

Study on Spatial and Temporal Characteristics of Extreme Precipitation and Its Affecting Factors of Climate in the Pearl River Basin*

Xushu Wu¹, Zhaoli Wang^{1#}, Chengguang Lai², Xiaohong Chen²

¹School of Civil and Transportation Engineering, South China University of Technology, Guangzhou

²Center for Water Resources and Environment Research, Sun Yat-sen University, Guangzhou

Email: 1205900021@qq.com, #wangzhl@scut.edu.cn

Received: Sep. 30th, 2013; revised: Nov. 20th, 2013; accepted: Nov. 26th, 2013

Abstract: Based on the daily precipitation data at 41 observational stations of the Pearl River Basin from 1960 to 2012, defining five extreme precipitation indices such as total extreme precipitation, extreme rain days, mean intensity of extreme precipitation, maximum 1-day precipitation, maximum consecutive 3-day precipitation and comprehensive index of extreme precipitation, using the methods of Mann-Kendall and Wavelet analysis, the spatial and temporal characteristics of extreme precipitation of the Pearl River Basin are analyzed. The affecting factors of climate are studied as well. The results show that: 1) The extreme precipitation shows an increasing trend in most area of the basin. More flood disasters might occur in the basin; 2) No significant mutation can be identified in these indices in recent 53 years; 3) All the indices have a long-term memory characteristic that future tendency is consistent with those of the past; 4) The extreme precipitation shows complex periodic variations with the primary oscillation periods of 2.2~6.5a; 5) Cross wavelet analysis and coherence analysis show that ENSO and sunspot are the main factors affecting the extreme precipitation in the basin.

Keywords: Extreme Precipitation; Spatial and Temporal Characteristics; Affecting Factors of Climate; Wavelet Analysis; The Pearl River Basin

珠江流域极端降雨时空变化规律及气候影响因素研究*

吴旭树¹, 王兆礼^{1#}, 赖成光², 陈晓宏²

¹华南理工大学土木与交通学院, 广州

²中山大学水资源与环境研究中心, 广州

Email: 1205900021@qq.com, #wangzhl@scut.edu.cn

收稿日期: 2013年9月30日; 修回日期: 2013年11月20日; 录用日期: 2013年11月26日

摘要: 依据珠江流域41个气象站1960~2012年的日降雨资料, 定义了5个极端降雨指标(极端降雨总量、极端降雨日数、极端降雨平均强度、最大1d降雨量、最大连续3d降雨量)及通过将五者叠加得到的极端降雨综合指数, 运用Mann-Kendall及小波分析等方法对珠江流域极端降雨时空变化特征规律及气候影响因子进行了研究。结果表明: 1) 珠江流域大部分地区极端降雨呈上升趋势, 预示着流域发生洪涝灾害的可能性增加, 防洪压力增大。2) 近53年流域极端降雨未发生显著突变。3) 流域极端降雨具有长期记忆性, 即未来仍呈不显著增加趋势。4) 流域极端降雨存在2.2~6.5a的主振荡周期, 且以短周期演变为主, 长周期变化不明显, 具有多尺度周期振荡特征。5) 交叉小波分析结果表明, ENSO、

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51209095); 国家自然科学基金重大国际合作和重点项目(51210013, 50839005)。

作者简介: 吴旭树(1989-), 男, 广东揭阳人, 硕士研究生, 研究方向: 水文水资源; 王兆礼(1979-), 男, 江苏徐州人, 博士, 讲师, 研究方向: 水文水资源。

#通讯作者。

太阳黑子活动是珠江流域极端降雨的主要影响因素。

关键词: 极端降雨; 时空变化特征; 气候影响因子; 小波分析; 珠江流域

1. 引言

极端降雨事件作为一种小概率事件, 具有明显突发性强、危害性大等特点, 其发生往往导致区域性洪涝灾害^[1]。在新世纪全球气候变暖的背景下, 水循环加剧导致降水时空分布规律发生变化, 极端降雨事件明显增加, 给人类经济社会发展带来重要影响^[2]。研究极端降雨时空演变特征及极端降雨的气候影响因素, 对于全面系统地了解、预测洪涝灾害的时空变化特征及流域防洪规划具有重要意义^[3]。

近些年来, 极端降雨事件受到国际社会的普遍关注。Karl T R 等^[4]针对区域极端降雨趋势变化进行深入研究, 得到极端降雨频率、强度均呈不同程度的上升趋势; Dingbao Wang 等^[5]则研究发现阿巴契科拉河除下游外, 中上游极端降雨强度均无明显变化。Lenderink, G 等^[6]分析出极端降雨事件与气候变化有关; Jain 等^[7]研究得出 ENSO 现象引发地区极端天气事件, 极端干旱与极端降雨和 ENSO 有较好的关联性。

在中国, 学者们也对极端降雨事件做了许多研究。Zhai P M 等^[8]分析了中国极端降水特征, 发现极端降雨事件趋多、趋强。NING Liang 等^[9]针对中国南部地区极端降雨进行分析, 得出 1990 年南部地区极端降雨出现突变, 并认为突变由夏季极端降雨引起。

LIU Jing Wei 等^[10]则分析得出较强南季风是引起中国东部地区极端降水事件的主要因素。

总结以往研究发现, 过去对大范围极端降水变化的研究颇多, 而针对珠江流域的研究较少, 难以捕捉珠江流域极端强降水事件变化的区域细节。而且, 过去主要集中在对极端降雨的趋势、突变研究, 对极端降雨周期变化及气候影响因素的研究还较少。本文研究珠江流域极端降雨的时空变化规律与气候影响因素, 为流域防洪减灾与可持续发展提供科学依据。

2. 资料与方法

2.1. 研究区域

珠江流域介于 102°14'E~115°53'E, 21°31'N~26°49'N (图 1), 流域面积达 453,690 km², 其中左江的上游在越南境内, 在我国境内的流域面积 442,100 km², 地处亚热带, 气候温和。流域年平均气温在 14°C~22°C 之间, 多年平均降雨为 1200~2200 mm。径流的年内变化受降水支配, 汛期降水量集中, 降雨分布由东向西逐步减少。

2.2. 资料来源

本文所用降雨资料来自中国国家气象局, 为珠江

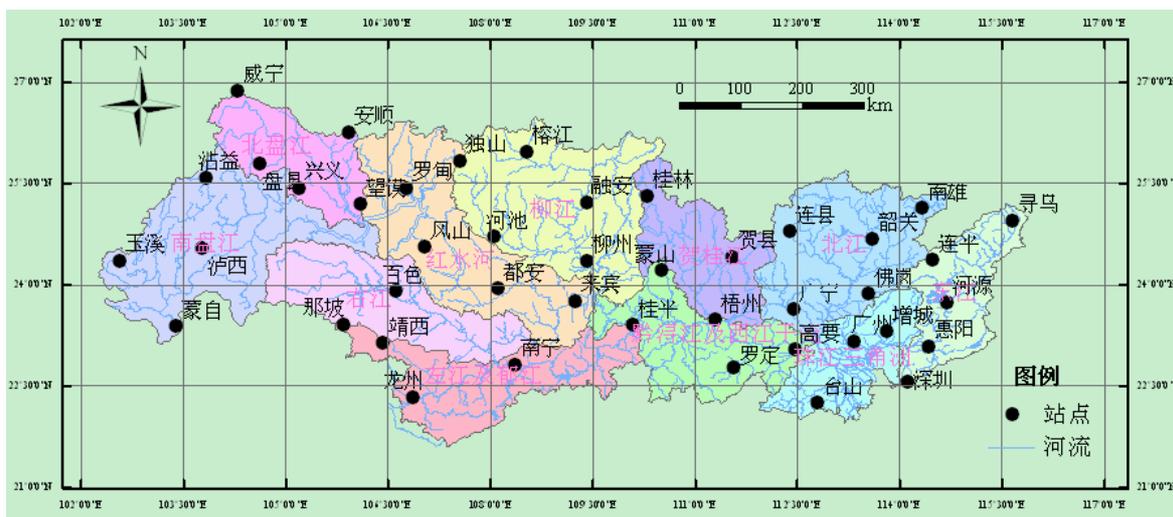


Figure1. Research area and hydrological station locations
图 1. 研究区域和雨量站分布

流域 1960~2012 年 43 个测站逐日降雨量资料。经过数据复核和筛选,剔除了 2 个缺测数据较多的测站,对剩下的 41 个测站数据进行分析。

2.3. 研究方法

2.3.1. 线性倾向与 Mann-Kendall 分析法

线性倾向趋势检验和非参数 Mann-Kendall 突变检验,已有大量文献详细阐述^[11],本文不再具体介绍。Mann-Kendall 突变检验的优点是无需样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,不仅计算方便,而且可以明确突变开始的时间,并指出突变区域。

2.3.2. R/S 分析法

R/S 分析法是一种处理时间序列的方法,其基本思想是改变本序列的时间尺度,研究其在不同尺度范围内的统计规律,从而进行大小事件尺度间的相互转换。根据不同时间尺度的 Hurst 指数,可分析研究对象时间序列的状态和规律,根据已知规律分析状态的持续性,预测未知情况。R/S 分析法具体实现过程可参考有关文献^[12]。

2.3.3. 小波分析

小波分析近年来在揭示气候变化周期性特征中应用广泛,它不但可以甄别出不同时间尺度下的周期性变化,而且还能够分析出不同时间尺度下的位相变化^[12]。

1) 小波变换

小波变换是把一称为基本小波的函数做位移后,再在不同的尺度域下对待分析信号做内积^[13]。小波变换的连续函数为:

$$\omega_f(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_R f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

其中, $\omega_f(a,b)$ 称为小波系数, $a > 0$ 为尺度因子,反映小波的周期长度; b 为时间因子,反映了在时间上的平移; $f(t)$ 为时间序列, $\bar{\psi}(t)$ 为 $\psi(t)$ 的复共轭函数。

2) 交叉小波变换

交叉小波变换是将小波变换与交叉谱分析相结合的一种新的信号分析技术,可以从多时间尺度来研究两个时间序列在时频域中的相互关系^[14]。设 $W_x(s)$ 和 $W_y(s)$ 分别是给定的两个时间序列 X 和 Y 的交叉小

波变换,定义它们的交叉小波谱为

$$W_n^{XY}(s) = W_n^X(s) W_n^{Y*}(s) \quad (2)$$

对应的交叉小波功率谱密度为 $|W_n^{XY}(s)|$, 其值越大,表明两者具有共同的高能量区,彼此相关显著。运用红色噪音标准谱对连续交叉小波功率谱进行显著性检验^[15],以显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下的红色噪音标准谱的检验。

2.4. 极端降雨阈值与指数

将研究时段内某站 1960~2012 年所有日降雨量 ≥ 0.1 mm 按升序排列,第 95 个百分位值为该站极端降雨阈值。

本文选取 5 个极端降雨指数作为研究珠江流域极端降雨的基本指标(表 1)。

为了表征极端降雨事件的整体发生状况,本文定义一个新指标,即极端降雨综合指数 (Z_{95}),它反映了整个流域极端降雨的综合态势。 Z_{95} 定义如下:

$$Z_{95} = Z_{R95p} + Z_{RD} + Z_{RI} + Z_{RX1day} + Z_{RX3day} + M \quad (3)$$

其中, Z_{R95p} 、 Z_{RD} 、 Z_{RI} 、 Z_{RX1day} 、 Z_{RX3day} 分别为 R_{95p} 、 RD 、 RI 、 RX_{1day} 、 RX_{3day} 序列对应的标准化序列, M 为常数。标准化序列为研究序列进行标准化处理后的序列,对序列进行标准化处理目的是使数据无量纲化和消除相邻数据的相关性,使不同的序列处于同一标准。本文采用 z-score 标准化法对极端降雨 5 个基本指标序列进行标准化处理,该标准化公式如下^[3]:

$$Z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式(4)中, Z_i 表示标准化后的序列要素值的时间序列; x_i 表示未经标准化的时间序列; \bar{x} 为要素序列的均值, s 为要素序列的标准差。

3. 结果与分析

3.1. 空间分布特征

利用线性倾向法对珠江流域各个测站近 53 年的 6 个极端降雨指标序列进行趋势分析并将各站极端降雨指标趋势反映到空间上。图 2a 为流域 R_{95p} 值趋势变化空间分布图(以下称趋势图),由图可知韶关 R_{95p} 值呈显著上升趋势,说明北江流域中上游极端降雨量

Table 1. Extreme precipitation indices used in the study with associated definition and units
表 1. 珠江流域极端降雨指数及相应定义与单位

序号	极端降雨指数	指数定义	单位
1	R_{95P}	极端降雨总量	mm
2	RD	极端降雨日数	d
3	RI	极端降雨平均强度	mm/d
4	RX_{1day}	最大 1d 降雨量	mm
5	RX_{3day}	最大连续 3d 降雨量	mm

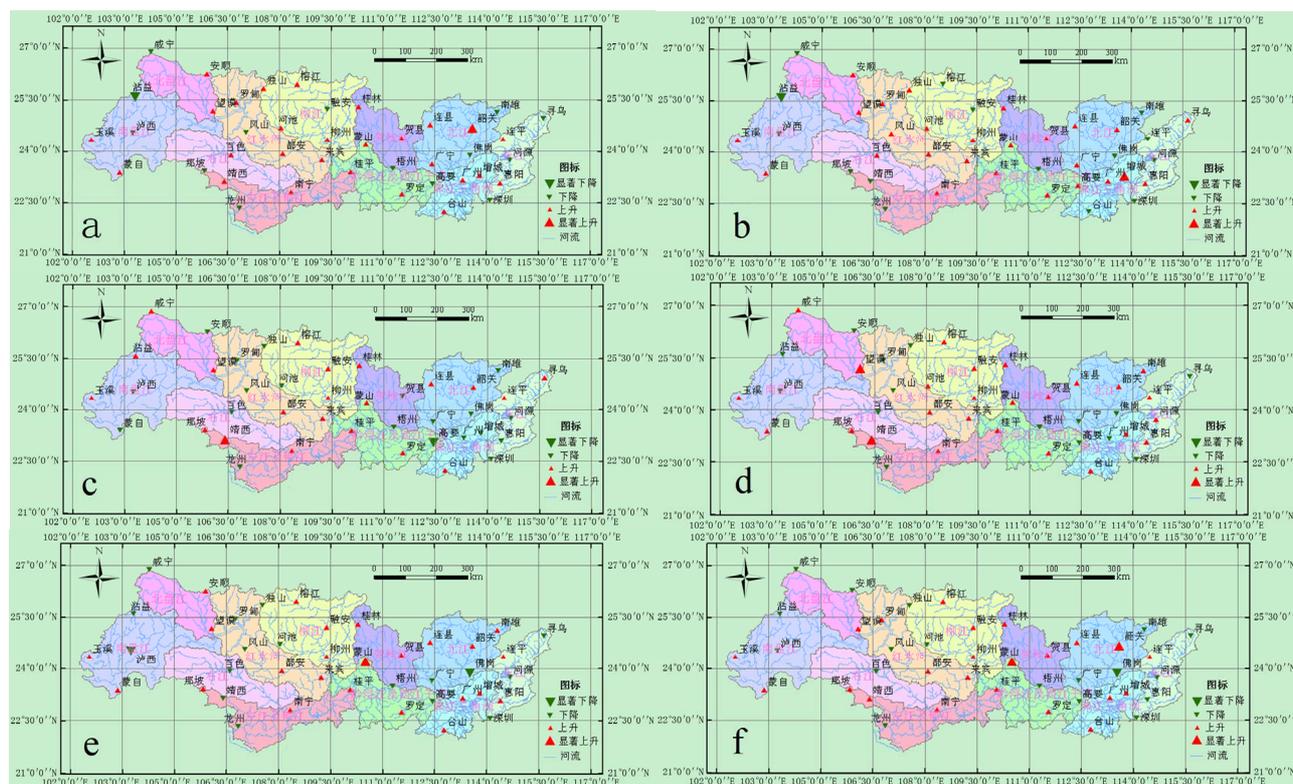


Figure 2. Spatial distribution of trends of R_{95P} (a); RD (b); RI (c); RX_{1day} (d); RX_{3day} (e) and Z_{95} (f)
图 2. 珠江流域 R_{95P} 值(a); RD 值(b); RI 值(c); RX_{1day} 值(d); RX_{3day} 值(e)与 Z_{95} 值(f)趋势变化空间分布图

明显增大。图 2b~c 中增城 RD 值、靖西 RI 值上升趋势显著则表明珠江三角洲流域中上游极端降雨频数明显增加, 左江及郁江流域上游极端降雨强度明显趋强。图 2d~e 为流域 RX_{1day} 值与 RX_{3day} 值趋势图, 这两个值代表极端降雨的集中强度和集中雨量; 图中望谟和靖西 RX_{1day} 值、蒙山 RX_{3day} 值有显著上升的趋势, 意味着北盘江流域、左江及郁江上游流域、黔淘江及西江上游流域容易出现集中强降雨情况, 是洪水易发区。图 2f 显示代表极端降雨整体发生情况的综合指数 Z_{95} 值趋势图, 该值越大表示全年极端降雨强度越大, 时间越长, 雨量越大, 集中度越高, 可由之辨别易发生洪涝灾害及降雨引发的滑坡等地质灾害的地区; 图

中蒙山和韶关 Z_{95} 值有显著上升趋势, 表明北江流域中上游、黔淘江及西江上游流域是洪涝灾害和滑坡等地质灾害的易发区。

图 2a~f 还共同反映出珠江流域大部分地区极端降雨指标均呈不显著的上升趋势, 仅局部地区出现下降甚至显著下降的情况, 这表明整个流域极端降雨总体上呈不显著上升趋势, 流域防洪压力增大。

3.2. 时间演变特征

3.2.1. 趋势与突变分析

将流域各测站 R_{95P} 、RD、RI、 RX_{1day} 、 RX_{3day} 与 Z_{95} 值分别取平均得到整个流域平均 R_{95P} 、RD、RI、

RX_{1day} 、 RX_{3day} 与 Z_{95} 值, 运用线性倾向与 M-K 方法分析其趋势与突变特征。结果显示 6 个序列呈增长趋势, 但不显著(相关系数 R 没有通过 0.05 信度检验), 对应的增长率分别为 5.47 mm/10a, 0.05d/10a, 0.069 $mm \cdot d^{-1}/10a$, 1.05 mm/10a, 0.69 mm/10a 和 0.272/10a; 6 个序列的 UF 和 UB 曲线虽在置信区内有交点, 但没有超过临界值线 ± 1.96 , 即没有通过 0.05 信度检验, 故 6 个序列突变不显著。因而珠江流域 R_{95P} 、RD、RI、 RX_{1day} 、 RX_{3day} 与 Z_{95} 均呈增长趋势, 但不存在突变点。

3.2.2. 周期分析

利用小波变换对珠江流域近 53 年 R_{95P} 、RD、RI、 RX_{1day} 、 RX_{3day} 与 Z_{95} 序列的周期进行分析, 得到如下结论: 1) R_{95P} 序列存在 2.3a、3.9a、7a、13.3a 和 23.7a 的变化周期, 且以 2.3a 和 3.9a 为主周期(通过 95% 红噪声检验, 下文同); 在 1963~1985 年、1994~1998 年、2003~2008 年有 2~2.4a 的显著周期(通过 95% 红噪声检验, 下文同), 1990~2005 年和 1988~1995 年则表现为 3.6~4.6a 和 4.8~7.1a 的显著周期, 另外在 1978~2000 年有 11.4~16.4a 的周期, 但不显著。2) RD 序列存在 2.3a、3.9a、6.9a、13.2a 和 22.1a 的变化周期, 并以 2.3a 和 3.9a 为主周期; 在 1968~1975 年、1977~1990 年、2004~2009 年存在 2~2.8a 的显著周期, 1988~2008 年则为 3.1~5.5a 的显著周期, 且在 1978~1996 年有 11~16.6a 的周期, 但不显著。3) RI 序列存在 2.3a 和 5.3a 的主周期, 并在 1960~1982 年和 1985~2012 年以 2~4.4a、2.1~6.7a 为显著周期。4) RX_{1day} 序列存在 2.2a、6.9a 和 13.3a 的变化周期, 且以 2.2a 为主周期; 并且在 1960~1997 年、2000~2012 年和 1989~1999 年序列表现为 2.1~3.2a、2~4.5a、5~6.8a 的显著周期。5) RX_{3day} 序列存在 2.2a、6.5a 和 13.6a 的变化周期, 其中 2.2a 和 6.5a 为序列主周期; 在 1960~1986 年、1992~1996 年和 2001~2012 年以 2~4a 为显著周期, 在 1985~2005 年则表现为 3.9~7.2a 的显著周期。6) Z_{95} 序列存在 2.3a、6.9a 和 13.5a 的周期, 且以 2.3a 为主周期; 在 1960~1987 年、1992~1997 年和 2001~2009 年表现为 2.1~4.1a 的显著周期, 在 1987~2000 年以 4.9~7.1a 为显著周期。

综合来看, 6 个序列的小波功率谱 COI 区域内能量密度的峰值主要集中在 2.2~6.5a 的短周期内, 这

表明珠江流域极端降雨以短周期演变为主, 长周期变化不明显; 上述分析还表明, 流域极端降雨序列存在多尺度周期振荡特征。

3.2.3. R/S 分析

运用 R/S 法分析珠江流域 R_{95P} 、RD、RI、 RX_{1day} 、 RX_{3day} 与 Z_{95} 序列的长期记忆性。6 个序列的 Hurst 指数分别为 0.6437 (R_{95P})、0.6269 (RD)、0.7949 (RI)、0.5668 (RX_{1day})、0.6348 (RX_{3day})、0.6274 (Z_{95})。显然 6 个序列的 Hurst 值均超过 0.5, 说明序列均是持续性时间序列, 具有长期记忆性特征, 即珠江流域 R_{95P} 、RD、RI、 RX_{1day} 、 RX_{3day} 与 Z_{95} 未来的变化也将持续过去不显著的增加趋势, 其中 RI 序列 Hurst 值远大于 0.5, 持续性显著。

珠江流域极端降雨指标趋势、突变、周期及长期记忆性分析结果见表 2。

3.3. 气候影响因素探讨

流域的极端降雨成因非常复杂, 其中气候因素的影响居于首位^[15]。太阳活动能够导致太阳辐射增强和等离子体运动, 直接或者间接地引起全球大气环流及气候的异常变化; 太阳黑子作为一种缓变型太阳活动, 是反映太阳辐射变化的重要指标, 对地球气候、水文的变化会有一些的调制作用^[16]。ENSO 事件是国际上公认的海气耦合系统中最强的年际变化信号, 许多地方的降水、气温等气候要素的异常与 ENSO 有着密切的联系, 尤其是对降水的影响更为显著。已有研究表明, ENSO 事件对东亚夏季风的强弱变化和我国夏季降水的分布有着重要影响。鉴于此, 本文拟对太阳黑子、ENSO 与珠江流域 R_{95P} 的关联性进行分析, 并为珠江流域极端降雨事件的气候影响因素提供科学依据。

3.3.1. 太阳黑子与珠江流域 R_{95P} 关联性分析

图 3a~c 为太阳黑子与珠江流域 R_{95P} 的小波功率谱、小波交叉谱和小波相干谱。由图 3a 可知, 1981~1995 年太阳黑子与 R_{95P} 序列均存在 12.4~13.4a 的主振荡周期, 并且通过 95% 的红噪声检验, 而且该频段两者周期显著带形状有一定的相似性, 说明太阳黑子与珠江流域 R_{95P} 存在时频域相关。

图 3b 小波交叉谱中, COI 区域内 1974~1998 年太阳黑子与 R_{95P} 序列存在 6.9~13.9a 的显著共振周期,

Table 2. Results of trends, mutations, periods and persistent characteristics of R_{95P} , RD, RI, RX_{1day} , RX_{3day} and Z_{95} in the Pearl River basin
表 2. 珠江流域 R_{95P} 、RD、RI、 RX_{1day} 、 RX_{3day} 与 Z_{95} 序列趋势、突变、周期及长期记忆性分析结果

序列名称	R_{95P}	RD	RI	RX_{1day}	RX_{3day}	Z_{95}
趋势	↑	↑	↑	↑	↑	↑
增长率	5.47 mm/10a	0.05d/10a	0.069 mm·d ⁻¹ /10a	1.05 mm/10a	0.69 mm/10a	0.272/10a
突变点	—	—	—	—	—	—
主变化周期	2.3a, 3.9a	2.3a, 3.10a	2.3a, 5.3a	2.2a	2.2a, 6.5a	2.3a
长期记忆性	√	√	√√	√	√	√

注: “↑”表示不显著上升, “↑↑”表示显著上升; “√”表示有持续性, “√√”表示持续性显著。

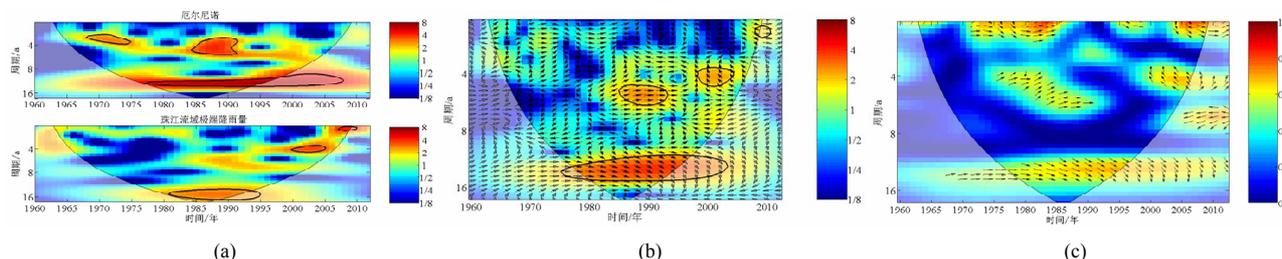


Figure 3. Continuous wavelet transform (a), Cross wavelet transform (b) and squared wavelet coherence (c) between R_{95P} and sunspot
图 3. 珠江流域 R_{95P} 与太阳黑子交叉小波分析的小波功率谱(a)、小波交叉谱(b)和小波相干谱(c)

并且在该频段上两者表现出反相位的显著共振关系, 且振荡的凝聚性最强, 其他频段上太阳黑子与 R_{95P} 序列的共振能量较低。图 3c 显示了太阳黑子与 R_{95P} 序列在中低频段上表现出很强的相干性, 主要集中在 1963~1972 年和 1980~1998 年。相干谱高能量区集中在 1963~1972 年的 2.1~3.9a 振荡周期内, 在该频段上相干性通过 95% 的红噪声检验。除此之外, 相干谱能量较高的区域还集中在 1980~1987 年的 2.1~2.5a 和 1983~1992 年的 3.3~5.2a 振荡周期内及 1984~1998 年的 8.8~11a 周期内, 但没有通过 95% 的红噪声检验。由此可知, 珠江流域 R_{95P} 对太阳黑子响应较大, 太阳黑子是影响珠江流域 R_{95P} 的主要因素之一。

3.3.2. 厄尔尼诺与珠江流域 R_{95P} 关联性分析

图 4a~c 为厄尔尼诺(ENSO)与珠江流域 R_{95P} 的小波功率谱、小波交叉谱和小波相干谱。由图 4a 可知, 1981~1995 年 ENSO 与 R_{95P} 序列存在 13.1~13.9a 的主振荡周期, 并且通过 95% 的红噪声检验, 而且该频段两者周期显著带形状有一定的相似性, 说明 ENSO 与珠江流域 R_{95P} 存在时频域相关。

图 4b 中, COI 区域内 1983~2010 年和 1977~1997 年 ENSO 与 R_{95P} 序列存在 2.1~6.2a 和 10.4~14.7a 的共振周期, 且 1985~1993 年、1998~2005 年、2008~2010 年和 1977~1997 年两者存在 4.6~5.8a、3.7~4.6a、2.2~

2.6a 和 10.5~14.7a 的显著共振周期, ENSO 与 R_{95P} 序列在这四个频段上表现出同相位的显著共振关系, 且振荡的凝聚性最强, 其他频段上 ENSO 与 R_{95P} 序列的共振能量较低。图 4c 相干谱能量较高的区域集中在 1972~1985 年、2004~2009 年的 2~2.5a 振荡周期内和 1977~1989 年、2001~2006 年的 3.7~5.8a 周期内以及 1977~1996 年 11~13.9a 周期内, 未通过 95% 的红噪声检验。由此可知, ENSO 与珠江流域 R_{95P} 有较好的关联性, ENSO 是影响珠江流域 R_{95P} 的主要因素之一。

4. 结论

1) 珠江流域大部分地区 R_{95P} 、RD、RI、 RX_{1day} 、 RX_{3day} 与 Z_{95} 值呈不显著的上升趋势, 说明整个流域极端降雨总体上呈不显著上升趋势, 流域防洪压力增大。其中, 北江中上游、北盘江、左江及郁江上游、黔洵江及西江上游是洪涝灾害易发区。

2) 线性倾向和 M-K 法研究表明, 珠江流域近 53 年极端降雨呈不显著的增加趋势, 但没有出现显著突变。

3) 小波变换分析周期结果显示, 珠江流域极端降雨以 2.2~6.5a 为主振荡周期, 另外在 6.9a~23.7a 还表现出非显著振荡周期, 说明江流域极端降雨以短周期演变为主, 长周期变化不明显, 极端降雨指标序列存在多尺度周期振荡特征。

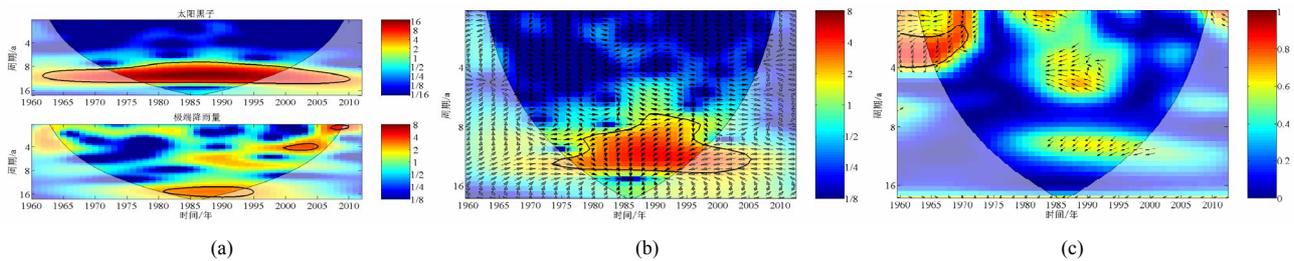


Figure 4. Continuous wavelet transform (a), Cross wavelet transform (b) and squared wavelet coherence (c) between R_{95P} and ENSO
图4. 珠江流域 R_{95P} 与 ENSO 交叉小波分析的小波功率谱(a)、小波交叉谱(b)和小波相干谱(c)

4) R/S 法分析表明, 珠江流域极端降雨具有长期记忆性特征, 即未来极端降雨仍呈不显著增加趋势。

5) 交叉小波变换分析结果显示, 太阳黑子和 ENSO 与珠江流域极端降雨有较好的关联性, 即太阳黑子和 ENSO 为珠江流域极端降雨的两个主要气候影响因素。

5. 致谢

感谢国家自然科学基金项目的支持, 感谢第十一届中国水论坛推荐!

参考文献 (References)

- [1] 张增信, 栾以玲, 姜彤等. 长江三角洲极端降水趋势及未来情景预估[J]. 南京林业大学学报, 2008, 32(3): 5-8.
ZHANG Zengxin, LUAN Yiling, JIANG Tong, et al. Changes of extreme precipitation in the Yangtze River delta and its pre-evaluation for future. Journal of Nanjing Forestry University, 2008, 32(3): 5-8. (in Chinese)
- [2] IPCC. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change: Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007.
- [3] 彭俊台, 张强, 陈晓宏, 陈永勤. 珠江流域极端降雨时空演变特征分析[J]. 灾害学, 2011, 26(4): 24-28. (in Chinese)
PENG Juntao, ZHANG Qiang, CHEN Xiaohong and CHEN Yongqin. Spatial and temporal evolution characteristics of extreme rainfalls in the Pearl River basin. Journal of Catastrophology, 2011, 26(4): 24-28. (in Chinese)
- [4] KARL, T.R., KNIGHT, R.W., et al. Secular trends of precipitation amount frequency and intensity in the USA. Journal of Hydrology, 2010, 25(3): 507-516.
- [5] WANG, D.B., HAGEN, S.C. and ALIZAD, K. Climate change impact and uncertainty analysis of extreme rainfall events in the Apalachicola River basin, Florida. Journal of Hydrology, 2013, 480(6): 125-135.
- [6] AGUILAR E., et al. Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(D23): D2310.
- [7] JAIN, S., LALL, U. Magnitude and timing of annual maximum floods: Trends and large-scale climatic associations for the Blacksmith Fork River, Utah. Water Resources Research, 2000, 36(12): 3641-3651.
- [8] ZHAI, P.M., ZHANG, X.B., et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. J. Climate, 2005, (18): 1096-1108.
- [9] NING, L., QIAN, Y.F. Interdecadal change in extreme precipitation over south china and its mechanism. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26(1): 109-118.
- [10] LIU, J.-W., et al. The extreme summer precipitation over east China during 1982-2007 simulated by the LASG/IAP regional climate model. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2012, 5(1): 62-67.
- [11] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 43-69.
WEI Fengying. Statistical diagnosis and forecasting technique of climate at present. Beijing: China Meteorological Press, 1999: 43-69. (in Chinese)
- [12] 王亚敏, 张勃等. 地磁 Ap 指数与太阳黑子数的交叉小波分析及 R/S 分析[J]. 地理科学, 2011, 31(6): 747-751.
WANG Yamin, ZHANG Bo, et al. Cross wavelet analysis and R/S analysis of relationship between geomagnetic Ap index and sunspot number. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(6): 747-751. (in Chinese)
- [13] 郝志新, 郑景云, 葛全胜. 黄河中下游地区降水变化的周期分析[J]. 地理学报, 2007, 62(5): 538-544.
HAO Zhixin, ZHENG Jingyun, GE Quansheng. Precipitation cycles in the middle and lower Yellow River. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(5): 538-544. (in Chinese)
- [14] TORRENCE, C., COMPO, G.P. A practical guide to wavelet analysis. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61-78.
- [15] LING, Y. Hydroelectric engineering books of Changjiang water resources commission. Beijing, 2005.
- [16] 王家龙, 孙静兰. 太阳活动及其对地球环境的影响[J]. 第四纪研究, 2002, 22(6): 511-521.
Wang Jialong, Sun Jinglan. Solar activities and their effects on terrestrial environments. Quaternary Sciences, 2002, 22(6): 511-521. (in Chinese)