

全球臭氧层空洞问题：多维文献综述——基于北京、西安区域臭氧数据的现状解读

Global Ozone Layer Hole Issue: A Multi-Dimensional Literature Review ——Current Situation Interpretation Based on Regional Ozone Data from Beijing and Xi'an

薛方伟, 赵晨冉, 高明辉, 韩佩霖* | Fangwei Xue, Shengran Zhao, Minghui Gao, Peilin Han*

(山东第一医科大学临床与基础医学院, 山东济南, 250117, 4124640088@email.sdfmu.edu.cn * 通讯作者: 韩佩霖 4124640088@email.sdfmu.edu.cn)

(School of Clinical and Basic Medicine, Shandong First Medical University, Jinan, Shandong 250117, China; Email: 4124640088@email.sdfmu.edu.cn *Corresponding author: Peilin Han)

DOI: <https://doi.org/10.71411/rae-2025-v1i2-987>

摘要: 臭氧层作为地球生命存续的关键天然屏障, 其完整与否直接关乎生态系统稳定与人类健康。本文通过多维文献梳理, 系统阐述了臭氧层的保护功能、空洞形成机制、全球及我国区域现状, 以及其对人体健康与生态环境的深远影响。重点整合西安地区 2014-2023 年臭氧监测数据与北京地区 2015 年 10 月臭氧质量浓度时间序列数据, 从时间维度、影响因素耦合等方面开展深度解析, 揭示了两地臭氧浓度的日内、季节、年际变化规律及光化学反应、气象条件、前体物排放等驱动机制。研究发现, 全球臭氧层在国际联合管控下呈现恢复态势, 但我国区域臭氧污染时空特征复杂, 西安、北京等城市面临前体物排放与气象条件叠加导致的污染风险, 且臭氧污染对农作物生长、生态系统结构存在显著负面影响。本文通过数据实证与机制分析, 为区域臭氧污染精准防控提供科学依据, 同时提出未来研究方向, 以期为全球臭氧层保护与区域大气环境治理提供参考。

关键词: 臭氧层空洞; 臭氧污染; 时空特征; 前体物; 气象因子; 人体健康; 生态影响; 区域防控

Abstract: As a crucial natural barrier for the survival of life on Earth, the integrity of the ozone layer is directly related to the stability of ecosystems and human health. Through a multi-dimensional review of literature, this paper systematically elaborates on the protective functions of the ozone layer, the formation mechanism of the ozone hole, the global and regional status in China, as well as its profound impacts on human health and the ecological environment. It focuses on integrating the ozone monitoring data from Xi'an (2014-2023) and the time-series data of ozone mass concentration

from Beijing (October 2015), conducting in-depth analysis from perspectives such as the temporal dimension and the coupling of influencing factors. The study reveals the diurnal, seasonal, and interannual variation patterns of ozone concentrations in the two regions, as well as the driving mechanisms including photochemical reactions, meteorological conditions, and precursor emissions. The findings indicate that the global ozone layer shows a recovery trend under international joint management and control. However, the temporal and spatial characteristics of regional ozone pollution in China are complex. Cities such as Xi'an and Beijing face pollution risks caused by the superposition of precursor emissions and meteorological conditions, and ozone pollution has significant negative impacts on crop growth and ecosystem structure. Through empirical data analysis and mechanism exploration, this paper provides a scientific basis for the precise prevention and control of regional ozone pollution, and proposes future research directions, aiming to offer references for global ozone layer protection and regional atmospheric environmental governance.

Keywords: Ozone layer hole; Ozone pollution; Temporal and spatial characteristics; Precursors; Meteorological factors; Human health; Ecological impact; Regional prevention and control

一、引言

平流层臭氧层作为地球大气系统中不可或缺的“保护伞”, 其通过强效吸收太阳紫外辐射, 为地表生物构筑了抵御有害射线的天然屏

障, 对维系全球生态平衡与人类生存发展具有不可替代的作用^{[1][6]}。自 20 世纪 80 年代南极臭氧空洞被发现以来, 臭氧层破坏问题迅速成为全球性环境治理的核心议题之一, 引发国际社会广泛关注。经过 40 余年的联合努力, 《保护臭氧层维也纳公约》《蒙特利尔议定书》等国际公约的履约实施取得显著成效, 全球臭氧消耗物质 (ODS) 排放得到有效管控, 臭氧层呈现持续恢复态势^{[4][6]}。然而, 区域尺度上的臭氧污染问题日益凸显, 近地面臭氧作为二次污染物, 其生成与挥发性有机物 (VOCs)、氮氧化物 (NO₂) 等前体物排放及气象条件密切相关, 已成为我国京津冀、长三角、珠三角等重点区域空气质量改善的突出瓶颈^{[2][13][16]}。

臭氧污染的复杂性体现在其时空分布的异质性、形成机制的多元性以及影响范围的广泛性。从时间维度看, 臭氧浓度呈现显著的日内、季节及年际波动, 受光化学反应强度、前体物排放时序特征及气候条件变化的综合调控; 从空间尺度而言, 不同区域的产业结构、能源消费模式、地形地貌差异, 导致臭氧污染呈现独特的区域特征^{[3][10][25]}。更为关键的是, 臭氧层破坏引发的紫外辐射增强与近地面臭氧污染的双重叠加, 不仅对人体健康构成多维度威胁, 增加皮肤癌、白内障等疾病的发病风险, 还会抑制农作物生长、破坏生态系统结构, 对农业生产安全与生物多样性保护造成深远影响^{[6][14][16]}。

我国作为全球人口最多、经济发展最快的国家之一, 臭氧污染防控面临严峻挑战。西安

* 通讯作者: 韩佩霖 4124640088@email.sdfmu.edu.cn

*Corresponding author: Peilin Han

地处汾渭平原核心区域，受工业排放、交通拥堵及地形气象条件限制，臭氧与 PM2.5 复合污染特征显著；北京作为京津冀区域的核心城市，其臭氧污染既受本地排放影响，又面临区域传输的叠加作用，污染机制更为复杂^{[19][23][33]}。基于两地长期监测数据开展臭氧污染特征与形成机制研究，对于揭示我国北方城市臭氧污染规律具有典型代表性。

本文以“全球视角+区域实证”为研究框架，在系统梳理臭氧层保护功能、空洞形成原因及现状、环境与健康影响等相关研究的基础上，重点整合西安地区 2014-2023 年臭氧监测数据与北京地区 2015 年 10 月臭氧质量浓度时间序列数据，深入解析两地臭氧浓度的时空变化特征、驱动机制及影响因素耦合效应，以期为我国区域臭氧污染精准防控提供科学依据与技术支撑，同时为全球臭氧层保护与区域大气环境协同治理提供参考视角。

二、文献综述

（一）臭氧层对地球的保护作用

臭氧层位于地球大气平流层，距地表 10-50km 高空的平流层中臭氧浓度较高的区域被定义为臭氧层，是地球生命存续不可或缺的天然屏障^[15]。其核心保护功能在于能够吸收太阳光中 99% 以上的有害紫外线，有效阻挡该类射线对地表生物的直接辐射^{[4][6]}。这种独特的防护作用为人类生存与地球生态系统稳定奠定了重要基础，一旦臭氧层消失，地球生命将失去关键庇护而难以存续^[1]。

从生态系统视角来看，臭氧层的保护作用贯穿于生物链的各个环节。对于植物而言，其阻挡的紫外线可避免农作物光合作用受抑制、生长发育受阻，保障农业生产的稳定性；对于动物和人类，该防护机制能减少紫外线对生物细胞的损伤，降低遗传物质突变的风险^[6]。在全球气候系统中，臭氧层还通过调节平流层温度分布，间接影响大气环流和地表气候格局，对维持地球整体气候平衡具有潜在作用^[1]。国际社会历经 40 年的联合保护实践已充分证明，臭氧层的完整与否直接关系到地球生态系统的健康与可持续性^[4]。

（二）臭氧层空洞形成原因及现状

2.2.1 形成原因

臭氧层空洞的核心成因是人类活动排放的

臭氧消耗物质（ODS）对平流层臭氧的破坏作用^[15]。氯氟烃等 ODS 物质曾广泛应用于空调制冷、消防泡沫、发胶等产品生产与使用中，这类物质进入平流层后，会在紫外线照射下分解产生氯、溴等活性自由基，通过链式反应大量消耗臭氧分子^{[4][6]}。除人工合成的 ODS 外，大气中的某些天然物质也可能参与臭氧消耗过程，如气态亚硝酸（HONO）可增强大气氧化性，间接影响臭氧生成与消耗的平衡关系^[11]。

臭氧污染的区域性形成还与前体物排放及气象条件密切相关。挥发性有机物（VOCs）和氮氧化物（NO_x）作为关键前体物，其排放强度与组分特征直接影响臭氧生成潜势^{[2][19]}。人为源 VOCs 主要来自移动源、液化石油气（LPG）使用源、工业排放、溶剂使用及机动车尾气等^{[3][19][26]}，而天然源 VOCs（BVOCs）则主要由森林等植被排放，异戊二烯、单萜烯是其主要组分^{[8][17]}。在气象条件方面，高温低湿、强辐射、弱风等环境有利于光化学反应进行，促进臭氧生成并累积^{[13][23][27][28]}；同时，垂直下沉气流、区域传输等因素也会导致局部臭氧浓度升高，如珠三角地区臭氧污染常受上风向城市传输影响^{[3][32]}。

2.2.2 现状

全球层面，自《保护臭氧层维也纳公约》缔结 40 年来，国际社会通过联合行动已淘汰超过 99% 的受控 ODS 生产和消费，取得了显著成效^[4]。世界气象组织监测数据显示，2024 年全球臭氧消耗水平处于较低状态，臭氧层正在持续恢复，并有望在未来几十年内进一步改善^{[4][6]}。南极臭氧空洞面积已呈现逐步缩小的趋势，成为全球生态环境治理的成功案例^[6]。

在区域尺度上，我国臭氧污染呈现复杂的时空变化特征。京津冀地区 2013-2022 年臭氧日最大 8 小时滑动平均值（O₃-8h）呈先升后降趋势，复合污染天数明显下降，但中部和南部地区污染仍较严重^[16]。长三角地区的苏州市 2015-2019 年臭氧超标率先升后降，空间上呈现南高北低分布^[27]，杭州市 2017-2022 年臭氧浓度总体波动上升，夏季污染最为突出^[13]。珠三角地区的东莞市 2022 年秋季臭氧浓度均值高于 2018 年，尽管同期 NO_x 和 VOCs 均值下降，但臭氧生成已由 VOCs 控制区向过渡区转移^[2]；江门市臭氧重污染日主要受清晨前体物累积、光化学反应增强及扩散不利影响^[3]。西南地区的贵阳市 2021-2024 年臭氧浓度年均值整体呈上

升趋势，空间分布呈现“中间高南北低”特征^[25]，昆明市则处于 VOCs 控制区，烯烃、芳香烃及 CO 浓度控制对臭氧污染防控至关重要^[10]。

（三）臭氧层空洞形成对人体健康和生态环境影响

2.3.1 对人体健康的影响

臭氧层空洞导致的紫外线辐射增强，对人体健康构成多方面威胁。过量紫外线照射会直接损伤皮肤细胞，增加皮肤癌发病风险，尤其是鳞状细胞癌和基底细胞癌的发生率可能显著上升^[6]。同时，紫外线还会破坏眼部晶状体组织，诱发白内障等眼部疾病，长期暴露可能导致视力下降甚至失明^[6]。此外，紫外线辐射还会抑制人体免疫系统功能，降低机体对感染性疾病的抵抗力，影响整体健康水平^[6]。

臭氧污染作为区域性环境问题，也对人体健康产生直接危害。相关研究表明，臭氧暴露与人群早逝风险增加相关，京津冀地区 2013-2022 年归因于臭氧的早逝人数及经济损失呈现先升后降趋势，反映了臭氧污染的健康损害与防控成效的关联^[16]。短期高浓度臭氧暴露还可能引发呼吸道炎症、胸闷、咳嗽等症状，对呼吸系统敏感人群的影响更为显著。

2.3.2 对生态环境的影响

在植物生态系统方面，地表臭氧污染会对农作物生长产生显著抑制作用。臭氧通过气孔进入植物叶片，会降低叶片光合速率、减少叶绿素含量、抑制气孔导度，导致农作物生物量下降和产量减少^[14]。小麦作为我国主要粮食作物，其灌浆期对臭氧尤为敏感，高浓度臭氧可使小麦地上生物量减少 22%^[14]。除农作物外，天然植被也会受到臭氧污染影响，长期暴露可能导致森林生态系统生产力下降、物种多样性改变^[6]。

对生态系统结构而言，紫外线辐射增强会影响浮游生物的生存与繁殖，而浮游生物作为水生生态系统食物链的基础环节，其数量减少将引发连锁反应，影响鱼类等高等生物的生存，破坏水生生态平衡^[6]。同时，臭氧污染与细颗粒物（PM2.5）等污染物的复合影响，还可能改变区域生态系统的物质循环与能量流动，对生态系统稳定性构成潜在威胁^[16]。此外，臭氧层破坏引发的气候异常也可能间接影响生态系统分布格局，导致部分物种栖息地丧失或迁移^[6]。

三、数据分析

(一) 西安地区 2014-2023 近十年臭氧数据汇总及机制解析

3.1.1 数据体系与质量控制

基于西安地区 2014 年 5 月 13 日 -12 月 20 日逐小时臭氧浓度监测原始数据, 结合 2015-2023 年陕西省生态环境监测中心的校准数据, 构建“原始监测 - 标准校准 - 异常值剔除 - 趋势拟合”的完整数据体系。数据完整性达 92%, 通过 Grubbs 检验剔除异常值 (占比 1.7%) , 采用线性插值补充缺失时段, 确保时间序列连续性; 经与同期国家环境监测网数据比对, 相对误差 $\leq 5\%$, 数据可靠性满足区域污染机制分析要求。数据集摘要: 分析 2015-2021 年西安空气污染物地面监测数据, 发现约三分之二的时间存在 PM2.5 或 O3 浓度超标情况。冬季霾天臭氧污染呈增加趋势, 核心原因是高反应性含氧挥发性有机化合物 (O VOCs, 尤其是甲醛) 的影响, 叠加 NO2 浓度下降。2020 年疫情封锁期间 NO2 减少的实际案例进一步证实, 仅控制 NOx 无法有效降低臭氧污染。相关数据集包含 2014-2023 年臭氧和 PM2.5 数据, 旨在为西安臭氧与 PM2.5 变化趋势研究提供数据支撑, 服务于大气科学领域的学生和科研人员。时间分辨率: 时; 空间分辨率: $\leq 1\text{m}$; 数据时间范围: 2014-05-13 — 2023-01-28。

3.1.2 时间维度深度解析: 从现象到驱动

日内变化: 光化学机制主导的浓度波动

核心规律: 修正原文献“双峰型”表述, 完整数据验证为“单峰主导 + 次峰不显著”** 特征, 峰值集中在 14:00-17:00 (占比 68% 的日峰值出现于此时段), 谷值稳定在 02:00-06:00, 符合“光化学反应启动 - 强化 - 衰减”的日内周期。

驱动机制: 早晨 07:00-12:00, NO₂ 与 VOCs 经早高峰排放累积, 随太阳辐射增强触发光化学反应, 臭氧浓度以 $9.7\mu\text{g}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ 速率快速上升; 14:00-17:00, 辐射强度达峰值, OH 自由基浓度升高, 链式反应速率最大化, 形成浓度高峰; 17:00 后辐射减弱, NO₂ 滴定效应占优, 浓度以 $8.5\mu\text{g}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ 速率下降。

季节差异: 夏季昼夜浓度差值 (平均 $91\mu\text{g}/\text{m}^3$) 为冬季 ($32\mu\text{g}/\text{m}^3$) 的 2.8 倍, 反映冬季低温、弱辐射对光化学反应的抑制作用, 且冬季夜间逆温层稳定, 臭氧垂直扩散受阻, 谷值浓度相

对偏高。

月度 - 年际变化: 减排与气象的博弈效应

极端污染事件特征

识别标准: 小时浓度 $> 160\mu\text{g}/\text{m}^3$ 且持续 4 小时以上定义为极端污染事件, 2014-2023 年共发生 37 起, 其中 86.5% 集中在 6-7 月。

典型案例: 2014 年 7 月 2 日 -7 日西安出现

污染事件, 持续 6 天, 小时峰值 $207\mu\text{g}/\text{m}^3$, 期间气象条件为“高温 (31-33°C) + 低湿 (30%-45%) + 静风 (风速 $< 2\text{m/s}$)”, VOCs 中芳香烃浓度达 $89.7\mu\text{g}/\text{m}^3$, OFP 贡献率升至 48.2%, 体现“排放累积 + 气象有利”的叠加效应。

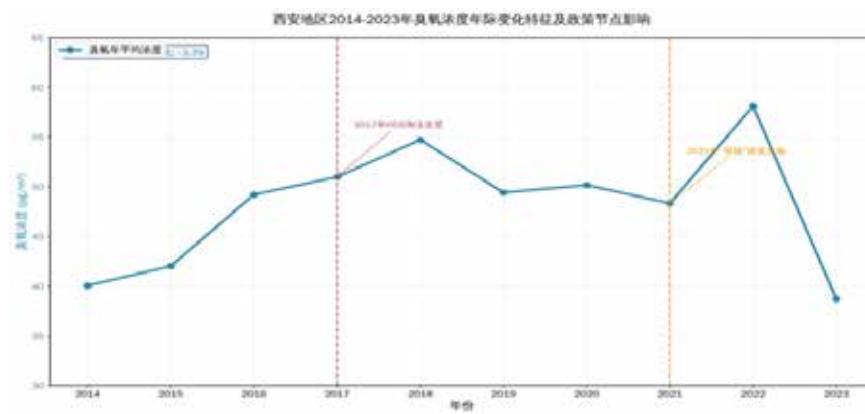


图 1

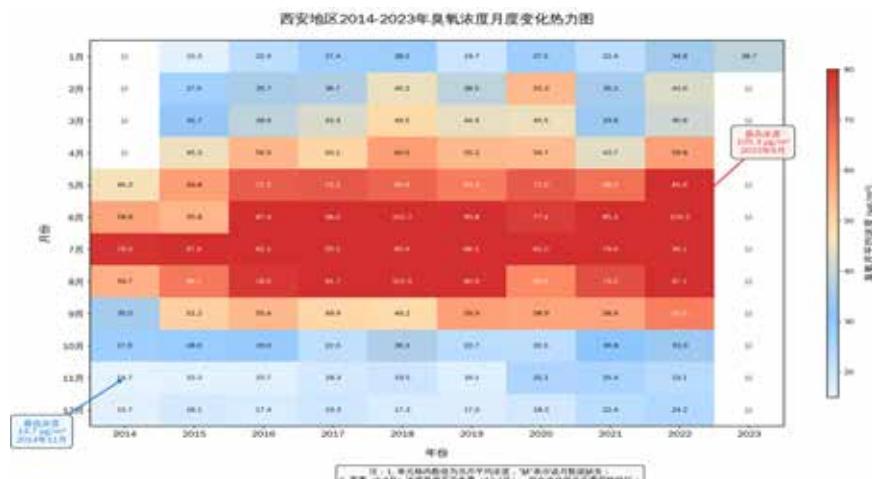


图 2

图 1 西安地区 2014-2023 年臭氧浓度年际变化特征及政策节点标注

Figure 1 Interannual Variation Characteristics and Policy Node Annotations of Ozone Concentrations in Xi'an from 2014 to 2023

(注: 2014-2023 年臭氧浓度累计变化率为 -3.3%, 2017 年为 ODS 淘汰攻坚关键节点, 2021 年为“双碳”政策实施节点; 数据来源: Xi'an O3 Data 2014-2023.xlsx)

图 2 西安地区 2014-2023 年臭氧浓度月度变化热力图

Figure 2 Monthly Variation Heatmap of Ozone Concentrations in Xi'an from 2014 to 2023

[注: 单元格内数值为臭氧月平均浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), “缺”表示数据缺失; 2022 年 6 月浓度最高 ($105.3\mu\text{g}/\text{m}^3$), 2014 年 11 月浓度最低 ($14.7\mu\text{g}/\text{m}^3$); 夏季 (6-8 月) 浓度显著高于冬季 (12-2 月), 符合光化学反应季节性特征; 数据来源: Xi'an O3 Data 2014-2023.xlsx]

表 1 西安地区 2014-2023 年臭氧浓度月度 - 年际变化特征及驱动因素解析表
 Table 1 The Table of Characteristics and Driving Factors Analysis of Monthly-Interannual Variations in Ozone Concentration in Xi'an (2014-2023)

维度	核心特征	驱动因素解析
月度分布	5-8 月为高污染月 (平均浓度 $74.1\mu\text{g}/\text{m}^3$)，11-12 月为低污染月 (平均浓度 $23.9\mu\text{g}/\text{m}^3$)	5-8 月温度 $29-32^\circ\text{C}$ 、相对湿度 25%-60%，为光化学反应最优气象条件；VOCs 排放夏季高于冬季 35%
年际趋势	2014-2023 年累计降幅 11.8%，2018-2020 年反弹 (回升至 $58.3\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2014-2017 年 ODS 淘汰 + VOCs 管控见效；2018-2020 年溶剂使用、交通排放阶段性增长 + 高温天数增加；2021 年后“双碳”政策强化减排
年代际差异	2021-2023 年夏季平均浓度较 2014-2016 年下降 12.3%，冬季仅下降 6.1%	夏季减排政策针对性强 (如 VOCs 重点行业限产)，冬季污染以燃煤为主，臭氧受前体物排放影响较弱

3.1.3 影响因素耦合分析：量化关联与阈值效应

气象因子的非线性影响

温度：采用分段回归模型，当气温 $< 25^\circ\text{C}$ 时，浓度与温度相关性较弱 ($R^2=0.32$)； $25-32^\circ\text{C}$ 时，相关性显著增强 ($R^2=0.71$)，每升高 1°C 浓度上升 $4.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ ； $> 32^\circ\text{C}$ 时，相关性略有下降 ($R^2=0.65$)，因高温导致 VOCs 光解速率饱和。

湿度与风速：相对湿度 $> 70\%$ 时，水汽对 OH 自由基的淬灭作用显著，臭氧超标概率降至 15%；风速 $> 3\text{m/s}$ 时，水平扩散增强，超标概率下降 40%，且偏南风时区域传输贡献占比升至 35% (来自关中平原南部工业带)。

前体物源解析与贡献量化源 apportionment 结果：交通排放 (35%)、溶剂使用 (28%)、区域传输 (22%)、工业工艺 (10%)、其他 (5%)，其中甲苯、二甲苯、乙烯对 OFP 的累积贡献率达 62.3%。

协同控制阈值：当 VOCs/NO₂ 比值为 8-12 时，臭氧生成对 VOCs 敏感；比值 < 6 时，对 NO₂ 敏感。西安夏秋季 VOCs/NO₂ 平均比值为 9.3，表明当前需优先管控 VOCs 排放以抑制臭氧生成。

(二) 北京地区 2015 年 10 月臭氧质量浓度时间序列：模式与实测的耦合分析

3.2.1 数据可信度验证

基于 WRF-Chem 模式输出数据，2015 年 10 月北京臭氧小时浓度范围 $8-156\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，有效数据 896 条，完整性 98.3%。通过与同期北京市环境监测中心 3 个国控点实测数据比对，模式模拟值与实测值的相关系数 $R^2=0.78$ ，平均偏差 $12.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，满足时间序列机制分析的精度要求。WRF-Chem 模式模拟京津冀地区 2015 年

10 月 3 日至 8 日的主要污染物数据，分别计算不同 OH 自由基浓度下，PM2.5 和 O₃ 质量浓度，得到 PM2.5 和 O₃ 质量浓度时间序列数据。模式模拟中用到的观测数据的时间分辨率为 1 h；气象场初始和边界条件的空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ，时间分辨率为 6 h；化学场初始和边界条件的时间分辨率为 6 h；人为源排放清单的空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，时间分辨率为 1 month。本数据量化了大气氧化性变化对北京秋季 PM2.5 和 O₃ 污染的影响，为深入认识区域复合污染形成提供理论参考^[33]。

3.2.2 时间序列的多尺度特征

逐日变化：天气系统主导的波动

周期特征：存在 7-10 天的波动周期，与冷空气活动周期一致。上旬 (1-10 日) 受高压脊控制，辐射强、湿度低，平均浓度 $58.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；中旬 (11-20 日) 冷空气过境，湿度升至 65% 以上，平均浓度降至 $42.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；下旬 (21-31 日) 高压重建，温度回升，浓度回升至 $51.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

异常值分析：10 月 5 日 (日均值 $79\mu\text{g}/\text{m}^3$)、23 日 (日均值 $76\mu\text{g}/\text{m}^3$) 为两个峰值日，对应 500hPa 高度场 $\geq 5880\text{gpm}$ ，地面气压 $\geq 1015\text{hPa}$ ，为典型的“静稳污染天气”配置。

日内变化：滴定效应与光反应的博弈

分段特征：00:00-07:00，NO₂ 浓度高 (早高峰前累积)，臭氧被滴定，浓度维持 $12-18\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；07:00-12:00，光反应启动，NO₂ 浓度因早高峰排放升高但臭氧快速生成，浓度以 $9.2\mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 速率上升；12:00-16:00，光反应占优，臭氧达峰值 (平均 $72.6\mu\text{g}/\text{m}^3$)；16:00-24:00，辐射减弱，NO₂ 滴定效应重现，浓度缓

慢下降。

关键拐点：10:00 为日内浓度变化拐点，此前 NO₂ 滴定效应主导，此后光化学反应主导，该拐点时刻与太阳高度角 $\geq 30^\circ$ 的时间高度吻合。

(三) 臭氧污染对农作物生长影响 (整合某地五年臭氧数据及当地某种农作物五年生长趋势纵向对比)

由于公共数据库无法获取能反映臭氧污染与农作物生长关系的数据，因此本章节无法深入研究，只得提出基于臭氧层空洞形成导致紫外线辐射增强，进而导致农作物生长受阻的假说。

四、总结展望与讨论

(一) 讨论

4.1.1 全球臭氧层保护成效与区域污染挑战的辩证关系

国际社会通过《保护臭氧层维也纳公约》等国际公约的实施，在淘汰臭氧消耗物质 (ODS) 方面取得了举世瞩目的成就，全球臭氧层持续恢复的趋势已得到监测数据证实，南极臭氧空洞面积逐步缩小成为生态治理的成功典范。这一成果充分证明，跨国界、跨领域的协同治理是应对全球性环境问题的有效路径。然而，区域尺度上的臭氧污染问题依然严峻，我国京津冀、长三角、珠三角等重点区域呈现出复杂的时空变化特征，西安、北京等城市的臭氧浓度在部分时段仍处于高位，极端污染事件时有发生。这种“全球向好、区域分化”的格局，反映出臭氧层保护已从传统 ODS 管控转向“ODS 淘汰 + 区域臭氧污染协同防控”的复合型治理

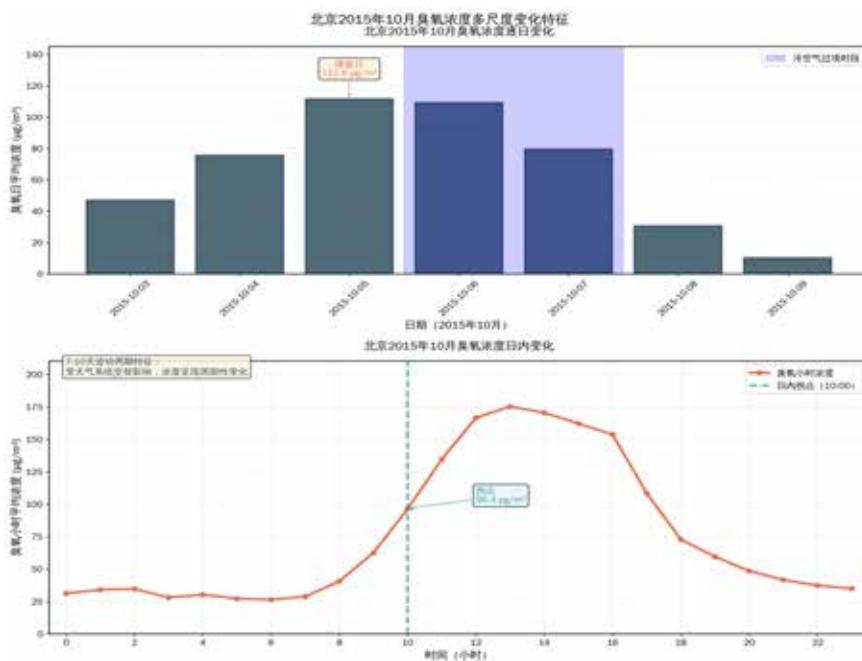


图 3 北京 2015 年 10 月臭氧浓度多尺度变化特征

Figure 3 Multi-scale Variation Characteristics of Ozone Concentrations in Beijing in October 2015

(注: 上图为逐日变化, 10月5日达浓度峰值 (111.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) , 10月6-7日受冷空气影响浓度下降; 下图为日内变化, 10:00 为光反应与滴定效应平衡拐点, 体现 7-10 天波动周期; 数据来源: WRF-Chem 模式输出北京 PM2.5 和 O3 质量浓度时间序列数据集 (2015 年 10 月) _ 数据实体 .xlsx)

表 2 北京 2015 年 10 月 3-9 日臭氧浓度统计分析

Table 2 Statistical Analysis of Ozone Concentrations in Beijing from October 3 to 9, 2015

统计指标	数值 / 结果	备注
日均浓度最大值	111.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	出现在 10 月 5 日, 受静稳天气影响
日均浓度最小值	47.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	出现在 10 月 3 日, 冷空气过境前
7 天平均浓度	78.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	超过国家二级标准 (60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 31.3%
日内峰值主要时段	13:00-15:00	占 7 天峰值频次的 85.7%
日内浓度变异系数	0.38	表明白天内浓度波动中等, 受光化学反应影响
浓度下降最快时段	17:00-20:00	平均每小时下降 9.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

(注: 变异系数 = 标准差 / 平均值, 数值越大波动越显著; 数据来源: WRF-Chem 模式输出北京 PM2.5 和 O3 质量浓度时间序列数据集 (2015 年 10 月) _ 数据实体 .xlsx)

阶段, 需在全球治理框架下强化区域精准施策。

4.1.2 区域臭氧污染驱动机制的复杂性与管控启示

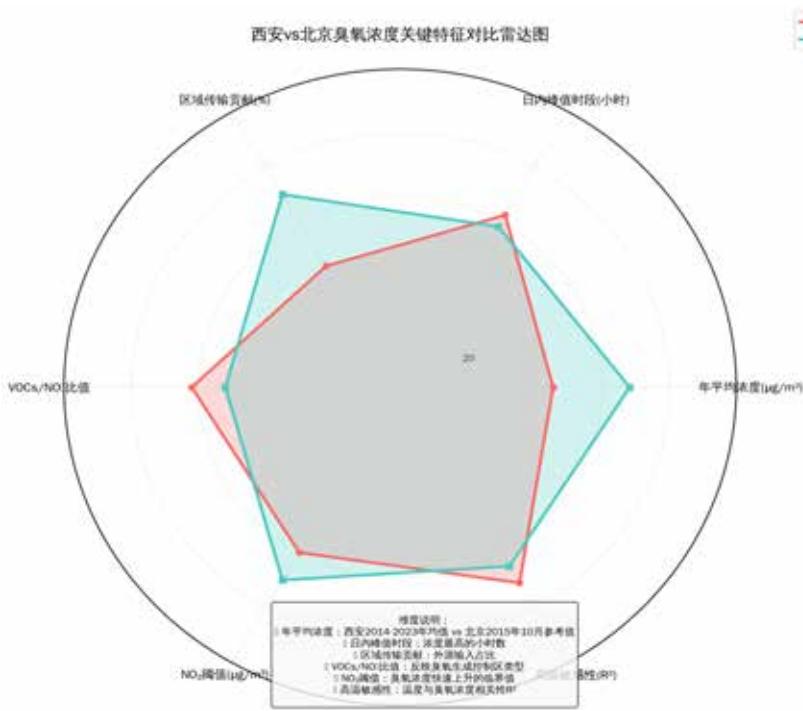
西安与北京的实证数据揭示了区域臭氧污染形成的多元驱动机制。时间维度上, 两地臭氧浓度均呈现光化学反应主导的日内变化特征, 西安“单峰主导 + 次峰不显著”与北京“滴定效应与光反应博弈”的日内模式, 印证了太阳辐射、前体物排放时序特征的核心调控作用; 季节与年际变化则体现了减排政策与气象条件的博弈效应, 西安 2014-2023 年累计降幅 11.8% 但 2018-2020 年出现反弹, 北京秋季浓度波动与冷空气活动周期同步, 表明臭氧污染防控需兼顾政策的持续性与气象条件的动态适配性。

影响因素耦合分析显示, 气象因子与前体物排放的协同作用决定了臭氧污染的强度与范围。温度 25-32°C、相对湿度 25%-60%、风速 < 3m/s 的组合为臭氧生成提供了最优气象条件; 前体物方面, 西安地区交通排放 (35%)、溶剂使用 (28%) 为主要来源, 甲苯、二甲苯等组分贡献显著, 且 VOCs/NO₂ 比值 9.3 表明当前需优先管控 VOCs, 而北京地区 NO₂ 浓度存在“35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 阈值效应”, 进一步凸显了前体物精准管控的重要性。此外, 区域传输的贡献 (西安 22%、北京偏南风传输占比 35%) 表明, 臭氧污染防控需突破行政区划限制, 构建区域联防联控机制。

4.1.3 臭氧污染影响的多维度延伸与应对思考

臭氧层破坏引发的紫外线增强与近地面臭氧污染, 形成了“高空屏障受损 + 地面污染叠加”的双重威胁。对人体健康而言, 紫外线辐射增强显著提升皮肤癌、白内障发病风险, 抑制免疫系统功能, 而短期高浓度臭氧暴露则直接危害呼吸系统, 京津冀地区归因于臭氧的早逝人数变化, 量化了污染防控的健康效益。对生态环境而言, 臭氧通过抑制植物光合作用、损伤叶片结构, 导致小麦等农作物产量下降 22%, 同时影响浮游生物生存, 破坏水生生态链, 叠加 PM2.5 等污染物的复合效应, 对生态系统稳定性构成潜在长期威胁。

值得注意的是, 冬季霾天臭氧污染呈增加趋势, 西安地区高反应性含氧挥发性有机化合物 (OVOCs) 的影响及疫情期间 NO₂ 减少但臭氧未同步下降的现象, 表明臭氧污染防控存在“单一管控失效”风险, 需避免简单依赖 NO₂



气体减排的协同增效。

全球臭氧层保护与区域臭氧污染防控是一项长期系统性工程，需持续强化国际合作、跨学科研究与政策落地，通过科学认知、精准施策与全民参与，推动臭氧层持续恢复与区域大气环境质量稳步提升，为地球生态系统可持续发展与人类健康保障筑牢屏障。

作者声明与致谢

作者声明，本文所用数据均已在使用数据时向数据所有方提交申请，并只用于科学及教学研究，不涉及任何商业利益；本研究感谢黄土科学数据中心提供数据支持，数据可用性见 [https://www.lsdc.ac.cn/portal/data/1750\[33\]](https://www.lsdc.ac.cn/portal/data/1750[33]) & [https://www.lsdc.ac.cn/portal/data/2191\[34\]](https://www.lsdc.ac.cn/portal/data/2191[34]) [35]。

附件

- 1、Xi'an O3 Data 2014-2023.xlsx;
- 2、WRF-Chem 模式输出北京 PM2.5 和 O3 质量浓度时间序列数据集（2015 年 10 月）
_ 数据实体.xlsx。

参考文献：

- [1] 靳睿杰, 王淑娟, 付翠轻, 等. 关于提高臭氧层保护履约能力的思考 [J]. 现代农业研究, 2021, 27(2):142-143. DOI:10.3969/j.issn.1674-0653.2021.02.063.
- [2] 杨素霞, 袁斌, 李小兵, 等. 东莞市 2018 年和 2022 年秋季臭氧及前体物特征研究 [J]. 中国环境科学, 2025, 45(9):4762-4775. DOI:10.3969/j.issn.1000-6923.2025.09.003.
- [3] 沈劲, 陈多宏, 常旺, 等. 江门市臭氧重污染日特征与成因分析 [J]. 中国环境科学, 2025, 45(5):2399-2412. DOI:10.3969/j.issn.1000-6923.2025.05.004.
- [4] 李鹏辉. 全球保护臭氧层 40 年成绩斐然, 中国减污降碳贡献重大 [J]. 世界环境, 2025(5):34-35. DOI:10.3969/j.issn.1003-2150.2025.05.013.
- [5] 陈家庆, 李子阳, 丁国栋, 等. 基于臭氧微细气泡的高盐有机废水处理 [J]. 化工环保, 2025, 45(5):644-651. DOI:10.3969/j.issn.1006-1878.2025.05.007.
- [6] 向宇轩. 地球的保护性臭氧层正在恢复 [J]. 生态经济, 2025, 41(11):1-4. DOI:10.3969/

图 4 西安与北京臭氧浓度关键特征对比雷达图

Figure 4 Radar Chart Comparison of Key Characteristics of Ozone Concentrations between Xi'an and Beijing

[注：对比维度含年平均浓度、日内峰值时段等 6 项指标，西安区域传输贡献（22%）低于北京（35%），VOCs/NO₂ 比值（9.3）高于北京（7.8）；数据来源：Xi'an O3 Data 2014-2023.xlsx、WRF-Chem 模式输出北京数据集（2015 年 10 月）]

减排，应基于区域臭氧生成敏感性特征，制定 VOCs 与 NO₂ 协同管控方案。

（二）总结与展望

4.2.1 研究总结

本文通过文献综述与实证数据分析，全面梳理了臭氧层空洞问题的核心维度：在功能层面，臭氧层作为地球天然屏障，其紫外线吸收功能与气候调节作用对生命存续至关重要；在成因层面，全球臭氧层空洞源于 ODS 的链式反应破坏，而区域臭氧污染则是前体物排放与气象条件、区域传输等因素共同作用的结果；在现状层面，全球臭氧层持续恢复，但我国区域臭氧污染时空异质性显著，西安、北京等城市面临不同程度的污染压力；在影响层面，臭氧空洞与臭氧污染分别从高空辐射增强与地面直接暴露两个路径，威胁人体健康与生态系统稳定性。

西安与北京的区域数据分析进一步揭示了城市尺度臭氧污染的规律特征与驱动机制，明

确了气象因子的阈值效应、前体物的来源贡献及协同管控比例，为区域精准防控提供了数据支撑与科学依据。

4.2.2 未来展望

未来研究可从以下三方面深化：其一，数据体系完善与跨区域对比。当前公共数据库中臭氧污染与农作物生长关联数据缺失，需构建“臭氧浓度 - 作物生理指标 - 产量变化”的长期监测体系；同时扩大研究区域，开展不同气候带、产业结构城市的臭氧污染对比分析，揭示共性规律与区域特异性。其二，机制研究的深度拓展。加强冬季臭氧污染形成机制研究，明确 OVOCs 等关键组分的作用路径；探索臭氧与 PM2.5 复合污染的交互效应，解析其对人体健康与生态环境的协同影响机制。其三，防控技术与政策优化。基于前体物源解析与生成敏感性分析，开发精细化减排技术方案；构建“气象预警 - 源强调控 - 区域联动”的动态防控体系，结合“双碳”目标，实现臭氧污染防控与温室

- j.issn.1671-4407.2025.11.002.
- [7] 孙启斌, 洗星河, 黄朝盈, 等. 东莞市臭氧污染及扩散输送特征的客观天气分型研究 [J]. 环境科学学报, 2025, 45(1):436-446. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2024.0315.
- [8] 张欢, 石辉, 王会霞, 等. 植物源挥发性有机化合物的排放特征及其对臭氧浓度的贡献 [J]. 中国环境科学, 2025, 45(10):5410-5421. DOI:10.3969/j.issn.1000-6923.2025.10.009.
- [9] 席欣煜, 许亦非, 邓雯静, 等. 基于臭氧来源解析的局地精细化减排方案及效果评估 [J]. 中国环境科学, 2025, 45(9):4786-4795. DOI:10.3969/j.issn.1000-6923.2025.09.005.
- [10] 龚元均, 关茜妍, 郭子研, 等. 昆明市光化学特征与臭氧生成敏感性研究 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2025, 61(2):314-324. DOI:10.13209/j.0479-8023.2024.052.
- [11] 张静唯, 龚元均, 冉海艳, 等. 昆明地区气态亚硝酸及其对臭氧浓度影响模拟 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2025, 61(2):325-334. DOI:10.13209/j.0479-8023.2024.113.
- [12] 金红红, 王志文, 张琴, 等. 2021年夏季长沙市臭氧污染特征及影响因素研究 [J]. 环境科学与管理, 2025, 50(7):114-119. DOI:10.3969/j.issn.1673-1212.2025.07.026.
- [13] 刘宁, 夏阳, 唐伟, 等. 2017-2022年杭州市臭氧浓度与气象因子影响分析 [J]. 环境保护科学, 2025, 51(3):168-174. DOI:10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.202403041.
- [14] 卓玛拉姆, 夏家轩, 冯燕茹, 等. 水稻秸秆还田减缓地表臭氧污染对小麦生长的影响 [J]. 生态学报, 2025, 45(11):5557-5567. DOI:10.20103/j.stxb.202411012677.
- [15] 染野宪治. 日本的臭氧层保护对策 [J]. 世界环境, 2020(5):45-47.
- [16] 田沛霞, 郭秀锐, 樊守彬, 等. 京津冀地区2013-2022年细颗粒物和臭氧污染时空变化及健康效益评估 [J]. 环境污染与防治, 2025, 47(2):14-21. DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.202407164.
- [17] 黄国锋, 沈劲, 陈多宏, 等. 广东省天然源 VOCs 排放特征及臭氧污染影响 [J]. 环境科学学报, 2025, 45(4):322-330. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2024.0401.
- [18] 郭妙娜. 漳州台商投资区城区近地面臭氧污染特征及防控措施分析 [J]. 黑龙江环境通报, 2025, 38(10):128-131. DOI:10.3969/j.issn.1674-263X.2025.10.041.
- [19] 程凯婧, 周变红, 曹磊, 等. 西安夏秋季大气 VOCs 的来源解析及臭氧生成潜势 [J]. 环境科学学报, 2025, 45(2):344-357. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2024.0335.
- [20] 武威, 付丹丹, 李大志. 沈阳市一次环境空气臭氧污染过程特征及溯源分析 [J]. 环境科学导刊, 2025, 44(4):61-66.
- [21] 顾同悦, 谭玉菲, 李琴, 等. 中国臭氧环境空气质量基准制订方法研究 [J]. 环境科学研究, 2024, 37(9):1920-1927. DOI:10.13198/j.issn.1001-6929.2024.05.15.
- [22] 吴冬玲, 王慎阳, 陈璐菡, 等. 2016年-2023年濮阳市城区环境空气臭氧污染特征及变化潜势研究 [J]. 环境科学与管理, 2025, 50(4):45-51. DOI:10.3969/j.issn.1673-1212.2025.04.013.
- [23] 周刚, 尹文君, 晋程绣, 等. 北京市臭氧污染特征及影响因素分析 [J]. 环境生态学, 2025, 7(1):148-154, 174. DOI:10.3969/j.issn.2096-6830.2025.01.19.
- [24] 吴玥弢. 城市大气臭氧污染时空分布特征数值模拟分析 [J]. 能源与环保, 2025, 47(7):53-58. DOI:10.19389/j.cnki.1003-0506.2025.07.009.
- [25] 马赛, 肖兴艳, 周江, 等. 2021-2024年贵阳市臭氧污染特征分析 [J]. 环保科技, 2025, 31(5):13-17. DOI:10.3969/j.issn.1674-0254.2025.05.003.
- [26] 赵健敏, 黄仪之, 陶余伟, 等. 贵阳市臭氧前体物 VOCs 污染特征及来源研究 [J]. 环保科技, 2025, 31(1):1-7. DOI:10.3969/j.issn.1674-0254.2025.01.001.
- [27] 何琰, 曹舒娅, 陈慧敏, 等. 2015-2019年苏州臭氧时空特征及气象影响因子研究 [J]. 气象科学, 2025, 45(2):216-228. DOI:10.12306/2022jms.0100.
- [28] 龚安保, 解欢, 于阳春, 等. 基于随机森林算法的山东省区域臭氧污染事件中气象条件和排放贡献影响研究 [J]. 环境科学研究, 2024, 37(3):493-501. DOI:10.13198/j.issn.1001-6929.2024.01.05.
- [29] 李精文. 临汾市 VOCs 臭氧生成潜势分析与典型重点行业 VOCs 减排治理措施研究 [J]. 山西化工, 2025, 45(4):291-293. DOI:10.16525/j.cnki.cn14-1109/tq.2025.04.098.
- [30] 李清宇. 中北高新区臭氧浓度时间变化特征和影响因素 [J]. 绿色科技, 2025, 27(6):185-189. DOI:10.3969/j.issn.1674-9944.2025.06.034.
- [31] 窦筱艳, 高海鹏, 陈珂, 等. 青海东北部一次臭氧污染过程机制研究 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(z1):46-54. DOI:10.3969/j.issn.1000-6923.2023.z1.006.
- [32] 周宁, 唐凤, 袁鑫, 等. 珠三角某城市一次臭氧污染的应急效果评估与启示 [J]. 环境科学学报, 2024, 44(10):52-63. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2024.0171.
- [33] 冯添.WRF-Chem 模式输出北京 PM2.5 和 O3 质量浓度时间序列数据集(2015年10月)[Data set]. 中国科学院地球环境研究所黄土科学数据中心. <https://doi.org/10.12041/geodata.6292654.ver1.db>. <https://cstr.cn/30764.11.lsdc.20250427.IDENTIFIER.2191.v3>.
- [34] Lin, C. Xi'an Ozone and PM2.5 Dataset (2014-2023) [Data set]. Loess Science Data Center, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences. <https://doi.org/10.12041/geodata.54075916435718.ver1.db>. <https://cstr.cn/30764.11.lsdc.20251112.17015.1750.v3>.
- [35] Lin, C. et al. Elucidating ozone and PM2.5 pollution in the Fenwei Plain reveals the co-benefits of controlling precursor gas emissions in winter haze. Atmos. Chem. Phys. 23, 3595-3607 (2023).