

# Analyzing the Spatial-Temporal Variation Trends in Extreme Precipitation in Beijiang River Basin of Guangdong Province\*

Zhanming Liu, Zishen Chen

Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou  
Email: liuzhanming177@163.com, eesczs@mail.sysu.edu.cn

Received: Mar. 4<sup>th</sup>, 2012; revised: Mar. 28<sup>th</sup>, 2012; accepted: Apr. 7<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** The paper selected 6 extreme precipitation indices base on the daily data of 18 stations in Beijiang River basin from 1965 to 2007. The river basin was divided into three different extreme precipitation spatial-temporal characteristic subareas by REOF method. The non-parametric method of Mann-Kendall trend test is applied to analysis variation trend. The change points of extreme precipitation indices were analyzed by the moving  $t$ -test method, the long-term changes in stability and relative variation were analyzed by variation coefficient, and the cycle characteristics were analyzed by the Morlet wavelet transform. Results show that, R1d, R5d, R95T and CDD were on the rise, while CWD and R95p declined; the change of extreme precipitation in long-term has large variability, and mountain area more than plain; the extreme indices were common mutation in the early 1990s, significant change cycle around 1990 scale difference, all of these may due to the high-speed economic development after 1990, and the influence of human activity more intense than before.

**Keywords:** Beijiang River Basin; Extreme Precipitation; Spatial-Temporal Variation Trend; M-K Trend Test; Moving  $t$ -Test; Wavelet Analysis

## 广东北江流域极端降水时空变化趋势分析\*

刘占明, 陈子桑

中山大学水资源与环境系, 广州  
Email: liuzhanming177@163.com, eesczs@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2012年3月4日; 修回日期: 2012年3月28日; 录用日期: 2012年4月7日

**摘要:** 本文以广东北江流域 18 测站 1965~2007 年日降水数据为基础, 选取 6 个极端降水指标, 应用 REOF 方法对极端降水场进行分区, 利用 M-K 方法进行变化趋势分析, 应用变差系数对长期变化的稳定程度及相对变化特征进行分析, 采用滑动  $t$  检验法进行变异年份分析, 应用 Morlet 小波分析振荡周期。结果表明: R1d、R5d、R95T、CDD 呈上升趋势, CWD、R95p 呈下降趋势; 极端降水的长期变化具有较大的波动性, 山区的波动性较平原地区更大; 极端降水指数在 20 世纪 90 年代初期发生变异的现象较为普遍, 显著周期尺度在 1990 年前后存在明显差异, 这些都可能与该区 20 世纪 90 年代之后经济高速发展从而造成人类活动的影响较之前更加强烈有关。

**关键词:** 北江流域; 极端降水; 时空变化趋势; M-K; 滑动  $t$  检验; 小波分析

\*基金项目: 2009 年广东省水利创新研究项目(合同号: 2009-41); 国家自然科学基金项目(项目号: 50839005)。  
作者简介: 刘占明(1979-), 男, 河南信阳人, 博士生, 从事随机水文学研究。

## 1. 引言

极端降水事件的变化, 导致气候变化的影响更加明显, 如直接致使洪涝灾害频发、土壤侵蚀和干旱加剧<sup>[1]</sup>。大量研究表明, 极端气候事件对社会稳定、经济发展和人民生活等各个层面的影响尤为严重, 造成的经济损失非常巨大<sup>[2]</sup>。据统计, 中国洪涝、干旱等气象灾害每年损失占整个自然灾害损失的 70%左右, 直接经济损失占国民生产总值的 3%~6%<sup>[3]</sup>。近年来随着极端天气事件的频繁发生, 人们对极端降水事件的关注不断增加, 我国已有许多学者对极端降水事件做了大量的分析讨论<sup>[4-6]</sup>。其中, 翟盘茂等<sup>[7]</sup>研究指出中国降水极值变化表现出了明显的区域性特点, 严中伟等<sup>[8]</sup>研究指出, 中国区域极端降水变化态势与全球态势基本一致, 区域性和局地性特点明显。当然, 由于气候变化科学认识的不确定性, 也有学者指出当前对气候变化的诸多研究结论并非是最最终定论, 对于具体区域需要开展详尽的评估<sup>[9]</sup>。

北江源于南岭山系, 源头深入江西、湖南边境, 全长约 582 km, 流域面积约 4.7 万 km<sup>2</sup>(广东境内约 4.3 万 km<sup>2</sup>), 是珠江水系第二大支流, 贯穿广东中北部, 是广东省境内重要河流。以前涉及到该流域极端降水的研究, 都是把该区嵌套在大尺度范围内(华南、我国东部地区)且只是针对某个季节<sup>[10,11]</sup>, 在具体到该流域范围时, 没有相应的代表站或者只是象征性的选取个别站点。同时, 北江流域属中亚热带向南亚热带过渡区域, 流域内部地形复杂, 受人类活动影响的程度存在着明显的空间差异。因此, 在没有经过系统分析的情况下选取的个别站点不一定具有代表性, 个别站点的变化更不能代表整个流域的变化。

本文以北江流域 18 观测站 1965~2007 年日降水数据为基础, 应用 REOF 方法对极端降水场进行分区, 根据 Trend Free Pre-Whitening<sup>[12]</sup>方法消除指标序列中的自相关性, 利用 Mann-Kendall 方法进行变化趋势分析, 应用变差系数对长期变化的稳定程度及相对变化特征进行分析, 采用滑动  $t$  检验法<sup>[13]</sup>进行变异年份分析, 应用 Morlet 小波<sup>[14]</sup>进行周期分析, 以期能全面评估该区极端降水事件的时空变化特征。对于科学理解洪旱灾害时空变化、减灾防灾具有重要意义; 对于分析流域内区域气候要素变化规律、区域水量平衡、水资源合理开发利用乃至珠江三角洲的生态安全等都

具有重要的理论和现实意义。

## 2. 极端降水指标选取

本文参考了世界气象组织(WMO)提出的指标, 选取了 6 个极端降水指标(如表 1 所示, 下文中的极端降水指标名称均以此表中的缩写字母代替)。采用超定量法确定各站极端降水事件阈值时, 将 1965~2007 逐年日降水量序列由小到大排列, 取其第 95 百分位数的 43 年平均值定义为极端降水事件的阈值, 当某站某日降水量超过这个阈值时, 就记为一次极端降水事件。

## 3. 结果与分析

### 3.1. REOF 分区

对极端降水场的分区, 目前大多采用对研究区域内各站每年发生极端降水事件日(次)数(R95p)作 REOF 分解的方法, 本研究也对流域 18 站 1965~2007 年逐年极端降水事件发生日(次)数(R95p)作 REOF 分解, 计算其旋转载荷向量, 进而分析区域内极端降水的空间异常。表 2 是前 3 个模态对总方差的贡献率和累积贡献率, 由表可见, 前 3 个模态累积解释方差贡献占总方差的 93.0%, 说明前 3 个空间模态基本上体现了极端降水的空间分布异常特征。在同一载荷向量场中, 把载荷值较高(大于 0.3, 图 1(a)~(c)中粗黑线所示)且地域上连成一片作为分区标准, 由此将流域划分为西北(A)、南部(B)、东北(C)3 个子区域(图 1(d)所

Table 1. Indices of extreme precipitation considered in paper  
表 1. 选取的极端降水指标

指标名称	指标含义(每年)	单位
R1d	1 日最大降水量	mm
R5d	连续 5 日最大降水量	mm
CDD	最长连续无降水(<0.1 mm)日数	d
CWD	最长连续有降水(≥0.1 mm)日数	d
R95p	极端降水(>95%分位数)日(次)数	d
R95T	极端降水(>95%分位数)降水量	mm

Table 2. The percentage of contribution to whole variance of the first three models of REOF  
表 2. REOF 前 3 模态对总方差的(累积)贡献率

序号	1	2	3	累积贡献率
贡献率	41.4%	27.2%	24.4%	93.0%

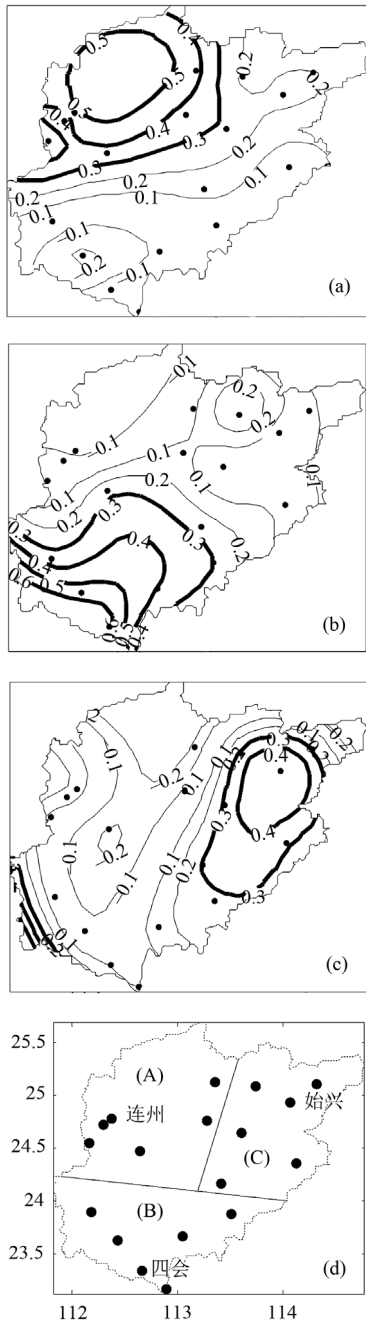


Figure 1. Spatial distribution and division result of the first three main models of REOF with index P95p in Beijiang basin  
图 1. 北江流域极端降水指标(P95p)REOF 前 3 模态空间分布及分区结果

示)。其中, 西北区载荷高值中心在连州(0.48)附近, 该区以山地为主, 海拔高, 起伏大, 是北江流域海拔最高、起伏最大的地区; 南部区域载荷高值中心在四会(0.65)附近, 该区西部地形以丘陵为主, 中东部位于珠江三角洲平原上, 地势低平, 起伏和缓, 人口稠密, 工业集中, 经济发达; 东北区载荷高值中心在始兴

(0.49)附近, 该区以山地、丘陵为主, 同时拥有相对宽广的河谷平原和山间小盆地。

### 3.2. Mann-Kendall 变化趋势分析

由图 2 可知, R1d: 12 站上升(3 站显著, 即  $Z_{\alpha} > 1.64$ , 下同), 6 站下降(1 站显著, 即  $Z_{\alpha} < -1.64$ ); 分区看, 西北区有 5 站上升(1 站显著), 1 站下降; 东北区 6 站全部上升(1 站显著), 南部区域 5 站下降(1 站显著), 1 站显著上升; 由此总结出 R1d 西北区、东北区上升, 南部区域下降, 总体呈上升趋势的结论。由表 3 可以看出, R5d: 13 站上升(3 站显著), 5 站下降(1 站显著); 分区看, 西北区 5 站上升 1 站下降, 南部区域 2 站上升(1 站显著)4 站下降(1 站显著), 东北区 6 站上升(2 站显著); 总体和各分区变化趋势与 R1d 相同。CDD: 所有测站全部上升(5 站显著, 其中 4 站分布在南部区域); 总体和各分区均呈上升趋势, 其中南部区域上升最为显著。CWD: 2 站上升, 16 站下降(7 站显著, 其中西北、南部区域各 2 站, 东北区 3 站); 总体与各分区均呈下降趋势。R95p: 7 站上升(1 站显著), 11 站下降(6 站显著, 其中南部区域 4 站, 东北区 2 站), 总体呈下降趋势; 分区看, 西北区不显著上升, 东北区不显著下降, 南部区域显著下降。R95T:

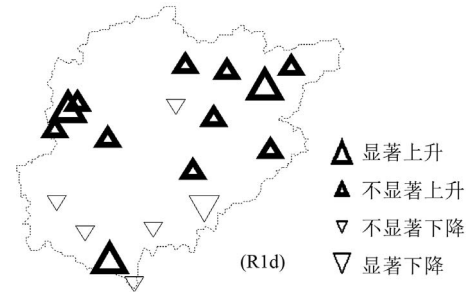


Figure 2. Spatial distribution of variation trend in 18 stations extreme precipitation index R1d identified by M-K test  
图 2. 18 站极端降水指标(R1d)M-K 变化趋势空间分布图

Table 3. Statistics of extreme indices identified by M-K test  
表 3. 极端降水指标 M-K 趋势检验统计表

指标名称	显著上升	不显著上升	不显著下降	显著下降
R5d	0-1-2	5-1-4	1-3-0	0-1-0
CDD	0-4-1	6-2-5	0-0-0	0-0-0
CWD	0-0-0	0-1-1	4-3-2	2-2-3
R95p	0-0-1	5-0-1	1-2-2	0-4-2
R95T	2-0-2	4-2-2	0-3-2	0-1-0

12 站上升(4 站显著, 西北区、东北区各 2 站), 6 站下降(1 站显著), 总体呈上升趋势; 分区看, 西北区、东北区呈上升趋势, 南部区域呈下降趋势。

### 3.3. 变差系数分析

从各区域指标的平均变差系数对比来看(表 4、图 3), R95T 最大, 其次是 R95p, 两者变差系数均在 0.4 以上; R1d、CDD 变差系数在 0.36 左右, R5d、CWD 在 0.30 上下; 从各分区来看, (A)区平均变差系数中有 5 项指标(R1d、R5d、CDD、R95p、R95T)高于另外两区, 也高于全流域平均值, 而(B)、(C)区之间无明显差别, 分析其原因可能与(A)区地形有关, 因为(A)

Table 4. Statistics of extreme indices by variation coefficient  
表 4. 极端降水指标变差系数统计表

区域	R1d	R5d	CDD	CWD	R95p	R95T
(A)区平均	0.38	0.34	0.38	0.30	0.46	0.51
(B)区平均	0.37	0.29	0.37	0.31	0.42	0.43
(C)区平均	0.32	0.27	0.34	0.32	0.44	0.46
全区平均	0.36	0.30	0.36	0.31	0.44	0.47

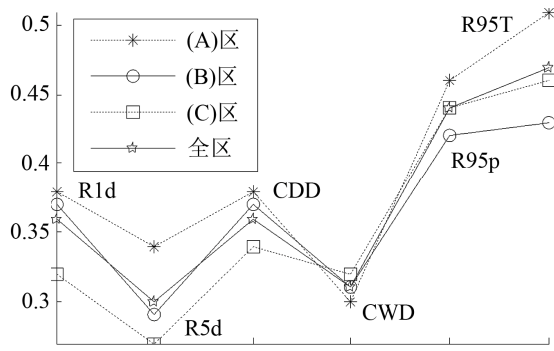


Figure 3. Variation coefficient contrast of extreme precipitation indices in Beijiang River basin  
图 3. 北江流域极端降水指标变差系数对比图

Table 5. Variation year statistics of extreme precipitation indices in Beijiang River basin  
表 5. 北江流域 18 站极端降水指标显著增减变点及变异年份统计表

	R1d	R5d	CDD	CWD	R95p	R95T
增加变点 (站数 - 变异年份)	1: 1992、 1: 1993 年	1: 1990、 3: 1991、 2: 1993 年	1: 1975、 4: 1976、 1: 1978 年	1: 1979、 2: 1990、 1: 1992 年	1: 1978、1: 1985、 1: 1991、1: 1992、 4: 1993 年	1: 1991、 5: 1993 年
减少变点 (站数 - 变异年份)	1: 1977 年	1: 1984 年	1: 1995 年	1: 1978、1: 1979、 2: 1980、2: 1983、 1: 1996、1: 1997、 1: 1998 年	1: 1983 年	0

区以山地为主, 是流域内海拔最高、起伏最大的地区。

### 3.4. 变异年份分析

采用滑动  $t$  检验法对各指标进行变异年份分析, 取子样本长度为 10 年; 由于一些指标为不显著变化趋势, 故适当降低其显著水平, 取  $\alpha = 0.1$ , 相应的  $t_{\alpha} = 1.73$  ( $\alpha = 0.05$  时,  $t_{\alpha} = 2.10$ )。  $t_{\max} > 0$  代表该点为趋向减少的变点,  $t_{\min} < 0$  则代表增加变点。图 4 只给出了(A)区 6 站 R1d 的滑动  $t$  检验情况, 其它站的变异情况统计见表 5。由表 5 可以看出: R1d 变异不显著(这里只统计 3 个以上测站同时期出现变异的情况, 下同); R5d、R95p、R95T 均有 6 站(1/3)在 90 年代初出现显著(显著增加、显著减少变点指通过了 90%置信度检验, 下同)增加变点; CDD 有 6 站(1/3)在 70 年代中后期出现显著增加变点; CWD 变异较复杂: 6 站(1/3)在 70 年代末、80 年代初出现显著减少变点, 3 站(1/6)在 90 年代初期出现增加变点, 3 站(1/6)在 90 年代后期出现减少变点。总体来看, 20 世纪 90 年代初期成为变异年份的现象较为普遍。

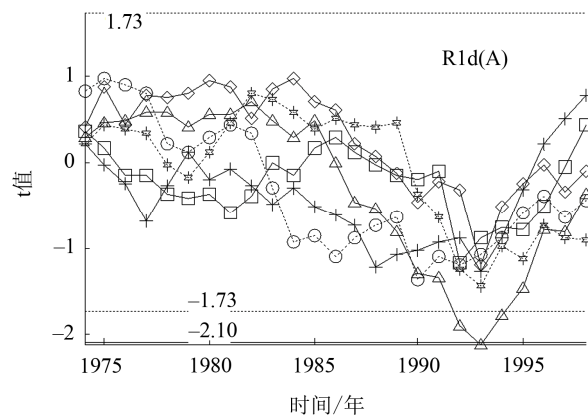


Figure 4. Variation analysis of extreme precipitation index R1d in subarea (A) by the moving  $t$ -test  
图 4. 北江流域(A)区 6 站极端降水指标变异年份分析

**Table 6. Statistics of extreme precipitation indices by significant periods of Lianzhou, Sihui and Shixing**  
**表 6. 连州、四会和始兴站极端降水指标显著周期统计**

指标	连州 - 西北区(A)	四会 - 南区(B)	始兴 - 东北区(C)
R1D	3 年: (1972~1991); 2~4 年: (1995~2007)	2 年: (1971~1975); 2~4 年: (1995~2007)	2~4 年: (1966~1995, 2003~2007)
R5D	2~3 年: (1975~1989); 2~4 年: (1998~2007)	2 年: (1969~1977); 2~4 年: (1982~2007)	2~4 年: (1965~1994, 2002~2007)
CDD	2~4 年: (1975~1983, 1990~2007)	2~4 年: (1970~1994)	2~4 年: (1966~1988, 1991~2007)
CWD	2~4 年: (1965~1983, 1986~2007)	2~4 年: (1965~2002); 4~8 年: (1970~1980)	2~3 年: (1975~1996, 2002~2007)
R95p	2 年: (1968~1976); 2~4 年: (1977~2007)	2~4 年: (1965~1988); 4~6 年: (1986~1998)	2~3 年: (1966~1981); 2~4 年: (1985~2007)
R95T	2~4 年: (1976~1992, 1998~2007)	2~4 年: (1965~1987, 2000~2007); 5~6 年: (1987~1997)	2 年: (1967~1981); 4 年: (1986~2007)

### 3.5. Morlet 小波分析

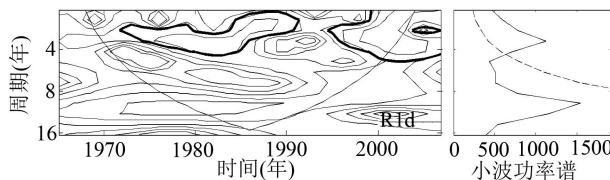
本研究选取(A)、(B)、(C)区 REOF 最大特征向量载荷的连州、四会、始兴作为基准站, 利用 Morlet 连续小波变换分析各指标的周期变化特征, 图 5 只给出了连州 R1d 小波功率谱, 其它指标的分析统计见表 6。总体来看, 6 种指标都具有 2~4 年的显著变化周期, 从显著周期对应的时域来看, 大致以 1990 年为界分为前后两部分, 1990 年之前频域尺度较小, 1990 年之后频域尺度较大。

### 4. 结论与讨论

本文对广东北江流域极端降水时空变化及其趋势进行分析, 并结合地形和人类活动的影响进行解释, 获得以下几点结论:

1) M-K 变化趋势分析表明: 总体来看, 1965~2007 年间, R1d、R5d、R95T、CDD 呈上升趋势, CWD、R95p 呈下降趋势; 由此可以得出北江流域极端降水正在向两极化方向发展的结论, 并将造成旱涝灾害加剧的趋势。从各分区来看, 除 CWD 外, 其余各指标变化趋势并不一致, 其中 R1d、R5d、R95T 指标出现南部区域与西北、东北区反向变化的现象, 这可能与南部区域地处珠江三角洲平原、人口稠密、工业集中、经济发达从而受到人类活动的影响程度远高于西北和东北区有关。

2) 极端降水的变化具有较大的波动性; 从分区对比来看, 西北区变差系数普遍高于另外两区, 这可能



**Figure 5. The wavelet power spectrum of extreme precipitation index R1d in subarea (A) in Beijing basin (Thick black lines and dotted lines are the 95% confidence level)**  
**图 5. 北江流域(A)区部分 R1d 指标小波功率谱(左图粗黑线、右图虚线表示通过 95%置信度检验)**

与西北区海拔高、起伏大的地形有关, 即山区极端降水较平原地区具有更大波动性。

3) 滑动  $t$  检验法进行变异年份分析表明: 20 世纪 90 年代 s 初期成为极端降水指数变异年份的现象较为普遍, 这可能与 20 世纪 90 年代之后经济高速发展从而造成人类活动的影响较之前更加强烈有关。

4) 选取 REOF 分区最大特征向量载荷的连州、四会、始兴作为基准站, 利用 Morlet 连续小波变换分析表明: 各指标均具有 2~4 年的显著周期, 从显著周期的时域来看, 大致以 1990 年为界, 1990 年之前频域尺度较小, 之后尺度较大。分析其原因可能也与该区 20 世纪 90 年代之后人类活动的影响较之前更加强烈有关。

### 参考文献 (References)

[1] IPCC, PARRY, M. L., et al. Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

- [2] IPCC. Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the inter-governmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 881.
- [3] 姜付仁, 程晓陶, 向立云, 等. 美国 20 世纪洪水损失分析及中美 90 年代比较研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 384-388.  
JIANG Fu-ren, CHENG Xiao-tao, XIANG Li-yun, et al. Review on the flood losses of the 20th century in the United States and comparative study on flood damages between China and USA in 1990s. *Advances in Water Science*, 2003, 14(3): 384-388. (in Chinese)
- [4] 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 中国年极端降水事件的时空分布特征[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(1): 75-83.  
YANG Jin-hu, JIANG Zhi-hong, WANG Peng-xiang, et al. Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China. *Climatic and Environmental Research*, 2008, 13(1): 75-83. (in Chinese)
- [5] ZHAI, P. M., ZHANG, X. B., WANG, H., et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *Journal of Climate*, 2005, 18(7): 1096-1108.
- [6] 苏布达, GEMMER, M., 姜彤, 等. 1960~2005 年长江流域降水极值概率分布特征[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(4): 208-213.  
SU Buda, GEMMER, M., JIANG Tong, et al. Probability distribution of precipitation extremes over the Yangtze River basin during 1960-2005. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(4): 208-213. (in Chinese)
- [7] 翟盘茂, 任福民, 张强. 中国降水极值变化趋势检验[J]. 气象学报, 1999, 57(2): 208-216.  
ZHAI Panmao, REN Fumin and ZHANG Qiang. Detection of trends in China's precipitation extremes. *Acta Meteorologica Sinica*, 1999, 57(2): 208-216. (in Chinese)
- [8] 严中伟, 杨赤. 近几十年中国极端气候变化格局[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(3): 267-272.  
YAN Zhongwei, YANG Chi. Geographic patterns of extreme climate changes in China during 1951-1997. *Climatic and Environmental Research*, 2000, 5(3): 267-272. (in Chinese)
- [9] 葛全胜, 王绍武, 方修琦. 气候变化研究中若干不确定性的认识问题[J]. 地理研究, 2010, 29(2): 191-203.  
GE Quan-sheng, WANG Shao-wu and FANG Xiu-qi. An uncertainty analysis of understanding on climate change. *Geographical Research*, 2010, 29(2): 191-203. (in Chinese)
- [10] 李丽平, 章开美, 王超, 等. 近 40 年华南前汛期极端降水时空演变特征[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 443-450.  
LI Liping, ZHANG Kaimei, WANG Chao, et al. Temporal and spatial variations of extreme precipitation in the pre-flood period of South China in recent 40 years. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15(4): 443-450. (in Chinese)
- [11] 陆虹, 何慧, 陈思蓉. 华南地区 1961~2008 年夏季极端降水频次的时空变化[J]. 生态学杂志, 2010, 29(6): 1213-1220.  
LU Hong, HE Hui and CHEN Si-rong. Spatiotemporal variation of extreme precipitation frequency in summer over South China in 1961-2008. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(6): 1213-1220. (in Chinese)
- [12] ZHENG Hong-xing, ZHANG Lu, LIU Chang-ming, et al. Changes in stream flow regime in headwater catchments of the Yellow River basin since the 1950s. *Hydrological Processes*, 2007, 21: 886-893.
- [13] TORRENCE, C., COMPO, G. P. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(1): 61-78.
- [14] YUE, S., WANG, C. Y. Applicability of pre-whitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. *Water Resource Research*, 2002, 38(6): 1068.