

DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2024.201

秦卓凡, 廖宏, 代慧斌. 气候变化影响我国大气重污染事件的研究进展 [J]. 气候变化研究进展, 2025, 21 (1): 56-68

Qin Z F, Liao H, Dai H B. A review of the impacts of climate change on severe air pollution events [J]. Climate Change Research, 2025, 21 (1): 56-68

气候变化影响我国大气重污染事件的研究进展

秦卓凡, 廖宏, 代慧斌

南京信息工程大学 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术
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
/ 环境科学与工程学院, 南京 210044

摘 要: 地表细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 和臭氧 (O_3) 重污染事件是我国大气污染治理的重点关注对象。文中综述了中国近几年关于气候变化对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 重污染事件影响的研究进展。结果表明, $\text{PM}_{2.5}$ 重污染事件主要发生在静稳天气条件下而 O_3 重污染事件主要发生在高温低湿天气条件下。气候变化 (包括气候系统内部变率和大气成分变化驱动的全球变暖), 主要通过影响大尺度环流和区域环流进而影响局地重污染气象条件。目前关于气候变化影响 $\text{PM}_{2.5}$ 的研究较为系统, 能识别气候因子或全球变暖对典型重污染事件或重污染事件长期变化趋势的影响, 但气候变化影响 O_3 重污染事件的研究还较少。

关键词: 细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$); 臭氧 (O_3); 大气重污染事件; 气候变化

引 言

近几十年来, 由于快速的工业化和城市化发展, 中国面临着严重的大气污染问题。细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 和对流层臭氧 (O_3) 是最主要的两类大气污染物, 也是中国环境空气质量治理关注的重点。 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度非常高时会对生态环境、人体健康和生产生活产生不利影响^[1-3]。中国发生大气重污染事件的频率在全球范围内处于较高水平^[4]。2021 年全国两会政府工作报告提出, “十四五”时期的主要目标任务包括持续改善环境治理, 基本消除重污染天气, 这为大气污染治理工作明确

了方向。2023 年生态环境部会同 26 个部门联合制定了《空气质量改善行动计划》, 明确提出要以减少重污染天气和解决人民群众身边的突出大气环境问题为重点。

文献中大气重污染事件的定义通常有以下 4 种: (1) 以污染物日浓度高于某个统一的阈值定义重污染天; (2) 以某段时间内污染物浓度所有数据中的第 90 或 95 百分位数作为重污染的阈值; (3) 以污染持续时间来定义重污染事件; (4) 一个地区一半以上的站点发生污染被定义为该地区的重污染事件。

对于 $\text{PM}_{2.5}$ 来说, 通常以日均浓度大于国家环

收稿日期: 2024-07-31; 修回日期: 2024-10-29

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42021004)

作者简介: 秦卓凡, 女, 博士研究生, qinzhuofan@nuist.edu.cn; 廖宏 (通信作者), 女, 教授, hongliao@nuist.edu.cn

境空气质量二级标准 ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 定义污染天^[5-6], 少数研究也将其定义为重污染天^[7], 考虑到中国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的严重性, 大多数研究以 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 为重污染天的阈值^[6,8-13]。还有一些研究对 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染天的定义为日均浓度大于其第 90^[14] 或 95^[15] 百分位数。也有些研究通过分析持续霾日 (日均能见度 $<10 \text{ km}$ 且日均相对湿度 $<90\%$) 来分析 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染, “持续”的概念为 3 d^[16] 或 4 d^[17] 及以上。也有研究将一个地区当天超过一半的站点观测到霾事件定义为该地区的严重灰霾日^[18]。

对于 O_3 来说, 通常用每日最大 8 h 平均 O_3 浓度 (MDA8-O_3) 来表示污染程度, $\text{MDA8-O}_3 > 160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (约 80 ppbv; 1 ppbv $\approx 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 通常被定义为 O_3 重污染天^[5,19-20], 也有研究用每日最大 O_3 小时浓度 $>60 \text{ ppbv}$ ^[21] 或 90 ppbv ^[22] 或 120 ppbv ^[23] 来定义 O_3 重污染天。还有一些研究将 MDA8-O_3 的第 90 百分位数视为重污染的标准^[14,24-26]。当 MDA8-O_3 超标且持续天数在 5 d 及以上时, 即意味着非常严重的污染事件^[27-28]。

国内外的许多研究已经表明, 虽然大气污染事件发生的根本原因是人为排放导致的空气质量下降, 但是天气条件及气候变化也对其有重要影响^[1,24,29-31], 如图 1 所示。气候变化可以分为自然变率和人为驱动两个方面。气候系统自然振荡相关的气候变化一般指非人为排放导致的地球系统中大气和海洋特性的变化。人为驱动的气候变化包括温室气体排放产生的温室效应以及气溶胶及其前体物排放通过影响辐射和云对气候产生的影

响。北极海冰^[32-39]、西伯利亚高压^[40-44]、海表面温度异常^[17,33,43,45-47]、青藏高原热强迫^[48]、厄尔尼诺和南方涛动 (ENSO)^[49-51] 等气候因子的变化是自然变率和人为活动影响的叠加, 这些气候因子之间也会有相互影响^[32,43-44,48,52]。这些因子的变化可以通过影响中国上空的大尺度环流 (如大气遥相关^[12,36-37,39,45,47,53]、东亚冬季风^[17,36,54-60] 和东亚夏季风^[58,61-64]) 进而影响局地环流和重污染天气。随着气候变暖, 大气稳定度加强, 地面污染物容易积累, 高温也会促进 O_3 的化学生成, 重污染事件更容易发生^[16,22,42,65-67]。

未来气候变化会导致更多重污染天气发生, 进而使大气重污染事件更加频繁^[7,8,3,20-22,26,68]。因此, 在未来气候变化背景下, 中国空气质量的管控将更具挑战性, 研究气候变化对大气重污染事件的影响具有十分重要的意义。本文综述了中国近几年关于气候变化对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 重污染事件的影响的研究进展, 并展望了相关领域未来研究的重点。

1 大气重污染事件的特征和变化趋势

1.1 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染

在过去的几十年中, 尤其是 2010 年以来, 经济发达及人口集中的中国东部地区几乎每年冬季 (12 月到次年 2 月) 都会发生 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染事件^[10,13,29,47,69-80]。尤其是在 2013 年 1 月, 一场持续且严重的雾霾袭击了中国中东部大部分地区并受到广泛关注, 华北平原、长江下游平原以及四川盆地近 1 个月来一直都被灰霾笼罩; 中国 74 个主要城市的观测数据显示, 约 70% 的城市 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度超过了 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 月均浓度最高超过了 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 小时浓度最高超过 $900 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。北京发布了历史上第一个雾霾橙色预警, 这一特殊的重霾事件对至少 17 个省份产生了严重影响, 覆盖了约 130 万 km^2 , 影响了 8 亿多人的生产生活^[29,38,42,48,81-86]。

近几十年来, 中国 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染事件的发生总体呈上升趋势。Dang 等^[9] 使用全球三维化学传输

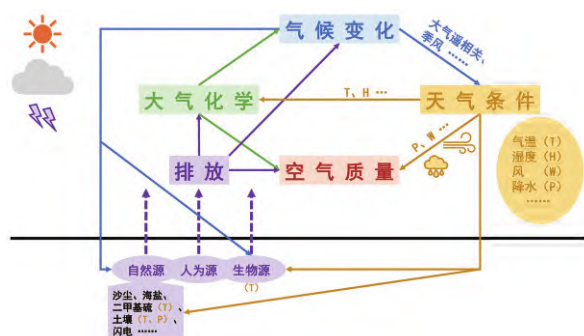


图 1 气候变化影响空气质量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of impact of climate change on air quality

模式模拟了 1985—2017 年京津冀地区冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染天（日均浓度 $>150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）的频率和强度的变化，冬季重污染天数和重污染期间日浓度均值分别呈每十年 4.5 d 和 $13.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的增加趋势。Chen 等^[18]的研究表明，华北地区重霾日（当天有超过一半的站点有霾发生）主要发生在冬季，每年的重霾天数总体呈增加趋势且呈现出明显的年代际变化，1960 年代相对较低，1970—1980 年代相对较高，1990 年代逐渐减少，2000—2012 年逐渐增加。

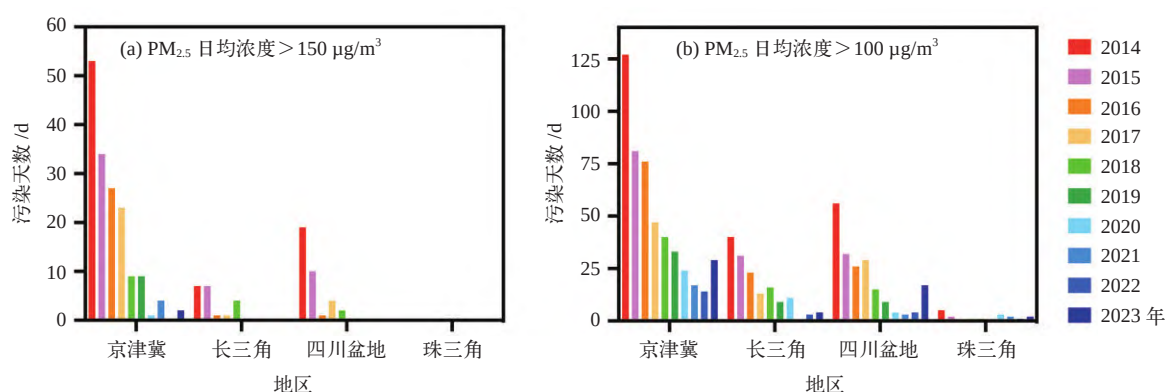
自 2013 年中国发布了《大气污染防治行动计划》以来，中国 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染天发生频率总体呈下降趋势^[4,7,11]。如图 2(a) 所示，从 2014 年开始，珠三角地区已经不再出现 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染天（日均浓度 $>150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ），长三角地区和四川盆地从 2019 年开始不再有重污染天，京津冀地区每年的重污染天都远高于其他地区，但从 2014 年（53 d）到 2023 年（2 d）呈明显下降趋势，2018 年开始已降至 10 d 以下。但是在最近几年，各地区依然存在 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度 $>100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的污染天，如图 2(b) 所示。图 3 给出了京津冀地区 2014—2023 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的逐日变化和重污染天（ $>150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）持续时间，结果表明重污染天数和持续时间总体都呈下降趋势，从 2020 年开始，重污染天持续时

间不再超过 2 d。

1.2 O_3 重污染

自 2010 年以来，中国东部发生了多次 O_3 重污染事件，且多出现在暖季（4—9 月）^[61,87-90]，每小时 O_3 浓度在京津冀地区最大达到 170 ~ 270 ppbv，长三角地区为 130 ~ 180 ppbv，珠三角地区为 200 ~ 220 ppbv^[24]。以 2015 年为例，4—9 月，中国东部经历了广泛和持续的 O_3 污染，观测到的最大小时 O_3 浓度在几乎所有城市都超过 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，25% 以上的城市超过 $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，有 6 个城市超过 $800 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ； O_3 每日最高小时浓度的平均值在 45% 的城市超过 $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[88]。

2013 年以来中国 O_3 重污染总体呈加重趋势，Fu 等^[24]分析 2013—2017 年中国 74 个主要城市的观测数据发现 MDA8-O_3 的第 90 百分位数的平均值从 2013 年的 $139 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 增加到 2017 年的 $167 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。图 4 给出了京津冀地区从 2014 年到 2023 年夏季 MDA8-O_3 的逐日变化。 O_3 污染（ $>160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）天数和持续时间总体都呈增加趋势，从 2016 年开始，每年夏季有一半以上的天数为污染天，持续时间最长可达到 12 d，持续时间在 3 d 及以上的重污染事件从 2014 年的 4 次增加到 2023 年的 10 次。



注：数据来自中国环境检测总站，<http://www.cnemc.cn>。

图 2 2014—2023 年中国 4 个地区不同标准下的 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染天数的逐年变化 (a) $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度 $>150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，(b) $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度 $>100 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Fig. 2 Yearly variation of the frequency of severe $\text{PM}_{2.5}$ pollution under different standards in four regions in China from 2014 to 2023. (a) Daily mean concentration $> 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, (b) daily mean concentration $> 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$

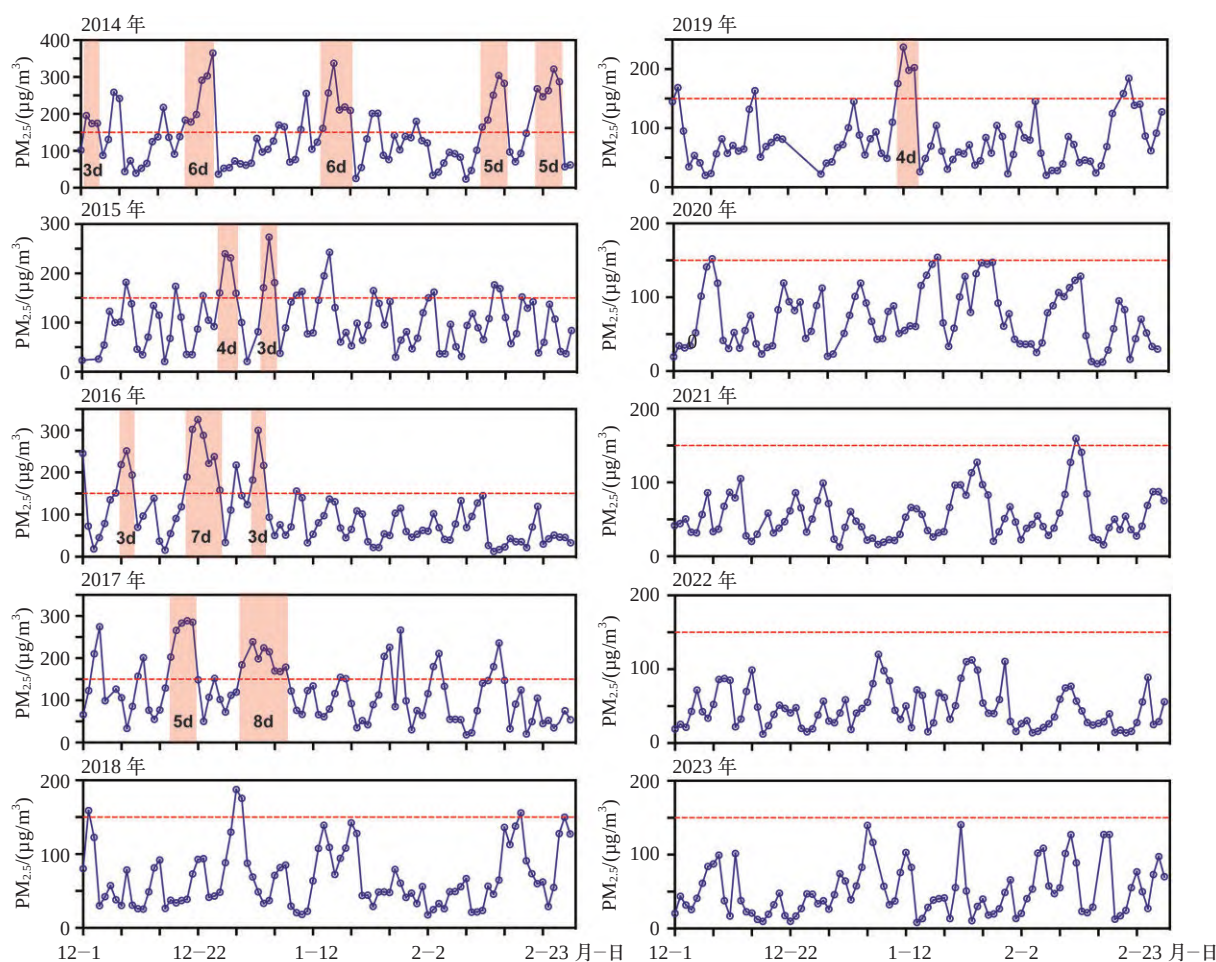
2 气候变化对 PM_{2.5} 重污染事件的影响

气候变化对 PM_{2.5} 重污染事件的影响主要体现在两个方面: (1) 在单次 PM_{2.5} 重污染事件形成中的作用; (2) 在历史和未来 PM_{2.5} 重污染事件的长时间尺度变化中的作用。研究方法以统计分析为主, 有时也会结合模式模拟, 分析重污染事件发生时独特的天气条件并分析其背后的气候因子的贡献。

2.1 气候变化对单次 PM_{2.5} 重污染事件的影响

2013 年 1 月中东部地区发生了有历史记录以来最严重的灰霾事件, 期间排放量并没有明显增

加, 二次颗粒物的快速生成^[42,82,86,91-96] 和不利于污染物扩散的天气条件^[8,42,80,83,91-94,96-100] 是其主要原因, 气候因子也在其中发挥了重要的作用, 如平流层突然变暖、弱东亚冬季风、弱西伯利亚高压、弱经向环流等^[8,10,38,40,42,44,57]。Zhang 等^[57] 的研究表明, 2013 年 1 月的气候背景异常有利于重霾的维持和发展, 该时期存在异常弱的东亚冬季风, 与之相对应的是中国东部受对流层低层偏南风异常影响, 风速减小, 气温升高, 500 hPa 的异常高压抑制对流, 近地面异常逆温增加了地面空气的稳定性, 有利于 PM_{2.5} 的生成和积累但不利于其扩散。Zou 等^[38] 结合观测数据的分析及气候模式的模拟, 得到 2013 年 1 月华北平原的重霾事件



注: 红色虚线表示 PM_{2.5} 重污染天的浓度阈值 (150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 红色阴影表示 PM_{2.5} 重污染天持续 3 d 及以上的时间段。数据来自中国环境检测总站, <http://www.cnemc.cn>。

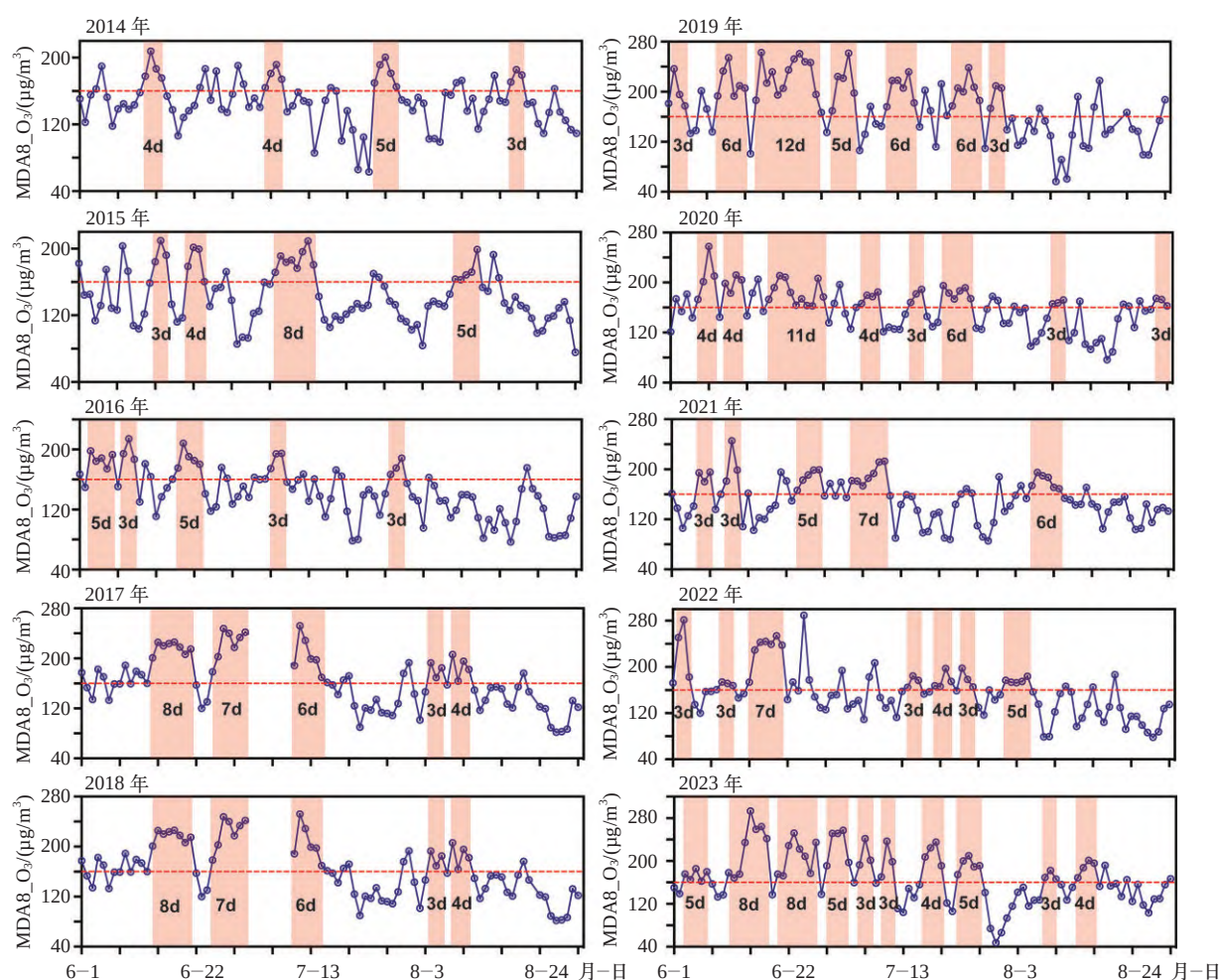
图 3 2014—2023 年京津冀地区冬季 (当年 12 月至次年 2 月) PM_{2.5} 浓度的逐日变化

Fig. 3 Daily variation of PM_{2.5} concentration in winter (from December to February) in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2014 to 2023

是由过去 30 年来最恶劣的通风条件造成的,极差的通风条件与北半球冰冻圈的变化有关,前一年秋季的北极海冰面积减少和初冬欧亚大陆降雪量增加是造成此次重霾事件的重要原因。Jia 等^[40]建立了西伯利亚高压位置指数 (SHPI),发现 2013 年 1 月华北地区的极端污染可以由 SHPI 值超过 2001—2013 年 1 月均值标准差的 2.6 倍来解释,即西伯利亚高压异常东伸,对流层下层和中层的西北风受到抑制,不利于污染物的扩散。Li 等^[10]通过使用有和没有人为强迫的气候模式模拟,估算出由温室气体排放增加导致的有利于 PM_{2.5} 重污染 (日浓度 >150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 的大气环流型发生的概率在 2013 年 1 月增加了至少 45%。

Yin 等^[36]的研究表明,近 30 年来,华北平原冬季霾日数在 2014 年最多,除人为影响外,气候变化引起的大气环流异常 (2014 年相对于 1979—2012 年) 也起了一定作用。在近地面,较弱的东亚冬季风导致华北平原的偏南风加剧霾污染;在对流层中下层,以华北上空的反气旋环流为中间系统,东大西洋 / 西俄罗斯 (EA/WR)、西太平洋和欧亚大陆正位相型导致大气污染扩散条件变差,霾日数增加。2014 年秋季北极海冰异常和欧亚大陆较暖的冬季地表诱发或加剧了 EA/WR 正位相。

2015 年 12 月,中国东部地区出现了严重的霾污染,在此期间,大气环流表现出异常的东西向海平面气压梯度和减弱的东亚冬季风, Li 等^[10]



注: 红色虚线表示 O₃ 污染天的浓度阈值 (160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 红色阴影表示 O₃ 重污染事件持续 3 日及以上的时间段。数据来自中国环境监测总站, <http://www.cnemc.cn>。

图 4 2014—2023 年京津冀地区夏季 (6—8 月) MDA8_O₃ 的逐日变化

Fig. 4 Daily variation of O₃ concentration in summer (from June to August) in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2014 to 2023

利用多个气候模式的模拟结果发现温室气体排放增加导致此次有利于重霾污染的大气环流型发生概率增加了 27%。Chang 等^[49]使用全球化学传输模式,发现 2015 年 12 月强厄尔尼诺事件导致华北地区的气象条件相对于 2014 年 12 月出现明显异常,PM_{2.5} 浓度显著增加,增幅为 80 ~ 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,促进了重霾的发生。

2016 年 10 月,北京的霾污染程度达到了历史同期最高点。Gao 等^[45]利用观测和再分析数据研究发现,2013 年以来,北大西洋和北太平洋关键区域的海温急剧增加并在 2016 年达到峰值,通过影响欧亚遥相关波列和北太平洋涛动诱发了此次严重的霾事件。2016 年 12 月 16—21 日期间华北地区实施了有力的人为排放控制措施,但仍然发生重霾,Yin 等^[47]的研究证实,大气环流在其中发挥了关键作用,对流层中部的 EA/WR 环流型增强了反气旋异常,抑制了华北地区的垂直对流,阿拉斯加湾和副热带东太平洋附近的秋季海温正异常和 1980 年以来最大的西伯利亚西部 10—11 月积雪增强了 EA/WR 环流型的正位相,导致有利于重霾发生的弱通风条件。

Yang 等^[13]基于地面观测、再分析资料、气溶胶源标记技术分析了中国冬季霾污染最严重时期的大气环流异常特征,在去除排放变化的影响后,2016 年 12 月和 2017 年 12 月分别被确定为中国北方(华北平原)和南方(长三角/珠三角地区)霾污染最严重的月份。2016 年 12 月大气环流异常表现为中国上空低压与西北太平洋向东北延伸的高压之间的异常海平面压力梯度,使华北平原对流层低层西北风减少,加之高压下边界层稳定,导致扩散条件差。2017 年 12 月大气环流异常表现为日本海和中国东北上空低压,对流层中低层上空高压,中国东部和南部盛行偏北风增强,北风异常导致气溶胶从污染的北方向南方输送。

综上所述,气候变化导致 PM_{2.5} 重污染事件发生的主要机制是通过影响大尺度环流(如东亚冬季风减弱)产生不利于污染物扩散的弱通风条件,导致该天气条件发生的最关键的气候因子是:北极海冰减少、欧亚大陆积雪增加、太平洋海温升高、

EA/WR 正位相。除了自然驱动的气候变化外,人为温室气体排放的增加也促进了有利于重霾事件的大气环流型发生的频次。

2.2 气候变化在 PM_{2.5} 重污染事件的长时间尺度变化中的作用

在关于历史时期气候变化对 PM_{2.5} 重污染事件影响的研究中,最常见的研究方法是分析某次或多次重污染事件发生期间的天气条件或大气大尺度环流特性,通过分析该特性在历史气候变化背景下的长时间变化(包括年际变化、年代际变化和长期趋势),得到历史气候变化对重污染事件长时间变化的影响。

Li 等^[12]以 2013—2019 年华北地区冬季所有 PM_{2.5} 重污染天(>150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)的天气型为参考,重建了历史时期(1979—2019 年)的有利天气型发生的频率,并识别了影响其年际变化最主要的气候驱动因子。结果显示,EA/WR 遥相关模式是第一主导气候因子,通过源自北大西洋中高纬度的大尺度波列经西欧和俄罗斯西部传播到东亚,导致有利于华北重污染天的天气条件发生;北太平洋海面温度异常的维多利亚模态是第二主导气候因子,通过由北太平洋西部延伸到高纬度北太平洋的波列影响华北地区重污染天的发生。

Chen 等^[18]利用站点观测数据,研究发现 1960—2012 年华北地区重霾事件(当天有超过一半的站点有霾发生)的年代际变化与同时期由气候变化驱动的大气环流年代际变化密切相关。1984—1992 年与 1993—2001 年相比,对流层低层风速较弱、湿度较大,对流层中层东亚大槽较弱,对流层高层东亚急流偏北,严重霾事件的发生频率更高;2002—2010 年重霾事件的频率也较高但不及 1984—1992 年,该时期可以观测到与 1984—1992 年类似的大气环流异常但某些信号较弱。

Zhang 等^[67]构建了一个综合气象指数用来描述北京及其周边地区冬季 PM_{2.5} 重污染发生时的不利天气条件,自 20 世纪 80 年代以来该指数呈增加趋势,主要贡献来自于人为温室气体排放导致的气候变暖,其特征是高层大气变暖大于低层大

气变暖,这种趋势在一定程度上也受到气溶胶污染积累的影响(特别是在 2010 年之后),因为地面气溶胶增加通过气溶胶-辐射相互作用导致地表冷却,在近地表大气产生逆温,大气更加稳定,气象条件更加不利于污染物扩散,形成恶性循环^[67]。Li 等^[10]利用再分析资料分析了与 2013 年 1 月和 2015 年 12 月北京 PM_{2.5} 重污染期间大尺度环流高度空间相似的异常环流型发生的长期趋势,结果显示,1948—2015 年异常环流型的频率呈增加趋势,该趋势是自然气候变率和人为气候变化的共同结果。Yang 等^[13]通过对导致极端霾污染的大气环流型历史变化研究发现,1980—2019 年,类似于中国北方 2016 年 12 月的弱风环流型呈减少趋势,而类似于中国南方 2017 年 12 月的强风环流型呈增加趋势,这表明在历史气候变化的影响下,中国东部重霾的形成正由北方的局地积累向南方的区域输送转变。

研究未来气候变化对 PM_{2.5} 重污染事件的影响通常有以下两种方法:(1)分析重污染发生的天气条件或大尺度环流型在未来不同情景下的变化;(2)通过固定 PM_{2.5} 人为排放为当前状态的模拟,得到未来不同情景下气候变化导致的重污染天数的变化。

Cai 等^[8]分析了 15 个 CMIP5 多模式模拟结果得到在典型浓度路径 RCP8.5 情景下,未来(2050—2099 年)相对于历史(1950—1999 年)气候变化会促进有利于北京冬季重霾天气条件的发生,与 2013 年 1 月重霾事件期间类似的天气条件发生频率增加了 50%,持续时间增加了 80%,有利于重霾的天气特征是地面北风减弱、对流层中层西北风减弱和低层大气稳定性增强。Yang 等^[13]分析了 CMIP6 多模式模拟结果得到与 2016 年 12 月北方重霾事件类似的大气环流型,发现其在共享社会经济路径 SSP1-2.6 和 SSP2-4.5 情景下减少,而在 SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下增加;对于与 2017 年 12 月南方重霾期间相似的环流型,只有在 SSP2-4.5 情景下减少,由此说明,可持续和中间发展情景是未来全球气候变化减缓和中国清洁空气目标的首选路径。

Hong 等^[22]利用区域气候-化学耦合模式系统,将人为大气污染物排放和边界条件固定在当前水平(2006—2010 年),模拟了 RCP4.5 情景下,到 21 世纪中叶(2046—2050 年),气候变化导致中国 74 个主要城市冬季 PM_{2.5} 浓度 >150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的天数分别增加了 1.8 d (11%) 和 1.1 d (42%);大气静稳事件占这些高 PM_{2.5} 天数的 70% 以上,是重污染天数增加的主要原因;在静稳天气期间,地面风速和边界层高度的降低不利于颗粒物的输送和扩散,从而加剧了污染。Chen 等^[7]使用社区地球系统模式(CESM1)进行了气溶胶人为排放固定在 2005 年的百年集合模拟,得到在 RCP8.5 情景下未来温室气体排放的增加导致的气候变暖会增加中国东部地区 PM_{2.5} 日浓度 >75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的污染天数,尤其是在京津冀地区,2090—2099 年相对于 2006—2015 年,温室气体增加最多会导致 PM_{2.5} 污染天数增加 2 d,可能的原因是静稳天数的增加和弱降水日数的减少不利于污染物的扩散和湿沉降。

综上所述,在中等和高排放情景下(如 RCP4.5、RCP8.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5),未来气候变化会导致更多重污染的天气条件或环流型的发生,进而使 PM_{2.5} 重污染事件更加频繁。除此以外,未来气候变化还会影响重污染事件发生的地区。Zhao 等^[59]的研究表明,作为影响中国冬季 PM_{2.5} 重污染的关键因子,东亚冬季风的强度变化不仅会影响重污染事件的发生,还会影响 PM_{2.5} 浓度的经向分布;在未来几十年里,随着东亚冬季风的强化,中国的重污染地区可能会从华北平原向南移动到长三角地区,而在 21 世纪下半叶,重污染地区可能会重新回到中国北方。

3 气候变化对 O₃ 重污染事件的影响

气候变化通过影响极端高温(热浪)^[22,26,101-102]、东亚夏季风^[58,61-64]等影响局地气象条件,进而影响 O₃ 的生物源排放^[103-105]、化学生成^[20,37,106-107]、区域传输^[20,37,61],对中国东部夏季 O₃ 浓度产生影响^[23-24,28,52,108-110]。虽然中国 O₃ 重污染事件呈加剧

趋势,但目前关于气候变化对 O_3 重污染事件影响的研究相对较少。

有较多的研究关注极端高温与 O_3 重污染之间的关系。Wang 等^[26]利用地面观测数据、全球化学传输模式(GEOS-Chem)以及CMIP6的多模式模拟结果,研究了中国地表极端 O_3 浓度和极端高温的耦合极端事件(OPC)的时空特征,华北平原是 OPC 的热点地区,且在 2014—2019 年期间 OPC 发生率呈上升趋势,高温和稳定的大气条件导致的化学生成增加是 OPC 期间 O_3 水平升高的主要原因,随着未来气候变暖,极端高温将在影响 O_3 污染方面发挥越来越重要的作用。Gong 等^[101]结合观测和模式结果,利用机器学习的方法,估算出在 SSP1-2.6 (SSP5-8.5) 情景下, OPC 在中国的平均值从 2030 年 3.7 d 下降至 2050 年 3.0 d (从 2030 年 4.5 d 增加至 6.4 d)。在 O_3 重污染天,高温增加生物源挥发性有机物排放从而增加 O_3 化学生成,低温让植被气孔关闭减少 O_3 干沉降,因此与季节平均相比,臭氧-植被相互作用整体贡献了华北(长三角)地区 O_3 重污染期间 MDA8- O_3 浓度增加量的约 8.4% (22.9%)^[28]。

在输送方面,Zhang 等^[23]研究表明,1999—2011 年香港每日最大 O_3 小时浓度 >120 ppbv 的重污染事件主要是由热带气旋影响下的区域输送和反气旋环流盛行时的光化学反应引起的。Yang 等^[20]基于地面观测、再分析数据、全球大气化学模式模拟和多模式未来预估,明确了中国不同地区 O_3 极端污染(MDA8- O_3 >160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)的气象特征,并分析了其历史变化和未来趋势。在 O_3 污染最严重的月份,2018 年 6 月(华北平原)和 2017 年 7 月(长三角地区)期间干热条件下 O_3 的化学生成增加,而区域运输是 2015 年 7 月四川盆地和 2019 年 9 月珠三角地区 O_3 重污染的主要原因。2000—2019 年华北平原和长三角地区高温和低温条件的发生频率,较 1980—1999 年有所增加,表明在历史气候变化的影响下 O_3 污染天变得更加频繁。1980—2019 年,与污染最严重月份相似的大气环流型在南海和珠三角地区出现的频率增加,加上干热条件的频繁出现,导致了南海和珠三角地区

严重 O_3 污染的增加。到 2100 年,SSP5-8.5 情景下出现异常高温的月份频率比 SSP1-2.6 情景呈现出更强的增加趋势。

也有少量研究关注了极端干旱和台风天气对 O_3 重污染的影响。在干旱条件下,植物气孔会收缩以减少水分的流失,这不仅抑制了光合作用,同时也减少了对 O_3 的吸收,导致近地表 O_3 浓度的增加^[111]。Li 等^[112]系统研究了 2014—2018 年发生在西北太平洋的 38 次台风外围环流特征及其对 O_3 污染的影响,发现受台风外围环流影响,粤港澳大湾区从地表到 3 ~ 5 km 高度都存在弱风现象,导致区域内出现持续性 O_3 污染事件的比例高达 94%。Wang 等^[113]指出台风增加了东南沿海地区 O_3 前体物(异戊二烯)的天然源排放,加剧了中国的跨区域 O_3 污染,受台风影响长三角、珠三角地区的近地面 O_3 浓度比夏季平均增加幅度可达 30 ppbv。

综上所述,尽管已有研究揭示了高温、干旱、台风等局地天气条件对 O_3 重污染的影响,但大多限于个例研究,在全国尺度上的系统认识较少,且还有其他气候因子或复合型极端事件影响 O_3 重污染,目前认识不足需进一步加强研究。

4 总结与讨论

近几年研究已经获得了较为系统的关于典型区域 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 重污染天气特征的认识,已能构建 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 重污染天气指数,可用于判断发生大气重污染的天气型并制定防控策略。然而,重污染形成的天气条件随区域和季节有所不同,需要在应用时做出具体分析。

目前研究已获得较为系统的气候变化在年际和年代际时间尺度上对 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染的影响机制。能识别全球变暖和气候因子(EA/WR、ENSO、北极海冰/积雪、海温等)与区域环流和局地静稳天气的配置关系,也能用气候因子进行 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染的季节预测,但关于气候变化影响 O_3 重污染的研究还相对较少。未来气候变化会增加重污染事件发生的风险,需要制定更严格的减排措施以

抵消气候变化的不利影响。

未来可以重点开展以下几个方面的研究：

(1) 气候变化对大气氧化剂（例如 OH 自由基等）的影响，以深入了解气候对二次生成的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 化学过程和机制的影响。

(2) 利用主导气候因子进行 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染的季节和年际变化预测预估。跟目前 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染天数的预测预估相比，结合对未来人为排放变化的预估以及机器学习等新的研究手段，实现从 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度量级上对 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染的预测预估是努力的方向，更好地服务于空气质量的中长期计划。

(3) 加强气候变化影响 O_3 重污染的研究，包括主导气候因子的识别、极端天气气候事件与 O_3 重污染的耦合等，特别需要关注臭氧—植被（陆面）相互作用在 O_3 重污染事件中的作用，实现对 O_3 重污染的季节和年际变化的预测预估。

(4) $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 均是影响气候变化的短寿命气候强迫因子，在“双碳”目标下，需要考虑重污染事件中生态系统—大气污染物—天气气候双向反馈，更准确地评估大气重污染的环境、生态和天气气候效应。■

参考文献

- [1] Gao J, Woodward A, Vardoulakis S, *et al.* Haze, public health and mitigation measures in China: a review of the current evidence for further policy response [J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 578: 148-157
- [2] Gong C, Yue X, Liao H, *et al.* A humidity-based exposure index representing ozone damage effects on vegetation [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16: 044030
- [3] Wang T, Xue L, Brimblecombe P, *et al.* Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects [J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 575: 1582-1596
- [4] Morawska L, Zhu T, Liu N, *et al.* The state of science on severe air pollution episodes: quantitative and qualitative analysis [J]. *Environment International*, 2021, 156: 106732
- [5] Dai H, Liao H, Wang Y, *et al.* Co-occurrence of ozone and $\text{PM}_{2.5}$ pollution in urban/non-urban areas in eastern China from 2013 to 2020: roles of meteorology and anthropogenic emissions [J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 924: 171687
- [6] Qiao X, Yuan Y, Tang Y, *et al.* Revealing the origin of fine particulate matter in the Sichuan Basin from a source-oriented modeling perspective [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, 244: 117896
- [7] Chen H, Wang H, Sun J, *et al.* Anthropogenic fine particulate matter pollution will be exacerbated in eastern China due to 21st century GHG warming [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19: 233-243
- [8] Cai W, Li K, Liao H, *et al.* Weather conditions conducive to Beijing severe haze more frequent under climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7: 257-262
- [9] Dang R, Liao H. Severe winter haze days in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 1985 to 2017 and the roles of anthropogenic emissions and meteorology [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19: 10801-10816
- [10] Li K, Liao H, Cai W, *et al.* Attribution of anthropogenic influence on atmospheric patterns conducive to recent most severe haze over eastern China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45: 2072-2081
- [11] Li J, Liao H, Hu J, *et al.* Severe particulate pollution days in China during 2013–2018 and the associated typical weather patterns in Beijing-Tianjin-Hebei and the Yangtze River Delta regions [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 248: 74-81
- [12] Li J, Hao X, Liao H, *et al.* Winter particulate pollution severity in North China driven by atmospheric teleconnections [J]. *Nature Geoscience*, 2022, 15: 349-355
- [13] Yang Y, Zhou Y, Li K, *et al.* Atmospheric circulation patterns conducive to severe haze in eastern China have shifted under climate change [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48: e2021GL095011
- [14] Wang L, Li M, Wang Q, *et al.* Air stagnation in China: spatiotemporal variability and differing impact on $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 during 2013–2018 [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 819: 152778
- [15] Pendergrass D C, Shen L, Jacob D J, *et al.* Predicting the impact of climate change on severe wintertime particulate pollution events in Beijing using extreme value theory [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46: 1824-1830
- [16] Wu P, Ding Y, Liu Y. Atmospheric circulation and dynamic mechanism for persistent haze events in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34: 429-440
- [17] Pei L, Yan Z, Sun Z, *et al.* Increasing persistent haze in Beijing: potential impacts of weakening East Asian winter monsoons associated with northwestern Pacific sea surface temperature trends [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18: 3173-3183
- [18] Chen H, Wang H. Haze days in North China and the associated atmospheric circulations based on daily visibility data from 1960 to 2012 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120: 5895-5909
- [19] Mao Y, Shang Y, Liao H, *et al.* Sensitivities of ozone to its precursors during heavy ozone pollution events in the Yangtze River Delta using the adjoint method [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 925: 171585
- [20] Yang Y, Zhou Y, Wang H, *et al.* Meteorological characteristics of extreme ozone pollution events in China and their future predictions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2024, 24: 1177-1191
- [21] Lee J B, Cha J S, Hong S C, *et al.* Projections of summertime ozone concentration over East Asia under multiple IPCC SRES emission scenarios [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 106: 335-346

- [22] Hong C, Zhang Q, Zhang Y, *et al.* Impacts of climate change on future air quality and human health in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116: 17193-17200
- [23] Zhang Y, Mao H, Ding A, *et al.* Impact of synoptic weather patterns on spatio-temporal variation in surface O₃ levels in Hong Kong during 1999–2011 [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 73: 41-50
- [24] Fu Y, Liao H, Yang Y. Interannual and decadal changes in tropospheric ozone in China and the associated chemistry-climate interactions: a review [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, 36: 975-993
- [25] Deng L, Sheng S. Spatial patterns in the extreme dependence of ozone pollution between cities in China's BTH region [J]. *Atmosphere*, 2023, 14: 141
- [26] 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
- [27] Gong C, Liao H, Zhang L, *et al.* Persistent ozone pollution episodes in North China exacerbated by regional transport [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 265: 115056
- [28] Gong C, Liao H, Yue X, *et al.* Impacts of ozone vegetation interactions on ozone pollution episodes in North China and the Yangtze River Delta [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48: e2021GL093814
- [29] An Z, Huang R, Zhang R, *et al.* Severe haze in northern China: a synergy of anthropogenic emissions and atmospheric processes [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116: 8657-8666
- [30] Doherty R M, Heal M R, O'Connor F M. Climate change impacts on human health over Europe through its effect on air quality [J]. *Environmental Health*, 2017, 16: 118
- [31] Fiore A M, Naik V, Spracklen D V, *et al.* Global air quality and climate [J]. *Chemical Society Reviews*, 2012, 41: 6663-6683
- [32] Li F, Wang H. Autumn Eurasian snow depth, autumn Arctic sea ice cover and East Asian winter monsoon [J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34: 3616-3625
- [33] Shen L, Jacob D J, Mickley L J, *et al.* Insignificant effect of climate change on winter haze pollution in Beijing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18: 17489-17496
- [34] Wang H, Chen H, Liu J. Arctic sea ice decline intensified haze pollution in eastern China [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2015, 8: 1-9
- [35] Wang H, Chen H. Understanding the recent trend of haze pollution in eastern China: roles of climate change [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16: 4205-4211
- [36] Yin Z, Wang H, Chen H. Understanding severe winter haze events in the North China Plain in 2014: roles of climate anomalies [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17: 1641-1651
- [37] Yin Z, Wang H, Li Y, *et al.* Links of climate variability in Arctic sea ice, Eurasian teleconnection pattern and summer surface ozone pollution in North China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19: 3857-3871
- [38] Zou Y, Wang Y, Zhang Y, *et al.* Arctic sea ice, Eurasia snow, and extreme winter haze in China [J]. *Science Advances*, 2017, 3: e1602751
- [39] Zou Y, Wang Y, Xie Z, *et al.* Atmospheric teleconnection processes linking winter air stagnation and haze extremes in China with regional Arctic sea ice decline [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20: 4999-5017
- [40] Jia B, Wang Y, Yao Y, *et al.* A new indicator on the impact of large-scale circulation on wintertime particulate matter pollution over China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15: 11919-11929
- [41] Pei L, Yan Z. Diminishing clear winter skies in Beijing towards a possible future [J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13: 124029
- [42] Wang L, Zhang N, Liu Z, *et al.* The influence of climate factors, meteorological conditions, and boundary-layer structure on severe haze pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region during January 2013 [J]. *Advances in Meteorology*, 2014: 1-14
- [43] Yin Z, Wang H. The relationship between the subtropical Western Pacific SST and haze over North Central North China Plain [J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 36: 3479-3491
- [44] Zhao S, Feng T, Tie X, *et al.* Impact of climate change on Siberian High and wintertime air pollution in China in past two decades [J]. *Earth's Future*, 2018, 6: 118-133
- [45] Gao Y, Chen D. A dark October in Beijing 2016 [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2017, 10: 206-213
- [46] Wang J, Zhu Z, Qi L, *et al.* Two pathways of how remote SST anomalies drive the interannual variability of autumnal haze days in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19: 1521-1535
- [47] Yin Z, Wang H. Role of atmospheric circulations in haze pollution in December 2016 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17: 11673-11681
- [48] Xu X, Zhao T, Liu F, *et al.* Climate modulation of the Tibetan Plateau on haze in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16: 1365-1375
- [49] Chang L, Xu J, Tie X, *et al.* Impact of the 2015 El Niño event on winter air quality in China [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 34275
- [50] Zhang J, Tian W, Xie F, *et al.* Influence of the El Niño Southern Oscillation on the total ozone column and clear-sky ultraviolet radiation over China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 120: 205-216
- [51] Zhao S, Zhang H, Xie B. The effects of El Niño-Southern Oscillation on the winter haze pollution of China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18: 1863-1877
- [52] Liu J, Curry J A, Wang H, *et al.* Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109: 4074-4079
- [53] Wang J, Zhao Q, Zhu Z, *et al.* Interannual variation in the number and severity of autumnal haze days in the Beijing-Tianjin-Hebei region and associated atmospheric circulation anomalies [J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2018, 84: 1-9
- [54] Jeong J I, Park R J. Winter monsoon variability and its impact on aerosol concentrations in East Asia [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 221: 285-292
- [55] Li Q, Zhang R, Wang Y. Interannual variation of the wintertime fog-haze days across central and eastern China and its relation with East Asian winter monsoon [J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36: 346-354

- [56] Wu G, Li Z, Fu C, *et al.* Advances in studying interactions between aerosols and monsoon in China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59: 1-16
- [57] Zhang R, Li Q, Zhang R. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013 [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57: 26-35
- [58] Zhang Y, Ding A, Mao H, *et al.* Impact of synoptic weather patterns and inter-decadal climate variability on air quality in the North China Plain during 1980–2013 [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 124: 119-128
- [59] Zhao S, Feng T, Tie X, *et al.* Air pollution zone migrates south driven by East Asian winter monsoon and climate change [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48: e2021GL092672
- [60] Zhu J, Liao H, Li J. Increases in aerosol concentrations over eastern China due to the decadal-scale weakening of the East Asian summer monsoon [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L09809
- [61] Wu J, Bei N, Li X, *et al.* Widespread air pollutants of the North China Plain during the Asian summer monsoon season: a case study [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18: 8491-8504
- [62] Yang Y, Liao H, Li J. Impacts of the East Asian summer monsoon on interannual variations of summertime surface-layer ozone concentrations over China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14: 6867-6879
- [63] Zhao Z, Wang Y. Influence of the West Pacific subtropical high on surface ozone daily variability in summertime over eastern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 170: 197-204
- [64] Zhou D, Ding A, Mao H, *et al.* Impacts of the East Asian monsoon on lower tropospheric ozone over coastal South China [J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8: 044011
- [65] Barnes E A, Fiore A M. Surface ozone variability and the jet position: implications for projecting future air quality [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40: 2839-2844
- [66] Hou P, Wu S. Long-term changes in extreme air pollution meteorology and the implications for air quality [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23792
- [67] Zhang X, Zhong J, Wang J, *et al.* The interdecadal worsening of weather conditions affecting aerosol pollution in the Beijing area in relation to climate warming [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18: 5991-5999
- [68] Han Z, Zhou B, Xu Y, *et al.* Projected changes in haze pollution potential in China: an ensemble of regional climate model simulations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17: 10109-10123
- [69] Fu H, Chen J. Formation, features and controlling strategies of severe haze-fog pollutions in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 578: 121-138
- [70] Huang X, Wang Z, Ding A. Impact of aerosol-PBL interaction on haze pollution: multiyear observational evidences in North China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45: 8596-8603
- [71] Liao T, Wang S, Ai J, *et al.* Heavy pollution episodes, transport pathways and potential sources of PM_{2.5} during the winter of 2013 in Chengdu (China) [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 584-585: 1056-1065
- [72] Liu C, Hua C, Zhang H, *et al.* A severe fog-haze episode in Beijing-Tianjin-Hebei region: characteristics, sources and impacts of boundary layer structure [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, 10: 1190-1202
- [73] Wang M, Cao C, Li G, *et al.* Analysis of a severe prolonged regional haze episode in the Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 102: 112-121
- [74] Wang P, Guo H, Hu J, *et al.* Responses of PM_{2.5} and O₃ concentrations to changes of meteorology and emissions in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 662: 297-306
- [75] Wang T, Du H, Zhao Z, *et al.* The impact of potential recirculation on the air quality of Bohai Bay in China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2022, 13: 101268
- [76] Yan J, Chen L, Lin Q, *et al.* Chemical characteristics of submicron aerosol particles during a long-lasting haze episode in Xiamen, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 113: 118-126
- [77] Zhang Q, Yan R, Fan J, *et al.* A heavy haze episode in Shanghai in December of 2013: characteristics, origins and implications [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, 15: 1881-1893
- [78] Zhang Z, Zhang X, Zhang Y, *et al.* Characteristics of chemical composition and role of meteorological factors during heavy aerosol pollution episodes in northern Beijing area in autumn and winter of 2015 [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2017, 69: 1347484
- [79] Zhang T, Shen Z X, Su H, *et al.* Effects of aerosol water content on the formation of secondary inorganic aerosol during a winter heavy PM_{2.5} pollution episode in Xi'an, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, 252: 118304
- [80] Zhong J, Zhang X, Dong Y, *et al.* Feedback effects of boundary-layer meteorological factors on cumulative explosive growth of PM_{2.5} during winter heavy pollution episodes in Beijing from 2013 to 2016 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18: 247-258
- [81] Ding Y, Liu Y. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity [J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 57: 36-46
- [82] Huang R, Zhang Y, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China [J]. *Nature*, 2014, 514: 218-222
- [83] Wang H, An J, Shen L, *et al.* Mechanism for the formation and microphysical characteristics of submicron aerosol during heavy haze pollution episode in the Yangtze River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 490: 501-508
- [84] Wang H, Xu J, Zhang M, *et al.* A study of the meteorological causes of a prolonged and severe haze episode in January 2013 over central-eastern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 98: 146-157
- [85] Wang X, Chen J, Sun J, *et al.* Severe haze episodes and seriously polluted fog water in Ji'nan, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 493: 133-137
- [86] Wang Q, Zhuang G, Huang K, *et al.* Probing the severe haze pollution in three typical regions of China: characteristics, sources and regional

- impacts [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 120: 76-88
- [87] Bei N, Zhao L, Wu J, *et al.* Impacts of sea-land and mountain-valley circulations on the air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH): a case study [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 234: 429-438
- [88] Li G, Bei N, Cao J, *et al.* Widespread and persistent ozone pollution in eastern China during the non-winter season of 2015: observations and source attributions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17: 2759-2774
- [89] Shi C, Wang S, Liu R, *et al.* A study of aerosol optical properties during ozone pollution episodes in 2013 over Shanghai, China [J]. *Atmospheric Research*, 2015, 153: 235-249
- [90] Wei W, Lv Z, Cheng S, *et al.* Characterizing ozone pollution in a petrochemical industrial area in Beijing, China: a case study using a chemical reaction model [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187: 377
- [91] Ji D, Li L, Wang Y, *et al.* The heaviest particulate air-pollution episodes occurred in northern China in January, 2013: insights gained from observation [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 92: 546-556
- [92] Quan J, Tie X, Zhang Q, *et al.* Characteristics of heavy aerosol pollution during the 2012–2013 winter in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 88: 83-89
- [93] Wang Y, Yao L, Wang L, *et al.* Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 57: 14-25
- [94] Wang J, Wang S, Jiang J, *et al.* Impact of aerosol-meteorology interactions on fine particle pollution during China's severe haze episode in January 2013 [J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9: 094002
- [95] Zhang Q, Quan J, Tie X, *et al.* Effects of meteorology and secondary particle formation on visibility during heavy haze events in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 502: 578-584
- [96] Zheng G J, Duan F K, Su H, *et al.* Exploring the severe winter haze in Beijing: the impact of synoptic weather, regional transport and heterogeneous reactions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15: 2969-2983
- [97] Han S, Wu J, Zhang Y, *et al.* Characteristics and formation mechanism of a winter haze-fog episode in Tianjin, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 98: 323-330
- [98] Yang Y, Liu X, Qu Y, *et al.* Formation mechanism of continuous extreme haze episodes in the megacity Beijing, China, in January 2013 [J]. *Atmospheric Research*, 2015, 155: 192-203
- [99] Zhang L, Wang T, Lv M, *et al.* On the severe haze in Beijing during January 2013: unraveling the effects of meteorological anomalies with WRF-Chem [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 104: 11-21
- [100] Zhang X Y, Wang J Z, Wang Y Q, *et al.* Changes in chemical components of aerosol particles in different haze regions in China from 2006 to 2013 and contribution of meteorological factors [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15: 12935-12952
- [101] Gong C, Wang Y, Liao H, *et al.* Future co-occurrences of hot days and ozone polluted days over China under scenarios of Shared Socioeconomic Pathways predicted through a machine learning approach [J]. *Earth's Future*, 2022, 10: e2022EF002671
- [102] Pu X, Wang T J, Huang X, *et al.* Enhanced surface ozone during the heat wave of 2013 in Yangtze River Delta region, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 603-604: 807-816
- [103] Lin J, Patten K O, Hayhoe K, *et al.* Effects of future climate and biogenic emissions changes on surface ozone over the United States and China [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47: 1888-1909
- [104] Liu Q, Lam K S, Jiang F, *et al.* A numerical study of the impact of climate and emission changes on surface ozone over South China in autumn time in 2000–2050 [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 76: 227-237
- [105] Wang Y, Shen L, Wu S, *et al.* Sensitivity of surface ozone over China to 2000–2050 global changes of climate and emissions [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 75: 374-382
- [106] Banerjee A, Archibald A T, Maycock A C, *et al.* Lightning NO_x, a key chemistry-climate interaction: impacts of future climate change and consequences for tropospheric oxidising capacity [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14: 9871-9881
- [107] Finney D L, Doherty R M, Wild O, *et al.* Response of lightning NO_x emissions and ozone production to climate change: insights from the atmospheric chemistry and Climate Model Intercomparison Project [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43: 5492-5500
- [108] Fang Y, Fiore A M, Horowitz L W, *et al.* The impacts of changing transport and precipitation on pollutant distributions in a future climate [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: D18303
- [109] Hauglustaine D A, Lathière J, Szopa S, *et al.* Future tropospheric ozone simulated with a climate chemistry biosphere model [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L24807
- [110] Jacob D J, Winner D A. Effect of climate change on air quality [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43: 51-63
- [111] Lei Y, Yue X, Liao H, *et al.* Global perspective of drought impacts on ozone pollution episodes [J]. *Environmental Science and Technology*, 2022, 56: 3932-3940
- [112] Li Y, Zhao X, Deng X, *et al.* The impact of peripheral circulation characteristics of typhoon on sustained ozone episodes over the Pearl River Delta region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, 22: 3861-3873
- [113] Wang N, Huang X, Xu J, *et al.* Typhoon-boosted biogenic emission aggravates cross-regional ozone pollution in China [J]. *Science Advances*, 2022, 8: eabl6166

A review of the impacts of climate change on severe air pollution events

QIN Zhuo-Fan, LIAO Hong, DAI Hui-Bin

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

Abstract: Severe air pollution events by fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) and ozone (O_3) are the target of air pollution control in China. This paper reviews the research progress on the impacts of climate change on severe pollution events of $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 in China in recent years. The results show that severe $\text{PM}_{2.5}$ pollution mainly occurs under stagnant weather conditions, while severe O_3 pollution mainly occurs under conditions of high temperature and low humidity. Climate change (including both anthropogenic global warming and the natural variability in the climate system) affects the local meteorological conditions that are conducive to severe pollution through changing large-scale circulation and regional circulation pattern. At present, the research on the impacts of climate change on severe $\text{PM}_{2.5}$ pollution is quite advanced, with the capability of identifying the impacts of climate factors or global warming on typical severe pollution events or the long-term trends of such events. However, there are few studies on the impacts of climate change on severe ozone pollution.

Keywords: Particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$); Ozone (O_3); Severe air pollution events; Climate change