

李晓娟,简茂球,方一川,等. 广东省前汛期大到暴雨频数的时空变化特征[J]. 气象,2012,38(11):1339-1347.

广东省前汛期大到暴雨频数的时空变化特征^{*}

李晓娟¹ 简茂球² 方一川¹ 罗 文¹

1 广州中心气象台,广州 510080

2 中山大学环境科学与工程学院,广州 510275

提 要: 利用实测降水量资料研究了广东前汛期大到暴雨频数的时空分布特征,分析结果表明:广东前汛期大到暴雨频数与同期雨量的空间分布具有很好的一致性,基本可以表征前汛期的旱涝程度,通过 REOF 可将其分为 4 个区:粤东区、珠江三角洲区、粤西北区和雷州半岛区;前汛期大到暴雨频数的年际变化明显,主要有准 2~3 a、6~10 a 周期,1985 年后各区周期均有缩短趋势,以 4~5 a 短周期为主;珠江三角洲及以南地区前汛期大到暴雨频数有增多趋势,其中珠江三角洲中心区域增多显著,6 月份变化最明显。

关键词: 广东前汛期,大到暴雨,时空变化,小波分析

Spatiotemporal Variations of Heavy Rain's Frequency in the Early Rainy Season in Guangdong

LI Xiaojuan¹ JIAN Maoqiu² FANG Yichuan¹ LUO Wen¹

1 Guangzhou Central Meteorological Observatory, Guangzhou 510080

2 School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275

Abstract: Based on the observed data of precipitation in Guangdong Province, the characteristics of spatiotemporal variations of heavy rain in early rainy season (April—June) were studied. The results show: (1) The spatial distribution of heavy rain frequency is consistent with the rainfall and has obvious regional characters. The heavy rain frequency can represent the drought and flood trend in the early rainy season. By REOF method, the heavy rain distribution can be divided into 4 regions: East Guangdong, the Pearl River Delta region, Northwest Guangdong and Leizhou Peninsula. (2) The main periods in the frequency variation of heavy rain are 2—3 a and 6—10 a. The period of each region has shortened since 1985, with the main period of 4—5 a. (3) The frequency of heavy rain in the Pearl River Delta and the region south to it has an increasing trend, which is more obvious in the center of Peal River Delta region, and passed a confidence level test at 0.05. The most obvious change happened in June.

Key words: early rainy season, heavy rain, spatiotemporal variations, wavelet analysis

引 言

广东省地处华南,具有平均年雨量大、汛期时间长、暴雨日数多的特点。每年的 4—6 月是广东第一个多雨期,因降水集中、暴雨和水灾多发,称为前汛

期,除了雷州半岛之外,其余地区前汛期雨量约占全年的 40%~50%^[1]。暴雨是广东省重要的水资源,但它又会造成江河洪水泛滥、山洪暴发、山体滑坡、泥石流和涝渍等灾害。

目前国内学者对中国暴雨的气候特征、成因以及变化规律的研究很多^[2-13],冷春香等^[10]分析了中

* 广东省气象局课题(2008A02、2012B02)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY20106001)、广东省科技计划项目(2011A032100006)共同资助

2011 年 6 月 15 日收稿; 2012 年 2 月 23 日收修定稿

第一作者: 李晓娟,主要从事天气预报和研究工作. Email: lxj_echo@163.com

国汛期雨型和暴雨日数的时空分布规律及其成因,发现我国南部和东部的大部分地区,汛期总雨量明显偏多年的多雨中心区域与暴雨日数显著偏多区域有很好的-致性,华南地区汛期暴雨日数的年际变化最主要特点是持续性。刘小宁^[11]分析了我国东部 25 站暴雨频数及一日最大降水强度时空分布特征。刘增基等^[12]通过数理统计和小波分析研究了福州市近百年暴雨频数的变化特征;彭丽英等^[13]对 1958—2000 年华南前汛期暴雨降水的气候特征进行了统计研究,发现华南的暴雨近 50%集中发生在前汛期。伍红雨等^[14]对华南年和前、后汛期的暴雨日、强度、贡献率等的气候特征及变化作了分析和研究,得到了一些有意义的结果。

近年来对气候变暖背景下暴雨和强降水的变化趋势的研究较多,很多观测和研究发现,由于全球变暖,水循环加剧,降水波动更大,干旱、强降水等极端天气事件的频率和强度也出现明显变化,旱涝的发生趋于频繁^[15-26]。国外的一些研究表明,20 世纪在全球大多数地区平均降水量增加的同时强降水事件也增加^[17],有研究^[18-19]指出中国极端降水值和平均强度都有增强趋势,尤其是 20 世纪 90 年代极端降水比例趋于增大。

孙风华等^[20]发现东北地区近 50 年总降水量虽减少,但暴雨频率并不减少,而且强度增大。翟盘茂等^[21]的研究发现西北大部分地区极端降水事件呈现出明显的增加趋势,且在近期比早期增长了近 1 倍;而东北东部到华北大部分地区极端降水发生的日数却趋于明显减少。可见气候变暖引起的天气变化有一定的地域分布。

对广东前汛期暴雨的研究当中,大多存在站点

密度较稀疏的问题,对其地域分布特征不能完整体现;另外,由于前汛期当中,各月降水的影响系统不尽相同,有必要分时段研究。本文选择大到暴雨频次进行研究,主要是因为大到暴雨在洪涝灾害高发的前汛期影响较大,而且其发生频次较暴雨明显偏高,直接关系到前汛期的旱涝趋势。对大到暴雨频次时空变化规律的研究,对预测和防灾减灾有重要意义。

1 资料和方法

使用广东省 86 站 1961—2009 年 4—6 月逐日 20—20 时雨量资料(其中小部分站点起始年份在 1962—1973 年之间,空缺资料不参加当次统计),资料来源于广东省气候中心经审核的月报表资料,本文使用时对各站进行了气候范围值检查。

研究方法包括转动主分量分析、小波分析、相关分析和线性回归等。

2 广东前汛期大到暴雨的气候统计特征

2.1 前汛期大到暴雨频数的地理分布

广东省地形比较复杂,降水分布也有很强的地域性。统计 1961—2009 年共 49 年广东 86 站 4—6 月大到暴雨频数(即日降水量≥25 mm 出现的日数),得到其多年平均的空间分布,与前汛期雨量的分布对比可见,大到暴雨频数的空间分布与前汛期总雨量的空间分布相当一致(图 1),呈现出明显的

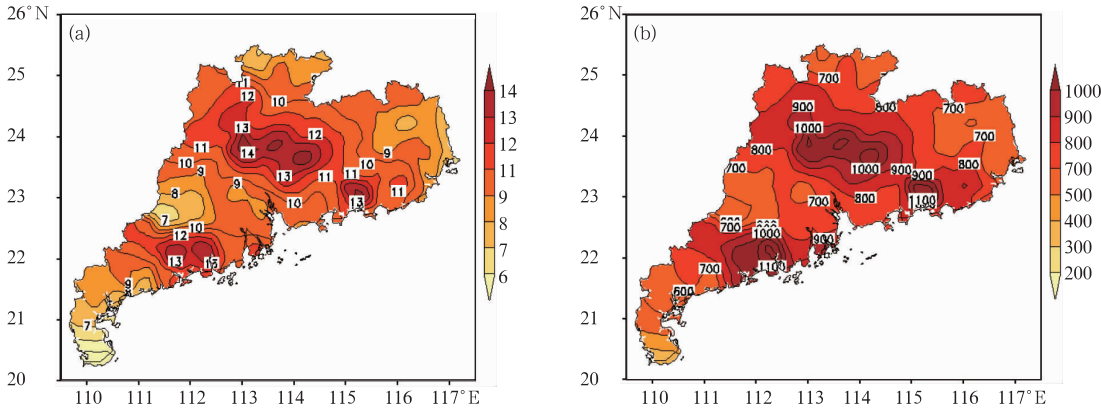


图 1 广东前汛期大到暴雨日数(a)和前汛期雨量(b)的分布(日数单位:d;雨量单位:mm)
Fig. 1 Day counts of heavy rain (a, unit:d) and the total precipitation (b, unit:mm)
in early rainy season in Guangdong

地域特征,有 3 个大到暴雨中心,与广东 3 大年多雨中心也非常吻合,分别为:粤北山区南部边缘的清远—佛冈—龙门—河源一带、粤西南的阳江—阳春—恩平—斗门一带以及粤东的海丰—陆丰一带。而在雷州半岛、粤北山区的北部和中部偏西地区是大到暴雨相对较少区。暴雨频数与大到暴雨的空间分布非常相似,但其值大小约是后者的 1/2~1/3 (图略)。

统计各站全年和前汛期大到暴雨频次发现,广东中北部地区的大到暴雨有 45%~55% 出现在前汛期,南部沿海除雷州半岛之外这个比例约是 40%~45%,而雷州半岛只有 20%~30% 左右。这与造成广东大到暴雨的天气系统和地理分布有关,广东中北部的大到暴雨大部分发生在前汛期,由与西风带系统活动相联系的冷暖空气交汇造成;沿海和粤东地区在后汛期受热带系统影响所致的强降水较多。

前汛期大到暴雨雨量占全年的相应比例,与大到暴雨日数相似(图略)。

2.2 大到暴雨频数的月际分布

从各月平均大到暴雨日数的气候分布(图 2)可见,广东的大到暴雨主要出现在 4—9 月汛期,10—3 月出现的几率很小,呈现双峰型分布,主峰在 5—6 月,次峰在 8 月。其中前汛期的 4 月大到暴雨中大约有 1/3 是暴雨,5—6 月略多于 1/3。

具体分析各月大到暴雨地理分布可以发现(图 3):4 月大到暴雨主要出现在粤西北,阳江地区也有一个弱的多雨中心;5 月的分布与 4 月差别不大,但大到暴雨日数增多,这在 3 个多雨中心都有反映;6 月的主要变化是靠近沿海的 2 个大到暴雨中心的值进一步增大,尤其是粤东中心成为全省最强。

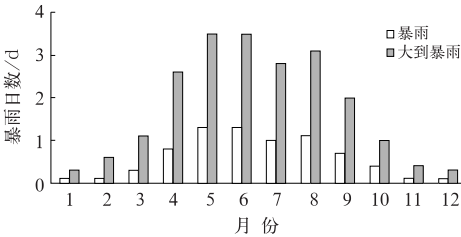


图 2 广东各月平均暴雨和大到暴雨日数分布(单位:d)

Fig. 2 Day counts of rainstorm (white) and heavy rain (grey) for each month in Guangdong (unit:d)

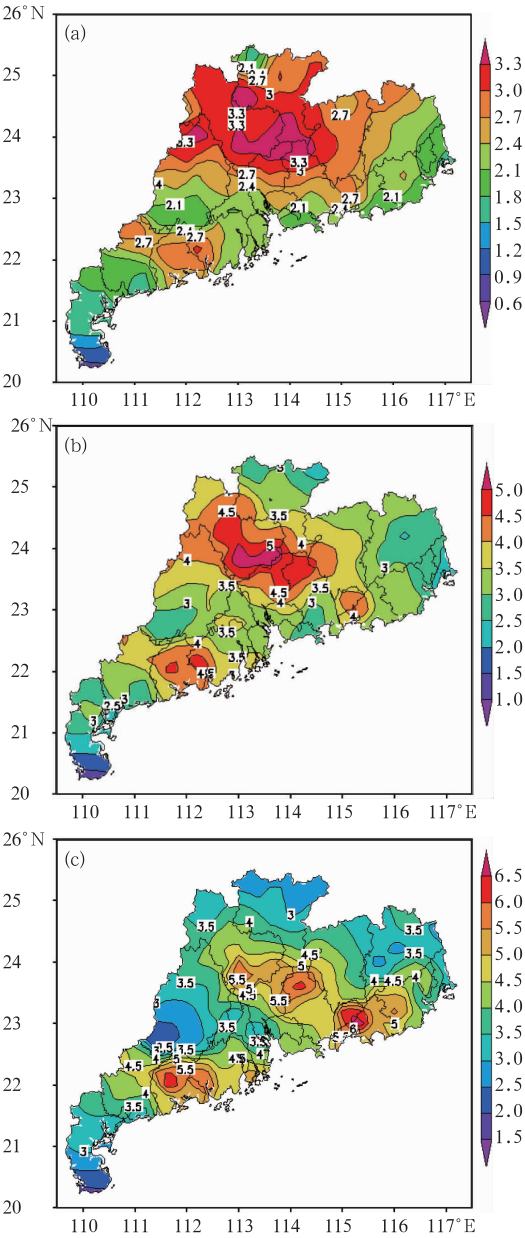


图 3 广东前汛期大到暴雨日数分布
(a) 4 月, (b) 5 月, (c) 6 月 (单位:d)

Fig. 3 Spatial distributions of day counts of heavy rain in April (a), May (b) and June (c) in Guangdong (unit:d)

大到暴雨频数的这种变化,是与环流演变相对应的。4—5 月主要是西风带系统造成的降水,以中北部地区为主;5 月下旬到 6 月,随着夏季风的爆发,西南暖湿气流造成的沿海降水增加。

2.3 前汛期大到暴雨频数与雨量的关系

为了解大到暴雨在前汛期降水中的贡献,统计

前汛期大到暴雨雨量占同期总雨量的比例,结果发现,在广东少雨地区其比例约为 55%~70%,在 3 大多雨中心达到 70%~80%以上(图略),说明广东前汛期降水量中有 50%以上(多雨中心 70%以上)由大到暴雨所造成。

相比而言,暴雨雨量占前汛期总雨量的 20%~55%,在大部分地区约为大到暴雨雨量的 1/3 到 1/2 左右,而 3 个大暴雨中心暴雨雨量的比例较高,在 40%以上;粤北山区和中部偏西地区比例则较小,在 20%~30%左右。

分析前汛期大到暴雨日数和同期雨量的相关系数可见,全省基本都在 0.8~0.9,且多雨中心其相关系数也较大。可见大到暴雨频数基本可以反应前汛期的旱涝情况。

3 广东前汛期大到暴雨的时空变化特征

3.1 广东前汛期大到暴雨的分区

已有许多研究表明,广东省的降水存在着较为显著的地域差异,且在年际和年代际变化上也有表现。刘黎明等^[22]曾用聚类分析等方法,把广东 4—8 月降水大致分为 4~5 个区域;刘燕等^[23]用 REOF 方法将广东前汛期降水分为 4 个区域。本文探讨大到暴雨发生的地域分布,了解其发生特点,对实际预测和防灾有一定参考意义。

旋转主分量分析(ROF)是一种较为客观的分区方法,气象上常采用 REOF 对要素场进行分析,不仅可以很好地反映不同地域的变化,而且可以反映不同地域的相关分布状况。

本文选取资料起始年份为 1961 年的广东省内 62 个测站 49 年来前汛期大到暴雨日数的标准化场进行主分量分析,发现前 4 个主分量的累计方差可达 62%,已大致包含了主要的气象信息。故选取大到暴雨日数的前 4 个主分量进行旋转。

图 4 给出了前 4 个主分量旋转后的荷载场的空间分布。第一旋转荷载因子的分布特点是全省基本为一致的正值区,高荷载区在粤东地区,荷载值基本 >0.5(最大值汕头为 0.88);第二旋转因子全省基本为一致的负值区,其中高荷载区主要位于珠江三

角洲西部以及中部偏西地区(中心最大荷载值位于顺德和中山,达到-0.78),其余地区较小;第三旋转因子的荷载全省大部分为负值,大值中心位于粤西北地区(中心最大值在乐昌和韶关,为-0.80);第四旋转因子的荷载大值区位于雷州半岛附近(最大值在廉江,为 0.80),其余大部地区值较小。

根据上述荷载场的分布特点,相应地可以把广东前汛期大到暴雨日数分布场分为 4 个区(图 5): (1)P1 区:粤东区;(2)P2 区:珠江三角洲区;(3)P3 区:粤西北区;(4)P4 区:雷州半岛区。下文及图中 P1、P2、P3、P4 同此定义,以 P0 区表示全省平均。

3.2 前汛期大到暴雨频数的年际和年代际变化

从全省平均大到暴雨频数来看(图略),各月均有一定的年代际波动,尤其是 5—6 月这种阶段性波动较明显;从偏多偏少的阶段来看,4 月和 5 月大致接近;20 世纪 60 年代处于偏少期,70 年代至 1985 年前后上升至偏多期,1985 年后再转入偏少阶段;6 月与 4 月及 5 月相反,60 至 70 年代中期偏多,1976 年转入偏少期;90 年代初再次转入偏多期,21 世纪以来的近 10 年频繁出现高值年。

从线性变化趋势来看,4 月有轻微的下陷趋势,5 月份基本无线性变化;6 月则有一定的上升趋势,但各月线性趋势变化均不显著。

按照本文中的分区分析发现,各区前汛期平均大到暴雨总日数的线性变化趋势也都不显著,而同样表现为年际和年代际的阶段性波动(图略)。

为了分析不同月份的变化,对各区逐月的大到暴雨日数分别做统计和分析,则发现有如下几个主要特点(图 6):(1)4 月 P4 区大到暴雨日数呈较显著下降趋势(通过 0.05 显著性水平检验),其余地区变化不明显;(2)5 月的大到暴雨日数 P4 区呈显著上升趋势(通过 0.01 显著性水平检验),其余地区的年代际波动都较明显而一致,与前文所述的 5 月全省平均变化相似;(3)6 月除 P4 区外,其余各区均有上升趋势;尤其进入 20 世纪 90 年代后,P1、P2 和 P3 区 6 月的大到暴雨日数波动趋于频繁,而且振幅加大,P2 区变化尤为明显,6 月大到暴雨呈较显著上升趋势(通过 0.10 显著性水平检验);而 P4 区 6 月的年际振荡很明显。

从各站点的线性趋势变化来看(图 7),前汛期

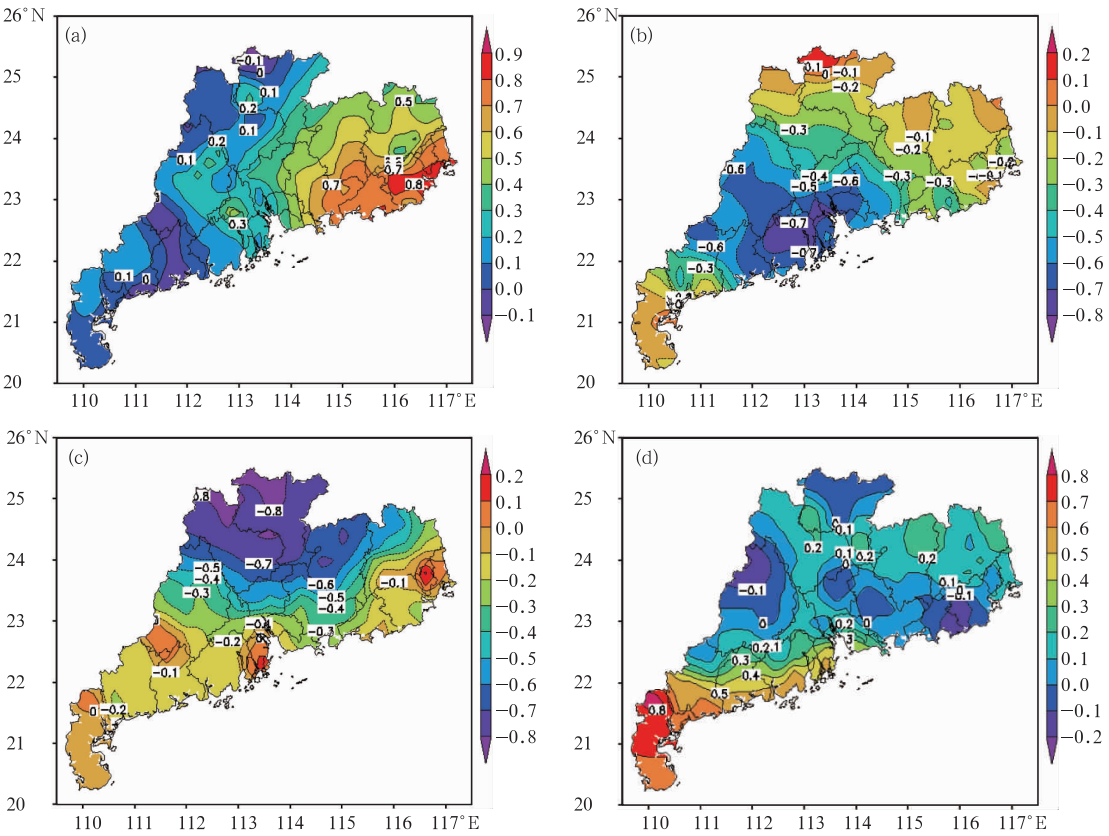


图 4 广东前汛期大到暴雨日数的前 4 个主分量旋转后的荷载场空间分布

Fig. 4 Spatial patterns of the rotated EOF (REOF) mode of heavy rain in early rainy season in Guangdong

(a) the first eigenvector, (b) the second one, (c) the third one, (d) the fourth one

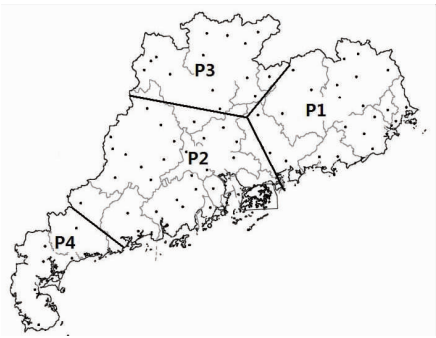


图 5 前汛期大到暴雨日数的分区

Fig. 5 Division of heavy rain areas in early rainy season in Guangdong

大到暴雨总日数在珠江三角洲及以南地区有所增多,其余大部分地区略有减少,其中珠江三角洲中心区域增加趋势明显(通过 0.05 显著性水平检验)。分月来看,4 月除了东部偏东地区略增多外,其余大部略有减少趋势;5 月西南部和中部偏西的部分地区呈现增加趋势,其余大部分地区呈现减少趋势;6

月变化最明显,除粤北偏北和雷州半岛南部局部地区外,大部地区呈增多趋势,其中珠江三角洲中心区域增多显著。

由此可见,前汛期珠江三角洲地区大到暴雨日数的增多主要是由于 6 月该地区大到暴雨日数的显著增多所造成。

3.3 大到暴雨频数的周期分析

从上一节的分析看出,各区大到暴雨日数的变化呈现出一定的阶段性和周期波动,为了进一步了解其周期变化,对全省和各区的大到暴雨日数进行小波分析。

从全省平均状况来看(图 8),大到暴雨日数的年际变化较明显,1985 年以前以准 6~10 a 周期为主,1985 年以后,除了 6~8 a 周期外,2~4 a 的短周期趋于明显——这在 4 个分区也有反映(图略);此外,全省平均大到暴雨频数还有准 30 a 的年代际变化特征。

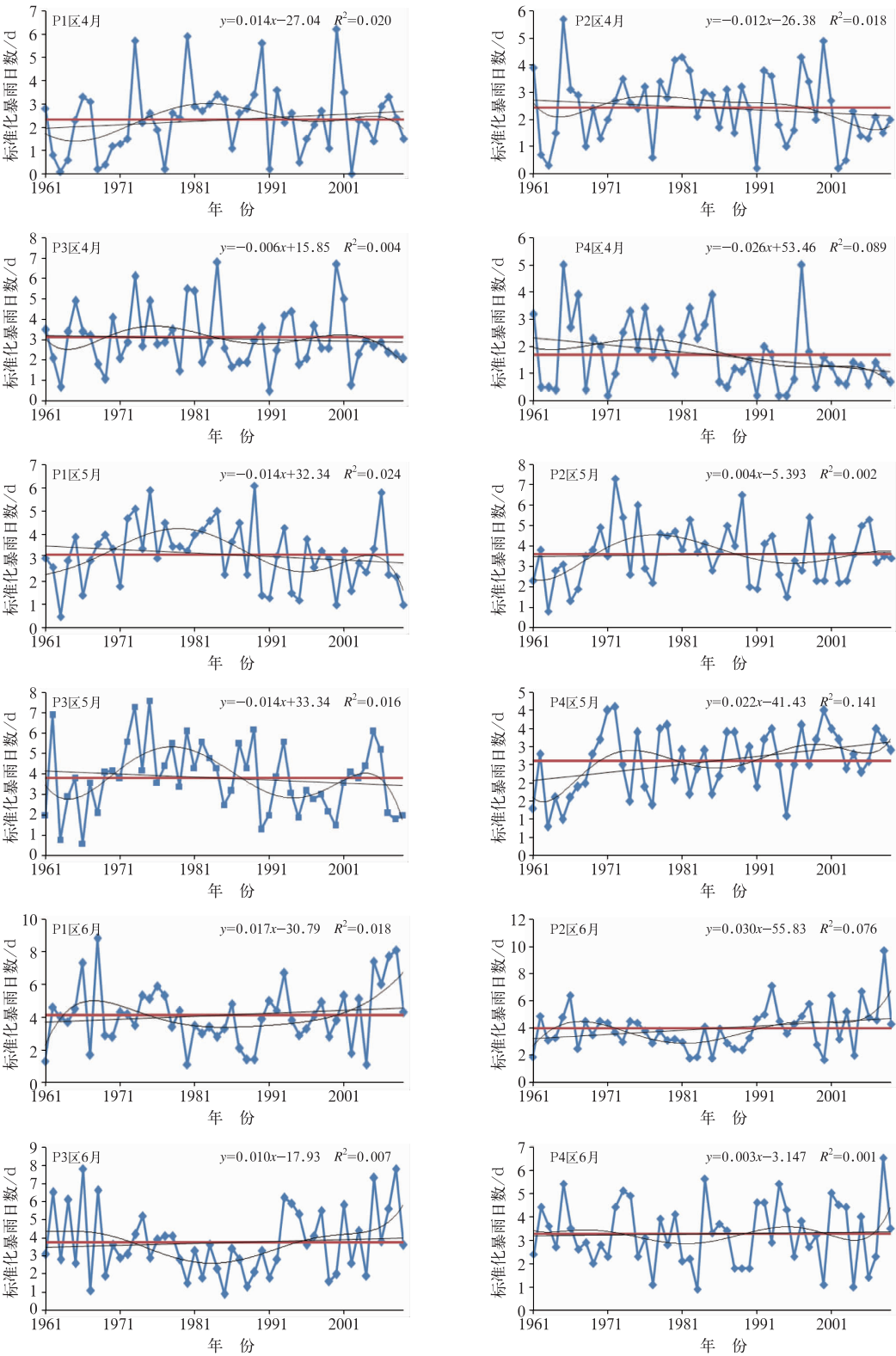


图 6 广东各区 4—6 月大到暴雨日数的变化 (单位: d)

(图中粗实线为多年平均线, 细实线为线性趋势线, 波浪线为 6 次多项式拟合线)

Fig. 6 Interannual variations of heavy rain day counts in April–May–June in different areas of Guangdong (unit: d)

(Solid line is mean annual average, the thin tilting line shows the linear trend fitting, the curves show six-order polynomial fitting)

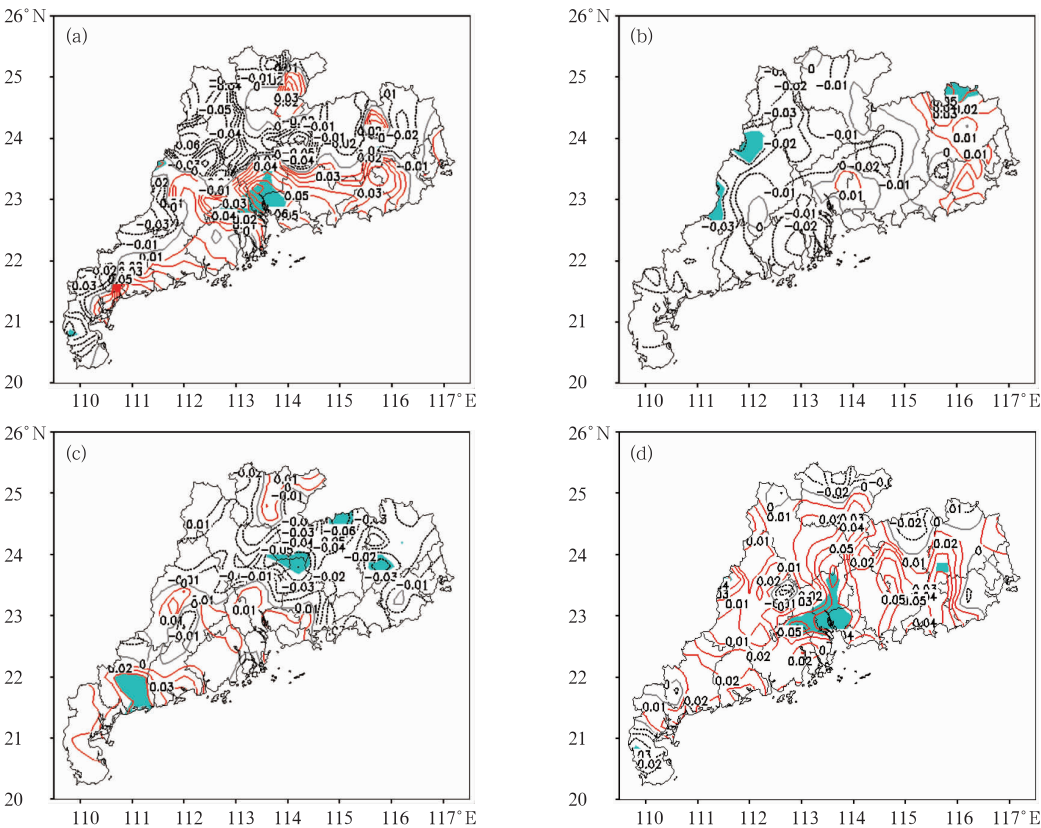


图 7 1961—2009 年 4—6 月大到暴雨日数的线性趋势
(a) 4—6 月, (b) 4 月, (c) 5 月, (d) 6 月
(阴影区通过 0.05 显著性水平检验)

Fig. 7 Spatial distributions of the linear trend of heavy rain day counts in early rainy season in Guangdong (a) early rainy season, (b) April, (c) May, and (d) June
(Shaded areas are passing the 0.05 significance level)

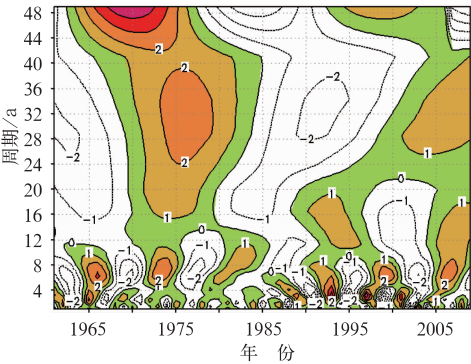


图 8 全省前汛期平均大到暴雨频数的小波分析
Fig. 8 The wavelet analysis for heavy rain day counts in early rainy season in Guangdong

针对 1985 年前后的周期变化,对 1961—1985 年和 1986—2009 年两段时期内全省和各区 4—6 月大到暴雨日数分别做功率谱分析(图 9,分区图略)。可以发现,各区在 1985 年后大到暴雨日数的周期都有缩短趋势,以 4~6 a 的短周期为主,其次是 2~3

a 的周期。这在一定程度上反映 1985 年后,前汛期旱涝的交替趋于频繁。

3.4 大到暴雨雨量的变化

大到暴雨产生的雨量是致灾的直接因素,对广东 4 个分区前汛期各月的大到暴雨雨量分别做统计分析发现(图略),其变化与 3.2 节分析的大到暴雨日数的变化基本相一致。首先,阶段性波动较明显;另外,6 月大到暴雨雨量变化较为明显,除 P4 区外,其余各区进入 20 世纪 90 年代后均有上升趋势,其中 P2 区 6 月大到暴雨雨量的线性增加趋势显著(通过 0.05 显著性水平检验);而雷州半岛(P4)区 5 月大到暴雨雨量也有明显的增加趋势(通过 0.01 显著性水平检验)。

3.5 局地日暴雨极值的变化

本文挑选所研究区域内站点日雨量的最大值作

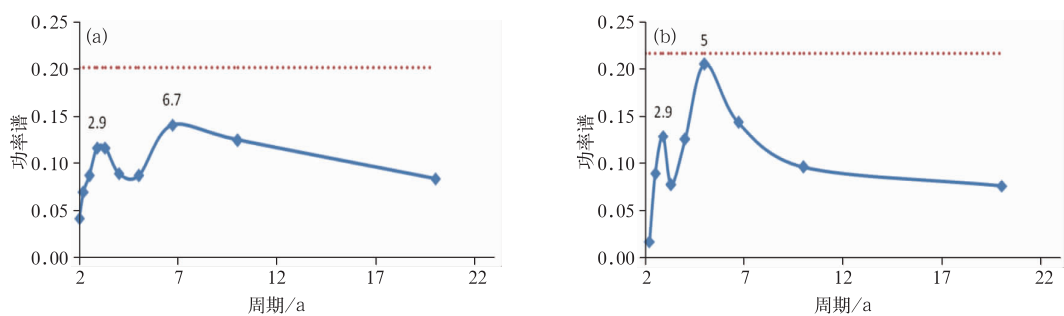


图 9 广东 4—6 月大到暴雨日数的功率谱分析

(a) 1961—1985 年, (b) 1986—2009 年

(虚线为 0.05 显著性水平检验谱)

Fig. 9 The power spectrum for the heavy rain day counts in early rainy season in Guangdong

(a) 1961—1985, (b) 1986—2009

(The dotted line is the test spectrum, at 0.05 significance level)

为该区域的局地日暴雨极值,认为一定程度上可表征该区域大到暴雨极端强度的变化。从全省范围来看(图 10),1961—2009 年广东局地日暴雨极值有较为显著的线性增加趋势(通过 0.05 显著性水平检验),另外 1976 年以后,日暴雨极值振荡明显,极端最大值比 1976 年前明显增大,1976 年前最大日雨量约在 400 mm 左右,而 1976 年以后多次出现 600 mm 左右的极值。

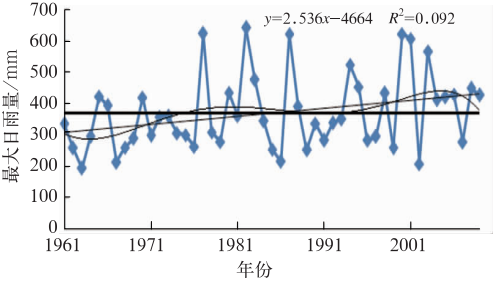


图 10 广东 4—6 月局地日雨量极值(单位:mm)

(图中细斜实线为线性趋势线,波浪线为 6 次多项式拟合线)

Fig. 10 The local maximum value of daily precipitation in early rainy season in Guangdong (unit: mm)

(The thin tilting line shows the linear trend fitting, the curves show six-order polynomial fitting)

分析各区逐月的局地日暴雨极值发现(图略),6 月变化最明显,除粤西北区外其余各区均有上升趋势,其中珠江三角洲地区上升显著(通过 0.05 的显著性水平检验),粤东区其次(通过 0.10 的显著性水平检验)。另外,粤东区在 1975 年以后、珠江三角洲区在 1990 年以后、雷州半岛区在 1980 年以后振幅

趋于增大。5 月暴雨极值的变化主要表现为 1980 年后粤东区和雷州半岛区振幅加大。粤西北 4 月暴雨极值在 1980 年以后振幅趋于增大。

从以上分析可知,20 世纪 90 年代后珠江三角洲地区 6 月大到暴雨雨日、大到暴雨雨量和局地日暴雨极值均呈现明显增加趋势。黎伟标等^[24]用 1998—2007 年卫星探测资料对珠江三角洲地区及邻近区域降水的分布特征研究发现,珠江三角洲城市群降水有明显的增多趋势,主要表现为对流性降水的增加,前汛期的趋势在全年最为明显。而一般来说,大到暴雨中对流性降水比例很大,故本文中 6 月珠江三角洲地区大到暴雨的变化趋势与黎的结论相吻合。

4 总结与讨论

本文研究了广东前汛期大到暴雨频数的时空分布特征,分析了不同区域大到暴雨日数、大到暴雨雨量和局地日暴雨极值的变化特征,主要结论有:

(1)广东前汛期大到暴雨日数与同期雨量的空间分布具有很好的一致性,并具有明显的地域特征,大到暴雨日数基本可以表征前汛期的旱涝程度。通过 REOF 可将广东大到暴雨分为 4 个区:粤东区、珠江三角洲区、粤西北区和雷州半岛区。

(2)广东前汛期大到暴雨频数的年际变化较明显,主要有准 2~3 a、6~10 a 的周期。1985 年后各区周期均有缩短趋势,以 4~5 a 的短周期为主。

(3)前汛期大到暴雨总日数在珠江三角洲及以南地区有所增多,其余地区略有减少,珠江三角洲中

心区域增加趋势显著;各月大到暴雨频数变化不尽相同,其中 6 月份变化最明显,除粤北偏北和雷州半岛南部外,广东大部呈现增多趋势;大到暴雨雨量的变化和日数变化相似;局地日暴雨极值除粤西北区外均有上升趋势。

1985 年之后广东前汛期大到暴雨频数的周期缩短,大部分地区 6 月份大到暴雨频数有较明显的上升趋势,且振动幅度加大,这与全球气候变暖之间是否有关,有待进一步探讨。另外,相比于其他地区,珠江三角洲地区大到暴雨日数、大到暴雨雨量和局地日暴雨极值增加趋势更为显著,这和城市化进程是否有关及其影响机制,有待于进一步研究。

参考文献

[1] 林良勋,黄忠,冯业荣,等. 广东省天气预报技术手册[M]. 北京:气象出版社,2006: 239-245.

[2] 魏风英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京:气象出版社. 1999.

[3] 谢炯光,纪忠萍. 西北太平洋海温与广东省汛期降水的关系[J]. 热带气象学报,1999, 15(1):56-63.

[4] 何立富,周庆亮,陈涛.“05.6”华南暴雨中低纬度系统活动及相互作用[J]. 应用气象学报,2010, 21(4): 385-394.

[5] 丁治英,常越,朱莉,等. 1958—2000 年 6 月连续性暴雨的特征分析[J]. 热带气象学报,2008, 24(2):117-126.

[6] 陶诗言,卫捷. 夏季中国南方流域性致洪暴雨与季风涌的关系[J]. 气象,2007, 33(3): 10-18.

[7] 高安宁,陈业国,吴兴国. 广西异常暴雨天气事件之异常指数初探[J]. 气象,2003, 29(1):46-48.

[8] 朱宵峰,钱永甫,宁亮,等. 长江下游地区汛期暴雨气候特征分析[J]. 热带气象学报,2008, 24(2):136-146.

[9] 刘裕禄,许柏林,许剑勇. 黄山地区汛期(5—9 月)降水时空特征[J]. 气象,2007,33(8):47-51.

[10] 冷春香,陈菊英. 中国汛期雨型和暴雨日数的时空分布规律及其成因研究[D]. 中国知网-优秀硕士论文. 中国气象科学研究院,2003,3.

[11] 刘小宁. 我国暴雨极端事件的气候变化特征[J]. 灾害学,

1999,14(1):54-59.

[12] 刘增基,邹燕,吴滨. 福州市近百年强降水频数的统计特征[J]. 气象,2002,28(2):46-50.

[13] 彭丽英,王谦谦,马慧. 华南前汛期暴雨气候特征的研究[J]. 南京气象学院学报,2006. 29(2):249-253.

[14] 伍红雨,杜尧东,秦鹏. 华南暴雨的气候特征及变化[J]. 气象, 2011,37(10):1262-1269.

[15] 姚莉,李小泉,张立梅. 我国 1 小时雨强的时空分布特征[J]. 气象,2009,35(2):80-87.

[16] 董啸,周顺武,胡中明,等. 近 50 年来东北地区暴雪时空分布特征[J]. 气象,2010,36(12):74-79.

[17] Hulme M, Osborn T, Johns T. Precipitation sensitivity to global warming: Comparison of observation with HadCM2 simulations[J]. Geophys Res Lett, 1998,25:3379-3382.

[18] Zhai P, Zhang X, Wang H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. Journal of Climate. 2005,18(7):1096-1108.

[19] Wang Y, Zhou L. Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961—2001 and associated changes in large-scale circulation [J]. Geophysical Research Letters, 2005,32(5): L9707.

[20] 孙风华,吴志坚,杨素英. 东北地区近 50 年来极端降水和干燥事件时空演变特征[J]. 生态学杂志,2006,25(7): 779-784.

[21] 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(Z1): 1-10.

[22] 刘黎明,陈创买. 广东的降水分区[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1998, 37(1): 109-113.

[23] 刘燕,叶萌. 基于 REOF 分析的广东前汛期降水趋势的区域特征[J]. 广东气象,2007, 29(4): 11-14.

[24] 黎伟标,杜尧东,王国栋,等. 基于卫星探测资料的珠江三角洲城市群对降水影响的观测研究[J]. 大气科学,2009,33(6): 1259-1266.

[25] 伍志方,曾沁,吴乃庚,等. 广州“5.7”高空槽后和“5.14”槽前大暴雨过程对比分析[J]. 气象,2011,37(7):838-846.

[26] 杜惠良,黄新晴,冯晓伟,等. 弱冷空气与台风残留低压相互作用对一次大暴雨过程的影响[J]. 气象,2011,37(7):847-856.