

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.006

基于CMIP6的全球及干旱带干旱时空演变

杨肖丽^{1,2}, 马慧君^{1,2}, 吴凡^{1,2}, 张梦如^{1,2}, 张林燕^{1,2}, 崔周宇^{1,2}, 任立良^{1,2}, 袁山水³

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098)

摘要:针对全球范围内极端气候事件频繁发生的问题,采用等距离分位数方法,构建CMIP6模式高精度降水、气温数据库,耦合帕默尔干旱指数(PDSI)预估未来情景(SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5)下全球及干旱带干旱特征时空演变趋势。结果表明:经过偏差校正的CMIP6模拟精度明显提高;基准期(1979—2014年)全球干旱频次变化较小,干旱历时较长,干旱烈度较强,干旱带的干旱烈度较弱;预测期(2025—2060年)全球干旱特征在时空分布上差异性显著,干旱频次较高,平均干旱历时增加,平均干旱烈度增强;预测期干旱带干旱频次、干旱历时和干旱烈度均呈现增加趋势,热带/亚热带干旱带和温带干旱带变旱趋势较显著。

关键词:气候变化;全球;干旱带;CMIP6;PDSI;干旱特征

中图分类号:P338+.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)02-0040-10

Spatiotemporal evolution of global and arid zone drought based on CMIP6// YANG Xiaoli^{1,2}, MA Huijun^{1,2}, WU Fan^{1,2}, ZHANG Mengru^{1,2}, ZHANG Linyan^{1,2}, CUI Zhouyu^{1,2}, REN Liliang^{1,2}, YUAN Shanshui³ (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In view of the frequent occurrence of extreme weather events in the world, the isometric quantile method was adopted to build the high-precision precipitation and temperature database of CMIP6. Coupled with Palmer drought index (PDSI), the spatiotemporal evolution of global and arid zone drought characteristics under future scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) was estimated. The results show that the simulation accuracy of CMIP6 with bias correction is significantly improved. In the base period (1979-2014), the global drought frequency changes slightly, the global drought duration and drought intensity are relatively strong, and the drought intensity in the arid zone is relatively weak. During the forecast period (2025-2060), the global drought characteristics have significant differences in spatio-temporal distribution, with higher drought frequency, increased average drought duration and increased average drought intensity. In the forecast period, the frequency, duration and intensity of drought in the arid zone will increase, and the trend of drought in the tropical/subtropical arid zone and the temperate arid zone will become more obvious.

Key words: climate change; global; arid zone; CMIP6; PDSI; drought characteristics

干旱灾害是全球最常见的自然灾害之一,其发生频率高、持续时间长、影响范围广^[1],对全球社会经济、生态环境以及人类生活造成了诸多不利影响。近年来干旱事件频发,自2020年以来,阿根廷东北部发生史上第二强干旱,巴西多地气温达历史最高纪录^[2],非洲马达加斯加南部地区发生了一场持续两年以上的严重干旱^[3]。联合国气候变化专门评

估委员会发布的AR6第一工作组报告指出,未来全球变暖加剧,极端高温事件、海洋热浪等发生频率将随之增加^[4-5]。在20世纪,干旱带对全球陆地变暖的贡献率高达40%^[6],干旱面积较19世纪70年代时增大了2倍多,特别是中亚、非洲和澳大利亚地区^[7]。目前,干旱带覆盖了全球陆地30%以上的面积,居住近1/3的人口,气候复杂多变,生态系统较

基金项目:国家自然科学基金(U2243203,52079036);江苏省自然科学基金(BK20210368);水文水资源与水利工程科学国家重点实验室基金(2021nkzd02)

作者简介:杨肖丽(1976—),女,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: yangxl@hhu.edu.cn

为脆弱,对气候的响应十分敏感^[8-9]。因此,研究全球及干旱带的干旱变化特征具有重要的科学意义。

CMIP6 模式采用共享经济发展路径 SSPs (shared socioeconomic pathways) 情景,增加更为多样的空气污染物排放情景,能根据区域气候预估相关研究提供更合理的模拟结果^[10-11]。国内外已有众多学者将 CMIP6 模式应用于干旱模拟的相关研究^[12-15],如 Zeng 等^[14]在 CMIP6 模式的基础上,分析了全球在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下气象干旱的时空分布特征,结果表明 1901—2100 年全球范围内的干旱事件发生范围、持续时间和严重程度均呈现增长趋势;Seree 等^[15]基于 CMIP6 多模式集合预估东南亚地区未来的气候变化和干旱情况,发现东南亚国家在近期处于中度至中度干旱状态,SSP5-8.5 情景的干旱历时较长,干旱严重程度较高;林慧^[16]对 CMIP6 气候模式模拟淮河中上游干旱特征及趋势进行了分析,结果显示流域干旱程度呈现增长趋势,高排放情景下的干旱化趋势更强。

干旱指数是干旱研究中的重要指标,选用合适的干旱指标能准确反映干旱过程^[17-18]。其中,帕默尔干旱指数 (Palmer drought index, PDSI) 是干旱研究中广泛使用的指标之一,其综合考虑了降水、土壤、潜在蒸发等因素,可有效判断长期干旱状况^[19]。不少学者利用 PDSI 进行干旱评估^[20-21],如 Zhai 等^[22]利用 CMIP6 耦合模式的 sc-PDSI 分析南亚地区 2020—2099 年的气象干旱特征和时空变化,发现该地区干旱事件发生频率高、持续时间较长,西北部和西南部干旱趋势显著;在 CMIP6 模式 CNRM - CM6 数据集的基础上,Nooni 等^[23]对非洲大陆 sc-PDSI 的时空变化进行研究,结果表明 21 世纪非洲的干旱频率、强度和受灾面积增加。在干旱指数的基础上,一些研究结合 Mann-Kendall (M-K) 参数检验等方法对其变化趋势及特征进行检验^[24-25]。已有的对未来干旱趋势预估的大多数结果显示,随着辐射强迫增加,干旱严重程度增加^[26-28]。如 Zhai 等^[22]在南亚地区 2020—2099 年的干旱特征时空变化的研究中,SSP5-8.5 情景干旱持续时间较长、强度较大,SSP1-2.6 情景频率最高,从低排放情景到高排放情景,干旱历时、强度增加,频率减少;Nooni 等^[23]预估非洲大陆的干旱变化时,发现 SSP3-7.0、SSP5-8.5 情景的干旱特征上升趋势大于 SSP1-2.6 和 SSP2-4.5 情景,并且预计在 SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下非洲南部干旱趋势加剧;Zhao 等^[29]基于 CMIP6 模式数据对 21 世纪的干旱变化进行分析,结果表明干旱持续时间增加,SSP5-8.5 情景涨幅大于 SSP2-4.5 情景。

目前 CMIP6 模式研究大多研究聚焦于小尺度区域,少有对全球干旱演变趋势的研究,而全球范围内极端气候事件发生频率频繁,影响范围更大,未来干旱带极端事件发生概率加剧^[30]。因此,本文基于 CMIP6 模式,预估未来不同情景下全球和干旱带的干旱及特征时空变化趋势,以期了解全球气候变化下的干旱特性。

1 研究数据

CMIP6 模式基于综合评估模型、不同 SSPs 以及最新人为排放趋势的新预估情景,未来情景包括 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)、SSP5-8.5 (高等强迫情景),在 2100 年的辐射强迫依次增加。降水和气温是干旱的主要影响因素,本文选用 CMIP6 系列中 15 个全球气候模式基准期 (1979—2014 年) 和预测期 (2025—2060 年) 降水、气温月尺度数据 (表 1),以及美国国家海洋和大气管理局气候预测中心提供的全球历史时期降水、气温月尺度数据作为观测值。

表 1 15 个 CMIP6 气候模式基本信息

Table 1 Basic information on CMIP6's 15 climate models

序号	模式名称	机构	空间分辨率	
			经向/(°)	纬向/(°)
1	ACCESS-CM2	澳大利亚 CSIRO - ARCCSS	1.8	1.2
2	ACCESS-ESM1-5	澳大利亚 CSIRO	1.8	1.2
3	BCC-CSM2-MR	中国 BCC	1.12	1.12
4	CanESM5	加拿大 CCCma	2.8	2.8
5	CESM2-WACCM	美国 NCAR	0.94	1.25
6	CMCC-CM2-SR5	意大利 CMCC	1	1
7	FGOALS-g3	中国 CAS	2	2.25
8	IITM-ESM	印度 CCCR - IITM	2	2
9	MIROC6	日本 MIROC	1.4	1.4
10	MPI-ESM1-2-HR	德国 MRI- MDWD DKRZ	0.9	0.9
11	MPI-ESM1-2-LR	德国 MRI - MAWI DKRZ	1.9	1.9
12	MRI-ESM2-0	日本 MRI	1.125	1.125
13	NorESM2-LM	挪威 NCC	1.9	2.5
14	NorESM2-MM	挪威 NCC	0.9	1.3
15	TaiESM1	中国台湾 RCEC - AS	1.3	0.9

全球干旱带的选取参考柯本-盖格气候分类法^[31]。柯本-盖格气候分类基于降水、气温和植被分布建立,定义了包括热带、干旱带、温暖带、内陆带和极地带在内的 5 个气候组^[32]。表 2 为干旱带气候特征。干旱带可分为热带/亚热带和温带,热带/亚热带半干旱、干旱主要分布于非洲撒哈拉沙漠区、非洲南部、亚洲中西部、蒙古高原以及澳大利亚中部、北美洲落基山脉区、南美洲西部等地,温带半干

旱、干旱则主要分布在沙漠气候区的外围^[33-34]。由于格陵兰岛大面积被冰川覆盖,不纳入本次研究范围。

表 2 干旱带气候特征

Table 2 Climate characteristic of arid zone

气候带及气候类型	代号	气候特征
干旱带	B	全年潜在蒸发量超过降水量
热带/亚热带半干旱	Bsh	潜在蒸发量超过降水量、所有月份的平均气温大于 0℃
热带/亚热带干旱	Bwh	降水量为 Bsh 的 1/2、所有月份的平均气温大于 0℃
温带半干旱	Bsk	与 Bsh 相同、但至少 1 月低于 0℃
温带干旱	Bwk	与 Bwh 相同、但至少 1 月低于 0℃

2 研究方法

2.1 统计降尺度方法

由于各气候模式数据空间分辨率不一致,采用双线性插值法、等距离累积分布函数法(equidistant cumulative distribution function method, EDCDFm)对数据进行降尺度和偏差校正,构建空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的优化数据集。EDCDFm 由 Li 等^[35]基于分位数函数提出,该方法考虑了气候变化中非平稳性带来的影响,能够更好地捕捉气候要素的时空特征,优化全球气候模式预估的精度^[36]。EDCDFm 考虑到历史和未来时期降水、气温的累积分布函数不同,分别构建气候要素观测值、基准期和预测时期模拟值的累积分布函数。降水和气温偏差校正的公式为

$$P_{\text{fad}} = P_f \frac{F_{\text{oc}}^{-1}[F_{\text{mp}}(P_f)]}{F_{\text{mc}}^{-1}[F_{\text{mp}}(P_f)]} \quad (1)$$

$$T_{\text{fad}} = T_f + F_{\text{oc}}^{-1}[F_{\text{mp}}(T_f)] - F_{\text{mc}}^{-1}[F_{\text{mp}}(T_f)] \quad (2)$$

式中: P_{fad} 、 T_{fad} 分别为偏差校正后的降水和气温值; P_f 、 T_f 分别为预测期的降水和气温值; $F_{\text{oc}}(\cdot)$ 为观测数据的累积分布函数; $F_{\text{mc}}(\cdot)$ 为基准期的累积分布函数; $F_{\text{mp}}(\cdot)$ 为预测期气候模式数据的累积分布函数。

降水分布采用混合性的伽玛分布进行模拟,气温则采用四参数的 β 分布进行模拟:

$$f(P_f) = \frac{G_{\text{mp}}(P_f) + (1 - p_0)H}{p_0} \quad (3)$$

$$f(T_f) = \frac{(T_f - a)^{p-1} (b - T_f)^{q-1}}{\beta(p, q) (b - a)^{p+q-1}} \quad (4)$$

($a \leq x \leq b$, $p > 0$, $q > 0$)

式中: $f(\cdot)$ 为模拟分布函数; p_0 为降水月份所占百分比; H 为阶跃函数,无降水时 $H = 0$,有降水时 $H = 1$; $G_{\text{mp}}(\cdot)$ 为对未来降水修正的两参数的伽玛分

布; a 、 b 为数据中极值的范围参数; p 、 q 为由最大似然估计法确认的形状参数。

采用泰勒图、均方根误差和偏差空间分布来评估模式模拟精度,涉及参数有标准差(standard deviation, SD)、均方根误差(root mean square error, RMSE)、相关系数(correlation coefficient, CC)、平均绝对偏差(mean absolute error, MAE)和相对偏差(relative deviation, RD)。SD 是衡量数据偏离算术平均值的程度,CC 代表模拟值与观测值的相关程度,两者的最优值均为 1,其余参数可表示模拟值与观测值之间的偏差,最优值为 0。

2.2 PDSI

PDSI 能够表征一段时间内某个地区实际水分供应持续少于该地气候适宜水分供应时的水分亏缺现象。PDSI 的计算基于两层土壤水分收支模型,输入参数包括降水、气温及土壤持水量,估算过程中选用适宜气候条件下的降水量^[37-38]。PDSI 值的计算公式为

$$I_{\text{PDSI}} = 0.897I_{\text{PDSI-1}} + \frac{1}{3}Z \quad (5)$$

式中: I_{PDSI} 为该月 PDSI 值; $I_{\text{PDSI-1}}$ 为前一个月 PDSI 值; Z 为当月水分异常指数,通过水分距平 d 与气候权重系数 w 的乘积得到, $\frac{1}{3}Z$ 为首月指数。

本文在 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的优化数据集基础上,采用由算术平均得到的多模式优化集合计算 PDSI 值。同时,结合 M-K 趋势检验的统计量 Z_s 进行显著性检验,确定置信水平 $\alpha = 0.05$ 。当 $|Z_s| \leq 1.96$ 时,原假设成立,没有变化趋势;反之,序列有明显趋势性,呈上升($Z_s > 1.96$)或下降($Z_s < -1.96$)趋势^[39]。当置信水平 $\alpha = 0.01$ 时, $Z_s = \pm 2.58$,满足置信度 99% 的显著性检验。

2.3 干旱特征变量提取

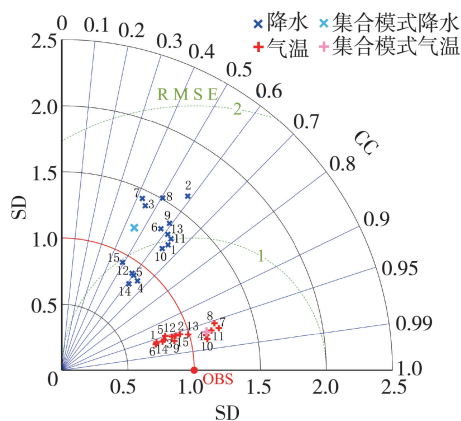
利用游程理论提取每个格点的干旱特征(干旱频次、干旱历时、干旱烈度等),并根据 PDSI 值进行干旱等级划分,当 PDSI 值在 $(-2, -1]$ 、 $(-3, -2]$ 、 $(-4, -3]$ 、 $(-\infty, -4]$ 区间时,干旱等级分别为轻微干旱、中等干旱、严重干旱和极端干旱。若时间序列为 $t_i (i = 1, 2, \dots, n)$,当 t_i 在某时段内都小于设定阈值 t_0 时,为负游程;反之,当 $t_i > t_0$ 时,为正游程。时间序列与阈值的交点分别为干旱事件的起止时间,以月作为统计干旱事件的时间步长,游程长度为干旱历时,每个干旱过程的峰值为最小的干旱指标值,序列与阈值之间的面积为干旱面积,负游程的值为干旱烈度。本研究的阈值取 -2,即 PDSI 值小于 -2 时发生中等及以上干旱事件,选择平均干

旱频次、平均干旱历时和平均干旱烈度作为干旱特征变量分析研究时段内干旱状态的变化。

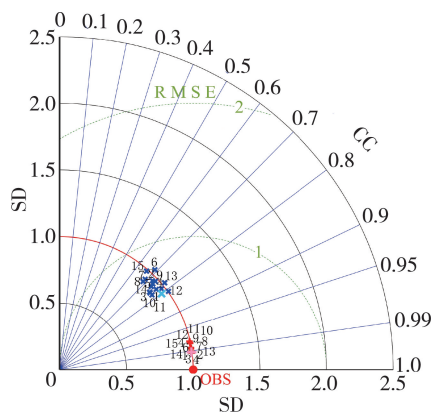
3 结果与分析

3.1 气候模式偏差校正精度评估

图1为15个气候模式及集合模式偏差校正前后的模拟精度泰勒图(图中OBS为观测点)。可见,未偏差校正前的SD以及CC表现较差,降水的SD最大值约为1.6,CC为0.4~0.7, RMSE为0.8~1.5 mm/月;气温的SD最大值约为1.3, CC为0.95~0.99, RMSE为0.3~0.4℃。经过偏差校正后,模式模拟降水与观测降水的CC为0.6~0.85,呈中度相关性,降水的SD值接近1, RMSE值小于1 mm/月,模拟降水效果提升;气温的CC为0.97~1.0,呈高度相关,SD值趋近1, RMSE值减小为0.1~0.2℃。



(a) 偏差校正前



(b) 偏差校正后

图1 不同模式的降水、气温偏差校正前后泰勒图

Fig.1 Taylor diagram of precipitation and temperature before and after deviation correction for different modes

从15个气候模式及集合模式降水和气温校正前后的RMSE值结果中发现,降水偏差校正后RMSE值明显减小,全球、南美洲、非洲和大洋洲偏差校正效果表现较好。全球总体变化最明显,除个别月份(如7月)外, RMSE值显著减小。以

MIROC6模式亚洲5月、6月和8月为例, RMSE值从12~15 mm/月减小至0~3 mm/月。偏差校正后的气温在北美洲、南美洲及亚洲等地的RMSE值得到了较好的改善,如:2月、3月, NorESM2-MM模式在北美洲的RMSE值从1.2~1.5℃减小至0.3~0.6℃。

集合模式降水、气温修正前后偏差的空间分布差异显著。降水偏差校正前的RD主要为10%~50%,亚洲西南、非洲北、北美及南美洲西部地区的RD大于150%;气温偏差校正前的MAE主要范围为-3~-0.5℃和1~4℃,亚洲南、欧洲和非洲北、北美和南美西部地区MAE为-1~-3℃。经过偏差校正,降水RD减小至-2%~5%,亚洲、北美洲校正效果较好;气温MAE减小至-0.2~0.5℃。

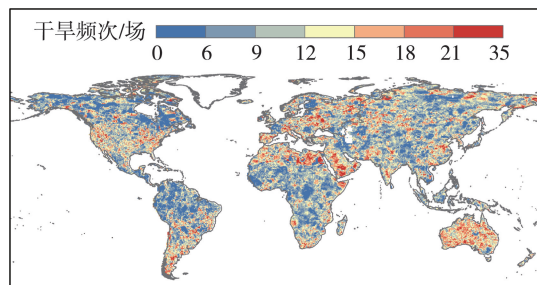
3.2 全球干湿变化空间分布

基准期全球干湿变化趋势差异性比较显著。年尺度下,北美洲、南美洲和非洲中南部呈现明显的干旱化趋势($Z_s > 2.58$),而在亚洲中部和东南部、非洲北部地区呈现轻微湿润化趋势($Z_s < 2.58$),均通过 $\alpha = 0.01$ 显著性水平。预测期4种排放情景下的干湿变化趋势的空间差异性较为显著,其干湿变化趋势均通过了 $\alpha = 0.01$ 显著性检验。SSP1-2.6情景下,北美洲、南美洲呈干旱化趋势面积减小,主要分布在北美洲中部和南部、南美洲东部和南部、非洲南部、大洋洲西部、欧洲东部及西部地区,亚洲地区表现为湿润化趋势。SSP2-4.5情景下,干旱化趋势面积稍有增加,稍弱于湿润化趋势,南美洲北部、欧洲东南部及亚洲中、东部干旱化趋势增强,北美洲、非洲中部和亚洲东南部湿润化趋势呈现增强。SSP3-7.0情景下,大部分地区 Z_s 值减小至置信水平间,尤其是非洲北部、非洲南部、南美洲南部和亚洲,北美洲和亚欧大陆交界地区干旱化趋势增加,亚洲北部地区湿润化趋势呈现增强。SSP5-8.5情景下,亚洲和非洲中部地区湿润化趋势呈现增强,大洋洲湿润化趋势减弱,北美洲中部和西南部、非洲北部和南部、亚洲西南部干旱化趋势增强,其中非洲北部地区干旱化和湿润化趋势均减弱。随着预测期强迫辐射变高,北美洲、非洲、大洋洲、欧洲中部和东部干旱化趋势增强,南美洲干旱化趋势减弱,北部地区未满足 $\alpha = 0.01$ 显著性检验的面积增加,亚洲呈现湿润趋势,预测期干旱趋势较基准期弱。

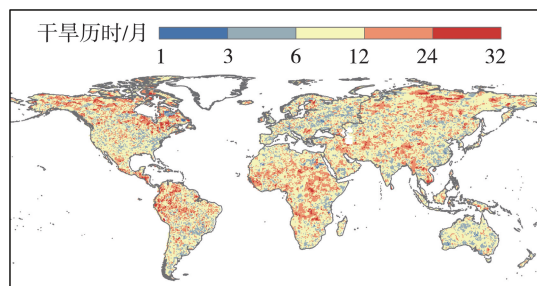
3.3 全球干旱特征变量空间分布

全球基准期的干旱特征变量的统计结果表明,全球干旱的频次最大为39场,平均频次为12场左右,最长历时约为48月,平均干旱历时约为9月,干旱频次分散程度较干旱历时大,干旱烈度最大为

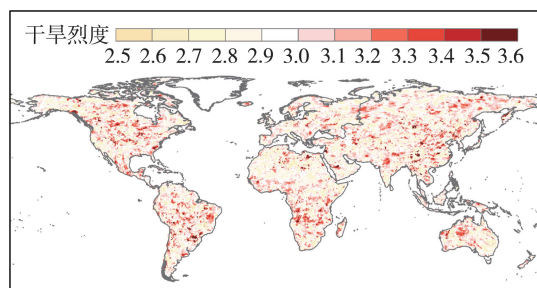
3.6,平均为2.7。图2为全球基准期干旱特征变量空间分布。可见,基准期干旱特征变量空间分布区域差异明显,大部分干旱频次为6~18场,非洲北的东部及与亚洲接壤地区频次较高,亚洲西北部、欧洲中南部和大洋洲中部地区发生频次偏高;绝大多数地区的平均干旱历时为6~24月,非洲中部、亚洲北部和西南部历时较长;平均烈度为2.7~3.2,北美洲中部烈度较大,南美洲东部偏南、非洲北部和中南部、欧洲和亚洲出现高烈度地区,烈度较高的地区分布较低烈度地区多。



(a) 干旱频次



(b) 干旱历时



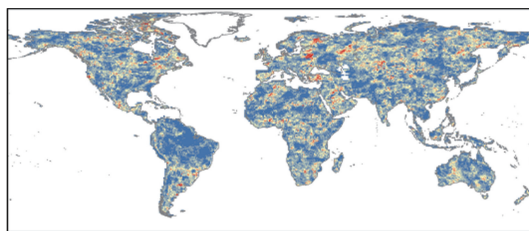
(c) 干旱烈度

图2 全球基准期干旱特征变量空间分布

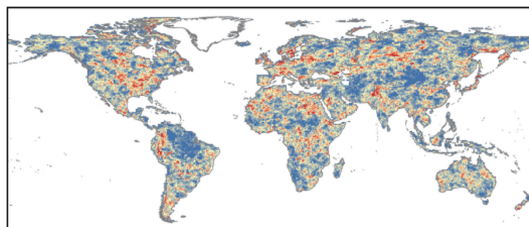
Fig.2 Global spatial distribution of drought characteristic variables in base period

图3~5为全球预测期不同情景下干旱特征变量的空间分布。全球大部分干旱频次在6~21场,SSP3-7.0和SSP5-8.5情景下欧洲、亚洲和非洲干旱频次为21~35场的频发地区明显增多,平均干旱历时大多为6~12月,干旱烈度为2.7~3.1,高烈度地区增加,全球预测期高频次、长历时和高烈度的地区主要集中于北半球。北美洲南部发生频次较多、历时较长,高烈度的干旱地区变多,与基准期相

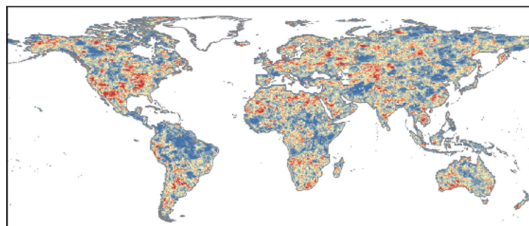
干旱频次/场 0 6 9 12 15 18 21 35



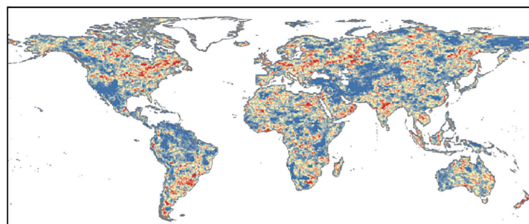
(a) SSP1-2.6



(b) SSP2-4.5



(c) SSP3-7.0



(d) SSP5-8.5

图3 全球预测期干旱频次空间分布

Fig.3 Global spatial distribution of drought frequency in forecast period

比,干旱趋势增强;南美洲未来频次较低的地区历时变短,低烈度地区较基准期变多,表现高频次、强烈度的部分干旱地区分布与基准期相似,分布在南美洲南部,干旱历时较长的区域主要分布在北部,但其烈度表现偏低。欧洲的干旱频次较高、历时较长的地区集中在中部及西北地区,基准期频次较低的东南部在未来呈现增加趋势,干旱烈度分布不均,主要分布在西部及西南部。亚洲在预测期干旱频次依次增加,北部、南部及东部沿岸趋势明显,与基准期分布相似,但未来西北部地区频次增加更明显,干旱历时、干旱烈度也随之增加。非洲预测期较基准期干旱频次显著增加,场次在12场以上的地区增加最显著,主要分布于北部及东北部,中部历时增长、烈度

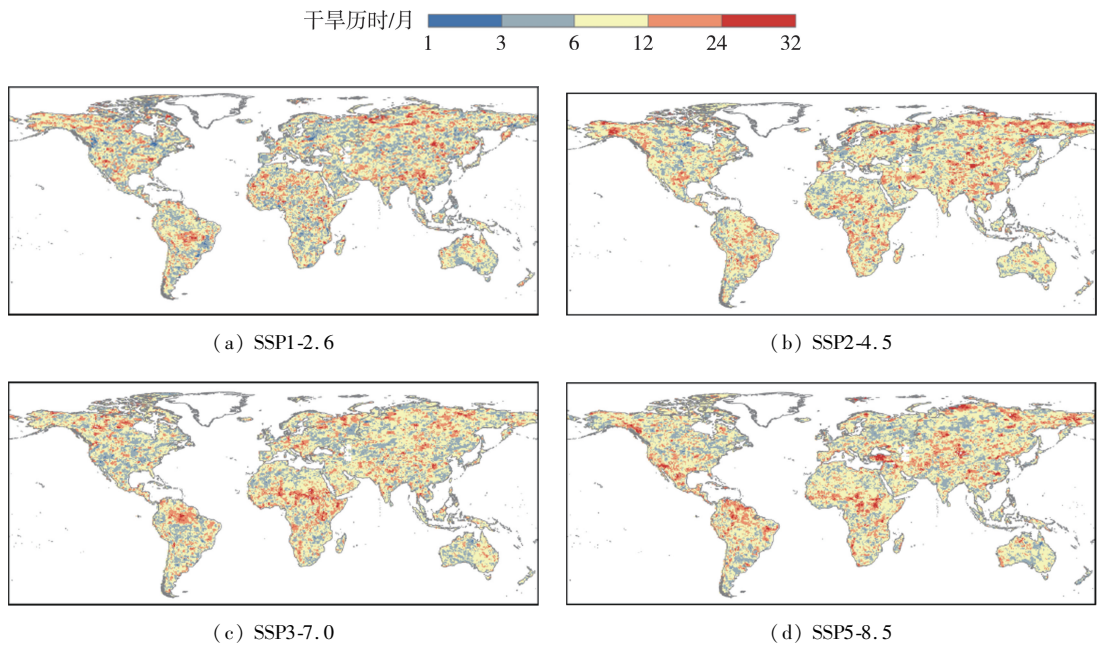


图 4 全球预测期干旱历时空间分布

Fig. 4 Global spatial distribution of drought duration in forecast period

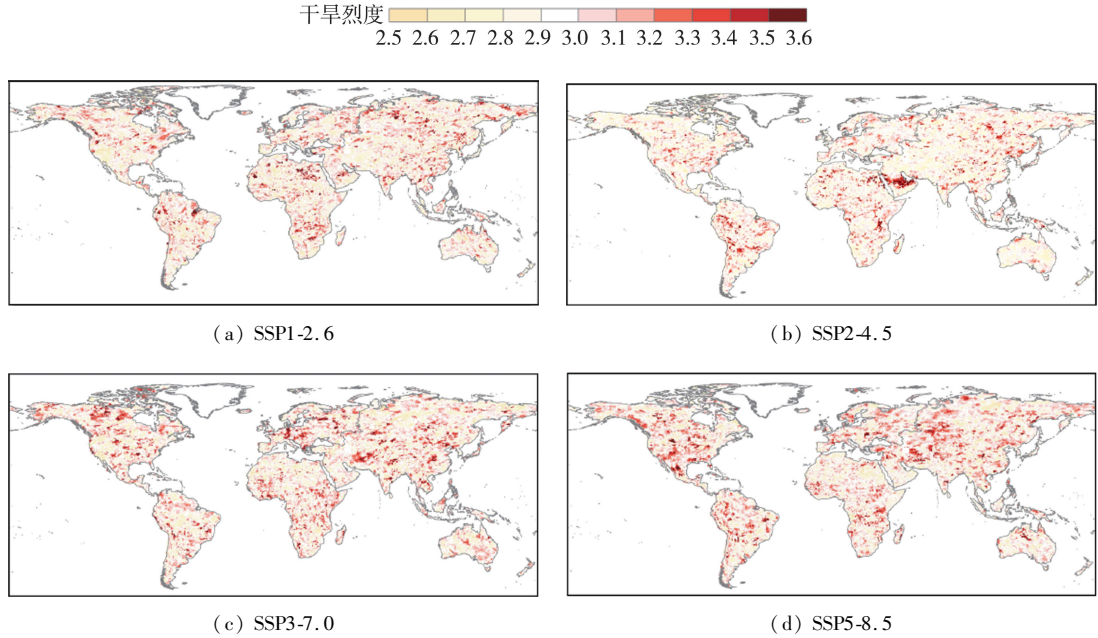


图 5 全球预测期干旱烈度空间分布

Fig. 5 Global spatial distribution of drought intensity in forecast period

增强。大洋洲干旱发生频率较基准期有所增加,干旱历时变短,SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下平均烈度为 3.4~3.6 的地区增加。

3.4 干旱带干旱特征变量空间分布

图 6 为干旱带基准期干旱特征变量空间分布,图 7~9 为干旱带预测期不同情景下干旱特征变量的空间分布。可见,干旱带基准期的干旱频次分布较为均匀,高频率场次集中表现在非洲南部和非洲北部,而在预测期高排放情景下变化较大,亚洲地区低频次地区增加,大部分地区干旱频次在 5~15 场。

干旱带基准期的干旱历时主要为 6~12 月,以非洲北部为代表的小部分地区的干旱历时约 20~48 月;预测期干旱历时为 6~12 月,高排放情景下亚洲中部、非洲北部等地区将出现长历时干旱事件。干旱带基准期的干旱烈度为 2.27~3.4 的地区占比较多,预测期干旱烈度为 3.4~3.6 的地区增多,高排放情景中亚洲、亚非接壤地区烈度较大且变化明显。

热带/亚热带在基准期内干旱频次为 6~21 场,并出现大于 21 场次的集中区域,干旱历时为 3~12 月,干旱烈度为 2.6~3.4;预测期,SSP2-4.5、SSP3-

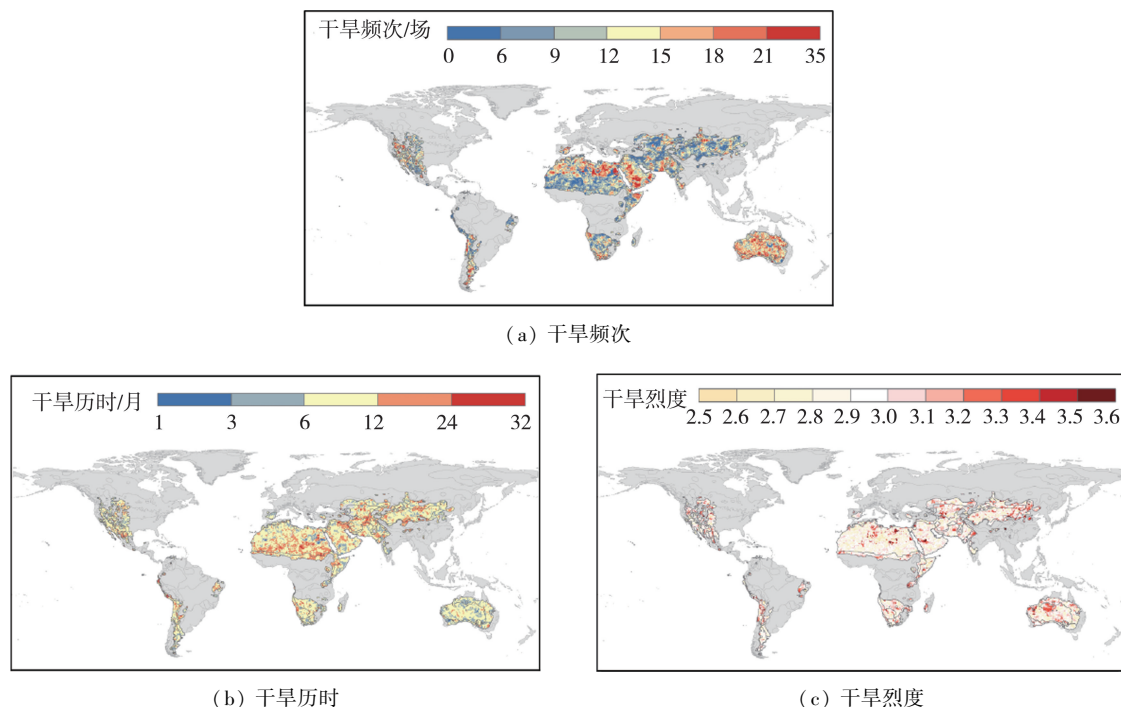


图6 干旱带基准期干旱特征变量空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of drought characteristic variables in base period in arid zones

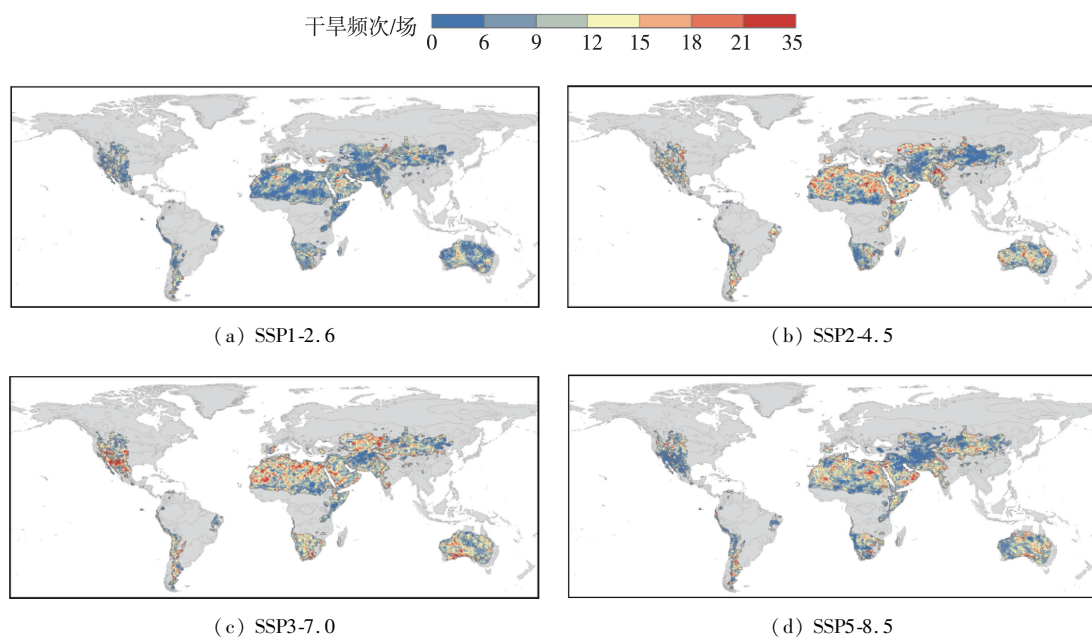


图7 干旱带预测期干旱频次空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of drought frequency in forecast period in arid zones

7.0情景高频次区域较多,SSP5-8.5 情景次之,干旱发生频率较高。其中,SSP5-8.5 情景大部分区域为6~18场,较高于基准期,但18~35场的频次区域较小,干旱历时与基准期相似,高排放情景长历时区域增加,干旱烈度增长;SSP2-4.5 情景高烈度区域明显增加,随着排放情景变化,低烈度及中烈度地区也增加。热带/亚热带半干旱紧邻热带/亚热带干旱地区,干旱特征表现相似,SSP3-7.0、SSP5-8.5 情景高频次区域较为明显,干旱发生频率较高,SSP1-2.6

情景低频率较多,主要为0~15场,干旱历时集中于6~24月,不同排放情景短历时区域占比不同,SSP3-7.0 情景烈度3.3以上的区域较多,大部分地区干旱烈度为3.0~3.2。预测期,随着排放强度增加,温带干旱的高频次区域增多,SSP3-7.0情景低频率区域较少,高频次地区与基准期相比增加,高排放情景的干旱历时中3~6月短历时区域减少,SSP3-7.0、SSP5-8.5 情景高烈度区域明显,干旱烈度在高排放情景下高烈度区域增加。温带半干旱呈现差异

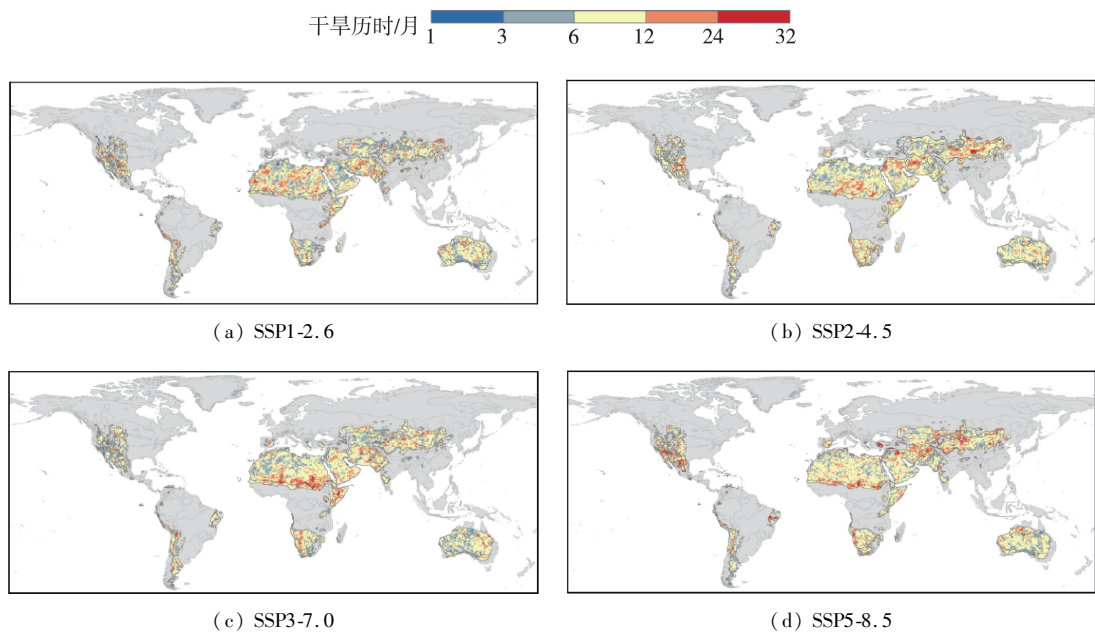


图 8 干旱带预测期干旱历时空间分布
Fig. 8 Spatial distribution of drought duration in forecast period in arid zones

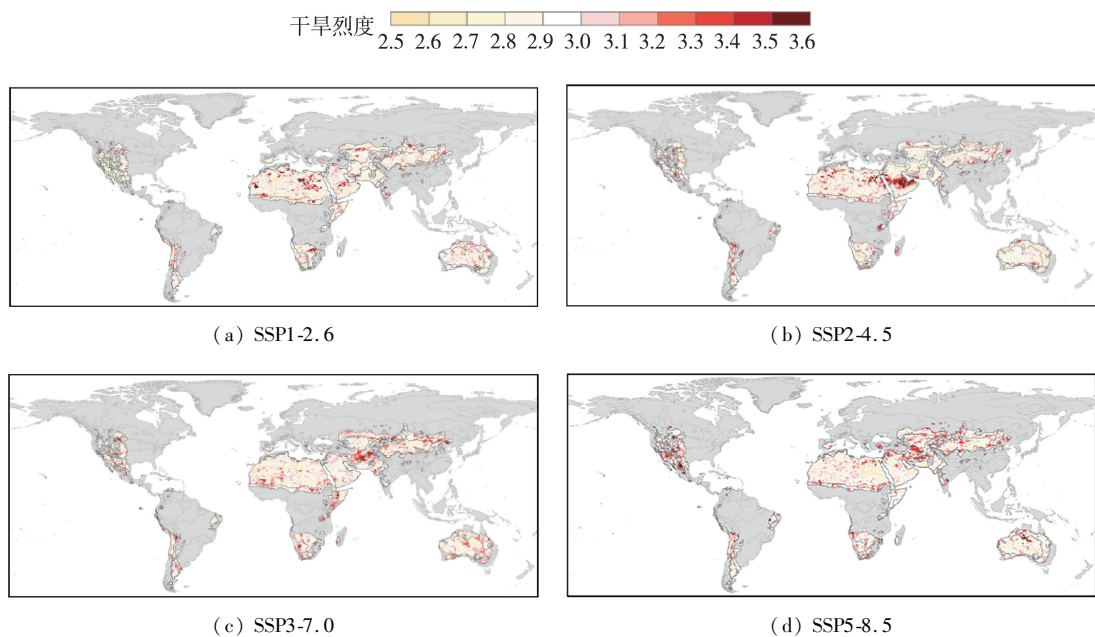


图 9 干旱带预测期干旱烈度空间分布
Fig. 9 Spatial distribution of drought intensity in forecast period in arid zones

较温带干旱地区明显;未来随着排放强度增加,高频次区域依次增多,与基准期场次范围相似,干旱历时长为 6~24 月,高排放情景 6 月以上长历时区域增加,干旱历时长在 24~32 月的区域明显增加,区域变化明显,随着排放情景变化,高烈度地区增加。

4 结 论

a. CMIP6 模式模拟数据经偏差校正后,降水与气温模拟精度明显提高,且集合模式模拟能力优于单个模式,能有效提升全球气候变化的模拟能力,该模式模拟气温能力优于降水。

b. 全球干旱特征变量呈现显著性差异。基准期的干旱频次偏高,多数地区干旱历时长,干旱烈度较高。预测期干旱频次相较于基准期增加,平均历时长、平均烈度随排放强度增加而增加,长历时、强烈度地区少于基准期。

c. 干旱带预测期低干旱频次地区较多,干旱历时长增加,干旱烈度较强的地区增多。热带/亚热带干旱与半干旱地区相比,高频次、强烈度区域较多,干旱历时长较短。温带干旱较半干旱地区高频次区域多,高排放情景中温带半干旱长历时区域增加,温带干旱的干旱烈度在高排放情景下呈增加趋势。

d. SSP3-7.0 情景下北美洲、欧洲和亚洲的干旱频次和干旱烈度均高于其他 3 个情景。可能与 SSP3-7.0 情景代表了大量土地利用变化(尤其是全球森林覆盖率下降)和高的气候强迫因子(特别是二氧化硫)有关。

参考文献:

[1] 李杨,张雯,陈云浩,等. 基于自适应帕默尔指数的 1961—2015 年全国干旱时空特征分析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(1): 43-51. (LI Yang, ZHANG Wen, CHEN Yun, et al. Self-calibrating Palmer drought severity index-based analysis on spatial and temporal characteristics of drought from 1961 to 2015 in China[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(1): 43-51. (in Chinese))

[2] 翟建清,代潭龙,王国复. 2020 年全球气候特征及重大天气气候事件[J]. 气象, 2021, 47(4): 471-477. (ZHAI Jianqing, DAI Tanlong, WANG Guofu. Global climate features and significant weather and climate events in 2020[J]. Meteorological Monthly, 2021, 47(4): 471-477. (in Chinese))

[3] 张颖娴,孙劭,刘远,等. 2021 年全球重大天气气候事件及其成因[J]. 气象, 2022, 48(4): 459-469. (ZHANG Yingxian, SUN Shao, LIU Yuan, et al. Global major weather and climate events in 2021 and possible causes [J]. Meteorological Monthly, 2022, 48(4): 459-469. (in Chinese))

[4] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[5] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[6] HUANG Jianping, GUAN Xiaodan, JI Fei. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12: 5391-5398.

[7] DAI Aiguo, KEVIN Trenberth, QIAN Taotao. A global dataset of Palmer drought severity index for 1870-2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming [J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(6): 1117-1130.

[8] DAI Aiguo. Drought under global warming: a review [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011, 2: 45-66.

[9] 闫昕畅,张强,闫晓敏,等. 全球干旱带分布特征及成因机制研究进展[J]. 地球科学进展, 2019, 34(8): 826-841. (YAN Xinyang, ZHANG Qiang, YAN Xiaomin, et al. An overview of distribution characteristics and formation mechanisms in global arid areas [J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(8): 826-841. (in Chinese))

[10] MOHAMED Salem Nashwan, SHAMSUDDIN Shahid. A novel framework for selecting general circulation models based on the spatial patterns of climate [J]. International

Journal of Climatology, 2020, 40(10): 4422-4443.

[11] 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. (in Chinese))

[12] 赵天保,陈亮,马柱国. CMIP5 多模式对全球典型干旱半干旱带气候变化的模拟与预估 [J]. 科学通报, 2014, 59(12): 1148-1163. (ZHAO Tianbao, CHEN Liang, MA Zhuguo. Simulation of historical and projected climate change in arid and semiarid areas by CMIP5 models [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(12): 1148-1163. (in Chinese))

[13] 张林燕,郑巍斐,杨肖丽,等. 基于 CMIP5 多模式集合和 PDSI 的黄河源区干旱时空特征分析 [J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 95-99. (ZHANG Linyan, ZHENG Weifei, YANG Xiaoli, et al. Temporal-spatial characteristics of drought in source region of Yellow River based on CMIP5 multi-mode Ensemble and PDSI [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 95-99. (in Chinese))

[14] ZENG Jianxin, LI Jiaxian, LU Xingjie, et al. Assessment of global meteorological, hydrological and agricultural drought under future warming based on CMIP6 [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2022, 15: 100143.

[15] SEREE Supharatid, JIRAWAT Nafung. Projected drought conditions by CMIP6 multimodel ensemble over Southeast Asia [J]. Journal of Water and Climate Change, 2021, 12(7): 3330.

[16] 林慧. 基于 CMIP6 模式的淮河中上游流域气象干旱特征及演变趋势研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2021.

[15] 郑丽虹,刘懿,任立良,等. 黄河流域气象干旱与水文干旱时空特征及其传递关系 [J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 87-95. (ZHENG Lihong, LIU Yi, REN Liliang, et al. Spatio-temporal characteristics and propagation relationship of meteorological drought and hydrological drought in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 87-95. (in Chinese))

[16] 栗晓玲,姜田亮,牛纪革. 生态干旱的概念及研究进展 [J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 15-21. (SU Xiaoling, JIANG Tianliang, NIU Jiping. Concept and research progress of ecological drought [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 15-21. (in Chinese))

[17] 吴志勇,程丹丹,何海,等. 综合干旱指数研究进展 [J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 36-45. (WU Zhiyong, CHENG Dandan, HE Hai, et al. Research progress of composite drought index [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 36-45. (in Chinese))

[18] 栗晓玲,褚江东,张特,等. 西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应 [J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 34-42. (SU Xiaoling, CHU Jiangdong,

- ZHANG Te, et al. Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(1): 34-42. (in Chinese))
- [19] WELLS Nathan, GODDARD Steven, HAYE Michael J. A self-calibrating Palmer drought severity index [J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(12): 2335-2351.
- [20] 陶然, 张珂. 基于 PDSI 的 1982—2015 年我国气象干旱特征及时空变化分析 [J]. *水资源保护*, 2020, 36(5): 50-56. (TAO Ran, ZHANG Ke. PDSI-based analysis of characteristics and spatiotemporal changes of meteorological drought in China from 1982 to 2015 [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(5): 102-108. (in Chinese))
- [21] 陆杰英, 孙丽颖, 王春林, 等. 基于 PDSI 指数的近 40 年广东干旱特征分析 [J]. *气象研究与应用*, 2022, 43(1): 36-40. (LU Jieying, SUN Liying, WANG Chunlin, et al. Analysis of drought characteristics in Guangdong in recent 40 years based on PDSI index [J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2022, 43(1): 36-40. (in Chinese))
- [22] ZHAI Jianqing, MONDAL Sanjit Kumar, FISCHER Thomas, et al. Future drought characteristics through a multi-model ensemble from CMIP6 over South Asia [J]. *Atmospheric Research*, 2020, 246: 105111.
- [23] NOONI Isaac Kwesi, HAGAN Daniel Fiifi Tawia, ULLAH Waheed, et al. Projections of drought characteristics based on the CNRM-CM6 model over Africa [J]. *Agriculture*, 2022, 12: 495.
- [24] 宋玉鑫, 马军霞, 左其亨, 等. 新疆多时间尺度干湿变化特征分析 [J]. *水资源保护*, 2021, 37(2): 43-48. (SONG Yuxin, MA Junxia, ZUO Qiting, et al. Analysis on characteristics of dry-wet variation on multi-time scale in Xinjiang [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(2): 43-48. (in Chinese))
- [25] 石朋, 詹慧婕, 瞿思敏, 等. 黄河源区气象干旱与水文干旱关联性分析 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(3): 80-86. (SHI Peng, ZHAN Huijie, QU Simin, et al. Correlation analysis of meteorological and hydrological droughts in Yellow River source region [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(3): 80-86. (in Chinese))
- [26] 姜彤, 吕嫣冉, 黄金龙, 等. CMIP6 模式新情景 (SSP-RCP) 概述及其在淮河流域的应用 [J]. *气候科技进展*, 2020, 10(5): 102-109. (JIANG Tong, LYU Yanran, HUANG Jinlong, et al. New scenarios of CMIP6 model (SSP-RCP) and its application in the Huaihe River Basin [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2020, 10(5): 102-108. (in Chinese))
- [27] JIANG Jie, ZHOU Tianjun, CHEN Xiaolong, et al. Future changes in precipitation over Central Asia based on CMIP6 projections [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15: 1-7.
- [28] CHEN Liqin, WANG Guojie, MIAO Lijuan, et al. Future drought in CMIP6 projections and the socioeconomic impacts in China [J]. *International Journal of Climatology*, 2021, 41: 4151-4170.
- [29] ZHAO Tianbao, DAI Aiguo. CMIP6 model-projected hydroclimatic and drought changes and their causes in the 21st Century [J]. *Journal of Climate*, 2021, 35: 897-921.
- [30] CAI Wenjun, WANG Guojian, DEWITTE Boris, et al. Increased variability of eastern Pacific El Niño under greenhouse warming [J]. *Nature*, 2018, 564(7735): 201-206.
- [31] KOTTEK Markus, GRIESER Jürgen, BECK Christoph, et al. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2006, 15(3): 259-263.
- [32] CHEN Deliang, CHEN Hans Weiteng. Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: an example for 1901-2010 [J]. *Environmental Development*, 2013, 6(1): 69-79.
- [33] 李一曼, 叶谦. ENSO 背景下基于柯本分类法的我国气候分类 [J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(4): 352-362. (LI Yiman, YE Qian. Climate classification over China based on Köppen climate classification in the context of ENSO [J]. *Climate Change Research*, 2019, 15(4): 352-362. (in Chinese))
- [34] 王连喜, 毛留喜, 李琪. *生态气象学导论* [M]. 北京: 气象出版社, 2012.
- [35] LI Haibin, SHEFFIELD Justin, WOOD Eric F. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D10): 985-993.
- [36] YANG Xiaoli, WOOD Eric F, SHEFFIELD Justin, et al. Bias correction of historical and future simulations of precipitation and temperature for China from CMIP5 models [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2018, 19(3): 609-623.
- [37] ZHANG Jie, CHEN Haishan, ZHANG Qiang. Extreme drought in the recent two decades in northern China resulting from Eurasian warming [J]. *Climate Dynamics*, 2019, 52: 2885-2902.
- [38] LIU Wenbin, SUN Fubao, LIM Wee Ho, et al. Global drought and severe drought affected population in 1.5°C and 2°C warmer worlds [J]. *Earth System Dynamics*, 2018, 9(1): 267-283.
- [39] SILVA Richarde Marques da, SANTOS Celso A G, MREIRA Madalena, et al. Rainfall and river flow trends using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in the Cobres River Basin [J]. *Natural Hazards*, 2015, 77(2): 1205-1221.

(收稿日期: 2022-06-30 编辑: 王芳)