

台风登陆前华南地区降水日变化特征分析

李卓¹, 黎伟标^{1,2}, 张稟祺^{1,2}

1. 中山大学大气科学学院, 广东 珠海 519080;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519080

摘要: 文章采用 1998—2017 年间日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)台风最佳路径、热带测雨卫星(tropical rainfall measuring mission, TRMM)逐 3 小时降水及日本 55 年再分析(Japanese 55-year reanalysis, JRA-55)逐 6 小时数据, 针对起源于西北太平洋、移动路径位于台湾岛以南且台风最外围第一波螺旋雨带经过华南地区的台风, 将符合上述条件的台风筛选出来后, 由卫星云图和 TRMM 降水资料判断出台风第一波螺旋雨带到达华南地区的日期, 并分析雨带到达之前台风对该地区日降水的影响, 以此探索台风登陆前外围环境场对华南地区降水日变化的影响规律及机理。结果表明, 在台风临近华南地区期间, 一方面台风外围气流会向该地区输送水汽促进该地区降水, 另一方面华南地区在台风外围辐散场下沉气流的影响下降水受到抑制。当前者作用大于后者时, 华南地区降水增强, 此情形下华南地区大气不稳定极值时间多发生于午后, 午后降水明显, 对应的台风多发生于 7、8 月份, 西太平洋副热带高压偏东, 有利于台风北移, 台风第一波雨带到达华南地区时台风中心距华南沿海较近; 反之, 华南地区降水减小, 大气层结较稳定, 夜间至清晨出现因辐射冷却导致的层云降水峰值, 对应的台风多出现于 9、10 月份, 西太平洋副热带高压西伸, 不利于台风向北发展, 台风第一波雨带到达华南地区时台风中心距华南沿海较远。文章结果有望提高对台风登陆前的外围环流场影响沿海地区云和降水过程的规律性认知。

关键词: 华南; 台风; 降水日变化; 台风登陆前; 外围环境场

中图分类号: P732.42

文献标识码: A

文章编号: 1009-5470(2022)02-0026-12

Analysis of diurnal variation characteristics of precipitation over South China before typhoon landfall

LI Zhuo¹, LI Weibiao^{1,2}, ZHANG Aoqi^{1,2}

1. Sun Yat-sen University, Zhuhai 519080, China;

2. Laboratory of Southern Ocean Science and Engineering (Zhuhai), Zhuhai 519080, China

Abstract: We used the Japan Meteorological Agency (JMA) best track data, tropical rainfall measuring mission (TRMM) 3B42 3-hourly precipitation data and Japanese 55-year reanalysis (JRA-55) 6-hourly data from 1998 to 2017. We selected typhoons, which originated from the Northwest Pacific and had rain belt passing through South China with moving path located to the south of Taiwan Island, as our research objects. The date of the first spiral rain belt of typhoon arriving in South China was manually judged from satellite cloud images and TRMM precipitation data. The influences of typhoons on diurnal variation of precipitation in the study area before the rain belt arriving were then analyzed. The results showed that on the one hand the peripheral circulations of typhoons would transport much water vapor into the region before typhoon landfall, which

收稿日期: 2021-04-09; 修订日期: 2021-07-07。殷波编辑

基金项目: 国家自然科学基金(42075004、42005062); 广东省自然科学基金(2021A1515011404)

作者简介: 李卓(1993—), 女, 四川省绵阳市人, 主要研究方向为降水日变化和台风。email: lizh227@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 张稟祺(1995—), 男, 安徽省合肥市人, 博士后, 主要研究方向为云和降水物理学。email: zhangaoq3@mail.sysu.edu.cn

Received date: 2021-04-09; Revised date: 2021-07-07. Editor: YIN Bo

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (42075004, 42005062); Natural Science Foundation of Guangdong Province of China (2021A1515011404)

Corresponding author: ZHANG Aoqi. email: zhangaoq3@mail.sysu.edu.cn

was beneficial to the precipitation in the region; on the other hand, the downdraft outside of cyclonic divergence field would suppress the convection in the region, which was inconducive to the occurrence of precipitation. When the former played a greater role than the latter, the precipitation in South China would increase. The maximum of atmospheric instability within a day would occur in the afternoon, resulting in an afternoon rainfall peak. These relevant typhoons appeared mostly in July and August, when the western Pacific subtropical high was located easterly and was favorable for the northward movement of typhoon. The typhoon centers were close to the coastal area of South China when their first wave of rainband reached South China. On the contrary, the atmospheric layer over South China was stable and therefore precipitation decreased; the diurnal variation of precipitation peaked in the morning due to radiative cooling and the relevant typhoons mostly appeared in September and October. As the westward extension of the western Pacific subtropical high is not conducive to the northward movement of typhoon, the typhoon centers were far away from the coastal area of South China when their first wave of rain band reached South China. The results are expected to improve the knowledge for impact of cyclonic peripheral circulation on precipitation process in coastal regions before typhoon landfall.

Key words: South China; typhoon; diurnal variation of precipitation; before typhoon landfall; cyclonic peripheral circulation

1 引言

日变化特征是降水研究的一个重要方面,它反映了大气热力、动力过程对水循环的影响。降水日变化最主要的驱动力为太阳辐射,不同区域的下垫面和地形条件有别,对太阳辐射响应特性不同,造成区域热力条件和环流特性的差异,从而对降水的形成发展产生影响(宇如聪等, 2014)。大气层结稳定性是降水触发的一个条件,可通过相当位温、 K 指数及对流有效位能(convective available potential energy, CAPE)等参量来衡量(莫志祥, 1983; Yao et al, 2016; 邹丽丽等, 2017)。受地表加热影响,陆面地区下午的大气层结结构为一天中最不稳定的阶段,因此陆面地区的日降水峰值通常出现在下午(Nesbitt et al, 2003; 宇如聪等, 2014)。

随着近 20 年内地基和空基观测手段的飞速发展,我国降水日变化特征研究已取得诸多进展(Yuan et al, 2012; Zhang et al, 2020)。例如,黄天福等(2013)利用多源卫星资料研究了全国夏秋季节降水日变化特征,指出夏季全国区域内多为午后至傍晚出现降水量最大值,秋季深夜至凌晨出现降水最大值的区域范围扩大。宇如聪等(2016)站点降水资料研究表明,全国大陆地区暖季降水日变化峰值相位按照空间可分为 7 个典型区域:东北至华北山区、东南内陆地区(下午峰值)、四川盆地西部至云贵高原东部、华北平原西部贴近山地的区域(夜间峰值)、华北平原东部、秦巴山区至华中西南部(清晨峰值区)以及青藏高原区(傍晚至夜间峰值)。

华南地区地处亚热带,大气环流和天气系统十分复杂,不仅受中高纬度环流的影响,还受到夏季风和热带气旋等热带环流或系统的影响。已有的华

南地区降水日变化研究表明,华南在夏季风期间降水峰值出现在午后(陈炯等, 2012; 宇如聪等, 2014),这是陆面受太阳辐射加热,大气低层在下午出现不稳定极值,触发深对流引起短时强降水所致(Yu et al, 2007)。另一方面,华南紧邻西北太平洋,台风活动频繁并带来大量降水(王文秀等, 2018; 杨云月等, 2020),已有研究表明华南沿海地区的热带气旋年降水占全年降水的比重可达 20%以上(杨慧, 2019)。因此台风过程必然会影响华南地区降水日变化特征,本文探讨了华南地区降水日变化在台风影响下的特征及其变化机理。

台风临近华南地区时,一方面,受太阳辐射和台风外围下沉气流的影响,华南地区午后地面很热,空气处于强对流不稳定状态,利于强降水产生(张学敏, 1991);台风移动方向右侧的偏东大风与低空急流有类似的效果,输送低空大气的水汽、热量和动量并加剧了大气的不稳定性(李传祥等, 2013)。另一方面,台风是一个深厚的低压系统,眼墙附近存在强辐合而台风外围则存在辐散场,台风临近时华南地区可能正处于台风的辐散场附近,该地区在台风登陆前大气低层(500hPa 以下)有弱的上升运动,中高层大气(500hPa 以上)下沉,大气的这种垂直运动下不利于形成降水(许春林等, 2009)。这些研究表明,台风临近时,华南地区的大气层结条件复杂且多变,然其对降水日变化的影响情况仍不清楚,本文将结合台风路径数据集和卫星降水产品,就台风登陆前华南地区降水日变化特征和机理进行深入探讨。

2 资料

本文选取的台风生成于西北太平洋,日本气象

厅(Japan Meteorological Agency, JMA)数据对西北太平洋热带气旋的定位精度较高(张长江 等, 2018), 因此本文采用 1998—2017 年的 JMA 台风最佳路径资料来描述台风中心的移动路径和中心强度的变化, 该资料记录了热带气旋中心的经纬度、最低气压、强度等信息, 记录时间间隔 6h。

降水资料来源于热带测雨卫星(tropical rainfall measuring mission, TRMM)提供的 1998—2017 年间的逐 3 小时降水资料, 该资料空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。Chang 等(1999)将 TRMM 数据用于研究逐月海洋降水发现 TRMM 数据能改善低降水率的问题, Shen 等(2010)用测站以及 6 种卫星降水数据资料来比较分析不同时间不同地区的降水, 发现卫星降水数据能较好的展示潮湿地区温暖季节的降水, 其中 TRMM 3B42 几乎能完全消除降水的季节和区域变化的偏差, 并能较好地反映夏季降水的情况。由于台风多发生于夏秋季节, 因此本文选用 TRMM 3B42 降水产品。

本文的温度、风场、湿度和垂直速度等数据来源于 1998—2017 年日本 55 年再分析(Japanese 55-year reanalysis, JRA55)逐 6 小时数据。该资料的网格分辨率为 $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$, 包括了 37 个垂直层。JRA55 采用了复杂的资料同化系统, 质量较高, 该资料中国大陆地区的有效性得到了大量研究认证(王美蓉 等, 2019; 张思齐, 2019)。

葵花-8 (Himawari-8)是由 JMA 发射的一颗地球同步卫星, 其搭载的传感器具有从 $0.47\mu\text{m}$ 到 $13.3\mu\text{m}$ 共 16 个波段。因通道不同, Himawari-8 全圆盘数据具有 0.5km 、 1km 和 2km 3 种不同的分辨率(Bessho et al, 2016)。本文选用了 $10.4\mu\text{m}$ 通道的亮温来表示云图, 空间分辨率为 2km , 这是由于该通道数据受大气影响较小并且能很好地反映云顶或者地球表面的信息(Zhang et al, 2018), 相关数据可从日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)官网获取(域名: ftp.ptree.jaxa.jp)。

3 方法介绍

3.1 关键区域和筛选出来的台风

本文研究对象为台风逐渐靠近华南地区的过程中该地区陆面的日降水变化过程, 之所以不考虑该地区附近海洋上降水日变化, 是由于海洋和陆地有着不同的海陆热力差异和动力、热力强迫等因素, 从而两者的日降水在时空上差异较为明显(吕翔 等, 2007)。广东临海地区降水过程受台风影响较早, 因

此截取广东的大部分和与广东接壤的邻近省市部分区域作为关键区域, 这是由 $(23^{\circ}00'N, 109^{\circ}00'E)$, $(25^{\circ}30'N, 116^{\circ}00'E)$, $(25^{\circ}30'N, 117^{\circ}00'E)$, $(21^{\circ}00'N, 110^{\circ}00'E)$ 这几个点围成的矩形区域, 如图 1 所示。

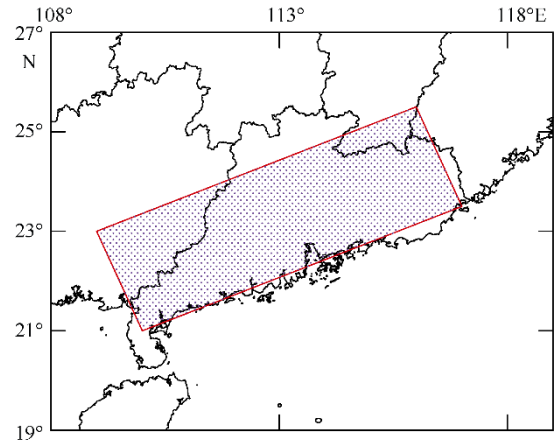


图 1 选取的研究区域(红色方框所示)

该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作

Fig. 1 The key area used in this study, shown by the red box

据统计在广东地区登陆的台风其源地有 2 个: 南海和西北太平洋, 这些台风多起源于太平洋(60% 以上), 登陆时强度多为台风和强热带风暴(80%), 而登陆时台风强度在热带风暴和热带低压的台风(20%)大都起源于南海(唐晓春 等, 2003), 考虑到登陆台风的数量和强度, 将起源于太平洋并且在 1998—2017 年间台风第一波外围远距离降水雨带经过华南区域的台风作为参考条件。

起源于太平洋且登陆广东的台风中, 部分移动路径经过台湾岛, 部分位于台湾岛以南。徐建平等(1995)对通过多个台风个例进行统计分析, 发现台风在靠近台湾岛的过程中, 台风的移动路径和移动速度都会发生变化, 台风的强度和环流结构也会发生改变, 主要表现为台风经过台湾岛之后路径北翘南折, 移动速度加快, 台风强度减弱, 台风的环流结构也发生变化, 如形成地面气压槽脊, 次生低压, 迎风坡上降水增强, 背风坡上出现焚风效应等。由于台湾岛对台风造成的这些方面的影响, 对起源于太平洋并且在 1998—2017 年间登陆于关键区域的台风进行进一步的筛选, 剔除其中移动路径经过台湾岛的台风。此外, 考虑到台风的移动路径受引导气流和副热带高压等其他环境因素的影响, 因此本文选择移动路径相似的台风, 在本文中选择移动方向为东南—西北走向的台风。

满足以上条件从 1998 到 2017 年间筛选出来的台风一共有 32 个, 这些台风起源于西北太平洋, 移动方向为东南—西北走向, 移动路径位于台湾岛以南, 华南地区会受到这些台风第一波雨带的影响, 进一步依据台风外围第一波雨带到达华南地区之前

该地区午后降水是否明显, 将筛选出来的所有台风分为 1 类和 2 类台风。在 1 类台风影响下台风第一波雨带到达关键区域之前该地午后降水明显, 2 类台风影响下午后降水不明显。筛选出来的台风路径、编号如图 2 所示。

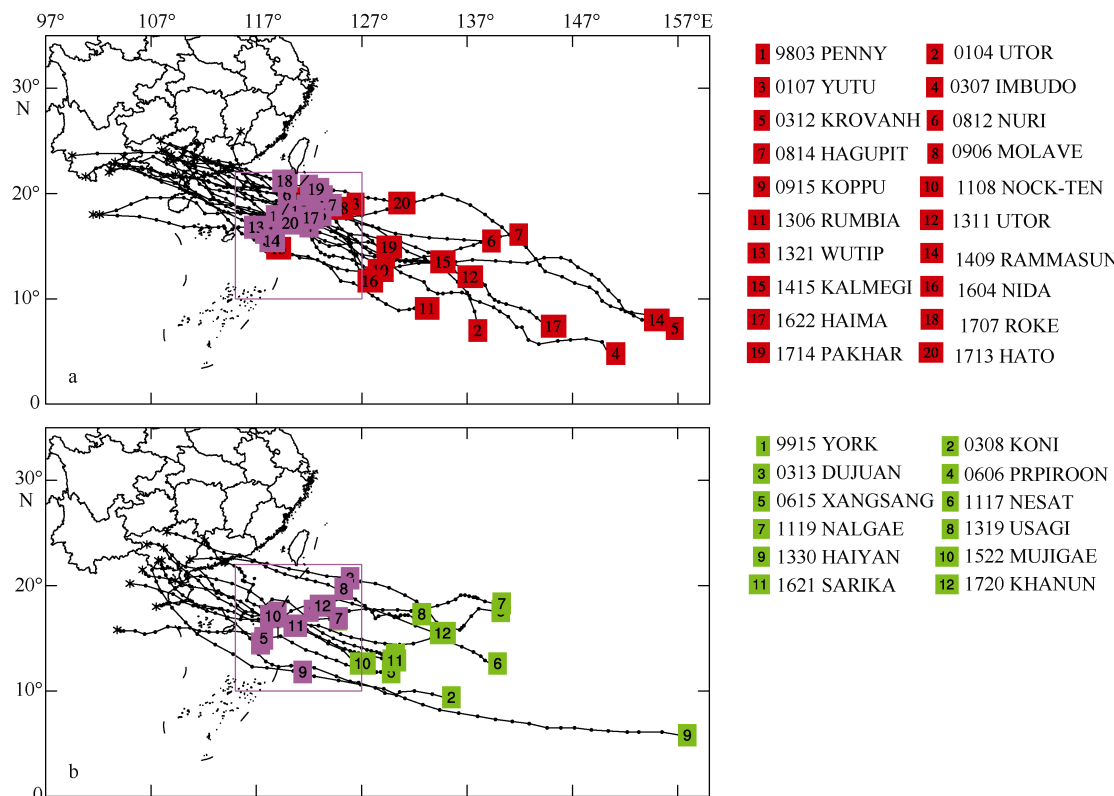


图 2 筛选出来的 1998—2017 年间的 1 类台风(a)和 2 类台风(b)

图中显示了台风编号、名称、路径和 day0 时台风中心经纬度。紫色方框内标注的各个点是两类台风第一波外围雨带到达华南地区时台风中心经纬度。该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作

Fig. 2 The selected Typhoon-1 (a) and Typhoon-2 (b) from 1998 to 2017. Their numbers, names, routes, and longitude and latitude of typhoon center on day0 as shown in the picture. The points marked in the purple box are the longitudes and latitudes of the typhoons' centers when the first wave of cyclonic spiral rain band reached South China

3.2 台风第一波雨带到达关键区域的日期

为发现台风登陆前华南地区陆面的日降水变化情况, 就要排除台风外围雨带到达华南地区之后台风雨带对华南地区日降水的影响, 找出台风最外围螺旋雨带到达关键区域的日期非常必要。本文将台风登陆前台风外围第一波螺旋雨带扫过关键区域, 使降水显著增加的首日定义为 day0, 这个日期可由卫星云图和关键区域的降水情况来确定, 其中卫星云图来源于日本高知大学气象学报网(<http://weather.is.kochi-u.ac.jp/sat/gms.sea/>), 降水情况用 TRMM 降水资料表示。关键区域在台风靠近的过程中该地不稳定能量的变化引起该地对流活动的发展, 在卫星云图上可发现台风外围螺旋雨带抵达关键区域的过

程中该地区高空有一个从无云或少云到多云这样一个云层明显加厚的现象, 考虑到卫星云图的分辨率, day0 准确的日期尚不能确定, 需要用 TRMM 降水资料进行进一步调整 day0 的日期。

图 3a 是 201604 号台风 day0 时刻葵花-8 卫星 10.4μm 通道的亮温, 具体时间为北京时 2016 年 7 月 31 日 00 时。图 3b 是由 TRMM 降水资料做出的 201604 号台风 day0 及其前后 5 天逐 3 小时降水量折线图, 从图 3b 中明显看见在 day0 之后的 3 天有一个连续性降水且相较于 day0 之前降水显著增多, 其他台风个例在 day0 时卫星云图与降水也有类似的变化, 用此种方法可全部找出所有台风个例的 day0。

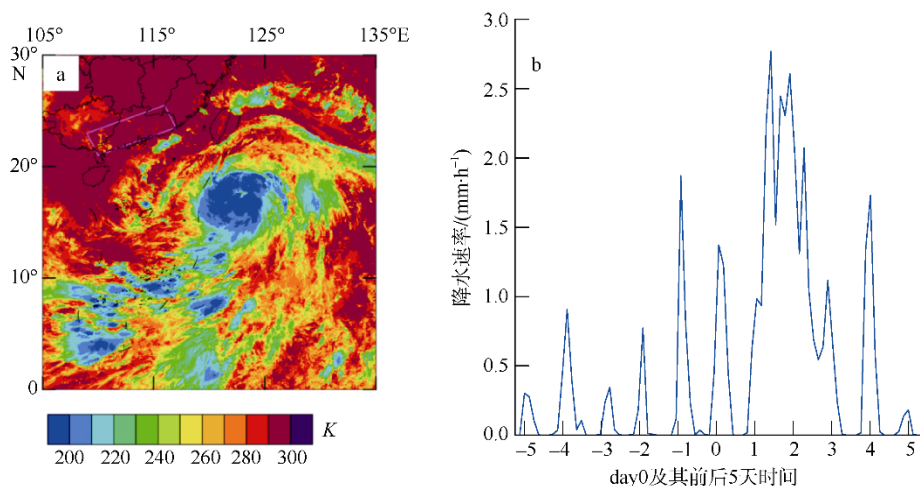


图3 201604号台风 day0 时刻 10.4 μm 通道亮温(a)和 day0 前后 5 天关键区域的平均降水量(b)

该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作

Fig. 3 Horizontal distribution of Himawari-8 10.4 μm brightness temperature on day0 moment for typhoon 201604 (a), and time series of average precipitation within the study area before and after day0 (b)

3.3 午后降水强弱分析

选取的 32 个台风个例中, 其第一波雨带到达华南地区之前华南地区降水日变化可分为两类, 一类是午后降水明显, 记为 1 类台风; 另一类午后降水不明显, 记为 2 类台风。为分析台风临近时关键区域的午后降水到底有怎样的变化, 是什么因素导致了这样的变化, 台风归类的方法在本文的研究中尤为重要。

本文对午后降水的判断中将北京时当日 08 时到次日 08 时的数据当做该日一天的数据, 14 时到 20 时视为午后, 进而将午后降水和当日降水进行比较来判断当日午后降水强弱。宇如聪等(2016)在探索中国大陆地区日降水峰值时间位相的区域特征时, 考虑到中国降水日变化的整体位相特征的时间分布, 将 14 时到 21 时视为午后时间段, 再将 14 时—21 时的逐小时降水作为午后降水处理后, 华南地区日降水量呈现显著的午后峰值特征。考虑到本文采用的是 TRMM 当日 08 时到次日 08 时逐 3 小时降水数据, 将 14 时到 20 时降水视为午后处理较为合理。

降水量是由降水频数、降水强度决定的, 就逐小时降水数据而言, 降水频数指发生降水的小时数(降水量 $\geq 0.1\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$), 降水强度指发生降水时刻的平均降水量(单位: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$), 三者之间关系可表述为: 降水强度=降水量/降水频数(唐红玉等, 2011; 李德帅, 2013)。本文中用 TRMM 逐 3 小时降水强度数据来计算关键区域的逐 3 小时降水频率和逐 3 小时降水比率(占日总降水量), 来分析当日午后降水强弱情况, 判断该日的降水是否集中于午后这一时间段。

经计算, 台风第一波雨带(day0)到达关键区域时, 台风中心距离关键区域约为 700~1000km。考虑到台风的生命周期一般为几天到十几天, 移动速度为每小时几千米到几十千米, 结合台风对环境场的影响范围, 选取 day0 的前 3 天来研究华南地区的降水日变化过程较为合适。

综上所述, 本文的具体台风归类标准如下:

1) 用 TRMM 逐 3 小时降水资料一个个画出每个台风 day0 前 3 天关键区域逐 3 小时降水频率和降水比率的情况, 在这几天中, 关键区域若无明显降水(降水量 $< 0.1\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$), 则直接将这类台风归类为 2 类台风, 如 201616 号台风, 若关键区域发生有效降水, 则需进一步的讨论。

2) 对关键区域 day0 前 3 天的午后降水情况进行统计, 如果午后逐 3 小时降水频率和降水比率均大于 50%, 说明该日的降水绝大部分发生于午后且降水量较大, 则将此类台风归类于 1 类台风, 否则判定为 2 类台风。

4 结果

4.1 台风归类结果

筛选出来的 32 个台风的分类及各个台风的具体情况如表 1 所示, 在表 1 中列出了两类台风的编号、台风起始月份、台风强度、day0 的日期。使华南地区午后降水明显的台风(1 类台风)共有 20 个, 使华南地区午后降水不明显的台风(2 类台风)共有 12 个, 1 类台风数量明显多于 2 类台风。从台风发生的时间来看, 各类台风发生时间均集中在 7 月至 10 月, 6 月和 11 月的台风分别有 1 个, 数量较少。1 类

台风多起源于 7、8 月份，占 1 类台风总数的 71.4%；2 类台风多起源于 9、10 月份，占第 2 类台风总数的 72.7%。由此可见，台风发生的时间会对华南地区的

日降水变化产生影响。从台风强度而言，无论是 1 类、2 类还是总的台风，day0 这天台风强度多为热带风暴和台风，其他强度的台风数量较少。

表 1 两类台风的基本信息

Tab. 1 Basic information for two classes of typhoons

1 类台风：影响下华南地区午后降水强(20 个)					2 类台风：影响下华南地区午后降水不明显(12 个)				
编号	起始月份	最大强度	day0 强度	day0 日期/(月.日)	编号	起始月份	最大强度	day0 强度	day0 日期/(月.日)
199803	8	强热带风暴	热带风暴	8.9	199910	9	强热带风暴	热带风暴	9.12
200104	7	台风	台风	7.4	200308	7	强热带风暴	热带风暴	7.19
200107	7	台风	热带风暴	7.23	200313	8	强台风	台风	9.1
200307	7	强台风	强台风	7.22	200606	8	台风	热带风暴	8.1
200312	8	台风	台风	8.23	200616	9	超强台风	台风	9.29
200812	8	台风	台风	8.21	201117	9	强台风	台风	9.28
200814	9	强台风	强台风	9.22	201119	9	强台风	台风	9.30
200906	7	台风	强热带风暴	7.17	201319	9	超强台风	超强台风	9.20
200915	9	台风	热带风暴	9.13	201330	11	超强台风	台风	11.8
201108	7	强热带风暴	热带风暴	7.28	201522	10	强台风	热带风暴	10.2
201306	6	强热带风暴	热带风暴	6.30	201621	10	超强台风	台风	10.16
201311	8	超强台风	台风	8.12	201720	10	强台风	热带风暴	10.13
201321	10	超强台风	热带风暴	9.27					
201409	7	超强台风	台风	7.16					
201415	9	台风	台风	9.15					
201604	7	强台风	强热带风暴	7.31					
201622	10	超强台风	超强台风	10.19					
201707	7	热带风暴	热带风暴	7.22					
201713	8	强台风	热带风暴	8.20					
201714	8	台风	热带风暴	8.25					

4.2 台风第一波雨带到达前关键区域降水日变化

根据中国气象局的规定，日降雨量小于 10.0mm 归类为小雨，日降雨量处于 10.0~24.9mm 之间为中雨，经计算关键区域在 1 类台风的影响下 day0 前 3 天平均日降雨量为 0.5~15mm，降水强度在小雨到中雨，在 2 类台风的影响下日降雨量小于 1mm，降水强度位于小雨范围内。

将这两种不同的降水日变化情况和该地 1998—2017 年每年 6—11 月多年平均降水进行比较，分析 day0 前 3 天降水的平均日变化情况(图 4)。从图 4 中发现关键区域 6—11 月多年平均降水日变化情况而言，降水强度强的时间集中于 14 时—20 时，在 1 类台风的影响下华南地区降水强度明显增强，特别是午后降水强度增长幅度较大；在 2 类台风的影响下华南地区日降水强度明显减弱，午后降水不明显(台风分为两类后各种参数的比较均为合成分

析的比较)。

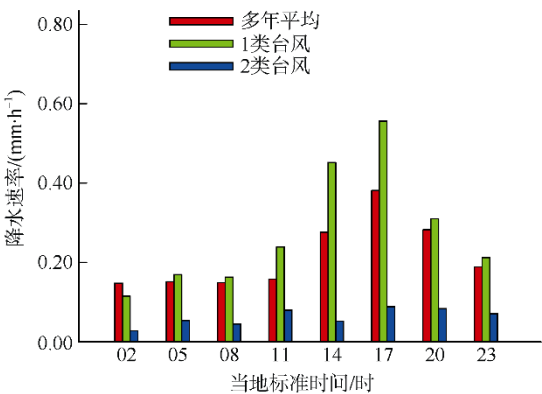


图 4 day0 前 3 天降水强度平均日变化情况

Fig. 4 Changes of precipitation rate in a day, which were three days before day0

首先统计降水峰值出现时间，然后计算出降水

峰值出现在各个时间段的概率, 该概率图如图 5 所示, 该概率图可用于判断降水峰值是否集中于某一时间范围。对关键区域 day0 前 3 天降水峰值出现的时间进行分析, 并和该地 1998—2017 年多年情况进行对比有如下的发现: 关键区域在 1998—2017 年每年 6—11 月的多年平均降水峰值发生在 14 时和 17 时的概率最大, 这两个时间范围概率之和为 36.5%, 其次为早上的 08 时和晚上的 20 时, 分别为 13.5% 和 12.7%; 1 类台风影响下关键区域 day0 前 3 天午后 (14 时、17 时、20 时) 降水达到峰值的概率增加到 53.1%, 此概率相对多年午后降水峰值出现的

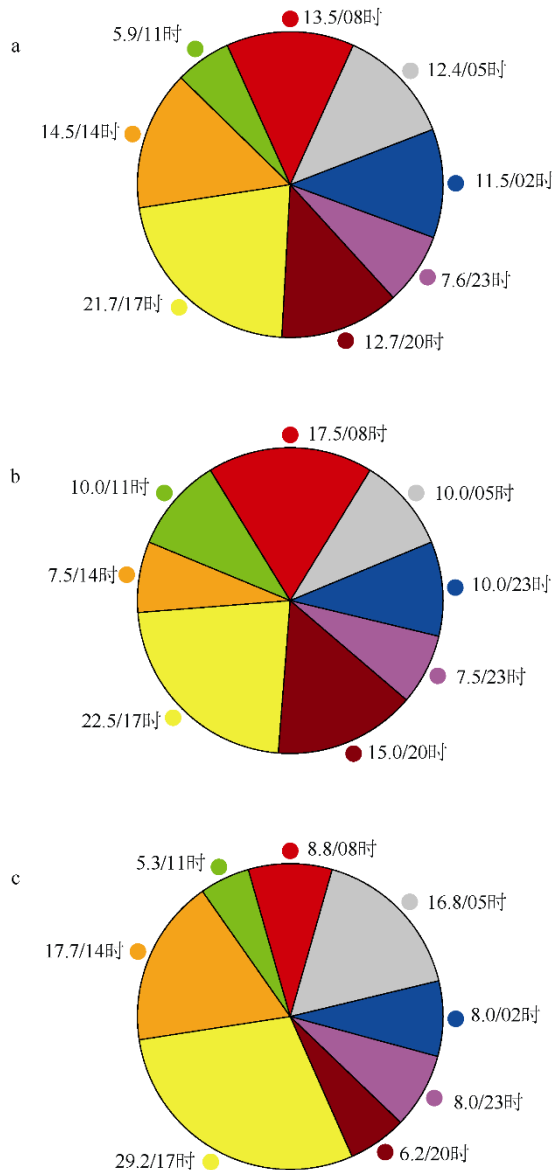


图 5 关键区域多年 6—11 月份(a)和在 1 类台风(b)、2 类台风(c)影响下降水峰值在各个时间段发生的平均概率值/时间分布

Fig. 5 Probability distribution of precipitation peak in key area under the influence of two kinds of typhoons and of annual average precipitation from June to November

概率(49.2%)增大了 3.9%, 峰值出现在夜间 23 时到早上 8 时的概率减小了 3.4%; 对于 2 类台风, 该地降水在 14 时、17 时和 20 时达到峰值的概率减小了 4.2%, 峰值出现在夜间 23 时到清晨 08 时的概率增加。

4.3 关键区域降水日变化特征分析

利用 TRMM 降水资料对关键区域 day0 的前 3 天降水强度作时间平均后, 分析该地区在台风第一波雨带到达之前各个时次降水强度的水平分布情况(图 6)。从图 6 中可以看出, day0 之前降水主要集中在海洋, 也就是台风雨带附近, 陆地上的部分地区在台风的影响下也有降水的产生。图 6a~6d 显示, 在 1 类台风的影响下关键区域 14 时、20 时出现了降水, 夜间 02 时和清晨 08 时降水较少; 在 2 类台风的影响下关键区域降水明显减少。就风场来看, 两种情况下都有台风外围的偏东风将水汽由海洋输向关键区域, 可见局地风场不是两种日变化的关键因素。

图 2 中已经标出 day0 时台风中心的经纬度位置, 经计算此时 1 类台风中心平均经纬度大致为 (18°18'36"N, 120°12'00"E), 2 类台风中心平均经纬度为 (16°49'48"N, 120°31'48"E), 这两个位置距关键区域的中心位置 (23°15'N, 113°00'E) 的距离分别为 928km 和 1062km, 由计算结果加上图 2 可知 1 类台风的外围第一波雨带到达华南地区时台风中心距离沿海区域较近且位置偏北, 2 类台风的外围第一波雨带到达华南地区时台风中心距离沿海区域较远且位置偏南, Hu 等(2017)也指出由台风中心到远距离的台风降水是逐渐递减的, 可见 day0 时台风中心的经纬度位置是两类台风影响华南区域日降水出现差异的原因之一。当台风外围螺旋雨带到达关键区域时, 1 类台风和 2 类台风的移动速度分别为 $26\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $23\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, 1 类台风的移动速度略大于 2 类台风。

图 7 是关键区域 day0 前 3 天每隔 6 小时的垂直气流、大气顶到当前高度层的不稳定能量积分 (CAPE_L)、温度和比湿情况。当日 08 时到次日 08 时的数据视作该日一天的数据, day0 前 3 天变化可用 day0 3 天前 08 时到 day0 1 天前 02 时各个时刻数据的变化表示, 起止时刻如图 7 中横坐标轴所示。图 7a 和 7b 显示在 1 类台风的影响下 day0 前 3 天关键区域气流对流层和平流层都处于上升的状态, 有利于水汽上升释放潜热形成降水, 在 2 类台风的影响下 day0 前 3 天关键区域对流层大气下沉, 不利于水汽输向高空形成降水。

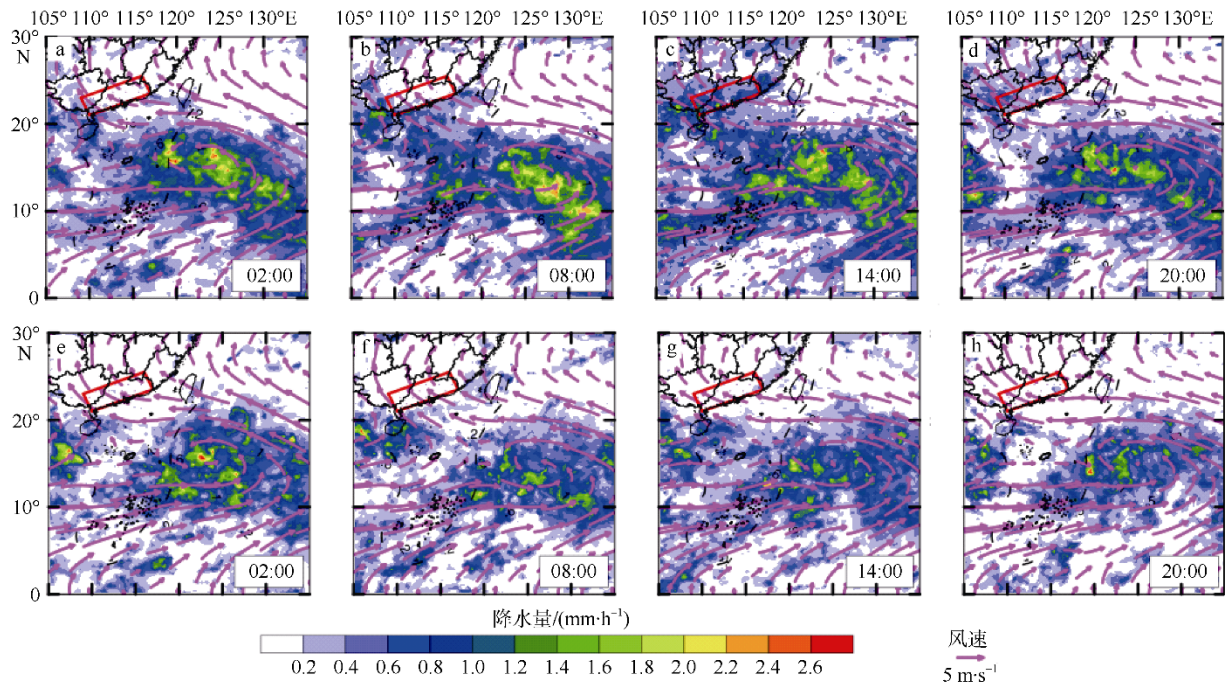


图6 1类台风(a~d)和2类台风(e~h)影响下华南地区地表降水量和850 hPa风场的变化

图中红色方框标注了关键区域, 填色代表了降水强度的强弱情况, 矢量线表示风场的大小和方向。该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1822的标准地图制作

Fig. 6 The average horizontal distributions of precipitation overlapped with 850 hPa wind field at different local times within three days before day0 under the influence of Typhoon-1 (a~d) and Typhoon-2 (e~h). The red box indicates the key area

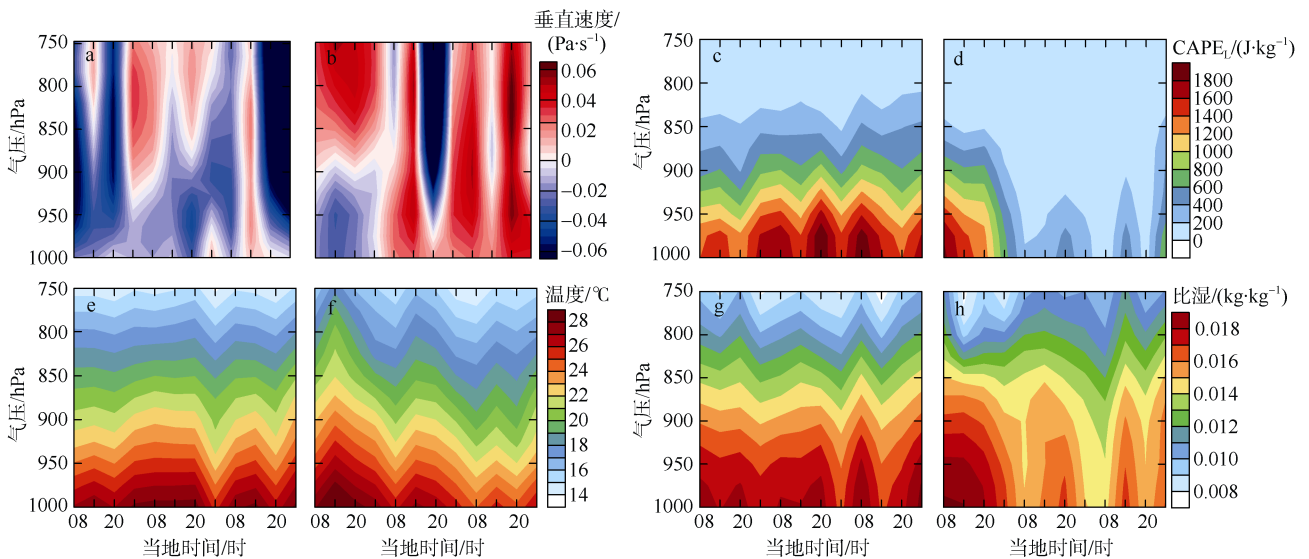


图7 day0前3天关键区域气流的垂直速度(a、b)、 $CAPE_L$ (c、d)、温度(e、f)、比湿(g、h)在垂直方向上的情况

图a、c、e、g表示1类台风影响下的情况; 图b、d、f、h表示2类台风影响下的情况。图a中数值为正代表气流下沉, 数值为负代表气流上升。 $CAPE_L$ 为大气顶到当前高度层的不稳定能量积分

Fig. 7 Temporal variations of vertical velocity (a, b), $CAPE_L$ (c, d), temperature (e, f), and specific humidity (g, h) with height in the key area within three days before day0

CAPE 可用于表征大气静力不稳定情况, 与 T-logP 图上的正面积相对应, 该值可通过被抬升气块的温湿特征和环境大气的温湿垂直分布状态的综合结果进行计算。通常我们使用的 CAPE 代表大气顶到地表的不稳定能量积分(夏静雯 等, 2016), 邹

丽丽等(2017)对对流有效位能的本质做了详细说明并且改进了计算方法, 本文中为表征不稳定能量随高度的变化, 用该方法计算出大气顶到当前高度层的不稳定能量积分(记为 $CAPE_L$), 图6c和6d分别为 day0 前3天研究区域 $CAPE_L$ 的垂直分布。

在 1 类台风影响下关键区域 1000hPa 的 $CAPE_L$ 均大于 $1000J \cdot Kg^{-1}$, 表明大气柱中存在不稳定层结, 有利于对流活动的发生。从垂直方向上来看, $CAPE_L$ 梯度较大的区域为 875~950hPa, 指示着不稳定层结的高度。从时间分布上来看, 白天地表对大气的感热加热更强, 其 $CAPE_L$ 高于夜间, 更有利于对流降水的发生, 因此午后存在明显的降水峰值。

在 2 类台风影响下关键区域 day0 前 3 天 1000hPa 的 $CAPE_L$ 值接近于 $0J \cdot Kg^{-1}$, 表明此时大气层结较稳定, 不利于对流活动的发生。这可能是由于台风登陆前, 其外围的辐散场控制了研究区域, 使得大气层结稳定, 抑制了对流活动以及降水。在这一情况下, 降水通常是由云内辐射冷却形成的层云降水, 多发生在夜间或早晨, 因而不存在午后降水峰值。

关键区域在 day0 前 3 天关键区域的水汽含量也有所区别, 如图 7g 和 7h 所示。比湿越大, 空气中的水汽含量越多, 在不稳定能量的作用下更易形成较

多的降水, 反之比湿越小, 空气中的水汽含量也越少, 即便存在着不稳定能量, 降水也较小。在两类台风的影响下关键区域 day0 前 3 天比湿的变化情况来看, 关键区域 day0 前 3 天在 1 类台风的影响下水汽含量比 2 类台风影响下情况下更大, 表明前者的降水量多于后者。就水汽含量出现的峰值时间来看, 前者多出现 14 时到 20 时, 降水在午后出现峰值, 后者多位于夜间至清晨, 降水在夜间至清晨出现峰值。

从图 7e 和 7f 可以看出关键区域 day0 前 3 天的温度变化。在 1 类台风影响下, 午后降水强, 对流层低层温度无明显变化, 对流层低层温度一直较高; 在 2 类台风影响下, 关键区域 day0 前 3 天午后降水不明显, 对流层低层温度有逐渐减小的趋势, 进一步表明关键区域大气在 1 类台风影响下相对于 2 类台风更加处于热力不稳定的状态。

水汽通量可用于反应大气中的水汽输送情况, 图 8a 和 8b 分别表示 1 类台风和 2 类台风的影响

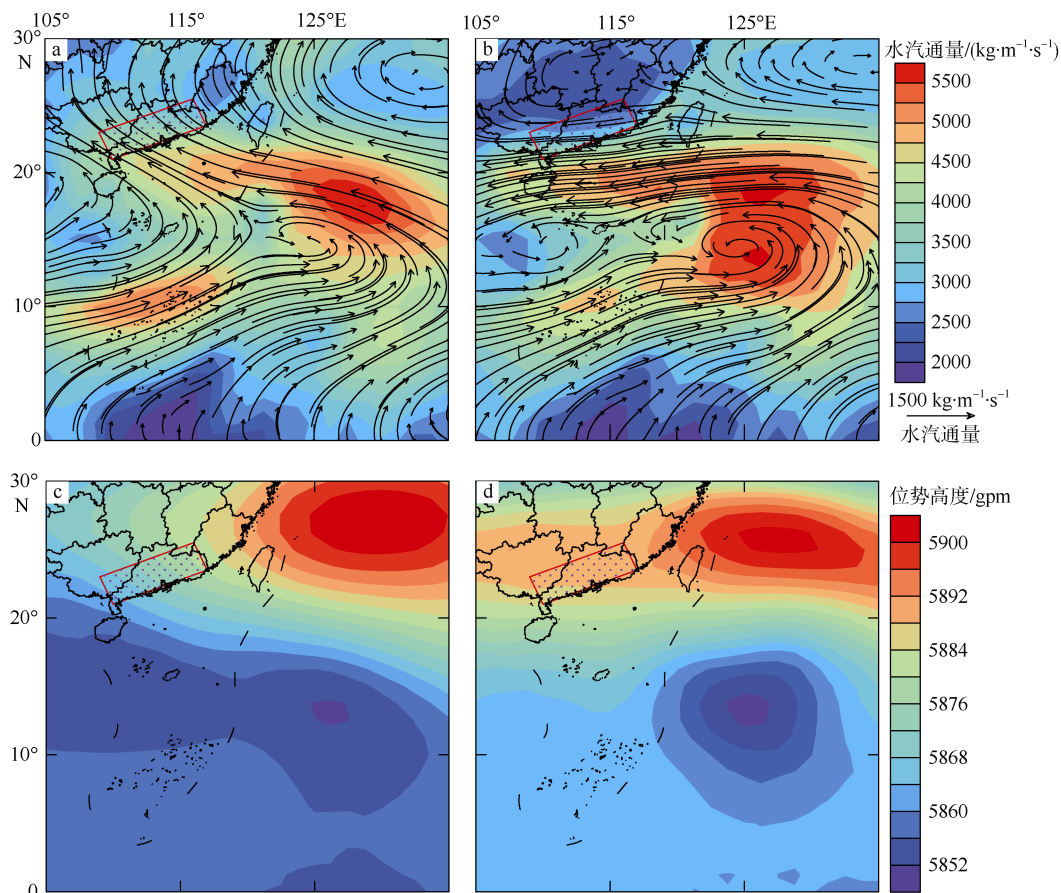


图 8 关键区域附近 1 类台风(a、c)和 2 类台风(b、d)影响下 day0 前 3 天大气整层的平均水汽通量(a、b)和 500hPa 位势高度(c、d)

图中红色方框为关键区域。该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作

Fig. 8 Horizontal distributions of average 500 hPa geopotential height overlapped with column water vapor flux within three days before day0 for the two types of typhoon

下关键区域 day0 前 3 天由大气层底到层顶整层的水汽通量情况,在水汽输送两者有较为明显的差异。就水汽通量来看,都有水汽从海洋输向陆地,在 1 类台风影响下从海洋向华南地区输送的水汽远远大于 2 类台风,且前者的陆地水汽输送中心正位于关键区域,而后者陆地水汽输送的中心却位于关键区域的左下区域,从而 1 类台风影响下华南地区大气中的水汽含量比 2 类台风影响下更大,降水量更多。

关键区域附近的环流情况还可以用西北副热带高压进一步说明,如图 8c 和 8d 分别表示两类台风影响下关键区域 day0 前 3 天的位势高度情况。对于 1 类台风,西太平洋副高偏东,太平南部的低压一直延伸到中南半岛和北部湾,处于低压区气旋环流区,在这种环流情况下,台风处于副高西侧的偏南气流中,其路径偏北分量加大,有利于台风往偏北方向移动(周琴芳, 2019),这和前文分析的台风第一波雨带影响关键区域时台风中心位置距离沿海区较近相对应,促进了台风在北移的过程中将海上水汽自南向北输送到华南地区,引发该地日降水增多。在 2 类台风环流场中,副高西伸到达广西区域,台风处于副高南侧的偏东气流中,路径偏西分量加大,引导台风往偏西方向移动不利于台风北上(周琴芳, 2019),台风第一波雨带影响关键区域时台风中心位置距离沿海区较远,加上海上水汽沿着东风带向中南半岛输运,主体水汽不能够到达广东关键区引起该地日降水减小。

5 结论

本文就起源于太平洋,移动路径位于台湾岛以南并且在 1998—2017 年期间第一波雨带经过华南地区的台风,研究了在台风第一波雨带到达华南地区之前台风外围环流对该地区降水日变化的影响,本文的结论如下:

1) 台风临近华南地区对该地区日降水的影响有两类,分别记为 1 类台风和 2 类台风。在 1 类台风的影响下,华南地区日降水强度明显增强,午后出现降水峰值的概率增加,此类台风多发生于 7、8 月份,西太平洋副热带高压位置偏东,有利于台风北移使得第一波雨带到达华南地区时离华南沿海较近;在 2 类台风的影响下,华南地区日降水强度明显减弱,出现午后降水减弱而清晨降水增多的情况,此类台风多发生于 9、10 月份,西太平洋副热带高压西伸,阻碍了此类台风向北发展,这类第一波雨带到达华南地区时离华南沿海较远。

2) 大气条件的不同是造成台风临近时华南地区降水日变化的不同的主要原因。在 1 类台风影响下,从海洋向陆地输送的水汽非常充足,且华南地区陆面温度较高,华南地区处于不稳定状态,不稳定极值时间发生于午后,导致华南地区降水增多且易出现午后降水峰值;在 2 类台风影响下,从海洋向陆地输送的水汽较少,大气层结辐散下沉,华南地区的降水相对多年平均减小,由于夜间的辐射冷却,降水的峰值偏向于夜间到清晨。

参考文献 References

- 陈炯, 郑永光, 张小玲, 等, 2013. 中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析[J]. 气象学报, 71(3): 367–382. CHEN JIONG, ZHENG YONGGUANG, ZHANG XIAOLING, et al, 2013. Analysis of the climatological distribution and diurnal variations of the short-duration heavy rain and its relation with diurnal variations of the MCSs over China during the warm season[J]. Acta Meteorologica Sinica, 71(3): 367–382 (in Chinese with English abstract).
- 黄天福, 谢佳君, 刘鹏, 2013. 基于多卫星资料的全国夏秋季节降水日变化特征研究[J]. 贵州气象, 37(6): 30–33 (in Chinese).
- 李传祥, 王咏青, 夏华弟, 等, 2013. “海棠”、“罗莎”和“莫拉克”登陆前降水量差异分析[J]. 浙江气象, 34(2): 32–39 (in Chinese).
- 李德帅, 2013. 基于逐小时资料的华南地区汛期降水时空变化特征及其成因研究[D]. 兰州: 兰州大学: 1–151. LI DESHUAI, 2013. Research on the spatiotemporal characteristics of hourly precipitation over South China during the warm season and its possible causes[D]. Lanzhou: Lanzhou University: 1–151 (in Chinese with English abstract).
- 吕翔, 徐海明, 2007. 中南半岛地区夏季降水日变化特征[J]. 南京气象学院学报, 30(5): 632–642. LÜ XIANG, XU HAIMING, 2007. Diurnal variations of rainfall in summer over the Indo-China peninsula[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 30(5): 632–642 (in Chinese with English abstract).
- 莫志祥, 1983. 从两次暴雨过程看热力条件分析的重要性[J]. 广西气象, (3): 21–24 (in Chinese).
- 唐红玉, 顾建峰, 俞胜宾, 等, 2011. 西南地区降水日变化特征分析[J]. 高原气象, 30(2): 376–384. TANG HONGYU, GU JIANFENG, YU SHENGBIN, et al, 2011. Analysis on diurnal variation of precipitation in Southwest China[J]. Plateau Meteorology, 30(2): 376–384 (in Chinese with English abstract).
- 唐晓春, 刘会平, 潘安定, 等, 2003. 广东沿海地区近 50 年登陆

- 台风灾害特征分析[J]. 地理科学, 23(2): 182–187. TANG XIAOCHUN, LIU HUIPING, PAN ANDING, et al, 2003. Analysis of disastrous features of landing Typhoon in coastal regions of Guangdong province in recent 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 23(2): 182–187 (in Chinese with English abstract).
- 王美蓉, 郭栋, 钟珊珊, 2019. 多源资料在青藏高原大气热源计算中的适用性分析[J]. 气象, 45(12): 1718–1726. WANG MEIRONG, GUO DONG, ZHONG SHANSHAN, 2019. Comparison of the multi-source datasets in calculation of the atmospheric heat sources over the Tibetan Plateau[J]. Meteorological Monthly, 45(12): 1718–1726 (in Chinese with English abstract).
- 王文秀, 郭汝凤, 陈世发, 等, 2018. 1951—2016 年登陆我国华南地区台风的时空分布特征分析[J]. 防护林科技, (6): 16–18. WANG WENXIU, GUO RUFENG, CHEN SHIFA, et al, 2018. Spatial and temporal distribution characteristics of Typhoons in Southern China from 1951 to 2016[J]. Protection Forest Science and Technology, (6): 16–18 (in Chinese with English abstract).
- 夏静雯, 傅云飞, 2016. 东亚与南亚雨季对流和层云降水云内的温湿结构特征分析[J]. 大气科学, 40(3): 563–580. XIA JINGWEN, FU YUNFEI, 2016. The vertical characteristics of temperature and humidity inside convective and stratiform precipitating clouds in the East Asian summer monsoon region and Indian summer monsoon region[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 40(3): 563–580 (in Chinese with English abstract).
- 许春林, 王文波, 杨森槐, 等, 2009. 台风“鹦鹉”登陆过程中肇庆降水显著偏弱的原因[J]. 广东气象, 31(6): 32–35. XU CHUNLIN, WANG WENBO, YANG SENHUI, et al, 2009. Significantly weaker precipitation in Zhaoqing during the landfall of typhoon Nuri compared to historical cases[J]. Guangdong Meteorology, 31(6): 32–35 (in Chinese with English abstract).
- 徐建平, 林佩云, 1995. 台湾地形对过岛台风的影响[J]. 广东气象, (4): 42–44. XU JIANPING, LIN PEIYUN, 1995. The influence of Taiwan topography on Typhoon crossing the island[J]. Guangdong Meteorology, (4): 42–44 (in Chinese with English abstract).
- 杨慧, 2019. 1960—2017 年中国热带气旋降水气候特征研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院: 1–62. YANG HUI, 2019. Research on the climate characteristics of Tropical cyclone precipitation in China from 1960 to 2017[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences: 1–62 (in Chinese with English abstract).
- 杨云月, 许涛, 罗翠榆, 等, 2020. 典型厄尔尼诺期间台风降水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化分析: 以 2018 年 22 号台风“山竹”为例[J]. 热带海洋学报, 39(4): 34–41. YANG YUNYUE, XU TAO, LUO CUIYU, et al, 2020. Analysis on the variation of typhoon precipitation $\delta^{18}\text{O}$ during typical El Niño event: A case study of Typhoon Mangkhut (2018)[J]. Journal of Tropical Oceanography, 39(4): 34–41 (in Chinese with English abstract).
- 宇如聪, 李建, 陈昊明, 等, 2014. 中国大陆降水日变化研究进展[J]. 气象学报, 72(5): 948–968. YU RUCONG, LI JIAN, CHEN HAOMING, et al, 2014. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 72(5): 948–968 (in Chinese with English abstract).
- 宇如聪, 李建, 2016. 中国大陆日降水峰值时间位相的区域特征分析[J]. 气象学报, 74(1): 18–30. YU RUCONG, LI JIAN, 2016. Regional characteristics of diurnal peak phases of precipitation over contiguous China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 74(1): 18–30 (in Chinese with English abstract).
- 张长江, 薛利成, 马雷鸣, 等, 2018. 热带气旋客观定位的红外亮温方差方法[J]. 中国图象图形学报, 23(3): 450–457. ZHANG CHANGJIANG, XUE LICHENG, MA LEIMING, et al, 2018. Infrared brightness-temperature variance method for the objective location of tropical cyclones[J]. Journal of Image and Graphics, 23(3): 450–457 (in Chinese with English abstract).
- 张思齐, 2019. 全球再分析与中国观测资料对比研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院: 1–72. ZHANG SIQI, 2019. Comparison research of observation and reanalysis data over China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences: 1–72 (in Chinese with English abstract).
- 张学敏, 1991. 台风环流降水的诊断分析[J]. 海洋预报, 8(1): 76–83. ZHANG XUEMIN, 1991. Diagnostic analysis of typhoon circulation precipitation[J]. Marine Forecasts, 8(1): 76–83 (in Chinese with English abstract).
- 周琴芳, 2019. 副热带高压对“灿鸿”和“苏迪罗”台风路径的影响[J]. 现代农业科技, (19): 196–197, 200. ZHOU QINFANG, 2019. Influence of subtropical high on Typhoon track of “Canhong” and “Sudiro”[J]. Modern Agricultural Science and Technology, (19): 196–197, 200 (in Chinese with English abstract).
- 邹丽丽, 谭桂容, 李任承, 等, 2017. 对流有效位能的本质和一种新的计算方法[J]. 气象科技进展, 7(3): 6–15. ZOU LILI, TAN GUIRONG, LI RENCHENG, et al, 2017. On the essence and new computing method of convective available potential energy[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 7(3): 6–15 (in Chinese with English abstract).
- BESSHO K, DATE K, HAYASHI M, et al, 2016. An introduction to Himawari-8/9 – Japan’s new-generation geostationary meteorological satellites[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. , 94(2): 151–183.
- CHANG A T C, CHIU L S, KUMMEROW C, et al, 1999. First results of the TRMM Microwave Imager (TMI) monthly oceanic rain rate: comparison with SSM/I[J]. Geophysical Research Letters, 26(15): 2379–2382.
- HU HAO, DUAN YIHONG, WANG YUQING, et al, 2017. Diurnal cycle of rainfall associated with Landfalling tropical cyclones in China from rain gauge observations[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 56(9): 2595–2605.
- NESBITT S W, ZIPSER E J, 2003. The diurnal cycle of rainfall and convective intensity according to three years of TRMM measurements[J]. Journal of Climate, 16(10): 1456–1475.
- SHEN YAN, XIONG ANYUAN, WANG YING, et al, 2010. Performance of high-resolution satellite precipitation products

- over China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D2): D02114.
- YAO SUXIANG, HUANG QIAN, 2016. An analysis of extreme intraseasonal rainfall events during January–March 2010 over eastern China[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 75: 22–32.
- YU RUCONG, ZHOU TIANJUN, XIONG ANYUAN, et al, 2007. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China[J]. *Geophysical Research Letters*, 34(1): L01704.
- YUAN WEIHUA, YU RUCONG, ZHANG MINGHUA, et al, 2012. Regimes of diurnal variation of summer rainfall over subtropical East Asia[J]. *Journal of Climate*, 25(9): 3307–3320.
- ZHANG AOQI, CHEN YILUN, ZHOU S N, et al, 2020. Diurnal variation of Meiyu rainfall in the Yangtze plain during atypical Meiyu Years[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(1): e2019JD031742.
- ZHANG AOQI, FU YUNFEI, 2018. Life cycle effects on the vertical structure of precipitation in East China measured by *Himawari-8* and GPM DPR[J]. *Monthly Weather Review*, 146(7): 2183–2199.