

平流层气溶胶注入地球工程实施与终止对中国极端气候的影响

张昊天¹, 赵传峰^{1,2*}, 陈安南¹, 牛莉雅^{1,2}, 游诗韬¹, 李杰峰¹, 罗焯泓^{3,4}

1. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871

2. 北京大学碳中和研究院, 北京 100871

3. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500

4. 广东省韶关市气象局, 韶关 512028

* 通讯作者, E-mail: cfzhao@pku.edu.cn

2025-07-04收稿, 2025-11-15修回, 2026-02-27接受, 2026-08-19网络版发表

国家重点研发计划项目(2024YFF0809400)资助

摘要 在全球温室气体排放持续增加、气候变暖日益加剧的背景下, 平流层气溶胶注入(Stratospheric Aerosol Injection, SAI)作为一种太阳辐射干预地球工程手段受到越来越多的关注。本文基于CMIP5/6和GeoMIP框架下的多模式模拟数据, 综合分析了G6sulfur(高排放背景下持续实施SAI)与G3(中等排放背景下实施SAI后终止)两种典型试验情景下, 中国区域2015–2100年间极端温度和极端降水指数的演变特征。结果表明, G6sulfur情景下, SAI可显著抑制中国地区的升温趋势, 将极端高温和强降水事件的增长幅度有效控制, 尤其在华北、华东和东南沿海等高风险区表现出良好缓解效果; 但对于干旱和湿润持续性指标的调节相对有限。G3试验进一步揭示了SAI终止可能带来的剧烈“反弹效应”, 即终止后3–5年内, 气温与极端高温指数迅速恢复并短期超过无干预水平, 显示出显著的“终止冲击”风险。研究指出, 尽管SAI在缓解区域极端气候方面具有一定效果, 但其潜在副作用及终止响应需被充分评估, 以支持未来气候政策的科学制定与风险治理。

关键词 地球工程, 极端天气, 气候变化, 气溶胶, 中国区域

1 引言

近年来, 随着人类活动引发的温室气体排放持续增加, 全球气候系统正经历前所未有的变化。大气中二氧化碳浓度已从工业化前的280 ppm($1\text{ ppm}=1\times 10^{-6}\text{ }\mu\text{g g}^{-1}$)上升至2023年超过420 ppm(Jarvis和Forster, 2024; Friedlingstein等, 2025); 全球平均地表温度较工业化前上升超过1.3 °C(IPCC, 2021; Bevacqua等, 2025); 极端高温、暴雨、干旱等气候灾害事件的频率和强度均呈加速上升趋势, 并表现出明显的区域非对称性和季节不均衡性(Suarez-Gutierrez等, 2023; Zhang等, 2024; Li等, 2025)。这些变化正在对农业、生态系统、水资源及城市

运行构成系统性风险。尽管《巴黎协定》提出控制升温在2 °C以内、努力限制在1.5 °C以内的全球目标, 但受制于政治意愿、技术转型与发展不平衡等多重因素, 全球减排进程目前远未达到预期(Stankovic等, 2023; Jarvis和Forster, 2024; Wang和Fang, 2024)。在此背景下, 探索除传统减排路径之外的补充性手段, 尤其是能快速抑制气温上升的技术路径, 成为全球气候研究和治理领域的重要议题。

地球工程, 尤其是太阳辐射干预(Solar Radiation Modification, SRM)技术, 近年来被视为可能应对气候变暖的有效策略(Caldeira等, 2013; Irvine等, 2016; Irvine和Keith, 2020)。其中, 平流层气溶胶注入(Strato-

中文引用格式: 张昊天, 赵传峰, 陈安南, 牛莉雅, 游诗韬, 李杰峰, 罗焯泓. 2026. 平流层气溶胶注入地球工程实施与终止对中国极端气候的影响. 中国科学: 地球科学, 56(9): 3503–3518, doi: 10.1360/SSTE-2025-0201

英文引用格式: Zhang H, Zhao C, Chen A, Niu L, You S, Li J, Luo Y. 2026. Impacts of stratospheric aerosol injection geoengineering deployment and termination on extreme climate events in China. Science China Earth Sciences, 69(9): 3448–3462, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1886-7>

spheric Aerosol Injection, SAI)是目前SRM研究最深入、科学界关注度最高的方案之一(图1)。其基本原理是通过向平流层注入硫酸盐气溶胶或前置气体,形成硫酸盐气溶胶云,增强地球反照率,从而减少入射短波辐射并引发气候冷却(Crutzen, 2006; Henry等, 2024; Sun等, 2024)。这一理念源于火山喷发自然事件的启发,尤其是1991年皮纳图博火山喷发造成的全球平均温度下降约0.5℃的冷却效应(Jones等, 2021; Boretti, 2024)。大量气候模式模拟研究表明,此过程可在一定程度上抑制全球气温上升、减缓部分气候风险。为了科学评估SAI的潜在气候效应,地球工程模式比较项目(Geoengineering Model Intercomparison Project, GeoMIP)设计了一系列标准化模拟试验,其中G6sulfur情景在高排放路径(SSP5-8.5)下,通过引入SAI干预,将辐射强迫强度调整为与中等排放路径(SSP2-4.5)的强迫强度相当,从而分析其可能的减缓效果(Jones等, 2021, 2022; Yue等, 2023; Nar-enpitak等, 2024; Visioni等, 2024)。近年来,基于该情景的多模式模拟结果不断积累,涵盖了地表温度、水文循环、极端气候事件等多个维度。尽管SAI在模拟中表现出有效的“降温”能力,但其带来的气候副作用与实施风险也备受争议。如何设计合理的注入策略、实现全球公平控制,以及应对可能的“终止冲击”(即终止SAI试验后气候可能的剧烈变化),都成为当前研究关注的关键问题(Grasso, 2022; Wells等, 2024; Duffey等, 2025)。特别是,如果在尚未建立稳定减排体系的背景下突然终止SAI,地球系统可能在短时间内迅速“回暖”,进而诱发一系列急剧的极端气候响应(Parker和Irvine, 2018; Tang和Kemp, 2021)。因此,系统评估SAI在不同区域、不同情景下的影响,对于未来政策制定具有重要科学价值。

目前,已有研究利用GeoMIP的一系列试验模拟评估SAI对极端气候的潜在影响。部分研究结果表明,SAI地球工程方案显著缓解了全球地表温度的升高,在SSP5-8.5等高排放背景下,通过SAI地球工程可以将辐射强迫水平有效降低至中等排放情景(SSP2-4.5)下的水平,以G6sulfur试验为例,地球工程可在赤道平流层注入硫酸盐气溶胶并动态调节注入强度,从而显著抑制21世纪中后期的全球变暖趋势(Jones等, 2022; Haywood等, 2023; Feng等, 2025)。全球多模式模拟结果显示,SAI对热带、中纬度和极地地区的冷却效应在空间分布上存在明显差异。在GLENS试验(于多纬度注入点投放硫酸盐气溶胶,并通过反馈算法控制温度梯度)中,高纬度地区受控冷却效应较弱,而热带地区则更容易出现过度降温现象,进而引发局地水文循环的扰动(Jiang等, 2019; Sun等, 2020; Henry等, 2024)。从区域尺度来看,SAI的降温效应往往

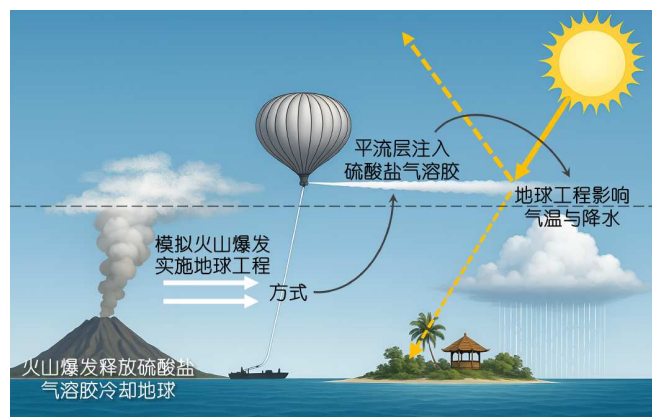


图1 SAI地球工程示意图

伴随着降水格局的重构(Nimusiima等, 2025)。在非洲、南亚和东亚等对季风降水高度敏感的地区,敏感性试验表明在热带或高纬度分别注入时,可能出现降水强度减弱或季节分布变化,进而影响农业和生态系统稳定性(Sun等, 2020; Zhao和Cao, 2022; Asutosh等, 2025)。在GLENS和G6sulfur等试验框架下的进一步研究表明,SAI可在一定程度上缓解由全球变暖引起的部分极端高温和强降水事件,尤其是在热带地区,但也可能在中高纬度地区引发新的极端事件变化,这类变化对平流层气溶胶的注入纬度、高度与强度具有高度敏感性(Barnes等, 2022; Tye等, 2022; Jiang等, 2024)。尽管在全球层面关于SAI地球工程影响的研究不断增多,但对于中国这一具有高度气候敏感性的国家而言,其相关研究仍显不足。作为世界上气候类型最复杂的国家之一,中国横跨东亚季风区、干旱半干旱区及青藏高原特殊区,具有显著的空间气候梯度与区域差异性(赵志强等, 2008; Chen等, 2014; Xu等, 2024)。近年来,受全球气候变暖背景影响,我国极端气候事件显著增多并呈现结构性演变趋势,对我国粮食安全、水资源调配、城市治理和基础设施建设形成了多重挑战(孙军和张福青, 2017; Gao等, 2025; 吕佳婴等, 2025)。因此,深入研究极端气候事件的时空演变对于制定国家适应战略与风险管理措施具有更加直接且现实的政策与社会经济意义(MacMartin等, 2022)。与此同时,考虑到SAI本质上是一种持续的人为强迫,其潜在的“终止冲击”可能在短时间内引发气温骤升与极端气候事件的显著反弹,这种非线性风险甚至可能超过干预实施期间的影响,对国家应急管理体系和全球气候治理机制均具有重要启示(Parker和Irvine, 2018)。目前关于SAI对中国极端气候的定量多模式证据尚有限,关于终止冲击在中国尺度上的系统性研究则更为稀少,仅有个别研究指出SAI可能增强东亚冬季风并加剧中国东北的极

端降水，但对我国整体极端气候与终止效应的多指标、长期跟踪与机制性分析仍需进一步加强(Liang和Haywood, 2023; Liu等, 2023)。因此，迫切需要结合多模式模拟结果，分析SAI实施与终止对中国极端气候变化的影响与区域性差异，从而为政策风险评估与未来全球气候治理方案提供科学支撑(曹龙, 2019a, 2019b)。

本研究基于GeoMIP、CMIP5和CMIP6多模式模拟数据，系统评估在2015–2100年期间中国区域极端气候的时空演变特征，聚焦极端温度指数与极端降水指数的逐年变化趋势。同时，通过合成分析等统计学方法，深入探讨SAI气候工程实施阶段中国不同区域极端气候事件的响应特征。最后，本研究进一步分析在2070年突然中止SAI干预后，中国区域极端气候指数的短期快速变化过程，以讨论“终止冲击”下潜在的气候冲击风险。

2 数据与方法

2.1 模式数据

为评估SAI干预措施的长期与大尺度影响，全球气候模式构成了当前研究的基础工具，其能提供完整的三维耦合响应，并通过区域选择与集合分析有效揭示SAI对特定区域的强迫响应与不确定性(Keys等, 2022; MacMartin等, 2022; Rezaei等, 2023)。因此，本研究首先基于GeoMIP的多模式集合对中国区域进行量化评估，以识别稳健的信号与受影响热点，为后续更具针对性的高分辨率或单模式机理研究提供筛选依据与研究方向。在全球气候模拟研究中，未来气候变化的预测主要基于共享社会经济路径(SSPs)和代表性浓度路径(RCPs)的耦合框架。SSPs描述了不同社会经济发展模式下的人类活动水平及其对气候系统的潜在影响，包括五种典型情景：SSP1(可持续发展路径)、SSP2(中等发展路径)、SSP3(区域竞争路径)、SSP4(不均衡发展路径)和SSP5(化石燃料主导路径)。RCPs则定义了不同辐射强迫水平下的温室气体浓度情景，涵盖从2.6到8.5 W m⁻²的范围。在CMIP6框架下，SSPs与RCPs通过系统耦合形成新的情景矩阵(O’Neill等, 2016)。本研究重点关注SSP5-8.5和

RCP4.5两种典型情景。

为评估平流层气溶胶注入地球工程在中国区域的气候效应，本研究选用GeoMIP6设计的G6sulfur试验方案模式数据，包括逐日近地表气温(Near-surface Air Temperature, TAS)、逐日近地表最高气温(TASMAX)、逐日近地表最低气温(TASMIN)与逐日平均降水(Precipitation, pr)等变量。该试验在SSP5-8.5情景基础上，模拟通过持续向热带平流层注入二氧化硫(SO₂)，使其在大气中自然氧化生成硫酸盐气溶胶，从而增强地球反照率以抵消部分温室气体引起的正辐射强迫，旨在将全球平均地表温度控制在SSP2-4.5情景的水平。试验时段为2020–2100年，通过动态调整注入强度，使各模式模拟的年代际全球近地表气温与SSP2-4.5情景的偏差保持在±0.2 °C范围内。本研究采用了四个已完成G6sulfur试验的全球气候模式(表1)，这些模式在火山喷发再现试验中均表现出良好的模拟性能，并得到了广泛的应用(Jones等, 2021; Visionsi等, 2024)。此外，为分析SAI终止后的气候响应特征，本研究还参考了基于CMIP5-GeoMIP5框架下的G3试验(表1)(Berdahl等, 2014)，由于公开可获取的逐日变量和完整时段数据仅有IPSL-CM5A-LR模式，因此本文的G3分析主要基于该模式结果。该试验基于RCP4.5情景，在2020–2069年间通过赤道注入硫酸盐气溶胶的方式维持辐射强迫稳定，并在2070年突然终止气溶胶注入。同时，本研究引入RCP4.5情景作为对照，该情景代表无地球工程干预的中等排放路径，可为评估SAI实施与终止对中国区域极端气候的影响提供基准参考。通过对比分析这些模式模拟数据，可以系统评估地球工程在不同实施阶段对中国气候的潜在影响。

2.2 极端气候指数与计算

为定量评估SAI地球工程对中国区域极端气候事件的影响，本文选取了由气候变化检测与指数专家组(Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI)定义的一组标准化极端气候指数(Klein-Tank等, 2009; Zhang等, 2011)，共计12项(表2)。这些指数可有效反映气候系统中极端温度与降水事件的频率、强度和持续性，

表1 本研究使用的气候模型

所属试验	模式名称	机构	水平分辨率(格点数)
SSP5-8.5/G6sulfur	CNRM-ESM2-1	法国国家气象研究中心	256×128
SSP5-8.5/G6sulfur	IPSL-CM6A-LR	法国皮埃尔-西蒙·拉普拉斯研究所	144×143
SSP5-8.5/G6sulfur	MPI-ESM1-2-LR	德国马克斯·普朗克气象研究所	192×96
SSP5-8.5/G6sulfur	UKESM1-0-LL	英国气象局哈德利中心	192×144
RCP4.5/G3	IPSL-CM5A-LR	法国皮埃尔-西蒙·拉普拉斯研究所	144×143

表2 极端气候指数定义及计算

极端气候指数	描述	定义	单位
TNn	年最低日最低气温	一年中最低的日最低气温	℃
TXx	年最高日最高气温	一年中最高的日最高气温	℃
FD	霜冻日数	一年中日最低气温低于0℃天数	天
SU	夏日数	一年中日最高气温高于25℃天数	天
TN10p	日最低气温第10百分位的冷日比例	一年中日最低气温低于基准期第10百分位的天数所占比例	%
TX90p	日最高气温第90百分位的热日比例	一年中日最高气温高于基准期第90百分位的天数所占比例	%
PRCPTOT	年累计降水量(湿日)	一年中所有“湿日”(日降水≥1 mm)的降水总量	mm
Rx5day	最大连续5日降水量	一年中任意连续5天内的最大总降水量	mm
CDD	连续干旱日数	一年中最长的连续“干旱日”(日降水≤1 mm)序列长度	天
CWD	连续湿润日数	一年中最长的连续“湿日”序列长度	天
R95pTOT	强降水日降水总量	一年中所有日降水量超过基准期第95百分位的降水日所产生的降水总量	mm
R99pTOT	极端强降水日降水总量	一年中所有日降水量超过基准期第99百分位的降水日所产生的降水总量	mm

具有明确的物理意义和可比性，已被广泛用于全球和区域尺度的极端气候监测与趋势分析(Sillmann等, 2013; Aswathy等, 2015; Tye等, 2022)。所采用的12个气候极端指数涵盖了极端高温、极端低温、极端干旱和强降水等多个方面，可分为三类：(1)固定极值类指数，如年最高日最高气温(TXx)、年最低日最低气温(TNn)等，与TASMAX/TASMIN反映的背景气候态平均气温不同，TXx/TNn指标强调年极端值特征，两者在计算方法与物理含义上有所不同；(2)持续性类指数，如霜冻日数(FD)、连续干旱日数(CDD)和连续湿润日数(CWD)等，描述某类极端状态的持续天数；(3)基于百分位数的概率类指数，如热日比例(TX90p)和强降水总量(R95pTOT、R99pTOT)等，用于反映事件的发生频率及其累计影响。为统一气候极端指数的判定标准，本研究采用对照试验模式(SSP5-8.5/RCP4.5)在2015–2024年期间的极端气候指数均值作为参考基准，用于确定各百分位阈值(如TN10p、TX90p、R95pTOT、R99pTOT等指数)(Jiang等, 2024)。

3 分析和结果

在研究极端气候的响应之前，本研究首先简要分析了模型模拟的基础气温与降水变量的气候平均态和变化趋势。图2与S1分别展示了SSP5-8.5情景与ERA5再分析数据2015–2024年期间TAS、TASMAX、TASMIN和pr在中国区域的气候态分布，各气候变量空间分布较为一致。从空间格局来看，中国TAS整体呈现由南向北递减、由东向西递减的格局，华南及东南沿海地区年均气温超过18℃，而青藏高原及西北高原地区则普遍低于8℃；TASMAX与TASMIN与TAS分布趋势类似，数值上略有差异。降水则呈现东南多、西北少的分布特征，受东亚季

风影响，东南沿海地区年降水量可达1500 mm以上，而西北内陆干旱区如塔里木盆地年降水量不足100 mm，湿润区干旱区边界明显。整体上，中国气候格局受控于纬度、海陆分布、地形地势及季风活动等多种因素的综合作用。

图3进一步展示了SSP5-8.5与G6sulfur两种试验情景下，中国区域逐年TAS、TASMAX、TASMIN和pr相对于2015–2024年基准期的距平演变趋势。在SSP5-8.5高排放情景下，TAS呈持续上升趋势。至21世纪末(2085–2094年)，日均气温相对基准期升高幅度达6.3℃，TASMAX与TASMIN升幅分别约为6和6.6℃。这显示出极端低温的变暖速率更高，表明“夜间升温”和“冬季缓和”现象更为显著。相比之下，在G6sulfur情景下，整体气温升幅被有效控制，至21世纪末，TAS距平值稳定在3.2℃左右。降水方面，SSP5-8.5情景下年均降水呈增加趋势，至21世纪末相对于基准期变化约0.37 mm/天；G6sulfur情景下的降水演变较为缓慢，较基准期变化约为0.14 mm/天。综上所述，SAI通过平流层气溶胶施加的短波辐射反照调节机制，在全球高排放背景下可有效缓解中国区域的地表变暖趋势以及降水增加趋势。

3.1 极端温度指数变化

在平均气温显著升高的背景下，极端温度事件的变化趋势尤为值得关注。为进一步探究SAI气候工程对极端高温与低温事件的影响，本节选取了6个代表性温度类极端气候指数(TNn、TXx、FD、SU、TN10p与TX90p)，分析其在基准期及未来不同情景下的空间格局与变化趋势。图S2展示了SSP5-8.5情景下2015–2024年4个极端温度指数的空间分布(TN10p与TX90p在基准期分布均为10%/90%，故省略)，作为本研究分析的气候基准状态。TNn

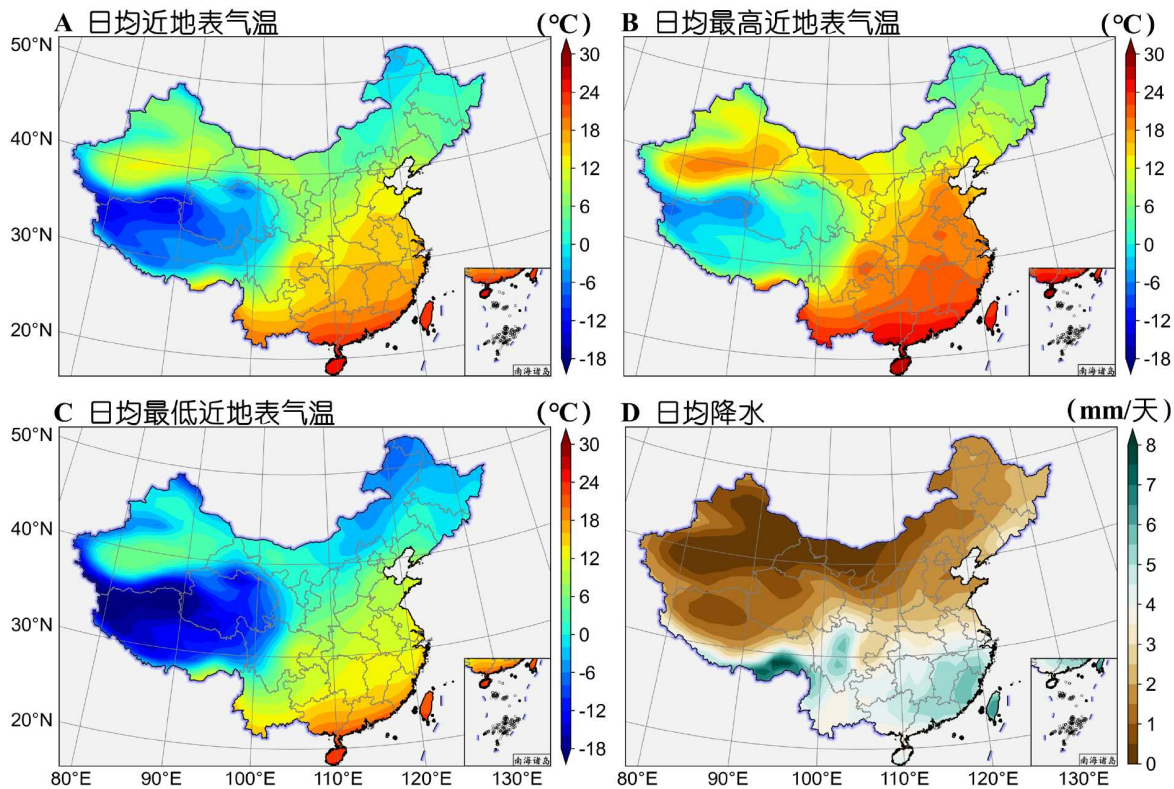


图2 中国区域气温与降水气候态分布。基于SSP5-8.5模式平均后2015–2024年中国区域日均近地表气温(A)、最高近地表气温(B)、最低近地表气温(C)与日均降水空间分布(D)

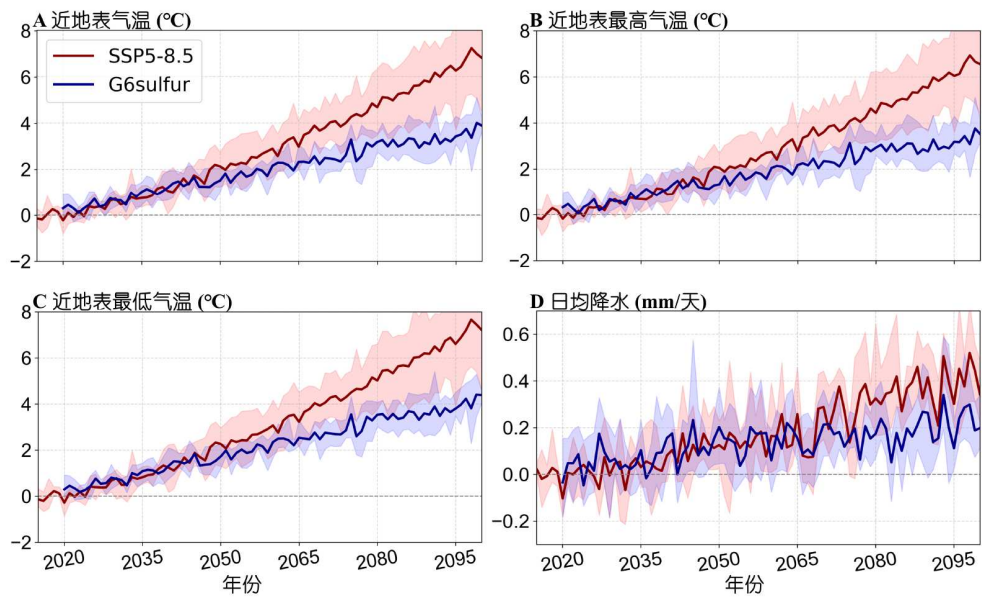


图3 中国区域未来逐年气温与降水变化。SSP5-8.5和G6sulfur情景下2015–2100年中国区域近地表气温(A)、近地表最高气温(B)、近地表最低气温(C)、日均降水(D)与SSP5-8.5情景在2015–2024年基准期的距平值。红线表示SSP5-8.5情景的多模式集合平均, 蓝线表示G6sulfur情景的多模式集合平均, 阴影区域表示各模式模拟结果的范围

的空间格局与TAS分布高度一致, 其在青藏高原和东北地区值最低, 为 -40°C , 反映出冬季严寒气候的显著性。

TXx则呈现出不同于TAS的分布特征, 其最高值集中于华北平原与西北干热区, 局部地区年极端最高温超过 36°C ,

显示出这些区域的大陆性热浪风险较高。FD和SU的分布则基本符合对气候带的直观认识,青藏高原和高纬地区FD高达300天以上,而南方大部分地区SU超过150天,反映出南北温差主导的极端温度日数特征。该基准气候态为后续极端温度指数在不同试验情景下的变化分析提供了基础参照。

图4展示了6个极端温度指数在SSP5-8.5与G6sulfur情景下相对于2015–2024年基准期的逐年距平演变趋势。TNn在两种情景下均呈显著升高趋势,反映出寒冷极端事件逐渐减少的趋势。在SSP5-8.5高排放路径下,TNn至21世纪末增幅达7.5℃;相比之下,G6sulfur情景下TNn升幅控制在4.7℃以内,表明SAI在缓解极端低温升高方面效果明显。TXx虽也呈现上升趋势,但增幅相对较小,至21世纪末SSP5-8.5增幅为5.7℃,而G6sulfur约为2.9℃。与温度绝对值对应的频率性指标也显示出相似特征:FD在SSP5-8.5情景中明显下降,21世纪末变化为-52天,而G6sulfur为-31天;SU变化趋势则相反,在SSP5-8.5情景下SU逐年增加,至21世纪末变化为47天,而G6sulfur为26天,表明极端高温频率在地球工程情景中得到一定缓

解。基于百分位阈值的极端频率指标亦展现出显著响应:TN10p在SSP5-8.5情景中急剧下降,至21世纪末较基准期变化-9.1%,这意味着极端寒冷事件(以现在为标准)几乎绝迹;而G6sulfur变化为-6.2%,虽然变化显著,但仍保持了部分低温波动性。TX90p则在SSP5-8.5下大幅上升+21.7%,G6sulfur控制在+12.2%,进一步佐证SAI在缓解极端高温频次方面的有效性。总体来看,SAI地球工程可在显著减缓背景气温升高的同时,有效控制极端高温和低温事件的频率和强度变化。

图5和6进一步展示了6个极端温度指数在SSP5-8.5与G6sulfur未来情景(2085–2094年)下相对于基准期(2015–2024年)在中国区域的空间合成变化情况。总体来看,各极端温度指数均表现出显著变化,且SAI气候工程在不同区域的缓解效应存在明显差异。TNn在全国范围内普遍升高,升温幅度在东北和青藏高原最为显著,G6sulfur情景虽同样呈升温趋势,但其缓解作用在空间分布上更为均衡。TXx也显示出全国性上升特征,其中SSP5-8.5情景下升温中心集中于西北和东北地区,而G6sulfur情景对西南地区的高温上升具有明显抑制效应,在西北地区则缓

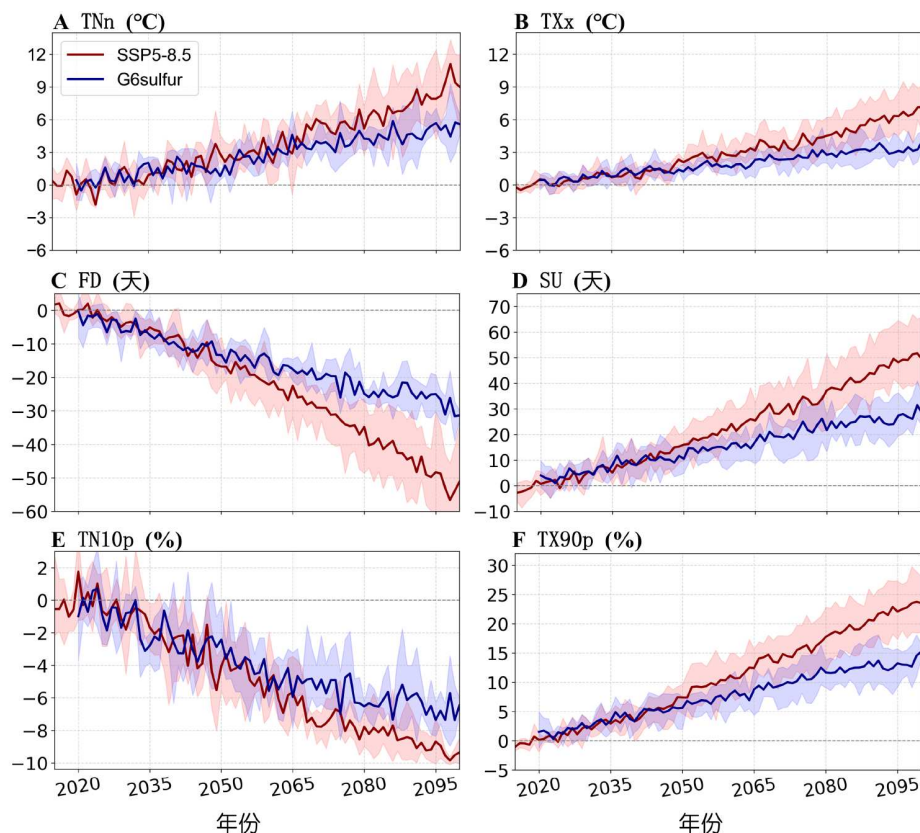


图4 中国区域未来逐年极端温度指数的变化。SSP5-8.5和G6sulfur情景下2015–2100年中国区域TNn(A)、TXx(B)、FD(C)、SU(D)、TN10p(E)、TX90p(F)极端温度指数与SSP5-8.5情景在2015–2024年基准期的距平值。红线表示SSP5-8.5情景的多模式集合平均,蓝线表示G6sulfur情景的多模式集合平均,阴影区域表示各模式模拟结果的范围

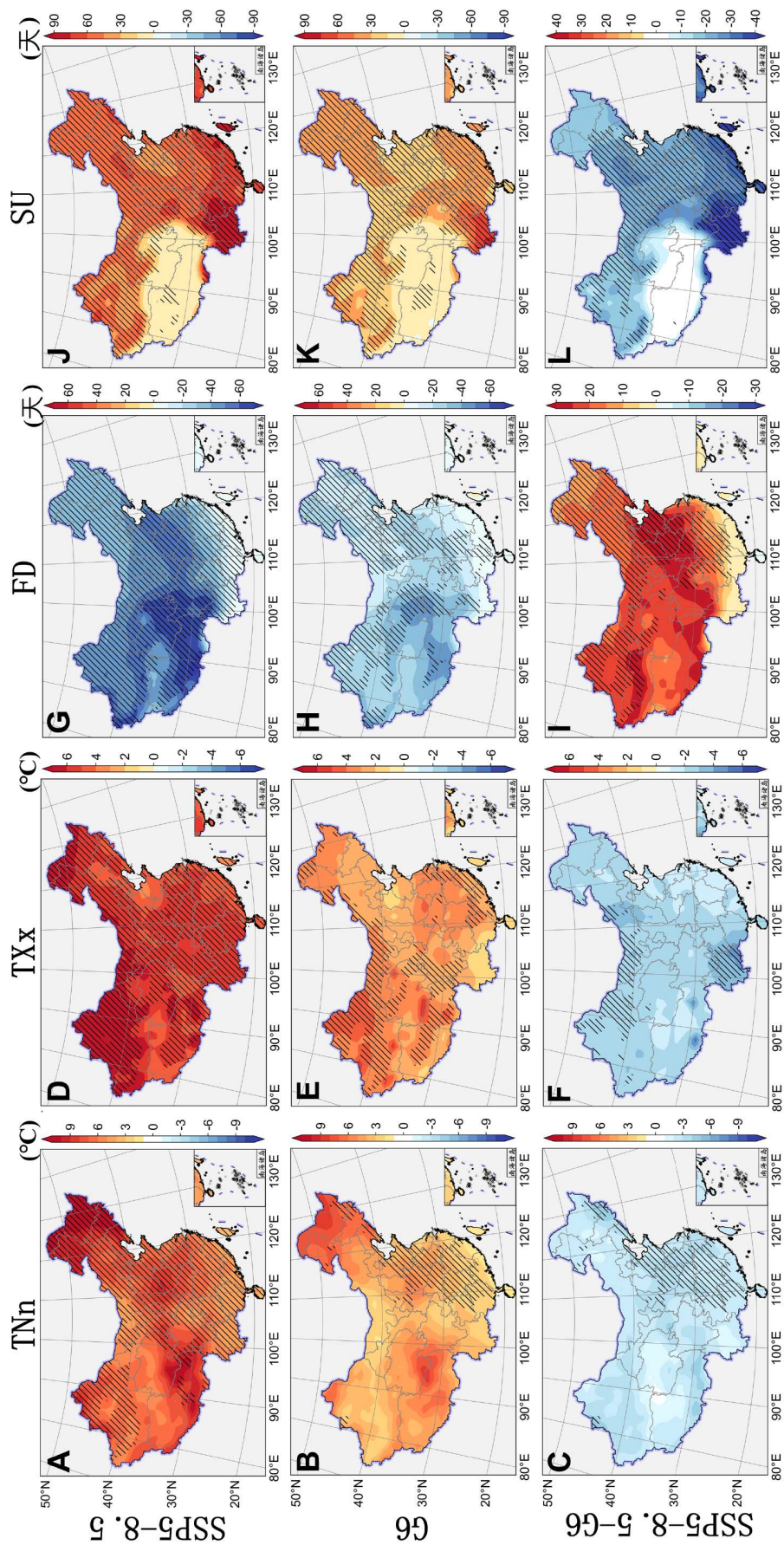


图5 对中国区域极端温度指数TNn、TXx、FD与SU合成分析。21世纪末(2085-2094年)SSP5-8.5、G6sulfur相对于基准值(SSP5-8.5情境下2015-2024年集合平均值)极端温度指数在中国区域的空间合成分析及两者之差。(A-C) 年最低日最低气温(TNn); (D-F) 年最高日最高气温(TXx); (G-I) 霜冻日数(FD); (J-L) 夏日数(SU)。阴影区域表示通过90%的Welch-t显著性检验

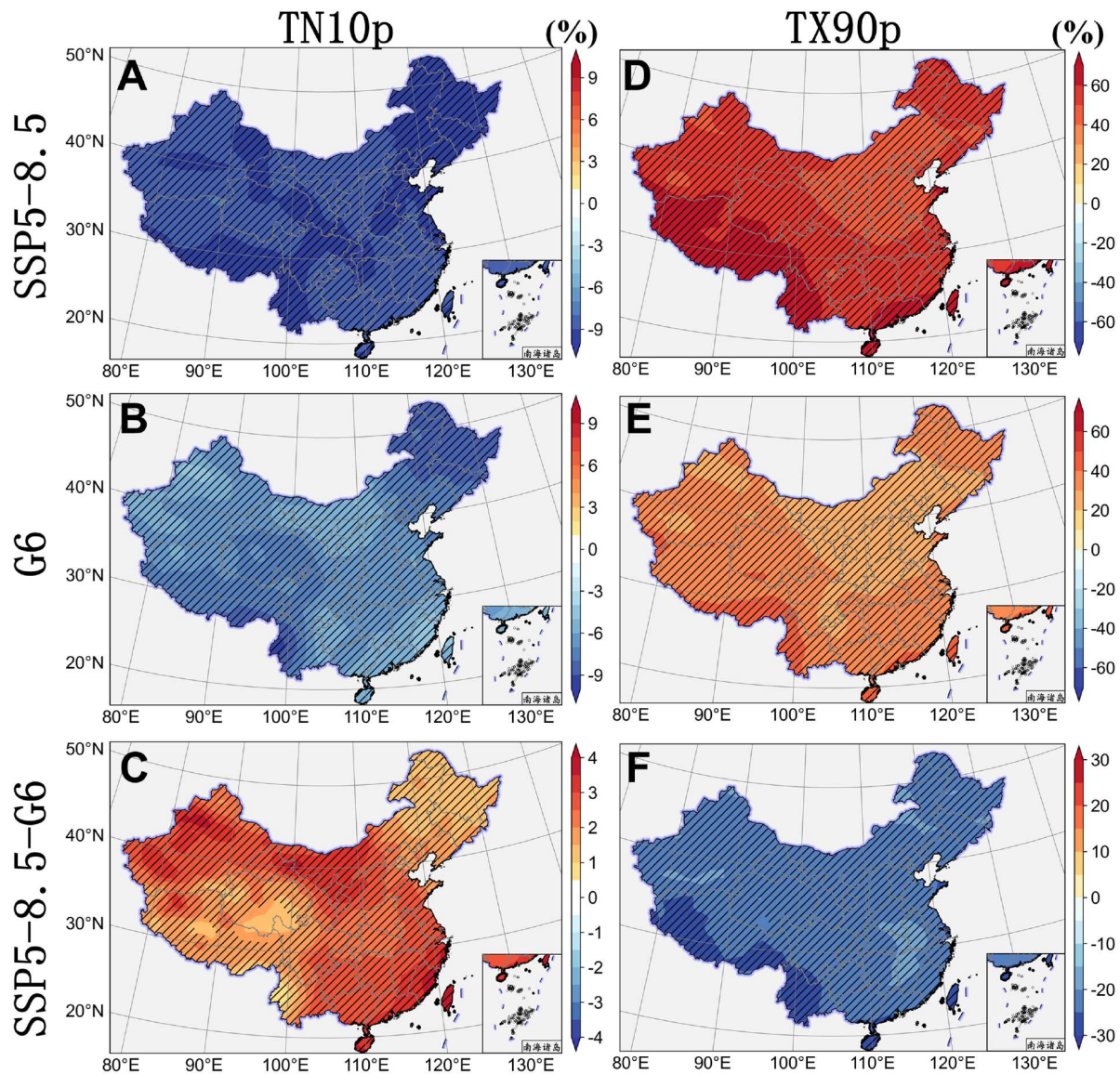


图6 对中国区域极端温度指数TN10p与TX90p合成分析。21世纪末(2085–2094年)SSP5-8.5、G6sulfur相对于基准值(SSP5-8.5情境下2015–2024年集合平均值)极端温度指数在中国区域的空间合成分析及两者之差。(A–C) 日最低气温第10百分位的冷日比例(TN10p); (D–F) 日最高气温第90百分位的热日比例(TX90p)。阴影区域表示通过90%的Welch- t 显著性检验

解较弱。FD指数普遍减少,尤其在青藏高原,表明未来霜冻事件频率大幅降低。相比之下, G6sulfur情景下FD的下降幅度较小,尤其在中部与西北地区,其保留低温事件的能力更强。SU指数则呈现出整体上升趋势,尤以西南地区为甚, G6sulfur在该区域的缓解效果尤为显著,而青高原因长期处于低温环境,变化较小。TN10p和TX90p的空间变化趋势与全国平均值一致,但SAI在区域尺度上的影响仍具有差异性。G6sulfur对TN10p下降的抑制主要体现在西北和东南沿海地区,对TX90p上升的缓解则在西南地区最为明显。总体而言, G6sulfur情景在减缓极端高温频率和强度方面表现出较强效果,尤其在东

部与西南地区,对极端寒冷事件的保留亦相对有效,显示出SAI气候工程在区域尺度上对极端温度事件调控的空间异质性和潜力。

3.2 极端降水指数变化

在全球变暖背景下,极端降水事件的频率和强度亦呈现出日益显著的变化,对区域水资源安全、农业产出及城市防洪体系构成重要挑战。因此,评估地球工程措施,尤其是SAI方案,对未来极端降水事件的潜在影响具有重要意义。本节选取了6个代表性降水类极端气候指数(PRCPTOT、Rx5day、CDD、CWD、R95pTOT和

R99pTOT), 从时间演变和空间响应两个维度分析其在不同情景下的变化特征, 以探讨SAI对中国区域不同类型降水极端事件的调节能力。图S3展示了SSP5-8.5情景下2015–2024年中国区域6个极端降水指数的空间分布, 作为本研究的气候基准状态。PRCPTOT与Rx5day的空间格局基本一致, 呈现出典型的“东南多、西北少”分布特征。东南沿海地区年降水量普遍高于1200 mm, Rx5day可超过150 mm, 而西北内陆多数区域两项指标均低于200与30 mm, 降水资源明显不足。干旱和湿润持续日数类指标展现出较强的区域对比特征。CDD在中国西北地区持续时间最长(170多天), 揭示出该区域干旱事件的频繁性与持续性; 而CWD则在青藏高原南部达到最大值(70多天), 其余区域呈现自北向南递增的空间分布, 符合东亚夏季风季节推进路径与地形调节的共同作用。极端降水强度类指标(R95pTOT和R99pTOT)亦体现出高度的区域集中性。两者高值区主要集中在中国东南沿海与华南地区, 表明极端强降水主要发生在海洋水汽输送活跃、对流系统频繁的区域。尽管青藏高原南部降水总量和湿润

日数较多, 但其极端降水贡献较低, 说明该区域降水以中等强度事件为主, 并非由极端降水主导。总体而言, 中国区域极端降水相关指数在空间上呈现出明显的地理分异特征, 既受大尺度气候系统控制, 也受到地形与局地环流的共同影响。这些基准态特征为后续分析不同排放情景及SAI干预条件下的极端降水演变趋势提供了重要参考基线。

图7展示了SSP5-8.5与G6sulfur两种情景下, 2015–2100年中国区域6个极端降水指数相对于基准期(2015–2024年)的逐年距平演变趋势。从整体趋势来看, 极端降水事件在未来呈现出频率增加与强度增强的双重特征, 而SAI地球工程在一定程度上对其增幅具有抑制作用。PRCPTOT方面, 两种情景均表现为持续上升趋势。至21世纪末, SSP5-8.5下PRCPTOT相较基准期增加约29%, 而G6sulfur情景下增幅控制在约16%, 显示出SAI干预可显著削弱长期累积降水的上升趋势。类似地, 极端强降水指标Rx5day亦呈增长趋势, SSP5-8.5情景下增幅为26%, G6sulfur为13%, 进一步表明SAI有助于抑制极端

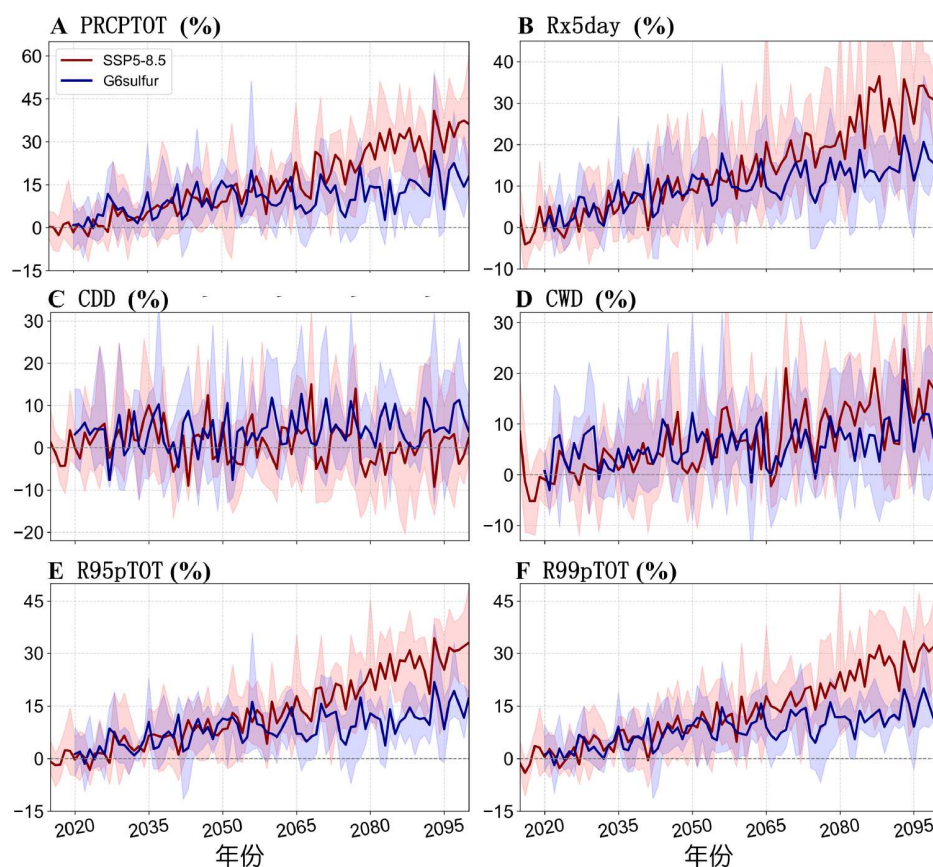


图7 中国区域未来逐年极端降水指数的变化。SSP5-8.5和G6sulfur情景下2015–2100年中国区域PRCPTOT(A)、Rx5day(B)、CDD(C)、CWD(D)、R95pTOT(E)、R99pTOT(F)极端降水指数与SSP5-8.5情景在2015–2024年基准期的距平值。红线表示SSP5-8.5情景的多模式集合平均, 蓝线表示G6sulfur情景的多模式集合平均, 阴影区域表示各模式模拟结果的范围

降水过程的强度增长。相较之下,连续干湿日数类指标的变化幅度较小。CDD在SSP5-8.5情景下略有上升,显示干旱期长度略有延长,而G6sulfur情景下则呈现轻微下降趋势;CWD则在两情景下均略有上升,SSP5-8.5与G6sulfur的增幅分别为12%和8%,说明随着整体降水量的提升,湿润事件的持续性亦有所增强。值得关注的是,高强度降水事件所占比重显著上升。R95pTOT与R99pTOT两项指标在SSP5-8.5情景下分别增加28%,而G6sulfur则为13%,差异显著,表明SAI可有效抑制极端降水总量的增长速度,降低由高强度降水引发的灾害风险。总体来看,尽管未来极端降水事件在所有情景下均表现出增强趋势,但SAI地球工程在削弱年降水总量增幅、限制极端降水强度增长方面具有明显作用,而对于湿持续性的调节效果相对有限。

从空间分布特征来看,未来中国区域极端降水指数的变化具有显著的地域差异性,SAI地球工程对其增强趋势的抑制效果亦在不同地区呈现出明显的空间非均一性。图8和图9展示了2085–2094年SSP5-8.5与G6sulfur情景相对于基准期(2015–2024年)6个极端降水指数在中国区域的空间合成变化情况。PRCPTOT在两种情景下均显示出在青藏高原南部、华北平原和华南地区显著增加的趋势;G6sulfur虽然同样表现出正距平,但在东南沿海和东北地区的增幅被明显抑制,部分区域甚至出现轻微下降,表明SAI对高降水区的调控效果较强。极端强降水指标Rx5day在SSP5-8.5情景下增幅最明显的区域为华北和东南沿海地区,而G6sulfur情景则主要集中在东南沿海,华北区域的强降水被显著抑制,显示出地球工程在部分内陆区域对短时强降水事件具有较好的调控潜力。类似地,R95pTOT与R99pTOT的空间变化趋势与PRCPTOT基本一致,但G6sulfur情景下整体增幅明显收敛,全国大部区域仅表现出轻微上升趋势。其中,东南沿海与东北地区的降水强度在G6sulfur情景下受到显著抑制,成为其缓解极端强降水风险最突出的区域。

在CDD方面(图9),尽管从全国平均趋势看变化幅度较小,但空间差异性非常突出:SSP5-8.5与G6sulfur情景均显示在中国西北地区和内蒙古区域的CDD时长呈现减少趋势,而华南和东南沿海则表现出干旱日数显著增加的倾向;G6sulfur情景下,该指数在北方大部(包括东北、西北和华北)出现增加趋势,表明SAI可能对北方潜在的湿润化过程存在一定削弱作用;而在南方地区,SAI则有效缓解了干旱日数的持续增长,改善热带季风区干旱风险。相对而言,CWD变化较小,但在空间上也表现出一定特征:SSP5-8.5显示CWD在青藏高原中部和华南区域有所增加,但G6sulfur情景下仅在青藏高原南部增加,其

余地区变化不大,SAI地球工程在青藏高原南部和西南地区呈现CWD增加效果,而在华南、东南区域呈现CWD抑制效果。综上所述,未来情景下中国区域极端降水指数的空间响应呈现出显著的区域不均一性,SAI地球工程在整体抑制降水增强趋势方面具有积极效应,尤其在东南沿海、东北和华北等高风险区域对强降水事件的缓解最为突出;同时,其在干旱持续性与降水连续性方面的影响表现出南北分异特征,整体反映出SAI在调节区域水文极端风险过程中所具有的空间异质性与复杂调控效果。

3.3 地球工程的终止效应

在前述分析中,基于多模式集合的SSP5-8.5与G6sulfur对比显示,SAI地球工程在减缓中国区域气候均值变化及极端温度、降水事件方面具有显著效果。然而,SAI作为一种人为维持的辐射强迫机制,其潜在风险之一在于可能面临突发性终止的现实情景,例如由于政治、经济或环境等原因中断实施。已有研究表明,在持续升高的温室气体背景下突然终止SAI将引发“终止冲击”效应,导致气候在短时间内快速变化,并可能诱发剧烈的极端气候事件。为进一步评估SAI终止对中国区域极端气候的潜在影响,本节基于GeoMIP项目中的G3试验情景展开分析。本节中G3试验选用单一模式(IPSL-CM5A-LR)模拟结果,其情景设定为在RCP4.5背景下于2020年起开始实施SAI,通过赤道地区平流层持续注入二氧化硫以维持辐射强迫稳定在2020年的水平,并于2070年突然终止注入(G6并没有设计终止试验)。本文将G3情景与RCP4.5进行对比,重点分析2070年之后极端气候指数的快速变化过程,评估SAI终止在中国区域可能造成的极端气候风险响应特征。

图10展示了RCP4.5与G3情景下2015–2100年中国区域TAS、TASMAX、TASMIN以及pr的逐年距平演变,参考基准期为2015–2024年RCP4.5情景下均值。总体来看,G3情景在实施SAI期间表现出对温度升高的显著抑制效应,且终止施加后引发迅速的气候响应。在实施期间(2020–2069年),G3情景下的TAS始终控制在基准期0.6℃以内,而RCP4.5情景则在同一时期逐渐升温至约2.5℃。此外,TASMAX与TASMIN的变化趋势与TAS高度一致,两情景之间的差值在实施期间持续维持,进一步反映出SAI对不同温度层次的同步调控能力。然而,2070年地球工程的突然终止带来了显著气候反弹效应。G3情景中TAS、TASMAX与TASMIN在终止后短短3–5年内迅速回升,并在2075年前后迅速逼近,甚至略微超过RCP4.5情景的气温水平,体现出强烈的“终止冲击”特征。这种快速升温可能导致极端气候事件频率与强度的急剧

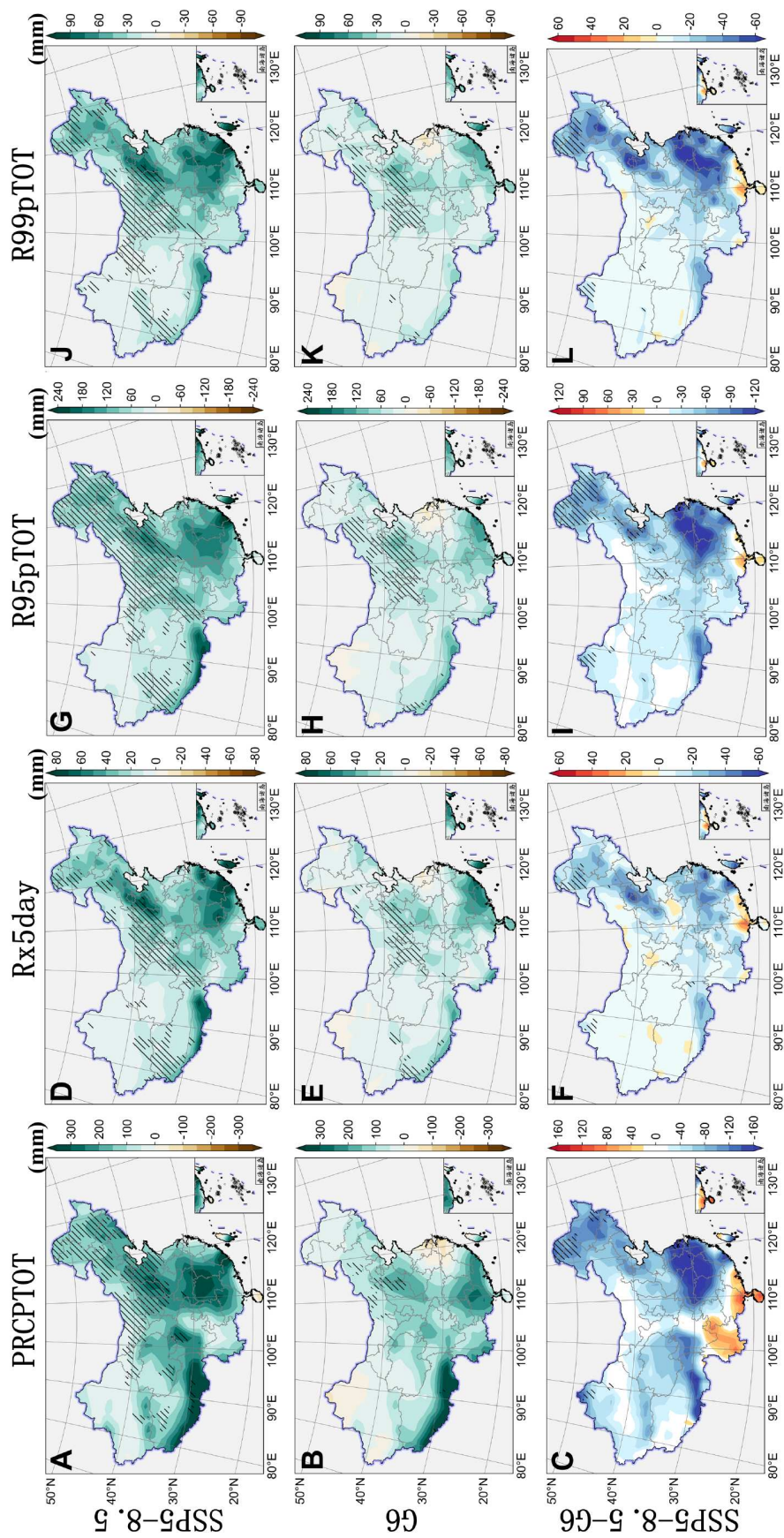


图8 对中国区域极端降水指数PRCPTOT、Rx5day、R95pTOT与R99pTOT合成分析。21世纪末(2085–2094年)SSP5-8.5、G6sulfur相对于基准值(SSP5-8.5情境下2015–2024年集合平均值)极端降水指数在中国区域的空间合成分析及两者之差。(A–C) 年累积降水量(PRCPTOT); (D–F) 最大连续5日降水量(Rx5day); (G–I) 强降水日降水总量(R95pTOT); (J–L) 极端强降水日降水总量(R99pTOT)。阴影区域表示通过90%的Welch- t 显著性检验

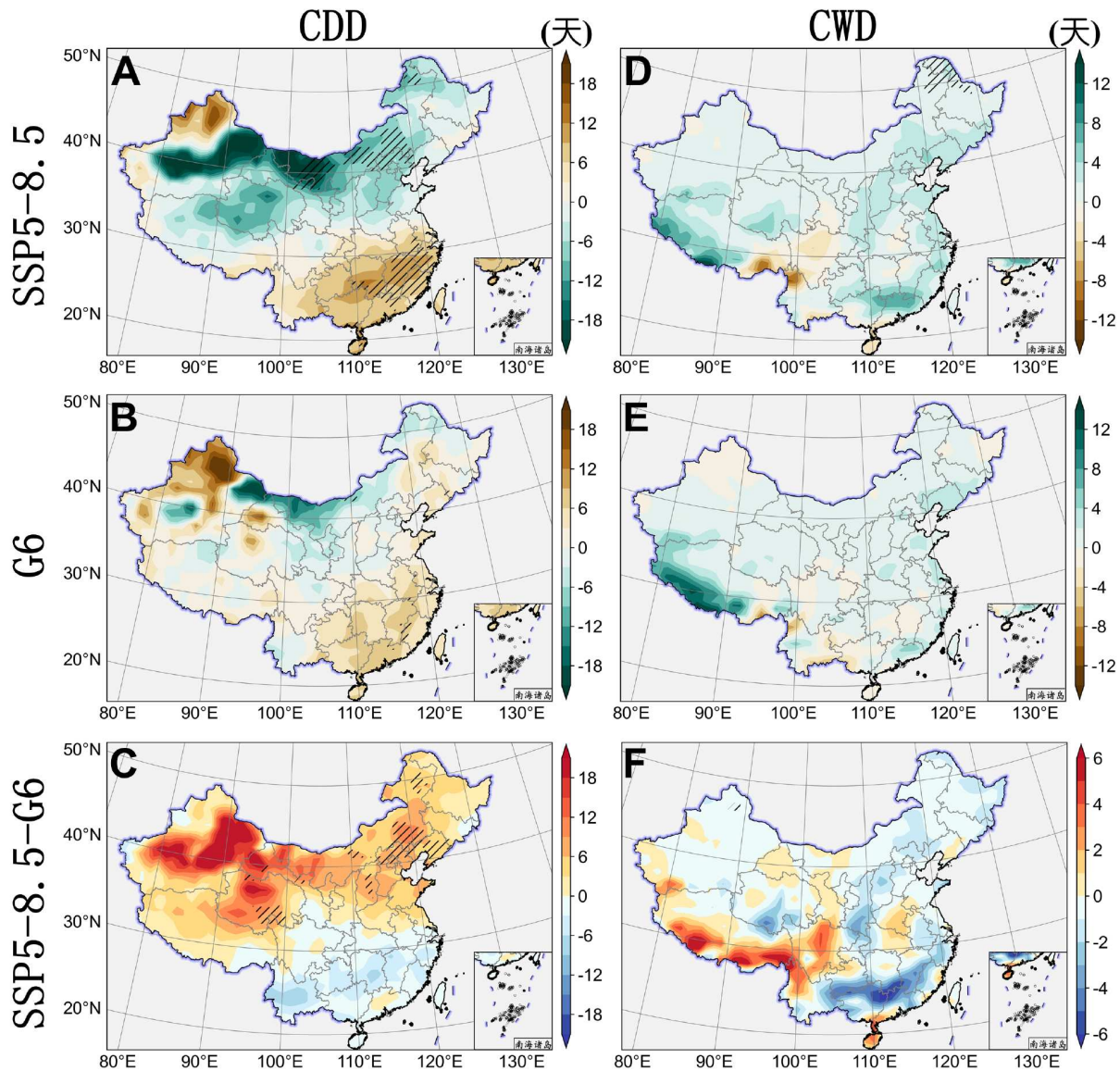


图9 对中国区域极端温度指数CDD与CWD合成分析。21世纪末(2085–2094年)SSP5-8.5、G6sulfur相对于基准值(SSP5-8.5情境下2015–2024年集合平均值)极端降水指数在中国区域的空间合成分析及两者之差。(A–C) 连续干旱日数(CDD); (D–F) 连续湿润日数(CWD)。阴影区域表示通过90%的Welch- t 显著性检验

跃升。值得注意的是，两情景在终止前后的气温上限均未超过+3℃，表明在RCP4.5情境下整体升温幅度相对受控。与温度变量相比，降水的变化幅度明显较小：在G3与RCP4.5两种情景中，降水变化整体较为平稳，未呈现出终止后明显的突变特征，说明SAI主要通过调节辐射强迫影响热量收支，而对降水的直接干预能力相对有限。总体来看，SAI终止将迅速抹去此前积累的降温效应，导致中国区域气温在短时间内发生剧烈反弹，而降水系统则表现出更强的稳定性与惯性。

图11展示了RCP4.5与G3情景下2015–2100年中国区域6个极端温度指数(TN_n、TX_x、FD、SU、TN10p、

TX90p)的逐年距平变化趋势，基准期为RCP4.5情景下的2015–2024年均值。通过与图10的平均气温变化相对照可见，极端温度事件对SAI终止的响应速度更快、波动幅度更大。在G3情景实施期间，大多数极端温度指数的变化趋势被有效抑制。例如，TN_n在RCP4.5下逐步升高，至21世纪末增幅接近4℃，而G3情景在试验期间仅有小幅增加，终止后仅用约1年便迅速回升至RCP4.5水平。TX_x的响应更为剧烈：在G3试验期间几乎无显著升温，但在终止后两年内迅速上升至RCP4.5水平，且2075–2080年间甚至略高于RCP4.5，反映出极端高温事件对SAI终止尤为敏感。FD与SU进一步验证了终止带来的突变特征。

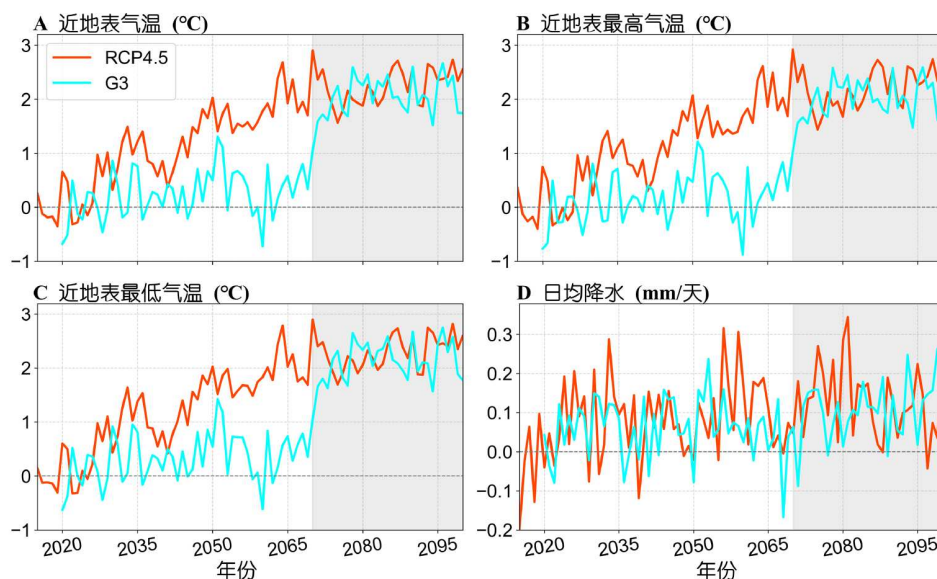


图10 中国区域未来逐年气温与降水变化(基于RCP4.5与G3情景)。RCP4.5和G3情景下2015–2100年中国区域近地表气温(A)、近地表最高气温(B)、近地表最低气温(C)、日均降水(D)与RCP4.5情景在2015–2024年基准期的距平值。红线表示RCP4.5情景的多模式集合平均, 蓝线表示G3情景的多模式集合平均, 阴影区域表示2070年终止SAI试验后结果

RCP4.5下FD逐年下降至-18天附近趋于平稳, G3试验期间降幅缓慢, 仅达-5天, 终止后4年内迅速收敛至RCP4.5值; SU在RCP4.5下至2060年增长约15天后趋于稳定, G3试验期间变化几乎没有变化, 但在终止后2年内迅速升高, 甚至在2075–2080年间一度高于RCP4.5, 达到18天以上, 表明极端高温频次在短时间内剧烈反弹。基于百分位阈值的极端事件频率指标亦表现出类似响应。TN10p在RCP4.5下于2050年前后变化约-6%, G3试验期间基本保持稳定, 终止后在3年内迅速降低至RCP4.5水平。TX90p的响应路径与SU高度一致, 终止后2年内快速上升至RCP4.5水平, 并在短期内略有超出, 证明地球工程终止可能带来一定的热浪风险。

此外, 降水相关的极端指标在G3情景中整体表现为波动性较大、趋势不稳定, 这与图10中日均降水变化幅度较小相一致。G3终止后, 极端降水指数并未如温度变量般出现快速剧烈反应, 显示出水分循环对SAI终止的响应较为缓慢且受控(图S4)。总体来看, 相较于平均气候状态, 极端温度事件对SAI终止的响应更为剧烈和迅速, 表现出短期内的非线性跃升, 尤其在极端高温频次和强度方面最为明显。这一现象揭示了地球工程在终止后对极端事件管理风险的高度敏感性, 强调了其在设计、执行及退出机制上的科学审慎性需求。

4 总结与讨论

本研究基于CMIP5和CMIP6与GeoMIP框架下的

G6sulfur和G3试验模拟数据, 系统评估了2015–2100年间SAI气候工程对中国区域极端气候事件的影响特征, 特别聚焦于其减缓效应与终止冲击效应。首先, 基础气候态分析显示, 中国区域年均气温呈现“南高北低、西低东高”的典型分布格局; 降水则表现为“东南多、西北少”的强烈空间差异。SAI地球工程在G6sulfur情景下有效抑制了背景气温的快速上升趋势, 至21世纪末将中国区域的升温幅度控制在+3.2 °C以内, 显著低于SSP5-8.5情景下的+6.3 °C。其次, 极端温度事件分析表明, SAI可明显缓解中国区域极端高温和低温事件的频率与强度增长趋势。在TXx、SU、TX90p三种高温类指标中, G6sulfur情景下的增幅相较SSP5-8.5情景下分别降低49%、45%、44%; TNn、FD、TN10p三种寒冷类指标分别增加37%、46%、32%, 证明地球工程的实施亦保留了部分极端低温事件的自然波动性。空间分布分析显示, SAI在中国东部、南部和西南地区的调控效果尤为显著。另外, 极端降水事件分析显示, SAI工程可在一定程度上减缓中国区域年降水总量及极端强降水强度的上升趋势。PRCPTOT、Rx5day、R95pTOT和R99pTOT四个指标中, G6sulfur情景表现出明显的抑制效应, 相较SSP5-8.5分别降低45%、50%、54%、54%。空间分布显示其在东南沿海、东北和华北区域最为显著。同时, SAI对CDD和CWD等干湿持续性指标的调节能力相对有限, 但呈现出明显的南北空间分异。最后, 终止冲击评估显示, 在RCP4.5背景下, G3试验的SAI实施期间成功压制了气温升高趋势, 但一

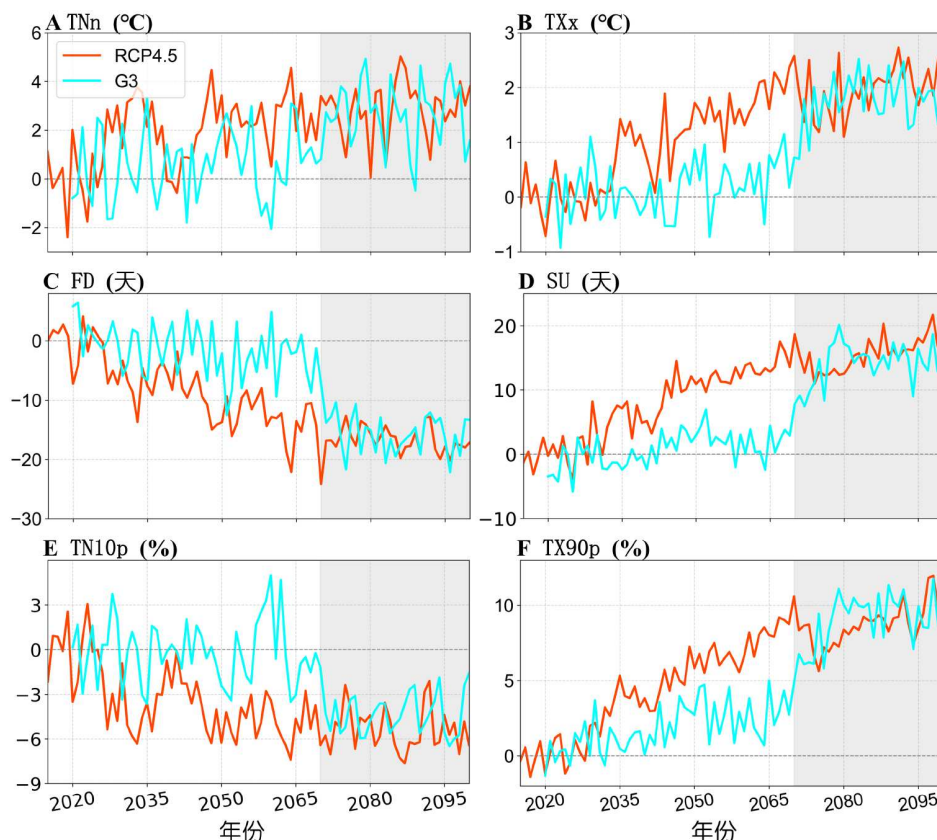


图11 中国区域未来逐年极端温度指数的变化(基于RCP4.5与G3情景)。RCP4.5和G3情景下2015–2100年中国区域TNn(A)、TXx(B)、FD(C)、SU(D)、TN10p(E)、TX90p(F)极端温度指数与RCP4.5情景在2015–2024年基准期的距平值。红线表示RCP4.5情景的多模式集合平均, 蓝线表示G3情景的多模式集合平均, 阴影区域表示2070年终止SAI试验后的结果

且在2070年终止注入, 将导致中国区域在3–5年内迅速恢复至无干预情景水平, 极端温度指数甚至出现短期“过冲”现象。综上, SAI地球工程在调节极端气候风险方面具有积极效应, 但其终止可能带来的强烈气候跃变亦需高度警惕。

值得注意的是, 本研究所使用G3与G6sulfur试验模拟均采用在赤道上空实施SAI, 但已有研究表明, 不同注入纬度与高度的选择将显著影响区域气候响应。例如, 将气溶胶注入至不同平流层层位或在北半球中纬度注入, 可能对全球不同位置的气候产生非对称影响(Jiang等, 2024)。这种空间施加方式的不确定性表明未来研究需更细致评估不同注入策略对中国区域气候的影响。需要指出的是, 由于本研究的G3分析仅基于IPSL-CM5A-LR单一模式, 其区域细节结果可能存在模式依赖性, 因此相关结论需谨慎解读, 未来仍需多模式模拟来验证其稳健性。为此, 本研究下一步将以CESM地球系统模式为基础开展系列敏感性试验, 针对中国及全球不同区域设置更精细的注入方案并结合高时空分辨率输出, 旨在深入解析局地物理机制与海气陆耦合过程。另外, 新近研究提

出将铝土、方解石等固体颗粒作为硫酸盐气溶胶的替代物参与SRM。模拟结果显示, 这些颗粒可减少平流层加热效应约70%, 降低对高空辐射散射约40%, 并有潜力将臭氧层破坏风险降低至 $\pm 14\%$ 的可控范围(Vattioni等, 2025)。尽管固体颗粒在大气寿命、凝结行为等方面仍存在技术挑战, 但其在安全性与环境兼容性方面展现出一定优势, 值得未来深入评估。

SAI本质上是一种全球性气候干预技术, 其实施、监管与终止涉及地缘政治、跨国治理与伦理公平等诸多议题(Wang等, 2024)。一方面, 与碳捕集等其他气候工程手段相比, SAI的技术门槛较低且实施成本相对有限(Smith, 2020; Huynh和McNeill, 2024), 因此可能诱发“单边行为”风险; 另一方面, 终止冲击效应的全球外溢性要求建立跨国协调机制与信息透明体系。当前地球工程相关政策框架仍较为薄弱, 全球层面尚缺乏明确的“进入-实施-退出”路径设计。对于中国而言, 加强地球工程研究不仅有助于系统评估本国潜在风险, 也有助于在国际气候治理和谈判中增强话语权(曹龙, 2019b)。在未来研究中, 除继续推进多模式模拟和情景评估外, 还可在

充分论证与风险可控的前提下，探索开展小尺度外场试验，以更深入理解其作用机理和环境效应，并在国际前沿研究与规则制定中发挥积极引领作用。

致谢 复旦大学朴世杰同学、南京信息工程大学杨以坤老师在文章构思、撰写方面提供了帮助，谨此一并致谢。

补充材料 补充材料为作者提供的原始数据，作者对其学术质量和内容负责，详见网络版(<http://earthcn.scichina.com>)。

参考文献

- 曹龙. 2019a. CMIP6地球工程模式比较计划(GeoMIP)概况与评述. 气候变化研究进展, 15: 487–492
- 曹龙. 2019b. 小规模平流层注入气溶胶实验有助于地球工程研究. 科学通报, 64: 2386–2389
- 吕佳婴, 宋长青, 高怡凡, 等. 2025. 1.5°C全球气候主张对中国土地系统长期影响的模拟与分析. 中国科学: 地球科学, 55: 468–484
- 孙军, 张福青. 2017. 中国日极端降水和趋势. 中国科学: 地球科学, 47: 1469–1482
- 赵志强, 李双成, 刘逢媛. 2008. 中国气候系统复杂性及其地域差异. 气候与环境研究, 13: 31–38
- Asutosh A, Tilmes S, Bednarz E M, et al. 2025. South Asian Summer Monsoon under stratospheric aerosol intervention. *npj Clim Atmos Sci*, 8: 3–9
- Aswathy V N, Boucher O, Quaas M, et al. 2015. Climate extremes in multi-model simulations of stratospheric aerosol and marine cloud brightening climate engineering. *Atmos Chem Phys*, 15: 9593–9610
- Barnes E A, Hurrell J W, Sun L. 2022. Detecting changes in global extremes under the GLENS-SAI climate intervention strategy. *Geophys Res Lett*, 49: e2022GL100198
- Berdahl M, Robock A, Ji D, et al. 2014. Arctic cryosphere response in the Geoengineering Model Intercomparison Project G3 and G4 scenarios. *J Geophys Res-Atmos*, 119: 1308–1321
- Bevacqua E, Schleussner C F, Zscheischler J. 2025. A year above 1.5 °C signals that Earth is most probably within the 20-year period that will reach the Paris Agreement limit. *Nat Clim Chang*, 15: 262–265
- Boretta A. 2024. Reassessing the cooling that followed the 1991 volcanic eruption of Mt. Pinatubo. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 256: 106187
- Caldeira K, Bala G, Cao L. 2013. The science of geoengineering. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 41: 231–256
- Chen F, Yuan Y, Wei W, et al. 2014. Tree-ring based temperature reconstruction for the west Qinling Mountains (China): Linkages to the High Asia, solar activity and Pacific-Atlantic Ocean. *Geochronometria*, 41: 234–244
- Crutzen P J. 2006. Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma? *Clim Change*, 77: 211
- Duffey A, Henry M, Smith W, et al. 2025. Low-altitude high-latitude stratospheric aerosol injection is feasible with existing aircraft. *Earths Future*, 13: e2024EF005567
- Feng Z Q, Tan M L, Juneng L, et al. 2025. Effects of solar radiation modification on precipitation extremes in Southeast Asia: Insights from the GeoMIP G6 experiments. *Adv Clim Change Res*, 16: 591–605
- Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones M W, et al. 2025. Global carbon budget 2024. *Earth Syst Sci Data*, 17: 965–1039
- Gao P, Gao Y, Ou Y, et al. 2025. Heterogeneous pressure on croplands from land-based strategies to meet the 1.5 °C target. *Nat Clim Chang*, 15: 420–427
- Grasso M. 2022. Legitimacy and procedural justice: How might stratospheric aerosol injection function in the public interest? *Hum Soc Sci Commun*, 9: 187
- Haywood J M, Jones A, Jones A C, et al. 2023. Climate intervention using marine cloud brightening (MCB) compared with stratospheric aerosol injection (SAI) in the UKESM1 climate model. *Atmos Chem Phys*, 23: 15305–15324
- Henry M, Bednarz E M, Haywood J. 2024. How does the latitude of stratospheric aerosol injection affect the climate in UKESM1? *Atmos Chem Phys*, 24: 13253–13268
- Huynh H N, McNeill V F. 2024. The potential environmental and climate impacts of stratospheric aerosol injection: A review. *Environ Sci-Atmos*, 4: 114–143
- IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al., eds. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- Irvine P J, Kravitz B, Lawrence M G, et al. 2016. An overview of the Earth system science of solar geoengineering. *WIREs Clim Change*, 7: 815–833
- Irvine P J, Keith D W. 2020. Halving warming with stratospheric aerosol geoengineering moderates policy-relevant climate hazards. *Environ Res Lett*, 15: 044011
- Jarvis A, Forster P M. 2024. Estimated human-induced warming from a linear temperature and atmospheric CO₂ relationship. *Nat Geosci*, 17: 1222–1224
- Jiang J, Cao L, MacMartin D G, et al. 2019. Stratospheric sulfate aerosol geoengineering could alter the high-latitude seasonal cycle. *Geophys Res Lett*, 46: 14153–14163
- Jiang J, Xia Y, Cao L, et al. 2024. Different strategies of stratospheric aerosol injection would significantly affect climate extreme mitigation. *Earths Future*, 12: e2023EF004364
- Jones A, Haywood J M, Jones A C, et al. 2021. North Atlantic Oscillation response in GeoMIP experiments G6solar and G6sulfur: Why detailed modelling is needed for understanding regional implications of solar radiation management. *Atmos Chem Phys*, 21: 1287–1304
- Jones A, Haywood J M, Scaife A A, et al. 2022. The impact of stratospheric aerosol intervention on the North Atlantic and Quasi-Biennial Oscillations in the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP) G6sulfur experiment. *Atmos Chem Phys*, 22: 2999–3016
- Keys P W, Barnes E A, Diffenbaugh N S, et al. 2022. Potential for perceived failure of stratospheric aerosol injection deployment. *Proc Natl Acad Sci USA*, 119: e2210036119
- Klein-Tank A M G, Zwiers F W, Zhang X. 2009. Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation. Technical Report. Geneva: World Meteorological Organization. Available from: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9419
- Li J, Wang S, Zhu J, et al. 2025. Accelerated shifts from heatwaves to heavy rainfall in a changing climate. *npj Clim Atmos Sci*, 8: 214
- Liang J, Haywood J. 2023. Future changes in atmospheric rivers over East Asia under stratospheric aerosol intervention. *Atmos Chem Phys*, 23: 1687–1703
- Liu Z, Lang X, Miao J, et al. 2023. Impact of stratospheric aerosol injection on the East Asian winter monsoon. *Geophys Res Lett*, 50: e2022GL102109
- MacMartin D G, Vioni D, Kravitz B, et al. 2022. Scenarios for modeling solar radiation modification. *Proc Natl Acad Sci USA*, 119: e2202230119
- Narenpitak P, Kongkulsiri S, Tomkratoke S, et al. 2024. Regional impacts of solar radiation modification on surface temperature and precipitation in

- Mainland Southeast Asia and the adjacent oceans. *Sci Rep*, 14: 22713–22717
- O'Neill B C, Tebaldi C, van Vuuren D P, et al. 2016. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci Model Dev*, 9: 3461–3482
- Nimusiima A, Ayesiga G, Odongo R I, et al. 2025. Implications of solar radiation modification on rainfall and temperature patterns over Eastern Africa. *Atmosphere*, 16: 646
- Parker A, Irvine P J. 2018. The risk of termination shock from solar geoengineering. *Earths Future*, 6: 456–467
- Rezaei A, Karami K, Tilmes S, et al. 2023. Changes in global teleconnection patterns under global warming and stratospheric aerosol intervention scenarios. *Atmos Chem Phys*, 23: 5835–5850
- Sillmann J, Kharin V V, Zhang X, et al. 2013. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate. *J Geophys Res-Atmos*, 118: 1716–1733
- Smith W. 2020. The cost of stratospheric aerosol injection through 2100. *Environ Res Lett*, 15: 114004
- Stankovic T, Hovi J, Skodvin T. 2023. The Paris Agreement's inherent tension between ambition and compliance. *Hum Soc Sci Commun*, 10: 550–556
- Suarez-Gutierrez L, Müller W A, Marotzke J. 2023. Extreme heat and drought typical of an end-of-century climate could occur over Europe soon and repeatedly. *Commun Earth Environ*, 4: 411–415
- Sun H, Bourguet S, Luan L, et al. 2024. Stratospheric transport and tropospheric sink of solar geoengineering aerosol: A Lagrangian analysis. *npj Clim Atmos Sci*, 7: 115–119
- Sun W, Wang B, Chen D, et al. 2020. Global monsoon response to tropical and Arctic stratospheric aerosol injection. *Clim Dyn*, 55: 2107–2121
- Tang A, Kemp L. 2021. A fate worse than warming? Stratospheric aerosol injection and global catastrophic risk *Front Clim*, 3: 720312
- Tye M R, Dagon K, Molina M J, et al. 2022. Indices of extremes: Geographic patterns of change in extremes and associated vegetation impacts under climate intervention. *Earth Syst Dynam*, 13: 1233–1257
- Vattioni S, Peter T, Weber R, et al. 2025. Injecting solid particles into the stratosphere could mitigate global warming but currently entails great uncertainties. *Commun Earth Environ*, 6: 132
- Visioni D, Robock A, Haywood J, et al. 2024. G6-1.5K-SAI: A new Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP) experiment integrating recent advances in solar radiation modification studies. *Geosci Model Dev*, 17: 2583–2596
- Wang D, Fang Y. 2024. Global climate governance inequality unveiled through dynamic influence assessment. *npj Clim Action*, 3: 1–6
- Wang O, Liang J, Gu Y, et al. 2024. Projected future changes in extreme precipitation over China under stratospheric aerosol intervention in the UKESM1 climate model. *Atmos Chem Phys*, 24: 12355–12373
- Wells A F, Henry M, Bednarz E M, et al. 2024. Identifying climate impacts from different stratospheric aerosol injection strategies in UKESM1. *Earths Future*, 12: e2023EF004358
- Xu F, Qu Y, Bento V A, et al. 2024. Understanding climate change impacts on drought in China over the 21st century: A multi-model assessment from CMIP6. *npj Clim Atmos Sci*, 7: 32
- Yue C, Jevrejeva S, Qu Y, et al. 2023. Thermosteric and dynamic sea level under solar geoengineering. *npj Clim Atmos Sci*, 6: 135–138
- Zhang B, Wang S, Slater L. 2024. Anthropogenic climate change doubled the frequency of compound drought and heatwaves in low-income regions. *Commun Earth Environ*, 5: 715–718
- Zhang X, Alexander L, Hegerl G C, et al. 2011. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *WIREs Clim Change*, 2: 851–870
- Zhao M, Cao L. 2022. Regional response of land hydrology and carbon uptake to different amounts of solar radiation modification. *Earths Future*, 10: e2022EF003288

(责任编辑: 吕健)