

# 洞庭湖流域极端降水变化特征分析

张卉<sup>1</sup>, 薛联青<sup>1,2,3</sup>, 刘远洪<sup>1</sup>, 迟艺侠<sup>1,3</sup>

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003; 3. 河海大学 文天学院, 安徽 马鞍山 243031)

**摘要:** 随着极端降水事件变率增强,洞庭湖流域频繁的极端洪旱事件严重威胁了地区人水和谐。基于洞庭湖流域 28 个国家气象站 1961-2015 年的逐日降水资料,采用 RCLimDex 模型定义阈值来识别极端降水事件,利用线性倾向估计法和集合经验模态分解(EEMD)组合的方法进一步分析了洞庭湖流域极端降水变化特征,由 EEMD 方法分解得到的各类极端降水指数的 3 个固有模态函数分量分别表现出 3~6a、8~15a 和 21~27a 的准周期。结果表明:洞庭湖流域极端降水频次峰值出现在 6 月,4-10 月份极端降水频次之和占全年的 82.7%,南岳和安化为极端降水高发带。洞庭湖流域除持续湿润日数 CWD 略有减小外,各项极端降水指数均表现出小幅上升趋势。在空间分布上,该流域东南部受山区地形地貌的影响,极端降水呈明显上升趋势。洞庭湖流域极端降水时空格局变化特征分析对流域水资源开发利用和水安全预警具有重要参考价值。

**关键词:** 极端降水; 时空特征; RCLimDex 模型; EEMD 方法; 洞庭湖流域

中图分类号:TV125; P426.6 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2017)04-0006-07

## Spatiotemporal characteristics analysis of extreme precipitation variations in Dongting Lake Basin

ZHANG Hui<sup>1</sup>, XUE Lianqing<sup>1,2,3</sup>, LIU Yuanhong<sup>1</sup>, CHI Yixia<sup>1,3</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 3. Wentian College, Hohai University, Manshan 243031, China)

**Abstract:** With the increasing of the variability of extreme precipitation events, the extreme flood and drought events in the Dongting Lake Basin have already seriously threatened the harmony relationship of human and water. Based on the daily precipitation records of 28 national meteorological stations in the Dongting Lake Basin from 1961-2015, a threshold defined by the RCLimDex model was used to identify extreme precipitation events. The methods of linear regression and ensemble empirical mode decomposition (EEMD) were employed to quantitatively analyze the temporal variability and spatial distribution of extreme precipitation indices. The intrinsic mode function (IMF) components of six extreme precipitation indices by EEMD in the Dongting Lake Basin reflect quasi-periodic periods of 3-6a, 8-15a and 21-27a. The results show that: the peak of extremely heavy precipitation occurred in June, and the extreme precipitation occurred during April to October, accounted for 82.7% of the total annual rainfall. Nanyue and Anhua with a high incidence of extreme precipitation and all extreme precipitation indices showed a slight upward trend in the Dongting Lake Basin except for the number of consecutive wet days (CWD). The spatial distribution in the southeast of the basin showed a significant upward trend of extreme precipitation, which is affected by the mountainous topography. The study on the variation characteristics of extreme precipitation events in the Dongting Lake Basin will be of important reference value to

收稿日期:2017-04-09; 修回日期:2017-05-18

基金项目:国家自然科学基金项目(41371052、U1203282); 水利部公益性行业专项(201501059); 江苏省“青蓝”工程及江苏省高校优秀中青年教师和校长境外研修项目; 2014 年度“江苏省博士后科研资助计划”(1401095C)

作者简介:张卉(1993-),女,河北保定人,硕士研究生,研究方向为水文水资源。

通讯作者:薛联青(1973-),女,新疆石河子人,博士,教授,博士生导师,研究方向为水文水资源。

the water resources utilization and water security early - warning.

**Key words:** extreme precipitation; spatiotemporal characteristics; RCLimDex model; ensemble empirical mode decomposition (EEMD); Dongting Lake Basin

近年来,受自然变异和人为强迫等外界变化条件的影响,水资源系统变得更加敏感和脆弱,极端水文气象事件(如洪涝、干旱、暴雨等)的发生频率、强度及时空随机性有明显增强的趋势<sup>[1-4]</sup>,这对流域水资源安全以及未来社会与流域环境的持续发展造成了巨大影响<sup>[5-7]</sup>。诸多流域频繁发生的极端水文、气象事件及气候改变对水资源可用性的潜在影响以及对水文极端事件的管理,已成为社会和科学界密切关注的焦点问题<sup>[8-10]</sup>。洞庭湖流域地形复杂,极端气候事件频发,不少学者对湖区降水的变化特征进行了分析。张剑明等<sup>[11]</sup>研究了湖南省1960-2009年暴雨极端事件的气候特征,发现过去50年暴雨极端事件有波动上升趋势且强度增大。覃鸿等<sup>[12]</sup>基于1960-2014年逐日降水量分析了洞庭湖区极端降水和暴雨的气候分布特征、年际、年代际变化及趋势特征,认为其极端降水阈值的分布与当地地形地貌有关。张晓艳等<sup>[13]</sup>研究了洞庭湖流域降雨极值的变化规律和风险特征,发现流域东北部洪水风险较高且近年来降雨有集中化的趋势。本文基于RCLimDex模型研究1961-2015年洞庭湖流域极端降水的时空分布特征,并采用线性回归方法研究极端降水指数的年际变化情况,结合集合经验模态分解(EEMD)方法探究其周期性,以期客观评价近55年来洞庭湖流域极端降水事件的演变趋势,为流域水资源安全监测、控制和危险源区预警定位提供一定的实际应用价值。

## 1 研究区概况

洞庭湖位于东经111°14'~113°10',北纬28°30'~30°23',即长江中下游荆江河段以南,为我国第二大淡水湖泊。其地势西高东低,被分为东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖,天然湖泊总面积约为2 625 km<sup>2</sup>。洞庭湖流域属于亚热带季风气候区,雨量充沛,多年平均降水量为1 244.5~1 467.9 mm<sup>[14]</sup>。降水年际差异大,且时空分布不均,降雨多集中在4-6月。近年来,随着气候变化和人类活动的影响,洞庭湖流域呈现出“小水大灾,洪旱并存”的水情特征<sup>[15]</sup>。

## 2 资料与方法

### 2.1 数据来源

本文数据来源于国家气象数据共享网,选取洞庭湖流域时间序列较长的28个国家气象站1961-

2015年的逐日降水资料。为保证降水数据的可靠性,对数据进行人工筛查处理,包括检查日降水量是否小于0,记录值是否严重偏离当地降水实际情况,即筛选剔除超出3倍标准差的异常值<sup>[16]</sup>。通过质量检查的数据用于极端降水指数的计算。

### 2.2 研究方法

2.2.1 极端降水事件阈值确定方法 在流域日极端降水的阈值确定中,为了克服按日降水量的实际概率分布计算带来的复杂性,可以把日降水量的实际概率分布转化为正态分布,利用标准正态分布来确定降水量百分位阈值<sup>[17]</sup>。选取较简单的立方根变换法,作为洞庭湖流域确定阈值的方法。立方根变换法公式如下:

$$Y_i = \sqrt[3]{X_i} \quad (1)$$

$$J_i = \frac{Y_i - \bar{Y}}{S} \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (3)$$

式中: $X_i$ 为降水量值; $n$ 为样本容量; $\bar{Y}$ 为样本平均值; $S$ 为样本标准差; $Y_i$ 为立方根变换法变换后的变量。

根据 $J_i$ 按升序排列后的第95百分位值,即为立方根变换法变换后的变量值。将对应的变量 $J_i$ 逆推反变换为降水量,即为确定的极端降水量阈值。

2.2.2 RCLimDex模型 RCLimDex是由加拿大气象研究中心的Zhang Xuebin与Yang Feng联合开发的基于R语言的软件,用于计算多种极端气候指数<sup>[18]</sup>。RCLimDex模型操作简单,只需要按文本格式输入逐日降水量、最高气温、最低气温等基本信息,就可以运行得到11个极端降水指数和16个极端气温指数。结合洞庭湖流域实际降水情况,选取涵盖降水量、降水日数、降水强度3个分类且与极端降水密切相关的7个极端降水指数,见表1。

在分析各极端降水指数的时空变化特征时,采用线性回归和5年滑动平均进行趋势拟合,基于ARCGIS克里金空间差值法绘制各指数变化趋势在空间上的分布图,以此探究降水序列的时空分布特性。

2.2.3 EEMD方法 集合经验模态分解(EEMD)是一种适用于非线性、非平稳时间序列的信号分析方法<sup>[19]</sup>,在气象领域中有着广泛的应用。EEMD的

原理是将原始数据分解成若干不同尺度的波动和趋势分量,得到具有不同时间尺度特征的固有模态函数 IMF。EEMD 方法针对 EMD 的不足,在原始信号中加入一定比例的白噪声,对原始信号和白噪声组

成的总体进行 EMD 分解,多次计算取平均使加入的白噪声相互抵消,加噪声的次数越多,平均后的结果所含的噪声越小,越接近真实值<sup>[20]</sup>。具体原理及操作见文献[21]。

表1 极端降水指标的定义

分类	指标名称	极端降水指数	定义
降水量指数	RX5day/mm	连续5日降水总量	年内连续5日最大降水量
	R95P/mm	R95 极端降水量	日降水量大于1961-2015年95%分位点的平均降水量
降水日数指数	R95N/d	极端降水频次	年内日降水量超过极端降水阈值(95%分位点)的次数
	R25/d	R25 mm 降水日数	日降水量大于等于25 mm 的日数
	CDD/d	持续干旱日数	日降水量小于1 mm 的最长持续日数
	CWD/d	持续湿润日数	日降水量大于等于1 mm 的最长持续日数
降水强度指数	SDII/(mm·d <sup>-1</sup> )	日降水强度	年总降水量/降水日数

## 3 结果分析

### 3.1 极端降水指数的时间特征

3.1.1 极端降水频次的年内分布特征 使用立方根变换法计算得到的日极端降水阈值为21.75 mm,以此为洞庭湖全流域极端降水阈值。图1为该阈值条件下,1961-2015年洞庭湖流域极端降水发生频次年内分布图。

洞庭湖流域极端降水频次为单峰分布,以6月最高,12月和1月最低。洞庭湖流域28个气象站点近55年共发生极端降水27854站次,极端降水发生在6月4816站次,5月、4月、7月次之,分别为4757次、3669次和3382次;12月份最低为394次。其中,4-10月份极端降水频次之和为23028次,占全年总频次的82.7%,而11-3月仅占17.3%。来凤气象站的极端降水发生频次峰值出现在7月,10个站点峰值出现在5月,17个站点峰值出现在6月。近55年洞庭湖流域单站点发生极端降水频次超过100次的有4个,次数从高到低依次是南岳、安化、道县和平江,即此4站附近为极端降水高发地带。

3.1.2 极端降水指数的年际变化特征 近55年来洞庭湖流域极端降水指数总体变化趋势较为平缓,但年际变化幅度大,极值波动较为频繁。从时间尺度来看,5d最大降水量(RX5day)上升趋势明显,从1963年的143.5 mm上升到2014年的178.2 mm,平均上升4.6 mm/10a。最大值为1998年的210.6 mm,较大值出现在1999年(205.2 mm)、1996年(204.7 mm),而最小值出现在1985年,为122 mm。

资料显示1996年和1999年洞庭湖湖区的资水和沅水确实发生洪水。说明近55年里,洞庭湖5d最大降水量在20世纪90年代处于较高水平,且从20世纪80年代中期开始,5d最大降水量逐年大幅增长。极端降水量(R95P)略有上升,其从1961年的391.8 mm上升到2015年的447.3 mm,平均上升率为12.6 mm/10a;日降水量大于440 mm的极端降水事件发生年份中,1990年以后发生的概率高达81.8%,其中超过500 mm的有2002年(654 mm)和1999年(591 mm)。极端降水日数(R25)上升趋势较为平缓,但年际变化幅度较大,尤其是2000年以后,极端降水天数波动非常显著,2002年极端降水天数高达22 d,而2011年仅为10 d。持续干旱日数(CDD)在过去55年呈现较为有序的上下波动,大致在20~35 d之间浮动。2000年以后,持续干旱日数高低转换频繁,可能会给农业供水带来负面影响,尤其是对农作物生长不利。

持续湿润日数(CWD)由1961年的9 d下降到了2015年的6 d,平均每10年下降0.2 d,这是本文极端降水指数中唯一呈下降趋势的指数,除1992年持续湿润日数达到11d外,其余年份均大致稳定在6~9 d之间。日降水强度(SDII)处于波动上升状态,平均每10年仅上升0.15 mm/d,表明洞庭湖流域年际有效日均降水量变化较小,多数年份位于11~13 mm/d之间;最小值出现在1985年(10.2 mm/d),较大值出现在2002年(14.2 mm/d)和1999年(14.1 mm/d)。

图2中红实线表示各指数5年滑动曲线,从中可以看出:除持续干旱日数外,其它指标的突变时间

多发生在 20 世纪末期到 21 世纪初期。在 1991 - 2000 年间,洞庭湖流域发生 6 次大的洪涝灾害,和期间的大量降水密切相关。除持续湿润日数略有减小外,其余指数均表现出上升趋势,其中 5 d 最大降水量上升趋势较为显著。

### 3.2 极端降水指数变化趋势的空间特征

从空间尺度来看(图 3),5 d 最大降水量 RX5 增大的地区主要在西北部大部地区和东南角小部分地区,即吉首、安化一带和郴州附近,安化、吉首、郴州的 RX5 趋势系数分别为 1.6、1.298 和 0.856 mm/a。洞庭湖中部南县、沅江、长沙、株洲、邵阳、武冈、通道、凯里 8 个站点 5d 最大降水量呈减少趋势。极端降水量 R95P 空间分布较为复杂,总体上武冈、邵阳、芷江一带极端降水量 R95P 发生次数呈下降趋势,吉首、沅陵、岳阳、道县一带极端降水量呈上升趋势。极端降水日数 R25 变化趋势总体上呈东高西低的分布格局,近 55 年,岳阳附近极端降水日数增加,极端降水发生频次增加,而 2 个小值中心分别位于洞庭湖西部的芷江和武冈周围,说明这两个气象站日降水量超过 25 mm 的天数呈下降趋势。

持续干旱日数 CDD 多年变化趋势呈现南高北低的格局,北部来凤、桑植、常德、沅江一带呈负增长状态,说明该地区日降水量小于 1 mm 的最长持续日数有下降趋势,降水有“由干转湿”的趋势;南部芷江

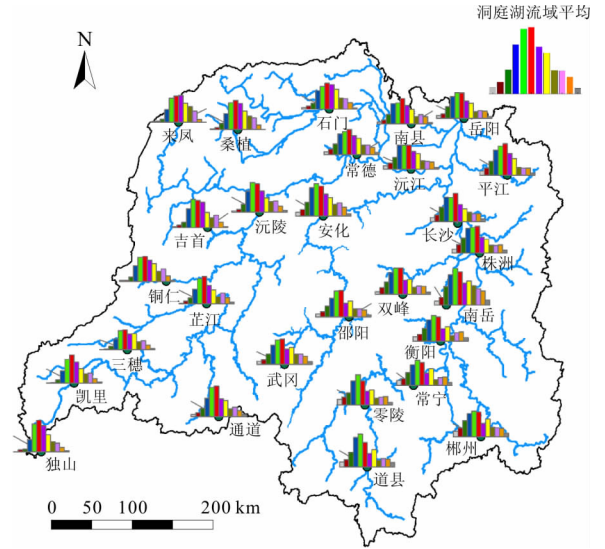


图 1 1961 - 2015 年洞庭湖流域极端降水发生频次的年内变化特征

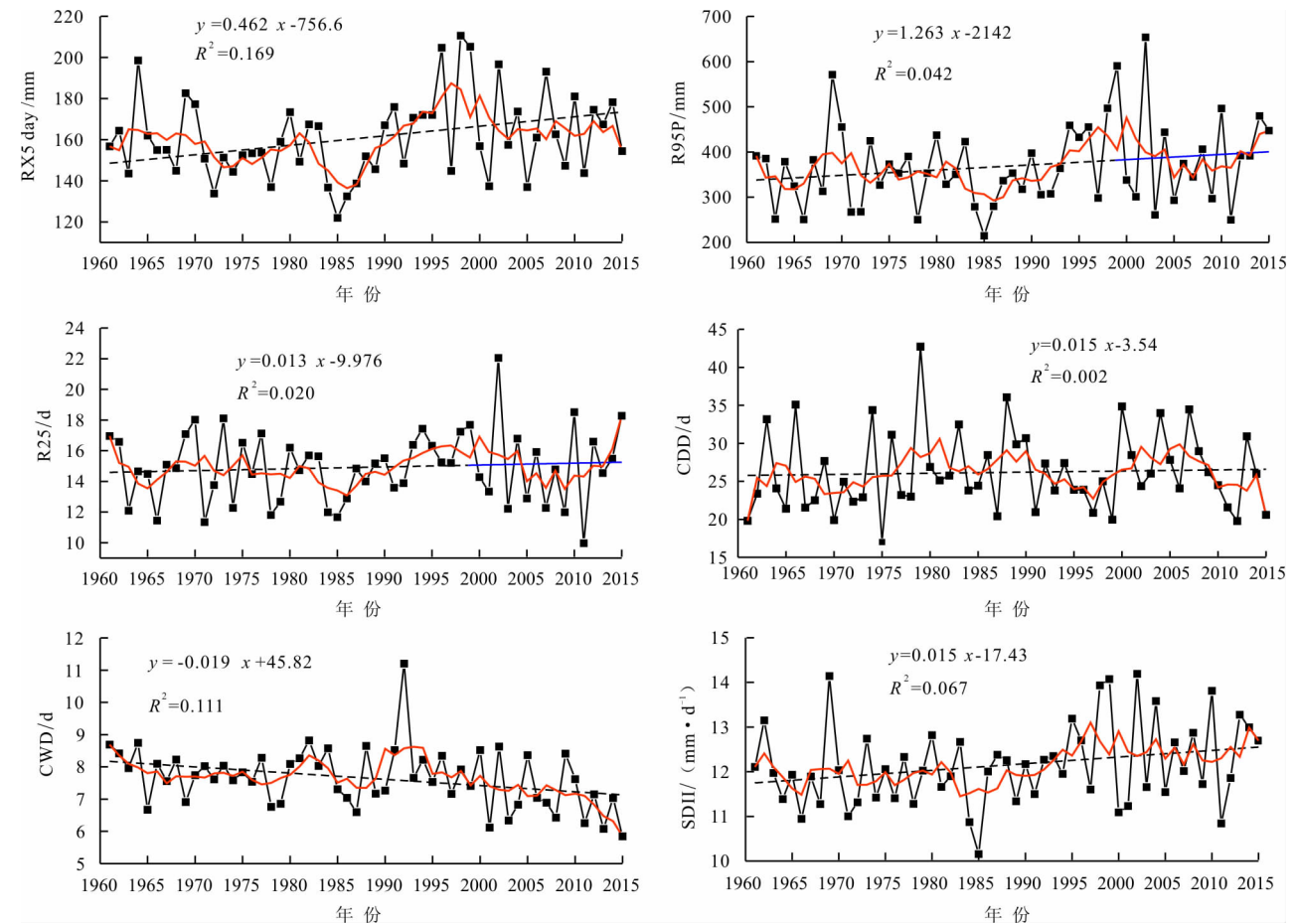


图 2 1961 - 2015 年洞庭湖流域极端降水指数年际变化



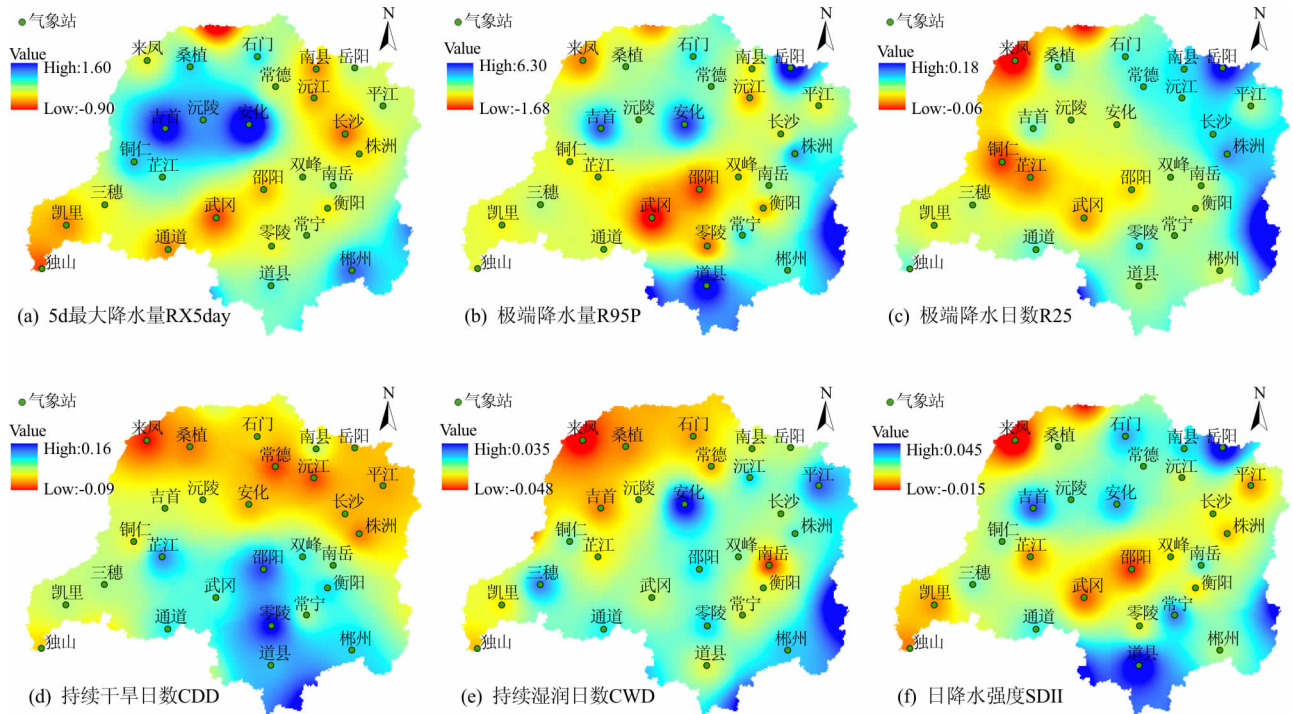


图3 1961 - 2015年洞庭湖流域极端降水指数空间分布

江、邵阳、零陵一带呈正增长状态,其中零陵站 CDD 变化率为  $1.46 \text{ d}/10\text{a}$ 。洞庭湖北部多数站点持续湿润日数 CWD 的趋势系数为负值,即 CWD 呈下降趋势。除安化站附近,日降水量大于  $1 \text{ mm}$  的最长持续日数有  $0.1 \text{ d}/10\text{a}$  的微小增长外,位于洞庭湖西北角的来凤、桑植、石门、吉首、常德一带,持续湿润指数相比其它站点下降趋势更为明显。日降水强度 SDII 和极端降水量的空间分布趋势极为相似,芷江、武冈、邵阳、平江 4 个地区普通日降水强度下降趋势较为显著,吉首、安化、岳阳一带及洞庭湖东南地区的道县、常宁一带。总体而言,洞庭湖区极端降水事件分布大致是山区丘陵大于平原区,流域东南部地处山地,降水有增加趋势,而中部丘陵区为降水量的低值区。

从各个极端降水指数的空间分布来看,持续干旱日数 CDD 的变化趋势和 5d 最大降水量 RX5day、极端降水量 R95P、日降水强度 SDII 的变化趋势呈相反状态,武冈、邵阳、双峰一带极端降水有下降趋势,而持续干旱日数呈现上升趋势,与各个指标代表的物理意义一致。洞庭湖区极端降水事件分布大致是山区丘陵大于平原区,流域东南部地处山地,降水有增加趋势,而中部丘陵区为降水量的低值区。

### 3.3 极端降水指数周期特征

采用 EEMD 集合经验模态分解法对洞庭湖流域 1961 - 2015 年的降水序列进行逐步分解,以期深

入研究洞庭湖流域极端降水指数的周期特征。本文设定扰动白噪声与原始信号的信噪比为 0.3,平均集合次数为 100 次,得到 3 个不同波动周期的固有模态函数和 1 个残差趋势项,即 IMF1 - IMF3 和 RES,见图 4。计算各 IMF 平均周期(表 2),分析 6 个极端降水指数的周期性。

由图 4 和表 2 可知,随着阶数的增加,洞庭湖流域极端降水指数的 IMF 分量振幅逐渐减少。各个极端降水指数的 IMF1 分量除 20 世纪 80、90 年代的波动幅度较小外,其他时间段内的振幅波动较大,整体表现出  $3 \sim 6\text{a}$  的准周期。IMF2 分量的变化周期涵盖范围较大,各指数振荡表现出  $8 \sim 15\text{a}$  的准周期。从 IMF3 分量看出,持续干旱日数 CDD 和日降水强度 SDII 的波动状态恰好相反,波峰与波谷相对,说明日降水量小于  $1\text{mm}$  的持续日数越大,日降水强度就会相对越小。IMF3 具有  $21 \sim 27\text{a}$  的年代际周期波动特征,在整个时间跨度上,振动幅度较 IMF1 和 IMF2 低,较为平缓,反映长时间尺度的极端降水指数变化特征。趋势项 RES 表示极端降水指数整体的变化趋势,以 80 年代末、90 年代初为分界点,持续干旱日数 CDD 和持续湿润日数 CDD 呈现先增加后减小的趋势变化,其余各个指标在近 55 年均呈现增长趋势。这与 RCLimDex 模型计算得到的变化趋势基本一致。

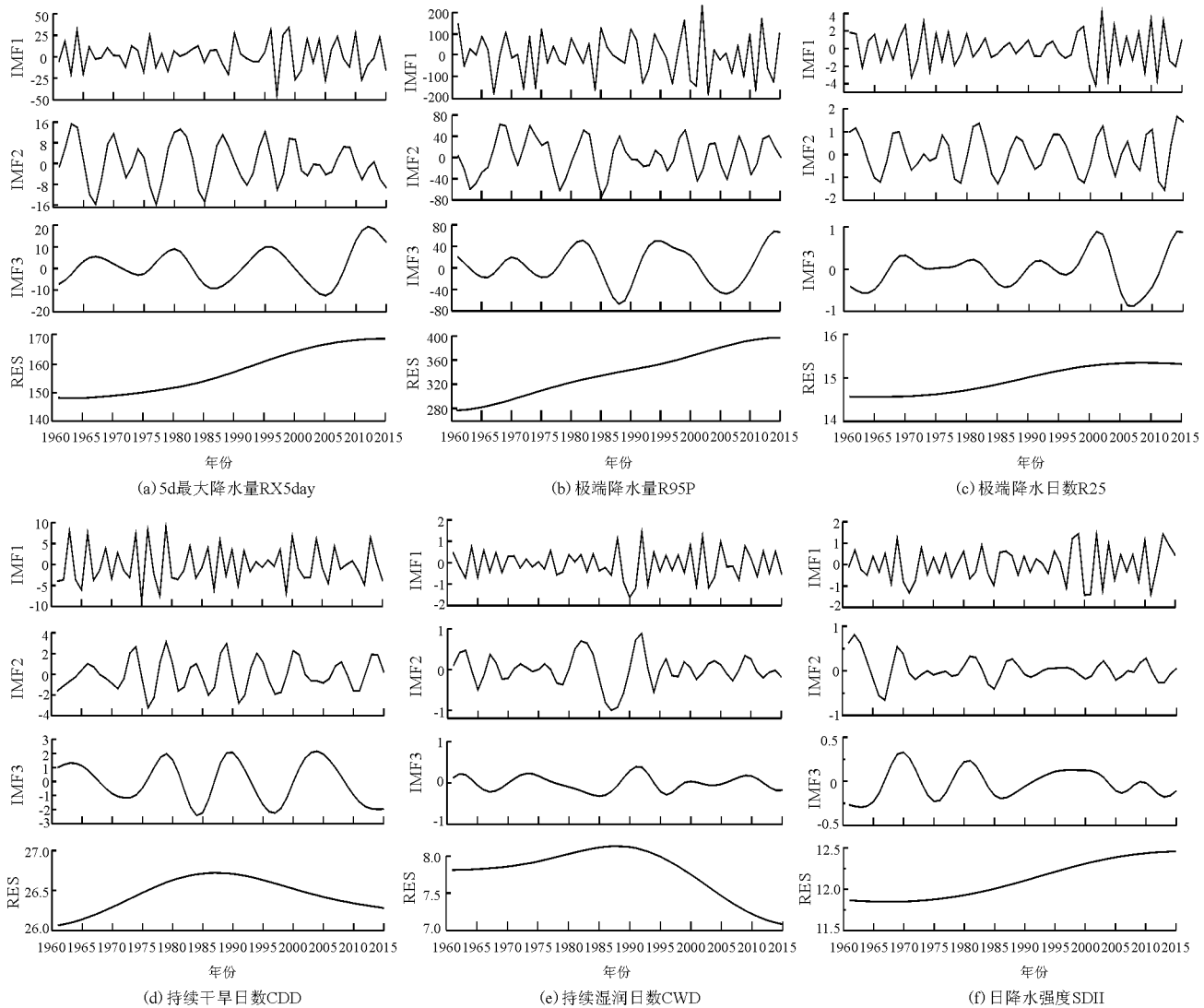


图 4 1961 - 2015 年洞庭湖流域极端降水指数 EEMD 分解

表 2 1961 - 2015 年洞庭湖流域极端降水指数各 IMF 分量的周期

极端降水指数	IMF1	IMF2	IMF3
R25	3	10	24
RX5day	6	9	25
R95P	6	11	27
SDII	5	10	21
CDD	4	8	21
CWD	6	15	24

## 4 结论与讨论

(1) 洞庭湖流域极端降水频次呈单峰分布, 以 6 月最高, 12 月和 1 月最低。其中, 4 - 10 月份极端降水频次之和占全年的 82.7%, 南岳、安化、道县和平江 4 站为极端降水高发地带。

(2) 近 55 年洞庭湖流域极端降水指数的变化趋势较为平缓, 各个极端降水事件的突变时间多发生在 20 世纪末期到 21 世纪初期, 除持续湿润日数略有减小外, 其它极端降水指标均呈小幅上升趋势。RX5day、R95P、SDII 变化趋势空间分布相似, 洞庭湖流域中部武功、邵阳、双峰一带极端降水有下降趋势, 持续干旱日数呈现上升趋势。通过 EEMD 方法分解得到的各类极端降水指数的固有模态函数分量 IMF1、IMF2 和 IMF3 分别表现出 3 ~ 6a、8 ~ 15a 和 21 ~ 27a 的准周期。

(3) 本文以洞庭湖流域 28 个气象站点的数据分析了极端降水事件的时空分布特征, 但由于极端降水事件的发生具有较强的不确定性, 且受地形和气候因子的影响显著, 洞庭湖流域各极端降水指数的空间分布特征并不完全一致, 单一指数难以整体描述极端降水事件的变化规律, 因此未来对极端洪

涝灾害的预测仍需进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 刘剑宇,张强,顾西辉,等.鄱阳湖流域洪水变化特征及气候影响研究[J].地理科学,2016,36(8):1234-1242.
- [2] 魏军,李婷,胡会芳,等.基于RClimDex模型的石家庄市极端降水时空变化特征[J].干旱气象,2016,34(4):623-630.
- [3] 王刚,严登华,张冬冬,等.海河流域1961年-2010年极端气温与降水变化趋势分析[J].南水北调与水利科技,2014,12(1):1-6.
- [4] Min S K,Zhang Xuebin,Zwiers F W, et al. Human contribution to more - intense precipitation extremes [J]. Nature,2011,470(7334):378-381.
- [5] 杨素英,孙风华,马建中.增暖背景下中国东北地区极端降水事件的演变特征[J].地理科学,2008,28(2):224-228.
- [6] Wang Baolong,Zhang Mingjun,Wei Junlin, et al. Changes in extreme events of temperature and precipitation over Xinjiang,northwest China,during 1960-2009 [J]. Quaternary International,2013,298(12):141-151.
- [7] Sharlene L B,Ricardo M C,Kishan K. Variations in extreme temperature and precipitation for a Caribbean island;Trinidad[J]. Theoretical and Applied Climatology,2015, 122(3-4):783-797.
- [8] Abbas F,Ahmad A,Safeeq M,et al. Changes in precipitation extremes over arid to semiarid and subhumid Punjab, Pakistan [J]. Theoretical and Applied Climatology,2014, 116(3-4):671-680.
- [9] Ávila A,Justino F,Wilson A, et al. Recent precipitation trends, flash floods and landslides in southern Brazil [J]. Environmental Research Letters, 2016,11(11):1-3.
- [10] Nowreen S,Murshed S B, Islam Akms, et al. Changes of rainfall extremes around the haor basin areas of Bangladesh using multi - member ensemble RCM [J]. Theoretical and Applied Climatology,2015,119(1-2):363-377.
- [11] 张剑明,廖玉芳,段丽洁,等.1960-2009年湖南省暴雨极端事件的气候特征[J].地理科学进展,2011,30(11):1395-1402.
- [12] 覃鸿,黄菊梅,徐志伟,等.1960-2014年洞庭湖区极端降水和暴雨的变化特征[C]//第32届中国气象学会年会S1灾害天气监测、分析与预报,2015:949-954.
- [13] 张晓艳,刘梅先.洞庭湖流域降雨和降雨极值时空分布及风险变化研究[J].湖南师范大学(自然科学学报),2016,39(2):10-15.
- [14] 王思琪,薛联青,王苓如,等.洞庭湖流域降水多尺度特征与趋势预测及空间分布规律[J].中国农村水利水电,2015(3):34-38.
- [15] 孙占东,黄群, Lotz Tom. 洞庭湖流域分布式水文模型[J].长江流域资源与环境,2015,24(8):1299-1304.
- [16] 王琼.1962-2011年长江流域极端气温和降水事件变化研究[D].兰州:西北师范大学,2014.
- [17] 李庆祥,黄嘉佑.北京地区强降水极端气候事件阈值[J].水科学进展,2010,21(5):660-665.
- [18] Zhang Xuebin, Yang Feng. RClimDex (1.0) User Manual [S]. Climate Research Branch Environment Canada Downsview, Ontario Canada, 2004.
- [19] Huang N E, Wu Zhaohua. A review on Hilbert - Huang Transform:Method and its applications to geophysical studies [J]. Reviews of Geophysics, 2008,46(2):1-23.
- [20] Rivera J A, Penalba O C. Trends and spatial patterns of drought affected area in Southern South America [J]. Climate, 2014,2(4):264-278.
- [21] 孙银凤,陆宝宏.基于EEMD的南京市降水特征分析[J].中国农村水利水电,2013(3):5-9.