

# 近50年珠江流域降雨多尺度时空变化特征及其影响

唐亦汉<sup>1,2</sup>, 陈晓宏<sup>1,2</sup>

(1. 中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275; 2. 华南地区水循环与水安全  
广东普通高校重点实验室, 广东 广州 510275)

**摘要:** 利用珠江流域38个站点54 a日降水资料, 采用Kendall非参数检验法、线性回归及空间克里格插值, 对多种降雨指数时空变化及影响进行了研究。结果表明: ① 珠江流域西部年降雨有减少趋势, 流域大部分的降雨日数则有增加趋势; ② 流域降雨具有季度、月份集中性, 其中, 季度集中性趋于空间均匀化, 月份集中性趋向空间极端化; ③ 极端降雨阈值东高西低, 全区极端降雨在20世纪60、80年代末有突变现象,  $P_{0.01\%}$ 设计值在21世纪达到最高。综合多尺度降雨时空变化结果进行分析, 将珠江流域划分为广东(包括江西)、广西中北部(包括湖南)、广西西南及云贵4个降雨特征区, 广东尤其是珠三角地区及广西中北部地区应注重防洪安全, 广西西南与云贵地区应注重保障用水安全。

**关键词:** 珠江流域; 多尺度; 降雨时空变化; 降雨指数

**中图分类号:** TV122<sup>2</sup>      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0690(2015)04-0476-07

受全球气候变化影响, 各地降雨在时空上重新分配<sup>[1]</sup>。珠江流域为中国三大流域之一, 降雨受热带气旋、西太平洋副热带高压等天气系统综合影响, 时空变化特征尤为复杂<sup>[2]</sup>。流域内人口与经济体密集, 降雨变动严重威胁地区供水与防洪安全<sup>[3-5]</sup>。认识珠江流域降雨时空变化规律对地区水资源合理配置、制定有效的防洪排涝策略具有重要意义。

目前, 对珠江流域降雨变化的研究成果虽多, 但多尺度、综合时空两方面的降雨变化研究几乎没有。王兆礼等<sup>[6]</sup>采用Kriging法仅针对月降雨序列进行了空间插值分析; Tao Yang等<sup>[7]</sup>采用区域频率、Copula仅对流域极端降雨进行了频率分析; 陆文秀等<sup>[8]</sup>虽然利用小波分析对不同时间尺度的降雨序列进行了周期变化分析, 但未能揭示其空间分布规律。刘艳群等<sup>[9]</sup>利用滑动平均和小波分析法研究了流域降雨主分量的演变特征, 但只侧重了时间变化; 张强等<sup>[10,11]</sup>利用Mann-Kendall等非参数检验法, 也仅仅分析了多种降雨指标序列随时

间的突变及趋势变化; 邓汗青等<sup>[12]</sup>只对典型年份降雨进行了时空变化分析, 缺少多年时间序列的变化研究。因此, 随着降雨变化影响、地区对水资源合理配置与防洪安全日益重视, 十分有必要进行多尺度、综合时空特征、系统全面的降雨变化分析。本文从年降雨、月季降雨及极端降雨三重时间尺度入手, 对珠江流域降雨随时、空变化的特征进行分析。本文利用流域内38个站点54 a(1959~2012年)日降雨数据进行多年降雨均量及降雨日率时空变化分析; 采用弗尔涅指数(FI)、降雨集中指数(PCI)表征降雨集中度, 对降雨的季度性进行时空变化分析; 通过对多种极端降雨指数序列的分析揭示极端降雨的时空变化分析。该研究成果将为研究区降雨变化特征分析提供新发现, 为制定适应气候变化的水资源管理及防洪政策提供理论依据。

## 1 流域概况

珠江流域地处中国南部沿海, 位于102°14'E~115°53'E, 21°31'N~26°49'N之间(图1)。流域面积

**收稿日期:** 2014-05-08; **修订日期:** 2014-08-18

**基金项目:** 国家自然科学基金国际合作重大和重点项目(51210013, 50839005), 国家科技支撑计划(2012BAC21B0103), 水利部公益项目(201201094, 201301002-02, 201301071-02), 广东省科技厅项目(2010B050300010), 广东省水利科技创新项目(2011-11), 中英瑞气候变化适应项目广东气候变化风险评估及适应对策研究(ACCC/20100705-1)资助。

**作者简介:** 唐亦汉(1991-), 女, 江苏无锡人, 博士研究生, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: aegean.sea.91@gmail.com

**通讯作者:** 陈晓宏, 教授。E-mail: eescxh@mail.sysu.edu.cn

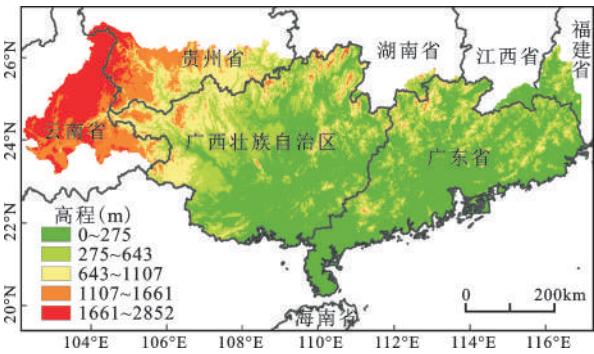


图1 珠江流域地理位置  
Fig.1 Location of Zhujiang River Basin

约 $4.52\times10^5\text{km}^2$ ,地形以山地和丘陵为主,约占总面积的94.5%<sup>[11]</sup>。珠江发源于云南省马雄山东麓,流经云南、贵州、广西、广东、湖南、江西6省,经由两广丘陵地带,其子流域(西江、东江及北江流域)

经由珠江三角洲网河区,江流至八大口门进入南海<sup>[2,11]</sup>。

珠江流域常年温和多雨,流域大部分地区属亚热带湿润气候。其中,北部为中亚热带湿润气候,西部滇南河谷为北热带湿润气候。流域降雨受东南季风和西南季风影响,年内分布不均;夏季降雨受热带气旋、西太平洋副热带高压等天气系统综合影响,时空变化特征复杂<sup>[5]</sup>。

2 资料与方法

研究采用全国气象数据共享网提供的珠江流域38个雨量站点1959~2012年24 h(20时~20时)降雨数据。其中,缺失数据由周边站点降水序列插补得到,极少数微量降水及雾露霜雪形式的降水以0值代替。研究区雨量站点分布如图2,对应编号见表1。

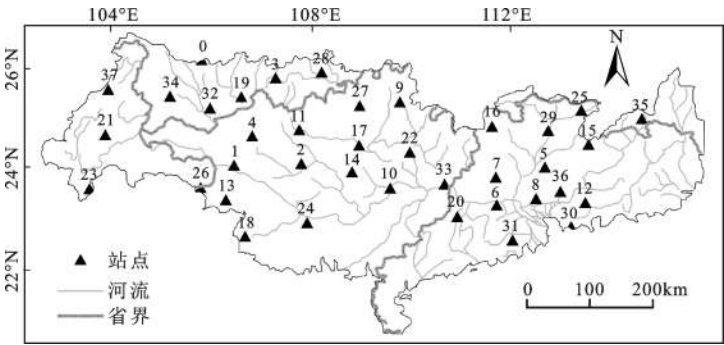


图2 珠江流域雨量站位置  
Fig.2 Locations of gauging stations in Zhujiang River Basin

表1 研究区雨量站

Table 1 Gauging stations in study area

台站编号	台站名称	序列长度(年)	台站编号	台站名称	序列长度(年)	台站编号	台站名称	序列长度(年)
0	安顺	1951~2012	13	靖西	1957~2012	26	那坡	1958~2012
1	百色	1951~2012	14	来宾	1957~2012	27	融安	1957~2012
2	都安	1953~2012	15	连平	1952~2012	28	榕江	1953~2012
3	独山	1951~2012	16	连县	1952~2012	29	韶关	1951~2012
4	凤山	1958~2012	17	柳州	1951~2012	30	深圳	1952~2012
5	佛岗	1957~2012	18	龙州	1953~2012	31	台山	1953~2012
6	高要	1953~2012	19	罗甸	1951~2012	32	望谟	1959~2012
7	广宁	1956~2012	20	罗定	1957~2012	33	梧州	1951~2012
8	广州	1951~2012	21	泸西	1958~2012	34	兴义	1951~2012
9	桂林	1951~2012	22	蒙山	1954~2012	35	寻乌	1955~2012
10	桂平	1953~2012	23	蒙自	1951~2012	36	增城	1958~2012
11	河池	1955~2012	24	南宁	1951~2012	37	沾益	1951~2012
12	惠阳	1952~2012	25	南雄	1954~2012			

针对降雨时间变化,本文采用 Kendall 非参数检验法分析年际降雨指数;采用线性回归拟合得到降雨集中性指数的变化趋势,以斜率量化表征指数变化情况;采用多种极端降雨指数反映极端降雨情况,采用 POT 时变系数反映极端降雨时变趋势,变差系数  $C_v$  体现站点极端降雨变化波动性。各类降雨指数如表 2 所示。文章另采用空间克里格插值法对降雨空间变化规律进行分析。

3 珠江流域降雨时空变化分析

3.1 年际降雨变化

珠江流域年降雨均值集中在 1 000~2 000 mm 之间(图 3)。从年均降雨量的空间分布规律来看,降雨量分布东多西少。其中,流域东南部(广东东部沿海)为平原,地处山脉丘陵迎风面,同时受东南暖湿气流、副热带高压、热带气旋及台风等<sup>[8]</sup>天气系统影响,雨量充沛;流域西南部(广西西南与云南东南)地处内陆山区,冷空气入侵减弱,副热带高压影响减小,降雨相对较少;流域北部(贵州南部与广西北部)为南岭山脉与九万大山、海洋山间的谷地,北方冷空气与华南静止锋在南岭一带成云致雨,区内降雨充足。从年均降雨量的时间变化趋势来看,流域降雨仅在 7 个站点上存在显著

趋势变化。其中,除位于珠三角地区的广州站显示上升外,其余皆呈下降趋势。年际降雨下降区域集中在流域西部,即云南东部、贵州南部和广西西南部一片。

珠江流域降雨日率总体集中在 50%~60%。流域北部(广西北部与贵州南部)降雨日率最低,向西南(云南东部)、东南(广东东南部)两向逐渐增加。其中,有 65% 的站点降雨日率存在显著上升趋势( $\alpha=0.05$ ),而显著性达 $\alpha=0.025$ 的站点有 8 个,皆集中在流域西南部,即广西西部及云贵东南。

综合年降雨量与降雨日率的变化情况来看,流域整体年均降雨量变化不明显而降雨日数显著增加,对应单日降雨强度减少。气候变化下的海温异常可能为其诱因:珠江流域降雨主要受西南、东南季风博弈影响与热带气旋、副高作用。从 20 世纪 50 年代起,地球系统 80% 以上的热容量入海,引起海洋热膨胀局部海温异常<sup>[12]</sup>。印度洋与赤道西太平洋的海温异常使得华南、长江中下游和东北地区降雨强度减小<sup>[13]</sup>。

3.2 年内降雨集中性

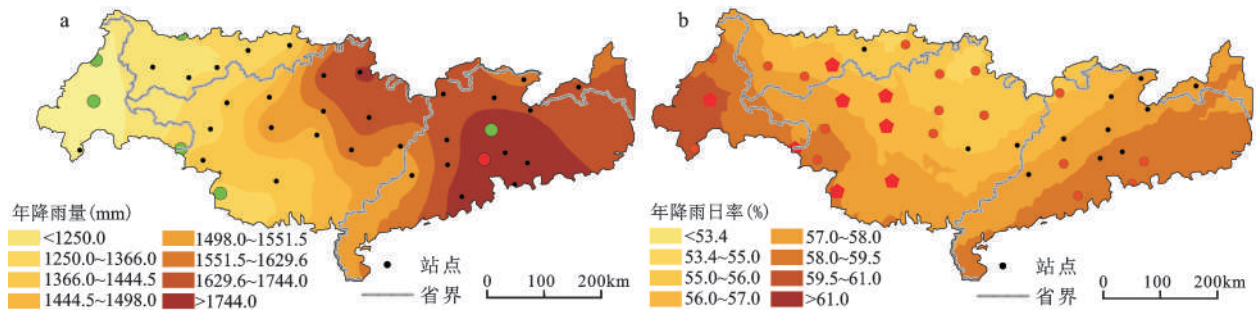
珠江流域  $PCI$  多年均值集中在 15% 左右(图 4a),季度集中性不高。其中,珠三角地区及云贵东南片区的  $PCI$  多年均值高于 15%,存在降雨季度

表2 降雨指数  
Table 2 Precipitation indexes

类型	指数	单位	定义
年际降雨	年均降雨量	mm	年平均降雨量
	年降雨日率	%	年降雨日数占全年日数的百分比
降雨集中性	$FI_6$	无	$FI = \frac{p^2}{P_a}$ 其中, $p$ 为全年最大降雨月的月降雨量(mm); $P_a$ 为当年降雨总量(mm) <sup>[14]</sup> <50%: 月份集中度低; 50%~100%: 月份集中度较高; >200%: 月份集中度高
	$PCI$	无	$PCI = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{\left(\sum_{i=1}^{12} p_i\right)^2}$ 其中, $p_i$ 为 $i$ 月降雨总量(mm) <sup>[15]</sup> <15%: 轻微季度集中性; 15%~20%: 季度集中性; 20%~50%: 高度季度集中性; >50%: 非常高
	$R_{95}$	mm	24 h 降雨量超过 95% 百分位数的降雨量 <sup>[16]</sup>
	$R_{99}$	mm	24 h 降雨量超过 99% 百分位数的降雨量
极端降雨	$C_e$	mm	$C_e = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2}{n}}$ , 其中, $K_i = \frac{x_i}{\bar{x}}$ , 其大小与样本离散程度成正相关
	$P_{0.01\%}$ 设计值	mm	极值序列频率计算后所得超过概率为 0.01% 的设计降雨量
	POT 时变系数	无	采用时变超限方法 <sup>[17]</sup> 选取极值样本时, 取样阈值随时间线性变化的斜率。时变系数为正, 即选取特定百分位样本基准提高, 等值样本发生频次减少; 反之则增加。

注: 由于月均降雨量最大值出现在 6 月<sup>[11]</sup>, 故本研究选取 6 月作为最大降雨月。





a为年均降雨量,绿色代表显著下降,红色代表显著上升( $\alpha=0.05$ );b为年降雨日率,橙色代表( $\alpha=0.05$ )显著上升,红色代表( $\alpha=0.025$ )显著上升。

图3 珠江流域全年降雨空间变化趋势

Fig.3 Spatial changing pattern of annual precipitation in Zhujiang River Basin

性;流域北部(广西北部及广东西北部) $PCI$ 值在10%~15%之间,存在轻微降雨季度性。从 $PCI$ 年际变化趋势来看(图4b),以广东广西省界为限,界限以东减小,以西则增加。其中,流域北部(广西北部与贵州南部)的降雨季度性增加趋势为全流域较强。综上所述,珠江流域 $PCI$ 低区降雨季度性增强;除流域西北部地区(云南东部与贵州西南片)外, $PCI$ 高区降雨季度性降低;除流域西北片降雨季度性增加外,全区降雨季度集中程度正趋于均匀化。

珠江流域6月降雨集中度强区渐强,除云贵交界处有低值增加趋势外,弱区更弱。珠江流域 $FI_6$ 的多年均值集中在40%~75%之间,流域降雨在最

大降雨月的集中性较强。其中,中北部(广西北部)及东南部(广东东南部)呈现高值,西南向逐渐减小(图4c)。  $FI_6$ 的变化特征与 $PCI$ 基本一致。如图4d中所示,流域北部与东南片区,即广西北部、湖南南部、贵州东南部与珠三角地区,6月降雨集中性呈现较高增加趋势;流域东南与西南区则呈现下降趋势。总体而言,珠江流域的降雨季度集中性与最大降雨月集中性具有相反的变化情势:流域季度降雨趋于流域均匀化,但最大降雨月的降雨集中度则趋向区域极端化。

### 3.3 极端降雨

由于 $R_{95}$ 与 $R_{99}$ 的时空变化情况基本一致,故选

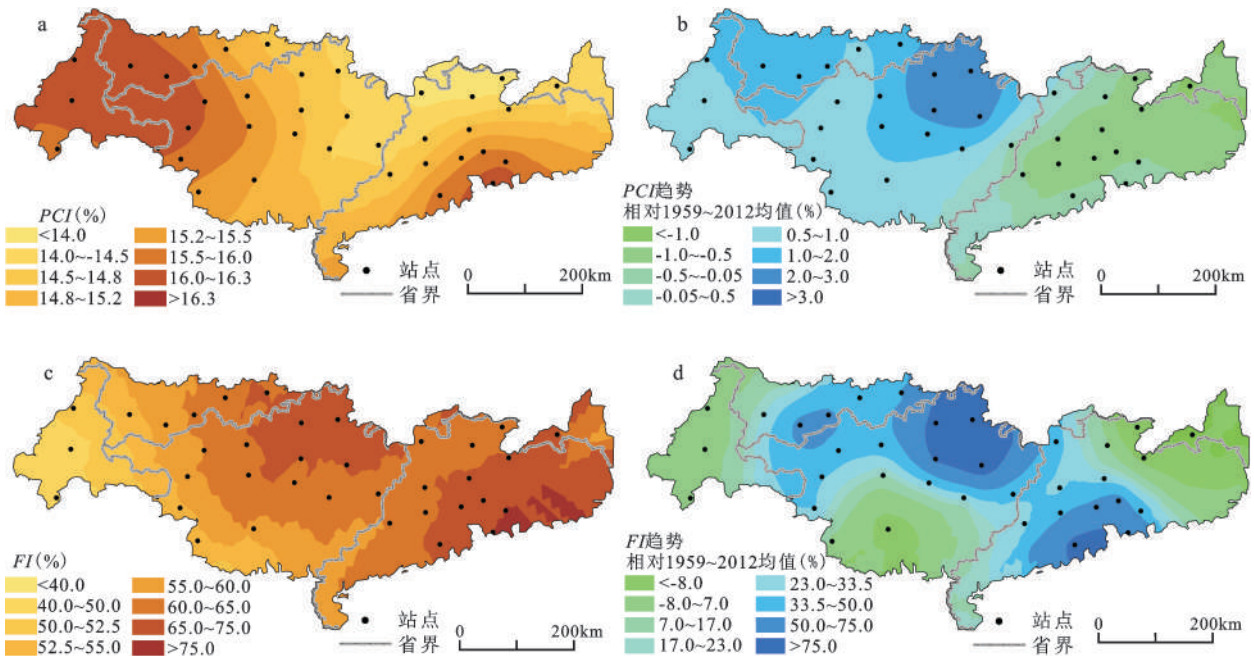
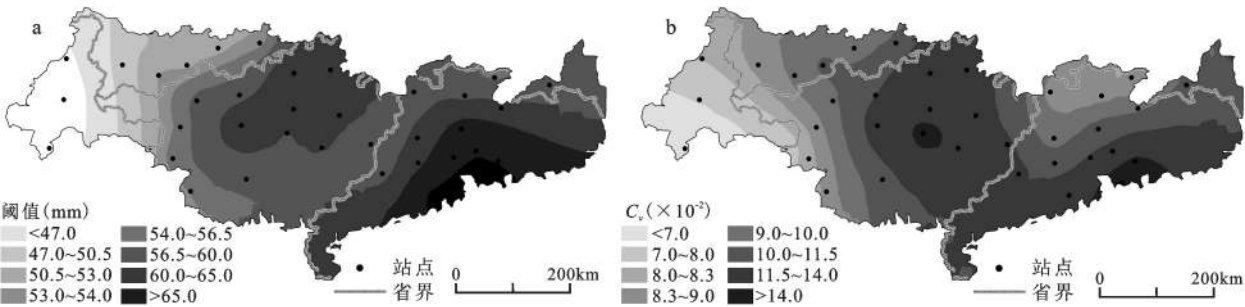


图4 珠江流域 $PCI$ 、 $FI_6$ 空间分布及变化趋势

Fig. 4 Spatial pattern and variation trend of  $PCI$ ,  $FI_6$  in Zhujiang River Basin



注：a为 $R_{99}$ 极端降雨阈值空间分布；b为 $R_{99}$ 极端降雨阈值样本离散度空间分布。

图5 珠江流域极端降雨空间分布情况

Fig.5 Spatial pattern of extreme rainfall in Zhujiang River Basin (a)Spatial pattern of  $R_{99}$  in Zhujiang River Basin; (b) Spatial pattern of  $C_v$  for  $R_{99}$

取 $R_{99}$ 结果作为代表。珠江流域 $R_{99}$ 高值出现在珠三角及广西北部,与极端 $C_v$ 高值区域一致(图5)。珠三角地区的极端降雨受到热带气旋及夏季西太平洋副热带高压夏季风影响,年际差异大、离散度较高;而广西地区极端降雨主要受华南偏南风水汽影响,华南偏南风则受孟加拉湾和南海的水汽影响,两处水汽来源变动幅度较大<sup>[2]</sup>。

1) 年际变化:取99%百分位得到各站 $POT$ 时变系数(图6),不难看出广西中北部地区 $POT$ 时变系数为正,极端降雨发生频次减少;广西西南部极端降雨发生频次变化不大;珠三角地区及云贵地区的 $POT$ 时变系数为负,极端降雨发生频次有随时间增加的趋势。

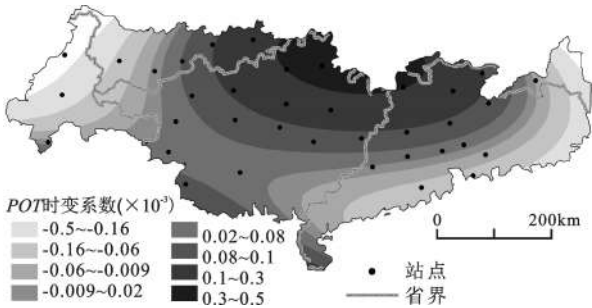


图6 珠江流域极端降雨 $POT$ 时变系数空间分布情况

Fig.6 Spatial pattern of  $POT$  slope extreme rainfall in Zhujiang River Basin

2) 年代际变化:将由泰森多边形法所得流域 $R_{95}$ 序列根据时间均分为6个年代段并进行频率分析得到 $P_{0.01\%}$ 设计降雨量。 $R_{95}$ 与 $P_{0.01\%}$ 设计降雨量随年代变化规律如表3所示:极端降雨阈值在20世纪60年代至20世纪末变化不明显,21世纪初则明显下降;从0.01%超过概率的降雨量来看,60、70年

表3 珠江流域 $R_{95}$ 极端降雨样本频率分析结果(mm)

Table 3 Frequency analysis result of  $R_{95}$  extreme rainfall in Zhujiang River Basin (mm)

编号	年代段	$R_{95}$	$P_{0.01\%}$ 设计降雨量
1	1959~1968	17.54	67.92
2	1969~1978	17.38	59.33
3	1979~1988	17.01	54.71
4	1989~1998	17.86	70.56
5	1999~2008	17.50	75.60
6	2003~2012	16.62	75.81

代最小,90年代至21世纪初则持续增加,21世纪初达到最高。从连续时段来看,60年代至70年代间、80年代至90年代间的极端降雨有较大的增加趋势,这与Fischer等<sup>[18]</sup>对最大5日降雨量序列进行突变检验的结果相似(1969年和1987年存在突变)。

3.4 降雨特征区

综合全年、季度及极端降雨情况,可将珠江流域大致划分为4个片区(见表4):a.广东地区(包括江西南部):全年降雨丰沛、季度性明显且极端降雨阈值高、波动大且有频次增加的趋势;b.广西中北部地区(包括湖南南部):全年降雨量、年内降雨集中性及极端降雨变化程度仅此于广东;c.广西西南地区:年降雨量少,季度性相对集中而极端降雨阈值低、变化小;d.云贵地区:年降雨量相对较少,极端降雨发生频次虽存在增加趋势,但整体阈值低、变幅小。

广东地区(包括江西南部)地处流域下游,经济发展迅速。地表水资源量同时受上游来水、当地降雨及下游潮汐的影响。在汲取上游来水的基础上,本区内年降雨充沛,利于保证当地水资源总

表4 珠江流域降雨空间分布特征

Table 4 Spatial pattern of precipitation in Pearl River Basin

		广东地区(包括江西南部)	广西中北部(包括湖南南部)	广西西南	云贵地区
全年降雨	降雨量(mm)	>1700+	1500~17000	1300~1500-	<1300-
	降雨日(%)	58~59;+	53~54+	54~55+++	56~57++
月、季降雨	PCI(%)	15.2~15.5-	14.8~15.0+	15.2~16.0+	>16.3-
	FI <sub>6</sub> (%)	60~75+	60~65+	45~55-	40~50-
	R <sub>99</sub> (mm)	>65	56~60	50~52	40~47
极端降雨	离散度(C <sub>r</sub> )	12~14	10~11	7~8	5~7
	POT时变系数	-	+	0	-

注:表内分别采用“+”、“-”、“0”代表“增加”、“减少”与“无明显趋势”,加减号个数与趋势变化程度成正比。

量。但该区的最大降雨月降雨集中度高且有增加趋势、极端降雨阈值高且发生频次增长,十分不利于地区防洪。该区城市化水平高,进一步增加了地表不透水面积,加速了降雨成洪。广东珠三角地区的防洪安全更应重视。

红水河、黔江等重要支流在广西中北部地区(包括湖南南部)汇入干流,当地水资源主要受上游来水和本地降雨影响。该区年降雨充沛、降雨日有增加趋势,利于维持地区水资源总量;但年内降雨集中度增加,不利于年内水资源量分配。广西西南与云贵地区地处流域上游,地区水资源主要依托降雨在山前汇流,地区全年降雨量减少与降雨强度减少,不利于地区产汇流与淡水资源蓄积,需适当注重水资源截蓄。其中,云贵地区的极端降雨阈值高、离散度大、发生频次有增加趋势,当地防治山洪、泥石流等自然灾害的压力较大。

4 结 论

通过对珠江流域全年降雨、月季度降雨集中性及极端降雨3个层面的时空变化分析,得到以下主要结论:

- 1) 因所处气候、地形条件影响,珠江流域年降雨量东多西少。海温异常影响下,流域降雨强度有减小趋势。
- 2) 珠江流域年内降雨集中性东西强中部弱,季度集中性上东西差异随时间减小,月份集中性上东西差异随时间增加。
- 3) 珠江流域极端降雨阈值东高西低,在珠三角与广西中部的离散度较高,珠三角与云贵地区的极端降雨发生频次增加。全区极端降雨在20世纪60年代、80年代末有突变现象, $P_{0.01\%}$ 设计值在21

世纪后达到最高。

4) 全流域可分为广东(包括江西南部)、广西中北部(包括湖南南部)、广西西南及云贵4个降雨特征区。其中,广东珠三角地区以及广西中北部山地应格外注重防洪安全;广西西南与云贵地区则应注重保障用水安全。

参考文献:

[1] IPCC,2007.Climate Change 2007:The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.[R]. Cambridge University Press,Cambridge,United Kingdom,New York,USA,2007.

[2] 邓汗青,罗 勇.近50年珠江流域降水时空特征分析[J].气象科学,2013,33(4):355~361.

[3] Piao Shilong, CiaisPhilippe,Huang Yao et al.The impacts of climate change on water resources and agriculture in China [J].Nature,2010,467:43-51.

[4] Huntington T. Evidence for intensification of the globalwater cycle:Review and synthesis [J].Journal of Hydrology, 2006,319, 83-95.

[5] 珠江水利委员会.珠江流域防洪规划报告[R].广东.广州,2007.

[6] 王兆礼,陈晓宏,张 灵,等.近40年来珠江流域降水量的时空演变特征[J].水文,2006,26(6):71~75.

[7] Yang Tao, Shao Quanxi,Hao Zhen-Chun,et al.Regional frequency analysis and spatio-temporal pattern characterization of rainfall extremes in the Pearl River Basin,China[J].Journal of Hydrology,2010,380(3-4):386-405.

[8] 陆文秀,刘丙军,陈晓宏等.珠江流域降水周期特征分析[J].水文,2013,33(2):82~86.

[9] 刘艳群,陈创买.珠江流域汛期降水的时间演变特征[J].人民珠江,2007,04:47~51.

[10] 张 强,孙 鹏,陈 喜,等.1956~2000年中国地表水资源状况:变化特征、成因及影响[J].地理科学,2011,31(12):1430~1436.

[11] 彭俊台,张 强,刘春玲.珠江流域降水特征研究[J].人民珠江, 2012,05:13~17.



- [12] Levitus S, Antonov J, Boyer T. Warming of the world ocean, 1955-2003[J]. *Geophys Res Lett*, 2005, 32, L02604, doi:10.1029/2004GL021592.
- [13] Ni Yunqi, Qian Yongfu, Lin Yuanbi. The Effects of Sea Surface Temperature Anomalies over the Equatorial Western Pacific and the Indian Ocean on the Asian Summer Monsoon [J]. *Acta-Meteorologica Sinica*, 1990, 03:336-344.
- [14] Fournier H. *Climat et érosion*. Paris: Ed. Presses Universitaires de France. 1960.
- [15] Oliver J E. Monthly precipitation distribution: A comparative index[J]. *Professional Geographer*, 1980, 32:300-309.
- [16] 贾文雄, 张禹舜, 李宗省. 近 50 年来祁连山及河西走廊地区极端降水的时空变化研究[J]. *地理科学*, 2014, 34(8):1002~1009.
- [17] Kysely Jan, Picek Jan, Beranová Romana. Estimating extremes in climate change simulations using the peaks-over-threshold method with a non-stationary threshold[J]. *Global and Planetary Change*, 2010, 72:55-68.
- [18] Thomas Fischer, Marco Gemmer, Lüliu Liu, Buda Su. Change-points in climate extremes in the Zhujiang River Basin, South China [J]. *Climatic Change*, 2012, 110(3-4):783-799.

## Multi-scale Spatio-temporal Characteristics and Influence of Precipitation Variation in Zhujiang River Basin During the Last 50 Years

TANG Yi-han<sup>1,2</sup>, CHEN Xiao-hong<sup>1,2</sup>

(1. *Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China;*

2. *Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)*

**Abstract:** Basing on daily precipitation data from 1959-2012 in 38 gauging stations in Zhujiang River Basin (PRB), we have adopted Kendall test and linear regression method in studying the spatio-temporal characteristics of multiple precipitation indexes as studied time series, conclusions are drawn as follows: 1) In PRB, annual precipitation decreases towards west and declines along time; RRB drops from center to surroundings and keeps an increasing trend in most part of the basin; 2) Precipitation is seasonal and moderately concentrated in June; *PCI* becomes even in the whole basin while differences between *FI<sub>6</sub>* values expands; 3) Threshold value of extreme rainfall descends from east to the west and jumps are found in 1960s and 1980s; volume of extreme rainfall with same recurrence interval comes to its peak in 21<sup>st</sup> century; 4) Four precipitation regions are divided as (a) Guangdong District, (b) north-central part of Guangxi District, (c) south-west of Guangxi District and (d) Yunnan-Guizhou District; flood prevention is crucial for a and b districts especially Pearl River Delta region, and water safety is major concern for c and d District.

**Key words:** Zhujiang River Basin; multi-scale; spatio-temporal variation in precipitation; precipitation index