

## 近 50 a 三峡库区汛期极端降水事件的时空变化\*

刘晓冉<sup>1,2</sup>, 程炳岩<sup>1</sup>, 杨 茜<sup>3</sup>, 郭 渠<sup>1</sup>, 张天宇<sup>1</sup>

(1: 重庆市气候中心, 重庆 401147)

(2: 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

(3: 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147)

**摘 要:** 利用三峡库区 35 个台站 1961—2010 年汛期(5—9 月)的逐日降水量资料, 首先定义不同台站的极端降水量阈值, 统计各站近 50 a 逐年汛期极端降水事件的发生频次, 进而分析其时空变化特征. 结果表明: 三峡库区汛期极端降水事件发生频次的最主要空间模式是主体一致性, 同时存在东西和南北相反变化的差异. 三峡库区汛期极端降水事件发生频次具有较大的空间差异, 可分为具有不同变化特点的 5 个主要异常区. 滑动  $t$  检验表明, 三峡库区西南部区代表站巴南的极端降水事件在 1974 年后发生了一次由偏多转为偏少的突变, 北部区代表站北碚在 1981 年后和 1993 年后分别发生了由偏少转为偏多和由偏多到偏少的突变, 中部区代表站武隆在 1984 年后发生了一次由偏多转为偏少的突变. 结合最大熵谱和功率谱分析表明, 近 50 a 来各分区汛期极端降水事件发生频次的周期振荡不太一致, 三峡库区东北部区代表站宜昌、北部区代表站北碚和中部区代表站武隆分别存在 5、2.4 和 8.3 a 的显著周期.

**关键词:** 三峡库区; 极端降水事件; 时空变化; 旋转主成分

## Temporal and spatial variation of extreme precipitation events in flood season over Three Gorges Reservoir area in recent 50 a

LIU Xiaoran<sup>1,2</sup>, CHENG Bingyan<sup>1</sup>, YANG Qian<sup>3</sup>, GUO Qu<sup>1</sup> & ZHANG Tianyu<sup>1</sup>

(1: *Chongqing Climate Center, Chongqing 401147, P. R. China*)

(2: *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, P. R. China*)

(3: *Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147, P. R. China*)

**Abstract:** Based on the daily precipitation data in flood season (from May to September) in 1961—2010 from 35 stations over Three Gorges Reservoir area, the extreme precipitation threshold value for all stations are determined firstly, then the frequency of extreme precipitation event in the flood season are counted and their temporal and spatial characteristics are analyzed. Consistent anomaly distribution is the main spatial model of extreme precipitation event frequency in flood season over Three Gorges Reservoir area. The spatial distribution of extreme precipitation event frequency is complex with anomaly difference between in the south and west, and in the east and west of Three Gorges Reservoir area, which can be divided into five main regions. The moving  $t$ -test analysis shows that there are abrupt changes of Banan in 1974, Beibei in 1981 and 1993, and Wulong in 1984 for the extreme precipitation event frequency. The Maximum Entropy Spectral and Estimation Power Spectral analysis shows that the periodic oscillations of these regions are not consistent in recent 50 a. The distinct periodic oscillation of the extreme precipitation event frequency of Yichang, Beibei and Wulong is 5, 2.4 and 8.3 a, respectively.

**Keywords:** Three Gorges Reservoir area; extreme precipitation event; temporal and spatial variation; rotated principal component

近年来, 高温、干旱、洪涝、台风、暴雪等极端气候事件对社会经济和生态环境造成影响和危害越来越大, 全球变暖背景引发的极端气候事件增多增强趋势已成为各国政府和社会各界关注的焦点. 尤其是极端降水事件, 其频率和强度的变化是导致洪涝灾害的主要因素, 往往造成严重的经济损失和社会危害, 受到专

\* 重庆市气象局重点业务建设项目(2010)“气候变化对三峡库区水资源的影响评估研究”资助. 2011—10—15 收稿; 2011—12—18 收修改稿. 刘晓冉, 男, 1982 年生, 博士研究生, 工程师; E-mail: liuxiaoran8283@126.com.

家学者和社会的普遍关注<sup>[1-3]</sup>. 有研究表明强降水事件在欧洲<sup>[4]</sup>、美国<sup>[5]</sup>、印度<sup>[6]</sup>等国家和地区有所增加. Gao 等<sup>[7]</sup>对东亚地区的气候模拟表明在二氧化碳倍增的情况下,暴雨雨日将增加<sup>[7]</sup>.

许多学者对近 50 a 中国的极端降水变化进行分析研究,认为中国的极端降水变化态势与全球的态势基本一致,但表现出明显的区域性<sup>[8-10]</sup>和季节变化<sup>[11]</sup>特点. 在全球变暖背景下中国的微量雨日普遍减少,但大暴雨日事件增多<sup>[12-14]</sup>. 鲍名等<sup>[15]</sup>对中国暴雨年代际变化的研究发现,长江流域暴雨有增多的趋势,华北地区暴雨则有减少的趋势. 翟盘茂等<sup>[16]</sup>提出了定义极端值和极端阈值的方法,研究中国北方近 50 年温度和降水极端事件的变化. 翟盘茂等<sup>[17-18]</sup>还指出中国降水强度普遍趋于增强,长江流域及以南地区、西北地区的极端强降水事件增多趋势明显,华北地区虽然极端降水事件频数明显减少,但极端降水量占总降水量的比例仍有所增加. Tang 等<sup>[19]</sup>研究了中国持续强降水事件的气候特征,对其频数、强度和雨带等进行归类. 闵岫等<sup>[20]</sup>分析了中国极端降水事件区域性和持续性特征,发现长江以南地区夏季极端降水的区域性与持续性均较好,容易导致区域性洪涝灾害发生. 王志福等<sup>[21]</sup>分析了中国不同持续时间的极端降水事件的变化特征,指出持续 2 d 以上极端降水事件在长江中下游流域、江南地区和高原东部有显著增多和增强的趋势,而在华北和西南地区有减少和减弱趋势. 还有很多学者着重研究了我国各流域的极端降水事件的变化特征<sup>[22-26]</sup>.

三峡库区位于四川盆地与长江中下游平原的结合部,西起重庆江津,东至湖北宜昌,全长 600 km,为跨长江两岸数公里的狭长区域. 长江三峡水利枢纽工程举世瞩目,三峡库区是长江中下游地区的生态环境屏障和西部生态环境建设的重点,三峡库区的区域气候变化及其影响成为人们日益关注的科学问题<sup>[27]</sup>. 近些年在全球变暖背景下,三峡库区的气候变化规律方面研究取得了一些进展,学者们对三峡库区的基本气候特征<sup>[28-29]</sup>、气象灾害变化趋势<sup>[30]</sup>以及未来 21 世纪库区的气候变化预估<sup>[31-32]</sup>等方面进行了研究,这对开展三峡库区的气候变化适应措施具有重要的借鉴意义. 但目前对三峡库区极端降水事件的变化规律还缺乏深入认识,本文利用百分位阈值定义三峡库区极端降水事件,并分析其发生频次的时空变化特征,这对于三峡库区防灾减灾和应对气候变化具有参考意义.

1 资料与方法

在我国通常把日降水量超过 50 mm 的降水事件称为暴雨,日降水量超过 25 mm 的降水事件称为大雨. 事实上,不同地区气候的地域差异明显,这类绝对阈值在各个地区之间缺乏可比性. 目前,国际上气候极值变化研究通常选择某个百分位作为阈值定义极端气候事件<sup>[2-6]</sup>.

本文利用三峡库区 35 个台站 1961—2010 年的逐日降水量资料,首先把各站逐年汛期 5—9 月的日降水量序列第 95 个百分位值的平均值定义为该站极端降水事件的阈值,当该站某日降水量超过这一阈值时,称该站发生极端降水事件<sup>[16]</sup>. 降水量第 95 个百分位值的计算方法采用 Bonsal 概率法<sup>[3]</sup>,即把降水量序列按升序排列为:

$$x_1, x_2, \cdots, x_m, \cdots, x_n \tag{1}$$

某个值小于或等于  $x_m$  的概率为:

$$P = (m - 0.31) / (n + 0.38) \tag{2}$$

式中, $m$  为  $x_m$  的序号, $n$  为降水量序列(含无降水日)的长度,第 95 个百分位值就是指  $P = 95\%$  所对应  $x_m$  的值.

在确定各站极端降水事件阈值的基础上,计算三峡库区各站 1961—2010 年逐年的汛期极端降水事件发生频次,并采用主成分分析(PCA)和旋转主成分分析(RPCA)<sup>[33]</sup>法分析三峡库区汛期极端降水事件的整体异常空间分布和局地异常敏感区. 利用滑动  $t$  检验、最大熵谱和功率谱等方法<sup>[33]</sup>分析各异常区极端降水事件的变化特征.

2 极端降水事件的空间分布特征

2.1 基本分布特征

三峡库区东、西部地区极端降水量阈值分布存在明显差异,库区东部地区的阈值相对较大,大部分地区

在 32.5 mm 以上,最大值位于湖北的鹤峰,达 40.7 mm;库区西部阈值相对较小,均在 30 mm 以下,最小值位于重庆的丰都,仅 26.6 mm(图 1a). 三峡库区各站极端降水量阈值均小于暴雨的标准阈值 50 mm/d.

三峡库区近 50 a 平均极端降水事件发生频次的空间分布表明,发生频次自西北向东增加,大体呈东多西少的分布特征,库区西北部极端降水事件发生频次在 7.0 d/a 以下,最少为重庆的梁平,为 6.8 d/a. 库区东部极端降水事件发生频次较高在 7.2 d/a 以上,最多为湖北的秭归,达 8.0 d/a(图 1b).

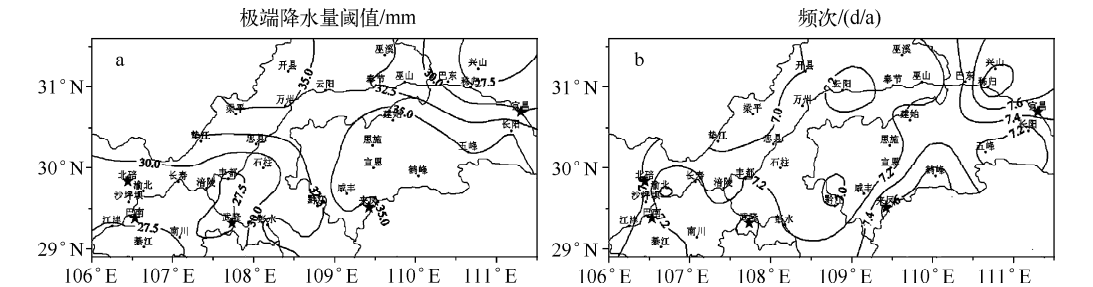


图 1 1961—2010 年三峡库区汛期极端降水量阈值(a)和发生频次(b)分布  
Fig. 1 Spatial distribution of the mean extreme precipitation threshold(a) and frequency(b) in flood season over the Three Gorges Reservoir area from 1961 to 2010

2.2 异常分布特征

通过对三峡库区 35 个台站 1961—2010 年的汛期极端降水事件发生频次进行主成分和旋转主成分分析,得到的载荷向量(LV)和旋转载荷向量(RLV)能够较好地反映三峡库区极端降水事件的空间异常分布特征. 旋转前后主成分和旋转主成分的方差贡献率表明,旋转后各分量的方差贡献比旋转前要均匀分散,除第 1 个分量的方差贡献减小外,其它分量旋转后均增加,同时某些分量方差贡献大小的顺序也发生了变化,这是因为旋转后各分量的物理意义着重表现空间的相关性分布特征,相应的方差贡献只集中在某一较小的区域,使其它区域的方差贡献尽量减小,着重把整个计算范围的方差贡献集中到前几个主成分上(表 1).

表 1 前 5 个主成分和旋转主成分对总方差的贡献率  
Tab. 1 The contribution percentages of the first five principal components and rotated principal components to the total variance

序号	1	2	3	4	5	累积贡献率
主成分贡献率/%	35.48	11.58	6.33	5.27	4.54	63.21
旋转主成分贡献率/%	14.42	11.84	12.47	12.31	12.17	63.21

下面给出前 3 个载荷向量场,它们对应主成分的累积方差贡献率为 53.40%,以揭示三峡库区汛期极端降水事件的整体空间异常结构. 第一载荷向量场(图 2a)在整个三峡库区为同一符号的正值区,而且这一空间异常分布对应的主成分对总体方差的贡献达 35.48%,库区东南部为载荷向量的高值区,其中心最大值位于湖北的宣恩,达 0.76,而库区西南部为低值区,其中心最小值位于重庆的南川,仅为 0.35. 这表明尽管三峡库区地形复杂,但汛期极端降水事件变化的空间分布还是具有较好的一致性,最主要的空间模式是主体一致性.

第二载荷向量场(图 2b)揭示了三峡库区极端降水事件在库区东、西部反位相变化的分布特征,108°30'E 以东的库区东部为载荷向量正值区,中心位于湖北的长阳,为 0.48;库区西部为负值区,中心位于重庆的巴南,为 -0.65. 这种分布突出反映了三峡库区东部极端降水事件偏多(少),则西部极端降水事件偏少(多)的特点.

第三载荷向量场(图 2c)反映了三峡库区的极端降水事件变化的南北差异. 库区南部为正值区,中心位于重庆的黔江,为 0.51;库区北部为负值区,中心位于重庆的云阳,为 -0.43. 这种分布突出反映了三峡库区的南部极端降水事件偏多(少),则北部极端降水事件偏少(多)的特点.

从三峡库区极端降水事件发生频次的总体空间异常结构可以看出,库区极端降水变化比较复杂,存在着

明显的东西或南北差异. 为了进一步研究库区各地域极端降水事件的局地特点,在上述主成分分析的基础上,取前 5 个主成分(其累积方差贡献率达到 63.21%)及对应的载荷向量进行旋转,按旋转载荷向量( $RLV$ )绝对值  $>0.5$  的高载荷区基本布满全区来考虑,得到三峡库区极端降水事件的 5 个主要空间异常区.

三峡库区东北部区,主要包括湖北的西北部,旋转载荷向量  $RLV1$  的中心在湖北的宜昌,为 0.77(图 3a);三峡库区西南部区,主要包括重庆的西南部,旋转载荷向量  $RLV2$  的中心在重庆的巴南,达  $-0.81$ (图 3b);三峡库区东南部区,主要包括重庆的东南部和湖北的西南部,旋转载荷向量  $RLV3$  的中心在湖北的来凤,达 0.83(图 3c);三峡库区北部区,主要包括重庆的中北部和东北部,旋转载荷向量  $RLV4$  的中心在重庆的北碚,为  $-0.66$ (图 3d);三峡库区中部区主要包括重庆的中南部,旋转载荷向量  $RLV5$  的中心在重庆的武隆,为 0.74(图 3e).

旋转载荷大值区基本没有重叠之处,它们将三峡库区汛期极端降水发生频次基本分为 5 个区域(图 3). 这 5 个区是三峡库区极端降水事件异常最敏感的区域,做好上述几个类型区域极端降水事件的分析,就抓住了三峡库区极端降水事件长期变化的关键.

3 极端降水事件的时间变化特征

某空间点的旋转载荷向量  $RLV$  值实际上表示对应的旋转主成分与该点要素之间的相关程度,同属于某一高载荷区内点具有较高的相关,而属于不同类型区的点之间的相关性则较差,因此可以取各异常区  $RLV$  值最大的站为代表站分析该异常型的时间变化特征.

3.1 变化趋势

各代表站汛期极端降水事件发生频次的逐年变化表明(图 4),三峡库区东北部区代表站宜昌的极端降水事件发生频次的年际波动明显,在 1970s 前期、1970s 后期至 1980s 前期、1990s 中期至 2010s 处于相对偏多期,其它时段整体处于相对偏少期,1990s 以来有增加趋势. 近 50 a,宜昌汛期极端降水事件最多发生在 1973 年达 14 d,1966、1977、1981、1991、2001 年相对较少,均为 2 d.

三峡库区西南部区代表站巴南的极端降水事件在 1970s 前期、1980s 中期和 1990s 中期处于相对偏多期,其他时段整体处于相对偏少期,尤其是 1990s 后期以来呈减少趋势,极端降水事件最多发生在 1998 年,达 16 d,2006 年最少,为 2 d.

三峡库区东南部区代表站来凤的极端降水事件在 1960s 前期、1960s 后期到 1980s 中期和 1990s 后期处于相对偏多期,其他时段整体处于相对偏少期,1990s 后期以来呈减少趋势,极端降水事件最多发生在 1983 年达 20 d,1961 和 1985 年最少,均为 2 d.

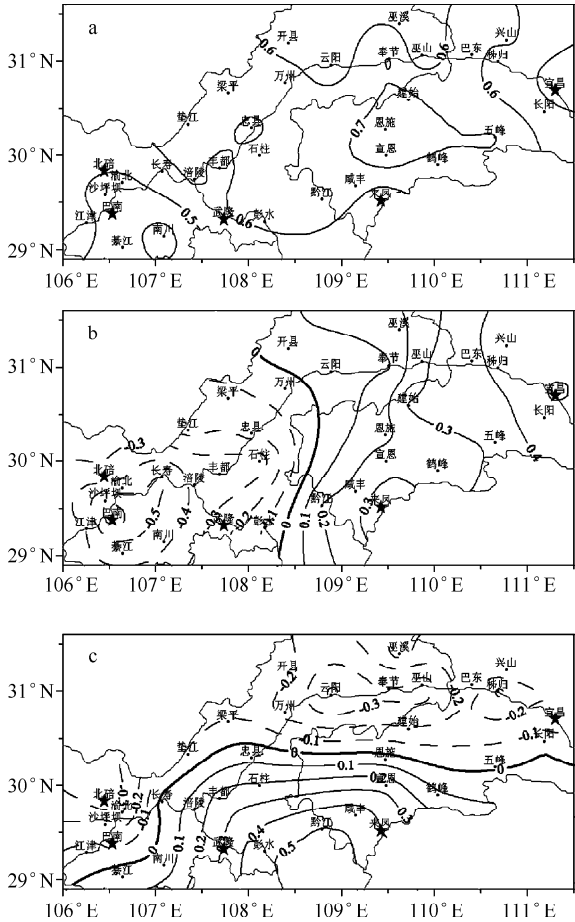


图 2 三峡库区汛期极端降水事件频次的  
第一(a)、二(b)、三(c)载荷向量场  
Fig. 2 The first(a), second(b), third(c)  
loading vector fields of the extreme  
precipitation event frequency in flood  
season over Three Gorges Reservoir area

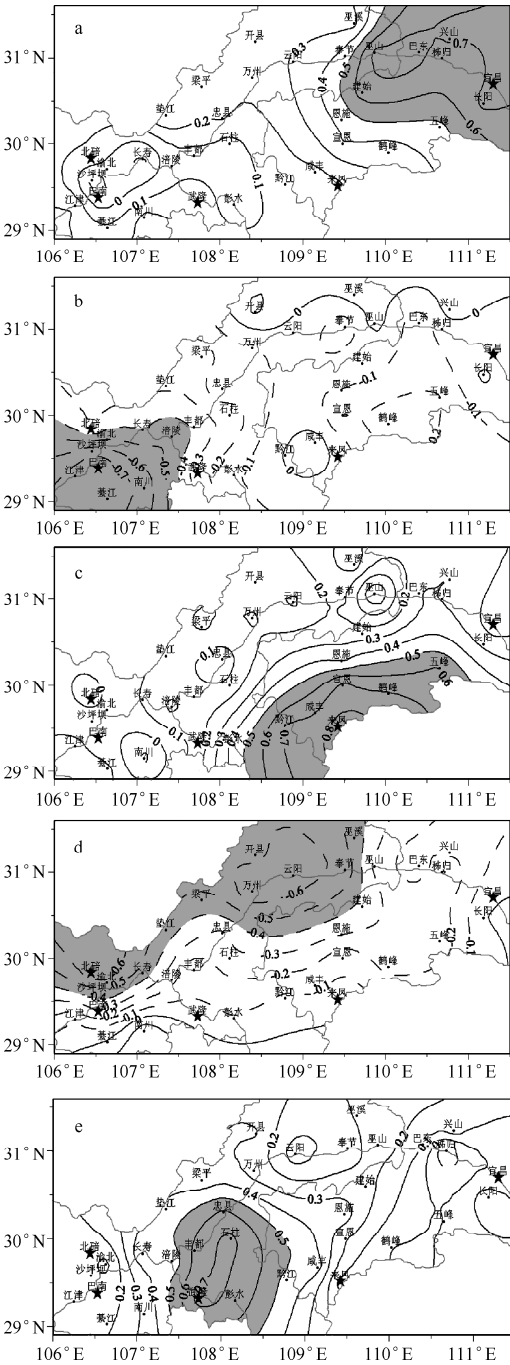


图3 三峡库存区汛期极端降水事件频次的第一(a)、二(b)、三(c)、四(d)、五(e)旋转载荷向量场

Fig. 3 The first(a), second(b), third(c), forth(d), fifth(e) rotated loading vector fields of the extreme precipitation event frequency in flood season over Three Gorges Reservoir area

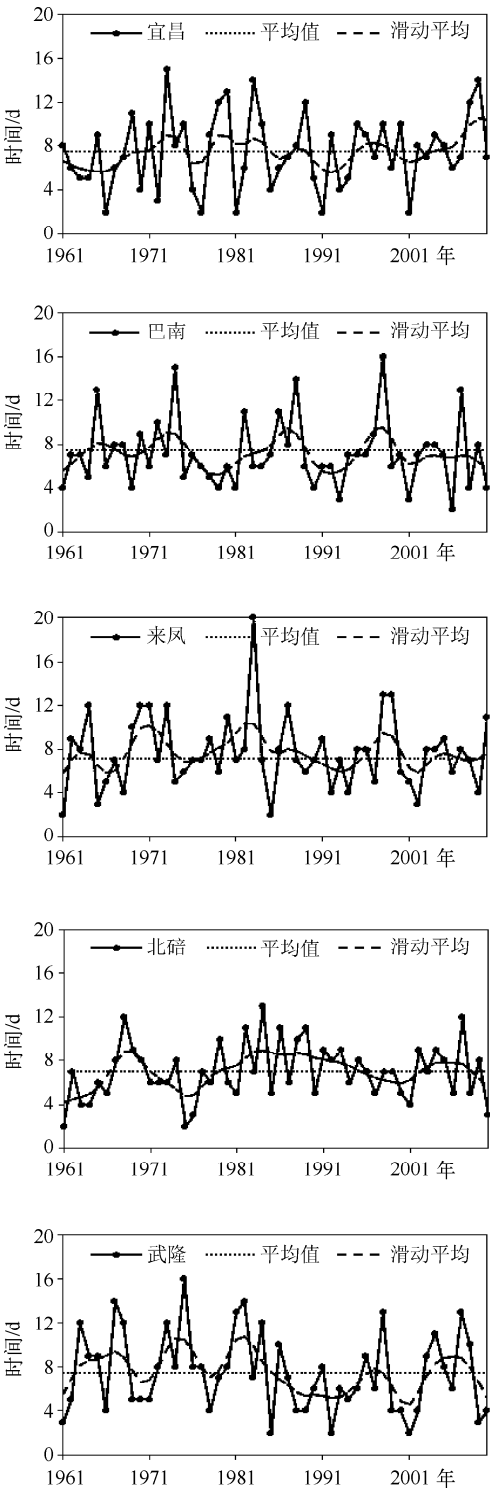


图4 各代表站汛期极端降水事件频次的  
时间变化曲线

Fig. 4 Change curves of the extreme precipitation event frequency of the representative stations in flood season

三峡库区北部区代表站北碚的极端降水事件在 1960s 中期、1980s 到 1990s 前期和 2010s 中期处于相对偏多期,其他时段整体处于相对偏少期,极端降水事件最多发生在 1985 年,为 13 d,1961 和 1975 年最少,均为 2 d.

三峡库区中部区代表站武隆的极端降水事件具有明显的年代际变化,1960s 中期到 1980s 中期以及 2010s 中期处于相对偏多期,1980s 后期以及 2010s 前期处于相对偏少期,极端降水事件最多发生在 1975 年,达 16 d,1986、1993 和 2002 年最少,均为 2 d.

为了进一步了解近 50 a 各分区代表站极端降水事件发生频次的长期变化趋势,分别计算其气候倾向率和趋势系数(表 2).宜昌和北碚表现为增多趋势,增多的气候倾向率分别为 0.32 d/10 a 和 0.23 d/10 a;巴南和来凤均表现为很弱的减少趋势,减少率分别为 -0.08 d/10 a 和 -0.06 d/10 a,武隆减小趋势比较明显,减少率为 0.41 d/10 a.

由此可见,尽管各异常区极端降水事件发生频次的年际变化特征不太一致,从长期变化趋势来看,三峡库区东北部区代表站宜昌和北部区代表站北碚表现为很弱的增加趋势,三峡库区西南部区代表站巴南和东南部区代表站来凤表现为很弱的减少趋势,三峡库区中部区代表站武隆则表现为相对较大的减少趋势.

3.2 突变检验

利用滑动  $t$  检验法(子序列长度  $n_1 = n_2 = 10$  a)对各代表站汛期极端降水事件频次进行突变检验(图 5),宜昌与来凤没有检测出突变点(图略),巴南极端降水事件  $t$  统计量在 1974 年的正值达到 0.05 显著性水平,说明 1974 年以前极端降水事件偏多,1974 年以后偏少,在 1974 年后发生了一次由偏多转为偏少的突变.北碚极端降水事件  $t$  统计量在 1981 年的负值和 1993 年的正值达到了 0.05 显著性水平,说明 1981 年后发生了由偏少转为偏多的突变,在 1993 年后又发生了由偏多到偏少的突变.武隆极端降水事件  $t$  统计量在 1984 年的正值远超过 0.05 显著性水平,说明 1984 年后发生了一次由偏多转为偏少的突变.

3.3 周期分析

最大熵谱分析方法对时间序列的周期信号具有分辨率高的优点,尤其适用于短时间序列.下面采用最大熵谱结合功率谱分析的方法分析三峡库区各分区汛期极端降水事件发生频次的变化周期,当最大熵谱分析提取出的周期与功率谱方法分析的周期一致时,则认为该周期是其主要周期且是可信的.各代表站汛期极端降水事件的最大熵谱和功率谱密度变化曲线表明(图 6),宜昌极端降水事件最大熵谱存在 5.0 a 的主峰值和 2.1 a 的次峰值,功率谱的主周期为 5 a 且超过了 0.05 显著性水平的白噪声标准谱,这表明宜昌极端降水事件存在显著的 5 a 周期的变化,而功率谱的 2.1 a 的次周期没有通过显著性水平检验.巴南汛期极端降水事件最大熵谱存在 2 a 的峰值,但功率谱没有通过显著性水平检验,说明周期不明显.来凤极端降水事件最大熵谱存在 3.8 a 的峰值,但也不显著.北碚极端降水事件最大熵谱存在 5 a 的主峰值和 2.4 a 的次峰值,而功率谱分析表明 5 a 的周期不显著,2.4 a 的周期通过了 0.05 的显著性水平检验.武隆极端降水事件

表 2 各代表站汛期极端降水事件频次的  
气候倾向率和趋势系数\*

Tab. 2 Climate trend and trend coefficient of the  
extreme precipitation event frequency of the  
representative stations in flood season

站名	气候倾向率/(d/10 a)	趋势系数
宜昌	0.32	0.1380
巴南	-0.08	-0.0376
来凤	-0.06	-0.0243
北碚	0.23	0.1320
武隆	-0.41	-0.1663

\* 趋势系数 0.1、0.05 和 0.01 的显著性水平临界值分别是 0.2353、0.2787 和 0.3610.

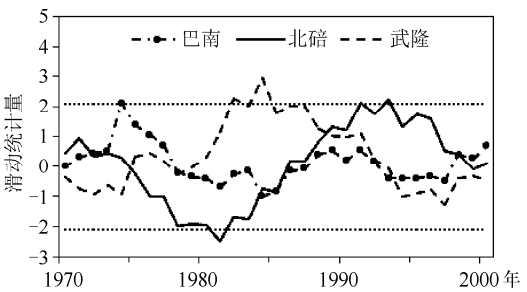


图 5 各代表站汛期极端事件频次的滑动  $t$  统计量曲线(.....为 0.05 显著性水平临界值)

Fig. 5 The moving  $t$ -statistic curves of the  
extreme precipitation event frequency of  
the representative stations in flood season

最大熵谱存在 8.3 a 的主峰值, 以及 4.2 a 和 2.4 a 的次峰值, 功率谱分析表明 8.3 a 周期通过了 0.05 显著性水平检验, 其他周期不显著.

因此, 近 50 a 来各异常区极端降水事件发生频次的周期振荡不太一致, 宜昌、北碚和武隆分别存在 5、2.4 和 8.3 a 的显著周期.

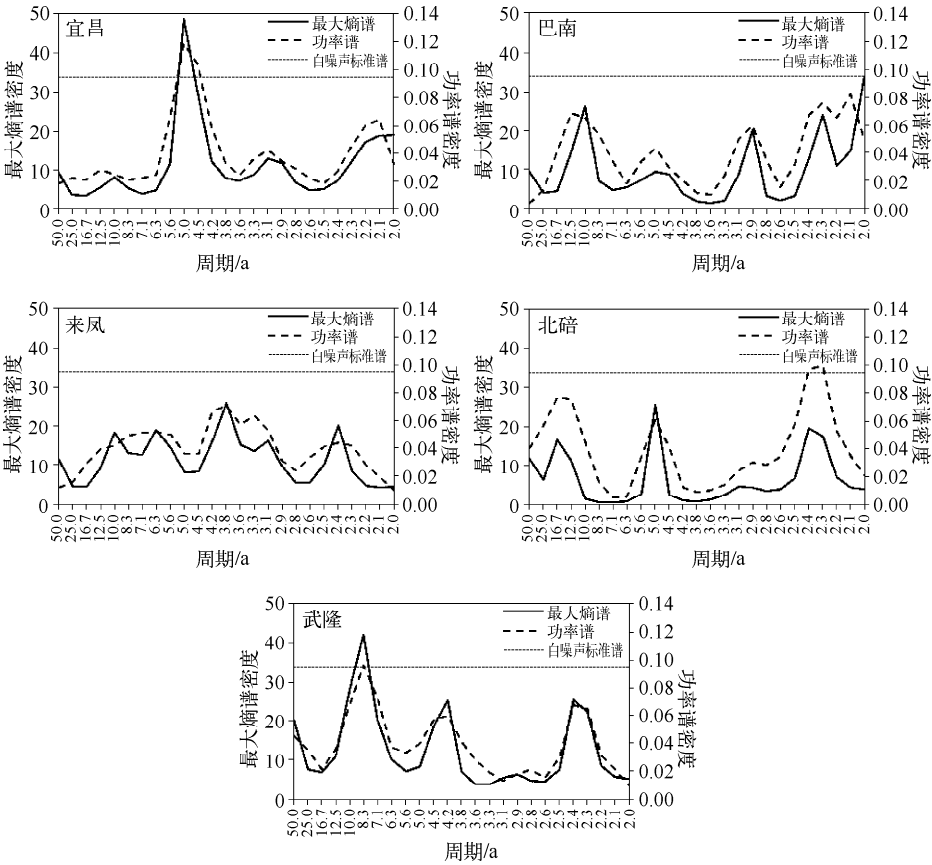


图 6 各代表站汛期极端降水事件频次的最大熵谱和功率谱分析

Fig.6 Maximum Entropy Spectral and Power Spectral analysis of the extreme precipitation event frequency of the representative stations in flood season

4 结论

在全球变暖的大背景下, 近 50 a 三峡库区极端降水事件的增减趋势不如长江中下游地区明显, 但因其特殊的地理位置和复杂的地形特征, 极端强降水事件的变化存在明显的区域差异. 因此, 今后仍需要探讨库区极端降水事件变化与气候变化的关联, 研究流域极端降水变化的成因机制.

5 参考文献

[ 1 ] Meehl GA, Karl T, Easterling DR *et al.* An introduction to trends in extreme weather and climate events: Observations, socioeconomic impacts, terrestrial ecological impacts, and model projections. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, **81**(3): 413-416.

[ 2 ] Frich P, Alexander LV, Della-Marta P *et al.* Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 2002, **19**: 193-212.

[ 3 ] Bonsal BR, Zhang X, Vincent LA *et al.* Characteristics of daily and extreme temperature over Canada. *Journal of Cli*

- mate, 2001, **14**(9):1959-1976.
- [ 4 ] Tank AMGK, Konnen GP. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-99. *Journal of Climate*, 2003, **16**(22): 3665-3680.
- [ 5 ] Karl TR, Knight RW. Secular trends of precipitation amount, frequency and intensity in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, **79**(2):231-241.
- [ 6 ] Goswami BN, Venugopal V, Sengupta D *et al.* Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment. *Science*, 2006, **314**(5804): 1442-1445.
- [ 7 ] Gao XJ, Zhao ZC, Giorgi F. Changes of extreme events in regional climate simulation over East Asia. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, **19**(5):927-942.
- [ 8 ] Han H, Gong DY. Extreme climate events over northern China during the last 50 years. *Geographical Sciences*, 2003, **13**(4):469-479.
- [ 9 ] Zhai PM, Sun AJ, Ren FM *et al.* Changes of climate extremes in China. *Climatic Change*, 1999, **42**: 203-218.
- [ 10 ] 潘晓华, 翟盘茂. 气候极端事件的选取与分析. *气象*, 2002, **28**(18): 28-31.
- [ 11 ] 陈海山, 范苏丹, 张新华. 中国近 50 a 极端降水事件变化特征的季节性差异. *大气科学学报*, 2009, **32**(6): 744-751.
- [ 12 ] Qian WH, Lin X. Regional trends in recent precipitation indices in China. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2005, **90**: 193-207.
- [ 13 ] Qian WH, Fu JL, Yan ZW. Decrease of light rain events in summer associated with a warming environment in China during 1961—2005. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(11): L11705.
- [ 14 ] 钱维宏, 符娇兰, 张玮玮等. 近 40 年中国平均气候与极值气候变化的概述. *地球科学进展*, 2007, **22**(7): 673-683.
- [ 15 ] 鲍 名, 黄荣辉. 近 40 年我国暴雨的年代际变化特征. *大气科学*, 2006, **30**(6): 1057-1067.
- [ 16 ] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化. *地理学报*, 2003, **58**(增刊): 1-10.
- [ 17 ] Zhai PM, Zhang XB, Wan H *et al.* Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *Journal of Climate*, 2005, **18**(7):1096-1108.
- [ 18 ] 翟盘茂, 王萃萃, 李 威. 极端降水事件变化的观测研究. *气候变化研究进展*, 2007, **3**(3):144-148.
- [ 19 ] Tang YB, Gan JJ, Zhao L *et al.* On the climatology of persistent heavy rainfall events in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, **23**(5): 678-692.
- [ 20 ] 闵 岫, 钱永甫. 中国极端降水事件的区域性和持续性研究. *水科学进展*, 2008, **19**(6): 763-771.
- [ 21 ] 王志福, 钱永甫. 中国极端降水事件的频数和强度特征. *水科学进展*, 2009, **20**(1): 1-8.
- [ 22 ] Su BD, Xiao B, Zhu D *et al.* Trends in frequency of precipitation extremes in the Yangtze River Basin, China: 1960—2003. *Hydrological Sciences Journal*, 2005, **50**(3): 479-492.
- [ 23 ] Zhang Q, Xu CY, Zhang ZX *et al.* Spatial and temporal variability of precipitation maxima during 1960—2005 in the Yangtze River basin and possible association with large-scale circulation. *Journal of Hydrology*, 2008, **353**(3/4): 215-227.
- [ 24 ] 闵 岫, 刘 建. 鄱阳湖区域极端降水异常的特征及成因. *湖泊科学*, 2011, **23**(3): 435-444.
- [ 25 ] 李 斌, 李丽娟, 李海滨等. 1960—2005 年澜沧江流域极端降水变化特征. *地理科学进展*, 2011, **30**(3): 290-298.
- [ 26 ] 余敦先, 夏 军, 张永勇等. 近 50 年来淮河流域极端降水的时空变化及统计特征. *地理学报*, 2011, **66**(9): 1200-1210.
- [ 27 ] 蔡庆华, 刘 敏, 何永坤等. 长江三峡库区气候变化影响评估报告. 北京: 气象出版社, 2010.
- [ 28 ] 王梅华, 刘莉红, 张 强. 三峡地区气候特征. *气象*, 2005, **31**(7): 67-71.
- [ 29 ] 陈鲜艳, 张 强, 叶殿秀等. 三峡库区局地气候变化. *长江流域资源与环境*, 2009, **18**(1): 47-51.
- [ 30 ] 陈鲜艳, 张 强, 邹旭恺等. 近几十年三峡库区主要气象灾害变化趋势. *长江流域资源与环境*, 2009, **18**(3): 296-300.
- [ 31 ] 刘骁冉, 杨 茜, 程炳岩等. 三峡库区 21 世纪气候变化的情景预估分析. *长江流域资源与环境*, 2010, **19**(1): 42-47.
- [ 32 ] 张天宇, 程炳岩, 范 莉等. 21 世纪三峡库区中雨以上日数的情景预估. *长江流域资源与环境*, 2010, **19**(Z2): 80-87.
- [ 33 ] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术: 第 2 版. 北京: 气象出版社, 2007: 57-124.