

前汛期惠州市强降水气候突变及其环流特征分析*

吴蔚^{1,2}, 乔云亭², 温之平², 陈运光¹, 李明华¹, 杨柳¹

(1. 惠州市气象局, 广东惠州 516003;

2. 中山大学季风与环境研究中心/大气科学系, 广东广州 510275)

摘要: 惠州市地处气候年际变化显著的东亚季风区, 近几十年来前汛期强降水事件频繁, 尤其自 20 世纪 90 年代以来有很多暴雨灾害发生。为了客观地分析惠州前汛期强降水事件的异常情况, 利用 1967-2009 年惠州市降水资料和 NCEP/NCAR 再分析资料, 研究了前汛期惠州强降水的气候变化及其环流特征。结果表明: 前汛期惠州市总降水量和暴雨量大, 暴雨日数多; 它们的年际变化一致, 无明显趋势变化。但自 1990 年代中期至今, 强降水异常有增多且强化的趋势。进一步对比惠州前汛期强降水异常事件突变前后的环流特征, 强降水偏多(少)年, 突变前后低纬地区均呈现偏南(东北)气流异常, 而引起强降水偏多(少)年突变的环流形势差异, 主要表现为突变后冷空气作用明显, 低层北风分量增强; 突变前后物理量的差异则主要表现为, 突变后强降水偏多年高、低层散度梯度加大, 垂直上升运动偏强, 对流性不稳定加大, 强降水偏少年上述物理量的变化相反; 以上差异特征均导致突变后强降水偏多年更易引发或加剧强降水异常, 强降水偏少年更不易于强降水的发生。

关键词: 前汛期; 强降水; 气候突变; 环流特征

中图分类号: P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2012)01-0114-08

Analysis of the Interdecadal Change of Heavy Rain during the First Rainy Season in Huizhou and its Circulation Characteristics

WU Wei^{1,2}, QIAO Yunting², WEN Zhiping², CHEN Yunguang¹, LI Minghua¹, YANG Liu¹

(1. Huizhou Meteorology Bureau, Huizhou 516003, China;

2. Research Center for Monsoon and Environment/Department of Atmospheric Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The interannual variability of heavy rainfall during the first rainy season in Huizhou and its circulation characteristics are investigated by using the daily precipitation data and NCEP/NCAR reanalysis data from 1967 to 2009. The results show that Huizhou is characterized by large amounts of total precipitation, heavy precipitation amount and rainstorm days. Heavy precipitation and rainstorm days are basically in agreement with the time series of the total precipitation. All of their tendency have little change. However, the anomalous heavy rainfall events tend to increase and intensify from middle 1990s up to the present. Coherent changes in atmospheric circulation are identified in tropical and midlatitude systems. Southerly (northeasterly) anomalies prevail over the low latitude region before and after the climate jump when heavy rainfall events increase (decrease) and intensify (weaken). However, northerly anomalies and cold air are responsible for the increase and intensification in heavy rainfall after middle 1990s. Moreover, with stronger updraft, convective instability, the heavy rainfall is favorable to form and increase after middle 1990s in Huizhou. The situation of decrease and weakening in heavy rainfall is ac-

* 收稿日期: 2011-03-24

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(40730951); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB421404); 国家自然科学基金重大国际合作研究项目(40810059005)

作者简介: 吴蔚(1983年生), 男, 硕士, 工程师; 通讯作者: 乔云亭; E-mail: qiaoyt@mail.sysu.edu.cn

accompanied by stronger northerly anomalies, weaker updraft and convective instability after middle 1990s.

Key words: climatology; heavy rainfall; climate jump; circulation characteristics

华南属副热带季风气候区,是我国汛期时间最长、降水最多、雨涝最多的地区之一,降水具有明显的季节变化^[1]。前汛期(4-6月)降水占华南全年降水40%~50%或更多,其中5月下旬-6月中旬(俗称“龙舟水”)为前汛期降水高峰。期间暴雨频繁发生,甚至出现大暴雨或特大暴雨,容易诱发洪涝灾害^[2]。因此,华南前汛期强降水事件一直备受国内外研究者的关注。

随着全球气候变暖,陆地大部分地区强降水比例增加,我国极端降水事件发生的频率也在增加,并具有明显的区域性和季节变化特征^[3-4]。尽管近几十年来,全国总降水量变化趋势不明显,但雨日显著减少^[5],表明降水过程可能存在强化的趋势,旱涝可能趋于增多^[6-8]。在我国不同地区,降水及其极端事件频率均有较明显的时空差异^[9-11]。就华南地区总体降水特征而言,年降水量在1992年经历了一次由减少趋势到增加趋势的突变,日最大降水量和年平均暴雨日数间有很好的相关关系^[12];华南夏季降水存在两个主要气候变异区,中部降水以年代际变化特征为主,西北部降水则以年际变化特征为主^[13]。而华南极端降水易发生在厄尔尼诺年春季和拉尼娜年夏季^[14]。综上所述,强降水事件的研究已引起越来越多气象学者的关注。然而,华南强降水事件研究尚处于起步阶段,强降水事件的变化存在明显地域差异。惠州市龙门县是广东省3大暴雨中心之一,近50年来惠州市雨日明显减少,降水呈集中趋势^[15],然而,针对惠州市前汛期强降水的气候分析尚存不足。因此,本文将在考察惠州前汛期强降水年际变化的基础上,重点分析强降水事件异常的环流背景及其对强降水的影响,为进一步研究华南前汛期强降水事件异常的机理提供观测事实和诊断基础。

1 资料与方法

本文使用的资料包括1967-2009年惠州市4个站的逐日降水资料和美国NOAA提供的1967-2009年NCEP/NCAR月平均再分析资料^[16]。采用的方法主要是Mann-Kendall检验法、小波分析^[17]和合成分析。

为了分析前汛期强降水事件的气候特征,本文选取总降水量、暴雨量和暴雨日数作为强降水统计指标,指标定义和单位见表1。

表1 惠州前汛期强降水统计指标及其定义

Table 1 The statistical indices and their definitions of heavy rain selected in this paper

序号	名称	定义	单位
1	总降水量	全部雨日(日降水量 ≥ 0.1 mm)的总降水量	mm
2	暴雨量	全部暴雨日(日降水量 ≥ 50.0 mm)的总降水量	mm
3	暴雨日数	日降水量 ≥ 50.0 mm的日数	d

2 前汛期强降水的气候变化特征

2.1 前汛期强降水的气候特征

广东省各地暴雨量可占年降水量20%以上,且就汛期而言,广东中北部(龙门、佛冈和清远一带)是前汛期暴雨量占年降水量大比值区之一^[18]。可见,广东各地的暴雨量往往对总降水量有重要贡献,而各地强降水的偏多或偏少,不仅具有地域代表性,且又与大范围降水过程密切相关。

从气候平均来看,前汛期华南区域平均总降水量、暴雨日数分别为660 mm和2.7 d^[19]。前汛期惠州市总降水量为879.5 mm,雨日52.3 d;其中暴雨量382.8 mm,占前汛期降水量的41.8%,而暴雨日数达4.5 d,占前汛期雨日的8.6%。可见,前汛期惠州市总降水量和暴雨量大,暴雨日数多,能很好反映惠州前汛期强降水的气候平均特征。然而,由于每年华南前汛期降水时空分布往往极不均匀,导致此间惠州市强降水指标在极端异常年份出现明显差异。如:前汛期总降水量、暴雨量和暴雨日数的极端最大值分别高达为1395.0 mm(2008年)、874.3 mm(2008年)和9 d(2008年),而极端最小值仅为324.2 mm(2002年)、130.6 mm(1995年)和1 d(2002年)。

2.2 前汛期强降水的年际变化

图1为惠州前汛期强降水指标标准化距平的时间序列。由图可见,惠州市前汛期近40年强降水指标均无明显的线性变化趋势,但这些强降水指标具有同相变化特征,其中暴雨量、暴雨日数与总降水的同期相关分别达0.93和0.85(超过0.01的显著性检验),说明本文所选的2个暴雨指标对惠州前汛期总降水量的时间变化有很好的指示意义。

值得注意的是,3个指标均经历了2个明显的

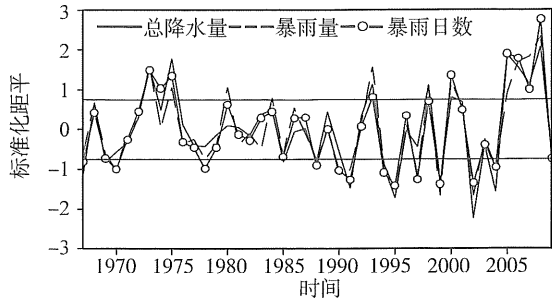


图 1 惠州前汛期强降水指标标准化距平曲线
Fig. 1 The standardized time series of heavy rain indices anomalies during the first rainy season in Huizhou

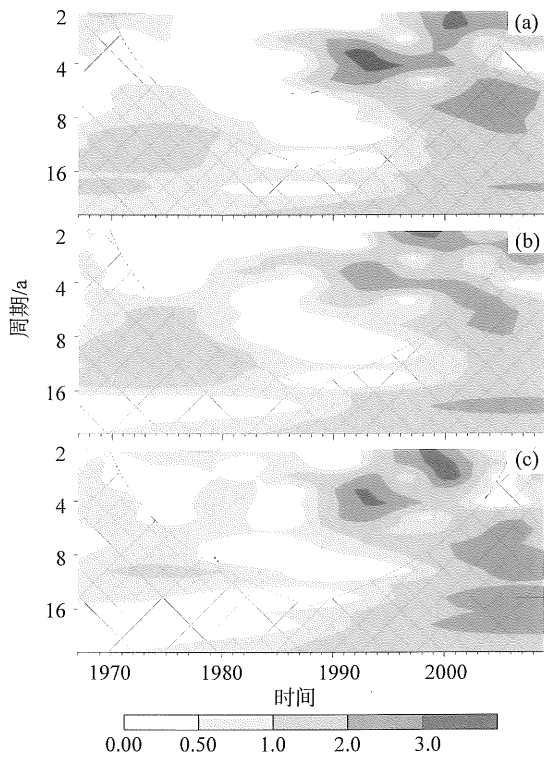


图 2 惠州前汛期强降水指标小波变换模
(a) 为总降水量, (b) 暴雨量, (c) 暴雨日数
Fig. 2 (a) Wavelet power spectrum of precipitation anomalies during the first rainy season in Huizhou. (b), (c) are same as (a) but for heavy rain and heavy rain days, respectively

阶段性变化, 即在上世纪 70 年代中至 90 年代前三者振幅均较小, 此后振幅加大。通过小波分析发现, 这些强降水指标在上世纪 90 年代之前无明显的振荡周期, 但从 1990s 之后开始呈现明显振荡周期, 1990 年代中期振荡周期为 4 a 左右, 1990 年代后期至今周期缩短至 2 a 左右 (图 2)。此外, 通过计算方差贡献率 (即距平方与方差之比) 发现, 强降水指标的逐年方差贡献率自 1990 年代也均呈显著增加 (图 3)。而总降水量、暴雨量和

暴雨日数的方差贡献率突变时间分别为 1998、1995 和 1997 年 (图 4)。突变后 3 者的平均方差贡献率分别为 4.5%、4.2% 和 4.1%, 大于突变前的 1.5%、1.3% 和 1.5%。综上所述, 近 20 年惠州市前汛期强降水不仅频率趋增多, 且气候变化异常幅度趋显著。

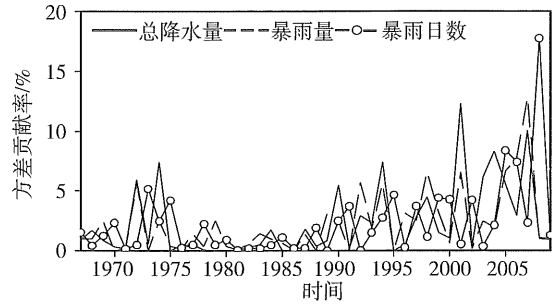


图 3 惠州前汛期强降水指标方差贡献率
Fig. 3 Variance contribution rate of heavy rain indices anomalies during the first rainy season in Huizhou

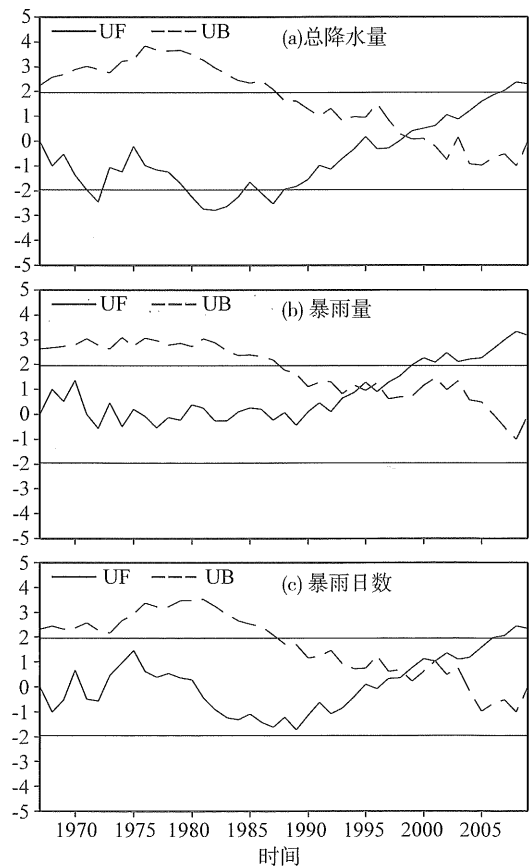


图 4 惠州前汛期强降水指标方差贡献率的 MK 曲线
直线为 0.05 显著性水平临界值
Fig. 4 (a) Mann-Kendall examination of variance contribution rate of precipitation anomalies during the first rainy season in Huizhou. (b), (c) Same as (a) but for heavy rain and heavy rain days, respectively. Straight line indicates confidence level at 5%

3 前汛期强降水与大气环流异常的关系

3.1 前汛期大气环流气候特征

图 5 给出了 1967 - 2009 年平均的前汛期 500 hPa 位势高度和 850 hPa 风场。对流层中层，西风带环流系统和热带季风系统是影响华南前汛期降水的主要因子。中高纬呈准一槽一脊型，槽、脊分别位于东亚和巴尔喀什湖附近，此外贝加尔湖和额库茨克海是弱高压脊；低纬副热带高压稳定维持在西北太平洋，南支槽开始活跃。对流层低层，华南西南气流主要来自南亚季风、南海季风和西北太平洋副热带高压西侧的东南季风。惠州市正好位于是沿副高脊线北上的暖湿气流与中纬南下的冷空气相交绥地区，锋面、气旋活动频繁，形成大范围降水天气，受其影响惠州市进入雨季。

3.2 前汛期强降水与环流的相关

为了进一步分析惠州市降水与大气环流的联系，图 6 给出了惠州市前汛期降水距平与 500 hPa 位势高度和 850 hPa 风场的回归。500 hPa，最明显的特征是巴尔喀什湖 - 贝加尔湖 - 额库茨克海呈现“+ - +”的遥相关波列（图 6a）；850 hPa，贝加尔湖附近存在一显著气旋性环流，西北太平洋则为显著反气旋性环流，华南及其沿海主要受该反气旋西北缘的异常西南气流影响（图 6b）。暴雨量、暴雨日数与大气环流的回归与上述结果类似，这里不再赘述。以上分析表明，惠州市前汛期强降水与大气环流存在显著相关，即对流层中层，巴尔喀什湖、额库茨克海高压脊偏强、贝加尔湖高压脊偏弱，且华南低层西南季风偏强，惠州市前汛期强降水偏多；反之则强降水偏少。

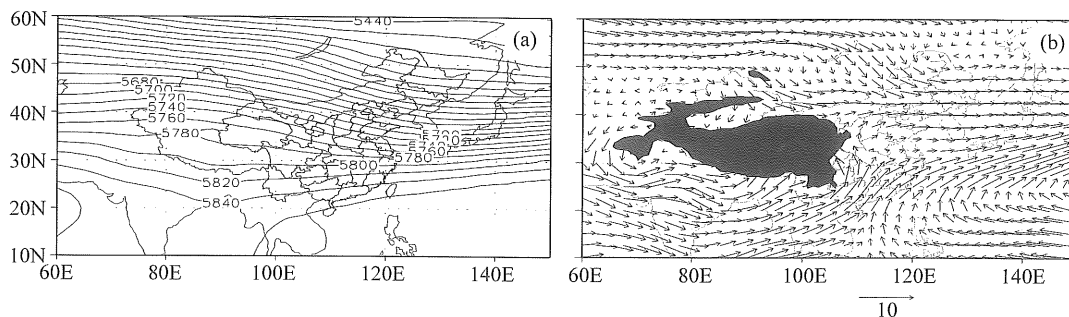


图 5 1967 - 2009 年前汛期 500 hPa 位势高度 (a, 单位: gpm) 和 850 hPa 风场 (b, 单位: $m \cdot s^{-1}$)

Fig. 5 (a) 500 hPa geopotential height during the first rainy season from 1967 to 2009 (unit: gpm). (b) Same as (a) but for 850 hPa winds (unit: $m \cdot s^{-1}$).

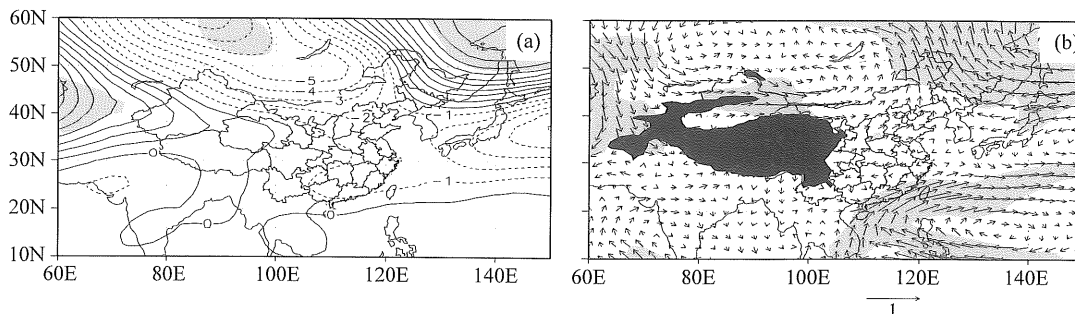


图 6 惠州市前汛期降水与 500 hPa 位势高度 (a, 单位: gpm) 和 850 hPa 风场 (b, 单位: $m \cdot s^{-1}$) 的回归 (阴影区: 通过 0.05 显著性检验)

Fig. 6 (a) 500 hPa geopotential height anomalies obtained by regression against the precipitation anomalies during the first rainy season in Huizhou (unit: gpm). (b) Same as (a) but for 850 hPa winds (unit: $m \cdot s^{-1}$). Shading indicates the correlation is significant at 5% level.

4 前汛期强降水气候突变的环流差异

大气环流异常是导致华南前汛期降水异常的直

接原因，因此有必要关注突变前后前汛期惠州市强降水偏多、少年的物理量和环流特征差异，从而为前汛期惠州市强降水变化的研究和气候预测提供物

理背景。这里定义总降水量、暴雨量和暴雨日数同时小(大)于 -0.75 (0.75) 个标准化距平的年份为强降水偏少(多)年(表 2), 突变时间选 3 个强降水指标方差贡献率中最早的 1995 年, 则强降水偏少、偏多年在突变前分别有 3 (1988、1991、1994) 和 3 (1973、1975、1993) 年, 在突变后分别有 4 (1995、1999、2002、2004) 和 5 (2000、2005、2006、2007、2008) 年。以下分别对强降水偏少(多)年突变前后的环流形势和物理量进行合成对比分析。

表 2 惠州前汛期强降水事件
Table 2 Heavy rain events during the first rainy season in Huizhou

	偏少年 (7)	偏多年 (8)
突变前	1988, 1991, 1994	1973, 1975, 1993
突变后	1995, 1999, 2002, 2004	2000, 2005, 2006, 2007, 2008

4.1 前汛期强降水气候突变的形势对比

图 7、8 分别给出了突变前后惠州前汛期强降水事件的合成 500 hPa 位势高度和 850 hPa 风场。

强降水偏多年, 500 hPa 突变前贝加尔湖附近为位势高度负异常区(图 7a), 突变后巴尔喀什湖附近为位势高度正异常区(图 7c), 巴尔喀什湖高压脊较突变前偏强, 脊前经向度加大, 更有利于引

导冷空气南下。850 hPa 突变前蒙古地区为气旋性异常环流, 其东侧有明显的偏南风异常, 华南受显著异常的西南风控制, 强盛的西南暖湿气流自中南半岛一直延伸至长江流域南侧, 我国大部地区处于一致的偏南风场(图 8a); 突变后蒙古地区为反气旋性异常环流, 其南侧北风异常显著, 低纬地区中南半岛为显著的东北风异常, 广西上空为偏北风, 广东南岭以北为东北风场, 沿海地区为明显的偏西风异常, 南海中东部的东南风异常直指广东沿海(图 8c)。

强降水偏少年, 500 hPa 突变前华南为位势高度正异常区(图 7b), 突变后华南高度场无明显异常, 而蒙古地区存在反气旋中心(图 7d), 突变后冷空气势力明显增强。850 hPa 突变前长江流域为反气旋北侧的西风异常, 南海为反气旋南侧的东风异常, 华南处于西南风和东北风的辐散区域(图 8b); 突变后黄淮-江淮为显著东北风异常, 华南-中南半岛亦为异常东北风, 我国大部地区处于一致的偏北风场(图 8d)。

进一步对比可知, 惠州前汛期强降水偏多(少)年, 突变前后低纬地区均呈现偏南(东北)气流异常; 而引起强降水偏多(少)年突变的环流形势差异, 主要表现为突变后冷空气作用明显, 低层北风分量增强。强降水偏多年, 突变前, 低纬

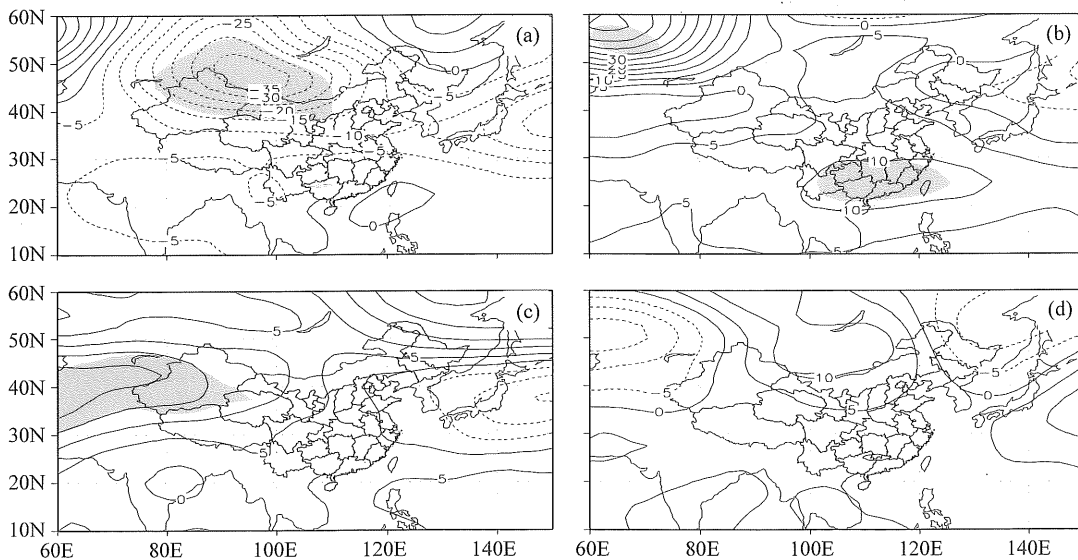


图 7 惠州前汛期不同强降水事件突变前 (a、b)、后 (c、d) 合成的 500 hPa 位势高度 (单位: gpm)
(a、c 为强降水偏多事件, b、d 为强降水偏少事件; 阴影区: 通过 0.05 显著性检验)

Fig. 7 (a) Composite 500 hPa geopotential height anomalies related to more heavy rain events before middle 1990s (unit: gpm). (c) Same as (a) but for those after middle 1990s. (b) Composite 500 hPa geopotential height anomalies related to less heavy rain events before middle 1990s (unit: gpm). (d) Same as (c) but for those after middle 1990s. Shading indicates the correlation is significant at 5% level.

地区的西南风异常尤为显著，强盛的西南暖湿气流对水汽和不稳定能量的输送造成惠州强降水明显偏多，但由于强盛的西南风延伸至长江流域南侧，我国大部地区为一致偏南风场，水汽仍可进一步向北输送，随着雨带北推，惠州强降水难以继续维持；突变后，南风异常虽不如突变前显著，但由于北风的显著增强，冷、暖空气在华南地区交汇，易引发惠州强降水，且因为北风的阻挡作用，致使水汽和不稳定能量在华南地区不断堆积，造成强降水的增幅和维持。即在一定的形势背景下，当存在冷空气和低层北风的显著作用时，更易引发或加剧强降水异常。强降水偏少年，突变前，华南地区主要受反气旋控制，南、北风辐散明显，低纬地区偏东气流异常对西南水汽输送的抑制，不利于惠州出现强降

水；突变后，冷空气较突变前强盛，中南半岛—华南为一致的东北风异常，华南受单一冷气团控制，大气更加干冷，更不易于惠州强降水的发生。

4.2 前汛期强降水气候突变的物理量差异

除了上述的形势差异以外，突变前后前汛期惠州强降水事件在动力和热力特征方面也有显著区别。强降水偏多年，华南上空高低层散度差进一步偏强（图 9a），有利于垂直上升运动的形成；而 500 hPa 垂直速度和假相当位温垂直梯度均呈负距平差异（图 10a、11a），则表明中层垂直上升偏强和对流不稳定加大。这些物理量的异常有利于突变后惠州地区强降水的发生。降水偏少年，情况则相反（图 9b、10b、11b），上述物理量的异常较突变前更不利于强降水的出现。

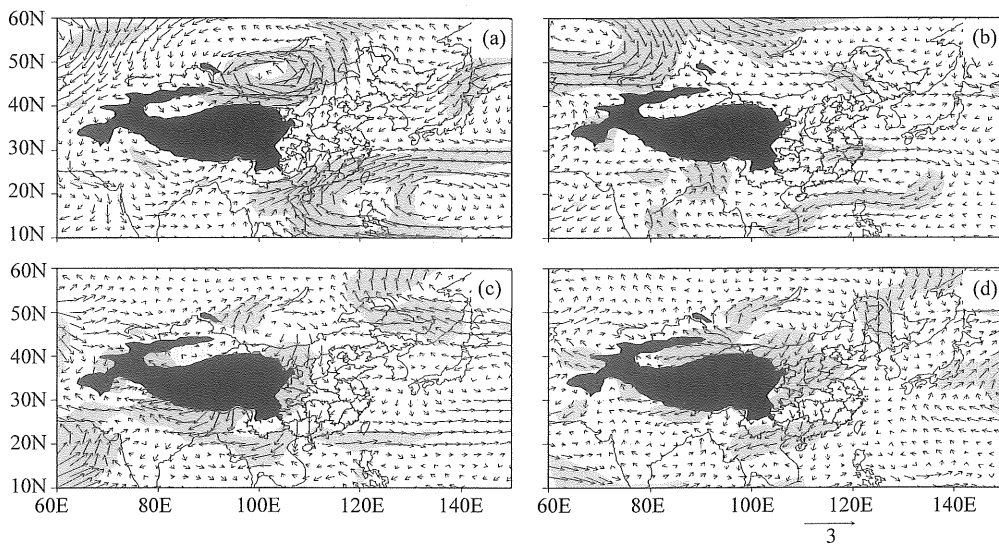


图 8 同图 7，但为 850 hPa 风场（单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）

Fig. 8 Same as Fig. 7 but for 850 hPa winds (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

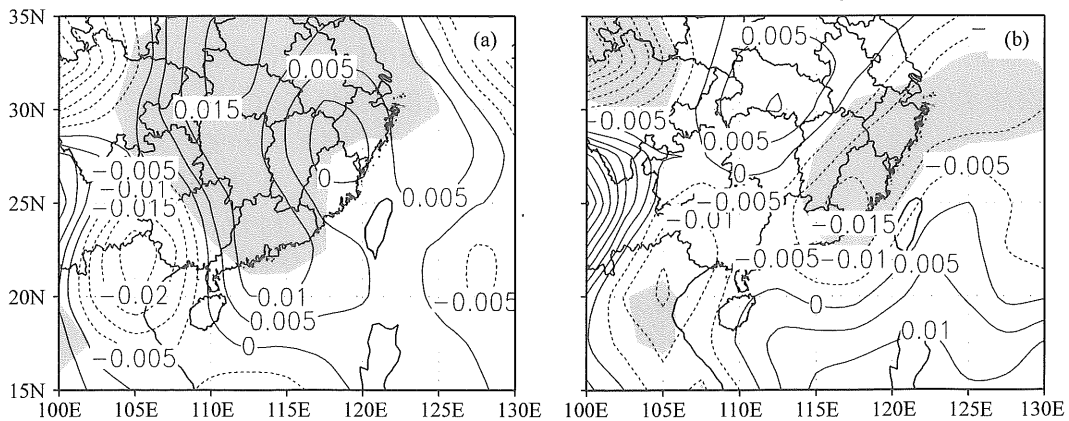


图 9 惠州市前汛期强降水事件散度 $D_{(200 \text{ hPa}-850 \text{ hPa})}$ 的突变差异（突变后减突变前，单位： $10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ ）

（a、b 分别为偏多、少年，阴影区：通过 0.05 显著性检验）

Fig. 9 (a) Differences of $D_{(200 \text{ hPa}-850 \text{ hPa})}$ related to more heavy rain events between the period before and after middle 1990s (unit: $10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$). (b) Same as (a) but for less heavy rain events. Shading indicates the area where is significant at 5% level

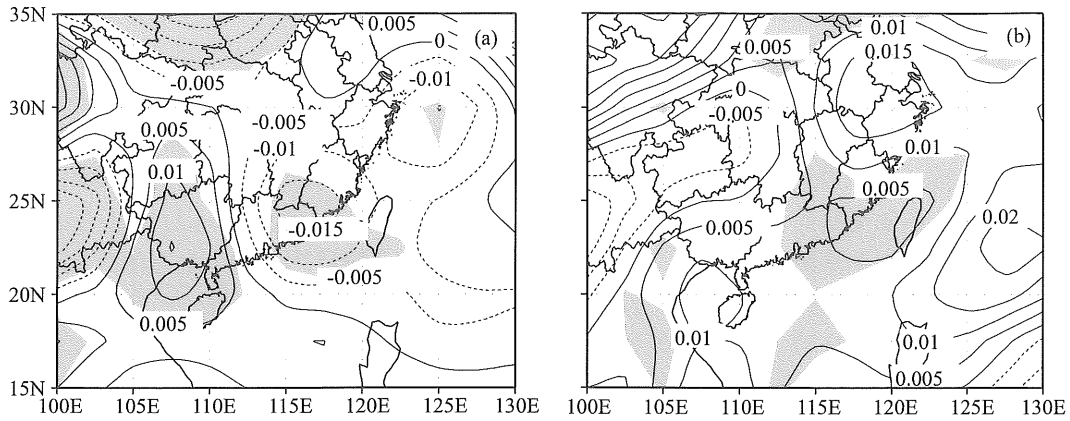


图 10 同图 9, 但为 500 hPa 垂直速度 (单位: $\text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)
 Fig. 10 Same as Fig. 9 but for 500 hPa vertical velocity (unit: $\text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)

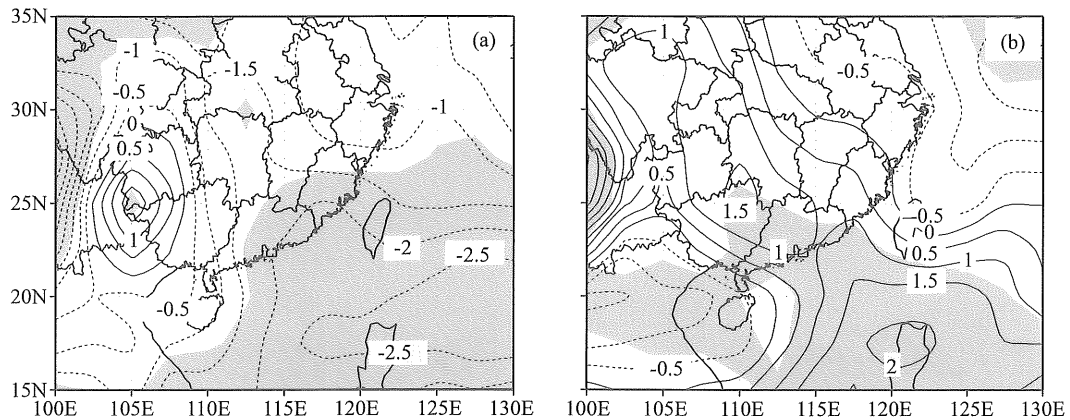


图 11 同图 9, 但为假相当位温 $\theta_{se(300 \text{ hPa}-850 \text{ hPa})}$ (单位: K)
 Fig. 11 Same as Fig. 9 but for $\theta_{se(300 \text{ hPa}-850 \text{ hPa})}$ (unit: K)

5 结 论

1) 总降水量、暴雨量和暴雨日数能很好反映惠州前汛期强降水气候特征, 惠州地区近 40 年前汛期平均总降水量、暴雨量分别为 879.5 和 382.8 mm, 暴雨日数达 4.5 d。

2) 惠州地区近 40 年前汛期平均总降水量、暴雨量和暴雨日数无明显趋势变化, 但 1990 年代中期至今, 其总降水量、暴雨量和暴雨日数不仅频率趋增多, 且气候变化异常程度趋显著。

3) 进一步对比惠州前汛期强降水异常事件突变前后的环流特征, 强降水偏多(少)年, 突变前后低纬地区均呈现偏南(东北)气流异常, 而引起强降水偏多(少)年突变的环流形势差异, 主要表现为突变后冷空气作用明显, 低层北风分量增强: 当存在冷空气和低层北风的显著作用时, 强

降水偏多年, 在一定的形势背景下, 冷暖气团交绥和北风阻挡堆积作用更易引发或加剧强降水异常; 强降水偏少年, 华南受单一冷气团控制, 为显著东北风异常, 大气更加干冷, 更不易于强降水发生。突变前后物理量的差异主要表现为, 突变后强降水偏多年高、低层散度梯度加大, 垂直上升运动偏强, 对流性不稳定加大, 利于强降水发生; 强降水偏少年上述物理量的变化则相反, 不利强降水出现。

参考文献:

[1] 李江南, 王安宇, 蒙伟光, 等. 广东省前汛期和后汛期降水的气候特征[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2002, 41(3): 91-95.
 [2] 季晓云, 张平. 西江“05.06”特大暴雨洪水分析[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2005, 44(2): 266-268.
 [3] 潘晓华, 翟盘茂. 华南地区干旱气候预测研究[J]. 气

- 象科技, 2007, 35(1): 26-30.
- [4] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告 (I): 中国气候变化的历史和未来趋势 [J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.
- [5] ZHAI P M, ZHANG X B, WAN H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. J Climate, 2005, 4: 1096-1107.
- [6] 翟盘茂, 任福民, 张强. 中国降水极值变化趋势检测 [J]. 气象学报, 1999, 57(2): 208-216.
- [7] 钱维宏, 符娇兰, 张玮玮, 等. 近 40 年中国平均气候与极值气候变化的概述 [J]. 地球科学进展, 2007, 22(7): 673-684.
- [8] 闵岫, 钱永甫. 我国近 40 年各类降水事件的变化趋势 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 47(3): 105-111.
- [9] 鲍名, 黄荣辉. 近 40 年我国暴雨的年代际变化特征 [J]. 大气科学, 2006, 30(6): 1057-1067.
- [10] 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰. 中国气候与环境演变评估 (I): 中国气候与环境变化及未来趋势 [J]. 气候变化研究进展, 2006, 1(1): 4-9.
- [11] 蔡敏, 丁裕国, 江志红. 我国东部极端降水时空分布及其概率特征 [J]. 高原气象, 2007, 26(2): 309-317.
- [12] 张婷, 魏凤英. 华南地区汛期极端降水的概率分布特征 [J]. 气象学报, 2009, 67(3): 442-451.
- [13] 肖伟军, 陈炳洪, 刘云香, 等. 近 45 a 华南夏季降水时空演变特征 [J]. 气象研究与应用, 2009, 30(1): 12-22.
- [14] 李威, 翟盘茂. 中国极端强降水日数与 ENSO 的关系 [J]. 气象变化研究进展, 2009, 5(6): 336-342.
- [15] 李明华, 黄健, 杨柳, 等. 惠州城区 50 年来雨日的气候统计和变化特征 [J]. 广东气象, 2008, 30(2): 27-30.
- [16] KALNAY E, KANAMITSU M, KISTLER R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull Amer Meteor Soc, 1996, 77(3): 437-471.
- [17] TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis. Bull Amer Meteor Soc, 1998, 79: 61-78.
- [18] 林良勋, 冯业荣, 黄忠, 等. 广东省天气预报技术手册 [M]. 北京: 气象出版社, 2006: 22.
- [19] 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.

(上接第 113 页)

- [12] 杨秀虹, 李适宇, 李岚, 等. 广州市工业、交通区表层土壤中多环芳烃分布特征初探 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 47(1): 93-97.
- [13] 马骁轩, 冉勇, 邢宝山, 等. 珠江三角洲一些菜地土壤中多环芳烃的含量及来源 [J]. 环境科学学报, 2007, 27(10): 1727-1733.
- [14] 许光辉, 郑洪元主编. 土壤微生物分析方法手册 [M]. 北京: 农业出版社, 1986: 258-260.
- [15] HADERLEIN A, LEGROS R and RAMSAY B. Enhancing pyrene mineralization in contaminated soil by the addition of humic acids or composted contaminated soil [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2001, 56: 555-559.
- [16] HOLMAN H-Y N, NIEMAN K, SORENSEN D L, et al. Catalysis of PAH biodegradation by humic acid shown in synchrotron infrared studies [J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36: 1276-1280.
- [17] SLATER G F, WHITE H, EGLINTON T I, et al. De-termination of microbial carbon sources in petroleum contaminated sediments using molecular ¹⁴C analysis [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39: 2552-2558.
- [18] KEUTH S, REHM H J. Biodegradation of phenanthrene by *Arthrobacter polychromogenes* isolated from a contaminated soil [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1991, 34: 804-808.
- [19] 朱凡, 田大伦, 闫文德, 等. 四种绿化树种土壤酶活性对不同浓度多环芳烃的响应 [J]. 生态学报, 2008, 28(9): 4195-4202.
- [20] SHENG X F, GONG J X. Increased degradation of phenanthrene in soil by *Pseudomonas* sp. GF3 in the presence of wheat [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38(9): 2587-2592.
- [21] 张晶, 张惠文, 张勤, 等. 长期石油污水灌溉对东北旱田土壤微生物生物量及土壤酶活性的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(1): 67-70.