



王雪晴¹ 李璇蔚^{1,2} 邵晓华² 高淑媛^{1,2} 林镔雷^{1,2} 杨陈心怡^{1,2} 姜彤^{1,2}

全球升温 1.5 和 2 °C 时中国特困区干旱变化特征研究

摘要

基于 15 个 CMIP6 全球模式在 4 个共享社会经济路径及典型浓度路径的组合情景 (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) 下的模拟结果,对全球升温 1.5 和 2 °C 目标下中国连片特困区干旱频次、强度和持续时间变化特征进行了分析。结果表明:1) 在全球升温 1.5 和 2 °C 时,特困区年均温较基准期分别平均增加约 1.1 和 1.8 °C,快于全球升温速率,年降水增幅明显,在特困区西北部尤为显著;2) 升温 1.5 °C 时,特困区平均干旱强度由基准期的轻微干旱转变为中等干旱,面积占比 74% 地区的干旱频次减少,面积占比 61% 地区的干旱持续时间缩短;3) 升温 2 °C 时,特困区干旱强度仍以中等干旱为主,干旱频次整体上保持减少,部分地区减少最多可达 0.6 次/a,但极端干旱事件发生概率增加,干旱持续时间有南部增加和北部减少两极化的发展趋势,面积占比约 55% 地区的干旱持续时间预计减少 1.3 个月;4) 全球升温从 1.5 °C 增加到 2 °C 时,特困区干旱变化特征在空间上存在相似性,干旱频次和持续时间在南部区域均表现为增长,北部区域为减少,干旱强度则在特困区大部分地区均有增强,相较于升温 1.5 °C,升温 2 °C 时,特困区很可能面临更大的干旱风险,将全球升温控制在 1.5 °C 以内能有效减少干旱事件对特困区的打击。

关键词

CMIP6; 中国特困区; 干旱变化特征; 全球升温 1.5 °C; 全球升温 2 °C

中图分类号 P467

文献标志码 A

收稿日期 2021-01-29

资助项目 国家自然科学基金(42071024, 42005126, 41571494); 江苏省博士后基金(2019K096); 中国博士后科学基金(2020M671536); 南京信息工程大学人才启动基金

作者简介

王雪晴,女,研究方向为大气污染与气候变化.201883300137@nuist.edu.cn

邵晓华(通信作者),女,博士,副教授,研究方向为全球变化与区域响应.xiaohua.shao@nuist.edu.cn

姜彤(通信作者),男,博士,教授,研究方向为气候变化风险评估和风险管理等.jiangtong@cma.gov.cn

0 引言

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告指出:1880 至 2012 年间,全球平均气温上升约 0.85(0.65~1.06) °C,由此引发了其他气候要素的变化,对世界环境、经济可持续发展造成了巨大威胁^[1].世界气象组织在《2019 年全球气候状况声明》中提到,2019 年全球平均温度比工业化前水平高出 1.1 °C,过去十年成为有记录以来最热的十年^[2],并且未来全球气候变暖将持续^[3].器测记录的研究结果表明变暖已经使得全球极端气象事件发生频次增加^[4],未来这一趋势或将持续^[5].

统计数据表明全球每年由于干旱造成的经济损失远高于其他气象灾害^[6].干旱直接影响了国家粮食安全和社会经济稳定^[7],对人类社会有深远影响^[8].中国是受干旱灾害影响最为严重的国家之一,干旱灾害发生频次多、持续时间长、影响范围大^[9],干旱的致灾面积占自然灾害总致灾面积的 57% 左右,其造成的损失占自然灾害总损失的 35% 左右^[10-11].1995 年以来,中国因旱灾造成的直接经济损失逐年增加^[12],位居各类灾害前列.过去半个世纪,中国半干旱与半湿润区分界线总体不断南移,干旱面积有增大的趋势^[13].中国华北、西北东部和东北地区干旱化趋势显著^[14],西南地区干旱程度增加明显^[15],从东北到西南已形成了一条干旱化趋势带^[16].这一趋势带的部分区域,与《中国农村扶贫开发纲要(2011—2020 年)》^[17](以下简称《纲要》)中的连片特困区重合^[18].近 60 年来,连片特困区平均每年暴露于旱灾影响区域的有 3.62 亿人口、5 900 亿国内生产总值(GDP)和 69.1 万 km² 的耕地^[16],干旱是对连片特困区影响巨大的自然灾害之一.世界银行报告指出,自然灾害会给贫困地区造成更大的冲击并加剧贫困的发生^[19].因此,研究《纲要》提及的连片特困区在气候变暖背景下干旱特征有何变化,将有助于当地政府制定有效的气候政策,对巩固脱贫成果尤为重要.

学术界对于随着全球变暖干旱特征将如何变化,观点并不一致. Sheffield 等^[20]认为气候变化对全球干旱事件发生频次和强度的影响很小, Dai^[21]基于观测和模式数据的研究认为气候变暖可以引起全球干旱发生频次的增多, Trenberth 等^[22]则认为变暖并不会导致干旱发生,但可以使得干旱强度增大,且持续时间可能变长.基于第五次国际耦合模式比较计划(CMIP5)的研究结果表明,中国未来重度和极端干

1 南京信息工程大学 灾害风险管理研究院, 南京, 210044

2 南京信息工程大学 地理科学学院, 南京, 210044

旱的发生概率急剧增加^[23-24],与历史时期相比,未来干旱频次、强度和持续时间将显著增加^[10].为避免极端气候变化带来的严重风险,2015年联合国气候变化框架公约(UNFCCC)近200个缔约方同意通过《巴黎协定》提出的“要把全球平均气温较工业化前增幅控制在2℃以内并最大可能限制在1.5℃以内”这一明确目标^[25].已有学者对这两个不同升温目标下全球^[26]、亚洲内陆干旱地区^[27]和中国^[28]干旱特征及差异进行了研究,而中国连片特困区1.5和2℃升温目标下干旱特征差异的研究还未见报道.

由世界气候研究计划(WCRP)组织的国际耦合模式比较计划目前已经到达第六阶段(CMIP6)^[29],并陆续公布了试验结果.相较于CMIP5,CMIP6新增加了多个模式团队,其模式在分辨率和物理参数化方案等方面都有改进和提高,未来预估试验的排放情景更新为更能反映辐射强迫和社会经济发展间关联的共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathway, SSP)-典型浓度路径(Representative Concentration Pathway, RCP),这为进行高分辨率的干旱特征预估提供了数据支持.

基于以上探讨,本文选取15个CMIP6全球气候模式下的4个组合情景模拟数据,采用多模式集合平均的方法研究相对于工业化前水平全球1.5和2℃的升温目标下,中国14个连片特困区干旱频次、强度和持续时间的时空演变特征,以期为中国连片特困区应对气候变化挑战、有效防止返贫提供决策依据.

1 数据和方法

1.1 研究区域

2011年,国务院印发了前文提及的《纲要》,划定了全国832个贫困县,本研究选取了其中680个县组成的14个连片特困地区(以下简称特困区)作为研究区(图1),包括大兴安岭南麓片区、燕山-太行山片区、吕梁山片区、六盘山片区、秦巴山片区、大别山片区、武陵山片区、乌蒙山片区、滇西边境片区、滇桂黔石漠化片区、罗霄山片区、新疆南疆三地州片区、西藏片区和四省藏片区.这14个连片特困区覆盖了全国21个省(市、自治区),行政区划总面积为392万km²(2017年),约占全国行政区划总面积的40.8%.截止2018年末,连片特困区的户籍人口数为24503万人,占全国总人口的17.6%,贫困发生率达到了4.5%^[30].

中国特困区大部分位于西部高原、山地和西南部丘陵地区,生态环境十分脆弱.从气候分区来看,

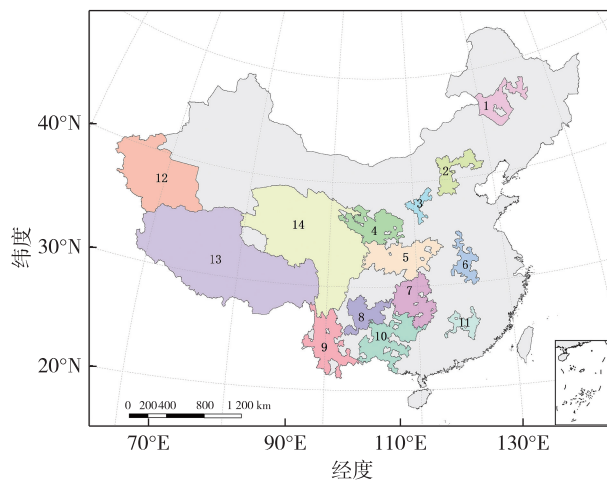


图1 中国14个连片特困区(1.大兴安岭南麓片区; 2.燕山-太行山片区;3.吕梁山片区;4.六盘山片区; 5.秦巴山片区;6.大别山片区;7.武陵山片区;8.乌蒙山片区; 9.滇西边境片区;10.滇桂黔石漠化片区;11.罗霄山片区; 12.新疆南疆三地州;13.西藏片区;14.四省藏区)

Fig. 1 Poverty-stricken areas in China (1.Southern area of Daxing'anling Mountains;2.Yanshan-Taihang Mountain area; 3.Lüliang Mountain area;4.Liupanshan area;5.Qinba Mountain area;6.Dabie Mountain area;7.Wuling Mountain area;8.Wumeng Mountain area;9.West Yunnan border area;10.Yunnan, Guangxi and Guizhou rocky desertification area;11.Luoxiao Mountain area;12.Three prefectures of southern Xinjiang;13.Tibet Autonomous Region;14.Tibetan areas in four provinces)

特困区40%的县位于干旱区、半干旱区及半湿润半干旱气候区,每年干旱发生的频率超过了40%,其中,华北燕山-太行山地区、内蒙古东部、青海西北部、新疆西南部、云南等地区贫困县的干旱发生频率超过60%,属于常年干旱区.

1.2 数据

1.2.1 气象观测数据

本文采用的气象数据为中国气象局所属的2400多个地面气象台站的观测资料和由其插值得到的格点气象数据集CN05.1(<http://data.cma.cn/site/index.html>),其中1961—2019年的站点气温和降水资料用于分析特困区历史气候特征,1995—2014年格点数据集提供的逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水、日照时数、风速、相对湿度用于模式模拟结果的订正.

1.2.2 气候模式资料

模式模拟数据为CMIP6中的15个全球气候模式的输出结果(<https://esgf-node.llnl.gov/search/>

cmip6/), 时间尺度为 1995—2100 年, 其中 1995—2014 年为历史模拟期, 2015—2100 年为未来预估期(表 1). 气象要素包括逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水、短波下行辐射、风速、相对湿度.

该套数据采用了 CMIP6 情景模式比较计划(The Scenario Model Intercomparison Project, Scenario MIP) 中核心试验 Tier-1 下的 4 个 SSP-RCP 组合情景, 包括 SSP1-2.6(低强迫情景)、SSP2-4.5(中等强迫情景)、SSP3-7.0(中高等强迫情景)和 SSP5-8.5(高强迫情景), 该组试验能够反映不同升温目标下特困区气候变化的总体特征.

考虑气候模式分辨率较粗, 且模式模拟能力存在差异, 本文对气候模式的输出数据统一进行了降尺度和偏差订正处理, 将模式模拟数据统一到 0.5° 的分辨率. 其中偏差订正方法为等距离累积分布函数(Equidistant Cumulative Distribution Functions, EDCDF)方法. EDCDF 方法首先建立实测、模拟、预估数据的累积概率分布函数(Cumulative Distribution Functions, CDF), 计算未来的某一值对应的累积概率, 并假定在此累积概率下对应的实测和模拟值的差值在未来时段保持不变, 最终通过这一差值达到对未来预测值的纠正^[28].

1.3 方法

1.3.1 基准期和全球升温 1.5 和 2 °C 的定义

本文以 1995—2014 年作为研究的基准期. 全球升温 1.5 和 2 °C 为相对于工业化革命前的升温. 对于每

个模式每个情景下的全球升温数据, 统计其 20 年滑动平均值, 获取相对于工业化革命前的全球升温达到 1.5 和 2 °C 时的年份, 前后选取共 20 年作为全球“升温 1.5 °C”和“升温 2 °C”的时期^[31-33](表 2).

1.3.2 干旱指标(sc-PDSI)

本文选取自校准的帕尔默干旱指数(Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index, sc-PDSI)来辨识干旱事件^[34]. 帕尔默干旱指数 PDSI(Palmer Drought Severity Index, PDSI, 量值为 I_{PDS}) 计算中主要公式如下:

$$I_{PDS,i} = p \cdot I_{PDS,i-1} + q \cdot Z_i,$$

$$Z = (P - P_c) \cdot K,$$

$$P_c = \alpha \cdot P_{ET} + \beta \cdot P_R + \gamma \cdot P_{RO} - \delta \cdot P_L,$$

$$\alpha_i = \frac{\overline{ET}_i}{P_{ET,i}}, \quad \beta_i = \frac{\overline{R}_i}{P_{R_i}},$$

$$\gamma_i = \frac{\overline{RO}_i}{P_{RO_i}}, \quad \delta_i = \frac{\overline{L}_i}{P_{L_i}},$$

式中, Z 为土壤湿度异常指数, i 是给定的月份, P 是实际月降水量, P_c 是给定月份的气候适宜降水量. K 代表了气候特征, p 和 q 是持续时间因子, 都可通过历史气候数据计算获取. P_c 是由水量平衡系数($\alpha, \beta, \gamma, \delta$)、潜在蒸散发量(P_{ET})、潜在土壤水补充量(P_R)、潜在产流量(P_{RO})和潜在土壤失水量(P_L)计算而得. ET, R, RO 和 L 分别为实际蒸散发量、实际土壤水补充量、实际产流量、实际土壤失水量.

表 1 本文所采用的 CMIP6 气候模式

Table 1 CMIP6 climate models used in this paper

模式名称	模式所属单位	模式分辨率 (经度×纬度)
ACCESS-CM2	澳大利亚联邦科学与工业研究组织、澳大利亚研究委员会气候系统科学卓越中心	1.875°×1.25°
ACCESS-ESM1-5	澳大利亚联邦科学与工业研究组织	1.875°×1.25°
CanESM5	加拿大气候模拟与分析中心	2.8125°×2.8125°
CNRM-CM6-1	法国国家气象研究中心、欧洲计算研究与高级培训中心	~1.4°×1.4063°
CNRM-ESM2-1	法国国家气象研究中心、欧洲计算研究与高级培训中心	~1.4°×1.4063°
EC-Earth3	欧洲中期天气预报中心	~0.7031°×0.7031°
INM-CM4-8	俄罗斯科学院数值数学研究所	2°×1.5°
INM-CM5-0	俄罗斯科学院数值数学研究所	2°×1.5°
IPSL-CM6A-LR	皮埃尔·西蒙·拉普拉斯研究所	~2.5°×1.2587°
MIROC6	日本海洋地球科学与技术局	~1.4063°×1.3953°
MIROC-ES2L	日本海洋地球科学与技术局	2.8125°×2.8125°
MPI-ESM1-2-HR	德国马克斯·普朗克气象研究所、德国气象局	0.9375°×0.9375°
MPI-ESM1-2-LR	德国马克斯·普朗克气象研究所、阿尔弗雷德·韦格纳研究所	1.875°×1.875°
MRI-ESM2-0	日本气象研究所	1.125°×1.125°
UKESM1-0-LL	大都会办公室哈德利中心、(英国)国家环境研究委员会、美国国家气象科学-英国气象局、(新西兰)国立水与大气研究所	1.875°×1.25°

表2 不同 SSPs-RCPs 情景下 15 个气候模式的全球升温 1.5 和 2.0 °C 的时间段

Table 2 Global warming period of 1.5 °C and 2.0 °C for climate models under different SSP-RCP scenarios

模式名称	情景	升温 1.5 °C	升温 2 °C	模式名称	情景	升温 1.5 °C	升温 2 °C
ACCESS-CM2	SSP1-2.6	2018—2037 年	2033—2052 年	IPSL-CM6A-LR	His+SSP1-2.6	2010—2029 年	2029—2048 年
	SSP2-4.5	2019—2038 年	2031—2050 年		His+SSP2-4.5	2009—2028 年	2024—2043 年
	SSP3-7.0	2018—2037 年	2030—2049 年		His+SSP3-7.0	2010—2029 年	2025—2044 年
	SSP5-8.5	2016—2035 年	2029—2048 年		His+SSP5-8.5	2009—2028 年	2025—2044 年
ACCESS-ESM1-5	SSP1-2.6	2021—2040 年	2064—2083 年	MIROC6	SSP1-2.6	2054—2073 年	
	SSP2-4.5	2020—2039 年	2036—2055 年		SSP2-4.5	2037—2056 年	2064—2083 年
	SSP3-7.0	2024—2043 年	2039—2058 年		SSP3-7.0	2034—2053 年	2050—2069 年
	SSP5-8.5	2018—2037 年	2030—2049 年		SSP5-8.5	2031—2050 年	2044—2063 年
CanESM5	His+SSP1-2.6	2004—2023 年	2017—2036 年	MIROC-ES2L	SSP1-2.6	2032—2051 年	
	His+SSP2-4.5	2004—2023 年	2015—2034 年		SSP2-4.5	2032—2051 年	2054—2073 年
	His+SSP3-7.0	2004—2023 年	2014—2033 年		SSP3-7.0	2030—2049 年	2046—2065 年
	His+SSP5-8.5	2003—2022 年	2013—2032 年		SSP5-8.5	2025—2044 年	2038—2057 年
CNRM-CM6-1	SSP1-2.6	2018—2037 年	2050—2069 年	MPI-ESM1-2-HR	SSP1-2.6	2032—2051 年	
	SSP2-4.5	2021—2040 年	2039—2058 年		SSP2-4.5	2028—2047 年	2054—2073 年
	SSP3-7.0	2023—2042 年	2036—2055 年		SSP3-7.0	2025—2044 年	2041—2060 年
	SSP5-8.5	2019—2038 年	2031—2050 年		SSP5-8.5	2024—2043 年	2040—2059 年
CNRM-ESM2-1	SSP1-2.6	2038—2057 年		MPI-ESM1-2-LR	SSP1-2.6	2033—2052 年	
	SSP2-4.5	2028—2047 年	2046—2065 年		SSP2-4.5	2027—2046 年	2048—2067 年
	SSP3-7.0	2027—2046 年	2043—2062 年		SSP3-7.0	2026—2045 年	2042—2061 年
	SSP5-8.5	2023—2042 年	2036—2055 年		SSP5-8.5	2025—2044 年	2039—2058 年
EC-Earth3	His+SSP1-2.6	2013—2032 年	2034—2053 年	MRI-ESM2-0	SSP1-2.6	2020—2039 年	
	His+SSP2-4.5	2013—2032 年	2035—2054 年		SSP2-4.5	2021—2040 年	2040—2059 年
	His+SSP3-7.0	2013—2032 年	2029—2048 年		SSP3-7.0	2022—2041 年	2036—2055 年
	SSP5-8.5	2015—2034 年	2026—2045 年		SSP5-8.5	2017—2036 年	2029—2048 年
INM-CM4-8	SSP1-2.6	2041—2060 年		UKESM1-0-LL	His+SSP1-2.6	2014—2033 年	2027—2046 年
	SSP2-4.5	2026—2045 年	2054—2073 年		His+SSP2-4.5	2014—2033 年	2025—2044 年
	SSP3-7.0	2026—2045 年	2043—2062 年		His+SSP3-7.0	2013—2032 年	2022—2041 年
	SSP5-8.5	2021—2040 年	2037—2056 年		His+SSP5-8.5	2014—2033 年	2022—2041 年
INM-CM5-0	SSP1-2.6	2027—2046 年					
	SSP2-4.5	2028—2047 年	2063—2082 年				
	SSP3-7.0	2023—2042 年	2041—2060 年				
	SSP5-8.5	2021—2040 年	2037—2056 年				

干旱等级的划分如表 3 所示。

表3 干旱等级的划分

Table 3 Drought grades by sc-PDSI

指数值	等级
(-1.00, 1.00)	正常
(-2.00, -1.00]	轻微干旱
(-3.00, -2.00]	中等干旱
(-4.00, -3.00]	严重干旱
(-∞, -4.00]	极端干旱

1.3.3 干旱特征

采用游程理论^[35-36],以 sc-PDSI 值首次小于-1

为开始,首次大于-1 为结束,由此识别为一次干旱事件.干旱频次为研究时段内年均干旱事件的次数;干旱强度为干旱事件内 sc-PDSI 值的平均;干旱持续时间为统计时段内平均每次干旱事件从开始到结束所经历的月数.通过此方法,对基准期、全球升温 1.5 和 2 °C 的干旱特征(频次、强度和持续时间)进行辨识.

2 结果

2.1 特困区气候变化特征

为了解特困区气候变化历史,本文分析了该区

域历史期气象观测数据的时间序列并将其与全国数据进行了对比.1961—2019 年特困区与全国年均温距平的对比(图 2a)表明:特困区和全国年均气温具有相似的变化,20 世纪 80 年代开始有明显的振荡上升趋势,1961—2019 年年平均气温的升温速率约达 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$.1961—2019 年特困区与全国年降水的对比(图 2b)表明:特困区和全国年降水具有相似的变化,并未表现明显的长期趋势,而是具有明显的振荡特征,年际振幅最大可超过 100 mm.

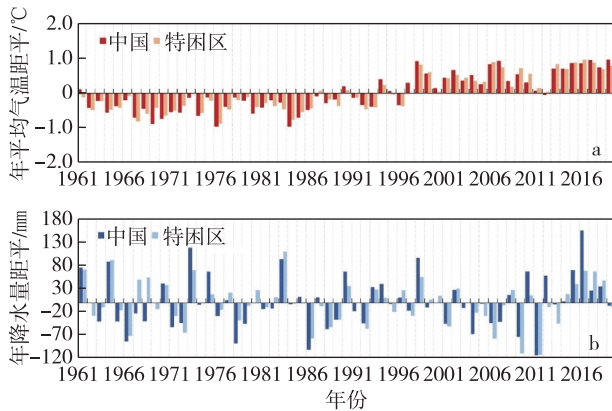


图 2 1961—2019 年中国与特困区年平均气温(a)与年降水量(b)距平

Fig. 2 Annual mean temperature (a) and precipitation (b) anomaly in China and poverty-stricken areas from 1961 to 2019

相比于基准期,全球升温 1.5 °C 时,中国 14 个特困区年均升温范围在 $0.1\sim 1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,平均为 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 3a).升温情况存在较大的区域差异,年均温增量整体是特困区北部大于南部,西部大于东部.

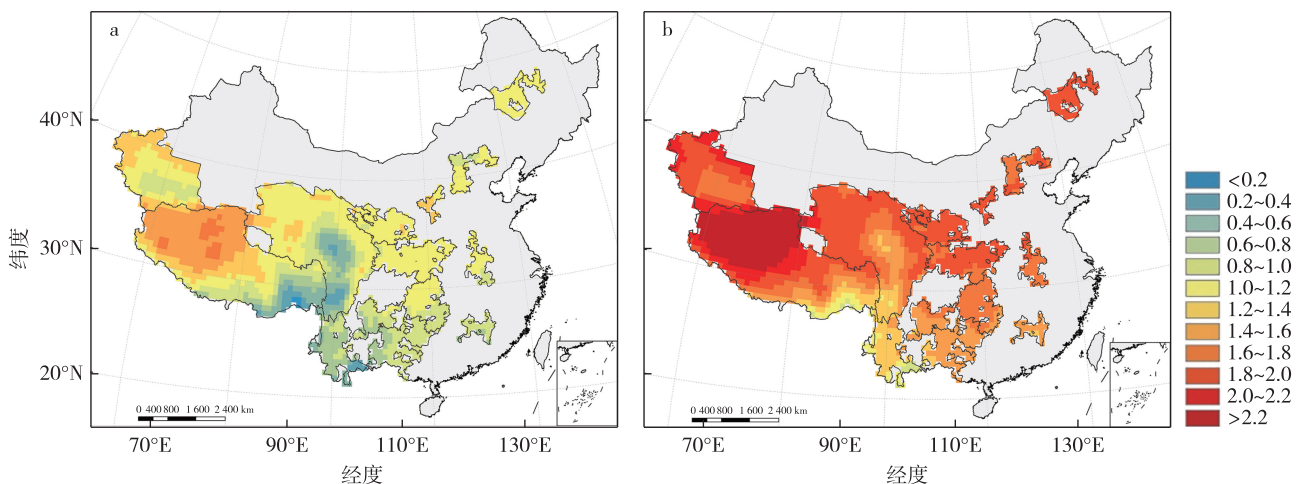


图 3 全球升温 1.5 °C(a)和升温 2 °C(b)背景下特困区年平均气温增量(°C)

Fig. 3 Annual mean temperature increment (°C) in poverty-stricken areas projected at 1.5 °C (a) and 2.0 °C (b) global warming levels

其中:西藏片区东南部、四省藏区的中部和南部以及滇西边境东南部升温幅度最小,不超过 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$;吕梁山片区整体增温较明显,升温幅度为 $1.2\sim 1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$.升温最显著的区域出现在西藏片区西北和北部,升温幅度达 $1.4\sim 1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,该区域面积占特困区总面积的 13%.需要指出的是,本文计算时使用的面积值均是格点数据($0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$)累加而得,按格点计算面积时,实际特困区边界所在的格点会按照整个格点纳入计算,因此只要区域包含有边界的格点,其面积会略大于行政区划中的实际面积.

相比于基准期,全球升温 2 °C 时,特困区年平均气温的升温范围大致在 $0.8\sim 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,平均为 $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 3b),整体升温幅度较全球升温 1.5 °C 时更为显著,除零星地区升温幅度小于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,大部分地区的升温幅度大于 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,约占特困区总面积 20% 的地区升温达 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上.升温最显著的区域(升温 $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上)仍为西藏片区北部,约占特困区总面积的 12%;特困区南部升温幅度相对较小,为 $1.4\sim 1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

在升温背景下,特困区年降水量也呈现显著的变化.升温 1.5 °C 时,特困区年降水量增幅在 $-1.5\%\sim 75.7\%$ 之间,超过 99.9% 的特困地区年降水量有增加趋势,平均增幅为 11.5%.虽然整体呈现增加趋势,但还是有明显区域差异.大别山片区、武陵山片区、滇西边境片区等大部分位于中国中、南部的特困区年降水增幅不足 10%,而西藏片区西部、四省藏区片区西北部和新疆南疆三地州片区东部降水增幅预计超过 30%(图 4a).升温 2 °C 时,年降水量增幅

的空间变化与升温 1.5 °C 时基本一致,但强度均有所增加,平均增幅可能超过 16%,其中特困区西北部仍然为降水增幅最显著的地区(图 4b)。

2.2 全球升温 1.5 °C 时的干旱变化特征

基准期特困区的年均干旱发生频次为 1.05 次/a,干旱强度为轻微干旱等级(sc-PDSI 指数值为 -1.9),干旱持续时间约为 4.5 个月。

全球升温 1.5 °C 时,相较于基准期,干旱事件的频次有减小的趋势(图 5a)。特困区大部分地区(占特困区总面积的 74%)干旱频次平均减少 0.15 次/a,干旱频次减少最显著的地区为特困区北部及西部区域。虽然总体上特困区干旱频次减少,但南部 5 个贫困区的干旱频次表现为增加趋势,平均增加 0.12 次/a,滇西边境片区南部等地频次可增加 0.3 次/a 及以上,干旱频次增加最显著的区域在四省藏区东南端,增加超过 0.6 次/a。不同于干旱频次的减少,特困区未来干旱事件的强度总体上明显增加,占特困区总面积 87% 地区的 sc-PDSI 值平均减小约 0.28,这也使得平均干旱强度由基准期的轻度干旱变为升温 1.5 °C 时的中等干旱(图 5b),干旱增强最显著的区域集中在新疆南疆三地州片区西南部及西藏片区东南部,其中有些区域的 sc-PDSI 减小值达 1.3 及以上。干旱强度仅在特困区西部和偏东北等部分区域略有降低。对于干旱持续时间,特困区大部分地区干旱持续时间呈现减少趋势,占特困区总面积 61% 地区的干旱持续时间平均减少 1.1 个月,四省藏区北部减少最明显,最多减少量能达到 4.5 个月。也有部分区域的干旱持续时间增加,这些区域集中在特困区偏南部地区 and 新疆南疆三地州片区西北

部,平均增加约 0.8 个月,部分地区增值可超过 4 个月(图 5c)。

综上所述,全球升温 1.5 °C 时,特困区干旱特征较基准期有明显的差异,总体上干旱事件的频次和持续时间减少,干旱强度增加,并且呈现明显的区域性特征。特困区南部和北部三项干旱指标反映的干旱变化基本一致,即南部干旱明显增强,北部干旱略有减弱,而特困区中西部干旱指标的变化并没有展现干旱的一致特征,如在新疆南疆三地州片区南部和四省藏区东部一些区域,出现了干旱频次与持续时间减少伴随着干旱强度增加的情况。

2.3 全球升温 2 °C 时的干旱变化特征

全球升温 2 °C 时,相较于基准期,特困区大部分地区(占特困区总面积的 74%)干旱频次平均减少约 0.17 次/a,减少最多的地区可达 0.6 次/a。部分地区的干旱频次呈现增加趋势,如特困区南部干旱频次增加较明显,平均增加约 0.12 次/a(图 6a)。全球升温 2 °C 时,特困区干旱强度明显增强,由基准期的轻度干旱变为中等干旱,占特困区总面积约 92% 区域的 sc-PDSI 值平均减小约 0.37。其中,四省藏区、西藏片区以及新疆南疆三地州片区干旱强度的增加最为显著,sc-PDSI 值减小值超过 1.6,干旱等级可能从轻微干旱转变为严重干旱(图 6b)。干旱持续时间变化(图 6c)与升温 1.5 °C 时类似,南部增加和北部减少的两极化发展趋势更显著。约占特困区总面积 45% 区域的干旱持续时间平均增加了 1.1 个月,这些区域主要位于特困区南部,其中乌蒙山片区干旱持续时间显著增加,最多增加可能接近 14 个月。约占特困区总面积 55% 区域的干旱持续时间平均减少约 1.3 个月,这些区域主要

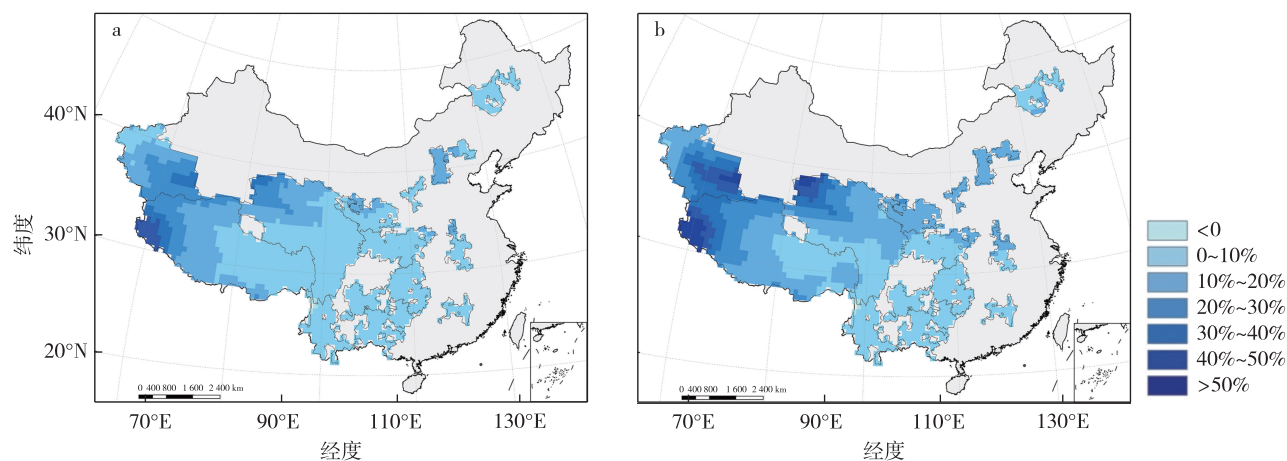


图 4 全球升温 1.5 °C (a) 和升温 2 °C (b) 背景下特困区年降水增幅(%)

Fig. 4 Annual precipitation increase (%) in poverty-stricken areas projected at 1.5 °C (a) and 2.0 °C (b) global warming levels

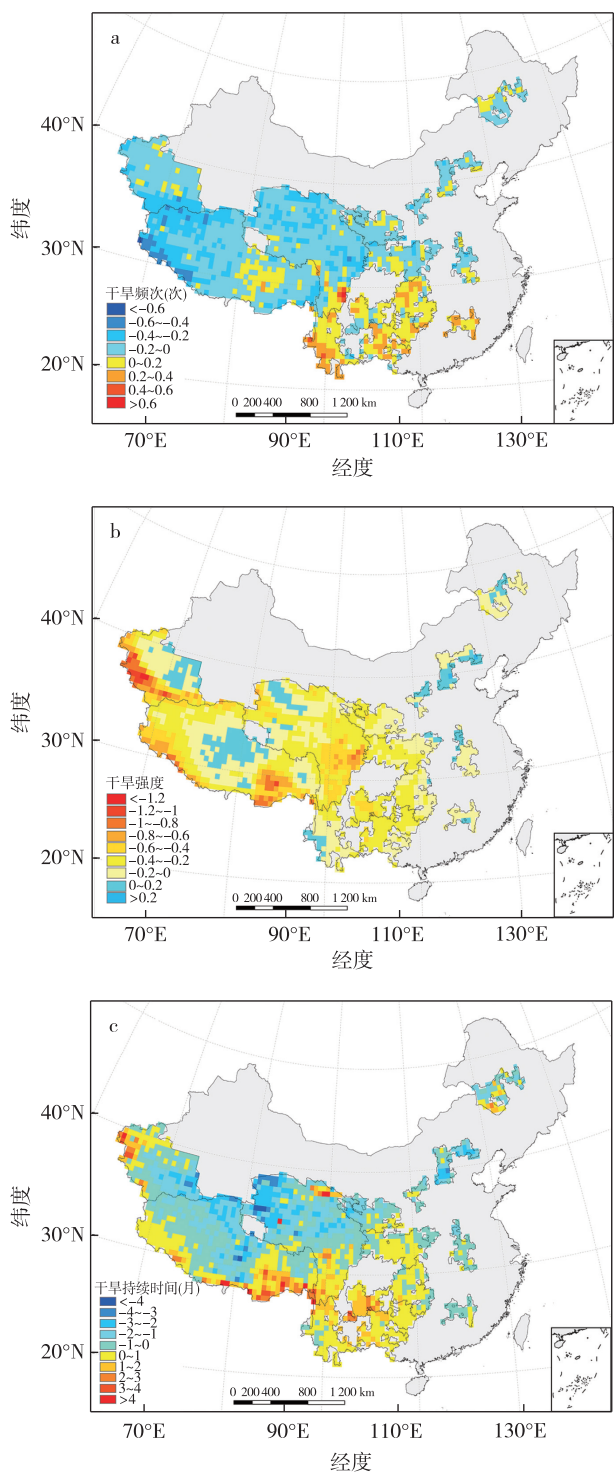


图5 全球升温 1.5 °C 背景下较基准期特困区干旱年均频次(a)、干旱强度(b)、干旱持续时间(c)变化值的空间分布
Fig.5 Projected changes of annual mean drought frequency (a), drought intensity (b), and drought duration (c) in poverty-stricken areas from baseline period to 1.5 °C warmer world

分布在特困区北部,其中四省藏区北部干旱持续时间减少值可能达 5.7 个月.

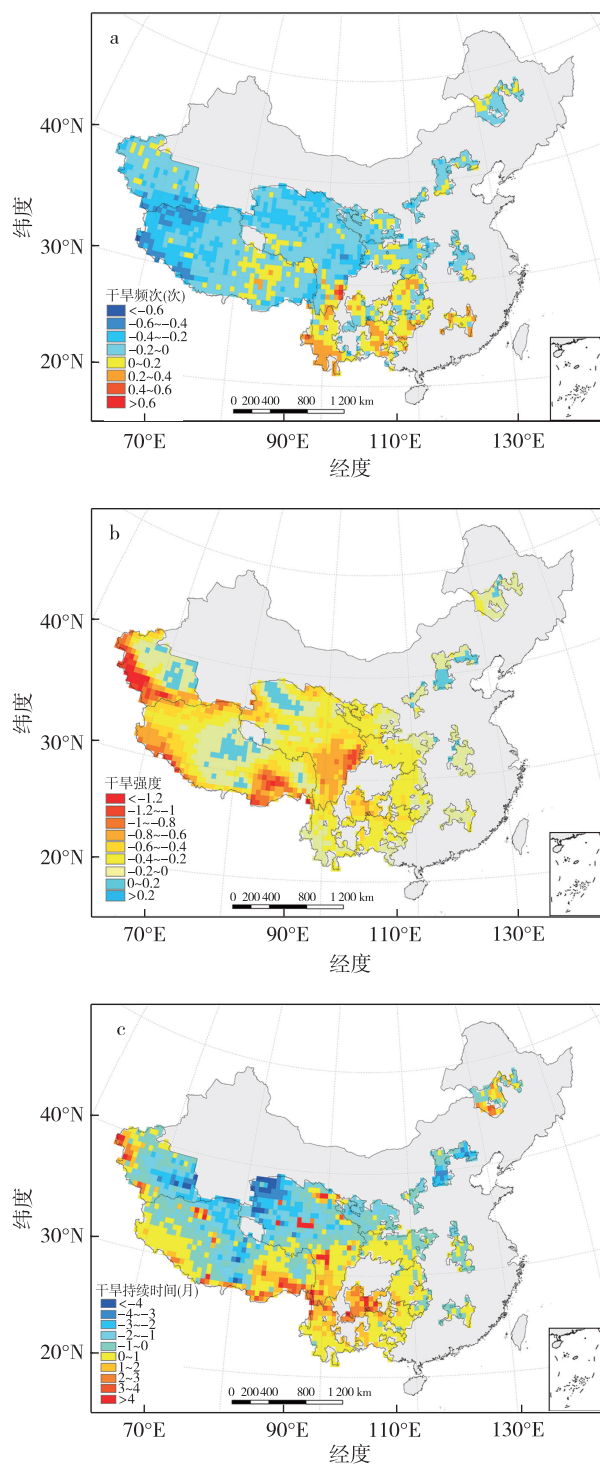


图6 全球升温 2 °C 背景下较基准期特困区干旱年均频次(a)、干旱强度(b)、干旱持续时间(c)变化值的空间分布
Fig.6 Projected changes of annual mean drought frequency (a), drought intensity (b), and drought duration (c) in poverty-stricken areas from baseline period to 2 °C warmer world

2.4 全球升温 2 °C 较 1.5 °C 时的干旱变化特征

当全球升温从 1.5 °C 增加到 2 °C 时,特困区干

旱频次整体上减小,并没有呈现明显的空间特征. 占特困区总面积 62% 区域的干旱频次平均减少了 0.04 次/a,以特困区偏东部地区减少最为显著,最长达 0.19 次/a,干旱频次增加的区域零散分布在西藏片区和四省藏区的交界区和秦巴山片区中部等(图 7a). 两个升温目标下特困区干旱强度的比较结果(图 7b)表明:相比于升温 1.5 °C,升温 2 °C 时特困区整体干旱强度有明显增加,有些地区 sc-PDSI 值减少量达到 0.45,仅有占特困区总面积 6% 区域的干旱强度减小(图 7b). 与全球升温 1.5 °C 相比,升温到 2 °C 时特困区干旱持续时间的变化大致呈现南部增加和北部减少的区域特征,仅有西藏片区中部有一南北分布的干旱持续时间减少区域不符合这一空间特征. 占特困区总面积 55.2% 地区的干旱持续时间增加,干旱持续时间平均延长 0.5 个月,在新疆南疆三地州区西部、四省藏区中部等地延长超过 4 个月,占特困区总面积 44.8% 地区的干旱持续时间平均减少约 0.4 个月,四省藏区北部的减少值尤为明显,达 1 个月以上(图 7c). 由此可见,升温 2 °C 相较于升温 1.5 °C,特困区的平均干旱强度将增加,面积占比超过一半地区的干旱持续时间将增加,特困区可能面临更大的干旱风险.

3 结论与讨论

本文使用了 15 个 CMIP6 模式的试验模式,通过分析历史观测时期(1961—2019 年)与未来相较于基准期(1995—2014 年)的气候变化特征,预估在全球 1.5 和 2 °C 升温状态下中国 14 个连片特困区干旱事件频次、强度和持续时间的空间变化特征,得到结论如下:

1) 历史时期,特困区和中国年均气温和降水时间序列整体较为一致,20 世纪 80 年代以来年均气温振荡上升,年降水量则没有长期趋势而振荡明显. 在全球升温 1.5 和 2 °C 背景下,特困区的年平均气温和降水都呈现增加的趋势. 在全球升温 1.5 和 2 °C 时,气温较基准期分别平均增加约 1.1 和 1.8 °C,相当于较工业化前分别增加了 1.95 和 2.65 °C,即特困区升温速率快于全球平均水平. 年降水增幅最显著的地区在特困区西北部,这与王晓欣等^[37]利用 CMIP5 模式数据预估的结果基本一致.

2) 全球升温 1.5 °C 时,特困区干旱事件发生频次和持续时间减少,灾害强度增加. 相对于基准期,

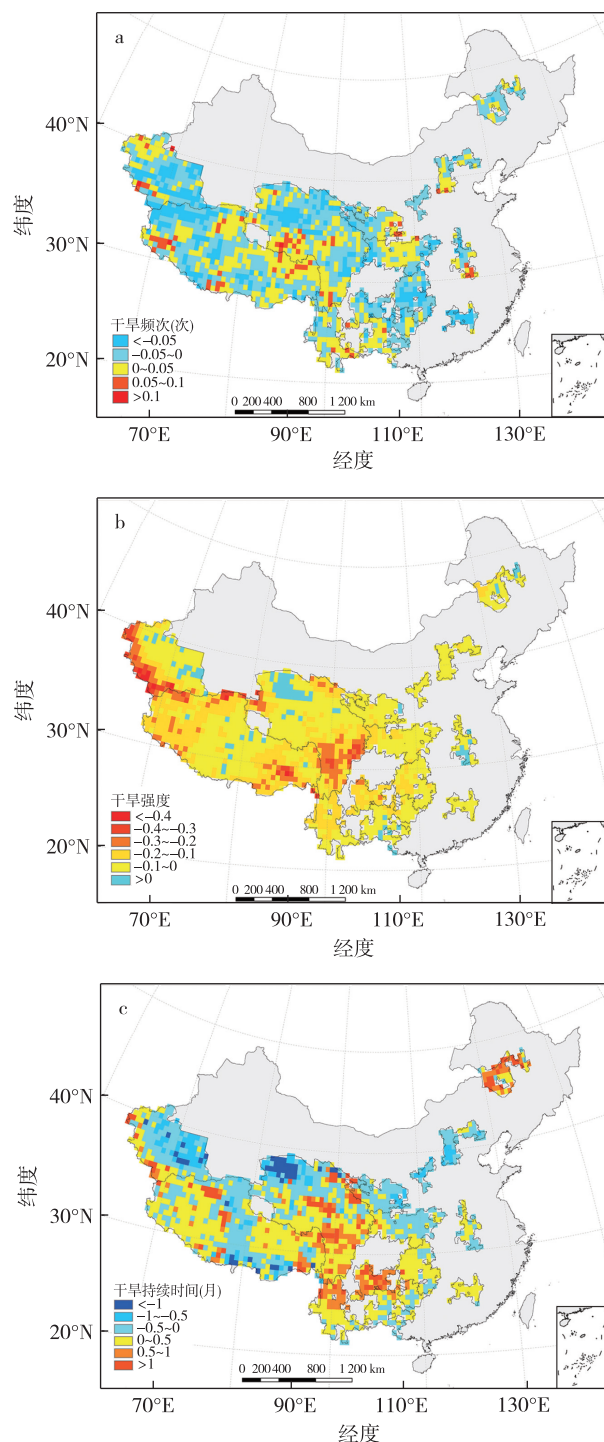


图 7 全球升温 2 °C 较 1.5 °C 背景下特困区干旱年均频次(a)、干旱强度(b)、干旱持续时间(c)变化值的空间分布
Fig. 7 Projected changes of annual mean drought frequency (a), drought intensity (b) and drought duration (c) in poverty-stricken areas from 1.5 °C to 2 °C warmer world

占特困区总面积 74% 地区的干旱频次将减少约 0.15 次/a;干旱强度几乎在所有地区增强,预计平均干旱强度达到中等干旱;占特困区总面积 61% 地区

的干旱持续时间平均减少了 1.1 个月,其余地区平均增加 0.8 个月.

3) 全球升温 2 °C 时,特困区极端干旱风险可能增加.干旱频次保持减少趋势,部分地区减少最多可达 0.6 次/a;干旱强度仍然以中等干旱为主但增强更明显,部分地区干旱等级可能从轻微干旱转变为严重干旱,这与干旱强度预计在全球范围内增加的结论^[38]一致;干旱持续时间有南部增加和北部减少两极化的发展趋势,占特困区总面积 45% 地区(主要位于特困区南部)的干旱持续时间预计平均增加 1.1 个月,其余地区平均减少 1.3 个月.

4) 空间上,全球升温 1.5 和 2 °C 时,特困区的南部相比于北部可能受干旱影响将更为显著.干旱频次和持续时间表现为偏南部增长,偏北部减少;干旱强度在特困区大部分地区均有增加,仅在西部中心区域及零星地区略有减弱.

5) 全球升温从 1.5 °C 增加到 2 °C 时,特困区干旱特征变化的幅度和范围更大,将面临更大的干旱风险.相较于升温 1.5 °C,升温 2 °C 将使得占特困区面积 94% 区域的干旱强度显著增加,干旱频次和持续时间减少的范围变小.将全球升温控制在 1.5 °C 以内能有效减少干旱事件对特困区的冲击.

研究结果发现,在全球升温 1.5 和 2 °C 时,特困区的干旱持续时间逐渐呈现南部延长、北部缩短的两极发展趋势,特困区的南部相比北部可能更容易受到干旱影响,这与前人研究提出的中国形成了一条东北—西南的干旱化趋势带^[16]并不一致,这可能是由于用于分析的模式数据本身存在一定的差异,也可能与全球升温背景下中国北方降水明显增加^[32]使得北方干旱事件严重程度降低有关.

值得注意的是,各模式情景下升温达到 1.5 °C 的平均时间(表 2)就在近两年,特困区大部分位于气候分区上的干旱与半干旱区,这些地区的干旱事件变化对全球变暖响应尤为敏感,如何做到在保持经济和社会发展的同时有效规避气候变化风险、巩固脱贫攻坚成果是特困区在未来规划中应当关注的.

致谢 感谢地理科学学院研究生陈丽琴提供了中国地区 sc-PDSI 的降尺度数据;感谢灾害风险管理研究院的黄金龙老师、高妙妮老师、林齐根老师、王艳君老师对论文写作及修改的悉心指导;感谢博士生导师丞在笔者撰写论文期间提供的帮助.

参考文献

References

- [1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate change 2013: the physical science basis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- [2] World Meteorological Organization. WMO statement on the state of the global climate in 2019 [R]. WMO, 2020, WMO-No.1248
- [3] Collins M, Knutti R, Arblaster J, et al. Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility [R] // Climate change 2013: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1029-1136
- [4] Rahmstorf S, Coumou D. Increase of extreme events in a warming world [J]. PNAS, 2011, 108(44): 17905-17909
- [5] Rajendra K P, Leo M, Gian-Kasper P, et al. Climate change 2014: synthesis report [R]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2015
- [6] Wilhite D A. Drought as a natural hazard: concepts and definitions [EB/OL]. [2020-12-18]. https://www.researchgate.net/publication/243785200_Drought_as_a_Natural_Hazard_Concepts_and_Definitions
- [7] van Dijk A I J M, Beck H E, Crosbie R S, et al. The millennium drought in southeast Australia (2001–2009): natural and human causes and implications for water resources, ecosystems, economy, and society [J]. Water Resources Research, 2013, 49(2): 1040-1057
- [8] Vasiliades L, Loukas A. Hydrological response to meteorological drought using the Palmer drought indices in Thessaly, Greece [J]. Desalination, 2009, 237(1/2/3): 3-21
- [9] 李克让,尹思明,沙万英.中国现代干旱灾害的时空特征 [J].地理研究, 1996, 15(3): 6-15
LI Kerang, YIN Siming, SHA Wanying. Characters of time-space of recent drought in China [J]. Geographical Research, 1996, 15(3): 6-15
- [10] 莫兴国,胡实,卢洪健,等. GCM 预测情景下中国 21 世纪干旱演变趋势分析 [J]. 自然资源学报, 2018, 33(7): 1244-1256
MO Xingguo, HU Shi, LU Hongjian, et al. Drought trends over the terrestrial China in the 21st century in climate change scenarios with ensemble GCM projections [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(7): 1244-1256
- [11] 宋连春.全球变化热门话题丛书:干旱 [M].北京:气象出版社, 2003
- [12] 王伟光,郑国光,陈迎,等.应对气候变化报告(2016):《巴黎协定》重在落实 [M].北京:社会科学文献出版社, 2016
- [13] 安洁,付博,李玮,等.东亚地区典型极端气候指标未来预估及高温下人口暴露度研究 [J].北京大学学报(自然科学版), 2020, 56(5): 884-892
AN Jie, FU Bo, LI Wei, et al. Future prediction of typical extreme climatic indices and population exposure to high temperature in east Asia [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2020, 56(5): 884-892
- [14] 翟盘茂,邹旭恺. 1951—2003 年中国气温和降水变化及其对干旱的影响 [J]. 气候变化研究进展, 2005, 1

- (1):16-18
ZHAI Panmao, ZOU Xukai. Changes in temperature and precipitation and their impacts on drought in China during 1951–2003 [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2005, 1(1): 16-18
- [15] 韩兰英, 张强, 姚玉璧, 等. 近 60 年中国西南地区干旱灾害规律与成因 [J]. *地理学报*, 2014, 69(5): 632-639
HAN Lanying, ZHANG Qiang, YAO Yubi, et al. Characteristics and origins of drought disasters in southwest China in nearly 60 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(5): 632-639
- [16] 景丞. 中国连片特困区干旱灾害影响评估 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017
JING Cheng. Assessment of the drought effect in contiguous extreme poverty areas of China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2017
- [17] 国务院扶贫开发领导小组办公室. 中国农村扶贫开发纲要(2011—2020年) [Z/OL]. [2021-01-01]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2011/content_2020905.htm
- [18] 万金红. 干旱与贫困 [J]. *中国水文化*, 2019(1): 58-59
- [19] Hallegatte S, Bangaloro M, Bonzanigo L, et al. Shock waves: managing the impacts of climate change on poverty [R]. Washington, DC, USA: The World Bank, 2015
- [20] Sheffield J, Wood E F, Roderick M L. Little change in global drought over the past 60 years [J]. *Nature*, 2012, 491(7424): 435-438
- [21] Dai A G. Increasing drought under global warming in observations and models [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 52-58
- [22] Trenberth K E, Dai A G, van der Schrier G, et al. Global warming and changes in drought [J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(1): 17-22
- [23] Wang L, Chen W. A CMIP5 multimodel projection of future temperature, precipitation, and climatological drought in China [J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(6): 2059-2078
- [24] Yin Y H, Ma D Y, Wu S H, et al. Projections of aridity and its regional variability over China in the mid-21st century [J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(14): 4387-4398
- [25] 王胜, 许红梅, 杨玮, 等. 基于 RCP 情景的全球 1.5 和 2.0 °C 升温下安徽省气候变化及气象干旱预估 [J]. *中国农业大学学报*, 2018, 23(6): 100-107
WANG Sheng, XU Hongmei, YANG Wei, et al. Estimated projections in climate change and meteorological drought in Anhui province under 1.5 and 2.0 °C global warming based on RCP [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(6): 100-107
- [26] Lehner F, Coats S, Stocker T F, et al. Projected drought risk in 1.5 °C and 2 °C warmer climates [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(14): 7419-7428
- [27] Miao L J, Li S Y, Zhang F, et al. Future drought in the dry lands of Asia under the 1.5 and 2.0 °C warming scenarios [J]. *Earth's Future*, 2020, 8(6): e2019EF001337
- [28] Su B D, Huang J L, Fischer T, et al. Drought losses in China might double between the 1.5 °C and 2.0 °C warming [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(42): 10600-10605
- [29] 张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌. CMIP6 情景模式比较计划 (ScenarioMIP) 概况与评述 [J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 519-525
ZHANG Lixia, CHEN Xiaolong, XIN Xiaoge. Short commentary on CMIP6 scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) [J]. *Climate Change Research*, 2019, 15(5): 519-525
- [30] 国家统计局. 中国农村贫困监测报告 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2019
- [31] IPCC. Special report on global warming of 1.5 °C [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018
- [32] 胡婷, 孙颖, 张学斌. 全球 1.5 和 2 °C 温升时的气温和降水变化预估 [J]. *科学通报*, 2017, 62(26): 3098-3111
HU Ting, SUN Ying, ZHANG Xuebin. Temperature and precipitation projection at 1.5 and 2 °C increase in global mean temperature [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(26): 3098-3111
- [33] Gao M N, Kim S J, Yang J, et al. Historical fidelity and future change of Amundsen Sea Low under 1.5 °C–4 °C global warming in CMIP6 [J]. *Atmospheric Research*, 2021, 255: 105533
- [34] Dai A G. Characteristics and trends in various forms of the Palmer drought severity index during 1900–2008 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D12): D12115
- [35] Yevjevich V. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts [J]. *Journal of Hydrology*, 1969, 7(3): 353
- [36] Zhai J Q, Mondal S K, Fischer T, et al. Future drought characteristics through a multi-model ensemble from CMIP6 over South Asia [J]. *Atmospheric Research*, 2020, 246: 105111
- [37] 王晓欣, 姜大勝, 郎咸梅. CMIP5 多模式预估的 1.5 °C 升温背景下中国气温和降水变化 [J]. *大气科学*, 2019, 43(5): 1158-1170
WANG Xiaoxin, JIANG Dabang, LANG Xianmei. Temperature and precipitation changes over China under a 1.5 °C global warming scenario based on CMIP5 models [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2019, 43(5): 1158-1170
- [38] Liu W B, Sun F B, Lim W H, et al. Global meteorological drought and severe drought affected population in 1.5 °C and 2 °C warmer worlds [J]. *Earth System Dynamics Discussions*, 2017: 1-45. DOI: 10.5194/esd-2017-85

Projected drought risk in poverty-stricken areas of China with CMIP6 models under SSPs-RCPs scenarios at 1.5 °C and 2 °C warmer levels

WANG Xueqing¹ LI Aiwei^{1,2} SHAO Xiaohua² GAO Shuyuan^{1,2}
LIN Binlei^{1,2} YANG-CHEN Xinyi^{1,2} JIANG Tong^{1,2}

1 Institute for Disaster Risk Management, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 School of Geographical Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Findings confirm that poor people may be more vulnerable to climate change. The huge socioeconomic costs of droughts make themselves a crucial target for impact assessments of climate change scenarios. Based on outputs from fifteen CMIP6 climate models under the four latest SSP-RCP scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5), drought characteristics (frequency, intensity and duration) at 1.5 and 2 °C warming levels were analyzed over the poverty-stricken areas of China. Results show that: (1) Relative to the baseline period (1995–2014), the annual mean temperature in poverty-stricken areas will increase by 1.1 and 1.8 °C at 1.5 and 2 °C global warming, respectively, which is faster than the global warming rate. The annual precipitation will also increase significantly, especially in north-west of poverty-stricken areas; (2) Relative to the baseline period, drought intensity will increase from slightly dryness to moderate dryness at the global warming of 1.5 °C. However, most regions will see a decrease trend in both drought frequency (74% of whole region) and duration (61% of whole region). (3) At the global warming level of 2 °C, drought intensity will still remain a moderate level, while drought frequency may keep decreasing. In some areas, the frequency is possible to decrease by 0.6 times annually. The drought duration tends to increase in the south and decrease in the north, which is expected to decrease by 1.3 months in some places (55% of whole region). (4) When facing the additional global warming of 0.5 °C, there are spatial similarities in the change of drought characteristics. The frequency and duration will both increase in southern region and decrease in northern region, while the intensity will increase in most regions. Our study suggests that limiting anthropogenic warming to 1.5 °C, as aspired by the Paris Climate Agreement, may have benefits for future drought risk alleviation over the poverty-stricken areas of China.

Key words CMIP6; poverty-stricken areas of China; change of drought characteristics; 1.5 °C global warming; 2.0 °C global warming