

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.01.002

黄河流域未来气象水文干旱传播的气候变化响应

谢灵枫,杨肖丽,吴凡,叶周兵,罗定

(河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098)

摘要:为研究未来时期黄河流域气象干旱向水文干旱传播中干旱特征的变化,基于可变下渗容量模型模拟了黄河流域历史时期(1961—2014年)与未来时期(2015—2100年)的水文过程,给出了基于干旱事件匹配的干旱强度传播指数与干旱历时传播指数,预估了未来时期黄河流域干旱特征传播较历史时期的变化。结果表明:气候变化使黄河流域干旱传播时间多有缩短;未来情景下气象干旱传播率与水文干旱敏感性较历史时期更高,气象干旱更容易向水文干旱传播;未来时期干旱强度传播的强度基本保持不变,干旱历时传播的强度将大幅下降。

关键词:气象干旱;水文干旱;干旱传播;VIC模型;干旱特征;黄河流域

中图分类号:P339

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2025)01-0010-08

Response of future meteorological and hydrological drought propagation to climate change in the Yellow River Basin

XIE Lingfeng, YANG Xiaoli, WU Fan, YE Zhoubing, LUO Ding

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To study the changes of drought characteristics in the propagation from meteorological drought to hydrological drought in the Yellow River Basin in the future, it is urgent to study the characteristics and transmission process of drought, so as to provide guidance for drought early warning. In this paper, the variable infiltration capacity (VIC) model was used to simulate the hydrological process of the Yellow River Basin in the historical period (1961-2014) and the future period (2015-2100), and the drought intensity propagation index and the drought duration propagation index were constructed based on the matching of drought events, and the changes of the drought characteristics propagation in the Yellow River Basin in the future compared with the historical period were analyzed. The conclusion shows that climate change has shortened the drought propagation time in the Yellow River Basin and in the future scenario, meteorological drought translation rate and hydrological drought sensitivity are higher than those in the historical period; thus, meteorological drought is more likely to spread to hydrological drought. The intensity of drought intensity propagation in the future period will remain basically unchanged, while the intensity of drought duration propagation will decrease significantly in the future.

Key words: meteorological drought; hydrological drought; drought propagation; VIC model; drought characteristics; the Yellow River Basin

受气候变化和人类活动叠加影响,全球干旱事件呈现加剧趋势^[1-2]。自 20 世纪 60 年代以来,黄河流域就呈现水文干旱加剧态势,给流域内的水资源安全、工农业生产、生态环境带来了风险与挑战^[3-4]。黄河流域常住人口占全国人口的 14.75%,是我国重要人口聚居区,而径流量约仅占全国径流量的 2%,水资源供求矛盾突出^[5-7]。因此,有必要对黄河流域干旱的发生以及演变进行研究,以便更好地对干旱进行监测预警,减小干旱带来的社会经济损失。

干旱是区域内降水不足同时蒸散发强烈导致的水分短缺现象^[8]。按照水分亏缺类型,干旱分为气象干旱、水文干旱、农业干旱、社会经济干旱,且不同种类的干旱之间存在强烈联系^[9]。气象干旱是最先发生的

基金项目:国家自然科学基金项目(U2243203,52079036)

作者简介:谢灵枫(2000—),男,硕士研究生,主要从事干旱传播研究。E-mail:221301020003@hhu.edu.cn

通信作者: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

引用本文:谢灵枫,杨肖丽,吴凡,等.黄河流域未来气象水文干旱传播的气候变化响应[J].河海大学学报(自然科学版),2025,53(1):10-17.

XIE Lingfeng, YANG Xiaoli, WU Fan, et al. Response of future meteorological and hydrological drought propagation to climate change in the Yellow River Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(1):10-17.

干旱,大部分水文干旱是由前期的气象干旱引起的^[10],两者之间的传播受到多种人为与环境因素的干扰,使得两者的传播机制变得更加复杂^[11]。准确描述水文干旱与气象干旱之间的响应关系,对理解水文-气象干旱的发生、发展规律,乃至对干旱灾害的预防、预警与预报具有重要作用^[12]。

目前,对于干旱传播过程的研究主要集中于不同时空尺度上气象干旱与水文干旱的传播时间、特征与影响因素等^[13-17]。Zhou 等^[18]最早于 2019 年提出了干旱传播强度指数(drought propagation intensity index, DPI),并研究了石羊河流域气象干旱对水文干旱的传播强度。Li 等^[19]注意到干旱历时也是干旱传播的主要指标,并修正了干旱指数计算时间尺度过大的问题,形成了干旱历时传播指数(drought propagation duration index, DDP)与干旱强度传播指数(drought propagation intensity index, DIP)。但是,以上研究均从整个干湿序列出发,未使用游程理论对干旱事件进行识别与匹配。干旱事件能更好地代表干旱特征,而使用全干湿序列会导致干旱特征受到非干旱时期干扰,因此有必要对干旱传播指数进行改进^[20-21]。

本文基于标准化蒸散发指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)和标准化径流指数(standardized runoff index, SRI),通过游程理论识别干旱事件,改进干旱强度传播指数与干旱历时传播指数,研究未来时期黄河流域气象干旱向水文干旱传播中干旱特征的变化,以期为干旱预警提供参考。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

黄河流域横跨干旱、半干旱与半湿润地区,面积广阔,东西高程差异显著,水文气象情况复杂多变,各个地区的干旱情况不一^[22]。黄河流域降水量 200~650 mm,集中于 6—9 月,多年平均蒸发量 1 100 mm,多年平均河川天然径流量为 534.8 亿 m³,流域内人均水量低于 600 m³,仅占到全国平均值的 1/4,干旱情况较为突出,在 1966—2010 年间有 16 年发生重旱及以上干旱,造成了粮食减产与巨大的经济损失^[3]。黄河流域子流域分区及水文站分布如图 1 所示。

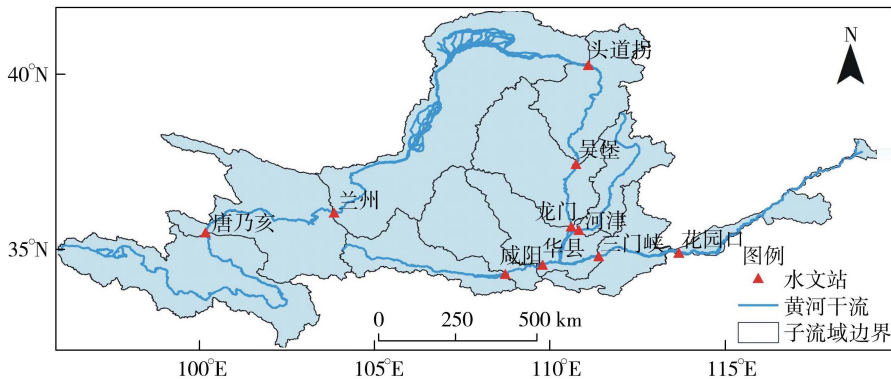


图 1 黄河子流域分区及水文站分布

Fig. 1 Sub-basins in the Yellow River Basin and spatial distribution of hydrological stations

1.2 研究数据

可变下渗容量(variable infiltration capacity ,VIC)模型数据包括气象数据、植被数据、土壤数据、DEM 数据与水文数据。气象数据包括分辨率为 0.25°×0.25°的格点化 CN05.1 数据集^[23],气候模式模拟气象资料包括风速、降水、最高气温、最低气温,采用来自 NEX-GDDP-CMIP6 数据集^[24]的 10 个气候模式的多模式集合(表 1)。NEX-GDDP-CMIP6 数据集包括 4 个未来情景:SSP126、SSP245、SSP370、SSP585^[25-28](2015—2100 年)。为分析历史时期与未来时期干旱特征发生的变化,本文将 CN05.1 数据集(1961—2014 年)作为历史基准期,而把 4 个未来情景作为未来时期(2015—2100 年)。植被数据参考美国马里兰大学发布的空间分辨率为 1 km 的全球植被分类系统确定^[29],土壤数据来自联合国粮食与农业组织(FAO),并统一分辨率至 0.25°。DEM 数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn>),分辨率为 30 m。水文数据来自黄河流域水文年鉴,主要为黄河流域内 10 个水文站点流量数据。

表1 气候模式集合数据信息

Table 1 Aggregate data information of global cimete models

序号	模式名称	研究机构
1	ACCESS-CM2	澳大利亚联邦科学和工业研究组织和气象局(澳大利亚)
2	ACCESS-ESM1-5	澳大利亚联邦科学和工业研究组织和气象局(澳大利亚)
3	BCC-CSM2-MR	中国国家气候中心(中国)
4	CMCC-ESM2	欧洲地中海气候变化中心(意大利)
5	CNRM-CM6-1	法国国家气象研究中心(法国)
6	MPI-ESM1-2-LR	马普气象研究所(德国)
7	MRI-ESM2-0	日本气象局气象研究所(日本)
8	NorESM2-LM	挪威气候中心(挪威)
9	NorESM2-MM	挪威气候中心(挪威)
10	TaiESM1	环境变化研究中心(中国台湾)

注:10个模式的时空分辨率均为日尺度、0.25°×0.25°。

2 研究方法

2.1 VIC 模型及参数率定方法

基于CN05.1数据集,采用VIC模型模拟黄河流域产流过程,时间尺度为日尺度,空间尺度为0.25°×0.25°。VIC模型可直接输出黄河流域各网格的潜在蒸散发与产流,并按月进行求和形成月流量与月潜在蒸散发序列用于计算SPEI与SRI。

考虑到黄河流域面积较大,气候、地形复杂多样,本文将整个流域划分为不同子流域分别率定,包括8个干流区与3个支流区域(图1)。除唐乃亥、咸阳、河津子流域外都是嵌套流域,需要计算区间流量。采用马斯京根分段连续演算法,将上游流域来水推演至下游出口断面,进而采用下游出口实测流量过程减去验算流量过程,得到区间流量。对于花园口以下区域,无法通过实测流量过程线进行参数率定,直接移用相邻子流域参数,花园口以下移用花园口参数。本文以1961—1975年为参数率定期,1976—1990年为参数验证期,考虑到黄河流域土壤、植被数据发生较大变化的可能性较小,将历史时期率定的参数沿用至各未来气候模式情景。

2.2 干旱事件识别

本文基于游程理论,采用SRI与SPEI对干旱事件进行识别^[30-31]。SPEI与SRI可以简便地识别干旱的严重程度与持续时间^[32]。由于多月时间尺度的SPEI与SRI识别的干旱事件持续时间偏长,信息重叠严重^[33],因此本文使用1月尺度的SPEI与SRI对轻旱级别(SPEI、SRI小于或等于-0.5)的干旱事件进行识别。

基于游程理论^[34]识别干旱事件并进行合并与剔除,提取干旱特征。本文对只间隔1月、SPEI或SRI指数小于0的事件进行合并,对SPEI或SRI指数大于-1、持续1月的事件进行剔除。每次干旱事件的持续时间定义为干旱历时;每次干旱事件的最小值定义为干旱强度。

2.3 干旱传播时间

一场或多场程度较轻、历时较短的气象干旱会经过水文循环引发干旱程度严重、历时长的水文干旱,而两种干旱发生的时间差值称为干旱传播时间^[35-36],用于反映干旱传播的快慢。本文使用Pearson相关系数分析不同时间尺度的气象干旱(SPEI_1、SPEI_2、SPEI_3、……、SPEI_24)与1月尺度的水文干旱(SRI_1)之间的相关性,将相关系数最大的SPEI对应的时间尺度作为干旱的传播时间(*t*),并进行显著性水平为0.05的显著性检验^[37]。

2.4 干旱传播率与干旱敏感性

采用干旱传播时间匹配气象干旱事件与水文干旱事件^[33],即当第*i*场水文干旱的开始月(*H_{si}*)满足式(1)时认为干旱事件匹配成功。

$$M_{sj} \leq H_{si} \leq M_{ej} + t$$

(1)

式中*M_{sj}*、*M_{ej}*分别为第*j*场气象干旱的开始月、结束月。

干旱的传播过程复杂多变,存在多场气象干旱引起一场水文干旱,也存在一场气象干旱不引起水文干

旱,还有可能一场气象干旱导致多场水文干旱的现象。为合理量化气象干旱与水文干旱之间的传播特征,本文基于干旱响应时间和游程理论对气象干旱和水文干旱进行匹配后,采用 Guo 等^[38]提出的气象干旱传播率(T_{r1})与水文干旱敏感性(T_{r2})描述干旱传播过程。 T_{r1} 表征气象干旱向水文干旱的传播率, T_{r2} 表征水文干旱对气象干旱的敏感度。

2.5 DIP 与 DDP

为反映干旱特征在干旱传播中发生的变化,本文基于格点内干旱事件匹配后的干旱强度和历时,构建 DIP 与 DDP,DIP 与 DDP 的分级见表 2。

3 结果与分析

3.1 VIC 模型参数率定结果

采用日尺度纳什效率系数与相对偏差评估模型模拟精度,黄河流域 10 个子流域出口水文站的参数率定结果见表 3。除头道拐、河津站模拟效果较差,存在相对偏差绝对值大于 30%,纳什效率系数小于 0.6 的情况,兰州站纳什效率系数略低于 0.6,其余水文站点模拟效果均在允许范围内。由于 1990 年后黄河流域修建了大型水利枢纽(包括龙羊峡水电站、李家峡水电站、万家寨水利枢纽、小浪底水利枢纽、龙口水利枢纽),水库的季节性调节改变了径流的年内分配,对黄河的径流过程产生了巨大影响,因此验证期截至 1990 年。参考 2022 年《黄河水资源公报》,花园口站以上区域实测径流量 321.7 亿 m^3 ,天然河川径流量为 461.02 亿 m^3 ,可见人类活动对黄河径流过程造成了强烈影响。

3.2 干旱传播特征

3.2.1 干旱传播时间

在进行气象干旱与水文干旱事件的匹配之前,需要先确定气象干旱向水文干旱传播所需要的干旱传播时间,以确定干旱事件匹配的时间区间。黄河流域的干旱传播时间存在极强的季节性^[39],基于 SPEI_1 至 SPEI_24 与 SRI_1 的 Pearson 相关系数,得到了黄河流域干旱传播时间分布(图 2)。整体来看,气候变化下未来时期黄河流域的干旱传播时间较历史时期缩短。在黄河上游流域,干旱传播时间较历史时期有增有减,2 月干旱传播时间平均缩短了 1.8~2.9 月,SSP126、SSP245 情景的干旱传播时间在 3 月分别缩短了 0.5 月、1.6 月,而 SSP370、SSP585 情景分别增加了 1.6 月。在黄河中游流域,SSP126、SSP245 情景的干旱传播时间整体缩短,特别在 2—3 月干旱传播时间较历史时期平均缩短 2.2~3 月,较历史时期缩短了 31.4%~68.2%,而 SSP585 情景在 3 月干旱传播时间增加了 1.1 月。在黄河下游流域 1 月出现了干旱传播时间平均增加 2.1~4.7 月,干旱传播时间延长 1~2.2 倍。

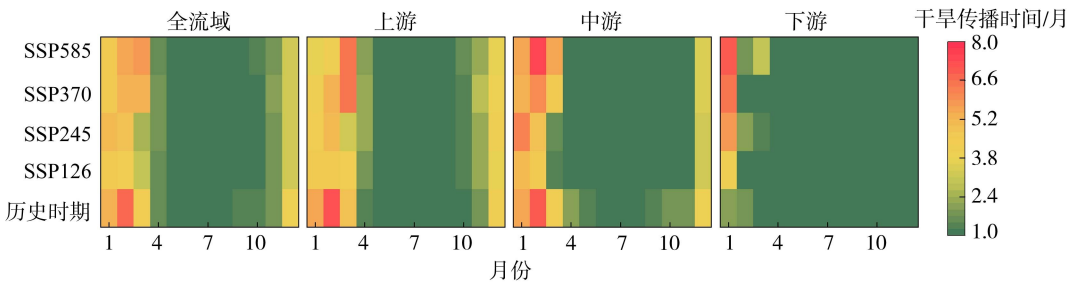


图 2 不同情景下各流域平均干旱传播时间

Fig. 2 Average drought propagation time of each river basin under different scenarios

表 2 干旱特征传播指数分级标准

Table 2 Classification standard of drought characteristic propagation index

DIP	DDP	传播指数分级
>0~<0.85	>0~<1.40	极弱
0.85~<0.90	1.40~<1.60	中弱
0.90~<0.95	1.60~<1.80	微弱
0.95~<1.05	1.80~<2.20	正常
1.05~<1.10	2.20~<2.40	微强
1.10~<1.15	2.40~<2.60	中强
≥1.15	≥2.60	极强

表 3 VIC 模型参数率定期与验证期模拟结果

Table 3 Simulation results of parameter calibration periods and verification periods for VIC model

水文站	相对偏差/%		纳什效率系数	
	率定期	验证期	率定期	验证期
唐乃亥	10.28	23.33	0.72	0.71
兰州	-14.35	-13.16	0.78	0.52
头道拐	60.54	81.57	0.67	0.47
吴堡	-4.51	-1.79	0.90	0.92
龙门	-6.06	-4.81	0.93	0.93
三门峡	7.40	4.48	0.87	0.90
河津	66.34	131.19	0.48	0.63
咸阳	-7.29	21.97	0.65	0.78
华县	-14.83	-20.74	0.80	0.82
花园口	-1.58	-0.50	0.92	0.90

3.2.2 水文干旱敏感性与气象干旱传播率

在进行基于格点事件的干旱传播特征指数计算之前,需要评估现有干旱匹配规则下的干旱事件匹配效果,以确定 DIP 与 DDP 指数能否反映该区域的干旱事件。黄河流域不同情景下的水文干旱敏感性与气象干旱传播率(图 3),除历史时期匹配效果较差,各未来时期均值都在 0.6 以上。参考其他流域的结果^[33,35,40],水文干旱敏感性与气象干旱传播率应在 0.6~0.9,而各情景中位数都在 0.6 以上,大部分干旱事件都参与了匹配,匹配效果较好。

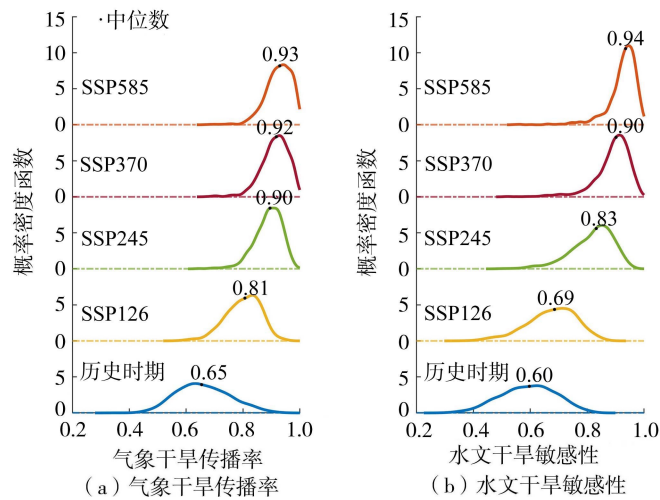


图 3 不同情景下黄河流域气象干旱传播率与水文干旱敏感性

Fig. 3 Meteorological drought translation rate and hydrological drought sensitivity in the Yellow River Basin under different scenarios

图 4 中降水进行了窗口期为 5 年的滑动平均。由图 4 可知,未来情景下黄河流域气温大多呈现上升趋势,较历史时期气温升高;降水呈现增加趋势,除 SSP585 情景在 2090 年后降水略多于历史时期,其余情景降水均较历史时期更少。越高排放的未来情景,其气象干旱传播率与水文干旱敏感性越高,这表明气候变化促进了气象干旱向水文干旱的传播,使得气象干旱更易向水文干旱传播。

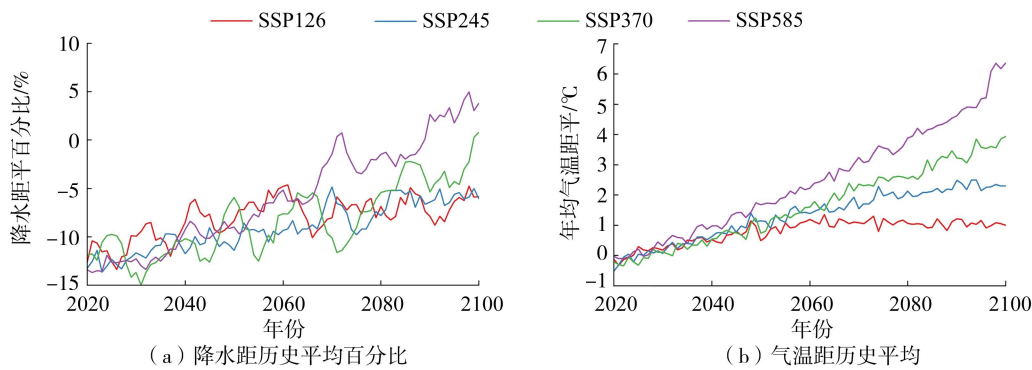


图 4 未来情景黄河流域气温距平与降水距历史时期平均变化

Fig. 4 Change of temperature and precipitation from historical periods in the Yellow River Basin in future scenarios

3.2.3 DIP 与 DDP 的变化

由图 5 可知,干旱特征传播较为强烈。对于 DIP 指数,中强、极强的像元,主要集中于黄河上游东北部与黄河中游西南部,分别占流域的 7.9% 和 3.0%,而干旱特征传播较弱的区域(极弱 2.1%,中弱 2.2%)集中在黄河中游南部区域。对于 DDP,中强、极强的像元占流域的 15.6%,分布在黄河上游流域与中游南部区域,远多于极弱、中弱的像元(7.6%)。

以 1961—2014 年为历史时期对比不同未来情景下干旱传播特征发生的变化,DIP(图 6)变化较为平缓,在黄河流域北部呈现较大范围的减少,SSP126、SSP245 情景在黄河流域西部也有较多的减少,而在黄河中部与黄河下游地区主要呈现干旱强度传播指数的提高。SSP585 情景 DIP 下降趋势最明显,下降幅度大于 10% 的像元占流域的 15.8%,而 SSP370 情景呈增长的区域最广,上升幅度大于 10.0% 的像元占到了流域 26.1%。

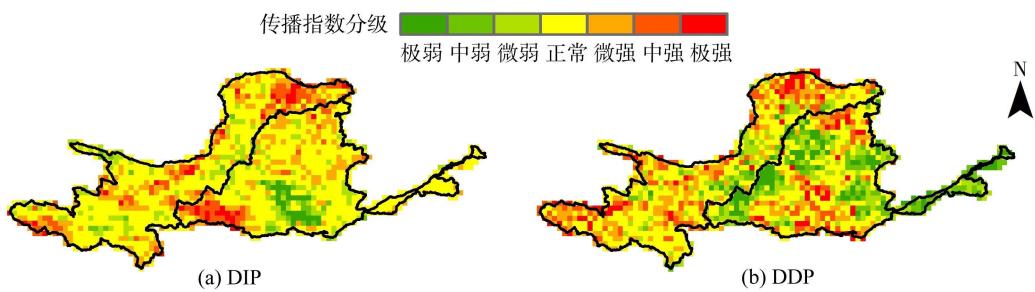


图 5 历史时期的 DIP 与 DDP 分级

Fig. 5 Grading of drought intensity propagation index and drought duration propagation index in historical period

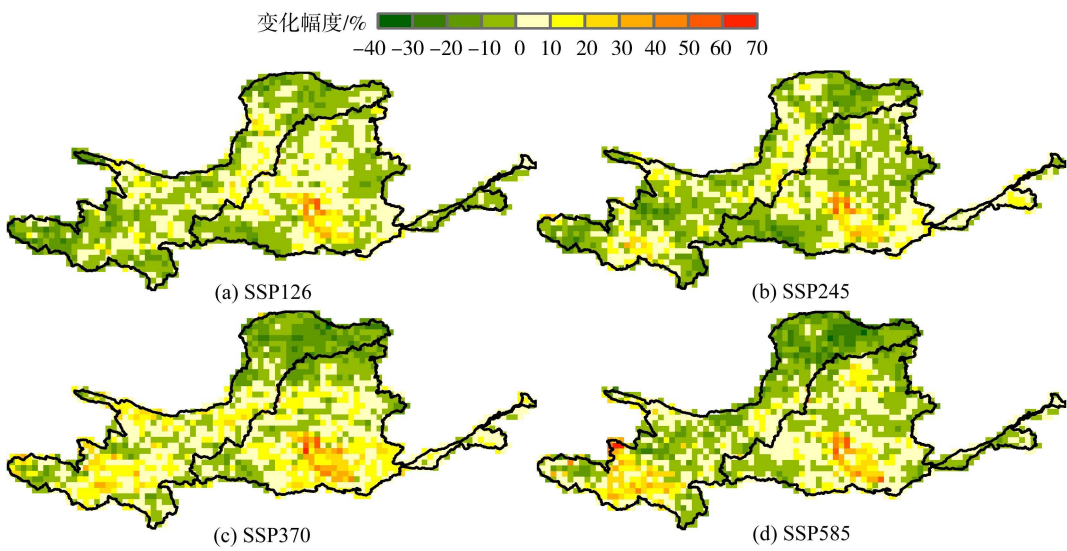


图 6 未来情景 DIP 较历史时期变化

Fig. 6 Change of drought intensity propagation index in future scenarios compared with the historical period

不同未来情景下 DDP (图 7) 变化较为剧烈, DDP 极弱的区域占流域面积增加约 30.0%, 黄河流域中部有较多增长。SSP126 情景下 DDP 下降最多, 变化幅度小于 10.0% 的像元占流域的 79.3%, 而 SSP585 情景的上升面积在所有情景中最大, 变化幅度大于 10.0% 的像元达到了流域的 14.1%, 像元变化幅度最大值达到了 97.8%。

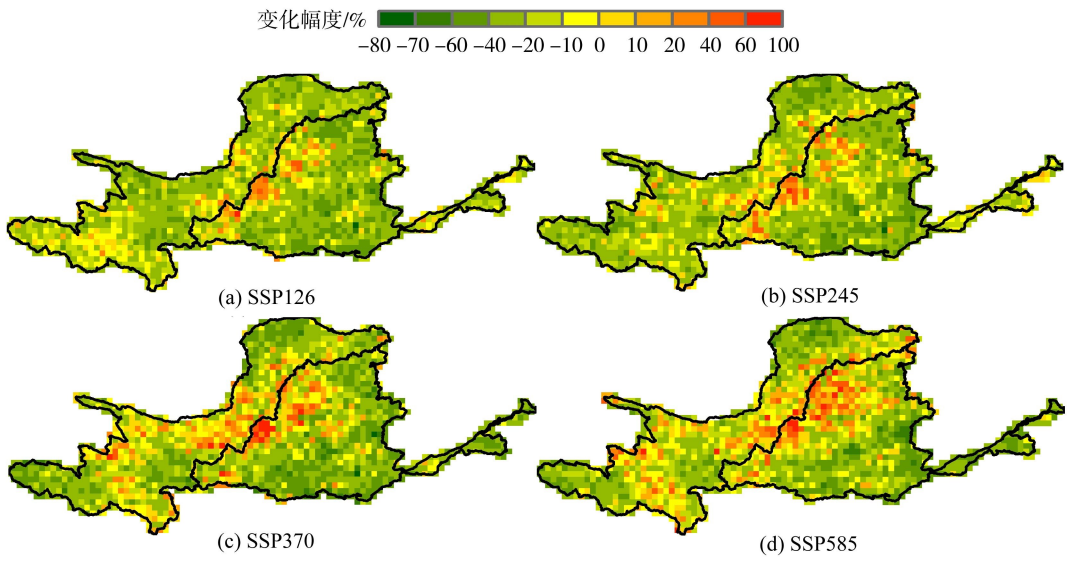


图 7 未来情景 DDP 较历史时期变化

Fig. 7 Change of drought duration propagation index in future scenarios compared with the historical period

4 结 论

- a. 黄河流域气象干旱向水文干旱的传播时间呈现缩短的趋势。尤其在黄河上游流域,1 月、2 月的干旱传播时间变短,而在 SSP370 和 SSP585 情景下,该传播时间相对较长。
- b. 未来情景下,气象干旱传播率与水文干旱敏感性均高于历史时期。排放越高的情景表现出更高的传播率和敏感性,说明气候变化促进了气象干旱向水文干旱的转化。
- c. 未来情景下,干旱强度传播指数整体变化不大,但黄河北部显示下降趋势,而黄河中部和下游地区则表现出干旱强度传播指数的提高。
- d. 未来情景下,干旱历时传播指数较历史时期变化剧烈,在黄河流域呈大范围下降趋势,而仅在流域中部出现小面积、大幅度的增长。

参考文献:

[1] ZHANG Xuan, HAO Zengchao, SINGH V P, et al. Drought propagation under global warming: characteristics, approaches, processes, and controlling factors[J]. Science of the Total Environment, 2022, 838: 156021.

[2] YANG Shiling, DING Zhongli, LI Yangyang, et al. Warming-induced northwestward migration of the East Asian monsoon rain belt from the Last Glacial Maximum to the mid-Holocene[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(43): 13178-13183.

[3] 陈艳萍, 蒋倩倩, 刘晶婕. 黄河流域“水资源生态保护高质量发展”空间均衡性诊断[J]. 水利经济, 2024, 42(1): 14-20. (CHEN Yanping, JIANG Qianqian, LIU Jingjie. Spatial equilibrium diagnosis of “water resources-ecological protection-high-quality development” in the Yellow River Basin[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(1): 14-20. (in Chinese))

[4] 薛联青, 肖颖, 刘远洪, 等. 黄河流域植被水分利用效率对干旱的时空累积响应[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 32-41. (XUE Lianqing, XIAO Ying, LIU Yuanhong, et al. Spatiotemporal accumulation response of vegetation water use efficiency to drought in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 32-41. (in Chinese))

[5] ZHOU Zixuan, SUN Xinrui, ZHANG Xuantao, et al. Inter-regional ecological compensation in the Yellow River Basin based on the value of ecosystem services[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 322: 116073.

[6] 牛玉国, 张金鹏. 构建黄河大水网促进黄河流域生态保护和高质量发展[J]. 水利经济, 2023, 41(2): 1-4. (NIU Yuguo, ZHANG Jinpeng. Research on building the Yellow River’s large water network and promoting the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(2): 1-4. (in Chinese))

[7] 刘永强. 黄河流域社会经济干旱时空演变与驱动机理研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.

[8] 田丰, 杨建华, 刘雷震, 等. 地理学视角的干旱传播概念、特征与影响因素研究进展[J]. 地理科学进展, 2022, 41(1): 173-184. (TIAN Feng, YANG Jianhua, LIU Leizhen, et al. Progress of research on the conception, characteristic, and influencing factors of drought propagation from the perspective of geographic sciences[J]. Progress in Geography, 2022, 41(1): 173-184. (in Chinese))

[9] 华悦. 嫩江下游水文、农业干旱对气象干旱响应关系[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.

[10] 马岚. 气象干旱向水文干旱传播的动态变化及其驱动力研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.

[11] 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))

[12] 张翔, 黄舒哲, 管宇航. 干旱传播的研究进展、挑战与展望[J]. 地球科学进展, 2023, 38(6): 563-579. (ZHANG Xiang, HUANG Shuzhe, GUAN Yuhang. Research progress, challenges, and prospects in drought propagation[J]. Advances in Earth Science, 2023, 38(6): 563-579. (in Chinese))

[13] YU Meixiu, LIU Xiaolong, LI Qiongfang. Responses of meteorological drought-hydrological drought propagation to watershed scales in the upper Huaihe River basin, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(15): 17561-17570.

[14] JEHANZAIB M, SATTAR M N, LEE J H, et al. Investigating effect of climate change on drought propagation from meteorological to hydrological drought using multi-model ensemble projections[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2020, 34(1): 7-21.

[15] RAN Lishan, LU X X, XIN Zhongbao, et al. Cumulative sediment trapping by reservoirs in large river basins: a case study of the

- Yellow River basin[J]. *Global and Planetary Change*,2013,100:308-319.
- [16] 顾磊,陈杰,尹家波,等. 气候变化下中国主要流域气象水文干旱潜在风险传播[J]. *水科学进展*,2021,32(3):321-333. (GU Lei, CHEN Jie, YIN Jiabo, et al. Risk propagation from meteorological to hydrological droughts in a changing climate for main catchments in China[J]. *Advances in Water Science*,2021,32(3):321-333. (in Chinese))
- [17] 刘永强,黄生志,郭烽,等. 气象干旱到不同等级水文干旱的传播阈值:以沁河流域为例[J]. *水力发电学报*,2022,41(2):9-19. (LIU Yongqiang, HUANG Shengzhi, GUO Yi, et al. Propagation threshold of meteorological drought to different levels of hydrological drought: a case study of Qinhe River Basin[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*,2022,41(2):9-19. (in Chinese))
- [18] ZHOU Junju, LI Qiaqiao, WANG Lanying, et al. Impact of climate change and land-use on the propagation from meteorological drought to hydrological drought in the eastern Qilian Mountains[J]. *Water*,2019,11(8):1602.
- [19] LI Qiaqiao, YE Aizhong, ZHANG Yuhang, et al. The peer-to-peer type propagation from meteorological drought to soil moisture drought occurs in areas with strong land-atmosphere interaction[J]. *Water Resources Research*,2022,58(9):e2022WR032846.
- [20] HAN Zhiming, HUANG Shengzhi, ZHAO Jing, et al. Long-chain propagation pathways from meteorological to hydrological, agricultural and groundwater drought and their dynamics in China[J]. *Journal of Hydrology*,2023,625:130131.
- [21] ZHANG Qiang, YAO Yubi, LI Yaohui, et al. Causes and changes of drought in China: research progress and prospects[J]. *Journal of Meteorological Research*,2020,34(3):460-481.
- [22] 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))
- [23] 吴佳,高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. *地球物理学报*,2013,56(4):1102-1111. (WU Jia, GAO Xuejie. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets[J]. *Chinese Journal of Geophysics*,2013,56(4):1102-1111. (in Chinese))
- [24] WU Fan, JIAO Donglai, YANG Xiaoli, et al. Evaluation of NEX-GDDP-CMIP6 in simulation performance and drought capture utility over China-based on DISO[J]. *Hydrology Research*,2023,54(5):703-721.
- [25] KRIEGLER E, BAUER N, POPP A, et al. Fossil-fueled development (SSP5): an energy and resource intensive scenario for the 21st century[J]. *Global Environmental Change*,2017,42:297-315.
- [26] FUJIMORI S, HASEGAWA T, MASUI T, et al. SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways[J]. *Global Environmental Change*,2017,42:268-283.
- [27] FRICKO O, HAVLIK P, ROGELJ J, et al. The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: a middle-of-the-road scenario for the 21st century[J]. *Global Environmental Change*,2017,42:251-267.
- [28] VAN VUUREN D P, STEHFEST E, GERNAAT D E H J, et al. Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm[J]. *Global Environmental Change*,2017,42:237-250.
- [29] HANSEN M C, DEFRIES R S, TOWNSHEND J R G, et al. Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach[J]. *International Journal of Remote Sensing*,2000,21(6/7):1331-1364.
- [30] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Climate*,2010,23(7):1696-1718.
- [31] 瞿德业,杨明月,刘婷婷,等. 基于 SPEI 的洮河流域气象干旱时空特征分析[J]. *水利水电科技进展*,2024,44(5):32-40. (QU Deyue, YANG Mingyue, LIU Tingting, et al. Analysis of spatiotemporal characteristics of meteorological drought in Taohe River Basin based on SPEI[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*,2024,44(5):32-40. (in Chinese))
- [32] SHUKLA S, WOOD A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought[J]. *Geophysical Research Letters*,2008,35(2):L02405.
- [33] ZHOU Zhaoqiang, SHI Haiyun, FU Qiang, et al. Investigating the propagation from meteorological to hydrological drought by introducing the nonlinear dependence with directed information transfer index[J]. *Water Resources Research*,2021,57(8):e2021WR030028.
- [34] 刘永佳,黄生志,李紫妍,等. 气象干旱到不同等级水文干旱的传播阈值及其动态变化:以渭河流域为例[J]. *灾害学*,2022,37(4):107-114. (LIU Yongjia, HUANG Shengzhi, LI Ziyang, et al. Propagation threshold and dynamic changes of meteorological drought to hydrological drought of different levels: a case study of Weihe River Basin[J]. *Journal of Catastrophology*,2022,37(4):107-114. (in Chinese))

[7] 叶婷,石朋,钟华,等. 基于 Budyko 假设和微分方程的淮河上中游径流变化归因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022,50(5):25-32. (YE Ting, SHI Peng, ZHONG Hua, et al. Attribution analysis of runoff change in the upper and middle Huaihe River based on Budyko hypothesis and differential equation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022,50(5):25-32. (in Chinese))

[8] 沈嘉聚,杨汉波,刘志武,等. 长江上游径流对气象要素变化的敏感性分析[J]. 水资源保护,2023,39(1):119-126. (SHEN Jiaju, YANG Hanbo, LIU Zhiwu, et al. Sensitivity analysis of annual runoff to annual variation of meteorological elements in upper reaches of the Yangtze River[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):119-126. (in Chinese))

[9] 吴承君,王仲梅,来志强. 乌江流域生态流量计算及其时空演变规律研究[J]. 人民长江,2023,54(5):94-100. (WU Chengjun, WANG Zhongmei, LAI Zhiqiang. Ecological flow calculation method and its application in Wujiang River Basin[J]. Yangtze River,2023,54(5):94-100. (in Chinese))

[10] 胡可可,何建村,赵健,等. 近 40 a 昆仑山北麓典型河流生态基流时空特征[J]. 长江科学院院报,2024,41(1):44-51. (HU Keke, HE Jiancun, ZHAO Jian, et al. Spatial and temporal characteristics of ecological base flow in typical rivers at the northern slope of Kunlun Mountains in the past four decades[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2024,41(1):44-51. (in Chinese))

[11] 《浙江通志》编撰委员会. 浙江通志·水利志[M]. 杭州:浙江人民出版社,2020.

[12] 浙江省水利厅. 浙江省河流手册[M]. 北京:中国水利水电出版社,2016.

[13] 黄志珍,楼峰青,丁伯良,等. 浙江省降水特征及其参数空间变化分析[J]. 水资源保护,2022,38(4):117-123. (HUANG Zhizhen ,LOU Fengqing, DING Boliang, et al. Spatial variation analysis of precipitation characteristics and statistical parameters in Zhejiang Province[J]. Water Resources Protection,2022,38(4):117-123. (in Chinese))

[14] 水利部水文局. 水文水资源分析计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,2018.

[15] 黄志珍,吕耀光,黄涵,等. 环境变化影响下水文系列资料连续性分析研究[J]. 浙江水利科技,2018,46(1):15-18. (HUANG Zhizhen, LYU Yaoguang, HUANG Han, et al. Continuity analysis of hydrological data under the influence of varying environment[J]. Zhejiang Hydrotechnics,2018,46(1):15-18. (in Chinese))

[16] 骆承政,陈树娥,周一敏,等. 中国历史大洪水调查资料汇编[M]. 北京:中国书店,2006.

[17] 浙江省水文总站. 中华人民共和国调查洪水资料 第一卷〈河段调查洪水成果〉浙江省洪水调查成果表[R]. 杭州:浙江省水文总站,1983.

[18] 浙江省水文局. 浙江省水资源[R]. 杭州:浙江省水文局,2007.

(收稿日期:2024 - 04 - 01 编辑:刘晓艳)

(上接第 17 页)

[35] 石朋,唐汉,瞿思敏,等. 西南地区气象干旱向水文干旱传播的特征[J]. 水资源保护,2023,39(1):49-56. (SHI Peng, TANG Han, QU Simin, et al. Characteristics of propagation from meteorological drought to hydrological drought in Southwest China [J]. Water Resources Protection,2023,39(1):49-56. (in Chinese))

[36] 薛联青,白青月,刘远洪. 人类活动影响下塔里木河流域气象干旱向水文干旱传播的规律[J]. 水资源保护,2023,39(1):57-62. (XUE Lianqing, BAI Qingyue, LIU Yuanhong. Propagation law from meteorological drought to hydrological drought in the Tarim River Basin under the impact of human activities[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):57-62. (in Chinese))

[37] 李帅,曾凌,张存杰,等. 长江上游近 120 年来气象干旱和水文干旱时空变化关系及其传递特征[J]. 气候变化研究进展, 2023,19(3):263-277. (LI Shuai, ZENG Ling, ZHANG Cunjie, et al. Spatio-temporal variations and propagation from meteorological to hydrological drought in the upper Yangtze River basin over last 120 years[J]. Climate Change Research,2023, 19(3):263-277. (in Chinese))

[38] GUO Yi, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, et al. Propagation thresholds of meteorological drought for triggering hydrological drought at various levels[J]. Science of the Total Environment, 2020,712:136502.

[39] 刘永佳,黄生志,方伟,等. 不同季节气象干旱向水文干旱的传播及其动态变化[J]. 水利学报,2021,52(1):93-102. (LIU Yongjia, HUANG Shengzhi, FANG Wei, et al. Propagation and dynamic change of meteorological drought to hydrological drought in different seasons[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2021,52(1):93-102. (in Chinese))

[40] 高放,刘冀,陈威,等. 淮河流域上游分区气象-水文干旱传播特征及响应概率研究[J]. 水土保持研究,2023,30(5):257-265. (GAO Fang, LIU Ji, CHEN Wei, et al. Study on propagation characteristics and response probabilities of meteorological and hydrological drought zones in the upper reaches of Huai River[J]. Research of Soil and Water Conservation,2023,30(5):257-265. (in Chinese))

(收稿日期:2024 - 03 - 06 编辑:刘晓艳)