

# 1961—2011 年秦巴山区极端降水事件的时空特征分析

杨波, 张勃, 安美玲, 张调凤

(西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070)

**摘 要:** 利用 1961—2011 年秦巴山区及其周边 36 个站点的逐日降水数据, 应用百分位阈值定义法、线性倾向估计法和 Morlet 小波周期和小波方差分析, 通过区域划分探讨秦巴山区极端降水事件的时空特征。分析表明: 秦巴山区极端降水阈值在空间上自东南向西北递减; 极端降水发生频数与年均降水日数分布情况相似, 自东向西依次增大; 年均降水量、年均极端降水量空间分布特征相似, 中部值最高, 而西部地区的极端降水比重最高, 达到 44%。极端降水的发生频数受降水日数多少的制约, 受地形影响更加显著。极端降水事件发生频数在东部、中部和全区呈不显著上升趋势; 西部地区为不显著下降趋势; 在 20 世纪 80 年代中期有一个明显的峰值, 90 年代中后期上升幅度较大, 而西部地区变化幅度最小。通过 Morlet 小波和小波方差分析得出, 整个秦巴山地区的准周期相似, 在 32 a 左右振荡最强, 为第 1 准周期, 还有 12 a 和 17 a 的第 2 准周期。此外, 秦巴山地区极端降水事件的发生可能受西南季风影响较大。

**关键词:** 秦巴山地; 极端降水; 时空变化; Morlet 小波分析

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)01-110-07

## Spatiotemporal Characteristics of Precipitation Extremes in the Qinba Mountains Region during 1961—2011

YANG Bo, ZHANG Bo, AN Mei-Ling, ZHANG Tiao-Feng

(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The Qinba Mountains covering the southeastern part of Gansu province, southern part of Shaanxi and partial Sichuan was considered. The present study focused on the analysis of the spatiotemporal characteristics in daily extreme precipitations indices at a regional scale over 51 years (1961—2011), while the index threshold is defined at 95th percentile and the linear least square method, Morlet wavelet analysis was used for the analysis. The distribution of extremely wet days in the area is regular and frequencies in western stations are more than eastern stations and southern stations are more than the northern those calculated for. Positive slopes were found in middle and eastern part of the Qinba Mountains in case of extremely wet days while the western part presented a positive slope, also, the positive slopes were detected in the whole region on an average level but all of the calculated slopes of extremely wet days are statistically insignificant. By Morlet wavelet and wavelet variance analysis, similar to the quasi periodic Qinba mountain area, around 32 a oscillation is strongest, as first quasi cycle. In addition, the extreme precipitation events in this area may be influenced more by southwest monsoon.

**Key words:** Qinba Mountains; extreme precipitation; temporal and spatial variation; Morlet wavelet analysis

近年来, 气候变化成为气候研究中最重要主题。全球变暖、气候变化显著, 已引起世界各地研究人员的关注。IPCC 第四次评估报告指出, 气温的升高直接影响温度极值的变化, 使大气水汽量增加, 进

而导致极端气候事件的发生频率与强度呈上升趋势, 同时, 活动范围也进一步扩大<sup>[1-2]</sup>。极端气候事件的变化对社会、经济和所处环境的影响较大, 其中极端降水事件通常会引发衍生地质灾害和极端水文事件

收稿日期: 2013-07-19

修回日期: 2013-10-09

资助项目: 国家自然科学基金项目(40961038); 生态经济学省级重点学科项目(5001-02); 西北师范大学知识与科技创新工程项目(NWNU-KJXCXGC-03-66)

作者简介: 杨波(1987—), 男, 甘肃徽县人, 硕士研究生, 主要从事区域环境与资源开发研究。E-mail: yangbo907@126.com

通信作者: 张勃(1963—), 男, 甘肃庆阳人, 博士, 教授, 主要研究方向为区域环境与资源开发。E-mail: zhangbo@nwnu.edu.cn

等,比如洪涝和干旱,对我国国民经济产生重大潜在影响,特别是以农业为主要收入和生活来源的地区。因此,极端气候事件研究成为气候研究中最重要课题<sup>[3-4]</sup>。各国学者采取不同的方法和不同的尺度对降水事件进行着广泛的研究<sup>[5-7]</sup>,比如 Alexander 等<sup>[8]</sup>在研究全球气候变化时发现,20 世纪中后期以来极端气温和极端降水均表现出上升趋势;Rahimzadeh 等<sup>[9]</sup>发现极端降水事件在更大区域里出现,特别是在陆地高纬度地区。同时国内学者王志福和钱永甫<sup>[10]</sup>研究表明,我国极端降水事件多发于 35°N 以南地区,且在这些地区极端降水事件持续时间也较长;翟盘茂和潘晓华<sup>[11]</sup>研究得出,近 50 a 我国华北地区强降水事件趋于减少,但西北地区强降水事件趋于增多;汪宝龙等<sup>[12]</sup>发现,我国西北地区最大的 1 d 和 5 d 降水总量、逐年平均降水强度和持续干旱天数均呈增加趋势;以及许多其他的研究<sup>[13]</sup>。尽管过去许多学者对全国各自然地理单元的极端降水变化特征都展开过相关研究,但我国幅员辽阔、地形复杂、区域差异显著,虽然近半个世纪的极端降水变化趋势研究已有许多,但是于近期在中尺度空间上是否也存在这种趋势,尚待进一步研究,因此,对于特殊区位的中尺度自然地理单元需要展开详尽深入的分析。

秦巴山地处我国南北气候缓冲区,包括秦岭以南、大巴山以北,其北部秦岭沿线是我国四大自然地理单元中南方地区和北方地区的分界,也是湿润与半湿润区分界、1 月份 0℃等温线分界、亚热带与暖温带分界、水田与旱田分界,也是同纬度极端降水事件影响最大的地区<sup>[14]</sup>,其自然区位重要性可见一斑。地貌构成以山地和盆地为主,地形结构复杂,土质疏松,因此放大了泥石流及滑坡等极端降水事件衍生灾害的影响程度,对山区人民的生命财产威胁尤为突出<sup>[15]</sup>。先前包含本研究区极端降水事件的研究除我国北方和西北地区大尺度区划外,主要以陕西省为研

究单位<sup>[16-17]</sup>,以自然区划为研究单位鲜有涉及。因此,本文选择该地区及其周边 36 个气象站点的日降水序列数据,以分析其极端降水事件的变化特征及区域差异,试图进一步了解该地区降水的时空变化,以便为当地农业生产及气象减灾预防提供参考依据。

### 1 研究区概况

秦巴山地有广狭义之分,本文以广义秦巴山地为研究区,即秦岭山脉和大巴山脉主体,囊括秦岭以南大巴山以北地区,位于青藏高原东缘,地跨陕甘川渝鄂豫 5 省 1 市,西以临潭、迭部境内的岷迭山系与昆仑山脉为界,东至河南伏牛山麓,地貌单元主要以山地、盆地、丘陵、坪坝为主(范围:31. 1°—34. 6°N, 102. 47°—111. 84°E)。该地区是东亚夏季风影响范围的北部<sup>[18]</sup>,属于副热带西风急流、副热带高压以及低空急流复合影响的区域。其中秦巴山区是传统的雨养农业区,属于东亚季风区,为北亚热带湿润气候<sup>[14]</sup>。本文选取四川省广元以北的嘉陵江上游和湖北省丹江口以西的汉江上游为研究区域,并以此绘制秦巴山地区域地形图,形如“宝葫芦”,同时为了利于对比研究区内极端降水事件的分布与变化特征,本文综合考虑研究区的水文关系和地貌两个要素进行自然区域划分<sup>[19]</sup>,将秦巴山地依据流域、地形和海拔特征划分为 3 个分区,即东部区(Ⅰ区)、中部区(Ⅱ区)和西部区(Ⅲ区)(图 1 和表 1)。

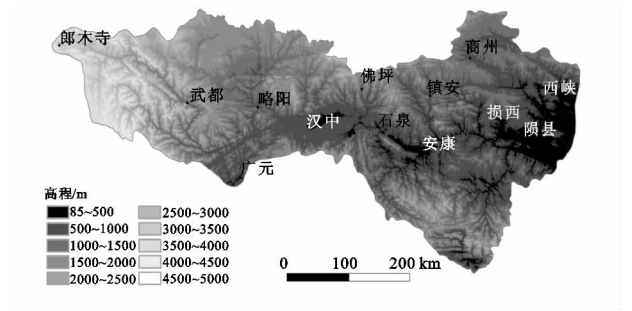


图 1 秦巴山地区概况及站点分布

表 1 秦巴山地区 3 个子区域概况

	区域面积/万 km <sup>2</sup>	平均海拔/m	平均距海距离/km	所属(子)流域	包含(主)地貌单元
Ⅰ区	6. 33	929. 84	1039. 45	汉水上游	秦巴东缘山地丘陵
Ⅱ区	4. 08	1176. 34	1357. 12	汉水上游	汉中、安康盆地
Ⅲ区	5. 84	2114. 58	1556. 93	嘉陵江上游	陇南山地
秦巴山区	16. 25	1418. 87	1328. 12	长江流域	秦巴山地

### 2 资料和方法

#### 2.1 资料选取

本文采用中国气象局国家气象信息中心提供的秦巴山地区 36 个站点(其中研究区域内为 13 个站点)国家标准气象站点 1961 年 1 月 1 日至 2011 年 12

月 31 日的日降水数据。数据经过较为严格的质量控制,包括时间一致性检验和极值检验。并为保证整个研究区气候特征及变化趋势分析的客观性,利用周边相关性最好相邻站点同日资料对郎木寺、郧西和郧县进行插补和订正延长,以确保数据的完整性和连续性。

## 2.2 研究方法

2.2.1 极端降水事件的定义 秦巴山区地处湿润气候与干旱气候的过渡区,东西横跨近 10 个经度、南北纵跨近 4 个纬度,区域面积大,站点间地形差异明显,降水区域连续性较差,因此,本文采用百分位法定义极端降水事件阈值,避免因采用全国统一降水量量级分析而出现检测不到部分地区极端降水事件发生的缺点。具体方法是:把各站 1961—2011 年逐年日降水量( $P \geq 0.1 \text{ mm}$ )序列按升序排列,将第 95 个百分位降水量值的 51 a 平均值,定义为某站极端降水事件的阈值<sup>[20]</sup>。当该站点某日降水量大于等于阈值时,则定义该站点该日发生极端降水事件<sup>[21-22]</sup>。某站某年发生极端降水事件的天数称为极端降水事件频数;某站某年发生极端降水事件所对应的日降水量的平均值称为年均极端降水量;多年降水量均值称为年均降水量;某站某年日降水量大于等于 0.1 mm 天数的多年平均值称为年均降水日数。

2.2.2 分析方法 Mann-Kendall 方法是一种非参数统计检验方法,优点是不需要样本遵从一定的分布,不受少数异常值的干扰,适于时间序列的检验,因此,本文采用该方法对年极端降水事件频数进行趋势分析和突变检验。采用最小二乘法线性拟合和滑动平均法进行趋势分析检验。由于 Morlet 小波用于分析时间序列时,小波系数实部的变化趋势与信号的起伏基本一致,等值线中心为高低值中心(正小波系数为高值,负小波系数为低值),因此中心值的大小可以反映出波动的振荡强度<sup>[23]</sup>。小波方差反映了波动的能量随尺度的分布,用来确定时间序列中各种尺度扰动的相对强度,峰值处的尺度即为该序列的主要时间尺度,即主周期<sup>[24]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 极端降水事件的空间分布特征

3.1.1 阈值的空间分布特征 由图 2 可知,1961—2011 年各站点极端降水事件的阈值介于 13.4~26.3 mm/d,研究区整体(13 个站点)平均值为 22.81 mm/d;最大值为 26.3 mm/d,出现在秦巴山地东部的西峡站;最小值为 13.4 mm/d,发生在西部的武都站;从分区来看,Ⅰ区平均阈值为 23.9 mm/d,Ⅱ区为 24.8 mm/d,Ⅲ区为 19.4 mm/d,表明秦巴山区极端降水阈值的空间区域差异明显,中东部地区极端降水阈值大于西部地区,南部阈值大于北部,呈由东南向西北递减的态势,表明秦巴山区极端降水阈值受地形因子

影响显著。

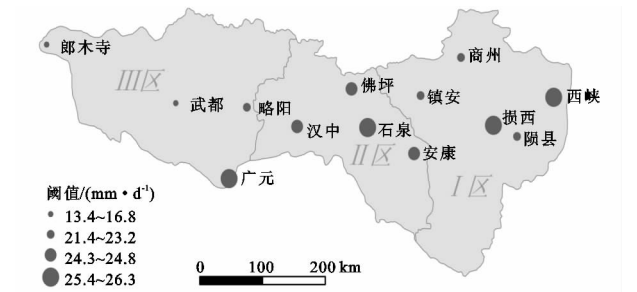


图 2 秦巴山地极端降水事件阈值的空间分布

3.1.2 极端降水指标的空间分布特征 结合表 2 和图 3 可知,秦巴山地区极端降水年平均发生频数(图 3a)为 6.0~11.2 d;分区域来看,频数值从Ⅰ区到Ⅲ区(自东向西)依次增大,全区平均发生频数为 9 d。年均降水量(图 3b)介于 460~960 mm 之间,最大值广元站为 955 mm,最小值在武都站为 467 mm,Ⅰ区平均年降水量最小(752 mm),Ⅱ区最大(870 mm),整个区域平均值为 806 mm。年均极端降水量(图 3c)仍然是Ⅱ区最大,达到 366 mm,而年均降水量相对较大的Ⅰ区极端降水量最小(298 mm),全区平均值为 330 mm。秦巴山地区年均降水日数(图 3d)分布范围在 100~154 d 之间,最大值在海拔较高的郎木寺站(154 d),最小值在武都站(102 d),分布情况与极端降水发生频数相似,从Ⅰ区到Ⅲ区依次增大,区域平均值为 120 d。综上所述,秦巴山地东部地区年均降水量较大,但降水日数最少,发生极端降水事件的概率最小;而西部地区年均降水量最小,但降水日数最多,最容易发生极端降水事件。

表 2 不同分区的各降水指数区域平均值

项目	Ⅰ区	Ⅱ区	Ⅲ区	全区
频数/(d·a <sup>-1</sup> )	7.45	8.72	9.58	8.58
年均降水量/(mm·a <sup>-1</sup> )	793.93	870.54	752.27	805.58
极端降水量/(mm·a <sup>-1</sup> )	297.50	365.69	328.42	330.54
极端降水日数/(d·a <sup>-1</sup> )	113.31	121.67	124.41	119.80

由表 3 中各指数之间的相关系数可知,海拔因子和其他因子的显著性相关程度最高,其中和阈值呈显著负相关,相关系数为-0.65(通过 0.01 的置信度检验),即海拔越高极端降水阈值越低,海拔还和极端降水频数和年均降水日数呈显著正相关,相关系数分别为 0.78 和 0.77(均通过 0.01 的置信度检验),表明地形对秦巴山地区极端降水事件发生的影响显著。此外,研究区极端降水发生频数除了受地形影响外,还与年均降水日数呈显著正相关,相关系数为 0.71(通过 0.01 的置信度检验),表明秦巴山地区极端降水发生频数还受降水日数多少的制约。

图3 极端降水事件年均频数(a)、年均降水量(b)、年均极端降水量(c)与年均降水日数(d)空间分布

表 3 海拔及各降水指数之间的相关系数

	海拔	阈值	频数	年均降水量	极端降水量	年均降水日数
海拔	1					
阈值	-0.65 **	1				
频数	0.78 **	-0.33	1			
年均降水量	-0.22	0.84 **	0.10	1		
极端降水量	-0.22	0.72 **	0.32	0.86 **	1	
年均降水日数	0.77 **	-0.13	0.71 **	0.39	0.22	1

注：\* \* 表示通过 0.01 的置信度检验。

### 3.2 极端降水事件的时间变化特征

对 1961—2011 年秦巴山地极端降水事件频数的时间序列进行线性拟合与 5a 滑动平均(图 4)。由图 4 可知, I 区的年际变化率为 0.026 1 mm/a, 相关系数为 0.022 7, 未通过 0.05 的置信度检验, 表明秦巴山地东部地区极端降水事件发生频数增加趋势不显著, 总体呈波动增加趋势。II 区的年际变化率为 0.037 1 mm/a, 相关系数为 0.006 6, 未通过 0.05 的置信度检验, 表明该地区极端降水事件发生频数的增加趋势也不显著, 呈波动上升趋势。III 区的年际变化率为 -0.029 1 mm/a, 相关系数为 0.033 3, 也未通过 0.05 的置信度检验, 说明秦巴山地西部地区极端降水事件发生频数的减少趋势不显著。从整个研究区来看, 频数的年际变化率为 0.011 4 mm/a, 也未通过 0.05 的置信度检验, 说明整个秦巴山地区极端降水事件的发生频数呈不显著增加趋势。总的来说, 秦巴山地区的极端降水事件发生频数在 20 世纪 80 年代中

期有一个峰值,90年代中后期频数上升幅度较大,但研究区西部地区变化幅度较小。

### 3.3 极端降水事件的变化周期分析

对极端降水事件频数的时间序列进行 Morlet 小波变换,得到小波变换系数(实部)等值线图(图 5),并对小波变换系数进行小波方差分析(图 6)。通过小波变换系数实部等值线可以看出,Ⅰ区极端降水事件发生频数在 17 a 和 32 a 左右的震荡比较明显,Ⅱ区存在 12 a 和 32 a 左右的震荡准周期。

由小波方差图可以看出:Ⅰ区小波方差有两个峰值,分别对应 17 a 和 32 a 的时间尺度,第一峰值是 32 a 时间尺度,说明秦巴山地东部地区极端降水发生频数在 32 a 左右振荡最强,为秦巴山地东部地区极端降水发生频数的第 1 准周期,而 17 a 左右的周期振荡很弱;Ⅱ区的小波方差有两个峰值,分别对应 12 a 和 32 a 的时间尺度,第一峰值是 32 a 时间尺度,说明Ⅱ区仍在 32 a 左右振荡最强,为该地区极端降水发生频数

的第 1 准周期,第 2 准周期为 12 a。此外,Ⅲ区极端降水事件发生频数在 12 a 和 32 a 左右的震荡比较明显,而全区存在 17 a 和 32 a 左右的震荡准周期,结合小波方差图 6 可以看出:Ⅲ区小波方差的峰值分别对应 12 a 和 33 a 的时间尺度,第一峰值也是 32 a 时间尺度,说明秦巴山地西部地区极端降水发生频数变化在 32 a 左右振荡最强,为第 1 准周期,而 12 a 左右的

周期振荡相对较弱;整个研究区的小波方差有 3 个峰值,分别对应 12 a、17 a 和 32 a 的时间尺度,第一峰值也是 32 a 时间尺度,说明整个秦巴山地区在 32 a 左右振荡最强,为该地区极端降水发生频数的第 1 准周期,第 2 准周期为 12 a。其中Ⅱ区(中部)和Ⅲ区(西部)的极端降水事件发生频数周期分布情况较为一致。

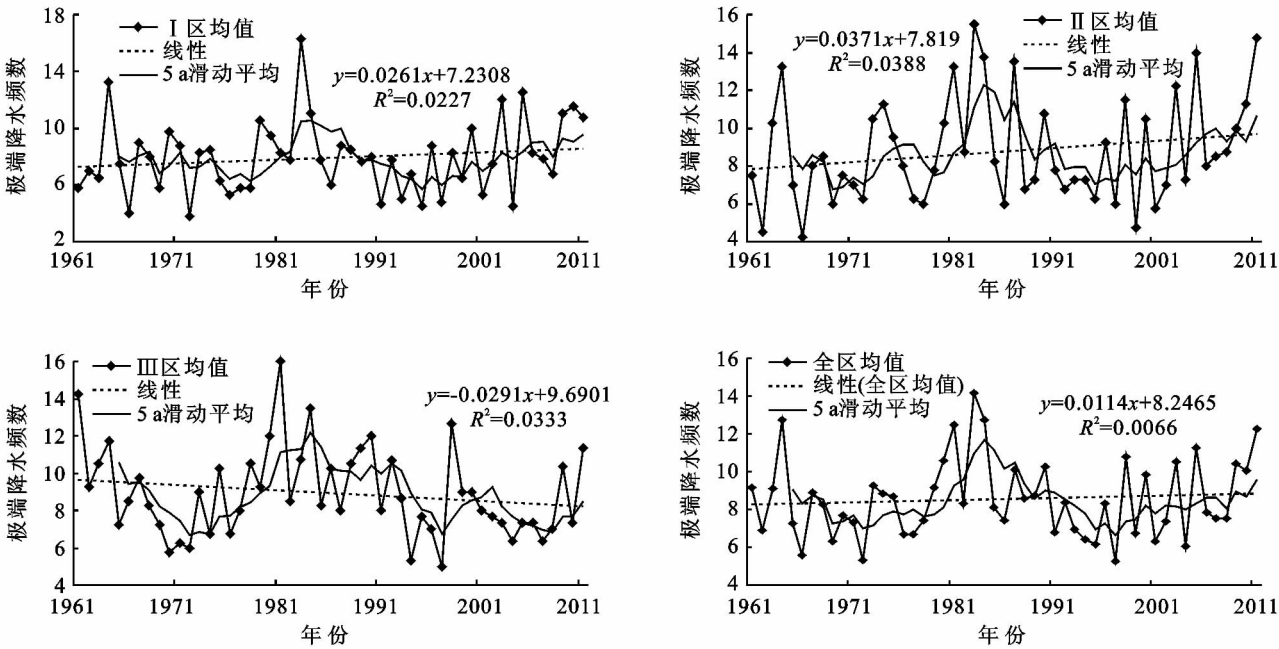


图 4 秦巴山地区不同区划下的年极端降水发生频数序列年际变化趋势

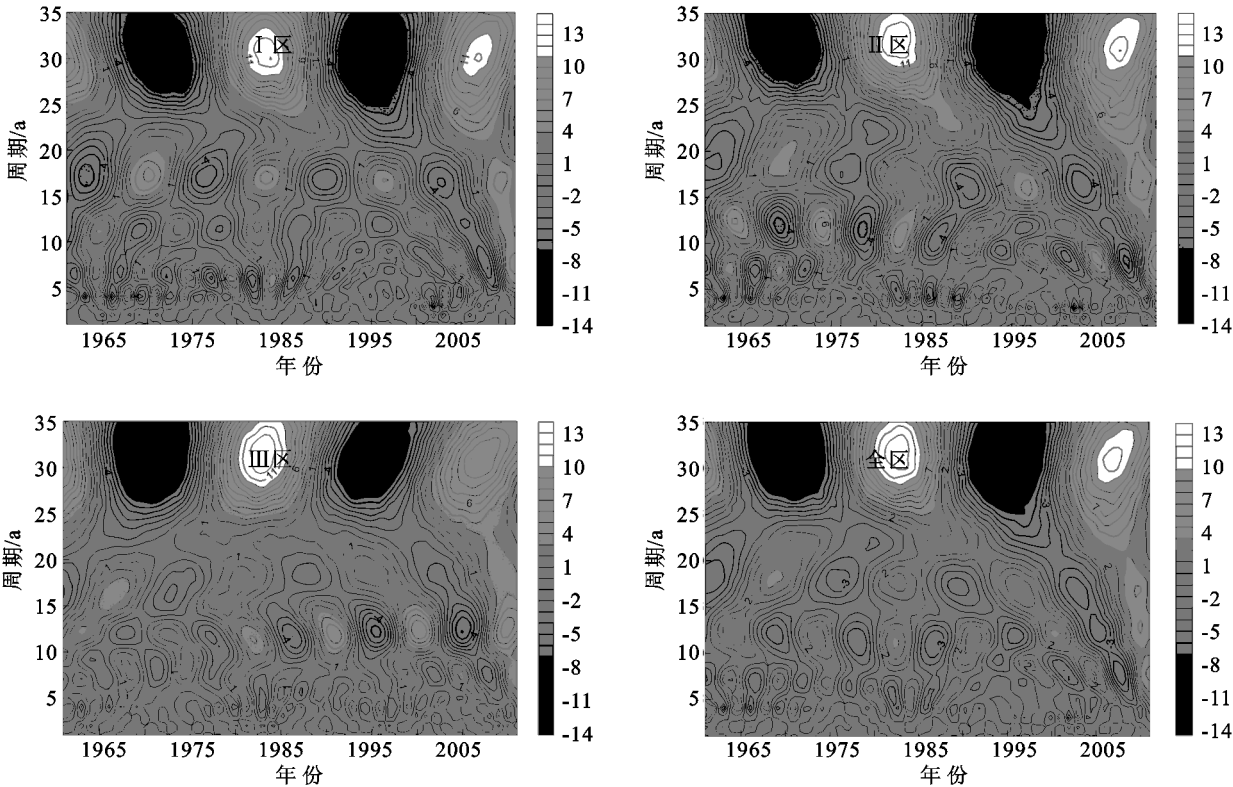


图 5 秦巴山地区不同区划下的年极端降水事件频数序列 Morlet 小波分析

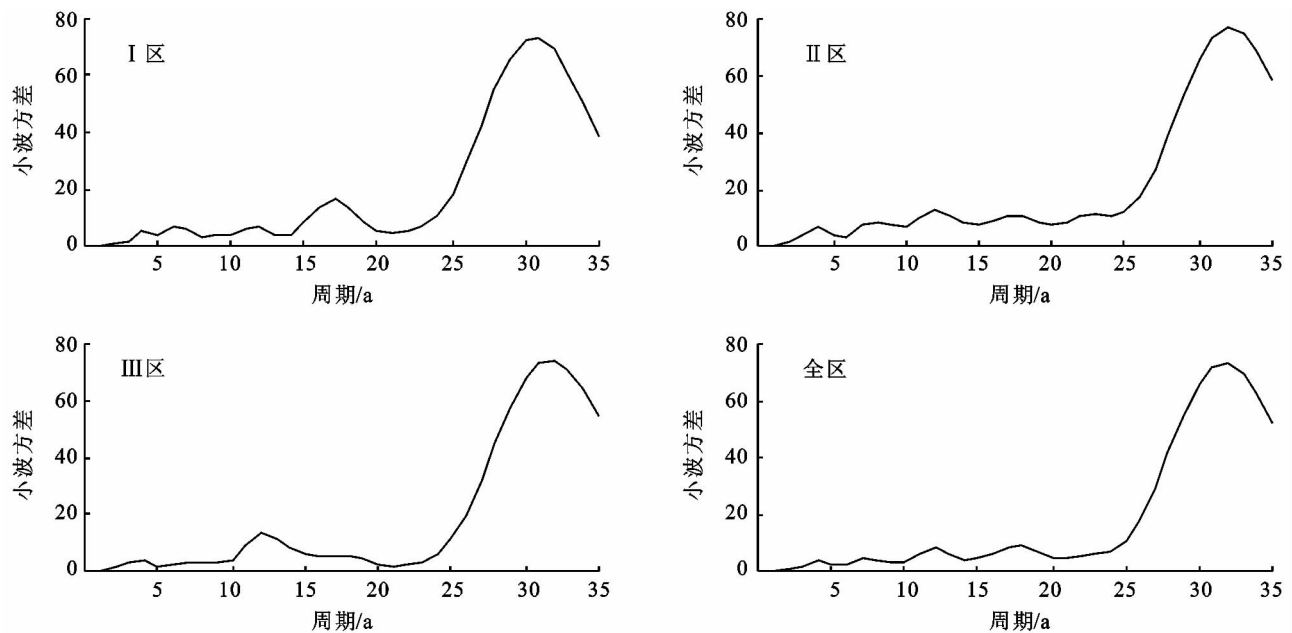


图 6 秦巴山区不同区划下的年极端降水事件频数序列 Morlet 小波方差图

## 4 结论和讨论

本文采用百分位阈值定义法、线性倾向估计法和 Morlet 小波周期等方法对秦巴山区极端降水事件各指数的时空特征分析,得出以下几点主要结论:

(1) 秦巴山区极端降水阈值的空间区域差异明显,中东部地区极端降水阈值大于西部地区,南部阈值大于北部,呈由东南向西北递减的态势;而频数值自东向西依次增大,与年均降水日数分布情况相似;年均降水量和年均极端降水量空间分布特征相似,中部值最高,但西部地区的极端降水比值最高,达到 44%。

(2) 依据相关性系数可知,研究区极端降水发生频数与年均降水日数呈显著正相关(通过 0.01 的置信度检验),表明极端降水发生频数还受降水日数多少的制约。此外,海拔和其他因子的显著性相关程度最高,和阈值、极端降水频数和年均降水日数的相关系数分别为 -0.65、0.78 和 0.77,均通过 0.01 的置信度检验,表明地形对秦巴山区极端降水事件的发生影响显著。

(3) 从秦巴山地东部、中部和全区来看,极端降水事件发生频数增加趋势不显著(未通过 0.05 的显著性检验),总体呈波动上升趋势。仅西部地区极端降水事件发生频数出现减少趋势,但趋势不显著(未通过 0.05 的显著性检验)。总体来看,秦巴山地区的极端降水事件发生频数在 20 世纪 80 年代中期有一个明显的峰值,90 年代中期后频数上升幅度较大,但研究区西部地区变化幅度最小。

(4) 由 Morlet 小波和小波方差分析得出,整个秦

巴山地区的准周期情况相似,在 32 a 左右振荡最强,为第 1 准周期,还有 12 a 和 17 a 的第 2 准周期。此外,秦巴山地区西部地区极端降水量和极端降水频数最高,结合周晓霞等<sup>[25]</sup>研究得出的西北地区东部的水汽输送主要是靠偏南风急流将孟加拉湾和中国南海的水汽输送而来的结果,表明秦巴山地区的极端降水事件发生可能受西南季风影响较大。

### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M] // Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Frich P, Alexander L V, Della-Marta P, et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century[J]. Climate Res., 2002, 19(3): 193-212.
- [3] Trambly Y, Badi W, Driouech F, et al. Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco [J]. Global and Planetary Change, 2012, 82(83): 104-114.
- [4] Yamamoto R, Sakurai Y. Long term intensification of extremely heavy rainfall intensity in recent 100 years [J]. World Resour. Rev., 1999, 11(2): 271-28.
- [5] 白桦, 穆兴民, 高鹏, 等. 江流域降水及径流演变规律分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 102-106.
- [6] 何毅, 王飞, 穆兴明, 等. 近 60 年关中一天水经济区降水量特征分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 65-69.
- [7] 赵志鹏, 曹立国, 魏锦桦, 等. 近 52 年黑龙江省不同级别降水特征分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 48-52.

- [8] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 2006, 111, D05109.
- [9] Rahimzadeh F, Asgari A, Fattahi E. Variability of extreme temperature and precipitation in Iran during recent decades [J]. *International Journal of Climatology*, 2009, 29(3):329-343.
- [10] 王志福, 钱永甫. 中国极端降水事件的频数和强度特征[J]. *水科学进展*, 2009, 20(1):1-9.
- [11] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J]. *地理学报*, 2003, 58(增刊):1-10.
- [12] 汪宝龙, 张明军, 魏军林, 等. 西北地区近 50a 气温和降水极端事件的变化特征[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(10):1720-1733.
- [13] 陈贺, 李原园, 杨志峰, 等. 地形因素对降水分布影响的研究[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(1):119-122.
- [14] 单树模. 中国名山大川辞典[M]. 济南: 山东教育出版社, 1992:158-159.
- [15] 张春山, 张业成, 胡景江, 等. 中国地质灾害时空分布特征与形成条件[J]. *第四纪研究*, 2000, 20(6):559-566.
- [16] 蔡新玲, 吴素良, 贺皓, 等. 变暖背景下陕西极端气候事件变化分析[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(4):1095-1101.
- [17] 姜创业, 魏娜, 程肖侠, 等. 1962—2008 年陕西省年际气温和降水区域性变化特征分析[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(1):197-200.
- [18] 王宝鉴, 李栋梁, 黄玉霞, 等. 东亚夏季风异常与西北东部汛期降水的关系分析[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(5):563-568.
- [19] 黄秉维. 中国综合自然区划的初步草案[J]. *地理学报*, 1958, 24(4):348-365.
- [20] 张利平, 杜鸿, 夏军, 等. 气候变化下极端水文事件的研究进展[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(11):1370-1379.
- [21] Bonsal B R, Zhang X B, Vincent L A, et al. Characteristic of daily and extreme temperature over Canada [J]. *Climate*, 2001, 4(9):1959-1976.
- [22] Folland C, Anderson C. Estimating changing extremes using empirical ranking methods[J]. *Climate*, 2002, 15(20):2954-2960.
- [23] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 第 2 版. 北京: 气象出版社, 2007:42-106.
- [24] 纪忠萍, 谷德军. 广州近百年来气候变化的多时间尺度分析[J]. *热带气象学报*, 1999, 15(1):48-55.
- [25] 周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 夏季亚洲季风区的水汽输送及其对中国降水的影响[J]. *气象学报*, 2008, 66(1):59-70.

(上接第 109 页)

- [15] 张学利, 杨树军, 刘亚萍, 等. 章古台固沙林主要树种根际土壤性质研究[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(1):72-76.
- [16] 刘建军, 陈海滨, 田呈明, 等. 秦岭火地塘林区主要树种根际微生态系统土壤特性研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(3):52-57.
- [17] 黄刚, 赵学勇, 张同会, 等. 科尔沁沙地 3 种灌木根际土壤 pH 值及其养分状况[J]. *林业科学*, 2007, 43(8):138-142.
- [18] 魏勇, 张焕朝, 张金屯. 杨树根际土壤有效磷的分布特征及其有效性[J]. *南京林业大学学报*, 2003, 27(5):20-25.
- [19] 丁应祥, 梁珍海, 康立新, 等. 滨海土壤上杨树根际微区性状的研究[J]. *南京林业大学学报*, 1996, 20(2):15-19.
- [20] Zoysa A K N, Loganathan P, Hedledy M J. A technique for studying rhizosphere processes in tree crops: soil phosphorus depletion around camellia (*Camellia japonica* L.) roots[J]. *Plant and Soil*, 1997, 190(2):253-265.
- [21] 张锡洲, 阳显斌, 李廷轩, 等. 不同磷效率小麦对磷的吸收及根际土壤磷组分特征差异[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(15):3083-3092.
- [22] 张广莉. 根际土壤磷的动态[J]. *土壤农化通报*, 1997, 12(2):39-45.
- [23] 侯杰, 叶功富, 张立华. 林木根际土壤研究进展[J]. *防护林科技*, 2006, 70(1):30-33.
- [24] 叶功富, 侯杰, 张立华. 木麻黄连栽林根际土壤化学性质与酶活性动态[J]. *亚热带水土保持*, 2012, 24(2):1-4, 19.
- [25] 张超, 刘国彬, 薛蕙, 等. 黄土丘陵区不同植被根际土壤微量元素含量特征[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(3):645-650.
- [26] 张福锁. 环境胁迫与植物根际营养[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998:21-75.