

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.06.014

基于 CMIP5 多模式集合和 PDSI 的黄河源区 干旱时空特征分析

张林燕,郑巍斐,杨肖丽,王雨茜,张梦如,于浣晗

(淮海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:针对黄河源区干旱情势逐年加剧的问题,采用 CMIP5 模型两种排放情景(RCP4.5 和 RCP8.5)下的 8 个模型的统计降尺度结果,运用最优赋权的多模式集合技术进行多模式集合优化,构建两种排放情景(RCP4.5、RCP8.5)的降水和气温数据集。在此基础上,构建黄河源区的 VIC 模型,结合帕尔默干旱指数(PDSI),分析黄河源区干旱的时空特征与变化趋势。结果表明,该流域在基准期(1961—1990 年)的 PDSI 变化较为平稳,表现出微弱的增加趋势,未来时期(2021—2050 年)PDSI 则显著增加。在 1961—1990 年,黄河源区大多数地区干旱发生的频次在 10 次左右,平均干旱历时在 4~10 个月,平均烈度为 6~24。在未来时期两种情景下,干旱的平均历时和平均烈度相较于基准期有所减少,且 RCP8.5 情景下的变幅明显高于 RCP4.5。

关键词:黄河源区;多模式集合;VIC 模型;帕尔默干旱指数;干旱特征

中图分类号:P338+.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2019)06-0095-05

Temporal-spatial characteristics of drought in source region of Yellow River based on CMIP5 multi-mode ensemble and PDSI//ZHANG Linyan, ZHENG Weifei, YANG Xiaoli, WANG Yuqian, ZHANG Mengru, YU Xiaohan(*College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Aiming at the problem that the drought situation in the source area of the Yellow River is increasing year by year, the statistical downscaling results of eight models under two emission scenarios (RCP4.5 and RCP8.5) of CMIP5 model are used, and the multi-mode ensemble optimization technology of optimal weighting is used to construct the precipitation and temperature data sets of two emission scenarios (RCP4.5 and RCP8.5). On this basis, the VIC (variable information capacity) model of the source area of the Yellow River is constructed. Combining with PDSI (Palmer drought severity index), the temporal-spatial characteristics and change trend of the drought in the source area of the Yellow River are analyzed. The results show that the PDSI of the research area in the reference period (1961—1990) is relatively stable, showing a slight increase trend, while in the future period (2021—2050), PDSI is significantly increased. From 1961 to 1990, the frequency of drought in most areas of the Yellow River source area was about 10 times, the average duration of drought was 4~10 months, and the average intensity was 6~24. In the future, the average duration and intensity of drought in the two scenarios are less than those in the reference period, and the variation amplitude in the RCP8.5 scenario is significantly higher than that in the RCP4.5 scenario.

Key words: source area of Yellow River; multi-model ensemble; VIC model; PDSI; drought characteristic

受气候变化和人类活动的影响,全球变暖的事实毋庸置疑^[1]。全球气温上升导致全球不同尺度水资源的时空分布以及格局的变化,进而加剧极端干旱、洪涝灾害的发生。近十年来,我国严重干旱事件频繁发生,成灾面积约 0.13 亿 hm^2 ,粮食减产及

绝收 600 亿 kg ^[2]。黄河源区地处干旱半干旱气候区,由于降水减少与时空分布不均致使黄河流域的地表河川径流量日趋减少,再加上黄河源区位于西风带上,大气环流所携带的水分大部分被青藏高原截留,产生的雨影效应造成西北地区干旱常有发生,

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2016YFA0601504);国家自然科学基金(51579066)

作者简介:张林燕(1994—),女,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail:924178053@qq.com。

通信作者:杨肖丽(1976—),副教授。E-mail:yangxl@hhu.edu.cn。

有时连季干旱或连年干旱往往形成重旱、极旱,这给我国西北地区的农业和工业生产造成了严重的经济损失^[3]。唐乃亥水文站以上的集水区是黄河流域的主要源头地区^[4],黄河源区水资源短缺的严峻形势以及冰川消融、土地退化等现象将会直接影响到干旱的发生以及下游的水资源供给^[5-7]。因此,预估黄河源区干旱及其特征的时空变化趋势对该流域的干旱治理以及生态环境保护具有重大意义。

近年来,很多学者结合全球气候模型(global climate model, GCM)数据、水文模型和干旱指数,开展了流域尺度气候变化对干旱的影响研究。如陈昱潼等^[8]基于帕尔默干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)指数和 GCM 分析了渭河流域的干旱变化特征,研究结果表明渭河流域有较显著的变干趋势,并且秋季发生干旱的可能性较大;陈华等^[9]利用统计降尺度的方法预测汉江流域降水变化,发现在未来时期(2021—2041 年)汉江流域上游和中游的年降水量均值比基准年(1961—2000 年)的降水量小,其余时间统计的汉江流域上、中、下游的年降水量均值大于基准年均值;荣艳淑等^[10]运用戴-帕尔默干旱指数和径流干旱指数,分析云南地区 2009—2014 年持续性气象干旱与水文干旱时空演变特征,并利用 NCAR/NCEP 再分析资料,从西太平洋副热带高压、青藏高原、南支槽、对流层垂直运动及水汽垂直分布等视角,进一步分析 2009—2014 年云南持续性干旱的原因。杨肖丽等^[11]基于降尺度和 SPI 对黄河流域进行了干旱预估,表明在(RCP 2.6、RCP4.5 和 RCP8.5)3 种气候情景下 21 世纪初的干旱情况相对于基准期(1961—1990 年)均变得比较严重,但是世纪末的干旱程度均明显减轻。上述学者的研究表明,未来时期我国各个研究流域的干旱程度有增加趋势,这为各流域的防旱减灾工程提供数据支撑。

黄河源区(95°50′~103°30′E, 32°10′~36°15′N),面积 12.2 万 km²,黄河源区地势西高东低,南高北低,高程在 2668~6253 m。该区属于高原气候,多年平均气温在 -4℃~5℃,多年平均降水量在 200~700 mm,降水量的年际变化大,年内降水分配不均。在全球变暖背景下,源区的生态环境也正遭受着很严重的破坏:土壤持水能力下降,植被退化,源区湿地水源涵养功能降低,大量的湿地已经变成了旱草地,径流量减少,土地荒漠化日益严重。因此,本研究在国内外学者研究的基础上结合全球气候模式和水文模型分析黄河源区的干旱及其特征的时空变化趋势,以期对黄河源区评估气候变化对水循环、干旱特性的影响研究提供科学依据和理论支撑^[12]。

1 数据与方法

1.1 数据资料

选取 CMIP5 的 8 个气候模式(bcc-csm1-1、CanESM2、CCSM4、CSIRO-Mk3-6-0、GISS-E2-R、MPI-ESM-LR、MRI-CGCM3、NorESM1-M)的降尺度数据,利用 Yang 等^[13]采用等距离累积分布函数(EDCDF)方法构建的中国区域 0.25°×0.25°的逐日降水、气温数据库。

黄河源区 VIC(variable infiltration capacity)模型所需要的水文气象观测数据、高程、植被覆盖、土壤资料包括:①水文统计年鉴提供的黄河源区 1 个水文站(唐乃亥水文站)和中国气象台提供的 9 个气象站的 1961—2005 年的日流量、日降水量、日最高及最低气温、平均气温和平均风速资料(图 1);②采用空间分辨率为 3s 的 SRTM 数字高程模型(DEM);③Maryland 大学全球 1km 的陆面覆盖类型资料;④土壤数据来源于联合国粮农组织发布的空间分辨率为 5' 的全球土壤数据库。

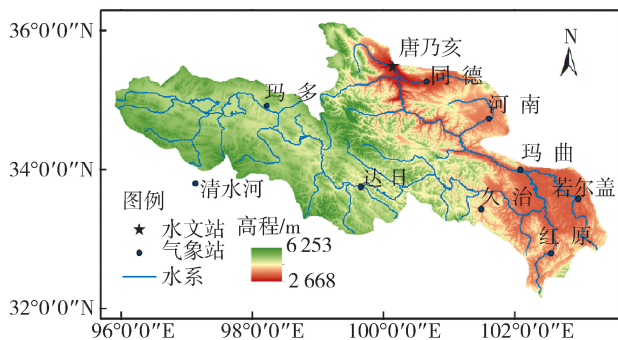


图 1 黄河源区高程、水文站、气象站分布

1.2 研究方法

1.2.1 多模式优化集合

Varis 等^[14]的研究表明,每个气候模式对于不同气候变量的模拟效果相差甚远,不存在一个气候模式可以很好地模拟出一个区域的多种气象要素。多模式集合法是根据各个模式和实测值之间的模拟效果来确定权重,模拟效果好、精度高的赋予较高权重,模拟效果差、精度低的赋予较低权重。基于最优化的思想,确定出对于计算模式的最优权重^[15-16]。通过最优赋权法可以确定各个模式在集合模式中每个时段的权重,基于每个时段的权重对各个模式进行多模式集合处理,其结果便是基于最优赋权的多模式集合数据集。

1.2.2 基于 VIC 模型的 PDSI

传统的 PDSI 表征在一段时间一定地区实际的水分供应持续少于该地气候适宜水分亏缺的情况。根据降水、气温、土壤含水量等水文变量计算水分异

常指数,在水分供应达到气候适宜时,平衡方程为

$$d = P - \bar{P} = P - (\alpha_i ET_p + \beta_i P_{RE} + \gamma_i P_R - \delta_i P_L) \quad (1)$$

式中: d 为相应水分偏离; P 为实测降水量; $\bar{P}$ 为气候适宜降水量; ET_p 为可能蒸散量; P_{RE} 为土壤潜在补水量; P_R 为潜在径流量; P_L 为土壤潜在失水量; α_i 、 β_i 、 γ_i 、 δ_i 为各指标第 i 月的权重因子。

采用刘懿^[17]在开发 scPDSI-x 基础上耦合 VIC-3L 模型,在黄河流域构建具有更强物理机制的多时间尺度的帕尔默干旱指数(简称为 VIC-scPDSI),并且利用 VIC-3L 模拟的结果计算 8 个水文分量,其中 4 个是可能分量(可能蒸散量 ET_p 、土壤潜在补水量 P_{RE} 、潜在径流量 P_R 、土壤潜在失水量 P_L)和 4 个是实际分量(实际蒸散发 ET_A 、土壤补水量 R_E 、土壤失水量 L 、径流量 R)。可能蒸散量 ET_p 、实际蒸散发 ET_A 和径流量 R 可直接采用 VIC-3L 模拟结果代替,其他的变量由下列公式间接计算得到。 R_E 、 P_{RE} 、 P_L 和 L 的计算公式为

$$R_E = \max(S_s + S_m + S_b + S_0, 0) \quad (2)$$

$$P_{RE} = A_{WC} - S_0 \quad (3)$$

$$P_L = \min(ET_p, S_s) + [ET_p - \min(ET_p, S_s)] \cdot (S_m + S_b) / A_{WC} \quad (4)$$

$$L = \max(S_0 - S_s - S_m - S_b, 0) \quad (5)$$

式中: A_{WC} 为土壤有效持水量; S_0 为上一时间节点土壤含水量; S_s 为上一时间节点第 1 层土壤含水量; S_m 为上一时间节点第 2 层土壤含水量; S_b 为上一时间节点第 3 层土壤含水量。潜在径流量 P_R 定义为土壤有效持水和潜在补水量的差:

$$P_R = A_{WC} - P_{RE} \quad (6)$$

将计算得出的 8 个水文分量带入式(1)可得到基于 VIC 模型的水分亏缺指数,进而计算出 PDSI 的值。本研究从基准期(1961—1990 年)和未来时期(2021—2050 年)两个时间分析黄河源区气候变化背景下 PDSI 和干旱特征的时空变化趋势。

1.2.3 干旱特征提取

干旱包含了多个方面的特征属性,如干旱历时、干旱烈度、干旱峰值等,这些特性变量之间也存在不同程度的相关关系。采用游程理论提取干旱特征,它假设时间序列为 $(t_1, t_2, \dots, t_n)$,设定阈值 X_0 ,当时间序列在某一个时间段内都小于该阈值时,出现负游程,而当序列值大于给定阈值时则为正游程。根据 PDSI 值进行旱涝等级的划分, PDSI 值处于 $(-\infty, -4]$ 、 $(-4, -3]$ 、 $(-3, -2]$ 、 $(-2, -1]$ 、 $[1, 2)$ 、 $[2, 3)$ 、 $[3, 4)$ 、 $[4, +\infty)$ 时,将旱涝等级分别划分极旱、重旱、中旱、轻旱、轻涝、中涝、重涝、极涝 8 个等级。为选用月尺度的指标序列,截断水平

取 -1,低于该值则认为干旱发生。

2 结果分析

2.1 VIC 模型模拟精度

通过 VIC 模型计算唐乃亥水文站日流量过程的 NSCE 值(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient)和水量相对偏差值来分析 VIC 模型的模拟精度。图 2 是 VIC 模型模拟的唐乃亥站率定期(1961—1990 年)和验证期(1991—2005 年)的日流量过程。率定期逐日流量的 NSCE 值为 0.792,水量相对偏差值为 -0.168%,验证期逐日流量的 NSCE 值为 0.774,水量相对偏差值为 -0.30%,模拟的精度较高,这表明 VIC 模型能够较好地模拟黄河源区的水文过程,可以为该区域 PDSI 的计算及其时空特征分析提供精度较高的数据支持。

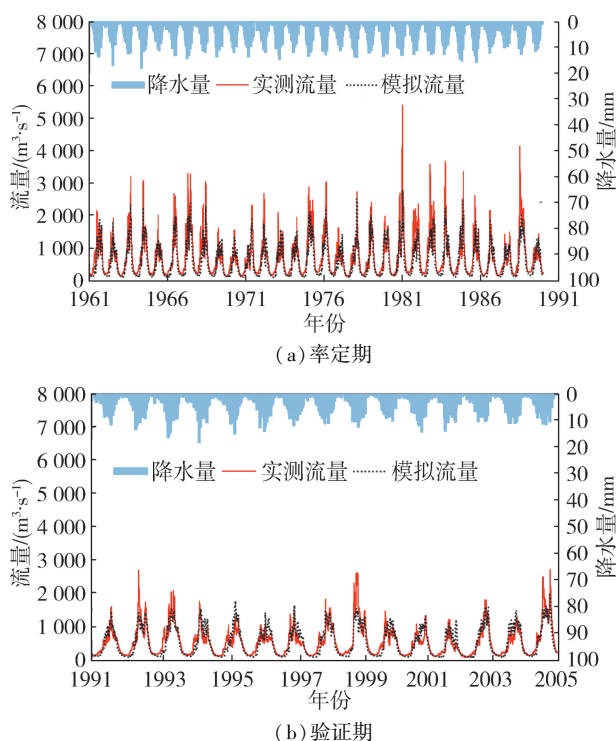


图 2 唐乃亥站率定期和验证期逐日流量模拟过程

2.2 黄河源区 PDSI 的时间变化趋势

图 3 和图 4 分别是黄河源区唐乃亥站基准期(1961—1990 年)和未来时期(2021—2050 年)的两种气候变化情景下的 PDSI 值序列。从图 3 中可以看出,基准期 PDSI 值的整体变化较为平稳,表现出微弱的增加趋势,范围为 -5.14 ~ 4.96,有 118 个月的数值小于 -1,其中在 1967、1971、1974 和 1979 这 4 个年份出现了较为严重的干旱现象,且干旱程度大都为重度干旱。从图 4 中可以看出,在未来时期 RCP4.5 情景下 PDSI 的值整体变化较为和缓,只有在 2028—2032 年 PDSI 的变化波动稍大,范围为 -1.51 ~ 6.03,其中只有 5 个月的数值小于 -1,干

旱月数远小于基准期,且都表现为轻度干旱。在 RCP8.5 情景下,除 2046 年 8—10 月 PDSI 值小于 -2,表现为中度干旱,其余月份都表现为轻度干旱,范围为 -2.37 ~ 8.02,其中有 18 个月的数值小于 -1,干旱月数多于 RCP4.5 情景下。比较两种情景下的 PDSI 值可以看出,RCP8.5 情景下的 PDSI 值序列整体呈下降趋势,RCP4.5 情景下整体呈微上升趋势,RCP8.5 情景下 PDSI 值较 RCP4.5 情景下震荡更为剧烈。

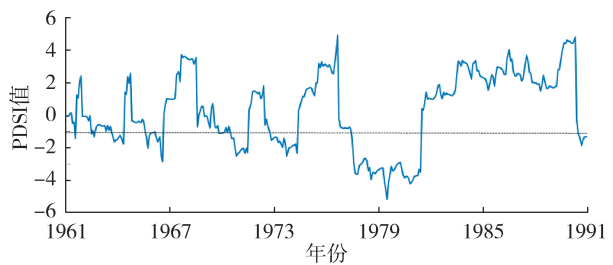


图3 唐乃亥站基准期 PDSI 值序列

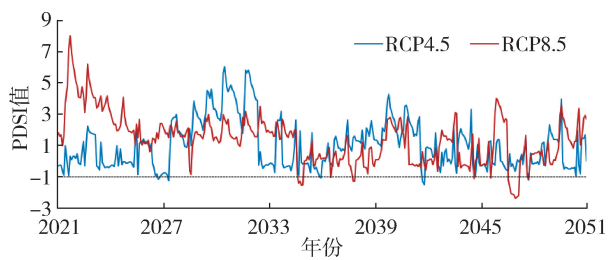


图4 唐乃亥站未来时期两种情景下 PDSI 值序列

2.3 黄河源区干旱特征的空间变化趋势

表 1 和图 5 分别为黄河源区唐乃亥站基准期 (1961—1990 年) 干旱变量统计以及黄河源区基准期干旱特征 (频次、总历时、平均历时、平均烈度) 空间分布。从表 1 可以看出,黄河源区唐乃亥站最长一次干旱历时为 48 个月,平均干旱历时为 10.73 个月,最大烈度为 165.98,平均烈度为 25.23,历时和烈度都为正偏,但干旱历时分散程度较干旱烈度小。从图 5 可以看出,黄河源区在基准期内大部分面积上的干旱频次在 10 次左右,绝大多数地区的干旱总历时在 80 ~ 140 个月,占整个研究时段 360 个月的 22.2% ~ 38.8%,这表明黄河源区有 1/4 时间都受到干旱的影响。另外,流域内绝大部分地区的平均干旱历时为 4 ~ 10 个月,东部干旱历时长于整个流

表 1 唐乃亥站基准期干旱变量统计

特征量	干旱历时/月	干旱烈度
最大值	48	165.98
最小值	1	1.05
平均值	10.73	25.23
标准差	13.82	47.99
变差系数	1.29	1.9
偏态系数	1.93	2.58

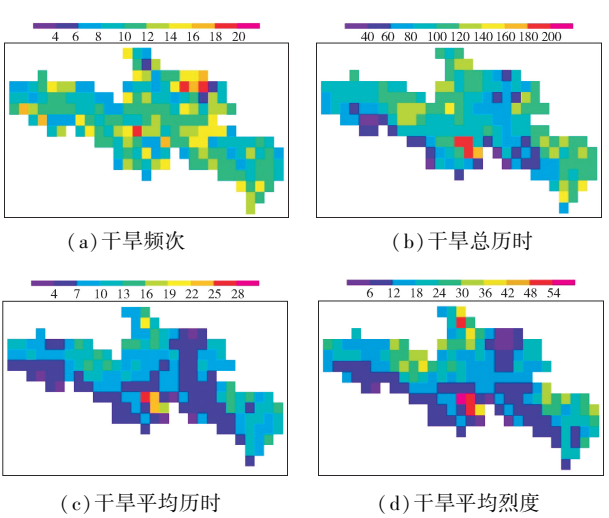


图5 黄河源区基准期干旱特征空间分布

域的平均历时,流域内大部分区域的平均干旱烈度为 6 ~ 24,东部的干旱烈度要高一些,其空间分布和流域内平均历时较为相似。

表 2 和图 6 分别是唐乃亥站未来时期 (2021—2050 年) 干旱变量统计以及黄河源区未来时期 (2021—2050 年) 两个模式下干旱特征 (频次、总历时、平均历时、平均烈度) 空间分布。从表 2 中可以看出,在 RCP4.5 情景下黄河源区唐乃亥站最长一次干旱历时 2 个月,平均干旱历时 1.2 月,最大烈度 2.79,平均烈度 1.49,历时和烈度都为正偏,但历时分散程度较烈度小。在 RCP8.5 情景下,唐乃亥站最长一次干旱历时达 8 个月,平均历时 2.57,最大烈度 16,平均烈度 4.1,无论干旱历时还是干旱烈度 RCP8.5 情景下的值都要大于 RCP4.5 情景下的。从图 6 中可以看出,在 RCP4.5 情景下,黄河源区大部分地区的干旱次数在 15 次左右。此外,黄河源区内大部分区域的干旱总历时在 160 个月左右,流域东部在 200 个月以上,占整个研究时段 360 个月的 44.4% ~ 55.5%。整个流域的平均烈度为 30 ~ 60,东部的平均烈度要远远的大于流域的其他地区。在 RCP8.5 情景下,黄河源区大部地区发生干旱的次数为 10 次左右,发生的频率要小于 RCP4.5 情景下的。干旱总历时分布不均,在流域西部总历时在 120 个月左右,而中部为 40 ~ 80 个月,东部总历时

表 2 唐乃亥站未来时期干旱变量统计

特征量	干旱历时/月		干旱烈度	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
最大值	2	8	2.79	16
最小值	1	1	1.09	1.02
平均值	1.2	2.57	1.49	4.1
标准差	0.45	2.64	0.73	5.52
变差系数	0.37	1.03	0.49	1.35
偏态系数	1.5	1.45	1.48	1.69

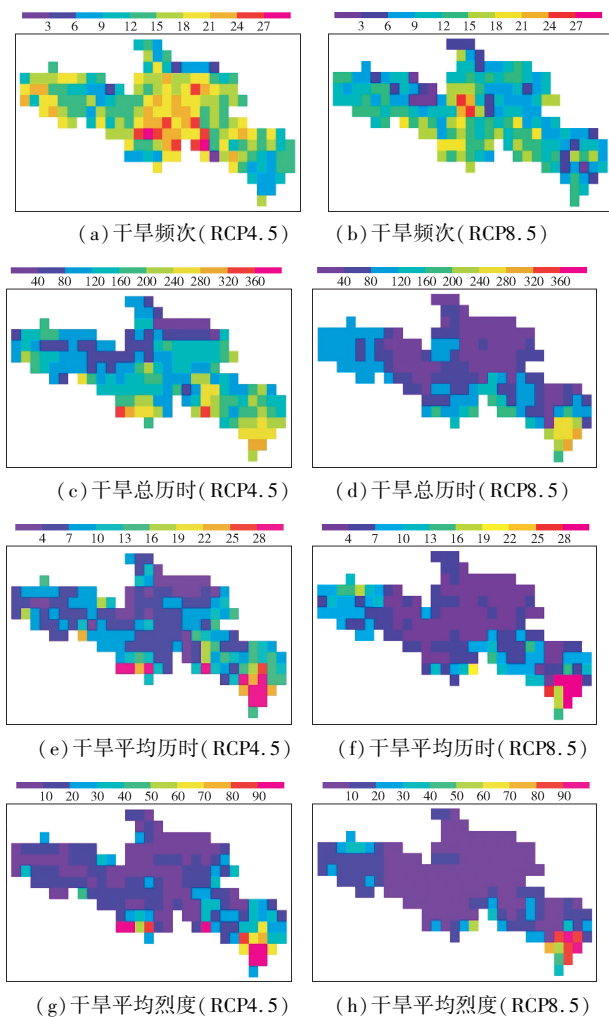


图6 黄河源区未来时期两种模式下干旱特征空间分布

最久高达240个月。平均历时流域大部分区域为10~20个月,其中东部的平均历时最大在20个月以上,流域平均烈度在20左右,流域东部的平均烈度最大。

3 结 论

a. 无论是降水还是气温,经过多模式优化集合处理后的效果都要优于单个模式,且采用最优赋权法的效果要好于算术平均法,通过使用降尺度与最优赋权多模式集合数据运行VIC模型能够较好地模拟黄河源区的水文过程。NSCE在率定期(1961—1990年)和验证期(1991—2005年)分别为0.792和0.774。率定期的水量相对偏差为-0.168%,验证期的水量相对偏差为-0.30%。

b. 黄河源区基准期(1961—1990年)的PDSI值序列变化较为平稳,表现出微弱的增加趋势,范围为-5.14~4.96,其中有118个月的数值小于-1,发生干旱;在未来时期(2021—2050年)RCP4.5情景下PDSI值整体变化较为和缓,范围为-1.51~6.03,其中只有5个月的数值小于-1,发生干旱;

RCP8.5情景下,PDSI值范围为-2.37~8.02,其中有18个月的数值小于-1;RCP8.5情景下PDSI值序列较RCP4.5情景下震荡更为剧烈。

c. 黄河源区干旱特征差异性显著。基准期(1961—1990年)黄河源区绝大部分地区的平均干旱历时为4~10个月,平均干旱烈度为6~24;未来时期(2021—2050年)RCP4.5情景下,黄河源区内大部分区域的干旱总历时在160个月左右,整个流域的平均烈度为30~60,东部的平均烈度要远远的大于流域的其他地区;在RCP8.5情景下,干旱的发生频率小于RCP4.5情景,大多数地区的干旱平均历时为10~20个月,平均烈度在20左右。

参考文献:

- [1] 朱智沼,王倩,符磊. 中国污水处理中碳排放的影子价格研究[J]. 水利经济, 2018, 36(6): 8-13. (ZHU Zhiming, WANG Qian, FU Lei. Shadow price of carbon emissions from wastewater treatment in China[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(6): 8-13. (in Chinese))
- [2] 秦大河. 气候变化与干旱[J]. 科技导报(北京), 2009, 27(11): 3. (QIN Dahe. Climate change and drought[J]. Science & Technology Review, 2009, 27(11): 3. (in Chinese))
- [3] 张洪泉. “红旗河”调水方案的制约因素与中国西北干旱治理对策[J]. 水资源保护, 2018, 34(4): 8-11. (ZHANG Hongquan. Potential pitfalls in “Hongqi River” water transfer proposal and drought management in Northwest China[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(4): 8-11. (in China))
- [4] 牛玉国,张学成. 黄河源区水文水资源情势变化及其成因初析[J]. 人民黄河, 2005, 27(3): 31-33. (NIU Yuguo, ZHANG Xuecheng. Changes and reasons analysis of hydrology and water resource over the Yellow River Source Regions[J]. Yellow River, 2005, 27(3): 31-33. (in Chinese))
- [5] 杨肖丽,郑巍斐,林长清,等. 基于统计降尺度和SPI的黄河流域干旱预测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 377-383. (YANG Xiaoli, ZHENG Weifei, LIN Changqing, et al. Prediction of drought in the Yellow River based on statistical downscale study and SPI[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(5): 377-383. (in Chinese))
- [6] 许朗,张维诚. 区域农业旱灾脆弱性评价及其影响因素[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(2): 14-19. (XU Lang, ZHANG Weicheng. Assessment of regional agricultural drought vulnerability and main influencing factors[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(2): 14-19. (in Chinese))

(下转第137页)

- development in Tibet, China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32 (9): 932-944. (in Chinese))
- [5] US National Wild and Scenic River System. Rio Grande Wild and Scenic River[EB/OL]. [2019-03-26]. <https://www.rivers.gov/rivers/rio-grande-tx.php>.
- [6] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 三江源国家公园总体规划[R]. 北京: 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2018: 25-26.
- [7] 宗志华, 陆美凝, 李帆. 淮安市国家级水利风景区旅游开发潜力综合评价[J]. 水利经济, 2016, 34(4): 69-72. (ZONG Zhihua, LU Meining, LI Fan. Comprehensive evaluation of tourism development potential of National Water Conservancy Scenic Area in Huai'an[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2016, 34(4): 69-72. (in Chinese))
- [8] 丁鼎, 薛小杰. 长阳清江国家水利风景区资源保护与利用[J]. 水利经济, 2017, 35(5): 70-74. (DING Ding, XUE Xiaojie. Conservation and utilization of water resources of Qingjiang National Water Park in Changyang County[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 35(5): 70-74. (in Chinese))
- [9] US National Wild and Scenic River System. Mckenzie Wild and Scenic River[EB/OL]. [2019-03-26]. <https://www.rivers.gov/rivers/mckenzie.php>.
- [10] NWPPA. Carmen-Smith Hydroelectric Project: new agreement projects fish and EWVB Customers [J]. NWPPA Bulletin, 2017, 70(4): 26-29.
- [11] NWPPA. What's inside my project boundary-and what's not? [R]. Washington DC: US Forest Service, 2015.
- [12] EWEB. An in-depth look at Carmen-Smith Hydroelectric Project[EB/OL]. [2019-03-26]. <http://www.eweb.org/about-us/news/an-in-depth-look-at-carmen-smith-hydroelectric-project>.
- [13] 李鹏, 张端, 戴向前, 等. 美国荒野风景河流体系发展阶段及其主要影响因素[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 178-186. (LI Peng, ZHANG Rui, DAI Xiangqian, et al. Development stages of US National Wild and Scenic Rivers System and main influencing factors[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 178-186. (in Chinese))
- [14] 中华人民共和国审计署. 长江经济带生态环境保护审计结果[EB/OL]. [2019-03-26]. <http://www.h2o-china.com/news/276563.html>.
- [15] US National Wild and Scenic River System. White Salmon Wild and Scenic River[EB/OL]. [2019-03-26]. <https://www.rivers.gov/rivers/white-salmon.php>.
- [16] RANDY G T, CHRISTOPHERA S, MIA H. Dam removal on the Lower White Salmon River: rewilding, sacred spaces, and "outstandingly remarkable values" [J]. International Journal of Wilderness, 2017, 23(2): 34-40. (收稿日期: 2018-12-29 编辑: 熊水斌)

(上接第 99 页)

- [7] 王红瑞, 洪思扬, 秦道清. 干旱与水资源短缺相关问题探讨[J]. 水资源保护, 2017, 33(5): 1-4. (WANG Hongrui, HONG Siyang, QIN Daoqing. Discussion on related issues of drought and water shortage [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5): 1-4. (in Chinese))
- [8] 陈昱潼, 畅建霞, 黄生志, 等. 基于 PDSI 的渭河流域干旱变化特征[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(5): 29-37. (CHEN Yutong, CHANG Jianxia, HUANG Shengzhi, et al. Variation characteristics of drought in Weihe River Basin based on Palmer drought severity index [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(5): 29-37. (in Chinese))
- [9] 陈华, 郭靖, 郭生练, 等. 应用统计学降尺度方法预测汉江流域降水变化[J]. 人民长江, 2008, 39(14): 53-55. (CHEN Hua, GUO Jing, GUO Shenglian, et al. Forecast of precipitation in the Hanjiang River Basin using statistical downscaling[J]. Yangtze River, 2008, 39(14): 53-55. (in Chinese))
- [10] 荣艳淑, 巩琳, 卢寿德. 云南 2009—2014 年持续性气象水文干旱特征及成因分析[J]. 水资源保护, 2018, 34(3): 22-29. (RONG Yanshu, GONG Lin, LU Shoude. Analysis on characteristics and causes of persistent meteorological and hydrological drought in Yunnan from 2009 to 2014 [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(3): 22-29. (in China))
- [11] 杨肖丽, 郑巍斐, 林长清, 等. 基于统计降尺度和 SPI 的黄河流域干旱预测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 377-383. (YANG Xianli, ZHNEG Weifei, LIN Changqing, et al. Prediction of drought in the Yellow River based on statistical downscale study and SPI [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(5): 377-383. (in Chinese))
- [12] 王根绪, 沈永平, 程国栋. 黄河源区生态环境变化与成因分析[J]. 冰川冻土, 2010, 22(3): 200-205. (WANG Genxu, SHEN Yongping, CHENG Guodong. Eco-environmental changes and causal analysis in the source regions of the Yellow River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 22(3): 200-205. (in Chinese))
- [13] YANG X, WOOD E F, SHEFFIELD J, 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.
- [14] VARIS O, KAJANDER T, LEMMEL R. Climate and water: from climate models to water resources management and vice versa [J]. Climatic change, 2004, 66(3): 321-344.
- [15] 黄振芳, 刘昌明. 基于博弈论综合权重模糊优选模型在地下水环境风险评价中的应用[J]. 水文, 2010, 30(4): 13-17. (HUANG Zhenfang, LIU Changming. A fuzzy optimization model based on comprehensive weight calculated with game theory and its application in environment risk assessment of groundwater system [J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(4): 13-17. (in Chinese))
- [16] 王栋. 气候变化对水文气象要素及极端事件的影响研究以黄河源区为例 [D]. 南京: 河海大学. 2016.
- [17] 刘懿. 多要素综合干旱指数构建及应用 [D]. 南京: 河海大学. 2017. (收稿日期: 2018-11-19 编辑: 王芳)