

# 天气和气候条件对大气PM<sub>2.5</sub>和臭氧污染形成过程的影响

廖宏<sup>1\*</sup>, 周颖<sup>2</sup>, 代慧斌<sup>1</sup>, 宫成<sup>3</sup>

1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044

2. 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

3. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

**摘要** 在大气污染过程中, 化学物质排放是内因, 气象条件是外因, 影响着污染物的传输扩散、化学转化、干湿沉降等过程。综述了中国近几年关于天气和气候条件对PM<sub>2.5</sub>和臭氧污染形成过程影响的研究进展和相关领域未来研究的重点。结果发现, 目前关于天气和气候条件影响PM<sub>2.5</sub>的研究较为系统, 能识别气候因子、区域环流、局地静稳天气的配置关系, 但对天气和气候影响臭氧污染的研究还较少。

**关键词** PM<sub>2.5</sub>; 臭氧; 大气复合污染; 天气; 气候

随着社会经济的发展, 中国以PM<sub>2.5</sub>和臭氧(O<sub>3</sub>)污染为特征的复合型污染状况严重。PM<sub>2.5</sub>是指空气动力学直径小于等于2.5 μm、能较长时间悬浮于空气中的固体或液体状态的细颗粒物。大气中PM<sub>2.5</sub>的主要化学成分包括硫酸盐、硝酸盐、铵盐、一次和二次有机碳、黑碳、沙尘及海盐。长期暴露在高PM<sub>2.5</sub>浓度的环境中, 会增加人群呼吸系统疾病(如下呼吸道感染、慢性阻塞性肺病、肺癌等)、心脑血管疾病(如缺血性心脏病、中风等)或其他非传染性疾病的患病率和死亡率<sup>[1]</sup>。高浓度PM<sub>2.5</sub>还

会造成能见度急剧降低, 对航空和路面交通造成很大影响。近地面O<sub>3</sub>是在光照条件下, 由氮氧化物(NO<sub>x</sub>)和挥发性有机物(VOCs)通过光化学反应生成的二次污染物。长期暴露在高O<sub>3</sub>环境中则会增加慢性阻塞性肺病的患病率和死亡率<sup>[2]</sup>, 同时还会降低植物的生理活性, 造成生态系统生产力下降、农作物减产等危害<sup>[3]</sup>。高浓度大气污染已对人民生活、人体健康及中国经济和社会的可持续发展带来越来越多的负面影响。

在大气污染过程中, 化学物质排放是内因, 气

收稿日期: 2021-11-23; 修回日期: 2022-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(42021004)

作者简介: 廖宏(通信作者), 教授, 研究方向为大气环境与气候变化, 电子信箱: hongliao@nuist.edu.cn

引用格式: 廖宏, 周颖, 代慧斌, 等. 天气和气候条件对大气PM<sub>2.5</sub>和臭氧污染形成过程的影响[J]. 科技导报, 2022, 40(15): 41-48; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.15.005

象条件是外因。大气污染物的来源可以分为人为源和自然源。人为源包括能源发电、工业生产、交通运输、居民用以及农业生产等过程中排放的大气污染物或其前体物。自然源排放的物质包括沙漠上的沙尘气溶胶、海洋上的海盐气溶胶,以及植被排放的挥发性有机物(BVOCs)等。气象条件影响着污染物的传输扩散、化学转化、干湿沉降等过程。天气条件与重污染天或重污染事件有着密切关系。 $PM_{2.5}$ 重污染事件通常发生在静稳气象条件下(地面弱风、边界层高度低等)<sup>[4-5]</sup>,高浓度 $O_3$ 污染则通常发生在高温和干燥等天气条件下<sup>[6-7]</sup>。在气候条件影响大气污染方面,季风环流以及相关降雨、垂直对流等的季节内、季节、年际和年代际变化都能对 $PM_{2.5}$ 和 $O_3$ 有重要影响<sup>[8-10]</sup>。海表面温度<sup>[11-12]</sup>、大地形<sup>[13]</sup>、雪盖和海冰<sup>[14]</sup>等强迫因子也能够通过调控大气环流对中国的大气污染产生显著影响。此外,年代际或百年尺度的全球变暖对 $PM_{2.5}$ 和 $O_3$ 污染也有显著影响<sup>[15-16]</sup>。因此,聚焦中国典型的污染区域,系统地认识天气、气候条件对大气污染形成过程的影响,是重污染事件防治和制定中长期空气质量计划的基础,有着重要的科学意义。

## 1 中国空气污染的现状

中国的空气污染是以 $PM_{2.5}$ 和 $O_3$ 污染为特征的复合型污染,大气氧化性物种和 $PM_{2.5}$ 浓度高、多种污染物发生多种界面间的相互作用。国务院于2013年颁布《大气污染防治行动计划》,即“大气十条”,以减缓中国严峻的 $PM_{2.5}$ 污染。2013—2017年,中国二氧化硫( $SO_2$ )、 $NO_x$ 、一氧化碳(CO)、黑碳(BC)和有机碳(OC)的人为排放下降21%~59%<sup>[17]</sup>,74个重点城市的年均 $PM_{2.5}$ 质量浓度从 $72 \mu g \cdot m^{-3}$ 下降至 $47 \mu g \cdot m^{-3}$ <sup>[18]</sup>,空气质量有明显改善但污染形势依然严峻。根据生态环境部公布的《2020年生态环境状况公报》(<http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/>),2020年168个地级及以上城市 $PM_{2.5}$ 和臭氧年均质量浓度分别为 $39 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $154 \mu g \cdot m^{-3}$ ,浓度依然远超世界卫生组织的空气质量标准,且 $PM_{2.5}$ 和臭氧为首要污染物的超标天数分别占总超

标天数的51.3%和43.1%。图1给出5个主要城市(北京、成都、广州、上海、西安) $PM_{2.5}$ 和 $O_3$ 年均浓度在2014—2020年的逐年变化, $PM_{2.5}$ 均呈现下降趋势,而臭氧总体呈上升趋势。

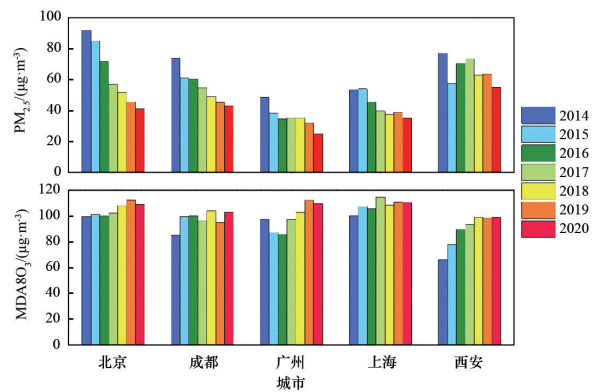


图1 2014—2020年中国5个主要城市 $PM_{2.5}$ 和日最大8 h平均臭氧浓度(MDA8  $O_3$ )年均值变化趋势

## 2 天气条件对大气污染形成的影响

近年来,随着重污染事件的频繁爆发,天气尺度环流系统与大气污染间的相互作用已成为大气污染防治关注的重要科学问题,国内相关研究人员也就此开展了大量的研究。重污染天气类型的研究以统计分析为主,但有时也结合空气质量模式解释重污染天气形成的物理和化学机制。

### 2.1 天气条件对 $PM_{2.5}$ 污染形成的影响

局地气象要素如温度、相对湿度、风速等对污染的发生和维持有重要影响。温度一般影响污染物的化学反应速率。研究表明,硫酸盐气溶胶主要由 $SO_2$ 氧化形成,温度升高能加快 $SO_2$ 的氧化,促进硫酸盐的生成;但温度的升高也会使得半挥发性的成分如硝酸盐和部分有机物由颗粒态向气态转化<sup>[19]</sup>。此外,温度还能影响BVOCs的排放和二次有机气溶胶的形成。近年来,越来越多的研究指出相对湿度对重污染期间二次污染物的形成有重要作用,很多地区都观测到 $PM_{2.5}$ 重污染期间硫酸盐在高相对湿度条件下的快速生成,表明 $SO_2$ 的液相氧化过程在污染期间不容忽视<sup>[20-21]</sup>。

目前的研究表明 $PM_{2.5}$ 污染大多发生在静稳天气下,且与反气旋天气系统有关,但主要受哪种天

气系统的影响也随污染发生的时间、地点和污染物类型而异。不少研究通过天气分类的方法,将研究时段内的天气形势归为数类,再通过对比不同天气形势下污染物浓度或是其他指标的差异,鉴别出利于发生污染的天气型<sup>[6,22-24]</sup>。目前有T型斜旋转主成分分析(The obliquely rotated principal component analysis in T-mode)软件,可对每日天气进行分类。例如,Li等<sup>[22]</sup>对2013—2019年冬季共632 d华北每日天气进行了分类,分为7种类型(简称为T1至T7),T1至T7分别占632 d中的15.2%、13.0%、20.1%、11.6%、22.6%、7.1%和10.4%。天气型T1至T7对应的北京—天津—河北平均PM<sub>2.5</sub>质量浓度分别为109.5、105.9、86.0、79.6、154.2、116.9、154.2 μg·m<sup>-3</sup>,则可判定PM<sub>2.5</sub>重污染发生在T5和T7天气型下。还有研究通过挑选出PM<sub>2.5</sub>高质量浓度污染天,再结合统计分析的方法,总结出污染天的天气特征。冬季PM<sub>2.5</sub>污染的天气特征表现为近地面北风减弱、对流层低层有逆温层结、对流层中层东亚大槽减弱以及高空急流北抬。Cai等<sup>[6]</sup>挑选了北京2009—2016年冬季的PM<sub>2.5</sub>重污染天,并指出地面北风减弱、对流层中层西北风减弱和对流层低层的逆温结构有利于重污染的发生。

## 2.2 天气条件对O<sub>3</sub>污染形成的影响

单一的气象要素会影响近地面的O<sub>3</sub>浓度。例如,高温会通过加快O<sub>3</sub>的化学生成速率以及增加BVOCs的排放增加O<sub>3</sub>浓度。Bloomer等<sup>[25]</sup>分析1987—2007年美国东部城市地区的O<sub>3</sub>观测数据发现,温度每增加1℃,O<sub>3</sub>浓度就会平均增加2.2~3.2(十亿分之一体积浓度)。相对湿度也会对O<sub>3</sub>的浓度产生重要影响,Kavassalis等<sup>[26]</sup>发现1987—2015年美国101个城市观测站点中夏季O<sub>3</sub>浓度与相对湿度呈现明显的负相关关系。此外,云量也会通过改变到达地面的太阳辐射强度进而影响O<sub>3</sub>浓度。Jeong等<sup>[27]</sup>通过三维全球化学传输模式的模拟,发现东亚地区从1985—1989年到2002—2006年O<sub>3</sub>的增加可以部分通过云量的减少解释。Han等<sup>[28]</sup>利用多元线性回归方法,分析了2013—2018年影响中国东部地区逐日O<sub>3</sub>浓度的关键气象要素,指出地面2 m温度的日变化对京津冀地区逐日O<sub>3</sub>浓

度影响最大,而地面2 m相对湿度的日变化对长三角和珠三角地区逐日O<sub>3</sub>浓度影响最大。

除局地单一的气象要素外,大尺度的环流场也会对地面O<sub>3</sub>浓度造成影响。例如,Ding等<sup>[29]</sup>发现当长三角地区处于反气旋环流控制下时,高温静稳的天气条件会引起O<sub>3</sub>浓度的升高。也有一些研究通过客观天气分型的方法,分析了不同天气形势下地面O<sub>3</sub>浓度的变化,发现当出现高压、高温、低湿、高边界层高度等条件时,地面O<sub>3</sub>浓度较高<sup>[30-33]</sup>。例如,Liao等<sup>[34-36]</sup>通过对中国长三角地区2013—2016年夏季的天气环流进行分型,发现近地面的西风会输送大量的BVOCs,且伴随的副热带高压的影响使得温度和辐射强度增加,进而引起长三角O<sub>3</sub>浓度的升高。Gong等<sup>[7]</sup>分析了华北平原123个O<sub>3</sub>污染天以及21次O<sub>3</sub>重污染事件,发现华北地区O<sub>3</sub>重污染事件发生的典型天气型为地面高温低湿,大气低层(地面~850 hPa)为南风异常且伴随辐散异常,500 hPa高度出现反气旋环流异常并伴随高压异常,同时地面至500 hPa整层出现下沉气流异常(图2),表明华北O<sub>3</sub>重污染事件的发生不是某个气象要素起决定作用,而是多个气象因素组成的天气环流型协同影响的结果。

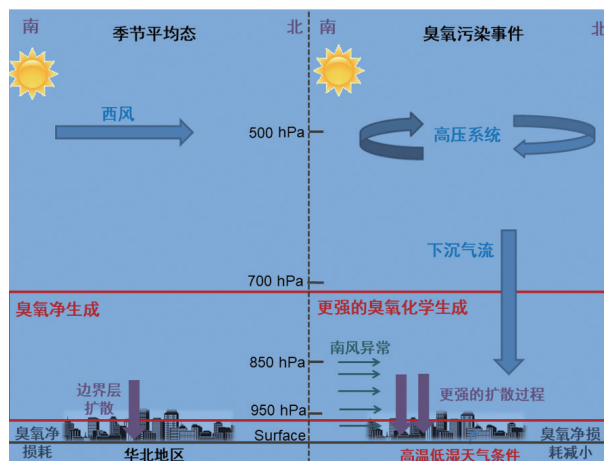


图2 华北地区O<sub>3</sub>重污染事件对应的典型天气型及相关过程解释示意

## 3 气候因子对大气污染的影响

目前有更多的关于气候变化影响中国PM<sub>2.5</sub>污



染的研究。从研究方法上主要分为:(1) 基于再分析气象场和观测的 $PM_{2.5}$ 浓度的统计分析;(2) 再分析气象场驱动全球化学传输模式的 $PM_{2.5}$ 长期变化模拟;(3) 污染物-气候耦合全球模式的模拟。已获得关于 $PM_{2.5}$ 污染的不利气候背景和主导因子的初步认识。

### 3.1 气候因子对 $PM_{2.5}$ 污染形成的影响

在大尺度环流背景变化影响 $PM_{2.5}$ 的研究方面,已明确东亚季风强度的减弱导致中国东部 $PM_{2.5}$ 浓度的增加。冬季风的减弱造成了寒潮发生率和冷空气活动频率的减少,伴随着地面风速的减弱、地面风速和纬向水平风速的垂直切变小,不利于污染物水平方向的输送和垂直方向的扩散<sup>[5,37]</sup>。夏季风的减弱在中国东部北方形成辐合风场,导致 $PM_{2.5}$ 的堆积<sup>[8,10]</sup>。此外,海表面温度、大地形、雪盖和海冰等强迫因子能够通过改变大气环流对中国的大气污染产生显著影响。Xiao等<sup>[11]</sup>研究指出,在年际和年代际尺度上,从夏季到冬季的北大西洋海温都与中国东部灰霾存在显著联系。在太平洋,前期秋季北太平洋海温与华北冬季霾日数呈显著的负相关,这种负相关在模式中也有稳定的体现,并能延续到冬季<sup>[12]</sup>。厄尔尼诺与南方涛动(ENSO)<sup>[38]</sup>和太平洋十年涛动(PDO)<sup>[39]</sup>等更大尺度的海温信号也能对中国东部 $PM_{2.5}$ 产生显著的调控效用。另外的一些研究也开始将中国东部 $PM_{2.5}$ 与青藏高原的增暖联系起来<sup>[13]</sup>,认为在西风带背景下高原大地形东侧背风坡可构成“避风港”效应,是中国东部区域 $PM_{2.5}$ 污染的重要影响因素之一。近些年,北极区域温度升高和海冰减少趋势都非常明显,前期秋季海冰减少会导致冬季欧亚大陆海平面气压正异常,气旋活动偏北和Rossby波偏弱等异常环流,并给中国东部带来更加稳定的大气层结,导致霾日数增多<sup>[37,40]</sup>。针对2013和2014年华北冬季极端 $PM_{2.5}$ 污染事件的综合诊断分析表明,海温、海冰和陆面能够通过在大气中激发遥相关或局地大气环流异常,进而影响华北局地的大气扩散条件<sup>[14]</sup>。

利用全球大气化学传输模式,在再分析气象场的驱动下, $PM_{2.5}$ 长期变化的模拟研究获得了气象场年际至年代际变化对中国东部 $PM_{2.5}$ 浓度影响幅度

的定量表达。在年际尺度上,假设人为排放量固定在某一年,气象场的年际变化导致华北和华南 $PM_{2.5}$ 浓度的平均年际变化幅度为9%~17%<sup>[41]</sup>,与2013年国务院《大气污染防治行动计划》中京津冀、长三角、珠三角细颗粒物浓度2012—2017年分别减排25%、20%和15%的减排目标量级非常接近,表明在评估中国短期污染控制措施的有效性时需区分减排和气象场的影响。过程分析也发现在华北地区,气相化学生成、气粒转化、输送分别是决定硫酸盐、硝酸盐、有机碳气溶胶年际变化的主导过程<sup>[37]</sup>。作为年际变化的特例,中国东部气溶胶的浓度与东亚季风强度呈负相关,弱季风年的中国东部气溶胶平均浓度比强季风年高大约20%<sup>[8,10]</sup>。在年代际时间尺度上,大气化学传输模式的结果显示过去20年中国东部 $PM_{2.5}$ 浓度增加了80%,其中人为排放的增加和气象场的长期变化对 $PM_{2.5}$ 浓度增加的贡献分别是83%和17%<sup>[42]</sup>。

在污染物-气候耦合模拟研究方面,全球气候模式的发展已能同步模拟气相化学机制和大气颗粒物的主要成分,此类模式被同时用于空气质量和气候中长期变化的研究<sup>[19,43]</sup>。目前研究污染物-气候相互作用如何影响中国 $PM_{2.5}$ 污染长期变化的工作还较少。Liao等<sup>[19]</sup>利用污染物-气候双向耦合模式的模拟研究表明,长期的 $PM_{2.5}$ 变化除了受到温室气体导致的气候增暖影响外, $PM_{2.5}$ 的浓度与其气候效应间存在正反馈:气溶胶导致地面温度降低,对流减弱,降雨减少, $PM_{2.5}$ 湿沉降减少,进一步增加 $PM_{2.5}$ 的浓度。Cai等<sup>[5]</sup>合成分析 $PM_{2.5}$ 浓度观测和国际耦合模式比较计划第5阶段(CMIP5)多模式的结果,发现全球变暖导致中国北方冬季 $PM_{2.5}$ 重污染事件的频次和持续时间增加。

### 3.2 气候因子对 $O_3$ 污染形成的影响

目前关于气候因子影响臭氧污染的研究相对较少。Zhou等<sup>[44]</sup>发现香港地区 $O_3$ 的年际变化与东亚夏季风的强弱有显著的相关关系,其机制为夏季风的强弱会影响中国大陆对香港地区 $O_3$ 输送的强度。Yang等<sup>[9]</sup>发现中国区域平均的地表 $O_3$ 浓度与东亚夏季风强度呈正相关,主要原因是强弱季风年臭氧的跨境输送不同。Zhao等<sup>[45]</sup>发现中国2014—

2016年地面 $O_3$ 的逐日变化与西太平洋副热带高压的日变化有着很强的相关性。西太平洋副热带高压较强时,会造成中国南部低温高湿多云、中国北部高温低湿少云的天气,引起中国南部 $O_3$ 浓度下降和中国北部 $O_3$ 浓度的升高<sup>[46]</sup>。统计分析研究大多关注的是平流层臭氧或臭氧柱浓度,发现ENSO作为最强的热带海洋信号,能够对北半球中纬度臭氧造成显著的影响<sup>[47]</sup>。也有研究发现中国夏季臭氧跟北极海冰和欧亚大陆遥相关有关联<sup>[48-49]</sup>,但从化学机制上的解释还较少。

## 4 结论

近几年研究已经获得了较为系统的关于天气条件影响 $PM_{2.5}$ 和 $O_3$ 污染过程的认识。针对典型污染区域污染天气特征的认识,已能构建污染天气指数,例如 $PM_{2.5}$ 污染指数与 $O_3$ 污染指数,用于判断利于发生大气污染的天气并制定防控策略。然而,利于污染形成的天气条件随区域、季节,以及关心的污染物而有所不同,需要在应用时作出具体分析。

研究已获得气候条件在季节、年际和年代际时间尺度上对 $PM_{2.5}$ 和 $O_3$ 污染的影响程度和机制的初步认识。目前关于气候条件影响 $PM_{2.5}$ 的研究较为系统,能识别气候因子、区域环流、局地静稳天气的配置关系,但关于气候条件影响臭氧的研究还相对较少。

在未来的研究中可以重点开展以下几个方面的研究:

1) 天气和气候条件对大气氧化剂(例如OH自由基等)的影响,以深入了解天气和气候对 $PM_{2.5}$ 和 $O_3$ 化学过程和机制的影响。

2) 影响 $PM_{2.5}$ 污染的主导气候因子。北极海冰/积雪、海温、PDO、ENSO等均能影响 $PM_{2.5}$ ,但最为主导的气候因子还不清楚,需要更多的研究以服务于空气质量的中长期计划。

3) 气候因子通过多尺度大气物理过程对 $O_3$ 污染的影响。

4)  $PM_{2.5}$ 和 $O_3$ 均是影响气候变化的短寿命气候强迫因子,在“碳达峰、碳中和”背景下,需要考虑大

气污染物-气候双向反馈,即定量评估未来大气污染物的变化、大气污染物变化对气候的影响,以及大气污染物对气候的响应。

## 参考文献(References)

- [1] Burnett R, Chen H, Szyszkowicz M, et al. Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115: 9592-9597.
- [2] Turner M C, Jerrett M, Pope C A, et al. Long-term ozone exposure and mortality in a large prospective study[J]. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2016, 193: 1134-1142.
- [3] 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.
- [4] Wang H, Shi G Y, Zhang X Y, et al. Mesoscale modeling study of the interactions between aerosols and PBL meteorology during a haze episode in China Jing-Jin-Ji and its near surrounding region, Part 2: Aerosols' radiative feedback effects[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15: 3277-3287.
- [5] Cai W J, Li K, Liao H, et al. Weather conditions conducive to Beijing severe haze more frequent under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7: 257-263.
- [6] Zhang Y, Ding A J, Mao H T, et al. Impact of synoptic weather patterns and interdecadal climate variability on air quality in the North China Plain during 1980-2013[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 124: 119-128.
- [7] Gong C, Liao H. A typical weather pattern for the ozone pollution events in North China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19: 13725-13740.
- [8] Zhu J L, Liao H, Li J P. 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.
- [9] 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: 6867-6880.
- [10] Mao Y H, Liao H, Chen H S. Impacts of East Asian summer and winter monsoons on interannual variations

- of mass concentrations and direct radiative forcing of black carbon over eastern China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17: 4799–4816.
- [11] Xiao D, Li Y, Fan S J, et al. Plausible influence of Atlantic Ocean SST anomalies on winter haze in China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2015, 122: 249–257.
- [12] Yin Z C, Wang H J. The relationship between the subtropical Western Pacific SST and haze over North–Central North China Plain[J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36: 3479–3491.
- [13] 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 (3): 1365–1375.
- [14] Yin Z C, Zhou B T, Chen H P, et al. Synergetic impacts of orecurory climate drivers on interannual–decadal variations in haze pollution in North China: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755(1): 143017.
- [15] Liao H, Chang W Y, Yang Y. Climatic effects of air pollutants over China: A review[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, 32(1): 115–139.
- [16] 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(9): 975–993.
- [17] 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.
- [18] Huang J, Pan X C, Guo X B, et al. Health impact of China’s Air Pollution Prevention and Control Action Plan: An analysis of national air quality monitoring and mortality data[J]. *Lancet Planetary Health*, 2018, 2(7): E313–E323.
- [19] Liao H, Zhang Y, Chen W T, et al. Effect of chemistry–aerosol–climate coupling on predictions of future climate and future levels of tropospheric ozone and aerosols [J]. *Journal of Geophysical Research–Atmosphere*, 2009, 114: D10306.
- [20] Cheng Y F, Zheng G J, Wei C, et al. Reactive nitrogen chemistry in aerosol water as a source of sulfate during haze events in China[J]. *Science Advances*, 2016, 2: e1601530.
- [21] Wang J F, Li J Y, Ye J H, et al. Fast sulfate production in Beijing haze associated with elevated HONO and N<sub>2</sub>O [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 2844.
- [22] Li J D, Hao X, Liao H, et al. Winter particulate pollution severity in North China driven by atmospheric teleconnections[J]. *Nature Geoscience*, 2022, 15: 349–355.
- [23] Li M G, Wang L L, Liu J D, et al. Exploring the regional pollution characteristics and meteorological formation mechanism of PM<sub>2.5</sub> in North China during 2013–2017 [J]. *Environmental International*, 2019, 134: 105283.
- [24] Li J D, Liao H, Hu J L, 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.
- [25] 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: L09803.
- [26] Kavassalis S C, Murphy J G. Understanding ozone–meteorology correlations: A role for dry deposition[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44: 2922–2931.
- [27] Jeong J I, Park R J. Effects of the meteorological variability on regional air quality in East Asia[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 69: 46–55.
- [28] Han H, Liu J, Shu L, et al. Local and synoptic meteorological influences on daily variability in summertime surface ozone in eastern China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20: 203–222.
- [29] Ding A J, Fu C, B Yang X Q, et al. Ozone and fine particle in the western Yangtze River Delta: An overview of 1 yr data at the SORPES station[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13: 5813–5830.
- [30] Liu J D, Wang L D, Li M L, et al. Quantifying the impact of synoptic circulation patterns on ozone variability in northern China from April to October 2013–2017[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19: 14477–14492.
- [31] Dong Y M, Li J, Guo J P, et al. The impact of synoptic patterns on summertime ozone pollution in the North China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 735: 139559.
- [32] Gao D, Xie M, Chen X, et al. Systematic classification of circulation patterns and integrated analysis of their effects on different ozone pollution levels in the Yangtze River Delta Region, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 242: 117760.
- [33] Shu L, Wang T J, Han H, et al. Summertime ozone pollution in the Yangtze River Delta of Eastern China dur-

- ing 2013–2017: Synoptic impacts and source apportionment[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 257: 113631.
- [34] Liao Z H, Gao M, Sun J R, et al. The impact of synoptic circulation on air quality and pollution-related human health in the Yangtze River Delta region[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607: 838–846.
- [35] Mao J, Wang L L, Lu C H, et al. Meteorological mechanism for a large-scale persistent severe ozone pollution event over Eastern China in 2017[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, 92: 187–199.
- [36] Lu C H, Mao J, Wang L L, et al. An unusual high ozone event over the North and Northeast China during the record-breaking summer in 2018[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 104: 164–276.
- [37] Wang H, Chen H. Understanding the recent trend of haze pollution in Eastern China: Role of climate change [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16: 4205–4211.
- [38] Gao J J, Tian H Z, Cheng K, et al. The variation of chemical characteristics of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> and formation causes during two haze pollution events in urban Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 107: 1–8.
- [39] Zhao S, Li J P, Sun C. Decadal variability in the occurrence of wintertime haze in central Eastern China tied to the Pacific Decadal Oscillation[J]. *Scientific Report*, 2016, 6: 27424.
- [40] Wang H J, Chen H P, Liu J P. Arctic sea ice decline intensified haze pollution in Eastern China[J]. *Atmospheric Oceanic Science Letters*, 2015, 8 (1): 1–9.
- [41] Mu Q, Liao H. Simulation of the interannual variations of aerosols in China: Role of variations in meteorological parameters[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14: 9597–9612.
- [42] Yang Y, Liao H, Lou S J. Increase in winter haze over Eastern China in the past decades: Roles of variations in meteorological parameters and anthropogenic emissions[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 2016, 121: 13050–13065.
- [43] Shindell D T, Lamarque J F, Schulz M, et al. Radiative forcing in the ACCMIP historical and future climate simulations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13: 2939–2974.
- [44] Zhou D R, Ding A J, Mao H T, et al. Impacts of the East Asian monsoon on lower tropospheric ozone over coastal South China[J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(4): 044011.
- [45] Zhao Z J, Wang Y X. Influence of the West Pacific subtropical high on surface ozone daily variability in summertime over Eastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 170: 197–204.
- [46] Dang R J, Liao H, Fu Y. Quantifying the anthropogenic and meteorological influences on summertime surface ozone in China over 2012–2017[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: 142394.
- [47] Zhang J K, Tian W S, Fei X, 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.
- [48] Yin Z C, Wang H J, Li Y 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(6): 3857–3871.
- [49] Yin Z C, Ma X Q. Meteorological conditions contributed to changes in dominant patterns of summer ozone pollution in Eastern China[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(12): 124062.

## Influence of weather and climate conditions on the formation of atmospheric PM<sub>2.5</sub> and ozone pollution

LIAO Hong<sup>1\*</sup>, ZHOU Ying<sup>2</sup>, DAI Huibin<sup>1</sup>, GONG Cheng<sup>3</sup>

1. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China
2. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China
3. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

**Abstract** Air pollution in China is characterized by high concentrations of PM<sub>2.5</sub> and ozone. With the implementation of the Action Plan for Air Pollution Prevention and Control issued by the State Council in 2013, concentrations of PM<sub>2.5</sub> have been decreasing but those of ozone show increasing trends. Concentrations of PM<sub>2.5</sub> and ozone are still far higher than the air quality standards recommended by the World Health Organization. For the formation of air pollutants, while emissions are the fundamental causes, meteorological conditions are the external drivers that affect transport, chemical reactions, dry and wet deposition of air pollutants. A systematic understanding of the impacts of weather and climate on air pollutants is essential for prevention of severe pollution events and for long-term air quality planning. This paper summarizes China's recent research progress on the roles of weather and climate in the formation of PM<sub>2.5</sub> and ozone. Currently, substantial progress has been made with respect to the impacts of weather and climate on PM<sub>2.5</sub>, especially the connections between climate factors, regional circulation patterns, and the local stagnant conditions for high PM<sub>2.5</sub> levels. However, less attention has been paid to the impacts of weather and climate on ozone. The research priorities in this field are highlighted in the conclusion section.

**Keywords** PM<sub>2.5</sub>; O<sub>3</sub>; atmospheric contamination; weather; climate ●



(责任编辑 祝叶华)