

淮河流域旱涝急转事件特征及成因分析

孙飞雪¹, 高玉琴¹, 徐勣祺², 冯鲲鹏¹, 王 岩¹, 施嘉航¹, 刘 杰³

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 黄河水利委员会山东黄河河务局; 3. 中国水利水电科学研究院)

摘要: 基于 1991—2020 年淮河流域逐月降水数据、逐月气象数据及大尺度气候指数, 采用标准化降水指数和长、短周期旱涝急转指数识别旱涝急转事件, 结合 REOF 分区、趋势突变检验、小波分析、偏相关分析、多元线性回归等方法, 揭示了淮河流域旱涝急转事件的时空演变特征及成因。结果表明: 淮河流域旱涝急转事件总体以涝转旱为主, 涝转旱多发于秋冬季, 旱转涝多发于春夏季; 汛期涝转旱高频区主要分布于流域南部, 旱转涝高频区主要分布于西北部 and 东北部; 长周期旱涝急转强度呈不显著的弱上升趋势, 2009 年前后出现较明显的突变信号, 并存在约 10 a 和 4 a 的周期; 短周期旱涝急转强度呈不显著的弱下降趋势, 主导周期为 15~20 月; 气象因子是主要驱动因子, 地表风速、相对湿度和地表太阳辐射作用较强, AO 和 ENSO 具有重要的背景调控作用。

关键词: 旱涝急转事件; 标准化降水指数; 旱涝急转指数; 淮河流域

中图分类号: P339

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2026)05-0120-10

Analysis of characteristics and driving factors of drought-flood abrupt alternation events in the Huaihe River Basin//Sun Feixue¹, Gao Yuqin¹, Xu Mengqi², Feng Kunpeng¹, Wang Yan¹, Shi Jiahang¹, Liu Jie³(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University; 2. Shandong Yellow River Administration Bureau, YRCC; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research)

Abstract: Based on the monthly precipitation, meteorological variables, and climate oscillation indices for the Huaihe River Basin during 1991-2020, drought-flood abrupt alternation (DFAA) events were identified using the standardized precipitation index (SPI) and the long- and short-cycle drought-flood abrupt alternation indexes (LDFAI and SDFAI). REOF-based regionalization, trend and abrupt-change tests, wavelet analysis, partial correlation analysis, and multiple linear regression were employed to investigate the spatiotemporal evolution and driving mechanisms of DFAA events. The results indicate that flood-to-drought events were more frequent than drought-to-flood events in the Huaihe River Basin. Flood-to-drought events occurred predominantly in autumn and winter, while drought-to-flood events were more frequent in spring and summer. In flood season, the high-frequency zones of flood-to-drought alternation are primarily distributed in the southern region of the basin, while the high-frequency zones of drought-to-flood alternation are mainly located in the northwestern and northeastern regions. The long-cycle drought-flood abrupt alternation intensity exhibited a weak but statistically non-significant upward tendency, with a relatively pronounced change signal around 2009 and periodicities of approximately 10 a and 4 a. The short-cycle drought-flood abrupt alternation intensity showed a weak but statistically non-significant downward tendency, with a dominant period of 15-20 months. Meteorological factors were the primary drivers, with surface wind speed, relative humidity, and surface solar radiation exerting relatively strong effects. The Arctic Oscillation (AO) and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) played important background-modulating roles.

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

全球气候变化背景下, 旱涝急转作为干旱与洪涝在较短时间内快速转换的极端水文气候事件, 具有突发性强和灾害链效应显著等特征, 对区域水安全与农业生产构成严重威胁^[1-3]。目前, 旱涝急转事件识别

主要以降水类指数为基础。标准化降水指数(SPI)具有计算简便和时空可比性较强等特点, 已广泛用于旱涝状态判别^[4]。在此基础上, 吴志伟^[5]提出长周期旱涝急转指数(long-cycle drought-flood abrupt alternation

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3210804-03); 国家自然科学基金面上项目(52079039); 江西省水利科技项目重点项目(202527ZDKT22)

作者简介: 孙飞雪(2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事水利规划及洪涝旱灾害研究。E-mail: 241302040010@hhu.edu.cn

通信作者: 高玉琴(1978—), 女, 教授, 博士, 主要从事水利规划及水利经济研究。E-mail: yqgao@hhu.edu.cn

index, LDFAI), 用于识别汛期前后阶段的旱涝转换; 张水锋等^[6] 构建了短周期旱涝急转指数(short-cycle drought-flood abrupt alternation index, SDFAI), 用于刻画相邻月份之间的快速旱涝转换。这两个指标从不同时间尺度拓展了旱涝急转事件的识别方法, 为综合分析汛期和月尺度旱涝急转特征提供了基础。随着研究深入, 旱涝急转研究已由事件识别逐步拓展至空间分异、演变规律及影响因素分析^[7]。在旱涝急转演变特征方面, 门宝辉等^[8] 采用旋转经验正交函数(EOF) 划分了京津冀旱涝急转特征区, 揭示了事件发生的区域差异; 闪丽洁等^[9] 基于日尺度指数分析了长江中下游旱涝急转事件的时空特征及其与厄尔尼诺-南方涛动(ENSO) 活动的关系, 发现旱涝急转事件发生具有明显的空间分异和气候响应特征。在影响因素方面, 涂新军等^[10] 的研究证实旱涝急转与大气环流异常、海温异常及人类活动密切相关; 沈柏竹等^[11] 对 2011 年长江中下游旱涝急转过程的研究表明, ENSO、印度洋海温异常及西太平洋副热带高压活动对事件形成具有重要影响。

然而, 现有研究仍存在以下不足: ①汛期与月尺度旱涝急转的综合识别和对比研究相对不足; ②不同分区事件频次、强度及周期变化的差异尚未得到系统揭示; ③气象条件、大尺度气候振荡和下垫面条件与旱涝急转之间的独立关联及综合解释能力仍有待量化。鉴于此, 本文利用 1991—2020 年淮河流域逐月降水、气象数据及相关环境数据, 采用 SPI、LDFAI 和 SDFAI 识别旱涝急转事件, 结合 EOF、趋势与突变检验和小波分析等方法揭示其时空演变特征, 并通过偏相关分析和多元线性回归定量评估多因子驱动效应及其贡献, 以期为淮河流域旱涝急转事件精准预警和差异化防灾减灾提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区淮河流域(含山东半岛) 位于我国东部, 地处长江与黄河之间, 流域面积约 33 万 km² (图 1); 地形以冲积平原为主, 地势总体呈西高东低、北高南低的特征; 地处南北气候过渡带^[12], 属温带半湿润季风气候, 降水时空分布不均, 年内主要集中于 6—9 月, 占全年降水量的 65%~75%, 空间上总体呈由南向北递减的特征。受季风气候、复杂地形和降水时空分布不均等因素影响, 研究区旱涝急转事件发生较为频繁。

1.2 数据来源

本文所用 1991—2020 年逐月降水数据来源于国家气象科学数据中心; 逐月气温、相对湿度、地表

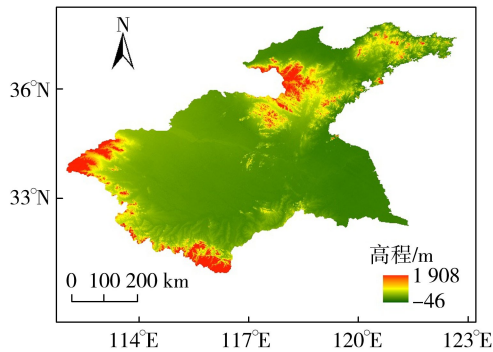


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

太阳辐射、地表风速等气象要素数据来源于国家青藏高原科学数据中心。大尺度气候指数数据来源于美国国家海洋和大气管理局物理科学实验室, 包括北极涛动(AO) 指数、太平洋年代际振荡(PDO) 指数、南方涛动指数(SOI) 和 ENSO(采用 Niño3.4 区海表温度指数表征) 指数。月平均太阳黑子数(SSN) 数据来源于比利时皇家天文台; 人口密度(PD) 数据来源于 WorldPop; 夜间灯光(LD) 数据用于表征区域经济活动强度, 来源于国家青藏高原科学数据中心; 归一化植被指数(NDVI) 数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心; 植被覆盖度(FVC) 根据 NDVI 计算获得。为满足后续分析需要, 将各类原始数据统一处理为 10 km 空间分辨率, 其中站点数据经空间插值转换为格点数据。

2 研究方法

2.1 空间分区方法

采用 EOF 方法根据淮河流域旱涝特征进行空间分区。EOF 是在经验正交函数(EOF) 分解基础上, 对特征向量进行极大方差正交旋转, 使提取的空间模态呈现高载荷区域更加集中的特征, 从而简化空间结构并突出局地特征的方法, 适用于刻画旱涝要素的空间分异规律^[13]。

本文利用 EOF 识别淮河流域旱涝变化的主要空间模态, 对不同时间尺度的 SPI 数据场进行 EOF 分解, 并结合累计方差贡献率和 North 准则筛选主模态。以旋转载荷绝对值大于或等于 0.50 作为高载荷区识别阈值^[14], 并结合载荷极大值中心、空间连续性及地理区位特征进行区域归并。

2.2 旱涝急转事件识别

2.2.1 SPI 构建

SPI 是基于降水概率分布构建的标准化指标, 用于表征不同累积时间尺度的干湿异常程度, 具体计算方法见文献[15]。本文依据 SPI 判别干湿状态: ≤ -0.5 为旱, ≥ 0.5 为涝, $-0.5 < SPI < 0.5$ 为正常

状态。基于 1991—2020 年逐月降水数据,分别计算 1、2、3、12 月时间尺度的 SPI,记为 SPI-1、SPI-2、SPI-3、SPI-12。其中,SPI-1 用于构建 SDAFI;SPI-2 用于构建 LDAFI;SPI-1、SPI-3、SPI-12 共同用于 REOF 空间模态提取与分区对比。

2.2.2 LDAFI 和 SDAFI 计算

将汛期划分为 6—7 月和 8—9 月两个阶段, LDAFI 计算公式为:

$$I_L = 1.8^{-|z_{67}+z_{89}|} (z_{89} - z_{67}) (|z_{67}| + |z_{89}|) \quad (1)$$

式中: I_L 为 LDAFI 值; z_{67} 、 z_{89} 分别为 6—7 月、8—9 月的 SPI-2 值; $1.8^{-|z_{67}+z_{89}|}$ 为权重项,作用是增加长周期旱涝急转事件所占权重,降低全旱或全涝事件的影响。 $I_L > 0$ 表示旱转涝, $I_L < 0$ 表示涝转旱, $|I_L|$ 越大表示急转强度越大。

SDAFI 的计算公式为:

$$I_{Si} = 3.2^{-|z_i+z_{i+1}|} (z_{i+1} - z_i) (|z_i| + |z_{i+1}|) \quad (2)$$

式中: I_{Si} 为第 i 月至第 $i+1$ 月的 SDAFI 值; z_i 、 z_{i+1} 分别为第 i 月、第 $i+1$ 月的 1 月尺度 SPI-1 值; $3.2^{-|z_i+z_{i+1}|}$ 为权重项,作用是增加短周期旱涝急转事件所占权重,提高相邻月急转事件识别的稳定性。 $I_{Si} > 0$ 表示旱转涝, $I_{Si} < 0$ 表示涝转旱, $|I_{Si}|$ 越大表示急转强度越大。

2.3 成因分析

2.3.1 驱动因子选取

为分析旱涝急转的成因,从多因子驱动视角^[16]出发,选取两类驱动因子:气象因子包括气温 (TMP)、相对湿度 (RH)、地表太阳辐射 (SSR)、地表风速 (WS),主要表征近地层水热与动力条件;气候环境因子包括大尺度气候指数 (AO 指数、ENSO 指数、PDO 指数、SOI)、SSN、PD、LD、FVC,主要表征区域气候背景及下垫面条件变化,对旱涝急转事件具有间接调控作用。

2.3.2 偏相关分析与多元线性回归

采用偏相关分析和多元线性回归分别评价各驱动因子与 SDAFI 之间的独立线性关联及不同驱动因子组合的综合解释能力。考虑大尺度气候指数及 SSN 与 SDAFI 之间可能存在滞后关联,先通过交叉相关分析确定各变量的适宜滞后期。偏相关分析在控制其他驱动因子的条件下进行,相关系数的正负表示关联方向,绝对值越大表明独立线性关联越强,显著性水平取 $p < 0.05$ ^[17]。

多元回归建模前,采用 Pearson 相关分析检验自变量间的共线性。针对高度相关的 PD 和 LD 两个指标,采用主成分分析构建人类活动综合指标,以替代 PD 和 LD 输入回归模型。基于 TMP、RH、

SSR、WS 数据构建气象因子基础模型,在此基础上分别加入人类活动综合指标、FVC、AO 指数、ENSO 指数、PDO 指数、SOI、SSN 构建扩展模型,并建立包含全部驱动因子的综合模型。采用决定系数 R^2 评价不同驱动因子组合对 SDAFI 变化的解释能力^[18], R^2 越大表示模型的综合解释能力越强。

3 结果与分析

3.1 空间分区

对研究区 SPI-1、SPI-3、SPI-12 数据场进行 EOF 分解,结果表明前 3 个主模态累计方差贡献率均超过 85%,且相邻特征值满足 North 准则,能够有效表征流域旱涝变化的主导空间结构。在此基础上,对前 3 个主模态实施极大方差正交旋转,得到 REOF 空间模态,如图 2 所示。旋转后各模态高载荷区相对独立、重叠较少:第一模态高载荷区主要位于研究区西部、中部及西南部;第二模态高载荷区主要覆盖研究区北部、东北部及山东半岛;第三模态高载荷区主要位于研究区东南部。据此,将研究区划分为 3 个旱涝特征相对一致的分区,如图 3 所示。

3.2 旱涝急转事件频次特征分析

3.2.1 频次空间分布

基于 1991—2020 年研究区的 LDAFI 和 SDAFI 栅格序列识别汛期与月尺度旱涝急转事件,结果表明涝转旱频次整体高于旱转涝,且不同时间尺度的空间分异特征显著。图 4 为研究区汛期旱涝急转频次空间分布。由图 4 可见,汛期涝转旱高频区主要位于研究区南部,尤其集中于西南部和东南部,受大别山及山前地形对暖湿气流的抬升增雨作用影响;旱转涝则主要分布于西北部 and 东北部,反映出汛期降水集中、雨带季节内推进及后期降水衰减共同作用下的典型急转特征。该空间格局与程智等^[19]的研究中 1960—2009 年淮河流域旱涝急转高频区位于流域上游和南部的结论一致。

图 5 为研究区月尺度旱涝急转频次空间分布。由图 5 可见,月尺度下,涝转旱高频区呈西部、中部、南部多中心分布,旱转涝高频区主要分布于南部、西部及东北部,说明月尺度旱涝急转除受季风控制外,更易受到短期水汽输送变化和局地强对流过程影响。总体上,研究区汛期旱涝急转主要受季风进退和雨带季节内位移控制,月尺度旱涝急转则表现出更显著的天气尺度和局地响应特征。

3.2.2 频次年际代际变化

为揭示旱涝急转事件频次的阶段性演变特征,将研究期划分为 1991—2000 年、2001—2010 年、2011—2020 年 3 个时段,并对其空间分布变化分别

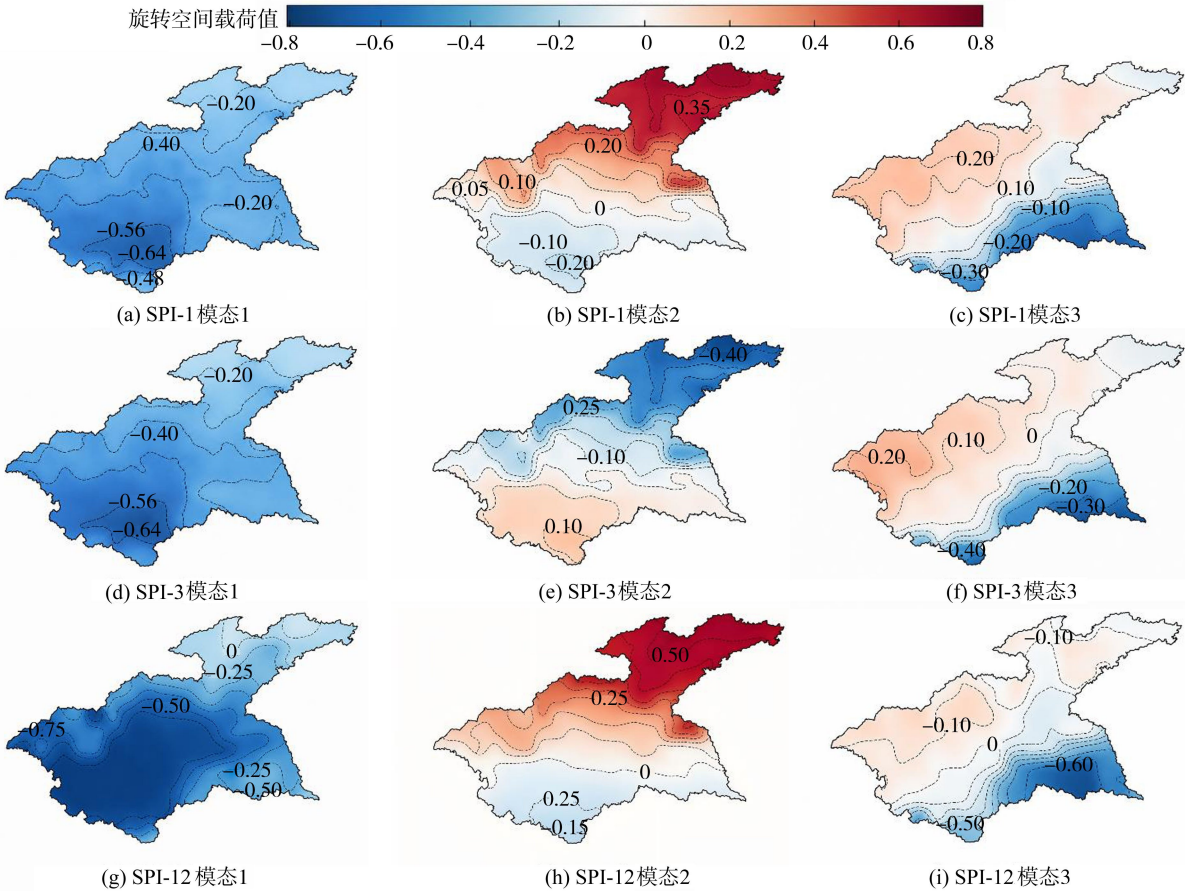


图 2 SPI-1、SPI-3 和 SPI-12 数据场的主要 REOF 空间模式

Fig. 2 Leading REOF spatial modes of SPI-1, SPI-3, and SPI-12 data fields

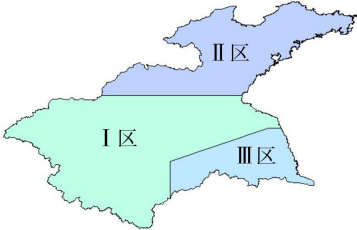


图 3 研究区旱涝特征分区

Fig. 3 Zoning of study area according to drought-flood characteristics

进行分析。图 6 为研究区汛期旱涝急转频次年代际分布。由图 6 可见,涝转旱高频区在 3 个阶段均主

要分布于研究区西南部,空间格局相对稳定,但高频区范围总体呈收缩趋势;旱转涝高频区迁移特征更为明显,整体表现为由东北部、东南部向西北部转移。总体上,汛期旱涝急转频次具有明显的年代际差异,其中涝转旱高频区相对稳定,而旱转涝高频区空间调整更为显著。

图 7 为研究区月尺度旱涝急转频次年代际分布。由图 7 可见,涝转旱高频区由 1991—2000 年的西北部 and 西南部,转移至 2001—2010 年的南部与东南部,在 2011—2020 年扩展并北移至中部偏东;旱转涝高频区则由 1991—2000 年的西南部,转移至

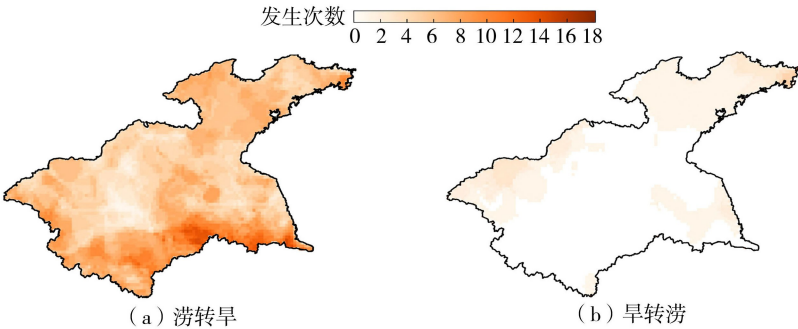


图 4 研究区汛期旱涝急转频次空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of drought-flood abrupt alternation frequency in flood-season of study area

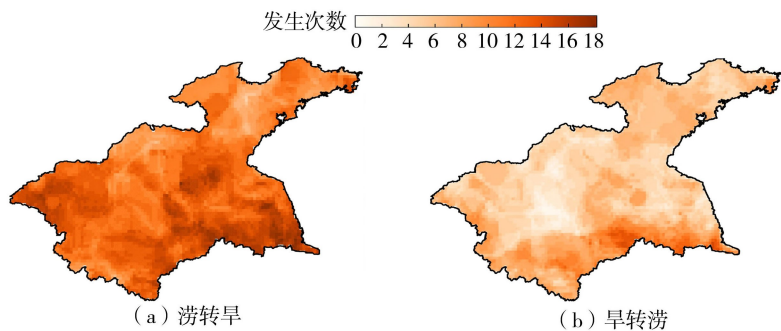


图 5 研究区月尺度旱涝急转频次空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of monthly drought-flood abrupt alternation frequency in study area

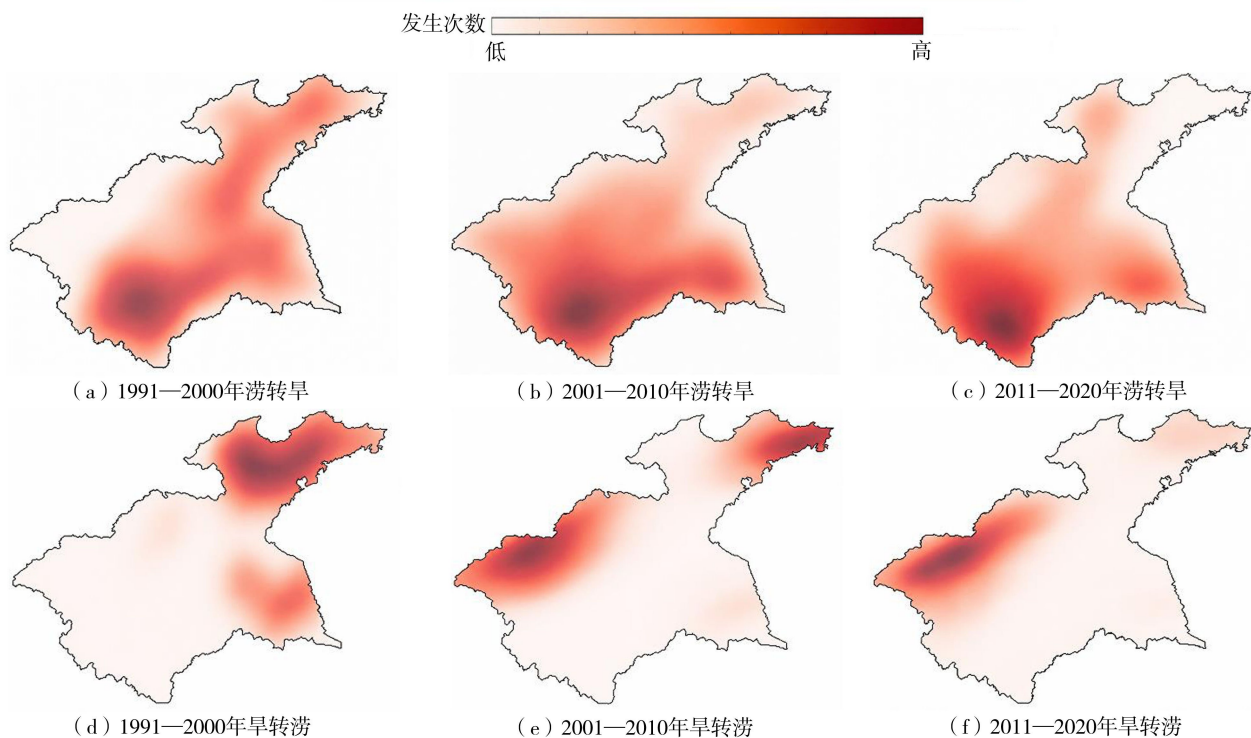


图 6 研究区汛期旱涝急转频次年代际分布

Fig. 6 Interdecadal distribution of drought-flood abrupt alternation frequency in flood-season of study area

2001—2010 年的南部,在 2011—2020 年仍以南部为核心,东北部成为次高频区。相较于汛期,月尺度高频区迁移幅度更大,空间调整更为明显,表明月尺度旱涝急转对阶段性气候波动和局地水热条件变化更为敏感。

3.2.3 频次季节差异

图 8 为研究区及各分区旱涝急转季节频次。由图 8 可见,涝转旱事件主要发生于秋冬季,其中秋季频次最高;各分区总体表现为 I 区频次高于 II 区和 III 区。该特征说明,汛期后期形成的偏湿背景在夏季风撤退后更易随降水迅速减少而转入干旱状态,从而增加涝转旱事件发生的可能性。旱转涝事件则主要发生于春夏季,频次由大到小依次为:春季、夏季、秋季、冬季。其主要原因在于,前期降水偏少易形成干旱背景,而春末夏初暖湿气流增强、对流活动

趋于活跃,为旱转涝事件发生提供了有利条件。从分区来看, I 区春季频次较高, II 区和 III 区频次则主要集中在夏季。总体上,研究区旱涝急转事件具有显著的季节差异:涝转旱事件发生以秋冬季为主,旱转涝事件发生以春夏季为主,不同类型旱涝急转过程对季节性水热配置变化具有明显响应。

3.3 强度演变特征分析

3.3.1 强度演变趋势与突变特征

基于 1991—2020 年研究区长、短周期旱涝急转强度序列,采用 Sen 斜率估计判断变化方向,并结合 Mann-Kendall (M-K) 检验评价长期趋势的显著性,对面积加权得到的全区及各分区序列采用滑动 t 检验,识别其阶段性突变特征^[20]。

基于 LDFAI 对汛期旱涝急转强度进行分析, Sen 斜率估计结果表明,研究区及各分区长周期旱

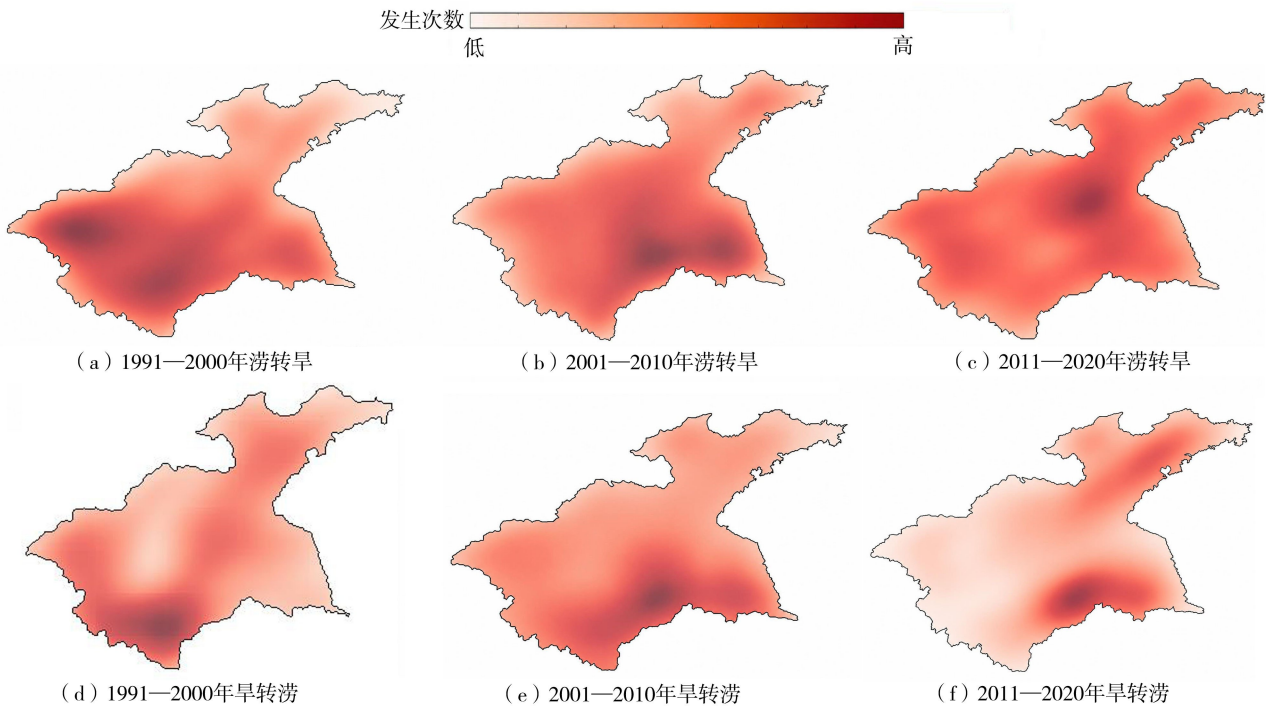


图7 研究区月尺度旱涝急转频次年代际分布

Fig. 7 Interdecadal distribution of monthly drought-flood abrupt alternation frequency in study area

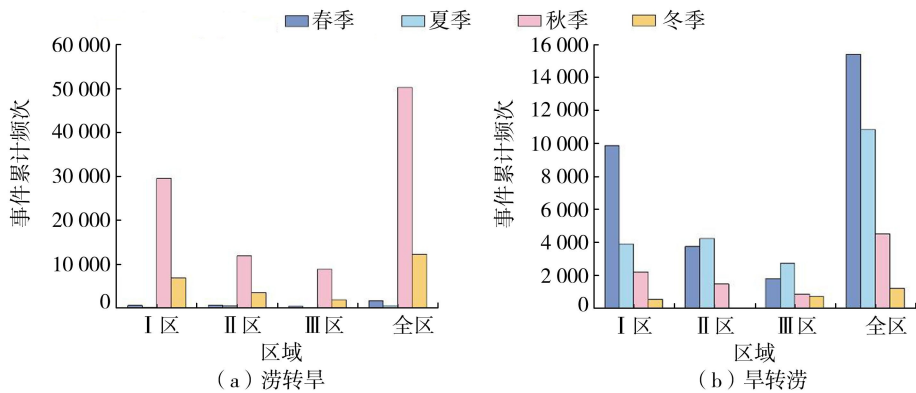


图8 研究区及各分区旱涝急转季节频次

Fig. 8 Seasonal frequency of drought-flood abrupt alternation in study area and subregions

涝急转强度均呈弱上升趋势。研究区及各分区 M-K 检验统计量为 0.82~1.14, 其中研究区为 1.11, 均未通过 0.10 显著性水平检验, 说明研究期内长周期强度的长期单调变化不显著, 主要表现为年际波动。其中, I 区上升趋势相对较强, II 区变化较为平缓。滑动 t 检验结果表明, 研究区长周期强度存在阶段性突变, 其中 2009 年前后的突变信号最为突出; I 区与研究区的变化过程较为一致, II 区和 III 区未表现出稳定的显著突变。总体而言, 研究期内长周期旱涝急转强度并未呈现持续增强的趋势, 而是以不显著的弱上升趋势和阶段性波动为主要特征。

基于 SDAFI 对月尺度旱涝急转强度进行分析, Sen 斜率估计与 M-K 检验结果表明, 研究区、I 区和 III 区短周期旱涝急转强度呈弱下降趋势, II 区总体

变化较为平稳。研究区及各分区 M-K 检验统计量为 $-0.48 \sim 0.06$, 其中研究区为 -0.42 , 均未通过 0.10 显著性水平检验, 说明月尺度旱涝急转强度的长期变化同样不显著。滑动 t 检验识别出若干阶段性异常信号, 但不同分区的出现时间和变化方向一致性较弱, 未形成稳定的全区共同突变特征。因此, 短周期强度主要表现为高频波动和阶段性调整, 不宜依据个别月份的突变信号作过度解释。

综合来看, 研究期内长周期旱涝急转强度呈不显著的弱上升趋势, 短周期旱涝急转强度呈不显著的弱下降趋势, 两者均以阶段性和多尺度波动为主要特征。长期单调趋势不足以完整表征其演变过程, 因此有必要进一步分析长、短周期旱涝急转强度的周期结构。

3.3.2 强度周期特征

采用 Morlet 小波分析^[21]研究 1991—2020 年研究区 LDFAI 和 SDFAI 序列的周期性特征,结果显示旱涝急转强度存在显著的多时间尺度振荡,且长、短周期的主导振荡特征与驱动机制差异明显。对 LDFAI 的周期性分析表明,研究区汛期旱涝急转强度呈显著年际振荡特征,10 a 尺度为主要周期,1995—2010 年信号持续稳定,同时叠加 4 a 尺度的清晰波动(图 9)。不同区域周期结构存在差异:

约 10 a 和 4 a 的周期可能分别受到太阳活动和 ENSO 年际变率的调控,但其具体联系仍需进一步验证。

对 SDFAI 的周期性分析表明,研究区月尺度旱涝急转强度的主导周期为 15~20 月,该信号在研究区内持续存在;同时存在 5~10 月的短周期信号,表现为高频扰动的阶段性加强(图 10)。研究区在约 240 月处主导周期带振幅显著增强,且短周期信号同步放大,形成局部强振幅区,指示该阶段多尺度波

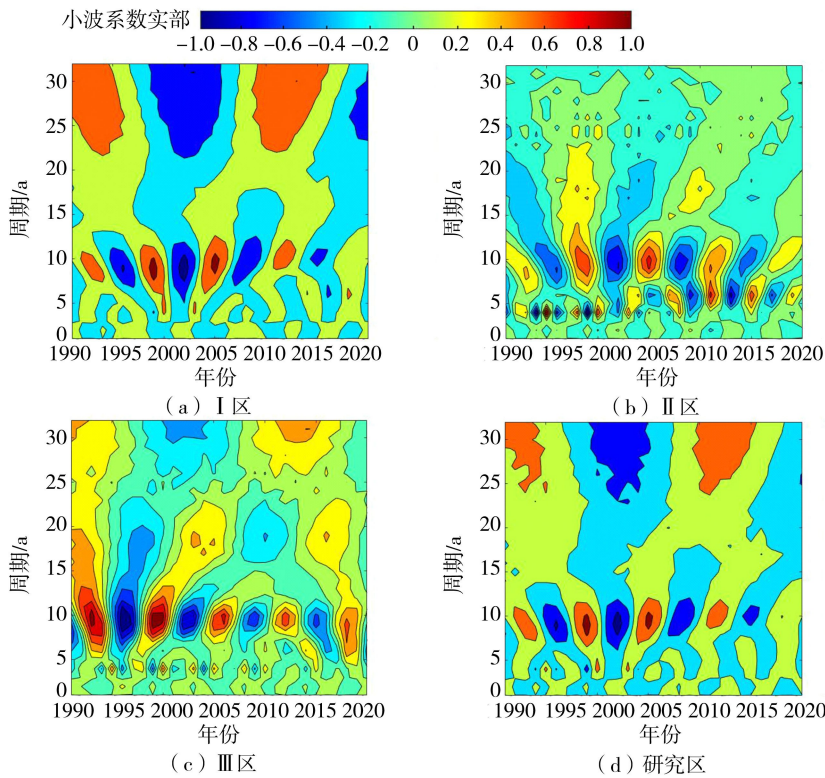


图 9 研究区及各分区 LDFAI 小波分析结果

Fig. 9 Wavelet analysis results of LDFAI in study area and subregions

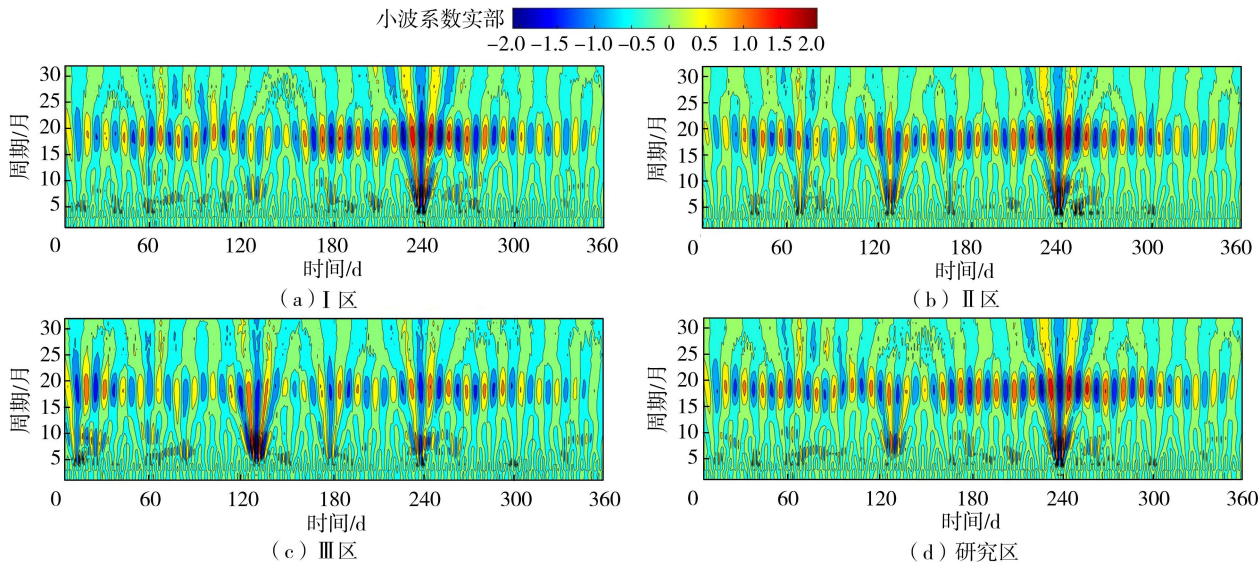


图 10 研究区及各分区 SDFAI 小波分析结果

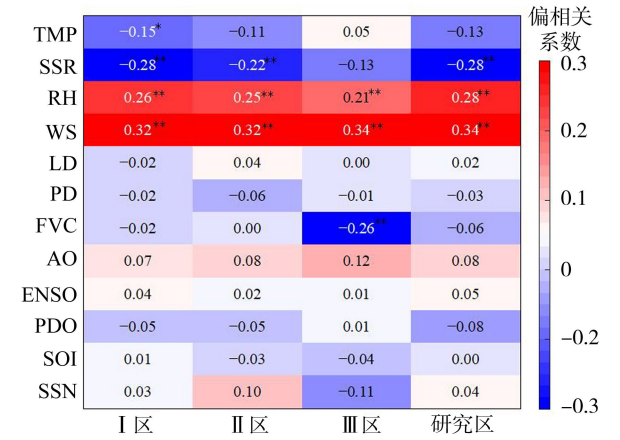
Fig. 10 Wavelet analysis results of SDFAI in study area and subregions

动同步加剧,Ⅲ区在约 120 月处也出现类似特征。各分区周期特征高度一致,均以 15~20 月为主导、5~10 月为短周期扰动,仅共振发生时间存在差异。15~20 月及 5~10 月尺度的波动可能与 ENSO 年际变率、东亚季风调整及区域天气系统活动有关,具体机制仍需进一步验证。

3.4 成因分析

3.4.1 定性分析

考虑大尺度气候指数的时滞效应,通过交叉相关分析确定 ENSO 和 SOI 提前 3 月、AO 提前 1 月、PDO 和 SSN 提前 6 月。偏相关分析表明,WS、RH、SSR 与 SDFAI 的独立线性关联相对较强(图 11)。其中,WS、RH 与 SDFAI 在各分区总体呈正相关关系,偏相关系数分别为 0.32~0.34、0.21~0.28,表明二者增大与 SDFAI 向正值方向变化相关;SSR 与 SDFAI 总体呈负相关关系,偏相关系数为-0.28~-0.13,表明其增大与 SDFAI 向负值方向变化相关。TMP、FVC 与 SDFAI 的偏相关程度相对较弱,PD、LD、大尺度气候指数(AO 指数、ENSO 指数、PDO 指数、SOI)及 SSN 与 SDFAI 的偏相关系数整体较小,表明其独立线性关联相对有限。综合来看,近地层气象因子与 SDFAI 变化的独立线性关联总体强于气候环境因子。



注: * 表示 $p<0.05$, ** 表示 $p<0.01$ 。

图 11 研究区及各分区的驱动因子与 SDFAI 的偏相关系数
Fig. 11 Partial correlation coefficients between driving factors and SDFAI in study area and subregions

3.4.2 定量分析

采用多元线性回归定量评估气候环境因子对研究区旱涝急转的影响,图 12 为研究区及各分区不同因子组合回归模型的决定系数(图中 H 表示人类活动综合指标;M 表示气象因子基础模型;A 表示综合模型)。由图 12 可见,气象因子基础模型在研究区、I 区、II 区、III 区的 R^2 分别为 0.343、0.355、0.325、0.267。构建综合模型后, R^2 分别提高至

0.411、0.404、0.363、0.337,较气象因子基础模型分别增加 0.068、0.049、0.038、0.070。由此可见,背景调控因子的引入在不同程度上提高了模型对 SDFAI 变化的解释能力,但气象因子仍构成模型解释能力的主体。从分区来看,I 区加入 PDO 和 AO 后模型 R^2 提升相对较大;II 区加入 SSN 后 R^2 提升较为明显;III 区加入 FVC 后 R^2 提升幅度最大;就研究区而言,加入 AO 和 ENSO 后模型 R^2 相对较高。这表明不同分区 SDFAI 变化所对应的背景调控因子存在差异,其中大尺度气候指数、太阳活动及下垫面条件可提供一定的附加统计解释。总体而言,气象因子基础模型具有较高的基础解释能力,说明近地层水热及动力条件与 SDFAI 变化关系密切;大尺度气候指数、人类活动及下垫面条件的引入进一步提高了模型解释能力,但其作用存在明显区域差异。

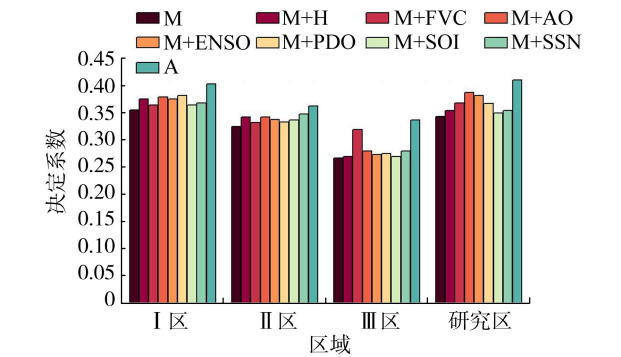


图 12 研究区及各分区不同因子组合回归模型的决定系数
Fig. 12 Coefficients of determination of regression models with different factor combinations in study area and subregions

4 讨论

为明确淮河流域旱涝急转特征的区域背景,将本文结果与已有研究进行定性比较。闪丽洁等^[9]对长江中下游流域的日尺度研究表明,自 20 世纪 60 年代以来,旱涝急转事件的影响范围逐渐扩大,发生频率和强度总体呈增长趋势,事件主要发生于 5 月和 6 月,高发区集中于汉江水系、中游干流区间、洞庭湖水系北部及鄱阳湖水系西北部。朱子青等^[22]对黄河中上游流域的长周期的研究显示,1982—2022 年平均每 2~3 a 发生一次旱涝急转事件,高频区主要分布于黄土高原和青藏高原东部,2003 年以后旱涝急转事件强度显著减弱。相比之下,本文研究发现,淮河流域旱涝急转总体以涝转旱为主,汛期涝转旱高频区主要位于流域南部,西南部和东南部较为突出;旱转涝高频区主要分布于西北部和东北部。月尺度下,涝转旱高频区呈西部、中部和南部多中心分布,旱转涝高频区主要分布于南部、

西部及东北部;长周期强度呈不显著的弱上升趋势,短周期强度呈不显著的弱下降趋势。上述差异表明,不同流域旱涝急转的时空特征具有明显区域性。

5 结 论

a. 基于 1991—2020 年研究区逐月降水数据构建 LDFAI 和 SDFAI,并将研究区划分为 3 个旱涝特征相对一致的分区。

b. 研究区旱涝急转事件总体以涝转旱为主,空间分异显著。汛期涝转旱高频区主要位于流域南部,旱转涝高频区主要分布于西北部和东北部;月尺度下,涝转旱高频区呈西部、中部和南部多中心分布,旱转涝高频区主要位于南部、西部及东北部。年代际上,汛期涝转旱高频区总体较稳定,旱转涝高频区空间调整更明显;月尺度下,两类事件高频区均呈现阶段性变化,涝转旱高频区后期向中部偏东扩展,旱转涝高频区逐渐形成以南部为核心、东北部为次高频区的格局。季节上,涝转旱主要发生于秋冬季,旱转涝主要发生于春夏季,表明不同类型旱涝急转过程对东亚季风季节性水汽输送条件呈现显著响应特征。

c. 在强度演变方面,长周期旱涝急转强度呈不显著的弱上升趋势,2009 年前后出现较明显的阶段性突变信号,并存在约 10 a 和 4 a 周期;短周期强度呈不显著的弱下降趋势,主导周期为 15~20 月。两种时间尺度的强度变化均以阶段性和多尺度波动为主要特征,未表现出显著的长期单调趋势。

d. 成因分析表明,旱涝急转总体上以气象因子驱动为主,其中地表风速、相对湿度和地表太阳辐射为主要驱动因子。大尺度气候指数中,AO 与 ENSO 对流域旱涝急转具有较显著作用;人类活动总体影响相对较弱,但在不同分区存在一定异质性。

参考文献:

[1] 毕吴瑕,翁白莎,王旭,等. 基于知识图谱的旱涝急转研究进展[J]. 水资源保护,2021,37(6):40-48. (Bi Wuxia,Weng Baisha,Wang Xu,et al. Research progress of drought-flood abrupt alternation based on knowledge graph [J]. Water Resources Protection,2021,37(6):40-48. (in Chinese))

[2] 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))

[3] 薛联青,章郁涵,刘远洪. 干旱区与湿润区旱涝急转演变特征对比研究[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))

[4] 何慧,廖雪萍,陆虹,等. 华南地区 1961—2014 年夏季长周期旱涝急转特征[J]. 地理学报,2016,71(1):130-141. (He Hui,Liao Xueping,Lu Hong,et al. Features of long-cycle drought-flood abrupt alternation in South China during summer in 1961-2014 [J]. Acta Geographica Sinica,2016,71(1):130-141. (in Chinese))

[5] 吴志伟. 长江中下游夏季风降水“旱涝并存、旱涝急转”现象的研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2006.

[6] 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))

[7] 高玉琴,曹祥,季孔阳,等. 高度城市化区域洪涝孕灾环境敏感性时空演变分析[J]. 水资源保护,2025,41(6):18-27. (Gao Yuqin,Cao Xiang,Ji Kongyang,et al. Spatial and temporal evolution analysis of sensitivity of flood disaster-prone environment in highly urbanized areas [J]. Water Resources Protection,2025,41(6):18-27. (in Chinese))

[8] 门宝辉,李国娇,吕行,等. 京津冀旱涝急转事件特征分析及风险评估[J]. 生态学报,2025,45(11):5351-5362. (Men Baohui,Li Guojiao,Lyu Xing,et al. Characterization and risk assessment of drought-flood abrupt alternation in Beijing-Tianjin-Hebei region of China [J]. Acta Ecologica Sinica,2025,45(11):5351-5362. (in Chinese))

[9] 阴丽洁,张利平,张艳军,等. 长江中下游流域旱涝急转事件特征分析及其与 ENSO 的关系[J]. 地理学报,2018,73(1):25-40. (Shan Lijie,Zhang Liping,Zhang Yanjun,et al. Characteristics of dry-wet abrupt alternation events in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin and their relationship with ENSO [J]. ActaGeographica Sinica,2018,73(1):25-40. (in Chinese))

[10] 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))

[11] 沈柏竹,张世轩,杨涵洧,等. 2011 年春夏季长江中下游地区旱涝急转特征分析[J]. 物理学报,2012,61(10):530-540. (Shen Baizhu,Zhang Shixuan,Yang Hanwei,et al. Analysis of characteristics of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River in spring and summer in 2011[J]. Acta

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)