

2022 年长江流域不同类型干旱时空响应关系

董蓉蓉^{1,2}, 栗晓玲^{1,2}, 屈艳萍^{3,4}, 姜田亮^{3,4}, 吴海江^{1,2}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国水利水电科学研究院防洪抗旱减灾研究中心, 北京 100038; 4. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038)

摘要: 为研究 2022 年长江流域不同类型干旱的时空响应关系, 基于三维时空聚类识别方法在月尺度下提取 2022 年长江流域气象、农业和水文干旱事件, 在候尺度(5 d)下利用三类型干旱事件对匹配规则识别 2022 年长江流域存在时空联系的气象-农业-水文干旱事件对, 定量揭示各类型干旱之间的时空响应关系。结果表明: 三维时空聚类识别方法在月尺度下识别出历时大于 2 月的气象、农业和水文干旱事件分别为 3、2 和 2 场, 能够清晰地刻画出各类型干旱在时空上的发生、发展、消亡过程; 利用三类型干旱事件对匹配规则在候尺度下识别出 2022 年长江流域 1 场气象-农业-水文干旱事件对, 即由气象和农业干旱事件共同引发的水文干旱事件, 该场干旱事件对中各类型干旱事件迁移路径均为长江上游至中下游迁移, 最终分别在湖北、重庆和湖北结束。

关键词: 特大干旱; 聚类识别方法; 干旱识别; 时空响应; 长江流域

中图分类号: P429; X43

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)03-0061-10

Spatiotemporal response relationships between different types of droughts in the Yangtze River Basin in 2022// DONG Rongrong^{1,2}, SU Xiaoling^{1,2}, QU Yanping^{3,4}, JIANG Tianliang^{3,4}, WU Haijiang^{1,2} (1. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Research Center on Flood & drought Disaster Prevention and Reduction, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 4. Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction of Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: To study the spatiotemporal response of different types of droughts in the Yangtze River Basin in 2022, a three-dimensional spatiotemporal cluster identification method was used to extract meteorological drought, agricultural drought, and hydrological drought events on monthly scale in 2022, and the matching rule for three types of drought events was employed to identify the meteorological-agricultural-hydrological drought event pair with spatiotemporal connections on pentad scale (i. e., five-day) in 2022, so as to quantitatively reveal the spatiotemporal response characteristics among various drought types in the Yangtze River Basin. The results indicated that three meteorological drought events, two agricultural drought events, and two hydrological drought events lasting longer than two months were extracted on monthly scale in the Yangtze River Basin in 2022, and the three-dimensional spatiotemporal cluster identification method can clearly depict the occurrence, development, and extinction processes of various drought types in time and space. Furthermore, a meteorological-agricultural-hydrological drought event pair, in which a hydrological drought event that was jointly triggered by meteorological drought and agricultural drought events in 2022, was identified based on the matching rule. The migration paths of the three drought types were all from the upper reaches toward the middle and lower reaches, and finally terminated in Hubei, Chongqing, and Hubei, respectively.

Key words: megadrought; cluster identification method; drought identification; spatiotemporal response; Yangtze River Basin

20 世纪以来, 全球 70% 以上的国家受到不同程度干旱灾害的威胁, 年均造成经济损失达 80 亿美

元^[1-3]。特别是进入 21 世纪后, 全球特大干旱发生次数增加了 29%, 每年因干旱造成的损失从 1980—

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079111, 51879222)

作者简介: 董蓉蓉(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事干旱演变及响应关系研究。E-mail: dongrn0426@163.com

通信作者: 栗晓玲(1968—), 女, 教授, 博士, 主要从事水文模拟及水资源优化研究。E-mail: xiaolingsu@nwfui.edu.cn

2009 年的 173 亿美元飙升到 2010—2017 年的 231 亿美元^[4]。据统计,中国平均每年因干旱事件波及的农田面积达 2 180 万 hm^2 ,造成粮食损失约 1 600 万 t ^[5]。此外,全球变暖背景下预估中国未来干旱的发生频率、影响面积和持续时间将进一步加大^[6],可能对水资源、农业生产、生态环境等造成更具有破坏力的影响^[7-9]。

长江流域地处我国湿润半湿润区,主要受太平洋和印度洋西南季风的影响^[10]。流域内降水分配不均,干旱发生时间多呈现出短期波动的特征,且存在旱涝并存与急转现象^[11-12]。21 世纪以来,长江流域发生极端干旱事件愈加频繁,且表现为历时长、致灾强度大、成灾面积广的特点^[2,13]。例如:2010—2011 年的秋冬春连旱创下自 1951 年以来长江中下游地区最严重的春旱记录^[14];2019 年伏秋连旱对当地农业生产造成了较为严重的经济损失,是 2019 年国内十大天气气候事件之一^[15];2022 年夏季长江流域遭遇了 1961 年有完整观测记录以来最强的极端高温热浪天气和影响面积最广的特大干旱事件,导致鄱阳湖和洞庭湖及众多支流的流量锐减^[16-17]。许多学者针对 2022 年长江流域干旱事件展开了相关研究,主要是分析干旱特点、成因、发展过程及其影响^[2,4,16],或者针对气象、农业和水文干旱其中的一种或两种进行讨论^[18-19],尚未有对 3 种干旱类型的时空演变规律的探讨。因此,厘清长江流域典型特大干旱事件(特别是 2022 年特大干旱事件)的时空特征关系可为抗旱减灾措施的精细化部署、抗旱预报和预警提供参考依据。

水分缺失信号在不同类型干旱之间的传递被定义为干旱的传递或传播,如由气象干旱演变为农业干旱和水文干旱的过程^[20-21]。目前,已有学者对不同类型干旱之间的传播关系展开研究。例如:Changnon 等^[22-23]通过不同气象水文要素长时序变化描述干旱的传播现象;刘永佳等^[24]采用回归模型和随机森林模型分析了不同季节气象干旱传播到水文干旱的时间,并量化了气象干旱向不同等级水文干旱传播的阈值;韩会明等^[20]利用游程理论识别了气象和水文干旱事件,利用 Copula 函数和条件概率方法对比分析了气象干旱向水文干旱传播的规律。然而,现有的研究多从时间维度(即一维(时间)干旱事件对匹配法)揭示不同类型干旱间传播规律,无法展示不同类型干旱在三维时空上的传播特征。为此,三维时空干旱事件对匹配法应运而生。例如:许凯^[25]在传统的一维和二维干旱事件识别方法的基础上提出了时空连续的三维干旱事件识别方法,并用该方法重现了我国西南地区 1961—2012 年最

为严重的干旱事件时空变化过程;冯凯等^[26]以标准降水蒸发指数(standardized precipitation evapotranspiration index,SPEI)和农业标准化降水指数(agricultural standardized precipitation index,aSPI)分别表征气象干旱和农业干旱,基于三维干旱识别方法提取干旱特征,并提出时空尺度干旱事件匹配准则,从三维视角探究农业干旱对气象干旱的时空响应关系;姜田亮^[27]在两类型干旱事件对时空匹配方法的基础上发展了三类型干旱事件对(气象-地下水-生态干旱)的时空匹配方法,识别出不同类型干旱在月尺度下的时空响应关系,并结合 Bayesian 网络模型确定了气象干旱和地下水干旱触发不同等级生态干旱事件的阈值,对揭示不同类型干旱在三维时空上的关系有借鉴意义。

上述研究多集中在探讨长时间序列的干旱演变规律及其不同干旱类型之间的响应关系,缺少对某场影响较大的特大干旱事件演变过程进行分析和讨论,且针对长江流域从时空角度探讨气象、农业和水文干旱之间的响应关系研究较少。基于此,本文在月尺度下运用三维时空聚类识别方法提取 2022 年长江流域干旱历时超过 2 月的气象、农业及水文干旱事件,在候尺度(5 d)下基于三类型干旱事件对匹配规则在时空尺度上匹配相关联的气象-农业-水文干旱事件对,探究 2022 年长江流域不同类型干旱事件之间的时空响应特征,以期为区域水资源规划管理、抗旱减灾措施制定和干旱早期预警发布等提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

长江流域(图 1)位于 $24^{\circ}30'N \sim 35^{\circ}45'N$ 、 $90^{\circ}33'E \sim 122^{\circ}25'E$ 、是世界第三大流域,流域总面积达 180 万 km^2 ,约占我国国土面积的 18.8%^[28]。长江流域横跨青藏高原寒区、西南热带季风区和华中亚热带季风区,气温呈东高西低、南高北低的分布

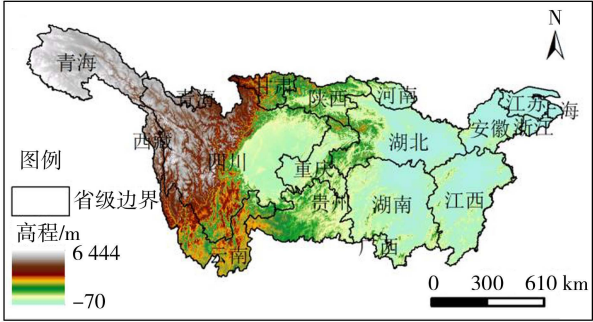


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

趋势,多年平均气温为 12.9℃。流域气候温暖,降水丰沛,受水汽输送路径及地形地貌等因素的影响,年内降水分布不均,主要集中在 5—9 月,占全年总降水量的 60%~80%^[11,29-30];空间分布上,降水量呈东南向西北递减的趋势。长江流域不仅是我国重要的战略水源地和生态绿色屏障,也是我国重要的粮食主产区。

1.2 数据来源

本文使用的 1948—2022 年逐月降水、径流以及 0~100 cm 土壤湿度数据来源于全球陆地同化系统 (GLDAS) Noah 模型数据集 (<https://search.earthdata.nasa.gov/>)。1961—2022 年逐日径流和根区土壤湿度数据来自 GLDAS Catchment 模型数据集,逐日降水数据来源于国家青藏高原科学数据中心中国逐日降水数据集 (<https://doi.org/10.11888/Atmos.tpdc.300523>),该数据集基于中国境内及周边 2 839 个实测站点的日降水观测数据,精度更好,且时间序列完整。以上所有数据集的空间分辨率均为 0.25°×0.25°。DEM 数据来源于地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 90 m×90 m。

2 研究方法

2.1 干旱指数的选取

选取月尺度和候尺度的标准化降水指数 (standardized precipitation index, SPI)、标准化土壤湿度指数 (standardized soil moisture index, SSI) 和标准化径流指数 (standardized runoff index, SRI) 分别表征气象干旱、农业干旱及水文干旱,3 个干旱指数均采用标准化指数构建法计算。以计算 SPI 为例,计算步骤如下:①设逐月/逐候的降水量时间序列为 D ,利用 F 分布函数拟合 D 序列后得到累积概率分布函数 $F(x)$;②基于正态分位数转化将 $F(x)$ 转化为标准正态分布,即可得到相应的 SPI 序列。SRI 选择与 SPI 相同的 F 分布函数拟合径流序列^[31],而 SSI 则采用 Beta 分布函数拟合土壤湿度序列^[32]。本文采用月尺度和候尺度干旱指数反映干旱的严重程度,月尺度干旱指数分别记为 $SPI_{月}$ 、 $SSI_{月}$ 、 $SRI_{月}$,候尺度干旱指数分别记为 $SPI_{候}$ 、 $SSI_{候}$ 、 $SRI_{候}$ 。

2.2 三维时空聚类识别方法

三维时空聚类识别方法基于已构建的单变量干旱指数在三维空间 (经度、纬度、时间) 识别出干旱事件,主要分为干旱斑块识别、干旱斑块时程联结和干旱特征变量提取^[26,33]。

2.2.1 干旱斑块识别

以月尺度为例描述干旱斑块识别过程。采用二

维干旱识别方法对月尺度干旱指数矩阵进行筛选,即筛选出 SPI、SSI、SRI 栅格值小于 -0.5 的相邻栅格联结成一个干旱斑块,并对识别出的不同斑块进行编号。运用三维时空聚类识别方法提取干旱事件时,在干旱斑块识别和判断干旱斑块是否存在时程上的联系这两个步骤中都需要先确定面积阈值 A ,保留面积达到 A 的斑块,剔除面积小于 A 的斑块。

时间尺度不同,面积阈值的取值大小也可能不同。相关研究表明,在月尺度下的干旱斑块识别中,通常面积阈值 A 取研究区面积的 1.6% 较为合理^[34-36],本文中月尺度下的干旱斑块面积阈值 $A=2.88$ 万 km^2 (约 43 个栅格)。

着重探讨候尺度下的干旱事件在识别过程中的面积阈值问题。在候尺度下提取干旱事件的过程中,分别设定不同的面积阈值 (占研究区面积的 1.0%~16%),分析其对长江流域干旱事件识别的影响。如图 2 所示,当面积阈值设定为研究区面积的 12% 时,候尺度下识别出的 3 类最长干旱事件的干旱历时和对应的干旱面积变化幅度逐渐缩小,气象和水文干旱面积趋于稳定。因此,在候尺度下识别干旱事件时,其面积阈值 A 取值为 21.6 万 km^2 (约 322 个栅格)。

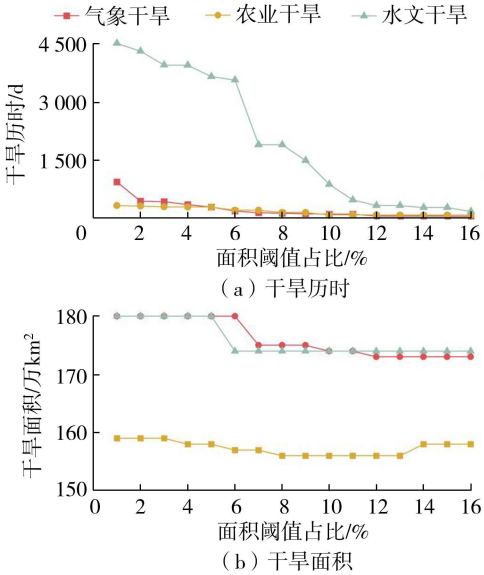


图 2 候尺度下最长干旱事件的干旱历时和干旱面积随面积阈值占比的变化

Fig. 2 Variations of drought duration and area of longest drought events with proportion of area threshold on pentad scale

2.2.2 干旱斑块时程联结

在完成干旱斑块识别后,需要判断已保留的干旱斑块在时间上是否存在联系,若存在联系则构成一次干旱事件。假设在 t 时刻某一编号的干旱斑块 A_t 和相邻 $t+1$ 时刻的某一干旱斑块 A_{t+1} 存在重叠,并

且重叠面积(A^*)大于面积阈值 A ,则认为 A_i 和 A_{i+1} 在时程上是连续的,即判定属于同一场干旱事件,反之则不属于同一场干旱事件。按照该匹配规则,从第 1 月开始依次判断相邻时刻任一对干旱斑块的重叠面积,直到重叠面积小于 A ,判定此次干旱事件结束。

2.2.3 干旱特征变量

相较于常见的二维干旱特征变量识别方法(如游程理论),三维时空聚类识别方法可以从干旱强度、干旱面积、干旱中心、干旱迁移距离等多个方面更全面地反映干旱事件的时空演变特征。干旱特征变量具体计算方法见文献[26]。

2.3 干旱事件对匹配

基于三维时空聚类方法识别出干旱事件后,需要对两种不同类型的干旱事件进行时空匹配,判断两种干旱在时间和空间上是否存在对应关系,存在对应关系则组成干旱事件对。以气象-水文干旱事件对为例,匹配过程^[27]如下:

a. 基于三维时空聚类识别结果,假设分别提取了 m 场气象干旱事件和 n 场水文干旱事件(在月尺度和候尺度下,历时分别超过 2 月和 10 d 的干旱被判定为一次干旱事件),按照时间顺序分别编码气象干旱和水文干旱事件,进而构造出 $m \times n$ 个元素的矩阵 $\mathbf{X}$,矩阵中每一个元素表示待识别的气象-水文干旱事件对。

b. 分别提取矩阵元素 x_{ij} 中每一场气象-水文干旱事件对的信息,从时间上判断气象干旱和水文干旱事件是否存在重叠,若存在重叠则标记为 1,反之记为 0。

c. 对 $x_{ij}=1$ 的气象-水文干旱事件对在空间上进行二次判断,若重叠面积大于 A ,则仍标记为 $x_{ij}=1$,否则替换为 0:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & A_{\text{Dmi}} \cap A_{\text{DHj}} \geq A \\ 0 & A_{\text{Dmi}} \cap A_{\text{DHj}} < A \end{cases} \quad (1)$$

式中 A_{Dmi} 、 A_{DHj} 分别表示第 i 场气象干旱事件和第 j 场水文干旱事件的影响面积。

d. 对成功匹配的气象-水文干旱事件对进行分

类。配对类型包括一场气象干旱事件引发一场水文干旱事件、多场气象干旱事件引发一场水文干旱事件、一场气象干旱事件引发多场水文干旱事件和多场气象干旱事件引发多场水文干旱事件^[27]。

e. 根据上述步骤分别完成气象-水文以及农业-水文干旱事件对匹配。在干旱事件对匹配过程中,部分干旱事件对可能存在时空上的重叠,但传播方向却存在不一致的现象。因此,需要依据干旱事件对传播方向进一步对已匹配成功的气象-水文、农业-水文干旱事件对做第三次判断,若两类干旱事件对的传播方向夹角大于 90° ,则匹配失败。

f. 为探究气象干旱事件和农业干旱事件是否会共同触发水文干旱事件,需要对已经提取的气象-水文干旱事件对和农业-水文干旱事件对做二次判断。对成功匹配的气象-水文干旱事件对和农业-水文干旱事件对分别编号组成两类干旱斑块,将这两类干旱斑块同时向标有水文干旱事件编号的坐标轴投影,重叠部分即为气象干旱和农业干旱共同引发的水文干旱事件。这些匹配成功的干旱事件对中,存在对应关系、包含关系和相交关系^[27]。

3 结果与分析

3.1 月尺度下气象、农业及水文干旱事件的识别

基于 $\text{SPI}_{\text{月}}$ 、 $\text{SSI}_{\text{月}}$ 和 $\text{SRI}_{\text{月}}$,运用三维时空聚类识别方法,识别出 2022 年长江流域历时超过 2 月的气象、农业和水文干旱事件分别为 3、2 和 2 场。如表 1 所示,2022 年长江流域历时最长(≥ 6 月)的气象、农业和水文干旱事件均发生在夏季。以下主要分析 2022 年长江流域 3 种类型干旱的时空演变过程。

从图 3 可以看出,2022 年第 2 场气象干旱事件于 5 月发生在陕西南部、湖北、湖南北部、安徽以及江苏局部地区,干旱面积达 31.7 万 km^2 ,干旱烈度为 95 万 $\text{km}^2 \cdot \text{月}$;6 月受干旱影响区域逐渐向长江流域上游蔓延,干旱强度有所降低,干旱面积相较 5 月减少了 6.2 万 km^2 ;7 月旱情发展迅速,干旱面积显著增加,受旱区域主要集中在长江流域上游和

表 1 2022 年长江流域气象、农业、水文干旱事件的干旱特征

Table 1 Drought characteristics of meteorological, agricultural, and hydrological drought events in the Yangtze River Basin in 2022										
干旱类型	序号	开始时间	结束时间	干旱 历时/月	干旱中心 时间	干旱中心位置		干旱面积/ (万 km^2)	干旱烈度/ (万 $\text{km}^2 \cdot \text{月}$)	干旱强度
						北纬/($^\circ$)	东经/($^\circ$)			
气象干旱	1	2022-03	2022-04	2	2022-04	32.43	113.65	41	160	4.03
	2	2022-05	2022-11	7	2022-08	30.81	109.26	152	1560	10.28
	3	2022-10	2022-11	2	2022-11	30.90	100.15	9	40	4.16
农业干旱	1	2022-03	2022-06	4	2022-04	31.31	113.41	57	100	1.84
	2	2022-07	2022-12	6	2022-08	31.39	109.99	134	1590	11.85
水文干旱	1	2022-03	2022-05	3	2022-04	31.65	113.73	42	210	4.96
	2	2022-07	2022-12	6	2022-08	31.61	109.10	119	1460	12.28

中游区域,干旱面积为 87.6 万 km^2 ,约占整个研究区面积的 49%;8 月干旱面积达到此次干旱事件的峰值,占整个研究区面积的 74%,干旱烈度为 475 万 $\text{km}^2 \cdot \text{月}$,干旱中心位于重庆市奉节县;9 月干旱面积减少,干旱区域主要集中在长江流域中下游,干旱强度较大的区域主要分布在湖南南部、湖北东部、江西以及安徽西部地区,干旱中心位于湖北省荆门市;10—11 月干旱情况逐渐缓解,11 月干旱面积仅占研究区面积的 8.6%。综上所述,整场气象干旱事件经历了发生、减弱、增强、消亡 4 个过程。

如图 4 所示,2022 年长江流域第 2 场农业干旱事件比气象干旱事件晚 2 月发生,起始于 7 月,起源于四川东南部、重庆南部、贵州以及江西东部地区,干旱强度较小,干旱面积仅占研究区面积的 19%,随后干旱中心逐渐向南迁移;8 月达到干旱面积峰值 128 万 km^2 ,干旱烈度为 273 万 $\text{km}^2 \cdot \text{月}$,干旱强

度较大地区主要分布在四川中部、湖南南部和江西等地;9—10 月干旱面积逐渐缩小,重旱区域主要分布在长江中下游的湖南和江西等地,干旱中心逐渐向东北方向迁移至湖北省南漳县;11 月湖南和江西部分地区干旱强度减弱,流域干旱面积为 103 万 km^2 ,干旱烈度为 380 万 $\text{km}^2 \cdot \text{月}$;随后干旱面积逐渐减小,重旱区域面积也减小,主要集中在湖北南部、湖南、贵州北部及西部和江西局部地区。综上所述,本场农业干旱事件历时 6 月,从受干旱影响范围来看,与姜雨彤等^[19]得到的空间分布结果基本一致,经历了发生、增强、减弱、增强、减弱 5 个过程。

由图 5 可以看出,2022 年第 2 场水文干旱事件历时 6 月,干旱面积约占研究区面积的 50%。此次水文干旱事件于 2022 年 6 月起始于贵州北部、重庆南部等地区,8 月干旱面积达到高峰期,约为 92.4 万 km^2 ,干旱烈度为 278 万 $\text{km}^2 \cdot \text{月}$,干旱中心

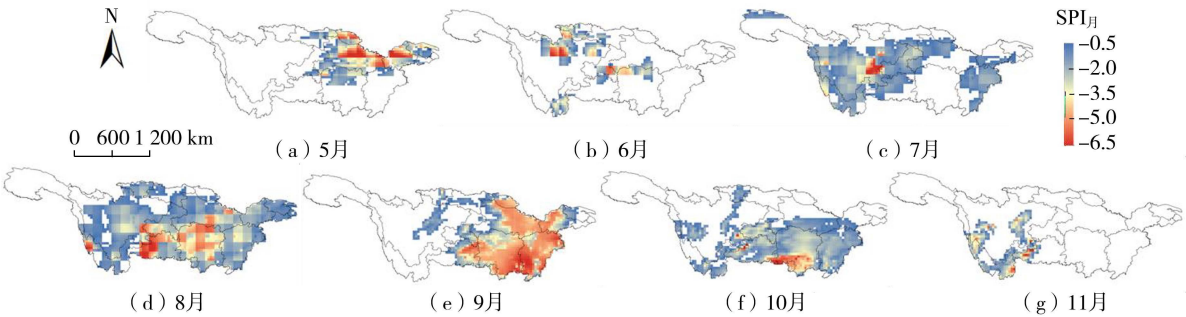


图 3 2022 年第 2 场气象干旱事件的时空动态演变

Fig. 3 Spatiotemporal dynamic evolution of second meteorological drought event in 2022

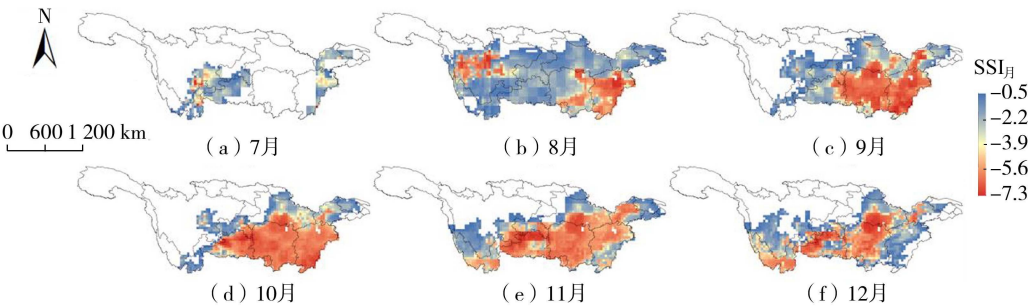


图 4 2022 年第 2 场农业干旱事件的时空动态演变

Fig. 4 Spatiotemporal dynamic evolution of second agricultural drought event in 2022

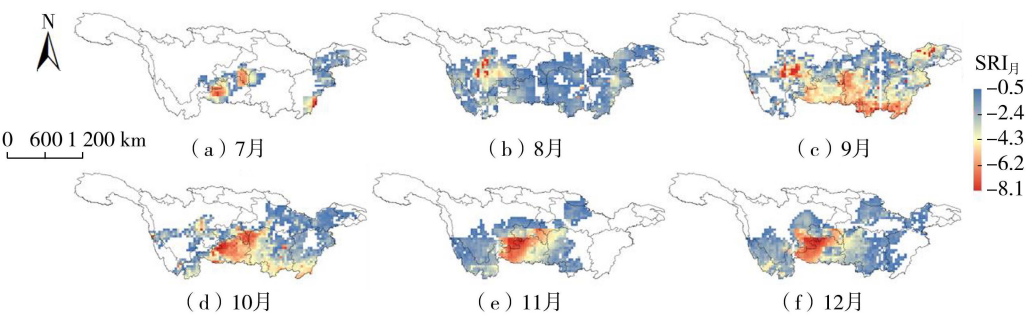


图 5 2022 年第 2 场水文干旱事件的时空动态演变

Fig. 5 Spatiotemporal dynamic evolution of second hydrological drought event in 2022

逐渐向东南方向迁移至重庆市城口县;9—11 月为干旱衰减期,干旱面积和烈度均呈现逐渐减小的趋势,干旱中心自东向西迁移;12 月干旱面积进一步向长江下游扩大,重旱区域集中分布在重庆、贵州以及四川局部地区,干旱中心位于四川省万源市。

3.2 候尺度下气象、农业、水文干旱时空响应关系

3.2.1 气象-农业-水文干旱事件对匹配

基于 $SPI_{候}$ 、 $SSI_{候}$ 和 $SRI_{候}$,运用三维时空聚类识别方法识别出 2022 年长江流域共发生了 16 场气象干旱事件、3 场农业干旱事件和 16 场水文干旱事件。如图 6 所示,根据时空尺度的三类型干旱事件对匹配规则,得出 2022 年长江流域在候尺度下匹配成功的气象-水文干旱事件对和农业-水文干旱事件对分别有 3 场和 1 场(图 6),由气象和农业干旱事件共同诱发的水文干旱事件对有 1 场。由于只考虑了 2022 年长江流域所发生的干旱事件,时间序列较短,不同类型的干旱事件对匹配成功的数量较少,未出现多场气象干旱或多场农业干旱事件共同引发一场水文干旱事件的情况。

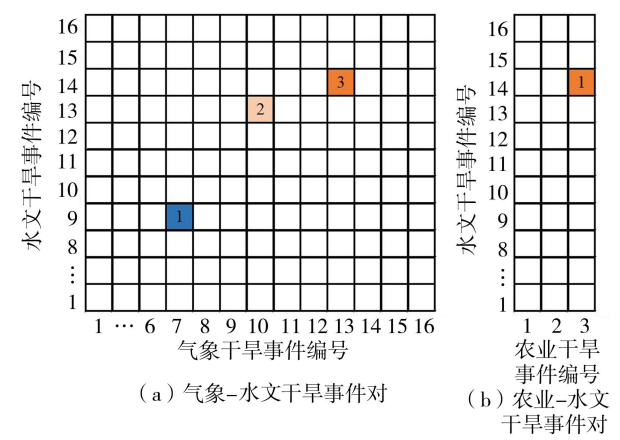


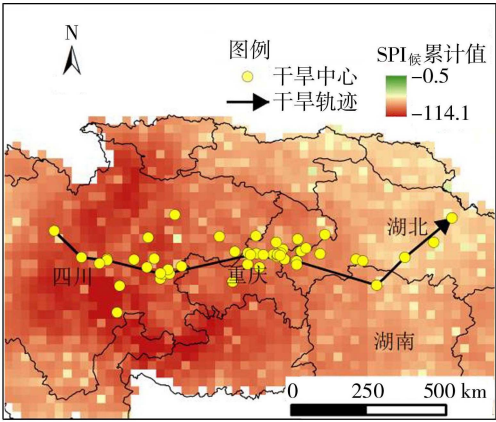
图 6 不同类型干旱事件对匹配示意图

Fig.6 Matching diagram of different types of drought events

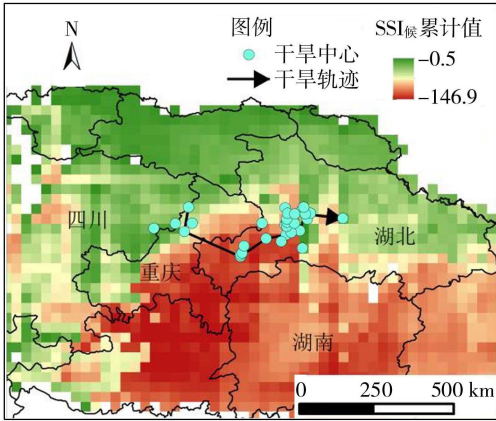
3.2.2 气象-农业-水文干旱事件对时空响应特征

以匹配成功的气象-农业-水文干旱事件对为例,分别探讨水文干旱对气象干旱和农业干旱的时空响应特征,该场(第 14 场)水文干旱事件由第 13 场气象干旱事件和第 3 场农业干旱事件共同导致。对比不同类型干旱事件的迁移路径(图 7)可以看出,水文干旱事件的迁移路径受到气象和农业干旱事件迁移路径的影响,三者迁移路径方向上具有较强的一致性。在该场干旱事件对中,以 $SPI_{候}$ 和 $SRI_{候}$ 为基础识别出的气象和水文干旱事件的起始时间早于月尺度下干旱事件的发生时间,而干旱发生初期受旱区域主要集中在上中游,因此,从干旱指数累计值的空间分布上来看,气象和水文干旱的受

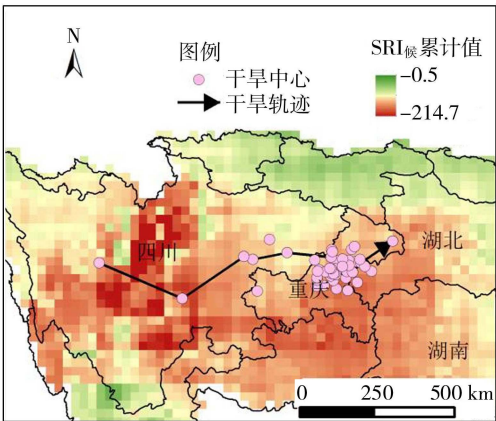
旱影响范围覆盖了整个长江流域,受重旱区域集中在长江流域上中游。该结果与月尺度数据结果有所不同,主要原因是候尺度数据更精细,在干旱事件识别过程中能够更准确地判断出干旱发生的具体时间。由此看来,在针对某一场次的特大干旱研究中,时间序列的精细程度也会影响干旱事件的识别结果,时间序列精度越好,识别干旱事件的发生时间越准确,有助于在干旱初期提出抗旱决策。



(a) 第13场气象干旱事件



(b) 第3场农业干旱事件



(c) 第14场水文干旱事件

图 7 候尺度下 2022 年匹配成功的不同类型干旱事件迁移轨迹

Fig.7 Migration trajectories of different types of drought events successfully matched on pentad scale in 2022

由气象、农业和水文事件的迁移路径(图7)可以看出,该场干旱事件对的中心主要分布在四川、重庆和湖北等地,其中气象和水文干旱中心在7月初至12月中下旬主要分布在重庆中部,农业干旱中心在8月末至12月下旬集中分布在湖北东部。在干旱迁移方向上,三类干旱事件均从长江上游迁移至长江中下游。时间上,该场干旱事件对中,水文干旱滞后气象干旱25 d,农业干旱滞后水文干旱90 d。其主要原因是在长江流域干旱期间水利部组织实施了“长江流域水库群抗旱保水联合调度”专项行动,优化调整供水和灌溉计划,充分发挥水利工程抗旱保水作用。长江水利委员会统筹抗旱用水需求,精准调度长江流域75座大中型水库,累计补水61.6亿 m^3 。截至2022年8月21日,长江上游控制性水库群共补水8.3亿 m^3 ,其中三峡水库共补水4.8亿 m^3 ,雅砻江和金沙江下游梯级水库连续补水3.5亿 m^3 ;湖南省调度湘资沅澧四水干支流骨干大中型水库群累计补水18.5亿 m^3 ;江西省调度万安、峡江等鄱阳湖水系共补水8.9亿 m^3 ,累计增加入湖量2.25亿 m^3 。第二次(9月上旬)抗旱补水调度专项行动期间共补水25.9亿 m^3 ,其中三峡水库、洞庭湖“四水”、鄱阳湖“五河”分别补水6.8亿、11.0亿、8.1亿 m^3 ^[37]。通过精细化调度水库群,一定程度上缓解了长江中下游干流水位偏低情况,有效减缓了农业干旱发生时间,保障了补水沿线356处大中型灌区190.4万 hm^2 秋粮作物及众多小型灌区灌溉用水需求^[16]。

图8(a)(b)中的干旱面积是历时内各类干旱事件在研究区的投影面积,图8(c)(d)中干旱烈度是所有干旱栅格缺水程度之和。从图8中可以看出,该场干旱事件对中干旱烈度峰值出现在8月中旬,因此,可根据干旱烈度的时程变化将该场干旱事件对分为两个阶段:①第一阶段为4月上旬至8月中旬,在第3场气象-水文干旱和第1场农业-水文干旱事件对中,气象和农业干旱均处于发展期,共同引发水文干旱,且两者在空间分布上具有较强的一致性(图7)。随后气象和水文干旱面积逐渐增加,干旱烈度显著增强,直至8月中旬该场干旱事件对进入了高峰期,水文干旱面积约占长江流域的90%,水文干旱面积和烈度分别为163万 km^2 和452万 $\text{km}^2\cdot\text{月}$,干旱中心均分布在长江上游。②第二阶段为8月中旬至12月末,气象干旱和水文干旱面积在11月上旬达到第二次峰值,该结果与夏智宏等^[18]的计算结果基本一致,农业干旱相较气象和水文干旱面积明显减少,干旱烈度逐渐减弱。气

象和农业干旱中心逐渐从重庆向湖北迁移(图7),最终分别在湖北广水市和重庆奉节县消失。

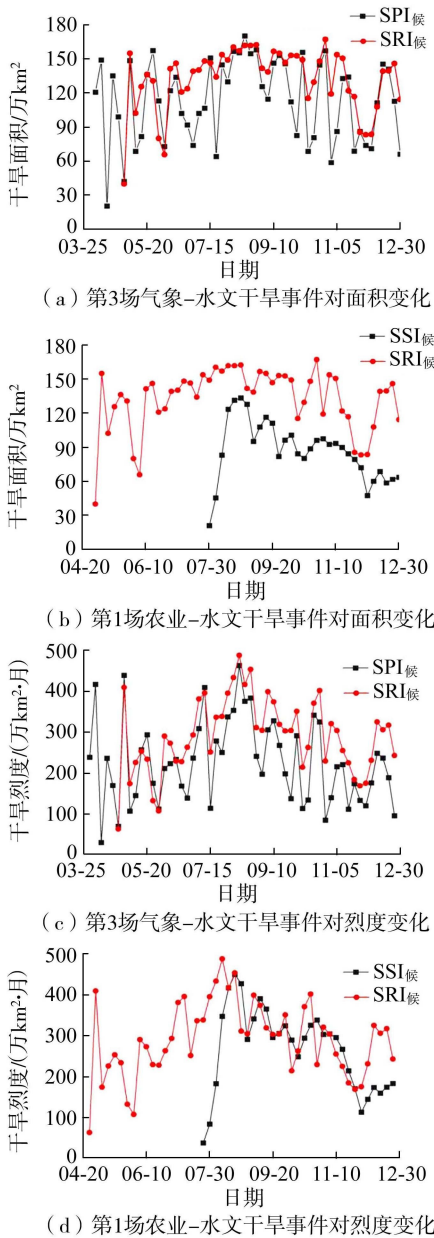


图8 第3场气象-水文干旱事件对和第1场农业-水文干旱事件对面积和烈度变化

Fig. 8 Temporal variations of area and severity of third meteorological-hydrological drought event and first agricultural-hydrological drought event

4 结论

- 采用三维时空聚类识别方法,在月尺度下识别出2022年长江流域历时大于2月的气象、农业和水文干旱事件分别为3、2和2场,长历时、高烈度和大影响面积的干旱事件发生在夏季,起始于长江流域上游。
- 在候尺度下匹配成功的气象-农业-水文干旱事件对共1场,该场干旱事件对中,水文干旱事件对

由气象和农业干旱事件共同引发,水文干旱滞后气象干旱 25 d,农业干旱滞后水文干旱 90 d。不同类型干旱事件在路径迁移方向和空间分布上具有较强的一致性,干旱中心均从长江流域上游向中下游方向迁移,气象、农业和水文干旱中心分别在湖北、重庆和湖北消失。

参考文献:

[1] 冯凯,李彦彬,王飞,等. 基于改进三维识别方法的西北地区干旱事件分析[J]. 水资源保护,2023,39(1):63-72. (FENG Kai,LI Yanbin,WANG Fei,et al. Analysis of drought events in Northwest China based on an improved three-dimensional identification method [J]. Water Resources Protection,2023,39(1):63-72. (in Chinese))

[2] 冯宝飞,邱辉,纪国良. 2022 年夏季长江流域气象干旱特征及成因初探[J]. 人民长江,2022,53(12):6-15. (FENG Baofei, QIU Hui,JI Guoliang. Characteristics and causes of meteorological drought over Changjiang River Basin in summer of 2022 [J]. Yangtze River, 2022, 53 (12): 6-15. (in Chinese))

[3] 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))

[4] 李忆平,张金玉,岳平,等. 2022 年夏季长江流域重大干旱特征及其成因研究[J]. 干旱气象,2022,40(5):733-747. (LI Yiping, ZHANG Jinyu, YUE Ping, et al. Study on characteristics of severe drought event over Yangtze River Basin in summer of 2022 and its causes [J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40 (5): 733-747. (in Chinese))

[5] 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 & Water Engineering, 2022, 33 (2): 194-202. (in Chinese))

[6] DAI Aiguo. Increasing drought under global warming in observations and models [J]. Nature Climate Change, 2013, 3 (1): 52-58.

[7] 罗荃,余博. 全球多地遭遇严重干旱气候[J]. 生态经济,2022,38(8):5-8. (LUO Quan, YU Bo. Severe arid climate in multiple parts of the world [J]. Ecological Economy, 2022, 38 (8): 5-8. (in Chinese))

[8] 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))

[9] 杨少康,刘冀,张特,等. 汉江上游气象-水文干旱特征变量响应概率研究[J]. 水资源保护,2023,39(5):143-151. (YANG Shaokang, LIU Ji, ZHANG Te, et al. Study on meteorological-hydrological drought characteristic variable response probability in upper reaches of the Hanjiang River Basin [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (5): 143-151. (in Chinese))

[10] 姜雨彤,郝增超,冯思芳,等. 长江与黄河流域复合高温干旱事件时空演变特征[J]. 水资源保护,2023,39(2):70-77. (JIANG Yutong, HAO Zengchao, FENG Sifang, et al. Spatiotemporal evolution characteristics in compound hot-dry events in Yangtze River and Yellow River basins [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (2): 70-77. (in Chinese))

[11] 黄涛,徐力刚,范宏翔,等. 长江流域干旱时空变化特征及演变趋势[J]. 环境科学研究,2018,31(10):1677-1684. (HUANG Tao, XU Ligang, FAN Hongxiang, et al. Temporal and spatial variation characteristics and the evolution trends of droughts in the Yangtze River Basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31 (10): 1677-1684. (in Chinese))

[12] 张佳运,马淑梅,余常兵,等. 长江流域旱地多熟模式水分供需平衡特征与水分生产效益[J]. 作物学报,2022,48(11):2891-2907. (ZHANG Jiayun, MA Shumei, YU Changbing, et al. Characteristics of water supply-demand equilibrium and water production benefits of the dryland multiple cropping patterns in the Yangtze River Basin [J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48 (11): 2891-2907. (in Chinese))

[13] 高琦,徐明. 2019 年长江中下游伏秋连旱的异常特征分析[J]. 气象与环境学报,2021,37(4):93-99. (GAO Qi, XU Ming. Characteristics of abnormal continuous drought in summer and autumn in the middle and lower reaches of the Yangtze River in 2019 [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2021, 37 (4): 93-99. (in Chinese))

[14] 吕星玥,荣艳淑,石丹丹. 长江中下游地区 2010/2011 年秋冬春连旱成因再分析[J]. 干旱气象,2019,37(2):198-208. (LYU Xingyue, RONG Yanshu, SHI Dandan. Reanalysis on the causes of continuous drought from autumn 2010 to spring 2011 in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37 (2): 198-208. (in Chinese))

[15] 李俊,袁媛,王遵娅,等. 2019 年长江中下游伏秋连旱演变特征[J]. 气象,2020,46(12):1641-1650. (LI Jun, YUAN Yuan, WANG Zunya, et al. Evolution characteristics of continuous drought in late summer and

- autumn in the middle and lower reaches of Yangtze River Valley in 2019 [J]. Meteorological Monthly, 2020, 46 (12):1641-1650. (in Chinese))
- [16] 屈艳萍,吕娟,苏志诚,等. 2022 年长江流域夏秋旱特点分析与思考[J]. 中国防汛抗旱,2023,33(3):30-33. (QU Yanping,LYU Juan,SU Zhicheng,et al. Analysis and thinking on summer-autumn drought in the Yangtze River Basin in 2022[J]. China Flood & Drought Management, 2023,33(3):30-33. (in Chinese))
- [17] 夏军,陈进,余敦先. 2022 年长江流域极端干旱事件及其影响与对策[J]. 水利学报,2022,53(10):1143-1153. (XIA Jun,CHEN Jin,SHE Dunxian. Impacts and countermeasures of extreme drought in the Yangtze River Basin in 2022 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022,53(10):1143-1153. (in Chinese))
- [18] 夏智宏,刘敏,秦鹏程,等. 2022 年长江流域高温干旱过程及其影响评估[J]. 人民长江,2023,54(2):21-28. (XIA Zhihong, LIU Min, QIN Pengcheng, et al. Development process of high temperature and drought events over Yangtze River Basin in 2022 and assessment on its influences[J]. Yangtze River,2023,54(2):21-28. (in Chinese))
- [19] 姜雨彤,侯爱中,郝增超,等. 长江流域 2022 年高温干旱事件演变及历史对比[J]. 水力发电学报,2023,42(8):1-9. (JIANG Yutong, HOU Aizhong, HAO Zengchao,et al. Evolution and historical comparison of hot droughts in the Yangtze River Basin in 2022[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(8):1-9. (in Chinese))
- [20] 韩会明,孙军红. 赣江流域气象水文干旱传播特征分析[J]. 中国农村水利水电,2022(12):101-106. (HAN Huiming,SUN Junhong. An analysis of the meteorological and hydrological drought propagation characteristics in Ganjiang River Basin [J]. China Rural Water and Hydropower,2022(12):101-106. (in Chinese))
- [21] 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))
- [22] CHANGNON S A, Jr. Detecting drought conditions in Illinois [R]. Champaign: Illinois State Water Survey Division,1987.
- [23] 田丰,杨建华,刘雷震,等. 地理学视角的干旱传播概念、特征与影响因素研究进展[J]. 地理科学进展,2022,41(1):173-184. (TIAN Feng,YANG Jianhua,LIU Leizhen,et al. Progress of research on the conception, characteristic, and influencing factors of drought propagation from the perspective of geographic sciences [J]. Progress in Geography, 2022, 41(1):173-184. (in Chinese))
- [24] 刘永佳,黄生志,李紫妍,等. 气象干旱到不同等级水文干旱的传播阈值及其动态变化:以渭河流域为例[J]. 灾害学,2022,37(4):107-114. (LIU Yongjia, HUANG Shengzhi, LI Ziyang, et al. Propagation threshold and dynamic changes of meteorological drought to hydrological drought of different levels: a case study of Weihe River Basin[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(4):107-114. (in Chinese))
- [25] 许凯. 我国干旱变化规律及典型引黄灌区干旱预报方法研究[D]. 北京:清华大学,2015.
- [26] 冯凯,栗晓玲. 基于三维视角的农业干旱对气象干旱的时空响应关系[J]. 农业工程学报,2020,36(8):103-113. (FENG Kai, SU Xiaoling. Spatiotemporal response characteristics of agricultural drought to meteorological drought from a three-dimensional perspective [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2020,36(8):103-113. (in Chinese))
- [27] 姜田亮. 西北地区生态干旱时空演变特征及其对气象干旱和地下水干旱的响应[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2022.
- [28] 陈珺,黄燕华,洪朋,等. 基于机器学习模型的河道水位预测[J]. 水利水电科技进展,2023,43(3):9-14. (CHEN Jun, HUANG Yanhua, HONG Peng, et al. Prediction of river water level based on machine learning model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(3):9-14. (in Chinese))
- [29] 李帅,杜涛. 长江流域气象干旱与降水季节性关系研究[J]. 水电能源科学,2021,39(8):1-5. (LI Shuai, DU Tao. Study on seasonality index of precipitation and its relation to meteorological droughts in the Yangtze River Basin[J]. Water Resources and Power,2021,39(8):1-5. (in Chinese))
- [30] 刘君龙,袁喆,许继军,等. 长江流域气象干旱演变特征及未来变化趋势预估[J]. 长江科学院院报,2020,37(10):28-36. (LIU Junlong, YUAN Zhe, XU Jijun, et al. Meteorological drought evolution characteristics and future trends in the Yangtze River Basin[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2020,37(10):28-36. (in Chinese))
- [31] LUO Xuan, LUO Xian,JI Xuan, et al. Meteorological and hydrological droughts in the Lancang-Mekong River Basin: spatiotemporal patterns and propagation[J]. Atmospheric Research,2023,293:106913.
- [32] 栗晓玲,梁晓萱,吴海江,等. 表征生态状况的综合干旱指数构建及干旱风险分析[J]. 水资源保护,2023,39(2):50-58. (SU Xiaoling, LIANG Xiaoxuan, WU Haijiang, et al. Construction of comprehensive drought index representing ecological condition and drought risk analysis[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2):50-58. (in Chinese))

[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)