

基于蒸散发干旱指数的子牙河流域 干旱时空变化特征分析

冯 平,任明雪,李建柱

(天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室,天津 300350)

摘要:为探究子牙河流域干旱时空分布特征,基于 2001—2021 年逐月降水和遥感蒸散栅格数据,采用标准化降水蒸散指数(SPEI)和标准化蒸散发亏缺指数(SEDI)表征流域干旱情况,运用 Sen 斜率估计和 Mann-Kendall 检验法分析了流域 2001—2021 年季尺度干旱时空分布及变化趋势,统计了干旱面积、干旱次数、干旱历时和干旱烈度等特征变量。结果表明:SPEI 对子牙河流域旱情发生时间、程度和范围识别的准确率更高,2001—2021 年流域 SPEI 呈上升趋势,表现出湿润化态势,冬季 SPEI 呈下降趋势,表现为干旱化态势,忻州、阳泉市等地存在显著干旱化的区域;流域各季节干旱面积占比呈现波动变化,部分年份出现大范围季节性干旱,夏旱和秋旱干旱面积占比最高,超过 90%;忻州和阳泉市部分区域、石家庄市西部区域和衡水市北部区域呈现干旱次数少、历时长、烈度大的特点,邯郸和邢台市部分区域、衡水市南部区域、石家庄市东部区域表现为干旱次数多、历时长、烈度小的特征。

关键词:遥感蒸散发;标准化降水蒸散指数;标准化蒸散发亏缺指数;干旱特征;子牙河流域

中图分类号:P426.616

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)03-0035-09

Analysis of spatiotemporal variation characteristics of droughts in the Ziya River Basin based on evapotranspiration-related drought indexes//FENG Ping, REN Mingxue, LI Jianzhu (State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: To investigate spatial and temporal distribution characteristics of droughts in the Ziya River Basin, the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) and standardized evapotranspiration deficit index (SEDI) were calculated based on monthly precipitation and remotely sensed evapotranspiration grid data from 2001 to 2021. The spatial and temporal distribution and trend of seasonal-scale droughts in the basin from 2001 to 2021 were analyzed using Sen slope estimation and Mann-Kendall test, and characteristic variables such as drought area, number of droughts, drought duration, and drought severity were calculated. The results indicated that SPEI has higher accuracy in identifying the onset, termination, degree, and extent of droughts in the Ziya River Basin, and it showed an overall increasing trend in the basin from 2001 to 2021, indicating a wetting trend. Furthermore, a decreasing trend of SPEI in winter was detected, showing an aridity trend, especially in Xinzhou and Yangquan cities, where there were significant aridity areas. The percentage of drought area in the basin showed a fluctuating trend, and there was a wide range of seasonal drought in some years. Summer and autumn drought areas accounted for the highest proportion, higher than 90%. In part regions of Xinzhou and Yangquan cities, the western region of Shijiazhuang City, and the northern region of Hengshui City, droughts were characterized by low frequency, long duration, and high severity, while in the Handan and Xingtai cities, the southern region of Hengshui City, and the eastern region of Shijiazhuang City, droughts were characterized by high frequency, short duration, and low severity.

Key words: remote sensing evapotranspiration; standardized precipitation evapotranspiration index; standardized evapotranspiration deficit index; drought characteristics; Ziya River Basin

随着人类社会的不断发展和气候变暖的加剧,干旱带来的损失愈发严重,造成全球每年 60 亿 ~

80 亿美元的经济损失,干旱对人口稠密、发展程度高的地区影响更大,直接危害人类的生命财产安

基金项目:国家自然科学基金项目(52079086)

作者简介:冯平(1964—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:fengping@tju.edu.cn

通信作者:李建柱(1981—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:lijianzhu@tju.edu.cn

全^[1]。选择适宜的干旱指标研究区域干旱时空分布可为抗旱减灾提供重要的理论依据。

目前,常用的干旱指标有标准化降水指数 (standardized precipitation index, SPI)^[2-3]、标准化降水蒸散指数 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)^[4-5]、帕默尔干旱指数 (Palmer drought severity index, PDSI)^[6]等。Vicente-Serrano 等^[4]于 2010 年提出的 SPEI 指数,融合了 PDSI 和 SPI 优点,考虑了蒸散发影响,能够充分反映气温上升所造成的干旱,得到了广泛应用。王卫光等^[7]应用 SPEI 指数对海河流域进行干旱评估,表明多时间尺度的 SPEI 可准确反映海河流域实际干旱时空变化特征。王素萍等^[8]发现 SPEI 对中国北方夏旱具有较强的监测能力。但在气候变暖背景下,蒸散发对干旱的影响作用逐渐显现,同时考虑潜在蒸散发和实际蒸散发两个变量能够更好地量化地表干湿状况及其对陆地生态环境的影响^[9]。蒸散发亏缺表示实际蒸散发和潜在蒸散发之间的差异,无论气候状况如何,较高蒸散发亏缺都会导致植被气孔关闭,降低光合活性、碳水化合物积累和净初级生产力^[10-11],而当蒸散发亏缺升高至萎蔫点,植物可能会因维管损伤而死亡^[12],因此,蒸散发亏缺可用于量化干旱严重程度^[9]。2016 年 Kim 等^[13]提出了完全基于蒸散发的标准化蒸散发亏缺指数 (standardized evapotranspiration deficit index, SEDI),发现其对干旱事件更敏感,并在农业干旱评价方面具有优势。Vicente-Serrano 等^[14]进一步基于 log-logistic 分布对散蒸发亏缺时间序列进行拟合,综合遥感数据可获得高时空分辨率的 SEDI 值。Liu 等^[15-16]基于 Vicente-Serrano 提出的 SEDI 计算方法研究干旱对生态系统影响。

子牙河流域位于海河流域中南部,是我国重要的农业生产区之一,对气候变化的响应极其敏感,也是区域生态环境异常脆弱的地区^[17]。旱灾是对子牙河流域影响最大的气象灾害,特别是 20 世纪 80 年代以来,随着社会经济快速发展,用水量急剧增加,持续干旱及其引发的地下水超采情况使流域处于严重缺水的状态,干旱发生频率逐年递增,生态环境不断恶化^[18],干旱及其引发的一系列问题成为制约流域经济发展的主要原因之一。目前对子牙河流域的干旱研究多包含在海河流域的相关研究中,如严登华等^[19]利用气象观测数据,结合累积相对湿度指数和模糊集对评价法,分析了海河流域干旱时空变化特征,结果表明流域主要干旱类型为中旱和重旱,且重旱面积呈现显著的增加趋势;关不了等^[5]、王卫光等^[7]基于 SPEI 和气象站数据探究了

流域干旱时空演变情况,前者侧重研究时空变化趋势和干旱空间分布模态,结果表明海河流域以较缓速率向干旱化发展且纬度影响干旱分布,后者侧重分析多个时间尺度 SPEI 的干旱时空变化,结果表明年、季、月尺度变化趋势各有不同,而整体呈轻微干旱趋势;赵安周等^[20]基于改进的干旱严重度指数对流域生长季及不同季节的干旱时空分布进行了评价,发现近些年来春、夏、秋季海河流域干旱有缓解的趋势。干旱是干旱历时、干旱烈度、受灾面积等多变量复杂交织的气象灾害事件^[21],相关干旱研究除上述提及的定性评估时空演变规律外,还可以综合适宜的干旱指标和高时空分辨率连续气象数据,基于高时空分辨率网格化干旱指标序列进一步提取干旱事件特征变量,定量分析流域干旱特征格局,进而得到区域干旱精细化特征^[22],为区域防旱、抗旱决策提供有效精确的科学依据。

本文基于子牙河流域 2001—2021 年逐月降水和遥感蒸散栅格数据,采用 SPEI 和 SEDI 作为干旱评价指标,分析流域 2001—2021 年的季尺度干旱时空变化趋势和受旱面积变化特征,以期为保障子牙河流域水资源安全和区域经济发展提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

子牙河流域是海河流域的子流域,位于 35.13°N~39.81°N、111.25°E~115.94°E,面积约为 48 436 km² (图 1),由发源于太行山东坡的滏阳河和发源于五台山北坡的滹沱河两大河系构成,于献县枢纽汇流后经子牙新河最终流入渤海湾,河流全长约 706 km。子牙河流域地处温带半湿润半干旱大

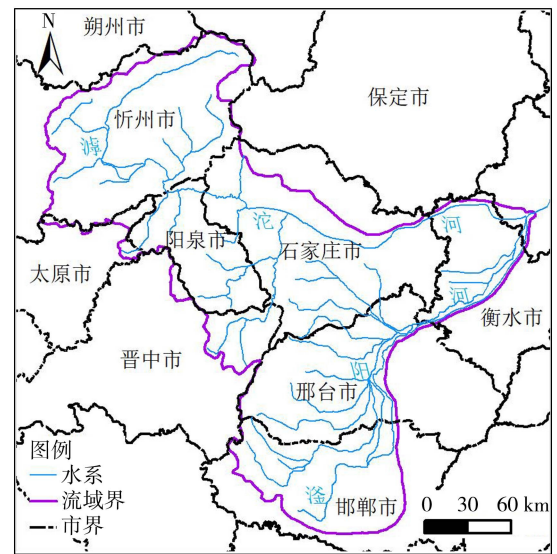


图 1 子牙河流域概况

Fig. 1 Overview of the Ziya River Basin

陆性季风气候区,春季受蒙古大陆性气候影响,气温回升相对较快,干旱多风,蒸发量大,往往有春旱发生;夏季受海洋性气候影响,湿润多雨,且多为暴雨,由于历年夏季太平洋副热带高压的进退时间、强度和影响范围不一致,流域降水量的变差很大,旱涝时有发生;秋季气温变幅大,降水量较少;冬季受西伯利亚冷风高压气旋影响,气候寒冷干燥^[23]。

流域内干旱灾害频发,根据水利部《中国水旱灾害公报》、国家防汛抗旱总指挥部《全国旱情及抗旱行动情况》、河北省气象局《河北省气候公报》以及山西省气象局《山西气候公报》,选取 2001—2021 年子牙河流域相关历史干旱事件对于干旱指标的适用性进行评价,选取的干旱事件包括 2001 年春旱和夏旱、2002 年夏旱、2006 年春旱和秋旱、2008 年冬旱、2014 年夏旱、2015 年夏旱以及2019 年夏旱。

1.2 数据来源

计算 SPEI 所需数据为降水和潜在蒸散发,计算 SEDI 所需数据为实际蒸散发和潜在蒸散发。其中,蒸散发的相关数据选用 MOD16A2 蒸散发数据集,来源于美国国家航空航天局的 EARTHDATA 网站 (<https://www.earthdata.nasa.gov/>)。该数据集采用 Penman-Monteith 公式、结合 Jarvis 气孔导度算法估算蒸散发,其中原始实际蒸散发和潜在蒸散发数据的时间分辨率为 8 d,始于2001 年1 月 1 日,处于持续更新中,空间分辨率为 500 m,覆盖范围为全球植被覆盖区,目前已广泛应用于蒸散发及干旱等相关研究^[24-25]。通过对原始数据拼接、裁剪、重采样等处理合成 2001—2021 年逐月 1 km 分辨率的实际蒸散发和潜在蒸散发。降水数据来源于国家地球系统科学数据中心 (<https://www.geodata.cn/>),由 Peng 等^[26]提供的 2001—2021 年 1 km×1 km 逐月降水量数据集,该数据集采用全国 496 个独立气象观测点的数据进行了验证。

2 研究方法

2.1 干旱指数及适用性评价方法

SPEI 具体计算方法见文献[4],以下介绍 SEDI 的具体计算过程^[14]。

a. 计算各栅格逐月实际蒸散发量与潜在蒸散发量的差值:

$$ET_{Di} = ET_{Ai} - ET_{Pi} \tag{1}$$

式中: ET_{Di} 为月实际蒸散发量与月潜在蒸散发量的差值; ET_{Ai} 、 ET_{Pi} 分别为月实际蒸散发量、月潜在蒸散发量; i 为月份。

b. 采用三参数的 log-logistic 概率分布对 ET_{Di} 序列进行拟合:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \tag{2}$$

其中

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta)}$$

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2}$$

$$\gamma = \omega_0 - \alpha\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta)$$

式中: $F(x)$ 为 log-logistic 概率分布函数; $\Gamma(\cdot)$ 为阶乘函数; w_0 、 w_1 、 w_2 为序列 ET_{Di} 的概率加权矩。

c. 对累积概率密度标准化处理得到各栅格对应的 SEDI 值:

$$I_{SEDi} = \begin{cases} \omega - \frac{c_0 + c_1\omega + c_2\omega^2}{1 + d_1\omega + d_2\omega^2 + d_3\omega^3} & P \leq 0.5 \\ -\omega + \frac{c_0 + c_1\omega + c_2\omega^2}{1 + d_1\omega + d_2\omega^2 + d_3\omega^3} & P > 0.5 \end{cases} \tag{3}$$

其中 $P = 1 - F(x)$ $\omega = \sqrt{-2\ln P}$

式中: I_{SEDi} 为标准化处理后的 SEDI 值; c_0 、 c_1 、 c_2 、 d_1 、 d_2 、 d_3 为参数, $c_0 = 2.515\ 517$ 、 $c_1 = 0.802\ 853$ 、 $c_2 = 0.010\ 328$ 、 $d_1 = 1.432\ 788$ 、 $d_2 = 0.189\ 269$ 、 $d_3 = 0.001\ 308$ ^[5]。

流域内主要发生季节性干旱,因此,本文使用时间尺度为 3 月的指数分析干旱时空分布和变化趋势,春、夏、秋、冬季的干旱程度分别用 3—5 月、6—8 月、9—11 月、12 月至次年 2 月的干旱指数值表示。依照 GB/T 20481—2017《气象干旱等级》对 SPEI 和 SEDI 进行干旱等级划分,当 SPEI (SEDI) 值分别为 >-0.5 、 $>-1.0 \sim -0.5$ 、 $>-1.5 \sim -1.0$ 、 $>-2.0 \sim -1.5$ 、 ≤ -2.0 时,对应的干旱等级分别为无旱、轻旱、中旱、重旱、特旱。

王素萍等^[8]给出了干旱指数适用性的评分标准,当未识别到旱情时,包括空识别或漏识别,评分为 0;当识别到旱情时,程度和范围均有偏差、程度和范围有 1 项符合、程度和范围均符合,评分分别为 1、2、3。基于该标准以历史干旱事件为参考,对比各干旱事件中 SPEI 和 SEDI 的识别效果。本文采用识别准确率来评价 SPEI 和 SEDI 的适用性,识别准确率的计算公式为

$$A = \frac{S}{3n} \times 100\% \tag{4}$$

式中: A 为识别准确率; S 为干旱事件中干旱指数识别效果实际得分总和; n 为事件数。

2.2 趋势分析方法

采用 Sen 斜率估计方法分析每个栅格干旱指数的变化趋势,通过每个栅格的空间变化特征,综合反映子牙河流域干旱演变规律,并结合 Mann-Kendall

(M-K)检验法对干旱趋势进行显著性检验^[27]。当 Sen 斜率值小于 0 时,干旱指数呈下降趋势,干旱更加严重;当 Sen 斜率值大于 0 时,干旱指数呈上升趋势,干旱程度得到缓解。M-K 检验统计量 UF 曲线超出置信水平区间 $[-1.96\ 1.96]$ 时,干旱趋势通过 95% (显著性水平为 0.05) 显著性检验,为显著(增大/减小)趋势。如果 UF 和 UB 曲线出现交点且交点在置信水平区间内,那么交点对应时刻即为突变开始时刻。

2.3 干旱特征变量提取

干旱事件的特征变量包括干旱次数、历时、烈度、烈度峰值和干旱面积等,基于各栅格逐月干旱指数值进行干旱事件识别和干旱特征变量提取,并对干旱特性进行定量评价的具体步骤为:①选择-0.5 为干旱指数阈值,当栅格的干旱指数值超过阈值,则初步确定该栅格发生了干旱事件;②若干旱事件历时仅为 1 月,则剔除该次干旱事件;③若相邻干旱事件间隔 1 月,则将这两次或多次干旱合并成一次干旱。最终时间序列存在若干个负游程,负游程的长度即为干旱历时,一次干旱事件中负游程干旱指数绝对值的累加之和为该次干旱事件的烈度。

3 结果与分析

3.1 降水和潜在蒸散发变化趋势分析

由图 2 可以看出,研究期间子牙河流域降水集中在夏秋季,约占全年降水量的 80%,四季降水量

均呈增加趋势。夏季多年平均降水量为 307.9 mm,以每 10 a 约 2.12 mm 的速率呈增加趋势;秋季多年平均降水量为 106.4 mm,以每 10 a 约 0.55 mm 的速率增加;春冬两季降水量均以每 10 a 约 0.06 mm 的速率小幅度增加。流域春夏季潜在蒸散发量约占全年的 70%,夏季潜在蒸散发量以每 10 a 约 0.84 mm 的速率呈增加趋势,但其趋势明显小于降水量增加趋势;春秋两季潜在蒸散发量分别以每 10 a 约 0.21 mm 和 0.69 mm 的速率呈减少趋势,且趋势大于降水量增加趋势;冬季多年平均潜在蒸散发量为 116.9 mm,以每 10 a 约 0.13 mm 的速率增加,趋势也略大于降水量增加趋势。

3.2 干旱事件识别及干旱指数适用性评价

基于子牙河流域各栅格降水和蒸散发值,计算了 2001—2021 年流域逐月季尺度 SPEI 和 SEDI 值,如图 3 所示。可以看出,2001—2021 年两个指数均显示出流域干旱发生频率较高,但各年干旱持续时间略有不同,SEDI 识别的干旱程度明显低于 SPEI,持续时间相对较短。两个指数整体上分别以 8.5×10^{-5} 和 1.6×10^{-4} 的速率增大,都表明 2001—2021 年流域干旱程度逐渐减轻。不同代际之间的变化趋势略有差异,两个指数在 2001—2010 年分别以 2.2×10^{-4} 和 1.9×10^{-4} 的速率增大,表明 2001—2010 年流域干旱程度逐渐减轻,这与周丹等^[28]的研究结果一致。但 2011—2021 年两个指数分别以 7.1×10^{-5} 和 2.9×10^{-5} 的速率减小,表明流域干旱程度逐渐加重。

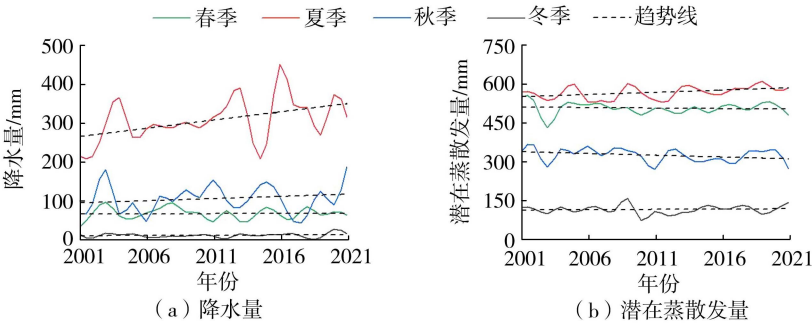


图 2 子牙河流域降水量和潜在蒸散发量变化趋势
Fig. 2 Trends of precipitation and potential evapotranspiration of the Ziya River Basin

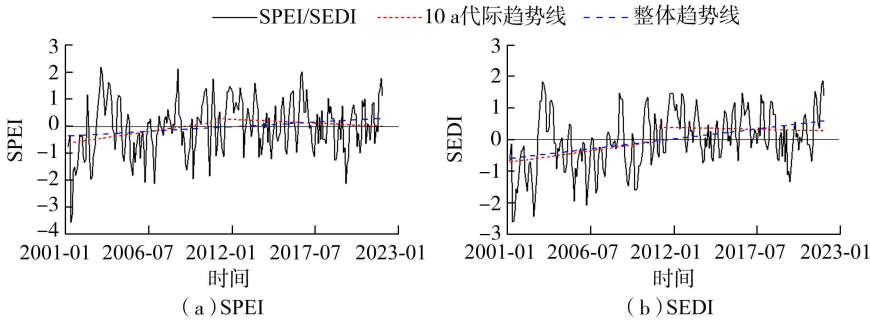


图 3 2001—2021 年 SPEI 和 SEDI 时间序列变化趋势
Fig. 3 Time series trends of SPEI and SEDI from 2001 to 2021

2001—2021 年 SPEI 和 SEDI 识别的子牙河流域干旱等级空间分布如图 4、5 所示。综合图 3 ~ 5 的识别结果,通过选取的干旱事件记录评价两个干

旱指数的适用性。从图 4、5 中可以看出,2001 年春夏连旱中,SPEI 和 SEDI 均识别出连续干旱,且在 6、7 月达到旱情高峰期,干旱范围覆盖全流域,而后干

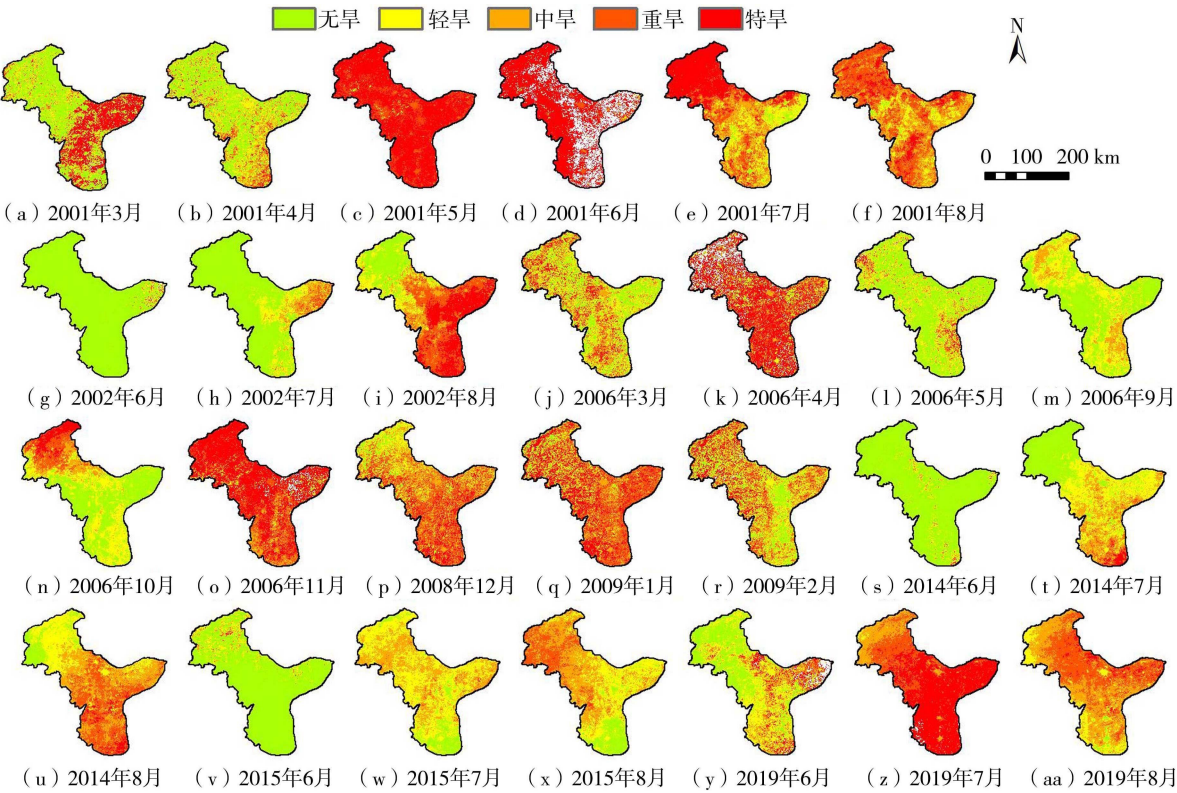


Fig. 4 Spatial distributions of drought grade identified based on SPEI

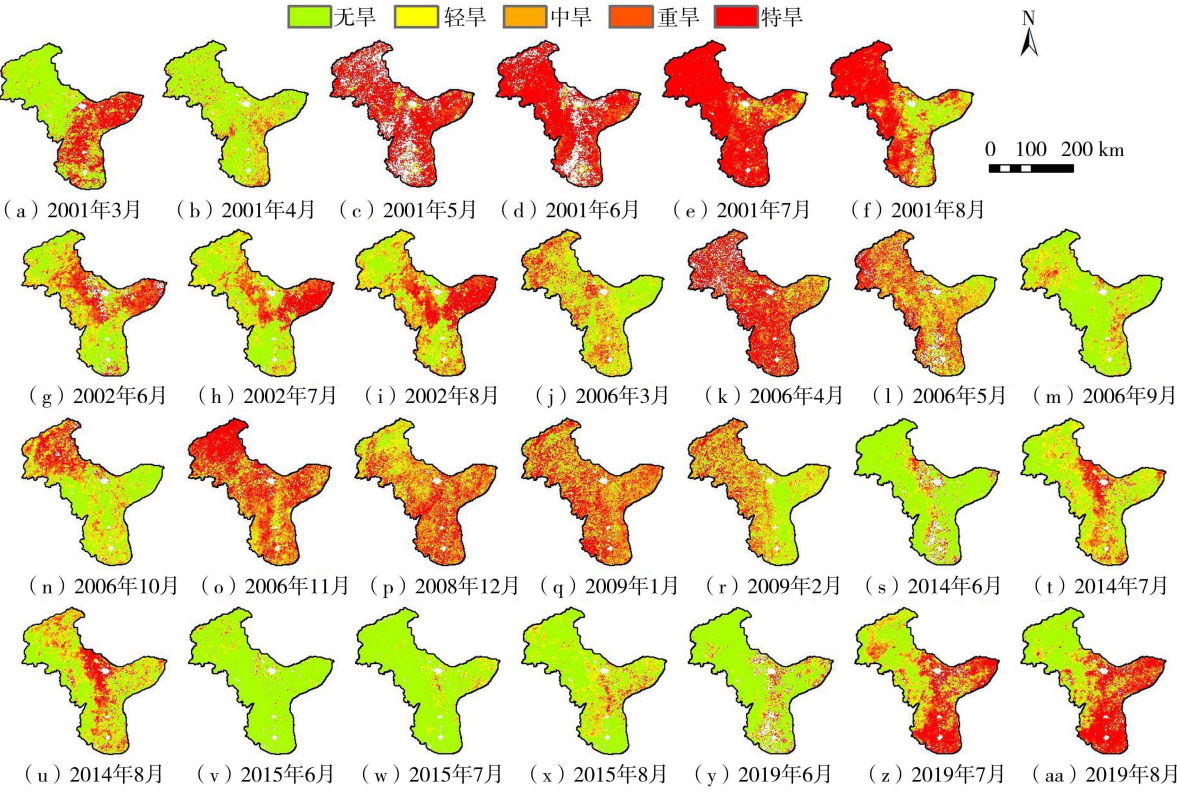


Fig. 5 Spatial distributions of drought grade identified based on SEDI

旱程度逐渐减轻,表明从春季到夏季,部分地区旱情出现逐渐缓解的情况,与历史旱情记录相符。2002 年夏旱中,SEDI 识别出 7 月干旱范围相对更为准确,监测到了石家庄市的严重干旱情况;对于 8 月份流域内河北地区旱情,SPEI 监测到的干旱范围更符合旱情记录,邢台、邯郸市等地存在重旱区域。对于 2006 年春旱,SPEI 和 SEDI 对旱情发展过程和程度的识别较准确,均捕捉到了 4 月全流域的重旱;对于 5 月的旱情,SEDI 捕捉到的旱情缓解速度相对缓慢,SEDI 对秋旱发生时间识别较为准确,10 月秋旱露头,11 月持续发展,而后逐渐缓解,与实际记录时间较为相符;相对而言,SPEI 识别的干旱程度更为严重,可能是严重偏少的降水量对 SPEI 产生的影响。2008 年冬旱中,SPEI 和 SEDI 的识别结果基本一致,12 月旱情开始,1 月旱情较重,2 月旱情逐渐缓解,干旱程度和范围均与实际旱情记录相符。2014 年夏旱,7 月旱情开始,8 月旱情程度逐渐加重,SEDI 识别的 8 月干旱程度为轻旱,SPEI 识别的干旱程度为中旱,SPEI 识别的干旱范围大于 SEDI,而 SEDI 识别到流域中部存在重旱,与气候公报描述的情况相同,但干旱范围较小,SPEI 识别结果与旱情描述更为接近。对于 2015 年夏旱,SEDI 未识别到该时间段内流域整体旱情,SPEI 对忻州市和河北省西南部的干旱监测相对较为准确,但对忻州市干旱程度识别较轻。对于 2019 年夏旱,两个指标的结果也有较大差异,SEDI 识别的干旱发生在河北省部分区域,且干旱程度较严重,SPEI 则识别了流域内河北和山西省的旱情,但由河北省 2019 年度气候公报和 2019 年山西省气候公报可知,流域内山西省

不存在大范围旱情,而衡水、邯郸和邢台市等地均存在较严重旱情,与 SEDI 识别的干旱范围及程度较为一致。

SPEI 和 SEDI 对干旱事件识别效果得分如表 1 所示,两个指数对干旱事件的识别都存在一定的偏差,SPEI 和 SEDI 识别准确率分别为 81.5% 和 74.1%,应用遥感蒸散发数据的 SPEI 和 SEDI 基本能反映子牙河流域的历史干旱分布与趋势。SPEI 在子牙河流域的适用性更好,在夏旱的识别中效果略优于 SEDI,这与王素萍等^[8]对 SPEI 指数适用性的研究结果一致,SPEI 对中国北方夏旱有较强的识别能力。

表 1 SPEI 和 SEDI 对不同干旱事件的识别效果得分

历史干旱	得分	
	SPEI	SEDI
2001 年春旱	3	3
2001 年夏旱	3	3
2002 年夏旱	1	2
2006 年春旱	3	2
2006 年秋旱	3	3
2008 年冬旱	3	3
2014 年夏旱	2	1
2015 年夏旱	2	0
2019 年夏旱	2	3

3.3 干旱时间序列变化分析

3.3.1 干旱季节变化趋势

采用适用性较好的 SPEI 指数,结合 Sen 斜率估计和 M-K 检验法分析 2001—2021 年子牙河流域各季节 SPEI 变化趋势(图 6)。由图 6 可以看出,春、夏、秋季 SPEI 呈上升趋势,冬季 SPEI 呈下降趋势,

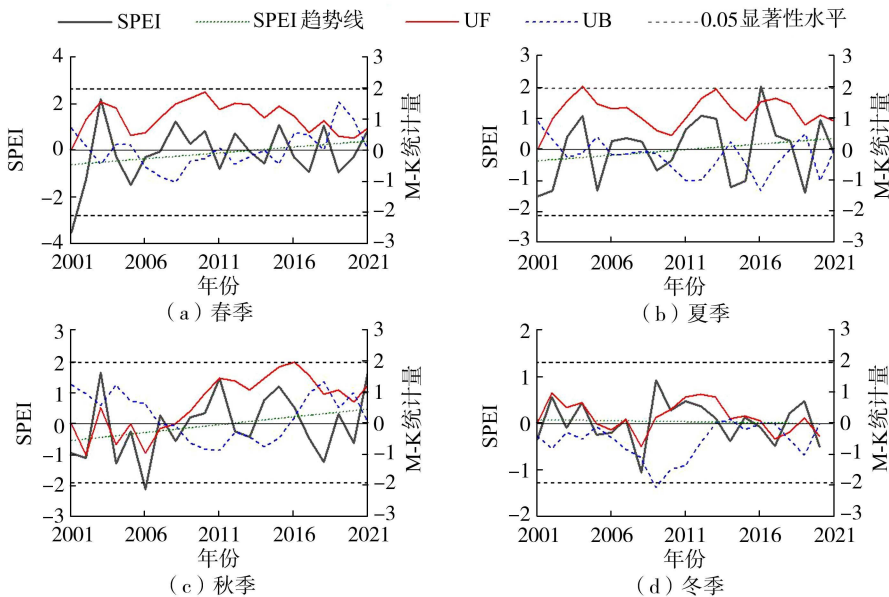


图 6 SPEI 季节变化趋势及其 M-K 检验结果

Fig. 6 Variation trends of SPEI in different seasons and results of M-K test

2008 年是冬季最干旱的年份,其 SPEI 值为-1.05。这与四季降水量均呈增加趋势相关,而冬季潜在蒸散发量增长趋势大于降水量。4 个季节 M-K 检验的 UF 曲线始终在 0.05 显著性水平的临界线之间,说明均无显著变化趋势;UF 与 UB 曲线交点均在临界线之间,表明研究期内不同季节变化趋势存在突变年份节点。

3.3.2 干旱面积变化

基于 2001—2021 年的季尺度 SPEI 栅格数据,分别统计不同季节各等级干旱面积占比,如图 7 所示。各季节逐年干旱面积占比呈现波动变化,说明流域内干旱发生较为频繁,较多年份存在大范围季节性干旱,印证了部分历史旱情记录。2005 年和 2019 年春季干旱面积占比分别为 72.7% 和 67.7%;夏季干旱面积占比较大的年份最多,2001 年和 2019 年干旱面积占比分别达到了 98.2% 和 98.0%;秋季干旱中 2006 和 2018 年干旱面积占比较高,分别为 95.7% 和 91.4%;冬季干旱中 2008 年干旱面积占比达到 74.4%。就不同等级干旱面积占比而言,轻旱和中旱面积占比较高,但干旱较严重季节中的重旱和特旱面积占比也较高,如 2001 年和 2019 年夏旱中重旱面积占比分别为 45.4% 和 38.8%,2006 年秋旱和 2005 年春旱中特旱面积占比分别达到 57.8% 和 30.0%。

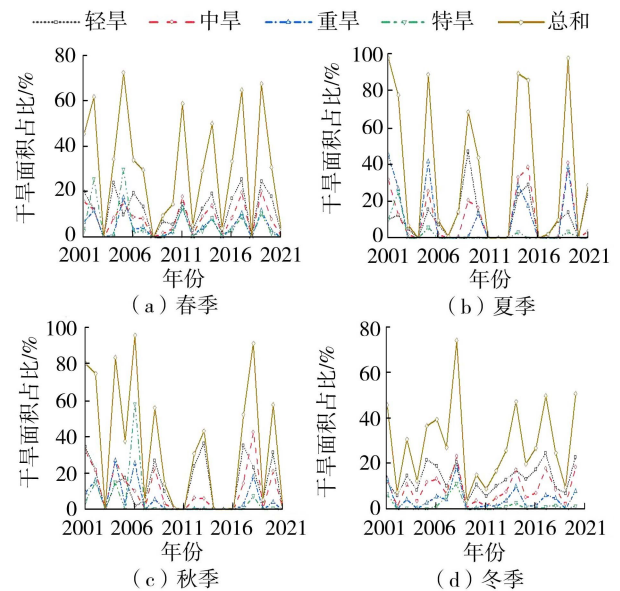


图 7 不同季节各干旱等级面积占比

Fig.7 Area proportions of different drought grades in different seasons

3.4 干旱空间特征分析

3.4.1 干旱空间变化趋势

2001—2021 年子牙河流域不同季节 SPEI 变化趋势如图 8 所示,不同变化趋势区域的面积占比见

表 2。春季和冬季 SPEI 呈下降趋势的区域面积占比分别为 39.3% 和 55.3%,冬季 6.2% 的区域呈显著下降趋势,主要分布在流域西北部五台县、盂县及周边区域,干旱程度增大趋势显著;夏季和秋季 SPEI 呈上升趋势,面积占比分别达到 94.3% 和 97.6%,干旱程度不显著下降,夏季流域东南部邯郸市部分区域 SPEI 呈下降趋势,存在干旱化趋势,而秋季衡水市少量区域存在干旱化趋势。

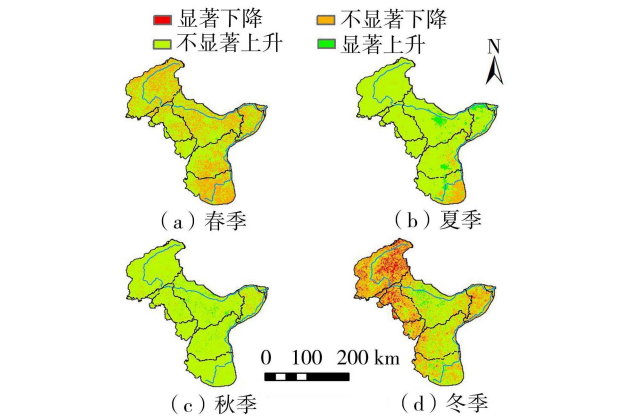


图 8 不同季节 SPEI 变化趋势

Fig.8 SPEI variation trends in different seasons

表 2 不同 SPEI 变化趋势面积占比

Table 2 Proportion of drought areas with different SPEI trends

季节	面积占比/%			
	显著下降	显著上升	不显著下降	不显著上升
春季	0	0.6	39.3	60.1
夏季	0.1	4.0	5.6	90.3
秋季	0	1.9	2.4	95.7
冬季	6.2	2.2	49.1	42.5

3.4.2 干旱特征变量空间分布

根据各栅格 SPEI 统计的干旱次数(图 9),2001—2021 年子牙河流域干旱发生总场次在 10 ~ 26 次之间,各区域平均干旱场次为 18 次,大部分区域干旱场次在 17 ~ 20 次之间。干旱场次低于 15 次的区域主要分布在石家庄、忻州市的部分区域和流域东北部衡水市的零星区域;而干旱频次较高的区域相对集中在流域西南部,主要分布在晋中市的昔阳县和邢台市的部分区域以及流域内邯郸市西北部的零散区域,干旱场次最高 25 次,干旱较为频繁。

根据流域各栅格 SPEI 统计的干旱历时(图 9),2001—2021 年子牙河流域干旱平均持续时间为 2.7 ~ 8.5 月,流域多年平均干旱历时为 4.0 月,流域大部分区域平均干旱历时为 3.5 ~ 4.5 月。干旱历时为 4.5 月以上的区域集中分布在石家庄市西部区域、阳泉和忻州市的部分区域;流域内衡水市南部区域、邢台和邯郸市中部部分区域的干旱历时集中在 2.7 ~ 3.5 月,平均历时较短。最大干旱历时分布

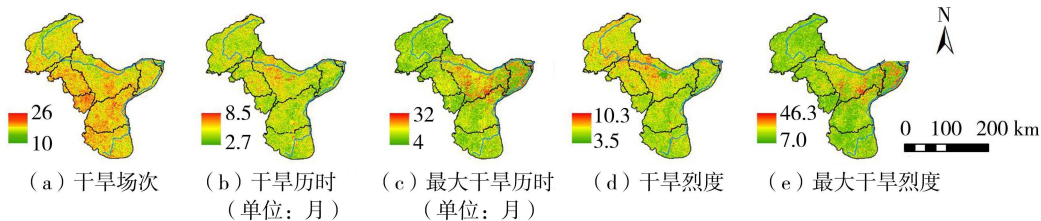


图9 2001—2021年子牙河流域干旱特征变量空间分布

Fig.9 Spatial distribution of drought characteristic variables in the Ziya River Basin from 2001 to 2021

与平均干旱历时分布较为一致,石家庄和衡水市部分区域的最大干旱历时值超过15月,表明流域东北部存在发展过程较长的区域性干旱。

流域大部分区域多年平均干旱烈度为4.5~5.5,干旱烈度大于6.0的区域集中在石家庄市西部的部分区域和忻州市小部分区域,最大干旱烈度值相对集中在12.0~16.0之间,干旱烈度大于25.0的区域也较集中分布在石家庄和衡水市的部分区域。

虽然干旱次数、干旱历时、干旱烈度空间分布差异明显,但干旱历时与干旱烈度具有很好的正相关性,这表明随着干旱持续时间增加,受灾面积可能会增大^[21],并且随着干旱历时和干旱烈度增大,极易发生极端长历时干旱事件。流域内各区域也显示出不同的干旱特征,西北部忻州和阳泉市部分区域、石家庄市西部区域和衡水市北部区域,干旱特征表现为次数少、历时长、烈度大;东部邯郸和邢台市、衡水市南部区域、石家庄市东部区域,干旱特征表现为次数多、历时短、烈度小。

3.5 讨论

本文通过高时空分辨率蒸散和降水数据计算了2001—2021年子牙河流域的SPEI和SEDI栅格序列,并分析了干旱时空变化特征。研究结果表明,2001—2021年子牙河流域年际及春、夏、秋季均呈干旱减缓趋势,与赵安周等^[20,25,29]的研究结果类似,且空间格局上呈显著干旱化的区域占比也较少。究其原因,子牙河流域2001—2021年四季降水均呈增加趋势,潜在蒸散发量呈相对减少趋势,气象条件缓解了干旱的发生(图2)。在干旱较严重的时期和区域,多以中旱和重旱为主,尤其在夏季干旱中占比最高,与严登华等^[19]关于海河流域干旱特征的部分结论相一致。此外,流域内各区域干旱特征与地区的气候、地形密切相关,忻州和阳泉市以山地和丘陵为主,土壤蓄水能力较差,加之降水补给少,容易发生较大旱情,李娜等^[30]的研究结果也表明两市的干旱相对较强,石家庄市西部太行山地区与之情况相似。严登华等^[19]研究发现子牙河流域内邯郸、邢台市的平原区域属于干旱易发区,与本文研究结果较为一致。本文研究结果基于SPEI与SEDI指数对比

分析得到,但干旱指数的适用性与遥感数据精度、干旱指数计算方法及流域特性等相关,未来可结合其他监测数据和干旱指数对子牙河流域干旱特征进行深入研究。

4 结论

a. SPEI和SEDI均能识别子牙河流域的历史干旱分布与趋势,但SPEI对干旱事件识别准确率较高,适用性较好。

b. 2001—2021年子牙河流域SPEI整体呈上升趋势,冬季呈下降趋势。不同区域显示出不同的季节干旱变化趋势,冬季除流域中部的部分区域外,其他区域均表现为干旱化态势,尤其是忻州、阳泉市等地存在部分显著干旱化的区域,此外,春季流域普遍呈不显著干旱化的态势。

c. 2001—2021年子牙河流域各季节干旱面积占比呈现波动变化,部分年份存在大范围季节性干旱,夏、秋季干旱面积占比最高超过90%,大部分区域多处于轻旱和中旱,特旱面积占比在旱情较严重的年份较高,超过50%。

d. 2001—2021年子牙河流域各区域干旱发生总场次为10~26次,干旱历时为2.7~8.5月,流域多年平均干旱历时为4.0月,流域大部分区域多年平均干旱烈度为4.5~5.5。西北部忻州和阳泉市部分区域、石家庄市西部区域和衡水市北部区域,干旱特征表现为次数少、历时长、烈度大,应加强防范极端连季干旱事件发生的风险意识和应对措施;东部邯郸和邢台市、衡水市南部区域、石家庄市东部区域,干旱特征表现为次数多、历时短、烈度小,应建立干旱风险常态化防范机制,实时监测旱情,积极采取有效抗旱措施。

参考文献:

- [1] 屈艳萍,吕娟,苏志诚,等.抗旱减灾研究综述及展望[J].水利学报,2018,49(1):115-125. (QU Yanping, LYU Juan, SU Zhicheng, et al. Research review and perspective of drought mitigation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 115-125. (in Chinese))

- [2] 黄生志,黄强,王义民,等. 基于 SPI 的渭河流域干旱特征演变研究[J]. 自然灾害学报,2015,24(1):15-22. (HUANG Shengzhi,HUANG Qiang,WANG Yimin,et al. Evolution of drought characteristics in the Weihe River Basin based on standardized precipitation index [J]. Journal of Natural Disasters,2015,24(1):15-22. (in Chinese))
- [3] 肖祖香,朱双,罗显刚,等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):515-520. (XIAO Zuxiang,ZHU Shuang,LUO Xiangang,et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(6):515-520. (in Chinese))
- [4] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration Index[J]. Journal of Climate,2010,23(7):1696-1718.
- [5] 关不了,姜珊,赵勇,等. 海河流域干旱时空演变及其与气候因子的关系[J]. 水资源保护,2023,39(4):59-68. (GUAN Buliao,JIANG Shan,ZHAO Yong,et al. Spatial and temporal evolution of drought and its relationship with climate factors in the Haihe River Basin [J]. Water Resources Protection,2023,39(4):59-68. (in Chinese))
- [6] 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):50-56. (in Chinese))
- [7] 王卫光,黄茵,邢万秋,等. 基于 SPEI 的海河流域干旱时空演变特征及环流成因分析[J]. 水资源保护,2020,36(3):8-13. (WANG Weiguang,HUANG Yin,XING Wanqiu,et al. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics and circulation causes of drought in Haihe River Basin based on SPEI [J]. Water Resources Protection,2020,36(3):8-13. (in Chinese))
- [8] 王素萍,王劲松,张强,等. 多种干旱指数在中国北方的适用性及其差异原因初探[J]. 高原气象,2020,39(3):628-640. (WANG Suping,WANG Jinsong,ZHANG Qiang,et al. Applicability evaluation of drought indices in Northern China and the reasons for their differences[J]. Plateau Meteorology,2020,39(3):628-640. (in Chinese))
- [9] ANDERSON M C, HAIN C, WARDLOW B, et al. Evaluation of drought indices based on thermal remote sensing of evapotranspiration over the Continental United States[J]. Journal of Climate,2011,24(8):2025-2044.
- [10] BRÜMMER C, BLACK T A, JASSAL R S, et al. How climate and vegetation type influence evapotranspiration and water use efficiency in Canadian forest, peatland and grassland ecosystems [J]. Agricultural and Forest Meteorology,2012,153:14-30.
- [11] VICENTE-SERRANO S M, CAMARERO J J, ZABALZA J, et al. Evapotranspiration deficit controls net primary production and growth of silver fir: implications for Circum-Mediterranean forests under forecasted warmer and drier conditions[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2015,206:45-54.
- [12] ANDEREGG W R L, FLINT A, HUANG C Y, et al. Tree mortality predicted from drought-induced vascular damage [J]. Nature Geoscience,2015,8(5):367-371.
- [13] KIM D, RHEE J. A drought index based on actual evapotranspiration from the Bouchet hypothesis [J]. Geophysical Research Letters,2016,43(19):10277-10285.
- [14] VICENTE-SERRANO S M, MIRALLES D G, DOMÍNGUEZ-CASTRO F, et al. Global assessment of the standardized evapotranspiration deficit index (SEDI) for drought analysis and monitoring[J]. Journal of Climate,2018,31(14):5371-5393.
- [15] LIU Wenbin,SUN Fubao,SUN Shaobo,et al. Multi-scale assessment of eco-hydrological resilience to drought in China over the last three decades[J]. Science of the Total Environment,2019,672:201-211.
- [16] LI Jun,WANG Zhaoli,LAI Chengguang. Severe drought events inducing large decrease of net primary productivity in mainland China during 1982-2015 [J]. Science of the Total Environment,2020,703:135541.
- [17] 车少静. 海河流域旱涝时空变化特征研究[D]. 南京: 南京信息工程大学,2010.
- [18] 于晓彤. 子牙河流域气象干旱特征及对水文干旱的影响[D]. 北京: 中国地质大学(北京),2018.
- [19] 严登华,袁喆,杨志勇,等. 1961 年以来海河流域干旱时空变化特征分析[J]. 水科学进展,2013,24(1):34-41. (YAN Denghua,YUAN Zhe,YANG Zhiyong,et al. Spatial and temporal changes in drought since 1961 in Haihe River basin[J]. Advances in Water Science,2013,24(1):34-41. (in Chinese))
- [20] 赵安周,张安兵,王冬利,等. 海河流域干旱时空变化及驱动因素分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2021,29(4):859-872. (ZHAO Anzhou,ZHANG Anbing,WANG Dongli,et al. Spatio-temporal variation characteristics of droughts and its driving factors in the Haihe River Basin [J]. Journal of Basic Science and Engineering,2021,29(4):859-872. (in Chinese))

(下转第 70 页)

[33] 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))

[34] WANG Aihui, LETTENMAIER D P, SHEFFIELD J. Soilmoisturedrought in China, 1950-2006 [J]. Journal of Climate,2011,24(13):3257-3271.

[35] LIU Yi, ZHU Ye, REN Liliang, et al. Understanding the spatiotemporal links between meteorological and hydrological droughts from a three-dimensional perspective [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019,124(6):3090-3109.

[36] 邓翠玲,余敦先,张利平,等. 基于图像三维连通性识别方法的长江流域干旱事件特征[J]. 农业工程学报, 2021,37(11):131-139. (DENG Cuiling, SHE Dunxian, ZHANG Liping, et al. Characteristics of drought events using three-dimensional graph connectedness recognition method in the Yangtze River Basin, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering),2021,37(11):131-139. (in Chinese))

[37] 郑静,张虎. 2022 年长江流域水库群抗旱补水调度实践与思考[J]. 人民长江,2023,54(2):7-11. (ZHENG Jing,ZHANG Hu. Practice and consideration on drought relief joint operation of multi-reservoirs in Yangtze River Basin in 2022 [J]. Yangtze River,2023,54(2):7-11. (in Chinese))

(收稿日期:2023 - 10 - 03 编辑:施业)

(上接第 43 页)

[21] 曹永强,李可欣,任博,等. 基于 SPEI 的辽宁省气象干旱特征及驱动因素分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(5):28-36. (CAO Yongqiang, LI Kexin, REN Bo, et al. Characteristics and driving factors analysis of meteorological drought in Liaoning Province based on SPEI [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(5):28-36. (in Chinese))

[22] 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))

[23] 卢路,于赢东,刘家宏,等. 海河流域的水文特性分析[J]. 海河水利,2011(6):1-4. (LU Lu, YU Yingdong, LIU Jiahong, et al. Hydrological characteristics analysis of Haihe River Basin [J]. Haihe Water Resources,2011(6):1-4. (in Chinese))

[24] ZHU Wenbin, TIAN Shengrong, WEI Jiaying, et al. Multi-scale evaluation of global evapotranspiration products derived from remote sensing images: accuracy and uncertainty [J]. Journal of Hydrology,2022,611:127982.

[25] 马梓策,孙鹏,张强,等. 基于 MODIS 数据的华北地区遥感干旱监测研究[J]. 地理科学,2022,42(1):152-162. (MA Zice, SUN Peng, ZHANG Qiang, et al. Remote sensing drought monitoring of North China based on MODIS data [J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42 (1): 152-162. (in Chinese))

[26] PENG Shouzhong, DING Yongxia, LIU Wenzhao, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017 [J]. Earth System Science Data, 2019,11(4):1931-1946.

[27] WEI Jia, WANG Weiguang, HUANG Yin, et al. Drought variability and its connection with large-scale atmospheric circulations in Haihe River Basin [J]. Water Science and Engineering, 2021,14(1):1-16.

[28] 周丹,张勃,罗静,等. 基于 SPEI 的华北地区近 50 年干旱发生强度的特征及成因分析[J]. 自然灾害学报, 2014,23(4):192-202. (ZHOU Dan, ZHANG Bo, LUO Jing, et al. SPEI-based intensity characteristics and cause analysis of drought in north China during recent 50 years [J]. Journal of Natural Disasters,2014,23(4):192-202. (in Chinese))

[29] 赵舒怡,宫兆宁,刘旭颖. 2001—2013 年华北地区植被覆盖度与干旱条件的相关分析[J]. 地理学报,2015,70(5):717-729. (ZHAO Shuyi, GONG Zhaoning, LIU Xuying. Correlation analysis between vegetation coverage and climate drought conditions in North China during 2001-2013 [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70 (5): 717-729. (in Chinese))

[30] 李娜,霍治国,钱锦霞,等. 基于改进后相对湿润度指数的山西省气象干旱时空特征[J]. 生态学杂志,2019,38(7):2249-2257. (LI Na, HUO Zhiguo, QIAN Jinxia, et al. Spatiotemporal distribution of drought in Shanxi Province based on modified relative moisture index [J]. Chinese Journal of Ecology,2019,38(7):2249-2257. (in Chinese))

(收稿日期:2023 - 09 - 04 编辑:施业)