



环境科学
Environmental Science
ISSN 0250-3301, CN 11-1895/X

《环境科学》网络首发论文

题目： 气候变化和城市化发展对北京高温-臭氧污染复合事件的影响
作者： 叶金秋, 陈磊, 朱佳, 龙籽谕
DOI: 10.13227/j.hjcx.202512404
收稿日期: 2025-12-31
网络首发日期: 2026-04-27
引用格式: 叶金秋, 陈磊, 朱佳, 龙籽谕. 气候变化和城市化发展对北京高温-臭氧污染复合事件的影响[J/OL]. 环境科学. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202512404>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

气候变化和城市化发展对北京高温-臭氧污染复合事件的影响¹

叶金秋, 陈磊*, 朱佳, 龙籽谕

(南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室, 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044)

摘要: 全球气候变暖与快速城镇化导致我国城市夏季高温-臭氧污染复合事件频发, 健康风险加剧。为系统评估城市地区夏季高温-臭氧污染复合事件的演变特征, 并定量解析气候变化、城市面积扩张和人为排放变化对复合强度的影响, 聚焦北京, 基于多套 1 km 高分辨率与 2003~2022 年长时序数据集及 WRF-Chem 模式, 针对历史 (2003 年)、当前 (2022 年) 与不同发展情景的未来 (2060 年) 展开敏感性试验分析。结果表明: ①2003~2022 年间, 北京地区夏季高温-臭氧污染复合事件呈显著恶化态势, 以 $7.0 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 发生频次、 $203.1 \text{ km}^2 \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 影响范围及 $5 \times 10^6 \text{ 人} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 暴露人口快速增加。②过去 20a 城市扩张主导了日最高气温 (T_{max}) 升高, 但在未来, 气候变暖将成为北京气温升高的主导因子, 且该主导作用在复合事件期间的贡献更为突出, 在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下贡献率分别达 88.9% 和 94.3%。③虽然未来人为减排能有效改善复合期间的空气质量 (MDA8 O_3 降低 4.5×10^{-9}), 但气候变暖产生的气候惩罚效应将导致 MDA8 O_3 反升 $16.6 \sim 27.5 \times 10^{-9}$, 其负面影响抵消了人为减排的效益。研究揭示了北京高温-臭氧污染复合事件及其强度的演变特征, 定量解析了城市化发展与气候变化的贡献, 可为制定适应气候变化的空气质量协同治理策略提供了科学依据。

关键词: 复合事件; 气候变化; 城市面积扩张; 人为减排; 数值模拟

DOI:10.13227/j.hjkx.202512404

Impacts of Climate Change and Urbanization on Compound Heat-Ozone Events in Beijing, China

YE Jin-qiu, CHEN Lei*, ZHU Jia, LONG Zi-yu

(Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Global warming and rapid urbanization have led to frequent summer compound heat-ozone events in densely populated cities in China, exacerbating health risks. To evaluate the evolution characteristics of these events and quantify the impacts of climate change, urban expansion, and anthropogenic emission changes, this study focuses on Beijing, utilizing multiple 1 km resolution long-term datasets (2003-2022) and the WRF-Chem model to conduct sensitivity experiments across historical (2003), current (2022), and future (2060) scenarios. The results indicate that: ①From 2003 to 2022, summer compound heat-ozone events in Beijing significantly worsened, characterized by rapid increases in frequency [$7.0 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$], affected area [$203.1 \text{ km}^2 \cdot (10 \text{ a})^{-1}$], and exposed population [$5 \times 10^6 \text{ persons} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]. ②While urban expansion dominated the rise in summer daily maximum temperature (T_{max}) over the past 20 years, climate warming is projected to become the primary driver in the future. This dominance is particularly pronounced during compound events, with contribution rates reaching 88.9% and 94.3% under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios, respectively. ③Although future anthropogenic emission reductions effectively improve air quality during compound events (MDA8 O_3 decreasing by 4.5×10^{-9}), the climate penalty induced by warming will elevate MDA8 O_3 by $16.6 \sim 27.5 \times 10^{-9}$, completely offsetting the benefits of emission reductions. This study reveals the evolution of compound heat-ozone events and their intensity, quantifies the contributions of urbanization and climate change, and provides a scientific basis for formulating climate-adaptive air quality co-governance strategies.

收稿日期: 2025-12-31; 修订日期: 2026-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42293323, 42305121, 42007195)

作者简介: 叶金秋 (2000~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境数值模拟, E-mail: 202312120021@nuist.edu.cn

*通信作者, E-mail: chenlei@nuist.edu.cn

Key words: compound events; climate change; urban expansion; anthropogenic emission reduction; numerical simulation

在全球气候变暖背景下,高温天发生频率、强度与持续时间显著增加^[1,2]。高温暴露不仅危害人体健康和生态系统,还与对流层臭氧(O₃)污染密切相关^[2~5]。高温通过加速光化学反应速率、促进生物源与人为源VOCs排放,促使近地面MDA8 O₃攀升,形成严峻的高温-臭氧污染复合事件^[7,8],且这种复合事件在局地小尺度的城市地区更容易发生^[9,10]。伴随人口聚集带来的城市化发展,包括城市面积扩张和人为排放变化,叠加气候变暖,愈发增强的城市高温和臭氧污染将显著恶化人群暴露与健康风险^[10~12]。因此,深入探究城市地区高温-臭氧污染复合事件及其复合强度,并解析城市化发展和气候变化的贡献,对城市健康风险评估和复合污染防控具有重要意义。

已有研究表明,气候变暖显著增加高温-臭氧污染复合事件的发生频率和强度^[14]。Li等^[15]基于观测以及气候-化学耦合模式的结果指出,本世纪初以来在气候变暖作用下,中国热浪频次和强度较以往均增加近两倍,高温-臭氧污染复合事件显著增多。Cui等^[16]分析动态降尺度的多模式结果发现,相较于1995~2014年,在中高排放情景SSP3-7.0下2071~2090年中国年均高温-臭氧污染复合事件天数预计增长两倍。基于不同的气候变化情景,Wang等^[17]预测在本世纪中期华北平原的高温-臭氧污染复合事件相较2019年将增加46~96 d。现有针对高温-臭氧污染复合事件的研究主要聚焦大尺度区域的分析^[18,19],但在小尺度的城市热点地区,复合事件对气候变化的响应可能会更加敏感,亟需探讨城市地区在气候变化背景下复合事件的演变情况。

城市面积扩张改变地表属性,进而导致城区气温升高,同时辐合更多的臭氧及其前体物,伴随大气污染发生^[18~20]。Yang等^[23]基于高分辨率的时空数据研究发现,郑州在2013~2016年的城市化发展可以使新城区地表温度显著上升1.80~3.92 °C。Chen等^[24]利用空气质量模式WRF-Chem通过敏感性试验发现农村土地改变为城市不透水用地会显著增加北京城区近地气温和行星边界层高度,以及降低相对湿度和风速,进而导致2015年夏季近地面MDA8 O₃升高 9.5×10^{-9} 。Zhang等^[25]基于WRF-Chem模式的结果表明,2001~2018年长三角城市群扩张使城区气温普遍升高0.5 °C左右,MDA8 O₃浓度在城市扩张区域变化最明显,最大增幅超过 $10 \mu\text{g m}^{-3}$ 。现有关于城市扩张对温度和臭氧影响的研究多侧重于分析夏季或年平均态的改变,而高温-臭氧污染事件作为城市地区当下和未来最具健康威胁的复合问题^[26~28],迫切需要定量评估高温和臭氧复合污染对城镇化发展的响应强度。

人为减排可以改善空气质量,是未来缓解城市高温-臭氧污染复合事件及其强度的重要措施。然而,受大气光化学反应非线性特征的影响,前体物排放比例的快速变化在一定阶段内导致了城区臭氧浓度的反弹,尤其是高温热浪期的臭氧浓度^[29,30]。Luo等^[31]基于WRF-Chem模式针对华北地区2019年夏季的一次O₃污染过程开展模拟分析,模拟结果显示,受人为排放变化的影响,2019年近地面O₃浓度较2012年基准情景呈现上升趋势,超过 $40 \mu\text{g m}^{-3}$ 。Liu等^[32]利用WRF-CMAQ模式研究发现,在VOCs控制区的京津冀城市群,由于2013~2017年间NO_x的减排幅度显著大于VOCs,这种减排比例的差异削弱了NO_x对臭氧的滴定效应,使近地面MDA8 O₃上升 $5 \sim 10 \times 10^{-9}$ 。Xu等^[33]通过机器学习构建了“无封锁”基准情景,并与2022年4月芜湖疫情封控期观测值对比,结果显示,在相同的气象条件下,人为排放削减使O₃浓度相较基准情景升高26.8%。在气候变暖和城市化发展背景下,未来人为活动将发生显著改变,人为排放变化会进一步加剧城市臭氧污染^[34]。因此,亟需探究城市高温-臭氧污染复合事件对人为排放变化的响应情况。

北京作为中国首都,近年来高温与臭氧污染问题突出^[32~34]。因此,本文聚焦北京市,基于区域空气质量模式WRF-Chem,针对历史(2003年)、当前(2022年)与不同发展情景的未来(2060年)这3个时段,详细描述高温-臭氧污染复合事件的时空演变特征,并通过多组敏感性试验,定量解析气候变暖、城市面积扩张与人为排放变化对复合事件强度的贡献。

1 材料与方法

1.1 模式设置

为定量探究历史和未来城市化发展(包括城市面积扩张和人为排放变化)与气候变化对北京地区高温-臭氧污染复合事件的影响,本文选用高分辨率空气质量模型WRF-Chem,采取三层双向嵌套设置(图1),

水平分辨率为 18、6 和 2 km，对应 90×90、112×112 和 100×100 网格，最外层（domain01）涵盖中国东部地区，中间层（domain02）包括京津冀城市群，最内层（domain03）聚焦北京市，地图投影方式为兰伯特投影。

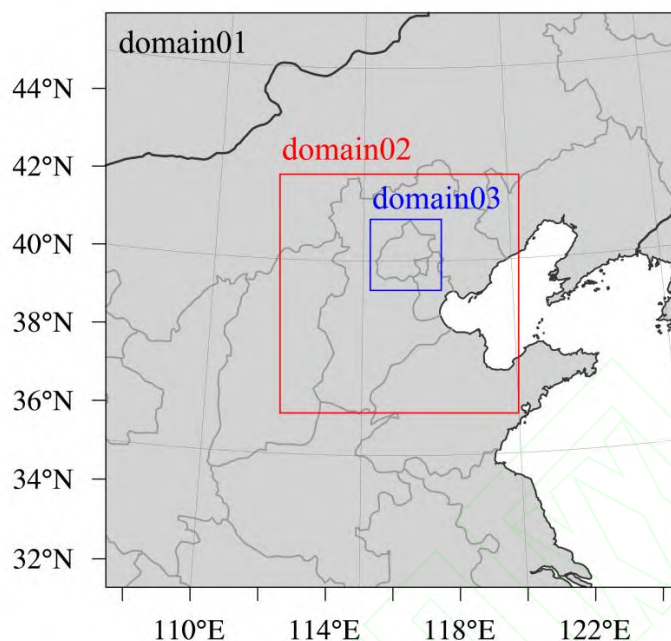


图 1 三重嵌套模拟区域

Fig. 1 Simulation domains designed in WRF-Chem model

气相化学采用 CBM-Z^[38] (carbon bond mechanism version Z) 方案，共包含 67 个物种与 164 个反应，并在 CBM-IV 基础上更新无机化学与异戊二烯相关参数。气溶胶模块选用 8 个粒径段 MOSAIC^[39] (model for simulating aerosol interactions and chemistry) 方案，涵盖热力学平衡、二元成核、凝聚、凝结及表面非均相反应。辐射方案采用 RRTMG^[40] (rapid radiative transfer model for GCMs) 长短波参数化；详细的物理化学参数化方案参见表 1。

表 1 模式模拟所用主要参数化方案

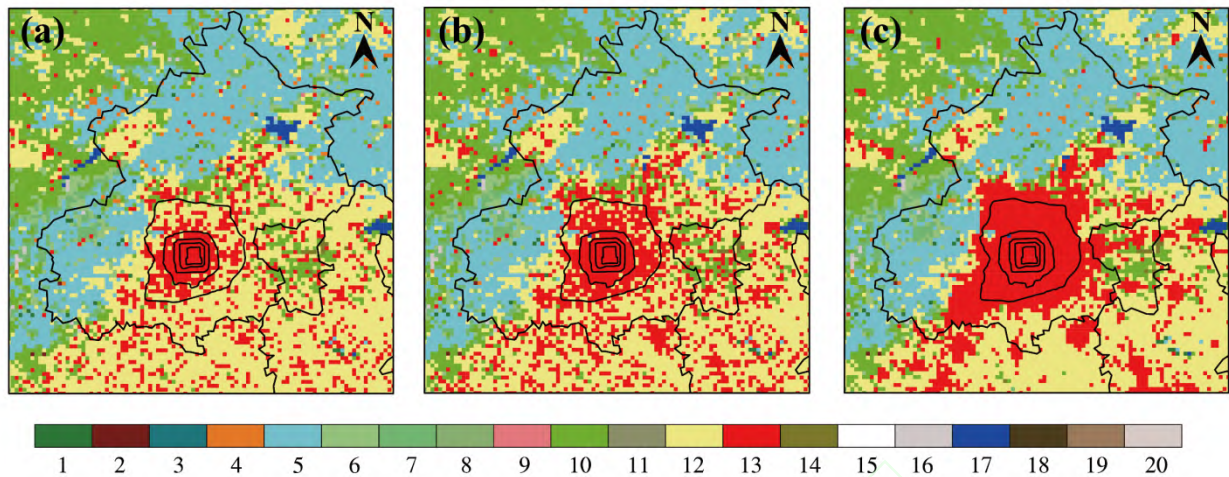
Table 1 Parameterization schemes used in WRF-Chem model

选项方案	参数化方案
微物理方案	Purdue Lin Scheme
长波辐射方案	RRTMG Scheme
短波辐射方案	RRTMG Scheme
陆面过程方案	Unified Noah Land-Surface Model
城市冠层方案	Single-Layer UCM Scheme
边界层方案	Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE Scheme
积云对流方案	Grell 3-D Ensemble Scheme
气相化学方案	CBMZ Scheme
光解方案	Fast-J Photolysis Scheme
气溶胶方案	8-bin MOSAIC Scheme
生物源排放	MEGAN

驱动 WRF-Chem 模式的气象初边界数据来自欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 提供的第五代全球再分析气象资料 ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets>), 时间分辨率为 1 h, 空间分辨率为 0.25°。未来不同情景 (e.g., RCP4.5 和 RCP8.5) 的气象场初边界数据来自 CESM 模式的模拟结果, 并经过偏差订正 (<https://gdex.ucar.edu/datasets/d316001/>)。该数据可以直接驱动 WRF-Chem 模式, 且已经被很多研究使用^[41,42]。

人为排放数据来自清华大学研发的 MEIC 排放清单 v1.4 版本 (http://meicmodel.org.cn/?page_id=560), 涵盖 SO₂、NO_x、CO、NMVOC、NH₃、BC、OC、PM_{2.5} 与 PM₁₀ 等关键污染物^[43]。本研究选取的 SSP2-45-ECP 和 SSP5-85-BHE 情景均基于 DPEC 模型^[44] (http://meicmodel.org.cn/?page_id=1922), 旨在确保空气质量模式中化学排放与气象驱动在社会经济路径 (SSPs) 和辐射强迫 (RCPs) 上的一致。其中, SSP2-45-ECP 代表延续当前政策力度的基准情景; 而 SSP5-85-BHE 则构建了剧烈变暖叠最严减排的极端“高碳-低污”未来。选取该组合旨在验证在极端气候变化下, 气候惩罚效应是否会抵消减排效益, 从而有效分离并量化气候变化的独立贡献。

历史和当前的下垫面静态数据更新自 CLCD (China Land Cover Dataset, <https://zenodo.org/records/15853565>)。未来 2060 年的下垫面数据来自 Luo 等^[45]、Chen 等^[46]以及国家科技基础条件平台-国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn/data/>) 预估的土地覆盖数据。为尽可能体现未来最显著的城市面积扩张, 本文做了如下处理: 只要三套数据中任一网格为城市, 即将该网格判定为未来的城市用地 (图 2)。



(a) 2003 年, (b) 2022 年, (c) 2060 年; 1.常绿针叶林, 2.常绿阔叶林, 3.落叶针叶林, 4.落叶阔叶林, 5.混交林, 6.封闭灌丛, 7.开放灌丛, 8.稀树草原, 9.疏林草原, 10.草原, 11.永久湿地, 12.农田, 13.城市和建筑, 14.农田/自然植被, 15.冰雪, 16.贫瘠或稀疏植被, 17.水, 18.树木繁茂的苔原, 19.混合苔原, 20.贫瘠的苔原

图 2 北京市不同时期的土地利用类型空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of land use and land cover in Beijing across different periods

1.2 观测数据

为验证 WRF-Chem 模式对北京市 2022 年夏季气象场和污染物的模拟能力, 该研究从怀俄明大学 (<http://weather.uwyo.edu/surface/meteorogram/seasia.shtml>) 获取北京 ZBAA 站点 (39.93°N, 116.28°E) 的小时分辨率气象数据, 包括 2 m 温度、2 m 相对湿度、10 m 风速和 10 m 风向, 以及从北京市生态环境监测中心 (<http://zx.bjmec.com.cn/>) 获取 35 个观测站点的逐小时臭氧浓度数据。依据《环境空气质量评价技术规范(试行)》(HJ663-2013), 在站点尺度上计算臭氧日最大 8 h 体积分数平均值 (MDA8 O₃)。

1.3 高温-臭氧污染复合事件的定义

本研究将高温-臭氧污染复合事件定义为: 同一日同时满足高温事件与臭氧污染事件的情形。具体而言, 当日最高气温 (T_{\max}) ≥ 35 °C 时判定为高温天^[19]; 鉴于 70×10^{-9} 是国际同类研究中广泛采用的评估阈值^[47,48], 且与美国 EPA 等国际较严格的空气质量标准一致, 能更灵敏地表征潜在健康风险^[49-51], 本研究将 $MDA8 O_3 \geq 70 \times 10^{-9}$ 时判定为臭氧污染天。当这两项条件在同一日同时成立时, 记为高温-臭氧污染复合事件。在本研究重点聚焦复合事件强度的变化, 即复合日内 T_{\max} 和 $MDA8 O_3$ 的改变程度。

1.4 敏感性试验设置

为定量评估北京市高温-臭氧污染复合事件在过去、当前和未来的演变特征, 以及城市面积扩张、人为排放变化和气候变暖各因子对复合事件强度的影响, 本文一共开展了 9 个敏感性试验(表 2)。His03 和 CTL 试验用来再现历史和当前的复合状况, 对比其模拟结果可反映过去 20a 间北京市快速发展阶段下复合事件及其强度的演变。其中, 历史阶段城市面积扩张(气候变化、人为排放变化)对高温-臭氧污染复合事件的贡献来自 Urb22 和 His03 试验的比较(Urb22 和 Urb22Met22 试验的比较、Urb22Met22 和 CTL 试验的比较)。未来模拟结果来自 Fut60_SSP245 和 Fut60_SSP585 试验, 与 CTL 相比, 反映未来不同社会发展和气候变化情境下, 北京市复合事件及其强度的演变。其中, 未来城市面积扩张(气候变化、人为排放变化)的贡献来自 CTL 和 Urb60 试验的比较(Urb60 和 Urb60Met60_SSP245 或 Urb60Met60_SSP585 试验的比较、Urb60Met60_SSP245 和 Fut60_SSP245 试验的比较或 Urb60Met60_SSP585 和 Fut60_SSP585 试验的比较)。所有试验的模拟时段均为 2022 年 7 月 27 日至 8 月 31 日, 其中前 5 d 作为 spin-up 时间。CTL 作为基准试验, 其模拟结果与观测数据进行比较来验证 WRF-Chem 的模拟性能。

表 2 敏感性试验设置

Table 2 Sensitivity experiments

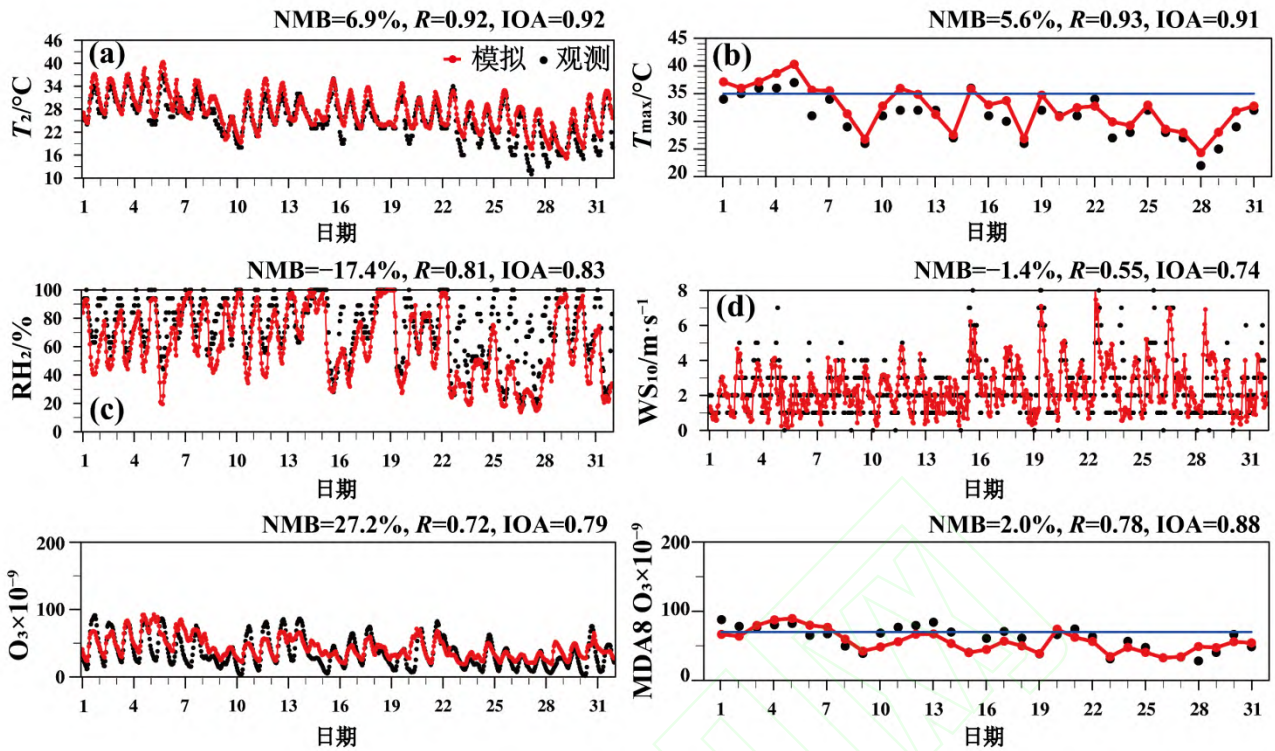
试验名称	下垫面数据年份	气象数据年份	人为排放年份
His03	2003	2003	2003
Urb22	2022	2003	2003
Urb22Met22	2022	2022	2003
CTL	2022	2022	2022
Urb60	2060	2022	2022
Urb60Met60_SSP245	2060	2060 (SSP245)	2022
Fut60_SSP245	2060	2060 (SSP245)	2060 (SSP245)
Urb60Met60_SSP585	2060	2060 (SSP585)	2022
Fut60_SSP585	2060	2060 (SSP585)	2060 (SSP585)

2 模式验证

为评估 WRF-Chem 模式对北京市气象要素和大气污染物的模拟性能，利用 2022 年 8 月逐小时观测资料对气温 (T_2)、相对湿度 (RH_2)、风速 (WS_{10}) 及臭氧体积分数 (O_3) 进行了验证 (图 3)。结果表明，模式对 T_2 及 T_{max} 的相关系数 (R) 和吻合度指数 (IOA) 均在 0.9 以上，归一化平均偏差 (NMB) 在 7% 以内，很好地再现温度昼夜演变特征以及高温过程，包括高温天的天数[图 3 (a) 和 3 (b)]；相对湿度和 10 m 风速的 R 分别为 0.81 和 0.55，虽存在一定低估 (NMB=-17.4%和-1.4%)，但时序变化与观测基本一致[图 3 (c) 和 3 (d)]。

针对小时臭氧模拟，虽然模式存在高估 (NMB=27.2%)，但平均归一化偏差 (MNB) 为-6.4%，符合 EPA 设定的标准 ($|MNB| \leq 15\%$)，且 R 和 IOA 均大于 0.7，说明模式能合理刻画臭氧的积累与消散过程[图 3 (e)]。WRF-Chem 对 MDA8 O_3 的模拟效果更好，NMB 仅为 2.0%，并能准确再现观测的臭氧污染天数 [11 d, 图 3 (f)]。

综上所述，WRF-Chem 模式能够可靠地重现目标分析地区的气象条件与臭氧污染特征，尤其是高温出现的天数和臭氧污染天，为后续的敏感性试验与情景分析提供了可靠的科学依据。



(a) 2 m 温度, (b) 相对湿度, (c) 10 m 风速, (d) O₃, (e) 日最高气温 T_{max} , (f) MDA8 O₃; NMB 表示归一化平均偏差, R 表示相关系数, IOA 表示吻合度指数

图 3 2022 年 8 月北京市气象场和臭氧观测值与模拟值的时间序列

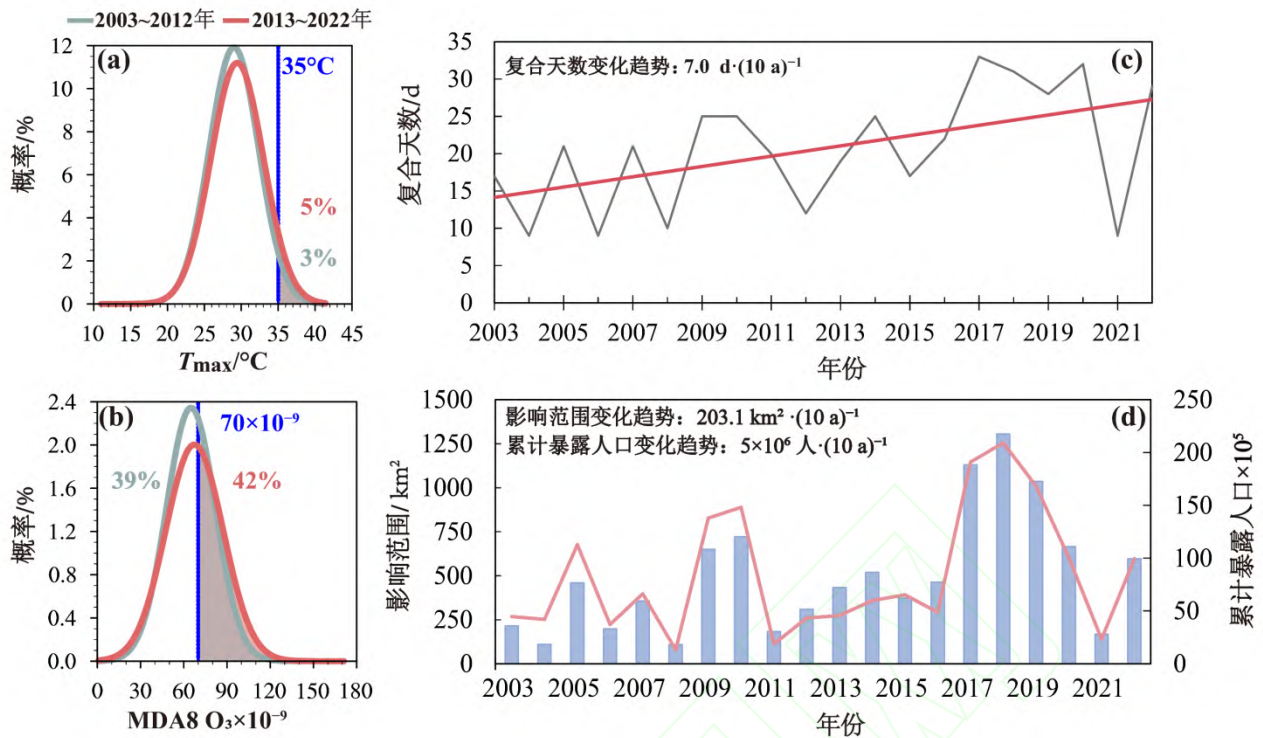
Fig. 3 Time series of observed and simulated meteorological parameters and ozone in Beijing during August 2022

3 结果与分析

3.1 北京市高温-臭氧污染复合事件的时空演变特征

气候变化和城市化发展,显著改变了城市区域的近地面温度与大气 MDA8 O₃^[52]。为厘清北京地区在此背景下高温、臭氧污染及其复合事件的长期演变规律,本研究整合了多源数据并开展系统评估,包括高分辨率(1 km)日最高气温数据集^[53](<https://zenodo.org/records/10983207>)、高分辨率(1 km)MDA8 O₃数据集(CHAP, <https://zenodo.org/records/16883507>),以及经中国统计年鉴修订的高分辨率(1 km)LandScan 网格人口数据(<https://landscan.ornl.gov/>)。

图 4 展示了 2003~2022 年北京夏季日最高气温(T_{max})、MDA8 O₃ 以及高温-臭氧污染复合事件的演变特征。从概率密度分布来看[图 4 (a)],相较于前 10a(2003~2012 年),2013~2022 年的 T_{max} 升高,平均值从 29.0 °C 增加至 29.4 °C,温度超过 35 °C 的高温天从 3% 升至 5%。同时,MDA8 O₃ 由 64.9×10^{-9} 升至 67.3×10^{-9} ,超过 70×10^{-9} 的臭氧污染天数比例由 39% 增至 42%[图 4 (b)]。气温的升高与臭氧污染的加剧共同驱动了北京夏季高温-臭氧复合事件频发的态势[图 4 (c)]。尽管 2021 年受华北夏季异常强降水及弱辐射条件的抑制,复合事件频次出现短暂回落,但这仅体现了短期气象条件的调制作用,并未改变 2003~2022 年间北京高温-臭氧污染复合事件波动增加 $[7.0 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$ 的长期恶化态势。与此同时,高温-臭氧污染复合事件的空间影响范围及其带来的人群暴露风险也持续扩大[图 4 (d)]。北京市受影响的面积(暴露人口)以 $203.1 \text{ km}^2 \cdot (10 \text{ a})^{-1} [5 \times 10^6 \text{ 人} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$ 快速增长。上述结果表明,高温-臭氧污染复合事件正呈现持续时间延长-空间范围扩张-影响程度恶化的多重态势,已成为制约城市生态文明建设的重要风险因素。



(a) 日最高气温 T_{\max} , (b) MDA8 O_3 的概率密度分布曲线, (c) 高温-臭氧污染复合天数的逐年变化特征, (d) 高温-臭氧污染复合事件影响范围及其暴露危害逐年变化特征

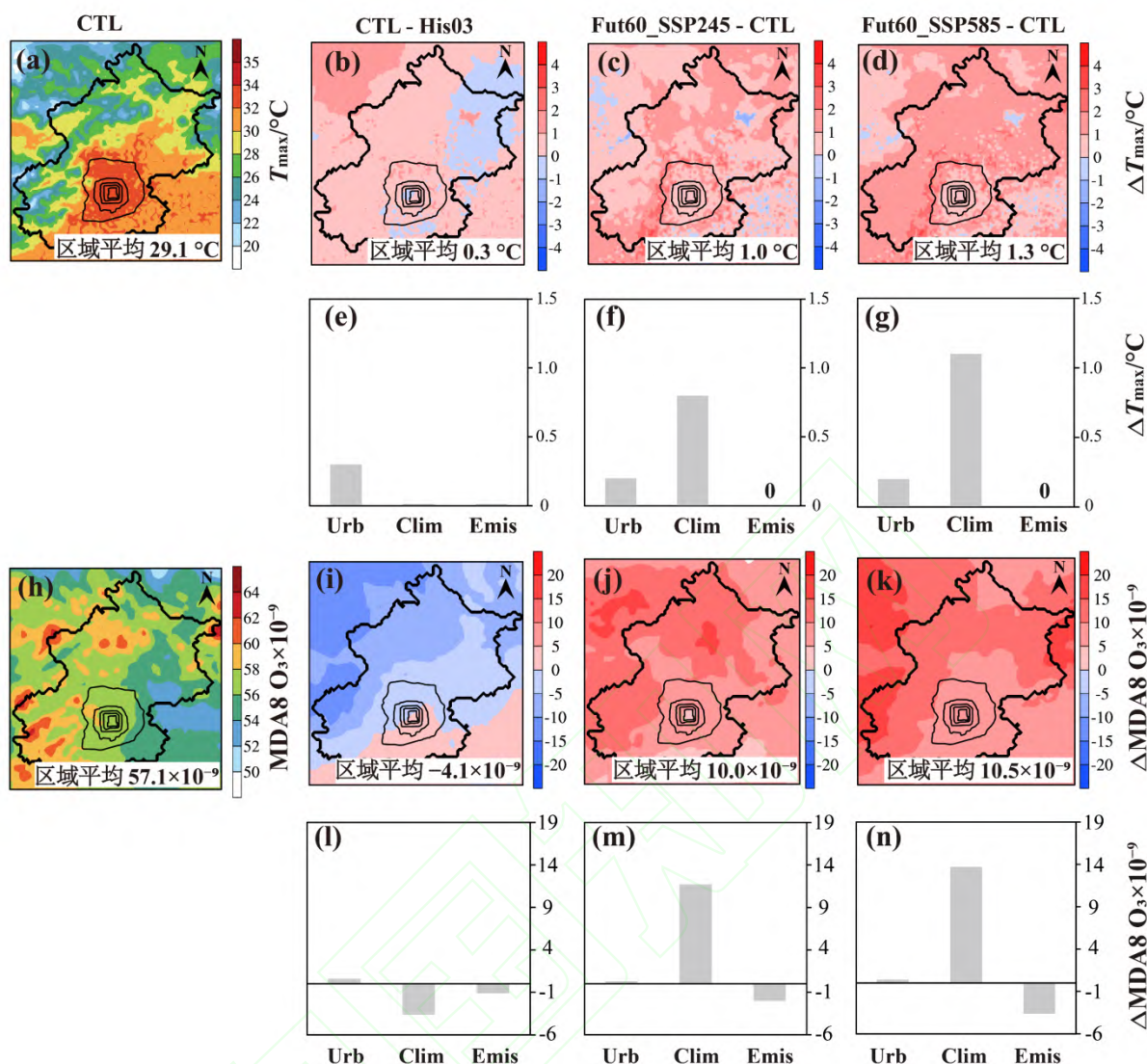
图 4 2003~2022 年北京夏季高温、臭氧污染及其复合事件的演变特征

Fig. 4 Spatial-temporal evolution characteristics of summer heat, ozone pollution, and their compound events in Beijing during 2003-2022

3.2 气候变化与城市化对高温-臭氧污染复合事件强度的量化解析

为评估城市面积扩张、气候变暖和人为排放变化对北京市夏季平均的 T_{\max} 和 MDA8 O_3 演变的驱动作用, 本研究针对不同时段定量解析了各因子的贡献, 结果如图 5 所示。在气温变化方面, 主导贡献的因子从城市面积扩张转变为气候变暖。从历史 (His03) 到当前 (CTL) 阶段, 北京市夏季平均的 T_{\max} 上升了 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ [图 5 (b)], 主要归因于城市面积扩张导致的下垫面改变[图 5 (e)], 该结论与 Zhou 等^[54]在合肥市开展的研究结果一致。然而, 在未来 SSP2-4.5 和 SSP-5.85 情景下, 气候变暖将成为主导因子, 分别贡献 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的增温[图 5 (f) 和 5 (g)], 推动全域平均 T_{\max} 升高 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ [图 5 (c) 和 5 (d)]。

北京市 MDA8 O_3 的演变表现出复杂的非线性特征。在过去 20 a (CTL 试验减去 His03 试验), 城市面积扩张加剧臭氧污染 (MDA8 O_3 升高 0.6×10^{-9}), 但气象条件变化和人为排放变化分别使 MDA8 O_3 下降 3.6×10^{-9} 和 1.1×10^{-9} [图 5 (l)]。北京市区域平均 MDA8 O_3 总体下降了 4.1×10^{-9} [图 5 (i)]。然而随着气候变暖, 气候惩罚效应在未来变得愈加明显, 气候变化成为臭氧污染的主导因子, 在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下分别导致 11.7×10^{-9} 和 13.7×10^{-9} 的臭氧增量, 该增量远超未来人为减排带来的改善效果, MDA8 O_3 降低 2.0×10^{-9} 和 3.6×10^{-9} [图 5 (m) 和 5 (n)], 最终使北京平均 MDA8 O_3 升高 10.0×10^{-9} 和 10.5×10^{-9} [图 5 (j) 和 5 (k)]。



CTL 时期的 (a) T_{\max} 和 (h) MDA8 O_3 及其相较于历史 (His03) 和未来 (Fut60_SSP245 和 Fut60_SSP585) 的空间演变 (b) ~ (d) 和 (i) ~ (k), 各阶段城市面积扩张、气候变化和人为排放变化对 (e) ~ (g) T_{\max} 和 (l) ~ (n) MDA8 O_3 变化量的定量贡献; Urb 表示城市扩张, Clim 表示气候变暖, Emis 表示人为减排

图 5 北京市 8 月平均的日最高气温 T_{\max} 和 MDA8 O_3 在过去、当前和未来的演变以及各影响因子的贡献

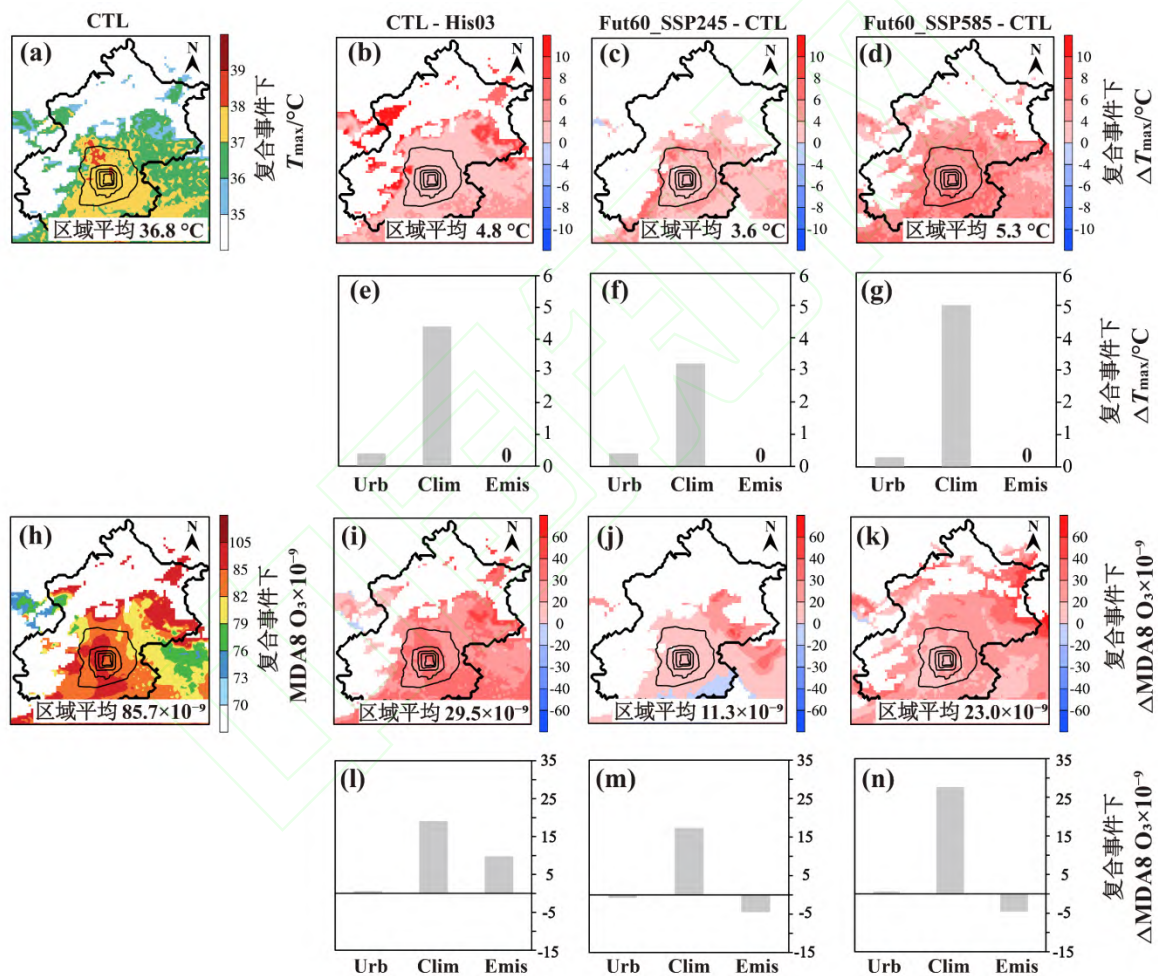
Fig. 5 Evolution of August mean daily maximum temperature (T_{\max}) and MDA8 O_3 in Beijing over historical, current, and future periods, along with the contributions of factors of climate change, urban expansion, and anthropogenic emission changes

温度升高加速气相化学反应速率, 并促进生物源与人为源 VOCs 排放, 使近地面 MDA8 O_3 升高, 导致高温天气常伴随臭氧污染, 二者在时间上的重叠构成了危害更严重的复合事件^[55]。相较于夏季平均态, 高温-臭氧污染复合事件期间 T_{\max} 与 MDA8 O_3 表现出更为突出的协同升高特征。

为厘清这一复合现象的驱动因素, 本研究聚焦历史、当前和未来不同时段内的复合事件, 定量估算城市面积扩张、气候变暖和人为排放变化对高温及臭氧污染演变的贡献, 结果如图 6 所示。复合事件期间, 北京地区表现出明显的高温特征。CTL 时期复合事件发生区域的平均 T_{\max} 高达 36.8 °C[图 6 (a)], 较历史时期 (His03) 升高 15%[图 6 (b)]。驱动因素分解显示[图 6 (e)], 气候变暖是增温的主导原因, 贡献了 91.7%的增幅 (T_{\max} 增加 4.4 °C), 远超城市扩张的影响 (T_{\max} 增加 0.4 °C)。未来模拟结果显示[图 6 (c) 和 6 (d)], 在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下, 复合事件期间区域平均 T_{\max} 预计将进一步升高 9.8%和 14.4%, 北京部分地区的 T_{\max} 甚至会突破 40 °C。其中, 气候变暖分别导致温度增加 3.2 °C和 5.0 °C, 贡献率分别为 88.9%和 94.3%。这表明, 未来气候变暖将持续加剧复合事件的高温强度, 影响程度远高于局地城市扩张

的贡献 (T_{\max} 增加 $0.3\sim 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

不同于夏季平均状况下的非线性演变特征，复合事件期间的 MDA8 O_3 在各个阶段皆呈现急剧增加趋势。CTL 阶段复合事件期间，MDA8 O_3 为 85.7×10^{-9} [图 6 (h)]，较历史时期大幅增加了 52.5% [图 6 (i)]。驱动因素分解显示[图 6 (l)]，气候变暖是 MDA8 O_3 升高的首要贡献因子，造成了 19.1×10^{-9} 的增量，叠加人为排放变化 (MDA8 O_3 升高 9.8×10^{-9}) 以及城市扩张 (MDA8 O_3 升高 0.6×10^{-9}) 的正向贡献，共同导致了历史时期复合事件期间 MDA8 O_3 的爆发式上升。在未来情景中，尽管人为减排措施表现出负贡献，但气候变暖导致的气候惩罚效应将削弱甚至超过人为减排的降污效果。SSP2-4.5 情景下[图 6 (j) 和 6 (m)]，复合事件期间 (MDA8 O_3 增加了 11.3×10^{-9})。其中，人为排放变化贡献了 4.5×10^{-9} 的下降，但气候变暖导致了 16.6×10^{-9} 的臭氧增量，其正向贡献幅度超过了人为减排的负向贡献。在 SSP5-8.5 情景下[图 6 (k) 和 (n)]，气候变暖对 MDA8 O_3 的正向贡献高达 27.5×10^{-9} ，而人为减排 (MDA8 O_3 下降 4.6×10^{-9}) 和城市扩张 (MDA8 O_3) 增加 0.1×10^{-9} 的贡献相对较小，各因素共同作用最终导致 (MDA8 O_3) 增加 23.0×10^{-9} 。这一结果与 Cui 等^[16]的研究结论一致，即未来气候变暖将通过气候惩罚效应，主导高温臭氧复合事件的恶化。



CTL 高温-臭氧污染复合时期 (a) T_{\max} 和 (h) MDA8 O_3 及其相较于历史复合时期 (His03) 和未来复合时期 (Fut60_SSP245 和 Fut60_SSP585) 的空间演变 (b) ~ (d) 和 (i) ~ (k)，不同时段复合事件城市面积扩张、气候变化和人为排放变化对 (e) ~ (g) T_{\max} 和 (l) ~ (n) MDA8 O_3 变化量的定量贡献；Urb 表示城市扩张，Clim 表示气候变化，Emis 表示人为减排

图 6 北京市高温-臭氧污染复合事件期间日最高气温 T_{\max} 和 MDA8 O_3 在过去、当前和未来的演变以及各影响因子的贡献

Fig. 6 Evolution of mean daily maximum temperature (T_{\max}) and MDA8 O_3 during compound heat-ozone events in Beijing over historical, current, and future periods, along with the contributions of factors of climate change, urban expansion, and anthropogenic emission changes

4 讨论

本研究仍存在局限性。①随着人口增长带来的城市面积扩张，人为热通量的释放及其动态增涨也会显著影响北京市的热环境和臭氧空气质量^[56]，但本研究在模拟过程中固定了人为热通量（低密度、中密度和高密度城市的人为热通量分别为 20、50 和 90 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ）。因此，相关结论在一定程度上低估了城市面积扩张对高温-臭氧污染复合事件强度的影响。②在本研究中，人为排放的改变特指臭氧前体物排放量的变化，如氮氧化物 NO_x 和挥发性有机化合物 VOCs 排放量的变化，而人为排放的温室气体及其在不同时段排放量的改变对复合事件强度的影响并没有涉及。温室气体变化带来的影响在当前的研究工作中主要体现在气候变化因子中。因此，相关结论在一定程度上低估了人为减排对高温-臭氧污染复合事件强度的影响。③气象驱动数据的选取存在一定的时间局限性。本研究采用 2003 年 8 月和 2022 年 8 月的特定气象场分别代表历史和当前的气候背景。尽管这两年均为典型的高温年份，有助于捕捉极端事件的特征，但忽略了气候系统的年际波动可能带来的偏差。利用年代际平均气象数据驱动模式能更有效地平滑气候噪音，模拟结果的代表性也更强。因此，本研究结论主要反映特定气象背景下的机制响应，未来研究可考虑采用多样本年份集合模拟以验证结论的稳健性。

5 结论

（1）北京夏季高温-臭氧污染复合事件呈恶化态势：2003~2022 年间，北京夏季高温-臭氧污染复合事件的发生频次、影响范围和暴露人口分别以 $7.0 \text{ d}\cdot(10 \text{ a})^{-1}$ 、 $203.1 \text{ km}^2\cdot(10 \text{ a})^{-1}$ 和 $5\times 10^6 \text{ 人}\cdot(10 \text{ a})^{-1}$ 的速率快速增长，呈现出持续时间延长、空间范围扩张及影响程度加剧的演变特征。

（2）气候变暖取代城市面积扩张主导夏季城市气温的升高：过去 20 a 城市扩张主导了北京夏季日最高气温 (T_{max}) 的升高 ($0.3 \text{ }^\circ\text{C}$)；但在未来 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下，气候变暖将成为主导因子，贡献率分别达 80% 和 84.6%。该主导作用在复合事件期间更为明显，气候变暖将分别导致 $3.2 \text{ }^\circ\text{C}$ (88.9%) 和 $5.0 \text{ }^\circ\text{C}$ (94.3%) 的升温，远超局地城市扩张的影响。

（3）气候变暖抵消人为减排效益导致未来臭氧空气质量：虽然未来人为减排能使复合事件期间 MDA8 O_3 降低约 4.5×10^{-9} ，但在 SSP2-4.5 (SSP5-8.5) 情景下，气候变暖将导致 MDA8 O_3 升高 16.6 (27.5) $\times 10^{-9}$ 。气候变化的正向贡献远超减排的负向贡献，成为主导未来复合强度增加的关键因子。这表明单纯依赖前体物减排难以遏制未来极端的复合污染，亟需构建适应气候变化的协同治理体系。

参考文献:

- [1] Tian P, Zhang F, Yan Y, *et al.* Spatial inequalities in global population exposure to extreme heats and heatwaves[J]. *Applied Geography*, 2025, **174**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133781.
- [2] Tuholske C, Caylor K, Funk C, *et al.* Global urban population exposure to extreme heat[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, **118**(41), doi: 10.1073/pnas.2024792118.
- [3] Tran H M, Tsai F-J, Lee K-Y, *et al.* Extreme temperature increases the risk of COPD morbimortality: a systematic review and meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2025, **958**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.178087
- [4] Khosla R, Jani A, Perera R. Health risks of extreme heat[J]. *BMJ*, 2021, **375**, doi: 10.1136/bmj.n2438.
- [5] Wang W, Shi K, Wang X, *et al.* The impact of extreme heat on lake warming in China[J]. *Nature Communications*, 2024, **15**(1), doi: 10.1038/s41467-023-44404-7.
- [6] Porter W C, Heald C L. The mechanisms and meteorological drivers of the summertime ozone-temperature relationship[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(21): 13367-13381.
- [7] Lu X, Zhang L, Shen L. Meteorology and climate influences on tropospheric ozone: a review of natural sources, chemistry, and transport patterns[J]. *Current Pollution Reports*, 2019, **5**(4): 238-260.
- [8] Li S, Yuan X, Li S, *et al.* Extreme heat event alters BVOC responses to elevated ozone: from physiology to emission patterns[J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, **59**(24): 12132-12144.
- [9] Su J, Jiao L, Xu G. Intensified exposure to compound extreme heat and ozone pollution in summer across Chinese cities[J]. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 2025, **8**(1), doi: 10.1038/s41612-025-00966-5.
- [10] Wang C, Hu X-M, Feron S, *et al.* Compound heat and ozone pollution in the urban environment[J]. *Urban Climate*, 2025, **62**, doi: 10.1016/j.uclim.2025.102511.
- [11] Feron S, Cordero R R, Damiani A, *et al.* Compound climate-pollution extremes in Santiago de Chile[J]. *Scientific Reports*, 2023, **13**(1), doi: 10.1038/s41598-023-33890-w.
- [12] Du H, Yan M, Liu X, *et al.* Exposure to concurrent heatwaves and ozone pollution and associations with mortality risk: a nationwide study in China[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2024, **132**(4), doi: 10.1289/EHP13790.
- [13] He Z, Wu Z, Herzog O, *et al.* Compound health effects and risk assessment of extreme heat and ozone air pollution under climate change: a case study of 731 urban areas in China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2025, **119**, doi: 10.1016/j.scs.2024.106084.
- [14] Zhang J, Gao Y, Luo K, *et al.* Impacts of compound extreme weather events on ozone in the present and future[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(13): 9861-9877.
- [15] Li M, Huang X, Yan D, *et al.* Coping with the concurrent heatwaves and ozone extremes in China under a warming climate[J]. *Science Bulletin*, 2024, **69**(18): 2938-2947.
- [16] Cui M, Hong C, Liu W, *et al.* Future warming exacerbates heatwave-ozone compound extremes in China[J]. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 2025, **8**(1), doi: 10.1038/s41612-025-01218-2.
- [17] Wang P, Yang Y, Li H, *et al.* North China Plain as a hot spot of ozone pollution exacerbated by extreme high temperatures[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, **22**(7): 4705-4719.
- [18] Ban J, Lu K, Wang Q, *et al.* Climate change will amplify the inequitable exposure to compound heatwave and ozone pollution[J]. *One Earth*, 2022, **5**(6): 677-686.
- [19] 唐颖潇, 姚青, 汪靖, 等. 气候变化情景下京津冀区域高温和臭氧变化预估[J]. *中国环境科学*, 2025, **45**(11): 5931-5940.
Tang Y X, Yao Q, Wang J, *et al.* Projection of high temperature and ozone changes in the Beijing-Tianjin-Hebei region under climate change scenarios[J]. *China Environmental Science*, 2025, **45**(11): 5931-5940.
- [20] Du H, Wang D, Wang Y, *et al.* Influences of land cover types, meteorological conditions, anthropogenic heat and urban area on surface urban heat island in the Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **571**: 461-470.
- [21] Roberge F, Sushama L. Urban heat island in current and future climates for the island of Montreal[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, **40**: 501-512.
- [22] Zhao Y, Zhong L, Zhou K, *et al.* Responses of the urban atmospheric thermal environment to two distinct heat waves and their changes with future urban expansion in a Chinese megacity[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, **51**(11), doi: 10.1029/2024GL109018.

- [23] Yang H, Xi C, Zhao X, *et al.* Measuring the urban land surface temperature variations under Zhengzhou city expansion using landsat-like data[J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(5), doi: 10.3390/rs12050801.
- [24] Chen L, Zhang M, Zhu J, *et al.* Modeling impacts of urbanization and urban heat island mitigation on boundary layer meteorology and air quality in Beijing under different weather conditions[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(8): 4323-4344.
- [25] Zhang X, Feng T, Zhao S, *et al.* Elucidating the impacts of rapid urban expansion on air quality in the Yangtze River Delta, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **799**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149426.
- [26] Meehl G A, Tebaldi C, Tilmes S, *et al.* Future heat waves and surface ozone[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, **13**(6), doi: 10.1088/1748-9326/aabedc.
- [27] Zhong X, Wang P, Yang Y, *et al.* Distinct climate drivers governing the dominant interannual variability of co-occurrences of heat and ozone pollution extremes over northern and southern urban clusters in eastern China[J]. *Atmospheric Research*, 2026, **330**, doi: 10.1016/j.atmosres.2025.108621.
- [28] Song Y, Wang P, Yang Y, *et al.* Meteorological conditions and physicochemical processes amplifying ozone pollution during heatwaves in major city clusters of China[J]. *Atmospheric Research*, 2026, **330**, doi: 10.1016/j.atmosres.2025.108580.
- [29] Pfannerstill E Y, Arata C, Zhu Q, *et al.* Temperature-dependent emissions dominate aerosol and ozone formation in Los Angeles[J]. *Science*, 2024, **384**(6702): 1324-1329.
- [30] Ryan R G, Marais E A, Gershenson-Smith E, *et al.* Measurement report: MAX-DOAS measurements characterise central London ozone pollution episodes during 2022 heatwaves[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023, **23**(12): 7121-7139.
- [31] Luo Y, Zhao T, Meng K, *et al.* Distinct responses of urban and rural O₃ pollution with secondary particle changes to anthropogenic emission reductions: Insights from a case study over north China[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, **950**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.175340.
- [32] Liu Y, Wang T. Worsening urban ozone pollution in China from 2013 to 2017 – Part 1: the complex and varying roles of meteorology[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(11): 6305-6321.
- [33] Xu H, Ruan Z, Fang H, *et al.* Machine learning unveils the impact of anthropogenic emission changes on urban PM_{2.5} and O₃: a case study in Wuhu[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2024, **158**: 395-404.
- [34] Liu Y, Chen T, Ma Z, *et al.* Variation of biogenic VOC contribution to ozone formation with reduced anthropogenic precursor emissions: coupling online observation and future scenario simulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2025, **961**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.178380.
- [35] 许启慧, 邵丽芳, 高旭旭, 等. 1980年以来京津冀地区群发性高温过程的变化特征[J]. *热带气象学报*, 2025, **41**(2): 236-244.
Xu Q H, Shao L F, Gao X X, *et al.* Characteristics of cluster high-temperature processes in the Beijing-Tianjin-Hebei region since 1980[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2025, **41**(2): 236-244.
- [36] 李云凤, 汤济霖, 纪元元, 等. 近年北京市环境空气臭氧及其背景浓度的对比分析[J]. *环境科学*, 2025, **46**(3): 1275-1284.
Li Y F, Tang J L, Ji Y Y *et al.* Comparative analysis of ambient ozone and its background concentration in Beijing in recent years[J]. *Environmental Science*, 2025, **46**(3): 1275-1284.
- [37] Zhang L, Wang L, Tang G, *et al.* Comprehensively exploring the characteristics and meteorological causes of ozone pollution events in Beijing during 2013-2020[J]. *Atmospheric Research*, 2023, **294**, doi: 10.1016/j.atmosres.2023.106978.
- [38] Zaveri R A, Peters L K. A new lumped structure photochemical mechanism for large-scale applications[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, **104**(D23): 30387-30415.
- [39] Zaveri R A, Easter R C, Fast J D, *et al.* Model for simulating aerosol interactions and chemistry (MOSAIC)[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113**(D13), doi: 10.1029/2007JD008782.
- [40] Zhao C, Ruby Leung L, Easter R, *et al.* Characterization of speciated aerosol direct radiative forcing over California[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(5): 2372-2388.
- [41] Dou C, Ji Z, Xiao Y, *et al.* Projection of air pollution in northern China in the two RCPs scenarios[J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(16), doi: 10.3390/rs13163064.
- [42] Peralta A H D, Gavidia-Calderón M, Andrade M de F. Future ozone levels responses to changes in meteorological conditions under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios over São Paulo, Brazil[J]. *Atmosphere*, 2023, **14**(4), doi: 10.3390/atmos14040626.
- [43] Zheng B, Tong D, Li M, *et al.* Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(19): 14095-14111.
- [44] Tong D, Cheng J, Liu Y, *et al.* Dynamic projection of anthropogenic emissions in China: methodology and 2015-2050 emission pathways under a range

- of socio-economic, climate policy, and pollution control scenarios[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(9): 5729-5757.
- [45] Luo M, Hu G, Chen G, *et al.* 1 km land use/land cover change of China under comprehensive socioeconomic and climate scenarios for 2020-2100[J]. *Scientific Data*, 2022, **9**(1), doi: 10.1038/s41597-022-01204-w.
- [46] Chen G, Li X, Liu X. Global land projection based on plant functional types with a 1-km resolution under socio-climatic scenarios[J]. *Scientific Data*, 2022, **9**(1), doi: 10.1038/s41597-022-01208-6.
- [47] Gao M, Wang F, Xu Y, *et al.* Future intensification of co-occurrences of heat, PM_{2.5} and O₃ extremes in China and India despite stringent air pollution controls[J]. *Environmental Research Letters*, 2025, **20**(1), doi: 10.1088/1748-9326/ad961d.
- [48] Lu X, Hong J, Zhang L, *et al.* Severe surface ozone pollution in China: a global perspective[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2018, **5**(8): 487-494.
- [49] 李晓倩, 魏永杰, 吴丰昌. 国际环境空气质量基准的起源、发展及启示: 以臭氧为例[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(8): 1779-1785.
Li X Q, Wei Y J, Wu F C, *et al.* Origin and development of ambient air quality criteria: illustrated by the case of ozone[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(8): 1779-1785.
- [50] 和金梅, 王宗爽, 郭敏, 等. 全球环境空气质量标准研究及未来我国标准展望[J]. *环境科学研究*, 2024, **37**(9): 1897-1910.
He J M, Wang Z S, Guo M, *et al.* Research on global ambient air quality standards and future prospects of China's standards[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2024, **37**(9): 1897-1910.
- [51] Fleming Z L, Doherty R M, Von Schneidemesser E, *et al.* Tropospheric ozone assessment report: present-day ozone distribution and trends relevant to human health[J]. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2018, **6**, doi: 10.1525/elementa.273.
- [52] 张熙涛, 周德成. 典型生态城市 1990~2020 年地表热环境的时空演变及其预测[J]. *环境科学*, 2025, **46**(8): 5196-5205.
Zhang X T, Zhou D C. Spatiotemporal evolution and prediction of land surface thermal environment in a typical ecological city from 1990 to 2020[J]. *Environmental Science*, 2025, **46**(8): 5196-5205.
- [53] Wang M, Wei J, Wang X, *et al.* Reconstruction of all-sky daily air temperature datasets with high accuracy in China from 2003 to 2022[J]. *Scientific Data*, 2024, **11**(1), doi: 10.1038/s41597-024-03980-z.
- [54] Zhou K, Zhong L, Wang Z, *et al.* Evaluating the impacts of land use/land cover changes and climate variations on urban heat islands using the WRF-UCM model in Hefei, China[J]. *Climatic Change*, 2024, **177**(8), doi: 10.1007/s10584-024-03777-4.
- [55] 何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 等. 城市臭氧污染特征与高影响气象因子: 以苏州为例[J]. *环境科学*, 2023, **44**(1): 85-93.
He Y, Lin H J, Cao S Y, *et al.* Characteristics of ozone pollution and high-impact meteorological factors in urban cities: a case of Suzhou[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(1): 85-93.
- [56] Chen F, Yang X, Wu J. Simulation of the urban climate in a Chinese megacity with spatially heterogeneous anthropogenic heat data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, **121**(10): 5193-5212.