

# 塔里木河流域气象干旱向生态干旱传播特征研究

薛联青<sup>1,2</sup>, 曹梦圆<sup>1</sup>, 刘远洪<sup>3</sup>, 褚心怡<sup>4</sup>, 徐若诗<sup>1</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院; 2. 皖江工学院水利工程学院; 3. 河海大学农业科学与工程学院;  
4. 江苏省水文水资源勘测局淮安分局)

**摘要:** 构建了塔里木河流域标准化降水蒸散指数和基于熵加权欧氏距离法的标准化生态干旱指数, 引入三阈值游程理论与 Copula 函数, 利用传播比与触发阈值量化了气象干旱向生态干旱传播的特征, 并揭示了主导驱动因子。结果表明: 1983—2022 年塔里木河流域生态干旱发生的频次、持续时间、强度均高于气象干旱; 气象干旱向生态干旱传播的传播比为 0.1~0.9, 触发阈值为 -2.5~-0.05, 传播特征具有空间异质性, 传播风险由近沙漠区向外围递减; 传播比在塔里木河流域 80% 的区域微弱上升, 触发阈值在南部近沙漠区和北部阿克苏河区域显著上升(每 10 a 最高上升速率为 1.5); 各驱动因子的贡献率相近, 太阳辐射(20.1%)和潜在蒸散发(21.3%)为传播比显著变化区域的主导驱动因子。

**关键词:** 气象干旱; 生态干旱; 游程理论; Copula 函数; 塔里木河流域

**Study on propagation characteristics of meteorological drought to ecological drought in the Tarim River Basin//** Xue Lianqing<sup>1,2</sup>, Cao Mengyuan<sup>1</sup>, Liu Yuanhong<sup>3</sup>, Chu Xinyi<sup>4</sup>, Xu Ruoshi<sup>1</sup>(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University; 2. School of Hydraulic Engineering, Wanjiang University of Technology; 3. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University; 4. Huai'an Branch of Jiangsu Provincial Hydrology and Water Resources Survey Bureau)

**Abstract:** The standardized precipitation evapotranspiration index and the standardized ecological drought index based on the entropy-weighted Euclidean distance method in the Tarim River Basin were constructed. The three-threshold run theory and Copula function were introduced to quantify the characteristics of meteorological drought propagating into ecological drought using propagation ratios and triggering thresholds, revealing the dominant driving factors. The results indicate that the frequency, duration, and intensity of ecological drought in the Tarim River Basin from 1983 to 2022 are higher than those of meteorological drought. The propagating ratio of meteorological drought propagating to ecological drought is 0.1~0.9, with a triggering threshold of -2.5~-0.05. The propagating characteristics have spatial heterogeneity, and the propagating risk decreases from near desert areas to the surrounding areas. The propagating ratio slightly increased in 80% of the Tarim River Basin, while the triggering threshold significantly increased in the southern near desert area and the northern Aksu River area (with a maximum increase rate of 1.5 per 10 a). The contribution rates of each driving factor are similar, with solar radiation (20.1%) and potential evapotranspiration (21.3%) being the dominant driving factors in regions with significant changes in propagation ratio.

**Key words:** meteorological drought; ecological drought; run theory; Copula function; the Tarim River Basin

干旱是全球极具破坏性且广泛发生的极端环境问题,对水资源、生态系统、农业生产和经济发展影响极深<sup>[1]</sup>。美国气象学会将干旱划分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱 4 种主要类型。其中,气象干旱是指由降水持续偏少引起的水分亏缺现象,是其他类型干旱发生的起始源头<sup>[2]</sup>;生态干旱指水资源供应的间歇性不足导致生态系统超出

复原力阈值进入脆弱状态,影响生态系统服务,并触发自然和人类系统的反馈<sup>[3]</sup>。当前生态干旱监测多依赖于植被健康指数<sup>[4]</sup>(vegetation health index, VHI)、总初级生态力<sup>[5]</sup>(gross primary production, GPP)等遥感指标及基于生态缺水概念构建的标准化生态缺水指数(standardized ecological water deficit index, SEWDI)等指标。这些指标虽被广泛应用,但

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3206804);江苏省水利科技项目(2024045)

作者简介:薛联青(1973—),女,教授,博士,主要从事生态水文与环境水文研究。E-mail:lxue@hhu.edu.cn

通信作者:刘远洪(1991—),男,助理研究员,博士,主要从事生态水文与环境水文研究。E-mail:lyh910926@163.com

VHI 本质是基于反差归一化的线性组合模型,无法描述水分与温度胁迫间的复杂非线性相互作用,并对极端干旱事件的反应不够敏感;GPP 对干旱响应时滞长,并难剥离光照、温度等非水分因素影响;SEWDI 的构建依赖复杂物理模型与经验参数,且主观性和区域局限性强<sup>[6]</sup>。相比之下,Waseem 等<sup>[7]</sup>提出的熵加权欧氏距离法构建的标准化生态干旱指数(standardized ecological drought index,SEDI),为多变量融合提供了更客观、透明的数据驱动框架,无需复杂参数化模型或主观经验参数,可避免人为偏差,更能综合反映干旱的多维本质。

干旱传播指不同种类干旱之间的缺水传播,对水资源、环境、经济和社会造成严重而广泛的影响<sup>[8]</sup>。Ma 等<sup>[9]</sup>在亚季节尺度量化了全球气象干旱向土壤干旱传播的特征及驱动因素;石朋等<sup>[10]</sup>利用皮尔逊相关分析确定了干旱响应时间,采用游程理论和数学函数建立了干旱传播模型,量化了西南地区气象干旱向水文干旱传播的特征;杜鸿等<sup>[11]</sup>利用游程理论、Copula 函数等方法,探究了嘉陵江流域多尺度的气象干旱向水文干旱的演变与传播。我国最大内陆河流域——塔里木河流域生态环境极其脆弱,水资源短缺问题突出,近年来受全球气候变化与人类活动加剧的影响,流域干旱事件频发且强度显著增加,生态环境问题日益严重。然而,关于塔里木河流域干旱的研究多集中于气象或水文干旱<sup>[12-13]</sup>,对气象干旱向生态干旱的传播过程尚不明确,缺乏系统性、定量化的传播机制研究<sup>[14-15]</sup>。

鉴于此,本文基于多时间尺度标准化降水蒸散指数(standardized precipitation-evaporation drought index,SPEI)与 SEDI,结合游程理论、Mann-Kendall (M-K)趋势检验以及 Copula 联合分布模型,识别塔里木河流域干旱事件,量化气象干旱向生态干旱传播的特征和触发阈值,揭示其时空规律与驱动机制,以为流域生态保护修复和干旱风险管理提供参考。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

塔里木河流域位于我国新疆南部,面积为 103 万 km<sup>2</sup>,地处塔里木盆地北部,横亘于天山、昆仑山与阿尔金山之间(图 1),具有降水稀少、蒸发强烈、昼夜温差大等显著气候特征<sup>[16]</sup>。同时,由于塔里木河流域植被覆盖度低,生态系统较为脆弱,其生产力和生态响应主要集中在气候温暖、降水相对集中、生长条件相对适宜的月份,非生长季(11 月至次年 3 月)气温偏低、植被生长活动微弱,难以识别有

效的生态干旱事件,亦不具备气象干旱向生态干旱传播的现实意义<sup>[17-18]</sup>,因此,本文于 4—10 月开展干旱事件识别与传播特征分析。由于塔里木河流域中部塔克拉玛干沙漠和东部库木塔格沙漠的自然本底条件较差,水资源匮乏,故不对其进行研究<sup>[19]</sup>。

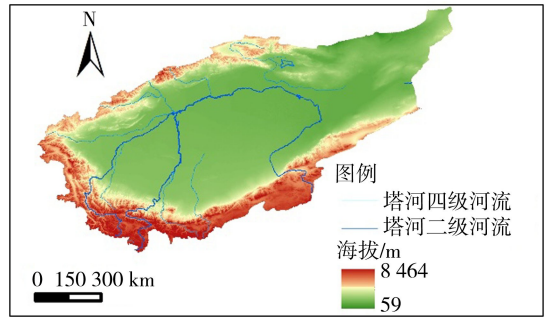


图 1 塔里木河流域概况

Fig. 1 Overview of the Tarim River Basin

### 1.2 数据来源

降水量、潜在蒸散发、平均气温数据来源于中国气象驱动数据集(1951—2024 年),空间分辨率为 0.01° (<https://doi.org/10.12072/ncdc.nieer.db6722>, 2025);太阳辐射数据来源于 TerraClimate 全球陆地表面月气候和气候平衡的网格数据集(1958—2020 年),空间分辨率为 4 km (<https://www.climatologylab.org/terraclimate.html>);土壤水分数据来源于欧洲中期天气预报中心提供的第五代大气再分析数据(1950 年至今),空间分辨率为 0.1°×0.1° (<https://cds.climate.copernicus.eu/>),将逐小时数据叠加得到月数据,其中土壤湿度数据分为 3 层:0~7、>7~28、>28~100 cm,将 3 层土壤湿度数据按照土壤厚度线性加权叠加,得到表层 1 m 的土壤湿度。

GPP 数据以 GLASS 产品 (<https://glass-product.bnu.edu.cn/>) 和 MODIS 产品为基础,GLASS GPP 产品覆盖 1983—2018 年,原始分辨率 500m,时间步长 8 d;2019—2022 年数据利用 MODIS GPP 产品(2000—2020 年),以 2000—2018 年为重叠期建立逐月线性转换方程( $p < 0.05$ )拟合修正后并入序列。归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)数据来源于美国国家海洋大气局发布的 GIMMS NDVI3g 数据集(1982—2022 年),原始分辨率为 1/12°×1/12° (<https://www.ncei.noaa.gov/>)。

采用的 SPEI 数据来源于 Gebrechorkos 等<sup>[20]</sup>发布的全球高分辨率干旱指数数据集,该数据集时间范围为 1981—2022 年,空间分辨率为 0.05°。本文选取 1983 年 1 月至 2022 年 12 月的 SPEI-01(1 月时间尺度)数据<sup>[21]</sup>。

选取塔里木河流域 1983—2022 年生长季(4—10 月)为研究期,共 280 月的数据,相关数据均统一重采样至 0.05°空间分辨率。

## 2 研究方法

### 2.1 生态干旱指数构建

熵在信息度量上优于方差,可更充分描述变量的分布特征,熵加权欧氏距离法构建的 SEDI 通过多元变量信息的整合,全面敏感地反映生态系统干旱响应。根据变量与生态干旱的相关关系,将饱和水汽压差(vapor pressure deficit, VPD)设为正相关系数集  $Y$ ; 实际蒸散发( $ET_A$ )、土壤湿度(soil moisture, SM)、GPP、NDVI 设为负相关系数集  $X$ 。SEDI 构建步骤如下:

**步骤 1** 基于每个栅格的  $X$  和  $Y$  代表月的平均值构建原始矩阵:

$$V = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n_1} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1n_2} \\ \vdots & & \vdots \\ y_{m1} & \cdots & y_{mn_2} \end{bmatrix} \quad (x_{ij} \in X, y_{ij} \in Y) \quad (1)$$

式中: $V$  为原始矩阵; $m$  为数据序列的长度; $n_1$ 、 $n_2$  分别为  $X$ 、 $Y$  变量集中变量的数量。

**步骤 2** 计算归一化矩阵:

$$N = \begin{bmatrix} N_{11} & \cdots & N_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ N_{m1} & \cdots & N_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$N_{ij} = \begin{cases} \frac{\text{abs}(x_{ij})}{\sum_{i=1}^m \text{abs}(x_{ij})} & (j = 1, 2, \dots, n_1) \\ \frac{\text{abs}(y_{ij})}{\sum_{i=1}^m \text{abs}(y_{ij})} & (j = 1, 2, \dots, n_2) \end{cases}$$

式中: $N$  为归一化矩阵; $n = n_1 + n_2$ 。

**步骤 3** 根据 Shannon 信息熵理论,计算归一化熵:

$$E_{N_j} = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m N_{ij} \ln N_{ij} \quad (3)$$

$$E_j = D_{S_j} / \sum_{j=1}^n D_{S_j} \quad (4)$$

其中  $D_{S_j} = 1 - E_{N_j}$

式中: $E_{N_j}$  为第  $j$  个变量的归一化熵; $E_j$  为第  $j$  个变量的权重。

**步骤 4** 确定每个归一化变量长时间序列中的最湿和最干条件:

$$M_w = \{a_1^+, a_2^+, \dots, a_n^+\} \quad (5)$$

$$M_D = \{a_1^-, a_2^-, \dots, a_n^-\} \quad (6)$$

其中

$$a_j^+ = \{\max N_{ij}, j = 1, 2, \dots, n_1; \min N_{ij}, j = 1, 2, \dots, n_2\}$$

$$a_j^- = \{\min N_{ij}, j = 1, 2, \dots, n_1; \max N_{ij}, j = 1, 2, \dots, n_2\}$$

式中: $M_w$ 、 $M_D$  分别为最湿、最干条件集。

**步骤 5** 计算加权欧几里得距离:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n E_j (N_{ij} - a_j^+)^2} \quad (7)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n E_j (N_{ij} - a_j^-)^2} \quad (8)$$

式中: $S_i^+$ 、 $S_i^-$  分别为第  $i$  个栅格与历史最湿、最干条件的加权欧氏距离。

**步骤 6** 计算每个栅格的 SEDI:

$$I_{SEI} = S_i^- / (S_i^- - S_i^+) \quad (9)$$

式中: $I_{SEI}$  为第  $i$  个栅格 SEDI 值。

SEDI 的取值范围为 0~1, 根据 100%、40%、20%、10%、5% 的累计概率对生态干旱等级进行划分。基于 SPEI 和 SEDI 对气象干旱和生态干旱等级进行划分,如表 1 所示。

表 1 气象干旱与生态干旱等级划分标准

Table 1 Classification standards of meteorological drought and ecological drought

干旱等级	SPEI	SEDI
无旱	>-0.5	>0.35
轻旱	>-1.0~-0.5	>0.20~0.35
中旱	>-1.5~-1.0	>0.13~0.20
重旱	>-2.0~-1.5	>0.08~0.13
极旱	≤-2.0	≤0.08

### 2.2 干旱事件识别

游程理论是一种对变量时间序列进行分析的方法,近年来常被用于提取干旱特征指标,包括干旱频次、干旱持续时间、干旱强度,相较于传统干旱指数准确性更高,在对区域干旱灾害的判别方面具有较高的实用价值<sup>[22-23]</sup>。本文基于月尺度的 SPEI 和 SEDI,采用游程理论对气象干旱和生态干旱进行识别,如图 2 所示。由图 2 可见,干旱频次为识别出的干旱总次数,干旱持续时间为所有干旱事件连续干旱月数之和,干旱强度直接反映水分亏缺程度,定义为干旱持续期内所有低于阈值  $R_0$  的月数累加,作为该事件的累积强度,将所有事件的累积强度相加后除以干旱频次,即得平均干旱强度。根据干旱等级的划分标准,只有 SPEI 和 SEDI 低于  $R_0$  才可能导致干旱事件的发生,气象干旱的 3 个阈值分别设定为  $R_0 = 0.5$ ,  $R_1 = -0.5$ ,  $R_2 = -1.5$ ; 生态干旱的 3 个阈值分别设定为  $R_0 = 0.35$ ,  $R_1 = 0.2$ ,  $R_2 = 0.13$ 。阈值的判定规则为:当 SPEI 或 SEDI 小于  $R_1$  时,初步判断此月干旱;若干旱仅历时 1 月,且对应的 SPEI 或

SEDI 小于  $R_2$ , 则确定该月是一次干旱事件, 反之认定为小干旱事件, 忽略不计; 对于间隔 1 月的两次相邻干旱事件, 若在间隔期间 SPEI 或 SEDI 在  $R_1 \sim R_0$  的范围内, 则认为这两次相邻干旱是从属干旱, 将这两次相邻干旱合并成一次干旱事件, 否则为两次独立干旱事件<sup>[24]</sup>。

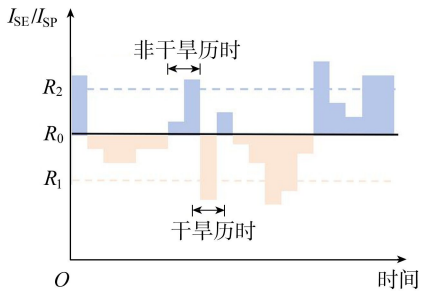


图 2 游程理论识别干旱事件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of identifying drought events using run theory

## 2.3 干旱传播特征量化指标

### 2.3.1 传播比

传播比作为干旱传播的关键指标, 反映区域对气象干旱的抵抗力以及不同等级干旱的触发阈值。本文基于 Copula 函数构建 SPEI 与 SEDI 的联合概率分布, 进而计算传播比。Copula 函数作为一种多元分析方法, 可以连接两个或多个具有不同边际分布的随机变量, 广泛用于干旱频率的传播分析。本文选取 Gaussian、Clayton、Gumbel、Frank、 $t$  分布 5 种 Copula 函数<sup>[25-26]</sup>, 利用赤池信息准则 (AIC) 筛选每个网格的最优 Copula 函数, 构建 SPEI 与 SEDI 的联合分布:

$$P(I_{SP} < I'_{SP}, I_{SE} < I'_{SE}) = C(u, v) \quad (10)$$

式中:  $u, v$  分别为 SPEI、SEDI 序列的边缘分布函数;  $C(\cdot)$  为选定的 Copula 函数;  $I'_{SP}, I'_{SE}$  分别为气象干旱和生态干旱的阈值, 本文取  $I'_{SP} = -1, I'_{SE} = 0.2$ 。

在此基础上, 通过条件概率计算传播比, 计算公式为:

$$P_r = P(I_{SE} < I'_{SE} | I_{SP} < I'_{SP}) = C(u, v) / u \quad (11)$$

式中:  $P_r$  为传播比, 其值越大, 表明在特定气象干旱强度下气象干旱向生态干旱的传播风险越高。

### 2.3.2 触发阈值

触发阈值是指触发特定等级生态干旱所需的气象干旱强度, 用于表征气象干旱驱动生态干旱发生的临界条件。基于传播比的定义, 本文通过逐步降低 SPEI 值的方法, 寻找使传播比首次达到或超过预设传播比 (本文取 0.6) 的 SPEI 值, 将其定义为触发阈值。SPEI 值低于或等于触发阈值时, 气象干旱能

够以超过 60% 的概率稳定地触发生态干旱。触发阈值越小, 表示引发生态干旱所需的气象干旱强度越高; 触发阈值越大, 表示轻度气象干旱即可引发生态干旱, 生态系统对气象干旱更敏感。

### 2.3.3 趋势判断与驱动因子分析

Ma 等<sup>[9]</sup> 的研究表明传播比与触发阈值在空间格局和变化趋势上高度一致, 且二者受控于相同的环境因子, 其驱动因子贡献模式经检验呈一致性。因此, 本文选取传播比作为干旱传播特征的代表性指标开展趋势判断与驱动因子分析, 采用滑动窗口法结合非参数趋势分析、偏 M-K 检验进行研究。以 20 a 为滑动窗口, 在像元尺度上提取每年 4—10 月的逐月传播比并计算其年均值, 形成传播比的时间序列数据集。使用 M-K 趋势检验识别各像元传播比的变化趋势<sup>[27-28]</sup>, 并利用 Sen's 斜率量化其趋势变化的幅度<sup>[29]</sup>。在识别出趋势变化显著的区域后, 引入偏 M-K 检验对 NDVI、气温 ( $T$ )、降水量 ( $P$ )、潜在蒸散发 ( $ET_p$ )、SM、太阳辐射 ( $R_s$ ) 6 个驱动因子进行评估, 分别计算剔除某一驱动因子后的偏 M-K 统计量, 若去除该驱动因子后趋势变化不再显著, 则可判定该因子对传播比变化趋势具有显著解释力, 为主要驱动因子。偏 M-K 统计量计算公式为:

$$Z' = Z_c - r_{cq} Z_q / \sqrt{(1 - r_{cq}^2) m(m-1)(2m+5)/18} \quad (12)$$

式中:  $Z'$  为偏 M-K 统计量;  $Z_c, Z_q$  分别为触发阈值与驱动因子的 M-K 统计量;  $r_{cq}$  为二者秩相关系数。

各驱动因子的贡献率计算公式为:

$$C_{R_i} = \frac{Z_{MK} - Z_i}{\sum_{i=1}^m (Z_{MK} - Z_i)} \times 100\% \quad (13)$$

式中:  $C_{R_i}$  为第  $i$  个驱动因子的贡献率;  $Z_{MK}$  为考虑全部驱动因子的 M-K 统计量, 反映干旱传播风险在研究期间的整体变化趋势;  $Z_i$  为第  $i$  个驱动因子的 M-K 统计量。

## 3 结果与分析

### 3.1 干旱事件特征分析

基于 1983—2022 年塔里木河流域 SPEI 和 SEDI 生长季逐月序列分析气象干旱和生态干旱的特征, 干旱频次、平均干旱持续时间、平均干旱强度的空间分布如图 3 所示。由图 3 可见, 气象干旱频次最高达 36, 受影响范围分散于整个研究区; 相较而言, 生态干旱频次最高达 44, 受影响范围在塔克拉玛干沙漠周边的区域以及北部区域。塔克拉玛干沙漠周边因植被稀缺, 生态系统对干旱响应更敏感, 直观表现为生态干旱持续时间最长达 38 月, 气象干

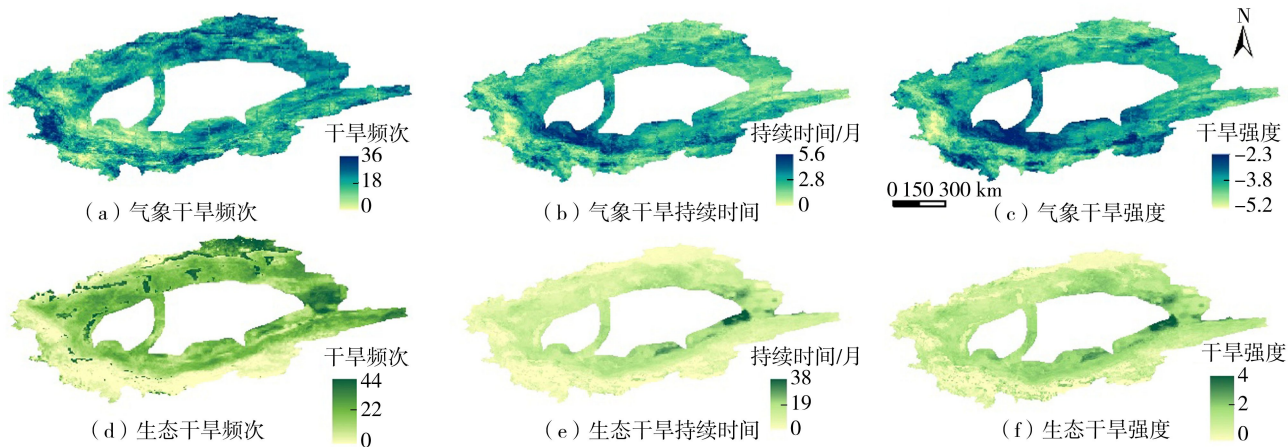


图3 1983—2022年塔里木河流域气象干旱和生态干旱的特征指标

Fig. 3 Characteristic indexes of meteorological drought and ecological drought in the Tarim River Basin from 1983 to 2022

旱持续时间最长仅 5.6 月,且气象干旱历时与干旱频次的特征相反,生态干旱持续时间远超过气象干旱,印证了干旱在生态系统中具有累积性与持续性效应<sup>[30]</sup>。从干旱强度的空间分布看,其高值区与干旱持续时间、干旱频次存在重叠。气象干旱强度高值区主要分布于塔里木河流域西南部叶尔羌河、和田河和克里雅河部分区域;生态干旱强度高值在塔里木河流域南部较多,需重点关注干旱防控与生态修复。干旱强度高值区与干旱频次、干旱持续时间的高值区空间耦合,塔里木河流域中部(沙漠周缘)生态干旱具有频发、久持、强影响的典型特征<sup>[31-32]</sup>,是干旱风险防控的核心区。

### 3.2 干旱传播特征的空间分布

图4为1983—2022年塔里木河流域的传播比和触发阈值的空间分布。由图4(a)可见,传播比在塔里木河流域呈现明显的空间异质性,整体水平在0~0.95范围内波动,中高值区主要集中于塔克拉玛干沙漠周围区域,并向开都-孔雀河、车尔臣河东部扩散。而绿洲区外围的高植被覆盖带以及南部高海拔地带则属于传播比低值区,这主要是由于高海拔区域土壤持水能力强、季节性积雪融水形成稳定水分补给且高寒区植被蒸腾需求低,这些区域气象干旱事件一旦发生,近地表土壤层快速失水,植被持续蒸腾耗水的协同作用,生态干旱状态极易同步响应,气象干旱向生态干旱的传播效能显著增强。绿洲核

心区受人工灌溉调控,土壤水分补给相对稳定,多项缓冲机制大幅削弱生态干旱指标对气象干旱波动的响应敏感性,抑制气象干旱向生态干旱的传播。由图4(b)可见,触发阈值整体在-2.5~-0.05范围内波动,西部山区、南部高原及北部环山地带的触发阈值较低( $<-1.5$ ),干旱传播门槛较高<sup>[3]</sup>,归因于高海拔区季节性积雪、冰川融水构成稳定水分补给;高寒草甸、灌丛植被蒸腾需求低,尤其是昆仑山沿线的高海拔区域,存在一定干旱缓冲能力;塔克拉玛干沙漠周边、开都-孔雀河及车尔臣河东部等区域触发阈值较高,说明这些区域生态系统对气象干旱的变化更加敏感,气象干旱向生态干旱传递的易发性与效率更显著。

### 3.3 干旱传播特征的变化趋势

图5为1983—2022年塔里木河流域干旱的传播比和触发阈值变化趋势。由图5(a)可见,传播比的上升趋势主要避开了处于塔里木河流域边缘的高海拔区域,这些区域气象干旱向生态干旱的传播随时间概率减小,生态系统对气象干旱的响应效率有所下降,该类区域约占流域总面积的20%。塔里木河流域其余80%的区域传播比均呈微弱上升趋势,每10a变化速率普遍低于0.05。由图5(b)可见,触发阈值在南部近塔克拉玛干沙漠地带呈下降趋势;而边缘地带(如昆仑山北麓过渡区)则表现为上升趋势;西部与南部相似,沙漠周边地带触发阈值下

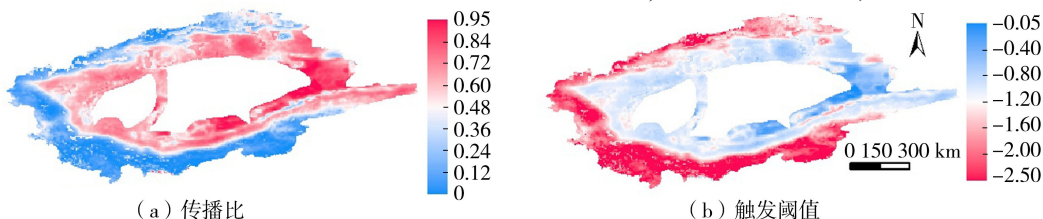


图4 1983—2022年塔里木河流域干旱的传播比和触发阈值的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of drought propagation ratio and trigger threshold in the Tarim River Basin from 1983 to 2022

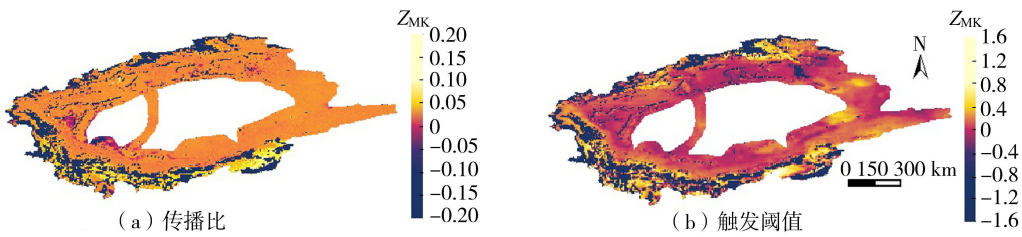


图5 1983—2022年塔里木河流域干旱的传播比和触发阈值变化趋势

Fig. 5 Change trend of drought propagation ratio and trigger threshold in Tarim River Basin from 1983 to 2022

降,高海拔山区及绿洲边缘则呈上升趋势,清晰反映出“沙漠—山地”梯度下阈值调控的空间差异。北部区域的趋势分化更为显著,阿克苏河区域、开都-孔雀河中部及车尔臣河中下游地区的触发阈值呈明显上升趋势,每10a最大速率可达1.5,这些区域需要更严重的气象干旱才能引发生态干旱,传播门槛显著提高;除此之外,触发阈值在北部其他区域仅显示微弱下降趋势,每10a变化速率绝对值小于0.2。时序演变上,传播比在南部约20%的河流沿岸区域呈明显上升趋势,其余区域变化平缓;触发阈值呈现出沙漠周边下降、高海拔及绿洲区上升的空间变化趋势,直观反映不同区域生态系统抗旱能力的动态变化<sup>[33-34]</sup>。

### 3.4 干旱传播特征变化的驱动因子

图6为1983—2022年塔里木河流域干旱的传播比显著变化区域( $p < 0.05$ )驱动因子的空间分布,图7为各驱动因子的面积占比和平均贡献率。由图6、图7可见,1983—2022年塔里木河流域干旱的传播比显著变化的区域中,潜在蒸散发和降水量是大多数区域的主导驱动因子。其中,21.3%的区域由潜在蒸散发变化驱动,平均贡献率为15.9%,这些区域主要分布于西部、北部和南部;17.8%的区域由降水量主导趋势变化,平均贡献率为16%。相比之下,东部和南部中间地带的主导因子为太阳辐射且面积占比为20.1%;土壤湿度作为主导驱动因子的面积占比为10.4%;气温作为主导驱动因子的面积占比9.6%,四散分布于西部和北部;NDVI只在4.8%的面积作为主导驱动因子,并且小范围集中分布在开都-孔雀河区域。通过各驱动因子的平均贡献率可见,各驱动因子占比均衡,为15%~18%。该特征反映出区域干旱传播由气候和环境条件共同约束所决定,其中大气能量输入(如温度与辐射增强)通过提升蒸散需求加速水分亏缺,而降水量与土壤湿度变化则通过陆面水分储量调节生态干旱对气象干旱的响应,使干旱在不同环境背景下表现出不同的传播路径与持续性,体现了流域干旱演变的复合性与协同控制机制<sup>[35-36]</sup>。

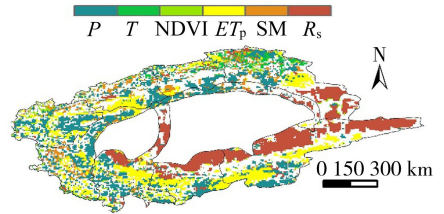


图6 1983—2022年塔里木河流域干旱的传播比显著变化区域( $p < 0.05$ )驱动因子的空间分布

Fig. 6 Dominant driving factors for significant change areas ( $p < 0.05$ ) of drought propagation ratio driving factors in Tarim River Basin from 1983 to 2022

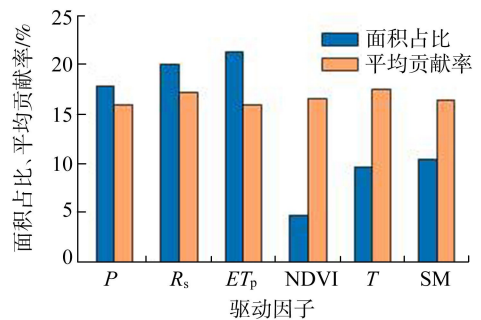


图7 各驱动因子的面积占比和平均贡献率

Fig. 7 Proportion and average contribution rate of each driving factor

## 4 结论

a. 塔里木河流域生态干旱在频次、持续时间、强度上均高于气象干旱,且高值区集中分布于塔克拉玛干沙漠周缘,呈现出明显的边缘集聚特征。

b. 塔里木河流域干旱的传播比和触发阈值在空间上表现出显著异质性,沙漠周缘及局部河谷区传播比高,其触发阈值相对较低,表明较弱的气象干旱即可引发生态响应;相比之下,绿洲区与高海拔区域传播特征则较弱。

c. 1983—2022年塔里木河流域多数区域干旱传播比呈微弱上升趋势,其中部分沙漠边缘和河谷区域的触发阈值升高,而高海拔及部分绿洲边缘的触发阈值降低。塔里木河流域干旱传播过程受多因子综合调控。驱动因子空间分异均衡,潜在蒸散发、太阳辐射、降水量、土壤湿度、NDVI等共同影响气

象干旱向生态干旱传播的效率。

## 参考文献:

- [ 1 ] 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))
- [ 2 ] 袁星,周诗琦,马凤,等. 气候和下垫面变化下骤旱形成演变机制研究进展[J]. 地球科学进展,2024,39(9):877-888. (Yuan Xing, Zhou Shiyu, Ma Feng, et al. Review on the formation and evolution mechanisms of flash droughts under climate and land cover change [ J ]. Advances in Earth Science, 2024, 39(9):877-888. (in Chinese))
- [ 3 ] Jiang Tianliang, Su Xiaoling, Qu Yanping, et al. Determining the response of ecological drought to meteorological and groundwater droughts in Northwest China using a spatio-temporal matching method [ J ]. Journal of Hydrology, 2024, 633:130753.
- [ 4 ] Wang Fei, Lai Hexin, Li Yanbin, et al. Dynamic variations of terrestrial ecological drought and propagation analysis with meteorological drought across the mainland China [ J ]. Science of the Total Environment, 2023, 896:165314.
- [ 5 ] 田小强,邵杏敏,张永强,等. 近二十年鄂尔多斯气象干旱与生态干旱的空间分布及其传递关系[J]. 地理研究, 2024, 43(7):1878-1890. (Tian Xiaoqiang, Shao Xingmin, Zhang Yongqiang, et al. Two decades of meteorological and ecological droughts in Ordos: spatial distribution and propagation [ J ]. Geographical Research, 2024, 43(7):1878-1890. (in Chinese))
- [ 6 ] Wang Hongxiang, Li Yanhua, Liu Jian, et al. Effects of ecological drought on vegetation in Inland River Basin of Inner Mongolia Plateau [ J ]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2025, 61:102628.
- [ 7 ] Waseem M, Ajmal M, Kim T W. Development of a new composite drought index for multivariate drought assessment [ J ]. Journal of Hydrology, 2015, 527:30-37.
- [ 8 ] Wang Lin, Wei Wei, Wang Lixin, et al. Trigger thresholds and propagation mechanism of meteorological drought to agricultural drought in an inland river basin [ J ]. Agricultural Water Management, 2025, 311:109378.
- [ 9 ] Ma Feng, Yuan Xing. Vegetation greening and climate warming increased the propagation risk from meteorological drought to soil drought at subseasonal timescales [ J ]. Geophysical Research Letters, 2024, 51(4):e2023GL107937.
- [ 10 ] 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))
- [ 11 ] 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))
- [ 12 ] Zhang Ke, Li Zhilin, Shi Wuzhi, et al. Spatiotemporal changes and interconnections between meteorological and hydrological droughts in China over past 34 years [ J ]. Water Science and Engineering, 2025, 18(3):274-287.
- [ 13 ] 薛联青,白青月,刘远洪. 人类活动影响下塔里木河流域气象干旱向水文干旱传播的规律[J]. 水资源保护, 2023, 39(1):57-62. (Xue Lianqing, Bai Qingyue, Liu Yuanhong. Propagation law from meteorological drought to hydrological drought in the Tarim River Basin under the impact of human activities [ J ]. Water Resources Protection, 2023, 39(1):57-62. (in Chinese))
- [ 14 ] Wang Yihui, Zhou Han, Huang Jiejun, et al. A framework for identifying propagation from meteorological to ecological drought events [ J ]. Journal of Hydrology, 2023, 625:130142.
- [ 15 ] Ge Chenhao, Sun Peng, Yao Rui, et al. Characteristics of propagation from meteorological drought to ecological drought in China: lag and cumulative effects [ J ]. Atmospheric Research, 2024, 304:107405.
- [ 16 ] 岳胜如,王伦澈,曹茜,等. 塔里木河流域植被动态及潜在因素驱动机制[J]. 地球科学, 2024, 49(9):3399-3410. (Yue Shengru, Wang Lunche, Cao Qian, et al. Vegetation dynamics and potential factors driving mechanisms in the Tarim River Basin [ J ]. Earth Science, 2024, 49(9):3399-3410. (in Chinese))
- [ 17 ] 丁琳,夏自强,颜乐,等. 新疆塔里木河流域干旱特征演变时空分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(4):13-17. (Ding Lin, Xia Ziqiang, Yan Le, et al. Analysis of spatial-temporal characteristics of drought change trend in Tarim River Basin [ J ]. Water Resources and Power, 2014, 32(4):13-17. (in Chinese))
- [ 18 ] 孙建光. 塔里木河流域绿洲生态水权分配制度变迁[J]. 水利经济, 2025, 43(3):7-12. (Sun Jianguang. Changes in the distribution system of ecological water rights in the oasis of the Tarim River Basin [ J ]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43(3):7-12. (in Chinese))
- [ 19 ] 岳胜如,王伦澈,曹茜,等. 近 20 年塔里木河流域植被

- 变化及与气候因子的关系[J]. 地球科学, 2025, 50(1): 33-45. ( Yue Shengru, Wang Lunche, Cao Qian, et al. Vegetation changes in Tarim River Basin over past 20 years and their relationship with climate factors[J]. Earth Science, 2025, 50(1): 33-45. (in Chinese))
- [20] Gebrechorkos S H, Peng Jian, Dyer E, et al. Global high-resolution drought indices for 1981-2022[J]. Earth System Science Data, 2023, 15(12): 5449-5466.
- [21] 高秉丽, 巩杰, 李焱, 等. 基于 SPEI 的黄河流域多尺度干湿特征分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 723-733. ( Gao Bingli, Gong Jie, Li Yan, et al. Analysis of multi-scalar characteristics of dry and wet conditions in the Yellow River Basin based on SPEI [ J ]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 723-733. (in Chinese))
- [22] 邹睿, 尹义星, 王小军, 等. 鄱阳湖流域气象干旱向水文干旱传递的时间特征研究[J]. 水文, 2024, 44(4): 69-76. ( Zou Rui, Yin Yixing, Wang Xiaojun, et al. Study on the temporal characteristics of meteorological drought to hydrological drought propagation in the Poyang Lake Basin [ J ]. Journal of China Hydrology, 2024, 44(4): 69-76. (in Chinese))
- [23] 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))
- [24] Xiong Hao, Han Juntai, Yang Yuting. Propagation from meteorological to hydrological drought: characteristics and influencing factors[J]. Water Resources Research, 2025, 61(4): e2024WR037765.
- [25] Wang Zhenwei, Chang Jianxia, Wang Yimin, et al. Temporal and spatial propagation characteristics of meteorological drought to hydrological drought and influencing factors[J]. Atmospheric Research, 2024, 299: 107212.
- [26] Li Yifei, Huang Shengzhi, Wang Hao, et al. Warming and greening exacerbate the propagation risk from meteorological to soil moisture drought [ J ]. Journal of Hydrology, 2023, 622: 129716.
- [27] 牛凯杰, 吴为, 刘庚, 等. 永定河流域水文响应变化归因与驱动因素研究[J]. 水资源保护, 2026, 42(2): 140-150. ( Niu Kaijie, Wu Wei, Liu Geng, et al. Analysis on the attribution and driving factors of hydrological response changes in the Yongding River Basin [ J ]. Water Resources Protection, 2026, 42(2): 140-150. (in Chinese))
- [28] Huang Shengzhi, Li Pei, Huang Qiang, et al. The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors [ J ]. Journal of Hydrology, 2017, 547: 184-195.
- [29] 窦佳瑶, 王华, 王世岩, 等. 鄱阳湖水文情势演变对水质的驱动作用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2026, 54(2): 82-93. ( Dou Jiayao, Wang Hua, Wang Shiyan, et al. Driving effect of hydrological regime evolution on water quality in Poyang Lake [ J ]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ), 2026, 54(2): 82-93. (in Chinese))
- [30] Wang Xiaolei, Luo Yi, Sun Lin, et al. Different climate factors contributing for runoff increases in the high glacierized tributaries of Tarim River Basin, China [ J ]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2021, 36: 100845.
- [31] Da Silva R M, Santos C A G, Moreira M, et al. Rainfall and river flow trends using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in the Cobres River Basin [ J ]. Natural Hazards, 2015, 77(2): 1205-1221.
- [32] 李铠峰, 赵超, 李文戎, 等. 气候变化及人类活动影响下永安溪河流水文健康响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 25-30. ( LI Kaifeng, Zhao Chao, Li Wenyu, et al. Hydrological health response of climate change and human activities impact of the Yong'an River [ J ]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ), 2025, 53(1): 25-30. (in Chinese))
- [33] Crausbay S D, Ramirez A R, Carter S L, et al. Defining ecological drought for the twenty-first century [ J ]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(12): 2543-2550.
- [34] Kong Xiangzhi, Li Qiao, Tao Hongfei, et al. Drought risk assessment and zoning in the Tarim River Basin, Xinjiang, China [ J ]. Agriculture, 2025, 15(12): 1287.
- [35] 刘轩, 粟晓玲, 刘雨翰, 等. 西北地区生态干旱脆弱性评估[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 65-73. ( Liu Xuan, Su Xiaoling, Liu Yuhan, et al. Vulnerability assessment of ecological drought in Northwest China [ J ]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 65-73. (in Chinese))
- [36] Zhou Zhaoqiang, Wang Ping, Li Linqi, et al. Recent development on drought propagation: a comprehensive review [ J ]. Journal of Hydrology, 2024, 645: 132196.

(收稿日期: 2025-10-15 编辑: 王芳)