

不同气候区气象干旱向农业干旱动态传播规律及影响因素分析

徐征光^{1,2}, 丁海伦¹, 吴志勇³, 郭 笑³, 李志灏¹

(1. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046; 2. 河南省水圈与流域水安全重点实验室, 河南 郑州 450046; 3. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为探究不同气候区气象干旱向农业干旱的动态传播规律及影响因素,以湘江流域、淮河王家坝以上流域和渭河华县以上流域为研究区,分别采用标准化降水指数和标准化土壤含水量指数表征气象干旱和农业干旱,采用 10 a 的滑动窗口和相关分析法获得了干旱传播时间序列,利用 Mann-Kendall 趋势检验分析了干旱传播时间的变化趋势,借助极端梯度提升算法识别了影响传播时间时空变化的主要驱动因素。结果表明:湘江流域的平均传播时间最短(6.4 旬),渭河华县以上流域的平均传播时间最长(33.1 旬),淮河王家坝以上流域传播时间显著变化的网格占比最高;土壤含水量与气温的耦合关系、年平均气温和土壤含水量记忆性分别是影响 3 个流域网格尺度上传播时间动态变化的最主要因素,平均相对重要性分别为 0.20、0.21 和 0.21;湘江流域干旱传播时间的空间分布特征最易受环境变化影响,土壤含水量记忆性是影响 3 个流域传播时间空间变化的最主要因素。

关键词:气象干旱;农业干旱;动态传播时间;Mann-Kendall 趋势检验;极端梯度提升算法

中图分类号:P429 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2025)03 - 0144 - 09

Analysis of dynamic propagation patterns and influencing factors from meteorological drought to agricultural drought in different climatic regions//XU Zhengguang^{1,2}, DING Hailun¹, WU Zhiyong³, GUO Xiao³, LI Zhihao¹
(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Henan Provincial Key Laboratory of Hydrosphere and Watershed Water Security, Zhengzhou 450046, China; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To explore the dynamic patterns and influencing factors of the propagation from meteorological drought to agricultural drought in different climatic regions, the Xiangjiang River Basin, the upper Huaihe River Basin above Wangjiaba Station, and the upper Weihe River Basin above Huaxian Station were selected as research areas, and the standardized precipitation index (SPI) and standardized soil moisture index (SSMI) were selected to characterize meteorological drought and agricultural drought, respectively. A 10 a sliding window and correlation analysis method were employed to obtain drought propagation time series. The Mann-Kendall trend test was used to analyze the variation trends in propagation time, and the extreme gradient boosting algorithm was utilized to identify the dominate influencing factors affecting the spatiotemporal variations in drought propagation time. The results indicate that the Xiangjiang River Basin has the shortest propagation time (6.4 ten-day period), whereas the average propagation time in the upper Weihe River Basin above Huaxian Station is the longest (33.1 ten-day period). The upper Huaihe River Basin above Wangjiaba Station has the highest proportion of grids with significant variations in drought propagation time. The coupling relationship between soil moisture and temperature, mean annual temperature, and soil moisture memory are identified as the top three influencing factors affecting dynamic changes in propagation time at the grid scale in the Xiangjiang River Basin, the upper Huaihe River Basin above Wangjiaba Station, and the upper Weihe River Basin above Huaxian Station, with average relative importance of 0.20, 0.21, and 0.21, respectively. The spatial distribution characteristics of drought propagation time in the Xiangjiang River Basin are more susceptible to changes in the environment. The soil moisture memory is the most important factor affecting the spatial variation in propagation time of the three basins.

Key words: meteorological drought; agricultural drought; dynamic propagation time; Mann-Kendall trend test; extreme gradient boosting algorithm

基金项目:国家自然科学基金项目(42401025);国家自然科学基金长江水科学研究联合基金重点项目(U2240225)

作者简介:徐征光(1991—),男,讲师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:xuzhengguang20@163.com

通信作者:吴志勇(1979—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:zywu@hhu.edu.cn

干旱是世界上影响范围最广且造成损失最严重的自然灾害之一,频繁发生的干旱灾害对粮食、供水和生态安全造成了严重的影响^[1-3]。根据受干旱影响的水文循环组分,可以将干旱分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱^[4-6]。不同类型的干旱存在密切的联系,气象干旱可以看作农业干旱和水文干旱的前兆,持续的气象干旱会造成土壤含水量降低、径流减少,进而引起农业干旱和水文干旱^[7-8]。干旱信号从气象干旱传递到其他类型干旱的现象被称为干旱传播^[9-10]。干旱传播从本质上可理解为流域水文过程对气象干旱的响应,深入研究干旱传播过程对于揭示干旱的发生发展机理以及提高干旱预警能力具有重要意义^[11]。

近年来,干旱传播逐渐成为国内外干旱研究领域的热点之一^[12],众多学者开展了干旱传播研究并取得了一系列的研究成果。例如:石朋等^[4]发现西南地区气象干旱到水文干旱的传播时间为2~7月;郑丽虹等^[11]从典型干旱事件的角度探讨了黄河流域气象干旱与水文干旱的传递关系,提出了气象干旱与水文干旱传递关系分类体系;薛联青等^[13]探讨了人类活动对气象干旱向水文干旱传播规律的影响,发现干流干旱传播时间缩短主要是受人类活动的影响;冯凯等^[14]建立了农业干旱特征变量对气象干旱特征变量的响应概率曲线,实现了对农业干旱特征及其发生概率的预测;相恺政等^[15]采用相关性分析方法分析了海河流域气象干旱向农业干旱的传播特征,发现气象干旱向农业干旱的传播时间存在显著的季节差异,夏秋季的干旱传播时间比春冬季的传播时间长;Dai等^[16]分析了渭河流域气象干旱向农业干旱的传播规律,结果表明春季干旱传播时间最长,秋季干旱传播时间最短;Bhardwaj等^[17]发现印度大多数流域从气象干旱到水文干旱的传播时间为1~3月,气候和流域特性是影响干旱传播时间的主要因素。以上研究对提高干旱传播规律的认识具有重要意义,但这些研究主要关注整个研究期内干旱传播时间的平均状况,对干旱传播时间的动态变化规律及其驱动因素考虑不足,难以全面反映变化环境对干旱传播的复杂影响。目前已有研究开始关注干旱传播时间的动态变化,如刘永佳等^[18]分析了黄土高原典型流域不同季节干旱传播时间的动态变化规律,但尚未揭示变化环境下不同气候区干旱传播时间的动态变化特征及其驱动因素的差异。

本文为探究不同气候区气象干旱向农业干旱传播时间的动态变化规律及影响因素,选取位于湿润区的湘江流域、湿润-半湿润过渡区的淮河王家坝以上流域、半湿润-半干旱过渡区的渭河华县以上流域

作为研究区,分别利用标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)和标准化土壤含水量指数(standardized soil moisture index, SSMI)表征气象干旱和农业干旱,以10 a为滑动窗口并采用相关系数法计算干旱传播时间序列,采用Mann-Kendall(M-K)趋势检验分析干旱传播时间的变化趋势,借助极端梯度提升(extreme gradient boosting, XGBoost)算法量化不同因素对干旱传播时间动态变化的影响,以期为深入理解变化环境下农业干旱形成过程与机理,提高农业干旱预报精度提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

湘江流域、淮河王家坝以上流域、渭河华县以上流域概况如图1所示。湘江属于长江流域洞庭湖水系,是我国南方重要的水系之一。湘潭水文站为湘江流域的水文控制站,流域集水面积为81 638 km²。湘江流域地形多样,以山地和丘陵为主,气候类型为亚热带季风性湿润气候,年平均气温约为17℃,年降水量为1 400~1 700 mm,其中降水大部分发生在4—9月^[19]。湘江流域包含湖南省“衡邵娄干旱走廊”的大部分区域,旱涝灾害发生频繁^[20]。淮河流域地跨湖北、河南、安徽、江苏、山东5省,介于长江与黄河之间,地处我国南北气候过渡带,南部为亚热带湿润季风气候区,北部为暖温带半湿润季风气候区^[21]。王家坝水文站位于淮河流域上游,流域集水面积为30 630 km²。淮河王家坝以上

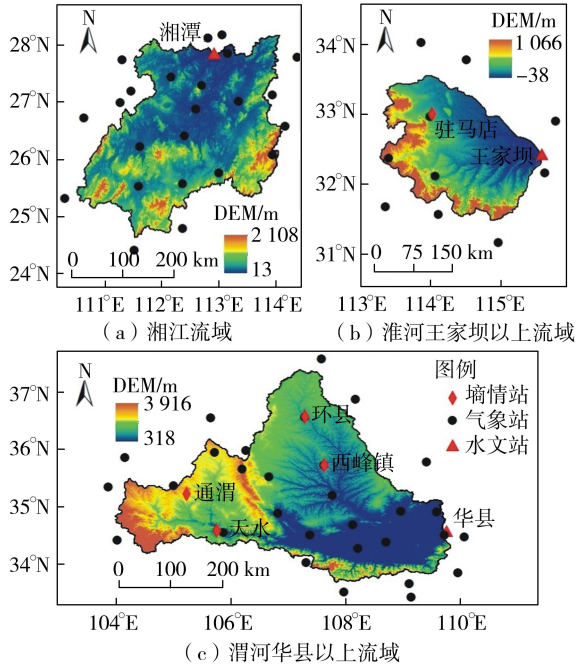


图1 研究区概况及站点分布

Fig. 1 Overview of study area and distribution of stations

流域年平均气温约为 15℃, 年降水量为 800~1400 mm, 超过 60% 的降水发生在 6—9 月, 降水时空分布不均^[22], 特殊的地理位置、气候条件和水热条件导致了该流域的干旱发生频繁。渭河是黄河流域最大的支流, 位于我国半干旱-半湿润过渡的西北内陆东部, 流域主要呈大陆性气候特征, 属于典型的干旱半干旱气候^[23]。渭河流域年降水量为 400~800 mm, 年平均气温为 7.8~13.5℃。汛期(6—9 月)降雨充沛, 约占年降水量的 65%^[24]。华县水文站位于渭河流域下游, 控制区集水面积为 10.6 万 km², 该地区降水时空分布不均, 干旱灾害频发。

1.2 数据来源

本文的研究时段为 1981—2020 年。使用的降水量、气温等气象数据均来自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>), 气象数据的时间范围为 1979 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日, 采用反距离权重插值法将逐日气象数据插值到 0.05°×0.05°网格。

计算农业干旱指数所需的土壤含水量来自 VIC (variable infiltration capacity) 模型模拟的 0.05°空间分辨率的数据, VIC 模型的驱动数据为上述降水量和气温数据。VIC 模型的水文参数分别利用湘潭水文站、王家坝水文站和华县水文站的实测流量数据率定获得, 率定期分别为 2001—2010 年、1996—2005 年、2001—2010 年, 验证期分别为 2011—2014 年、2006—2010 年、2011—2014 年。模型的植被参数根据 500 m 空间分辨率的 MODIS 数据确定。土壤参数从 30 弧秒分辨率的面向陆面过程模型的中国土壤水文数据集(1980 年)^[25]和中国土壤有机质数据集^[26]中提取得到, 数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn>)。在进行土壤含水量模拟时, 1979—1980 年的气象数据用于 VIC 模型预热, 最终模拟生成 1981—2020 年逐日土壤含水量数据。采用 0~60 cm 土层厚度的土壤含水量代表根区土壤含水量, 因此基于国际土壤水分网络 (<https://ismn.earth/en/>) 中 5 个站点(4 个站点位于渭河华县以上流域, 1 个站点位于淮河王家坝以上流域)1981—1999 年每月 8、18、28 日的实测土壤含水量数据, 对模型模拟的 0~10 m 和 0~60 cm 土层厚度的土壤含水量进行了验证。

本文使用的逐月归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 数据来源于国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>), 该数据的原始空间分辨率为 8 km, 本文将其重采样到 0.05°空间分辨率。本文使用的潜在蒸散发和干燥度指数数据来自 Zomer 等^[27]开发的全球干燥度指数和

潜在蒸散发数据集。基于这套数据集计算的湘江流域、淮河王家坝以上流域、渭河华县以上流域的干燥度指数分别为 1.67、1.04 和 0.61。因此, 湘江流域和淮河王家坝以上流域的蒸发主要受能量限制, 而渭河华县以上流域的蒸发主要受水量限制^[28]。

2 研究方法

2.1 干旱指数及干旱传播时间计算

McKee 等^[29]提出的 SPI 是目前应用最广泛的气象干旱指数之一, 该指数具有时间尺度灵活、计算简单等优势, 是世界气象组织推荐使用的干旱评估指数。为了更好地反映干旱传播时间的时空差异, 本文将计算 SPI 的时间滑动窗口由月调整为旬, 由此得到气象干旱的逐旬变化过程。计算 SPI 的具体步骤为: ①根据所选时间尺度计算对应的累积降水量; ②选择合适的概率分布函数拟合降水量序列, 为了避免对于分布的假设以及减少拟合分布参数的计算, 本文选择 GPP (Gringorten plotting position) 算法^[30]计算降水量的累积概率(式(1)); ③通过等概率变换将降水量的累积概率转化为标准正态分布对应的值, 即为 SPI。

$$F = (i - 0.44) / (n + 0.12) \tag{1}$$

式中: F 为降水量的累积概率; i 为降水序列升序时的次序; n 为样本序列长度。

采用相关系数分析法确定气象干旱向农业干旱的传播时间。为此, 计算了降水累积期为 1、2、…、36 旬的 SPI, 记为 SPI1、SPI2、…、SPI36; 计算 SSMI 的方法与 SPI 相同, 选择 3 旬时间尺度的 SSMI 表征农业干旱, 记为 SSMI3。为了确定气象干旱向农业干旱的传播时间, 依次计算 SSMI3 与 SPI i ($i = 1, 2, \dots, 36$) 之间的相关系数, 并将与 SSMI3 序列相关系数最大的 SPI 序列(记为 SPI m)对应的降水累积期 m 作为气象干旱向农业干旱的传播时间。为了分析干旱传播时间的动态变化规律, 采用 10 a 滑动窗口、1 a 滑动步长将每个网格的 SSMI 和 SPI 划分成 31 个子序列, 采用上述方法计算每个子序列的干旱传播时间, 得到每个网格的干旱传播时间序列。

2.2 干旱传播时间时空变化分析

M-K 趋势检验是世界气象组织推荐并已被广泛使用的一种非参数检验方法, 可有效检验时间序列的变化趋势^[16]。本文利用该方法检验各网格干旱传播时间的变化趋势以及不同因素对干旱传播时间空间变化影响的变化趋势。M-K 趋势检验统计量 $Z > 0$ 时, 序列呈上升趋势; $Z < 0$ 时, 序列呈下降趋势。

为了评估干旱传播时间空间分布的变化, 以

1981—1990 年各网格的干旱传播时间为基准,计算不同时期干旱传播时间与 1981—1990 年干旱传播时间的空间相关系数,用来衡量不同时段干旱传播时间的空间相似性。两个时段的空间相关系数为正且越大,表示这两个时段传播时间的空间分布越相似,即某时段内高值区域在另一个时段也是高值区域,这意味着传播时间的空间分布格局相对稳定。为了计算两个时段之间干旱传播时间的空间相关系数,将每个时段的干旱传播时间展平为包含 k 个分量的向量(k 为流域的网格数,每个空间位置的数据值作为向量的一个分量),然后计算两个向量的相关系数。

2.3 干旱传播时间影响因素重要性评估

采用 XGBoost 算法^[31] 计算每个因素在干旱传播时间动态变化中的相对重要性,以确定影响干旱传播时间时空变化的主要因素。XGBoost 算法的基本思想与梯度提升决策树相同,但通过优化模型结构,有效防止了过拟合并提高了模型的泛化能力。XGBoost 算法的一个重要应用是进行数据特征挖掘分析,通过分析每个特征对目标变量的影响来评估其重要性。具体来说,相对重要性是通过计算每个特征在构建决策树过程中所带来的信息增益来确定的。XGBoost 算法采用分裂节点时特征的增益作为其重要性评分,汇总所有树中每个特征的增益,计算其平均值并归一化,最终得出每个特征的相对重要性分数,这些分数直观地反映了各个特征对模型预测结果的影响。

本文评估 8 个因素对干旱传播时间动态变化的影响,其中,4 个气象要素分别是年平均降水量(P)、年平均气温(T)、年平均潜在蒸散发(ET)和干燥度指数(I_A)。土壤含水量的变化是一个持续性的过程,从而使得土壤含水量具有一定记忆性特征^[32],本文采用土壤含水量滞后 1 旬的滞后相关系数(R_{sc})来描述土壤含水量的记忆性。较强的记忆性表明土壤含水量对气象异常的反应比较缓慢,这一特征可能会影响干旱传播时间,因此需分析土壤含水量的记忆性对干旱传播时间动态变化的影响。选择土壤含水量与降水量之间的耦合关系以及土壤含水量与气温之间的耦合关系作为陆-气耦合强度指数,评估陆-气耦合强度对干旱传播时间动态变化的影响,利用土壤含水量与降水量之间的相关系数(R_{sp})以及土壤含水量与气温之间的相关系数(R_{st})表征上述两个耦合关系。最后,选择 NDVI 评估植被状况对干旱传播时间变化的影响。为了确定影响干旱传播时间动态变化的主要驱动因素,对 8 个因素采用了与计算干旱传播时间相同的滑动窗口。

评估过程中,首先将降水量、气温、潜在蒸散发、干燥度指数和 NDVI 数据划分为 31 个子序列,计算每个子序列的年平均值。同样地,将旬降水量、旬气温和旬土壤含水量数据划分为 31 个子序列,计算每个子序列土壤含水量滞后 1 旬的滞后相关系数、土壤含水量与降水量之间的相关系数以及土壤含水量与气温之间的相关系数。在评估 8 个因素对网格尺度干旱传播时间动态变化的影响时,以目标网格所有时段的干旱传播时间为目标变量,8 个因素为特征变量,对 XGBoost 模型进行训练,输出每个网格各因素对干旱传播时间变化影响的相对重要性。在评估 8 个因素对于干旱传播时间空间分布的影响时,首先以 1981—1990 年目标流域所有网格的干旱传播时间为目标变量,8 个因素为特征变量,对 XGBoost 模型进行训练,输出 1981—1990 年各因素对干旱传播时间空间变化影响的相对重要性。以此类推,可以获得 8 个因素对干旱传播时间空间变化影响相对重要性的时间变化过程。

3 结果与分析

3.1 VIC 模型率定结果

采用纳什效率系数和相对误差评价 VIC 模型模拟流量的精度,采用相关系数和无偏均方根误差评价土壤含水量的模拟精度,各指标的计算方法见 Wu 等^[33] 的研究,评价结果如表 1、表 2 所示。由表 1 可见,从湿润区到半湿润-半干旱过渡区 VIC 模型模拟精度逐渐降低,湘江流域径流模拟精度最高,率定期和验证期纳什效率系数分别为 0.88 和 0.84,渭河华县以上流域径流模拟精度最低,纳什效率系数分别为 0.74 和 0.67。总的来看,VIC 模型在 3 个流域具有较好的适用性,基于实测径流数据率定的水文参数比较合理,可以进一步用于土壤含水量模拟。由表 2 可见,VIC 模型模拟的土壤含水量能较好地反映实际土壤含水量的变化过程,除环县站 0~60 cm 土层厚度的土壤含水量外,相关系数均在 0.50 以上,0~10 cm 和 0~60 cm 土层厚度土壤含

表 1 VIC 模型率定期和验证期模拟流量的纳什效率系数和相对误差

站点	率定期		验证期	
	纳什效率系数	相对误差/%	纳什效率系数	相对误差/%
湘潭	0.88	-6.01	0.84	-7.11
王家坝	0.79	-6.41	0.81	-5.61
华县	0.74	0.83	0.67	17.07

水量的平均相关系数分别为 0.68 和 0.65。此外,模型模拟的 0~10 cm 和 0~60 cm 土层厚度土壤含水量的平均无偏均方根误差分别为 $0.051\text{ m}^3/\text{m}^3$ 和 $0.040\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。总的来看,VIC 模型模拟土壤含水量与实测结果比较一致,可以进一步用于干旱传播研究。

表 2 土壤含水量的 VIC 模型模拟值与实测值的相关系数和无偏均方根误差

Table 2 Correlation coefficients and unbiased root mean square error between simulated soil moisture by VIC model and observed values

站点	土层厚度 0~10 cm		土层厚度 0~60 cm	
	相关系数	无偏均方根误差/(m^3/m^3)	相关系数	无偏均方根误差/(m^3/m^3)
驻马店	0.76	0.069	0.74	0.029
环县	0.64	0.040	0.35	0.063
天水	0.76	0.043	0.74	0.032
通渭	0.53	0.057	0.66	0.037
西峰镇	0.73	0.047	0.77	0.037

3.2 干旱传播时间

图 2 为 3 个流域气象干旱向农业干旱传播时间的空间分布。由图 2 可见,3 个流域的干旱传播时间存在显著的差异,位于湿润区的湘江流域干旱传播时间最短,平均传播时间为 6.4 旬,淮河王家坝以上流域的干旱传播时间略长于湘江流域,平均为 7.7 旬,渭河华县以上流域的干旱传播时间最长,平均为 33.1 旬。湘江流域的干旱传播时间主要集中在 5~7 旬,约占总网格的 86.4%;而淮河王家坝以上流域的干旱传播时间主要集中在 6~12 旬,约占总网格的 85.6%;渭河华县以上流域大部分网格的干旱传播时间不低于 30 旬,约占总网格的 89.0%。此外,渭河华县以上流域的干旱传播时间整体上呈现从西北向东南递减的分布特征,西北部干旱传播时间为 36 旬左右。以上结果与 Xu 等^[34]的研究结论一致,即湿润区干旱传播时间比干旱、半干旱地区传播时间长。此外,本文计算的 SPI 以旬为单位,与利用月尺度的干旱指数相比,可以更好地反映干旱传播时间的时空差异。

3.3 网格尺度干旱传播时间的变化趋势及影响因素

为了分析各网格气象干旱向农业干旱传播时间的变化趋势,采用 10 a 的滑动窗口和 1 a 的滑动步长计算得到各网格干旱传播时间序列,并对干旱传播时间序列进行了 M-K 趋势检验,结果如图 3 所示,黑色点表示通过显著性水平为 0.05 的检验。由图 3(a)可见,湘江流域气象干旱向农业干旱传播时间显著降低的网格主要分布在流域南部,流域中部的干旱传播时间呈显著增加的趋势。干旱传播时间

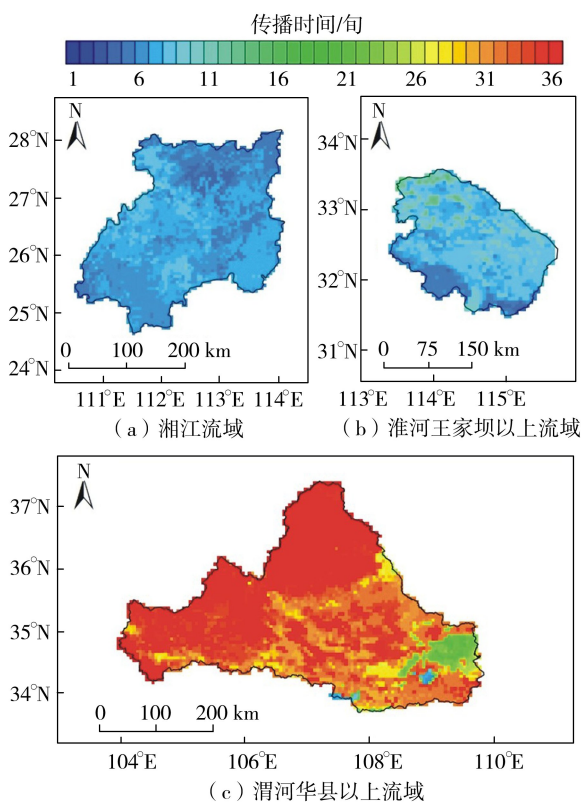


图 2 3 个流域气象干旱向农业干旱传播时间的空间分布
Fig.2 Spatial distribution of propagation time from meteorological drought to agricultural drought in three basins

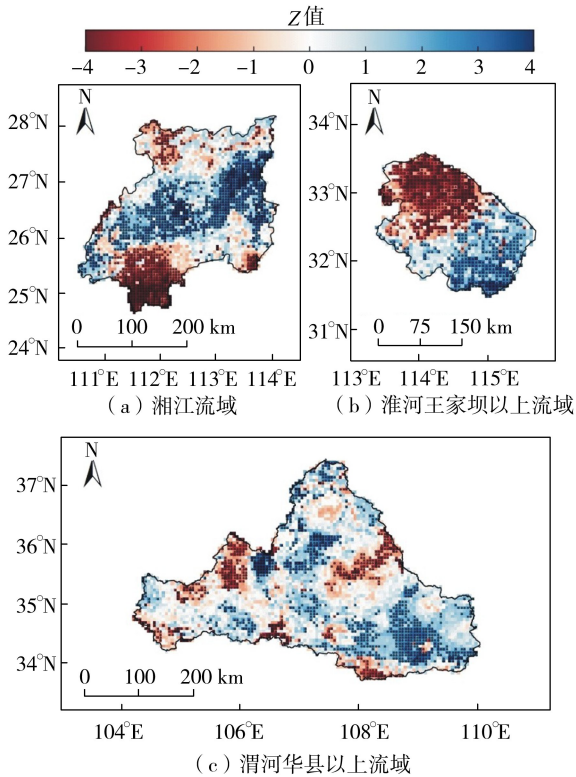


图 3 3 个流域干旱传播时间的 M-K 趋势检验结果
Fig.3 M-K trend test results of propagation time for three basins

显著降低和显著增加的网格分别约占总网格的 18.2% 和 26.9%。由图 3(b) 可见, 淮河王家坝以上流域干旱传播时间发生显著变化的网格明显高于其他流域, 干旱传播时间显著降低和增加的网格分别约占总网格的 34.4% 和 23.8%, 其中干旱传播时间显著降低和显著增加的网格分别位于流域的西北部 and 东南部。由图 3(c) 可见, 渭河华县以上流域约 64.1% 的网格的干旱传播时间有增加的趋势, 但干旱传播时间显著增加的网格仅为总网格的 17.8%, 且主要集中在流域的东南部。渭河华县以上流域干旱传播时间显著降低的网格空间分布特征不显著且比例较低(约为总网格的 10.2%)。

采用 XGBoost 算法分析了 8 个因素对流域网格干旱传播时间动态变化的影响, 图 4 为各因素对 3 个流域干旱传播时间变化影响的平均相对重要性及各因素主导干旱传播时间变化的网格占比。由图 4 可见, 影响不同流域网格尺度干旱传播时间动态变化的因素存在显著的差异。 R_{ST} 、 T 和 ET 是影响湘江流域干旱传播时间动态变化的主要因素, 平均相对重要性分别为 0.20、0.19 和 0.13, 分别在约 24.0%、18.8% 和 14.1% 的网格主导了干旱传播时间的动态变化。 T 、 R_{SC} 和 ET 是影响淮河王家坝以上流域干旱传播时间动态变化的主要因素, 平均相对重要性分别为 0.21、0.21 和 0.17, 分别在约 22.6%、24.3% 和 17.5% 的网格主导了干旱传播时间的动态变化。 R_{SC} 、 I_A 和 P 是影响渭河华县以上流域干旱传播时间动态变化的主要因素, 平均相对重要性分别为 0.21、0.19 和 0.14, 分别在 25.0%、25.5% 和 15.5% 的网格主导了干旱传播时间的变化。在 3 个流域中, 湘江流域年平均降水量最高, 蒸散发的变化主要受能量的影响, 因此湘江流域气温的变化会显著影响蒸散发, 进而造成土壤含水量的变化, R_{ST} 和 T 是影响湘江流域干旱传播时间变化

的最主要因素。渭河华县以上流域的降水量和气温低于其他流域, 导致该流域的水文循环速度相对较慢, 使得土壤含水量具有较高的记忆性。这种特性导致该流域的干旱传播时间整体上比其他流域更长, 与 Bhardwaj 等^[17]的研究结果一致。 R_{SC} 的变化反映土壤含水量对气象异常的响应速度, 是影响该流域干旱传播时间变化的最主要因素。此外, 渭河华县以上流域的降水量较低, 该流域的蒸散发主要受水量的限制, 降水量和干燥度指数的变化会影响蒸散发, 因此 I_A 和 P 的变化对该流域干旱传播时间的影响高于其他流域。与湘江流域相似, 淮河王家坝以上流域蒸散发主要受能量限制, 气温变化仍然是该流域干旱传播时间变化的主要驱动因素。同时, 淮河王家坝以上流域地处我国南北气候过渡带, R_{SC} 对该流域干旱传播时间变化的影响介于湘江流域和渭河华县以上流域之间, 也是影响该流域干旱传播时间变化的最主要因素。

3.4 干旱传播时间的空间变化及影响因素

除了在网格尺度上的动态变化外, 干旱传播时间的空间分布特征也会随时间不断变化。为了评估干旱传播时间空间分布的变化, 以 1981—1990 年的干旱传播时间为基准, 计算了 3 个流域不同时期干旱传播时间与 1981—1990 年干旱传播时间的空间相关系数, 结果如图 5 所示, 相关系数较高表明评估时期的干旱传播时间与基准干旱传播时间在空间分布上具有较好的相似性。由图 5 可见, 3 个流域干旱传播时间的空间分布特征随时间不断发生变化。湘江流域和淮河王家坝以上流域干旱传播时间的空间分布与基准的相似性均先逐渐降低, 在 2005 年之后有所增加, 但淮河王家坝以上流域的相似性高于湘江流域; 渭河华县以上流域干旱传播时间的空间分布与基准的相似性在 1989 年之前不断降低, 在 1994 年之后不断增加。整体上来看, 湘江流域不同

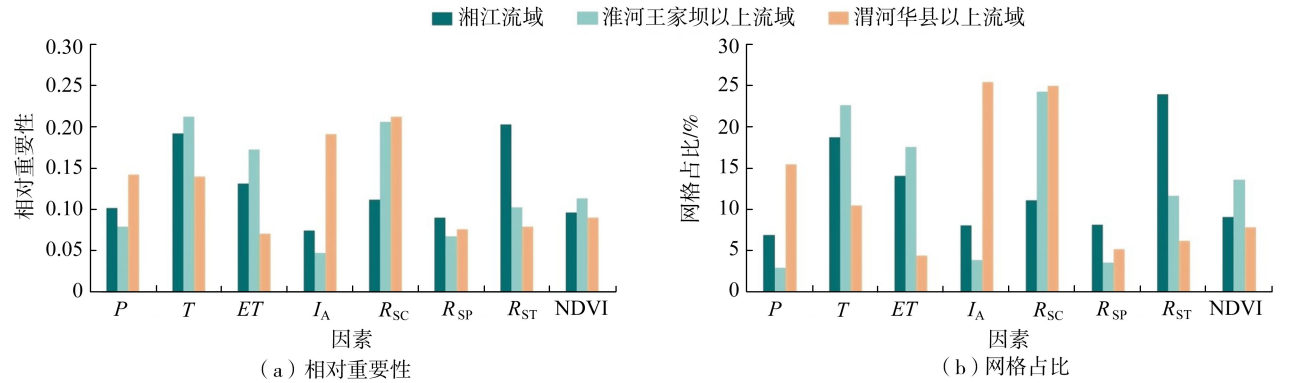


图 4 各因素对 3 个流域干旱传播时间变化影响的平均相对重要性及各因素主导干旱传播时间变化的网格占比

Fig. 4 Average relative importance of each factor to drought propagation time variation in three basins and proportion of grids dominated by each factor in drought propagation time variation

时期干旱传播时间与基准干旱传播时间之间的空间相关系数最低,平均为 0.38,淮河王家坝以上流域和渭河华县以上流域的平均空间相关系数分别为 0.64 和 0.51,表明湘江流域干旱传播时间的空间分布更容易受变化环境的影响。

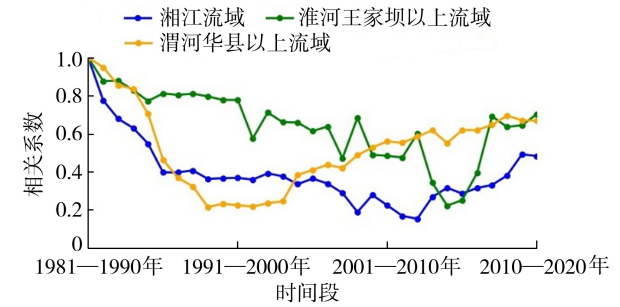


图 5 不同时期干旱传播时间与基准干旱传播时间的空间相关系数

Fig. 5 Spatial correlation coefficient between drought propagation time and reference drought propagation time in different periods

进一步分析各因素对干旱传播时间空间变化的影响,结果如图 6 所示。由图 6 可见,一些因素的相对重要性在不同时期存在显著差异,比如在渭河华县以上流域,1991—2000 年 T 对干旱传播时间空间变化影响的相对重要性为 0.02,而在 1992—2001 年则为 0.39,这一差异导致干旱传播时间的空间分布特征不断变化,也表明需要从动态的角度识别影响干旱传播时间空间变化的因素。对于湘江流域, R_{sc} 、 P 和 ET 是影响干旱传播时间空间变化的最主要因素,平均相对重要性分别为 0.33、0.16 和 0.14。此外, P 对湘江流域干旱传播时间空间变化的影响呈显著增加的趋势($p \leq 0.01$),表明未来降水量的空间差异可能会加剧湘江流域干旱传播时间的空间异质性。 R_{sc} 、 R_{sp} 和 P 是影响淮河王家坝以上流域干旱传播时间空间变化的主要因素,平均相对重要性分别为 0.32、0.25 和 0.14。与其他流域类似, R_{sc} 是影响渭河华县以上流域干旱传播时间空间分布的最主要因素,平均相对重要性为 0.44。此外, T 和 R_{st} 也会影响渭河华县以上流域干旱传播时间的空间分布,平均相对重要性均为 0.13。总体来看, R_{sc} 是影响干旱传播时间空间分布的最主要因素,与 Xu 等^[32,35]的研究结果一致。湘江流域气温高于其他流域,土壤水分蒸发较快,降水量补充不及时容易发生农业干旱,降水量的空间异质性导致土壤水分的补充存在差异,因此 P 也是影响湘江流域干旱传播时间空间异质性的主要因素之一。淮河王家坝以上流域地处我国南北气候过渡带,降水量自南向北逐渐降低,降水量与土壤水分之间的耦

合关系存在显著的区域差异,导致土壤含水量对降水量的响应因区域而异, R_{sp} 也是影响该流域干旱传播时间空间变化的主要因素之一。渭河华县以上流域的气温和降水量低于其他流域,气温的空间差异可能会影响不同区域蒸散发或降水补充土壤水分的时间和比例^[36],因此 T 和 R_{st} 也是影响该流域传播时间空间分布的主要因素。

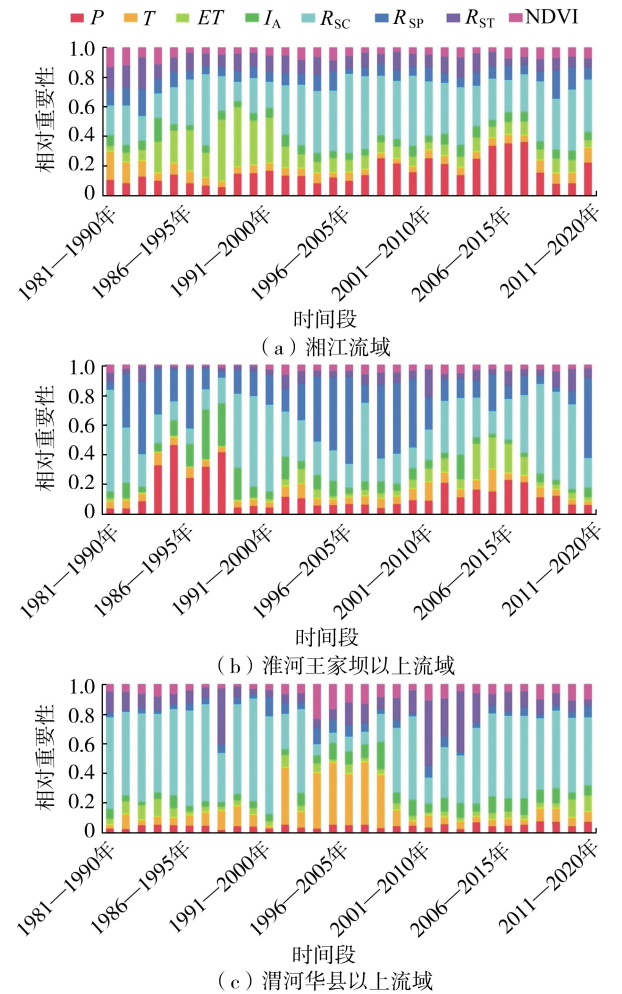


图 6 不同时期各因素对干旱传播时间空间变化影响的相对重要性

Fig. 6 Relative importance of influence of factors on spatial variation of drought propagation time in different periods

4 结 论

- a. 从湿润区、湿润-半湿润过渡区到半湿润-半干旱过渡区,气象干旱向农业干旱的传播时间逐渐增加,湘江流域、淮河王家坝以上流域和渭河华县以上流域的平均传播时间分别为 6.4、7.7、33.1 旬。
- b. 网格尺度上,位于湿润-半湿润过渡区的淮河王家坝以上流域最易受变化环境影响,干旱传播时间发生显著变化的网格占比最高。此外,从湿润区、湿润-半湿润过渡区到半湿润-半干旱过渡区,气

温相关的变量(T 和 R_{ST})对干旱传播时间动态变化的影响逐渐降低,而土壤含水量的记忆性特征(R_{SC})的影响逐渐增加。

c. 从干旱传播时间的空间变化来看,位于湿润区的湘江流域最易受变化环境影响,但影响3个流域干旱传播时间空间变化的主要因素均为 R_{SC} 。此外,降水量也是影响湘江流域和淮河王家坝以上流域干旱传播时间空间变化的主要因素,气温对渭河华县以上流域干旱传播时间空间变化的影响仅次于 R_{SC} 。

参考文献:

[1] MONDAL S, MISHRA A K, LEUNG R, et al. Global droughts connected by linkages between drought hubs[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 144.

[2] 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))

[3] 吴志勇,白博宇,何海,等. 珠江流域 1981—2020 年水文干旱时空特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 1-9. (WU Zhiyong, BAI Boyu, HE Hai, et al. Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(1): 1-9. (in Chinese))

[4] 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))

[5] WU Jingwen, MIAO Chiyuan, ZHENG Haiyan, et al. Meteorological and hydrological drought on the loess plateau, China: evolutionary characteristics, impact, and propagation [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(20): 11569-11584.

[6] BARKER L J, HANNAFORD J, CHIVERTON A, et al. From meteorological to hydrological drought using standardised indicators[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(6): 2483-2505.

[7] 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))

[8] 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))

[9] APURV T, SIVAPALAN M, CAI Ximing. Understanding the role of climate characteristics in drought propagation [J]. Water Resources Research, 2017, 53(11): 9304-9329.

[10] 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. (ZHANG Xuan, XU Yang, HAO Fanghua, et al. Characteristics and risk analysis of drought propagation from meteorological drought to hydrological drought in Luanhe River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(2): 165-175. (in Chinese))

[11] 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. (ZHANG 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))

[12] 智协飞,田云涛,陈昌春,等. 干旱传播研究进展与展望 I : 干旱传播含义、特征、类型与研究方法[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(4): 625-653. (ZHI Xiefei, TIAN Yuntao, CHEN Changchun, et al. Progress and prospects in drought propagation research part I: meaning, characteristics, types, and research methods [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(4): 625-653. (in Chinese))

[13] 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))

[14] 冯凯,李彦彬,许桂平,等. 西北地区农业干旱对气象干旱的时空多角度响应[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 59-69. (FENG Kai, LI Yanbin, XU Guiping, et al. Spaitotemporal and multi-angle response of agricultural drought to meteorological drought in Northwest China [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 59-69. (in Chinese))

[15] 相恺政,赵安周,胡小枫,等. 1980—2019 年海河流域气象干旱和农业干旱变化及传播特征[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(2): 194-202. (XIANG Kaizheng, ZHAO Anzhou, HU Xiaofeng, et al. Variation and propagation characteristics of the meteorological and agricultural drought in the Haihe River Basin from 1980 to 2019 [J]. Journal of Water Resources and Water

- Engineering, 2022, 33(2):194-202. (in Chinese))
- [16] DAI Meng, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, et al. Propagation characteristics and mechanism from meteorological to agricultural drought in various seasons [J]. Journal of Hydrology, 2022, 610:127897.
- [17] BHARDWAJ K, SHAH D, AADHAR S, et al. Propagation of meteorological to hydrological droughts in india [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125(22):e2020JD033455.
- [18] 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))
- [19] ZHU Qian, QIN Xiaodong, ZHOU Dongyang, et al. Impacts of spatiotemporal resolutions of precipitation on flood event simulation based on multimodel structures: a case study over the Xiang River basin in China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2024, 28(7): 1665-1686. ((in Chinese))
- [20] 隆院男, 黄崇荣, 李正最, 等. 基于 Copula 函数的湘江流域气象干旱向水文干旱传播特性[J]. 农业工程学报, 2023, 39(21): 66-78. (LONG Yuannan, HUANG Chongrong, LI Zhengzui, et al. Characteristics of the transmission from meteorological drought to hydrological drought in the Xiangjiang River Basin of China using Copula function [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(21): 66-78. (in Chinese))
- [21] 李晓英, 吴淑君, 王颖, 等. 淮河流域陆地水储量与干旱指标分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 80-85. (LI Xiaoying, WU Shujun, WANG Ying, et al. Analysis of terrestrial water storage and drought indices in the Huaihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 80-85. (in Chinese))
- [22] WEI Chong, DONG Xiaohua, MA Yaoming, et al. Applicability comparison of various precipitation products of long-term hydrological simulations and their impact on parameter sensitivity [J]. Journal of Hydrology, 2023, 618: 129187.
- [23] 景朝霞, 夏军, 匡洋, 等. 基于 CI 指数的渭河流域干旱时空演变特征研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(7): 86-91. (JING Zhaoxia, XIA Jun, KUANG Yang, et al. Spatial and temporal patterns of droughts in weihe river basin based on CI drought index [J]. Yellow River, 2017, 39(7): 86-91. (in Chinese))
- [24] SHI Wuzhi, HUANG Shengzhi, LIU Dengfeng, et al. Drought-flood abrupt alternation dynamics and their potential driving forces in a changing environment [J]. Journal of Hydrology, 2021, 597:126179.
- [25] DAI Yongjiu, SHANGGUAN Wei, DUAN Qingyun, et al. Development of a China dataset of soil hydraulic parameters using pedotransfer functions for land surface modeling [J]. Journal of Hydrometeorology, 2013, 14(3): 869-887.
- [26] SHANGGUAN Wei, DAI Yongjiu, LIU Baoyuan, et al. A China data set of soil properties for land surface modeling [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2013, 5(2): 212-224.
- [27] ZOMER R J, XU Jianchu, TRABUCCO A. Version 3 of the global aridity index and potential evapotranspiration database [J]. Scientific Data, 2022, 9(1): 409.
- [28] ZHOU Jianhong, YANG Kun, CROW W T, et al. Potential of remote sensing surface temperature- and evapotranspiration-based land-atmosphere coupling metrics for land surface model calibration [J]. Remote Sensing of Environment, 2023, 291: 113557.
- [29] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [C]// Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim; American Meteorological Society, 1993:179-184.
- [30] GRINGORTEN I I. A plotting rule for extreme probability paper [J]. Journal of Geophysical Research, 1963, 68(3): 813-814.
- [31] CHEN Tianqi, GUESTRIN C. XGBoost: a scalable tree boosting system [C]//Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. San Francisco; ACM, 2016:785-794.
- [32] XU Zhengguang, WU Zhiyong, SHAO Quanxi, et al. From meteorological to agricultural drought: propagation time and probabilistic linkages [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, 46:101329.
- [33] WU Zhiyong, XU Zhengguang, WANG Fang, et al. Hydrologic evaluation of multi-source satellite precipitation products for the upper Huaihe River basin, China [J]. Remote Sensing, 2018, 10(6): 840.
- [34] XU Yang, ZHANG Xuan, HAO Zengchao, et al. Characterization of agricultural drought propagation over China based on bivariate probabilistic quantification [J]. Journal of Hydrology, 2021, 598:126194.
- [35] APURV T, CAI Ximing. Regional drought risk in the contiguous United States [J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(5): e2020GL092200.
- [36] 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.

(收稿日期:2024-09-18 编辑:王芳)