林小红，杨舒楠，王健治，等，2023. 过台湾岛的台风所引发的东南沿海地区的暴雨特征分析[J]. 气象，49(9)：1097-1107. Lin X H，Yang S N，Wang J Z，et al，2023. Characteristics of rainstorm in southeast coastal area caused by typhoon passing through Taiwan Island[J]. Meteor Mon，49(9)：1097-1107(in Chinese).

过台湾岛的台风所引发的东南沿海地区的暴雨特征分析*

林小红[1,2] 杨舒楠[3] 王健治[4] 尹丝雨[2]

1 福建省灾害天气重点实验室，福州 350007

2 福建省气象台，福州 350007

3 国家气象中心，北京 100081

4 民航厦门空管站，厦门 361000

提 要： 利用 1961—2020 年中国气象局上海台风研究所台风资料和中国台站逐日台风降水资料，对我国东南沿海地区（浙江、福建和广东）过台湾岛台风（以下简称过岛台风）不同量级暴雨的气候特征进行统计分析，并初步探讨造成过岛台风极端降水差异的成因。研究表明：九成过岛台风会给东南沿海地区带来暴雨影响，年均有 1.6 次过岛台风暴雨事件发生。过岛台风日最大降水量的年际变化有明显增强趋势，特别是自 2003 年以来暴雨极端事件呈现明显增多增强现象。不同量级日暴雨发生的频次月变化均表现为单峰型，7—9 月为高峰季。过岛台风过程日最大降水不同量级发生的频次表明，东南沿海 100 mm 以上强降水频次随着降水强度的增加而减少，300 mm 以上强降水频次明显减少。空间分布上，东南沿海日暴雨频次呈现由沿海向内陆不均匀快速递减特征。过岛台风暴雨对福建北部沿海地区的影响最为突出，其中福建的柘荣站是暴雨极值中心。利用 NCEP 再分析资料对两组相似台风引发极端降水差异的大尺度环境对比显示：强降水组的台风中心北侧大风速区导致向岸风较大，在山脉地形作用下，山前具有更强的辐合及深厚的强垂直上升运动，配合更有利的水汽条件，将低空高能高湿水汽送至中高层，降水动力和水汽条件均明显强于弱降水组的台风，从而造成更强的台风暴雨。

关键词： 过台湾岛台风，东南沿海地区，不同量级暴雨，成因分析

中图分类号： P457 **文献标志码：** A **DOI：** 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.062702

Characteristics of Rainstorm in Southeast Coastal Area Caused by Typhoon Passing Through Taiwan Island

LIN Xiaohong[1,2] YANG Shunan[3] WANG Jianzhi[4] YIN Siyu[2]

1 Fujian Key Laboratory of Hazardous Weather, Fuzhou 350007

2 Fujian Meteorological Observatory, Fuzhou 350007

3 National Meteorological Centre, Beijing 100081

4 The Civil Aviation Xiamen Air Traffic Control Station, Xiamen 361000

Abstract: Based on the typhoon data of Shanghai Typhoon Institute and the daily typhoon precipitation data of national stations of China during 1961－2020, the climatic characteristics of different levels of typhoon precipitation caused by typhoon passing though Taiwan Island in southeast coastal of China including Zhejiang, Fujian and Guangdong provinces are statistically analyzed, and the causes for the differences

* 福建省灾害天气重点实验室重大科技专项(2020TF04、2020KX05)、福建省科技厅面上项目(2021J01456)共同资助

2022 年 4 月 24 日收稿； 2023 年 8 月 2 日收修定稿

第一作者：林小红，主要从事台风、暴雨等预报技术研究. E-mail：pop_lxh@163.com

通讯作者：杨舒楠，主要从事灾害性天气预报研究. E-mail：shunanyoung@163.com

in extreme precipitation are discussed. The study results show that 90% of the typhoons passing though Taiwan Island can bring rainstorms to the southeast coastal area of China. There are 1.6 typhoon rainstrom events every year. The interannual variation of the daily maximum precipitation amount of shows an obvious increasing trend. Especially, the rainstrom extreme events have increased significantly since 2003. The variation of monthly frequency of daily precipitation at different levels shows a single peak pattern, and the peak months are from July to September. The occurrence frequency of the daily maximum precipitation at different levels shows that the frequency of extreme precipitation over 100 mm decreases with the increase of precipitation intensity, and the frequency of extreme precipitation over 300 mm decreases obviously. In terms of spatial distribution, the daily rainstorm frequency shows an uneven and rapid decrease from the coastal areas to the inland areas. The rainstorms from the typhoon through Taiwan Island have most prominent impact on the northern coast of Fujian Province, and Zherong Station in Fujian is the extreme rainstorm center. Based on NCEP reanalysis data, the large-scale environmental comparison of the difference between the two similar typhoon groups shows that to the heavy precipitation typhoon group, strong wind speed area on the north side of the typhoon center leads to strong onshore winds. With the effect of mountain terrain, there is stronger convergence and very strong deep vertical upward movement, in front of mountains. With better moisture conditions, the upward motion can take the low-level high-energy water vapor to the middle-high levels. The precipitation dynamics and water vapor conditions are significantly stronger than those of the weak precipitation typhoon group, thus resulting in more typhoon rainstorms.

Key words: typhoon passing through Taiwan Island, southeast coastal area of China, rainstorm of different levels, cause analysis

引 言

台风是一种严重的灾害性天气，台风暴雨引发的灾害令人触目惊心，如1601号超强台风尼伯特(Nepartak)登陆台湾岛后再次登陆福建石狮，造成福建因灾死亡83人，失踪22人，直接经济损失达99.94亿元。长期以来，台风暴雨的形成机理及预报技术都是台风研究的重要前沿科学问题之一(端义宏等，2014；陈博宇等，2020)。研究认为：台风环流长时间维持或滞留；低空急流、季风涌、双台风作用及下垫面水体的水汽和潜热能量输送；中纬度槽提供的位能和不稳定能量；山脉地形和台风高层云团中的微物理过程等均对台风暴雨的产生起着重要作用(Thorncroft and Jones，2000；Hart and Evans，2002；陈联寿和丁一汇，1979；陈联寿等，2004；陈联寿和许映龙，2017；李英等，2005；陈涛等，2021)。目前，台风暴雨预报主要面临三个方面挑战：暴雨落区预报偏差大，暴雨强度预报准确性不高，缺乏暴雨精细分布预报能力。因此，台风灾害防御对台风暴雨的精细化准确预报需求非常迫切。

浙江、福建和广东(以下简称东南沿海地区)是我国遭受台风影响最为严重的地区，其地理位置与台湾岛隔海峡毗邻。统计显示1949—2020年登陆东南沿海地区的台风中有八成曾登陆过台湾岛，而台风经过台湾岛前后，其路径、结构、强度等均会发生明显改变或调整(孟莹等，2005；董林和端义宏，2008；胡姝等，2012；薛霖等，2015；邢蕊等，2020)。在台风路径方面，当台风靠近台湾岛时，地形可使台风东北—西南向非对称性结构增大，路径通常会发生北翘(Brand and Blelloch，1974；Huang et al，2011；邢蕊等，2020)，过台湾岛后强度较弱且移动缓慢的台风，路径发生偏折的现象更加明显(Yeh and Elsberry，1993)；在台风环流结构上，会诱生次生低压、产生地形辐合线、迎风坡上降水明显增强、背风坡上形成焚风效应等(Chang，1982；Ishijima and Estoque，1987；骆荣宗等，1988；Wang，1991；孟智勇等，1998；孟莹等，2005)；在台风强度方面，台风穿过台湾岛后强度通常会减弱，且从台湾岛东侧登陆损失的强度为西侧登陆的三倍左右(Brand and Blelloch，1974；Wu，2001；董林和端义宏，2008；胡姝等，2012)，上述变化将导致台风风场、湿度场和降水分布等发生显著改变，这势必会给东南沿海地区的台风暴雨预报带来更多的不确定性。因此，研究台湾

岛对东南沿海地区台风暴雨精细化预报的影响至关重要。

上述回顾显示,针对过台湾岛台风对我国大陆暴雨影响的研究成果丰硕,但主要是针对个例的分析,缺乏对过台湾岛台风(以下简称过岛台风)对我国大陆暴雨影响的整体性特征研究。因此,本文基于 1961—2020 年我国长时间序列的台风资料、降水资料以及 NCEP 再分析资料等,开展过岛台风引发东南沿海地区不同量级暴雨的气候特征及产生极端降水的环境条件分析,为进一步提高东南沿海地区台风暴雨的预报准确率提供参考。

1　资料与方法

1.1　资　料

采用中国气象局上海台风研究所提供的 1961—2020 年间隔 6 h 一次的台风资料、国家气象信息中心提供的 1961—2020 年中国大陆 2005 个国家级气象站逐日(20 时至次日 20 时)降水数据。本文仅将受台风影响较为严重的东南沿海地区的共 192 个国家级气象站(图 1)作为研究区域。在环境条件分析中,利用美国国家环境预测中心(National Center of Environmental Prediction,NCEP)再分析资料,1979 年之前仅有 2.5°×2.5°网格再分析资料,将其插值成 1°×1°网格资料,1979 年之后为 1°×1°网格资料,要素包括风场、湿度场、温度场和高度场等,时间间隔为 6 h,层次为 17 层。

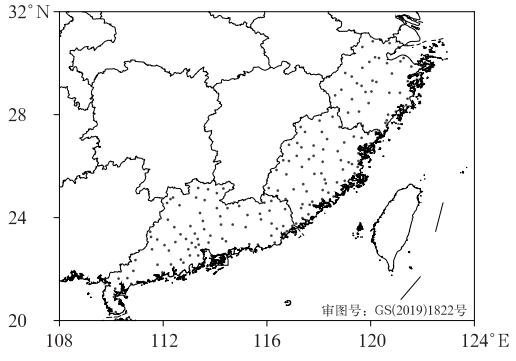


图 1　中国东南沿海地区(浙江、福建和广东)192 个国家级气象站分布

Fig. 1　Distribution of the 192 national meteorological stations in southeast coastal area of China (including Zhejiang, Fujian and Guangdong provinces)

1.2　方　法

1.2.1　定　义

东南沿海地区过岛台风暴雨事件是指过岛台风给东南沿海地区带来至少 3 个站的日降水量≥50 mm 的台风过程。平均降水强度指过岛台风暴雨事件发生时东南沿海地区各站点所有降水量≥0.1 mm·(24 h)$^{-1}$的降水量平均值。本文所指的台风包含热带低压及以上级别的所有热带气旋。

本研究中过岛台风极端降水的定义参考国际上通用的百分位方法来定义不同站点的极端降水事件的阈值(翟盘茂和潘晓华,2003)。其方法为:对于某一台站,将 1961—2020 年台风日降水量≥0.1 mm 的降水序列按升序排列,定义其第 95%分位值为该站极端降水的阈值;当该站日降水量达到或超过该阈值时,即定义为一次极端降水事件。

1.2.2　台风降水天气图客观识别法

本文采用 Ren et al(2007)提出的台风降水天气图客观识别法(objective synoptic analysis technique,OSAT)识别我国台风降水。该方法模拟预报员利用天气图人工分离台风降水的过程,将日降水场分解成几个独立的自然雨带和一些离散的降水台站,根据自然雨带与台风中心的位置关系,确定出可能台风雨带;最后针对每一个降水台站,根据它是否属于台风雨带以及它与台风中心之间的距离大小,判断它的降水是否为台风降水,进而将所有的台风降水台站组合成为台风降水场,再从中剥离出影响东南沿海地区的台风降水资料,对过岛台风及其降水进行统计。

2　过岛台风特征

统计 1961—2020 年共有 95 个过岛台风引发了东南沿海地区暴雨事件的发生,占过岛台风总数的 92.2%;年均约受 1.6 个过岛台风影响。图 2 给出了这 95 个过岛台风移动路径的分布情况。图中显示,过岛台风主要来自于西北太平洋洋面上,台风西行登陆台湾岛后大部分台风再次登陆我国大陆,其中过岛登闽台风有 68 个,占比为 71.6%;登浙 8 个(8.4%);登粤 6 个(6.3%);近海转向及海上减弱消失 13 个(13.7%)。可见,过岛台风中有九成会给我国东南沿海地区带来暴雨过程,其中有八成会再次登陆大陆,又以登闽台风个数为最多。而过岛台风

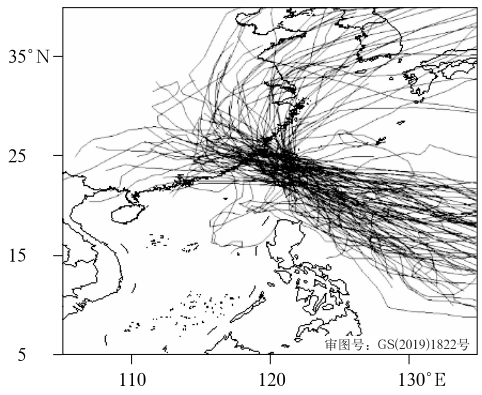


图 2 1961—2020 年引发东南沿海地区暴雨的过岛台风路径分布

Fig. 2 Track distribution of typhoon passing through Taiwan Island and causing rainstorm in southeast coastal area of China from 1961 to 2020

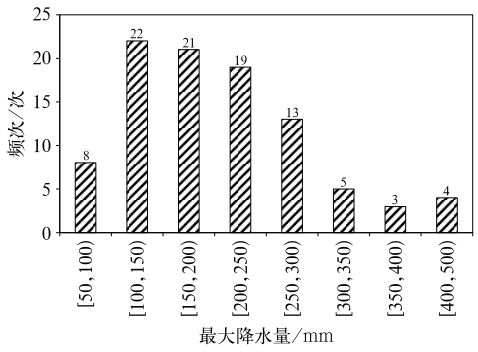


图 3 1961—2020 年东南沿海过岛台风过程日最大降水不同量级的发生频次分布

Fig. 3 Frequency distribution of daily maximum rainfall at different levels in southeast coastal area of China during the process of typhoon passing through Taiwan Island from 1961 to 2020

中仅一成未给东南沿海地区带来暴雨过程，究其原因这些台风大都在登岛时强度已经减弱，其登岛后直接在岛上停编消失或下岛后迅速在海峡内停编消失，也有少量台风登岛后立即转向远离东南沿海地区。

3 暴雨时空特征

3.1 时间特征

过岛台风过程日最大降水不同量级的发生频次分布显示(图 3)，东南沿海 100 mm 以上强降水频次随着降水强度的增加而减少，尤其是 300 mm 以上强降水频次明显减少；强降水频次主要集中位于 100～250 mm，占总频次的 65.3%。在 95 次过岛台风暴雨事件中，有 8 次台风过程日最大降水量在 50～100 mm，占总比的 8.4%；100 mm 以上台风暴雨事件频次显著增加，达 87 次(91.6%)，200 mm 以上暴雨事件频次快速减少到 44 次(46.3%)，300 mm 以上为 12 次(12.6%)，400 mm 以上仅为 4 次(4.2%)。从台风日最大降水量的年际变化显示其随时间有明显增强趋势(图 4)，且通过了 0.05 显著性水平检验，特别是自 2003 年以来暴雨极端事件呈现明显增多、增强现象。

台风降水致灾程度与降水强度关系密切，重灾的发生往往由少数极端降水事件导致。表 1 给出了东南沿海过岛台风过程日最大降水量≥300 mm 暴

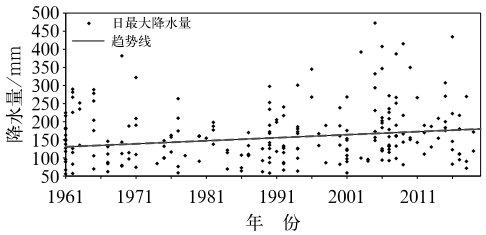


图 4 1961—2020 年东南沿海过岛台风日最大降水不同量级的年际分布

Fig. 4 Interannual distribution of daily maximum rainfall at different levels in southeast coastal area of China during the process of typhoon passing through Taiwan Island from 1961 to 2020

雨极端事件的历史排名，共有 12 次暴雨极端事件发生，排名第一为 2005 年的“海棠(Haitang)”，产生了 472.5 mm·(24 h)$^{-1}$的日降水，其次为 2016 年的“鲇鱼(Megi)”，第三位为 2009 年的“莫拉克(Morakot)”；台风暴雨极端事件主要发生在 7—9 月，2000 年以来暴雨极端事件发生 8 次，部分反映了近 20 年来台风暴雨极端事件在不断增加的事实。

东南沿海过岛台风日降水的季节变化与台风活动关系紧密。50 mm 以上的日降水量主要发生在 5—11 月(图 5)，100 mm 以上主要发生在 5—10 月，300 mm 以上则主要为 7—9 月。1961—2020 年不同量级日降水的月频次变化均表现为单峰型，7—9 月为高峰季。其中，除 300 mm 以上日降水的峰

值出现在 7 月外,其他不同量级的日降水频次均在 8 月达到峰值。因此,可将东南沿海过岛台风暴雨的影响时间划分为:早季(5—6 月)、高峰季(7—9 月)及晚季(10—11 月)。此外,50～100 mm 的日降水频次达 48 次,与 200～300 mm 的频次(41 次)较接近;100～200 mm 的日降水频次最多达到 118 次,占总频次的一半以上(53.4%),显著高于其他量级的降水频次;300 mm 以上的日降水频次最少,仅为 14 次。

表 1　1961—2020 年东南沿海过岛台风暴雨极端事件排名

Table 1　Historical ranking of typhoon rainstorm extreme events in the southeast coastal area of China during the process of typhoon passing through Taiwan Island from 1961 to 2020

排名	台风编号(名称)	台风暴雨时间	过程日最大降水量/mm	观测站
1	0505(海棠,Haitang)	2005 年 7 月 18—20 日	472.5	福建柘荣
2	1617(鲇鱼,Megi)	2016 年 9 月 28—30 日	434.4	福建柘荣
3	0908(莫拉克,Morakot)	2009 年 8 月 8—11 日	415.2	福建柘荣
4	0604(碧利斯,Bilis)	2006 年 7 月 14—17 日	407.6	广东博罗
5	0309(莫拉克,Morakot)	2003 年 8 月 4—5 日	392.4	福建南安
6	0808(凤凰,Fung-wong)	2008 年 7 月 28—30 日	387.2	广东陆丰
7	6911(Elsie)	1969 年 9 月 27—29 日	381.7	福建柘荣
8	1011(凡亚比,Fanapi)	2010 年 9 月 20—22 日	349.8	广东上川岛
9	9608(Herb)	1996 年 8 月 1—2 日	344.9	福建柘荣
10	7123(Bess)	1971 年 9 月 23 日	322.1	福建柘荣
11	1513(苏迪罗,Soudelor)	2015 年 8 月 8—10 日	307.3	福建周宁
12	9406(Tim)	1994 年 7 月 11—12 日	300.9	福建柘荣

注:给出过程日最大降水量≥300 mm 排名。

3.2　空间特征

空间分布上,东南沿海过岛台风不同量级降水的发生频次及位置存在差异。分别选取日降水量超 50 mm 和超 100 mm 的影响频次作为研究对象,由两者发生频次的空间分布显示(图 6),1961—2020 年东南沿海日暴雨频次呈现由沿海向内陆不均匀快速递减的分布特征。日降水量超 50 mm 的高频区(≥50 次)集中位于福建中北部沿海到浙江南部沿海一带,高频中心出现在福建的柘荣站,达 98 次(站点位置见图 6a 三角);福建南部沿海、广东东部沿海及浙江中部沿海地区暴雨频次达 30～50 次;东南沿海其余地市暴雨频次低于 30 次。随着暴雨强度[≥100 mm·(24 h)$^{-1}$]的增强,高频区(≥20 次)北缩并集中位于福建北部沿海到浙江南部沿海一带(图 6b),30 次以上高频区仅出现在福建北部沿海,高频中心依然是在福建的柘荣站,达 57 次。表 1 也显示过岛台风暴雨极端事件中有 75%暴雨极值发生在柘荣站,且排名前 3 位事件极值也是位于该站。可见,福建的柘荣是东南沿海频率最高、强度最大的过岛台风暴雨极值中心。因此,研究台风暴雨极值中心与过岛台风的关系十分必要。

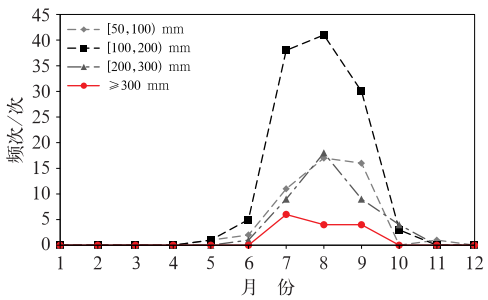


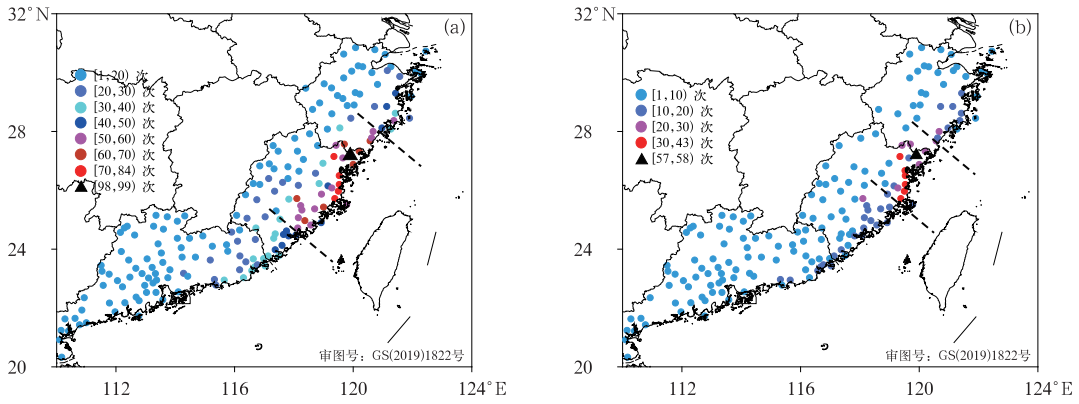
图 5　1961—2020 年东南沿海过岛台风日最大降水不同量级发生频次的月分布

Fig. 5　Monthly frequency distribution of daily maximum rainfall at different levels in southeast coastal area of China during the process of typhoon passing through Taiwan Island from 1961 to 2020

4　降水极端性的成因探讨

4.1　引发降水极端性的过岛台风特征

由过岛台风引发东南沿海地区暴雨过程的平均降水强度显示(图 7a),降水强度由沿海向内陆快速递减;日均降水量超 50 mm 的区域发生在福建沿海及浙江中南部沿海地区,日均降水量超 100 mm 的区域主要位于福建北部沿海一带,其中柘荣站是暴雨中心,均值为 238.4 mm。日降水量极值(图 7b)

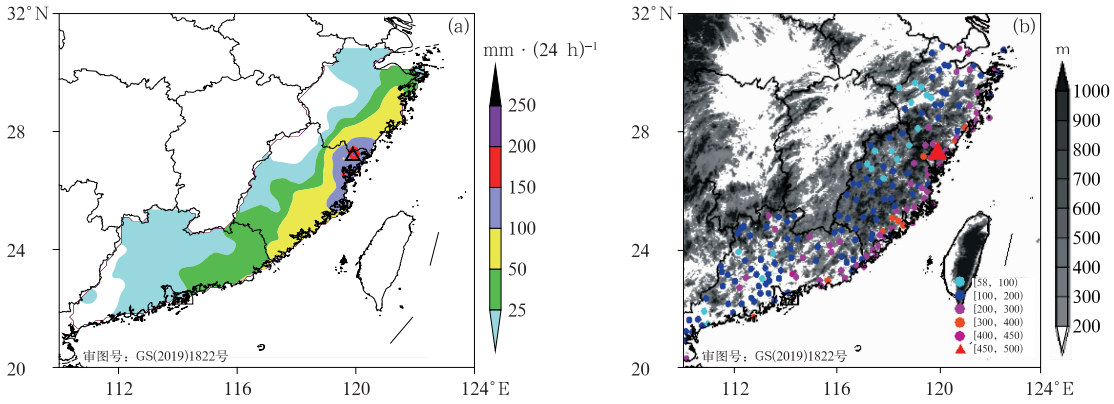


注：三角形：福建柘荣站，点线：高低值频次分割线。

图 6 1961—2020 年东南沿海过岛台风不同量级降水的频次分布

(a)≥50 mm·(24 h)$^{-1}$，(b)≥100 mm·(24 h)$^{-1}$

Fig. 6 Frequency distribution of daily maximum rain of (a) ≥50 mm·(24 h)$^{-1}$ and (b) ≥100 mm·(24 h)$^{-1}$ at different levels in southeast coastal area of China during the process of typhoon passing through Taiwan Island from 1961 to 2020



注：图 b 中，三角形：福建柘荣站，阴影：地形高度。

图 7 1961—2020 年东南沿海过岛台风暴雨过程的(a)平均降水强度和(b)日降水量极值(彩色圆点，单位：mm)分布

Fig. 7 Distribution of (a) mean precipitation intensity and (b) daily precipitation extreme value (colored dot, unit: mm) in southeast coastal area of China during the process of typhoon passing through Taiwan Island from 1961 to 2020

与日均降水量分布基本一致，日降水量极值超 200 mm 的区域集中位于福建沿海及浙江中南部沿海地区，降水量极值中心是柘荣站，达 472.5 mm。上述的降水高频区及降水量极值区正是位于闽东北部西南—东北走向的鹫峰山脉(海拔为 800～1300 m)的迎风坡前，而山脉前的柘荣站即是暴雨频次中心，又是降水量极值中心。因此，柘荣站的降水极端性与过岛台风的关系值得探究。

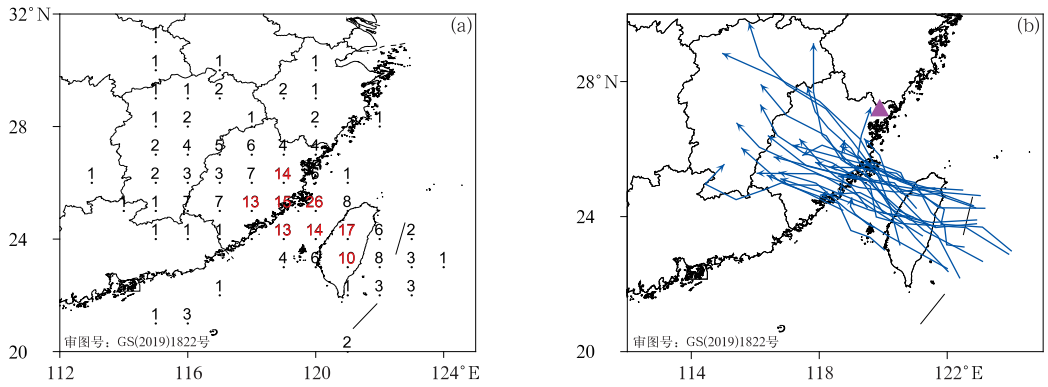
统计引发柘荣站日降水量超 100 mm 对应的台风位置发现(图 8a)，其发散度大，台风位置主要分布在福建与江西、台湾岛及台湾海峡等地，密集区域(≥10 次)为福建中部沿海、台湾海峡中部及台湾岛中北部。显然，台风穿过台湾岛及台湾海峡中部并再次登陆福建中部沿海的移动路径是引发柘荣站降水高发、强度大的高频路径。该高频路径的影响台风共有 28 个(图 8b)，除了 1111 号“南玛都(Nanmadol)”外，其他 27 个台风均在登陆当日引发了 100 mm 以上的强降水；此外，柘荣站强降水总体发

生在距离台风中心 170～350 km 处，并位于台风西行路径的右侧。可见，台风过岛后再次登陆福建中部沿海，造成柘荣站极端暴雨发生的频率高、强度大，且距离台风路径较远的现象可能与此类台风的环境特征以及沿海山麓地形对台风北侧东风向岸气流的抬升作用有关。不同的环境条件及向岸风强弱等，可能会造成此类路径台风极端降水产生差异，下文就此类路径台风降水极端性的环境条件进行探讨。

针对柘荣站极端暴雨发生频率高、强度大且距离台风路径较远的现象，本研究选取路径相似、登陆点相近的台风个例作为研究对象，对造成柘荣站过程日最大降水量超 100 mm 的台风进行排名，将排名前 5 位定义为强降水台风组，排名最后 5 位为弱降水台风组，最终筛选得到强降水台风组和弱降水台风组（表 2 和图 9）。由表 2 可统计得到强降水台风组过程日最大降水量的平均值为 386.9 mm，弱降水台风组为 122.4 mm，前者约是后者 3.2 倍。由图 9 可见，两组台风登陆日的平均路径相近，登陆时强度方面，强降水台风组平均近中心风速为 32.1 m·s^{-1}，弱降水台风组为 28.8 m·s^{-1}，两组登陆强度也大致相当，由此开展对这两组相似台风产生极端降水差异的成因探讨。研究将台风过岛后再次登陆福建前后最靠近有路径资料的时刻近似作为台风登陆时刻，利用 NCEP 再分析资料对两组台风登陆福建时刻的环境条件进行合成对比分析。

4.2　大尺度环境形势特征差异

由两组过岛台风登陆时刻的高空合成图可见（图 10）：在 500 hPa 高度场上（图 10a，10b），两组台风均位于副热带高压（以下简称副高）西南侧，从副高面积上看，强降水台风组的副高面积较弱降水台风组明显西伸且偏大偏强，强降水组的台风中心位势高度较后者低强度更强，台风与副高 5880 gpm 线



注：数字：1°×1°网格距内频次，紫色三角形：柘荣站。

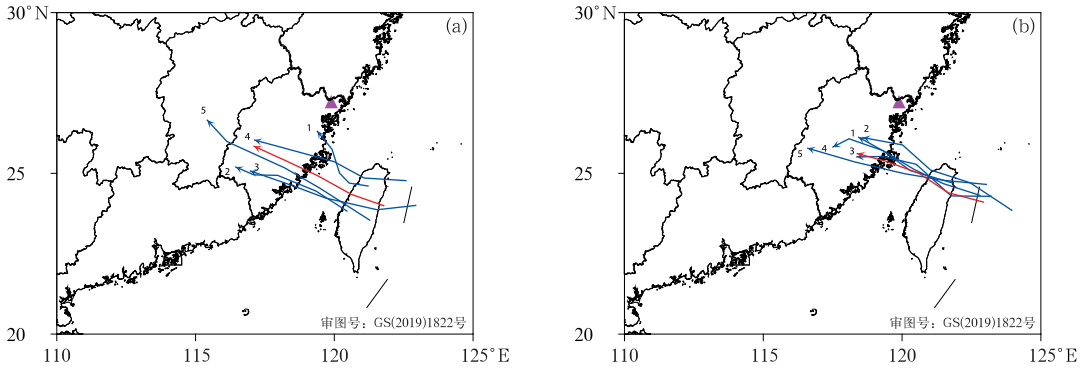
图 8　1961—2020 年引发福建柘荣站降水强度≥100 mm·(24 h)$^{-1}$ 的(a)过岛台风位置频次（单位：次）和(b)其对应的登陆闽中台风路径分布

Fig. 8　(a) Distribution of typhoon location frequency of rain intensity [≥100 mm·(24 h)$^{-1}$] at Zherong Station of Fujian in the process of typhoon passing through Taiwan Island (unit: time) and (b) the corresponding typhoon landing track distribution in central Fujian from 1961 to 2020

表 2　强降水台风组和弱降水台风组日降水量极值对比

Table 2　Comparison of daily precipitation extremes in heavy and weak precipitation typhoon groups

强降水台风组		过程日最大降水量/mm	观测站	弱降水台风组		过程日最大降水量/mm	观测站
排名	台风编号（名称）			排名	台风编号（名称）		
1	0505（海棠，Haitang）	472.5	福建柘荣	1	8012（Norris）	140.4	福建柘荣
2	1617（鲇鱼，Megi）	434.4	福建柘荣	2	1307（苏力，Soulik）	130.1	福建柘荣
3	6911（Elsie）	381.7	福建柘荣	3	6708（无名称）	123.7	福建柘荣
4	9608（Herb）	344.9	福建柘荣	4	1709（纳沙，Nesat）	110.7	福建柘荣
5	9406（Tim）	300.9	福建柘荣	5	7613（Billie）	107.2	福建柘荣



注：红色实线：登陆日平均路径。

图 9 (a)强降水台风组和(b)弱降水台风组登陆日路径(蓝线)及日暴雨极值站点(三角形)分布

Fig. 9 Distribution of typhoon landing day tracks (blue line) of (a) heavy precipitation typhoon group and (b) weak precipitation typhoon group (red line: average track of landing day) and the stations with daily rainstorm extremes (triangle)

距离更靠近，台风与副高之间的气压梯度力较后者明显，导致台风右侧风速显著；另外，强降水台风组北侧为带状高压叠加蒙古高压脊，为北高南低形势，而弱降水台风组北侧蒙古地区为西风槽影响，槽区可能引导部分冷空气南下进入台风环流北部，产生斜压锋生，引发不稳定能量释放导致降水增强。

对于对流层高层，南亚高压位置和强度的变化也会引起周围及中低层环流的改变(金荣花等，2006)。200 hPa 合成的高度场和散度场显示(图 10c，10d)，两组台风均处于南亚高压底部的辐散场中，强降水组台风还处于辐散分流区中，受其影响，强降水组的台风中心北侧为辐散大值区，其辐散值较后者显著偏大，拥有更强的高空辐散抽吸作用，有利于台风强度的维持，并可以导致更强降水的发生。

4.3 水汽条件差异

上述分析表明强降水台风组台风右侧风速显著高于弱降水组，由对流层低层 925 hPa 合成风场对比可见(图 11)，强降水组的风场非对称结构更加显著，台风中心右侧最大风速值超过 18 m·s^{-1}，而弱降水组右侧最大风速值仅约为 12 m·s^{-1}。合成的 925 hPa 水汽通量场上，两组的水汽均来源于低纬孟加拉湾到南海一带的西南季风输送，强降水组的季风气流北上直通台风环流内，为其带来超过 30 g·s^{-1}·hPa^{-1}·cm^{-1}水汽通量值，而弱降水组的水汽北上输送至台风右侧，其水汽通量中心值较前者明显偏小(10 g·s^{-1}·hPa^{-1}·cm^{-1})，且大值区较前者更向东偏离台风中心些，水汽经由台风北侧弱东风转输送至台风环流内的水汽通量明显偏弱。强降水组在低纬西南季风的作用下，高能、高湿空气被不断输送至台风中心东侧，再转由东南急流将充沛水汽送至台风北侧(福建北部沿海地区)环流内。因此，福建北部沿海地区拥有较强的低层水汽输送，配合低层的辐合抬升及山麓地形作用，有利于该区域强暴雨的产生。

4.4 动力条件差异

合成的散度场剖面显示(图 12)，强降水组台风中心北侧的低空辐合值及高空辐散值均明显强于弱降水组；台风中心北侧山脉前的辐合值及上升流也均明显强于后者。强降水组的纬向垂直环流较弱降水组强，与其上空副高及南亚高压强盛有密切相关，深厚高压系统与台风之间气压梯度力更强，引起中低层大风区的厚度也更厚。强降水组的台风中心北侧的大风速区可导致向岸风较大，其在山脉地形作用下，山前具有较强的辐合值及非常深厚的强垂直上升运动，通过强垂直上升运动将低空高能高湿水汽送至中高层，其引发强降水的动力条件明显强于弱降水组。

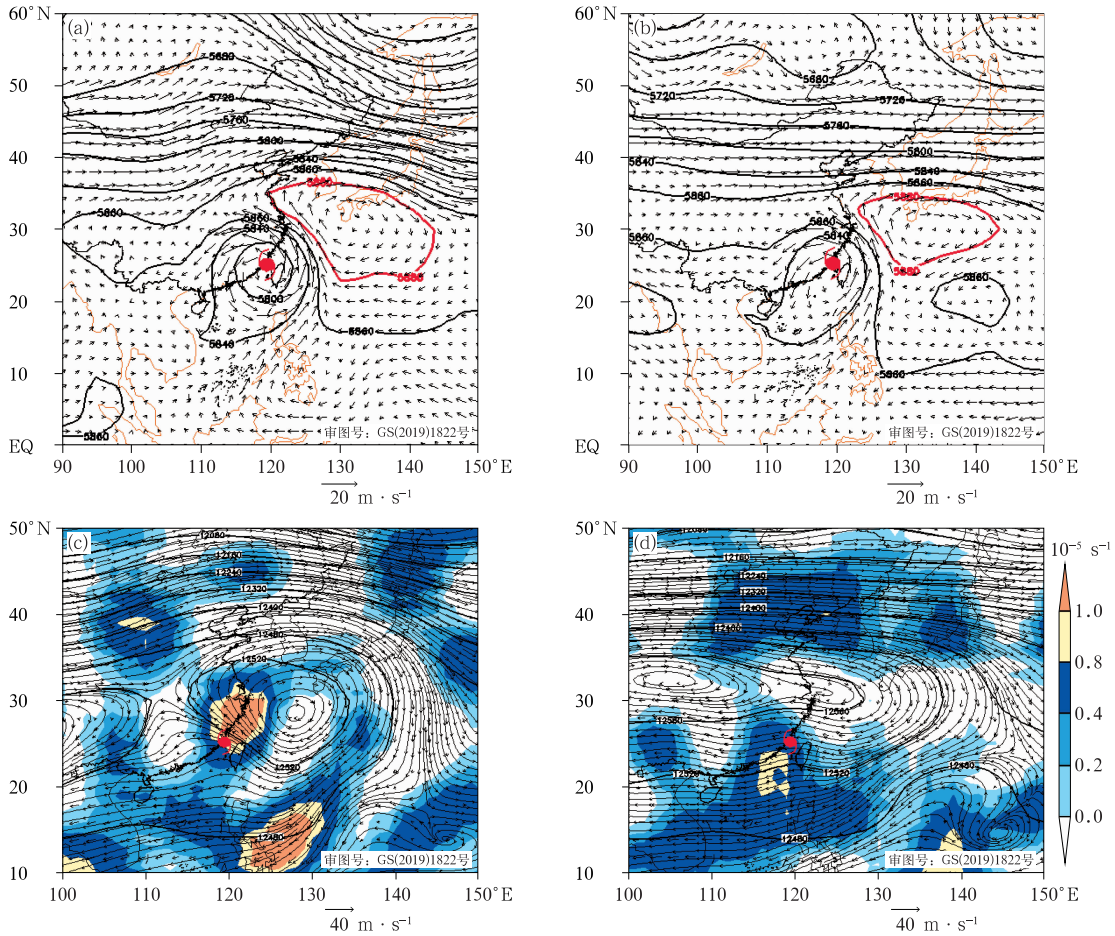


图 10　过岛台风登陆时刻合成的(a,c)强降水台风组和(b,d)弱降水台风组的(a,b)500 hPa 高度场(等值线，单位:gpm,红色线为 5880 gpm)、风场(风矢),(c,d)200 hPa 高度场(等值线,单位:gpm)、流线、散度场(填色)

Fig. 10　Composite image of (a, b) height field (contour, unit: gpm, red line: 5880 gpm), wind field (wind vector) at 500 hPa, and (c, d) height field (contour, unit: gpm), streamline, divergence field (colored) at 200 hPa at the typhoon landing time of (a, c) heavy precipitation typhoon group and (b, d) weak precipitation typhoon group

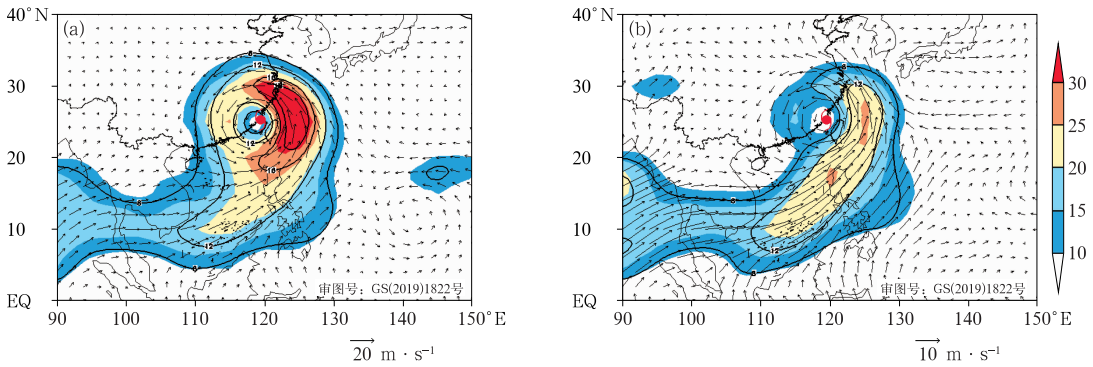
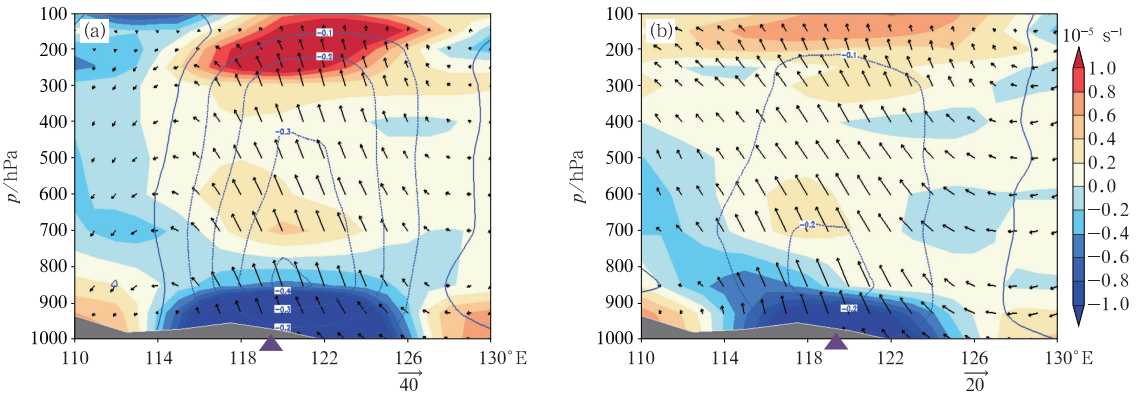


图 11　台风登陆时刻合成的(a)强降水台风组和(b)弱降水台风组 925 hPa 风场(风矢,等值线为≥8 m·s^{-1}全风速值)和水汽通量场(填色,单位:g·s^{-1}·hPa^{-1}·cm^{-1})

Fig. 11　Composite image of wind field (wind vector, contour: ≥8 m·s^{-1}) and water vapor flux field (colored, unit: g·s^{-1}·hPa^{-1}·cm^{-1}) at 925 hPa at the typhoon landing time of (a) heavy precipitation typhoon group and (b) weak precipitation typhoon group



注：灰色阴影：地形；三角形：台风中心平均位置。

图 12 台风登陆时刻(a)强降水台风组和(b)弱降水台风组过台风中心北侧 27°N 的纬向垂直环流(箭矢，纬向风速 u 和 100 倍的 p 坐标垂直速度 ω 合成)、散度场(填色)及垂直运动场(等值线，单位：Pa·s^{-1})剖面合成

Fig. 12 Composite profile image of zonal vertical circulation (vector, zonal wind speed u and 100 times of p coordinate vertical velocity ω synthesis), divergence field (colored) and vertical movement (contour, unit: Pa·s^{-1}) along 27°N on the north side of typhoon center at the typhoon landing time of (a) heavy precipitation typhoon group and (b) weak precipitation typhoon group

5 结论与讨论

利用 1961—2020 年中国上海台风所台风资料和中国台站逐日台风降水资料，对过岛台风引发东南沿海地区(浙江、福建和广东)不同量级暴雨的气候特征进行统计分析，并利用 NCEP 再分析资料对两组相似过岛台风极端降水差异的大尺度环境条件进行对比分析，主要结论如下：

(1)过岛台风中有九成会给我国东南沿海地区带来暴雨天气。过岛台风日最大降水量的年际变化有明显增强趋势，特别是自 2003 年以来暴雨极端事件呈现明显增多增强现象。不同量级日暴雨发生的频次月变化显示 7—9 月为高峰季。

(2)过岛台风过程日最大降水不同量级发生的频次表明，东南沿海 100 mm 以上强降水频次随着降水强度的增加而减少，300 mm 以上强降水频次明显减少；强降水频次主要集中位于 100～250 mm，占总频次的 65.3%。

(3)东南沿海日暴雨频次由沿海向内陆不均匀快速递减地分布。过岛台风暴雨对福建北部沿海的影响在暴雨频次及强度上最为突出，福建柘荣站是过岛台风暴雨极值中心。

(4)对强弱两组台风的环境特征对比表明：强降水台风组北侧大风速区要明显强于弱降水台风组，前者显著向岸风在山脉地形作用下具有山前更强的辐合及非常深厚的强垂直上升运动，配合更有利的水汽输送条件，强垂直上升运动将低空高能高湿水汽送至中高层，其引发强降水的动力和水汽条件均明显强于弱降水组。

本文对过岛台风引发东南沿海地区不同量级暴雨的特征开展了较全面的分析，并针对过岛相似台风极端降水差异的大尺度环境特征进行了诊断对比，得到了一些可供预报参考的结论。但就过岛台风的强度、结构等方面的调整变化对东南沿海暴雨的影响及其物理机制还需深入分析，这将是下一步工作的研究重点。

参考文献

陈博宇，代刊，唐健，等，2020. 基于多模式 QPF 融合的台风暴雨预报后处理技术研究及应用试验[J]. 气象，46(10)：1261-1271. Chen B Y，Dai K，Tang J，et al，2020. Research and application experiment on post-processing technology of typhoon rainstorm forecast based on multi-model QPF fusion[J]. Meteor Mon，46(10)：1261-1271(in Chinese).

陈联寿，丁一汇，1979. 西太平洋台风概论[M]. 北京：科学出版社. Chen L S，Ding Y H，1979. An Introduction to West Pacific Typhoons[M]. Beijing：Science Press(in Chinese).

陈联寿，罗哲贤，李英，2004. 登陆热带气旋研究的进展[J]. 气象学报，62(5)：541-549. Chen L S，Luo Z X，Li Y，2004. Research

advances on tropical cyclone landfall process[J]. Act Meteor Sin,62(5):541-549(in Chinese).

陈联寿,许映龙,2017. 中国台风特大暴雨综述[J]. 气象与环境科学,40(1):3-10. Chen L S,Xu Y L,2017. Review of typhoon very heavy rainfall in China[J]. Meteor Environ Sci,40(1):3-10(in Chinese).

陈涛,董林,罗玲,等,2021. 台风利奇马登陆期间的对流结构特征及对强降雨影响[J]. 气象,47(12):1433-1443. Chen T,Dong L,Luo L,et al,2021. Convection structure and impact on severe precipitation during landing of Typhoon Lekima[J]. Meteor Mon,47(12):1433-1443(in Chinese).

董林,端义宏,2008. 热带气旋经过台湾岛强度变化特征[J]. 气象,34(7):10-14. Dong L,Duan Y H,2008. A statistical analysis of intensity change of tropical cyclones landing Taiwan[J]. Meteor Mon,34(7):10-14(in Chinese).

端义宏,陈联寿,梁建茵,等,2014. 台风登陆前后异常变化的研究进展[J]. 气象学报,72(5):969-986. Duan Y H,Chen L S,Liang J Y,et al,2014. Research progress in the unusual variations of typhoons before and after landfalling[J]. Acta Meteor Sin,72(5):969-986(in Chinese).

胡姝,李英,许映龙,2012. 登陆台湾岛热带气旋强度和结构变化的统计分析[J]. 热带气象学报,28(3):300-310. Hu S,Li Y,Xu Y L,2012. A statistical analysis on intensity and structure changes of tropical cyclones making landfall on Taiwan Island[J]. J Trop Meteor,28(3):300-310(in Chinese).

金荣花,高拴柱,顾华,等,2006. 近 31 年登陆北上台风特征及其成因分析[J]. 气象,32(7):33-39. Jin R H,Gao S Z,Gu H,et al,2006. An analysis on characteristics of landing and going northward typhoons and its causes during 1975－2005[J]. Meteor Mon,32(7):33-39(in Chinese).

李英,陈联寿,徐祥德,2005. 水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值模拟[J]. 大气科学,29(1):91-98. Li Y,Chen L S,Xu X D,2005. Numerical experiments of the impact of moisture transportation on sustaining of the landfalling tropical cyclone and precipitation[J]. Chin J Atmos Sci,29(1):91-98(in Chinese).

骆荣宗,李棠华,许金镜,1988. 台湾岛和台湾海峡地区台风异常路径的分析[J]. 台湾海峡,7(3):31-37. Luo R Z,Li T H,Xu J J,1988. Analysis of typhoon anomalous path over Taiwan Island and Taiwan Strait[J]. J Oceanogr Taiwan Strait,7(3):31-37(in Chinese).

孟莹,卢娟,缪启龙,2005. 影响台湾岛海域的西太平洋台风特征分析[J]. 热带气象学报,21(3):315-322. Meng Y,Lu J,Liao Q L,2005. Analysis of the characteristics of the West-Pacific typhoon affecting the sea area around the island of Taiwan[J]. J Trop Meteor,21(3):315-322(in Chinese).

孟智勇,徐祥德,陈联寿,1998. 台湾岛地形诱生次级环流系统对热带气旋异常运动的影响机制[J]. 大气科学,22(2):156-168. Meng Z Y,Xu X D,Chen L S,1998. Mechansism of the impact of the cyclone system induced by the Taiwan Island topography on tropical cyclone unusual motion[J]. Sci Atmos Sin,22(2):156-168(in Chinese).

邢蕊,徐晶,林瀚,2020. 热带气旋过台湾后再次登陆的路径强度变化统计分析[J]. 气象,46(4):517-527. Xing R,Xu J,Lin H,2020. Statistical analysis of track and intensity variations of tropical cyclone landing mainland after passing through Taiwan[J]. Meteor Mon,46(4):517-527(in Chinese).

薛霖,李英,许映龙,等,2015. 台湾地形对台风 Meranti(1010)经过海峡地区时迅速增强的影响研究[J]. 大气科学,39(4):789-801. Xue L,Li Y,Xu Y L,et al,2015. Effect of Taiwan topography on the rapid intensification of Typhoon Meranti(1010) passing by the Taiwan Strait[J]. Chin J Atmos Sci,39(4):789-801(in Chinese).

翟盘茂,潘晓华,2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J]. 地理学报,58(S1):1-10. Zhai P M,Pan X H,2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th Century[J]. Acta Geogr Sin,58(S1):1-10(in Chinese).

Brand S,Blelloch J W,1974. Changes in the characteristics of typhoons crossing the island of Taiwan[J]. Mon Wea Rev,102(10):708-713.

Chang S W J,1982. The orographic effects induced by an island mountain range on propagating tropical cyclones[J]. Mon Wea Rev,110(9):1255-1270.

Hart R,Evans J L,2002. Extratropical transition:one trajectory though cyclone phase space[C]// 25th Conf on Hurricane and Tropical Meteorology. San Diego:Amer Meteor Soc:539-540.

Huang Y H,Wu C C,Wang Y Q,2011. The influence of island topography on typhoon track deflection[J]. Mon Wea Rev,139(6):1708-1727.

Ishijima S,Estoque M,1987. An observational study of orographic effects on westbound typhoons crossing Taiwan[J]. J Meteor Soc Japan,65(3):455-467.

Ren F M,Wang Y M,Wang X L,et al,2007. Estimating tropical cyclone precipitation from station observations[J]. Adv Atmos Sci,24(4):700-711.

Thorncroft C,Jones S C,2000. The extratropical transitions of Hurricanes Felix and Iris in 1995[J]. Mon Wea Rev,128(4):947-972.

Wang S T,1991. Observational study on the messoscale flow structures of typhoons encountering the Taiwan terrain[C]// Preprints,International Conference on Mesoscale Meteorology and TAMEX. Taipei,China:Amer Meteor Soc:330-341.

Wu C C,2001. Numerical simulation of Typhoon Gladys(1994) and its interaction with Taiwan terrain using the GFDL hurricane model[J]. Mon Wea Rev,129(6):1533-1549.

Yeh T C,Elsberry R L,1993. Interaction of typhoons with the Taiwan orography. Part Ⅰ:upstream track deflections[J]. Mon Wea Rev,121(12):3193-3212.

（本文责编：何晓欢）