

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.041.

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.

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

高放^{1,2}, 刘冀^{1,2}, 陈威³, 杨少康^{1,2}, 冯浩^{1,2}, 刘艳丽^{4,5}

(1.三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北 宜昌 443002; 2.三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 3.湖北省荆州市水文水资源勘测局, 湖北 荆州 434099; 4.南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 5.水利部 应对气候变化研究中心, 南京 210029)

摘 要: [目的]探究气象—水文干旱传播特征及响应概率, 为水文干旱预警提供科学参考。[方法]基于淮河上游 35 个气象站及王家坝、息县水文站 1980—2013 年气象、水文数据, 将王家坝以上流域分为息县(XX)和息县—王家坝区间(WJB)两个子流域, 分别计算各分区的标准化蒸散发指数(SPEI)和标准化径流指数(SRI), 利用相关系数法计算各分区的气象—水文干旱响应时间, 据此对气象、水文干旱事件进行匹配, 从而得出不同分区的气象—水文干旱传播特征, 进一步结合 Copula 联合分布函数与贝叶斯网络构建淮河上游分区气象—水文干旱响应概率模型, 计算不同重现期下的气象—水文干旱响应概率。[结果] (1) WJB 与 XX 气象—水文干旱响应时间分别为 7 个月与 5 个月, 两个分区平均干旱传播历时约为 1 个月, 平均干旱解除历时约为 2 个月; (2) WJB 与 XX 气象干旱历时、强度总体上小于相应的水文干旱特征值, 且 WJB 水文干旱对气象干旱敏感度低于 XX; (3) WJB 与 XX 气象—水文干旱响应概率与气象干旱历时、强度、烈度成正比, WJB 更易发生于干旱历时较长的水文干旱事件, 而 XX 更易发生于干旱强度、烈度较大的水文干旱事件; (4) 气象干旱传播为相同重现期水文干旱的气象—水文干旱响应概率呈现随重现期增大而减小的特征, 且 XX 气象—水文干旱响应概率大于 WJB。[结论] XX 与 WJB 两个分区的气象—水文干旱传播特征以及响应概率均存在差异, 应针对性地加强水文干旱预警研究。

关键词: 干旱传播特征; 响应概率; 贝叶斯网络; Copula; 淮河上游

中图分类号: P339

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0257-09

Study on Propagation Characteristics and Response Probabilities of Meteorological and Hydrological Drought Zones in the Upper Reaches of Huai River

GAO Fang^{1,2}, LIU Ji^{1,2}, CHEN Wei³, YANG Shaokang^{1,2}, FENG Hao^{1,2}, LIU Yanli^{4,5}

(1.Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Yichang, Hubei 443002, China; 2.College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3.Hydrological Water Resources Survey Bureau of Jingzhou, Jingzhou 434099, China; 4.State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China; 5.Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: [Objective] Exploring the propagation characteristics and response probability of meteorological hydrological drought is conducive to providing scientific reference for hydrological drought early warning. [Methods] Based on the meteorological and hydrological data of 35 meteorological stations and Wangjiaba and Xixian hydrologic stations in the upper reaches of the Huai River from 1980 to 2013, the basin above

收稿日期: 2022-09-30

修回日期: 2022-11-19

资助项目: 国家自然科学基金“变化环境下跨境流域水利益共享研究”(52079079)

第一作者: 高放(1994—), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: gaofangbg@163.com

通信作者: 刘冀(1980—), 男, 河北保定人, 博士, 副教授, 主要从事流域水文模拟与防洪调度研究。E-mail: liuji@ctgu.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

Wangjiaba was divided into two sub basins: Xixian (XX) and Xixian Wangjiaba interval (WJB). The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Standardized Runoff Index (SRI) of each region were calculated respectively, and the meteorological hydrological drought response time of each region was calculated by using the correlation coefficient method. The hydrological drought events were matched to obtain the meteorological hydrological drought propagation characteristics of different regions. Further, combined with Copula joint distribution function and Bayesian network, the meteorological hydrological drought response probability model of the upper reaches of the Huai River was constructed to calculate the meteorological hydrological drought response probability under different return periods. [Results] (1) The response time of meteorological hydrological drought in WJB and XX was 7 months and 5 months, respectively, the average drought propagation duration in the two regions was about 1 month, and the average drought relief duration was about 2 months. (2) The durations and intensities of meteorological drought in WJB and XX were generally less than the corresponding hydrological drought characteristic values, and the sensitivity of hydrological drought in WJB to meteorological drought was lower than XX. (3) The meteorological hydrological drought response probabilities of WJB and XX were in direct proportion to the duration, intensity and intensity of meteorological drought. WJB was more prone to hydrological drought events with longer drought duration, while XX was more prone to hydrological drought events with greater drought intensity and intensity. (4) When meteorological drought spreaded to hydrological drought with the same return period, the response probability of meteorological hydrological drought decreased with the increase of return period, and the response probability of XX meteorological hydrological drought was greater than WJB. [Conclusion] There were differences in the meteorological and hydrological drought propagation characteristics and response probability between XX and WJB. Therefore, the hydrological drought early warning research should be strengthened based on the differences.

Keywords: drought propagation characteristics; response probability; Bayesian network; Copula; the upper reaches of Huai River

干旱是区域内水分收支失衡造成的水分短缺现象,对人们的生活、生产有着较大的负面影响^[1-2]。在各类干旱中,水文干旱被认为是气象干旱的延续,因为大部分水文干旱是由气象干旱引起的,并且气象干旱是自然条件下水文干旱唯一的外在驱动因子^[3-5]。因此,深入研究气象—水文干旱传播特征及响应关系对于水文干旱的监测、预警以及减小水文干旱造成的农业、社会经济负面影响具有重要意义^[6]。

由于干旱难以直接进行检测,研究中普遍通过构建标准化降水蒸散发指数(SPEI)、标准化径流指数(SRI)等干旱指数来评价区域内的干旱状况^[7-9]。气象—水文干旱传播特征及响应关系研究是基于气象干旱事件及其对应的水文干旱事件来进行的^[10],因此研究中需要确定气象—水文干旱响应时间用以进行气象干旱事件与水文干旱事件的匹配,气象—水文干旱响应时间分析中常用的方法有多尺度干旱指数相关性分析、小波分析法等^[11-14]。目前在气象—水文干旱传播特征方面,较为普遍的是探究干旱传播过程中气象干旱与水文干旱在干旱历时、干旱强度、干旱烈度上的差异,并分析干旱传播率、干旱敏感度等指

标^[10]。而在气象—水文干旱响应关系方面,研究者们开始尝试以气象干旱特征为自变量,以水文干旱特征为因变量构建两种干旱间的响应关系模型^[15-16]。在此基础上,部分学者考虑到气象干旱向水文干旱传播实际上是概率问题,因此将 Copula 函数引入到气象—水文干旱响应关系研究中,得到了不同严重程度的水文干旱对气象干旱的响应阈值^[3,13]。我国部分区域少有气象—水文干旱传播相关研究,淮河流域是我国重要的粮食产区,其特殊的气候条件导致干旱频发,大量学者先后对流域内干旱演变特征进行了探索,发现气象—水文干旱的传播特征存在流域空间差异^[12,17-19],且少有研究关注气象—水文干旱传播特征及响应关系^[20-22],特别是气象—水文干旱的传播响应概率问题。

本文基于淮河上游 35 个气象站及王家坝、息县水文站 1980—2013 年气象、水文数据,将淮河上游王家坝以上流域分为息县(XX)和王家坝(WJB)两个子区域,分别探究其气象—水文干旱传播特征并构建气象—水文干旱响应概率模型,以期水文干旱预警、预报工作提供科学参考。

1 研究区域及数据来源

1.1 研究区概况

淮河流域位于我国南北气候过渡带,河流密集,是我国重要的粮食生产地,频发的干旱灾害对当地农业造成了重大损失^[23-25]。流域多年平均降水量约 1 040 mm,汛期的降水量占据年降水量的 60%~80%,平均气温 11~16℃,流域面积在 27 万 km² 左右^[20,25]。本文以淮河上游王家坝以上流域为研究区域,将其划分为息县(XX)和息县—王家坝区间(WJB)两个子流域。其中 XX 面积约为 1 万 km²,WJB 面积约为 2 万 km²。本文选用的气象站、水文站分布以及 WJB、XX 范围如图 1 所示。

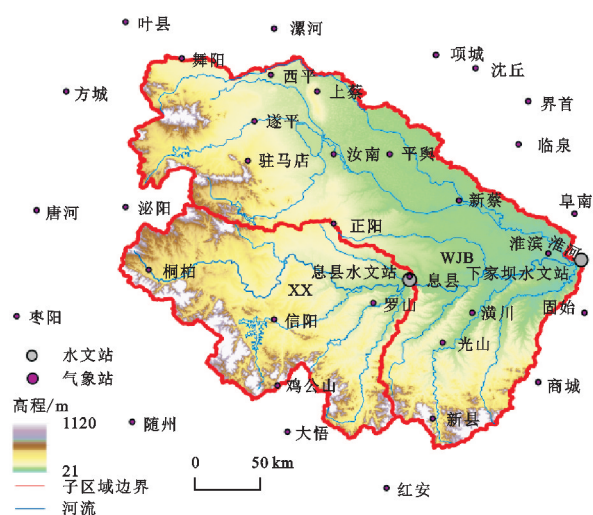


图 1 水文站与气象站分布、XX 及 WJB 范围

1.2 数据来源

本文采用的气象数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn>),包括 1980—2013 年淮河流域与周边地区 35 个气象站点的日值气温、日照时数、平均大气压、平均风速、降水量、平均相对湿度数据,数据经过严格的三性检查,极少数缺测数据采用多年均值进行插补,平均水汽压基于气温及平均相对湿度数据利用 Tetens 公式计算得到^[26]。1980—2013 年息县水文站、王家坝水文站日流量数据来源于淮河水利委员会。

2 研究方法

2.1 干旱指数

本文选择 3 个月时间尺度的 SPEI 指数(SPEI-3)用以识别气象干旱、选择 3 个月时间尺度的 SRI 指数(SRI-3)用以识别水文干旱,该尺度的干旱指数有利于干旱事件的识别^[27]。研究区域的 SPEI-3 由各站点 SPEI-3 通过反距离方法^[28]插值得到。计算 SPEI-3 指数需要的潜在蒸散发量通过 Penman-Monteith 公式^[9]得到,潜在蒸散发量计算公式如式

(1)所示,SPEI 计算如式(2),(3),(4)所示:

$$\text{ET}_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中: γ 为干湿计常数 ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); Δ 饱和水汽压曲线斜率 ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); U_2 为 2 m 高处的风速 (m/s); R_n 为净辐射 (MJ/m^2); e_s 为饱和水汽压 (kPa); e_a 为实际水汽压 (kPa); G 为土壤热通量 (MJ/m^2); T 为平均气温 ($^{\circ}\text{C}$)。逐月降水与蒸散的差值 D_i 计算如式(2)所示:

$$D_i = P_i - \text{PET}_i \quad (2)$$

式中: D_i 为某月的水分盈亏状况; P_i 为某月的降雨量; PET_i 为某月的潜在蒸散量。根据逐月降水与蒸散的差值 D_i 得到水分盈亏累积序列, 并利用 Log-logistic 分布进行标准正态化得到概率分布 $F(x)$, 累计概率密度 $p=1-F(x)$ 。概率加权矩计算如式(3)所示:

$$\omega = \sqrt{-2 \ln(p)} \quad (3)$$

当 $p \leq 0.5$ 时 SPEI 计算公式如(4)所示,当 $p \geq 0.5$ 时, SPEI 在式(4)的基础上取负值。

$$\text{SPEI} = \omega - \frac{c_0 + c_1 \omega + c_2 \omega^2}{1 + d_1 \omega + d_2 \omega^2 + d_3 \omega^3} \quad (4)$$

式中: $c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.013028, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$ 。SPEI 气象干旱等级见表 1。

表 1 SPEI 气象干旱等级

干旱等级	SPEI 取值范围
轻旱	$-1 < \text{SPEI} \leq -0.5$
中旱	$-1.5 < \text{SPEI} \leq -1$
重旱	$-2 < \text{SPEI} \leq -1.5$
极旱	$\text{SPEI} \leq -2$

标准化径流指数(SRI)通过 Gamma 分布拟合径流量的累积概率 $F(x)$, 经正态标准化得到 SRI 指数, 计算公式如下:

$$\text{SRI} = S(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}) \quad (5)$$

$$t = \sqrt{-2 \ln(F(x))} \quad (6)$$

式中: $F(x) > 0.5$ 时 $S = 1$, $F(x) \leq 0.5$ 时, $S = -1$ 。
 $c_0 = 2.515517$, $c_1 = 0.802853$, $c_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$ 。SRI 水文干旱等级见表 2。

表 2 SRI 水文干旱等级

干旱等级	SRI 取值范围
轻旱	$-1 < \text{SRI} \leq -0.5$
中旱	$-1.5 < \text{SRI} \leq -1$
重旱	$-2 < \text{SRI} \leq -1.5$
极旱	$\text{SRI} \leq -2$

2.2 干旱事件识别

气象干旱事件及水文干旱的识别通过游程理论^[29]进行,识别方法见图2。根据干旱种类选定相应的干旱指数作为阈值 R_0, R_1, R_2 ,当干旱指数在一段时间内小于 R_1 时,初步识别该时段内发生干旱事件,在这些干旱事件中剔除仅持续一个月且该月干旱指数大于 R_2 的干旱事件,若两次干旱事件间隔为一个月且该月干旱指数小于 R_0 则将这两次干旱事件合并为一次干旱事件。通过游程理论识别出的干旱事件所经历的时间长度即干旱历时,干旱事件中各月干旱指数小于阈值 R_1 部分之和的绝对值即为干旱强度,阈值 R_1 减去干旱事件各月中最小的干旱指数即为干旱烈度。本文选定干旱指数小于0,干旱指数达到轻旱、干旱指数达到中旱时的数值为阈值,因此 R_0, R_1, R_2 分别对应0, -0.5, -1。

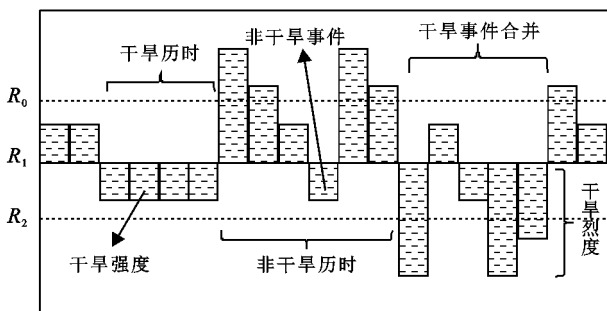


图2 游程理论及干旱特征

2.3 干旱传播率与干旱敏感度

由于气象干旱向水文干旱传播过程复杂,同时流域具有一定的调蓄作用,气象干旱并非一定会导致水文干旱,1次气象干旱导致多次水文干旱或多次气象干旱共同导致1次水文干旱的情况也时有发生。因此本文根据Guo等^[30]提出的干旱传播率及干旱敏感度来表征干旱传播特征。干旱传播率及干旱敏感度计算如式(7),(8)所示:

$$T_{r1} = \frac{N_{h-m}}{N_m} \quad (7)$$

$$T_{r2} = \frac{N_{m-h}}{N_h} \quad (8)$$

式中: T_{r1}, T_{r2} 分别为干旱传播率和干旱敏感度; T_{r1} 越大表明气象干旱向水文干旱传播的概率越大; T_{r2} 越大表明水文干旱对气象干旱越敏感; N_m 为气象干旱总次数; N_h 为水文干旱总次数; N_{h-m} 为引起水文干旱的气象干旱次数; N_{m-h} 为由气象干旱引起的水文干旱次数。

2.4 Copula函数与贝叶斯网络

Copula函数的条件概率能够有效反映自变量与因变量间的非线性概率关系,该目标可通过Copula函数与贝叶斯网络结合来实现^[13,31]。本文选择常用

的18种边缘分布函数及3种Copula联合分布函数对WJB及XX干旱历时、干旱强度、干旱烈度进行拟合,并分别通过K-S检验以及贝叶斯系数(BIC)、纳什系数(NSE)、均方根误差(RMSE)对函数进行优选。二维Copula函数形式如式(9)所示:

$$C(u, v) = C[f_X(x), f_Y(y)] \quad (9)$$

式中: x, y 为两个具有一定相关性的变量; f_X 与 f_Y 为 x, y 的边缘分布函数; $C(u, v)$ 为Copula联合分布函数。

Copula联合分布函数所得结果为:一个变量小于 x 且另一变量小于 y 的概率。在与贝叶斯网络结合后,所得结果为已知自变量大于 x 的条件下,因量大于 y 的概率,该结果有利于在气象干旱发生时预估不同水文干旱情形的响应概率。Copula联合分布函数结合贝叶斯网络模型所得表达式如式(10)所示:

$$P(Y > y | X > x) = 1 - \frac{f_Y(y) - C[f_X(x), f_Y(y)]}{1 - f_X(x)} \quad (10)$$

3 结果与分析

3.1 干旱事件识别与匹配

进行干旱事件匹配需定量分析水气象—水文干旱响应时间。当一个月时间尺度的SRI-1与1至12个月时间尺度SPEI- n 的Pearson相关系数最大时,水文干旱对气象干旱响应时间为 $n-1$ 个月,即由气象干旱导致的水文干旱发生时间最晚为气象干旱发生后 $n-1$ 个月左右^[6]。本文通过游程理论识别出WJB发生气象干旱25次、水文干旱23次,XX发生气象干旱26次、水文干旱23次。WJB的SPEI-8与SRI-1相关系数最大且通过水平为0.01的显著性检验,因此WJB水文干旱对气象干旱的平均响应时间为7个月,经过匹配识别出气象干旱向水文干旱传播16次;XX的SPEI-6与SRI-1相关系数最大且通过水平为0.01的显著性检验,因此水文干旱对气象干旱的平均响应时间为5个月,经过匹配识别出气象干旱向水文干旱传播17次。

3.2 气象—水文干旱传播特征

统计WJB,XX每一次干旱传播过程中气象—水文干旱历时、干旱强度、干旱烈度,并计算它们在气象—水文干旱传播过程中的变化量,结果见图3。大部分气象干旱事件的干旱历时、干旱强度小于相应水文干旱事件的干旱历时、干旱强度,二者的干旱烈度未表现出明显规律。同时,WJB和XX气象干旱向水文干旱传播过程中,干旱强度的变化量总体上随干旱强度的增加而增大,气象—水文干旱历时与干旱烈度增加值无明显变化规律。

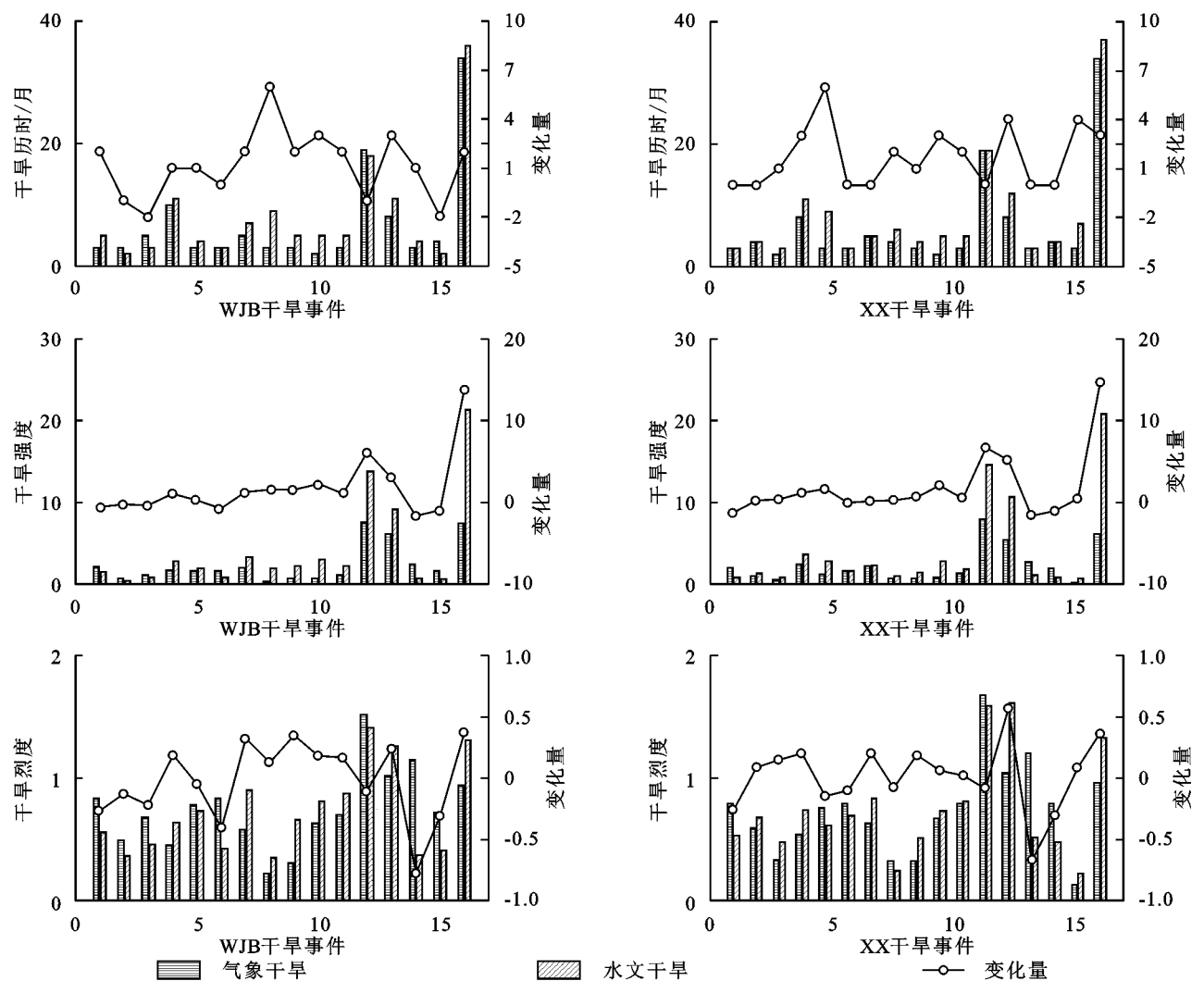


图 3 气象—水文干旱传播过程中的干旱历时、干旱强度、干旱烈度及相应变化量

WJB,XX 气象—水文干旱传播特征见表 3。“场均干旱”表示研究时段内,干旱传播特征在该区域发生的所有干旱传播过程中的均值,其中场均干旱传播历时为平均每次干旱传播中水文干旱滞后于气象干旱发生的时间,场均干旱解除历时为平均每次干旱传播中水文干旱迟于气象干旱结束的时间,场均干旱解除历时与场均干旱传播历时的差值即干旱历时变化量。由表 3 可知,WJB,XX 气象—水文干旱传播过程中干旱历时与干旱强度的场均变化量较大,而场均干旱烈度变化量远小于两者。因此由气象干旱导致的水文干旱,其干旱历时与干旱强度总体上大于气象干旱,干旱烈度与气象干旱总体上相近。研究区域内场均干旱传播历时远小于场均干旱解除历时,两者较大的差值使得场均干旱历时变化量较大。WJB 和 XX 气象干旱总上传播到水文干旱需要一个月左右,而气象干旱结束后水文干旱仍会持续两个月左右乃至更长时间。

WJB 干旱历时变化量较 XX 大约少半个月,干

旱强度、干旱烈度变化量与 XX 相近。总体上 WJB 气象干旱传播到水文干旱历时略长于 XX,但气象干旱结束后水文干旱解除需要的时间略短于 XX。同时,WJB 干旱传播率为 0.8,干旱敏感度为 0.74;XX 干旱传播率为 0.84,干旱敏感度为 0.87。两个区域干旱敏感度的差距明显大于干旱传播率,由于 WJB 受人类活动影响较 XX 更大^[6]、人类活动导致水文干旱发生更加频繁^[32],从而使得 WJB 气象干旱导致的水文干旱占比减小、干旱传播过程中干旱敏感度降低。

表 3 气象—水文干旱传播特征

干旱传播特征	区域	
	WJB	XX
场均干旱历时变化量	1.19	1.76
场均干旱强度变化量	1.73	1.78
场均干旱烈度变化量	-0.02	0.01
场均干旱传播历时	0.75	0.53
场均干旱解除历时	1.94	2.29
干旱传播率 Tr1	0.80	0.84
干旱敏感度 Tr2	0.74	0.87

3.3 气象—水文干旱响应概率

以 18 种常用边缘分布函数对研究区域气象干旱与水文干旱的干旱历时、干旱强度、干旱烈度进行拟合,并根据 K-S 检验结果选择最优拟合函数,结果见表 4。经 K-S 检验优选,用于拟合干旱特征的边缘分布函数包括“Lognormal”分布、“t Location-Scale”分布、“Stable”分布、“Log-Logistic”分布和“Gamma”分布。所有分布函数的 K-S 统计量均小于阈值,在 K-S 检验的允许范围内。

Copula 函数的构建要求变量间具有一定的相关

性,因此对干旱特征进行相关性检验,随后利用 BIC, NSE, RMSE 指标对“Clayton”“Gumbel”“AMH”这 3 种常用的 Copula 函数进行优选^[33],结果见表 5。两个区域气象干旱与水文干旱的干旱历时、干旱强度的 Pearson 相关系数达 0.89 以上,均通过 0.01 显著性检验,干旱烈度相关系数小于干旱历时与干旱强度,但通过了 0.05 水平的显著性检验,因此可以构建 Copula 联合分布函数。经过优选,两个区域气象干旱与水文干旱的干旱历时、干旱强度、干旱烈度最优拟合函数均为“Gumbel”函数。

表 4 干旱特征单变量边缘分布最优拟合函数及 K-S 检验

干旱类型	函数特征	WJB			XX		
		干旱历时	干旱强度	干旱烈度	干旱历时	干旱强度	干旱烈度
气象干旱	分布名称	Lognormal	t Location-Scale	Stable	Log-Logistic	Stable	Gamma
	统计量	0.29	0.21	0.09	0.21	0.08	0.13
	阈值	0.33	0.33	0.33	0.32	0.32	0.32
水文干旱	分布名称	Stable	Log-Logistic	Log-Logistic	Log-Logistic	Stable	Stable
	统计量	0.13	0.20	0.14	0.17	0.11	0.15
	阈值	0.33	0.33	0.33	0.32	0.32	0.32

表 5 干旱特征相关系数及 Copula 函数优选

区域	干旱特征	相关系数 r	显著性 p	BIC	NSE	RMSE
WJB	干旱历时	0.97	0.00	-53.81	0.72	0.17
	干旱强度	0.91	0.00	-93.54	0.98	0.05
	干旱烈度	0.55	0.03	-89.84	0.96	0.06
XX	干旱历时	0.98	0.00	-70.08	0.83	0.12
	干旱强度	0.89	0.00	-95.71	0.97	0.06
	干旱烈度	0.74	0.00	-85.72	0.93	0.07

结合 Copula 函数和贝叶斯网络构建 XX 与 WJB 气象—水文干旱响应概率模型,结果如图 4、图 5 所示。图中任意一点的气象—水文干旱响应概率表明:当干旱传播过程中发生干旱特征指标(干旱历时、干旱强度、干旱烈度)超过气象干旱相应值时,水文干旱的相应干旱特征指标超过该点的概率。由图 4、图 5 可知,气象—水文干旱响应概率随着气象干旱的干旱特征指标变大而增大。同时干旱特征指标越大的水文干旱对气象干旱的响应概率越小。由水文干旱对气象干旱响应概率等值线可知,随着气象干旱历时变长,WJB 干旱历时的气象—水文干旱响应概率等值线斜率增长速度较 XX 更快;随着气象干旱强度、烈度逐渐变大,XX 干旱强度、干旱烈度的气象—水文干旱响应概率等值线斜率增长速度较 WJB 更快。因此,随着气象干旱的干旱特征指标增大,WJB 气象—水文干旱响应概率等值线所对应水文干旱的干旱历时相较于 XX 明显更大,说明 WJB 有更大概率发生

干旱历时较长的极端水文干旱事件;XX 气象—水文干旱响应概率等值线所对应水文干旱的干旱强度与干旱烈度相较于 WJB 明显更大,说明 XX 有更大概率发生干旱历时较长的极端水文干旱事件。

干旱历时、干旱强度、干旱烈度重现期为 5 a, 10 a, 20 a, 50 a, 100 a 时,气象—水文干旱响应概率见表 6。由表 6 可知,随着气象干旱的干旱特征指标重现期变大,气象—水文干旱响应概率随之增大,但气象干旱与水文干旱的干旱特征指标重现期相差越大,气象—水文干旱响应概率增大速率越小,因此气象干旱更容易向干旱特征指标重现期与之相近的水文干旱传播。气象干旱向干旱特征指标重现期与之相同的水文干旱传播时,气象—水文干旱响应概率随干旱特征指标重现期增大而减小。此外,WJB 与 XX 的气象干旱特征指标重现期、水文干旱特征指标重现期均相同时,XX 气象—水文干旱响应概率大于 WJB 响应概率。

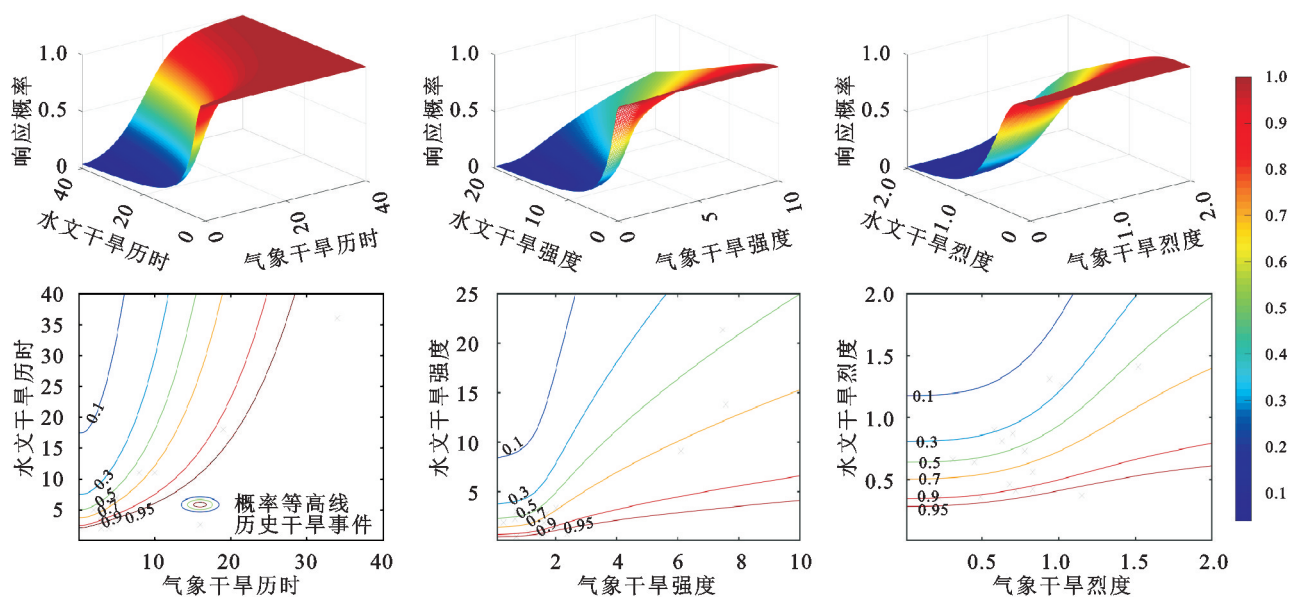


图 4 WJB 气象—水文干旱响应概率

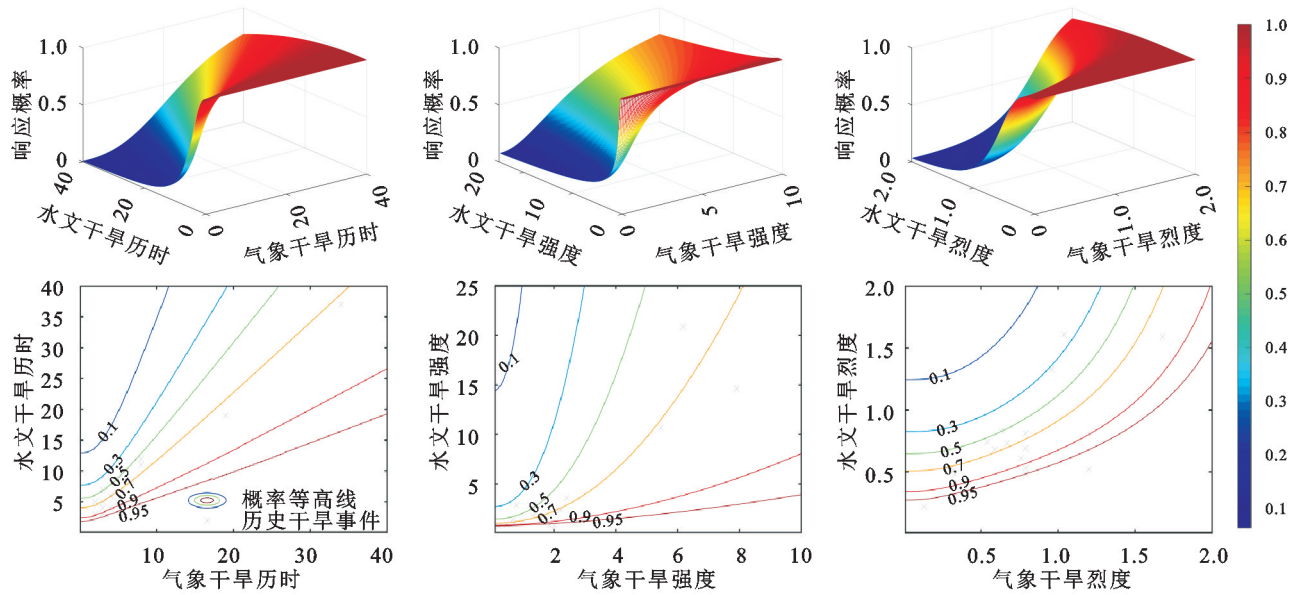


图 5 XX 气象—水文干旱响应概率

表 6 不同重现期下气象—水文干旱响应概率

干旱特征	气象干旱重现期	WJB 水文干旱重现期					XX 水文干旱重现期				
		5 a	10 a	20 a	50 a	100 a	5 a	10 a	20 a	50 a	100 a
干旱历时	5 a	0.69	0.42	0.23	0.10	0.05	0.79	0.47	0.25	0.10	0.05
	10 a	0.83	0.61	0.38	0.18	0.09	0.94	0.74	0.45	0.20	0.10
	20 a	0.91	0.77	0.57	0.31	0.17	0.98	0.91	0.71	0.37	0.19
	50 a	0.96	0.89	0.78	0.55	0.36	1.00	0.98	0.92	0.70	0.44
	100 a	0.98	0.94	0.87	0.72	0.54	1.00	0.99	0.97	0.88	0.69
干旱强度	5 a	0.69	0.41	0.23	0.10	0.05	0.74	0.45	0.24	0.10	0.05
	10 a	0.83	0.60	0.38	0.18	0.09	0.89	0.68	0.42	0.19	0.10
	20 a	0.91	0.76	0.57	0.31	0.17	0.96	0.85	0.65	0.34	0.19
	50 a	0.96	0.89	0.77	0.54	0.35	0.99	0.95	0.86	0.63	0.40
	100 a	0.98	0.93	0.87	0.71	0.54	0.99	0.98	0.94	0.81	0.62
干旱烈度	5 a	0.60	0.35	0.20	0.09	0.04	0.73	0.44	0.24	0.10	0.05
	10 a	0.71	0.48	0.30	0.15	0.08	0.88	0.66	0.41	0.19	0.10
	20 a	0.79	0.60	0.43	0.23	0.14	0.95	0.83	0.63	0.34	0.18
	50 a	0.86	0.73	0.59	0.39	0.26	0.98	0.93	0.84	0.61	0.39
	100 a	0.90	0.80	0.69	0.52	0.38	0.99	0.97	0.92	0.79	0.60

4 结论

(1) WJB 水文干旱对气象干旱响应时间为 7 个月, XX 为 5 个月。两个分区水文干旱发生时间较气象干旱平均晚 1 个月左右, 水文干旱结束时间较气象干旱平均晚 2 个月左右。

(2) 相较于水文干旱, WJB 气象干旱场均干旱历时长 1.19 个月、场均干旱强度大 1.73, XX 气象干旱场均干旱历时长 1.76 个月、场均干旱强度大 1.78。WJB 气象干旱向水文干旱传播率为 0.8, XX 为 0.84, WJB 水文干旱对气象干旱敏感度为 0.74, XX 为 0.87。

(3) 气象—水文干旱传播过程中, WJB 和 XX 气象—水文干旱响应概率随着气象干旱的干旱历时、干旱强度、干旱烈度变大而增大。WJB 有更大概率发生干旱历时较长的水文干旱事件, XX 有更大概率发生干旱强度与干旱烈度较大的水文干旱事件。

(4) 气象干旱向重现期与之相同的水文干旱传播时, 气象—水文干旱响应概率随重现期变大而减小。WJB 与 XX 气象—水文干旱重现期相同时, XX 气象—水文干旱响应概率大于 WJB 气象—水文干旱响应概率。

参考文献:

- [1] Corey L, Pedram R, Navin R. Influence of extreme weather disasters on global crop production[J]. *Nature*, 2016, 529(7584):84-87.
- [2] Zhang Q, Li Q, Singh V P, et al. Nonparametric integrated agrometeorological drought monitoring: Model development and application[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(1):73-88.
- [3] 张璇, 许杨, 郝芳华, 等. 滦河流域气象干旱向水文干旱传播特征及风险分析[J]. *水利学报*, 2022, 53(2):165-175.
- [4] 裴源生, 蒋桂芹, 翟家齐. 干旱演变驱动机制理论框架及其关键问题[J]. *水科学进展*, 2013, 24(3):449-456.
- [5] 杨铭珂, 贺中华, 任荣仪. 黔中地区气象水文干旱演变特征及其响应关系[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(1):264-274, 280.
- [6] Yu M X, Liu X L, Li Q F. Responses of meteorological drought-hydrological drought propagation to watershed scales in the upper Huai River basin, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020, 27(15):17561-17570.
- [7] Carmelo C, Jonathan S, Paulo B, et al. The effects of non-stationarity on SPI for operational drought monitoring in Europe[J]. *International Journal of Climatology*, 2021, 42(6):3418-3430.
- [8] Yue S P, Sheng X D, Yang F T. Spatiotemporal evolution and meteorological triggering conditions of hydrological drought in the Hun River basin, NE China[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2022, 22(3):995-1014.
- [9] 李翔翔, 居辉, 刘勤, 等. 基于 SPEI-PM 指数的黄淮海平原干旱特征分析[J]. *生态学报*, 2017, 37(6):2054-2066.
- [10] 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.
- [11] Li J Y, Wu C H, Xia C A, et al. Assessing the responses of hydrological drought to meteorological drought in the Huai River Basin, China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2021, 144(3):1043-1057.
- [12] Wang J, Wang W, Cheng H, et al. Propagation from meteorological to hydrological drought and its influencing factors in the huai river basin[J]. *Water*, 2021, 13(14):1985.
- [13] 刘永强, 黄生志, 郭怿, 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.
- [14] 杨铭珂, 贺中华, 张浪, 等. 不同时间尺度下气象干旱向水文干旱传播过程[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6):350-360.
- [15] 张浪. 喀斯特地区气象干旱—水文干旱传播过程及其驱动机制[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2022.
- [16] 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.
- [17] Li C, Zhang X, Yin G D, et al. Evaluation of drought propagation characteristics and influencing factors in an arid region of northeast Asia (ARNA) [J]. *Remote Sensing Letters*, 2022, 14:3307.
- [18] Han Z M, Huang S Z, Huang Q, et al. Propagation dynamics from meteorological to groundwater drought and their possible influence factors [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 578(C):124102.
- [19] Huang S Z, Li P, Huang Q, et al. The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 547:184-195.
- [20] 姚蕊, 夏敏, 孙鹏, 等. 淮河流域干旱时空演变特征及成因[J]. *生态学报*, 2021, 41(1):333-347.
- [21] 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]. 江苏扬州: 扬州大学, 2021.
- [22] Xiao M Z, Yu Z B, Zhu Y L. Copula-based frequency analysis of drought with identified characteristics in space and time: A case study in Huai River basin,

- China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 137(3/4):2865-2875.
- [23] 李宗盟,霍兵兵,朱文敏,等.淮河中上游段干支流河道走向特征分析[J].信阳师范学院学报:自然科学版, 2022,35(2):248-251.
- [24] Wang H, Liu Z Z, Zhu J, et al. Spatio-temporal extraction of surface waterbody and its response of extreme climate along the Upper Huai River [J]. Sustainability, 2022, 14(6):3223.
- [25] 张特,刘冀,魏榕,等.淮河上游植被对气象干旱的响应[J].水土保持研究, 2020,27(2):213-219.
- [26] 袁开蓉,王玉英,刘衍,等.不同饱和水汽压计算式对室外湿球温度计算的影响[J].工业建筑, 2020, 50(7): 101-106.
- [27] 杨少康,刘冀,魏榕等.长江上游流域生长季气象干旱分异特征[J].水土保持研究, 2022,29(02):184-191.
- [28] 郭晓芳,李旭东,程东亚.云贵高原气温与降水空间分布特征及其影响因素[J].水土保持研究, 2021,28(1): 159-163,170.
- [29] Wang W Y, Li J L, Qu H J, et al. Spatial and temporal drought characteristics in the huanghuaihai plain and its influence on cropland water use efficiency[J]. Remote Sensing Letters, 2022,14(10):2381.
- [30] Guo Y, Huang S Z, Huang Q, et al. Propagation thresholds of meteorological drought for triggering hydrological drought at various levels [J]. Science of the Total Environment, 2020,712:136502.
- [31] Hao Z C, Hao F H, Singh V P, et al. Probabilistic prediction of hydrologic drought using a conditional probability approach based on the meta-Gaussian model [J]. Journal of Hydrology, 2016,542:772-780.
- [32] 李京芳,彭涛,董晓华,等.基于 Copula 函数的汉江流域水文干旱风险研究[J].水土保持研究, 2022, 29(3): 179-188.
- [33] Pathak A A, Dodamani B. M. Connection between meteorological and groundwater drought with copula-based bivariate frequency analysis[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2021,26(7):05021015.

(上接第 256 页)

- [11] 田宏伟,胡程达,黄进,等.近 30 年河南省冬小麦气象年景的时空演变及其与大气环流的联系[J].水土保持研究, 2020,27(6):346-352.
- [12] 田宏伟,闵俊杰,黄进,等.基于集合经验模态分解的河南省夏玉米产量波动对大气环流的响应[J].水土保持通报, 2020,40(4):176-182.
- [13] 韩红,冯光辉,邓国取.基于 ND-GAIN 模型的河南省农业抗灾能力评价[J].水利水电科技进展, 2022,42(1):67-74.
- [14] 薛昌颖,张永涛,刘伟昌.1971—2016 年河南省夏玉米生长季极端干旱时空特征[J].干旱地区农业研究, 2020,38(2):258-266.
- [15] 竹磊磊,常军,张善强.河南夏季干旱气候特征分析[J].气象与环境科学, 2012,35(1):49-55.
- [16] 陈家栋,田宏伟,黄进,等.1970—2019 年河南省年内降水分非均匀性的时空演变[J].水土保持通报, 2021, 41(3):342-349.
- [17] 王新伟,平凡,姬兴杰,等.近 40 年河南省夏季降水变化特征分析[J].暴雨灾害, 2018,37(3):219-229.
- [18] 崔童,张若楠,郝立生,等.华北雨季降水年代际变化与水汽输送的联系[J].大气科学, 2022,46(4):903-920.
- [19] 赵树云,陈丽娟,崔童. ENSO 位相转换对华北雨季降水的影响[J].大气科学, 2017,41(4):857-868.
- [20] 范磊,吕爱锋,张文翔.青海省干旱时空特征及与大气环流响应关系[J].干旱区资源与环境, 2021,35(12): 60-65.