

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.031.

薛雨婷, 李谢辉, 贾何佳. 基于 CMIP6 模式的西南地区旱灾风险未来预估[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 247-255.
XUE Yuting, LI Xiehui, JIA Hejia. Future Projection of Drought Risk in Southwestern China Based on CMIP6 Model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 247-255.

基于 CMIP6 模式的西南地区旱灾风险未来预估

薛雨婷, 李谢辉, 贾何佳

(成都信息工程大学 大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225)

摘 要:预估西南地区在全球气候变暖背景下未来的干旱变化趋势,可为西南各区域研究旱灾变化并防范未来旱灾风险提供有效参考。通过评估 30 个 CMIP6 模式对西南地区的模拟性能,挑选并计算出由 10 个模式组成的多模式集合平均数据,基于标准化降水蒸散指数 SPEI、地形、人口、GDP 和土壤含水量等指标,利用 AHP-熵权组合权重法和 ArcGIS 的空间分析功能来构建包含致灾因子危险性和承灾体易损性的旱灾风险评估模型,对西南地区 SSP126, SSP245, SSP585 三种组合情景下的 2021—2040 年近期和 2041—2060 年远期的旱灾风险进行了预估。结果表明:(1)高风险区主要分布在贵州南部、云南东部以及重庆的沙坪坝、四川的温江、越西等零星地区;(2)低风险区主要分布在四川东部和相邻的重庆西部等地区,大致呈南北递减的变化趋势;(3)从近期到远期,未来 3 种情景组合都表现出次高和高风险区范围增大,次低和低风险区范围减少的形势。综上,全球气候变暖背景下,西南地区未来的旱灾风险整体将有加大加重的趋势,尤其是低纬度地区未来的风险性将明显加重。

关键词:CMIP6 模式; AHP-熵权组合权重法; 旱灾风险评估; 西南地区

中图分类号:P426 文献标识码:A 文章编号:1005-3409(2023)02-0247-09

Future Projection of Drought Risk in Southwestern China Based on CMIP6 Model

XUE Yuting, LI Xiehui, JIA Hejia

(Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, School of
Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Predicting the future drought trend in southwest China under the background of global warming can provide an effective reference for southwest regions to study drought changes and prevent future drought risks. By evaluating the simulation performance of 30 CMIP6 models in southwest China, the multi-model ensemble average data composed of 10 models were selected and calculated, then based on the standardized precipitation evapotranspiration index SPEI, topography, population, GDP and soil water content, and the AHP-entropy weighting combined weighting method and the spatial analysis function of ArcGIS were used to construct a drought risk assessment model containing the hazard of disaster factors and the vulnerability of disaster bearers. The drought risk in the near term from 2021 to 2040 and the long term from 2041 to 2060 under the combination scenarios of SSP126, SSP245 and SSP585 in southwest China were estimated. The results showed that: (1) the high-risk areas in the future comprehensive projection of drought risk in southwestern China mainly distributed in southern Guizhou Province, eastern Yunnan Province, and scattered areas such as Shapingba in Chongqing, Wenjiang and Yuexi in Sichuan Province; (2) the low-risk areas mainly distributed in eastern Sichuan and adjacent western Chongqing, and generally showed a north-south

decreasing trend; (3) from the near term to the long term, the next three scenario combinations all showed an increase in the range of the sub-high and high risk areas, and a decrease in the scope of the sub-low and low risk areas. In summary, under the background of global warming, the future drought risk in southwestern China will increase overall, especially in low-latitude areas.

Keywords: CMIP6 model; AHP-entropy combined weight method; drought risk assessment; southwestern China

IPCC 第五次评估报告已表明全球气候变暖明确且毋庸置疑^[1]。自 20 世纪 50 年代以来,观测到的许多变化是几十年甚至上千年来前所未有的,气候变暖不仅表现为大气和海洋的变暖,还有积雪和冰量的减少、海平面上升、温室气体浓度增加等^[2]。气候变暖背景下,极端降水和极端干旱频发,自然环境、人类活动、农业生产、社会经济等各方面都遭受到了不同程度的损失,其中干旱灾害分布广、持续时间长,且日趋严重,对我国经济、农作物及人类生命财产安全等造成了巨大的损失。马鹏里等^[3]对我国 1960—2014 年的干旱研究表明,气候变暖背景下我国干旱范围扩大、程度加剧、频次增加、持续时间变长,且干旱发生的范围有所转移,南方各区域干旱加重趋势明显大于北方各区域,尤其西南、华中、华南等地区干旱明显加重。西南地区是我国重要的农业和经济作物生产区,科学评估干旱灾害风险对西南地区在防灾、减灾和救灾等方面具有重要的指示意义。

针对不同地区的旱灾风险评估研究,国外学者 Dabanli^[4]根据水文和社会经济数据对以土耳其为代表的地中海地区进行了干旱危害性以及脆弱性的分析和风险评估;Singh 等^[5]通过评估几种干旱指数构建综合框架分析了印度克里希纳流域干旱灾害风险分布。国内王莺等^[6]基于灾害学理论,对我国南方干旱灾害进行了风险评估;黎世民等^[7]基于格网尺度,采用模糊聚类的方法对河南省冬小麦进行了气象干旱区划和风险评估;丁青云等^[8]基于信息扩散理论评估模型,利用降水距平百分率和标准化降水指数对云南省楚雄市长期和近 5 a 的干旱风险率进行了评估。此外,基于 GIS 的空间数据分析能力,学者们从致灾因子危险性、孕灾环境脆弱性、承灾体暴露性、防灾减灾能力 4 个方面选取指标,通过构建旱灾风险评估模型进行了不同地区的旱灾风险区划分析,如徐玉霞等^[9]对陕西省进行的旱灾风险评估和区划,刘晓冉等^[10]对重庆市不同季节的干旱灾害进行的风险评估与区划。

在干旱研究基础上,通过引入未来模式情景数据,可以探究未来的干旱变化趋势。如利用 CMIP5 多模式模拟数据,赵天保等^[11]将全球 GPCC(Global Precipitation Climatology Centre)的年总降水气候平均值 500 mm

所围成的区域定义为干旱半干旱地区,并对此区域进行了未来气候变化模拟和预估。许崇海等^[12]根据 IPCC AR4 多模式和 PDSI 指数,从干旱频率、持续时间、干旱面积、分布型几个方面评估了全球气候模式对中国地区 1961—2000 年干旱变化的模拟能力,并预估了 SRES A1B 情景下在未来 40 a 干旱的可能变化特征。韩会庆等^[13]基于 CMIP5 模式数据和 SPI 指数,利用 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 三种排放情景下的降水预估月值数据分析了贵州省 2016—2050 年的干旱趋势。张奇谋等^[14]利用 CMIP5 的 5 个 GCMs 数据,以 RCP2.6 和 RCP8.5 两种情景下的日降雨预估数据通过计算汉江流域的多尺度 SPI 指数,预估了汉江流域未来干旱的变化趋势。目前,最新的第六次国际耦合模式比较计划 CMIP6 由于参与的模式数量多、科学试验完善、提供的模拟数据丰富,与 CMIP5 模式相比,考虑的过程更复杂,且大气和海洋模式的分辨率明显提高^[15]。此外,CMIP6 模式将 CMIP5 的 RCPs 情景和共享社会经济路径 SSPs 进行组合,更能满足政府研究的需求^[16]。

从气象灾害上来看,西南地区近 60 a 干旱灾害范围、程度和频次均在增加,受灾率、成灾率和绝收率上升,干旱综合损失率明显高于全国平均水平,是中国旱灾最频发的地区之一^[17]。特别是 2009—2012 年西南地区的持续性干旱事件给西南地区农业生产和社会经济发展造成了严重的损失^[18]。目前,对西南地区旱灾风险预估的研究较少,已有研究中 Wang 等^[19]利用 CMIP5 多模式在 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下对西南干旱进行了未来 3 个时期的预估,但仅利用 SPEI 指数进行,相对简单。因此,本文利用 CMIP6 多模式数据,基于多指标构建旱灾风险未来评估模型,在 3 种不同情景组合下对西南未来两个时期的旱灾风险进行综合预估,其结果能为西南地区旱灾风险预警和防范提供重要的参考价值。

1 研究区概况

本文研究的西南地区主要包括四川省、云南省、贵州省和重庆市,地理范围介于 21°08′—34°19′N, 97°08′—110°11′E。全区地形复杂多样,以山地地形

为主,同时还有云贵高原和四川盆地等。西南地区是重要的农业和经济作物生产区,气候整体较为湿润,但区域之间差异大,降水量分布不均,变率大,加之大气环流的动力和热力作用,导致西南地区气候复杂多变,灾害性天气频发。在全球气候变暖的背景下,西南地区近 50 年来呈“暖干化”趋势,且在 21 世纪以后进一步加剧,面积和频率均有增大的趋势^[20]。

2 数据资料和研究方法

2.1 数据资料

温度和降水观测资料来自于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供的中国地面温度和降水月值 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 格点数据集(V2.0)。CMIP6 全球气候系统模式数据来自于网站 <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>,包括历史气候模拟试验(简称 historical)下 1985—2014 年的气温和降水模式数据,以及气温、降水、地形、土壤含水量等在 SSP126(可持续发展低辐射强迫)、SSP245(中度发展中等辐射强迫)、SSP585(化石燃料驱动的发展高辐射强迫)3 种未来情景下 2021—2060 年的模式模拟数据。根据资料的可利用性,总共选取了 30 个气候模式数据,其模式基本信息见表 1。由于各模式的分辨率不同,为了在模式评估中便于模式与观测数据,以及模式和模式之间进行相互对比,将模式数据统一使用双线性插值法插值到 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 的格点上。

此外,利用全球环境研究中心(<http://www.cger.nies.go.jp/gcp/population-and-gdp.html>)提供的共享社会经济路径 SSPs 的 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 网格数据,选用了 3 种情景 SSP1(可持续路径)、SSP2(中间路径)、SSP3(区域竞争路径)下的与 CMIP6 模式未来 3 种情景相对应的 GDP 和人口数据进行旱灾未来承灾体易损性评估分析。

2.2 研究方法

根据相关系数、标准差之比和技巧评分,首先评估 30 个 CMIP6 模式对历史试验期降水和温度的模拟性能,选出技巧评分排名前 10 的模式,得到 3 种未来组合情景 SSP126, SSP245, SSP585 下的 CMIP6 多模式集合平均数据,然后基于 SPEI 指数、地形、人口、GDP 和土壤含水量等指标,利用 AHP-熵权组合权重法,构建包括致灾因子危险性和承灾体易损性的旱灾风险未来评估模型,最后利用 ArcGIS 的反距离权重插值和自然断点法,预估西南地区 2021—2040 年未来近期和 2041—2060 年未来远期旱灾风险。

2.2.1 技巧评分 通过技巧评分 S_1 和 S_2 来定量评估每个模式对研究区域的模拟能力,其中技巧评分值

越大说明该模式的模拟能力越好^[21]。 S_1 和 S_2 的计算公式如下:

$$S_1=\frac{4(1+R)}{(\sigma+1/\sigma)^2(1+R_0)} \tag{1}$$

$$S_2=\frac{4(1+R)^4}{(\sigma+1/\sigma)^2(1+R_0)^4} \tag{2}$$

式中: R 为模拟值和观测值之间的相关系数; R_0 为最大相关系数; σ 为模拟值与观测值之间的标准差之比。

表 1 CMIP6 中 30 个气候模式基本信息

序号	模式名	所属国家	大气模式分辨率 (格点数)
1	ACCESS-CM2	澳大利亚	144×192
2	ACCESS-ESM1-5	澳大利亚	145×192
3	AWI-CM-1-1-MR	德国	192×384
4	BCC-CSM2-MR	中国	160×320
5	CAMS-CSM1-0	中国	160×320
6	CanESM5	加拿大	64×128
7	CESM2-WACCM	美国	192×288
8	CIESM	中国	192×288
9	CMCC-CM2-SR5	意大利	192×288
10	CMCC-ESM2	意大利	192×288
11	EC-Earth3	欧盟	256×512
12	EC-Earth3-CC	欧盟	256×512
13	EC-Earth3-Veg	欧盟	256×512
14	EC-Earth3-Veg-LR	欧盟	160×320
15	FGOALS-f3-L	中国	180×288
16	FGOALS-g3	中国	80×180
17	FIO-ESM-2-0	中国	192×288
18	GFDL-ESM4	美国	180×288
19	IITM-ESM	印度	94×182
20	INM-CM4-8	俄罗斯	120×180
21	INM-CM5-0	俄罗斯	120×180
22	IPSL-CM6A-LR	法国	143×144
23	KACE-1-0-G	韩国	144×192
24	MIROC6	日本	128×256
25	MPI-ESM1-2-HR	德国	192×384
26	MPI-ESM1-2-LR	德国	96×192
27	MRI-ESM2-0	日本	160×320
28	NorESM2-LM	挪威	96×144
29	NorESM2-MM	挪威	192×288
30	TaiESM1	中国	192×288

2.2.2 标准化降水蒸散指数(SPEI) SPEI 在 SPI 的基础上增加了对蒸散项的考虑,既有 SPI 和 PDSI 的优点,又结合了温度的影响,相对干旱监测效果较好。本文主要基于 Thornthwaite 方法求潜在蒸散量来计算 SPEI,用于表征干旱程度,具体计算公式可参阅文献[22],干旱等级划分可见表 2。

表 2 SPEI 干旱等级划分

等级	类型	SPEI 范围
1	无旱	$-0.5 < \text{SPEI}$
2	轻旱	$-1.0 < \text{SPEI} \leq -0.5$
3	中旱	$-1.5 < \text{SPEI} \leq -1.0$
4	重旱	$-2.0 < \text{SPEI} \leq -1.5$
5	特旱	$\text{SPEI} \leq -2.0$

2.2.3 AHP-熵权组合权重法 层次分析法(AHP)是一种将定性与定量相结合的主观分析方法,而熵权法是一种广泛应用的客观赋权法。本文首先通过层次分析法与熵权法分别计算权重,然后再利用线性组合将主观和客观的权重相结合得到综合权重,从而可以充分发挥主客观赋权方法的优点,提高评估结果的可靠性,具体的计算方法可参阅文献[23]。

2.2.4 旱灾风险未来预估模型 根据已有的研究,考虑到资料的完整性和可获取性,本文主要从致灾因子危险性和承灾体易损性两个方面来综合分析旱灾风险,通过构建评估模型“未来旱灾综合风险=未来致灾因子危险性×未来承灾体易损性”对西南地区旱灾风险进行未来预估。其中,未来致灾因子危险性包括干旱强度和干旱频率 2 个指标,通过计算未来时期的 SPEI 指数来反映,SPEI 值表征干旱强度,干旱频率为干旱发生年数与总研究年数之比;未来承灾体易损性包括地形、未来人口、未来 GDP、未来土壤含水量 4 个评价指标。由于所选指标数据的量纲和数量级不一致,为了便于比较和计算,主要采用极值标准化方法^[24]对所有指标进行无量纲化处理。

3 结果与分析

3.1 模式模拟性能评估及 SPEI 精度验证

已有研究表明,从总体上来看多模式集合的结果与观测值更接近。本文首先选取 1980—2014 年的观测数据和历史气候模式试验数据进行 30 个 CMIP6 模式的模拟性能评估。表 3 为其的空间相关系数 R 、标准差之比 σ 和技巧评分 S_1, S_2 的计算结果。可以看出,各模式对气温的模拟情况均较好,而对降水的模拟效果有所差异,其中 EC-Earth3, EC-Earth3-CC, EC-Earth3-Veg 这 3 个模式对降水的模拟效果最好。故根据对降水的技巧评分结果,最终选出排名前 10 的模式有:ACCESS-CM2(1)、ACCESS-ESM1-5(2)、EC-Earth3(11)、EC-Earth3-CC(12)、EC-Earth3-Veg(13)、EC-Earth3-Veg-LR(14)、INM-CM4-8(20)、INM-CM5-0(21)、IPSL-CM6A-LR(22)和 MIROC6(24),且选出的 10 个模式均通过了 0.1 的显著性水平检验。

为验证多模式集合平均对 SPEI 指数的计算精度,然后利用筛选出的前 10 个模式进行温度和降水的集合平均,由 SPEI 指数计算干旱强度得到试验期模拟值和观测值的干旱强度时间变化趋势图 1。可以看出,观测值与模拟值之间的干旱强度时间变化均呈现一致的下降趋势,相比而言,虽观测值的下降幅度较小,但差别不大,10 个模式集合平均的 SPEI 指数模拟结果较好,能反映出其时间变化趋势,满足本文的研究需求。因此后续对旱灾风险的未来预估主要使用 10 个模式的集合平均数据进行。

3.2 旱灾风险未来预估

3.2.1 致灾因子危险性未来预估 致灾因子危险性是指干旱灾害的异常程度,与干旱发生的强度、频率、持续时间等因素有关。通常,致灾因子危险性越高,干旱灾害风险越大,对人类社会的危害程度也越大。根据 AHP-熵权组合权重法,结合干旱强度和干旱频率两个评价指标,权重分别为 0.8, 0.2, 对 SSP126, SSP245, SSP585 三种组合情景下的 2021—2040 年、2041—2060 年两个近远期的西南地区未来旱灾致灾因子危险性进行了预估,结果见图 2,主要利用 ArcGIS 的自然断点法分为低危险区、次低危险区、中危险区、次高危险区和高危险区 5 个等级。

可以看出,未来近期(图 2A, 2C, 2E)的危险区分布较零散,以低和次低危险区为主,高和次高危险区多分布于川西地区、贵州省东部地区、云南省南部和重庆东部地区;未来远期(图 2B, 2D, 2F)的危险性明显增加,以次低和中危险区为主,高和次高危险区多分布于四川西部和北部地区、贵州省大部分地区、云南省东部和西部局部地区。在 SSP126 情景下,危险性均值由近期 0.6 增大至远期 0.74,川西高原和四川盆地的高危险区明显扩大,其余 3 省市以次高危险区为主;SSP245 情景下,危险性均值由近期 0.56 增至远期 0.74,空间分布由近期的中部低、四周高发展为远期的中部高,并向南北两边逐渐减小的态势;在 SSP585 情景下,西南地区危险性均值由 0.59 增大至 0.71,四川高危险区范围扩大,重庆市东部地区次高危险区变为低危险区,贵州省以次高危险区为主,云南省以中危险区为主。

3.2.2 承灾体易损性未来预估 承灾体易损性包括了承灾体的暴露性和孕灾环境的脆弱性,主要受地形、土壤、水文、植被、农作物、区域经济社会条件等多种因素影响。承灾体易损性越高,在同等致灾情况下对旱灾的放大程度越大,区域能够承受的干旱损失越小,则旱灾风险也就越大。根据地形、土壤含水量、人口和 GDP 这 4 个指标,利用 AHP-熵权组合权重法

分别赋予 0.29,0.25,0.3,0.16 的权重,对 SSP126, 2041—2060 年两个近远期的西南地区未来旱灾承灾
SSP245,SSP585 三种组合情景下 2021—2040 年、 体易损性预估,结果见图 3,同样划分了 5 个等级。

表 3 30 个 CMIP6 气候模式试验数据和观测数据的空间相关系数、标准差之比、技巧评分

序号	降水				气温			
	R	σ	S_1	S_2	R	σ	S_1	S_2
1	0.32	1.183	0.833 *	0.5203 *	0.92	0.946	0.987	0.958
2	0.407	1.081	0.908 *	0.691 *	0.91	0.928	0.98	0.936
3	−0.108	0.948	0.577	0.112	0.929	0.969	0.994	0.979
4	0.103	1.037	0.715	0.262	0.921	1.005	0.991	0.963
5	−0.313	0.834	0.431	0.038	0.931	0.912	0.987	0.975
6	0.128	0.978	0.732	0.287	0.898	1.054	0.976	0.916
7	−0.056	1.241	0.585	0.134	0.934	0.956	0.995	0.988
8	−0.009	0.002	0	0	0.934	0.970	0.997	0.989
9	−0.153	1.797	0.397	0.066	0.927	0.988	0.994	0.975
10	−0.193	1.777	0.383	0.055	0.925	1.013	0.993	0.971
11	0.512	1.065	0.977 *	0.923 *	0.938	1.048	0.997	0.996
12	0.513	1.042	0.980 *	0.928 *	0.939	1.050	0.998	0.998
13	0.528	1.018	0.991 *	0.966 *	0.938	1.038	0.998	0.997
14	0.396	0.954	0.904 *	0.672 *	0.933	1.045	0.995	0.986
15	0.151	1.521	0.629	0.262	0.935	1.112	0.987	0.981
16	−0.230	1.287	0.469	0.059	0.932	1.137	0.98	0.969
17	−0.153	1.857	0.383	0.064	0.935	1.021	0.997	0.991
18	0.08	1.025	0.7	0.241	0.933	0.988	0.997	0.988
19	0.244	0.814	0.774	0.407	0.923	0.985	0.992	0.967
20	0.541	1.241	0.955 *	0.955 *	0.915	0.855	0.964	0.928
21	0.457	1.322	0.876 *	0.740 *	0.915	0.865	0.967	0.932
22	0.366	0.866	0.868 *	0.605 *	0.929	1.206	0.961	0.946
23	0.293	1.186	0.815	0.481	0.896	1.224	0.939	0.878
24	0.315	1.18	0.830 *	0.516 *	0.916	0.970	0.987	0.953
25	−0.051	0.935	0.613	0.143	0.931	0.995	0.996	0.984
26	−0.262	1.013	0.479	0.053	0.917	0.922	0.982	0.949
27	0.252	1.009	0.812	0.436	0.936	1.038	0.997	0.992
28	−0.100	0.933	0.581	0.116	0.915	0.896	0.976	0.940
29	0.180	1.112	0.757	0.340	0.935	0.989	0.998	0.992
30	−0.110	1.932	0.385	0.074	0.935	1.011	0.998	0.992

注: * 分别为技巧评分排名前 10 的模式。

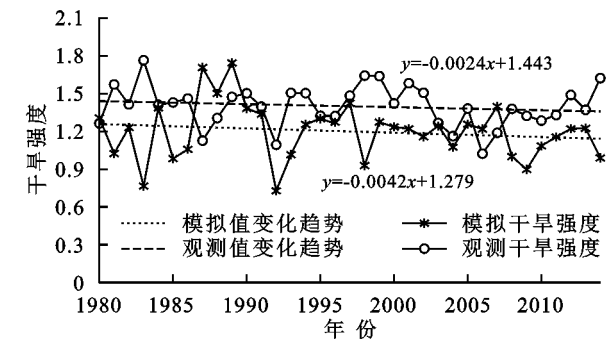
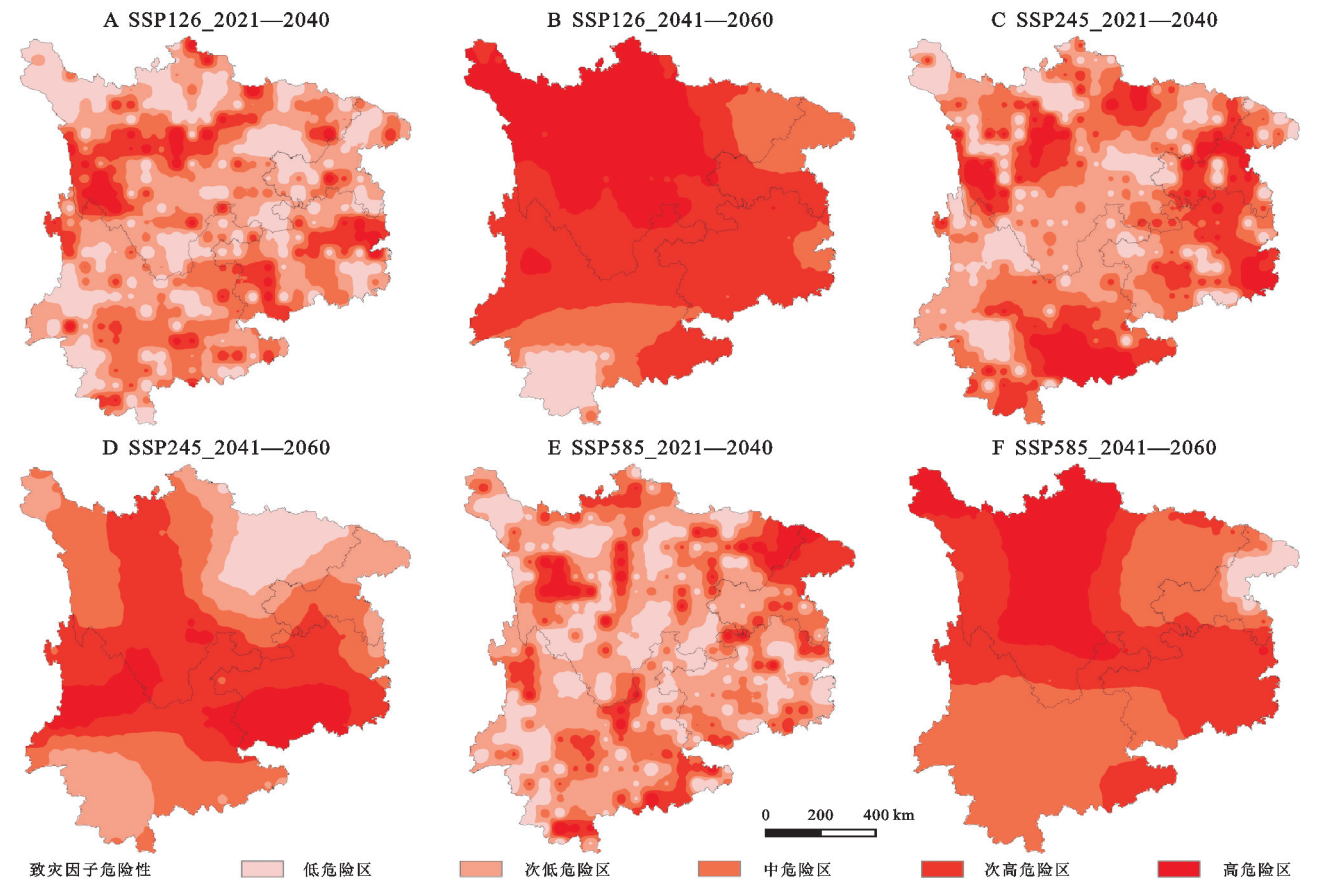


图 1 试验期西南地区干旱强度观测值和 10 个模式
集合平均的时间变化趋势

可以看出,未来 3 种情景组合下两个时期的西南
地区易损性空间分布基本相似,主要呈现出由西北向

东南的递增变化特点,即高和次高易损区主要分布
在云南东部和贵州南部地区,其余地区以次低和中
易损区为主。此外,四川省的都江堰、温江,重庆市的
沙坪坝、奉节等地区也是局部的高易损区。在 SSP126
情景下,易损性均值从近期 0.3 增至远期 0.31,贵州
省和云南省中部的高易损区范围局部增加,次高和
中易损区向四川扩大,云、贵、渝 3 省市的次低易损
区都在减小。SSP245 和 SSP585 情景下,西南地区
两个时期的易损性均值都为 0.3,除 SSP245 情景下
位于四川省南部的盐源、西昌地区的小范围次高易
损区减小,其余地区未来近期和远期的易损区分布均
无明显变化。



注：基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2019)1786 号的标准地图制作，底图未做修改，下图同。

图 2 3 种不同情景组合下西南地区未来两个时期旱灾致灾因子危险性空间分布

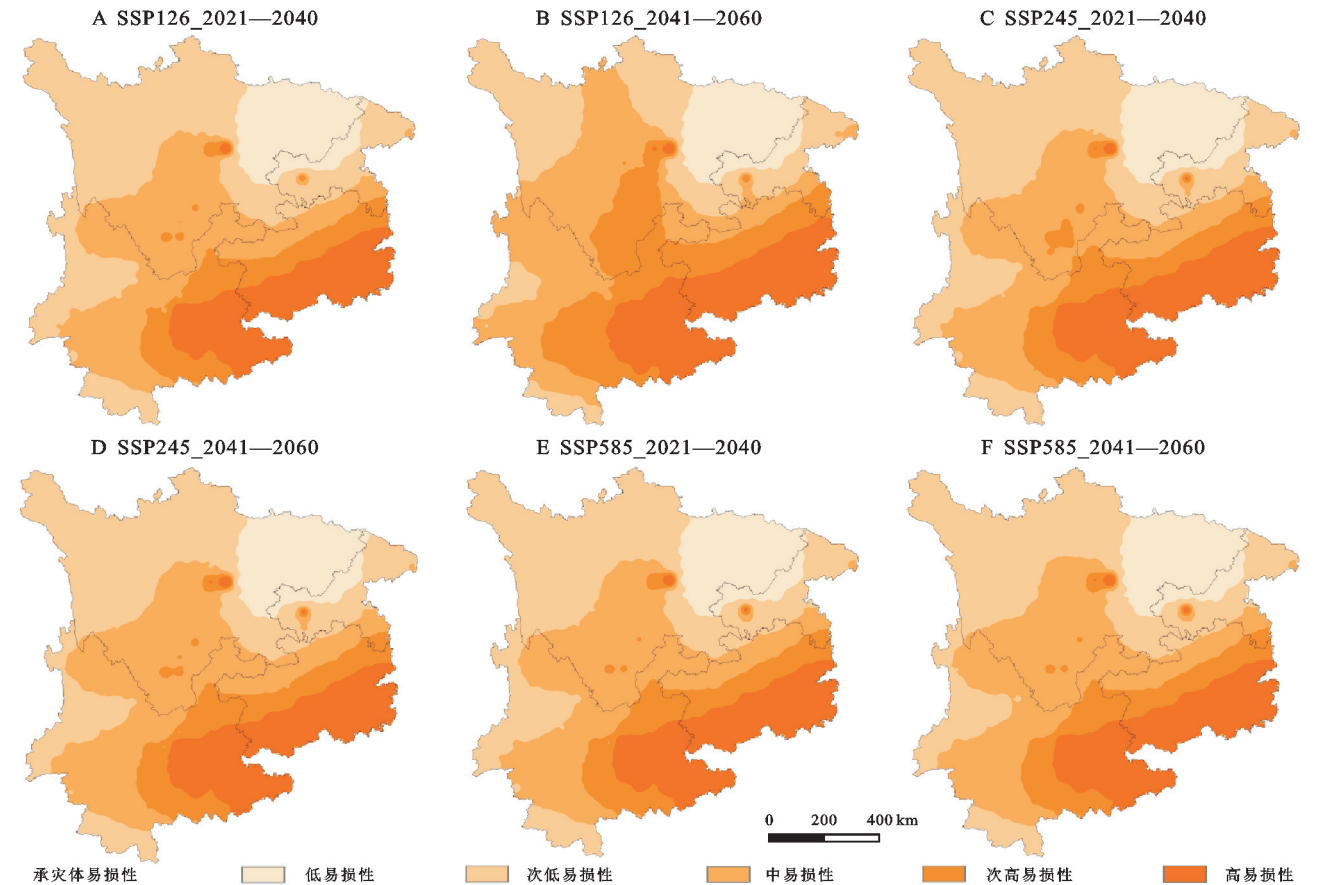


图 3 3 种不同情景组合下西南地区未来两个时期旱灾承灾体易损性空间分布

3.2.3 旱灾风险未来综合预估 基于以上的未来致灾因子危险性和未来承灾体易损性,根据 AHP-熵权组合权重法和自然断点法,通过分别赋予 0.4、0.6 的权重,对 SSP126, SSP245, SSP5853 种不同组合

情景下的未来近期 2021—2040 年和远期 2041—2060 年西南地区旱灾风险进行了综合预估,从而得到 5 个级别的综合旱灾风险未来预估空间等级分布(图 4)。

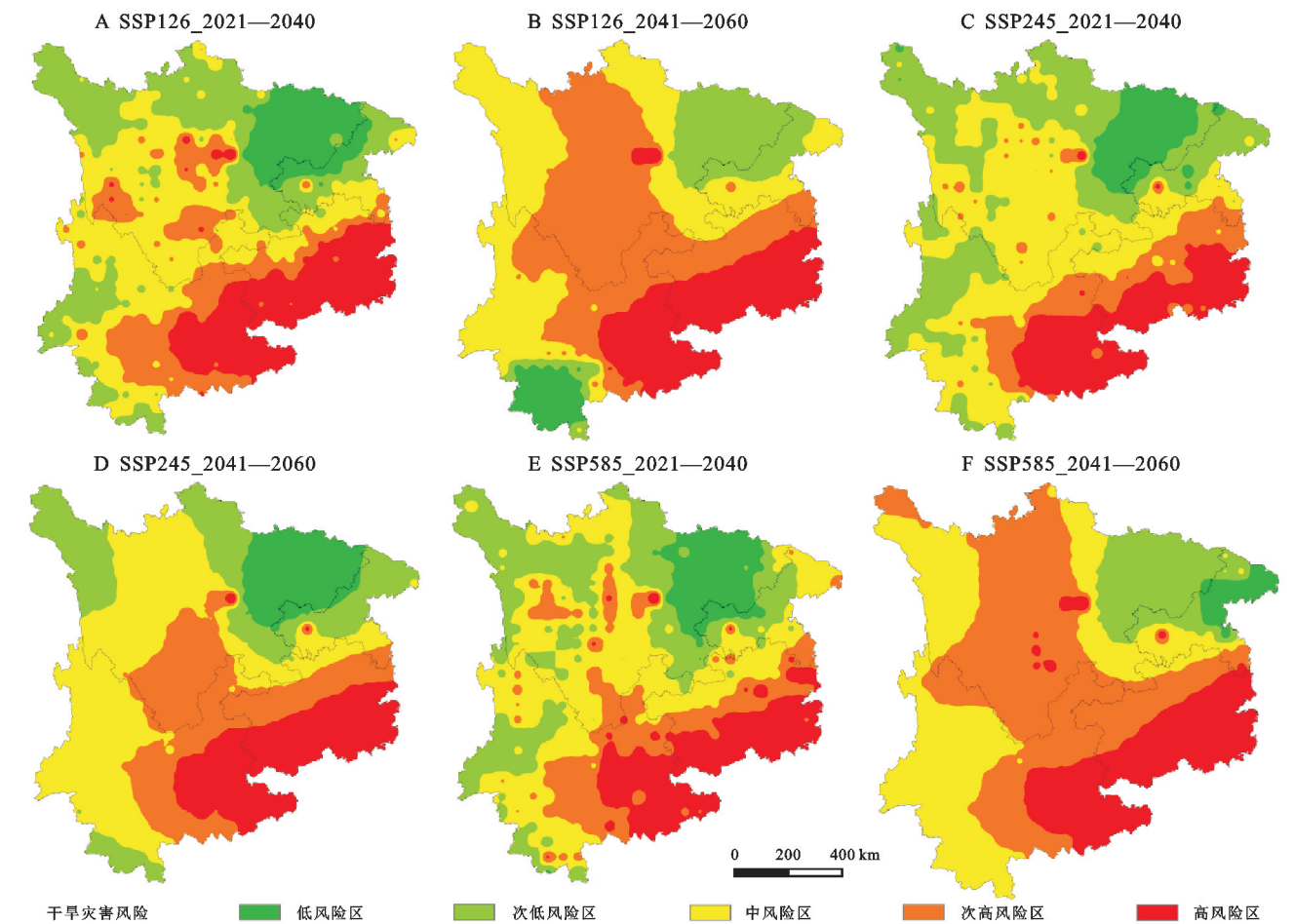


图 4 3 种不同情景组合下西南地区未来两个时期旱灾风险综合预估空间分布

可以看出,未来 3 种情景组合下西南地区未来两个时期的旱灾风险分布特征较相似,未来近期(图 4A,4C,4E)的风险区分布相对较零散,未来远期(图 4B,4D,4F)的风险区分布相对较均匀。高风险区主要分布在贵州南部和云南东部地区,低风险区主要分布在四川东部和相邻的重庆西部等地区,大致呈南北递减的变化趋势;此外,在重庆的沙坪坝地区、四川的温江、越西等地区零星分布有高风险区。在 SSP126 情景下,西南地区未来旱灾风险均值从近期 0.42 增至远期 0.48,其中四川省旱灾风险增大,川东及相邻的渝西局部地区由低风险区变为次低风险区,四川中部零散分布的次高风险区向川北及川西地区扩大为大面积的次高风险区,云南省高风险和次高风险区无明显变化。SSP245 情景下,未来旱灾风险均值从近期 0.4 增至远期 0.48,高风险区和次高风险区分布范围均有扩大,西南地区整体干旱风险增加;贵州南部

和云南东部地区的高风险区在省内向北小范围扩大,而次高风险区向西北方向扩大至四川中部;云南省西部的次低风险区全部转为中风险区。在 SSP585 情景下,未来旱灾风险均值从近期 0.42 增至远期 0.47,空间分布变化趋势与 SSP245 情景相似;低风险区只在重庆梁平、万州、奉节等局部地区存在,次低风险区仅分布于川东及重庆北部,次高风险区将成为西南地区最主要的旱灾风险区,并向西北方向一直扩大到四川北部;云南省西部的次低风险区全部转为中风险区。从近期到远期,未来 3 种情景组合都呈现出次高和高风险区范围扩大,次低和低风险区范围减小,旱灾风险整体呈现加大加重的趋势。

4 讨论与结论

基于 CMIP6 模式数据,利用 AHP-熵权组合权重法和 ArcGIS 的空间分析功能,通过构建包含致灾

因子危险性和承灾体易损性的旱灾风险评估模型,本文对3种组合情景 SSP126, SSP245, SSP585 下的 2021—2040 年近期和 2041—2060 年远期西南旱灾风险进行了未来预估,得出以下一些主要结论:(1)通过技巧评分筛选的多模式集合平均对历史试验期降水和气温的空间分布模拟效果较好,且干旱强度也与观测资料的时间变化趋势一致,整体呈现缓慢下降的趋势。(2)致灾因子危险性在未来近期的危险区分布较零散,以低和次低危险区为主,高和次高危险区多分布于川西地区,贵州省东部,云南省南部和重庆东部地区;未来远期的危险性明显增加,以次低和中危险区为主,高和次高危险区多分布于四川西部和北部地区、贵州省大部分地区、云南省东部和西部部分地区。(3)承灾体易损性在未来两个时期的空间分布相似,由西北向东南递增。即高和次高易损区主要分布在云南省东部和贵州省南部地区,其余地区以次低和中易损区为主。此外,四川省的都江堰、温江,重庆市的沙坪坝、奉节等地区也是局部的高易损区。(4)西南旱灾风险未来综合预估结果表明,未来3种情景组合下两个时期的旱灾风险分布特征较相似,高风险区主要都分布在贵州省南部和云南省东部地区,低风险区主要分布在四川东部和重庆西部等地区,大致呈南北递减的变化趋势。从近期到远期,未来3种情景组合都呈现出次高和高风险区范围扩大,次低和低风险区范围减小的变化趋势。

从本文对西南旱灾风险未来预估的结果来看,西南地区的未来旱灾风险整体将加大加重,且贵州和云南省东部地区未来将一直处于高和次高风险区,更易发生旱灾,这个结论与周秀华^[25]、刘小刚等^[26]、吕桂军等^[27]对云南和贵州的未来干旱变化趋势预估结果较一致。此外,四川省中部的次高风险区范围从未来近期到远期在扩大,说明四川省中部地区未来旱灾受灾面积增大,干旱发生趋势增加,需重点防范,而重庆由于受地形和降水量分布等多种因素影响,除沙坪坝局部地区有较大的旱灾风险外,整体未来处于低或次低风险区,不易发生旱灾。未来西南地区旱灾风险增加,可能与全球变暖背景下热带和副热带的大气环流增强且北移扩大有关,尤其是云南和贵州地理位置更靠近赤道,受热力影响更明显。但未来各地区在变暖趋势下,受副热带高压、季风、海温等影响机制的具体变化情况尚不明确,有待更进一步深入细致的探究。

目前,在 CMIP5 模式基础上已经开展了较多对西南地区气温、降水以及干旱时空特征变化的研究,但基

于 CMIP6 模式对西南地区干旱风险的预估研究仍然十分有限。CMIP6 模式具有更高的分辨率,对温度和降水等变量的模拟能力相对 CMIP5 有了明显提高。本文利用优选的 CMIP6 多模式集合平均数据,能降低单个模式预估未来干旱状况的偏差,使得模拟效果能更加可靠,且本文的旱灾风险预估不仅反映了西南地区未来干旱加重加大的趋势,还从空间分布上将干旱风险区域更加细化和精确,更能为各个地区防范未来旱灾风险提供有效参考。然而,限于未来模式数据的完整性和可获取性,研究对西南未来旱灾风险预估模型的构建不仅考虑了基于 SPEI 指数表征的干旱强度和干旱频率致灾因子危险性,还考虑了包括地形、人口、GDP 和土壤含水量的承灾体易损性指标,但和目前对历史时期的旱灾风险评估模型相比,构建相对简单,而选用过多的未来评估指标从另一方面也会极大增加其预估的不确定性。为了增加未来干旱风险预估的精度,减少分析的不确定性,也可以对采用的全球气候模式使用统计或动力降尺度,多模式不同权重集合,以及利用区域气候模式数据等进行完善改进,以上这些都将是后续进一步需要开展的工作。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014.
- [2] Murray V, Ebi K L. IPCC special report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation(SREX)[J]. Journal of Epidemiology and Community Health, 2012, 66(9): 759-760.
- [3] 马鹏里, 韩兰英, 张旭东, 等. 气候变暖背景下中国干旱变化的区域特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39(6): 209-215.
- [4] Dabanli I. Drought hazard, vulnerability, and risk assessment in Turkey [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(18). DOI: 10.1007/s12517-018-3867-x.
- [5] Singh G R, Jain M K, Gupta V. Spatiotemporal assessment of drought hazard, vulnerability and risk in the Krishna River basin, India[J]. Natural Hazards, 2019, 99(2): 611-635.
- [6] 王莺, 沙莎, 王素萍, 等. 中国南方干旱灾害风险评估[J]. 草业学报, 2015, 24(5): 12-24.
- [7] 黎世民, 张红利, 王来刚, 等. 基于格网和模糊聚类的河南省冬小麦气象干旱风险区划与分析[J]. 河南农业科学, 2020, 49(11): 172-180.
- [8] 丁青云, 艾萍, 吴军澜, 等. 基于信息扩散理论的干旱灾害风险评估[J]. 中国农村水利水电, 2015(3): 99-102.
- [9] 徐玉霞, 许小明, 杨宏伟, 等. 基于 GIS 的陕西省干旱灾害风险评估及区划[J]. 中国沙漠, 2018, 38(1): 192-199.

[10] 刘晓冉,康俊,王颖,等.基于 GIS 的重庆地区不同季节干旱灾害风险评估与区划[J].自然灾害学报,2019,28(2):92-100.

[11] 赵天保,陈亮,马柱国.CMIP5 多模式对全球典型干旱半干旱区气候变化的模拟与预估[J].科学通报,2014,59(12):1148-1163.

[12] 许崇海,罗勇,徐影.IPCC AR4 多模式对中国地区干旱变化的模拟及预估[J].冰川冻土,2010,32(5):867-874.

[13] 韩会庆,张娇艳,陈梦玲,等.RCPs 情景下贵州省干旱趋势分析[J].水利水电技术,2018,49(10):1-7.

[14] 张奇谋,陈思,陈松生,等.不同 RCP 情景下未来汉江流域气象干旱变化趋势预估研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(6):1470-1480.

[15] 周天军,邹立维,陈晓龙.第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述[J].气候变化研究进展,2019,15(5):445-456.

[16] 姜彤,景丞,王艳君,等.SSPs 路径下实现全球可持续发展目标的可能性分析[J].中国科学:地球科学,2020,50(10):1445-1454.

[17] 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.

[18] 姚玉璧,张强,王劲松,等.中国西南干旱对气候变暖的响应特征[J].生态环境学报,2014,23(9):1409-1417.

[19] Wang L, Chen W, Zhou W. Assessment of future drought in Southwest China based on CMIP5 multimodel projections[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2014,31(5):1035-1050.

[20] 苏秀程,王磊,李奇临,等.近 50 a 中国西南地区地表干湿状况研究[J].自然资源学报,2014,29(1):104-116.

[21] 张武龙,张井勇,范广洲.CMIP5 模式对我国西南地区干湿季降水的模拟和预估[J].大气科学,2015,39(3):559-570.

[22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.气象干旱等级 GB/T20481—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.

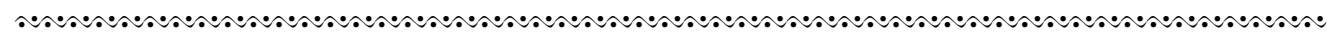
[23] 刘媛媛,王绍强,王小博,等.基于 AHP_熵权法的孟印地区洪水灾害风险评估[J].地理研究,2020,39(8):1892-1906.

[24] 王鹏涛.西北地区干旱灾害时空统计规律与风险管理研究[D].西安:陕西师范大学,2018.

[25] 周秀华.我国西南及周边地区气候的模拟和预估[D].北京:中国气象科学研究院,2014.

[26] 刘小刚,冷险险,孙光照,等.基于 1961—2100 年 SPI 和 SPEI 的云南省干旱特征评估[J].农业机械学报,2018,49(12):236-245,299.

[27] 吕桂军,冷险险,刘小刚,等.基于 CMIP5 多模式集合预估贵州省干旱时空变化[J].江苏大学学报:自然科学版,2021,42(2):221-228.



(上接第 246 页)

[22] 鲁亚楠,姚顺波,邓元杰,等.陕北地区土地利用及景观格局变化对生态服务价值的影响:基于退耕还林(草)背景[J].中国农业资源与区划,2019,40(11):180-192.

[23] 何云玲,余岚,屈新星,等.云南喀斯特关键带植被时空变化特征及气候与人为影响因子解析[J].长江流域资源与环境,2021,30(2):439-447.

[24] 董懿,尹冬勤,李渊,等.黄土高原植被的时空变化及其驱动力分析研究[J].中国农业大学学报,2020,25(8):120-131.

[25] 殷崎栋,柳彩霞,田野.基于 MODIS NDVI 数据的陕西省植被绿度时空变化及人类活动影响[J].生态学报,2021,41(4):1571-1582.

[26] Zhu Z, Bi J, Pan Y, et al. Global data sets of vegetation leaf area index(LAI)3g and fraction of photosynthetically active radiation (FPAR)3g derived from global inventory modeling and mapping studies (GIMMS) normalized difference vegetation index(NDVI3g) for the period 1981 to 2011 [J]. Remote Sensing, 2013,5(2):927-948.

[27] Zhao A Z, Zhang A B, Liu X F, et al. Spatiotemporal changes of normalized difference vegetation index(NDVI) and response to climate extremes and ecological restoration in the Loess Plateau, China[J]. Theoretical and Applied Climatology,2018,132:555-567.

[28] Geng G, Yang R, Liu L. Downscaled solar-induced chlorophyll fluorescence has great potential for monitoring the response of vegetation to drought in the Yellow River Basin, China: Insights from an extreme event[J]. Ecological Indicators, 2022,138:108801.

[29] Piao S, Yin G, Tan J, et al. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years[J]. Global Change Biology, 2015,21(4):1601-1609.

[30] 杨睿,耿广坡,周洪奎,等.基于 SPEI_PM 指数的渭河流域气象干旱时空演变特征[J].中国农业气象,2021,42(11):962-974.