

近60年来登陆华南热带气旋降水的气候变化特征及其成因

罗小莉¹, 姚才², 肖志祥², 张成扬¹

(1. 广西壮族自治区气候中心, 广西南宁 530022; 2. 广西壮族自治区气象科学研究所, 广西南宁 530022)

摘 要: 采用华南67个气象观测站逐日降水资料和NCEP/NCAR再分析风场、表面气压场、高度场、海表温度场资料以及上海台风所提供的热带气旋资料, 分析了1960—2016年登陆华南热带气旋降水(TCP)的气候变化特征及其成因。结果表明:(1)华南区TCP存在显著的地域差异, 沿海最大, 往西往北递减, EOF展开TCP的距平场前3个模态特征向量的累积方差贡献达70.6%, 其中第一模态整个区域表现为一致的偏多或偏少;(2)华南区TCP和TC频数年代际变化特征明显, 1960—1995年TCP的平均值远远高于1996—2016年TCP的平均值, 两者差值54.6 mm/站, 两个时段年平均登陆TC频数相差1.4个;(3)1995年之后, 西太平洋副高脊线明显西伸, 南海北部的偏东气流减弱, 不利热带气旋在这一带西行登陆华南, 同时1995年之后整个华南总体的水汽通量辐合减小, 三者的共同作用使得1995年之后华南地区TCP比1995之前TCP明显减少。

关键词: 登陆华南; 热带气旋降水; 气候特征

中图分类号: P444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2020)04-0076-10

1 引言

华南地区位于南海北部, 是我国受热带气旋(Tropical Cyclone, TC)影响最多的地区, 由TC产生的降水也是该地区降水的重要组成部分^[1]。台风对我国最大的影响表现在台风降水方面, 中国最大的暴雨主要是由TC造成的。2009年8月6—10日0908号台风“莫拉克”给中国台湾造成了特大暴雨, 阿里山站3天的累积降水量高达3 004.5 mm, 9日的日降水量为1 165.5 mm^[2]。中国大陆的特大暴雨也有一部分是由台风造成的, 例如7503号台风“尼娜”给河南省造成了特大暴雨, 过程总降水达1 631 mm, 驻马店地区的泌阳县林庄最大日降雨量达1 062 mm。如此大的暴雨通常会引发江河泛滥、水库决堤、山洪和泥石流等重大灾难, 造成惨重损失^[3]。因此TC降水及其预测一直是气象研究的热点, 也是防灾减灾关注的重点工作。

当前大多关于热带气旋降水(Tropical Cyclone Precipitation, TCP)的研究工作主要是针对中国区域开展的, 分别从整个中国或分区域等不同的角度分析了TCP的特征^[4-8]。刘通易等^[8]指出, 1965—2010年我国TCP呈现华东和东南沿海增多、华南减少的变化趋势。匡礼勇等^[1]对增暖环境下华南区和华北区的TCP进行了对比分析, 发现: 1957—2004年华南区TCP呈下降趋势, 而且比全国下降趋势更为显著, 华南TCP极值呈准12 a的周期振荡, 华南区与华北区TCP极值呈反位相。而登陆华南地区的TCP在华南3省的分布也各有特点, 袁金南等^[9]发现登陆广东TCP存在明显的年际变化, 主要有3种空间振荡模态。吴胜安等^[10]计算海南TCP平均占年总降水量的30%, 但呈3%/10a的显著线性下降趋势; 覃卫坚等^[10]指出在TC影响下, 广西沿海地区发生暴雨的可能性最大, 北部山区最小, 路径和中心滞留广西境内的时间影响发生暴雨的概率。

收稿日期: 2019-08-29; 修回日期: 2020-02-10。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41665006, 41465003, 41575051, 41765002)。

作者简介: 罗小莉(1984-), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事热带气旋、大气环流异常及其短期气候预测研究。E-mail: xlpeace2003@126.com

通讯作者: 姚才(1963-), 男, 正研级高级工程师, 博士, 主要从事天气气候分析。E-mail: dlhntfyj@126.com

上述研究工作虽然给出了华南TCP整体或局部的一些特征,但由于侧重角度、分析区域、资料来源、资料序列长度以及分析方法不尽相同,因此研究结果也有些差异。另外,还存在以下几个问题:(1)上述研究大部分是将华南作为中国的一个部分去研究,或者是从华南的各个部分去研究,将华南单独作为一个整体去研究的工作尚少;(2)在分析影响TCP因子的研究工作中,大部分是选择月季尺度的环流因子进行分析,而TCP主要与天气过程有关,TCP对这些因子在季节尺度的响应可能不如日变化影响显著;(3)研究分析资料序列长度不一样,但是罗小莉等^[11]的研究表明,近10 a来登陆华南的台风的极端强度有增强的趋势,那么登陆华南TCP是否也随之发生了相应的变化?

因此华南区TCP的一些规律还有待做系统深入的分析,主要有以下几个问题:第一,目前全国观测监测网密度日益加大,补充了新的地面降水资料,在更多台站更长的降水序列中,用台风降水客观分离得出的登陆华南TCP的时空特征发生了怎样的变化?第二,登陆华南TCP的长期变化趋势是怎样的?是否存在突变特征?主要受哪些因子的影响?本文采用Ren等^[6]提出的改进的客观天气图分析法(Objective Synoptic Analysis Technique, OSAT),用最新的TC和台站逐日降水资料,并且将资料序列延长到2016年,研究登陆华南TCP的特征。分析时不包括从沿海经过但未登陆的TC造成的降水,并在此基础上着重研究上述存在的两个问题。这些工作将对登陆华南TCP的预测研究提供很好的参考依据。

2 资料与方法

2.1 资料

本文所用的TC路径资料为中国气象局上海台风研究所以及中国气象局编制的西北太平洋TC年鉴资料(1960—2016年,网址:http://tcdata.typhoon.org.cn/zjljsjj_sm.html)。本文研究的华南地区TCP指的是西北太平洋(包括南海)生成的TC登陆华南所造成的降水,由于热带低压登陆时同样能产生很强的降水,因此本文讨论TC时考虑中心最大风速大于10.8 m/s的TC,即强度为热带低压及其以上的TC。

降水资料来自中国气象局气象数据中心提供的1951—2016年824站逐日站点资料(网址:http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html),日降水量为前一日20时—当日20时的累积降水。考虑台站资料形成初期连续建站等原因,1951—1959年华南区域台站数目呈现激增趋势,因此本研究开始的年份选取为1960年;同时考虑站点数目的稳定性和某些台站观测资料的缺测情况,挑选出华南地区包括海南、广东和广西3省的67个台站(见图1)的逐日降水资料,其中广东35个、广西24个、海南8个。

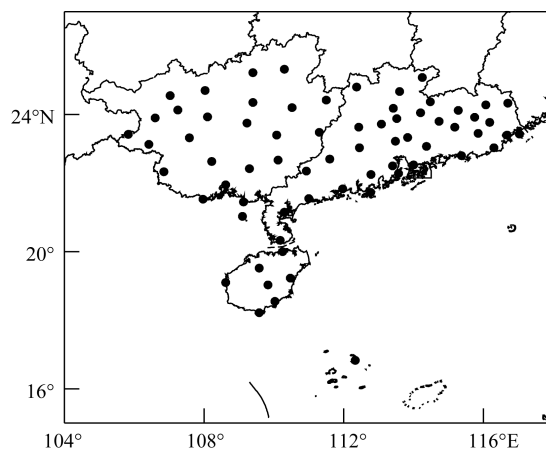


图1 华南67个观测降水台站分布图

大气环流分析使用美国国家环境预报中心以及美国国家大气研究中心(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR)的逐日再分析资料,包括风场、比湿场、高度场和表面气压场等资料,分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,美国国家海洋大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的第五版扩展再分析海表温度资料(网址:<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.ersst.v5.html>),分辨率 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 。

2.2 方法

本文使用的方法有:线性趋势、滑动平均、显著性检验、经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分解和OSAT^[6,12]。OSAT方法主要分为两个步骤,分别是自然雨带的分离和TC雨带的识别。其中TC雨带的识别主要是根据各雨带的雨

量加权中心与TC中心距离的关系筛选出可能的TC雨带。该方法一个明显的优点就是TC登陆时,TC雨带与TC中心距离的控制阈值会随TC强度等级变化而变化,分离出来的TCP数据可靠。本文研究的登陆华南TCP指的是—年中所有由于登陆华南TC引起辖区内观测站的日降水的总和。

文中对引导气流、高度场、水汽通量场、水汽通量散度场的合成分析均是取台风降水日的平均。由于海温的日变化较小,对于海温场的合成分析取台风出现频数较多的5—10月的平均值。另外,本研究的引导气流选取850~300 hPa共6个标准层风速的加权平均^[13],水汽通量和水汽通量散度是采用NCEP/NCAR的日平均风场、比湿场和表面气压场计算整层积分,积分层次选择由地面积分至500 hPa高度层,参与积分的标准层共6个。

3 登陆华南TCP的空间分布特征

图2a为多年平均的华南TCP年降水分布图。从图中可以看出,华南区TCP存在显著的地域差异,TCP梯度呈东南-西北走向。具体表现在:沿海最大,往西往北递减,最大降水量出现在南部沿海和海南岛,均超过300 mm/a,其中珠江口附近和粤东局地超过450 mm/a,纬度较高的一些地区,TCP也大部在200 mm/a以上,只有广西北部部分地区降水在150 mm/a以下。

为了衡量TCP在全年总降水中的重要程度,图

2b给出了登陆华南TCP占全年总降水的百分比。从图中可以看出,华南大部TCP占总降水的比重在10%以上,其中广东沿海和海南大部TCP占总降水的比重在20%以上,大值中心主要位于粤东沿海、珠江口附近、湛江南部、海口和海南西部,海南西部沿海超过30%。

台风带来的灾害主要有大风、暴雨和风暴潮,其中台风暴雨灾害是上述3种灾害中发生最为频繁的危害^[14]。图3给出了1960—2016年华南地区年平均TCP暴雨量和暴雨日数的分布。从图3a可以看出,华南大部每年因TC引起的暴雨量与TCP具有类似的分布特征,从东南向西北内陆递减,最大暴雨出现在华南沿海,沿海有25个台站年均暴雨超过了200 mm/a(占37%),最多的高达362.1 mm/a,100~200 mm的有18个站(占27%)。从图3b可以看出,广东、广西沿海和海南省年平均由TC造成的暴雨日数超过2 d,并且年平均暴雨日数从沿海往内陆递减,其中广东沿海有4站年均暴雨日数超过3 d,而广西内陆大部、广东西北部不到1 d。

为了分析整个华南区TCP空间变化情况,本文对1960—2016年华南67个台站的TCP距平场进行EOF展开。表1给出了前3个模态特征向量的方差贡献和累积方差贡献的百分比,第一特征向量的方差贡献占总方差的48.76%,远远大于其它各个特征向量的方差贡献,它反应了登陆华南TCP最主要的信息。前3个模态特征向量的累积方差贡献达70.6%,因此它们所对应的各个降水的空间振荡基本

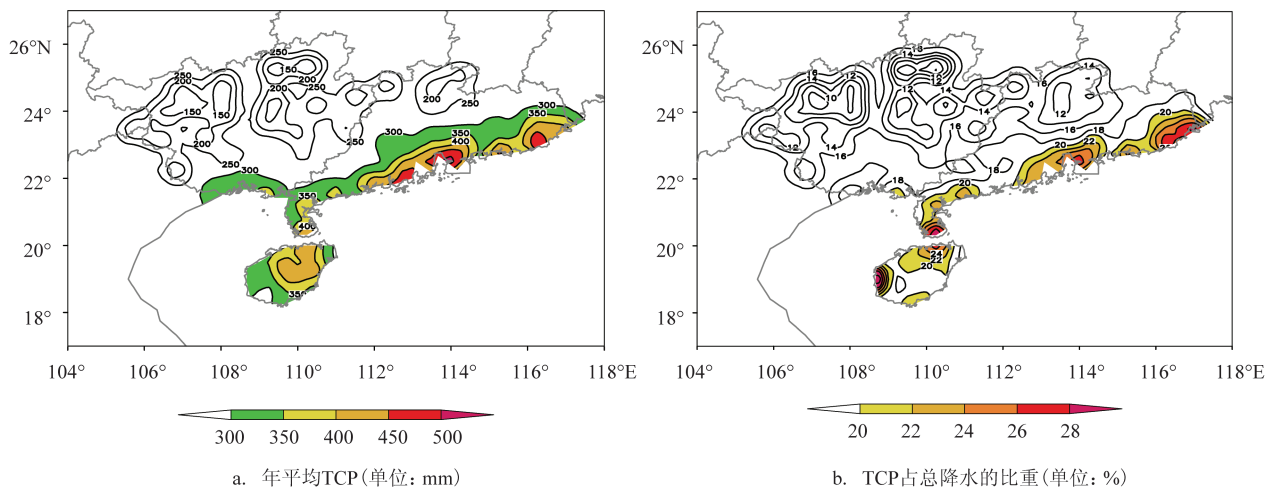


图2 1960—2016年登陆华南TCP的空间分布特征

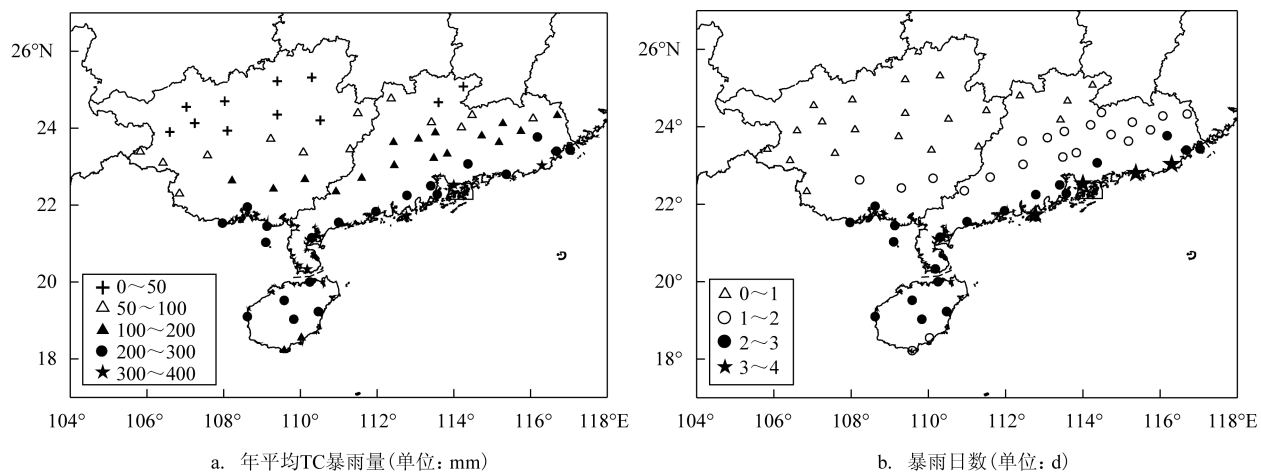


图3 1960—2016年华南67站暴雨情况统计

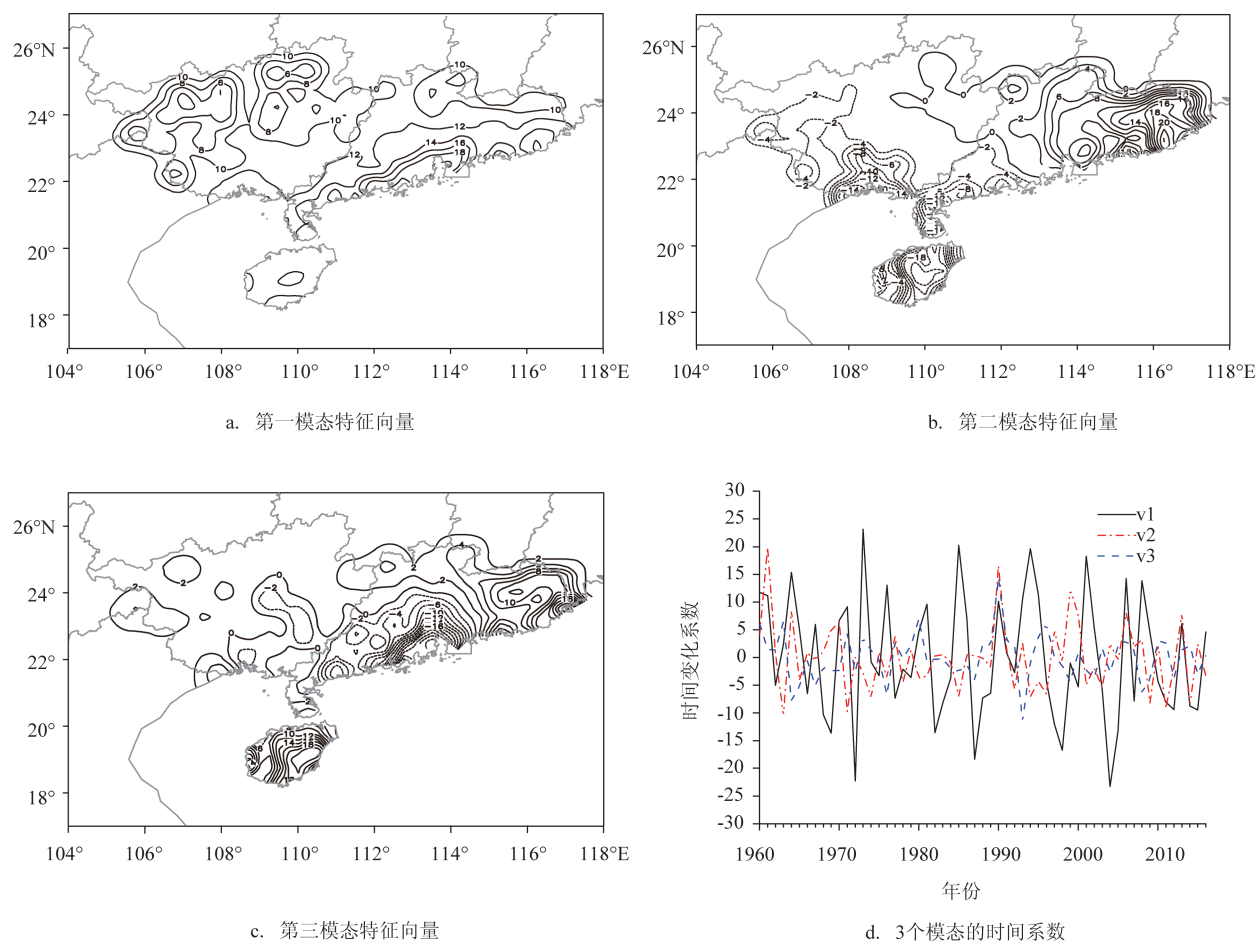


图4 1960—2016年华南地区67个台站的TCP距平场EOF分析(图a、b、c的等值线扩大100倍,单位:mm;图d的等值线缩小100倍)

表1 华南TCP距平场EOF分析前3个特征向量的
方差贡献(单位:%)

特征向量	1	2	3
方差贡献	48.76	14.9	6.94
累积方差贡献	48.76	63.66	70.6

上能反应华南TCP距平场最主要的空间振荡型态。

图4给出了EOF展开TCP距平场的前3个模态的特征向量和它们的时间系数变化。从图4a可以看出,第一模态特征向量在整个华南区域均是正值区,最大正值区位于珠江口到阳江一带,这说明整个华南地区TCP距平场的空间振荡型态是同相变化的,华南TCP变化比较一致。这是由于通常TC的降水区域比较大,而登陆华南的TC大部分会同时影响到广东、广西和海南省,因此登陆华南TCP最主要的表现为整体偏多或者整体偏少,其中以广东中部沿海变化最为敏感。第二模态特征向量以台山-梧州-柳城一线为界,以东以北为正值区,以西以南为负值区。这说明广东中部、东北部和广西东北部与其它地区呈反位相的变化,变化敏感的区域为粤东沿海、广西沿海和海南岛。第三模态特征向量的负值区主要位于广西东南部、珠江口以西湛江以北的地区,其它地区为正值区。这表明华南TCP第三特征向量对应的空间振荡在广西东南部、珠江口以西湛江以北的地区与其它地区是反位相的。

3个模态的时间系数变化趋势不显著,将时间系数序列进行5 a滑动平均,去掉年际变化后,发现序列的下降趋势也不显著(图略)。

4 登陆影响TCP的长期变化趋势

图5给出了1960—2016年登陆华南地区67个台站的年平均TCP以及TC暴雨的年变化,同时为了突出近60 a TCP的年代际变化趋势,对TCP进行了5 a滑动平均处理,并对处理后的降水序列作趋势分析。结果发现:1960—1995年的TCP年平均值(301.3 mm/站)远远高于1996—2016年的平均值(247.7 mm/站),两者差值54.6 mm/站,而两者的TC暴雨量差别不大,平均每年在150 mm/站左右。经5 a滑动平均后TCP也呈现显著的下降趋势,这一趋势通过了信度为0.05的显著性检验;而TC暴雨则没有显著的下降趋势。这说明近几十年登陆华南TC造成的极端降水并没有减少,这与Su等^[15]和Qiu等^[16]指出的东南沿海TC极端降水在近几十年呈明显增强趋势的结论相一致,其可能原因将在后面小节中继续讨论。

表2为登陆华南TCP的年代际变化特征,结果表明TCP最多的5 a是19世纪60年代初,TCP最少的是19世纪90年代末;而TC暴雨最多的是19世纪90年代初,最少的是19世纪60年代末。从TC暴雨占TCP的百分比可以看出,1995年前后发生了一次突然变化,1995年后TC暴雨占TCP的百分比均在56%以上。由图5可知,这主要由于1995年以后TCP下降明显,而TC暴雨量变化不明显造成的。但是1995年之后TC暴雨量并没有明显减少,能否说明近几十年登陆华南TC极端降水增加了?如果是极端降水增加了,那么是由登陆华南的TC频数

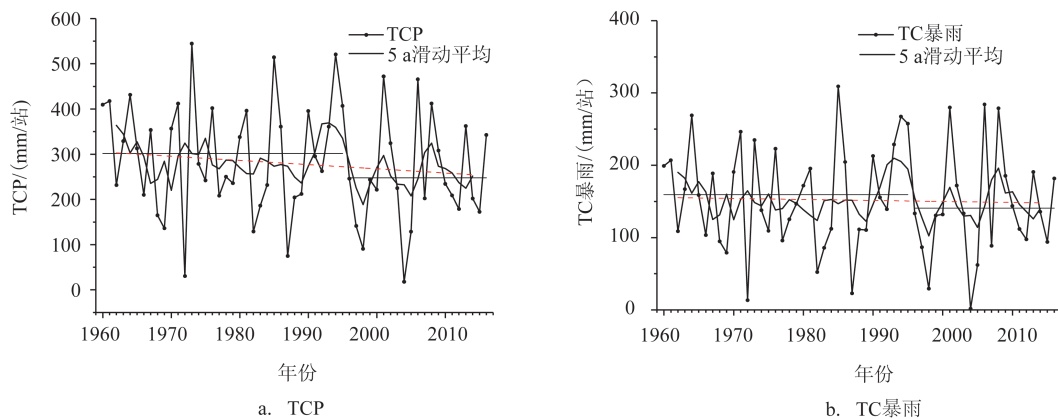


图5 1960—2016年华南地区TCP和TC暴雨年际变化趋势图

表2 登陆华南TCP的年代际变化特征表

年份	TCP/ (mm/站)	TC暴雨/ (mm/站)	TC一般性降水/ (mm/站)	TC暴雨占TCP的 百分比/%	TC一般性降水占TCP的 百分比/%
1960—1964	363.8	190.2	173.6	52.3	47.7
1965—1969	235.5	125.0	110.4	53.1	46.9
1970—1974	324.4	164.7	159.7	50.8	49.2
1975—1979	267.7	140.1	127.5	52.4	47.6
1980—1984	256.2	123.5	132.7	48.2	51.8
1985—1989	273.3	151.7	121.6	55.5	44.5
1990—1994	367.0	200.8	166.2	54.7	45.3
1995—1999	225.7	127.5	98.3	56.5	43.5
2000—2004	252.1	143.8	108.3	57.0	43.0
2005—2009	303.4	179.8	123.6	59.3	40.7
2010—2016	243.1	136.5	101.4	56.1	41.7

变化引起还是强度变化或者其它因素引起的?这些是我们后续研究值得关注的问题。

5 华南TCP突变的影响因子分析

由第4节分析可知,1960—1995年与1996—2016年两个时段的TCP平均值发生了突变,本研究将1960—2016年的数据资料分为两个时期:1960—1995年与1996—2016年。从登陆华南TC的频数、西太平洋副热带高压(以下简称“副高”)、海表温度、引导气流以及水汽通量等方面分两个时段进行比较分析(差值场均是由1996—2016年间台风降水日的平均值减去1960—1995年间台风降水日的平均值),分析两个时段登陆华南TCP突变的可能原因。

5.1 登陆华南热带气旋频数的长期变化趋势

华南区TCP的变化与影响该地区的热带气旋频数的变化密切相关^[1]。王咏梅等^[7]指出在时间变化上,过去几十年全国台风降水总量显著下降,主要原因是这段时间内影响中国的台风频数呈现明显减少趋势。本研究计算登陆华南TC频数与华南地区TCP的相关系数发现,相关系数高达0.657 8,通过了99.9%的显著性检验。图6给出了1960—2016年登陆华南TC(包括热带低压)的频数变化情况。1960—2016年登陆热带气旋共312个,平均每年5.5个,年际变化显著,最多的一年有9个,最少的

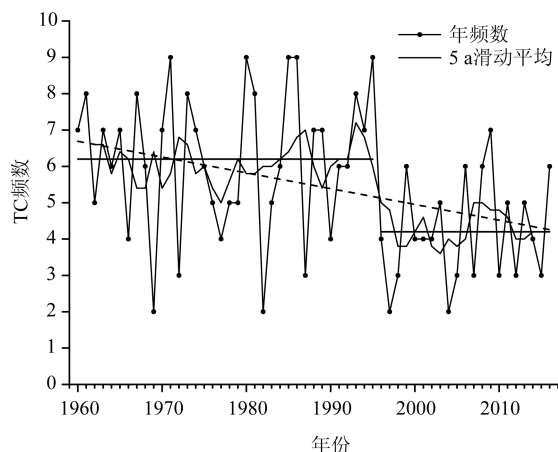


图6 1960—2016年登陆华南地区热带气旋频数变化趋势图

为2个,均方差为2.1个/a。为了突出其年代际变化趋势,对序列作5 a滑动平均,去掉其年际变化,发现登陆华南区TC频数有减少的趋势,气候趋势通过了信度为0.01的显著性检验。

1960—1995年平均每年登陆华南TC有6.2个,而1996—2016年平均每年登陆华南TC为4.2个,两个时段的登陆华南的TC数相差两个。这可能与1995年之后中国南海和华南一带TC活动频数明显减少有关,这与刘通易等^[8]研究的1995之后该区域TC活动频数之和明显减少的结论一致。

5.2 副高变化特征

图7给出了1996—2016年与1960—1995年台

风降水日平均的500 hPa高度差值场。从图上可以看出,1995年以前西太平洋副高西边界的平均位置位于128°E附近,1995年以后西太平洋副高明显西伸,其西边界位置伸到中国东南沿海约120°E附近,而且西太平洋副高的控制范围较1995年以前明显扩大,脊线位置也略向南移。Zhou等^[17]认为副高西伸的一个可能原因是西太平洋和赤道印度洋的增暖以及与季风相关的非绝热加热作用。

为了进一步验证副高的这种变化,计算了两个时段5—10月平均的海表温度差值场(见图8)。结果表明:1995年之后全球大部海表温度较1995年之前有明显的上升,升温最明显的区域在南印度洋、南太平洋和大西洋的西北部,太平洋中部和北部海温也有明显升高。分别计算赤道印度洋海温距平、NINO1+2、NINO3、NINO4、NINO3+4区平均海温距

平与华南67站降水的相关系数(图略),赤道印度洋海温距平、NINO1+2区海温距平与华南67站降水均呈显著的负相关,其中NINO1+2区海温距平与华南67站降水相关更密切,有41个站通过信度为0.05的显著性检验(占61.2%),而赤道印度洋海温距平有21个台站通过信度为0.05的显著性检验(占31.3%)。说明海温除了影响副高西伸之外,对华南台风降水也有一定的影响。

5.3 引导气流变化特征

热带气旋运动由大尺度环境引导气流与气旋环流以及 β 效应的相互作用共同决定^[18-20]。Wu等^[21]指出,平均引导气流是热带气旋盛行路径转变的主要原因。图9给出了1996—2016年与1960—1995年台风降水日平均的引导气流差值场。从图中可

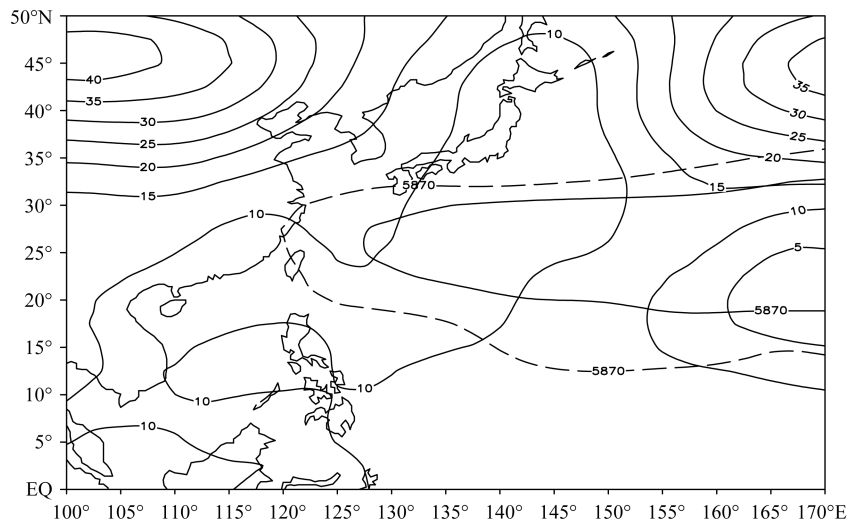


图7 1996—2016年与1960—1995年台风降水日平均的500 hPa高度差值场(单位:位势米,实线和虚线分别为1960—1995年和1996—2016年台风降水日平均的5870位势米线)

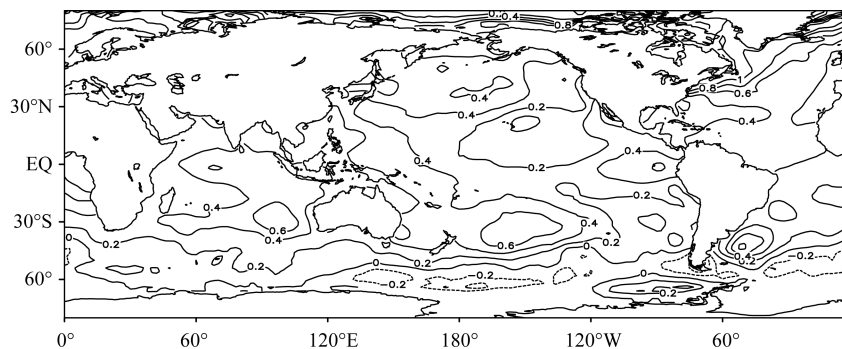


图8 1996—2016年与1960—1995年5—10月平均海表温度差值场(单位:°C)

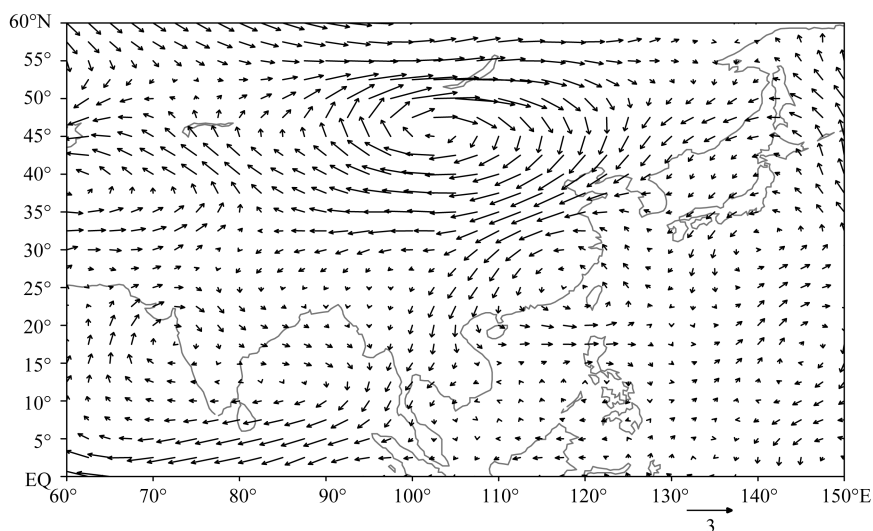


图9 1996—2016年与1960—1995年5—10月台风降水日引导气流差值场(单位:m/s)

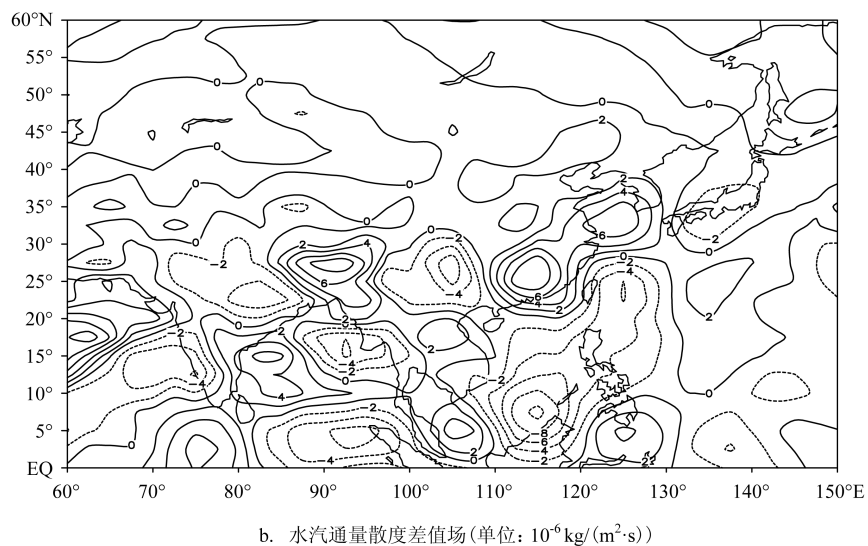
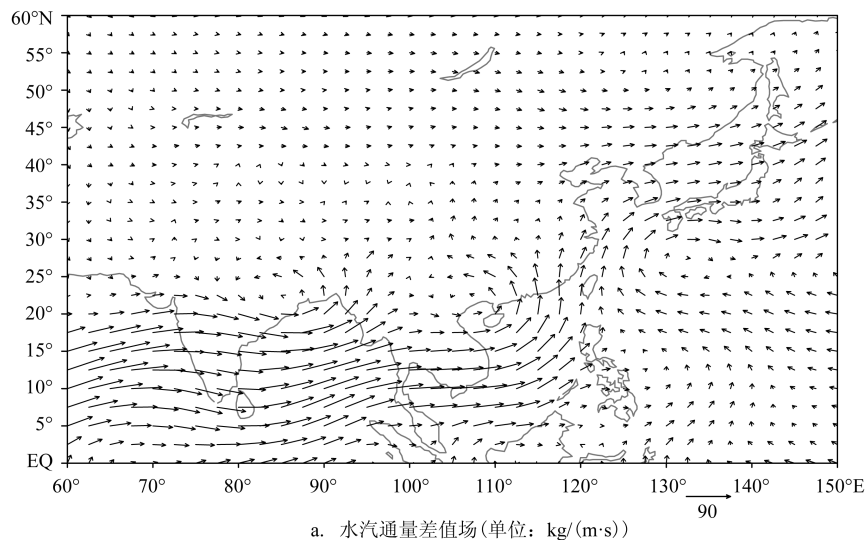


图10 1996—2016年与1960—1995年水汽输送变化特征

以看出,中国东海-南海-华南一带出现了一个气旋性环流。说明1995年之后较1995年以前的东风气流减弱(图略),差值场上南海北部的西风气流不利于热带气旋在这一带西行登陆华南,而台湾岛以东的偏南气流有利于热带气旋向北转向,这与Wu等^[21]和Wang等^[22]的研究结果基本一致。

5.4 影响华南的水汽输送变化特征

刘通易等^[8]指出30°N以南的TCP变化既与TC频数变化有关,又受到水汽输送的影响,因为海上输送到华南的暖湿气流和水汽的变化会影响登陆该地区TC的发展与维持,进而影响TCP。

从1996—2016年与1960—1995年台风降水日平均的水汽通量差值场来看(见图10a),中国受TC影响的大部地区均出现了自南向北的水汽通量。这说明1995年之后原本自南向北输送的水汽通量较1995年之前变大(图略),其中华南地区中东部最为显著,而华南南部差值场上是自西向东的水汽通量,华南西部则是自东向西的水汽通量,说明台风降水与水汽通量的关系并无明显的对应关系;但是从1996—2016年与1960—1995年台风降水日平均的水汽通量散度差值场(见图10b)来看,华南的中东部地区水汽通量散度差值为正,有1个大值中心,位于广东的东北部,其中心值高达 $8 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,而华南西部和南部的水汽通量散度为负,负值区的范围和强度不如华南中东部明显,总体上可以说明华南地区1995年之后较1995年之前水汽辐合较弱,不利于降水的生成。

6 结论与讨论

(1)华南区TCP存在显著的地域差异,沿海最大,往西往北递减,最大降水量出现在南部沿海和海南岛,均超过300 mm/a,纬度较高的一些地区,TCP也大部在200 mm/a以上。EOF展开TCP的距平场前3个模态特征向量的累积方差贡献达70.6%,其中第一模态整个区域表现为一致的偏多或偏少。

(2)华南区TCP和TC频数年代际变化特征明显,1960—1995年的TCP年平均值(301.3 mm/站)远远高于1996—2016年的平均值(247.7 mm/站),

两者差值54.6 mm/站,平均登陆TC频数两者相差1.4个。

(3)1995年前后台风降水日平均的副高和引导气流均发生了明显的变化。1995年之后,西太平洋副高脊线明显西伸,西边界从128°E附近西伸到东南沿海约120°E附近,脊线位置略有南落,副高范围明显增强,这与全球海温变暖有密切关系。1995年之后较1995年之前南海北部的偏东气流减弱,不利于热带气旋在这一带西行登陆华南。

(4)1995年前后台风降水日平均的水汽输送均发生了明显的变化,但登陆华南台风降水与水汽通量的关系不显著,主要受水汽通量散度的影响较大;1995年之后在华南中东部的水汽通量辐合明显减小,而华南西部和南部水汽辐合略有增加,总体的水汽通量辐合减小导致华南地区TCP减少。

上述分析表明,1995年之后,全球海温异常增暖导致西太平洋副高偏强偏西,南海北部的偏东气流减弱,西行登陆华南TC频数减少,同时水汽在华南一带的辐合明显减少,从而使得登陆华南TCP较1995之前明显减少。由于热带气旋活动的变化不仅包括路径的变化,其强度的变化以及维持时间尤其是陆上的维持时间等对TCP的影响也是值得考虑的,而陆上持续时间又可能与地形、地表摩擦、垂直风切变等因子关系密切,这也是将来需要研究的重要方面。

参考文献:

- [1] 匡礼勇, 罗哲贤. 增暖环境下华南地区热带气旋降水量的特征[J]. 中国科技信息, 2008(11): 22-25, 27.
- [2] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [3] 丁一汇. 暴雨和中尺度气象学问题[J]. 气象学报, 1994, 52(3): 274-284.
- [4] 吴胜安, 郭冬艳, 杨金虎. 海南热带气旋降水的气候特征[J]. 气象科学, 2007, 27(3): 307-311.
- [5] 程正泉, 陈联寿, 刘燕, 等. 1960—2003年我国热带气旋降水的时空分布特征[J]. 应用气象学报, 2007, 18(4): 427-434.
- [6] Ren F M, Wang Y M, Wang X L, et al. Estimating tropical cyclone precipitation from station observations[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2007, 24(4): 700-711.
- [7] 王咏梅, 任福民, 李维京, 等. 中国台风降水的气候特征[J]. 热带气象学报, 2008, 24(3): 233-238.
- [8] 刘通易, 吴立广, 张娇艳, 等. 1965—2010年7—9月影响中国的热带气旋降水变化趋势分析[J]. 气象学报, 2013, 71(1): 63-75.
- [9] 袁金南, 郑彬. 广东热带气旋降水年代际变化特征的分析[J]. 热带气象学报, 2010, 26(4): 385-391.

- [10] 覃卫坚, 李耀先, 廖雪萍. 广西热带气旋的暴雨统计分析及数值模拟[J]. 气象研究与应用, 2013, 34(1): 1-6.
- [11] 罗小莉, 姚才, 谭金凯. 登陆华南台风的频数及强度变化特征分析[J]. 海洋预报, 2018, 35(4): 58-67.
- [12] 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: 296.
- [13] Holland G. Tropical cyclone motion[M]//Holland G. Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting. Melbourne: Bureau of Meteorology Research Centre, 1993.
- [14] 陈联寿, 孟智勇, 丛春华. 台风暴雨落区研究综述[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(4): 1-7.
- [15] Su Z Z, Ren F M, Wei J, et al. Changes in monsoon and tropical cyclone extreme precipitation in southeast China from 1960 to 2012[J]. Tropical Cyclone Research and Review, 2015, 4(1): 12-17.
- [16] Qiu W Y, Ren F M, Wu L G, et al. Characteristics of tropical cyclone extreme precipitation and its preliminary causes in Southeast China[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2019, 131(3): 613-626, doi: 10.1007/s00703-018-0594-5.
- [17] Zhou T J, Yu R C, Zhang J, et al. Why the Western Pacific Subtropical High has extended westward since the late 1970s[J]. Journal of Climate, 2009, 22(8): 2199-2215.
- [18] Holland G J. Tropical cyclone motion: environmental interaction plus a beta effect[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1983, 40(2): 328-342.
- [19] Carr III L E, Elsberry R L. Observational evidence for predictions of tropical cyclone propagation relative to environmental steering[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1990, 47(4): 542-546.
- [20] 王斌, Elsberry R L, 王玉清, 等. 热带气旋运动的动力学研究进展[J]. 大气科学, 1998, 22(4): 535-547.
- [21] Wu L G, Wang B, Geng S Q. Growing typhoon influence on East Asia[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(18): L18703, doi: 10.1029/2005GL022937.
- [22] Wang R F, Wu L G, Wang C. Typhoon track changes associated with global warming[J]. Journal of Climate, 2011, 24(14): 3748-3752.

The climatic characteristics and causes of precipitation related to tropical cyclones landing in South China in recent 60 years

LUO Xiao-li¹, YAO Cai², XIAO Zhi-xiang², ZHANG Cheng-yang¹

(1. Guangxi Climate Center, Nanning 530022 China; 2. Guangxi Meteorological Science Institute, Nanning 530022 China)

Abstract: Based on the daily precipitation data of 67 weather observation stations in South China, the wind, surface pressure, altitude and sea surface temperature fields of the NCEP/NCAR reanalysis datasets and the tropical cyclone data obtained from Shanghai typhoon institute, the climatic characteristics of precipitation associated with tropical cyclone landing in South China from 1960 to 2016 as well as their causes are analyzed. The results show that the tropical cyclone precipitation (TCP) reveals significant regional differences in South China, which is the largest over the coastal area and decreases from the west to the north. The first three eigenvectors of the EOF modes explains 70.6% of the variation in the TCP anomaly data. The first mode represents a consistent weaker or heavier precipitation in the whole region. The TCP and tropical cyclone frequency shows significant interannual variability. The average TCP from 1960 to 1995 is much higher than that from 1996 to 2016 with a difference of 54.6 mm per station, while the difference of the frequency of landfall tropical cyclone is 1.4 on average between the two periods. Starting from 1995, the ridge line of the western Pacific subtropical high extends remarkably westward and the easterly flow in the northern South China Sea weakens, which is unfavorable for the westward landfall of tropical cyclones in South China. Meanwhile, the convergence of water vapor flux weakens over the whole region. Under the joint influence of those three conditions, the TCP in South China after 1995 is significantly less than that before 1995.

Key words: landing in South China; tropical cyclone precipitation; climatic characteristics