

郑江禹,张强,史培军,等.珠江流域多尺度极端降水时空特征及影响因子研究[J].地理科学,2017,37(2):283-291.[Zheng Jiangyu, Zhang Qiang, Shi Peijun et al. Spatiotemporal Characteristics of Extreme Precipitation Regimes and Related Driving Factors in the Pearl River Basin. *Scientia Geographica Sinica*,2017,37(2):283-291.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2017.02.015

# 珠江流域多尺度极端降水时空特征及影响因子研究

郑江禹<sup>1</sup>,张强<sup>2,3,4</sup>,史培军<sup>2,3,4</sup>,顾西辉<sup>1</sup>,郑泳杰<sup>1</sup>

(1. 中山大学水资源与环境系,广东广州 510275; 2. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部  
重点实验室,北京 100875; 3. 北京师范大学地理科学学部,北京 100875;  
4. 北京师范大学减灾与应急管理研究院,北京 100875)

**摘要:**基于珠江流域74个气象站点1952~2013年逐日降水和气温数据,采用POT抽样、Mann-Kendall(MK)趋势检验、泊松回归等方法,从降水量级、降水频率及发生时间等方面系统分析了珠江流域年、雨季及旱季3个时间尺度上的极端降水特征,并从降水对温度变化响应及ENSO影响等角度,探讨了极端降水变化特征的机理。研究表明:①珠江流域极端降水年内分布不均,多发于4~9月,其中6月份发生频率最高;②珠江流域极端降水频率在雨季及年际间分布较为均匀。但在旱季,珠三角地区极端降水在不同年份差异性较大;③在雨季及年际尺度上,极端降水年序列趋势性并不显著;而相对干旱季节,极端降雨量级、发生频次均随年份增加呈显著上升趋势,且发生时间提前。珠江流域农业以水稻(*Oryziasativa*)种植为主,旱季极端降水增加易导致冬汛及其引起的作物倒伏与农田渍涝等灾害,同时对秋冬防洪提出新的挑战,需要引起人们的关注;④温度升高和ENSO事件对珠江流域极端降水过程有显著影响。从ENSO影响的角度讲,在厄尔尼诺年,珠江流域西部极端降水量级和频率增加,而流域东部沿海区域极端降水量级减少,时间延后。

**关键词:**极端降水;集聚性;泊松过程;ENSO;珠江流域

**中图分类号:**P333.2      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-0690(2017)02-0283-09

近几十年来,在气候暖化与人类活动共同影响下,全球及区域尺度水循环加剧,极端降水事件时空特征发生显著变异<sup>[1]</sup>,旱涝灾害事件增多,给经济社会发展带来重要影响<sup>[2]</sup>。因此,极端降水过程时空特征及可能机理的研究引起了人们的广泛兴趣<sup>[3]</sup>。珠江流域是中国流域面积第三、流量第二的大河流域,对中国尤其是南部地区可持续发展有着举足轻重的作用。由于受气候变异和剧烈人类活动的双重影响,流域气象水文要素时空变异特征显著<sup>[4]</sup>。

以往研究对珠江流域极端降水已做了大量工作<sup>[4-8]</sup>,但所用指标多为年或季节最大降水量来定义极端降水事件,在一定程度上限制了降水数据信息的挖掘,而超阈值抽样(POT)能够比年极端降水指标提供更多更丰富的极端降水过程信息<sup>[9]</sup>。另外,

对于流域降水天数与降水强度变化,由于珠江流域纬度较低,夏季漫长,冬季很短,四季不分明,所以本文没有将珠江流域分为传统的四季进行研究,而是选择将珠江流域分为全年、雨季(4月到9月)和旱季(10月到次年3月)进行分析。同时越来越多的研究表明中国的极端天气事件与厄尔尼诺事件存在一定的联系<sup>[10]</sup>,基于此,本文通过分析不同ENSO年水汽通量变化探讨珠江流域极端降水时空特征成因及机理<sup>[11]</sup>。目的在于探讨:①珠江流域极端降水事件发生的年内和年际集聚性;②基于POT抽样的珠江流域极端降水在量级、频率和发生时间上的趋勢时空规律;③ENSO事件(厄尔尼诺事件和拉尼娜事件)对珠江流域的极端降水量级、频率和发生时间的影响及潜在的机理分析。

**收稿日期:**2016-03-03; **修订日期:**2016-06-11

**基金项目:**国家自然基金委创新群体项目(41621061),国家杰出青年科学基金(51425903)资助。[Foundation: Fund for Creative Research Groups of National Natural Science Foundation of China (41621061); National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (51425903).]

**作者简介:**郑江禹(1993-),男,江西宜春人,硕士研究生,主要从事气象水文学研究。E-mail:zhengjy37@mail2.sysu.edu.cn

**通讯作者:**张强,教授。E-mail:zhangq68@bnu.edu.cn

## 1 研究区域和数据

珠江流域( $102^{\circ}14'E\sim115^{\circ}53'E$ ,  $21^{\circ}31'N\sim26^{\circ}49'N$ )位于中国南方,横跨云南、贵州、广西、广东、湖南、江西6省,面积达 $4.52\times10^5\text{km}^2$ 。流域地形以山地和丘陵为主,占总流域面积的94.5%;平原面积小而分散,仅占5.5%。流域地势西北高而东南低。在气候上,珠江流域属亚热带季风气候,温和多雨。流域大部分地区年均温在 $20^{\circ}\text{C}$ 以上,年际变化不大,年降水量在1 000~2 200 mm之间。

本文所分析数据为珠江流域74个雨量站点逐日降水和气温序列(图1)。时间为1952~2013年共62 a的数据,数据由国家气候中心提供,数据质量经严格控制且用双累计曲线法检验数据的一致性。缺测数据采用Zhang等人提出的方法进行了插值处理<sup>[12]</sup>。

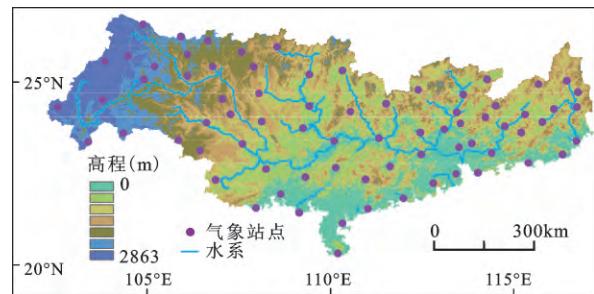


图1 珠江流域气象站点分布

Fig.1 Locations of the weather stations in the Pearl River Basin

## 2 研究方法

### 2.1 POT取样

为避免丰枯水年的干扰,使用POT进行取样,通过设定某一值作为阈值,将各站点降水序列中超过该阈值的降水过程重新组成一个新的极端降水序列<sup>[13]</sup>。本文使用各站点非零降水值(日降水量大于1 mm)的95%分位数作为阈值,分别在年尺度、雨季和旱季尺度上进行了抽样。

### 2.2 趋势分析

#### 2.2.1 Mann-Kendall检验

本研究趋势检验采用Mann-Kendall趋势检验法的改进法(MMK)<sup>[14]</sup>。该方法在研究气候及水文序列趋势方面得到广泛应用<sup>[15]</sup>。在本研究中,MMK用于检验POT序列的极端降水特征值变化

趋势:① 极端降水的量级;② 极端降水在年内的发生时间;③ 流域各站点的温度。趋势的量化使用Sen趋势度进行评估,各趋势分别在年尺度和季节尺度上进行检测。

#### 2.2.2 泊松回归模型

泊松回归模型是一种广义线性回归模型<sup>[16]</sup>。以 $k$ 表示观测的某一事件发生频率,并假定随机变量 $N_i$ 等于 $k$ 的概率,则该泊松分布密度函数为:

则该泊松分布密度函数为:

$$P(N_i=k|\lambda_i)=\frac{e^{-\lambda_i}\lambda_i^k}{k!} \quad (k=0,1,2,\dots) \quad (1)$$

式中 $\lambda_i$ 为发生率参数。为评估各站点极端降水频率是否具有统计意义上的显著上升或下降趋势,在泊松回归模型中将发生率参数与时间建立线性关系:  $\lambda_i=\exp(\beta_0+\beta_1 t_i)$ 。如果回归系数 $\beta_1$ 在5%的置信区间内异于零,说明极端降水频率变化趋势具有统计意义。

### 2.3 月频率法

极端降水多(少)发月份可以通过每个月份极端降水发生次数的期望值比得到。在非季节模型中,极端降水的各月发生频率均相同,而在季节模型中极端降水在某些月份的发生频率会更高。由于各月份天数不同,首先将各个月份的极端降水频率进行修正,得到各月份修正频率 $FF_m$ 。假设极端降水无季节性分布,在任意月份极端降水事件的频率是1/12。所以,在非季节模型中,任意月份极端降水的概率等于1/12。在5%的显著性区间内,月频率变化的上下边界分别为 $L_U^N$ 、 $L_L^N$ 。如果有月份的频率超出界限,则说明极端降水没有遵循一个年内的均匀分布且在5%的显著区间内季节模式是存在的<sup>[2]</sup>。公式如下:

$$FF_m=\frac{F_m}{N} \frac{30}{n_m} \quad (2)$$

$$L_U^N=\frac{N+11.491}{0.048N^{1.131}} \quad (3)$$

$$L_L^N=\frac{N-27.832}{0.199N^{0.964}} \quad (4)$$

式中, $FF_m$ 是第 $m$ 个月的修正频率, $F_m$ 是 $m$ 月观察到的极端降水发生次数, $N$ 是用POT法抽取出的极端降水序列的总次数, $n_m$ 是 $m$ 月的天数,在本文中,为了消除闰月的影响,2月天数的取值为28.25。

### 2.4 极端降水的年际集聚性

在POT序列中,每年极端降水发生次数一般假定遵循泊松分布<sup>[17]</sup>,公式如下:

$$P(m) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^m}{m!} \quad (5)$$

其中,  $P(m)$  为给定年份中超过阈值  $m$  次的概率。 $\lambda$  为每年超过阈值的次数的均值。假设不同年份超过阈值的次数是独立同分布, 那么泊松过程中两次事件间隔时间遵循指数分布。考虑到在年尺度上, 存在极端降水多发与少发期, 从而破坏了齐次泊松过程假设。一个泊松过程的聚集和离散程度可用离散指数( $D$ )表示, 为极端降水序列每年发生次数相对于它的数学期望值的变化程度, 即:

$$D = \frac{\text{Var}(Z(T))}{E(Z(T))} - 1 \quad (6)$$

其中,  $Z(T)$  是时间窗口  $T$  下的年极端降水发生次数序列。对于泊松过程,  $D$  值应为零。 $D$  值为负代表低离散, 表示大部分年份极端降水发生次数相近; $D$  值为正值代表过离散, 表示在年尺度上极端降水事件存在着时间聚集性。

$D$  值显著性在 5% 的置信区间内用自由度为 1 的卡方分布的拉格朗日乘子法进行检验:

$$LM = 0.5 \times \frac{\left( \sum_{i=1}^k [(z_{i-\lambda})^2 - z_i] \right)}{k\lambda^2} \quad (7)$$

式中,  $LM$  为拉格朗日乘子检验的结果, 大于 0.05 表示该序列不具统计显著性。反之, 该序列具有统计显著性。 $\lambda$  为长度  $k$  的极端降水序列  $z$  中年极端降水发生的次数的均值。

### 3 研究结果

#### 3.1 极端降水的年内分布特征

一年中存在极端降水多发或少发月份。在月时间尺度上, 极端降水频率改变与降水产生机制

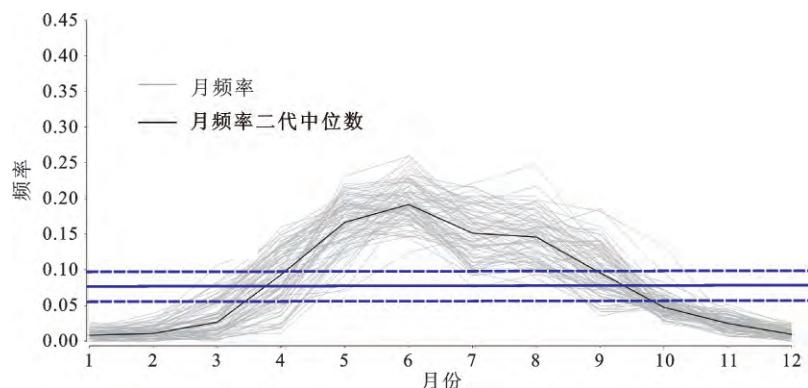
密切相关。所以, 对极端降水的年内分布进行分析, 量化月尺度上极端降水发生频率具有重要意义。本文通过 74 个站点极端降水事件月频率中位数来分析珠江流域极端降水季节模式(图 2), 极端降水多发季节为每年 4~9 月。由于珠江流域降水主要受季风控制, 这个时期来自太平洋的大量水汽开始从珠江流域由南向北移动; 同时, 此时降水事件发生的更加频繁。极端降水少发时期是 10 月~次年 3 月, 与流域旱季时期吻合。

#### 3.2 极端降水集聚性变化特征

由图 3a 看出, 在 POT 全年序列上, 离散指数变化范围是 -0.63~0.01。全年极端降水集聚性显著的站点占总站点数的 12.2%; 74 个站点中有 73 个站点的离散指数为负值, 绝大部分站点表现为低离散。9 个具有统计显著性的站点都属于低离散, 其中 8 个站点位于珠江流域的西部。雨季极端降水过程集聚性分析结果与全年相似, 图 3b 中离散指数  $D$  值的变化范围是 -0.63~0.01, 流域绝大部分站点都表现为低离散, 7 个具有统计显著性的站点均属于低离散。而旱季仅有一个站点的极端降水具有显著集聚性, 但是从空间上来讲, 旱季极端降水集聚性较明显的区域主要集中于珠江流域中下游, 特别是位于  $110^{\circ}\text{E}$ ~ $115^{\circ}\text{E}$  的区域。从年和雨季上来看, 在这两个时间尺度上极端降水发生次数在年际间的变化不大。POT 旱季序列的结果与年和雨季的结果差异较大, 离散指数  $D$  值的变化范围是 -0.32~0.63, 其中有 38 个站点的  $D$  值为正值, 显示过离散, 说明在旱季珠江流域年际间极端降水次数变化较大。

#### 3.3 极端降水量级、发生时间趋势检验

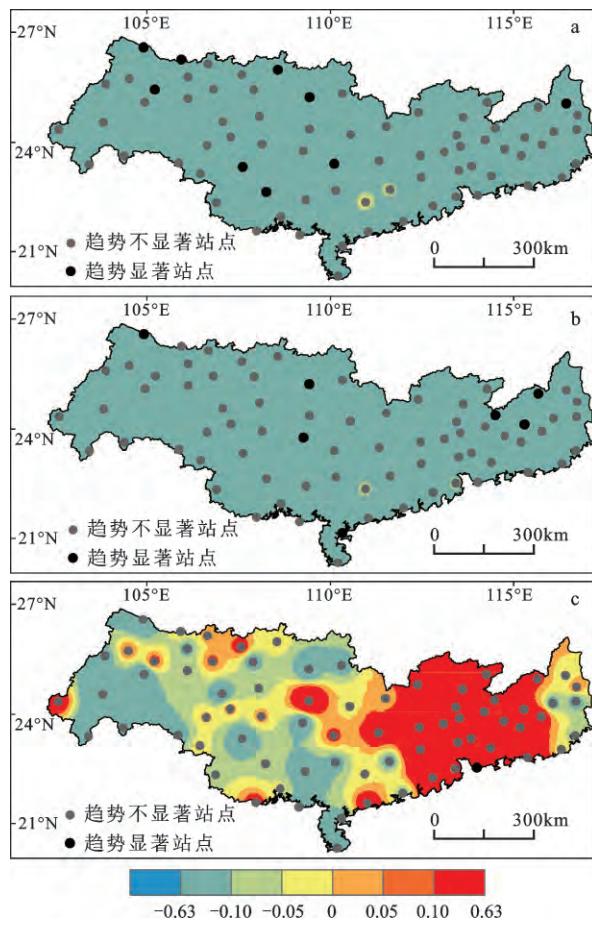
使用 MMK 法对基于 POT 采样的极端降水量



注:蓝色水平线表示在 5% 置信区间内无季节模式时极端降水月频率的均值和上下界。

图 2 珠江流域极端降水月发生频率

Fig.2 Monthly frequency of extreme precipitation in the Pearl River Basin

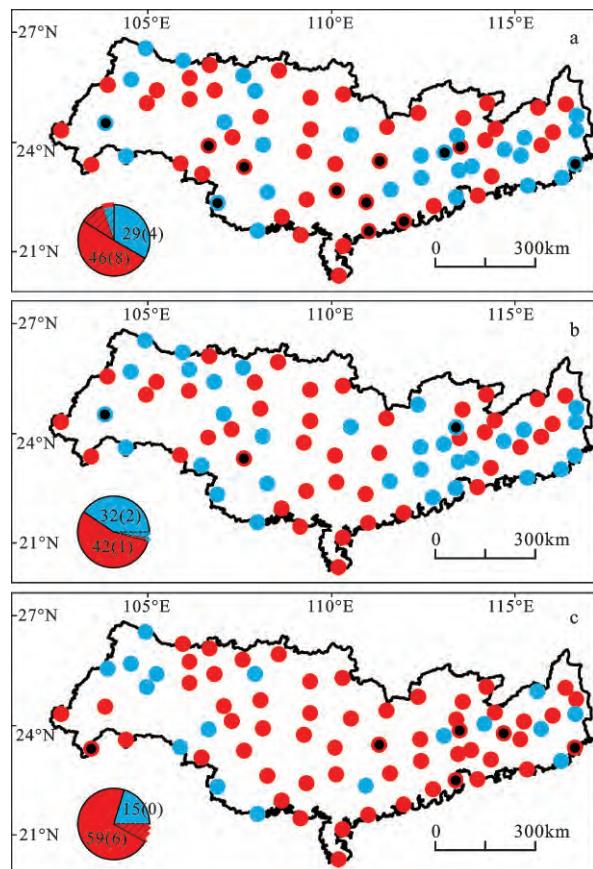


注:a全年;b雨季;c旱季

图3 珠江流域极端降水离散指数的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of discrete index of extreme precipitation in three time-scale of the Pearl River Basin

进行趋势检验,在年、雨季、旱季3个尺度下进行(图4),发现珠江流域极端降水量在3个尺度上均呈显著增加趋势。具体来说:①在年尺度上,有8个气象站点呈显著上升趋势,主要位于流域中部;4个气象站点呈显著下降趋势。不具有显著趋势的站点中,38个站点呈上升趋势,25个站点呈下降趋势。在年尺度上珠江流域极端降水的量级以上升趋势为主;②在雨季,具有统计显著性的站点较少,其中2个站点呈显著下降趋势,1个站点呈显著上升趋势。不具有统计显著性的站点中,41个站点呈上升趋势,30个站点呈下降趋势。珠江流域在雨季极端降水量以增加趋势为主,但并不明显;③在旱季,有6个气象站点极端降水量呈显著增加趋势,其中3个站点位于珠三角地区。而极端降水量呈不显著变化的站点中,15个站点呈下降趋势,而有53个站点呈上升趋势。在旱季,珠江流



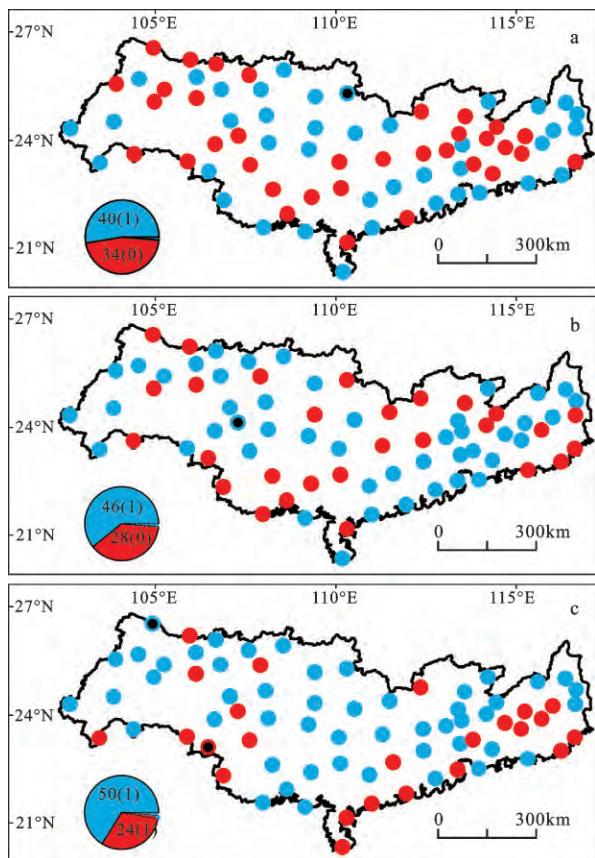
注:实心红圈:上升趋势;实心蓝圈:下降趋势;黑色点:趋势显著,置信水平为95%。a全年;b雨季;c旱季。

图4 珠江流域各站点1952~2013年间极端降水量级变化趋势的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of the variation tendency of extreme precipitation magnitude in the Pearl River Basin in 1952-2013

域极端降水量呈明显上升趋势,进一步印证了之前的研究发现,即包括珠江流域在内的全国流域降水均存在季节性的变化,即旱季(本文主要指降水较少的冬季以及春与秋季的部分时段)降水呈增加趋势,而夏季降水呈不显著变化或呈微弱下降趋势<sup>[18,19]</sup>。同时值得注意的是,旱季极端降水量呈明显上升,且主要集中在珠三角地区,该区域是珠江流域的核心区域。极端降水作为一种灾害事件,其量级的显著增大应该引起足够的重视。

在年、雨季和旱季3个时间尺度,利用MMK法对每个站点极端降水年内发生时间变化趋势进行分析(图5)。由图5看出,在年、旱与雨季3个时间尺度上,极端降水发生时间具有显著变化趋势的站点均较少,但极端降水发生时间呈不显著提前的站点更多。具体来讲:①年尺度上54%的站点极端降



注:实心红圈:上升趋势;实心蓝圈:下降趋势;黑色点:趋势显著,置信水平95%。a 全年;b 雨季;c 干季。

图5 珠江流域各站点1952~2013年间极端降水年内发生时间变化趋势的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of variation tendency of extreme precipitation time in the Pearl River Basin in 1952-2013

水发生时间有提前趋势(图5a),仅有1个站点发生时间显著提前现象,没有发现极端降水发生时间有明显滞后现象的气象站点;②雨季极端降水发生时间以前移为主(图5b),有62%的站点发生时间提前,跟年尺度变化类似,在雨季仍没有发现极端降水发生时间有明显滞后的站点;③旱季极端降水发生时间也以提前为主(图5c),其中有68%的站点其极端降水发生时间呈提前现象。由上述分析不难看出,珠江流域极端降水发生时间整体提前,极端降水事件在时间变化上的显著提前现象,对于珠江流域生态系统、农业生产管理、灌溉以及水资源管理等提出了新的亟待解决的问题。

### 3.4 极端降水频率泊松回归系数空间分布

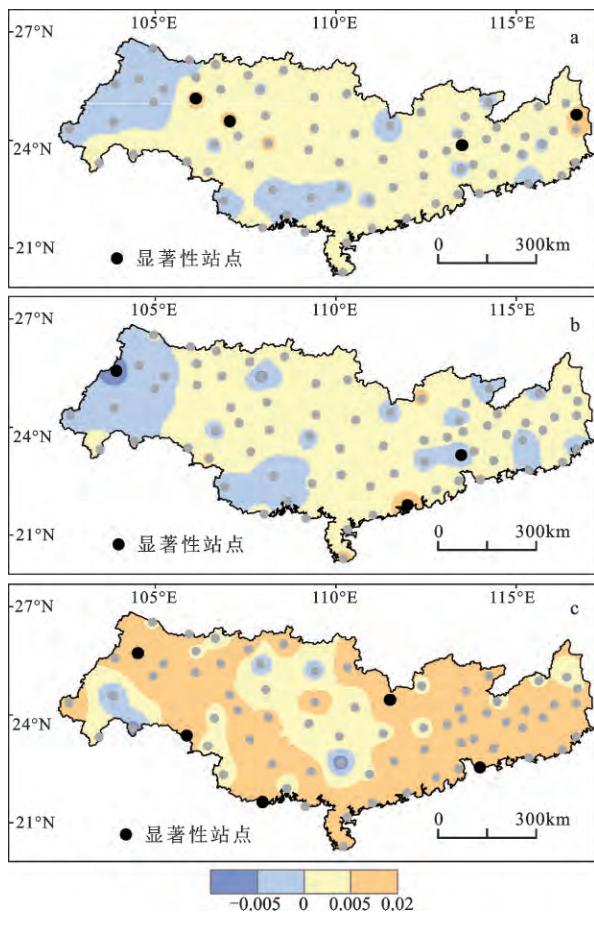
利用泊松回归模型对每个站点极端降水POT序列进行分析,用年发生次数和年份进行回归拟

合,得到回归系数。对全年、雨季和旱季3个时间尺度的POT序列的回归系数进行空间分析(图6),由图6看出,3个时间尺度上,极端降水发生频率的变化趋势具有相同的变化特征,即随年份的增大而增大,具体来说:①从全年尺度来讲,泊松回归参数变化范围是-0.005~0.008,极端降水发生频率以上升趋势为主,呈上升趋势站点占总站点的65%,其中有4个站点通过了显著性检验。下降趋势均不显著。②在雨季,泊松回归参数变化范围是-0.008~0.009,通过显著性检验的站点较少。其中67%的站点呈上升趋势。呈下降趋势的站点大多位于流域西部。③在旱季,回归参数变化范围为-0.008~0.02,且93%的站点极端降水发生频率呈上升趋势,有5个站点上升趋势达到显著。从空间分布来看,极端降水发生频率呈上升趋势的站点多分布于珠江流域东部和南部,极端降水发生频率呈下降趋势的站点多位于珠江流域西部海拔较高的区域。

综上分析,珠江流域极端降水事件时空特征为:在极端降水事件在量级及发生频率上呈上增加趋势,发生时间提前。旱季极端降水事件增加趋势最为明显。从空间分布特征看,极端降水频次和量级上升区域主要为珠江流域东部和南部等低海拔地区,这些区域是珠江流域重要人口聚集区,尤其是珠三角地区,是中国经济最为发达的地区之一,旱季极端降水频次和量级的显著增加会导致该区域洪旱灾害风险增加,同时也会使旱季降水时间分布更趋不均,易致洪旱急转现象。

### 3.5 极端降水变化趋势成因分析

气温上升会导致蒸发增加,空气饱和水汽压指数增加,从而造成空气中的水汽含量增加,而空气中水汽含量会直接影响降水量和降水频率。因此,气温变化可能是影响珠江流域极端降水变化的原因之一。通过MMK法,分别对流域年、雨季和旱季均温进行趋势分析(图7),在研究时段内3个时间尺度上气温升高趋势均非常显著:在年尺度上,气温呈上升趋势的站点占全部站点的97%,其中,82%的站点呈显著上升趋势,仅有2个站点呈下降趋势,均位于流域上游。在雨季,气温呈上升趋势的站点占全部站点的96%,其中,73%的站点呈显著上升趋势。仅有3个站点呈下降趋势。在旱季,气温呈上升趋势的站点占全部站点的99%,其中73%站点呈显著上升趋势。珠江流域在研究时段内年均温和季节均温呈显著上升趋势,只有流域上游海



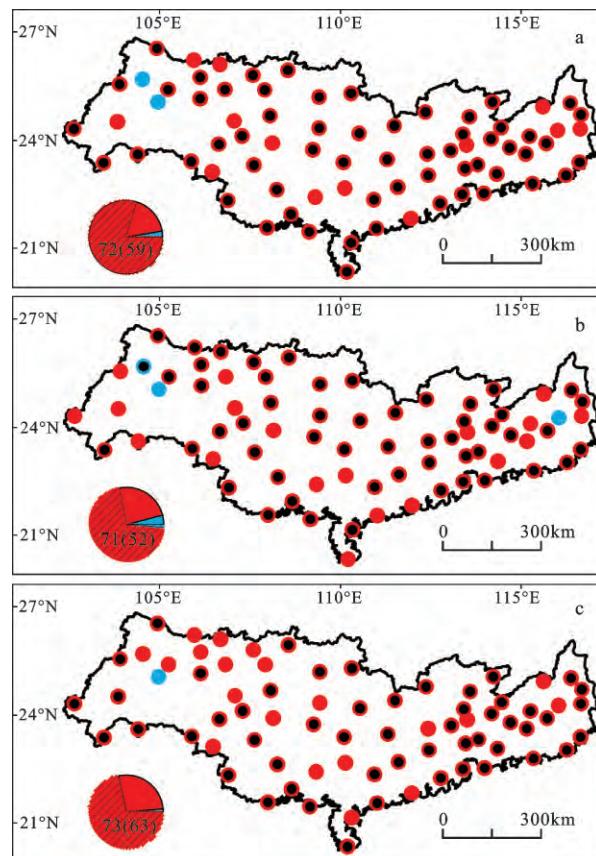
注:a全年;b雨季;c旱季

图6 珠江流域各站点1952~2013年间极端降水频率的泊松回归系数空间分布

Fig.6 Spatial distribution of Poisson Regression coefficient of extreme precipitation frequency in the Pearl River Basin in 1952-2013

拔较高地区出现极少数气温呈下降趋势和不显著上升趋势的站点。而从极端降水量级、频率等趋势变化特征空间分布来看,极端降水量级及频率等显著上升的区域也主要在珠江流域下游,尤其是珠三角地区。两者在空间分布上有一致性,显著气温变化对极端降水的影响。

本文分析暖ENSO事件(厄尔尼诺事件)与冷ENSO事件(拉尼娜事件)对不同时间尺度下珠江流域极端降水量级、发生时间和频率影响的差异性,并采用Student *t*检验差异的显著性,置信区间为90%(图8)。由图8看出,当ENSO处于暖事件时,珠江流域上游极端降水量级都呈增加趋势,流域下游以及南部边缘极端降水量级减少,其中流域上游旱季极端降水减少趋势显著。珠江流域中下游极端降水发生时间在ENSO处于冷事件时滞



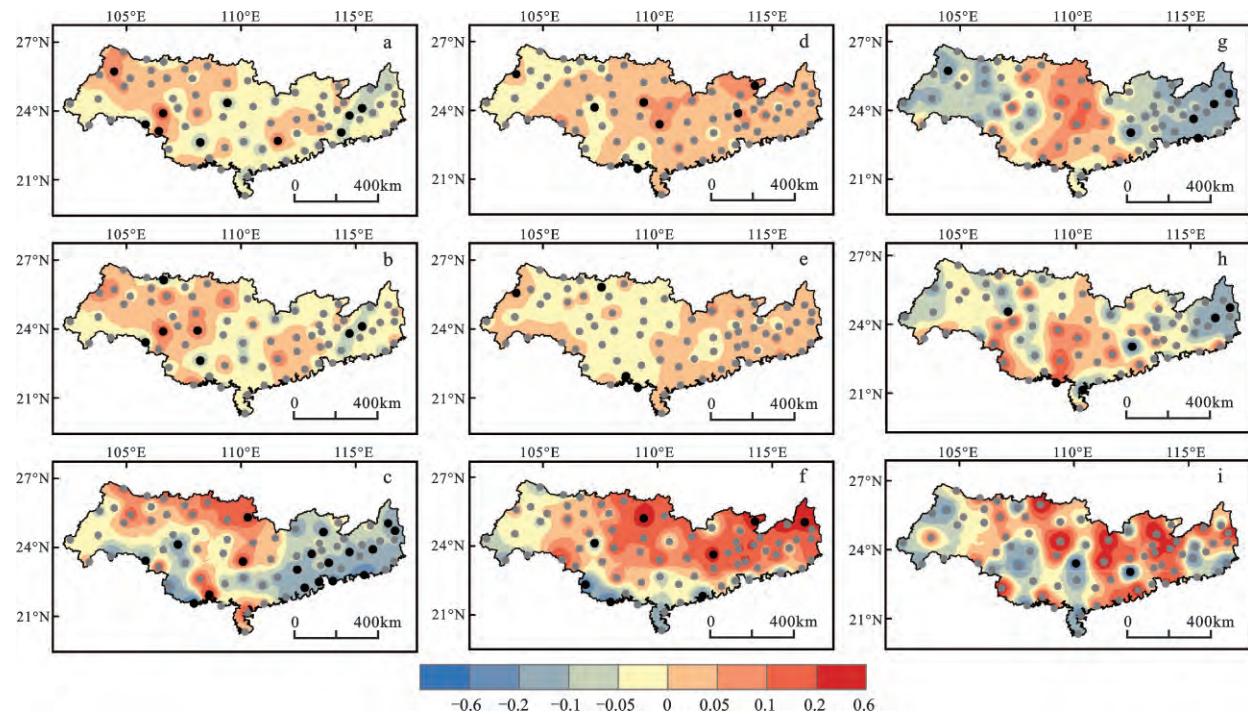
注:实心红圈:上升趋势;实心蓝圈:下降趋势;黑色点:趋势显著,置信区间95%。a全年;b雨季;c旱季。

图7 珠江流域各站点1952~2013年间年均温变化趋势的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of the variation tendency of mean annual temperature in the Pearl River Basin in 1952-2013

后,珠江流域东北区旱季极端降水呈显著滞后。在全年和雨季尺度上,珠江流域中游区域极端降水发生次数在ENSO处于暖事件时增加,而其下游与上游地区极端降水事件发生频率则呈减少趋势,其中年尺度上流域下游极端降水发生频率减少趋势显著。而在旱季,流域下游地区呈增多趋势,表明珠江流域下游旱季极端降水过程呈加剧趋势。

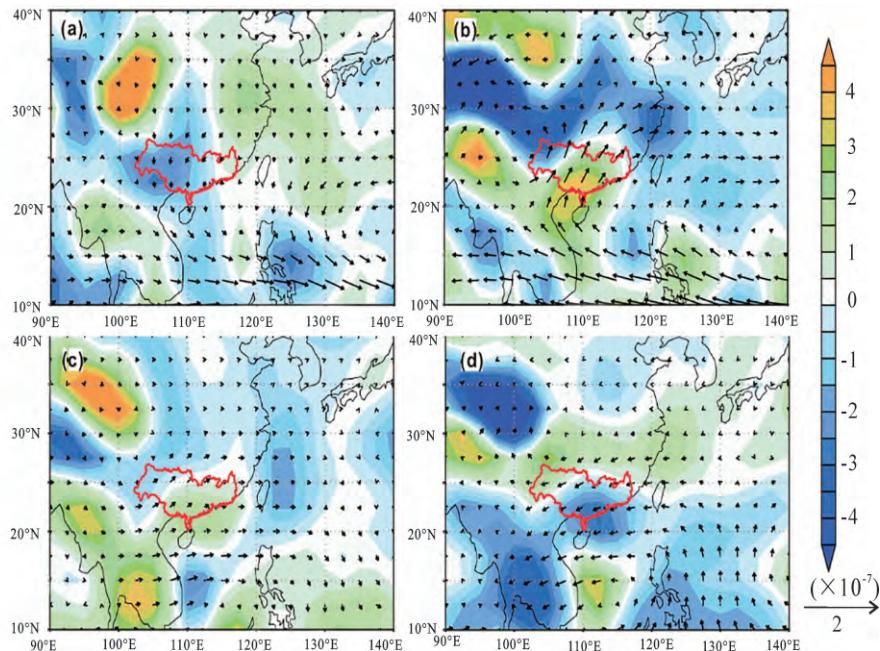
为进一步探讨珠江流域极端降水时空特征形成机理,本文进一步研究了不同冷暖ENSO过程中水汽通量变化(图9)。从图9看出,在雨季,ENSO暖事件下珠江流域西部出现明显的水汽辐合异常,该区大气中水汽含量增加,因此发生极端降水的风险也可能增加。而ENSO冷事件下流域西北表现为异常的水汽辐合,而流域中部表现出明显的水汽辐散异常,该区水汽含量减少,发生极端降水的量级也会相应减少,与图8b中表现的现象相



注:颜色填充图表示冷暖ENSO条件下量级、发生时间和频率的差异性,计算结果为(暖事件发生年份均值-冷事件发生年份均值)/冷事件发生年份均值。采用Student *t*检验差异的显著性水平,双侧检测显著性水平为0.1,通过了显著性检验的站点标记为黑色圆圈,未通过检验的站点标记为灰色圆圈。a全年量级;b雨季量级;c旱季量级;d全年发生时间;e雨季发生时间;f旱季发生时间;g全年频率;h雨季频率;i旱季频率。

图8 暖冷ENSO事件对珠江流域极端降水量级、发生时间和频率的影响

Fig.8 The influence of different ENSO events for magnitude, frequency and occur time of extreme precipitation in the Pearl River Basin



注:a表示暖事件下的雨季,b表示冷事件下的雨季,c表示暖事件下的旱季,d表示冷事件下的旱季。图中矢量图代表水汽通量g/(cm·s·hPa),用于表示水汽输送方向,颜色填充图表示水汽通量散度,表示区域水汽辐合辐散情况,蓝色表示水汽辐合区域,黄色表示水汽辐散区域,研究区域以红色边界表示。

图9 暖冷ENSO事件下珠江流域850 hPa水汽输送距平场

Fig.9 Moisture transmission field of 850 hPa in the Pearl River Basin under different ENSO events

一致。ENSO冷事件下,从珠江流域到江淮流域表现出明显的水汽输送异常,使江淮地区及中国中部地区水汽辐合增加。而在旱季,ENSO冷事件下,珠江流域的东南区域出现大量的水汽辐合,该去水汽含量增加,流域东南部发生极端降水的量级也在ENSO冷事件系下相应增加。从图8和图9的对比可以看出量级与水汽通量关系密切。

## 4 结论

本文利用POT抽样法进一步研究珠江流域74个气象站点1952~2013年极端降水在量级、频率和发生时间等3个方面的年及季节变化,并从气温、ENSO以及不同ENSO事件水汽通量的变化等多个角度全面探讨了珠江流域极端降水时空特征机理,得到以下结论:

1) 珠江流域极端降水过程存在年内聚集现象,该流域极端降水多发时期为每年4~9月,少发期为10月至次年3月。每年的6月极端降水发生频率最高。

2) 全年、雨季珠江流域极端降水事件在年际间均呈低离散,年际间极端降水发生次数差异不大。而在旱季,珠三角地区呈高离散现象,极端降水在年际上显著存在多发与少发年份,意味着更高的洪旱灾害风险。珠三角地区是中国经济最为发达的地区之一,且城镇化高度发达,人口密集,旱季的高洪旱灾害风险将对该区域水资源配置以及水资源应急管理提出了新的挑战与急需要解决的科学问题,应当引起重视。

3) 通过对极端降水量级、发生时间和频率变化趋势的分析,认为珠江流域极端降水整体上量级增大,发生时间提前,发生频率更趋频繁。在3个时间尺度上,旱季的变化趋势最为明显。从空间分布特征来看,极端降水频次和量级呈上升趋势的区域主要为珠江流域下游以及流域南部区域,而极端降水频次上升趋势不显著或呈下降趋势的区域主要位于流域上游高海拔区域。

4) 分析气温对极端降水过程影响,结果表明珠江流域大部分区域年均温在研究时段内呈显著上升趋势,气温呈不显著上升趋势甚至呈下降趋势的站点多分布于流域上游区域。温度变化趋势与极端降水频率变化在时空特征上具有相似性,气温变化可被认为是珠江流域极端降水过程加剧的重要因素之一。

5) ENSO处于暖事件易致珠江流域上游极端降水量级增加;而东部沿海区域极端降水量级显著下降;ENSO处于冷事件时,珠江流域上游地区极端降水发生时间提前,而东部沿海区域极端降水发生时间推后。ENSO处于暖事件时珠江流域的旱季极端降水频率显著增大。水汽通量是影响流域极端降水量级的主要因素。在ENSO冷暖事件的影响下,珠江流域会显示出不同的水汽辐合和辐散现象,进而来影响该年份极端降水的特性。

## 参考文献(References):

- [1] Allan R P, Soden B J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes[J]. *Science*, 2008, 321(5895): 1481-1484.
- [2] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C et al. Climate extremes: Observations modeling and impacts[J]. *Science*, 2000, 289(5487): 2068-2074.
- [3] Chou C, Tu J Y, Tan P H. Asymmetry of tropical precipitation change under global warming[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(17): 421-425.
- [4] Zhang Qiang, Li Jianfeng, Singh V P et al. Influence of ENSO on precipitation in the East River basin, South China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(5): 2207-2219.
- [5] Zhang Q, Xu C Y, Gemmer Metal. Changing properties of precipitation concentration in the pearl river basin, China[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2009, 23 (3): 377-385.
- [6] 彭俊台, 张强, 刘春玲. 珠江流域降雨特征研究[J]. 人民珠江, 2012, 33(5): 13-17. [Peng Juntai, Zhang Qiang, Liu Chunling. Changing properties of precipitation regimes over the Pearl River Basin. Pearl River, 2012, 33(5): 13-17.]
- [7] 陆文秀, 刘丙军, 陈俊凡, 等. 近50a来珠江流域降水变化趋势分析[J]. 自然资源学报, 2014, (1): 80-90. [Lu Wenxiu, Liu Bingjun, Chen Junfan et al. Variation trend of precipitation in the Pearl River Basin in recent 50 years. *Journal of Natural Resources*, 2014(1): 80-90.]
- [8] Wang W, Chen X, Shi P et al. Detecting changes in extreme precipitation and extreme streamflow in the Dongjiang River Basin in southern China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2008, 12(1): 207-221.
- [9] 顾西辉, 张强, 孙鹏, 等. 新疆塔河流域洪水量级、频率及峰现时间变化特征、成因及影响[J]. 地理学报, 2015, 70(9): 1390-1401. [Gu Xihui, Zhang Qiang, Sun Peng et al. Magnitude, frequency and timing of floods in the Tarim River, Xinjiang: Characteristics, causes and impacts. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1390-1401.]
- [10] Qiang Zhang, Jian Fengli, Vijay P S et al. Influence of ENSO on precipitation in the East River basin, South China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118(5): 2207-2219.

- [11] Zhang Q, Xu C Y, Zhang Z. Observed changes of drought/wetness episodes in the Pearl River basin, China, using the standardized precipitation index and aridity index[J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2009, 98(1/2): 89-99.
- [12] Zhang Qiang, Qi Tianyao, Singh V P et al. Regional frequency analysis of droughts in China: a multivariate perspective[J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(6): 1767-1787.
- [13] 苏怀智, 王峰, 刘红萍. 基于POT模型建立大坝服役性态预警指标[J]. *水力学报*, 2012, 43(8). [Su HuaiZhi, Wang Feng, Liu Hongping. Early-warning index for dam service behavior based on POT model. *ShuiLi XueBao*, 2012, 43(8): 974-986.]
- [14] Hamed K H, Rao A R. A modified Mann-Kendall trend test for auto-correlated data[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 204(1/4): 182-196.
- [15] Mitchell J M, Dzerdzevskii B, Flohn H. Climate change[M]. WHO Technical Note 79, World Meteorological Organization: Geneva, 1966: 79.
- [16] 陈小龙. 泊松回归模型[A]. 科技资讯, 2012, 17. [Chen Xiaolong. Poisson regression model. *Science & Technology Information*, 2012, 17.]
- [17] Villarini G, Smith J A, Vecchi G A. Changing frequency of heavy rainfall over the central United States[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(1): 351-357.
- [18] Zhang Qiang, Xiao Mingzhong, Singh V P et al. Regionalization and spatial changing properties of droughts across the Pearl River basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 472-473 (24): 355-366.
- [19] Zhang Qiang, Xu Chongyu, Chen Xiaohong et al. Statistical behaviors of precipitation regimes in China and their links with atmospheric circulation 1960-2005[J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(11): 1665-1678.

## Spatiotemporal Characteristics of Extreme Precipitation Regimes and Related Driving Factors in the Pearl River Basin

Zheng Jiangyu<sup>1</sup>, Zhang Qiang<sup>2,3,4</sup>, Shi Peijun<sup>2,3,4</sup>, Gu Xihu<sup>1</sup>, Zheng Yongjie<sup>1</sup>

(1. Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China; 2. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Daily precipitation and temperature data of 74 weather stations of the Pearl River Basin in 1952-2013 were analyzed to characterize spatiotemporal characteristics of extreme precipitation in terms magnitude, frequency and occurrence time by using the peaks-over-threshold approach (POT), Mann-Kendall test (MK) and Poisson Regression Model for the whole year, wet season (April-September) and dry season (October-March). In addition, causes behind extreme precipitation changes were investigated by relating spatiotemporal patterns of extreme precipitation to ENSO and large-scale moisture circulation. The results indicate that: 1) Extreme precipitation over the Pearl River Basin is uneven. Precipitation extreme mainly occurs from April to September and highest extreme precipitation regimes can be found in June; 2) The frequency of extreme precipitation across the Pearl River Basin during wet season and whole year is even. However, occurrence rates of extreme precipitation within the Pearl River Delta during dry season tends to be uneven with significant difference in annual frequency of extreme precipitation; 3) Magnification of extreme precipitation can be observed during dry season with respect to precipitation magnitude and occurrence rates. Besides, occurrence timing of extreme precipitation regimes tends to be earlier. However, no significant trend can be identified in extreme precipitation during wet season and during the entire year. Winter flood has the potential to cause agricultural loss. Therefore, wetting tendency of dry season can pose new challenges for regional water resources management; 4) Warming climate across the Pearl River Basin and variations of warm and cold episodes of ENSO have significant effects on extreme precipitation processes. From the perspective of the ENSO's influence, magnitude and frequency of extreme precipitation over the west of the Pearl River Basin increases in El Niño years with decreased magnitude of extreme precipitation in the lower Pearl River Basin.

**Key words:** extreme precipitation; clustering; poisson process; ENSO; the Pearl River Basin