

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20212707

# 基于遗传算法的气候突变对江西省分期 降雨极值分布的影响

唐 莉<sup>a,b</sup>, 刘海明<sup>b</sup>, 魏 希<sup>c</sup>, 闫中月<sup>b</sup>, 杨冰冰<sup>b</sup>

(南昌工程学院 a. 江西省水安全与可持续发展软科学研究基地; b. 工商管理学院; c. 综合管理科, 江西 南昌 330099)

**摘要:** 为了研究气候变化对江西省内主汛期降雨极值分布的影响,以江西省 1960~2017 年的逐日降雨资料为基础资料,采用多种检验方法检测突变点并对突变点进行检验,使用遗传算法与 Fisher 最优分割法对气候突变前后的汛期进行分期,并对气候突变前后分期降雨极值分布与设计降雨进行探讨。结果表明,1960~2017 年江西省降雨量突变为 1991 年,广昌与鄱阳湖区域需重点关注极端强降雨的发生;遗传算法适用于汛期划分与分期,气候突变后(1991~2017 年)江西省主汛期设计降雨值大于气候突变前(1960~1990 年),也大于整时段(1960~2017 年)所得设计降雨值,在以设计降雨为基础推求江西省设计洪水时,需考虑气候变化对设计降雨值的影响,加强对洪水的防范。

**关键词:** 气候变化;主汛期划分;降雨极值分布;江西省

**中图分类号:** TV697.1<sup>+</sup>3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)06-0001-04

## 1 引言

随着经济社会的发展,气候变化对水文循环过程的影响在增大,这使极端降雨造成的风险不断加大,当工程需以可能最大洪水作为校核洪水时,尚需推求可能最大降雨,即设计降雨,且为满足水库分期蓄水、调度运用和施工等需要,在暴雨特性有明显季节性差别的地区,需确定分期设计降雨,供推求分期设计洪水之用。目前在汛期划分与分期中应用较广泛的分析方法为 Fisher 最优分割法<sup>[1]</sup>,可实现多指标样本间的时序聚类,可靠性强,在汛期分期中应用广泛,但其计算繁琐(引用)。遗传算法<sup>[2]</sup>是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法,相对一些常规的优化算法往往能较快地获得优化结果。鉴此,本文以江西省为例,采用多种气候突变检验方法检测突变年,通过建立汛期划分与分期遗传算法模型,对气候突变前后江西省汛期进行划分与分期,并与 Fisher 最优分割法结果进行对比,探讨本文所建立遗传算法在汛期划分与分期中适用性,在突变年前后汛期各期中选取极值样本作为新的研究序列,

采用皮尔逊Ⅲ型分布进行降雨突变前后分期降雨极值设计,探讨江西省降雨极值及概率极值的时空分布变化,以期对江西省水库等水利工程的运营与管理、绿色发展建设和水资源可持续开发利用提供决策依据。

## 2 基于遗传算法的汛期划分与分期

### 2.1 个体的编码和解码

不同地区的河流,汛期出现的时间、次数及其组合情况均不相同,一般可将一年划分成非汛期—汛期—非汛期三个时间段,即汛期划分。此外,由于在汛期内降水的集中性不同,汛期又可分为主汛期、前汛期、后汛期,即汛期分期。其中,主汛期是极易产生洪水的时期。由于汛期是一年中降水量最大的时期,易引发洪涝、泥石流等地质灾害,应做好防汛工作,主汛期又是汛期降水集中期,因此对汛期的划分与分期便成了防洪非工程措施的重要内容。汛期划分与分期均属于离散优化问题,为找出最优的划分方案,可按汛期划分与分期的思路首先进行时段分割。

如将一年划分成 72 个候,72 候序列相当于

**收稿日期:** 2021-12-10, **修回日期:** 2022-03-01

**基金项目:** 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ211945, GJJ201930)

**作者简介:** 唐莉(1992-),女,博士、讲师,研究方向为水文学及水资源, E-mail: Li370336892@163.com

**通讯作者:** 刘海明(1978-),男,博士、讲师,研究方向为管理科学与工程, E-mail: lauhoming@foxmail.com

一个染色体,将 72 候划分成三段,即非汛期—汛期—非汛期,以 5、24、72 节点为例,代表分段为 1-5、6-24、25-72,即 1-5 为非汛期、6-24 为汛期、24-72 为非汛期,染色体之间可选择、交叉、变异,解码的过程是从左至右依次读取染色体,则对汛期划分的研究就转变为染色体解码的过程,即根据适应度函数求解结果,直到找到最佳方案,确定分割节点。对于汛期分期而言针对提取出的汛期序列进行新的染色体解码。

### 2.2 适应度函数

遗传算法用适应度函数值来评价一个个体(解)的好坏,适应度函数值越大,解的质量越好。对于汛期的划分要求类间差距最大但类内差距最小,因此可将汛期各指标归一化处理后将汛期划分的适应度函数概化为求内部差异最小与外部差异最大的值。本文以切比雪夫距离作为度量标准进行聚类分析,即类内差距为循环对指标间差的绝对值求和,类间为各类内差距差的绝对值<sup>[3]</sup>。具体步骤如下。

设存在  $n$  个有序样本,各有  $m$  项评价指标,  $x_{i,j}$  为第  $i$  个样本的第  $j$  个指标特征值,构造指标特征值矩阵  $X$ :

$$X = \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,j} & \cdots & x_{1,m} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,j} & \cdots & x_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i,1} & x_{i,2} & \cdots & x_{i,j} & \cdots & x_{i,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \cdots & x_{n,j} & \cdots & x_{n,m} \end{pmatrix} \quad (1)$$

对各指标无量纲化得到  $z_{i,j}$ ,可转化为标准矩阵  $Z$ :

$$Z = \begin{pmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & \cdots & z_{1,j} & \cdots & z_{1,m} \\ z_{2,1} & z_{2,2} & \cdots & z_{2,j} & \cdots & z_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_{i,1} & z_{i,2} & \cdots & z_{i,j} & \cdots & z_{i,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_{n,1} & z_{n,2} & \cdots & z_{n,j} & \cdots & z_{n,m} \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中  $z_{i,j} = x_{i,j} / \max(x_{i,j})$

对每一个对象  $i$  均有一个  $m$  维向量,即  $z_i(z_{i,1}, z_{i,2}, \dots, z_{i,m})$ ,假设对象  $a$  至对象  $b$  分为一类,则可计算定义类内直径  $d$ :

$$d(a, b) = \frac{1}{2} \sum_{i=a}^b |z_i - \bar{z}_i| \quad (3)$$

式中,  $z_i$  为样本特征值;  $\bar{z}_i$  为  $z_i$  的均值。

当划分成三类时,假设为对象  $1 \sim a, a+1 \sim b, b+1 \sim n$  三类,则可计算定义类间直径  $D$ :

$$D(1, n) = |d(1, a) - d(a + 1, b)| + |d(1, a) - d(b + 1, n)| + |d(a + 1, b) - d(b + 1, n)| \quad (4)$$

当类内直径之和越小,类间直径越大时,符合汛期与非汛期的聚类原则,则适应度函数可表示为:

$$F(a, b) = \min \left\{ \sum_{s=1}^3 d - D(1, n) \right\} \quad (5)$$

式中,  $s$  为分类,  $s=1, 2, 3$ 。

即取  $a$  与  $b$  分割点使式(5)的值最小,则为分割点的最优解。

### 2.3 主程序源码

采用轮盘赌运算完成种群中个体优胜劣汰的过程以提高算法全局搜索能力,选取随机交叉的方式进行互换基因,采用单点编译法对染色体整数编码。

## 3 实例应用

### 3.1 数据资料

选取江西省波阳、修水、玉山、南昌、宜春、南城、吉安县、井冈山、广昌、赣县、寻乌、樟树共 12 个基准站点 1960~2017 年的逐日与逐年降雨资料为基本资料,使用反距离权重法插补和修正了部分站点缺失或错误数据。基础气象数据源于中国气象科学数据共享服务网。

### 3.2 突变检测

对各站点逐年降雨资料加权后求得流域面雨量进行突变分析。为了避免单一检测方法的误差性,选用 MK 检验法、Cramer 法、Yamamoto 法、Pettitt 法、Lepage 法及 Moving-t 检验法进行突变点检验<sup>[4]</sup>,给定显著性水平为 0.01 时,得到 MK 检验法与 Yamamoto 法突变点均为 1991 年,其余方法未检测到突变年。因此,将 1991 年定为变异年,对研究年份进行分割,即分割为 1960~1990 年与 1991~2017 年两个研究时间段。

### 3.3 汛期划分与分期

以江西省 12 个气象站点的 1960~2017 年逐日 20:00~20:00 累计降雨量为基础资料,以候为单位,将一个月划分成 6 个候,将整年分为 72 个候,其中平年的 2 月第 6 个候为 26~28 日,即 3 d,闰年的 2 月第 6 个候为 26~29 日,即 4 d,有 31 d 的月份,第 6 个候为 26~31 日,即 6 d,其余情况一候均为 5 d。分别计算突变前后多年平均候总降雨量、多年平均候暴雨天数、多年平均候大雨天数、多年平均候最大 3 d 降雨及多年平均候最大 1 d 降雨 5 个能反映洪水季节性的指标。这

样就得到了两个有序指标序列,每个序列有 72 个样本,每个样本又有 5 项评价指标,对 5 项指标进行归一化处理后采用 Fisher 最优分割法与遗传算法进行汛期分期与划分<sup>[5]</sup>。

### 3.3.1 Fisher 最优分割划分结果

通过 Fisher 最优分割法,用得到的两个有序指标序列分别对 1960~1990、1991~2017 年两个时段进行汛期划分与分期计算,发现当  $s=3$  时,斜率  $\beta(s)$  均为最大值,同时  $F(r,s)$  随分类数  $s$  变化曲线出现拐点,因此可得最优分类数为 3,1960~1990 年汛期时段为 4 月 1 日~7 月 5 日,前汛期为 4 月 1 日~6 月 15 日,主汛期为 6 月 16~30 日,后汛期为 7 月 1~5 日;1991~2017 年汛期时段为 4 月 6 日~7 月 15 日,前汛期为 4 月 6 日~6 月 10 日,主汛期为 6 月 11~30 日,后汛期为 7 月 1~15 日。

### 3.3.2 遗传算法划分结果

采用本文建立的遗传算法对 1960~1990、1991~2017 年的 72 个侯有序指标序列进行汛期划分与分期计算,在计算过程中通过调整迭代次数来寻求最优解,计算结果见表 1。由表 1 可知,1960~1990 年汛期时段为 4 月 1 日~7 月 5 日,前汛期为 4 月 1 日~5 月 15 日,主汛期为 5 月 16 日~6 月 15 日,后汛期为 6 月 16 日~7 月 5 日;1991~2017 年汛期时段为 4 月 6 日~7 月 15 日,前汛期为 4 月 6 日~6 月 5 日,主汛期为 6 月 6~30 日,后汛期为 7 月 1~15 日。

表 1 1960~2017 年汛期划分与分期结果

Tab. 1 Division and staging results of main flood seasons from 1960 to 2017

年份	遗传算法	汛期划分	汛期分期
1960~1990	迭代次数	1 000	2 000
	适应度函数值	630.36	48.23
	分类	1~18,19~37,38~72	1~15,16~18,19
1991~2017	迭代次数	1 000	1 000
	适应度函数值	629.618 9	60.794 9
	分类	1~19,20~39,40~72	1~12,13~17,18~20

### 3.3.3 分期结果对比

将 Fisher 最优分割法所得汛期划分与分期结果与本文所建立的遗传算法相比,结果见图 1。

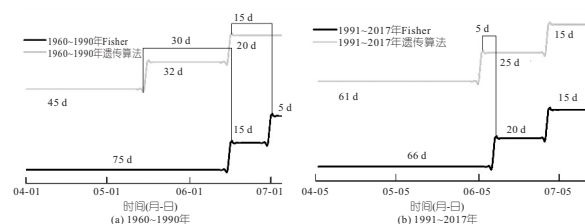


图 1 汛期分期结果对比

Fig. 1 Comparison of staging results in flood season

由图 1 可看出,在气候突变前后遗传算法得到的前汛期较 Fisher 短,主汛期较 Fisher 长,尤其气候突变前,Fisher 最优分割法得到的主汛期仅有 15 d。本文所建立的遗传算法与 Fisher 最优分割法均属于聚类分析,而对于聚类物理解析是一个长期的验证过程,从安全角度看,Fisher 最优分割法得到的主汛期与实际情况出入较大,如 2019 年 6 月 6~13 日,江西省的持续强降雨天气过程导致了洪涝灾害,2020 年江西省自 6 月 2 日后就迎来了极端强降水,导致鄱阳站水位创历史新高,达到 22.75 m。对于 2019、2020 年极端降水事件,遗传算法所得的汛期分期更合理。为此,以遗传算法所得汛期分期为依据,研究江西省降雨极值及概率极值分布时空变化。

## 3.4 降雨极值分布

### 3.4.1 降雨极值时空分布变化

由于汛期中的主汛期是降雨的密集期,因此对江西省 12 个站点气候突变前后的主汛期最大 1 d 雨量、暴雨天数、大雨天数作为降雨极值指标,研究 1960~1990、1991~2017 年江西省降雨极值的时空分布规律,结果见图 2。

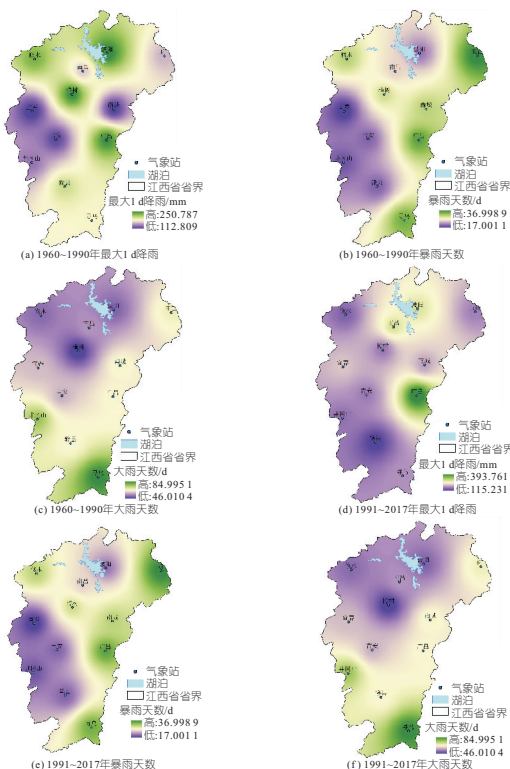


图 2 江西省降雨极值分布

Fig. 2 Rainfall extreme value distribution in Jiangxi Province

由图 2 可看出,气候突变前最大 1 d 降雨呈由南北多东西少的趋势,气候突变后最大 1 d 降雨较气候突变年前大,且呈以鄱阳湖与广昌为中心向周边递减趋势,由此可判断最大 1 d 降雨高

发区气候突变年前后均包括鄱阳湖区域,且气候突变后应关注广昌区域的极端降雨事件。气候突变前后暴雨天数呈东多西少的分布特征,其中除最大 1 d 降雨极端区域外,玉山为暴雨极端分布区。气候突变前后大雨天数均呈南多北少的趋势。综合气候突变年主汛期极端降雨指标可看出,整体上暴雨天数的集中区也是江西省最大 1 d 降雨的高发区,在广昌与鄱阳湖区域需重点关注极端强降雨的发生。

### 3.4.2 降雨极值概率分布对比

选用超定量取样法选取样本,即除去日降雨小于 0.1 mm 的样本点,将剩余的日降雨序列从小到大排列,选取位于第 95% 位的降雨值作为极端降雨的阈值,然后在两个主汛期内按照各自的门限值选取频率分析的样本。选用 P-III 分布设计 1991 年前后主汛期降雨极值,结果见表 2。由表 2 可看出,气候突变后江西省设计降雨值大于气候突变前与整时段设计降雨值,与气候突变后江西省最大 1 d 降雨普遍大于气候突变前的实际相吻合。因此,在江西省水库等水利设施的运营与管理方面,需考虑气候突变对降雨极值概率分布的影响,相应地提高设计标准。

表 2 设计降雨值

Tab. 2 Rainfall extreme value

重现期/a	1960~1990 年	1991~2017 年	1960~2017 年
5	241.45	266.56	256.88
10	261.86	286.38	277.54
20	282.21	306.05	298.09
30	294.12	317.52	310.10
100	329.30	351.24	345.46
1 000	396.37	415.00	412.63

### 3.4.3 降雨极值概率时空分布

由于降雨量时空分布的不均匀性,降雨极值概率分布也会表现出一定的时空特征,由江西省降雨极值分布可知,江西省气候突变后设计降雨值会变大,为进一步分析江西省降雨极值概率分布特点,对 12 个站点的主汛期降雨极值取样,设计重现期为 100、500、1 000 年时的降雨极值,获取江西省极端降雨概率时空分布特征,结果见图 3。由图 3 可看出,江西省不同重现期的设计降雨均以鄱阳湖与广昌为极端区域,1 000、500、100 年一遇的设计降雨分别可达 600.409、538.047、394.035 mm,在江西省水利工程运营与管理时可参考所得设计降雨值,对于设计标准较低的地区,采取有效措施,防止灾害的发生。

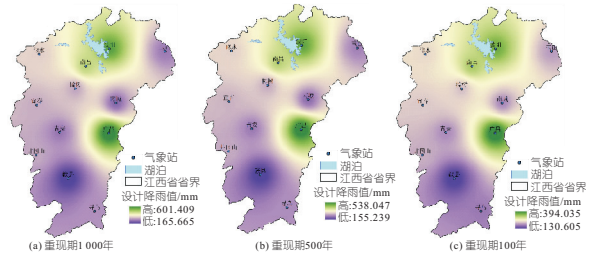


图 3 江西省降雨极值概率分布

Fig. 3 Probability distribution of rainfall extreme value in Jiangxi Province

## 4 结论

a. 使用 MK 突变点检测方法并结合其他常用的气候突变检测方法得到 1960~2017 年江西省降雨量突变年为 1991 年。

b. 使用 Fisher 最优分割法得到降雨量突变前(1960~1990 年)汛期时段为 4 月 1 日~7 月 5 日,主汛期为 6 月 6~30 日;降雨量突变后(1991~2017 年)汛期时段为 4 月 6 日~7 月 15 日,主汛期为 6 月 11~30 日。使用遗传算法得到的汛期研究时段与 Fisher 最优分割法一致,但汛期分期有所不同,得到气候突变前汛期为 4 月 1 日~5 月 15 日,主汛期为 5 月 16 日~6 月 15 日,后汛期为 6 月 16 日~7 月 5 日;气候突变后前汛期为 4 月 6 日~6 月 5 日,主汛期为 6 月 6~30 日,后汛期为 7 月 1~15 日;从安全与实际的角度考虑,遗传算法结果更可靠。

c. 分析江西省 12 个基准站的极值降雨分布可知,鄱阳湖与广昌地区的极端降雨需引起注意;对江西省设计降雨的研究表明,气候突变后的主汛期设计极端降雨值大于气候突变前及整时段主汛期设计极端降雨值,在对江西省主汛期降雨进行设计时,要注意对洪水的防范。

### 参考文献:

- [1] 李俊,武鹏林. 改进的 Fisher 最优分割法在汛期分期中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2016(11): 23-26, 30.
- [2] 于志刚,宋申民,段广仁. 遗传算法的机理与收敛性研究[J]. 控制与决策, 2005(9): 971-980.
- [3] 章永来,周耀鉴. 聚类算法综述[J]. 计算机应用, 2019, 39(7): 1869-1882.
- [4] 张媛,李常斌,王刘明,等. 几种河川径流序列突变检验方法的对比[J]. 水利水电技术, 2020, 51(2): 38-47.
- [5] 唐莉,张永波,祝雪萍,等. 基于 PCA-Fisher 最优分割法的汛期分期影响研究[J]. 水力发电, 2018, 44(1): 13-16, 76.

参考文献:

[1] 朱玲玲,许全喜,熊明. 三峡水库蓄水后下荆江急弯河道凸冲凹淤成因[J]. 水科学进展,2017,28(2): 193-202.

[2] 胡向阳. 三峡工程下游宜昌至湖口河段河道演变研究[J]. 人民长江,2012,43(24):1-4.

[3] 渠庚,郭小虎,何娟,等. 下荆江熊家洲至城陵矶弯曲型河段河床调整规律[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2020,18(6):156-163,169.

[4] 卢金友,渠庚,李发政,等. 下荆江熊家洲至城陵矶河段演变分析与治理思路探讨[J]. 长江科学院院报,2011,28(11):113-118.

[5] 王佳妮,毛北平,孙思瑞. 三峡水库修建后长江中游城陵矶至九江河道冲淤变化研究[J]. 水电能源科学,2020,38(3):25-29.

[6] YANG YUNPING, LI YITIAN, SUN ZHAOHUA, et al. Suspended sediment load in the turbidity maximum zone at the Yangtze River Estuary: The trends and causes[J]. Journal of geographical sciences,2014,24(1):129-142.

[7] 卢金友,朱勇辉. 三峡水库下游江湖演变与治理若干问题探讨[J]. 长江科学院院报,2014,31(2): 98-107.

[8] 李春光,景何仿,吕岁菊,等. 弯道水流运动和河床变形数值模拟研究进展[J]. 华北水利水电学院学报,2010,31(1):1-5.

[9] 李宁波,曾勇,吴忠明. 长江荆江河段七弓岭弯道主流撇弯原因初探[J]. 人民长江,2013,44(1):22-25.

[10] 何广水,姚仕明,金中武. 长江荆江河段弯道凸岸边滩非典型冲刷研究[J]. 人民长江,2011,42(17):1-3,15.

[11] ALBERT C, STEFFLER P. Estimating transverse mixing in open channels due to secondary current-induced shear dispersion[J]. Journal of hydraulic engineering,2007,133(2):186-196.

[12] 覃连超,余明辉,谈广鸣,等. 河湾水流动力轴线变化与切滩撇弯关系研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2009,24(1):29-35.

[13] 郭小虎,渠庚,刘亚,等. 三峡工程运用后坝下游河道泥沙输移变化规律[J]. 湖泊科学,2020,32(2): 564-572.

## Evolution Law of Curved River Channel Downstream of Reservoir After Operation of Three Gorges Project

GUO Xiao-hu, TANG Feng, CHEN Dong, DENG Cai-yun

(Key Laboratory of River and Lake Management and Flood Control in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River of MWR, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** After the operation of the Three Gorges Project, the process of water and sediment in the lower reaches of the reservoir changed greatly and led to the adjustment of the evolution law of the curved channel, which may have adverse effects on the stability of the river and the safety of flood control. Based on the measured data, the evolution law of the typical bends in the lower reaches of the reservoir and its main causes were analyzed. The results show that after the operation of the Three Gorges Project, the typical bends in the lower reaches of the reservoir all appear "cutting beaches", and the main reason is that the sediments enter each river reaches. The amount of sand, especially fine-grained sand, has been greatly reduced. The main reasons for the "skipping bends" in most of the bends in the Lower Jingjiang are that the variation coefficient of the monthly average runoff process is large and the bending radius of the bends itself is small. With the successive operation of cascade reservoirs in the main and tributaries of the upper reaches of the Yangtze River, it is expected that the variation coefficient of the monthly average runoff process in the lower reaches of the reservoir will continue to increase, which may lead to the occurrence of bends with relatively small bending radius that do not currently have "skipping bends".

**Key words:** Three Gorges Project; downstream of reservoir; curved river channel; evolution law

\*\*\*\*\*  
(上接第4页)

## Influence of Climate Abrupt Change on Extreme Distribution of Staged Rainfall in Jiangxi Province Based on Genetic Algorithm

TANG Li<sup>a,b</sup>, LIU Hai-ming<sup>b</sup>, WEI Xi<sup>c</sup>, YAN Zhong-yue<sup>b</sup>, YANG Bing-bing<sup>b</sup>

(a. Jiangxi Provincial Soft Science Research Base of Water Security and Sustainable Development;

b. School of Business Administration; c. Comprehensive Management Section, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

**Abstract:** In order to study the influence of climate change on rainfall extreme value distribution in main flood season, based on the daily rainfall data from 1960 to 2017 in Jiangxi Province, a variety of test methods were used to detect and test the abrupt change points. Genetic algorithm and Fisher's optimal segmentation method were used to stage the flood season before and after the climate abrupt change, and the extreme distribution of staged rainfall and design rainfall before and after the climate abrupt change were discussed. The results show that 1991 was the abrupt change year of precipitation in Jiangxi Province from 1960 to 2017, and it was necessary to pay more attention to the occurrence of extreme heavy rainfall in Guangchang and Poyang Lake regions. Genetic algorithm is suitable for the division and staging of flood season. After the abrupt climate change (1991-2017), the designed rainfall value in the main flood season of Jiangxi Province was greater than that before the abrupt climate change (1960-1990), and also greater than that in the whole period (1960-2017). When calculating the designed flood based on the designed rainfall, the influence of climate change on the designed rainfall value should be considered, and strengthen protection against floods.

**Key words:** climate change; flood season division; rainfall extreme value distribution; Jiangxi Province