

基于三维 Copula 函数的干旱事件识别及其演变特征研究

季永月^{1,2}, 曾思栋^{1,2}, 阳林翰^{1,2}, 吴 涵^{1,2}, 夏 军³

(1. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院山地自然灾害与工程安全重点实验室;
2. 中国科学院大学重庆学院; 3. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室)

摘要:为研究气候变化背景下全球干旱演变的时空特征,基于三维 Copula 函数,融合降水与潜在蒸散发差值(PPET)、土壤湿度(SM)和径流 3 个干旱要素,构建了综合季节性干旱指数(CSDI),并分析了 1982—2021 年全球干旱的时空差异。结果表明:CSDI 与标准化降水蒸散指数(SPEI)的相关系数为 0.914;在历史典型干旱事件验证方面,相比 SPEI,CSDI 在干旱初期识别的干旱覆盖面积更大,且与 PPET 和 SM 负异常的时空一致性更高,对 2009—2010 年中国西南、2010—2011 年非洲之角及 1992 年中欧历史干旱事件的初、中、后期演变过程刻画完整;在干旱特征方面,1982—2021 年全球干旱呈现出显著的空间差异,干旱与半干旱区表现为高频次、长持续和高强度的耦合特征,湿润区整体风险较低,但北半球部分中高纬度湿润区出现较高的干旱频次与强度;典型干旱区平均干旱历时缩短,而湿润区在频次增加的同时,呈现出更持久的干旱过程,总体上,全球干旱演变趋势呈现出频发化、快发化、极端化的特征。

关键词:综合季节性干旱指数;标准化降水蒸散指数;土壤湿度;Copula 函数;干旱特征;全球干旱

Research on identification and evolution characteristics of drought events based on three-dimensional Copula function// Ji Yongyue^{1,2}, Zeng Sidong^{1,2}, Yang Linhan^{1,2}, Wu Han^{1,2}, Xia Jun³ (1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Engineering Resilience, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences; 2. Chongqing School, University of Chinese Academy of Sciences; 3. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University)

Abstract: To examine the spatiotemporal evolution of global drought under the background of climate change, this study developed a composite seasonal drought index (CSDI) by integrating precipitation minus potential evapotranspiration (PPET), soil moisture (SM), and runoff using a three-dimensional Copula function, and analyzed the spatiotemporal heterogeneity of global drought from 1982 to 2021. Results indicated that the correlation coefficient between CSDI and the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) reached 0.914. In terms of historical drought validation, compared to SPEI, CSDI identified a larger drought coverage area in the early stage and exhibited higher spatiotemporal consistency with negative anomalies of PPET and SM. Furthermore, CSDI completely captured the early, middle, and late evolutionary stages of typical historical droughts, such as the Southwest China drought from 2009 to 2010, the drought in Horn of Africa from 2010 to 2011, and the Central Europe drought in 1992. Regarding drought characteristics, global drought exhibited strong spatial heterogeneity from 1982 to 2021. Arid and semi-arid zones showed a coupling feature characterized by high frequency, long duration, and high intensity, whereas humid regions generally faced lower risk, though some mid- to high-latitude humid zones in the Northern Hemisphere experienced elevated flash frequency and intensity. Temporally, in typical arid regions, the average drought duration shortened, while humid regions displayed more persistent drought processes with increasing frequency. Overall, the global trend of drought shows characteristics of frequent occurrence, rapid onset, and extreme severity.

Key words: comprehensive seasonal drought index; standardized precipitation evapotranspiration index; soil moisture; Copula function; drought characteristics; global drought

基金项目:重庆市自然科学基金创新发展联合基金项目(CSTB2025NSCQ-LZX0055);中国科学院战略性先导科技专项(XDB1390000);中国博士后科学基金项目(2025M780358);重庆市博士后研究项目特别资助项目(2025CQBSHTB3101);中国科学院青年创新促进会资助项目(2021385);国家自然科学基金青年科学基金项目(42401093,42207104)

作者简介:季永月(1996—),女,助理研究员,博士,主要从事生态水文学研究。E-mail:jiyongyue@cigit.ac.cn

通信作者:曾思栋(1987—),男,研究员,博士,主要从事流域生态水文研究。E-mail:zengsidong@cigit.ac.cn

干旱是由水分收支或供需失衡引发的水分短缺现象,通常由多种成因机制或驱动因素共同作用而成,其发生机理复杂、发展过程多变,是全球最具灾难性的自然灾害之一^[1-2]。在全球变暖与经济快速发展的背景下,干旱发生频次显著上升,已成为全球面临的严重环境问题之一^[3]。干旱事件,尤其是极端干旱的发生,直接威胁国家粮食安全和社会经济稳定。全球尺度的系统研究表明,自 20 世纪 70 年代以来,全球大部分地区呈现出明显的干旱化趋势^[4];20 世纪下半叶非洲、欧亚、澳大利亚和南美洲的季节性干旱普遍加剧,尤以非洲和欧亚大陆最为显著^[5]。近几十年来,全球多地相继爆发干旱事件。例如:2009 年秋季至 2010 年春季,中国西南地区发生特大干旱,云南、贵州、广西、四川、重庆五省市受灾人口超过 6000 万人;2011 年,东非地区遭遇自 20 世纪 80 年代以来最严重的干旱,饥荒导致数万人死亡,受灾人口超过 1 200 万人^[6]。可见,干旱频发与极端化趋势已对全球生态环境和人类社会产生深远影响,深入研究干旱特征已成为当前亟须解决的科学问题之一。

干旱成因错综复杂,单一气象水文变量构建的干旱指数往往难以全面揭示干旱过程的多维特征。近年来,许多学者开始考虑结合多种气象-水文变量、融合不同类型的干旱指数,以构建干旱信息更为全面的综合干旱指数。其中,线性联合是结合不同干旱指数的一种常用且简单的方法。例如:Hao 等^[7]采用了等权重线性组合干旱指数预测干旱;Meyer 等^[8]使用主成分分析将帕默尔干旱指数与作物湿度指数进行联合;Rajsekhar 等^[9]基于熵值法构建了多变量干旱指数;邢贞相等^[10]运用主成分分析法和熵权法分别对 3 种单一干旱指数赋权,构建融合气象干旱和水文干旱信息的综合干旱指数。然而,在变化的环境中,与干旱相关的变量相互作用复杂,线性联合可能导致干旱信息的缺失^[11]。因此,利用 Copula 函数来刻画变量间复杂的非线性依赖关系逐渐兴起。近年来,基于 Copula 函数的多变量综合干旱指数研究逐渐兴起,但仍局限于二维联合。例如:Suo 等^[11]基于 Copula 函数,联合降水与潜在蒸散发差值和土壤湿度,构建了中亚干旱区的非线性综合气象-土壤干旱指数;Hao 等^[12]同样利用二维 Copula 函数联合反映气象干旱与农业干旱。然而,目前从气象、水文和农业干旱三维角度进行非线性联合来识别干旱的研究仍较为有限,尤其在全球尺度上构建三维非线性综合季节性干旱指数方面尚需进一步探索。

本文综合利用全球 1982—2021 年逐期(1 期为

8 d)水文气象数据,通过优选各变量的边际分布函数,基于三维 Copula 函数,刻画 3 类干旱要素的非线性依赖结构,并据此构建综合季节性干旱指数(CSDI),进一步开展干旱事件的识别、合并与验证,系统分析全球不同区域的干旱特征,以期为全面识别和评估干旱的多维属性,深入理解全球干旱的识别与演变规律提供方法支撑与理论参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区为 $-60^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 、 $-180^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}\text{E}$ 范围的陆地。为分析不同气候区干旱发生发展的特征差异性,并降低不同气候背景导致的空间异质性,根据联合国环境规划署 1997 年的定义,基于干燥指数(I_A)将研究区划分为 5 类:极端干旱区($I_A < 0.03$)、干旱区($0.03 \leq I_A < 0.2$)、半干旱区($0.2 \leq I_A < 0.5$)、亚湿润干旱区($0.5 \leq I_A < 0.65$)和湿润区($I_A \geq 0.65$),如图 1 所示。基于此,在各分区内开展 CSDI 构建、干旱事件识别与合并以及干旱特征分析,从而保证参数在分区内的稳定性和在各分区间的可比性。

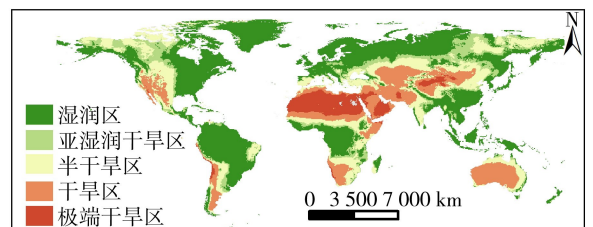


图 1 基于 1970—2000 年长期干燥指数的全球干湿分区

Fig. 1 Global dry and wet zones based on long-term aridity index from 1970 to 2000

1.2 数据来源

构建 CSDI 所用数据集包括土壤水分、降水、潜在蒸散发和径流数据。气象干旱以降水与潜在蒸散发差值(PPET)表征,农业干旱以土壤湿度(SM)表征,水文干旱以径流(R)表征。1982—2021 年的土壤水分、降水和径流数据均来自欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA5-Land 再分析数据集,其原始时空分辨率为逐小时和 0.1° 。ERA5-Land 土壤水分数据提供 4 层体积含水量,1~4 层深度分别为 $0\sim 7$ 、 $>7\sim 28$ 、 $>28\sim 100$ 、 $>100\sim 289$ cm。本文研究选取前 3 层数据,并采用厚度加权线性叠加的方法,构建表层 1 m 的土壤湿度数据集^[13]。潜在蒸散发(PET)基于 ERA5-Land 逐小时气象变量(气温、风速、比湿、净辐射等)计算得到^[14],其原始时空分辨率为 1 h 和 0.1° 。

为评估构建的 CSDI 的准确性和可靠性,采用标准化降水蒸散指数(SPEI)全球逐日数据集

(<https://doi.org/10.5281/zenodo.8060268>) 进行对比验证,其空间分辨率为 0.25° ,时间尺度为 1 d,时间跨度为 1982—2021 年。为实现各数据集的时空一致性,将所有数据双线性插值至 0.5° 的空间分辨率,并将逐时、逐日数据转换为逐期时间尺度。

2 研究方法

2.1 边际分布函数优选

对于 SM 和 R ,选取 11 种单变量概率分布类型作为边际分布函数,包括伽马分布、瑞利分布、正态分布、指数分布、对数正态分布、威布尔分布、极值分布、广义极值分布、对数逻辑斯谛分布、逻辑斯谛分布和 t 位置尺度分布,以 Kolmogorov-Smirnov 检验^[15]和赤池信息量准则(AIC)^[16]为评判标准选择每个分区 SM 和 R 的最优边际分布函数。对于 PPET 而言,由于其可能取负值,而对数正态分布、威布尔分布和伽马分布等仅适用于非负数,难以直接拟合该变量。相比之下,3 参数对数逻辑斯谛分布可通过位置参数容纳负值,且在累积分布函数拟合方面具有较好适应性,被广泛用于构建 PPET 的边际分布^[17-18],本文据此采用该分布函数拟合 PPET。

2.2 C-Vine Copula 三维联合

选取 C-Vine Copula 函数模拟 PPET、SM 和 R 之间的复杂依赖结构。C-Vine Copula 函数通过将高维 Copula 函数的估计分解为一系列二维 Copula 函数的组合,既能灵活刻画变量间的非线性和非对称依赖关系,又可显著减少参数数量,从而降低模型估计复杂度^[19]。通过联合 PPET、SM 和 R 的边际分布函数,可有效捕捉三者之间的复杂依赖关系。在三维情形下,设有 3 个随机变量 X_1, X_2, X_3 ,其联合边际分布函数 $F_{X_1X_2X_3}(x_1, x_2, x_3)$ 可通过以下方式分解:

$$F_{X_1X_2X_3}(x_1, x_2, x_3) = C_{12}(F_1(x_1), F_2(x_2)) \cdot C_{132}(F_{112}(x_1|x_2), F_{312}(x_3|x_2)) \quad (1)$$

式中: $C_{12}(\cdot)$ 为 X_1 和 X_2 的二维 Copula 函数; $C_{132}(\cdot)$ 为给定 X_2 条件下 X_1 和 X_3 的条件 Copula 函数; $F_1(x_1), F_2(x_2)$ 分别为 X_1 和 X_2 的边际分布函数; $F_{112}(x_1|x_2), F_{312}(x_3|x_2)$ 分别为给定 X_2 条件下 X_1 和 X_3 的条件边际分布函数。

第一层树(简称树 1)结构为构造变量 X_1 和 X_2 的二维 Copula 函数,根据两个变量的边缘分布计算其联合分布;第二层树(简称树 2)结构则在给定 X_2 的条件下,构造 X_1 和 X_3 的条件 Copula 函数,并根据 $F_{112}(x_1|x_2), F_{312}(x_3|x_2)$ 计算条件联合分布。考虑不同气候干湿背景下变量依赖结构可能存在差异,针对不同干湿分区样本,分别对 3 变量可能的顺

序组合进行 Copula 函数拟合,并以贝叶斯信息准则(BIC)为模型优劣评价标准,确定该分区的最优变量顺序。随后,在固定最优顺序的条件下,基于候选 Copula 族(Gaussian、Student- t 、Clayton、Gumbel、Frank、Joe 及其旋转型)进行逐对拟合,选取基于 BIC 评价最优的 Copula 族组合,据此逐像元调用最优变量顺序及 Copula 族得到 3 变量联合概率分布函数。

2.3 季节性干旱事件识别

得到长时间序列 PPET、SM 和 R 的联合边际分布函数 $F_{X_1X_2X_3}(x_1, x_2, x_3)$ 后,进一步将其转化为标准正态分布,得到 CSDI:

$$I_C = \varphi^{-1}(F_{X_1X_2X_3}(x_1, x_2, x_3)) \quad (2)$$

式中: I_C 为 CSDI 的值; $\varphi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。

干旱事件识别遵循游程理论,参照已有研究中基于 PPET、SM 和 R 构建的 SPEI、标准化土壤湿度指数(SSI)和标准化径流指数(SRI)对季节性干旱的分类与定义^[11,15],设定阈值 $\theta = -0.5$ 。以 8 d 为 1 期,对于 1982—2021 年的 I_C 序列,当满足 $I_C < \theta$ 的历时不少于 9 期(72 d)时,定义为一次季节性干旱事件^[20-21]。干旱历时定义为 $I_C < \theta$ 的持续时间,干旱烈度为干旱时间段内 I_C 与 θ 差值的累积量,干旱强度则为单位干旱历时下的干旱烈度。

2.4 季节性干旱特征与合并

对于两个相邻的季节性干旱事件,其特征分别为 $(t_{s,i}, t_{e,i}, d_i, s_i), (t_{s,i+1}, t_{e,i+1}, d_{i+1}, s_{i+1})$,其中, $t_{s,i}, t_{e,i}$ 分别为第 i 次季节性干旱事件开始和结束时间; d_i, s_i 分别为第 i 次季节性干旱事件的历时和干旱烈度。两个相邻干旱事件之间的非干旱事件特征为 (t_i, v_i) ,其中, t_i 为两次季节性干旱事件间的非干旱时间间隔, $t_i = t_{s,i+1} - t_{e,i}$; v_i 为两次季节性干旱事件间隔过程中 I_C 与 θ 差值的累积量。依据事件特征,干旱合并原则^[22]为:

$$\begin{cases} t_i < t_c \\ p_i < p_c \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$p_i = |v_i/s_i|$$

式中: t_c 为预设间隔时间; p_c 为预设临界比值, $p_c \in [0, 1]$ 。

两次干旱进行合并后,形成新的更长时间的季节性干旱事件。合并后季节性干旱事件特征为:

$$\begin{cases} d = d_i + d_{i+1} + t_i \\ s = s_i + s_{i+1} - v_i \end{cases} \quad (4)$$

随着 t_c (设定为 8~64 d^[22])的变化,合并后干旱事件特征与合并前干旱事件特征的比率会随之发生改变。根据 t_c 增加时,比率变化逐渐减小的原则确

定最优间隔时间(t_c^*);最优临界比值(p_c^*)则为随着临界比值的增加(步长 0.01),干旱特征比率变化趋于平缓的临界点。为量化相邻干旱合并间隔时间窗口,基于第 k 和 $k+1$ 个 t_c 取值对应干旱特征比率曲线间的差异,定义相邻两条曲线在全体 p_c 上的总体差异为:

$$D_k = \int_{p_{c,\min}}^{p_{c,\max}} |R_{k+1}(p_c) - R_k(p_c)| dp_c / \Delta p_c \quad (k = 1, 2, \dots, m-1) \quad (5)$$

式中: D_k 为相邻干旱合并间隔时间窗口所对应的干旱特征比率曲线间的总体差异; $R_{k+1}(p_c)$ 为以 p_c 作为临界比值合并的干旱特征与初始特征的比率; m 为预设 t_c 的取值个数。

进一步利用分段线性回归方法将 D_k 拟合为两段线性模型,从而得到 t_c^* :

$$D_k = \begin{cases} \alpha_1 + \beta_1 k + \varepsilon_k & k \leq b \\ \alpha_2 + \beta_2 k + \varepsilon_k & k > b \end{cases} \quad (6)$$

$$t_c^* = \operatorname{argmin}_b S_b + 1 \quad (7)$$

式中: b 为枚举断点, $b = 2, 3, \dots, m-2$; $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 为系数; ε_k 为回归拟合的随机误差项; S_b 为断点为 b 时分段线性回归模型的残差平方和。

基于 t_c^* ,对 $R(p_c)$ 进行分段线性回归,从而得到 p_c^* :

$$R(p_c) = \begin{cases} a_1 + b_1 p_c + \eta(p_c) & p_c \leq \tau \\ a_2 + b_2 p_c + \eta(p_c) & p_c > \tau \end{cases} \quad (8)$$

$$p_c^* = \operatorname{argmin}_\tau S'_\tau \quad (9)$$

式中: τ 为枚举断点, $\tau = p_2, p_3, \dots, p_{n-1}$; n 为预设 p_c 的取值个数; a_1, a_2, b_1, b_2 为系数; $\eta(p_c)$ 为回归拟合的随机误差项; S'_τ 为断点为 τ 时分段线性回归模型的残差平方和。

2.5 分区统计与相关性分析

在对 1982—2021 年干旱事件特征的逐年统计中,跨年游程不做拆分,按完整事件识别,并以其起始年份归入对应年度统计。依据干燥指数将所有像元划分到极端干旱区、干旱区、半干旱区、亚湿润干旱区和湿润区,进一步在像元尺度提取事件特征(频次、历时、强度等),对每个目标分区内事件的特征进行空间加权平均,得到不同干湿区的干旱特征。

表 1 各干湿区最优变量顺序与 Copula 族

Table 1 Optimal variable ordering and Copula families across different dry and wet climate zones

分区	最优变量顺序	树 1 条件边与 Copula 族	树 2 条件边与 Copula 族
极端干旱区	PPET, R, SM	PPET-R: Student-t; PPET-SM: Gaussian	R-SM PPET: Clayton 旋转式
干旱区	R, PPET, SM	R-PPET: Gumbel; R-SM: Clayton	PPET-SM R: Clayton
半干旱区	SM, R, PPET	SM-R: Clayton; SM-PPET: Clayton	R-PPET SM: Gumbel
亚湿润干旱区	R, SM, PPET	R-SM: Clayton; R-PPET: Clayton 旋转式	SM-PPET R: Survival-Gumbel
湿润区	R, SM, PPET	R-SM: Gaussian; R-PPET: Gumbel	SM-PPET R: Clayton

在像元尺度开展 CSDI 与 SPEI 相关性分析,对每个有效像元 i 提取 1982—2021 年逐期 CSDI 与 SPEI 序列 $\{x'_{i,j}\}$ 与 $\{y'_{i,j}\}$ ($j = 1, 2, \dots, J$) (J 为时间序列总期数),计算皮尔逊相关系数 r_i 。在区域尺度开展 CSDI 与 SPEI、PPET 异常值和 SM 异常值相关性比较,PPET 与 SM 异常值基于 1982—2021 年逐期时间序列,采用 Z-score 标准化方法计算。在区域尺度上,对全球或指定分区内像元进行面积加权平均,得到区域时间序列 $\{x'_j\}$ 与 $\{y'_j\}$ ($j = 1, 2, \dots, J$),再据此计算区域层面的皮尔逊相关系数 r 。

3 结果与分析

3.1 干旱事件识别与合并参数

各干湿区 PPET、SM 和 R 的联合最优变量顺序及 Copula 族选择结果如表 1 所示。总体上,各分区最优 C-Vine 结构呈现相近的依赖模式。树 1 以 R-SM 和 R-PPET 为主要边;树 2 中常见的条件 Copula 为 R-SM|PPET、PPET-SM|R 或 SM-PPET|R 等组合,体现了供需、蓄存、产汇流之间的传递性关联。最优合并参数结果表明,各分区 t_c^* 均为 24 d,而 p_c^* 在极端干旱区、干旱区、半干旱区、亚湿润干旱区、湿润区分别为 0.07、0.10、0.12、0.11、0.11。

3.2 季节性干旱验证

3.2.1 CSDI 与 SPEI 相关性分析

像元尺度的 CSDI 与 SPEI 相关性分布(图 2)表明,总体上 CSDI 与 SPEI 在全球多数陆地区域具有较高一致性,相关系数多在 0.4 以上,大部分区域达到 0.6 及以上。高相关性主要集中在副热带干旱与半干旱气候带,而在热带湿润区和高纬度寒冷区,相关性相对较低。时间序列上(图 3),1982—

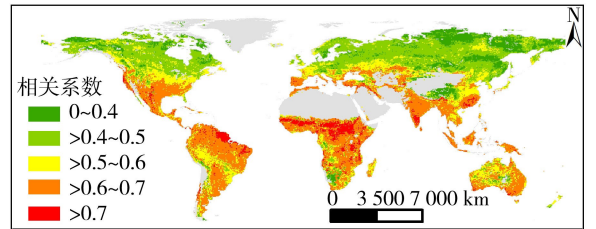


图 2 CSDI 与 SPEI 逐像元相关性空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of pixel-level correlations between CSDI and SPEI

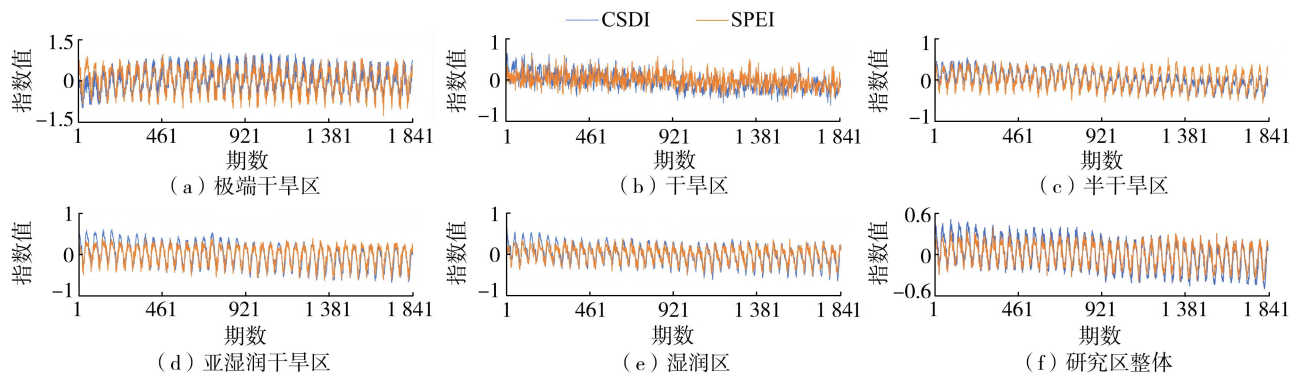


图3 1982—2021年逐期全球平均CSDI与SPEI比较

Fig. 3 Comparison of global average CSDI and SPEI over successive periods

2021年CSDI与SPEI在研究区的加权平均呈现高度一致的季节性起伏,波峰与波谷基本同步,相关系数为0.914。在极端干旱区、干旱区、半干旱区、亚湿润干旱区和湿润区,二者相关系数分别为0.723、0.488、0.790、0.888和0.847,总体上,各分区的时间序列均呈现较为同步的季节性起伏,但在干旱区二者相关性较弱,随时间波动并不完全一致。

由于CSDI与SPEI在不同干湿背景下对应关系存在差异,在不同分区进一步比较二者与SM及PPET的关系。由表2可知,CSDI与SM的相关性在各干湿区均显著高于SPEI;在亚湿润干旱区,CSDI与SM呈正相关关系,而SPEI与SM则表现为负相关关系。整体上,CSDI与SM的相关系数达到0.440,显著高于SPEI与SM的相关系数。CSDI和SPEI与PPET的相关性则呈现分区差异:在干旱区和亚湿润干旱区,CSDI与PPET的相关性更高;在湿润区两者相当;而在极端干旱区和半干旱区,SPEI与PPET的相关性略优于CSDI。

表2 CSDI和SPEI与SM和PPET的相关性比较

Table 2 Comparison of correlations of CSDI and SPEI with SM and PPET

分区	相关系数			
	CSDI与SM	SPEI与SM	CSDI与PPET	SPEI与PPET
极端干旱区	0.218**	0.151**	0.803**	0.867**
干旱区	0.501*	0.378**	0.753**	0.364**
半干旱区	0.479**	0.177**	0.791**	0.941**
亚湿润干旱区	0.109**	-0.145**	0.922**	0.902**
湿润区	0.619**	0.366**	0.902**	0.902**
研究区整体	0.440**	0.234**	0.918**	0.930**

注: *表示 $p < 0.05$, **表示 $p < 0.01$ 。

3.2.2 历史干旱事件验证

为检验CSDI在不同气候背景下对干旱初、中、后期的表征能力,选取3起重大历史干旱事件作为验证对象,分别为2009—2010年中国西南干旱、2010—2011年非洲之角干旱(涉及埃塞俄比亚、厄立特里亚、吉布提、索马里和肯尼亚5国)与1992年

中欧干旱(涉及德国、捷克和波兰3国)。中国西南干旱发生于2009年秋至2010年春,主要涉及云南、贵州、广西西北部及四川南部等高原-丘陵过渡带,重点干旱区位于滇中—滇南和黔西—黔南(图4);东非干旱起于2010年末,2011年4—9月达到峰值,主要影响索马里中南部、埃塞俄比亚南部和肯尼亚东北部等非洲之角区域,重点干旱区集中在索马里中南部与肯尼亚东北部(图5);中欧干旱以1992年春夏为主、秋季逐步缓解,范围覆盖德国、捷克、波兰的温带湿润区与山地-平原过渡带,重点干旱区位于德国北部—波兰西部—捷克一线(图6)。上述事件覆盖季风边缘、热带干旱带与温带湿润区3类典型环境。

3起典型事件中CSDI与SPEI对比结果表明,CSDI能更完整地刻画干旱发生—发展—缓解过程,且与PPET和SM异常值的时空变化具有更高的一致性。与SPEI相比,CSDI的主要优势体现在其对干旱起始阶段的识别范围更广。在3起典型事件的干旱初期,CSDI识别的干旱覆盖面积更大,且与PPET、SM同期负异常的联合出现相吻合。具体而言,在2009—2010年中国西南干旱与2010—2011年非洲之角干旱中,CSDI在干旱早期即识别出核心区成片干旱信号,覆盖范围普遍大于SPEI,其空间位置与PPET、SM负异常的同时出现相匹配。在1992年中欧季节性干旱中,CSDI在干旱中期的空间分布与PPET的显著负异常位置相对应,同时能捕捉到SM的负异常范围;而SPEI的识别范围则主要集中于PPET局地异常中心,未能充分反映SM的响应。在干旱后期,CSDI仍能识别出少量干旱残余,而SPEI已不再给出干旱指示。

3.3 全球干旱特征

1982—2021年全球干旱事件的空间分布特征如图7所示,全球干旱特征在空间上呈现显著的区域差异性。干旱频次(图7(a))高值主要分布在北

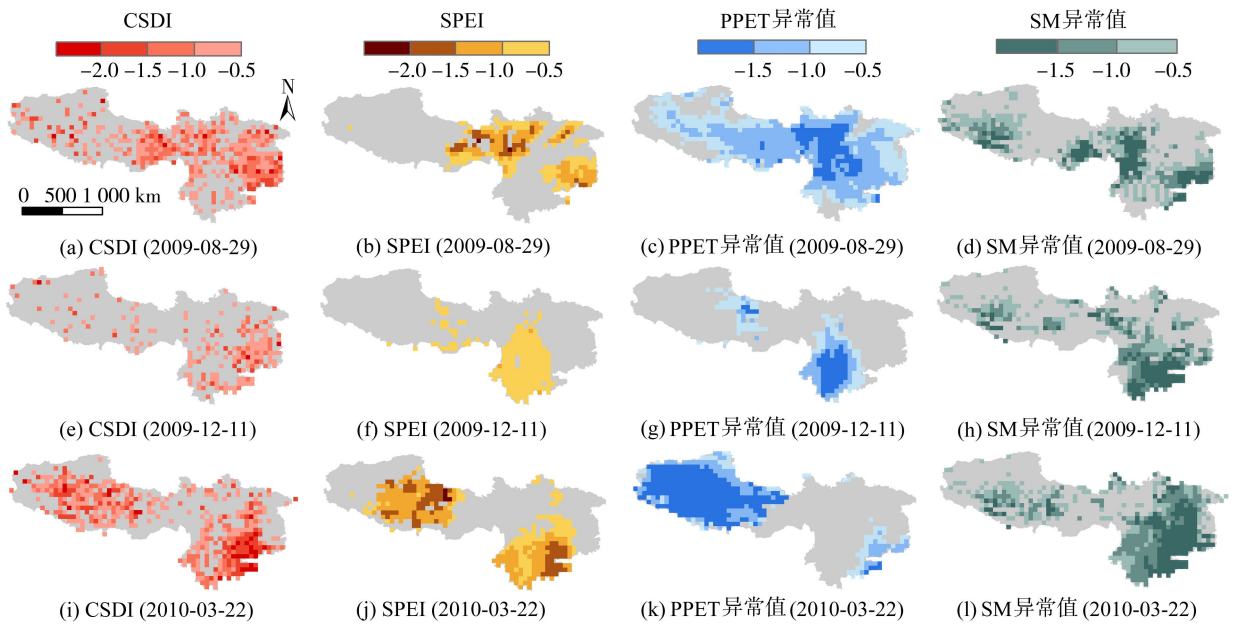


图 4 中国西南干旱 CSDI 和 SPEI 与 PPET 和 SM 异常值空间分布对比

Fig. 4 Comparison of spatial distributions of CSDI and SPEI with PPET and SM anomalies in Southwest China drought

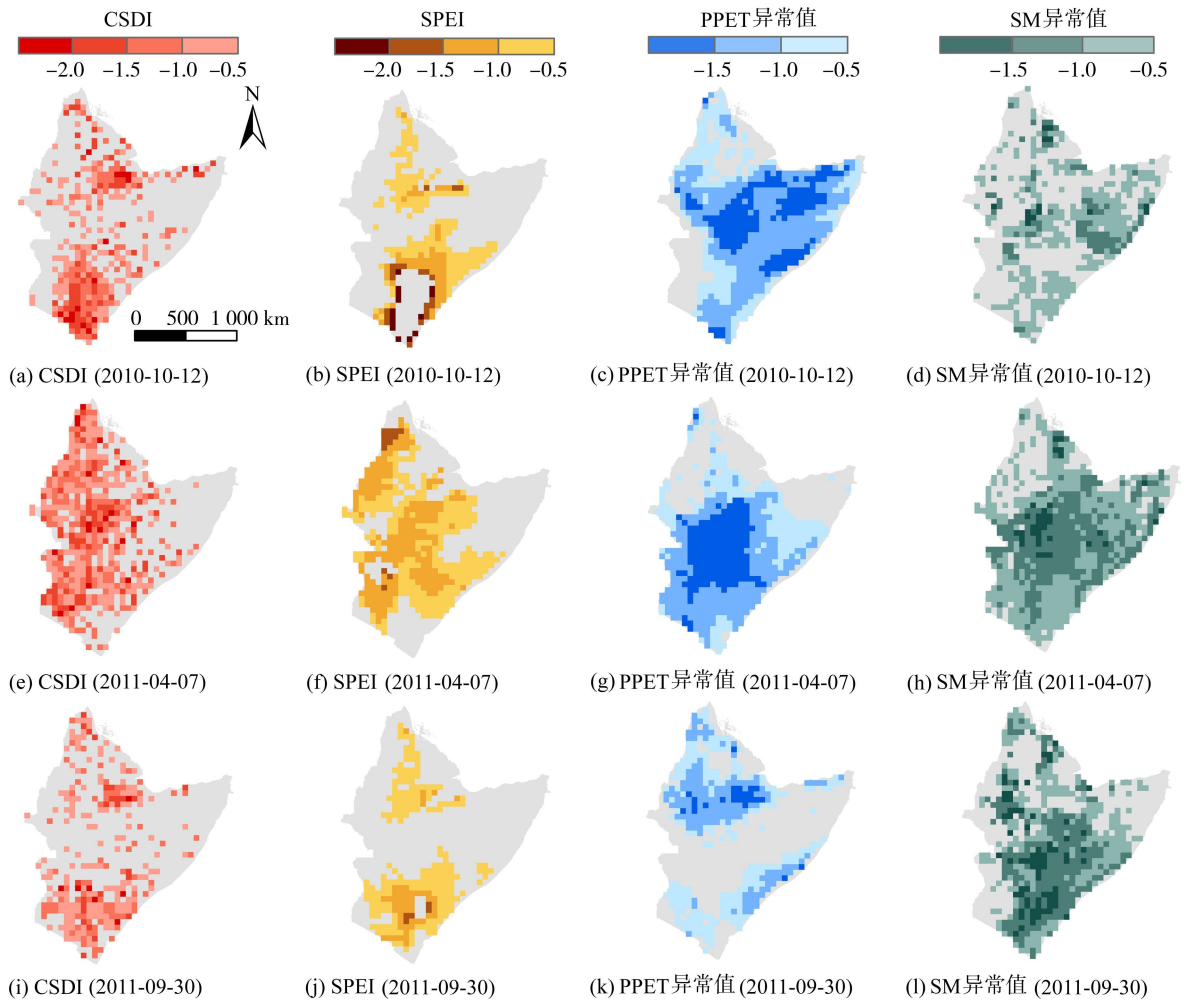


图 5 非洲之角干旱 CSDI 和 SPEI 与 PPET 和 SM 异常值空间分布对比

Fig. 5 Comparison of spatial distributions of CSDI and SPEI with PPET and SM anomalies in drought of Horn of Africa

美中部、东欧及中亚、南美东部和非洲部分地区，累计发生频次超过 30 次；而亚马孙流域、中非热带

雨林及东南亚等湿润区频次较低，通常不足 10 次。平均干旱历时（图 7(b)）在北非、西亚至中亚地区

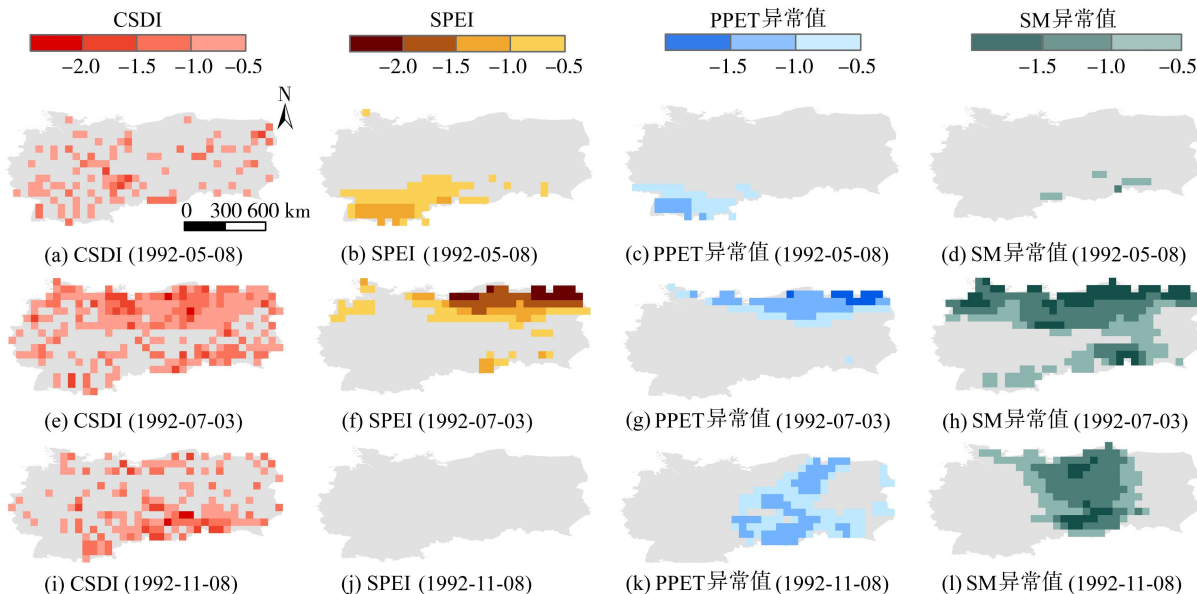


图6 中欧干旱 CSDI 和 SPEI 与 PPET 和 SM 异常值空间分布对比

Fig. 6 Comparison of spatial distributions of CSDI and SPEI with PPET and SM anomalies in Central Europe drought

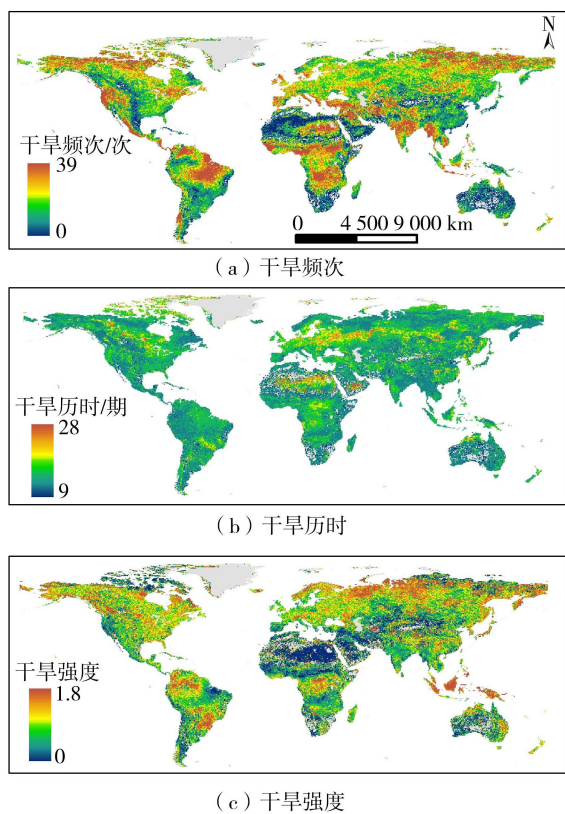


图7 全球干旱特征空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of global drought characteristics

表现突出,多在 20 期以上,说明干旱过程较为持久;而热带湿润区干旱过程相对短暂,平均不足 12 期。干旱强度(图 7(c))变化范围为 0~1.8,高值区集中在东非裂谷、西非干旱过渡带以及西亚—中亚地区,局部超过 1.2,表明水分亏缺程度严重;而欧洲中部、东亚东南部及南美南部等区域干旱强度普遍较低,多低于 0.5。总体而言,全球季节性干旱的高风

险区主要分布在干旱与半干旱气候带,表现为高频次、长持续、高强度的空间耦合特征。同时,在部分湿润区,尤其是北半球中高纬度地区,也表现出较高的发生频次与干旱强度。

1982—2021 年全球不同干湿区的干旱特征呈现出显著的阶段性演变,整体表现为干旱频次增加、平均干旱历时缩短和干旱强度增强(图 8)。在干旱

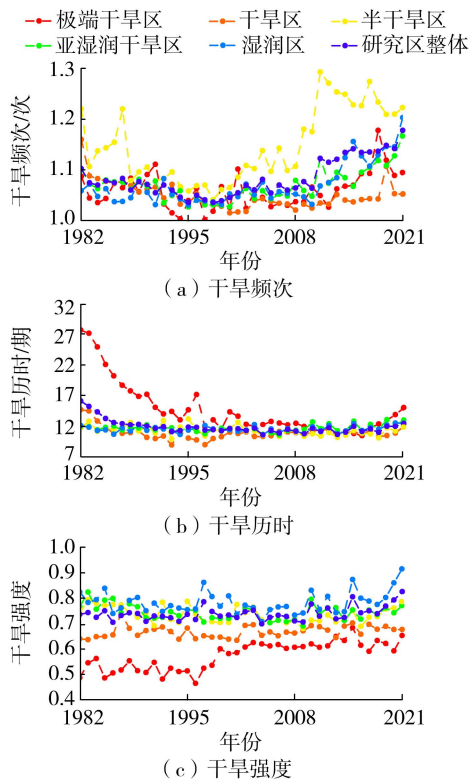


图8 全球不同干湿区干旱特征年际变化

Fig. 8 Interannual variation of drought characteristics in different global dry and wet climate zones

频次方面,各气候区均呈上升趋势。尤以湿润区最为显著,其年均干旱频次由1982年的1.06次增加至2021年的1.20次,增幅达到13.6%。在干旱历时方面,大多数区域表现为显著缩短。其中,极端干旱区平均历时由1982年的27.65期降至2021年的15.03期,下降幅度达45.6%;干旱区则由14.76期缩短至12.01期,降幅为18.6%。相比之下,半干旱区、亚湿润干旱区和湿润区的干旱历时略有延长,增幅分别为2.0%、7.5%和3.3%。这表明典型干旱区的干旱过程正由持续性向突发性转变,而湿润区一旦发生干旱,其过程可能更趋持久。在干旱强度方面,多数气候区呈现缓慢上升趋势。极端干旱区干旱强度增幅最为突出,从0.49提高至0.65,增长33.9%;湿润区亦表现出显著增强,由0.82升至0.92。这说明尽管干旱持续时间缩短,但干旱事件的水分亏缺程度却在不断加剧。总体而言,1982—2021年全球干旱过程呈现出频发化、快发化、极端化趋势。

3.4 讨论

在干旱识别与验证方面,CSDI与SPEI的时空格局总体相近,在典型事件的发生—发展—缓解全过程中,CSDI与PPET和SM的联合负异常表现出更高的一致性,尤其在干旱起始阶段识别范围更广,体现了多要素联合刻画干旱过程链的优势^[11,20,23-24]。同时,CSDI与SPEI亦存在区域性差异,如在北半球高纬度地区和干旱区差异较大,且在复杂地形处像元尺度下结果略显碎片化。上述差异与不确定性主要源于再分析资料中降水、潜在蒸散发与土壤湿度的不确定性^[25],以及时空分辨率、干旱阈值等设定对事件识别的影响。总体而言,CSDI在早期干旱识别、空间连续性与多要素一致性方面表现稳健。但其与SPEI的区域差异与碎片化特征表明,未来研究仍需对数据源、阈值与参数设定开展敏感性检验,并与其他综合干旱指数进行交叉验证。

干旱特征分析结果表明,1982—2021年全球干旱呈现频发化、快发化、极端化趋势,这一结论与现有全球干旱研究结果一致^[26],该现象主要由气候变化和人类活动干扰的共同作用导致^[27-28]。在全球升温背景下,饱和水汽压差升高使湿润区和亚湿润区对降水波动更加敏感^[29]。在典型干旱区,干旱持续时间缩短、强度增强,表明干旱过程正由累积型向突发型转变^[26,30]。这一变化与极端高温事件的频发密切相关,高温加速了土壤失水,提高了大气蒸散需求,从而在较短时间内加剧干旱强度^[31]。此外,土地利用变化与水资源过度利用削弱了生态系统的缓冲能力,进一步增大了干旱风险^[32]。同时,大气

环流异常与ENSO事件增强也是中高纬度湿润区干旱频次上升的重要气候因子^[33-34]。综上,干旱演变趋势不仅是全球变暖背景下水文循环强化的直接反映,也与人类活动导致的地表过程扰动密切相关。这表明未来干旱风险预警应综合考虑气候因子与人类活动的交互作用,并针对不同气候区制定差异化的防御与适应策略。

4 结论

a. 像元尺度上,在全球多数陆地区域CSDI与SPEI具有较高相关性,高相关性主要分布于副热带干旱与半干旱气候带,而在热带湿润与高纬度寒冷区相关性相对偏低;时间上,两者表现出高度一致的季节性起伏。与SPEI相比,CSDI与SM的相关性显著增强,且在不同干湿区均优于SPEI;在干旱区和亚湿润干旱区,CSDI与PPET的相关性更高。

b. CSDI能完整刻画2009—2010年中国西南、2010—2011年非洲之角与1992年中欧典型干旱的初、中、后期全过程。相较于SPEI,CSDI在干旱起始阶段识别的干旱覆盖面积更大,并与PPET和SM的同期负异常值具有更高的一致性,体现了多要素联合刻画干旱过程链的优势,进一步证明了该指数在全球尺度干旱监测中的可靠性。

c. 1982—2021年,全球干旱在空间上呈现显著的区域差异性。全球季节性干旱的高风险区主要分布在干旱与半干旱气候带,表现为高频次、长持续、高强度的空间耦合特征。同时,部分湿润区,尤其是北半球中高纬度地区,也表现出较高的干旱频次与干旱强度。

d. 在阶段性演变上,1982—2021年全球干旱呈现出频发化、快发化、极端化的总体趋势。典型干旱区的平均干旱历时显著缩短,干旱强度增强,表明干旱过程正由持续性向突发性转变;湿润区则在干旱频次增加的同时,过程更趋持久。

参考文献:

- [1] Gebrechorkos S H, Sheffield J, Vicente-Serrano S M, et al. Warming accelerates global drought severity [J]. *Nature*, 2025, 642 (8068) : 628-635.
- [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] Tang Tao, Ge Jun, Shi Haiyun, et al. Drought frequency, intensity, and exposure have increased due to historical land use and land cover changes [J]. *Communications Earth & Environment*, 2025, 6(1): 398.
- [4] Dai Aiguo, Trenberth K E, Qian Taotao. A global dataset of palmer drought severity index for 1870-2002; relationship with soil moisture and effects of surface warming [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(6): 1117-1130.
- [5] 马柱国, 符淙斌. 20 世纪下半叶全球干旱化的事实及其与大尺度背景的联系 [J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 2007, 37(2): 222-233. (Ma Zhuguo, Fu Congbin. Evidence of global aridification in the second half of the 20th century and its connection to large-scale background conditions [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2007, 37(2): 222-233. (in Chinese))
- [6] Dutra E, Magnusson L, Wetterhall F, et al. The 2010-2011 drought in the Horn of Africa in ECMWF reanalysis and seasonal forecast products [J]. *International Journal of Climatology*, 2013, 33(7): 1720-1729.
- [7] Hao Zengchao, Hao Fanghua, Singh V P. A general framework for multivariate multi-index drought prediction based on multivariate ensemble streamflow prediction (MESP) [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 539: 1-10.
- [8] Meyer S J, Hubbard K G, Wilhite D A. The relationship of climatic indices and variables to corn (maize) yields; a principal components analysis [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1991, 55(1/2): 59-84.
- [9] Rajsekhar D, Singh V P, Mishra A K. Multivariate drought index; an information theory based approach for integrated drought assessment [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 526: 164-182.
- [10] 邢贞相, 李根, 付强, 等. 寒区农业流域综合干旱指数构建及其适用性分析 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(4): 42-51. (Xing Zhenxiang, Li Gen, Fu Qiang, et al. Construction of an optimized comprehensive drought index for agricultural watersheds in cold regions and its applicability analysis [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(4): 42-51. (in Chinese))
- [11] Suo Nanji, Xu Changchun, Cao Linlin, et al. A copula-based parametric composite drought index for drought monitoring and applicability in arid Central Asia [J]. *Catena*, 2024, 235: 107624.
- [12] Hao Zengchao, Aghakouchak A. Multivariate standardized drought index: a parametric multi-index model [J]. *Advances in water resources*, 2013, 57: 12-18.
- [13] 张利利, 雷晓辉, 王浩, 等. 多源多层土壤湿度实时同化及在实时洪水预报中的应用 [J]. *水科学进展*, 2024, 35(5): 773-783. (Zhang Lili, Lei Xiaohui, Wang Hao, et al. Real-time multi-source information assimilation improves multi-layer soil moisture for real-time flood forecasting [J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(5): 773-783. (in Chinese))
- [14] Singer M B, Asfaw D T, Rosolem R, et al. Hourly potential evapotranspiration at 0. 1° resolution for the global land surface from 1981-present [J]. *Scientific Data*, 2021, 8(1): 224.
- [15] Du Hong, Zeng Sidong, Zhang Yiting, et al. Climate change will lead to different over-threshold flood risks patterns of the riverside cities in the Yangtze River Basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 661: 133664.
- [16] Akaike H. Maximum likelihood identification of Gaussian autoregressive moving average models [J]. *Biometrika*, 1973, 60(2): 255-265.
- [17] 冯平, 任明雪, 李建柱. 基于蒸散发干旱指数的子牙河流域干旱时空变化特征分析 [J]. *水资源保护*, 2024, 40(3): 35-43. (Feng Ping, Ren Mingxue, Li Jianzhu. Analysis of spatiotemporal variation characteristics of droughts in the Ziya River Basin based on evapotranspiration-related drought indexes [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(3): 35-43. (in Chinese))
- [18] 李琼芳, 方凯悦, 韩幸焯, 等. 基于多维 Copula 函数的澜沧江-湄公河流域气象干旱特征分析 [J]. *水资源保护*, 2024, 40(1): 52-59. (Li Qiongfang, Fang Kaiyue, Han Xingye, et al. Analysis of meteorological drought characteristics in the Lancang-Mekong River Basin based on multi-dimensional Copula function [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(1): 52-59. (in Chinese))
- [19] 周子滢, 杨赛霓, 刘晓燕, 等. 基于 C-Vine Copula 函数的台风灾害链“风-雨-潮”联合概率分布研究 [J]. *热带地理*, 2024, 44(6): 1036-1046. (Zhou Ziyong, Yang Saini, Liu Xiaoyan, et al. Joint probability distribution of typhoon disaster chain “strong wind-rainstorm-storm surge” based on C-Vine Copula function [J]. *Tropical Geography*, 2024, 44(6): 1036-1046. (in Chinese))
- [20] Mao Yun, Wu Zhiyong, He Hai, et al. Spatio-temporal analysis of drought in a typical plain region based on the soil moisture anomaly percentage index [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 752-765.
- [21] Yang Liyan, Wang Weiguang, Wei Jia. Assessing the response of vegetation photosynthesis to flash drought events based on a new identification framework [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 339: 109545.
- [22] Wang Tian, Tu Xinjun, 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.
- [23] 李忆平, 王劲松, 李耀辉. 2009/2010 年中国西南地区区域性大旱的特征分析 [J]. *干旱气象*, 2015, 33(4): 537-545. (Li Yiping, Wang Jinsong, Li Yaohui. Characteristics of a regional meteorological drought event in southwestern China during 2009-2010 [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2015, 33(4): 537-545. (in Chinese))

(下转第 217 页)

- [23] 于鲁冀,王燕鹏,梁亦欣. 基于污水治理成本的流域污染赔偿标准研究[J]. 生态经济,2011(9):51-54. (Yu Luji, Wang Yanpeng, Liang Yixin. Research of compensation standards of pollution based on river sewage treatment costs[J]. Ecological Economy,2011(9):51-54. (in Chinese))
- [24] 念东,王佳伟,刘立超,等. 城市污水处理厂化学除磷效果及运行成本研究[J]. 给水排水,2008,34(5):7-10. (Nian Dong, Wang Jiawei, Liu Lichao, et al. Study on chemical phosphorus removal efficiency and operational cost of urban wastewater treatment plants [J]. Water Supply and Drainage,2008,34(5):7-10. (in Chinese))
- [25] 谭雪,石磊,陈卓琨,等. 基于全国 227 个样本的城镇污水处理厂治理全成本分析[J]. 给水排水,2015(5):30-34. (Tan Xue, Shi Lei, Chen Zhuokun, et al. Cost analysis of the municipal wastewater treatment plant operation based on 227 samples in China [J]. Water Supply and Drainage,2015(5):30-34. (in Chinese))
- [26] 马乃毅. 城镇污水处理定价研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [27] 刘亮,沈珺,张静,等. 基于污水处理成本核算谈长江经济带城镇污水处理费调整[J]. 城镇供水,2021(6):62-65. (Liu Liang, Shen Jun, Zhang Jin, et al. On the adjustment of urban sewage treatment charges in the Yangtze River Economic Belt based on cost accounting of wastewater treatment [J]. City and Town Water Supply, 2021(6):62-65. (in Chinese))
- [28] 夏天虹,罗滔,董桂君,等. 乡镇污水处理厂全生命周期成本分析[J]. 四川建筑,2015,35(3):308-310 (Xia Tianhong, Luo Tao, Dong Guijun, et al. Life cycle cost analysis of township sewage treatment plants [J]. Sichuan Architecture,2015,35(3):308-310. (in Chinese))

(收稿日期:2025-11-14 编辑:胡新宇)

(上接第 126 页)

- [24] 孟长青,董子娇,刘柯莹,等. 嘉陵江流域骤发干旱时空演变特征分析[J]. 水利水电科技进展,2024,44(4):23-30. (Meng Changqing, Dong Zijiao, Liu Keying, et al. Analysis of spatiotemporal evolution characteristics of flash droughts in Jialing River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(4):23-30. (in Chinese))
- [25] Soci C, Hersbach H, Simmons A, et al. The ERA5 global reanalysis from 1940 to 2022 [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2024, 150 (764): 4014-4048.
- [26] Yuan Xing, Wang Yumiao, Ji Peng, et al. A global transition to flash droughts under climate change [J]. Science,2023,380(6641):187-191.
- [27] 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))
- [28] 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.
- [29] Yuan Weping, Zheng Yi, Piao Shilong, et al. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth [J]. Science Advances, 2019, 5 (8): eaax1396.
- [30] 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 Taohu River Basin based on SPEI [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(5):32-40. (in Chinese))
- [31] Trenberth K E, Dai Aiguo, Van Der Schrier G, et al. Global warming and changes in drought [J]. Nature Climate Change,2014,4(1):17-22.
- [32] Foley J A, Defries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use [J]. Science,2005,309(5734):570-574.
- [33] Dai Aiguo. Drought under global warming: a review [J]. WIREs Climate Change,2011,2(1):45-65.
- [34] 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))

(收稿日期:2025-07-23 编辑:施业)