

华南地区前后汛期极端降水事件对比分析*

蔡悦幸^{1,2}, 陆希^{1,3}, 杨崧^{1,3}

(1. 中山大学大气科学学院, 广东 广州 510275;

2. 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;

3. 广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 根据 1961–2014 年华南地区 50 个测站的逐日降水量资料, 采用改良后的百分位法定义了华南地区前后汛期的极端降水, 并运用小波分析、SVD 等统计方法分析了华南地区的前、后汛期极端降水事件的时空变化规律以及可能影响原因。结果表明: 近 54 a 来, 华南地区前、后汛期极端降水都有明显的年际变化, 极端降水指数都呈上升趋势, 但是变化周期不同, 分别具有 3~5 a 和 6~8 a 的显著的变化周期; 华南地区前、后汛期的极端降水指数的空间分布存在差异, 前汛期在广西东北部和广东中部极端降水指数较大, 后汛期在华南沿海地区极端降水指数较大。造成前、后汛期上述差异的可能因素是: ① 大气环流和前冬海温异常变化可能是影响华南前汛期极端降水的重要因素。前汛期由于南海夏季风的爆发, 强盛的西南气流由南向北输送暖湿气流, 同时北方冷空气延伸至华南地区, 冷暖空气在华南中北部交汇, 对流旺盛, 易于发生极端降水; 前汛期前冬季赤道太平洋海温异常增暖特别是中东太平洋的增暖, 为华南地区前汛期降水偏多创造了有利条件; ② 后汛期极端降水的主要原因是局地海温增加, 对流旺盛, 西北太平洋和南海热带气旋的增多, 在华南沿海地区易出现极端降水。

关键词: 极端降水; 前后汛期; 年际变化; 时空特征

中图分类号: P426.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529–6579 (2018) 01–0083–10

Comparison of extreme precipitation events in early and latter rainy seasons over South China

CAI Yuexing^{1,2}, LU Xi^{1,3}, YANG Song^{1,3}

(1. School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. State Key Laboratory on Severe Weather, Beijing 100081, China;

3. Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on the daily precipitation data collected from 50 meteorological stations in South China, the temporal and spatial variations and abnormal distributions of extreme precipitation events defined by the modified percentile method in the early rainy season (ERS) and the late rainy season (LRS) of South China from 1961 to 2014 were analyzed and possible reasons of differences were discussed by using more-

* 收稿日期: 2016–12–06

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金 (教外司留 [2015] 311); 中央高校基本科研业务费专项 (16lgy02); 国家自然科学基金 (41530530, 41575069); 国家自然科学基金委国际合作项目 (41661144019); 灾害天气国家重点实验室开放课题 (2016LASW–B01); 中国气象局广州热带海洋气象研究所/广东省区域数值天气预报重点实验室、中国清洁发展机制基金赠款项目 (2014085)

作者简介: 蔡悦幸 (1991 年生), 女, 研究方向: 降雨日变化研究, 数值模拟; E-mail: 513012183@qq.com

通信作者: 陆希 (1983 年生), 女, 研究方向: 海气相互作用, 数值模式; E-mail: luxis@mail.sysu.edu.cn

let wavelet analysis and SVD method. The results indicate that the extreme precipitation indexes of ERS and LRS during recent 54 years have a significant interannual variation with 3 – 5 years and 6 – 8 years periods, respectively, and showing a trend of slight increase. The distributions of extreme precipitation index are also significantly different between ERS and LRS. The maximum anomalies of ERS are mainly in the northeast Guangxi and central part of Guangdong, but those of LRS are near the coastal areas. The possible reasons for the differences between ERS and LRS are as follows: ① The atmospheric circulation and SST anomalies in the preceding winter can be considered as important factors of the extreme precipitation events in ERS of South China. Due to the onset of summer monsoon, the strong southwesterlies carrying warm and wet air from the South China Sea merge with the north cold air at the north-central region of south China, and convection becomes stronger, which is more prone to heavy precipitation. The increase of SST in tropical Pacific, especially over the central eastern Pacific, creates a favorable condition for extreme precipitation in ERS. ② The extreme precipitation in LRS shows no obvious relationship with atmospheric circulation features. The warmer local SST and stronger convection are helpful for tropical cyclones to move westward, which increases extreme precipitation in the coastal areas of South China.

Key words: extreme precipitation; early rainy season and latter rainy season; interannual variations; temporal and spatial characteristics

华南地区位于我国最南方,属热带、亚热带季风气候区,并且紧邻南海以及太平洋,是全国雨量最充沛的地区之一。每年华南地区降水集中在两个时期,分别是 4 – 6 月(前汛期)和 7 – 9 月(后汛期)^[1-3]。很多学者探讨了前后汛期降水的不同成因和变化规律,发现前汛期降水主要以锋面降水为主,受大尺度西风带影响^[4-5],年际变化不明显,总体呈减少趋势^[6];后汛期降水以强对流活动和台风降水为主,有明显的年际变化^[3,7]。

进入汛期后,华南地区雨量增加,极端降水事件频发,往往导致严重的洪涝灾害,给工农业生产和社会生活带来巨大损失^[8-10]。然而关于华南地区前后汛期极端降水的研究相对较少,有研究指出华南前后汛期极端降水的概率分布特征不同,前汛期自南向北呈“高 – 低 – 高”的分布,后汛期由沿海至内陆递减^[11]。文献[12 – 13]分析了近 40 a 的资料表明 90 年代以来华南前汛期极端降水异常程度明显增加,后汛期极端降水长期线性变化趋势不明显,但在 90 年代也发生了明显的转折。也有研究表明华南夏季极端降水在 80 年代末有明显的转折与西北太平洋海温异常有关^[14]。综上所述,华南前后汛期极端降水事件存在很大差异,其时空分布变化规律、异常分布特征以及可能影响原因有各自的特点^[15]。然而前人的研究多数把前汛期与后汛期分开研究,极端降水事件对比分析尚不多见;且仅用百分位法来表征极端降水,在华南地区不够准确,需要改进。本文拟采用改进后的百分位法和统计分析方法,对比分析华南地区前、后汛期

极端降水总量和频次的时空变化规律和异常分布特征,并分析该地区前、后汛期极端降水变异与大气环流、太平洋海域的海温异常以及与南海热带气旋之间的关联性,探讨我国华南地区前、后汛期极端降水事件发生差异的可能原因,为区域气候诊断分析提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

本文使用 1961 – 2014 年广东、广西、海南三省的逐日降水资料来自国家气象信息中心。由于有些站点建站时间较晚,资料序列长度不足 54 a,为保证资料序列的均一性,选取 50 个站点作为华南地区代表站,站点分布如图 1 所示。位势高度场、风场、相对湿度和地面气压等数据均来自美国国家环境预报中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR)发布的第一套全球逐月再分析数据,选用 1960 – 2014 年共 55 a 的月平均再分析资料,区域范围 90°E – 120°W, 30°S – 60°N,分辨率为 2.5° × 2.5°^[16]。射出长波辐射(Outgoing Longwave Radiation)资料来源于 1975 – 2013 年共 39 a 的 NOAA(美国国家海洋和大气局)Interpolated OLR 的月平均资料,覆盖范围为 90° – 150°E, 0° – 60°N,分辨率为 2.5° × 2.5°^[17]。热带气旋资料来自日本气象厅(JMA)热带气旋最优路径数据集^[19]。

1.2 研究方法

定义极端降水事件一般有 2 种方法:一是采用日累积降水量 ≥ 50 mm(暴雨)作为判定标准,缺

点是不能体现不同地区的极端降水特征，因为不同地区极端降水的阈值不同。另一种方法为国际上通用的百分位法，将各站 1961 - 2014 年汛期（4 - 9 月）逐日降水量按升序排列，并将该序列的第 95 个百分位值的 54 a 平均值定义为极端降水事件的阈值，若某站日降水量超过阈值则认为该站有一次极端降水事件发生。第 95 个百分位降水的计算方法如下^[19]：

若把降水序列按升序排列为： $X_1, X_2, X_3, \dots, X_m, \dots, X_n$ ，则某个降水值 $\leq X_m$ 的概率为

$$\rho = \frac{m - 0.31}{n + 0.38} \quad (1)$$

其中 m 为 X_m 的序号， n 为降水序列的个数，这里 $n = 183$ ，为整个汛期（4 - 9 月）的总天数。第 95 个百分位是指 $P = 95\%$ 所对应的 X_m 值。这种定义极端降水阈值的方法消除了地域和时间因素的影响，有利于极端降水事件的空间可比性以及时间趋势^[20]，有利于客观地分析极端降水的变化趋势。

根据百分位法，图 1 给出了华南地区各站点汛期（4 - 9 月）极端降水事件阈值的空间分布。由图 1 可见，极端降水阈值存在明显的地区差异，广东沿海地区、广西的东南沿海地区及海南省的阈值较大，广西西部及广东和广西北部交界处的阈值较小。其中，最大值（86.135 mm）出现在广东的上川岛，其阈值已超出暴雨强度；最小值（43.01 mm）出现在广西的那坡。根据传统的百分位定义华南地区的极端降水事件，缺点在于有些地区的阈值小于 50 mm 暴雨标准，然而华南地区泄洪条件较好，为了研究引发灾害的极端降水事件，本文在传统的百分位定义法基础上增加暴雨条件即某站日降水量超过阈值且 ≥ 50 mm 则定义为极端降水事件。为了描述极端降水事件，本文选用了 2 个指标来表征华南地区汛期的极端降水特征，分别为：极端降水总量即一定时间段内日降水量大于第 95 百分位值且大于等于 50 mm 的总降水量；极端降水频率即一定时间段内日降水量大于第 95 百分位值且大于等于 50 mm 的总降水量与总日数之比，单位为 %。

为分析极端降水异常分布特征，本文采用 Morlet 小波分析等^[21-22]方法研究华南地区前、后汛期的极端降水事件的时空变化规律，并利用合成分析和奇异值分解（SVD）方法^[23]分析该地区极端降水异常与太平洋海温的关联性特征。

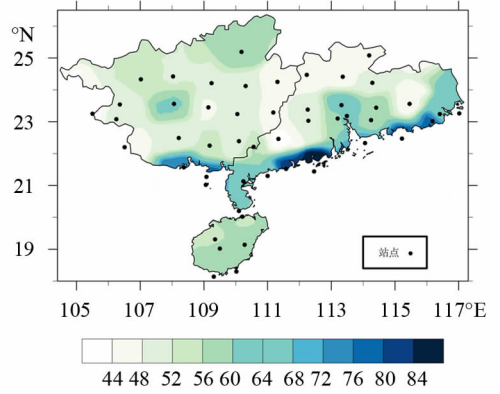


图 1 华南地区汛期（4 - 9 月）极端降水阈值的空间分布

Fig. 1 The spatial distribution of extreme rainfall threshold (mm) in flood season (April-September) of 50 meteorological stations (dot) of South China from 1961 to 2014

2 前汛期和后汛期极端降水的时空变化特征

本文统计了 1961 - 2014 年前后汛期的极端降水总量和极端降水频率，两种指标的变化趋势基本一致。从距平图（图 2a, 2b）可以看出前后汛期极端降水总量与频率都有很明显的年际变化，且呈上升趋势，说明华南地区整个汛期极端降水事件多发且降水总量增加。前汛期（4 - 6 月）极端降水事件多发年（即标准化大于 1）主要集中在 1968, 1971, 1973, 1993, 1998, 2001, 2005, 2008 和 2010 年，少发年（即标准化小于 -1）主要集中在 1963, 1967, 1976, 1985, 1989, 1991, 1999, 2002 和 2004 年，其中发生极端降水事件最多的一年是 2008 年，最少的一年是 1963 年。而后前汛期（7 - 9 月）的极端降水事件多发年为 1961, 1967, 1976, 1981, 1985, 1993, 1994, 2001, 2002, 2006 和 2013 年，少发年为 1965, 1975, 1977, 1983, 1989, 2011 和 2012 年，其中发生极端降水事件最多的一年是 2002 年，最少的一年是 1989 年。

从小波分析结果（图 2c, 2d）可知，前汛期极端降水频率主要存在 2 个周期。一是 3 ~ 5 a 年际变化周期，其能量波动影响的时域主要在 60 年代中后期和 90 年代后期到 2000 年代初期；此外准两年的变化周期出现在 2000 年代初期以后。后汛期则有 6 ~ 8 a 的显著变化周期，其波动能量影响

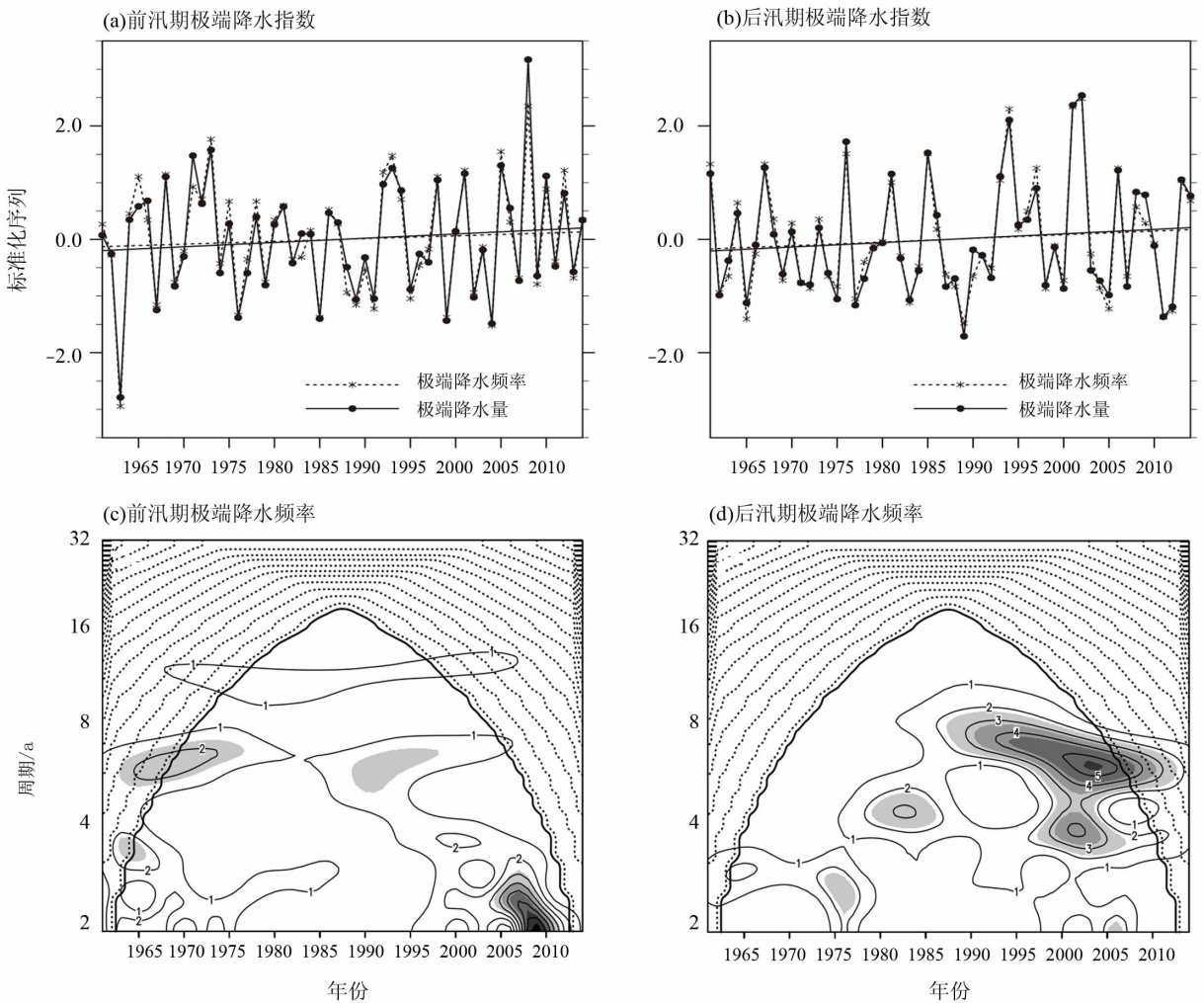


图2 华南地区前汛期和后汛期平均极端降水总量和极端降水频率的标准化距平序列以及极端降水频率的小波分析
(图中阴影区域表示通过信度为 0.05 的显著性检验)

Fig. 2 The standardized time series and morlet wavelet analysis of region averaged extreme rainfall in the early (a, c) and latter (b, d) rainy season of South China

的时域主要分布在 90 年代以后。华南地区前后汛期存在着不同的变化周期, 而两者呈现出显著变化周期主要都位于 90 年代以后。

为了揭示前后汛期极端降水的空间分布特征, 图 3 给出了华南地区前后汛期近 54 a 平均的极端降水总量和极端降水频率分布图。前汛期的极端降水总量 (图 3a) 大值区位于广西东北部和广东中部以及南部沿海地区, 广东广西大部分极端降水频率 (图 3c) 偏高, 其大值区与极端降水总量大值区基本一致。广西东北部山区较多, 很容易由极端降水事件引发泥石流等地质灾害。后汛期的极端降水总量 (图 3b) 大值超过前汛期, 主要在广西广东南部沿海地区和海南, 极端降水频率 (图 3d) 的大值落区也基本一致。综上所述, 华南地区前后汛期极端降水事件的时间和空间分布均有差异。

3 前后汛期极端降水事件时空差异的成因

由前文可知, 华南极端降水事件存在着明显的年际变化, 且前后汛期变化周期不一样, 这与大气环流、海温的关系密切。因此研究华南地区极端降水事件多发年和少发年的大气环流和海温异常特征对于研究华南地区汛期极端降水事件的可能成因有重要意义。由于后汛期华南地区还受到南海热带气旋活动影响, 且南海区域由于受到低纬度环流的影响, 其热力学变化对华南降水起着重要作用^[24]。因而探讨南海大气对流活动对华南地区前后极端降水事件的影响, 对于研究该地区汛期极端降水事件的可能成因也有一定意义。

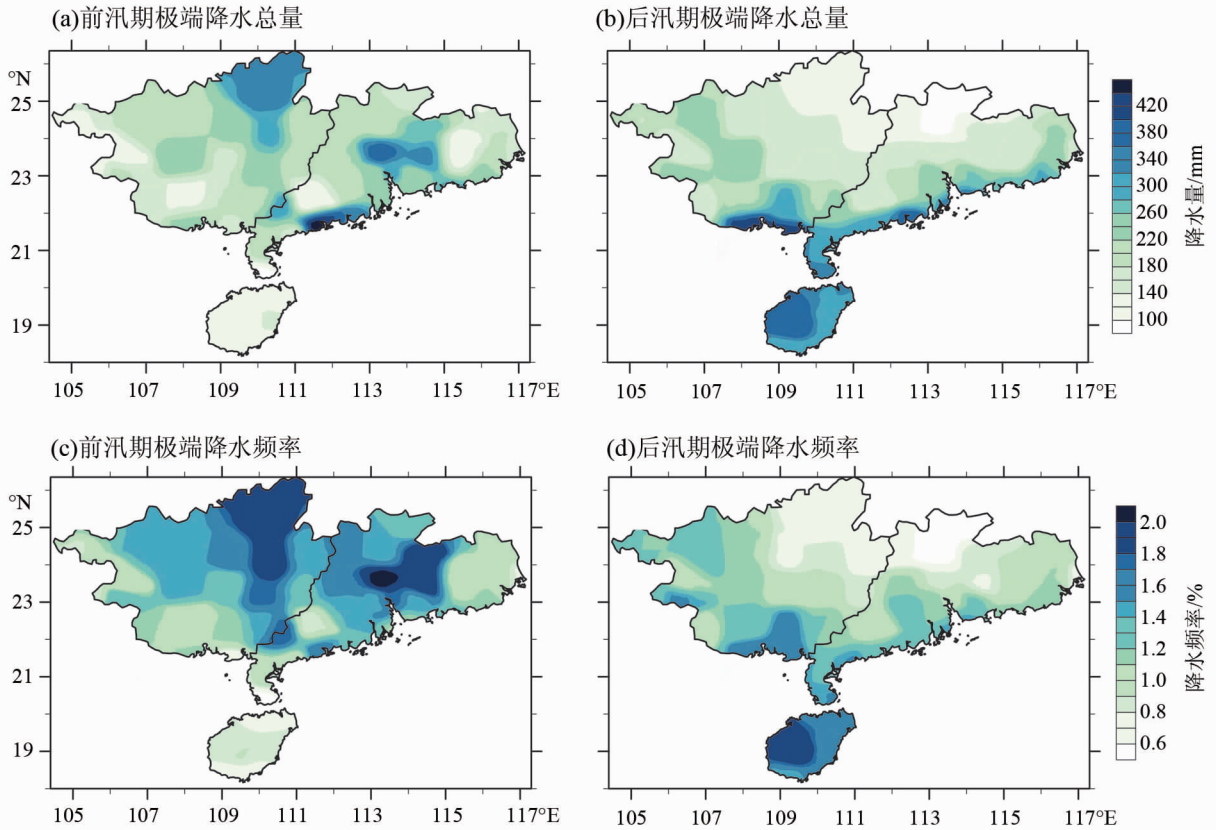


图 3 1961 - 2014 年华南地区前后汛期极端降水总量和极端降水频率的空间分布图

Fig. 3 The spatial distribution of extreme rainfall index in South China; (a) extreme rain amount (mm) in the early rainy season; (b) extreme rain amount (mm) in the latter rainy season;

(c) extreme rainfall frequency (%) in the early rainy season; (d) extreme rainfall frequency (%) in the latter rainy season

3.1 年际变化与大气环流、海温的关系

由前文可知，前后汛期极端降水事件可分为多发年与少发年，根据前文的统计结果，将东亚地区 500 hPa 位势高度场、850 hPa 风场和整层水汽通量散度等各海气要素的异常值针对前、后汛期极端降水指数的多发年和少发年分别进行合成分析，图 4 和图 5 分别给出了各要素在极端降水事件多发年和少发年的合成差值。由 500 hPa 位势高度场的合成差值场可看出，多发年与少发年相比，前汛期（图 4a）有来自北方的冷高压势力加强，东亚大槽加深发展，有利于北方冷空气向南扩展。西太平洋副热带高压强度偏强，并向西伸，导致大量的暖湿气流向华南输送，与北方冷空气交汇，易于对流活动旺盛，产生极端降水事件^[5,25]。后汛期（图 4b）中高纬地区出现纬向环流，高纬处贝加尔湖和中国东北部为正异常，45°N 附近出现东西向的负距平带，且副高位置偏东偏北。华南地区出现负值区，环流形式有利于热带气旋等低值系统以及夏季风的偏南气流在华南维持，对流活跃，易产生极端降

水^[26]。

由 850 hPa 风场的合成差值场可得，前汛期（图 5a）在 30°N 以南的洋面上出现了反气旋差值环流，其西南侧有强盛的西南差值气流由南海自北输送，说明了极端降雨多发年南海夏季风强盛。同时在大陆中部有一支强盛的偏北气流由华中直接向华南地区输送，南北气流在华南地区交汇，有利于中尺度对流的生成和活跃，从而产生极端降水事件。这与前文分析的高度场结果相吻合。后汛期（图 5b），在南海以及华南上空出现气旋性差值环流，有利于局地的水汽辐合，上升运动加强，为该地区热带气旋等对流系统的发展创造了有利条件，易发生极端降水事件。同时随着西北太平洋夏季风向东向北推进，西北太平洋上空也出现了气旋性差值环流，利于西北太平洋热带气旋的产生，西北太平洋的热带气旋经过南海也会造成华南地区的极端降水。从前后汛期的显著区域可以看出华南极端降水事件的多发年与南海夏季风和西北太平洋夏季风的强度有密切关系^[27-30]。图 5c 是前汛期的整层水

汽通量散度的合成差值场 (垂直积分为地表气压到 300 hPa, 以消除地形影响), 图中清楚地显示了最大的水汽辐合区位于华南地区, 有利于上升运动。而孟加拉湾、西北太平洋和中国北方上空均为水汽辐散区, 这些地区的水汽在华南地区上空辐

合, 造成前汛期极端降水偏多^[31]。后汛期华南上空的水汽辐合区位置较前汛期偏南, 延伸至南海、东海, 菲律宾沿海以及北印度洋为水汽辐散区, 同时西北太平洋也出现了水汽辐合区, 利于热带气旋的发生发展。

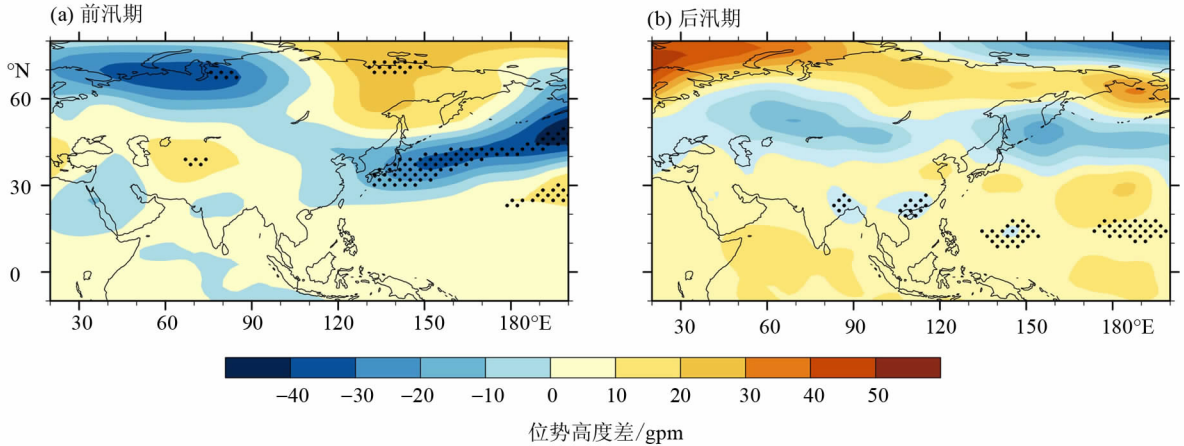


图 4 东亚地区 500 hPa 位势高度场的合成差值场

(多发年减少发年, 其中打点区域表示通过信度为 0.05 的显著性检验)

Fig. 4 The differences of 500 hPa geopotential height during the early and latter rainy season between high and less frequent years

由于华南前、后汛期极端降水存在区域性差异, 为进一步了解影响华南地区极端降水的异常情况, 本研究将探讨太平洋海温的影响。对华南地区前后汛期极端降水总量, 极端降水频次的标准化场分别与不同时间的太平洋海温异常的标准化场进行 SVD 异性相关分析。发现前期冬季海温 (前一年 12 月至今年 2 月) 对前汛期极端降水有很好的指示作用, 极端降水总量和极端降水频次的第一模态协方差率分别为 38.01% (图 6a) 和 51.16% (图略), 远远大于第二模态协方差。相关性结果表明前汛期极端降水总量和前期冬季海温相关系数为 0.45 (通过了信度为 0.01 的显著性检验)。从海温异性相关分布场可以看出 (图 6c) 海温分布类似于 ENSO 型, 热带中东太平洋为显著的正异常, 热带西太平洋为负值区并且向东北延伸。中高纬度中太平洋为显著的负异常区。结合极端降水的异性相关场 (图 6a) 可以得出当赤道中东太平洋异常增暖时, 广西广东交界处以及广西南部, 广东西部极端降水增多。

后汛期的极端降水总量和极端降水频次与同期

夏季 (6-8 月) 有很好的相关, 其第一模态的协方差率分别为 25.93% (图 6b) 和 21.58% (图略)。相关分布场可以看出整个热带太平洋都为正异常区 (图 6d), 对应整个华南大部分地区为极端降水正异常区 (图 6b), 即当热带太平洋异常增暖时, 后汛期华南大部分地区极端降水增多。相关系数表明后汛期极端降水总量与同期夏季太平洋海温相关系数为 0.65 (通过了信度为 0.01 的显著性检验), 可见海温对于后汛期极端降水影响更加明显。

综上所述, 前汛期前期冬季海温呈 El Nino 分布时, 造成了相应的大气环流异常。以北纬 30°N 为界, 南北洋面上出现了两种不同类型的大气环流, 东北太平洋上的异常气旋环流将北方冷湿空气向南输送, 西南洋面上的异常反气旋环流将暖湿气流向北输送, 冷暖气流在华南交汇造成极端降水偏多。后汛期随着同期夏季热带太平洋增暖, 特别是西北太平洋暖池, 造成洋面上对流旺盛, 出现了气旋性异常, 上升运动明显, 局地强对流性降水增强引起极端降水增多。

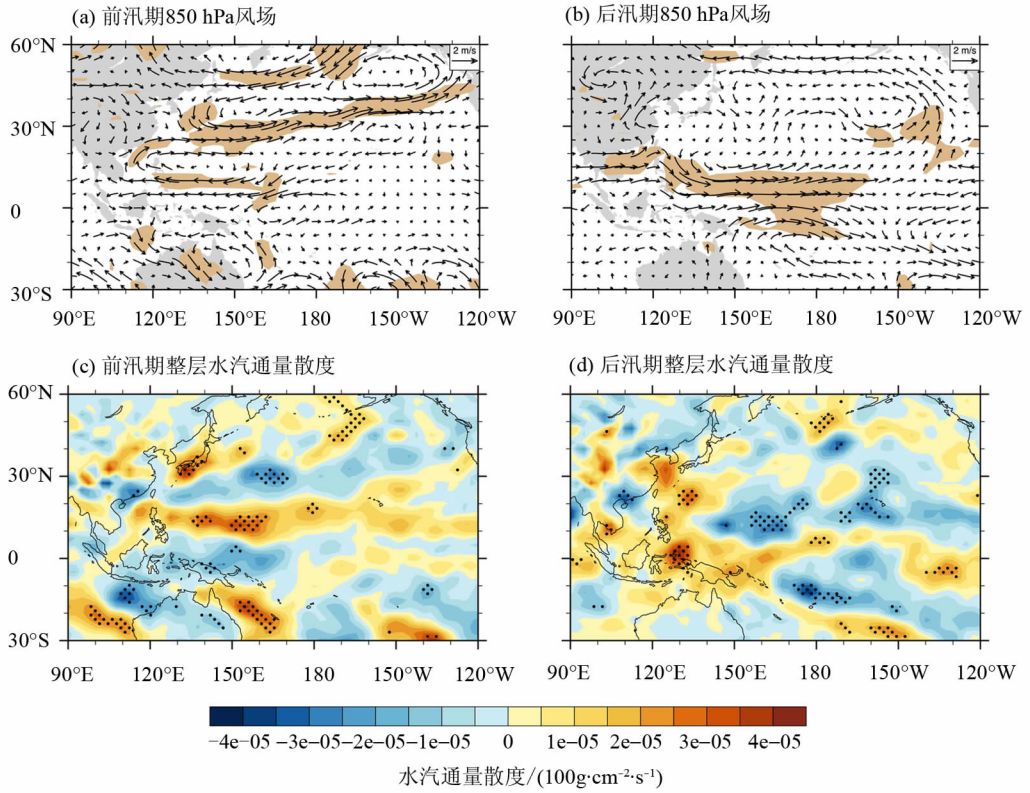


图 5 东亚地区 850 hPa 风场和整层水汽通量散度的合成差值场

(多发年合成场减去少发年合成场的合成差, 其中打点区域表示通过信度为 0.05 的显著性检验)

Fig. 5 The differences of 850 hPa wind and vertically-integrated water vapor flux divergence during the early (a, c) and latter (b, d) rainy season (the difference is between high and less frequent years).

Shaded areas (5a and 5b) and dotted areas (5c and 5d) are statistically significant at 0.05 confidence level

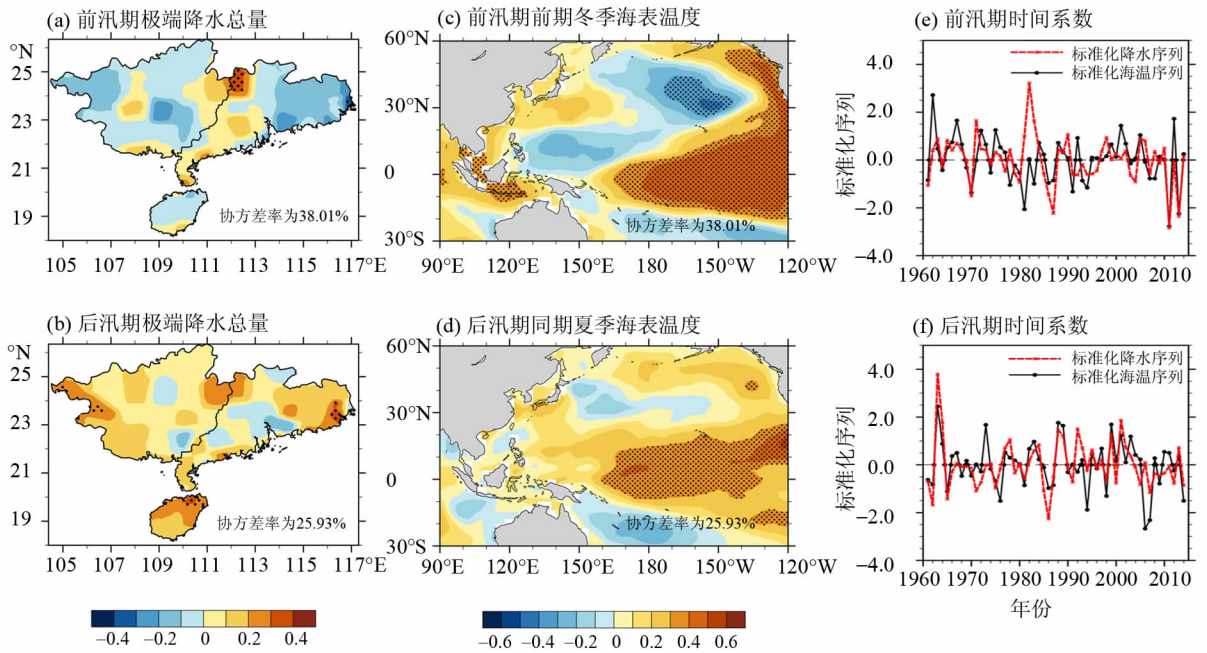


图 6 华南地区前后汛期极端降水总量与太平洋海表温度异常第一耦合模态异性相关场分布

(打点区域表示通过信度为 0.05 的显著性检验)

Fig. 6 Heterogeneous correlation patterns for the leading SVD mode between extreme rainfall anomaly in the early rainy season (a) and the preceding winter SST anomaly (c), and their associated time series (e); (b) and (d) and (f) are in the latter rainy season. Dotted areas are statistically significant at 0.05 confidence level

3.2 南海周边大气对流活动的贡献

由于华南前后汛期极端降水明显与局地强对流系统有关, 本文将进一步探讨南海周边大气对流活动的贡献。OLR 低值区表示对流活动发展旺盛, 高值区对应着少云或无云的下沉区。由于 OLR 资料限制, 分析华南地区 1975 - 2013 年前、后汛期极端降水总量与其同期的 OLR 的相关性, 可以看出前汛期 OLR 低值区 (图 7a) 即对流旺盛区呈西南 - 东北带状分布, 华南地区东北部对流系统更加旺盛, 这与极端降水的空间分布一致 (图 3), 副高脊线位于 15°N 附近, 深入南海上空, 导致降水系统偏北。后汛期 (图 7b) 副高北跳, 高压强大, 脊线呈东西向, 有利于热带气旋西行登陆, 引发强对流系统偏南, 位于华南沿海地区。为了进一步检验热带气旋对前后汛期极端降水的影响, 本文选用了日本气象厅热带气旋最优路径数据中的 1977 - 2014 年前、后汛期南海热带气旋数目 ($0^{\circ}\text{N} - 25^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E} - 125^{\circ}\text{E}$), 分别与前后汛期极端降水总量和极端降水频次进行相关分析 (图略)。前汛期南海热带气旋的年平均数为 2.26 个, 与极端降水总量几乎不相关, 可见热带气旋对于前汛期极端降水的影响极其微弱。后汛期南海热带气旋 (生成与经过) 年平均 6.83 个, 与极端降水总量和极端降水频次的相关系数分别为 0.27 和 0.29 并通过信度为 0.1 的显著性检验, 且在 90 年代以及 2000 年代中后期相关性更好, 说明热带气旋的发生发展对于后汛期华南极端降水的影响较大。

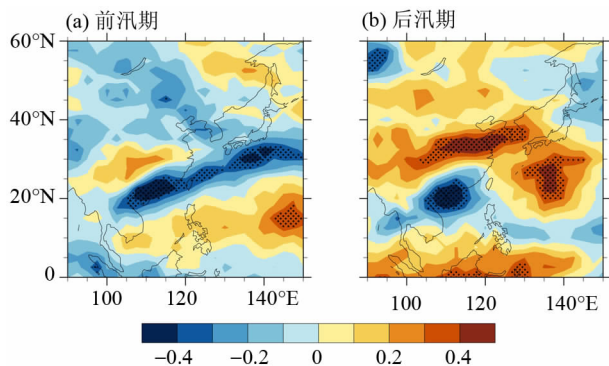


图 7 华南地区前后汛期极端降水总量与 OLR 的相关系数分布 (打点区域表示通过信度为 0.05 的显著性检验)
Fig. 7 The correlation distribution of extreme rainfall over South China against OLR; (a) is in the latter rainy season; (b) is in the latter rainy season. Dotted areas are statistically significant at 0.05 confidence level

4 结 论

根据 1961 - 2014 年华南地区 50 个站点的逐日降水资料, 采用了改良后的百分位法定义了华南地区前后汛期的极端降水, 并运用小波分析、SVD 等统计方法分析了华南地区的前、后汛期极端降水事件的时空变化规律以及可能影响的原因。主要结论如下:

1) 华南地区前后汛期极端降水都有明显的年际变化, 极端降水总量和极端降水频次都呈上升趋势, 但是变化周期不同。前汛期主要为 3 ~ 5 a 的周期变化, 而后汛期主要为 6 ~ 8 a 的周期变化。前后汛期极端降水的空间分布也存在差异, 前汛期极端降水多发生在广西东北部和广东中部, 而后汛期极端降水多发生在沿海地区。

2) 造成前后汛期极端降水时空变化差异的主要原因如下: ① 前汛期由于南海夏季风的爆发, 强盛的西南气流由南向北输送暖湿气流, 同时北方冷空气延伸至华南地区, 冷暖空气在华南中北部交汇, 对流旺盛, 易于发生极端降水。后汛期由于局地海温变暖对流旺盛, 西北太平洋和南海热带气旋的增多, 在华南沿海地区易出现极端降水。② 前汛期前冬季赤道太平洋特别是中东太平洋增暖使得广西东部, 广东西部极端降水增多。后汛期同期夏季整个热带太平洋海温增暖造成华南大部份地区极端降水增多。

参考文献:

- [1] 梁建茵, 吴尚森. 广东省汛期旱涝成因和前期影响因子探讨[J]. 热带气象学报, 2001, 17(2):97 - 108.
LIANG J Y, WU S S. Formation reasons of drought and flood in the rain season of Guangdong and preceding impact factors[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2001, 17(2):97 - 108.
- [2] 何有海, 金祖辉. 华南后汛期降雨量的振动和分布[J]. 热带气象学报, 1998, 14(4):359 - 363.
H E Y H, JIN Z H. Oscillation and distribution of rainfall during second rainy season in South China[J]. Journal of Tropical Meteorology, 1998, 14(4):359 - 363.
- [3] 王志伟, 唐红玉, 李芬. 近 50 年中国华南雨涝变化特征分析[J]. 热带气象学报, 2005, 21(1):87 - 92.
WANG Z W, TANG H Y, LI F. Analysis of changing characteristics of floods in South China during the recent 50 years[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2005, 21(1):87 - 92.
- [4] 伍红雨, 杨崧, 蒋兴文. 华南前汛期开始日期异常与大气环流和海温变化的关系[J]. 气象学报, 2015, 73

- (2):319-330.
- WU H Y, YANG S, JIANG X W. Anomalous onset date of the first rainy season in South China and its relationship with the variation of the atmospheric circulation and SST [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2015, 73 (2):319-330.
- [5] 李晓明, 杨玉静, 何林宴. 华南地区前汛期降水异常特征与大气环流的关系[J]. *气象研究与应用*, 2011, 32(s2):109-110.
- LI X M, YANG Y J, HE L Y. Relationship between the first rainy season precipitation anomaly in South China and atmospheric circulation[J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2011, 32(S2):109-110.
- [6] 强学民, 杨修群. 华南前汛期降水异常与太平洋海表温度异常的关系[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(8):2583-2593.
- QIANG X M, YANG X Q. Relationship between the first rainy season precipitation anomaly in South China and the sea surface temperature anomaly in the Pacific[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(8):2583-2593.
- [7] 吴尚森, 黄成昌, 薛惠娴. 华南后汛期降水的年际变化[J]. *热带气象学报*, 1990(4):348-356.
- WU S S, HUANG C C, XUE H X. Interannual variation of precipitation during the second rainy season in South China[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 1990(4):348-356.
- [8] 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 极端降水事件变化的观测研究[J]. *气候变化研究进展*, 2007, 3(3):144-148.
- ZHAI P M, WANG C C, LI W. A review on study of change in precipitation extremes[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(3):144-148.
- [9] 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 中国年极端降水事件的时空分布特征[J]. *气候与环境研究*, 2008, 13(1):75-83.
- YANG J H, JIANG Z H, WANG P X, et al. Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2008, 13(1):75-83.
- [10] 吴丽姬, 温之平, 贺海晏, 等. 华南前汛期区域持续性暴雨的分布特征及分型[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2007, 46(6):108-113.
- WU L J, WEN Z P, HE H Y, et al. The distribution features and patterns of regional durative rainstorm during pre-rainy season over South China[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2007, 46(6):108-113.
- [11] 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.
- ZHANG T, WEI F Y. Probability distribution of precipitation extremes during raining seasons in South China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(3):442-451.
- [12] 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.
- LI L P, ZHANG K M, WANG C, et al. Temporal and spatial variations of extremes precipitation in the pre-flood period of South China in recent 40 years[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15(4):443-450.
- [13] 李丽平, 许冠宇, 成丽萍, 等. 华南后汛期极端降水特征及变化趋势[J]. *大气科学学报*, 2012, 35(5):570-577.
- LI L P, XU G Y, CHENG L P, et al. Characteristics of extreme precipitation and its variation trend in the post-flood of South China[J]. *Journal of Nanjing institute of Meteorology*, 2012, 35(5):570-577.
- [14] 齐庆华, 蔡榕硕, 张启龙. 华南夏季极端降水时空变异及其与西北部太平洋海气异常关联性初探[J]. *高原气象*, 2013, 32(1):110-121.
- QI Q H, CAI R S, ZHANG Q L. Primarily analyses on variations of summer extreme precipitation in South China and its relation to the sea-air anomaly in Northwestern Pacific Ocean[J]. *Plateau Meteorology*, 2013, 32(1):110-121.
- [15] 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.
- LI J N, WANG A Y, MENG W G, et al. The climatological characteristics of precipitation of the pre-summer rainy season and second rainy season in Guangdong province[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2002, 41(3):91-95.
- [16] KALNAY E, KANAMITSU M, KISTLER R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3):437-472.
- [17] LIEBMANN B. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(6):1275-1277.
- [18] SHUNSUKE H, TETSUO N. Estimation of tropical cyclone's intensity using TRMM/TMI brightness temperature data[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2007, 85(4):437-454.
- [19] BONSAI B R, ZHANG X, VINCENT L A, et al. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada [J]. *Journal of Climate*, 2010, 14(9):1959-1976.

- [20] 王冀, 江志红, 严明良, 等. 1960 - 2005 年长江中下游极端降水指数变化特征分析 [J]. 气象科学, 2008, 28(4):384 - 388.
WANG Y, JIANG Z H, YAN M L, et al. Trends of extreme precipitation indices in the mid-lower Yangtze River valley of China during 1960 - 2005 [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2008, 28(4):384 - 388.
- [21] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 2007:37 - 43.
- [22] TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(79):61 - 78.
- [23] 屠其璞. 气象应用概率统计学 [M]. 北京: 气象出版社, 1984:445.
- [24] 丁伟钰, 梁经萍. 南海地区 OLR 变化与华南汛期降水的联系 [J]. 热带气象学报, 2002, 18(3):276 - 282.
DING W Y, LIANG J P. Relationship between the variations of OLR over South China Sea and the precipitation in rainy seasons in South China [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2002, 18(3):276 - 282.
- [25] 伍红雨, 杨崧. 华南冬季气温异常与大气环流和海温的关系 [J]. 热带气象学报, 2014, 30(6):1061 - 1068.
WH H Y, YANG S. Winter temperature anomalies in South China and its relation to atmospheric circulation and SST [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2014, 30(6):1061 - 1068.
- [26] 管勇, 袁锡沛, 黄青兰. 广东省后汛期多雨和少雨的年际异常特征 [J]. 广东气象, 2011, 33(4):20 - 24.
GUAN Y, YUAN X P, HUANG Q L. The interannual characteristic of precipitation in flood and drought events in second rainy season in Guangdong province [J]. *Guangdong Meteorology*, 2011, 33(4):20 - 24.
- [27] 王慧, 丁一汇, 何金海. 西北太平洋夏季风的气候学研究 [J]. 气象学报, 2005, 63(4):418 - 430.
WANG H, DING Y H, HE J H. The climate research of summer monsoon over the western North Pacific [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(4):418 - 430.
- [28] WU R, WANG B. Multi-stage onset of the summer monsoon over the western North Pacific [J]. *Climate Dynamics*, 2001, 17(4):277 - 289.
- [29] LAU K M, KIM K M, YANG S. Dynamical and boundary forcing characteristics of regional components of the Asian summer monsoon [J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(14):2461 - 2482.
- [30] 林爱兰, 李春晖, 郑彬, 等. 南海夏季风爆发与华南前汛期锋面降水气候平均的联系 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2010, 49(4):134 - 138.
LIN A L, LI C H, ZHENG B, et al. Relationship between onset of South China Sea summer monsoon and South China frontal precipitation in the first raining period on climatological mean [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2010, 49(4):134 - 138.
- [31] ZHAO S, YANG S. Dynamical prediction of the early season rainfall over Southern China by the NCEP climate forecast system [J]. *Weather & Forecasting*, 2014, 29(29):1391 - 1401.