

# 《四川省生态环保技术 2021 年度白皮书 (大气环境领域)》

四川省生态环境厅  
四川省科学技术厅  
四川省环境科学学会

二〇二三年一月



# 前 言

近年来，我省污染防治攻坚战不断深入，生态环境质量持续改善，生态环境保护事业取得较大发展，生态环境科技支撑作用成效明显，科技水平和创新能力不断提升。为全面掌握行业绿色转型发展的科技需求，精准评估全省生态环境科技发展水平状况，更好地推动生态环境科技成果转化和产业化应用，不断提高科技服务水平，由四川省生态环境厅、四川省科学技术厅牵头，四川省环境科学学会组织编写《四川省生态环保技术白皮书》。因涵盖领域较广、涉及技术种类众多，采取分年度分专业领域进行编写。

2021 年已编制完成《四川省生态环保技术 2020 年度白皮书（水环境领域）》并对外发布，2022 年按计划聚焦我省大气环境治理领域编写《四川省生态环保技术 2021 年度白皮书（大气环境领域）》。本书从大气环境技术政策概述、大气环境综合决策管理技术、工业源大气污染防治技术、面源大气污染防治技术、移动源大气污染防治技术等五大部分，细分到钢铁、建材、火力发电、餐饮油烟、VOCs、焦化、水泥、陶瓷、砖瓦、玻璃、化工、涂装、家具、油品储运、包装印刷、扬尘、汽修、机动车等 18 个行业领域，系统梳理了我省大气环境领域的发展现状、技术水平与需求，

展示了当前主流技术与典型应用案例，并结合生态环境管理需求，提出了大气环境治理技术创新未来发展重点方向的建议。

本书充分利用省环境科学会的学科资源优势，精心组织与统筹安排，成立了由四川省生态环境科学研究院、四川省生态环境监测总站、四川省机动车排污监控中心、四川大学、成都信息工程大学、成都市环境保护科学研究院、夹江西部瓷都陶瓷协会等川内高校、科研院所和行业协会相关专家构成的编制课题组，并根据擅长领域安排专人分章负责编写任务。

希望本书能推动我省大气环境治理领域先进适用技术的推广应用，畅通科研院所、科技企业间的供需对接和交流合作渠道，为促进我省生态环保科技创新和成果转化、深入打好污染防治攻坚战、改善生态环境质量、推动经济高质量发展提供有力科技支撑。因受时间和资料限制，书中如有不妥和疏漏之处，敬请批评指正。

编委会

2023年1月6日

# 编委会

## 主任：

四川省生态环境厅党组成员、副厅长 彭勇

## 副主任：

四川省生态环境厅科技与财务处处长 阳恺

四川省科学技术厅社会发展科技处处长 胡钢

四川省环境科学学会副理事长/研究员 叶宏

## 编委：

四川省生态环境厅科技与财务处副处长 文芒

四川省科学技术厅社会发展科技处三级调研员 冷祥

四川省生态环境厅科技与财务处博士 于倩楠

四川省生态环境科学研究院副院长/高级工程师 陈强

四川大学建筑与环境学院教授 李建军

四川大学建筑与环境学院教授 王斌

四川大学建筑与环境学院教授 代忠德

成都信息工程大学资源环境学院副院长/教授 刘盛余

四川省环境科学学会秘书长/高级工程师 胡颖铭

四川省生态环境科学研究院大气所所长/高级工程师 姜涛

四川省生态环境监测总站大气室主任/高级工程师 张巍

四川省机动车排污监控中心科长/高级工程师 李涛

成都市环境保护科学研究院高级工程师 邓也



# 目 录

<b>第一章 四川省大气环境技术政策概述</b> .....	1
<b>一、全省大气环境空气质量现状</b> .....	1
(一) 大气环境总体状况.....	1
(二) 重点区域空气质量状况.....	1
(三) 全省 21 市州空气质量状况.....	2
(四) 大气污染逐年变化情况.....	3
<b>二、全省大气污染防治措施实施情况</b> .....	4
(一) 多举措并举深入打好蓝天保卫战, 积极应对气候变化.....	4
(二) 以大气污染物排放标准为核心, 推进大气环境保护水平提升.....	5
(三) 以创新生态环境管理方式为抓手, 切实推进大气环境治理能力现代化.....	7
<b>三、四川省重点实验室和工程技术中心建设情况</b> .....	9
<b>四、2016—2021 年期间大气环境保护领域科学技术奖励情况</b> .....	13
<b>第二章 四川省大气环境综合决策管理技术</b> .....	19
<b>一、全省大气环境预警预报技术</b> .....	19
(一) 预报业务机制.....	19
(二) 预报技术方法.....	27
<b>二、全省大气环境污染物溯源技术</b> .....	36
(一) 大气污染源清单源解析技术.....	36
(二) 基于观测和模拟的污染来源解析技术.....	38
(三) 走航源解析技术.....	43
(四) 结论与展望.....	51
<b>三、全省大气环境污染防治管控技术路径</b> .....	51
(一) 城市大气污染防治管控技术路径.....	52
(二) 城市大气污染防治信息化技术应用.....	54
(三) 结论与展望.....	62
<b>第三章 四川省工业源大气污染防治技术</b> .....	64
<b>一、工业污染常用治理技术介绍</b> .....	64
(一) 二氧化硫治理技术.....	64
(二) 氮氧化物治理技术.....	77
(三) 颗粒物治理技术.....	85

(四) VOCs 治理技术.....	91
<b>二、全省钢铁行业大气污染防治技术.....</b>	<b>103</b>
(一) 钢铁行业污染防治现状.....	103
(二) 钢铁行业污染防治技术水平与需求.....	105
(三) 钢铁行业污染防治技术介绍.....	115
(四) 钢铁行业污染防治技术典型应用案例.....	119
(五) 结论与展望.....	123
<b>三、全省建材行业大气污染防治技术.....</b>	<b>124</b>
(一) 陶瓷行业.....	124
(二) 砖瓦行业.....	143
(三) 玻璃行业.....	153
(四) 水泥行业.....	164
<b>四、全省火力发电行业大气污染防治技术.....</b>	<b>171</b>
(一) 火力发电行业污染防治现状.....	171
(二) 火力发电行业污染防治技术水平与需求.....	175
(三) 火力发电行业污染防治技术原理介绍.....	182
(四) 火力发电行业污染防治典型应用案例.....	184
(五) 结论与展望.....	187
<b>五、全省涉 VOCs 行业大气污染防治技术.....</b>	<b>189</b>
(一) 涉 VOCs 行业污染防治现状.....	189
(二) 涉 VOCs 行业污染防治技术水平与需求.....	191
(三) 涉 VOCs 行业污染防治技术原理介绍.....	196
(四) 涉 VOCs 行业污染防治技术典型应用案例.....	222
(五) 结论与展望.....	223
<b>第四章 四川省面源大气污染防治技术.....</b>	<b>225</b>
<b>一、全省扬尘大气污染防治技术.....</b>	<b>225</b>
(一) 扬尘污染防治现状.....	225
(二) 扬尘污染防治技术水平与需求.....	230
(三) 结论与展望.....	236
<b>二、全省汽修大气污染防治技术.....</b>	<b>237</b>
(一) 汽修行业污染防治现状.....	237

(二) 汽修行业污染防治技术水平与需求 .....	239
(三) 汽修行业污染防治技术原理介绍 .....	246
(四) 汽修行业污染防治技术典型应用案例 .....	256
(五) 结论与展望 .....	258
<b>三、全省餐饮油烟大气污染防治技术 .....</b>	<b>259</b>
(一) 餐饮油烟行业污染防治发展现状 .....	259
(二) 餐饮油烟行业污染防治技术水平与需求 .....	263
(三) 餐饮油烟行业防治技术原理介绍 .....	266
(四) 餐饮油烟行业污染防治技术典型应用案例 .....	273
(五) 结论与展望 .....	275
<b>第五章 四川省移动源大气污染防治技术 .....</b>	<b>277</b>
<b>一、全省移动源大气污染防治现状 .....</b>	<b>277</b>
(一) 机动车保有量情况 .....	277
(二) 机动车新注册量情况 .....	277
(三) 非道路移动机械保有量情况 .....	277
(四) 移动源大气污染物排放量情况 .....	278
<b>二、全省移动源大气污染防治技术 .....</b>	<b>278</b>
(一) 移动源污染防治技术发展现状 .....	278
(二) 道路运输污染防治技术水平与需求 .....	279
(三) 道路运输污染防治技术原理介绍 .....	280
(四) 道路运输污染防治技术典型应用案例 .....	288
<b>三、结论与展望 .....</b>	<b>289</b>



# 第一章 四川省大气环境技术政策概述

## 一、全省大气环境空气质量现状

### (一) 大气环境总体状况

2021 年全省  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$  年均浓度为  $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，CO 日均值第 95 百分位浓度为  $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ， $\text{O}_3$  日最大 8 小时值第 90 百分位浓度为  $127 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均优良天数率为 89.5%，重污染天数平均为 0.7 天，污染日全省首要污染物以  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{PM}_{10}$  为主，占比分别为 67%、31%、2%， $\text{PM}_{2.5}$  占比同比大幅降低， $\text{O}_3$ 、 $\text{PM}_{10}$  同比分别上升 4%、2%。全省 21 个市州，攀枝花、绵阳、广元、遂宁、内江、广安、巴中、雅安、眉山、资阳、阿坝、甘孜、凉山等 13 个市（州）环境空气质量达标。

### (二) 重点区域空气质量状况

**成都平原地区。**成都、德阳、眉山、资阳、乐山、遂宁、绵阳、雅安 8 城市环境空气质量总优良率为 87.1%，其中优为 35.7%，良为 51.4%； $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$  年均浓度为  $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，CO 日均值第 95 百分位浓度为  $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ， $\text{O}_3$  日最大 8 小时值第 90 百分位浓度为  $137 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

**川南地区。**内江、宜宾、泸州、自贡 4 市环境空气质量总优良率为 81.8%，其中优为 31.6%、良为 50.2%； $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$  年均浓度为  $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，CO 日均值第 95 百分位浓度为  $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ， $\text{O}_3$  日最大 8 小时值第 90 百分位浓度为  $139 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

川东北地区。广元、达州、南充、广安、巴中 5 市环境空气质量优良率为 92.1%；其中优为 50.3%、良为 41.8%；SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 年均浓度为 6 μg/m<sup>3</sup>、24 μg/m<sup>3</sup>、32 μg/m<sup>3</sup>、50 μg/m<sup>3</sup>，CO 日均值第 95 百分位浓度为 1.2 μg/m<sup>3</sup>，O<sub>3</sub> 日最大 8 小时值第 90 百分位浓度为 110μg/m<sup>3</sup>。

### (三) 全省 21 市州空气质量状况

2021 年全省 21 市州污染物浓度及优良率见下表。全省 21 市州 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO、O<sub>3</sub>、PM<sub>10</sub> 浓度均达到环境标准浓度二级限值，仅南充、达州、乐山、泸州、德阳、成都、宜宾、自贡 8 市 PM<sub>2.5</sub> 浓度超过二级浓度限值，超标幅度在 5.7%—25.7%，宜宾超出幅度最大。甘孜州、阿坝州优良率均为 100%，除自贡优良率为 78.6%外，其余城市优良率在 80.5%—98.6%，污染日首要污染物以 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 为主，占比分别在 20%—100%和 7.3%—80%。

表 1-1 2021 年全省 21 市州污染物浓度及优良率

城市	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	O <sub>3</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	优良率
阿坝	12	11	1	108	17	26	100.0%
甘孜	8	20	0.6	96	8	17	100.0%
凉山	11	15	0.8	129	21	36	98.6%
攀枝花	22	29	2.3	133	31	47	96.7%
广元	7	27	1.2	112	24	41	96.2%
巴中	4	24	1	108	28	44	95.6%
雅安	7	20	0.8	118	28	40	93.2%
南充	5	21	1.1	107	<b>37</b>	55	92.1%
遂宁	8	20	0.9	126	30	49	90.1%
达州	9	31	1.4	96	<b>38</b>	60	88.8%
绵阳	8	26	1	139	35	57	88.8%
资阳	6	24	1	132	28	50	88.8%
广安	6	19	1.1	127	34	51	87.7%
乐山	7	26	1.1	138	<b>37</b>	55	86.0%

城市	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	O <sub>3</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	优良率
眉山	9	31	1.1	149	34	54	85.2%
泸州	12	27	1	137	<b>41</b>	52	84.4%
内江	9	24	1.1	137	35	52	83.8%
德阳	6	31	1	146	<b>37</b>	63	82.7%
成都	6	35	1	151	<b>40</b>	61	81.9%
宜宾	8	29	0.9	142	<b>44</b>	60	80.5%
自贡	8	24	0.9	142	<b>43</b>	66	78.6%
二级标准 限值	60	40	4	160	35	70	/

注：单位：CO 为 mg/m<sup>3</sup>，其余污染物为 μg/m<sup>3</sup>；优良率为%。

#### （四）大气污染逐年变化情况

2015 年—2021 年，除臭氧外，其余污染物指标呈波动下降趋势，幅度在 10%—48% 之间，其中 SO<sub>2</sub> 下降幅度最大。PM<sub>2.5</sub> 浓度自 2018 年开始达到二级标准限值（35μg/m<sup>3</sup>）。2015 年—2020 年臭氧浓度呈逐年上升趋势，上升幅度在 1%—6% 之间，2017 年同比上升幅度最大，2021 年显著下降，下降幅度达 7%；2016 年—2020 年优良率呈逐年上升趋势，2021 年有小幅下降，下降幅度为 1.2%。

表 1-2 四川省 2015 年—2021 年污染物浓度变化情况

	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	O <sub>3</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	优良率
2015 年	16	27	1.4	120	42	67	85.2%
2016 年	15	28	1.4	121	42	66	83.8%
2017 年	13	29	1.3	129	38	60	86.2%
2018 年	11	28	1.1	132	34	56	88.4%
2019 年	9	28	1.1	134	34	53	89.1%
2020 年	8	25	1.1	136	31	49	90.7%
2021 年	8	24	1.1	127	32	49	89.5%

注：单位：CO 为 mg/m<sup>3</sup>，其余污染物为 μg/m<sup>3</sup>；优良率为%。

## 二、全省大气污染防治措施实施情况

### (一) 多措并举深入打好蓝天保卫战，积极应对气候变化

突出问题导向，开展大气污染防治专项攻坚行动。四川省生态环境厅编制《四川省水生态环境质量和环境空气质量激励约束办法》，每月召开新闻发布会通报空气质量月排名，实施夏季臭氧专项攻坚，冬季细颗粒物专项攻坚，修订重污染天气应急预案，强化重污染天气过程调度，分析指出相关城市突出问题，推动地方落实精准管控。实施工业源、移动源和扬尘源三项专项整治，开展打击伪劣油品、秸秆综合利用、烟花爆竹零售清理整治、森林防火计划烧除。

**强化区域联防联控，推进区域空气质量持续改善。**建立川渝地区大气污染防治联防联控机制，开展毗邻地区交叉执法检查。定期召开两省市生态环境保护联席会，推动出台《成渝地区双城经济圈生态环境保护规划》，召开生态环境保护各类会议 50 余次，签订协议近 100 个。建立环保标准协同机制，开展联合攻关，协同编制四川省《水泥工业大气污染物排放标准》，共同商讨联合出台川渝两地玻璃和陶瓷行业统一污染排放标准，持续推进川渝标准一体化。联合印发《关于做好川渝地区水泥常态化错峰生产工作的通知》，协同开展水泥企业精准错峰生产。

**积极加强能源结构调整。**持续推动产业结构低碳发展，累计创建省级企业技术创新中心 1244 家，国家级和省级绿色工厂 405 家。严格项目节能审查，坚决遏制“两高”项目盲目发展，淘汰退出落后产能企业 150 余户，减少用能约 30 余万吨标准煤。加快建设清洁能源示范省和国家天然气（页岩气）千亿立方米级产能基地。乌东德、白鹤

滩等重大水电工程建成发电，清洁能源装机和发电量占比分别达 85.3%、86.6%，水电总装机 8947 万千瓦，全国优质清洁能源基地和国家清洁能源示范省加快建设。

**加快交通运输结构调整。**重点引导实施“公转铁、公转水”，实施新车国六排放标准，注销老旧车 53.85 万辆。全面推广新能源汽车，截至 2021 年底，全省新能源汽车保有量达 30.55 万辆。

**深入贯彻落实党中央碳达峰碳中和决策部署。**2020 年单位 GDP 二氧化碳排放强度比 2015 年下降 29.9%，超额完成国家下达的降低 19.5% 目标，目标完成率达 153.3%。积极参与全国碳排放权交易市场，做好全国碳排放权交易市场第一个履约周期碳排放配额清缴工作，全省共有 46 家按时足额清缴，完成配额清缴量 7718.51 万吨，履约率为 99.72%，稳定运行温室气体自愿减排（CCER）交易市场，开展碳市场专题培训，与泛珠三角、重庆等地区开展应对气候变化合作。

## **（二）以大气污染物排放标准为核心，推进大气环境保护水平提升**

**制定出台了《四川省施工场地扬尘排放标准》（DB51/2682-2020）。**四川省虽然提出了“六不准、六必须”的扬尘防治管控要求，但扬尘的排放标准仍处于空白阶段。很多施工场地虽然实施了相关的抑尘措施，但难以量化考核，不能有效判定其排放是否满足要求。标准的制定，补充了现有标准的不足，促进了施工场地扬尘管理的有效开展，倒逼施工扬尘排放单位主动落实扬尘污染控制措施，规范建筑施工、减少能源和原材料消耗，降低污染物的产生和排放，对推动扬尘排放持续下降，改善大气环境质量具有重要意义。该标准于 2020 年 4 月

16日发布，2020年9月1日实施。

制定出台了《四川省水泥工业大气污染物排放标准》（**DB 51/2864-2021**）。针对四川省水泥工业无组织管控不到位、企业超负荷生产，污染治理设施小马拉大车、小型企业占比较大，存在限制类产业仍在生产等问题，确定控制指标、排放限值、监测方法和实施监督等规定，希望通过标准的实施，实现四川省大气环境质量持续改善。该标准于2021年12月发布，2022年7月1日实施。

制定出台了《四川省加油站大气污染物排放标准》（**DB 51/2865-2021**）。挥发性有机物（VOCs）作为臭氧（O<sub>3</sub>）和细颗粒物（PM<sub>2.5</sub>）的重要前体物，是大气污染防治的关键一环，VOCs减排对改善大气环境质量具有重要意义。大气污染物排放清单研究结果表明我省加油站油气排放是VOCs重点排放源，迫切需要加强加油站油气排放控制。我省很多加油站油气回收设施常处于不正常运行状态或无法起到预期的油气回收效果，亟需加强加油站的运行维护以及各个排放环节的控制与监管。为加快推动我省VOCs治理工作，强化加油站油气排放控制，有必要在新《国标》的基础上，制定符合我省“十四五”及未来长期规划管理需求的加油站大气污染物排放标准，进一步加严相关排放限值，明确在线监测和油气处理装置的安装范围，细化监测和管理要求，从而不断提升四川省加油站大气污染防治水平。

研究制定四川省《玻璃工业大气污染物排放标准》。目前，四川省平板玻璃行业执行《平板玻璃工业污染物排放标准》（**GB 23453-2011**），日用玻璃和玻璃纤维执行《工业炉窑大气污染物排放标准》（**GB 9078-1996**）。随着深入践行习近平生态文明思想，加快

建设美丽四川工作的推进，全省玻璃企业大气污染排放控制有了较大提高，燃料基本改为天然气，并采用 SCR 脱硝技术。此外，全省正在开展玻璃行业深度治理，现行国家标准已经不能满足四川省对玻璃行业排污的管控要求。通过标准的制定，是确保玻璃行业污染减排和升级改造的重要保障。

研究制定四川省《陶瓷工业大气污染物排放标准》。针对四川省陶瓷行业环保设施投入不足、无组织排放管控不到位等现状，同时为了满足污染物减排、更严格的管控依据、社会发展等的需求，制定四川省陶瓷行业排放标准的研究，可以促进地方环境管理，引导四川省工业行业进行产业结构调整，增强四川省在区域经济合作中的纽带作用和承接产业转移中的对接功能，改善环境空气质量，提高人们环境空气质量的满意度。

### **（三）以创新生态环境管理方式为抓手，切实推进大气环境治理能力现代化**

开展了“千名专家进万企业”帮扶活动，扎实推进大气污染防治工作。在成都、自贡、泸州、德阳、绵阳等 15 个重点城市，按照属地为主、分级指导原则，组建市县专家团队，重点推动解决全省大气污染防治普遍性问题和疑难问题。一是以重点帮扶企业名录为主，分城市深入企业摸排情况、识别问题、听取诉求，填写《企业现场问题排查表》，会同企业明确整治目标，形成问题台账及治理建议清单；二是深入开展“一行一策”调研，重点针对“两高”项目、重点行业超低改造、深度治理及挥发性有机物（VOCs）综合治理情况进行调研，按照标本兼治、精准施策要求，进一步完善四川省重点行业“一行一策”

综合治理指导意见；三是围绕大气污染防治攻坚，协助各地开展区域性和相关城市大气质量分析，针对性提出意见和建议。

**开展了四川长江生态环保修复驻点跟踪研究工作。**为贯彻落实习近平总书记关于长江经济带“共抓大保护、不搞大开发”的重要指示精神，落实《长江保护修复攻坚战行动计划》，创新科研组织实施机制，2018—2021年，在国家统一要求下，开展四川长江生态环保修复驻点跟踪研究工作。紧密结合地方实际，科学决策和精准施策，整合省级优势资源和科技力量，创新机制，组建“省队”服务配合“国家队”，驻点跟踪研究工作组由具有研究优势和积极性的中央级科研单位和地方生态环境科研与监测机构以及相关科研单位等共同组成。驻点跟踪研究工作组通过深入一线和驻地研究的方式，紧密结合地方政府打好污染防治攻坚战的实际需求，协助开展“找问题、提建议、出方案、做评估”等科技服务工作。开展源清单编制和生态环境问题解析，提出“一市一策”综合解决方案，提升地方科技支撑能力。

**开展了四川省污染防治重点县结对攻坚工作。**根据四川省人民政府印发的《四川省污染防治重点县（市、区）结对攻坚工作方案》，四川省污染防治攻坚战领导小组办公室关于印发《四川省污染防治重点县结对攻坚工作细则》的通知（川污防攻坚〔2019〕22号），组建攻坚结对工作技术组，落实“一对一”结对攻坚技术专员，开展空气质量日报分析，对当地污染防治实施方案提供技术咨询、指导，切实提高三区污染防治水平，为各区县空气质量持续改善提供科技支撑。

**建立了大气污染防治工作联席会议制度。**建立成都市及周边地区、川东北地区、川南地区大气污染防治工作联席会议制度，成都市

及周边、川南、川东北地区分别以成都、自贡、南充市政府为召集人单位，共同协调开展对大气污染防治工作的监督管理，组织推动开展环评会商、联合执法、信息共享、预警应急、协调纠纷、后督察等工作。

### 三、四川省重点实验室和工程技术中心建设情况

涉及大气环境保护领域的重点实验室和工程技术中心共计 13 个详见下表，主要批建单位有科技部、四川省科学技术厅、四川省生态环境厅、四川省发展和改革委员会等，其中由四川省科学技术厅批建的重点实验室和工程技术研究中心 4 个、四川省生态环境厅批建的重点实验室和工程技术研究中心 5 个、四川省教育厅批建的重点实验室 1 个、四川省发展和改革委员会批建的工程技术研究中心 1 个、科技部批建的重点实验室和工程技术研究中心 2 个。自实验室和工程技术研究中心建设以来，相关依托单位认真按照《四川省环境保护重点实验室管理办法》《四川省环境保护工程技术中心管理办法》等相关要求，加强能力建设和科技开发，有力促进了四川省大气环境保护工作的开展，为环境质量改善和生态环境保护提供了技术支撑。

表 3-1 四川省环境保护重点实验室和工程技术中心

序号	名称	依托单位	简介	批建单位
1	国家烟气脱硫工程技术研究中心	中国工程物理研究院环境保护工程研究中心、四川大学	重点是针对烟气脱硫市场需求，适应国际烟气脱硫发展趋势，进行烟气脱硫新材料、新工艺、新设备等方面的创新研究与引进技术的消化、吸收、创新相关研究开发，开展烟气脱硫信息服务、工程技术服务、应用人才培养和对外交流；从事燃煤烟气脱硫脱硝工程的投融资、规划和设计、施工建设、设备成套及工程运营等一条龙服务；并致力于发展其他环保新技术和新设备、成套设备制造及系统集成等工作，是我国烟气污染控制和相关环保产业发展提供技术支撑和全方位服务的国家级科技平台和产业化基地。	科技部

序号	名称	依托单位	简介	批建单位
2	工业排放气综合利用国家重点实验室	西南化工研究设计院	该实验室主要针对国家在能源、资源、环境等领域的重大需求，以煤层气、转炉气、焦炉气、黄磷尾气等分离、净化与综合利用为主要研究对象，凝练形成了分离、催化与反应、净化与转化工程三个研究方向。主要开展工业排放气净化、提纯与综合利用的基础研究、应用研究、工程化开发与示范，为行业技术进步提供技术储备与支撑，为高层次人才集聚、培养和产学研结合提供平台。该重点实验室近两年主要研究含甲烷、氢气工业排放气富集、净化、提纯、转化技术及成套装置研究；含 CO、CO <sub>2</sub> 工业排放气富集、净化、提纯技术及成套装置研究；含碳有机工业排放气富集、净化、提纯技术及成套装置研究；工业排放气转化与利用等领域的关键技术研究。	科技部
3	四川省碳中和技术创新中心	四川大学	该创新中心是四川省科学技术厅组织建设的首批省级技术创新中心，旨在贯彻落实党中央、国务院关于碳达峰、碳中和的重大决策部署，瞄准我省新兴产业培育与传统产业转型升级的重大需求，突破“碳减排”“碳零排”“碳负排”关键核心技术瓶颈，助力我省实现碳达峰碳中和目标。创新中心依托四川大学大气清洁技术积累基础，以加强碳中和应用基础研究为导向，以前沿引领技术和关键共性技术的研发与应用为核心，协同推进现代工程技术和颠覆性技术创新。该中心拟布局碳减排、碳零排、碳负排三大研发方向，着力突破化石能源如煤、石油、天然气等利用过程的碳减排变革性技术；加速推进非化石能源如有机废弃物“碳-氢-氧”原材料体系转化、“碳-氢”能源化学品等可再生能源的碳零排颠覆性技术；加强推广大气 CO <sub>2</sub> 捕集、封存与利用产业碳负排创新性技术。	四川省科学技术厅
4	四川省二氧化碳矿化利用工程技术研究中心	四川大学	目前承担了多项相关研究课题，包括二氧化碳咸水层封存及其资源化利用合作研究（国际科技项目），二氧化碳矿化利用技术研发与工程示范（国家科技部支撑计划项目），磷石膏钾长石矿化 CO <sub>2</sub> 联产硫酸和钾肥基础研究（国家自然科学基金重点项目），二氧化碳制造石灰岩地下储存库以及二氧化碳水解生物质可再生能源等领域的研究。中心研究方向主要有：低能耗下 CO <sub>2</sub> 高效捕获技术与装备；非传统天然矿物 CO <sub>2</sub> 矿化联产化工、建材产品的技术与装备；工业固废 CO <sub>2</sub> 矿化联产化工、建材产品的技术与装备；碳酸岩层 CO <sub>2</sub> 矿化造腔制备巨型矿化反应器技术。	四川省科学技术厅

序号	名称	依托单位	简介	批建单位
5	四川省脱硫腐蚀控制工程技术研究中心	成都龙之泉科技股份有限公司	公司设立技术研发中心，研究、改进防腐施工工艺以及防腐材料在施工中的运用，引进新技术及进行技术创新。从事“烟气脱硫防腐研究方向、烟窗防腐研究方向、石油、化工防腐保温研究方向”等三项课题的研究。	四川省科学技术厅
6	高原大气与环境四川省重点实验室	成都信息工程大学	立足高原及其周边地区，辐射全国乃至东亚，满足气候变化、气象灾害科学研究和防灾减灾国家和地方需求，已形成“高原大气动力学”“气候变化与生态环境”“气象灾害与防灾减灾”和“青藏高原陆一气相互作用”四大特色研究方向，并围绕四大科研方向，建成具有研究人员年龄结构、知识结构和专业技术职务结构合理且具有较高学术水平的科研创新团队。成立以来一直围绕青藏高原以及周边地区（西南地区）持续开展了大气科学相关领域的研究（如高原天气、高原气候、高原低涡、高原积雪、区域生态环境等方面），取得了不少有影响的科研成果，培养了一大批高层次人才，形成了在国内具有特色和区域影响地位的研究方向，得到了国内外相关学术界的高度重视，已对我国气候变化研究、气象业务预报、防灾减灾、生态环境保护等方面产生了深远影响。	四川省科学技术厅
7	四川省环境保护大气复合污染与防控重点实验室	四川省生态环境科学研究院	自建立以来，大气环境研究所积极开展大气环境科学研究与工程技术攻关，目前已建立起一支由不同专业领域的专家、博士、硕士等组成的专业科研技术人才队伍。大气环境主要研究领域包括气候变化背景下的大气环境研究、复合型大气污染化学过程观测、城市与区域大气污染化学过程模拟与污染控制措施研究、城市和区域尺度高时空分辨率排放源清单建立、挥发性有机物以及臭氧排放特征及污染防控研究、移动源污染防治研究、噪声污染控制研究、典型污染源排放特征测试及分析、大气污染控制工程研究、大气污染治理项目技术评估、可行性研究、初步设计、施工设计咨询等方面。	四川省生态环境厅
8	四川省环境保护移动源污染与控制重点实验室	四川省生态环境科学研究院	大气环境研究所建有“四川省环境保护大气复合污染与防控重点实验室”以及“四川省环境保护移动源污染与控制研究重点实验室”；依托重点实验室，开展区域复合污染研究、移动源污染防治研究以及大气治理工艺研究。研究所长期承担国家和地区的各种重大科研项目，包括科技部重大科技计划项目、环保部公益项目、四川省重大科研专项等。	四川省生态环境厅

序号	名称	依托单位	简介	批建单位
9	四川省区域环境空气质量综合监测重点实验室	四川省生态环境监测总站、西南交通大学	面向我省大气污染防治领域的技术需求，通过对空气中污染物浓度进行监测，分析不同粒径大气颗粒物的浓度、物理化学性质，围绕我省灰霾污染现状及形成机理、区域大气污染物空间变化规律、空气中污染物光化学反应及二次污染物转化趋势等方向开展研究。打造一支高水平的科技创新团队，形成我省大气污染防治领域提供技术支持与服务的平台。同时，以重点实验室为学术交流与合作平台，促进省内外相关领域优势单位和人员的合作交流，培养优秀创新型骨干人才和领军人才。	四川省生态环境厅
10	四川省大气污染治理催化剂工程技术中心	成都东方凯特瑞环保催化剂有限责任公司	立足我省大气污染防治领域，开展烟气脱硝、脱二噁英及多污染物协同控制的催化剂领域关键技术开发和工程化研究与示范，形成一批具有自主知识产权的高技术成果。承担领域内技术咨询和服务，促进产学研合作，推进环保产业发展，引领行业技术进步，为环境管理提供技术服务和支撑。开展环保交流与合作，培养优秀技术人才和管理人才队伍。	四川省生态环境厅
11	四川省环境保护环境催化材料工程技术中心	四川大学	该工程技术中心集产、学、研为一体，以创新驱动发展，立足环境催化与环境材料领域，主要开展机动车尾气净化、脱硫脱硝、VOCs 污染控制、催化燃烧等领域关键技术开发和共性技术工程化研究与示范，并承担高层次人才培养和学术交流的任务。	四川省生态环境厅
12	大气环境模拟与污染控制四川省高校重点实验室	成都信息工程大学	实验室已发展成为具有科研持续发展能力的科技创新基地、学科发展和人才培养基地，形成了三个具有特色与优势的研究方向：大气环境监测与大气化学、大气环境模拟与评价、大气污染控制与催化技术。	四川省教育厅
13	四川省机动车尾气净化工程技术研究中心	中自环保科技股份有限公司	研究中心建设合成汽油机、柴油机催化研究实验室、机动车尾气净化催化剂检测实验室、机动车尾气催化剂中试技术实验室、发动机台架实验室和整车排放测试实验室等配套设施，各建设设备及系统能满足催化剂的台架性能测试、催化剂评价系统能满足催化剂研发过程中的筛选。实验室依托以上实验设备、技术人才及技术创新，在稀土催化材料和内燃机后处理催化剂关键技术上取得了多项重大成果。	四川省发展和改革委员会

#### 四、2016—2021 年期间大气环境保护领域科学技术奖励情况

2016—2021 年期间，全省大气环境保护领域获得四川省科学技术奖 29 项，其中一等奖 5 项、二等奖 10 项、三等奖 14 项，且获奖类型主要为科技进步类奖，其次为技术发明类奖。各年度具体获奖数量见图 4-1，获奖等级占比见图 4-2，获得四川省科学技术奖项目的获奖等级、获奖项目、完成单位等详见表 4-1。

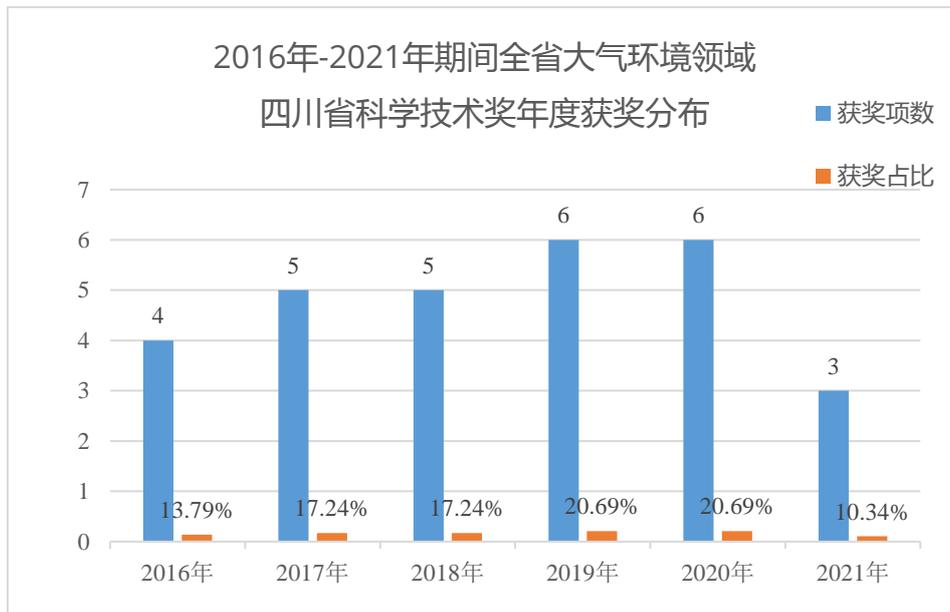


图 4-1 2016 年—2020 年期间全省大气环境领域四川省科学技术奖年度获奖分布

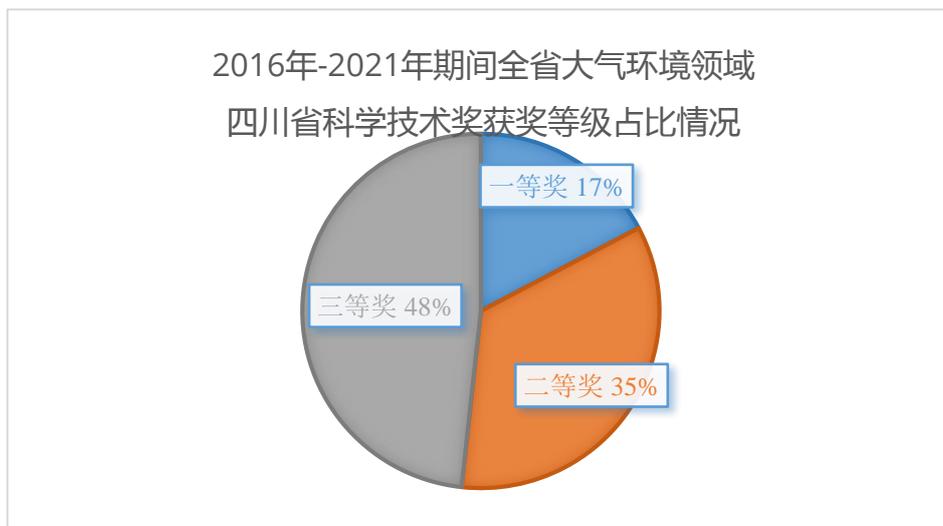


图 4-2 2016 年—2020 年期间全省大气环境领域四川省科学技术奖获奖等级占比情况

表 4-1 全省大气环境保护领域获得的四川省科学技术奖

序号	获奖年份	获奖等级	获奖项目	完成单位	完成人员
1	2016	一等奖(科技进步类)	环境微痕量恶臭硫化物气体检测溯源关键技术	中国测试技术研究院化学研究所	方正、刘庆、潘义、王星、周鑫、王维康、聂巍、江月军
2	2016	二等奖(科技进步类)	电石尾气、钠盐电解尾气净化及综合利用技术开发	四川天一科技股份有限公司、茂县鑫新能源有限公司、四川岷江雪盐化有限公司、茂县新纪元电冶有限公司	彭奕、孙俊超、林在群、杨云、冉崇慧、赵浩川、孙孟君、王小勤
3	2016	二等奖(科技进步类)	钒钛钢连铸过程碳氮化物析出特征及关键技术研究与应用	攀钢集团研究院有限公司、攀钢集团西昌钢钒有限公司、攀钢集团攀枝花钢钒有限公司	吴国荣、陈永、祭程、程书文、黎建全、仲剑丽、杨星地、李光跃
4	2016	三等奖(科技进步类)	高效低 NO <sub>x</sub> 燃烧试验台开发及应用研究	东方电气集团东方锅炉股份有限公司、上海交通大学	王勇、陈灿、范卫东、周棋、胡修奎、林山虎
5	2017	一等奖(科技进步类)	满足国 V 排放标准的天然气汽车尾气净化催化剂研究及应用	四川大学、中自环保科技有限公司	陈耀强、王健礼、李大成、徐海迪、王云、程永香、李云、王勤、蒋中锋、龚茂初
6	2017	二等奖(科技进步类)	低压常温变压吸附法回收炼厂催化重整尾气轻烃资源工业化技术	四川天一科技股份有限公司、中国石油四川石化有限责任公司	张剑锋、张东平、王键、徐云阶、刘丽、姜景杰、陈中明、张杨
7	2017	二等奖(科技进步类)	旋转喷镁铁水脱硫工艺技术与关键装备开发与应用	攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司、攀钢集团研究院有限公司、攀钢集团西昌钢钒有限公司	戈文荪、周遵传、梁新腾、黄基红、陈向辉、喻林、熊杰、张国才
8	2017	三等奖(科技进步类)	油车尾气处理液新技术研究及工业应用	四川泸天化股份有限公司	宁忠培、郭春建、闵劲、赵永清、李勇、戴志谦
9	2017	三等奖(科技进步类)	高时空分辨率大气污染源动态耦合排放清单关键技术及数字平台应用	四川省环境保护科学研究院	陈军辉、何敏、李媛、韩丽、冯小琼、范武波
10	2018	二等奖(科技进步类)	大型烧碱装置节能减排降耗成套技术开发与应用	中国成达工程有限公司	黄泽茂、王琼、曾宇峰、郑渊、唐瑾、丁海、王如翼、徐秀海

序号	获奖年份	获奖等级	获奖项目	完成单位	完成人员
11	2018	二等奖（科技进步类）	煤矿井下硫化氢的释放机制及控制技术	四川省煤炭产业集团有限责任公司、北京科技大学、四川华蓥山广能（集团）有限责任公司、四川达竹煤电（集团）有限责任公司	林海、陈显坤、王昌润、董颖博、吕志刚、余玉江、陈月芳、王友军
12	2018	三等奖（科技进步类）	除尘专用高效玻璃纤维覆膜过滤材料	四川省玻纤集团有限公司	李军、康明、杜学勤、唐昌万、邹岩辉、刘俊哲
13	2018	三等奖（科技进步类）	大型天然气净化装置二氧化硫和废水超低排放关键技术研发与应用	中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司、中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司重庆天然气净化总厂、中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司天然气研究院、中国石油工程建设有限公司西南分公司、国家能源高含硫气藏开采研发中心	喻泽汉、岑嶺、常宏岗、傅敬强、王晓东、万义秀
14	2018	三等奖（科技进步类）	柴油机尾气治理关键核心技术研发及应用	西华大学、成都威特电喷有限责任公司、中自环保科技有限公司、成都大运汽车集团有限公司、四川省汽车产业技术研究院	孟忠伟、方嘉、廖雪梅、黄铁雄、王瑞芳、张明超
15	2019	一等奖（科技进步类）	大气污染物硫化氢强化去除关键技术及应用	四川大学、四川省科学城天人环保有限公司、中国石油化工股份有限公司镇海炼化分公司、上海华畅环保设备发展有限公司	江霞、张进、李剑平、吴文锋、师彦俊、王金龙、周琦颖、朱晓帆、靳紫恒、崔馨
16	2019	二等奖（科技进步类）	焦炉气制甲醇绿色技术研发及应用	四川天一科技股份有限公司、四川达兴能源股份有限公司、西南化工研究设计院有限公司	蹇守华、王良辉、邓晋、傅宗国、彭杰、陈凯、申莉、杜勇
17	2019	二等奖（科技进步类）	低能耗尿素热解的高效 SCR 脱硝技术开发及工程应用	东方电气集团东方锅炉股份有限公司	李小勤、杨志忠、叶茂、何维、张定海、韦耿、黄敏、张章
18	2019	三等奖（科技进步类）	急倾斜煤层采掘工作面粉尘治理关键技术研究	四川省华蓥山煤业股份有限公司、中煤科工集团重庆研究院有限公司	李正军、邓天华、李德文、刘建、陈云、黎志

序号	获奖年份	获奖等级	获奖项目	完成单位	完成人员
19	2019	三等奖(科技进步类)	燃煤 NO <sub>x</sub> 高效还原机理研究及复合多级燃尽风技术研发与应用	东方电气集团东方锅炉股份有限公司、上海交通大学、中山火力发电有限公司	王勇、陈灿、范卫东、谢佳、冯杰、刘一
20	2019	三等奖(科技进步类)	大型煤制甲醇中蒸汽和尾气利用新技术	中国成达工程有限公司	周芳、聂李红、王时川、高良宏、姜波、邓均辉
21	2020	一等奖(技术发明类)	CO <sub>2</sub> 矿化减排与利用耦合工艺关键技术及应用	四川大学	梁斌、刘涛、岳海荣、李季、朱家骅、谢和平
22	2020	一等奖(科技进步类)	典型工业副产气模块化净化提纯关键技术及应用	西南化工研究设计院有限公司、中国石油四川石化有限责任公司	陈健、管英富、伍毅、张东平、武立新、王大军、卜令兵、马学军、冯良兴、陈耀壮
23	2020	二等奖(科技进步类)	高含硫天然气安全环保高效净化处理成套技术开发与应用	中国石油化工股份有限公司西南油气分公司、中国石化工程建设有限公司、华东理工大学、中石化南京化工研究院有限公司	周家伟、孙丽丽、沈本贤、李浩、吴基荣、崔吉宏、毛松柏、朱学军
24	2020	三等奖(科技进步类)	四川省灰霾污染防治精细化动态调控技术与应用	四川省生态环境科学研究院、北京美科思远环境科技有限公司	钱骏、陈军辉、姜涛、刘政、康思聪、李媛
25	2020	三等奖(科技进步类)	含硫气井络合铁脱硫工艺工业化应用关键技术	中国石油化工股份有限公司西南油气分公司	刘言、杨宇、孟庆华、罗国仕、卢克超、赵凯
26	2020	三等奖(科技进步类)	甲醛污染物检测量值保障及溯源关键技术研究与应用	中国测试技术研究院化学研究所、四川中测标物科技有限公司	王星、周鑫、董了瑜、李鹏辉、王显建、左又铭
27	2021	二等奖(科学技术进步奖)	低温高活性的低贵金属汽油车尾气催化净化关键技术及产业化	四川大学、中自环保科技有限公司、江门市大江集团有限公司、重庆小康动力有限公司	王健礼、陈启章、陈耀强、李大成、焦毅、凌青海、李建统、刘志敏
28	2021	三等奖(科学技术进步奖)	我国不同地域PM <sub>2.5</sub> 对人体健康效应的影响及其分子调控机制研究	四川绵阳四〇四医院、西南科技大学、西南医科大学	邓建军、张青碧、霍婷婷、周云、蒋正方、曾娅莉
29	2021	三等奖(科学技术进步奖)	混合气分层燃烧等效协同控制	西华大学、成都恩吉威汽车系统有限公司、成都易控智联汽车电子有限公司	韩志强、田维、吴学舜、张鹏、姜泽军、夏琦

2016—2021 年期间，全省大气环境保护领域获得中国环境科学学会环境保护科学技术奖 1 项，获奖信息详见下表 4-2 所示。全省大气环境保护领域获得四川省环境保护科学技术奖 6 项，其中，一等奖 1 项、二等奖 2 项、三等奖 3 项，获奖项目等级、完成人和完成单位信息详见下表 4-3 所示。

表 4-2 2016—2021 年期间大气环境保护领域获得的环境保护科学技术奖

序号	获奖年份	获奖等级	获奖项目	完成单位	完成人员
1	2021	二等奖（中国环境科学学会环境保护科学技术奖）	四川盆地复杂气象条件下大气污染调控关键技术研发与应用	四川省生态环境科学研究院、清华大学、上海地听信息科技有限公司、上海大学	陈军辉、钱骏、刘欢、李莉、张伟锋、冯小琼、李媛、梁茵、孙蜀

表 4-3 2016—2021 年期间大气环境保护领域获得的四川省环境保护科学技术奖

序号	获奖年份	获奖等级	获奖项目	完成单位	完成人员
1	2016	二等奖（四川省环境保护科学技术奖）	区域机动车尾气动态源清单建立及时空分布技术	四川省环境保护科学研究院	陈军辉、钱骏、李媛、汪汀、刘思宇、张亮、范武波、赵文艳
2	2017	一等奖（四川省环境保护科学技术奖）	挥发性有机物动态采集多尺度耦合排放清单动态更新技术及应用	四川省环境保护科学研究院	陈军辉、冯小琼、范武波、姜涛、孙蜀、杨怡阁、韩丽、徐晨曦、王波
3	2017	三等奖（四川省环境保护科学技术奖）	燃煤锅炉烟尘除尘、脱硫、脱硝一体化装置	四川君和环保股份有限公司	罗启贵、杨贤有、杨波、张宇斌、乐国祥
4	2017	三等奖（四川省环境保护科学技术奖）	“欧瑞康”油烟净化智能一体机	成都欧瑞康环保科技有限公司	钟志锋、李学军、王志洪、吴经彪、张良
5	2020	二等奖（四川省环境保护科学技术奖）	高硫烟气脱硫除尘除雾一体化超低排放协同固废资源化综合利用技术	成都蓝鼎环保科技集团有限公司、攀枝花市蓝鼎环保科技有限公司、四川省环保科技工程有限责任公司、四川大学	李自树、叶宏、李建军、王幸锐、曾景祥、黄明忠、唐刚、李富勇、徐筠、黄晓

序号	获奖年份	获奖等级	获奖项目	完成单位	完成人员
6	2020	三等奖（四川省环境保护科学技术奖）	2007—2017年成都市大气颗粒物组分特征演变规律及污染来源解析研究	成都市环境保护科学研究院、南开大学	谭钦文、宋丹林、冯银厂、黄凤霞、田瑛泽、陆成伟、周子航、邓也

## 第二章 四川省大气环境综合决策管理技术

### 一、全省大气环境预警预报技术

#### (一) 预报业务机制

根据整体规划设计的原则，国家环境空气质量预报预警业务体系分为“国家-区域-省级-城市”四个层次。

四川省作为京津冀及周边、长三角、华南、东北、西北和西南六个区域空气质量预测预报中心之一的西南区域空气质量预测预报中心（以下简称西南区域预报中心）主要负责所在西南区域内的环境空气质量业务预报、空气质量预测预报工作的总体协调、数据信息共享与预报会商，以及对重庆、贵州、云南、西藏省级环境空气质量预测预报中心的技术指导等工作。

同时以中国环境监测总站环境质量预报预警中心为依托，负责四川省内环境空气质量预测预报工作协调、四川省省级业务预测预报工作、数据信息共享与预报会商，对各市（州）预报工作开展技术指导和为各市（州）提供预报指导产品与支持等。

四川省辖区内各市（州）环境空气质量预报部门，负责市（州）辖区内的日常环境空气质量以及城市重污染过程精细化预报。

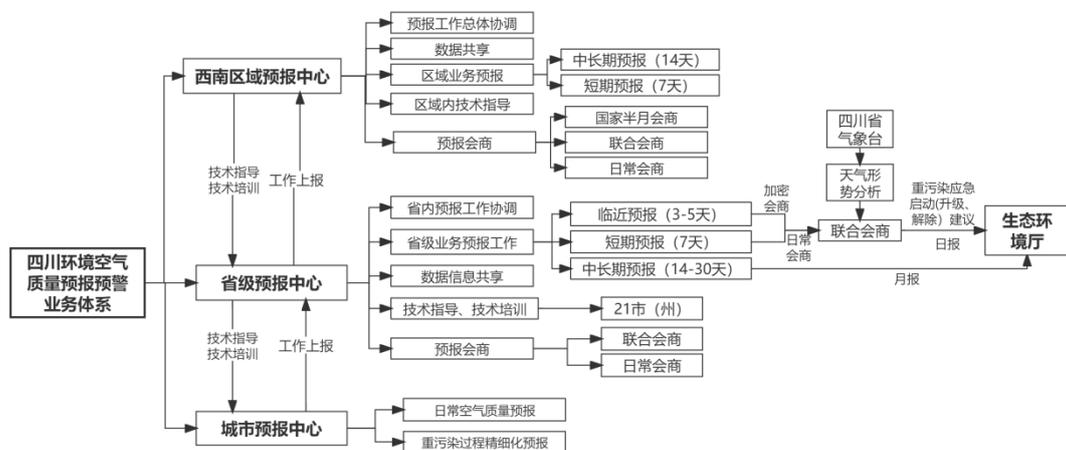


图 1-1 全国环境空气质量预报预警业务体系

## 1. 人员与制度

西南区域、四川省级和市级预报团队配备专职预报员，预报员具备大气科学、气象学等相关专业背景，共同承担起空气质量预报预警工作。

预报实行主副班值班制度，每班 2 人，1 人为主班，1 人为副班，实行主班负责制。主班负责每日区域或全省或市级的空气质量预报和信息发布，负责与气象部门及监测部门开展会商，收集制作会商材料，组织开展一周环境空气质量预报回顾和未来一周天气及环境空气质量预测工作，总结预报经验；副班负责填写值班日志等记录工作，遇到重污染天气、重大活动保障等特殊情况下，协助主班完成工作。

西南区域和四川省级预报中心除了负责日常预报外，还承担专报任务、定期技术培训等工作，制定相关业务预报、会商和值班工作制度及规范。

## 2. 预报工作流程

开展环境空气质量业务化预报工作流程包括环境空气质量监测状况回顾、大气条件分析与预测、模式预报结果分析、历史相似案例对比、人工订正和预报会商等。

### 2.1 环境空气质量监测状况回顾

环境空气质量监测状况回顾是判断环境空气质量未来变化趋势的基础分析，包括对辖区内过去一段时间的污染物浓度、空气质量指数和首要污染物等进行分析，同时也可利用 GIS 等空间分析技术，识别污染区域分布和各污染物浓度的空间分布特征，特别是在重污染发生时，对判断未来污染是否持续、是否进一步加重以及何时结束至关重要。环境空气质量监测状况回顾是作为判断环境空气质量未来发展

变化的基础。

## 2.2 大气条件分析与预测

分析区域内主要气象因素的观测和预报资料，掌握区域大气环境扩散条件，深入理解空气中污染物的迁移变化规律以及气象条件对空气质量的影响，有助于对未来污染变化情况做出准确判断。对大气条件的分析与预测，主要包括东亚地区 500 hPa、700 hPa、850hPa 和地面四个不同高度层的天气形势图，重点关注 500 hPa 高空槽脊等各主要天气系统的发展变化、700hPa 和 850hPa 的风场、温度、相对湿度的变化，以及海平面气压、地面风速风向、相对湿度、温度、降水的强度和落区等信息，并综合分析各层系统匹配情况、系统移动及与污染场的协同变化。

## 2.3 模式预报结果分析

模式预报结果分析主要包括数值预报模式和统计预报模式结果。模式预报结果分析采取以数值模式预报结果为主，统计模式预报结果为辅的方式。

数值预报模式很好地将污染化学反应过程、机制与气象要素的变化结合在一起，为环境空气污染预测和污染控制决策提供更为丰富的信息。数值模式解析的预报结果包括未来十四天的污染落区、AQI、各种污染物、主要气象要素（相对湿度、降水量、最高气温、最低气温、云量、风场）小时浓度、日浓度空间分布，环境空气质量等级、首要污染物等。基于数值模式的预报指导产品，从污染区域范围、污染能达到的最大等级、污染团移动规律和特点等方面分析数值模式对区域空气质量的预报。

环境空气质量统计预报模式是利用历史观测资料建立大气污染

物浓度与气象条件或非气象条件间的统计关系，从而得到对未来大气污染物浓度和环境空气质量的预报结果。统计模式的预报结果包括未来七天的各污染物日浓度和 AQI 的日均值。

#### **2.4 历史相似案例对比**

开展环境空气质量业务化预报，回顾分析区域内历史污染过程的特征、污染来源与成因，掌握污染过程的典型气象因素、大气颗粒物光学特征/化学组成、大气光化学污染特征，对预测和判断该地区的大气污染演变趋势非常重要。以历史典型大气污染过程案例数据库为基础，从主导天气形势及气象影响因素等方面对比分析，分析相似主导因素下区域空气污染水平的变化趋势特征，为空气质量预报提供参考。

#### **2.5 人工订正**

在环境空气质量模式预报结果的基础上，通过区域内环境空气质量实况分析和大气环境扩散条件预判，参考历史相似污染案例，从未来污染变化趋势、最高污染等级、污染持续时间、污染物大气化学反应的条件、污染扩散条件等角度对预报结果的准确性和合理性做出判断，并结合潜在的突发源分析（秸秆等生物质燃烧影响、浮尘天气影响、烟花爆竹燃放等）进行必要的人工订正。

#### **2.6 预报会商**

环境空气质量预报结果受污染源排放、地理位置、地形和气象等多种因素的影响。其中，气象条件有明显的季节变化和月变化，对环境空气质量变化影响较大，气象参数是开展环境空气质量预报不可缺少的数据基础。因此，在环境空气质量预报工作机制中，与气象部门建立合作机制十分重要。开展多部门联合会商有助于研判未来污染形

势，提高预报的科学性和准确性。会商形式包括通过微信群、QQ群、线上会议、电子邮件等大众传媒加密沟通和实时会商。会商内容主要包括环境空气质量实况、气象条件与污染潜势、环境空气质量级别、首要污染物、传输路径及可能发生重污染天气等内容。

西南区域预报中心与四川省气象部门、贵州、云南、西藏、重庆生态环境监测中心每半月定期开展一次未来十五天的西南区域环境空气质量会商，遵循“独立预报、共同会商、联合发布”的原则。在秸秆等生物质燃烧、浮尘天气影响、烟花爆竹燃放等源排放异常的季节或污染频发期，加大区域会商频次。

四川省级预报会商包括例行会商、联合会商和重污染天气会商。例行会商，以预报员团队内部讨论为主，每日至少进行一次，会商内容主要包括环境空气质量实况、气象条件与污染潜势、污染落区、首要污染物及可能发生重污染天气等内容，基于值班预报员初步预报意见，参加讨论的预报员对当日预报结果进行讨论订正，形成会商预报结果。联合会商，在污染频繁期，组织与气象部门进行联合会商，准确把握未来的气象变化和污染形势演变。重污染天气会商，成立常态化的重污染天气预测会商专家组，充实有关科研机构、气象气候、环境监测等方面的专业力量，及时开展科学研判、动态会商，不断提高预测预报科学性、缜密性，提升预警精准性、时效性。预测有重污染天气风险时，与专家组进行会商，全体预报员参加，会商研判认为需要启动区域预警时，提前1—2天向省厅上报预警建议，包括预警的城市、污染程度、主要污染物、启动时间、气象条件等信息。

市（州）级预报会商包括内部会商、部门会商和外部会商。内部会商，由当日主班预报员组织发起，会商预报员团队一般包括主班预

报员、副班预报员和预报审核人员等，由主班预报员进行前一日预报结果评估及当日预报判断，通过会商对预报结果进行客观订正。若遇重污染天气，应适当增加预报员进行会商。部门会商和外部会商是由城市站与气象部门，以及与相关专家组成的联合会商，在秸秆等生物质燃烧、浮尘天气影响、烟花爆竹燃放等源排放异常的季节或污染频发期，组织开展部门会商和外部会商。例行内部会商每日至少进行一次，部门会商和外部会商在必要时组织进行。预报会商内容主要包括空气质量实况、气象条件与污染潜势、空气质量级别与范围、首要污染物及可能发生重污染天气等内容，基于值班预报员初步预报意见，预报员团队对当日预报结果进行讨论订正，形成会商预报结果。

### 3. 预报审核

省级预报信息的审核遵照以下原则：环境空气质量预报结果为“优”至“良”级别时，由当日预报员审核；预报结果为“轻度污染”至“中度污染”时，报部门负责人审核；当预报结果为“重度污染”及以上时，报分管领导审核。

市（州）级预报经会商后，形成最终的城市预报结果，预报内容包括未来七天污染气象趋势分析，空气质量预报等级、AQI 范围、细颗粒物（PM<sub>2.5</sub>）浓度、臭氧（O<sub>3</sub>）浓度、首要污染物信息，填报并提交负责人审核。在重污染应急值班时，预报值班将会商确定的预报结果报送部门负责人和分管领导审核后，进入预报信息发布程序。

### 4. 预报信息发布

西南区域预报发布信息内容包括西南区域未来七天环境空气质量等级范围和首要污染物名称，以及对未来环境空气污染变化趋势的预判描述。环境空气质量等级范围以环境空气质量指数划分，根据预

报情况，可使用单级别预报或等跨越一个级别的预报；首要污染物可以是 1-2 种污染物。

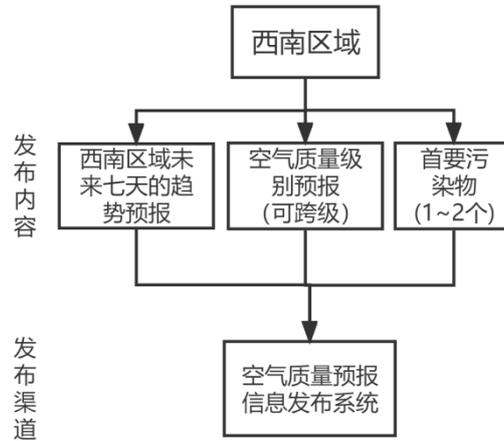


图 1-2 西南区域预报信息发布流程

四川省级预报发布信息内容包括全省区域未来七天的环境空气质量趋势预报和环境空气质量级别预报，以及全省各市（州）未来七天 AQI、细颗粒物（PM<sub>2.5</sub>）、臭氧（O<sub>3</sub>）浓度变化。重污染应急值班时，发布内容在例行发布的基础上增加向省级相关管理部门报送重污染预报和预警提示信息。

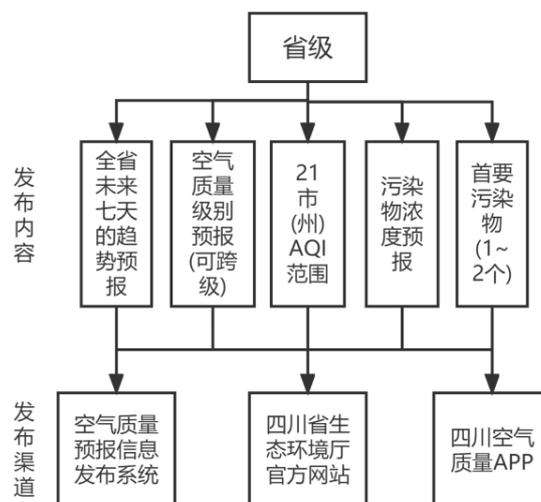


图 1-3 四川省级预报信息发布流程

市（州）级预报信息发布内容为城市七天的环境空气质量级别、AQI 范围、污染物浓度及首要污染物等预报信息。重污染应急值班时，发布内容在例行发布的基础上增加向市（州）相关管理部门报送重污染预报和预警提示信息。

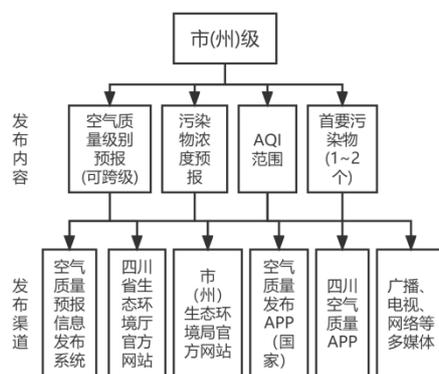


图 1-4 市（州）预报信息发布流程

## 5. 预报效果回顾

预报效果回顾主要包括中长期预报效果统计评估、短期预报效果回顾和典型污染过程全面推演三种类型。

中长期预报效果统计评估侧重于预报准确率的评估，包括预报等级、污染落区和省污染物预报准确率的统计分析，主要是评估预报中可能存在的系统性偏差，分析其原因优化模式和人工预报方法，提高预报准确率。短期预报效果回顾主要是记录当日的空气质量预报结果和昨日的空气质量等级和关要污染物等信息，评价等级预报、污染落区和首要污染物的预报准确性，指导临近预警和次日预报。典型污染过程全面推演重点针对污染事件开展成因研判、来源分析、过程推演、历中相似案例比较等方面的全面分析。

市（州）级预报还包括每日利用四川省空气质量监测网络管理系统自动对模式和预报员的预报效果进行评估，评估内容包括预报级

别、AQI 范围预报、细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 浓度、臭氧 (O<sub>3</sub>) 浓度、首要污染物预报准确率和倾向性评估。每周开展一次预报回顾, 回顾上周预报结果、天气形势, 分析预报偏差原因, 总结预报经验, 积累预报资料, 通过交流提升整体预报水平。按月、季度、年度和重污染时段开展预报回顾与评估, 形成环境空气质量预报月、季度、年度评估报告, 同时对每个连续重污染时段或特殊污染时段开展污染特征分析和预报回顾评估。

## (二) 预报技术方法

国内外主流的环境空气质量预报方法有两种: 数值预报方法和统计预报方法。四川省目前采用主要是 WRF-CMAQ 数值模型预报。

### 数值预报方法

空气质量预报是一项复杂的系统工程, 是当今环境科学研究的热点与难题。通过各类预报方法与手段, 可对痕量气体、气溶胶等多种大气污染物在城市、区域、全球尺度下的不同类型污染过程进行模拟预测研究, 研究内容涉及气象、物理、化学等多个学科, 包含宏观、微观多种过程, 是当前城市及区域污染调控与治理的有效途径。

空气质量数值预报方法以大气动力学理论为基础, 在给定的气象场、源排放以及初始和边界条件下, 通过一套复杂的偏微分方程组描述大气污染物在空气中的各种物理化学过程 (输送、扩散、转化、沉降等), 并利用计算机高速运算进行数值计算方法的求解, 预报污染物浓度动态分布和变化趋势, 提供高时空分辨率的污染物浓度区域分布, 同时可用于污染来源追因与贡献分析。目前的数值模式预报主要涉及高性能计算系统、空气质量模式、大气气候数值模式、源清单编制与动态更新机制、监测网络数据同化和综合分析工具等, 其在区域

性空气质量预报与分析方面具有明显优势，是目前国内外主流的环境空气质量预报技术方法之一。

目前，国内外主流的环境空气质量数值预报模式主要包括中科院大气所自主研发的 NAQPMS 模式，美国的 CMAQ 模式、CAMx 模式和 WRF-Chem 模式以及法国的 Polyphemus 模式等。

## 1. CMAQ 数值预报

### 1.1 模式概述

四川省数值预报系统是以 WRF+CMAQ 为核心模式构建的 36、12、4 公里的三重嵌套网格预报系统，运行在统一的计算平台和环境。在空气质量模式本地化的基础上，采用模块化设计、编程技术和网络技术实现全球大气气候预报场的自动下载、初始数据的自动预处理、空气质量模式的自动运行、预报结果的后处理及产品的自动生成等功能。模式框架见下图。

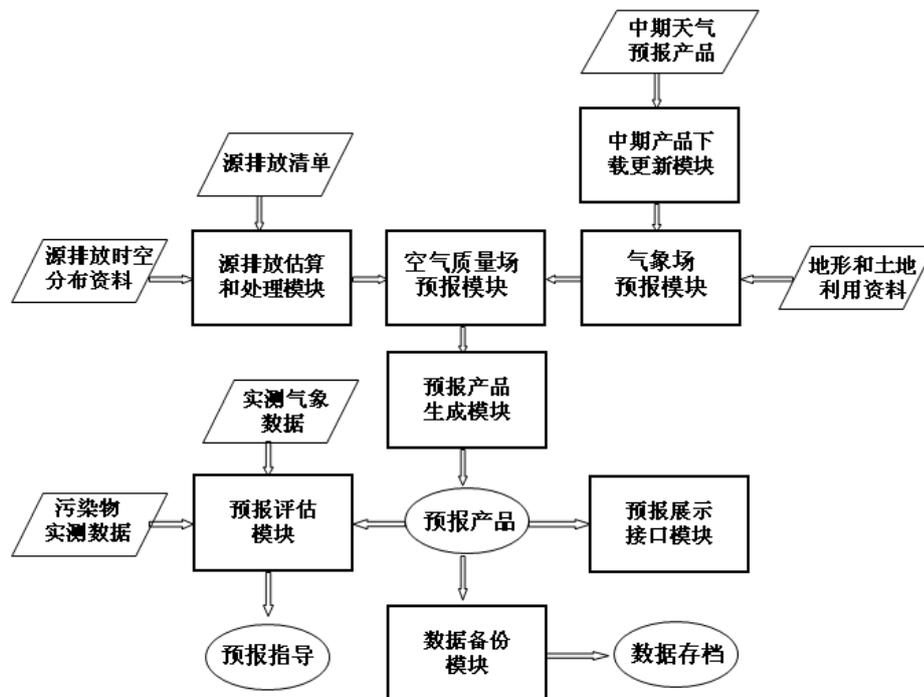


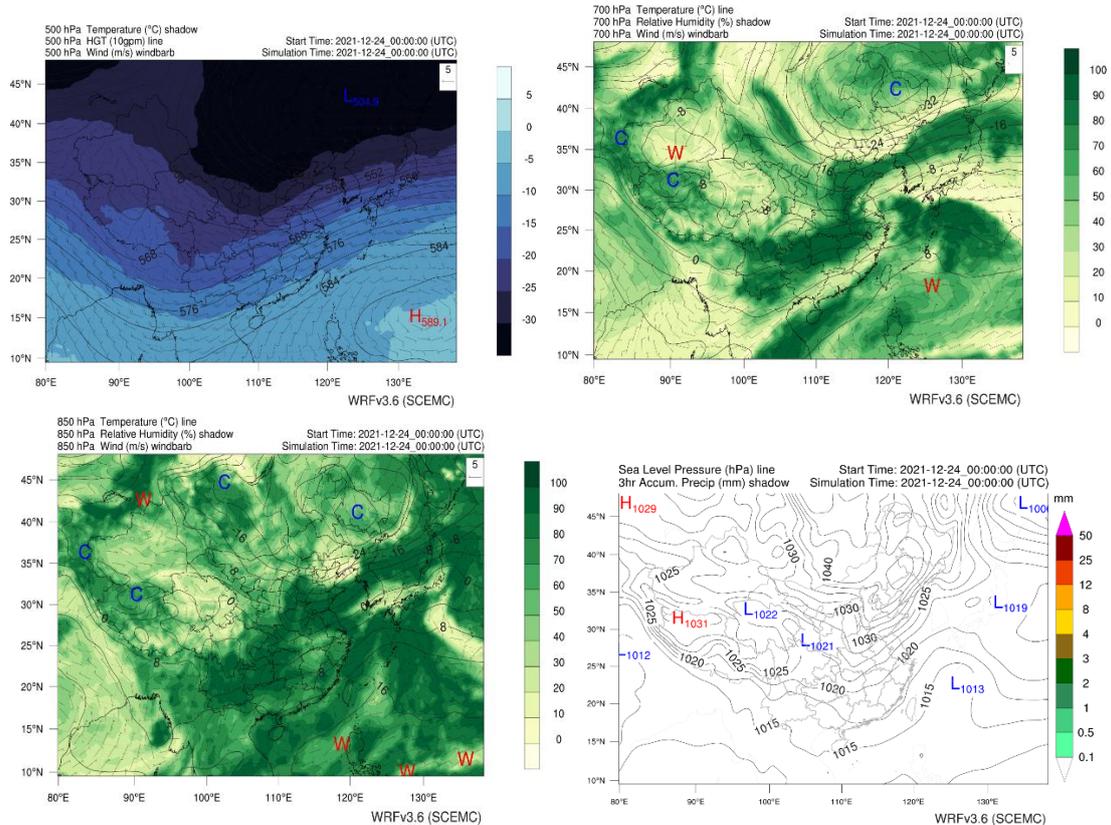
图 1-5 四川省空气质量数值预报系统

## 1.2 业务预报案例

### (1) 等压面气象预报案例

利用 grads 和 ncl 两个气象作图软件，充分发挥精细化的数值预报的优势，提供丰富的预报产品，将模式结果直观、简单地展示。为了方便预报员使用，把气象模式的原始变量转换成预报员常用的变量。产品包括：地面、925hPa、850hPa、700hPa、500hPa、200hPa 六个高度层的区域天气形势预报产品，未来 14 天时间分辨率 3 小时

同时，输出空气质量监测站点和常规气象站点的风速、风向、温度、相对湿度、边界层高度、云量、降水等气象要素预报结果数据文本并作图展示（时间序列图和网格化空间分布图），实现环境空气及气象监测数据与预测产品数据混合作图功能。



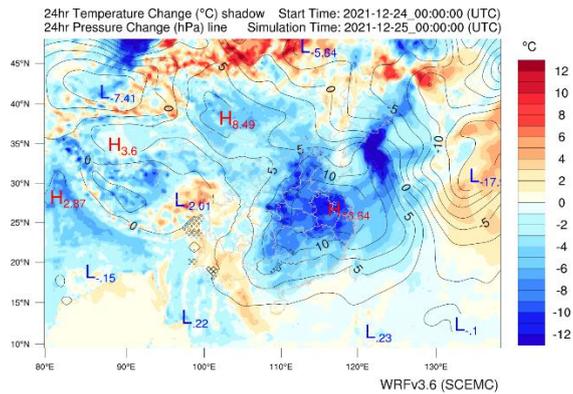


图 1-6 数值预报系统 500hpa、700hpa、850hpa 及地面气象形势预报产品 (ncl 作图)

## (2) 垂直剖面气象案例

在“后处理和可视化模块”的框架下，输出四川地区各城市未来 14 天风、温、湿垂直廓线图和剖面图。图形有二维分布图和动态图等多种形式。

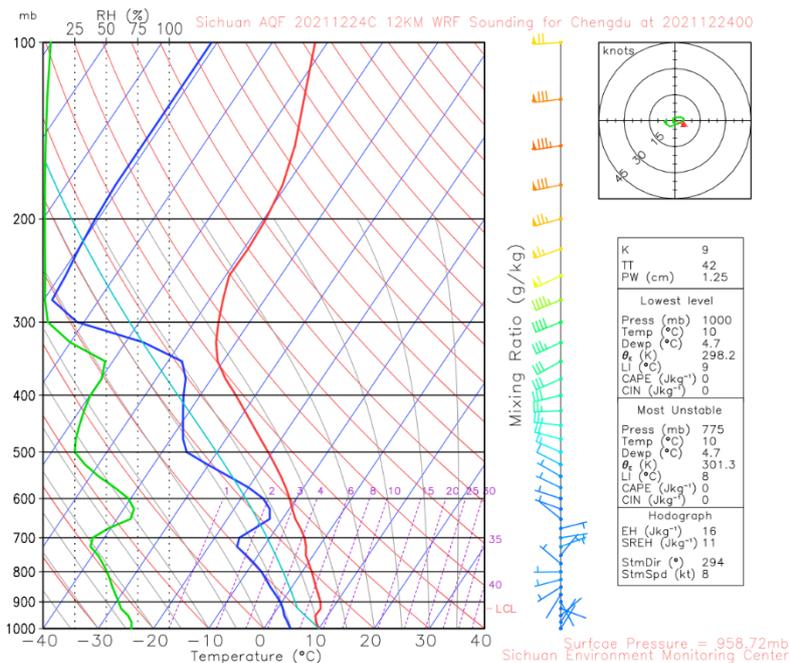


图 1-7 城市垂直探空图

## (3) 地面气象及空气质量预报案例

数值预报系统为四川省区域及城市提供未来 14 天的气象要素及空气质量预报产品，气象要素包括降水量、云量、气温、湿度、气压及边界层高度等，空气质量 AQI 及污染物包含空气质量指数 AQI、

细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>)、可吸入颗粒物 (PM<sub>10</sub>)、臭氧 (O<sub>3</sub>)、二氧化氮 (NO<sub>2</sub>)、二氧化硫 (SO<sub>2</sub>) 和一氧化碳 (CO) 浓度的逐时预报, 预报产品为网格化空间分布图。

#### (4) 城市时间序列预报案例

数值预报系统为四川省城市提供未来 14 天的气象要素及空气质量预报产品, 气象要素包括降水量、云量、气温、湿度、气压及边界层高度等, 空气质量 AQI 及污染物包含空气质量指数 AQI、细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>)、可吸入颗粒物 (PM<sub>10</sub>)、臭氧 (O<sub>3</sub>)、二氧化氮 (NO<sub>2</sub>)、二氧化硫 (SO<sub>2</sub>) 和一氧化碳 (CO) 浓度的逐日及逐时预报。由于四川盆地多数城市以细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 和臭氧 (O<sub>3</sub>) 为首要污染物, 夏季臭氧超标突出, 秋冬季则以细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 区域性污染频繁, 针对盆地重点城市研发城市中期污染形势潜势预报产品, 见下图; 针对单个城市, 综合城市气象要素与空气质量, 实现多要素叠加作图展示, 见图。

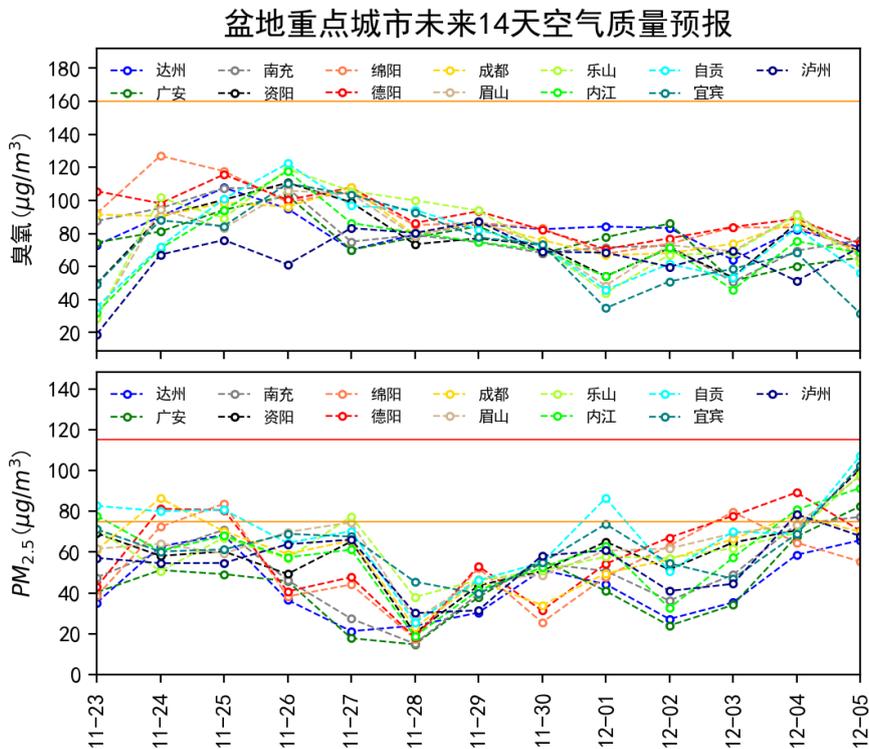


图 1-8 四川省盆地重点城市未来 14 天空气质量预报产品

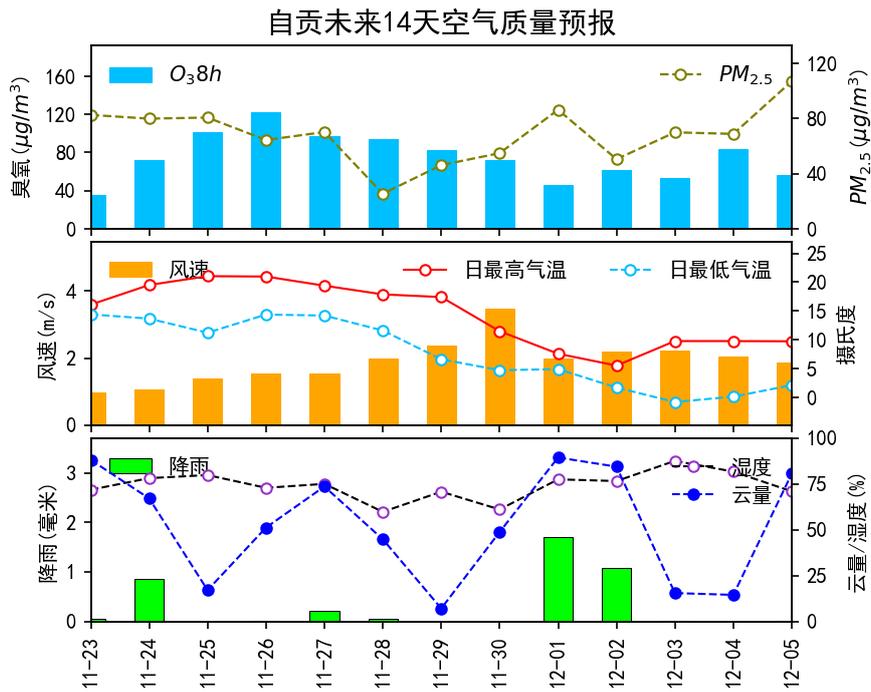
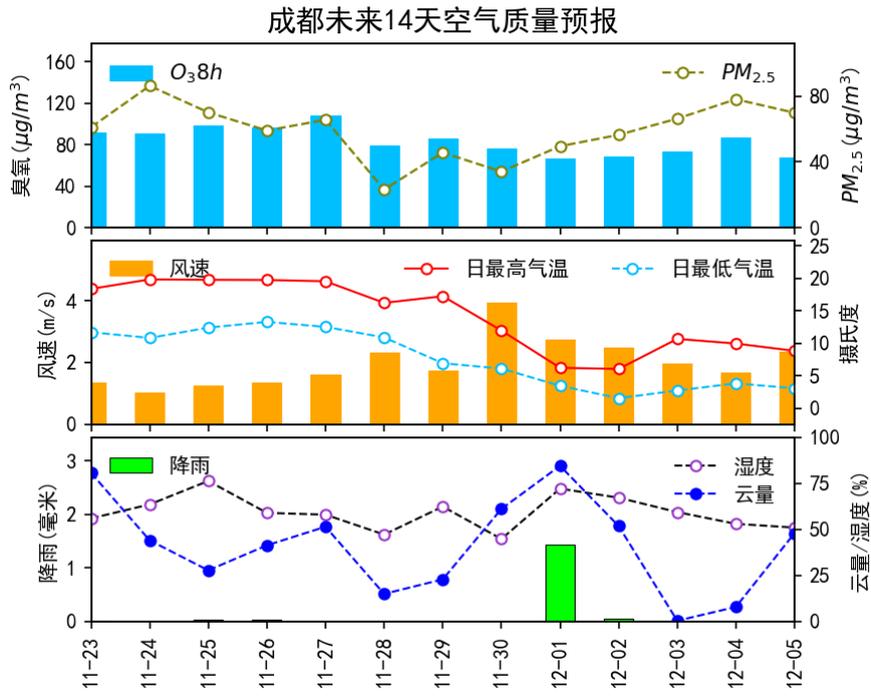


图 1-9 城市气象及空气质量综合预报图（以成都、自贡为例）

## (5) 污染追因溯源案例

污染物组分数据预报产品，包括 PM<sub>2.5</sub> 主要化学组分（EC、OC、OM、硫酸盐、硝酸盐、铵盐、土壤组分等），预报产品分为逐日和逐小时两种时间分辨率，提供四川地区各城市国控站的预报情况，并

且能够通过某一城市所有国控站点的平均预测结果来反映该城市的总体情况。

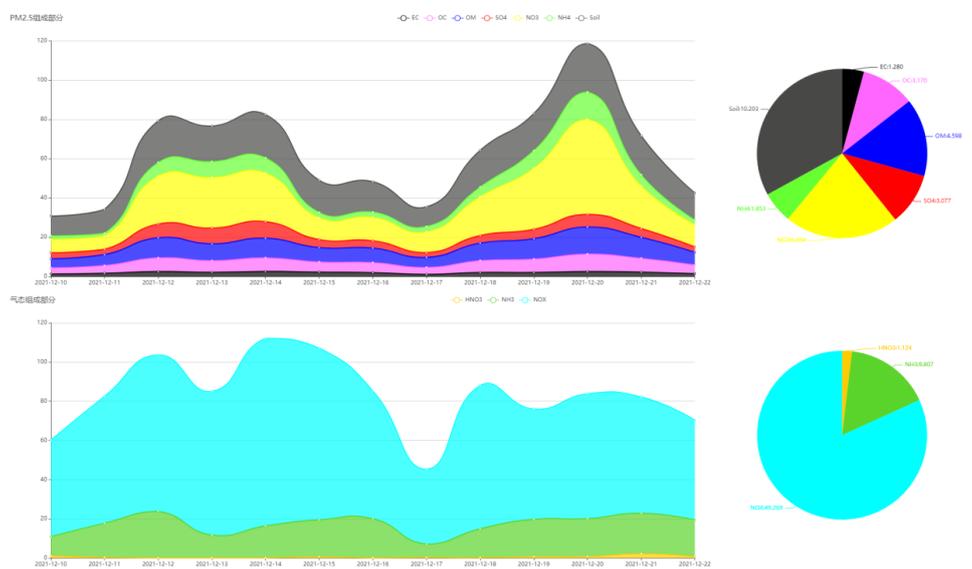


图 1-10 成都市 PM<sub>2.5</sub> 化学组分日均浓度的预报产品示例

数值预报系统可以提供未来 7 天四川区域内重点地区的 CO、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、PM<sub>2.5</sub> 及组分（硝酸盐、硫酸盐、铵盐、EC、有机物等）源贡献预报的时间序列文本和空间分布图形产品。图形产品将实现静态和动态结合的展示方式，数据产品包含文本格式和图形格式，有逐日和逐时两种时间分辨率，提供四川盆地各城市（四川省成都、德阳、绵阳、眉山、资阳、广元、巴中、达州、广安、南充、遂宁、乐山、雅安、宜宾、泸州、内江、自贡；重庆市）以及西藏、云南、贵州三省（区）主要城市国控站的预报情况，并且能够通过某一城市所有国控站点的平均预测结果来反映该城市的总体情况。

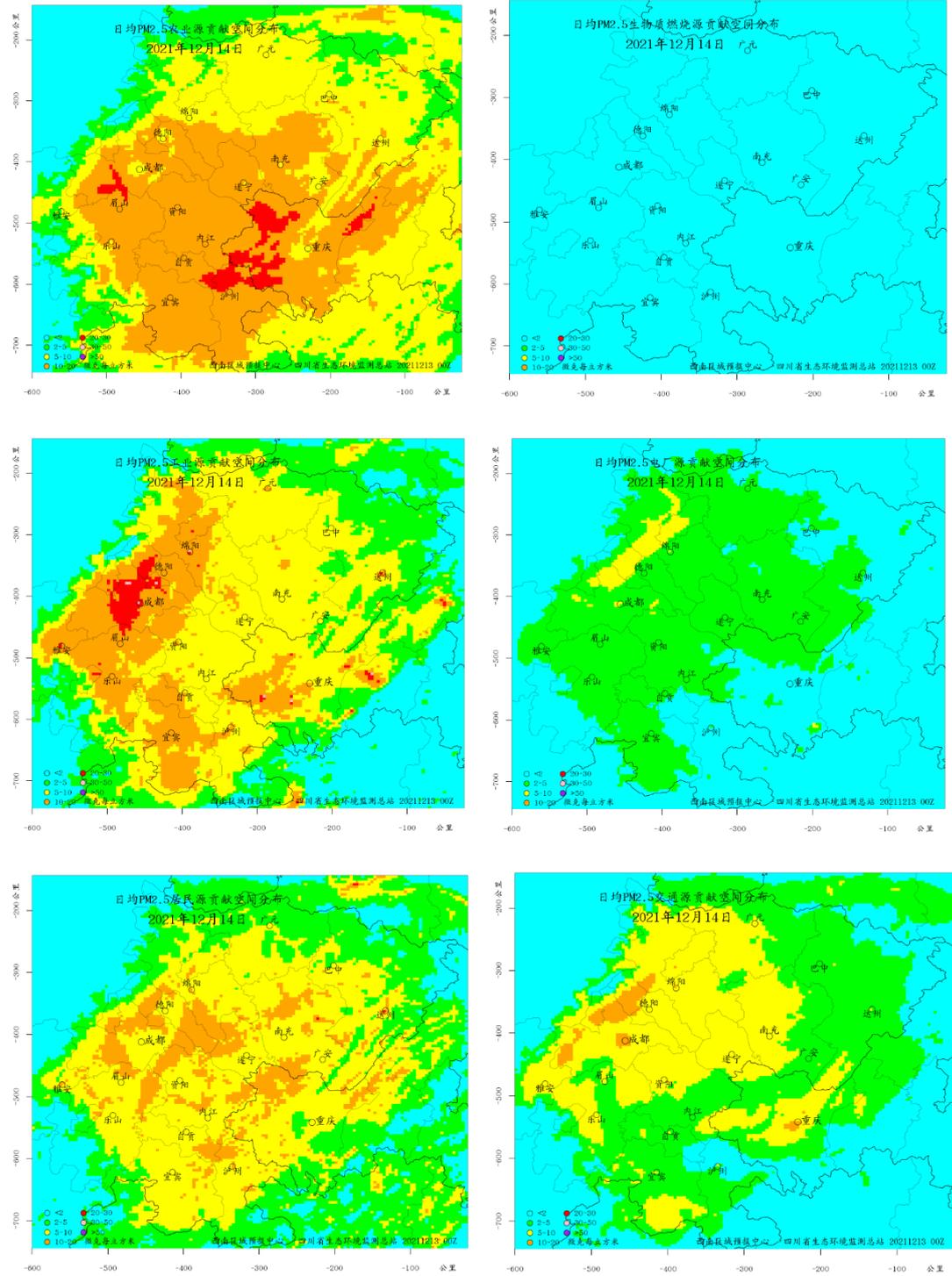


图 1-11 日均 PM<sub>2.5</sub> 源贡献解析结果

(分为农业源、生物质燃烧源、工业源、电厂源、居民源、交通源)

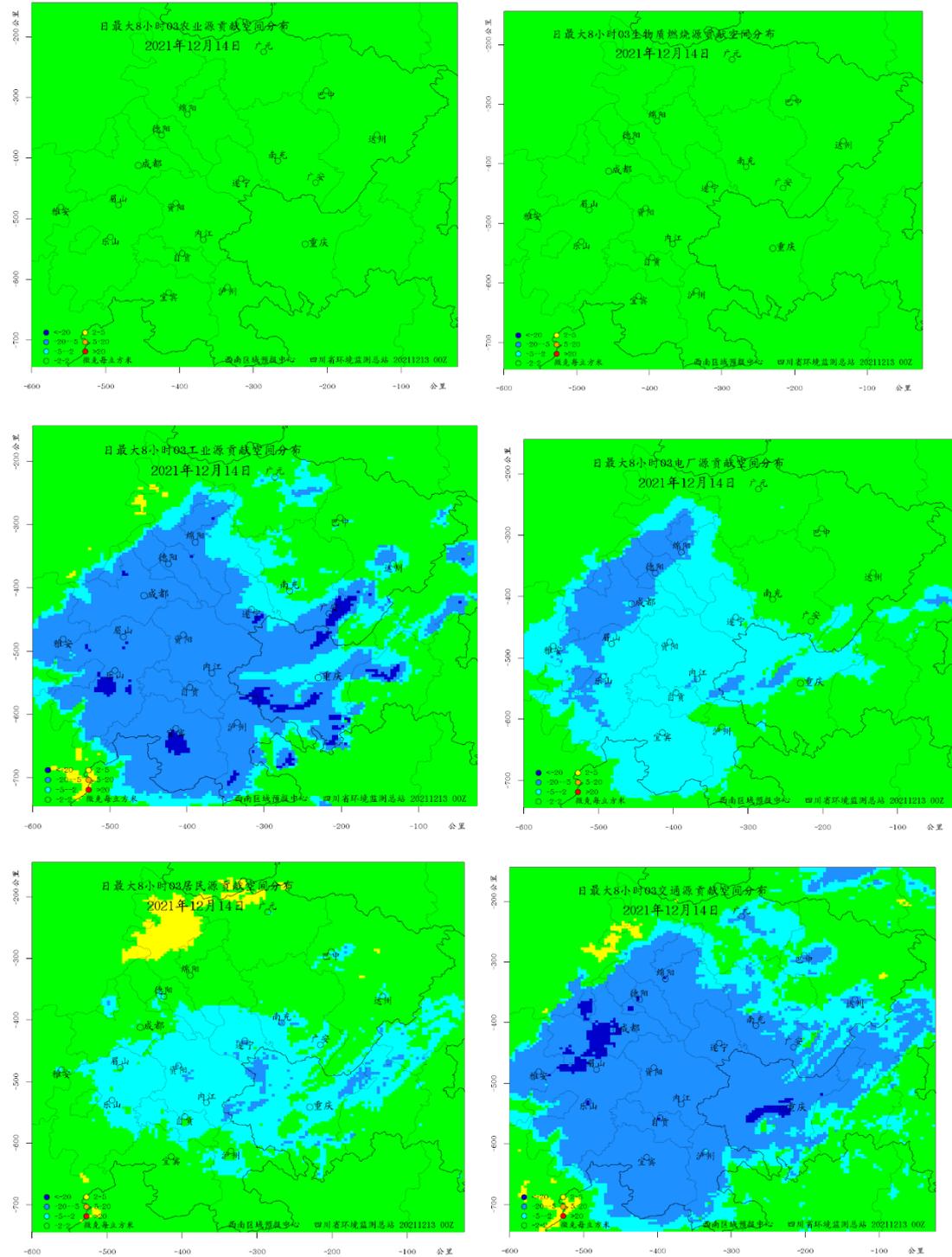


图 1-12 日最大 8 小时 O<sub>3</sub> 源贡献解析结果

(分为农业源、生物质燃烧源、工业源、电厂源、居民源、交通源)

## 二、全省大气环境污染物溯源技术

### (一) 大气污染源清单源解析技术

大气污染源清单是基于对各污染源的详细调查，根据各源的基本工况和排放因子模型，建立污染源清单和数据库，据此可以分析各源排放对总排放量的贡献及对空气质量的相对影响，确定重点污染源。但由于源清单的不完整性及排放因子的可适用性，源清单源解析结果具有较大的不确定性、误差较大的特点。

#### 案例一：2021年四川省大气污染源清单源解析案例

根据自下而上的填报审核方式（企业 - 区县 - 市 - 省），基于四川省空气质量调控综合决策支撑平台统计 2021 年四川省污染源清单数据。工业过程源的估算主要采用基于产品产量或原辅材料的排放因子法。针对道路移动源，采用 2014 年国家环境保护部《道路机动车排放清单建立指南》，同时结合现有部分车型实际道路测试结果对部分因子进行更新后，对四川省道路移动源排放清单进行估算。

2021 年，四川省共排放 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、VOCs、NH<sub>3</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、BC、OC 分别为 196.5kt、525.0kt、3439.4 kt、470.5 kt、467.0 kt、644.6 kt、261.7 kt、10.9 kt、20.6 kt，各行业排放情况如下图所示。

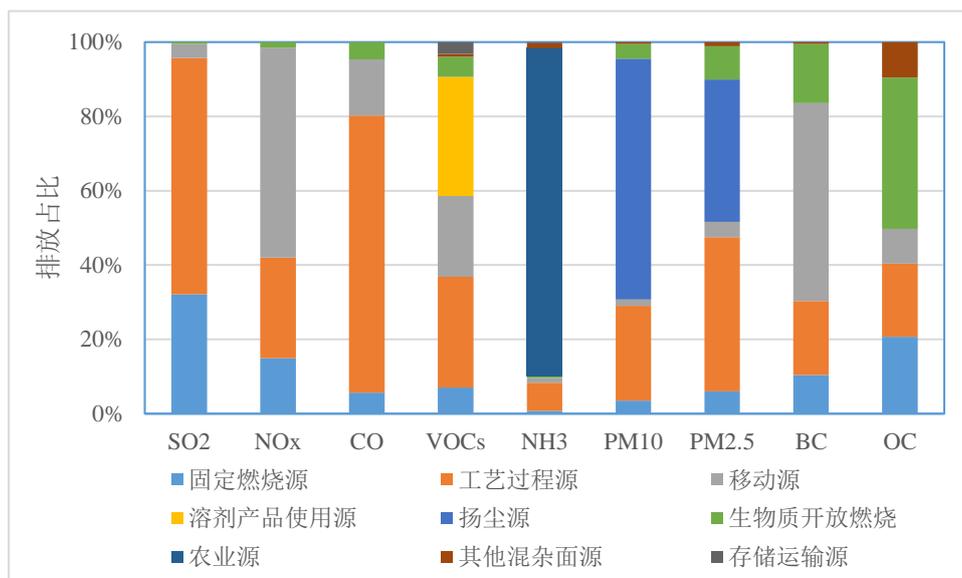


图 2-1 2021 年四川省污染源排放分担率

由图可知，工艺过程源是 SO<sub>2</sub> 的最大贡献源，分担率为 63.12%；其次为固定燃烧源，分担率为 32.56%；此外，移动源和生物质开放燃烧源分别对 SO<sub>2</sub> 贡献了 3.90%和 0.42%。就 NO<sub>x</sub> 而言，移动源、工艺过程源和固定燃烧源的排放较大，占比分别达到 56.53%、27.11%和 14.95%。对于 CO 而言，工艺过程源、移动源、固定燃烧源是主要的排放源，分担率分别约为 74.61%、15.09%和 5.67%。VOCs 的排放主要来源于溶剂产品使用源、工艺过程源和移动源，献率分别为 31.76%、29.83%、21.75%。农业源是 NH<sub>3</sub> 的最大贡献源，2021 年农业源分担率为 88.42%。对于颗粒物排放，扬尘源和工艺过程源贡献最大。其中，扬尘源和工艺过程源对 PM<sub>10</sub> 的贡献分别为 63.58%和 26.36%，对 PM<sub>2.5</sub> 的贡献分别为 36.25%和 42.81%。就 BC 而言，排放主要来自移动源、工艺过程源和生物质开放燃烧源，其排放占比分别为 53.24%、19.94%和 15.91%。就 OC 而言，排放主要来自生物质开放燃烧源、固定燃烧源和工艺过程源，其排放占比分别为 40.72%、20.67%和 19.75%。

## (二) 基于观测和模拟的污染源解析技术

20 世纪 70 年代由排放清单源解析转移到受体模式, 开始了受体模式的研究。受体模式通过分析颗粒物化学成分和物理特性来推断污染物来源, 估算各类污染源的贡献率, 自问世以来得到了迅速发展, 结果可以作为战略决策的依据。受体模式经过了 30 多年的发展, 逐渐形成了富集因子、CMB 模式、多元统计分析(如因子分析、主成分分析等)用于识别和解析颗粒物来源的方法, 目前国内大气颗粒物解析多采用化学质量平衡、多因子分析法以及多元统计分析方法。受体模型主要用于颗粒物的来源解析研究。在污染物从源到受体质量守恒且呈线性关系的假设下, 受体模式通过分析受体大气颗粒物化学特性和物理特性来推断污染物的主要来源并估算各类污染源的贡献率。由于受体模型不依赖于气象资料和污染源清单, 主要基于污染源排放特征、源排放化学成分谱和受体大气的物理化学特征, 因此是一种典型的基于环境浓度水平“至上而下”的源解析方法, 能有效确定影响受体大气的主要污染源类, 避免了重要污染源类型的遗漏。

针对臭氧源解析, 主要从基于观测与基于空气质量模型两个方面展开。基于观测的臭氧成因与 VOCs 来源解析方法(以下简称观测法)是给出臭氧及其前体物的分布和变化最直观的方式, 对观测得到的数据进行科学的解析, 即可获得有关区域传输/本地贡献、臭氧与前体物关系等必要的信息, 因此被广泛应用。观测法主要包含臭氧及其前体物检测、臭氧及其前体物污染特征分析、臭氧生成敏感性分析和 VOCs 来源解析等, 根据臭氧及其前体物

的观测数据，判断臭氧形成的敏感性，并定量解析各污染源对臭氧及其前体物形成的贡献。基于空气质量模型的来源解析方法是以数值模式方法描述臭氧前体物从排放到生成臭氧所经历的大气物理化学过程，进一步定量估算不同区域和不同类别污染源排放对环境空气中臭氧及其前体物生成贡献的技术方法。

### 案例一：四川省某市 $PM_{2.5}$ 来源解析

#### 1) 采样设置

2020年4—2021年2月，在四川省某市设置3个采样点，分别为A点、B点、C点，利用四通道颗粒物采样器在采样点同时采集  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  样品，每个样品分别使用石英膜（Q膜）和聚丙烯膜（P膜）同时进行采集。监测分为春、夏、秋、冬四个季节监测，监测时间为2020年4月、5月、6月、7月、8月、9月、10月、12月和2021年1月、2月，共监测72天。每天样品采集时间为11:00至次日10:00，共采集23小时。

#### 2) 样品分析

采集的样品利用 ICP-MS\ICP-OES、离子色谱仪、热/光碳分析仪分别对样品中元素组分、离子组分和碳组分进行分析，得到所有样品中每个组分的质量浓度，为 CMB 模拟提供基础数据。

#### 3) CMB 源解析结果

全市及各站点  $PM_{2.5}$  平均源解析结果如下表所示。二次源（二次硫酸盐+二次硝酸盐+SOC）对全市  $PM_{2.5}$  贡献率最高，为36%，其次为机动车、燃煤源和扬尘源。各站点主要污染源类似，均为二次源、机动车、燃煤源和扬尘源。各站点比较而言，A和C站

点燃煤源贡献率较高，A 站点周边企业较多，应注意周边企业燃煤源管控，C 站点周边应注意散煤燃烧等管控。B 站点处于中心城区，机动车相对较高。

表 2-1 PM<sub>2.5</sub> 全年平均源解析结果

	工艺过程源	扬尘	机动车	二次硝酸盐	二次硫酸盐	生物质	燃煤	餐饮	SOC	其他
全市平均	5%	10%	19%	14%	11%	5%	16%	5%	11%	5%
A 点	5%	8%	19%	14%	11%	6%	17%	5%	10%	5%
B 点	3%	10%	22%	21%	12%	5%	7%	5%	12%	3%
C 点	5%	9%	15%	16%	11%	6%	17%	6%	9%	7%

## 案例二：基于观测的臭氧源解析案例

### 1) 采样设置

2020 年 8 月 25—29 日，在四川省某市 A 点和 B 点同步采集 5 天。监测频次：站点每日 8 个样品（即采样日的 08:00-9:00、9:00-10:00、10:00-11:00、12:00-13:00、14:00-15:00、15:00-16:00、17:00-18:00、18:00-8:00 共计 8 个时段的样品。

### 2) 样品分析

离线监测采样苏玛罐（不锈钢）采样法，采用美国 Entech 公司生产的体积为 3.2 L 和 6.0 L 的不锈钢采样罐收集空气样品，采样前罐内壁经过抛光、硅烷化处理，采样入口流量采用流量阀控制，采样时间分为 1h、14h，采样罐的采样时间及设定的恒定流量参照 HJ759 执行，使用前采样罐流量应校准。VOCs 组分离线分析采用预浓缩仪（Entech Model 7500）- GC-MS/FID（Agilent 7890A-5977B），按照美国环保署 TO14、TO15 的方法进行三级冷阱预浓缩，预浓缩后样品转移至 GC-MS 进行分析。

### 3) PMF 来源解析

2020年8月25日—2020年8月29日期间A点逐日的VOCs来源解析结果如下图所示，A站点VOCs主要来自工业过程排放源、溶剂使用源、机动车尾气、燃烧源、天然源+二次生成、餐饮油烟、油气挥发源共7类源，贡献占比分别为26%、21%、15%、15%、14%、6%、4%。

8月25日、28—29日A站点溶剂使用、工业过程排放贡献占比较为突出；8月26日该站点出现短时臭氧轻度污染，当日机动车尾气、天然源+二次生成源占比明显较前一日有所上升。8月28日，可能受高温辐射影响，天然源+二次生成源贡献占比明显上升，占比达21%。

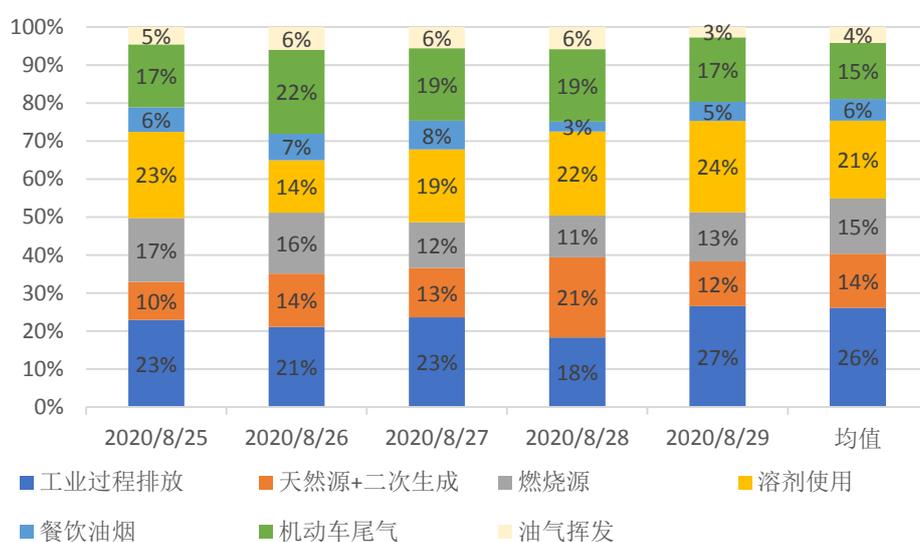


图 2-2 8月25—29日A点VOCs来源贡献分布

B点逐日的VOCs来源解析结果如下所示，VOCs主要来自机动车尾气、工业过程排放源、溶剂使用源、区域背景+二次生成源、油气挥发、天然源、餐饮油烟排放源共7类源，贡献占比分别为27%、22%、19%、11%、10%、7%、6%。

8月25日B站点工业过程排放、溶剂使用贡献占比较为突出；8月26日、29日该站点出现短时臭氧轻度污染，工业过程排放、区域背景+二次生成、溶剂使用、餐饮油烟占比相对较高。8月27—28日机动车尾气贡献占比最高，均在30%以上。整体来看，B点受站点周边机动车尾气、工业企业排放、溶剂使用影响较为明显。

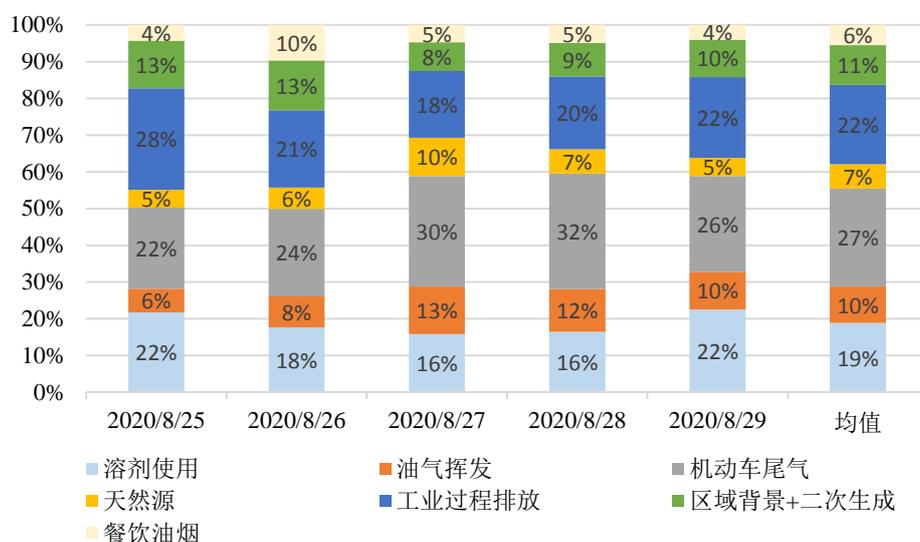


图 2-3 8月25—29日B点VOCs来源贡献分布

### 案例三：基于空气质量模型的臭氧源解析案例

#### 1) 模拟时间

模拟时间选取某市2019年1月、4月、7月和10月全月作为模拟月份，分别代表冬季、春季、夏季和秋季。为了减少初始条件的影响，分别在每个模拟月份的前一个月的26/27日开始模拟，即4个月对应的分别有5天的初始场模拟。

#### 2) O<sub>3</sub>行业来源解析

使用CAMX模型的OSAT模块对各个行业对某市的贡献进行了模拟，模拟结果如下表所示。

表 2-2 各行业对某市 O<sub>3</sub> 贡献

监测站	月	能源电力	工业锅炉	工艺过程	溶剂使用	道路交通源	非道路移动源	居民源	农业	扬尘	其他(油气+植被)
站点 1	1	5%	7%	8%	3%	25%	13%	9%	0%	0%	31%
	4	8%	12%	12%	3%	31%	19%	2%	0%	0%	14%
	7	8%	14%	11%	2%	33%	22%	2%	0%	0%	9%
	10	6%	12%	11%	3%	30%	18%	2%	0%	0%	18%

### (三) 走航源解析技术

#### 3.1 VOCs 走航监测技术

VOCs 走航监测系统使用移动载具, 搭载挥发性有机物监测设备, 其工作方式是利用走航新技术, 对挥发性有机物排放源进行快速检测, 掌握 VOCs 污染全貌, 锁定重点污染源, 并开展定性定量分析, 理论上可同时监测 300 多种 VOCs 气体。全在线 VOCs 走航监测车可实现环境空气 VOCs 全天候移动式监测, 以及突发性环境污染事故发生时快速应急监测和 VOCs 数据调查。其应用范围非常广, 具有在线和离线 VOCs 监测功能。

#### 案例一: VOCs 走航监测案例展示

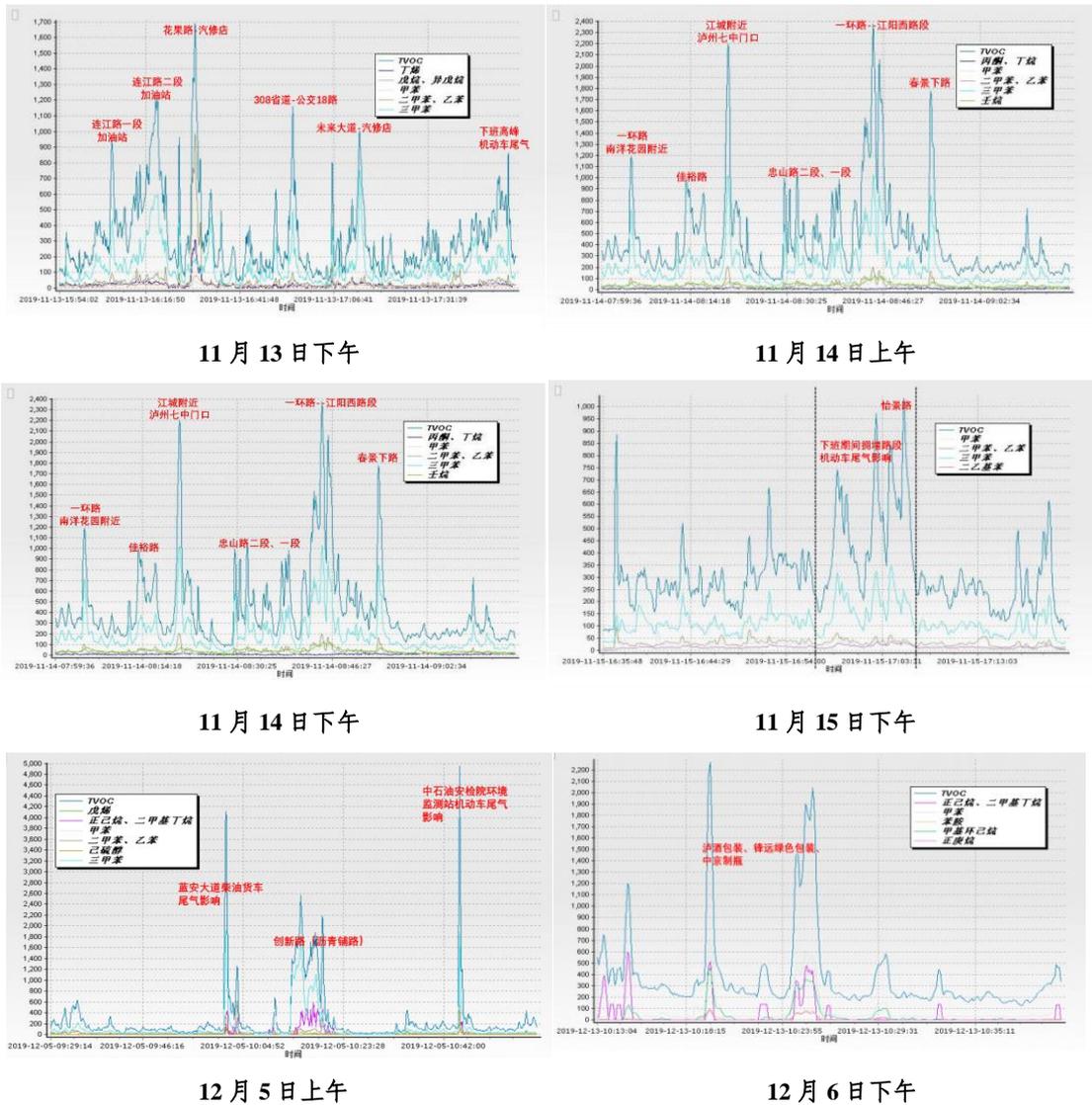
##### 1) 监测时间

2019 年 11 月 13—15 日、12 月 5—6 日、12 月 12—13 日, 共计 7 天, 主要围绕某市主城区进行 VOCs 走航, 对国控点市环监站、蓝田宪桥周围区域、江南科技产业园等进行重点排查。



图 2-4 主要走航范围

## 2) 监测结果



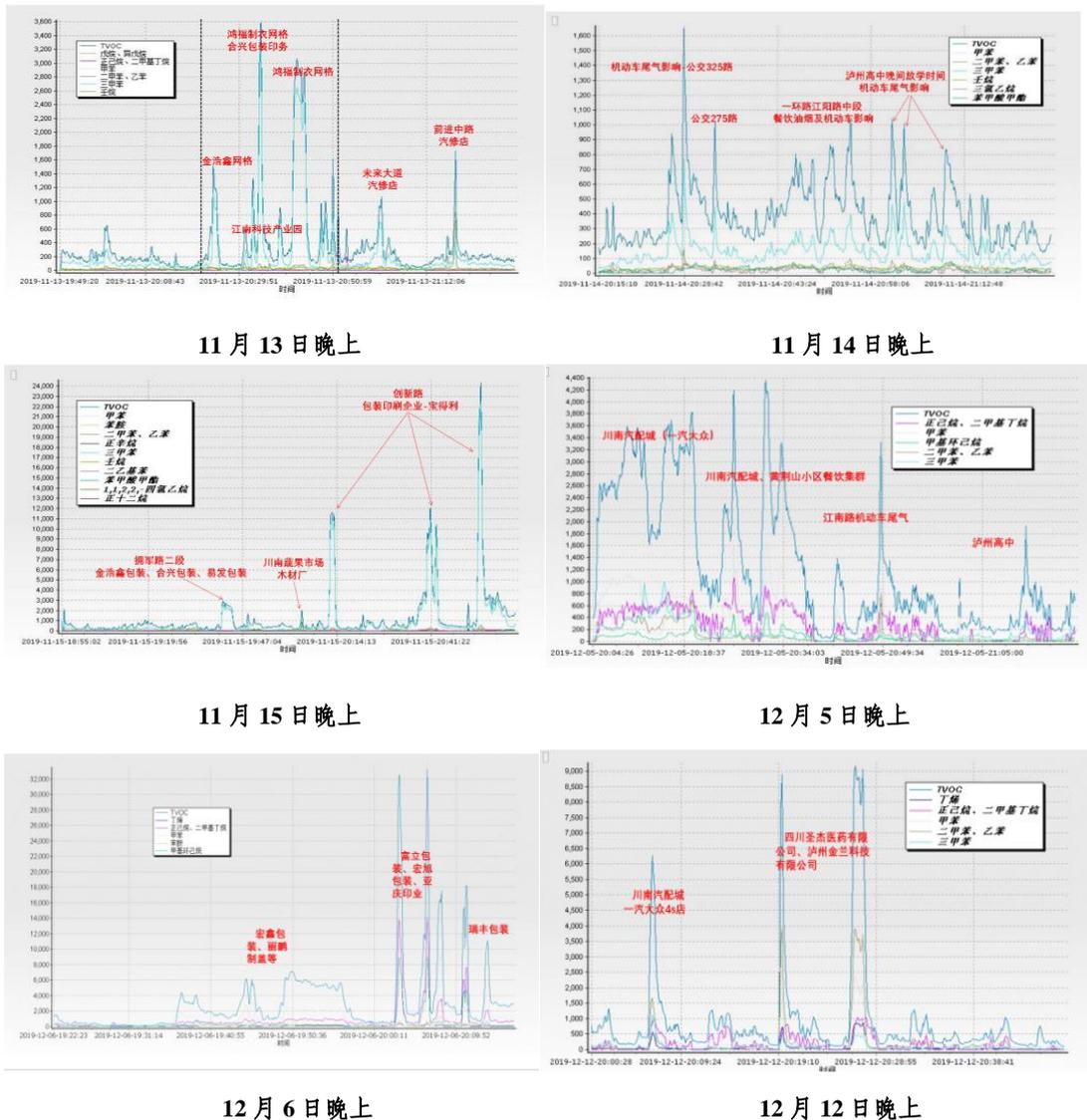


图 2-5 某市主城区 VOCs 走航监测谱图

从图 2-5 某市主城区 VOCs 走航监测谱图可以看出，某市主城区 VOCs 排放浓度白天与夜间相比，物种基本没变，但白天的浓度明显高于夜间。主要物种为：三甲苯、二甲苯、乙苯、甲苯、戊烷、丁烯、丙酮、丁烷等物种，三甲苯排放浓度最高，主要来源于印刷包装、汽修企业的溶剂使用和机动车尾气排放影响。江南科技产业园区内包装印刷企业、泸州酒业集中发展区、辖区内汽修店和早晚高峰期机动车尾气排放对苯系物整体浓度水平贡献最大。

### 3.2 颗粒物走航监测技术

颗粒物激光雷达技术是基于米散射原理，通过对监测区域发射激光，接收颗粒物散射信号，实现大气颗粒物的时空分布遥感探测。激光碰触到大气中的颗粒物会产生回波信号，回波信号被采集器接收，通过计算机反演计算，可以形成所监测区域内的污染物分布图以供分析。这些数据叠加在高清 GIS 地图上，放大就能清晰地看到污染源的具体位置，经过相关系数、公式的计算得出大气中的颗粒物是  $PM_{2.5}$  还是  $PM_{10}$ 。

#### 案例二：颗粒物走航监测案例

##### (1) 走航概况

双流区颗粒物激光雷达走航时间为 2021 年 1 月 1 日 10:55 ~ 13:48，走航区域为双流区九龙工业园区、蛟龙工业港园区、武侯区蓝天立交及九江镇主要道路。走航时天气为晴天，有雾，能见度 2.4 公里，气温 2~8℃，相对湿度在 87% 左右，风向为南风，风力为 1 级。

##### (2) 结果分析

走航时段低温高湿，有雾，利于颗粒物吸湿性增长。走航区域消光系数整体较低，数值维持在 0.35 左右，200m 以下近地面退偏振比普遍较小 ( $<0.1$ )，消光物质为细颗粒物，其主要来源为汽车尾气和工业废气。武侯区蓝天立交至九江镇路段消光系数相对偏高，主要污染源为机动车尾气及道路扬尘；九龙工业园区和蛟龙港工业园区消光系数整体较低，但局地近地面消光系数明显高于其他区域，主要污染源为固定污染源排放及园区内小散企业

排放。

九龙工业园区内 200m 以下近地面消光系数较低，退偏振比较小，表明主要消光物质为粗颗粒物。但在园区内走航时发现有用农用柴油车在园区内怠速行驶，伴有浓烈的黑烟，当走航车经过农用车时消光系数明显升高。同时，在园区外侧柑龙路中段监测到近地面消光系数显著升高，排查发现某家具企业为疑似高排放源，且污染物有向高空扩散的趋势。

蛟龙工业港园区多数企业节假日已停产，走航时园区内近地面消光系数较低，但在经过园区内新华大道东段时消光系数有明显升高，排查发现该区域为园区内小散企业集中区域，且污染物有向高空扩散的趋势。

武侯区蓝天立交至九江镇路段在走航时，从消光图谱可以看出，三环路及外侧的道路消光系数略高于三环路内侧城区道路，且西三环路一段 - 武侯立交 - 武兴路路段进出城车流量大，道路拥堵，机动车尾气排放严重。同时，在成新蒲快速通道 - 星空路四段有市政工程正在进行土石方作业，且未进行湿法作业，运渣车辆带泥上路，该路段车流量大、重型车多、路面积尘严重、车过起尘，走航时消光系数明显升高，退偏振比相对较大（0.1 ~ 0.35），气溶胶主要为粗颗粒物。



图 2-6 双流区九龙工业园、蛟龙工业港园区 532nm 消光系数分布图

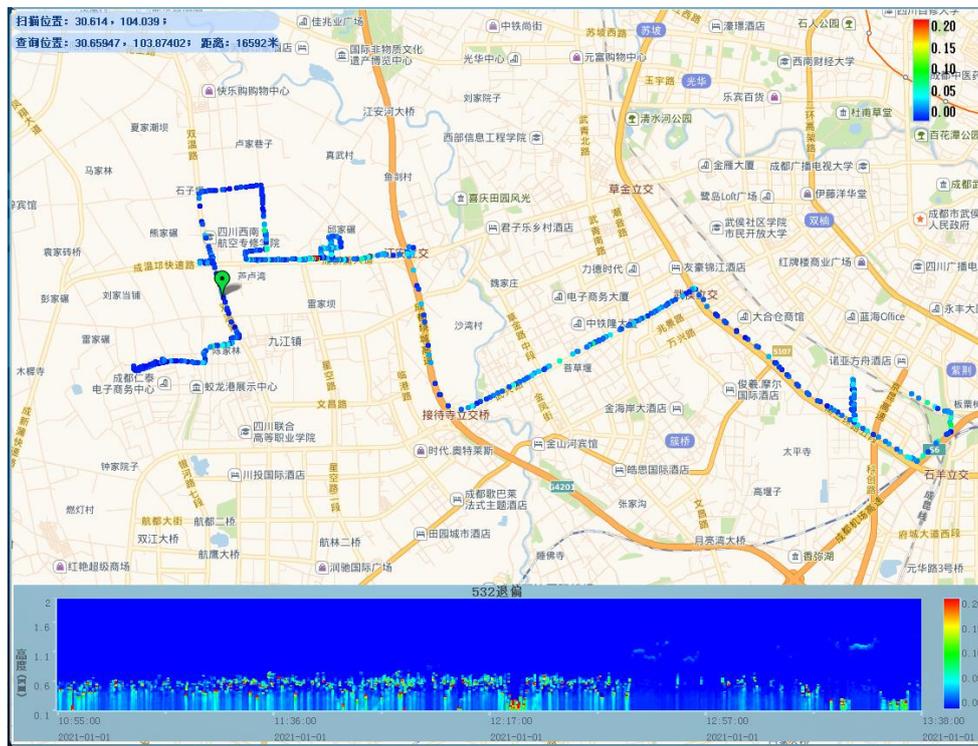


图 2-7 双流区九龙工业园、蛟龙工业港园区退偏系数分布图

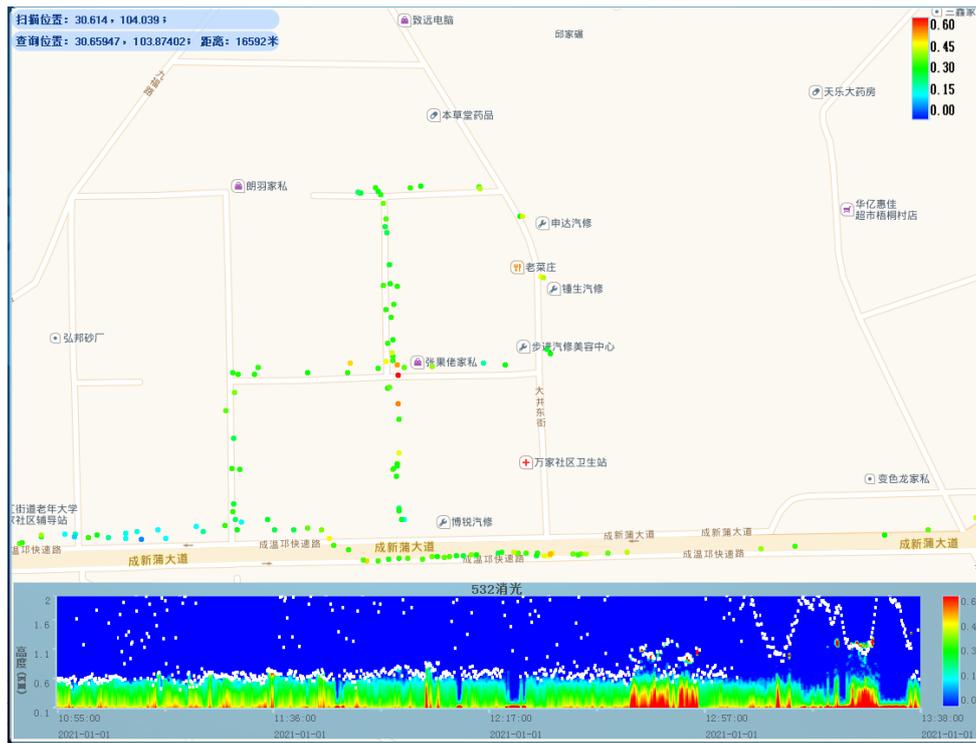


图 2-8 九龙工业园区 532nm 消光系数分布图

### 3.3 NO<sub>x</sub> 走航监测技术

便携式多组分气体测定仪是为了满足环境应急监测、污染源现场检测等需求而自主研发的便携式环境监测仪器。不仅可同时测量二氧化硫、一氧化氮、二氧化氮、氨气、苯系物等气态污染物，而且可以通过集成电化学传感器来扩充检测的组分，满足现场多样化的需求。适用于空气自动站、化工园区空气、污染源厂界、重污染区域、工厂、车间、室内及污染泄漏事故等环境空气中有毒污染气体的定量检测和潜在泄漏区的多种特征因子监督性监测、车载走航监测等。

#### 案例三：NO<sub>x</sub> 走航监测案例

走航地点：成都市某区。走航车速：最快车速 60km/h，平均车速 40km/h。气象条件：北风 1-2 级，车外温度 15 度。



图 2-9 11月25日范围内 NO<sub>2</sub> 走航图

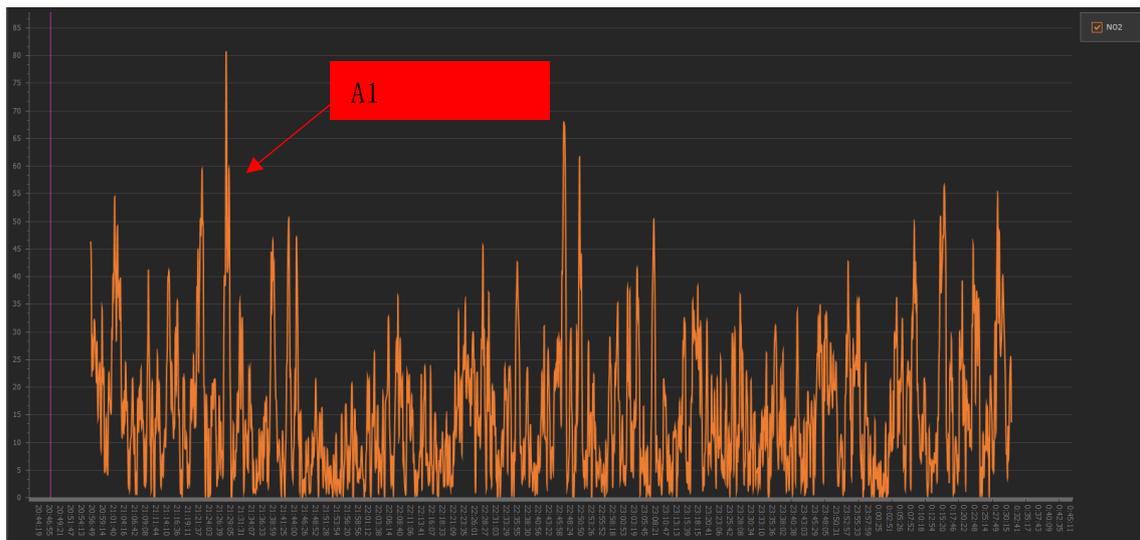


图 2-10 11月25日 NO<sub>2</sub>走航曲线图

从上图可以看出，在整个走航过程中，NO<sub>2</sub>的浓度在 21:29 的时候出现了一个高值（用箭头标注），高值出现在 A1，其中浓度高达 80ppb 左右，其他时刻 NO<sub>2</sub> 的浓度变化较均匀，浓度均在 70ppb 以下。从上图可以看出，在整个走航过程中，NO<sub>2</sub>的浓度平均都在 40ppb 以下，比较均衡，相对没有污染。

#### **(四) 结论与展望**

大气污染源解析为人们及时掌握区域内主要污染来源，为源头降低提供了第一手宝贵资料支撑。广大环境监测人员除了要熟练掌握各种监测技术外，还应关注新技术新理论的发展，不断提升源解析结果的准确性，为环境保护提供技术支撑。

### **三、全省大气污染防治管控技术路径**

近年来，频发的雾霾、光化学烟雾等大气污染问题引起了全社会的高度关注，四川盆地一度成为全国雾霾污染最为严重的区域之一，大气污染已成为民生之患。四川盆地特殊地形和静稳高湿的气象条件严重制约着盆地空气质量改善，加之污染治理科学化、精准化水平不足，四川盆地大气复合污染呈现出发生频次高、持续时间长、影响范围广的特点，严重危害到人群健康。随着《大气污染防治行动计划》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等政策的颁布实施，大气污染治理的力度和深度逐渐加强，大气污染治理逐渐进入深水区。末端治理潜力收窄，能源和产业结构调整污染削减潜力尚未得到充分释放，深入打好污染防治攻坚战面临严峻挑战。风速小、静风频率高、大气层结稳定、逆温频率高、湿度大等是四川盆地独特的气象条件，也是发生严重空气污染的潜在外在因素。相比较而言，长三角、珠三角等区域属沿海地带，扩散条件较好，四川盆地山区、丘陵区和平原区气象背景差异大，地理气象条件先天不足给四川盆地大气污染治理带来的困难更大。

总体而言，四川盆地空气质量改善面临“特殊地理气象条件限

制”“污染源体系复杂且变化迅速”“管控措施动态响应实时量化评估难”等关键难题，做好四川省大气污染防治，更加需要科技支撑搞清污染来源、成因，制定针对性对策措施、做好科学规划和评估，从而提高大气污染防治精准化和科学化水平。

### (一) 城市大气污染防治管控技术路径

	明确污染源	弄清污染成因	精准控制策略
管理需求	分站点类别的臭氧/细颗粒物污染源、主要贡献行业、部分城市夜间高臭氧浓度来源等	臭氧形成机制的演变、细颗粒物爆发式增长机制、传输通道演变、上风向城市贡献、气象主控因子等	短期和中长期防控策略、分片区差异化防控策略等
技术支撑	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 臭氧形成敏感性分析：EKMA曲线等</li> <li>• 在线、离线溯源技术：溯源至源类别或行业</li> <li>• 关键源识别：污染源排放清单编制技术</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 多维复合污染观测及解析技术</li> <li>• 空气质量监测数据分析融合技术</li> <li>• 卫星遥感反演技术</li> <li>• 传输通道识别：后向轨迹等</li> <li>• 模型模拟：传输通道贡献等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 污染物排放预测技术</li> <li>• 模型模拟动态评估技术</li> <li>• 短期管控清单编制技术</li> <li>• 污染源在线监测用电监控分析技术</li> </ul>

图 3-1 城市大气污染防治管控技术路径

图 3-1 罗列了现阶段大气污染防治的主要管理需求以及对应的可支撑技术，以城市为基础，明确污染源，弄清污染成因是精准控制策略的前提，现阶段以臭氧和 PM<sub>2.5</sub> 协同防控，十四五期间可针对性开展以下工作。

**城市污染成因综合分析。**开展城市 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 污染现状、趋势和时空分布特征研究，跟踪研判典型 O<sub>3</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 污染过程，分析 O<sub>3</sub> 或 PM<sub>2.5</sub> 的污染成因。根据需要开展观测实验，分析主要前体物浓度水平及其时空分布特征，明确 O<sub>3</sub> 生成潜能大的关键挥发性有机物（VOCs）物种，提出 VOCs 和氮氧化物（NO<sub>x</sub>）的协同减排比例。

**PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 主要前体物来源与管控对策研究。**根据本地产业、能

源、交通、用地结构和各类污染源排放特征，建立城市重点源 NO<sub>x</sub> 排放清单，分析涉 NO<sub>x</sub> 污染源、重点行业减排潜力；结合典型行业污染源排放 VOCs 成分谱研究，构建城市精细化、分物种 VOCs 动态化排放清单，明确对 O<sub>3</sub> 生成有重要贡献的涉 VOCs 重点行业；针对主要前体物提出针对性强、可行有效的重点行业强化管控技术对策。

**提出春夏季 O<sub>3</sub> 防控解决方案。**梳理城市 O<sub>3</sub> 污染防治主要前体物治理措施存在的突出问题，结合 O<sub>3</sub> 污染协同防控和减污降碳的要求，研究提出重点行业、企业分级分类管理，针对典型行业提出基于全流程控制技术的“一行一策”综合管控方案；利用空气质量监测、综合观测、模式模拟等手段，综合评估污染防治措施实施效果；根据产业、能源、交通结构特点，结合气候气象因素等研究，提出并持续完善污染防治解决方案。

**秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 深度治理与重污染天气应对。**编制重污染天气应急预案及管控清单，针对污染过程开展重污染过程跟踪研判与应急预案实施效果评估等工作，及时总结优化管控策略，为重污染天气应对提供科技支撑。

**制定 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 污染协同防控综合解决方案。**研究 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 污染的共同来源与关键影响因素，综合评估夏季 O<sub>3</sub> 和秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 污染攻坚行动实施效果；根据国家、省、市“十四五”发展规划及碳达峰相关工作的要求，研判不同阶段 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 污染协同控制目标，综合地形地貌、气候气象特征、社会经济发展特点，因地制宜提出 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 污染协同防控的路线图和时间表。

## (二) 城市大气污染防治信息化技术应用

随着信息技术的发展以及监测网、物联网技术的应用，采用信息化技术进行海量数据收集、精准研判，迅速评估，以此进一步提升大气污染防治工作的科学性以及精准性，信息化技术的应用促使复合污染防治从“全面管理”到“有的放矢”，进入“科学化”“信息化”的新时代，以四川省空气质量决策平台说明大气污染防治信息化技术的应用。



图 3-2 四川省空气质量决策平台技术框架图

四川省空气质量平台自 2018 年由四川省生态环境科学研究院牵头建设，建立区域空气质量调控综合决策支撑平台，平台集问题识别、事态研判、综合决策和执行反馈全流程于一体。旨在提升四川省及各市州决策平台的数据分析能力、污染影响智能分析和溯源能力，为打赢蓝天保卫战提供精准的技术支撑。

平台集成气象数据、地理数据、空气质量监测数据、大气超级站数据、污染源排放及核算数据、重点源在线数据、社会经济数据等，集成各类空气质量模型，形成污染成因分析研判、措施成效模拟评估，决策制定等功能。平台建设有综合决策支撑一张图、大气污染源排放清单、重污染天气应急评估、移动源管理、来源追踪和成因分析等模

块，各模块之间相互支撑形成综合决策研判成果。平台目前支持 21 个市州使用，在省级工作层面上，已在 2019 年的中日韩三国首脑会议的空气质量保障、夏季臭氧攻坚、重污染管控中均发挥出了良好的作用，提升了我省的大气污染防治精准施策水平和能力。

### 1. 综合决策支撑一张图

本模块针对各级用户，将空气站点、排放源、气象实时监测、预报等内容统一集成至 GIS 地图上，通过行政归属识别，动态划定各级用户的访问范围，方便各级用户直观查阅污染源分布、实时污染情况、污染传播、各类预测预报数据等，为决策人员提供评估、分析、决策的技术支撑。



图 3-3 一张图模块风场、监测数据、源排放展示



图 3-4 一张图模块基础功能说明

## 2. 污染源摸底

**大气污染源排放清单。**编制大气污染源排放清单是“摸清家底”的核心手段，是实施空气质量改善计划的核心支撑。依据生态环境部颁布的《排放清单技术编制指南》，建立了一整套规范的排放清单编制方法、管理体系和业务化管理工具，实现大气污染源排放信息采集、清单核算、数据质控、可视化分析、动态更新与模型对接，为空气质量预报预警、重污染应急管理和空气质量达标规划等工作提供核心基础数据支撑。目前在四川省实现各类涉气污染源年度更新。



图 3-5 污染源分布展示

**重点污染源移动源排放核算及管理。**通过交通流量分析，结合流密度模型，实现成都市移动源高分辨率实时动态的解析能力，通过对“车、油、路、管”等不同的减排措施的模型评估，进行减排效果计算，通过量化的技术手段，为移动源整体排放决策的制定及监管落实提供技术支撑，构建移动源监管 - 治理 - 评估的动态政策评估体系。可实时动态展示成都市机动车污染物排放量。

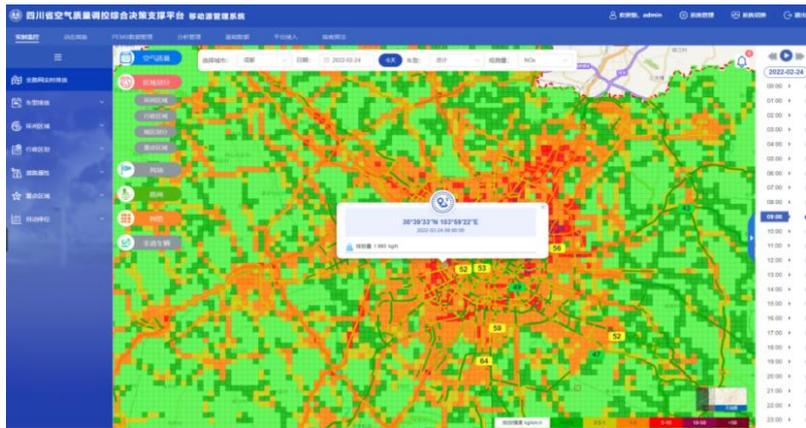


图 3-6 实时展示路网/网格逐小时机动车尾气排放强度

序号	措施名称	年份	城市	实施范围	操作
1	2020年成都市机动车尾气检测率提升计划	2020	成都	全市	详情
2	2020年成都市机动车尾气检测率提升计划	2020	成都	全市	详情
3	2020年成都市机动车尾气检测率提升计划	2020	成都	全市	详情
4	2020年成都市机动车尾气检测率提升计划	2020	成都	全市	详情
5	2020年成都市机动车尾气检测率提升计划	2020	成都	全市	详情
6	2020年成都市机动车尾气检测率提升计划	2020	成都	全市	详情
7	2020年成都市机动车尾气检测率提升计划	2020	成都	全市	详情
8	2020年成都市机动车尾气检测率提升计划	2020	成都	全市	详情
9	2020年成都市机动车尾气检测率提升计划	2020	成都	全市	详情

图 3-7 车辆管控中长期一短期应急措施库

### 3. 污染过程来源追踪和成因分析

来源追踪和成因分析系统融合了超级站观测数据，数值模型、气象数据等多维技术手段，提供了污染溯源、在线源解析，臭氧成因分析、污染过程动态评估、小尺度来源解析等功能，从而为环保部门提供信息技术支撑，能够动态掌握周边城市、本地重点源对大气环境质量的影 响等情况，及时制定防控策略。

#### (1) 实况数据展示及监测日历、同比等基础分析

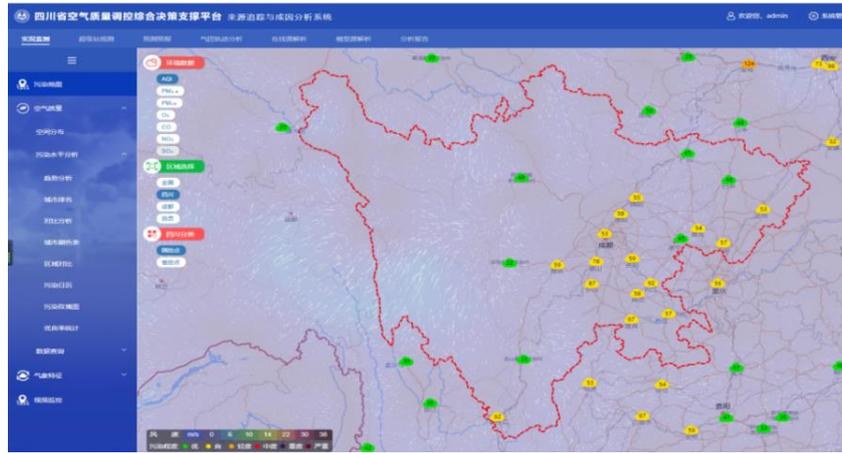


图 3-8 不同等级监测数据、风场等要素集成展示



图 3-9 城市污染日历

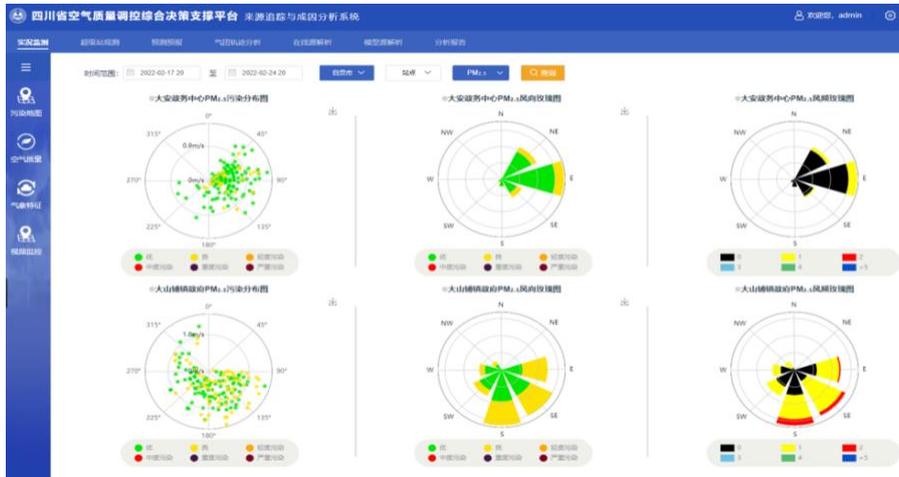


图 3-10 污染风向玫瑰图

## (2) 大气超级观测站数据集成分析及结果解析

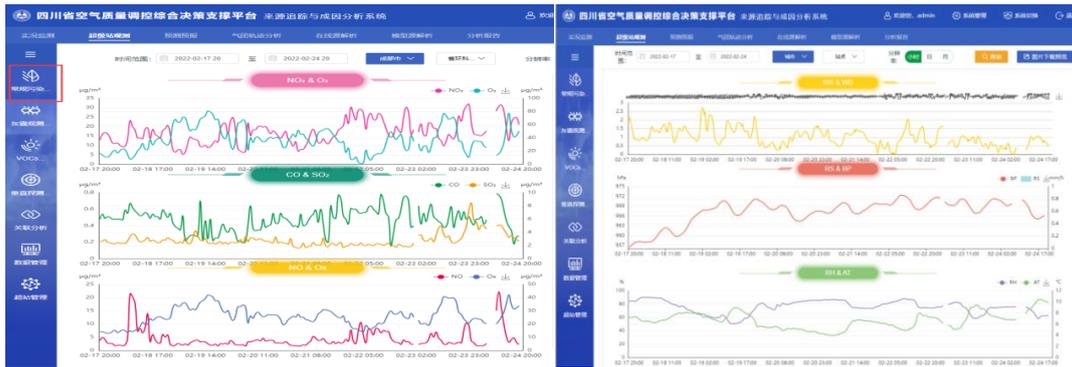


图 3-11 常规污染物及气象参数观测

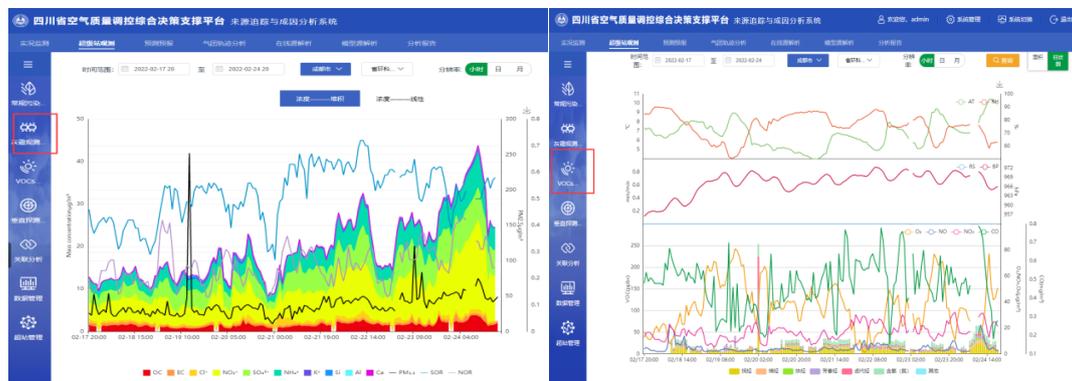


图 3-12 灰霾观测细颗粒物组分及臭氧观测挥发性有机物组分

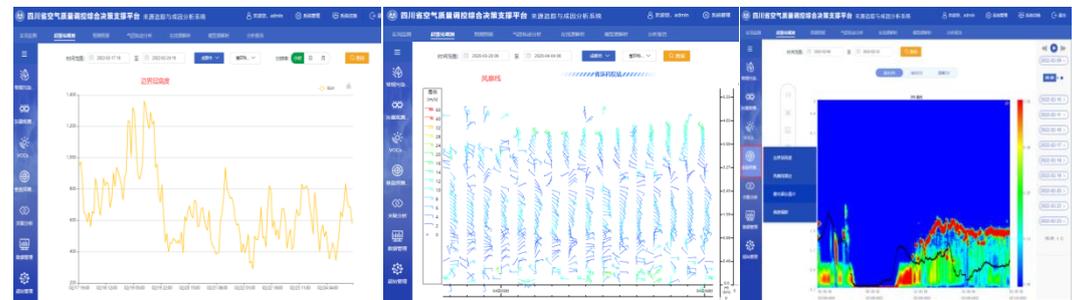


图 3-13 垂直观测：边界层高度、风廓线、激光雷达

## (3) 颗粒物及挥发性有机物溯源

平台内嵌 PMF、CMB 模型，基于大气超级观测站设备获取的 PM<sub>2.5</sub> 组分以及 VOCs 组分数据进行逐小时 PM<sub>2.5</sub> 以及 VOCs 的溯源解析，溯源至污染源及重点行业。



图 3-14 颗粒物溯源：逐小时解析颗粒物化学成分、基于成分谱进行 PM2.5 来源溯源



图 3-15 挥发性有机物溯源：逐小时测定 VOCs 化学成分、基于成分谱进行来源溯源

#### 4. 重点时段重污染管控基础（重污染天气应急管理系统）

重污染天气应急应对信息管理系统，可构建各城市重污染天气应急减排清单，为各城市重污染天气应急管控提供基础数据支撑。同时针对企业层面，实现绩效评级申报、审核，一厂一策实施方案申报、审核，一厂一策公示牌编制等重要功能模块，确保重污染天气期间减排措施“可操作、可监测、可核查”，大大促进大气环境质量持续改善。

四川省空气质量调控综合决策支撑平台 重污染应急管理系统

请输入企业名称 行业及分支 选择城市 审核完成 审批次数 搜索 退出

序号	企业名称	行业类型	行业分支	所属城市	审核状态	审核等级	审核日期	审核人	审核备注
1	高阳新能源汽车有限公司	汽车整车	汽车整车	宜宾市	审核中	A	A	A	A
2	科特勒托利多(成都)称重设备系统有限...	工业涂装	其他工业	成都市	审核中	A	A	A	A
3	四川德亿聚合材料工程有限公司	橡胶制品	橡胶零件	成都市	审核中	B	B	B	B
4	成都千门门业有限公司	家具制造	家具制造	成都市	审核中	B	B	B	B
5	四川德大印务彩色印刷有限公司	包装印刷	其他类包	成都市	审核中	B	B	B	B
6	成都一汽富维伟世德汽车外饰有限公司	工业涂装	其他工业	成都市	审核中	B	B	B	B
7	台都成都玻璃有限公司	玻璃	平板玻璃	成都市	审核中	B	B	B	B
8	四川德丰防水材料有限公司	涂料制造	涂料制造	成都市	审核中	B	B	B	B
9	四川德丰防水材料有限公司	防水建筑	防水涂料	成都市	审核中	B	B	B	B
10	成都众信印务有限责任公司	包装印刷	塑料彩印	成都市	审核中	B	B	B	B

图例说明: ● 完全符合建议措施 ● 不通过 ● 存疑,建议现场核查 ● 暂未审核 ● 详细 ● 分配专家 ● 现场资料 ● 审核进展

共 70 条 1

图 3-16 四川省重点行业绩效评级

重污染天气应急响应“一厂一策”公示牌

企业名称: 泸县恒维混凝土工程有限公司 企业法人: 杜斌军 18583067333  
 行业类型: 水泥-水泥制品 措施落实责任人: 徐孝江 18583060333

企业绩效分级等级: ● 重点行业 ● 非重点行业 当前预警级别为: 黄色, 公司执行 黄色应急响应措施。 预警启动时间为: 年 月 日

管控环节	设备	数量	应急措施
全厂停产	除尘器、喷淋、三面罩、水洗车设备、扬尘摄像头、扬尘检测仪	16	水泥制品停产, 禁止使用窑炉及以下下罩式设备, 扬尘摄像头、扬尘检测仪、进行物

企业郑重承诺: 严格落实重污染天气应急相关措施, 切实履行企业治污主体责任, 如未严格落实相关措施, 自愿接受处罚。

监督投诉电话

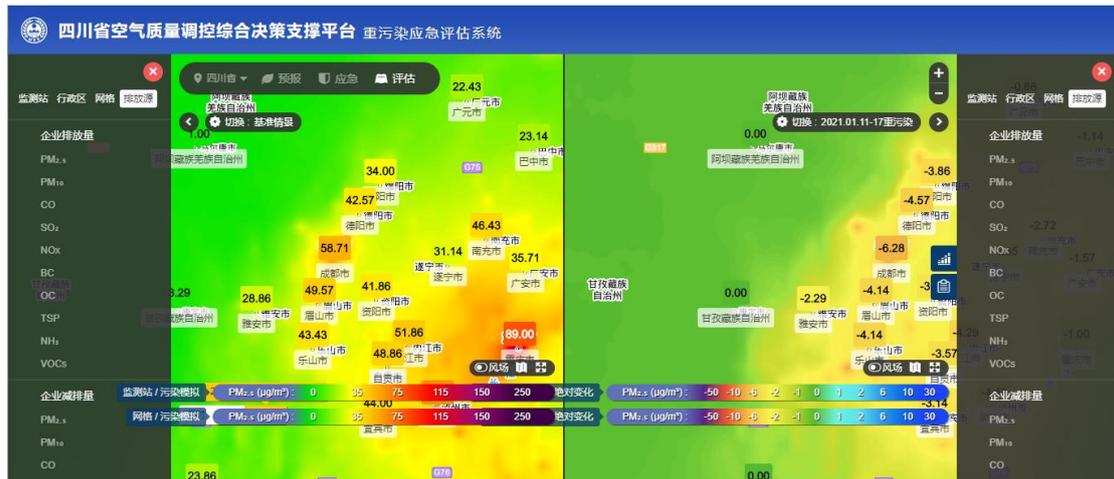
图 3-17 企业“一厂一策”公示牌



图 3-18 各城市重污染应急管控清单不同响应级别的减排比例

## 5. 重点时段污染管控成效快速评估

在重污染天气应急预案和重大活动保障方案基础上，提供以短期空气质量改善为核心的可视化决策支持系统，量化分析各类控制情景下污染源排放强度变化，通过多种情景模拟筛选最佳应急管控方案。



组织排放占比达 60% 以上。二是简易低效设施泛滥成灾。当前 VOCs 治理领域充斥着大量低温等离子、光催化、光氧化等简易低效设施，减排效果约等于零。部分地区使用率甚至达 80% 以上。三是高效治理装备形同虚设。部分企业由于设计不规范、系统不匹配、密闭不到位、收集不彻底等原因，即便使用高效治理技术，治污效果也大打折扣。

**NO<sub>x</sub> 实际减排与空气质量改善需求之间存在很大差距。**通过实施电厂超低排放和工业锅炉技术改造和升级，十三五期间 NO<sub>x</sub> 减排达 15% 以上，但初步测算认为，为实现臭氧污染稳定进入下降轨道，京津冀、长三角和珠三角等地 NO<sub>x</sub> 减排需要至少超过 50%。末端治理难以在短期内完成这一任务，需要高度重视双碳目标下的协同减污增效，推进能源、产业和交通结构调整，更大力度加速释放 NO<sub>x</sub> 减排潜力。

**在用机动车体量庞大、污染排放监管薄弱。**在用机动车排放控制已成为空气质量改善的瓶颈。实测显示，在用车后处理系统失效、劣质油品使用、人为屏蔽等监管问题十分突出，实际道路 NO<sub>x</sub> 排放远超出正常水平；部分国五汽油车蒸发排放产生的 VOCs 量超过了尾气排放；重型柴油货车普遍存在行驶里程长、工况恶劣排放水平高等问题，亟需构建以精细化监管为手段的在用车机动车排放管理体系。

基于此，本书着重从 NO<sub>x</sub> 减排和 VOCs 减排方面论述重点污染源的减排技术以及管理手段，包括以钢铁、水泥为代表的建材行业，涉 VOCs 的工业行业，移动源以及汽修、餐饮源等源减排方式。

## 第三章 四川省工业源大气污染防治技术

### 一、工业污染常用治理技术介绍

#### (一) 二氧化硫治理技术

##### 1. 烟气脱硫技术

##### 1.1 湿法脱硫

**工艺路线:** 湿法烟气脱硫就是采用液态吸收剂洗涤烟气, 经化学反应吸收烟气中的  $\text{SO}_2$ , 基本的工艺路线有两种:

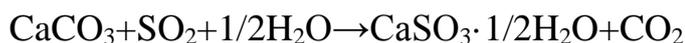
烟气→除尘器→脱硫塔→烟囱;

烟气→脱硫→除尘器→烟囱。

该技术的关键是脱硫剂的选择和脱硫塔的结构设计。目前国内外湿法脱硫(吸收)应用较多的有: 石灰石—石膏法、氨法、钠法、钙法、双碱脱硫法等, 在此基础上, 近几年又发展有液相催化氧化法。脱硫塔按内部结构不同分为: 喷雾分离塔、三相液态反应器, 三相流化床和旋流板塔等。每种方法由于吸收剂种类和脱硫塔结构的不同各有其特点。

##### (1) 石灰石湿法烟气脱硫

**技术原理:** 该法是目前技术成熟运行稳定工业应用较多的脱硫技术, 用石灰(石)溶液吸收烟气中  $\text{SO}_2$ , 主要反应为:



**技术特点:** 应用该法可在现有麻石水膜除尘器的基础上, 在不改

变塔体结构的基础上内装旋流板或三相流化床使脱硫除尘一体化。其脱硫效率 85%—92%，具有不用新建脱硫塔，减少系统占地和节省投资，工期短等优点。

**应用领域：**火电厂、水泥、工业锅炉、钢铁烧结等行业采用石灰石/石灰 - 石膏湿法烟气脱硫工程。

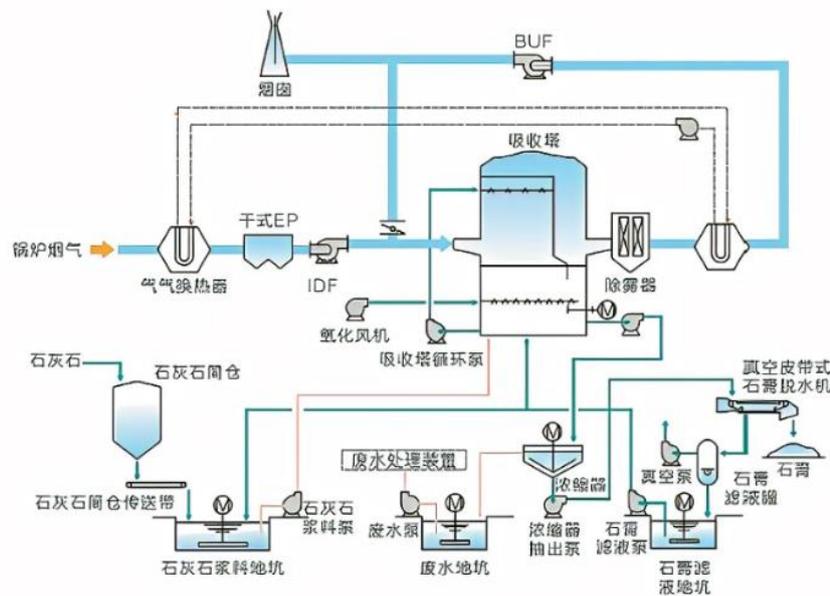
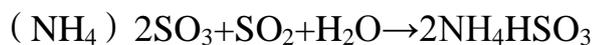
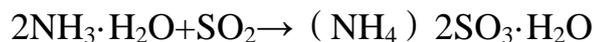


图 1-1 石灰石湿法烟气脱硫工艺流程示意图

## (2) 氨法烟气脱硫

**技术原理：**用氨水 ( $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) 作为吸收剂吸收烟气中的  $\text{SO}_2$  中间产物为亚硫酸铵 [ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ ] 和亚硫酸氢铵 [ $\text{NH}_4\text{HSO}_3$ ]。采用不同方法处理中间产物可回收硫酸铵、石膏和单体硫等副产物主要反应为：



近年来以氨水为吸收剂的烟气脱硫方法有：氨法吸收同步生产硫

酸铵法、磷铵肥法（PAFP）、TS-35 型氨法脱硫等。

氨法吸收同步生产硫酸铵基本原理是：以气氨、氨水或碳铵为原料，在水溶液中吸收  $\text{SO}_2$  形成亚硫酸盐，进一步利用亚硫酸盐直接同步催化得到硫酸铵溶液。硫酸铵溶液与氯化钾反应生成硫酸钾及副产品氯化铵，可简化硫酸分解和解析工艺流程。该法是处理低浓度  $\text{SO}_2$  的新技术。

TS-35 型氨法脱硫工艺原理是烟气经文丘理水膜除尘器处理后，进入脱硫设备。用稀释后的氨水作吸收剂，雾化的氨水与烟气中  $\text{SO}_2$  进行气热交换和化学反应。在两级旋流板作用下，反应后的液滴或已挥发干的固体颗粒坠落到下部密封水槽内处理。

**技术特点：**氨法脱硫率可达 80%，相对投资小，占地回积小，操作简单，无需吸收剂再循环，无污水排出，但氨气易挥发造成二次污染。

**应用领域：**适合中小型锅炉烟气脱硫。

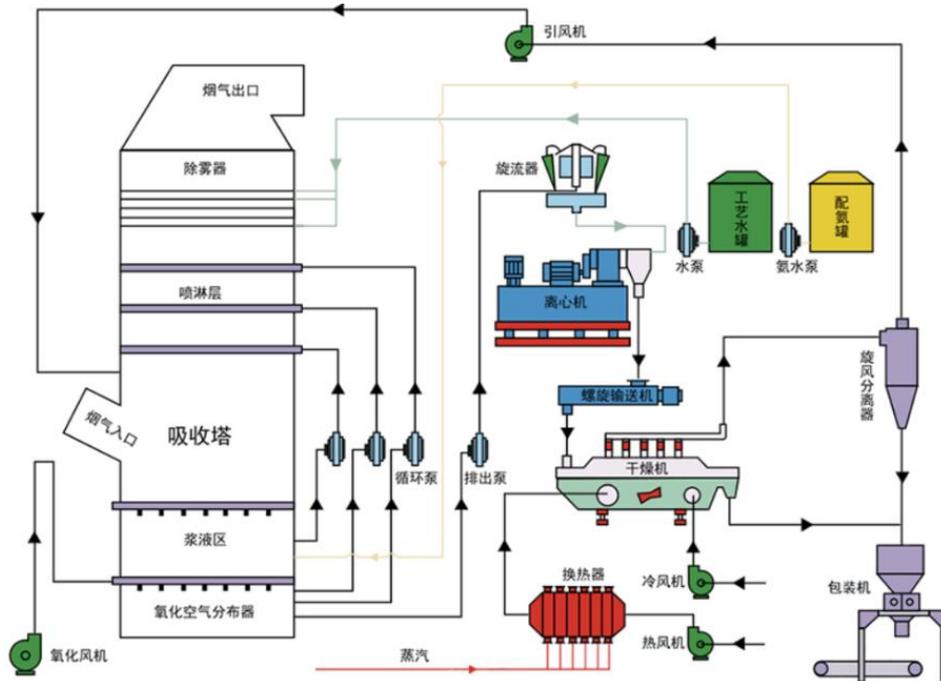
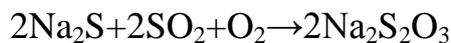
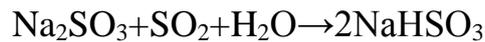
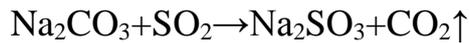
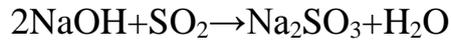


图 1-2 氨法烟气脱硫工艺流程图

### (3) 钠法烟气脱硫

**技术原理：**用钠碱或钠盐水溶液作吸收剂吸收烟气中的  $\text{SO}_2$ ，主要反应为：



对生成的  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ 、 $\text{NaHSO}_3$  和  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  的吸收液，以释放方法处理后可获得副产品。国内外比较典型的钠法烟气脱硫法有：美国的亚硫酸钠盐循环法（wellman-lord）、联邦德国的基里洛（Grillo）法、美国的凯米克（Chemical）法、水和稀硫酸吸收法（日本千代田法）、W-L 法、磷铵肥法（PAFP 法）和近几年研究的硫化碱加 TFS 添加剂法、液相催化氧化法等。

**W-L 法：**利用亚硫酸钠溶液吸收  $\text{SO}_2$  的反应是可逆反应，一般情况下，吸收温度  $50^\circ\text{C}$  左右，解析温度  $100\sim 120^\circ\text{C}$ ，随着  $\text{SO}_2$  的解析，中间产物亚硫酸氢钠结晶析出，维持液相中的  $\text{NaHSO}_3/\text{Na}_2\text{SO}_3$  比不变， $\text{SO}_2$  去除率可达 97%，不产生二次污染。较适宜大型工业锅炉烟气脱硫。

**硫化碱加 TFS 添加剂法：**其核心技术是加入一定量添加剂 TFS 使反应定向进行，避免其他副产物的生成。基本工艺流程为：除尘→吸收→过滤脱色→浓缩结晶→分离干燥。与现已成熟的钠碱法相比：吸收剂（含硫化钠 60%）价格低，耗量少，副产品较多，系统闭路循环，无废水、废渣，烟气脱硫率  $\geq 94\%$ 。

工艺路线:

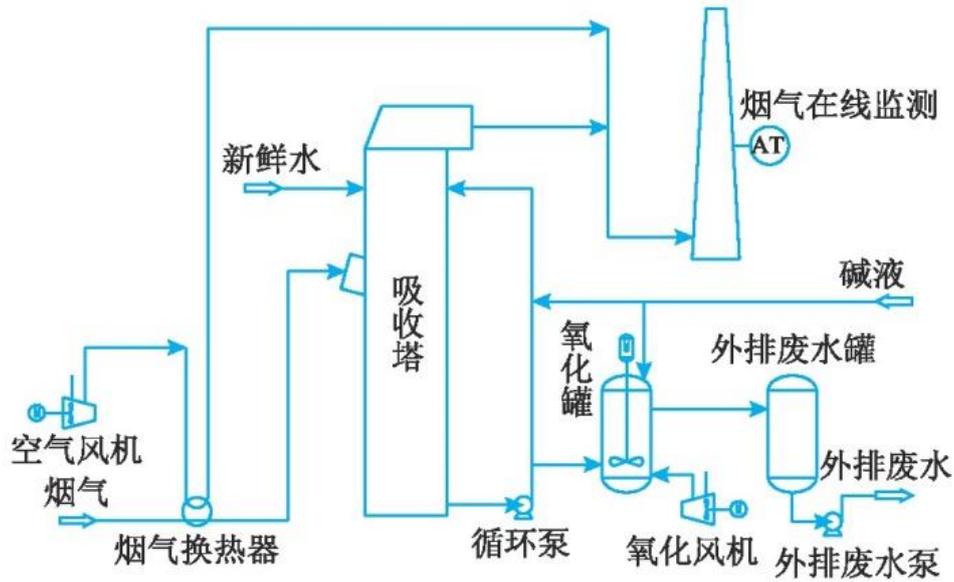
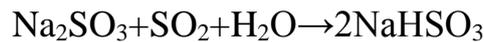
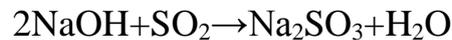


图 1-3 钠法烟气脱硫工艺流程图

#### (4) 双碱脱硫法

**技术原理:** 双碱脱硫法即用氢氧化钠作为脱硫剂, 氢氧化钙作再生剂。其脱硫率可达 80%, 化学反应如下:



烟道气中有氧气存在时, 还发生如下反应:



用电石渣作为再生剂时, 则发生如下反应:



**技术特点:** 反应产生的石膏可再利用, 氢氧化钠可作为脱硫剂循环使用。

对于氨法、钠法、钙法及双碱脱硫法, 如果需要回收中间产物, 必须先进行除尘再脱硫; 如不回收中间产物, 脱硫除尘可同时进行。

综上所述，湿法烟气脱硫技术在实际应用中存在的主要问题有：

- (1) 烟气温度降低，影响烟气的抬升、扩散，需要烟气加热系统；
- (2) 系统阻力大，源消耗大；
- (3) 流程复杂（包括副产品回收），一次性投资大，运行费用高；
- (4) 副产品回收成本高，产品质量低，应用途径受限；
- (5) 存在废水处理与废渣综合利用问题。

**工艺路线：**来自锅炉的烟气先经过除尘器除尘，然后烟气经烟道从塔底进入脱硫塔。在脱硫塔内布置若干层（根据具体情况定）旋流板的方式，旋流板塔具有良好的气液接触条件，从塔顶喷下的碱液在旋流板上进行雾化使得烟气中的  $\text{SO}_2$  与喷淋的碱液充分吸收、反应。经脱硫洗涤后的净烟气经过除雾器脱水后进入换热器，升温后的烟气经引风机通过烟囱排入大气。

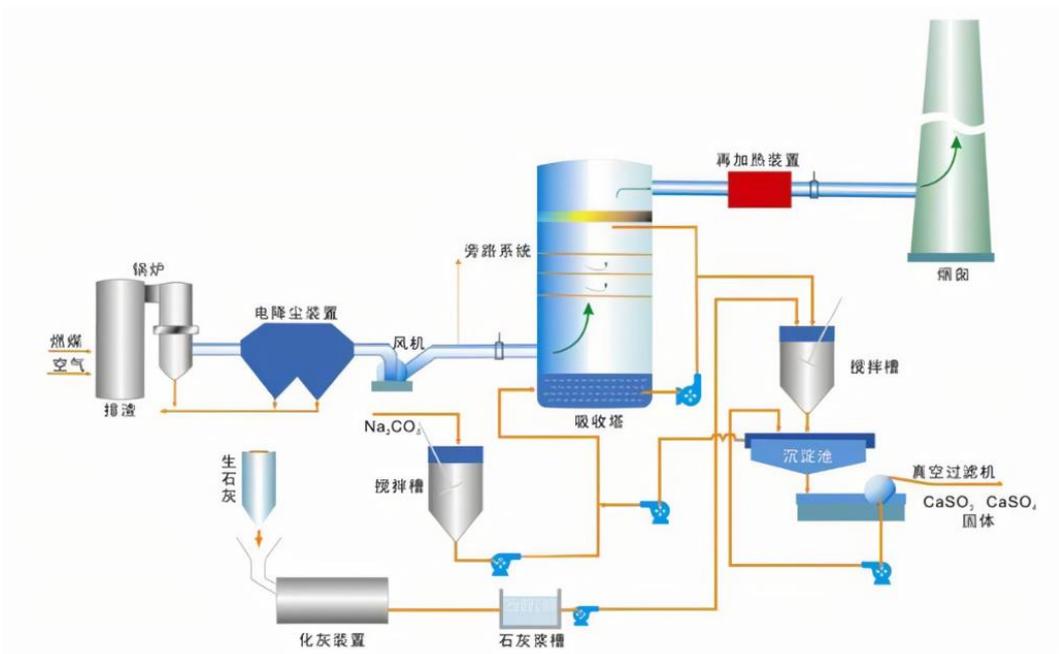


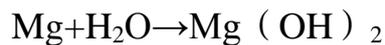
图 1-4 双碱脱硫法工艺流程图

## (5) 镁法脱硫

技术原理：镁法脱硫的基本原理是采用轻烧氧化镁粉（氧化镁）作为脱硫吸收剂，将氧化镁通过浆液制备系统制成氢氧化镁过悬浮液，在脱硫吸收塔内与烟气充分接触，烟气中的二氧化硫与浆液中的氢氧化镁进行化学反应生成亚硫酸镁，亚硫酸镁可进一步氧化成硫酸镁。

从工艺原理上讲，镁法脱硫可以实现氧化镁的循环利用。采用脱硫副产品亚硫酸镁制硫酸方案，将亚硫酸镁煅烧生成二氧化硫和氧化镁，其中二氧化硫可制成工业原料硫酸，氧化镁作为脱硫原料可重复利用。若不循环利用氧化镁，则可将亚硫酸镁强制氧化成硫酸镁，经过进一步的浓缩结晶制得不同结晶水含量的硫酸镁，可作为副产品出售。镁法脱硫过程中发生的主要化学反应有：

氧化镁水化：



二氧化硫吸收溶解：



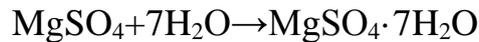
亚硫酸镁氧化：



氧化镁再生：



硫酸镁浓缩结晶:



技术特点: 与钙法相比镁法脱硫过程由于镁原子量低、反应活性高, 达到相同的脱硫效率, 镁法脱硫所需液气比只有钙法脱硫的1/3~1/5, 从而实现装置小型化, 建设费用低, 占地面积小, 运行消耗低、脱硫剂用量少等优点。另外镁法反应产物比钙法产物溶解度高, 系统不容易堵塞。若采用氧化镁循环工艺, 可以回收  $\text{SO}_2$  制取硫酸, 大部分  $\text{MgO}$  循环利用, 能大大减少固体废弃物排放。若采用副产硫酸镁, 则可回收工农业应用价值较高的硫酸镁产品, 补偿部分脱硫费用。但  $\text{MgO}$  产地主要分布于辽宁、山东等地, 原料的供应受限。

## 1.2 干法脱硫

干法脱硫采用固体粉末或颗粒为吸附剂(或反应剂)。干法脱硫后, 烟道气仍具有较高的温度(100℃以上), 排出后易扩散, 但设备庞大、投资高、脱硫效率低, 技术难度也较大。干法脱硫主要有活性炭法、活性氧化锰吸收法、碳酸氢钠法、催化氧化法以及还原法等。常用的有活性炭法和催化氧化法。

### (1) 活性炭法

**技术原理:** 活性炭法是利用活性炭的活性与较大的比表面积使烟气中的  $\text{SO}_2$  在活性炭表面与氧及水蒸气反应生成硫酸而被吸附, 其化学反应式如下:



在吸附设备中, 由于活性炭的工作状态不同, 可分为固定床、移

动床和流动床活性炭脱硫法等。用水洗脱吸在活性炭表面上的硫酸，使其吸收率达 98%，回收产物为 15% ~ 17% 的稀硫酸。水洗脱吸固定床活性炭脱硫设备主要为 5 个活性炭吸附器，其中 4 个吸附器进行通气吸附、1 个进行脱吸处理，轮换使用。

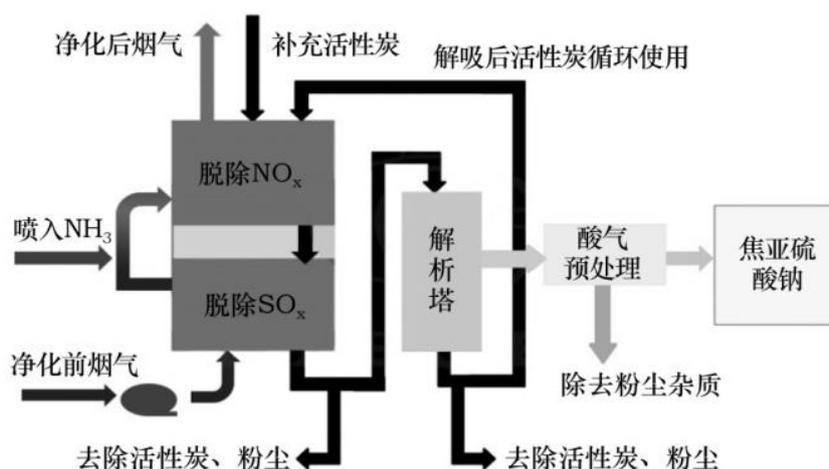


图 1-5 活性炭法工艺流程图

## (2) 催化氧化法

**技术原理：**以氧化铝为载体，氧化铈、硫酸钾或五氧化二钒等为催化剂，使二氧化硫转化成无水或 78% 的硫酸。该方法是在高温条件下进行的操作，所需费用较高。

**工艺路线：**美国孟山都等公司联合研究发展的孟山都催化氧化法 (Monsanto Cat-OX) 是气相催化氧化法的典型工艺。经高温电除尘器净化的烟气进入置有若干层钒催化剂的转化器，使烟气中 80% ~ 90% 的  $\text{SO}_2$  氧化为  $\text{SO}_3$ ，经转化器的烟气再经省煤器、空气预热器冷却后，在一台填充塔内用冷硫酸洗涤除去  $\text{SO}_3$ ，可得浓度为 80% 的硫酸。烟气中残余的飞灰沉积在催化剂表面，使转化器阻力增加，需定期取出催化剂清理。

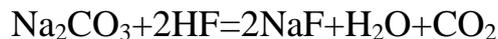
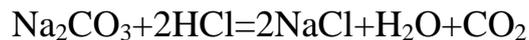
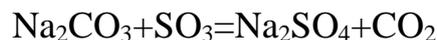
**应用领域：**由于技术上比较成熟，目前国内外对高浓度二氧化硫的烟气治理多采用此法。但在处理电厂锅炉气及炼油厂尾气技术尚未成熟。

### (3) 碳酸氢钠法

**技术原理：**碳酸氢钠（小苏打， $\text{NaHCO}_3$ ）可以用作烟气脱硫的吸附剂。它通过化学吸附去除烟气中的酸性污染物，同时，它还可以通过物理吸附去除一些无机和有机微量物质。此工艺将碳酸氢钠细粉直接喷入高温烟气。在高温下碳酸氢钠分解生成碳酸钠  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$ 。



新产生的碳酸钠  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  在生成瞬间有高度的反应活性，可自发地与烟气中的酸性污染物进行下列反应：



一般情况下，烟气温度在  $140\sim 250^\circ\text{C}$  之间。由于碳酸氢钠吸附剂的高度活性，通常略微过量的碳酸氢钠（化学计量因子在 1.1 和 1.3 之间）就足够。原则上碳酸钠（苏打， $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ）也可用于烟气脱硫。碳酸钠的反应活性稍低，但工艺流程几乎不变。

**工艺路线：**首先，经过研磨的碳酸氢钠脱硫剂被送入料仓中暂时存储；然后，储料仓下部可变量控制的给料机，结合烟气量的变化输出适量的钠基脱硫剂，经过送风机被吹送至脱硫反应器内，再与进入

的烟气以高能量的速度混合反应，脱除烟气中的酸性气体成分。

**应用领域：**主要适用于烟气量较小、SO<sub>2</sub>浓度较低且烟气温度范围符合（110-160℃）的工况。

#### **（4）电子束烟气脱硫（EBDS）**

**技术原理：**电子束烟气净化技术研究始于20世纪70年代初，日本的研究人员对此做出开创性的贡献。烟气在喷雾冷凝器内冷却到近65℃，然后引入反应器，在添加氨的情况下接受EB辐照。EB能量被氮、氧、水和SO<sub>2</sub>等气体主要成分吸收，形成离子和激发分子，在稳定的过程中产生许多氧化的自己基，使SO<sub>2</sub>和NO<sub>2</sub>氧化成硫酸和硝酸，直接与EB辐照前所添加的氨反应，形成粉状硫酸铵和硝酸铵。部分SO<sub>2</sub>未经辐照直接与氨反应，最终形成硫酸铵（热反应），经ESP或布袋过滤器收集。

目前能供应的加速器水准在能量为0.3MeV和0.6~0.8MeV时分别达到300~500kw和120~240kw。建造低等或中等装置（用于净化功率输出相当于100MW的锅炉烟气）技术上是可行的。如我国在成都建立的电子锅炉烟气处理装置，可以处理200MW燃煤发电锅炉产生的烟气（600000m<sup>3</sup>/h）的一半。

**技术特点：**同时脱除SO<sub>2</sub>和NO，操作方便，无二次污染，副产物为有用农肥；投资和运行费用比同规模其他传统方法低25%和20%，但盐粒收集、气体运行系统淤塞和现代电子加速器的功率不足等问题是必须考虑的。

### **1.3 半干法脱硫**

**技术原理：**脱硫机理仍为吸收剂与SO<sub>2</sub>的化学反应，只是水分或

吸收剂的作用是调质，脱硫灰作为辅助脱硫剂成分，反应在气、固、液三相中进行。在高温烟气的干燥下，水分蒸发，脱硫产物为干粉状态，脱硫效率受烟气温度、Ca/S、脱硫灰循环量等因素的影响。该法烟气脱硫后进入除尘系统，不用水处理和烟气加热。

**技术特点：**实际应用中应用较多的方法是以石灰为脱硫剂，如旋转喷雾干燥法、炉内喷钙增湿活化法和双循环流化床半干法等，其中双循环流化床半干法工业示范项目表明这是一种适应范围较为广泛的脱硫技术，且与静电除尘器有良好的配合，脱硫效率可达到90%以上的高效脱硫技术。同时半干法脱硫具有技术成熟、系统可靠、工艺流程简单、耗水量少、占地面积小、一次性投资费用低、脱硫产物呈干态、无废水排放、可脱除部分重金属等优点。

## 2. 烟气脱硝技术

### 2.1 低氮燃烧技术

**技术原理：**所谓低氮氧化物燃烧技术，就是改变燃烧条件，使氮氧化物的生成受到抑制，或者是对已经产生的氮氧化物进行破坏，从而降低氮氧化物排放量的一种技术。这种技术主要包含有：低过量空气燃烧、烟气再循环以及二段燃烧。我国在所有控制氮氧化物的相关技术里面，应用最广的就是低氮氧化物燃烧技术，工艺简单，经济有效。

低氮燃烧技术属于源头治理，通过采用新型燃烧方式和生产工艺，对燃烧过程中燃烧条件和燃烧器结构的改进，达到在燃烧过程中控制 $\text{NO}_x$ 产生量的目的。低氮燃烧技术一般可使 $\text{NO}_x$ 的排放量降低30%~60%。

根据具体方式，又分为低氮燃烧控制、低氮燃烧器、烟气再循环燃烧法。

低氮燃烧控制：低氮燃烧控制分三个方面，一是控制燃料中含氮有机物的生成，如焦炉煤气中氰化物和氨气的定期检测和前端控制，控制燃料型氮氧化物生成；高炉煤气入炉焦炭、喷煤控制，减少煤气中含氮有机物生成，控制快速型氮氧化物生成。二是根据燃料的燃烧特性，对影响热力型氮氧化物生成不同的燃料类型进行合理配比，通过合理混烧，减少氮氧化物生成。三是控制燃料和空气的配比，避免燃烧中空气过剩，增加废气中的氧含量，导致废气中氮氧化物浓度超标。

低氮燃烧器：低氮燃烧器是低氮燃烧在燃烧结构形式和数量布置上的具体应用，总的来说，在保证工艺性能（炉膛温度）前提下，在炉膛中，为了抑制  $\text{NO}_x$  的生成，除了降低炉内平均温度外，还必须设法使炉内温度分布均匀，避免局部高温。

烟气再循环技术：烟气再循环技术是指将燃烧产生的一部分烟气抽回，不排放进大气，而是与新鲜空气及燃气混合，形成混合气体送入炉膛内部，共同参与燃烧。因烟气混合稀释了氧浓度，使燃烧速度和炉内温度降低。

烟气再循环技术的实质是改变参与燃烧的混合气体中氧、氮的占比，使其有良好的燃烧效率同时降低  $\text{NO}_x$  排放量。烟气再循环的效果与燃料种类、燃烧器负荷和再循环的烟气量有关。再循环烟气量与未采用烟气再循环时的烟气总量之比，称为烟气再循环率。烟气再循环率的增大可降低  $\text{NO}_x$  的生成率，烟气再循环率一般控制在 20% 以下。

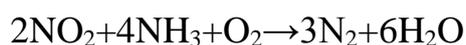
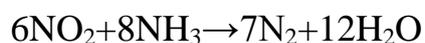
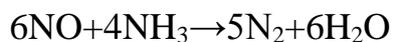
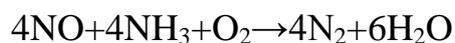
**应用领域：**该技术主要适用于燃煤锅炉和热风炉

## **(二) 氮氧化物治理技术**

### **1. 选择性非催化还原法 (SNCR)**

**技术原理：**就是含有氮氧化物的大气在催化剂以及一定温度的条件下与相应的还原剂反应，把二氧化氮以及一氧化氮等气体还原成氮气，并且还原剂和大气里面的氧气反应可以生成二氧化碳以及水。所用的还原剂气体一般是低碳氢化合物、氢气、甲烷以及一氧化碳。所使用的催化剂是钨以及铂，比较合适的反应温度是 550℃ 到 800℃，产生的净化效果是最好的。

将氨水(质量浓度 20% ~ 25%)或尿素溶液(质量浓度 30% ~ 50%)通过雾化喷射系统直接喷入分解炉合适温度区域(850~1050℃)，雾化后的氨与 NO<sub>x</sub> (NO、NO<sub>2</sub> 等混合物)进行选择性非催化还原反应，将 NO<sub>x</sub> 转化成无污染的 N<sub>2</sub>。当反应区温度过低时，反应效率会降低；当反应区温度过高时，氨会直接被氧化成 N<sub>2</sub> 和 NO。喷氨后炉内发生的化学反应有：



为了提高脱 NO<sub>x</sub> 的效率并实现 NH<sub>3</sub> 的逃逸最小化，应满足以下条件：在氨水喷入的位置没有火焰；在反应区域维持合适的温度范围(850~1050℃)；在反应区域有足够的停留时间(至少 0.5 秒，900℃)。

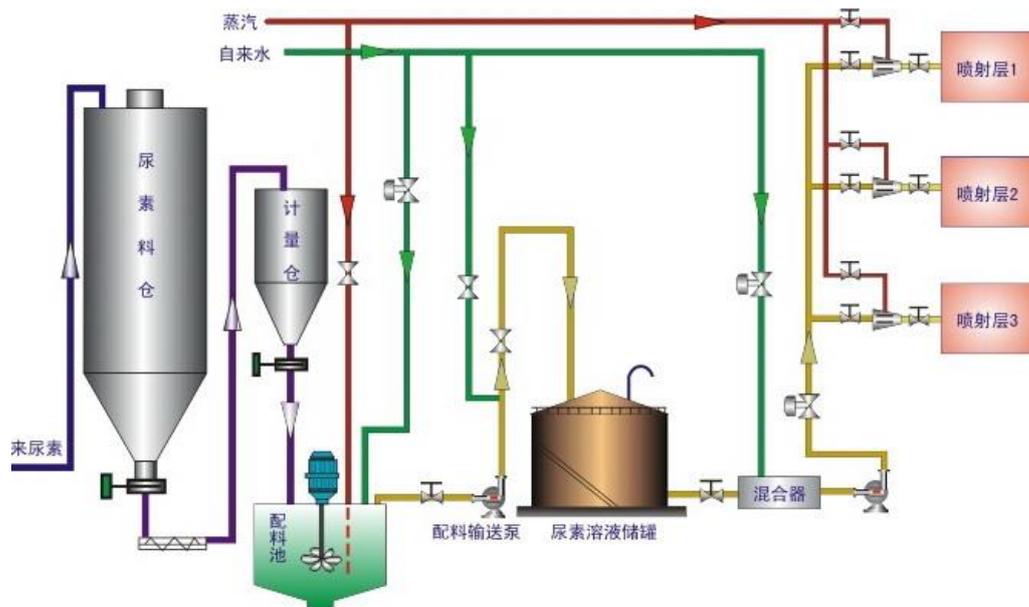


图 1-6 尿素 SNCR 系统脱硝工艺流程图

**技术特点：**SNCR 脱硝过程中不使用催化剂，工艺整个还原过程在锅炉内部进行，不需要另外设立反应器，还原剂通过安装在锅炉墙壁上的喷嘴喷入烟气中，且整个过程没有压力损失，不需提高引风机压头。同时 SNCR 可以协同低  $\text{NO}_x$  燃烧器改造或简易 SCR 等其他脱硝方式，在优化投资成本的前提下获得满意的脱硝效率。

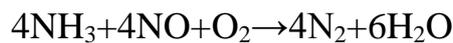
但由于 SNCR 脱硝效率仅为 50% ~ 60%，在化学反应发生足够迅速时，SNCR 过程会受动力扩散的控制，难以达到较高效率。SNCR 对温度要求严格，温度过低， $\text{NO}_x$  转化率低；温度过高， $\text{NH}_3$  则容易被氧化为  $\text{NO}_x$ ，抵消了  $\text{NH}_3$  的脱除效率。此外 SNCR 过程氨的泄漏量大，不仅污染大气，而且在燃烧含硫燃料时，会形成  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ，堵塞空气预热器。

**应用领域：**SNCR 脱硝技术占地面积小、对工业窑炉改造的工作量少、施工安装周期短、节省投资，较适合于老厂改造。

## 2. 选择性催化还原法 (SCR)

**技术原理:** 将氨用作还原剂来催化还原处理里面含有氮氧化物的  
大气, 让氨可以有选择性地与氮氧化物反应, 不与大气里面的氧反应。  
所使用的催化剂是钨、铂金属催化剂以及含有铜、锰、铁等元素的非  
金属催化剂。当反应温度不超过 400℃ 的时候, 反应可以发挥出绝对  
优势。

选择性催化还原法技术相对成熟, 且具有高效的脱硝率。其工艺  
原理是利用催化剂, 在一定温度条件下, 以  $\text{NH}_3$  为还原剂, 利用  $\text{NH}_3$   
的选择性将烟气中  $\text{NO}_x$  催化还原为无害的  $\text{N}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ , 从而降低  $\text{NO}_x$   
的排放量, 减少烟气对环境的污染, 满足日趋严格的环保要求。



其中第一个化学反应是主要的, 因为烟气中几乎 95% 的  $\text{NO}_x$  是  
以  $\text{NO}$  的形式存在。

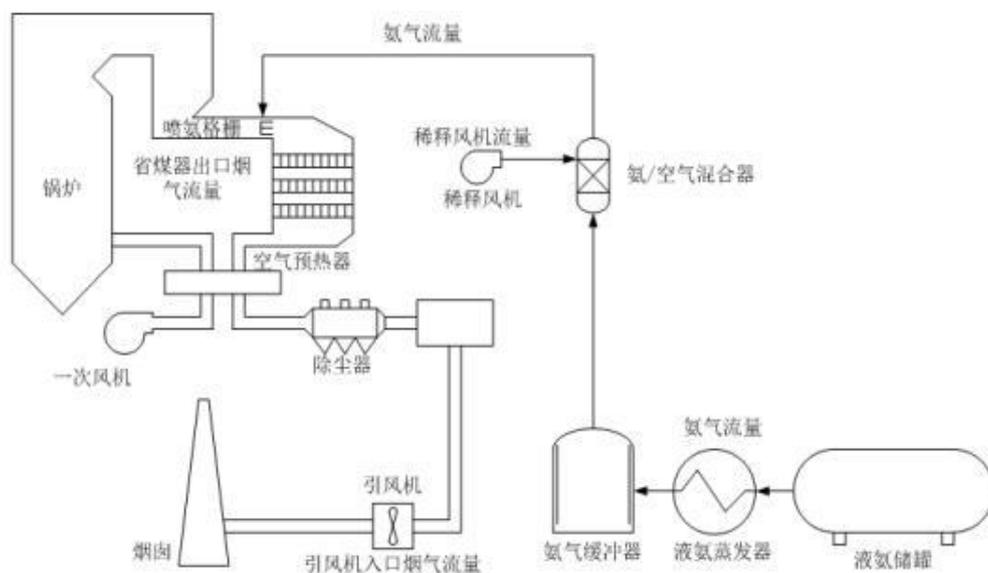


图 1-7 SCR 脱硝工艺流程示意图

**技术特点：**该法的优点是反应温度较低，净化率高，可达 85% 以上；工艺设备紧凑，运行可靠，还原后的氮气放空，无二次污染。但也存在一些明显的缺点，即烟气成分复杂，某些污染物可使催化剂中毒；高分散的粉尘微粒可覆盖催化剂的表面，使其活性下降，投资与运行费用较高。

**应用领域：**SCR 具有成熟可靠、效率高、选择性好和良好的性价比，在世界各地固定源  $\text{NO}_x$  控制中得到普遍的应用，目前使用的 SCR 数量是 SNCR 的两倍左右。SCR 除了用于通常的燃煤、燃油、燃气电站外，还应用于垃圾焚烧厂、化工厂、玻璃厂、钢铁厂和水泥厂等。

### 3. 湿法脱硝技术

湿法烟气脱硝技术是通过液相对烟气洗涤、吸收脱氮的一种方法。其原理有氧化和还原两种，主要采用氧化吸收法，即利用氧化剂和  $\text{NO}$  发生氧化反应，将难溶于水的  $\text{NO}$  氧化成易溶于水的  $\text{NO}_2$ ，再利用溶液进行吸收；还原法则是添加还原剂将  $\text{NO}_x$  还原为  $\text{N}_2$  直接排放。湿法烟气脱硝技术具体可分为碱液吸收法、酸吸收法、络合吸收法、液相吸收还原法、氧化吸收法等。

#### (1) 碱液吸收法

**技术原理：** $\text{NO}_2$  或一定比例的  $\text{NO}/\text{NO}_2$  混合气可以很好地溶解于碱性溶液中，因此可以用碱液对  $\text{NO}_x$  进行吸收脱除。这里所用的吸收液一般是指金属的氢氧化物（如  $\text{Na}$ 、 $\text{K}$ 、 $\text{Mg}$  等）或弱酸盐等物质形成的碱性溶液，常用的有烧碱、纯碱、石灰乳、氨水等， $\text{NO}_x$  被吸收后，反应产物为硝酸盐和亚硝酸盐，这些盐类可以通过蒸发结晶分离加以回收利用。但  $\text{NO}$  在水和碱液中的溶解度都很低，当  $\text{NO}_2/\text{NO}$

气体摩尔比例小于 0.5 时，NO 只能有一部分被吸收。

**应用领域：**该方法一般适用于 NO<sub>2</sub> 含量比较高的尾气，如硝酸厂排放的废气。对于火电厂或其他燃煤锅炉，废气中的 NO<sub>x</sub> 大多为 NO（一般 90% 以上），不适宜采用这种方法。

## （2）酸吸收法

**技术原理：**NO 难溶于水和碱液，但其在硝酸中有较高的溶解度，硝酸浓度越高，NO 的溶解度也越高，同时 NO<sub>2</sub> 也能较好地溶解于稀硝酸中；1:1 的 NO<sub>2</sub>/NO 可以很好地溶解在浓硫酸中，反应生成亚硝酸硫酸（NOHSO<sub>4</sub>）；这种用酸处理 NO<sub>x</sub> 的方法称为酸吸收法。该方法适合于硝酸厂或同时生产硫酸和硝酸的企业，脱硝率能达到 90% 以上，当吸收剂为硝酸时，产物为浓度更高的硝酸副产品，可回收利用。

**应用领域：**硫酸作为吸收剂时，该法不能吸收含水气体，当有水存在时，NOHSO<sub>4</sub> 会被水分解，另外，酸吸收法需要加压，气液比小，酸循环量较大，能耗较高，故应用不多。

## （3）络合吸收法

**技术原理：**利用 NO 和络合剂之间的络合反应脱除 NO<sub>x</sub> 的方法称为络合吸收法，反应后生成的络合物可通过加热解析回收 NO。由于某些金属离子与其配体构成的络合剂对 NO 具有良好的捕集吸收作用，避免了酸碱吸收法对 NO<sub>2</sub>/NO 气体比例有要求的弊端，有较广泛的适用范围，是湿法脱硝技术研究的热点之一。常用的 NO 络合剂多为亚铁螯合剂和钴螯合剂，如 FeSO<sub>4</sub>、Fe（II）-EDTA、Fe（II）-EDTA-Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>、钴胺和乙二胺合钴（[Co（en）<sub>3</sub>]<sup>2+</sup>）等。

**技术特点：**实验室研究发现，络合吸收剂的损耗和再生是目前面

临的主要难题，利用乙二胺四乙酸铁配合物[Fe(II) EDTA]协同脱硫脱硝时，由于氧气的存在，将消耗部分 Fe(II) EDTA，将其氧化为 Fe(III) EDTA，并且在脱除过程中，Fe(II) EDTA 与 NO 也不断结合生成 Fe(II) EDTA-NO，有研究人员通过对比催化法、还原剂再生法、微生物再生法，一致认为微生物再生法是前景较好的再生技术，不会造成二次污染且副产物少。

总体来说，络合吸收法用于协同脱硫脱硝，脱除效率高、不会造成二次污染且副产物较少，副产物若加以回收利用，还可作为肥料。但在研究领域需研发更加环保、效率更高、成本更低的络合吸收剂，或探究络合剂损耗较少、容易再生的技术方法，为工业化应用做铺垫。

**应用领域：**适用于中小型企业脱硝，同时湿法脱硝技术中只有络合吸收法比较适用于燃煤烟气脱硝。

#### (4) 氧化吸收法

**技术原理：**氧化吸收法是利用氧化剂将 NO 氧化为易溶于水的 NO<sub>2</sub>再吸收脱除的一种方法。用于氧化 NO 的氧化剂大致可分为气相氧化剂和液相氧化剂两类，气相氧化剂主要有 O<sub>3</sub>、Cl<sub>2</sub>、ClO<sub>2</sub>等；液相氧化剂主要有 KMnO<sub>4</sub>、NaClO<sub>2</sub>、NaClO、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、KBrO<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>CrO<sub>7</sub>、HClO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>等。

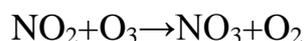
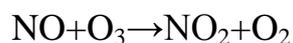
**技术特点：**NaClO<sub>2</sub>具有强氧化性，其溶液可将 NO 氧化为 NO<sub>2</sub>并吸收得到硝酸钠。采用 NaClO<sub>2</sub>脱硝简单易行，NO 脱除率高。此外，NaClO<sub>2</sub>粉末也可作为脱硝氧化剂，而且气相中的 SO<sub>2</sub>可以促进 NaClO<sub>2</sub>对 NO 的脱除效果，但 NaClO<sub>2</sub>和 NaClO 氧化法对设备耐腐蚀性要求较高，氧化剂价格相对较贵，制约了其在工业上的应用。

$\text{H}_2\text{O}_2$  性能优良，在脱硝技术的研究中使用较多，除可单独用于脱硝外，还常和其他技术互补使用。高温或紫外光存在的环境能增强  $\text{H}_2\text{O}_2$  氧化  $\text{NO}$  的效果，可迅速将  $\text{NO}$  氧化为易溶于水的  $\text{NO}_2$ 。 $\text{H}_2\text{O}_2$  是一种绿色的氧化剂，无二次污染，价格相对低廉，能达到较高的脱硝率，近年研究成果较多，但由于  $\text{H}_2\text{O}_2$  具有性质不稳定、受热易分解、装置运行不稳定、氧化剂消耗大等缺点，制约了其大规模的工业应用。

$\text{O}_3$  是最早被研究的氧化剂之一，目前已取得了一系列的成果并成功在工业上得到应用。 $\text{O}_3$  具有很强的氧化性，与烟气接触过程中一秒就可以将  $\text{NO}$  氧化为溶解度较高的  $\text{NO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}_3$  和  $\text{N}_2\text{O}_5$  等。 $\text{O}_3$  氧化结合碱液吸收是目前  $\text{O}_3$  应用于脱硝技术的主要途径，该方法可同时脱硫脱硝，具有投资低、工艺流程简单、脱除率高等优点，是湿法脱硝领域的热点之一。

## 5. 臭氧氧化技术

**技术原理：**利用臭氧的强氧化性，将不可溶的低价态氮氧化物氧化为可溶的高价态氮氧化物，提高烟气中氮氧化物的水溶性，从而通过吸收塔内碱液湿法洗脱实现脱除的目的。其主要反应为：



**技术特点：**温度要求低。脱硝反应对温度有严格的要求，SNCR 的反应温度为 800~1100℃，SCR 为 280~400℃，限制了设备布置和脱硝效率。臭氧氧化法要求反应温度低于 250℃，最佳反应温度区间为≤150℃。因此臭氧的喷射及混合设备可布置在除尘器和余热回收系统后，不会降低系统的热效率和经济性，适应性更广，对于某些低温烟气（如 150℃ 烧结烟气）尤其适用。

脱硝效率高。传统烟气脱硝技术根据运行环境不同，脱硝效率有所波动，SNCR 为 30%~70%，SCR 不超过 85%，当 NO<sub>x</sub> 浓度偏高时难以达标。臭氧氧化法由于其化学反应可在常温常压下进行，无需高温、催化等特殊环境，故只要保证足够的臭氧量以及与烟气的均匀混合，即可获得很好的脱硝效果。以往项目的运行实践表明，该技术脱硝效率能保持在≥90%，最高可达到 99%。

反应速率快。臭氧氧化吸收法采用氧化反应路径，所需活化能远低于 SNCR 和 SCR 的还原反应，因此臭氧氧化反应迅速，理论上完全反应时间约为 0.1s，在实际工程运行中，停留时间为 1s 时即可保证完全反应。因此在现阶段大部分的脱硝反应条件下，O<sub>3</sub> 均能保证将 NO 完全氧化。

改造难度小。由于臭氧氧化 NO<sub>x</sub> 的反应极其迅速，使得该技术所需的反应空间更小。例如 SCR 需要布置完整的反应器作为脱硝载体，SNCR 需要旋风分离器作为反应空间，而臭氧氧化仅需借助 5~10m 的烟道即可完成反应，对烟道截面的形状尺寸也无特殊规定，改造工作量小，布置更加灵活。

### (三) 颗粒物治理技术

#### 1. 电除尘技术

**技术原理：**电除尘（静电除尘）技术是在电极上施加高电压后使气体电离，形成电子和离子，进入电场空间的烟尘与电子和离子相碰撞后荷电，在电场力的作用下向相反电极性的极板移动，并沉积在极板上的方法。然后，通过振打等方式将沉积在极板上的灰尘清除落入灰斗，使含尘气体与粉尘在电场中实现分离。

**技术特点：**电除尘器除尘效率能达到 99.9% 以上。如果合理配置，电除尘器排放粉尘浓度可小于  $50\text{mg}/\text{m}^3$ 。通过增加电场数量、降低电场风速、增加比集尘面积、优化供电电源、增加辅助清灰等措施，电除尘器的排放浓度可以进一步降低。电除尘器阻力损失小，设备阻力小、总能耗低。电除尘器的总能耗包括供电装置、加热装置、设备阻力、振打以及附属设备（卸灰电动机、气化风机等）的能耗。电除尘器的阻力损失通常情况下是  $150 \sim 300\text{pa}$ ，大约是袋式除尘器的  $1/5$ ，在总能耗中它的占比是比较低的。同时电除尘器烟气处理量大，因为电除尘器的结构易于模块化，所以它的装置可以是比较大型的。单台电除尘器的最大电场截面积可达到  $400$  平方米。此外允许操作温度高。就像 shwb 型电除尘器他最高允许操作温度达到为  $250^\circ\text{C}$ ，其他还有一些甚至可以到  $350 \sim 400^\circ\text{C}$  及以上。最后电除尘器完全实现了自动控制自动操作的功能。

**应用领域：**电除尘技术目前已较成熟，是净化颗粒物广泛应用的高效除尘技术之一。电除尘器对烟气温度波动适应性较强，可以用于烧结工艺各工序的除尘。电除尘器内通常采用碳钢材料，尤其适用于

温度较高（100~180℃）、烟气量波动的烧结机头烟气除尘。但烧结机头烟气中粉尘比电阻较高，通常在  $10^{12} \sim 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$  之间，这将导致电除尘器电极上形成绝缘层，出现反电晕现象，降低电除尘器效率。采用 400~500mm 宽极距电除尘技术，可提高电场电压，有效控制高比电阻的反电晕现象。电除尘器运行维护量较小，但对制造、安装、运行、维护都有较高要求。

## 2. 袋式除尘技术

**技术原理：**袋式除尘技术是利用纤维织物的过滤作用对含尘气体进行过滤分离。当含尘气体进入袋式除尘器后，粒径大、比重大的粉尘在重力作用下沉降，落入灰斗；携带烟尘的气体通过滤料时，细小粉尘被阻留在滤料上，气体通过滤料，从而尘气分离，使含尘气体得到净化。

**技术特点：**袋式除尘器的除尘效率可以达到 99.9% 以上，烟气排放粉尘可控制在  $30\text{mg}/\text{m}^3$  以内，甚至可达  $10\text{mg}/\text{m}^3$  以下。

袋式除尘器的清灰方式主要有脉冲清灰、反吹风清灰、机械振打清灰方式。脉冲清灰方式具有清灰效果好、净化率高、长期运行稳定等优点。脉冲清灰对控制系统和维护管理水平的要求较高。

**应用领域：**袋式除尘器属高效除尘设备，广泛应用于粉尘的净化过程。袋式除尘器对粉尘比电阻变化适应性强，适用于温度和水分不高且波动不大的原料系统、烧结机尾、整粒和成品系统尘源点烟气的净化。但是，袋式除尘器不适用于温度高、湿度大、含有腐蚀性气体的烧结机头烟气。粉尘和烟气成分不同时，袋式除尘器可能需要采用不同的滤料。滤袋破损时需要更换，运行维护工作量较大，对制造、

安装、运行、维护都有较高要求。

### 3. 电袋复合除尘技术

**技术原理：**烟气的流过路径：进口烟道→进口烟箱→静电除尘区→布袋除尘区→净气室→出口烟道→风机。含尘烟气经进口喇叭内气流分布板的作用，均匀地进入收尘电场，大部分粉尘在电场中荷电，并在电场力作用下向收尘极沉积。当有规律地振打收尘极时，被收集的粉尘从极板上脱落并落入下部灰斗。含有少量粉尘的烟气少部分通过多孔板进入袋收尘区，大部分烟气折向下部，然后由下而上地进入袋收尘区，当含尘烟气通过滤袋时（外滤式），粉尘被阻留在滤袋表面上，纯净烟气从滤袋内腔进入上部的净气室，再经提升阀进入烟道排出。袋收尘区可划分为若干个独立的收尘室，每个收尘室安装 1 个提升阀，当采用离线清灰时，可有规律地关闭某个室的提升阀，烟气便不能从该室的滤袋通过。每排滤袋上方安装 1 根喷吹管，喷吹管上开若干个小孔，每个孔对准下部的滤袋，喷吹管端与气包相，气包上安装淹没式脉冲阀。当滤袋表面积灰过厚需要清灰时，脉冲控制仪便启动脉冲阀上的电磁阀，打开脉冲阀上的气流通路，压缩空气便通过脉冲阀、喷吹管喷入滤袋。

电袋复合式除尘技术是将静电除尘和袋式除尘有机结合的复合型除尘技术。常见的电袋复合式除尘器有两种结构。一种结构是除尘器前端设置电场，后端设置袋式除尘装置。前端电场的预除尘作用和荷电作用可减少后级袋式除尘器的过滤负荷，可预收烟气中 70% 甚至 80% 以上的粉尘量，同时由于前端的预荷电作用滤料上粉尘层变得疏松，细微粉尘凝聚成较大颗粒，可减少后端袋除尘器运行阻力，提高

滤袋的清灰效果。另一种结构是电除尘器的电极与袋式除尘器的滤袋混合交叉布置，使电场荷电与滤袋收尘有机结合，强化荷电与过滤的结合，改善了布袋的运行条件，提高组合型除尘器的性能。前电后袋结构已在电力行业应用，电袋混合结构也已进行了小型工业示范。

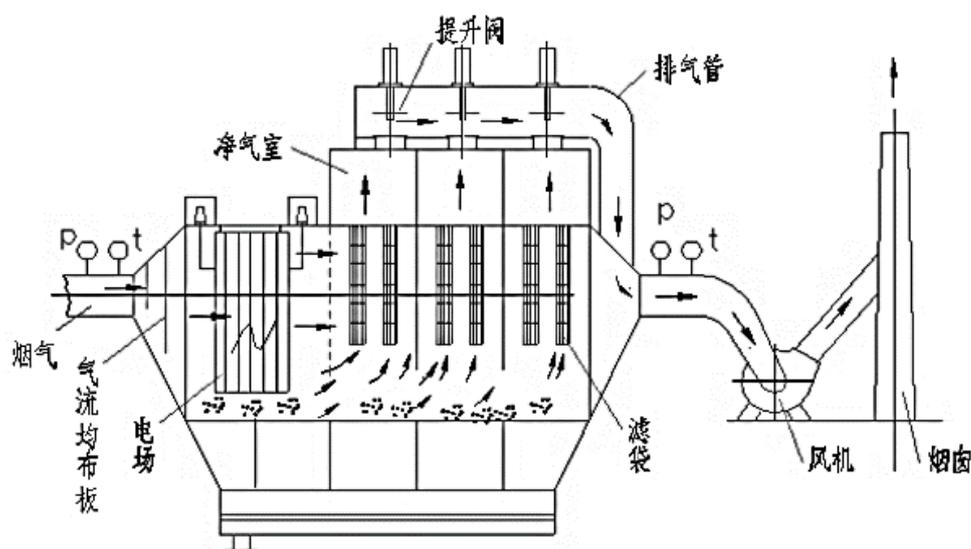


图 1-8 电袋复合除尘器结构图

**技术特点：**电袋复合式除尘器适应性较强，净化效率高，烟气排放粉尘可控制在  $30\text{mg}/\text{m}^3$  以内，但对制造、安装、运行及维护都有较高要求。考虑到电场作用，电袋复合式除尘器应选择抗氧化、抗腐蚀性能强的滤料。电袋复合式除尘技术适用于新建及原有除尘系统技术改造（除机头以外），对电除尘器升级改造具有优势。改造时可利用原电除尘器和壳体结构，降低钢材消耗，缩短施工周期，改造成本相对较低，不占用新的厂区面积。

**应用领域：**电袋复合除尘技术正不断创新，特别是随着高精度、耐高温的过滤材料开发成功和清灰技术的重大进步，作为一次除尘且不依赖二次除尘的超低排放技术路线，电袋复合除尘技术未来仍然会广泛地应用于煤电行业，甚至在非电行业也会占领一席之地。

#### 4. 湿式电除尘技术

**技术原理：**湿式电除尘器和与干式电除尘器的收尘原理相同，都是靠高压电晕放电使得粉尘荷电，荷电后的粉尘在电场力的作用下到达集尘板/管。干式电收尘器主要处理含水很低的干气体，湿式电除尘器主要处理含水较高乃至饱和的湿气体。在对集尘板/管上捕集到的粉尘清除方式上 WESP 与 DESP 有较大区别，干式电除尘器一般采用机械振打或声波清灰等方式清除电极上的积灰，而湿式电除尘器则采用定期冲洗的方式，使粉尘随着冲刷液的流动而清除。

**技术特点：**湿式电除尘器具有较强地对细小颗粒物的去除能力，对  $\text{SO}_3$  酸雾、HF、重金属颗粒也具有一定的捕集作用；除尘效率对被收集粉尘的理化性质依赖性不高，对高比电阻、高粘附性粉尘同样具有较好的处理效果；采用湿式清灰的方式，粉尘较难在集尘极表面附着，不易形成粉尘层或结块，能最大程度地减少二次起尘、反电晕问题的发生；湿式清灰的同时会有一定量的水雾进入收尘空间，能够捕获微细颗粒物及提高粉尘荷电量，进一步提高除尘效率。

同时也应注意。湿式电除尘器需维持较低的烟气流速以保证除尘效率，故需要较大的占地面积，基建投入较高，由于除尘器内部长期存在水分，工业烟气成分复杂，溶于水后形成腐蚀性液体会对除尘器内部结构造成破坏，故在材质选用需选用耐酸碱、耐腐蚀的高强度材质作为电极材料，一定程度上增加了投入成本。

根据除尘器内部结构的不同，分为管式、板式两类。板式除尘器结构与常见的干式电除尘器相同，可以在水平、垂直两个方向进入烟气，仅在清灰方式上取消了干式清灰装置，采用喷淋装置对集尘板进

行清灰。

管式除尘器只能在垂直方向进气，通常采取下进上出的方式，使部分大颗粒物能够在重力作用下与气流分离。目前大部分管式除尘器采用蜂窝型阳极结构，不同于板式除尘器对于有效收尘面积的限制，蜂窝型结构具有承受强度高、节省材料、有效收尘面积大等特点，应用较广泛。



图 1-9 管式除尘器蜂窝阳极

阴极线从每个蜂窝单孔中穿过，每个独立蜂窝管均构成一个电场，每个电场区下部均设固定旋紧装置，防止阴极线在除尘器运行过程中摆动，从而影响运行电压波动，保证电场运行稳定性。除尘器上方安装喷淋系统，用于极线和极板的清灰。

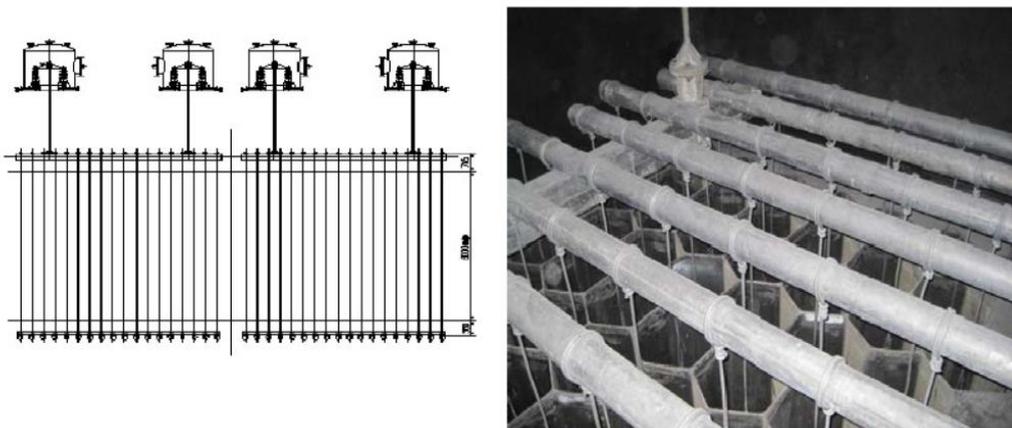


图 1-10 管式除尘器蜂窝阳极结构

对于湿式电除尘器，被脱除粉尘的含水率并不影响除尘效率的高低，真正影响除尘效率的是到达集尘极水膜表面或进入并穿过水膜，或黏附在水膜表面的粉尘量的多少。而一个固定区域的集尘极表面，粉尘捕集量是有限的，当大量粉尘在同一区域捕集必然影响除尘效率，要想获得较高的除尘效率，需要含尘气流均匀地进入电场，并保证气体流速的均匀分布。

因湿式电除尘器对细小颗粒物硫酸雾的高效捕集作用，目前已广泛应用在燃煤电厂烟气末端的精细化治理中，并取得了良好的效果。根据相关数据，配备湿式电除尘器和 WFGD 的燃煤电厂对细颗粒物的去除效率在 85% 以上，对三氧化硫的去除效率也在 80% 以上，有效提高了颗粒物的减排，降低了烟气浊度，并对石膏雨、蓝烟现象具有很好的控制作用。

**应用领域：**根据国外相关经验和国内相关单位的试验结果，湿式静电除尘器对酸雾、有毒重金属和  $PM_{10}$  有较好的去除效果，尤其是  $PM_{2.5}$  的细粉尘。因此，湿电除尘器可用于电厂  $PM_{2.5}$  的  $SO_3$  酸雾和 P 的控制，并具有“汞”等多种污染物的联合去除效果。

#### **（四）VOCs 治理技术**

##### **1. 吸附法**

吸附浓缩技术是利用各种固体吸附剂（如活性炭（包括活性炭纤维）、分子筛、活性氧化铝和硅胶等）对排放废气中的 VOCs 进行吸附浓缩，同时达到净化废气的目的。吸附工艺主要分为吸附段和脱附段。

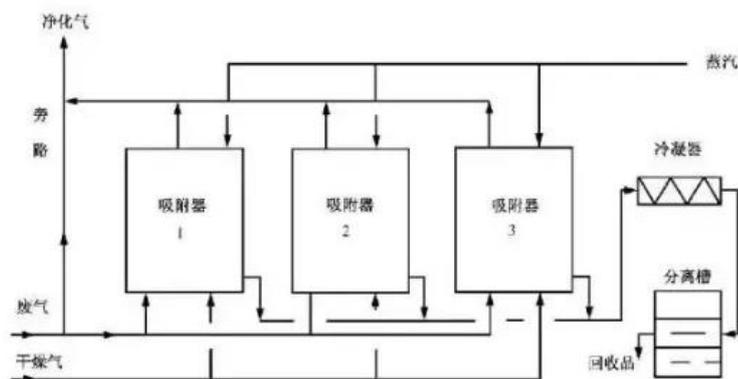


图 1-11 吸附法工艺原理

### (1) 吸附段需要注意的事项

采用活性炭吸附工艺，进入吸附系统的废气温度应控制在  $40^{\circ}\text{C}$  以内，废气中颗粒物浓度低于  $1\text{mg}/\text{m}^3$ 。同时，进入吸附系统的易燃、易爆有机废气浓度应控制在其爆炸极限下限的 25% 以下。对于含有混合有机化合物的废气，其控制浓度  $P$  应低于最易爆炸组分或混合气体爆炸极限下限值的 25%，即  $P < \min(P_e, P_m) \times 25\%$ ， $P_e$  为最易爆炸组分极限下限值（%）， $P_m$  为混合气体爆炸极限下限值（%）， $P_m$  按照下式进行计算：



图 1-12 活性炭吸附装置

$$P_m = (P_1 + P_2 + \dots + P_n) / (V_1/P_1 + V_2/P_2 + \dots + V_n/P_n)$$

式中： $P_m$ ——混合气体爆炸极限下限值，%；

$P_1, P_2, \dots, P_n$ ——混合气体中各组分的爆炸极限下限值，%；

$V_1, V_2, \dots, V_n$ ——混合气体中各组分所占的体积百分数，%；

$n$ ——混合有机废气中所含有机化合物的种类数量。

在理想状态下，中低浓度 VOCs（一般在 $<1000\text{mg}/\text{m}^3$ ），净化效率能达到 90% 以上，但吸附材料吸附能力接近饱和时，吸附效率显著降低，无法保证处理后废气稳定达标排放，同时，目前没有成熟可靠、经济实用的技术对吸附材料的吸附能力变化情况进行实时监测分析，因此吸附工艺一般与其他处理工艺组合使用。在不施用深冷、高压的手段下，可以有效回收有价值的有机物组分。吸附剂应选择具有大比表面和孔隙率的；具有良好选择性的；吸附能力强，吸附容量大的；易于再生；机械强度、化学稳定性、热稳定性好；使用寿命长的。更换填料或是运行维护过程中产生的固废及危险废物按照国家固体废物污染环境防治法有关要求进行管理、处置。固定床吸附器应符合《环境保护产品技术要求工业废气吸附净化装置》（HJ/T 386）的规定。吸附层的风速应根据吸附剂的材质、结构和性能共同确定。常用的吸附剂有两类，分别为活性炭吸附剂和沸石分子筛吸附剂。

①活性炭吸附剂特点：操作简单，吸附能力强，吸附效果好，可以对活性炭进行再生，重新使用。

②沸石分子筛吸附剂特点：作为离子型吸附剂，吸附选择性强，吸附能力强，是不燃材料，因此在较高的温度下，吸附效率仍然比较高，同时，脱附温度也相应较高。

③固定床吸附器应符合《环境保护产品技术要求 工业废气吸附

净化装置》(HJ/T 386)的规定。吸附层的风速应根据吸附剂的材质、结构和性能共同确定；采用颗粒状活性炭时，宜取 0.20-0.60m/s，采用蜂窝状活性炭时，宜取 0.70—1.20m/s。对于废气浓度特别低或有特殊要求的场合，风速可适当增加。

表 1-1 活性炭物性参数

性质	单位	颗粒活性炭	粉状活性炭	活性炭纤维
真密度	g/cm <sup>3</sup>	2.0-2.2	1.9-2.2	0.2-0.8
粒密度	g/cm <sup>3</sup>	0.6-1.0	/	/
堆积密度	g/cm <sup>3</sup>	0.35-0.6	0.15-0.6	0.03-0.05
孔隙率	%	33-45	45-75	50-80
细孔容积	cm <sup>3</sup> /g	0.5-1.1	0.5-1.4	0.6-1.1
平均孔径	Å	1.2-4.0	1.5-4.0	5.0-14.0
比表面	m <sup>2</sup> /g	700-1500	700-1600	800-2000

吸附装置用于处理易燃、易爆气体时，应符合安全生产及事故防范的相关要求。除控制处理气体的浓度外，在管道系统的适当位置，应安装符合《石油气体管道阻火器》(GB/T 13347)规定的阻火装置。接地电阻应小于 2Ω。

## (2) 脱附段需要注意的事项

脱附操作可采用升温、降压、置换、吹扫和化学转化等脱附方式或几种方式的组合。脱附气源可采用热空气、热烟气和低压水蒸气。当回收脱附产物时，应保证脱附后气体达到设计要求的冷却水平。有机溶剂的脱附宜选用水蒸气和热空气，当回收的有机溶剂沸点较低时，冷凝水宜使用低温水；对不溶于水的有机溶剂冷凝后直接回收，对溶于水的有机溶剂应进一步分离回收。采用活性炭作为吸附剂时，脱附气体的温度宜控制在 120℃ 以下；采用沸石分子筛作为吸附材料时，脱附气体的温度宜控制在 220℃ 以下。

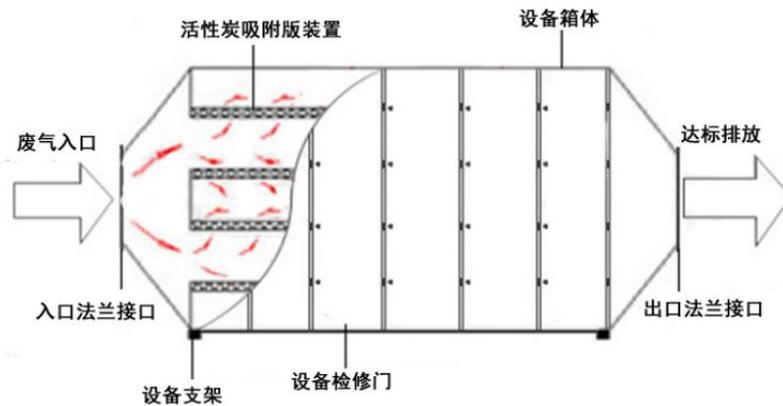


图 1-13 活性炭吸附过程

## 2.生物净化

通过附着在反应器内填料上的微生物的新陈代谢作用将有机废气中的污染物转化为简单的无机物（ $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{SO}_2$  等）和微生物。使用生物净化时，应注意：

（1）生物法适合处理“高水溶性+易生物降解”的 VOCs，

去除效率能达到 70%—90%，对其余类型的 VOCs 处理效果较差。生物法处理效果从大到小依次为醇类、酯类、苯系物>醛、酮、卤代烃>小分子烯烃、烷烃。

（2）主要应用于中低浓度（一般在 $<1000\text{mg}/\text{m}^3$ ）有机废气的处理；风量较大的情况下，其处理的浓度更低（一般在 $<200\text{mg}/\text{m}^3$ ）。

（3）微生物的筛选和挂膜的时间较长。

（4）要通过有效预处理和合理管理，尽量降低填料堵塞带来的影响。

（5）更换填料或是运行维护过程中产生的固废以及危险废物按照国家固体废物污染环境防治法有关要求进行管理、处置。

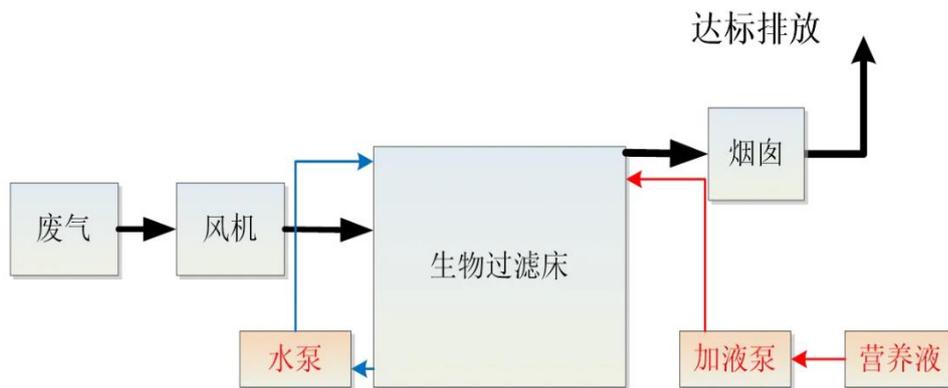


图 1-14 生物滤床处理过程

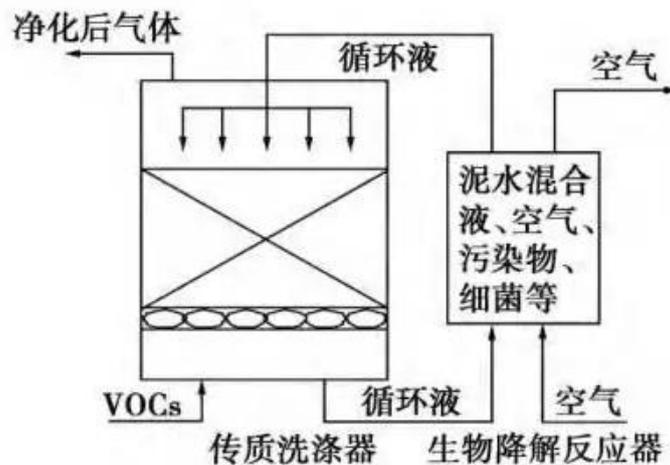


图 1-15 生物净化工艺原理图

### 3. 直接燃烧法

直接燃烧法分为常规直接燃烧（TO）和蓄热式燃烧（RTO）。是利用辅助燃料燃烧所发生热量，把可燃的有害气体的温度提高到 700-900℃ 的反应温度，从而发生氧化分解。由于燃烧炉可于较短时间内进入工作状态，非常适合用于高浓度废气及间歇性排放工艺。蓄热式燃烧（RTO）处理系统中加温和氧化分解产生的热能利用具有高热容量的陶瓷蓄热体作为蓄热系统，实现换热效率达到 90% 以上的节

能效果。使用燃烧时，应注意：

(1) 处理净化效率高，能达到 95% 以上，连续运行稳定，技术成熟且安全可靠、操作维护简单，使用寿命长。

(2) 一次性投资成本高，运行成本较高；

(3) 严格控制进口有机物的浓度，使其入口浓度必须远低于爆炸下限，控制在一个安全的水平。

(4) 不适宜处理小于  $8000\text{m}^3/\text{h}$  以下风量的废气，对含有机硅成分较多的废气容易造成蓄热体堵塞，更换蓄热材料费用较高。

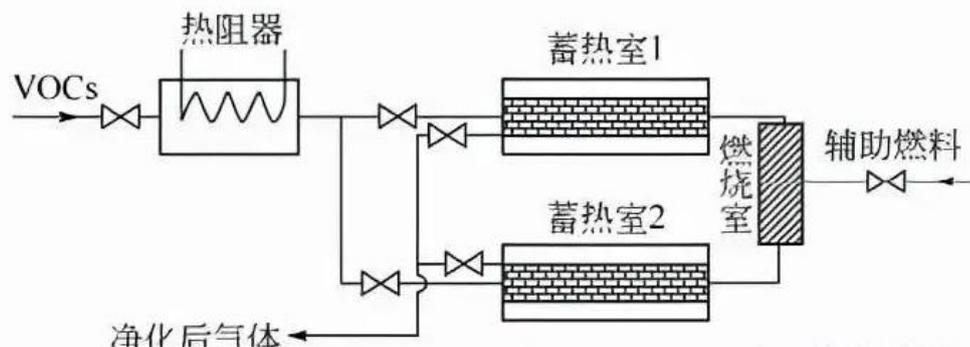


图 1-16 蓄热式燃烧法工艺原理图

#### 4. 催化燃烧法

催化燃烧分为常规催化燃烧（CO）和蓄热式催化燃烧（RCO）。利用结合在高热容量陶瓷蓄热体上的催化剂，使有机气体在  $300\sim 400^{\circ}\text{C}$  的较低温度下，氧化为水和二氧化碳。蓄热式催化燃烧（RCO）的处理系统加热和氧化产生的热量被蓄热体储存并用以加热待处理废气，以提高换热效率。催化燃烧法的关键因素是催化剂的选择。已有多种可供选择的催化剂：按其活性分，有钯、铂、稀土和过渡金属氧化物催化剂；按其形状分，有无定形颗粒状、球形颗粒状、整体蜂窝状、网状、丝蓬状和透气板状等催化剂。催化剂的载体一般以氧化铝和陶瓷为主，此外还有天然沸石、镍铬丝和不锈钢丝等。



图 1-17 催化燃烧装置

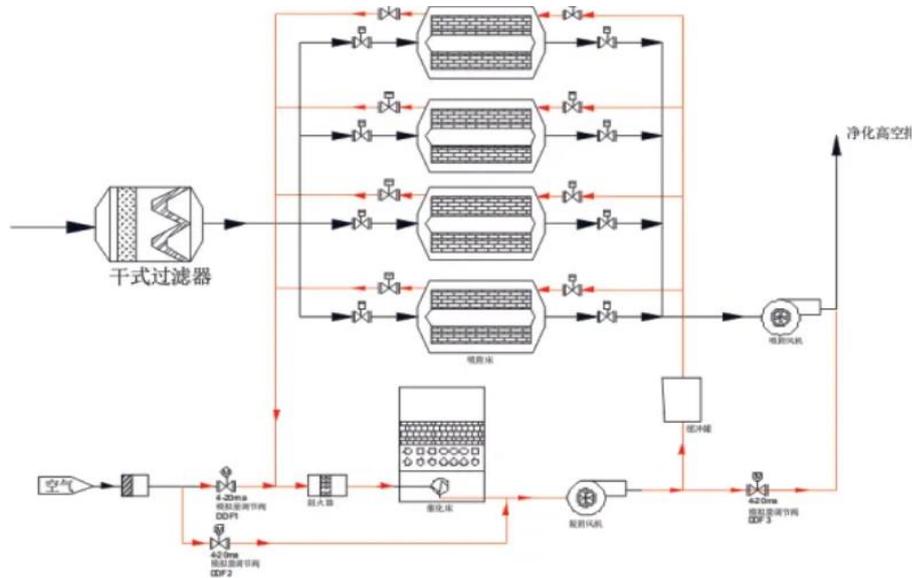


图 1-18 催化燃烧设备流程图

(1) 催化燃烧工艺具有如下特点：

处理净化效率较高，能达到 95% 以上，燃烧温度较低，较少产生  $\text{NO}_x$  和  $\text{SO}_x$ 。催化剂的选择需要与处理对象相吻合，严格避免催化剂的中毒。在汞、铅、锡、锌等金属蒸气和磷、磷化物、砷等存在时，随使用时间的延长，这些物质覆盖在催化剂表面，催化剂将失去活性。卤素和大量的水蒸气存在时，催化剂活性暂时衰退；当这些物质不存在时，其活性在短期内即可恢复。尘埃、金属锈、煤灰、硅和有机金属化合物等覆盖在催化剂表面上，将影响废气中可燃成分与催化剂表面接触，从而使催化剂活性降低。催化剂的工作温度应低于  $700^\circ\text{C}$ ，

并能够承受 900℃ 短时间的高温冲击，设计工况下催化剂使用寿命应大于 8500h。催化燃烧装置预热室的预热温度宜控制在 250-350℃，不宜超过 400℃。催化剂床层的设计空速应考虑催化剂的种类、载体的形式、废气的组分等因素，宜大于 10000h<sup>-1</sup>，但不宜大于 40000h<sup>-1</sup>。

(2) 使用蓄热催化燃烧时，应注意：

处理净化效率较高，能达到 95% 以上，比蓄热式燃烧节约 25% ~ 40% 运行费用，其热回收效率可达 90% 以上；很少产生 NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>x</sub>，不受水气含量影响。废气的成分复杂，起始燃烧温度随废气成分不同而有所差异。预热温度过低，不能进行催化燃烧；预热温度过高，浪费能源。催化燃烧法最大的缺点是必须注意催化剂的中毒。在汞、铅、锡、锌等的金属蒸气和磷、磷化物、砷等存在时，随使用时间的延长，这些物质覆盖在催化剂表面，催化剂将失去活性。卤素和大量的水蒸气存在时，催化剂活性暂时衰退；当这些物质不存在时，其活性在短期内即可恢复。尘埃、金属锈、煤灰、硅和有机金属化合物等覆盖在催化剂表面上，影响废气中的可燃成分与催化剂表面接触，从而使活性降低；废气浓度过高时会导致催化剂超温；不能处理温度高于 450℃ 的废气。

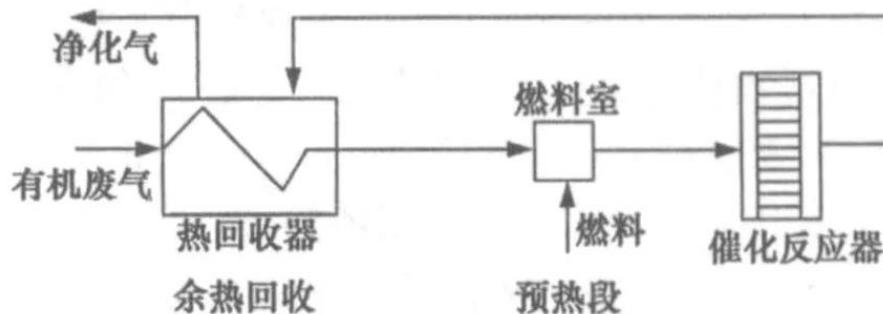


图 1-19 催化燃烧工艺原理图

## 5. 吸收法

吸收法是利用相似相溶原理，常采用沸点较高、蒸气压较低的低挥发或不挥发液体（如柴油、煤油等）为吸收剂，吸收废气中的 VOCs 组分，VOCs 从气相转移到液相中，从而达到净化废气的目的。在石化企业 VOCs 废气处理中，吸收法适用于炼油行业高压、低温、高浓度的 VOCs 废气处理，设施运行费用低。可用于原油、半成品、成品油储罐呼吸气，以及常减压装置初、常顶废气处理。储罐灌顶呼吸气可采用低温柴油吸收，减少废气排放；常减压装置不凝气可采用轻烃回收装置进行处理。轻烃回收装置主要包括瓦斯气增压系统、汽油吸收系统、柴油回收系统、脱吸系统、稳定系统、脱硫系统六大系统组成。

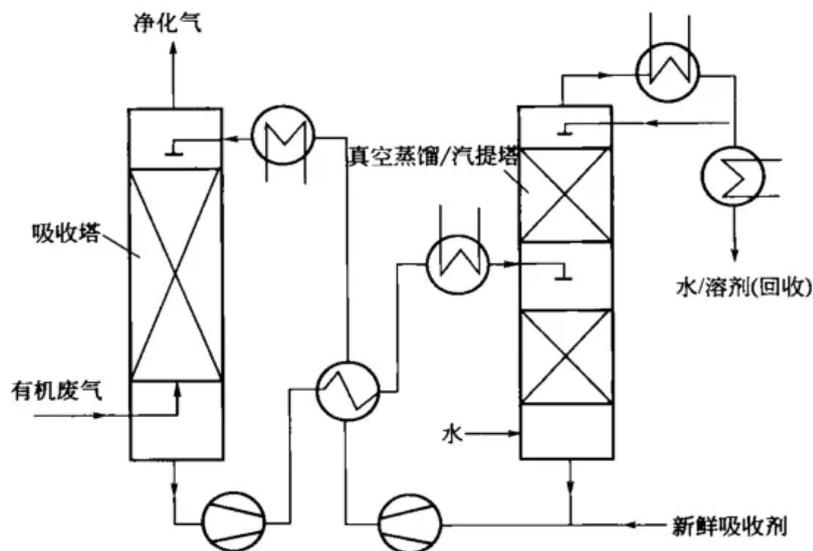


图 1-20 吸收法工艺原理图

常减压装置瓦斯气经压缩、冷凝、吸收、脱吸、分馏等过程，得到液化石油气产品，可显著降低 VOCs 排放。

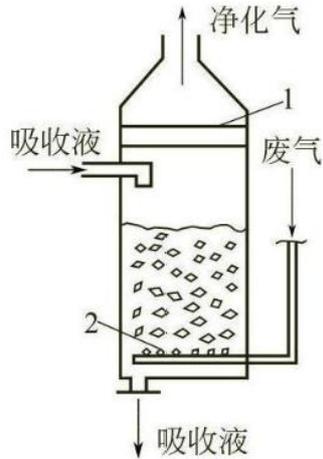


图 1-21 吸收法工艺原理图

## 6. 冷凝回收法

废气中的 VOCs 在冷凝器中冷凝，通过降低气体温度使 VOCs 达到过饱和后从气体中液化出来而得到净化，冷凝下来的有机物可以回收利用。

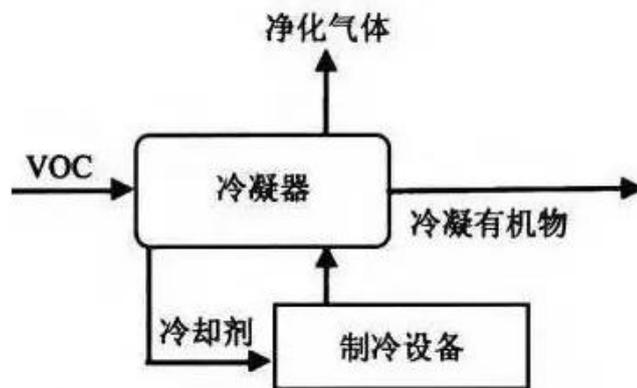


图 1-22 冷凝法工艺原理图

使用冷凝法时，应注意：

(1) 主要用于处理高浓度废气，特别是组分比较单纯的、有一定回收经济价值的废气，净化效率为 50%—80%；

(2) 冷凝法吸收效率波动幅度大，可作为燃烧或吸附处理的预处理工段，特别是 VOCs 含量较高时，可通过冷凝回收降低后续净化装

置的操作负担;

(3) 可处理含有大量水蒸气的高温蒸汽。

(4) 冷凝法对废气的处理程度受到冷凝温度限制, 要处理效率高或处理低浓度废气时, 需要将废气冷却到非常低的温度, 经济上不合算。

## 7. 膜分离油气回收法

膜分离油气回收法是采用一系列并联安装于管道上的膜组件构成的膜分离器, 将油蒸气/空气混合物在膜的渗透侧的真空作用下分成含有少量烃类的截留物流和富集烃类的渗透流。截留物流再经吸附剂吸附净化后, VOCs 浓度低于排放标准可以直接排入大气, 而渗透流循环至膜法油气回收装置的压缩机口, 与收集的排放油气相混合, 混合气体经过喷淋塔, 通过蒸气带压, 使得富集物流在喷淋塔中分成烃蒸气和液态烃两相流, 经喷淋吸收塔后液态烃以液体的形式返回罐区, 实现油气回收。而烃蒸气则进入膜分离器, 再次进行上述循环。膜分离油气回收法可用于轻质油品、苯类、混芳类装车过程以及乙烯粗裂解产品汽油储罐释放的挥发油气处理。

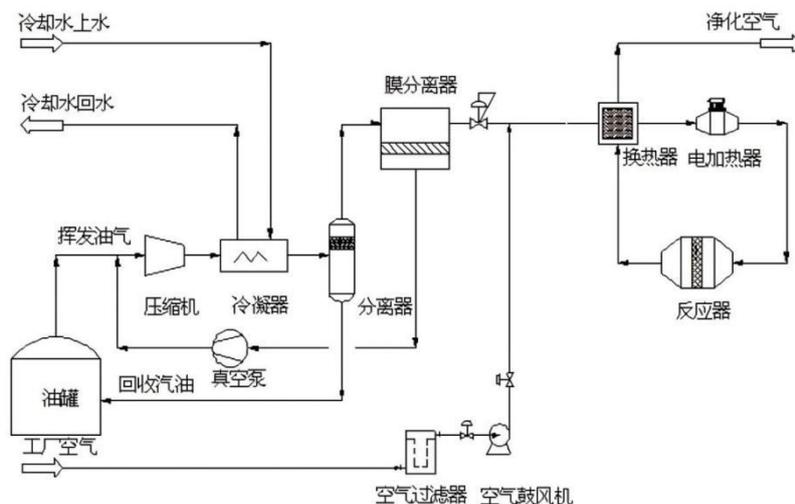


图 1-23 膜分离油气回收法工艺流程

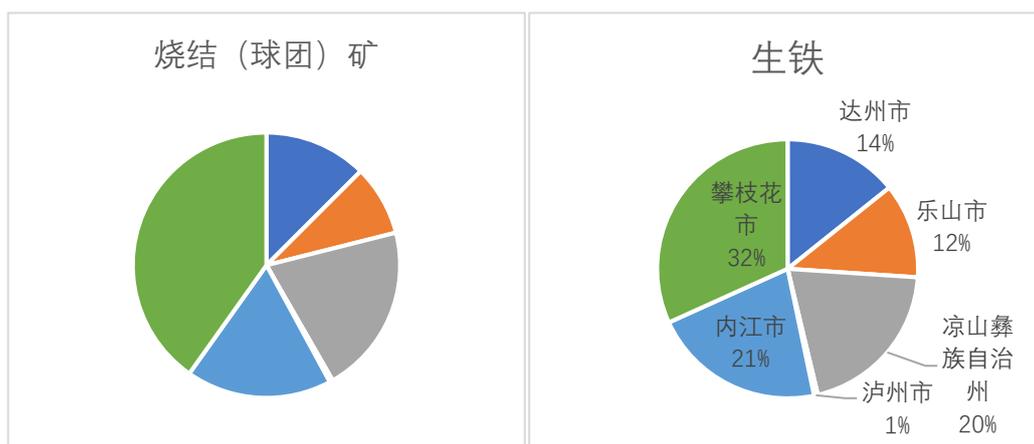
## 二、全省钢铁行业大气污染防治技术

### (一) 钢铁行业污染防治现状

#### 1. 企业分布情况

根据 2021 年统计数据，四川省钢铁行业共 71 家，涉及工业炉窑约 190 台。长流程钢铁企业共 5 家，短流程钢铁企业（包括独立轧钢、球团）企业 66 家。长流程钢铁企业在攀枝花、凉山州、乐山、内江以及达州，其他短流程钢铁企业主要分布在绵阳市、成都市、乐山市、攀枝花市、泸州市、德阳市、遂宁市、达州市、雅安市、凉山州等 10 个市州。

从产量统计来看，2021 年四川省球团矿、烧结矿、生铁、粗钢、钢材产量分别为 1134 万吨、3210 万吨、2136 万吨、2800 万吨、3437 万吨，与 2019 年钢铁产量基本持平。我省钢铁行业产能主要集中在攀枝花市、凉山州、内江市、乐山市、达州市这几个地区，另外钢材产能在泸州市、成都市、绵阳市和德阳市也有一定分布。



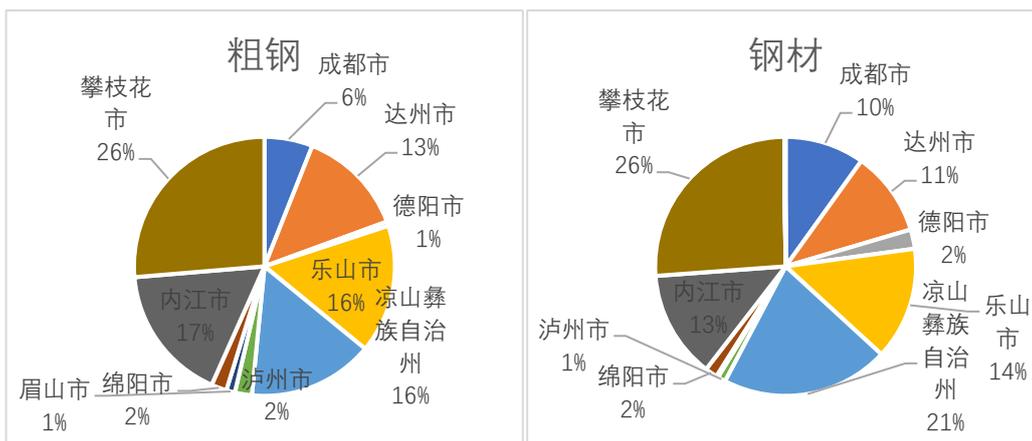


图 2-1 四川省钢铁产能分布

表 2-1 四川省钢铁行业分布情况

市州	企业数量
成都市	8
攀州市	16
泸州市	1
德阳市	4
绵阳市	24
遂宁市	1
内江市	1
乐山市	9
达州市	3
雅安市	2
凉山州	2
总计	71

## 2. 污染物排放情况

根据 2021 年大气污染物排放清单结果,全省 71 家钢铁企业 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、颗粒物排放量分别为 1.5 万吨、2.5 万吨、1.2 万吨,其中长流程钢铁企业排放占比达到钢铁行业总排放量的 70%、90%和 72%;独立球团企业排放占比分别为 25%、5%和 20%;其他短流程钢铁企业排放占比相对较小。四川省长流程钢铁企业各污染工段排放占比如下

图，二氧化硫排放占比较高的是烧结和高炉，氮氧化物占比较高的是烧结和发电机组（锅炉），PM<sub>2.5</sub> 排放占比较高的是高炉、炼钢和烧结，一氧化碳排放占比较高的烧结和高炉。

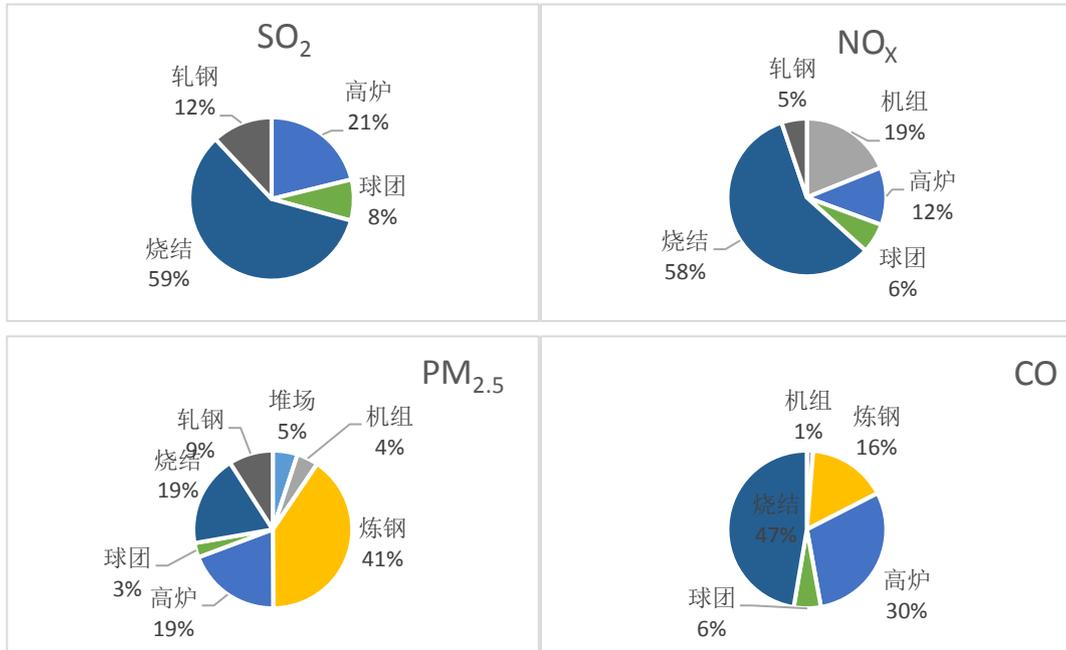


图 2-2 长流程钢铁企业各污染工段排放占比

### 3. 焦化行业分布情况和排放量

全省 11 家焦化企业 2021 年 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、颗粒物、VOCs 排放量分别为 3704 吨、11759 吨、1035 吨和 34085 吨，分别占全省工业污染源排放量的 2.5%、5%、0.5%和 15%。

全省有焦化企业的市州 7 个，攀枝花市各污染物排放量最大，其次为达州市，凉山州和内江市排放量次之，广元市、乐山市和眉山市排放量相对较小。根据各市州产能分布情况来看，达州市、凉山州和内江市焦化企业脱硫脱硝除尘治理效果较好，攀枝花市焦化企业焦炉烟气脱硫脱硝治理有待加强。

## （二）钢铁行业污染防治技术水平与需求

### 1. 长流程钢铁企业污染防治技术水平与需求

## **(1) 有组织**

①烧结：四川省长流程钢铁企业烧结机头废气主要采用石灰石/石灰-石膏法+普通/高效静电除尘法，其中两家企业烧结机头使用了SCR脱硝工艺；

②球团：四川省长流程钢铁企业中，目前只有两家企业存在球团生产工艺，其有组织废气主要采用石灰石/石灰-石膏法+普通静电除尘法；

③高炉：四川省高炉工艺的有组织废气主要采用布袋除尘法；

④转炉：主要采用布袋除尘法/高效静电除尘法。

## **(2) 无组织**

四川省的长流程钢铁行业无组织的管控方面，具体分为以下三个方面。

### **1) 物料储存**

部分料场未封闭或者为半封闭料棚，颗粒物扬尘较为严重。

### **2) 物料运输**

物料运输主要有管道运输、皮带运输、汽车运输和火车运输；较为突出的问题为皮带运输、汽车运输和火车运输；主要是室外皮带未封闭或出现破损等导致封闭不完全；汽车运输与火车运输过程未覆盖，卸料过程无收尘抑尘措施等。

### **3) 生产工艺**

生产工艺无组织排放较为突出的主要在烧结、炼铁和炼钢区域。

①烧结：较为突出的问题有破碎、筛分等车间未封闭或封闭不完全，现场无组织散逸较为严重；

②炼铁：出铁场集气收尘能力不足，集气罩不能完全覆盖所有产尘区域，尤其在开堵铁口时，无组织散逸尤其严重，收尘能力明显不足；其次高炉铁沟、渣沟未加盖半封闭或未封闭状态，存在无组织散逸现象；铸铁车间未封闭。

③炼钢：转炉—二次除尘集气能力不足，在加料过程中存在烟尘无组织散逸现象；真空精炼炉在精炼过程产生明显烟尘外逸，顶部无废气收集治理等。

## **2. 短流程钢铁企业污染防治技术水平与需求**

### **(1) 有组织**

有组织废气中的污染物主要包括生产过程中产生的粉尘、加热炉/热处理炉燃烧天然气或电加热产生的烟尘、二氧化硫、氮氧化物等，酸洗生产线产生的酸雾。对于烟（粉）尘的处理，主要采用布袋过滤；酸雾采用水喷淋、硫化钠氧化喷淋、氢氧化钠溶液喷淋吸收三级处理；加热炉、热处理炉均采用天然气加热或电加热，外排烟气中二氧化硫及颗粒物含量低，能达到超低排放限值。

### **(2) 无组织**

#### **1) 物料储存**

废钢料场为半封闭料场，未采用密闭料仓或封闭料棚等方式储存，料仓前后未进行封闭，仅有两侧围墙及顶棚，且两侧围墙上部镂空，未完全封闭。

#### **2) 生产工艺**

①电弧炉出料过程集气罩面积较小，不能完全覆盖倾斜的炉体上方，导致废气收集效果较差。

②精炼炉顶部设置有集气罩及配套除尘管道，但集气效果不佳，合金加入过程中有少量烟尘外逸现象。

③连轧上料机的推料过程，钢坯表面部分氧化铁皮会掉落，未设置接渣槽，现场的积尘明显；减定径机组底部有少量渣屑。

④修磨机采用全密闭罩+布袋除尘器除尘，集气罩有一侧封闭不全，修磨机顶部以及周边设备、楼梯护栏等均积尘严重，颗粒物无组织逸散明显，废气收集效果较差。抛丸机采用布袋除尘器除尘，抛丸机采用软布围挡，抛丸机、软布及地面均有较厚积尘，废气收集效果较差。

### 3. 焦化行业污染防治技术水平与需求

#### (1) 四川省焦化企业源头控制现状

焦化行业源头控制主要是用于焦炉燃烧的原料煤和作为燃料的焦炉煤气、高炉煤气。使用低硫煤，高炉煤气和焦炉煤气进行精脱硫工艺，从源头上削减污染物的产生，达到源头减污的目的。我省本地的煤炭大多为高硫煤，源头削减本身面临加大难度，多数焦化企业采用外地煤炭（陕西、云南、重庆等地）的低硫煤与本地高硫煤配合混烧，可一定程度上减少源头二氧化硫的产生；其次，在高炉煤气、焦炉煤气精脱硫方面，我省焦化企业的荒煤气基本都进行相应脱硫处理，降低焦炉煤气中的  $H_2S$  含量，但高炉煤气精脱硫方面仍存在较大不足，几个联合钢铁生产企业均未配套相应高炉煤气精脱硫技术。

#### (2) 工艺水平发展现状

根据《产业结构调整指导目录（2019 年本）》中对于焦炉规定的限制类和淘汰类要求：顶装焦炉炭化室高度 $<6.0$ 米、捣固焦炉炭化

室高度<5.5 米，100 万吨/年以下焦化项目为限制类工艺，炭化室高度小于 4.3 米焦炉（3.8 米及以上捣固焦炉除外）为淘汰类。

根据调研情况来看，我省焦化企业主要焦炉类型为捣固焦炉，顶装焦炉分布在 3 家企业，其中 1 家企业的 4.3m 顶装焦炉为限制类工艺；捣固焦炉中 1 家企业的 4.3m 焦炉为限制类工艺，1 家企业的 3.9m 捣固焦炉属于限制类工艺。

此外，从熄焦方式来看，全省焦化企业基本采用干熄焦工艺，湿熄焦均存在，作为备用设备，但其中一家企业采用自然熄焦法，与行业发展要求不符。

### （3）末端治理现状

四川省焦化企业均为常规机焦生产工艺，主要包括备煤单元、炼焦单元、熄焦单元、焦处理单元及煤气净化单元，主要的有组织排放末端治理包括破碎筛分的颗粒物排放，焦炉烟囱的颗粒物、二氧化硫和氮氧化物的燃烧废气，装煤推焦过程的颗粒物、二氧化硫，干熄焦排放的颗粒物、二氧化硫，筛焦过程的颗粒物排放以及后续煤气净化单元的粗笨管式炉燃用焦炉煤气的设备产生含颗粒物、二氧化硫和氮氧化物的废气、硫铵结晶干燥产生含颗粒物、氨的废气等。

焦炭生产过程资源和能源的利用效率低，同时产生大量的废气、废水和固体废物等对环境造成严重的污染，随之而来的污染问题也严重地制约着焦化工业的发展。焦化工业排放的大气污染物种类繁多且毒性大，以高强度和间歇性排放的典型特征。气态污染物主要来自焦炉荒煤气泄漏、放散煤气净化和化学产品回收工段的无组织排放，主要成分包括挥发性有机物（VOCs）、氮氧化物、一氧化碳与含硫化

合物等。焦炉产生的污染物是大气污染最严重的部位。

对于焦炉烟气的污染治理主要是脱硫脱硝除尘要求，根据调研情况来看，四川省焦炉烟气脱硫除尘设施安装率较高，11家焦化企业均安装脱硫设施，其中3家企业为石灰石-石膏法、2家企业为氨法、2家为双碱法、4家为干法/半干法脱硫技术，一家企业6座焦炉中4座未安装脱硫设施；除尘工艺中11家焦化企业有9家采用布袋除尘技术，占比82%，2家采用湿法除尘技术；脱硝工艺方面6家企业安装脱硝设施，多选择SCR脱硝工艺，5家企业未安装脱硝设施。可见，焦炉烟气有组织排放治理需进一步加大投入，特别是结合钢铁行业超低排放相关要求进行深度治理。

表 2-2 四川省焦化行业焦炉烟囱及煤气净化区域 VOCs 治理设施情况

序号	企业名称	脱硫工艺	脱硝工艺	除尘工艺	VOCs 治理
1	1#公司	双碱法	选择性催化还原法	布袋除尘法	
2	2#公司	石灰石/石灰-石膏法	选择性催化还原法	湿法除尘法	燃烧
3	3#公司	氨法	无	布袋除尘法	洗涤+吸附法
4	4#公司	氨法	其它脱硝技术	布袋除尘法	
5	5#公司	石灰石/石灰-石膏法	无	湿法除尘法	洗涤+吸附法
6	6#公司	干法脱硫	选择性催化还原法	布袋除尘法	吸附
7	7#公司	干法脱硫	选择性催化还原法	布袋除尘法	洗涤+吸附法
8	8#公司	双碱法	无	湿法除尘法	燃烧
9	9#公司	无	无	布袋除尘法	
		SDS 干法脱硫	无	布袋除尘法	
		无	无	布袋除尘法	
10	10#公司	石灰石/石灰-石膏法	选择性催化还原法	布袋除尘法	
11	11#公司	半干法脱硫	无	布袋除尘法	

## ②颗粒物排放源

焦化生产过程中颗粒物有组织排放主要包括装煤、推焦、干熄焦、筛焦等过程。根据调研情况来看，我省焦化企业在装煤、推焦、干熄

焦、筛焦等过程都配套建设了相应的除尘设施，处理工艺以布袋除尘为主。部分企业在推焦拦焦侧未配套相应除尘设施，出焦过程中颗粒物无组织排放严重。

结合调研收集的企业污染物排放监测结果来看，装煤、推焦 PM 排放浓度介于  $10\text{mg}/\text{m}^3\sim 40\text{mg}/\text{m}^3$ ，干熄焦 PM 浓度介于  $10\text{mg}/\text{m}^3\sim 20\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $\text{SO}_2$  排放浓度介于  $20\text{mg}/\text{m}^3\sim 40\text{mg}/\text{m}^3$ ，筛分除尘排放 PM 小于  $20\text{mg}/\text{m}^3$ 。

### ③ 煤气净化单元

煤气净化单元有组织排放主要是挥发性有机物收集治理，焦化化产区域 VOCs 收集治理是满足挥发性有机物无组织排放标准和超低排放改造深度治理的要求。根据调研情况来看，我省焦化化产区域 VOCs 收集治理水平较低，达兴能源有限公司两个焦化厂、内江博威能源、采用全流程收集，将 VOCs 收集后与焦炉煤气混合作为燃料进入焦炉燃烧，处理较为彻底；四川省煤焦化、仁寿铁马焦化将 VOCs 收集后采用洗涤+吸附的方式进行治理；西昌盘江煤焦化化产区域目前还未安装 VOCs 治理设施。

## （4）无组织排放防治现状

### 1) 备煤单元

#### ① 物料存储

原料煤经厂外运输至厂区，采用封闭式料棚进行储存，同时配备相应雾炮喷淋等抑尘措施。根据现场调研情况来看，我省焦化企业煤堆场颗粒物扬尘问题较为突出，料场未封闭或未封闭完全，特别是还存在大量露天堆放的情况。

煤粉斗槽及贮煤塔，多数情况为密闭料仓储存，但料仓顶部加料口未封闭完全，且无收尘设施，进料时可见烟尘外逸严重，斗槽顶部车间地面煤灰严重，窗户多处破损严重。

## ②物料输送

物料输送皮带普遍存在的问题：①皮带头部尾部落料点封闭不完全，封闭效果较差，下料时扬尘明显外逸；②转运站间皮带盖瓦封闭不严及盖瓦存在破损情况；③转运站和车间内皮带敞开运输，无封闭或抑尘收尘设施（如斗槽、贮煤塔中环形布料皮带等）；④转运站四周无围挡封闭措施，地面散落物料及积灰情况严重；⑤部分皮带通廊封闭不完全，通廊内积灰情况严重；⑥部分物料转运皮带落料点收尘装置破损，采用微重力除尘方式，收尘除尘效果较差，后期将不能满足超低排放要求。总体看来焦化区域物料转运过程无组织排放控制较差。

## ③除尘灰转运

焦化区域除尘灰主要涉及焦炉装煤推焦除尘、机侧除尘、干熄焦除尘等过程，均采用密闭料仓储存，但除尘灰转运过程均采用汽车运输，卸灰点处于半封闭状态，除尘灰加湿转运。省内焦化企业未见罐车运输或管道运输案例。

## 2) 炼焦单元

①焦炉晾焦台，用于湿熄焦焦炭堆放。目前企业实际情况多为焦炭露天堆存，四周无遮挡封闭措施，且无抑尘装置，现场散料在起风时可见烟尘严重。

②焦炉炉顶装煤口封闭不严，少量烟尘外逸，拦焦侧炉门封闭不

严，大量黄色烟尘外逸；装煤车装煤口有收尘除尘设施，装煤过程中集气能力不足，装煤完毕加盖封闭不及时，大量烟尘外逸；推焦机侧有随车集气罩，推焦时打开炉门处连接机侧除尘管道，机侧有少量烟尘外逸；拦焦车机侧有随车集气罩，出焦时炉门打开与除尘管道连接，但除尘能力不足，出焦时烟尘外逸严重。

③焦炉炉门封闭不严，大量烟尘外逸。机侧无除尘设施，有雾炮机喷淋抑尘；推焦车与焦炉炉门处有集气罩，车载小除尘器配，集气效果很差，推焦过程烟尘外逸严重；装煤车有车载金属滤筒除尘器，装煤口有集气罩，装煤过程仍有大量烟尘外逸，装煤过程结束后封闭不及时，大量烟尘外逸。

### 3) 熄焦单元

干熄焦过程顶部设置有除尘器，装焦罐在提升过程中顶盖封闭不完全，提升过程和熄焦过程中仍有烟尘外逸情况。湿熄焦工艺不满足要求，且未配备相应除尘设施。

### 4) 焦处理单元

切焦筛焦生产设备密闭不严，现场有大量焦炭散落，生产过程中扬尘外逸严重。

### 5) 煤气净化单元

根据《挥发性有机物无组织排放标准》（GB 37822-2019）要求，企业载有气态 VOCs 物料、液态 VOCs 物料的设备与管线的密封点  $\geq 2000$  个，应开展泄露监测与修复工作（LDAR），设备与管线组件包括：泵、压缩机、搅拌器（机）、阀门、开口阀或开口管线、法兰及其他连接件、泄压设备、取样连接系统和其他密封设备。从调研情

况来看，仅内江博威能源公司、四川煤焦化集团公司、仁寿铁马焦化开展了 LDAR 监测工作。

化产区域 VOCs 无组织排放管控主要从物料储存、生产工艺、物料转运方面进行调研。根据调研情况来看主要存在以下几方面问题：

### ①物料存储

化产工序 VOCs 主要来源于包括硫氨母液储槽、粗苯生产区新洗油槽、富油槽、粗笨槽、焦油储槽、洗油储槽等顶部及侧面呼吸口、顶部人孔的无组织排放。其中所有储槽大小呼吸产生的废气均为进行收集处理，焦油储槽顶部人孔长期处于敞开状态。现场采用 PID 对某企业呼吸口和顶部人孔进行了 VOCs 检测，检测结果显示浓度均在  $6 \sim 400\text{mg}/\text{m}^3$  之间，VOCs 逸散严重。

### ②生产工艺环节

生产工艺环节 VOCs 主要来自气液分离器、刮渣槽、焦油氨水分离槽、氨水中间槽、剩余氨水中间槽、焦油中间槽、除油机等顶部放散管、放散口、观察口等的无组织逸散。

从现场调研来看，所有放散管/口产生的废气均未进行收集处理，顶部观察口和除油机顶部处于敞开状态，无加盖。现场采用 PID 对某企业顶部放散口、观察口进行了 VOCs 检测，检测结果显示浓度均在  $12 \sim 100\text{mg}/\text{m}^3$  之间，VOCs 逸散严重，尤其是剩余氨水中间槽 VOCs 浓度达到  $1000 \text{mg}/\text{m}^3$ 。

### ③物料输送环节

物料输送环节共无组织排放点位，包括机械刮渣槽下渣口、粗苯装车位、煤焦油装车位、机械式刮渣槽煤焦油下渣口等。

1) 机械刮渣槽下渣口，渣槽敞开无覆盖，无收集设施；现场采用 PID 对某企业机械式刮渣槽下渣口进行了 VOCs 检测，检测结果显示浓度在  $20\text{mg}/\text{m}^3$  左右。

2) 粗苯装车位、煤焦油装车位均采用鹤管、顶部装油，装卸过程无收集；

3) 机械式刮渣槽煤焦油下渣口仅两面遮挡，未封闭完全。

#### ④废水集输及治理

废水集输及治理区域包括焦化废水气浮池、隔油池和调节池，从现场来看该区域废水均未加盖，无废气收集处理设施。现场采用 PID 对某企业废水上方 50cm 处进行监测，VOCs 浓度为  $0.3\text{mg}/\text{m}^3$  左右。

### (三) 钢铁行业污染防治技术介绍

2019 年 4 月 29 日，生态环境部、财政部、发展改革委、工业和信息化部、交通运输部联合印发《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》（环大气〔2019〕35 号）明确了全国新建（含搬迁）钢铁项目原则上要达到超低排放水平。推动现有钢铁企业超低排放改造，到 2025 年底前，重点区域钢铁企业超低排放改造基本完成，全国力争 80% 以上产能完成改造的主要目标。

2019 年 8 月 23 日，四川省生态环境厅、省发展和改革委员会、经济和信息化厅、财政厅、交通运输厅五部门在结合四川省自身特点，联合印制了《四川省推动钢铁行业超低排放改造实施清单》（川环函〔2019〕891 号），在全面满足《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》（环大气〔2019〕35 号）的基础上，明确了任务清单和政策清单及相关牵头部门，同时提出了四川省钢铁行业超低排放改造年度

计划表。本文重点对超低技术进行说明。

表 2-3 常用污染防治技术

适用范围	工序	技术内容	备注
源头减排	总体要求	加强源头控制，采用低硫煤、低硫矿等清洁原、燃料，采用先进的清洁生产和过程控制技术，实现大气污染物的源头削减。	
	烧结/球团工序	<p>①强化烧结机机头、机尾密封板、台车滑道、润滑系统、风箱及卸灰阀等密封改造，将机头烟气中的含氧量控制在 16% 以内。</p> <p>②鼓励企业结合自身实际，配套烧结机头烟气循环系统。</p> <p>③烧结机环冷机采用上下水密封技术。</p> <p>④球团生产宜采用链蓖机回转窑、带式焙烧机等生产工艺。按国家规定不得掺烧硫含量大于 3% 的高硫石油焦作为燃料。</p>	
	焦化工序	<p>①焦炉装煤采用高压氨水喷射技术、导烟技术、单孔炭化室压力调节技术等，以减少废气量。</p> <p>②焦炉加热采用废气循环技术，将焦炉燃烧废气回配至焦炉燃烧加热系统，减少 NO<sub>x</sub> 产生量。该技术分为炉内废气循环和外部烟气回配两种工艺，其中外部烟气回配适用于使用焦炉煤气加热的焦炉。</p> <p>③新建常规机焦炉采用分段（多段）加热技术，向焦炉燃烧室立火道分段供入煤气或空气，形成多点燃烧，在实现焦炉均匀加热的同时，降低燃烧强度，减少 NO<sub>x</sub> 产生量。</p> <p>④焦炉煤气净化系统冷鼓、粗苯、油库区各类贮槽等采用压力平衡技术，调节系统压力，利用管道将相关放散气引入煤气鼓风机前的煤气管道内，避免放散气外排；脱硫再生装置等排放的尾气，由于含有空气不宜引入煤气系统，应设置集气罩收集后送焦炉焚烧。</p> <p>⑤焦化熄焦采用干熄焦工艺。</p> <p>⑥焦炉煤气中硫含量应满足下游用户要求，可采用催化加氢、乙醇胺脱硫、分子筛干法吸附等工艺脱除焦炉煤气中的有机硫。</p>	
	其他涉 SO <sub>2</sub> 、NO <sub>x</sub> 排放工序	<p>高炉热风炉、轧钢热处理炉、石灰窑、白云石窑、自备电厂等宜采用 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 源头控制技术。</p> <p>①严格控制高炉入炉焦炭、喷吹煤含硫率。高炉宜使用干熄焦焦炭，焦炭含硫率宜低于 0.6%，喷吹煤含硫率宜低于 0.4%。</p> <p>②高炉煤气净化系统宜配套脱酸装置，净化后 H<sub>2</sub>S 浓度宜小于 10mg/m<sup>3</sup>。</p> <p>③鼓励高炉煤气有机硫脱除技术的研发和工程应用。</p> <p>④鼓励采用分级燃烧、烟气循环燃烧、无焰燃烧等低氮燃烧技术。</p>	

适用范围	工序	技术内容	备注
	烧结机机头（球团焙烧）烟气、焦炉烟囱废气	<p>①烧结机头（球团焙烧）烟气进入脱硫设施前宜配置不少于四电场的配备高频电源或脉冲电源的电除尘器，电场风速宜小于 0.75m/s、比集尘面积不宜低于 115m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>/s。</p> <p>②脱硫可采用石灰石/石灰-石膏等湿法脱硫工艺，循环流化床、旋转喷雾、密相干塔等半干法脱硫工艺，活性炭（焦）干法脱硫工艺；焦炉烟囱烟气还可采用小苏打喷射干法脱硫技术。</p> <p>③脱硝可采用设置独立脱硝段的活性炭（焦）工艺或选择性催化还原（SCR）工艺。</p> <p>④湿法脱硫设施需配备湿式电除尘器；半干法脱硫设施需配备高效袋式除尘器；活性炭脱硫脱硝设施后如颗粒物不能满足要求的，需配备高效袋式除尘器。</p>	
有组织排放治理技术	烧结机机尾、烧结筛分、球团焙烧设备机尾、焦炉（装煤、推焦、干熄焦、筛焦）、高炉出铁场、高炉矿槽、转炉（二次烟气、三次烟气）、电炉、混铁炉、铁水预处理、精炼炉、石灰窑、白云石窑等含尘废气	<p>①宜采用高效节能袋式除尘技术，依据具体工况条件和要求确定滤袋的形式和滤料材质。</p> <p>②鼓励采用预荷电袋滤器技术、折叠滤筒除尘技术。</p> <p>③由于场地受限，导致采用普通圆袋过滤风速无法达到 0.8m/min 时，宜采用折叠滤筒等除尘技术。</p> <p>④鼓励使用聚四氟乙烯微孔覆膜滤料、超细纤维面层梯度滤料、金属间化合物多孔（膜）材料等新型滤材。</p> <p>⑤废气中含磨损性较强的粉尘时，如烧结矿筛分废气，宜采用超细纤维面层针刺/水刺滤料，不宜使用覆膜滤料。</p>	
	电炉烟气	电炉烟气应采用炉内排烟+密闭罩+屋顶罩的捕集方式；炉内排烟应采用烟气急冷+高效袋式除尘技术。	
	含湿废气	烧结混料环节若单独排放，可采用高效湿式除尘器；轧钢（棒、线材除外）车间精轧机宜采用塑烧板除尘；钢渣热闷废气宜采用高效湿式除尘器。	
	主要技术参数参考值	<p>①湿式电除尘器：烟气温度 60℃以下；电场风速不宜大于 2m/s；宜选用金属材质。</p> <p>②高效袋式除尘器：过滤风速宜小于 0.8m/min；除尘器阻力宜小于 1200Pa；漏风率小于 2%；除尘器进口应设置气流分布均流装置。</p> <p>③滤筒除尘器：全过滤风速小于 0.7m/min；绑带间距差异宜小于 0.5mm；根据入口粉尘浓度以及粉尘特性，滤筒折数宜小于 46；除尘器进口应设置气流分布均流装置。</p> <p>④石灰石/石灰-石膏湿法脱硫：脱硫塔入口粉尘浓度宜小于 50mg/m<sup>3</sup>；其他相关技术要求满足《石灰石/石灰-石膏湿法烟气脱硫工程通用技术规范》（HJ 179-2018）要求。</p> <p>⑤烟气循环流化床半干法脱硫：除尘器滤料可采用耐温</p>	

适用范围	工序	技术内容	备注
		<p>耐腐蚀的超细纤维面层梯度滤料、复合滤料等；除尘器阻力宜小于 2000Pa；其他相关技术要求满足《烟气循环流化床法烟气脱硫工程通用技术规范》（HJ 178-2018）要求。</p> <p>⑥活性炭（焦）脱硫脱硝一体化设施：脱硫段烟气停留时间不小 6s；脱硝段烟气停留时间不小于 7.5s；活性炭性能指标及检测方法满足《煤质颗粒活性炭试验方法》（GB/T 7702）、《脱硫脱硝用煤质颗粒活性炭试验方法》（GB/T 30202）、《烟气集成净化专用碳基产品》（GB/T 35254）要求。</p> <p>⑦选择性催化还原（SCR）脱硝：氨氮摩尔比小于 1；催化剂层数不少于 2 层；反应温度小于 230℃时，催化剂空速小于 3800h<sup>-1</sup>；反应温度 280℃左右时，催化剂空速小于 4500h<sup>-1</sup>。</p>	
无组织排放治理技术	封（密）闭	<p>①物料密闭。石灰、除尘灰、脱硫灰、粉煤灰等粉状物料采用密闭料仓、储罐等方式密闭储存，采用管状带式输送机、气力输送设备、罐车等方式密闭输送。</p> <p>②物料封闭。原料堆场、皮带通廊等开放性扬尘面源或线源需进行封闭；运输含水率小于 6%的易扬尘物料时，各皮带转运节点需进行局部或全程封闭；运输块状或粘湿物料的车辆需采用加盖封闭车厢；铁水运输过程中需加盖封闭。</p> <p>③车间封闭。破碎、筛分等易扬尘作业工段，宜对生产设备进行整体封闭或半封闭+橡胶软帘密封；高炉出铁场铁沟、渣沟需加盖封闭；烧结机环冷机、高炉矿槽、炼钢车间等应进行整体封闭。</p>	
	收尘	<p>①固定或连续作业的产尘点宜优先采用收尘技术，在不影响生产和安全的前提下，尽量提高收尘罩的密闭性；移动卸料尘源，可采用移动通风槽等收尘技术。</p> <p>②按照“应收尽收”的原则设计各产尘点收尘罩的风量，在收尘系统管路风阀全开状态下，每个收尘罩罩面风速宜大于 1.5m/s。</p> <p>③收尘系统应保持与生产工艺设备同步运转，确保收尘点无肉眼可视粉尘外逸。</p>	
	抑尘	<p>①间歇式、非固定的产尘点，可采用干雾等抑尘技术，雾滴直径宜小于 30μm。抑尘作业需快速精准联动，响应时间宜小于 5s，喷雾需明显覆盖扬尘区域。</p> <p>②长期堆放的物料可使用加湿、喷洒表面结壳剂、覆盖等抑尘技术，控制物料表面风蚀扬尘；水和结壳剂喷洒量不得超过生产工艺许可，不得含有毒有害成分。</p> <p>(4) 道路清洁</p> <p>①物料存储及上料区域每个车辆出口处，需配置 1 套车身及车轮清洗装置，且清洗装置距离出口位置小于 5m。清洗装置配备拦车杆，确保车辆清洗时间；配备抖水台</p>	

适用范围	工序	技术内容	备注
		或吹干装置，尽量减少洗车后的车身滴水。 ②车身及车轮清洗装置清洗水压宜高于 1.0MPa，清洗喷头保持通畅，并配套污水处理设施或排入污水处理厂集中处置。 ③厂区需配备足够的湿扫车和洒水车，所有环保清洁车辆加装北斗或 GPS 定位系统，记录环保清洁车辆历史工作情况。	

#### (四) 钢铁行业污染防治技术典型应用案例

##### 1. 长流程钢铁行业

##### (1) 长流程联合钢铁行业有组织案例

四川省某钢铁企业积极推进超低排放改造工作，企业实施了“烧结烟气脱硫脱硝改造项目”“焦炉烟道废气脱硫脱硝项目”废气治理升级改造等项目，最终所有有组织废气排放均能满足超低排放改造要求。

表 2-4 四川某钢铁企业 7 月 25 日-8 月 25 日在线监测数据汇总表（单位：毫克/立方米）

排放口	PM	超低限值	SO <sub>2</sub>	超低限值	NO <sub>x</sub>	超低限值
烧结脱硫主烟囱	3.86	10.00	7.90	35.00	23.00	50.00
能动中心发电站 2#烟囱	1.30	10.00	5.01	35.00	/	
能动中心发电站 1#烟囱	2.61	10.00	5.88	35.00	/	
3 号矿焦槽除尘	6.69	10.00	/		/	
3 号高炉屋顶除尘	6.65	10.00	/		/	
3 号高炉出铁场除尘器	5.90	10.00	/		/	
2 号提钒二三次除尘	3.32	10.00	/		/	
2 号烧结机机尾除尘	4.93	10.00	/		/	
2 号炼钢二三次除尘	3.13	10.00	/		/	
2 号矿焦槽除尘	6.07	10.00	/		/	
2 号高炉屋顶除尘	5.63	10.00	/		/	
2 号高炉出铁场除尘器	3.83	10.00	/		/	
1 号提钒二三次除尘	6.10	10.00	/		/	
1 号烧结机机尾除尘	5.50	10.00	/		/	
1 号炼钢二三次除尘	5.45	10.00	/		/	
1 号矿焦槽除尘	4.69	10.00	/		/	
1 号高炉屋顶除尘	7.07	10.00	/		/	
1 号高炉出铁场除尘器	6.29	10.00	/		/	

## 2. 短流程钢铁行业

四川省某新建短流程钢铁企业以钢铁行业超低要求为基础，建设目前基本满足超低要求的企业设施设备。

### (1) 原料工序

①废钢等块状或粘湿物料采用密闭料仓或封闭料棚等方式储存并配置了除尘设施。



图 2-3 废钢料场及除尘设施

②废钢加工工位设置在集气罩的封闭空间内进行



图 2-4 废钢加工集气罩

### (2) 炼钢工序

①电炉炼钢过程加强除尘设施的集气能力建设并且设置了三级

除尘，无可见烟粉尘外逸。



图 2-5 电炉无可见烟粉尘外逸

②精炼炉炼钢过程加强除尘设施的集气能力建设，无可见烟粉尘外逸。



图 2-6 精炼炉无可见烟粉尘外逸

### 3. 焦化行业

#### (1) 有组织排放措施

结合调研统计情况来看，在焦炉烟气治理方面，川内调研企业中有三家安装了相应高效脱硫脱硝除尘设施；装煤、推焦及拦焦车均安装了相应地面除尘站；熄焦工艺方面均为干熄焦方式；筛焦炉配套相

应布袋除尘器。同时，根据在线监测结果显示，三家企业装煤、推焦、熄焦、筛焦排放口颗粒物排放浓度基本小于  $15\text{mg}/\text{m}^3$ ，能达到特别排放限值要求；焦炉烟囱颗粒物、二氧化硫、氮氧化物排放浓度分别小于  $10\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $150\text{mg}/\text{m}^3$ ，均达到了超低排放要求。

表 2-5 部分焦化行业焦炉烟囱治理设施情况

序号	企业名称	脱硫工艺	脱硝工艺	除尘工艺
1	企业 1	石灰石/石灰-石膏法	选择性催化还原法	湿法除尘法
2	企业 2	干法脱硫	选择性催化还原法	布袋除尘法
3	企业 3	石灰石/石灰-石膏法	选择性催化还原法	布袋除尘法

## (2) 无组织排放管控

焦化企业颗粒物无组织排放主要是煤堆场、煤破碎、筛分、转运、焦炉、熄焦、焦炭处理等环节。结合调研情况来看，采用全封闭料棚，棚内有雾炮等抑尘设施，无组织管控相对较好；煤粉转运环节，采用皮带通廊封闭效果相对较好。



图 2-7 煤场封闭、棚内有雾炮等抑尘设施



图 2-8 通廊封闭、转运站封闭

## （五）结论与展望

### 5.1 结论

根据 2020 年大气污染物排放清单结果,四川省钢铁行业共 71 家,涉及工业炉窑约 190 台。长流程钢铁企业共 5 家,短流程钢铁企业(包括独立轧钢、球团)企业 66 家,SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、颗粒物排放量分别为 1.5 万吨、2.5 万吨、1.2 万吨,其中长流程钢铁企业排放占比达到钢铁行业总排放量的 70%、90%和 72%;独立球团企业排放占比分别为 25%、5%和 20%;其他短流程钢铁企业排放占比相对较小。全省 11 家焦化企业 2021 年 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、颗粒物、VOCs 排放量分别为 3704 吨、11759 吨、1035 吨和 34085 吨,分别占全省工业污染源排放量的 2.5%、5%、0.5%和 15%。

在污染防治技术方面,钢铁企业烧结机头废气主要采用石灰石/石灰-石膏法+普通/高效静电除尘法,球团生产工艺有组织废气主要采用石灰石/石灰-石膏法+普通静电除尘法,四川省高炉工艺的有组织废气主要采用布袋除尘法,转炉主要采用布袋除尘法/高效静电除尘法。在高炉煤气、焦炉煤气精脱硫方面,我省涉焦化企业的荒煤气基本都进行相应脱硫处理,降低焦炉煤气中的 H<sub>2</sub>S 含量,但高炉煤气精脱硫方面由于技术不成熟等原因,四川省长流程钢铁生产企业均未配套相应高炉煤气精脱硫技术。

对于焦炉烟气的污染治理主要是脱硫脱硝除尘要求,四川省焦炉烟气脱硫除尘设施安装率较高,11 家焦化企业均安装脱硫除尘设施,脱硝工艺方面 6 家企业安装脱硝设施,多选择 SCR 脱硝工艺,5 家企业未安装脱硝设施。

## 5.2 展望

随着 2025 年底前，全国力争 80% 以上产能完成改造的主要目标的临近。钢铁行业应按照《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》（环大气〔2019〕35 号）和《四川省推动钢铁行业超低排放改造实施清单》（川环函〔2019〕891 号）的要求，参考《关于印发《钢铁企业超低排放改造技术指南》的通知》（中环协〔2020〕4 号）中在技术路线选择、工程设计施工、设施运行管理等方面的意见，逐步按钢铁行业超低排放相关要求进行深度治理。

### 三、全省建材行业大气污染防治技术

#### （一）陶瓷行业

##### 1. 现状介绍

##### 1.1 四川陶瓷产能情况

经过近 35 年快速发展，四川形成以夹江陶瓷产区为中心的陶瓷产区格局，2004 年中国建材协会、中国建筑卫生陶瓷协会命名为中国西部瓷都。2021 年全国陶瓷砖总产量 89 亿平方米，同比增长 4.58%；其中四川在全国陶瓷产区中排名第四，位于广东、福建、江西之后；夹江在全国县级陶瓷产区中排名第五。

2021 年，四川省全省建成建筑陶瓷生产企业 112 家（含在建），生产线数量 186 条（含屋面瓦），陶瓷砖日产能 256.36 万平方米，建筑陶瓷年产能约为 7.67932 亿平方米，约占全国总产量的 9%；卫生陶瓷 100 万件/年（夹江产区）。

2017 年以来四川不断有建筑陶瓷企业退出市场。陶瓷砖产量开始快速下降，四川约（夹江 40）余家规模上、下建筑陶瓷企业关停

或退出行业。2021 年以来建筑陶瓷行业进入激烈的洗牌整合阶段，产量进一步下滑，企业规模化程度和集中度不断提升。

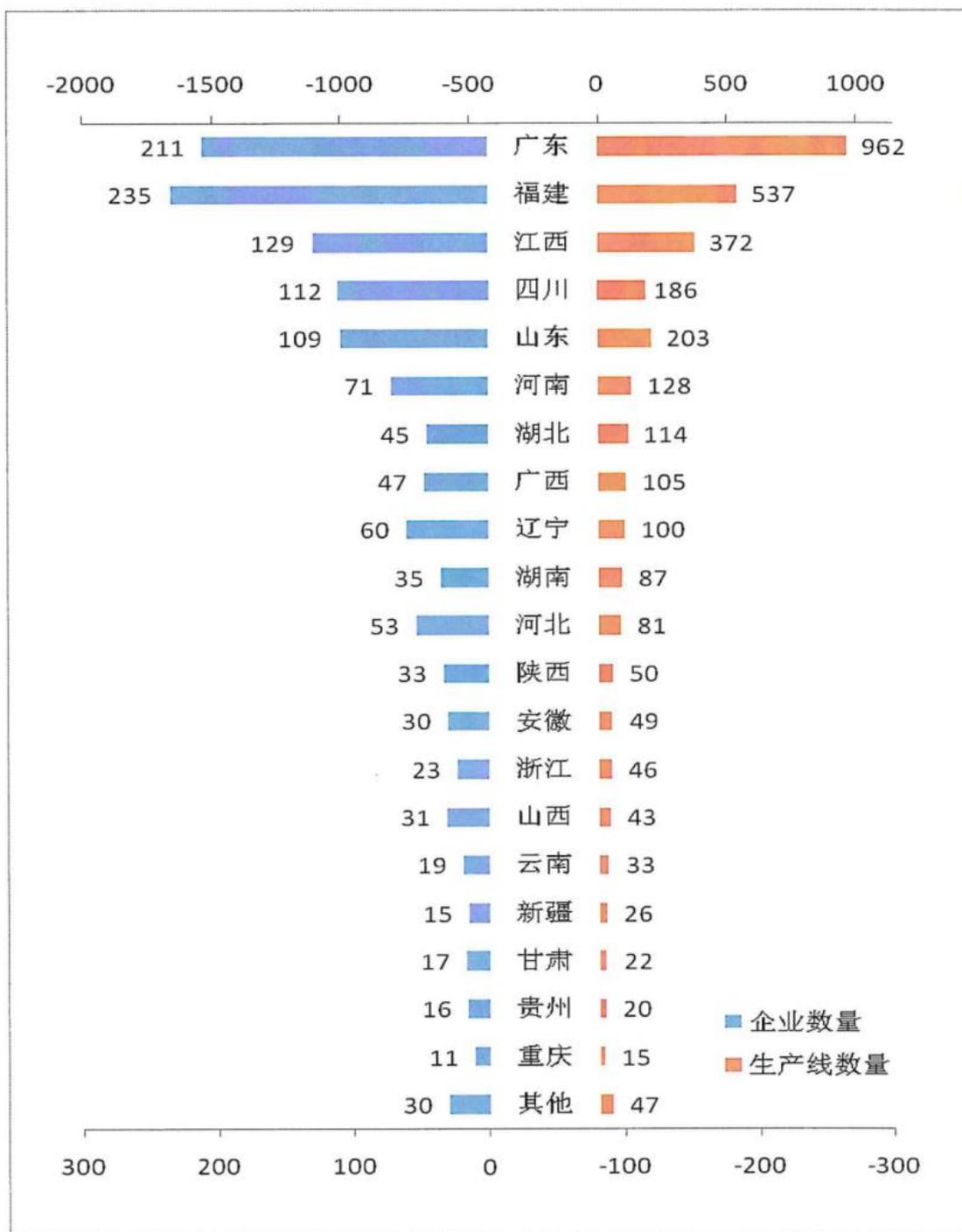


图 3-1-1 2021 年全国及四川建筑陶瓷企业及生产线数量

## 1.2 四川陶瓷企业数量及分布

表 3-1-1 四川陶瓷企业分布情况

市州	企业数量 (家)	生产线数量 (条)	年总产能 (亿m <sup>2</sup> )	产能全省占比
乐山市	64	115	4.56	59.3%
眉山市	30	48	1.2	16%
内江市	5	10	0.79	10%
自贡市	3	4	0.18	2.3%
宜宾市	3	4	0.44	5.7%
泸州市	2	2	0.12	1.6%
广安市	3	3	0.14	1.8%
达州市	2	2	0.25	3.3%
总计	112家	186	7.68	100%

从上述四川陶瓷企业数量及产能分布统计表可以看出,截至 2021 年,四川共有陶瓷企业 112 家,生产线 186 条,年总产能 7.68 亿平方米。其中,乐山市有陶瓷企业 64 家,生产线 115 条,年总产能 4.56 亿平方米,在全省陶瓷中占比 59.3%;眉山市有陶瓷企业 30 家,生产线 48 条,年总产能 1.2 亿平方米,在全省陶瓷中占比 16%;内江市有陶瓷企业 5 家,生产线 10 条,年总产能 0.79 亿平方米,在全省陶瓷中占比 10%;宜宾市有陶瓷企业 3 家,生产线 4 条,年总产能 0.44 亿平方米,在全省陶瓷中占比 5.7%;达州市有陶瓷企业 2 家,生产线 2 条,年总产能 0.25 亿平方米,在全省陶瓷中占比 3.3%;自贡市有陶瓷企业 3 家,生产线 4 条,年总产能 0.18 亿平方米,在全省陶瓷中占比 2.3%;广安市有陶瓷企业 3 家,生产线 3 条,年总产能 0.14 亿平方米,在全省陶瓷中占比 1.8%;泸州市有陶瓷企业 2 家,生产线 2 条,年总产能 0.12 亿平方米,在全省陶瓷中占比 1.6%。

2021 年四川陶瓷企业数量 112 家,同比 2017 年的 146 家相比减少 34 家,占比减少 23.29%;生产线(含屋面瓦)186 条,与 2017 年的 224 条相比减少 38 条,占比减少 16.96%。卫生陶瓷隧道窑生产

线（夹江）1条。其中乐山、眉山陶瓷产量约占省内的75%；内江、自贡、达州、宜宾、泸州市等的建筑卫生陶瓷总产量约占全省产量的25%。

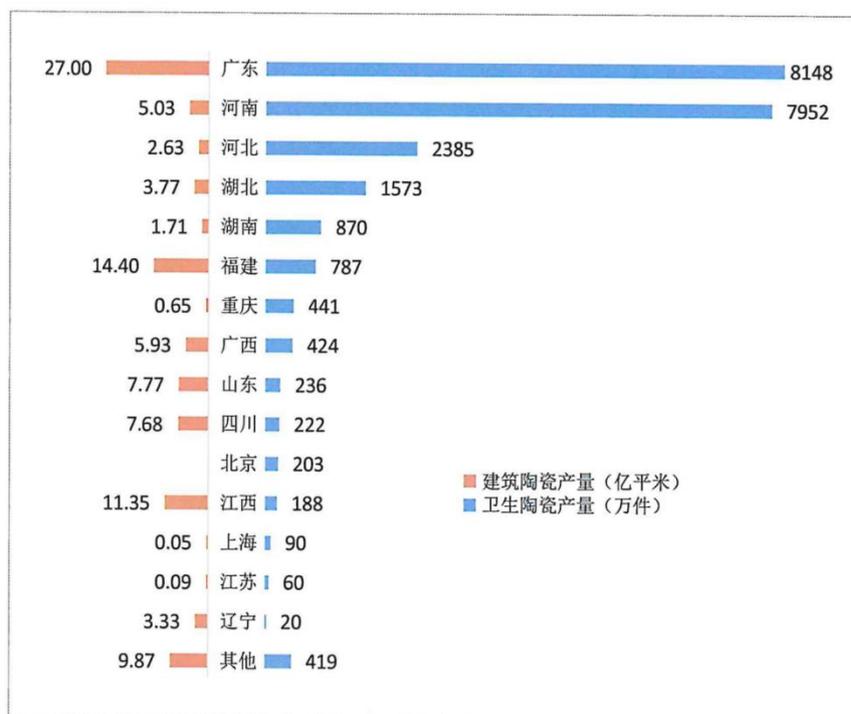


图 3-1-2 2021 年全国及四川建筑卫生陶瓷产量

### 1.3 原料种类、燃料结构及其消耗量

建筑卫生陶瓷的原料以天然矿物原料为主，化工原料为辅。天然矿物原料有粘土类原料（高岭土、球土、瓷土、镁质粘土等）、长石类原料（钾长石、钠长石、钙长石、钡长石等）、石英类原料（石英岩、硅砂、海砂、蛋白石等）、钙镁质原料（方解石、菱镁矿、白云石、萤石、滑石、磷灰石等）、瓷石等原料。其中粘土类、长石类和石英类原料占天然矿物原料总量的90%。

常用化工原料主要用于色釉料中，有氧化物类（主要有氧化铝、氧化锌等）、金属盐类（主要有硅酸锆、碳酸锂、碳酸锰等）、熔块及色料、添加剂（主要有水玻璃、小苏打、羧甲基纤维素等）等辅料。

建筑陶瓷行业燃料主要是天然气、煤制气、水煤浆、煤、其他（焦炉煤气、煤层气等）；卫生陶瓷主要采用天然气、液化石油气和电力作为窑炉的供热能源。据《2020 年中国瓷砖产能报告》显示，天然气的使用占比为 95.5%，水煤气等其他燃料（包括焦化气、液化气、煤层气）的使用占比为 4.5%。卫生陶瓷窑炉的燃料主要以天然气为主，少部分企业使用液化石油气。

夹江、眉山在四川陶瓷集中度占比较高，建筑陶瓷产区煤改气工作力度大，企业基本上全部使用天然气。近两年随着“煤改气”政策的逐渐推行，四川产区天然气的占比迅速提升。

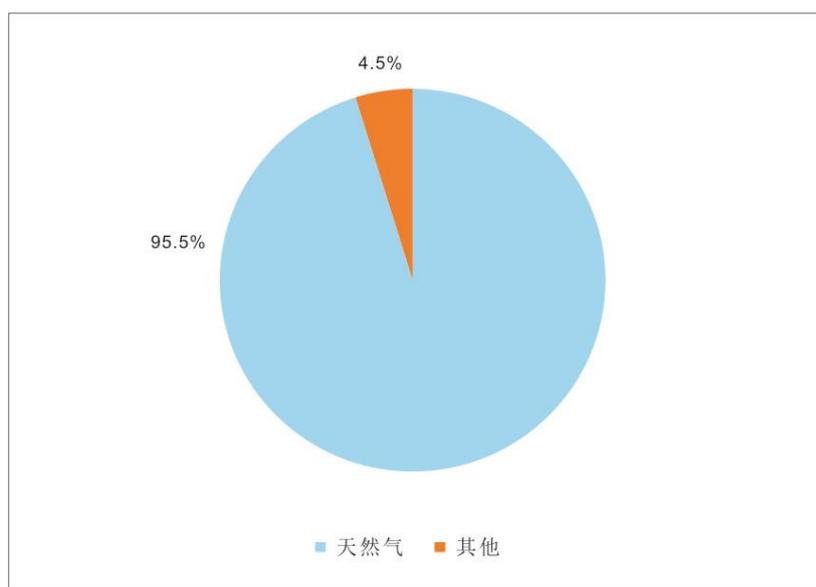


图 3-1-3 四川建筑陶瓷烧成燃料结构（2021 年）

## 2. 生产工艺及污染物产生节点

建筑卫生陶瓷的生产过程主要包括原料制备（制粉、制浆）成形、干燥、施釉、烧成等工序。

在配料、混料、干压成形、喷釉等环节会产生含尘废气，而喷雾干燥塔热风炉和陶瓷窑炉是必不可少的热工设备，也是大气污染物的

主要排放源，主要产生颗粒物、SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>，等大气污染物。

## 2.1 建筑陶瓷生产工艺及产污节点

建筑陶瓷的生产工艺，从制粉工艺上可分为湿法制粉工艺和干法制粉工艺；从成型工艺上，可分为干压成型（陶瓷砖）、塑性挤出成型（陶板）和塑性模压成型，目前湿法制粉和干压成型是建筑陶瓷制造的主流工艺；从烧成工艺上可分为一次烧成工艺和二次烧成工艺。二次烧成工艺又分为高温素烧、低温釉烧及低温素烧、高温釉烧工艺，也有少部分产品采用三次烧成工艺。

### (1) 湿法制粉工艺及产污节点

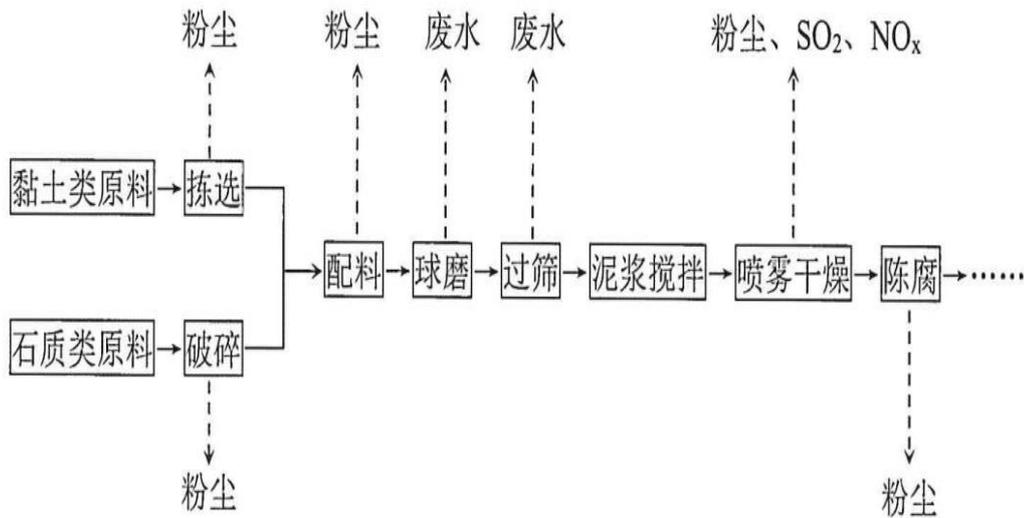


图 3-1-4 湿法制粉工艺及产污节点

### (2) 干法制粉工艺及产污节点

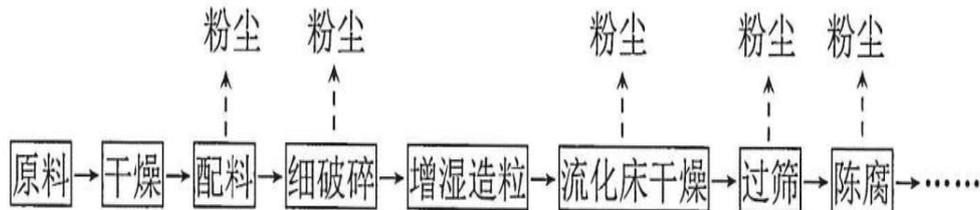


图 3-1-5 干法制粉工艺及产污节点

干法制粉工艺应用干式原料配混系统、采用立式磨机代替球磨机、增加除尘装置、斗提、造粒机等先进设备进行陶瓷粉料生产。通过替代原有的湿法工艺，省去了喷雾干燥塔，大幅度降低了能源消耗与碳排放，节能、节水、节地，生产高效，消除了制粉环节  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  的排放。

### (3) 一次烧成工艺及产污节点

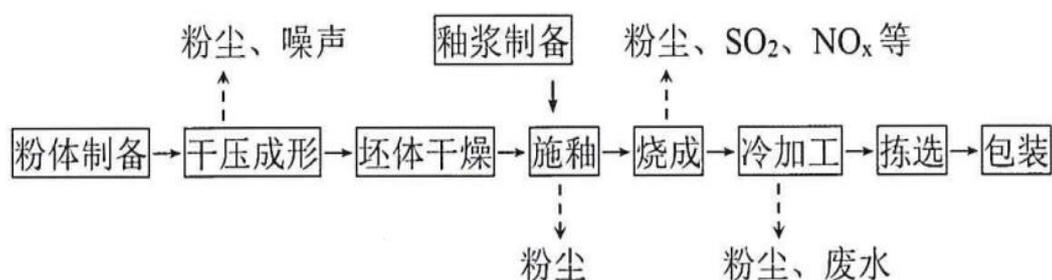


图 3-1-6 一次烧成工艺及产污节点

### (4) 二次烧成工艺及产污节点

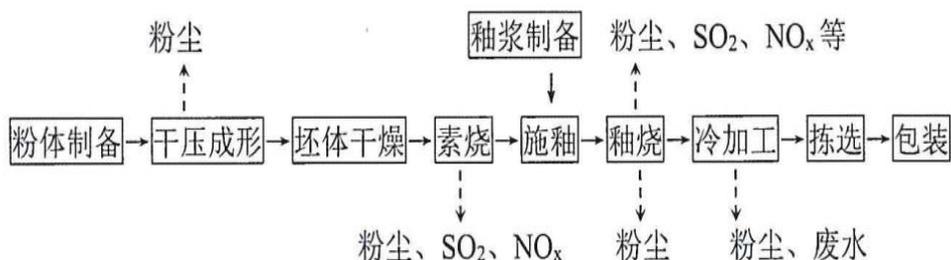


图 3-1-7 二次烧成工艺及产污节点

## 2.2 卫生陶瓷生产工艺及产污节点

卫生陶瓷的主要生产工序包括泥浆和釉浆的制备、注浆成型、施釉和烧成。具体工艺流程：根据设定的配方，将不同原料按比例配料，放入球磨机中制备浆料，泥浆经陈腐后进行注浆成型，成形后的坯体经干燥后施釉、入窑烧成，出窑后经检验、包装入库。

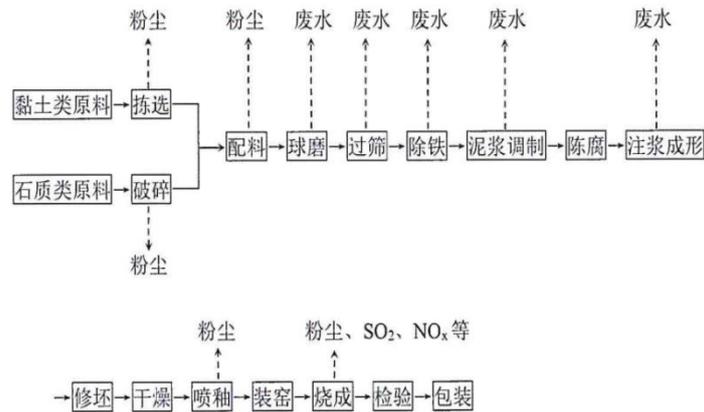


图 3-1-8 卫生陶瓷生产工艺及产污节点

### 3. 污染物来源及排放情况

建筑卫生陶瓷行业的大气污染物排放分为有组织排放和无组织排放。有组织排放主要包括工艺废气、喷雾干燥塔、窑炉烟气。工艺废气主要是粉尘，喷雾干燥塔的主要污染物是原料粉尘和热风炉烟气（颗粒物、SO<sub>2</sub>和氮氧化物），窑炉烟气主要污染物是颗粒物、SO<sub>2</sub>和氮氧化物，此外还有少量的氟化物、铅等重金属及其化合物，如表所示。

表 3-1-1 大气污染物来源分析

污染物分类		污染物种类	来源
有组织排放	喷雾干燥塔	粉尘	细小粉体颗粒
		颗粒物	燃料不完全燃烧的碳黑、燃料本身携带的粉尘
		SO <sub>2</sub>	燃料中的硫
		NO	燃料中的氮元素、空气中的氮气
	窑炉烟气	颗粒物	燃料不完全燃烧的碳黑、坯体、窑炉内附着的粉尘
		SO <sub>2</sub>	燃料中的硫元素、原料中的硫元素
		NO	燃料中的氮元素、空气中的氮气
		氟化物	原料中的氟化物
		氯化物	原料（痕量）、添加剂（用量少）、自来水（含量低）
	重金属及其化合物	色料、釉料	
	工艺废气	粉尘	原料破碎、粉料输送、干压成形、坯体干燥、施釉、抛光、磨边、磨底
无组织排放	粉尘	原料堆场、煤场、渣场、道路	

### 3.1 颗粒物

陶瓷行业颗粒物的来源有两类：一类是工艺过程中排放的含尘废气，如破碎、配料、粉料输送、干压成形、修坯、施釉等环节排放的含有粉尘的废气；另一类是喷雾干燥塔热风炉和窑炉烟气中含有的颗粒物。

喷雾干燥废气中颗粒物来源主要是燃料（天然气、水煤浆、煤粉等）不完全燃烧产生的碳黑，以及携带的细小粉体颗粒。喷雾干燥塔排放的颗粒物具有浓度高、含湿率高的特点。喷雾干燥塔颗粒物的初始浓度一般在（8000-12000） $\text{mg}/\text{m}^3$  烟气温度在（70-200） $^{\circ}\text{C}$ 之间，含湿量 16%左右，氧含量 15%—18%居多。

窑炉烟尘来源主要有燃料本身携带的粉尘以及不完全燃烧产生的碳黑，陶瓷坯体、炉材及窑炉内表面附着的颗粒物等。建筑陶瓷辊道窑烟气颗粒物浓度一般在 50—200 $\text{mg}/\text{m}^3$ ，卫生陶瓷窑炉烟气颗粒物浓度一般在 15—30 $\text{mg}/\text{m}^3$ ，氧含量 15%—18%居多。

### 3.2 二氧化硫

烟气中的二氧化硫主要来自含硫燃料，其次来自原料中的含硫杂质。气体燃料（如天然气、液化石油气）一般含硫量很低，但是固体燃料和燃料油燃烧会产生  $\text{SO}_2$ 。不同燃料中的硫含量如表所示。

表 3-1-2 不同燃料中的硫含量

燃料类别	硫含量		
煤粉 2	$\leq 0.5\%$ （一级）	0.5%—1%（二级）	
水煤浆	$\leq 0.3\%$ （一级）	$\leq 0.3\%$ （二级）	$\leq 0.55\%$ （三级）
水煤气	(3000-4000) $\text{mg}/\text{m}^3$ (以 $\text{SO}_2$ 计)		
天然气 4	$\leq 20\text{mg}/\text{m}^3$ （一类）	$\leq 100\text{mg}/\text{m}^3$ （二类）	
燃料油	$\leq 1\%$ （低硫）	1%—2%（中硫）	$> 2\%$ （高硫）

陶瓷原料中的硫主要以黄铁矿（ $\text{FeS}_2$ ）、石膏和其他硫酸盐以及有机硫的形式存在。粘土中的硫含量分布如下图所示，硫含量在0.12%以下的占到83%。

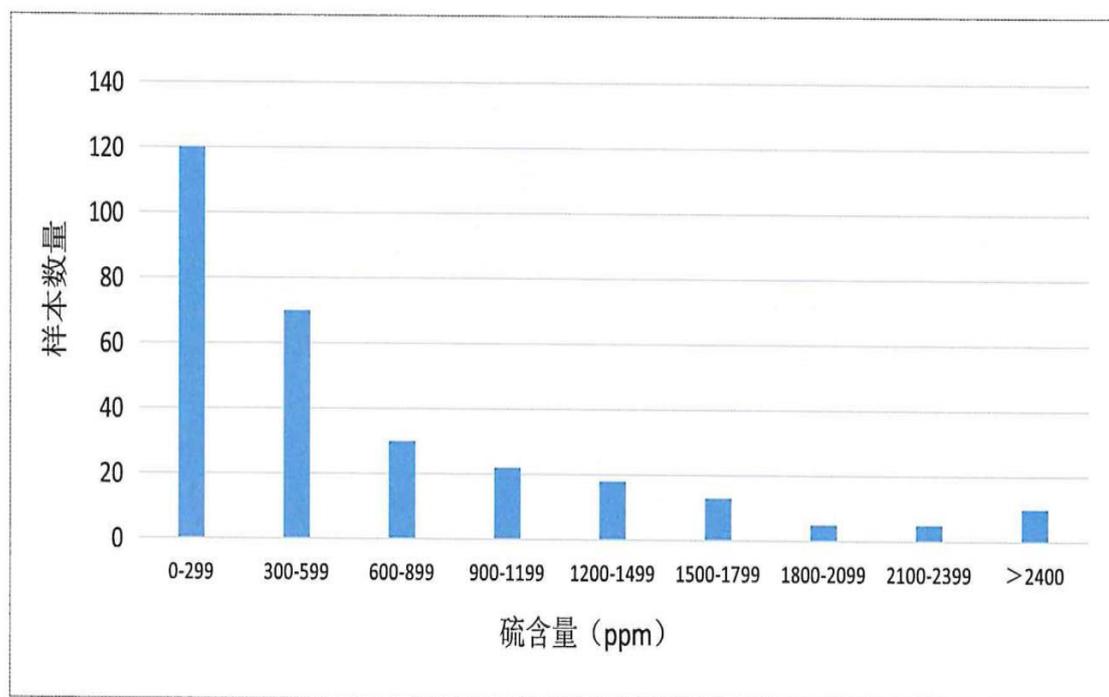


图 3-1-9 粘土中的硫含量 (ppm)

高温下，燃料中的硫随着燃料的燃烧而氧化，并释放到烟气中。原料中的硫一部分形成  $\text{SO}_x$ ，释放到烟气中。当陶瓷原料中含有  $\text{CaCO}_3$  时， $\text{CaCO}_3$  与  $\text{SO}_x$  反应可减少硫的排放，反应产物留在陶瓷坯体中。

以水煤浆为燃料的喷雾干燥塔为例，烟气中的  $\text{SO}_2$  初始浓度为  $250\text{mg}/\text{m}^3$ ；以天然气为燃料的卫生陶瓷窑炉为例，烟气中的  $\text{SO}_2$ ，初始浓度计算结果为  $23\text{mg}/\text{m}^3$ 。

喷雾塔烟气中  $\text{SO}_2$  初始浓度在  $70\text{—}500\text{mg}/\text{m}^3$  范围内，一般小于  $200\text{mg}/\text{m}^3$ 。建筑陶瓷窑炉中  $\text{SO}_2$  的初始浓度在  $50\text{—}500\text{mg}/\text{m}^3$  范围内，而卫生陶瓷窑炉中  $\text{SO}_2$  的初始浓度一般在  $10\text{—}30\text{mg}/\text{m}^3$  范围内。

燃料种类和烟气中硫化物处理前的关系如下图所示。采用天然气，烟气中处理前硫化物的浓度更低。

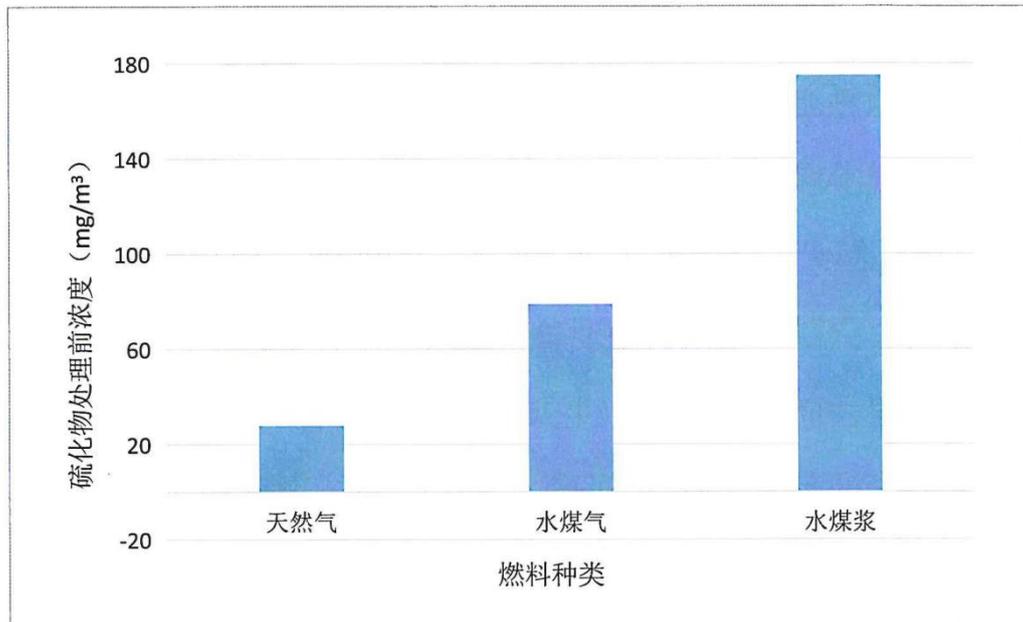


图 3-1-10 燃料种类与硫化物处理前浓度的关系

### 3.3 氮氧化物

陶瓷烟气中的氮氧化物有两个来源：一是燃料，如煤、煤制气中含有；二是在燃烧过程中，空气中的氮气在高温中反应生成(热力型)。对于热力型的氮氧化物，其生成量与燃烧过程中的最高温度及氮、氧浓度有关系，温度越高，氮氧化物浓度越大。但燃料（主要是固体或液体燃料）中有含氮化合物或者是有机添加剂中含有氮，在更低的温度下也会生成氮氧化物（燃料型）。

当燃料中氮的含量超过 0.1%时，燃料型氮氧化物的生成量占主要地位。如煤中的氮含量一般为 0.5%—2.5%，生成的燃料型氮氧化物可占生成总量的 60%以上。对于气体燃料，由于其氮含量较低，故其生成的氮氧化物主要是热力型和快速型氮氧化物。

陶瓷烧成窑中的氮氧化物产生水平在 30—250mg/m<sup>3</sup> 范围，喷雾

干燥塔在 90—250mg/m<sup>3</sup> 范围, SNCR 脱硝技术预期能降解 50%—70% 的喷雾塔排放的氮氧化物。

### 3.4 氟化物 (HF)

几乎所有的天然原料都含有少量的氟化物, 污染物中的氟化物来源于原料中的氟化矿物的直接分解。粘土中氟含量如图 3-3 所示。在曾经选取的 300 多个样品中, 82% 的样品氟含量在 0.1% 以下。

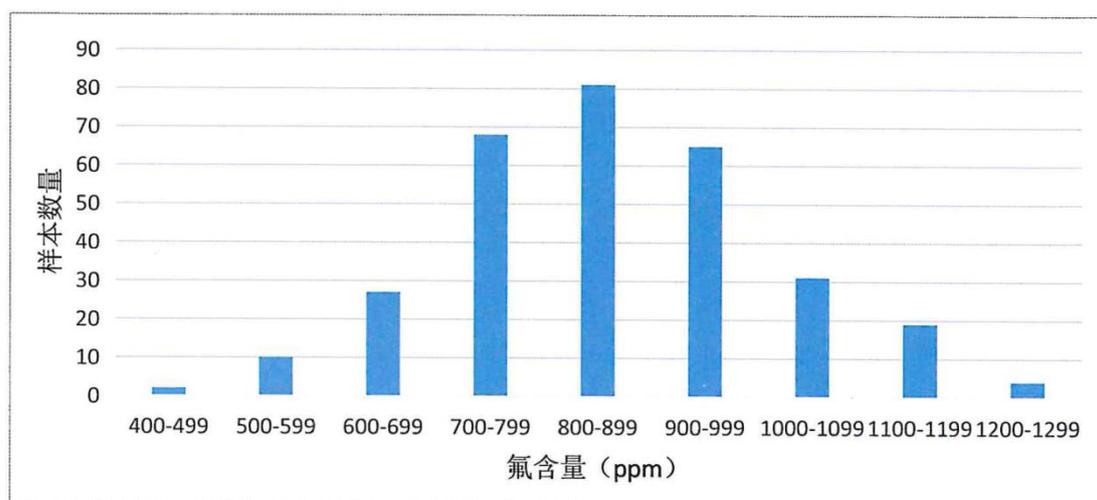


图 3-1-11 粘土中氟含量分布

## 4. 污染防治技术水平

陶瓷生产大气污染治理已经历了黑烟治理和主要大气污染物治理两个阶段。其中, 20 世纪 90 年代, 主要通过改进控制燃烧技术, 解决烟囱排“黑烟”问题。随着《陶瓷工业污染物排放标准》(GB 25464-2010) 的实施, 尤其是近 10 年来国家加大环境治理的力度和行业环境保护意识的提高, 促进了大气污染治理技术进步。针对治理颗粒物、二氧化硫和氮氧化物排放的专项技术和组合技术不断成熟, 其中, 标志性的是石灰石-石膏湿法脱硫技术、喷雾干燥塔热风炉 SNCR 脱硝技术在行业中的应用取得成功。生态环境部《陶瓷工业污

染防治可行技术指南》（HJ 2304- 2018）筛选并形成 11 条包括预防技术、窑炉烟气治理技术和喷淋干燥塔烟气治理技术及技术组合。通过严格管理，采用陶瓷工业大气防治可行技术可以实现稳定达标排放要求。

近年来，建筑卫生陶瓷企业加大技术改造，提升产业自动化、智能化、集约化水平，推进节能减排与发展循环经济，促进陶瓷产业结构优化和转型升级，使陶瓷产业持续健康发展。行业内一批龙头骨干企业积极响应国家标准，投入大量资金进行设备和技术改造，根据各地政策和企业的实际情况，大胆创新，研究、试验了很多新型环保技术。目前在行业的环保治理中，除尘主要采用布袋除尘、湿式电收尘、旋风除尘、沉降室水幕喷淋除尘等；脱硫主要采用石灰石 - 石膏法、钠碱法等；脱硝主要是配套 SNCR 脱硝装置等。

#### 4.1 颗粒物治理技术

对于工艺废气的治理，企业根据粉尘性质、设备布局等对生产过程中各工艺设备的产尘点，设置除尘系统进行收集后由排气筒排放，捕集回收的粉尘一般均回用。除尘设备采用袋式除尘器居多，少部分采用湿法除尘器。经袋式除尘器净化后的废气颗粒物浓度可以降低到  $30\text{mg}/\text{m}^3$  以下。

对于烟气中颗粒物处理，可采用布袋除尘，以及在湿法脱硫后增加湿电除尘。布袋除尘技术净化效率高，颗粒物能稳定控制在  $20\text{mg}/\text{m}^3$  左右，干烟气采用高效覆膜式滤袋可以控制在  $10\text{mg}/\text{m}^3$  左右。目前夹江陶瓷产区内已有陶瓷企业开始湿电除尘试点，初步效果显示颗粒物可稳定控制在  $15\text{mg}/\text{m}^3$  左右或更低。

喷雾干燥塔可选用旋风除尘器作为一级除尘处理措施，采用对温度、湿度有一定承受能力的脉冲式袋式除尘作为二级除尘处理措施，脉冲袋式除尘能达到 99% 以上的除尘效率，回收后的干粉尘直接回用于生产。

窑炉排放的烟气由于其中粉尘含量低，大部分企业未设置专门的除尘设施，少数企业在脱硫系统前设置袋式除尘器；也有企业为确保颗粒物能稳定达标，在脱硫系统后设置水喷淋塔或湿式静电除尘器。多数企业通过湿法脱硫协同脱除颗粒物。

表 3-1-3 建筑卫生陶瓷行业颗粒物治理技术应用情况

序号	颗粒物治理技术	行业应用情况
1	袋式除尘	应用范围广，除尘效率一般高于 99.9%；颗粒物排放浓度能控制在 30mg/m <sup>3</sup> 以下
2	湿式电除尘	行业内有部分企业在湿法脱硫后安装。除尘效率一般高于 60%，粉尘排放浓度可控制在 10mg/m <sup>3</sup> 以下
3	重力除尘	在行业应用较少，适用于初级除尘。除尘效率为 40% ~ 70%
4	旋风除尘	适用于初级除尘。除尘效率为 60% ~ 70%
5	喷淋除尘	一般在湿法脱硫系统后加装喷淋降尘装置
6	水膜除尘	卫生陶瓷、日用及陈设艺术陶瓷企业喷釉工序除尘

## 4.2 SO<sub>2</sub> 防治技术

SO<sub>2</sub> 防治技术包括前端脱硫处理（燃料脱硫、原料脱硫）和末端治理技术。

前端脱硫处理是通过减少原料或燃料中硫成分的含量来降低陶瓷烧成过程中 SO<sub>2</sub> 的生成量。采取原料清洁化和优化原料配方等方式，使用低硫的原料和添加剂，降低原料中的硫含量。喷雾干燥塔煤基燃料热风炉采用钙基固硫剂伴烧进行烟气预脱硫，钙硫比(摩尔比)一般约为 1:1，采用低硫煤技术和高温固硫技术，降低喷雾干燥塔烟

气 SO<sub>2</sub> 初始排放浓度。

末端脱硫治理是将脱硫能力移到系统末端，对产生的 SO<sub>2</sub> 进行净化处理。陶瓷行业目前应用的钠碱法、石灰石 - 石膏法的脱硫效率一般高于 90%，SO<sub>2</sub> 排放浓度大多能控制在 50mg/m<sup>3</sup> 以下。采用规范化设计的湿法脱硫设备，脱硫效率高于 95%，SO<sub>2</sub> 排放浓度可控制在 30mg/m<sup>3</sup> 以下。

表 3-1-4 湿法与半干法技术对比

序号	分类	工艺	经济特性	主要缺点
1	湿法	石灰/石灰石 - 石膏法	运行费用低；副产品为含泥石膏。	一次投资成本高。
2		钠/钙双碱法	初始建设投资低，运行费用高。	脱硫塔及管道系统容易被结晶物堵塞，影响稳定运行；钠盐溶于雾滴中易导致烟尘超标排放。
3		钠碱法	初始建设投资省，运行费用高。	钠盐溶于雾滴中易导致颗粒物超标排放。
4	半干法	烟气循环流化床法	无废水产生，解决湿法脱硫带来的烟囱“白烟”问题。	一次投资成本偏高，钙硫比较石灰石 - 石膏法偏高。

2008 年之前，企业采用钠碱法处理硫化物，由于钠和硫结合溶于水，时间久了水会饱和，需要更换新水且钠碱消耗量大、运行费用高，之后出现了双碱法。该技术与钠碱法相比，可令水饱和的速度变慢，延长设备运行时间，2012 年左右在业内普及使用。但双碱法没有从根本上解决水逐渐饱和、钠碱消耗量大、运行费用高的问题。2014 年从电力行业引入石灰 - 石膏法脱硫设备，该技术中使用的脱硫添加剂采用石灰石或石灰，在运行过程中定时将沉淀物取出，而上层的水仍然可以循环使用，故此系统中的水可实现全密闭循环使用，无需外

排。这种方法可实现长期稳定运行，运维成本不高，满足企业生产需求。

### 4.3 NO<sub>x</sub> 治理技术

目前国内陶瓷行业喷雾干燥塔烟气脱硝主要采用 SNCR，也有企业采用湿法多污染物协同控制技术。喷雾干燥塔在热风炉烟 800-1100℃ 的合适区段，采取 SNCR 技术，脱硝效率可超过 50%，NO<sub>x</sub> 排放浓度可控制在 100 m/m<sup>3</sup> 以下。

对于现代建筑卫生陶瓷工业来说，NO<sub>x</sub> 几乎都属于热力型。热力型 NO<sub>x</sub> 主要在燃料燃烧过程中生成，温度低于 1300℃ 时生成速度较慢。之后随温度提高呈指数规律增加。根据配方的不同，建筑卫生陶瓷的完全瓷化温度在 1160-1260℃ 间。所以控制坯体烧成温度是业内减低氮氧化物的主要手段。

### 4.4 其他污染物治理

陶瓷企业一般未对窑炉尾气单独设置去除氟化物、氯化物和重金属及其化合物的设施，氟化物和氯化物一般在窑炉尾气后的湿法脱硫过程中一并去除；重金属及其化合物浓度较小，绝大数附着在废气中颗粒物上，在除尘时大部分可去除。

作为建筑陶瓷最先进的生产国，意大利采用天然气作为燃料，窑炉的污染物主要控制因子是颗粒物、氟化物和以铅为代表的重金属。意大利采用覆膜式滤袋，颗粒物排放要求为 5mg/m<sup>3</sup>，重金属的去除也得到保证，同时采用干法脱氟工艺，有效去除氟化物。

干法除氟工艺与布袋除尘器共用，将脱氟剂以干粉状态喷入除尘器内，与废气中的气态氟化物直接反应，达到除氟效果。

## 5. 典型应用案例

### 案例一：石灰石膏法脱硫治理

项目名称：某公司石灰石膏法脱硫治理项目

项目规模：（处理量）40 万 m<sup>3</sup>/h

投资成本：176 万元



图 3-1-12 湿法脱硫工艺流程图与案例照片

表 3-1-5 湿法脱硫工艺治理效果

污染物指标	进口浓度	出口浓度	处理效率	执行标准
SO <sub>2</sub>	380mg/m <sup>3</sup>	5 mg/m <sup>3</sup>	99%	GB 25464-2010

### 案例二：单碱法脱硫塔

项目名称：某公司单碱法脱硫塔烟气治理项目

项目规模：560000m<sup>3</sup>/h

投资成本：172 万元

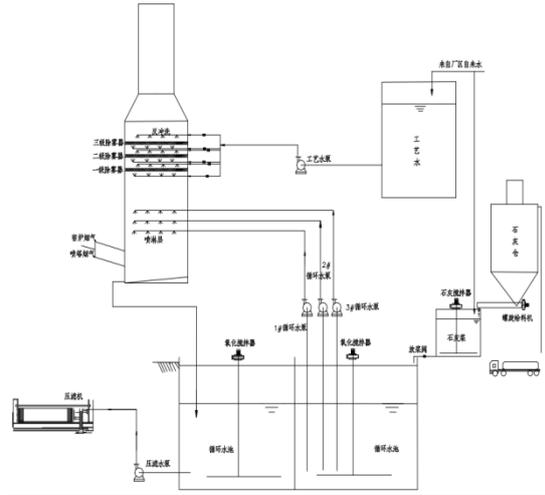


图 3-1-13 单碱法脱硫塔工艺流程图与案例照片

表 3-1-6 单碱法脱硫塔工艺治理效果

污染物指标	进口浓度	出口浓度	处理效率	执行标准
二氧化硫	400mg/Nm <sup>3</sup>	≤30mg/Nm <sup>3</sup>	95%	GB25464-2010
颗粒物	100mg/Nm <sup>3</sup>	≤20mg/Nm <sup>3</sup>	95%	GB25464-2010

### 案例三：SNCR 烟气治理项目设施

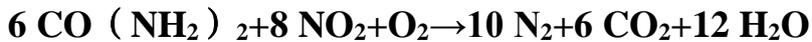
项目名称：某建材有限公司治理项目

项目规模：45 万 m<sup>3</sup>/小时

投资成本：16.6 万元



采用尿素作为还原剂的主要化学反应为：



干燥塔烟气（800-900℃） $\longrightarrow$  尿素溶液  $\longrightarrow$  处理后烟气

图 3-1-14 SNCR 烟气治理工艺流程图与案例照片

表 3-1-7 SNCR 烟气治理工艺治理效果

污染物指标	进口浓度	出口浓度	处理效率	执行标准
氮氧化物	120mg/m <sup>3</sup>	60mg/m <sup>3</sup>	50%	100mg/m <sup>3</sup>

## 6. 结论与展望

我国建筑卫生陶瓷企业在不断加大技术改造，提升产业自动化、智能化、集约化水平，推进节能减排与发展循环经济，促进陶瓷产业结构优化和转型升级，使陶瓷产业持续健康发展。否则无法适应现代企业的管理要求。行业内一批又一批在行业领先的企业，积极响应国家要求，投入大量专项资金进行设备和技术改造，引入国际先进设备、工艺的同时，还根据国内的实际情况，大胆创新，研究、试验了很多新型环保技术，达到环境治理的先进水平。我们看到，随着陶瓷行业大气污染物排放标准的逐步加严，“煤改气”政策、污染治理先进技术的应用、新地标的执行等，各地政府、环保部门在强力推动，在建陶卫生陶瓷行业的能源结构发生重大变化的时候，天然气的占比也将逐步增大。在此过程中，天然气的供应量、价格以及能源安全问题需要特别关注，将来随着科学技术的提高，陶瓷电窑炉、氢能源窑炉将会应运而生，这将是清洁能源时代真正地到来。在行业治理水平不断提升的今天，行业企业应当以低碳环保绿色生产为任，彻底改变陶瓷行

业的面貌，加强清洁生产管理，以事实说话，帮助主导部门确定准确、科学、适用的要求及做法，确保行业能够使用真正环保有效的环保工艺，引导行业环保设备技术向低水电消耗量、低药剂消耗量、材料制备低碳环保并可循环利用的方向发展。

## (二) 砖瓦行业

### 1. 现状介绍

砖瓦是墙体屋面材料的重要组成部分，是建筑物的主体材料，几乎占建筑物主体固体材料用料 70% 以上。被广泛应用于城乡建设中的住宅和公共建筑的承重、非承重墙体围护结构以及屋面、道路、广场路面等，与人们的生活息息相关，不仅是建材工业的重要组成部分，更是工程建设不可或缺的材料。其产量和产值在经济中占有举足轻重的地位。

根据第二次全国污染源普查及四川省 2019 年排放源清单更新统计分析填报的砖瓦企业相关信息。2019 年全省 21 个市（州）砖瓦行业企业共 1700 家，涉及工业炉窑 1962 台，其中成都市、泸州市、南充市、绵阳市、达州市砖瓦企业数量相对较多。

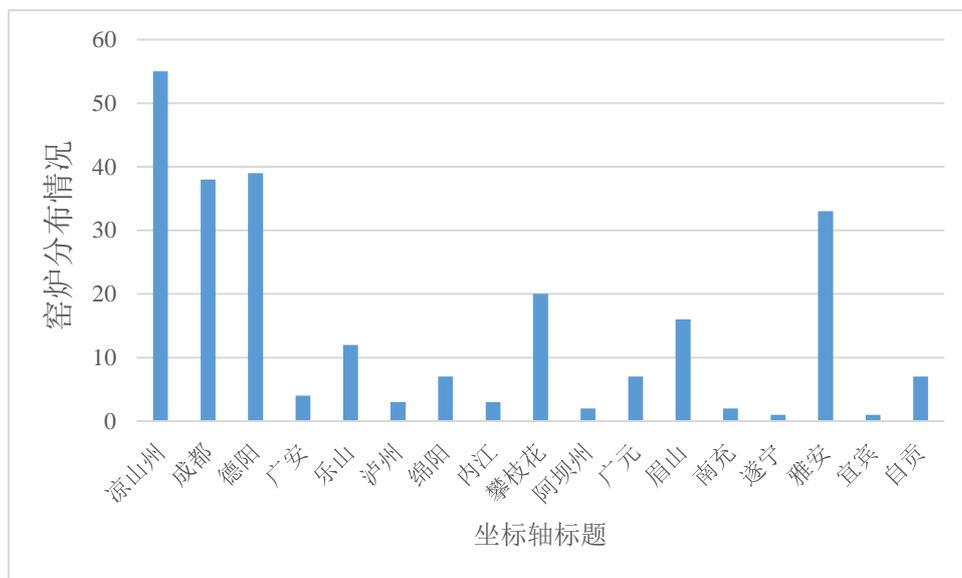


图 3-2-1 四川省砖瓦行业工业炉窑分布情况

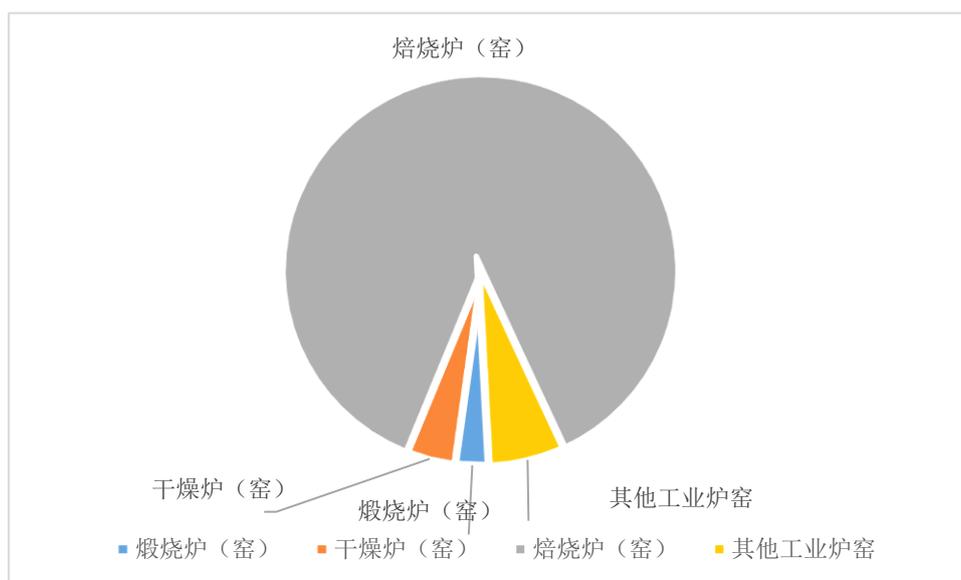


图 3-2-2 四川省砖瓦行业工业炉窑类型分布情况

从砖瓦行业涉及的炉窑类型来看，砖瓦生产的主要设备焙烧窑占比 87%，其他工业炉窑占比 6%，其他干燥窑和煅烧窑占比 7%。按照砖瓦企业产能统计结果，其中年产能 1000 万匹以下的小规模企业数量占全省砖瓦企业总数的 50%，但总产能规模仅占砖瓦企业总产能的 13%；年产能 3000 万匹以上的大规模企业数量仅占比 12%，但产能规模占比接近 50%。可见，全省的小规模砖瓦企业仍是主要类型，按照砖瓦行业《产业结构调整指导目录（2011 年）（修正）》中产业结构调整要求，这些小型企业大多属于限制或淘汰类，未来这类企业占比将进一步减少。

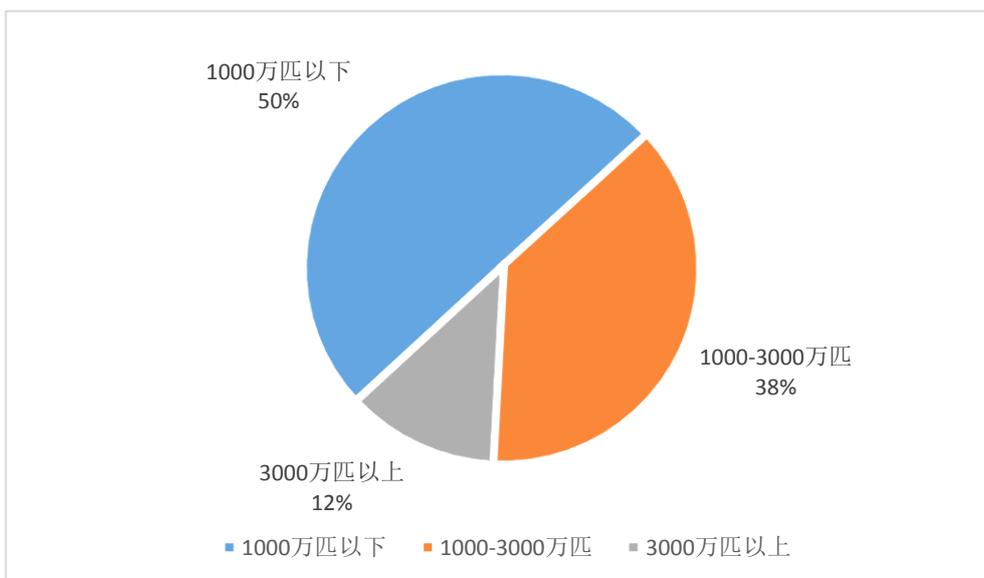


图 3-2-3 四川省砖瓦企业按不同产能数量分布情况

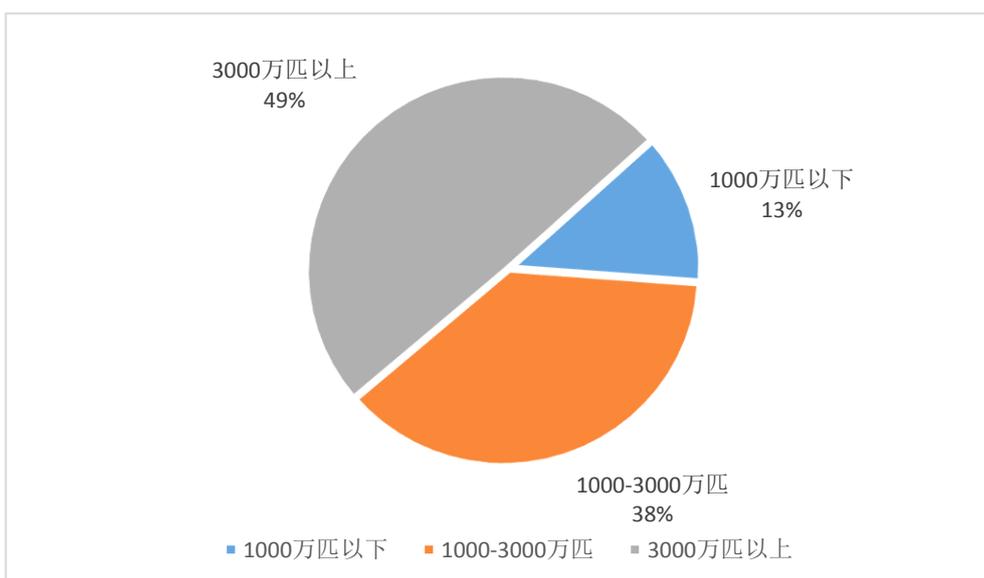


图 3-2-4 四川省砖瓦企业按不同产能总产能规模分布情况

## 2. 污染防治治理情况

图 3-2-5 所示为四川省砖瓦行业炉窑污染治理设施安装情况统计。从中可以看出，砖瓦行业主要炉窑类型脱硫脱硝除尘设施安装比例情况类似，脱硫设施安装率为 80%—90% 之间，除尘设施安装率接近 80%，其中煅烧窑除尘设施安装率较低，仅为 50%；脱硝设施总体安装率很低，为 10% 左右。

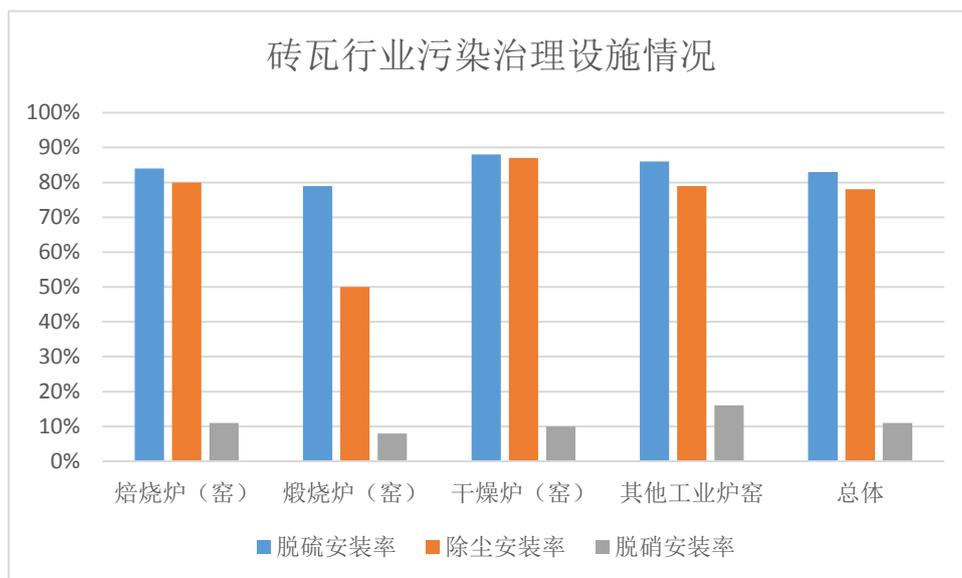


图 3-2-5 四川省砖瓦行业污染治理设施安装情况

四川省砖瓦行业炉窑脱硫设施主要以双碱法为主，占脱硫设施安装量的 86%。四川省砖瓦行业工业炉窑规模多为中小型，双碱法脱硫技术设备相对简单，运行管理难度不大，且石灰/石膏或烧碱等脱硫剂购买方便，配制简单，对于大多数烟气二氧化硫含量高的炉窑类型具有显著优势。石灰石石膏法及其他脱硫技术占比分别为 8%和 6%。

除尘工艺选择方面，砖瓦行业以重力除尘、水膜除尘等低效除尘技术为主，该类除尘技术约占 40%；湿法除尘是砖瓦行业第二大除尘技术，占比为 33%；布袋除尘在砖瓦行业除尘工艺选择方面仅占比 26%。砖瓦企业在选择除尘技术上一方面受限于工艺技术投资及燃烧烟气含湿量大等问题，多数情况是以湿法脱硫塔兼顾除尘的方式，除尘效果难以得到保证。

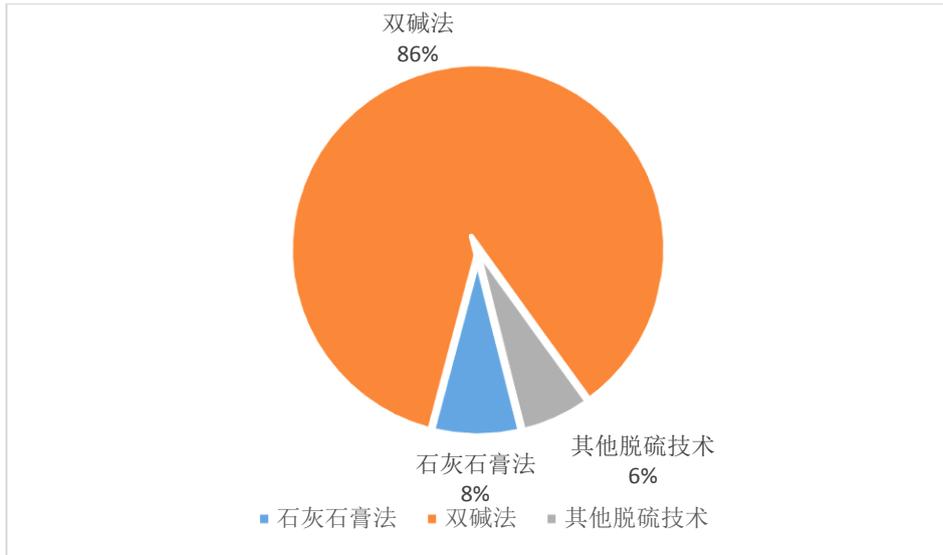


图 3-2-6 四川省砖瓦炉窑脱硫技术分布

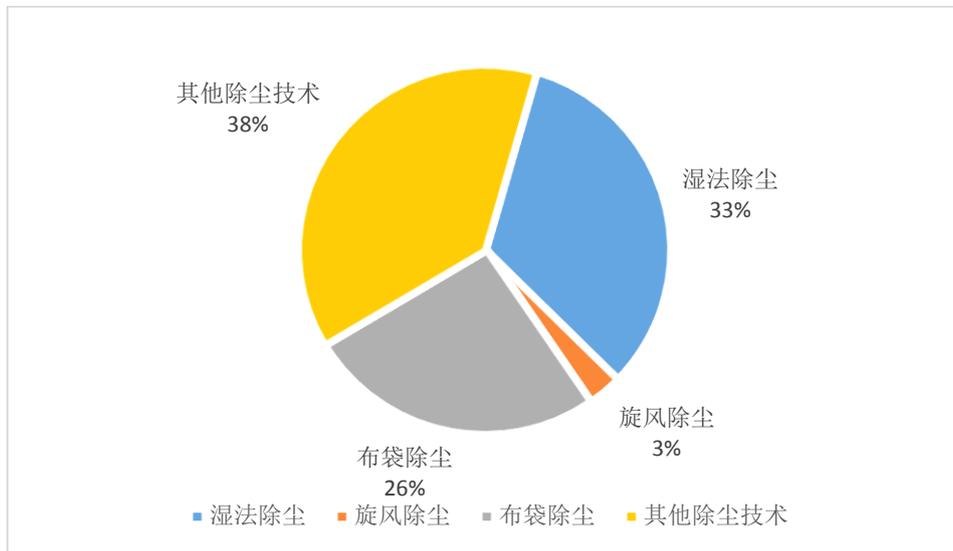


图 3-2-7 四川省砖瓦炉窑除尘技术分布

### 3.污染防治技术水平

对砖瓦行业来说，源头控制可以从根本上改善污染物的排放，可以包括窑型的选择、原燃料配比以及做好砖瓦窑的保温等措施。在生产过程中，可以采取及时清扫窑车、燃烧条件的精准控制、降低砖坯挤出含水率等，减少生产过程中污染物的产生。

末端治理作为砖瓦生产排放前的最终解决方案，颗粒物（粉尘）、二氧化硫、氮氧化物等是其典型的大气污染物。当前主流的控制技术详细参数及技术特点如表所示。

表 3-2-1 常用污染防治技术

主要治理污染物名称/指标	技术名称	适用范围	技术特点	处理效率	单位投资及治理成本
颗粒物	电除尘技术	生产过程中原料制备、成型、包装机对应排放口以及窑烟囱等含颗粒物烟气	①处理效率高，如合理配置，排放粉尘浓度可小于 50mg/m <sup>3</sup> 。②烟气处理量大，烟气流动阻力小。可以通过增加电除尘器工作单元和体积的方法来增加烟气处理量。③对烟气中烟尘颗粒范围适应性较好，能收集 100mm 以下的不同粒径的粉尘，特别是能除掉粒径为 0.01 ~ 5mm 的超细粉尘。④对烟尘浓度的适应性较好，通常可处理含尘浓度为 7 ~ 30g/m <sup>3</sup> 的烟气。⑤运行费用相对较低，除尘器的磨损轻，维修工作量少。	99.9% 以上	较高
	袋式除尘技术	窑烟囱等含颗粒物烟气	①处理效率高，能除掉微细的尘粒。②可捕捉的粉尘粒径范围大，适宜处理有回收价值的细小颗粒物，结构简单，运行稳定。③使用温度低，且操作时气体的温度需要高于露点温度。④对烟尘浓度的适应性较好，通常可处理含尘浓度为 7 ~ 30g/m <sup>3</sup> 的烟气。⑤布袋容易破损，清灰会造成粉尘二次飞扬，运行费用相对较高。	99.9% 以上	一般
二氧化硫	石灰石 - 石膏法	窑烟囱等	①工艺技术成熟，操作成熟，管理成型。②脱硫效率高，对煤种适用性③吸收剂：石灰石或石灰，脱硫剂来源广，价格低廉。④脱硫剂钙硫比 Ca/S: ≤1.03，为脱硫剂最大利用率、最小消耗率的方法。⑤脱硫产物为石膏（二水硫酸钙），可作建材使用，也易于处理综合利用。	85% ~ 92%	较低
	半干法脱硫		①投资少、运行费用较低；②设备腐蚀性小，耗水量少；③占地面积少；④自动化要求比较高，工艺可靠	65% ~ 80%	较低
氮氧化物	选择性催化还原法 (SCR) 脱硝技术	窑烟囱等	①反应温度低，可根据烟气温度选择催化剂，确保催化剂活性最大。②烟气经除尘器后，粉尘浓度降低，可延长催化剂的寿命。③氨泄漏量相对高温高尘要少。④反应产物是氮气和水，不会产生 SO <sub>3</sub> ，不会出现二次污染。	80% ~ 95%	较高
	选择性非催化还原法 (SNCR) 脱硝技术		①不需要加入催化剂，无需另设反应器；②脱硝效率较低；③反应温度高，且对反应温度要求严格；④反应过程氨泄漏风险较大。	50% ~ 60%	较低

#### 4. 典型应用案例

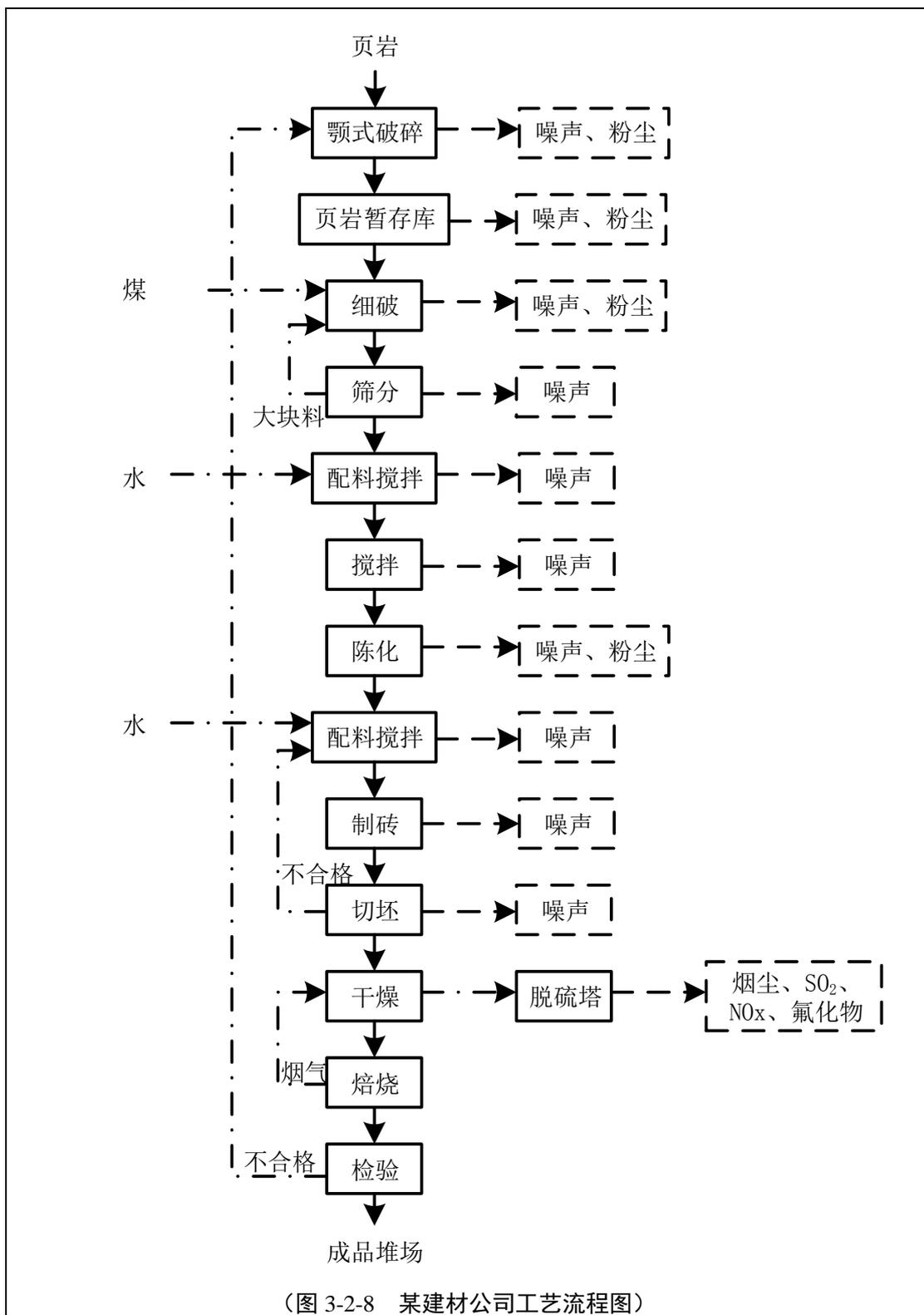
##### 案例一：双碱法烟气治理工艺技术

项目名称：某建材公司静电除尘+双碱法脱硫烟气治理项目

项目规模: 130000 m<sup>3</sup>/h

投资成本: 约 400 万元 (依据类似项目估计)

技术工艺路线:



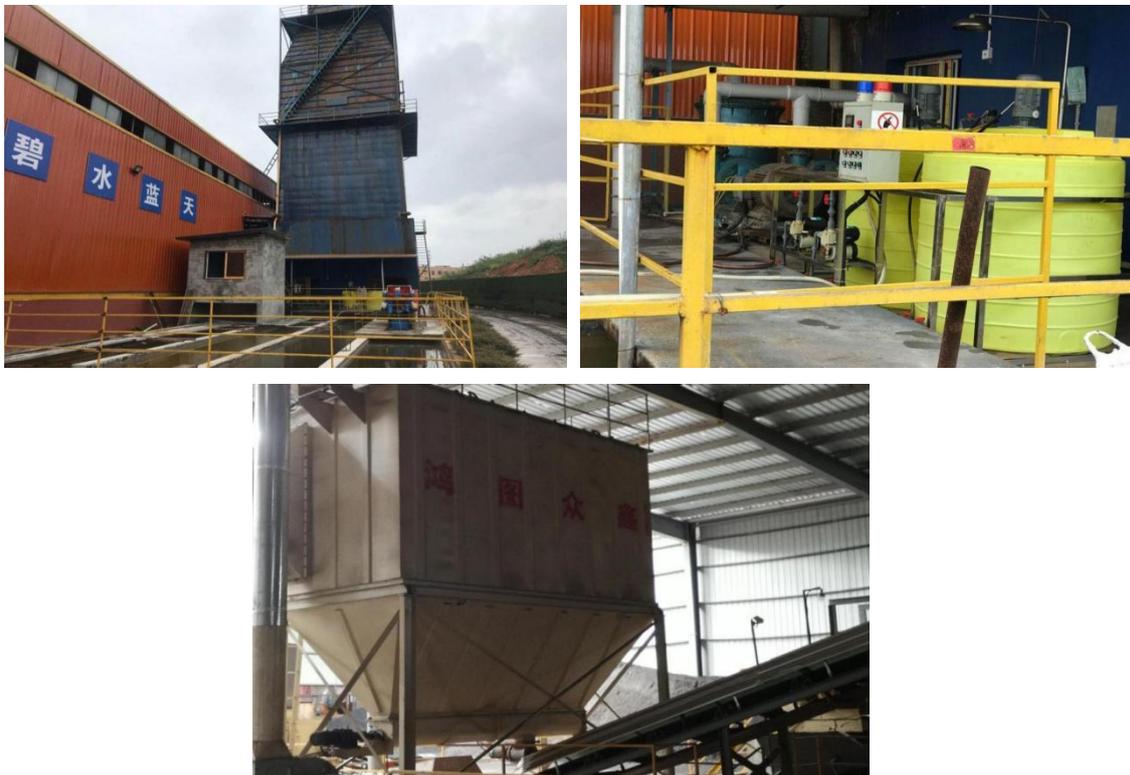
## 治理效果:

表 3-2-2 窑炉排放口工艺治理效果

污染物指标	进口浓度	出口浓度	处理效率	执行标准
二氧化硫	400 mg/m <sup>3</sup>	57 mg/m <sup>3</sup>	85.75%	300 mg/m <sup>3</sup>
氮氧化物	200 mg/m <sup>3</sup>	190 mg/m <sup>3</sup>	5%	200 mg/m <sup>3</sup>
颗粒物	150 mg/m <sup>3</sup>	24.3 mg/m <sup>3</sup>	83.8%	30 mg/m <sup>3</sup>

进口数据来源于：近似体量的砖瓦企业污染物核算。

## 案例照片:



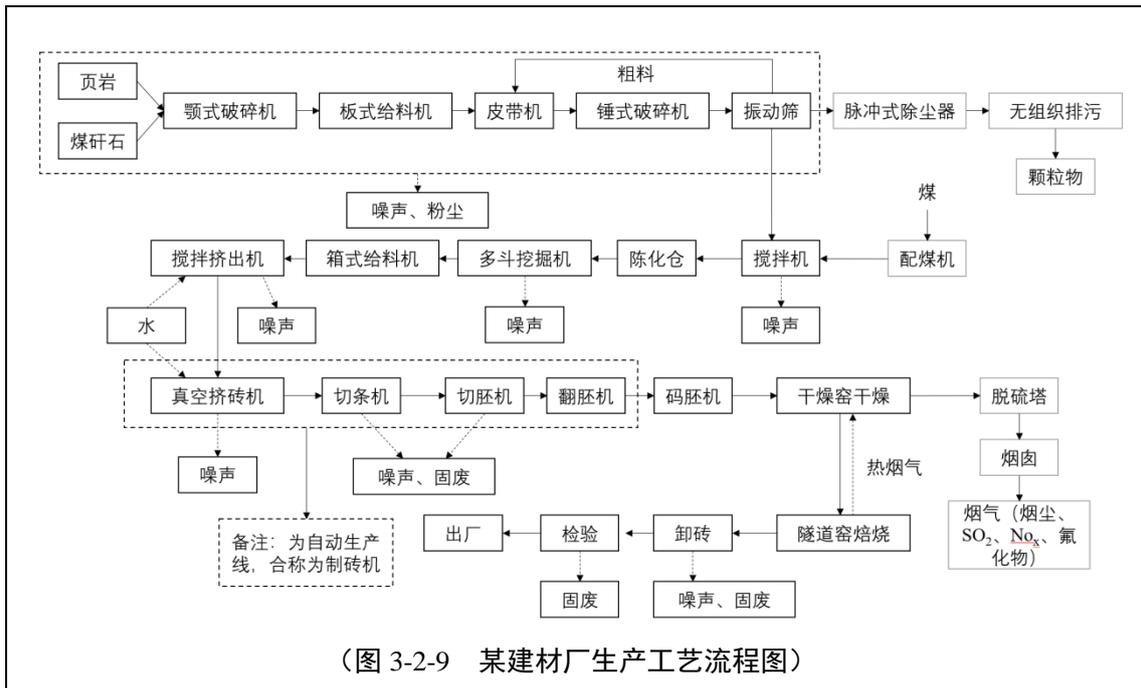
## 案例二：双碱法烟气治理工艺技术

项目名称：某建材厂双碱法脱硫烟气治理项目

项目规模：94000 m<sup>3</sup>/h

投资成本：约 420 万元

### 技术工艺路线:



### 治理效果:

表 3-2-3 窑炉排放口工艺治理效果

污染物指标	进口浓度	出口浓度	处理效率	执行标准
二氧化硫	400 mg/m <sup>3</sup>	13 mg/m <sup>3</sup>	96.75%	300 mg/m <sup>3</sup>
氮氧化物	100 mg/m <sup>3</sup>	36 mg/m <sup>3</sup>	64%	200 mg/m <sup>3</sup>
颗粒物	150 mg/m <sup>3</sup>	17.8 mg/m <sup>3</sup>	88.13%	30 mg/m <sup>3</sup>

进口数据来源于：近似体量的砖瓦企业污染物核算。

### 案例照片:



## 5. 结论与展望

四川省存有砖瓦企业数量多，分布相对集中的特点。由此在砖瓦行业生产过程中产生的含污染物的废气排放对各地大气环境带来了较明显的环境影响。当前，由于我国烟气脱硫除尘治理工作起步较晚，相对缺乏治理经验，相应的污染治理技术的发展较缓。另一方面，砖瓦企业在环保方面的投入也较少，与建材其他行业如水泥、陶瓷相比，不论是在生产工艺设备还是污染治理设施水平上都存在明显的落后。近年来，在政府和企业各方的努力下，除个别企业外，绝大多数企业在砖瓦窑炉建设了脱硫除尘装置，但实际运行中，依然存在治理效果欠佳，难以长时间稳定运行的诸多问题。而在烟气脱硝方面，由于排放标准和脱硝技术的限制等因素，砖瓦窑炉的脱硝安装率非常低，整体烟气中的氮氧化物并没有得到有效的处置。

近年来，随着国内烟气处置技术的迅速发展，适配于砖瓦行业烟气特点的除尘、脱硫技术较老式技术路线有了明显的改善和发展，在效用性、稳定性、经济性等多方面有了显著的提高。以 SCR 等为代表的烟气脱硝技术也不断优化逐渐应用于各大砖瓦企业的烟气脱硝。下一步，随着国家地区环境管理制度和排放标准的不断完善、“双碳”目标的具体落地，将会对砖瓦行业典型污染物控制提出更高的要求，也将推动各砖瓦企业在污染控制工艺路线的提标升级，淘汰落后企业，逐步形成以“环保、低碳”为背景的砖瓦行业绿色、健康发展路径。

### (三) 玻璃行业

#### 1. 现状介绍

2021 年，全省玻璃企业分布情况如表所示。全省有炉窑的玻璃企业共 120 家，其中，平板玻璃制造企业 10 家，主要分布在成都市和泸州市；日用玻璃企业共 73 家，主要分布在内江市、成都市、泸州市和德阳市；玻璃纤维企业共 11 家，主要在内江市、成都市和泸州市；其他玻璃制品企业共 26 家，主要分布在成都市。

表 3-3-1 全省玻璃企业分布情况

市州	平板玻璃	日用玻璃	玻璃纤维	其他玻璃制品	小计
阿坝州	—	—	—	1	1
成都市	4	15	2	15	36
达州市	—	1	1	—	2
德阳市	1	8	1	2	12
广安市	—	2	—	—	2
广元市	—	2	—	—	2
乐山市	—	—	—	2	2
泸州市	3	14	2	—	19
眉山市	—	—	—	1	1
绵阳市	1	2	—	2	5
南充市	—	3	—	1	4
内江市	—	20	4	—	24
遂宁市	—	2	—	1	3
雅安市	—	1	—	—	1
宜宾市	1	2	—	—	3
资阳市	—	1	—	—	1
自贡市	—	—	1	1	2
总计	10	73	11	26	120

总体上看，全省玻璃企业主要集中在成都市、内江市和泸州市。其中，成都市共 36 家占比 30%，其次是内江市，共 24 家占比 20%，泸州市共 19 家占比 16%，排名第三。从地区来看，成都平原地区共 61 家占比 51%，全省第一；其次是川南地区，共有 48 家占比 40%；川东北地区 and 川西地区玻璃企业相对较少，总占比不足 10%。

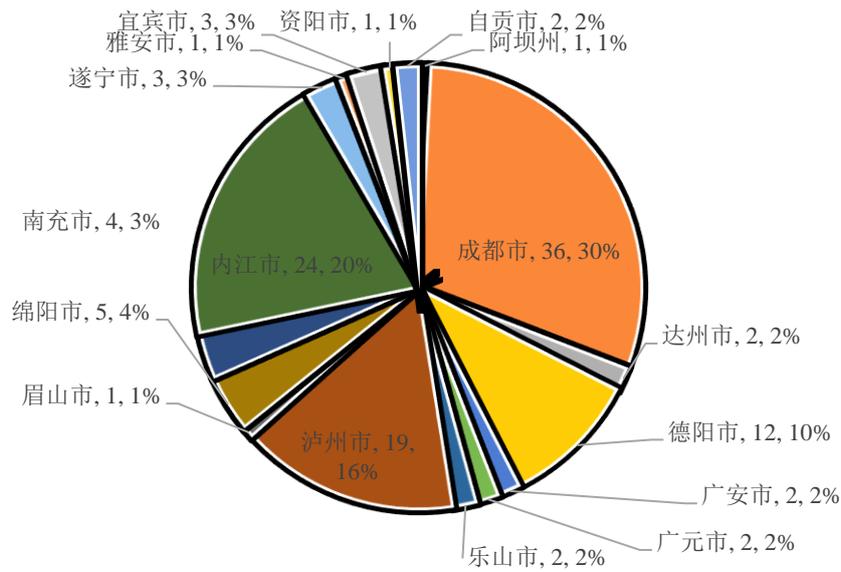


图 3-3-1 全省玻璃企业分布情况（城市，数量，占比）

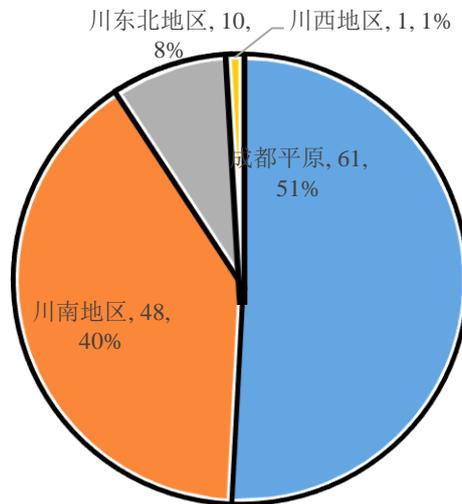


图 3-3-2 全省玻璃企业地区分布情况（地区，数量，占比）

## 2. 污染物排放情况

2021 年全省玻璃行业共排放二氧化硫 10504 吨、氮氧化物 9804 吨、PM<sub>2.5</sub> 10353 吨、PM<sub>10</sub> 10539 吨。

从行业来看，各污染物总体以平板玻璃和日用玻璃排放为主。其中，平板玻璃制造企业二氧化硫排放总量为 6560 吨，氮氧化物排放总量为 5916 吨，PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 排放总量分别为 8448 吨和 8529 吨；日用玻璃企业二氧化硫排放总量为 3844 吨，氮氧化物排放总量为

3412 吨，PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 排放总量分别为 1298 吨和 1371 吨；玻璃纤维企业二氧化硫排放 53 吨，氮氧化物排放 126 吨，PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 分别排放 370 吨和 389 吨；其他玻璃制造企业二氧化硫排放 46 吨，氮氧化物共排放 350 吨，PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 分别排放 239 吨和 249 吨。

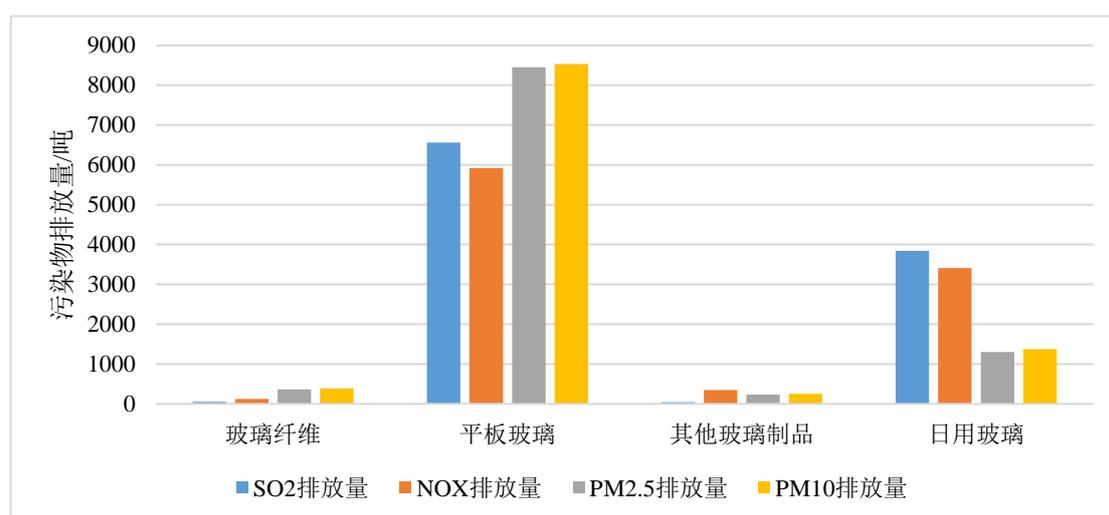


图 3-3-3 全省玻璃企业主要污染物排放情况

从城市来看，成都市排放的二氧化硫、氮氧化物、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 总量最大，为 20310 吨，占全省玻璃行业排放的 49%，其次是泸州市和宜宾市，排放总量分别为 6562 吨和 6041 吨，分别占全省的 16% 和 15%。单项污染物排放方面，成都市玻璃企业各项污染物排放量最高，二氧化硫、氮氧化物、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 排放量分别占全省 41%、50%、54% 和 53%；泸州市排放的二氧化硫和氮氧化物均位于全省第二位，占比分别为 22% 和 13%，排放的 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 位于全省第三位，占比均为 14%；宜宾市排放的 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 均位于全省第二位，占比均为 23%；德阳市排放二氧化硫位于全省第三位，占比为 16%；阿坝州、达州、广元、乐山、眉山、雅安、资阳、自贡等地排放的污染物相对较低。

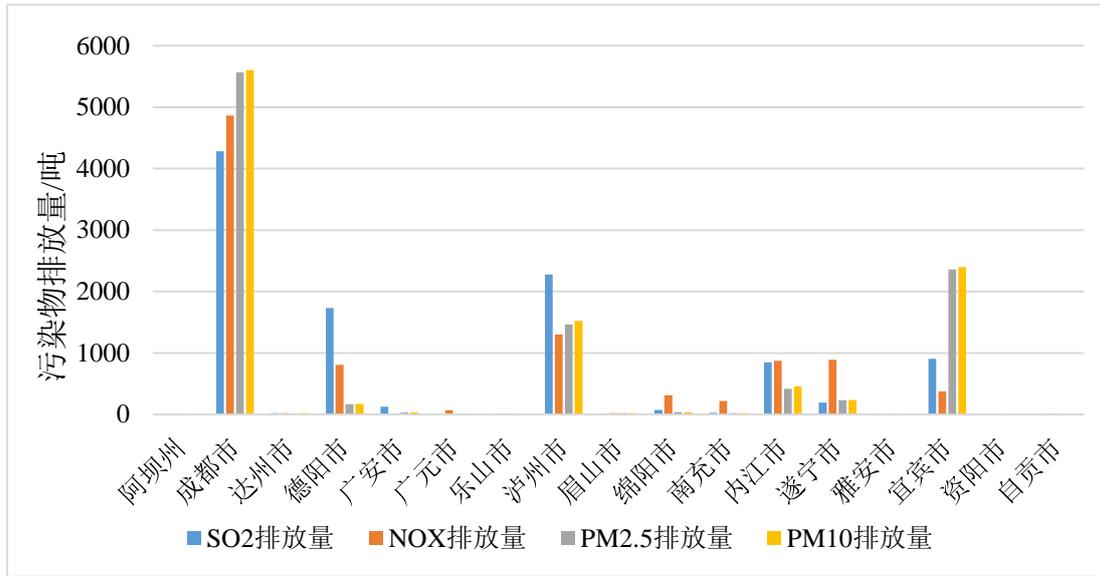


图 3-3-4 各城市玻璃行业主要污染物排放情况

从地区来看，成都平原地区排放的二氧化硫、氮氧化物、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 总量最大，为 25300 吨，占全省玻璃行业排放的 61%，其次是川南地区，排放 15213 吨，占比 37%，其他地区排放相对较少。单项污染物排放方面，仍以成都平原地区排放为主，其二氧化硫、氮氧化物、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 排放量分别占全省 70%、58%、58%和 61%；其次是川南地区，排放占比分别为 26%、41%、42%和 37%。川东北和川西地区污染物排放相对较低。

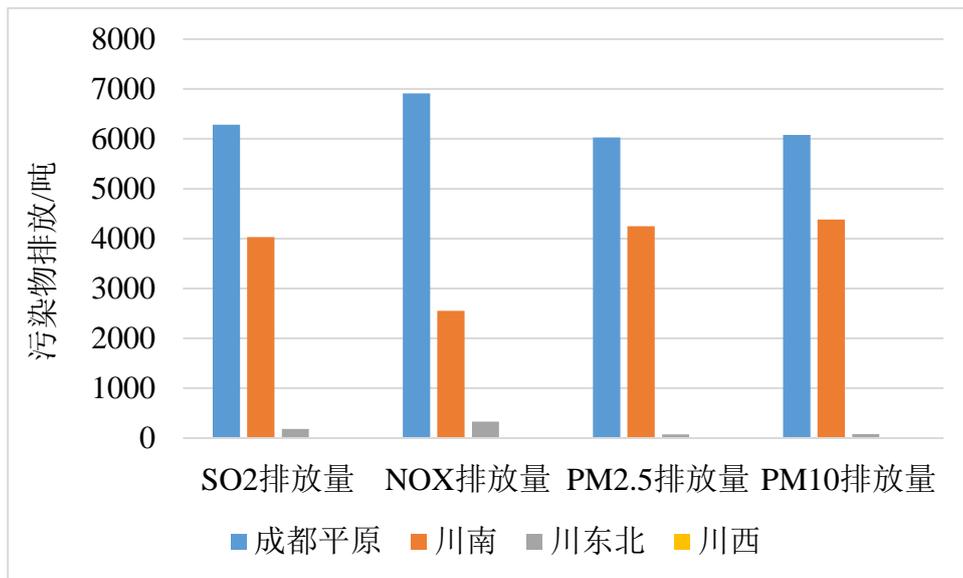


图 3-3-5 各地区玻璃企业主要污染物排放情况

### 3.污染防治技术水平

全省玻璃行业污染治理设施安装情况如表 2 所示。全省共 120 家玻璃企业，未安装任何污染治理设施的占比 22%，主要分布在成都、内江、南充等地，以其他玻璃制品和日用玻璃两个行业为主，占比分别为 54%和 46%。除一家电熔窑企业安装除尘设施外，其余企业脱硫设施安装率为 34%，脱硝设施安装率为 54%，除尘设施安装率为 74%，安装比率总体较低。

全省 10 家平板玻璃重有 1 家为电熔窑外，其余 9 家企业中安装脱硫设施占比 67%，脱硝设施和除尘设施安装率均为 100%，其中采用 SCR 脱硝占比 83%，除尘主要以布袋除尘、电袋复合除尘为主，个别采用静电除尘或其他除尘方式。73 家日用玻璃企业脱硫设施安装率为 34%，主要采用石灰石/石灰 - 石膏法、氨法和双碱法，脱硝设施安装率为 60%，以 SCR 和 SNCR 脱硝为主，除尘设施安装率为 78%，主要采用布袋除尘（52%）。11 家玻璃纤维熔窑企业脱硫设施安装率为 64%，主要采用石灰石/石灰 - 石膏法脱硫，脱硝设施安装率为 73%，主要采用 SNCR 脱硝，除尘设施安装率 91%，主要采用布袋除尘。26 家其他玻璃制品脱硫设施安装率为 8%，脱硝设施安装率 12%，除尘设施安装率 46%，主要采用布袋除尘。

表 3-3-2 全省玻璃企业污染治理设施安装情况

行业类别	企业数量 (家)	脱硫设施	脱硝设施	除尘设施	无任何设施
平板玻璃 (电熔窑)	1	—	—	100%	0%
平板玻璃 (不含电熔窑)	9	67%	100%	100%	0%
日用玻璃	73	34%	60%	78%	16%

行业类别	企业数量 (家)	脱硫设施	脱硝设施	除尘设施	无任何设施
玻璃纤维	11	64%	73%	91%	0%
其他	26	8%	12%	46%	54%
合计	120	34%	54%	74%	22%

#### 4.目前的污染治理存在的难点与问题

①行业现行排放标准指标涵盖不全。玻璃熔窑废气脱硝过程中存在氨逃逸，但现行标准中未规定氨的排放控制要求；日用玻璃熔窑排放氮氧化物，喷漆、烘干等工序的涉及 VOCs 排放，但现行标准中未规定氮氧化物和 VOCs 的排放限值要求。2019 年 10 月发布的《四川省工业炉窑大气污染综合治理实施清单》指出：大气污染防治重点区域日用玻璃氮氧化物排放限值不高于 400 毫克/立方米。各地对政策标准宣贯不足，企业环保认识不够，导致部分污染物实际排污情况与文件要求差异较大。

②部分企业设施简易，降污减排效果差。目前四川省玻璃行业中仍有小部分企业未安装任何大气污染治理设施，污染物散排严重。部分使用煤或煤气的企业未安装脱硫设施或采取简易脱硫设施，烟气颜色气味等明显异常，二氧化硫去除效果差。玻璃熔窑内燃烧温度高，会产生大量的氮氧化物，但部分企业采用简易脱硝设施，不考虑脱硝反应的参数条件，投入大量成本却达不到脱硝效果，脱硝设施形同虚设。

③行业管理参差不齐，无组织排放仍明显。近年来，全省加快推进玻璃企业有组织污染物排放浓度治理，污染排放水平得到显著提升，但部分企业无组织排放管理差距仍较大。原料储存、装卸区未采

取全封闭，物料周转频繁，导致堆场无组织排放明显。在物料制备、配料和输送系统未采取半封闭化管理，部分原辅材料在筛分转运、加料等过程时易产生颗粒物无组织排放。是熔窑烟气收集设施不满足现场要求，大气烟气无组织排放。部分企业在喷釉过程中未采取有效的挥发性有机物废气收集治理设施，废气无组织排放。

### 5.污染防治技术原理介绍

玻璃行业产生的污染物主要有颗粒物（粉尘）、二氧化硫、氮氧化物、氟化物，氯化氢等。一般情况下，颗粒物大多采用袋式除尘器、静电除尘器、电袋复合除尘器、旋风除尘器等方法进行去除，二氧化硫主要采取干法脱硫、半干法脱硫和湿法脱硫等方式去除，氮氧化物主要采取 SCR 脱硝方式去除。随着玻璃行业工艺技术提升，污染治理水平越来越高，一体化治污设施等多种先进治理技术不断涌入市场，行业废气治理得到了重大突破。

技术名称	适用范围	技术特点
选择性催化还原法 (SCR) 脱硝技术	玻璃熔窑烟气脱硝	①反应温度低，可根据烟气温度选择催化剂，确保催化剂活性最大。 ②烟气经除尘器后，粉尘浓度降低，可延长催化剂的寿命。 ③氨泄漏量相对高温高尘要少。 ④反应产物是氮气和水，不会产生 SO <sub>3</sub> ，不会出现二次污染。
SDS 干法脱硫技术	适用于平板玻璃炉窑烟气脱硫	①工艺系统简单，设备可靠耐用，使用寿命长。 ②脱硫效率高，脱硫系统全干态运行，没有废水处理和排放问题，没有湿法拖尾和含尘湿烟气排放问题，无二次污染。 ③脱硫系统基本不产生温降，排烟温度高。 ④工艺流程简单，操作维护方便，调节灵活，可控性好，自动化程度高。
NID 半干法脱硫技术	适用于平板玻璃炉窑烟气脱硫	①NID 技术克服了其他干法（半干法）脱硫工艺脱硫剂消化系统的复杂性及运用中产生的一系列粘结、堵塞、崩塌等严重问题。生石灰消化及增湿的一体化设计不仅对提高脱硫效率十分有利，同时也降低了吸收剂消化系统的投资和维修费用。

技术名称	适用范围	技术特点
		<p>②利用循环灰携带水分，当水与大量的粉尘接触时，不再呈现水滴的形式，而是在粉尘颗粒的表面形成水膜，在尽可能短的时间内形成温度和湿度适合的理想反应环境。同时也克服了传统半干法活化反应器中可能出现的粘壁问题。</p> <p>③NID 技术的烟气在反应器内停留时间只需 1 秒左右，可有效降低脱硫反应器高度。</p> <p>④对所须吸收剂要求不高，可广泛取得；循环灰的循环倍率可达 30~150 倍，使吸收剂的利用率提高到 95% 以上。</p> <p>⑤脱硫后烟气不必再加热，可直接排放，脱硫后烟气温度达到 70~75℃，高于酸露点 15℃ 以上，对风机、烟道、烟囱系统无腐蚀。</p>
HQ - 脱硫脱氟除尘一体化+SCR 烟气治理工艺技术	平板玻璃、日用玻璃等窑炉烟气深度治理及超低排放	<p>①陶瓷管能经受 420℃ 的高温，克服了传统布袋除尘不能满足高温环境的难题。</p> <p>②陶瓷管的使用寿命为 8 年，克服了布袋除尘易坏频繁更换布袋的现象。</p> <p>③除尘率达 95% 以上，可实现烟尘超低排放。</p> <p>④除尘脱硫脱氟与脱硝分体建设，可降低 SCR 的维护成本。</p> <p>⑤末端的中高温 SCR 还可采用低温 SCR 代替，可不必对烟气进行升温，降低运行费用。</p> <p>⑥未浸泡过催化剂的陶瓷管废弃后属于固体废物，不是危险废物。</p> <p>⑦独立的 SCR 催化剂老化或淘汰后可通过复活或粉碎后再生利用。</p> <p>⑧减少了传统烟气治理过程中除尘脱硝后需建设脱硫塔、再次除尘等设施的建设及后期运行管理成本。</p>
陶瓷催化剂管式玻璃窑炉烟气多污染物协同控制技术	适用于玻璃行业烟气净化，建议烟气量 < 120 万 Nm <sup>3</sup> /h	<p>①该技术实现了在陶瓷反应釜中集中脱除氮氧化物、硫氧化物、尘、氟化氢等污染物，且实现了高效脱除。相比较传统环保工艺，整个工艺流程简单，易操作维护，运行成本低，陶瓷催化剂比传统 SCR 催化剂使用寿命长，且能够长期稳定超低排放。</p> <p>②在高温下进行高效除尘，出口粉尘浓度 &lt; 5mg/Nm<sup>3</sup>，解决了传统工艺 SCR 脱硝催化剂堵塞以及氨逃逸大，以及传统工艺无法脱除 HF 的问题，NO<sub>x</sub> 排放浓度 &lt; 100mg/Nm<sup>3</sup>，氨逃逸 &lt; 5ppm，HF &lt; 1mg/Nm<sup>3</sup>。</p>
无极 UV 光氧化+活性炭吸附-脱附浓缩-窑炉燃烧 VOCs 治理技术	适用于低浓度有机废气治理	<p>①利用了自有天然气窑炉的优势，既处理了 VOC 废气，又提升了窑炉空气进窑炉的温度，相对减少窑炉天然气的使用量。</p> <p>②本技术可将浓缩后的有机废气直接引入 1500℃ 以上的高温窑炉燃烧，节省了燃烧设备的建设，节约了燃烧的能源消耗，具有造价相对较低，蓄热式燃烧有一定的自我调节能力，抗干扰能力强等优点。</p>

技术名称	适用范围	技术特点
		③本技术能回收有用的有机溶剂，且具有造价相对较低，蓄热式燃烧有一定的自我调节能力，抗干扰能力强等优点。可以在有燃煤锅炉、窑炉的地方实现减少建设成本的投入。

## 6. 典型应用案例

### 案例一：HQ-脱硫脱氟除尘一体化+SCR烟气治理工艺技术

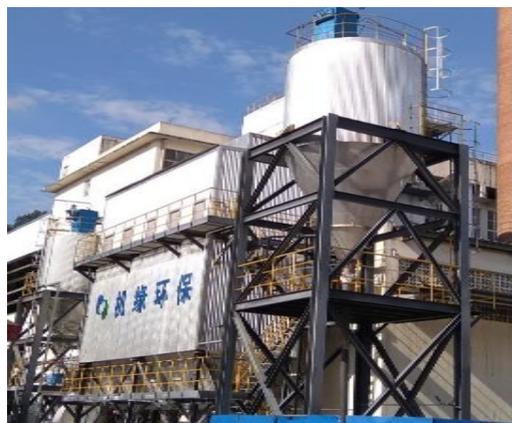
项目名称：某玻璃制造有限公司 1#2#、3#4#窑炉 HQ-脱硫脱氟除尘一体化+SCR烟气治理项目

项目规模：24000 Nm<sup>3</sup>/h×2

投资成本：1100 万元

污染物排放浓度：满足《四川省工业炉窑大气污染综合治理实施清单》（川环函〔2019〕1002号）中相关限值要求。

案例照片：



## 案例二：陶瓷催化剂管式玻璃窑炉烟气多污染物协同控制技术

目前，该技术在某玻璃制造有限公司 5#炉窑、2#公司炉窑、3#玻璃有限公司炉窑烟气处理系统中均成功运用。

项目名称：某玻璃有限公司

项目规模：18000 Nm<sup>3</sup>/h

投资成本：700 万元

污染物排放浓度：满足《四川省工业炉窑大气污染综合治理实施清单》（川环函〔2019〕1002号）中相关限值要求。

案例照片：



### 案例三：无极 UV 光氧化+活性炭吸附 - 脱附浓缩 - 窑炉燃烧 VOCs 治理技术

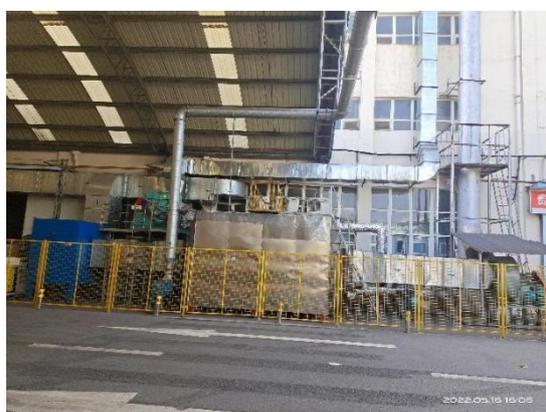
项目名称：某公司 2#、3#、4#库印标生产线废气治理控制系统

项目规模：1 套

投资成本：156 万元

污染物排放浓度：满足《四川省固定污染源大气挥发性有机物排放标准》（DB51 2377-2017）中相关限值要求。

案例照片：



## 7.结论与展望

2020 年，全省有炉窑的玻璃企业共 120 家，包括平板玻璃制造企业 10 家（含 1 家电熔窑），日用玻璃企业共 73 家，玻璃纤维企业共 11 家，其他玻璃制品企业共 26 家，主要分布在成都、泸州、内江、德阳等地；全省玻璃行业共排放二氧化硫 10504 吨、氮氧化物 9804 吨、PM<sub>2.5</sub> 10353 吨、PM<sub>10</sub> 10539 吨，各污染物总体以平板玻璃和日用玻璃排放为主。全省 120 家玻璃企业未安装任何污染治理设施的占比 22%，主要分布在成都、内江、南充等地；脱硫设施安装率为 34%，脱硝设施安装率为 54%，除尘设施安装率为 74%，安装比率总体较低。平板玻璃脱硫设施安装占比 67%，脱硝设施和除尘设施均为 100%；

日用玻璃脱硫设施安装率 34%，脱硝设施 60%，除尘设施 78%；玻璃纤维脱硫设施安装率 64%，脱硝设施 73%，除尘设施 91%；其他玻璃制品脱硫设施 8%，脱硝设施 12%，除尘设施 46%。强化治污设施全面升级，进一步降低行业污染物排放。平板玻璃积极推进深度治理，日用玻璃、玻璃纤维等企业要完善污染治理设施，坚决淘汰简易低效的脱硝设施，积极推进陶瓷纤维滤管除尘脱硝一体化等高效治污设施，部分使用非清洁能源或含硫原辅料的企业要主动安装脱硫设施，全面提升治污能力。未来，将会推动玻璃行业大气污染物排放治理向高效、绿色、经济、循环的方向不断发展。

#### （四）水泥行业

##### 1.现状介绍

##### （1）企业分布情况

2021 年，全省水泥企业分布情况如表所示。全省共有水泥企业 1154 家，分布在全省 21 市州。其中，水泥制造企业 94 家（其中水泥熟料企业 73 家），主要分布在达州市、乐山市、眉山市等地；水泥制品制造企业 826 家，主要分布在成都市、泸州市、绵阳市等地；砼结构构件制造企业 145 家，主要分布在成都市、绵阳市、内江市等地；其他水泥类似制品制造企业 84 家，主要分布在成都市、绵阳市和内江市；石棉水泥制品制造 5 家，全部位于成都市。

表 3-4-1 全省水泥企业分布情况

城市	水泥制造	水泥制品制造	砼结构构件制造	其他水泥类似制品制造	石棉水泥制品制造	总计
巴中市	1	23	1	2		27
成都市	4	244	51	39	5	343
达州市	11	1				12

城市	水泥制造	水泥制品制造	砼结构构件制造	其他水泥类似制品制造	石棉水泥制品制造	总计
德阳市	3	51	2	6		62
广安市	8	10	7	1		26
广元市	4	28	10	2		44
乐山市	10	18	5	1		34
泸州市	5	89	5	1		100
眉山市	8	50	2	2		62
绵阳市	7	86	17	9		119
南充市	1	36	11	1		49
内江市	4	31	17	9		61
攀枝花市	3	4	1	1		9
遂宁市	1	34	4	2		41
雅安市	4	12		1		17
宜宾市	6	54	6	3		69
资阳市	1	14	3	2		20
自贡市	1	14	1	2		18
阿坝州	2	13	1			16
甘孜州	2	6	1			9
凉山州	8	8				16
<b>合计</b>	<b>94</b>	<b>826</b>	<b>145</b>	<b>84</b>	<b>5</b>	<b>1154</b>

总体上看，全省水泥企业主要集中在成都市、绵阳市和泸州市。其中，成都市共 343 家占比 30%，其次是绵阳市，共 119 家占比 10%，泸州市共 100 家占比 9%，排名第三。从地区来看，成都平原地区共 698 家占比 60%，全省第一；其次是川南地区，共有 248 家占比 22%；川东北地区共 158 家，占比 14%；川西地区和攀西地区水泥企业相对较少，占比均为 2%。

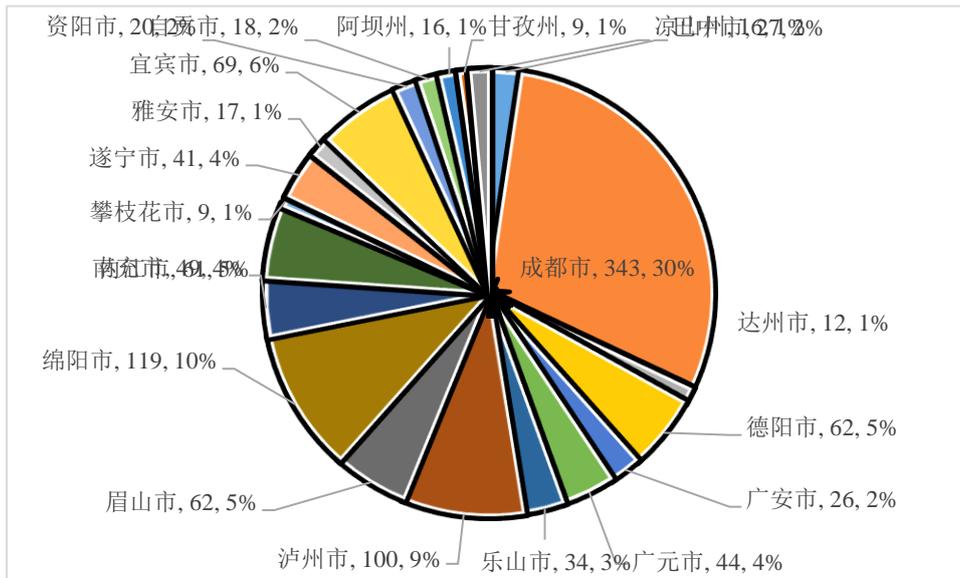


图 3-4-1 全省水泥企业分布情况（城市，数量，占比）

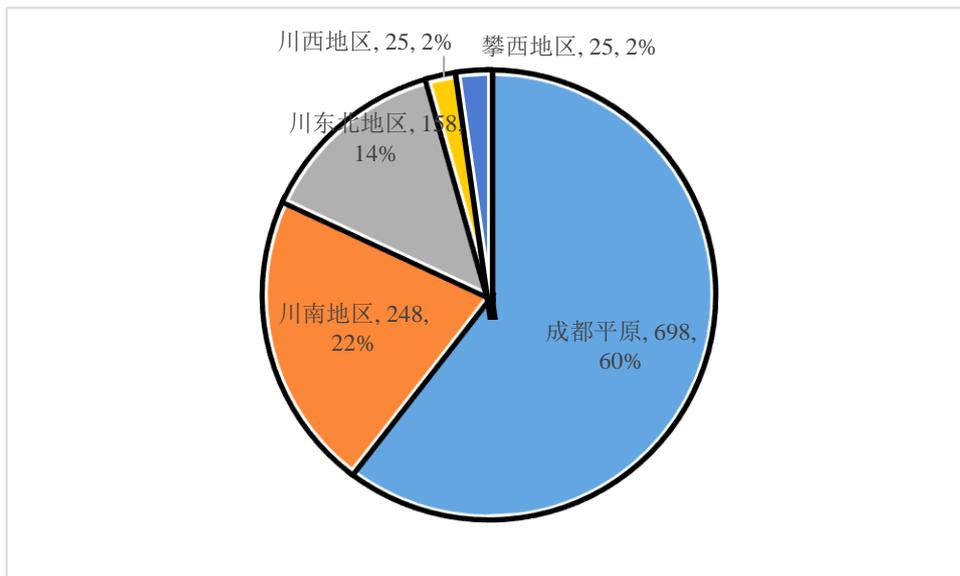


图 3-4-2 全省水泥企业地区分布情况（地区，数量，占比）

## （2）污染物排放情况

2020 年全省水泥行业共排放二氧化硫 15157 吨，氮氧化物 33258 吨，PM<sub>2.5</sub> 40214 吨，PM<sub>10</sub> 63026 吨，氨 1190 吨。

从行业来看，各污染物排放量均以水泥制造为主，其二氧化硫排放总量为 15091 吨，氮氧化物排放总量为 33181 吨，PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 排放总量分别为 37385 吨和 54344 吨，NH<sub>3</sub> 排放总量为 1188 吨，分别

占全省水泥行业的 99.6%、99.8%、93.0%、86.2%和 99.8%，水泥制造企业中各项污染物排放又以水泥熟料企业为主，共排放二氧化硫 15091 吨，氮氧化物共排放 33181 吨，PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub>排放量分别为 36827 吨和 52259 吨，氨排放 1188 吨。水泥制品企业二氧化硫排放总量为 35 吨，氮氧化物排放总量为 22 吨，PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub>排放总量分别为 2022 吨和 5962 吨；砗结构企业 PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub>分别排放 483 吨和 1600 吨；其他水泥类制品企业二氧化硫排放 29 吨，氮氧化物共排放 55 吨，PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub>分别排放 317 吨和 1107 吨；石棉水泥制品各项污染物排放量均较小。

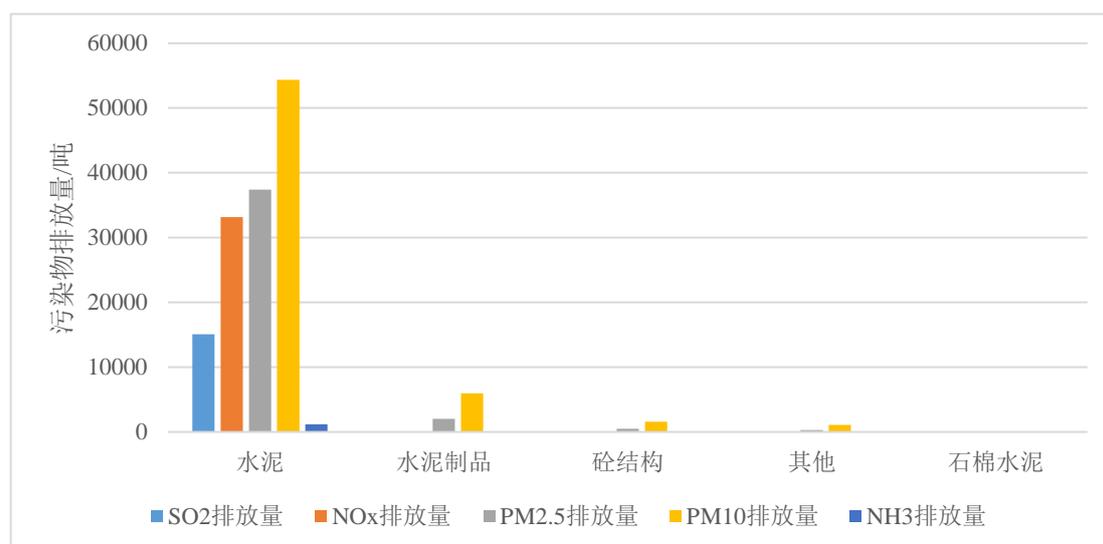


图 3-4-3 全省水泥行业主要污染物排放情况

从城市来看，乐山市排放的二氧化硫、氮氧化物、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>和 NH<sub>3</sub> 总量最大，为 23463 吨，占全省水泥行业排放的 15%，其次是成都市和绵阳市，排放总量分别为 6562 吨和 6041 吨，分别占全省的 12%和 10%。单项污染物排放方面，乐山市各项污染物排放量最高，二氧化硫、氮氧化物、PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub> 排放量分别占全省 25%、17%、

13%和 14%；成都市排放的二氧化硫和 PM<sub>10</sub>、广安市排放的氮氧化物和绵阳市排放的 PM<sub>2.5</sub>，位于全省第二位，占比分别为 12%、13%、12%和 13%；绵阳市排放二氧化硫、宜宾市排放的氮氧化物以及广元市排放的 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub>，位于全省第三，占比均为 11%。泸州市、南充市、遂宁市、资阳市、自贡市、阿坝州、甘孜州等地排放的污染物相对较低。

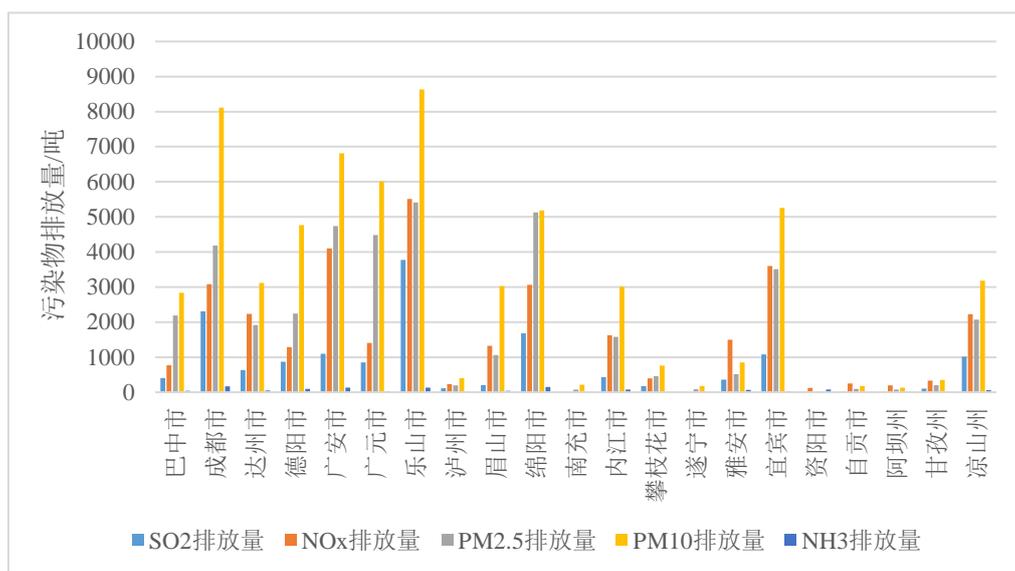


图 3-4-4 各城市水泥行业主要污染物排放情况

## 2. 污染防治技术水平

2020 年全省 73 家水泥熟料企业有 52% 的企业安装有脱硫设施，主要采取氨法脱硫、其他脱硫技术和石灰石/石灰 - 石膏法脱硫，占比分别为 26%、12% 和 11%；全部安装有脱硝设施，均以选择性非催化还原法（SNCR）脱硝技术为主，个别采用其他脱硝技术脱硝；除尘设施安装率为 100%，除尘技术主要有布袋除尘、电袋复合除尘、静电除尘等。其中，以布袋除尘法为主，占比 80%，其次是电袋复合除尘法，占比 7%。

## 3. 目前的污染治理存在的难点与问题

①污染治理设施存在“小马拉大车”。当前水泥企业大多超负荷生产，多数超过设计产能的 20%，而污染治理设施处理能力均依据设计生产能力进行设计，超负荷生产后，污染治理设施出现“小马拉大车”现象，致使处理能力不足，个别企业熟料转运、窑头、分解炉出现明显粉尘排放，导致“治污”反“致污”。

②无组织排放管理仍不到位。全省仍有部分水泥企业无组织排放管理不到位，主要表现在：石灰石露天堆放，煤粉、砂岩、页岩等其他原辅料堆场未封闭，临时堆存物料未覆盖，装车收尘无组织控制效果差，矿山开采、上料过程无降尘措施，扬尘无组织排放明显。

③氨逃逸缺少监管手段。全省水泥企业脱硝大多采用选择性非催化还原技术（SNCR），多采用氨水、尿素等作为还原剂。部分企业一味地通过大量喷氨水的方式降低 NO<sub>x</sub> 浓度，造成了氨逃逸的问题。虽然国家标准中有氨排放限值的规定，但地方并未将氨排放浓度作为企业是否达标的考核指标，有些企业甚至未开展氨排放浓度的监测。

#### 4. 污染防治技术原理介绍

水泥行业产生的污染物主要有颗粒物（粉尘）、二氧化硫、氮氧化物和氨等。一般情况下，颗粒物大多采用袋式除尘器、静电除尘器、电袋复合除尘器等方法进行去除，二氧化硫主要采取石灰石/石灰-石膏法脱硫、氨法脱硫等方式去除，氮氧化物主要采取 SNCR 脱硝方式去除。随着水泥行业管理水平提升，尤其是企业环保意识的提高，使得行业污染治理水平越来越高，多数水泥企业开始申请重污染绩效评级，并不断推进深度治理甚至是超低排放改造，行业废气污染物排放正在逐渐降低。

## 5. 典型应用案例

### 案例一：低氮分级燃烧+SNCR+SCR 联合脱硝技术

项目名称：某水泥 1#、2#水泥熟料生产线氮氧化物超低排放改造项目

项目规模：340000 Nm<sup>3</sup>/h×2

投资成本：5000 万元

污染物排放浓度：1#、2#水泥熟料生产线氮氧化物排放浓度均满足超低排放要求，即：NO<sub>x</sub> 排放浓度小于 50 mg/Nm<sup>3</sup>，小于 5 mg/Nm<sup>3</sup>。

案例照片：



## 6. 结论与展望

2020 年，全省 1154 家水泥企业，遍布全省 21 市州，其中，94 家水泥制造企业主要分布在达州市、乐山市、眉山市等地；全省水泥行业共排放二氧化硫 15157 吨，氮氧化物 33258 吨，PM<sub>2.5</sub> 40214 吨，PM<sub>10</sub> 63026 吨，氨 1190 吨，各污染物排放量均以水泥制造为主。

2020 年全省 73 家水泥熟料企业有 52% 的企业安装有脱硫设施，全部安装有脱硝设施，以选择性非催化还原法（SNCR）脱硝技术为主，全部安装除尘设施，以布袋除尘法为主。全省多数水泥企业已完成深度治理，部分企业正在推进超低排放改造。积极推进超低排放改

造，全面提升行业污染物治理水平。随着《四川省水泥工业大气污染物排放标准》的发布与实施，全面推进水泥企业深度治理已成必然趋势，鼓励企业结合实际开展超低排放改造，行业竞争越发突出，优胜劣汰日益明显。“双碳”政策实施将对水泥行业产生重大影响。随着“双碳”工作的持续推进，将促使水泥行业全面进入低碳绿色的高质量发展阶段，促进产业升级改造，推动行业节能降碳，低效水泥产能的退出。“双碳”推进，将促进水泥企业产业链延伸，推进行业协同处置、智能化和布局新能源。要加大减碳技术创新的投入，构建行业碳减排的协同机制。要加快行业率先碳达峰的步伐，做好完成碳配额指标情况下的产能和产量输出，研究和积极参与碳交易市场。促进水泥行业绿色、低碳发展。

#### **四、全省火力发电行业大气污染防治技术**

##### **(一) 火力发电行业污染防治现状**

###### **1. 污染防治现状**

火力发电是利用燃料（煤、油、天然气等）在燃烧过程中，将化学能转变为电能的一种发电方式。我国煤炭资源丰富，火力发电具有巨大的潜力。近年来，四川省的火力发电发展迅速，从发电结构来看，截至 2021 年末，四川火电装机容量为 1825 万千瓦，占比 16.0%；2021 年火电发电量 663 亿千瓦时，占比 15.32%，其中燃煤发电占主导地位。燃煤发电厂生产工艺主要包括输煤系统、燃煤系统、热力系统、除灰渣系统、电气系统和其他辅助生产系统等。发电过程中会产生大量具有严重危害性的粉尘。这些粉尘在空气中的稳定性较高，严重危害发电厂职工的身体健康。

## (1) 粉尘来源及污染防治现状

火电厂的粉尘主要来自下面几个过程：1) 运煤和装卸中引起飞扬的煤尘；2) 原煤粉碎引起的煤尘；3) 输煤系统散逸的煤尘；4) 储灰场粉煤灰的二次扬尘；5) 锅炉烟筒排出的烟尘。这些粉尘主要具有以下特点：

①煤尘中游离的  $\text{SiO}_2$  粉尘一般在 10% 以下（国家规定最高容许排放质量浓度为  $10 \text{ mg/m}^3$ ），直径小于  $5 \mu\text{m}$  的占 73%。燃煤中常含有石块、木块等杂质，若不去除，会对设备造成严重的损伤。

②锅炉尘中游离的  $\text{SiO}_2$  粉尘一般在 10% ~ 40%（国家规定最高容许排放质量浓度为  $2 \text{ mg/m}^3$ ）。当锅炉内燃烧不充分的油粒或煤粉被烟气带到锅炉房尾部烟道上受热会引发二次燃烧事故。

③除尘器、干灰输送系统及粉煤灰等综合利用作业场所的粉尘，也是含有 10% ~ 40% 游离  $\text{SiO}_2$  的粉尘，粒径一般在  $15 \mu\text{m}$  以下， $5 \mu\text{m}$  以下的占有相当份额。

④脱硫装置制粉系统的游离  $\text{SiO}_2$  的粉尘一般在 10% 以下。其主要成分为  $\text{CaO}$ 、 $\text{CaCO}_3$  或其他脱硫剂（脱硫剂的品位一般要求纯度为 90% 或 95%）。脱硫装置石膏处理或废渣处理系统的粉尘一般是含 10% 以下游离  $\text{SiO}_2$  的粉尘，其主要成分为  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  或其他脱硫废渣。

通过对全省 67 座火电厂进行深入考察，结果发现，当前，多家火力发电厂在除尘器的选择上，大多采用喷水防尘器、旋风防尘器、湿式防尘器、电除尘器以及布袋除尘器等。虽然在长期除尘过程中，这些除尘设备起到了显著的除尘效率，但在实际运行阶段，仍然需要

大量的维护工作。

另一方面，四川省大多数电厂在国家颁布新的工业粉尘浓度排放标准之前，一直沿用原工业企业卫生设计标准的参数，即在  $\text{SiO}_2$  含量小于 10% 的前提下，执行  $10 \text{ mg/m}^3$  标准，但随着国家颁布的《职业病防治法》和新的工业企业设计卫生标准的颁布，对火电厂的输煤环节粉尘排放标准提出了更高、更加严格的要求，规定中明确指出，煤粉尘在短期内的接触浓度应当小于等于  $6 \text{ mg/m}^3$ ，同时在劳动环境和员工保护方面提出了更高的要求。现阶段我省火电厂仍旧沿用旧标准时期采用的除尘技术和设备，对于极大地提升除尘效率，降低输煤过程中煤粉尘的含量极为不利，为了最大程度地适应并赶超国家新标准的规定，电厂企业应当大力引进新科学技术，不断创新粉尘治理的设计和研发，加强粉尘的综合治理。

## （2）二氧化硫污染特征与治理现状

煤炭是当今世界上利用最为广泛的不可再生资源，同时也是火力发电过程中使用占比最高的能源。在燃煤发电过程中会产生一定量的有害气体，包括  $\text{SO}_2$  和氮氧化物。这些废气则是造成酸雨、光化学烟雾的罪魁祸首。目前，四川省非常注重大气治理，因此，大多数火力发电厂开始采用先进的脱硫技术处理燃烧过程中产生的  $\text{SO}_2$  废弃物。

现阶段，火电厂的烟气脱硫技术正在不断探究与创新，其技术日渐成熟。烟气脱硫技术主要运用物理与化学方法实现对烟气中硫的固定与脱除。当前，最为经典的脱硫方法有：石灰石法、电子束法与循环流化床法等。另外，根据脱硫的位置，可以分为：燃烧前、燃烧中与燃烧后脱硫。燃烧前，通过原煤的洗选与煤气化等技术实现脱硫；

燃烧中，通过在炉内加入石灰石，实现对硫的吸收，从而生成  $\text{SO}_2$ ；燃烧后，主要对产生的烟气进行脱硫，常见的方法为干法和湿法。

现如今四川省对于污染费用设置的收费标准较低。因此，可以把超出配额脱硫数量按照较低价格比例向小型火电厂售卖，使其在保证拥有相应流动资金的基础上，可以获得简易的脱硫设备。另外，目前很大一部分脱硫设备来自海外进口，我们应当加强脱硫设备的国产化，降低脱硫成本。其次，由于脱硫设备购置需要花费较多资金，而只依靠国家划拨款项是无法满足众多火电厂企业需求的，因此，可以通过提高电费的方式来获得更多资金储备，从而有效解决资金不足的问题。

### **(3) 氮氧化物污染特征与治理现状**

火力发电厂中氮氧化物的主要来源为使用的燃料，所产生的氮氧化物占排放总量的 70% 左右。另外，在火力发电厂中，含氮化合物会与空气接触，进而形成  $\text{NO}$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  等物质，在进行煤脱挥发分的过程中，随着空气中温度的升高，其挥发的程度逐渐加大，根据近几年资料显示当空气中的温度超过  $1300\text{ }^\circ\text{C}$  时，燃料中的氮氧化物会被抑制。最后，根据研究数据表明，当火力发电厂的燃烧温度在  $800\text{ }^\circ\text{C}$  以上时，氮氧化物产生主要来源于挥发分氮，在低于  $800\text{ }^\circ\text{C}$  时氮氧化物主要来源于焦炭，除此之外，氮氧化物生成量还取决于煤的挥发分含量。

近年来，四川省火力发电厂低氮燃烧技术的研发和生产取得了很大的进步，实现了自主设计、自主制造和自主安装调试，已成为四川省火电行业氮氧化物控制的首选和主流技术。但是，目前仅在燃烧过

程中控制氮氧化物的排放已不能满足当下发展要求，因此实施烟气脱硝成为发展趋势。在火电厂烟气脱硝过程中，选择性催化还原技术（SCR）烟气脱硝项目成了当前氮氧化物减排的主力军。川内主要锅炉厂与多家环保工程公司基本掌握了 SCR 烟气脱硝技术。有部分公司已经着手研发具有自主知识产权的烟气脱硝技术。我省脱硝产业是在脱硫产业的基础上逐步发展起来的，脱硫工程的工艺技术、设计、成套设备、施工、调试等方面的经验都为脱硝产业的发展打下了良好的基础。另外，大部分脱硝设备已实现国产化，只有部分仪器仪表、关键阀门等需要采用进口设备。

## （二）火力发电行业污染防治技术水平与需求

### 1. 粉尘处理水平

火电厂的粉尘主要包括以下几个方面：1）来煤原始含尘，在煤炭开采或加工过程中产生细小固体颗粒；2）转运煤尘，在卸载过程中，大颗粒燃煤由于与设备等物体发生碰撞而碎裂为小固体；3）储存煤尘，由于煤场车辆的碾压、燃煤的风化以及煤自燃等原因，使得燃煤颗粒变小形成煤尘，该过程产生的煤尘为储存煤尘；4）加工煤尘，在加工破碎过程中产生的煤尘为加工煤尘；5）其他煤尘，该类煤尘的特点是产生途径多样化，产生量随着设备状况不同变化较大。

燃煤电厂煤炭的装卸应当采取封闭、喷淋等方式防治扬尘污染。厂内煤炭输送过程中，输煤栈桥、输煤转运站应采用密闭措施，也可采用圆管带式输送机，并根据需要配置除尘器。除尘器可根据煤炭挥发分的实际情况选择袋式除尘器或干式电除尘器以及冲击式、水激式、文丘里式等湿法除尘器与湿式电除尘器的组合，见表 4-1。

表 4-1 煤炭装卸、储存与输送过程扬尘防治可行技术

扬尘防治环节	可行技术	适用性
煤炭装卸作业过程扬尘防治	(1) 封闭式螺旋卸船机、桥式抓斗绳索牵引式卸船机	水路来煤
	(2) 缝式煤槽卸煤装置，两侧封闭	汽车来煤
	(3) 卸煤设施除进、出端外应采取封闭措施	铁路来煤
厂内煤炭输送作业过程扬尘防治	(1) 圆管带式输送机或封闭输煤栈桥	适用于所有电厂煤炭输送
	(2) 转运站配袋式除尘器	适用于各种煤质
	(3) 转运站配静电除尘器	适用于低挥发分煤
	(4) 转运站采用湿式除尘器与湿式电除尘器的组合	适用于各种煤质，环境较敏感地区
厂内储煤场扬尘防治	(1) 露天煤场设喷洒装置、干煤棚、周边进行绿化	适用于南方多雨、潮湿的地区且周围无环境敏感目标的现有煤场
	(2) 露天煤场设喷洒装置与防风抑尘网组合	适用于不能封闭的现有煤场
	(3) 储煤筒仓配置库顶式除尘器	适用于储煤量较小、配煤要求高的电厂
	(4) 封闭式煤场设置喷洒装置	适用于能够封闭的煤场

## 2. 烟气脱硫水平

目前，火电厂烟气脱硫技术正在不断研究与应用，其技术趋于成熟。烟气脱硫技术主要运用物理与化学方法实现对烟气中硫的固定与脱除。

现阶段，脱硫方法中最为典型的是：石灰石法、电子束法与循环流化床法等。根据脱硫的位置，对  $\text{SO}_2$  的控制主要分为三种，即：燃烧前、燃烧中与燃烧后的脱硫。在燃烧前，通过在原煤的洗选与煤气化等技术实现脱硫；在燃烧中，通过在炉内加入石灰石，实现对硫的吸收，从而生成  $\text{SO}_2$ ；在燃烧后，主要对其烟气进行脱硫，主要方法为干法与湿法。火电厂烟气脱硫技术的原理主要为以下几点。一是利用  $\text{SO}_2$  的酸性，根据其酸性的特点，在其加入碱性物质，将实现对其

吸收，从而得到相对稳定的盐。将  $\text{SO}_2$  与钙进行作用，二者经过反应，将生成新的物质，并难溶于水。二是利用  $\text{SO}_2$  的还原性，将烟气中的  $\text{SO}_2$  与强氧化剂、催化剂等进行接触，使其氧化，从而生成三氧化硫，再利用吸收剂将其吸除。三是利用  $\text{SO}_2$  的氧化性，将烟气中的  $\text{SO}_2$  与还原剂接触，从而将其还原为硫。

当前我省火力发电厂普遍采用的脱硫方法主要有两种，即半干法和湿法。所谓半干法指的是利用喷雾干燥的原理，在吸收剂浆液喷入吸收塔之后所进行的脱硫工作，或者通过干燥方式使其在塔内分离，或者使其与  $\text{SO}_2$  反应，从而生成固体灰渣，进而达到脱硫效果。半干法具有自身优势，即投资费用少、设备可靠性较高，并且具有较高的脱硫效率，基于半干法的优势条件，其适用范围不断扩大，成为一项主导型的火力发电厂脱硫工艺。与半干法相对应的另一种火力发电厂脱硫技术是湿法脱硫技术，目前已成为大型锅炉中一项首选的脱硫方法，较为流行的湿法脱硫方法有碱式硫酸铝法脱硫技术、湿式氨法脱硫技术、海水脱硫技术、双碱法脱硫技术、简易湿法脱硫技术等。所谓湿法脱硫技术指的是在烟道末端，采用浆液剂洗涤烟气，脱硫剂和脱硫产物均为湿态，反应在溶液中进行，钙利用率高，脱硫效率可以达到 90% 以上。湿法脱硫技术的脱硫率相当高，但也有其自身的缺点和不足，即湿法脱硫工艺的投资大，运行费用高，废水难处理，需装设除雾器或专门的再热装置。

### 3. 烟气氮氧化物控制水平

控制氮氧化物的第一次控制措施是指，通过外界的各种技术手

段，继而控制氮氧化物的生成，通常在火力发电厂中降低氮氧化物的一次措施主要有：采用低氮氧化物燃烧器、使用含氮量低的燃料、控制燃烧局部温度、控制燃烧区域内氧气浓度等等方式，从而降低氮氧化物的生成。降低氮氧化物的第二次控制措施是指通过某种手段将已经生成的氮氧化物还原成氮气，从而使得排放出的氮氧化物程度降低，目前我国火力发电厂采用这种措施的方法有催化还原法、燃料的分级燃烧技术等等。目前我省的低氮燃烧技术主要包括两个方面：

①改变燃烧过程中的空气系数：目前我国现有的低氮燃烧技术之一是通过改变燃烧中的空气系数，这种方法的原理是通过降低空气系数，空气内的氧气也会相对减少，从而产生低程度的氮氧化合物，与此同时也降低了燃料中氮与空气中氧的化合反应。但是风量系数的增加会导致燃烧效率的降低，两者是成反比关系的。因此，要经过多次实验，找到一个合适的空气系数来降低氮氧化合物。

②通过不断对试验进行调整：通过多次燃烧试验可以发现，当发电厂内的炉内温度增加时，产生的氮氧化合物更多，因此，保持炉内温度低温燃烧较为合适。目前我国很多火力发电厂采用的是两级分级燃烧，这种燃烧器的燃烧方法能有效减少氮氧化物，这样，用于燃烧部分的风量就会比正常所需风量少，与上一原理相同，能够有效减少氮氧化物的排放。

#### **4.火力发电行业污染处理存在问题及需求分析**

**(1) 除尘器无法达到额定出力：**除尘器作为最重要的颗粒物去除设备，对燃煤电厂大气污染物达标排放具有重要意义。在对电除尘器

和电袋复合除尘器的监督检查中发现，除尘器电场故障停运或运行期间无法达到额定电压的情况比较多，导致除尘器无法达到额定出力，影响颗粒物去除效果，烟气中杂质含量升高，并对脱硫设施的效率和石膏脱水造成不良影响。因此，在设备运行过程中，当进口烟气颗粒物浓度小、设备二次电压低、二次电流大时，可调整延长阴阳极振打周期时间，反之则缩短；同时严密监视前级电场运行的二次电压和二次电流值，调整运行参数以保证前级电场不掉电。如果运行条件很差，为了保持电场投运，也可以采取降低运行参数（一般通过调节电流极限来限流）的方式运行。

**（2）滤袋压差过高：**布袋除尘器在运行过程中出现频率较高的问题是滤袋压差过高，特别是在更换超细布袋之后，设备运行一段时间滤袋压差达 1800~3200 Pa，不但影响除尘效率，还增加电耗。因此，针对布袋除尘器，当滤袋压差长时间高于设计值时，可采取提高清灰气源压力或者缩短清灰周期的方式降低压差；停机时要进行清灰，检查反吹风量压力及覆盖面积是否符合设计要求。另外需要重视检修，按照计划针对大小修的不同特点对除尘器进行维护。

**（3）脱硫剂浪费现象突出：**针对超低排放改造的要求，部分循环流化床电厂采用了炉内干法脱硫+炉外半干法脱硫的改造方式。但由于炉内脱硫反应存在迟滞现象及脱硫剂下料不均匀、不稳定等情况，改造后需要炉内与炉外脱硫同时运行，才能实现  $\text{SO}_2$  不超过 35  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  的排放目标，容易造成炉膛出口  $\text{SO}_2$  排放浓度波动幅度大，导致炉外脱硫系统脱硫剂用量增大，钙硫比 $>3.0$ ，甚至达到 5~6，脱

硫灰 CaO 含量在 20%左右，脱硫剂浪费现象非常突出。因此，在脱硫系统运行过程中，建议适当减少系统冷却水和密封水量，密切观察除雾器压差变化，在保证除雾器不堵塞的前提下，适当延长除雾器冲洗水冲洗周期，减少脱硫系统进水量。

**(4) 密度计无法正常测量浆液密度：**大部分吸收塔采用的是科氏力原理密度计，容易受到浆液起泡和吸收塔液位等因素的影响，经常出现管路堵塞和磨损的问题，难以正常测量浆液密度。因此，密度计出现故障后大部分电厂采用的是定期人工冲洗的方法，同时对浆液密度进行手工检测，是比较消极的应对方式；改变密度计安装位置及在密度计入口设计冲洗水排放系统可以解决测量管路堵塞的问题；此外，采用周期取样压差测量原理的密度计代替原有密度计，堵塞和磨损问题也得到了一定程度的改善。

**(5) 脱硫系统物化实验不合规的问题：**部分电厂存在脱硫系统石膏、浆液化验项目及周期不满足标准要求的情况；石膏化验结果不合格，水份含量超标的问题也比较普遍。此外，没有按照相关标准要求的项目和频次对废水进行定期化验的问题也比较突出。

**(6) 脱硫石膏脱水困难：**出于经济性和废物利用角度考虑，现在部分电厂在不改变原有设施结构的基础上开始采用电石渣取代石灰石作为脱硫剂。随着设备的运行，出现了脱硫石膏脱水困难的问题。且当燃煤中硫分高时，加入大量的电石渣会影响  $\text{CaSO}_3$  氧化，部分电厂石膏中亚硫酸盐 >40%，使石膏脱水困难的问题更加恶化。因此，在电石渣脱硫系统运行过程中，增大浆液池容积和氧化风量有助于解

决石膏含量低、不宜脱水及吸收塔积垢等问题。另外有研究和实践表明，电石渣浆液的品质和运行 pH 值的控制是制约石膏品质的关键因素，使用电石渣做脱硫剂应根据实际情况，提前做好脱硫剂的预处理和石膏脱水系统的优化设计。

**(7) 脱硝系统停运：**SCR 脱硝技术在 305~420 °C 温度范围内的脱硝效率可以达到 80% ~ 90% 之间，但是由于机组起停机时或低负荷时烟温低，无法达到该技术要求的温度下限，导致脱硝系统停运，造成短时间内氮氧化物排放超标。因此，提高 SCR 脱硝系统自动控制的能力，可以采用主汽流量信号代替实际机组负荷信号来预测氮氧化物变化并在前馈部分加入氮氧化物浓度变化的微分作用，缩短控制响应时间，减少人为的喷氨过量；加强脱硝系统在线监测仪表的维护工作。定期校准在线表计并进行比对测试。氨逃逸表应采取抽取式（三点或多点）预处理后再进行激光吸收光谱分析；严格控制氨逃逸，减少硫酸氢铵的产生；定期优化脱硝喷氨系统，保证还原剂分布与烟气中氮氧化物浓度分布一致。

**(8) 喷氨过量：**选择性非催化还原技术（SNCR）脱硝工艺中的喷氨系统无法完全实现自动控制。喷氨自动控制系统受锅炉燃烧、煤种特性、催化剂特性、反应温度等因素影响，尤其当脱硝系统入口氮氧化物波动较大或机组负荷低时，自动控制系统会出现调节不及时的情况，极易造成喷氨过量。因此，对于 SNCR 脱硝而言，提高其全负荷适应性、加入添加剂、控制氨氮摩尔比、提高烟气和还原剂混合的均匀性及优化脱硝自动控制系统等措施可以有效提高脱硝效率，降低

氨逃逸。

### (三) 火力发电行业污染防治技术原理介绍

火力发电行业的主要污染物有粉尘、SO<sub>2</sub>和氮氧化物等。现阶段，主要的除尘技术有：电除尘、电袋复合除尘和袋式除尘技术。除尘技术应根据环保准则、燃煤性质、飞尘性质、现场条件、电厂规模和锅炉类型等进行选择。烟气脱硫技术主要运用物理与化学方法实现对烟气中硫的固定与脱除。当前，最为经典的脱硫方法有：石灰石法、电子束法与循环流化床法等。氮氧化物主要采取 SNCR-SCR 联合脱硝技术去除。目前，火电厂的各类去污技术正在不断探究与创新，技术日渐成熟。

表 4-2 常用污染防治技术

主要治理 污染物名 称/指标	技术名称	适用范围	技术特点
	电除尘技术	工况比电阻在 $1 \times 10^4 \Omega \text{ cm} \sim 1 \times 10^{11} \Omega \text{ cm}$ 范围内的烟尘去除	<p>①电除尘器是各类除尘器中效率最高的，除尘效率最高可达 99.9%。</p> <p>②电除尘器的阻力损失一般为 150 ~ 300 Pa，约为袋式除尘器的 1/5，在总能耗中所占的份额较低。</p> <p>③电除尘器由于结构上易于模块化，因此可以通过增加电除尘器工作单元和体积来增加烟气处理量。</p> <p>④常规高温电除尘器一般用于处理 350 °C 及以下的高温烟气，如果进行特殊设计，则可以处理 350 °C 以上的高温烟气。</p>
	电袋复合除尘技术	大多数燃煤机组燃用的煤种，尤其是高硅、高铝、高灰分、高比电阻、低硫、低钠、低含湿量的煤种	<p>①电袋复合除尘器具有长期稳定低排放、运行阻力低、滤袋使用寿命长、运行维护费用低、占地面积小、适用范围广的特点。</p> <p>②电袋复合除尘器能够长期稳定保持污染物达标或超低排放，除尘效率为 99.50% ~ 99.99%，出口烟尘浓度通常在 20 mg/m<sup>3</sup>。</p>

主要治理 污染物名 称/指标	技术名称	适用范围	技术特点
	袋式除尘技术	适用煤种及工况条件范围广泛，常用于捕集细小、干燥、非纤维性粉尘。	①袋式除尘器除尘效率基本不受燃烧煤种、烟尘比电阻和烟气工况变化等影响。 ②占地面积小，控制系统简单，可实现较为稳定的低排放。
	石灰石-石膏湿法脱硫技术	SO <sub>2</sub> 入口浓度低于12000 mg/m <sup>3</sup> 的燃煤烟气	①该工艺脱硫率高达95%以上，而且烟气含尘量也大大减少。有利于地区和电厂实行总量控制。 ②技术成熟，运行可靠性高，系统可利用率达98%以上。 ③无论是含硫量大于3%的高硫煤，还是含硫量低于1%的低硫煤，石灰石（石灰）-石膏湿法脱硫工艺都能适应。 ④在脱硫工艺的各种吸收剂中，石灰石价格最便宜，破碎磨细较简单，钙利用率较高。
	烟气循环流化床脱硫技术	适用于燃用中低硫煤或有炉内脱硫的循环流化床机组，特别适合缺水地区。	①工艺流程简洁、占地面积小、节能节水、排烟无需再热、烟囱无需特殊防腐、无废水产生等特点。 ②副产物为干态，便于处理处置。与其他脱硫工艺比较，具有的技术优势包括工艺简单，无需烟气冷却和加热。 ③设备基本无腐蚀、无磨损、无结垢，无废水排放，脱硫副产品为干态；占地少，节省空间，设备投资低；钙的利用率高，运行费用不高。 ④对煤种适应性强，既适用于不同硫份的燃煤电厂，也适合于现有电厂增设脱硫装置的改造等。
	氨法脱硫技术	适用于电厂周围200 km范围内有稳定氨源，且电厂周围没有学校、医院、居民密集区等环境敏感目标的300 MW级及以下的燃煤机组。	①氨水碱性强于石灰石浆液，可在较小的液气比条件下实现95%以上的脱硫效率。采用空塔喷淋技术，系统运行能耗低，且不易结垢。 ②氨法脱硫技术目前主要采用多段复合型吸收塔氨法脱硫工艺，对煤种适应性好，在低、中、高含硫烟气治理上的脱硫效率达99%以上。 ③氨法脱硫技术主要用于工业企业的自备电厂，最大单塔氨法脱硫烟气量与300 MW燃煤发电机组烟气量相当。
	SNCR-SCR联合脱硝技术	适用于受空间限制无法加装大量催化剂的中小型机组。	①与SCR脱硝技术相比，SNCR-SCR联合脱硝技术中的SCR反应器一般较小。 ②催化剂层数较少，一般利用SNCR的逃逸进行脱硝。

#### (四) 火力发电行业污染防治典型应用案例

##### 案例一：某发电有限公司，电袋复合除尘工艺技术

**案例简介：**某电厂一期 2×600 MW 燃煤机组工程自 2003 年 1 月开展前期工作，2004 年 11 月开工建设，工程同步建设高效静电除尘和烟气全脱硫装置，双机于 2007 年投产发电。

**工程规模：**建厂时，公司已投入 7 亿余元建设环保装置。而到了 2013 年前后，公司又投入 4.4 亿元开始环保装置的改造升级。目前，改造已经完成，发电厂当前的排污标准  $\text{SO}_2$  不高于  $35 \text{ mg/m}^3$ ；烟尘不高于  $10 \text{ mg/m}^3$ ；氮氧化物不高于  $50 \text{ mg/m}^3$ ，均在“超低排放”标准范围内。

**处理性能：**除尘装置是在“双室五电场的基础上，改为前两级电除尘加后三级布袋除尘装置”，除尘器除尘效率可达到大于 99.96%。

##### 案例照片：



图 4-1 某公司环保处理工艺全景图

## 案例二：某发电总厂石灰石 - 石膏湿法脱硫工艺

**案例简介：**四川省某电厂装机  $3 \times 200$  MW，高坝发电厂装机  $1 \times 100$  MW。

**工程规模：**该厂烟气脱硫工程项目是在两台 200 MW 发电机组上安装脱硫装置，总投资约 1.7 亿元。

**处理性能：**脱硫装置采用石灰石 - 石膏湿法脱硫工艺，脱硫效率大于 95%。投运正常后，按机组年运行 5000 h 计算，年可除去  $\text{SO}_2$  58000 余吨，烟尘 820 t，极大地改变了周边地区的大气环境。

**案例照片：**



图 4-2 某发电总厂脱硫工艺全景图

### 案例三：某发电厂低氮燃烧改造+SCR 烟气脱硝技术

案例简介：始建于 1958 年，是西南地区出现较早的火力电厂。

工程规模：后经历了四期建设工程，全厂总装机容量 126 万 kW，固定资产 60 多亿元。

处理性能：通过低氮燃烧改造，将氮氧化物排放降低至 450 mg/Nm<sup>3</sup> 以内，然后通过 SCR 脱硝装置（SCR 脱硝装置入口浓度按照 550 mg/Nm<sup>3</sup> 考虑），最终将氮氧化物排放控制在 200 mg/Nm<sup>3</sup> 以内。不进行低氮燃烧改造，仅通过 SCR 脱硝装置（SCR 脱硝装置入口浓度按照 910 mg/Nm<sup>3</sup> 考虑），最终将氮氧化物排放控制在 200 mg/Nm<sup>3</sup> 以内

案例照片：



图 4-3 某发电厂“低氮燃烧改造+SCR 烟气脱硝技术”工艺全景图

#### 案例四：某发电总厂磷铵肥法（PAFP）烟气脱硫工艺

案例简介：本案例成立于 1993 年，现有装机容量 65 万千瓦，员工 1800 余人。

工程规模：电厂有两个 50 MW 发电机组和两个 100 MW 发电机组，总装机容量为 300 MW。机组配备两台 230 t/h 燃煤锅炉 和两台 410 t/h 燃煤锅炉。发电总厂现有装机容量 70 万千瓦，其中一分电厂总装机容量为 30 万千瓦，二分电厂装机容量 40 万千瓦。

处理性能：脱硫效率大于 95%

案例照片：



图 4-4 某发电总厂电厂烟气脱硫工艺全景图

#### （五）结论与展望

通过对四川省多家燃煤电厂的除尘、脱硫和脱硝等烟气处理设施的监督管理，提出了以下改进建议和管理措施。对于除尘设施，要严格按照相关操作规程，根据燃煤及机组运行状况及时优化、调整运行参数；并重视检修工作，减少设备故障发生率。对于脱硫吸收塔要特

别注意加强易腐蚀部位的防腐涂刷；根据运行参数调整除雾器冲洗水周期，维持系统水平衡；重视排水和工艺水水质控制，降低氯离子含量；采取设备改造或者新工艺应对炉内干法脱硫+炉外半干法脱硫脱硫酸剂下料不匀，密度计故障率高和脱硫废水投运率低等问题；加强对电石渣脱硫系统优化运行的研究。提高催化剂全负荷适应性和还原剂自动控制系统运行的可靠性，通过喷氨系统优化调整促进还原剂和烟气中氮氧化物混合的均匀性，减少氨逃逸量，缓解空预器堵塞和腐蚀是脱硝系统目前最突出的问题，相关的研究及运行调整也集中在这方面。燃煤电厂应从管理层面上重视技术监督工作，提高认识，加大人员和资金投入，采取有效措施充分调动全员积极性，从领导到基层员工多层次多角度共同发力，把设施隐患消灭在萌芽状态，确保企业安全平稳度过超低排放改造“后时代”。

根据当前我省的能源消耗、环境污染的情况，既然火力发电将长期作为生产生活的主要供应源，那么在这一长期趋势和大背景下，积极探索清洁高效的火力发电技术就显得尤为重要。常见的新型火力发电技术，包含煤炭加工、煤炭转化、烟气净化以及燃料电池四种，尤其是燃料电池和烟气净化，对此，行业内学者和电厂工程师应继续探索，寻找更加清洁高效的火力发电方式。现阶段，我省的社会用电量需求大，电厂分布广。如果同时研究、同时转型，在技术上和财政上，都得不到强有力的支持。因此应该在制度上加强梯度建设，优先在发达地区，技术成熟的地区做试点，然后逐级更新。对于电厂的发展，要切合当地的资源以及需求，真正做到因地制宜。

## 五、全省涉 VOCs 行业大气污染防治技术

### (一) 涉 VOCs 行业污染防治现状

自 2020 年起，四川省印刷业呈现持续稳定健康发展态势。一是产业规模不断壮大。2021 年全省印刷业资产总额 450.14 亿元，较“十二五”末增长 5.40%；印刷工业总产值 474.35 亿元，较“十二五”末增长 12.10%；销售收入 464.37 亿元，较“十二五”末增长 12.65%；利润总额 24.7 亿元，较“十二五”末增长 4.56%；二是产业结构逐步优化。2020 年全省印刷企业 3021 家，较“十二五”末减少 7.01%；从业人员 8.38 万人，较“十二五”末减少 6.98%；年印刷产值超过 5000 万元的规模以上重点印刷企业 156 家，较“十二五”末增长 12.88%，产业集中度继续提高；三是内生动力得到增强。全省 CTP 装机量达 756 台，数字印刷机装机量 79 台，技术装备水平持续提高。传统印刷加快转型升级，新产品、新业态和新模式不断涌现，印刷与文化、服务等领域加快融合发展，印刷电子商务平台达 18 家；四是绿色印刷成效显著。通过绿色印刷认证企业数量 652 家，较“十二五”末增长 79.50%。全省中小学教材教辅、省内出版的少儿类读物实现绿色印刷全覆盖，绿色印刷成为行业共识；五是市场环境更加成熟。印刷业法规制度进一步完善，出版管理部门简政放权、放管结合、优化服务，监管能力和服务水平不断提高。行业协会等社会组织发挥桥梁和纽带作用，推动了信用评价体系建设和行业自律。标准质量体系基本建立，“宽进严管、依法经营、产品环保、践行标准、科学管理、诚实守信”的市场环境逐步形成。

四川化工产业包括国家在四川建设的重大石油化工项目和天然

气、硫、磷、钛、盐等。经过几十年的发展，已形成门类比较齐全，结构相对合理，布局相对集中，专业基本配套的格局，是国家重要的化工生产和科研开发基地。2007 年四川化工产业拥有规模以上企业 714 家，实现销售收入、工业增加值、利税分别达 758.43 亿元、346.4 亿元、82.62 亿元，分别占全省工业的 7.23%、9.67 %、7.14%，其中利润 56 亿元，占全省工业利润的 8.66%。

此外据国家统计局涂企产值公布，四川的涂料业发展迅猛，其现价工业总产值、新产品产值、现价销售产值的增幅皆远远高于其他地区，其增幅分别为：98.8%、412.1%、97.2%。可见，四川已逐渐发展成为国内涂料市场的新增长极。从目前现有的喷涂流水线来看，主要存在以下问题：

一是设计水平不高。其一是我国在喷涂设备研制方面投入不多，很少有成熟的喷涂设备占领市场，即便是国内自行建设的喷涂流水线，生产线上的一些关键设备也是引进为多。其二是我国一些基础元件及控制元件质量不过关，经受不住长期考验。因此，尽管生产线设计先进，但却无设备的充分保证。同时国内对生产线的投资盲目降低，不能按要求选取设备。由于诸多原因反映出生产线水平不高，牵涉到设计水平变化。实际我国自行设计制造的一些生产线结合国情，工艺及设备水平也不逊于国外的一些生产线，但常为元器件的可靠性和寿命所困扰。二是制造水平粗糙。国内行业布局分散，企业规模一般比较小，综合实力薄弱，在很大程度上依赖于车工操作，所以制造工艺粗糙、技术落后设备外观拙劣，直接影响了设备的性能指标和使用可靠性，也导致了国内喷涂流水线价位低下的局面。三是使用

水平低下。操作人员对涂装知识欠缺，不按操作规程，不按工艺条件，无视操作环境，对环境保护不重视。四是安全水平堪忧。我国一些喷涂流水线由于一次性投资的限制，以及对安全问题的不够重视，有大量的喷涂流水线不符合涂装作业安全规程，对照国家涂装作业安全规程系列标准，在防毒、防尘、防火、防爆等方面存在诸多隐患，如何达到综合防护，促进喷涂流水线向有利于工人健康、保证安全的方向发展不够重视、不下功夫。（注：数据来自 2019 年统计局统计数据）

## （二）涉 VOCs 行业污染防治技术水平与需求

根据对已建成园区企业进行调查，全省涉 VOCs 行业主要涉及化工行业，涂装行业，油品储运行业和包装印刷行业四大板块。各行业企业处理后的废气排放标准主要参照我省新出台的《四川省固定污染源大气挥发性有机物排放标准》（DBDB51/ 2377—2017）。该标准的排放限值比国家排放标准收严了 50% 以上，同时针对重点行业排放的特征 VOCs 污染物，较国家排放标准增加了 20 项污染物控制项目。

其中家具制造行业喷涂，调漆等工艺要求 VOCs 最高排放浓度为  $60\text{mg}/\text{m}^3$  去除率不得低于 80%；印刷行业同样要求 VOCs 最高排放浓度为  $60\text{mg}/\text{m}^3$  去除率不得低于 80%；油品储运方面，石油炼制过程中废水处理装置排出有机废气的 VOCs 最高浓度为  $100\text{mg}/\text{m}^3$  去除率不得低于 97%；汽车制造行业喷漆工艺等要求 VOCs 最高排放浓度为  $60\text{mg}/\text{m}^3$  去除率不得低于 90%；表面涂装过程中要求 VOCs 最高排放浓度为  $\text{mg}/\text{m}^3$  去除率不得低于 80%。各类行业无组织最高排放浓度为  $2.0\text{mg}/\text{m}^3$ 。

根据我省“十四五”生态保护规划明确要求，要坚持源头治理、综

合施策，深化工业源、移动源、面源治理，协同治理 PM<sub>2.5</sub> 和臭氧污染。VOCs 作为臭氧前体物，针对二者协同治理我省还在去年出台《臭氧污染防控攻坚方案》。以重点区域和重点行业的污染源（工业源、城市面源、移动源）排放管控为着力点，强化 VOCs 和氮氧化物协同控制，把 VOCs 治理作为现阶段控制臭氧污染的有效途径。大力推进低（无）VOCs 含量清洁原辅材料替代，对化工、工业涂装、包装印刷等重点行业实施源头替代；督促指导企业对照标准要求开展 VOCs 无组织排放环节排查整治，对达不到要求的加快整改；开展化工、制药、农药等重点行业泄露排查，建立泄漏检测与修复企业清单。组织开展 VOCs 走航监测，排查重点管控行业及管控区域；强化臭氧污染前体物应急减排，建立应急管控清单。结合企业 VOCs 减排现状，目前的治理技术主要集中在末端治理上。

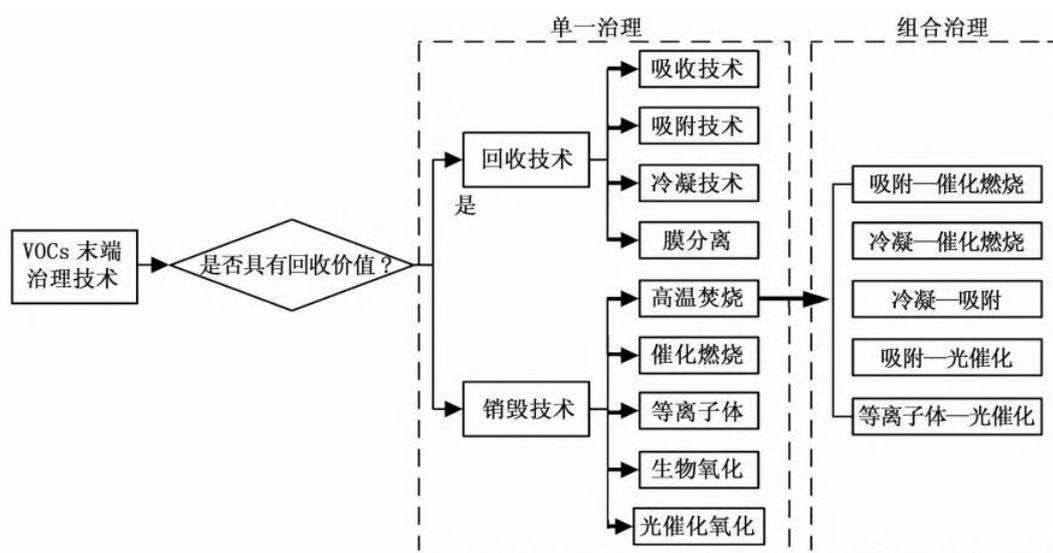


图 5-1 VOCs 末端治理技术路线

表 5-1 VOCs 常用污染防治技术

技术名称	适用范围	技术特点
吸附浓缩技术	中低浓度 VOCs	①对中低浓度 VOCs 的净化效率高。吸附效率受吸附材料影响较大。吸附工艺一般与其他处理工艺组合使用。 ②在不施用深冷、高压的手段下，可以有效回收有价值的有机物组分。 ③具有操作简单，吸附能力强，吸附效果好，可以对活性炭进行再生。沸石分子筛吸附剂还具有吸附选择性强，在较高的温度下，吸附效率仍然比较高。
生物净化技术	适合处理“高水溶性+易生物降解”的 VOCs	①去除效率达到 70%—90%，对其余类型的 VOCs 处理效果较差。 ②主要应用于中低浓度有机废气的处理；风量较大的情况下，其处理的浓度更低。 ③微生物的筛选和挂膜的时间较长。易造成填料堵塞。
直接燃烧法	高浓度 VOCs	①非常适合用于高浓度废气及间歇性排放工艺，处理净化效率高，连续运行稳定，技术成熟且安全可靠、操作维护简单，使用寿命长。 ②一次性投资成本高，运行成本较高； ③对进口有机物的浓度要求高，不适宜处理小风量的废气，对含有机硅成分较多的废气容易造成蓄热体堵塞，更换蓄热材料费用较高。
催化燃烧法	适合处理低于 450℃的 VOCs	①处理净化效率较高，能达到 95%以上，燃烧温度较低，较少产生 NO <sub>x</sub> 和 SO <sub>x</sub> ，不受水气含量影响。 ②关键因素是催化剂的选择，催化剂的选择需要与处理对象相吻合。
吸收法	适合处理低温、高浓度的 VOCs	①适用于炼油行业高压、低温、高浓度的 VOCs 废气处理，设施运行费用低。
冷凝回收法	高浓度 VOCs	①处理高浓度废气，特别是组分比较单纯的、有一定回收经济价值的废气，净化效率为 50%—80%。 ②吸收效率波动幅度大，可作为燃烧或吸附处理的预处理工段。 ③可处理含有大量水蒸气的高温蒸汽。 ④对废气的处理程度受到冷凝温度限制，要处理效率高或处理低浓度废气时，需要将废气冷却到非常低的温度，经济上不划算。
膜分离油气回收法	挥发油气	①可用于轻质油品、苯类、混芳类装车过程以及乙烯粗裂解产品汽油储罐释放的挥发油气处理。

省内涉 VOCs 企业在末端治理技术中主要采用回收治理技术和销毁治理技术两种。其中回收治理技术中，主要采用吸附、吸收、冷凝及膜分离手段来对 VOCs 进行捕集及后续回收处理。吸附技术利用

吸附剂将气体混合物中，具有某种特性的组分进行吸附，从而实现混合气体中部分组分的分离。现阶段常用的吸附剂有活性炭（颗粒状、粉状）、分子筛（微孔、介孔、大孔）、疏水硅胶和高分子吸附树脂等。吸收也是 VOCs 末端治理的重要技术之一，VOCs 废气中的有机碳氢化合物与 VOCs 废气中的有机碳氢化合物亲和力，然后根据有机碳氢化合物分子和吸收剂的不同物理性质，将两者分离开。目前，常用的吸收剂有煤油和柴油。冷凝技术的运行主要利用的是压力冷却原理，将气态形式的 VOCs 转化成液态。膜分离技术是一种利用 VOCs 和其他气态污染物，通过自然膜或人工合成膜，通过过滤、过滤或其他动态特性，将 VOCs 与混合物分离开来。而 VOCs 的销毁机理是改变挥发性有机物的组成结构，使其转化成一个其他的无挥发性或无毒性的物质。VOCs 的销毁治理技术包括燃烧、等离子体、光催化氧化等。燃烧法能将烃类完全分解，无二次污染，操作简单。而高温焚烧一般控制在 700℃ 以上，可以将大部分有机物分解成二氧化碳和水，脱除效率可达 95% 以上。与高温焚烧相比，催化燃烧技术可显著降低设备运行费用。光催化氧化技术可以分解大多数的有机物。可将 VOCs 中的有害物质转化为相对安全的特性，因而不会产生任何粉尘。但是，缺点是开发容易导致活性下降，影响污染物的处理，而且这些方法都不适于大规模处理。

在实际的生产活动中产生的 VOCs 成分较为复杂，在部分生产中产生的 VOCs 以混合的形式排放，单一治理技术无法达到明显的治理效果，在现有的废气治理方法中，大多数大型企业，尤其是家具和化工企业采用组合治理方法来处理废气，其中采用较多的是低温等离子体 - 光催化治理技术，治理效率在 96% 以上，而冷凝 - 变压吸附治理技术治理效率在 83% 以上，但是没有达到理想效果，最高效率仅为

90%，膜分离-变压吸附治理技术由于温度的限制，在不同环境下的治理效率不理想，治理效率波动较大。我省目前面临细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)和臭氧(O<sub>3</sub>)污染的双重压力。从省内目前多数企业VOCs的排放情况来看，VOCs治理和管控中还存在以下难点与问题。

### **VOCs治理的难点**

1.工业排放VOCs种类繁多，物理和化学性质差异大，单一治理技术难以有效治理；

2.排放条件复杂（温度、湿度、风量、颗粒物浓度等）；

3.排放方式不固定，浓度无规律，浓度范围波动较大；

4.排放环节多而散，无组织逸散普遍，特别是具有臭味的VOCs。

### **VOCs治理的问题**

1.研发能力薄弱。设备研发投入少，对不同行业有机废气认识不足，对各种技术状态的理解不够，在技术使用上缺乏针对性，致使废气治理设施的使用效果通常较差；

2.设计能力差。企业只是侧重于末端治理设施的设计与制造，与生产车间的通排风系统不匹配，不但工程规模小、效率差，也难以保证治理效果；

3.安全性能得不到保障。净化设备安全性能设计较差，容易导致设施存在安全隐患，造成客户企业生产损失；

4.投资成本高。采用的技术耗材较多，能耗较大，人工操作，运维成本高。多数企业面临治理资金缺乏、技术能力不足的现实状况。不少企业存在VOCs废气处理方面的典型问题，如VOCs物料储存场地不规范、生产车间未密闭、治理效率低下、设备不正常运行等。

### (三) 涉 VOCs 行业污染防治技术原理介绍

#### 1. 化工行业



图 5-2 化工行业

#### 1.1 源头削减

##### (一) 生产工艺

宜采用全密闭、连续化、自动化等生产技术。

##### (二) 装置

采样口应采用密闭采样或等效设施。企业内污染严重、服役时间长的生产装置和管道系统实施升级改造。宜选用无泄漏或泄漏量小的机泵和管阀件等设备。

##### (三) 输送

优选采用管道输送，减少罐车和油船装卸作业及中间罐区。相近储罐之间收发挥发性有机液体，可采用气相平衡技术。含溶解性油气物料（例如酸性水、粗汽油、粗柴油等），在长距离、高压输送进入常压罐前，宜经过脱气罐回收释放气，避免闪蒸损失。

#### **(四) 延迟焦化**

采用冷焦水密闭循环、焦炭塔吹扫气密闭回收等技术。宜采用密闭除焦技术改造。

#### **(五) 脱水脱气**

采用密闭脱水、脱气、掺混等工艺。

#### **(六) 防腐防水涂装**

采用低 VOCs 含量涂料替代溶剂型涂料。

#### **(七) 污水处理场**

含油污水应密闭输送, 安装水封等控制措施。尽可能减少集水井、隔油池数量, 将污水沟渠管道化。集水井或无移动部件隔油池可安装浮动盖板(浮盘)。

#### **(八) 循环水冷却塔**

宜采用密闭式循环水冷却系统。

### **1.2 过程控制**

#### **(一) 开展设备与管线组件泄漏检测与修复(LDAR)工作**

企业应识别载有气态 VOCs 物料、液态 VOCs 物料的设备 and 管线组件的密封点, 建立企业密封点档案和泄漏检测与修复计划。

宜建立企业密封点 LDAR 信息平台, 全面分析泄漏点信息, 对易泄漏环节制定针对性改进措施。

泵、压缩机、阀门、开口阀或开口管线、气体/蒸气泄压设备、取样连接系统每 3 个月检测一次。法兰及其他连接件、其他密封设备每 6 个月检测一次。

## (二) 储罐

依据储存物料的真实蒸气压选择适宜的储罐罐型。

罐体应保持完好，不应有漏洞、缝隙或破损。

固定顶罐附件开口（孔）除采样、计量、例行检查、维护和其他正常活动外，应密闭；应定期检查呼吸阀的定压是否符合设定要求。

浮顶罐浮顶边缘密封不应有破损，支柱、导向装置等附件穿过浮盘时，应采取密封措施。应定期检查边缘呼吸阀定压是否符合设定要求。

内浮顶罐浮盘与罐壁之间应采用液体镶嵌式、机械式鞋形、双封式等高效密封方式。

外浮顶罐浮盘与罐壁之间应采用双封式密封，且初级密封采用液体镶嵌式、机械式鞋形等高效密封方式。

加强人孔、清扫孔、量油孔、浮盘支腿、边缘密封、泡沫发生器等部件密封性管理，强化储罐罐体及废气收集管线的动静密封点检测与修复。

宜采用油品在线调和技术。

宜采取平衡控制进出罐流量、减少罐内气相空间等措施。

常见石油炼制储罐介质、罐型、储存温度见表。

表 5-2 常见石油炼制储罐介质、罐型、储存温度一览表

序号	介质	常见罐型	常见储存温度	备注
1	原油	内浮顶罐、外浮顶罐	常温	苯、甲苯、二甲苯等采用内浮顶罐，并安装顶空联通置换油气回收装置
2	汽油	内浮顶罐、外浮顶罐	常温	
3	航空汽油	内浮顶罐、外浮顶罐	常温	
4	轻石脑油	内浮顶罐、外浮顶罐	常温	
5	重石脑油	内浮顶罐、外浮顶罐	常温	
6	航空煤油	内浮顶罐、外浮顶罐	常温	
7	柴油	固定顶罐、内浮顶罐、外浮顶	常温	

序号	介质	常见罐型	常见储存温度	备注
8	烷基化油	内浮顶罐	常温	
9	抽余油	内浮顶罐	常温	
10	蜡油	固定顶罐	伴热	
11	渣油	固定顶罐	伴热	
12	污油	固定顶罐、内浮顶罐	常温	
13	燃料油	固定顶罐、外浮顶罐	常温	
14	正己烷	内浮顶罐	常温	
15	正庚烷	固定顶罐、内浮顶罐	常温	
16	正壬烷	固定顶罐	常温	
17	正癸烷	固定顶罐	常温	
18	MTBE	内浮顶罐	常温	
19	丙酮	内浮顶罐	常温	
20	苯	内浮顶罐	常温	
21	甲苯	内浮顶罐	常温	
22	间二甲苯	内浮顶罐	常温	
23	邻二甲苯	内浮顶罐	常温	
24	对二甲苯	内浮顶罐	常温	
25	甲酸甲酯	压力罐	常温	
26	乙醇	内浮顶罐	常温	
27	甲醇	内浮顶罐	常温	
28	正丁醇	固定顶罐、内浮顶罐	常温	
29	环己醇	固定顶罐、内浮顶罐	必须高于 25.9℃	
30	乙二醇	固定顶罐	常温	
31	丙三醇	固定顶罐	必须高于 20℃	
32	二乙苯	内浮顶罐	常温	
33	苯酚	固定顶罐	必须高于 43℃	
34	苯乙烯	固定顶罐	常温	
35	醋酸	固定顶罐	必须高于 16℃	
36	正丁酸	固定顶罐	常温	
37	丙烯酸	固定顶罐	必须高于 14℃	
38	丙烯腈	内浮顶罐	常温	
39	醋酸乙烯	内浮顶罐	常温	
40	乙酸乙酯	内浮顶罐	常温	
41	乙二胺	固定顶罐	必须高于 9℃	
42	三乙胺	内浮顶罐	常温	
43	丙苯	固定顶罐	常温	
44	乙苯	固定顶罐	常温	
45	正丙苯	固定顶罐	常温	
46	异丙苯	固定顶罐	常温	
47	1-辛醇	固定顶罐	常温	
48	甲基丙烯酸甲酯	固定顶罐	常温	
49	间二氯苯	固定顶罐	常温	

序号	介质	常见罐型	常见储存温度	备注
50	正丙醇	固定顶罐	常温	
51	异丙醇	内浮顶罐	常温	
52	异丁醇	固定顶罐	常温	
53	异辛烷	内浮顶罐	常温	
54	乙酸丁酯	固定顶罐	常温	
55	四氯乙烯	固定顶罐	常温	
56	糠醛	固定顶罐	常温	
57	甲酸	内浮顶罐	常温	
58	甲基异丁基	固定顶罐	常温	
59	环己酮	固定顶罐	常温	
60	癸醇	固定顶罐	必须高于 6℃	
61	二乙二醇	固定顶罐	常温	
62	醋酸正丙酯	固定顶罐	常温	
63	醋酸仲丁酯	固定顶罐	常温	
64	DMF	固定顶罐	常温	
65	甲乙酮	内浮顶罐	常温	
66	苯胺	固定顶罐	常温	
67	煤焦油	固定顶罐	常温	

### (三) 装卸

宜采用快速干式接头。

严禁喷溅式装载，采用顶部浸没式装载或底部装载。顶部浸没式装载出油口距离罐底高度应小于 200 毫米。

应密闭装油并将油气收集、输送至回收处理装置。

### (四) 催化重整

优化调整催化剂再生温度、供风量等。

### (五) 污水集输与处理

集水井（池）、调节池、隔油池、气浮池、曝气池、浓缩池等污水处理池应采用密闭收集措施，密闭材料应具有防腐性能，密闭盖板应接近液面，负压收集，回收或处理。优化气浮池运行，严格控制气浮池出水中的浮油含量。

## （六）循环水冷却塔



图 5-3 循环水冷却塔

对于开式循环水,每六个月至少开展一次循环水塔和含 VOCs 物料换热设备进出口总有机碳 (TOC) 或可吹扫有机碳 (POC) 监测工作,出口浓度大于进口浓度 10%的,要溯源泄漏点并及时修复。

## （七）火炬

在任何时候,挥发性有机物和恶臭物质进入火炬都应能点燃并充分燃烧。禁止熄灭火炬系统长明灯。设置视频监控装置。

## （八）非正常工况

制定开停车、检维修、生产异常等非正常工况的操作规程和污染控制措施。装置检维修过程管理宜数字化,计量吹扫气量、温度、压力等参数;宜通过辅助管道和设备等建立蒸罐、清洗、吹扫产物密闭排放管网。选用适宜的清洗和吹扫介质。检修过程产生的物料分类进入瓦斯管网和火炬系统,以及带有废气处理装置的污油罐、酸性水罐和污水处理场。做好检维修记录,并及时向社会公开非正常工况相关

环境信息，接受社会监督。非计划性操作应严格控制污染，杜绝事故性排放，事后及时评估并向生态环境主管部门报告。

### 1.3 末端治理

工序/位置	推荐方法与注意事项	常用处置技术
储罐	储存真实蒸气压 $\geq 5.2$ kPa 但 $< 27.6$ kPa 的设计容积 $\geq 150$ m <sup>3</sup> 的挥发性有机液体储罐，以及储存真实蒸气压 $\geq 27.6$ kPa 但 $< 76.6$ kPa 的设计容积 $\geq 75$ m <sup>3</sup> 的挥发性有机液体储罐，若采用固定顶罐，应安装密闭排气系统至有机废气回收或处理装置。	吸收、吸附、冷凝、膜分离+蓄热式催化燃烧、催化燃烧
装卸	甲醇、乙醇、环氧丙烷等易溶于水的化学品装载作业排气，宜采用水吸收或吸收+催化燃烧处理。	吸收、吸附、冷凝、膜分离+蓄热式燃烧、蓄热式催化燃烧、催化燃烧
废水液面	隔油池、气浮池等高浓度废气宜采用催化燃烧、焚烧等处理技术，不应采用低温等离子、UV 光解等单一低效处理技术。	生物法、吸附、焚烧
工艺有组织	重整催化剂再生烟气、离子液法烷基化装置催化剂再生烟气	脱氯后焚烧、催化燃烧
	氧化脱硫醇尾气	焚烧炉/低温柴油吸收
	氧化沥青尾气	焚烧
	乙二醇/环氧乙烷装置乙二醇/环氧乙烷反应系统循环气	焚烧
	苯乙烯装置多乙苯塔尾气和真空泵密封罐尾气	作加热炉燃料
	聚苯乙烯装置密封液罐尾气	冷凝/除雾器回收液滴
	苯酚丙酮装置多异丙苯塔顶尾气和氧化反应器尾气	焚烧炉或催化燃烧处理，其他含有烃类的废气应进入火炬系统
	聚乙烯、聚丙烯装置尾气	催化燃烧、焚烧
	氯乙烯装置工艺尾气	高温焚烧处理，焚烧烟气进行吸收处理
	精对苯二甲酸 PTA 生产尾气	高压催化燃烧
	丙烯腈生产尾气	焚烧、催化燃烧
	橡胶生产尾气	预处理（冷凝、除雾、过滤、洗涤等）+催化燃烧、蓄热式催化燃烧
	环氧丙烷/苯乙烯生产尾气	催化燃烧
	苯胺生产废气	预处理（冷却和除雾）+催化燃烧
氯苯生产废气	蓄热燃烧+碱洗+吸附	

工序/位置	推荐方法与注意事项	常用处置技术
固体废物堆场	废催化剂、废吸附剂、废树脂、蒸馏残液等危险废物贮存间废气应收集处理	活性炭吸附
非正常工况	装置检维修过程选用适宜的清洗剂和吹扫介质；清扫气应接入有机废气回收或处理装置	冷凝、吸附、吸收、催化燃烧

## 2. 涂装行业

### 2.1 源头削减

#### (一) 含 VOCs 原辅材料

使用的涂料、清洗剂、胶粘剂中 VOCs 含量的限值应符合 2020 年 7 月 1 日起实施的《船舶涂料中有害物质限量》（GB 38469-2019）以及 2020 年 12 月 1 日起实施的《木器涂料中有害物质限量》（GB 18581-2020）、《车辆涂料中有害物质限量》（GB 24409-2020）、《工业防护涂料中有害物质限量》（GB 30981-2020）、《胶粘剂挥发性有机化合物限量》（GB 33372-2020）、《清洗剂挥发性有机化合物含量限值》（GB 38508-2020）等标准的要求。

在同一个工序内，同时使用符合《低挥发性有机化合物含量涂料产品技术要求》（GB/T 38597-2020）规定的粉末、水性、无溶剂、辐射固化涂料产品，符合《清洗剂挥发性有机化合物含量限值》（GB 38508-2020）规定的水基、半水基清洗剂产品，符合《胶粘剂挥发性有机化合物限量》（GB 33372-2020）规定的水基型、本体型胶粘剂产品时，排放浓度稳定达标的，相应生产工序可不执行末端治理设施处理效率不应低于 80% 的要求。

## (二) 喷涂工艺



图 5-4 喷涂工艺

除大型工件特殊作业（例如，船舶制造行业的分段总组、船台、船坞、造船码头等涂装工序）外，禁止敞开式喷涂、晾（风）干作业。

大件喷涂可采用组件拆分、分段喷涂方式，兼用滑轨运输、可移动喷涂房等装备。

宜采用静电喷涂、自动喷涂、高压无气喷涂或高流量低压力（HVLP）喷枪等高效涂装技术，减少使用手动空气喷涂技术。

### 2.2 过程控制

#### (一) 储存

涂料、固化剂、稀释剂、清洗剂、胶粘剂、密封胶等 VOCs 物料应密闭储存。

盛装 VOCs 物料的容器或包装袋应存放于室内，或存放于设置有雨棚、遮阳和防渗设施的专用场地。

盛装 VOCs 物料的容器或包装袋在非取用状态时应 加盖、封口，保持密闭。

废涂料、废稀释剂、废清洗剂、废活性炭等含 VOCs 废料（渣、

液) 以及 VOCs 物料废包装物等危险废物密封储存于危废储存间。

## (二) 转移和输送

VOCs 物料转移和输送应采用密闭管道或密闭容器等。

宜采用集中供漆系统。

## (三) 调配

涂料、稀释剂等 VOCs 物料的调配过程应采用密闭设备或在密闭空间内操作，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统；无法密闭的，应采取局部气体收集措施，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统。

宜设置专门的密闭调配间。

## (四) 喷涂

喷涂过程应采用密闭设备或在密闭空间内操作，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统；无法密闭的，应采取局部气体收集措施，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统。

新建线宜建设干式喷漆房，鼓励使用全自动喷漆和循环风工艺；使用湿式喷漆房时，循环水泵间和刮渣间应密闭，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统。



图 5-5 喷漆房

涂装车间应根据相应的技术规范设计送排风速率，禁止通过加大送排风量或其他通风措施故意稀释排放。

### （五）流平

流平过程应在密闭空间内操作，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统；无法密闭的，应采取局部气体收集措施，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统。

禁止在流平过程中通过安装大风量风扇或其他通风措施故意稀释排放。

### （六）干燥



图 5-6 喷涂行业干燥烘箱

干燥（烘干、风干、晾干等）过程应在密闭空间内操作，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统；无法密闭的，应采取局部气体收集措施，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统。

温度较高的烘干废气不宜与喷涂、流平废气混合收集处理。

### （七）清洗

设备清洗应采用密闭设备或在密闭空间内操作，换色清洗应在密闭空间内操作，产生的废气应排至 VOCs 废气收集处理系统；无法密闭的，应采取局部气体收集措施，废气应排至 VOCs 废气收集处理系

统。使用多种颜色漆料的，宜设置分色区，相同颜色集中喷涂，减少换色清洗频次和清洗溶剂消耗量。

### (八) 回收

涂装作业结束时，除集中供漆外，应将所有剩余的 VOCs 物料密闭储存，送回至调配间或储存间。设备清洗和换色过程产生的废清洗溶剂宜采用密闭回收废溶剂系统进行回收。

### (九) 非正常工况

VOCs 废气收集处理系统发生故障或检修时，对应的生产工艺设备应停止运行，待检修完毕后同步投入使用；生产工艺设备不能停止运行或不能及时停止运行的，应设置废气应急处理设施或采取其他替代措施。

## 2.3 末端治理

工序/位置	推荐方法与注意事项	常用处置技术
喷涂、晾（风）干	新建线	文丘里/水旋/水幕湿法漆雾捕集+多级干式过滤除湿联合装置；干式漆雾捕集过滤系统
	小风量低浓度或不适宜浓缩脱附的废气可采用一次性活性炭吸附等工艺，活性炭吸附工艺应设置进出口浓度监测并根据浓度变化监测活性炭饱和程度，根据饱和程度及时更换活性炭	吸附浓缩+燃烧（蓄热燃烧、催化燃烧）；活性炭吸附
烘干	使用溶剂型涂料的生产线，烘干废气宜单独处理，具备条件的可采用回收式热力燃烧装置。	热力焚烧/催化燃烧
调配、流平（含闪干）	调配废气宜采用吸附方式或其他等效方式处置。 调配、流平废气可与喷涂、晾（风）干废气一并处理。	活性炭吸附
清洗	清洗废气宜采用吸附方式或其他等效方式处置。	活性炭吸附
非正常工况	应记录污染防治设施非正常情况信息。	/

### 3. 家具行业

#### 3.1 源头削减

##### (一) 含 VOCs 原辅材料

家具行业含 VOCs 原辅材料主要包括稀释剂、固化剂、胶黏剂(溶剂型胶黏剂、水基型胶黏剂、本体型胶黏剂)、清洗剂、涂料(水性涂料、粉末涂料、溶剂型涂料、辐射固化涂料)、腻子。在源头削减方面,使用的涂料(含腻子)中 VOCs 含量限值应满足《木器涂料中有害物质限量》(GB 18581-2020)要求,胶黏剂中 VOCs 含量限值应满足《胶粘剂挥发性有机化合物限量》(GB 33372-2020)要求,清洗剂中 VOCs 含量限值应满足《清洗剂挥发性有机化合物含量限值》(GB 38508-2020)要求。

在同一个工序内,同时使用符合《低挥发性有机化合物含量涂料产品技术要求》(GB/T 38597-2020)规定的粉末、水性、无溶剂、辐射固化涂料产品,符合《清洗剂挥发性有机化合物含量限值》(GB 38508-2020)规定的水基、半水基清洗剂产品,符合《胶粘剂挥发性有机化合物限量》(GB 33372-2020)规定的水基型、本体型胶粘剂产品时,排放浓度稳定达标的,相应生产工序可不执行末端治理设施处理效率不应低于 80%的要求。

##### (二) 喷涂工艺

喷涂工艺环节应在保持密闭的喷漆房(间)内实施,严禁敞开式喷涂、晾(风)干作业。



图 5-7 喷涂工艺

### 3.2 过程控制

#### (一) 储存

稀释剂、固化剂、胶黏剂、清洗剂、涂料、腻子等 VOCs 物料应密闭储存。

盛装 VOCs 物料的容器或包装袋应存放于室内，或存放于设置有雨棚、遮阳和防渗设施的专用场地。

盛装 VOCs 物料的容器或包装袋在非取用状态时应 加盖、封口，保持密闭。

废涂料、废稀释剂、废清洗剂、废活性炭等含 VOCs 废料（渣、液）以及 VOCs 物料废包装物等危险废物密封储存于危废储存间。

#### (二) 转移和输送

VOCs 物料转移和输送应采用密闭管道或密闭容器等。

宜采用集中供漆系统。

#### (三) 施胶

施胶工序应在密闭空间内操作，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统；无法密闭的，应采取局部气体收集措施，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统。

宜设置在密闭喷漆房内开展施胶工序。

#### （四）调配

涂料、稀释剂等 VOCs 物料的调配过程应采用密闭设备或在密闭空间内操作，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统；无法密闭的，应采取局部气体收集措施，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统。

宜设置专门的密闭调配间。

#### （五）喷涂

喷涂过程应采用密闭设备或在密闭空间内操作，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统；无法密闭的，应采取局部气体收集措施，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统。

新建线宜建设干式喷漆房，鼓励使用全自动喷漆和循环风工艺；使用湿式喷漆房时，循环水泵间和刮渣间应密闭，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统。宜优先采用高效涂装设备，包括往复式喷涂箱、辊涂、淋涂、机械手等。



图 5-8 喷漆房外部



图 5-9 喷漆房内部

喷漆房应根据相应的技术规范设计送排风速率，禁止通过加大送排风量或其他通风措施故意稀释排放。

#### (六) 流平

流平过程应在密闭空间内操作，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统；无法密闭的，应采取局部气体收集措施，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统。禁止在流平过程中通过安装大风量风扇或其他通风措施故意稀释排放。

#### (七) 干燥



图 5-10 干燥间

干燥（烘干、风干、晾干等）过程应在密闭空间内操作，废气应

排至 VOCs 废气收集处理系统；无法密闭的，应采取局部气体收集措施，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统。

温度较高的烘干废气不宜与喷涂、流平废气混合收集处理。宜设置专门的密闭干燥间。

### （八）清洗

设备清洗应采用密闭设备或在密闭空间内操作，换色清洗应在密闭空间内操作，产生的废气应排至 VOCs 废气收集处理系统；无法密闭的，应采取局部气体收集措施，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统。使用多种颜色漆料的，宜设置分色区，相同颜色集中喷涂，减少换色清洗频次和清洗溶剂消耗量。

### （九）回收

涂装作业结束时，除集中供漆外，应将所有剩余的 VOCs 物料密闭储存，送回至调配间或储存间。设备清洗和换色过程产生的废清洗溶剂宜采用密闭回收废溶剂系统进行回收。

### （十）非正常工况

VOCs 废气收集处理系统发生故障或检修时，对应的生产工艺设备应停止运行，待检修完毕后同步投入使用；生产工艺设备不能停止运行或不能及时停止运行的，应设置废气应急处理设施或采取其他替代措施。

## 3.3 末端治理

工序/位置	推荐方法与注意事项	常用处置技术
喷涂、晾（风）干	新建线	文丘里/水旋/水幕湿法漆雾捕集+多级干式过滤除湿联合装置；干式漆雾捕集过滤系统

工序/位置	推荐方法与注意事项	常用处置技术
	小风量低浓度或不适宜浓缩脱附的废气可采用一次性活性炭吸附等工艺，活性炭吸附工艺应设置进出口浓度监测并根据浓度变化监测活性炭饱和程度，根据饱和程度及时更换活性炭	吸附浓缩+燃烧（蓄热燃烧、催化燃烧）；活性炭吸附
烘干	使用溶剂型涂料的生产线，烘干废气宜单独处理，具备条件的可采用回收式热力燃烧装置。	热力焚烧/催化燃烧
施胶、调配、流平（含闪干）	施胶、调配废气宜采用吸附方式或其他等效方式处置。 调配、流平废气可与喷涂、晾（风）干废气一并处理。	活性炭吸附
清洗	清洗废气宜采用吸附方式或其他等效方式处置。	活性炭吸附
非正常工况	应记录污染防治设施非正常情况信息。	/

## 4. 油品储运

### 4.1 加油站



图 5-11 加油站油品储运

#### （一）过程控制

##### 1. 储存

埋地油罐应采用电子式液位计进行油气密闭测量，避免人工量油的情况，宜选择具有测漏功能的电子式液位测量系统。

所有影响储油油气密闭性的部件，包括油气管线和所连接的法兰、阀门、快接头以及其他相关部件应保证不漏气。

对于未安装后处理装置的加油站，应将顶部安装了真空/压力阀（P/V 阀）的油气排放管上的阀门保持常开；原顶部安装了防火罩的油气排放管上的阀门应保持常闭；对于按照油气回收后处理设施的，原有真空/压力阀（P/V 阀）和防火罩的有油气排放管上的阀门均需保持关闭。

## **2. 加油**

需使用油气回收型加油枪，有密封罩，且密封罩完好无损。应采用真空辅助方式密闭收集加油油气，加油时油气回收泵需正常工作。需将密封罩紧密贴在汽车油箱加油口进行加油作业。当汽车油箱油面达到自动停止加油高度时，不应再向油箱内加油。应配备具有拉断截止阀的加油软管，加油时不得溢油、滴油。油气回收管线上的开关应常开，检测口开关应常闭。加油机内油气回收相关管路、接头不得有跑冒滴漏现象。油气回收检测口安装合理，有控制开关、堵头，周围空间方便检测操作。给摩托车加油时，应由加油枪直接为摩托车加油，禁止使用油壶或油桶等容器。

## **3. 卸油**

卸油口和油气回收接口应安装截流阀（或密封式快速接头）和帽盖。连接软管应采用密封式快速接头与卸油车连接，卸油后连接软管内不能存留残油。所有油气管线排放口应设置压力/真空阀。卸油时应保证卸油油气回收系统密闭。卸油前卸油软管和油气回收软管应与油罐汽车和埋地油罐紧密连接，然后开启油气回收管路阀门，再开启

卸油管路阀门进行卸油作业。卸油后应先关闭与卸油软管及油气回收软管相关的阀门，再断开卸油软管和油气回收软管，卸油软管和油气回收软管内应没有残油。卸油全过程要在视频监控下进行，视频角度应能观测到两根管道的连接状况。卸油完毕后，应确保油气回收阀及卸油阀关严关实。

#### **4. 非正常工况**

制定加油站区域内油气浓度气味突然异常增高等非正常工况的操作规程和污染控制措施。当发现加油站区域内或局部区域内油气浓度气味突然异常增高工况，应立即停止对外营业，对相应设备开展排查维修。出现其他异常状况时，亦应立即停止对外营业，对相应设备开展排查维修。做好非正常工况相关记录。事故工况开展事后评估并及时向环境保护主管部门报告。

#### **4.2 储油库**

##### **(一) 过程控制**

##### **1. 发油**

油气处理装置应开启并能正常运行，因故障停用时不得进行发油作业，应急排空口应采用压力/真空阀（P/V 阀）密封。应采用底部发油，上装发油鹤管应拆除，未拆除的需封闭。与油罐车连接的发油鹤管和回气管应紧密连接，油气、汽油不得泄漏。

##### **2. 装油**

应采用顶部浸没式或底部装油方式，顶部浸没式装油管出油口距离罐底高度应小于 200mm。

### 3. 油气储存

储油库储存汽油应按照规定采用浮顶罐储油。新、改、扩建的内浮顶罐，浮盘与罐壁之间应采用液体镶嵌式、机械式鞋形、双封式等高效密封方式，新、改、扩建的外浮顶罐，浮盘与罐壁之间应采用双封式密封，且初级密封采用液体镶嵌式、机械式鞋形等高效密封方式。浮顶罐所有密封结构不应有造成漏气的破损和开口，浮盘上所有可开启设施在非需要开启时都应保持密封状态，应定期对浮盘进行检查，并记录检查过程与结果。

### 4. LDAR 工作开展

#### (1) 是否开展 LDAR 工作

依据企业动静密封点台账，动静密封点的检测报告，密封点个数 $\geq 2000$  个的企业应开展 LDAR 工作。企业如密封点个数少于 2000 个，可不开展 LDAR 工作，但是企业需提供证明材料说明本企业密封点个数少于 2000 个。

#### (2) LDAR 工作是否符合要求

企业密封点检测频次及相关要求见表。

表 5-3 动静密封点检测要求

序号	检测内容	检测频次及泄漏判定条件
1	泵、压缩机、阀门、开口阀或开口管线、气体/蒸气泄压设备、取样连接系统	每 6 个月 1 次
2	法兰及其他连接件、其他密封设备	每 12 个月 1 次
3	直接排放的泄压设备泄压后，应在泄压之日起 5 个工作日内，对泄压设备进行泄漏检测	5 天内

### 5. 废水集输系统

企业若含 VOCs 废水的集输系统，集输系统应符合下列规定之

一：①采用密闭管道输送时，接入口和排出口与环境空气隔离；②采用沟渠输送时，若敞开液面上方 100 mm 处 VOCs 检测浓度  $\geq 200\mu\text{mol/mol}$ ，重点地区  $\geq 100\mu\text{mol/mol}$ ，应加盖密闭，接入口和排出口采取与环境空气隔离的措施。

## 6. 废水储存处理设施

企业若含 VOCs 废水储存和处理设施，若敞开液面上方 100mm 处 VOCs 检测浓度  $\geq 200\mu\text{mol/mol}$ ，重点地区  $\geq 100\mu\text{mol/mol}$ ，应符合下列规定之一：①应采用浮动顶盖；②采用固定顶盖时，应收集废气至 VOCs 废气收集处理系统；③采用其他等效措施。

### 4.3 油罐车

#### (一) 过程控制

油罐汽车应具备底部装卸油系统。在装卸油时，管路应紧密连接，人孔盖严格密封，禁止油气泄漏。



图 5-12 油罐车

油罐车卸油后、道路行驶过程中，禁止人为开启人孔盖，防止油气泄漏。人孔盖为保证油罐车的运输安全、环保而设计。具有倾翻防溢、防爆功能。并且具有当罐内外压差过大时的呼吸功能达到内外压力平衡。设有内置式呼吸阀和紧急排气装置。

## (二) 油气回收

油罐汽车应具备油气回收系统。装油时能够将汽车油罐内排出的油气密闭输入储油库回收系统；往返运输过程中能够保证汽油和油气不泄漏；卸油时能够将产生的油气回收到汽车油罐内。任何情况下不应因操作、维修和管理等方面的原因发生汽油泄漏。油罐汽车油气回收系统应采用 DN100mm 的密封式快速接头和相应的气动底阀、无缝钢管、阀门、过滤网、弯头、胶管和帽盖等。

## 5. 包装印刷行业



图 5-13 包装印刷

### 5.1 源头削减

#### (一) 含 VOCs 原辅材料

在同一个工序内，使用的油墨、清洗剂、胶粘剂、涂料等原辅材料均符合低 VOCs 含量限值要求，排放浓度稳定达标的，相应生产工序可不要求建设末端治理设施，可不执行末端治理设施处理效率不应低于 80% 的要求。在同一个工序内，使用的原辅材料 VOCs 含量均小于 10%，相应生产工序可不要求进行无组织废气收集。

## （二）印刷工艺

塑料包装印刷企业宜采用无溶剂复合技术、共挤出复合技术代替干式复合技术。

包装印刷产品宜优化设计，在满足产品功能的前提下尽量减少图文部分覆盖比例、印刷色数、墨层厚度及复合层数。

新建、改建、扩建项目优先选择柔版印刷、水性凹版印刷、UV凹版印刷等污染物产生水平较低的印刷工艺。

## 5.2 过程控制

### （一）储存

油墨、稀释剂、胶粘剂等 VOCs 物料应储存于密闭的容器或包装袋中。盛装 VOCs 物料的容器或包装袋应存放于室内，或存放于设置有雨棚、遮阳和防渗设施的专用场地。盛装 VOCs 物料的容器或包装袋在非取用状态时应加盖、封口，保持密闭。废油墨、废清洗剂、废活性炭、废擦机布等含 VOCs 的危险废物，宜分类放置于贴有标识的容器或包装袋内，加盖、封口，保持密闭，并及时转运、处置，减少在车间或危废库中的存放时间。

### （二）调配

油墨、胶粘剂等 VOCs 物料的调配过程应采用密闭设备或在密闭空间内操作，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统；无法密闭的，应采取局部气体收集措施，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统。

### （三）输送

液态 VOCs 物料应采用密闭管道输送。采用非管道输送方式转移液态 VOCs 物料时，应采用密闭容器。向墨槽中添加油墨或稀释剂

时宜采用漏斗或软管等接驳工具，减少供墨过程中 VOCs 的逸散。

#### **（四）印刷**

印刷过程应在密闭空间内操作，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统；无法密闭的，应采取局部气体收集措施，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统。使用溶剂型油墨的凹版、凸版印刷工艺宜采用配备封闭刮刀的印刷机，或采取安装墨槽盖板、改变墨槽开口形状等措施，缩小供墨系统敞开液面面积。送风或吸风口应避免正对墨盘，防止溶剂加速挥发。

#### **（五）复合/覆膜/涂布/上光**

复合、覆膜、涂布及上光过程应在密闭设备或密闭空间内操作，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统；无法密闭的，应采取局部气体收集措施，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统。使用溶剂型胶粘剂的复合或覆膜工序，宜采取安装胶槽盖板或对复合/覆膜机进行局部围挡等措施，减少 VOCs 的逸散。

#### **（六）烘干**

应提高烘箱的密闭性，减少因烘箱漏风造成的 VOCs 无组织排放。应控制烘箱送风、排风量，使烘箱内部保持微负压。

#### **（七）清洗**

集中清洗应在密闭设备或密闭空间内操作，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统；无法密闭的，应采取局部气体收集措施，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统。宜根据生产需要和工作规程，合理控制油墨清洗剂的使用量。

### 5.3 末端治理

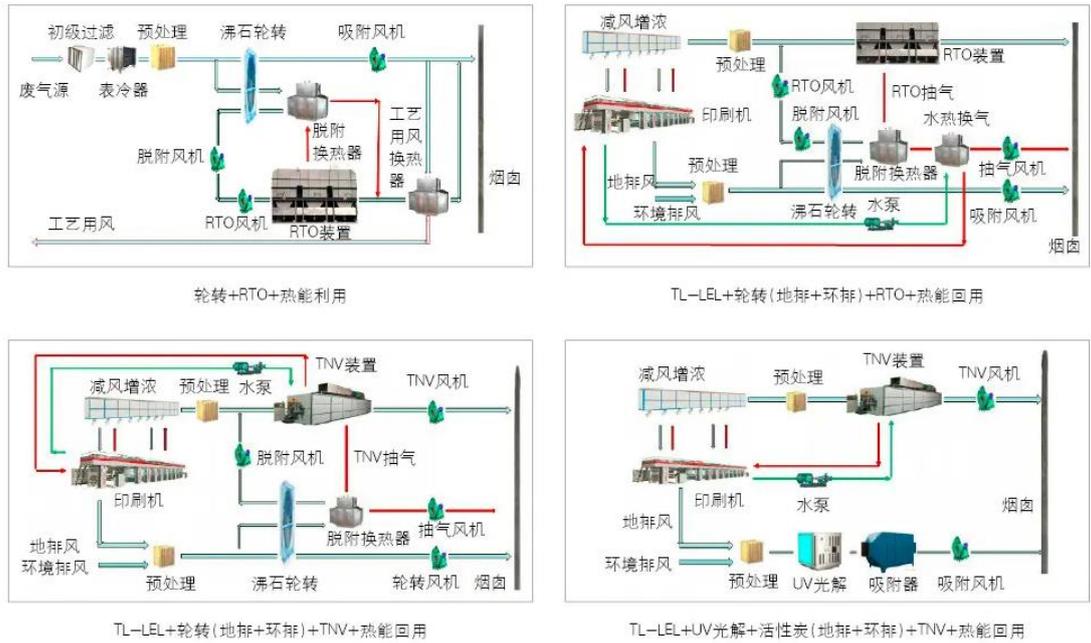


图 5-14 包装印刷行业 VOCs 末端治理技术

工序/位置	废气类别	常用处置技术
凹版印刷	溶剂型凹版印刷无组织废气	吸附+冷凝、吸附+燃烧或燃烧；活性炭吸附+热氮气再生+冷凝回收、活性炭吸附/旋转式分子筛吸附浓缩 <b>+RTO/CO</b>
	溶剂型凹版印刷烘干废气	吸附+冷凝或燃烧；活性炭吸附+热氮气再生+冷凝回收、减风增浓+RTO/CO
	水性凹版印刷及烘干废气	吸附+燃烧
柔板印刷	溶剂型柔版印刷及烘干废气	吸附+燃烧；旋转式分子筛吸附浓缩 <b>+RTO、活性炭吸附/旋转式分子筛吸附浓缩+CO</b>
复合	干式复合无组织废气	吸附+冷凝、吸附+燃烧或燃烧；活性炭吸附+热氮气再生+冷凝回收、活性炭吸附/旋转式分子筛吸附浓缩 <b>+RTO/CO</b>
	干式复合烘干废气	吸附+冷凝或燃烧；活性炭吸附+热氮气再生+冷凝回收、减风增浓+RTO/CO
涂布	涂布无组织废气	吸附+燃烧或燃烧；活性炭吸附/旋转式分子筛吸附浓缩+RTO/CO
	涂布烘干废气	燃烧；减风增浓+RTO/TO
覆膜/上光	溶剂型覆膜、溶剂型上光及烘干废气	吸附+燃烧
其他	调配、清洗等工序产生的无组织废气	吸附+燃烧；活性炭（小风量）

工序/位置	废气类别	常用处置技术
非正常工况	VOCs 治理设施发生故障时，或由于非正常工况所产生的废气超出治理设施处理能力时，对应的生产设备或工艺操作应立即停止，敞开的墨槽、胶槽等应采取封盖措施进行封盖，待治理设施或生产设施恢复正常后，再开始生产。做好非正常工况相关记录。	

#### (四) 涉 VOCs 行业污染防治技术典型案例

案例技术名称：储油库油气回收装置

案例名称：某公司四川销售 104 油库油气回收装置

投资成本：593 万，运行期间 25.055 元/h

处理量：600 m<sup>3</sup>/h

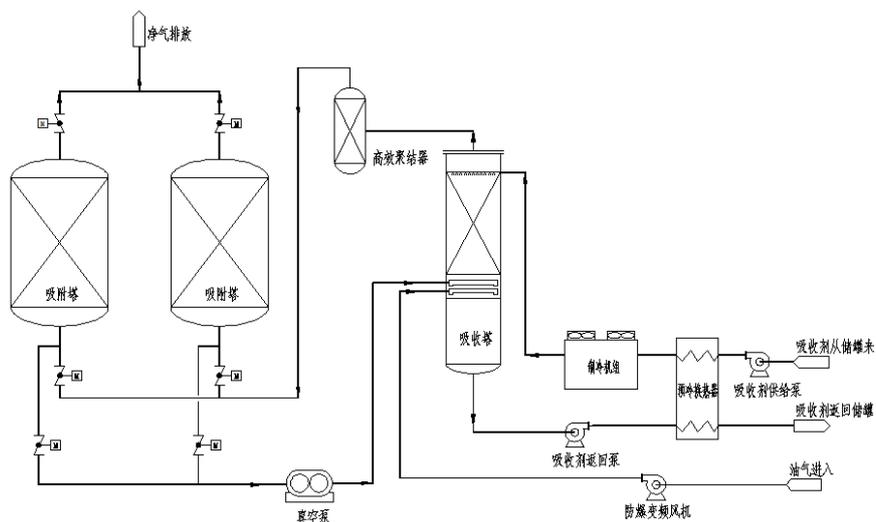


图 5-15 工艺流程图

案例照片：



## 治理效果:

污染物削减率、 排放浓度等	入口：非甲烷总烃浓度约 300~1300g/m <sup>3</sup> （体积浓度 10%—40%） 出口：非甲烷总烃<10g/m <sup>3</sup> 排放指标优于 GB20950-2020 储油库大气污染物排放标准
------------------	--

## （五）结论与展望

### 1. 结论

总体来看，全省涉 VOCs 行业主要为化工行业，涂装行业，油品储运行业和包装印刷行业四大板块。其中印刷业呈现持续稳定健康发展态势，产业规模不断扩大的同时也形成了更完整的污染治理体系，基本形成绿色印刷全覆盖。化工和油品储运行业已形成门类比较齐全，结构相对合理，布局相对集中，专业基本配套的格局。我省涂装行业更是发展成为国内涂料市场的新增长极。

依托我省新出台的《四川省固定污染源大气挥发性有机物排放标准》（DBDB51/ 2377—2017），涉 VOCs 行业的污染治理体系也相对成熟。在污染物处理技术方面，主要由回收处理技术和销毁处理两块构成。其中回收治理技术中，主要采用吸附、吸收、冷凝及膜分离手段，在化工行业以及油品储运行业中使用较多。以燃烧、等离子体、光催化氧化等为代表的销毁处理技术则在包装印刷行业以及涂装行业中应用更为广泛。以活性炭作为吸附剂的吸附法仍是大多数企业的末端治理选择，而在销毁处理中，RTO 催化燃烧被更多用在印刷包装行业当中。

### 2. 展望

近年来我省对涉 VOCs 行业的污染控制力度加大，相关政策也更加完善。目前行业内多数企业仍采取活性炭吸附为主的治理方式，对

VOCs 废气的认识不足。企业大多关注末端治理，忽视无组织排放以及车间通风系统的设计，导致处理效率较低。

另外应加大行业企业排放溯源，实时了解涉排企业的真实情况。关注 VOCs 与 O<sub>3</sub> 生成的关联，有望推进二者协同治理。国家及地区在涉 VOCs 行业大气污染物排放以及装备水平，创新发展，治污降耗，清洁生产等方面的要求也不断提高。未来，将会推动该行业大气污染物排放治理向高效、绿色、经济、循环的方向不断发展。

## 第四章 四川省面源大气污染防治技术

### 一、全省扬尘大气污染防治技术

#### (一) 扬尘污染防治现状

当前,我国经济的快速发展程度达到了前所未有的地步,但与此同时,空气质量的改善却面临着巨大的压力。近年来,我国大气环境污染现象日趋严重,尤其是城市大气污染。我国城市大气环境污染的首要污染物之一是颗粒物,其主要来源于扬尘。城市扬尘将降低了大气能见度,对大气环境和人类活动产生了极为不利的影响,同时也将严重影响人体健康。扬尘是指暴露于城市环境空气中的某些载尘体上的降尘,主要是由各单一源(汽车尾气尘、建筑水泥尘、土壤风沙尘、煤烟尘等)排放的初始态颗粒物沉降部分形成混合物,具有源强不确定性和排放不连续性等特点。扬尘产生的原因是作用于颗粒物的外力接近某一临界值 $f$ 时,少数颗粒物受到该作用力的影响开始在原位置振动。当外力超过 $f$ 时,振动加强,迎面阻力和上升力也随之增大,其将足以克服重力作用。在旋转力矩作用下,部分不稳定的颗粒物会首先沿地表滑动或滚动,但在运动过程中,某些颗粒物由于碰到地表凸起颗粒物或因其他运动尘粒冲击将会获得巨大冲量,其运动轨迹会迅速发生改变,从而骤然向上跃起进入气流开始运动,扬尘便产生了。

根据《防治城市扬尘污染技术规范》(HJ/T393-2007)的规定,城市扬尘可分为道路扬尘、施工扬尘、土壤扬尘和堆场扬尘四类。施工扬尘、道路扬尘、堆场扬尘主要由人类活动产生的。其中施工扬尘主要是来自原有建筑物拆除、土方作业、物料堆放、场地平整及运输

车辆行驶道路产生的扬尘；道路扬尘主要是受当地风力、道路清洁度、城市车辆速度和密度影响产生的二次扬尘；堆场扬尘是指工业生产中各种各样的原料堆、工业固体废弃物、工程建筑渣土、工程垃圾和建筑工人的生活垃圾。这些料堆和垃圾在装卸、传送和堆积的过程中经风蚀作用将会形成扬尘；土壤扬尘是指多种土地的利用类型裸露在地面经过风蚀排放大气颗粒物产生的扬尘。大量研究表明，在城市中人为扬尘是扬尘排放的主体，其排放量与自然扬尘相差一个数量级以上。

随着四川盆地经济的快速发展，扬尘污染问题已成为四川省面临的环境难题之一。四川省扬尘源颗粒物排放总量为 883.74t/d。颗粒物排放量较高的城市为达州市和成都市，依次分别为 151.07t/d、135.52t/d。成都市工地数量较多，达到 2656 个，占全部工地数量的 47.68%，但由于常规管控较好，颗粒物排放仅占全省扬尘源总量的 15.33%；达州市工地数量仅 188 个，但由于常规管控问题，其扬尘源颗粒物排放量高于成都市；巴中市、乐山市和德阳市颗粒物排放相对较低，排放量分别为 8.54t/d、7.27t/d、6.58t/d，占扬尘源颗粒物排放总量的 0.97%、0.82%、0.74%。

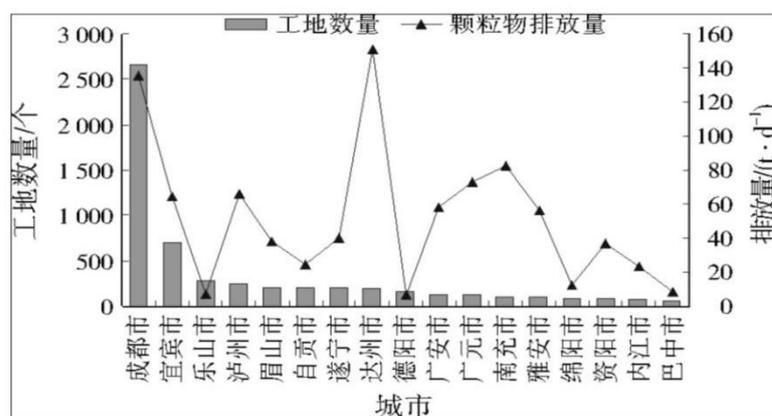


图 1-1 各市施工工地数量和颗粒物排放量

成都、凉山、乐山、攀枝花和达州是颗粒物排放贡献的主要城市，共占全省  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  排放总量的 34% 和 43%。各城市  $PM_{10}$  主要来自扬尘源和工艺过程源，较为一致。由于成都机动车保有量较大，使得移动源成为次要贡献源，南充和达州的生物质燃烧亦为主要贡献源。各城市  $PM_{2.5}$  排放贡献则不尽相同，成都移动源在总排放量的贡献中有进一步提升，由  $PM_{10}$  的 11% 提升到  $PM_{2.5}$  的 22%；攀枝花工艺过程源在总排放量的贡献中，由  $PM_{10}$  的 68% 提升到  $PM_{2.5}$  的 84%；以钢铁制造和建材制造的内江、乐山、凉山、德阳、眉山和广安，其排放贡献几乎超过了扬尘源。 $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的空间分布特征：均集中于路网密集和施工强度较大的建成区，以及部分工业区内。总体来看交通路网越密集、建成区面积越大的城市，其排放量较大的网格数量就越多，成都因为路网发达才导致道路扬尘排放贡献较大，其  $PM_{2.5}$  排放量较大的网格数量显著高于  $PM_{10}$ ，几乎覆盖了成都市整个区域。

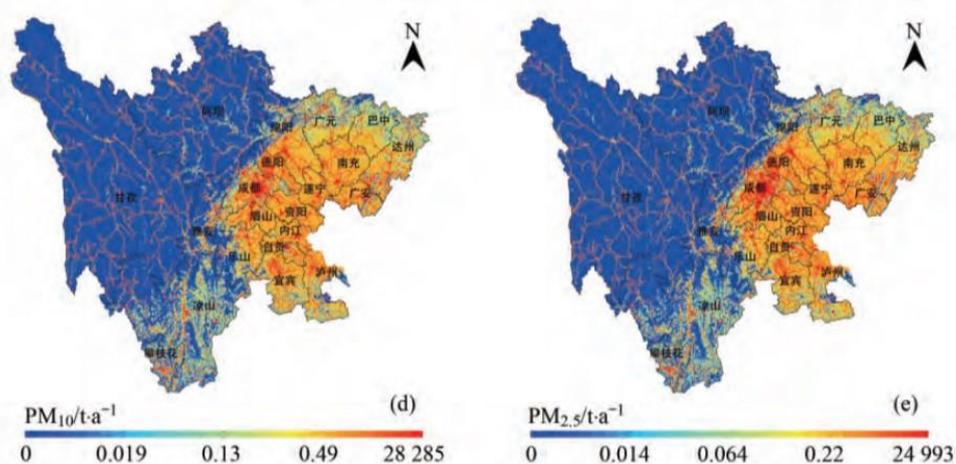


图 1-2 四川省人为源大气污染物排放空间分布

据资料显示，我国城市大气颗粒物污染十分严重，目前已成为城市大气污染的首要因素。我国北方城市由于气候干燥、地表植被覆盖

率低，导致水土固着差，加之人为活动造成的植被破坏，加快了沙漠化的速度，致使扬尘污染严重。

北方主要是土壤扬尘；南方主要是道路扬尘和施工扬尘。西北地区和北方地区类似，因为水土流失严重、土地沙漠化加剧、土地疏松、盐渍化严重，导致扬尘污染严重。四川属于西南地区，与南方地区类似，该地区大多位于山区，群山环绕，地形复杂，市区建筑密度大。

表 1-1 各个城市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 排放因子 (g · km<sup>-1</sup> · vkt<sup>-1</sup>)

研究区域	道路类型	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	研究区域	道路类型	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
西安	主干路	0.38	1.31	北京	主干路	-	2
	次干路	0.55	1.89		次干路	-	4.9
	支路	0.48	1.66		支路	-	1.7
天津	主干路	0.11	0.46	渭南	主干路	0.25	1.02
	次干路	0.17	0.71		次干路	0.37	1.52
	支路	0.49	2.02		支路	0.44	1.83
重庆	主干路	0.35	1.46	武汉	主干路	0.16	0.54
	次干路	0.41	1.70		次干路	0.17	0.57
	支路	0.42	1.75		支路	0.27	0.92
济南	主干路	0.60	4.73	成都	主干路	0.15	0.63
	次干路	0.32	2.76		次干路	0.17	0.7
	支路	0.14	1.55		支路	0.28	1.15

成都市 2012 年各类型道路的扬尘 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 排放因子排序为主干路<次干路<支路，与天津市、渭南市、武汉市和重庆市道路扬尘排放因子的排序相似，而与济南市和北京市的道路扬尘排放因子的排序和排放值却有所差异，这说明了道路扬尘的排放具有明显的地域性差别。

表 1-2 全国部分城市扬尘排放量

地区	扬尘类型	PM <sub>2.5</sub> /kt · a-1	PM <sub>10</sub> /kt · a-1	年份
新疆南部	土壤	4000	12000	2016
天津市	土壤	/	23	2016
哈尔滨市	道路	14	55	2016
河南省	土壤、道路和施工	103	461	2016
郑州市	土壤、道路和施工	22	104	2016

地区	扬尘类型	PM <sub>2.5</sub> /kt · a-1	PM <sub>10</sub> /kt · a-1	年份
雄安新区	土壤、道路和施工	10	43	2020
山东省	土壤、道路和施工	3716	3640	2016
四川省	道路和施工	819.8	187.9	2018

通过全国部分城市扬尘排放量可知，在我国广大北方干旱 - 半干旱地区，每年的扬尘污染十分严重，其中新疆南部 PM<sub>2.5</sub> 甚至达到 4 亿吨。与此同时，山东在土壤、道路和施工方面扬尘排放量也很高，其中四川省在 2018 年扬尘 PM<sub>2.5</sub> 达到 819.8kt · a-1，PM<sub>10</sub> 达到 187.9kt · a-1。由此可知四川省的道路扬尘和施工扬尘治理仍然十分必要。

制定建筑行业扬尘排放标准对完善本省环境标准体系、有效控制施工场地扬尘排放有着重大意义。《大气污染物综合排放标准》（GB16297-1996）、《防治城市扬尘污染技术规范》《环境空气质量标准》（GB3095-2012）以及《建设工程施工现场环境与卫生标准》（JGJ146-2013）等对颗粒物的排放作了相关规定。

2016 年 1 月，上海市率先发布了《建筑施工颗粒物控制标准》（DB 31/964- 2016），此后辽宁省《施工及堆料场地扬尘排放标准》（DB21/2642-2016）、陕西省《施工场界扬尘排放限值》（DB61/1078-2017）、《福建省建设工程施工现场扬尘防治与监测技术规程》（DBJ/T 13-275-2017）、河北省《施工场地扬尘排放标准》（DB13/2934-2019）、《四川省施工场地扬尘排放标准》（DB51/2682-2020）等省市陆续发布了施工场地扬尘排放标准。此外南京市和深圳市分别实施了《南京市建设工地扬尘智能监控指导手册（2018）》《深圳市工地扬尘在线监测信息系统建设实施方案（2018）》，也规定了污染物的监测要求与排放浓度限值。除上述的排放限值标

准，江西省、山东省、浙江省、北京市、天津市、河南省、河北省等多个省市均发布了建设工程施工扬尘防治技术标准、规范或指南，对扬尘治理措施提出了明确的规定，部分标准中也给出了相应的扬尘浓度预警值，当高于预警值时，将采取更为严格的扬尘污染防治措。

## **(二) 扬尘污染防治技术水平与需求**

通过对四川省部分施工场地进行现场调查后，初步掌握了城市扬尘的主要产生原因。工地扬尘主要产生于工地施工前期准备阶段、土方开挖、地基建设阶段、主体建设阶段、室内外装修阶段，具体为施工场地准备、脚手架工程安装、地基开挖与基坑施工、土方运输、地基处理与桩基施工、模板施工、钢筋加工、混凝土施工、钢结构施工、砌体施工、起重设备与混凝土结构吊装、滑动模板施工、屋面施工、建筑地面施工、建筑装饰装修、建筑防腐蚀施工、场地绿化等；道路施工产生的扬尘一般在场地整理、沟槽开挖、管道铺设、土方回填等阶段，不同类别道路产生的扬尘存在一定差异。按照四川道路进行划分的原则，城区道路一般分为、快速路、主干道、次干道和支路，将郊区公路分为高速公路、一级公路、二级公路、三级公路、四级公路和等外级公路；堆场产生的扬尘一般分为静态、装卸扬尘；土壤扬尘节点一般在荒地、河滩、耕地。

### **1. 施工扬尘**

随着我国城市建设规模的进一步扩大，施工扬尘在空气颗粒物中所占的比重越来越大。因此，加大力度控制施工扬尘污染应成为城市环境空气管理的重要内容，而施工扬尘污染防治往往需要采取综合防治措施。其中，施工扬尘产生的最大环节为内部场地车辆碾压以及风

蚀扰动，一旦施工场地内部产生了大量扬尘以外，还会导致其源源不断地向外部传输。针对这种情况，在防治施工场地内部道路扬尘时要重点开展主要运输道路硬化、道路湿法、裸土覆盖、出场运输车辆货箱密闭、车辆出场冲洗，以及重点起尘点位安装定点喷雾等措施。道路湿法和裸土覆盖主要目的是从源头控制生产环节和气象扰动影响，并避免积尘向场地内的道路或场地外输送；而机动车道路硬化和表面积尘清扫主要在于控制积尘负荷水平来控制道路上车辆扰动起尘。上述措施也就是当前常说的施工扬尘防治“六个百分之百”防治措施的重要内容。除此以外，降低车速、增加扬尘源颗粒物含水率、增大扬尘源颗粒物粒径等也是抑制施工扬尘产生的重要方法。

表 1-3 建筑施工扬尘主要控制措施

措施分类	具体措施	控制的污染源
降低风速影响	设置围挡	整个工地
减少颗粒物暴露量	料堆覆盖	料堆
	防尘网	料堆、建筑物表面
	裸地绿化	未铺装道路
	覆盖抑尘剂	未铺装道路及料堆
	机动车辆遮盖	机动车
	地面定期清扫	整个工地
	冲洗运输车	工地入口及附件铺装道路
增大粒径	道路硬化、覆盖礁渣、沙砾	未铺装道路
增加含水率	洒水/喷雾	地面、路面、房屋拆迁及其他具体施工操作
减少人为扰动	降低车速	机动车
	减少建材处理	料堆、建筑材料

不同施工阶段的抑尘措施会有所不同，但总体而言四川省的抑尘措施主要包括定期洒水、设置围挡、冲洗运输车、清扫地面、堆料覆盖、安装防尘网、裸地绿化、遮盖机动车等常规措施，其中定期洒水、设置围挡、冲洗车辆是使用频率最高的三种抑尘措施，使用频率超过90%。相比之下，对于投资成本相对较高的道路硬化、采取化学抑尘

剂措施，以及延误工地施工进度的降低车速、减少建材处理等措施的使用频率较低，均不足 20%。其中，施工扬尘主要的来源之一是在土石方作业阶段，工程机械地挖掘、铲运、回填等作业工序产生的施工扬尘，针对这种施工扬尘，各地环保、住建部门提出“一机一炮”作业方式，从而降低施工过程中产生的扬尘。

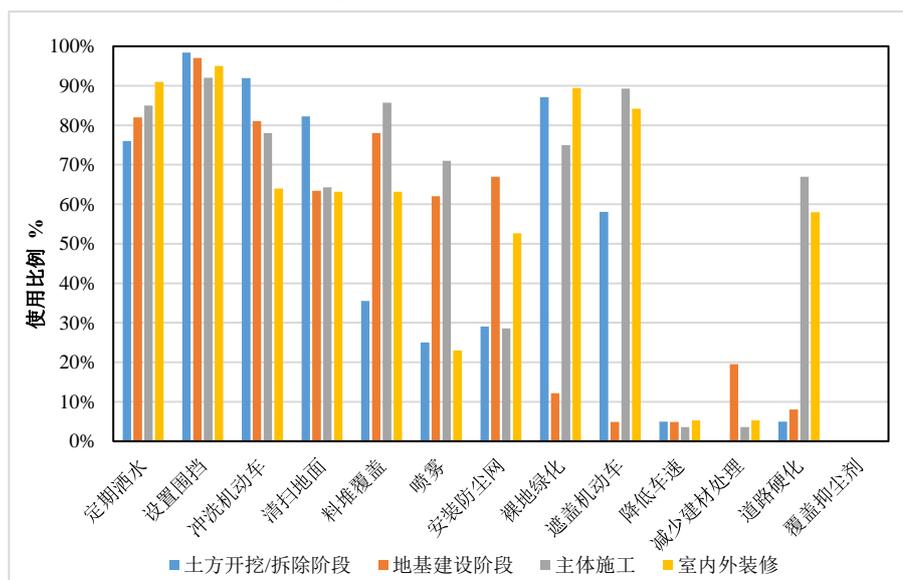


图 1-3 建筑施工扬尘抑尘措施使用情况



图 1-4 建筑施工扬尘抑尘措施

不同抑尘措施的测试结果效率各不相同。洒水的抑尘效率相对较高，约为 40%—50% 之间，平均为 45%；冲洗运输车的抑尘效率相对较小，约为 22%—33%，平均抑尘效率约为 29%；清扫地面的抑尘效率约为 30%—39% 之间，平均约为 35%。四川省施工场地常见的设置围挡、安装防尘网、遮盖运土车、冲洗运输车等控制措施的抑尘效率相对较低，而清扫地面、喷雾、定期洒水、道路硬化等措施的抑尘效果较好。但由于地理条件的不同，控制扬尘时应结合当地条件选择适合的控制措施。例如，盆地内部可以采取喷雾、定期洒水等措施，而阿坝、甘孜、凉山等部分地区水资源相对缺乏，控制扬尘时则可以采用道路硬化、定期清扫，再配合洒水等措施。

表 1-4 建筑施工扬尘主要控制措施抑尘效率

控制措施	控制效率	平均控制效率	控制措施	控制效率	平均控制效率
设置围挡	7% ~ 15%	12%	堆料覆盖	29% ~ 38%	32%
安装防尘网	12% ~ 25%	18%	定期清扫	30% ~ 39%	35%
减少建材处理	14% ~ 26%	20%	喷雾	37% ~ 46%	42%
降低车速	19% ~ 33%	23%	定期洒水	40% ~ 50%	45%
遮盖运土车	23% ~ 27%	25%	道路硬化洒水	40% ~ 52%	46%
冲洗运输车	22% ~ 33%	29%	使用抑尘剂	68% ~ 96%	84%

## 2. 道路扬尘

道路扬尘指道路积尘在一定的动力条件（风力、机动车碾压、人群活动等）的作用下进入环境空气中形成的扬尘。道路扬尘是一种化学组成复杂的大气颗粒物混合污染源，由机动车行驶过程中产生的湍流引起的道路积尘再悬浮是车辆非尾气排放颗粒物的最重要来源，另一方面，道路扬尘也是受体，其来源为大气降尘、车轮黏带泥土、轮胎磨损刹车磨损、机动车尾气排放和当地土壤的混合。道路扬尘对城市扬尘具有重要贡献，定量检测并采取有效措施控制道路扬尘对于高

效精准地削减道路扬尘排放量、改善城市大气环境质量具有重要的现实意义。

当前，道路扬尘防治途径主要包括加大道路的日常清扫保洁力度、加强道路路面基础设施运维、加强运渣车辆管理等。道路清扫保洁的目的在于降低道路表面积尘，对于控制道路扬尘较为有效。目前普遍采用的道路扬尘控制措施为街道清扫、洒水、冲洗、高空喷雾车等组合使用，街道清扫一般采用集刷、扫、吸尘、洒水为一体的多功能清扫车，在任何时段都是一种主要的保洁方式。洒水、冲洗、高空喷雾等的使用则具有明显的时间特征：夏季时，很多城市都会采用上述湿法作业，同时会有降低温度、减缓臭氧生成等作用，此时道路扬尘去除效果相对较好；然而，一旦进入秋冬季，大气扩散条件变差，大气环境中颗粒物浓度普遍较高，为避免颗粒物吸湿性增长，大部分城市明显降低了湿法作业频次。

加强道路基础设施维护主要通过路面修复、道路扩宽和新路建设等各项措施逐步消除路面坑槽、裂缝、沉陷和路肩裸土等各类问题，保障道路功能并提升道路品质，避免路基材料在车辆碾压过程中受损起尘，其中以大型运输车辆密集、年久失修的国省干线和县乡道路为重点路段，以城区周围城乡接合部为重点区域，以风沙季和雨季为重点时段开展基础设施运维。加强运渣车辆管理的目的在于尽可能减少车辆行驶过程中物料遗撒加重道路积尘负荷的情况出现，一般情况下要求车辆在离开出土场之前要进行车身冲洗，车辆要进行密闭；此外，部分城市还会发放“入城证”等，如宜宾市对中心城区建筑工地核发“入城证”，规定了运输车辆数量、运输路线、运输时段等。值得说

明的是，渣土车作为道路扬尘的最主要污染源，在有些城市只被允许晚上运输，而有些城市考虑到需同时控制其他污染物浓度夜间攀升，禁止渣土车在夜间运输。



图 1-5 道路扬尘抑尘措施

### 3.堆场扬尘

与施工扬尘和道路扬尘相比，堆场扬尘受到的关注相对较小，主要来自工业企业生产中的原辅料堆场、燃料堆场，工程建筑过程中的砂石料、原材料堆场，工业固体废弃物工程建筑渣土等，其排放一方面来自料堆和垃圾在装卸、传送过程形成的扬尘，另一方面受到风力作用形成的扬尘，具有明显的间歇性排放特征：当风速超过启动风速时，风力使料堆表面颗粒产生的向上迁移的动力足以克服颗粒自身重力和颗粒之间的摩擦力以及其他阻碍颗粒迁移的外力时，颗粒就离开堆垛表面而扬起。城市中的各种料堆不计其数，随处可见，而且大部分都没有采取有效的防控措施，在不利的天气条件下，对城市大气环

境造成严重污染。

目前，堆场扬尘控制方法主要包括洒水、增加堆料含水率、覆盖遮挡、安装防风网等方式。洒水抑尘是一种最原始、最简单的抑尘方法，其作用主要在增加堆料含水量，减少起尘趋势。洒水操作简单易行，被广泛应用于露天储煤场的扬尘控制中。防风网，又叫防风抑尘墙、防风墙、挡风墙、抑尘墙等，主要起挡风防尘的作用，与覆盖遮挡的原理较为类似。防风网主要用于煤矿、焦化厂、电厂等企业工厂的储煤厂的防风抑尘；此外，港口、码头储煤厂及各种料场，钢铁、建材、水泥等企业各种露天料场等也常采用防风网抑尘。单层防风网效果一般可达 65%~85%，双层防风网效果一般可达 95% 以上。



图 1-6 堆场扬尘抑尘措施

### (三) 结论与展望

当前，我省城市化建设正步入快速发展阶段，以道路扬尘和施工扬尘为代表的城市扬尘正逐渐成为大气环境的主要来源之一，且多数城市道路扬尘对颗粒物的贡献明显大于施工扬尘。尽管各地都采取了抑尘措施，也取得了一定的防治效果，但在“精准治尘”方面还是存在较大差异，特别是缺少对城乡接合部这类经济发展滞后、监管缺失、扬尘类型复杂区域扬尘治理的关注与研究，部分地区粗放施工，工地秩序乱，管控难度大，缺少系统治理。在扬尘治理技术方面，施工扬

尘、道路扬尘等仍然以传统的覆盖、清扫、湿法抑尘措施为主，这类措施抑尘效率不高，控尘时间较短，而抑尘效果相对较好的抑尘剂等受价格影响尚未大量应用。此外，我省还缺少对城市扬尘的系统性监测，不能及时准确地掌握城市扬尘的污染特征、变化趋势、发展规律。

因此，未来城市扬尘的防治应当在治理模式、治理措施、监测网络等领域开展更多研究。在关注中心城区城市扬尘的同时，应该更多地关注中心城区以外区域的扬尘防治。在省内扬尘治理模式方面，应探索政府、企业、街道社区三方协作的抑尘治理方式；在治理措施方面，应对扬尘污染防治形势进行跟踪研究，识别扬尘防治主要问题并提出应对措施，侧重智能化、科技化等高新技术，有助于精确、高效地治理扬尘污染；在监测网络方面，应综合线上线下、在线离线等监测方式，构建涵盖“环境空气质量监测、污染源监测监控和定期抽查巡检”三位一体的扬尘综合监测监控网络，并确保持续良好状态运行。此外，城市扬尘污染防治还需要大量保障措施，主要包括组织领导、培训交流、专家咨询等，特别是自上而下的组织领导和配套的考核问责机制是扬尘防治工作强力推进最为核心和最为重要的驱动。

## **二、全省汽修大气污染防治技术**

### **(一) 汽修行业污染防治现状**

近年来，随着国民经济的飞速发展和人民生活水平的提高，机动车保有量和机动车消费不断增长，根据国家统计局发布的《中华人民共和国 2021 年国民经济和社会发展统计公报》，2021 年末全国民用汽车保有量 30151 万辆，同比增长 7.35%，其中四川省民用汽车拥有量 1382 万辆，同比增长 7.0%，而成都 2021 年汽车保有量超过 570 万，位居全国第二。汽车保有量的大幅增加，促进了汽车维修行业的

快速发展，在国民经济和人民生活发挥着越来越重要的作用。

汽车维修行业排放的主要大污染物包括挥发性有机物、颗粒物，在整个汽车修理过程中产生挥发性有机物污染排放环节主要集中在涉及油漆作业的喷漆及相关配套工序，包括油漆存储运输、表面处理、调配、喷漆、烘干、清洗等过程。因其工艺特点，在维修过程尤其是喷涂操作过程中涉及多种有机溶剂的使用，调漆、喷涂等过程若管理不到位，极易造成 VOCs 挥发逸散产生无组织排放，因此汽车维修行业是 VOCs 使用和排放的重点行业。

在我省汽修行业大气污染管控方面，《四川省蓝天保卫行动方案（2017—2020 年）》首次明确提出：“推进汽修行业 VOCs 治理，积极推广车用水性、高固分等低挥发性涂料；推广静电喷涂等涂着效率较高的涂装工艺；喷漆室、流平室和烘干室应设置成完全封闭的围护结构体，配备有机废气收集和处理系统，取缔露天和敞开式汽修喷涂作业。”，近年来，《四川省挥发性有机物污染防治实施方案》《四川省环保汽修集中攻坚专项行动方案》等文件再次强调推动汽修行业 VOCs 治理，规范喷烤漆作业流程，喷漆和烘干操作在喷烤漆房内完成，加强挥发性有机物的排放控制，全面推广汽修行业使用低挥发性涂料。

通过 2021 年四川省大气污染源排放清单调查，获得全省各市（州）交通运输局提供的涉喷涂的汽修企业数量以及汽修企业的污染治理设施现状。全省 21 市州涉 VOCs 喷涂的汽修企业为 3937 家，其中一类汽修企业有 558 家，占 14%，二类 2218 家，占 56%，三类 1161 家，占 29%。从市州数量分布来看，成都市、德阳市、绵阳市、宜宾市、眉山市、南充市等市州数量较多，在 200 家以上，各市数量详见

下表 2-1。

根据四川省环科院汽修行业 VOCs 全口径调研获得的 VOCs 排放因子，1 家汽修企业平均 VOCs 产生量为 0.7 吨/年，进一步考虑活性炭、光氧等末端处理技术按照 20% 去除效率，催化燃烧按照 60% 去除效率计算，我省 21 个市州的 VOCs 排放量为 2204 吨，占全省 VOCs 排放量的 0.5%。

表 2-1 四川省 21 市（州）汽修企业数量分布（家）

序号	市（州）	一类	二类	三类	总计
1	成都市	159	558	195	912
2	德阳市	37	251	81	369
3	绵阳市	41	209	101	351
4	宜宾市	27	81	159	267
5	眉山市	27	86	138	251
6	南充市	51	127	28	206
7	乐山市	10	70	107	187
8	攀枝花市	25	93	49	167
9	自贡市	14	78	69	161
10	达州市	37	106	14	157
11	广元市	12	98	27	137
12	雅安市	11	92	31	134
13	凉山州	24	67	42	133
14	阿坝州	6	49	35	90
15	甘孜州	3	45	37	85
16	泸州市	13	49	13	75
17	遂宁市	28	32	12	72
18	内江市	6	50	4	60
19	广安市	11	37	/	48
20	资阳市	9	24	11	44
21	巴中市	7	16	8	31
	总计	558	2218	1161	3937

## （二）汽修行业污染防治技术水平与需求

### 1. 源头污染防治现状及存在问题

根据四川省环科院对 57 家我省不同类型的汽修企业调研，了解到汽修行业的原辅料十分复杂，大体分为底漆、色漆、稀释剂、清洗

剂、固化剂、清漆、原子灰（钣金灰、腻子）、除油剂、快干剂、发动机清洗剂等。

### 1.1 台账记录管理

从原辅料的使用管理来看，总体十分混乱。60%以上的汽修企业没有建立原辅材料台账，对原料的使用量信息仅限于出入库单据，还有部分汽修企业原辅料由第三方配漆供应商供应，没有具体的用漆量记录。已有台账记录的台账信息也往往没有统计全部的原辅料用量，还有部分记录的信息存在明显错误。

### 1.2 原辅料使用现状

57家汽修企业中，共计41家企业提供了原辅料使用信息，但使用量信息总体偏小，存在部分原辅料信息无法提供的情况。这41家企业中，大部分提供了底漆、色漆、清漆、稀释剂（含清洗剂）的用量，部分企业提供了固化剂、钣金灰的用量，还有小部分企业提供了除油剂、发动机清洗剂等的用量。根据调研，统计了汽修企业的主要原辅料平均用量，如下图所示。

表 2-2 汽修企业主要原辅料平均用量/家（单位：kg/a）

类别	除油剂	底漆/ 中涂	固化 剂类	腻子钣金 灰原子灰	清漆	色漆	稀释剂/ 清洗剂
一类	149.00	292.90	514.69	478.39	665.23	594.27	872.73
二类	7.00	52.06	60.00	175.29	164.86	160.44	250.87
三类	30.00	73.38	33.67	135.50	172.67	197.25	346.67
平均	81.83	118.86	229.45	282.32	329.24	297.38	482.59

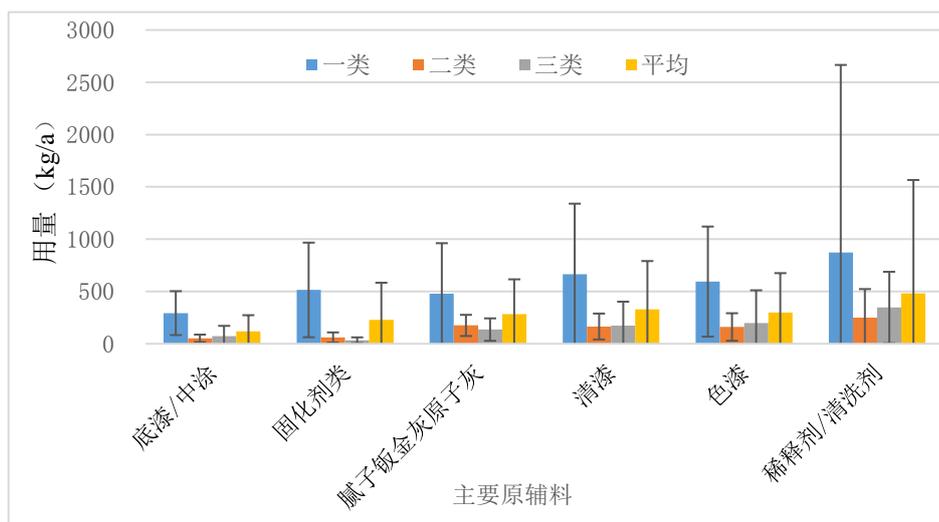


图 2-1 主要原辅料用量

各原辅料的产品检测报告和 MSDS 报告整体较为缺失，56 家企业中，仅有 20 家企业提供了相应的检测报告，且部分汽修企业不清楚有相关检测报告，往往临时与提供厂家联系获取。提供的检测报告中，90%的质量检测报告为 2020 年之后检测的，采用最新的国标《车辆涂料中有害物质限量》（GB24409-2020）进行评价，但仍有 10%的报告采用老国标进行评价，未进行及时的更新。相关的检测报告与实际使用的原辅料存在不对应的情况，企业实际使用的原辅料类型远多于厂家提供的检测报告中的原辅料数量，且检测报告中的检测条件与实际企业的使用配比也存在差异。部分汽修企业原辅料由第三方配漆供应商供应，故汽修厂不清楚具体的用漆类型、厂家、品牌等，相应的检测报告也无从谈起。

## 2. 过程污染防治现状及存在问题

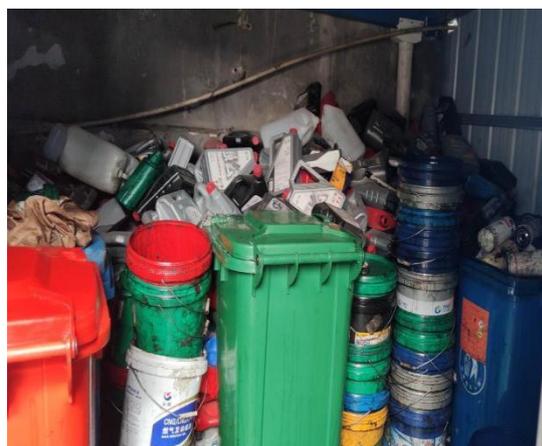
### 2.1 废弃原辅料及容器的存储管理

汽修企业废溶剂、废清洗剂、沾有涂料或溶剂的废弃物基本按照危废处理要求，有相应的转运处理记录，但有部分汽修企业并没有及

时将废弃容器放置在危废暂存间，或者没有进行加盖遮盖处理，还有小部分汽修企业的危废暂存间不符合三防要求，个别危废间是临时搭建的，整体来看，部分危废间密闭性相对较差，甚至有部分汽修企业在危废间安装了排风扇。有个别汽修企业在危废间安装了报警装置。



(a) 临时搭建的危废暂存



(b) 没有加盖，密封性差



(c) 废弃油漆桶没有及时安置于危废间



(d) 设置排风扇

图 2-2 不同类型危废间

## 2.2 调漆和清洗间

调研企业中，有 50 家企业有调漆作业，其中有 50% 的汽修企业设置了单独的调漆间或调漆工位，并对废气进行了收集处理，其余企业未设置单独的调漆间或没有进行收集，还有部分企业调漆作业是在室外完成的。调漆工位进行收集处理的企业中，部分企业是将废气合并到喷烤漆处理系统，部分企业是单独设立活性炭吸附装置。



图 2-3 不同类型的调漆间

调研的企业中，40%的企业设置了喷枪清洗工位，或者直接在调漆间进行清洗；其余 60%的企业没有单独设置喷枪清洗间（没有调漆间），这些企业部分在喷烤漆房内清洗喷枪，或直接露天清洗。喷枪清洗多采用香蕉水，企业直接将喷枪浸泡在盛有香蕉水的桶内进行清洗，也有一些汽修企业采用专用的喷枪清洗机，1 台的价格在 1 万元左右。

### 2.3 喷烤漆房

57 家企业中，除 1 家汽修美容无喷漆房之外，还有一家货车维修企业为露天喷涂，其余汽修企业均在喷烤漆房中开展修补和烘烤。60%的汽修为 1 个喷烘房，30%的汽修为 2 个喷烘房。调研的汽修企业中，喷烤漆房的送风方式均为上送风，下出风，部分汽修企业的烤漆房的密闭性较差，与烤漆房部分区域存在破损以及烤漆房风机长期缺少维护等原因有关。

表 2-3 调研企业喷漆房

喷烘两用房数量（个）	一类	二类	三类	总计
露天喷涂	1			1
1个喷烘房	7	18	9	34
2个喷烘房	6	10	1	17
3个喷烘房	1	1		2
4个喷烘房	1			1
6个喷烘房	1			1

## 2.4 喷枪类型

调研的 56 家涉喷涂的企业中，仅有一家汽修采用了 HVLP 喷枪（低压高流量喷枪），其余均采用常规空气型喷枪。

## 2.5 打磨工序废气处理现状

调研的 58 家企业打磨工序废气处理主要分为 2 类：半密闭空间打磨机收尘，密闭空间打磨并进行集中收尘，还有少部分露天打磨。部分汽修企业将收集处理的打磨颗粒物按照危废处理，也有部分企业将其直接倾倒。



图 2-4 打磨工序

### 3. 末端污染防治现状及存在问题

#### 3.1 全省汽修行业末端污染治理现状

从末端污染治理设施来看，四川省全部汽修企业对喷涂工序实现了集中收集处理，其中 49.1%的企业采用活性炭处理技术，34.1%采用光氧处理技术，3.3%采用活性炭加光氧，0.1%采用催化燃烧技术，剩余 13.4%采用活性炭吸附棉或水喷淋等技术，可以看出我省汽修行业末端治理技术效率整体偏低。

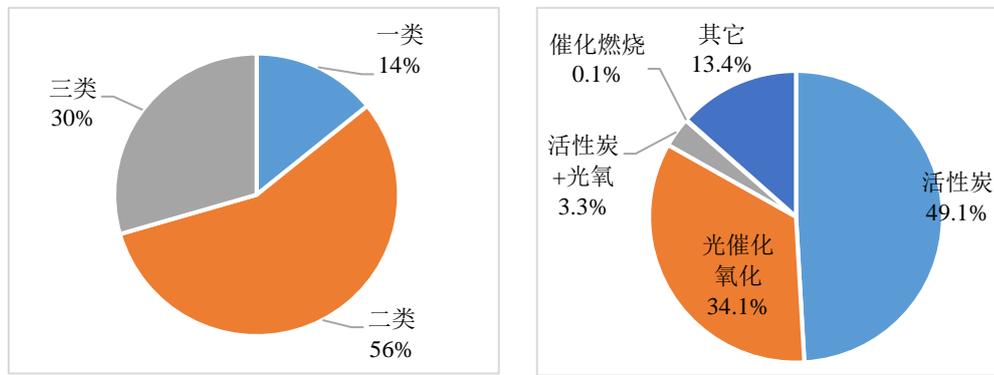


图 2-5 四川省汽修企业等级与治理技术分布

选取调研的 57 家汽修企业中，喷漆房废气全部安装了末端处理装置，从治理技术的安装和投资来看，去除漆雾的方式均为干式，即采用过滤棉等方式去除；末端治理技术上，本次调研涵盖了主流的四中技术，其中成都主城区和天府新区部分汽修企业安装了催化燃烧设施，经费投入为 25 万~60 万之间；光催化投资费用在 1.5 万~30 万之间，平均为 5 万左右，单独的活性炭吸附装置费用较低，平均 2 万左右。

从设施的实际使用和运维来看，少部分规模较大的汽修企业治理设施的安装使用较为规范，能够按照厂家的进行定期的维护，并且至少一年监测一次；但总体来看，大部分企业的处理装置治理效果十分堪忧，调研发现的普遍问题有：1.末端治理装置、风机等铭牌模糊，

厂家不明，治理装置本身效果无法保证；2.治理装置缺少检修维护；3.活性炭、吸附棉更换不及时、灯管老化破损未及时更换；4.活性炭填充量少，只有一层，治理装置的大部分空间为空；5.更换的活性炭、吸附棉等属于“三无”产品，无法判断相应碘值等。

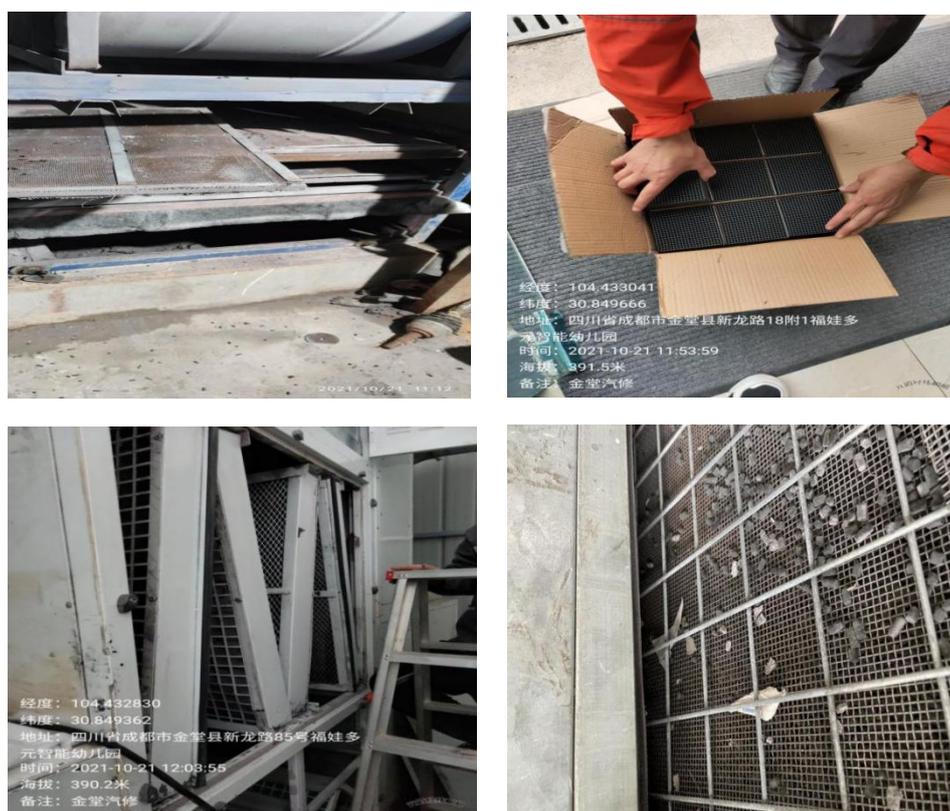


图 2-6 部分 VOCs 处理装置

### 3.2 排放口现状及存在问题

根据 57 家调研企业提供的监测报告了解到，喷漆废气处理后排放的风量总体偏小，48%的企业风量不足 1 万  $m^3$ （有 11%低于 5000  $m^3$ ），46%的企业风量为 1 万-2 万  $m^3$ ，仅有 6%的企业风量在 2 万  $m^3$  以上；从排气筒高度来看，70%以上的汽修企业排气筒低于 15m。

#### （三）汽修行业污染防治技术原理介绍

##### 1. 源头污染防治

源头控制是指提倡使用低挥发性有机物含量的原辅材料，按照

《低挥发性有机化合物含量涂料产品技术要求》(GB T 38597-2020)、《清洗剂挥发性有机化合物含量限值》(GB 38508-2020)的要求,汽修行业低挥发性涂料、清洗剂需满足以下要求。

表 2-4 低挥发性有机化合物含量涂料、清洗剂限值

溶剂类型	产品类别	产品类型	限量值/(g/L)
水性涂料	汽车修补用涂料	底色漆	≤380
		本色面漆	≤380
溶剂型涂料	汽车修补用涂料	底漆	≤540
		中涂	≤540
		本色面漆	≤540
		清漆	≤420
无溶剂涂料			≤60
辐射固化涂料	金属基材与塑胶基材	喷涂	≤350
清洗剂	水基清洗剂	VOCs 含量	≤50
	半水基清洗剂	VOCs 含量	≤100

汽修行业挥发性有机物主要来源于修补用料,包括腻子,底漆,中涂,色漆,清漆、稀释剂、固化剂等,其中色漆与清漆的使用量最大,约分别占有油漆使用量的 40%与 30%。依照工艺、质量要求选择合适的低挥发性有机物含量的原料替代,可以有效地减少 VOCs 的排放。

底漆、中涂与清漆鉴于遮盖力、抗撞击性、膜厚、表面保护、干燥速度与工艺等要求,主要通过使用高固份涂料进行替代,水性性质涂料也有一定应用,从而削减 VOCs 排放。

色漆主要以水性漆替代为主,几年已有大量的推广和应用。水性色漆相较于传统的溶剂型色漆价格略高,同时对工艺的要求比较严格,汽车维修行业用水性漆代替溶剂型涂料喷涂需要对喷漆房的空气条件,温度条件,湿度条件进行严格的控制,再配备专用的水性漆喷

枪，水性漆吹风枪，水性漆洗枪机，工艺改造难度不大，技术上可行。

清洗剂以水基型和半水基型清洗剂替代为主，VOCs含量相对较低，这种水性的清洗剂大约包含80%的水，15%的溶剂和5%的表面活性剂，经乳化后可以对汽车表面进行除油。相较于纯溶剂清洗剂可用于车辆前处理、稀释和喷枪清洗，水性清洗剂用途比较单一，汽修店倾向于购买溶剂型清洗剂以降低成本，使得此类清洗剂推广受到一定阻碍。但是使用低VOCs清洗剂可以降低VOCs总排放，技术上可行。

## **2. 过程污染防治**

### **2.1 物料存储、运输**

油漆、稀释剂、固化剂、腻子等VOCs物料应存储于密闭容器、包装袋、储库、料仓中，盛装VOCs物料的容器或包装袋应存放于室内，或存放于设置有雨棚、遮阳和防渗设施的场地；在非取用状态应加盖、封口，保持密闭；转运过程应采用密闭容器，推荐使用密闭管道输送。

### **2.2 表面处理**

汽车修理过程中的表面处理包括打磨、刮腻子、抛光等流程，由于腻子中也含有挥发性有机物，可能在使用过程中产生挥发性有机物逸散，同时打磨工序存在颗粒物的排放。建议表面前处理打磨、腻子等工序应在密闭空间内进行，未在密闭空间内进行的应配备专用的治理设施。

### **2.3 调漆**

调漆包括混合基料、稀释剂、固化剂、色漆等，是喷漆前必不可

少的一个环节，调漆过程应在专用的调配间或其他密闭空间内进行，同时建议使用调漆浆盖进行作业。调漆浆盖具有密封性好，精确控制出漆量，并且可以在取用油漆的时候最大限度地减少 VOCs 的无组织逸散。

## 2.4 喷烤漆

汽车维修必须配备喷烤漆房及设备，并且需通过交通产品认证，进行喷漆作业的汽修店均已配备至少一间喷烤漆房。所有喷漆施工，不论单一漆面修补或整车喷涂，均须在喷烤漆房内进行。喷烤漆作业过程中喷漆房须处于密闭，排风开启状态，最高限度收集漆雾与喷漆废气。喷漆间需要定期维护，避免由于喷漆间的损坏或不能密封造成不必要的 VOCs 排放。

在喷漆的过程中，鼓励采用静电喷涂、高压无气喷技术，减少使用空气喷涂技术。应使用喷涂效率较高的喷枪，推荐使用高流低压喷枪（HVLP）可以提高传质效率，增加喷涂的附着率，减少油漆使用量，减少 VOCs 的排放。美国、欧盟、香港等地发布的汽修行业指南中也提到高流量低压（HVLP）喷枪比一般的高压喷枪节省物料多达 20%~25%，同时 HVLP 喷枪以极低的风帽雾化压力雾化涂料，提高油漆的附着力，减少飞散及反弹，可有效降低 VOCs 排放约 30%~45%。

## 2.5 清洗

受成本及操作便捷性的影响，汽修企业多使用纯溶剂稀释剂来进行清洗，清洗过程应采用密闭设备或在密闭空间内进行操作，废气应排至 VOCs 废气收集处理系统；无法密闭的，应采取局部气体收集措

施后进行处理。采用集气罩对废气进行局部收集的，集气罩设施应符合 GB/T 16758 的规定，采用外部排风罩的，最远控制点风速不应低于 0.3m/s。根据香港环境保护署“应用含低挥发性有机化合物及水溶性汽车修补漆所需设备技术指引”，在清洗的过程中，使用喷枪清洗机可以有效减少 VOCs 的挥发，并且及时有效地收集废旧溶剂，将整个清洗工序的 VOCs 排放降低，是一种高效环保的喷枪清洗设备。

### 3. 末端污染防治

末端治理设施是指采用收集装置收集所产生的废气，并通过治理技术进行处理，减少排放废气中的挥发性有机物浓度，达标排放。汽修行业为间歇式作业，喷漆废气中含有漆雾颗粒及 VOCs 等成分，末端治理需考虑如下因素：（1）风量大，温度范围大，单个喷烤漆房风量在 1.5 万-2.5 万立方米/时之间，因此喷烤漆工序的废气风量在几万至十几万立方米/时不等，温度一般在 100 摄氏度以下；（2）含颗粒物，喷涂车间通常含有一定粘性漆雾和粉尘等杂质；（3）浓度低，喷烤漆房的浓度一般来说较低，一般在 60—150mg/Nm<sup>3</sup> 之间；（4）成分复杂，由于涂料类型不同，其中 VOCs 物质差异较大，包括醇类、醚类、芳香烃、酯类等，目前很多企业是水性和溶剂型涂料混合使用；（5）间歇性排放，由于涂装企业间歇或连续性作业，排放废气时间不定；（6）在考虑安装 VOC 净化设备时要尽可能考虑老喷漆房场地有限、供电量不足等因素。

#### 3.1 喷涂漆雾治理技术

喷涂修复汽车表面过程中，通常存在大量地过喷涂漆雾，漆雾中

液体溶剂和固体颗粒物并存，而液体溶剂以气溶胶的形式存在，其颗粒度小、黏度大，需要对漆雾颗粒进行高效收集和治理，否则极易造成环境污染与破坏。针对漆雾颗粒物治理技术，主要使用干式去除法和湿式去除法。

干式去除法是指利用过滤材料对漆雾进行过滤与拦截，所采用的主要材料有地网棉、初效棉、中效棉、漆雾棉、迷宫纸和玻纤阻漆网等，并且需定期更换过滤材料。具体过程为：过滤材料被固定在过滤装置上，风机将含有漆雾的废气抽入后经过过滤材料，风速降低，漆雾颗粒被截留、黏附在滤料上，废气经过过滤后，颗粒物明显降低至相关排放标准，减少向空气中排放。

湿式去除法是一种利用液态物质喷淋来捕捉喷漆颗粒物的技术。所采用的液态物质多为水溶液，利用水旋式、文丘里式、水帘式（水幕式）等方式，促进水与漆雾充分混合捕捉颗粒物，从而达到降低颗粒物排放的效果。其中，为实现固液分离、净化循环水，从而提高利用率并且降低成本，通常会在水中添加絮凝剂。此技术会增加废水处理的费用。

表 2-5 汽修行业漆雾处理技术

处理技术	优点	缺点	适用条件
干式去除法	捕捉效率高（约为 98%）；无水污染问题；设备简单，噪音小，能耗低	需要频繁更换过滤材料；清理、维护工作频繁；过工件体积小，相对而言滤漆雾不彻底，设备污染更严重	更适合汽修喷涂行业
湿式去除法	处理的容漆量大、日常维护操作简单；漆雾处理稳定；安全性高	存在水污染，需治理；造价高，清理难度大；要求的风机风压高，增加涂料消耗	适合大批量的、工艺成型流水线式的车体涂装车间

### 3.2 喷涂 VOCs 治理技术

VOCs 治理技术包括回收利用技术、销毁技术以及这两种技术的组合形式，汽修行业常见的 VOCs 末端治理技术及其适用性如下所述。

(1) 吸附法。吸附技术是目前工业 VOCs 治理的主流技术之一，是较为经典的气体净化技术。活性炭被广泛应用于吸附回收有机气体和吸附剂循环使用中，其比表面积大、微孔多、吸附能力强、吸附速率快且能吸附不同分子量的物质，可再生利用且制作活性炭的原料廉价充足，制备工艺也相对简单，适用于处理低浓度有机废气。喷涂行业一般采用活性炭作为吸附剂，对醇类、苯、醋酸及有机烃类具有较好的吸附效果。选用吸附容量更大、效率更高的蜂窝活性炭、活性炭纤维等吸附剂净化效率较高，但目前对吸附处理技术运行效果的监管较为困难，后期处置费用很高。

(2) 光催化氧化。在常温、常压下利用催化剂的特性，在可见光或紫外光作用下使有机废气污染物光解、氧化成一些低分子中间产物，之后终极氧化成无毒无害的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  等小分子物质，从而达到对废气进行净化的目的。此技术对光源、催化剂等方面要求较高，从现有实际应用而言，光催化氧化对 VOCs 治理效果低下，主要适用于气体异味治理。

(3) 热力燃烧法。将废气作燃料加热到有机溶剂的燃点温度以上 ( $760 \sim 980^\circ\text{C}$ ) 进行燃烧净化。适用于处理高浓度、小气量的可燃性气体，净化效率高，有机废气被彻底氧化分解，缺点：设备易腐蚀，安装与运行成本高，易形成二次污染。

(4) 催化燃烧法。在催化剂的作用下，使有机废气中的碳氢化合物在温度较低条件下迅速氧化成水和二氧化碳，达到治理的目的。

缺点：催化剂易中毒，投入成本高。

(5) 蓄热燃烧法。蓄热式燃烧技术采用了热量回收系统，回收燃烧后高温气体的热量用于预热进入系统的废气。与传统的催化燃烧、直燃式热氧化炉（TO）相比，具有热效率高、运行成本低、能处理大风量低浓度废气等特点，浓度稍高时，还可进行二次余热回收，大大降低生产运营成本。RTO 适用于绝大部分的有机废气，能够处理大风量、低浓度废气，同时对废气流量弹性很大，能够适应废气中污染物的组成和浓度的变化、波动。

(6) 光催化氧化+活性炭吸附。该工艺将光催化氧化和活性炭进行组合，先将 VOCs 在可见光或紫外光作用下使有机废气污染物光解、氧化成一些低分子中间产物，之后经活性炭吸附后，排出废气。活性炭吸附饱和后，需及时进行更换，否则处理效果大打折扣，且运行处理费用较高。

(7) 活性炭吸附脱附+催化氧化。活性炭吸附脱附+催化氧化的工艺使用中，将喷漆和烤漆的 VOCs 废气吸附于装填有活性炭的吸附床上，干净空气被排出；活性炭吸附饱和后，热空气送入吸附床对活性炭进行脱附再生；脱附产生的高浓度 VOCs 气体，进入催化氧化床分解，干净的热空气用于活性炭脱附再生。目前市场已有专门为汽修行业量身定制的采用该工艺的废气处理系统，设备高度集成，占地面积少，安装投资成本和运行费用适中，适合规模较小、排放量不高，经济效益也不高的维修企业选用。实际处理效率可达到 50%—70%，

对于源头替代措施实施较到位的汽修企业采用该技术可实现达标排放。

(8) 吸附浓缩+燃烧。吸附浓缩+燃烧是国内外低浓度、大风量 VOCs 治理的主流技术之一，将吸附技术和催化燃烧技术有机地结合起来的一种组合技术。将一次设备投资和运维费用较高，适合规模大，废气风量大、浓度高或不稳定、排放量高，经济效益好的维修企业选用。气体通过活性炭吸附装置后，将饱和的活性炭解析出来的有机气体通过脱附引风机作用送入净化装置，在较低温度下，在催化剂的作用下使废气中的可燃组分彻底氧化分解，从而使气体得到净化处理的一种废气处理方法。该项技术更为先进的装置是沸石转轮吸附浓缩+催化燃烧，采用优质的疏水性石分子筛作为吸附介质，取代活性炭，具有良好的吸附选择性和吸附容量大等特点，原位再生后可重复使用，而无须经常更换介质，但投资费用较高，在汽修行业推广较为困难。

表 2-6 不同 VOCs 治理技术适用范围与优缺点

处理技术	优点	缺点	适用条件
吸附法	能耗低，工艺成熟，设备简单，易于自动化控制	不适用于高浓度、高温的有机废气，且吸附材料需定期更换，吸附剂再生、运行费用高，监管困难	适用于中低浓度的 VOCs 的净化，一般废气浓度 < 1500mg/m <sup>3</sup>
光催化氧化	条件温和，常温常压；设备简单、维护方便	净化效率低；技术尚不成熟；对于成分复杂的废气效果差；工况变化影响大；产生臭氧	VOCs 治理效率低下，仅适用于恶臭异味治理
热力燃烧	投资低，无二次污染	反应温度高，能耗高，运行费用较高	适用于中高浓度且无回收利用价值的有机废气治理，其中催化燃烧技术不适用于废气
催化燃烧	反应温度低，运行费用低	催化剂的费用较高且只有一定的寿命	

处理技术	优点	缺点	适用条件
蓄热燃烧	热利用效率高，设备运行费用低	费用较高，对间歇式排放处处理不经济	中含催化剂中毒的 VOCs 物种。 适用于含有高沸点物
光催化氧化+活性炭吸附	工艺成熟，设备简单，反应条件温和	光氧净化效率低，吸附材料需定期更换，吸附剂再生、运行费用高，监管困难	质或易聚合的 VOCs 净化，活性炭吸附饱和后若未及时更换，效果大打折扣，监管难度大
活性炭吸附+催化氧化	VOCs 去除效率高，一次投入相对较低	不适用于高沸点有机物的净化；对高湿度有机废气的去除效率较低	适用于中低浓度、大风量 VOCs 的治理
吸附浓缩+燃烧	安全性高，VOCs 去除效率高且稳定	一次性投资高	适用于低浓度、大风量 VOCs 的治理排放

按照生态环境部印发的《重点行业挥发性有机物综合治理方案》（环大气〔2019〕53号）、《关于加快解决当前挥发性有机物突出问题的通知》（环大气〔2021〕65号）要求，“对治理难度大、单一治理工艺难以稳定达标的，宜采用多种技术的组合工艺；除恶臭异味治理外，一般不使用低温等离子、光催化、光氧化等技术”。喷漆废气中含有漆雾颗粒及 VOCs 等成分，具有大风量、低浓度、间歇性、工艺复杂等特点，光催化氧化等低效技术不适用于汽修行业 VOCs 治理。同时由于汽车维修 VOCs 废气在工业 VOCs 中属于中低浓度排放，排放量相对较小，企业可接受的成本也有限，因此对于有机溶剂年用量小的小微型企业可全面采用水性、高固体份等低 VOCs 含量涂料替代技术后加装活性炭吸附等较为简单的治理设施达标排放；对于大中型汽修企业推荐采用吸附脱附+催化氧化、吸附浓缩+燃烧等高效组合治理工艺；在汽修企业较为集中的地区建议建立区域集中喷涂中心，可采用投资和运行成本较高的沸石转轮吸附浓缩+燃烧法处理。

表 2-7 汽修行业治理工艺推荐

企业类型	治理工艺	投资费用	运行费用
小微企业	活性炭吸附	3 万-5 万元/套	0.5 万-1 万元/年
大中型企业	吸附浓缩+燃烧	25-30 万元/套	5 万-6 万元/年
	活性炭吸附脱附+催化氧化	10-15 万/套	3-5 万元/年
集中喷涂中心	沸石转轮吸附浓缩+燃烧法	200 万-500 万元/套	20 万-35 万元/年

#### (四) 汽修行业污染防治技术典型应用案例

##### 案例一：源头替代技术

**项目名称：**成都某汽车维修公司

**项目介绍：**项目场地采用了流水线作业设计，其中车辆维修过程喷漆工序配备了密闭化中涂工位 2 个和喷涂工位 3 个。企业于 2021 年 12 月引进某品牌水性漆，实验成功后逐步推进，目前面漆全部替换成水性漆，从源头解决 VOCs 的排放问题，涂装质量获得提升，获得了有效的推广。

**工艺介绍：**项目采用水性漆替代工艺，去除传统油性漆内 VOCs 含量最高的有机稀释剂的使用，目前使用水性漆调整剂（离子水）全面替换了有机稀释剂，使得 VOCs 含量从原来的 73%降低到了 10% 以内。末端再配套以过滤棉+活性炭吸附为主的尾气处理工艺，VOCs 减排量可达 90%，大幅减少了 VOCs 排放。

##### 案例二：沸石转轮吸附浓缩+燃烧法治理技术

**项目名称：**自贡某绿色钣喷中心

**项目介绍：**该绿色共享钣喷中心，占地 3000 平方米，利用现有厂房进行改造，共建设 8 条喷漆流水线（包括 8 台喷烤漆房、3 台中涂房、16 个打磨工位、一套中央集尘处理系统、一套供气系统和一套废气处理系统），通过从源头控制、过程管理、末端治理的全过程把控，采用水性汽车修补漆、无尘干磨工艺技术、催化燃烧废气处理

工艺等，大幅度减少挥发性有机物的排放，配合中央集尘打磨系统、轨道式流水线等行业先进设备，彻底改变传统喷漆作业效率低、污染排放量大的局面，破解汽修行业钣喷生产难题，预计每年减少 VOCs 排放量约 15 吨。

**工艺介绍：**打磨工序废气处理工艺：车辆打磨在全封闭的打磨工位里进行。采用中央集尘处理工艺，将打磨产生的粉尘收集装袋密封后按一般固废进行处置，打磨工位内的气体通过风机进行抽排更换。

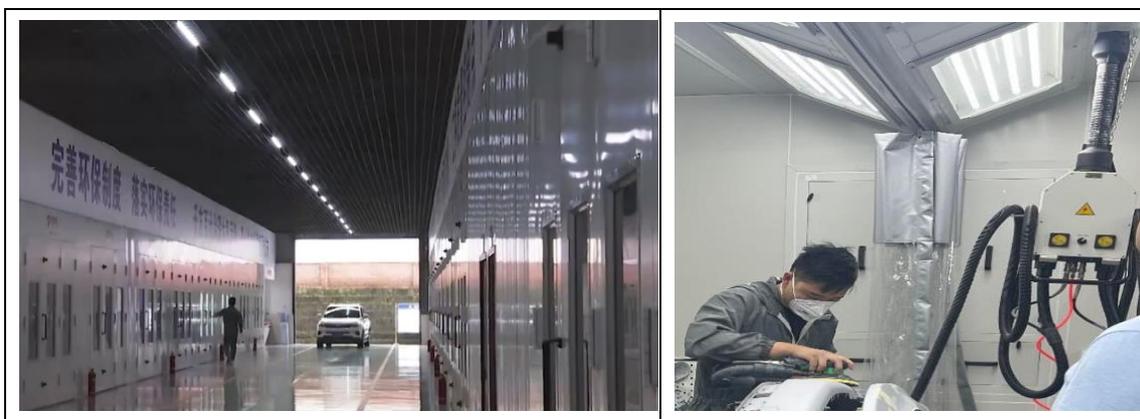


图 2-7 打磨车间

**末端废气处理工艺：**打磨完成的车辆在中涂房和烤漆房内喷底漆和清漆，喷漆产生的废气经“三次过滤棉拦截、活性炭吸附”预处理后，再通过“喷淋塔喷雾水洗、初中效过滤”中度处理，最后进入“分子筛吸附+催化燃烧”深度处理，使废气中 VOCs 去除率达到 95% 以上。



图 2-8 废气处理装置

## （五）结论与展望

总体来看，近年来，随着国民经济的飞速发展和人民生活水平的提高，我省机动车保有量和机动车消费不断增长，促进了汽车维修行业的快速发展，我省 21 市州涉 VOCs 喷涂的汽修企业为 3900 余家，主要分布在成都市、德阳市、绵阳市、宜宾市、眉山市、南充市等市州，汽车维修行业排放的主要大污染物包括挥发性有机物和颗粒物，因其工艺特点，在维修过程尤其是喷涂操作过程中涉及多种有机溶剂的使用，调漆、喷涂等过程若管理不到位，极易造成 VOCs 挥发逸散产生无组织排放，因此汽车维修行业是涉 VOCs 溶剂使用和排放的重点行业之一。在污染物源头控制方面，汽修行业挥发性有机物应依照工艺、质量要求选择合适的低挥发性有机物含量的原料替代，可以有效地减少 VOCs 的排放；过程控制方面，需从物料存储与运输、表面处理、调漆、喷烤漆、清洗等过程方面加强管控，减少 VOCs 的无组织排放；末端污染防治方面，对于有机溶剂年用量小的小微型企业可全面采用水性、高固体份等低 VOCs 含量涂料替代技术后加装活性炭吸附等较为简单的治理设施达标排放；对于大中型汽修企业推荐采用吸附脱附+催化氧化、吸附浓缩+燃烧等高效组合治理工艺；在汽修企业较为集中的地区建议建立区域集中喷涂中心，可采用投资和运行成本较高的沸石转轮吸附浓缩+燃烧法处理。

近年来，上海、江苏、重庆、北京等地区都出台了地方汽车维修行业污染物排放标准或规范性指南，这有力弥补了国家相关制度缺失和行业标准宽松的现状。四川作为西部地区经济发达的地区，汽修行业从规模到数量都首屈一指，有必要针对四川目前环境容量不足的情况制



餐饮源颗粒物排放量占比较高的城市主要为泸州、达州、内江、广安等城市，其对  $PM_{10}$  的贡献分别为 19.65%、11.30%、10.95%、10.00%，对  $PM_{2.5}$  的贡献分别为 19.65%、11.30%、10.95%、10.00%，对 VOCs 的贡献分别为 19.65%、11.30%、10.95%、10.00%。

## 2. 餐饮行业废气排放的环境影响

餐饮油烟的形成过程：当温度达到 50-100 °C 时，低沸点物质和水分汽化，油层表面有热气产生；当温度上升至 100-270°C 时，较高沸点物质逐渐汽化形成油烟；当温度大于 270°C 时，高沸点物质急剧汽化形成大量油烟雾。各阶段产生的气态物质在上升过程中与空气剧烈混合，温度迅速下降到 60-80°C 形成含冷凝物的气溶胶，最终以水汽、颗粒物、食用油和食品高温分解产生的 VOCs 通过风机逸散至大气中。

餐饮油烟已经成为城市大气污染防治中越来越重要的源项。餐饮油烟作为典型的城市生活排放源，不仅是颗粒物的一次排放源及颗粒物中有机碳的重要贡献源，又是臭氧污染物生成前驱体之挥发性有机物的重要排放来源，其中的一些高活性的挥发性有机物与大气中的二氧化氮发生光化学反应，可直接增强大气的氧化性。公开发表的研究成果表明，餐饮源在全省大气污染物排放清单中人为源排放总量中的占比不高，一般为 10% 以下；据估算，成都市餐饮油烟为大气颗粒物中最主要 OC 排放贡献源，占全市的 42%。在出现大气重污染预警而对其他人为源进行了严格管控时，餐饮油烟的贡献占比会显著提升，最高可达到百分之十几，可能严重影响局地的环境空气质量。

油烟对局地环境的直观影响，主要表现为排放出黏性较强的油类

物质会黏结在周边建筑表面，并发出霉味，使建筑表面发黑、清洗极为困难，既破坏环境卫生，又影响城市景观。另外，油烟在排气筒及出口处遇冷凝聚易形成黏稠的油滴，油滴又与空气中的其他颗粒物混合形成难以消除的油渍，附着在排气筒内壁和管道接口外壁上，天长日久成为火灾隐患。

餐饮油烟扰民也是城市环境管理中面临的难点。烟气中脂肪酸、烷烃、烯烃、醛类化合物、醇类、酮类、酯类、芳香族化合物、杂环化合物等 220 多种成分，部分挥发性的醇、醛、脂肪酸、酯、胺、芳香类、杂环类等有机物具有异味，强烈的刺激气味通常使人产生流泪和咳嗽等反应，会直接干扰周边居民的生活。餐饮油烟中所含的颗粒物和有机物会含有苯并芘（BaP）、挥发性亚硝胺、杂环胺类化合物等致突变物和致癌物，对人体健康产生不利的影响，导致肺部及呼吸道疾病，而多环芳香烃类和杂环胺类化合物会引发癌症。

据统计，2015 年度北京市餐饮油烟大气污染投诉占大气污染投诉总量的 34%。济南市在 2017 年中央环保督察中，涉及的餐饮油烟类案件占比达 21%。以成都市为例，2018 年至 2021 年，市民通过市长热线、网络理政等途径所投诉的餐饮油烟污染问题共计 56940 件。因此，餐饮油烟污染防治已经成为城市大气污染防治和城市环境管理的重要工作。

### **3. 餐饮油烟废气污染防治技术存在的问题**

#### **3.1 饮油烟排放口设置**

从餐饮油烟污染投诉分析，餐饮油烟排放口不规范、不合理是其中的主要原因之一。餐饮行业具有非常典型的邻避效应。由于历史的

原因，许多城市的老城区用地功能混杂，在居民区内或居民旁边开设了众多的中小型餐饮企业，其大部分餐饮油烟废气排放口设置不规范，不能满足《饮食业环境保护技术规范》（HJ 554-2010）中的选址和总平面布置要求。2018年修订的《中华人民共和国大气污染防治法》的第八十一条规定：“排放油烟的餐饮服务业经营者应当安装油烟净化设施并保持正常使用，或者采取其他油烟净化措施，使油烟达标排放，并防止对附近居民的正常生活环境造成污染。禁止在居民住宅楼、未配套设立专用烟道的商住综合楼以及商住综合楼内与居住层相邻的商业楼层内新建、改建、扩建产生油烟、异味、废气的餐饮服务项目。”这一条法律的制定对于规范餐饮行业的发展非常重要。部分餐饮企业在法律颁布后难以找到适合自己发展的环境场所而面临关闭。

### 3.2 餐饮油烟废气排放标准

针对餐饮油烟污染治理，我国于2002年1月1日实施《饮食业油烟排放标准》（GB 18483-2001），该项标准根据餐饮单位规模规定了油烟最高允许排放浓度和油烟净化设施最低去除效率。国家标准在餐饮油烟污染防治方面发挥了巨大作用，有力推动了油烟净化产业的进步和发展，但随着《大气污染防治行动计划》《大气污染防治法》《重点行业挥发性有机物削减行动计划》等一系列政策法规出台，现有餐饮油烟排放标准未将颗粒物、VOCs和异味排放限值纳入，其难以适应当前对大气污染防控的需求。生态环境部于2019年8月公示了《餐饮业油烟污染物排放标准（征求意见稿）》，对餐饮废气中的非甲烷总烃提出限值要求，并对油烟和非甲烷总烃的净化去除率提高了要

求，但尚未正式发布。国内已有多地制订了餐饮业大气污染物排放的地方标准，而四川省尚未制订此排放标准。

### **3.3 餐饮油烟废气净化设备的安装与运维**

近年来全省大气污染防治工作中对可能影响到环境空气质量的各类污染源管理严格，城区内的餐饮油烟排放是监管的重点之一。据不完全统计，位于城区的餐饮企业，油烟废气净化设备的安装率可达到90%以上，而城区外其他区域餐饮企业的油烟废气净化设备的安装率也可达到70%以上。然而，与安装率相对应的净化设备的运行率或处理的有效率却不容乐观。目前全省餐饮企业基本上都采用静电式油烟净化设备，由于缺乏定期的运行维护，油烟净化设备的有效运行存在明显的问题，许多油烟净化设备形同虚设。

### **3.4 餐饮油烟废气监测和监管**

目前全省餐饮企业的日常管理由城市管理部门负责，生态环境管理部门对其污染物的排放进行监督管理。由于多种原因，餐饮企业的油烟排放监督性监测工作开展不充分，且监测频次低，无法及时发现餐饮油烟排放过程出现的超标现象，以及油烟净化设备是否同步开启。同时，许多餐饮企业的排气筒安装条件受限，无法满足开展油烟采样工作的基本技术要求，对监测结果的准确性、可比性影响很大。

## **(二) 餐饮油烟行业污染防治技术水平与需求**

2010年国家环境保护部发布了《饮食业环境保护技术规范》(HJ 554-2010)，规定了饮食业单位选址与总平面布置、环境保护设计的总体要求、油烟净化与排放、排水与隔油、噪声与振动控制、固体废物控制要求等。该技术规范对排气筒的安装、周边敏感环境目标、排

气筒的设置、油烟净化装置、排气口朝向，以及风速风量作了详细的要求，为从源头上防治饮食业污染、规范餐饮企业的环保工作提供了技术指导。

四川省餐饮行业油烟污染防治技术水平总体上与全国保持同步。目前仅少数大型餐饮企业采用运水烟罩、水喷淋、撞击流等湿式油烟净化器，对油烟有一定的净化能力，同时能起到较好的防火效果；而绝大多数餐饮企业则使用静电式油烟净化器，应用最为广泛。

油烟净化设备在使用过程中普遍存在一些问题，使得餐饮油烟排放不达标：一是油烟废气集气管道设计风量不规范。大部分餐饮企业是按照厨房新风量或换气量或经验进行设计，并非从油烟废气收集和排放角度考虑。二是油烟净化设备选型不当。目前省内市场销售的油烟净化设备的价格、性能、可靠性参差不齐，油烟净化设备品牌鱼龙混杂，没有行业管理或权威性技术机构的统一认定。三是油烟净化设备缺乏定期的运行维护，尤其是静电净化设备和过滤吸附装置在初始安装的时候效果良好，但随着使用时间的增加，餐饮油烟会富集在极板上使得净化效率急剧下降。四是油烟废气处理设备能否达标没有有效的监测或监控手段，中小餐饮企业按时开展现场监测困难较多。

随着 2018 年修订的“四川省《中华人民共和国大气污染防治法》实施办法”和成都市 2021 年 12 月颁布的《成都市餐饮服务业油烟污染防治管理办法》的实施，餐饮服务业经营者是餐饮油烟污染防治的责任主体，面临越来越具体的环境压力。如何有效地监管餐饮业大气污染物排放，将油烟治理与监控纳入日常生产管理体系，建立管理台账，提高末端管理水平将是餐饮企业亟待解决的工作。

四川省餐饮行业油烟污染防治稳定运营与达标排放的主要技术需求有：

### **1.建立餐饮行业油烟污染防治技术体系**

从 2001 年开始的餐饮油烟污染防治工作在取得重要成绩的同时，也暴露出许多防治技术上的问题。餐饮油烟污染防治是一个系统性工程，目前存在的亟待解决的技术问题有：更新餐饮业大气污染物排放标准、提出适应新排放标准的餐饮业油烟废气排放设计的技术规范、制定新的餐饮业大气污染物监测和监控方法。

### **2.餐饮废气油烟和 VOC 稳定达标技术**

全省餐饮油烟污染防治仍然执行着《饮食业油烟排放标准》（GB 18483-2001），没有对餐饮废气中的 VOCs 和异味提出限值要求。为了减轻和降低餐饮行业大气污染物的影响，实施更新的餐饮油烟排放标准势在必行。全国部分省市近年来都已制定了餐饮行业新的地方排放标准，油烟净化设备生产企业也在为此做着充分的准备。但除了采用活性炭吸附法外，餐饮油烟废气治理中尚没有看到公认的技术经济可行的 VOCs 处理工艺和成熟设备。

### **3.餐饮油烟废气排放精细化监管技术**

为了适应全省餐饮业油烟污染防治精细化监管的需要，及时反映油烟净化设备的运行状况、处理效率、排放异常等信息，现已广泛采用了传感器+无线传输+互联网平台的餐饮油烟废气排放实时监管系统。但监管系统中的油烟和非甲烷总烃传感器在检测准确性、测定稳定性、校准维护性等方面存在技术难题，目前尚无法作为餐饮业油烟排放环境执法的依据。因此，有必要以创新思维研发出技术经济可行

的精细化监测监管方法。

### **(三) 餐饮油烟行业防治技术原理介绍**

#### **1. 餐饮油烟净化技术**

##### **1.1 机械分离法**

技术原理：机械分离法的原理是强制使烟气流运动方向发生强烈旋转，油烟中的颗粒物在惯性作用下到达沉积面，进而从气体中分离。机械式净化设备采用设置折板式、滤网式、蜂窝波纹式等滤油栅（金属网罩、格栅），使得油烟颗粒物与格栅碰撞、黏附而从气流中分离去除。滤油栅一般安装于集气罩内或集成于其他净化设备的前端，以减轻其他设备的清洗维护压力。

技术特点：该法具有结构简单、压力损失小、对大粒径颗粒去除率较好、设备及运维低等优势，被广泛应用于家用厨房抽油烟机和小型餐饮企业油烟处理系统中。为了提高净化效率，通常采取对集油板、外形/尺寸、增设吸油烟通道以及扩散吸油烟范围等改进措施。

处理性能：对小粒径油烟颗粒物的捕集效率低，油烟净化率通常为 30% ~ 60%，不能有效去除 VOCs 和异味。

应用领域：适于油烟污染物的预处理或净化效率要求较低の場合。由于油烟废气中颗粒物粘度很大，故清洗维护工作量较大，限制了该技术的推广。

##### **1.2 静电捕获法**

技术原理：静电捕获法的净化原理油烟通过外加高压电场的作用下，负极的金属丝表面或附近产生粒子风，油烟粒子在极短的时间内因碰撞俘获气体离子而荷电，当荷电微粒经过正极集尘板时，在电场

力的作用下沉积下来，以达到净化的目的。其净化机理与其他方法的区别在于：分离力是静电力，直接作用在粒子上，而非作用于气流上，因此具有能耗低，阻力小的特点。

技术特点：技术成熟、设备投资少、占地面积小、能耗较低，是目前油烟净化的最佳方法。但静电导致极板上形成油垢黏度较高，不易清洗；若用清洗剂清洗会导致二次污染，长期使用会在集尘极表面形成一层油膜层，使去除效率大幅下降。

处理性能：静电捕获法对亚微米颗粒物有较好的捕集效率，对油烟的去除效率可达 90% 以上，对于 VOCs 气态污染物基本无去除。

应用领域：静电式油烟净化技术成熟，应用广泛，市场占有率高达 80% 以上。

### 1.3 洗涤吸收法（又称湿法）

技术原理：洗涤吸收法根据湿法除尘的工作原理，采用水或其他洗涤液（水与一定量的表面活性剂的混合物），以喷头喷洒的方式形成水膜、水雾来吸收油烟，油烟粒子与喷嘴喷出的水雾、水膜相接触，经过相互的惯性碰撞、滞留、细微颗粒的扩散和相互凝聚等作用后，使油烟由气相转移到液相中，从而达到净化目的。

技术特点：洗涤吸收法设备的类型有二类。第一类运水烟罩：这些设备安装在集烟罩的前端，该法对直径 $>2\mu\text{m}$ 的烟雾颗粒有较高的去除效率，而对直径 $<1\mu\text{m}$ 的雾颗粒去除效率较差。该方法具有系统阻力小、无噪声污染、工程造价低和净化效果高等优点。第二类洗涤塔：利用正反向喷雾，增设中间隔板或填料等方式，甚至使用流化床，增加净化液与油烟的接触时间，达到净化效果。由于油烟雾滴的疏水

性，在净化液中加入的表面活性剂可改善油水混合性能，提高去除效率。该方法设备结构简单、投资少、占地小、运行费用低、维修管理方便。但存在二次污染、阻力大、对亚微米级颗粒物的净化率低、需对产生的油污水进行处理等缺点。

处理性能：对油烟的去除效率可达 80% 以上，同时可对废气中的 VOCs 气态污染物有去除效果，去除效率可达 40%—70%。

应用领域：主要应用于一些大型饭店和宾馆。但其产生的含油污的洗涤废液有可能直接排入城市污水管网，会造成浪费资源，并污染水环境。因此，加强废水的处理与循环利用是今后该类净化设备应改进的方向。

#### 1.4 过滤吸附法

技术原理：当油烟通过过滤和吸附介质时，通过拦截、碰撞、筛分、吸附等作用从而去除颗粒物和挥发性有机气体。过滤和吸附材料包括金属丝网、海绵、无纺布、多孔陶瓷颗粒、活性炭颗粒、活性炭纤维毡等。

技术特点：过滤吸附法的优点是设备结构简单、维修管理方便、运行稳定可靠。但不同的过滤介质其性能具有较大差异，实际应用中受滤料易燃、易清理性、重复使用性、阻力等多重因素影响；吸附剂在运行初期效果好，随运行时间变长，油烟开始附着在吸附质上，吸附层逐渐增厚使吸附能力逐渐下降。过滤/吸附层逐渐增厚使运行阻力加大，这将致使风机运行费用增加，风机的噪声污染问题凸显。

处理性能：作为油烟前端处理工艺，单独使用过滤可以去除 60%—75% 的油烟；作为油烟后端处理工艺，在油烟颗粒物和水汽得到有

效去除，且定期更换或定期再生的情况下，单独采用活性炭为吸附材料时中 VOCs 的去除效率最低可以达到 50%以上，最佳条件时可达 80%以上。

应用领域：吸附法主要应用于油烟废气的后端的 VOCs 处理，目前是我国餐饮油烟中 VOCs 控制的主要手段。吸附材料使用后需要经常更换吸附材料或定期再生处理，吸附剂更换或再生成本较高。因此，在使用活性炭或其他吸附剂控制油烟 VOCs 和异味时，需与其他控制油烟的装置配合使用。

### 1.5 低温等离子法

技术原理：低温等离子体是继固态、液态、气态之后的物质第四态，当外加电压达到气体的放电电压时，气体被击穿，产生包括电子、各种离子、原子和自由基在内的混合体。放电过程中虽然电子温度很高，但重粒子温度很低，整个体系呈现低温状态，所以称为低温等离子体。该方法是将有机物引入等离子体反应器单元，通常采用介质阻挡放电（简称 DBD）产生低温等离子体，在该区域由于高能电子的作用，使有机污染物分子受激发，带电粒子或分子间的化学键被打断，产生自由基等活性粒子，这些活性粒子和  $O_2$  反应达到分解有机物的目的。同时空气中的水和氧气在高能电子轰击下也会产生 OH 自由基、活性氧等强氧化性物质，利用这些高能电子、自由基等活性粒子和废气中的有机污染物作用，使污染物分子在极短的时间内发生分解，并发生后续的各种反应以达到降解污染物的目的。

技术特点：低温等离子体法具有设备结构无机械部件、操作简单便利、处理工艺简洁、烟气阻力小、能量利用率高、单位风量耗电量

低等特点，特别是在异味有机废气的处理上。

处理性能：低温等离子法目前尚被列为 VOCs 废气处理的低效方法之一。有研究报道，低温等离子体处理 VOCs 有机废气时，其非甲烷总烃去除率只有 40% 左右，恶臭异味的去除率可达到 90%；如果废气在低温等离子体反应器中停留时间不足，有可能出现排气出口中 VOCs 浓度升高的现象。但与紫外光分解法同列为低效方法不同，低温等离子法从原理到实践都还具备较大的完善和改进空间。

应用领域：低温等离子对餐饮废气中挥发性异味有机物的处理效果较好，国内目前已有采用低温等离子法处理餐饮油烟的净化设备。

## 1.6 紫外光分解法

技术原理：紫外光分解法指利用特殊波长紫外灯发出的紫外线对油烟分子进行照射达到分解油烟分子的净化方式。利用紫外线 C 波段（185 或 250nm）的光来改变油质的分子链，同时这种紫外线与空气中的氧反应后产生臭氧，臭氧将油质分子冷燃烧后生成水和二氧化碳，同时烟道中的异味也随之消除。

技术特点：紫外光催化法具有设备结构简单、设备成本低、烟气阻力小、电气控制方便等优点而成为餐饮油烟废气净化的热门处理方法之一。但紫外光分解法在技术上存在的不足是紫外光灯能量转换效率低、有机污染物紫外吸收光量子效率低、光分解速率慢。如果增加废气的停留时间，则会导致净化设施体积过大；而为了提高单位废气量的紫外光功率会导致设备用电能耗的大幅增加，并附带产生次生的臭氧污染。

处理性能：紫外光分解法目前已列为 VOCs 废气处理的低效方法

之一，VOCs 的去除效率可以忽略不计，但可以考虑作为异味处理的技术手段。

应用领域：很多厂家开发的油烟净化设备尚在采用紫外光分解法作为油烟净化设备的后端处理方法。

### 1.7 组合工艺的复合技术

复合式油烟净化设备指将不同技术的优势进行互补，组合成为一个系统，成为高效的控制设备。目前常见的有机械与静电、湿式与静电相结合等方式，其中又以湿式与静电组合式居多。从加严油烟排放浓度标准、新增油烟废气中非甲烷总烃和恶臭异味控制指标角度看，复合式油烟净化技术趋于成熟并得到了广泛的应用，处理后的洁净烟气可以达到饮食业油烟排放标准要求。从已有的报道看，以下几种复合技术应该成为今后的发展方向。

- 静电捕获 - 吸附组合技术 这一组合工艺是目前国内各地制订餐饮油烟排放标准时公认可以满足下阶段餐饮废气中油烟、VOCs 和异味处理要求的过渡性技术。其特点是在静电捕获对餐饮油烟进行有效去除后，再通过活性炭吸附对 VOCs 和异味气体进行有效吸附。两个方法的技术原理和工艺参数清楚，去除效果可靠。
- 静电捕获 - 低温等离子体组合技术 其特点是整个工艺过程分段采用静电沉积和低温等离子体技术对餐饮油烟中固、液、气相污染物进行分类处理，可以充分发挥两种方法的优点，通过技术耦合和过程强化实现对餐饮油烟中各类污染物的综合治理，总体上具有较高的油烟去除效率和一定的 VOCs 去除效率。
- 喷雾净化 - 旋转过滤 - 离心分离 - 液体吸收组合技术 其特点是

整个工艺环节为机械法和洗涤吸收法的组合，利用高速旋转的放射状网盘的切割和离心作用将油烟从气流中分离出来，可以在油烟管道的前端实现油烟的分离和回收，适于各种风量烟气的净化。目前已用于餐饮业和家庭油烟的净化。

- **机械分离 - 洗涤吸收 - 旋转填充床强化处理组合技术** 其特点是整个工艺环节为机械分离法和洗涤吸收法的组合，整个过程采用旋转填充床强化油烟废气和表面活性剂的洗涤效果，可适于各种风量烟气的净化。整机集成度高，操作简便，目前是中国台湾地区油烟净化工艺的研究热点之一。

## **2. 餐饮油烟废气在线监测监管技术**

从全省餐饮企业的构成看，中小微型餐饮企业的占比很高。由于各种原因，许多中小微型餐饮企业在选址上存在不足，其排气筒设置不规范，现场开展排气筒监测的条件较难符合油烟监测规范的要求，餐饮油烟排放的监测和监管需要新的技术手段。目前，基于激光散射和电化学传感器的餐饮油烟在线监管技术正逐渐引进到餐饮企业的油烟监管上。

**技术原理：**油烟细颗粒物是构成物质相对稳定的球形颗粒物集合，其粒径分布、密度、表面光学特性都相对稳定。用稳定激光光束照射油烟颗粒时，粒子集合散射光强度与其总表面积呈线性关系，测定到散射光的强度即可推知粒子集合的总表面积。当不同强度的激光散射光被快速计数后，可以得到颗粒物的粒径数浓度谱。在已知颗粒物粒径数谱后，可计算出颗粒物和油烟的质量浓度。VOCs 检测可选择的种类较多，有基于光离子化电流的 PID 传感器、基于金属氧化物

的催化燃烧传感器、基于金属氧化物的半导体气敏传感器、基于定电位电解型气体传感器等。

技术特点：激光散射传感器响应速度快，散射光强度实时反映油烟颗粒物的浓度，VOCs 传感器的响应电学信号能够快速实时反映 VOCs 的浓度变化；油烟气体用专用管路引入传感器的检测区，检测信号受管道内烟气温湿度、烟气流速的影响小，方法的抗干扰能力较强；独特的结构设计，避免了光学器件和传感器被油烟污染，可延长设备的维护周期。但由于油烟引入传感器并不满足等速采样要求，餐饮油烟废气在线监测技术尚不成熟，在应用过程中仍然存在方法的科学性、检测灵敏度、使用经济性、运行稳定性、可维护性等问题。

性能指标：油烟检测量程：0-20 mg/m<sup>3</sup>，示值误差：±10%，分辨率：0.05 mg/m<sup>3</sup>，响应时间：< 30s。VOCs 检测量程：0-50 mg/m<sup>3</sup>，示值误差：±10%，分辨率：0.1 mg/m<sup>3</sup>，响应时间：< 60s。设置至少两路开关量输入接口，可用于检测风机和净化器的开关状态。

应用领域：餐饮企业油烟和颗粒物排放监测监控。由于基于光散射和其他原理的传感器需要定期校准，其运维工作非常困难。因此，该技术获取的定量检测数据只适合用于餐饮油烟废气排放的监管，尚不能作为生态环境执法的技术依据。

#### **（四）餐饮油烟行业污染防治技术典型应用案例**

**案例：**餐饮油烟静电捕获低温等离子体处理复合技术

## 1.工艺流程示意

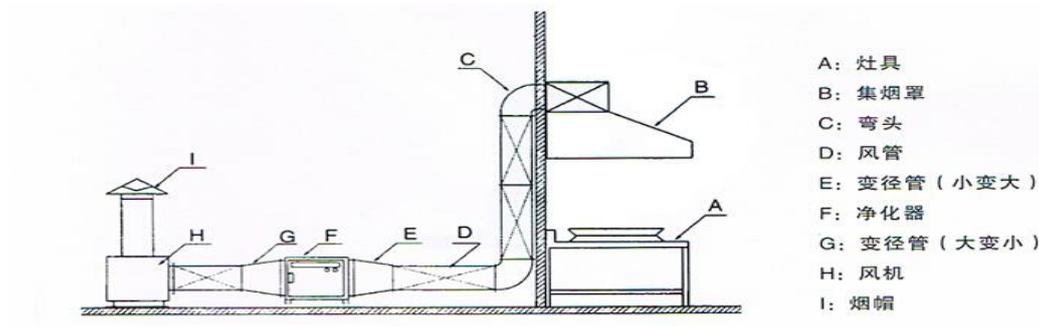


图 3-2 工艺流程示意图



图 3-3 餐饮油烟静电捕获低温等离子体处理复合净化设备

## 2.治理效果

主要排放指标治理效果见表 3-1。

表 3-1 工艺治理效果

适用菜系	湘菜、川菜、烧烤等油烟浓度较高的菜系
处理效果	油烟排放浓度 $\leq 1.0 \text{ mg/m}^3$ ；颗粒物去除率 $\geq 95\%$ ； 异味 $\leq 60$ （无量纲）；非甲烷总烃净化率 $\geq 70\%$ 。
技术特点	采用专利菱形电场+双区板式电场二级处理，利用不同电场各自优势组合而成，适用于 $20 \text{ mg/m}^3$ 高浓度油烟、高标准排放要求。

项目名称：某商业广场底商餐饮油烟治理工程

技术指标：油烟排放执行《饮食业油烟排放标准》（GB 18483-2001）

**治理效果:** 餐饮油烟稳定达标排放, 油烟排放  $< 1.0\text{mg}/\text{m}^3$ , VOCs (以非甲烷总烃计) 去除率  $> 70\%$ , 有效去除了餐饮油烟异味。

### (五) 结论与展望

据最新统计, 四川省的餐饮营业收入在全国名列前茅, 而成都市在全国省会城市中排名第一。餐饮行业废气排放的主要特征污染物为油烟(颗粒物)、VOCs、异味, 对城市大气环境的影响主要体现在秋冬季雾霾中细颗粒物中有机碳的贡献以及夏季光化学烟雾的重要前体物。全省在城市建成区内的餐饮企业普遍安装油烟净化设备, 对餐饮废气中的油烟颗粒物的控制效果明显, 但因餐饮废气排放标准更新滞后, 实际管理中对餐饮废气中 VOCs 和异味的关注不够, 导致 VOCs 和异味污染治理技术的发展缓慢。加上餐饮行业关乎民生, 其废气污染防治上资金投入少, 产生的环境问题日渐显现。

在污染物处理技术方面, 静电式油烟净化技术占据着餐饮行业油烟废气处理的绝大部分市场, 在餐饮废气的 VOCs 治理方面, 活性炭吸附是目前常见的、可接受的过渡性工艺, 而餐饮废气异味控制方面, 紫外光分解法得到一定的应用; 油烟、VOCs、异味为特征污染物的废气治理涌现出多种以机械与静电、湿式与静电相结合复合式油烟净化技术, 以其不断发展创新而等方式, 趋于成熟并得到了广泛的应用, 使得洁净后的餐饮废气达到日趋严格的排放标准要求。四川省作为全国的餐饮业大省, 在促进餐饮业健康发展的同时应该加快餐饮行业废气管控要求的更新, 尽早出台餐饮业废气地方排放标准, 为严格规范餐饮业废气排放管理提供执法管理的依据。鼓励社会资源参与餐饮废气净化设备的技术研发和创新, 通过不断改进机械分离、静电捕获、

洗涤吸收、过滤吸附、低温等离子等方法的处理工艺并优化基于以上技术复合的工艺参数，实现餐饮废气中油烟颗粒物、VOCs、异味污染物指标的达标排放；通过市场竞争机制和政府引导，促进餐饮废气的处理工艺和装备水平不断提高，废气治理方法的多样性和技术经济性能能够满足市场各种需求。采用传感器网络+智慧环保平台+大数据分析等现代方法，创新餐饮行业废气监测监管模式，加强餐饮废气净化设备的运行维护和处理效果的有效监督，最大限度地满足城市管理和大气污染防治的不断提升的要求。

## 第五章 四川省移动源大气污染防治技术

### 一、全省移动源大气污染防治现状

#### (一) 机动车保有量情况

2021 年全省机动车保有量 2030 万辆，其中汽车 1382 万辆，摩托车 637 万辆。2021 年全省汽车保有量前五位的城市依次为成都、绵阳、南充、德阳和宜宾，分别为 573.96、85.86、67.52、60.52 和 54.02 万辆。2021 年全省新能源汽车保有量 30.55 万辆，占全省汽车保有量的 2.21%，其中成都市 24 万辆，占成都市汽车保有量的 4.18%。

#### (二) 机动车新注册量情况

2021 年全省新注册机动车 215.04 万辆，其中汽车 126.93 万辆，摩托车 63.16 万辆。2021 年全省新注册汽车前五位的城市依次为成都、绵阳、南充、宜宾和凉山，分别为 48.46、7.96、6.49、5.87 和 5.5 万辆。2021 年全省新注册新能源汽车 13.6 万辆，占全省新注册汽车总量 10.71%，其中成都市新注册新能源汽车 10 万辆，占成都市新注册汽车总量 20.63%。

#### (三) 非道路移动机械保有量情况

2021 年底，全省完成信息登记的非道路移动机械达 14 万余台，以工程机械为主，按照排放标准阶段划分，国 I 机械占总量的 6.32%，国 II 机械占总量的 39.51%，国 III 机械占总量的 46.69%，其他占总量的 7.48%。按照机械类型划分，挖掘机占总量的 48.35%，装载机占总量的 18.52%，叉车占总量的 8.99%，压路机占总量的 3.62%，推土机占总量的 1.35%，起重机占总量的 0.25%，其他占 18.92%。

#### (四) 移动源大气污染物排放量情况

据“二污普”数据，2017 年全省移动源排放氮氧化物 36.03 万吨，颗粒物 1.36 万吨，挥发性有机物 11.49 万吨。其中，机动车排放氮氧化物 21.72 万吨，颗粒物 0.37 万吨，挥发性有机物 9.81 万吨；非道路移动源排放氮氧化物 14.31 万吨，颗粒物 0.99 万吨，挥发性有机物 1.68 万吨。

我省移动源氮氧化物排放占比高达 55.68%，是首要排放源；挥发性有机物排放占比达 27.77%，仅次于生活源（见图 5-1）。移动源氮氧化物和挥发性有机物排放量大、占比高，是影响当前我省空气质量的主要原因之一。

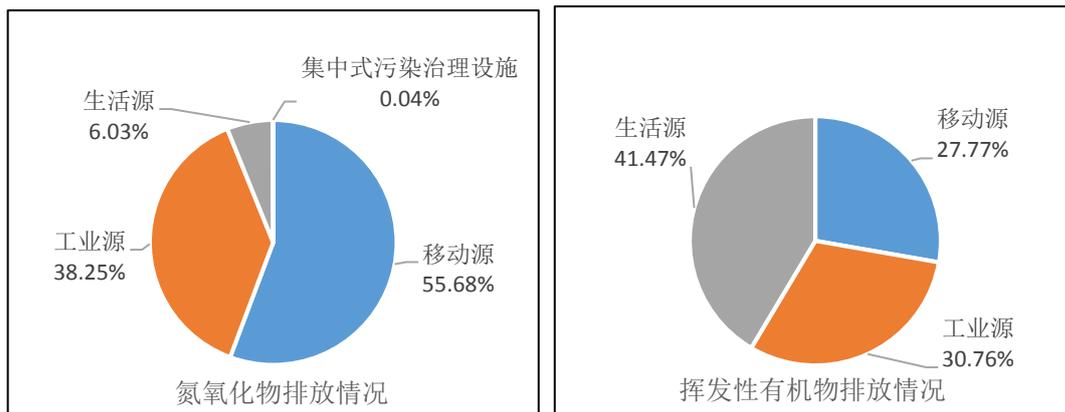


图 1-1 移动源主要大气污染物排放占比情况

## 二、全省移动源大气污染防治技术

### (一) 移动源污染防治技术发展现状

截至 2021 年底，全省柴油车保有量约 130 万辆，在汽车保有量中占比不足 10%，但其氮氧化物排放量却超过了汽车排放总量的 80%，颗粒物超过 90%。此外，非道路移动机械大多使用柴油机，其排放主要大气污染物也是氮氧化物和颗粒物，排放量与机动车相当。

为此，柴油车和非道路移动机械管控是当前我省移动源污染防治的重点，进一步提升柴油机大气污染物排放水平是移动源污染防治技术的发展重点。从控制方式来分，柴油机大气污染防治技术分为机内净化技术和机外净化技术两大类。

从柴油机有害污染物的生成机理及影响因素出发，通过对柴油机进行调整或改进，达到控制燃烧、减少和抑制污染物生成的各种技术称为机内净化技术。简单地说就是降低污染物生成量的技术，如改进发动机的燃烧室结构、改进点火系统、改进进气系统、采用电控燃油喷射和电控点火技术、采用废气再循环技术等。这是一种通过改进发动机燃烧过程从而减少污染物产生的方式。

在柴油机燃烧生成的废气排出发动机排气门后，且还未排入到大气环境之前，进一步采取净化措施，最终有目的地减少一种或多种污染物排放的技术，被称为机外净化技术。简单地说就是对排出发动机排气口的污染物进行进一步处理和净化的技术。如二次空气喷射技术、热反应器技术、氧化催化转化技术、催化还原净化技术和颗粒物捕集技术等。

## **(二) 道路运输污染防治技术水平与需求**

自 1892 年德国工程师狄赛尔发明柴油机以来，100 多年间人们一直致力于柴油机质量和品质的提升。到了 20 世纪 90 年代以后，节能与环保逐渐成为内燃机及的新方向。在欧、美、日等发达地区和国家的推动和带领下，世界各国不断推出更苛刻的排放法规，并要求柴油机生产商强制执行。可以说节能环保是推动柴油机技术进步的主要动力。

我国自 2001 年实施重型柴油车国一排放标准到 2021 年实施国六排放标准，整车和发动机生产企业都面临着技术路线的选择和污染防治技术的提升。每一次排放技术提升需要对整个发动机（进气系统、供油系统和排气后处理系统）进行不同程度的改进和优化。进气系统的优化，包括进气道、多气门、涡轮增压器技术水平的提升等，在设计优化的同时，附属零件都要有相应的技术提升；供油系统的优化，主要是压力的提升和喷油速率的灵活控制，喷油速率的灵活控制主要靠电控来实现，再配合燃烧室形状的优化。不同排放阶段的需求也就对应了不同的技术水平（见表 1-1）。

表 1-1 国零到国六排放标准升级主要污染防治技术

排放标准	主要污染防治技术
国零	机械泵、自然吸气
国一	机械泵、自然吸气或涡轮增压
国二	机械泵、增压水空中冷、增压空空中冷
国三	电控供油系统（高压共轨、单体泵、泵喷嘴）、增压中冷
国四	电控供油系统、 deNOx 系统或 EGR + 去颗粒物系统
国五	电控供油系统、 deNOx 系统或 EGR +DPF
国六	电控供油系统、 deNOx 系统 + DPF

### （三）道路运输污染防治技术原理介绍

#### 1. 机内净化

柴油机的污染物排放取决于柴油机混合气形成及缸内燃烧过程，而这些归根结底是由喷油、气流、燃烧系统以及缸内工质的配合所决定的。柴油机内净化的核心是对燃烧过程进行优化，使发动机达到混合均匀、燃烧充分、工作柔和、启动可靠、排放减少的要求。目前主要有以下几种方式：

## 1.1 改进燃烧室

柴油机燃烧室的形式形状和结构参数对柴油机的燃烧及污染物的生成有重要影响，柴油机的燃烧室分为直喷式和分隔式两类。对于直喷式燃烧室，趋向于采用中央布置，加大燃烧室直径，能改善燃油与空气的分布，使燃油和空气充分混合，燃烧更彻底，会有效减少PM、碳氢化合物和NO<sub>x</sub>的生成。对于分隔式燃烧室利用部分燃料先期燃烧的能量，促成后期混合气的形成和燃烧，使得NO<sub>x</sub>的排放量降低，其他有害成分碳氢化合物、CO等也相对较低。

## 1.2 改进进气系统

改进进气系统可适当地降低NO<sub>x</sub>排放，可以从组织适当的进气涡流强度、改变进气重叠度、改变进气状态和采用多气门技术等多个方面着手。进气涡流减弱，NO<sub>x</sub>降低，但烟度增加。其原因是混合气形成条件变差而使燃烧速度变慢，因而气缸内温度降低。因此，进气涡流强度需要在NO<sub>x</sub>与烟度之间做适中的选择。气门的大小和配气相位影响气缸内残余废气系数，从而影响NO<sub>x</sub>排放。当残余废气增加时，NO<sub>x</sub>排放降低。此外，通过改变进气状态如适当地增加进气湿度，使最高燃气温度降低，也可以使NO<sub>x</sub>排放降低。在柴油机上采用多气门技术是满足更严格排放指标的有效途径。

进气涡轮增压技术是使发动机轻量化、提高输出功率的有效措施，也是现代柴油机的代表性技术。经涡轮增压后，进气温度提高、滞燃期缩短、混合气可适当变稀，这些因素能使柴油机的噪声、CO和碳氢化合物排放以及油耗都有所降低。特别是进气增压后，由于进气量大幅度增加，可使柴油机的空燃比进一步提高，同时允许燃油喷射

压力进一步提高，这些措施可大幅度降低 PM 排放。但是，柴油机涡轮增压后进气温度升高、混合气氧含量增加，这种高温富氧的燃烧必然导致 NO<sub>x</sub> 排放增加。为达到更严格的排放法规要求，新型的增压柴油机一般都采用中冷技术，可使柴油机在进气压力增高的同时，降低 NO<sub>x</sub> 的排放 60% 以上。

柴油机采用增压中冷技术不仅可显著提高柴油机的动力性和经济性，而且能极大地改善排放指标特别是 NO<sub>x</sub> 和 PM。采用增压中冷以后，一方面，进气管内的空气压力温度着火滞后期燃烧速率和过量空气系数都相应地发生了变化，使得 NO<sub>x</sub> 的生成更加困难，另一方面，增压可使气缸内浓度增加为改进混合气形成和燃烧创造条件，同时增压还可以提高进气温度促使液体燃料蒸发汽化，从而减少微粒的生成。

### 1.3 废气再循环 (EGR)

EGR 是指将发动机一部分排气引回到进气管，与新鲜空气混合后进入气缸作为工质参加气缸内的热循环，EGR 作为控制 NO<sub>x</sub> 排放的一项有效措施，应用已很普遍。由于废气再循环减少了进气中含氧量，废气的热容量增加而使最高温度下降，所以只有在部分负荷或空燃比足够大的工况下采用，以免碳氢化合物和 PM 排放量明显增加。EGR 技术的关键应使 NO<sub>x</sub> 在最大程度降低情况下，不影响柴油机经济性和碳氢化合物、PM 排放。采用有效的调整装置来优化柴油机整个工作范围内的废气再循环量这一问题，可用电控技术有效地解决，其与增压中冷技术的结合使用，可提高发动机的整机性能。利用废气中的冷凝水导入进气管从而使 NO<sub>x</sub> 下降，在进气系统中加入氧，可

促使混合气氧化，改善性能和排放。

#### 1.4 燃油高压喷射技术

燃油喷射系统是柴油机的核心，也是发展最快的系统。传统的泵—管—嘴系统的喷油压力较低，一般不超过 50~80 MPa，因此燃油的雾化不好，易导致 PM 排放高。为使 PM 排放严格地达到排放法规，就采用了高压喷射技术，喷射压力从原来的 80 MPa 提高到 140~200 MPa，甚至更高。如果不考虑到其他性能的平衡，高压喷射可使 PM 达到国三乃至更严格的排放标准，使柴油机告别冒黑烟的时代。柴油机喷油压力越高，燃油和空气的混合就越好，排烟就越少。高压喷射可通过 3 种形式的喷油系统实现：共轨系统、单体泵和泵喷嘴。与其他的燃油喷射不同，共轨式喷油系统能提供持续的高压喷射，而且容易实现单循环多次喷射。目前国外已经在用的共轨系统最高压力可达 200 MPa。电控高压喷射可非常精确地控制喷油量和喷油时间，以适应不同的道路工况，并且有的还具有自适应能力，可以补偿零件磨损和零件制造偏差引起的变化，以取得 NO<sub>x</sub>、PM 和燃油经济性之间的最佳配合。现有的共轨喷射系统大多采用多次喷射技术，可以实现柔和燃烧，也可减少柴油机 PM 的排放。

#### 1.5 喷油定时延迟

延迟喷油定时是柴油机降低 NO<sub>x</sub> 排放的一项行之有效的措施。推迟喷油定时的主要作用是降低燃烧峰值温度和减少高温出现的持续时间，但是增加了排气门出口的温度，会引起烟度和油耗的增加。要解决降低污染物排放与保证发动机性能之间的矛盾，较好的办法是综合运用 EGR 废气再循环、延迟喷油定时和高压喷射等技术，达到

NO<sub>x</sub> 和微粒排放、油耗、功率等的最佳平衡。

## 1.6 改进润滑系统

窜入燃烧室的润滑油不完全燃烧，不但会产生大量的碳烟微粒，而且还大大地促成可溶性有机物的生成。该润滑油来源于活塞环与气缸臂之间的间隙和气门挺杆周围的缝隙。所以，在结构上要改善气缸套与活塞的配合，提高接触面的加工精度，改进气门挺杆的密封措施等，尽可能地减少窜漏的润滑油数量。

## 1.7 可变控制技术

可变控制技术是根据发动机不同的工况，适时地调整喷油定时、燃烧室涡流状况以及增压系统的各项参数，以达到充分发挥燃油效率，减少污染排放的目的。

## 2. 机外净化

随着排放法规的日益加严，仅凭机内净化而没有后处理技术的柴油机很难满足排放标准要求，因此必须采用机外净化进一步降低污染物排放。简单地讲就是对排出发动机排气口的污染物进行进一步处理和净化的技术，如氧化催化转化技术、催化还原净化技术和颗粒物捕集技术等。

柴油机主要污染物 NO<sub>x</sub> 和 PM 的排放之间是一种双曲线关系，也可以说是一种综合协调的关系。机内净化就是通过改善燃烧来达到 NO<sub>x</sub> 和 PM 的最佳排放点。当机内净化做到极致后，就很难再仅凭机内净化措施同时减少 NO<sub>x</sub> 和 PM 的排放。因此，采用机外净化技术利用各种过滤净化装置和催化转化器对排气系统内废气进行最后处理，进一步降低有害物的排放量，是机内净化方法的重要补充。柴油

机的排气后处理技术主要分为两大类：NO<sub>x</sub> 控制技术和 PM 控制技术。

## 2.1 NO<sub>x</sub> 控制技术

目前，NO<sub>x</sub> 后处理技术主要有稀 NO<sub>x</sub> 捕集技术、低温等离子体技术、NO<sub>x</sub> 吸附转化技术、选择性催化还原技术，国内主要采用选择性催化还原技术（SCR）。

SCR 可以将发动机排气中的 NO<sub>x</sub> 还原，从而有效改善发动机的排放，是达到国 4 及以上排放标准的最佳选择。SCR 系统的核心部件是 SCR 催化器，在催化反应器中通过以氨或尿素为还原剂，以 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-TiO<sub>2</sub>、Ag -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 以及含 Cu、Pt、Co 或 Fe 的人造沸石为催化剂进行反应，对 NO 进行选择性还原（见图 5-2）。

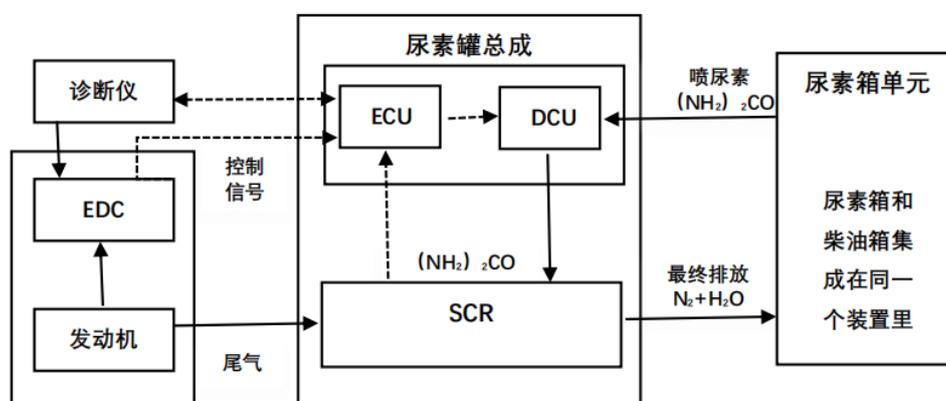


图 1-2 典型 SCR 系统结构

采用 SCR 技术的发动机燃油消耗率比较低，油耗可节省 5% ~ 7%，若扣除因尿素所增加的费用，还将有节油 2%~3% 的优势。此外，这一路线对于燃油品质相对不敏感。但使用 SCR 后不但要增加 SCR 本身装置的质量为 150~300 kg，另外，还要增加 1 个尿素溶液箱和尿素溶液。而且尿素消耗较快，定期添加尿素的责任也必须由用户来

完成，这就加大了装置的复杂性和保养的难度。

## 2.2 PM 控制技术

柴油机排放颗粒物的主要组分是炭烟，来自柴油的不完全燃烧。目前，比较常用的柴油机颗粒物后处理技术有氧化型催化器、部分流过滤器、壁流式捕集器等。

### 2.2.1 氧化型催化器（DOC）

DOC 是最早被使用的柴油机颗粒物后处理装置，DOC 一般以陶瓷或金属作为催化剂的载体，涂层中主要活性成分是铂、钯等贵金属和稀土金属。DOC 安装在柴油车排气系统中，通过催化剂进行氧化反应，能同时降低排气中 CO、THC（总烃）和 PM 中的可溶性有机组分。研究表明，DOC 碳氢化合物部分减少 68%，多环芳香碳氢化合物排放减少 56%，乙醛减少 70%。根据颗粒中的含量不同，柴油机氧化催化器可以降低 3%~25% 的颗粒排放。

由于柴油中含有的硫燃烧生成  $\text{SO}_2$ ，经 DOC 后氧化成  $\text{SO}_3$ ，然后与排气中的水分化合生成硫酸盐。所以对于含硫量较高的柴油来说，使用 DOC 将使 PM 排放中的硫酸盐比例增大，仅硫酸盐颗粒物的形成就会导致 PM 的排放超过排放限值。另外燃料中的硫还会引起催化剂中毒。所以使用高硫柴油会极大地影响 DOC 的净化效果和降低催化器的寿命。

### 2.2.2 部分流颗粒捕集器（POC）

柴油机部分流捕集器通常使用金属载体，由特殊的多孔金属箔基板与金属网层构成。尾气流过时被导向邻近的通道，而颗粒物则留在金属网上，基于不同的过滤直径和运行条件，POC 对颗粒物的去除

效率为 40%—70%。

POC 通常与 DOC 配合使用，其技术原理：先在 DOC 里面将废气中的 NO 转化为 NO<sub>2</sub>（同时在 DOC 中也会将一部分 SOF 直接去除），接着在后面 POC 中，由生成的 NO<sub>2</sub> 与捕集的炭烟发生反应将其氧化掉。

### 2.2.3 颗粒捕集器（DPF）

DPF 是目前公认的降低柴油机微粒排放的有效手段，常见的 DPF 对颗粒物（PM）的过滤效率可以达到 90% 以上，有的可以到达 99%。目前，常用的是壁流式 DPF，它是通过相邻的蜂窝孔道前后交替封堵的方法，使排气进入孔道后穿过多孔壁从相邻的孔道流出以达到捕集颗粒的目的。目前常用的过滤材料有堇青石蜂窝陶瓷、泡沫陶瓷、编织陶瓷纤维、金属丝网、金属纤维毡、碳化硅、氮化硅、钛酸铝、莫来、活性炭纤维等。

但随着运行时间的增加，过滤材料中的微粒聚集增多，如果不及及时去除会影响到发动机的正常运转。因此，在使用一段时间后将微粒除掉，即为微粒捕集器再生。

再生的方法有两种：一种通过在燃油中加入添加剂或在过滤材料表面涂催化层来降低 PM 的燃点，使 PM 能在较低的温度下燃烧掉，一般称为被动再生；另一种称为主动再生的是指利用外界能量来提高 DPF 内的温度，使 PM 着火燃烧。当然也可以把各种不同的方案组合起来使用，以确保可靠的再生和 PM 过滤系统在寿命周期内的正常功能。

DPF 应用的一个实际问题是燃油中的硫比较敏感。因为由

DOC 氧化  $\text{SO}_2$  而形成的  $\text{SO}_3$  会与机油中某些组分产生反应生成“灰分”，无法通过燃烧去除，时间长了便会阻塞 DPF。所以安装 DPF 的车辆一般在行驶一段时间或里程后需要将 DPF 拆下进行清洗。

#### (四) 道路运输污染防治技术典型应用案例

##### 1. 柴油货车应用案例

随着排放标准的日益加严，柴油机的排放控制逐渐加强。自 2021 年 7 月 1 日起，我省开始实施重型柴油车国六排放标准，可以说发动机排放控制已接近极致。无论是机内净化的燃烧控制，还是机外净化的后处理技术，所有先进的控制技术都将全部应用到发动机上。机内净化方面，包括超高压喷射的燃油系统、可变截面增压器或多级增压器、两级冷却的 EGR 等；而机外净化方面更是使得组合式的排气后处理系统的出现成为必然。目前，应用较为普遍的是：高压共轨+增压中冷+EGR + DOC + DPF + SCR+ASC 组合式结构（见图 1-3）。

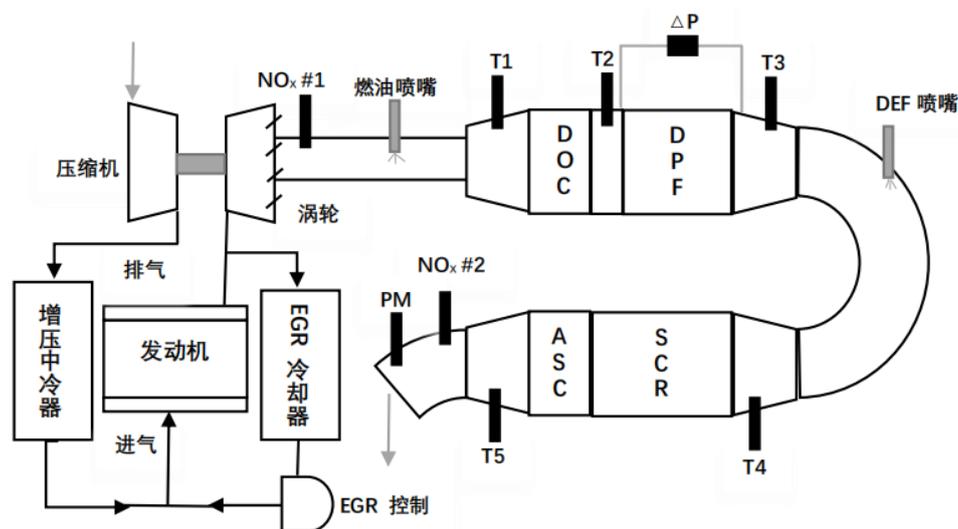


图 1-3 典型柴油货车污染防治技术结构

##### 2. 非道路移动机械应用案例

目前，非道路移动机械执行国三排放标准，自 2022 年 12 月 1 日

起，全国将执行国四排放标准。从国三标准升级到国四，发动机供油系统并没有本质变化，主要是使用更加复杂的机外净化技术（后处理技术）来进一步降低整体排放水平。目前，应用较为普遍的是：高压共轨+增压中冷+EGR + DOC + DPF + SCR 组合式结构（见图 1-4）。

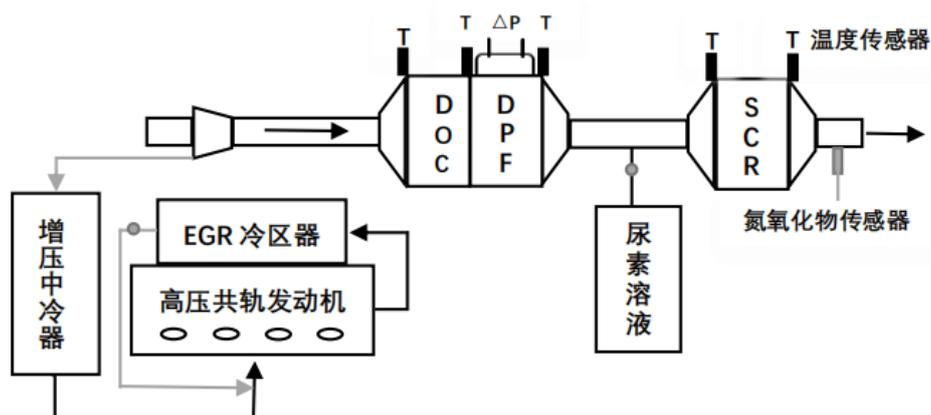


图 1-4 典型非道路移动机械污染防治技术结构

### 三、结论与展望

总体来看，我省移动源保有量大、区域分布差距大、新能源汽车占比较低、污染物排放量大。全省汽车保有量居全国第七，老旧汽车和非道路移动机械占比较高，淘汰进展慢。成都平原 8 市汽车保有量占全省 65%，其中，成都市汽车保有量占全省 42%，保有量次于北京市。全省新能源汽车保有量占比仅为 2%，新车渗透率仅为 10%。移动源氮氧化物排放占比超过 50%，是首要排放源；挥发性有机物排放占比近 30%，仅次于生活源。在污染防治技术方面，主要基于新车(机)出院所采用机内和机外净化技术，通过优化发动机燃烧室结构、点火系统、进气系统等减少污染物生成；通过加装氧化催化转化、催化还原净化和颗粒物捕集等装置减少污染物排放，最终符合排放法规要

求。全省未实施老旧汽车、非道移动机械污染排放深度治理工程。

近年来，随着《柴油货车污染治理攻坚战行动计划》的推进，全省移动源排放达标率明显提高。下一步，我省将重点围绕《柴油货车污染治理攻坚行动方案》，坚持“车、油、路、企”统筹，发展移动源超低排放和近零排放技术体系，集成发动机后处理控制、智能监管等共性技术，推进淘汰具备条件的老旧非道路移动机械更换国四排放标准发动机，降低污染物排放总量。未来，我省移动源保有量结构清洁、低碳程度将明显提高，移动源冒黑烟现象将彻底消除。