

大气环境中PM_{2.5}和O₃协同控制策略研究进展

刘在平

湖北万绿生态环境科技有限公司, 湖北 荆门

收稿日期: 2024年3月18日; 录用日期: 2024年4月20日; 发布日期: 2024年6月14日

摘要

目前, PM_{2.5}与O₃是影响中国环境空气质量最基本的污染物, 两者之间具有密切的关联性和相互作用机制, 就大气环境中PM_{2.5}与O₃形成机制、作用关系进行分析, 探讨两者之间的协同控制策略研究进展, 展望未来的研究方向和挑战, 旨在为改善空气质量和大气污染预防和应对措施制订提供科学依据和技术支持。

关键词

PM_{2.5}, O₃, 协同控制, 策略

Research Progress of Collaborative Control Strategies for PM_{2.5} and O₃ in Atmospheric Environment

Zaiping Liu

Hubei Wanlv Ecological Environmental Technology Co. Ltd., Jingmen Hubei

Received: Mar. 18th, 2024; accepted: Apr. 20th, 2024; published: Jun. 14th, 2024

Abstract

At present, PM_{2.5} and O₃ are the most basic pollutants affecting ambient air quality in China, and there is a close correlation and interaction mechanism between them. This paper analyzes the formation mechanism and interaction relationship between PM_{2.5} and O₃ in atmospheric environment, discusses the research progress of collaborative control strategies between them, and looks forward to future research directions and challenges. The aim is to provide scientific basis and technical support for the improvement of air quality and the formulation of air pollution prevention and response measures.

Keywords

PM_{2.5}, Ozone, Cooperative Control, Tactics

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 大气污染成为全球关注的环境问题之一, 其中, PM_{2.5} (细颗粒物)和 O₃ (臭氧)成为影响空气质量的两大最基本关键污染物。PM_{2.5} 能深入人体呼吸系统, 对人体健康构成严重威胁[1] [2], 而地面 O₃ 则是一种强氧化剂, 能刺激呼吸道, 损害植物, 甚至影响整个生态系统的平衡。尽管两者的来源和形成机制各不相同[3], 但它们在大气环境中的反应却相互关联, 形成了一个复杂的交互作用系统[4]。卫文[5]对全球 372 座城市开展研究发现, PM_{2.5} 和 O₃ 污染复合暴露对居民的死亡风险存在联合效应。

由于 PM_{2.5} 和 O₃ 之间存在着相互影响, 仅针对单一污染物的控制策略往往难以取得理想的改善效果。因此, 协同控制成为解决这一难题的关键策略, 不仅可以有效降低 PM_{2.5} 浓度, 同时也能减缓地面 O₃ 的生成, 这一策略的实施涉及复杂的科学研究和技术创新, 需要跨学科的合作和综合治理方法。姜华等[6]对我国 PM_{2.5} 与 O₃ 协同控制提出坚持科学精准治气、坚持综合系统治气、坚持严格依法治气和坚持多维协同治气等理论性建议。本文探讨大气环境中 PM_{2.5} 和 O₃ 协同控制的研究进展, 分析目前的策略和技术, 以及展望未来的研究方向和挑战, 旨在为改善空气质量提供科学依据和技术支持。

2. PM_{2.5} 和 O₃ 的形成机制

PM_{2.5} 和 O₃ 虽然都是大气中的基本污染物, 但它们的来源和形成机制有所不同, 这些差异对于制定有效的协同控制策略至关重要。

2.1. PM_{2.5} 的形成

PM_{2.5} 是指环境空气中空气动力学当量直径小于或等于 2.5 μm 的颗粒物, 也称细颗粒物[7], 能够携带多种有害物质, 并深入到肺部的深处, 它们主要来源于工业排放、汽车尾气、建筑施工、农业活动(如焚烧废弃物)以及自然源(如森林火灾和沙尘暴等)。此外, PM_{2.5} 还可以通过大气化学反应生成, 如硫酸氧化物和氮氧化物(NO_x)等前体物质在大气中经过复杂的光化学反应形成细颗粒物。

2.2. O₃ 的形成

地面 O₃ 是通过阳光照射下, 氮氧化物(NO_x)和挥发性有机化合物(VOCs)等前体物质[8] [9]在大气中发生光化学反应生成的。这个过程主要发生在温暖和阳光充足的条件下, 因此, O₃ 污染在夏季尤为严重。与 PM_{2.5} 不同, O₃ 是一种次生污染物, 即它不是直接从污染源排放出来, 而是在大气中通过化学反应形成的。

2.3. PM_{2.5} 与 O₃ 之间的相互作用

PM_{2.5} 和 O₃ 之间存在着复杂的相互作用[10] [11]。一方面, PM_{2.5} 中的某些组分(如黑炭)可以吸收太阳辐射, 影响大气的温度和稳定性, 进而影响臭氧的形成; 另一方面, PM_{2.5} 可以携带大量的 NO_x 和 VOCs

进入大气中，为 O_3 的生成提供“原料”，陈楠等[12]研究了湖北省 2015~2020 年 $PM_{2.5}$ 和 O_3 复合污染演变，结果表明： $PM_{2.5}$ 和 O_3 协同控制重点为在保持现有 NO_x 控制力度基础上强化 VOCs 控制，遏制暖季和东部区域 O_3 浓度上升，加强冬季和中部 $PM_{2.5}$ 治理。因此，控制 $PM_{2.5}$ 的排放不仅有助于直接降低颗粒物污染，也对减少地面 O_3 污染水平具有间接效应。

3. 协同控制策略的研究进展

在应对 $PM_{2.5}$ 和 O_3 污染的协同控制方面，研究和实践已经取得了一系列的进展[13]-[34]。这些策略旨在通过综合的方法减少两种污染物的排放和浓度，进而改善环境空气质量。以下是一些关键的研究进展和控制策略：

3.1. 源头防控、末端减排

控制 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的最直接方法是减少其前体物质的排放，尤其是 VOCs 作为二者的重要前体物质，是 $PM_{2.5}$ 和 O_3 协同控制的关键，源头控制包括限制含 VOCs 物质的使用，使用低含量 VOCs 物质或水性涂料代替高含量 VOCs 物质，对工业排放 VOCs 废气设施进行提标升级改造，生态环境部门严格的监督管理，以及提高汽车排放标准。例如，推广使用低硫燃料和清洁能源，如天然气和可再生能源，可以显著降低硫氧化物和氮氧化物的排放量。

3.2. 优化交通结构

鉴于交通运输是 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 的重要来源之一，优化交通结构和提升公共交通系统效率对于减少污染至关重要。政策措施包括发展低排放和零排放车辆，比如推广燃气汽车、氢燃料汽车和新能源汽车，以及实施交通限行措施、优化交通流量来减少机动车的使用，这些措施能显著减少 NO_x 和 VOCs 排放，从而减少 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的生成。

3.3. 工业领域的技术创新

提升工业生产的能效和引入清洁生产技术可以减少污染物的排放。此外，采用先进的污染控制技术，如烟气脱硫和脱硝设施，可以直接减少工业排放中的 SO_2 (二氧化硫)和 NO_x 等废气。

3.4. 城市规划和绿化

通过优化城市规划和增加城市绿化，可以改善城市微气候，降低热岛效应，从而间接减少 O_3 的生成。此外，植被可以通过吸收 CO_2 (二氧化碳)和某些污染物(如 VOCs)来净化空气。

3.5. 公众意识和参与

提高公众对空气污染问题的认识，并鼓励大家参与减少污染的行动，也是协同控制策略中的一个重要方面，这包括采用环保的生活方式，比如使用公共交通工具、减少使用易挥发性有机化合物的产品等。

尽管已经取得了一定的进展，但协同控制 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的挑战依然存在，包括技术创新的需要、政策执行的难度以及公众参与的提高等。未来的研究需要进一步探索更有效的协同控制策略，尤其是在不断变化的环境和气候条件下，如何适应和应对这些挑战。

4. 案例研究和实践应用

协同控制 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的策略已在国内外得到实践，取得了显著的改善效果。以下是一些具有代表性的成功案例：

为了改善严重的空气污染问题，北京市实施了一系列协同控制措施，包括关闭或搬迁污染严重的工业企业，推广使用清洁能源，如使用电、天然气代替煤炭、生物质成型燃料，以及严格控制机动车排放，比如更新老旧车辆和发展新能源汽车。此外，北京市还加强了城市绿化工程，增加了公园和绿地面积。这些综合措施显著降低了 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度，并在一定程度上控制了 O_3 污染，有效改善了北京市的环境空气质量。

美国加利福尼亚州由于其特殊的地理和气候条件，长期以来一直面临 O_3 污染问题，为了应对这一挑战，该州采取了一系列严格的排放控制措施，包括对工业排放的严格限制，推广低排放汽车和零排放汽车，以及实施严格的燃油挥发性物质控制。这些措施不仅减少了 NO_x 和 VOCs 的排放，也有效降低了地面 O_3 的浓度。另外，这些政策也促进了清洁技术和可持续交通方式的发展。

为了减少空气污染，英国伦敦设立了低排放区(LEZ)和超低排放区(ULEZ)，限制高排放车辆进入市中心。这一措施通过减少交通排放直接降低了 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_x 的排放量。同时，伦敦还推广了自行车使用和公共交通，鼓励市民选择更环保的出行方式。这些政策的实施显著改善了伦敦的环境空气质量，并为其他城市提供了可借鉴的经验。

这些案例展示了通过实施综合控制策略可以有效地协同控制 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染。这不仅需要政府的政策支持和科技创新，还需要公众的广泛参与和支持。

5. 未来研究方向和挑战

尽管目前在协同控制 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 方面已经取得了一定的进展，但仍然面临着诸多挑战[35]和研究空白。未来的研究需要关注以下几个关键方向，以提高控制策略的有效性和可持续性。

5.1. 细化污染源解析

$\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的生成和分布受多种因素影响，包括气象条件、地理位置和人类活动的强度等，虽然它们的形成机制不同，但 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 在城市和工业化地区的浓度往往同时较高，这是因为这些地区的人为活动同时释放了 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的前体物质，控制这两种污染物的关键在于减少人为排放的 NO_x 和 VOCs ，以及通过政策和技术手段降低工业排放和交通尾气排放。因此，更准确地识别和量化不同污染源对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度的贡献，特别是在城市和工业区[36] [37] [38] [39]，可以帮助制定更有针对性的控制措施。

5.2. 气候变化的影响

全球气候变化对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的生成和分布产生了深远的影响，气候变化通过改变气温、风速、降水模式和大气边界层的条件，间接影响了这些污染物的化学生成过程、输送、稀释和沉降，全球气候变化通过多种机制影响 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的生成和分布，这些影响提示我们在制定空气质量管理策略时，需要考虑到气候变化的综合影响，并采取适应性措施以应对未来可能加剧的空气污染问题。

值得一提的是，全球气候变化如何通过上述因素影响 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的生成和分布，以及如何调整协同控制策略以适应这些变化还有待深入研究。

5.3. 技术创新与应用

在 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的控制领域，技术创新与应用是推动空气质量改善的关键因素。开发新的减排技术和污染控制设备，特别是对工业排放和汽车尾气，以及提高现有技术的效率和经济性。同时，部署先进的空气质量监测网络，实时监测 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 等污染物的浓度，为污染控制提供数据支持也至关重要。建立大数据分析预测模型，利用人工智能和大数据技术，预测空气污染趋势，为制定应急减排措施提供依据。

5.4. 政策与法规

政策和法规在协同控制 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 中起到框架性的作用，许多国家和地区制定了严格的空气质量标准和排放标准，限定了工业、交通运输和农业等关键行业的污染物排放上限。此外，通过经济激励政策鼓励采用清洁技术和能源，如对低排放车辆的税收减免、对采用清洁生产技术的企业提供补贴等，这些政策有效促进污染物减排。制定和实施更严格的环境保护法规和标准，同时确保政策的连贯性和长期稳定性，以促进技术创新和投资。

5.5. 公众参与

公众参与是实现 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 协同控制目标的重要组成部分，通过增强公众意识、鼓励环保行为和促进社会参与，可以有效地降低这两种污染物的排放量和浓度。提高公众对空气污染问题的认识，并鼓励采取更环保的生活方式和行为，如使用公共交通、电动能源车、减少使用易挥发性有机化合物的产品等。

公众不仅可以为减少 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的排放做出贡献，还能推动社会和政府采取更加有效的空气质量管理策略，共同改善生活环境。因此，公众的参与和行动对于实现长期的空气质量改善目标至关重要。

5.6. 跨领域区域合作

加强不同学科领域之间的合作，如环境科学、大气化学、公共健康、能源政策和经济学等，以促进综合解决方案的发展。考虑到大气污染物传输和区域间，甚至是国家间的相互作用，研究区域内各城市间、各国间的协同控制策略，以实现区域、国家环境空气质量整体改善。

面对这些挑战和未来的研究方向，需要政府、科研机构、企业和公众共同努力，通过科技创新、政策支持和社会参与，实现 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的有效协同控制，保护公共健康和环境安全。

6. 结论

$\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 空气污染对人类健康和环境造成了严重影响，了解这些污染物的来源、产生机制以及它们带来的环境影响，对于制定有效的控制策略和保护生活环境至关重要，协同控制 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 是实现空气质量持续改善的关键，通过技术手段、政策与法规的综合应用，虽已取得了一定的成效，然而，面临的挑战仍然存在，需要通过持续的研究和创新、完善政策以及公众参与等多方面的努力，共同推进空气质量的改善。

参考文献

- [1] Huo, M., Ken, Y., Chen, F., *et al.* (2022) Spatial-Temporal Variation in Health Impact Attributable to $\text{PM}_{2.5}$ and Ozone Pollution in the Beijing Metropolitan Region of China. *Atmosphere*, **13**, Article 1813. <https://doi.org/10.3390/atmos13111813>
- [2] Lian, Z., Qi, H., Liu, X., *et al.* (2022) Ambient Ozone, and Urban $\text{PM}_{2.5}$ Co-Exposure, Aggravate Allergic Asthma via Transient Receptor Potential Vanilloid 1-Mediated Neurogenic Inflammation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **243**, Article 114000. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114000>
- [3] 姚楠. 基于天气分型的珠三角 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧污染特征与来源解析[D]: [硕士学位论文]. 东莞: 东莞理工学院, 2023.
- [4] Guan, Y., Xiao, Y., Rong, B., *et al.* (2023) Heterogeneity and Typology of the City-Level Synergy between CO_2 Emission, $\text{PM}_{2.5}$, and Ozone Pollution in China. *Journal of Cleaner Production*, **405**, Article 136871. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136871>
- [5] 卫文. $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧复合暴露对健康有协同危害[J]. 家庭医学, 2024(1): 32.
- [6] 姜华, 高健, 李红. 我国大气污染协同防控理论框架初探[J]. 环境科学研究, 2022, 35(3): 601-610.
- [7] 中国环境科学研究院, 中国环境监测总站. GB3095-2012 环境空气质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.

- [8] 岳萌萌, 王玉莹, 潘星任, 等. $\text{PM}_{2.5}$ 与 O_3 协同控制下 VOCs 的时空污染特征研究进展[J]. 广东化工, 2024, 51(2): 65-66, 53.
- [9] 冯春莉, 饶永才, 李辉, 等. 徐州市臭氧污染特征及前体物协同控制策略分析[J]. 环境科学学报, 2023, 43(5): 325-332.
- [10] 潘冬燕, 赵承军. 关于 $\text{PM}_{2.5}$ 与臭氧的作用机制及二者协同控制的思考[J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(18): 108-110.
- [11] 晁俊杰, 苏倩, 陈敏. $\text{PM}_{2.5}$ 与臭氧污染形成机制及协同防控思路[C]//上海筱虞文化传播有限公司. 工程技术创新与管理研讨会论文集: 2022 年卷. 2022: 18-20.
- [12] 陈楠, 陈立, 王莉莉, 等. 2015-2020 年湖北省 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧复合污染特征演变分析[J]. 环境科学研究, 2022, 35(3): 659-672.
- [13] 刘炳江. 加强 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧协同控制深入打好蓝天保卫战[J]. 中国环境监察, 2021(12): 40-43.
- [14] 李红, 彭良, 毕方, 等. 我国 $\text{PM}_{2.5}$ 与臭氧污染协同控制策略研究[J]. 环境科学研究, 2019, 32(10): 1763-1778.
- [15] 张家煜. 化工园区 $\text{PM}_{2.5}$ 与臭氧污染协同控制研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.
- [16] 张韬, 魏志强, 焦国嵩. 三个治污总体要求背景下的 $\text{PM}_{2.5}$ 与臭氧协同控制建议[J]. 价值工程, 2022, 41(24): 10-12.
- [17] 丁君. $\text{PM}_{2.5}$ 与臭氧污染协同控制的挑战与应对策略[J]. 中国高新科技, 2022(13): 99-101.
- [18] 戴海夏, 安静宇, 黄成, 等. 长江三角洲区域大气 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧污染协同控制路径[J]. 科学通报, 2022, 67(18): 2100-2112.
- [19] 曾丽. $\text{PM}_{2.5}$ 与臭氧污染协同控制策略探究[J]. 低碳世界, 2021, 11(9): 29-30.
- [20] 刘诚, 邢成志, 胡启后, 等. 地基超光谱立体遥感网络——一种探究中国 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 协同控制的新策略[J]. 工程(英文), 2022, 19(12): 71-83, 85.
- [21] 胡建林, 张远航. 加强 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 协同控制, 持续改善我国环境空气质量[J]. 科学通报, 2022, 67(18): 1975-1977.
- [22] 刘鑫, 史旭荣, 雷宇, 等. 中国 $\text{PM}_{2.5}$ 与 O_3 协同控制路径[J]. 科学通报, 2022, 67(18): 2089-2099.
- [23] 谢婧怡. 大气中 OVOCs 与 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染特征相关性及其协同控制研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [24] 王君悦. 长三角地区 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 污染协同控制研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2022.
- [25] Lin, X., Yan, R.-C., Jin, J.-J., et al. (2022) Coordinated Control of $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 in Hangzhou Based on SOA and O_3 Formation Potential. *Environmental Science*, **43**, 1799-1807.
- [26] 张新民, 范西彩, 赵文娟, 等. 关于 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 协同控制的一些思考[J]. 环境影响评价, 2021, 43(2): 25-29.
- [27] Kong, L., Song, M., Li, X., et al. (2024) Analysis of China's $\text{PM}_{2.5}$ and Ozone Coordinated Control Strategy Based on the Observation Data from 2015 to 2020. *Journal of Environmental Sciences*, **138**, 385-394. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.03.030>
- [28] 白静. 大气 $\text{PM}_{2.5}$ 与臭氧的作用机制与协同控制策略研究[J]. 能源与节能, 2021(10): 119-120.
- [29] Liu, Z., Qi, Z., Ni, X., et al. (2021) How to Apply O_3 and $\text{PM}_{2.5}$ Collaborative Control to Practical Management in China: A Study Based on Meta-Analysis and Machine Learning. *Science of the Total Environment*, **772**, Article 145392. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145392>
- [30] Liu, J., Niu, X., et al. (2024) Exposure Risk Assessment and Synergistic Control Pathway Construction for O_3 - $\text{PM}_{2.5}$ Compound Pollution in China. *Atmospheric Environment*, **21**, Article 100240. <https://doi.org/10.1016/j.aea.2024.100240>
- [31] Lin, C., Huang, R.-J., Zhong, H., et al. (2023) Elucidating Ozone and $\text{PM}_{2.5}$ Pollution in the Fenwei Plain Reveals the Co-Benefits of Controlling Precursor Gas Emissions in Winter Haze. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **23**, 3595-3607. <https://doi.org/10.5194/acp-23-3595-2023>
- [32] Dong, Z., Xing, J., Zhang, F., et al. (2023) Synergetic $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 Control Strategy for the Yangtze River Delta, China. *Journal of Environmental Sciences*, **123**, 281-291. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.04.008>
- [33] Liu, C., Xing, C., Hu, Q., et al. (2022) Ground-Based Hyperspectral Stereoscopic Remote Sensing Network: A Promising Strategy to Learn Coordinated Control of O_3 and $\text{PM}_{2.5}$ over China. *Engineering*, **19**, 71-83. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.02.019>
- [34] Wu, X., Zhang, Y., Hou, F., et al. (2022) The Energy and Time Saving Coordinated Control Methods of CO_2 , VOCs, and $\text{PM}_{2.5}$ in Office Buildings. *PLOS ONE*, **17**, e0275157. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275157>

-
- [35] 李红, 鲍捷萌, 毕方, 等. $\text{PM}_{2.5}$ 与臭氧污染协同控制: 挑战与应对[J]. 世界环境, 2020(5): 24-29.
- [36] Zhang, N., Guan, Y., Jiang, Y., *et al.* (2022) Regional Demarcation of Synergistic Control for $\text{PM}_{2.5}$ and Ozone Pollution in China Based on Long-Term and Massive Data Mining. *Science of the Total Environment*, **838**, Article 155975. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155975>
- [37] 黄丽滢. 深圳市某区域 $\text{PM}_{2.5}$ 与臭氧源解析及协同减排研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [38] 汪水兵. 典型区域 $\text{PM}_{2.5}$ 与 O_3 污染成因、来源解析及协同控制研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- [39] 刘颀嫻, 刘彬, 张壹, 等. 唐山市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 行业来源解析[J]. 大气科学学报, 2023, 46(5): 679-693.