

# 中国春季极端旱涝急转事件时空分布特征研究

尹浩如<sup>1,2</sup>, 杨宇星<sup>3</sup>, 黄菲<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>中国海洋大学透明北极山东省重点实验室, 深海多圈层与地球系统前沿科学中心, 山东 青岛

<sup>2</sup>中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛

<sup>3</sup>海洋动力环境观测与预报重点实验室和中国科学院海洋研究所海洋环流与波动实验室, 山东 青岛

收稿日期: 2026年4月23日; 录用日期: 2026年5月22日; 发布日期: 2026年5月28日

## 摘要

目前, 针对旱涝急转事件的判定尚缺乏统一的指标体系。为克服现有气象干旱指数在春季持续性旱涝研究中存在的全国范围可比性不足、季节针对性欠缺及物理意义不清晰等问题, 并填补春季极端强度旱涝急转事件研究的空白, 本文基于1971~2020年中国地面气象台站逐日降水资料, 构建了适用于表征春季持续性旱涝异常的春季持续性旱涝指数(Spring Persistent Drought-Flood Index, SPDFI)。在此基础上, 采用旋转经验正交函数进行客观分区, 识别出春季旱涝关键区域; 依据SPDFI进一步定义春季极端旱涝急转事件的识别标准, 系统识别了1971~2020年间黄淮与江南两个春季旱涝核心区域发生的所有具有极端强度的旱涝急转事件, 并分析了其时间变化特征。结果表明: 中国春季存在黄淮、江南、西北和华北四个旱涝关键区, 其中黄淮与江南区域方差贡献最大, 是中国春季持续性旱涝异常的核心区域。频域分析结果显示, 在季节内尺度(10~90天)上, 黄淮区域降水异常的显著信号集中于10~20天准双周频段, 而江南区域则以30~60天低频振荡为主。这一差异表明两者可能分别受中高纬度系统与热带/副热带系统的主导调控。两区域春季极端旱涝急转事件的统计结果显示, 黄淮区域两类事件表现出明显的季节锁相特征, 这可能与降水气候态季节内振荡有关。此外, 两区域事件在发生时间上基本相互独立, 未表现出同步性。本文构建的SPDFI及极端旱涝急转事件识别方法, 为中国春季旱涝急转研究提供了新的分析工具与区域划分框架, 研究结果可为深入理解中国春季极端旱涝急转的物理机理奠定基础, 相关影响机制有待进一步研究。

## 关键词

气象干旱指数, 旱涝急转, REOF方法, 极端事件识别

# Spatiotemporal Distribution Characteristics of Extreme Drought-Flood Whiplash Events in China in Boreal Spring

Haoru Yin<sup>1,2</sup>, Yuxing Yang<sup>3</sup>, Fei Huang<sup>1,2\*</sup>

\*通讯作者。

文章引用: 尹浩如, 杨宇星, 黄菲. 中国春季极端旱涝急转事件时空分布特征研究[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(3): 633-647. DOI: 10.12677/ccrl.2026.153069

<sup>1</sup>Frontier Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, Key Laboratory of Transparent Arctic Shandong, Ocean University of China, Qingdao Shandong

<sup>2</sup>College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong

<sup>3</sup>Key Laboratory of Ocean Observation and Forecasting & Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao Shandong

Received: April 23, 2026; accepted: May 22, 2026; published: May 28, 2026

## Abstract

At present, a unified index system for identifying drought-flood whiplash events remains lacking. To address the limitations of existing meteorological drought indices in studying persistent spring droughts and floods—namely insufficient nationwide comparability, lack of seasonal specificity, and ambiguous physical implications—and to fill the gap in research on extreme-intensity drought-flood whiplash events in boreal spring, this study constructs a Spring Persistent Drought-Flood Index (SPDFI) based on daily precipitation data from surface meteorological stations across China for the period 1971~2020. The SPDFI is specifically designed to characterize persistent spring drought and flood anomalies. On this basis, rotated empirical orthogonal function (REOF) analysis is employed for objective regionalization, identifying key regions of spring drought and flood variability. Using the SPDFI, a set of criteria is further established to define extreme spring drought-flood whiplash events. All such extreme-intensity whiplash events occurring between 1971 and 2020 in the two core regions—the Huang-Huai region and the Jiangnan region—are systematically identified, and their temporal characteristics are analyzed. The results reveal four principal drought-flood variability regions in China during boreal spring: Huang-Huai, Jiangnan, Northwest China, and North China. Among these, the Huang-Huai and Jiangnan regions exhibit the largest variance contributions, establishing them as the core areas of persistent spring drought and flood anomalies in China. Frequency-domain analysis shows that, on the intraseasonal timescale (10~90 days), significant signals of precipitation anomalies in the Huang-Huai region are concentrated in the quasi-biweekly band of 10~20 days, whereas the Jiangnan region is dominated by low-frequency oscillations of 30~60 days. This contrast implies that the two regions are primarily governed by mid-to-high latitude systems and tropical/subtropical systems, respectively. Statistical results for extreme spring drought-flood whiplash events in the two regions indicate that events in the Huang-Huai region exhibit a pronounced seasonal phase-locking feature, which may be related to the climatological intraseasonal oscillation of precipitation. In addition, the timing of events in the two regions is largely independent, showing no notable synchronicity. The SPDFI and the identification methodology for extreme drought-flood whiplash events developed in this study provide a new analytical tool and regionalization framework for research on spring drought-flood transitions in China. The findings lay a foundation for a deeper understanding of the physical mechanisms underlying extreme spring drought-flood whiplash events in China, though the associated influencing mechanisms warrant further investigation.

## Keywords

Meteorological Drought Index, Drought-Flood Whiplash Events, Rotated Empirical Orthogonal Function Analysis, Extreme Event Identification

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

旱涝灾害机理及其影响一直是大气科学研究的热点问题[1]-[7]。长期以来,学术界的研究焦点主要集中在季节至年代际等较长时间尺度的持续性旱涝异常上,但近年来对在季节内尺度上的旱涝剧烈转换——即“旱涝急转”的关注越来越多。旱涝急转指的是在同一季节内,旱涝在短期内交替出现的现象[8] [9]。旱涝急转作为一种特殊的复合型极端事件[10],它反映了极端旱涝事件在短期内的共存与交替。即便发生了旱涝急转事件,季节平均降水量仍可能接近常年,但区域将在短期内相继遭受旱灾与涝灾的双重冲击,往往比单一的旱涝事件具有更强的破坏性[11]。

现有气象干旱指数在应用于中国春季旱涝研究时仍存在不足[12],核心问题在于多数指数并非针对春季设计,难以适应春季独特的气候统计特征。降水观测序列长、数据可靠性高且物理意义清晰,是单因素气象干旱指数中最常采用的气象要素。常用的单因素气象干旱指数包括降水量距平百分率(precipitation anomaly in percentage, PA), 标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)以及加权平均降水量(weighted average of precipitation, WAP)等。其中,降水量距平百分率使用某时段的降水量与同期气候平均降水量之差除以同期气候平均降水量,并换算成百分比得到[13]。该指数在春季应用时面临“无雨日”占比过高的困境。本文基于中国东部 1955 个台站 1971~2020 年 4~6 月逐日降水资料的统计结果显示,春季日降水量  $< 0.1 \text{ mm}$  的无雨日占比高达 60%。当某时段全部为无雨日时,该时段累计降水量为零,PA 恒为-100%。PA 虽能有效反映极端降水强度,但无法有效区分极端干旱的强度。标准化降水指数(SPI)通过将降水量序列拟合为  $\Gamma$  分布(或皮尔逊III型分布),再经标准正态化处理得到[14]。然而,春季高频无雨日导致降水序列包含大量零值,拟合  $\Gamma$  分布时易出现参数估计不稳定,尤其在短时间尺度上问题更为突出。此外,SPI 的正态标准化处理虽使指数服从标准正态分布,但导致其正负异常值在实际降水量异常上并不对等。具体而言,SPI = -2 所代表的降水短缺幅度与 SPI = 2 所代表的盈余幅度通常差异显著,该指数无法真实反映降水异常的相对强度。加权平均降水量(WAP)通过赋予近期降水更高权重,能够逐日动态反映区域的干湿状况[15]。将 WAP 应用于全国范围春季旱涝对比时,权重系数缺乏普适的物理基础。衰减系数的确定需依赖敏感性试验,不同气候区乃至同一区域不同季节适用的权重各异,难以建立全国统一、物理意义明确的评价标准。综上所述,现有基于降水的干旱指数(PA, SPI, WAP)在春季、全国尺度这一特定应用场景下,均存在各自局限,亟需构建一种兼顾季节针对性、全国可比性与物理意义清晰度的新气象干旱指数。

现有研究已从年际、季节内至天气尺度等不同层次,揭示了旱涝急转的形成机理与关键驱动因子。年际尺度上,ENSO 位相转换可为旱涝急转提供稳定的背景环流与水汽条件[16][17];季节内尺度上,以 10~20 天准双周振荡、30~60 天季节内振荡为代表的大气低频信号,通过调控西太平洋副热带高压、水汽输送及对流活动,直接决定旱涝急转的发生时间与演变过程[18];此外,中高纬环流异常、遥相关型及区域地形的不同配置决定了旱涝急转的空间分布、强度差异与区域特征[19]。旱涝急转事件的发生并非单一因子作用的结果,而是多时间尺度、多环流系统协同作用的集中体现[20]。然而,现有研究中针对春季(4~6 月)这一关键冬夏季季节转换期的旱涝急转事件的系统研究相对匮乏,其时空分布特征及其影响机理尚未得到充分揭示。此外,多数机理分析基于旱涝急转个例展开,其结论缺乏普适性。不同旱涝急转事件的强度存在差异[11],但目前尚未有研究专门聚焦该时段内达到极端强度的旱涝急转事件,其时空分布特征及影响机理研究仍处于空白状态,这也正是本文的核心研究目标。

## 2. 数据与方法

### 2.1. 数据

本研究所用的降水观测资料来自中国地面气候资料日值数据集(V3.0)中的逐日降水观测数据。日降水

量定义为每日北京时间 8 时至次日 8 时之间的 24 小时累计降水量。对原始台站降水观测资料进行预处理，具体步骤如下：

1. 台站降水记录需覆盖完整的 50 年时段(1971 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日)。

2. 剔除单站降水量连续缺测超过 3 天的台站以及台站年累计缺测天数超过全年天数 5% (即超过 18 天)的台站。

3. 对于筛选后存在数据缺测、存疑或错误的台站，采用基于中国台站降水的最佳插值方案进行插补 [21]。具体步骤如下：首先，计算各台站气候日降水量( $P_c$ )，定义为该台站 50 年气候平均日降水量经傅里叶截断(0~6 谐波叠加)后得到的年循环序列；接下来，构建逐日降水比值场  $P/P_c$ ，其中  $P$  为观测日降水量， $P_c$  为对应日历日的气候日降水量；最后，采用反距离加权法(inverse distance weighted, IDW)对降水比值场进行空间插值，将插值得到的比值乘以待插值台站的气候日降水量  $P_c$ ，最终得到待插值日的降水量估计值。

4. 在插值过程中，使用待插值台站最邻近的 3 个可用台站进行计算，以确保插值稳定性(被插值台站最远 365 公里范围内可满足三个可用台站条件)。经上述处理后，最终获得涵盖 2070 个台站、时间范围为 1971 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日的连续逐日台站降水数据集。

## 2.2. 方法

### 2.2.1. 春季持续性旱涝指数的定义

本文将春季定义为每年 4 月 1 日至 6 月 30 日。该时段是我国农业生产关键期，同时也是东部季风区旱涝变化剧烈、旱涝急转事件频发的时期。

为突出与旱涝急转相关的季节内时间尺度低频降水异常，本研究采用傅里叶分解对原始降水序列进行预处理。基于 1971~2020 年共 50 年的台站逐日降水资料(已剔除闰年 2 月 29 日)，首先对每年同一日历日的降水进行多年平均，得到长度为 365 天的气候日降水序列。对该序列进行傅里叶分解后，保留均值和前 3 个谐波分量重构得到降水气候年循环，再用逐日原始降水量减去对应日期的年循环分量，获得去除年循环的逐日降水异常序列。

本研究在降水量距平百分率的基础上进行改进，构建了能够动态反映持续性降水异常相对强度的春季持续性旱涝指数(spring persistent drought-flood index, SPDFI)。该指数反映了滑动时段内平均日降水异常相对于该台站春季平均日降水量的偏离程度，物理意义明确，以百分率(%)为单位。其具体计算公式如下：

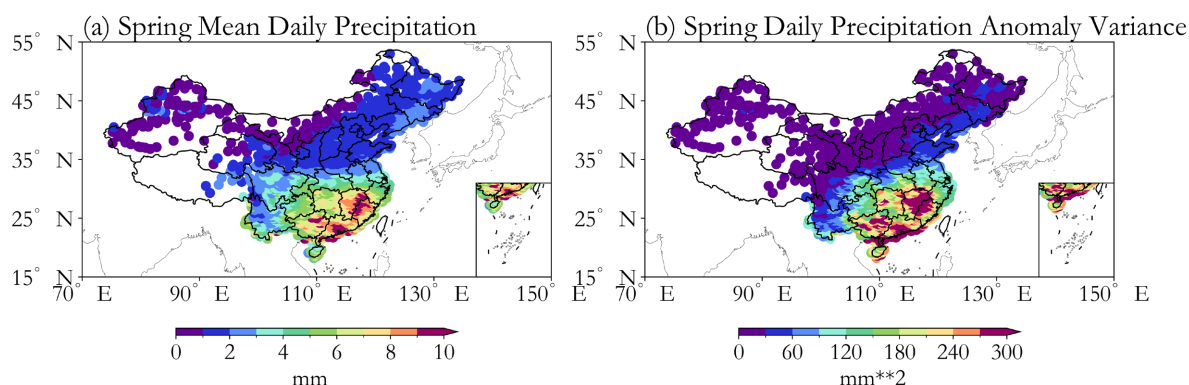
$$P'_i = \frac{1}{n} \sum_{j=i-m}^{i+m} (P_j - \bar{P}_j) \quad (1)$$

$$\text{SPDFI} = \frac{P'_i}{P_c} \times 100\% \quad (2)$$

上述公式中  $P_j$  与  $\bar{P}_j$  分别代表某台站第  $j$  天的原始降水量与该日气候年循环降水量。 $n$  代表滑动窗口时间长度，为奇数。 $m = (n-1)/2$ ，代表以第  $i$  天为中心时间窗口在第  $i$  天前后覆盖的天数。 $P'_i$  代表以第  $i$  天为中心  $n$  天滑动平均后的日降水异常， $P_c$  代表该站春季日降水量，其定义为 1971~2020 年 50 年每年 4~6 月总共 4550 天的逐日降水量均值。

根据台站春季气候日降水量与春季降水异常方差的空间分布(图 1)可以看出，我国春季气候日降水量由东南沿海向西北内陆递减，高值区主要分布于广西东部、广东、江西与福建交界一带，低值区则集中在西北内陆及青藏高原等非季风区。春季日降水异常方差的空间分布与气候日降水量基本一致，同样呈现东南高、西北低的特征，表明我国东部季风区春季降水变率更大，旱涝异常信号更强。

基于上述空间分布特征, 本研究将后续分析范围限定于  $96^{\circ}\text{E}$  以东的台站, 主要依据如下: 一方面,  $96^{\circ}\text{E}$  以西区域气候日降水量与降水方差均较小, 且并非我国春季农业生产的核心区域; 另一方面, 我国  $96^{\circ}\text{E}$  以东大部分区域属于典型季风区, 水汽输送与降水形成机制具有物理一致性, 有利于构建具有统一物理背景的旱涝指数并开展区域间对比分析。与之不同, 西部地区(如新疆、青藏高原)春季降水过程复杂, 受冰雪融水、局地蒸发再循环等非季风过程影响显著, 与东部降水机制存在明显差异。因此, 后续春季旱涝关键区域的识别和极端旱涝急转事件的分析均基于  $96^{\circ}\text{E}$  以东的 1955 个台站。



注: 该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为审图号 GS (2022) 1873 号的标准地图制作, 底图无修改。

**Figure 1.** Spatial distributions of (a) climatological daily precipitation and (b) daily precipitation anomaly variance in spring for 1955 stations east of  $96^{\circ}\text{E}$  in eastern China

**图 1.** 中国东部  $96^{\circ}\text{E}$  以东共 1955 个台站(a)春季气候日降水量和(b)春季日降水异常方差空间分布

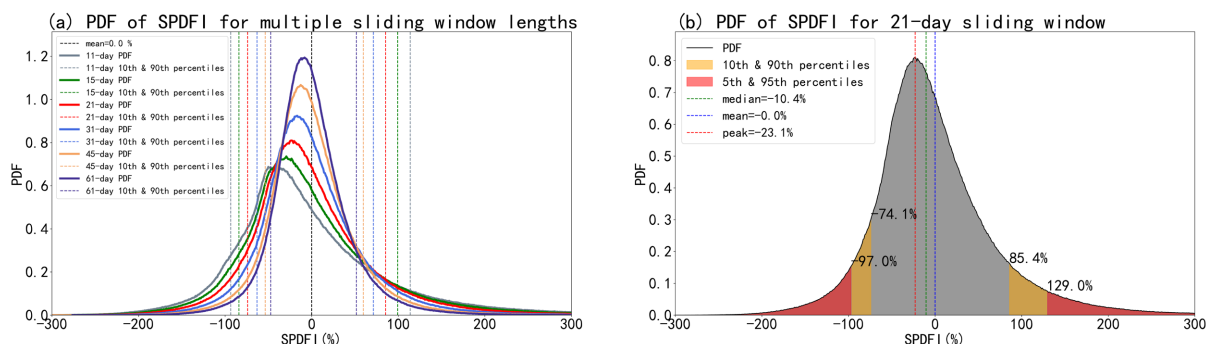
为确定春季持续性旱涝指数(SPDFI)的最优滑动窗口时长, 本研究设计了敏感性试验, 选取 11、15、21、31、45 及 61 天 6 种不同滑动窗口, 基于 1971~2020 年春季(4~6 月)中国东部( $96^{\circ}\text{E}$  以东) 1955 个台站的逐日降水资料, 计算并对比分析不同时长滑动窗口对应 SPDFI 的统计特征(表 1、图 2(a))。结果表明, 随着滑动窗口时长的增加, SPDFI 序列的偏度与峰度呈逐渐减小趋势, 序列分布逐步趋近于正态分布。本研究最终确定 21 天为 SPDFI 的窗口时长, 该窗口长度可较好保留次季节时间尺度的降水异常信号, 契合 SPDFI 聚焦春季持续性旱涝及早涝急转特征的核心需求。进一步延长滑动窗口时长, 虽可继续降低指数偏度、优化序列正态性, 但会过度平滑短周期次季节信号, 导致旱涝异常的阶段性特征被掩盖。因此, 21 天滑动窗口在 SPDFI 序列正态化特征与次季节信号保留之间实现了较优平衡。后文中所有 SPDFI 的计算均采用 21 天滑动窗口, 其详细统计特征参见图 2(b)。

**Table 1.** Statistical characteristics of SPDFI derived from different sliding windows

**表 1.** 不同滑动窗口对应 SPDFI 统计特征

滑动窗口时长(天)	最大值(%)	最小值(%)	偏度	超额峰度
11	5109.7	-382.1	2.423	21.517
15	3707.0	-376.3	2.077	16.768
21	2611.3	-362.1	1.722	12.350
31	1743.1	-326.7	1.391	9.066
45	1382.2	-298.7	1.170	7.355
61	996.8	-276.2	1.060	6.530

文中新定义的春季持续性旱涝指数(SPDFI), 突出了次季节尺度的降水异常信号。SPDFI 通过对滑动窗口内的平均日降水异常除以台站春季平均日降水量实现了指数的无量纲化, 从而使得不同区域台站的 SPDFI 直接可比, 为开展跨区域春季旱涝异常对比及旱涝急转事件的客观识别提供了可靠支撑。



**Figure 2.** (a) Probability density distributions of SPDFI derived from sliding windows of 11, 15, 21, 31, 45 and 61 days (shown by gray, green, red, blue, orange and purple solid lines, respectively). Dashed lines of the corresponding colors represent the 10th and 90th percentiles of SPDFI for each window; (b) Probability density distribution of SPDFI for the 21-day sliding window. Red shading denotes the range of SPDFI below the 10th percentile or above the 90th percentile; orange shading denotes the range between the 10th and 25th percentiles or between the 75th and 90th percentiles. The green, blue and red dashed lines indicate the median, mean and the peak of the SPDFI density, respectively

**图 2.** (a) 基于 11、15、21、31、45 及 61 天滑动窗口(分别以灰色、绿色、红色、蓝色、橙色及紫色实线表示)计算出 SPDFI 概率密度分布。各颜色虚线对应相应窗口下 SPDFI 的第 10 及第 90 百分位数阈值; (b) 21 天滑动窗口下 SPDFI 的概率密度分布。红色填充区域表示 SPDFI 值低于第 10 百分位数或高于第 90 百分位数的区间; 橙色填充区域表示 SPDFI 值介于第 10 与第 25 百分位数之间或第 75 与第 90 百分位数之间的区间。绿色、蓝色及红色虚线分别标识 SPDFI 的中位数、均值及概率密度峰值

### 2.2.2. 春季旱涝关键区域的客观选取

REOF 方法在气象领域中已被广泛用于不同研究区域的客观划分[22] [23]。该方法基于统计特征进行分区, 而非依赖主观判定, 可确保同一分区内台站的变化特征具有高度一致性。为客观识别中国春季持续性旱涝的空间分布特征, 本文采用旋转经验正交函数(REOF)对春季旱涝关键区域进行划分与选取。

### 2.2.3. 极端旱涝急转事件的识别方法

识别某区域春季极端旱涝急转事件的具体流程如下:

1. 设定极端阈值: 基于 1971~2020 年 50 年春季(每年 4~6 月)各区域 SPDFI 指数序列, 采用百分位阈值法, 分别计算 SPDFI 第 10 和第 90 百分位数, 定义为极端旱阈值( $T_d$ )与极端涝阈值( $T_f$ )。

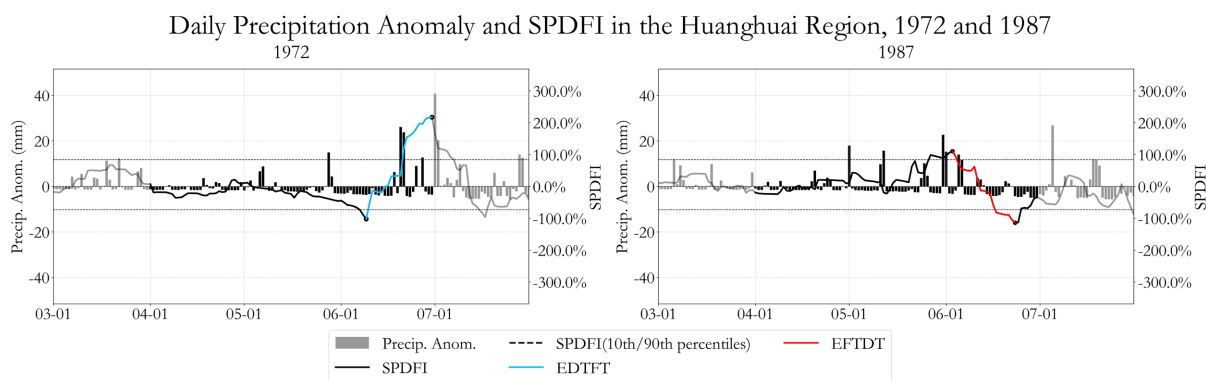
2. 确定事件起始日: 若某日(记为  $D_0$ )的 SPDFI 指数超过极端阈值(即  $D_0 \leq T_d$  或  $D_0 \geq T_f$ ), 且在以该日为中心的 21 天滑动窗口内为最小或最大值, 则将  $D_0$  标记为一次潜在极端旱涝急转事件的起始日。

3. 确定事件结束日: 自起始日之后, 在 45 天的时间间隔内(考虑季节内时间尺度旱涝急转事件的时间周期应小于 90 天), 若某日(记为  $D_1$ )的 SPDFI 超过相反的极端阈值(即起始为极端旱则  $D_1 \geq T_f$ , 起始为极端涝则  $D_1 \leq T_d$ ), 并为 21 天滑动窗口内的最值(结束日为极端旱则要求是 21 天窗口内最小值, 结束日为极端涝则要求是 21 天窗口内最大值), 则将  $D_1$  记为该次极端旱涝急转事件的结束日期。本研究将所有事件的起讫时间限定于 4 月 1 日至 6 月 30 日的范围内, 确保事件的完整发生时段完全处于 4 月 1 日至 6 月 30 日之内。

为了识别春季极端旱涝急转事件, 需要另外计算对应区域 3 月和 7 月两个月份的 SPDFI。其中 3 月和 7 月 SPDFI 的计算方法与 4~6 月份完全一致, 分母部分仍然使用 4~6 月份的春季气候日降水量。满足以上全部条件的事件则被识别为一次极端旱转涝事件(Extreme Drought-to-Flood Transition, EDTFT)或极

端涝转旱事件(Extreme Flood-to-Drought Transition, EFTDT), 具体示例如图 3 所示。

为验证事件识别标准中 45 天间隔阈值的合理性, 分别采用 40 天和 50 天进行对照。相较 45 天阈值(黄淮区识别出 12 次 EFTDT, 江南区识别出 15 次 EDTFT), 40 天阈值下黄淮区域 EFTDT 减少 2 次, 江南区域 EDTFT 减少 1 次; 50 天阈值下则分别增加 3 次和 1 次。黄淮区域 EDTFT 与江南区域 EFTDT 在三种阈值下识别结果完全一致。尽管黄淮区域 EFTDT 对阈值有一定敏感性, 45 天仍能有效捕捉 12 次主要转折过程, 表明以 45 天作为旱涝急转事件的时间间隔是合理且稳健的。此外, 将事件起讫时间限定为 4~6 月, 主要基于两点: 其一, SPDFI 构造中除以台站春季日降水量, 7 月后夏季降水变率增大, 若沿用春季阈值易出现超限, 降低指数适用性。其二, 本文聚焦春季(冬夏转换期)环流特征, 放宽时间边界会混入夏季或冬季信号, 掩盖春季演变特征。故本文将事件起讫时间严格限定于 4~6 月。



**Figure 3.** Example of extreme drought-flood whiplash event identification. SPDFI and daily precipitation anomalies in the Huang-Huai region in 1972 and 1987. Black bars and black solid lines denote daily precipitation anomalies and SPDFI series during April~June, respectively. Gray bars and gray solid lines denote daily precipitation anomalies and SPDFI series for March and July, respectively. Black dashed lines indicate the extreme drought and extreme flood thresholds of SPDFI for the Huang-Huai region. Blue and red solid lines mark the identified extreme drought-to-flood (EDTFT) events and extreme flood-to-drought (EFTDT) events, respectively

**图 3.** 极端旱涝急转事件识别示例。图中为黄淮区域 1972 年和 1987 年 SPDFI 与逐日降水距平。黑色柱状图与黑色实线分别表示 4~6 月逐日降水距平及 SPDFI 序列, 灰色柱状图与灰色实线分别表示 3 月及 7 月的逐日降水距平与 SPDFI 序列。黑色虚线标示黄淮区域 SPDFI 的极端旱与极端涝阈值。蓝色实线与红色实线分别标注识别出的极端旱转涝(EDTFT)事件与极端涝转旱(EFTDT)事件

### 2.2.4. 其他统计方法

为识别旱涝关键区域春季降水异常的显著周期, 本文采用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)进行功率谱分析。对区域平均逐日降水序列去除年循环后, 逐年提取春季(4~6 月)时段, 经去趋势、去均值处理并施加 Tukey 窗以抑制频谱泄漏。通过 FFT 计算逐年功率谱后取 50 年平均, 获得春季降水异常的集合平均功率谱。采用理论红噪声谱作为背景谱检验功率谱峰的统计显著性[24]。

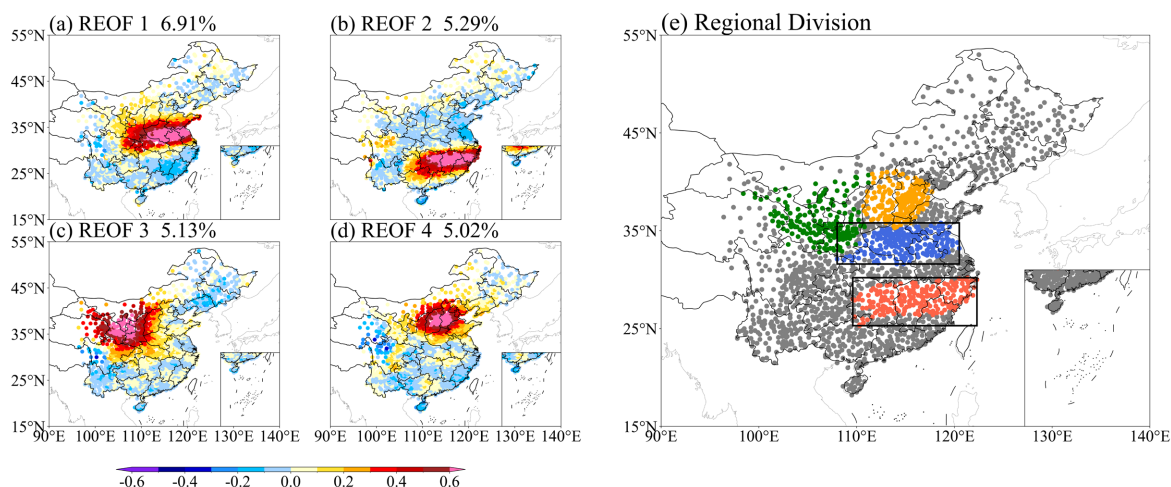
针对极端旱涝急转事件样本量较少的特点, 合成结果的显著性检验采用自助法 t 检验(bootstrap t-test), 以提升小样本条件下统计推断的稳健性[25]。该方法基于有放回重抽样构建统计量经验分布, 不依赖正态分布假定。本文设置重抽样次数为 10,000 次, 相较于传统 t 检验更适用于小样本情形。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 春季旱涝关键区划分

对中国东部 96°E 以东 1955 个台站春季 4~6 月标准化后 SPDFI 序列进行 REOF 分析。EOF 前 15 个模态的累计方差贡献略高于 50%, 能够较好反映原始数据的主要空间变率特征, 同时避免引入过多噪声

模态,故本文选取前15个EOF模态进行REOF分解。方差贡献最大的前4个REOF模态如图4(a)~(d)所示。为验证REOF结果的物理意义,将各模态对应的时间系数回归至春季SPDFI场(图略),前4个REOF模态仅因子载荷较高的台站呈现出显著的回归关系,而低载荷区域的回归系数普遍未通过显著性检验。这验证了以载荷场百分位阈值定义的关键区能够有效识别对各模态方差贡献相对较大的站点集合,具备明确的物理代表性。基于REOF方法共识别出4个春季旱涝关键区,前4个模态依次对应于黄淮区域、江南区域、西北区域及华北区域。



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为审图号GS(2022)1873号的标准地图制作,底图无修改。

**Figure 4.** (a)~(d) The first four spatial modes of the spring standardized SPDFI derived from REOF; Subfigures (a)~(d) show the four REOF modes with the largest variance contributions, and the percentages in the subplot titles indicate the variance contribution of the corresponding modes; (e) Site distribution of the spring extreme drought-flood whiplash events in China based on regional division. Blue, red, green and orange dots represent stations belonging to the Huanghuai, Jiangnan, Northwest and North China regions, respectively; gray dots denote all 1955 eastern China stations used in the REOF analysis. The black boxes delineate the longitudinal and latitudinal extents of the two key study regions, *i.e.*, Huanghuai and Jiangnan

**图 4.** (a)~(d)春季标准化 SPDFI 的 REOF 前 4 个空间模态;子图(a~d)依次为方差贡献最大的前 4 个 REOF 模态,标题中的百分数表示对应模态的方差贡献;(e)春季中国极端旱涝急转事件分区的站点分布。蓝色、红色、绿色及橙色散点分别表示黄淮区域、江南区域、西北区域及华北区域所包含的台站;灰色散点为 REOF 分析所用的全部 1955 个东部台站。黑色框线标示黄淮与江南两个重点研究区域的经纬度范围

**Table 2.** Statistical characteristics of SPDFI over the Huanghuai and Jiangnan regions

**表 2.** 黄淮与江南区域 SPDFI 的统计特征

区域名称	均值 (%)	最大值 (%)	最小值 (%)	90 百分位阈值 (%)	10 百分位阈值 (%)	偏度	超额峰度	标准差
黄淮区域	-2	285	-152	84	-73	0.92	1.51	0.64
江南区域	-2	182	-76	52	-41	0.85	1.16	0.37

为进一步明确各 REOF 模态的空间影响核心区,本文对每个旋转后的因子载荷场计算所有站点因子载荷的绝对值,将绝对值超过 90 百分位阈值的站点定义为该模态的高载荷核心区。鉴于西北区域与黄淮区域存在 3 个重叠台站,西北区域与华北区域存在 14 个重叠台站,在区域划分时各区域均已剔除全部重叠台站。由于方差贡献最大的黄淮与江南区域地处中国东部季风区,春季降水量及变率相对较大且对农业生产影响显著,故选取上述两区域作为本文重点研究的春季旱涝核心区。其中,黄淮区域包含 193 个台站,区域范围为 108.0°E~120.5°E、31.6°N~35.8°N;江南区域包含 196 个台站,区域范围为 109.6°E~122.3°E、

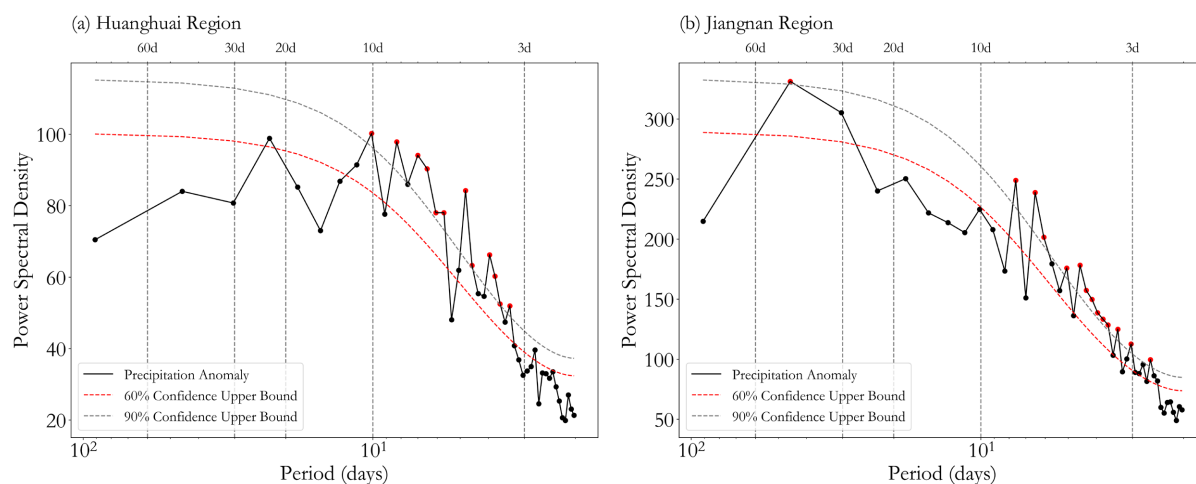
25.3°N~30.2°N。区域划分及各旱涝关键区内台站的具体空间分布如图 4(e)所示。

在进行上述旱涝关键区划分后,将区域内所有台站 SDPFI 的均值作为该区域的 SPDFI 序列。黄淮和江南两个春季旱涝核心区 SPDFI 的统计特征见表 2。

### 3.2. 黄淮和江南区域春季降水异常的周期特征

对黄淮与江南区域春季降水异常的功率谱分析结果如图 5 所示。两区域降水周期特征呈现显著差异,表明二者分别受控于不同的环流系统与物理过程。

黄淮区域春季降水异常在天气尺度(3~7 天)的大部分周期 10 天左右的准双周时间尺度上存在显著信号,而 30~60 天的低频信号未通过显著性检验。这一特征可能与春季亚洲中高纬环流由冬季型向夏季型转换的季节进程密切相关。4~6 月正值环流转型的关键过渡期,西风带斜压性较强、高频瞬变扰动活跃 [26],有利于激发显著的天气尺度降水异常。10~20 天周期则对应于东北冷涡、西伯利亚高压及乌拉尔山位势高度异常等相对低频系统的振荡尺度 [27]-[29]。因此,黄淮春季降水异常的准双周显著信号,可能是中高纬环流季节转换期低频系统活跃在降水上的直接体现。此外,30~60 天频段未通过显著性检验,则可能与东亚夏季风的季节进程有关:南海夏季风平均于第 28 候爆发 [30],东亚夏季风主体于 6 月中下旬北推至黄淮流域 [31],春季期间热带低频模态(30~60 天)对该区域的影响较弱。



**Figure 5.** Power spectra of spring regional mean precipitation anomalies for (a) the Huang-Huai region and (b) the Jiangnan region. Black solid lines denote the ensemble mean power spectrum of daily precipitation anomalies for 50 spring seasons (91 days each) over 1971~2020. Red solid and gray dashed lines indicate the 60% and 90% confidence upper limits of the red noise spectrum, respectively. Red dots mark periods where the observed power spectral density exceeds the 90% confidence limit (*i.e.*, passes the 90% significance test), and black dots mark periods that do not

**图 5.** (a)黄淮区域与(b)江南区域春季区域平均降水异常功率谱。黑色实线为 1971~2020 年 50 年春季(每年 91 天)逐日降水异常的集合平均功率谱。红色实线表示红噪声谱的 60%置信上限,灰色虚线表示红噪声谱的 90%置信上限。红色散点表示该周期对应功率谱密度超过 90%置信上限(即通过 90%显著性检验),黑色散点表示未超过

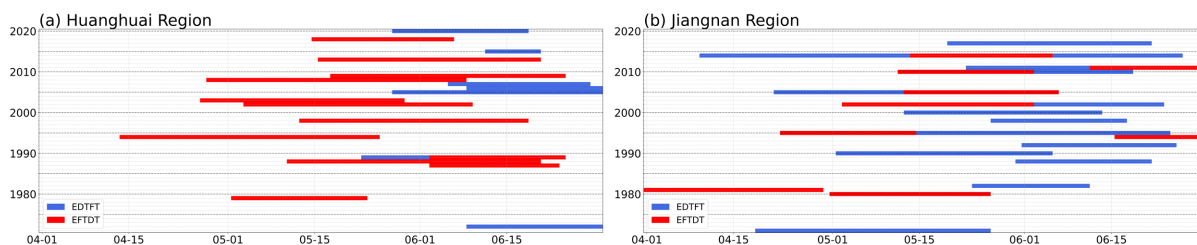
江南区域春季降水异常则表现出与黄淮区域不同的周期特征:在 30~60 天季节内振荡时间尺度上存在 45 天左右的显著信号,天气尺度(3~7 天)的绝大部分频段同样显著,但准双周尺度(10~20 天)的所有周期均未通过显著性检验。45 天左右的显著周期可能与北半球夏季季节内振荡第一模态(BSISO1)有关。BSISO1 是亚洲夏季风区最主要的低频模态之一,具有 30~60 天振荡周期,并与东传 MJO 存在协同作用 [32]。BSISO1 相关的环流异常信号在季风爆发前的春季即已出现,可通过影响西太平洋副热带高压的强度和位置,进而调制江南区域的水汽输送。与此同时,西太平洋副热带高压本身也具有显著的 30~60 天

振荡特征[33],其位置变化在调节江南降水中起关键作用。天气尺度信号一方面可能来源于热带对流系统的短周期波动并向西北传播影响江南,另一方面中高纬 Rossby 波列的传播亦可产生贡献。尽管已有研究指出江南春季降水在部分年份存在显著的准双周振荡[34],但该周期信号的年际差异较大,且不同月份间主导周期亦可能不同,致使准双周振荡未能在 50 年气候平均的功率谱中表现为统计显著的周期。

综上,黄淮与江南区域春季降水在显著周期上的差异反映了两地主导物理机制的不同:黄淮区域主要受中高纬西风带系统及其季节转换过程控制,而江南区域则主要受热带/副热带低频模态(BSISO1 与西太平洋副热带高压)的调制,由此导致二者在春季降水显著周期上呈现明显差异。

### 3.3. 黄淮区域春季极端旱涝急转事件的统计特征

黄淮区域极端旱涝急转事件表现出明显的季节锁相特征。具体而言,极端涝转旱事件(EFTDT)主要起始于 4 月下旬至 5 月中旬,多数事件于 6 月中下旬结束;极端旱转涝事件(EDTFT)的起始时间则集中于 5 月下旬至 6 月上旬,除一次事件外,均结束于 6 月中下旬(图 6(a))。黄淮区域两类极端旱涝急转事件所呈现的季节锁相特征,可能与气候态季节内振荡(climatological intraseasonal oscillation, CISO)干、湿位相的交替有关[35],而中国降水亦存在显著的 CISO 信号[36]。本文构建的指数在构造过程中保留了降水季节内尺度中的相对低频分量,因此指数中所含的 CISO 信号很可能是上述季节锁相特征的主要成因。



**Figure 6.** (a) Huanghuai region and (b) Jiangnan region: temporal distribution of spring extreme drought-flood whiplash events. Blue and red indicate the time ranges of extreme drought-to-flood transition (EDTFT) and extreme flood-to-drought transition (EFTDT), respectively. Dashed lines mark the years ending with 5 or 0

**图 6.** (a) 黄淮区域与 (b) 江南区域春季极端旱涝急转事件时间分布图。图中蓝色和红色分别代表极端旱转涝(EDTFT)和极端涝转旱(EFTDT)事件的时间范围。虚线表示年份末尾为 5 或 0 的年份

**Table 3.** Statistical characteristics of EFTDT over the Huanghuai region

**表 3.** 黄淮区域极端涝转旱事件(EFTDT)统计特征

开始日期	结束日期	极端涝位相强度	极端旱位相强度	急转强度	持续时间(天)
1979-5-2	1979-5-23	89%	-88%	177%	21
1987-6-3	1987-6-23	111%	-114%	225%	20
1988-5-11	1988-6-20	89%	-146%	235%	40
1989-6-3	1989-6-24	124%	-120%	244%	21
1994-4-14	1994-5-25	90%	-83%	173%	41
1998-5-13	1998-6-18	161%	-122%	283%	36
2002-5-4	2002-6-9	169%	-92%	260%	36
2003-4-27	2003-5-29	122%	-86%	207%	32
2008-4-28	2008-6-8	122%	-76%	198%	41
2009-5-18	2009-6-24	110%	-91%	201%	37
2013-5-16	2013-6-20	147%	-106%	253%	35
2018-5-15	2018-6-6	150%	-108%	258%	22

根据表 3~5, 1971~2020 年春季黄淮区域共发生 12 次 EFTDT 事件, EFTDT 事件的极端涝位相平均强度为 124%, 极端旱位相的平均强度为-103%, 急转强度平均为 226%, 平均持续时长为 31.8 天。黄淮区域总共发生过 7 次 EDTFT 事件。EDTFT 事件的极端旱位相平均强度为-95%, 极端涝位相的平均强度为 198%, 急转强度平均为 294%, 平均持续时长为 19.6 天。黄淮区域两类极端旱涝急转事件除极端旱位相强度外, 在极端涝位相强度, 急转强度以及持续时间上均存在显著差异。上述差异性可能暗示黄淮区域两类极端旱涝急转事件的环流成因存在差异。

**Table 4.** Statistical characteristics of EDTFT over the Huanghuai region

**表 4.** 黄淮区域极端旱转涝事件(EDTFT)统计特征

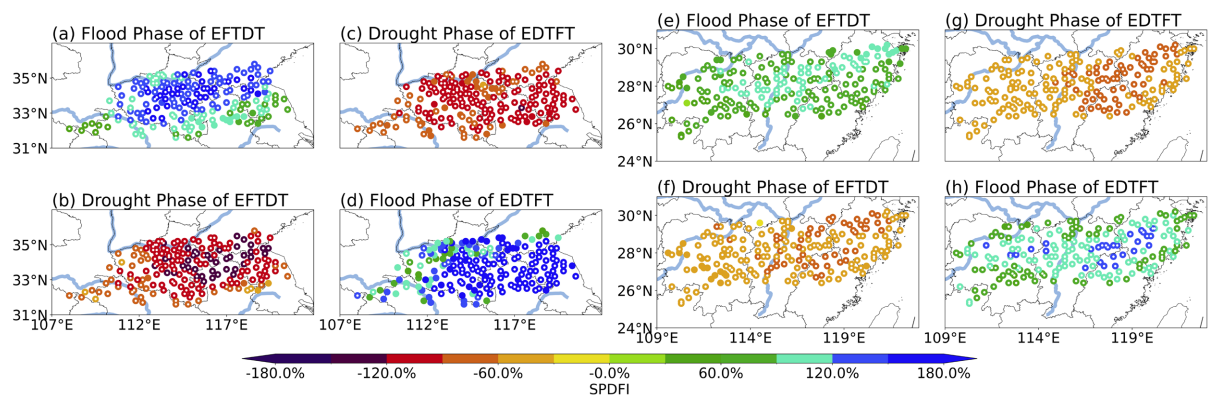
开始日期	结束日期	极端旱位相强度	极端涝位相强度	急转强度	持续时间(天)
1972-6-9	1972-6-30	-102%	217%	320%	21
1989-5-23	1989-6-3	-84%	124%	208%	11
2005-5-28	2005-6-30	-99%	173%	273%	33
2006-6-9	2006-6-30	-120%	261%	381%	21
2007-6-6	2007-6-28	-79%	270%	348%	22
2015-6-12	2015-6-20	-84%	144%	228%	8
2020-5-28	2020-6-18	-96%	200%	297%	21

**Table 5.** Comparison of statistical characteristics between the two types of extreme drought-flood whiplash events in the Huanghuai region

**表 5.** 黄淮区域两类极端旱涝急转事件统计特征对比

事件类型	极端旱位相强度	极端涝位相强度	急转强度	持续时间(天)
EFTDT	-103%	124%*	226%*	31.8*
EDTFT	-95%	198%*	294%*	19.6*

注: \*代表该统计量通过显著性水平  $\alpha = 0.05$  的 Bootstrap t 检验。



**Figure 7.** (a)~(d) Huanghuai region: composite fields (scatter plots) of station-based SPDFI for the EFTDT extreme wet phase (a); EFTDT extreme dry phase (b); EDTFT extreme dry phase (c); and EDTFT extreme wet phase (d); (e)~(h) Jiangnan region: composite fields (scatter plots) of station-based SPDFI for the EFTDT extreme wet phase (e); EFTDT extreme dry phase (f); EDTFT extreme dry phase (g); and EDTFT extreme wet phase (h). Stations marked with white dots indicate that their composite SPDFI values are significantly different from zero based on the Bootstrap t-test at the significance level  $\alpha = 0.05$

**图 7.** (a)~(d)黄淮区域: 分别为 EFTDT 极端涝位相(a); EFTDT 极端旱位相(b); EDTFT 极端旱位相(c)及 EDTFT 极端涝位相(d)的台站 SPDFI 合成场(散点图); (e)~(h) 江南区域: 分别为 EFTDT 极端涝位相(e); EFTDT 极端旱位相(f); EDTFT 极端旱位相(g)及 EDTFT 极端涝位相(h)的台站 SPDFI 合成场(散点图)。图中白色散点标记的台站表示其 SPDFI 合成值与 0 的差异通过显著性水平  $\alpha = 0.05$  的 Bootstrap t 检验

黄淮区域两类极端旱涝急转事件中极端旱、涝位相的台站 SPDFI 合成结果如图 7(a)所示。在两类事件的极端旱与极端涝位相, 区域内大部分台站均通过  $\alpha = 0.05$  显著性水平的统计检验, 表明本文选取的黄淮关键区具有良好的空间代表性。进一步对比空间分布可见, 两类事件极端涝位相的 SPDFI 场存在差异: EFTDT 事件的极端涝位相中, SPDFI 高值中心主要位于黄淮北部; EDTFT 事件的极端涝位相中, 强异常信号则集中于黄淮东部与南部。此外, EFTDT 事件极端旱位相比较强的异常区主要分布在黄淮中东部, 而 EDTFT 事件极端旱位相中台站 SPDFI 强度的空间分布则相对均匀。

### 3.4. 江南区域春季极端旱涝急转事件的统计特征

1971~2020 年春季, 江南区域共识别出 15 次 EDTFT 事件(表 6), 其极端旱位相平均强度为-55%, 极端涝位相平均强度为 97%, 急转强度平均为 152%, 事件平均持续时长为 26.1 天(表 8)。共识别出 9 次 EFTDT 事件(表 7), 其极端旱位相平均强度为-53%, 极端涝位相平均强度为 82%, 急转强度平均为 135%, 事件平均持续时长为 22.6 天(表 8)。统计检验结果表明, 江南区域两类极端旱涝急转事件在极端旱位相强度、极端涝位相强度、急转强度及持续时长上均无显著性差异。此外, 本文所采用的极端旱涝急转事件识别方法, 在江南区域成功捕捉到 2011 年长江中下游地区发生的极端旱涝急转事件, 该事件已被国内外相关研究广泛探讨与证实[16]-[18], 进一步证明了本研究方法的可靠性。

Table 6. Statistical characteristics of EDTFT over the Jiangnan region

表 6. 江南区域极端旱转涝事件(EDTFT)统计特征

开始日期	结束日期	极端旱位相强度	极端涝位相强度	急转强度	持续时间(天)
1971-4-19	1971-5-26	-44%	81%	125%	37
1982-5-24	1982-6-11	-47%	90%	137%	18
1988-5-31	1988-6-21	-53%	59%	113%	21
1990-5-2	1990-6-5	-46%	56%	103%	34
1992-6-1	1992-6-25	-59%	118%	177%	24
1995-5-14	1995-6-24	-51%	133%	184%	41
1998-5-27	1998-6-17	-53%	182%	235%	21
2000-5-13	2000-6-13	-72%	85%	158%	31
2002-6-2	2002-6-23	-76%	83%	159%	21
2005-4-22	2005-5-13	-44%	66%	109%	21
2010-6-2	2010-6-18	-41%	96%	137%	16
2011-5-23	2011-6-12	-74%	97%	171%	20
2014-4-10	2014-5-14	-46%	67%	112%	34
2014-6-5	2014-6-26	-59%	87%	146%	21
2017-5-20	2017-6-21	-58%	155%	213%	32

江南区域春季极端旱涝急转事件时间分布如图 6(b)所示。在分析黄淮与江南区域极端旱涝急转事件的关联性时发现, 尽管春季标准化 SPDFI 场的 REOF 第一、二模态均显示两区域旱涝异常在空间上呈反位相分布, 但这一大尺度空间关系并未体现于两类极端事件的时间同步性上。两区域不同类型极端旱涝急转事件的发生在时间上基本相互独立, 仅个别年份存在重合。具体而言, 黄淮区域极端旱转涝(EDTFT)

与江南区域极端涝转旱(EFTDT)事件仅在 2005 年同期出现; 黄淮区域极端涝转旱(EFTDT)与江南区域极端旱转涝(EDTFT)事件则分别于 1988 年、1998 年及 2002 年同期发生。进一步计算两区域春季 SPDFI 的同期相关系数, 结果表明二者仅呈弱负相关(相关系数  $r = -0.14$ , 且未通过显著性水平  $\alpha = 0.05$  的显著性检验)。这一结果进一步证实, 尽管黄淮与江南区域在春季同期易呈现相反的旱涝异常空间分布, 但两区域极端旱涝急转过程的发生基本相互独立。

**Table 7.** Statistical characteristics of EFTDT over the Jiangnan region

**表 7.** 江南区域极端涝转旱事件(EFTDT)统计特征

开始日期	结束日期	极端涝位相强度	极端旱位相强度	急转强度	持续时间(天)
1980-5-1	1980-5-26	69%	-52%	121%	25
1981-4-1	1981-4-29	86%	-51%	137%	28
1994-6-16	1994-6-30	132%	-48%	179%	14
1995-4-23	1995-5-14	80%	-51%	131%	21
2002-5-3	2002-6-2	72%	-76%	148%	30
2005-5-13	2005-6-6	66%	-42%	108%	24
2010-5-12	2010-6-2	71%	-41%	113%	21
2011-6-12	2011-6-30	97%	-58%	155%	18
2014-5-14	2014-6-5	67%	-59%	126%	22

**Table 8.** Comparison of statistical characteristics between the two types of extreme drought-flood whiplash events in the Jiangnan region

**表 8.** 江南区域两类极端旱涝急转事件统计特征对比

事件类型	极端旱位相强度	极端涝位相强度	急转强度	持续时间(天)
EFTDT	-53%	82%	135%	22.6
EDTFT	-55%	97%	152%	26.1

与黄淮区域相比(图 7(a)), 江南区域两类极端旱涝急转事件中极端旱、涝位相的平均强度相对偏弱(图 7(b))。合成分析结果显示, 江南区域在极端旱、涝位相, 大部分台站 SPDFI 通过  $\alpha = 0.05$  的显著性检验, 表明江南关键区的选取同样具有良好的合理性与代表性。从空间分布形态来看, 江南区域 EFTDT 与 EDTFT 两类事件的极端旱、涝异常空间分布特征较为一致, 高值中心的位置无明显差异。江南中部区域在上述四个位相中旱涝异常强度相对突出, 为江南区域内 SPDFI 异常最强的地区。

## 4. 结论与展望

### 4.1. 结论

(1) 基于新构建的春季持续性旱涝指数 SPDFI 的 REOF 客观分区结果表明, 春季中国存在黄淮、江南、西北和华北四个旱涝关键区。其中黄淮区域、江南区域为方差贡献最大、旱涝变化最集中的两个旱涝核心区。

(2) 对黄淮和江南两个区域春季降水异常的频域分析结果显示, 黄淮和江南区域春季降水异常均存在显著的天气尺度振荡周期。黄淮区域在 10~20 天准双周时间尺度上存在显著信号, 而 30~60 天季节内振荡时间尺度的信号不显著。相反, 江南区域在 30~60 天季节内振荡时间尺度上信号显著, 准双周时间

尺度的信号则不显著。两区域降水显著周期上的差异，反映了二者主导物理机制的不同：黄淮春季降水异常可能受中高纬西风带系统及其季节转换过程的控制，而江南则可能主要受热带/副热带系统(BSISO1和西太平洋副热带高压)的调制。

(3) 基于 SPDFI，本研究首次对黄淮和江南两个春季旱涝核心区域具有极端强度的旱涝急转事件进行了识别，对所有极端旱涝急转事件的极端旱、涝位相强度，急转强度和持续时间等特征量进行了统计，并分析了其时间分布特征。黄淮区域春季两类极端旱涝急转事件具有季节锁相特征，可能源于该区域的降水气候态季节内振荡(CISO)信号。尽管 REOF 结果显示黄淮与江南区域旱涝异常易呈反位相特征，但两区域极端旱涝急转事件在时间上基本相互独立，仅少数年份不同类型极端旱涝急转事件同步发生。

## 4.2. 展望

本研究主要聚焦于春季持续性旱涝指数构建、旱涝关键区识别及极端旱涝急转事件的时空特征分析，受篇幅所限，尚未深入探讨黄淮、江南区域极端旱涝急转事件的大气环流异常特征及其影响机理。未来将进一步分析黄淮和江南两区域中极端旱涝急转事件对应的环流异常特征，揭示不同区域极端旱涝急转事件的物理成因与机制差异。

## 参考文献

- [1] 王绍武, 赵宗慈. 近五百年我国旱涝史料的分析[J]. 地理学报, 1979(4): 329-341.
- [2] 叶笃正, 黄荣辉. 我国长江黄河两流域旱涝规律成因与预测研究的进展、成果与问题[J]. 地球科学进展, 1991(4): 24-29.
- [3] 黄荣辉, 孙凤英. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响[J]. 大气科学, 1994(2): 141-151.
- [4] Dai, A. (2011) Drought under Global Warming: A Review. *WIREs Climate Change*, **2**, 45-65. <https://doi.org/10.1002/wcc.81>
- [5] Dai, A. (2013) Increasing Drought under Global Warming in Observations and Models. *Nature Climate Change*, **3**, 52-58. <https://doi.org/10.1038/nclimate1633>
- [6] Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., *et al.* (2013) Global Flood Risk under Climate Change. *Nature Climate Change*, **3**, 816-821. <https://doi.org/10.1038/nclimate1911>
- [7] Trenberth, K.E., Dai, A., van der Schrier, G., Jones, P.D., Barichivich, J., Briffa, K.R., *et al.* (2014) Global Warming and Changes in Drought. *Nature Climate Change*, **4**, 17-22. <https://doi.org/10.1038/nclimate2067>
- [8] 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(14): 1717-1724.
- [9] 吴志伟, 李建平, 何金海, 等. 正常季风年华南夏季“旱涝并存、旱涝急转”之气候统计特征[J]. 自然科学进展, 2007(12): 1665-1671.
- [10] Qiao, Y., Xu, W., Wu, D., Meng, C., Qin, L., Li, Z., *et al.* (2022) Changes in the Spatiotemporal Patterns of Dry/Wet Abrupt Alternation Frequency, Duration, and Severity in Chinese Mainland, 1980-2019. *Science of the Total Environment*, **838**, Article ID: 156521. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156521>
- [11] Zhang, Y., You, Q., Ullah, S., Chen, C., Shen, L. and Liu, Z. (2023) Substantial Increase in Abrupt Shifts between Drought and Flood Events in China Based on Observations and Model Simulations. *Science of the Total Environment*, **876**, Article ID: 162822. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162822>
- [12] 彭窈, 谭勇展, 蒋熙, 等. 几种旱涝指数在华南春季适用性的对比分析[J]. 广东气象, 2022, 44(5): 6-10, 42.
- [13] 全国气候与气候变化标准化技术委员会(SAC/TC540). GB/T20481-2017 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [14] McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. (1993) The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Anaheim, 17-22 January 1993, 179-184.
- [15] Lu, E. (2009) Determining the Start, Duration, and Strength of Flood and Drought with Daily Precipitation: Rationale. *Geophysical Research Letters*, **36**, L12707. <https://doi.org/10.1029/2009gl038817>

- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 童金, 徐海明. 长江中下游旱涝急转年多尺度低频振荡特征及其对旱涝急转的影响[J]. 热带气象学报, 2014, 30(4): 707-718.
- [19] 王映思, 肖天贵, 董雪峰. 1961-2019 年中国西南地区夏季长周期旱涝急转与大气环流特征[J]. 高原气象, 2021, 40(4): 760-772.
- [20] Shi, W., Huang, S., Liu, D., Huang, Q., Han, Z., Leng, G., *et al.* (2021) Drought-Flood Abrupt Alternation Dynamics and Their Potential Driving Forces in a Changing Environment. *Journal of Hydrology*, **597**, Article ID: 126179. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126179>
- [21] Han, J., Miao, C., Gou, J., Zheng, H., Zhang, Q. and Guo, X. (2023) A New Daily Gridded Precipitation Dataset for the Chinese Mainland Based on Gauge Observations. *Earth System Science Data*, **15**, 3147-3161. <https://doi.org/10.5194/essd-15-3147-2023>
- [22] 叶瑾琳, 王绍武, 李晓东. 中国东部旱涝型的研究[J]. 应用气象学报, 1997(1): 70-78.
- [23] 赵翠光, 赵声蓉. 华北及周边地区夏季分区客观降水预报[J]. 应用气象学报, 2011, 22(5): 558-566.
- [24] Gilman, D.L., Fuglister, F.J. and Mitchell, J.M. (1963) On the Power Spectrum of "Red Noise". *Journal of the Atmospheric Sciences*, **20**, 182-184. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020<0182:otpson>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0182:otpson>2.0.co;2)
- [25] Efron, B., and Tibshirani, R.J. (1994) An Introduction to the Bootstrap. Chapman and Hall/CRC.
- [26] 布和朝鲁, 林大伟, 齐道日娜, 等. 亚洲中高纬环流春夏季节转换过程的关键特征[J]. 大气科学, 2022, 46(1): 151-167.
- [27] 刘慧斌, 温敏, 何金海, 等. 东北冷涡活动的季节内振荡特征及其影响[J]. 大气科学, 2012, 36(5): 959-973.
- [28] 马宁, 何丽焯, 梁苏洁, 等. 京津冀冬季冷空气过程的低频特征及西伯利亚高压低频变化的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(3): 485-496.
- [29] 徐彬羽, 姚素香, 孙庆飞. 冬季乌拉尔山阻塞高压建立和维持与位势高度季节内振荡的联系[J]. 高原气象, 2023, 42(6): 1548-1561.
- [30] Wang, B., Ho, L., Zhang, Y. and Lu, M. (2004) Definition of South China Sea Monsoon Onset and Commencement of the East Asia Summer Monsoon. *Journal of Climate*, **17**, 699-710. <https://doi.org/10.1175/2932.1>
- [31] Wang, B. and Ho, L. (2002) Rainy Season of the Asian-Pacific Summer Monsoon. *Journal of Climate*, **15**, 386-398. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<0386:rsotap>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0386:rsotap>2.0.co;2)
- [32] Lee, J., Wang, B., Wheeler, M.C., Fu, X., Waliser, D.E. and Kang, I. (2013) Real-Time Multivariate Indices for the Boreal Summer Intraseasonal Oscillation over the Asian Summer Monsoon Region. *Climate Dynamics*, **40**, 493-509. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1544-4>
- [33] 苏同华, 薛峰, 陈敏艳, 等. 季节内振荡影响西太平洋副热带高压两次北跳的机制[J]. 大气科学, 2017, 41(3): 437-460.
- [34] 郭浩康, 李春, 石剑. 2021 年 5 月江南持续强降水的准双周振荡及可能成因[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2023, 53(11): 11-23.
- [35] Wang, B. and Xu, X. (1997) Northern Hemisphere Summer Monsoon Singularities and Climatological Intraseasonal Oscillation. *Journal of Climate*, **10**, 1071-1085. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<1071:nhsmsa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<1071:nhsmsa>2.0.co;2)
- [36] 黄菲, 黄少妮, 张旭. 中国降水季节内振荡的气候特征分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2008, 38(2): 173-177.