

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.049.

杨天增, 张洪波, 黎扬兵, 等. 北洛河流域气象干旱百年演化特征研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 187-198.

Yang Tianzeng, Zhang Hongbo, Li Yangbing, et al. Spatiotemporal Variations of Meteorological Drought in the Beiluo River Basin from 1915 to 2020[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 187-198.

北洛河流域气象干旱百年演化特征研究

杨天增¹, 张洪波^{1,2}, 黎扬兵¹, 王雨巍¹, 高文冰^{3,4}, 吕丰光¹

(1. 长安大学 水利与环境学院, 西安 710054; 2. 长安大学 水利部 旱区生态水文与水安全重点实验室, 西安 710054;

3. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 西安 710021; 4. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 西安 710021)

摘要: [目的] 揭示黄土高原典型区域百年尺度干旱演化特征, 与地貌类型耦合阐明气象干旱的时空变化规律, 进而为北洛河流域综合治理提供科技支撑。 [方法] 基于 1915—2020 年北洛河流域 1 km 分辨率的平均气温及降水数据, 计算了年际标准化降水蒸散指数 (SPEI), 并结合 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验、小波分析、反距离权重插值 (IDW) 等方法, 分析了流域内 100 余年不同地貌类型区的气象干旱时空演变特征。 [结果] (1) 北洛河流域降水量及平均气温的空间分布差异较大, 总体呈现东南向西北递减的特点; 降水量多呈条带状分布, 平均气温沿河道自上而下梯度增加, 上游区 (丘陵沟壑区) 降水量相对较少, 下游区 (阶地平原区) 平均气温相对偏高; (2) 1915—2020 年北洛河流域 SPEI-12 震荡明显, 干旱事件交替出现且弱减, 下降速率为 $-0.04/10\text{ a}$, 1942 年, 1990 年和 2010 年为旱势转折年, 并以 1990 年最为明显; 周期变化大致可从 1960 年分为两个时期, 之前以 10 a, 17 a 为主, 其后为 3 a, 7 a, 30 a 左右, 10 a 和 30 a 周期在不同时期干旱变化中起主导作用; (3) SPEI-12 的不显著下降趋势具有全域性且由东北向西南有增大趋势, 表明北洛河流域总体呈弱旱化发展; (4) 不同年代干旱事件发生频率差异较大, 1990s 重旱和特旱发生频率最高; 2000s 不同类型干旱事件发生的总频率最大, 其中上游区 (丘陵沟壑区) 和下游区 (阶地平原区) 可达 70%, 而中游区 (土石山林区和高原沟壑区) 约为 60%; (5) 不同类型干旱空间分布存在异质性, 轻旱发生频率有自南向北逐渐降低的趋势, 中旱发生频率与之相反。 总体来看, 北洛河流域上游区 (丘陵沟壑区) 易发生中旱, 下游区 (阶地平原区) 更易发生轻旱, 重旱高发区在流域内零散分布, 特旱的发生概率仅为 1.69%~2.10%。 [结论] 全球变暖引发的旱化趋势在黄土高原地区的影响客观存在, 北洛河流域不同地貌类型区气象干旱发生的高频类型略有差别, 未来应提升中下游地区的抗旱减灾能力。

关键词: 气象干旱; SPEI; 时空格局; 演化特征; 北洛河流域

中图分类号: P426.616

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0187-12

Spatiotemporal Variations of Meteorological Drought in the Beiluo River Basin from 1915 to 2020

Yang Tianzeng¹, Zhang Hongbo^{1,2}, Li Yangbing¹, Wang Yuwei¹, Gao Wenbing^{3,4}, Lyu Fengguang¹

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Eco-hydrology and Water Security in Arid and Semi-arid Regions, Ministry of Water Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Exploration and Development

Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710021, China; 4. National Engineering Laboratory for Exploration & Development of Low Permeability Oil/Gas Fields, Xi'an 710021, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to reveal the century-scale drought evolution characteristics in typical areas of the Loess Plateau, couple with landform types to clarify the spatiotemporal variation of meteorological drought, and provide scientific and technological support for the comprehensive management

收稿日期: 2022-10-31

修回日期: 2022-11-16

资助项目: 国家自然科学基金 (51979005); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2022JC-LHJJ-03)

第一作者: 杨天增 (1998—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 2020129015@chd.edu.cn

通信作者: 张洪波 (1979—), 男, 辽宁康平人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源研究。E-mail: hbzhang@chd.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

of the Beiluo River Basin. [Methods] The annual standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) was calculated by using average temperature and precipitation data with a resolution of 1 km in the Beiluo River Basin from 1915 to 2020, and the spatiotemporal variations of meteorological drought in various land-form types were examined by using the Theil-Sen Median trend analysis, Mann-Kendall test, wavelet analysis, and inverse distance weighted interpolation (IDW). [Results] (1) The Beiluo River Basin's spatial distribution of temperature and precipitation was quite diverse, showing a general decreasing trend from southeast to northwest along with a top-to-bottom gradient distribution of temperature along the channel. The temperature was relatively high in the downstream area (terrace plain area) while there was comparatively little precipitation in the upstream area (the hilly-gully area). (2) Throughout the study period, the SPEI-12 of this basin changed dramatically, suggesting that drought occurrences appeared in cycles. Overall drought occurrences displayed the decreasing tendency in terms of quantity, with a decline rate of $-0.04/\text{decade}$. Among them, the trend turned in 1942, 1990, and 2010, with 1990 marking the biggest turning point. Drought cycle variations could be loosely separated into two periods: the period prior to 1960, when the primary cycles were the 10 years and 17 years, and the period following 1960, when the dominant cycles were the 3 years, 7 years, and 30 years. The 10-year and 30-year cycles predominated the basin drought fluctuations across the whole time span. (3) The reduction in SPEI-12 was increasing from the northeast to the southwest, indicating that the Beiluo River Basin was often experiencing weak drought. This decline was global, but not statistically significant. (4) In the time domain, the frequency of drought events varied substantially. The 2000 s could be seen the highest frequency of all types of drought events, with the upstream (hilly-gully area) and the downstream (terrace plain area) both reaching 70% and the midstream (rocky-mountain area and table-gully area) at about 60%. The 1990 s could be seen the highest frequency of severe and extreme drought. (5) Different types of droughts distributed differently. While the frequency of moderate droughts slowly rose from the south to the north, the frequency of mild droughts gradually reduced from the south to the north. In general, moderate droughts were more likely to occur in the upper parts of the Beiluo River Basin (the hills-gully area), whereas mild droughts were more likely to occur in the downstream sections (the terrace plain area). The probability of experiencing an acute drought was just 1.69 to 2.10% in the majority of the basin's high-incidence zones, which dispersed throughout the basin. [Conclusion] Drought trends caused by global warming have an objective impact on the Loess Plateau region. The high-frequency types of meteorological droughts in different geomorphic types of the Beiluo River Basin are slightly different. In the future, drought resistance and disaster reduction capabilities in the middle and lower reaches should be improved.

Keywords: meteorological drought; SPEI; spatial and temporal pattern; evolutionary characteristics; Beiluo River Basin

近年来,全球气候变化明显,气候变暖使得降水区域性加大,高温、洪涝、干旱等极端事件趋多、趋强^[1-2]。IPCC 在 2021 年发布的气候变化评估报告显示,当前的气候比工业化前变暖约 1.1°C ^[3]。世界气象组织(WMO)报告显示,自 2000 年以来全球干旱出现次数和持续时间增加了 29%。目前,全球气候变暖已导致我国干旱情势加重,旱灾造成的损失也在增加^[4]。国家气候中心(NCC)报告显示,我国 2022 年出现高温过程的综合强度为 1961 年有完整气象观测记录以来最强。生态环境脆弱的北洛河流域对气候变化敏感,同时又在大力开展退耕还林(草)^[5]。在

气候变化及植被恢复等活动的耦合作用下,区域干旱特征复杂性有所加剧,不确定与弱规律性相互交织,使科学认识流域气象干旱发展趋势与走向面临挑战,因此开展北洛河流域气象干旱时空分布与演化特征研究对流域“四预”建设与防灾减灾尤为重要。

当前,已有众多学者在黄土高原地区气象干旱的变化特征方面做了大量的研究工作。Wang 等研究发现黄河流域年际多尺度标准化降水蒸散指数(SPEI)以 $-0.148/10\text{ a}$ 的速率下降,夏季干旱频率及强度均占较大比重^[6]。田甜等计算了渭河流域 1960—2013 年各站点的 SPEI,发现 1990 年前后的

干旱发生频率差异较大^[7]。孙艺杰等基于 1960—2016 年黄土高原 59 个气象站点的逐日数据,认为较长时间尺度的 SPEI 对气候因子响应更明显^[8]。Gao 等利用分辨率为 0.5° 的 GCM 降尺度数据,发现在气候变化的影响下,2001—2050 年黄土高原呈现出暖湿趋势^[9]。师玉锋等通过分析计算黄土高原 1901—2017 年的 SPEI,认为中部地区轻旱、重旱发生频率较高^[10]。杨睿等利用 25 个气象站点 1980—2018 年月值气象数据集,基于多尺度 SPEI-PM 分析发现渭河流域以轻中旱为主,干旱站次比呈增加趋势^[11]。Liu 等基于黄土高原 1957—2012 年 54 个气象站点的实测数据,发现干旱频率在空间上由东南向西北递减,时间上冬季中期、春末夏初较高^[12]。Cai 等分析认为 1990s 渭河流域南北旱情出现反转^[13]。丁浩等基于 CanESM2 全球气候模式数据,分析了渭河流域在历史基准期与未来期在 2 种排放情景下的干旱时空演变特征^[14]。

梳理以上研究,不难发现当前研究多采用气象站点数据或通过插值获得网格数据来分析黄土高原气象干旱的变化特征。然而,由于部分气象站建立时间较晚或站点空间覆盖不足,常导致很多基于该数据序列的研究成果代表性较为欠缺,很难较为准确地反映流域/区域干旱的长期变化特征。而且,最新的研究成果表明^[15-17],人类活动对全球干旱风险的影响可能早在 19 世纪就已开始,全球气候历史记录中上次最明显的变暖也发生在 20 世纪上半叶,由此可见从百年尺度研究全球的干旱演化特征,认识气候变化和人类活动对区域干旱事件演化的影响正在成为干旱时空演化规律领域研究的新趋势。但是,由于黄土高原地区气候变化复杂且缺乏长期观测数据,人们很难捕捉到干旱事件变化的宏观时空规律,从而难以全面了解气候变异全球化演进过程对区域干旱事件的影响。因此,亟待从更长期的角度来看待强烈气候过渡期内冷暖变化对区域旱化过程的扰动,进一步理解现代气候变化,并形成未来变化和应对气候异常的新见解或新策略。另一方面,相对较低的分辨率网格数据多无法有效反映地形地貌对气候变化的影响,很难刻画干旱在小地理尺度上的精细化特征,对区域尺度的干旱演变和空间格局变化常无法做到有效表征。虽然有部分学者也考虑到了这两个方面,但研究尺度相对较大,对黄土高原区域应对干旱的指导意义不甚明显。

梳理有关北洛河流域的研究文献,不难发现大多数学者主要聚焦于土地利用^[18]、水沙演变^[5,19]及植被生态系统时空格局等^[20-21]方面,对长时间序列的气

象干旱演变与发展情势尚缺乏定量分析和研究。鉴于此,本文拟利用 1915—2020 年 1 km 高空间分辨率长时间序列的月尺度平均气温与降水数据,分析北洛河流域百余年 SPEI(SPEI-12)指标的时空变化,探讨不同地貌类型下流域气象干旱演化趋势、频率变化及其空间异质性,以期揭示气候变化及人类活动双重影响下的流域气象干旱在百年尺度的演化规律,同时为北洛河流域甚至黄土高原的水土流失治理和生态环境建设提供科学参考。

1 研究区概况及数据来源

北洛河全长 680 km,是渭河的一级支流,流域内梁峁起伏、沟谷纵横,从上游到下游,横跨多种地貌区^[22]。北洛河流域大陆性季风气候显著,年均气温 9.6℃,年均降水量 510~540 mm,主要集中在 7—9 月份。北洛河流域水资源匮乏,且时空分配不均,河川径流量主要来自中游^[23-24]。复杂的地形地貌条件以及水资源赋存状态,使得北洛河作为承载体的旱灾脆弱性较大,因此,厘清流域内气象干旱演化规律对流域农业生产和社会高质量发展意义重大。

本文所用的 1915—2020 年 1 km 分辨率平均气温及降水数据集^[25]来自“国家青藏高原科学数据中心”(http://data.tpdc.ac.cn),496 个独立气象观测点数据验证结果可信,目前已得到广泛应用^[26-29]。本文按水系分布及地貌特征将北洛河流域由上游至下游划分为 3 个不同的子区域进行研究,以使分析结果更具代表性,即上游区(丘陵沟壑区)、中游区(土石山林区和高原沟壑区)及下游区(阶地平原区),各分区覆盖范围如图 1 所示。

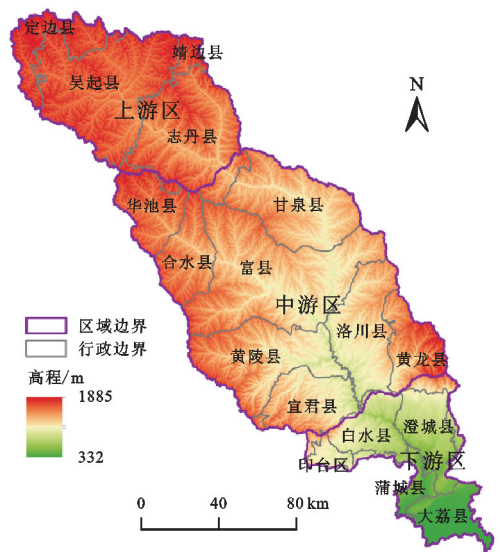


图 1 北洛河流域

Fig. 1 The Beiluo River Basin

2 研究方法

2.1 趋势分析

Theil-Sen Median 趋势分析对测量误差和离群数据不敏感,多用于长时间序列数据的斜率估计^[30]。计算公式如下:

$$\beta=\text{Median}\left(\frac{x_j-x_i}{j-i}\right),\forall j>i\quad(1)$$

式中: x_j 和 x_i 为时间序列数据。 $\beta>0$ 表示序列呈上升趋势;反之,呈下降趋势。Mann-Kendall(M-K)检验应用广泛^[31],本文用来进行趋势及变异检验。

2.2 潜在蒸散量计算

潜在蒸散量(PET)由采用月尺度计算的 Thornthwaite 方法得出^[7],具体过程^[32]如下:

$$\text{PET}=16.0\times\left(\frac{10\ T_i}{H}\right)^A\quad(2)$$

式中:PET 为月潜在蒸散量(mm/月); T_i 为月平均气温

($^{\circ}\text{C}$); H 为年热量指数; A 为常数。计算方式如下:

$$H=\sum_{i=1}^{12}H_i=\sum_{i=1}^{12}\left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514}\quad(3)$$
$$A=6.75\times10^{-7}H^3-7.71\times10^{-5}H^2+1.792\times10^{-2}H+0.49\quad(4)$$

当 $T_i\leq0^{\circ}\text{C}$ 时, $H=0$, $\text{PET}=0$ 。

2.3 SPEI 计算

标准化降水蒸散指数(SPEI)由 Vicente-Serrano 等^[33]提出,不仅能够有效地描述多时间尺度的水分亏缺,较为实际地反映气象干旱特征,而且相关数据容易获取、适用性强,计算过程见文献^[32]。不同时间尺度的 SPEI 可反映不同类型的干旱状况,年尺度 SPEI 变化相对稳定,能较好地体现干旱情势的年际演变规律^[8]。本文聚焦北洛河流域年际尺度的干旱情势演变,通过计算 SPEI-12 并分析其演化特征,依照《GB/T20481-2017 气象干旱等级》,按表 1 进行划分。

表 1 干旱等级划分

Table1 Classification of drought grades

无旱	轻旱	中旱	重旱	特旱
$-0.5<\text{SPEI}$	$-1.0<\text{SPEI}\leq-0.5$	$-1.5<\text{SPEI}\leq-1.0$	$-2.0<\text{SPEI}\leq-1.5$	$\text{SPEI}\leq-2.0$

3 结果与分析

3.1 降水量及平均气温变化特征

为初步解析全球变暖背景下北洛河流域的气候变化,首先分析降水量及平均气温的变化规律和分布格局。图 2 是北洛河流域百余年降水量及平均气温的年代际变化。由图 2A 可知,在统计期内,年降水量的变化范围是 355.2~805.6 mm(多年平均 530.7 mm),平均气温在 7.8~10.5 $^{\circ}\text{C}$ 间波动(多年平均 9.2 $^{\circ}\text{C}$),分别计算线性倾向率并采用 M-K 方法进行趋势检验,结果为 $-0.047\text{ mm}/10\text{ a}$ ($p>0.05$), $0.106^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ($p<0.01$),统计分析表明在年尺度上,

降水量不显著下降,而平均气温的上升趋势显著,说明整体上流域趋于暖干化,YAO 等^[34]用 1961—2008 年实测站点数据得到的研究结论与本文一致。从图 2B 容易看出,北洛河流域降水量的代际变化相对稳定,且呈现一定的宏观波动性。需要注意的是,20 世纪 60 年代数据分布较为分散,波动强烈,90 年代后流域降水量处于持续上升阶段,当前正处在丰水期。平均气温与降水变化在 20 世纪上半叶变化较为协同,表现为较为稳定的宏观波动,但 90 年代开始,北洛河流域的气温陡然增加,且保持在较高水平,已超出 20 世纪上半叶的温度波动范畴,表明北洛河流域的干旱威胁进一步加大。

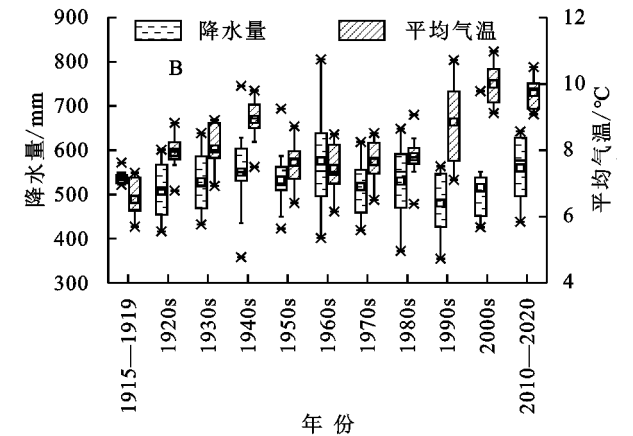
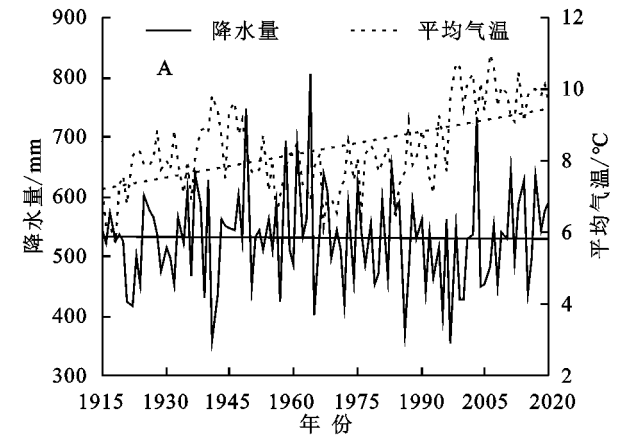


图 2 北洛河流域降水量及平均气温的年际(A)与代际(B)变化

Fig. 2 Interannual (A) and intergenerational (B) changes of precipitation and average temperature in the Beiluo River Basin

图 3 显示了北洛河流域多年平均降水及气温的空间分布。从流域整体看,降水量及平均气温的空间分布差异较大,但均呈现出“东南大西北小”的空间格局,高温伴随高降水,这对抑制干旱是有利的。其不同之处在于,降水量呈条带状分布,平均气温则从上

游至下游沿河道近似线性增加。从区域分布看,上游区(丘陵沟壑区)降水相对较少,下游区(阶地平原区)气温相对偏高,气候变化的异质性和不均衡的下垫面变化极有可能引发局地灾害。

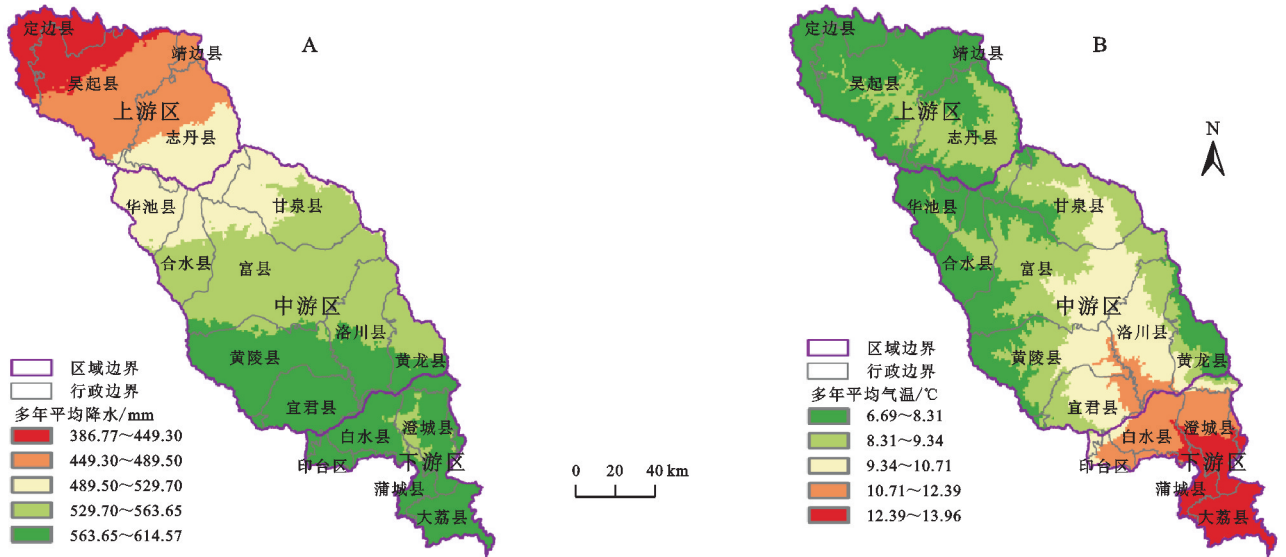


图 3 北洛河流域多年平均降水(A)及气温(B)的空间变化

Fig. 3 Spatial variation of annual mean precipitation (A) and temperature (B) in the Beiluo River Basin

3.2 年际 SPEI 指数变化特征

3.2.1 年际变化特征 图 4 为 1915—2020 年北洛河流域年际 SPEI 变化曲线,由图可知流域内上游区(丘陵沟壑区)、中游区(土石山林区和高原沟壑区)和下游区(阶地平原区)的 SPEI-12 均呈波动下降趋势,线性倾向率分别为 $-0.045/10\text{ a}$, $-0.037/10\text{ a}$ 和 $-0.042/10\text{ a}$,经 M-K 趋势检验后发现均未通过置信水平为 95%的置信检验。整体来看,北洛河流域及各区域的 SPEI-12 波动频繁,旱涝交替且有明显的阶段性特征,主要干旱时期集中在 1921—1942 年及 1991—2010 年,相对湿润年份集中在 1943—1990 年,且湿润年份离散程度较大。聚焦北洛河流域的 SPEI-12 变化(图 4D),可以发现其以 $-0.04/10\text{ a}$ 的速率呈非显著的下降趋势,说明 100 余年来北洛河流域干旱趋势逐渐加强,其中 1941 年(-2.15)及 1997 年(-2.16)干旱强度最大,表现为特旱;1964 年(2.65)湿润程度最大,表现为特涝。1941—1943 年是全国严重干旱灾害年^[35];1964 年北方地区特涝主要由春季和夏季特涝所致^[36];1997 年北方地区发生持续时间长、影响范围广、干旱程度重的夏秋连旱^[37]。与之对比可以发现,SPEI-12 在反映北洛河流域内旱涝的年际变化特征方面是保有优势的。

3.2.2 趋势与周期特征 图 5 为北洛河流域 SPEI-12

与累积距平变化曲线。可以看出,干旱演变大致经历了 3 个较为明显的阶段,累积距平在 1910s 中期到 40s 初(第 1 阶段)及 90s 至今(第 3 阶段)整体下降趋势明显,干旱强度逐渐增加;在 40s 到 80s(第 2 阶段)呈增加趋势,干旱强度逐渐减弱。其中,1942 年、1990 年和 2010 年为旱势转折年,并以 1990 年最为明显。总体来看,百年来北洛河流域呈现“湿润—干旱—湿润—干旱”的交替变化,气候逐渐由湿变干,年际变化特征明显,1970s,80s 相对湿润,90s 中期进入全面干旱时期,2010 年前后旱化触底且有返湿趋势。

采用 M-K 变异检验对北洛河流域的 SPEI-12 进行检验,结果如图 6 所示。已有研究表明,1990 年是渭河流域平均 SPEI 变异的开始^[7,38],结合累积距平变化曲线(图 5)可以发现流域 SPEI-12 在 1990 年发生显著变异,这一方面与中国 1990 年之后开始的全面变暖^[39]有关,另一方面也受到了北洛河流域 1990 年后的大规模土地利用改变等^[18]潜在影响。

为进一步探索北洛河流域气象干旱的时域变化特征,对 SPEI-12 序列进行小波分析,结果如图 7 所示。由小波系数实部图可以发现,北洛河流域的气候演化存在明显的干湿周期变化特征。小波方差图显示,SPEI-12 在 15 a 及 49 a 的时间尺度上出现 2 个明显峰值。当然,也可能存在由于时间序列有限

而无法检测到的更大主周期。其中,15 a(第一主周期)和 49 a(第二主周期)的时间尺度,分别对应 10 a 和 30 a 左右的周期变化。结合小波系数实部图可进一步将序列大致分为两个时期:1960 年前主要以 10 a,17 a 周期变化为主,其后则主要表现为 3 a,7 a,30 a 的周期变化。由此可知,北洛河流域干湿变化的

小周期是 10 a 左右、大周期为 30 a 左右,目前仍处于相对湿润状态。滕怀颐等^[40]所得结果与本文基本相符,刘宇等提出渭北黄土台塬区 SPEI-12 的平均变化周期为 4.8 a 和 8 a^[41],与本文研究结果比较接近,但所用时间序列长度较短,未能识别出更大时间尺度的周期。

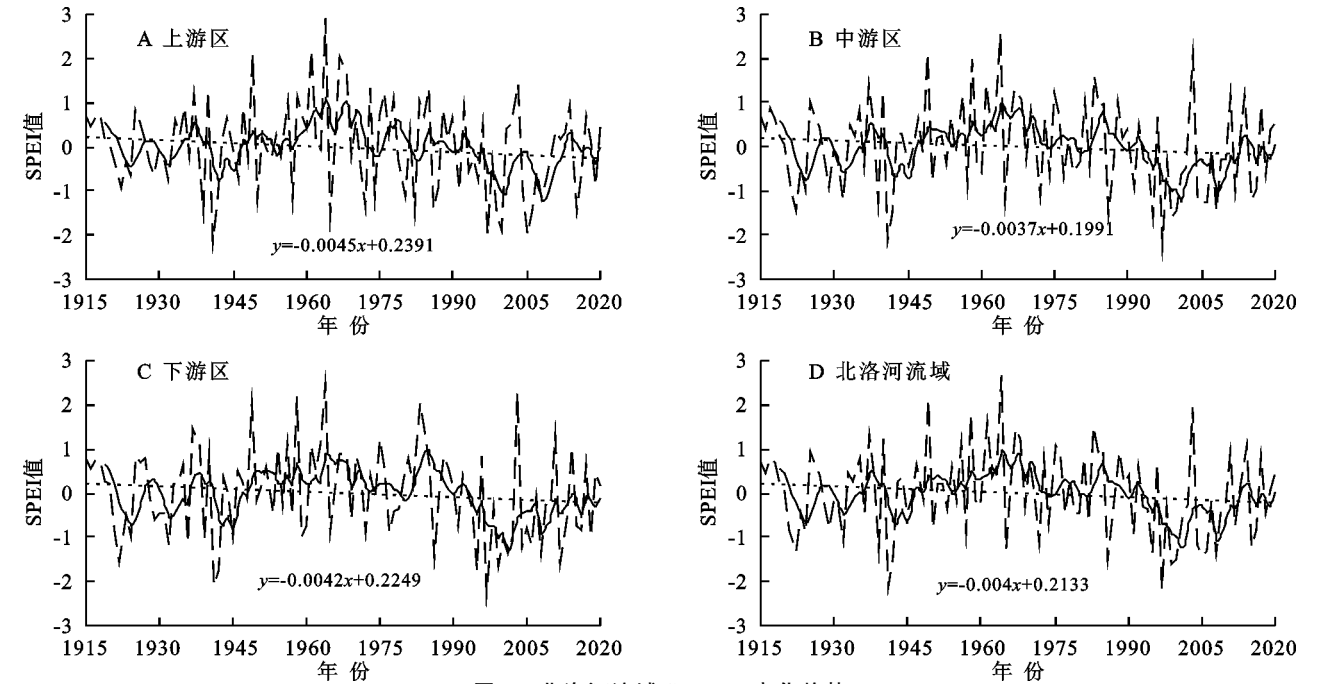


图 4 北洛河流域 SPEI-12 变化趋势

Fig. 4 Variation trend of SPEI-12 in the Beiluo River Basin

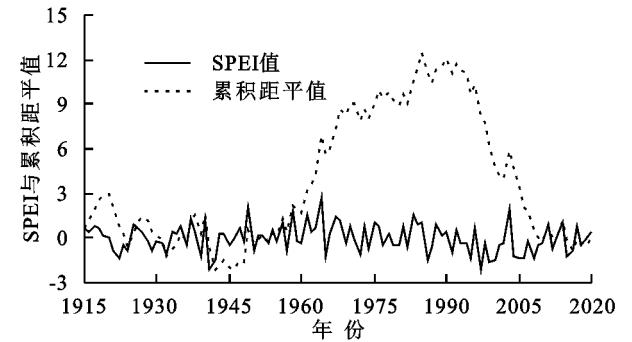


图 5 北洛河流域 SPEI-12 值及累积距平变化曲线
Fig. 5 SPEI-12 value and cumulative anomaly change curve in the Beiluo River Basin

3.2.3 空间变化特征 为了解 SPEI-12 变化趋势的空间分布,利用 Theil-Sen Median 方法对每个像元的年际 SPEI 序列进行趋势分析,并采用 M-K 趋势检验进行显著性检验,所得结果的空间分布如图 8 所示。由图可知,北洛河流域的 SPEI-12 呈现全域性的不显著下降趋势,趋势系数介于 $(-0.020\sim-0.067)/10\text{ a}$,即以干旱化趋势为主。SPEI-12 下降幅度整体上由东北向西南逐渐变大,具有明显的空间差异。其中,甘泉县、志丹县下降趋势相对较小,黄陵县、大荔县及定边县下降趋势更为明显。

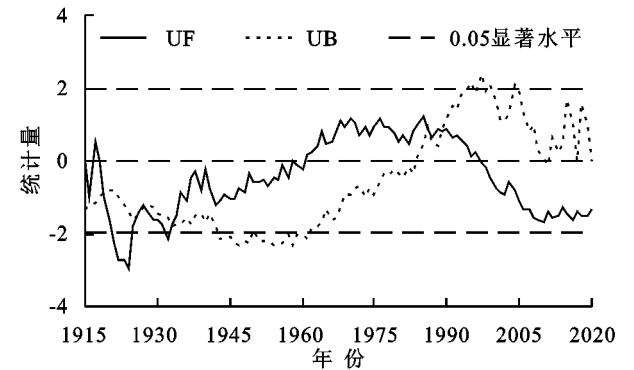


图 6 北洛河流域 SPEI-12 变异检验
Fig. 6 SPEI-12 variation test in the Beiluo River Basin

3.3 干旱频率时空变化特征

3.3.1 干旱频率时间变化特征 为厘清北洛河流域百余年间不同干旱事件的演化特征,依据 SPEI 等级划分标准(表 1),将不同类型干旱的频率分布与地貌类型进行耦合,并统计不同地貌类型区域的 SPEI-12 值,涉及上游区(丘陵沟壑区)、中游区(土石山林区和高原沟壑区)及下游区(阶地平原区),结果如图 9 所示。不难看出,北洛河流域不同地貌类型区的无旱频率为 70%左右,各区等级干旱发生的频率有所不同,如上游区易发生中旱,下游区更易发生轻旱。在

1915—2020 年统计期内,上、中、下游区同时发生特旱的有 1 a,占统计年数的 0.94%。中游区和下游区同时发生特旱,而上游区未发生也有 1 a 记录。综合分析表明北洛河流域轻旱发生频率 10.4%,中旱

发生频率 12.3%,重旱及特旱的发生频率大致为 1.9%,总干旱发生频率为 26.4%,这与李洁^[42]和杨睿^[11]等所得总干旱频率 26.4%~39.6%(1961—2013 年),32.25%(1980—2018 年)大致相符。

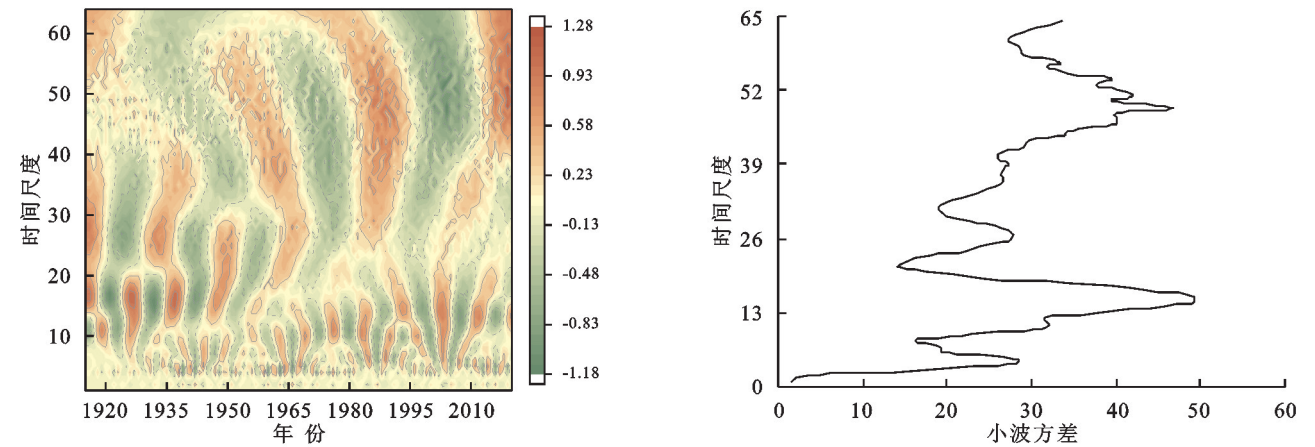


图 7 小波系数实部与小波方差

Fig. 7 Real part of wavelet coefficient and wavelet variance

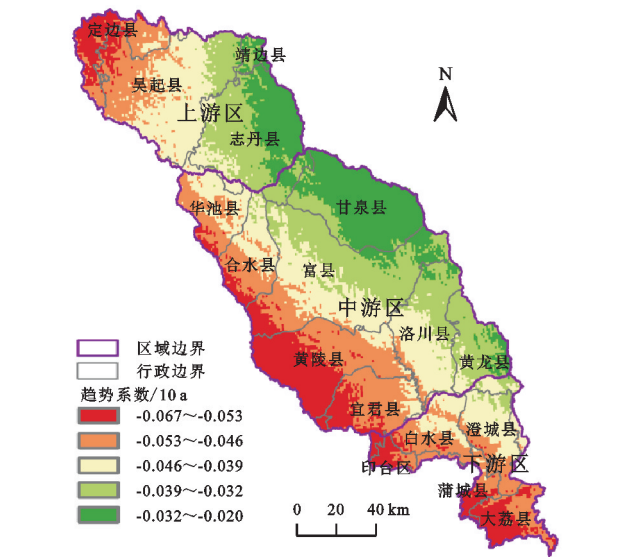


图 8 北洛河流域 SPEI-12 趋势空间变化

Fig. 8 Spatial variation of SPEI-12 trends in Beiluo River Basin

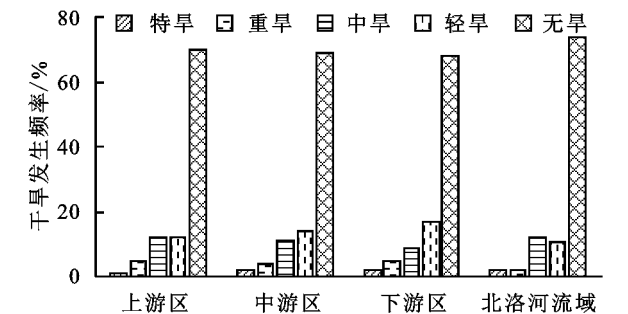


图 9 北洛河流域不同区域干旱发生频率

Fig. 9 The frequency of drought in different regions of the Beiluo River Basin

为进一步探究不同地貌类型区干旱发生频率的时间演变特点,统计了不同年代的干旱发生频率(图 10)。由图可知,不同年代的干旱发生频率差异较大,

其中 1915—1919 年北洛河流域相对湿润,各类型区均未发生干旱;1990s 流域重旱和特旱发生频率最高,重旱发生频率各类型区域均在 20%左右,特旱发生频率存在空间差异,全域约为 10%,与中、下游区相当;2000s 是北洛河流域干旱事件发生频率的高值区间,其中上游区和下游区最高(近 70%),中游区次之(约 60%)。

3.3.2 干旱频率空间变化特征 为探索不同等级干旱频率在流域空间上的分布规律,采用反距离权重插值法(IDW)进行空间插值,所得结果如图 11 所示。

由图可知,北洛河流域不同等级干旱发生频率的空间分布表现出较大的差异性。轻旱发生频率自南向北逐渐降低,而中旱发生频率与之相反,上游区(丘陵沟壑区)内志丹县大部、吴起县和定边县局部最高。重旱发生频率呈现零散的区域分布,中游区(土石山林区和高原沟壑区)内甘泉县及上游区(丘陵沟壑区)内定边县等地最高。特旱发生频率为 1.69%~2.10%,覆盖总面积的 94.3%,与其他等级干旱相比,高值分布区域及频率变化范围均较小,空间变异不明显。其中,发生频率最低的区域主要集中在上游区(丘陵沟壑区)吴起县及靖边县部分地区,而中游区(土石山林区和高原沟壑区)内黄陵县西部及上游区(丘陵沟壑区)吴起县东部发生特旱的频率最高。统计数据显示,总体上流域中下游区的干旱发生频率约为 31.53%~35.85%,而该区域人口密度较大、耕地面积较多,承载体脆弱性大,应予以重点关注。

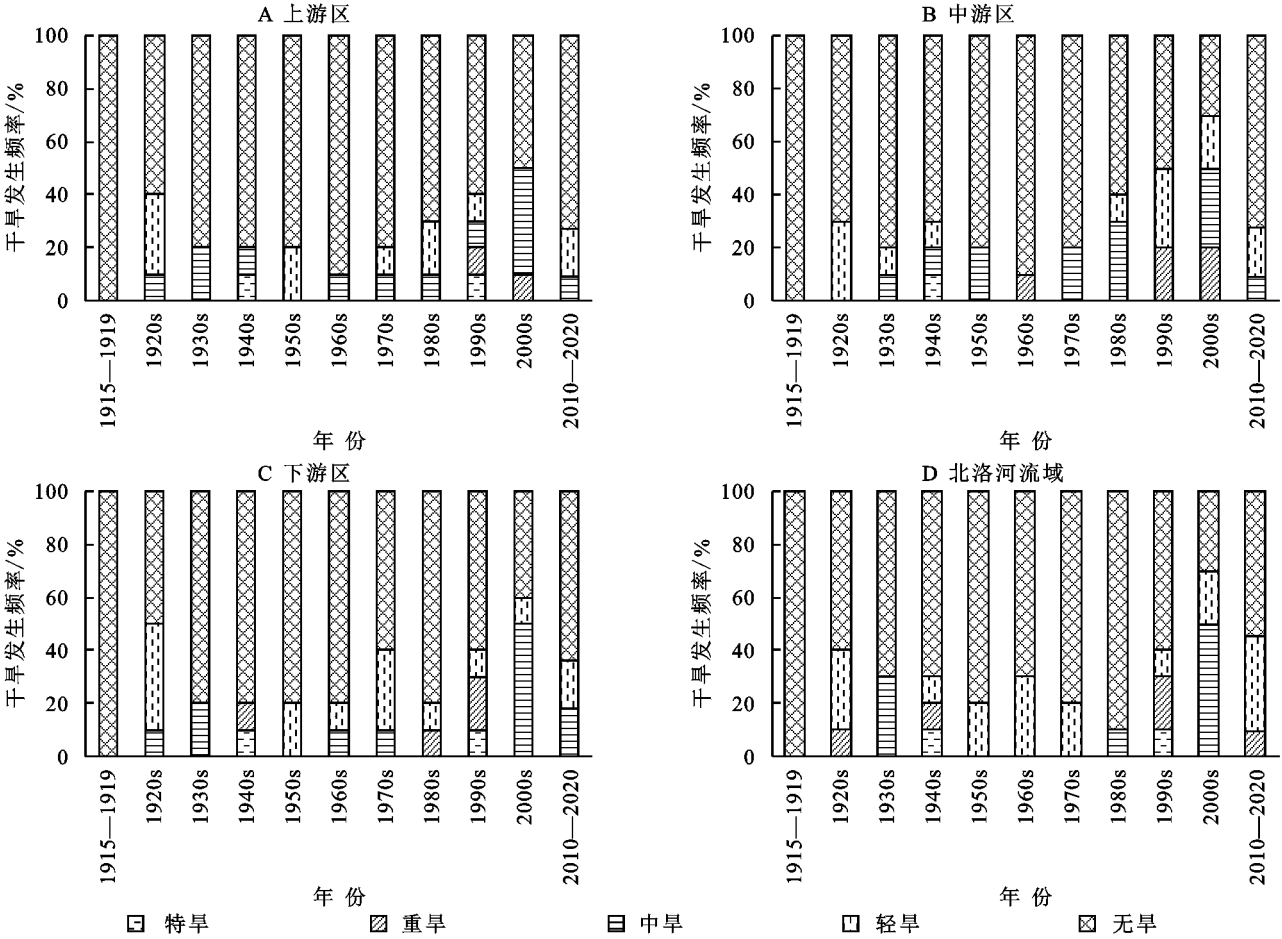


图 10 北洛河流域各区域不同时段各等级干旱发生频率

Fig. 10 The frequency of droughts of different grades in different periods in different regions of the Beiluo River Basin

4 讨论

由以上分析可以看出,北洛河流域年平均气温的代际变化与全球平均地表温度变化大致趋同,也呈现出自 20 世纪 60 年代开始的持续升温现象,体现了局部地区对全球变暖的响应。年平均降水量变化受局地气候条件与地形地貌影响,与全球变化相比存在一定差异。从 SPEI-12 反映的干旱事件百年演化趋势看,北洛河流域与全球的旱化趋势相一致,表现为持续的加重趋势。由此可见,全球变暖引发的旱化趋势在我国北方黄土高原的影响是客观存在的,且根据已有研究预测,气候变暖会驱动黄土高原区的温度与降水的双重变化,且旱化趋向可能更加明显^[43]。

本文在研究中使用了 Thornthwaite 方法来计算潜在蒸散量,虽然可能在一定程度上高估了干旱的趋势和强度,但从选取的典型年来看,SPEI 指标尚保有优势,所表征特征较为合理。其结果也能有效地从更长的时间尺度来挖掘北洛河流域气象干旱的演变特征,进而实现对区域干旱长期演化规律以及与全球旱化趋势协同响应的客观描述。

对比已有的区域研究可以发现,刘宇等^[41]基于

1969—2016 年气象站实测资料所得到的干旱频率分析结果与本研究区各等级干旱频率在空间分布上较为一致。杨睿等^[11]统计发现渭河流域年尺度干旱频率为 13.25%~24.15% (1980—2018 年),且以洛川站为核心的圆形区域干旱频率最高,孙洋洋的分析结果也表明中下游区干旱发生频率最大^[44],这与本文结果在空间位置上大体相符。因本文与已有研究所采用的统计数据在站点密度和序列长度上有所差异,故统计数值上略有不同。对比表明,尽管近年来北洛河流域的气温和降水表现出了较为明显的时空变化,但气象干旱事件的时空格局与发生频率并未发生非常显著的变化。当然,影响干旱演化趋势和空间异质性的因素很多,且事件发生与发展的物理机制均较为复杂,不同因素的贡献程度也还有待进一步研究。

5 结论

本文结合全球干旱化特征的研究尺度,以标准化降水蒸散指数(SPEI)为研究对象,开展了北洛河流域气象干旱百年尺度的时间演化特征研究,并透过与地貌类型的耦合,分析了流域气象干旱演化的空间格局及伴生特点。取得的具体结论如下:

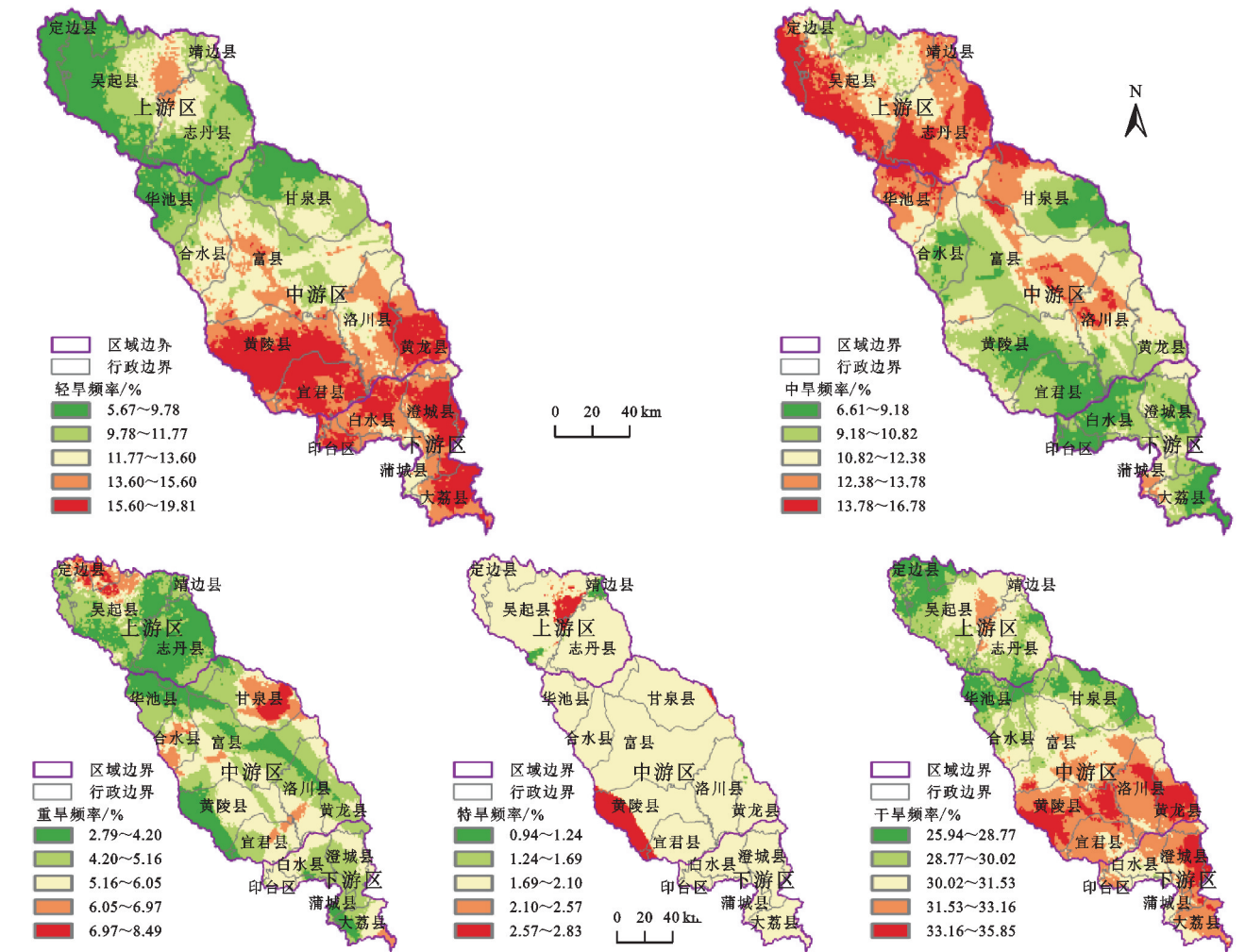


图 11 北洛河流域干旱频率空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of drought frequency in the Beiluo River Basin

(1) 1915—2020 年北洛河流域平均气温上升趋势显著,降水量呈不显著的下降趋势。从流域整体看,空间分布差异较大,但均呈现出东南部大于西北部;不同之处在于,降水量呈条带状分布,平均气温从上游至下游沿河道近似线性增加。从区域分布看,上游区(丘陵沟壑区)降水相对较少,下游区(阶地平原区)气温相对偏高,空间格局基本类似。

(2) 统计期内,北洛河流域及各类型区域 SPEI-12 波动震荡明显,但整体上呈减小趋势,说明流域干旱情势持续加剧。其中,1942 年、1990 年和 2010 年存在转折,且以 1990 年最为明显。北洛河流域的气候特点呈现为“湿润—干旱—湿润—干旱”的交替过程,主要干早期集中在 20 世纪 20、30 年代和 20 世纪 90 年代及 21 世纪 00 年代,相对湿润的年份主要集中在 20 世纪 40 年代至 80 年代。周期特征显示,北洛河流域气象干旱指数周期变化呈现分期性特征,即 1960 年前以 10 a, 17 a 周期震荡为主,1960 年后以 3 a, 7 a, 30 a 左右为主,其中 10 a 和 30 a 左右的周期

在不同时期气象干旱指数变化中起主导作用。

(3) 统计数据显示,北洛河流域 SPEI-12 呈不显著的下降趋势,且具有全域性,整体上表现为由东北向西南增加,下降趋势较大的区域主要分布在黄陵县、大荔县及定边县。从地貌类型上看,上游的丘陵沟壑区易发生中旱,下游的阶地平原区易发生轻旱。流域尺度上整体以轻中旱为主,轻旱发生频率 10.4%,中旱发生频率 12.3%,重旱及特旱频率约 1.9%,总干旱发生频率为 26.4%。

(4) 北洛河流域不同等级干旱发生频率的代际特征突出,且具有空间异质性。具体表现为 1990s 重旱,甚至特旱发生频率最高,2000s 干旱发生频率最大。轻旱发生频率呈现自南向北“逐渐降低”的趋势;中旱发生频率呈现自南向北“逐渐升高”的规律;重旱发生频率呈现零散的区域分布;北洛河流域发生特旱的频率为 1.69%~2.10%。

(5) 全球变暖引发的旱化趋势在我国黄土高原地区的影响客观存在,但并未引起北洛河流域气象干旱空

间格局和频率的显著改变。然而,随着全球变暖效应的累积与区域环境的改变,北洛河流域的旱化趋势在2010年前后被打破,此后是否会持续,值得关注。

参考文献:

- [1] 何霄嘉,王国庆,鲍振鑫.气候、植被变化与水文循环响应研究进展及展望[J].水资源与水工程学报,2016,27(2):1-5.
He X J, Wang G Q, Bao Z X. Progress and prospective of climate and vegetation coverage change as well as responses of hydrological cycle[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016, 27(2):1-5.
- [2] 姜彤,孙赫敏,李修仓,等.气候变化对水文循环的影响[J].气象,2020,46(3):289-300.
Jang T, Sun H M, Li X C, et al. Impact of climate change on water cycle[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(3):289-300.
- [3] 吴玉.联合国报告称气候变化影响“前所未有”[J].自然杂志,2021,43(5):342,373.
Wu Y. IPCC climate report: Earth is warmer than it's been 12500 years[J]. Chinese Journal of Nature, 2021, 43(5):342,373.
- [4] 马鹏里,韩兰英,张旭东,等.气候变暖背景下中国干旱变化的区域特征[J].中国沙漠,2019,39(6):209-215.
Ma P L, Han L Y, Zhang X D, et al. Regional characteristics of drought in China under the background of climate warming[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(6):209-215.
- [5] 谢剑,高鹏,穆兴民,等.近80年来北洛河流域径流变化特征及其归因分析[J].水土保持研究,2023,30(2):122-128.
Xie J, Gao P, Mu X M, et al. Variation characteristics of runoff in Beiluo River Basin over the past 80 years and its attribution analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2):122-128.
- [6] Wang F, Wang Z, Yang H, et al. Study of the temporal and spatial patterns of drought in the Yellow River basin based on SPEI[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61(8):1098-1111.
- [7] 田甜,黄强,郭爱军,等.基于标准化降水蒸散指数的渭河流域干旱演变特征分析[J].水力发电学报,2016,35(2):16-27.
Tian T, Huang Q, Guo A J, et al. Drought evolution characteristics in Wei River basin based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(2):16-27.
- [8] 孙艺杰,刘宪锋,任志远,等.1960—2016年黄土高原多尺度干旱特征及影响因素[J].地理研究,2019,38(7):1820-1832.
Sun Y J, Liu X F, Ren Z Y, et al. Spatiotemporal variations of multi-scale drought and its influencing factors across the Loess Plateau from 1960 to 2016[J]. Geographical Research, 2019, 38(7):1820-1832.
- [9] Gao X, Zhao Q, Zhao X, et al. Temporal and spatial evolution of the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in the Loess Plateau under climate change from 2001 to 2050[J]. Science of the Total Environment, 2017, 595:191-200. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.226>.
- [10] 师玉锋,梁思琦,彭守璋.1901—2017年黄土高原地区气候干旱的时空变化[J].水土保持通报,2020,40(1):283-289,325.
Shi Y F, Liang S Q, Peng S Z. Spatiotemporal variation of climate drought in Loess Plateau region during 1901—2017[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(1):283-289,325.
- [11] 杨睿,耿广坡,周洪奎,等.基于SPEI-PM指数的渭河流域气象干旱时空演变特征[J].中国农业气象,2021,42(11):962-974.
Yang R, Geng G P, Zhou H K, et al. Spatial-temporal evolution of meteorological drought in the Wei River Basin based on SPEI-PM[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, 42(11):962-974.
- [12] Liu Z, Wang Y, Shao M, et al. Spatiotemporal analysis of multiscalar drought characteristics across the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2016, 534:281-299.
- [13] Cai S, Zuo D, Xu Z, et al. Spatiotemporal variability and assessment of drought in the Wei River basin of China[J]. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2018, 379:73-82.
- [14] 丁浩,张洪波,张靖伽,等.基于CanESM2的渭河流域干旱演变特征研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2022,50(8):131-145,154.
Ding H, Zhang H B, Zhang J R, et al. Evolution characteristics of drought in the Weihe River Basin based on CanESM2[J]. Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.), 2022, 50(8):131-145,154.
- [15] Ljungqvist F C, Krusic P J, Sundqvist H S, et al. Northern Hemisphere hydroclimate variability over the past twelve centuries[J]. Nature, 2016, 532(7597):94-98.
- [16] Hegerl G C, Brönnimann S, Schurer A, et al. The early 20th century warming: anomalies, causes, and consequences[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2018, 9(4):e522.
- [17] Marvel K, Cook B I, Bonfils C J W, et al. Twentieth-

- century hydroclimate changes consistent with human influence[J]. *Nature*, 2019,569(7754):59-65.
- [18] 何亮.1980—2019年北洛河流域土地利用和土地覆被变化分析[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2020.
- He L. Land use and land cover changes in the Beiluo river basin from 1980 to 2019[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2020.
- [19] 谢敏,张晓明,赵阳,等.北洛河流域水沙变化对降雨和土地利用的响应[J].中国水利水电科学研究院学报,2019,17(1):39-44.
- Xie M, Zhang X M, Zhao Y, et al. The mechanism of response of runoff and sediment yield to precipitation and LUCC in Beiluohe River basin[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2019,17(1):39-44.
- [20] 梁冰洁.气候变化背景下的北洛河流域植被生态系统时空格局演变分析[D].郑州:郑州大学,2017.
- Liang B J. Analysis of spatio-temporal variation of vegetation ecosystem in Beiluo River Basin in the context of climate change[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.
- [21] 何亮,吕渡,郭晋伟,等.基于MODIS的北洛河流域植被盖度变化研究[J].人民黄河,2020,42(2):67-71,76.
- He L, Lyu D, Guo J W, et al. Study on vegetation coverage change of Beiluo River Basin based on MODIS [J]. *Yellow River*, 2020,42(2):67-71,76.
- [22] 薛帆,张晓萍,张櫓,等.基于Budyko假设和分形理论的水沙变化归因识别:以北洛河流域为例[J].地理学报,2022,77(1):79-92.
- Xue F, Zhang X P, Zhang L, et al. Attribution recognition of streamflow and sediment changes based on the Budyko hypothesis and fractal theory: A case study in the Beiluo River Basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(1):79-92.
- [23] 崔文艺,王武成.北洛河流域中上游水文特性分析及防洪减灾对策[J].陕西水利,2009,158(3):43-44.
- Cui W Y, Wang W C. Analysis of hydrological characteristics and countermeasures of flood control and disaster reduction in the middle and upper reaches of Beiluo River Basin[J]. *Shaanxi Water Conservancy*, 2009,158(3):43-44.
- [24] 黄河水资源保护科学研究院.北洛河流域综合规划环境影响报告书[R].郑州:黄河水资源保护科学研究院,2015.
- Yellow River Water Resources Conservation Research Institute. The Beiluo River Basin Comprehensive Planning Environmental Impact Report[R]. Zhengzhou: Yellow River Water Resources Conservation Research Institute, 2015.
- [25] 彭守璋.中国1 km分辨率逐月降水量数据集(1901—2020)[DS].国家青藏高原科学数据中心,2020.
- Peng S. 1-km monthly minimum temperature dataset for China (1901—2020)[DS]. National Tibetan Plateau Data Center, 2020.
- [26] Peng S, Ding Y, Wen Z, et al. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011—2100 [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017,233:183-194.
- [27] Peng S, Gang C, Cao Y, et al. Assessment of climate change trends over the Loess Plateau in China from 1901 to 2100[J]. *International Journal of Climatology*, 2018,38(5):2250-2264.
- [28] Peng S, Ding Y, Liu W, 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.
- [29] Ding Y, Peng S. Spatiotemporal trends and attribution of drought across China from 1901—2100[J]. *Sustainability*, 2020,12(2):477-493.
- [30] Al Buhairi M H. Analysis of monthly, seasonal and annual air temperature variability and trends in Taiz City-Republic of Yemen [J]. *Journal of Environmental Protection*, 2010,1(4):401-409.
- [31] 张姝琪,张洪波,辛琛,等.水文序列趋势及形态变化的表征方法[J].水资源保护,2019,35(6):58-67.
- Zhang S Q, Zhang H B, Xin C, et al. A method for characterizing trends and morphological changes of hydrological series [J]. *Water Resources Protection*, 2019,35(6):58-67.
- [32] 中华人民共和国国家标准.气象干旱等级:GB/T20481-2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- National Standard of the People's Republic of China. Meteorological drought grade: GB/T20481-2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [33] 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.
- [34] Yao Y B, Wang R Y, Yang J H, et al. Changes in terrestrial surface dry and wet conditions on the Loess Plateau (China) during the last half century [J]. *Journal of Arid Land*, 2013,5(1):15-24.
- [35] 董安祥,李耀辉,柳媛普.1941—1943年中国北方大旱的特点及其影响[J].干旱气象,2011,29(4):423-426,432.
- Dong A X, Li Y H, Liu Y P. Characteristics of extreme

- drought event occurred from 1941 to 1943 in North China and its influence[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2011, 29(4): 423-426, 432.
- [36] 胡子瑛, 周俊菊, 张利利, 等. 中国北方气候干湿变化及干旱演变特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(6): 1908-1919.
Hu Z Y, Zhou J J, Zhang L L, et al. Climate dry-wet change and drought evolution characteristics of different dry-wet areas in northern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(6): 1908-1919.
- [37] 宋家喜. 1997/98 年强厄尔尼诺现象及其对热带大气环流和我国重大气象、气候年际变化的影响[C]// 国减灾与新世纪发展战略: 首届“中国 21 世纪安全减灾与可持续发展战略高级研讨会”论文集. 北京: 气象出版社, 1998: 154-157.
Song J X. Strong El Niño Phenomenon in 1997/98 and its influence on tropical atmospheric circulation and major meteorological and climate interannual variations in China[C]// *China's Disaster Reduction and New Century Development Strategy: Proceedings of the First "Senior Seminar on China's 21st Century Security Disaster Reduction and Sustainable Development Strategy"*. Beijing: Meteorological Press, 1998: 154-157.
- [38] 周丹, 张勃, 任培贵, 等. 基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50 年干旱特征分析[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(4): 677-688.
Zhou D, Zhang B, Ren P G, et al. Analysis of drought characteristics of Shaanxi Province in recent 50 years based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(4): 677-688.
- [39] 赵嘉阳. 中国 1960—2013 年气候变化时空特征、突变及未来趋势分析[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
Zhao J Y. Changes and mutation in temperature and precipitation of China during 1960—2013 and future prediction[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.
- [40] 滕怀颐, 冯克鹏. 基于 SPEI 干旱指数的西北地区干旱时空分布[J]. *农业与技术*, 2021, 41(8): 887-893.
Teng H Y, Feng K P. Temporal and spatial distribution of drought in northwest China based on SPEI drought index[J]. *Agriculture and Technology*, 2021, 41(8): 887-893.
- [41] 刘宇, 李雯晴, 刘招, 等. 基于 SPEI 渭北黄土台塬区干旱时空演变特征[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(1): 109-117.
Liu Y, Li W Q, Liu Z, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of the drought in Weibei Loess Tableland Area based on SPEI[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(1): 109-117.
- [42] 李洁, 莫淑红, 沈冰, 等. 基于 SPEI 的渭河流域干旱特征分析[J]. *西安理工大学学报*, 2016, 32(1): 70-76.
Li J, Mo S H, Shen B, et al. Analysis of drought characteristics of the Weihe River Basin based on SPEI[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2016, 32(1): 70-76.
- [43] Miao L, Li S, Zhang F, et al. Future drought in the dry lands of Asia under the 1.5 and 2.0°C warming scenarios[J]. *Earth's Future*, 2020, 8(6): e2019 EF001337.
- [44] 孙洋洋. 渭河流域气象与水文干旱时空演变特征[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
Sun Y Y. Characteristics of temporal and spatial evolution of hydrological and meteorological drought in the Wei River Basin[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.

(上接第 186 页)

- [23] 胡彩虹, 管新建, 吴泽宁, 等. 水土保持措施和气候变化对汾河水库入库径流贡献定量分析[J]. *水土保持措施*, 2011, 25(5): 12-16.
Hu C H, Guan X J, Wu Z N, et al. Analysis for contribution of soil and water conservation and climate change to runoff in the upper reaches of Fenhe reservation[J]. *Chinese Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 12-16.
- [24] 胡彩虹, 王艺璇, 管新建, 等. 基于双累积曲线法的径流变化成因分析[J]. *水资源研究*, 2012(1): 204-210.
Hu C H, Wang Y X, Guan X J, et al. The causes of runoff variation based on double cumulative curve analysis method[J]. *Journal of Water Resources Research*, 2012(1): 204-210.
- [25] 穆兴民, 张秀勤, 高鹏, 等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J]. *水文*, 2010, 30(4): 47-51.
Mu X M, Zhang X Q, Gao P, et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology[J]. *Chinese Journal of Hydrological*, 2010, 30(4): 47-51.