

气候变化背景下臭氧污染风险的治理挑战与应对思路

李会杰

邢台市生态环境监控中心 河北 邢台 054000

摘要: 近地面臭氧(O₃)作为典型的二次污染物和光化学烟雾的主要成分,已成为我国乃至全球许多地区夏季首要的大气污染物。近年来,随着全球气候变暖趋势加剧,高温、强辐射、低湿等气象条件频发,显著促进了臭氧的生成与累积,使得臭氧污染呈现出强度更高、持续时间更长、影响范围更广的新特征。本文系统梳理了气候变化对臭氧污染形成机制的影响路径,深入剖析了在此背景下臭氧污染治理所面临的核心挑战,并在此基础上提出了多维度、系统性的应对思路。研究表明,未来臭氧污染防治必须打破传统单一污染物治理的思维定式,将气候政策与环境政策深度融合,构建“减污降碳”协同增效的治理体系,以实现空气质量持续改善与应对气候变化的双重目标。

关键词: 气候变化; 臭氧污染; 前体物; 协同治理; 减污降碳

引言

自21世纪以来,随着我国大气污染防治工作的深入推进,以PM_{2.5}为代表的颗粒物污染得到了有效控制,全国空气质量显著改善。然而,在这一背景下,近地面臭氧(O₃)污染问题却日益凸显,尤其是在京津冀、长三角、汾渭平原及成渝地区等重点城市群,臭氧浓度呈现持续上升或高位徘徊态势,其超标天数已超过PM_{2.5},成为夏季首要污染物。臭氧不仅对人体健康构成严重威胁,可引发呼吸系统疾病、损害心血管功能,还会抑制植物光合作用,造成农作物减产和生态系统退化。与此同时,全球气候变化正以前所未有的速度和规模重塑着地球的自然系统。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告明确指出,人类活动是导致全球变暖的主要原因,且未来几十年内全球地表温度将持续上升。气候变化通过改变温度、湿度、太阳辐射、边界层高度以及大气环流模式等一系列关键气象要素,深刻影响着臭氧的化学生成、物理扩散与沉降过程。这种“气候-化学”的复杂耦合效应,使得臭氧污染的成因更为复杂,治理难度显著加大。因此,在气候变化这一宏观背景下,重新审视臭氧污染的形成机理、识别治理中的新挑战,并探索科学有效的应对策略,不仅是深化大气污染防治攻坚战迫切需要,更是实现“双碳”(碳达峰、碳中和)战略目标下环境与气候协同治理的关键环节。本文旨在系统探讨这一交叉领域的核心问题,为未来政策制定提供理论支撑与实践参考。

1 气候变化影响臭氧污染的内在机理

臭氧并非直接排放的污染物,而是由氮氧化物(NO_x)和挥发性有机物(VOCs)在阳光照射下发生复杂的光化学反应生成的二次污染物。气候变化主要通过以下几个

方面影响这一光化学反应链:

1.1 温度升高加速光化学反应速率

根据阿伦尼乌斯方程,化学反应速率常数随温度升高呈指数增长。臭氧生成的核心反应——VOCs与羟基自由基($\cdot\text{OH}$)的反应,以及后续一系列自由基链式反应,其速率均对温度高度敏感。研究显示,气温每升高1°C,臭氧日最大8小时平均浓度(MDA8)可能增加1-3 ppb。持续的高温天气不仅直接加速了臭氧的生成,还通过增加空调使用负荷间接推高了能源消耗和相关污染物的排放。

1.2 太阳辐射增强促进光解过程

臭氧生成的起始步骤依赖于NO₂的光解,该过程需要波长小于420纳米的紫外光。气候变化导致部分地区云量减少、晴天日数增多,使得到达地表的太阳短波辐射增强,从而极大地促进了NO₂的光解,产生更多的原子氧(O),进而与氧气(O₂)结合生成臭氧(O₃)^[1]。强辐射与高温往往相伴而生,二者协同作用,共同构成了臭氧污染事件的典型气象背景。

1.3 大气稳定度增加抑制垂直扩散

气候变化背景下,副热带高压系统趋于增强和西伸,导致更多地区出现持续性的晴热少雨天气。这种天气形势下,大气边界层高度降低,逆温层频繁出现,大气处于高度稳定状态。这极大地抑制了污染物的垂直扩散和稀释能力,使得前体物和已生成的臭氧在近地面积聚,浓度迅速攀升。

1.4 生物源VOCs(BVOCs)排放量激增

植被是天然VOCs(主要是异戊二烯和单萜烯)的重要排放源。研究表明,BVOCs的排放速率对温度和光照同样极为敏感。在全球变暖和CO₂浓度升高的双重驱动下,一方面,植被生长季延长、生长速率加快,增加了

BVOCs的总排放量；另一方面，高温胁迫本身也会刺激植物释放更多的VOCs作为防御机制。这些额外的生物源VOCs为臭氧生成提供了充足的“燃料”，尤其是在城市周边的森林和农田区域，形成了“天然”与“人为”污染源叠加的复杂局面。

综上所述，气候变化并非孤立地作用于臭氧污染，而是通过一个复杂的反馈网络，从动力、热力和化学等多个层面重塑了臭氧污染的时空格局，使其治理变得更加棘手。

2 气候变化背景下臭氧污染治理面临的核心挑战

在上述机理的作用下，当前臭氧污染治理工作面临着前所未有的严峻挑战。

2.1 传统治理路径的有效性受到质疑

过去十年，我国大气污染防治的核心策略是“协同控制”，即通过燃煤电厂超低排放改造、机动车尾气治理等措施，同步削减SO₂、NO_x和一次颗粒物。这一策略对PM_{2.5}治理成效显著，但在臭氧治理上却显现出局限性。特别是在一些VOCs控制相对滞后的地区，单纯大幅削减NO_x可能导致臭氧生成从“VOCs控制区”向“NO_x控制区”转变，甚至在短期内因滴定效应减弱而出现臭氧浓度不降反升的“反弹”现象。气候变化带来的额外臭氧生成压力，进一步放大了这种非线性响应的风险，使得基于历史经验的减排路径难以奏效。

2.2 前体物协同控制的复杂性陡增

臭氧生成的非线性化学特性决定了其治理必须精准把握NO_x与VOCs的减排比例。然而，气候变化引入了新的不确定性变量。例如，高温下BVOCs排放的剧增，意味着即使人为源VOCs得到严格控制，臭氧生成的“原料”总量依然可能维持在高位。这要求治理策略必须从单纯关注人为源，转向统筹考虑人为源与自然源的动态平衡，对排放清单的精细化和动态更新提出了极高要求^[2]。此外，不同VOCs物种的臭氧生成潜势（OFP）差异巨大，如何精准识别并优先控制高活性组分，也成为技术上的巨大挑战。

2.3 跨区域传输与联防联控难度加大

臭氧及其前体物具有较长的大气寿命，可在数百甚至上千公里范围内进行区域性传输。气候变化可能改变区域间的风场结构和大气环流模式，从而重塑污染物的输送路径和沉降区域。这意味着传统的、基于固定地理边界的区域联防联控机制可能不再完全适用。一个地区的减排努力，可能因为上游地区受气候变化影响而产生的更强输送通量而被部分抵消。如何建立更具弹性和适应性的跨区域协同治理框架，是摆在决策者面前的一道难题。

2.4 健康与生态风险的复合叠加效应

气候变化本身就会带来热浪、干旱等极端天气事件，直接危害人体健康和生态系统。臭氧污染的加剧与这些极端事件在时间和空间上高度重合，产生了显著的复合叠加效应。例如，高温与高臭氧的协同作用会极大地加重心肺疾病的发病率和死亡率。对于农业而言，高温胁迫就抑制作物生长，叠加臭氧的毒性作用，可能导致更严重的产量损失。这种复合风险的评估与管理，远比单一风险更为复杂，现有的公共卫生和农业防护体系亟待升级。

2.5 政策协同不足与制度壁垒

目前，我国的气候变化应对（主要由生态环境部应对气候变化司等部门负责）与大气污染防治（主要由生态环境部大气环境司负责）在管理体制、政策工具、数据基础和考核指标上仍存在一定程度的割裂。碳减排政策（如碳市场）主要关注CO₂等温室气体，而大气污染防治政策聚焦于常规污染物。这种“两张皮”的现状，使得能够同时带来减污和降碳效益的协同措施（如能源结构清洁化、产业结构优化）未能得到最优化的设计和最高效的执行。

3 应对思路：构建“减污降碳”协同增效的臭氧治理新范式

面对上述挑战，必须摒弃头痛医头、脚痛医脚的传统思路，转向一种系统集成、协同增效的综合治理新范式。

3.1 强化顶层设计，推动环境与气候政策深度融合

国家层面应将臭氧污染防治深度融入“双碳”战略的整体布局中。在制定和修订《大气污染防治行动计划》等纲领性文件时，应明确纳入气候变化因素的考量，设定兼顾空气质量改善与温室气体减排的协同目标。建立跨部门的协调机制，打通数据、技术和政策壁垒，确保在能源、交通、工业、农业等关键领域出台的政策既能有效削减臭氧前体物，又能助力碳减排。例如，大力发展可再生能源不仅可以减少燃煤产生的NO_x，还能直接降低CO₂排放，实现双重效益。

3.2 实施精准、科学、依法治污，优化前体物减排策略

(1) 精细化排放清单与动态模拟：利用卫星遥感、地面观测和大数据技术，构建融合人为源与生物源的高时空分辨率动态排放清单。结合先进的化学传输模型（CTM），量化不同减排情景下臭氧浓度的响应，为制定差异化、精准化的区域减排方案提供科学依据。(2) VOCs深度治理与源头替代：将VOCs治理提升到与NO_x同等甚至更重要的位置。重点推进石化、化工、工业涂装、包装印刷等重点行业的全过程、全链条VOCs管控。

大力推广使用低VOCs含量的原辅材料，从源头上减少高活性VOCs的使用和排放。(3) NO_x减排的科学审慎推进：在VOCs得到有效控制的基础上，继续推进移动源（尤其是柴油货车）和工业源的NO_x深度减排。同时，加强科学研究，准确识别各区域臭氧生成的敏感性（VOCs控制型还是NO_x控制型），避免“一刀切”式的NO_x减排引发臭氧反弹。

3.3 构建韧性适应体系，防范复合风险

(1) 完善预警预报与应急响应：发展融合气象与化学信息的臭氧污染智能预报系统，提高预报的准确性和提前量。建立基于健康风险的分级预警和应急响应机制，在预测到高温、强辐射与高臭氧叠加的极端事件时，及时启动健康防护指引，保护敏感人群。(2) 加强生态系统适应性管理：在城市规划和生态建设中，科学选择低BVOCs排放的绿化树种，优化城市绿地布局，以减轻生物源VOCs对臭氧生成的贡献。同时，研发和推广抗臭氧的农作物品种，提升农业系统的气候韧性。

3.4 深化区域协同与国际合作

在国内，应根据最新的大气环流和污染传输特征，动态调整和优化重点区域的范围与联防联控机制。建立更加公平合理的区域间生态补偿和责任分担机制，激励上游地区加大减排力度^[3]。在国际层面，臭氧污染和气候变化都是全球性问题，应积极参与和引领相关领域的国际科研合作与政策对话，共享治理经验和技術，共同应对跨境污染挑战。

3.5 加强基础科学研究与技术创新

持续加大对“气候-大气化学-健康/生态”耦合机制的基础研究投入，特别是对BVOCs排放动态、臭氧与PM_{2.5}的相互作用、复合暴露的健康效应等前沿问题的攻

关。同时，鼓励和支持传感器、人工智能、大数据等新技术在污染监测、溯源、预报和治理效果评估中的应用，为科学决策提供强大的技术支撑。

4 结语

气候变化与臭氧污染的交织，标志着大气环境治理进入了一个更为复杂和不确定的新阶段。高温、强辐射等有利气象条件的常态化，正在不断抵消我们通过传统手段取得的减排成果，甚至可能逆转治理趋势。这要求我们必须以更大的战略视野和系统思维来应对这一挑战。未来的臭氧污染防治，绝不能仅仅停留在末端治理和技术层面，而必须将其置于国家生态文明建设和“双碳”战略的大局中考量。通过顶层设计的引领，推动环境政策与气候政策的深度融合；通过科技赋能，实现前体物减排的精准化和科学化；通过制度创新，构建跨区域、跨领域的协同治理网络；并通过加强适应能力建设，有效防范气候与污染复合风险。唯有如此，才能在应对气候变化的时代洪流中，牢牢守住蓝天白云的生态底线，实现人与自然和谐共生的现代化目标。

参考文献

- [1]张盟,王磊.生态环境监测中臭氧污染特征与治理对策研究[C]//河北省环境科学学会,北京环境科学学会,天津市环境科学学会.京津冀生态环境科技产业金融协同发展大会论文集.河北省沧州生态环境监测中心;沧州市生态环境监控中心,2025:27-33.
- [2]王杨.城市大气臭氧污染特征分析与治理路径探究[J].皮革制作与环保科技,2024,5(02):193-195.
- [3]李铭裕.生态环境监测臭氧污染特征与治理对策思考[J].皮革制作与环保科技,2022,3(16):178-180.