DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250116

考虑空间迁移与差异的江苏省旱涝急转事件特征分析

周月娇[1],栾承梅[1],冯胜男[1],褚心怡[2]

(1. 江苏省水文水资源勘测局,江苏 南京 210029; 2. 江苏省水文水资源勘测局淮安分局,江苏 淮安 223005)

摘要:基于江苏省1960～2020年的降水数据,采用改进的标准化旱涝急转指数(I_{SWDAI})对旱涝急转情景进行识别,利用趋势分析、Morlet小波分析法研究了旱涝急转事件时间演变特征;引入标准差椭圆模型,细致刻画旱涝急转各类情景的频次重心迁移情况,并利用泰尔指数定量揭示区域间旱涝急转事件的空间差异性。结果表明,1960～2020年间涝转旱强度高于旱转涝,且旱涝急转事件发生存在4～6年明显周期规律;各类情景下发生频次的重心均位于西部,呈向东南移动趋势;三大地理分区内部各城市间发生旱涝急转的风险差异远大于地理分区间的差异,苏南地区内部旱涝急转情景的风险差异较大,而淮北地区内部出现单一涝转旱情景的风险差异较大。

关键词:旱涝急转;空间演变;区域差异;江苏省

中图分类号:P338^{+}.6 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-7709(2026)03-0056-06

Characterization of Drought-flood Abrupt Alternation in Jiangsu Province Considering Spatial Migration and Variability

ZHOU Yue-jiao[1], LUAN Cheng-mei[1], FENG Sheng-nan[1], CHU Xin-yi[2]

(1. Jiangsu Hydrological and Water Resources Survey Bureau, Nanjing 210029, China;
2. Huai'an Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Huai'an 223005, China)

Abstract: Based on the precipitation data of Jiangsu Province from 1960 to 2020, the improved standardised drought and flood rapid transition index (I_{SWDAI}) was used to identify drought and flood sudden transition scenarios. The temporal evolution of drought and flood rapid transition events was investigated by using trend analysis and Morlet wavelet analysis. The standard deviation ellipse model was introduced to describe the migration of the centre of gravity of the frequency of various scenarios of droughts and floods. The spatial differences of sudden transitions from drought to flood among regions were quantitatively revealed by using the Terrell index. The results show that the intensity of flood-to-drought transition is higher than that of drought-to-flood transition from 1960 to 2020, and there is an obvious cycle pattern of drought and flood emergencies in the period of 4-6 years; The centre of gravity of the occurrence of various scenarios is located in the west, with a tendency of shifting to the southeast; The difference in the risk of drought and flood emergencies among cities within the three major geographic divisions is much greater than that among geographic regions. There is a greater difference in the risk of drought and flood emergencies in the South Jiangsu region. The differences in the risk of a single flood-drought transition scenario are greater in the Huaibei region.

Key words: drought-flood abrupt alternation; spatial evolution; regional differences; Jiangsu Province

1 引言

受气候变暖及人类活动的影响,近年来极端水文气象灾害的发生频率和强度不断增加,短时间内发生水旱交替现象的概率明显上升[1-3]。旱涝急转事件的发生对防汛抗旱工作中的精准预报和预警决策提出了更高的要求。不同流域、不同区域的旱涝急转时空演变特征,也受到越来越多的关注。目前,针对旱涝急转的研究主要集中在两个方面,一方面是通过多元回归方法对旱涝急转事件的驱动因素进行定性和定量分析,如薛联

收稿日期:2025-01-15,**修回日期**:2025-05-29,**接受日期**:2025-05-31

作者简介:周月娇(2000-),女,硕士、助理工程师,研究方向为水文,E-mail:425480770@qq.com

通讯作者:栾承梅(1976-),女,博士、高级工程师,研究方向为水文预报,E-mail:253206294@qq.com

中国知网 https://www.cnki.net

青等[4]采用随机森林等方法探究典型干旱区和湿润区旱涝急转驱动因子;雷晓平等[5]采用交叉小波变换探究各时段旱涝急转指数与大气环流指数的时频域关系。另一方面是通过构建旱涝急转指标,对区域发生的旱涝急转事件进行识别与特征分析;如孟长青等[6]基于月尺度的旱涝急转指数,分析了长江流域历史和未来四种事件,并构建旱涝急转时变函数,揭示了未来旱涝急转风险变化;梁曼琳等[7]对比并优选能够精准刻画流域水旱特点的旱涝急转指数,并对珠江流域旱涝急转事件进行识别与验证。由于针对旱涝急转的研究多以流域为对象[7-8],缺乏以行政分区作为研究对象的成果,这与以行政区作为主体的防汛抗旱措施制定存在偏差。同时,以往研究中多采用数理统计的方法对演变情况进行分析,而缺乏从空间角度直观地刻画与表达旱涝急转事件发生特征。为此,本文以江苏省为例,采用改进的旱涝急转指数(I_{SWDAI})识别 1960～2020 年间旱涝急转的各种情景,并利用趋势分析、Morlet 小波分析法分析其时间演变特征;在此基础上,引入标准差椭圆模型和泰尔指数,刻画旱涝急转各类情景在空间上的重心迁移情况和区域差异状况,从而助力旱涝急转预警与综合应对能力的提升。

2　数据来源与研究方法

2.1　研究区概况与数据来源

江苏省(北纬 30°45′～35°08′,东经 116°21′～121°56′)位于我国东部沿海地区中部,长江、淮河下游,总面积 $10.26\times10^4\text{km}^2$;年均降水量为 700～1250 mm,年径流深 150～400 mm。受西风带、副热带和热带天气系统的多重影响,春夏之交易形成江淮梅雨,夏秋之际多台风暴雨,秋冬春季常出现干旱情况[9],旱涝急转事件是江苏省防洪抗旱工作开展亟需考量的因素。

根据地理分区,将全省划分为淮北、江淮、苏南 3 个分区,见图 1。本文采用的气象数据为江苏省 1960～2020 年月尺度的降雨数据,数据来源于中国气象数据网。

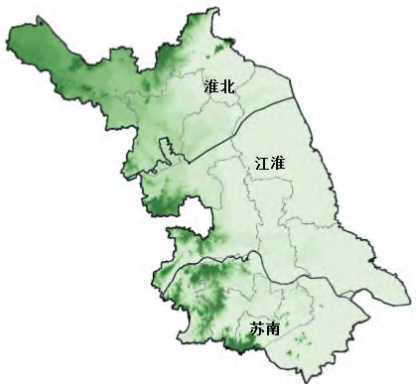


图 1　研究区概况图

Fig. 1　General map of the study area

2.2　研究方法

2.2.1　改进的标准化旱涝急转指数

标准化降水指数(I_{SPI})[10-11]是能够定量表征干旱强度和持续时间的气象指标,具有计算简单、时间尺度灵活的特点。其采用伽马分布函数对降水时间序列进行拟合,再通过等概率变换原则转化为正态分布,实现对干旱不同发展阶段的刻画。以月尺度降雨数据为基础,具体计算公式为:

$$I_{SPI}=\begin{cases}-\left(k-\dfrac{c_0+c_1k+c_2k^2}{1+d_1k+d_2k^2+d_3k^3}\right) & 0<P(x)\leqslant0.5,k=\sqrt{\ln\left[\dfrac{1}{P(x)^2}\right]}\\ k-\dfrac{c_0+c_1k+c_2k^2}{1+d_1k+d_2k^2+d_3k^3} & 0.5<P(x)<1,k=\sqrt{\ln\dfrac{1}{1-P(x)^2}}\end{cases}\tag{1}$$

其中 $P(x)=\dfrac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)}\int_0^x x^{\alpha-1}\mathrm{e}^{-t/\beta}\mathrm{d}t\quad x>0$　(2)

式中,x 为时段降雨量;α、β 分别为形状、尺度参数;$\Gamma(\alpha)$为 Gamma 函数;c_0、c_1、c_2、d_1、d_2、d_3 均为参数,分别取值为 2.515 517、0.802 853、0.010 328、1.432 788、0.189 269、0.001 308。

传统的长短周期旱涝急转指数计算中多涉及旱涝急转强度、旱涝强度和权重 3 个要素,其权重参数的设置影响着旱涝急转事件的识别能力,出现随着权重系数的增加,错判率减小而漏判率增大的情况,始终无法避免错漏判问题。涂新军等[12]提出的改进标准化旱涝急转指数,以相邻事件分别为旱、涝事件的前提,计算旱涝急转指数,其计算公式为:

$$I_{SWDAI}=\begin{cases}0 & (I_{SPI_i}<0.5\cap I_{SPI_{i+1}}<0.5)\cup(I_{SPI_i}>-0.5\cap I_{SPI_{i+1}}>-0.5)\\ \dfrac{I_{SPI_{i+1}}-I_{SPI_i}}{2}\left[1+\dfrac{|I_{SPI_{i+1}}-I_{SPI_i}|}{(\max I_{SPI}-\min I_{SPI})}\right] & (I_{SPI_i}\leqslant-0.5\cap I_{SPI_{i+1}}\geqslant0.5)\cup(I_{SPI_i}\geqslant0.5\cap I_{SPI_{i+1}}\leqslant-0.5)\end{cases}\tag{3}$$

对相邻事件存在同旱、同涝及存在非旱或非涝等情形进行归零处理,设置 $(I_{SPI_{i+1}}-I_{SPI_i})/2$ 为旱涝急转强度,保证其与旱涝分级标准一致,见表 1;设置 $1+|I_{SPI_{i+1}}-I_{SPI_i}|/(\max I_{SPI}-\min I_{SPI})$

中国知网　https://www.cnki.net

为权重项，权重大于等于 1，且增加非对称旱涝急转情形的权重，避免旱涝急转的错漏判。旱涝急转等级划分标准见表 1。

表 1 旱涝急转等级划分标准

Tab. 1 Criteria for classifying drought-flood abrupt alternation

旱涝分级	I_{SWDAI}	旱涝分级	I_{SWDAI}
极度	$I_{SWDAI}\leqslant -2.0$	轻度	$0.5\leqslant I_{SWDAI}<1.0$
重度	$-2.0<I_{SWDAI}\leqslant -1.5$	中度	$1.0\leqslant I_{SWDAI}<1.5$
中度	$-1.5<I_{SWDAI}\leqslant -1.0$	重度	$1.5\leqslant I_{SWDAI}<2.0$
轻度	$-1.0<I_{SWDAI}\leqslant -0.5$	极度	$I_{SWDAI}\geqslant 2.0$

2.2.2 空间特征分析方法

构建标准差椭圆模型[13-14]准确刻画旱涝急转事件空间演变特征。以图形化的输出方式，通过标准化椭圆横纵轴长度的差异，能够直观量化旱涝急转事件在空间上分布的方向性和离散程度。当长、短半轴的值差距越大，表明空间上旱涝急转事件发生的方向性越强，聚集程度越高。其次，通过标准化椭圆圆心的坐标变化，能够动态刻画旱涝急转事件发生在空间上的重心迁移特点。

泰尔指数是一种用来评价系统发展协调程度、衡量差异状况的统计指标。采用泰尔指数[15]定量描述旱涝急转事件发生的空间差异状况。将江苏省旱涝急转事件发生的总体空间差异，分解淮北、江淮与苏南三个地理分区内部各行政区划间差异和三个地理分区间差异两部分，即组内差异和组间差异两个部分。当组间差异占比较大为主导时，说明三个地理分区间旱涝急转特征差别较大，同一分区内部各行政区划间差异较小。据此，可精准定位差异点，提供针对性政策制定依据。即：

$$T=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{y_i}{\bar{y}}\ln\left(\frac{y_i}{\bar{y}}\right) \tag{4}$$

$$T=T_w+T_b \tag{5}$$

$$T_w=\sum_{p=1}^{m}\left(\frac{n_p}{n}\frac{\overline{y_p}}{\bar{y}}\right)T_p \tag{6}$$

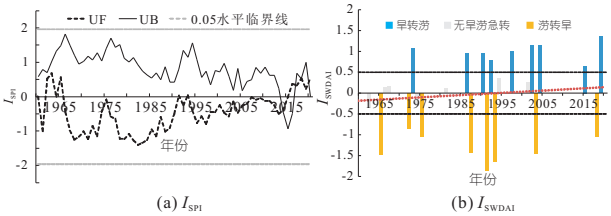
$$T_b=\sum_{p=1}^{m}\left(\frac{n_p}{n}\frac{\overline{y_p}}{\bar{y}}\right)\ln\left(\frac{\overline{y_p}}{\bar{y}}\right) \tag{7}$$

式中，T 为泰尔指数；n 为城市数量；y_i 为第 i 个城市旱涝急转发生概率；$\bar{y}$ 为旱涝急转发生概率的均值；T_w 为区域内部差异；T_b 为区域间差异；m 为区域数，分为淮北、江淮和苏南 3 个区域；n_p 为区域 p 内城市数；$\overline{y_p}$ 为区域 p 内旱涝急转发生概率的均值；T_p 为区域 p 的泰尔指数。

3 结果与分析

3.1 旱涝急转指数时间变化特征分析

对江苏省 1960～2020 年的 I_{SPI} 值进行 MK 突变检验[16]，如图 2(a)所示。由图 2(a)可知，I_{SPI} 值变化阶段明显，旱、涝事件的发生趋势交替变化。1960～1963、1968～1975、1983 年以后 I_{SPI} 存在上升趋势，表明该段时间内干旱强度处于增大趋势；其余时段存在下降趋势。同时在 0.05 水平的临界线范围内，在 2013～2020 年江苏省出现 3 次旱涝情况的突变点。这表明旱、涝强度在 2013～2020 年间内转变迅速，这与近年来东亚季风年际变率增强、厄尔尼诺与拉尼娜事件影响副热带高压位置与强度有关[17]。



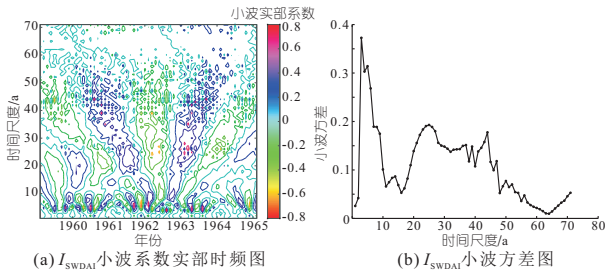
(a) I_{SPI} (b) I_{SWDAI}

图 2 1960～2020 年的 I_{SPI} 与 I_{SWDAI} 指标年际趋势图

Fig. 2 Inter-annual trend of I_{SPI} and I_{SWDAI} indicators from 1960 to 2020

进一步分析江苏省 I_{SWDAI} 指标计算的年际趋势，如图 2(b)所示。由图 2(b)可知，1960～2020 年间共发生 8 次涝转旱，其中 62.5%的涝转旱强度为中度及以上；发生 9 次旱转涝事件，其中 55.6%的旱转涝强度为中度，不存在重度与极度旱转涝的情况。此外，I_{SWDAI} 指标整体上年变化呈上升趋势，上升速率为 0.5%/a。

采用 Morlet 小波分析法[18]分析 1960～2020 年的旱涝急转的周期变化规律，如图 3 所示。小波振幅显示了江苏省旱涝急转事件的变化周期。由图 3 可知，I_{SWDAI} 的时间序列在多个时间尺度上均存在明显的周期性变化规律，尤其是在 4～6 年尺度上周期较为明显。同时，在 1980 年以前，I_{SWDAI} 指数在 20 年尺度上周期性震荡也较为明显；1980 年以后，周期变化时间尺度变为 14～16、22～24 年。此外，在 2010～2020 年，I_{SWDAI} 的强



(a) I_{SWDAI}小波系数实部时频图 (b) I_{SWDAI}小波方差图

图 3 1960～2020 年的旱涝急转小波分析图

Fig. 3 Wavelet analysis of drought-flood abrupt alternation from 1960 to 2020

中国知网 https://www.cnki.net

度减弱,且高值中心闭合圈不完整,这表明在 2020 年后旱涝急转出现的风险较大。

3.2　旱涝急转频次空间迁移特征分析

采用标准差椭圆模型描述旱涝急转情景发生的空间变化特征,如图 4、表 2 所示。由图 4、表 2 可知,1960～2020 年旱涝急转、旱转涝及涝转旱的发生频次重心在淮安与扬州之间波动,且一直居于地理重心的西部。参考各年代重心移动距离,整体上旱涝急转整体发生频次的重心及各分情景的频次重心均逐渐向扬州范围内移动。其中,旱涝急转及旱转涝情景的频次重心均在 1960～1990、2010～2020 年间由北向南移动;而在 1990～2010 年间发生北抬,表明该段时间内旱转涝情景的空间分布存在突变,苏北地区旱涝急转发生频次明显增加。同时,各年代涝转旱的频次重心基本均在旱转涝重心的东北部,表明江苏西南部山丘区降水增多、出现旱转涝的概率占比例较高。

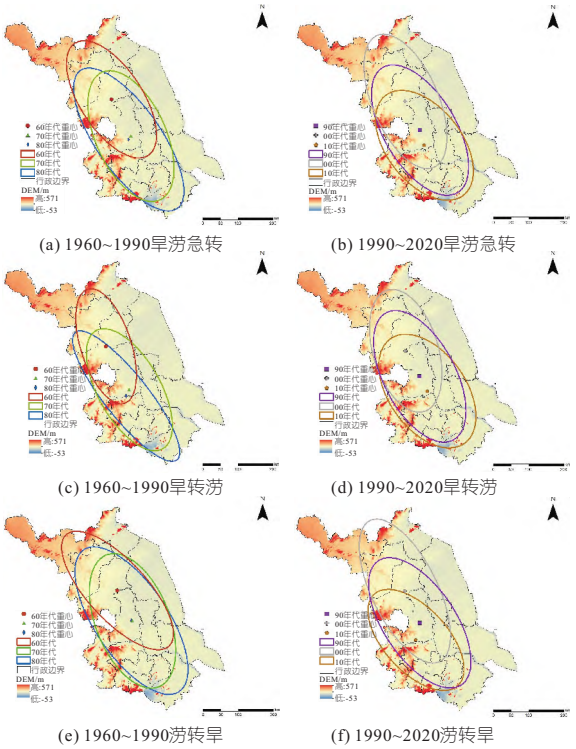


图 4　旱涝急转发生频次空间迁移图

Fig. 4　Spatial migration of the frequency of drought-flood abrupt alternation occurrence

表 2　各旱涝急转情景标准差椭圆特征表

Tab. 2　Table of standard deviation ellipse characteristics for each drought-flood abrupt alternation scenario

情景	年份	重心坐标		移动距离/km	方向	方位角/(°)	扁率
		经度	纬度				
旱涝急转	1960～1970	119.09	33.34			146.58	0.533
	1970～1980	119.59	32.55	103.46	东南	155.37	0.498
	1980～1990	119.54	32.48	10.14	西南	144.82	0.614
	1990～2000	119.49	32.68	22.55	西北	149.27	0.507
	2000～2010	119.12	33.30	80.25	西北	156.88	0.541
	2010～2020	119.60	32.35	118.37	东南	142.22	0.408
旱转涝	1960～1970	118.96	33.33			161.97	0.579
	1970～1980	119.55	32.39	123.13	东南	150.44	0.540
	1980～1990	119.47	32.25	17.91	西南	141.45	0.731
	1990～2000	119.49	32.69	48.19	东北	152.27	0.501
	2000～2010	119.13	33.23	72.69	西北	163.25	0.485
	2010～2020	119.68	32.37	114.19	东南	144.70	0.399
涝转旱	1960～1970	119.24	33.36			153.75	0.584
	1970～1980	119.63	32.70	84.19	东南	137.63	0.484
	1980～1990	119.60	32.71	2.95	西北	137.34	0.608
	1990～2000	119.49	32.67	12.82	西南	158.32	0.481
	2000～2010	119.11	33.35	86.83	西北	146.05	0.574
	2010～2020	119.40	32.30	120.89	东南	146.21	0.519

分析标准差椭圆的形状发现,旱涝急转各种情景的长轴均呈现西北至东南方向的倾斜延伸,且 1980～1990 年其标准椭圆扁率均为多年最大,说明旱涝急转各种情景的发生频次空间分布上趋于离散,西部地区发生频次较高。旱转涝情景在 1980～2020 年其扁率一直降低,且椭圆方位角在 150°左右,表明空间上东西部发生旱转涝的概率差距逐步缩小。

3.3　旱涝急转空间差异性分析

对淮北、江淮及苏南三个地理分区发生旱涝急转概率的差异情况进行分析,如表 3 所示。将旱涝急转、旱转涝、涝转旱 3 个情景江苏省内发生的空间总体差异分解为三个地理分区的组内差异和组间差异。由贡献率可知,各种情景均是三个地理分区的区域内部发生概率差异远大于地理分区间的差异,旱涝急转和涝转旱的组内差异占比分别达到 88.33%、91.41%。其次,对比三个情景中贡献率均较低的组内差异,发现旱转涝的组间差异数值相对较高,说明旱转涝情景在江苏省内发生的位置较其他情景南北分布更为分散。

具体分析不同情景下的组内差异情况,发现

表 3　三大地理分区旱涝急转发生概率泰尔指数

Tab. 3　Theil index of probability of occurrence of drought-flood abrupt alternation for the three geographic subregions

情景	总体差异 T	组间差异 T_b		组内差异 T_w							
		指数	贡献率/%	总体		江淮		淮北		苏南	
				指数	贡献率/%	指数	贡献率/%	指数	贡献率/%	指数	贡献率/%
旱涝急转	0.015 48	0.001 81	11.67	0.013 67	88.33	0.005 39	34.84	0.001 97	12.71	0.006 31	40.78
旱转涝	0.036 52	0.013 70	37.52	0.022 82	62.48	0.010 34	28.32	0.002 75	7.53	0.009 73	26.63
涝转旱	0.022 38	0.001 92	8.59	0.020 45	91.41	0.002 76	12.34	0.012 22	54.63	0.005 47	24.44

中国知网　https://www.cnki.net

不同情景下，组内差异贡献率最值存在的区域也不同，这表明江苏省不同区域旱涝急转各类事件的驱动机制存在显著差异。在旱涝急转总体情况中，苏南贡献率最大达到 40.78%，即苏南南京、常州、无锡、镇江、苏州 5 市出现旱涝急转情景的风险差异较大，其中南京出现旱涝急转的风险较高，这主要与区域内地势有关。就旱转涝和涝转旱单个情景而言，旱转涝事件在江淮地区表现出最强的空间异质性；涝转旱的组内差异则主要来自淮北地区，位于淮北的宿迁、徐州、盐城以及连云港出现涝转旱情景的风险差异较大，其中连云港风险相对较高，这主要与连云港受东亚季风以及东北部山丘区气候与下垫面的双重影响有关。

4 结论

a. 基于江苏省 1960～2020 年的降水数据，采用改进的 I_{SWDAI} 指标对旱涝急转情景进行识别，利用趋势分析、小波分析、标准椭圆模型以及泰尔指数等方法分析了江苏省旱涝急转事件的时空演变特征。

b. 江苏省 1960～2020 年间共发生 8 次涝转旱，其中 62.5%强度为中度及以上；发生 9 次旱转涝事件，其中 55.6%强度为中度。I_{SWDAI} 指标年变化呈上升趋势，且存在 4～6 年明显周期规律。

c. 采用标准椭圆模型刻画旱涝急转空间变化特征，发现 1960～2020 年旱涝急转事件的频次重心均居于地理重心的西部，且总体向东南移动。代表旱涝急转各类情景的标准化椭圆长轴均呈现西北至东南方向的倾斜延伸特征；且椭圆扁率总体呈减小状况，表明东西部发生旱转涝的概率差距逐步缩小。

d. 江苏省旱涝急转各情景的总体差异主要与三个地理分区内部行政区划间发生概率的差异有关。其中苏南地区出现旱涝急转情景的风险差异较大，南京风险较高；淮北地区出现涝转旱情景的风险差异较大，连云港风险相对较高。

参考文献：

[1] 孙锦浩，苏布达，王东方，等. 中国旱涝急转事件时空变化特征[J]. 水利水电技术(中英文)，2024，55(8)：13-23.(SUN J H，SU B D，WANG D F，et al. Characteristics of spatial and temporal changes of drought and flood emergencies in China[J]. Water resources and hydropower engineering，2024，55(8)：13-23.(in Chinese))

[2] 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 C Q，DONG Z J，WANG Y K，et al. Evolutionary characteristics of droughts and floods in the Yangtze River basin and their socio-economic exposure[J]. Journal of hydroelectric engineering，2024，43(4)：34-49.(in Chinese))

[3] 覃江林，彭盼盼，胡铁松. 旱涝急转条件下水稻水分利用效率变化研究[J]. 中国农村水利水电，2024(1)：48-55.(QIN J L，PENG P P，HU T S. Water use efficiency of rice under drought and flood conditions[J]. China rural water and hydropower，2024(1)：48-55.(in Chinese))

[4] 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 L Q，ZHANG Y H，LIU Y H. Comparative study on the evolutionary characteristics of drought and flooding in arid and humid zones[J]. Water resources protection，2024，40(4)：1-8.(in Chinese))

[5] 雷晓平，宋小燕，果华雯，等. 中国南北过渡带短周期旱涝急转及潜在驱动因素分析[J]. 自然灾害学报，2022，31(4)：31-43.(LEI X P，SONG X Y，GUO H W，et al. Analysis of short-period droughts and floods in the north-south transition zone of China and the potential driving factors[J]. Journal of natural disasters，2022，31(4)：31-43.(in Chinese))

[6] 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 C Q，DONG Z J，WANG Y K，et al. Evolutionary characteristics of droughts and floods in the Yangtze River basin and their socio-economic exposure[J]. Journal of hydroelectric engineering，2024，43(4)：34-49.(in Chinese))

[7] 梁曼琳，刘丙军，李旦. 珠江流域旱涝急转事件识别指数优选研究[J]. 自然灾害学报，2022，31(4)：57-64.(LIANG M L，LIU B J，LI D. Preferred identification index for drought and flood emergencies in the Pearl River Basin[J]. Journal of natural disasters，2022，31(4)：57-64.(in Chinese))

[8] 秦国帅，刘建卫，许士国，等. 太子河流域降水及旱涝时空演变特征分析[J]. 中国农村水利水电，2019(8)：76-82.(QIN G S，LIU J W，XU S G，et al. Spatiotemporal evolution characteristics of precipitation and drought-flood in the taizi river basin[J]. China rural water and hydropower，2019(8)：76-82.(in Chinese))

[9] 章益棋，袁飞，张利敏，等. 基于降水统计方法的

中国知网 https://www.cnki.net

江苏省旱涝急转演变特征研究[J]. 水文，2022，42(2)：36-41，29.(ZHANG Y Q，YUAN F，ZHANG L M，et al. Characteristics of droughts and floods in Jiangsu Province based on precipitation statistics[J]. Journal of China hydrology，2022，42(2)：36-41，29.(in Chinese))

[10] 王乐，訾丽. 基于SPI指数的长江上游多尺度旱涝特征分析[J]. 中国防汛抗旱，2022，32(5)：30-37.(WANG L，ZI L. Characterisation of multi-scale drought and flooding in the upper Yangtze River based on SPI index[J]. China flood & drought management，2022，32(5)：30-37.(in Chinese))

[11] 吴浩，张剑明，颜鹏程，等. 湖南省不同时间尺度SPI干旱特征研究[J]. 气象科技进展，2021，11(2)：138-147.(WU H，ZHANG J M，YAN P C，et al. Characteristics of SPI drought at different time scales in Hunan Province[J]. Advances in meteorological science and technology，2021，11(2)：138-147.(in Chinese))

[12] 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 X J，PANG W N，CHEN X H，et al. Limitations and improvements of the traditional drought and flood emergency assessment index[J]. Advances in water science，2022，33(4)：592-601.(in Chinese))

[13] 黎扬兵，张洪波，任冲锋，等. 基于TRMM降尺度数据的渭河流域干旱时空演变特征与重心迁移规律研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版)，2023，44(3)：14-24.(LI Y B，ZHANG H B，REN C F，et al. Study on the spatial-temporal evolution characteristics of drought and gravity center migration in the Weihe River Basin based on TRMM downscaling data[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (natural science edition)，2023，44(3)：14-24.(in Chinese))

[14] 赵子萌，邵薇薇，曹永强，等. 辽宁省旱涝急转特征与趋势研究[J]. 水利水电技术(中英文)，2024，55(6)：32-43.(ZHAO Z M，SHAO W W，CAO Y Q，et al. Characteristics and trends of droughts and floods in Liaoning Province[J]. Water resources and hydropower engineering，2024，55(6)：32-43.(in Chinese))

[15] 张文睿，孙栋元，王亦可，等. 河西走廊水资源-生态环境-社会经济系统耦合关系及时空分异[J]. 干旱区研究，2024，41(9)：1527-1537.(ZHANG W R，SUN D Y，WANG Y K，et al. Coupled water resources-ecological environment-socio-economic systems and spatial and temporal variability in the Hexi Corridor[J]. Arid zone research，2024，41(9)：1527-1537.(in Chinese))

[16] 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[J]. 地理科学，2021，41(12)：2222-2231.(ZHAO D S，ZHANG J C，DENG S Q，et al. Spatial and temporal variability characteristics of drought and flooding emergencies in Southwest China from 1960 to 2018[J]. Scientia geographica sinica，2021，41(12)：2222-2231.(in Chinese))

[17] 丁一汇，司东，柳艳菊，等. 论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化[J]. 大气科学，2018，42(3)：533-558.(DING Y H，SI D，LIU Y J，et al. On the characteristics，driving forces and inter-decadal variability of the East Asian summer monsoon[J]. Chinese journal of atmospheric sciences，2018，42(3)：533-558.(in Chinese))

[18] 楚纯洁，张小磊，周金凤. 1960—2018年河南省短周期旱涝急转事件演变特征[J]. 水土保持研究，2023，30(4)：275-285.(CHU C J，ZHANG X L，ZHOU J F. Evolutionary characteristics of short-period drought and flooding episodes in Henan Province from 1960 to 2018[J]. Research of soil and water conservation，2023，30(4)：275-285.(in Chinese))

(上接第 193 页)

[6] 朱晋锋，褚剑锋，陈宣有，等. 浅谈某水电站筒形阀缺陷分析及处理[J]. 水电站机电技术，2024，47(5)：68-72.(ZHU J F，CHU J F，CHEN X Y，et al. Discussion on defect analysis and treatment of cylindrical valve at a hydropower plant[J]. Mechanical & electrical technique of hydropower station，2024，47(5)：68-72.(in Chinese))

[7] 钱勤，杨怀刚，符建平，等. 大型水轮发电机组上机架和顶盖振动特性计算分析[J]. 水电能源科学，2004，22(2)：49-50，63.(QIAN Q，YANG H G，FU J P，et al. Computation and analysis of vibration characteristic for upper bracket and head cover of a large-scale hydropower generator unit[J]. Water resources and power，2004，22(2)：49-50，63.(in Chinese))

[8] 庞立军，钟苏. 带圆筒阀的水轮机顶盖轴向刚度主要影响因素分析[J]. 大电机技术，2010(1)：54-57.(PANG L J，ZHONG S. The main factors analysis for the axial stiffness of ring gate structure turbine head cover[J]. Large electric machine and hydraulic turbine，2010(1)：54-57.(in Chinese))

中国知网 https://www.cnki.net