

2021-2030 年大气污染防治行业发展 展望报告

主编单位：福建龙净环保股份有限公司

参编单位：中国环境保护产业协会废气净化委员会

中国环境保护产业协会机动车污染防治技术专业委员会

中国环境保护产业协会室内环境控制与健康分会

指导专家：李俊华 朱法华 朱天乐 栾志强 姚 群

指导单位：中国环境保护产业协会

2021 年 11 月

编写组成员

福建龙净环保股份有限公司：

郭俊 庄焯 郭刚 陈奎续 王建春 吴雪萍 李昌斌
王岭 吴华秀 郭上迎 李泉鸣 黄志杰 赵亚飞 林天化
朱振炜 韩小梅 李俊 陈静 朱翔

中国环境保护产业协会废气净化委员会：

栾志强 郝郑平 王喜芹 李京芬

中国环境保护产业协会机动车污染防治技术专业委员会：

方茂东 王计广 李孟良 谢振凯

中国环境保护产业协会室内环境控制与健康分会：

朱天乐 岳仁亮 李景广 张静

前 言

大气污染是一项全球性问题。党中央、国务院历来高度重视大气污染防治。十八大报告提出，要大力推进生态文明建设，强化大气污染防治。新修订的《中华人民共和国大气污染防治法》，进一步为大气污染防治提供了坚实的法律基础。“大气污染防治行动计划”和“打赢蓝天保卫战三年行动计划”实施以来，我国燃煤电厂、钢铁行业超低排放改造大规模展开，工业锅炉、各种炉窑大气污染治理和挥发性有机物治理不断升级，机动车排放和室内环境治理取得明显突破，各种治理技术持续快速发展，大气污染治理取得明显成效，获得了国际社会的广泛赞誉。

当前我国大气污染治理形势依然严峻。《国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》明确指出要“强化多污染物协同控制和区域协同治理，加强细颗粒物和臭氧协同控制，基本消除重污染天气”。展望“十四五”乃至更长时期，我国将更加深入落实十九大报告强调的生态文明建设和绿色发展，推动 PM_{2.5} 和臭氧、常规和非常规大气污染物、大气污染物和二氧化碳协同减排的治理任务繁重。同时，我国碳达峰、碳中和目标下，减污降碳协同增效工作更加凸显，大气污染治理行业将进入一个新目标、新挑战、新机遇共同作用的新的发展阶段。

本报告基于国内外大气污染治理行业发展现状以及面临形势机遇的分析研究，进行了我国未来 10 年大气污染治理行业市场发展、技术装备、经营模式、行业格局的展望，并提出了大气污染治理行业发展的建议，供有关部门参考。本报告在中国环保产业协会具体指导下，得到协会主要领导和编制指导专家清华大学李俊华教授、国电环境保护研究院朱法华院长、北京航空航天大学朱天乐教授、解放军防化研究院栾志强研究员、中钢集团天澄环保姚群教授级高工等的悉心指导，在此一并致谢！

目 录

1 国外大气污染治理行业发展概况.....	1
1.1 国外大气污染治理行业市场现状分析.....	1
1.1.1 发达国家大气污染治理市场现状.....	1
1.1.2 发展中国家大气污染治理市场现状.....	3
1.2 发达国家大气污染治理技术发展现状及趋势.....	4
1.2.1 工业烟气治理.....	4
1.2.1.1 除尘技术.....	4
1.2.1.2 脱硫技术.....	6
1.2.1.3 脱硝技术.....	6
1.2.1.4 脱汞技术.....	7
1.2.1.5 碳捕集技术.....	8
1.2.1.6 多污染物协同脱除技术.....	8
1.2.2 VOCs 治理.....	9
1.2.2.1 吸附技术.....	9
1.2.2.2 高温焚烧技术.....	10
1.2.2.3 催化燃烧技术.....	10
1.2.2.4 生物技术.....	10
1.2.2.5 低温等离子体降解技术.....	10
1.2.2.6 光（催化）氧化技术.....	10
1.2.3 机动车船尾气治理.....	11
1.2.3.1 汽油车排放控制技术.....	11
1.2.3.2 柴油机排放控制技术.....	12
1.2.4 室内污染与油烟治理.....	13
1.2.4.1 室内空气净化技术.....	13
1.2.4.2 油烟治理技术.....	14
1.3 行业发展主要特征.....	15
1.3.1 工业烟气治理行业.....	16
1.3.2 VOCs 治理行业.....	16
1.3.3 机动车船尾气治理行业.....	17
1.3.4 室内污染与油烟治理行业.....	17
2 我国大气污染治理行业发展现状.....	18
2.1 行业市场现状分析.....	18
2.1.1 工业烟气治理市场.....	18

2.1.2	VOCs 治理市场.....	20
2.1.3	机动车船尾气治理市场.....	21
2.1.4	室内污染与油烟治理市场.....	22
2.2	行业发展主要特征.....	23
2.2.1	生命周期分析.....	23
2.2.2	行业驱动力分析.....	23
2.2.3	行业竞争力分析.....	25
2.2.4	行业发展格局分析.....	26
2.3	技术及装备发展现状.....	27
2.3.1	工业烟气治理技术与装备.....	27
2.3.1.1	除尘技术与装备.....	27
2.3.1.2	脱硫技术与装备.....	28
2.3.1.3	脱硝技术与装备.....	29
2.3.1.4	碳捕集技术与装备.....	29
2.3.1.5	脱汞技术与装备.....	30
2.3.1.6	多污染物协同脱除技术与装备.....	30
2.3.2	VOCs 治理技术与装备.....	31
2.3.3	机动车船尾气治理技术与装备.....	32
2.3.4	室内污染与油烟治理技术与装备.....	33
2.4	大气环境服务业发展现状.....	34
3	大气污染治理行业发展机遇与挑战.....	35
3.1	主要发展机遇.....	35
3.2	主要问题与挑战.....	36
3.2.1	内部主要问题与挑战.....	36
3.2.2	外部主要问题与挑战.....	37
3.2.3	较为薄弱的关键技术与装备.....	38
3.2.4	不确定因素.....	39
4	我国大气污染治理行业发展展望.....	39
4.1	大气污染治理行业发展主导因素分析.....	39
4.1.1	国家“减污降碳”战略和政策的影响.....	39
4.1.2	行业自身高质量发展的动力影响.....	40
4.1.3	污染形态的变化.....	41
4.1.4	新一轮科技革命和创新成果的驱动.....	41
4.1.5	商业模式创新与应用.....	42

4.1.6 国际经济走势、贸易环境及环保需求.....	42
4.2 大气污染治理行业市场展望.....	43
4.2.1 工业烟气治理市场.....	43
4.2.2 VOCs 治理市场.....	45
4.2.3 机动车船尾气治理市场.....	46
4.2.4 室内污染与油烟治理市场.....	47
4.2.5 大气市场展望小结.....	48
4.3 行业技术与装备发展展望.....	48
4.3.1 “减污降碳”技术发展趋势.....	48
4.3.2 工业烟气治理技术与装备.....	49
4.3.3 VOCs 治理技术与装备.....	52
4.3.4 机动车船尾气治理技术与装备.....	54
4.3.5 室内污染与油烟治理技术与装备.....	54
4.3.6 重点开发的关键技术与重大核心装备展望.....	55
4.4 大气环境服务商业模式创新.....	60
4.5 行业发展格局展望.....	61
4.5.1 产业规模与产业结构发展.....	61
4.5.2 产业发展能力.....	61
4.5.3 企业经营发展模式.....	61
4.5.4 行业竞争或合作等多元化格局.....	62
4.6 政策与资金需求.....	62
4.6.1 政策需求.....	62
4.6.1.1 需求侧引导.....	62
4.6.1.2 供给侧支持.....	63
4.6.2 资金需求.....	63
4.7 建议.....	64
4.7.1 政府端.....	64
4.7.2 企业端.....	64
4.7.3 行业协会.....	65
参考文献.....	66

1 国外大气污染治理行业发展概况

发达国家经过半个世纪的发展，大气污染已基本得到有效治理，排放标准已趋于稳定，大气污染治理市场的政策推动力减弱；而发展中国家大气污染治理起步晚，且近十年排放标准呈现大幅度加严趋势，政策推动力逐步加强。此外，受全球产业链分工、发达国家产业结构优化及能源结构调整等因素影响，发达国家大气污染治理行业进入存量市场更新阶段，发展中国家大气污染治理行业进入了需求旺盛的增量市场阶段。目前发达国家已拥有较为成熟的大气污染治理技术，近年来相关技术虽无颠覆性革新，但在技术优化、协同控制、节能降耗、智慧控制、新材料开发等方面创新不断。发展中国家由于经济发展较为滞后，技术能力普遍薄弱，在大气污染治理技术的关键工艺、材料和核心设备的自主创新、引进和消化及再创新方面仍有一段路要走。

1.1 国外大气污染治理行业市场现状分析

1.1.1 发达国家大气污染治理市场现状

在产业结构优化、能源结构调整和大气污染排放标准加严等政策的推动下，发达国家工业烟气治理行业进入存量市场更新阶段，未来市场需求主要集中于现有设备的更换和优化。美国、日本等发达国家和欧盟组织的烟气排放标准大多颁布于上个世纪七十年代之后，并逐渐收严。近十年，发达国家烟气排放标准已逐渐趋于稳定，加之原有污染源的治理接近尾声，烟气治理市场趋于平缓，工业烟气治理行业的关注度和市场均处于低位。发达国家已借助自身优势在国际工业烟气治理市场深耕多年，在相关技术产品和服务等领域占有重要市场份额。以美国为例，环保对外出口产值一度占全球环保产业总产值的三成左右^[1]。同时，发达国家产业结构优化和能源结构调整也限制了烟气治理市场的扩增，目前已形成第三产业及资本密集的高科技工业为主的产业结构。日本、德国、美国等发达国家的第三产业占国内生产总值（GDP）比重均超过 70%^[2]。发达国家的重心在于通过能源结构调整、污染产业转移和清洁能源技术应用等方面从源头上控制大气污染物，进一步促进空气质量改善。

在挥发性有机物（VOCs）治理方面，欧美发达国家先后经历了几十年的发展历程，法规标准体系比较成熟，目前已经达到平稳发展阶段。美国 VOCs 管控标准主要有新污染源行为标准（NSPS）、有毒空气污染物排放标准、消费品及涂

料、粘合剂等工业产品中 VOCs 类物质限值标准等^[3]。在炼油、石化、精细化工（杀虫剂、涂料、染料颜料等杂项有机化学品）、油品储运、制药、表面涂装、出版印刷等行业都有基于技术的排放标准^[4]。欧盟主要通过工业排放指令进行 VOCs 管控，先后发布有机溶剂使用指令（1999/13/EC）、涂料指令（2004/42/EC）、油品储运回收指令（1994/63/EC、2009/126/EC）等。在总量控制上欧盟通过 NEC 指令《大气污染物排放量最高国家标准》（2001/81/EC），确定各成员国排放量削减目标。2020 年生效的 2016/2284 指令（取代了 2001/81/EC 指令并更新了 2003/35/EC 指令），提出 2020—2029 年期间，以 2005 年排放量为基准值，欧盟 28 国 VOCs 总排放量降低 28%、细颗粒物（PM_{2.5}）降低 22% 的目标^[5]。2004 年，日本修订了《大气污染防治法》，提出建立 VOCs 排放限值，针对工厂等固定 VOCs 污染源，制定排放法规和标准，另外鼓励企业自愿削减排放。发达国家的排放量总体上平稳下降，在技术产品和服务上处于领先地位。

在机动车船尾气治理方面，近年来世界各国机动车船排放法规标准持续加严，带动了机动车船污染治理产业的进一步发展，发达国家在技术水平、市场占有率等方面在行业内仍占据绝对优势。为应对更严格排放标准，针对在用和新生产的车/船、非道路柴油机械排放治理的逐步开展，发达国家机动车船尾气治理行业正展现出蓬勃发展生机^[6]。

在室内污染治理方面，发达国家室内空气污染的主要特征是颗粒物（PM）等物理污染较轻，VOCs、半挥发性有机物（SVOCs）等化学污染和生物污染并重。工作重点是控制室内产品污染和室内活动产生的过程污染。发达国家空气净化技术相对较发达，在全球市场拥有较高的市场占有率。

在碳捕集、利用与封存（CCUS）方面，国际能源署（IEA）发布《2020 年能源技术展望：碳捕集、利用与封存特别报告》中指出，CCUS 作为能够直接减少关键部门排放量并抵消减排压力较大部门排放量的技术，通过强调减排和直接支持 CCUS 早期项目、协调推进共享二氧化碳（CO₂）基础设施的工业中心的发展、鼓励二氧化碳储存的发展、推动创新以降低成本并确保新兴技术商业化等四个方面措施对全球净零排放目标做出贡献。碳捕集技术已在美国、挪威、加拿大、日本、英国、澳大利亚、阿联酋等多个国家的燃煤电厂、天然气处理、化肥厂、炼油厂、钢铁厂等多方面开展了工程项目。2016 年美国得克萨斯州的佩特拉诺

瓦 (Petra Nova) 项目在 240MW 的燃煤电厂上实现了 CO₂ 年碳捕集量 160 万吨, 并用于强化采油 (EOR) [7]。2020 年美国新增 12 个 CCUS 商业项目, 运营中的 CCUS 项目增加至 38 个[8]。2016 年阿联酋的阿布扎比 (Abu Dhabi) 项目在钢铁厂实现了 CO₂ 年捕集量 80 万吨, 并用于 EOR[7]。2019 年澳大利亚西部的高更 (Gorgon) 项目在天然气处理上实现了 CO₂ 年捕集量 400 万吨, 并用于咸水层封存[7]。欧盟 2020 年有 13 个商业 CCUS 项目在运行, 另有约 11 个项目计划在 2030 年前投运[8]。国际研究机构对碳中和不同路径下 CCUS 减排贡献量做了预测, 2030 年为 1 亿—16.7 亿吨/年, 2050 年为 27.9 亿—76 亿吨/年[8]。

1.1.2 发展中国家大气污染治理市场现状

近十年, 发展中国家正处于前工业化时期, 全球制造业向发展中国家的转移, 导致发展中国家的大气污染呈加重趋势。以印度为例, 工业体系主要以纺织、化工、钢铁、水泥、石油和机械等传统工业为主, 2018 年工业增加值占印度 GDP 的比重为 27%^[9], 2018 年的制造业增加值约为 4086 亿美元, 全球排名第六^[10]。近十年制造业增加值年均增长率为 6.34%, 导致 2019 年其空气质量世界排名倒数第五。由于印度的人均制造业增加值仍远低于东亚和欧美水平, 2018 年人均发电量仅为中国的 1/4、人均钢产量仅为中国的 1/9, 鉴于印度经济建设发展的需求, 预计其仍将有大量电力和钢材资源的需求, 将会给发展中国家带来大气污染的压力。孟加拉国、巴基斯坦、印度、印尼空气质量排名分别位于世界的倒数 1、2、5、6 名。由于制造业发展的需求和发展中国家空气污染的压力, 迫使近十年, 印度、泰国、印尼、巴西等发展中国家的工业大气污染排放标准迅速提升。例如印度环境部 2015 年发布的最新法案显示, 对 2017 年之后新建的火电厂, 烟尘、二氧化硫 (SO₂)、氮氧化物 (NO_x) 排放标准分别加严至 30、100、100mg/m³。发展中国家大气污染问题、传统工业发展和工业烟气排放标准加严趋势等烟气治理市场的关键驱动因素已经开始发力, 工业烟气治理行业步入了需求旺盛的增量市场阶段。目前发展中国家的工业烟气治理技术和装备能力较为薄弱, 大部分以引进为主, 印度、巴西等部分国家的工业烟气治理设备能够实现国产化。

在 VOCs 治理方面, 由于全球大规模产业转移的原因, 在上世纪 80 年代之后涉及到 VOCs 污染排放的一些重污染行业, 如包装印刷、人造革、家具、人造棉、纺织印染、制药等行业逐步向欠发达国家转移。有 VOCs 治理需求的主要集

中在巴西、南非以及“一带一路”沿线等发展中国家，这些国家的 VOCs 治理工作目前尚处于起步阶段，法规和标准不健全，治理技术大部分以引进为主。

在机动车船尾气治理方面，发展中国家机动车船排放治理产业发展相对滞后，其排放治理装置系统及关键部件（载体、催化剂、衬垫、传感器等）研发和生产能力、系统集成（含排放控制策略）及产业化等均落后于发达国家。近年来，随着发展中国家和地区机动车船保有量快速增长带来的环境空气污染问题，开展机动车船排放治理已引起国家、地方政府和社会公众的高度关注。国家和地方相关管理部门采用新车排放标准升级和在用车排放深度治理、淘汰、更换发动机等措施，加大机动车船污染防治力度，带动整个机动车船排放治理产业链（产品关键部件、系统等）的产品技术研发和产业化发展。在各国政府管控政策的刺激下，发展中国家机动车船排放治理相关行业企业也迎来巨大的发展空间^[11]。

在室内污染治理方面，发展中国家室内空气污染的主要特征是室外大气污染导致的室内颗粒物污染和甲醛（CH₂O）、VOCs 等化学污染并重。工作重点主要是控制建筑材料等结构性、固定性污染。近年，全球净化市场主要由亚太地区构成。印度作为快速发展中的经济体，越南、斯里兰卡、缅甸和孟加拉国等国家的发展也将大幅拉动空气净化市场的增长。

1.2 发达国家大气污染治理技术发展现状及趋势

1.2.1 工业烟气治理

1.2.1.1 除尘技术

当前工业除尘技术主要有电除尘和过滤除尘两大类，技术优化进展主要为提高技术适用性及节能降耗。

电除尘技术目前发达国家主要以设备出口、技术转让、技术服务等为主。欧美及其他发达国家目前使用的干式电除尘器，其烟尘排放浓度都低于 20mg/m³。如果采用湿式、低低温电除尘器，烟尘排放浓度可以控制在 5mg/m³ 以下。美国具有代表性的除尘工艺是静电除尘工艺和袋式除尘工艺。日本新建大容量燃煤机组多采用最具代表的低低温电除尘器和移动极板电除尘器工艺。德国的大容量燃煤机组目前主要除尘措施是装备高效电除尘器。2015 年法国苏伊士环能集团（GDF Suez）应用计算流体动力学（CFD）优化、双电晕（Bi-corona）、新型电源等新技术，在德国建造的 790MW 锅炉配套电除尘器在总功率 880kW 时，

出口浓度小于 $6\text{mg}/\text{m}^3$ ^[12]。发达国家重视采用先进的电源技术，如高频电源、脉冲电源、三相电源等配合电除尘进一步提效降耗。2015 年法国阿尔斯通 (Alstom) 推出的 SIR 系列大功率高压高频电源输出参数为 60—100kV 和 0.8—1.7A；2018 年丹麦史密斯 (FLSmidth) 将某发电厂除尘器原有高频电源更换为脉冲电源后，在更低能耗下将高比阻粉尘排放浓度降低了近 50%^[13]；日本三菱 (Mitsubishi) 低低温干式电除尘和湿式电除尘工艺最低排放浓度可分别小于 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 和 $1\text{mg}/\text{m}^3$ ^[14]；美国巴布科克 (Babcock) 的智能控制系统根据烟气工况实时自动调控电除尘设备运行参数，该系统在德国纽拉特 (Neurath) 褐煤电厂可使除尘器能耗降低 85%^[15]；美国电力研究协会 (EPRI) 开发的托克森二代 (Toxecon II™) 技术将活性炭注入电除尘器的后半段，可同时实现除尘和脱汞 (Hg) 的目的。

袋式除尘技术的优化发展主要体现在脉冲清灰技术、气流分布技术、模块化设计等方面。美国毕威公司 (BHA) 和澳大利亚高原公司 (Goyen) 对脉冲清灰技术做了大量试验研究工作，开发了新型的脉冲清灰袋式除尘器产品；法国阿尔斯通 (Alstom) 通过改进脉冲清灰技术和应用 CFD 技术，成功开发了 12 米长滤袋除尘器；美国哈蒙 (Hamon) 的即插即用袋式除尘器采用模块化设计，可根据烟气量选择模块数量，且模块间可灵活组装和拆卸，方便运输和检修^[16]；美国通用公司 (GE) 研发的褶皱式滤筒采用星形褶皱式结构，其过滤面积是相同尺寸普通滤袋的两三倍；丹麦托普索 (Haldor Topsoe) 将选择性催化还原 (SCR) 催化剂浸渍于陶瓷纤维滤筒内，能实现粉尘、 NO_x 、一氧化碳 (CO) 和 VOCs 的联合脱除；韩国科特雷尔 (KC Cottrell) 的旋风袋式复合除尘设备将常规布袋除尘的灰斗改为旋风除尘，利用旋风除尘降低二级布袋除尘的粉尘负荷^[17]。

电袋复合除尘技术在欧美等国家应用并不广泛，美国部分电厂结合烟气脱汞有应用，采用前电后袋的 Toxecon 技术喷射活性碳粉和收集残余飞灰；美国电力研究所 (EPRI) 和能源与环境研究中心 (EERC) 均开展了电袋复合除尘技术研究及相关中试，但没有规模化应用。

滤料方面，耐温、耐腐蚀、高透气性的微米级滤料是过滤除尘技术优化的关键。适用于 250°C 以下的滤料主要有聚苯硫醚 (PPS)、聚酰亚胺 (PI) 纤维、聚四氟乙烯 (PTFE)，技术相对成熟，且有广泛的工业应用，研究进展主要集中于超细滤料、异形纤维滤料等，代表供应商主要有日本东丽 (Toray)、美国戈尔

(Gore)、奥地利兰精 (Lenzing) 等。250℃以上的高温滤料多采用金属或陶瓷,是近些年研究开发的热点,美国盟德 (Mott) 的不锈钢烧结粉末滤料的过滤精度达到 0.08μm,运行温度 400—815℃,最高可承受 20Mpa 压差^[18];比利时贝卡尔特 (Bekaert) 的烧结金属纤维滤料最高使用温度可达 1000℃^[19],较具代表性的厂商还有美国颇尔 (Pall)、德国吉凯恩 (GKN)、日本富士过滤 (Fuji Filter) 和瑞典博普 (BOPP),美国过滤集团 (Filtration Group) 开发的适用于亚微米颗粒物的陶瓷纤维滤料运行温度为 180—600℃^[20]。

1.2.1.2 脱硫技术

目前主流的脱硫技术包括湿法、干法和半干法。以石灰石/石膏法为代表的湿法技术应用最广。

湿法脱硫方面,通过提高脱硫泵功率,增加喷嘴数量,优化气流分布塔板设计,配置单/双塔双区、单塔双循环等措施提高气液传质效果;采用低压喷头,优化喷头布局,降低设备压降;洗涤液中加入特制氧化剂,提高 Hg、NO_x 和硫氧化物 (SO_x) 的协同去除效率;利用 CFD 和化学反应动力学模型等优化反应器设计,提高流场均布。美国孟莫克 (MECS) 开发的动力波逆喷洗涤塔技术可同时完成烟气急冷、酸性气体和粉尘脱除^[21]。资源化方面,可索服 (Cansolv) 工艺以有机胺为吸收剂,基本无废水废渣排放,产物为高纯度硫酸,该工艺在有色、火电和石化行业已得到诸多应用^[22]。

干法和半干法脱硫具有系统简单、占地少、腐蚀少等优点,逐渐成为非电行业脱硫的重要组成部分。目前主要包括:德国鲁奇 (Lurgi) 循环流化床法烟气脱硫 (CFB—FGD)、德国沃福 (Wulff) 回流式循环流化床法烟气脱硫 (RCFB—FGD)、丹麦尼鲁 (NIRO) 旋转喷雾干法烟气脱硫 (SDA)、瑞典 ABB 一体化烟气脱硫 (NID)、德国卡波 (BF) 及日本住友 (Sumitomo) 等公司的活性焦技术属于硫资源化的烟气脱硫工艺,在日本得到一定的应用。随着美国对烟气及脱硫废水的重金属、烟气二次粒子等排放标准的提高,(半)干法烟气净化工艺越来越受火电行业重视。

1.2.1.3 脱硝技术

脱硝技术包括 SCR 脱硝、选择性非催化还原 (SNCR) 脱硝和 SCR—SNCR 联用等工艺,其中 SCR 脱硝工艺商用最广,现美日德三国约 90%的火电厂采用

SCR 脱硝工艺。

SCR 脱硝工艺多以液氨为还原剂，催化剂以板式或蜂窝式的钒钛系为主，近年来技术优化进展主要包括：流场优化方面，美国通用公司（GE）采用特有的喷氨格栅以及在喷嘴下游设置扰流装置（Iso Swirl Mixing）可提高氨的均匀性；脱硝温度拓展方面，目前美国科美特克（Cormetech）的 SCR 催化剂使用温度范围为 250℃—530℃，德国巴斯夫（BASF）的 SCR 催化剂的温度窗口为 288℃—580℃，比利时优美科（Umicore）公司开发了采用玻璃纤维为载体的波纹式中低温脱硝催化剂，在 150—590℃可去除 NO_x、二噁英等^[23]；催化剂抗中毒方面，美国巴布科克（Babcock）在催化剂中引入特制添加剂，可提高催化剂的抗硫性能，并使烟气中 90%的零价汞（Hg⁰）氧化为二价汞（Hg²⁺）；催化剂结构优化方面，2020 年美国科美特克（Cormetech）开发的适用于高尘烟气的催化剂采用大孔径结构，有效防止粉尘积累，现已在垃圾焚烧等行业得到应用^[24]。

SNCR 脱硝工艺效率一般为 30%—70%，实际应用通常与 SCR 脱硝工艺联用，效率可达 95%。美国通用公司（GE）开发的伞型氨喷嘴工艺（Umbrella—SNCR）可根据锅炉工况调节喷嘴高度^[25]；美国哈蒙（Hamon）通过流体力学模型和反应动力学为脱硝工艺优化提供理论支撑^[26]；美国燃料技术公司（Fuel Tech）以锅炉负荷和温度作为调控喷氨量和不同氨类还原剂比例的依据，氨逃逸小于 15ppm 时，脱硝效率最高可达 70%。

1.2.1.4 脱汞技术

随着发达国家对重金属排放标准的提高，脱汞日益受到重视。烟气脱汞技术主要包括吸附脱汞和氧化脱汞。

吸附脱汞方面，美国卡尔冈炭素（Calgon Carbon）和卡博特（Cabot）分别利用含硫和含氯化物处理活性炭，发现经过上述处理均可提高活性炭的脱汞性能；2019 年美国新型碳材料公司（Carbonxt）的专利显示，在吸附剂表面引入磁性，利用磁选法可解决吸附剂与烟气粉尘难以分离再生的难题；美国科尔（Core）开发的用于吸附 Hg 和氧化汞（HgO）的含氟聚合物吸附催化材料用于除尘器下游或直接置于脱硫塔内，通过化学吸附作用最多截留其自身 5%重量的 Hg^[27]。

氧化脱汞方面，美国燃料技术公司（Fuel Tech）将具有多孔结构的硫化亚铁颗粒加入湿法脱硫工艺，通过吸附、还原和沉淀作用，将 Hg⁰ 和 Hg²⁺转化为化

学状态稳定的硫化汞 (HgS)；美国庄信万丰 (Johnson Matthey) 和科美特克 (Cormetech) 等公司开发的商用 SCR 催化剂可将烟气中 Hg^0 氧化为 Hg^{2+} ，然后通过湿法脱硫工艺去除；美国巴布科克 (Babcock) 中试实验发现在湿法脱硫中加入硫化氢 (H_2S)、乙二胺四乙酸 (EDTA) 可显著增加系统的脱汞效率。

1.2.1.5 碳捕集技术

碳捕集技术主要分为燃烧前捕集、燃烧后捕集和富氧燃烧。

燃烧前捕集的 CO_2 浓度较高，分离能耗相对较低，但目前燃烧前捕集系统相对复杂，投资成本高；富氧燃烧产生的 CO_2 浓度较高，更易于捕获，但是由于其采用纯氧作为氧化剂进入燃烧系统，需要额外增加制氧系统的能耗，提高了系统的总投资，同时增加了技术复杂性。

燃烧后碳捕集技术主要有吸收法、膜分离法和吸附法，其中胺基吸收法相对成熟，在全球已有多项示范工程。吸收法利用吸收剂对 CO_2 的物理/化学作用分离 CO_2 ，然后升温 and 减压得到高浓度 CO_2 ，目前已有公司生产这类吸收剂，例如挪威阿克 (Aker)、美国壳牌 (Peek)、德国林德 (Linde) 等。膜分离法利用聚合物、金属膜等材料使 CO_2 选择性地透过达到分离的目的，但在火电、水泥等行业，由于烟气具有大流量、低气压、成分复杂等特点，膜分离技术有待进一步优化。吸附法中吸附材料的性能和工艺流程尚处于实验探索阶段。

1.2.1.6 多污染物协同脱除技术

随着社会对环境质量的重视和单项污染物治理工艺的日趋成熟，多污染协同治理已成为主流趋势。协同治理技术可分为湿法洗涤、半干法洗涤、干法吸附、气相氧化和液相氧化等，相关技术均有商业化产品。

湿法、半干法和干法多污染治理技术大多是基于烟气脱硫工艺的技术提升。湿法洗涤技术应用最多的是石灰石浆液作为洗涤剂的湿法洗涤技术，脱硫效率大于 98%，氯化氢 (HCl) + 氟化氢 (HF)、粉尘和 Hg^{2+} 脱除效率分别约为 95%、85% 和 85%。加拿大气载过程 (Airborne Process™) 工艺对 SO_x 、 NO_x 和 Hg 的去除率大于 95%；美国哈蒙 (Hamon) 的反应 (ReACT™) 工艺以活性焦为吸附剂，对 SO_2 、Hg 和二噁英均有脱除效果^[28]；丹麦托普索 (Haldor Topsoe) 的烟道气脱硫 (SNOX™) 工艺利用催化氧化作用，将 SO_2 转化 H_2SO_4 ^[29]；美国戈尔 (Gore) 的催化滤袋可实现尘硝一体脱除，类似产品还有美国三梅尔 (Tri-

Mer) 和过滤集团 (Filtration Group) 等生产的陶瓷催化滤筒。

气相氧化法主要利用高压放电产生具有强氧化性的自由基、臭氧 (O₃) 等, 将烟气中的 SO₂、一氧化氮 (NO) 和 Hg 分别氧化为 SO₃、二氧化氮 (NO₂) 和 HgO, 然后结合下游的洗涤、除尘、脱硫技术将其脱除。ECO™ + ECO₂® 技术主要由介质放电和湿法洗涤组成, 脱硫、脱硝效率分别为 95% 和 90%, 该技术已实现工程应用; 电子擦洗过程 (e-Scrub™ Process) 系统中试结果表明, 对 SO₂ 和 NO_x 的去除率分别为 90%—99% 和 70%—90%。液相氧化法和气相氧化法类似, 代表性工艺有以色列莱克斯坦 (Lextran) 公司的莱克斯坦 (Lextran) 工艺和美国凯能科技 (Cannon Technology) 公司的洛托克斯 (Lotox™) 工艺, 这两项工艺均有工业应用^[30]。

此外, 可索服 (Cansolv) 有机胺吸收工艺可同时实现 SO₂ 和 CO₂ 的脱除; 美国清洁能源与燃料公司 (CEFCO) 利用专有的微波技术使烟气和相应试剂之间发生强烈的接触碰撞, 从而将污染物从烟气中清除。日本三菱 (Mitsubishi) 开发的三菱—托莫尼 (MHPS—TOMONI) 技术类似国内近年开发的“智慧环保岛”, 可实现众多污染治理设施的智能协同和远程运维^[31]。

1.2.2 VOCs 治理

1.2.2.1 吸附技术

吸附技术主要利用多孔吸附材料通过物理吸附或化学吸附作用, 将 VOCs 气体分子从废气中分离。主要包括溶剂吸附回收技术、低浓度 VOCs 的吸附浓缩技术和分散吸附异地再生技术。常用的吸附材料主要包括颗粒活性炭、活性碳纤维、蜂窝状活性炭、蜂窝状分子筛和吸附树脂等。以活性炭和活性碳纤维为吸附材料的溶剂吸附回收技术发展最早, 应用也最为广泛。活性碳纤维制造优势公司有日本帝人 (Teijin)、日本东洋纺 (Toyobo)、德国优尼科 (Unicorn) 等。1986 年, 瑞典蒙特公司 (Munters) 率先将蜂窝状沸石转轮用于 VOCs 废气处理。1988 年, 日本株式会社西部技研公司 (Seibu Giken) 开发了以蜂窝状分子筛为吸附材料的吸附转轮, 并成功用于低浓度 VOCs 的净化处理。日本、瑞典、美国等国公司的转轮吸附浓缩技术在汽车制造涂装、包装印刷、化工等低浓度工业有机废气的治理得到了普遍应用。油气回收技术在美日欧等地发展较早, 普遍采用冷凝+吸附或吸附+吸收工艺, 开发了油气回收用专用活性炭。针对小型污染源和恶臭

异味的深度治理需要，普遍采用活性炭分散吸附—集中再生工艺。

1.2.2.2 高温焚烧技术

高温焚烧技术是在高温下将有机物彻底氧化分解，转变成 CO_2 及水 (H_2O)。采用陶瓷蓄热体直接换热的蓄热式焚烧技术 (RTO) 使得热能利用率得以大幅度提高，其适用范围得以拓宽，近年来在 VOCs 治理中得到了大量的应用。目前国外从事高温焚烧技术的企业非常多，其中优势公司包括美国恩国 (Anguil)、德国杜尔 (Durr) 等。

1.2.2.3 催化燃烧技术

催化燃烧技术是利用氧化催化剂在较低的温度下将有机物氧化分解为 CO_2 和 H_2O 。典型应用有蓄热式催化燃烧技术 (RCO)，采用直接换热方式大幅度提高热能利用率，拓宽了适用范围。国外优势公司有德国杜尔 (Durr)、美国恩国 (Anguil)、加拿大科迈科 (ComEnCo) 等。催化氧化技术的核心材料氧化催化剂主要研发公司包括德国巴斯夫 (BASF)、德国南方化学 (Sud—Chemie AG)、日本日挥触媒化成 (JGC—C&C) 等。

1.2.2.4 生物技术

生物技术是利用微生物的新陈代谢作用使污染物转化为简单的无机物或细胞自身组成物质。按系统中微生物的存在形式，生物净化工艺可分为生物洗涤法、生物过滤法和生物滴滤法。生物法具有绿色环保、运行费用较低的优点，在国外发达国家 VOCs 净化领域的占比较高。主要研发公司有德国瀚鲁夫特 (Reinluft)、加拿大碧欧蓝 (Biorem)、美国福陆丹尼尔 (Daniel)、日本日立 (Hitachi) 等。

1.2.2.5 低温等离子体降解技术

低温等离子体降解技术是利用低温等离子体激发产生的 O_3 、 OH 等高能粒子使有机物发生氧化反应，形成中间产物、 CO_2 和 H_2O 等。在恶臭异味领域应用相对较多，特别是在含硫、含氮有机物的恶臭治理方面，效果较好。主要公司有加拿大离子氧化科技 (IonO₂X Technology) 等。

1.2.2.6 光(催化)氧化技术

光氧化技术是利用 UV (紫外线) 光活化氧分子生成游离氧，进一步生成 O_3 ，以降解有机物。光(催化)氧化技术是利用特定紫外光波照射二氧化钛 (TiO_2) 等光催化剂，在氧气和水分子存在下产生 OH 、 O_2^- 等活性物质以降解有机物。

光（催化）氧化技术本身具有局限性，在恶臭异味净化方面得到了一些应用。主要公司有德国贺利氏（Heraeus）、丹麦紫外探测机器人公司（UVD Robots）、日本牛尾（Ushio）、瑞典森特莱尔（Centriair）等。

1.2.3 机动车船尾气治理

1.2.3.1 汽油车排放控制技术

国外汽油车主要围绕降低排气管、燃油蒸发和曲轴箱泄漏等三种来源的污染物排放，其中排气管排放是污染物控制的重点，分为机内控制技术和机外控制技术。其中机外控制技术主要如下：

（1）三元催化转化器（TWC）技术

三元催化转换器是利用装置中贵金属催化剂将汽车尾气排出污染物 CO、碳氢化物（HC）和 NO_x 通过氧化还原作用转变为 CO₂、H₂O 和氮气（N₂）。“闭环电控燃油喷射+三元催化转化器”已成为当前汽油发动机降低排放的基本技术。对于二气门或多气门、非增压或增压发动机的汽油车，可采用“闭环电控燃油喷射系统+低起燃温度三元催化转化器”同时降低 CO、HC 和 NO_x 排放。主要载体研发公司：美国康宁（Corning）、日本特殊陶业株式会社（NGK），主要催化剂研发公司：德国巴斯夫（BASF）、比利时优美科（Umicore）、英国庄信万丰（Johnson Matthey）、日本科特拉（Cataler）等，主要封装与系统集成公司：德国埃贝赫（Eberspaecher）、法国佛吉亚（Faurecia）等。

（2）汽油机颗粒捕集器（GPF）技术

汽油机颗粒捕集器是汽油机颗粒物排放满足不断升级排放法规的重要技术手段。当前 GPF 的主要研究方向是再生控制与发动机控制系统结合、灰分对 GPF 的影响及老化后对过滤效率、油耗的影响、GPF 相关车载诊断系统（OBD）故障诊断监控及失效处理、GPF 与 TWC 整合为四元转化器等方面。主要载体研发公司：美国康宁（Corning）、日本特殊陶业株式会社（NGK）等，主要催化剂研发公司：德国巴斯夫（BASF）、比利时优美科（Umicore）、英国庄信万丰（Johnson Matthey）、日本科特拉（Cataler）等，主要封装与系统集成公司：德国埃贝赫（Eberspaecher）、美国天纳克（Tenneco）、法国佛吉亚（Faurecia）等。

（3）车载油气回收系统（ORVR）技术

车载油气回收系统被设计固定在油箱和燃油加注管之间，能够在车辆加油过

程中以及油箱温度变化时有效吸附燃油挥发排放出的油气。当汽车加油时，油箱中的燃油蒸气会被一个具有吸附作用的碳罐吸收。当发动机开始运转，碳罐中的油气就会进入发动机进气管，从而作为燃料被使用。该部分技术多由主机厂自主研发，其他以该部分业务为主的研发公司：美国伊顿（Eaton）、美国英杰维特（Ingevity）等。

1.2.3.2 柴油机排放控制技术

柴油机（含道路和非道路）排放污染物主要来自排气管和曲轴箱泄漏排放，其排气管排放的控制技术分为机内控制技术和机外控制技术两种。其中机外控制技术主要如下：

（1）柴油机氧化催化器（DOC）技术

柴油机氧化催化器主要作用在于消除可溶性有机物及细小颗粒物数量，消除绝大部分 CO 和 HC。DOC 不仅可以单独使用，也可与其他后处理技术、机内净化技术共同使用以满足当各国严格的排放法规。由于 DOC 中铂（Pt）、钯（Pd）等贵金属催化剂对燃油中硫特别敏感，易引起催化剂中毒，因此 DOC 一般适用于低硫柴油。主要载体研发公司：美国康宁（Corning）、日本特殊陶业株式会社（NGK）等，主要催化剂研发公司：德国巴斯夫（BASF）、比利时优美科（Umicore）、法国佛吉亚（Faurecia）等，主要封装与系统集成公司：美国天纳克（Tenneco）、法国佛吉亚（Faurecia）、美国康明斯（Cummins）等。

（2）柴油机颗粒捕集器（DPF）技术

柴油机颗粒捕集器是目前降低柴油机颗粒物排放最有效的技术。DPF 使用受燃油油品中硫含量影响较大，已在欧洲、美国、韩国等十余万辆重型柴油车颗粒物排放治理中应用。主要载体研发公司：美国康宁（Corning）、日本特殊陶业株式会社（NGK）等，主要催化剂研发公司：德国巴斯夫（BASF）、比利时优美科（Umicore）、英国庄信万丰（Johnson Matthey）等，主要封装与系统集成公司：美国天纳克（Tenneco）、法国佛吉亚（Faurecia）、美国康明斯（Cummins）等。

（3）选择性催化还原（SCR）技术

选择性催化还原技术是在催化剂的作用下，通过尿素喷射系统向 SCR 入口端喷入车用尿素水溶液，把尾气中 NO_x 还原成 N₂ 和 H₂O。SCR 催化剂在低温下具有更高的活性来有效减少 NO_x 的实际排放，同时满足燃油经济性。主要载体

研发公司：美国康宁（Corning）、日本特殊陶业株式会社（NGK）等，主要催化剂研发公司：德国巴斯夫（BASF）、比利时优美科（Umicore）、英国庄信万丰（Johnson Matthey）等，主要封装与系统集成公司：美国天纳克（Tenneco）、法国佛吉亚（Faurecia）、美国康明斯（Cummins）等。

（4）固体储氨（SSCR）技术

固体储氨技术使用固体形式的存储 NO_x 还原剂（能释放氨气（NH₃））材料，主要为铵盐或氨化合物。该技术由丹麦安米内斯（Amminex）研发，应用该技术原为欧三/四/五标准的公交客车可达到欧六/实际行驶污染物排放（RDE）的排放标准。

（5）氨逃逸催化器（ASC）

氨逃逸催化器是柴油车排气后处理装置的一种，装在 SCR 后端，它在载体内壁使用贵金属等催化剂涂层，用于还原废气中的氨，ASC 是通过催化氧化作用降低 SCR 后端排气中 NH₃ 的装置。由于该装置多集成于 SCR 后端，该技术产品主要研发生产单位与 SCR 相同。

（6）排放远程监测（OBD3）技术

排放远程监测技术是通过实际运行工况下发动机及污染控制装置系统工作状态实时数据进行采集和分析，为政府排放监管、企业产品优化匹配和用户车辆排放故障维修等提供应用服务。OBD3 技术已经广泛应用于机动车排放监管与整车开发中。该项技术产品主要研发生产单位有：德国博世公司（Bosch）、德国大陆电子（Continental）等。

1.2.4 室内污染与油烟治理

1.2.4.1 室内空气净化技术

在室内空气净化领域开展技术开发及应用研究的国家已超过 50 个，日本、美国、韩国、德国均是推进室内空气净化技术发展的主要国家。各国在技术布局上具有一定共性，即过滤材料与静电集尘技术是各国重点研究的领域，同时各国之间也存在一定的差异。其中，日本研发机构诸如松下（Panasonic）、大金（Dakin）、夏普（Sharp）等，主要是在光触媒与吸附技术上进行技术攻关；韩国乐金（LG）、三星（Samsung）重点研究等离子技术；美国、欧洲则把主要精力放在过滤技术方面。典型公司有美国爱美克（AAF）、美国明尼苏达矿务及制造业公司（3M）、

瑞典康斐尔（Camfil Group）等。

（1）吸附技术

吸附净化技术是目前室内空气净化常用的、有效可靠的控制技术。常见的吸附剂有颗粒活性炭、活性碳纤维、沸石分子筛、多孔黏土矿石、活性氧化铝、硅胶等。国外在非织造过滤材料领域技术领先，并形成了完整的体系，研发多种高性能纤维、碳纤维、非织造过滤材料及复合过滤材料。如美国杜邦公司（DuPont）研发 PTFE、玻璃纤维（GF）；美国贺氏公司（H&V）研发出超细纤维。

（2）光催化氧化技术

光催化氧化技术采用特定的波长照射纳米复合材料，产生光生强氧化剂。通常采用紫外光，还有除臭杀菌的功能。采用TiO₂纳米材料可杀灭微生物，在两者作用下产生的光生强氧化剂能催化氧化吸附在其表面难降解的VOCs，使其矿化生成H₂O和CO₂的无机小分子。还有一些在自然光源下就能催化反应的新型催化材料，或添加纳米银离子增强灭菌能力等。

（3）吸附催化组合技术

多种空气净化技术复合是国内外技术发展趋势，为了更全面净化空气中各种污染物。例如采用机械过滤、表面吸附与不同催化氧化相结合的方案，可以在去除固体颗粒物的同时，分解醛（RCHO）、苯（C₆H₆）、NH₃等气体污染物，还有杀死细菌、病毒等微生物的效果。

（4）负离子空气净化技术

活性氧具有很强的氧化活性，能与通常都带正电离子的病菌、尘埃微粒、有机有害气体等结合，从而达到净化空气的目的。负离子相关的专业设备在瑞典、法国、德国等西方国家也得到广泛应用，如瑞典莱特艾尔（LightAir）负离子空气净化器、法国得康氧（Teqoya）负离子空气净化器、德国薇伊（Viiyi）生态级空气负离子生成机等。

1.2.4.2 油烟治理技术

目前，日本、美国、英国、德国、南非等地均有研发各种油烟处理技术。日本用特种陶瓷滤料治理厨房油烟，用有机硅黏结剂与钛（Ti）、锆（Zr）、镧（La）或者锰（Mn）的氯化物的混合物去除油烟中的胺、吡啶等气体。在吸收法处理方面，存在着用溶液和泡沫吸收油烟的方法。在美国有用多孔耐火砖上涂上 Pt、

钌（Ru）、锇（Os）等贵金属催化氧化剂去除油烟以及用循环水系统去除油烟；在英国通过蛇形冷凝管去除油烟；在德国利用热交换原理去除油烟；在南非有用螺旋状喷雾器去除油烟。典型公司有美国垂恩（Trion）、美国联合空气（UAS）、美埃（Mayair）等。

（1）静电式技术

静电式技术主要应用于大中型餐饮业，多采用荷电电场与吸附电场结合形成多级梯度电场。高压电源是该类油烟净化设备的关键组件。目前中国的静电式油烟净化器已出口英国、澳大利亚、新西兰、马来西亚等国家。

（2）机械式技术

机械式技术的应用主要包括机械碰撞和吸附过滤两大类。机械碰撞技术主要用于预处理，多与其它技术组合使用。吸附过滤技术的市场应用面较小，从检测结果分析，吸附过滤技术可以满足净化效率要求，但实际应用中受滤料易燃、吸附容量、易清理性、重复使用性、阻力等多重因素影响，要同时兼有几方面的优良特性，这在选择滤料时不可避免地会受到一定局限。

（3）湿法技术

湿法技术是一类比较成熟的技术。国外湿式设备主要应用于美国、欧洲及日本的电厂，日本三菱（Mitsubishi）最早用于重油锅炉产生的烟气，国内部分较大规模的餐饮企业也有使用湿法技术用于餐饮油烟的污染控制。湿法技术日常维护相对简便且无消防隐患，还具有除油和一定的除味功能，该法适用大颗粒油雾的去除。但在北部地区冬季室外运行存在设备防冻问题。部分生产厂专门研制了湿法专用除油风机，该风机兼有引风和利用特殊叶片结构切碎洗涤液体净化油烟的功能。

（4）复合式技术

一般由机械处理作为预处理单元，后加上静电处理单元或湿法处理单元构成净化系统。有除味要求的敏感排放区域也有在静电或湿法处理单元后再加一活性炭吸附单元作为后处理单元。复合式技术把不同的技术特点组合在一个系统，充分发挥各自的技术专长组成一个经济合理、净化效率高的优化系统。复合式技术是今后最具发展前景的实用技术。

1.3 行业发展主要特征

1.3.1 工业烟气治理行业

传统工业烟气污染物尘/硫/硝治理方面，发达国家经历了导入、成长和成熟阶段，现已进入存量更新阶段。总体而言，发达国家常规大气重点污染已得到有效控制，市场饱和度、集中度高，行业内竞争者数量减少，盈利呈下降趋势，未来市场主要集中在现有治理设备更新、局部改造以及集成治理技术的精细智能运营。发达国家基本都已掌握烟气治理技术和装备的加工与制造，小型环保公司更关注单项治理技术的细节优化，重点提升专业化服务能力，主要采用工程咨询和提供高质量专业化设备的商业模式，并以技术授权或转让模式拓展国际市场；大型环保公司则强调治理业务和公司其它业务的联动，增大托管运营业务比例，通过技术多元化、系统规模化和精细运营理念赢得客户。

非常规污染物重金属 Hg 和 CO₂ 越来越成为关注的重点。美国环保署 2013 年制订的 Hg 及有毒气体标准（MATS）开始推动美国火电行业的重金属治理，目前欧盟组织以及日韩等国虽未大规模实施，但呼声日渐高涨，烟气重金属治理可能成为未来市场新的增长点。

CO₂ 减排方面，近年来发达国家市场需求逐步升温，围绕工业烟气 CO₂ 富集、净化和应用，诸多公司介入新技术、新材料、新产品的研发和工程示范，但除 CO₂ 成功用于驱油外，尚未形成其它可持续的规模化的商业模式，产业尚处于导入阶段，技术呈现多元化，商业化应用条件尚未成熟。

受产业全球化影响，加之自身对大气环境质量的不断重视，发展中国家（东欧、印度及东南亚各国）近年来陆续出台了新的污染排放标准，市场需求不断增长，但这些国家技术能力普遍薄弱，尚未完全掌握关键工艺、核心设备和材料，目前主要采用较为落后的治理技术，或通过引进先进技术和装备满足本国治理需求。此外，由于发展中国家经济实力较弱，投融资能力较差，加之文化差异、地方保护主义和排放政策执行不到位等因素影响，行业发展较为缓慢。因此，发展中国家治理行业多处于导入期或成长期，是未来全球工业烟气治理的主要阵地。

1.3.2 VOCs 治理行业

发达国家 VOCs 治理经历了从上世纪五六十年代资源回收利用的初步阶段，到八十年代后大规模的减排阶段，以及进入到 21 世纪以后的深度净化阶段。目前，美国已经建立起比较完整的 VOCs 控制的法律法规和管理政策体系，实行分

行业控制和分类型控制。欧盟通过指令对各成员国提出排放总量要求，并对单项 VOCs 物质进行管控，同时实施分级控制标准。日本 VOCs 减排采取的是政府法令监管和企业自主减排相结合的路径。发达国家经过了大规模的 VOCs 治理工作，其相关治理技术、核心装备和关键材料等方面也根据行业发展和治理需求得到了发展和完善，整体产业规模稳定。为了保证治理设施的长期稳定运行，控制各类风险的发生，相关的服务模式和针对污染源管理的服务行业逐步建立，包括检测/监测行业，治理设施的运营服务和集中的服务模式。发展中国家的 VOCs 治理工作还处于起步阶段，法规和标准不健全，治理技术大部分以引进为主，自主研发能力薄弱，整体产业规模呈上升趋势。

1.3.3 机动车船尾气治理行业

随着各国机动车船污染管控力度加强，全球范围内机动车船排放治理正处于快速发展期。无论对于发达国家还是发展中国家，严格的机动车船排放标准政策法规要求机动车船生产、使用者必须采用排放治理装置以达到合规的排放水平，机动车船排放治理行业具有广阔的发展空间和产业生命力。在经济全球化的背景下，机动车船排放治理行业逐步呈现阶梯化的发展形态。对于发达国家，针对新车、在用车排放法规 and 政策的制定实施，在技术和产品研发方面处于领先地位，主要围绕载体及催化剂的配方、工艺等方面，在产品性能、可靠性及稳定性方面具备优势。而对于发展中国家，则是利用政府资金和政策配套，凭借丰富的人力、资源，在封装、机加工生产、集成应用等方面存在成本优势，并逐步向高端产品研发生产靠拢。发达国家多以跨国公司形式存在，其产品价格较本地企业更高，但凭借技术优势其市场占有率较发展中国家更高，盈利能力更强。而对于发展中国家，多以本地生产企业为主，企业规模相比发达国家较小，市场主要集中在本地。机动车船尾气治理行业，以产业链形式发展和存在，形成关键部件（载体、催化剂、传感器）研发生产、集成封装、匹配应用的完整产业链。

1.3.4 室内污染与油烟治理行业

发达国家通过解决大气环境问题解决了室外污染源，从而对污染过程中本体防护控制技术研发较少；发展中国家则是关注产品本身的功能，对于其环境性能、健康性能相对关注较少，从而污染源本身控制成为主要问题。欧美国家的法规及政策颁布实施是促进地区空气净化市场增长的主要动力，其医药、化工、航空等

高端制造业也带动了空气净化技术和市场的发展。多种技术联合使用是近年来室内空气净化领域的发展趋势，但目前这些核心的技术主要掌握在欧美企业中。此外，国外油烟控制主要侧重消防控制。由于饮食结构和烹饪模式的不同，发达国家对油烟净化技术的需求程度并不突出。油烟治理行业对烹饪油烟排放特征、动态规律和制污机理的研究较少，没有清晰的技术发展路线。

2 我国大气污染治理行业发展现状

近十年来，我国大气污染物排放标准不断加严，监管力度不断加大，激励政策不断推进，工业烟气、VOCs、机动车船尾气治理等大气污染治理市场需求持续释放，各种治理技术快速发展，技术水平和装备质量显著提高，大批核心功能材料取得突破，从业企业数量逐渐增多、产业规模不断壮大，大气污染治理行业获得了蓬勃发展。根据不完全统计，2019年，我国大气污染治理规模约为2600亿—2800亿元，细分领域市场现状如表所示。

大气污染治理细分领域 2019 年市场现状

类型 规模	工业烟气治理 市场	VOCs 治理 市场	机动车船尾气治理 市场	室内污染与油 烟治理市场
市场规模 (亿元)	900—1000	600	750	435.7

2.1 行业市场现状分析

2.1.1 工业烟气治理市场

近十年火电行业和钢铁、焦化、水泥、玻璃、垃圾焚烧等主要非电行业的烟气治理市场分析如下：

火电行业。近十年火电行业受《火电厂大气污染物排放标准》（GB 13223—2011）和《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》（2015年发布）的政策驱动，2011年火电行业逐渐释放出满足（GB 13223—2011）排放标准的烟气治理市场，2014年火电行业释放出超低排放烟气治理市场。据中国电力企业联合会统计，截至2019年年底，我国累计完成火电厂超低排放改造8.9亿kW，约占煤电机组总装机容量的86%^[32]。

钢铁行业。目前全国现有烧结机面积约12万m²，球团产量约1.3亿吨，粗钢产能约10亿吨。2012年颁布《钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准》（GB

28662—2012)后,全国烧结(球团)设备陆续安装了除尘、脱硫设施。2019年,生态环境部等五部委联合发布《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》,钢铁企业2025年前力争80%以上产能完成超低排放改造,钢铁行业颗粒物、SO₂、NO_x的超低排放治理市场迅速释放。生态环境部2020年12月例行新闻发布会数据显示,截至2020年年底全国约6.2亿吨粗钢产能正在进行超低排放改造。

焦化行业。截至2019年年底,焦化行业焦炭总产能约6.26亿吨,独立焦化企业约400家,产能约4.7亿吨。2012年颁布《炼焦化学工业污染物排放标准》(GB 16171—2012)后,全国焦化企业陆续安装了除尘、脱硫、脱硝设施。2018年起,河北省、河南省、山西省等部分地区,陆续将焦化行业大气污染物排放标准进一步收紧,已释放出焦化行业烟气超低排放市场。据不完全统计,大约80%的焦化企业已启动烟气超低排放治理项目。

水泥行业。水泥行业受《水泥工业大气污染物排放标准》(GB 4915—2013)政策驱动,近年来已持续释放出水泥除尘改造项目,目前已完成90%,10%左右的水泥企业因原辅燃料中含硫成分高,需要安装炉外烟气脱硫装置,目前已基本完成。2018年以前,由于水泥行业NO_x的排放标准相对宽松,采用炉内SNCR装置即能满足排放要求。2018年起,河南省、河北省、江苏省等部分地区,水泥行业NO_x排放标准陆续收紧,水泥行业SCR脱硝装置的项目释放,目前全国1500条水泥生产线,已有50余条生产线启动SCR治理项目。

玻璃行业。目前我国有300条左右的浮法玻璃生产线。2011年颁布《平板玻璃工业大气污染物排放标准》(GB 26453—2011)后,全国平板玻璃企业陆续安装了除尘、脱硫、脱硝设施。2017年环保部发布《关于征求钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准等20项国家污染物排放标准修改单(征求意见稿)意见的函》,对平板玻璃等行业大气污染物排放标准增加了排放特别限值。2018年起,河南省、河北省等部分地区,陆续将平板玻璃行业大气污染物排放标准进一步收紧,2018年开始释放出平板玻璃烟气超低排放治理市场。据不完全统计,约20%的平板玻璃企业已启动烟气超低排放治理项目。

垃圾焚烧行业。截至2019年年底,我国已建成450座生活垃圾焚烧电厂,垃圾焚烧处理量为45万吨/天,且80%是近十年内建成的。自2014年颁布《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)后,新建生活垃圾焚烧企业已达

到排放标准的烟气治理要求。2019年起，浙江省、广东省等地区出台更严格的地方排放标准，近两年全国新建垃圾焚烧处理量为19万吨/天，占比约35%，烟气治理设施基本以超低排放标准建设。

工业锅炉行业。据不完全统计，全国有20多万台工业锅炉，其中燃煤锅炉约10万台。2018年起，长三角、珠三角等地区启动10吨/小时以上的燃煤工业锅炉超低排放改造，目前已基本完成改造。陕西省、成都市等部分西部地区也已出台严于国家排放标准的工业锅炉大气污染排放限值。

铸造行业。目前我国约有2.6万家铸造企业，2021年以前，我国铸造工业大气污染物排放执行《大气污染物综合排放标准》（GB 16297—1996）和《工业炉窑大气污染物排放标准》（GB 9078—1996）的有关规定，其标准比较宽松。2020年12月29日，生态环境部印发《铸造工业大气污染物排放标准》（GB 39726—2020），2021年1月1日实施。目前铸造工业的冲天炉约30%颗粒物能够满足排放要求、25%SO₂能够满足排放要求、NO_x基本满足排放要求。燃气炉约60%颗粒物能够满足排放要求、SO₂和NO_x基本满足要求^[33]。

石油炼制行业。我国约有200多家炼油厂，目前执行《石油炼制工业污染物排放标准》（GB 31570—2015），其工艺加热炉烟气和催化裂化剂再生烟气为颗粒物、SO₂和NO_x的主要排放源，近五年已基本完成烟气治理，能够满足排放要求。

根据中国环境保护产业协会编发的《2019年度电除尘行业发展报告》《2019年袋式除尘行业技术发展报告》《脱硫脱硝行业2019年发展报告》及相关测算，2019年49家骨干电除尘企业年销售收入约130亿元^[34]；近百家袋式及电袋除尘企业年产值约200亿元^[35]；20余家骨干火电烟气脱硫脱硝公司新签合同额约110亿元^[36]；30余家非电烟气脱硫脱硝公司新签合同额约150亿元^[36]；10余家骨干企业烟气脱硫脱硝在运第三方运维合同额约为180亿元^[36]。按上述统计的骨干企业市场规模约占工业烟气治理市场规模的80%估算，2019年工业烟气治理市场规模在900亿—1000亿元，其中烟气治理工程市场规模约占76.6%、烟气治理第三方运维约占23.4%，约占全国GDP比重0.1%。

2.1.2 VOCs 治理市场

VOCs的排放所涉及的行业众多，据不完全统计涉及到VOCs排放的工业行

业至少在 120 个以上，其中年排放量超过 1 万吨以上的行业预计有 50 个以上。有的如石化、包装印刷等行业甚至超过 100 万吨排放规模，涉及到喷涂的行业排放总量在 600 万吨/年以上。在产业结构方面，在改革开放以后通过技术引进吸收，我国的制造业有了快速的发展，其中很大一部分的制造业都涉及到 VOCs 的排放问题，特别是一些涉及到 VOCs 排放的重污染行业，如原料药、皮革/人造革、人造棉、包装印刷、纺织印染、集装箱、家具、造船等行业。目前我国的产能均占到较大的全球市场，由此造成我国的 VOCs 排放总量巨大。除了工业源以外，尚有大量的生活源，如餐饮油烟、汽车维修（4S 店）、加油站、垃圾转运与处理、废水处理等所产生的 VOCs 和异味源也需要进行治理^[37]。

目前我国 VOCs 治理的重点区域包括京津冀及周边、长三角、汾渭平原等重点地区，还有苏皖鲁豫交界地区及其他 O₃ 污染防治任务重的地区城市。治理的重点行业包括石化、化工、包装印刷、表面涂装、油气储运销等。目前我国的 VOCs 排放量依然非常大。2019 年 6 月，生态环境部印发《重点行业挥发性有机物综合治理方案》，针对 VOCs 治理中存在的无组织排放、治理设施简易低效等问题，要求加大力度整治。根据统计，2011—2017 年，全国人为源 VOCs 排放量逐年增长，2018—2019 年排放量达到拐点并开始有所下降。2019 年全国 VOCs 排放总量约为 2500 万吨（根据清华大学 MEIC 模型估算）。

由于 VOCs 污染源极其分散，单个治理工程规模通常很小，因此从事 VOCs 治理的工程公司规模难以做大，目前最大的企业年产值规模约在 6 亿—7 亿元，超过 1 亿元年产值的企业数量占比很小，约在 80 家左右，大部分的企业规模在 3000 万—1 亿元年产值之间。近两年来《挥发性有机物无组织排放控制标准》以及制药、涂料、油墨及胶粘剂、农药制造、陆上石油天然气开采等行业排放标准陆续出台，排放标准体系得到了进一步的完善。根据中国环境保护产业协会废气净化委员会估算，2019 年从事 VOCs 治理的企业预计在 3000 家以上，治理工程年产值达到了 600 亿元的规模。

2.1.3 机动车船尾气治理市场

汽车产业是我国经济社会发展的重要支柱产业。虽然近年来我国新能源汽车产业的快速发展给传统机动车排放治理行业市场带来一定冲击，但我国传统燃油车保有量和年新增销售量仍然十分巨大。2010—2019 年我国汽车年均产销量始

终保持在 2500 万辆以上，连续十年居全球第一。国内机动车排放治理行业受法规标准、政策等多因素驱动，正面临前所未有的发展机遇。当前无论从国家层面、还是京津冀等地方层面开展排放源解析结果来看，机动车排放污染已成为继工业污染之后的第二大污染源，政府管理部门通过制定和实施更加严格的排放标准和管理措施，推动了国内新车和在用车后市场排放治理产业链的高速发展^[38]。

根据中国环境保护产业协会机动车污染防治技术专业委员会统计，2018 年国内机动车环保产业链上相关企业（载体、催化剂、衬垫、传感器、尿素喷射泵等关键零部件以及封装和系统集成）保持在 150 多家。根据中国汽车工业协会数据显示，2019 年乘用车年销售量是 2144.4 万辆；商用车年销售量是 432.4 万辆。以乘用车排放污染治理装置 1500 元/套、商用车排放污染治理装置 10000 元/套估算，排放治理领域产值约为 750 亿元。此外，2019 年生态环境部《中国移动源环境管理年报（2019）》显示非道路移动机械排放超标严重。非道路机械将于 2022 年 12 月 1 日执行国四标准，淘汰不符合要求的非道路机械势在必行，从而促进老旧设备退出市场，将刺激用户对新设备的需求。

随着航运经济的不断发展，以柴油机为主推进动力的船舶数量和吨位均大幅增长。由于长期使用高硫含量的廉价重质残渣油（HFO）作为燃料，船舶废气排放中含有大量的 SO_x ，造成了严重的大气环境污染，从而引发了国际社会的高度关注。据 2014 年国际海事组织（IMO）统计数据显示，船舶废气年排放 SO_x 、 NO_x 分别约占全球排放总量的 13%和 15%。在全球范围内，船舶废气所造成的大气污染约占整个大气污染的 5%—10%。在一些航运业发达的港口城市（如香港、上海等），比例甚至高达 30%—40%，船舶废气成为当地主要的空气污染源。为了减少船舶废气中 SO_x 、 NO_x 对大气环境的污染，国内部分地区正在大力推进船舶废气排放治理，预期拥有广阔的市场前景。

2.1.4 室内污染与油烟治理市场

我国室内污染治理市场发展十余年来，基本形成了以空气净化器、新风机、净化材料、净化治理服务和室内环境检测仪器、检测机构于一体的产业链发展体系。消费者对装修之后的室内空气污染问题格外重视，这也是国内空气净化行业的发展潜力所在。根据奥维云网的监测数据来看，2019 年我国空气净化器累计销量为 413.7 万台，净化器零售总额为 90.7 亿元。

近年来，随着我国餐饮业单位数量不断增加，餐饮业油烟污染源已经成为仅次于工业污染源和交通污染源后的第三大空气污染源，并成为引起城市大气雾霾的重要污染源之一。经过近 20 年发展，我国商用油烟净化设备已经成为大中城市餐饮业必不可少的环保设备。有关数据显示，2019 年中国油烟机零售额为 345 亿元。

2.2 行业发展主要特征

2.2.1 生命周期分析

2017 年 12 月，中央经济工作会议明确：“打好污染防治攻坚战，要使主要污染物排放总量大幅减少，生态环境质量总体改善，重点是打赢“蓝天保卫战”，控制复合型大气污染、打赢“蓝天保卫战”已经上升到国家根本大计和战略层面。为打赢“蓝天保卫战”，与大气污染治理相关的政策和标准紧密出台。截至 2019 年年底，全国达到超低排放限值的煤电机组 8.9 亿 kW，占全国煤电总装机容量的 86%，生态环境部已出台了《燃煤电厂超低排放烟气治理工程技术规范》等技术规范，火电行业烟气治理技术、装备和市场均已成熟，火电行业处于衰退期。受《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》的政策影响，钢铁行业的超低排放新建及改造市场已全面释放，钢铁行业、焦化行业处于成熟期。水泥、玻璃、垃圾焚烧等行业受部分地区出台了更严格的大气污染物排放标准或超低排放要求的影响，市场已逐渐释放，处于成长期。

我国的 VOCs 治理工作可以划分为三个阶段：2010 年之前的着重于资源回收利用和规避健康风险的前 VOCs 治理阶段、2010 年到 2014 年大规模治理之前的以配套政策和管理制度准备为主的起步阶段和 2014 年之后的全面治理、快速发展阶段。鉴于国内新车、在用车/船/机排放控制的巨大市场需求，结合技术和产业的持续革新，我国机动车排放治理行业处于成长期。空气净化和油烟治理行业伴随着中国经济的发展而发展，市场需求量大，处于成长期。

2.2.2 行业驱动力分析

我国大气污染防治产业发展与工业化进程、经济实力、烟气治理政策和政府决心密切相关。近十年，我国工业化进程加快，GDP 增长率保持 6% 以上，国家不断深化生态文明思想和生态文明建设，打赢“蓝天保卫战”的决心强烈和力度空前，环保监管力度不断加大，环保绩效分级管理、税收优惠和电价优惠等激励

政策不断完善，极大促进了大气污染治理行业的发展。2021年3月发布的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》（以下简称《规划纲要》），明确提出支持有条件的地方和重点行业、重点企业率先达到碳排放峰值；推进PM_{2.5}和O₃协同控制，地级及以上城市PM_{2.5}浓度下降10%，有效遏制O₃浓度增长趋势，基本消除重污染天气。国务院最新发布的《排污许可证管理条例》，将进一步倒逼高污染行业排放治理。尤其在工业烟气治理方面，火电、钢铁、水泥、玻璃等行业的大气污染物排放标准不断加严，极大促进了各行业的工业烟气治理市场需求。在环保绩效分级管理、税收优惠和电价优惠等激励政策的促进下，工业企业主动升级改造烟气治理设备和加强环境管理的积极性大大增强。

“一带一路”为我国与沿线各国在生态环境保护方面的合作创造有利条件，尤其东南亚、南亚等发展中国家的空气质量污染比较严重，自身的工业烟气治理技术能力相对落后，缺乏先进的治理技术和有效治理设备，因此有大量的工业烟气治理市场需求。同时我国在工业烟气治理方面的先进技术和经验为我国工业烟气环保产业“走出去”提供了机遇。

2013年发布的《大气污染防治行动计划》中明确提出针对石油化工、有机化工、工业涂装、包装印刷等VOCs排放的重点行业的治理工作；2017年，《“十三五”挥发性有机物污染防治工作方案》明确提出到2020年VOCs的排放量要在2015年的基础上减排10%的目标任务；2019年制定发布的《重点行业挥发性有机物综合治理方案》对VOCs治理工作提出了更加严格的要求和具体的整治方案。《规划纲要》中将VOCs列入总量控制指标，提出了在“十四五”期间VOCs排放量下降10%的总体目标，为我国工业VOCs治理行业的发展提供了强有力的政策支持，“十四五”期间VOCs治理行业还将处于高速发展阶段。在机动车船尾气治理行业，国家层面将“打好柴油货车污染治理攻坚战”提升至“标志性的重大战役”的高度，对机动车及非道路移动机械排放限值、排放检测技术等提出了新的更严格的要求。新版《民用建筑工程室内环境污染控制标准》（GB 50325—2020）及新版《室内空气质量标准》都将室内健康放在首位，调整了5项指标的限值，包括NO₂、CH₂O、C₆H₆、细菌总数、氡（Rn），增加PM_{2.5}、三氯乙烯（C₂HCl₃）、四氯乙烯（C₂Cl₄）。2019年北京市实施的《餐饮业大气污染物排放

标准》提高了餐饮油烟排放油烟和颗粒物限值，新增非甲烷总烃（NMHC）限值自 2020 年 1 月 1 日起执行。多地省市陆续出台了餐饮油烟排放政策，油烟治理行业进入了发展快轨。

2.2.3 行业竞争力分析

技术创新方面，《2008—2017 年全球环境技术专利热度分析报告（大气污染防治领域）》中数据显示，中国在近十年逐步成为全球布局大气污染防治技术领域最热的国家，近十年发明专利申请数量占比 34.1%，年均增长率接近 30%。排名第二、三名的分别是日本和美国，占比为 14.92%和 11.22%，数量变化趋势较为平稳。但核心专利分布方面，中国在大气污染防治领域核心专利数量仅占比 5.6%，排名前三的分别是美国、日本和德国，主要集中在脱硫、除尘、脱硝等领域，专利质量相比发达国家仍有一定差距^[39]。

技术装备应用方面，我国大气污染物排放标准已达到或超越欧美发达国家标准，火电大气污染物排放标准多次修订、不断加严，直到火电厂全面实施超低排放改造。受此驱动作用，国内静电除尘器、低低温电除尘器、湿式电除尘器、袋除尘器、石灰石—石膏湿法脱硫、半干法脱硫等工业烟气治理技术同步历经“引进—消化—再创新”三个阶段，总体已经达到国际先进，部分技术实现国际领先，工程应用业绩已处于国际领先地位。近年来，非电行业成为超低排放的主战场，在充分借鉴火电行业超低排放改造技术成果和经验做法的基础上，结合各非电行业烟气特点，目前已形成多种非电行业烟气治理技术工艺路线并开展了大规模的工程应用。

核心材料与工艺装备方面，非电行业的中低温催化剂、高温过滤材料，VOCs 治理技术所用到的如氧化催化剂、特殊需求的活性炭、活性碳纤维、硅铝分子筛、陶瓷蓄热体、生物菌剂等，总体性能接近国外先进水平，部分关键技术指标与国外相比存在差距，但差距在逐步缩小。VOCs 治理装备，如 RTO、RCO 等国产设备还有提升空间。在 VOCs 治理技术集成方面，不同行业的工艺设计经验不足，针对一些重点行业尚未形成完整的工艺设计要求和工艺包。国内机动车船尾气污染治理行业的发展优势与劣势并存，核心部件主要围绕载体及催化剂的配方、衬垫等方面，关键部件的技术依赖发达国家，存在较大差距。但是国内凭借丰富的人力和资源，在封装、机加工生产、集成应用等方面存在成本优势，虽然在核心

材料和核心零部件生产制造方面存在短板，近年来总体的进步也非常明显。国六标准实施以来，国内机动车排放后处理系统核心技术自主研发能力进一步提升，已达到国际先进水平。

产业链方面，我国在工业烟气治理领域的产业链上游研发环节相比发达国家投入不足，基础研究薄弱；产业链中游烟气设备制造水平相比发达国家，规模大，成本优势明显，但质量仍有差距；产业链下游技术咨询、技术服务、运营服务等方面相比发达国家发展相对滞后。

综上所述，我国大气污染治理技术在工程应用业绩、成本等方面总体具有优势。并且在大气污染治理技术与产品出口发展中国家方面，我国与发展中国家有着相近的发展经历，都面临着发展经济和保护环境的双重任务，我国的大气污染治理企业更能充分理解他国的具体难处和现实情况，更易根据他国的实际需要提出解决方案。同时，相较于发达国家环保技术设备，中国物美价廉的环保产品和服务更具有竞争优势。

2.2.4 行业发展格局分析

国内从事工业烟气治理的骨干企业约 20 家，龙头企业有龙净环保、国电龙源、远达环保、菲达环保、清新环境等。火电烟气治理市场主要由上述龙头企业作为主要市场参与者，其中部分企业在火电烟气超低排放市场释放后将研发重心转向非电行业的烟气治理技术研究，通过工程实践、积累经验后，和非电行业各主要环保公司或研究院旗下环保公司一起成为主要市场参与者。火电行业中民营企业与国企企业的脱硫脱硝市场份额基本相当，烟气除尘的市场集中度相对低于脱硫脱硝，但整体上国企企业和民营企业形成虽激烈但优势互补的良性竞争。非电行业工业烟气领域中民营企业占比较高，行业自身产能分布集中度较低。

我国的 VOCs 产污企业分属不同的行业，排污特征多样，且其规模、盈利及管理水平的千差万别，对于污染治理的承受能力差别大。治理企业中国资与民营、大型集团与中小企业共存，企业规模普遍较小，总体上中小企业占大多数。在机动车船领域，国内机动车排放治理企业多以中型企业为主，该领域产业投资大、产业链长，小型企业多数难以负担长期的大额投资。国内室内空气净化行业目前依然是以小规模发展为主，市场上拥有自主研发、设计、生产能力的企业并不多，由于空气净化产品在环保大行业市场中有不到 1% 的占比，还没有大型国企正

式进入该领域，在国内市场仍缺少龙头企业，这也将是各个企业发展的机遇。

2.3 技术及装备发展现状

2.3.1 工业烟气治理技术与装备

2.3.1.1 除尘技术与装备

我国除尘常用电除尘、袋式除尘及电袋复合除尘技术。20 世纪 90 年代后，开始大量推广高效的电除尘器，进入 21 世纪，电袋复合除尘器开始大量推广，袋式除尘推广应用也在增加。除尘装备不但全部实现自主研发、设计、制造，而且大量出口，总体装备水平达到国际先进，部分技术装备达到国际领先水平。

新型电除尘技术主要有低低温电除尘、湿式电除尘、新型电源等。根据中国电力企业联合会统计，截至 2018 年年底，电除尘器在火电行业除尘市场占有率约为 66%^[40]，电除尘器依然是燃煤电厂的主流除尘设备。其中低低温电除尘技术是国内大型燃煤电厂超低排放应用最多的电除尘技术，不仅提高了电除尘的收尘效率，也可以实现余热回收、协同捕集 SO₃、节约风机电耗、降低脱硫降温水耗等多重功效。为应对换热器磨损问题的挑战，目前市场上已开始推出各种技术升级产品，如整体式螺旋翅片管、椭圆管、真空光管等。湿式电除尘在燃煤电厂应用最多的是金属极板式，起着捕集 PM_{2.5}、协同脱除 SO₃ 重要作用。近年来大功率高频电源、脉冲电源发展也较快，不断缩小与国外公司的差距。同时旋转电极技术、电凝聚或化学团聚等细颗粒团聚技术、导电滤槽技术、机电多复式双区技术、离线振打技术、径流式电除尘技术、电源节能及控制技术，可根据烟气及粉尘特性、场地状况、工艺特性选择一种或几种组合，以提高电除尘技术的多工况适应性。湿式电除尘可实现钢铁行业转炉一次烟气烟尘超低排放，径流式电除尘在技术与材料工艺上取得重大突破。随着钢铁、水泥、平板玻璃、电解铝、石化等非电行业的烟气治理超低排放改造持续推进，为非电除尘行业带来了一定的发展机遇。

电袋复合除尘技术是我国独立自主开发的一项新型高效除尘技术，围绕该技术已建立了较完整的标准体系，技术水平和应用规模均达到国际领先水平。电袋复合除尘器在火电行业除尘市场占有率约为 25%， “超净电袋与脱硫协同除尘” 配合成为燃煤电厂烟尘治理超低排放三大技术路线之一。另外，高温超净电袋复合除尘器在电区与袋区耦合匹配、专属电袋结构气流分布、微粒聚并细颗粒捕集、

低阻长寿命合金滤料、高温材料和结构设计等方面取得重大突破，在有色、生物质锅炉等行业超低排放上也取得成功应用。以高温超净电袋为核心的高温尘硝一体化超低排放技术目前已完成中试研发，实现了由先脱硝再除尘转变为先除尘再脱硝，可以有效解决目前高尘 SCR 脱硝普遍存在的氨逃逸超标，催化剂中毒、磨损、寿命短，硫酸氢铵造成下游设备堵塞严重等问题，为突破常规工艺流程、实现一体化集成提供了新的方向。

袋式除尘技术取得了非常显著的进步，滤袋技术进步主要体现在滤料材质多样化、滤料面层超细化、滤袋形质多样化、原材料生产国产化等方面；脉冲清灰技术进步主要体现在新颖柱塞式脉冲阀研发、低压长袋脉冲清灰、适度清灰技术、智能脉冲阀等方面；本体结构技术进步主要体现在多种清灰机理的合理组合匹配、结构的大型化等方面。另外，袋式除尘器在自封堵滤袋缝纫线材料开发、滤袋和滤筒新产品、顶部垂直进风袋式除尘、低阻除尘器结构开发应用等方面取得显著进步，如顶部垂直进风袋式除尘器在农产品加工业酵母废气干法净化与回收工程项目上进行了成功应用，实现了 $\leq 10\text{mg}/\text{m}^3$ 的排放^[41]。袋式除尘器已形成了以长袋低压脉冲喷吹除尘器、回转喷吹袋式除尘器、高炉煤气袋式除尘器、高温袋式除尘器等为主要产品的技术装备体系，在钢铁、水泥、垃圾焚烧以及工业锅炉等行业有广泛应用^[42]。

其它除尘技术特别是针对工业无组织排放颗粒物（粉尘）治理的生物纳膜抑尘技术、云雾抑尘技术、天网抑尘技术、新型湿式收尘技术以及全封闭的皮带机输煤、管带机输煤等技术得到较快发展，并在钢铁、水泥、焦化、粮食等行业得到推广应用。

2.3.1.2 脱硫技术与装备

目前我国主流的末端烟气脱硫技术路线中，可分为湿法、半干法和干法三种。2000 年以来，我国的脱硫技术快速发展，已经全面国产化，替代进口，并有部分出口，部分技术达到国际先进水平，甚至国际领先水平。

湿法主要有石灰石—石膏法、氨法、镁法等。石灰石—石膏法应用最广，尤其是在大型燃煤机组脱硫领域，现已形成了逆流喷淋空塔、鼓泡塔、液柱塔、托盘/筛板塔等核心塔技术；氨法脱硫在化工行业得到了更多的应用；镁法脱硫在有吸收剂来源和副产物加工条件的场合应用较多。进入超低排放阶段，脱硫工艺

路线并未发生本质性变化，石灰石—石膏法优化改进路径主要包括：pH 值分区的单/双塔双区技术、脱硫喷淋空塔提效技术、强化传质吸收塔技术、两级串联吸收塔脱硫技术。但依然存在设备腐蚀、废水较难处理、副产物利用率低、耗水量大等问题。

干/半干法主要有循环流化床法、旋转喷雾干燥法、活性炭/焦干法等，其中循环流化床法应用最多，适用于中低硫工况，已经在钢铁、热电（燃煤锅炉）、玻璃、催化裂化、铝业等多领域得到较大规模应用，旋转喷雾干燥法主要应用在低含硫工况的烧结和垃圾焚烧领域；活性焦法目前应用在烧结低硫工况，并生成有利用价值的副产物硫酸。

2.3.1.3 脱硝技术与装备

烟气脱硝技术分为燃烧中控制技术和燃烧后去除技术。我国烟气脱硝技术 2011 年以来发展较快，自主开发的各种烟气脱硝技术已经广泛应用，部分技术达到国际先进水平。

低氮燃烧技术是一种较经济的燃烧中控制技术，我国普遍使用的低氮燃烧技术有：低氮燃烧技术、燃料分级燃烧技术和空气分级燃烧技术，主要依靠改变燃煤器的内部结构，调整优化锅炉配风方式和设备运行参数，如添加或修改空气喷嘴、煤粉喷嘴的位置与形状等方式，实现空气分级燃烧或燃料分级燃烧，减少 NO_x 的生成，脱除效率一般小于 60%，要满足更高的排放标准，需要与烟气脱硝技术相结合。

燃烧后去除技术又分为还原法、活性炭吸附法和氧化法。还原法分为 SCR、SNCR 和 SNCR/SCR 联用技术。SCR 脱硝效率理论可接近 100%，由于维持高效率费用高，实际设计脱硝效率在 70%—90%之间。“十二五”期间，随着我国排放标准的提高，SCR 演变为火电和钢铁行业的主流技术；SNCR 属于脱除效果较弱的早期主流工艺，效率最高可达 75%，实际应用中考虑到氨逃逸问题，效率常为 30%—50%，主要用于水泥窑、流化床锅炉和生物质锅炉；SNCR/SCR 联用技术在集中供热等中小型锅炉的超低排放中得到越来越多的应用，脱硝效率可达 90%以上，氨逃逸 $\leq 3\text{ppm}$ ；中低温 SCR、活性炭（焦）吸附法和氧化脱硝法等新型脱硝技术在钢铁行业、石化行业超低排放领域也得到了进一步应用。

2.3.1.4 碳捕集技术与装备

中国企业积极开展了 CCUS 技术研发与示范活动，获得了较大的进展，中国华能集团早在 2008 年就研制出中国燃煤电厂二氧化碳捕集装置，在北京高碑店电厂建设 CCUS 示范工程。从捕集环节看，部分技术已达到或接近达到商业化应用阶段。从利用环节看，化工利用取得较大进展，二氧化碳强化石油开采技术已应用于多个驱油与封存示范项目。至今中国已投运或建设中的 CCUS 示范项目约为 40 个，捕集能力 300 万吨/年^[8]。但是这些项目多以石油、煤化工、电力行业小规模捕集利用示范为主，缺乏大规模的多种技术组合的全流程工业化示范。国家能源集团鄂尔多斯碳捕集与封存（CCS）示范项目已成功开展了 10 万吨/年规模的 CCS 全流程示范^[8]。中石油吉林油田 EOR 项目是全球正在运行的 21 个大型 CCUS 项目中唯一一个中国项目，也是亚洲最大的 EOR 项目，累计已注入 CO₂ 超过 200 万吨^[8]。国华锦界电厂 15 万吨项目是目前我国规模最大的燃煤电厂燃烧后碳捕集与封存全流程示范项目^[8]。2021 年 7 月，中石化正式启动建设我国首个百万吨级 CCUS 项目（齐鲁石化—胜利油田 CCUS 项目）^[8]。

2.3.1.5 脱汞技术与装备

我国的烟气脱汞技术主要分为基于现有环保设施协同除汞和吸附剂除汞。在超低排放技术应用的大背景下，各种高效除尘器、湿式电除尘器和脱硫脱硝等设备对 Hg 的协同脱除效果明显，基本都可以达标。

有研究表明，SCR 脱硝设备对 Hg⁰ 的氧化效率最高可达 91.1%，平均氧化效率为 52.7%；湿法脱硫设备脱汞效率最高可达 97.6%，平均为 54.3%，向烟气或吸收液中添加氧化剂，可抑制部分 Hg²⁺ 还原为 Hg⁰；低低温电除尘器平均脱汞效率为 77.0%；电袋除尘平均脱汞效率为 61.5%；湿式电除尘器、烟气循环流化床脱硫等烟气治理设施对 Hg 及其化合物均有一定的脱除效果^[43]。

各种环保设施的同时运行，总体上有助于更加高效的协同脱汞。超低排放改造后机组的平均脱汞效率为 80.1%，以低低温电除尘器为核心的技术路线的平均脱汞效率高达 91.3%^[43]。此外，吸附剂喷射技术具有较高的脱汞效率，但因其具有成本高、影响飞灰处置等缺点，尚未得到深度开发和推广。

2.3.1.6 多污染物协同脱除技术与装备

烟气多污染物协同脱除技术主要可分为多污染物一体化脱除技术和以一种核心技术为主的多种污染物协同脱除技术。

多污染物一体化脱除技术目前主要有脱硫脱硝或尘硝一体化脱除。如高温复合滤筒尘硝一体化装备在焦化、玻璃窑、生物质锅炉等领域大量应用；活性炭/活性焦同时脱硫脱硝在钢铁等行业得到应用，但设备投资及运行费用较高。

以一种核心技术为主的多污染协同控制技术在我国有较广泛的应用，比较有代表性的有烟气干式净化工艺以烟气循环流化床反应器为核心，在脱硫脱酸的同时，高效吸附脱除 Hg、铅 (Pb)、砷 (As)、镉 (Cd)、铬 (Cr) 等重金属污染物，并选用 COA/SNCR/SCR 的一种或多种技术实现高效脱硝，在燃煤锅炉、钢铁、石化、焦化、催化裂化等多方面应用。另外，单塔三区超净脱硫除尘、旋汇耦合高效脱硫除尘、SCR 脱硝装置协同脱汞技术、低低温电除尘器协同脱除 SO₃ 等，均得到成功应用。

2.3.2 VOCs 治理技术与装备

由于涉及行业众多，污染物种类繁多，排放条件多变，VOCs 无组织逸散的问题非常严重，废气收集效率低，有些行业 VOCs 的无组织排放量占到 60%以上，VOCs 的治理技术体系非常复杂。目前实用的治理技术包括吸附技术、吸收技术、冷凝技术、膜分离技术、高温焚烧技术、催化燃烧技术、生物技术、低温等离子体、光（催化）氧化技术等。《挥发性有机物无组织排放控制标准》（GB 37822—2019）要求，强化废气收集，完善废气收集措施，降低无组织排放是目前各地涉 VOCs 排放企业管控的重点。

2.3.2.1 吸附回收技术与装备

我国早在上世纪八十年代即开发了活性炭吸附溶剂回收技术，后续引进了活性碳纤维吸附回收技术。VOCs 回收用活性炭主要是颗粒活性炭和活性碳纤维。近年来在化工、制药、农药等行业含氯溶剂回收领域，研发了专用活性碳纤维和树脂等吸附材料。针对高沸点、难解吸的有机物，如各类溶剂油的吸附回收，研发了以介孔为主的活性炭吸附材料。1990 年左右开发了低浓度废气的蜂窝活性炭吸附浓缩+催化燃烧技术，目前已研发出 800mg/g 以上的高碘值蜂窝活性炭材料。沸石转轮吸附浓缩装置最先通过采购进口转轮进行整机组装，近年来沸石吸附材料和转轮完成自主研发，目前沸石材料在疏水性、吸附选择性方面已达国际先进水平。油气回收技术专用活性炭取得一定进展，但对进口还有较大依赖。

2.3.2.2 高温焚烧技术与装备

2000 年左右引进开发了高温焚烧技术，主要在涂装等行业用于高浓度废气的治理。后来发展了热效率高的蓄热焚烧技术，热回收效率达 95%以上。早期开发的两室 RTO 焚烧炉，去除效率达 95%以上，之后开发的多室包括旋转式 RTO 焚烧炉，去除效率达 99%以上。

2.3.2.3 催化燃烧技术与装备

催化燃烧技术是 VOCs 减排与控制的主流控制技术之一，核心材料氧化催化剂的活性成分主要包括贵金属（Pd、Pt 为主），单一过渡金属氧化物和稀土复合氧化物等。实际使用过程中将上述活性组分涂覆/浸渍到蜂窝陶瓷载体或直接挤出成型为蜂窝催化剂上使用。目前我国氧化催化剂的性能和国外同类材料相比尚存在差距，催化活性和稳定性还有待提高。

2.3.2.4 生物净化技术与装备

在废气治理方面，生物净化技术最早应用于除臭领域，并在市政污水废气处理等领域得到了大量应用。近年来生物技术发展很快，逐步拓展到各类工业废气的恶臭异味净化和低浓度 VOCs 治理。

2.3.2.5 集成净化技术与装备

为了提高治理效果，降低治理成本，在实际的工程中通常情况下需要采用集成净化技术。针对高浓度的 VOCs 废气，通常先采用冷凝等技术对有机物进行回收利用，再用吸附、燃烧、催化燃烧等技术进一步进行达标治理。针对低浓度废气，通常先采用吸附浓缩工艺将有机物增浓后再利用 RTO、RCO 进行处理，也可以进行冷凝回收。如汽车涂装工序采用漆雾预处理+沸石转轮吸附浓缩+RTO 集成净化工艺；包装印刷行业的溶剂型凹版印刷工序采用沸石转轮吸附浓缩+RTO 或循环风浓缩+RTO 集成净化工艺，溶剂型干复工序采用活性炭/活性碳纤维吸附+冷凝回收集成净化工艺等；在制药、农药、精细化工等行业，对恶臭异味的净化要求非常高，通常治理工艺路线长，涉及吸收、冷凝、吸附、焚烧等多技术的集成；对于难生物降解的低浓度有机废气治理，采用高级氧化+生物净化集成净化工艺等。

2.3.3 机动车船尾气治理技术与装备

关于机动车船尾气治理技术与装备，与机动车污染防治行业相关的七大子系统：尾气后处理系统（载体、催化剂、衬垫、封装、尿素喷射系统）、发动机管

理系统（燃油喷射系统、传感器、电磁阀、电机等）、OBD 车载诊断系统、燃油蒸发系统（碳罐）、曲轴箱通风系统（PVC）、涡轮增压系统（涡轮增压器、增压中冷器）、废气再循环系统（EGR、EGR 中冷器等）。

2.3.3.1 汽油车主要排放控制技术与装备

汽油车主要排放控制技术包括：电控发动机管理系统、配备 TWC 技术、ORVR 技术以及 GPF 新技术等，随着国六排放标准实施，ORVR、GPF 等技术产品将成为轻型车上的标配装置。

2.3.3.2 柴油机主要排放控制技术与装备

柴油机（含道路和非道路）主要排放控制技术包括：排气后处理技术（DPF、SCR、DPF+SCR）、电控高压喷射（共轨、泵喷嘴、单体泵等）技术、发动机综合管理系统、发动机本身结构优化设计技术、可变增压中冷技术、EGR 技术等。在柴油机（含道路和非道路）排放治理行业，国四排放阶段起开始匹配安装 DOC、DPF 和 SCR 等排放治理装置产品，但市场主要被国外企业产品技术垄断。随着国内自主企业在排放治理装置产品领域研发投入和技术升级，涌现一批技术实力强、产品优的自主企业（如安徽艾可蓝、四川中自环保、贵州焯缔、浙江邦得利、云南菲尔特、江苏凯龙高科等），并逐步在国五及以上排放阶段柴油车排放市场进行产品市场化推广应用、市场份额逐步增大，打破了国外产品技术垄断。国家对非道路柴油机械排放控制持续加严，将极大促进非道路柴油机械排放控制技术和装置的发展应用^[44]。

2.3.4 室内污染与油烟治理技术与装备

2.3.4.1 室内空气净化技术与装备

目前，市场上空气净化器应用领域广泛，使用的技术也各式各样。其中主流技术有活性炭吸附技术、负离子技术、臭氧灭菌技术、光触媒技术、高效滤网（HEPA）过滤技术 5 种。主要设备类型以净化器、新风系统、净化材料等满足不同场景的应用为主。在能源供应紧张、能源结构亟待调整的趋势下，可再生能源、能量的回收及综合利用技术在室内环境产业的应用越来越多。

2.3.4.2 油烟治理技术与装备

我国油烟治理技术主要有机械式净化技术、吸附式净化技术、静电式净化技术、等离子降解技术、生物降解技术、液体洗涤技术（超重力技术）等；油烟 VOCs

的去除方法主要有两类：一是回收技术，主要是通过改变温度压力或采用吸附剂等方式来分离有机污染物的方法，包含冷凝、吸收、吸附等；二是催化氧化技术，通过不同种类的催化剂将 VOCs 降解。油烟净化的新材料如多孔矿物基 VOCs 净化材料、改性聚偏氟乙烯（PVDF）纤维网等性能较高的 VOCs 或颗粒物吸附材料等。这些技术应用于餐饮油烟净化设备，主要分为机械式油烟净化设备、湿式油烟净化设备、光化学油烟净化设备和静电油烟净化设备。

2.4 大气环境服务业发展现状

近年来，我国大气环境服务业行业规模总体呈现平稳扩张态势，治理服务模式更加丰富，第三方治理专业化水平得到了一定程度提升。目前较为常用的运作方式有：委托运营（Operations & Maintenance, O&M）、建设—运营—移交（Build—Operate—Transfer, BOT）、建设—拥有—运营（Build—Own—Operate, BOO）、设计—建设—运营（Design—Build—Operate, DBO）、转让—运营—移交（Transfer—Operate—Transfer, TOT）和改建—运营—移交（Rehabilitate—Operate—Transfer, ROT）。环境保护部科技标准司《中国环境服务业发展报告（2015）》调查了 218 个已运营大气治理外包服务项目，其中 63.38%采用 O&M 方式，5.63%采用 DBO 方式，4.69%采用 BOT/ROT 方式，分别引入了专业化的第三方工业治污机构^[45]。大气污染治理服务业已形成了以委托运营为主，BOT/TOT/DBO 等为辅的第三方治理模式。区域/园区/企业的环境第三方综合治理与管理服务模式兴起，各方不断探索与创新服务方式，出现了“以环境咨询服务为基础”的环保管家模式及“环境监测+治理服务型”的环保管家模式。火电行业第三方治理受益于环保外部成本内部化等环保政策的实施，得到了较快发展。目前存在问题主要为第三方治理税收政策仍需进一步完善、融资贷款存在困难、结算执行有待优化、产业管理有待进一步规范。

VOCs 治理企业经营方式由早期的污染源末端治理逐渐向全过程的污染控制方向发展，第三方运营服务、咨询和培训业务发展迅速，“一行一策”“一市一策”“一厂一策”等治理方案的编制业务需求增多，对污染源、园区/产业集群的治理设施运营服务在行业发展中的占比越来越高。机动车船尾气治理企业则是通过为主机厂新车型匹配排放治理装置、为在用车用户加装减排设备及为维修机构提供排放控制装置等方式，广泛服务于发动机/整车生产企业、车辆用户、政府

部门及维修机构。近年来，企业发展经营普遍采用传统发展模式，结合中外合资、企业联盟等形式，同行业在竞争中加强合作，为提高国内机动车排放治理服务水平、促进技术进步起到积极作用。在室内污染与油烟治理行业，近年来国内已有一批与“物联网”和“智慧环保”相关的企业达成深度合作，成为物联网技术与环保产业深度融合的第一批样板。

3 大气污染防治行业发展机遇与挑战

3.1 主要发展机遇

目前，生态环境部已经启动了“十四五”大气污染防治专项规划的编制工作，将延续“大气十条”“打赢蓝天保卫战三年行动计划”的思路，并主要围绕着空气质量改善和主要污染物减排量方面来设计目标，包括针对 O₃ 的两项前体物 VOCs 和 NO_x 设计减排目标；在重点举措方面，将加强 PM_{2.5} 与 O₃ 协同控制，加强区域联防联控和重污染天气应对，进一步提升环境监测和执法监管能力，推进大气环境管理体系和治理能力现代化^[46]。未来 5 年大气污染防治仍是我国环保的重点攻坚方向。随着“一带一路”及区域全面经济伙伴关系（Regional Comprehensive Economic Partnership, RCEP）的持续推进，中国与广大发展中国家的合作将会更加密切，国内大中型环保公司有望以关键设备供货、项目本土化运行、技术合作、技术转让等方式进一步开拓国际市场，使我国大气污染防治行业走向有治理需求、但技术相对落后的东南亚及南亚等发展中国家提供了有利条件，为未来我国大气污染防治行业的进一步发展提供了机遇。

工业烟气的治理主要体现在：一是火电行业将聚焦常规机组超低排放的优化提升以及非常规机组的超低排放等方面；二是非电行业将加快钢铁、水泥、冶金、生物质、焦化、玻璃炉窑等领域的超低/低排放改造^[47]；三是尘/硫/硝外的非常规污染物的技术研发，如 SO₃、Hg 等；四是污染物治理工艺、技术等改变带来的变化，如垃圾处理逐渐由填埋逐渐转向焚烧为主的工艺带动了国内垃圾焚烧的烟气治理需求；五是环保设备快速发展的过程中，设备的运营维护、检测、监测水平的相对滞后带来的市场需求；六是继续开拓如印度、泰国、印尼、巴基斯坦、巴西等发展中国家为主的国际市场。

VOCs 的治理主要体现在：相对于颗粒物、SO₂、NO_x 污染控制，VOCs 管理基础薄弱，工业源 VOCs 治理已成为大气环境管理短板。石化、化工、工业涂

装、包装印刷、油品储运销等行业是我国 VOCs 重点排放源^[48]。“十四五”期间，工业源 VOCs 治理将迎来新的发展机遇期，我国将建立健全 VOCs 污染控制的政策法规和管理制度体系，有效治理现有污染源，将显著提升污染企业清洁生产水平，预计 VOCs 排放总量将在 2020 年基础上减少 20%—30%，初步控制 VOCs 污染问题。

机动车船尾气的治理主要体现在：国家陆续出台《柴油货车污染治理攻坚战行动计划》等一系列政策，同时发布并实施了轻重型汽车国六排放标准、研究制定非道路移动机械国四排放标准以及船舶排放标准，显示了国家推动移动源污染防治的决心，为移动源排放后处理市场提供了良好的发展机遇。

从更长远看，钢铁、水泥、玻璃、焦化等部分非电行业预计在 2025 年前基本完成超低/低排放改造，2026—2030 年间主要以已改造机组的优化提升、“特、难”等烟气工况的超低/低排放改造，以及 SO₃、重金属、氨等非常规污染物治理的国际化拓展为主；VOCs 治理产业将持续发展，质量效益显著提升，技术水平明显进步，关键材料和装备市场占有率明显提高；传统燃油汽车提标改造要求进一步凸显；室内净化和油烟治理需求更加迫切。在《巴黎协定》碳减排要求下，全球化石能源低碳化利用的需求凸显。IEA 预测，CCUS 的重要性随时间不断增加，2030 年之前重点将放在已有发电厂和工业过程的碳捕集，比如煤电、化工、水泥以及炼钢冶金，CCUS 应用前景广阔。

3.2 主要问题与挑战

3.2.1 内部主要问题与挑战

我国粗放式经济模式和环境治理对大气环境破坏尤为严重。虽然通过近十年的努力，我国主要大气污染物排放量呈现下降趋势，酸雨污染大幅减轻，PM_{2.5} 浓度显著降低，但以重化工为主的产业结构、以煤为主的能源结构和以公路货运为主的运输结构没有根本改变，污染排放和生态破坏的严峻形势没有根本改变，大气污染状况仍然十分严峻。当前我国大气污染治理产业集中度不高、规模偏小，全方位服务体系尚未形成，大气环保行业仍然存在恶性竞争，大气环保企业仍然存在资金紧缺、创新能力不足等问题，亟待突破解决。（1）融资难、回款难、盈利能力不足等普遍性行业问题。大气环保企业普遍存在应收账款回收不畅，回款周期长，垫付资金比例高等难题，尤其民营企业资金周转压力更大。（2）恶

性市场低价竞争和低水平重复等现象依然存在，导致整个行业利润偏低，盈利能力不足。（3）技术创新能力不足。中国烟气治理企业普遍属于工程应用研究型，缺少基础性理论的研究，原创技术创新能力较为薄弱，尤其是非电领域，各行业工艺过程不同，排放污染物不同，各项目烟气成分和性质差异大，传统火电行业烟气治理“一招鲜”技术难以重现。VOCs等治理技术在核心材料、工艺装备和技术集成方面也需要不断提升发展。（4）烟气治理向中小工业炉窑方向深入，VOCs污染源点多面广，治理与监管难度加大。

3.2.2 外部主要问题与挑战

主要包括：（1）技术差距。以欧盟组织成员国和美日为代表的发达国家经过了数十年的大气污染治理实践，形成了针对不同行业与排放标准相适应的系列化、成套化的多污染物高效治理技术与装备。我国部分治理装备和净化材料技术水平和国外产品相比尚存在一定差距。布袋除尘器用对位芳纶帆布、回流式高压水喷枪，德国产品均对国产产品有5倍以上寿命优势。典型的1.8—2.5米直径，主要用于脱硫循环泵和其他液流循环设备，巴斯夫（BASF）、赛莱默（Xylem）等国外公司以国产设备3—5倍价格占据50%以上市场份额，国产设备寿命和能效指标差距较大。美国加州批准了一项开创性政策，预计将从2024款车型开始实施，初期要求零排放车辆占比至2030年达到30%—50%^[49]。该项政策的出台与实施将为移动源排放后处理产业链提出新的挑战。（2）标准国际化程度低。我国大气环保设备产品普遍按国内国家标准/行业标准设计、制造和安装，但中国国标尚未在国际上得到普遍认可，同时不同国家的地域文化、法规、经济等差异较大，制约了中国大气环保技术和产品走向世界。（3）煤电建设下滑。欧洲、加拿大持续提高可再生能源发电比例，燃煤电厂将被逐步淘汰直至完全关闭，拜登新政府把发展新能源作为与中国战略竞争的重要手段，越南、印尼、印度、蒙古已出台政策停建或缓建煤电机组。（4）市场准入壁垒。特别是部分国家存在对设备质量要求较高、市场准入难、关税高、国家保护主义等现象盛行，成为我国大气环保企业国际化的突出问题和挑战。例如：印度对进口中国电力设备实施高关税壁垒，并强制要求国有电力项目必须有一定比例的本土生产设备，致使大部分出口印度的电力项目亏损、资金短缺，评标过程中人为因素多、废标几率大。在施工服务方面对中国承包的项目实施工作签证人员数量限制且工作签证办理手续繁琐、周

期长，项目工期不确定，大部分项目存在业主恶意拖欠设备款，法律维权难度极大，严重削弱了我国环保企业的海外竞争力和国际市场拓展的积极性。

3.2.3 较为薄弱的关键技术与装备

经过近 30 年的发展，我国在大气污染控制领域技术研发水平与发达国家的差距显著缩短。但是，随着节能减排要求不断提高，还需加强燃煤、冶金、建材、化工等重点工业行业大气污染物全过程深度减排与协同控制技术研发，并提升温室气体协同减排的技术水平。针对移动源污染减排的技术需求，重点突破满足新阶段控制标准的机动车、船舶、工程机械等尾气净化关键及集成技术。

工业烟气污染治理行业目前较为薄弱的关键技术与装备，主要集中在关键技术、基础材料和核心零部件三个方面。在烟气治理基础研究的流场方面，目前市场上通用的 CFD 软件如 Fluent、Star-CD、CFX、Phoenics 均为欧美软件。在（半）干法脱硫方面，需要攻克的技术和装备包括高品质吸收剂制备技术、副产物资源化应用技术、超高硫烟气工况下的节能降耗技术和 SDA 用的高速旋转喷雾器、高压超雾化水喷嘴生产制造等。PPS、PI 等化纤滤料虽已完全实现国产化，但与国外先进水平相比，还有一定的差距。超细纤维和纳米纤维的过滤材料有待突破。产业的智能化、数字化和绿色化较为薄弱。在中低温催化剂方面，较薄弱的关键技术主要是多孔（50 孔以上）催化剂的成型工艺。我国在脱除 SO₃、Hg 方面技术较为薄弱。低成本碳捕集技术亟需攻关突破。

在 VOCs 治理行业，国内各种装备制造企业水平发展很快，但是在转筒式疏水型沸石（硅铝分子筛）、同时需求的专用活性炭、活性炭纤维制造原料、VOCs 氧化催化剂等核心材料方面，在高端市场应用方面与外国相比还有一定的差距。关键技术，如 RTO、RCO、生物净化等技术水平需要进一步提升。

在机动车船尾气治理行业，目前移动源排放控制用 DPF、SCR 等污染控制装置核心零部件（如载体、催化剂、衬垫、传感器等）以及排放控制系统核心技术产品主要掌握在国外企业，美国康宁（Corning）和日本特殊陶业株式会社（NGK）、比利时优美科（Umicore）、德国巴斯夫（BASF）、美国庄信万丰（Johnson Matthey）、德国博世公司（Bosch）分别占国内载体、催化剂和柴油车电控系统市场份额的 80%以上。

对于室内污染与油烟治理行业，小粒径颗粒去除技术的滤料堵塞问题、活性

炭吸附技术的吸附饱和以及再生困难问题、湿式处理技术吸收液的二次污染问题，这些技术及相关设备都和国外存在一定差距。

3.2.4 不确定因素

目前全球经济增长速度放缓，国际经济形势较以往更为复杂。中美贸易战等摩擦不断且短期局势难变，如美国要求制造业回流，要与中国制造脱钩，同时对中国高科技产品进行技术封锁和断供，我国经济形势面临着严峻的考验。受全球经济形势影响，大量国际订单都已取消或计划要取消，国际项目大多处于停建缓建中，全球经济需求疲软对国际贸易也产生严重不利影响，环保产业发展面临新的风险与挑战。

受新冠疫情影响或环保改造资金缺乏，项目落地数量明显减少。疫情对大气环保企业的影响，主要集中在杠杆较大的环保工程类企业和环保装备制造类企业，受暂缓复工的影响，存在财务成本较高、现金流紧张、供应商停产断货等问题。

4 我国大气污染防治行业发展展望

2020年9月，中国国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布，中国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。2021年3月，习近平总书记在中央财经委员会第九次会议强调，要把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局，对实现减污降碳协同效应提出了明确要求。我国“十四五”规划和2035年目标，在碳达峰、多污染物协同控制、PM_{2.5}和O₃协同控制等方面作了系列顶层设计和部署安排。“十四五”我国将全面实施PM_{2.5}与O₃协同控制，突出以降碳为源头治理的“牛鼻子”，实施减污降碳协同治理，突出以生态环境质量改善、二氧化碳达峰倒逼总量减排、源头减排、结构减排，推动产业结构、能源结构、交通运输结构加快调整，实现从注重末端治理向更加注重源头预防和治理有效传导，二氧化碳排放强度持续降低，主要污染物排放总量持续减少，碳市场建设快速推进。2035年PM_{2.5}治理将对标中等发达国家水平，力争好于第二阶段过渡值（25 μg/m³）。展望未来10年，我国将持续推进空气质量提升，大气污染防治行业依然有广阔的市场前景，工业烟气、VOCs、机动车船、室内油烟等领域绿色技术将持续创新突破、提升发展并得到广泛应用。

4.1 大气污染防治行业发展主导因素分析

4.1.1 国家“减污降碳”战略和政策的影响

习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上，向国际社会作出的碳达峰碳中和承诺，彰显了中国积极应对气候变化、走绿色低碳发展道路的坚定决心，为我国应对气候变化、绿色低碳发展明确了目标、指明了方向。生态环境部表示，《“十四五”生态环境保护规划》以减污降碳为主抓手，突出降碳为源头治理的“牛鼻子”，以PM_{2.5}和O₃协同控制为核心，积极探索重点污染物协同治理，围绕“提气”“降碳”等重点任务深入打好污染防治攻坚战，进一步提升空气环境质量，实现“十四五”期间空气质量稳步提升，严重污染天气基本消除，主要污染物排放总量持续减少，温室气体排放快速增长趋势得到有效遏制。在PM_{2.5}和O₃协同控制方面，2021年1月生态环境部有关负责人表示NO_x、VOCs都是PM_{2.5}和O₃的重要前体物，正在研究将VOCs纳入环境保护税征收范围。采取税收优惠和电价优惠政策，激励钢铁、焦化、水泥、平板玻璃等非电行业超低排放。2021年2月，生态环境部大气环境司负责人在生态环境部召开的例行发布会上进一步指出，“十四五”期间，生态环境部将设置PM_{2.5}、优良天数、NO_x和VOCs、基本消除重度污染天数五个目标指标。

4.1.2 行业自身高质量发展的动力影响

2019年，全国337个地级及以上城市累计发生严重污染452天、重度污染1666天，以PM_{2.5}为首要污染物的天数占重度及以上污染天数的78.8%。2020年1—12月，京津冀及周边地区“2+26”城市PM_{2.5}年均浓度为51 μg/m³，其中12月PM_{2.5}浓度为76 μg/m³。2020年9月，生态环境部在国务院新闻办公室吹风会上指出，工业和民用散煤，以及柴油车对区域内PM_{2.5}的影响较大。当前，我国制定的《环境空气质量标准》PM_{2.5}年均浓度限值标准为35.0 μg/m³，许多地区达标仍困难很大，但这仅仅是WHO过渡期目标—1，处于WHO提出的最低标准。美国和日本的标准一样，与WHO过渡期目标—3（15.0 μg/m³）基本一致。澳大利亚的标准最为严格（8.0 μg/m³），年均标准比WHO的准则值（10.0 μg/m³）还低。我国目前重点区域PM_{2.5}浓度水平、PM_{2.5}浓度限值标准仍与WHO准则值存在很大的差距，大气污染治理仍然任重道远。另一方面，二氧化碳等温室气体与常规污染物排放具有同根、同源、同过程的特点，火电、钢铁、水泥、有色、石化、化工、煤化工等行业和交通领域的CO₂排放量占全国排放总量的84%，特别是在碳达峰、碳中和的背景下，高污染、高能耗、高排放行业的

自身高质量发展实现绿色低碳转型的需要更加迫切。因此，从行业自身发展对大气污染防治行业的影响看，一方面非化石能源的大力发展与产业结构调整是必然趋势，必将在源头上协同减少包括 SO₂、NO_x 等大气污染物的产生，推动大气环境的改善。另一方面，产业结构的深度调整必将使煤炭能源的占比持续下降，对末端治理企业提出了更高的生存发展要求，倒逼行业企业对现有业务进行高质量发展以及“降碳”形势下新业务的拓展。节能降碳效果突出、协同减排常规和非常规污染物效果好的环保技术装备定会得到更大范围的推广应用，拥有更加广阔的发展空间。

4.1.3 污染形态的变化

随着常规污染物 SO₂、NO_x 和烟尘的大规模治理并取得显著成效，重金属、SO₃ 等非常规污染物以及常规污染物治理过程中产生的二次污染物如氨、脱硫浆液滴等非常规污染物的治理日益受到重视，对这些污染物的研究和治理成为今后工业烟气治理的重要方向。2019 年 3 月，联合国环境规划署发布的《全球汞评估报告》对 17 个关键领域的全球人为源大气汞排放量进行了量化，其结果为约 2220 吨，化石燃料和生物质的静态燃烧约占全球排放的 24%，其主要来自煤的燃烧。在燃煤烟气重金属治理的技术中，以添加吸附剂法、添加卤素添加剂法和协同脱除法为主。燃煤烟气 SO₃ 治理的技术主要有碱性物质法、静电方法、袋式过滤法和湿法脱硫技术等。燃煤烟气氨治理一方面可以通过优化改造系统和调整系统主要参数来实现，另一方面可以对逃逸的氨进行后处理。随着钢铁行业短流程化发展对环保装备多污染物的协同脱除将提出更高要求，无组织源污染治理将提上日程，脱硫脱硝过程的二次污染物、二噁英、CO₂、VOCs、SVOCs、NMHC 等污染物治理也将是行业重点发展方向。

4.1.4 新一轮科技革命和创新成果的驱动

我国大气污染防治技术未来将向着更低成本、更高效率、协同控制、资源化和智能化方向发展。以信息技术为核心，互联网技术、信息化软件技术、工业技术等各类新技术的快速发展，将促进传统大气环保业务与新一轮科技革命成果的深度融合，将促进大气污染防治技术全面提升，促进智能化设计、智能化制造、智慧化运维等能力建设，形成信息化技术与定制化生产需求结合的解决方案能力。“大气环保+工业互联网”平台的建设，将进一步推动实现企业营销管理、项目

管理、技术生产管理、采购供应商管理、财务成本管理、数据管理等业务模块以及上下游客户信息的融合管理，为产业链上下游提供绿色化生产信息技术支持；将推动大气环保装备行业高效实现总承包集成服务新模式和规范；将推动建立面向不同行业的低成本高效率大气多污染物高效协同治理技术路线和标准体系；在行业里形成可以复制可以推广的系统集成解决方案，全面提升支撑我国空气质量根本改善的污染防控技术能力。此外，无人机平台技术、环境传感器技术、环境遥感技术等新兴技术的交叉融合发展将进一步激发环保技术创新，新材料研发的突破。石墨烯、高性能活性碳纤维、树脂基吸附剂、新型硅铝分子筛等研究工作的突破，有望使吸附材料的性能大幅度提高；氧化催化剂向非贵金属催化剂方向发展，将扩大其应用范围；生物填料、生物菌剂等的发展，将进一步拓宽生物技术的应用领域。

4.1.5 商业模式创新与应用

参照发达国家大气污染治理行业发展历程，并结合近年来，我国环境服务业领域相关政策的密集出台及其配套措施的相继实施，预计未来 10 年内，综合环境服务、环境咨询服务、污染治理设施第三方运营、社会化环境监测、环境管家等模式将快速发展，环保产业结构将更加合理^[1]。我国大气污染治理行业将从以环保工程、设备为主的商业模式向环保工程、设备与环境服务业并存的商业模式发展。环境服务类业务将快速发展及不断优化创新，如现有传统的封闭式污染治理模式存在专业化水平低、诚信和制约机制缺乏、资金压力大等问题，阻碍了超低排放改造的高效推进。通过建立信用评估、监督管理和风险保障机制，借助互联网技术，实现社会众筹募股融资，以新型的第三方污染治理模式实现快速高效的污染治理。

4.1.6 国际经济走势、贸易环境及环保需求

总体看，“十四五”时期，国际经济发展形势将更加复杂严峻。国际经济、政治格局深刻调整，经济全球化遭遇逆流，国际经贸合作机制发生改变，总需求增长放缓趋势难以避免，贸易环境风险将持续存在。但与此同时，大气污染治理作为全球环境治理的重要组成部分，国际化发展仍然具有广泛的需求和广阔的空间。发展中国家和新兴经济体，工业化和城镇化发展迅速，面临生态破坏和环境

污染的共性问题，也面临污染物的跨境传输转移问题，大气污染治理需求迫切。发达国家正在研究制定更加严格的大气污染物排放标准，比如在机动车尾气控制方面，有外媒报道欧盟委员会（European Commission）将在2021年第四季度就新一轮欧7（Euro 7）排放标准提出立法建议，欧7的排放标准将进一步降低空气污染物允许的最大排放量，如PM_{2.5}、碳氢化合物（CH）和CO，预计最快会在2025年生效。可以预见，随着全球环境治理的深入推进，大气污染治理国际市场需求将进一步加大。

4.2 大气污染治理行业市场展望

4.2.1 工业烟气治理市场

4.2.1.1 市场容量展望

2021—2025年工业烟气治理工程主要集中在新建火电、新建垃圾焚烧电厂和钢铁、水泥、玻璃等主要非电行业的产能置换、异地搬迁烟气治理及尚未完成的超低排放，2026—2030年主要集中在火电和钢铁等行业超低排放的二次改造。根据不完全统计与预测，2021—2025年火电行业和钢铁、水泥、玻璃、垃圾焚烧、焦化等主要非电行业烟气治理工程市场容量为2390亿—3250亿元；2021—2025年陶瓷、生物质锅炉、炭素、砖瓦、有色、工业锅炉、铸造工业和石油炼制等其它非电行业烟气治理工程市场容量约为500亿元。以2019年工业烟气治理工程和第三方运维服务的占比情况来看，第三方运维服务占比将在“十四五”期间取得一定增长。预计到2025年，第三方运维服务将占到工业烟气治理行业市场容量的30%，工业烟气治理工程占比将下降到70%。2021—2025年工业烟气治理工程市场容量约为2890亿—3750亿元，2021—2025年工业烟气治理第三方运维服务市场容量约为1240亿—1610亿元，2021—2025年工业烟气治理行业市场容量约为4130亿—5360亿元。主要细分领域市场容量分析如下：

火电行业。根据全球能源监测、绿色和平印度分部和塞拉俱乐部共同发布的《繁荣与衰落2020：追踪全球燃煤电厂开发》数据，中国预计在2025年前将增加燃煤电厂装机容量150GW^[50]，将带来火电除尘市场容量130亿—160亿元、脱硝市场容量180亿—210亿元、脱硫市场容量200亿—240亿元，2021—2025年火电烟气市场容量为510亿—610亿元。

钢铁行业。预计未来五年将完成钢铁行业烟气超低改造市场，2021—2025年钢铁烟气治理市场容量为900亿—1300亿元。

焦化行业。焦化行业烟气市场容量大约在60亿—70亿元。预计在2021—2025年内释放完毕。

水泥行业。预计未来五年将完成水泥行业烟气超低改造市场，2021—2025年的水泥行业烟气治理市场容量为620亿—870亿元。

玻璃行业。预计未来五年将完成玻璃行业烟气超低改造市场，2021—2025年的市场容量为60亿—80亿元。

垃圾焚烧行业。垃圾焚烧行业烟气治理市场主要集中在未来新建垃圾焚烧和潜在超低排放改造烟气市场，2021—2025年的市场容量为240亿—320亿元。

4.2.1.2 市场主要特点

火电行业烟气治理市场特点如下：火电烟气治理行业已成为中国环保产业中能与国际厂商抗衡且最具竞争力的行业之一，随着我国火电厂实现超低排放，减排效果显著，超低排放改造遗留的问题进入消缺阶段；火电市场的对象多为国企，整体较为成熟及规范，各项法规标准较为全面，工程结款情况较为良好；未来我国将参考美国、日本等国家环境技术出口发展路线，利用我国火电行业先进技术、工程业绩等优势，将烟气治理关键设备供货、项目本土化、技术转让、技术合作等方式作为火电行业烟气治理开拓国际市场的新模式。

非电行业烟气治理市场特点如下：当前我国非电行业烟气治理行业处于发展初期。尽管钢铁、水泥、玻璃等非电行业的脱硫、脱硝、除尘等设备安装率不低，但由于非电行业的业主、供应商、地方监管、技术等多方面的制约，使其过去发展缓慢。因火电市场饱和，非电行业的排放标准趋于加严，其改造市场将不断释放，但受非电行业排放源众多，工艺过程不同，排放的污染物种类复杂，温度、湿度、流量及浓度差异较大，技术支撑不足等现状影响，其市场格局相对分散，技术路线选择不明确；相比火电行业，钢铁、水泥、玻璃等非电行业的法规标准还待完善，且企业资质普遍低于电力企业，规范性较差，工程结款难度较大，人工成本增加，大幅度挤压了企业的盈利空间。尽管市场朝着品牌、资质、业绩、信誉、服务好的企业倾斜，但恶性竞争、低于成本价竞标等现象在非电行业的市场中仍普遍存在，行业利润率得不到提高，同时也制约了产业的健康发展。

4.2.2 VOCs 治理市场

4.2.2.1 市场容量展望

VOCs 治理行业“十三五”期间得到了快速的发展，预计未来 VOCs 治理行业还会维持 3—5 年的快速发展时期，到“十四五”结束时，各重点行业和主要排污工序的治理技术将逐步完善，我国的 VOCs 治理市场将会趋于成熟。由于“十三五”期间我国的 VOCs 治理工作推进速度过快，技术准备不足，大部分企业第一轮治理设施需要提升改造。“十四五”期间将是我国 VOCs 治理的关键时期，很大一部分的现有治理设施将会进行升级改造，现存的污染源大部分将会得到有效治理。2020 年 VOCs 的治理市场规模约为 800 亿—900 亿元，“十四五”期间按照 10% 的增速（略低于“十三五”期间的增速）计算，至 2025 年的行业规模年产值将达到 1300 亿—1500 亿元^[37]。VOCs 已列入“十四五”规划空气质量改善的控制指标，VOCs 检测/监测设备与服务市场仍将维持一定规模的增长，工业园区与产业集群 VOCs 绿岛项目、设备运营维护、环保管家等第三方服务市场将会得到快速的增长。

4.2.2.2 市场主要特点

VOCs 治理行业的特点在于污染排放涉及的行业众多，污染源散、乱、小，废气排放特征千差万别，治理技术体系也非常复杂。VOCs 治理市场将由“十三五”期间的京津冀及周边地区、长三角地区、汾渭平原等重点区域为主，逐步拓展到其他污染地区；重点行业的治理市场已经初步形成，目前正在向精细化规范化的方向发展，除了继续对石化、化工、工业涂装、包装印刷、油品储运销、制药、农药等重点行业向进行深度治理外，将逐步扩展到如煤化工、纺织印染、橡胶制品、皮革/人造革、彩钢板、玻璃钢、制鞋等众多涉 VOCs 排放行业。随着治理过程的不断深入，VOCs 治理市场也将从注重末端治理到源头减排、过程控制、末端治理、维护运营等全过程扩展。由于 VOCs 污染物的特殊性，检测/监测方法标准有待完善，检测/监测机构的检测水平也有待提高。随着国家对监测数据要求的提高和加大对检测/监测机构的监督力度，检测/监测市场也将越来越规范。

从发达国家 VOCs 的治理进程和经验来看，VOCs 的治理工作从开始重视到基本完成污染源的治理任务大约需要 20 年的时间。前期主要是完善相关的政策

法规和管理制度体系，制定重点行业和主要排污工艺的技术指南，以引导治理工作健康有序的发展。并且根据相关的政策法规要求，完成对主要污染源的治理工作。后期主要是控制新增污染源并严格管理，对重点行业和重点污染源的治理效果进行评估，并在此基础上进行不断的提升改造，实现对重点行业和重点污染源的深度治理。我国的 VOCs 治理工作尚处于对污染源进行大规模治理的第一阶段，治理任务依然繁重。

4.2.3 机动车船尾气治理市场

4.2.3.1 市场容量展望

机动车产业是带动中国经济发展的重要支柱产业，国内汽车产销量也不断突破历史新高。随着机动车污染防治工作加强，一方面新车排放法规的不断升级，通过采用更先进的排放后处理装置、电控等技术措施，新车的污染排放大幅降低。另一方面，高排放柴油车、营运汽油车（如出租车等）和非道路机械等成为机动车污染物控制的重点。生态环境部、交通运输部和市场监管总局发布《关于建立实施汽车排放检验与维护制度的通知》，提出加快建立实施汽车排放检验与维护 I/M 制度，将进一步带动和推进排放后处理装置后市场应用，为移动源排放后处理装置系统及各相关零部件（载体、催化剂、传感器、衬垫以及系统集成）整个产业链带来巨大的市场潜力。

以后处理装置行业为例，预计到 2025 年，假定轻中型柴油车以 170 万辆/年来计算，每年将有 100 亿元的后处理市场，重型柴油车以 180 万辆/年计算，每年将有至少 200 亿元的后处理市场，轻型汽油车年增长量以 1500 万辆/年计算，每年至少 300 亿元的后处理市场^[51]。此外，还将拉动下游环保载体、催化剂、电控装置、尿素、机械加工等相关产业，将形成千亿级的产业规模。

目前，我国推进非道路移动机械排放法规升级和监管制度体系完善的步伐已经加快，非道路移动机械的尾气后处理市场潜力巨大。2019 年底，我国工程机械保有量约为 800 万辆，农业机械约为 4000 万台，随着排放标准升级，NO_x 和颗粒物排放限制逐步加严，据生态环境部预测，国四实施后 NO_x/PM 的减排效果将在 2025 年达到 12.5%、19.3%，2030 年达到 35%、46.8%。在技术层面，新增车载法整机测试/瞬态测试循环/排放控制系统检测/新增 PN 限制 $\leq 5 \times 10^{12}$ 个/千瓦时等要求，新的技术要求将催生检测/监测等方面的市场需求。此外非道路

移动机械每年新增约为 200 万台，国四后处理系统根据排量等因素主要采取 DOC+DPF 或 DOC+DPF+SCR 技术路线，假设后处理单价 3000 元/套，“存量+新增”将带来约 200 亿元/年后处理新增空间。随着国际和国内市场对船舶环保要求的提升，以及船舶排放标准的不断升级，我国巨大的船舶尾气排放治理需求将为发动机尾气后处理行业带来广阔的市场空间。

4.2.3.2 市场主要特点

移动源污染防治产业是典型的政策和标准法规驱动型产业，行业发展与技术升级主要来自新车和在用车排放标准的制定与执行、环保政策及监管力度加严等。与此同时，由于现有政策及管理制度不完善，导致对于不同市场产品准入门槛存在一定差异：

（1）对于新车市场，污染控制装置市场准入严格，污染控制装置供应商需要与整车/发动机企业进行一系列开发、匹配、标定等后才能进入新车企业，并接受企业及政府管理部门等监督检查，例如：新车环保达标核查、一致性检查等。

（2）对于在用车市场，污染控制装置市场准入相对宽松，维修企业对原车污染控制装置维修或替代中，无需对车辆进行相关匹配标定等程序，且对污染控制装置没有明确规定，导致在用车市场中易出现污染控制装置造假作弊等现象。

4.2.4 室内污染与油烟治理市场

4.2.4.1 市场容量展望

预计到 2025 年，中国室内空气净化产品销售收入将达 62.8 亿元。若以平均年复合增长率 7.4% 计算，到 2030 年中国仅产品销售额将达 89.7 亿元。如果将中国的发展速度及产品带动的工程、运维服务价值也统计在内的话，中国 2030 年市场规模有可能将达到 325 亿元。同时，伴随近些年中国空气净化产品自主牌的崛起，逐步涉及滤材、滤料等核心组件的研发制造，也将带动中国企业的产品向亚太及欧美地区的出口。

总体上，2021—2030 年，我国油烟治理行业将迎来全面发展，治理要求更高更全、应用领域更加细分、产品技术加速升级、市场规模快速增长。未来数年，商用油烟治理市场将以年均 20% 左右的速度迅猛发展。预计到 2025 年，我国油烟净化器市场规模将达到 406.61 亿元，其中低空油烟净化器将占据主要市场。未来几年，在我国服务消费占比 49.5% 并持续上升、全国居民消费倾向高达

70.3%的情况下，餐饮业仍将是形成强大国内市场、释放内需潜力的重要力量。

4.2.4.2 市场主要特点

在室内空气净化市场方面，主要问题是品牌建设不充分，传统观点认为欧美产品技术质量高等约束造成国内企业发展较难，同时存在国内企业基础研发投入较低、夸大宣传、核心技术不强等问题。如何应对我国特征的室内环境问题将成为未来重大的挑战。

未来随着全国及各地区油烟排放标准进一步健全和收紧、环保督察行动持续进行以及下游主要应用行业规模持续稳步增长，预计下游应用行业商用油烟净化设备安装渗透率将进一步扩大，并且早年间已安装的油烟净化设备也有更新淘汰、升级换代的需要，均为商用油烟净化设备行业稳定发展提供广阔市场空间。

4.2.5 大气市场展望小结

随着我国能源结构的绿色化、低碳化发展，燃煤烟气治理和燃油机动车尾气处理市场将持续萎缩。同时，随着污染防治攻坚战持续深入和我国持续改善空气质量的美好愿景，可以预见，我国在燃煤电厂、钢铁超低排放治理基础上，水泥、焦化、玻璃、垃圾焚烧、陶瓷、生物质锅炉、炭素、砖瓦、有色、工业锅炉、铸造、石油炼制等非电行业烟气市场需求将进一步释放；VOCs治理市场将快速发展。预计至2025年，工业烟气治理市场年市场规模约为800亿—1000亿元、VOCs治理年市场规模约1300亿—1500亿元、机动车尾气处理年市场规模约为600亿元、室内及油烟年市场规模约为470亿元，预计未来5年大气污染治理市场规模约为1.6万亿—1.8万亿元。从长远看，随着人民群众对空气质量要求的不断提高以及我国在全球环境治理的深度参与，预计大气污染治理行业在相当长时期内具有十分广阔的市场空间。

4.3 行业技术与装备发展展望

4.3.1 “减污降碳”技术发展趋势

在碳达峰、碳中和“3060”目标下，大气污染治理技术加速向绿色、低碳、高效、节能、协同的方向转型，大气污染综合治理、系统治理、高效治理、协同治理、集中治理等技术的突破需求更加凸显，主要表现在：

污染源头控制技术将得到进一步开发和突破。火电、石化、煤化工、钢铁、有色、水泥等行业源头污染控制技术开发需求迫切，低碳电源、燃料替代、氢基

工业、生物燃料等工艺革新技术的研发将不断加快。冬季清洁取暖、煤电兜底保障、燃煤锅炉（炉窑）和散煤清洁能源替代、低（无）VOCs 含量原辅材料替代、汽（柴）油车采用新能源车替代、低碳交通装备、终端用能电气化等方面相关技术成为重要方向和趋势，各种绿色低碳技术将得到进一步应用。

节能高效治污技术将获得更大力度开发和推广应用。“双碳”目标下，燃煤电厂、钢铁、水泥等行业以及室内油烟、机动车船等领域大气污染治理设施节能提效技术的挖掘和深化开发成为重要趋势。大气污染治理将更加重视低碳工艺路线、高效能装备、信息化管理、降低运行能耗、优化设计、工艺创新、结构改进、智慧控制等方面的技术创新开发，持续推进大气污染治理设施深度节能降耗，进一步促进减污降碳协同增效。同时，燃煤发电（含热电）、石化、钢铁等行业 CO₂ 减排技术及示范工程建设将加速推进，能够实现更低成本和更低能耗的 CCUS 技术具有广阔的推广应用需求。

系统化治污技术将向更深层次发展和推广应用。钢铁、水泥等行业无组织排放治理技术的开发应用成为推动空气质量持续提升的重要方向。在各类原料、燃料运输、装卸、储存、转移与输送、生产工艺（工序）以及室内装修过程中产生的颗粒物（粉尘）、挥发性有机物等大气污染治理的高效智能管控技术急需加强突破。同时，面向不同行业不同物料的封闭储存、密闭输送，以及 VOCs、臭气等废气集中收集的各种新型高效无组织排放治理技术将获得新的研究突破和更大范围的推广应用。此外，烟风道优化、余热综合利用、煤气净化回收，以及脱硫石膏利用、废催化剂再生等副产物资源化的低碳技术将得到进一步发展。

4.3.2 工业烟气治理技术与装备

除尘技术与装备：展望未来 10 年，火电、钢铁、石化、有色等行业基本实现烟尘的超低/低排放改造，机组运行稳定性、经济性得到进一步优化，智能化、精细化设备得到一定发展。除尘设备对 SO₃、PM_{2.5}、气溶胶、重金属等颗粒物的“协同治理”技术得到进一步提高，并通过提效改造实现更优的减污降碳效果。对于高温、高压、高湿、高粘性等“特、难”工况的烟气实现低排放处理。工艺更简单、集成度更高的尘/硫/硝一体化技术成为行业追求的方向，在新建机组及具备改造条件为主的范围得到一定规模应用。装备的制造水平稳步向高质量发展，与国际发达水平差距进一步缩小。

(1) 电除尘方面。利用仿真模拟等手段、应用多种创新技术开发出新的电除尘技术，在无需湿式电除尘器、余热利用等设备的情况下，单一干式电除尘可实现 $10\text{mg}/\text{m}^3$ ，甚至 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 以下的稳定排放，达到国际领先水平。同时，比电耗降低（如大型机组出口烟气含尘浓度 $\leq 5\text{mg}/\text{m}^3$ ，机组比电耗能达到 $0.00030\text{kWh}/\text{m}^3$ 的 1 级能耗标准）。电除尘在多煤种、宽负荷、变工况下实现超低排放的技术取得进展。烟气工况、粉灰成分及二次扬尘等因素对除尘效率的波动性影响降低。电源方面，微秒级的脉冲电源得到开发，建立示范工程。纳米级的脉冲电源基础研究取得一定成果。变频电源与本体设备、工况的关联性，匹配问题得到研究解决，推动技术进一步向精细化发展。同时，作为电除尘器核心装置，电源将向着控制的智慧化、运维的智能化、能耗的节约化发展。

(2) 电袋复合除尘方面。更精准的“电”“袋”结构比、气流均布、长袋脉冲清灰等技术取得突破，电袋复合除尘器的除尘效率、节能性得到进一步提升，通过技术升级，进一步降低运行电耗，提升降碳效果。新一代耦合增强电袋复合除尘技术在火电行业大型机组得到规模化应用，氧化铝高温电袋、氯碱高温电袋、预荷电电袋得到规模化应用。开发耐高温、耐腐蚀材料，扩大电袋复合除尘器在非电行业应用范围，实现高温超净电袋复合除尘技术在非电行业大规模应用；以高温超净电袋为核心的生物质高温尘硝一体化、废液焚烧高温尘硝一体化技术实现推广应用，较好解决超低排放稳定性、可靠性问题。

(3) 袋式除尘方面。金属滤料、特种纤维、超细面层梯度结构滤料、高温覆膜滤料等材料的开发，提升了滤料耐高温、耐腐蚀和过滤性能，拓展了袋式除尘器的应用范围；波形褶皱滤袋和新型折叠滤筒的开发，过滤面积进一步增大，设备成本有效降低；滤袋缝制和密封件的精细化发展，消除了接口泄漏，使得袋式除尘器的综合性能提高。陶瓷滤管实现国产化，替代进口，有效解决了滤管易碎、工况局限于小烟气量的问题，技术达到国际先进水平。金属滤袋成本得到有效降低，在高温除尘领域实现大规模应用，拓展在中温除尘领域的应用，解决目前废旧化纤滤料存在的二次污染问题。耐高温（ 250°C — 300°C ）的化纤滤料得到开发应用。预荷电袋式除尘器、顶部垂直进风袋式除尘器在钢铁、酵母等行业实现大规模应用。可协同脱除烟尘、 SO_2 、 NO_x 和二噁英等多污染物的功能型过滤材料、复合型一体化装置得到研发突破，使得袋式除尘器实现“一机多能”，最

大限度节约占地，降低能耗，节省投资及运行费用。

(4) 其它除尘技术方面。工业无组织排放颗粒物（粉尘）治理的长距离和大运量的高可靠的节能型管带输送技术、管带托辊新技术、智能化带式输送巡检机技术、输送机软启动及节能运行技术、智慧型环保料场技术及散料输送环保岛集成技术、先进的抑尘新技术等有望获得更大技术突破并在电力、钢铁、化工等领域形成规模化应用。

脱硫技术与装备：高效、节能、运行可靠、成本低廉的脱硫技术和装备是发展趋势，未来脱硫技术将从设备优化、工艺创新和交叉应用科学技术等角度出发，实现技术优化升级。

(1) 湿法脱硫方面。提高现有技术和设备对 SO_3 、粉尘的协同脱除效率，满足未来可能进一步提升的排放标准；优化防腐材料的性能及设计工艺，提升塔体和管道的抗腐蚀性能；提高脱硫副产物（石膏、硫酸铵、硫酸）的资源化利用率，降低回收成本，提高产品纯度，实现副产物的精细化管理，未来脱硫灰渣在建筑材料、矿井处理、环境治理等方向可能得到进一步发展；脱硫废水（近）零排放技术将得到进一步的应用；此外还需关注湿法脱硫在非电行业的适用性，换热设备易结垢堵塞，高硫煤烟气脱硫难以达标等问题。

(2) 半干/干法脱硫方面。研发高品质脱硫吸收剂、高吸附易解吸活性炭/焦等；解决（半）干法吸收塔内结壁、管道易堵塞、雾化器易磨损等问题；解决脱硫副产物资源化应用问题。

(3) 计算机模拟仿真技术方面。进一步深入应用到脱硫工艺开发过程中，突破国内目前仅停留在对脱硫系统的气流场模拟的现状，实现气固两相传质过程的有效模拟，从而提高脱硫系统的流场均布和喷淋技术；多污染物一体化脱除技术，降低污染治理综合费效比，单独使用脱硫除尘技术，占地面积大，运行和投资费用高，但是使用脱硫脱硝（除尘）一体化工艺可以克服以上缺点，并提高污染治理综合费效比；脱硫系统智能化升级，将电厂的智慧运行与“互联网+”运用到脱硫系统中，实施脱硫工程的智慧运行管理、智慧安全检修等举措，提升电厂烟气治理项目的运行效率，降低运维成本。

脱硝技术与装备：脱硝技术的发展将围绕实际工程面临的难题，提高脱硝技术的适用性和可靠性，向低能耗、低物耗、智能化和多污染物联合脱除的方向发

展。技术进展主要集中于脱硝工艺的优化和 SCR 催化剂的研发。

(1) 脱硝工艺方面。精准喷氨技术，尤其是结合烟气工况实时智能调控的喷氨技术，使氨逃逸长期稳定小于 3ppm；脱硝还原剂尿素替代液氨升级改造，减小氨泄漏及存储风险；提升脱硝工艺在非电行业的适用性，解决非电行业烟气存在的水蒸气含量高、粉尘浓度高、成分复杂、有机硫堵塞、碱金属和 HCl 含量高等问题；开发催化剂原位再生技术，使脱硝系统长期稳定达标排放。

(2) SCR 催化剂方面。研发低温脱硝催化剂 (<180℃)，提高 SCR 技术适用性，满足全负荷（低负荷）脱硝需求以及钢铁、烧结等非电行业后置式 SCR 系统；大孔耐磨 SCR 催化剂，满足高尘烟气脱硝需求，如水泥烟气；抗水性 SCR 脱硝催化剂，满足高含水废气脱硝需求；多功能脱硝催化剂，随着相关排放标准的提高，能够同时脱除 Hg 和二噁英的脱硝催化剂将更能满足排放要求。

(3) 计算机模拟仿真技术方面。利用 CFD、反应动力学模型以及锅炉燃烧模型、SCR 模型与 SNCR 模型等，进行流场模拟、浓度场模拟、气液固三相流模拟、化学反应模拟等，优化反应器结构，提高流场均匀性；多污染物协同治理，如具有 SCR 催化脱硝性能的复合功能滤袋/滤筒，脱硫脱硝一体化技术，实现烟气尘硝（硫）同步脱除；开发具有更高吸附容量和吸附效率的活性炭/焦吸附剂，实现尘硫硝和重金属协同脱除；利用高压放电产生的强氧化性自由基，氧化烟气中的 SO₂、NO 和 Hg，然后结合下游的设备将其脱除；利用物联网、大数据和云计算等信息技术，为传统脱硝技术赋能，从而实现脱硝过程的实时精细化管控的智慧脱硝系统。

碳捕集技术与装备：重点是降低 CCUS 大规模应用成本和能耗，并确保其具有长期安全性和可靠性。碳捕集技术装备发展的重点包括：燃烧后捕集方面，大力推进复合有机胺吸收剂相应的工艺开发和示范、新一代有机胺吸收剂开发、实验和试验性验证平台建设、高效反应器、膜分离和固体吸附、热集成与耦合优化等技术开发；燃烧前捕集方面，深入推进大规模煤气化、燃料气脱碳、中高温 CO₂ 分离膜材料、系统集成技术的化工—动力多联产等技术开发；富氧燃烧捕集方面，低能耗制氧、酸性气体共压缩纯化、新型载氧体、增压富氧燃烧、全流程热耦合优化等技术有望得到开发突破，化学链捕集技术得到进一步发展^[52]。

4.3.3 VOCs 治理技术与装备

在工业 VOCs 的治理技术与装备中，占比最高的集中在吸附技术、高温焚烧技术和催化燃烧技术三类。从长远来看，能够进行资源循环利用的溶剂回收技术和绿色环保的生物净化技术将会具有广泛的应用前景。对于 VOCs 中的无组织排放废气，多采用对装料、卸料、生产过程以及废水处理装置等全过程进行分类收集和分质处理，选择合理的收集技术和处理工艺，加强收集的有效性、处理工艺的有效性和经济性，变无组织排放转为有组织达标排放，进而进行高效治理。

吸附技术与装备：重点发展以活性炭、活性碳纤维和吸附树脂为吸附剂的溶剂吸附回收技术和装备、以蜂窝状沸石为吸附剂的低浓度废气吸附浓缩技术和装备、以及以活性炭为吸附剂的高浓度油气回收技术和装备。应该针对不同的污染物类型、污染物沸点的高低、污染物和活性炭的反应性等有针对性地选择和开发吸附材料。

高温燃烧技术和催化燃烧技术与装备：目前技术和设备的发展已经相对比较成熟，未来国产设备的占比不断提高。但在高性能陶瓷蓄热体的制备、切换阀门的密封性和使用寿命、治理工艺的安全性设计等方面技术水平尚需进一步提升，特别是氧化催化剂的制备技术和国外相比还存在较大的差距，尚未形成具有显著竞争力的核心生产企业。

生物净化技术与装备：目前我国已经有大量的工程公司开始涉足生物技术领域，但总体技术水平和国外相比尚存在一定的差距，主要在于针对不同类型污染物的生物菌剂的筛选和培育，生物反应器的设计和应用等方面。由于我国的除臭市场巨大，生物除臭技术今后将得到快速的发展，在低浓度 VOCs 的治理领域的占比将会不断提高。

低温等离子体降解、光（催化）氧化等治理技术与装备：在“十三五”期间得到了大量的应用。但随着治理要求的不断加严，该类技术的局限性不断显现，因治理效果差，难以达到目前的标准要求，近两年逐步被淘汰出局。但在低浓度恶臭异味的治理，特别是 VOCs 达标排放以后的低浓度恶臭治理方面，低温等离子体降解技术具有较好的异味去除效果，因此在恶臭异味治理领域还具有一定的使用空间。今后需要进一步加强对低温等离子体降解技术的研究，逐步明确其适用范围和使用条件。

集成净化技术与装备：在实际的应用中，大多数情况下需要用到不同技术组

合而成的集成治理工艺，技术集成创新在工业 VOCs 治理行业显得尤为重要。由于我国 VOCs 治理工作起步较晚，针对重点行业尚未形成完整工艺设计要求和工艺包。需要大力发展多技术组合而成的集成技术，针对不同行业和工序产生的污染物的排放特征，开发成套的集成技术治理工艺。

4.3.4 机动车船尾气治理技术与装备

道路和非道路机动车排放控制技术与装备：随着机动车排放标准不断升级，内燃机尾气污染治理行业需要不断研发新技术、新设备，以满足更高标准的排放要求，主要是在柴油机和汽油机排放控制基础技术装置的基础上根据发动机对象及应用场景进行组合使用，并进行相关技术匹配与标定。例如轻型柴油商用车国四阶段采用 DOC+POC 或 DPF 两种技术路线，但在国五阶段主要采用 SCR 为主、DOC+DPF 为辅的技术路线。因此，在国五阶段大部分轻型柴油商用车必须加装 SCR 系统，将大大增加 SCR 系统的市场需求，但到国六阶段必须采用 DPF+SCR 组合技术才能满足国家标准要求，未来随着非道路移动机械、船舶用柴油机排放标准的不断升级，将进一步大幅增加 DPF 和 SCR 系统的市场需求^[53]。

船舶排放控制技术与装备：控制船舶 SO_x 排放控制措施有国内外已处于中试或实船应用阶段的 SO_x 排放控制技术，主要包括燃油替换和尾气脱硫；控制船舶颗粒物排放控制措施有主要包括机内控制和机外烟气治理（尾气除尘）两类；控制船舶尾气 NO_x 排放的措施有主要包括燃料替换、燃烧过程控制和尾气脱硝。

4.3.5 室内污染与油烟治理技术与装备

室内空气净化技术与装备：未来室内污染净化技术与装备将走向专业化、复合化、差别化和智能化，加强核心技术的研发，在未来市场的改革中取得立足之地。吸附材料与光催化剂组合，将更趋向于吸附材料与光催化剂组合使用或者混合负载使用；离子技术与吸附技术组合，在利用离子技术产生的自由基等对细菌或者病毒进行灭活的同时，活化催化剂，缩短灭菌时间；降低使用噪声技术，研究探索的驻极体材料，在保证相同的净化效率的情况下阻力更小，静音效果更好，对于静电除尘和低温等离子体技术，不断改进设备，提高净化效率的同时降低噪声；产品智能化。

油烟治理技术与装备：未来我国油烟治理技术与装备将体现在引入更多的先

进制造工艺，从而提升生产效率与品质。比如，一次性成型电源封装工艺，能够有效提升高压发生器密封性，确保电源在高压运行情况下不存在漏电现象，降低高压发生器使用故障率；高压真空灌装技术，能够有效提升高压发生器的抗干扰性和耐高温性，进而提升产品的稳定性和安全性；高速自动化焊接工艺，能有效提升焊接效率以及产品精度，为产品性能及稳定性提供基础保障。油烟治理效果的提升，还体现在运用先进物联网技术升级服务能力。比如，通过物联网信息化技术的应用，传统的油烟净化设备变得更加智能化，新的油烟净化设备及运营维护平台能够突破原有物理和地域限制，解决设备后续运营维护中的各项痛点，成为油烟治理行业融合新旧产业的重要应用。

4.3.6 重点开发的关键技术与重大核心装备展望

4.3.6.1 工业烟气治理的关键技术与核心装备

碳捕集技术与装备：CCUS 全链条技术单元关键技术与核心装备实现突破，各技术单元之间的兼容与集成优化显著提高，高效率、高通量、紧凑型吸收设备等重大核心技术装备成功开发，建成具有单管 200 万吨/年输送能力的陆地长输管道^[52]；CO₂ 化工利用、生物利用以及 CO₂ 驱替煤层气（CO₂—ECBM）、CO₂ 强化咸水开采（CO₂—EWR）等 CO₂ 地质利用和封存技术开发取得重大突破，“十四五”期间建成 3—5 项百万吨 CCUS 全链条示范工程^[8]。

除尘技术与装备：电除尘方面，低低温升级改造技术和节能优化控制是电除尘器的重点研究方向，实现与其他环保设备协同污染控制的有效结合；电除尘在协同处置煤电废气、废液、重金属等非常规污染物方面实现新的技术突破和产品开发；另外利用 CFD 等手段，开发出更高效、更节能，可实现 10mg/m³，甚至 5mg/m³ 以下，降碳效果更优的稳定排放的干式电除尘器，并得到一定规模应用。电源开发将出现百花齐放局面，更高功率、更可靠的高频电源开发出来并取得广泛应用，彻底取代工频电源；脉冲电源研发与应用研究相结合，在电除尘的节能提效中获得更多成果；中小功率的各种智能高效电源开发将进展迅速，中等功率微秒级脉冲电源技术研发获得突破并开始应用；纳秒级脉冲电源技术攻关有重大进展，中小功率级别得到应用；本体与各种高效电源的匹配技术将被掌握而更加成熟。

(1) 电袋复合除尘方面。重点开发适应各种非电行业高难烟气工况的高温

超净电袋复合除尘技术，实现非电行业颗粒物超低/低排放；重点加快以高温超净电袋为核心的高温尘硝一体化技术的工程应用研究，确保性能稳定、可靠，探索其对解决脱硝系统普遍存在的氨逃逸超标、催化剂寿命短等问题的实际效果。新一代耦合增强电袋复合除尘器在火电行业大型机组得到应用；高温尘硝一体化设备在生物质、化工等行业得到规模应用，在火电、有色等行业实现突破。

(2) 袋式除尘方面。进一步提升多种纤维超细化、超细面层梯度结构滤料、覆膜滤料、金属滤料、功能性滤料制造工艺水平及产品质量；开发完善耐高温、耐高压、长寿命智能脉冲阀；重点解决金属滤袋成本偏高、陶瓷滤管易断、局限于小烟气量应用等问题，实现金属滤袋、陶瓷滤管袋式除尘器在以钢铁、水泥、石化、焦化、有色等非电为主的行业实现大规模应用。全面掌控袋式除尘器的高效、低阻、长寿命的综合性能和环保、节能、节资、降碳多重效应。

(3) 其它除尘技术方面。长距离、大运量的高可靠、节能型管带输送技术将有望在现有技术基础上实现节能 10%以上，综合管带机、封闭料场、抑尘等系列技术以及散料输送环保岛一体化集成技术将在无组织排放治理中得到广泛应用，工业领域物料输送、存储、封闭、巡检等全过程智慧化水平将显著提高。

脱硫技术与装备：SO₂/SO₃ 协同脱除技术水平与发达国家的差距进一步缩小，甚至达到国际先进水平，SO₃ 排放浓度小于 5mg/m³；设备流场均匀性和喷淋效率更高，气液吸收效果加强；干法脱硫吸收剂吸附容量更大、稳定性更高；活性焦吸附剂容量更大，适用性更广；干法工艺中的旋转喷雾器基本实现国产化；湿法脱硫设备腐蚀和堵塞问题有所改善；资源化方面，可再生湿法脱硫工艺基本实现国产化，并在高含硫烟气领域得到推广，提升我国烟气 SO_x 的资源化利用率；脱硫废水（近）零排放的工艺得到广泛应用，满足国家对火电行业清洁生产、超低排放和近零排放的要求；脱硫副产物（硫酸、石膏、硫酸铵）回收精制技术进一步提升，产品应用领域得到拓展；“智慧脱硫”系统在改造和新建项目中得到小规模应用。

脱硝技术与装备：脱硝催化剂研制方面，低温 SCR 脱硝催化剂（<180℃）的设计、制造成型工艺达到国际领先水平，并大范围用于低负荷脱硝及非电行业低温烟气脱硝领域；适用于高尘烟气的耐磨抗碱金属中毒 SCR 催化剂能有效防止粉尘积累和催化剂中毒，在水泥玻璃等行业应用实现进一步拓展；SCR 催化

剂同时具有重金属和二噁英的脱除功能，满足更为严苛的排放标准；喷氨精准度和均匀性更高，氨逃逸减少；具有催化脱硝性能的复合功能滤筒更成熟，使用温度和强度更高；设备智能化程度进一步提升，能够实现常规工况的自动化运行；各非电行业脱硝市场逐渐由多种技术并存向单一优势技术转化；脱硝系统智能化水平得到提升。

协同控制与非常规污染物治理技术：在非电行业各种中小烟气量的各种污染排放治理领域获得应用示范，对烟气 SO_3 、Hg、Pb、As、Cd、Cr 等非常规污染物的生成/抑制机理和迁移/转化机制，多污染物一体化治理或协同治理的先进技术研究将进一步提速，相关技术研究开发有望得到更大的突破。非常规污染物与温室气体协同减排、资源化转化利用、智能化调控等关键技术和设备有望取得新的突破。在工业烟气治理领域， SO_3 、Hg 等非常规污染物排放控制将更加严格，基于湿式电除尘、低低温电除尘、袋式除尘、电袋复合除尘等烟气污染治理设备实现 SO_3 、Hg 等非常规污染物协同脱除的研究将不断深化，相关新材料、新技术、新工艺、新设备有望得到进一步开发、推广、应用；改性 SCR 催化剂重金属氧化技术、脱硫塔内添加稳定剂、脱硫废水中加络合剂等其它 Hg 控制技术也将获得有效改进。同时，二噁英污染控制更加紧迫，二噁英在线监测技术、高效色谱/高效质谱法二噁英检测技术将得到新的突破发展并在工程中应用。垃圾焚烧行业通过低温 SCR 技术和烟气深度除尘技术的推广将实现二噁英的深度减排。烟气梯级分割及热量回收等技术有望在钢铁行业二噁英减排中推广应用。此外，以氨逃逸控制为目的的脱硝流场优化、控制系统优化等技术也将得到进一步发展并在实际工程中广泛应用^[54]。

工业烟气智慧环保岛技术与装备：在以物联网、云计算和人工智能等为代表的新一代信息技术的推动下，智慧环保技术将进入增速较快的成长期，未来技术进展主要包括以下几方面：治理设备运行数据的采集将更精准、更多元、更及时，解决现阶段数据采集片面、数据价值难发挥的问题；基于海量数据的处理、挖掘和分析技术在环保大数据中得到进一步应用；此外还包括数据实时可视化展示技术、设备远程智能运维和信息安全等。

4.3.6.2 VOCs 治理的关键技术与核心装备

旋转式吸附浓缩的技术与装备：以沸石（硅铝分子筛）为吸附材料，包括各

种类型的疏水型蜂窝状沸石材料的研究开发以及旋转式吸附设备的制造技术。近年来我国已经有一批企业开始投入研发旋转式吸附浓缩装备，包括疏水沸石的研究开发，个别企业的技术水平已经接近国外水平。预计在“十四五”期间整体技术水平将会得以大幅度提升。在包装印刷和喷涂等无组织排放行业中废气的循环增浓技术（ESO）得到广泛应用，通过废气循环提高废气浓度，达到一定浓度时直接使用 RTO 等进行焚烧处理，省去了沸石转轮等吸附浓缩设备，从而达到高效治理和降低设备成本的目的。

新型材料的开发与应用：用于不同类型溶剂吸附回收，包括油气回收活性炭、含氯溶剂吸附回收用活性碳纤维和吸附树脂等。以介孔为主的油气和高浓度溶剂吸附回收用活性炭具有很大的应用市场，目前主要以进口为主，国产材料的总体性能虽然和国外产品尚存在一定的差距，但近年来已经达到了实际应用水平需要进一步提高材料性能的同时，重点应该加强应用技术研究。含氯溶剂在化工、制药等行业使用量大，目前是 VOCs 治理的一个难点问题，采用活性炭、活性碳纤维和吸附树脂进行吸附回收具有很大的应用前景，需要加强基础研究工作，尽快在材料的制造技术上实现突破。

生物净化技术与装备：生物菌剂（复合菌剂）、生物填料和针对不同污染物的生物净化工艺。按照国外在恶臭异味和 VOCs 治理中的技术应用来看，生物技术在低浓度 VOCs 和恶臭异味治理中占比达到 30%以上。由于我国恶臭异味治理市场容量巨大，生物技术在该领域将具有巨大应用前景。

集成净化技术与装备：包括废气的收集技术、预处理技术以及由多技术组合而成的集成净化技术。针对不同行业和工序产生的污染物的排放特征，开发成套的集成技术治理工艺，固化工艺设计，在同行业或同工序中快速推广应用。在船舶制造行业，露天表面喷涂中无组织废气的排放污染问题，也越来越得到重视，移动式收集—沸石吸附浓缩—催化氧化一体化技术等有很好的应用前景。

除臭用低温等离子体净化技术与装备：通过加强基础和应用研究，明确低温等离子体净化技术的适用范围和使用条件以及针对污染物适用的技术类型、适用的行业、适用的浓度范围等。通过“十三五”的应用实践来看，该技术在恶臭异味治理领域还具有较大的应用前景。

4.3.6.3 机动车船尾气治理的关键技术与核心装备

道路和非道路机动车排放控制技术与装备:对于装配汽柴油内燃机的传统车辆、新能源汽车(如混合动力等),仍将以发动机热效率提升、排放控制关键技术性能改善优化及与整车发动机匹配作为研发攻关方向,开展研究和鼓励自主研发汽油车缸内直接喷射系统(GDI)、可变进气、涡轮增压、EGR、GPF等技术,掌握燃烧和电控等核心技术,研发GDI、增压器、EGR阀、GPF等关键零部件;鼓励自主研发柴油车高压共轨(HPCR)燃油喷射系统、高效增压中冷系统、EGR、SCR、DPF等技术,掌握燃油喷射和后处理等核心技术,研发HPCR、增压器、SCR、SSCR、DPF、传感器等关键零部件^[55]。电动汽车、混合动力、氢能燃料等新能源汽车将逐步成为移动源发展的趋势,同时将带动污染控制相关领域技术进步和行业发展。未来我国将开展内燃机细微颗粒物(PM_{10/2.5})颗粒捕集器(DPF/GPF)后处理装置专用载体研发,掌握颗粒物捕集器载体的设计和制造工艺技术,满足国五排放标准对颗粒物的质量(PM)和数量(PN)净化的要求,形成国内DPF、SCR系统及关键零部件研发及产业化,并逐步打破国外技术壁垒。

船舶排放控制技术与装备:在燃料替换和发动机改造成本较高的条件下,船舶尾气治理是实现达标排放的有效措施。如何在船舶有限的空间实现多种烟气污染物的去除是科研工作者需要重点关注的问题。结合国内外船舶尾气治理技术发展趋势,多污染物协同控制技术将是今后船舶尾气污染控制技术的发展方向,其中以湿式洗涤技术为基础的湿法多污染物协同控制技术将是该类型技术的研究热点和突破方向。国际上针对固定源烟气污染控制,常采用单一污染物控制技术组合的工艺路线(如脱硝+除尘+脱硫等),但由于船舶空间、运行稳定性、安全性和经济性等原因,单一的技术路线无法在船舶尾气污染控制中推广应用。为此,经济、高效且占地小的多污染物协同控制技术日渐受到关注。

4.3.6.4 室内污染与油烟治理的关键技术与核心装备

室内空气净化技术与装备:在空气净化领域,组建由国内外相关领域的专家组开展室内空气污染与传播阻断机理与技术攻关,制定有针对性的建筑空气污染与传播阻断成套技术方案、规范和指南。随着生物技术和医疗保健行业的快速发展,高效微粒净化器将作为行业中极具价值的部件,该核心装备的研发和生产能推动中国市场的增长。

油烟治理技术与装备：通过分析餐饮、食品加工、居民烹饪等不同的安装需求和污染物排放特征，以及对油烟净化技术的整合应用，并结合结构、工艺、系统集成等系列创新，研制新一代高效油烟分离与烟气净化设备，对关键材料和设备形成规模化生产。智能高压电源、新型过滤介质开发净化 PM_{2.5}、新型吸附材料净化油烟、复合式油烟净化以及实时在线监测等五大技术是未来 10 年重点开发的关键技术。

4.4 大气环境服务商业模式创新

近年来，国内工业烟气治理领域的商业模式主要以设计采购施工（Engineering—Procurement—Construction, EPC）、O&M、BOT、BOO 等为主。未来，O&M、BOT、BOO 等第三方治理模式将更加成熟，第三方治理模式在燃煤电厂脱硫脱硝应用中比例将有增高，并将进一步扩充到燃煤电厂除尘、脱硫废水处理等领域。第三方治理支付机制、第三方计价模式、融资服务机制有望得到进一步完善。环保产业将由以装备制造业为主向以环境服务业为主转变，能提供系统解决方案的综合环境服务将得到重点发展。环境服务业创新工作将以合同环境服务为抓手，探索新的商业模式，增强环境企业核心竞争力，推动环境服务模式机制创新，解决资金问题的长短结合问题，实现从单一产业链向全产业链的发展。VOCs 的排放涉及到众多的行业，各种类型的化工和制造业园区是目前我国 VOCs 排放的主要来源。从世界各国 VOCs 的治理进程来看，首先是做好重点行业的治理工作，其次是做好产业集群（园区）的治理工作。实施“一行一策”“一市一策”“一园一策”“一企一策”，抓住重点行业、重点区域、重点企业是各地推进 VOCs 治理工作的基本思路。

对重点行业实施“一行一策”，通过制定行业排放标准、治理技术指南、治理工程技术规范及治理设施运营规范等法规文件，以规范重点行业的污染治理。根据轻重缓急，首先从排放量大的一些行业入手，如石化与化工、包装印刷、装备制造涂装等行业，逐步推进。由于产业集群对局部大气环境质量影响大，治理要求通常要高于其它区域，更需要进行综合治理。各地区推行的“一市一策”“一园一策”治理模式，即根据各地的产业结构特点，对 VOCs 排放的重点区域（城市区域、园区），根据“一行一策”提出治理规划，建立统一的监测与监管体系，对区域内的重点企业根据“一企一策”的原则进行重点治理。在条件允许、

具有规模效应的区域建立共用共享治理设施，如活性炭集中再生中心、统一溶剂提纯中心、集中喷涂中心等。集中治理模式将成为区域治理的重要的治理模式，可以大大降低单一企业的治理费用，保证治理设施的运行效果，同时有利于政府对污染源的有效管理。共享治理设施可以由第三方负责投资建设，也可以由政府、排污企业投资建设，第三方负责运营管理，各排污企业购买服务；检测监管体系通常由政府投资建设，第三方负责运营管理，政府购买服务。

4.5 行业发展格局展望

4.5.1 产业规模与产业结构发展

我国火电行业的烟气治理市场、技术路线与装备等已相对成熟，并已有相应的行业技术规范，行业主要龙头企业市场占有率相对稳定，未来市场集中度也将处于相对稳定状态。随着非电行业超低排放改造的深度推进，未来拥有能够稳定达标和经济性好的非电行业治理技术的公司市场占有率将不断提升。VOCs 污染治理市场，目前尚有大量的污染源有待治理，同时大部分的现有 VOCs 污染治理设施有待提升改造，治理工程建设业务量将会继续增长，未来第三方服务运营的比重会逐渐提高。机动车船尾气治理市场中，整体来看国外企业与国内领先企业处于主导地位。总体来看，2020 年以来，我国经济发展内外部环境均发生深刻复杂变化，不稳定、不确定性增多，但总体看大气污染治理市场将得到持续发展。预计到 2025 年大气污染治理年市场规模约 3200 亿—3600 亿元。

4.5.2 产业发展能力

预计 2021—2025 年，大气污染治理产业发展能力在盈利能力、资产运营能力、融资能力方面都能基本保持稳定。对于行业龙头企业，在继续提升企业核心竞争力，特别是重视拓展环境服务业，利用技术与资本的双轮驱动，掌握良好服务模式，产品有望持续出口。盈利能力、资产运营能力、融资能力均能稳步提升，拥有更强的产业发展能力；对于在细分领域或产业链中掌握专有技术的中小型企业，可以利用技术创新扩大竞争优势，应用良好的服务获得更好的产业发展能力；对于核心竞争力较弱的企业，如在技术创新、服务创新上没有突破，将陷入更困难的境地。

4.5.3 企业经营发展模式

从发达国家大气治理的经验与相关行业发展历程来看，整个大气污染治理领域市场释放更早，行业内结构性调整也更快。未来 10 年，伴随火电、钢铁行业超低排放改造市场接近尾声，建材等其他非电行业市场将逐步释放。以火电行业治理市场为主营的龙头企业经营受到了一定的影响，企业将加强非电行业的烟气治理技术装备的研发与优化，并通过投资、并购等方式拓展新业务。从产业角度看，大气行业细分子行业多，产业结构散，产业集中度低，但增长速度快，并购整合是产业大势所趋。从上市公司角度看，上市公司所处细分行业有限，产业链环节有限，规模有限，而上市公司在寻找发展空间和业绩压力下，积极寻求扩大规模提高市场占有率，延长产业链，进入相关领域，以及获取国际先进技术，并购重组将成为重要成长方式。

4.5.4 行业竞争或合作等多元化格局

未来将形成以国资企业和民营企业中的龙头企业为主的行业竞争多元化格局。央企、国企纷纷入局，环保行业整合加速。近年来，环保产业市场竞争将愈加激烈，行业“洗牌”的趋势更加明显，具有较强资金实力、资本运作能力和创新型的企业将呈现巨大发展潜力，成为行业发展的主要力量，而同质化竞争严重、缺乏核心技术和创新能力的企业将逐步淘汰退出。“混改组合”将国资企业的规范与民营企业的灵活、国资企业的公平与民营企业的效率、国资企业的监督与民营企业的激励有机融合，有助于环保行业科技创新和提质增效。从进出口情况看，先进环保技术装备通过产品结构调整，利用装备生产制造成本优势，扩大市场份额，打造一批行业龙头企业，培育一批“专精特新”企业，形成技术和市场的积累，提供整体解决方案并对外提供技术、核心关键设备和零部件等，参与国际市场分工，参与国际市场开拓，向“一带一路”沿线国家分享中国生态文明建设经验。

4.6 政策与资金需求

4.6.1 政策需求

4.6.1.1 需求侧引导

建立大气污染物减排完善的政策法规和标准管理体系。包括排放标准体系、能够实现污染源达标排放的政策性法规体系（技术指引）以及相关的监督检查、

奖励处罚等配套管理制度。建立完善的排放标准体系。鼓励各地方政府，根据地方污染物排放特点、产业结构、总量控制等方面，制定符合本地实际的地方排放标准，鼓励出台环保绩效政策。在排放标准制实施后，关键配备技术指南，指导企业尽快实现达标排放。为了对污染源进行有效的监管，实现长期稳定的达标排放，需要制定合理有效的监督检查措施与检查方法。运用经济激励措施对排污单位进行奖惩，按照治理设施的投入按比例进行政府资金补助，由政府出资（或部分出资）安装在线监测设施等。

进一步完善环保绩效评价体系，有力推动差异化控制措施落地。建议各省根据《重污染天气重点行业应急减排措施制定技术指南（2020年修订版）》，加快开展水泥、焦化、石化等重点行业企业绩效评定，确定企业绩效分级。根据绩效评定结果，建立重污染天气应急减排管控清单并实时更新。加强现场检查，完善企业绩效评级动态管理。

4.6.1.2 供给侧支持

扩大所得税税收优惠范围，将脱硝设备、除尘设备、脱硫废水治理设备和VOCs治理设备（如吸附回收、吸附浓缩、RTO、RCO、生物降解）等环保设备纳入“三免三减半”税收优惠范围。同时扩大税收优惠目录，将代表性的新型环保设备列入税收优惠目录，对新技术、新产品，特别是节能降耗、智慧控制等技术应用给予支持，对运营服务（第三方服务等）给予税收优惠。

提高资源综合利用产品和劳务增值税优惠力度，参照垃圾发电税收优惠模式，对资源综合利用烟气治理劳务、脱硫石膏、回收溶剂（油品）、废催化剂、废活性炭等实行增值税即征即退100%退税政策，切实落实国家现有对资源综合利用、环境服务等税收优惠政策，保证政策有效、及时执行。

4.6.2 资金需求

大气污染治理企业尤其是民营企业融资较难，而烟气治理项目周期长、垫资要求高、回款进度慢，资金需求大，需要金融机构加大对民营烟气治理企业融资的支持：一是明确以第三方治理资产质押等形式融资信贷支撑政策。银行等金融业应积极拓展排污权质押融资等金融产品和服务，并在贷款额度、贷款利率、还款条件等方面给予优惠。二是支持第三方治理的环境服务公司发行企业债券、中小企业集合债券、短期融资券、中期票据等，鼓励融资性担保机构加大对其担

保力度并给予补贴。

4.7 建议

4.7.1 政府端

(1) 建议政府进一步推动环保外部成本内部化，进一步实施财政奖补、税收调节、产能调节等激励政策。借鉴火电行业脱硫脱硝电价、超低排放电价的成功经验，从国家层面加快制定非电行业推进超低排放差别化电价激励政策。同时建议政府结合《排污许可管理条例》的实施，继续加大环境执法力度，继续对环境违法行为加大处罚，提高违法成本。

(2) 鉴于“十四五”时期 O₃ 治理任务艰巨，O₃ 前体物 VOCs 因点多面广，治理难度很大。建议政府出台强有力扶持政策，大力推广园区“环保管家”式集中治理模式，竞标优选有实力的企业，根据园区的特点，制定整体治理全产业链工艺，实现良性治理，科学精准治理，闭环治理。

(3) 发展中国家和新兴经济体的工业化为大气污染治理产业发展提供了重要机遇，我国大气环保装备企业“走出去”具备一定的基础，但也面临困境。建议政府研究出台更大力度的政策，支持大气环保装备在全球疫情得到控制后“走出去”，比如出口退税、对“一带一路”沿线国家建立环保示范工程补助、在援外项目中考虑国产环保装备等。

(4) 生态环境部 2018 年底已经起草了《恶臭污染物排放标准》征求意见稿，将臭气浓度排放限值加严，建议国家尽快予以发布实施该标准，并鼓励有条件的地方实施比国家标准更加严格的地方标准。

4.7.2 企业端

(1) 行业龙头企业和综合实力较强的企业要开展行业发展前沿和共性关键技术瓶颈攻关，推进基础研究，推动本领域具有重大创新突破的新一代重大技术装备的开发应用，拥有核心技术，增强国际国际竞争力，引领行业技术进步和产业发展。

(2) 中小企业要聚焦技术装备核心部件或材料等方面的技术创新能力建设和制造工艺水平提高，通过专业化、精细化、特色化、新颖化发展，在各自的细分领域做精做强做大。

(3) 企业要加大知识产权保护力度，加快新技术、新材料、新工艺、新产

品专利申请和专利质量提升，切实保护核心技术，挖掘利用专利资源，合理规避专利陷阱，支撑企业发展。

4.7.3 行业协会

（1）行业协会进一步完善诚信机制、外部监督机制、解决纠纷机制等，通过进行企业信用评价、产品质量认证、先进技术奖励等方式规范引导企业行为，大力弘扬和宣传行业内“重质量、守信誉”，推崇诚实守信，弘扬正能量。逐步强化和提升行业自律，推进行业健康、高质量发展。

（2）在推动环保技术装备标准国际化方面发挥更大作用，利用与国际行业组织对接的有利条件，引导企业积极参加国际标准化组织工作，大力推进环保技术装备领域更深层次的技术、标准和规则互通互认，推动中国技术标准与国际接轨，不断提升我国标准国际化水平，持续提高我国环保装备产业国际竞争力。

参考文献

- [1] 中国科学院创新发展研究中心, 中国生态环境技术预见研究组.中国生态环境 2035 技术预见[M], 2020.
- [2] 日本、德国、美国的服务业占 GDP 比重都超过 70%, 这说明了什么呢? [EB/OL].
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1659152973631823271&wfr=spider&for=pc>, 2020-2.
- [3] 竹涛等.国内外挥发性有机物排放标准对比研究[J].矿业科学学报, 2020, 5(2).
- [4] 张国宁等.国外固定源 VOCs 排放控制法规与标准研究[J].环境科学, 2011, 32(12).
- [5] 欧盟国家排放限额指令(National Emission Ceiling Directive, NECD) (2016/2284/EC),
Official Journal of the European Union.
- [6] SUN Li, 孙丽, GE Yang, 等.国外汽车尾气排放标准分析与启示[C].中国环境科学学会, 2015.
- [7] 全球碳捕集与封存研究院, 2020.全球碳捕集与封存现状[R], 2020.
- [8] 蔡博峰, 李琦, 张贤等, 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2021) --中国 CCUS 路径研究[R].生态环境部环境规划院, 中国科学院武汉岩土力学研究所, 中国 21 世纪议程管理中心, 2021.
- [9] 商务部国际贸易经济合作研究院, 商务部对外投资和经济合作司等单位.对外投资合作国别 (地区) 指南 印度 (2019 年版) [J], 2019.
- [10] 制造业增加值:中国第 1、美国第 2、德国第 4、韩国第 5、印度第 6、意大利第 7.[EB/OL].
https://www.sohu.com/a/325506216_100110525, 2020.
- [11] 伍赛特.车用柴油机微粒排放控制技术综述[J].机电产品开发与创新, 2019, 32(05):78-80.
- [12] Andreas Bäck, Enhancing ESP Efficiency for High Resistivity Fly Ash by Reducing the Flue Gas Temperature, 11th International Conference on Electrostatic Precipitation.
- [13] Alstom Environmental Control olutions.[EB/OL].<http://www.vok.nu/wp-content/uploads/2015/04/Panndagarna-2015-Christer-Mauritzson.pdf>, 2021-05
- [14] Air quality control systems.[EB/OL].<https://power.mhi.com/catalogue/pdf/aqcs.pdf>, 2020-8.
- [15] Together, we make the world a cleaner place.[EB/OL].<https://www.steinmueller-Babcock.com/about/>, 2021-2.
- [16] Plug&Play Fabric Filters. [EB/OL].<https://www.Hamon.com/files/Image/solutions>, 2021-2.

- [17] Hybrid Module Type Precipitator.[EB/OL].<http://www.kc-cottrell.com/kc/web/eng/biz/biz010106.html>, 2021-1.
- [18] Mott Utility Line and Bulk Filters.[EB/OL].<https://files.valinonline.com/userfiles/documents>, 2020-11.
- [19] Porous metal fibre filter elements & systems for industrial gases.[EB/OL].
<https://www.bekaert.com/>, 2020-10.
- [20] Filtration Group.[EB/OL].<https://store.filtrationgroup.com/>, 2020-10.
- [21] MECS DYNAWAVE REVERSE JET SCRUBBING TECHNOLOGY.[EB/OL].
<https://cleantechnologies.dupont.com/industries/cement/>, 2020-09.
- [22] Cansolv technology.[EB/OL].<https://www.power-technology.com/contractors/environmental/cansolv/>, 2021-01
- [23] Topsoe's Emission Management Solution--DeNO_x.[EB/OL].<https://missionenergy.org/soxnox/presentations/Haldor%20Topsoe-Sachin%20Panwar.pdf>, 2020-11.
- [24] Emissions Reduction Catalyst Technology.[EB/OL].<https://www.cormetech.com>, 2020-12.
- [25] Umbrella-SNCR: New Technology for Selective Non-Catalytic Reduction of NO_x.[EB/OL].
<https://www.ge.com/power/services/boilers/upgrades/nox-solutions>, 2021-01.
- [26] NO_x Removal.[EB/OL].<https://www.Hamon.com/solutions/nox-removal/>, 2020-10.
- [27] GORE Mercury and SO₂ Control System for Incineration.[EB/OL].[https://www.gore.com/resources/brochure-gore-mercury-and-SO₂-control-system-for-incineration](https://www.gore.com/resources/brochure-gore-mercury-and-SO2-control-system-for-incineration), 2020-9.
- [28] Regenerative Activated Coke Technology.[EB/OL].<https://www.Hamon.com/solutions/>, 2020-11.
- [29] Efficient and cost-effective removal of sulfur dioxide, nitrogen oxides and particulates from flue gases.[EB/OL].<https://info.topsoe.com/nox-sulfur-dioxide-removal-0>, 2020-11.
- [30] Advances in multi-pollutant Control.[EB/OL].<https://usea.org/sites/default/files/>, 2020-11.
- [31] Air quality control systems.[EB/OL].<https://power.mhi.com/catalogue/pdf/aqcs.pdf>, 2020-11.
- [32] 中国电力企业联合会.中国电力行业年度发展报告 2020[R], 2020-6.
- [33] 辽宁省环境科学研究院, 中国铸造协会, 沈阳铸造研究所.铸造工业大气污染物排放标准(征求意见稿)编制说明[M], 2018-8.

- [34] 中国环境保护产业协会电除尘委员会.2019年电除尘行业发展报告[R], 2019.
- [35] 中国环境保护产业协会袋式除尘委员会.2019年袋式除尘行业技术发展报告[R], 2019.
- [36] 中国环境保护产业协会脱硫脱硝委员会.2019年脱硫脱硝行业发展报告[R], 2019.
- [37] 中国环境保护产业协会废气净化委员会.2019年有机废气治理行业发展报告[R], 2019.
- [38] 王计广, 方茂东, 谢振凯.2019年机动车污染防治行业发展评述及展望[J].中国环保产业, 2020(03):23-25.
- [39] 中国环境保护产业协会.2008-2017年全球环境技术专利热度分析报告(大气污染防治领域)[J], 2018.
- [40] 中国电力企业联合会.中电联2018年度火电厂环保产业信息[J], 2018.
- [41] 宋七棣, 姚群等.2019年袋式除尘行业发展评述和2020年发展展望[J].中国环保产业, 2020.
- [42] 姚群.政策加持 我国袋除尘行业须由大转强.[EB/OL].<http://huanbao.bjx.com.cn/news/20200827/1100197.shtml>, 2020-8.
- [43] 曹晓满, 刘亚文等, 超低排放燃煤电厂污染控制设备协同脱汞研究进展[J].洁净煤技术, 2020.1-10.
- [44] 生态环境部.机动车污染防治技术政策[M], 000014672/2017-02062.
- [45] 环境保护部科技标准司.中国环境服务业发展报告(2015)[R], 2015.
- [46] 生态环境部.“十四五”大气污染防治专项规划编制工作已启动.[EB/OL].
<http://env.people.com.cn/n1/2020/0515/c1010-31710781.html>, 2020.
- [47] 朱法华, 张静怡, 徐振等.我国工业烟气治理现状、困境及建议[J].中国环保产业, 2020, 10:13-16.
- [48] 生态环境部.重点行业挥发性有机物综合治理方案[EB], 2019-6.
- [49] Manufacturers of Emission Controls Association, TECHNOLOGY FEASIBILITY FOR HEAVY-DUTY DIESELTRUCKS IN ACHIEVING 90% LOWER NO_x STANDARDS IN2027, 2020.2.
- [50] 全球能源监测、绿色和平印度分部和塞拉俱乐部.繁荣与衰落 2020: 追踪全球燃煤电厂开发[J], 2020.
- [51] 方茂东, 王计广.2018年机动车污染防治行业发展概述及发展展望[J].中国环保产业, 2019(04):13-14+17.

- [52] 蔡博峰,刁玉杰,林千果等.中国碳捕集利用与封存技术发展路线图(2019)[M]. 科学技术部社会发展科技司, 中国 21 世纪议程管理中心编著, 2019.9.
- [53] 王志坚, 王晓华, 郭圣刚, 李建文, 王意宝, 孔梦茜, 帅石金.满足重型柴油机超低排放法规的后处理技术现状与展望[J].环境工程, 2020, 38(09):159-167.
- [54] 王圣.燃煤电厂非传统大气污染物控制展望[J].中国电力, 2018, 51(8):173-178.
- [55] 蓝祖龙.重型车柴油机国六排放后处理技术分析[J].技术与市场, 2020, 27(03):78-80.