

西南地区不同下垫面干旱传播特征及差异分析

皇甫萌娜¹,李 冲¹,赵乾佐²,许 杨³,张 璇¹,郝芳华¹

(1. 北京师范大学水科学研究院; 2. 香港大学土木工程学院; 3. 北京林业大学水土保持学院)

摘要:为探究西南地区不同下垫面条件下的干旱传播差异,采用 *K*-prototypes 聚类算法将研究区划分为轻度喀斯特-农业主导生态区、典型喀斯特-林灌生态区、轻度喀斯特-高山草灌生态区 3 种类型下垫面。结合多种干旱指数与最大相关系数法计算干旱传播时间,利用结构方程模型构建了不同类型下垫面的干旱传播链条。结果表明:西南地区标准化降水蒸散指数与标准化土壤湿度指数、标准化径流指数呈强正相关关系;各干旱指数与地下水干旱指数呈中等相关关系,最大相关系数为 0.3~0.6;典型喀斯特-林灌生态区内各类干旱向地下水干旱传播的速度快于其他类型下垫面,平均传播时间范围为 6.9~7.8 月;西南地区干旱主要遵循气象—浅层土壤水—水文—深层土壤水—地下水干旱的传播规律,但仅典型喀斯特-林灌生态区内深层土壤水干旱可显著传播至地下水干旱,其余类型下垫面向地下水干旱传播的趋势不显著。

关键词:干旱传播;气象干旱;地下水干旱;结构方程模型;西南地区

中图分类号:P339 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2026)05-0108-12

Characteristics and differential analysis of drought propagation of different underlying surfaces in Southwest China//Huangfu Mengna¹, Li Chong¹, Zhao Qianzuo², Xu Yang³, Zhang Xuan¹, Hao Fanghua¹ (1. College of Water Sciences, Beijing Normal University; 2. Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong; 3. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University)

Abstract: To investigate the differences in drought propagation under various underlying surface conditions in Southwest China, the *K*-prototypes clustering algorithm was employed to classify the study area into three underlying surface types: the mild karst-agriculture-dominated ecological area, the typical karst-forest and shrub ecological area, and the mild karst-alpine grassland and shrub ecological area. Drought propagation times were quantified using multiple drought indices in combination with the maximum correlation coefficient method, and structural equation model was applied to construct drought propagation chains for different underlying surface types. The results showed that the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) was strongly positively correlated with the standardized soil moisture index (SSMI) and the standardized runoff index (SRI) in Southwest China, while all drought indices showed moderate correlations with the GRACE-based groundwater drought index (GGDI), with maximum correlation coefficients ranging from 0.3 to 0.6. The propagation time from various drought types to groundwater drought in the typical karst-forest and shrub ecological area was shorter than that in other regions, with mean propagation times ranging from 6.9 to 7.8 months. Drought in Southwest China generally followed meteorological-shallow soil moisture-hydrological-deep soil moisture-groundwater drought propagation sequence. However, only in the typical karst-forest and shrub ecological area can deep soil moisture drought significantly propagate to groundwater drought, while in other regions the propagation trend toward groundwater drought was not significant.

Key words: drought propagation; meteorological drought; groundwater drought; structural equation model; Southwest China

随着全球气候变暖及人类活动影响加剧,干旱事件凭借其频次高、历时长、危害程度大等特征,已成为对人类社会影响范围最广的灾害之一^[1-2]。根据研究目的与水文要素的不同,干旱通常被划分为

气象干旱、水文干旱、农业干旱、社会经济干旱 4 类^[3]。不同干旱类型间联系密切^[4],气象干旱随水文循环过程传递异常信号,逐步触发不同类型干旱的过程称为干旱传播^[5]。地下水干旱作为一种

基金项目:国家自然科学基金项目(42271023,42330515)
作者简介:皇甫萌娜(2002—),女,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:202421470013@mail.bnu.edu.cn
通信作者:张璇(1984—),女,教授级高级工程师,博士,主要从事流域水环境管理研究。E-mail:xuan@bnu.edu.cn

严重影响区域水资源可持续发展的新型水文干旱类型,具有隐蔽性及滞后性^[6-8],加之监测站点稀疏等因素,阻碍了地下水干旱相关研究的发展^[9]。近年来,GRACE/GRACE-FO 卫星的运行行为地下水干旱监测、驱动因子分析等研究提供了关键数据支持^[10],但包含地下水干旱在内的多级干旱传播过程仍不明晰。同时,干旱传播过程受下垫面条件、人类活动等因素影响,存在空间异质性^[5]。在各类干旱向地下水干旱传播的过程中,地形地貌、植被覆盖类型、土壤属性等下垫面条件起着关键调控作用^[11-12]。因此,基于下垫面异质性,差异化探究多级干旱传播规律,对深入理解干旱传播过程、旱情监测方案的针对性制定等具有重要意义。

了解干旱传播的特征有助于定量分析干旱传播过程^[5],为旱情早期预警提供依据。其中,干旱传播时间是干旱传播最重要的特征之一,常采用相关分析法进行研究,该方法计算简便,能够反映水分亏缺累积效应,是目前确定干旱传播时间的最基本方法。例如:杜鸿等^[13]结合游程理论和皮尔逊相关系数,探究了嘉陵江流域气象—水文干旱的传播时间;Um 等^[14]利用滞后相关分析法,统计了长江流域气象—水文干旱的累积传播时间及传播滞时;Ding 等^[15]利用皮尔逊相关系数,分析了中国不同气候区和季节下气象干旱、水文干旱及农业干旱之间的传播时间;Xu 等^[16]结合相关分析和滑动窗口法,确定了长江流域气象—农业干旱的动态传播时间。近年来,事件匹配^[17]、条件概率^[18]、交叉小波变换^[19]、收敛交叉映射^[20]等方法也陆续被用于干旱传播时间的确定。

研究多级干旱传播规律及链条能够有效避免干旱级联效应形成,对旱情风险应对至关重要^[21]。Han 等^[22]基于干旱传播时间进行研究,认为中国干旱传播遵循气象—水文—农业—地下水干旱的路径。但在我国西南地区,喀斯特地貌发育广泛^[23],植被覆盖类型丰富,下垫面空间异质性显著,其干旱传播较该链条具有更多不确定性,已有学者对此展开了研究。例如:石朋等^[24]选用西南地区 1968—2017 年站点实测数据,利用标准化降水蒸散指数 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI) 与标准化径流指数 (standardized runoff index, SRI) 量化了西南地区气象—水文干旱传播时间,为 2~7 月;Liu 等^[25]研究发现西南地区岩溶区气象—农业干旱与农业—地下水干旱的传播时间较非岩溶区缩短了 1.25 月;Shi 等^[26]通过日尺度阈值法,分析认为岩溶区气象—水文干旱传播的强度与速度显著高于非岩溶区。以上研究对探究西南地区干旱传

播特征及过程具有重要意义,但尚未形成完整的干旱传播链条,且多聚焦于干旱传播速度层面,对干旱传播机制探讨不足;而且,研究多围绕喀斯特地貌对西南地区干旱传播过程的影响开展分析,未考虑高程、植被覆盖类型等其他下垫面要素对于干旱传播过程的作用。

综上,为综合探究不同下垫面条件下的多级干旱传播差异,本文聚焦西南地区喀斯特地貌分布、高程、植被覆盖类型 3 种下垫面要素,分别以 SPEI、SRI、标准化土壤湿度指数 (standardized soil moisture index, SSMI)、GRACE 地下水干旱指数 (GRACE-based groundwater drought index, GGDI) 表征气象干旱、水文干旱、土壤水干旱、地下水干旱,采用最大相关系数法确定各类型干旱的传播时间,利用结构方程模型量化各类型干旱之间的直接与间接效应,以厘清不同下垫面条件下的干旱传播链条,为区域差异化水资源管理、旱情风险预警提供科学依据与支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

西南地区 (21°8′~34°19′N, 97°31′~110°11′E) 包括云南、四川、贵州、重庆 4 省 (市),总面积约 113 万 km²,区内喀斯特地貌分布广泛,约占总面积的 42.8% (图 1)。西南地区地处北回归线附近,以亚热带季风气候为主^[27],雨热同期,2002—2024 年降水量均大于 800 mm,时空分布极不均匀;地势较高,呈西北高东南低的分布格局;地貌复杂多样,由横断山脉、四川盆地、云贵高原等构成^[28];植被覆盖类型丰富,以针叶林、阔叶林、灌丛、草地和栽培植被为主。

1.2 数据来源

本文研究时段为 2002 年 4 月至 2024 年 11 月,所用数据主要包括基础地理数据、气象数据、陆面水文数据、陆地水储量变化数据及地下水位实测数据,使用前采用双线性内插法统一重采样至 0.25°×0.25°空间分辨率。基础地理数据包括数字高程模型、植被覆盖类型及喀斯特地貌分区,其中数字高程模型、植被覆盖类型来源于中国科学院资源环境科学与数据平台 (<https://www.resdc.cn>),喀斯特地貌分区来源于《中国岩溶环境地质图 (1 : 500 万)》;气象数据包括逐月降水量及潜在蒸散发量数据,来源于物理—一致性良好、干旱研究中应用广泛的 ERA5-Land 再分析数据集 (<https://cds.climate.copernicus.eu>);陆面水文数据中,浅层土壤 (0~7 cm) 水分、深层土壤 (100~289 cm) 水分及径流深数据来源于 ERA5-Land 再分析数据集,土壤水、雪水当量、冠层水储量变化等浅层地表水储量变化数

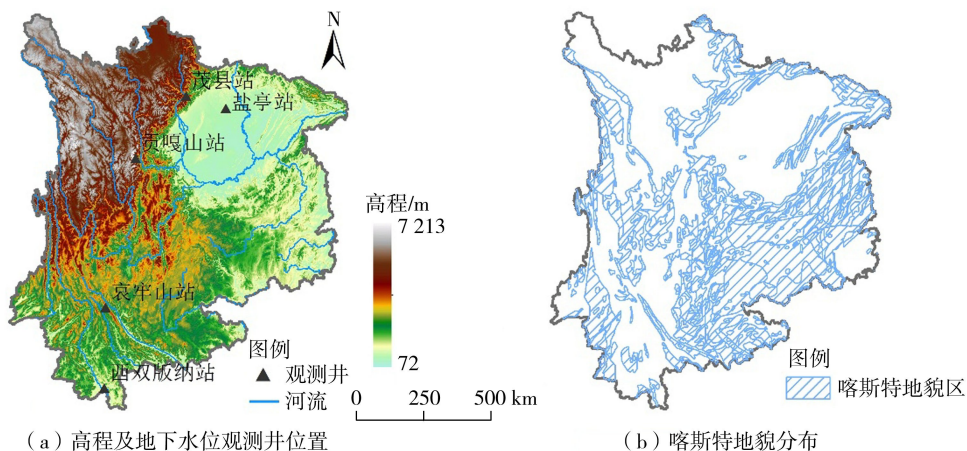


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

据来源于 GLDAS 数据集 (<https://disc.gsfc.nasa.gov>); 陆地水储量变化数据来源于 CSR GRACE/GRACE-FO RL06 mascons (CSR mascons) 数据集 (https://www2.csr.utexas.edu/grace/RL06_mascons.html), 间断期数据利用奇异谱分析法进行插值; 地下水位实测数据来源于国家生态科学数据中心资源共享服务平台的《2005—2014 年 CERN 地下水位数据集》(<https://www.nesdc.org.cn>), 用于验证地下水储量变化计算结果, 研究区内包含茂县站、盐亭站、贡嘎山站、哀牢山站、西双版纳站 5 个观测井, 具体位置见图 1(a)。

2 研究方法

2.1 下垫面类型划分

采用 K -prototypes 聚类算法对研究区的下垫面类型进行划分, 该算法通过引入参数控制不同类型数据在聚类过程中的权重, 结合了 K -means 算法处理数值型数据与 K -modes 算法处理分类型数据的优势, 在混合型数据的聚类分析中得到了广泛应用^[29-30]。本文基于高程、喀斯特地貌分布、植被覆盖类型 3 种下垫面要素对研究区栅格进行聚类, 进而识别不同下垫面类型, 其中高程属于数值型数据, 喀斯特地貌分布、植被覆盖类型属于分类型数据。具体步骤^[31]为: ①随机选取 K 个样本为初始聚类中心; ②计算各样本与初始聚类中心的距离, 并将其划分至距离最近的中心点所对应的类别中, 其中数值型变量计算欧氏距离的平方, 分类型变量计算不匹配度; ③更新聚类中心, 数值型、分类型样本分别取均值、众数作为新原型特征值; ④计算成本函数, 重复以上过程, 迭代至总成本或样本类别不再变化, 终止算法并返回最终聚类结果。

2.2 干旱指数构建

干旱强度、影响范围等特征难以直接观测, 直接

将不同时空尺度下的水文量进行比较容易产生偏差^[32], 因此, 目前干旱研究通常借助实测或模拟的水文气象数据构建干旱指数以识别、表征干旱特征。本文采用 SPEI、SRI、SSMI、GGDI 分别表征气象干旱、水文干旱、土壤水干旱、地下水干旱, SPEI 和 SRI 的计算方法见文献[33-36], SSMI 的计算方法见文献[37-38], GGDI 的计算方法见文献[39], 选用 GLDAS 数据集及插补后的 CSR mascons 数据集用于 GGDI 的计算。同时, 由于干旱传播时间、强度随土壤深度的变化而变化^[40], 为细化干旱传播过程, 利用对短期天气与气候响应敏感的浅层土壤水分^[41]反映浅层土壤水干旱情况, 受地表影响最小且具有长期储水能力的深层土壤水分^[42]反映深层土壤水干旱情况, 并分别采用浅层土壤水干旱指数 (SSMIS) 和深层土壤水干旱指数 (SSMID) 表征, 计算方法同 SSMI。通过滑动累积法获得不同时间尺度下的水分盈亏、径流深、土壤水分序列, 进而计算多时间尺度的干旱指数。

2.3 干旱传播时间计算

采用最大相关系数法计算干旱传播时间。以不同类型干旱指数为变量, 一类干旱指数构建多时间尺度序列, 另一类干旱指数采用月尺度序列, 计算不同时间尺度组合下两类干旱指数之间的相关系数, 最大相关系数对应的时间尺度即为两类干旱之间最可能的传播时间^[13,43]。以气象—水文干旱传播为例, 计算格点研究期内 1—12 月的月尺度 SRI 与多时间尺度 (本文为 1~24 月) 对应月份 SPEI 序列的皮尔逊相关系数, 取最大的相关系数作为年最大相关系数, 所对应的 SPEI 时间尺度则为该格点气象—水文干旱的传播时间^[9]。

2.4 结构方程模型

结构方程模型克服了传统回归分析的局限, 以协方差矩阵为核心, 可同时整合多个显变量及潜变

量,以路径形式表现变量间的直接与间接效应^[44],在多变量因果关系的建立、估计及检验中广泛应用。结构方程模型通常由测量模型、结构模型两部分组成,分别探究模型中显变量与潜变量之间、各潜变量之间的关系,具体表达式参考张豪等^[45]研究。当结构方程模型中仅包含结构模型且潜变量被显变量替代时,即为路径分析。在水科学领域中,当解释多要素间影响效应及作用机制时,常选用路径分析以简化模型。本文以各类干旱指数为显变量,使用 SPSS Amos 29 软件,利用路径分析量化不同下垫面类型下各类干旱之间的直接与间接效应,进而结合干旱传播特征与水循环理论,差异化厘清干旱传播链条。

路径系数是结构方程模型的核心参数之一,取值范围通常为-1~1,用于表征变量间的效应方向与相对强度^[46],路径系数为正(负)时表示正向(负向)效应,绝对值越大则相对强度越大。在模型结构中,两变量间若通过单一路径直接相连,则对应路径系数为直接效应值;两变量间若通过一个或多个中介变量联系,则存在间接效应,间接效应值为各间接路径系数乘积之和^[47]。变量间的总效应为直接效应与所有间接效应之和^[48]。

为检验结构方程模型的拟合效果,选取卡方自由度比(χ^2/df)、均方根误差近似值(RMSEA)、非规范拟合指数(TLI)为评估指标,当 $1.00 < \chi^2/df < 3.00$ 、RMSEA 小于 0.08、TLI 大于 0.95 时认为模型拟合效果良好,当 $1.00 < \chi^2/df < 5.00$ 、RMSEA 小于 0.1、TLI 大于 0.90 时认为模型拟合效果可以接受^[49]。

3 结果与分析

3.1 下垫面类型

西南地区喀斯特地貌发育广泛,高程、植被覆盖类型等下垫面要素具有典型区域特征,采用 K-prototypes 聚类算法将研究区下垫面划分为 3 种类型:轻度喀斯特-农业主导生态类下垫面(以下简称“农业类”)、典型喀斯特-林灌生态类下垫面(以下简称“岩溶类”)、轻度喀斯特-高山草灌生态类(以下简称“高山类”),其空间分布见图 2。农业类分布于四川盆地、云南中部及贵州东南部,区内植被以栽培植被为主,喀斯特地貌分布占比低于 20%;岩溶类集中于贵州、云南东部及四川南部局部地区,区内林地、灌丛分别占该类下垫面的 33.6%、29.8%,喀斯特地貌发育广泛,分布占比 70% 以上;高山类主要位于横断山脉一带,平均海拔高于 3 900 m,植被覆盖类型以草地、灌丛为主,分别占该类下垫面的 34%、39.7%。

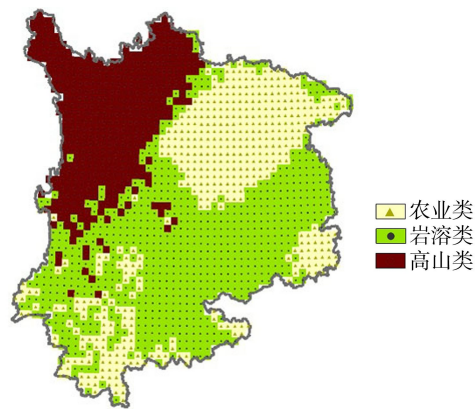


图 2 不同下垫面类型的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of different underlying surface types

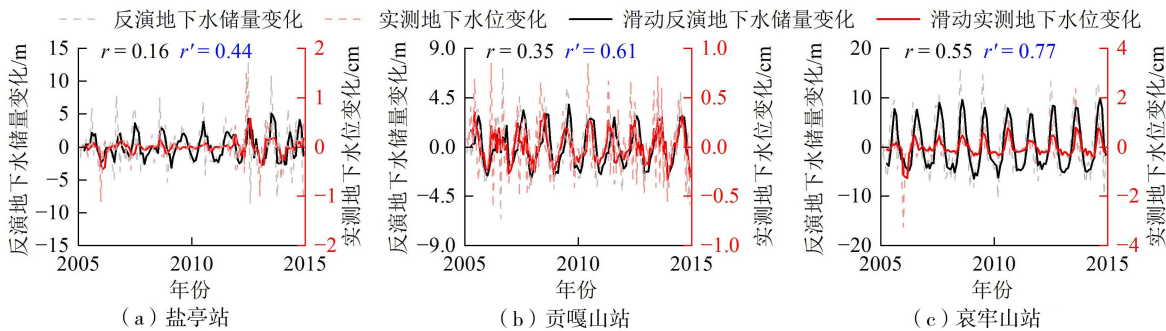
3.2 GRACE 卫星反演数据合理性验证

为检验 GRACE 卫星反演数据精度及间断期数据插补的合理性,选用研究区内茂县站、盐亭站、贡嘎山站、哀牢山站、西双版纳站 5 个观测井 2005—2014 年的地下水位实测数据,对反演数据与实测数据进行相关性分析;并利用《中国大陆区域基于降水重构陆地水储量变化数据集(2002—2019)》对间断期插补数据进行补充检验。选取盐亭站、贡嘎山站、哀牢山站为例展示反演数据与实测数据的对比情况,3 个站点分别属于农业类、高山类、岩溶类下垫面。图 3 为 3 个站点反演地下水储量变化与实测地下水位变化对比。图 4 为插补数据集与重构数据集相关系数的空间分布。

由图 3、图 4 可见,3 个站点的反演数据与实测数据相关性良好,变化趋势基本一致。5 个观测井中,贡嘎山站、哀牢山站、西双版纳站的相关系数通过显著性水平 $\alpha = 1\%$ 的显著性检验,茂县站、盐亭站通过 $\alpha = 10\%$ 的显著性检验。季尺度平滑处理后^[50],茂县站通过 $\alpha = 5\%$ 的显著性检验,其余站点均通过 $\alpha = 1\%$ 的显著性检验。插补数据集与重构数据集呈较强相关关系,多数地区相关系数大于 0.9,部分区域为 0.6~0.8,主要分布于横断山脉处,因重构数据集基于降水数据获得,高海拔地区测站分布不均且地形起伏复杂,故模型较难模拟出实际降水差异,进而影响其数据反演。Liu 等^[25,51]已将 CSR mascons 数据集应用于西南地区地下水干旱研究,并利用不同方式对数据集合理性进行了验证。综上,CSR mascons 数据集及间断期插补数据在西南地区使用满足精度要求,可用于 GGDI 指数的计算及干旱传播研究。

3.3 西南地区干旱传播特征

利用最大相关系数法逐格点计算西南地区各干旱指数之间的相关关系,其最大相关系数的空间分



注: r 为反演地下水储量变化与实测地下水位变化的相关系数; r' 为经季尺度平滑处理后二者的相关系数。

图3 反演地下水储量变化与实测地下水位变化对比

Fig.3 Comparison of groundwater storage anomalies and measured groundwater level variation

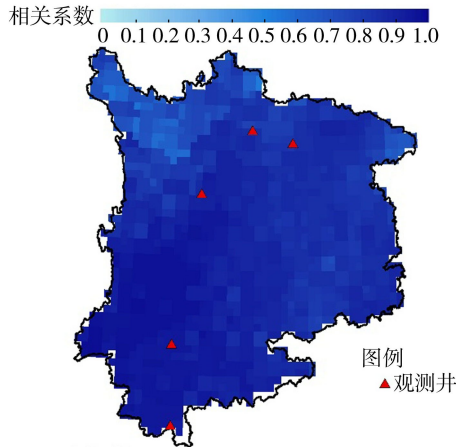


图4 插补数据集与重构数据集相关系数的空间分布
Fig.4 Spatial distribution of correlation coefficients between imputed and reconstructed datasets

布如图5所示,表1为不同下垫面各类干旱指数之间最大相关系数的均值。由图5和表1可见,农业类、岩溶类、高山类下垫面区域的 SPEI 与 SSMIS、SRI、SSMID 呈强正相关关系,均通过 $\alpha=5\%$ 的显著性检验,表明西南地区气象干旱较易传播至水文干旱与土壤水干旱。SSMIS 与 SSMID 在整个研究区最大相关系数的均值为 0.92,深、浅层土壤水干旱之间联系密切。SPEI、SSMIS、SRI、SSMID 与 GGDI 的最大相关系数为 0.3~0.6,空间异质性显著。其中,农业类下垫面区域各干旱指数与 GGDI 的相关性较弱,且在四川盆地、云南中南部呈弱相关或负相关关系;岩溶类区域各干旱指数与 GGDI 的最大相关系数相对最高,即该下垫面条件下地下水干旱的发生与演化同其他类型干旱可能存在更为紧密的水

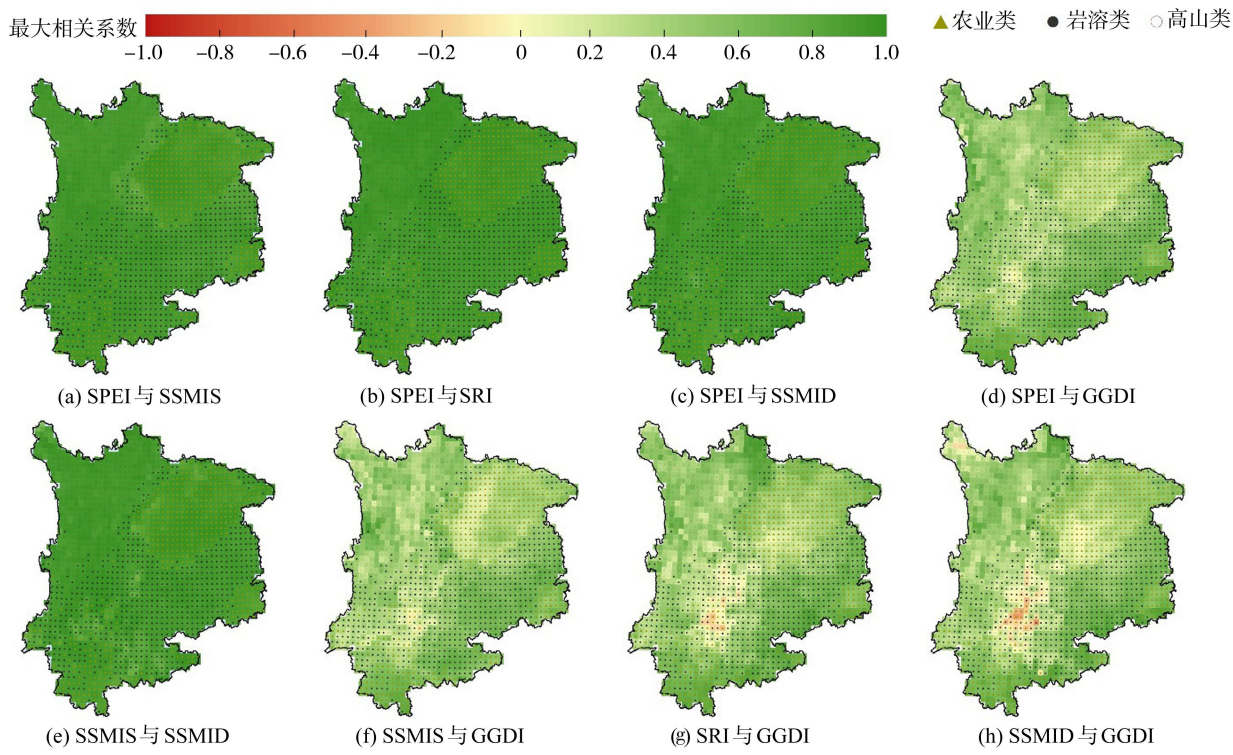


图5 各类干旱指数之间最大相关系数的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of maximum correlation coefficients between drought indices

文联系;高山类区域各干旱指数与 GGDI 的最大相关系数为 0.45 左右,离散程度相对较低。

表 1 不同下垫面各类干旱指数之间最大相关系数的均值
Table 1 Mean maximum correlation coefficients between drought indices of different underlying surface types

下垫面类型	干旱指数	最大相关系数均值	干旱指数	最大相关系数均值
农业类	SPEI 与 SSMIS	0.92	SSMIS 与 SSMID	0.91
	SPEI 与 SRI	0.94	SSMIS 与 GGDI	0.40
	SPEI 与 SSMID	0.92	SRI 与 GGDI	0.45
	SPEI 与 GGDI	0.44	SSMID 与 GGDI	0.40
岩溶类	SPEI 与 SSMIS	0.91	SSMIS 与 SSMID	0.91
	SPEI 与 SRI	0.93	SSMIS 与 GGDI	0.50
	SPEI 与 SSMID	0.91	SRI 与 GGDI	0.49
	SPEI 与 GGDI	0.53	SSMID 与 GGDI	0.45
高山类	SPEI 与 SSMIS	0.91	SSMIS 与 SSMID	0.92
	SPEI 与 SRI	0.94	SSMIS 与 GGDI	0.43
	SPEI 与 SSMID	0.91	SRI 与 GGDI	0.47
	SPEI 与 GGDI	0.48	SSMID 与 GGDI	0.44

图 6 为各类干旱之间传播时间的空间分布。由图 6 可见,西南地区全区气象干旱向水文干旱、土壤水干旱传播的时间在空间上差异较小,气象—浅层土壤水干旱、气象—水文干旱的平均传播时间分别为 1.5、3.1 月,气象—深层土壤水干旱的传播时间则延长至 4~6 月,四川盆地、云南中南部等农业类下垫面区域内干旱传播时间较长;浅层土壤水—深层土壤水干旱传播过程中,高山类区域干旱传播时间在空间上表现出较强的一致性;与气象—土壤水

干旱、气象—水文干旱等传播过程相比,气象干旱与地下水干旱的相关关系相对较弱,全区 62.2% 的格点通过 $\alpha=5\%$ 显著性检验,与 Han 等^[22,52] 的研究结果基本一致,可能与地下水系统对干旱传播的缓冲效应及灌溉、地下水开采等人为因素^[53-54] 有关。此外,从气象干旱、浅层土壤水干旱、水文干旱、深层土壤水干旱向地下水干旱的干旱传播时间在空间分布格局上较为相似,均具有区域性差异。

基于正相关关系且通过 $\alpha=5\%$ 显著性检验的栅格统计不同下垫面各类干旱之间的平均干旱传播时间,结果如表 2 所示。由表 2 可见,各类干旱向地下水干旱传播的时间具有显著区域性差异。其中,农业类区域内各类干旱向地下水干旱传播较为困难,气象干旱、浅层土壤水干旱、水文干旱、深层土壤水干旱向地下水干旱传播的过程中,分别仅 45.5%、37.3%、53.6%、46% 的区域通过 $\alpha=5\%$ 的显著性检验,平均传播时间分别为 11.5、10.6、9.6、9.6 月;岩溶类区域干旱传播时间较短,各类干旱向地下水干旱的平均传播时间范围为 6.9~7.8 月;高山类区域平均干旱传播时间范围为 12.0~14.8 月。

3.4 西南地区干旱传播链条

基于对干旱传播时间的分析发现,西南地区各类干旱与地下水干旱的传播关系存在区域性差异,如岩溶类下垫面区域内各类干旱与地下水干旱之间的相关性显著强于其他区域且干旱传播速率最大。

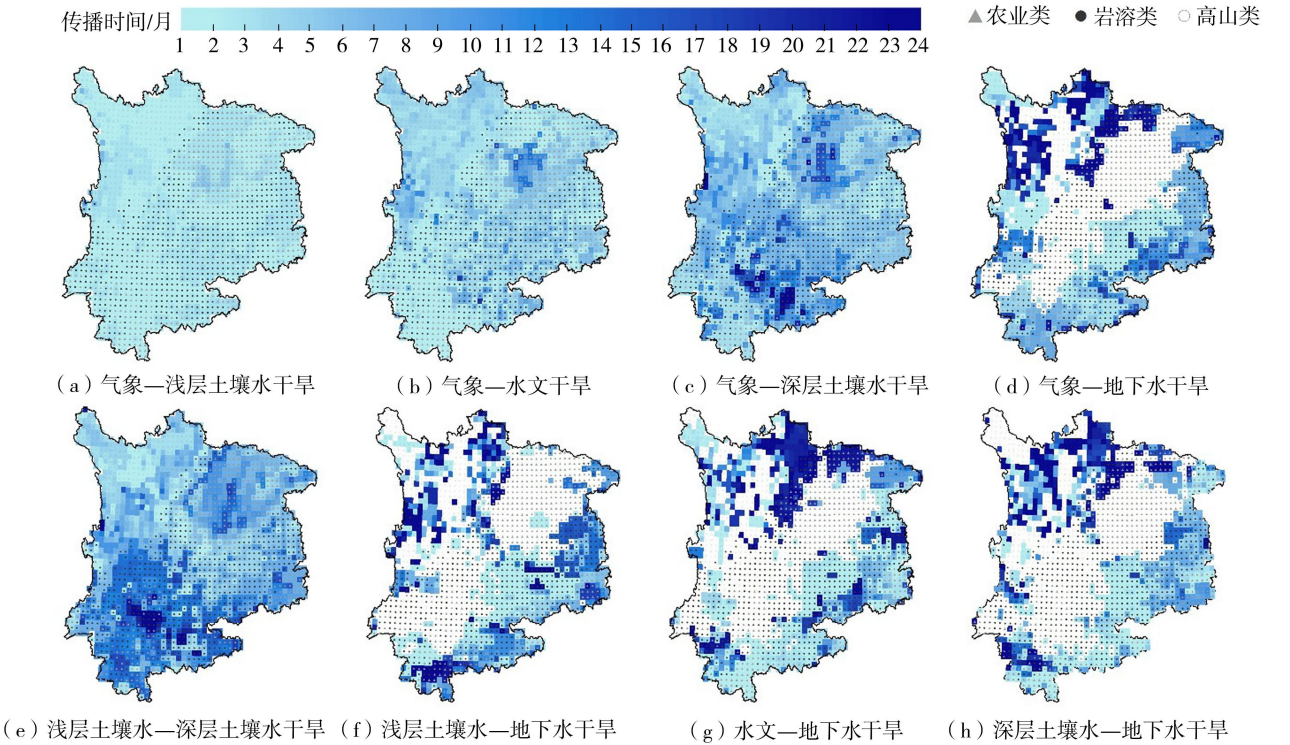


图 6 各类干旱间传播时间的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of propagation time between drought types

表 2 不同下垫面各类干旱之间的平均传播时间

Table 2 Mean propagation time between drought types of different underlying surface types

下垫面类型	干旱传播类型	平均传播时间/月	干旱传播类型	平均传播时间/月
农业类	气象—浅层土壤水干旱	1.7	浅层土壤水—深层土壤水干旱	8.2
	气象—水文干旱	3.5	浅层土壤水—地下水干旱	10.6
	气象—深层土壤水干旱	6.6	水文—地下水干旱	9.6
	气象—地下水干旱	11.5	深层土壤水—地下水干旱	9.6
岩溶类	气象—浅层土壤水干旱	1.4	浅层土壤水—深层土壤水干旱	8.4
	气象—水文干旱	2.8	浅层土壤水—地下水干旱	7.8
	气象—深层土壤水干旱	6.2	水文—地下水干旱	7.8
	气象—地下水干旱	6.9	深层土壤水—地下水干旱	7.0
高山类	气象—浅层土壤水干旱	1.5	浅层土壤水—深层土壤水干旱	5.1
	气象—水文干旱	3.3	浅层土壤水—地下水干旱	12.1
	气象—深层土壤水干旱	4.9	水文—地下水干旱	12.0
	气象—地下水干旱	12.5	深层土壤水—地下水干旱	14.8

为探究不同下垫面条件下的干旱传播差异,利用水文、气象变量均值计算月尺度下的区域干旱指数,基于结构方程模型量化各干旱类型之间的直接与间接影响效应,识别不同下垫面条件下气象干旱向地下水干旱传播最可能的干旱传播路径。同时,参考农业类、岩溶类、高山类下垫面区域内的气象—地下水干旱传播时间,引入多时间尺度气象干旱指数,农业类、岩溶类、高山类下垫面区域分别选用 SPEI-1、SPEI-6、SPEI-12 (SPEI-12 表示 12 月尺度的 SPEI 值,以此类推) 进行分析,以考虑干旱传播累积效应。

利用 Amos 路径探索工具检验各区域所有潜在干旱传播路径组合,结合干旱传播机理、不同下垫面干旱传播特征及模型拟合参数进行比选。其中,水力联系明确的路径为必须保留路径,而在特定下垫

面条件下对整体干旱传播链解释作用有限且统计不显著的路径,适当不纳入选择。最终优选出不同下垫面类型最可能的干旱传播路径,如图 7 所示(箭头上数据为路径系数,*、**、*** 分别表示该路径达到 0.05、0.01、0.001 显著性水平)。由图 7 可见,农业类、岩溶类、高山类下垫面区域内 SPEI 对 SSMIS 的影响均在短时间尺度下最为显著,路径系数分别为 0.83、0.83、0.66,即西南地区气象干旱对浅层土壤水干旱的影响即时且强烈。各类下垫面区域 SPEI 对 SRI 的总效应均为正向,表明西南地区气象干旱可传播至水文干旱,但短时间尺度下传播路径存在差异,农业类区域主要经浅层土壤水干旱间接影响水文干旱。在短时间尺度下,各下垫面区域 SPEI 对 SSMID 的总效应为正向但直接效应为负向,结合长时间尺度路径系数,考虑西南地区气象干旱

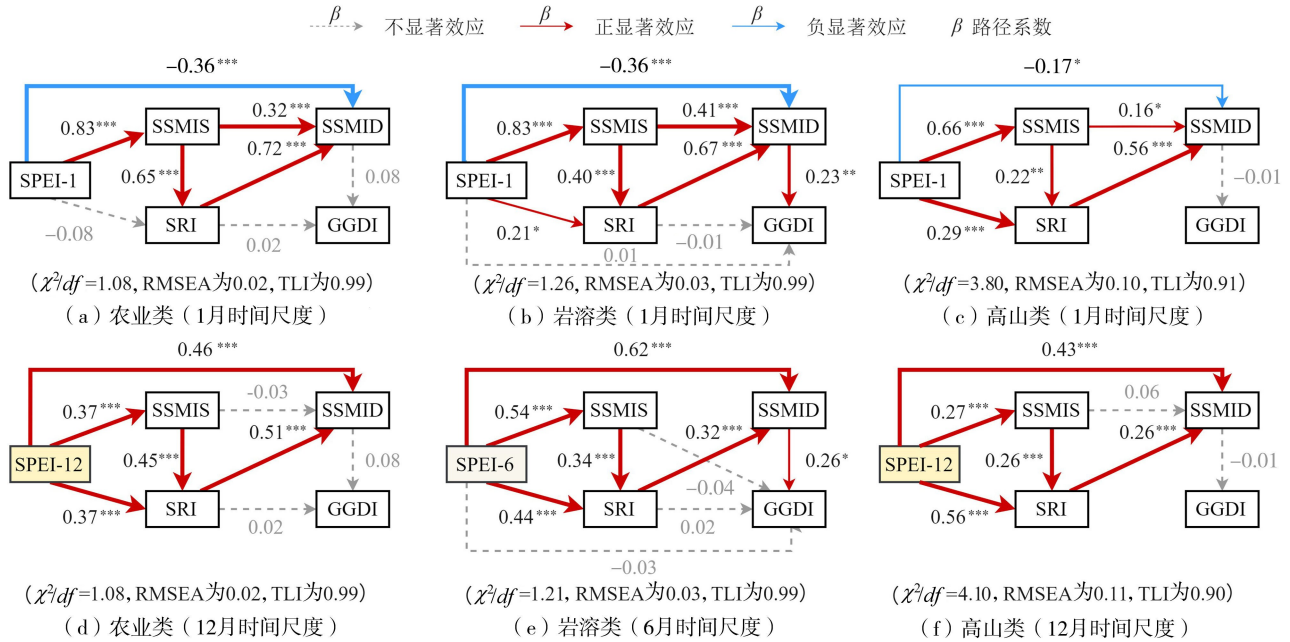


图 7 不同下垫面的干旱传播路径

Fig. 7 Drought propagation path of different underlying surfaces

可传播至深层土壤水干旱,但传播过程存在累积效应。各下垫面区域 SSMIS 与 SRI、SRI 与 SSMID 间均为显著正效应,说明西南地区浅层土壤水干旱与水文干旱、水文干旱与深层土壤水干旱间联系紧密。SSMID 对 GGD I 仅在岩溶类区域内存在显著正效应,月、半年时间尺度下的路径系数分别为 0.23、0.26,其余区域相关效应均不显著。

综上,西南地区干旱传播链可划分为气象干旱至深层土壤水干旱、深层土壤水干旱至地下水干旱两阶段。其中,全区均可由气象干旱传播至深层土壤水干旱,干旱类型之间多数为显著正效应,主要传播次序为气象干旱依次经浅层土壤水干旱、水文干旱传播至深层土壤水干旱;但不同下垫面区域内深层土壤水—地下水干旱的传播情况存在差异,岩溶类区域深层土壤水干旱可显著传播至地下水干旱,其他区域传播趋势不显著。

4 讨 论

研究表明,西南地区不同下垫面干旱传播特征存在显著差异,农业类下垫面区域中各类干旱向地下水干旱的传播较为困难,岩溶类区域可由深层土壤水干旱传播至地下水干旱的区域占比最大且历时最短,高山类区域干旱传播时间最长。四川盆地等农业类区域内,人工灌溉等活动削弱了降水与其他水文组分间的联系,对干旱传播存在一定的延缓作用^[55]。岩溶类区域内地表裂隙、溶沟、溶洞、地下水流通分布广泛,保水条件弱于非岩溶地区^[56],降水、土壤水与地下水存在更为密切的水力联系,使得该下垫面条件下干旱传播速率较大,与 Jiang 等^[57]利用试验得出的喀斯特地貌区干旱特征一致。高山类区域主要分布于四川西北部,地处横断山脉一带,全年平均气温较低且降水较少,区内水循环整体较弱^[25],从而延缓了干旱传播过程^[58],其效果受区域气候特征、季节变化、植被覆盖类型等因素共同调节。如四川甘孜州主要植被覆盖类型为草地,干旱传播时间相对较短,而灌丛发育广泛的区域则由于土壤保水能力较强^[59],干旱传播过程普遍历时较长。

基于结构方程模型,研究发现西南地区干旱传播过程可分为气象干旱至深层土壤水干旱、深层土壤水干旱至地下水干旱两阶段,全区气象干旱均可传播至深层土壤水干旱,主要遵循气象—浅层土壤水—水文—深层土壤水干旱的传播链条,但仅岩溶类区域内可由深层土壤水干旱进一步显著传播至地下水干旱。其本质为区域水量收支失衡,水分异常信号经降水、径流、地下水补给与排泄等水循环环

节^[60],以链条形式进行传递。具体而言,气象干旱作为干旱传播的初始环节,通常在某区域降水持续减少但蒸发相对稳定或增强时诱发^[61],随即直接影响浅层土壤使得包气带水分持续亏缺,引发浅层土壤水干旱。当土壤湿度降低时,降水将优先补给包气带导致地表径流减少,进而诱发水文干旱^[5]。深层土壤水分变化本身相对缓慢,在径流补给与浅层土壤水补给受阻情况下,深层土壤水干旱发生响应且过程存在累积效应^[62]。伴随以上干旱过程的持续发展,降水入渗、地表水渗漏及侧向径流补给等地下水重要补给过程受到不同程度抑制,最终引发地下水干旱。但不同下垫面条件下,干旱传播过程存在差异,如岩溶类区域内喀斯特地貌通过其独特的水文地质特征,显著影响西南地区干旱传播的速度及路径,具有快速爆发、快速传播、快速结束等特点^[57]。

本文优化了西南地区干旱链式传播体系,围绕不同下垫面条件构建了干旱传播路径,可为区域精准抗旱提供理论支撑与启示:①四川盆地等农业生态区干旱传播受人为灌溉因素影响,需大力推广滴灌、保墒等节水抗旱技术,旱情预警与农时相结合;②贵州等典型喀斯特地貌区干旱传播速率较大且可传播至地下水干旱,需加强地下水位监测网络的建立,并设立应急水源以保障基本居民用水;③横断山脉等高海拔地区干旱传播时间较长但生态系统较脆弱,需加强生态保护、保障河道生态基流、增强区域抗旱韧性。

5 结 论

a. 西南地区 SPEI 与 SSMIS、SRI、SSMID 均呈强正相关关系,空间一致性较强。但各类干旱指数与 GGD I 呈中等相关关系且存在区域差异,最大相关系数集中于 0.3~0.6,岩溶类下垫面区域各类干旱指数与 GGD I 之间的相关性强于其他区域。

b. 西南地区气象干旱向浅层土壤水干旱、水文干旱、深层土壤水干旱传播时间的空间差异较小,全区平均传播时间分别为 1.5、3.1、5.9 月,但各类干旱向地下水干旱的传播情况呈显著空间分异格局。其中,四川盆地等农业类下垫面区域内各类干旱向地下水干旱传播较为困难;岩溶类下垫面区域内干旱传播速率大于其他区域,平均传播时间范围为 6.9~7.8 月;高山类下垫面区域内平均干旱传播时间范围为 12~14.8 月;

c. 西南地区干旱传播链条可划分为气象干旱至深层土壤水干旱、深层土壤水干旱至地下水干旱两阶段,不同下垫面条件下干旱传播过程存在差异。其中,全区气象干旱均可传播至深层土壤水干旱,主

要遵循气象—浅层土壤水—水文—深层土壤水—地下水干旱的传播规律;但仅岩溶类下垫面区域内可由深层土壤水干旱显著传播至地下水干旱,其余区域向地下水干旱传播的趋势不显著。

参考文献:

[1] 王磊,曾思栋,阳林翰,等. 基于 CMIP6 的气候变化下汉江流域气象干旱特征研究[J]. 水资源保护, 2024, 40 (5): 39-45. (Wang Lei, Zeng Sidong, Yang Linhan, et al. CMIP6-based meteorological drought characteristic study under climate change in the Hanjiang River Basin[J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (5): 39-45. (in Chinese))

[2] 徐征光,丁海伦,吴志勇,等. 不同气候区气象干旱向农业干旱动态传播规律及影响因素分析[J]. 水资源保护, 2025, 41 (3): 144-152. (Xu Zhengguang, Ding Hailun, Wu Zhiyong, et al. Analysis of dynamic propagation patterns and influencing factors from meteorological drought to agricultural drought in different climatic regions [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (3): 144-152. (in Chinese))

[3] 王孟浩,江善虎,任立良,等. 变化环境下骤发干旱的径流表征方法[J]. 水科学进展, 2025, 36 (3): 372-382. (Wang Menghao, Jiang Shanhu, Ren Liliang, et al. A new approach to manifesting flash drought by streamflow under a changing environment[J]. Advances in Water Science, 2025, 36 (3): 372-382. (in Chinese))

[4] 张丹,要威,肖华,等. 基于因果分析的金沙江流域气象-水文干旱传播特征及其未来情景预估[J]. 水资源保护, 2025, 41 (2): 158-164. (Zhang Dan, Yao Wei, Xiao Hua, et al. Meteorological drought to hydrological drought propagation characteristics in the Jinsha River Basin and their prediction under future scenarios based on causal analysis[J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (2): 158-164. (in Chinese))

[5] Zhang Xuan, Hao Zengchao, Singh V P, et al. Drought propagation under global warming: characteristics, approaches, processes, and controlling factors[J]. Science of the Total Environment, 2022, 838: 156021.

[6] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts[J]. Journal of Hydrology, 2010, 391 (1/2): 204-216.

[7] Hellwig J, de Graaf I E M , Weiler M, et al. Large-scale assessment of delayed groundwater responses to drought [J]. Water Resources Research, 2020, 56 (2): e2019WR025441.

[8] Liu Qingping, Zhang Xuan, Xu Yang, et al. Characteristics of groundwater drought and its correlation with meteorological and agricultural drought over the North China Plain based on GRACE[J]. Ecological Indicators, 2024, 161: 111925.

[9] 栗晓玲,褚江东,张特,等. 西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应[J]. 水资源保护, 2022, 38 (1): 34-42. (Su Xiaoling, Chu Jiangdong, Zhang Te, et al. Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 34-42. (in Chinese))

[10] 任立良,王宇,江善虎,等. 基于 GRACE 和 GRACE-FO 的黄河流域陆地水储量及影响因素分析[J]. 水资源保护, 2022, 38 (4): 26-32. (Ren Liliang, Wang Yu, Jiang Shanhu, et al. GRACE and GRACE-FO-based terrestrial water storage and its influencing factor analysis of the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (4): 26-32. (in Chinese))

[11] 张浪,贺中华,杨铭珂,等. 气象干旱-水文干旱传播过程特征及其影响因素:以贵州黔中水利工程区为例[J]. 水土保持学报, 2022, 36 (1): 142-152. (Zhang Lang, He Zhonghua, Yang Mingke, et al. Characteristics of meteorological drought-hydrological drought propagation process and its influencing factors: taking Guizhou Qianzhong water conservancy project area as an example [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36 (1): 142-152. (in Chinese))

[12] 高超,陈财,罗纲. 冬小麦干旱的下垫面孕灾环境研究:以淮河流域为例[J]. 水土保持学报, 2021, 35 (3): 359-368. (Gao Chao, Chen Cai, Luo Gang. Study on the hazard-formative environment on underlying surface of winter wheat drought: a case study of Huaihe River Basin, China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35 (3): 359-368. (in Chinese))

[13] 杜鸿,曾思栋,韦晓福,等. 嘉陵江流域气象干旱向水文干旱传播特征研究[J]. 水资源保护, 2025, 41 (3): 134-143. (Du Hong, Zeng Sidong, Wei Xiaofu, et al. Study on propagation characteristics from meteorological drought to hydrological drought in the Jialing River Basin[J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (3): 134-143. (in Chinese))

[14] Um M J, Kim Y, Jung K, et al. Evaluation of drought propagations with multiple indices in the Yangtze River Basin[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 317: 115494.

[15] Ding Yibo, Gong Xinglong, Xing Zhenxiang, et al. Attribution of meteorological, hydrological and agricultural drought propagation in different climatic regions of China [J]. Agricultural Water Management, 2021, 255: 106996.

[16] Xu Zhengguang, Guo Xiao, Wu Zhiyong, et al. Spatiotemporal dynamic characteristics and influencing factors of propagation time from meteorological drought to agricultural drought [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2025, 62: 102806.

[17] 赵彦颜,张璇,许杨,等. 干旱半干旱地区气象干旱到农

- 业干旱的传播阈值研究[J]. 水土保持研究, 2025, 32 (2): 234-243. (Zhao Yanyan, Zhang Xuan, Xu Yang, et al. Study on the propagation thresholds from meteorological drought to agricultural drought in arid and semi-arid region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32 (2): 234-243. (in Chinese))
- [18] Dai Meng, Huang Shengzhi, Huang Qiang, et al. Propagation characteristics and mechanism from meteorological to agricultural drought in various seasons [J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: 127897.
- [19] Li Ronghui, Chen Nengcheng, Zhang Xiang, et al. Quantitative analysis of agricultural drought propagation process in the Yangtze River Basin by using cross wavelet analysis and spatial autocorrelation [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 280: 107809.
- [20] Luo Ding, Yang Xiaoli, Xie Lingfeng, et al. Propagation characteristics of meteorological drought to hydrological drought in China [J]. Journal of Hydrology, 2025, 656: 133023.
- [21] Liu Ying, Shan Fuzhen, Yue Hui, et al. Global analysis of the correlation and propagation among meteorological, agricultural, surface water, and groundwater droughts [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 333: 117460.
- [22] Han Zhiming, Huang Shengzhi, Zhao Jing, et al. Long-chain propagation pathways from meteorological to hydrological, agricultural and groundwater drought and their dynamics in China [J]. Journal of Hydrology, 2023, 625: 130131.
- [23] 吕妍, 张黎, 闫慧敏, 等. 中国西南喀斯特地区植被变化时空特征及其成因 [J]. 生态学报, 2018, 38 (24): 8774-8786. (Lyu Yan, Zhang Li, Yan Huimin, et al. Spatial and temporal patterns of changing vegetation and the influence of environmental factors in the karst region of Southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38 (24): 8774-8786. (in Chinese))
- [24] 石朋, 唐汉, 瞿思敏, 等. 西南地区气象干旱向水文干旱传播的特征 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (1): 49-56. (Shi Peng, Tang Han, Qu Simin, et al. Characteristics of propagation from meteorological drought to hydrological drought in Southwest China [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (1): 49-56. (in Chinese))
- [25] Liu Ying, Shan Fuzhen, Yue Hui, et al. Characteristics of drought propagation and effects of water resources on vegetation in the karst area of Southwest China [J]. Science of the Total Environment, 2023, 891: 164663.
- [26] Shi Peng, Tang Han, Qu Simin, et al. Drought propagation in karst and non-karst regions in Southwest China compared on a daily scale [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 51: 101628.
- [27] 龙明康, 白晓永, 李姿霖, 等. 中国西南喀斯特石漠化治理对生物多样性的影响 [J]. 地理学报, 2024, 79 (1): 97-113. (Long Mingkang, Bai Xiaoyong, Li Zilin, et al. Positive contribution and negative impact of karst rocky desertification control on biodiversity in southwest China [J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79 (1): 97-113. (in Chinese))
- [28] 邱华, 于飞, 李琛, 等. 基于 kNDVI 指数的西南地区植被动态变化及驱动力最优探测 [J]. 环境科学, 2025, 46 (10): 6344-6355. (Qiu Hua, Yu Fei, Li Chen, et al. Optimal detection of vegetation dynamics and driving forces in southwest China based on kNDVI index [J]. Environmental Science, 2025, 46 (10): 6344-6355. (in Chinese))
- [29] Huang Zhexue. Extensions to the k-means algorithm for clustering large data sets with categorical values [J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 1998, 2 (3): 283-304.
- [30] 侯羽璋, 叶思菁, 罗蒋梅, 等. 中国中低产田空间分布与土壤固碳潜力 [J]. 农业工程学报, 2026, 42 (1): 342-350. (Hou Yuzhang, Ye Sijing, Luo Jiangmei, et al. Spatial distribution and soil carbon sequestration potential of medium and low-yield croplands in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2026, 42 (1): 342-350. (in Chinese))
- [31] Preud'homme G, Duarte K, Dalleau K, et al. Head-to-head comparison of clustering methods for heterogeneous data: a simulation-driven benchmark [J]. Scientific Reports, 2021, 11 (1): 4202.
- [32] 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))
- [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] 杨肖丽, 朱敏讷, 罗定, 等. 黄河流域气象干旱及其恢复动态分析 [J]. 水资源保护, 2025, 41 (3): 127-133. (Yang Xiaoli, Zhu Minne, Luo Ding, et al. Dynamic analysis of meteorological drought and its recovery in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (3): 127-133. (in Chinese))
- [35] 瞿德业, 杨明月, 刘婷婷, 等. 基于 SPEI 的洮河流域气象干旱时空特征分析 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (5): 32-40. (Qu Deyue, Yang Mingyue, Liu Tingting, et al. Analysis of spatiotemporal characteristics of meteorological drought in Taohe River Basin based on SPEI [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (5): 32-40. (in Chinese))
- [36] Shukla S, Wood A W. Use of a standardized runoff index

- p>for characterizing hydrologic drought [J]. Geophysical Research Letters,2008,35(2):L02405.
- [37] 董蓉蓉,栗晓玲,屈艳萍,等. 2022 年长江流域不同类型干旱时空响应关系[J]. 水资源保护,2024,40(3):61-70. (Dong Rongrong, Su Xiaoling, Qu Yanping, et al. Spatiotemporal response relationships between different types of droughts in the Yangtze River Basin in 2022[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 61-70. (in Chinese))
- [38] 王文,王鹏,崔巍. 长江流域陆地水储量与多源水文数据对比分析[J]. 水科学进展,2015,26(6):759-768. (Wang Wen, Wang Peng, Cui Wei. A comparison of terrestrial water storage data and multiple hydrological data in the Yangtze River Basin [J]. Advances in Water Science,2015,26(6):759-768. (in Chinese))
- [39] Thomas B F, Famiglietti J S, Landrer F W, et al. GRACE groundwater drought index: evaluation of california central valley groundwater drought [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 198: 384-392.
- [40] 贺军奇,龙婷,陈云飞,等. 毛乌素沙地南缘多年气象干旱向土壤干旱垂向传播过程解析[J]. 农业工程学报, 2025, 41(9): 113-124. (He Junqi, Long Ting, Chen Yunfei, et al. Analysis of the vertical propagation process from meteorological drought to soil drought in the southern margin of the Mu Us Sandy Land [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(9): 113-124. (in Chinese))
- [41] You Zhiwen, Sun Xunlai, Sun Huaiwei, et al. Mechanisms of meteorological drought propagation to agricultural drought in China: insights from causality chain [J]. Natural Hazards, 2025, 2(1): 24.
- [42] He Liang, Guo Jianbin, Liu Xuefeng, et al. Exploring the multifaceted reason for deficits in soil water within different soil layers in China's drylands [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 373: 123634.
- [43] 谢灵枫,杨肖丽,吴凡,等. 黄河流域未来气象水文干旱传播的气候变化响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 10-17. (Xie Lingfeng, Yang Xiaoli, Wu Fan, et al. Response of future meteorological and hydrological drought propagation to climate change in the Yellow River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(1): 10-17. (in Chinese))
- [44] Zhou Xianhui, Wu Wenjuan, Niu Kechang, et al. Realistic loss of plant species diversity decreases soil quality in a Tibetan alpine meadow [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 279: 25-32.
- [45] 张豪,鲍振鑫,王婕,等. 气候与植被协同变化下的径流响应研究:以秦岭北麓为例[J]. 水科学进展, 2025, 36(4): 596-609. (Zhang Hao, Bao Zhenxin, Wang Jie, et al. The response of runoff to coordinated changes in climate and vegetation: a case study at northern foothills of Qinling Mountains [J]. Advances in Water Science, 2025, 36(4): 596-609. (in Chinese))
- [46] 张燕,官冬杰,周李磊,等. 元耦合下的山水林田湖草复合生态系统隐含碳流耦合研究[J]. 中国环境科学, 2026, 46(2): 1114-1124. (Zhang Yan, Guan Dongjie, Zhou Lilei, et al. The coupling of embodied carbon flows in the composite ecosystem of Mountains, Rivers, Forests, Farmlands, Lakes, and Grasslands under the metacoupling framework [J]. China Environmental Science, 2026, 46(2): 1114-1124. (in Chinese))
- [47] 孟霜,刘益宏,刘富平,等. 城市化水平和景观格局变化与城市绿地土壤典型生态系统服务功能的关联机制[J]. 环境科学, 2026, 47(4): 2511-2519. (Meng Shuang, Liu Yihong, Liu Fuping, et al. Mechanisms linking urbanization intensity and landscape pattern changes with typical soil ecosystem service functions of urban greenspace [J]. Environmental Science, 2026, 47(4): 2511-2519. (in Chinese))
- [48] Chen Huiling, Zhu Yongtai, Zhu Gaofeng, et al. Energy partitioning over an irrigated vineyard in arid northwest China: Variation characteristics, influence degree, and path of influencing factors [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2024, 350: 109972.
- [49] Chen Yunfei, He Junqi, He Yi, et al. Seasonal hydrological traits in *Salix psammophila* and its responses to soil moisture and meteorological factors in desert areas [J]. Ecological Indicators, 2022, 136: 108626.
- [50] 许智铭,王正涛. 联合 GRACE 和水文数据探测松花江流域地下水时空变化[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(9): 1409-1415. (Xu Zhiming, Wang Zhengtao. Detect Songhua River Basin groundwater spatiotemporal variation characteristics by GRACE and multi-source hydrological data [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(9): 1409-1415. (in Chinese))
- [51] Wang Aili, Xing Yuanxiao, Wang Shunsheng, et al. Spatial and temporal evolution trends of groundwater drought and its correlation with meteorological drought in Guizhou Province [J]. Agricultural Water Management, 2025, 318: 109682.
- [52] Liu Lin, Zhou Zhaoqiang, Li Wenlu, et al. Global characteristics of drought propagation from surface water to groundwater [J]. Journal of Hydrology, 2026, 665: 134734.
- [53] Han Zhiming, Huang Shengzhi, Huang Qiang, et al. GRACE-based high-resolution propagation threshold from meteorological to groundwater drought [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 307: 108476.
- [54] Ren Xiaofei, Li Peiyue, Wang Dan, et al. Drivers and characteristics of groundwater drought under human interventions in arid and semiarid areas of China [J]. Journal of Hydrology, 2024, 631: 130839.

[55] Li Fawen,Zhang Manjing,Zhao Yong, et al. Influence of irrigation and groundwater on the propagation of meteorological drought to agricultural drought [J]. Agricultural Water Management,2023,277:108099.

[56] Zhang Qiang,Kong Dongdong,Singh V P, et al. Response of vegetation to different time-scales drought across China: spatiotemporal patterns, causes and implications [J]. Global and Planetary Change,2017,152:1-11.

[57] Jiang Guanghui,Guo Fang,Liu Fan, et al. Hydrogeological responses of karst compartments to meteorological drought in subtropical monsoon regions[J]. Journal of Hydrology, 2025,655:132940.

[58] Yang Fan, Duan Xingwu, Guo Qiankun, et al. The spatiotemporal variations and propagation of droughts in Plateau Mountains of China [J]. Science of the Total Environment,2022,805:150257.

[59] 张秀霞,韩丽莎,党星海,等. 西北干旱区近 30a 植被覆盖的时空变化及其对气候因子的响应[J]. 干旱区研究,2025,42(6):1067-1079. (Zhang Xiuxia,Han Lisha, Dang Xinghai, et al. Spatiotemporal changes in vegetation coverage in the arid regions of Northwest China over the past 30 years and their response to climatic factors [J]. Arid Zone Research, 2025, 42 (6): 1067-1079. (in Chinese))

[60] 张翔,黄舒哲,管宇航. 干旱传播的研究进展、挑战与展望[J]. 地球科学进展,2023,38(6):563-579. (Zhang Xiang,Huang Shuzhe,Guan Yuhang. Research progress, challenges, and prospects in drought propagation [J]. Advances in Earth Science, 2023, 38 (6): 563-579. (in Chinese))

[61] Mukherjee S, Mishra A, Trenberth K E. Climate change and drought:a perspective on drought indices[J]. Current Climate Change Reports,2018,4(2):145-163.

[62] Zhou Yaoqiang,Li Jiayu,Jia Wenhao, et al. The evolution of drought and propagation patterns from meteorological drought to agricultural drought in the Pearl River Basin [J]. Water,2025,17(8):1116.

(收稿日期:2025 - 11 - 24 编辑:王芳)

+++++

(上接第 80 页)

[30] Wieland M,Schmidt S,Resch B, et al. Fusion of geospatial information from remote sensing and social media to prioritise rapid response actions in case of floods [J]. Natural Hazards,2025,121(7):8061-8088.

[31] Schnebele E, Cervone G. Improving remote sensing flood assessment using volunteered geographical data [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences,2013,13(3):669-677.

[32] 邢子瑶,董芯蕊,咎糈莉,等. 融合 VGI 和遥感等多源数据的洪涝范围提取与模拟方法[J]. 地球信息科学学报,2023,25(9):1869-1881. (Xing Ziyao,Dong Xinrui,Zan Xuli, et al. Flood inundation mapping and estimation using VGI,remote sensing images and other multi-source data [J]. Journal of Geo-information Science, 2023, 25 (9): 1869-1881. (in Chinese))

[33] Rosser J F, Leibovici D G, Jackson M J. Rapid flood inundation mapping using social media, remote sensing and topographic data[J]. Natural Hazards,2017,87(1):103-120.

[34] 童超,詹哈煜,崔罡,等. 融合 ResNet-18 与水动力模型的洪水演进快速预测[J]. 水资源保护,2026,42(1):129-136. (Tong Chao,Zhan Hanyu,Cui Gang, et al. Rapid flood evolution prediction by integrating ResNet-18 and hydrodynamic model [J]. Water Resources Protection, 2026,42(1):129-136. (in Chinese))

[35] 康艳,艾慧茹,彭仁娟,等. 基于误差校正 HYMOD-LSTM 融合模型的自适应带宽洪水区间预报[J/OL]. 水资源保护,1-15[2025-05-20]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1356.tv.20250519.1753.045>. (Kang Yan,Ai Huiru,Peng Renjuan, et al. Adaptive bandwidth flood interval forecasting based on error-corrected HYMOD-LSTM HybirdModel[J/OL]. Water Resources Protection, 1-15 [2025-05-20]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1356.tv.20250519.1753.045>. (in Chinese))

[36] Bonham-Carter G F, Agterberg F P, Wright D F, et al. Weights of evidence modelling:a new approach to mapping mineral potential [R]. Ottawa: Geological Survey of Canada,1990:171-183.

[37] Weed D L. Weight of evidence:a review of concept and methods[J]. Risk Analysis,2005,25(6):1545-1557.

[38] 宋文龙,马建威,孙亚勇,等. 海河“23.7”流域性特大洪水启用蓄滞洪区洪水淹没全过程卫星遥感监测分析[J]. 中国防汛抗旱,2023,33(10):31-36. (Song Wenlong,Ma Jianwei,Sun Yayong, et al. Satellite remote sensing monitoring and analysis of the entire process of flood inundation in the activated flood storage areas of Haihe“23·7”basin-wide extreme flood[J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33 (10): 31-36. (in Chinese))

(收稿日期:2026 - 04 - 08 编辑:王芳)