

基于气象旱涝指数的旱涝急转事件识别方法

杨家伟, 陈 华, 侯雨坤, 赵 英, 陈启会, 许崇育, 陈 杰

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 基于长江流域212个气象站点1961-2017年的日降水资料, 借助标准化加权平均降水指数(SWAP), 结合多门槛游程理论, 提出一种识别旱涝急转事件的新方法。方法应用于旱涝急转事件高发的长江流域, 分别从典型站点旱涝事件分析、区域典型旱涝急转事件分析、旱涝急转事件时空分布规律分析等角度, 探讨了长江流域1961-2017年旱涝急转事件规律。结论显示: ① SWAP指数对于旱涝事件具有良好的识别能力。② 聚类方法可聚合相似旱涝急转事件, 2011年长江中下游旱涝急转事件中干旱事件占主导地位, 持续时间远长于洪涝事件。③ 长江流域旱涝急转事件呈现明显的区域规律: 上游发生频率较低, 中下游偏高; 此外, 长江流域多数分区近期旱涝急转事件发生频率呈现上升趋势。研究结果表明, 基于SWAP指数并结合多门槛游程理论的方法能够比较准确地识别旱涝急转事件, 可进一步应用于旱涝急转事件的预测及评估中。

关键词: 旱涝急转; 平均降水指数(SWAP); 多门槛游程理论; 聚类

DOI: 10.11821/dlxb201911012

1 引言

《中国水旱灾害公报2017》统计结果显示: 21世纪以来, 中国因旱涝灾害年均受灾人口近亿人次, 经济损失上千亿元^[1], 研究旱涝事件规律具有重要的社会经济价值。作为影响旱涝事件的决定性因素, 降水受到研究者们广泛关注。然而, 以往的研究多围绕降水异常引起的季节内洪涝事件, 却很少探讨季节间的旱涝交替现象^[2]。近年来随着旱涝灾害及极端降水发生频率的增加^[3-5], 短时间内的旱涝交替也愈加频繁。对于前期处于干旱状态的区域, 极端降水的发生可能使得该区域迅速由干旱转变为洪涝, 这种短期内由干旱转为洪涝的自然现象, 称为“旱涝急转”。旱涝急转是典型的因季节间降雨异常引起的旱涝交替现象^[6], 由于旱涝并存且转变快速, 旱涝急转往往比单独的干旱或洪涝事件的危害更大^[7]。

旱涝急转现象在中国时有发生, 典型事件如1994年夏初珠江流域以及2011年夏初长江中下游的旱涝急转事件^[8-9], 造成了巨大的工农业损失及人员伤亡。国内外学者针对旱涝急转事件的筛选做了一系列研究, Wu等^[10]根据夏季降水量和无雨日定义了旱涝急转指数(Droughts-Floods Coexistence Index, DFCI), 首次定量筛选了季尺度的旱涝急转事件; Zong等^[11]采用扩展经验正交函数(Extended Empirical Orthogonal Function, EEOF)对长江流域2011年旱涝急转事件进行分析; 闪丽洁等^[12]将DFCI指数加以改进, 定义了日

收稿日期: 2018-12-17; 修订日期: 2019-08-10

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0603702); 国家自然科学基金项目(51339004) [Foundation: National Key R&D Program, No.2017YFA0603702; National Natural Science Foundation of China, No.51339004]

作者简介: 杨家伟(1994-), 男, 河南周口人, 硕士生, 主要从事旱涝灾害研究。E-mail: yang_jiawei@whu.edu.cn

通讯作者: 陈华(1977-), 男, 福建建瓯人, 教授, 博导, 主要从事流域水文模拟等研究。E-mail: chua@whu.edu.cn

2358-2370 页

尺度旱涝急转指数 (Dry-Wet Abrupt Alternation Index, DWAAI)。综合以往旱涝急转的研究, 其不足之处有二: 首先, 多从月尺度甚至季尺度上筛选旱涝急转事件, 较大的时间尺度容易造成旱涝中和, 导致旱涝急转事件筛选不准确, 而从日尺度上筛选旱涝急转事件的研究较少^[12]。此外, 已有研究普遍缺乏对旱涝急转事件期间的降水量、无雨日等特征分析, 这些特征对于事件的分析与预测至关重要。

基于此, 本文在计算日尺度气象旱涝指数 (Standard Weighted Average Precipitation, SWAP) 基础上 (该指数在旱涝监测方面被证明具有良好的适用性, 可以从较短时间尺度上, 实现对旱涝情景的动态识别^[13-15]), 结合多门槛游程理论^[16-17], 提出了一种定量筛选旱涝急转事件的新方法。鉴于长江流域旱涝急转事件较为频发, 且相关研究较少, 故本文选取长江流域为研究对象。

2 研究区域与数据

长江流域水量充沛, 流域面积约 180 万 km², 干流全长 6300 km, 是年径流量仅次于亚马逊河和刚果河的世界第三大河^[18-19]。流域内工农业发达、人口密集。然而, 受季风气候影响, 长江流域降水时空分布不均, 旱涝灾害频发, 旱涝急转现象时有发生, 对流域内工农业发展造成重大影响。

资料来源于国家气象信息中心产品“中国地面气候资料日值数据集 (V3.0)”, 选用 1961-2017 年长江流域内气象站点的日降水资料, 其中缺失值大于 15% 的站点被弃用, 所选站点的缺失值采用历史同日均值插补, 最终筛选得到长江流域 212 个气象站点 1961-2017 年完整的日降水数据。本文按照水资源二级分区, 将长江流域自上游而下划分为 12 个二级子流域, 各子流域的地理位置、面积和对应的气象站点如图 1、表 1 所示。

3 方法

3.1 标准化加权平均降水指数 SWAP

Lu 等^[13]假设当日旱涝状态受前期旱涝状态和当日降水的影响, 提出了加权平均降水指数 (Weighted Average Precipitation, WAP), 来衡量当前的气象旱涝状态。WAP 的计算公式为:

$$WAP = \sum_{n=0}^N w_n P_n \quad (1)$$

$$w_n = (1 - \alpha) \alpha^n \quad (2)$$

式中: P_n 表示前 n 天当天的降水; w_n 表示 P_n 的权重; α 是表征权重随时间衰减参数; N 是前期影响天数。按经验 α 取 0.9, N 取 44。采用 Gamma 分布拟合 WAP 多年同日序列, 经正态标准化得到标准化加权平均降水指数 SWAP^[14]。值得注意的是, Gamma 分布拟合时需对 0 值数据进行处理, 以往多采用式 (3) 处理 0 值序列^[20-21]:

$$p(x) = \begin{cases} p_0 + (1 - p_0)F(x_{p>0}, \lambda), & x > 0 \\ p_0, & x = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $p(x)$ 为累计降水的概率分布; p_0 表示序列中 0 值对应概率。但季风区冬春季干燥少雨, WAP 值可能出现多日 0 值, 极端情况下 ($p_0 > 50\%$), 会使得标准化 SWAP 值均大于等于 0, 结果就会偏“洪涝”^[21]。为避免出现这种不合理现象, 本文采用 Soláková 等^[22]提出的一种 0 值处理方式处理 WAP 序列:

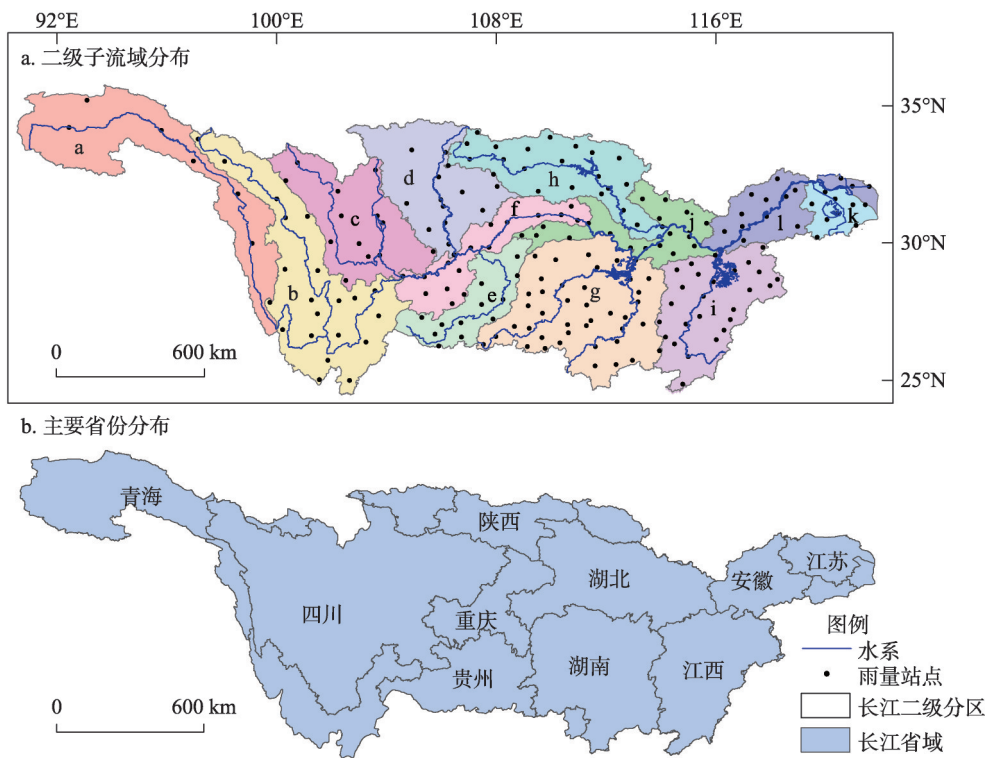


图1 长江二级子流域及气象站点分布

Fig. 1 Spatial distribution of sub-basins and meteorological stations in the Yangtze River Basin

表1 长江流域二级子流域分区表
Tab. 1 Sub-basins of the Yangtze River Basin

区域	编号	二级子流域分区	面积(万 km ²)	气象站点数 (个)
长江上游	a	金沙江石鼓上游	20.83	7
	b	金沙江石鼓下游	23.71	20
	c	岷沱江	16.48	14
	d	嘉陵江	15.88	13
	e	乌江	8.7	11
	f	上游干流区	12.02	15
长江中游	g	洞庭湖	26.23	42
	h	汉江	15.55	23
	i	鄱阳湖	16.23	25
	j	中游干流区	9.67	19
长江下游	k	三角洲平原区	3.75	9
	l	下游干流区	9.25	14

$$p(x)=\begin{cases} p_0+(1-p_0)F(x_{p>0},\lambda), & x>0 \\ \bar{p}_0=\frac{n_{p=0}+1}{2(n+1)}, & x=0 \end{cases} \quad (4)$$

式中： $n_{p=0}$ 表示0值的个数； n 为序列总数。

3.2 基于游程理论的旱涝事件以及旱涝急转事件识别

游程理论是一种时间序列分析方法，广泛应用于量化筛选旱涝事件^[16-17]。采用日尺度旱涝指数筛选旱涝事件时，游程理论的应用更加广泛^[23-24]。本文将SWAP指数与多门槛游程理论相结合，对1961-2017年间长江流域的旱涝事件与旱涝急转事件进行筛选。

3.2.1 旱涝事件识别 本文首先由各气象站的日降水资料计算对应的日尺度SWAP值，随后参考旱涝强度等级划分（表2），得到每日旱涝状况，最后根据每日的旱涝状况结合多门槛游程理论定量筛选旱涝事件。因SWAP指数与综合干旱指数（Compound Index, CI）的旱涝等级对应的概率相近，且两者同为日尺度旱涝指标，本文借鉴CI的游程设置^[23, 25-26]，以干旱事件为例，采用以下步骤识别事件：

① 干旱事件起始：轻旱等级以上持续10 d（一句）常作为干旱事件的发生标准^[25-26]，因此本文取干旱事件发生的截取水平 R_0 为-1（轻旱等级上界），当SWAP值连续10 d小于 R_0 时，定义为一次干旱事件开始，干旱起始日为这10 d中的第一天。② 干旱事件终止：连续7~10 d出现较多自然降水，使得土壤水分达到适宜或者偏湿润状态时，常作为干旱解除的标志^[23, 25-26]，因此本文取干旱事件结束的截取水平 R_1 为0.5（正常等级上界）；同时，鉴于SWAP指数已考虑前N天降水的贡献，取SWAP值连续7 d大于 R_1 时（而不是更长的10 d），为干旱事件结束标志，防止筛选得到的事件持续时间过长，干旱结束日为这7 d中的最后一天。③ 干旱持续时间：从干旱起始日期到干旱结束日期的时间间隔。④ 干旱强度：干旱持续时间内所有小于等于 R_0 的SWAP值的均值。⑤ 时段干旱评价：时段内至少发生一次干旱事件，则认为该时段发生干旱事件；时段内干旱强度为干旱事件期间内SWAP值的均值。

类似地，洪涝事件的开始和结束截取水平分别选为1（轻涝水平上界）、-0.5（正常等级下界），洪涝事件识别与干旱事件类似，在此不再赘述。另外，由于长江流域11月-次年3月为非汛期，几乎不发生洪涝事件^[18]，故本文仅考虑汛期（4-10月）的暴雨洪涝事件。

3.2.2 旱涝急转事件识别 若某时期先后发生一次干旱事件和一次洪涝事件，且干旱事件结束与洪涝事件开始的时间间隔小于5 d（一候），则定义为一次旱涝急转事件发生。其中，旱涝急转事件的起讫时间分别为干旱事件的起始时间与洪涝事件的结束时间。

定义以下统计指标，用来刻画急转事件的特征：

- (1) 急转点：一次旱涝急转事件中干旱事件的结束日期。
- (2) 急转事件次数 N ：某时段内发生旱涝急转事件的总次数。
- (3) 急转事件强度 K ：表征事件的急转程度，按如下公式定义：

$$K = \frac{\left| \sum_{i=1}^D SWAP_{后} - \sum_{i=1}^D SWAP_{前} \right|}{D}$$

(5)

式中： $\sum_{i=1}^D SWAP_{前}$ 、 $\sum_{i=1}^D SWAP_{后}$ 分别表示急转点前、后的某 D 天SWAP值累加，本文中 D 取5，即旱涝急转事件中旱涝事件的最大间隔期，旱涝急转强度等级划分如表3所示。值

表2 基于SWAP指数的旱涝强度等级
Tab. 2 SWAP categories based on the initial classification of SAWP values

旱涝等级	SWAP	概率(%)
特涝	$2.0 \leq SWAP$	2.3
重涝	$1.5 \leq SWAP < 2.0$	4.4
中涝	$1.0 \leq SWAP < 1.5$	9.2
轻涝	$0.5 \leq SWAP < 1.0$	15
正常	$-0.5 < SWAP < 0.5$	38.2
轻旱	$-1.0 < SWAP \leq -0.5$	15
中旱	$-1.5 < SWAP \leq -1.0$	9.2
重旱	$-2.0 < SWAP \leq -1.5$	4.4
特旱	$SWAP \leq -2.0$	2.3

得注意的是, 由于本文基于气象站点实测数据, 可通过邻近站点加权等方法拓展到区域旱涝急转事件的定义。

(4) 时段总无雨日距平、总降水量距平:
Wu 等^[10]认为时段内降水总量与同期相近, 而无雨日较同期增多时, 则该时段降水相对集中、分配不均匀, 并将此作为判断旱涝急转事件特征的依据。本文引入时段总无雨日距平 D_{un} 、时段总降水量距平 P_{un} 这两个指标, 分析筛选得到的旱涝急转事件的降水特征, 两指标定义为:

$$D_{un} = \frac{D_0 - \bar{D}}{\bar{D}} \tag{6}$$

$$P_{un} = \frac{P_0 - \bar{P}}{\bar{P}} \tag{7}$$

式中: D_0 、 \bar{D} 分别表示时段总无雨日、时段总无雨日均值; P_0 、 \bar{P} 分别为时段总降水量、时段总降水量均值。

3.3 K-means 聚类

K-means 聚类是一种无监督机器学习算法^[27], 该算法可自动聚合相似样本数据为一个聚类, 被广泛应用于旱涝事件的特征提取与分析^[28]。本文采用 K-means 聚类来聚合相似的旱涝急转事件, 并分析聚类事件的共同特征。

4 结果与分析

4.1 基于SWAP指数的旱涝事件筛选

为评估 SWAP 指数对于旱涝事件的筛选能力, 本文以武汉气象站为例进行分析。根据多来源灾情文献记载^[29-32], 选取湖北省 1961-2017 年间农作物成灾面积在 1000 万亩以上的 10 个典型干旱事件 (包含武汉站所在区域) (表 4)。基于武汉站 1961-2017 年日降水数据计算日尺度 SWAP 值, 结合 3.2.1 节旱涝事件识别方法推求武汉站的旱涝事件, 选出与文献灾情记载同期的干旱事件 (表 4)。由表 4 可知, 方法筛选得到的武汉站干旱事件与

表 3 旱涝急转强度等级划分
Tab. 3 Categories of drought-flood transition severity

旱涝急转强度	K
轻度	$1.0 \leq K < 2.0$
中度	$2.0 \leq K < 3.0$
重度	$3.0 \leq K$

表 4 基于SWAP指数的武汉站干旱事件筛选

Tab. 4 Identification of droughts at Wuhan station based on SWAP

干旱起始	干旱结束	持续天数(d)	历史记载	来源
1961/7/12	1961/9/2	52	严重伏秋连旱	1,2
1966/3/22	1966/11/13	236	轻度春夏, 严重伏秋连旱	1,2
1972/6/8	1972/9/12	96	严重伏秋连旱	1,2
1976/7/23	1976/10/22	91	严重伏秋连旱	1,2
1978/7/7	1978/10/26	111	特大伏秋连旱	1,2
1981/5/1	1981/6/27	57	严重春夏连旱	1
1992/8/11	1993/1/3	145	严重伏秋连旱	1
1994/5/2	1994/7/13	72	严重夏旱	1
2001/5/15	2001/11/29	198	严重春夏秋连旱	3
2010/11/29	2011/6/14	197	严重春夏连旱	4

注: 历史记载来源: 1《中国气象灾害大典: 湖北卷》; 2《湖北省气候志》; 3《2001 年湖北省天气气候特点及主要气象灾害》; 4《中国水旱灾害公报 2011》。

同期历史记载吻合良好，如1966年春夏秋连旱，筛选得到的同期事件从当年3月持续到11月；2011年春夏连旱，筛选的事件区间在2010年底到2011年6月初，这些事件与文献记载均大致相符。值得注意的是，由于文献记载的干旱事件是大致日期范围，本研究方法筛选得到的事件起止时间与记载不完全相同，如历史记载的1992年严重伏秋连旱（8-11月），筛选得到的事件为8月11日至次年1月3日，包含记载的干旱时段，虽干旱结束时间比记载时段略延迟一个月，仍可认为两者吻合良好。由以上分析可知，SWAP指数结合多门槛游程理论的方法对于干旱事件的筛选效果良好。

为验证该方法对暴雨洪涝事件的筛选能力，选取武汉站1961-2017年实测单日最大降水的前10位对应的暴雨洪涝事件，表5展示了这10个典型暴雨日及筛选得到的同期暴雨洪涝事件起止日期。10个典型暴雨日中，有5个暴雨日与暴雨洪涝事件起始日重合，剩余的5个暴雨日均在筛选得到的暴雨洪涝事件区间内。图2展示了1998年与2016年武汉站夏季暴雨洪涝事件中降水与SWAP值的变化关系，由图2可见，1998年7月21日武汉站单日降水达285.7 mm，当日SWAP值随之增大，由于考虑了前期降水的影响，SWAP值在21日后的一段时间内保持偏涝水平；2016年6月19日，7月1日、2日、6日武汉站单日降水分别为180 mm、162.8 mm、153.1 mm、241.5 mm，SWAP指数自6月19日开始随着降水变化而变化，至7月6日达到峰值。可见该方法能捕捉降水的变化情况，准确地刻画暴雨洪涝事件发生过程。

表5 基于SWAP的武汉站暴雨洪涝事件筛选
Tab.5 Identification of rainstorm floods at
Wuhan station based on SWAP

日期	单日降水(mm)	暴雨洪涝起始	暴雨洪涝结束
1982/6/20	298.5	1982/6/20	1982/10/7
1998/7/21	285.7	1998/7/21	1998/9/5
1969/8/23	261.7	1969/7/7	1969/10/10
2016/7/6	241.5	2016/6/19	2016/9/2
1961/6/8	214.5	1961/6/8	1961/6/25
1991/7/9	209.8	1991/5/21	1991/8/22
1962/7/4	198.0	1962/7/4	1962/10/20
2011/6/18	197.9	2011/6/14	2011/7/13
1962/8/23	180.9	1962/7/4	1962/10/14
2016/6/19	180.0	2016/6/19	2016/9/2

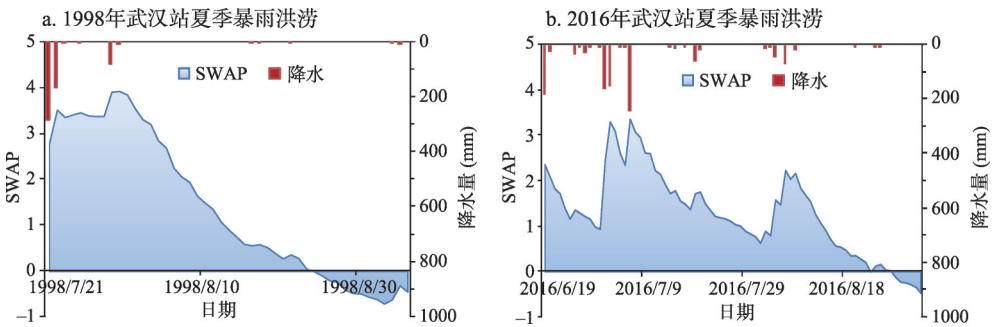


图2 暴雨洪涝事件中SWAP指数与降水的关系
Fig. 2 The relationship of SWAP and precipitation during the rainstorm flood

4.2 2011年长江流域典型旱涝急转事件评估

在旱涝事件筛选的基础上，为评估SWAP指数对旱涝急转事件的刻画能力，本小节针对2011年长江中下游区域典型旱涝急转事件^[9, 12, 32]，取2011年5月、6月6个旬时段，采用3.2.1节中时段旱涝事件筛选方法，得到长江流域212个气象站点2011年5-6月各旬对应的旱涝事件，采用反距离权重法插值得到旱涝事件强度的空间分布（图3）。由图3可知，2011年5月上旬，长江中下游地区已经出现大面积旱情，重旱区域集中在湖北东

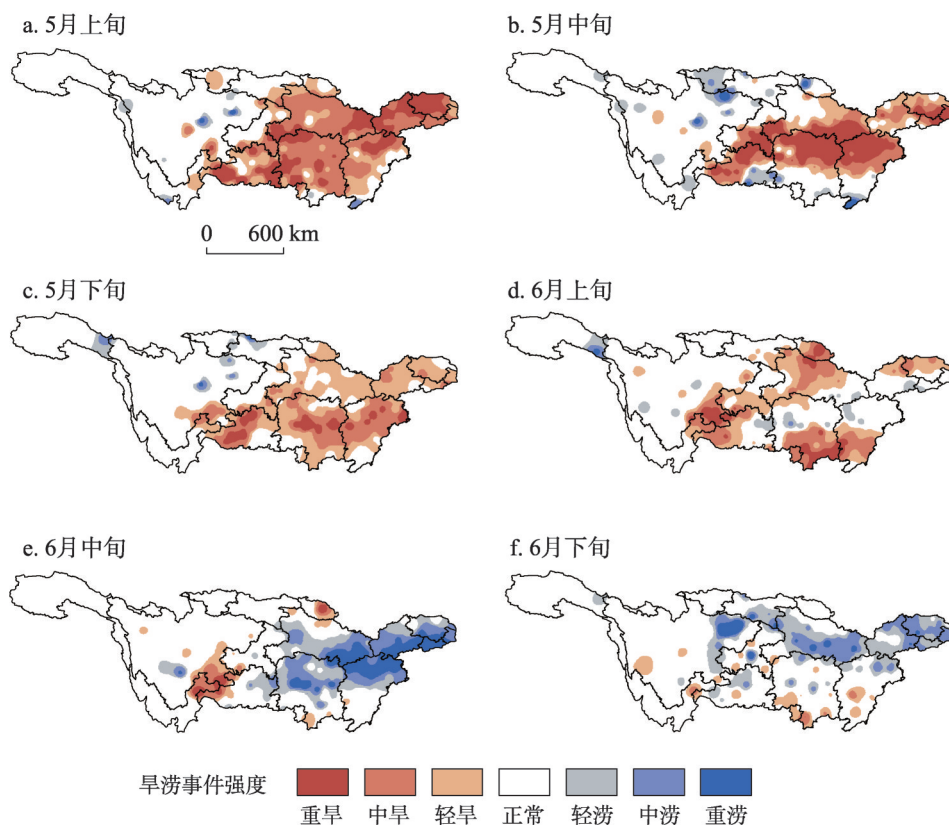


图3 2011年5-6月长江流域各旬旱涝事件强度

Fig. 3 The severity of droughts and floods in the Yangtze River Basin from May 2011 to June 2011

部及西北部、江苏南部、江西北部、贵州北部等地；到5月中旬，重旱区域明显增多，从重庆中部、贵州北部向东延伸；到5月下旬，重旱区域明显减少，旱情初步缓解；6月上旬，湖北东部、湖南北部、江西北部等地的旱情得到明显缓解；6月中旬长江中下游由旱转而向涝发展，其中湖北东南部、江西北部、湖南中部、安徽东南部及江苏南部出现重涝，这些区域的旱涝情势短时间内发生明显转变；至6月下旬，长江流域的旱涝事件基本结束。

根据3.2.2节旱涝急转事件的筛选方法，筛选得到长江流域212个气象站点1961-2017年旱涝急转事件，选取急转点在2011年6月的事件，对应51个气象站点事件。图4展示了这些站点事件强度的空间分布，其中圆点标记区域发生了旱涝急转，圆点半径越大表示事件强度越强。由图4可知，2011年6月旱涝急转事件发生区域集中在长江中下游的湖北大部、湖南北部、江西北部、安徽南部及江苏南部区域，与图3中短时间内由旱转涝的区域吻合，也和文献记载的旱涝急转区域相符^[32]。

为进一步分析旱涝急转事件的特

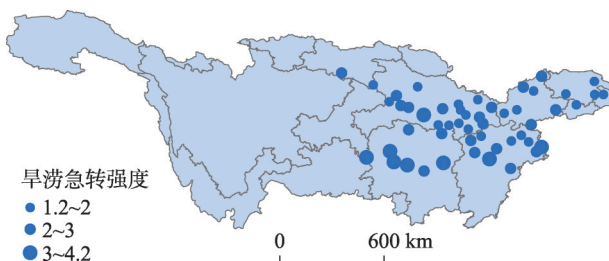


图4 2011年6月长江流域旱涝急转强度分布

Fig. 4 Spatial distribution of the severity of drought-flood transition events in June 2011 in the Yangtze River Basin

征, 选用3.2.2节定义的总无雨日距平与总降水量距平两个指标进行分析。首先, 根据上文计算结果得到的2011年6月长江流域51个旱涝急转站点事件, 选取这51个急转事件的时段作为计算时段, 计算各时段对应的总无雨日距平与总降水量距平两个指标; 随后, 采用K-means聚类分析上述各事件时段对应的两个指标的特征, 聚类步骤如下:

(1) 计算样本选取51个急转事件对应的总无雨日距平和总降水量距平, 样本记为 $X_{51 \times 2}$; 选择聚类个数为2 ($K=2$); 初始聚类中心点(2个)从样本点中随机选取, 记为 $\mu_{2 \times 2}$ 。

(2) 计算样本点 $X_{1 \times 2}^i (i=1, 2, \dots, 51)$ 距离各聚类中心点 $\mu_{1 \times 2}^j (j=1, 2)$ 之间的欧式距离, 取欧式距离最近的中心点作为该点所属中心点, 每个中心点和其从属的点构成聚类。

(3) 计算每个聚类的均值, 作为新的中心点。

(4) 循环(2)~(3), 直到中心点位置不再发生变化。

经优化迭代得到A(-0.19, 0.18)、B(0.16, 0.06)两个聚类中心, 对应的两聚类分别占总数的78%、22%(图5)。51个旱涝急转事件中, 有50个事件对应的时段无雨日距平为正, 表明多数事件期间无雨日呈增加状态。B聚类总降水量较多年同期均值有所增加, 同时无雨日也明显增多, 降水时长短但雨量多, 表明了B聚类的旱涝急转事件期间降水分配不均匀的状态; A聚类对应的事件期间总降水量较多年同期均值明显减少, 总无雨日较多年同期也明显增加, 因此, A聚类事件期间两个统计指标并不能体现降水分布不均匀的状态。进一步计算上述各旱涝急转事件期间干旱事件持续天数与洪涝事件持续天数, 并分别计算A聚类与B聚类平均旱涝持续时长比, 对比分析发现: A聚类平均旱、涝持续时长比为3.91, 早期持续时间远长于涝期; 而B聚类平均旱、涝持续时长比为1.17, 旱、涝持续时间基本持平。

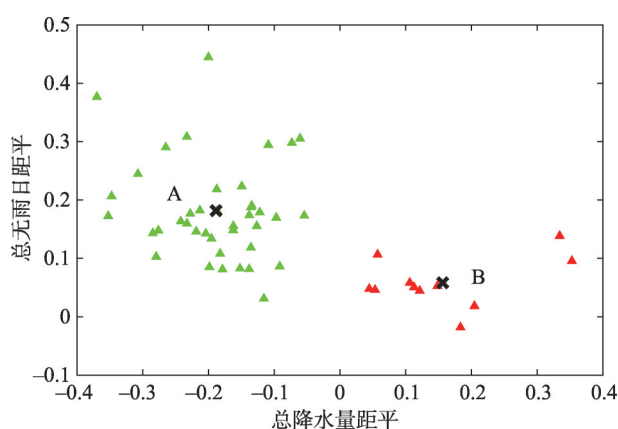


图5 2011年6月长江流域旱涝急转事件统计特征聚类

Fig. 5 Characteristics clustering of drought-flood transition events in June 2011 in the Yangtze River Basin

综上可知, 2011年长江中下游流域旱涝急转事件按降水特征可分为两类: 旱涝时长相近的事件和早期远长于涝期的事件, 其中占主体的是早期远长于涝期的事件(A聚类), 该类急转事件期间干旱持续时间远长于洪涝事件, 事件期间总无雨日增多的同时总降水量减少, 总降水量、总无雨日这两个指标不能表现出降水不均匀的状态; 另一类急转事件期间旱、涝事件持续时长相近, 事件期间总降水量变化不大、总无雨日明显增多, 这两个指标可体现出降水分配不均匀的状态。

以武汉站为例对站点旱涝急转事件进行分析, 图6展示了武汉站2011年旱涝急转事件中日尺度SWAP与日降水的变化。2010年底-2011年5月底, 武汉站持续干旱少雨, 而从6月中上旬开始出现系列强降水, 短时间内旱涝形势急转。由表2知, 筛选得到的干旱事件区间为2010年11月29日-2011年6月14日, 筛选得到的暴雨洪涝事件开始于2011年6月15日, 当日降水达77 mm(距干旱事件结束仅1 d, 被筛选为旱涝急转事件), 随后, SWAP指数随降水的增减而变化, 使得洪涝事件持续到7月中旬才结束。若采用常用

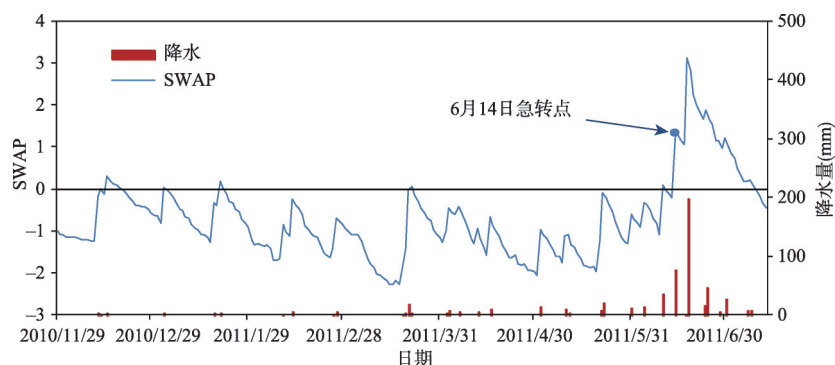


图6 2011年武汉站旱涝急转事件中SWAP指数与降水的关系

Fig. 6 The relationship of SWAP and precipitation during the drought-flood transition event at Wuhan station in 2011

的Wu等^[10]定义的长周期旱涝急转指数,则会将5-6月降水进行加和,从而导致旱涝中和,遗漏此次典型旱涝急转事件。以上分析直观地表明了日尺度上筛选旱涝急转事件的优越性。

4.3 1961-2017年长江流域旱涝急转事件时空分布规律分析

图7展示了长江流域212个气象站点1961-2017年每年发生旱涝急转事件的站次数。1961-2017年长江流域旱涝急转事件平均每年发生40站次,21世纪以来,旱涝急转事件年发生站次明显增加,2011年达到峰值(76站次),与前人研究结论一致^[2, 12]。

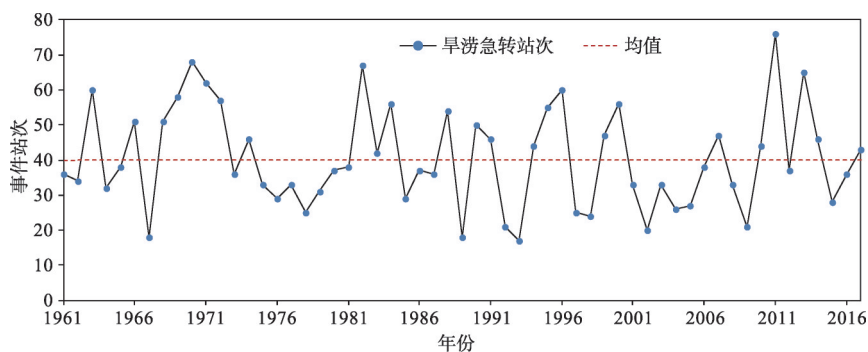


图7 1961-2017年长江流域旱涝急转事件发生站次统计

Fig. 7 Statistics of stations where drought-flood transition events occurred in the Yangtze River Basin during 1961-2017

图8展示了长江流域1961-2017年旱涝急转事件发生频率及平均强度的空间分布。大部分区域过去57年旱涝急转事件的发生次数为8~14次,对应的频率为0.15~0.25。而上游嘉陵江流域东部、长江上游干流区西南部,中游洞庭湖流域中南部、鄱阳湖流域北部,以及下游的三角洲平原区和干流区为旱涝急转事件多发区,对应的事件频率为0.25~0.4;旱涝急转事件低发区主要集中在长江上游及中游的部分区域,包括金沙江流域大部分地区、嘉陵江流域西北部,以及长江上游干流区和中游干流区的交界区域,事件的发生频率小于0.15。长江流域过去57年旱涝急转事件强度的区域规律显著(图8b):长江中下游广大地区以及上游岷沱江流域东部、嘉陵江、乌江、上游干流区等区域事件强度较高;而上游岷沱江流域西北部、金沙江流域以及中游鄱阳湖流域东部等区域事件强度较弱。

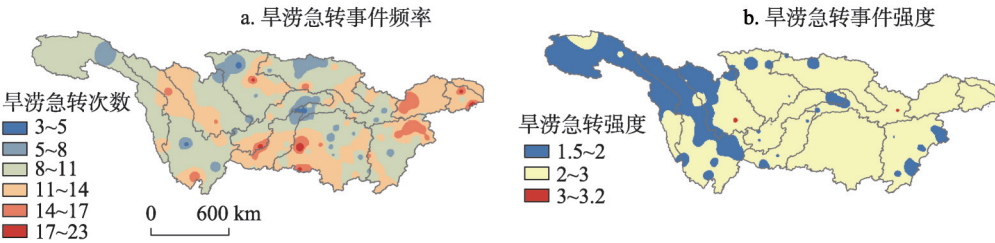


图8 1961-2017年长江流域旱涝急转事件频率(a)与强度(b)的空间分布
Fig. 8 Spatial distribution of drought-flood transition characteristics in the Yangtze River Basin during 1961-2017: (a) frequency, (b) severity

为进一步揭示长江流域旱涝急转事件的时空分布规律，选取1968-1977年、1978-1987年、1988-1997年、1998-2007年、2008-2017年5个时期，进行不同分区事件发生频率的对比分析（图9）。各二级流域分区每10年发生的旱涝急转事件次数在0.5~3次之间，且呈现明显的时空规律：长江中上游大部分二级流域（图9a~9j）在1968-1977年旱涝急转事件发生频率较高，随后进入相对低发期，2008-2017年又呈高发态势；长江下游二级流域（图9k~9l）在1978-1987年旱涝急转事件发生频率较高，随后进入相对低发期，1998-2017年又呈高发态势。总体上看，除中上游部分二级流域（图9a、9e~9g）外，长江流域1998-2017年旱涝急转事件发生频率呈现上升态势，需重点做好防范工作。

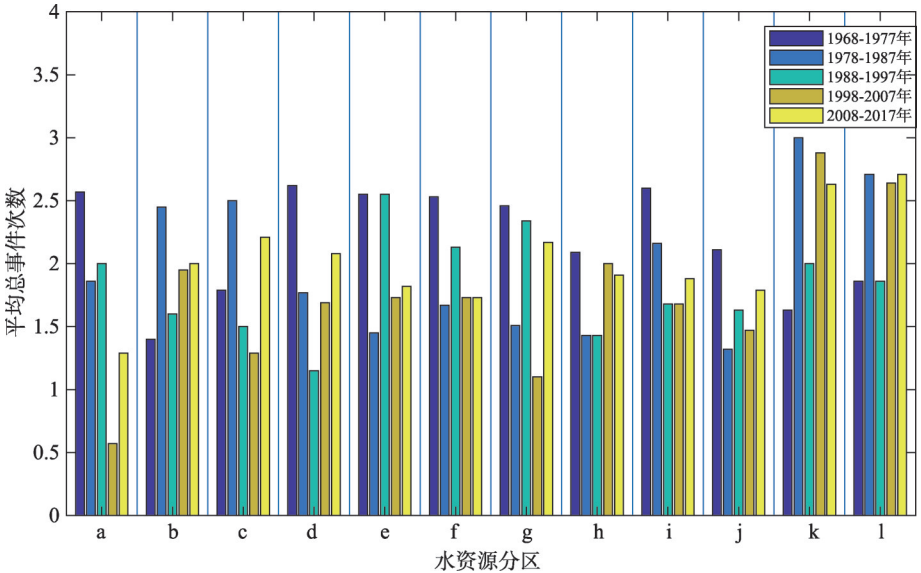


图9 1968-2017年长江流域各分区时段平均旱涝急转事件发生频率
Fig. 9 Decadal variation of the regional average drought-flood transition events at each sub-basin in the Yangtze River Basin during 1968-2017

5 结论

本文基于气象旱涝指数SWAP，结合多门槛游程理论，在识别旱涝事件的基础上提出了一种识别旱涝急转事件的新方法，并将之应用于长江流域。研究首先筛选了长江流域的旱涝事件，并对武汉站的典型旱涝事件进行分析；接着选取了长江流域典型旱涝急

转事件,并结合聚类方法对事件的特征进行了分析;最后对1961-2017年长江流域旱涝急转事件的时空分布规律进行了探讨,得出的结论如下:

(1) SWAP指数对于气象干旱以及暴雨洪涝事件具有良好的识别性,能够准确识别典型旱涝事件的起止时间,为从旱涝事件角度筛选旱涝急转事件提供基础。

(2) K-means聚类能聚合相似的旱涝急转事件,借助聚类分析提取出2011年夏初长江中下游地区的两类旱涝急转事件:旱涝时长相近的事件和早期远长于涝期的事件,其中占主体的是早期远长于涝期的事件,该类事件表现出降水量显著减少和无雨日明显增加的状态。

(3) 长江流域旱涝急转事件发生次数呈现明显区域规律:长江上游大部分区域发生频率相对较低,而中下游地区相对高发;长江流域旱涝急转事件强度则无明显区域差异。从时间上看,长江流域多数分区近期旱涝急转发生频率呈现上升的趋势,需做好防范工作。

参考文献(References)

- [1] Office of State Flood Control and Drought Relief Headquarters. Bulletin of Flood and Drought Disaster in China 2017. Beijing: SinoMaps Press, 2018. [国家防汛抗旱总指挥部. 中国水旱灾害公报 2017. 北京: 中国地图出版社, 2018.]
- [2] Feng Guolin, Yang Hanwei, Zhang Shixuan, et al. A preliminary research on the reason of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin in late spring and early summer of 2011. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2012, 36(5): 1009-1026. [封国林, 杨涵清, 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. *大气科学*, 2012, 36(5): 1009-1026.]
- [3] Mallet J, Fortin G, Germain D. Extreme weather events in northeastern New Brunswick (Canada) for the period 1950-2012: Comparison of newspaper archive and weather station data. *Canadian Geographer*, 2018, 62(2): 130-143.
- [4] Rahmani V, Hutchinson S L, Harrington J A, et al. Analysis of frequency and magnitude of extreme rainfall events with potential impacts on flooding: A case study from the central United States. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(10): 3578-3587.
- [5] Fu G, Yu J, Yu X, et al. Temporal variation of extreme rainfall events in China, 1961-2009. *Journal of Hydrology*, 2013, 487: 48-59.
- [6] Yang S, Wu B, Zhang R, et al. Relationship between an abrupt drought-flood transition over mid-low reaches of the Yangtze River in 2011 and the intraseasonal oscillation over mid-high latitudes of East Asia. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013, 27(2): 129-143.
- [7] Ma Y, Yang Y, Wang C. How essential of the balance between large and small scale features to reproduce precipitation during a sudden sharp turn from drought to flood. *Climate Dynamics*, 2019, 52(7): 5013-5029.
- [8] Tang Huifang, Han Jiangang. An overview of disaster in summer of 1994 in China. *Disaster Reduction in China*, 1994, 4(4): 6-8. [唐惠芳, 韩建钢. 1994年夏季我国灾害性天气概述. *中国减灾*, 1994, 4(4): 6-8.]
- [9] 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 Basin in 2011. *Climatic and Environmental Research*, 2014, 19(1): 41-50. [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. *气候与环境研究*, 2014, 19(1): 41-50.]
- [10] Wu Z W, Li J P, He J H, 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): L05813. Doi: 10.1029/2005GL024487.
- [11] Zong H F, Cholaw B, Chen L T, et al. A typical mode of seasonal circulation transition: A climatic view of the abrupt transition from drought to flood over the middle and lower reaches of the Yangtze River Valley in the late spring and early summer of 2011. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2012, 5(5): 349-354.
- [12] 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 the relationship with ENSO. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(1): 25-40. [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.]
- [13] Lu E. Determining the start, duration, and strength of flood and drought with daily precipitation: Rationale. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L12707. Doi: 10.1029/2009GL038817.

- [14] Lu E, Cai W Y, Jiang Z H, et al. The day-to-day monitoring of the 2011 severe drought in China. *Climate Dynamics*, 2014, 43(1/2): 1-9.
- [15] Song Yanling, Cai Wenyue, Liu Yanju, et al. The variation of droughts in southwestern China and its impact on rice yield in Guizhou. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2014, 25(5): 550-558. [宋艳玲, 蔡雯悦, 柳艳菊, 等. 我国西南地区干旱变化及对贵州水稻产量影响. *应用气象学报*, 2014, 25(5): 550-558.]
- [16] Moyé L A, Kapadia A S. Predictions of drought length extreme order statistics using run theory. *Journal of Hydrology*, 1995, 169(s1-4): 95-110.
- [17] Shiau J T. Fitting drought duration and severity with two-dimensional copulas. *Water Resources Management*, 2006, 20(5): 795-815.
- [18] Chang Jiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources. *Flood and Drought Disaster in the Yangtze River Basin*. Beijing: China Water & Power Press, 2002. [水利部长江水利委员会. 长江流域水旱灾害. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.]
- [19] Office of State Flood Control and Drought Relief Headquarters, Hydrology and Water Resources Department. *Flood and Drought Disaster in China*. Beijing: China Water & Power Press, 1997. [国家防汛抗旱总指挥部, 水利部南京水文水资源研究所. 中国水旱灾害. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.]
- [20] Zhang Q, Xu C Y, Zhang Z Z. Observed changes of drought/wetness episodes in the Pearl River basin, China, using the standardized precipitation index and aridity index. *Theoretical & Applied Climatology*, 2009, 98(1/2): 89-99.
- [21] Stagge J H, Tallaksen L M, Gudmundsson L, et al. Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, 2015, 35(13): 4027-4040.
- [22] Soláková T, Michele C D, Vezzoli R, et al. Comparison between parametric and nonparametric approaches for the calculation of two drought indices: SPI and SSI. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, 19(9): 04014010. Doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000942.
- [23] He J, Yang X H, Li J Q, et al. Spatiotemporal variation of meteorological droughts based on the daily comprehensive drought index in the Haihe River Basin, China. *Natural Hazards*, 2015, 75(2): 199-217.
- [24] Deo R C, Byun H R, Adamowski J F, et al. A real-time flood monitoring index based on daily effective precipitation and its application to Brisbane and Lockyer valley flood events. *Water Resources Management*, 2015, 29(11): 4075-4093.
- [25] Zhang Qiang, Zou Xukai, Xiao Fengjin, et al. *Classification of Meteorological Drought*, GB/T20481-2006. Beijing: China Standard Press, 2006. [张强, 邹旭恺, 肖凤劲, 等. 气象干旱等级, GB/T20481-2006. 北京: 中国标准出版社, 2006.]
- [26] Zou Xukai, Ren Guoyu, Zhang Qiang. Droughts variations in China based on a compound index of meteorological drought. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15(4): 371-378. [邹旭恺, 任国玉, 张强. 基于综合气象干旱指数的中国干旱变化趋势研究. *气候与环境研究*, 2010, 15(4): 371-378.]
- [27] Macqueen J B. Some methods for classification and analysis of multivariate observations//*Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. California: University of California Press, 1967: 281-297.
- [28] Rad A M, Khalili D. Appropriateness of clustered raingauge stations for spatio-temporal meteorological drought applications. *Water Resources Management*, 2015, 29(11): 4157-4171.
- [29] Jiang Hairu, Yang Baisong, Wu Shijing, et al. *Complete Book of Meteorological Disasters in China: Hubei Volume*. Beijing: China Meteorological Press, 2007. [姜海如, 杨柏松, 吴世经, 等. 中国气象灾害大典: 湖北卷. 北京: 气象出版社, 2007.]
- [30] Qiao Shengxi. *Climate Record of Hubei*. Wuhan: Hubei People's Publishing House, 1989. [乔盛西. 湖北省气候志. 武汉: 湖北人民出版社, 1989.]
- [31] Xiang Hua. Characteristics of weather and climate and major meteorological disasters in Hubei Province 2001. *Rainstorm Disasters*, 2002, 21(1): 42-44. [向华. 2001年湖北省天气气候特点及主要气象灾害. *暴雨灾害*, 2002, 21(1): 42-44.]
- [32] Office of State Flood Control and Drought Relief Headquarters. *Bulletin of Flood and Drought Disaster in China 2011*. Beijing: China Water & Power Press, 2012. [国家防汛抗旱总指挥部. 2011年中国水旱灾害公报. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.]

A method to identify the drought-flood transition based on the meteorological drought index

YANG Jiawei, CHEN Hua, HOU Yukun, ZHAO Ying, CHEN Qihui,
XU Chongyu, CHEN Jie

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A new method was proposed to identify drought-flood transition events by combining a drought-flood index (Standard Weighted Average Precipitation, SWAP) with the multi-threshold theory. This method was tested in the Yangtze River Basin using daily precipitation data from 212 stations for the 1961-2017 period. With this method, the meteorological drought and rainstorm flood in the representative station were identified, and representative regional drought-flood transition events and spatiotemporal patterns of drought-flood transition were analyzed. The results show that: SWAP is an effective index to identify the meteorological drought and rainstorm flood. K-means clustering can classify similar drought-flood transition events into one cluster. The drought event plays a dominate role in drought-flood transition events for the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin in 2011, and the drought lasts for a much longer duration than the flood during the drought-flood transition event. Drought-flood transition events show an obvious regional pattern for the Yangtze River Basin with low frequency for the upper reaches and high frequency for the middle and lower reaches. In addition, the drought-flood transition frequency presents an increasing trend recently for most parts of the Yangtze River Basin. Overall, the results imply that the proposed method combining meteorological drought index with multi-threshold theory is capable of identifying drought-flood transition events, and can be further used for predicting drought-flood transition events.

Keywords: drought-flood transition; Standard Weighted Average Precipitation; multi-threshold theory; clustering