

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).

热带气旋过台湾后再次登陆的路径 强度变化统计分析^{*}

邢蕊¹ 徐晶² 林瀚³

1 天津市滨海新区气象局,天津 300450

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

3 南京信息工程大学,南京 210044

提 要: 登陆台湾后再次登陆大陆的热带气旋(TC)由于受复杂下垫面及中低纬天气系统的共同影响,过岛后在海峡内的路径、强度及结构变化复杂,导致登陆大陆的精确化定位、定强及预报难度大。分析了1949—2017年二次登陆的81个热带气旋路径及强度变化特征,并对上海台风所(CMA/STI)、美国联合台风警报中心(JTWC)及东京区域台风中心(RSMC-Tokyo)的热带气旋最佳路径数据中过岛热带气旋的定位定强进行对比分析。结果表明:二次登陆大陆热带气旋强度以减弱为主,少数热带气旋在海峡内增强;过岛后热带气旋路径多数会发生明显偏折,但三家最佳路径资料判断的偏折趋势不一致;由于热带气旋过岛时结构遭到破坏,定位定强难度增大,导致三个业务中心对其定位定强的差异较大,这种不确定性增大了其路径和强度监测预报的难度。

关键词: 二次登陆热带气旋,强度,路径

中图分类号: P457

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.04.006

Statistical Analysis of Track and Intensity Variations of Tropical Cyclone Landing Mainland After Passing Through Taiwan

XING Rui¹ XU Jing² LIN Han³

1 Meteorological Office of Tianjin Binhai New Area, Tianjin 300450

2 State Key Laboratory of Disaster Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: The track, intensity and structure of the tropical cyclone (TC) in Taiwan Strait become more complex because of the complicated underlying surface and the influence of the middle and low latitude weather system after TC crossing Taiwan. Thus, it is difficult to forecast the precise position and intensity of TC landing mainland. In this paper, the track and intensity variation characteristics of 81 TCs landing Taiwan and mainland from 1949 to 2017 were analyzed, and the TC positions and intensities in the best track datasets of Shanghai Typhoon Institute (CMA/STI), American Joint Typhoon Warning Center (JTWC) and Tokyo Regional Typhoon Center (RSMC-Tokyo) were compared and analyzed. The results show that most of the TCs weakened except that a few strengthened in the strait. The track deflections are obtained in most TCs in strait, compared with tracks of TC before landing Taiwan Island, but the deflection

^{*} 国家自然科学基金项目(41675044)、天津市自然科学基金项目(19JCYBJC23700)和天津市气象局博士基金项目(201735bsjj01)共同资助
2019年1月1日收稿; 2019年10月14日收修定稿

第一作者:邢蕊,主要从事短期天气预报和热带气旋的分析研究. Email: nuistxr@163.com

通讯作者:徐晶,主要从事热带气旋内核动力学、数值模拟等研究. Email: xujing@cma.gov.cn

orientations are different in the three best track datasets. It is more difficult to determine the TC center and intensity because the TC structure is broken down when passing through Taiwan Island. As a result, TC center and intensity records are very different in the three best track datasets. The position and intensity uncertainties of TC increase the difficulty in monitoring and forecasting TC track and intensity.

Key words: tropical cyclone of two landings, intensity, track

引 言

中国是世界上登陆热带气旋(tropical cyclone, TC)最多的国家(陈联寿和丁一汇,1979),每年平均有 7~8 个 TC 登陆中国,而其中首次登陆点在台湾的平均有 3.7 个(Wu and Kuo, 1999),登陆台湾的 TC 中又有 68.2%穿越海峡,从华东、华南地区二次登陆大陆(任福民等,2008),给台湾地区及大陆均造成严重影响。例如,2001 年 9 月 16 日,台风 Nari 在台湾东北部登陆,强度由台风降至热带风暴,之后沿中央山脉向南贯穿台湾岛,在岛上滞留约 36 h,造成严重水患,18 日从台南安平进入台湾海峡,20 日加强为强热带风暴,之后在广东沿海登陆。由于该 TC 在穿过台湾岛及海峡过程中路径和强度变化复杂,增加了预报难度,给台湾地区和广东沿海造成严重的财产损失和人员伤亡。2016 年 7 月 8 日,超强台风尼伯特在台湾南部登陆,并发生“临登偏折”现象,从中央山脉南部绕过北上,离岛后在海峡内路径分为三个阶段:停滞少动、偏北行径和西北行径,最终以强热带风暴级别在福建石狮市再次登陆,“尼伯特”带来的强降水共造成福建 83 人死亡,19 人失踪。可见台湾附近 TC 的预报难度较大(Wu and Kuo,1999),从而增加了防灾减灾工作的难度。气象学者已针对 TC 展开多方面研究(徐亚钦等,2018;王尚宏等,2018;何晓彤和徐国强,2018;高洋和方翔,2018;胡姝等,2012),以期加深对 TC 结构等方面的理解,从而为防灾减灾工作提供支持。

台湾岛地形及台湾海峡的存在对 TC 路径和结构会产生较为显著的影响。在结构方面,TC 过岛时其内部区域的水平气流被山脉阻挡,低层不对称环流平流 TC 中心使路径发生偏折,而在垂直结构上,由于 TC 环流低层受山脉阻挡无法过山,而高层 TC 环流可连续过山,导致 TC 发生倾斜,中、低层环流在位相上越来越不匹配,二者有可能会沿着山脉向不同的方向移动,低层 TC 内部的气压场可能会

发生堵塞,造成 TC 减弱。Yang et al(2018)通过对 TC 个例的数值模拟分析指出,TC 过岛时,受地形影响眼墙破碎,但在雨带中对流性热塔(VHTs)的作用下又会发生眼墙的重建。在路径方面,台湾岛地形可使 TC 东北—西南向非对称性增大,进而改变 TC 的移动路径(余贞寿等,2007;Huang et al, 2011;简国基,2011)。登岛后,强度较弱且移动缓慢的 TC 路径偏折的会更加明显(Yeh and Elsberry, 1993a)。另外,以不同方位靠近台湾东侧的 TC,其过岛路径也会表现出巨大差异:当 TC 在台湾北部附近时,过岛路径一般为连续路径;当 TC 接近台湾中南部时,过岛路径多为不连续路径(Yeh and Elsberry,1993b);当 TC 离开中央山脉后,就进入狭长的台湾海峡,路径会变得更为复杂。由于 TC 离岛后的路径偏折将直接影响到 TC 再次登陆点的预报,而以往 TC 登陆台湾岛的研究多关注在 TC 接近和在岛上时路径和结构的变化以及与中央山脉的相互作用,TC 过岛后强度变化趋势、减弱的程度、以及路径的偏折等尚需要细致分析(董林和端义宏,2008)。目前已有的研究表明:TC 近海强度的迅速变化是其内部结构、环境气流、下垫面等多个影响因子综合作用的结果,且各因子的相对重要性具有不确定性(端义宏等,2005;Kaplan et al,2010;Shu et al, 2012;Elsberry et al,2013);薛霖等(2015)对台风 Meranti(未从台湾岛登陆)经过海峡地区时迅速增强的原因进行了分析,发现台湾地形是其迅速增强的一个重要因子;骆荣宗等(1988)分析过台湾岛及其附近海域 TC 异常路径,将其分为左折类、右折类、跳跃式类、双涡旋相对运动类、打转类。统计结果显示在 1949—1984 年异常路径 TC 占总路径的 37.6%,其中台湾岛和海峡地区的伴生低压是造成 TC 路径异常的原因之一(骆荣宗和许金镜,1990)。鉴于台湾岛及海峡对 TC 结构、路径和强度造成的复杂影响,以及存在的一些尚未解决的问题,本文有必要利用 CMA/STI 资料对过台湾岛后再次登陆大陆的 TC 从路径及强度(近中心最大风速)的角度进

行系统分析,以期增加对过岛 TC 的变化规律统计特征的认识。

另外,目前在西北太平洋区域业务和科研中广泛使用的主要有三套热带气旋最佳路径资料,分别为中国气象局上海台风所(CMA/STI)、日本区域气象中心(RSMC-Tokyo)、以及美国联合台风警报中心(JTWC)。有学者对三套热带气旋最佳路径数据集进行对比分析,发现在路径方面的差异相对微小,TC 中心定位点间的距离差一般小于 30 km (Song et al, 2010)。然而,三套资料对 TC 强度的估计差异较大,余晖等(2006)指出,CMA/STI 与 RSMC-Tokyo 和 JTWC 对西北太平洋区域 TC 强度均值分别相差 0.6 和 1.7 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,均通过 0.01 的显著性水平检验,即存在显著差异,其中,三套资料对同一 TC 确定的强度最大差异超过 30 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而本文所关注的二次登陆 TC,由于 TC 过台湾岛时和中尺度地形相互作用,造成离岛前后 TC 的路径、强度和结构差异显著;另外,由于跨过中央山脉的风暴强度减弱,结构变得松散,甚至出现“空心”结构,下山后又面临着再次进入台湾海峡,风暴迅速地再次组织,这些过程都导致 TC 过台湾岛后定位定强的不确定性变大。针对二次登陆 TC,三家路径资料表现出的差异性到底怎样? 目前仍然缺乏这方面定量的分析。

综上所述,本文将针对 TC 过台湾岛后二次登陆大陆期间的活动特征及强度变化进行统计分析,同时将对 TC 过岛后的三套最佳路径资料间的差异进行对比分析,从而为后续研究和业务提供参考。

1 资料与方法

本文首先利用 TC 最佳路径资料:CMA/STI 资料集(Ying et al, 2014; <http://tcdata.typhoon.org.cn>),分析选取 1949—2017 年的 81 个登陆台湾岛后又二次登陆大陆的 TC 进行统计分析,选择样本的标准为具有“在台湾岛东侧登陆经台湾海峡后又在大陆登陆”的路径表现。采用的信息包括 TC 定位点的经度和纬度、最大风速等。在统计分析 TC 过岛后的路径特点及偏折特征时,根据以连续和不连续路径过岛的两类情况进行分组(非连续路径个例参考台湾气象机构发布的 TC 路径分析报告

(<http://photino.cwb.gov.tw/tyweb/tyfnweb/baseon-track.htm>)。

另外,为了分析过岛 TC 定位定强的不确定性,本文对比了业务科研常用的三套最佳路径资料在此区域的差异,分别是 CMA/STI, RSMC-Tokyo 数据集(<http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/besttrack.html>),以及 JTWC 资料集(<http://www.metoc.navy.mil/jtwc/jtwc.html/western-pacific>)。其中,RSMC-Tokyo 在 1977 年以前没有最大风速资料,三套 TC 最佳路径资料中定位定强信息的时间间隔一般为 6 h,在个别时段有小于 6 h 间隔的加密资料。值得注意的是,三套资料近中心最大风速所定义的平均时段各不相同,CMA/STI 资料的平均时段为 2 min, RSMC-Tokyo 为 10 min,而 JTWC 为 1 min (Song et al, 2010)。因此,在 TC 强度对比分析中,我们将强度化成统一标准:将 JTWC 的 1 min 平均最大风速转换成 10 min 平均,转换系数为 0.871 (余晖等, 2006; Knapp and Kruk, 2010); CMA/STI 资料的 2 min 平均风速由于与 10 min 平均风速差异不大而未做转换(Barcikowska et al, 2012)。由于海峡区域狭窄,本文在计算 TC 在陆地上及海峡内的维持时间,以及分析二次登陆 TC 强度变化特征时,对 6 h 间隔的资料进行线性插值,得到 1 h 间隔的 TC 位置和强度资料。

2 TC 过台湾岛后再次登陆的路径强度特征分析

由于 TC 靠近、登岛及离岛过程中自身结构遭到破坏,同时受到大尺度环流背景的影响,其离岛前后和在海峡内的运动变得更为复杂,而其路径和强度变化将直接影响到 TC 再次登陆点和强度的预报,本文首先利用 CMA/STI 资料从路径及强度(近中心最大风速)的角度分析 TC 离岛前后的时空分布特征。

图 1 显示了 1949—2017 年登陆台湾后二次登陆大陆 TC 的定位点频次分布,数据时间间隔为 6 h (CMA/STI 资料截止至热带风暴),可见,当 TC 从台湾东侧登陆后穿过台湾岛、台湾海峡至再次登陆时,登陆点发散度明显加大,自北向南可登陆江苏、浙江、福建、广东。其中超过 80% 的 TC 再次登陆福建。再次登陆后的 TC 仍然可深入内陆,对江西、

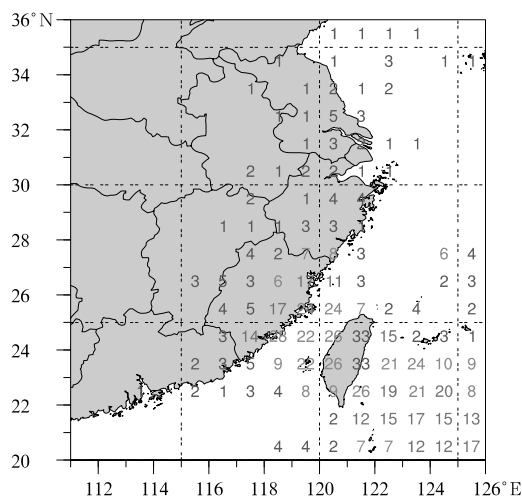


图 1 1949—2017 年登陆台湾后再次

登陆大陆的 TC 频次分布

(图中数字代表 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 网格距内 TC 出现的频次)

Fig. 1 Frequency distribution of TC landing mainland after passing through Taiwan from 1949 to 2017

(Numbers represent the frequency of TC within $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ grid distance)

安徽等地造成影响。

TC 登陆后由于下垫面摩擦增加,隔绝了来自海洋直接的感热和潜热能量供给,强度会迅速衰减,而登陆时的强度会直接影响其在陆地的维持时间。根据统计分析的结果可知,81 个 TC 从台湾东侧登陆时开始计算,其在台湾岛、台湾海峡及大陆上的平均维持时间约为 38.7 h(截至减弱为热带低压,不包括变性台风和登陆大陆后又出海的相应时次),其中在海峡内平均滞留 14.3 h,而再次登陆大陆后截至为热带低压,在陆地上的平均维持时间约为 23.2 h(指的是以热带低压及以上强度登陆大陆的 68 个 TC,另有 13 个 TC 在登陆大陆时或登陆大陆前强度减弱到热带低压以下级别,未算在内)。图 2 分别给出了不同初始强度级别的 TC 从台湾登陆至再次登陆大陆后减弱至热带低压(图 2a)、TC 在台湾海峡期间(图 2b)、以及 TC 再次登陆大陆后(图 2c)的各平均强度随时间的变化。TC 按照初始强度分级为超强台风(super TY)、强台风(STY)、台风(TY)、强热带风暴(STS)、热带风暴(TS)、热带低压(TD)。由图可见,分别有 9 个超强台风、24 个强台风、26 个台风、19 个强热带风暴、2 个热带风暴及 1 个热带低压从台湾登陆(图 2a),除初始强度为热带风暴的 TC 及 1 个初始强度为热带低压的 TC 随时间变化有加强趋势以外,其余各强度 TC 均随时

间显著减弱,随时间变化加强的 TC 很有可能是在海峡内重新组织加强,后面将对此做具体分析。差不多所有 TC 强度均在 32 h 以内减弱至热带风暴,而其后的热带低压维持大约 36~105 h,这就意味着不管以何强度登陆台湾的 TC,其登陆后一天左右都迅速衰减为热带风暴,即从台湾岛东侧登陆时强度越强的 TC,登陆后衰减的强度越大(图 2a),这与董林和端义宏(2008)的研究结果一致,TC 过岛的强度变化除与登岛前自身强度有关以外,还与路径、登陆角度等因素有关(董林和端义宏,2008)。受台湾岛地形影响,TC 强度明显减弱,但仍有超过半数的 TC 以台风及以上级别的强度进入台湾海峡(图 2b),由图 2b 可知,多数 TC 在海峡内随时间减弱,但初始强度为热带风暴及 1 个初始强度为热带低压的 TC 强度有加强趋势,且初始强度为热带风暴的 TC 在海峡内维持的时间最长。另外,初始强度越强,在海峡内滞留的时间越短,强度增强的几率越小。TC 登陆大陆后受地形影响并与中纬度系统相互作用,其气旋性环流仍可维持 1~4 d 不等,造成 TC 登陆后长时间维持的原因较多,例如除合适的大气环境以外,当 TC 经历湖泊和湿地下垫面时将有利于其环流的维持(李英和陈联寿,2005)。TC 跨越台湾岛及海峡过程中强度虽然显著衰减,但仍有 17 个台风及 37 个强热带风暴再次登陆大陆,超过二次登陆大陆 TC 总数的 65%(图 2c 中以热带低压及以上级别登陆大陆的 TC 共 68 个),登陆大陆 TC 同样呈现出登陆时强度越强,登陆后强度衰减得越严重,并在陆地上维持时间越长的现象。另外,TC 在跨越台湾岛及登陆大陆的过程中平均每小时强度减弱约 $1.13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而在海峡期间平均每小时则减弱约 $0.83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,可见 TC 在海峡期间强度衰减得要更慢一些。

当 TC 离开中央山脉,进入台湾海峡温暖的水面时,其环流往往会重新组织,有的 TC 甚至会再度增强。为定量考察海峡内水体对 TC 强度的影响,图 3a 给出了 TC 在台湾海峡内插值到逐小时后计算的逐 6 h 最大风速变化的分布频数。正值代表 TC 增强,负值表示减弱。TC 在海峡内强度以减弱为主,在进入海峡的第一个 6 h 内,强度减弱的范围达 $0 \sim 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,其中最大风速减弱 $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的频次最多,之后的逐 6 h 风速变化范围逐渐缩小。TC 穿过海峡的平均时间约为 14.3 h,在海峡内维持时间越长,逐 6 h 减弱的程度越小,即 TC 强度趋于

稳定。另外,除有一定数量的 TC 强度维持基本不变($0 \sim 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)外,尤其值得关注的是有 7 个出现入海峡加强现象的个例,并且加强时次基本都出现在入海峡的 15 h 以内(图 3a)。此时 TC 在海峡内维持的时间明显较长(表 1),7 个 TC 中除 6708 号在海峡内只停留 7 h,强度略有加强外,其余 6 个 TC 都维持超过了 15 h,其中 0116 号离岛后西南行(图 4),在海面上总时长达到 47 h 后以强热带风暴等级在广东再次登陆,在此过程中,6 h 强度变化最大达 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。另一个典型的海峡内增强个例是

9018 号,由热带低压在 6 h 内加强 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 迅速发展为台风,针对此个例对 JTWC、CMA/STI 和 RSMC-Tokyo 资料进行比较发现,这突然加强的记录在三家业务中心中的记录并不一致,这在下一节中将进行讨论。TC 再次登陆大陆后,强度快速减弱。在登陆大陆后的第一个 6 h 内,TC 最大风速减弱的范围主要集中在 $5 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 3b),之后的逐 6 h 风速减弱的范围逐渐缩小,此时一般 TC 已经很弱,强度趋于仅维持气旋性环流。

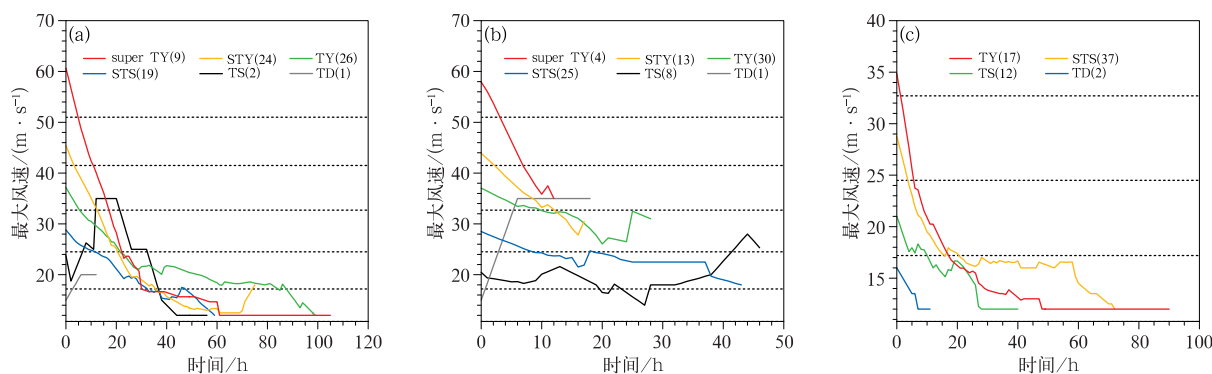


图 2 不同初始强度 TC 从台湾登陆到再次登陆大陆后减弱至热带低压(a),在台湾海峡期间不同初始强度 TC(b)和不同初始强度 TC 再次登陆大陆后(c)的平均强度随时间的变化
(纵坐标按照强度为各级热带气旋分级,括号内数字为样本数)

Fig. 2 Average intensity changing with time of (a) TC with different initial intensities after landing from Taiwan, (b) TC with different initial intensities during its staying in Taiwan Strait, (c) TC landing from the Mainland
(Vertical coordinates are classified according to the intensity of tropical cyclones, and the numbers in brackets are the sample numbers)

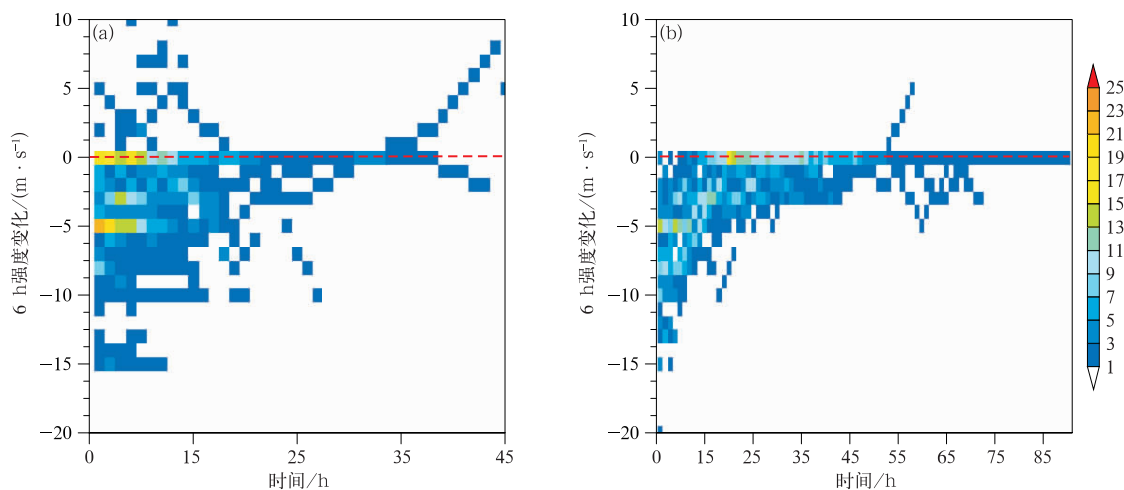


图 3 TC 在海峡内的逐 6 h 强度变化(a)和再次登陆后的逐 6 h 强度变化(b)的分布频数
(彩色表示频数)

Fig. 3 The TC distribution frequency of intensity variation every 6 h (a) in the strait and (b) after landing Mainland
(Shaded area represents the frequency numbers)

表 1 海峡内增强 TC 列表

Table 1 List of strengthened TC in the strait

编号	海峡内持续 时间/h	进入海峡时的 初始强度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	二次登陆时的 强度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	海峡期间逐 6 h 强度变 化最大值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
5218	19	25.0(STS)	25.0(STS)	5
6104	20	19.2(TS)	15.0(TD)	10
6510	15	27.5(STS)	26.7(STS)	10
6708	7	18.3(TS)	20.0(TS)	1.7
8403	20	22.5(TS)	25.0(STS)	5
9018	19	15.0(TD)	35.0(TY)	20
0116	47	18.7(TS)	25.3(STS)	8

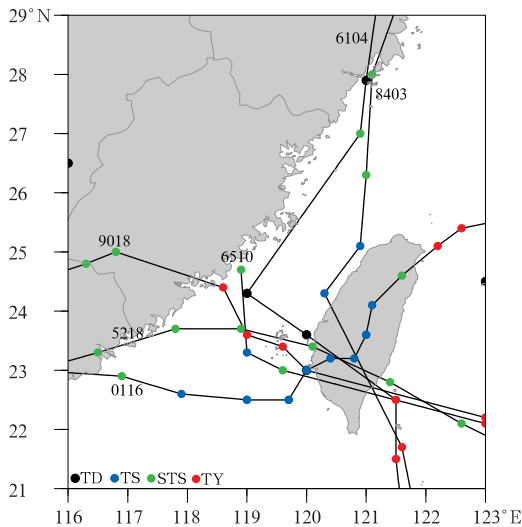


图 4 1949—2017 年台湾海峡内
强度增强的 TC 路径分布

Fig. 4 Track distribution of strengthened TCs
in Taiwan Strait from 1949 to 2017

3 CMA/STI、RSMC-Toyko 和 JTWC 资料中二次登陆 TC 的路径强度差异比较

最佳路径资料的制作虽然有一定的业务规范,但是在完成过程中,有一定的主观因素,以及各业务中心业务规范的差异必然造成最佳路径资料存在一定的不确定性,因此在使用最佳路径资料时需要特别谨慎。前人已做诸多的比较,例如有学者发现虽然三套资料(CMA/STI、RSMC-Tokyo 和 JTWC)的 TC 定位点差异较小,但在 TC 定强方面具有显著差别,这导致对于西北太平洋 TC 活动趋势的分析结果不同(Song et al,2010)。对于本文研究的二次登陆 TC,由于环境及下垫面的复杂影响,定位定

强难度更大,本节对过台湾岛与海峡及登陆大陆后这段时间的相关 TC 进行三套资料路径及强度的对比分析,取三套资料中各 TC 样本数据过台湾岛前一时次为 0 时刻,去掉二次登陆大陆后又出海的记录及热带风暴以下级别的数据(参考图 1 所示范围内的 TC 点),资料时间间隔为 6 h。

3.1 定位点差异分析

图 5 为 RSMC-Tokyo、JTWC 资料相对于 CMA/STI 资料 TC 中心位置的分布。以 CMA/STI 资料 TC 中心作为参考点,计算 RSMC-Tokyo 和 JTWC 资料相对于 CMA/STI 资料各时次 TC 中心之间的距离和方位角(图 5a),其中三套资料共有 TC 数 77 个,由图 5a 可见,灰色圆点代表资料间 TC 中心距离小于 50 km,RSMC-Tokyo(红色圆点)与 CMA/STI 资料 TC 中心间距离大于 50 km 的时次数有 82 个,而 JTWC 资料中(绿色圆点)则有 97 个,总体而言,RSMC-Tokyo 与 CMA/STI 资料关于 TC 定位之间的差异要更小一些。而且,位于 CMA/STI 资料 TC 中心偏北方向($315^{\circ} \sim 45^{\circ}$)距离差较大的点要稍多一些。

图 5b 为两套资料(RSMC-Tokyo 与 JTWC)分别与 CMA/STI 资料 TC 中心的距离大于 50 km 时与 CMA/STI 资料 TC 中心的连线,由图可见,不同资料 TC 中心的距离大于 50 km 时,TC 主要位于台湾岛、台湾海峡和大陆沿岸,其中间距超过 100 km 的点主要集中在台湾岛的中南部地区,其次集中在台湾海峡中。同样,上述地区也是三套资料中 TC 强度差异较大的分布区域(图略),这说明受下垫面特殊环境的复杂影响,TC 的定位定强会有较大的不确定性。

由此可见,三个业务中心对 TC 在岛上和海峡中存在明显的定位差异,这将进一步影响对 TC 过

岛后路径的判断。由于台湾岛中央山脉的阻挡作用,TC 过岛路径一般表现为连续和不连续路径两种,其中,路径连续 TC 指过岛时不发生跳跃性的间断现象,TC 中心连续过岛。而 TC 路径不连续指 TC 接近和登陆台湾岛时,在中央山脉西侧背风坡生成低压中心,即副中心,进而副中心代替主中心,体现为 TC 路径发生跳跃性的间断。TC 过岛的路径连续与否往往与 TC 登陆前的强度以及登陆地点有关,较弱的 TC 以及在跨越海拔较高的中央山脉中段的时候往往会导致 TC 路径不连续(Lin et al, 2005)。为确保资料的准确性,本文参考台湾气象机构网站发布的“侵台台风资料库”,对 1949—2014 年共 76 个二次登陆 TC 的连续与不连续路径进行判定,其中 CMA/STI 资料中 TC 连续路径 42 个,不连续路径 34 个。分别利用三套最佳路径资料对

TC 离岛进入海峡的路径偏折进行分析。为考虑在台湾岛不同区域登陆 TC 的情况,本文将台湾岛划分为中北和中南两部分分别进行考虑(图 7)。首先对路径偏折做出如下定义:根据每个 TC 的 6 h 间隔路径,判断 TC 过台湾岛及海峡时的路径偏折情况,若在此期间各时次连线没有明显偏折,判断为穿岛直行,若出现某时次及以后时次的路径明显在之前路径连线延长线的左侧,判断为左偏,在右侧的判断为右偏。通过分析 CMA/STI 资料发现,其所记录的 TC 路径以右偏为主(占 1949—2014 年 76 个二次登陆 TC 总数的 60.5%),其中连续过岛路径中有 54.8% 右偏过岛,而不连续路径中右偏占 67.6%。图 6 给出了三套资料中连续及不连续路径过岛 TC 路径的偏折统计。整体看来,三套资料对于 TC 在台湾中北、中南登陆的统计情况较为一致:

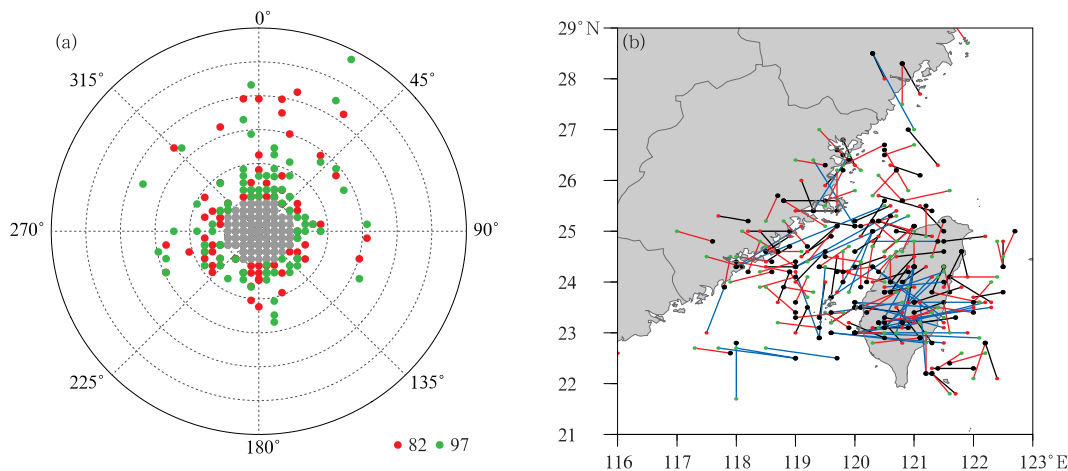


图 5 RSMC-Tokyo、JTWC 资料相对于 CMA/STI 资料 TC 中心位置分布

- (a) 距离和方位角(圆盘图圆心为 CMA/STI 资料 TC 中心,最外圈半径为 300 km,每个内圈的半径间隔为 50 km,灰色散点代表 RSMC-Tokyo、JTWC 资料与 CMA/STI 资料 TC 中心的距离小于 50 km 时的相对位置,红色和绿色散点分别代表 RSMC-Tokyo、JTWC 资料与 CMA/STI 资料 TC 中心的距离大于 50 km)
- (b) TC 中心连线(黑色和红色短线分别代表 CMA/STI 与 RSMC-Tokyo、JTWC 资料 TC 中心的距离 $50 \text{ km} < R < 100 \text{ km}$ 时各时次的连线,蓝色短线代表两套资料与 CMA/STI 资料 TC 中心的距离 $R \geq 100 \text{ km}$ 时各时次的连线,黑色、红色、绿色点分别代表各时次 CMA/STI、RSMC-Tokyo、JTWC 资料 TC 中心)

Fig. 5 TC center location distribution of RSMC-Tokyo data and JWC data relative to CMA/STI data
(a) distance and azimuth (The center of the circular diagram is the TC center in CMA/STI dataset, the radius of the outermost circle is 300 km, each inner ring has a radius interval of 50 km, the grey scatter points represent that the TC center distance between CMA/STI and RSMC-Tokyo data (JTWC data) is less than 50 km, the red/green scatter points represent that the TC center distance between RSMC-Tokyo/JTWC and CMA/STI data is larger than 50 km); (b) connection between TC centers [The black/red short lines represent the TC center distance between CMA/STI and RSMC-Tokyo (JTWC) data when the distance is 50—100 km, while the blue short lines represent that when the distance is greater than 100 km, the black, red and green dots represent of TC centers CMA/STI, RSMC-Tokyo and JTWC data at each time]

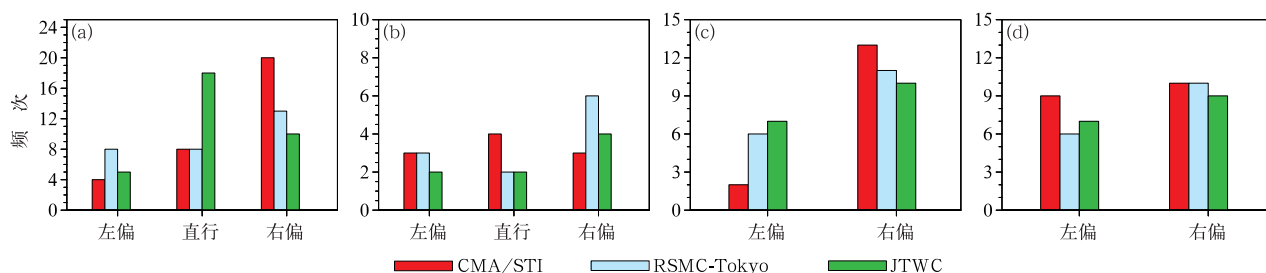


图 6 连续路径中北(a)、中南(b),不连续路径中北(c)、中南(d)部登陆 TC 过岛时路径偏折情况统计

Fig. 6 Statistical histogram of different TC track deflections when continuous track TCs land at north-central part (a) and south-central part (b) of Taiwan and when discontinuous track TCs land at the north-central part (c) and south-central part (d)

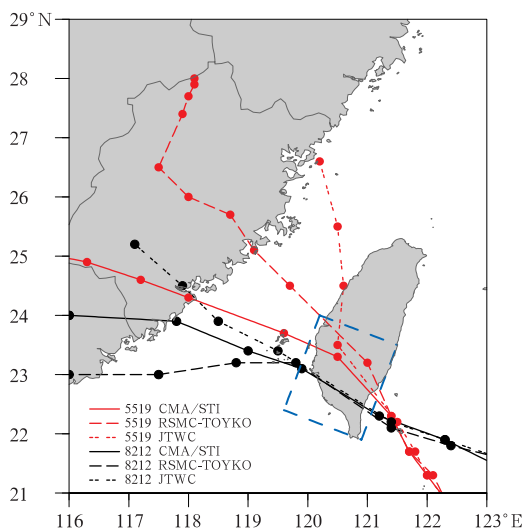


图 7 5519 号(红线)、8212 号(黑线)TC 在 CMA/STI、RSMC-Tokyo、JTWC 资料中的路径对比 (蓝色虚线框表示台湾中南部地区)

Fig. 7 Track comparison of No. 5519 (red line) and No. 8212 (black line) TC in CMA/STI, RSMC-Tokyo and JTWC data (Blue dashed line frame indicates south-central Taiwan)

连续路径 TC 在中北部登陆的情况占统计样本总数的 40%~44%,在中南部登陆的情况占 10%~15%;不连续路径 TC 在中北、中南部登陆的均占总数的 20%~25%左右,其中在 CMA/STI 资料中,在中南部登陆的情况稍多于在中北部登陆的情况,而在 RSMC-Tokyo 与 JTWC 资料中,不连续路径 TC 在中北、中南部登陆的情况相差不多(表略)。

但值得关注的是,针对过岛后在海峡内路径的偏折情况而言,三套资料的表现差异较大(图 6):对于连续路径 TC 而言,CMA/STI 与 RSMC-Tokyo 资料在中北部登陆时 TC 路径均以右偏为主,

JTWC 资料与二者差异较大,明显以直行为主,右偏的 TC 有 10 个。而在中南部登陆时,RSMC-Tokyo 与 JTWC 资料的统计情况差异较小,均为右偏 TC 数占比最大,其中 RSMC-Tokyo 记录中有 6 个 TC 过岛后路径出现向右偏折,这与 Huang et al (2011)的理想模拟中,TC 中南部过岛后会发生路径右折一致,而 CMA/STI 只有 3 个 TC 发生右折, JTWC 则有 4 个 TC,与之趋势相反的是,CMA/STI 将 4 个中南部过岛的 TC 判定为直行(左偏与右偏的各 3 个)。对于不连续路径而言,在中南部登陆时三套资料的统计差异较小,而在中北部过岛时, RSMC-Tokyo 与 JTWC 资料间的差异较小,CMA/STI 资料的统计结果与二者差异较大。这一结果充分说明 TC 过岛后的路径大多会发生偏折,但是由于背景环流的引导系统复杂,加之下垫面影响以及三套资料中定位点的一定主观不确定性,使得三套资料对于过岛 TC 路径偏折的判断具有较大差异,因此目前的统计并不能看出偏折方向的明显趋势。

图 7 为 5519 号不连续路径 TC 与 8212 号连续路径 TC 在三套资料中的路径对比,这两个 TC 均在台湾岛中南部登陆,在进入海峡之前,三套资料的路径差异较小,但进入台湾海峡后,三套资料在路径上表现出巨大的差异:对于 5519 号 TC 而言,CMA/STI 与 RSMC-Tokyo 资料中的路径表现为向左偏折,但二者间的路径差异较大,而在 JTWC 资料中路径表现为明显右偏;对于 8212 号 TC 而言,在 CMA/STI 资料中路径以直行为主,在 RSMC-Tokyo 与 JTWC 资料中路径则分别以左偏和右偏为主。可见三套最佳路径资料对于 TC 离开台湾岛进入海峡这段时间的路径偏折情况的记录差异较大。

3.2 强度差异分析

由上述分析可见,三套最佳路径资料在 TC 定位上差异明显,同时对进入海峡的 TC 路径偏折的判断差异也相对明显,这主要是因为 TC 离开中央山脉后结构在一定程度被破坏,定位不确定性增大,同时定强的不确定性也增大。将 RSMC-Tokyo 和 JTWC 中 TC 样本的最大风速分别与 CMA/STI 的做对比,得到图 8。由于 RSMC-Tokyo 资料在 1977 年以后才有近中心最大风速资料,因此图 8a 中的 TC 样本数为 46 个,图 8b 为 77 个。从图 8 中可见二者与 CMA/STI 相比,共同特征是:从台湾东侧登陆至减弱到热带风暴,CMA/STI 资料的 TC 强度要强于 RSMC-Tokyo 及 JTWC 资料的强度,其中过台湾岛与海峡时,CMA/STI 资料最大 10 m 风速平均比 JMA 资料高 $3.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (最大相差 $20.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),比 JTWC 资料高 $4.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (最大相差 $22.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。这与三套最佳路径资料在西北太平洋上的差异趋势是不同的,在余晖等(2006)的研究中,JTWC 资料的 TC 强度往往会高于 CMA/STI 的定强,从不同强度区间资料的频率分布看,余晖等(2006)指出在所有小于 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速等级中,CMA/STI 和 JTWC 的风速频率分布都较为接近,并且三套资料均在热带风暴与强热带风暴级别中出

现的频率较高,但从本文的统计结果看,三套资料中两两间的频率分布差异均较大(图略),CMA/STI 在强热带风暴与台风级别中出现的频率较高,而 RSMC-Tokyo 和 JTWC 则在热带风暴与强热带风暴级别中出现的频率较高。与余晖等(2006)研究结果的差异可能主要是由于关注范围不同导致,本文关注的海峡及沿海区域测站和雷达资料密集,丰富的佐证信息有助于获得更为精准的 TC 强度信息。比较而言,RSMC-Tokyo 与 CMA/STI 资料的差异要小一些。从趋势线来看,RSMC-Tokyo 与 CMA/STI 资料的差异随 TC 强度的增强而减小,但 JTWC 资料与 CMA/STI 资料的差异则随 TC 强度的增强先减小后增大。另外,对于第 3 节中所提到的 9018 号 TC,CMA/STI 中记录离开台湾岛进入海峡时的第一个时次(9 月 7 日 12 时)的最大风速为 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而 RSMC-Tokyo 与 JTWC 中的记录分别为 33.15 和 $31.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,与 CMA/STI 中的最大风速相差 $16 \sim 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,根据 CMA/STI 的记录,此 TC 在之后的 6 h 内最大风速迅速加强到 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (台风级),但在 RSMC-Tokyo 与 JTWC 中之后的 6 h 内 TC 强度则分别减弱 2.6 和 $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,相应的三个业务中心的路径记录在此时段内也具有较大差异(图略),由于 9018 号 TC 属于不连续路径 TC,过岛后产生次生低压,给定位定强带来一定的

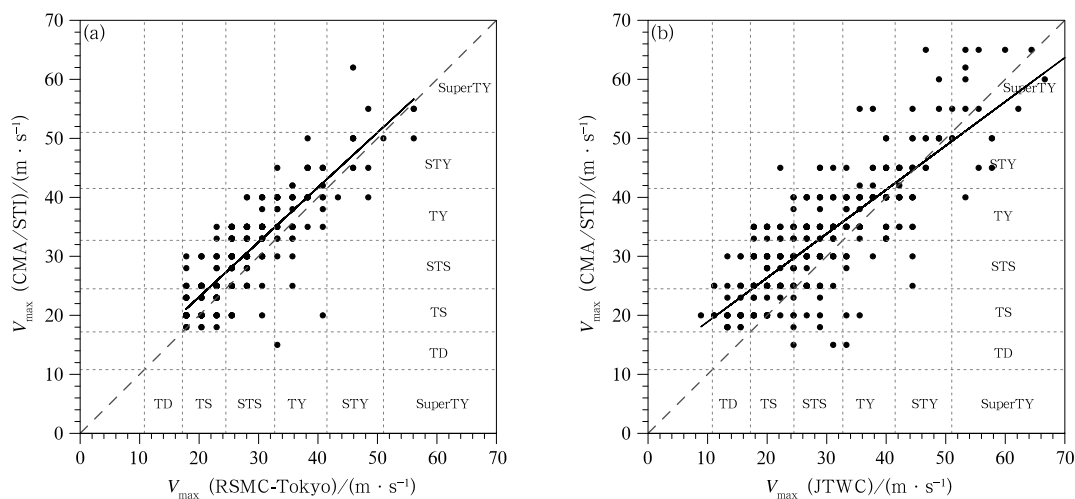


图 8 CMA/STI 资料最大风速与 RSMC-Tokyo 资料对比(a)及与 JTWC 资料对比(b)的散点图
(虚线代表二者最大风速相等,实线代表趋势线)

Fig. 8 Scatter diagram of maximum wind speed comparison
(a) CMA/STI and RSMC-Tokyo dataset, (b) CMA/STI and JTWC dataset
(Dashed line represents the same maximum wind speed between two datasets,
and solid line represents the trend line)

难度,这可能是导致三个业务中心的记录差异较大的一个原因。对于 TC 过台湾岛与海峡这段时间内,三套资料间的巨大差异增加了对 TC 强度变化认识的难度。

4 主要结论

本文利用西北太平洋 TC 研究中主要使用的 CMA/STI、RSMC-Tokyo 和 JTWC 三套最佳路径资料对 1949—2017 年穿越台湾岛,二次登陆的 TC 路径和强度变化进行了统计分析和比较。同时,以 CMA/STI 资料为主,分析了二次登陆 TC 路径及强度的主要特征。得到以下主要结论:

(1)统计分析发现 1949—2017 年穿越台湾岛,再次登陆大陆的 TC 共有 81 个,其中有 68 个以热带低压及以上强度发生二次登陆。TC 在台湾岛、台湾海峡及大陆上的平均累计维持时间约为 38.7 h,其中在海峡内平均滞留 14.3 h。TC 登陆台湾后,强度迅速衰减,不管以何强度登陆台湾的 TC,其登陆后 24 h 左右迅速衰减为热带风暴。TC 进入海峡内,环流得以重新组织,但仍以强度衰减为主,衰减速度较前期在台湾岛上时减慢。进入海峡的 TC 中,只有 7 个在海峡内强度再次增强,它们的共同特点是在海峡内都维持超过了 15 h(除了 6708 号在海峡里只停留 7 h,强度略有加强)。

(2)当 TC 再次登陆大陆后,受地形影响并与中纬度系统相互作用,其气旋性环流仍可维持 1~4 d 不等。据统计,TC 再次登陆大陆后的平均维持时间约为 23.2 h(截至热带低压)。TC 离岛后到再次登陆前路径会发生偏折,再次登陆点自北向南包括江苏、浙江、福建、广东,其中超过 80% 的 TC 再次登陆福建。再次登陆后的 TC 仍然可深入内陆,对江西、安徽等地造成影响。

(3)西北太平洋三个主要业务中心的 TC 最佳路径资料(CMA/STI、RSMC-Tokyo、JTWC)对 TC 过岛前后的定位及过岛后的路径偏折差异明显。主要表现为 RSMC-Tokyo、JTWC 资料与 CMA/STI 资料 TC 中心间的距离大于 50 km 时的 TC 主要位于台湾岛、台湾海峡和大陆沿岸,其中距离超过 100 km 的点主要集中在台湾岛的中南部地区,其次集中在台湾海峡中。三套资料对过岛后在海峡内路径的偏折差异尤其明显,但统计结果已充分说明 TC 过岛后的路径大多会发生较原有路径的偏折。

以 CMA/STI 资料为主要分析目标发现,过岛后 TC 路径以向右偏折为主,占二次登陆 TC 总数的 60.5%,其中连续过岛路径中有 54.8% 过岛右偏,而不连续路径中右偏占 67.6%。

(4)三套最佳路径资料的强度对比发现,从台湾东侧登陆至减弱到热带风暴,CMA/STI 资料的 TC 强度要强于 RSMC-Tokyo 及 JTWC 资料的强度,其中过台湾岛与海峡时,CMA/STI 资料最大 10 m 风速平均比 JMA 资料高 $3.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (最大相差 $20.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),比 JTWC 资料高 $4.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (最大相差 $22.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),这与余晖等(2006)对于西北太平洋 TC 的研究有所不同。并且 RSMC-Tokyo 与 CMA/STI 资料的差异随 TC 强度的增强而减小,但 JTWC 与 CMA/STI 资料的差异则随 TC 强度的增强先减小后增大。

上述分析表明,台湾岛地形对过岛及二次登陆 TC 的路径和强度会造成很大影响,造成这些差异的机制以及对这类 TC 结构变化和降水分布的影响将是下一步的研究重点。另外,对三家权威 TC 最佳路径资料的对比分析表明,过岛 TC 定位定强存在明显差异,说明 TC 离开中央山脉后结构在一定程度被破坏,造成定位定强的不确定性大。这种不确定性增大了其路径和强度监测和预报的难度,本文的统计结果希望为研究和业务中使用最佳路径资料提供参考依据。

参考文献

- 陈联寿,丁一汇,1979. 西太平洋台风概论[M]. 北京:科学出版社:22-26. Chen L S, Ding Y H, 1979. Introduction to Typhoon on the Western Pacific Ocean[M]. Beijing: Science Press: 22-26 (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,余晖,伍荣生,2005. 热带气旋强度变化研究进展[J]. 气象学报,63(5):636-645. Duan Y H, Yu H, Wu R S, 2005. Review of the research in the intensity change of tropical cyclone[J]. Acta Meteor Sin, 63(5):636-645 (in Chinese).
- 高洋,方翔,2018. 基于 CloudSat 卫星分析西太平洋风云系的垂直结构及其微物理特征[J]. 气象,44(5):597-611. Gao Y, Fang X, 2018. Analyses on vertical structure and microphysical features of typhoon cloud in Western Pacific based on CloudSat satellite data[J]. Meteor Mon, 44(5):597-611 (in Chinese).
- 何晓彤,徐国强,2018. 1513 号台风苏迪罗云系演变特征及模拟分析

- [J]. 气象, 44(8):998-1008. He X T, Xu G Q, 2018. Characteristics and simulation analysis of cloud evolution of Typhoon Soudelor (2015)[J]. Meteor Mon, 44(8):998-1008 (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).
- 简国基, 2011. 海棠台风登陆台湾前内核结构演变之研究[J]. 大气科学, 39(1):83-94. Jian G J, 2011. A numerical study of the inner core structure change of supertyphoon Haitang (2005) prior to its landfall in Taiwan[J]. 39(1):83-94 (in Chinese).
- 李英, 陈联寿, 2005. 湿地边界层通量影响热带气旋登陆维持和降水的数值试验[J]. 气象学报, 63(5):683-693. Li Y, Chen L S, 2005. Numerical study on impacts of boundary layer fluxes over wetland on sustention and rainfall of landfalling tropical cyclone[J]. Acta Meteor Sin, 63(5):683-693 (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).
- 骆荣宗, 许金镜, 1990. 台湾岛和台湾海峡地区台风和伴生低压相对运动规律初探[J]. 热带气象, 6(2):173-179. Luo R Z, Xu J J, 1990. A preliminary discussion on the relative motion law of typhoon to its associated low in Taiwan Island and Taiwan Strait[J]. J Trop Meteor, 6(2):173-179 (in Chinese).
- 任福民, 王小玲, 陈联寿, 等, 2008. 登陆中国大陆、海南和台湾的热带气旋及其相互关系[J]. 气象学报, 66(2):224-235. Ren F M, Wang X L, Chen L S, et al, 2008. Tropical cyclones landfalling in the mainland, Hainan and Taiwan of China and their interrelations[J]. Acta Meteor Sin, 66(2):224-235 (in Chinese).
- 王尚宏, 汤杰, 雷小途, 2018. 登陆过程中台风高层暖心结构演变特征分析[J]. 气象, 44(5):612-620. Wang S H, Tang J, Lei X T, 2018. Evolution of warm-core structure in upper level of land-falling typhoons[J]. Meteor Mon, 44(5):612-620 (in Chinese).
- 徐亚钦, 夏园锋, 翟国庆, 等, 2018. “苏拉”台前强螺旋云带辐合特征分析[J]. 气象, 44(10):1275-1285. Xu Y Q, Xia Y F, Zhai G Q, et al, 2018. Convergence characteristics of severe prefrontal spiral cloud band of Typhoon Saola[J]. Meteor Mon, 44(10):1275-1285 (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).
- 余晖, 胡春梅, 蒋乐怡, 2006. 热带气旋强度资料的差异性分析[J]. 气象学报, 64(3):357-363. Yu H, Hu C M, Jiang L Y, 2006. Comparison of three tropical cyclone strength datasets[J]. Acta Meteor Sin, 64(3):357-363 (in Chinese).
- 余贞寿, 郝增周, 谢海华, 等, 2007. 台湾岛地形对台风“海棠”(0505)移动路径影响的数值试验研究[J]. 热带气象学报, 23(6):575-580. Yu Z S, Hao Z Z, Xie H H, et al, 2007. A numerical study of the effect of Taiwan Island terrain on Typhoon Haitang (0505) track[J]. J Trop Meteor, 23(6):575-580 (in Chinese).
- Barcikowska M, Feser F, von Storch H, 2012. Usability of best track data in climate statistics in the Western North Pacific[J]. Mon Wea Rev, 140(9):2818-2830.
- Elsberry R L, Chen L S, Davidson J, et al, 2013. Advances in understanding and forecasting rapidly changing phenomena in tropical cyclones[J]. Trop Cycl Res Rev, 2(1):1-12.
- 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.
- Kaplan J, DeMaria M, Knaff J A, 2010. A revised tropical cyclone rapid intensification index for the Atlantic and eastern North Pacific basins[J]. Wea Forecasting, 25(1):220-241.
- Knapp K R, Kruk M C, 2010. Quantifying interagency differences in tropical cyclone best-track wind speed estimates[J]. Mon Wea Rev, 138(4):1459-1473.
- Lin Y L, Chen S Y, Hill C M, et al, 2005. Control parameters for the influence of a mesoscale mountain range on cyclone track continuity and deflection[J]. J Atmos Sci, 62(6):1849-1866.
- Shu S J, Ming J, Chi P, 2012. Large-scale characteristics and probability of rapidly intensifying tropical cyclones in the western North Pacific basin[J]. Wea Forecasting, 27(2):411-423.
- Song J J, Wang Y, Wu L G, 2010. Trend discrepancies among three best track data sets of western North Pacific tropical cyclones[J]. J Geophys Res, 115 (D12): D12128. DOI: 10. 1029/2009JD013058.
- Wu C C, Kuo Y H, 1999. Typhoons affecting Taiwan: current understanding and future challenges[J]. Bull Amer Meteor Soc, 80(1):67-80.
- Yang M J, Wu Y C, Liou Y C, 2018. The study of inland eyewall reformation of Typhoon Fanapi (2010) using numerical experiments and vorticity budget analysis[J]. J Geophys Res, 123(17):9604-9623.
- Yeh T C, Elsberry R L, 1993a. Interaction of typhoons with the Taiwan orography. Part I: upstream track deflections[J]. Mon Wea Rev, 121(12):3193-3212.
- Yeh T C, Elsberry R L, 1993b. Interaction of typhoons with the Taiwan orography. Part II: continuous and discontinuous tracks across the island[J]. Mon Wea Rev, 121(12):3213-3233.
- Ying M, Zhang W, Yu H, et al, 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. J Atmos Oceanic Technol, 31(2):287-301.