孔少杰,马 静,易洪涛.O_3 暴露与健康研究的文献计量学分析与演化趋势 [J]. 中国环境科学, 2026,46(2):1072-1083.
Kong S J, Ma J, Yi H T. Bibliometric analysis and evolutionary trend of researches on O_3 exposure and health [J]. China Environmental Science, 2026,46(2):1072-1083.

O_3 暴露与健康研究的文献计量学分析与演化趋势

孔少杰[1],马 静[2*],易洪涛[1*] (1.中国人民大学公共管理学院,北京 100872；2.郑州大学政治与公共管理学院,河南 郑州 450001)

摘要：为了系统地了解臭氧(O_3)的暴露与健康风险的研究现状及演化趋势,基于中国知网(CNKI)和 Web of Science (WoS)核心合集数据库进行检索,利用 R 语言的 Bibliometric 功能对 O_3 暴露与健康相关中英文文献进行数据分析与挖掘,并结合绘图软件 Origin 和文献数据可视化 CiteSpace 软件对结果进行可视化分析,揭示该领域的研究发展路径.结果表明:O_3 暴露与健康研究在 2000~2025 年间稳步增长,中英文文献各 582 和 915 篇,且经历了萌芽期(2000~2016 年)和激增期(2017 年至今)两个阶段.英文文献中各国家、机构和作者之间的合作比较紧密.英文研究趋势经历了技术积累与初步关注、暴露评估与健康影响的初步探索、长期暴露与健康研究的深入、健康负担评估与政策引导 4 个阶段.中文关键词主要集中在健康效应与影响、污染源与形成过程以及时空分布与变化 3 个方面,且经历了早期研究与暴露评价(2009~2015 年)、污染源识别(2016~2020 年)以及特定群体的风险与高科技手段的引入(2021~2025 年)3 个阶段的演变.

关键词：臭氧(O_3)；暴露与健康；可视化分析；文献计量；演变趋势
中图分类号：X515 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)02-1072-12

Bibliometric analysis and evolutionary trend of researches on O_3 exposure and health. KONG Shao-jie[1], MA Jing[2*], YI Hong-tao[1*] (1.School of Public Administration and Policy, Renmin University of China, Beijing 100872, China；2.School of Politics and Public Administration, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China). *China Environmental Science*, 2026,46(2)：1072~1083

Abstract：To gain a more systematic understanding of the current status and evolving trends in O_3 exposure and health risk research, literature was retrieved from the CNKI and Web of Science (WoS) core collection databases. Bibliometric tools in R were used to analyze the Chinese and English literature related to O_3 exposure and health. The visualization software Origin and CiteSpace were then used to visualize the results, revealing the research development path in this field. The results showed that research on the health impacts of O_3 exposure increased steadily from 2000 to 2025, with 582 and 915 articles in Chinese and English literature, respectively. The research evolution comprised two phases: the budding phase (2000~2016) and the explosive phase (2017 to present). Collaboration among countries, institutions, and authors was relatively close in the English literature. The trends in English research progressed through four stages: technological accumulation and initial concern, exposure assessment and preliminary exploration of health effects, in-depth study of long-term exposure and health, and health burden assessment and policy guidance. Chinese keywords focused mainly on three aspects: health effects and impacts, pollution sources and formation processes, and temporal-spatial distribution and variation. Chinese literature evolved through three stages: early research and exposure assessment (2009~2015), identification of pollution sources (2016~2020), and the introduction of high-tech methods for risk assessment in specific groups (2021~2025).

Key words：O_3；exposure and health；visual analysis；bibliometrics；evolutionary trends

O_3 在空气中作为二次污染物,通过复杂的化学反应生成,受到氮氧化物(NO_x)和挥发性有机化合物(VOCs)等物质的影响[1-3].O_3 污染的长期存在不仅影响环境质量,也对公众健康构成严重威胁.流行病学研究表明,O_3 暴露与哮喘[4]、慢性阻塞性肺疾病[5]等呼吸系统疾病以及多种心血管疾病[6-7]的发生密切相关;长期暴露还可能通过诱导免疫功能下降[8]和肺功能损伤[9],加剧相关慢性疾病的风险,从而显著增加全球疾病负担.在儿童、老年人以及有基础疾病的易感人群中[10-12],健康风险尤为突出.近年来,随着研究技术的进步,O_3 暴露与健康影响的研究逐渐深入,研究领域逐步从单一的健康效应评估,扩展到多学科交叉的综合研究.然而,尽管在全球范围内对 O_3

收稿日期：2025-07-15
基金项目：国家社科基金一般项目(24BZZ085);中国人民大学 2025 年度拔尖创新人才培育资助计划成果;中国人民大学海外人才科研启动经费(581517006209)
* 责任作者：马 静, 副教授, jingma_zzu@163.com; 易洪涛, 教授, yihongtao@ruc.edu.cn

暴露与健康风险的相关研究成果日益增多,但研究方法、结论以及关注的热点问题存在较大差异,导致了当前领域内的研究难以全面系统地呈现其研究趋势和发展动态.

文献计量学作为一项文献综述的研究方法,近年来在环境科学领域得到了广泛应用.从已有研究看,一类研究以单一环境问题,如以 O_3 污染为研究对象,借助文献计量学分析了我国 O_3 污染研究领域的发文量,主要讨论了 O_3 的现状与演变、成因与来源、影响与效应、管控与路径等[13].另一类研究则借助 CiteSpace 软件对中英文数据库文献进行跨库梳理分析,捕捉减污降碳协同相关研究的关键问题和主题演变规律[14].通过对 O_3 暴露与健康研究的相关文献进行计量学分析,能够揭示该研究领域的发展趋势、热点问题以及跨学科的合作网络,帮助研究人员和政策制定者识别关键研究方向和全球科研动态.

基于此,本研究通过系统的文献计量和可视化分析技术,揭示 O_3 暴露与健康领域的研究动态、热点问题及跨学科协同发展的趋势.以期为相关政策的制定、研究的进一步深入以及国际合作的推进提供参考.

1　材料与方法

1.1　数据来源

中文文献通过中国知网(CNKI)数据库进行检索,以“臭氧 or O_3 and 暴露 and 健康”为主题,删除会议,报纸和成果,得到了 582 篇相关文献,其中包括学术期刊 155 篇,硕博学位论文 427 篇.为了全面涵盖全球研究成果,英文文献则在 Web of Science (WoS) 核心合集数据库中进行检索,限定语种为 English,文献类型为 Article 和 Review Article,检索主题为“O_3 and exposure and health”,共获得 915 篇文献.中英文文献的检索时间范围设定为 2000 年 1 月 1 日~2025 年 6 月 16 日,分别以“Refworks”和“Plain text file”格式导出,用于进一步分析.

为进一步验证检索策略的全面性和敏感性,本研究对原有检索式进行了敏感性分析.首先,在 WoS 和 CNKI 检索式基础上,分别加入“oxidative stress”“氧化应激”相关术语进行补充检索.结果显示:在 WoS 数据库中检索到 78 篇文献,在 CNKI 数据库中检索到 43 篇文献.经比对,大部分文献已包含在原有的 915 篇英文文献(WoS)和 582 篇中文文献(CNKI)之中,未被覆盖的文献数量有限,表明原始检索式具有较高的覆盖度.此外,补充使用 PubMed 数据库进行对比检索.以“ozone AND exposure AND health”为核心检索式,共获得 1182 篇英文文献.与 WoS 数据库对比发现,其中大部分文献已被 WoS 收录,未被覆盖的文献数量为 267 篇,由此可见,WoS 与 PubMed 两个数据库的结果高度一致,差异主要来源于收录范围和文献类型的不同.因此,本研究的核心结论和趋势分析具有稳健性.

1.2　研究方法

结合文献计量学方法与科学知识图谱分析,采用可视化技术对 O_3 暴露与健康研究领域的发展脉络与前沿动态进行了定量分析.首先,通过对 CNKI 和 WoS 数据库的检索结果,使用 R 语言的 Bibliometric 功能,对文献的发表时间、来源国(地区)、研究领域、发表期刊等多维度信息进行统计,通过 Origin 绘图软件生成发文量统计,系统概述该领域的发文现状.此外,研究利用 CiteSpace 软件对文献中的“机构”、“国家”以及“作者”节点的合作网络进行分析,揭示学术合作的结构和主要的研究团队.同时,研究通过分析“关键词”节点的共现网络,结合突现功能,识别当前 O_3 暴露与健康研究中的核心主题和研究热点,揭示当前领域内最受关注的研究问题及未来可能的发展方向.

2　结果分析

2.1　总体概况

2.1.1　发文量演变特征　由图 1 可见,O_3 暴露与风险研究的文献数量呈显著增长趋势,CNKI 和 WoS 数据库的总量分别为 582 和 915 篇.该领域发文量可分为两个阶段:萌芽阶段(2000~2016 年),发文量较少,中英文分别为 70 篇和 47 篇,且中英文每年发文量均小于 15,研究主要集中在 O_3 暴露的初步评估与健康效应的基础研究;激增阶段(2017 年至今),该阶段中英文文献数量显著增加,分别发表 512 篇和 868 篇,表明 O_3 暴露与健康相关研究得到了越来越多的关注和重视,特别是近几年学术研究的兴趣和资源迅速增加,反映了这一领域的政策推动、社会关注和科研技术的发展.此外,由于 2000~2009 年英文文献的发文量较少,每年发文总量均少于 3 篇,因此仅展

示了 2010~2025 年各国的发文情况(图 2).在统计各国英文发文量时,使用 Bibliometric 中的 Countries' Production over Time 功能,即一篇国际合作论文同时计入所有参与国家的发文量,这样能够完整反映各参与国家在国际合作研究中的贡献情况.在英文文献发文量排名前 10 的国家中,中国以 417 篇位居首位,占总发文量的 45.57%,显示其在 O_3 暴露与健康研究领域的高活跃度和重要影响力,美国(226 篇,占 24.70%)和英国(61 篇,占 6.67%)分列第 2 位、第 3 位,其他国家发文量均未超过 60 篇.

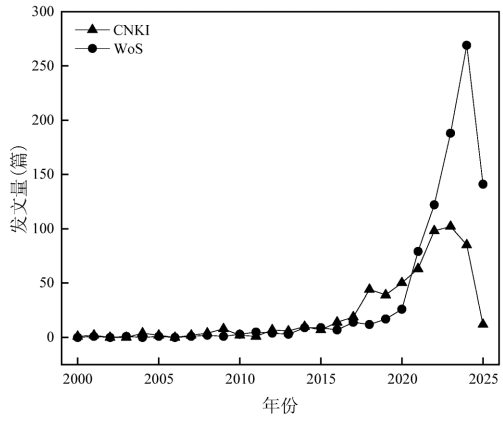


图 1 2000~2025 年中英文 O_3 暴露与健康研究领域发文量

Fig.1 Number of Chinese and English papers in the research field of O_3 exposure and health from 2000 to 2025

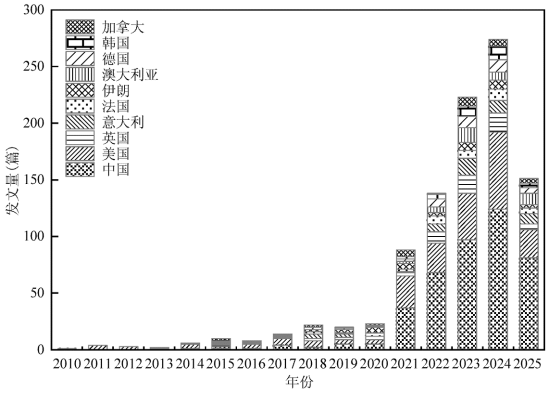


图2 2010~2025年英文文献发文量排名前10国家的发文量

Fig.2 Number of English papers published in the top 10 countries from 2010 to 2025

2.1.2 英文文献合作关系分析 (1)发文国家合作关系:英文文献的国际合作网络(图3(a))显示,节点数 N=84,连线数 E=502(Density=0.144),表明共有 84 个国家参与研究,共形成 502 条合作连线,网络密度为 0.144,反映出较高的国际合作水平,并形成以中国(中心度 0.04)、美国(中心度 0.22)、英国(中心度 0.18)为核心的 3 大合作集群.因此,O_3 暴露与健康领域的研究呈现出强烈的全球性合作特征,美国在国际合作网络中具有较强的桥梁作用,而中国凭借庞大的研究产出在该领域展现了突出的引领地位.

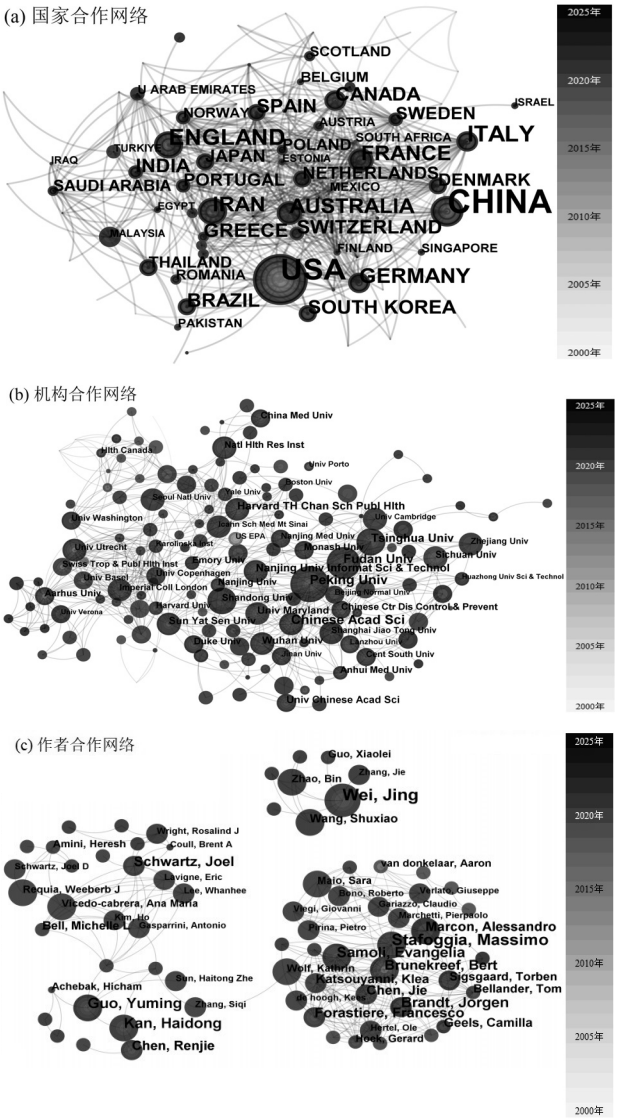


图 3 英文文献国家、机构和作者间合作网络

Fig.3 Countries, institution and authors cooperation network of English papers

(2)主要研究机构合作关系:英文发文量前 3 的机构分别为中国科学院(Chinese Academy of Sciences, 50 篇)、北京大学(Peking University, 49 篇)和复旦大学(Fudan University,37 篇).英文文献机构合作网络(图 3(b))显示,N=386,E=1243 (Density=0.0167),表明有 386 个研究机构间形成了 1213 条合作连线,网络密度为 0.0167,表明合作较紧密,主要形

成以北京大学(中心度 0.11)、中国科学院(中心度 0.12)、清华大学(中心度 0.09)以及复旦大学(中心度 0.04)为中心的合作网络.此外,不仅国内机构之间的合作非常密切,同时与国外的合作也非常频繁.具体表现为,国内的顶尖机构(如北京大学、清华大学、复旦大学、中国科学院)与国外的知名大学(如哈佛大学、斯坦福大学、剑桥大学等)之间存在广泛而紧密的合作关系.机构之间不仅在国内形成了强大的合作网络,而且在全球范围内 O_3 暴露与健康领域中扮演着重要的角色.总之,国内外的科研力量和知识共享形成了一个紧密的合作体系,推动该领域的全球性研究发展.

(3)作者合作关系:由英文文献作者合作网络(图 3(c))可见,N=521,E=1181(Density=0.0087),表明共有 521 位作者形成了 1181 条合作连线.网络密度为 0.0087 显示出该领域的学者之间有着密切的合作关系,尤其是一些核心作者如 Guo, Yuming 和 Wei, Jing 等,他们在合作网络中占据中心位置,并与其他研究人员有着广泛的合作.Guo, Yuming 等人的研究主要聚焦在室外 O_3 污染相关的健康风险[15-16],如室外 O_3 增加会加剧心血管死亡负担,心肺死亡率,并分析了长期 O_3 暴露与成人发病哮喘之间的因果关系[17].Wei, Jing 等人探讨心血管死亡率与广泛范围内的长期 O_3 暴露水平之间的关联[18],并分析短期暴露于 O_3 与城乡中风(缺血性和出血性)死亡率之间的关联[19].合作网络的紧密性显示了学者们在信息交流和研究合作上的频繁互动,而图中作者来自多个国家和地区,体现了该领域的国际化合作趋势,尤其是中国学者在这一领域的积极参与.总体而言,这一合作网络反映了 O_3 暴露与健康研究的全球化特征和协作密集性,推动了该领域的深入发展.

2.1.3　所属期刊分布及引用情况　表 1 为 O_3 暴露与健康研究发文量排名前 10 位的中英文期刊.从英文期刊的发文量来看,Environmental Research(95 篇)、Science of the Total Environment(66 篇)、Environmental Pollution(47 篇)等期刊的发文数量较为突出,显示出这些期刊在 O_3 暴露与健康领域的学术影响力较大.这些期刊的影响因子和学术声誉较高,因此吸引了更多的研究投稿.与英文期刊相比,中文期刊的发文量普遍较低,均少于 20 篇,显示出中文期刊的学术研究集中度较低,更多集中在国内研究领域.从期刊名称来看,英文期刊更多集中在环境科学和污染研究方面(如 Atmospheric Environment、Environmental International 等),而中文期刊则涉及更广泛的医学研究领域,包括公共卫生和疾病控制(如现代防疫医学、中华疾病控制杂志等).

表 1　发文量排名前 10 的中英文期刊

Table 1　Top 10Chinese and English journals with papers publications

英文期刊名称	发文量(篇)	2024 影响因子	中文期刊名称	发文量(篇)	2024 影响因子
Environmental Research	95	7.7	环境与职业医学	18	1.437
The Science of the Total Environment	66	8.0	环境与健康杂志	17	–
Environmental Pollution	47	7.3	环境卫生学杂志	14	1.061
Environment International	40	9.7	中国环境科学	13	3.741
Atmospheric Environment	36	3.7	环境科学	10	6.137
Ecotoxicology and Environmental Safety	34	6.1	环境科学研究	7	4.848
Atmosphere	19	2.3	科学通报	5	2.313
Environmental Science and Pollution Research	19	0.99(2023)	环境科学学报	4	3.169
Journal of Hazardous Materials	19	11.3	中华疾病控制杂志	4	3.139
Air Quality Atmosphere and Health	16	2.9	现代预防医学	4	2.646

2.1.4　研究领域演变特征　表 2 所列的研究领域来源于 WoS 与 CNKI 数据库的自带学科分类体系.由于两个数据库的学科划分方式存在差异,对部分交叉学科进行了归并,以保持中英文分类的对应性和可比性.需要指出的是,这些学科与“O_3 暴露与健康”的关联程度存在差别.其中,环境科学与工程主要用于揭示 O_3 的来源与暴露水平,公共卫生与预防医学和临床医学相关学科(如呼吸、心血管领域)直接提供了 O_3 暴露与健康的流行病学与临床证据,环境毒理学与分子生物学则有助于阐明 O_3 对机体损伤的机制途径.通过这种分类,可以更全面地展示该研究领域在不同学科背景下的发展格局和学术贡

献.由表 2 可见,中英文研究在 O_3 暴露与健康风险领域有很多共同点,特别是在环境科学(英文 613 篇,中文 466 篇)、公共健康(英文 241 篇,中文 207 篇)以及大气科学(英文 94 篇,中文 40 篇)等领域,但在具体的研究侧重点上有所不同.英文文献更注重 O_3 在工程学(Engineering,77 篇)和毒理学(Toxicology,76 篇)的研究,而中文则更多关注呼吸系统疾病(36 篇)和心血管疾病(36 篇)等医学方面的研究.两者可以相互补充,共同推动对 O_3 暴露的全方位了解与应对策略的研究.

表 2 中英文文献研究领域学科排名(前 10 名)

Table 2 Discipline ranking in Chinese and English literature (Top 10)

英文研究领域	发文量(篇)	中文研究领域	发文量(篇)
Environmental Sciences Ecology	613	环境科学与资源利用	466
Public Environmental Occupational Health	241	预防医学与卫生学	207
Meteorology Atmospheric Sciences	94	气象学	40
Engineering	77	呼吸系统疾病	36
Toxicology	76	心血管系统疾病	36
Science Technology Other Topics	61	神经病学	22
Chemistry	22	儿科学	19
General Internal Medicine	18	妇产科学	19
Geology	14	内分泌及全身性疾病	14

2.2 英文 O_3 暴露与健康研究热点与前沿趋势

2.2.1 关键词的热点分析

由英文文献 O_3 暴露与健康研究领域关键词共现网络(图 4)可见,在 O_3 暴露与健康风险研究的关键词分析中,空气污染(air pollution)和臭氧(ozone)是研究的核心主题,表明研究重点集中在 O_3 污染对人类健康的影响.研究中提到的暴露(exposure)和健康(health)关键词突出表明该领域的研究重点是探讨 O_3 暴露与健康问题之间的密切关系.此外,$PM_{2.5}$ 和颗粒物(particulate matter)也是频繁出现的关键词,强调了颗粒物污染与 O_3 暴露共同作用对健康的影响.

从疾病的角度来看,关键词如死亡率(mortality)、呼吸系统疾病(respiratory disease)、心血管疾病(cardiovascular disease)表明,O_3 暴露对各类疾病,尤其是呼吸系统和心血管系统的影响具有显著的公共卫生风险.关键词炎症(inflammation)和肺功能(lung function)进一步突出了 O_3 暴露对人体生理的直接影响,特别是对免疫系统和呼吸功能的损害.

在研究方法方面,模型(model)和风险评估(risk assessment)等关键词表明,研究通过建立模型来评估 O_3 暴露的健康风险,并通过使用时间序列(time series)、随机森林(random forest)和机器学习(machine learning)等先进的分析技术来研究 O_3 暴露的长期和短期影响.

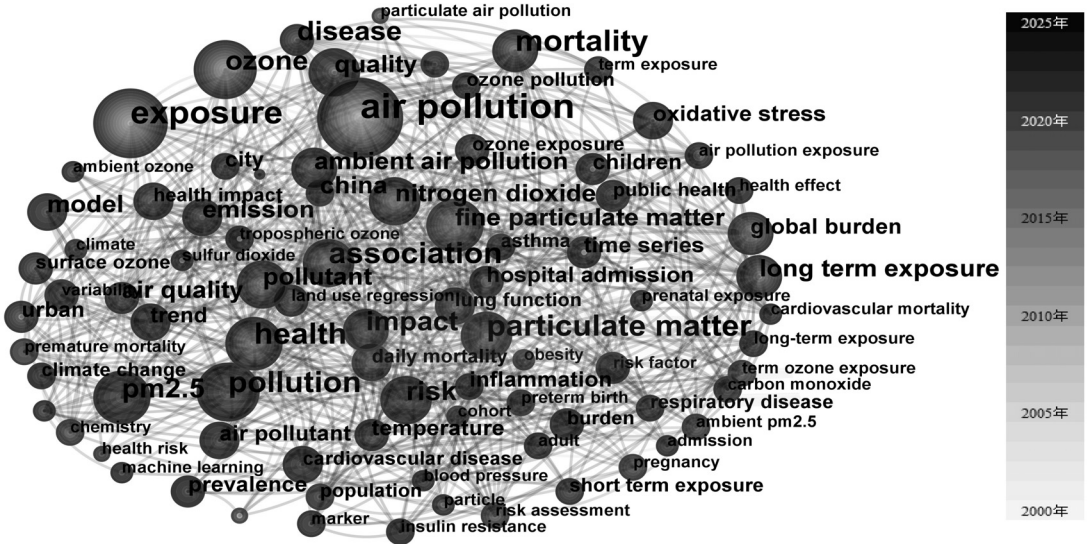


图 4 英文文献 O_3 暴露与健康研究领域关键词共现网络

Fig.4 Co-occurrence network analysis of keywords in English literature in the research field of O_3 exposure and health

环境因素也是该领域研究的重要内容,城市(urban)和户外空气质量(outdoor air quality)指向了空气污染在城市环境中的较高浓度及其对居民健康的危害.关键词长期暴露(long-term exposure)和短

期暴露(short-term exposure)则反映出该领域对不同暴露时长的健康影响差异的关注.

最后,关键词如公共卫生(public health)和环境正义(environmental justice)表明,研究不仅关注 O_3 对人体健康的直接影响,也涉及社会公平,特别是如何确保弱势群体(如儿童(children)、孕妇(pregnancy))免受严重空气污染的影响.这些关键词的出现揭示了 O_3 暴露研究的社会和政策层面的广泛关注.

2.2.2　研究趋势与前沿　由表 3 可见,该领域研究趋势可以分为以下 4 个阶段:技术积累与初步关注(2001~2010 年):被动采样器(passive sampler)是第一个显现出来的关键词,突显强度为 2.02,表明这一时期的研究主要集中在 O_3 暴露的监测技术和数据采集方法的开发上[20].研究开始关注如何准确地测量和采集 O_3 暴露数据,但研究的强度较低,主要处于技术积累阶段.

暴露评估与健康影响的初步探索(2005~2015 年):在此阶段,沉积(deposition)和颗粒物空气污染(particulate air pollution)逐渐突显,标志着研究开始关注 O_3 污染与环境中的沉积过程[21].随着对 O_3 暴露和空气污染的深入认识,研究逐渐转向了暴露评估和其对呼吸系统等健康问题的初步分析,特别是对颗粒物与 O_3 共同暴露对健康的综合影响[22].

长期暴露与健康研究的深入(2008~2020 年):从 2008 年开始,关键词如反应(response)、肺功能(pulmonary function)、氮氧化物(nitrogen oxide)等逐渐突显,研究的焦点转向了 O_3 暴露对健康的具体影响,特别是对呼吸系统的损害[23].流行病学(epidemiology)和暴露评估(exposure assessment)等关键词的突现表明,研究逐步转向了基于流行病学的方法和更精细的暴露评估,探索 O_3 暴露与健康之间的具体关联[24].

健康负担评估与政策引导(2017~2025 年):在这一阶段,关键词如全球负担(global burden)、阻塞性肺病(obstructive pulmonary disease)和日常死亡率(daily mortality)突显,表明 O_3 暴露对全球健康负担的影响,尤其是呼吸系统疾病和死亡率的增加,已成为研究的核心内容[25].此外,系统回顾(systematic review)和长期暴露(term exposure)也在此期间突显,强调对 O_3 暴露影响的系统评估与长期暴露健康风险的研究,尤其是对 O_3 暴露的政策与健康评估方向的关注[26].

表 3　英文文献 O_3 暴露与健康研究关键词突现图谱

Table 3　Emerging keywords mapping in the research field of O_3 exposure and health from English literature

关键词	突现强度	突现开始	突现结束	突现图谱(2000~2025 年)
passive sampler	2.02	2001	2010	
deposition	2.20	2005	2015	
particulate air pollution	4.69	2007	2020	
response	1.73	2008	2022	
ambient air	1.99	2010	2020	
pulmonary function	1.88	2010	2014	
nitrogen oxide	1.64	2011	2017	
epidemiology	2.62	2012	2021	
outdoor	1.82	2012	2022	
environment	2.04	2013	2018	
air pollution exposure	3.38	2015	2020	
exposure assessment	1.81	2016	2021	
global burden	4.45	2017	2021	
obstructive pulmonary disease	3.43	2017	2020	
daily mortality	2.65	2017	2019	
land use regression	2.42	2017	2021	
hospital admission	1.72	2017	2019	
ambient air pollution	3.36	2018	2020	
term ozone exposure	2.98	2019	2022	
systematic review	1.93	2020	2023	
term exposure	1.94	2021	2023	

2.3　中文 O_3 暴露与健康研究的热点与发展趋势

2.3.1　关键词的热点分析　由图 5 可见,中文 O_3 暴

露与健康研究主要集中在健康效应与影响、污染源与形成过程以及时空分布与变化 3 个方面.

在健康效应与影响方面,常见的关键词有健康效应、健康风暴、呼吸系统、健康影响、心血管、暴露效应、疾病、呼吸道等.这些关键词集中于 O_3 暴露对人体健康的不同影响,O_3 对呼吸系统的影响已被广泛研究,尤其是对肺部的损伤,可能导致或加重哮喘、慢性阻塞性肺病、肺功能下降等.除了呼吸系统,O_3 暴露还可能对心血管系统造成影响,增加心脏病和其他心血管疾病的发生率.此外,不同的人群对 O_3 暴露的敏感性存在显著差异,相关关键词如“人群”、“儿童”、“老年人”、“易感人群”等,揭示了易感人群在 O_3 暴露中的健康风险.儿童、老年人以及已有呼吸道或心血管疾病的人群在 O_3 污染中面临更高的健康风险.因此,研究通常关注这些易感人群的暴露水平及其健康影响.这类研究可以帮助研究者识别哪些群体在 O_3 污染下需要特别关注,并为制定相应的健康保护措施提供依据.

污染源与形成过程的关键词主要有大气污染、空气污染、臭氧污染、污染物、污染源、温室气体、二次污染、化学反应等.这一类关键词关注的是 O_3 的形成机制及其与其他污染物的相互作用.O_3 作为二次污染物,主要由 NO*x* 和 VOCs 在阳光照射下反应生成.因此,O_3 污染的源头可以追溯到工业排放、交通尾气、农业活动等.识别 O_3 的污染源并采取有效的减排措施,对于降低 O_3 浓度、改善空气质量,以及减少由 O_3 暴露引发的健康问题至关重要.

O_3 浓度的时空分布具有显著的季节性和区域差异,与之相关的关键词有时间序列、时空分布、季节性分布、时空变化、时间效应等.气温、湿度、风速等气象因素直接影响 O_3 的生成和消散过程,导致 O_3 浓度在不同季节和地区有显著差异.通过时空分析,能够追踪 O_3 浓度的变化趋势,从而评估不同时间和地点的暴露风险.这对于公共健康干预和污染控制策略的实施提供了基础数据.

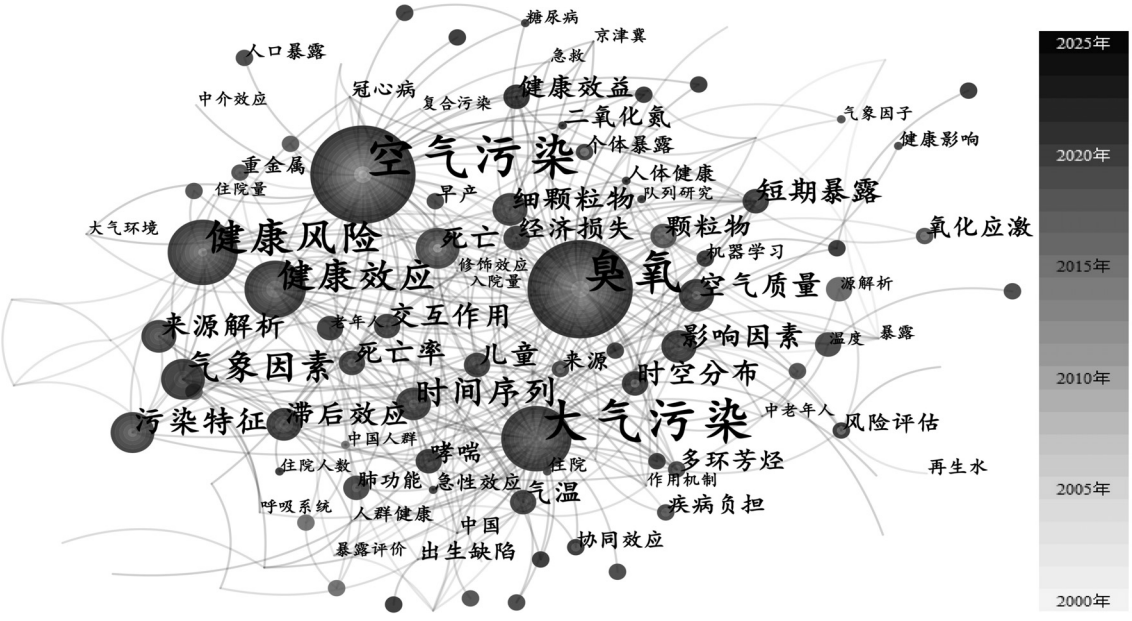


图 5 中文文献 O_3 暴露与健康研究领域关键词共现网络

Fig.5 Co-occurrence network analysis of keywords in Chinese literature in the research field of O_3 exposure and health

2.3.2 发展趋势 由表 4 可见,中文文献中 O_3 暴露与健康研究的关键词研究经历了 3 个阶段的演变:①早期研究与暴露评价(2009~2015 年):在这一阶段,研究主要聚焦于基础的暴露评估和健康效应的初步分析.通过流行病学方法,如时间序列分析[27-28]和风险评估[29],开始量化不同地区和时间段的 O_3 暴露情况,并探讨其对呼吸系统等健康问题的影响.尽管这一阶段的研究相对基础,但为后续的更深入分析奠定了基础.②污染源识别(2015~2020 年):随着研究的深入,研究开始转向 O_3 污染源的识别和具体暴露情境的分析,尤其是室内环境对 O_3 暴露的影响[30].研究者探讨了不同来源的 O_3 污染(如交通、工业排

放等)以及不同环境下 O_3 的分布特征,进一步明确了 O_3 暴露与健康风险之间的关系[31].同时,呼吸系统疾病(如哮喘)的影响开始成为研究的热点[32].③特定群体的风险与高科技手段的引入(2021~2025 年):研究着重关注特定群体,如儿童和中老年人在 O_3 暴露中的健康风险,特别是这些群体在长期暴露下可能面临的更高风险[7-8].同时,结合气象因素和机器学习等先进技术,深入分析 O_3 暴露的时空分布[33]、滞后效应[34]以及暴露后长期健康影响[35]的变化.这一阶段的研究更加复杂,探索了 O_3 暴露对健康的长期和交互作用效应[36],为未来的政策制定提供了重要依据.

表 4　中文文献 O_3 暴露与健康研究关键词突现图谱

Table 4　Emerging keywords mapping in the research field of O_3 exposure and health from Chinese literature

关键词	突现强度	突现开始	突现结束	突现图谱(2000~2025 年)
暴露评价	1.62	2009	2016	
时间序列	0.92	2009	2013	
健康效应	0.78	2009	2011	
流行病学	1.11	2013	2017	
风险评估	0.96	2013	2015	
来源识别	1.16	2014	2017	
室内环境	1.03	2014	2018	
暴露	1.13	2015	2017	
分布特征	1.08	2015	2018	
呼吸系统	0.73	2018	2020	
细颗粒物	1.58	2020	2022	
中老年人	1.09	2020	2022	
儿童	2.2	2021	2023	
交互作用	1.9	2021	2023	
哮喘	1.24	2022	2025	
气象因素	4.16	2023	2025	
时空分布	2.66	2023	2025	
健康效益	2.16	2023	2025	
机器学习	1.7	2023	2025	
滞后效应	1.48	2023	2025	

3　讨论

3.1　研究进展

3.1.1　暴露评估方法的演进　O_3 暴露评估经历了从静态向动态的转变.早期研究主要依赖固定空气质量监测站点的数据[37],难以反映暴露的时空异质性.近年来,借助移动监测、遥感技术及高分辨率气象与大气扩散模型[38-41],能够更精确地模拟 O_3 的空间分布与季节变化,显著提升了暴露数据的时效性和准确性,为健康风险评估提供了更坚实的数据基础.

3.1.2　生物学机制的深入探索　在机制层面,研究从细胞与分子水平揭示了 O_3 暴露对机体健康的影响路径.具体而言,O_3 暴露可通过激发氧化应激[42]和慢性炎症反应[43],诱导自由基生成,引发 DNA 损伤、细胞衰老及基因突变[44].此外,O_3 还可能导致免疫功能紊乱,促进白细胞活化,加剧由感染或过敏引发的慢性疾病[45].当前研究逐步向分子水平延伸,开始识别潜在的生物标志物,如炎症因子、8-OHdG 及 ROS 等[6,46-47],以期实现早期健康风险预警.

3.1.3　健康效应的流行病学证据　流行病学研究不断深化,关注点从短期健康影响拓展至长期慢性疾病风险.自 2000 年以来,多项大型队列研究证实,长期暴露于 O_3 污染与呼吸系统疾病、心血管疾病、糖尿病等多种慢性病的发生密切相关[48-51].同时,儿童、孕妇及老年人等敏感人群因生理特点,对 O_3 更为敏感.例如,儿童在高 O_3 环境中生活,哮喘与过敏性疾病风险显著上升[52];老年人则因生理机能退化及暴露累积,健康负担日益加重[9].

3.1.4　健康负担评估与政策响应　随着 O_3 污染问题日益严峻,健康负担评估成为政策制定的重要依据[53].研究者结合空气质量监测[54]、疾病负担[55]及

人口统计数据[5,33],定量评估 O_3 污染的公共健康影响.WHO 报告指出,O_3 每年导致全球约 40 万人死亡,尤其在心血管和呼吸系统疾病方面负担显著[56].相关研究成果已推动多个国家制定更严格的空气质量标准与减排政策.

3.1.5 中英文研究热点差异 中文研究往往与国家特定的社会背景和研究资金的配置有关.例如,针对特定群体的风险研究,主要受到中国特有的城乡差异和健康不平等的推动[57-58];而高科技手段的应用,是由于中国近年来在环境监测技术、人工智能与大数据领域的迅速发展[37,59].英文研究更多关注健康负担评估与政策引导,这与西方国家对环境健康的早期重视、健全的公共健康系统和数据统计框架密切相关[60-61].此外,健康负担的评估方法(如 DALY)已成为许多国际组织、政府部门和学术界研究的重要工具[15,62],且这些方法对政策制定和健康资源分配有重要指导意义.

3.2 研究展望

3.2.1 O_3 暴露与健康的因果机制仍不明确 流行病学研究普遍揭示了 O_3 暴露与健康问题之间的关联,但目前关于其具体的生物学机制和因果关系的研究尚不充分.O_3 暴露通过什么途径引发炎症反应、免疫系统功能下降、肺功能受损以及心血管疾病的发生,这些机制仍是未来研究的重要方向.此外,如何准确捕捉和量化 O_3 暴露对人体生理的具体影响仍是研究中的一大难题.

3.2.2 研究方法和技术的局限性 在 O_3 暴露与健康研究中,目前已经采用了大量先进的监测技术,如被动采样器和空气质量传感器,然而这些技术仍面临一定的局限性.例如,基于时间序列分析的暴露评估方法虽然能够揭示长期暴露对健康的影响,但却无法精确捕捉瞬时暴露的效应.此外,目前大多数研究依赖于模型推算和环境数据的关联分析,缺乏直接的生物医学实验数据,这使得某些健康效应的评估存在一定的不确定性.因此,未来研究需要结合更多的现场监测数据和生物标志物,以进一步揭示 O_3 暴露与健康之间的因果关系.

3.2.3 O_3 暴露与特定群体健康风险的差异 O_3 暴露对不同人群健康的影响存在差异,尤其是儿童、老年人和患有慢性疾病的易感人群.未来的研究应更深入地探讨特定人群对 O_3 暴露的敏感性.例如,儿童的免疫系统和呼吸系统尚未完全发育,对空气污染的反应可能更为敏感;而老年人群体常常伴随有基础性健康问题,如心血管疾病和肺功能减退,对 O_3 的暴露可能会加剧病情的进展.因此,特定人群的健康风险评估应成为未来 O_3 暴露与健康研究的核心议题.

3.2.4 全球政策和公共健康的应对 全球气候变化和碳中和目标的提出使得 O_3 暴露的治理问题日益受到关注.全球减排目标的实现不仅有助于减缓气候变化,也能减少 O_3 暴露对人类健康的负面影响.O_3 暴露与健康影响的研究已经开始与环境政策、公共健康干预等领域的研究紧密结合,尤其是在发展中国家和城市化进程较快的地区.然而,在许多国家和地区,空气质量标准仍未充分考虑 O_3 的健康影响.因此,未来应在全球范围内加强 O_3 暴露的监测与评估,并推动基于健康影响的空气质量标准的制定.此外,先进的环境监测技术不断发展,如遥感技术和大数据分析的应用,未来 O_3 暴露的评估将更加精准,这为政策制定和公众健康干预提供了更有力的支持.

在中国“十四五”大气污染防治规划的政策背景下,O_3 暴露与健康研究亟需进一步服务于国家战略目标.未来应聚焦三方面路径:一是技术创新,利用遥感监测、大数据和机器学习方法,提高 O_3 浓度时空分布预测和健康风险预警能力;二是重点人群保护,结合我国老龄化与儿童健康保护的需求,建立易感人群的健康风险监测与干预体系;三是区域协同,强化京津冀、长三角等重点区域的大气联防联控与跨区域健康风险评估,推动区域治理和公共健康保障的协同提升.

4 结论

4.1 O_3 暴露与健康研究中英文相关研究文献数量呈现显著上升趋势,经历了由萌芽期向快速发展期的转变,学术关注度不断提升.英文文献显示出紧密的国际合作网络,且各机构之间建立了广泛合作.O_3 暴露与健康研究已从初步探索走向多层次、跨学科和国际化的发展阶段.

4.2 O_3 暴露与健康研究热点呈现出显著的阶段性演化特征.英文研究大致经历了从监测技术与暴露评估,到长期健康效应探讨,再到健康负担评估与政策引导的演进过程;中文研究则依次聚焦于基础性暴露与健康效应分析、污染源识别及暴露特征研究,

以及特定人群风险和高新技术方法的引入.

参考文献：

[1] Li K, Jacob D J, Liao H, et al. A two-pollutant strategy for improving ozone and particulate air quality in China [J]. Nat Geosci, 2019, 12(11):906-910.

[2] Liu H, Liu S, Xue B, et al. Ground level ozone pollution and its health impacts in China [J]. Atmospheric Environment, 2018,173:223-230.

[3] Lu X, Hong J, Zhang L, et al. Severe surface ozone pollution in China: A global perspective [J]. Environmental Science and Technology Letters, 2018,5(8):487-494.

[4] Dearborn L C, Hazlehurst M F, Sherris A R, et al. Early-life ozone exposure and asthma and wheeze in children [J]. JAMA Network Open, 2025,8(4):e254121.

[5] 夏永杰,周　璐,牛　越,等.2020 年中国大气臭氧对慢性阻塞性肺病死亡影响的疾病负担分析和健康经济学评价 [J]. 环境科学研究, 2023,36(2):237-245.
Xia Y J, Zhou L, Niu Y, et al. COPD mortality burden and related health economic assessment associated related with to ambient ozone in 2020 in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2023,36(2): 237-245.

[6] 姜云星,白丽君,吴少伟.臭氧短期暴露对人群心血管健康及相关表观遗传标志物的影响 [J]. 兰州大学学报(医学版), 2025,51(1): 12-25.
Jiang Y X, Bai L J, Wu S W. Progress in research into the effects of short-term ozone exposure on cardiovascular health and related epigenetic markers in the population [J]. Journal of Lanzhou University (Medical Sciences), 2025,51(1):12-25.

[7] 贾云飞,陈春静,王恒学,等.南京市大气 PM_{10} 短期暴露对心血管疾病死亡的影响 [J]. 环境与职业医学, 2020,37(8):753-758.
Jia Y F, Chen C J, Wang H X, et al. Effect of short-term exposure to PM_{10}on mortality of cardiovascular diseases in Nanjing [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2020,37(8):753-758.

[8] 方欣怡,陈仁杰,阚海东,等.臭氧暴露对哮喘的影响及作用机制 [J]. 上海预防医学, 2024,36(3):303-310.
Fang X Y, Chen R J, Kan H D, et al. The effect of ozone exposure on asthma and the potential mechanisms [J]. Shanghai Journal of Preventive Medicine, 2024,36(3):303-310.

[9] 陈嘉惠,胡大宇,贾　旭,等.大气臭氧短期监测指标与健康年轻人肺功能和气道炎症的关联 [J]. 北京大学学报(医学版), 2020,52(3): 492-499.
Chen J H, Hu D Y, Jia X, et al. Monitoring metrics for short-term exposure to ambient ozone and pulmonary function and airway inflammation in healthy young adults [J]. Journal of Peking University(Health Sciences), 2020,52(3):492-499.

[10] 谢晓栋,胡建林,张远航.我国臭氧污染研究热点与趋势的文献计量分析 [J]. 中国环境科学, 2024,44(12):6513-6521.
Xie X D, Hu J L, Zhang Y H. Research topic and trend analysis of ozone pollution in China based on bibliometric review [J]. China Environmental Science, 2024,44(12):6513-6521.

[11] 张家韬.基于出生队列的大气臭氧短期暴露与婴幼儿哮喘/喘息的关联性研究 [D]. 济南:山东大学, 2024.
Zhang J T. The association between short-term exposure to ambient ozone and infant asthma/wheezing, based on a birth cohort [D]. Jinan: Shandong University, 2024.

[12] 黄忠国,杨丽莉,卓煜琳,等.气温长期暴露与中老年人心血管代谢性疾病共病发生发展关联的队列研究 [J]. 中国慢性病预防与控制, 2025,33(4):247-253,259.
Huang Z G, Yang L L, Zhuo Y L, et al. A cohort study on the correlation between long-term temperature exposure and the development and progression of cardio-metabolic diseases comorbidities in the middle-aged and old populations [J]. Chinese Journal of Prevention and Control of Chronic Diseases, 2025,33(4): 247-253,259.

[13] 李　燃,夏依章,张　艳,等.2020 年成渝地区大气污染所致老年人群健康风险评估及预测分析 [J]. 中国医药导报, 2023,20(14):159-162.
Li R, Xia Y Z, Zhang Y, et al. Health risk assessment and prediction analysis of elderly population caused by air pollution in Chengdu-Chongqing area in 2020 [J]. China Medical Herald, 2023, 20(14):159-162.

[14] 孔少杰,易洪涛.基于文献计量学的减污降碳政策研究进展与展望 [J]. 环境科学研究, 2025,38(2):231-242.
Kong S J, Yi H T, Research progress and prospects of pollution reduction and carbon emission mitigation policies: A bibliometric analysis [J]. Research of Environmental Sciences, 2025,38(2):231-242.

[15] Sun H Z, Daalen K R V, Morawska L, et al. An estimate of global cardiovascular mortality burden attributable to ambient ozone exposure reveals urban-rural environmental injustice [J]. One Earth, 2024,7(10):1803-1819.

[16] Sun H Z, Zhao J C, Liu X, et al. Antagonism between ambient ozone increase and urbanization-oriented population migration on Chinese cardiopulmonary mortality [J]. Innovation, 2023,4(6):100517.

[17] Zhang J Y, Ai B Z, Guo Y M, et al. Long-term exposure to ambient ozone and adult-onset asthma: A prospective cohort study [J]. Environmental Research, 2024,252(2):118962.

[18] Zhang Z L, Wang C Q, Lin C Y, et al. Association of long-term exposure to ozone with cardiovascular mortality and its metabolic mediators: Evidence from a nationwide, population-based, prospective cohort study [J]. The Lancet Regional Health-Western Pacific, 2024, 52:101222.

[19] Zhao K, He F F, Zhang B Y, et al. Short-term ozone exposure on stroke mortality and mitigation by greenness in rural and urban areas of Shandong province, China [J]. BMC Public Health, 2024,24(1): 2955.

[20] Cox R M. The use of passive sampling to monitor forest exposure to O_3, NO_2 and SO_2: A review and some case studies [J]. Environmental Pollution, 2003,126(3):301-311.

[21] Handley T, Grulke N E. Interactive effects of O_3 exposure on California black oak (Quercus kelloggii Newb.) seedlings with and without N amendment [J]. Environmental Pollution, 2008,156(1):53-60.

[22] Geels C, Andersson C, Hänninen O, et al. Future premature mortality due to O_3, secondary inorganic aerosols and primary PM in Europe-

sensitivity to changes in climate, anthropogenic emissions, population and building stock [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015,12(3):2837-2869.

[23] Sticozzi C, Pecorelli A, Romani A, et al. Tropospheric ozone affects SRB1levels via oxidative post-translational modifications in lung cells [J]. Free Radical Biology and Medicine, 2018,126:287-295.

[24] Kaplan G G, Tanyingoh D, Dixon E, et al. Ambient ozone concentrations and the risk of perforated and nonperforated appendicitis: A multicity case-crossover study [J]. Publication: Environmental Health Perspectives, 2013,121(8):939-943.

[25] Tang W L, Yu M, Bai G X, et al. Ambient ozone and mortality from respiratory diseases: A nationwide analysis in China [J]. Global Transitions, 2024,6:113-122.

[26] Bravo M A, Fang F, Hancock D B, et al. Long-term air pollution exposure and markers of cardiometabolic health in the national longitudinal study of adolescent to adult health (Add Health) [J]. Environment International, 2023,177:107987.

[27] 廖志恒,范绍佳.2006~2012年珠江三角洲地区O_3污染对人群健康的影响 [J]. 中国环境科学, 2015,35(3):897-905.
Liao Z H, Fan S J. Human health impact of exposure to ozone pollutant in Pearl River Delta region during 2006~2012 [J]. China Environmental Science, 2015,35(3):897-905.

[28] 班 婕,李湉湉.北京市不同度量方式下臭氧短期暴露人群急性健康效应研究 [J]. 环境与健康杂志, 2016,33(4):287-291.
Ban J, Li T T. Short-term effects of different ozone metrics on daily mortality in Beijing [J]. Journal of Environment and Health, 2016,33(4):287-291.

[29] 陈仁杰,陈秉衡,阚海东.上海市近地面臭氧污染的健康影响评价 [J]. 中国环境科学, 2010,30(5):603-608.
Chen R J, Chen B H, Kan H D. Health impact assessment of surface ozone pollution in Shanghai [J]. China Environmental Science, 2010,30(5):603-608.

[30] 孙岩岩,黄 婧,赵 岩,等.室内臭氧对循环系统炎症因子 EGF 及 Fractalkine 的影响—随机双盲交叉试验 [J]. 中国循证心血管医学杂志, 2020,12(5):550-553.
Sun Y Y, Huang J, Zhao Y, et al. Effects of indoor ozone on inflammatory factors EGF and Fractalkine in circulatory system [J]. Chinese Journal of Evidence-Based Cardiovascular Medicine, 2020,12(5):550-553.

[31] 陈远翔,修光利,杨 军,等.城市轨道交通地下车站环境健康风险因子及相关标准的研究进展 [J]. 环境与健康杂志, 2012,29(12):1139-1148.
Chen Y X, Xiu G L, Yang J, et al. Environmental health risk factors and related standards for urban mass transit underground stations: A review of recent studies [J]. Journal of Environment and Health, 2012,29(12):1139-1148.

[32] 张 宏,董继元,王建军,等.兰州市臭氧对儿童哮喘的短期影响及其季节性差异 [J]. 北京大学学报(医学版), 2022,54(2):227-235.
Zhang H, Dong J Y, Wang J J, et al. Short-term effects and seasonal variation of ozone on daily hospital outpatient visits for childhood asthma in Lanzhou [J]. Journal of Peking University(Health Sciences), 2022,54(2):227-235.

[33] 孔少杰,易洪涛.中国 O_3 暴露与健康风险时空演变及不平等的双维分区管控 [J]. 中国环境科学, 2025,45(10):5873-5884.
Kong S J, Yi H T. Spatialtemporal evolution of O_3 exposure and health risks and unequal two-dimensional zoning control in China [J]. China Environmental Science, 2025,45(10):5873-5884.

[34] 陈 瑞,杨永宏,魏巧珍,等.2014~2022年兰州市大气O_3-8h浓度对居民急救的影响 [J]. 环境卫生学杂志, 2025,15(3):229-235,239.
Chen R, Yang Y H, Wei Q Z, et al. Analysis of the impact of atmospheric O_3-8h concentration on resident emergency admissions in Lanzhou city, China, 2014~2022 [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2025,15(3):229-235,239.

[35] 刘晓慧,曹 寒,张 晗,等.大气臭氧长期暴露对社区自然人群抑郁、焦虑和压力状况的影响 [J]. 医学新知, 2021,31(1):5-13.
Liu X H, Cao H, Zhang H, et al. Effects of long-term exposure to atmospheric ozone on depressive, anxiety and stress symptoms of natural population in the community [J]. New Medicine, 2021,31(1):5-13.

[36] 张 丽,张晓飞,石国秀,等.宁波市 O_3 与气象因素短期暴露对死亡人数的影响及交互作用 [J]. 中华疾病控制杂志, 2023,27(5):522-527,539.
Zhang L, Zhang X F, Shi G X, et al. Effects and interactions of short-term exposure to O_3 and meteorological factors on the number of deaths in Ningbo city [J]. Chinese Journal of Disease Control and Prevention, 2023,27(5):522-527,539.

[37] 郑向东,韦小丽.中国 4 个地点地基与卫星臭氧总量长期观测比较 [J]. 应用气象学报, 2010,21(1):1-10.
Zheng X D, Wei X L. Long-term total ozone comparisons between space-based and ground-based observations at 4sites in China [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010,21(1):1-10.

[38] 骆雨茜,陈 静,郝宇杭,等.2015~2022 年重庆市近地面臭氧的暴露风险及环境影响 [J]. 中国环境科学, 2024,44(5):2754-2765.
Luo Y Q, Chen J, Hao Y H, et al. Exposure risk assessments and environmental impacts of surface ozone in Chongqing during 2015~2022 [J]. China Environmental Science, 2024,44(5):2754-2765.

[39] 程育恺,戴海夏,张蕴晖,等.长三角地区 2017~2020 年臭氧浓度时空分布与人群健康效益评估 [J]. 环境科学, 2023,44(2):719-729.
Cheng Y K, Dai H X, Zhang Y H, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of ozone concentration and population health benefit assessment in the Yangtze River Delta region from 2017 to 2020 [J]. Environmental Science, 2023,44(2):719-729.

[40] Fenech S, Doherty R M, Heaviside C, et al. The influence of model spatial resolution on simulated ozone and fine particulate matter for Europe: Implications for health impact assessments [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018,18(8):5765-5784.

[41] Andrea L, Pineda R. Simple atmospheric dispersion model to estimate hourly ground-level nitrogen dioxide and ozone concentrations at urban scale [J]. Environmental Modelling and Software, 2014,59:127-134.

[42] Fang M, Jiang C Z, Yuan Z, et al. The interaction of ambient ozone and personal temperature variability on blood markers of inflammation, oxidative stress, coagulation, endothelial function, and stress hormones [J]. Atmospheric Environment, 2024,338:120818.

[43] Viebahn H R, León O S. Ozone in medicine. The low-dose ozone concept and its basic biochemical mechanisms of action in chronic

inflammatory diseases [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021,22(15):7890.

[44] Xu K, Yao Y, Liu H J, et al. ITGB4deficiency induces DNA damage by downregulating HDAC1in airway epithelial cells under stress stimulation [J]. Pediatric Allergy and Immunology, 2022,33(10): e13871.

[45] 陈　浪,赵　川,关茗洋,等.我国大气臭氧污染现状及人群健康影响 [J]. 环境与职业医学, 2017,34(11):1025−1030.
Chen L, Zhao C, Guan M Y, et al. Ozone pollution in China and its adverse health effects [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2017,34(11):1025−1030.

[46] Kadiiska M B, Basu S, Brot N, et al. Biomarkers of oxidative stress study V: Ozone exposure of rats and its effect on lipids, proteins, and DNA in plasma and urine [J]. Free Radical Biology & Medicine, 2013,61:408−415.

[47] Sunil V R, Patel−Vayas K, Shen J L, et al. Classical and alternative macrophage activation in the lung following ozone−induced oxidative stress [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2012,263(2):195−202.

[48] Yang C, Wang W Z, Wang Y Y, et al. Ambient ozone pollution and prevalence of chronic kidney disease: A nationwide study based on the China national survey of chronic kidney disease [J]. Chemosphere, 2022,306:135603.

[49] 李安琪,李　娜,李韵谱,等.中国 4 个城市大气臭氧对呼吸系统疾病住院人数影响的时间序列分析 [J]. 地球环境学报, 2024,15(3): 514−525.
Li A Q, Li N, Li Y P, et al. A time−series analysis of the effect of atmospheric ozone on hospitalization of residents with respiratory diseases in four Chinese cities [J]. Journal of Earth Environment, 2024, 15(3):514−525.

[50] Liang S R, Chen Y M, Sun X L, et al. Long−term exposure to ambient ozone and cardiovascular diseases: Evidence from two national cohort studies in China [J]. Journal of Advanced Research, 2024,62:165−173.

[51] Levi A, Carasso Romano G H, Barnett−Itzhaki Z. Ground−level ozone exposure and type 2diabetes incidence: An ecological study of environmental and social determinants [J]. Atmosphere, 2025,16(5): 528.

[52] Dimakopoulou K, Douros J, Samoli E, et al. Long−term exposure to ozone and children's respiratory health: Results from the RESPOZE study [J]. Environmental Research, 2020,182:109002.

[53] Clayton C J, Turnock S T, Marsh D R, et al. Reducing inequities in the future air pollution health burden over Europe [J]. Earth's Future, 2025,13(5):e2024EF005404.

[54] Yang J, Ju Q Y, Chen S F, et al. Spatiotemporal evolution of regional air pollution exposure and health effects assessment in Jiangsu province, China [J]. Atmosphere, 2025,16(4):446.

[55] 刘静怡,孟聪申,韩京秀.1990~2019 年全球环境危险因素疾病负担—GBD2019 数据再分析 [J]. 环境卫生学杂志, 2023,13(3):170−176.
Liu J Y, Meng C S, Han J X. Global disease burden due to environmental risk factors in 1990~2019: A reanalysis of GBD 2019 data [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2023,13(3):170−176.

[56] WHO. Health risks of air pollution in Europe−HRAPIE project. New emerging risks to health from air pollution−results from the survey of experts. World Health Organization, 2013.

[57] 杨昆鹏,刘浩然,邢成志,等.基于 TROPOMI 观测的珠三角地区对流层臭氧特征研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2025,20(1):47−59.
Yang K P, Liu H R, Xing C Z, et al. Analysis of tropospheric ozone characterization in Pearl River Delta region based on TROPOMI [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2025,20(1):47−59.

[58] 何　超.中国地表臭氧污染水平、风险与暴露不平等的时空格局研究 [D]. 武汉:武汉大学, 2021.
He C. Research on the spatialtemporal pattern of surface ozone pollution level, risk and exposure inequality in China [D]. Wuhan: Wuhan University, 2021.

[59] 赵　楠,卢毅敏.中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估 [J]. 环境科学, 2022,43(3):1235−1245.
Zhao N, Lu Y M. Estimation of surface ozone concentration and health impact assessment in China [J]. Environmental Science, 2022,43(3): 1235−1245.

[60] Lefohn A S, Foley J K. Establishing relevant ozone standards to protect vegetation and human health−exposure dose−response considerations [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1993,43(1):106−112.

[61] Tagliaferro S, Maio S, Pirona F, et al. Assessing external exposome by implementing an environmental data management system using open data [J]. Scientific Reports, 2024,14(1):1−14.

[62] Morantes G, Lara−Ibeas I, Molina C, et al. Harm from indoor air contaminants in offices [J]. Building and Environment, 2025,284: 113365.

作者简介：孔少杰(1995−),男,陕西渭南人,中国人民大学博士研究生,主要从事减污降碳,环境健康经济和政策评估研究.发表论文 10 余篇. ksj0806@ruc.edu.cn.