

孔锋, 孙劭, 王品, 等. 地球工程对中国未来降雨时空分异格局的潜在影响(2010–2099)[J]. 灾害学, 2018, 33(4): 99–107, 121. [KONG Feng, SUN Shao, WANG Pin, et al. Study on the potential impact of geoengineering on the spatial and temporal pattern of future rainfall in China from 2010 to 2099[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(4): 99–107, 121. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.04.018.]

地球工程对中国未来降雨时空分异格局的 潜在影响(2010–2099)*

孔 锋^{1,2,3}, 孙 劭⁴, 王 品⁵, 王一飞²

(1. 清华大学 公共管理学院, 北京 100084; 2. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 3. 中亚大气科学研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830002; 4. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081; 5. 杭州师范大学 理学院, 浙江 杭州 311121)

摘 要:《巴黎协定》确定的1.5℃和2℃温控目标下,全球减排压力剧增,因此地球工程温控手段被多次讨论。针对地球工程中讨论最多的太阳辐射管理,基于BNU-ESM模式的地球工程(G4实验)和非地球工程(RCP4.5)两种情景,以2010–2099年中国日值降雨量数据对两种情景下的中国降雨量时空分布及其差异进行统计分析。结果表明:①在时间序列上,地球工程有利于中国整体降雨量的增加。2010–2099年和2020–2069年两种情景下的中国降雨量呈增加趋势,且2010–2099年地球工程情景下的降雨量增加趋势大于非地球工程,而2020–2069年两种情景下变化趋势的相差幅度不大。2070–2099年,地球工程实施结束后,地球工程情景下的降雨量呈增加趋势,而非地球工程呈减少趋势;七大地理分区的降雨量变化趋势在地球工程情景下高于非地球工程。②在空间格局上,不同研究时段在两种情景下的中国降雨量空间分布相似,仅面积分布有所不同。地球工程实施期间多数地区降雨量减少,地球工程结束后的2070–2099年降雨量明显显著。③2010–2099年地球工程情景下的降雨量呈增加趋势的面积多于非地球工程,尤其是2070–2099年地球工程实施结束后中国降雨量增加区域明显增多。降雨量波动特征在地球工程情景下相比非地球工程整体有所减小,地球工程情景下的中国降雨年际变化相对稳定。

关键词:地球工程; RCP4.5; 降雨变化; 区域差异; 气候变化

中图分类号: P642; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2018)04-0099-10

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.04.018

地球工程,也称气候工程^[1-3],是近年来气候变化领域最为关注的科学问题之一^[4-6]。地球工程分为碳移除(carbon dioxide removal, CDR)和太阳辐射管理(solar radiation management, SRM)两大类^[5,7-8]。CDR旨在通过包括海洋施肥、土地利用管理、二氧化碳的捕集封存与利用、生物质碳捕获(BECCS)等人工手段移除大气中的CO₂含量^[9]。相比SRM,CDR直接减少大气中的温室气体含量,在机理和技术上与传统减缓途径具有很多共性^[10]。SRM旨在通过影响太阳辐射为地球“直接降温”,主要包括平流层注射硫酸盐气溶胶(Stratospheric Aerosol Injection, SAI)、设置太空反射镜,以及海洋云层增白、屋顶涂白、沙漠绿化等改变地表反照率的方法技术^[11-15]。假如1.5℃甚至2℃目标越来越被证明难以实现,地球工程作为最直接的“人

工干预气候行为”,是否会被纳入气候行动框架^[16]?不少学者呼吁1.5℃目标下不要回避气候工程,但目前国内还很少有学者对此进行系统分析,国外有少数学者对此作了一些讨论^[17-21]。目前针对地球工程对区域天气气候事件的影响研究处于起步阶段,而且当前中国的工业化水平飞速提高,但是产业结构能耗高,排放量大^[22],同时又面临着比较严峻的减贫脱困任务,经济社会发展需求强烈,中国碳排放压力长期内很可能居高不下^[23]。《巴黎协定》温控目标下中国的减排压力也很可能进一步增大,地球工程国际讨论中将很难绕开“中国话题”。这种背景下,探讨地球工程对中国未来降雨的影响具有重要意义,但目前学界对此尚未开展相应研究。综上,本文正是基于这一背景,对采用SRM的地球工程下2010–2099

* 收稿日期: 2018-02-13 修回日期: 2018-05-14

基金项目: 国家重大科学研究计划(2015CB953603); 国家自然科学基金重大项目(71790611); 国家自然科学基金“智库研究项目”(71642005); 国家自然科学基金项目(41801064; 41701103; 41775078); 中国气象局气候变化专项项目(CCSF201843和CCSF201844); 中亚大气科学基金(CAAS201804)

第一作者简介: 孔锋(1986-),男,山西临汾人,博士,主要研究方向为气候变化与自然灾害. E-mail: kongfeng0824@foxmail.com

通讯作者: 孙劭(1989-),男,北京人,博士,主要研究方向为气候变化风险评估. E-mail: sunshao@cma.gov.cn

年中国降雨展开研究和对比分析,一方面诊断地球工程对区域降雨时空变化的可能影响,另一方面为未来中国气候变化风险防范和水资源规划与利用提供可能的决策支撑。

1 数据和方法

本文采用的中国地区的 2010–2009 年 $0.5 \times 0.5^\circ$ 非地球工程的日值降雨预估数据是 BNU–ESM($2.5^\circ \times 2.5^\circ$) 在 RCP4.5 情景下的通过统计降尺度得到的 125×105 个格网数据,其经度范围 $73.25^\circ \sim 135.25^\circ \text{E}$, 纬度范围是 $3.25^\circ \sim 53.75^\circ \text{N}$ 。该模式的观测强迫数据使用的是 1970 年 1 月 1 日至 1999 年 12 月 31 日,共计 30 年时段。地球工程的日值降雨预估数据则是在 2020 年 1 月 1 日至 2069 年 12 月 31 日进行的 G4 气候工程的试验即在大气平流层注射的硫酸盐气溶胶反射太阳辐射 (SAI 情景), 从而降低全球温度在 2070 年停止注射 (地球工程停止), 模式继续运行至 2099 年 12 月 31 日, 最后查看气候工程结束之后的降雨反应^[24]。

本文采用变化趋势、波动特征、图谱对比等方法对比中国整体和七个地理分区 (图 1) 的地球工程和非地球工程背景下的降雨量时空分布特征及其差异研究。七大地理分区是按照 Wang 等^[25] 和程雪蓉等^[26] 的方法, 根据区域气候的相似性特征, 同时结合地貌特点, 将中国划分为七个分区, 即北方地区 (N)、东北地区 (NE)、东南地区 (SE)、西北东部地区 (ENW)、西北西部地区 (WNW)、西藏地区 (Tibet) 和西南地区 (SW)。同时本文整体研究时段为 2010–2009 年, 地球工程实施阶段为 2020–2069 年, 近期、中期和远期分别为 2010–2039、2040–2069 和 2070–2099 年。本文中的近、中和远期的时间段依次是 2010–2039 年、2040–2069 年和 2070–2099 年。

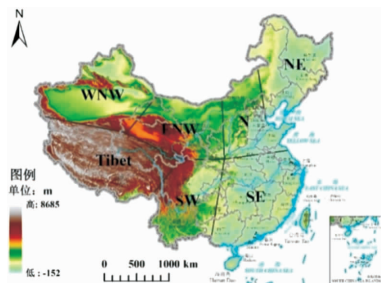


图 1 中国七大地理分区与数字高程

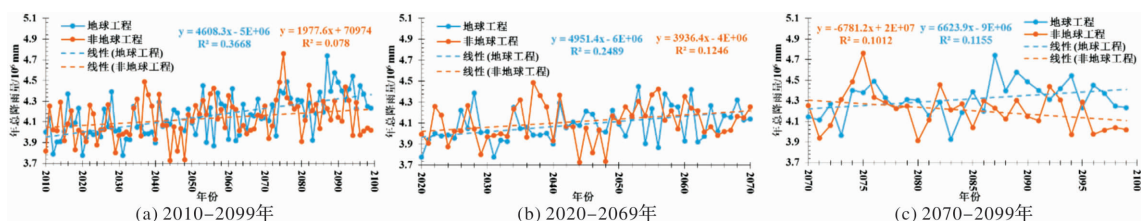


图 2 地球工程和非地球工程情景下中国降雨量时间序列对比

2 结果与分析

2.1 降雨量时间序列对比分析

从时间较长的 2010–2009 年来看, 地球工程和非地球工程情景下的中国年总降雨量均呈增加趋势 (图 2a), 但地球工程情景下的中国年总降雨量增加趋势明显大于非地球工程。这表明全球变暖背景下, 中等排放情景中的用于降雨的水汽充足, 当实施地球工程时, 大气中气溶胶凝结核增多, 有利于中国降雨事件的发生。从实施地球工程的 2020–2069 年来看, 地球工程和非地球工程情景下的中国年总降雨量也均呈增加趋势 (图 2b), 且地球工程情景下的中国年总降雨量增加幅度大于非地球工程, 但变化趋势的相差幅度不大。从地球工程实施结束后的 2070–2099 年来看, 地球工程情景下的中国年总降雨量在波动中呈现出增加趋势 (图 2c); 而非地球工程情景下的中国年总降雨量则呈现出减少趋势; 2070–2099 年两种情景下的年总降雨量对比表明, 地球工程有利于中国整体年总降雨量的增加。

从七大地理分区来看, 在 2010–2009 年, 除西北西部地区外, 其它六大地理分区的总降雨量在地球工程和非地球工程情景下均呈增加趋势, 且地球工程情景下的总降雨量的增加趋势均高于非地球工程 (图 3)。在 2020–2069 年, 西北东部、北方、东北、东南总降雨量在地球工程和非地球工程情景下均呈增加趋势 (图 4); 西北西部和西南地区的总降雨量在地球工程情景下呈减少趋势, 而在非地球工程情景下呈增加趋势; 西藏地区的总降雨量在地球工程情景下呈增加趋势, 而在非地球工程情景下呈减少趋势。通过对比发现, 西北东部、西藏和东南地区的总降雨量在地球工程情景下的变化趋势高于非地球工程, 而其它四个分区的总降雨量在地球工程情景下的变化趋势低于非地球工程。上述分析表明, 地球工程实施阶段总降雨量在不同地区表现出不同程度的变化趋势, 相比 2010–2009 年总降雨量的变化趋势而言, 地球工程对不同地区降雨的影响开始显现。在地球工程实施结束后的 2070–2099 年, 除西北东部总降雨量外, 其它六个分区总降雨量在地球工程情景下呈增加趋势 (图 5)。除西藏总降雨量外, 其它六个分区总降雨量在非地球工程情景下呈减少趋势。通过对比发现, 七大地理分区的总降雨量的变化趋势在地球工程情景下均高于非地球工程。这进一步表明地球工程结束后的总降雨量高于非地球工程。

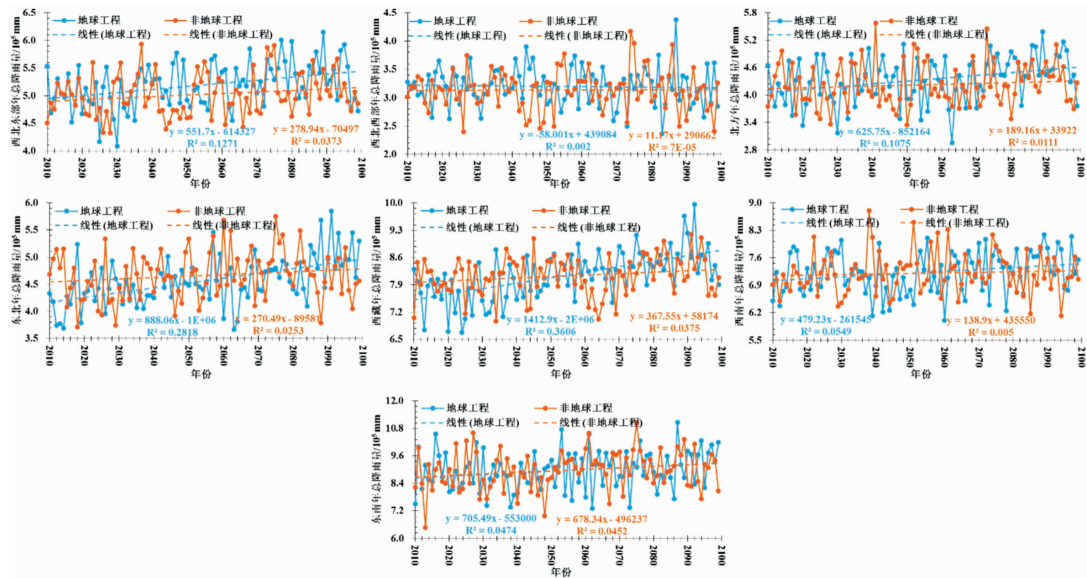


图3 地球工程和非地球工程情景下中国七大地理分区降雨量时间序列对比(2010-2099)

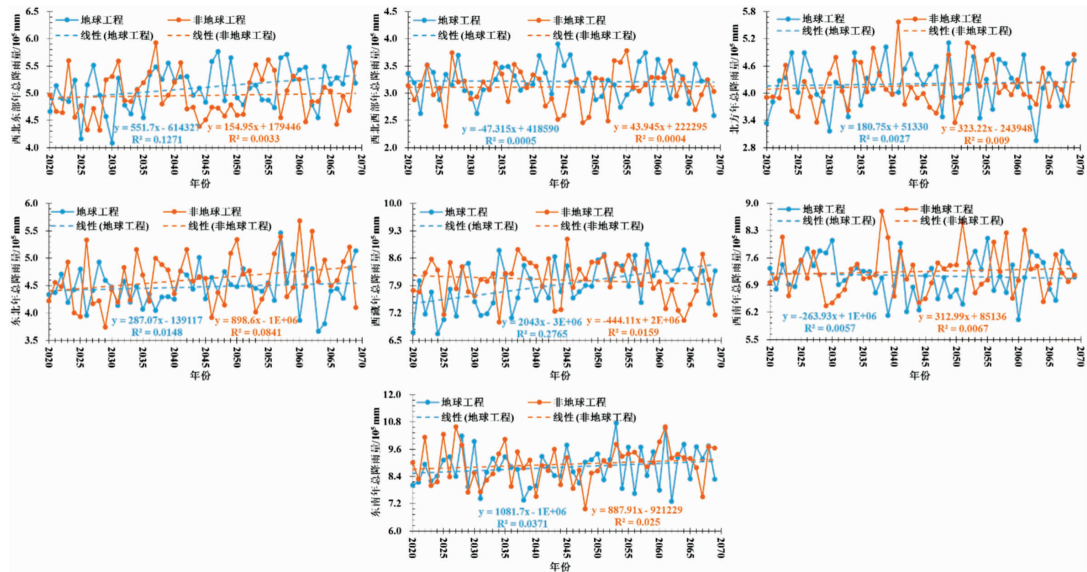


图4 地球工程期间中国七大地理分区降雨量时间序列对比(2020-2069)

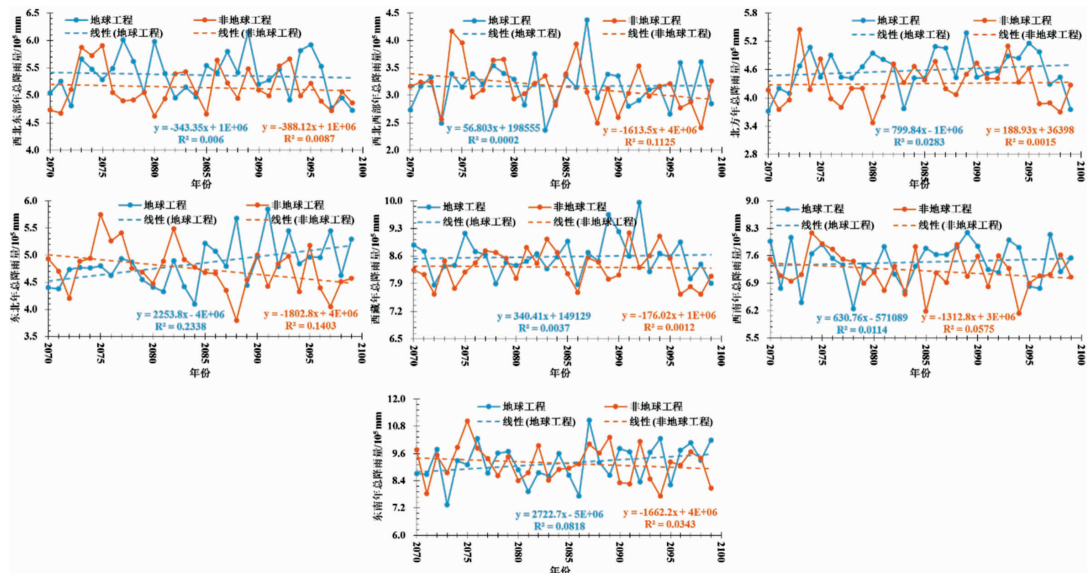


图5 地球工程期后中国七大地理分区降雨量时间序列对比(2070-2099)

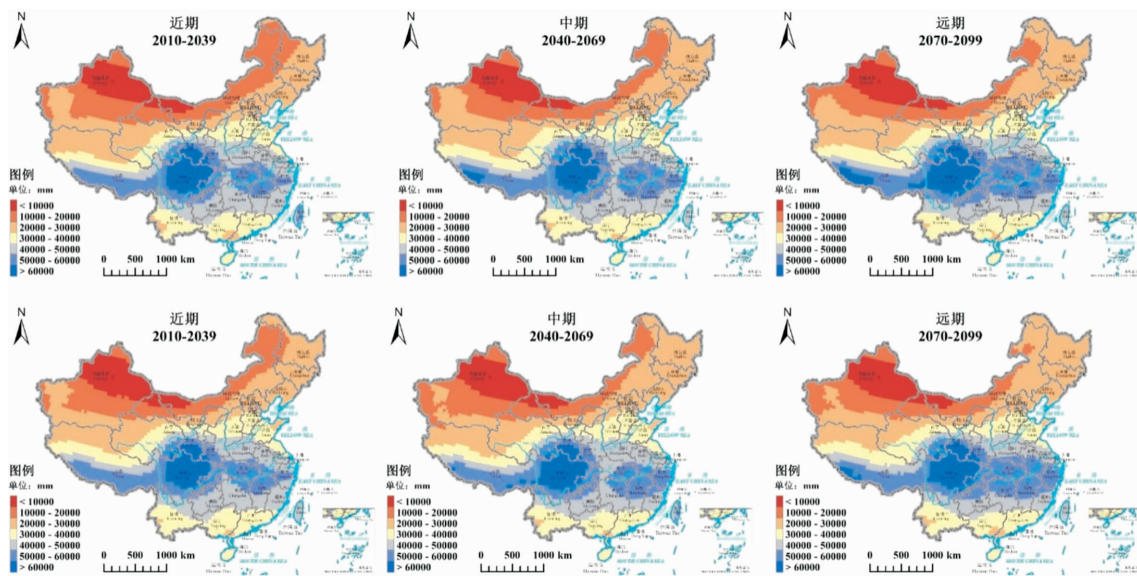


图6 地球工程(上行)和非地球工程(下行)情景下近中远期中国降雨量空间格局对比

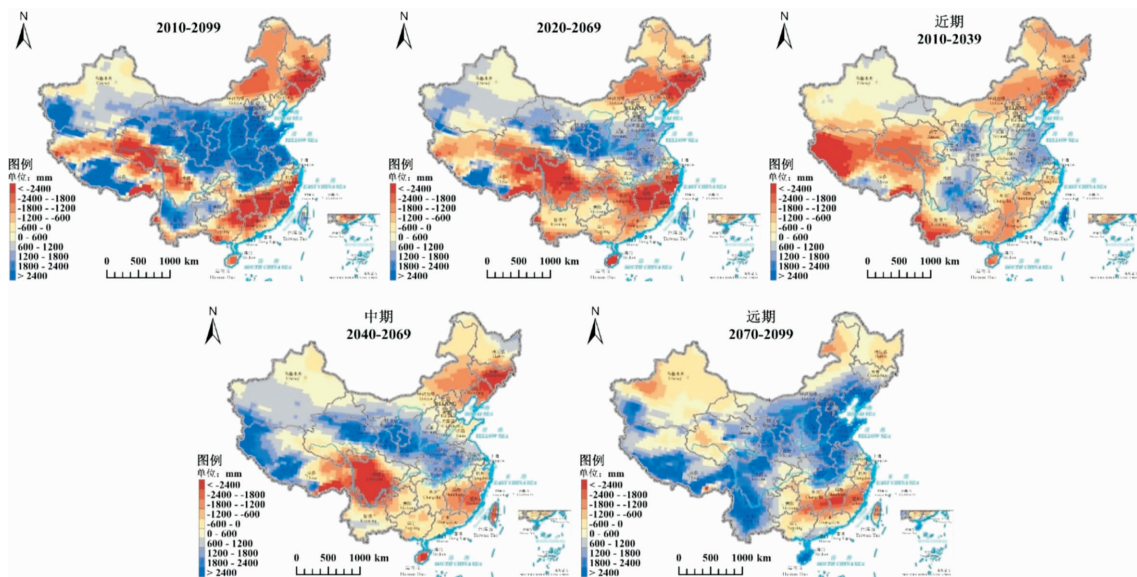


图7 地球工程和非地球工程情景下近中远期中国降雨量空间格局差异性

2.2 降雨量空间格局对比分析

从空间分布格局来看,地球工程和非地球工程情景下的近期(2010-2039年)、中期(2040-2069年)和远期(2070-2099年)的中国降雨量空间分布特征具有相似性,只是在不同等级降雨量分布面积上有不同差异(图6)。整体来看,四川大部及甘肃南部地区在两种情景下均是降雨量的高值分布区,长江流域降雨量次之。长江流域以南和以北地区的降雨量逐渐减少。地球工程和地球工程情景下的降雨量在近期、中期和远期对应的空间相关系数为0.71、0.65和0.61($n=3898$),均通过了0.01显著性水平的检验。从相关系数的差异可以看出,地球工程实施后,使得降雨量区域差异增大。

为了进一步定量诊断地球工程和非地球工程情景下的降雨差异,我们计算了相同研究时段地

球工程情景下的降雨量与非地球工程情景下的降雨量之差。从2010-2099年来看,东北及内蒙古东部、上海-广西西部一线的东南地区、西藏北部-青海南部-四川西部地区等主要为负值(图7),表明地球工程情景下,这些地区降雨量相比非地球工程情景下减少。而西藏南部、云南北部-贵州南部、长江中下游以北地区连绵至华北平原-黄土高原-内蒙古西部-新疆南部地区降雨量则主要以正值为主,表明气候工程在这些地区有利于降雨量的增加;同时值得注意的是以正值为主的地区正是我国水资源相对匮乏的地区,也是南水北调工程主要经过地区,地球工程的实施可能对此地区的水资源缺乏具有一定的缓解作用。从2020-2069年来看,实施地球工程阶段的中国降雨量空间分布与2010-2099年具有相似的格局,所不同的是相比2010-2099年、2020-2069年中

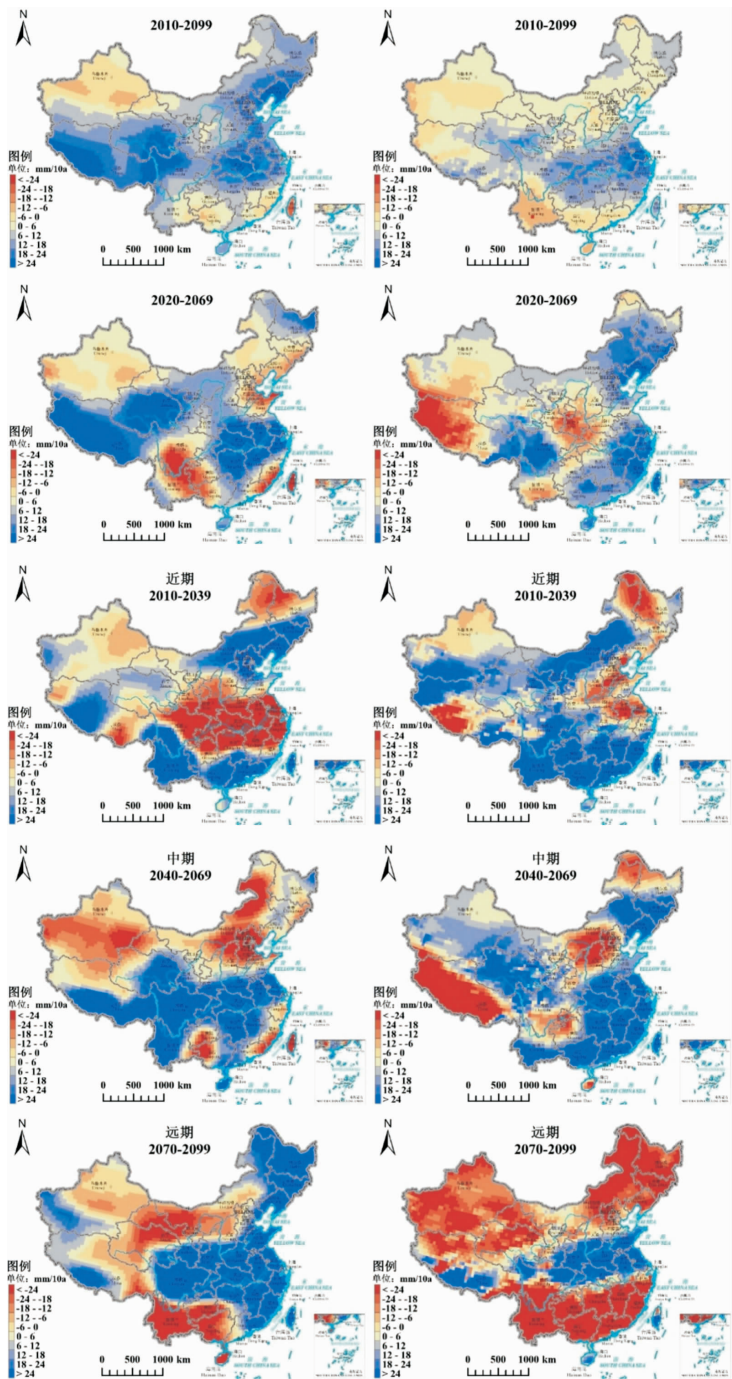


图8 地球工程(左)和非地球工程(右)情景下近中远期中国降雨量变化趋势空间格局对比

表1 地球工程和非地球工程情景下近中远期中国降雨量差异等级的格点数(百分比)

降雨量相差幅度	2010 – 2099 年	2020 – 2069 年	2010 – 2039 年	2040 – 2069 年	2070 – 2099 年
< – 2400	343(8.88%)	372(9.63%)	171(4.43%)	204(5.28%)	12(0.31%)
– 2400 ~ 1800	242(6.26%)	359(9.29%)	251(6.50%)	151(3.91%)	49(1.27%)
– 1800 ~ 1200	393(10.17%)	335(8.67%)	485(12.56%)	250(6.47%)	96(2.49%)
– 1200 ~ 600	383(9.91%)	496(12.84%)	789(20.42%)	350(9.06%)	243(6.29%)
– 600 ~ 0	284(7.35%)	519(13.44%)	622(16.10%)	752(19.47%)	807(20.89%)
0 ~ 600	427(11.05%)	546(14.13%)	840(21.74%)	677(17.53%)	692(17.91%)
600 ~ 1200	460(11.91%)	608(15.74%)	436(11.29%)	702(18.17%)	564(14.60%)
1200 ~ 1800	289(7.48%)	349(9.03%)	198(5.13%)	324(8.39%)	474(12.27%)
1800 ~ 2400	255(6.60%)	127(3.29%)	52(1.35%)	240(6.21%)	433(11.21%)
> 2400	787(20.37%)	152(3.93%)	19(0.49%)	213(5.51%)	538(13.93%)

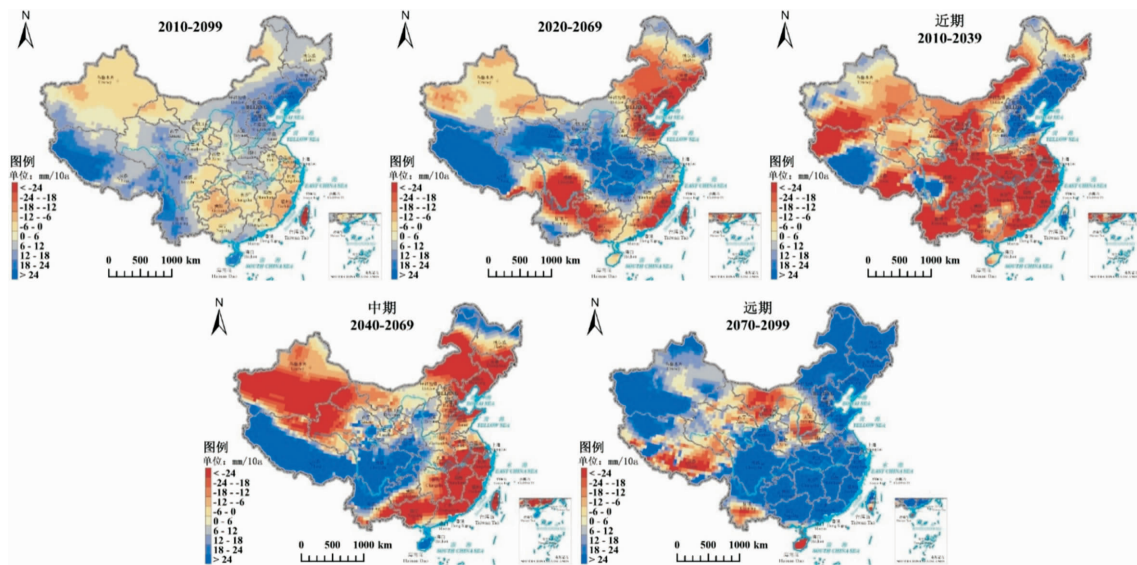


图9 地球工程和非地球工程情景下近中远期中国降雨量变化趋势空间格局差异性

国降雨量以负值为主的区域有所扩张，而正值区域则有所减少，表明地球工程实施期间在多数地区较大幅度上抑制了降雨事件的发生。从近期来看，宁夏及周边地区、四川东部-贵州、山东-江苏-安徽地区等主要是正值分布区；而西藏西部和北部-青海、云南南部、东北-内蒙古东部、广东西部-广西东部-湖南南部-江西地区是负值的主要分布区。从中期来看，西藏西部-北部、新疆南部、青海北部、黄土高原向东南连绵至长江以南地区、黑龙江东北等是正值的主要分布区。而辽宁-吉林-内蒙中东部、西藏东部-四川中部和东部、江西中部和南部-浙江东部和南部-福建-广东东部、台湾和海南等是负值的主要分布区。中期相比近期而言，正值分布区的面积大大扩张，且正负值的分布区域开始逐渐发生调整。进一步地，从远期来看，正值分布区面积进一步扩张，长江中下游以北连绵至华北平原和黄土高原、四川西部、青海北部、西藏北部、新疆西南等地均是正值的分布区。而负值分布区则主要分布在长江以南和珠江流域北部、内蒙古东北西部、新疆西北等地。对比远期与近期和中期结果可以发现，地球工程结束后的2070-2099年中国多数地区的降雨均有不同程度的增加，表明地球工程结束后的2070-2099年有利于降雨事件的发生。从地球工程与非地球工程情景下的降雨量格点数目差异来看，2010-2099、2020-2069、2010-2039、2040-2069和2070-2099年地球工程情景下的降雨量超过非地球工程的格点数占总格点数的百分比依次为57.42%、46.13%、39.99%、55.81%和69.92%（表1）。对比进一步发现，地球工程结束后的2070-2099年降雨量增加显著，明显高于其它四个时段。

2.3 降雨量变化趋势空间对比分析

从变化趋势空间格局来看，不同研究时段降

雨量变化趋势分布格局在两种情景下具有各自明显差异（图8）。2010-2099年地球工程情景下的降雨量变化趋势呈增加趋势的地区明显高于非地球工程。从2020-2069年实施地球工程期间和近期、中期和远期来看，两种情景下的变化趋势空间格局差异较大。进一步地，我们采用地球工程情景下的降雨量变化趋势与非地球工程情景下的降雨量变化趋势之差来诊断，结果发现2010-2099年期间西藏、青海东部、四川西部、云南、海南、环渤海的省份及其毗邻地区是降雨量趋势差异的正值主要集中区（图9）。2020-2069年地球工程实施期间长江中下游向西北连绵至黄土高原、青藏高原、东北北部均是降雨量趋势差异的正值主要集中区。而环渤海省份及其毗邻地区、福建-广东东部、四川、贵州南部-广西西部-云南北部等地均是降雨量趋势差异的负值主要集中区。从近期来看，除环渤海省份及其毗邻地区、四川西部-西藏东部、西藏中部等地是降雨量趋势差异的正值主要集中区外，其它地区大多以负值为主。从中期来看，除东北北部、山西、陕西向西南连绵至云南西部、西藏等地是降雨量趋势差异为正值的主要集中区外，其它地区均以负值为主。从远期来看，全国多数地区降雨量趋势差异为正，仅山西、陕西、内蒙古西部、甘肃中部、青海中部、西藏北部和东部为负值。从两种情景下降雨量变化趋势差异格点数目来看，2010-2099、2020-2069、2010-2039、2040-2069和2070-2099年地球工程情景下的降雨量变化趋势超过非地球工程的格点数占总格点数的百分比依次为72.54%、54.15%、30.82%、37.80%和80.65%（表2）。综上，地球工程实施结束后的2070-2099年整体上有利于降雨量的增加。

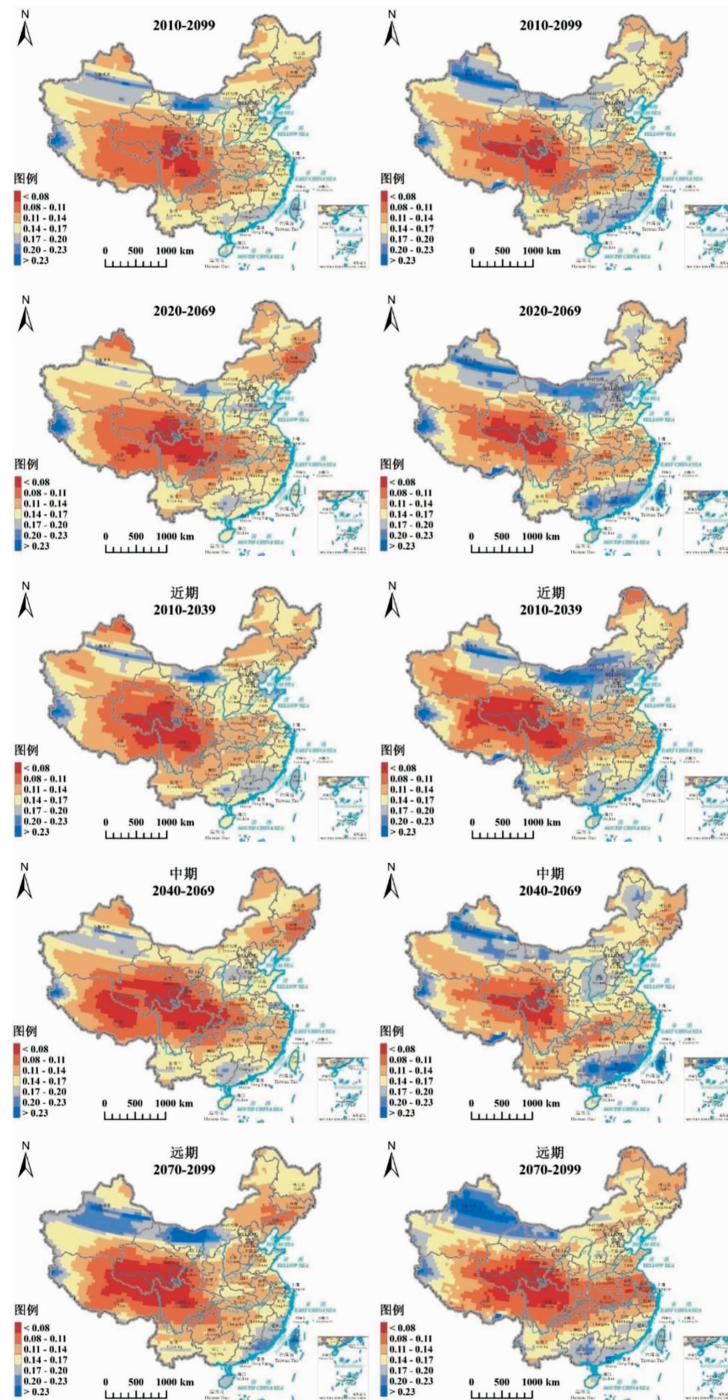


图 10 地球工程(左列)和非地球工程(右列)情景下近中远期中国降雨量波动特征空间格局对比

表 2 地球工程和非地球工程情景下近中远期中国降雨量变化趋势差异等级的格点数(百分比)

变化趋势相差幅度	2010-2099 年	2020-2069 年	2010-2039 年	2040-2069 年	2070-2099 年
< -24	13(0.34%)	430(11.20%)	1241(32.33%)	1242(32.35%)	124(3.23%)
-24 ~ 18	0(0.00%)	231(6.02%)	338(8.80%)	216(5.63%)	124(3.23%)
-18 ~ 12	7(0.18%)	240(6.25%)	421(10.97%)	380(9.90%)	119(3.10%)
-12 ~ 6	182(4.74%)	407(10.60%)	368(9.59%)	328(8.54%)	187(4.87%)
-6 ~ 0	852(22.19%)	452(11.77%)	288(7.50%)	222(5.78%)	189(4.92%)
0 ~ 6	830(21.62%)	382(9.95%)	341(8.88%)	233(6.07%)	206(5.37%)
6 ~ 12	968(25.21%)	451(11.75%)	230(5.99%)	253(6.59%)	374(9.74%)
12 ~ 18	553(14.40%)	311(8.10%)	122(3.18%)	126(3.28%)	257(6.69%)
18 ~ 24	295(7.68%)	276(7.19%)	79(2.06%)	143(3.72%)	254(6.62%)
> 24	139(3.62%)	659(17.17%)	411(10.71%)	696(18.13%)	2005(52.23%)

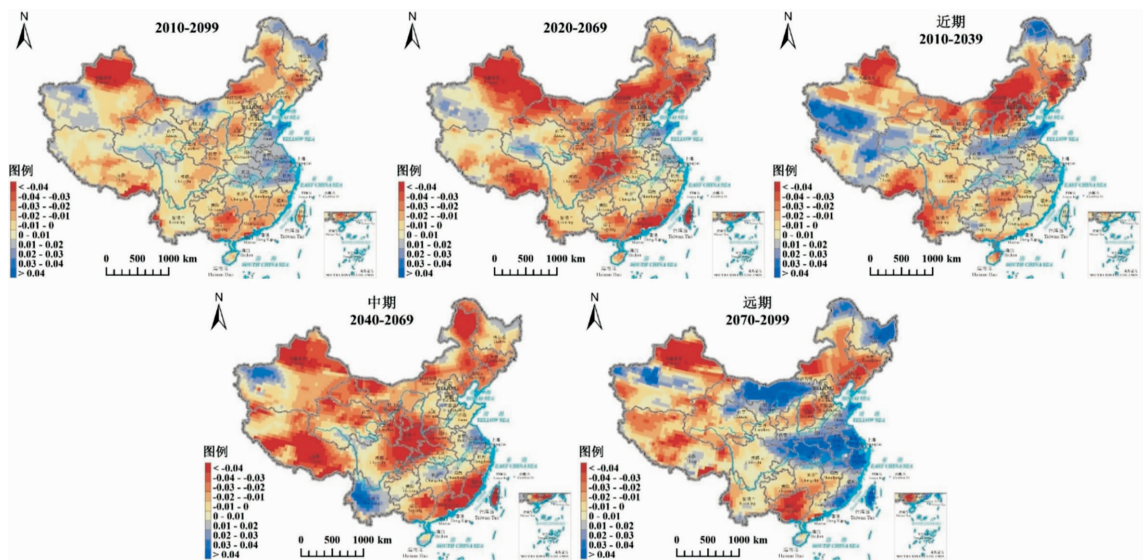


图 11 地球工程和非地球工程情景下近中远期中国降雨量波动特征空间格局差异性

表 3 地球工程和非地球工程情景下近中远期中国降雨量波动特征差异等级的格点数

波动特征相差幅度	2010 – 2099 年	2020 – 2069 年	2010 – 2039 年	2040 – 2069 年	2070 – 2099 年
< -0.04	181 (4.71%)	548 (14.27%)	355 (9.25%)	704 (18.34%)	299 (7.79%)
-0.04 ~ -0.03	108 (2.81%)	511 (13.31%)	241 (6.28%)	461 (12.01%)	254 (6.62%)
-0.03 ~ -0.02	255 (6.64%)	561 (14.61%)	442 (11.51%)	587 (15.29%)	382 (9.95%)
-0.02 ~ -0.01	733 (19.09%)	636 (16.57%)	497 (12.95%)	676 (17.61%)	606 (15.79%)
-0.01 ~ 0	1059 (27.59%)	633 (16.49%)	686 (17.87%)	571 (14.87%)	574 (14.95%)
0 ~ 0.01	800 (20.84%)	610 (15.89%)	607 (15.81%)	477 (12.43%)	584 (15.21%)
0.01 ~ 0.02	497 (12.95%)	260 (6.77%)	462 (12.03%)	213 (5.55%)	300 (7.81%)
0.02 ~ 0.03	174 (4.53%)	66 (1.72%)	321 (8.36%)	90 (2.34%)	302 (7.87%)
0.03 ~ 0.04	31 (0.81%)	14 (0.36%)	183 (4.77%)	47 (1.22%)	236 (6.15%)
> 0.04	1 (0.03%)	0 (0.00%)	45 (1.17%)	13 (0.34%)	302 (7.87%)

2.4 降雨量波动特征空间对比分析

从波动特征空间格局来看，不同研究时段地球工程和非地球工程情景下的降雨量波动特征空间分布特征大都类似，仅是降雨量不同强度波动在面积分布上略有差异(图 10)。通过对比可发现，地球工程情景下的降雨量波动高值区面积相比非地球工程有所减少。为了印证这一结论，我们进一步采用地球工程情景下的降雨量波动值与非地球工程情景下的降雨量波动值之差进行诊断。结果发现不同研究时段的波动特征区域差异各不相同。其中 2020 – 2069 年实施地球工程期间，全国多数地区波动差异均以负值为主(图 11)。2040 – 2069 年也表现出类似的波动差异特征。从两种情景下降雨量波动特征差异格点数目来看，2010 – 2099、2020 – 2069、2010 – 2039、2040 – 2069 和 2070 – 2099 年地球工程情景下的降雨量波动特征超过非地球工程的格点数占总格点数的百分比依次为 39.15%、24.75%、42.15%、21.88% 和 44.91% (表 3)。可见地球工程情景下不同时段降雨波动均比非地球工程情景下的小。这表明地球工程情景下的降雨年际变化相对稳定。

3 讨论与结论

3.1 讨论

地球工程作为人类干预气候的重要手段，在全球温控目标下具有重要的讨论意义^[27-29]。但目前学界对地球工程最为关注和担心的是，其影响可能打破原有的基于季风气候和天气系统的社会经济生活规律，从而产生弊大于利的影响。因此，基于气候模式对比分析地球工程和非地球工程情景下的气候差异具有十分重要的理论意义和科学实践意义。本文基于 BNU – ESM 模式探讨了地球工程和 RCP4.5 情景下的中国降雨时空差异特征。囿于数据限制，本文仅分析了单个模式数据对比结果。但今后仍需基于集合模式结果分析地球工程和非地球工程情景下的降雨变化差异。同时需要对两种情景下差异特征寻求可能的因果联系。

3.2 结论

(1)在时间上，2010 – 2099 年和 2020 – 2069 年地球工程和非地球工程情景下的中国年总降雨量均呈增加趋势，且 2010 – 2099 年地球工程情景下的增加趋势明显大于非地球工程，而 2020 –

2069 年两种情景下变化趋势的相差幅度不大。地球工程实施结束后的 2070–2099 年, 地球工程情景下的中国年总降雨量呈增加趋势, 而非地球工程则呈减少趋势; 七大地理分区的总降雨量的变化趋势在地球工程情景下均高于非地球工程。综合对比表明, 地球工程有利于中国整体年总降雨量的增加。

(2) 在空间上, 不同研究时段在两种情景下的中国降雨量空间分布相似, 仅在各等级面积上不同。四川大部及甘肃南部地区在两种情景下均是降雨量的高值分布区, 长江流域降雨量次之。长江流域以南和以北地区的降雨量逐渐减少。地球工程实施后, 降雨量区域差异变大。地球工程实施期间多数地区降雨量减少, 地球工程结束后的 2070–2099 年降雨量明显显著。

(3) 在变化趋势上, 两种情景下不同研究时段降雨量变化趋势空间分布具有各不相同的差异特征。整体上 2010–2099 年地球工程情景下的降雨量增加趋势面积多于非地球工程, 尤其是 2070–2099 年地球工程实施结束后中国降雨量增加区域明显增多。在波动特征上, 两种情景下在不同研究时段空间分布相似, 仅分布面积有差异。降雨量波动特征在地球工程情景下相比非地球工程整体有所减小, 地球工程情景下的中国降雨年际变化相对稳定。

参考文献:

- [1] Sillmann J, Lenton T M, Levermann A, et al. Climate emergencies do not justify engineering the climate [J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(4): 290–292.
- [2] LONG J C, Loy F, Morgan M G. Policy: start research on climate engineering. [J]. *Nature*, 2015, 518(7537): 29–31.
- [3] Kavazanjian E. Commentary: The Role of the geo-engineer in natural hazard mitigation [J]. *Hoppe – Seyler's Zeitschrift für physiologische Chemie*, 2006, 350(2): 1081–1087.
- [4] 潘家华. “地球工程”作为减缓气候变化手段的几个关键问题 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(5): 22–26.
- [5] 辛源. 地球工程的研究进展简介与展望 [J]. *气象科技进展*, 2016, 6(4): 30–36.
- [6] 陈迎, 辛源. 1. 5℃ 温控目标下地球工程问题剖析和应对政策建议 [J]. *气候变化研究进展*, 2017, 13(4): 337–345.
- [7] Fox T A, Chapman L. Engineering geo-engineering [J]. *Meteorological Applications*, 2015, 18(1): 1–8.
- [8] Waajen G, Van O F, Douglas G, et al. Geo-engineering experiments in two urban ponds to control eutrophication [J]. *Water Research*, 2016, 97(2): 69–82.
- [9] Moore J C, CHEN Y, CUI X, et al. Will China be the first to initiate climate engineering? [J]. *Earth's Future*, 2016, 4(12): 1–9.
- [10] Bürger G, Cubasch U. The detectability of climate engineering [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2016, 120(22): 238–243.
- [11] Rob B. A Sociotechnical Framework for governing climate engineering: [J]. *Science Technology & Human Values*, 2016, 41(2): 135–162.
- [12] Ömer ündül, Tuğrul A. On the variations of geo-engineering properties of dunites and diorites related to weathering [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(19): 1326–1337.
- [13] Baard P, Wikman – Svahn P. Do We Have a Residual Obligation to Engineer the Climate, as a Matter of Justice? [M]// *Climate Justice and Geoengineering: Ethics and Policy in the Atmospheric Anthropocene*. 2016.
- [14] Baatz O, Konrad C. Klimaethik: mitigation, adaptation and climate engineering: klimagerechtigkeit und klimaethik [J]. *Vanderbilt Journal of Transnational Law*, 2015, 44(7): 291–296.
- [15] Borland A M, Wullschlegel S D, Weston D J, et al. Climate – resilient agroforestry: physiological responses to climate change and engineering of crassulacean acid metabolism (CAM) as a mitigation strategy [J]. *Plant Cell & Environment*, 2015, 38(9): 1833–1840.
- [16] Heutel G, Morenacruz J, Ricke K. Climate Engineering Economics [J]. *Annual Review of Resource Economics*, 2016, 8(1): 1–13.
- [17] 孔锋, 孙劭, 史纬恒, 等. 气候工程对中国极端降雨强度的影响(2010–2099) [J]. *灾害学*, 2018, 33(2): 106–113.
- [18] 辛源, 潘家华. 认知气候工程: 气候主宰还是气候缓和? [J]. *中国软科学*, 2016, 31(12): 15–23.
- [19] 张莹, 陈迎, 潘家华. 气候工程的经济评估和治理核心问题探讨 [J]. *气候变化研究进展*, 2016, 12(5): 442–449.
- [20] Liu Z, Chen Y. Impacts, risks, and governance of climate engineering [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2015, 6(z1): 197–201.
- [21] 银森录, 李俊生, 吴晓蕾, 等. 地球工程开展现状及其对生物多样性的影响 [J]. *生物多样性*, 2013, 21(3): 375–382.
- [22] 陈迎. 地球工程的国际争论与治理问题 [J]. *国外理论动态*, 2016, 26(3): 57–66.
- [23] 史军, 卢愿清, 郝晓雅. 地球工程的“道德风险” [J]. *自然辩证法研究*, 2013(12): 47–52.
- [24] Ji D, Wang L, Feng J, et al. Basic Evaluation of Beijing Normal University Earth System Model (BNU – ESM) Version 1 [J]. *Geoscientific Model Development*, 2014, 7(5): 2039–2064.
- [25] Wang A, Lettenmaier D P, Sheffield J. Soil Moisture Drought in China, 1950–2006 [J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(13): 3257–3271.
- [26] 程雪蓉, 任立良, 杨肖丽, 等. CMIP5 多模式对中国及各分区气温和降雨时空特征的预估 [J]. *水文*, 2016, 36(4): 37–43.
- [27] Winickoff D E, Flegal J A, Asrat A. Engaging the global south on climate engineering research [J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(07): 239–243.
- [28] 郝晓雅. 气候地球工程的道德反思 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [29] 王金平. 旨在减缓全球变化的海洋地球工程有可能加速气候变暖 [J]. *地球科学进展*, 2010, 25(3): 316–319.

(下转第 121 页)