

过去 40 a 全球人为气溶胶变化对中国降水的影响

杨洋,李姝歆,廖宏*

南京信息工程大学 气候系统预测与变化应对全国重点实验室/环境科学与工程学院,江苏 南京 210044

* 联系人, E-mail: hongliao@nuist.edu.cn

2025-09-02 收稿, 2025-11-15 接受

国家自然科学基金项目(42521006;42475032)

摘要 降水是地球气候系统中关键的组成部分,其变化对区域水资源安全、农业生产和生态系统具有深远影响。本文利用地球系统模式 1.2.1 版(Community Earth System Model, CESM1)和全球降水气候学计划(Global Precipitation Climatology Project, GPCP)观测资料,定量分析了过去 40 a(1980—2019 年)全球人为气溶胶排放的量级与空间分布变化对中国降水的影响。通过对比不同敏感性试验发现,1980—2019 年全球气溶胶变化导致中国南部年均降水量减少,其主要受人为排放空间再分布主导,而排放总量变化的贡献相对较小。1980—2019 年,全球人为气溶胶排放热点从高纬度欧美地区向低纬度南亚和东亚转移。中国南方地区 $PM_{2.5}$ 柱浓度显著增加,导致云滴数浓度上升、云滴半径减小,降水效率降低。结果表明,全球人为气溶胶排放的空间分布变化在过去 40 a 中主导了中国南部降水的持续减少,凸显了在评估气溶胶气候效应时需同时考虑排放的地理格局及其区域气候反馈。

关键词

气溶胶;
人为排放;
降水变化;
地球系统模式;
气候反馈

降水是地球大气系统中关键的组成部分,在全球气候与天气系统中发挥着重要作用,其变化对区域水资源安全、农业生产和生态系统具有深远影响。降水受复杂的大气动力与热力过程控制,并受到外部强迫的调制(Huang et al., 2020; Fowler et al., 2021)。过去几十年,中国降水呈现出显著的时空非均匀变化特征,总体呈现从东南向西北减弱的趋势,降水强度也显著从弱降水向强降水转变(Bai et al., 2024),中国东部夏季降水出现“南涝北旱”的空间格局(Li et al., 2016),大部分地区的极端降水事件频次明显上升(Wang L Y et al., 2023),反映了区域气候系统对外部强迫的复杂的响应机制。

气溶胶是悬浮在大气中的细小颗粒物,对辐射强迫、云的形成以及降水过程具有深远影响。在众多外部强迫因素中,人为气溶胶因其独特的辐射与云微物理效应,被认为是影响降水的重要因子(Wang P Y et al., 2023; Zou et al., 2025)。气溶胶通过直接效应散射或吸收太阳辐射,改变地表能量

收支(Charlson et al., 1992);通过间接效应作为云凝结核,改变云滴数量和大小,进而影响云的反照率与降水效率(Twomey, 1977; Albrecht, 1989);同时,气溶胶的半直接效应可加热局地大气层结、抑制对流活动(Li et al., 2017; 李占清, 2020)。这些过程共同作用于区域能量平衡和环流结构,进而调节水汽输送与降水分布。气溶胶与云和降水系统的复杂相互作用涉及多种物理与化学机制,仍然是区域和全球气候系统中最大的不确定性来源之一(Chang et al., 2021; IPCC, 2021; 廖宏等, 2021; Williams et al., 2022)。

自 20 世纪 80 年代以来,全球人为气溶胶排放热点从发达国家向发展中国家(亚洲大陆)转移,由于气溶胶-云-辐射的相互作用,可能会影响区域和全球气候(Quaas et al., 2009; Yang et al., 2022)。与全球均匀混合的温室气体相比,由于排放源的空间异质性且在大气中停留的时间短,人为气溶胶在地理上是不均匀的(Kang et al., 2021;

引用格式: 杨洋,李姝歆,廖宏,2026.过去 40 a 全球人为气溶胶变化对中国降水的影响[J].大气科学学报,49(1):147-155.

Yang Y, Li S X, Liao H, 2026. Impacts of changes in anthropogenic aerosols on precipitation over China during the past four decades[J]. Trans Atmos Sci, 49(1): 147-155. DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20250902007. (in Chinese).

Wang and Wen, 2022)。气溶胶和前体物的人为排放过去几十年中发生了显著变化,具有和温室气体不同的空间模式和时间演变。自20世纪80年代中期以来,由于严格的污染治理政策,北美和欧洲等传统发达国家的排放水平已经大幅降低。但由于近几十年来亚洲地区的快速工业化和经济发展,人为气溶胶排放量呈指数式增长(Klimont et al., 2013; Yang et al., 2024)。由于人为气溶胶对区域辐射收支以及云系统的动力学和微物理演变的显著影响,这种人为气溶胶的全球再分布可能成为全球气候变化的关键因素。

人为气溶胶的空间不均匀分布通过大尺度大气环流的变化导致水文循环中不同的区域响应。研究表明,人为气溶胶排放的减少会增强高空急流并改变大气环流,从而导致亚洲高山地区降水分布的变化(Jiang et al., 2023)。Wilcox et al. (2020)指出,未来人为气溶胶和前体物的快速削减将显著加强全球及亚洲夏季季风降水量。Xie et al. (2022)发现,南亚和东亚的人为硫酸盐气溶胶通过驱动亚洲西风急流向赤道偏移,增强了中亚干旱地区的夏季降水。Dong et al. (2022)指出,过去40 a 欧亚副热带西风急流显著减弱,主要由人为气溶胶引起的纬向温度梯度减小所导致,未来随着亚洲气溶胶排放减少,西风急流可能再次增强。Liu et al. (2023)发现,自2013年开始中国实施的大气污染防治行动计划显著减少了人为气溶胶及其前体物排放,而南亚地区的气溶胶污染上升协同东亚减排共同促进了东亚夏季风强度增强。Liu et al. (2024)发现,亚洲人为气溶胶增加通过引发北半球中纬度的罗斯贝波列,使得大西洋经向翻转环流减弱。Wang et al. (2024)指出,中国气溶胶的快速减排通过激发东亚-北太平洋大气遥相关,使得阿留申低压增强并南移、削弱局地西风,从而引起东北太平洋海表显著增暖,为近十年暖泡事件的频繁出现和增强提供了有利条件。

基于此,本研究利用地球系统模式1.2.1版(Community Earth System Model, CESM1)的模拟结果,分析了1980—2019年全球人为气溶胶排放变化对中国年均降水量的影响。通过对比固定排放总量与固定空间分布的敏感性试验,定量评估了气溶胶排放量级与空间分布变化对中国区域降水的贡献及主导机制,以揭示过去40 a 中国降水变化的主要人为驱动因素,为未来气候变化归因研究和减排政策制定提供科学依据。

1 资料和方法

1.1 数据来源

本研究使用第六次耦合模式比较计划开发的通用排放数据系统(Community Emissions Data System, CEDS)中的气溶胶及其前体物排放量,作为CESM1模式模拟的人为气溶胶排放输入数据集。CEDS估计了全球221个地区、8种燃料和55个排放部门的排放量。CEDS的生成主要包括前期排放因子和排放数据的收集与处理、制定排放估算值、校准排放估算值、将当前的排放延长到历史时期、总结输出的排放、生成数据产品(网格化数据以及对未来的不确定性估计)(Hoesly et al., 2018)。

本研究使用的降水资料来自全球降水气候学计划(Global Precipitation Climatology Project, GPCP)的最新版本GPCPv2.3,水平分辨率是 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。GPCP是1986年世界气候研究计划(World Climate Research Programme, WCRP)建立的全球降水气候学计划。GPCP数据集是综合红外和微波卫星观测以及全球6000多个常规观测生成的全球降水估计资料,评估了1979年至今的全球月平均降水量,是目前最全面的全球降水数据集,也是目前研究气候变化方面最常用的降水数据。本研究使用2019年GPCP降水数据评估模式对于降水的模拟效果。

1.2 数值模式和试验方案

本研究使用美国国家大气中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)开发的CESM1,探究全球人为气溶胶及其前体物排放的量级和空间分布对中国降水的影响。CESM1由大气、海洋、海冰、陆地等模块组成。其中,大气模块使用CAM5(Community Atmosphere Model version 5)模式,海洋模块使用POP(Parallel Ocean Program)模式(Hurrell et al., 2013)。本研究采用包含大气和海洋全耦合的CESM1进行了多组数值模拟试验(表1)。ALL_2019为参照试验,人为气溶胶及其前体物的排放在全球范围内固定为2019年的水平。ALL_1980和ALL_2019的设置相同,但人为排放固定为1980年的水平。在MAG_1980试验中,通过保持各格点排放量占全球总排放量的比例与2019年相同,固定人为排放的空间分布,但将全球总排放量缩放至1980年的水平。相反,在DIS_1980试验中,将2019年的人为气溶胶总排放量按照1980年的空间分布分配到各格点上。在所有模拟中,生物质燃烧排放均固定为2019年的水平。每组试验运

行 125 a,其中前 25 a 用来平衡模式,后 100 a 的平均值用以分析 1980—2019 年全球人为气溶胶变化对中国降水的影响,以减少模式的内部变率对模拟结果的干扰。ALL_2019 与 ALL_1980 的差异反映了 2019 年相对于 1980 年人为气溶胶总排放变化的影响。ALL_2019 与 MAG_1980 的差异反映了 2019 年相对于 1980 年人为气溶胶排放量级变化的影响。ALL_2019 与 DIS_1980 的差异反映了 2019 年相对于 1980 年人为气溶胶排放空间分布变化的影响。

表 1 不同排放量级与空间分布组合下 CESM1 全耦合试验设计方案

Table 1 Summary of CESM1 fully coupled experiments with different combinations of anthropogenic emission magnitudes and spatial distributions

试验	气溶胶和前体物的人为排放的参照年份	
	排放总量	空间分布
ALL_2019	2019 年	2019 年
ALL_1980	1980 年	1980 年
MAG_1980	1980 年	2019 年
DIS_1980	2019 年	1980 年

此前,许多研究都对 CESM1 在气溶胶浓度模拟方面进行了广泛评估。研究表明该模式能够很好地模拟气溶胶的空间分布,但是却显著低估了中国气溶胶的近地表浓度,这也是许多气候模型中普遍存在的偏差 (Ren et al., 2021; Gao et al., 2022)。为评估 CESM1 在模拟降水方面的效果,图 1 将 ALL_2019 试验中模拟的降水率和 GPCP 全球降水数据集观测到的数据进行了对比。在热带辐合带、季风区等全球主要降水带,模式模拟的降水量高值区空间分布与观测值高度吻合,相关系

数为 0.84。这表明,CESM1 对全球降水的空间分布模拟具有较强的可信度,能够捕捉到全球降水从赤道向两极递减、热带多雨与副热带少雨的空间特征。相对于 GPCP 观测,CESM1 模式在青藏高原东南侧降水平均态的模拟中存在湿偏差,这与 CMIP6 模式普遍存在的局地偏差一致 (Zhu and Yang, 2020)。在观测资料相对匮乏且地形复杂的青藏高原地区,气候模拟是理解区域气候变化的关键。然而,无论是全球模式还是区域模式,均难以完全消除青藏高原地区的模拟偏差。研究显示,CMIP 模式集合通常表现为降水高估和气温低估的“湿冷”偏差,模拟结果存在较大不确定性 (Gao et al., 2018; 林文青等, 2023; 杨珂珂等, 2023; 王康宁等, 2025)。因此,本研究的结果可能会受到该偏差的影响,需要在以后的研究中进一步减少这种不确定性。

2 1980—2019 年人为气溶胶变化对中国降水的影响

1980—2019 年,由于西方国家实施了严格的空气质量管理政策,美国和欧洲的人为排放显著减少,而南亚的人为排放在此期间持续上升。中国在 2013 年开始实施大气污染防治行动计划,使得气溶胶排放趋势从增加转变为降低,因此中国的气溶胶排放在 1980—2019 年间并未出现显著变化 (表 2)。然而,中国区域降水呈现出明显的时空变化特征。整体来看,中国西南地区降水显著减少,尤其是在青藏高原东南边和云贵高原一带,降水减少幅度超过 $0.30 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,而东北部分地区降水略有增加。全国平均降水在此期间总体减少 $0.02 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,南方地区 ($90^\circ \sim 120^\circ \text{E}, 20^\circ \sim 30^\circ \text{N}$) 平均降水减少 $0.21 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ (图 2a)。

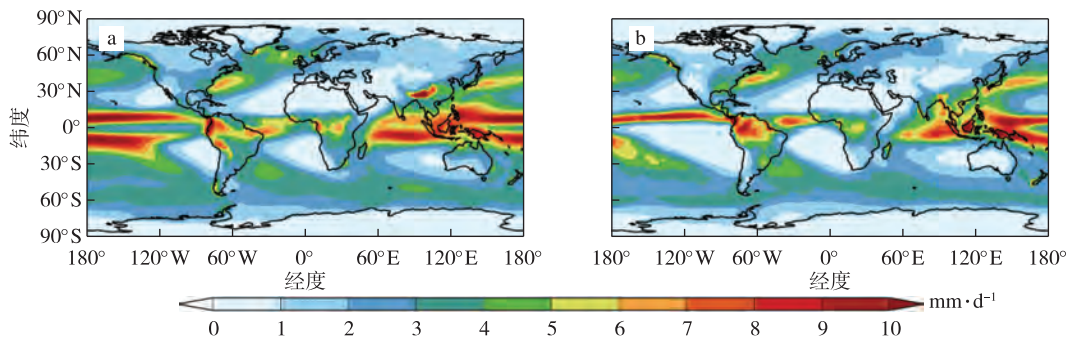


图 1 2019 年 CESM1 模拟(a)和 GPCP 观测(b)所得平均日降水量(单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of the annual-mean daily precipitation (units: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) from (a) CESM1 model simulations and (b) GPCP observations in 2019

表2 不同区域气溶胶和前体物的人为排放变化总量(2019年相对于1980年的变化)

Table 2 Total changes in anthropogenic aerosol and precursor emissions across different regions (2019 minus 1980) Tg

区域	气溶胶和前体物的人为排放变化总量		
	SO ₂	BC	OC
美国	-22.97	-0.25	-0.50
欧洲	-35.49	-0.30	-0.23
中国	0.05	0.15	-0.01
南亚	10.21	0.55	1.60

在此期间,中国 PM_{2.5}柱浓度平均增加了 1.23 mg · m⁻²。尽管全国排放总量变化很小,但中国南方地区排放的增加以及南亚气溶胶增加导致的跨界传输的增强,导致中国南方的 PM_{2.5}柱浓度上升超过 8 mg · m⁻²(图 3a)。相应的气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)在南方增加了 0.02 ~ 0.08(图 3b),云滴数浓度柱含量(vertically-integrated cloud droplet number concentration, CDNC)增加超过 1.5 × 10¹⁰ m⁻²(图 3c)。气溶胶浓度的升高导致云滴数量增加,云滴尺寸减小,抑制了云水转化过程,使得云滴难以成长为降水粒子,从而抑制了降水的形成,导致地表降水量减少。这表明,气溶胶增加导致的云微物理效应对区域水循环起到了抑制作用。此外,过去研究也发现,气溶胶减少可以通过改变大气环流,使得向中国南方地区的水汽输送增加(Yang et al., 2022; Zou et al., 2025)。反之,气溶胶的增加会导致水汽输送减少(图 3d),从而进一步减少了南方降水。这种气溶胶主导的云微

物理效应与大气动力学过程的协同作用共同导致了 中国南方降水的持续减少,并改变了区域水循环的时空分布格局。

3 全球气溶胶空间分布变化主导中国降水变化

2019年中国 PM_{2.5}柱浓度相对于1980年的平均总变化为 1.23 mg · m⁻²,这一增量并非源于全球人为排放总量的变化,而是由排放源的空间分布的调整驱动的。具体而言,全球人为排放的量级变化导致 PM_{2.5}柱浓度减少 1.62 mg · m⁻²(图 4a),而人为排放的空间分布变化使中国 PM_{2.5}柱浓度增加 2.18 mg · m⁻²(图 4b),主导了 2019年相对于1980年 PM_{2.5}柱浓度的增幅。受全球排放热点由高纬度向低纬度迁移的影响,中国区域的 PM_{2.5}柱浓度明显向南部集中。这表明,尽管中国在 1980—2019年人为排放总量趋于稳定,但人为排放热点空间分布的调整,特别是南亚气溶胶的增加,依然能够显著影响中国区域气候系统。

相应地,CDNC的全国平均变化为 0.51 × 10¹⁰ m⁻²,人为气溶胶排放的空间分布变化主导了 CDNC的上升,且主要集中在南方地区(图 4c、4d)。这表明,人为排放的空间再分布通过微物理过程显著增加了南方地区的 CDNC,减小了云滴半径,从而削弱了降水形成效率。与此同时,气溶胶引起的大气环流变化导致水汽输送减弱,从而进一步放大了这种影响(图 4e、4f)。

这种以空间再分布为主导的气溶胶变化特征不仅影响气溶胶本身的时空分布,而且通过云微物理效应与大气动力学过程调节了降水。降水分解结果

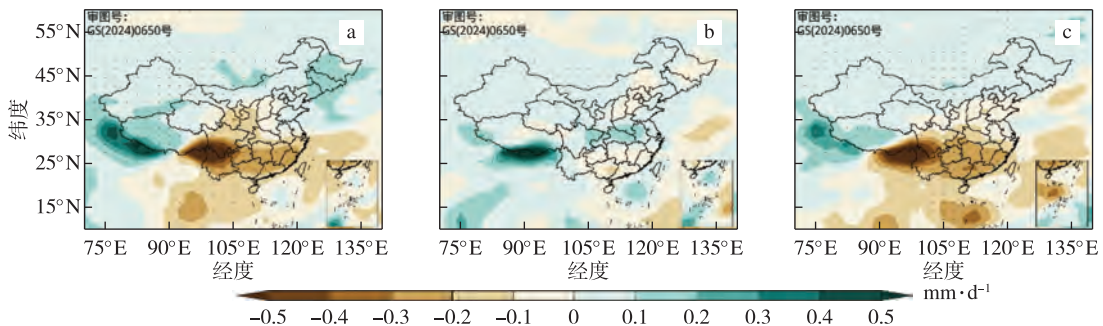


图2 2019年相对于1980年的全球人为气溶胶排放总变化(a)、量级变化(b)和空间分布变化(c)引起的平均日降水量变化(单位:mm · d⁻¹)的空间分布(打点区域表示通过置信度为95%的双尾t显著性检验)

Fig.2 Spatial distribution of simulated changes in annual-mean daily precipitation (units:mm · d⁻¹) attributable to changes in (a) total anthropogenic aerosol emissions, (b) emission magnitude, and (c) emission spatial distribution. Dotted areas indicate statistical significance at 95% confidence level based on a two-tailed Student's *t*-test

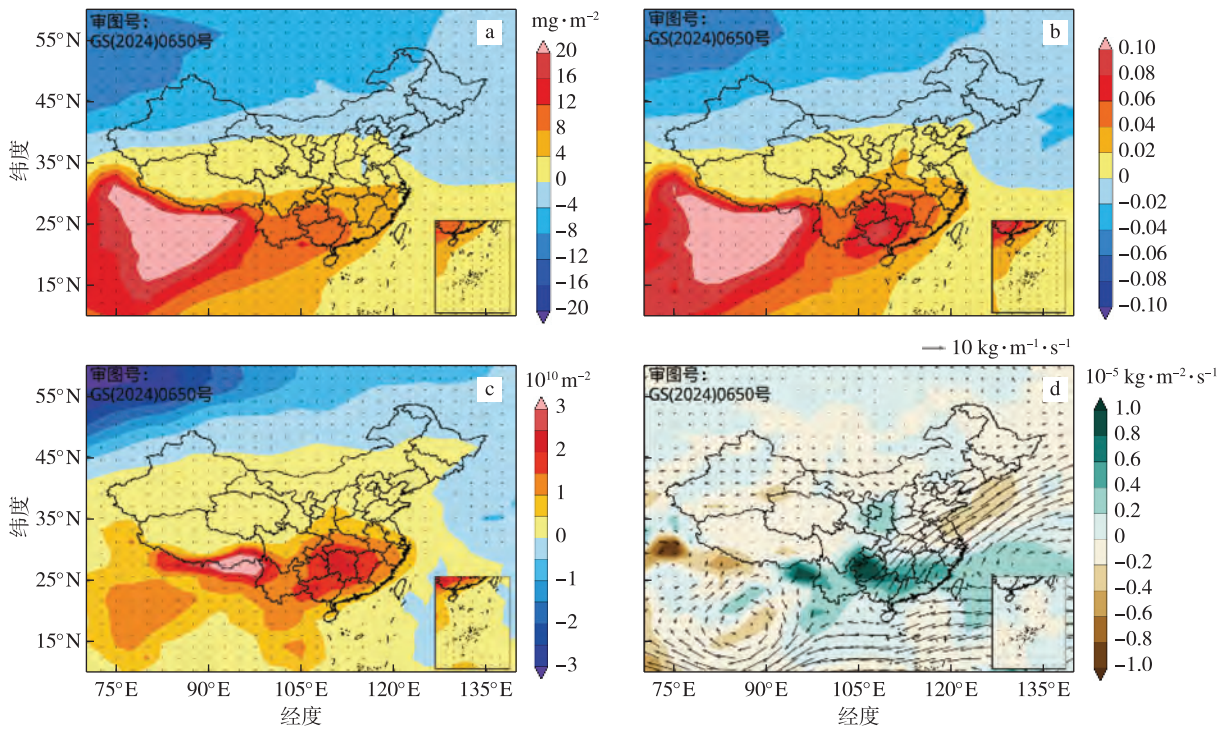


图 3 2019 年相对于 1980 年的人为气溶胶排放变化导致的年平均 PM_{2.5} 柱浓度 (a; 阴影, 单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$)、气溶胶光学厚度 (b; 阴影)、云滴数浓度柱含量 (c; 阴影, 单位: 10^{10}m^{-2}) 以及水汽通量 (箭头, 单位: $10 \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 及其散度 (阴影, 单位: $10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) (d) 变化的空间分布 (打点区域表示通过置信度为 95% 的双尾 t 显著性检验)

Fig.3 Spatial distribution of simulated changes in annual-mean (a) PM_{2.5} column burden (shadings, units: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$), (b) aerosol optical depth (AOD; shadings), (c) vertically-integrated cloud droplet number concentration (shadings, units: 10^{10}m^{-2}), and (d) water vapor flux (arrows, units: $10 \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and its divergence (shadings, units: $10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) resulting from changes in anthropogenic aerosol emissions between 1980 and 2019. Dotted areas indicate statistical significance at the 95% confidence level from a two-tailed Student's t -test

显示, 中国区域降水变化主要受人为气溶胶空间再分布的控制。2019 年相对于 1980 年的全球气溶胶变化导致中国南方地区平均降水减少 $0.21 \text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 其中人为气溶胶量级变化导致降水增加了 $0.02 \text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ (图 2b), 而空间分布变化引起更为显著的变化, 降水减少了 $0.21 \text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ (图 2c)。1980—2019 年期间南方地区降水显著减少而北方略有增加的格局主要由人为气溶胶的空间再分布所驱动。

4 结论与讨论

2019 年相对于 1980 年的全球气溶胶排放的变化导致中国南方降水显著减少、东北降水增加。这种降水的长期变化主要由人为排放的空间再分布所主导, 而非全球人为排放总量的变化。尽管中国气溶胶排放总量在此期间保持相对稳定, 但全球排放热点由高纬度向低纬度迁移, 中国南方排放增加叠加南亚跨界传输增强, 使得 PM_{2.5} 柱浓度在中国南

方显著升高, 从而驱动了中国的降水变化。

在云微物理方面, 人为排放的空间再分布通过增加南方地区的 CDNC, 减少云滴半径, 削弱了降水效率, 从而导致降水减少。在动力热力方面, 气溶胶引起的大气环流变化导致水汽输送减弱, 进一步减弱了降水的形成。二者的共同作用导致了中国南方降水的持续减少。

人为排放的量级变化对中国降水的贡献相对次要, 产生了轻微降水增加, 而人为排放空间分布变化则主导了全国降水的减少和区域水循环的时空分布格局。这一发现表明, 在全球气溶胶减排的进程中, 相对于人为排放的总量变化, 人为排放的地理变化对区域气候产生了更深远的影响。因此, 评估气溶胶对气候的影响不能仅依赖总量的变化, 而应同时考虑排放的空间格局的演变。

本研究聚焦于 1980 和 2019 年之间全球人为气溶胶排放长期的净变化, 以凸显全球气溶胶空间再分布在 40 a 尺度上的主导作用。然而, 仅对比 1980

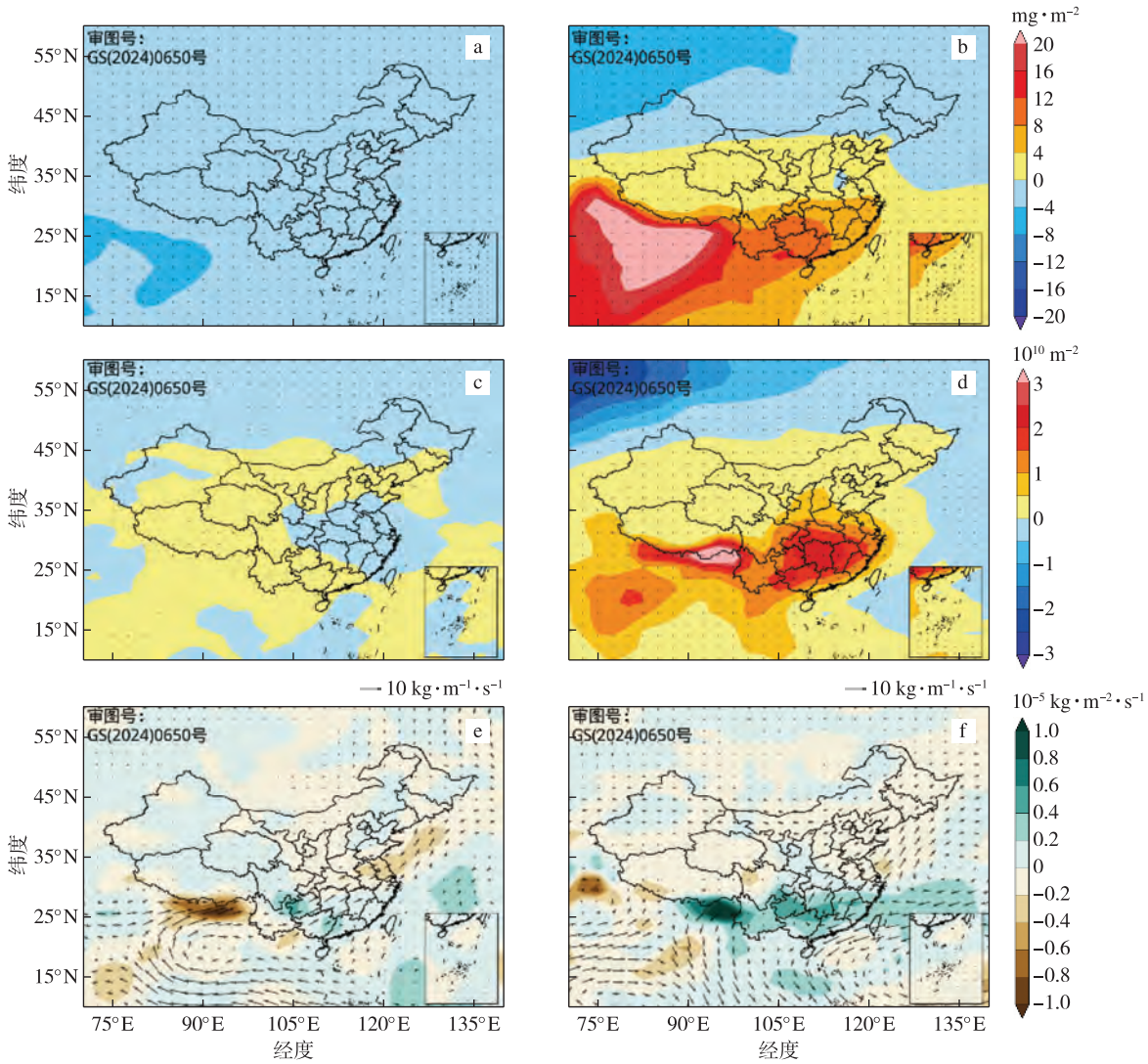


图4 2019年相对于1980年的人为气溶胶排放量级变化(a、c、e)和空间分布变化(b、d、f)导致的年平均 $\text{PM}_{2.5}$ 柱浓度(a、b;阴影,单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$)、云滴数浓度柱含量(c、d;阴影,单位: 10^{10} m^{-2})以及水汽通量(箭头,单位: $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)及其散度(阴影,单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)(e、f)变化的空间分布(打点区域表示通过置信度为95%的双尾 t 显著性检验)

Fig.4 Spatial distribution of simulated changes in annual-mean (a, b) $\text{PM}_{2.5}$ column burden (shadings, units: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$), (c, d) vertically-integrated cloud droplet number concentration (shadings, units: 10^{10} m^{-2}), and (e, f) water vapor flux (arrows, units: $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and its divergence (shadings, units: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) due to changes in the (a, c, e) magnitude and (b, d, f) spatial distribution of anthropogenic aerosol emissions between 1980 and 2019. Dotted areas indicate statistical significance at the 95% confidence level based on a two-tailed Student's t -test

年和2019年并未完全捕捉到中国区域人为气溶胶排放的复杂演变过程。事实上,在1980—2019年间,中国的人为气溶胶排放经历了显著的非单调变化过程。1980年至2013年是中国排放的快速增长期,而2013年后由于实施大气污染防治行动计划,排放量大幅减少,减排幅度在京津冀、长三角等核心城市群体现出明显的空间集中性(图5)。正是这种抵消效应导致中国区域在整个40a内排放总量变化很小,从而使得本研究能够清晰地分离并凸显空

间分布变化的主导性。尽管这种抵消使得长期总量贡献很小,但排放趋势的快速逆转对区域气候可能产生了显著的短期和非线性影响。研究表明,2010年以来中国气溶胶排放的快速下降,通过扰动云微物理和大气动力学,加速了中国极端降水频率的增强趋势(Zou et al., 2025)。因此,未来的研究应结合多阶段敏感性试验,来区分不同阶段排放趋势逆转所带来的差异性气候响应,从而更全面地评估人为气溶胶对中国气候变化的影响。

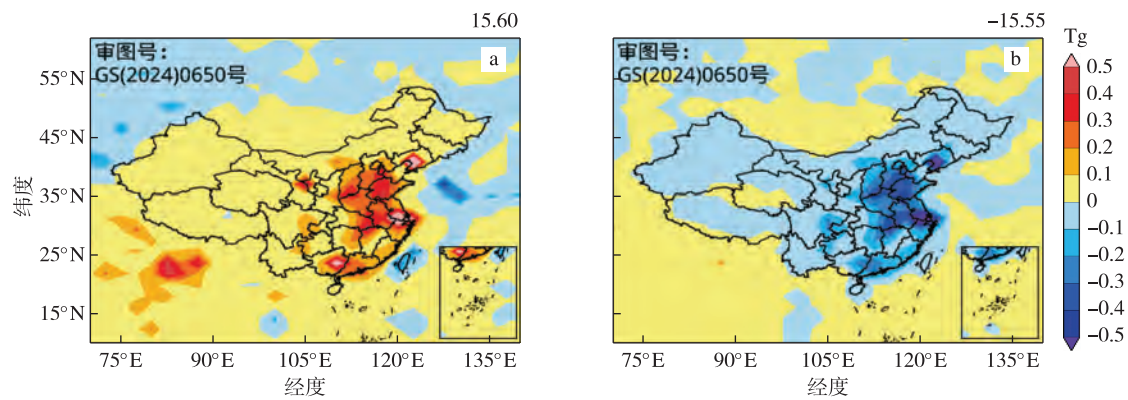


图 5 2013 年相对于 1980 年 (a)、2019 年相对于 2013 年 (b) 的二氧化硫 (SO_2) 人为排放变化的空间分布 (阴影, 单位: Tg; 右上角的数值分别代表对应时段的中国 SO_2 变化总量)

Fig.5 Spatial distribution of changes in anthropogenic sulfur dioxide (SO_2) emissions (shadings, units: Tg) for (a) 2013 relative to 1980 and (b) 2019 relative to 2013. Values in the upper-right corner show the total change in emissions over China for the corresponding period

参考文献 (References)

- Albrecht B A, 1989. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness [J]. *Science*, 245(4923): 1227-1230. DOI: 10.1126/science.245.4923.1227.
- Bai J Y, Ai W W, Tang H N, et al., 2024. Detectable anthropogenic influence on the changes in structure of precipitation over China using CMIP6 models [J]. *Climate Dyn*, 62(9): 8899-8911. DOI: 10.1007/s00382-024-07368-y.
- Chang D Y, Lelieveld J, Steil B, et al., 2021. Variability of aerosol-cloud interactions induced by different cloud droplet nucleation schemes [J]. *Atmos Res*, 250: 105367. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105367.
- Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, et al., 1992. Climate forcing by anthropogenic aerosols [J]. *Science*, 255(5043): 423-430.
- Dong B W, Sutton R T, Shaffrey L, et al., 2022. Recent decadal weakening of the summer Eurasian westerly jet attributable to anthropogenic aerosol emissions [J]. *Nat Commun*, 13(1): 1148. DOI: 10.1038/s41467-022-28816-5.
- Fowler H J, Lenderink G, Prein A F, et al., 2021. Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes [J]. *Nat Rev Earth Environ*, 2(2): 107-122. DOI: 10.1038/s43017-020-00128-6.
- Gao J Y, Yang Y, Wang H L, et al., 2022. Fast climate responses to emission reductions in aerosol and ozone precursors in China during 2013—2017 [J]. *Atmos Chem Phys*, 22(11): 7131-7142. DOI: 10.5194/acp-22-7131-2022.
- Gao Y H, Xiao L H, Chen D L, et al., 2018. Comparison between past and future extreme precipitations simulated by global and regional climate models over the Tibetan Plateau [J]. *Int J Climatol*, 38(3): 1285-1297. DOI: 10.1002/joc.5243.
- Hoesly R M, Smith S J, Feng L Y, et al., 2018. Historical (1750—2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS) [J]. *Geosci Model Dev*, 11(1): 369-408. DOI: 10.5194/gmd-11-369-2018.
- Huang X Y, Swain D L, Hall A D, 2020. Future precipitation increase from very high resolution ensemble downscaling of extreme atmospheric river storms in California [J]. *Sci Adv*, 6(29): eaba1323. DOI: 10.1126/sciadv.aba1323.
- Hurrell J W, Holland M M, Gent P R, et al., 2013. The community earth system model: a framework for collaborative research [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 94(9): 1339-1360. DOI: 10.1175/bams-d-12-00121.1.
- IPCC, 2021. *Climate change 2021: the physical science basis* [R] // Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press.
- Jiang J, Zhou T J, Qian Y, et al., 2023. Precipitation regime changes in high mountain Asia driven by cleaner air [J]. *Nature*, 623(7987): 544-549. DOI: 10.1038/s41586-023-06619-y.
- Kang S M, Xie S P, Deser C, et al., 2021. Zonal mean and shift modes of historical climate response to evolving aerosol distribution [J]. *Sci Bull*, 66(23): 2405-2411. DOI: 10.1016/j.scib.2021.07.013.
- Klimont Z, Smith S J, Cofala J, 2013. The last decade of global anthropogenic sulfur dioxide: 2000—2011 emissions [J]. *Environ Res Lett*, 8(1): 014003. DOI: 10.1088/1748-9326/8/1/014003.
- Li S, Wang T J, Solmon F, et al., 2016. Impact of aerosols on regional climate in southern and northern China during strong/weak East Asian summer monsoon years [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 121(8): 4069-4081. DOI: 10.1002/2015jd023892.
- Li Z Q, Guo J P, Ding A J, et al., 2017. Aerosol and boundary-layer interactions and impact on air quality [J]. *Natl Sci Rev*, 4(6): 810-833. DOI: 10.1093/nsr/nwx117.

- 李占清,2020.气溶胶对中国天气、气候和环境影响综述[J].大气科学学报,43(1):76-92. Li Z Q,2020.Impact of aerosols on the weather, climate and environment of China;an overview[J].Trans Atmos Sci,43(1):76-92.DOI:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200115005.(in Chinese).
- 廖宏,高瑜成,陈东林,等,2021.空气污染-气候相互作用:IPCC AR6的结论解读[J].大气科学学报,44(5):658-666. Liao H,Gao Y C,Chen D L,et al.,2021.Assessment of air quality-climate interactions in IPCC AR6[J].Trans Atmos Sci,44(5):658-666.DOI:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210823011.(in Chinese).
- 林文青,陈活泼,徐慧文,等,2023.西南地区未来极端降水增加将导致其人口暴露风险加剧[J].大气科学学报,46(4):499-516. Lin W Q, Chen H P,Xu H W,et al.,2023.Significant increase of precipitation extremes will enlarge its population exposure over Southwest China in the future[J].Trans Atmos Sci,46(4):499-516.DOI:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20221118007.(in Chinese).
- Liu C,Yang Y,Wang H L,et al.,2023.Influence of spatial dipole pattern in Asian aerosol changes on East Asian summer monsoon[J].J Climate,36(6):1575-1585.DOI:10.1175/jcli-d-22-0335.1.
- Liu F K,Li X,Luo Y Y,et al.,2024.Increased Asian aerosols drive a slowdown of Atlantic meridional overturning circulation[J].Nat Commun,15(1):18.DOI:10.1038/s41467-023-44597-x.
- Quaas J,Ming Y,Menon S,et al.,2009.Aerosol indirect effects-general circulation model intercomparison and evaluation with satellite data[J].Atmos Chem Phys,9(22):8697-8717.DOI:10.5194/acp-9-8697-2009.
- Ren L L,Yang Y,Wang H L,et al.,2021.Aerosol transport pathways and source attribution in China during the COVID-19 outbreak[J].Atmos Chem Phys,21(20):15431-15445.DOI:10.5194/acp-21-15431-2021.
- Twomey S,1977.The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds[J].J Atmos Sci,34(7):1149-1152.DOI:10.1175/1520-0469(1977)034<1149:tiopot>2.0.co;2.
- Wang H,Wen Y J,2022.Climate response to the spatial and temporal evolutions of anthropogenic aerosol forcing[J].Climate Dyn,59(5):1579-1595. DOI:10.1007/s00382-021-06059-2.
- Wang H,Zheng X T,Cai W J,et al.,2024.Atmosphere teleconnections from abatement of China aerosol emissions exacerbate Northeast Pacific warm blob events[J].Proc Natl Acad Sci USA,121(21):e2313797121.DOI:10.1073/pnas.2313797121.
- 王康宁,陈权亮,葛非,等,2025.CMIP6 HighResMIP模式对青藏高原东侧极端降水的模拟评估及热动力效应[J].大气科学学报,48(2):240-254. Wang K N,Chen Q L,Ge F,et al.,2025.Assessment of extreme precipitation simulations over the eastern Qinghai-Xizang Plateau using CMIP6 HighResMIP models;the rmdynamic and dynamic contributions[J].Trans Atmos Sci,48(2):240-254.DOI:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20240416001.(in Chinese).
- Wang L Y,Gu X H,Slater L J,et al.,2023.Attribution of the record-breaking extreme precipitation events in July 2021 over central and eastern China to anthropogenic climate change[J].Earth's Future,11(9):e2023EF003613.DOI:10.1029/2023EF003613.
- Wang P Y,Yang Y,Xue D K,et al.,2023.Aerosols overtake greenhouse gases causing a warmer climate and more weather extremes toward carbon neutrality[J].Nat Commun,14(1):7257.DOI:10.1038/s41467-023-42891-2.
- Wilcox L J,Liu Z,Samsel B H,et al.,2020.Accelerated increases in global and Asian summer monsoon precipitation from future aerosol reductions [J].Atmos Chem Phys,20(20):11955-11977.DOI:10.5194/acp-20-11955-2020.
- Williams A I L,Stier P,Dagan G,et al.,2022.Strong control of effective radiative forcing by the spatial pattern of absorbing aerosol[J].Nat Climate Chang,12(8):735-742.DOI:10.1038/s41558-022-01415-4.
- Xie X N,Myhre G,Shindell D,et al.,2022.Anthropogenic sulfate aerosol pollution in South and East Asia induces increased summer precipitation over arid Central Asia[J].Commun Earth Environ,3:328.DOI:10.1038/s43247-022-00660-x.
- 杨珂珂,郭东林,华维,等,2023.CMIP6 HighResMIP对青藏高原气候模拟的评估和预估[J].大气科学学报,46(2):193-204. Yang K K,Guo D L,Hua W,et al.,2023.Evaluation and projection of CMIP6 HighResMIP in simulating surface air temperature and precipitation over the Tibetan Plateau[J].Trans Atmos Sci,46(2):193-204.DOI:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20220808001.(in Chinese).
- Yang Y,Ren L L,Wu M X,et al.,2022.Abrupt emissions reductions during COVID-19 contributed to record summer rainfall in China[J].Nat Commun,13(1):959.DOI:10.1038/s41467-022-28537-9.
- Yang Y,Mou S X,Wang H L,et al.,2024.Global source apportionment of aerosols into major emission regions and sectors over 1850—2017[J].Atmos Chem Phys,24(11):6509-6523.DOI:10.5194/acp-24-6509-2024.
- Zhu Y Y,Yang S N,2020.Evaluation of CMIP6 for historical temperature and precipitation over the Tibetan Plateau and its comparison with CMIP5 [J].Adv Climate Change Res,11(3):239-251.DOI:10.1016/j.accre.2020.08.001.
- Zou A L,Yang Y,Wang H L,et al.,2025.Aerosol decline accelerates the increasing extreme precipitation in China[J].Geophys Res Lett,52(4): e2024GL113887.DOI:10.1029/2024GL113887.

· ARTICLE ·

Impacts of changes in anthropogenic aerosols on precipitation over China during the past four decades

YANG Yang, LI Shuxin, LIAO Hong

State Key Laboratory of Climate System Prediction and Risk Management (CPRM)/School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

Abstract Precipitation is a fundamental component of the Earth's climate system, and its variability strongly influences regional water resources, agricultural productivity, and ecosystem health. In this study, we used the Community Earth System Model (CESM1) together with Global Precipitation Climatology Project (GPCP) observations to quantitatively assess how changes in both the magnitude and spatial distribution of global anthropogenic aerosol emissions have affected precipitation over China during the past four decades (1980—2019). Sensitivity experiments demonstrate that global aerosol changes have contributed to a decrease in annual-mean precipitation over southern China, with the dominant driver being the spatial redistribution of emissions rather than changes in their total magnitude. From 1980 to 2019, global anthropogenic aerosol emission hotspots shifted from high latitudes (Europe and North America) toward lower-latitude regions in South Asia and East Asia. This shift resulted in a pronounced increase in $PM_{2.5}$ column burden over southern China, which in turn enhanced cloud droplet number concentrations, reduced cloud droplet radius, and weakened precipitation efficiency. These findings indicate that changes in the spatial distribution of anthropogenic aerosol emissions have played a central role in the persistent decline in precipitation over southern China during the past four decades. The results highlight the importance of considering both the geographic pattern of emissions and their associated regional climate feedbacks when evaluating aerosol-climate interactions.

Keywords aerosols; anthropogenic emissions; precipitation change; Earth System Model; climate feedback

DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20250902007

(责任编辑:刘菲)