

中国清洁空气计划中 2019 年相对于 2013 年气溶胶辐射气候效应的变化

韩志伟^{1,2} 王菁² 梁明洁³ 郑媛媛⁴ 李嘉伟¹

1 中国科学院大气物理研究所, 地球系统数值模拟与应用全国重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学地球和行星科学学院, 北京 101408

3 北京应用气象研究所, 北京 100029

4 云南大学地球科学学院, 昆明 650500

1 Key Laboratory of Earth System Numerical Modeling and Application, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029.

2 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049.

3 Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029.

4 College of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500

摘要 本文利用区域大气化学/气溶胶-气候耦合模式研究了中国东部 2013 和 2019 年冬季气溶胶浓度、气溶胶直接和间接辐射效应以及对气象要素的影响。研究显示在清洁空气计划期间, 相较于 2013 年, 2019 年中国东部平均近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度减小约 29%, 地面气溶胶直接辐射效应(DRE)减小约 24%, 主要是人为源减排导致, 而间接辐射效应(IRE)增加 12%, 与南方云量增加有关, 因此气溶胶总辐射效应(TRE)减小约 10%。相较于 2013 年冬季, 2019 年中国北方大部分地区气温增加, 最大增温在京津地区, 冬季平均超过 1.0°C , 这主要是由于清洁空气计划导致气溶胶辐射效应和冷却作用减弱, 而在南方部分地区气温下降, 最大超过 0.7°C , 降水减少, 这是由于该地区 IRE(TRE)比 2013 年更强。本文揭示了中国清洁空气计划在改善空气质量的同时对气候的可能影响, 强调制定健康-气候双赢政策的必要性。

关键词 中国 清洁空气 $\text{PM}_{2.5}$ 气溶胶辐射效应 气温 降水

Abstract By using an online coupled regional atmospheric chemistry/aerosol-climate model, this paper investigated aerosol distribution, aerosol direct and indirect radiative effects and feedbacks on meteorology in winter 2013 and 2019 over east China. Model results revealed that during the Clean Air Plan from 2013 to 2019, regional mean near-surface $\text{PM}_{2.5}$ concentration decreased by 29%, aerosol direct radiative effect (DRE) decreased by 24%, which was mainly attributed to reduction in anthropogenic emissions, while aerosol indirect radiative effect (IRE) increased by 12%, which was associated with an increase in cloud amount in southern China, resulting in a decrease in aerosol total radiative effect (TRE) by 10% over east China. Compared with winter 2013, surface air temperature in 2019 increased in most areas of northern China, with the maximum increase exceeding 1.0°C in Beijing and Tianjin, which was mainly attributed to the weakening of aerosol cooling effect due to the Clean Air Plan, while in parts of southern China, air temperature in 2019 decreased by

作者简介 韩志伟, 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事大气化学、气溶胶与气候变化领域的研究。E-mail: hzw@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金面上项目 42375107

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 42375107)

more than 0.7°C with precipitation decrease as well, which was due to stronger IRE(TRE) than those in 2013. This study reveals potential climatic effects by the Clean Air Plan, which has significantly improved air quality, and highlights the necessity to design a win-win health-climate policy to deal with environment and climate change.

Keywords East China, Clean Air Plan, PM_{2.5}, Aerosol radiative effects, Air temperature, Precipitation.

作者简介 韩志伟, 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事大气化学、气溶胶与气候变化领域的研究。

E-mail: hzw@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金面上项目 42375107

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 42375107)

1 引言

大气气溶胶是大气化学成分的重要组成, 对空气质量、人体健康和气候系统都有重要的影响。气溶胶可通过散射、吸收太阳/红外辐射影响辐射平衡(直接效应), 通过作为云凝结核(CCN)或冰核(IN)改变云的性质影响辐射传输和降水(间接效应), 吸收性气溶胶可以吸收太阳辐射, 加热大气使云蒸发, 进而影响辐射和云(半直接效应)。尽管一些吸收性气溶胶如黑碳会增温, 但总体气溶胶通常导致降温效应(IPCC, 2013)。另外, CCN可通过Twomey效应导致降水减少, 但在某些特定的气象条件下, CCN也可能促进对流从而使得降水增加(Rosenfeld, 2008)。近几十年, 中国经济不断发展, 城市化水平不断增加, 伴随着大气污染问题日益严重, 严重危害人民身体健康和经济可持续发展。在2013年冬季, 华北地区霾事件发生频率和污染水平都达到最高, 大气污染事件中石家庄PM_{2.5}小时浓度超过1000 μg m⁻³(王自发等, 2014)。为了应对严峻的污染形势, 自2013年下半年起, 中国政府制定并推行了一系列控制措施来改善空气质量, 例如2013年至2017年期间实施了“大气污染防治行动计划”(也称“大气十条”或“大气十条”)。该计划的实施有效地减少了污染源排放和改善了空气质量。与2013年相比, 京津冀(BTH)、长三角(YRD)和珠三角(PRD)地区的年平均PM_{2.5}浓度分别下降了37%、27%和21%(Zhang et al., 2019)。随后在2017年3月, 又继续推出了另一个空气污染治理计划“打赢蓝天保卫战三年行动计划”, 颗粒物浓度进一步下降。已有许多针对我国污染控制以及排放源和气溶胶浓度变化的研究, 也有一些研究模拟和分析减排(2012-2017)对气溶胶辐射效应的扰动及其对化学和气候的影响(Dang and Liao, 2019; Zheng et al., 2020; Gao et al., 2022; Yang et al., 2024), 但是对清洁空气计划期间气溶胶辐射效应的变化及其对区域气候影响的研究还很缺乏, 本文拟针对重污染频发的冬季, 利用大气化学/气溶胶-气候耦合模式研究2013年和2019年冬季气溶胶浓度、光学性质、直接和间接辐射效应的变化以及对区域气候的影响, 分析清洁空气计划导致的人为排放和气象条件变化对上述变化趋势的相对贡献, 本文将对认识清洁空气计划可能带来的辐射平衡和区域气候变化提供科学依据, 对大气污染防治与应对气候变暖双赢政策的制定有重要的科学意义。

2 模式及参数

本研究采用基于区域集成环境模式系统RIEMS(Fu et al., 2005)研发的大气化学/气溶胶-气候在线耦合模式系统RIEMS-Chem(Han, 2010; Han et al., 2012; Li&Han, 2016a)。该系统可反映气体和气溶胶在大气中的排放、输送、扩散、多相化学、干湿沉降等理化过程, 以及与动力和其他物理过程的相互作用。RIEMS-Chem共考虑了10种人为和自然源气溶胶类型, 包括硫酸盐、硝酸盐、铵盐、黑碳、一次有机气溶胶POA、二次有机气溶胶SOA、一次PM_{2.5}和PM₁₀、沙尘和海盐。人为气溶胶的粒径分布主要是从OPAC数据库(Optical Properties of Aerosols and Clouds)(Hess et al., 1998)和实际观测得到(Wu et al., 2021), 沙尘和海盐分为5个粒径段(0.1~1.0、1.0~2.0、2.0~4.0、4.0~8.0、8.0~20.0 μm)。起沙采用Han et al.(2004)的方案, 海盐产生采用Gong et al.(1997)的方案。模式假设人为气溶胶之间为内部混合, 而与沙尘和海盐外部混合。

气溶胶干沉降速度表示为所有阻力的倒数加上重力沉降速度, 气溶胶的云下湿清除效率是降水率和雨

滴与气溶胶碰撞效率的函数 (Han et al., 2004)。RIEMS-Chem 中二次无机盐浓度基于 CB-IV 气相化学模型 (Gery et al, 1989) 和热力学平衡模型 ISORROPIA II (Fountoukis and Nenes, 2007) 计算得到, 模式还考虑了在吸湿性气溶胶、沙尘和海盐表面上通过非均相化学反应产生二次无机气溶胶的过程 (Li and Han, 2010; Li et al., 2018a; Li et al., 2018b)。SOA 的生成由两产物模型 (Odum et al., 1997) 计算。

模式中主要气溶胶光学参数包括气溶胶的消光效率 (Q)、单次散射反照率 (SSA) 和非对称因子 (g), 采用 Ghan 和 Zaveri (2007) 基于 Mie 散射理论参数化方案计算。气溶胶吸湿增长由 Petters 和 Kreidenweis (2007) 方案描述。

吸湿性气溶胶活化为云滴的过程由 Abdul-Razzak et al. (1998) 发展的基于经典寇拉 (Köhler) 理论参数化方案来描述, 云微物理过程采用 Reisner 方案描述 (Reisner et al., 1998)。实际大气中活化的云滴数浓度由气溶胶数浓度、气溶胶粒径分布和组分、上升气流速度和环境过饱和度等因素决定。气溶胶对云滴-雨滴转换率的影响由 Beheng (1994) 方案描述。RIEMS-Chem 尚未考虑气溶胶对冰核和对流云的影响。

RIEMS-Chem 参与了国际大气模式比较计划第三阶段 (MICS-Asia phase III), 对中国东部气溶胶浓度和光学性质具有好的模拟能力 (Gao et al., 2018)。RIEMS-Chem 已广泛应用于东亚和中国地区人为和自然气溶胶时空分布、演变过程、辐射效应和反馈作用以及气候效应的研究 (Han, 2010; Han et al., 2012; Han et al., 2013; Li et al., 2014; Li and Han, 2016; Gao et al., 2018; Han et al., 2019; Li et al., 2019; Gao et al., 2020; Li et al., 2022; Li et al., 2024; Liang et al., 2023, 2024)。

模式模拟采用的 2013 和 2019 年月均人为排放源来自于清华大学开发的中国多分辨率排放清单系统 MEIC (<http://meicmodel.org/>)。该清单水平分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, 包括了二氧化硫 (SO_2)、氮氧化物 (NO_x)、氨气 (NH_3)、非甲烷挥发性有机化合物 (NMVOC)、一氧化碳 (CO)、黑碳 (BC)、一次有机碳 (POC) 以及人为排放一次 $\text{PM}_{2.5}$ 和一次 PM_{10} 等物质。中国以外地区的人为排放清单来自基准年为 2010 年的 MIX 排放清单 (Li et al., 2017), 该清单是为支持亚洲模式相互比较研究 (MICS Asia III) 和半球空气污染传输项目 (HTAP) 开发的。生物质燃烧源来自于全球火灾排放数据库第 4 版 (GFEDv4, <https://www.globalfiredata.org/>)。陆地生态系统释放的挥发性有机化合物 (VOC) 排放量来自全球排放清单 GEIA (<http://www.geiacenter.org/>)。上述经纬度网格排放清单通过双线性插值方法转换到 RIEMS-Chem 中 Lambert 投影网格上。

RIEMS-Chem 水平分辨率为 60 公里, 垂直方向上使用 σ 地形追随坐标, 分为 16 层, 其中, 最低的 7 层在边界层内。RIEMS-Chem 的气象初始和边界条件由 FNL 再分析数据提供。化学物质的边界条件由 6 小时一次的 MOZART-4 (Model for Ozone and Related chemical Tracers, <http://www.acd.ucar.edu/wrfchem/mozart.html>) 全球模式结果提供。

模式模拟时段为 2012 年 12 月至 2013 年 2 月和 2018 年 12 月至 2019 年 2 月, 以反映 2013 和 2019 年冬季情况。本文设计了一系列数值试验以得到气溶胶的直接、间接和总辐射效应, 通过有无气溶胶模拟结果的差异来反映气溶胶对气象要素的影响。研究设计了 4 个试验, 分别标记为 BASE 试验、2013 试验、2019 试验和 2019M 试验, BASE 试验中不考虑气溶胶的辐射效应(及其对气象的影响), 其他 3 个试验都考虑了气溶胶辐射效应, 其中 2013 试验采用 2013 年人为排放源和气象场, 2019 试验采用 2019 年人为排放源和气象场, 2019M 试验采用 2019 年气象场但是用 2013 年排放源。

3 结果与讨论

Liang et al. (2023) 对 RIEMS-Chem 在中国冬季气象要素、气溶胶浓度、光学厚度的模拟结果进行过系统的检验, 对中国 24 个主要城市地面气温、相对湿度和风速模拟的总体相关性分别为 0.97, 0.83, 和 0.76, 对地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度模拟的相关性和相对偏差分别为 0.53 和 -8.1%, 对北京和河北香河 AERONET 站 AOD 模拟的相关性和相对偏差分别为 0.7 和 -12.5%, 表明该模式对气象和气溶胶有良好的模拟能力。

3.1 气象要素和 PM_{2.5} 浓度

图 1 给出了模式模拟的 2013 和 2019 年冬季平均近地面气象要素和 PM_{2.5} 浓度的时空分布。结果显示 2019 年近地面气温、风速风向与 2013 年比较接近,除了在东北和长江中游部分地区 2019 年风速更大一些。中国冬季降水主要集中在华南、四川和西藏东部地区,2019 年和 2013 年冬季累计降水量分布相似,但是 2019 年在中国东南沿海和西南地区累计降水大于 2013 年,而 2013 年在西太平洋地区降水明显大于 2019 年。值得注意的是几乎在中国东部所有地区,2013 年近地面 PM_{2.5} 浓度都明显高于 2019 年。2013 年和 2019 年北京冬季平均观测的近地面 PM_{2.5} 浓度分别为 142.1 和 47.3 $\mu\text{g m}^{-3}$,对应的模式模拟值分别为 143.2 和 48.6 $\mu\text{g m}^{-3}$,2013 年和 2019 年上海冬季平均观测的近地面 PM_{2.5} 浓度分别为 80.2 和 42.0 $\mu\text{g m}^{-3}$,对应的模拟值分别为 61.5 和 40.8 $\mu\text{g m}^{-3}$;说明模式合理地反映了 2013 至 2019 年冬季北京和上海 PM_{2.5} 浓度减小的趋势(分别减小 66%和 48%),对北京 PM_{2.5} 浓度变化模拟更准确,对上海模式低估了 2013 年冬季 PM_{2.5} 浓度。从中国东部区域平均来看,2019 年相较于 2013 年 PM_{2.5} 浓度减小 29%,其中京津冀、川渝和长江中游地区平均减小更明显(40%~50%)。PM_{2.5} 浓度的明显下降与人为排放和气象条件变化都有关系,而 2013 和 2019 年中国东部气象条件相似(图 1i,j,k),气象条件不同导致的 PM_{2.5} 浓度差异也比较小(附件图 1 中 2013 试验与 2019M 试验的对比),因此上述 PM_{2.5} 浓度变化主要是由于人为源排放减少导致。在西南地区,由于 2019 年的降水大于 2013,该区域 PM_{2.5} 浓度下降还与湿清除作用增加有一定关系。上述气溶胶浓度的变化会带来气溶胶辐射效应的变化。

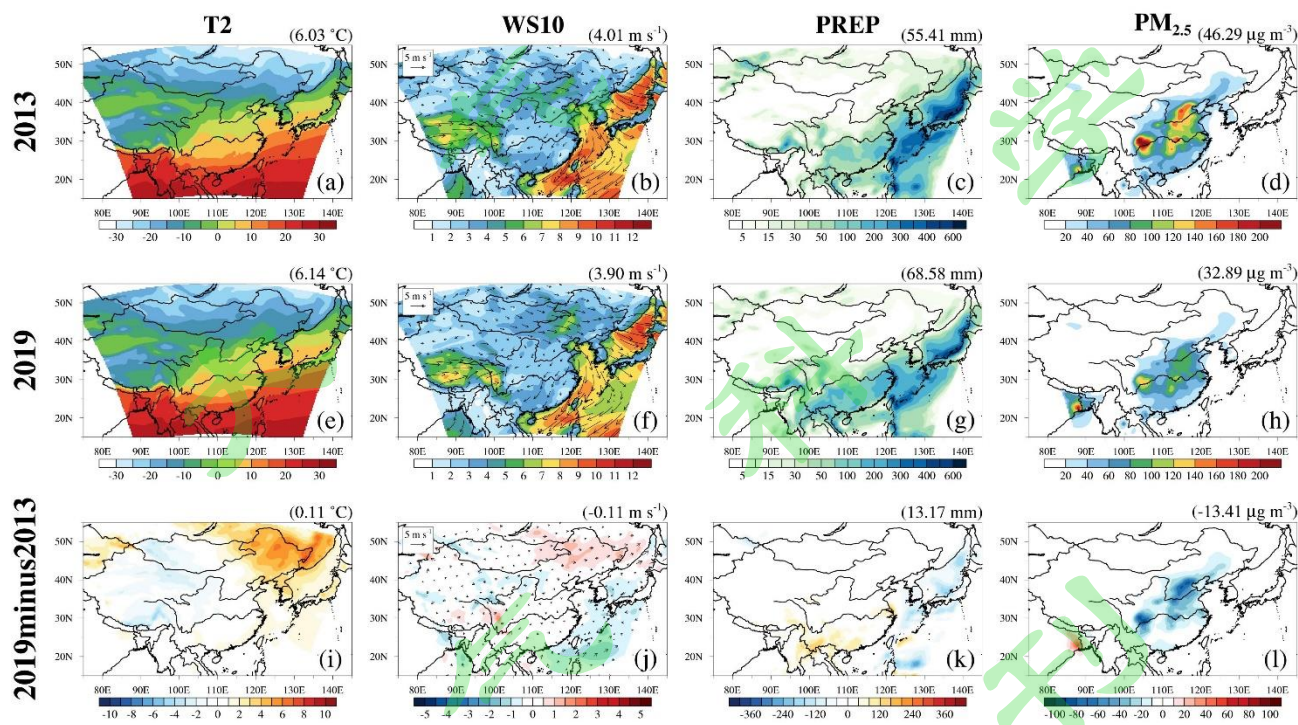


图 1 模式模拟 2013 和 2019 年冬季平均近地面气象要素(T2: 2 米气温, WS10: 10 米风速风向, PREP: 累积降水)和 PM_{2.5} 浓度的空间分布, 以及 2019 与 2013 年的差异 (2019 减 2013)。右上角数字代表中国东部 (100.0°E - 123.0°E, 18.0°N - 45.0°N) 区域平均值

Figure 1 Model simulated mean near-surface meteorological variables (T2: air temperature at 2m, WS10: wind speed and direction at 10 m, PREP: accumulated precipitation) and PM_{2.5} concentration in winter 2013 and 2019, and the differences between 2013 and 2019 (2019 minus 2013). The numbers in the upper-right corner of each panel represent domain average values over east China (100.0°E - 123.0°E, 18.0°N - 45.0°N).

3.2 气溶胶辐射效应

图 2 给出了模式模拟的 2013 和 2019 年冬季平均地面气溶胶直接(DRE)、间接(IRE)和总辐射效应(TRE)。气溶胶直接辐射效应的计算是通过比较一个时步内有无气溶胶情况下地面和大气顶(TOA)辐射通量的瞬时差异得到,此时考虑气溶胶对辐射的散射吸收,但不考虑气溶胶对云微物理性质的扰动;间接辐射效应的计算方法相似,既通过比较一个时步内有无气溶胶情况下地面和大气顶(TOA)辐射通量的瞬时差异得到,此时考虑气溶胶对云物理性质(云滴数浓度等)的影响,但不考虑气溶胶对辐射的直接扰动;总辐射效应是同时考虑气溶胶散射吸收辐射和对云扰动情况下,比较有无气溶胶时辐射通量的瞬时变化。

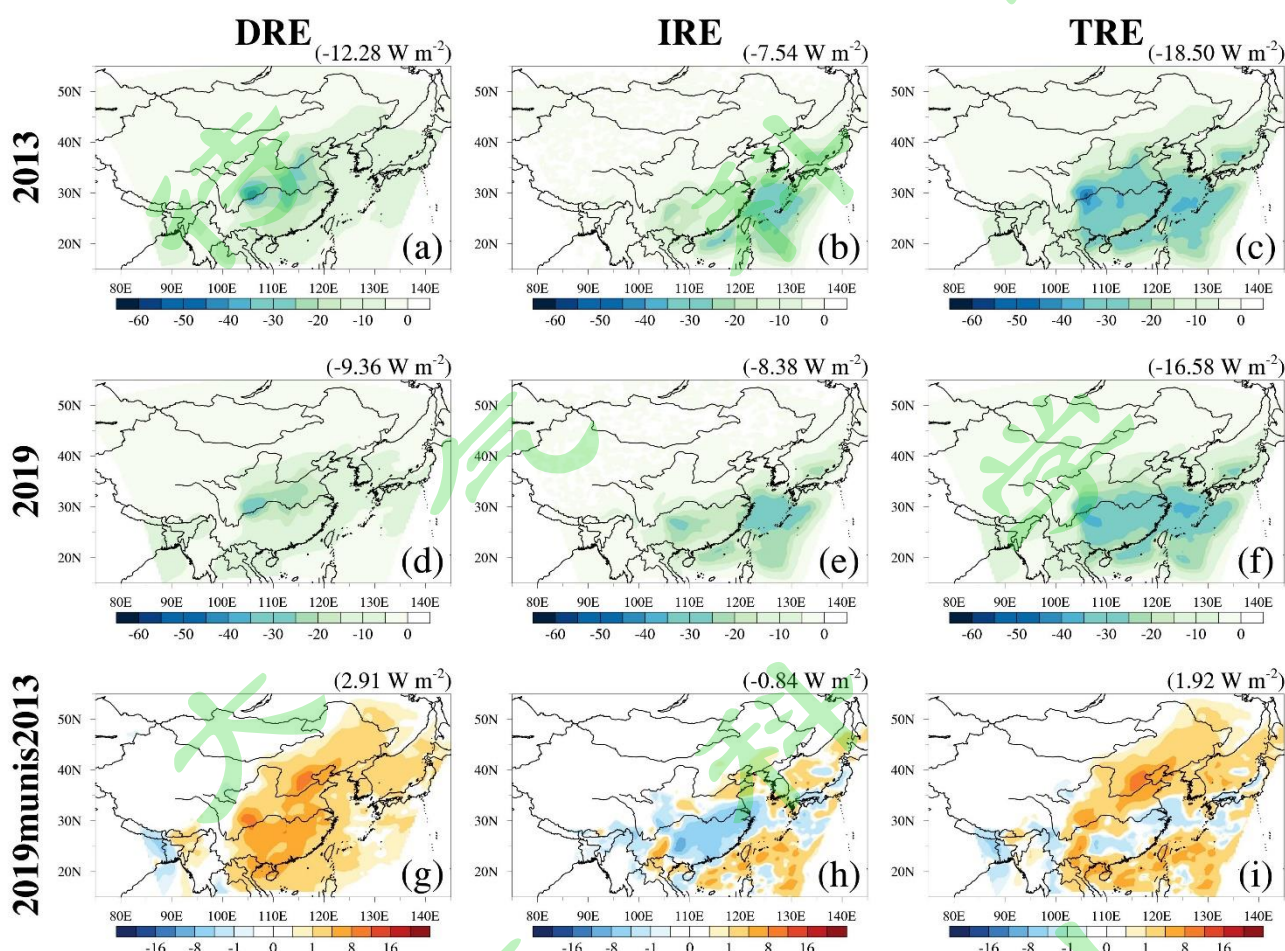


图 2 模式模拟 2013 和 2019 年冬季平均地面气溶胶 DRE, IRE 和 TRE (单位: W m^{-2}), 以及 2019 与 2013 年的差异 (2019 减 2013) 右上角数字代表中国东部区域平均值

Figure 2 Model simulated mean DRE, IRE and TRE at the surface in winter 2013 and 2019 (unit: W m^{-2}), and the differences between 2019 and 2013 (2019 minus 2013). The numbers in the upper-right corner of each panel represent domain average values over east China ($100.0^{\circ}\text{E} - 123.0^{\circ}\text{E}$, $18.0^{\circ}\text{N} - 45.0^{\circ}\text{N}$).

图 2 显示 DRE 的空间分布与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布相似,在华北、川渝和长江中游地区的 DRE 相对较强,而 IRE 的分布除了与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度还与云的分布有关,高值主要集中在我国西南、长江中下游和华南地区,IRE 最大值是在中国近海和西太平洋地区,这与冬季陆地气溶胶向海上输送,以及海上云量更多有关。与 2013 年相比,2019 年 DRE 明显减弱,与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的减小趋势一致,重庆和华北地区 DRE 从约 -40W m^{-2} 和

30Wm^{-2} 减弱至 -30Wm^{-2} 和 -20Wm^{-2} 。中国东部平均 DRE 减小了约 24% (-12.3 至 -9.4Wm^{-2})。相较于 DRE, IRE 的变化相对比较小, 中国东部平均从 2013 年的 -7.5Wm^{-2} 增强至 -8.4Wm^{-2} (变化 12%), 这主要是由于气溶胶活化的饱和效应 (Liang et al., 2024), 既在气溶胶浓度较高时, 活化的云滴数浓度对 CCN 的变化不敏感, 而 IRE 的有所增加主要是由于 2019 年云量比 2013 年多, 云量增加主要在西南地区(图 1c,g), 可能与陆面过程或输送导致的水汽增加有关。气溶胶总辐射效应 TRE 的变化是气溶胶直接和间接共同作用的结果, 但是由于 IRE 变化相对比较小, 所以 TRE 的变化主要是由 DRE 的变化决定, 因此中国东部 TRE 从 2013 至 2019 年呈现出减弱的趋势, 从 -18.5 至 -16.6Wm^{-2} 减弱了 10%。虽然 DRE 明显减小(24%), 但是由于 IRE 略有增加(12%), TRE 的变化明显小于 DRE 的变化(24%)。2013 至 2019 年 TRE 变化受到排放和气象变化的共同影响。2013 和 2019M 试验中中国东部平均 TRE 分别为 -18.5 和 -18.8Wm^{-2} , 既在同样的排放条件下气象的变化导致的 TRE 变化很小(2%), 说明 TRE 的变化主要是由于人为排放的变化导致, 这与上述 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的主导因子一致。上述气溶胶辐射效应的变化会导致气溶胶气候效应的变化。

3.3 气溶胶对气象要素的影响(天气/气候效应)

通过 BASE 与 2013 和 2019 试验的差异, 可以得到 2013 和 2019 年冬季气溶胶辐射效应对气象的影响。图 3a-h 给出了模式模拟的 2013 和 2019 年冬季平均气溶胶总辐射效应对地面气温、相对湿度、风速风向和降水的影响。结果显示气溶胶(辐射效应)总体上使地面气温降低、风速减小、降水减少。总体上气溶胶在中国南方导致的冷却作用大于北方, 2013 年降温强于 2019 年, 这与气溶胶辐射效应的变化趋势一致。2013 年气溶胶导致的降温在华北平原、重庆和华南较大, 而 2019 年气溶胶降温的大值主要在贵州和广西北部地区, 原因一是由于华北和重庆由于清洁空气计划气溶胶明显减少, 二是由于 2019 年西南地区云量及 IRE 有所增加(图 2e), TRE 相应增加, 这些地区 TRE 超过了 2013 年, 使地面降温比 2013 年更大。对应于地面降温, 相对湿度增加, 地面风速总体上减小, 但是某些地区(如广东和广西和南海部分地区)风速增加, 这是由于地面降温引起气流辐散(南风异常), 导致上述地区风速增加(图 3c,g)。气溶胶辐射效应总体上使降水减少, 这主要是由于气溶胶直接和间接辐射效应导致地面降温, 感热和潜热通量减少, 对流减弱, 进而降水减少。2019 年在西南部分地区降水减少的幅度比 2013 年大, 这与上述该地区降温更强基本一致。由于 2019 年气溶胶在西南地区导致的降水减少更多, 因此总体上 2019 年气溶胶导致中国东部降水的减少大于 2013 年 (-11.8 vs -8.8mm)。从中国东部区域平均来看, 2013 年气溶胶导致的地面降温、相对湿度增加和风速减小要强于 2019 年, 但是 2019 年气溶胶导致的降水减少更多。

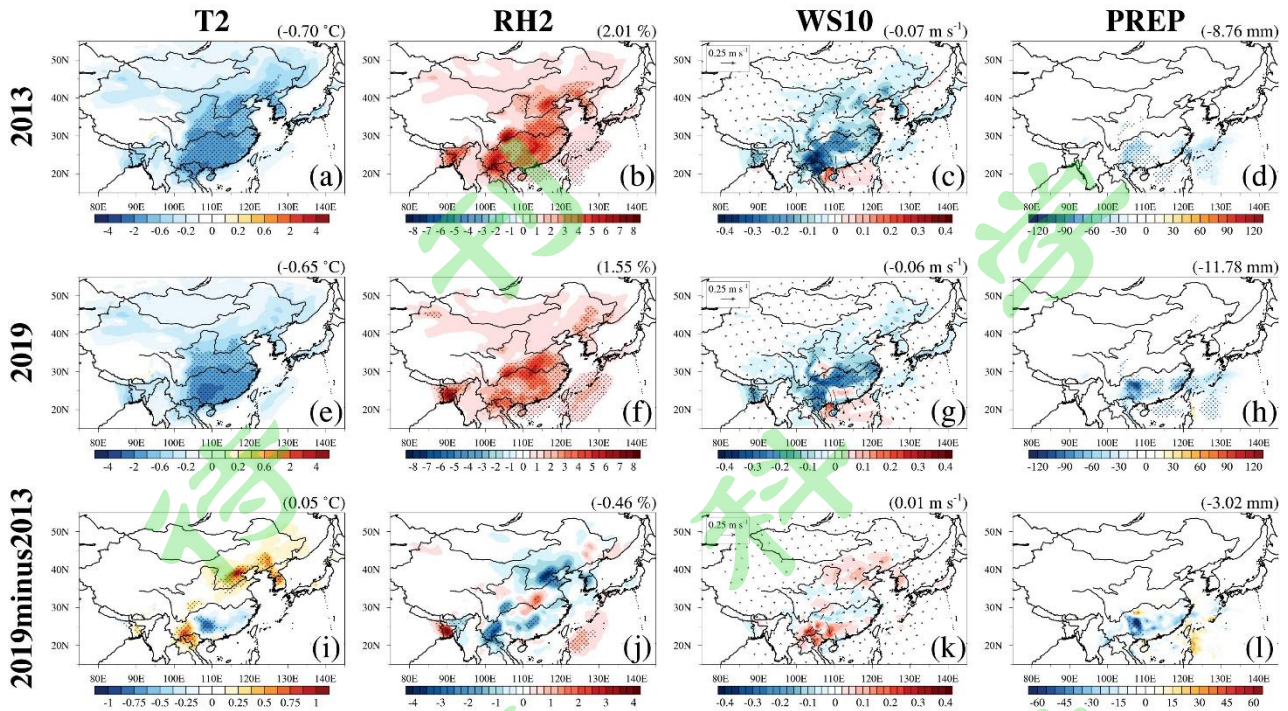


图3 模式模拟2013 (a-d)和2019年(e-h)冬季平均气溶胶总辐射效应对地面气象要素的影响, 以及2013与2019年气溶胶对气象要素影响的差异(i-l), 黑点表示通过99%置信度检验的区域, 右上角数字代表中国东部区域平均值

Figure 3 Model simulated mean changes in near-surface meteorological variables induced by aerosol TRE in winter 2013 and 2019, and the differences in the above changes between 2013 and 2019, the dotted areas indicate the difference is statistically significant at the 99% confidence level according to a two-tailed t-test, the numbers in the upper-right corner of each panel represent domain average values over east China (100.0°E – 123.0°E, 18.0°N – 45.0°N).

图3i-l给出了2013和2019年气溶胶导致气象变化的差异(2019减2013), 可以更清楚看出这两年由于清洁空气计划导致的气溶胶气候效应的变化。相较于2013年, 2019年在中国北方大部分地区气温增加, 这主要是由于清洁空气计划的减排措施导致气溶胶辐射效应减弱和冷却作用减弱, 最大增温出现在华北的京津地区, 超过1.0°C; 而在华南部分地区2019年地面降温比2013年更强, 最大超过0.7°C, 这主要是由于该地区IRE和TRE增加导致。相对于2013年冬季, 2019年中国东部大部分地区风速有所增加, 而在贵州广西部分地区, 2019年降水减少, 最大达到50mm。从区域平均来看, 2013-2019年, 中国东部地面气温增加0.05°C, 相对湿度减小0.46%, 风速增加0.01ms⁻¹, 累计降水减少3mm, 这主要是由于清洁空气计划导致的气溶胶辐射效应减弱造成的, 但是气象条件(如云状况)的变化也起一定的作用, 如在某些地区(西南地区)云量增加导致间接辐射效应增加, 冷却作用增强, 可部分抵消减排造成的增温作用, 而且使降水减少更多。

4 结论和讨论

本文的主要结论如下:

(1) 2013和2019年冬季气象条件总体上相差不大, 2019年中国南方降水比2013年多。2013-2019年中国东部平均近地面PM_{2.5}浓度减少29%, 主要是清洁空气计划的人为源减排措施造成的。

(2) 与2013年相比, 2019年DRE明显减弱, 与PM_{2.5}浓度减小趋势一致。中国东部平均DRE减小了约24%, 而IRE变化相对较小, 区域平均增加12%, 与IRE对气溶胶浓度变化不敏感和云量增加有关,

TRE 平均减小 10%。

(3) 总体上 2013 年气溶胶导致的地面降温、相对湿度增加和风速减小的幅度大于 2019 年，但是气溶胶导致的降水减少在 2019 年更多。

(4) 相较于 2013 年，2019 年中国北方大部分地区地面气温上升，这主要是由于清洁空气计划导致气溶胶辐射效应和冷却作用减弱，最大增温在京津地区，超过 1.0°C，而在南方部分地区，2019 年气温更低，降水更少，因为该地区 IRE 和 TRE 相较于 2013 年更强。

清洁空气计划有效地降低了气溶胶浓度，减小了颗粒物污染对人体健康的危害，然而同时引起气溶胶辐射效应以及冷却效应减弱，气温上升，有利于气候变暖。因此如何准确评估减排引起的各方面效应，制定环境保护和气候变化应对的双赢策略，是需要面对和亟待解决的问题。

参考文献 (References)

- Abdul-Razzak H, Ghan S J, Rivera-Carpio C. 1998. A parameterization of aerosol activation: 1. Single aerosol type [J]. *J. Geophys. Res.*, 103: 6123 – 6131.
- Beheng K D. 1994. A parameterization of warm cloud microphysical conversion processes [J]. *Atmos. Res.*, 33: 193 – 206.
- Dang R, Liao H. 2019. Radiative forcing and health impact of aerosols and ozone in China as the consequence of clean air actions over 2012-2017 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 46: 12511-12519.
- Fu C B. 2005. Regional climate model intercomparison project for Asia [J]. *B. Am. Meteorol. Soc.*, 86: 257 – 266.
- Fountoukis C, Nenes A. 2007. ISORROPIA II: a computationally efficient thermodynamic equilibrium model for $K^+ - Ca^{2+} - Mg^{2+} - NH_4^+ - Na^+ - SO_4^{2-} - NO_3^- - Cl^- - H_2O$ aerosols [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 7: 4639 – 4659.
- Gao J, Yang Y, Wang H, et al. 2022. Fast climate responses to emission reductions in aerosol and ozone precursors in China during 2013-2017 [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 22: 7131-7142.
- Gao M, Han Z W, Liu Z R, et al. 2018. Air quality and climate change, topic 3 of the model intercomparison study for Asia phase III (MICS-Asia III), Part I: overview and model evaluation [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 18: 4859 – 4884.
- Gao M, Han Z W, Tao Z N, et al. 2020. Air quality and climate change, Topic 3 of the Model Inter-Comparison Study for Asia Phase III (MICS-Asia III) – Part 2: aerosol radiative effects and aerosol feedbacks [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 20: 1147 – 1161.
- Gery M W, Whitten G Z, Killus J P, et al. 1989. A photochemical kinetics mechanism for urban and regional scale computer modeling [J]. *J. Geophys. Res.*, 94: 12925 – 12956.
- Ghan S, Zaveri R A. 2007. Parameterization of optical properties for hydrated internally mixed aerosol [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: D10201.
- Gong S L, Barrie L A, Blanchet J P. 1997. Modeling sea-salt aerosols in the atmosphere: 1. Model development [J]. *J. Geophys. Res.*, 102 (D3): 3805 – 3818.
- Han Z W, Ueda H, Matsuda K, et al. 2004. Model study on particle size segregation and deposition during Asian dust events in March 2002 [J]. *J. Geophys. Res.*, 109: D19205.
- Han Z W. 2010. Direct radiative effect of aerosols over East Asia with a Regional coupled Climate/Chemistry model [J]. *Meteorol. Z.*, 19: 287 – 298.
- Han Z W, Li J W, Xia X A, et al. 2012. Investigation of direct radiative effects of aerosols in dust storm season over East Asia with an online coupled regional climate-chemistry-aerosol model [J]. *Atmos. Environ.*, 54: 688 – 699.
- Han Z W, Li J W, Guo W D, et al. 2013. A study of dust radiative feedback on dust cycle and meteorology over East Asia by a coupled regional climate-chemistry-aerosol model [J]. *Atmos. Environ.*, 68: 54 – 63.
- Han Z W, Li J W, et al. 2019. A regional model study of the characteristics and indirect effects of marine primary organic aerosol in springtime over East Asia [J]. *Atmos. Environ.*, 197: 22 – 35.
- Hess M, Koepke P, Schuit I, et al. 1998. Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC [J]. *B. Am. Meteorol. Soc.*, 79: 831 – 844.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* [M]. Stocker, T. F. D. Qin, G.-K. Plattner, et al., Eds. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 1535pp.
- Li J, Chen X S, Wang Z F, et al. 2018. Radiative and heterogeneous chemical effects of aerosols on ozone and inorganic aerosols over East Asia [J]. *Sci. Total. Environ.*, 622-623: 1327 – 1342.

- Li J W, Han Z W. 2010. A modeling study of the impact of heterogeneous reactions on mineral aerosol surfaces on tropospheric chemistry over East Asia [J]. *Particuology*, 8: 433 – 441.
- Li J W, Han Z W, Zhang R J. 2014. Influence of aerosol hygroscopic growth parameterization on aerosol optical depth and direct radiative forcing over East Asia [J]. *Atmos. Res.*, 140-141: 14-27.
- Li J W, Han Z W. 2016. Aerosol vertical distribution over east China from RIEMS-Chem simulation in comparison with CALIPSO measurements [J]. *Atmos. Environ.*, 143: 177 – 189.
- Li J W, Han Z W, Yao X H. 2018. A modeling study of the influence of sea salt on inorganic aerosol concentration, size distribution, and deposition in the western Pacific Ocean [J]. *Atmos. Environ.*, 188: 157 – 173.
- Li J W, Han Z W, Yao X H, et al. 2019. The distributions and direct radiative effects of marine aerosols over East Asia in springtime [J]. *Sci. Tot. Environ.*, 651: 1913 – 1925.
- Li J W, Han Z W, Surapipith V, et al. 2022. Direct and indirect effects and feedbacks of biomass burning aerosols over Mainland Southeast Asia and South China in springtime [J]. *Sci. Tot. Environ.*, 842: 156949.
- Li J W, Han Z W, Fu P Q, et al. 2024. Seasonal characteristics of emission, distribution, and radiative effect of marine organic aerosols over the western Pacific Ocean: an investigation with a coupled regional climate aerosol model [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 24: 3129 – 3161.
- Li M, Zhang Q, Kurokawa J I, et al. 2017. MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 17: 935 – 963.
- Liang M J, Han Z W, Li J W, et al. 2023. Radiative effects and feedbacks of anthropogenic aerosols on boundary layer meteorology and fine particulate matter during the COVID-19 Lockdown over China [J]. *Sci. Total. Environ.*, 862: 160767.
- Liang M J, Han Z W, Li J W, et al. 2024. Aerosol effects during heat waves in summer 2022 and responses to emission change over China [J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7: 190.
- Odum J R, Jungkamp T P W, Griffin R J, et al., 1997. The atmospheric aerosol-forming potential of whole gasoline vapor [J]. *Science*, 276: 96 – 99.
- Petters M D, Kreidenweis S M. 2007. A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 7: 1961 – 1971.
- Reisner J, Rasmussen R M, Bruintjes R T. 1998. Explicit forecasting of super cooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model [J]. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124: 1071-1107.
- Rosenfeld D, Lohmann U, Raga G B, et al. 2008. Flood or drought: How do aerosols affect precipitation? [J]. *Science*, 321: 1309 – 1313.
- Wu Y F, Xia Y J, Zhou C, et al. 2021. Effect of source variation on the size and mixing state of black carbon aerosol in urban Beijing from 2013 to 2019: Implication on light absorption [J]. *Environ. Pollut.*, 270: 116089.
- Yang H, Chen L, Liao H, et al. 2024. Weakened aerosol-radiation interaction exacerbating ozone pollution in eastern China since China's clean air actions [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 24: 4001-4015.
- Zhang Q, Zheng Y X, Tong D, et al. 2019. Drivers of improved PM_{2.5} air quality in China from 2013 to 2017 [J]. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 116: 24463 – 24469.
- Zheng Y, Zhang Q, Tong D, et al. 2020. Climate effects of China's efforts to improve its air quality [J]. *Environ. Res. Lett.*, 15: 104052.
- 王自发, 李杰, 王哲, 等. 2014. 2013 年 1 月我国中东部强霾污染的数值模拟和防控对策 [J]. *中国科学: 地球科学*, 44: 3-14.