

海南岛热带气旋极端降水的特征及其成因

蒋贤玲^{1,2} 任福民³ 蔡亲波⁴

(1 海南省气象台, 海口 570203; 2 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海口 570203;
3 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 4 海南省气象局, 海口 570203)

摘要: 围绕海南岛热带气旋(TC)极端降水的特征及其成因, 利用国家气象信息中心提供的海南岛台站日降水数据、上海台风所的TC最佳路径数据集和NCEP/NCAR再分析数据, 通过气候统计、天气诊断相结合的方法, 探讨了1958—2013年海南岛TC极端降水的空间分布和时间变化特征, 并进一步诊断分析了极端降水产生的可能成因。结果表明, 海南岛TC极端降水在西北部出现最多, 东南部出现较少。从长期趋势看, 无论从TC极端降水量还是从TC极端降水频数, TC极端降水的极端趋势均在增加。充足的西南水汽通量输送是产生TC极端降水的重要条件; 当南亚高压和副热带高压相距较近, 即南亚高压偏东偏强, 副热带高压偏西偏强时, 海南岛容易出现TC极端降水事件; 在TC路径和低层风场结构的配合下, 海南岛地形对极端降水的落区有关键影响。

关键词: 海南岛, 热带气旋, 极端降水

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.04.014

Characteristics and Causes of Tropical Cyclone Extreme Rainfall Events over Hainan Island

Jiang Xianling^{1,2}, Ren Fumin³, Cai Qinbo⁴

(1 Hainan Meteorological Observatory, Haikou 570203

2 Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203

3 State Key Laboratory on Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

4 Hainan Meteorological Service, Haikou 570203)

Abstract: Focusing on characteristics and causes of Tropical Cyclone (TC) Extreme Rainfall Events (TCERs) over Hainan Island, the spatial distribution and temporal variation characteristics and possible causes of TCERs from 1958 to 2013 were investigated through the combination of climate statistics and weather diagnosis using station daily rainfall data over Hainan Island provided by the National Meteorological Information Centre, TC best track data from Shanghai Typhoon Institute and NCEP/NCAR reanalysis data. The results show that TCERs over Hainan Island occur frequently in the northwest half, and less in the southeast half. From the long-term trend, regardless of the rainfall amount or the frequency, the extreme trend of TCERs is increasing. Adequate southwest water vapor flux transport is an important condition for generating TCERs. When the distance between the South Asia High (SAH) and the Northwest Pacific Subtropical High (NWPSH) is closer, that is, the SAH is stronger to the east and the NWPSH is stronger to the west, TCERs occur more easily. With the configuration of TC track and low-level wind structure, the topography plays a key role in the TCERs.

Keywords: Hainan Island, tropical cyclone (TC), extreme rainfall events

0 引言

热带气旋(TC)是发生在热带海洋上的一种旋转的猛烈的风暴。TC极端降水属于TC暴雨的范畴, 关于TC极端降水的研究, 国内外学者已做了较多的工作。研究主要集中在以下两个方面。

一方面, 对TC暴雨个例研究较多。陶诗言等^[1]对

7707号TC的研究表明, 上海特大暴雨主要与东风气流中尺度云团和中尺度辐合线等有关。Wu^[2]的研究指出, 台湾岛地形使得在台风Gladys临近时在背风坡一侧可激发出诱发低压。Murata^[3]的结果显示, 台风Meari登陆日本时山脉地形对暴雨形成有明显作用。于玉斌^[4]研究台风桑美时指出, 台风宝霞残涡并入“桑美”是导致“桑美”近海增强的重要原因。Wu等^[5]表明, 热带风暴Paul的存在对Rachel的降水和运动造成了很大的影响。冯文等^[6]在研究海南TC中尺度强降水时得出, 登陆前后, 中尺度强降水基本均出现在气旋中心西南到东南侧100~200 km, 表现出明显的南北

收稿日期: 2019年8月31日; 修回日期: 2020年5月19日
第一作者: 蒋贤玲(1986—), Email: jiangxl0127@163.com
资助信息: 海南省重点研发计划科技合作方向项目(SQ2019KJHZ0028); 海南省气象局科研项目(HNQXJS202001)

不对称。

另一方面,对区域TC极端降水的研究集中在统计特征。侯建忠等^[7]研究表明,陕西的极端暴雨与近海TC活动的相关率接近87%;7、8两个月TC影响最为显著。Shepherd等^[8]研究发现,主要飓风产生大部分的极端日降水,而热带低压或风暴则对累计季节性降水产生明显影响。罗伯良等^[9]的结果显示,影响湖南的TC登陆地点以广东、福建最多,强度达强热带风暴或以上的TC可造成极端暴雨降水,主要出现在8月;20世纪90年代以后暴雨强度呈加大趋势。李海鹰等^[10]发现7—10月中山出现的暴雨主要是由TC造成的,且TC距中山800 km范围内才能给中山造成暴雨。赵珊珊等^[11]研究表明,中国日降水量和过程降水量的极值站数在1960年代最多。吴慧等^[12]研究表明,登陆海南TC暴雨与登陆时TC强度和登陆维持时间分别有显著的负相关和显著的正相关关系,但登陆时TC强度对暴雨的影响强于登陆维持时间。

海南是受热带气旋影响最多的省份之一,关于海南TC暴雨的研究也有一些。毛夏等^[13]指出,海南的小时特大暴雨绝大部分集中分布在热带气旋的西南部,一般在3个纬距以内。近40年,单个TC在海南岛产生的极端降水量和日数明显增加^[14]。西太平洋副热带高压(以下简称副高)(或其他高值系统)和热带扰动的相互作用建立了热带扰动引发的华南暴雨的双重正反馈机制^[15]。蔡小辉等^[16]认为1117号强台风纳沙造成海南岛特大暴雨的原因包括西南季风和地形。其他研究^[17-18]也强调了海南岛地形的重要性。

由以上可知,关于TC极端降水的研究,集中研究TC个例,专门针对区域的研究较少。然而,在做预报时,往往是针对某个区域做出相应的天气预测。因此,针对区域TC极端降水进行研究,并找出其规律是极其重要的。

值得提出的是,海南岛是我国沿海最多TC登陆的地方之一^[19]。登陆海南岛的TC一般都产生暴雨,还有相当多的TC虽然未登陆海南岛,但亦对海南岛有影响,也带来暴雨。基于此及以上存在的问题,研究海南岛的TC极端降水是具有意义的。本研究首先统计分析海南岛TC极端降水的空间分布特征和时间变化特征;其次,进一步探讨其产生的可能原因。

1 资料和方法

本文所用的台站降水资料包括中国气象局国家气象信息中心提供的1958—2013年海南岛19个站点的日资料、上海台风研究所提供的西北太平洋TC资料以及NCEP/NCAR再分析数据。

TC降水的分离利用的是任福民等^[20-22]提出的成熟的TC降水识别方法,即客观天气图分析法(OSAT)。

本文研究的TC包括热带低压及以上级别的所有TC。影响海南的TC,包括登陆海南岛和未登陆海南岛且对海南岛造成影响的TC。规定当海南岛地区有一个台站出现TC降水时,则该TC就定义为影响海南岛的TC。

TC极端降水是指TC日降水量在统计上达到极端强度的降水。确定极端降水事件需要首先确定极端降水阈值,极端降水阈值包括两种阈值,即相对阈值和绝对阈值。本文计算了99%极端降水阈值,图1表示海南岛近几十年第99百分位降水量阈值,可以发现,海南岛极端降水阈值有两个中心,分别位于东部和西部,东部中心是万宁站,阈值是139.4 mm,西部中心是昌江站,阈值达到137.5 mm。每个台站的极端降水阈值均超过了100 mm。

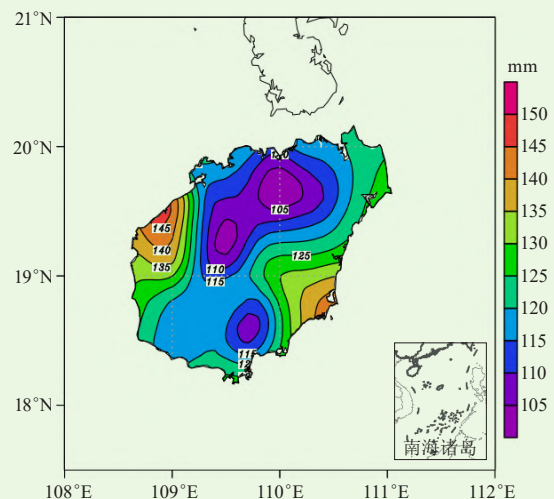


图1 海南岛1958—2013年第99百分位降水量阈值
Fig. 1 The 99th percentile precipitation threshold from 1958 to 2013 for Hainan Island

然而,气象部门在预报中,将24 h降水量达到50~100 mm的降雨过程定义为暴雨,将24 h降水量达到100~250 mm的降雨过程定义为大暴雨,将24 h降水量达到或超过250 mm的降雨过程定义为特大暴雨。因此,为了与天气预报一致,结合相对降水阈值,本文主要选取特大暴雨作为TC极端降水的研究对象。

2 海南岛TC极端降水的特征

为了了解海南岛TC极端降水的分布特征,分析海南岛TC日降水的极值分布规律是必要的。

2.1 海南岛TC日降水的极值分布特征

为了找出海南岛TC日降水的极值分布特征,本文

计算了1958—2013年影响海南岛的TC在所有站点产生的最大日降水量（海南岛TC最大日降水，图2）。可以看出，TC在整个海南岛地区产生的最大日降水均很大，均超过了300 mm；其中，日降水量达到400 mm以上的区域主要在海南岛的东部、西部和中部的局部地区。TC最大日降水量的地区差异很大，最大相差超过300 mm，东部和西部分别有两个大值中心，分别位于海南岛的西部昌江县和东部琼海市，分别达到644.6和614.7 mm，分别是200114号台风菲特及2010年的热带低压产生。

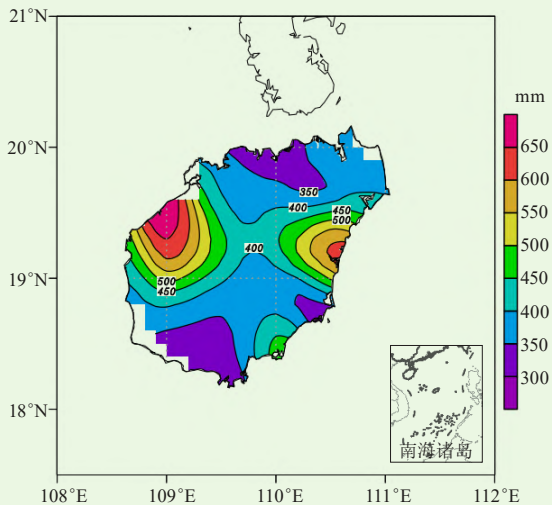


图2 海南岛1958—2013年TC最大日降水的空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of TC maximum daily rainfall from 1958 to 2013 over Hainan Island

为了详细了解海南岛的TC日降水极值的分布区间，选取每个TC产生最大降水的站点的降水量（TC最大单站降水量）进行分析，生成TC最大单站日降水量—频数分布图（图3）。经计算，1958—2013年共有491次TC过程影响海南岛。TC降水极值随着降水区间的增加而显著递减；处于0~100 mm的有273次，占了55.6%；达到100~250 mm的有171次，比例为34.8%；达到250~500 mm的有45次，比例为9.2%；≥500 mm的只有2次。总体看来，TC最大单站日降水

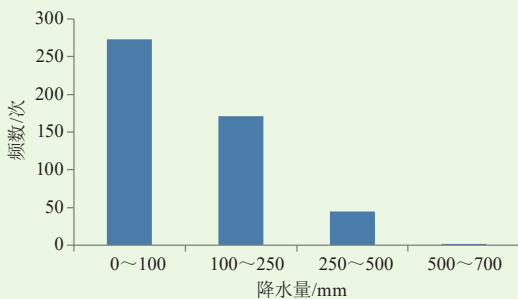


图3 海南岛TC最大单站日降水量—频数分布
Fig. 3 TC maximum single daily rainfall amount—frequency distribution over Hainan Island

量在0~250 mm的共有444次，产生频数达到90.4%，占了绝大部分。

为了研究TC日降水的年极值的年际变化，本文挑选出每年的TC单站最大降水，绘制成序列图（图4）。可以发现，1958—2013年，年最大TC日降水的长期趋势是增加的，即年最大TC日降水趋于极端化，平均每10年增加10.4 mm。其年代际变化也非常明显。从9年滑动平均来看，有着弱的年代际波动；其波动振幅也有明显的转变，20世纪80年代之前波动振幅较大，而之后波动却较小，直到21世纪之后，波动又突然增大。从降水量来看，年最大TC日降水在2004、1961、1969和1959年达到较小的极值，降水极值分别是28.7、91.3、116.0和120.4 mm，而在2001、2010、1977和1958年达到较大的极值，降水极值分别为644.6、614.7、490.3和471.9 mm。

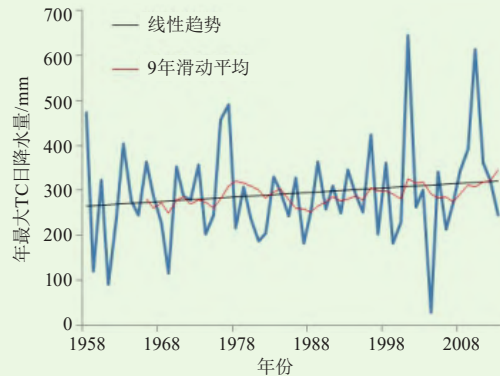


图4 海南岛年最大TC日降水的逐年变化
Fig. 4 Interannual changes of annual maximum TC rainfall over Hainan Island

2.2 海南岛 TC 极端降水的特征

图5a表示近50年来在海南岛各个台站产生极端降水的频数的空间分布，可以发现，台站TC极端降水频数在西北部较多，东南部相对较少；频数排名前6的分别是昌江县、白沙县、临高县、五指山市、东方市、屯昌县，分别是10、9、8、8、7和7次，而保亭县和琼中县最少，分别只有2次，定安县、陵水县的也较少，分别只有3次。

将每个TC产生的大于或等于250 mm的台站的日降水量都绘制在横坐标为年的坐标轴上，就得到了极端降水随时间的散点图（图5b）。经分析，1958—2013年共有104次极端降水，降水主要集中在250~400 mm，只有个别台站的降水超过400 mm。个别台站降水趋于极端化，如2001年、2010年的单站降水分别达到644.6、614.7 mm，这是近50年来最大的两次单站日降水，而之前的最大单站降水不到500 mm。TC极端降水中排名前五的年份除了2001和2010年

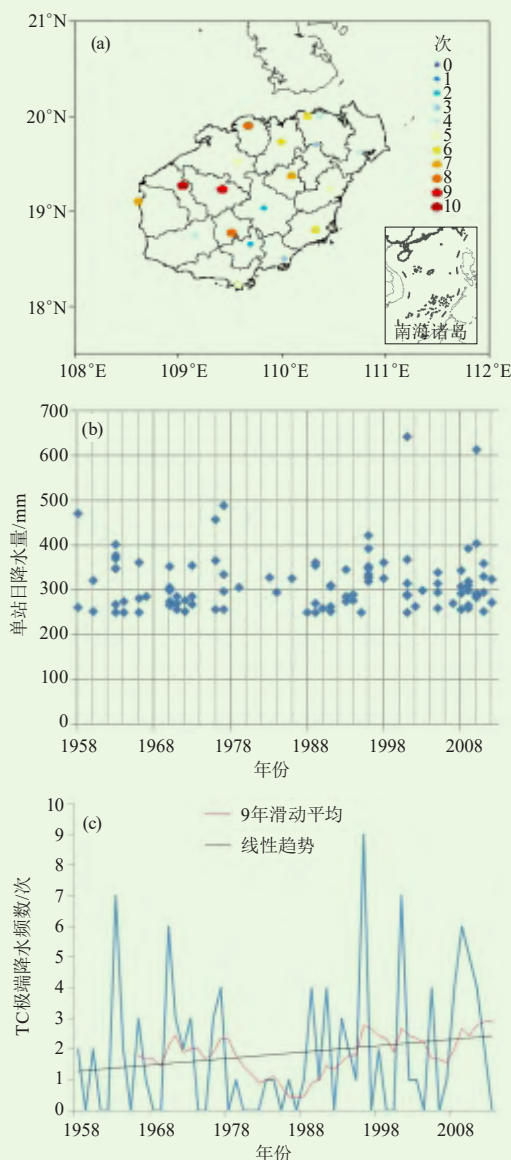


图5 1958—2013年海南岛TC极端降水统计量
(a) 台站频数分布, (b) 降水量逐年分布, (c) 年频数变化
Fig. 5 Statistics of TCERs from 1958 to 2013 over Hainan Island
(a) station frequency distribution, (b) rainfall amount
interannual distribution, (c) interannual frequency changes

外, 还有1977、1958和1976年, 降水量分别是490.3、471.9和457.6 mm。

从图5c可以看到, TC极端降水的频数的长期趋势是弱的增加; 年际波动很大, 例如, 可以从1996年的9次降到1997年的0次, 从1995年的1次升到1996年的9次; 其中, 1996、1963、2001、1970和2009年分别达到9、7、7、6和6次, 而很多年份并没有产生TC极端降水, 如2004、1959、1961、1962和2013年。从9年滑动平均曲线看, 其年代际变化明显, 20年左右的震荡周期非常显著, 20世纪70年代末至80年代初、90年代末到21世纪前5年减少, 20世纪80年代末至90年代

初、2005年之后增加明显。

综合以上(图5)的分析, 海南岛极端降水的频数在西北部出现最多, 东南部出现较少; TC极端降水的极端趋势在增加。

3 海南岛TC极端降水的成因分析

3.1 影响海南岛极端降水 TC 的背景场特征

前面已经分析到, 1958—2013年共有47个TC产生极端降水。在计算过程中, 选取这47个TC产生单站最大降水的日期, 进行TC环流场的合成。由于大气环流场有明显的季节转换, 且产生极端降水的TC集中在7—10月, 故选取1958—2013年7—10月环流场的多年平均作为气候平均场。

产生极端降水的条件之一就是源源不断的水汽供应, 分析合成的850 hPa水汽通量(图6a~6b)可以发现, TC环流场有更强的水汽通量相连, $\geq 8 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的范围向东延伸到105°E附近, 它一方面可以为强降水提供充分的水汽, 另一方面也使未来暴雨区的底层大气增温增湿, 为暴雨积累大量不稳定能量, 有利于产生对流不稳定。而与气候平均场相连的水汽通量相对较小, $\geq 8 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的范围相对小很多, $\geq 8 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的范围向东延伸到95°E附近。这些条件可能会导致TC环流场低层水汽更强的辐合上升, 从而释放出更多的潜热来维持TC的暖心结构。从850 hPa的水汽通量散度(图6c~6d)可以证明这一点, 对于TC环流场, 在海南岛及其附近海域有很明显的水汽通量辐合, 中心超过8个单位($10^{-8} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$); 而对于气候平均场, 在海南岛及其附近海域并没有明显的辐合。由上可知, 强的西南水汽通量是产生TC极端降水的重要条件。

按照传统的定义^[23], 将500 hPa上5880 gpm线包围的区域作为副高强度指标, 纬向风 $U=0$ 线作为脊线, 5880 gpm线的西伸脊点经度作为西伸指数。分析500 hPa高度场(图7a), 对于TC环流场, 副高偏西偏强, 5880 gpm线西伸脊点在120°E附近; 对于气候平均场, 副高则偏东偏弱, 5880 gpm线西伸脊点在130°E附近, 比TC环流场偏东约10个经度左右。

另外, 南亚高压依照张琼等^[24]的定义, 将100 hPa上16800 gpm线包围的区域作为南亚高压强度指标, 风速零线作为脊线, 16800 gpm线的东部脊点经度作为东伸指数。从100 hPa高度场(图7b)来看, TC环流场的南亚高压偏强, 东伸指数在117°E附近, 16800 gpm线南部边缘在华南沿海, 南亚高压偏强, 有利于海南岛高层气流的辐散, 从而为强降水提供有利的动力条件。而气候平均场的南亚高压相对偏弱,

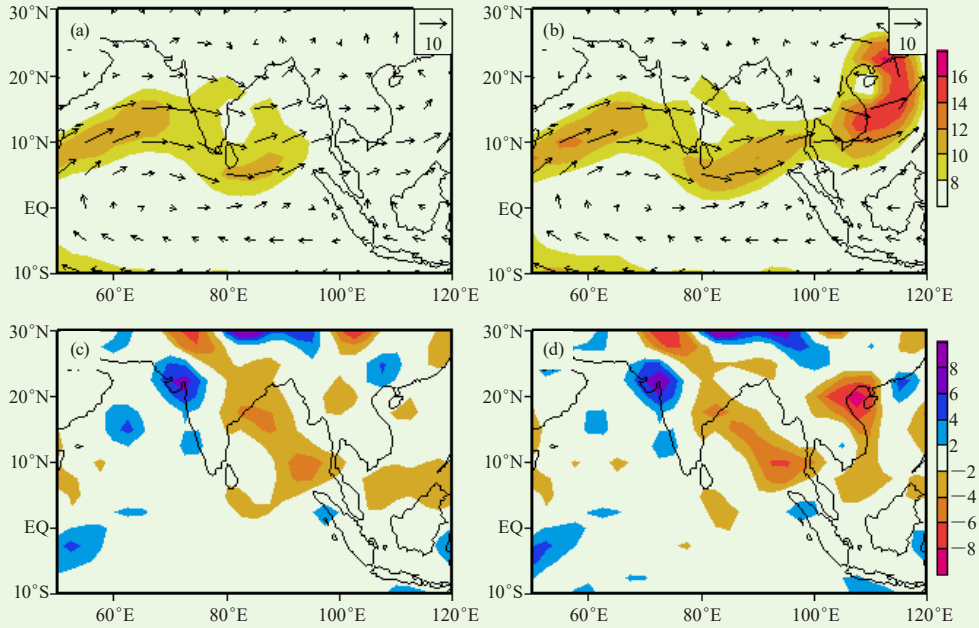


图6 850 hPa水汽通量 (a, b, 单位: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$) 和水汽通量散度 (c, d, 单位: $10^{-8} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)
(a, c表示气候平均; b, d表示TC环流)

Fig. 6 850 hPa water vapor flux (a, b, unit: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$) and water vapor flux divergence (c, d, unit: $10^{-8} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)
(a and c represent the climatic average; b and d represent the TC circulation)

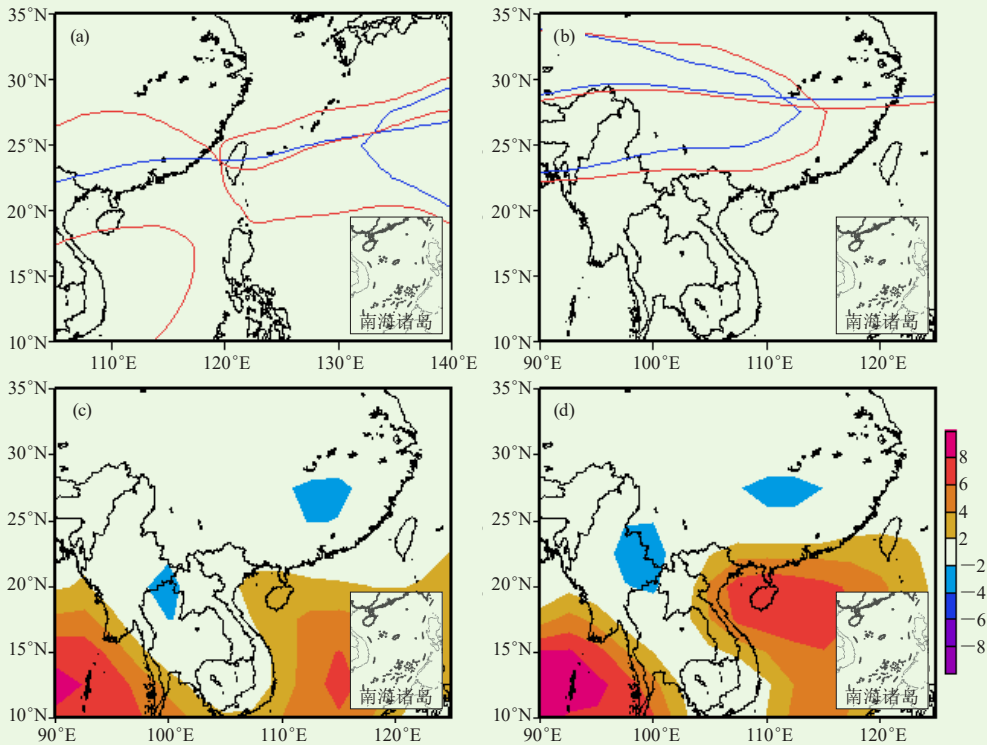


图7 500 hPa副高位置 (a)、100 hPa南亚高压位置 (b) 以及200 hPa散度 (c、d)
(其中, a、b中, 蓝色表示气候平均, 红色表示TC场, a中等值线表示5880 gpm线, b中等值线表示16800 gpm线, 单位: gpm; c表示气候平均场, d表示TC场, 单位: 10^{-6}s^{-1})

Fig. 7 The NWPSH position at 500 hPa (a), the SAH position at 100 hPa (b) and wind divergence at 200 hPa (c, d)
(In a and b, blue solid lines indicate climate average, and red solid lines indicate TC field. In a, the contour indicates 5880 gpm line. In b, the contour indicates 16800 gpm line, unit: gpm. c indicates climate average field, and d indicates TC field, unit: 10^{-6}s^{-1})

16800 gpm线的东伸指数在113°E附近, 16800 gpm线南部边缘在华中一带, 距离海南岛较远, 从而不利于海南岛高层气流的辐散。从200 hPa散度场(图7c~7d)可以看出, TC环流场中海南岛及其附近海域有很明显的辐散场, 大于等于8个单位, 而气候平均场中海南岛及其附近辐散场较弱, 只有2~4个单位。

通过以上的分析可知, 当海南岛出现TC极端降水时, 南亚高压和副高距离很近, 即南亚高压偏东偏强, 副高偏西偏强。

3.2 海南岛地形对TC极端降水的作用

根据实际预报经验及海南岛的地形特征, 将海南岛分为北部、西部、东部、中部和南部5个区域(图8)。

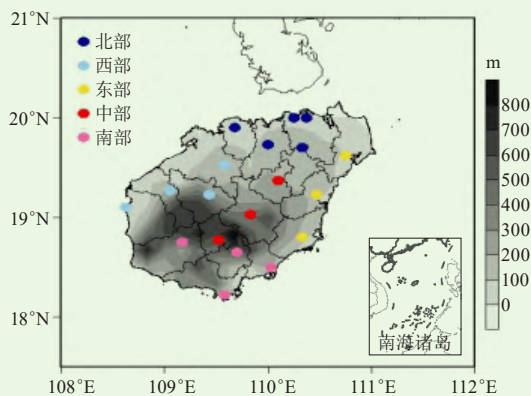


图8 海南岛的台站分区(阴影部分表示海拔高度)
Fig. 8 Station division of Hainan Island (shaded areas indicate altitude)

根据产生极端降水的TC最大日降水台站所在区域的不同, 将极端降水分为五种降水型。将最大日降水台站在北部、西部、东部、中部和南部的降水型分别称为北部降水型、西部降水型、东部降水型、中部降水型和南部降水型。为了探究海南岛地形对TC极端降水落区的作用, 绘制了各个降水型所对应的产生最大日降水当天的TC路径图(图9)。由于1966年之前一些台站缺测较多, 本部分使用的降水和TC路径资料时间段是1966—2013年。

分析各个降水型所对应的产生最大日降水当天的TC路径(图9)可知, 不同降水型的共同点是路径基本都向西北偏西行或是西北行, 且都在海南岛上或附近。同时, 各降水型又各有自己的规律。北部降水型的路径基本上是西北偏西行, 除了南部沿海有一个, 其他均在五指山以北登陆, 路径的陆上部分基本都在五指山以北, 只有一个在五指山以南, 结合海南岛地形(图8)可知, 海南岛北部距离TC中心最近, 更容易受到台风眼壁的影响, 且大多处于TC路径的向岸风面, 容易受到海陆风摩擦辐合的影响, 进而产生强降水。西部降水型路径较集中, 登陆点集中在五指山以北到雷州半岛一带, 也是西北偏西行, 但偏西分量比北部降水型大, 路径的陆上部分除了有一个穿过五指山, 其余的均在五指山以北, 结合海南岛地形(图8), 海南岛西部处于TC路径的向岸风面或五指山的

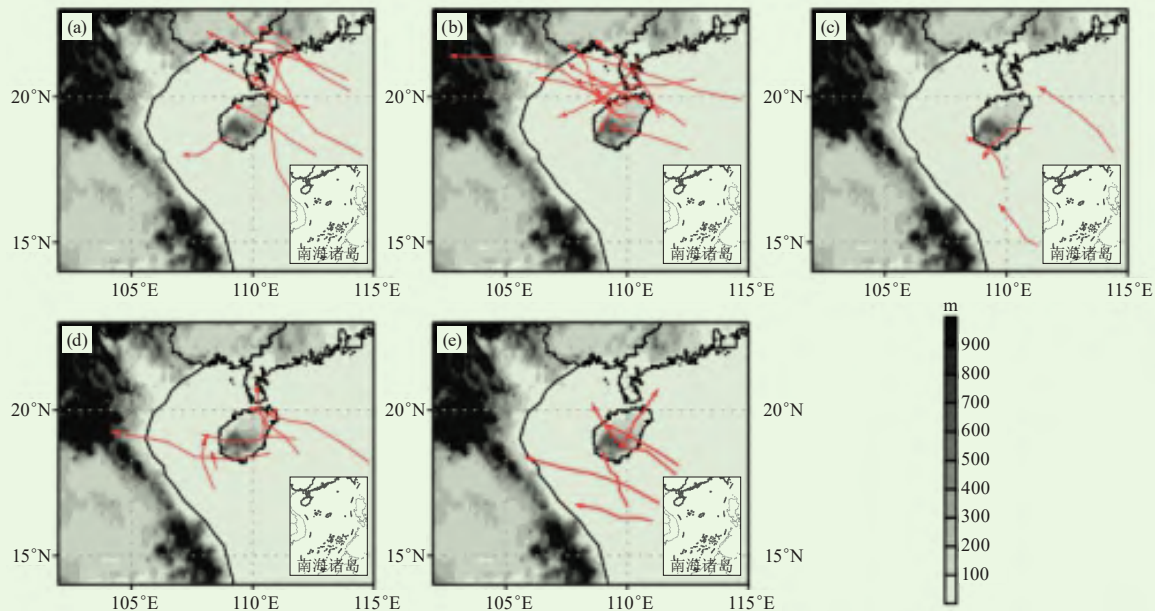


图9 1966—2013年各降水型对应的TC最大日降水当日路径(箭头表示移动方向, 阴影部分表示海拔高度)
(a) 北部, (b) 西部, (c) 东部, (d) 中部, (e) 南部
Fig. 9 TC tracks on the maximum daily rainfall day for each rainfall type from 1966 to 2013
(arrows indicate moving directions, shaded areas indicate altitude)
(a) north, (b) west, (c) east, (d) middle, (e) south

迎风坡,在海陆风摩擦辐合或五指山抬升辐合的作用下,容易造成强降水的增幅。东部降水型的路径则偏东偏南,陆上部分在海南岛南半部,路径长度较短,规律较差,结合海南岛地形,海南岛东部大多处于TC路径的向岸风面或五指山的迎风坡(只有一个TC路径偏北,不属于此类型),在海陆风摩擦辐合或五指山抬升辐合的作用下,同样容易造成强降水的增幅。中部降水型路径较一致,大部分是西北偏西行,陆上部分较均匀地分布于海南岛的各个区域。南部降水型的路径偏南,路径的陆上部分主要在五指山及其以南,路径较分散,结合海南岛地形,海南岛南部距离TC路径较近或处于五指山的迎风坡,有利于形成强降水。从TC个数来看,西部降水型TC最多,达到13个,其次是北部降水型,有9个,再次是中部降水型,有7个,较少的是南部降水型和东部降水型,分别是6个、4个,由此进一步说明海南岛西北部是极端降水频数的大值中心。通过以上分析可知,在TC路径和低层风场结构的配合下,海南岛地形对极端降水的落区起关键性作用,在做极端降水落区预报时,不可忽视海南岛地形的影响。

4 结论

利用中国气象局国家气象信息中心提供的海南岛19个台站的日降水数据、中国气象局上海台风研究所的热带气旋最佳路径数据集和NCEP/NCAR再分析数据,探讨了海南岛TC极端降水的空间分布和时间变化特征,并进一步诊断分析了极端降水产生的可能成因,所得结论如下。

1) TC在整个海南岛地区产生的最大日降水均超过了300 mm,东部和西部分别有两个大值中心,分别位于海南岛的西部昌江县和东部琼海市,分别达到644.6和614.7 mm。TC最大单站日降水随着降水区间的增加而显著递减,在0~250 mm的共有444次,产生频数达到90.4%,占了绝大部分。年最大TC日降水趋于极端化,平均每10年增加10.4 mm。

2) 海南岛TC极端降水在西北部出现最多,东南部出现较少;无论从TC极端降水量级还是从TC极端降水频数,TC极端降水的极端趋势均在增加。

3) 1958—2013年共有47个TC产生极端降水,平均每年有0.8个,全部发生在5—11月,集中在7—10月,8、9月的频数最多,均有12个。

4) 充足的西南水汽输送是产生TC极端降水的重要条件;当海南岛出现TC极端降水时,南亚高压和副高相距很近,即南亚高压偏东偏强,副高偏西偏强;在TC路径和低层风场结构的配合下,海南岛地形

对极端降水的落区起关键性作用。

需要指出的是,TC极端降水的成因十分复杂,除本文提出的影响因子外,还有很多其他动力学和热力学方面的影响因子。因此,本文对TC极端降水的成因分析不够深入,下一步将使用天气学诊断和数值模拟相结合的方法对海南岛TC极端降水的成因做进一步的研究。

参考文献

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980.
- [2] Wu C C. Numerical simulation of typhoon Gladys (1994) and its interaction with Taiwan terrain using the GFDL hurricane model. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(6): 1533-1549.
- [3] Murata A. A Cloud-resolution numerical simulation for characteristic rainfall induced by typhoon Meari (2004). Team member report on topic 0.3 of Sixth International Workshop on Tropical Cyclones, 2006.
- [4] 于玉斌. 我国近海热带气旋强度突变的机理研究. 北京: 中国气象科学研究院, 南京: 南京信息工程大学, 2007.
- [5] Wu C C, Cheung K K W, Chen J H, et al. The impact of Tropical Storm Paul (1999) on the motion and rainfall associated with Tropical Storm Rachel (1999) near Taiwan. *Monthly Weather Review*, 2010, 138: 1635-1650.
- [6] 冯文, 徐向春, 黄耀怀, 等. 登陆海南的热带气旋中尺度降水分布变化特征. *气象*, 2009, 35(3): 15-20.
- [7] 侯建忠, 王川, 鲁渊平, 等. 台风活动与陕西极端暴雨的相关特征分析. *热带气象学报*, 2004, 22(2): 203-208.
- [8] Shepherd J M, Grundstein A, Mote T L. Quantifying the contribution of tropical cyclones to extreme rainfall along the coastal southeastern United States. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34, L23810.
- [9] 罗伯良, 张超. 登陆热带气旋影响湖南并造成强降水的气候特征. *广东气象*, 2008, 30(4): 12-15.
- [10] 李海鹰, 马慧, 夏冠聪, 等. 热带气旋与中山两种极端天气的关系. *气象研究与应用*, 2009, 30(z2): 6-7.
- [11] 赵珊珊, 王小玲. 影响中国的热带气旋极端事件年代际变化. *气候变化研究进展*, 2012, 8 (1): 16-21.
- [12] 吴慧, 林熙, 吴胜安, 等. 1949—2005年海南岛登陆热带气旋的若干变化特征. *气象研究与应用*, 2010, 3: 9-12.
- [13] 毛夏, 贺忠, 毛绍荣. 华南热带气旋特大暴雨的统计特征. *热带气象学报*, 1996, 12(1): 78-84.
- [14] Wu Y, Wu S, Zhai P. The impact of tropical cyclones on Hainan Island's extreme and total precipitation. *International Journal of Climatology*, 2007, 27(8): 1059-1064.
- [15] 徐珺. 热带扰动引发的华南特大暴雨两个案例分析. 北京: 中国气象科学研究院, 2011.
- [16] 蔡小辉, 杨仁勇, 周过海, 等. 1117号强台风“纳沙”引发海南岛特大暴雨过程分析. *气象研究与应用*, 2012, 33(2): 5-8.
- [17] 段丽, 陈联寿, 徐祥德. 山脉地形对热带风暴Fitow结构和运动影响的数值试验. *气象学报*, 2006, 64(2): 186-193.
- [18] 黄萍, 黄槐平, 陈海坚, 等. 2009年热带风暴“天鹤”移动路径及特大暴雨降水分析. *气象研究与应用*, 2010, 31(3): 5-8.
- [19] 王鼎祥. 西行台风和海南岛的台风灾害. *热带地理*, 1985, 5(3): 141-148.
- [20] 任福民, Gleason B, Easterling D. 一种识别热带气旋降水的数值方法. *热带气象学报*, 2001, 17(3): 308-313.
- [21] Ren F, Wang Y, Wang X, et al. Estimating tropical cyclone precipitation from station observations. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(4): 700-711.
- [22] 任福民, 吴国雄, 王小玲, 等. 近60年影响中国之热带气旋. 北京: 气象出版社, 2011.
- [23] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 2000.
- [24] 张琼, 钱永甫, 张学洪. 南亚高压的年际和年代际变化. *大气科学*, 2000, 24(1): 67-78.