

淮河流域旱涝急转事件识别及时空演变特征

刘 娣^{1,2,3}, 李 康^{1,2,3}, 吕海深^{1,2,3}, 朱永华⁴, 余钟波^{1,3}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 2. 河海大学水文水资源学院;
3. 河海大学全球变化与水循环国际合作联合实验室; 4. 河海大学地理与遥感学院)

摘要:为揭示淮河流域旱涝急转事件的时空演变特征,基于 2000—2020 年逐日格点降水数据,构建了考虑降水记忆效应的标准加权平均降水指数,结合游程理论,识别了事件间隔时间不超过 8 d 的旱涝急转事件,分析其频次、强度、持续期及空间迁移特征,并进行了急转强度归因分析。结果表明:淮河流域旱涝急转事件频次呈中部高、边缘低的空间格局,且以旱转涝事件为主;旱转涝事件的影响面积占比和平均急转强度的年际变化呈波动中略增强趋势,涝转旱事件则相对少发且呈略减弱趋势;旱转涝事件的空间分布较为稳定,而涝转旱事件空间离散性更强;旱转涝强度主要受急转后洪涝阶段控制,但高强度事件更易出现在前期干旱累积较强的背景下;涝转旱事件主要受急转后干旱阶段控制;复合极端风险以前旱后涝的快速转换为主,前期干旱累积和急转后强降水应共同纳入预警指标体系。

关键词:旱涝急转事件;标准加权平均降水指数;游程理论;淮河流域

中图分类号:P339 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2026)05 - 0099 - 09

Identification and spatiotemporal evolution characteristics of drought-flood abrupt alternation events in the Huaihe River Basin//Liu Di^{1,2,3}, Li Kang^{1,2,3}, Lyu Haishen^{1,2,3}, Zhu Yonghua⁴, Yu Zhongbo^{1,3}(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University; 3. Joint International Research Laboratory of Global Change and Water Cycle, Hohai University; 4. College of Geography and Remote Sensing, Hohai University)

Abstract: To reveal the spatiotemporal evolution characteristics of drought-flood abrupt alternation (DFAA) events in the Huaihe River Basin, a standardized weighted average precipitation (SWAP) index incorporating the precipitation-memory effect was constructed based on daily gridded precipitation data from 2000 to 2020. Combined with the run theory, DFAA events with event interval time not exceed 8 d were identified, and their frequency, intensity, duration, spatial migration, and stage-wise attribution were analyzed. And the attribution analysis of the abrupt alternation intensity was conducted. Results show that DFAA events in the Huaihe River Basin exhibit a clear spatial pattern of higher occurrence in the central basin and lower occurrence toward the margins, and that drought-to-flood transitions dominate. The affected-area ratio and mean intensity of drought-to-flood events tended to increase amid interannual fluctuations, whereas flood-to-drought events were less frequent and generally showed a weak decreasing tendency. The spatial distribution of drought-to-flood events was relatively stable, whereas that of flood-to-drought events was more dispersed. The drought-to-flood intensity is mainly controlled by the post-transition flooding stage, although high-intensity events are more likely to occur under stronger antecedent drought accumulation. The flood-to-drought intensity is primarily controlled by the post-transition drought stage. The rapid drought-to-flood transition is the dominant compound risk in the Huaihe River Basin, and that antecedent drought accumulation and subsequent heavy rainfall should be jointly incorporated into early-warning systems.

Key words: drought-flood abrupt alternation event; standardized weighted average precipitation index; run theory; the Huaihe River Basin

旱涝急转是指在较短时间内由持续干旱迅速转为洪涝,或由洪涝迅速转为干旱的复合水文气象极端事件。与单一干旱或洪涝相比,旱涝急转兼有转折速度快、前后阶段相互耦合的特点,既会造成土壤水分、产汇流条件和农业生产环境的突变,还可能引发作物减产、工程调度失衡及社会经济损失扩大等

基金项目:国家自然科学基金项目(42471019)
作者简介:刘娣(1986—),女,副教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:liudi@hhu.edu.cn
通信作者:余钟波(1964—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:zyu@hhu.edu.cn

灾害链效应^[1-3]。在全球变暖背景下,复合极端事件发生风险持续上升,旱涝急转已成为水文气象与灾害风险研究的重要对象^[4]。

在旱涝急转识别方法方面,研究经历了从月尺度或汛期尺度异常统计向日尺度过程识别的发展。早期工作多基于标准化降水指数 (standardized precipitation index, SPI)、标准化降水蒸散指数 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI) 等指标刻画干湿异常情况,适用于气候背景诊断,但容易平滑数天内发生的突变信号,难以同时刻画转折发生日、转折间隔及前后阶段持续时间。为更准确地识别急转过程,近年来研究开始引入游程理论、日尺度干湿指数及过程型识别框架^[5-7]。其中,含记忆效应的标准加权平均降水 (standardized weighted average precipitation, SWAP) 指数通过指数衰减权重突出近期降水并保留前期降水影响,相较于传统固定累计窗指标,更适合表征旱涝急转这类由前期预条件与后期触发共同作用的日尺度快变事件^[8-10]。

从区域研究看,现有成果已在全国尺度及黄淮海、长江中下游、珠江、汉江等流域尺度揭示了旱涝急转频次、强度和持续期的时空差异,并指出我国是旱涝急转高发区之一^[11-16]。然而,多数研究仍侧重月尺度或汛期尺度统计,关注重点集中在事件发生频率、强度变化及危险度评估,对旱涝急转事件空间演化路径、重心迁移、前期预条件及后期触发因子的阶段归因讨论相对不足^[17-18]。因此,如何在日尺度下实现连续识别,并将过程识别与空间演化、归因分析相结合,仍是当前旱涝急转研究需要进一步推进的方向。

针对淮河流域,已有研究主要从汛期降雨、径流过程识别、阈值确定与灾害危险度评估等角度开展分析^[19-23],对日尺度下旱涝急转事件的连续识别、不同类型事件的空间迁移特征及其主导的阶段贡献缺少系统刻画。淮河流域地处南北气候过渡带,降水过程既受东亚季风雨带季节性南北移动的影响,又与极端降水和陆面干湿记忆密切相关,具备发生快速旱涝转换的典型气候背景^[24]。因此,本文利用2000—2020年逐日格点降水数据构建SWAP指数,结合游程理论识别过渡间隔不超过8d的旱涝急转事件,分析其时空演变特征,并通过转折前后窗口指标定量区分事件强度的阶段贡献与触发条件,以期为淮河流域防汛抗旱转换调控和复合风险预警提供依据。

1 研究区概况与数据来源

淮河流域(图1)位于我国东部季风区,地处长

江与黄河之间,气候与水文条件呈明显的南北过渡特征,受东亚季风雨带年内南北移动及极端降水过程影响显著,旱涝灾害具有发生频次高、过程转换快等特点^[24]。

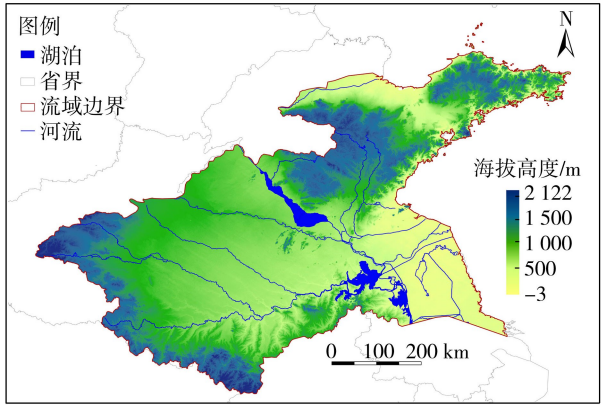


图1 淮河流域概况

Fig.1 Overview of the Huaihe River Basin

选用国家地球系统科学数据中心发布的2000—2020年逐日格点降水数据构建SWAP指数并识别旱涝急转事件。数据预处理包括:①提取研究期内的逐日降水序列,记为 P_t ;②依据淮河流域边界对栅格数据进行裁剪;③统一投影坐标系、空间分辨率与栅格对齐方式,确保像元间具有可比性;④对缺测值进行检查并对异常值进行识别与处理,获得研究区逐日格点降水数据集,为后续SWAP指数计算与旱涝急转事件识别提供基础输入。

2 研究方法

2.1 SWAP 指数构建

SWAP指数在加权平均降水 (weighted average precipitation, WAP) 指数的基础上引入指数衰减权重,在突出近期降水贡献的同时保留前期降水的记忆效应,适用于在日尺度下刻画由旱转涝或由涝转旱的快速演变过程,其构建方法和计算公式见文献^[5-6,10]。本文在格点尺度下逐日计算WAP指数,其中衰减系数 α 取0.9,记忆窗口长度 N 取44d。

考虑到研究期为2000—2020年,若按单一日历日分别拟合Gamma分布,单个格点每个日历日的有效样本数仅为21,尾部参数易受异常年份影响。为兼顾季节位相与样本稳定性,本文以目标日历日为中心、取 ± 15 d滑动窗口合并各年份WAP样本拟合Gamma分布(2月29日并入相邻日序),再将累积概率映射至标准正态分布,得到SWAP指数序列。标准化后的SWAP指数近似服从标准正态分布,可在不同时段和不同空间单元间直接对比。

由于SPI、SPEI及SWAP指数均为经概率映射

得到的日尺度干湿异常量,本文采用统一的标准化累积频率分布划分旱涝等级^[8]: ≤ -2.0 、 $> -2.0 \sim -1.5$ 、 $> -1.5 \sim -1.0$ 、 $> -1.0 \sim -0.5$ 依次对应极端干旱、重度干旱、中度干旱、轻度干旱; $> -0.5 \sim < 0.5$ 为正常; $0.5 \sim < 1.0$ 、 $1.0 \sim < 1.5$ 、 $1.5 \sim < 2.0$ 、 ≥ 2.0 依次对应轻度洪涝、中度洪涝、重度洪涝、极端洪涝。

2.2 基于游程理论的旱涝急转事件识别

在获得逐日 SWAP 指数序列后,本文采用 Fu 等^[9]提出的游程理论来识别连续干旱事件与洪涝事件,并在此基础上界定旱涝急转事件。该方法以阈值为核心,能够从时间序列中提取“持续偏旱/偏涝—短暂过渡—快速反转”的典型过程(图 2)。为提高识别结果的可靠性,本文在事件识别后引入权重一致性检验对结果进行验证。该方法已在汉江流域等地区得到应用,具有较好的日尺度刻画能力^[10]。基于游程理论的旱涝急转事件识别的主要步骤为:

a. 确定干旱/洪涝事件的阈值与最小持续期。结合 SWAP 分级与日尺度异常识别需求,将第 t 日的 SWAP 值记为 S_t ,本文以 $S_t \leq -0.5$ 和 $S_t \geq 0.5$ 分别作为干旱和洪涝事件的判别阈值,并设置最小持续期为 10 d,以降低单日降水脉冲对事件识别的干扰。当 $S_t \leq -0.5$ 且连续持续 10 d 及以上时判定为干旱事件;当 $S_t \geq 0.5$ 且连续持续 10 d 及以上时判定为洪涝事件。

b. 同类事件合并。为避免短时降水波动导致同一过程被切分为多个短事件,本文引入“事件间隔时间-体量准则”合并相邻的同类事件。以两个相邻同类事件为例,设前一事件的起止日为 t_1 、 t_2 ,后一事件的起止日为 t_3 、 t_4 ,计算事件间隔时间 Δt (式(1)),其中 t_c 为间隔时间阈值,参考 Wang 等^[18]的研究,本文取 $t_c = 2$ d;进一步地,为度量间隔期内的扰动强度,定义 V 为相应时段内 SWAP 偏离量的累计值(式(2)), V_1 、 V_0 分别为前一事件时段和两事件间隔期的 V 值, V_1 反映前一事件的严重度, V_0 反映间隔期强度超越量,将 V_0 与 V_1 进行比较(式(3)),其中 ρ_c 为比例阈值,参考 Wang 等^[18]的研究,本文取 $\rho_c = 0.2$;当同时满足式(1)与式(3)时,认为两相邻同类事件属于同一过程,予以合并。

$$\Delta t = t_3 - t_2 - 1 \quad (\Delta t \leq t_c) \quad (1)$$

$$V = \sum_t (1 - S_t) \quad (2)$$

$$V_0/V_1 \leq \rho_c \quad (3)$$

c. 旱涝急转事件的判定与类型划分。在获得干旱事件序列与洪涝事件序列后,进一步识别旱转涝事件和涝转旱事件。若某次干旱事件的结束日与

其后洪涝事件的开始日之间的事件间隔时间 $\Delta t \leq 8$ d,则判定发生旱转涝事件;同理,若洪涝事件结束日与其后干旱事件的开始日之间的事件间隔时间 $\Delta t \leq 8$ d,则判定发生涝转旱事件。

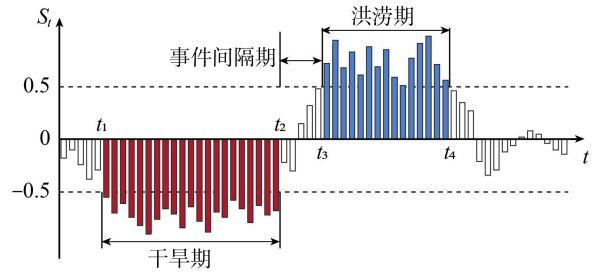


图 2 基于游程理论的旱涝急转识别示意图

Fig. 2 Schematic of DFAA identification based on run theory

2.3 急转强度与持续期计算

采用急转强度表征旱涝急转事件的转变幅度,反映急转前后水分状态的平均变化量。以急转界面为中心,向前至前一场事件结束,向后至后一场事件开始,这一阶段称为急转前后窗口期,急转强度的计算公式为:

$$K = (A_2 - A_1)/D \quad (4)$$

式中: K 为急转强度; A_1 、 A_2 分别为急转前窗口期、急转后窗口期的 S_t 累计值; D 为窗口长度,本文取 $D = 10$ d。依据 K 值对急转强度等级进行划分: $1.0 \sim < 2.0$ 为轻度、 $2.0 \sim < 3.0$ 为中度、 ≥ 3.0 为重度。

旱涝急转持续期定义为前一场干旱或洪涝事件起始日至后一场洪涝或干旱事件终止日的时间跨度:

$$L = t_4 - t_1 + 1 \quad (5)$$

式中: L 为旱涝急转持续期。

2.4 急转强度归因分析

为定量区分急转强度中来自急转前累积条件与急转后发展过程的相对作用,本文提出了急转强度归因分析方法^[18,25]。为避免参数冗余并保证分析的内在一致性,归因分析窗口期与急转强度计算窗口期一致,取为 10 d。分别计算急转前窗口期、急转后窗口期 SWAP 指数的平均值 S_1 、 S_2 , S_1 反映急转前水分亏缺或盈余背景, S_2 反映急转后水分状态的变化情况。据此定义干旱贡献 G_d 和洪涝贡献 G_f ,旱转涝事件、涝转旱事件分别按式(6)、式(7)计算。进一步定义干旱贡献率 C_d 和洪涝贡献率 C_f ,分别反映急转强度中干旱阶段和洪涝阶段的相对贡献,取值范围为 0~1,计算公式见式(8)。

$$\begin{cases} G_d = -\min\{S_1, 0\} \\ G_f = \max\{S_2, 0\} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} G_d = -\min\{S_2, 0\} \\ G_f = \max\{S_1, 0\} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} C_d = G_d / (G_d + G_f) \\ C_f = G_f / (G_d + G_f) \end{cases} \quad (8)$$

另外,本文引入两个补充指标刻画旱涝急转过程的触发条件与前期背景:转折后 0~10 d 内的最大连续 5 d 降水量 P_5 ,表征极端降水的触发强度;转折前 10 d 内的连续无雨日数 N_d ,表征前期干旱累积程度。通过相关性分析检验二者与急转强度的关系,以判别触发条件与前期背景对急转强度的影响。鉴于旱转涝事件样本数量远多于涝转旱事件,触发条件与前期背景指标的分析主要针对旱转涝事件开展。

3 结果与分析

3.1 旱涝急转事件识别及历史事件验证

为直观展示旱涝急转事件的日尺度演变特征,选取 2006 年、2009 年、2018 年、2020 年 4 个典型年份,绘制年内日尺度 SWAP 指数及降水过程,如图 3 所示。由图 3 可见,典型年份的 SWAP 指数序列均表现出旱涝急转特征:急转发生前,SWAP 指数多处于 -0.5 以下,在少量日尺度强降水脉冲触发下,SWAP 指数在短时间内跨越 0 并进一步跃升至 0.5 以上,部分年份峰值接近或超过 2.0,显示出显著的突变特征。

历史灾情记录显示,2006 年 6 月,黄淮地区出现持续性高温少雨天气,气象干旱快速发展;同年 6 月下旬,华东地区出现大范围降雨过程,有效遏制了干旱的进一步蔓延。2009 年 2 月上旬,安徽等多个冬小麦主产省份遭受严重农业干旱,受灾作物面

积占全国同期作物受旱总面积的 95.03%。2018 年 8 月中下旬,受热带风暴系统影响,江南东北部、江淮、黄淮等区域相继出现强降雨过程,引发区域性洪涝事件。2020 年 6 月 10 日起,主雨带在淮河流域持续南北摆动,累计形成 8 轮区域性强降水过程,并于 7 月 18 日触发淮河 2020 年第 1 号洪水^[26]。上述历史旱涝事件的灾情记录,与基于 SWAP 指数和游程理论的旱涝急转事件识别结果一致,验证了该方法用于旱涝急转事件识别的有效性与可靠性。同时,SWAP 指数较好地刻画了旱涝急转事件的日尺度演化过程,完整呈现出前期异常累积、短时集中降水触发和急转后异常持续 3 个阶段。

3.2 旱涝急转频次的空间格局

图 4 为 2000—2020 年淮河流域旱涝急转频次的空间分布。由图 4 可见,淮河流域旱涝急转总频次为 0~33 次,空间上呈中部偏高、边缘偏低的格局,流域中部、中北部存在连续的中高值区,西南部及东南边缘以相对低值为主,显示旱涝急转事件具有一定的空间集聚性。从类型构成看,旱转涝频次为 9~28 次,其空间格局与总频次高度一致,且高值区覆盖范围广,表明研究期内淮河流域旱涝急转以旱转涝过程为主。相较之下,涝转旱频次明显偏低,0~2 次的低值区几乎覆盖全流域,仅在中部及东北部局地出现 3~5 次的斑块状分布,6~8 次的高值点较为零散。总体上,旱转涝的主导性说明研究区在短时间尺度上更易发生于干旱背景向洪涝状态的快速转换,涝后快速转旱事件则更多局限于局部地区,发生次数较少。

3.3 旱涝急转强度的空间格局

图 5 为 2000—2020 年淮河流域平均急转强度

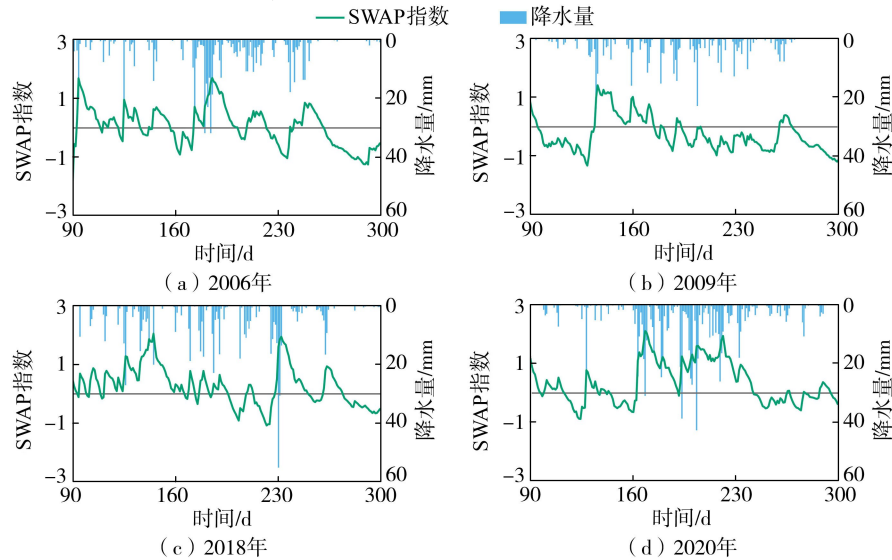


图 3 典型年份日尺度 SWAP 指数与降水过程

Fig. 3 Daily SWAP index and precipitation processes in typical years

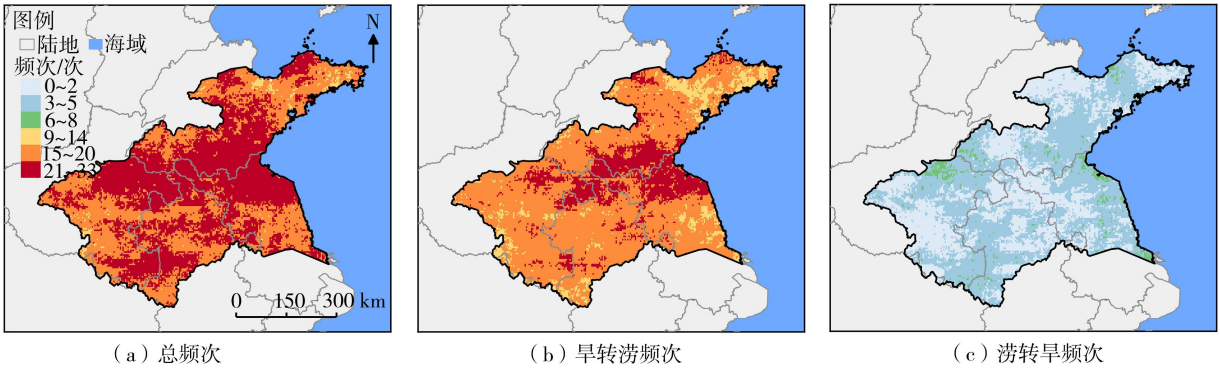


图 4 2000—2020 年淮河流域旱涝急转频次的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of drought-flood abrupt alternation frequency in the Huaihe River Basin from 2000 to 2020

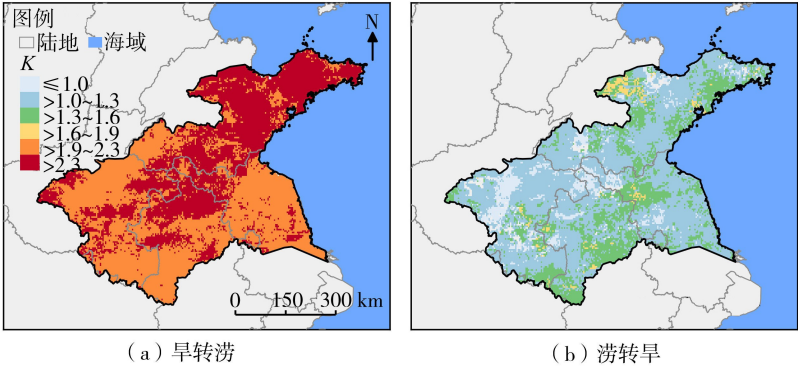


图 5 2000—2020 年淮河流域平均急转强度的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of average abrupt alternation intensity in the Huaihe River Basin from 2000 to 2020

的空间分布。由图 5 可见,旱转涝事件平均急转强度明显高于涝转旱事件,旱转涝事件的急转强度范围为 1.9~2.8,以 2.3 以上的中高值为主;涝转旱事件的急转强度范围主要为 0.7~1.3,仅少数区域达到 1.3~1.6。两类事件强度差异明显,表明淮河流域旱转涝过程不仅发生更频繁,急转幅度也更突出。空间上,旱转涝事件的急转强度高值区主要位于流域中北部及东北部局地,呈带状与斑块状镶嵌分布,西南部与东南缘以相对低值为主;涝转旱事件的急转强度空间分布呈更显著的斑块化特征,高值点主要出现在流域东北部及南部部分区域,中部地区以

中低值为主。总体而言,两类事件急转强度高值区的空间位置存在明显差异。

3.4 旱涝急转持续期的空间格局

图 6 为 2000—2020 年淮河流域平均旱涝急转持续期的空间分布。由图 6 可见,旱转涝事件平均持续期为 36~65 d,其中 36~45 d 覆盖范围较广,46~55 d 的高值区沿流域中北部呈带状分布,显示该区域先旱后涝过程的时间尺度较长;涝转旱事件平均持续期为 25~91 d,空间差异更大,中部—东北部局地可达 66~91 d,西南部与东南边缘多为 25~55 d。结合图 5 分析可得,旱转涝事件总体强度较

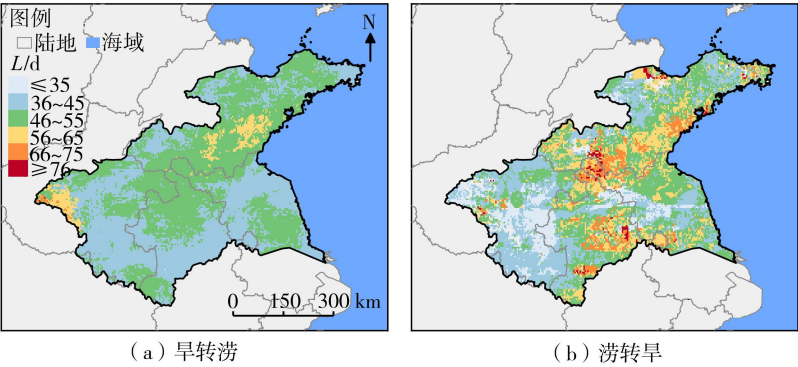


图 6 2000—2020 年淮河流域平均旱涝急转持续期的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of average drought-flood abrupt alternation duration in the Huaihe River Basin from 2000 to 2020

高、持续期中等偏长;涝转旱事件发生频次较低,但在部分区域持续期明显偏长,说明涝后转旱可能伴随较长时间的水分亏缺过程。

3.5 旱涝急转事件受影响面积占比与急转强度的年际变化

为刻画旱涝急转事件在年际尺度上的波动特征,统计 2000—2020 年旱涝急转事件的受影响面积占比与平均急转强度的年际变化。受影响面积占比为旱涝急转事件发生时像元面积占流域总面积的比例,平均急转强度为旱转涝事件和涝转旱事件的急转强度空间平均值。统计结果如图 7 所示,图中 k 为线性拟合斜率, r 为相关系数, p 为显著性。由图 7(a) 可见,旱转涝事件受影响面积占比整体明显高于涝转旱事件,旱转涝事件受影响面积占比年际差异明显,研究期后段高值年份相对集中;涝转旱受影响面积占比在多数年份维持在较小范围,仅个别年份阶段性升高。由图 7(b) 可见,两类事件平均急转强度的差异同样明显。分析结果表明,旱转涝受影响面积占比和平均急转强度均呈波动中略上升趋势,但未通过 0.05 显著性水平检验;涝转旱受影响面积占比和平均急转强度呈波动中略下降趋势,同样未通过 0.05 显著性水平检验,表明其年际变化受个别年份影响较大,线性趋势不显著。综合而言,淮

河流域旱涝急转事件以旱转涝过程为主导,其受影响面积占比和平均急转强度在研究期内呈一定的增强趋势;涝转旱事件更具间歇性,并呈波动中略减弱趋势。

3.6 旱涝急转事件标准差椭圆特征与重心迁移轨迹

为进一步揭示淮河流域旱涝急转事件空间分布的方向性及其年际演变特征,采用标准差椭圆与重心迁移方法,在年际尺度上对旱转涝与涝转旱事件发生格点进行方向分布统计,提取 1σ 标准差椭圆并计算各年份的空间重心,得到重心迁移轨迹,如图 8 所示。由图 8(a) 可见,旱转涝事件长期集中分布于流域中部、中东部,标准差椭圆整体呈东北—西南向展布,长轴方向相对稳定;不同年份标准差椭圆尺度变化有限,表明旱转涝高发区位置较为稳定,但仍存在阶段性摆动。从重心迁移轨迹看,2001—2006 年重心由中部偏北向中部偏南调整,2006—2012 年明显向东北方向推进,2012 年后总体向西南回移,呈现先东北扩展、后西南回摆的演变特征。由图 8(b) 可见,相较之下,涝转旱事件的空间离散性与方向变化更为明显。2001—2002 年重心位于流域中西部附近,2006—2008 年向东南方向移动,2012 年跃迁至流域东北部,2019 年仍位于偏东部位置。对应的标准差

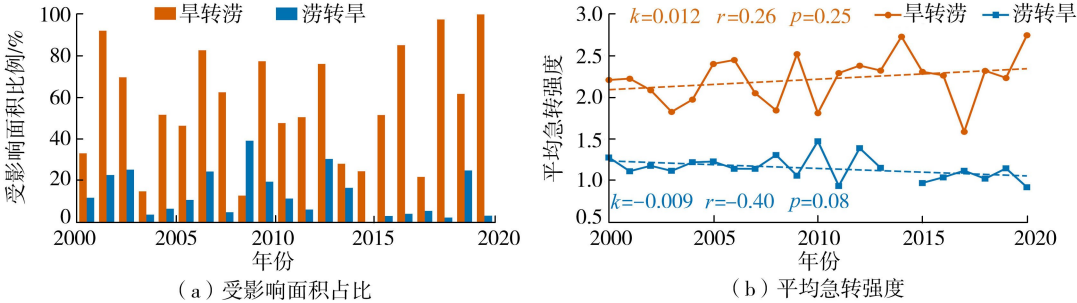


图 7 2000—2020 年淮河流域受影响面积占比与平均急转强度
Fig. 7 Proportion of affected area and average intensity of abrupt alternation in the Huaihe River Basin from 2000 to 2020

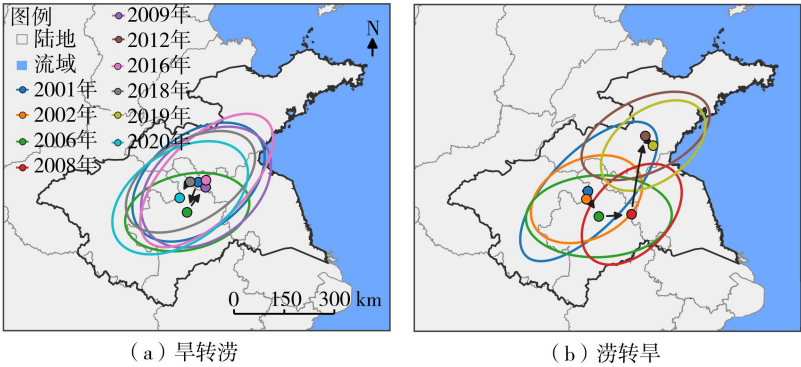


图 8 2000—2020 年淮河流域旱涝急转事件标准差椭圆与重心迁移轨迹

Fig. 8 Standard deviation ellipse and trajectory of gravity center migration of drought-flood abrupt alternation events in the Huaihe River Basin from 2000 to 2020

椭圆在后期年份明显增大并向下游沿海方向扩展,说明涝后转旱过程在特定年份具有更显著的跨区域扩散特征。总体而言,旱转涝事件高发区位置相对稳定,重心迁移幅度较小;涝转旱事件更易出现重心跨区域转移和标准差椭圆尺度增大的现象,这一差异与前文旱涝急转频次和持续期的空间格局相互印证。

3.7 急转强度归因分析

进一步分析淮河流域旱涝急转强度的主导阶段及其空间差异,图 9 为归因分析指标的空间分布。由图 9(a)(b)可见,旱转涝事件的洪涝贡献率在全流域普遍大于 0.5,表明旱转涝的急转强度总体由急转后的洪涝阶段主导;涝转旱事件的干旱贡献率在多数区域也高于 0.5,局地为 0.8~1.0,说明涝转旱强度主要受急转后的干旱阶段控制。两类事件的主导阶段不同,且贡献率均呈明显的空间差异。由图 9(c)(d)可见, P_5 在流域南部及下游相对较高, N_d 则在中北部和东北部偏高,表明急转后强降水触发条件与前期干旱累积背景在空间上并不同步,各自具有不同的高值区,需进一步分析。

图 10 为旱转涝事件平均急转强度与触发条件、前期背景指标的相关关系。由图 10 可见,旱转涝事件平均急转强度与 N_d 呈较强正相关关系,说明急转前干旱累积越充分,SWAP 指数负异常背景越明显;当急转后出现集中降水使 SWAP 指数快速转为正异常时,前后旱涝状态差异被进一步放大,急转强

度相对较高。相比之下,平均急转强度与 P_5 的相关性较弱,主要反映急转后强降水对洪涝阶段的建立和维持作用。从物理机制看,持续少雨通过降低土壤含水量、增大陆面水分亏缺和蒸散需求,形成有利于干旱持续的前期背景;在 SWAP 指数的衰减记忆作用下,这种前期负异常会保留在急转强度的计算窗口期^[5]。随后若发生短历时集中降水,SWAP 指数会在较短时间内由负异常跃升至正异常,形成明显的旱涝状态转换。此外,前期干旱还可能通过改变土壤入渗、地表结皮、植被水分胁迫及产汇流响应等过程,影响后续强降水的水文效应。因此,前期干旱累积是高强度旱转涝事件形成的重要前置条件,急转后的强降水则是触发旱涝状态转换的直接气象因素^[25]。

上述归因分析结果与淮河流域的气候及下垫面背景相一致。淮河流域位于暖温带-北亚热带过渡区、东亚夏季风北缘及副热带高压活动敏感区^[26-29];当季风偏弱或雨带偏南导致前期少雨时,流域易形成干旱背景,副热带高压北抬、西南急流加强并叠加冷空气南下后,沿淮地区易出现持续性强降水,形成前旱后涝的快速转换^[16,28-31]。前期干旱还会通过土壤湿度记忆、蒸散消耗及入渗-产流关系影响后续降水的水文响应^[32-33];当连续强降水超过土壤入渗和河网调蓄能力时,地表径流与内涝风险迅速增大,淮河中部平原区地势平缓、河网密集,行蓄洪区集中的下垫面条件进一步增强了旱转涝事件

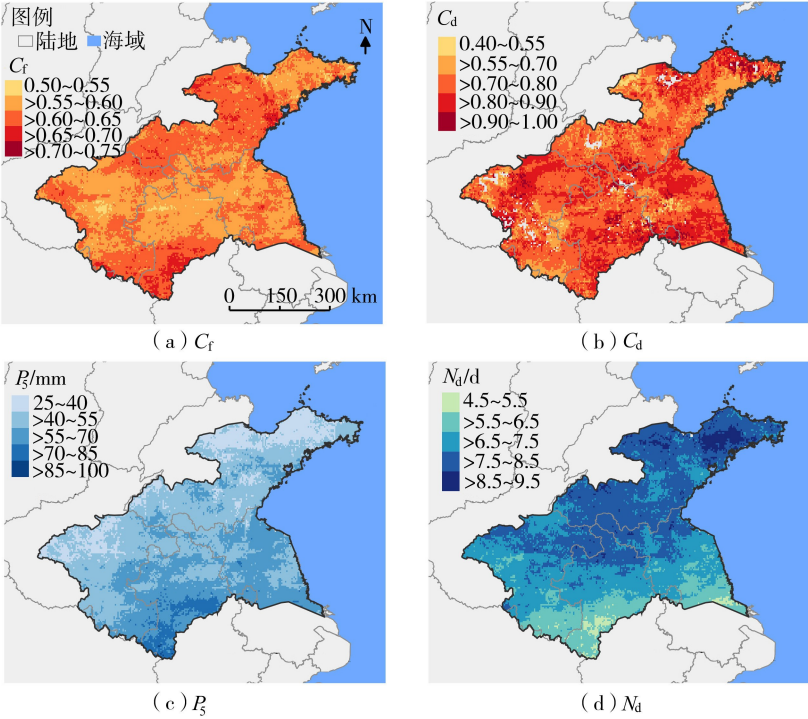


图 9 归因分析指标的空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of attribution analysis indicators

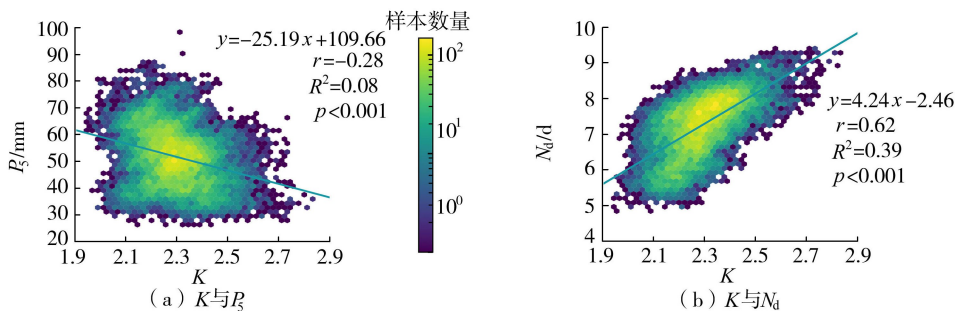


图 10 旱转涝事件平均急转强度与触发条件、前期背景指标的相关关系

Fig. 10 Correlation between average intensity of drought-flood abrupt alternation events, triggering conditions, and early background indicators

的突发性和空间集聚性^[34]。

4 结 论

a. 基于 2000—2020 年淮河流域逐日格点降水资料,利用 SWAP 指数和游程理论在日尺度下识别淮河流域旱涝急转事件,总频次为 0~33 次,空间上呈中部高、边缘低的格局。事件类型以旱转涝为主,旱转涝频次为 9~28 次,空间格局与总频次高度一致;涝转旱频次大部分区域为 0~2 次,仅局地达 3~8 次。

b. 旱转涝事件的平均急转强度(1.9~2.8)明显高于涝转旱事件(0.7~1.6),旱转涝事件平均持续期以 36~65 d 为主;涝转旱事件平均持续期为 25~91 d,空间差异更大; t 检验结果表明两类事件的急转强度与持续期差异均通过了 0.001 显著性水平检验。年际尺度上,旱转涝事件的影响面积占比与平均急转强度呈波动中略增强趋势,涝转旱事件相对少发且呈略减弱趋势,均未通过 0.05 显著性水平检验。

c. 旱转涝事件高发区长期集中于流域中部—中东部,标准差椭圆呈东北—西南向展布,重心迁移幅度较小;涝转旱事件空间离散性强,易出现重心跨区域转移和标准差椭圆尺度增大的现象,在后期年份高发区有向下游方向扩展的迹象。

d. 旱转涝强度总体由急转后洪涝阶段主导(洪涝贡献率普遍大于 0.5),但事件强度与急转前 10 d 内连续无雨日数呈较强的正相关关系,高强度事件多出现在前期干旱累积较强的背景下;涝转旱强度主要受转换后干旱阶段控制。淮河流域复合极端风险以前旱后涝的快速转换为主,防汛抗旱转换管理中除需关注流域中部高发区外,还需重视下游区域在涝后快速转旱的风险,并将前期干旱累积与转换后强降水共同纳入预警指标体系。

参考文献:

[1] Bai Xiaoyan, Zhao Chengxin, Tang Yihan, et al.

Identification, physical mechanisms and impacts of drought-flood abrupt alternation: a review[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: 1203603.

[2] 袁星,冯越,胡开明,等.旱涝急转风险辨识与预报研究进展[J]. *大气科学*, 2025, 49(6): 1633-1648. (Yuan Xing, Feng Yue, Hu Kaiming, et al. Advances in risk identification and forecasting of abrupt drought-to-flood transition events [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2025, 49(6): 1633-1648. (in Chinese))

[3] 乔宇,徐伟,孟晨娜,等.旱涝急转事件研究:进展与挑战[J]. *灾害学*, 2023, 38(3): 131-138. (Qiao Yu, Xu Wei, Meng Chenna, et al. A review of study on dry wet abrupt alternation: progress and challenge [J]. *Journal of Catastrophology*, 2023, 38(3): 131-138. (in Chinese))

[4] Zscheischler J, Westra S, van den Hurk B J J M, et al. Future climate risk from compound events [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(6): 469-477.

[5] Lu Er. Determining the start, duration, and strength of flood and drought with daily precipitation: rationale [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(12): L12707.

[6] 杨家伟,陈华,侯雨坤,等.基于气象旱涝指数的旱涝急转事件识别方法[J]. *地理学报*, 2019, 74(11): 2358-2370. (Yang Jiawei, Chen Hua, Hou Yukun, et al. A method to identify the drought-flood transition based on the meteorological drought index [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(11): 2358-2370. (in Chinese))

[7] 涂新军,庞万宁,陈晓宏,等.传统旱涝急转评估指数的局限和改进[J]. *水科学进展*, 2022, 33(4): 592-601. (Tu Xinjun, Pang Wanning, Chen Xiaohong, et al. Limitations and improvement of the traditional assessment index for drought-wetness abrupt alternation [J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(4): 592-601. (in Chinese))

[8] 梁曼琳,刘丙军,李旦.珠江流域旱涝急转事件识别指数优选研究[J]. *自然灾害学报*, 2022, 31(4): 57-64. (Liang Manlin, Liu Bingjun, Li Dan. Optimization of identification index for drought-flood abrupt alternation events in the Pearl River Basin [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(4): 57-64. (in Chinese))

- [9] Fu Jianyu, Liu Bingjun, Lu Yang, et al. Validation of the detected Dry-Wet Abrupt Alternation by developing a weighting analysis method [J]. International Journal of Climatology, 2023, 43(10): 4572-4589.
- [10] 赵英, 陈华, 杨家伟, 等. 基于 SWAP 和 SRI 的汉江流域旱涝急转时空特征分析 [J]. 人民长江, 2020, 51(4): 94-99. (Zhao Ying, Chen Hua, Yang Jiawei, et al. Spatio-temporal variations of drought-flood abrupt alternation events in Hanjiang River Basin based on SWAP and SRI [J]. Yangtze River, 2020, 51(4): 94-99. (in Chinese))
- [11] Zhao Dongsheng, Deng Siqi, Zhang Jiacheng. Spatiotemporal characteristics of dry-wet abrupt alternation events in China during 1960-2018 [J]. International Journal of Climatology, 2022, 42(16): 9612-9625.
- [12] Qiao Yu, Xu Wei, Wu Dong, et al. Changes in the spatiotemporal patterns of dry/wet abrupt alternation frequency, duration, and severity in Mainland China, 1980-2019 [J]. Science of the Total Environment, 2022, 838(Pt 3): 156521.
- [13] Bi Wuxia, Li Meng, Weng Baisha, et al. Drought-flood abrupt alternation events over China [J]. Science of the Total Environment, 2023, 875: 162529.
- [14] Ren Jiaxin, Wang Weiguang, Wei Jia, et al. Evolution and prediction of drought-flood abrupt alternation events in Huang-Huai-Hai River Basin, China [J]. Science of the Total Environment, 2023, 869: 161707.
- [15] Chen Huijiao, Wang Shuo, Wang Y. Exploring abrupt alternations between wet and dry conditions on the basis of historical observations and convection-permitting climate model simulations [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125(9): e2019JD031982.
- [16] Shan Lijie, Zhang Liping, Song Jiyun, et al. Characteristics of dry-wet abrupt alternation events in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin and the relationship with ENSO [J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(8): 1039-1058.
- [17] Bai Xiaoyan, Yao Yue, Wu Jiefeng, et al. Tracking drought-flood abrupt alternations: event identification, path analysis, and ecological impacts on vegetation [J]. Journal of Hydrology, 2026, 666: 134858.
- [18] Wang Li, Yuan Zhe, Shi Xiaoliang, et al. A driving force analysis method for drought-flood abrupt alternation events [J]. Ecological Informatics, 2025, 90: 103214.
- [19] 张水锋, 张金池, 闵俊杰, 等. 基于径流分析的淮河流域汛期旱涝急转研究 [J]. 湖泊科学, 2012, 24(5): 679-686. (Zhang Shuifeng, Zhang Jinchi, Min Junjie, et al. Drought-flood abrupt alternation based on runoff in the Huaihe River Basin during rainy season [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(5): 679-686. (in Chinese))
- [20] 程智, 徐敏, 罗连升, 等. 淮河流域旱涝急转气候特征研究 [J]. 水文, 2012, 32(1): 73-79. (Cheng Zhi, Xu Min, Luo Liansheng, et al. Climate characteristics of drought-flood abrupt change events in Huaihe River Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(1): 73-79. (in Chinese))
- [21] 黄茹. 淮河流域旱涝急转事件演变及应对研究 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015.
- [22] Ji Zhonghui, Li Ning, Wu Xianhua. Threshold determination and hazard evaluation of the disaster about drought/flood sudden alternation in Huaihe River basin, China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 133(3): 1279-1289.
- [23] 梁晨辉, 朱永华, 王启猛, 等. 1958—2023 年安徽省淮北平原作物生育期内旱涝急转特征分析 [J]. 节水灌溉, 2025(2): 71-77. (Liang Chenhui, Zhu Yonghua, Wang Qimeng, et al. Analysis on the characteristics of drought flood abrupt alternation during crop growth period in Huaibei Plain of Anhui Province from 1958 to 2023 [J]. Water Saving Irrigation, 2025(2): 71-77. (in Chinese))
- [24] 曹丽青, 葛朝霞. 江淮地区大气中平均水汽含量特征及变化趋势 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 636-639. (Cao Liqing, Ge Zhaoxia. Characteristics of average water vapor content in the atmosphere in Yangtze-Huaihe region and its variation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004, 32(6): 636-639. (in Chinese))
- [25] Shi Wuzhi, Huang Shengzhi, Liu Dengfeng, et al. Drought-flood abrupt alternation dynamics and their potential driving forces in a changing environment [J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: 126179.
- [26] 国家防汛抗旱总指挥部, 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
- [27] 薛联青, 章郁涵, 刘远洪. 干旱区与湿润区旱涝急转变特征对比研究 [J]. 水资源保护, 2024, 40(4): 1-8. (Xue Lianqing, Zhang Yuhuan, Liu Yuanhong. Comparative study on change characteristics of drought-flood abrupt alternation in arid and humid zones [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 1-8. (in Chinese))
- [28] Yang Peng, Zhang Shengqing, Xia Jun, et al. Analysis of drought and flood alternation and its driving factors in the Yangtze River Basin under climate change [J]. Atmospheric Research, 2022, 270: 106087.
- [29] 张云帆, 翟丽妮, 林沛榕, 等. 长江中下游典型流域旱涝与旱涝/涝旱急转变规律及其驱动因子研究 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(10): 887-897. (Zhang Yunfan, Zhai Lini, Lin Peirong, et al. Variation characteristics and driving factors of drought and flood and their abrupt alternations in a typical basin in the middle reaches of Yangtze River [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(10): 887-897. (in Chinese))

Physica Sinica,2012,61(10):530-540. (in Chinese))

[12] 鞠琴,马啸赞,刘艳丽,等. 基于秩评分方法的 CMIP6 全球气候模式对淮河流域降水和气温模拟能力评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(6):12-20. (Ju Qin, Ma Xiaozan, Liu Yanli, et al. Evaluation for CMIP6 global climate models in simulating precipitation and temperature over the Huaihe River Basin based on rank score method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(6): 12-20. (in Chinese))

[13] Kawamura R. A rotated EOF analysis of global sea surface temperature variability with interannual and interdecadal scales[J]. Journal of Physical Oceanography, 1994, 24(3):707-715.

[14] 赵峰,毕硕本,李兴宇,等. 基于 EOF 和 REOF 的 1470—1911 年黄河中下游地区旱涝空间分布特征分析[J]. 干旱区地理,2019,42(4):799-809. (Zhao Feng, Bi Shuoben, Li Xingyu, et al. Spatial characteristics of drought/flood disasters based on EOF and REOF in the middle and lower reaches of the Yellow River from 1470 to 1911[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 799-809. (in Chinese))

[15] 孟长青,董子娇,王远坤,等. 长江流域旱涝急转演变特征及其社会经济暴露度[J]. 水力发电学报,2024,43(4):34-49. (Meng Changqing, Dong Zijiao, Wang Yuankun, et al. Evolution characteristics of drought-flood abrupt alternation events in Yangtze River basin and its socio-economic exposure [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43(4): 34-49. (in Chinese))

[16] 董甲平,冶运涛,顾晶晶,等. 影响滦河流域降水空间分布的多元环境因子作用机制[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):38-47. (Dong Jiaping, Ye Yuntao, Gu Jingjing, et al. Influencing mechanism of multi-source environmental factors on the spatial distribution of precipitation in the Luanhe River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 38-47. (in Chinese))

[17] Erb I. Partial correlations in compositional data analysis [J]. Applied Computing and Geosciences, 2020, 6: 100026.

[18] Tranmer M, Elliot M. Multiple linear regression [R]. Manchester: Cathie Marsh Centre for Census and Survey Research, 2008.

[19] 程智,徐敏,罗连升,等. 淮河流域旱涝急转气候特征研究[J]. 水文,2012,32(1):73-79. (Cheng Zhi, Xu Min, Luo Liansheng, et al. Climate characteristics of drought-flood abrupt change events in Huaihe River Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(1): 73-79. (in Chinese))

[20] 刘蓉,文军,王欣. 黄河源区蒸散发量时空变化趋势及突变分析[J]. 气候与环境研究,2016,21(5):503-511. (Liu Rong, Wen Jun, Wang Xin. Spatial-temporal variation and abrupt analysis of evapotranspiration over the Yellow River source region [J]. Climatic and Environmental Research, 2016, 21(5): 503-511. (in Chinese))

[21] Pfander G E, Benedetto J J. Periodic wavelet transforms and periodicity detection [J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 2002, 62(4): 1329-1368.

[22] 朱子青,李铮,殷杰,等. 1982—2022 年黄河中上游旱涝急转事件变化特征及其对植被覆盖的影响[J]. 地理科学,2025,45(12):2751-2763. (Zhu Ziqing, Li Zheng, Yin Jie, et al. Changing characteristics of dry-wet abrupt alternation event in the upper and middle reaches of the Yellow River and its impact on vegetation cover in 1982-2022 [J]. Geographical Science, 2025, 45(12): 2751-2763. (in Chinese))

(收稿日期:2025-12-05 编辑:王芳)

+++++

(上接第 107 页)

[30] 吴志伟,李建平,何金海,等. 大尺度大气环流异常与长江中下游夏季长周期旱涝急转[J]. 科学通报,2006,51(14):1717-1724. (Wu Zhiwei, Li Jianping, He Jinhai, et al. Large-scale atmospheric singularities and summer long-cycle droughts-floods abrupt alternation in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(14): 1717-1724. (in Chinese))

[31] 封国林,杨涵洧,张世轩,等. 2011 年春末夏初长江中下游地区旱涝急转成因初探[J]. 大气科学,2012,36(5):1009-1026. (Feng Guolin, Yang Hanyu, Zhang Shixuan, et al. A preliminary research on the reason of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River in late spring and early summer of 2011 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2012, 36(5): 1009-1026. (in Chinese))

[32] Götte J, Brunner M I. Hydrological drought-to-flood transitions across different hydroclimates in the United States [J]. Water Resources Research, 2024, 60(7): e2023WR036504.

[33] 吴志勇,张静杰,程丹丹,等. 考虑地表-土壤-作物水分联合亏缺的综合旱情指数研究[J]. 水资源保护,2023,39(3):55-64. (Wu Zhiyong, Zhang Jingjie, Cheng Dandan, et al. Study of comprehensive drought index based on water deficits of surface, soil, and crop [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 55-64. (in Chinese))

[34] 李致家,何蒙,闫凤翔,等. 河道洪水演算方法在淮河及滹沱河中游的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):95-101. (Li Zhijia, He Meng, Yan Fengxiang, et al. Applications of channel flood routing methods in middle part of Huaihe River and Hutuo River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(2): 95-101. (in Chinese))

(收稿日期:2026-02-08 编辑:王芳)