doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.18.033

岷沱江流域气象-水文-社会经济干旱级联传播与响应特征

姚　宁[1]　陈欣怡[1]　卓　拉[2]　蒋昆昊[1]　李海亮[3]　李付静[4]

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 陕西杨凌 712100;
3. 银川市水利工程质量监督站, 银川 750004; 4. 甘肃省生态环境工程评估中心, 兰州 730030)

摘要: 干旱是破坏力强、经济损失严重的一类自然灾害,在较湿润地区发生频次不断增加,不同类型干旱交织,进一步威胁当地社会经济稳定发展。本研究基于岷沱江流域 2000—2020 年气象、水文和社会经济等数据,估算标准化降水指数(SPI)、标准化径流指数(SRI)和标准化供需水指数(SWSDI);采用游程理论、相关系数法(PCC)和收敛交叉映射法(CCM)分析气象水文干旱与社会经济干旱间的传播规律和响应关系。结果表明:月尺度 SPI 和 SRI 波动剧烈,干湿交替明显,识别出的干旱事件与历史干旱事件基本一致;在过去 21 年间,基于 SWSDI 识别出 14 次社会经济干旱事件,其中 2000、2001、2002、2003、2004、2006、2007、2008、2009 年干旱情况尤为严重。气象水文干旱和社会经济干旱在相关性和因果关系上具备季节特征,气象干旱和社会经济干旱的 PCC 和 CCM 结果均表现出大丰水期明显强于大枯水期。干旱传播主要以多场气象水文干旱引起社会经济干旱为主,且长历时气象水文干旱更易导致高强度社会经济干旱发生。

关键词: 气象干旱; 水文干旱; 社会经济干旱; 干旱传播; 岷沱江流域

中图分类号: P339　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)18-0385-10　　**OSID**:

Cascading Propagation and Response Characteristics of Meteorological - Hydrological - Socio-economic Drought in Mintuo River Basin

Yao Ning[1]　Chen Xinyi[1]　Zhuo La[2]　Jiang Kunhao[1]　Li Hailiang[3]　Li Fujing[4]

(1. *College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *College of Soil and Water Conservation Science and Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
3. *Yinchuan Water Conservancy Project Quality Supervision Station*, *Yinchuan* 750004, *China*
4. *Gansu Ecological Environment Engineering Assessment Centre*, *Lanzhou* 730030, *China*)

Abstract: Drought is a type of natural disaster with strong destructiveness and heavy economic losses. Its occurrence frequency is increasing continuously in relatively humid areas. The interweaving of different types of droughts further threatens the stable development of the local social economy. The standardised precipitation index (SPI), standardized runoff index (SRI) and the standardised water supply and demand index (SWSDI) were estimated based on meteorological, hydrological and socio-economic data in the Mintuo River Basin from 2000 to 2020. The run theory, correlation coefficient method (PCC) and cross-correlation method (CCM) were used to analyze the response relationship between meteorological drought and socio-economic drought. The results showed that the monthly scale SPI and SRI fluctuated violently, and the dry-wet alternation was obvious. The identified drought events were basically consistent with the historical drought events. In the past 21 years, totally 14 socio-economic drought events were identified based on SWSDI, among which the droughts in 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2006, 2007, 2008 and 2009 were particularly serious. Meteorological and hydrological drought and socio-economic drought had seasonal characteristics in correlation and causality. The results of PCC and CCM of meteorological drought and socio-economic drought showed that the large wet season was significantly stronger than the large dry season. Drought propagation was mainly characterized by multiple meteorological and hydrological droughts triggering socio-economic droughts, and long-duration

收稿日期: 2025-05-13　修回日期: 2026-02-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(52209070)、唐仲英基金会项目和甘肃省基础研究计划-软科学专项(22JR4ZA020)

作者简介: 姚宁(1988—),男,副教授,博士,主要从事作物生长对干旱时空变异响应研究,E-mail: yaoning@nwafu.edu.cn

meteorological and hydrological droughts were more likely to lead to high-intensity socio-economic droughts.

Key words: meteorological drought; hydrological drought; socio-economic drought; drought propagation; Mintuo River Basin

0 引言

干旱是一种反复出现、复杂、多维度的自然现象,发生在一系列时空范围内,对区域水循环和水平衡具有重大影响。干旱不仅给全球生态系统和社会经济造成巨大损失,还对正常供水、作物灌溉、社会环境以及人民生活质量产生重大影响[1-3]。干旱事件通常由降水不足引起,从而导致水分短缺。此外,工业发展和人口增长导致水资源需求增加也可能引起社会经济干旱[4]。由于人口增长和水需求增加,社会经济干旱已成为世界许多地区的主要问题[5]。因此,深入研究环境变化背景下社会经济干旱演变对经济发展和生态环境影响具有重要意义。

一般来说,干旱可根据物理和社会经济因素分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱,不同类型干旱均由水供需不平衡引起[6-7]。气象干旱通常作为开始阶段,一般指某个地区降水和蒸发量供需不平衡[8]。水文干旱是指径流或地下水资源低于正常水平;农业干旱是指由于土壤水分持续短缺而造成的作物水分亏缺,影响作物正常生长发育[9]。水资源供应主要通过河流流量或水库蓄水量衡量,社会经济干旱主要通过比较供水量和需水量量化[10]。为对干旱进行有效监测,并且能够更精确地评估和跟踪干旱事件的发展及其影响,学者开发了各种干旱指标描述不同类型干旱,如标准化降水指数(Standardized precipitation index, SPI)[11]、标准化土壤水分指数(Standardized soil moisture index, SSI)[12]、标准化径流指数(Standardized runoff index, SRI)[13]和归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)[14]等。其中,SPI 和 SRI 能描述不同时间尺度干旱特征,并有效地反映各区域和各时段的旱涝状况,在水文气象领域得到广泛应用。贾建伟等[15]使用 SPI 和 SRI 对鄱阳湖不同区域的干旱状况进行了评估,并探讨了干旱现象在时间和空间上演变规律;黄生志等[16]则运用 SPI 对渭河流域干旱的变化趋势和特征进行了分析。而近年来随着对社会经济干旱指标的构建,对社会经济干旱的理解也更进一步。描述社会经济干旱的指标主要包括多元标准化信度和恢复力指数(Multivariate standardized reliability and resilience index, MSRRI)[5]、社会经济干旱指数(Socioeconomic drought index, SEDI)[17]等,但这些指标构造复杂、数据需求量大、计算复杂。而 Wang 等[18]提出的标准化水供需指数(Standardized water supply and demand index, SWSDI),不仅能够揭示流域出水口控制站供水量与需水量间的联系,同时也更加客观和独立于研究区域,不要求研究区域内存在水库。

不同类型干旱之间有着复杂的联系,随着时间推移,一种干旱会成为另一种干旱的原因或者结果。干旱传播主要指不同类型干旱之间亏水信息的传递[19]。目前,对干旱传播的研究主要集中在气象、水文和农业干旱之间[19-21]。诸多国内外学者通过结合不同干旱指数和统计分析技术,对干旱传播机制进行了深入研究,重点探讨了干旱传播时长、传播可能性、触发干旱的临界值,以及干旱特征对环境变化的反应[22]。干旱传播时间通常由 2 类干旱的相关性分析得出[23]。有学者利用相关系数方法发现,黄河流域气象干旱到农业干旱之间的传播时间为 0~3 个月[24],珠江流域气象干旱到水文干旱之间的传播时间为 2~6 个月[25]。干旱传播时间也表现出一定的时空差异性,在勒拿河流域,季节性降水和蒸发的差异导致气象干旱向水文干旱的传播时间在雨季较短,而在旱季则显著延长[26]。黑河流域气象干旱向农业干旱的传播时间在灌溉季节和非灌溉季节也存在显著差异,上游地区的传播时间从灌溉季节的 9 个月增加到非灌溉季节的 11 个月,这种差异与灌溉用水季节性分配和土壤水分的动态变化有关[27]。Wang 等[28]利用 Copula 函数构建了标准化降水指数(SPI)和标准化水文指数(SSI)联合分布模型,从条件概率角度分析了不同程度气象干旱对水文干旱的传播概率和传播阈值,定量评估气象干旱与水文干旱之间的动态关系。这些研究表明,干旱传播具有聚集性特征,具体表现为强度衰减、时间滞后及范围延展。

综上所述,在气候变化背景下,研究干旱事件的传播和匹配至关重要,可为有效的干旱管理策略提供信息。长江流域作为我国经济的重要支柱区域,气候条件复杂多变,自然资源得天独厚,但同时也是干旱灾害的频发地带[29]。其中长江上游四川盆地在 1961—2015 年气象干旱发生频率总体呈升高趋势,同时高温、干旱事件在四川地区均呈增加趋势[30-31]。因此,本研究基于岷沱江流域 2000—

2020 年气象、水文和社会经济等数据，估算标准化降水指数(SPI)、标准化径流指数(SRI)和标准化水供需指数(SWSDI)，分析气象水文干旱和社会经济干旱的变化规律，同时对干旱事件进行匹配，全面分析气象、水文和社会经济干旱间的传播关系，以期为岷沱江地区干旱应对和社会经济发展提供科学依据。

1　研究区域与数据集

1.1　研究区域

岷沱江流域(28° ~ 34°N、99° ~ 106°E)是长江上游的一级支流，大部分位于中国四川省，小部分流经青海省和重庆市，流域面积为 1.688×10^5 km^2，涵盖岷江、沱江、青衣江、大渡河 4 条河流(图 1)。根据历年水资源公报统计，岷沱江流域总供水量占四川全省的 50% 左右，流域年均降水量 1 097 mm，年均水资源总量达到 1.052×10^{11} m^3。岷沱江流域流经的大中型城市较多，人口密集、工农业发达，丰富的自然资源和水能资源为流域辖区内城市社会经济发展和居民生活提供充足的物质保障[32]。

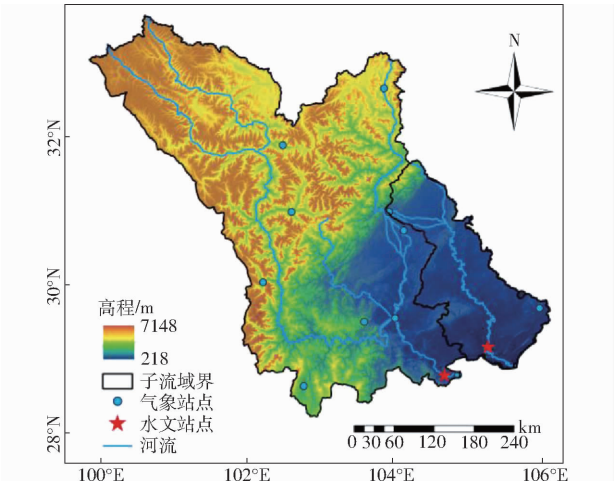

图 1　岷沱江流域地理位置及各站点分布图

Fig. 1　Geographical location and distribution of Mintuo River Basin

1.2　数据资料

气象数据来源于中国气象数据网，包括降雨量、平均气温、最高气温、最低气温、风速与日照时数等。SWAT(Soil and water assessment tool)模型中 DEM 数据来自地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)。土壤特性数据来自世界土壤数据库(HWSD v2.0)，该数据库提供了每个网格点的土壤类型、土壤相位、土壤物理和化学特性等信息。人口和社会经济数据来源于省份统计年鉴、水资源公报的发展数据，需水量计算定额以及地表水供水比例则来自长江流域水资源公报。需要说明的是，由于数据来源是以年为单位，所计算的需水量为年尺度数据，为保证供水量与需水量的对应关系，根据水库运行记录提取月度用水比例(1—12 月用水比例分别为 5.11%、3.83%、4.15%、6.19%、10.22%、11.12%、13.29%、12.79%、10.06%、11.84%、6.57% 和 4.82%)。

2　研究方法

2.1　标准化降水指数和标准化径流指数

McKee 最早在 1993 年构造出标准化降水指数(SPI)，是基于降水描述气象干旱的指数，用于描述科罗拉多州的干旱状况。SPI 指数是表征特定时期降水概率的指标，具有多时间尺度计算、计算方法简单、易于获取所需数据等优点，可用于长序列降水监测，在干旱相关研究中得到广泛应用[28,33]。SPI 计算原理是以某月的降水量为随机变量 x，计算某一时期降水的伽马分布概率和对伽马分布概率进行常态化标准化，并划分干旱等级[34]。SRI 类似 SPI 的计算，是对径流数据进行拟合。Gamma 分布能够有效地匹配流域内降水和径流数据序列[35]，概率密度函数 $f(x)$ 可表示为

$$f(x) = \frac{1}{\beta^{\gamma}\Gamma(\gamma)} x^{\gamma-1} \mathrm{e}^{-x/\beta} \tag{1}$$

式中　β——形状参数

　　γ——尺度参数

最佳 β、γ 估计值可采用极大似然估计法求得。根据 β、γ 得到降水累积概率，累积概率函数为

$$H(x) = q + (1-q)G(x) \tag{2}$$

式中　$G(x)$——累积概率

　　q——概率，可能为 0

以降水数据为例，最后得出的标准化降水指数为

$$SPI = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \tag{3}$$

式中：当 $H(x) \leqslant 0.5$ 时，$t = \sqrt{\ln \frac{1}{G^2(x)}}$；当 $H(x) > 0.5$ 时，将 $H(x)$ 替换为 $1 - H(x)$，并且生成的 SPI 值取反符号。$c_0 = 2.515\ 517$；$c_1 = 0.802\ 853$；$c_2 = 0.010\ 328$；$d_1 = 1.432\ 788$；$d_2 = 0.189\ 269$；$d_3 = 0.001\ 308$。

2.2　标准化水供需指数

由于社会经济干旱本质上是水的供需不平衡，因此，可以参照 SPEI 计算方法[36]。每月水供需差(WSDD)概率密度函数归一化后转化为标准正态分布，从而计算水供需差概率密度函数[37]。水供需差计算式为

$$WSDD = S - D \tag{4}$$

式中 S——月供水量

D——月需水量

美国干旱监测机构(U. S. Drought Monitor)发布统计,5%、10%、20% 和 30% 为干旱等级合理的分类标准[38],因此将 SPI、SRI 和 SWSDI 指数分为 4 个干旱等级,如表 1 所示。

表 1 干旱等级分类

Tab. 1 Classification of drought levels for SPI and SWSDI

干旱等级	干旱类型	SPI/SRI/SWSDI
1	轻度干旱	(-1.0, -0.5]
2	中度干旱	(-1.5, -1.0]
3	重度干旱	(-2.0, -1.5]
4	极端干旱	(-∞, -2.0]

月供水量采用 SWAT 模型估算。SWAT 模型是由美国农业研究局(USDA - ARS)开发的半分布式水文模型,通过遥感和 GIS 技术,对流域土壤类型和土地利用模式进行空间分析,基于水循环和水平衡原理模拟河流产汇流过程,在流域供水能力评估方面具有独特优势[39-41]。由于岷沱江流域主要由岷江和沱江 2 条河流构成,因此选取高场、富顺分别作为岷江、沱江下游出口进行模型构建。首先,在 SWAT 模型中加入 DEM 数据和河网数据,将流域划分为 53 个子流域;其次,在 SWAT 模型导入土地利用、土壤数据库等属性,建立地理信息模块。最后,将气象数据(降水量、温度、日照时数、风速等)导入 SWAT 模型,对岷沱江流域进行月径流模拟。水量平衡公式为

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t_1} (R_{dayi} - Q_{surfi} - E_{ai} - W_{seepi} - Q_{gwi}) \tag{5}$$

式中 SW_t——最终含水量,mm

SW_0——初期含水量,mm

t_1——时间,d

R_{dayi}——第 i 天降水量,mm

Q_{surfi}——第 i 天地表径流量,mm

E_{ai}——第 i 天蒸散发量,mm

W_{seepi}——第 i 天渗透水流量,mm

Q_{gwi}——第 i 天地下水量,mm

在 SWAT - CUP 软件使用 SUFI2 算法对模型结果进行校准和不确定性分析[42]。将 SWAT - CUP 软件标定参数再次加入 SWAT 模型,利用接近性和相似性概念进行全流域参数分布,得到岷沱江流域自然径流量,再根据地表水供水比例计算得出岷沱江流域月供水量。在校准 SWAT 模型过程,为确保径流结果不受水库作用的影响,须将水文站测量径流转换为自然径流。SWAT 模型使用 2007—2020 年高场和富顺 2 个水文站 14 年的月径流数据,模型预热期为 2 年。模型性能通过决定系数(R^2)和 Nash - Sutcliffe Efficiency(NSE)进行评估,当 R^2 和 NSE 均超过 0.50 时,表明模拟结果具有良好可靠性。

从水资源角度将流域出水口控制断面内岷沱江河道外需水量分为 4 个部分:生活、农业、工业和生态,但由于生态需水量在本研究区域占比极小,因此只考虑前 3 种需水量,对不同部分需水量采用定额法计算。生活需水包括农村生活和城镇生活 2 个部分,根据四川省统计用水定额公布的城镇人均生活用水以及农村人均生活用水分别乘以区域内的城镇人口及农村人口得到城镇生活需水量及农村生活需水量,两者相加得到区域内生活需水量。农业需水量是将区域内农田实灌公顷均用水量乘以区域耕地面积得到年尺度农业需水量。工业需水量则采用 GDP 第二产业增加值乘以万元 GDP 需水量得出。

2.3 干旱响应关系

2.3.1 游程理论

采用游程理论三阈值方法(图 2)识别干旱事件并提取特征,如干旱持续时间、干旱强度。在月时间尺度上识别干旱事件的具体方法如下:设置 3 个截断水平 X_0、X_1、X_2(X 为干旱指标值)。当干旱指标值低于 X_1 时,初步认为当月发生了干旱。当干旱指标值大于 X_2 时,对于持续 1 个月的干旱事件,确定当月无干旱,排除该事件。若 2 个相邻的干旱事件间隔仅为 1 个月,且这个间隔月份的干旱指数小于 X_0,相邻的 2 个干旱事件可以被合并。在第 4 种情况下,干旱持续时间等于相邻 2 个干旱事件时间加上间隔事件时间,干旱烈度是干旱指数绝对值之和。

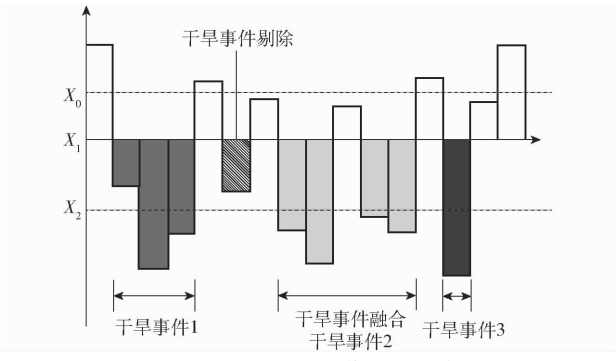

图 2 游程理论三阈值方法示意图

Fig. 2 Schematic of three-threshold method of run theory

2.3.2 皮尔逊相关性和因果关系

利用相关系数法(PCC)和收敛交叉映射法(CCM)分析气象干旱、水文干旱和社会经济干旱的

关系。PCC 用于确定 2 个序列间的相关性，在科学界被广泛使用[43]，通过对气象水文干旱和社会经济干旱数据的 PCC 分析，可以识别两者之间的相关性模式，从而得出干旱之间的传播时间。传播时间定义为从一种干旱开始到另一种干旱开始的时间，并且可以简化为不同累积期的干旱指数间数学联系。气象干旱和水文干旱指数的时间尺度为 n 个月（n=1，2，…，12），而社会经济干旱指数的时间尺度为 1 个月。SPI－n/SRI－n 和 SWSDI－1 间的最大皮尔逊相关系数表示气象水文干旱和社会经济干旱之间的联系，累积期 n 被定义为干旱传播时间[26,44]。而 CCM 用于评估 2 个序列间的因果关系，进一步揭示这些模式背后的潜在因果机制。

2.3.3　气象-水文-社会经济干旱级联传播

为识别与气象和水文干旱事件相对应的社会经济干旱事件，需对不同干旱事件进行匹配。开始匹配前，首先要确定干旱传播时间。计算不同时间尺度的 SPI 和 SRI（SPI－n、SRI－n）以及月尺度的 SWSDI，通过 2 种干旱指标间的相关系数初步确定这 2 种干旱的传播时间。相关系数最高所对应的 n 即为干旱最佳传播时间。由游程理论识别的 3 种干旱事件首先要进行一一对应，当一种干旱事件发生前 n 个月到该干旱事件结束之间发生与之对应的另一种干旱事件，则认为这 2 种干旱之间发生了传播。

在月尺度下，对时间相邻的气象、水文干旱事件和社会经济干旱事件进行对应关系识别，将两者传播情景分为 5 种：仅发生气象水文干旱事件（S0）；仅发生社会经济干旱事件（S1）；一场气象水文干旱事件传播为一场社会经济干旱事件（S2）；多场气象水文干旱事件传播为一场社会经济干旱事件（S3）；多场气象水文干旱事件传播为多场社会经济干旱事件（S4）。

3　结果与分析

3.1　SWAT 模型校正和验证

为提高模型准确性，选取 2 个水文站进行率定和验证，分别为岷江的高场站和沱江的富顺站，根据站点还原后的天然径流调整径流相关参数。将 2007—2016 年作为模型率定期，2017—2020 年作为模型验证期，预热期为 2 年。SWAT 模型参数率定结果见表 2。

各月在率定期和验证期的实测流量、模拟流量和降水过程比较一致，2 个水文站模拟结果较好，表明所采用的水文模型在模拟 2 个水文站径流方面性能良好（图 3）。富顺水文站率定期和验证期 R^2 分别为 0.83 和 0.80，表明模拟值与观测值间的相关性非常强，模型拟合度很高。NSE 系数分别为 0.75 和 0.79，证实了模型在这 2 个时期的模拟效果较好。高场水文站率定期 R^2 为 0.82，NSE 系数为 0.72，而验证期 R^2 提高到 0.89，NSE 系数也达到 0.88，模型模拟结果比较稳定和可靠。总体而言，2 个水文站在率定和验证期间径流量满足要求。SWAT 模型能较好地模拟受气候和土地利用变化影响的流域水文过程，可用于流域水文条件的模拟和分析。

表 2　SWAT 模型参数率定结果

Tab. 2　Calibration results of parameters of SWAT model

参数	最小值	最大值	最终值
TLAPS/(℃·km^{-1})	－10	10	－9.95
CN2	35	98	41.14
CH_N2	－0.01	0.30	0.01
CH_K2/(mm·h^{-1})	－0.01	500	63.74
ESCO	0	1	0.14
SMTMP/℃	－20	20	0.9
SFTMP/℃	－20	20	6.5
SMFMX/(mm·℃$^{-1}$·d^{-1})	0	20	0.55
SMFMN/(mm·℃$^{-1}$·d^{-1})	0	20	10.15
SOL_BD/(g·cm^{-3})	0.9	2.5	2.38
SOL_K/(mm·h^{-1})	0	2 000	1 075
SOL_AWC/(mm·mm^{-1})	0	1	0.36
GWQMN/mm	0	4 000	1 637.50
GW_REVAP	0.02	0.20	0.10
ALPHA_BF/d	0	1	0.037 5

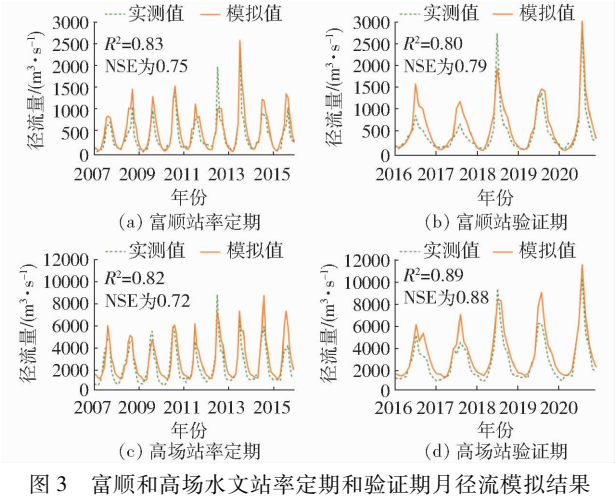

图 3　富顺和高场水文站率定期和验证期月径流模拟结果

Fig. 3　Measured and simulated flow rates in Fushun station and Gaochang station

3.2　气象水文干旱和社会经济干旱时间演变特征

图 4 为 2000—2020 年岷沱江流域月尺度下 3 种干旱指数变化曲线。SPI 和 SRI 波动剧烈，干湿交替明显。根据《中国气象年鉴》统计，2000—2020

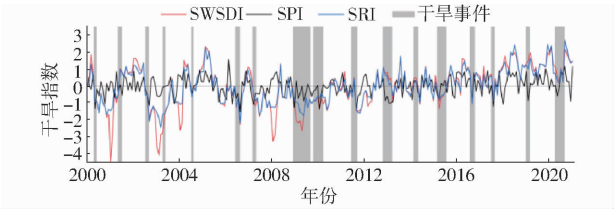

图 4 2000—2020 年岷沱江流域月尺度 SPI、SRI 和 SWSDI 变化曲线

Fig. 4 Variation curves of SPI, SRI and SWSDI at different time scales in Mintuo River Basin, 2000—2020

年共发生 17 次干旱事件,SPI 和 SRI 在月尺度上识别的干旱事件与历史干旱事件基本一致。根据美国干旱监测机构标准,社会经济干旱水平可通过 4 个不同干旱等级确定。为深入分析社会经济干旱特征,如持续时间和严重性,采用游程理论提取社会经济干旱事件。通过分析 2000—2020 年月度尺社会经济干旱指数(SWSDI),发现该指数在识别社会经济干旱方面表现出色。在岷沱江流域,过去 20 年识别出 14 次社会经济干旱事件。重度干旱发生在 2000、2001、2002、2003、2004、2006、2007、2008、2009 年,其中 2001 年 1 月干旱最为严重,最小 SWSDI 降至 -4.44。2007—2010 年出现历时长达 40 个月的社会经济干旱,并且在 2008 年 1 月和 2009 年 1 月均出现极端社会经济干旱。

3.3 气象-水文-社会经济干旱响应关系

收敛交叉映射法(CCM)结果可分为单向因果关系、双向因果关系和无因果关系 3 类。为探明二者间是否存在明显的因果关系,使用 CCM 对 SPI - SWSDI 和 SRI - SWSDI 全年、大丰水期(5—10 月)、大枯水期(11—次年 4 月)进行分析。随着时间序列长度增加,图形收敛性在不同季节和不同方向的因果关系表现出不同特点(图 5)。在全年趋势上,SPI - SWSDI 的 CCM 结果收敛性较差,SRI - SWSDI 的 CCM 结果收敛于 0.92 左右,SRI - SWSDI 的 CCM 结果收敛性明显优于 SPI - SWSDI。SRI 对 SWSDI 的影响比 SPI 对 SWSDI 的影响更大,并且随着时间序列延长而变得更加明显(图 5a、5g)。

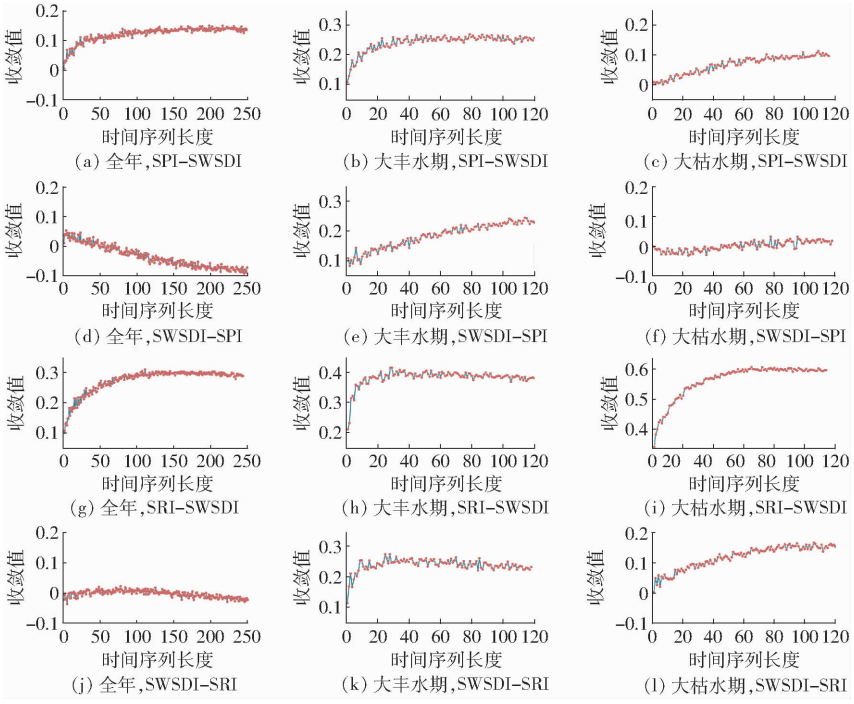

图 5 SPI - SWSDI、SWSDI - SPI、SRI - SWSDI 和 SWSDI - SRI 收敛交叉映射法结果

Fig. 5 Convergent cross mapping results of SPI - SWSDI, SWSDI - SPI, SRI - SWSDI and SWSDI - SRI

根据四川省电力调度机构对水期的划分,分为 2 个季节,即大丰水期(5—10 月)和大枯水期(11—次年 4 月)。而从不同季节 CCM 结果变化趋势来看,在大丰水期,SPI 对 SWSDI 的影响以及 SRI 对 SWSDI 的影响都随着时间增长而增强,CCM 结果的收敛性提升(图 5b、5h)。相比之下,大枯水期 SPI - SWSDI 的 CCM 图形收敛性较差,而 SRI - SWSDI 的 CCM 则表现出较强收敛趋势。整体而言,图形收敛性越强,表明因果关系证据越充分,不同季节的动态关系随着时间序列延长变得更加显著。

3.4 气象-水文-社会经济干旱传播特征

通过计算不同的 SPI - n 和 SRI - n,然后分别计算其与 SWSDI 的相关性,确定最优干旱传播时间。图 6 为 SPI - n、SRI - n 与 SWSDI 间的 Pearson 相关系数,能够看出年内各月干旱传播时间各有差异,各月气象干旱和水文干旱与社会经济干旱间的关系紧密性也各不相同。岷沱江流域气象干旱和水文干旱传播为社会经济干旱的最短时间均为 1 个月,气象

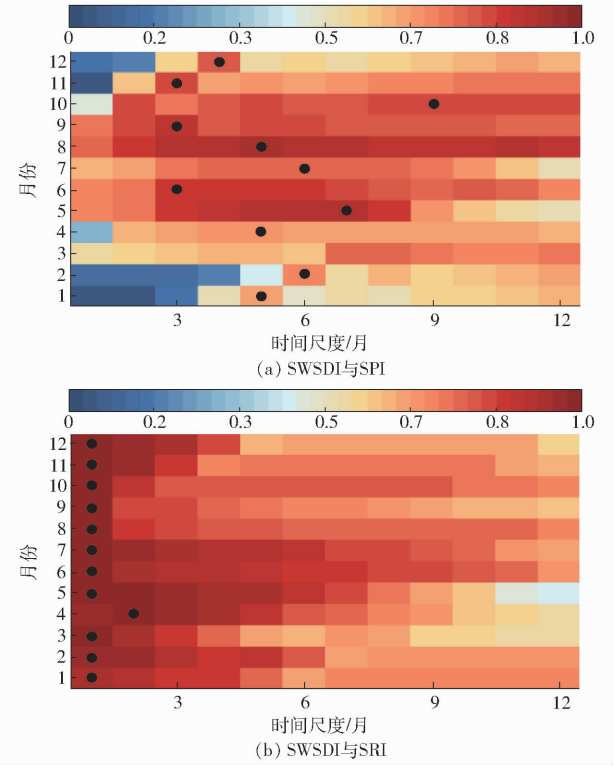

图 6　2000—2020 年岷沱江流域各时间尺度上 SWSDI 与 SPI 和 SRI 的相关系数

Fig. 6　Correlation coefficients between SWSDI and SPI, SRI series at various time scales at Mintuo River Basin from 2000 to 2020

干旱传播的最长时间为 9 个月，水文干旱传播的最长时间为 2 个月（图 6）。将 SWSDI 与 SPI－n 出现最大相关系数的 n 作为气象干旱向社会经济干旱的最优传播时间，SWSDI 与 SRI－n 出现最大相关系数的 n 作为水文干旱向社会经济干旱的最优传播时间（图 6 中 • 表示）。

总体上，岷沱江流域气象、水文干旱向社会经济干旱的传播存在显著的季节差异，大枯水期传播时间比大丰水期传播时间长，SWSDI 和 SPI、SRI 的相关性在枯水期低于丰水期。供水量与需水量的差异被认为是社会经济干旱发生的基础，水的供应直接受到径流的影响。

由图 6 可知，从气象干旱到社会经济干旱的最佳传播时间为 5 个月，水文干旱到社会经济干旱的最佳传播时间为 1 个月，对 2 种传播途径的干旱事件进行一一对应，在 5 种情景下分别识别出 16 次和 13 次干旱传播事件，不同传播情景占比如图 7 所示。在岷沱江流域中，由气象干旱到社会经济干旱传播途径中，未发生干旱传播的情景（S0、S1）占 54.6%，干旱事件一一对应的干旱传播情景占 22.7%，多场气象干旱事件传播为社会经济干旱的干旱传播情景占 22.7%（图 7a）。由水文干旱到社会经济干旱传播途径中，未发生干旱传播的情景（S0、S1）占 65%，干旱事件一一对应的干旱传播情景占 10%，多场水文干旱事件传播为社会经济干旱的干旱传播情景占 25%（图 7b）。总结 2 种传播途径发现，气象干旱和社会经济干旱的传播关系主要以多场气象干旱事件传播为社会经济干旱为主，其次为未发生干旱传播情景，气象干旱与社会经济干旱一一对应传播较少；而水文干旱和社会经济干旱的传播关系中，多场水文干旱传播为社会经济干旱的情景（S3、S4）以及 2 种干旱一一对应传播的情景（S2）占比接近，未发生干旱传播情景占比较少。

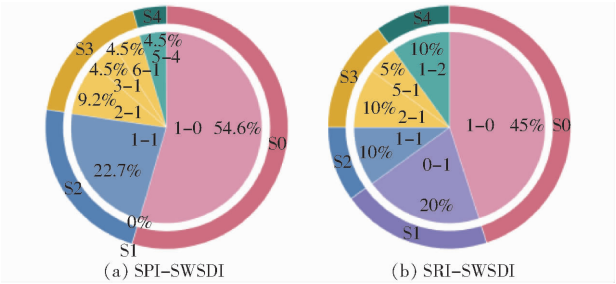

图 7　气象/水文和社会经济干旱传播关系

Fig. 7　Propagation relationship between meteorological/hydrological and socio-economic droughts propagation

对 2 种传播途径下各情景干旱平均历时以及峰值强度进行分析，S0 情境下干旱历时和峰值强度均比 S3、S4 情景低，认为当气象水文干旱的发生时间较短或者干旱强度较弱时，可能不足以引发长期的水资源短缺，因此不会造成供需水失衡而引发社会经济干旱（图 8）。在气象干旱到社会经济干旱传播途径下，对于 S2～S4 这 3 种情景的特征状况，多场气象干旱更易引起社会经济干旱的产生，且引发的社会经济干旱历时和峰值强度均比气象干旱高。而在水文干旱到社会经济干旱传播途径下，多场长历

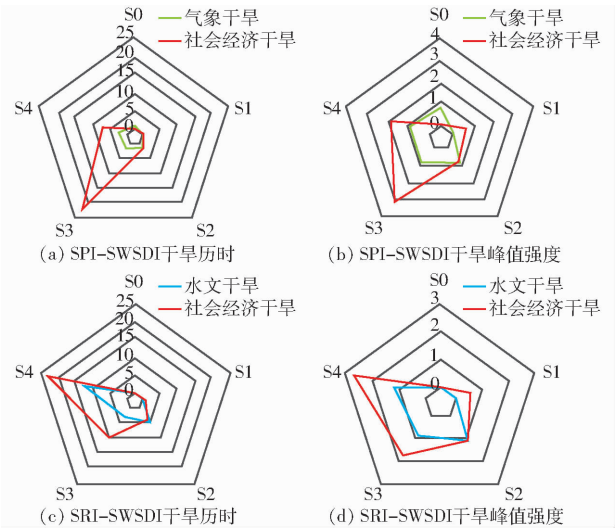

图 8　气象/水文和社会经济干旱传播特征

Fig. 8　Propagation characteristics between meteorological/hydrological and socio-economic droughts

时的水文干旱会引发高强度的社会经济干旱。当社会经济干旱恢复尚未完成,新的气象水文干旱事件又接踵而至,易导致持久且难以逆转的社会经济干旱情形。

4 讨论

通过提取干旱特征,分析了 2000—2020 年气象水文干旱和社会经济干旱的时间变化趋势,通过 PCC 和 CCM 对不同干旱进行分析,探讨了气象水文干旱和社会经济干旱间的传播关系,结果表明在不同季节中不同干旱间的传播存在不同差异。岷沱江流域干旱传播时间在大枯水期通常比大丰水期更长,干旱间的传播也表现为多场气象水文干旱更易引起社会经济干旱的产生,这也符合人类活动对传播的干扰过程,在气象水文干旱导致社会经济干旱发生时,通过水库放水、泵站提水等措施对水资源合理利用,可以缓解供需水失衡,但持续气象水文干旱的发生,会直接影响地表水和地下水补给,从而减少可用水量,对供水安全构成了威胁,使得高人口和社会经济密度的城市将面临水资源方面的重大影响和挑战。

综合考虑 CCM 的演变趋势可以发现,整个流域在干旱相互影响关系上存在一定的季节性。气象水文干旱到社会经济干旱的 CCM 结果均在大丰水期收敛性较强,初步判断是因为在大丰水期流域降水相对较多,对地表径流影响较大,从而对流域供水产生较明显的影响;而在大枯水期,降水减少,流域供水大部分来自地表水,因此径流对供水产生的影响更明显。同时 SPI 和 SWSDI、SRI 和 SWSDI 间的因果关系,随着时间序列长度增加,显著性水平都会提高。这意味着在更长的时间尺度上,降水和土壤水分缺失之间的相互影响更为明显[45]。不同类型干旱间存在传播阈值,即只有当干旱严重程度达到一定条件时,才会引发下一类型的干旱[46]。同时气象水文干旱对社会经济干旱的影响明显强于社会经济干旱对气象水文干旱的影响,因为社会经济干旱的发生不仅取决于气象水文条件,还受到人类活动、经济结构、水资源管理等多种因素的影响,这些因素增加了从气象水文干旱传播到社会经济干旱的复杂性和不确定性。李敏等[47]发现人类活动会降低气象干旱和水文干旱间的相关性,也使得气象水文干旱间的传递表现出季节性差异。Zhang 等[48]通过贝叶斯模型与方差分析相结合的方法发现温度、降水等气候因素以及土壤湿度等下垫面因素对干旱传播时间的贡献显著,且各因素间存在交互作用。此外,也有其他研究表明[49-51],干旱传播是由多种因素综合作用的结果。

本研究主要基于气象水文条件探讨了气象水文干旱与社会经济干旱的响应关系,然而在实际干旱传播过程,人类活动、土地利用方式及社会经济发展水平等因素均对干旱传播存在不同程度的影响。后续研究需综合考虑自然与社会经济因素的相互作用,深入探究气象水文干旱向社会经济干旱传播的关键影响因素。

5 结论

(1)SPI 和 SRI 波动剧烈,干湿交替明显,在月尺度上识别出的干旱事件与历史干旱事件基本一致;基于在过去 21 年 SWSDI 识别出 14 次社会经济干旱事件。重度干旱发生在 2000、2001、2002、2003、2004、2006、2007、2008、2009 年。

(2)气象水文干旱和社会经济干旱在相关性和因果关系上存在季节差异,均表现出大丰水期明显强于大枯水期。并且在因果关系上,SPI、SRI 和 SWSDI 的 CCM 结果,随着时间序列长度增加,显著性水平会提高。

(3)通过对干旱事件进行匹配以及 5 种干旱传播情景识别,情景占比最大的为发生干旱传播情景(S2、S3、S4),气象水文干旱和社会经济干旱间发生传播的情景主要为多场气象水文干旱事件传播为社会经济干旱事件(S3、S4),表明持续时间短、干旱强度低的气象水文干旱不易引发长期的水资源短缺而引发社会经济干旱;多场气象水文干旱更易引起社会经济干旱的产生,且引发的社会经济干旱历时和峰值强度均比气象干旱高。

参 考 文 献

[1] Deb P, Kiem A S, Willgoose G. A linked surface water-groundwater modelling approach to more realistically simulate rainfall-runoff non-stationarity in semi-arid regions[J]. Journal of Hydrology, 2019, 575: 273 - 291.

[2] Deb P, Kiem A S, Willgoose G. Mechanisms influencing non-stationarity in rainfall-runoff relationships in southeast Australia [J]. Journal of Hydrology, 2019, 571: 749 - 764.

[3] Fang W, Huang S, Huang G, et al. Copulas-based risk analysis for inter-seasonal combinations of wet and dry conditions under a changing climate[J]. International Journal of Climatology, 2018, 39: 2005 - 2021.

[4] Guo Y, Huang S, Huang Q, et al. Assessing socioeconomic drought based on an improved multivariate standardized reliability and resilience index[J]. Journal of Hydrology, 2019, 568: 904 - 918.

[5] Mehran A, Mazdiyasni O, Aghakouchak A. A hybrid framework for assessing socioeconomic drought: linking climate

variability, local resilience, and demand[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(15): 7520 - 7533.
[6] Sun P, Ma Z, Zhang Q, et al. Modified drought severity index: model improvement and its application in drought monitoring in China[J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128097.
[7] Yao N, Li Y, Lei T, et al. Drought evolution, severity and trends in mainland China over 1961—2013[J]. Science of the Total Environment, 2018, 616 - 617: 73 - 89.
[8] 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 Resource and Hydraulic Engineering, 2022, 33(2): 194 - 202. (in Chinese)
[9] Wang T, Tu X, Singh V P, et al. A CMIP6-based framework for propagation from meteorological and hydrological droughts to socioeconomic drought[J]. Journal of Hydrology, 2023, 623: 129782.
[10] Wang T, Tu X, Singh V P, et al. A composite index coupling five key elements of water cycle for drought analysis in Pearl River Basin, China[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 320: 115813.
[11] Mckee T B, Doesken N J, Kleist J R. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C] // Eighth Conference on Applied Climatology, 1993: 179 - 186.
[12] Hao Z, Aghakouchak A. A nonparametric multivariate multi-index drought monitoring framework [J]. Journal of Hydrometeorology, 2014, 15(1): 89 - 101.
[13] Hao Z, Singh V P, Xia Y. Seasonal drought prediction: advances, challenges, and future prospects[J]. Reviews of Geophysics, 2018, 56(1): 108 - 141.
[14] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2): 213 - 224.
[15] 贾建伟,王栋,徐伟峰,等. 2022 年鄱阳湖流域干旱综合评估及成因分析[J]. 人民长江, 2023, 54(2): 36 - 42.
Jia Jianwei, Wang Dong, Xu Weifeng, et al. Comprehensive evaluation and cause analysis of drought in Poyang Lake Basin in 2022[J]. Yangtze River, 2023, 54(2): 36 - 42. (in Chinese)
[16] 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)
[17] Shi H, Chen J, Wang K, et al. A new method and a new index for identifying socioeconomic drought events under climate change: a case study of the East River Basin in China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 616 - 617: 363 - 375.
[18] Wang T, Tu X, Singh V P, et al. Socioeconomic drought analysis by standardized water supply and demand index under changing environment[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 347: 131248.
[19] Huang S, Huang Q, Chang J, et al. Linkages between hydrological drought, climate indices and human activities: a case study in the Columbia River Basin[J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(1): 280 - 290.
[20] Guo Y, Huang S, 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.
[21] Zhu Y, Liu Y, Wang W, et al. A global perspective on the probability of propagation of drought: from meteorological to soil moisture[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 126907.
[22] 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)
[23] Abbas A, Waseem M, Ullah W, et al. Spatiotemporal analysis of meteorological and hydrological droughts and their propagations[J]. Water, 2021, 13(16): 2237.
[24] 王飞. 多干旱类型视角下的黄河流域干旱时空演变特征研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
Wang Fei. Study on the temporal and spatial evolution characteristics of drought from a multiple drought types perspective in the Yellow River Basin[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020. (in Chinese)
[25] Zhou Z, Shi H, Fu Q, et al. Characteristics of propagation from meteorological drought to hydrological drought in the Pearl River Basin[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021, 126(4): e2020JD033959.
[26] Xu Y, Zhang X, Wang X, et al. Propagation from meteorological drought to hydrological drought under the impact of human activities: a case study in northern China[J]. Journal of Hydrology, 2019, 579: 124147.
[27] Bai M, Li Z, Huo P, et al. Propagation characteristics from meteorological drought to agricultural drought over the Heihe River Basin, Northwest China[J]. Journal of Arid Land, 2023, 15(5): 523 - 544.
[28] Wang H, Zhu Y, Qin T, et al. Study on the propagation probability characteristics and prediction model of meteorological drought to hydrological drought in basin based on Copula function[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 961871.
[29] 姜浩,张寒博,刘诚斌,等. 基于温度-降水-植被综合干旱指数的长江流域干旱时空动态监测[J]. 农业机械学报, 2025, 56(8): 95 - 106, 119.
Jiang Hao, Zhang Hanbo, Liu Chengbin, et al. Spatiotemporal dynamics monitoring of drought in Yangtze River Basin using temperature - precipitation - vegetation integrated dryness index (TPVDI)[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(8): 95 - 106, 119. (in Chinese)

[30] 张午朝,高冰,马育军. 长江流域 1961—2015 年不同等级干旱时空变化分析[J]. 人民长江, 2019, 50(2): 53 - 57.
Zhang Wuzhao, Gao Bing, Ma Yujun. Temporal and spatial variation characteristics of different drought grades from 1961 to 2015 in Yangtze River Basin[J]. Yangtze River, 2019, 50(2): 53 - 57. (in Chinese)
[31] 卫仁娟,潘妮,钟馨,等. 四川省极端高温干旱复合事件变化特征研究[J]. 水文, 2024, 44(6): 60 - 67, 75.
Wei Renjuan, Pan Ni, Zhong Xin, et al. Study on the variation characteristics of extreme high temperature and drought compound events of Sichuan Province[J]. Journal of China Hydrology, 2024, 44(6): 60 - 67, 75. (in Chinese)
[32] 杨丹荔,胡艳,佘佳,等. 岷沱江流域水资源生态足迹与可持续性研究[J]. 人民长江, 2023, 54(10): 67 - 75.
Yang Danli, Hu Yan, She Jia, et al. Ecological footprint and sustainability of water resources in Minjiang and Tuojiang River Basin[J]. Yangtze River, 2023, 54(10): 67 - 75. (in Chinese)
[33] Kao S C, Govindaraju R S. A Copula-based joint deficit index for droughts[J]. Journal of Hydrology, 2010, 380(1): 121 - 134.
[34] 商守卫,王银堂,崔婷婷,等. 基于标准化降水指数的成都市气象干旱演变特征[J]. 水电能源科学, 2022, 40(12): 26 - 29, 63.
Shang Shouwei, Wang Yintang, Cui Tingting, et al. Evolution characteristics of meteorological drought in Chengdu City based on standardized precipitation index[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(12): 26 - 29, 63. (in Chinese)
[35] 张璇,王佳刚,许杨,等. 滦河流域干湿变化及大尺度气候因子影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(4): 636 - 644, 668.
Zhang Xuan, Wang Jiagang, Xu Yang, et al. Variations of dryness/wetness and responses to large scale climate factors based on SPI in Luanhe River Basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(4): 636 - 644,668. (in Chinese)
[36] Venancio L P, Filgueiras R, Mantovani E C, et al. Impact of drought associated with high temperatures on *Coffea canephora* plantations: a case study in Espírito Santo State, Brazil[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 19719.
[37] Wang T, Tu X, Singh V P, et al. Assessment of future socioeconomic drought based on CMIP6: evolution, driving factors and propagation[J]. Journal of Hydrology, 2023, 617: 129009.
[38] Anderson M C, Hain C, Otkin J, et al. An intercomparison of drought indicators based on thermal remote sensing and NLDAS - 2 simulations with U.S. drought monitor classifications[J]. Journal of Hydrometeorology, 2013, 14(4): 1035 - 1056.
[39] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment Part I: model development1 [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007, 34(1): 73 - 89.
[40] Yang J, Yao Y, Shao C, et al. A novel TIR-derived three-source energy balance model for estimating daily latent heat flux in mainland China using an all-weather land surface temperature product[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 323: 109066.
[41] Eini M R, Javadi S, Delavar M, et al. High accuracy of precipitation reanalyses resulted in good river discharge simulations in a semi-arid basin[J]. Ecological Engineering, 2019, 131: 107 - 119.
[42] Abbaspour K C, Rouholahnejad E, Vaghefi S, et al. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model[J]. Journal of Hydrology, 2015, 524: 733 - 752.
[43] Barker L J, Hannaford J, Chiverton A, et al. From meteorological to hydrological drought using standardised indicators[J]. Hydrol. Earth Syst. Sci., 2016, 20(6): 2483 - 2505.
[44] Xu Y, Zhang X, Hao Z, et al. Characterization of agricultural drought propagation over China based on bivariate probabilistic quantification[J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: 126194.
[45] Hu C, She D, Wang G, et al. Soil moisture and precipitation dominate the response and recovery times of ecosystems from different types of flash drought in the Yangtze River Basin[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2024, 358: 110236.
[46] 莫晓梅,涂新军,王天,等. 东江流域气象干旱向水文干旱传递阈值研究[J]. 人民珠江, 2021, 42(7): 9 - 16.
Mo Xiaomei, Tu Xinjun, Wang Tian, et al. Study on the transfer threshold from meteorological to hydrological drought in Dongjiang River Basin[J]. Pearl River, 2021, 42(7): 9 - 16. (in Chinese)
[47] 李敏,冯子龙,张铭锋,等. 人类活动对流域气象-水文干旱传递的影响分析[J]. 中国农村水利水电, 2024(6): 31 - 39.
Li Min, Feng Zilong, Zhang Mingfeng, et al. Analysis of the influence of human activities on the propagation of meteorological drought to hydrological drought in basin[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(6):31 - 39. (in Chinese)
[48] Zhang Q, Li Y P, Huang G H, et al. Bayesian analysis of variance for quantifying multi-factor effects on drought propagation [J]. Journal of Hydrology, 2024, 632: 130911.
[49] Huang S, Zhang X, Chen N, et al. Drought propagation modification after the construction of the Three Gorges Dam in the Yangtze River Basin[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 127138.
[50] Huang S, 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.
[51] Tijdeman E, Barker L J, Svoboda M D, et al. Natural and human influences on the link between meteorological and hydrological drought indices for a large set of catchments in the contiguous United States[J]. Water Resources Research, 2018, 54(9): 6005 - 6023.