

# 干旱区与湿润区旱涝急转演变特征对比研究

薛联青<sup>1,2</sup>, 章郁涵<sup>1</sup>, 刘远洪<sup>1</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 皖江工学院水利工程学院, 安徽 马鞍山 243031)

**摘要:**以长江、黄河和淮河流域为研究对象,基于标准化旱涝急转指数,利用趋势分析、变点检验、小波分析、随机森林等方法探究典型干旱区与湿润区旱涝急转演变特征及其驱动因子。结果表明:湿润和半湿润区是极端旱涝急转事件的高频发生区,干旱区是极端旱转涝事件的高频发生区;干旱区的突变发生在1998年,湿润区的突变在1978年,未来干旱区更易发生旱转涝事件,湿润区则相反;气象因子在湿润区对旱涝急转的贡献度更大,大气环流对干旱区的影响突出,旱涝急转与不同驱动因子间存在非线性关系。

**关键词:**旱涝急转;标准化旱涝急转指数;大气环流;长江流域;黄河流域;淮河流域

中图分类号:P339

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)04-0001-08

**Comparative study on change characteristics of drought-flood abrupt alternation in arid and humid zones//XUE Lianqing<sup>1,2</sup>, ZHANG Yuhang<sup>1</sup>, LIU Yuanhong<sup>1</sup> (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Wanjiang University of Technology, Maanshan 243031, China)**

**Abstract:** Taking the Yangtze River, Yellow River, and Huai River basins as research objects, based on the standardized drought-wetness abrupt alternation index, this study explores the characteristics and driving factors of drought-flood abrupt alternation in typical arid and humid areas using methods such as trend analysis, change point test, wavelet analysis, and random forest. The results indicate that the humid/semi-humid areas are the high-frequency occurrence areas of extreme drought-flood abrupt alternation events, and the arid areas are the high-frequency occurrence areas of extreme drought to flood events. The mutation in arid areas occurred in 1998, while the mutation in humid areas occurred in 1978. In the future, arid areas are more prone to drought to flood events, while humid areas are the opposite. The contribution of meteorological factors to the rapid transition of drought and flood is greater in humid areas, and the impact of atmospheric circulation on arid areas is prominent. There is a non-linear relationship between the rapid transition of drought and flood and different driving factors.

**Key words:** drought-flood abrupt alternation; standardized drought-wetness abrupt alternation index; atmospheric circulation; Yangtze River Basin; Yellow River Basin; Huai River Basin

目前,气候变暖和强人类活动正在导致全球高温、洪水、干旱等极端水文气象灾害发生频率增高、强度加大,对生态系统和人类社会造成严重的威胁<sup>[1-3]</sup>。在气候变化的背景下,复合灾害的频率和严重程度将在未来增加,我国是复合灾害高发地区,而与降水和温度变化相关的旱涝交替事件尤为突出<sup>[4]</sup>。长江、黄河和淮河流域(以下简称“江-黄-淮流域”)分布有我国典型的干旱区和湿润区,旱涝急转、旱涝并存现象表现明显<sup>[5-6]</sup>,因此,研究江-黄-淮流域旱涝急转现象的演变规律和影响有助于针对性地减少和预防不同气候区未来可能发生的灾害。

旱涝急转指数是定量评估旱涝急转变化特征的基础,吴志伟等<sup>[7]</sup>基于标准化降水序列定义了时间尺度为2月的长周期旱涝急转指数(long-cycle drought-flood abrupt transition index, LDFAI),并得到广泛认可和使用,此后诸多旱涝急转指数的改进都是基于LDFAI,如径流旱涝急转指数(runoff drought-flood abrupt alternation index, RDFAI)<sup>[8]</sup>、日尺度旱涝急转指数(dry-wet abrupt alternation index, DWAAI)<sup>[9]</sup>等。然而此类旱涝急转指数往往通过调整权重项来避免将旱/涝事件错判为旱涝急转,在确定权重时不可避免具有主观随意性。相较于上述旱

涝急转指数, 标准化旱涝急转指数 (standardized drought-wetness abrupt alternation index, SDWAI)<sup>[10]</sup> 则更适合进行区域性旱涝急转的评估, 但目前基于 SDWAI 识别不同气候分区旱涝急转特征的研究较少。

旱涝变化往往受到降水、湿度、气温等气象因素的直接影响, 除此之外, 大气环流与旱涝急转的形成与变化之间也具有密切联系。如西太平洋副热带高压、持续的拉尼娜事件及其变化为旱涝急转的发生创造了有利条件<sup>[11-12]</sup>。随着研究的深入, 对旱涝急转事件驱动因素的定性和定量分析成了一大研究趋势。Shi 等<sup>[13]</sup> 采用偏相关和多元线性回归方法, 揭示了北极涛动和厄尔尼诺-南方涛动等大气环流因子与渭河流域旱涝急转事件的发生显著相关; Yang 等<sup>[14]</sup> 基于交叉小波能量谱定性分析了气象因子和大气环流因子对长江流域旱涝急转事件的影响。然而, 大量的潜在影响因素之间存在高度相关性, 传统的多元线性回归模型无法很好地解释这一问题。相较于此, 随机森林算法不会受到多重共线性的影响, 在面对大量数据时仍可以达到理想的拟合精度, 而不会出现过拟合问题, 最重要的是随机森林算法能够量化每个潜在影响因子对旱涝急转的重要性<sup>[15]</sup>。

因此, 本研究选取具有典型干旱区和湿润区的江-黄-淮流域为研究区, 基于 SDWAI 分析江-黄-淮流域不同气候分区旱涝急转变特征, 利用随机森林算法定量探究其变化的驱动因子, 以期进一步了解旱涝急转事件对复杂气候变化的响应机制, 从而加强对典型干旱区和湿润区旱涝灾害的预警与防范能力。

## 1 研究区概况与数据来源

长江、黄河和淮河是我国重要的水系, 江-黄-淮流域 (23°N ~ 42°N, 89°E ~ 124°E) 位于我国东部, 流经 18 个省 (自治区、直辖市), 面积 287 万 km<sup>2</sup>, 约占全国总面积的 30%。江-黄-淮流域是我国经济最为发达的地区, 拥有 7.3 亿人口, 占全国总人口的 50% 以上, 城镇化率达 46%。该地区以季风气候为主, 横跨亚寒带、温带和亚热带, 囊括了干旱区、半干旱区、半湿润区和湿润区。由于复杂的地形和气候特征, 该流域内温度和降水的空间分布和时间变化极不均匀, 自然灾害 (如洪水、干旱和地质灾害) 频繁发生。根据气候, 将江-黄-淮流域分为 4 个分区: 干旱区、半干旱区、半湿润区和湿润区, 如图 1 所示。

本文采用江-黄-淮流域 1961—2020 年月尺度气象数据及大气环流数据。气象数据包括降水、湿度、风速和温度, 均来自 CN05 数据集 (<https://ccrc>。

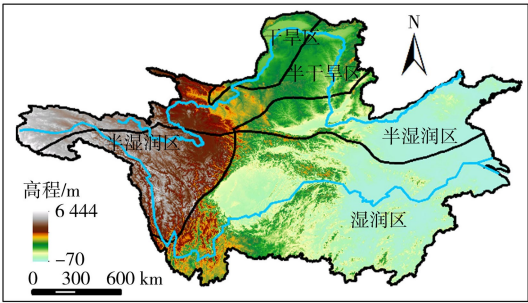


图 1 江-黄-淮流域地形及气候分区

Fig. 1 Topographic and climatic zoning of the Jiang-Huang-Huai River Basin (JHHRB)

iap. ac. cn/), 潜在蒸散发 (potential evapotranspiration, PET) 数据来自 ERA5 数据集 (<https://climate.copernicus.eu/>)。大气环流数据包括据西太平洋副高强度指数 (Western Pacific Subtropical high intensity index, WPSHII)、南海副高强度指数 (South China Sea subtropical high intensity index, SCSSHII)、北极涛动指数 (Arctic oscillation, AO)、北太平洋遥相关型指数 (North Pacific pattern, NP)、大西洋多年涛动指数 (Atlantic Multi-decadal oscillation index, AMO)、太阳黑子指数 (total sunspot number index, TSNI)、南方涛动指数 (Southern oscillation index, SOI)、厄尔尼诺-南方涛动指数 (El Nino-Southern oscillation, ENSO) 和太平洋 10 年涛动 (Pacific decadal oscillation, PDO), 均来自中国气象局国家气候中心 (<http://www.ncc-cma.net/>)。

## 2 研究方法

### 2.1 标准化降水指数

标准化降水指数 (standardized precipitation index, SPI)<sup>[16]</sup> 是用于监测干湿状况的气象干旱指数。与其他干旱指数相比, SPI 可在任何时间尺度上计算降水不足/盈余, 量化降水量, 能准确反映干旱/洪涝的发生情况, 且简单可靠, 应用广泛<sup>[17-18]</sup>。具体的计算方法是将长期月降水序列转换为适当的概率密度函数, 然后通过反正态分布函数将该分布转化为正态分布。基于伽马分布的 SPI 计算公式为

$$I_{SP} = S \left\{ t - \frac{(c_2 t + c_1) t + c_0}{[(d_3 t + d_2) t + d_1] t + 1.0} \right\} \quad (1)$$

$$F(x < x_0) = \int_0^{x_0} \beta^{-\gamma} \Gamma^{-1}(\gamma) x^{\gamma-1} e^{-x/\beta} dx \quad (2)$$

其中  $t = \sqrt{\ln(1/F^2)}$   $\Gamma(\gamma) = \int_0^\infty x^{\gamma-1} e^{-x} dx$

式中:  $x$  为降水量;  $F$  为与  $\Gamma$  函数相关的降水概率分布;  $\gamma, \beta$  分别为形状参数和尺度参数,  $\gamma$  和  $\beta$  的最佳值均用最大似然法估算;  $S, c_0, c_1, c_2, d_1, d_2, d_3$  均为拟合参数。当  $F > 0.5$  时,  $F = 1.0 - F$ ,  $S = 1$ ; 当  $F \leq$

0.5时, $S=-1$ ,  $c_0=2.515\ 517$ ,  $c_1=0.802\ 853$ ,  $c_2=0.010\ 328$ ,  $d_1=1.432\ 788$ ,  $d_2=0.1892\ 69$ ,  $d_3=0.001\ 308$ 。

根据 SPI 的不同阈值划分不同旱涝等级,包括特旱( $I_{SP}\leq-2.0$ )、重旱( $-2.0<I_{SP}\leq-1.5$ )、中旱( $-1.5<I_{SP}\leq-1.0$ )和轻旱( $-1.0<I_{SP}\leq-0.5$ ),洪涝包括特涝( $I_{SP}\geq2.0$ )、重涝( $1.5\leq I_{SP}<2.0$ )、中涝( $1.0\leq I_{SP}<1.5$ )和轻涝( $0.5\leq I_{SP}<1.0$ )。

2.2 标准化旱涝急转指数

涂新军等<sup>[10]</sup>提出了改进的 SDWAI,以定量研究旱涝急转事件的科学内涵和演变特征。与传统的旱涝急转指数相比,SDWAI 弥补了对旱涝急转事件的误判和漏判,使结果更加客观。根据 SDWAI 值  $I_{SA}$  进行划分, $-0.5<I_{SA}<0.5$  时为正常情况, $I_{SA}\leq-0.5$  时为旱转涝, $I_{SA}\geq0.5$  时为涝转旱,两种情况均包含轻度、中度、重度和极度 4 个等级,其划分阈值与 SPI 一致。

2.3 趋势分析及变点检验

MK 检验通常作为一种非参数检验,用于确定水文气象时间序列是否存在显著趋势。然而,时间序列往往具有自相关性,这会改变传统 MK 检验结果的显著性<sup>[19-20]</sup>。因此,使用去趋势预置白的 MK 检验 (Mann-Kendall test with trend-free pre-whitening, TFPW-MK)<sup>[21]</sup>,以减少自相关的影响,保证检验结果的准确性。此外,Pettitt 变点检测方法<sup>[22]</sup>可用于评估时间序列中是否存在突变现象,小

波分析方法<sup>[23]</sup>可以分析时间序列在不同时间尺度上的演变特征。结合 TFPW-MK、Pettitt 变点检测方法和小波分析方法,可以有效地分析旱涝急转事件的时空变化和周期性特征。

2.4 定量分析方法

采用随机森林算法<sup>[24]</sup>分析各气象因素和大气环流因素对旱涝急转的相对贡献度。随机森林算法是将集成算法与随机子空间方法相结合的一种基于决策树的 Bagging 集成学习算法,被广泛用于预测和回归分析中,具有较好的准确性、泛化能力和抗噪能力。利用随机森林算法容易实现对所获特征进行重要性排序的目的。

3 结果与分析

3.1 降水及潜在蒸散发的时空分布特征

图 2 为 1961—2020 年江-黄-淮流域多年平均降水量和潜在蒸散发量的空间分布及变化趋势。由图 2 可见,多年平均降水量自西北向东南呈增加趋势,年平均潜在蒸散发量为 533.6 mm,呈西低东高趋势。降水最丰富的地区集中在长江流域中下游(即湿润区),多年平均降水量为 1260.4 mm,年最大降水量超过 2 000.0 mm。干旱区降水量最小但潜在蒸散发量大,多年平均降水量为 277.7 mm,年最小降水量不足 300.0 mm,但多年平均潜在蒸散发量高达 612.5 mm。总体上,1961—2020 年江-黄-淮流域多年平均降水量和潜在蒸散发量呈增加趋势。

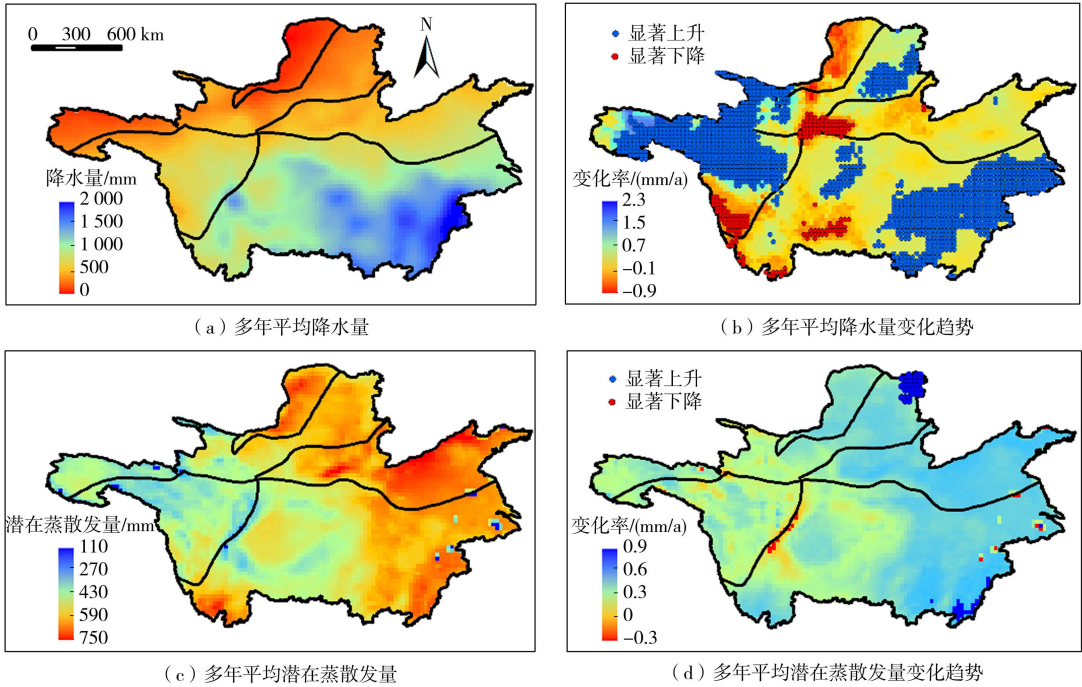


图 2 1961—2020 年江-黄-淮流域多年平均降水量和潜在蒸散发量的空间分布及变化趋势

Fig.2 Spatial distribution and changing trends of multi-year average precipitation and potential evapotranspiration in the JHHRB from 1961 to 2020

图3为江-黄-淮流域各气候分区降水量的年内分布。由图3可见,各气候分区的降水量分布和月均降水量存在显著差距,干旱区和半干旱的月均降水量不足50.0 mm,降雨多集中在夏季。而湿润区的月均降水量可达100.0 mm,夏秋多雨。各气候分区汛旱涝交替的发生时间存在差异,在计算江-黄-淮流域汛期前后的旱涝交替时,需要区别对待不同气候分区的降水。湿润区雨季相对较长,因此将湿润区旱涝交替的持续时间设定为3月,其他气候分区则设定为2月。

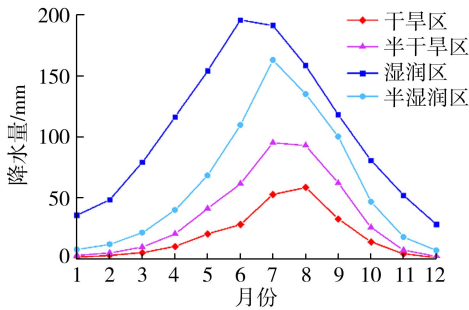


图3 1961—2020年各气候分区月降水量的年内分布  
Fig.3 Annual distribution of monthly precipitation in different climate zones from 1961 to 2020

3.2 旱涝急转事件的时空演变特征

3.2.1 空间特征

图4为江-黄-淮流域的SDWAI多年平均值以及旱涝急转事件发生频率。1961—2020年,涝转旱事件主要发生在半湿润区,而旱转涝事件主要发生在半干旱区。总体来说,干旱区和半干旱区在历史

上更倾向于发生旱转涝,湿润区和半湿润区则相反。通过分析旱涝急转事件发生次数(图4(b))发现,湿润区和半湿润区最易发生旱涝急转事件。由图4(c)(d)可见,研究区发生了18次以上(包括18次)涝转旱事件的区域占64.2%,高频区域主要分布在半湿润区和湿润区,这些地方同样也是旱转涝事件的高频发生区,这意味着这些区域很可能短期内存在涝转旱转涝再转旱的交替变化,在防范涝转旱事件的同时也要注意旱转涝事件的发生。此外,江-黄-淮流域不同气候分区旱涝急转事件发生烈度不同。例如,研究时段内干旱区更易发生极端旱转涝事件,占比为5.4%;而湿润区则是重度涝转旱事件的高频发生区,占比为14.8%。

3.2.2 时间特征

通过计算SDWAI的年际变化趋势和突变,总结了江-黄-淮流域旱涝急转事件的时间演化特征,结果如图5所示。由图5可见,1961—2020年干旱区是发生旱涝急转事件最多的地区,总共为28次,半干旱区、湿润区和半湿润区分别发生了19、16和10次旱涝急转事件。此外,在TFPW-MK去除序列自相关影响后,干旱区SDWAI的年变化呈现显著上升趋势,上升速率为0.012。相反地,湿润区呈现下降趋势,下降速率为0.002。还可以从SDWAI突变分析结果看出,干旱区SDWAI在1998年发生了显著突变,在突变前该地区主要由涝转旱事件主导,此后转变为旱转涝事件主导。仅2000—2020年干旱区就发生了7次旱转涝事件,其中57.1%的旱涝急

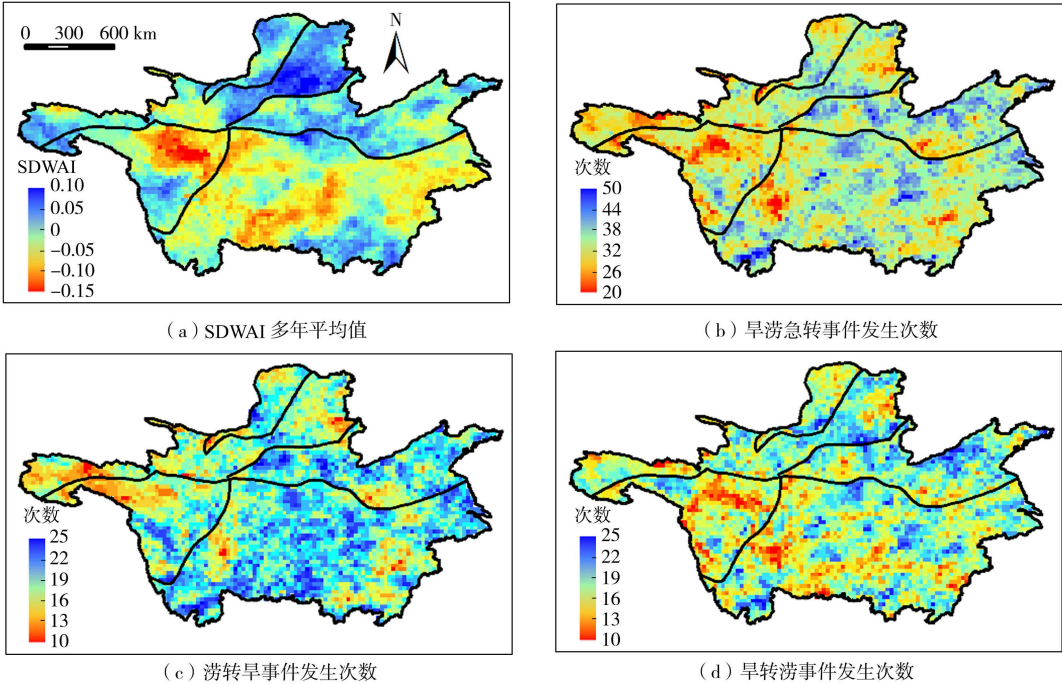


图4 江-黄-淮流域的SDWAI多年平均值以及旱涝急转事件发生频率  
Fig.4 Annual average SDWAI and frequency of drought-flood abrupt alternation events in the JHHRB

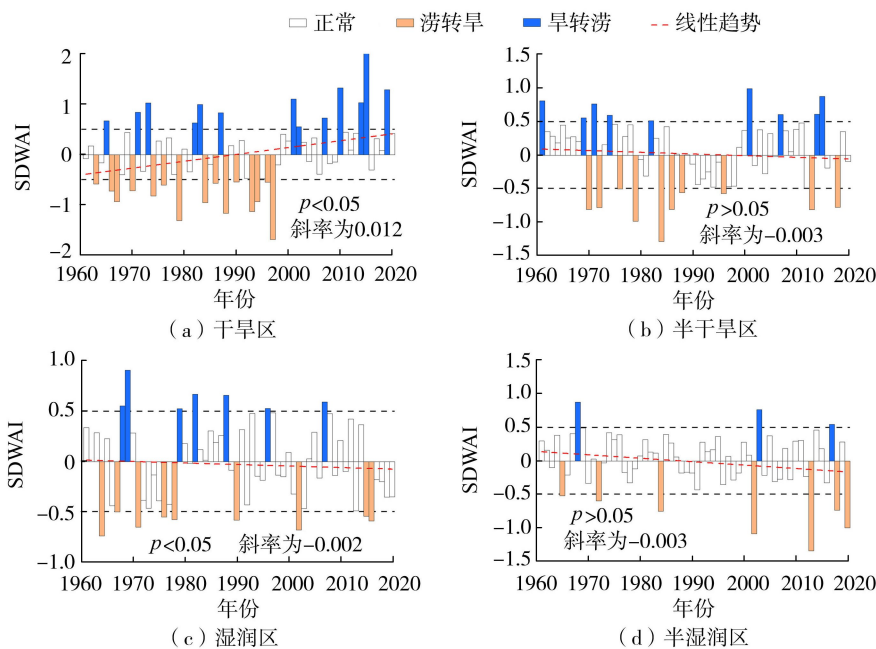


图 5 各气候分区旱涝急转事件的年际变化

Fig. 5 Interannual variation of drought-flood abrupt alternation events in different climate zones

转烈度为中度及以上。1997—1998 年发生了 20 世纪最强厄尔尼诺事件,副高强度异常强大,导致华北和黄河一带少雨、易干旱。半干旱区在 1978 年发生突变,而湿润区和半湿润区 SDWAI 分别在 1978 年和 1976 年发生突变。

将 1961—2020 年 SDWAI 进行 Morlet 小波分析,从而揭示江-黄-淮流域旱涝急转的周期变化规

律。图 6 为 SDWAI 小波系数实部的变化,其数值越小,SDWAI 越小,反之亦然。此外,小波振幅显示了汛期旱涝急转事件的周期。结果表明,各气候分区 SDWAI 时间序列在多个时间尺度上出现明显的周期性变化。干旱区在 4 ~ 6、12 ~ 18 a 尺度上的周期性震荡较为明显,1998 年以前,在 12 a 尺度上有着较为频繁的周期变化,在突变年之后,周期性震荡的

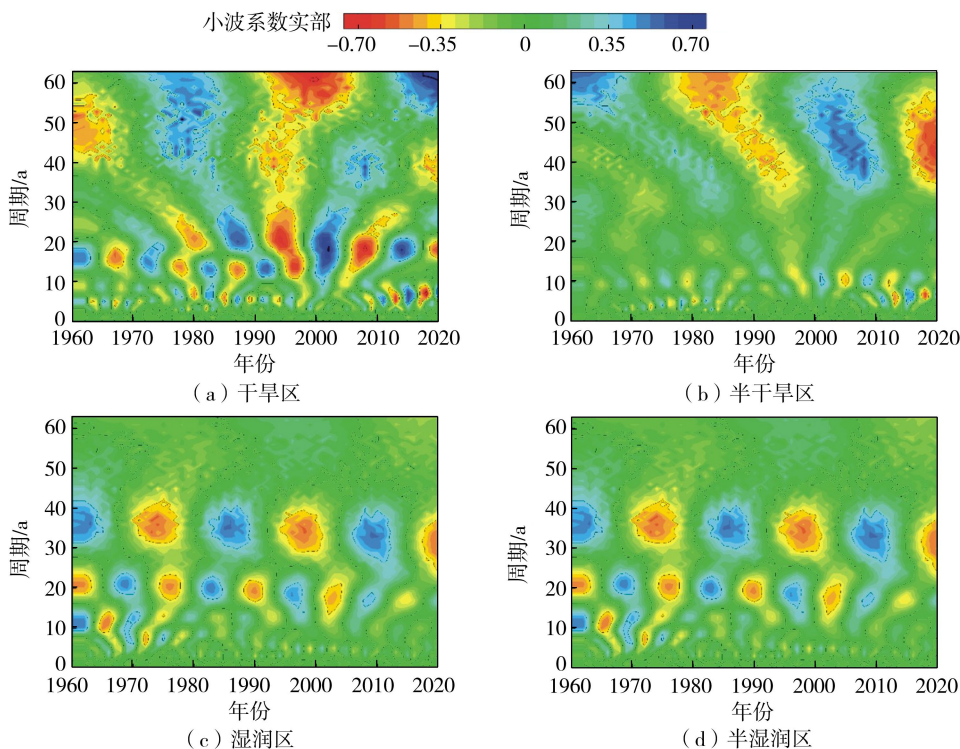


图 6 江-黄-淮流域 SDWAI 时间序列的小波系数实部

Fig. 6 Real part of wavelet coefficients in SDWAI time series in the JHHRB

时间尺度约为 18 a,但其烈度增加,并呈现出涝转旱和旱转涝的交替变化,且其未形成完整的高值中心闭合圈,表明 2020 年后干旱区仍面临着涝转旱的风险。半干旱区则是在 4~10、40~55 a 尺度上存在周期性震荡,同样在 2020 年后仍将是涝转旱的高发区。湿润区在 9~12、18~22、33~40 a 3 个时间尺度上有着显著的周期性震荡,且具有明显的规律性,但其均为轻度的旱涝急转,在人为干预的前提下,可以有效防范旱涝急转事件并尽可能减小旱涝急转给该区域带来的损失。对于半湿润区,可以看出其在突变年之前存在 9~11 a 尺度的旱转涝-涝转旱-旱转涝的周期性变化,在突变年之后没有明显的周期性震荡,但图 5 (d)表明其在 1976 年之后旱涝急转事件增多,涝转旱的程度增大,所以在该区域要多加防范突发性旱涝急转事件的发生,以免带来超出预期的损失。

3.3 旱涝急转事件变化的驱动机制

3.3.1 定性评价

计算不同气候分区 SDWAI 与各驱动因子的 Pearson 相关系数,定性揭示各驱动因子对江-黄-淮流域的旱涝急转事件的影响,结果见表 1。由表 1 可见,不同地区间影响旱涝急转的驱动因子既具有一定的相似性也具有一定的差异性。具体来看,降水与所有气候分区 SDWAI 呈显著的正相关关系,在干旱区,温度和风速与 SDWAI 呈负相关关系,而湿度则与 SDWAI 呈正相关关系。研究表明,温度的升高对干湿特征的变化趋势有不同的贡献。随着温度的升高,空气储水量和饱和蒸汽压增加,从而降低了相对湿度,增加了地表的潜在蒸散量,导致干旱频率和强度的增加<sup>[25]</sup>。与此同时,温度升高是区域洪水事件增加的主要因素。例如热带气旋的频率和强度

表 1 各驱动因子与 SDWAI 之间的 Pearson 相关系数

Table 1 Pearson correlation coefficient between each driving factor and SDWAI

| 驱动因子    | 干旱区    | 半干旱区   | 湿润区    | 半湿润区   |
|---------|--------|--------|--------|--------|
| 降水      | 0.31 * | 0.40 * | 0.22 * | 0.31 * |
| 湿度      | 0.10   | 0.02   | -0.02  | 0.08   |
| 风速      | -0.11  | -0.01  | -0.01  | -0.02  |
| 温度      | -0.15  | -0.06  | 0.00   | 0.05   |
| WPSHII  | 0.31 * | 0.02   | -0.04  | -0.03  |
| SCSSHII | 0.18   | 0.07   | -0.03  | 0.06   |
| AO      | 0.14   | 0.09   | 0.03   | -0.01  |
| NP      | -0.11  | -0.03  | 0.02   | 0.01   |
| AMO     | 0.33 * | 0.05   | -0.03  | -0.05  |
| TSNI    | -0.07  | 0.01   | 0.03   | 0.01   |
| SOI     | 0.05   | 0.05   | -0.05  | 0.03   |
| ENSO    | 0.00   | -0.07  | 0.06   | -0.05  |
| PDO     | -0.11  | -0.09  | 0.02   | 0.01   |

注: \* 表示在  $p<0.05$  水平上显著相关。

显著增大,其每年对黄河流域直接或间接影响有 1~3 次,且历史上的较大洪水大部分与北上台风有着密切的联系<sup>[26]</sup>。此外,大气环流因素对每个气候分区的旱涝急转事件都有一定的影响。例如:WPSHII 与干旱区和半干旱区 SDWAI 正相关,而与湿润区和半湿润区 SDWAI 负相关;SCSSHII 在干旱区、半干旱区和湿润区都对旱涝急转事件存在正向影响;而 AO、AMO、NP 和 PDO 也是干旱区旱涝急转事件的潜在影响因素。

3.3.2 定量分析

利用随机森林算法计算各驱动因子对旱涝急转事件的相对贡献度,结果见图 7。由图 7 可见,气象因子对干旱区、半干旱区、湿润区和半湿润区旱涝急转事件的相对贡献度分别为 39.2%、63.4%、71.1% 和 64.1%,降水较少的干旱区旱涝急转更易受大气环流影响,而在半干旱区、湿润区和半湿润区,气象因子对旱涝急转的发生更具有主导性。由于江-黄-淮流域的干旱区位于高纬度地区,远离海洋和湿润气流,降水量受副热带高压等大气环流的控制,而旱涝急转多与短时强降雨有关,所以干旱区更容易受到大气环流的影响。而湿润区的水汽输送多受海洋和季风的影响,稳定的大气环流模式使得湿润区的降水也相对稳定,短期大气环流的变化不会给湿润区的降水带来较大的波动,因此在湿润区,降水、湿度和温度这些气象因子的作用相对重要,相比之下,大气环流对其影响较小。在干旱区,AMO 对旱涝急转事件的相对贡献度最高,为 19.8%,其次则为降水和温度,相对贡献度分别为 16.0% 和 11.8%。中国西北干旱区降水较多,与 AMO 正相位有关,此时西风减弱,同时来自印度洋和西太平洋的垂直整合水汽增强,干旱区受东亚夏季风 (East

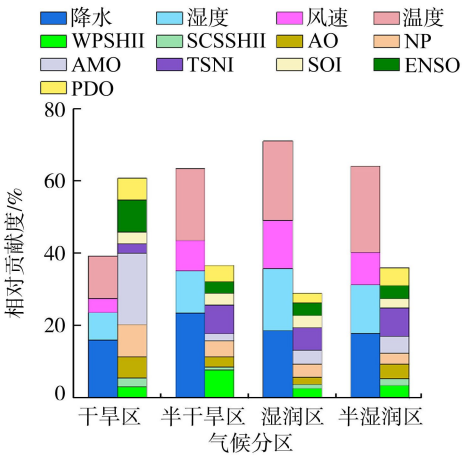


图 7 各驱动因子对旱涝急转事件的相对贡献度  
Fig. 7 Relative contribution of driving factors on drought-flood abrupt alternation events

Asian summer winds, EASM) 影响, 气候呈现干湿交替的趋势<sup>[27]</sup>。在半干旱区, 降水的相对影响最高, 为 23.5%, 其次是温度, 相对贡献度为 19.9%, 而温度对于湿润区和半湿润区的旱涝急转相对贡献度最大, 分别为 22.0% 和 23.8%, 可见在全球气候变化的背景下, 更要防范高温热浪带来的影响。对于大气环流因子, 除 AMO 之外, 对干旱区影响尤为显著的是 AO、NP、ENSO 和 PDO, 其相对贡献度分别为 5.7%、9.0%、8.9% 和 6.1%; 在半干旱区, WPSHII 和 TSNI 对旱涝急转的相对贡献度分别为 7.7% 和 8.0%; 在湿润区和半湿润区, 相比于其他大气环流因子, TSNI 的影响则更为显著, WPSHII 和 TSNI 对旱涝急转的相对贡献度分别为 6.1% 和 7.9%。

气候变化受到太阳活动、大气环流等因素的多重影响, 其中太阳活动通过臭氧引起平流层温度的变化, 从而改变了平流层环流, 并通过动力效应影响对流层的气候<sup>[28]</sup>。TSNI 反映了太阳活动的变化, 其变化周期为 11a, 与半干旱区、湿润区和半湿润区旱涝急转的周期性震荡相吻合。此外, 太阳活动还会引起 PDO 的变化, 而 PDO 通常被认为是北太平洋海表温度(sea surface temperature, SST)异常的主导因素, 并导致 AO 发生变化, 春季 AO 的变化则可以影响随后的 EASM, 东亚季风的异常行为可能导致东亚许多地区发生严重的洪涝、干旱和极端温度事件<sup>[29-30]</sup>。同时, 东亚地区汛期降雨也受到印度季风影响, ENSO 事件可能减弱印度季风, 导致依赖降水输入的干旱区出现旱涝急转事件。

## 4 结 论

- a. 江-黄-淮流域干旱区和半干旱/湿润区的雨季比湿润区滞后 1~2 月, 湿润区和半湿润区是旱涝急转事件的高频发生区, 干旱区更易发生极端旱转涝事件, 湿润区则相反。
- b. 1961—2020 年, 江-黄-淮流域干旱区 SDWAI 呈显著上升趋势, 上升速率为 0.012, 湿润区、半干旱/湿润区则呈下降趋势。干旱区 SDWAI 在 1998 年发生突变, 湿润区、半干旱/湿润区则在 20 世纪 70 年代发生突变。此外, 江-黄-淮流域在 2020 年后仍可能发生旱涝急转事件。
- c. 气象因子和大气环流因子对江-黄-淮流域的 SDWAI 存在非线性的影响。干旱区大气环流因子的作用更为显著, 相比之下, 气象因子在湿润和半干旱/湿润区对旱涝急转事件的发生的贡献更大。

## 参考文献:

[ 1 ] BELLPRAT O, GUEMAS V, DOBLAS-REYES F, et al.

Towards reliable extreme weather and climate event attribution[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1732.

[ 2 ] 张长征, 沈婷, 徐慎晖, 等. 极端天气下特大型城市“水资源-能源-粮食”安全风险研究[J]. 水利经济, 2023, 41(1): 55-61. (ZHANG Changzheng, SHEN Ting, XU Shenhui, et al. Study on the security risk of “water-energy-food” in mega cities under extreme weather[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(1): 55-61. (in Chinese))

[ 3 ] 苑希民, 王小姣, 田福昌, 等. 旱涝交替下驮英灌区年内水资源优化调控研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 8-15. (YUAN Ximin, WANG Xiaojiao, TIAN Fuchang, et al. Study of optimal regulation and control of water resources in Tuoying irrigation area under alternate drought and flood[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 8-15. (in Chinese))

[ 4 ] 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: 156521.

[ 5 ] 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))

[ 6 ] 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.

[ 7 ] 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))

[ 8 ] 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))

[ 9 ] 闪丽洁, 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]. *Acta Geographica 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] 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 (3/4): 1279-1289.
- [12] 李迅, 袁东敏, 尹志聪, 等. 2011 年长江中下游旱涝急转成因初步分析[J]. *气候与环境研究*, 2014, 19 (1): 41-50. (LI Xun, YUAN Dongmin, YIN Zhicong, et al. Preliminary analysis of sudden turn of drought and flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River during 2011[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2014, 19 (1): 41-50. (in Chinese))
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 张轩, 张行南, 王高旭, 等. 长江上游水库入库流量的中长期预报[J]. *水资源保护*, 2022, 38 (4): 131-136. (ZHANG Xuan, ZHANG Xingnan, WANG Gaoxu, et al. Medium and long term forecast of reservoir inflow in upper reaches of the Yangtze River [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38 (4): 131-136. (in Chinese))
- [16] MCKEE T, DOESKEN N, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [C]// *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. Anaheim: American Meteorological Society, 1993: 179-183.
- [17] 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))
- [18] LIU Changhong, YANG Cuiping, YANG Qi, et al. Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11 (1): 1280.
- [19] 徐宗学, 班春广, 张瑞. 我国主要河川径流演变规律与归因及其区域特征[J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44 (1): 1-8. (XU Zongxue, BAN Chunguang, ZHANG Rui. Evolution law, attribution and regional characteristics of runoff for major rivers in China[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44 (1): 1-8. (in Chinese))
- [20] WANG Fei, WANG Zongmin, YANG Haibo, et al. Comprehensive evaluation of hydrological drought and its relationships with meteorological drought in the Yellow River basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 584: 124751.
- [21] YUE Sheng, WANG Chunyuan. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38 (6): 1068.
- [22] PETTTTT A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. *Applied Statistics*, 1979, 28 (2): 126-135.
- [23] MORLET D, PEYRIN F, DESSEIGNE P, et al. Wavelet analysis of high-resolution signal-averaged ECGs in postinfarction patients [J]. *Journal of Electrocardiology*, 1993, 26 (4): 311-320.
- [24] BREIMAN L. Random forests [J]. *Machine Learning*, 2001, 45 (1): 5-32.
- [25] WU Jiefeng, CHEN Xiaohong. Spatiotemporal trends of dryness/wetness duration and severity: the respective contribution of precipitation and temperature [J]. *Atmospheric Research*, 2019, 216: 176-185.
- [26] HUANG Chunchang, PANG Jiangli, ZHA Xiaochun, et al. Impact of monsoonal climatic change on Holocene overbank flooding along Sushui River, middle reach of the Yellow River, China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26 (17/18): 2247-2264.
- [27] GUO Shuyang, GUAN Xiaodan, GAO Linlin, et al. Opposite Atlantic Multidecadal Oscillation effects on dry/wet changes over Central and East Asian drylands [J]. *Atmospheric Research*, 2022, 271: 106102.
- [28] MARUYAMA F, KAI K, MORIMOTO H. Wavelet-based multifractal analysis on a time series of solar activity and PDO climate index [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60 (6): 1363-1372.
- [29] CHEN Shangfeng, CHEN Wen, WU Renguang, et al. Impacts of the Atlantic multidecadal oscillation on the relationship of the spring arctic oscillation and the following East Asian summer monsoon [J]. *Journal of Climate*, 2020, 33 (15): 6651-6672.
- [30] CHEN H, WANG S, 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.