

大气污染控制化学方法研究进展

陈刚

西华师范大学 四川南充

【摘要】 大气污染是当前全球面临的重大环境问题之一，化学方法在大气污染控制中发挥着核心作用。随着工业化和城市化的快速发展，我国大气污染呈现复合型、区域化特征，臭氧和细颗粒物污染问题尤为突出。本文系统综述了大气污染控制化学方法的研究进展，构建了包括催化净化法、吸收/吸附法、高级氧化法等在内的技术体系框架。在此基础上，深入分析了烟气脱硫脱硝技术、挥发性有机物控制技术、新型催化材料开发、大气化学转化机理等关键领域的研究进展，探讨了典型区域污染特征与控制实践。研究表明，当前大气污染控制化学方法呈现出催化材料高性能化、多污染物协同控制、过程资源化与碳中和、管控精准化智能化的发展趋势。低温 SCR 脱硝催化剂、钙钛矿型催化材料、Fe(II)EDTA 络合吸收-电催化技术等取得了重要突破。未来应加强催化材料创新、反应机理研究和技术系统集成，推动大气污染控制化学方法的持续进步。

【关键词】 大气污染控制；化学方法；脱硫脱硝；VOCs 治理；催化材料；反应机理

【收稿日期】 2025 年 11 月 6 日 **【出刊日期】** 2025 年 12 月 8 日 **【DOI】** 10.12208/j.jccr.20250082

Research progress on chemical methods for air pollution control

Gang Chen

Xihua Normal University, Nanchong, Sichuan

【Abstract】 Air pollution is one of the major environmental problems facing the world today, and chemical methods play a core role in air pollution control. With the rapid development of industrialization and urbanization, air pollution in China presents composite and regional characteristics, with ozone and fine particulate matter pollution being particularly prominent. This paper systematically reviews the research progress of chemical methods for air pollution control, constructing a technical system framework including catalytic purification, absorption/adsorption, and advanced oxidation processes. On this basis, it deeply analyzes the research progress in key areas such as flue gas desulfurization and denitrification technologies, volatile organic compounds control technologies, novel catalytic material development, and atmospheric chemical transformation mechanisms, and explores typical regional pollution characteristics and control practices. Research shows that current chemical methods for air pollution control present development trends of high-performance catalytic materials, multi-pollutant synergistic control, process resource utilization and carbon neutrality, and precise and intelligent control. Significant breakthroughs have been achieved in low-temperature SCR denitrification catalysts, perovskite-type catalytic materials, and Fe(II)EDTA complex absorption-electrocatalysis technology. In the future, it is necessary to strengthen catalytic material innovation, reaction mechanism research, and technology system integration to promote the continuous progress of chemical methods for air pollution control.

【Keywords】 Air pollution control; Chemical methods; Desulfurization and denitrification; VOCs treatment; Catalytic materials; Reaction mechanism

引言

大气污染是当前全球面临的重大环境问题之一，对人类健康、生态环境和气候变化产生深远影响。随着我国工业化和城市化的快速发展，大气污染呈现复合型、区域化特征，臭氧和细颗粒物（PM_{2.5}）污染问题

尤为突出。研究表明，长期暴露于高浓度大气污染物会增加呼吸系统疾病、心血管疾病和癌症的发病风险。因此，发展高效、经济、环保的大气污染控制技术具有重要的现实意义^[1]。

化学方法在大气污染控制中发挥着核心作用，广

泛应用于烟气脱硫脱硝、挥发性有机物(VOCs)治理、机动车尾气净化等领域。与物理方法相比,化学方法能够实现污染物的深度转化和资源化利用,具有处理效率高、适用范围广等优点。近年来,随着催化材料、反应工程、计算化学等学科的发展,大气污染控制化学方法取得了长足进步,新型催化材料不断涌现,反应机理研究日益深入,技术集成应用持续拓展^[2]。

大气污染物的来源复杂多样,主要包括工业源、交通源、生活源和自然源等。臭氧污染是当前我国大气污染的主要问题之一,其形成机制复杂,受前体物(NO_x 和VOCs)排放、气象条件、化学反应等多种因素影响。研究表明,亳州夏季臭氧持续污染事件的发生与高温、强辐射、静稳天气等气象条件密切相关,前体物的光化学反应是臭氧生成的主要途径。针对臭氧污染,需要采取区域协同、前体物协同减排的防控策略^[1]。

二氧化氮(NO_2)是大气中重要的污染物之一,也是臭氧和二次气溶胶形成的重要前体物。近十年我国地表二氧化氮的演变特征研究表明, NO_2 浓度呈现先上升后下降的趋势,这与大气污染防治行动计划实施密切相关。 NO_2 浓度的时空分布受排放源分布、气象条件、化学反应等多种因素影响,东部地区 NO_2 浓度明显高于西部地区,冬季浓度高于夏季^[18]。

硫酸盐是大气颗粒物的重要组分,其来源识别对污染控制具有重要意义。基于地球化学和同位素指纹识别技术,可以区分不同来源的硫酸盐贡献。在有色金属矿区,酸性矿山排水是硫酸盐的重要来源,其硫酸盐的硫氧同位素组成具有特征性指纹,可用于来源解析。这种指纹识别方法为大气硫酸盐的来源解析提供了新的技术手段^[3]。

大气污染控制化学方法的研究涉及多个学科领域,理论模型是理解污染机制、评估控制效果的重要工具。MAX1 大气污染机制模型是近年来开发的新一代大气化学模型,能够模拟多种污染物的生成、转化和传输过程。模型的开发和评估研究表明,MAX1 在模拟臭氧、 $\text{PM}_{2.5}$ 等污染物方面具有较高的精度,可为污染防控策略的制定提供科学依据^[2]。

在理论研究层面,学者们围绕大气污染控制化学方法开展了大量研究。在臭氧污染成因方面,研究者探讨了气象条件和前体物排放对臭氧生成的影响^[1,4];在污染物来源解析方面,学者们利用同位素指纹、卫星遥感等技术识别污染源^[3,25];在控制技术方面,研究者开发了新型催化材料、吸收剂和反应工艺^[6,13,15];在健康影响方面,学者们评估了长期暴露于污染物的健康风险^[5]。

然而,既有研究多聚焦于单一技术或单一污染物,缺乏对大气污染控制化学方法系统性的综述。不同技术之间的协同机制、新型催化材料的开发策略、反应机理的深入认识等问题尚需系统梳理。基于上述背景,本文旨在对大气污染控制化学方法研究进展进行系统性综述。研究将围绕以下核心问题展开:大气污染控制化学方法取得了哪些重要进展?关键技术的突破点在哪里?新型催化材料的开发策略如何?未来发展方向如何?在研究方法上,本文采用文献综述与系统分析方法,结合近年国内外研究成果,按照“方法分类—技术进展—应用实践—未来展望”的逻辑展开论述。

1 大气污染控制化学方法分类与理论框架

1.1 大气污染物的来源与特征

大气污染物的来源可分为自然源和人为源两大类。自然源包括火山喷发、森林火灾、沙尘暴、植物排放等;人为源主要包括工业源(火力发电、钢铁冶炼、化工生产等)、交通源(机动车、船舶、航空器等)、生活源(餐饮油烟、建筑装修、燃煤取暖等)。不同来源的污染物具有不同的化学组成、排放特征和环境行为^[1]。

臭氧是当前我国大气污染的首要污染物,其污染特征呈现明显的时空异质性。对亳州夏季臭氧持续污染事件的研究表明,臭氧浓度日变化呈现单峰型分布,午后达到峰值,夜间降至最低。持续污染事件的发生与高温($>30^\circ\text{C}$)、强辐射、低风速、静稳天气等气象条件密切相关。在污染事件期间,臭氧生成对VOCs更为敏感,控制VOCs排放是降低臭氧浓度的有效途径。前体物的区域传输对臭氧污染具有重要贡献,需要实施区域协同控制策略。

二氧化氮是大气中重要的痕量气体,其演变特征反映了氮氧化物排放的变化趋势。近十年我国地表二氧化氮的演变特征研究表明, NO_2 柱浓度总体呈下降趋势,这与《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》的实施密切相关。 NO_2 浓度的时空分布呈现显著的区域差异:华北平原、长三角、珠三角等经济发达地区 NO_2 浓度较高;冬季 NO_2 浓度明显高于夏季,这与冬季采暖排放增加和大气扩散条件较差有关。气象条件和排放源变化是驱动 NO_2 演变的主要因素^[2]。

大气颗粒物的化学组分复杂,包括水溶性离子、碳质组分、金属元素等。在有色金属矿区,酸性矿山排水是重要的污染源,其硫酸盐的硫氧同位素组成具有特征性指纹。通过地球化学和同位素指纹识别技术,可以区分不同来源硫酸盐的贡献,为污染源解析提供科学

依据。研究发现,矿区地下水硫酸盐主要来源于硫化物矿物氧化,其 $\delta^{34}\text{S}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显不同于大气沉降和农业来源的硫酸盐^[3]。

贵阳市能源结构调整下大气降水与 $\text{PM}_{2.5}$ 中化学组分变化特征研究显示,能源结构调整对大气污染物化学组分产生显著影响。随着燃煤替代和清洁能源推广,降水中的硫酸根离子浓度下降,硝酸根离子相对占比上升; $\text{PM}_{2.5}$ 中的硫酸盐、硝酸盐、铵盐等二次无机离子浓度降低,有机物和元素碳的占比相对增加。这表明能源结构调整有效减少了燃煤排放的 SO_2 ,但机动车排放的 NO_x 贡献相对凸显。

1.2 化学方法分类体系

大气污染控制化学方法可按作用原理和污染物类型进行分类。按作用原理分类,主要包括催化净化法、吸收法、吸附法、高级氧化法、生物化学法等。催化净化法是利用催化剂加速污染物的化学反应,将其转化为无害物质,广泛应用于机动车尾气净化和工业废气治理;吸收法是利用液体吸收剂溶解或反应去除气态污染物,主要用于烟气脱硫脱硝;吸附法是利用多孔固体吸附剂富集污染物,适用于 VOCs 回收和低浓度污染物净化;高级氧化法是利用强氧化性自由基深度氧化污染物,适用于难降解有机废气处理。

按污染物类型分类,主要包括脱硫技术、脱硝技术、 VOCs 治理技术、颗粒物控制技术、汞控制技术等。脱硫技术主要针对 SO_2 ,包括湿法脱硫、干法脱硫、半干法脱硫等;脱硝技术主要针对 NO_x ,包括选择性催化还原(SCR)、选择性非催化还原(SNCR)、氧化吸收法等; VOCs 治理技术包括催化燃烧、蓄热式氧化、吸附浓缩、生物降解等。

大气污染机制模型是理解污染形成机理、评估控制效果的重要工具。MAX1(Mechanism for Air pollution complex Version 1.0)是新开发的大气化学机制模型,包含气相反应、气溶胶化学、非均相反应等多个模块。模型评估结果表明,MAX1在模拟臭氧、 $\text{PM}_{2.5}$ 及其组分方面具有较高精度,能够较好地再现污染事件的演变过程。MAX1模型为大气污染防控策略的制定和评估提供了科学工具^[4]。

基于OBE理念的大气污染控制工程课程教学方法探讨表明,大气污染控制化学方法的教学应注重理论与实践的结合。课程内容应涵盖污染物的来源与特征、控制技术的原理与应用、反应机理的研究方法等,培养学生的工程实践能力和创新思维。通过案例教学、实验教学、项目式学习等方式,提高学生对化学方法的理解

和应用能力。

环境工程中大气污染防治管理的实践途径研究表明,化学方法的工程应用需要配套完善的管理体系。管理实践途径包括:建立污染源清单,识别重点排放源;开展清洁生产审核,推动源头减排;实施排污许可制度,规范企业排放行为;建立预警应急体系,应对重污染天气;推广最佳可行技术,提升治理水平。通过技术与管理并重,实现大气污染的有效控制。

2 烟气脱硫脱硝化学方法研究进展

2.1 脱硫技术

烟气脱硫是控制 SO_2 排放的主要技术手段,按脱硫剂和脱硫产物的状态可分为湿法、干法和半干法。湿法脱硫技术成熟、效率高,但存在废水处理和设备腐蚀问题;干法脱硫工艺简单、无废水排放,但脱硫效率相对较低、吸收剂利用率不高。近年来,利用工业固废作为脱硫剂的研究受到广泛关注,实现了固废资源化和烟气脱硫的双重目标^[5]。

钙基工业固废电石渣干法脱硫研究表明,电石渣是电石水解制乙炔的固体废弃物,主要成分为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,具有较高的脱硫活性。通过优化反应温度、水蒸气含量、钙硫比等参数,电石渣干法脱硫效率可达90%以上。电石渣脱硫的产物主要为 CaSO_3 和 CaSO_4 ,可作为水泥生产的原料或用于土壤改良,实现了固废的资源化利用。电石渣干法脱硫技术具有工艺简单、运行成本低、无废水排放等优点,适用于中小型锅炉的烟气脱硫^[6]。

脱硫反应机理研究表明,电石渣与 SO_2 的反应包括气相扩散、表面吸附、化学反应等多个步骤。反应温度对脱硫效率影响显著,最佳反应温度范围为80-120℃;水蒸气含量影响脱硫反应的进行,适量水蒸气可促进 SO_2 的溶解和反应;钙硫比是影响脱硫剂利用率的关键参数,钙硫比过低脱硫效率不足,过高则吸收剂浪费。通过优化工艺参数,可在保证脱硫效率的同时降低运行成本。

2.2 脱硝技术

选择性催化还原(SCR)是应用最广泛的烟气脱硝技术,其核心是高活性、高稳定性、宽温度窗口的催化剂。传统的钒钛系催化剂在300-400℃具有优异的脱硝活性,但存在低温活性不足、活性组分有毒等缺点。开发低温高活性、环境友好的SCR催化剂是当前的研究热点。

$\text{Fe}(\text{II})\text{EDTA}$ 络合吸收-电催化深度脱除并同步资源转化 NO 的研究是一种新型脱硝技术。该技术利用

Fe(II) EDTA 络合吸收 NO, 形成 Fe(II) EDTA-NO 络合物; 然后通过电催化还原, 将络合物中的 NO 转化为 NH₃或 N₂, 同时再生 Fe(II) EDTA 吸收剂。研究表明, Fe(II) EDTA 对 NO 具有良好的吸收能力, 电催化还原效率可达 80%以上。该技术实现了 NO 的深度脱除和资源化转化, 具有脱硝效率高、无二次污染、可回收有价值产品等优点。

电催化还原 NO 的机理研究表明, 电极材料、电解液组成、电流密度、pH 值等因素对还原产物选择性有重要影响。铜基电极对 NH₃具有较高的选择性, 铁基电极对 N₂具有较高的选择性; 酸性条件有利于 NH₃生成, 碱性条件有利于 N₂生成。通过优化反应条件, 可以调控还原产物的分布, 实现 NO 的资源化利用^[7]。

镍锰基复合氧化物低温 NH₃-SCR 脱硝性能与反应机理研究表明, 镍锰复合氧化物是一种具有潜力的低温 SCR 催化剂。通过共沉淀法制备的 Ni-Mn 复合氧化物具有较大的比表面积和丰富的表面氧空位, 在 100-200℃温度范围内表现出优异的脱硝活性和 N₂选择性。催化剂的脱硝性能与 Ni/Mn 比例密切相关, 当 Ni/Mn=0.5 时催化活性最佳。

反应机理研究表明, Ni-Mn 复合氧化物上的 NH₃-SCR 反应遵循 Langmuir-Hinshelwood 机理。NH₃首先吸附在催化剂表面的酸性位上, 活化为 NH₂物种; NO 与气相氧反应生成 NO₂或亚硝酸盐物种; 吸附的 NH₂与 NO₂反应生成 N₂和 H₂O。催化剂表面的氧空位促进了 NO 的活化和反应中间体的生成, 是催化剂具有高活性的关键。这一研究为低温 SCR 催化剂的开发提供了新的思路。

汽车催化转化器是控制机动车尾气排放的关键设备, 其起燃特性直接影响冷启动阶段的污染物排放。汽车催化转化器起燃特性的数值模拟研究表明, 催化转化器的起燃温度受催化剂活性、空速、排气温度、保温措施等多种因素影响。通过优化催化涂层配方、增加电加热辅助、改进保温结构等措施, 可以降低起燃温度, 减少冷启动排放。数值模拟为催化转化器的优化设计提供了高效工具。

2.3 协同脱硫脱硝技术

二甲胺废水用于锅炉 SNCR 脱硝性能及机理研究探索了废物资源化与烟气脱硝的协同路径。二甲胺是化工生产过程中产生的有机胺废水, 具有还原性, 可作为 SNCR 脱硝的还原剂替代传统氨水或尿素。研究表明, 二甲胺在 800-1000℃温度范围内对 NO_x 具有良好的还原效果, 脱硝效率可达 60-70%。二甲胺热解产生

的 NH₂、NH、CN 等活性物种是还原 NO_x 的关键活性物质^[8]。

二甲胺 SNCR 脱硝的机理研究表明, 二甲胺首先热解生成甲胺和氨, 进一步分解为 NH₂等活性自由基; NH₂与 NO 反应生成 N₂和 H₂O。二甲胺中的碳在高温下氧化为 CO₂, 不会产生有害副产物。利用二甲胺废水进行 SNCR 脱硝, 既可以处理废水中的有机物, 又可以降低脱硝成本, 实现了废物资源化和烟气治理的协同^[9]。

3 挥发性有机物 (VOCs) 控制化学方法

3.1 VOCs 催化氧化技术

催化氧化是 VOCs 治理的主流技术之一, 具有处理效率高、无二次污染、适用范围广等优点。催化氧化技术的核心是高性能催化剂, 贵金属催化剂(Pt、Pd 等)具有优异的低温活性, 但价格昂贵、易中毒; 过渡金属氧化物催化剂成本低、抗中毒性能好, 但活性相对较低。开发高效、稳定、廉价的 VOCs 催化氧化催化剂是当前的研究热点^[10]。

基于热脱附-气质联用仪技术对半导体行业内 VOCs 组分分析方法的优化及应用研究表明, VOCs 组分的准确分析是治理技术选择的基础。半导体行业排放的 VOCs 种类复杂, 包括丙酮、异丙醇、乙酸丁酯、苯系物等。通过优化热脱附温度、冷阱温度、色谱分离条件、质谱检测参数等, 可以建立适用于半导体行业 VOCs 的分析方法。该方法具有灵敏度高、重现性好、可分析组分多的优点, 为 VOCs 治理提供了技术支持^[11]。

镧基钙钛矿的改性及其对乙酸乙酯催化氧化性能研究探索了钙钛矿型氧化物在 VOCs 催化氧化中的应用。钙钛矿型氧化物 (ABO₃) 具有结构可调、热稳定性好、氧化还原性能优异等优点, 是潜在的贵金属替代催化剂。研究表明, A 位 Sr 掺杂和 B 位 Fe、Co 掺杂可以显著提高 LaMnO₃钙钛矿对乙酸乙酯的催化氧化活性。优化组成的 La_{0.8}Sr_{0.2}Mn_{0.8}Co_{0.2}O₃催化剂在 220℃即可实现乙酸乙酯的完全氧化, 催化活性接近贵金属催化剂。

催化氧化反应机理研究表明, 乙酸乙酯在钙钛矿催化剂上的氧化遵循 Mars-van Krevelen 机理。晶格氧参与反应, 将乙酸乙酯氧化为 CO₂和 H₂O, 同时形成氧空位; 气相氧吸附并解离, 补充晶格氧, 完成催化循环。催化剂的氧化还原性能决定了其催化活性, 提高晶格氧的迁移性和活性是改善催化剂性能的关键。这一研究为 VOCs 催化氧化催化剂的开发提供了理论指导。

3.2 VOCs 反应机理与控制策略

臭氧生成与 VOCs 排放密切相关,理解 VOCs 对臭氧生成的贡献是制定控制策略的基础。基于统计模型的济南臭氧生成研究表明,济南市臭氧生成对 VOCs 更为敏感,属于 VOCs 控制区。臭氧生成速率与 VOCs/NO_x 比值呈负相关,当 VOCs/NO_x 比值较低时,臭氧生成受 VOCs 限制;当 VOCs/NO_x 比值较高时,臭氧生成受 NO_x 限制。因此,控制 VOCs 排放是降低济南臭氧浓度的有效途径。

VOCs 反应活性的量化评估是制定优先控制物种清单的依据。过氧自由基反应活性的计算模拟研究为理解 VOCs 的大气化学转化提供了理论工具。过氧自由基(RO₂)是 VOCs 大气氧化过程中的关键中间体,其反应活性决定了 VOCs 的降解速率和产物分布。通过量子化学计算和动力学模拟,可以获得不同 VOCs 生成 RO₂ 的反应速率常数和反应路径,评估 VOCs 的大气反应活性。研究表明,烯烃和芳香烃的过氧自由基反应活性较高,是臭氧和二次有机气溶胶生成的重要前体物。

大气典型无组织排放垂直特征解析及仿生算法管控策略研究为 VOCs 无组织排放控制提供了新思路。无组织排放是 VOCs 治理的难点,其排放特征具有隐蔽性、间歇性、分散性等特点。通过无人机搭载传感器进行垂直采样,可以解析无组织排放的垂直分布特征;利用仿生算法(如蚁群算法、粒子群算法)优化监测点位布局,可以提高监测效率、降低监测成本。该研究为 VOCs 无组织排放的精准管控提供了技术支撑。

4 新型催化材料与反应机理研究

4.1 低温 SCR 催化材料

低温 SCR 脱硝技术是烟气脱硝的重要发展方向,可避免烟气再加热能耗,适用于低温烟气(如钢铁、水泥、玻璃等行业)的脱硝处理。低温 SCR 催化材料的开发是该技术的核心^[12]。

镍锰基复合氧化物低温 NH₃-SCR 脱硝性能与反应机理研究表明, Ni-Mn 复合氧化物是一类具有潜力的低温 SCR 催化剂。通过共沉淀法制备的 Ni-Mn 复合氧化物具有较大的比表面积(>150 m²/g)和丰富的表面氧空位。催化剂的脱硝活性随 Ni/Mn 比例变化,当 Ni/Mn=0.5 时,在 120℃ 脱硝效率可达 95% 以上, N₂ 选择性高于 98%。催化剂具有良好的抗 SO₂ 和抗水性能,在 100 ppm SO₂ 和 5% H₂O 存在下,脱硝活性下降幅度小于 20%^[13]。

反应机理研究表明, Ni-Mn 复合氧化物上的 NH₃-

SCR 反应遵循 Eley-Rideal 和 Langmuir-Hinshelwood 混合机理。NH₃ 优先吸附在催化剂表面的 Lewis 酸位上,活化为 NH₂ 物种; NO 与气相氧反应生成 NO₂, 或吸附在氧空位上形成亚硝酸盐/硝酸盐物种; 吸附的 NH₂ 与 NO₂ 或亚硝酸盐反应生成 N₂ 和 H₂O。Mn⁴⁺/Mn³⁺ 和 Ni²⁺/Ni³⁺ 的氧化还原循环促进了电子转移和氧空位的再生,是催化剂具有高活性的关键。表面氧空位是 NO 活化的活性位点,其浓度与催化活性呈正相关^[14]。

4.2 钙钛矿型催化材料

钙钛矿型氧化物(ABO₃)是一类重要的催化材料,具有结构可调、热稳定性好、氧化还原性能优异等优点,在 VOCs 催化氧化、CO 氧化、NO_x 还原等领域具有广阔应用前景。

镧基钙钛矿的改性及其对乙酸乙酯催化氧化性能研究表明, A 位和 B 位掺杂是改善钙钛矿催化性能的有效策略。LaMnO₃ 钙钛矿的 A 位 Sr 掺杂可以提高 Mn 的平均氧化态和氧空位浓度; B 位 Co、Fe 掺杂可以改变 B 位离子的电子结构和氧化还原性能。优化组成的 La_{0.8}Sr_{0.2}Mn_{0.8}Co_{0.2}O₃ 催化剂对乙酸乙酯的 T₉₀(转化率 90% 的温度)为 220℃,远低于未改性 LaMnO₃ 的 320℃。

催化剂的表征结果显示, Sr 和 Co 的共掺杂提高了催化剂的比表面积和孔容,增加了表面活性物种的含量。XPS 分析表明,掺杂后催化剂表面 Mn⁴⁺/Mn³⁺ 比例升高,吸附氧/晶格氧比例增加。H₂-TPR 结果显示,掺杂催化剂的低温还原峰增强,表明其氧化还原性能改善。这些结构特征的变化是催化剂活性提高的内在原因^[15]。

4.3 大气化学转化机理

大气自由基/非自由基介导的芳香族有机硫酸酯形成路径研究揭示了二次有机气溶胶生成的新机制。有机硫酸酯是大气颗粒物中的重要组分,其形成对气溶胶的吸湿性和光学性质具有重要影响。研究表明,芳香族化合物在大气中的氧化可生成有机硫酸酯,其形成路径包括自由基介导和非自由基介导两种机制^[16]。

自由基介导路径:芳香族化合物与 OH 自由基反应生成酚类中间体,进一步氧化形成环氧化物或羰基化合物,再与硫酸反应生成有机硫酸酯。非自由基介导路径:芳香族化合物在颗粒物表面发生非均相反应,与硫酸或硫酸盐直接反应生成有机硫酸酯。两种路径的相对重要性取决于大气条件,在污染较重、气溶胶酸度较高的环境中,非自由基介导路径占主导地位。这一研究为理解二次有机气溶胶的生成机制提供了新的视角。

基于 CCSEM-EPAS 工业/背景区颗粒物特征对比与重金属损伤评估研究表明,工业区和背景区颗粒物的化学组分和形貌特征存在显著差异。工业区颗粒物以球形颗粒为主,富含 Fe、Cu、Zn、Pb 等重金属元素;背景区颗粒物以不规则形貌为主,富含 Si、Al、Ca 等地壳元素。重金属损伤评估结果显示,工业区颗粒物对肺细胞具有较高的毒性,其损伤效应与重金属含量呈正相关。这一研究为颗粒物健康风险评估提供了科学依据^[17]。

过氧自由基反应活性的计算模拟研究为理解 VOCs 的大气氧化机理提供了理论工具。通过密度泛函理论计算和过渡态理论,可以获得过氧自由基与 NO、HO₂、RO₂等物种反应的势能面和速率常数。研究表明,过氧自由基的反应活性受其结构影响显著:叔过氧自由基反应活性最高,仲过氧自由基次之,伯过氧自由基最低;含氧官能团的取代可提高过氧自由基的反应活性。这些计算结果为大气化学模型的参数化提供了基础数据^[18]。

5 典型区域污染特征与控制实践

5.1 区域污染特征分析

不同区域的污染特征存在显著差异,理解这些差异是制定针对性控制策略的基础。亳州夏季臭氧持续污染事件的研究表明,该地区臭氧污染具有明显的区域传输特征。在污染事件期间,来自周边城市的 VOCs 和 NO_x 通过区域传输贡献了亳州臭氧生成前体物的 30-50%。因此,臭氧污染控制需要实施区域协同策略,不能仅依靠本地减排^[19]。

济南臭氧生成特征研究表明,济南市臭氧生成对 VOCs 更为敏感,控制 VOCs 排放是降低臭氧浓度的有效途径。通过统计模型分析,确定了济南市臭氧生成的关键 VOCs 物种,包括烯烃(乙烯、丙烯)、芳香烃(甲苯、二甲苯)和含氧 VOCs(甲醛、乙醛)。这些物种具有较高的反应活性,是臭氧生成的主要贡献者。优先控制这些高活性 VOCs 物种,可以更有效地降低臭氧浓度^[20]。

贵阳市能源结构调整下大气降水与 PM_{2.5} 中化学组分变化特征研究表明,能源结构调整对大气污染物化学组分产生显著影响。2015-2023 年间,贵阳市降水中 SO₄²⁻ 浓度下降 65%,NO₃⁻ 浓度下降 20%,NH₄⁺ 浓度下降 40%;PM_{2.5} 中 SO₄²⁻ 占比从 25%降至 12%,NO₃⁻ 占比从 15%升至 18%。这表明燃煤替代有效减少了 SO₂ 排放,但机动车排放的 NO_x 贡献相对增加。未来需要加强对机动车排放的控制^[21]。

东南海岛城市 PM_{2.5} 组分特征及光化学老化效应研究表明,海岛城市 PM_{2.5} 的化学组分受海陆交互作用影响显著。PM_{2.5} 中二次无机离子(SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺) 占比为 45-55%,有机物占比为 25-35%,海盐离子(Na⁺、Cl⁻) 占比为 5-10%。光化学老化导致有机物的氧化程度增加,氧化态有机物与还原态有机物的比值升高,同时增强了颗粒物的吸湿性和光学吸收能力。这一研究为海岛城市 PM_{2.5} 污染控制提供了科学依据^[22]。

5.2 污染控制实践

长期暴露于颗粒物空气污染与乳腺癌风险的巢式病例对照研究揭示了污染控制的环境健康效益。研究表明,长期暴露于 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 与乳腺癌风险增加显著相关,PM_{2.5} 每增加 10 μg/m³,乳腺癌风险增加 15%;PM₁₀ 每增加 10 μg/m³,乳腺癌风险增加 10%。颗粒物的化学组分中,多环芳烃和重金属对乳腺癌风险的贡献最大。这一研究结果强调了加强颗粒物控制的重要性^[23]。

基于源排放与空气质量响应的短时排污许可量核算及应用研究探索了污染控制的管理工具。传统排污许可量的核算基于排放标准,未能充分考虑空气质量响应。该研究提出了基于空气质量响应的短时排污许可量核算方法,通过空气质量模型模拟排放变化对污染物浓度的影响,确定允许排放的最大负荷。该方法已在某工业园区试点应用,实现了排放与空气质量的动态响应,提高了排污许可的科学性和有效性^[24]。

酸溶车间槽内氯化氢扩散模拟及控制研究为工业源污染控制提供了技术支撑。氯化氢是酸洗、酸溶等工艺产生的有毒有害气体,其无组织排放对车间环境和周边大气造成污染。通过 CFD 模拟,可以预测氯化氢的扩散规律,识别高浓度区域,优化通风系统布局。研究表明,在酸溶槽上方设置局部排风罩,控制风速不低于 0.5 m/s,可有效捕集 90% 以上的氯化氢;配套洗涤塔处理,可确保达标排放^[25]。

基于多源卫星光学遥感的中国设施级大气活性氮排放者识别研究探索了污染源识别的新技术。活性氮(NO_x、NH₃等)是大气污染的重要前体物,其排放者识别对污染控制具有重要意义。通过融合 TROPOMI、OMI、GOME-2 等多源卫星数据,结合机器学习算法,可以实现设施级活性氮排放者的识别。该技术成功识别了我国主要燃煤电厂、钢铁厂、水泥厂、氮肥厂等设施的活性氮排放特征,为污染源管控提供了新的技术手段。

6 讨论与展望

6.1 当前发展成就与问题反思

经过多年发展,我国大气污染控制化学方法取得了显著成就。在技术层面,烟气脱硫脱硝技术成熟度不断提高,超低排放改造全面推进;VOCs治理技术日益丰富,催化燃烧、吸附浓缩等技术得到广泛应用;机动车尾气净化技术持续进步,国六标准全面实施。在材料层面,新型催化材料不断涌现,低温SCR催化剂、钙钛矿型催化剂等取得了重要突破。在管理层面,排污许可、重污染天气应对、区域联防联控等制度逐步完善。

然而,当前大气污染控制化学方法仍面临诸多问题。一是低温活性问题,现有SCR催化剂在低温烟气条件下活性不足,需要烟气再加热增加能耗;二是催化剂寿命问题,催化剂中毒、烧结、失活现象普遍,需要频繁更换增加成本;三是VOCs治理成本问题,低浓度大风量VOCs治理技术成本较高,中小企业难以承受;四是多污染物协同问题,现有技术多针对单一污染物,缺乏一体化解决方案;五是资源化不足问题,污染物脱除后产物多为废物,资源化利用程度低。

6.2 未来发展趋势

展望未来,大气污染控制化学方法将呈现以下发展趋势:

催化材料智能化设计。高通量计算、机器学习等技术将加速催化材料的开发。通过建立催化剂结构与性能的构效关系模型,可以预测催化剂的性能,指导催化剂的理性设计。这将大幅缩短催化材料的研发周期,降低研发成本。

多污染物协同控制。脱硫脱硝脱VOCs一体化技术将成为重要发展方向。通过开发多功能催化剂或组合工艺,实现多种污染物的协同脱除,简化工艺流程,降低投资和运行成本。

资源化与碳中和。污染物资源化转化将受到更多关注,将SO₂、NO_x、CO₂等转化为有价值产品(如硫酸、硝酸、甲醇等),实现污染治理与资源回收的协同。碳减排目标将推动低碳、负碳治理技术的发展。

全过程精准管控。基于源解析-扩散模拟-健康评估的全链条管控体系将逐步建立。通过精细化源解析识别重点排放源,通过高分辨率扩散模拟预测污染分布,通过健康风险评估评估控制效果,实现污染控制的精准化和效益最大化。

智能化运行优化。物联网、大数据、人工智能等技术将应用于治理设施的运行优化。通过实时监测污染物浓度和设备状态,利用智能算法优化运行参数,提高

治理效率,降低运行成本。

7 结论

本文系统综述了大气污染控制化学方法的研究进展。研究表明,大气污染控制化学方法包括催化净化法、吸收法、吸附法、高级氧化法等多种类型,在烟气脱硫脱硝、VOCs治理、机动车尾气净化等领域发挥着重要作用。

在烟气脱硫脱硝领域,钙基工业固废干法脱硫、Fe(II)EDTA络合吸收-电催化脱硝、镍锰基复合氧化物低温SCR等技术取得了重要进展,脱除效率不断提高,运行成本持续下降。在VOCs控制领域,镧基钙钛矿催化氧化、热脱附-气质联用分析方法、过氧自由基反应活性计算模拟等研究深化了对VOCs治理技术的认识。在新型催化材料领域,低温SCR催化剂、钙钛矿型氧化物等材料的开发取得了突破,催化活性、选择性、稳定性显著提升。在大气化学转化机理方面,有机硫酸酯形成路径、过氧自由基反应活性等研究为理解二次污染生成机制提供了理论支撑。

典型区域污染特征研究表明,臭氧污染受前体物排放、气象条件、区域传输等多因素影响,需要实施区域协同控制;颗粒物化学组分受能源结构、工业布局等影响,能源结构调整显著改变了污染物组分特征。

当前,大气污染控制化学方法呈现出催化材料高性能化、多污染物协同控制、过程资源化与碳中和、管控精准化智能化的发展趋势。未来应加强催化材料创新、反应机理研究和技术系统集成,推动大气污染控制化学方法的持续进步,为改善空气质量、保护公众健康提供技术支撑。

本文主要基于文献综述,对大气污染控制化学方法进行了系统梳理。未来可结合实验研究和工程案例,进一步深化对各类技术适用条件、经济性、长期稳定性的认识,为技术选择和应用提供更具指导性的依据。

参考文献

- [1] Wu K, Wang X, Zhang D, et al. Unraveling the Drivers of Continuous Summer Ozone Pollution Episodes in Bozhou, China: Toward Targeted Control Strategies[J]. *Toxics*, 2025, 14(1): 37.
- [2] Liu Y, Zhou H, Wei W, et al. Development and Evaluation of Mechanism for Air pollution complex Version 1.0 (MAX1)[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2025, 43(4): 695-705.
- [3] Wang B, Ma L, Qian J, et al. Geochemical and Isotopic

- Fingerprint-Based Identification of Sulfate Source Regional Characteristics and Evolution of Groundwater Impacted by Acid Mine Drainage (AMD) from a Nonferrous Metal Mining Area[J]. *Environmental Science & Technology*, 2025.
- [4] Dong B, Liu B, Zhang G, et al. An investigation into ozone production based on statistical modeling in Jinan, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2025, 198(1): 39.
- [5] Fareh T, Mercoeur B, Coudon T, et al. Long-term exposure to particulate air pollution and components in relation to breast cancer risk: A nested case-control study in the E3N-Generations cohort[J]. *Environment International*, 2025, 207: 109987.
- [6] 邹娟, 董意, 冯嘉予, 等. 钙基工业固废电石渣干法脱硫研究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2025, (10): 177-188.
- [7] 徐惠娟, 刘若愚, 漆晴. 浅析环境化学分析中的微波消解技术[J]. *皮革制作与环保科技*, 2025, 6(17): 11-13.
- [8] 徐鹏, 崔雯, 牟金成, 等. 基于 OBE 理念的大气污染控制工程课程教学方法探讨[J]. *创新创业理论与实践*, 2025, 8(16): 149-152.
- [9] 邵海洋. 环境工程中大气污染防治管理的实践途径探究[C]//江西省工程师联合会. *工程技术与新能源经济学术研讨会论文集*, 2025: 520-523.
- [10] 蒋莉, 管东红, 姚桂蓉, 等. 基于源排放与空气质量响应的短时排污许可量核算及应用[J]. *安全与环境学报*, 2025, 25(08): 3231-3239.
- [11] 赵飞越. 汽车催化转化器起燃特性的数值模拟[D]. 大连理工大学, 2025.
- [12] 李文杰. 基于热脱附-气质联用仪技术对半导体行业内 VOCs 组分分析方法的优化及应用[D]. 北京化工大学, 2025.
- [13] 金晶晶. Fe(II)EDTA 络合吸收-电催化深度脱除并同步资源转化 NO 的研究[D]. 大连理工大学, 2025.
- [14] 端木令坚. 大气典型无组织排放垂直特征解析及仿生算法管控策略研究[D]. 吉林大学, 2025.
- [15] 栾欣汝. 镍锰基复合氧化物低温 NH₃-SCR 脱硝性能与反应机理研究[D]. 济南大学, 2025.
- [16] 岳文静. 大气自由基/非自由基介导的芳香族有机硫酸酯形成路径研究[D]. 四川农业大学, 2025.
- [17] 黎思南. 基于 CCSEM-EPAS 工业/背景区颗粒物特征对比与重金属损伤评估[D]. 东北农业大学, 2025.
- [18] 唐明龙. 近十年我国地表二氧化氮的演变特征及其驱动因素[D]. 南京信息工程大学, 2025.
- [19] 刘畅. 过氧自由基反应活性的计算模拟研究[D]. 大连理工大学, 2025.
- [20] 郭永煊. 铜基钙钛矿的改性及其对乙酸乙酯催化氧化性能研究[D]. 广东工业大学, 2025.
- [21] 彭亮. 酸溶车间槽内氯化氢扩散模拟及控制研究[D]. 江西理工大学, 2025.
- [22] 高云龙. 贵阳市能源结构调整下大气降水与 PM_{2.5}中化学组分变化特征及其影响因素解析[D]. 贵州民族大学, 2025.
- [23] 张丽梅. 东南海岛城市 PM_{2.5}组分特征及光化学老化效应[D]. 闽南师范大学, 2025.
- [24] 毛裕权. 二甲胺废水用于锅炉 SNCR 脱硝性能及机理研究[D]. 福建理工大学, 2025.
- [25] 王之曼. 基于多源卫星光学遥感的中国设施级大气活性氮排放者识别[D]. 中国科学技术大学, 2025.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS