J. Lake Sci.(湖泊科学), 2027, 39(4):000-000
DOI 10.18307/2027.0441
©2027 by Journal of Lake Sciences

近 60 年来鄱阳湖区旱涝急转事件时空演变及其组成特征解析*

孙锦昌[1]，刘　波[1**]，王文鹏[1,2]，李云良[3]，陈　静[4]，殷晓然[1]，赵晓旭[1]，鲁程鹏[1]

（1: 河海大学水文水资源学院，南京 210098）

（2: 水利部水利大数据重点实验室，南京 211100）

（3: 中国科学院南京地理与湖泊研究所，南京 210008）

（4: 江西省水文监测中心，南昌330002）

摘　要：厘清旱涝急转事件的发生与转换规律，是提升区域复合水文极端事件风险识别与防灾减灾能力的重要基础。为揭示鄱阳湖区旱涝急转事件的时空特征并解析其组成特征，实现复合极端水文事件物理内涵的进一步解析，本文基于鄱阳湖区 22 个国家基本雨量站 1965—2024 年逐日降雨数据，通过调整日尺度旱涝急转指数（*DWAAI*）判别时序，对旱急转涝与涝急转旱事件进行识别，并将 DWAAI 解耦为表征转换速率的“急”（$DWAAI_{急}$）与表征转换强度的“转”（$DWAAI_{转}$）两个过程性指标。结果表明：1965—2024 年，研究区旱急转涝事件平均发生频次为 4.7 次/10 年，约 2 年发生 1 次，其中湖区北部星子站发生频次最高（34 次），西部赣抚平原发生频次较低，但重度事件占比较高（20%）；涝急转旱事件平均发生频次为 4.9 次/10 年，与旱急转涝事件接近，空间上主要集中于东部信江、饶河下游，西部相对较少。约 94.5%的旱急转涝事件由“转”主导，“急”主导的旱急转涝事件均发生于非汛期，主要由短时强降雨引发；涝急转旱事件多发生于汛期末期，且几乎全部由“转”主导。研究表明，鄱阳湖区旱涝急转事件总体以转换强度主导，不同类型事件在发生季节和空间分布上存在明显差异。成果可为鄱阳湖区及相似流域旱涝急转精准预警、水资源应急调度和防洪抗旱减灾决策提供理论支撑。

关键词：旱涝急转；组成特征解析；鄱阳湖区；时空演变

Spatiotemporal evolution and identification in drought-flood abrupt alternation events in the Lake Poyang Basin in the past 60 years*

Sun Jinchang[1] , LIU Bo[1**], Wang Wenpeng[1,2], Li Yunliang[3]，Chen Jing[4], Yin Xiaoran[1], Zhao Xiaoxu[1]& Lu Chengpeng[1]

(1: *College of Hydrology and Water Resource, Hohai University, Nanjing* 210098, *P.R.China*)

(2: *Key Laboratory of Water Big Data Technology , Ministry of Water Resources, Nanjing* 211100, *P.R.China*)

(3: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008, *P.R.China)*

(4: *Hydrological Bureau of Jiangxi Province, Nanchang* 330002, *P.R.China*)

Abstract: Dry-Wet Abrupt Alternation (DWAA) describes the succession and rapid shift of short-term extreme hydrological events. It provides a key scientific basis for understanding the extremity and complexity of regional water cycles under climate change. Based on daily precipitation data from 22 national meteorological stations in the Lake Poyang Basin from 1965 to 2024, this study established a time series of the Dry-Wet Abrupt Alternation Index (DWAAI) to identify DWAA events. It also unified the identification framework for dry-to-wet and wet-to-dry abrupt events. The DWAAI was further decomposed into two process indicators: Abruptness, which reflects transition rate, and Transition, which represents transition intensity. This decomposition supports an in-depth analysis of the physical meaning of compound extreme hydrological events. The results show that dry-to-wet events occurred at a frequency

*2026-01-26 收稿；2026-07-15 收修改稿；2026-07-29 录用。
国家重点研发计划项目（2024YFC32116600-1）和国家自然科学基金项目（U24A20587）联合资助
** 通信作者；E-mail：liubohhu@hhu.edu.cn

of 4.7 events per decade during 1965–2024. The Xingzi Station in the northern lake area recorded the highest occurrence, with 34 events. The western Gan-Fu Plain had a lower overall event frequency but a relatively high proportion of severe events (20%). Wet-to-dry events occurred at a similar frequency of 4.9 events per decade. They were concentrated in the lower reaches of the eastern Xinjiang and Raohe Rivers and were less frequent in the western basin. Statistical analysis of DWAA events indicates that 94.5% of dry-to-wet events were dominated by the Transition indicator. In contrast, Abruptness-dominated dry-to-wet events all occurred in the non-flood season and were triggered by short-duration heavy rainfall. Most wet-to-dry events occurred at the end of the flood season and were almost entirely controlled by the Transition indicator. These findings provide theoretical support for accurate early warning of DWAA events, emergency water resource regulation, and decision-making for flood control, drought relief, and disaster mitigation in the Lake Poyang Basin and other similar watersheds.
Keywords: DFAA; identification of component characteristics; Poyang Lake; spatiotemporal evolution

全球变暖加速了水文循环，导致全球降雨不均匀性加剧，干旱与洪涝已成为全球范围内发生频率最高、影响范围最广的极端水文事件，严重制约经济社会可持续发展并威胁生态系统稳定性[1]。旱涝急转作为一种复合型水文极端事件，与单一的干旱或洪涝灾害不同，其灾害链效应更加复杂，不仅具备各自原有的致灾特性[2]，更由于旱涝状态的急剧转换而产生叠加放大的生态与社会经济影响[3]，已日益成为水文学、气象学及灾害风险管理领域关注的热点与前沿问题[4-6]。旱涝急转的形成是气象因子与水文过程共同驱动的结果，其中降雨模式的骤变起决定性作用。汛期与非汛期的急剧转换、汛期骤发干旱、非汛期突发暴雨等，均是旱涝急转事件的典型触发形式[2]。在气候变化背景下，现有观测数据与气候模型预测成果均表明，全球旱涝急转事件频率、强度与影响范围均呈显著增加趋势[7-8]。尤其是中纬度亚热带地区，因降雨年内分配不均匀性增强，成为旱涝急转事件频发区与高风险区。旱涝急转事件的主要特征在于旱、涝两种极端水文状态在数天至数月的短历时内快速转换，形成“旱急转涝”或“涝急转旱”两种类型，易对农业生产[9]、水资源调度[10]和生态系统[11]造成双重压力。此外，单一的干旱/洪涝事件通常表现为持续的水分亏缺/过剩过程，两者在防灾减灾应对策略上相对成熟[12]；而旱涝急转事件要求防灾体系必须具备快速响应与双向调节能力，其不确定性更高、防灾难度更大[13]。

早期研究多基于季节或月尺度降水、径流异常构建旱涝急转指数，代表性指标包括旱涝并存指数 DFCI[14]、长周期旱涝急转指数 LDFAI[15]以及基于径流过程的旱涝急转指数 RDFAI[16]、多尺度标准化旱涝急转指数 MSDFAI[17]等，主要通过比较前后时段干湿差异识别旱急转涝或涝急转旱过程。此类指标结构相对清晰、对资料的需求较低，适用于长期气候统计和流域尺度对比，但月尺度或季节尺度容易平滑短历时强降水和阶段性干旱过程，对急转发生时间、转换速率和过程连续性的刻画不足。为提高对上述变化的识别能力，相关研究进一步采用旬降水距平[18]及短周期旱涝急转指数 SDFAI[19]等方法，识别相邻旬、相邻月或短周期内的旱涝转换过程[20-21]。该类方法相较月尺度指标更能反映较短时间内的干湿变化，但仍对转折节点和急转强度的表达不够精细。随着逐日气象资料和多源遥感及再分析数据的发展，日尺度旱涝急转指数 DWAAI[22]、标准化加权平均降水指数 SWAP[23]及改进型旱涝急转评估指数[24]等被提出。这些指数能够更精细地捕捉旱涝急转过程，在事件开始时间、持续时间和转换强度的识别方面具有优势，并已在长江流域[22, 25]、珠江流域[23]等区域开展了应用研究。多因子标准化旱涝急转指数 MSDFI[12]和土壤水分集中指数 SMCI[26]等方法将蒸散发、土壤水分等关联要素纳入事件识别体系，或引入联合概率将植被响应[27]纳入影响分析框架，以增强指标对旱涝急转事件中土壤水分和生态响应的表征能力。上述指数为旱涝急转事件的定量识别提供了重要的方法基础。但现有指标对旱涝急转事件的识别逻辑主要基于“旱”与“涝”两种水文情势的相态转换[28]，对急转过程的物理内涵尚需细化。

鄱阳湖是长江中游吞吐型湖泊，也是我国第一大淡水湖，具有高水似湖，低水似河的水文特征[29]，对长江中下游水量交换及生态平衡具有关键调节作用[30]。近年来，在气候变化与人类活动双重影响下，鄱阳湖流域旱涝急转事件频发，给流域水安全和生态系统带来了巨大威胁[31]。鄱阳湖流域作为长江中游旱涝急转事件的高频发生区，其旱涝急转过程呈现显著的年际变化特征，旱急转涝与涝急转旱事件交替出现[32]。

进入 21 世纪以来，流域内旱涝急转事件的年际变化将进一步加剧，事件发生的频次与强度都将呈现上升趋势，其中涝急转旱事件频次上升态势更为突出[33]。季节尺度上，流域在 4—5 月与 6—7 月间容易发生旱涝急转事件[34-35]。在空间上，信江的旱涝急转事件发生频次最多，修水北支最少[19]。这些研究为理解鄱阳湖流域旱涝急转时空演变规律奠定了重要基础。

本研究完善了现有日尺度旱涝急转指数 DWAAI 的识别框架，通过调整“旱期”和“涝期”的判别顺序，对旱急转涝与涝急转旱两类事件进行识别，并在此基础上明确了急与转两个维度的定量刻画方式，实现了旱涝急转事件的进一步刻画与解析。主要研究内容包括：1）认知研究区内旱涝急转事件的总体时空变化规律；2）解析旱涝急转事件中“急”与“转”特征组成；3）识别与分析由“急”与“转”主导的旱涝急转事件。研究成果可为鄱阳湖区旱涝急转形成机理理解与风险精准防控提供过程导向的科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖流域下游平原区是整个流域的生物多样性宝库[36]、重要的粮食生产基地及社会经济中心，也是近年来鄱阳湖流域受旱涝急转影响较为严重的区域。位于其中部的湖泊与临近湖泛平原区（以下简称为“鄱阳湖区”）包括入湖主要支流的下游冲积平原及尾闾平原，和受湖泊水位涨落影响的湖泛平原，为鄱阳湖流域平原区内第四系松散沉积物覆盖的区域，是相对独立的水文地质单元（图 1）。在鄱阳湖区内，湖泊与地下水交互作用活跃，旱涝急转事件易对地表水与地下水交换水量及该区域的地下水储量产生较大影响。鄱阳湖区位于 27.83°~29.46°N ，115.36°~117.01°E，南北长 180 km，东西宽 161 km，总面积 1.21 万 km^2，约占整个鄱阳湖平原区面积的 23.63%[37]，其中丰水期时湖区整体被淹没，对应的水面面积 3000 km^2[36]，占研究区面积 24.79%，陆地面积 9100 km^2，占比 75.21%。研究区内河网水系发达，由修水、赣江、抚河、饶河、信江五大流域与鄱阳湖共同构成[38]，多年平均降雨量 1620 mm[39]，汛期为 4—9 月，汛期降雨量占全年降雨量的 75%，多年平均气温 18.9 ℃[40]。

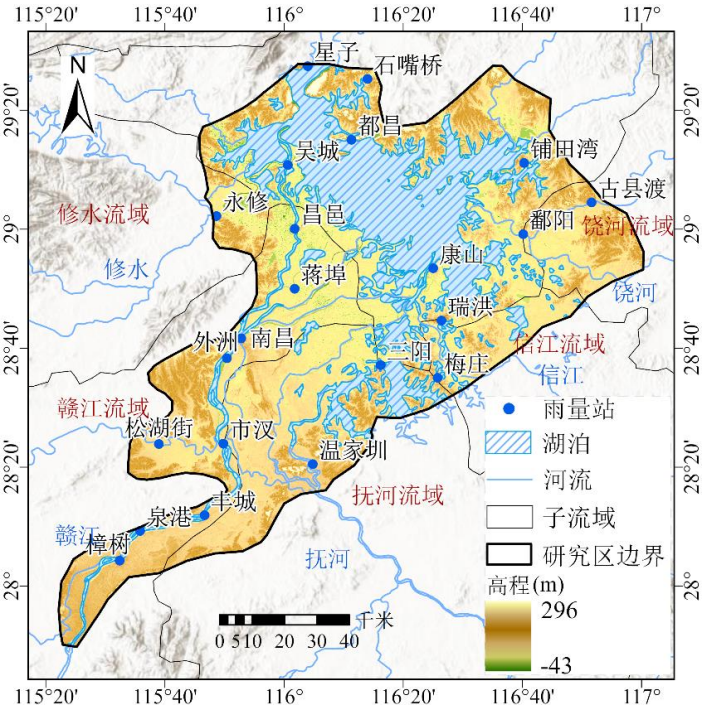

图 1 研究区概况图

Fig.1 Schematic diagram of the study area

1.2 数据来源

本研究采用鄱阳湖区内全部 22 个国家级基本雨量站 1965—2024 年共计 60 年逐日降水观测资料进行旱涝急转分析，数据来源于江西省水文监测中心，数据均经过严格一致性检查与质量控制，达到资料整编规范标准，可满足旱涝急转事件识别及时空变化分析的精度与质量要求。由于篇幅限制，采取在图中标注经纬度的方式，便于读者确定站点信息，并未对站点进行罗列。

1.3 旱涝急转事件识别方法

本文选用日尺度旱涝急转指数（Dry-wet Abrupt Alternation Index，DWAAI）识别旱涝急转事件。相较于月尺度或旬尺度指标，DWAAI 具有更高的时间分辨率，且能更准确地刻画长江流域旱涝急转事件[22]。同时该指数对“急”与“转”两个特征具有较好的区分能力，便于从日尺度上对旱涝急转的组成特征进行解耦。DWAAI 指数计算公式如下[22]：

$$DWAAI=\left[\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{SAPI_i-SAPI_0}{i}\right)+\left(SPA_{后}-SPA_{前}\right)\times\left(\left|SPA_{前}\right|+\left|SPA_{后}\right|\right)\right]\times a^{-\left|SPA_{前}+SPA_{后}\right|} \tag{1}$$

式中，*SAPI* 为标准化前期降雨指数，即对前期降水指数 *API* 取标准化[41]，用来表征前期降水对当前水文过程的累积影响[42-43]，$SAPI_i$、$SAPI_0$ 分别为分析日期的后期第 i 天和前期最后一天标准化前期降水指数。已有研究对 a 的取值对 DWAAI 指数的影响进行了分析，后续研究多沿用 a=1.3 取值[22]。系数 $a^{-\left|SPA_{前}+SPA_{后}\right|}$ 能够调节前后期旱涝状态转换对指数值的影响：当前后期旱涝状态差异越大，该系数计算值越大，得到的 DWAAI 指数越大；当前后期同旱或同涝特征较明显时，系数计算值较小，从而避免同旱或同涝事件被误判为旱涝急转[24]。$SPA_{前}$和 $SPA_{后}$分别是计算当日前 m 日和后 n 日的标准化降水异常值，计算公式如下[44]：

$$SPA_k^{(N)}=\frac{X_k^{(N)}-\overline{X}^{(N)}}{\sigma_N},\ k=1,2,...,\ L-N+1 \tag{2}$$

式中，$X_k^{(N)}$ 表示从第 k 个时段开始、连续 N 个时段的累计降水量，$\overline{X}^{(N)}$ 表示 N 时段累计降水序列的均值，σ_N 表示 N 时段累计降水序列的标准差，当计算前 m 日和后 n 日的标准化降水异常值时，N 分别取 m 和 n。

本研究参考长江中下游流域研究成果[22,45]，取旱期 44d、涝期 10d、进行旱涝急转事件识别与分析。旱涝急转事件的强度等级沿用已有研究给出的阈值进行判定（表 1）。考虑到研究区位于亚热带季风气候区，短历时零星降雨过程较多，部分降雨在形成有效径流前会被截留、填洼和补充土壤含水量等过程消耗。水文产流理论中通常将这部分产流前的损失概化为降雨量初损，其作用是从实测降雨中分离出能够引起地表湿润和径流响应的有效降雨[46]。SCS-CN 方法及其改进研究表明[47]，初损量与前期土壤含水量、土地利用和下垫面条件等密切相关，且会直接影响有效降雨量。

表 1 DWAAI 指数等级划分

Tab.1 Classification of DWAAI Grades

旱涝急转等级	DWAAI 范围
重度旱急转涝	DWAAI＞15
中度旱急转涝	13＜DWAAI≤15
轻度旱急转涝	10＜DWAAI≤13
正常	-10≤DWAAI≤10
轻度涝急转旱	-13≤DWAAI＜-10
中度涝急转旱	-15≤DWAAI＜-13
重度涝急转旱	DWAAI＜-15

为检验降雨初损对识别结果的影响，本文进一步比较了未扣除初损和扣除 35 mm 初损两种情景下的旱涝急转事件识别结果。结果表明，扣除初损后，研究区旱涝急转事件总次数由 1476 次调整为 1248 次，事件减少 15.4%。其中，旱急转涝事件由 723 次调整为 617 次，涝急转旱事件由 753 次调整为 631 次。因此，若直接采用实测降雨量计算旱涝急转指数，部分未形成有效湿润响应的短时降雨可能会抬高涝期降雨贡献，进而造成中等强度事件的误判（图 2）。

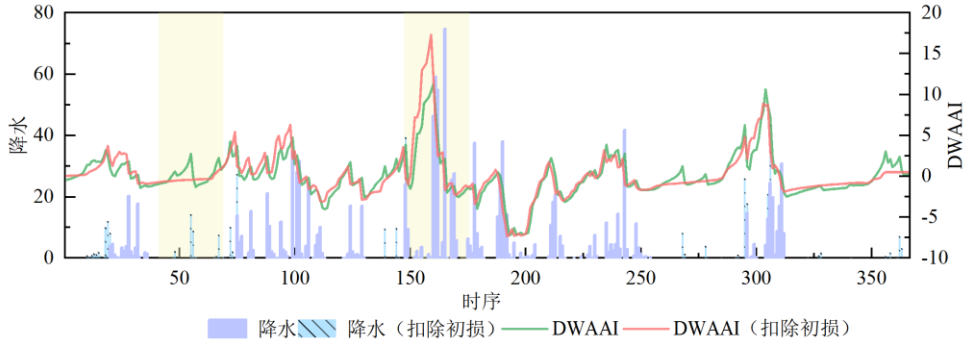

图 2 扣除初损对事件识别的影响示意图

Fig 2. Schematic diagram of the effect of initial loss deduction on event identification

基于上述考虑，本文在涝期降水计算中引入降雨初损扣除思想，并参考《江西省暴雨洪水查算手册》中鄱阳湖区暴雨洪水计算经验，将降雨初损量取为 35 mm[48]。该取值适用于鄱阳湖区湿润亚热带季风气候背景下的区域尺度、长期序列和日尺度降雨过程分析。由于本文重点关注 1965—2024 年旱涝急转事件的时空分布特征，因此采用统一的初损值有利于保持不同年份、不同站点之间指数计算的一致性和结果的可比性。具体处理时，以连续降雨过程为单元进行扣除：当降雨过程累计雨量不超过 35 mm 时，不计入有效涝期降水；当累计雨量超过 35 mm 时，仅将超过初损量的部分作为有效降雨参与 DWAAI 指数计算。

式（1）反映的是前后两个时期之间，旱、涝状态发生转变的程度，标志着旱转涝事件的发生。旱期 m 通常取 30-60 d，涝期 n 通常取 5-15d。但根据指标定义，如果固定上述 m、n 的取值，则 DWAAI＞0 时，指标侧重分析前期旱后期涝的事件，即旱急转涝；在后期为旱期时，由于 n 给定的时间步长过短，无法准确提取干旱事件，故当 $DWAAI$＜0 时，对涝急转旱事件易产生漏判。因此，这里对 DWAAI 指数对旱涝急转事件的分析框架进行完善，具体计算公式如下：

$$DWAAI=\begin{cases} DWAAI_{DF}, 当 DWAAI_{DF}>0 且 DWAAI_{FD}>0, m=m_D, n=n_F \\ 0, 当 DWAAI_{DF}\cdot DWAAI_{FD}<0 \\ DWAAI_{FD}, 当 DWAAI_{FD}<0 且 DWAAI_{DF}<0, m=m_F, n=n_D \end{cases} \tag{3}$$

式中，各符号的下标 D、F 分别表示旱、涝，下标 DF、FD 分别表示旱急转涝、涝急转旱。当前期与后期分别取旱期与涝期的分析时间步长，则代表旱急转涝指标 $DWAAI_{DF}$；与之相对应的时间窗口取值，代表涝急转旱指标 $DWAAI_{FD}$。当两种指标均为正值，取 $DWAA=DWAAI_{DF}$，代表旱急转涝事件，均为负值代表涝急转旱事件，两指标取值相反，取 $DWAAI$=0，代表未发生旱涝急转。

旱涝急转属于复合事件，其基本特征不仅包括水分状态在旱与涝之间发生转换，还表现为这种转换在较短的时间内快速发生。原有 DWAAI 识别框架对急与转的量化定义进行了初步说明[22]，为进一步理清旱涝急转事件结构特征，给出两者具体计算公式为：

$$DWAAI_{急}=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{SAPI_i-SAPI_0}{i}\right)\times a^{-|SPA_{前}+SPA_{后}|} \tag{4}$$

$$DWAAI_{转}=[(SPA_{后}-SPA_{前})\times(|SPA_{前}|+|SPA_{后}|)]\times a^{-|SPA_{前}+SPA_{后}|} \tag{5}$$

式中各参数含义与式（1）相同，则 *DWAAI* 分解为 $DWAAI_{急}$ 与 $DWAAI_{转}$ 的组合：

$$DWAAI = DWAAI_{急} + DWAAI_{转} \tag{6}$$

在指数的定义中，$DWAAI_{急}$ 体现了对于旱涝急转事件中的“急”的程度量化，主要通过 *SAPI* 反映的计算时段前后累积降雨短时综合变幅，代表旱涝状况在短时间内的转换速度，计算时段内，短时旱涝水平差异越大，$DWAAI_{急}$ 值越大，在 DWAAI 指数中的占比越高，表明该事件是由旱涝/涝旱快速转换主导的旱涝急转事件；$DWAAI_{转}$ 表示旱涝急转事件中“转”的程度，通过计算转换前后期标准化降雨量的差异来量化，反映了计算时刻前期与后期平均旱涝等级的变化程度，$DWAAI_{转}$ 在 DWAAI 指数中的占比越高，表明该事件是由旱涝/涝旱状态的接续转换主导的旱涝急转事件。因此，急更强调短时间内旱涝状态的快速变化特征，反映事件发生过程中的突变性；转则更强调前后两个阶段旱涝状态的差异，反映事件由旱向涝或由涝向旱转变的幅度。从旱涝转换过程来看，对于等级相近的旱涝急转事件，由于降水的强度与集中程度不同，若叠加旱期零星降雨的差别，有可能识别出的旱涝转换程度与转换速度均存在差异，有必要在旱涝急转事件分析的基础上，进一步明晰其组成结构特征。

2 结果

2.1 旱涝急转事件时空特征分析

1965—2024 年间，研究区内 22 个站点共计发生 1248 站次，相当于平均每年全部站点都会发生 1 次旱涝急转事件，发生频次总体基本稳定（图 3），1970 年代略低，年均 18 站次，即 81.8%的站点会发生 1 次，2010 年代发生频次增高至 23 站次。两类旱涝急转事件中，旱急转涝发生 617 站次，年均 47%的站点发生 1 次（0.47 次/年），发生频次小幅增加，平均线性增长率为 0.8 次/10 年；涝急转旱事件发生 631 站次，年均 49%站点发生 1 次，发生频次略高于旱急转涝事件（0.49 次/年），年代际波动总体稳定且略减。

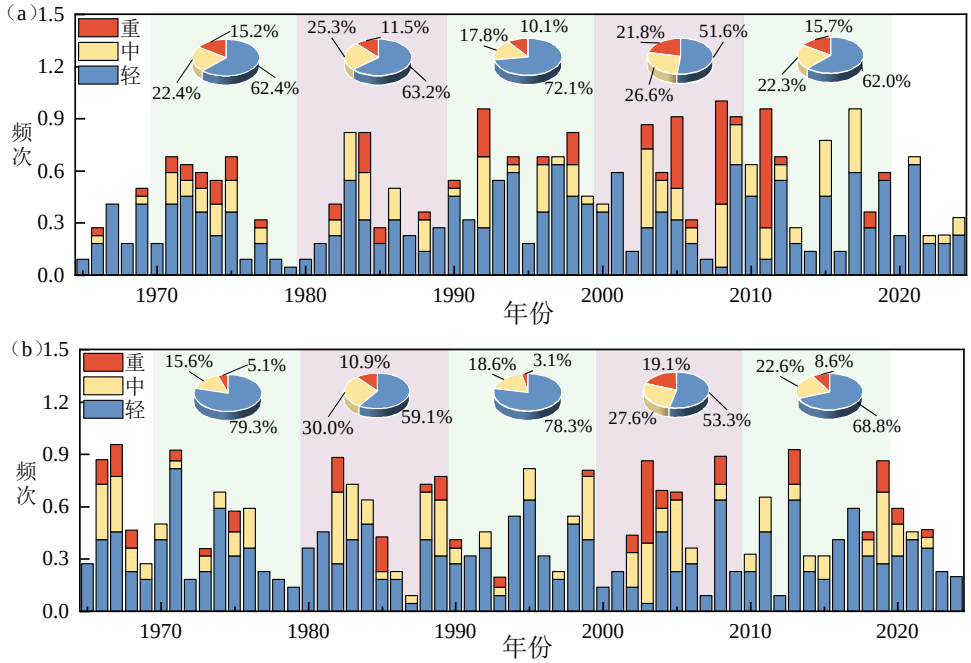

图 3 （a）旱急转涝（b）涝急转旱不同程度事件年际变化

（纵坐标 0.3 表示一年中有 30%的站点发生旱涝急转事件，其余同）

Fig. 3 Interannual variations in (a) dry-to-wet and (b) wet-to-dry events at different levels.

(The value 0.3 on the y-axis indicates that 30% of the stations experienced dry-wet abrupt alternation events in a given year, and the rest follow the same rule.)

各等级旱涝急转事件存在一定的年代际波动。旱急转涝事件中，轻度事件发生频次最高（图 3a），年均 30%站点发生 1 次，占旱急转涝事件总数的 64.7%，且发生频次由 1970 年代 5 站次增加至 2010 年代的 10 站次，年际与年代际差异均有所增大。中度旱急转涝事件占旱急转涝事件总数的 21.4%，年均 10.2%站点发生 1 次，2000 年后，该类事件发生频次有所增加，部分年份（如 2003 年、2011 年等）发生频次高于轻度旱急转涝事件。重度旱急转涝的年均发生频次最低，不是每年发生，年均仅 6%站点发生 1 次，占旱急转涝事件总数的 13.9%，但 2000 年前，平均每年仅有 1 个站点会发生 1 次，2000 年后增加 1 倍，且 2005—2012 年间，发生频次增加 5 倍。涝急转旱事件的年际与年代际差异均变化不大，轻度事件发生占比 67.0%（图 3b），年均 32%站点发生 1 次；中度涝急转旱事件占涝急转旱事件总数的 23.5%，年均 11.4%站点发生 1 次；重度涝急转旱的年均发生频次最低，年均仅 1 个站点发生 1 次，占涝急转旱事件总数的 9.5%，1970 年代仅有 3 年发生重度涝急转旱事件，年均仅 2.2%站点发生 1 次，2000 年代发生频次最高，年均 8.6%站点发生 1 次。可见近年来受气候变化影响，水文情势不稳定性加剧，中等强度以上的旱涝急转事件发生频次均有所增大。

空间上，旱急转涝事件发生频次总体北部多、中部少（图 4a）。在湖区北部、饶河流域下游相对多发。其中，星子站的发生频次最高，60 年间发生 34 次，约 2 年发生 1 次；其次为鄱阳站（31 次），且上述区域的旱急转涝事件以轻度为主，如星子站、鄱阳站轻度事件占比分别为 76.5%、67.7%。湖区西部的赣江流域与抚河流域（以下简称赣抚流域）下游平原旱急转涝事件发生频次较少，如永修站 23 次、南昌站 25 次，但该区域重度事件发生频次与占比均较高，如永修站（5 次）、南昌站（5 次）为研究区内重度旱急转涝事件相对多发区域，两站重度事件占比分别为 17.9%、20.0%。中度事件的空间分布较为均匀，其中发生最多的站点在湖区北部的都昌站，共发生 10 次，占全部事件的 34.5%；发生最少的站点为饶河流域下游的古县渡站（2 次），占比仅 7.1%。

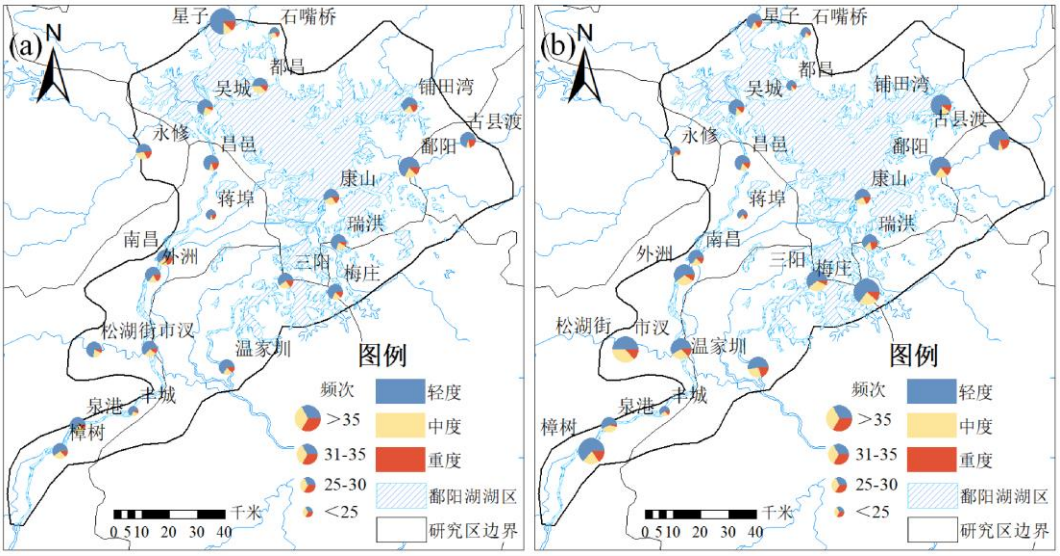

图 4 （a）旱急转涝（b）涝急转旱事件各站频次分布图

Fig. 4 Spatial distribution of (a) dry-to-wet and (b) wet-to-dry events at each station.

涝急转旱事件的空间分布格局与旱急转涝具有较为明显的差异，总体南部多发、北部少（图 4b）。赣抚流域上游、信江流域下游较为多发，如樟树站发生的频次最多，60 年间发生 39 次，约 1.5 年发生一次，其次是梅庄（37 次）和松湖街站（36 次）；湖区北部的石嘴桥站则只发生了 19 次。类似的，涝急转旱事件发生频次较多的区域，仍以轻度事件为主，如樟树站（25 次）轻度事件占比 64.1%。重度事件发生最多的站点为温家圳，共发生 6 次。其中重度事件共发生 26 次，较旱转涝事件（22 次）偏多 18.2%，研究揭示的空间格局表明，旱急转涝高发的湖区北部需重点防范高频次轻度事件的累积风险，而涝急转旱重度事

件集中的赣抚流域则是流域防汛抗旱的核心风险区，该分异特征为鄱阳湖区实施分区预警、分类施策的精准防灾减灾策略提供了重要空间依据。

2.2 不同类型旱涝急转事件年内分配

分析各月份不同组成特征的旱涝急转事件发生频次在对应旱涝急转事件类型总数中的年内分布占比（图 5b），表明约 94.5%的旱急转涝事件由转主导，由急主导的事件占比仅为 5.5%，且均发生在非汛期（11 月—次年 3 月）。由转主导的轻度旱急转涝事件全年均有发生，重度事件主要发生在 3—9 月，其中鄱阳湖的汛初期 6 月份发生频次最高，占旱急转涝事件发生总数的 6.8%，反映出流域骤然进入汛期可能引发的旱涝急转风险特征。由急主导的旱急转涝事件发生频次较低，且多为轻度事件，占比为 5.1%。除 11 月发生过中度以急为主导的旱急转涝事件之外，其他月份均未发生过中等强度及以上的该类事件。

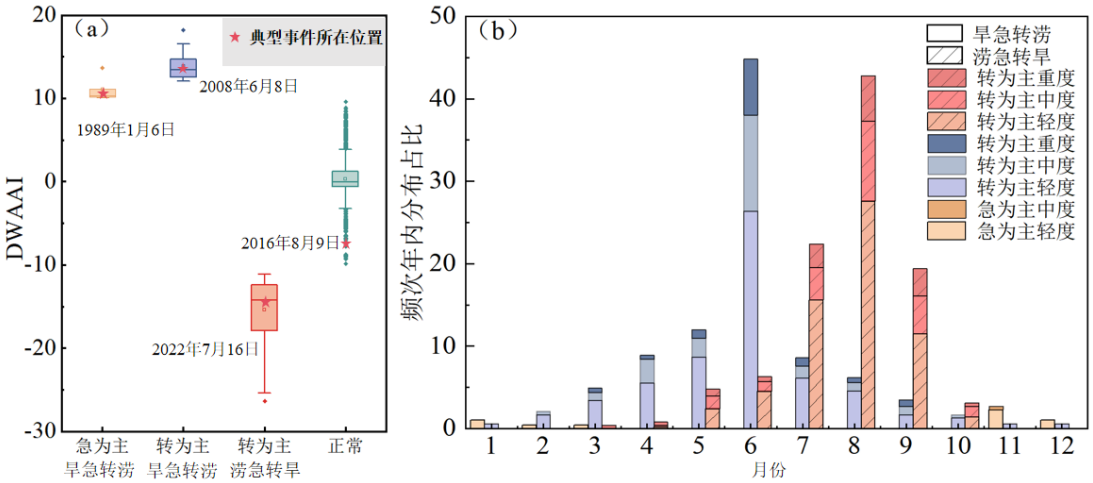

图 5 （a）典型事件所在位置（b）不同组成特征的旱涝急转事件发生频次年内分布占比

Fig 5. (a) Locations of typical events; (b) annual distribution proportions of dry-wet abrupt alternation events with different compositional characteristics

涝急转旱事件未识别出由急主导的类型，全部由转主导，反映的是后期干旱事件相较于突发性降雨具有更强的持续性与累积性，涝急转旱主要体现流域干旱与湿润状态的连续转换。涝急转旱事件主要发生在 4—10 月，期间各月轻度至重度事件均有发生，其中汛期末期的 8 月份发生频次最高，年内分布占比高达 42.8%，重度事件占比为 5.5%，表明流域在汛期结束后，易接续出现较长连续少雨期，形成以转为主的涝急转旱事件。

2.3 典型旱涝急转事件的急/转特征解析

根据鄱阳湖流域识别出的不同类型的旱涝急转事件，分别按照主导特征划分为急为主和转为主两种，统计各类型事件强度（图 5a）。其中旱急转涝事件在 1989 年 1 月 6 日的强度为 10.1，2008 年 6 月 8 日事件强度为 14.4，可用于表征转换特征较为突出的过程。因此，本文分别选取 1989 年 1 月 6 日和 2008 年 6 月 8 日作为急为主和转为主旱急转涝事件的典型案例。对于涝急转旱事件，2022 年 7 月 16 日事件强度为 -15.7，同时该事件过程具有较清晰的涝转旱过程，因此将其选为涝急转旱的典型事件。此外，由于涝急转旱事件中未识别出急为主的类型，因此在正常旱涝转换事件中，选择 2016 年 8 月 9 日作为涝转旱的对比

2.3.1 旱急转涝事件的急与转特征

在旱涝急转事件分析指标中，*DWAAI* 急反映了旱涝状态的转换速度。以 1989 年 1 月 6 日发生的一场典型旱急转涝事件为例（图 6a），在该事件的旱期（红色区域）内，总降雨量为 5.1mm，几乎无有效降雨。1 月 5 日的 *SAPI* 指数为-1.1（图 6c），属于中度干旱。1 月 6 日发生一场 54.1mm 突发性强降雨，*SAPI* 上升至 1.42，由中度干旱转为中度湿润。当日 *DWAAI* 指数为 10.1，为轻度的旱急转涝事件，指数在 10 日间涨幅为 9.1，当日 *DWAAI* 急为 5.7，指数占比 56%。在随后 10 天内，陆

续发生 20mm 左右间歇降雨，SAPI 在 1.5~2.5 之间波动，*DWAAI* 逐渐减小。在这类典型事件中，前期（旱期）降雨量极少，一场突发性暴雨过程形成了较为剧烈的旱涝转换。可见，以急为主的旱急转涝事件多发生在非汛期，反映的主要是非汛期突发强降雨引发的旱急转涝。

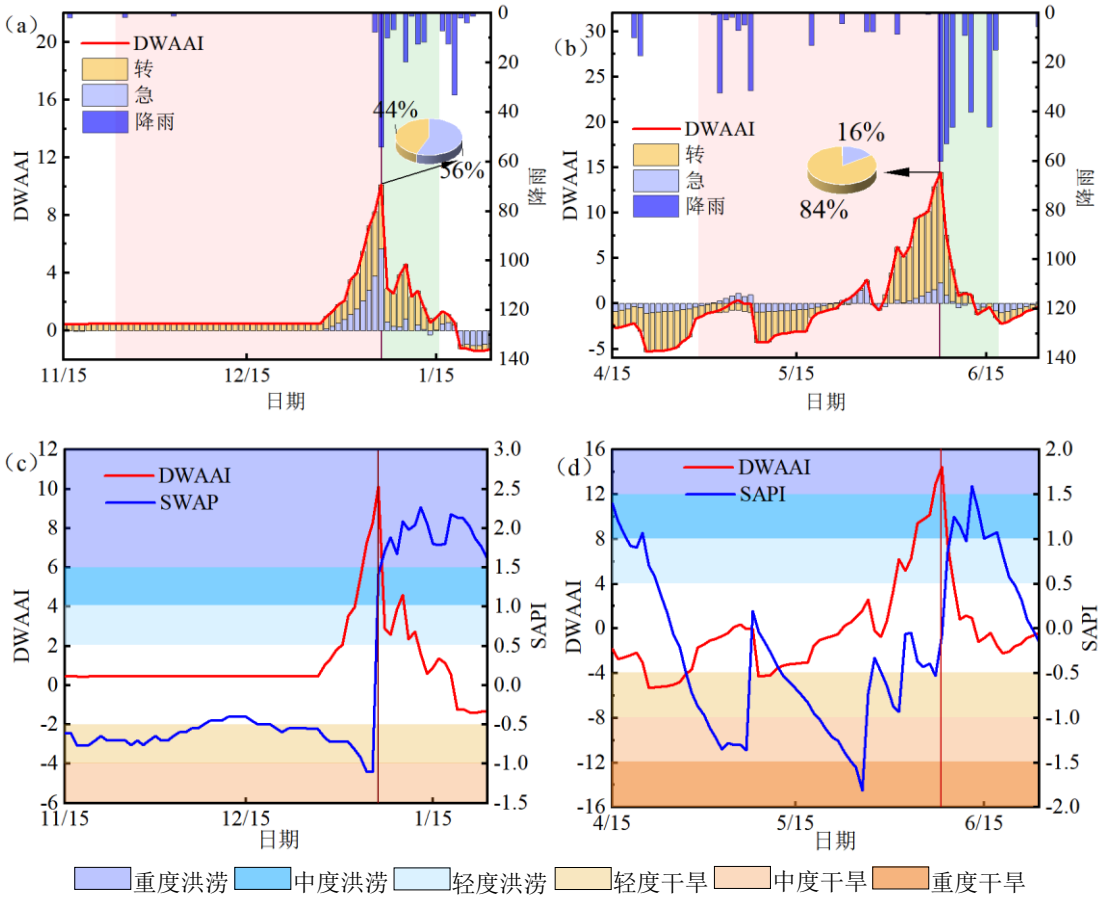

图 6 不同主导类型的两场典型旱急转涝事件对比图

（a）1989 年以“急”主导的典型旱急转涝过程及（c）指数解析，

（b）2008 年以“转”主导旱急转涝过程及（d）指数解析

Fig.6 Comparison of two typical dry-to-wet events with different dominant types.

(a) A typical dry-to-wet process dominated by “abruptness” in 1989, and (c) its index identification;

(b) a typical dry-to-wet process dominated by “Transition” in 2008, and (d) its index identification

DWAAI $_{转}$反映的是旱涝状态的转换。以 2008 年 6 月 8 日发生的一场旱急转涝事件为例（图 6b），该事件在旱期内存在约 90 mm 降雨，使干旱程度有所缓解。在旱涝急转发生前一天（6 月 7 日），SAPI 指数为-0.52，介于-0.5~-1.0 之间，属于轻度干旱程度。其后 10 天的降雨量达到 269.6 mm，为重度湿润状态。当日 DWAAI 指数为 14.4，为中度旱急转涝事件，当日 *DWAAI* $_{转}$为 12.1，转的属性占比 84%，是一场以转为主的旱急转涝事件。这类以转为主的旱急转涝事件，后期降雨量往往较大，尽管前期存在阶段性降雨，流域整体仍处于偏旱状态（图 6d），中等及以上程度的旱涝接续发生，形成此类旱急转涝事件，且指数在 10 日间涨幅为 14.6，大于以急为主的事件同期涨幅，反映出以转为主的旱急转涝事件，其强度等级往往更高。可见，这类事件的典型特征是是汛期初阶段性少雨与连续性强降雨接续发生形成的旱急转涝。

2.3.2 *涝急转旱事件的急与转特征*　由于干旱事件发生的渐进性与累积性，急的属性在涝急转旱事件中的贡献占比往往较小，多以涝向旱的状态转换为主要特征。以 2022 年 7 月 16 日发生的一次典型涝急转旱事件为例（图 7a），涝期 5 日降雨量 169.8 mm，SAPI 值最高达 1.44，接近重度湿润状态（图 7c），其后降雨结束，后期 44 日旱期总降雨量仅为 30.3 mm，接近重度干旱状态。但由于 7 月 16 日前后的涝期与旱期中旱涝状态峰值的间隔时间较长（47 日），因此尽管识别的 *DWAAI* 为-15.7，为重度涝急转旱事件，但 DWAAI$_{急}$指数仅为-4.2，贡献率不到 30%。本场涝急转旱事件的典型特征仍是由重度湿润向重度干旱状态接续发生的旱涝转换，反映的是汛期后期降雨结束后，非汛期骤然少雨的特征。

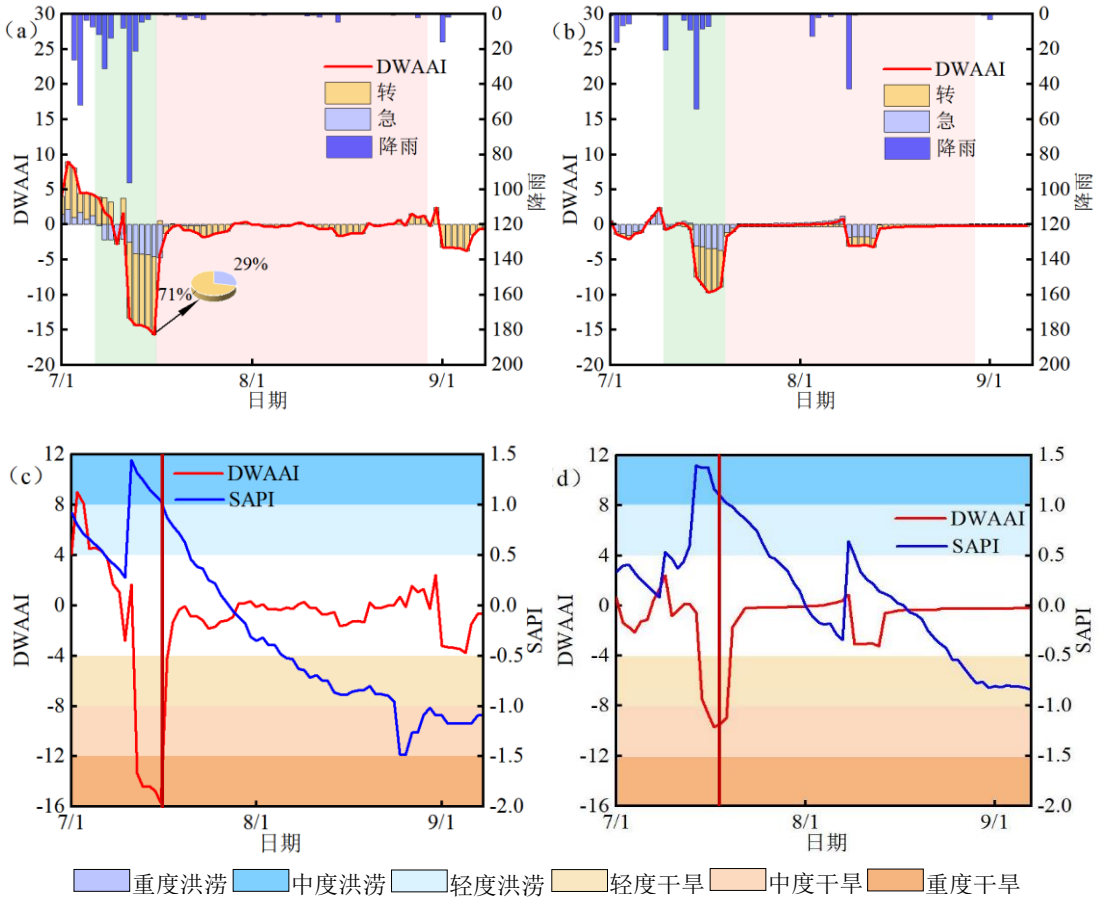

图 7 不同主导类型的两场典型涝急转旱事件对比图
（a）2022 年以“转”主导的典型涝急转旱过程及（c）指数解析，
（b）2016 年一般旱涝转换过程及（d）指数解析

Fig. 7 Comparison of two typical wet-to-dry events with different dominant types.
(a) A typical wet-to-dry process dominated by “transition” in 2022 and (c) its index identification;
(b) a general dry-wet transition process in 2016 and (d) its index identification

在正常年景下，汛末期由涝向旱的转换是阶段性的、缓变的，可以被认为是具有一段时间间隔、相对独立的涝期与旱期，因此不被识别为一次旱涝急转事件。以 2016 年 7 月汛期结束时的一次由涝转换为旱的过程为例（图 7b），涝期五日降水量达 64.0 mm，使得 SAPI 值达到了 1.37（图 7d），属于中度偏湿状态，随后在接下来的半个月内降水量开始逐步减少，直到 8 月 9 日出现了一场降雨过程，总雨量达到 42.5 mm，使该流域的湿润程度再次达到轻度，因此识别的 *DWAAI* 为-8.8，其中 *DWAAI*$_{急}$为-3.7，与典型事件

接近，但 $DWAAI_{终}$较小，仅为-5.7；随后该站点在接下来的 20 天内持续向轻度干旱过渡，进入非汛期。因此，对于流域内正常汛期与非汛期的交替，通常以降水的逐渐减弱或由连续性降水转变为间歇性降水为主要形式，故不属于旱涝急转事件。

以急为主的旱急转涝事件主要特征是前期连续少雨后，突发短时强降雨过程；涝急转旱事件多以转为主，急的贡献度相对较小，其典型特征是过程性强降雨后的连续长期无雨。

3 讨论

本研究通过重构日尺度 DWAAI 指数框架，对旱涝急转事件“急”与“转”双重特征进行解耦，进一步认识了复合极端水文事件物理过程。本文所得鄱阳湖流域旱涝急转事件特征与已有研究既存在一致性，也表现出一定差异。例如王容等[19]基于月尺度资料鄱阳湖流域旱涝急转事件进行分析，指出整个流域旱转涝事件与涝转旱事件的发生频次基本相当，与本文基于日尺度指数识别出的鄱阳湖流域涝急转旱事件总频次与旱急转涝事件大致相当的认识一致，但与月尺度研究相比，尺度越细，能识别出的事件数量越多。此外，最严重等级事件在不同尺度下均相对较少，说明严重旱涝急转事件具有一定的极端性，不会因时间尺度变化而完全消失。

现有研究中，旱涝状态可基于标准化降水指数、土壤含水量、径流指数等不同指标进行表征，不同指标所反映的物理过程并不完全一致。其中，降水类指标主要强调气象意义上的干湿异常，而土壤含水量和径流类指标则进一步体现下垫面蓄水条件、产汇流过程及农业或水文系统响应。本文在构建日尺度 DWAAI 指数时并未直接使用原始降水量，而是结合前期土壤含水量状态对降水初损进行扣除，旨在考虑前期土壤亏缺对有效降水形成的影响。也就是尝试通过扣除初损使指数能够在一定程度上反映降水对土壤含水量的补充，尝试由气象旱涝急转向水文意义上的旱涝急转进行过渡。

本文进一步将旱涝急转事件分解为急和转两个组成部分具有一定的必要性。现有研究[12,17,22]已经认识到，旱涝急转不仅包括前后期旱涝状态的差异，还包含由旱向涝或由涝向旱变化的快慢程度。然而现有多数研究在分析中主要将旱涝急转事件作为一个整体，为了进一步对事件内部的组成结构进行认识，本文通过对急和转进行定量解耦，进一步识别不同事件的主导组成，能够在现有的分析基础上进一步揭示事件形成过程差异。急主要反映短时间尺度下降水条件的快速变化，尤其是旱期强降水突然出现和汛期降水的集中产生；转则主要表征前后时期旱涝状态的持续性转换。因此，急与转的定量解耦不仅有助于识别事件强度的来源，也有助于理解不同季节旱涝急转事件的形成差异。

此外，本文采用的 DWAAI 指数包含多个经验参数，参数设置对事件识别结果具有一定影响。其中，参数 a 主要用于调节旱涝转换程度的计算，使真实旱涝急转事件与全旱、全涝等非急转过程相区分。已有研究通过不同 a 取值下事件转的程度对比，认为 a 取 1.3 时能够较好地区分不同类型事件。本文采用 44 d 旱期窗口和 10d 涝期窗口，主要沿用长江中下游及鄱阳湖流域已有研究中的参数设置[22,45]。已有研究指出，前期降水对当日旱涝程度的影响具有指数衰减特征，前期第 44 天的影响已明显减弱，因此常将 44 d 作为旱期窗口；而涝期响应时间相对较短，通常取 10d 作为后期窗口。该固定时窗能够较好反映鄱阳湖流域及长江中下游湿润区旱涝急转事件的总体特征，但其适用性仍具有区域条件限制。对于干旱、半干旱地区，降水稀少且下垫面蓄水亏缺明显，前期降水衰减过程、土壤初损条件和产流响应时间均可能与湿润区不同，若直接套用 44d 和 10d 时窗，可能导致事件识别偏差。因此，后续研究有必要开展参数敏感性分析，比较不同 a 值、旱期窗口和涝期窗口对事件频次、等级结构及急转组成的影响，并结合不同气候区水文气象特征对参数进行区域化修正。

4 结论

本研究采用日尺度 DWAAI 指数，系统解析了 1965—2024 年鄱阳湖区旱涝急转事件的时空演变规律与急转组成特征，并通过调整旱涝判别时序，构建了旱急转涝与涝急转旱的识别框架。与传统仅关注事件频次或强度的识别方法相比，本研究进一步将旱涝急转过程分解为“急”和“转”两个组成部分，实现了

复合水文极端事件过程的深度解耦与定量评估，为揭示旱涝急转事件的过程机制及其主控特征提供了新的方法学支撑。

1）鄱阳湖区旱涝急转事件总体发生频次稳定，空间上具有南北空间分异特征。1965-2024 年间，旱急转涝年均 4.7 次/10 年，以轻度为主且呈北多南少格局，湖区北部星子站 2 年发生 1 次；涝急转旱年均 4.9 次/10 年，呈南多北少格局，东部信江、饶河下游高发。两类事件合计约 2 年 1 次，2000 年后中度以上事件显著增加，其中重度旱急转涝在 2005-2012 年间增幅达 5 倍，揭示气候变化下极端水文情势不稳定性加剧。

2）对典型旱涝急转事件的组成解析表明，以急为主的旱急转涝事件通常发生在非汛期，以前期少雨条件下的突发性强降雨为典型特征；以转为主的旱急转涝事件通常发生在汛期，以汛期初降雨偏少、或仅发生零星降雨过程后，接续发生连续性、阶段性强降雨为典型特征，且其强度往往高于以急为主的旱急转涝事件。涝急转旱事件未识别到以急为主的类型，全部为以转为主，此类事件多发生在汛期降雨充沛、湿润程度较高之后，骤然发生持续少雨阶段为典型特征。旱涝急转事件的发生过程与组成特征，均与流域汛期前后一般类型的旱涝转换存在显著差异。

3）鄱阳湖区旱急转涝事件的总发生频次中，由急主导事件仅占 5.5%，且主要发生在 11 月—次年 3 月，其余约 94.5%的事件由转主导，此类事件发生的总频次与重度等级事件发生频次的年内分配，均以 6 月最为多发。涝急转旱事件则全部以转主导，急的贡献率普遍低于 30%，主要发生在 4—10 月。这反映出不同类型复合极端事件受鄱阳湖地区的季节性降水波动影响，年内分配存在差异。

研究结果可为鄱阳湖区构建分季节、分类型的旱涝急转预警体系提供依据，尤其是为汛期重点关注旱急转涝、汛末及汛后重点关注涝急转旱的差异化防灾减灾、水资源调度和湖区风险管理提供科学支撑。

致谢：论文数据来源于江西省水文中心，特此致谢。

5 参考文献

[1] He N, Yin JB, Liu P *et al*. Global increases in dry-wet abrupt alternation events under climate change. *Geophysical Research Letters*, 2025, **52**(18): e2025GL117322. DOI: 10.1029/2025GL117322.

[2] Shi WZ, Huang SZ, Liu DF *et al*. Drought-flood abrupt alternation dynamics and their potential driving forces in a changing environment. *Journal of Hydrology*, 2021, **597**: 126179. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126179.

[3] Sun JH, Su BD, Wang DF *et al*. Temporospatial characteristics of drought-flood abrupt alteration events in China. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, **55**(8): 13-23. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2024.08.002. [孙锦浩, 苏布达, 王东方等. 中国旱涝急转事件时空变化特征. 水利水电技术: 中英文, 2024, **55**(8): 13-23.]

[4] 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. *Journal of Geophysical Research*: *Atmospheres*, 2020, **125**(9): e2019JD031982. DOI: 10.1029/2019JD031982.

[5] Jiang SH, Cui H, Ren LL *et al*. Will China's Yellow River Basin suffer more serious combined dry and wet abrupt alternation in the future *Journal of Hydrology*, 2023, **624**: 129871. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129871.

[6] Yoon JH, Wang SS, Lo MH *et al*. Concurrent increases in wet and dry extremes projected in Texas and combined effects on groundwater. *Environmental Research Letters*, 2018, **13**(5): 054002. DOI: 10.1088/1748-9326/aab96b.

[7] Zhang YQ, You QL, Ullah S *et al*. Substantial increase in abrupt shifts between drought and flood events in China based on observations and model simulations. *Science of the Total Environment*, 2023, **876**: 162822. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162822.

[8] Chen H, Wang S, Zhu J *et al*. Projected changes in abrupt shifts between dry and wet extremes over China through an ensemble of regional climate model simulations. *Journal of Geophysical Research*: *Atmospheres*, 2020, **125**(23): e2020JD033894. DOI: 10.1029/2020JD033894.

[9] Niu JL, He ZY, Zhang TY *et al*. Impacts of sudden drought to flood change on manufacture livelihood and ecology—a case study from Huailin town of Chaohu, Anhui Province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, **22**(S1): 108-115. [牛建利, 何紫云, 张天宇等. 旱涝急转对生产、生活与生态的影响及应对措施效果分析——以安徽省巢湖市槐林镇为例. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(S1): 108-115.]

[10] Li GF, Xiang XY, Tong YY *et al*. Impact assessment of urbanization on flood risk in the Yangtze River Delta. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2013, **27**(7): 1683-1693. DOI: 10.1007/s00477-013-0706-1.

[11] Zhu ZQ, Li Z, Yin J *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. *Scientia Geographica Sinica*, 2025, **45**(12): 2751-2763. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.20241012. [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. 地理科学, 2025, **45**(12): 2751-2763.]

[12] Bai XY, Wang ZX, Wu JF *et al*. A novel multivariate multiscale index for drought-flood abrupt alternations: Considering precipitation, evapotranspiration, and soil moisture. *Journal of Hydrology*, 2024, **643**: 132039. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.132039.

[13] Liu FL, Huang GB. Research progress in formation mechanism of urban drought-flood abrupt alternation and urban waterlog prevention system. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2012, **29**(11): 28-32. [刘凤丽, 黄国兵. 旱涝急转形成机理及城市防涝减灾体系研究进展. 长江科学院院报, 2012, **29**(11): 28-32.]

[14] Wu ZW, Li JP, He JH *et al*. Occurrence of droughts and floods during the normal summer monsoons in the mid- and lower reaches of the Yangtze River. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(5): 2005GL024487. DOI: 10.1029/2005GL024487.

[15] Wu ZW, Li JP, He JH *et al*. Large-scale atmospheric circulation anomaly and long-term drought and flood sharp turn in summer in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**(14): 1717-1724. [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. 科学通报, 2006, **51**(14): 1717-1724.]

[16] Zhang SF, Zhang JC, Min JJ *et al*. Drought-flood abrupt alternation based on runoff in the Huaihe River Basin during rainy season. *J Lake Sci*, 2012, **24**(5): 679-686. DOI: 10.18307/2012.0506. [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. 湖泊科学, 2012, **24**(5): 679-686.]

[17] Wang L, Guo SL, Wang J *et al*. A novel multi-scale standardized index analyzing monthly to sub-seasonal drought-flood abrupt alternation events in the Yangtze River basin. *Journal of Hydrology*, 2024, **633**: 130999. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.130999.

[18] Yan DH, Wu D, Huang R *et al*. Drought evolution characteristics and precipitation intensity changes during alternating dry–wet changes in the Huang–Huai–Hai River basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, **17**(7): 2859-2871. DOI: 10.5194/hess-17-2859-2013.

[19] Wang R, Li XH, Xue CY *et al*. Spatio-temporal variations of the drought-flood abrupt alternation events in the Lake Poyang Basin from 1960 to 2012. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 207-222. DOI: 10.18307/2020.0120. [王容, 李相虎, 薛晨阳等. 1960—2012 年鄱阳湖流域旱涝急转事件时空演变特征. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 207-222.]

[20] Zhao DS, Zhang JC, Deng SQ *et al*. Spatio-temporal characteristics of drought-flood abrupt alternation in the southwest China from 1960 to 2018. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, **41**(12): 2222-2231. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2021.12.016. [赵东升, 张家诚, 邓思琪等. 1960—2018 年中国西南地区旱涝急转的时空变化特征. 地理科学, 2021, **41**(12): 2222-2231.]

[21] Zhang YQ, Li DL. Drought-flood abrupt alternation and its atmospheric circulation characteristics during flood season in Southern China. *Climatic and Environmental Research*, 2019, **24**(4): 430-444. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18024. [张玉琴, 李栋梁. 华南汛期旱涝急转及其大气环流特征. 气候与环境研究, 2019, **24**(4): 430-444.]

[22] Shan LJ, Zhang LP, Zhang YJ *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. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(1): 25-40. DOI: 10.11821/dlxb201801003. [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. 地理学报, 2018, **73**(1): 25-40.]

[23] Shi XL, Yang YQ, Yuan Z *et al*. Integrating SWAP and SIF anomaly to assess the responses of vegetation to the drought-flood abrupt alternation in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin, China. *Journal of Hydrology*: *Regional Studies*, 2024, **52**: 101726. DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.101726.

[24] Tu XJ, Pang WN, Chen XH *et al*. Limitations and improvement of the traditional assessment index for drought-wetness abrupt alternation. *Advances in Water Science*, 2022, **33**(4): 592-601. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.04.007. [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. 水科学进展, 2022, **33**(4): 592-601.]

[25] Liu YB, Liu B, Wang WP *et al*. Evolution of drought-flood abrupt alternation events in Chongqing based on the daily dry-wet abrupt alternation index. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2024, **35**(4): 20-28. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2024.04.03. [刘玉冰, 刘波, 王文鹏等. 基于日尺度旱涝急转指数的重庆市旱涝急转事件演变特征分析. 水资源与水工程学报, 2024, **35**(4): 20-28.]

[26] Qiu JX, He CX, Liu XP *et al*. Projecting dry-wet abrupt alternation across China from the perspective of soil moisture. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2024, **7**: 269. DOI: 10.1038/s41612-024-00808-w.

[27] Shi WZ, Huang SZ, Zhang K *et al*. Quantifying the superimposed effects of drought-flood abrupt alternation stress on vegetation dynamics of the Wei River Basin in China. *Journal of Hydrology*, 2022, **612**: 128105. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128105.

[28] Matanó A, Berghuijs WR, Mazzoleni M *et al*. Compound and consecutive drought-flood events at a global scale. *Environmental Research Letters*, 2024, **19**(6): 064048. DOI: 10.1088/1748-9326/ad4b46.

[29]Min Q, Zhan LS. Characteristics of low-water level changes in Lake Poyang during 1952－2011. *J Lake Sci*, 2012, **24**(5): 675-678. [闵骞，占腊生. 1952—2011 年鄱阳湖枯水变化分析. 湖泊科学, 2012, **24**(5): 675-678.].

[30] Song JP, Gong LQ, Wang XL *et al*. Changes in hydrological conditions and ecological environment in Lake Poyang before and after the construction and operation of the Three Gorges Project: Retrospect and prospect. *J Lake Sci*, 2025, **37**(3): 716-733. DOI: 10.18307/2025.0301. [宋继鹏，龚磊强，王晓龙等. 三峡工程建设运行前后鄱阳湖水文情势变化与生态环境演变特征：回顾与展望.湖泊科学, 2025, **37**(3): 716-733.]

[31] Tu GY, Lu Q, Zhang FQ *et al*. Spatiotemporal variability and multidimensional driving mechanisms of drought-flood abrupt alternation in the Poyang Lake basin. *Atmospheric Research*, 2026, **336**: 108887. DOI: 10.1016/j.atmosres.2026.108887.

[32] Wang L, Xia H, Yuan Z *et al*. Analysis of evolutionary characteristics and causes of drought-flood abrupt alternation in middle and lower reaches of Yangtze River Basin. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2026, **57**(6): 1-20**.** [王丽，夏欢，袁喆等. 长江中下游地区旱涝急转演变特征及成因分析(英文). 水利水电技术（中英文）, 2026, **57**(6): 1-20**.**]

[33]Hu J, Yin J, Wang L *et al*. Analysis of characteristics of drought-flood abrupt alternation events in middle and lower reaches of Yangtze River Basin. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025. [胡静，尹军，王丽等. 长江中下游流域旱涝急转事件特征分析. 水利水电技术（中英文）, 2025.]

[34] Meng CQ, Dong ZJ, Wang YK *et al*. Evolution characteristics of drought-flood abrupt alternation events in Yangtze River basin and its socio-economic exposure. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2024, **43**(4): 34-49. DOI: 10.11660/slfdxb.20240404. [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. 水力发电学报, 2024, **43**(4): 34-49.]

[35] Luo Wei, Zhang Xiang, Deng Zhimin *et al.* Variation of the total runoff into Poyang Lake and drought-flood abrupt alternation during the past 50 Years. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2013, **21**(5): 845-856. [罗蔚，张翔，邓志民等. 近 50 年鄱阳湖流域入湖总水量变化与旱涝急转规律分析. 应用基础与工程科学学报, 2013, **21**(5): 845-856.].

[36] Li YL, Yao J, Zhang Q. Numerical study on the hydrodynamic influences of the Yangtze River backflow into Poyang Lake. *J Lake Sci*, 2017, **29**(5): 1227-1237. DOI: 10.18307/2017.0521. [李云良，姚静，张奇. 长江倒灌对鄱阳湖水文水动力影响的数值模拟. 湖泊科学, 2017, **29**(5): 1227-1237.]

[37] Wang H. Regional assessment of human-caused ecological risk in the Poyang Lake Eco-economic Zone using production-living-ecology analysis. *PLoS One*, 2021, **16**(2): e0246749. DOI: 10.1371/journal.pone.0246749.

[38] Jiang WY, Liu B, Deng YP *et al*. Simulation of surface water-groundwater interaction in the plain area of the Poyang Lake considering the change of water body area. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2023, **50**(4): 95-104. [姜文瑜，刘波，邓月萍等. 考虑水体面积变化的鄱阳湖平原区地表-地下水相互作用模拟. 水文地质工程地质, 2023, **50**(4): 95-104.]

[39] Liu J, Zhang Q, Zuo HJ *et al*. A surface runoff model for Lake Poyang watershed. *Journal of Lake Sciences*, 2009, **21**(4): 570-578. DOI: 10.18307/2009.0417. [刘健，张奇，左海军等. 鄱阳湖流域径流模型. 湖泊科学**,** 2009, **21**(4): 570-578.]

[40] Li Y L, Zhang Q, Li XH *et al.* Hydrological effects of Poyang Lake catchment in response to climate changes. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, **22**(10): 1339-1347. [李云良，张奇，李相虎等. 鄱阳湖流域水文效应对气候变化的响应. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(10): 1339-1347.]

[41] Wang CL, Chen HH, Tang LS *et al*. A daily meteorological drought indicator based on standardized antecedent precipitation index and its spatial-temperal variation. *Climate Change Research*, 2012, **8**(3): 157-163. [王春林，陈慧华，唐力生等. 基于前期降水指数的气象干旱指标及其应用. 气候变化研究进展, 2012, **8**(3): 157-163.]

[42] Xie WP, Yang JS. Assessment of soil water content in field with antecedent precipitation index and groundwater depth in the Yangtze River Estuary. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, **12**(4): 711-722. DOI: 10.1016/S2095-3119(13)60289-0.

[43] McQuigg J. A simple index of drought conditions. *Weatherwise*, 1954, **7**(3): 64-67. DOI: 10.1080/00431672.1954.9930323.

[44] Maheras P, Xoplaki E, Kutiel H. Wet and dry monthly anomalies across the Mediterranean Basin and their relationship with circulation, 1860–1990. *Theoretical and Applied Climatology*, 1999, **64**(3): 189-199. DOI: 10.1007/s007040050122.

[45] Zhou W, Liu DD, Zhang JY *et al*. Identification and frequency analysis of drought–flood abrupt alternation events using a daily-scale standardized weighted average of the precipitation index. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, **11**: 1142259. DOI: 10.3389/fenvs.2023.1142259.

[46] Baltas EA, Dervos NA, Mimikou MA. Technical Note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, **11**(6): 1825-1829. DOI: 10.5194/hess-11-1825-2007.

[47] Shen HB, Xu ZX, Cao B *et al*. A distributed SCS-CN model with revised effective precipitation. *Advances in Water Science*, 2023, **34**(4): 553-561. [申红彬, 徐宗学, 曹兵等. 分布式 SCS-CN 有效降雨修正模型建立及应用. 水科学进展, 2023, **34**(4): 553-561.]

[48] 江西省水文局. 江西省暴雨洪水查算手册 . 南昌：江西省水文局，2015.