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.

气候变化情景下京津冀区域高温和臭氧变化预估

唐颖潇[1],姚 青[1*],汪 靖[2],蔡子颖[1],韩素芹[1] (1.天津市环境气象中心,中国气象局-南开大学大气环境与健康研究联合实验室,天津 300074；2.天津市气象科学研究所,天津 300074)

摘要：为探究未来气候变化对高温天气和 O_3 污染的影响,基于 CMIP6-WRF/Chem 模式降尺度,模拟 21 世纪不同年份夏季温度和 O_3 浓度.结果显示,相较于 2014 年, SSP2-4.5 情景下京津冀典型城市 2100 年气温升高放缓,北京、天津和石家庄最高温升温速率分别为 0.29℃/10a、0.46℃/10a 和 0.33℃/10a,而 SSP5-8.5 情景下升温则明显加剧 3 座城市升温速率分别为 0.63℃/10a、0.80℃/10a 和 0.72℃/10a. 两种情景下北京、天津和石家庄日均 O_3 浓度和 $MDA8O_3$ 浓度均呈增加趋势,增加速率分别为 1.1μg/(m^3·10a)、1.5μg/(m^3·10a)和 0.9μg/(m^3·10a)以及 1.2μg/(m^3·10a)、1.3μg/(m^3·10a)和 1.1μg/(m^3·10a),但 O_3 超标天数表现不同,可能与高温天和非高温天 O_3 浓度的变化差异有关.各城市非高温天 O_3 浓度均呈增加趋势,最大增量发生在 SSP5-8.5 情景下 2035 年的北京,增加 12.9μg/m^3.高温天 O_3 浓度则不同程度减少,最大减少发生在 SSP2-4.5 情景下 2100 年的天津,减少 13.9μg/m^3.不同情景下天津市温度惩罚因子均低于 2014 年,不同情景和年份均存在高温对 O_3 的抑制作用.气温对 O_3 的影响并非线性,相对湿度可能影响高温与 O_3 浓度的关系.

关键词：气候变化；CMIP6；高温热浪；臭氧(O_3)；京津冀
中图分类号：X51 **文献识别号**：A **文章编号**：1000-6923(2025)11-5931-10

Projection of high temperature and ozone changes in the Beijing-Tianjin-Hebei region under climate change scenarios.

TANG Ying-xiao[1], YAO Qing[1*], WANG Jing[2], CAI Zi-ying[1], HAN Su-qin[1] (1.CMA-NKU Cooperative Laboratory for Atmospheric Environment-Health Research, Tianjin Environmental Meteorology Center, Tianjin 300074, China；2.Tianjin Institute of Meteorological Science, Tianjin 300074, China). *China Environmental Science*, 2025,45(11)：5931~5940

Abstract：In order to investigate the impact of future climate change on high temperatures and ozone pollution, summer temperatures and O_3 concentrations for different years in the 21st century were simulated using downscaling based on the CMIP6-WRF/Chem model. The results of the study indicated that, in comparison with 2014, the rate of temperature increased in typical cities within the Beijing-Tianjin-Hebei region would slow down by 2100 under the SSP2-4.5 scenario with peak warming rates of 0.29°C/decade, 0.46°C/decade, and 0.33°C/decade for Beijing, Tianjin, and Shijiazhuang respectively. Under the SSP5-8.5 scenario, warming accelerated markedly, with rates of 0.63°C/decade, 0.80°C/decade, and 0.72°C/decade for the three cities. Under both scenarios, daily average O_3 concentrations and $MDA8O_3$ concentrations in Beijing, Tianjin, and Shijiazhuang all exhibited increasing trends, with growth rates of 1.1μg/(m^3·decade), 1.5μg/(m^3·decade) and 0.9μg/(m^3·decade), and 1.2μg/(m^3·decade), 1.3μg/(m^3·decade) and 1.1 μg/(m^3·decade), respectively. However, the number of days exceeding O_3 standards exhibited differing patterns, potentially linked to variations in O_3 concentrations between hot and non-hot days. Non-hot-day O_3 concentrations exhibited an increasing trend across all cities, with the largest increment occurring in Beijing under the SSP5-8.5scenario by 2035, rising by 12.9μg/m^3. Conversely, O_3 concentrations decreased to varying degrees on high-temperature days, with the largest reduction occurring in Tianjin under the SSP2-4.5 scenario by 2100, decreasing by 13.9μg/m^3. Under all scenarios, Tianjin's temperature penalty factor was lower than in 2014, indicating a consistent high-temperature suppression effect on O_3 across scenarios and years. The influence of air temperature on O_3 is non-linear, and relative humidity may modulate the relationship between high temperatures and O_3 concentrations.

Key words：climate change；CMIP6；heat wave；ozone(O_3)；Beijing-Tianjin-Hebei

气候变化是 21 世纪人类面临的最大挑战.气象条件,尤其是气温的变化对臭氧(O_3)的生成有着重要影响.强太阳辐射是大气光化学污染的重要驱动力[1],而高温是强辐射的标志之一.气候变暖是影响 O_3 污染的重要因素,最早在北美的观测分析中发现 O_3 污染随气温升高而加重的现象[2],针对欧洲热浪事件的研究表明高浓度的 O_3 污染往往出现高温地区[3-5].未来气候变暖将加剧高温天气,尤其是极端

收稿日期：2025-03-12
基金项目：天津市气象局一般项目(202407ybxm07);国家自然科学基金资助(42307150);气象能力提升联合研究专项(23NLTSQ009)
* 责任作者, 正高级工程师, yao.qing@163.com

高温现象的发生频率和强度,进而促进 O_3 生成,这可能会部分抵消人为减排的贡献.

京津冀区域是我国重要的政治经济中心,也是我国大气污染防治重点关注区域之一.近年来该地区颗粒物浓度逐年下降,光化学污染问题日渐突出[6-7].全国 O_3 污染重点区域中,京津冀地区 O_3-8h 滑动平均最大值 90 百分位(MDA8O_3-90th)最高, 2014~2023 年均值超过国家二级标准限值,2019~2023 年 O_3-8h 滑动平均最大值(MDA8O_3)浓度高于全国平均水平约 30%左右[8].春夏季气温是影响京津冀区域 O_3 浓度变化的重要因素[9],干热而稳定的大气层结有利于光化学反应发生,有利于高温下 O_3 生成,且在全球增暖背景下,气温对 O_3 的影响将越来越大[10].

未来气候变化背景下 O_3 污染的潜在变化近年来得到较多的关注.有研究采用全球气候模式结合不同排放情景进行分析,结果表明在低排放情景中未来地面 O_3 浓度下降,而在高排放情景中,O_3 浓度则上升[11-12].由于全球气候模式空间分辨率较为粗糙,无法很好地预测区域天气特征及其对 O_3 的影响.相关研究多采用未来气候预测结果驱动区域模式,模拟区域未来 O_3 浓度变化,分析区域气象条件变化对 O_3 浓度的影响.预测结果显示高排放情景 RCP8.5 中热浪、静稳天气和两者综合的未来变化导致美国 O_3 污染天数增加[13],中国夏季的研究也表明气候变暖背景下高温日数的增加可直接导致 O_3 极端污染事件增加[14].基于 CMIP6 模式气候预测产品,本文利用 WRF/Chem 模式降尺度模拟,评估和分析不同 SSP 情景下 21 世纪初、21 世纪中叶和 21 世纪末气象条件变化情况及其对 O_3 浓度的影响,进而厘清京津冀区域未来气候变化背景下高温天气和 O_3 污染变化特征,以期为 O_3 污染防治提供科技支撑.

1 数据与方法

1.1 资料来源

全球模式是研究气候变化常用的工具,相较于全球气候模式比较计划第五阶段(CMIP5),CMIP6 新增了更接近实际的物理和生物地球化学过程,并提出 4 个不同的共享社会经济路径(SSP),按高至低的人为辐射强迫排列分别为 SSP5-8.5、SSP3-7.0、SSP2-4.5 和 SSP1-2.6[15].CMIP6 中 20 个气候模式在 4 个情景下的气候预测数据对比结果表明,未来华北地区极端气温存在明显的空间差异[16].大量研究利用 CMIP5 模式结果作为侧边界数据驱动环境气象模式得到降尺度结果,以此分析不同情景下 O_3 浓度变化情况[17-18],而基于 CMIP6 模式预测产品驱动环境气象模式的研究相对较少,无法满足目前最新的气候变化影响评估需要.

基于区域模式的动力降尺度方法,是获取未来高分辨率天气气候信息的重要途径.在传统动力降尺度模拟过程中,全球模式的误差会传递到区域模式中,从而降低降尺度模拟的可信度.因此,本研究使用的 CMIP6 数据来源于 Xu 等[19-20]发展的一个基于多模式结合的误差订正方法得到的一套 CMIP6 多模式集合误差订正数据 (http://www.doi.org/10.11922/sciencedb.00487).这个订正方法在综合以往全球气候模型(Global Climate Model,GCM)误差订正方法优势的基础上,进一步引入 18 个 GCM 模式集合的非线性趋势,以减小单一 GCM 预估结果不确定性大的问题,同时基于 ERA5 再分析资料订正了 CMIP6 模式的平均态和年际变率误差,显著改善了区域模式对气候平均态和极端事件的模拟能力.该数据包括 1979~2014 年的 CMIP6 历史时期订正结果,以及 2015~2100 年 CMIP6 的 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 两个未来共享社会经济路径情景的订正结果.数据为 6 小时分辨率,包括海表面温度、海平面气压、地表气压以及 14 个等压面的大气温度、相对湿度、纬向风、经向场和位势高度场等变量,可为全球不同区域的动力降尺度模拟,提供高质量的大尺度驱动场,在不同区域的未来气候变化和污染物预估中发挥了重要作用[21-23].

1.2 区域模式设置和试验设计

CMIP6-WRF/Chem 模式包括气候驱动场和区域模式两部分.本研究采用 WRF-Chem V3.4 版本,化学过程采用 MOZART-4 方案,长波辐射和短波辐射采用 RRTMG 方案,积云对流采用 GRELL-3D 方案,微物理过程采用 Lin 方案,边界层方案使用 YSU 方案.模拟地区中天津以外的人为排放源清单采用清华大学 MEIC2016,分辨率 0.25°×0.25°,天津则采用源谱调查排放源清单数据,其分辨率为 1km,模式采用单层网格(如图 1),水平分辨率分别为 15km,水平网格 121×121,中心经纬度为 116.0°E,39.0°N,垂直分辨率为 41 层.

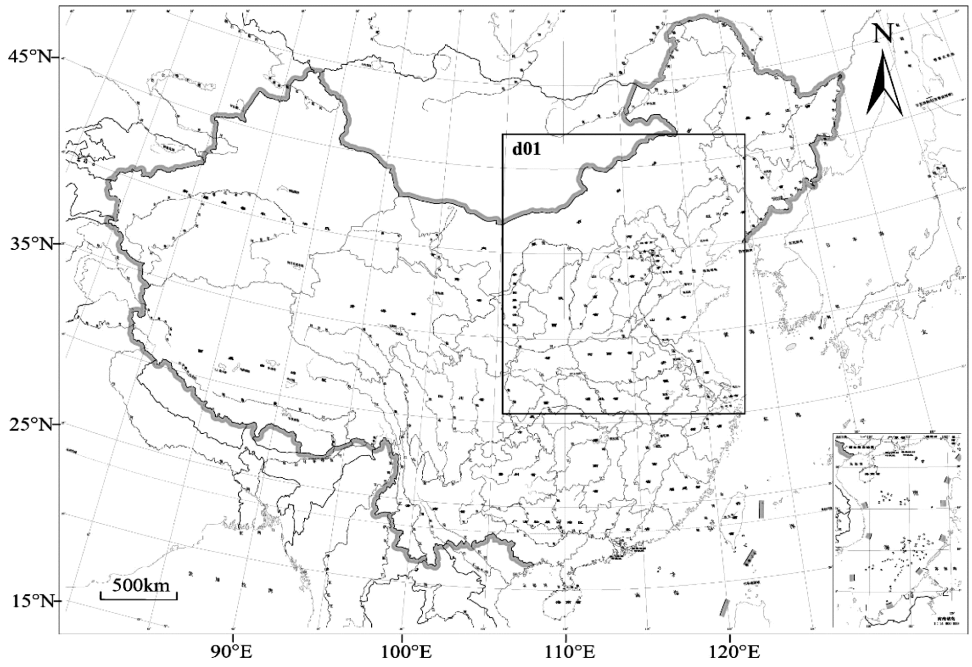


图 1　模式模拟区域和范围示意

Fig.1　Model simulation area and range

审图号:GS(2022)4307

选取 SSP2−4.5 和 SSP5−8.5 情景的 2035、2050 和 2100 年的 5~8 月,作为典型年的夏季,通过 CMIP6 驱动 WRF/Chem 模式进行降尺度模拟,并以 2014 年为基准年,作为未来气候变化参照,以此研究未来不同模拟时间下高温和 O_3 相对变化特征,具体情景和时间范围见表 1.

表 1　不同情景设置以及时间范围设定

Table 1　Scenario settings and time range settings

试验名称	模拟时间	气象场
hist	2014 年 5~8 月	历史评估 2014 年气象场
2030−SSP2	2035 年 5~8 月	SSP2−4.5 情景结果
2050−SSP2	2050 年 5~8 月	SSP2−4.5 情景结果
2100−SSP2	2100 年 5~8 月	SSP2−4.5 情景结果
2030−SSP5	2035 年 5~8 月	SSP5−8.5 情景结果
2050−SSP5	2050 年 5~8 月	SSP5−8.5 情景结果
2100−SSP5	2100 年 5~8 月	SSP5−8.5 情景结果

选取北京、天津和石家庄作为京津冀区域典型城市,进一步验证模式模拟设置和历史气象场的准确性.环境观测数据来自中国环境监测总站(http://www.cnemc.cn//),气象数据来自中国气象数据服务系统(http://data.cma.cn//).表 2 给出了 2014 年 5~8 月北京、天津和石家庄气象要素、O_3 浓度模拟和观测值的对比情况.总体而言,模式模拟与观测气象要素的相关性较好,其中气温的模拟效果最好,O_3 浓度模拟与观测值相关性较高,但存在一定低估现象,这一结果与中国其他基于 WRF−Chem 模式的研究相接近[24−25],表明基于同样设置和排放的未来预估具备一定的可比性.

表 2　2014 年模拟值与观测值统计量

Table 2　Statistical comparison between the observed and simulated variables in 2014

要素	城市	模拟均值	观测均值	相关系数	均方根误差
气温(℃)	北京	25.2	24.9	0.64	0.32
	天津	24.6	26.2	0.60	1.52
	石家庄	26.2	26.5	0.62	0.33
相对湿度(%)	北京	57	61	0.45	3.55
	天津	66	62	0.51	4.24
	石家庄	55	57	0.44	2.29
风速(m/s)	北京	3.0	1.8	0.22	1.23
	天津	4.1	2.1	0.24	2.01
	石家庄	3.4	1.8	0.15	1.56
$\rho(O_3)$ (μg/m^3)	北京	95	97	0.55	19.70
	天津	86	81	0.50	18.52
	石家庄	95	78	0.50	33.18

1.3　高温和臭氧污染事件定义

根据中国气象局定义,将日最高温度(T_{max})达到或超过 35°C 定义为高温天,连续 3d 或以上高温天,定义为一次高温热浪事件.同时按照高温预警的划

分标准,将高温天划分为 3 类,其中日最高温度≥35°C 且小于 37°C,定义为一般性高温;日最高温度≥37°C 且小于 40°C,定义为危害性高温;日最高温度≥40°C,定义为强危害性高温.根据我国《环境空气质量标准》(GB 3095−2012),将 $MDA8O_3$ 超过 160Fμg/m^3 定义为 O_3 污染或 O_3 超标事件.

2 结果与讨论

2.1 不同 SSP 情景下高温变化趋势

图 2 给出了北京、天津和石家庄 3 座城市不同情景下 2035 年、2050 年和 2100 年 5~8 月日平均气温(T_{ave},a~b)和 T_{max} (c~d)相较于 2014 年的变化情况.如图 2(a),SSP2−4.5 情景下,北京、天津和石家庄 2014~2050 年的 T_{ave} 升温速率分别为 0.93℃/10a、0.88℃/10a 和 0.84℃/10a,SSP5−8.5 情景下则为 0.84℃/10a、0.89℃/10a 和 0.71℃/10a (图 2(b)),3 座城市的升温速率接近,2100 年 SSP2−4.5 情景下 3 座城市 T_{ave} 与 2050 年接近,仅有小幅增温,但 SSP5−8.5 情景下继续维持强增温,相比于 2014 年存在 6℃左右的增温.如图 2(c),北京、天津和石家庄 SSP2−4.5 情景下 T_{max} 至 2100 年的升温速率分别为 0.29℃/10a、0.46℃/10a 和 0.33℃/10a,SSP5−8.5 情景下则为 0.63℃/10a、0.80℃/10a 和 0.72℃/10a (图 2(d)),T_{max} 的升温幅度与 T_{ave} 有所差异,北京和石家庄的 T_{max} 升温小于 T_{ave},但天津 T_{max} 升温较快,可能与不同城市夜间升温差异有关[26-27].

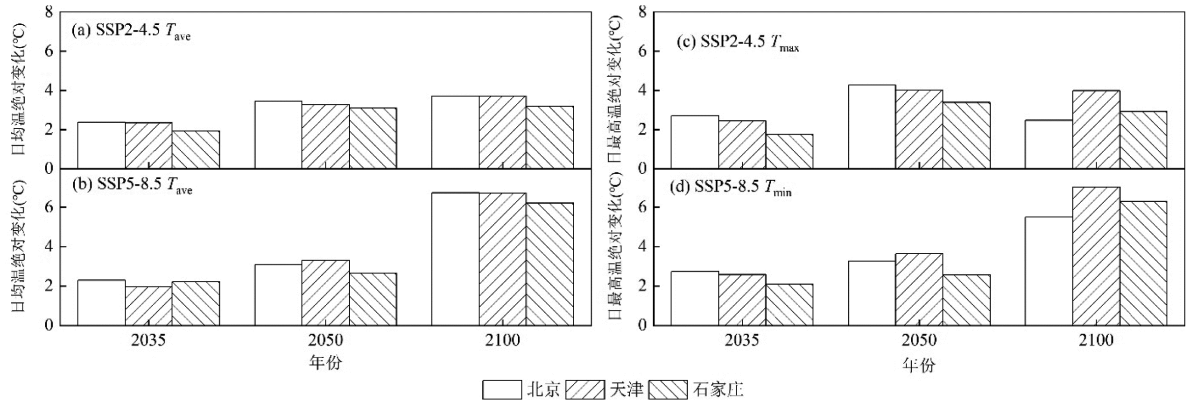


图 2 京津冀典型城市 2035 年、2050 年和 2100 年 5~8 月日平均气温(a~b)和日最高气温(c~d)相较于 2014 年的变化

Fig.2 Variations of daily average temperature (a~b) and daily maximum temperature (c~d) from May to August in 2035, 2050 and 2100 in typical cities of Beijing−Tianjin−Hebei compared with 2014

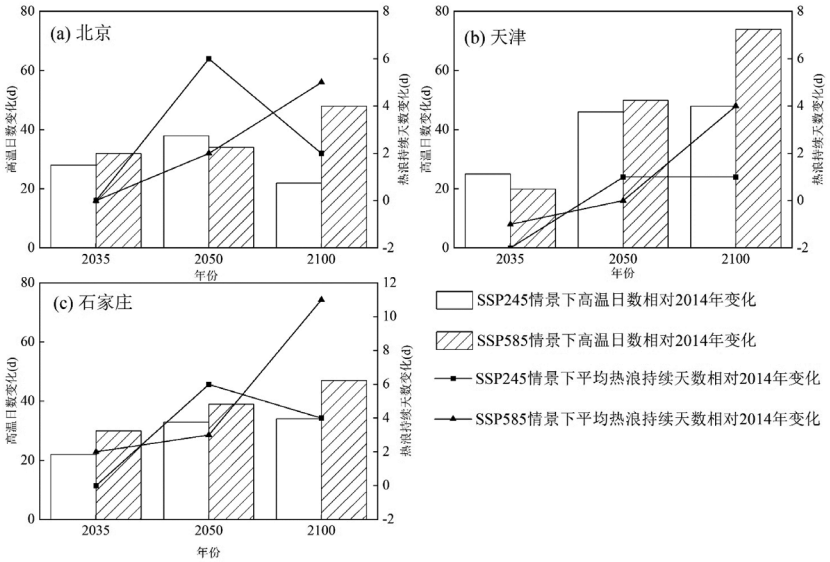


图 3 不同情景下京津冀典型城市 2035 年、2050 年和 2100 年 5~8 月高温日数和热浪事件平均持续天数相较于 2014 年的变化

Fig.3 Variations of the number of high temperature days and average duration of heat wave events from May to August in 2035, 2050 and 2100 in typical cities of Beijing−Tianjin−Hebei under different scenarios compared with 2014

T_{max} 的变化直接影响高温热浪事件,图 3 给出了 3 座城市高温日数和热浪事件平均持续天数相对于 2014 年的变化,可见不同情景不同年份 3 座城市高温天数相较于 2014 年均有所增加.除 SSP2−4.5 情景下北京 2100 年高温日数增量明显降低外 (图 3(a)),其他城市不同情景下高温日数增量均逐年增加,尤其天津高温日数增加最为明显,在图 3(b)中,SSP5−8.5 情景下 2100 年天津高温日数相较于 2014 年增加 74d.图 3 中,SSP2−4.5 情景下各城市热浪持续天数增加在 2050 年达到顶峰,2100 年有不同程度下降,SSP2−4.5 情景下则持续增加,并且增幅高于 2050 年,表明不受约束的排放下高温热浪天气将趋于更加频繁和持久.图 4 给出了 3 座城市未来不同等级高温天气占总高温天的比例变化情况.图 4(a)~(c)中,SSP2−4.5 情景下 3 座城市的强危害性高温天数占比呈现先增多后减少,而图 4(d)~(f)中,SSP5−8.5 情景下则呈现持续增多趋势,2100 年 3 座城市强危害性高温天气占比均超过 50%.两个情景下各年份中(图 4(c)和图 4(f)),石家庄的一般性高温天占比最低,强危害性高温占比最高,表明石家庄高温天气危险性需要引起足够重视.

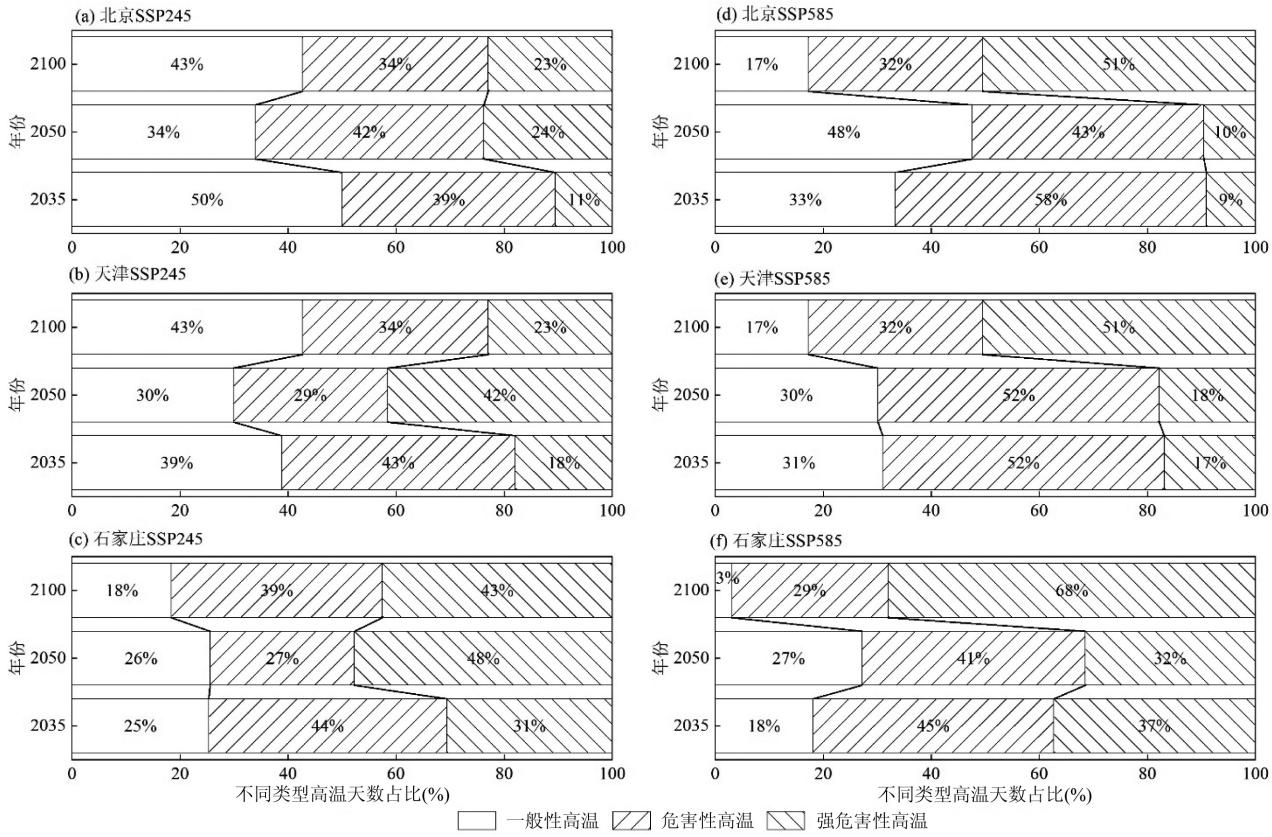


图 4　SSP2−4.5 情景(a~c)和 SSP5−8.5 情景(d~f)京津冀典型城市 2035 年、2050 年和 2100 年 5~8 月不同类型高温天气占总高温天比例情况

Fig.4　The proportions of different high temperature weathers in the total high temperature days from May to August in 2035, 2050 and 2100 in the typical cities of Beijing−Tianjin−Hebei under SSP2−4.5scenarios (a~c) and SSP5−8.5scenarios (d~f)

2.2　不同 SSP 情景下臭氧变化趋势

O_3 作为光化学污染物,未来不同升温情景直接影响着 O_3 的生成.图 5 给出了 3 座城市不同情景下日平均 O_3 浓度(图 5(a)~(b))和 $MDA8O_3$ 浓度(图 5(c)~(d))相较于 2014 年的变化情况.两种情景下 3 座城市各年份日均 O_3 浓度和 $MDA8O_3$ 浓度相较于 2014 年均有所增加.如图 5(a)中,SSP2−4.5 情景下 3 座城市日均 O_3 浓度增加先升后降,而在图 5(b)中,SSP5−8.5 情景下北京和天津持续升高,石家庄先降后升,至 2100 年 3 座城市日平均 O_3 浓度的升高速率分别为 1.1μg/(m^3·10a)、1.5μg/(m^3·10a)和 0.9μg/(m^3·10a).SSP2−4.5 情景下,北京和天津 $MDA8O_3$ 浓度与日均 O_3 浓度变化趋势一致,呈现先升后降,石家庄则表现为持续下降(图 5(c)).而在图 5(d)中,SSP5−8.5 情景下北京和石家庄 $MDA8O_3$ 浓度变化一致,表现为先降后升,天津则持续升高,至 2100 年 3

座城市 $MDA8O_3$ 浓度升高速率依次为为 1.2μg/ (m^3·10a)、1.3μg/(m^3·10a)和 1.1μg/(m^3·10a).

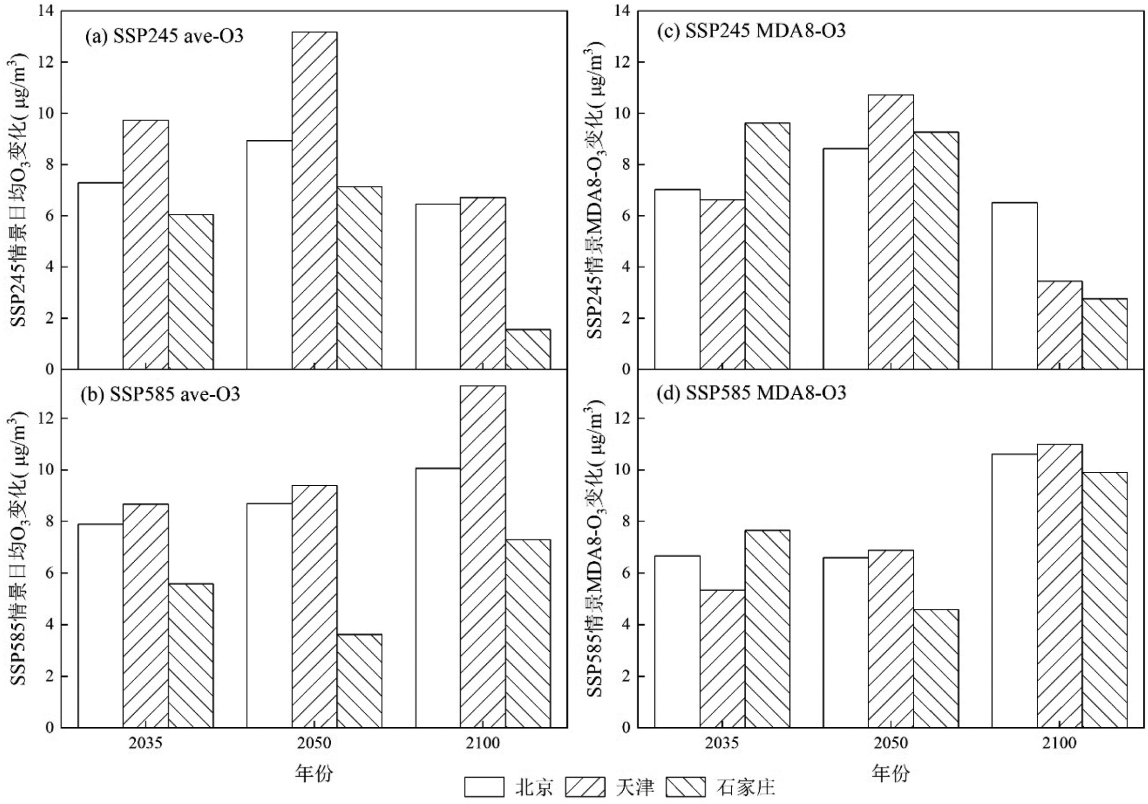


图 5 不同情景下京津冀典型城市 2035 年、2050 年和 2100 年 5~8 月日平均 O_3 浓度(a~b)和 $MDA8O_3$(c~d)相对于 2014 年的变化

Fig.5 Variations of average daily O_3 concentration (a~b) and $MDA8O_3$ (c~d) from May to August in 2035, 2050 and 2100 in typical cities of Beijing−Tianjin−Hebei under different scenarios compared with 2014

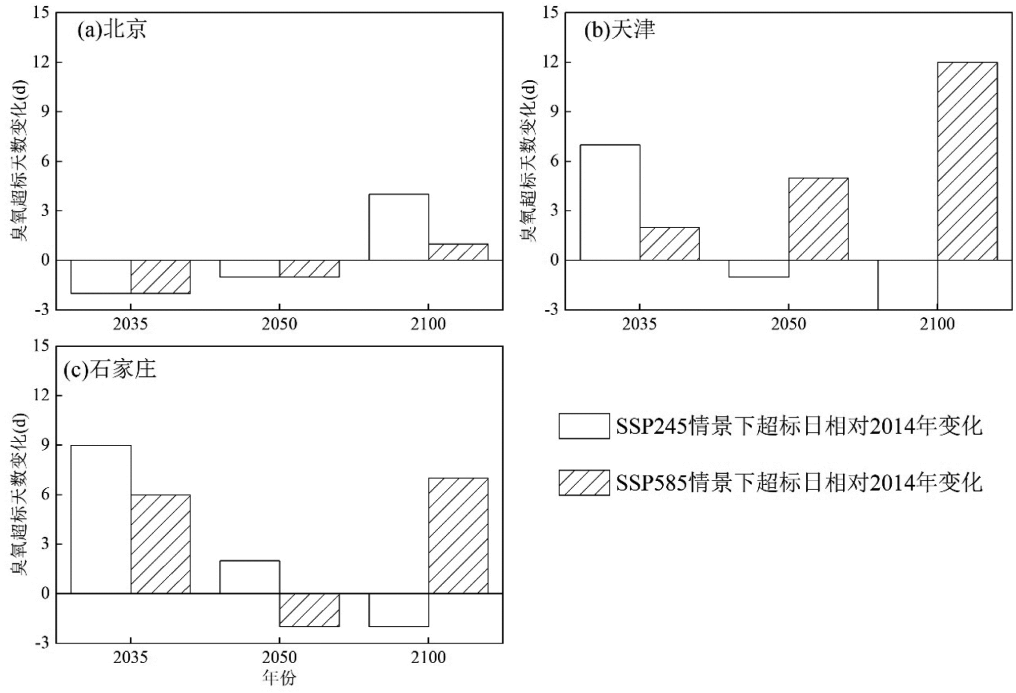


图 6 不同情景下京津冀典型城市 2035 年、2050 年和 2100 年 5~8 月 O_3 超标日数相较于 2014 年的变化

Fig.6 Variations of the number of O_3 concentration exceeding the threshold days from May to August in 2035, 2050 and 2100 in typical cities of Beijing−Tianjin−Hebei under different scenarios compared with 2014

图 6 给出了不同情景下 3 座城市 O_3 超标天数相较于 2014 年的变化情况.与 O_3 浓度变化趋势不同,3 座城市各年份 O_3 超标天数相较于 2014 年变化各不相同.在图 6(a)中,相较于 2014 年,北京两种情景下 2035 年和 2050 年 O_3 超标天数均呈现减少趋势,2100 年则表现为增加,特别是 SSP2−4.5 情景下增加较多.天津两种情景下 2035 年 O_3 超标天数均有所增加,其后呈减少趋势,而 SSP5−8.5 情景下各年份均呈增加趋势 (图 6(b)).而在图 6c 中,石家庄两种情景下 2035 年超标天数均有所增加,但 2050 年 SSP2−4.5 情景下超标天数增加,而 SSP5−8.5 情景下变为减少,2100 年则呈现相反特征.这种差异可能与不同城市高温天气和 O_3 污染特征差异有关.

2.3　高温影响下的 O_3 未来变化预估

O_3 浓度和超标日的变化差异,可能与高温天和非高温天臭氧浓度变化差异有关.图 7 给出了非高温天和高温天中日均 O_3 浓度相较于 2014 年的变化.在图 7(a)~(c)中,SSP2−4.5 情景下非高温天日均 O_3 浓度变化相对一致,北京、天津和石家庄日均 O_3 浓度相较于 2014 年均呈增加,其中北京 O_3 浓度增量逐年上升,天津和石家庄增量先升后降.相较于 2014 年,除石家庄 2035 年浓度外,各城市高温天日均 O_3 浓度均呈减少趋势,且随年份增加而减少更多.在图 7(d)~(f)中,SSP5−8.5 情景下,相较于 2014 年,北京和天津非高温天 O_3 浓度增加,且增量逐年减少,高温天 O_3 浓度减少,且减少量也逐年减少.石家庄高温天 O_3 浓度在 2035 年和 2100 年仅增加了 0.2μg/m^3 和 0.1μg/m^3,而非高温天 O_3 浓度变化与北京、天津一致,相较于 2014 年均为增加,且增量逐年减少.尽管两种情景下各城市非高温天 O_3 浓度均呈增加趋势,高温天 O_3 浓度呈减少趋势,但是 O_3 超标日数的变化却有所不同.图 8 给出了非高温天和高温天中 O_3 超标日数相较于 2014 年的变化.这种浓度与超标日的差异,反映出两种情景下各城市 O_3 污染的结构特征差异,总体而言,SSP5−8.5 情景下高温天 O_3 超标日(图 8(d)~(f))远多于 SSP2−4.5 情景,非高温天 O_3 超标日(图 8(a)~(c))则低于 2014 年.

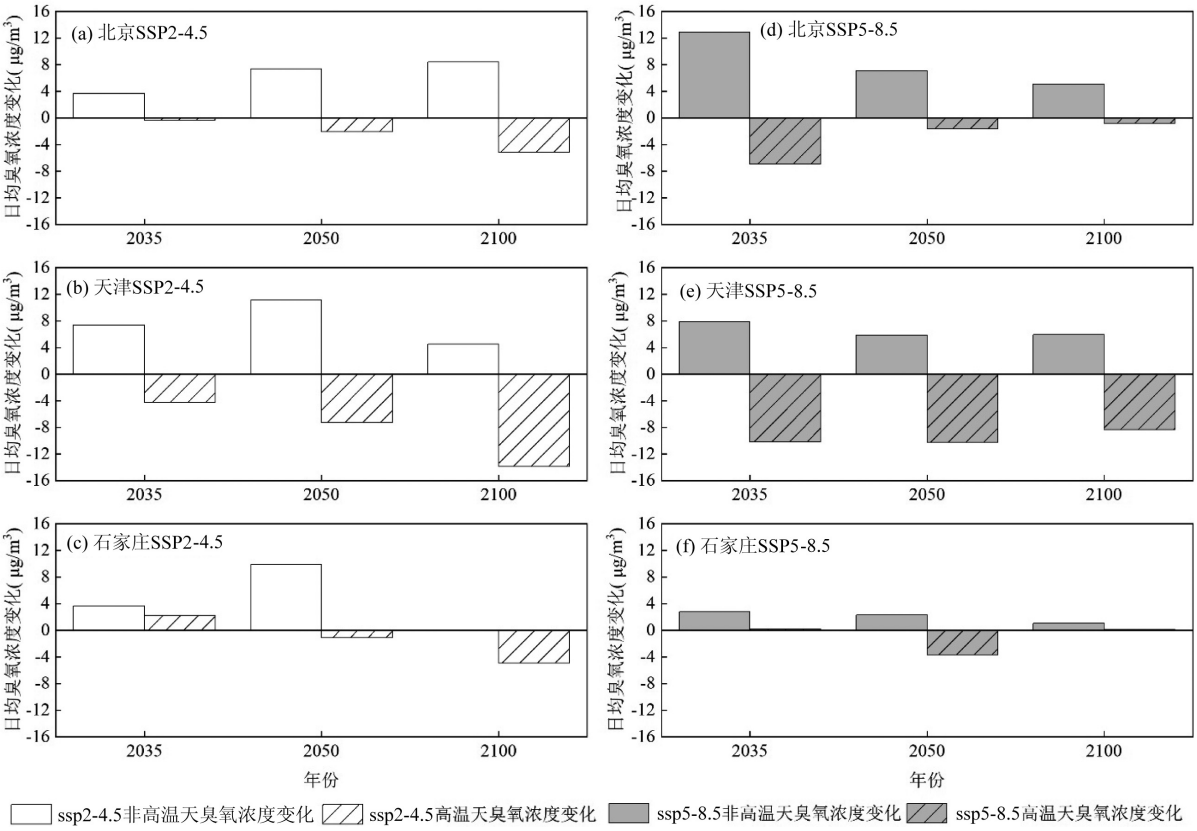


图 7　SSP2−4.5 情景(a~c)和 SSP5−8.5(d~f)情景下京津冀典型城市 2035 年、2050 年和 2100 年 5~8 月非高温天和高温天日均 O_3 浓度相较于 2014 年的变化

Fig.7　Variations of average daily O_3 concentrations on non−high temperature and high temperature days from May to August in 2035, 2050 and 2100 in typical cities of Beijing−Tianjin−Hebei compared with 2014 under SSP2−4.5 scenarios (a~c) and SSP5−8.5 scenarios (d~f)

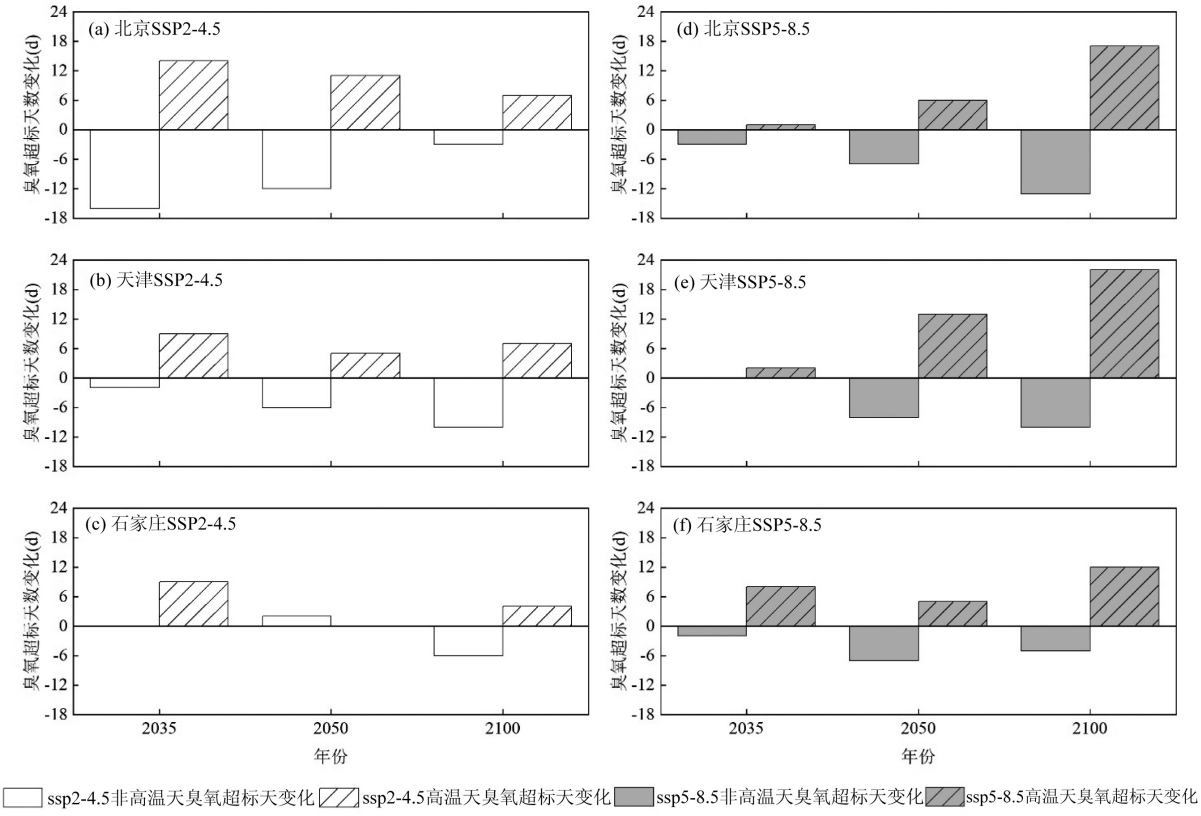


图 8 SSP2−4.5 情景(a~c)和 SSP5−8.5(d~f)情景下京津冀典型城市 2035 年、2050 年和 2100 年 5~8 月非高温天和高温天 O_3 超标天数相较于 2014 年的变化

Fig.8 Variations of the number of O_3 concentration exceeding the threshold days on non−high temperature and high temperature days from May to August in 2035, 2050 and 2100 in typical cities of Beijing−Tianjin−Hebei compared with 2014 under SSP2−4.5 scenarios (a~c) and SSP5−8.5 scenarios (d~f)

2.4 未来气候变化下高温对 O_3 的抑制

为进一步研究 O_3 浓度与气温之间的关系,图 9 列出了天津气温小时值高于 24℃时,每隔 3℃区间内的第 5、25、50、75 和 95 百分位 O_3 浓度变化情况[28-29],并取 24~42℃的气温跨度.在所有情景和年份中气温与 O_3 浓度均呈现线性正相关关系,拟合程度均通过显著性检验.各百分位数的斜率代表温度每上升 1℃各百分位 O_3 增量,5 条拟合曲线斜率的平均值定义为区域温度惩罚因子(temperature penalty factor,TPF).从中可以看到,在图 9(g)中,2014 年 TPF 为 6.6μg/(m^3·℃),高于 SSP2−4.5 情景(图 9(a)~(c))和 SSP5−8.5 情景(图 9(d)~(f))下各年份 TPF 值.SSP2−4.5 情景下 TPF 最大值出现在 2035 年(图 9(a)),为 5.2μg/(m^3·℃),而 SSP5−8.5 情景最大值则出现在 2100 年(图 9(f)),为 4.6μg/(m^3·℃).SSP2−4.5 情景和 SSP5−8.5 情景下均出现了 39~42℃温度区间 O_3 浓度持平或者降低的情况,即存在明显的高温对 O_3 抑制作用.各情景和年份 O_3 浓度持平或降低的温度区间各不相同,2035 年两个情景下 O_3 浓度持平或降低均出现在 39~42℃温度区间,2050 年 SSP2−4.5 情景下 75 和 95 百分位数 O_3 浓度在 36~39℃温度区间浓度持平或降低,25 和 50 百分位数在 39~42℃温度区间降低,SSP5−8.5 情景下 39~42℃温度区间 O_3 浓度降低,2100 年两种情景下均未出现浓度降低.这表明气温对 O_3 的影响并非线性,混杂其他因素对 O_3 浓度变化的影响.

有研究表明,相对湿度也会影响 O_3 浓度.图 10 列出了天津气温、相对湿度和 O_3 浓度映射图,在图 10(g)中,2014 年 O_3 浓度变化显示其高值主要集中在气温 30~40℃,相对湿度 20%~70%之间,与其他文献基本一致[9,30].O_3 浓度大于 160 μg/m^3 区间对应气温约为 32.4℃,相对湿度约为 43%.SSP2−4.5 情景(图 10(a)~(c))和 SSP5−8.5 情景(图 10(d)~(f))下,相对于 2014 年,O_3 浓度高值整体向相对湿度低值区偏移,但 O_3 浓度高值区所在温度区间则存在一定差异.在图 10(a)~(c)中,SSP2−4.5 情景下,2035、2050 和 2100 年 O_3 浓度小时值大于 160 μg/m^3 区间对应气温(相对湿

度)均值分别为 32.8℃(33%)、32.6℃(35%)和34.2℃(35%).在图 10d~f 中,SSP5-8.5 情景下则依次为 32.4℃(39%)、33.5℃(35%)和 37.1℃(36%).以 10%相对湿度作为间隔对 20%~70%相对湿度进行分区研究湿度出现频率,结果显示 2014 年天津相对湿度频度峰值出现在 40%~50%区间,与 O_3 浓度值大于160μg/m^3 区间相对应,表明湿度条件有利于臭氧生成.SSP2-4.5 情景和 SSP5-8.5 情景下 O_3 浓度超标值对应更小的湿度区间或更高的温度区间,表明高温天气下臭氧受到抑制,可能与湿度较高有关.此外,NO_2 浓度下降以及风速风向也会认为是造成高温天气下 O_3 抑制的重要因素[31].

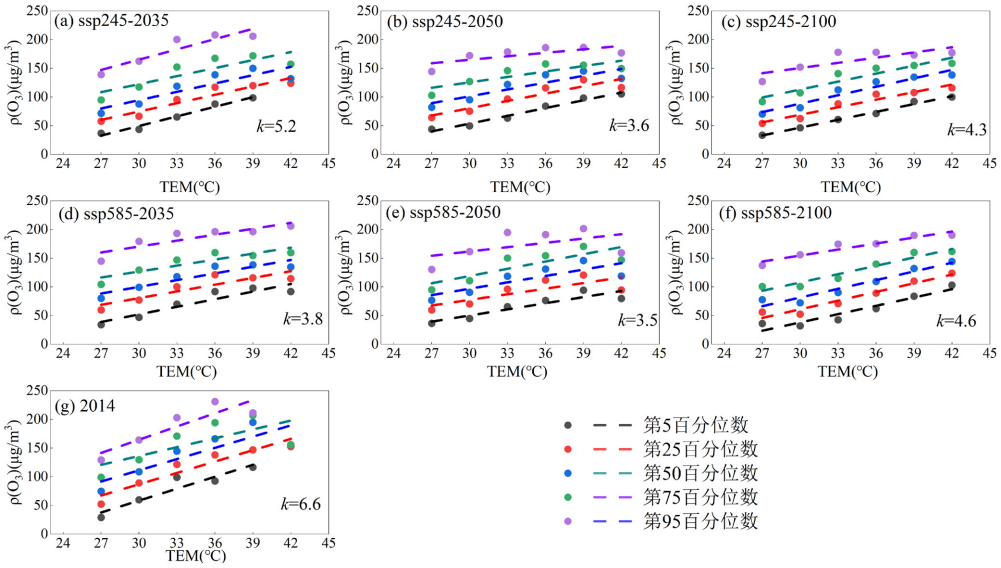


图 9　SSP2-4.5 情景(a~c)和 SSP5-8.5 情景(d~f)下天津 2035 年、2050 年和 2100 年以及 2014 年 5~8 月(g)气温区间、不同百分位数的 O_3 浓度散点图、线性拟合曲线和区域温度惩罚因子

Fig.9　Scatter plots of O_3 concentration, linear fitting curves, and TPF at different percentages in different temperature intervals for Tianjin in 2035, 2050, and 2100 from May to August, as well as 2014(g), under SSP2-4.5 scenarios (a~b) and SSP5-8.5 scenarios (c~d)

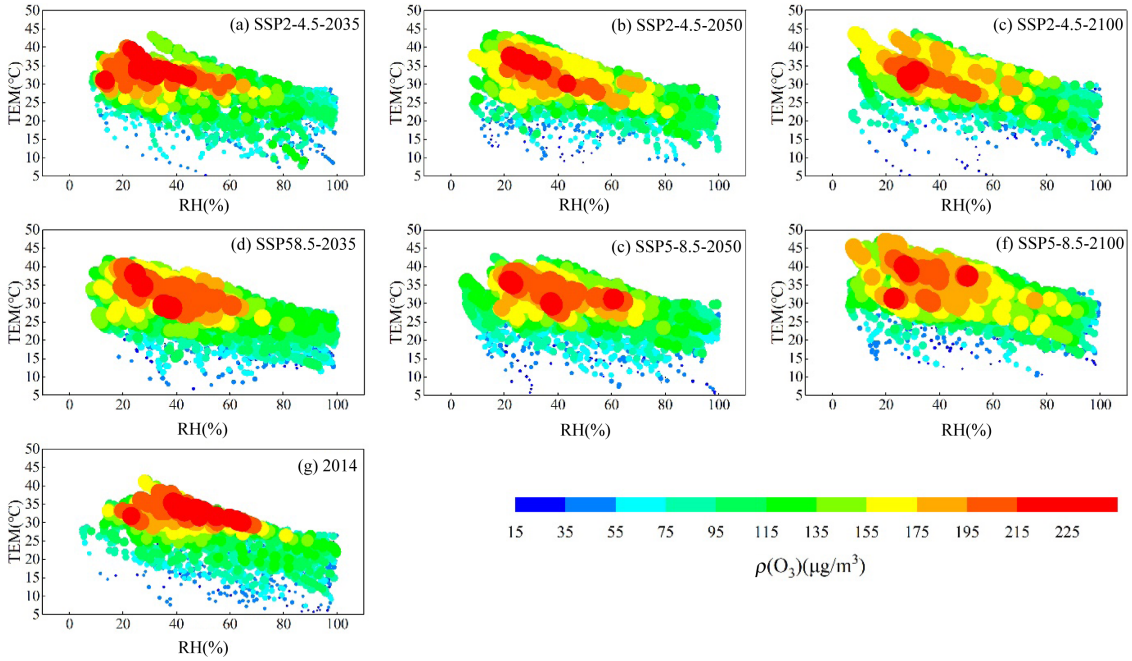


图 10　SSP2-4.5 情景(a~c)和 SSP5-8.5 情景(d~f)下天津 2035 年、2050 年和 2100 年以及 2014 年 5~8 月(g) O_3 浓度在不同温湿区间的气泡图

Fig.10　Bubble charts of O_3 concentration with different intervals of temperature and humidity for Tianjin in 2035, 2050, and 2100 from May to August, as well as 2014(g), under SSP2-4.5 scenarios (a~b) and SSP5-8.5 scenarios (c~d)

3 结论

3.1 基于CMIP6-WRF/Chem降尺度模拟结果显示,相较于 2014 年,SSP2-4.5 情景下京津冀典型城市2100 年日均温升温放缓,而 SSP5-8.5 情景下升温则明显加剧.2100 年各城市强危害性高温天气占总高温天的比例均将超过 50%.

3.2 两种情景下各城市日均 O_3 浓度和 $MDA8O_3$ 浓度均呈增加趋势,但O_3超标天数表现不同.各城市非高温天 O_3 浓度均呈增加趋势,高温天 O_3 浓度则不同程度减少.

3.3 2014 年天津市 TPF 为 6.6μg/(m^3℃),高于 SSP2-4.5 情景和 SSP5-8.5 情景下各年份.存在高温对 O_3 抑制作用,但不同情景和年份对应的温度区间各不相同.

参考文献:

[1] Camalier L, Cox W, Dolwick P. The effects of meteorology on ozone in urban areas and their use in assessing ozone trends [J]. Atmospheric Environment, 2007,41:7127-7137.

[2] Lin C, Jacob D, Fiore A. Trends in exceedances of the ozone air quality standard in the continental United States, 1980~1998 [J]. Atmospheric Environment, 2001,35(19):3217-3228.

[3] Filleull L, Cassadou S, Médina S, et al. The relation between temperature, ozone, and mortality in nine French cities during the heat wave of 2003 [J]. Environmental Health Perspectives, 2006,114(9):1344-1347.

[4] Pyrgou A, Hadjinicolaou P, Santamouris M. Enhanced near-surface ozone under heatwave conditions in a Mediterranean island [J]. Scientific Reports, 2018,8:9191.

[5] Varotsos K, Giannakopoulos C, Tombrou M. Ozone-temperature relationship during the 2003 and 2014 heatwaves in Europe [J]. Regional Environmental Change, 2019,19(6):1653-1665.

[6] Li K, Jacob D J, Liao H. Anthropogenic drivers of 2013~2017 trends in summer surface ozone in China [J]. PNAS, 2019a,116(2):422-427.

[7] Li K, Jacob D J, Liao H. A two-pollutant strategy for improving ozone and particulate matter air quality in China [J]. Nature Geoscience, 2019b,12,906-910.

[8] 韩素芹,等.天津臭氧污染成因及预报技术研究 [M]. 北京:气象出版社, 2023.
Han S Q, et al. Research on the causes and forecasting techniques of ozone pollution in Tianjin [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2023.

[9] 王 玫,郑有飞,柳艳菊,等.京津冀臭氧变化特征及与气象要素的关系 [J]. 中国环境科学, 2019,39(7):2689-2698.
Wang M, Zheng Y F, Liu Y J, et al. Characteristics of ozone and its relationship with meteorological factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. China Environmental Science, 2019,39(7):2689-2698.

[10] 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, 2022,22:4705-4719.

[11] Silva R, West J, Lamarque J, et al. Future global mortality from changes in air pollution attributable to climate change [J]. Nature Climate Change, 2017,7(11):647-651.

[12] Akritidis D, Pozzer A, Zanis P. On the impact of future climate change on tropopause folds and tropospheric ozone [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019,19(22):14387-14401.

[13] 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.

[14] 胡安琪,谢晓栋,龚康佳,等.气候变化对中国夏季臭氧影响 [J]. 环境科学, 2023,44(4):1801-1810.
Hu A Q, Xie X D, Gong K J, et al. Impact of climate change on summer ozone in China [J]. Environmental Science, 2023,44(4):1801-1810.

[15] 周天军,邹立维,陈晓龙.第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述 [J]. 气候变化研究进展, 2019,15(5):445-456.
Zhou T J, Zou L W, Chen X L. Commentary on the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) [J]. Advances in Climate Change Research, 2019,15(5):445-456.

[16] 王 慧,肖登攀,赵彦茜,等.基于 CMIP6 气候模式的华北平原极端气温指数评估和预测 [J]. 地理与地理信息科学, 2021,37(5):86-94,142.
Wang H, Xiao D P, Zhao Y X, et al. Evaluation and projection of extreme temperature indices in the North China Plain based on CMIP6 Models [J]. Geography and Geo-Information Science, 2021,37(5):86-94,142.

[17] Zhang J X, 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.

[18] Liu S, Xing J, Westervelt D M, et al. Role of emission controls in reducing the 2050 climate change penalty for $PM_{2.5}$ in China [J]. Science of the Total Environment, 2021,765:144338.

[19] Xu Z, Han Y, Yang Z. Dynamical downscaling of regional climate: A review of methods and limitations [J]. Science China Earth Sciences, 2019,64:365-375.

[20] Xu Z, Han Y, Tam C Y, et al. Bias-corrected CMIP6global dataset for dynamical downscaling of the historical and future climate (1979~2100) [J]. Scientific Data, 2021,8,293.

[21] Li H M, Yang Y, Jin J B, et al. Climate-driven deterioration of future ozone pollution in Asia predicted by machine learning with multi- source data [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2023,23(2):1131-1145.

[22] Wang Y J, Xiang Y, Han Z Y, et al. Future extreme high-temperature risk in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration of China based on a regional climate model coupled with urban parameterization scheme [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2023,153(1/2):621-634.

[23] Zhang Y Q, Gao Y, Xu L R, et al. Assessment of future solar energy potential changes under the shared socio-economic pathways scenario 2-4.5 with WRF-chem: The roles of meteorology and emission [J]. Atmospheric Environment, 2024,318:120232.

[24] Chen D, Liu Z Q, Fast J, et al. Simulation of sulfate-nitrate-ammonium (SNA) aerosols during the extreme haze events over northern China in October 2014 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016,16(16):10707-10724.

[25] 周广强,瞿元昊,余钟奇.长江三角洲城市臭氧数值预报与释用 [J]. 中国环境科学, 2021,41(1):28-36.
Zhou G Q, Qu Y H, Yu Z Q. Numerical forecast and improvement of ozone over YRD cities [J]. China Environmental Science, 2021,41(1):28-36.

[26] Hu T, Sun Y. Projected changes in extreme warm and cold temperatures in China from 1.5 to 5°C global warming [J]. International Journal of Climatology, 2020,40(8):3942–3953.

[27] 尹 红,孙 颖.基于 ETCCDI 指数 2017 年中国极端温度和降水特征分析 [J]. 气候变化研究进展, 2019,15(4):363-373.
Yin H, Sun Y. Characteristics of extreme temperature and precipitation in China in 2017 based on ETCCDI indices. Advances in Climate Change Research [J]. 2019,15(4):363-373.

[28] Bloomer B J, Stehr J W, Piety C A, et al. Observed relationships of ozone air pollution with temperature and emissions [J]. Geophysical Research Letters, 2009,36:109803.

[29] 刘静达,何 超,赵舒曼,等.七大区域不同温湿条件下臭氧浓度变化 [J]. 环境科学, 2023,44(10):5392-5399.
Liu J D, He C, Zhao S M, et al. Variations in Ozone Concentration in Seven Regions Under Different Temperature and Humidity Conditions [J]. Environmental Science, 2023,44(10):5392-5399.

[30] 李 源,陆彦彬,白 宇,等.基于天津臭氧污染特点的气象条件与天气分型研究 [J]. 中国环境监测, 2022,38(5):56-64.
Li Y, Lu Y B, Bai Y, et al. Study of meteorological conditions and weather types based on ozone pollution characteristics in Tianjin [J]. Environmental Monitoring in China, 2022,38(5):56-64.

[31] 欧林冲,陈伟华,伍永康,等.中国高温下臭氧抑制事件的时空特征及其影响因素 [J]. 环境科学, 2023,44(12):6586-6597.
Ou L C, Chen W H, Wu Y K, et al. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of ozone suppression events under high temperature in China [J]. Environmental Science, 2023,44(12):6586-6597.

作者简介: 唐颖潇(1990-),男,福建宁德人,高级工程师,博士,主要从事大气环境与健康气象方面的科研工作.发表论文 20 余篇. tangyingx@163.com.