

# 江西省信江流域极端降水时空变化特征

张余庆<sup>1</sup>, 陈昌春<sup>2</sup>, 姚鑫<sup>2</sup>, 李艳萍<sup>2</sup>

(1. 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044;

2. 南京信息工程大学 地理与遥感学院, 南京 210044)

**摘 要:**随着全球气候变化加剧, 极端降水事件对人类社会造成严重影响。基于江西省信江流域 1960—2005 年逐日降水数据, 利用 ClimDex 模型与集合经验模态分解法(EEMD)分析信江流域极端降水指数时空分布特征。结果表明: 各类极端降水指数呈不同程度上升趋势, 其中以极端降水量(R95P)上升趋势最为显著。经 EEMD 分解得出各项极端降水指数的 IMF 分量, 具体表现出 2.56~2.88 a, 5.11~6.57 a, 9.20~11.50 a 和 22.59~36.48 a 的准周期, 其中以 IMF1 方差贡献率最大, IMF3 的振荡周期较为显著。在 3 种典型年的极端降水事件空间分布上, 五日最大降水量(RX5day)和极端降水量(R95P)呈中部略高于周边地区, 且极端多水年高于平水年和极端少水年, 表明流域中部地区极端多水年的极端降水事件发生频率相对较高。

**关键词:**信江流域; 极端降水; RClimDex; EEMD

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)04-0189-06

## Spatiotemporal Characteristics of Extreme Precipitation Variations in Xinjiang Basin, Jiangxi Province

ZHANG Yuqing<sup>1</sup>, CHEN Changchun<sup>2</sup>, YAO Xin<sup>2</sup>, LI Yanping<sup>2</sup>

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters,

Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of

Geography and Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Under the background of global climate change, extreme precipitation events have been happening, which caused a serious influence and damage to human living. Spatiotemporal distributions of extreme precipitation indices were quantitatively analyzed using ClimDex model and ensemble empirical mode decomposition (EEMD) based on the data of daily precipitation in Xinjiang basin, Jiangxi Province from 1960 to 2005. The results showed that all kinds of extreme precipitation indices presented an upward trend at different degrees, especially for extreme precipitation (R95P). The IMFs of extreme precipitation indices showed the quasi-periods of 2.56~2.88 years, 5.11~6.57 years, 9.20~11.50 years, 22.59~36.48 years, and the largest contribution belongs to IMF1 variance, the IMF3 oscillation period was more significant. A comparison of three extreme typical precipitation event years for five-day extreme precipitation (RX5day) and extreme precipitation (R95P) revealed a slightly higher 'values' in the central basin than the surrounding areas, and the two indices were higher in the extremely rainy years than in normal and extremely dry years, extreme precipitation events in extremely rainy years had a relative high occurrence frequency in the central basin.

**Keywords:** Xinjiang basin; Extreme precipitation; RClimDex; EEMD

降水作为反映水文气候环境的一个重要指标, 随着全球气候变化加剧, 极端气候事件发生频率呈增加趋势, 尤其近年来, 极端降水事件频发, 所造成的洪旱灾害及土壤侵蚀事件, 给人类社会带来巨大损失<sup>[1-4]</sup>。为探究极端降水事件时空变化规律, 国内外许多学者

利用不同方法做了相关研究。如 You 等<sup>[5]</sup>利用 6 个极端降水指标分析中国极端降水变化情况, 得出长江流域和东南地区极端降水增长趋势显著; Kenyon 等<sup>[6]</sup>利用观测台站的强降水指标定量分析全球极端降水事件, 得出由 ENSO 引起的强降水较为显著; 任

正果等<sup>[7]</sup>基于世界气象组织所推荐的 5 个极端降水指数,利用格点资料研究了中国南方地区的极端降水变化,研究表明各极端降水指数呈现明显的空间分布规律,越靠近东南方向越湿润,而越靠近西北方向越干旱;赵丽等<sup>[8]</sup>根据百分位阈值法,结合一元线性回归、EOF 分析等方法深入研究新疆极端降水的时空分布特征及变化趋势,得出该区域极端降水受地形因素影响较大,极端降水对年降水量的贡献越大。由此可知,极端降水事件的时空变化特征已成为当前全球广泛关注的水文气象学术研究热点之一。

信江流域作为鄱阳湖流域乃至长江流域的重要组成部分之一,其流域极端气候所引起的降水变化对鄱阳湖水资源有着重大影响。近年来,信江流域由极端降水事件引起的旱涝灾害次数明显增多。有鉴于此,本文基于 ClimDex 模型研究 1960—2005 年信江流域极端降水事件的时空变化特征,利用集合经验模态分解法对极端降水指数进行模态分解,并采用典型年法定量分析极端降水指数空间分布,以期客观评估信江流域极端降水事件的时空变化特征,为预测未来极端降水事件奠定基础,为国家相关部门制定相适宜的区域气候变化对策提供科学依据。

## 1 研究区概况

信江是鄱阳湖流域五大河流之一,位于东经  $116^{\circ}42'$ — $118^{\circ}40'$ 、北纬  $27^{\circ}33'$ — $28^{\circ}58'$ ,地处江西省东北部。信江干流全长 364 km,全流域面积约为  $16\ 000\text{ km}^2$ ,多年平均流量  $575\text{ m}^3/\text{s}$ ,占鄱阳湖入湖总量的 12%,居五大河第二位,其中梅港水文站控制断面以上信江流域面积为  $15\ 535\text{ km}^2$ ,占整个流域面积的 97%。流域东西长约 190 km,南北宽约 90 km,呈长条形叶脉状,左右岸不对称,左岸面积约占总面积的三分之二<sup>[9]</sup>。上游沿岸一带以中低山为主,地形起伏较大;中游为信江盆地,地势由北、东、南三面边缘渐次向中部降低,并有向西倾斜;下游为鄱阳湖冲积平原,地势平坦开阔。该流域位于副热带湿润季风气候区,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,春雨、梅雨明显,多年平均气温约为  $18.2^{\circ}\text{C}$ 。多年平均降水量约为  $1\ 846.7\text{ mm}$ ,降水时空分布不均,4—6 月占全年降水量的 50%,以 6 月份暴雨居多,相对强度较大,上半年雨多易涝,下半年又雨少易旱,山区多于平原<sup>[10-11]</sup>。河川径流主要是雨水补给,多年平均径流量为  $181.6\text{ 亿 m}^3$ (梅港站),径流系数为 0.64。

## 2 资料与研究方法

### 2.1 数据预处理

流域内共 11 个气象站点,其中上饶县和鹰潭镇出

现大面积缺测,故并未使用,考虑到 1960 年前降水有缺测值,故采用 1960 年以后的数据序列。因此,本文所用的数据为江西省气象局提供的 9 个县级气象站 1960—2005 年逐日降水数据,精度为  $0.1\text{ mm}$ ,为了保证降水资料的可信与可靠,对逐日降水数据进行质量控制检验。首先,检查日降水量是否小于  $0\text{ mm}$ ,若小于  $0\text{ mm}$ ,则按缺失值处理;进而检验逐日降水量是否严重偏离本流域降水量的实际情况,即超出 3 倍标准差的值定义为出界值,通过人工核实并尽可能与相邻站点的记录进行比对,保留合理数据,不合理的按缺测进行处理。经具体检查,发现铅山站点降水数据有极少量的缺测值,因此,采用距离铅山较近的两个气象站点为横峰和上饶,经计算铅山距离横峰和上饶分别为 17 km 和 43 km,再计算其逐日相关系数分别为 0.92, 0.85,均通过 0.01 显著性水平。由于铅山距离横峰最近,相关系数最高,气候态非常相似,且横峰无缺测值,因此,根据横峰降水数据,采用线性相关法求出铅山极少量的缺测值,并保证插补后的铅山逐日降水数据与横峰逐日降水数据的相关系数在 0.92。

### 2.2 ClimDex 模型

气候变化检测和指标专家组 (Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices, ETCCDMI)提供了一系列气候指数计算程序 ClimDex,该模型是基于日降水、气温数据来定义极端气候指数,这些指数具有噪声低、显著性强的优点<sup>[12]</sup>。在此基础上由加拿大气象研究部的 Xuebin Zhang 和 Feng Yang<sup>[13]</sup>基于 R 语言开发的 RClimDex 软件,用于计算多种类型极端气候指数,该模型已被世界气象组织气候委员会所推荐,用于极端气候指数分析和气候变化检测、监测,其功能结构如图 1 所示。同时,该模型已被广泛应用到世界各地,如 Keggenhoff 等<sup>[14]</sup>基于该模型分析南高加索的格鲁吉亚地区极端降水,最大 1 d 和 5 d 降水量呈增长趋势,极端降水量在 1971—2010 年总降水量中的比重增大;Croitoru 等<sup>[15]</sup>基于 13 个气象站 1961—2008 年逐日降水资料,结合 11 个极端降水指数,利用该模型分析黑海西海岸极端降水情况,得出大部分极端降水指数呈上升趋势,北部较南部变化显著;杜军等<sup>[16]</sup>采用该模型分析西藏极端降水事件的变化,得出近 52 a 西藏连续干旱日数(CDD)显著减少,那曲地区西部极端降水指数变化显著,雅鲁藏布江中游多数极端降水指标趋于下降,而山南地区南部、林芝地区东南部的降水极值和降水强度在增加。

该模型的优点在于只需按规定格式输入逐日最高/最低气温和降水数据,即可计算获取 27 个核心极端气

候指数,其中极端气温类指数为 16 个,极端降水类指数为 11 个。模型考虑了降水缺测值对极端降水指数计算的敏感性,因此假定当降水数据在一个月中出现 3 d 以上或一年中出现 15 d 以上缺测值时,则对该月或该年不

进行极端降水指数的计算<sup>[17]</sup>。在完成降水资料质量控制处理后,进行各站点极端降水指数计算处理。结合信江流域实际降水情况 and 研究需要,选取与极端降水紧密相关的 6 个极端降水指数,如表 1 所示。

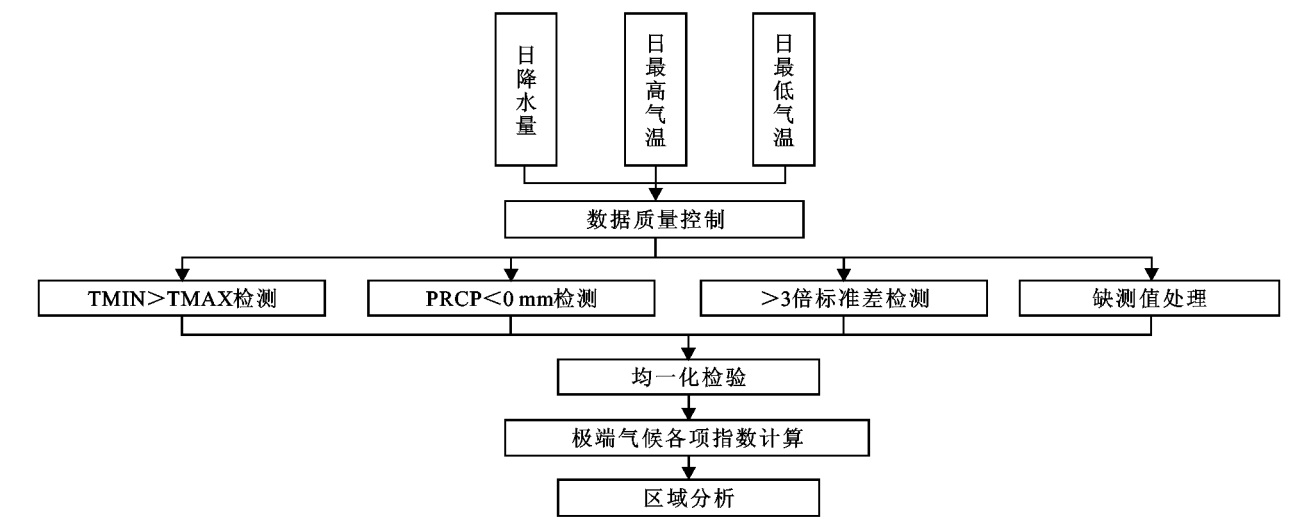


图 1 ClimDex 模型结构示意图

表 1 极端降水指数定义

极端降水指数	指数名称	定义	单位
R25	极端降水日数	每年日降水量 $\geq 25$ mm 的总日数	d
RX5day	五日最大降水量	每年连续 5 日的最大降水量	mm
R95P	极端降水量	每年日降水量 $>$ 第 95%分位值的强降水之和	mm
SDII	普通日降水强度	日降水量 $\geq 1$ mm 的总量与总日数之比	mm/d
CDD	持续干燥指数	日降水量 $< 1$ mm 的最长连续日数	d
CWD	持续湿润指数	日降水量 $\geq 1$ mm 的最长连续日数	d

2.3 EEMD 方法

集合经验模态分解法 (Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD) 作为 EMD 的改进方法,其原理与 EMD 相似,适用于非线性、非平稳时间序列特征分析<sup>[18]</sup>,尤其像极端降水这样的非线性过程,该方法将复杂的时间序列信号进行平稳化处理,从而在原始时间序列中提取不同尺度的波动和趋势分量,得到若干具有不同尺度特征的固有模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF)。EEMD 很大程度上克服了 EMD 存在的模态混淆问题,能够提供更为科学的尺度分解,使其模态分解在物理上具有唯一性,从而得出的固有模态函数 IMF 分量可以准确描绘时间序列的内在波动特征和趋势变化,在水文气象领域的应用效果显著<sup>[19-22]</sup>。相比小波分析而言,EEMD 不仅具备小波周期分析的优势,而且很大程度上克服了小波基函数的选择对信号分析结果的影响,具有直观性、后验性和自适应性的优点。

候指数,将计算得出的各项指数值进行泰森多边形加权平均,求得每个指数在整个流域尺度上的平均值,从而在整体上反映该区域极端降水情况,其各气象站点所控制区域的泰森多边形如图 2 所示。

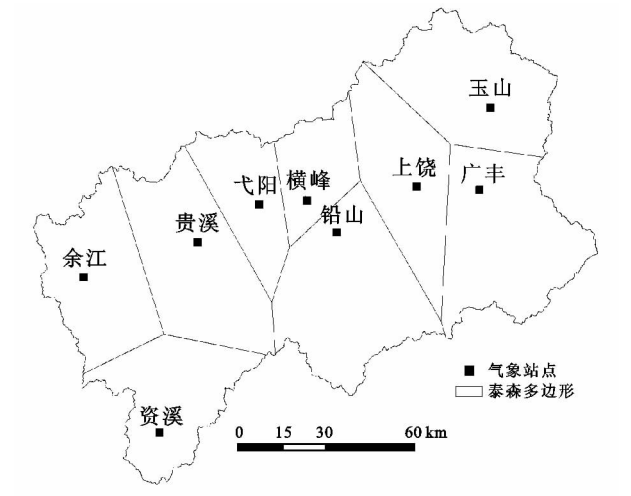


图 2 信江流域气象站点及其泰森多边形

3.1 极端降水指数时间特征分析

极端降水各项指数变化显示,流域极端降水事件均有不同程度的上升,表明极端降水事件发生频率在

3 结果与分析

利用 RClimDex 计算信江流域各站点的极端气

过去 46 a 内呈增加趋势。根据图 3, 极端降水日数 (R25) 上升趋势线尽管较为平缓, 但其年际差异较大, 波动幅度较大。五日最大降水量 (RX5day) 呈上升趋势, 从 1960 年的 111.3 mm 上升到 2005 年的 149.4 mm, 平均上升了 8.3 mm/10 a。而极端降水量 (R95P) 上升趋势十分显著, 其从 1960 年的 178.8 mm 上升到 2005 年的 381.1 mm, 46 a 来极端降水量翻了一倍多, 平均上升近 44.0 mm/10 a, 即极端降水总量在总降水量中所占比例不断上升, 在总降水量一定时, 极端降水增加, 小雨呈减少趋势。反映平均降水情况的普通日降水量 (SDII) 略上升, 其从 1960 年的 10.4 mm 上升到

2005 年的 11.9 mm, 平均上升了 0.33 mm/10 a, 表明该流域年内有效日均降水强度在增加。持续干燥指数 (CDD) 在过去 46 a 间呈现较为复杂的变化, 尽管其趋势线变化不显著, 但年际间的极高、极低值显现相邻分布, 这对流域工农业用水造成负面影响, 尤其长时间的干燥可能会形成大面积干旱, 这对农业生产活动形成不利影响。而与之相反的持续湿润指数 (CWD) 由 1960 年的 11 d 上升到 2005 年的 12 d, 平均上升 0.22 d/10 a, 该指数在 1960—1977 年期间变化较为平稳, 后续时间阶段的年际间变化较为剧烈, 且不稳定, 持续湿润指数过大会导致雨涝事件的发生。

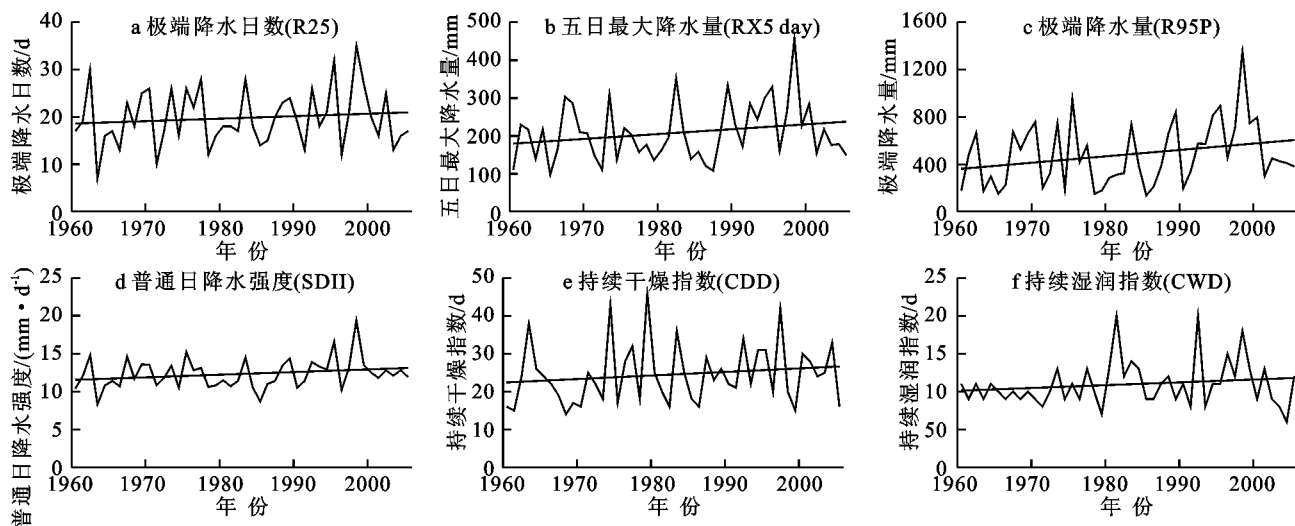


图 3 信江流域极端降水指数的年际变化

### 3.2 极端降水周期分析

为了深入探究信江流域极端降水事件发生的周期变化特征, 对信江流域各极端降水指数值进行 EE-MD 分解。利用镜像拓延法对数据进行对称延伸, 以消除边界对于 EEMD 分解过程中所造成的上下脉冲影响。采用集合分解的扰动白噪声与原始信号的信噪比为 0.3, 平均集合次数为 500 次, 得出 4 类不同波动周期的固有模态函数分量 (IMF1~4) 和一个残差趋势项 (RES), 如图 4 所示。各极端降水指数的 IMF 分量反映了从高频到低频不同时间尺度的波动特征, 在相同时段内, 不同时间尺度的周期振荡随时间呈现出非均匀强弱变化, 这种非均匀振荡变化一定程度上反映了影响降水变化的大气内部动力过程和外部强迫共同作用的非线性。通过求各 IMF 平均周期, 并将不同尺度信号波动的频率和振幅对原数据序列总体特征影响程度用方差贡献率表示出来, 见表 2。

根据图 4 与表 2, 表征极端降水事件的各类指数的 IMF 分量依次从高频到低频的波动。IMF1 除 1975 年之前的持续湿润指数 (CWD) 波幅较为较小外, 其余指数在整个时间范围内的振幅波动较大, 整体表现出 2.56~2.88 a 的准周期, 其方差贡献率在 26.89%~

34.24%, 所占比重最大。IMF2 表现出 5.11~6.57 a 的准周期, 周期规律较为明显, 其方差贡献率在 21.43%~26.94%。随着阶数的增加, IMF 分量的波幅逐渐减小, 波长增长, IMF3 具有 9.20~11.50 a 的准周期, 其方差贡献率在 17.99%~20.62%。IMF4 包含了 22.59~36.48 a 的年代际周期波动特征, 在整个时间跨度上波幅较小, 较为平稳, 反映极端降水长期变化特征。根据残差趋势项 RES, 表征极端降水事件的各类指数整体呈不同程度上升趋势, 这与 RClimDex 模型计算得出的趋势一致。

### 3.3 极端降水空间格局

为了深入分析流域极端降水事件发生情况及其空间分布, 选取 3 种典型降水年 (极端多水年、平水年、极端少水年) 进行各项极端降水指数的统计分析<sup>[23]</sup>。根据流域总体极端降水概率情况, 选取年降水频率为 10%, 50% 和 90% 的 3 种概率分布条件下的年降水量分别为 2 230.4 mm, 1 807.5 mm 和 1 394.2 mm, 与这 3 种降水频率降水量相近的年份分别为 1973 年、1988 年和 1996 年, 作为极端多水年、平水年和极端少水年, 最后分别计算这 3 种典型年各站点极端降水指数的空间分布格局。

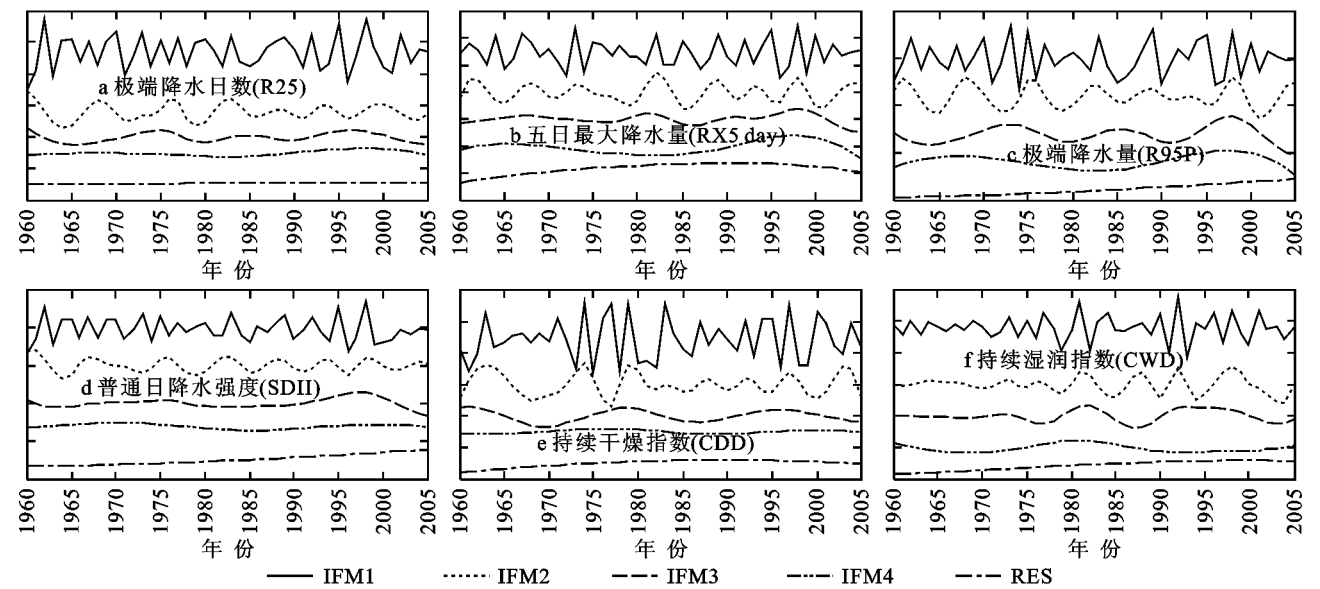


图 4 信江流域极端降水指数的 EEMD 分解结果

表 2 信江流域极端降水指数各分量的周期与方差贡献率

IMF 分量	极端降水指数	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	RES
周期/a	R25	2.88	6.57	11.50	36.48	
	RX5day	2.71	5.11	9.20	22.91	
	R95P	2.88	5.75	11.50	22.74	
	SDII	2.71	5.11	11.50	24.70	
	CDD	2.71	5.11	11.50	22.59	
	CWD	2.56	5.75	11.50	24.96	
方差贡献率/%	R25	34.24	26.94	17.99	12.44	8.39
	RX5day	32.44	24.04	19.03	17.24	7.26
	R95P	30.28	21.43	20.4	18.23	9.66
	SDII	28.11	23.32	20.62	17.88	10.09
	CDD	27.55	25.87	18.98	15.37	12.23
	CWD	26.89	22.11	19.68	18.93	12.39

根据图 5,3 种典型年的极端降水日数(R25)总体上呈中西部略高于东部的空间分布格局,极端多水年(1973 年)日降水量 $\geq 25$  mm 的总日数最多,9 个站点均值高达 27.9 d,其次是平水年(1988 年),为 22.7 d,极端少水年(1996 年)最少,仅为 15.1 d,差距较为显著。各年代各站点均值的五日最大降水量(RX5day)和极端降水量(R95P)基本呈现中部略高于周边地区,该两项指数空间分布特征可能与流域地势有关,该流域南部为绵长的武夷山脉,北部亦有中低山脉,唯有东部山脉高程较低,夏季东南季风带来丰富的水汽,在东西向的信江平原地区形成了较高的降水量;分析其指数空间分布情况,极端多水年的五日最大降水量和极端降水量均值高达 357.8 mm,691.0 mm,其次是平水年为 220.2 mm,635.2 mm,极端少水年仅为 187.5 mm,385.9 mm,约为极端多水年的一半。普通日降水强度(SDII)空间差距较小,每个站点 3 种典型年份的差距较小,尤其是贵溪站点,表明信江流域普通日降水强度较为稳定,受极端降水事件影响较小。持续干燥指数(CDD)整体呈现

东部略高于中西部地区,其中东部地区以平水年最高,尤以上饶最为明显,1988 年 CDD 值高达 43 d,而极端多水年(1973 年)、极端少水年(1996 年)的 COD 值仅为 18 d,20 d,表明 CDD 在平水年份表现尤为严重。最后一项指标为持续湿润指数(CWD),总体上东部高于中西部,其中以余江为代表的西部地区,该值差距细微,以玉山为代表的东部地区极端少水年(1996 年)的 CWD 值反而较其它年份略高,一定程度上表明持续湿润指数与极端降水量的相关性不显著。

4 结论与讨论

本文基于 RClimDex 模型、采用集合经验模态分解方法定量分析了信江流域 1960—2005 年极端降水事件的时空分布特征,并结合 6 种极端降水指数分析了 3 种不同典型降水年份下的空间分布格局,得出以下主要结论:

(1) 信江流域极端降水事件发生频率在过去 46 a 内呈增加趋势,其中极端降水量(R95P)上升趋势十分显著,其在总降水量中所占比例不断上升。

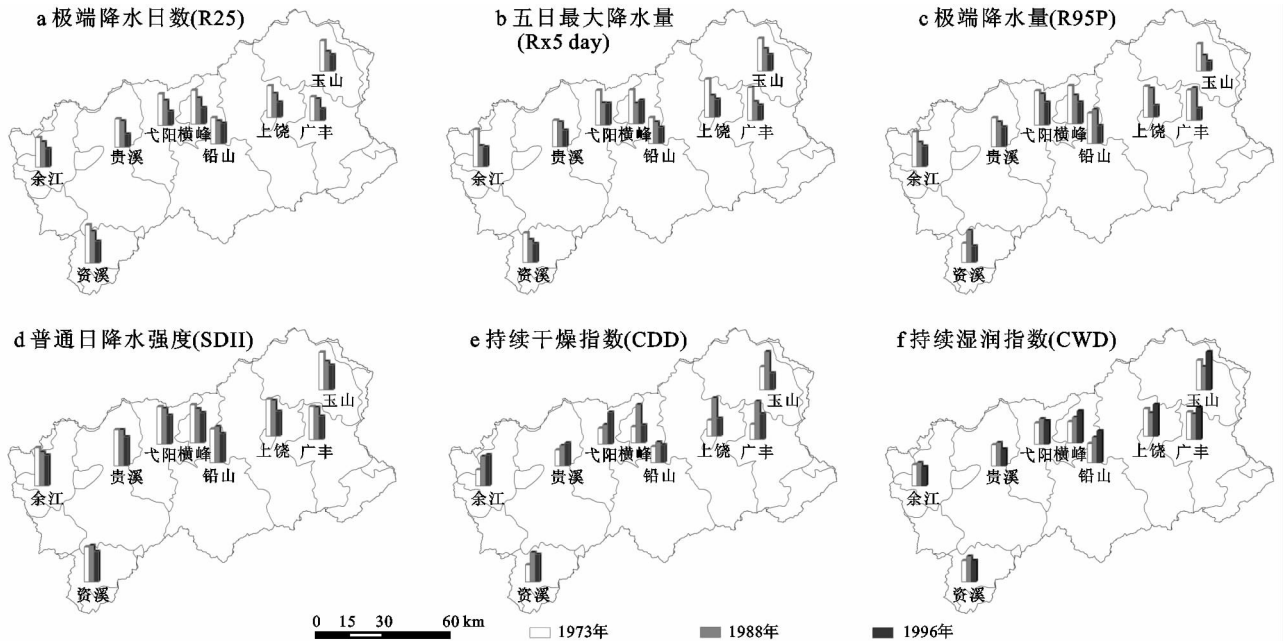


图 5 3 种典型年极端降水指数空间分布

(2) 由 EEMD 分解得出的各类极端降水指数的 IMF 表现出 2.56~2.88 a, 5.11~6.57 a, 9.20~11.50 a 和 22.59~36.48 a 的准周期,其中以 IMF1 方差贡献率最大,IMF3 的振荡周期较为显著,其包含真实极端降水事件的物理意义信息较多。根据残差趋势项 RES,极端降水事件呈不同程度上升趋势。

(3) 选取 3 种典型降水年份分析信江流域极端降水事件空间分布情况,得出极端降水日数(R25)呈中西部略高于东部的空间分布格局,差距较为显著;各年代各站点均值的极端降水量(R95P)和五日最大降水量(Rx5day)基本呈现中部略高于周边地区;普通日降水强度(SDII)空间差异较小,极端多水年的强度略大于平水年和极端少水年;持续干燥指数(CDD)和持续湿润指数(CWD)整体呈现东部略高于中西部地区。

本文仅以信江流域 9 个县级气象站点数据,结合 ClimDex 模型和 EEMD 方法系统分析极端降水事件近 46 a 的时空变化特征,由于气象站点空间分布不均匀、地形以及气候复杂性等影响,一定程度上增加了极端降水事件发生的不确定性。尽管 EEMD 方法有着小波分析所不具备的优势,但由于数据时间序列的长度所限,分解得出的能量集中于 IMF1,而其余分量贡献率较小因此,极端降水事件的研究方法及其归因分析仍需进一步深入研究。

#### 参考文献:

- [1] Cinco T A, Guzman R G D, Hilario F D, et al. Long-term trends and extremes in observed daily precipitation and near surface air temperature in the Philippines for the period 1951—2010[J]. Atmospheric Research, 2014,145:12-26.
- [2] 汪宝龙,张明军,魏军林,等. 西北地区近 52 a 气温和极端降水事件的变化特征[J]. 自然资源学报,2012,27(10):1721-1733.
- [3] 戴海伦,苑爽,张科利,等. 贵州省降雨侵蚀力时空变化特征研究[J]. 水土保持研究,2013,20(1):37-41.
- [4] 翟盘茂,潘晓华. 中国北方近 50 a 温度和降水极端事件变化[J]. 地理学报,2003,58(S):1-10.
- [5] You Q L, Kang S C, Aguilar E et al. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961—2003. Climate Dynamics, 2011,36(11/12):2399-2417.
- [6] Kenyon J, Hegerl G C. Influence of Modes of Climate Variability on Global Precipitation Extremes[J]. Journal of Climate, 2010,23(23):1157-1166.
- [7] 任正果,张明军,王圣杰,等. 1961—2011 年中国南方地区极端降水事件变化[J]. 地理学报,2014,69(5):640-649.
- [8] 赵丽,杨青,韩雪云,等. 1961—2009 年新疆极端降水事件时空差异特征[J]. 中国沙漠,2014,34(2):550-557.
- [9] 程宗锦. 江西五大河流科学考察[M]. 南昌:江西科学技术出版社,2009.
- [10] 张余庆,陈昌春,杨绪红,等. 信江流域土地利用变化的径流响应研究[J]. 水电能源科学,2013,31(8):27-30.
- [11] 张余庆,陈昌春,尹义星,等. 江西多年平均降水量空间插值模型的选取与比较[J]. 水土保持研究,2013,20(4):69-74.
- [12] Sillmann J, Roeckner E. Indices for extreme events in projections of anthropogenic climate change [J]. Climatic Change, 2008,86(1/2):83-104.

绿色空间的生态骨架;加强东、西、南、北四个农业生态区的建设。以促进研究区域重点生态功能区的保护和管理,增强涵养水源、保持水土能力,保护生物多样性。

#### 参考文献:

- [1] Waker Nagel M, Rees W E. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth[M]. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996:30-100.
- [2] Rees W E. Revisiting carrying capacity: area-based indicators of sustainability[J]. Population and Environment, 1996, 17(3):195-215.
- [3] 张志强,徐中民,程国栋.生态足迹的概念及计算模型[J].生态经济:学术版,2000(10):8-10.
- [4] 刘宇辉,彭希哲.中国历年生态足迹计算与发展可持续性评估[J].生态学报,2004,24(10):2257-2262.
- [5] 陈成忠,林振山.中国1961—2005年人均生态足迹变化[J].生态学报,2008,28(1):338-344.
- [6] 王建源,陈艳春,李曼华,等.基于能值分析的山东省生态足迹[J].生态学杂志,2007,26(9):1505-1510.
- [7] 张恒义,刘卫东,林育欣,等.基于改进生态足迹模型的浙江省域生态足迹分析[J].生态学报,2009,29(5):2738-2748.
- [8] 宫继萍,潘竟虎,石培基.基于生态足迹和灰色关联度的甘肃省可持续发展研究[J].水土保持研究,2011,18(2):198-201.
- [9] 高标,崔凤午.吉林省生态足迹与生态承载力动态变化分析
- 与预测研究[J].水土保持研究,2012,19(6):105-110.
- [10] 郑晖,石培基,何娟娟.甘肃省生态足迹与生态承载力动态分析[J].干旱区资源与环境,2013,27(10):13-18.
- [11] 安宝晟,程国栋.西藏生态足迹与承载力动态分析[J].生态学报,2014,34(4):1002-1009.
- [12] 王保利,李永宏.基于旅游生态足迹模型的西安市旅游可持续发展评估[J].生态学报,2007,27(11):4777-4784.
- [13] 何淑勤,郑子成,孟庆文,等.基于生态足迹的雅安市土地生态安全研究[J].水土保持研究,2010,17(6):118-122.
- [14] 王宁,栗晓玲.陕西关中地区水资源生态足迹与生态赤字研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2013,41(3):221-227.
- [15] 李健,张吉辉.水足迹视角下区域水资源灾变的灰色拓扑预测[J].天津大学学报:社会科学版,2013,15(1):1-4.
- [16] 章锦河,张捷.旅游生态足迹模型及黄山市实证分析[J].地理学报,2004,59(5):763-771.
- [17] Haberl H, Wackernagel M, Krausmann F, et al. Ecological footprints and human appropriation of net primary production: a comparison[J]. Land Use Policy, 2004, 21(3):279-288.
- [18] Kitzes J, Moran D, Galli A, et al. Interpretation and application of the Ecological Footprint: A reply to Fiala (2008)[J]. Ecological Economics, 2009, 68(4):929-930.
- [19] 黎瑞波,蒋菊生.生态足迹分析模型及其研究现状[J].华南热带农业大学学报,2004,10(2):12-15.
- [20] 程建权.城市系统工程[M].武汉:武汉大学出版社,1999.

(上接第194页)

- [13] Xuebin Zhang, Feng Yang. RClimDex(1.0) User Manual[S]. Climate Research Branch Environment Canada Downsview, Ontario Canada, 2004.
- [14] Keggenhoff I, Elizbarashvili M, Amiri-Farahani A, et al. Trends in daily temperature and precipitation extremes over Georgia, 1971—2010[J]. Weather and Climate Extremes, 2014(4):75-85.
- [15] Croitoru A, Chitoroiu B, Todorova V I, et al. Changes in precipitation extremes on the Black Sea Western Coast[J]. Global and Planetary Change, 2013, 102(3):10-19.
- [16] 杜军,路红亚,建军.1961—2012年西藏极端降水事件的变化[J].自然资源学报,2014,29(6):990-1002.
- [17] 宋敏红,马耀明,张宇,等.雅鲁藏布江流域气温变化特征及趋势分析[J].气候与环境研究,2011,16(6):760-766.
- [18] Huang N E, Wu Z H. A review on Hilbert-Huang Transform: Method and its applications to geophysical studies[J]. Reviews of Geophysics, 2008, 46(2), DOI: 10.1029/2007RG000228.
- [19] 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.
- [20] 李慧群,付遵涛.基于EEMD的中国地区1956—2005年日照变化的趋势分析[J].北京大学学报(自然科学版),2012,48(3):393-398.
- [21] 孙阳,陈元芳,程龙,等.基于EEMD的枯水季入库径流预报分析[J].中国农村水利水电,2012(2):34-37.
- [22] 薛春芳,侯威,赵俊虎,等.集合经验模态分解在区域降水变化多尺度分析及气候变化响应研究中的应用[J].物理学报,2013,62(10):504-511.
- [23] 陈昌春,张余庆,王腊春,等.基于RClimDex模型的江西省极端降水时空变化研究[J].中国农村水利水电,2013(11):41-45.