

穿过江苏热带气旋活动及潜在破坏力的时空分布特征

张雪蓉 廖一帆 濮梅娟 陈联寿 李英

Spatiotemporal distributions of tropical cyclones passing through Jiangsu province and their destructive potential

ZHANG Xuerong, LIAO Yifan, PU Meijuan, CHEN Lianshou, LI Ying

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11676/qxxb2025.20240136>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

热带气旋背景下广东龙卷气候特征和环境条件

Climatic characteristics and environmental conditions of the tornado occurrences within tropical cyclones over Guangdong province, China

气象学报. 2024, 82(3): 319–339 doi: [10.11676/qxxb2024.20230125](https://doi.org/10.11676/qxxb2024.20230125)

登陆中国的热带气旋活动及其风雨变化的RegCM4集合预估

Projected changes in activity and impact of associated wind and rainfall of the tropical cyclones landing in China based on RegCM4 downscaling simulations

气象学报. 2024, 82(3): 356–370 doi: [10.11676/qxxb2024.20230116](https://doi.org/10.11676/qxxb2024.20230116)

西北太平洋热带气旋生成与路径的次季节预报方法及其性能评估

Sub-seasonal prediction of tropical cyclone genesis and track over Northwest Pacific: Methods and performance evaluation

气象学报. 2025, 83(2): 320–333 doi: [10.11676/qxxb2025.20230146](https://doi.org/10.11676/qxxb2025.20230146)

热带气旋研究和业务预报进展—第九届世界气象组织热带气旋国际研讨会（IWTC-9）综述

Advances and trends in tropical cyclone research and forecasting: An overview of the ninth World Meteorological Organization International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-9)

气象学报. 2020, 78(3): 537–550 doi: [10.11676/qxxb2020.050](https://doi.org/10.11676/qxxb2020.050)

热带气旋奇异向量在GRAPES全球集合预报中的初步应用

The preliminary application of tropical cyclone targeted singular vectors in the GRAPES global ensemble forecasts

气象学报. 2020, 78(1): 48–59 doi: [10.11676/qxxb2020.006](https://doi.org/10.11676/qxxb2020.006)

热带气旋大风风圈半径非对称性特征及成因简析

Analysis on the asymmetric characteristics and causes of the wind circle radius of tropical cyclones

气象学报. 2022, 80(6): 896–908 doi: [10.11676/qxxb2022.064](https://doi.org/10.11676/qxxb2022.064)



扫码关注公众号，获取更多信息！

穿过江苏热带气旋活动及潜在破坏力的时空分布特征*

张雪蓉^{1,2} 廖一帆³ 濮梅娟⁴ 陈联寿⁵ 李英⁵
ZHANG Xuerong^{1,2} LIAO Yifan³ PU Meijuan⁴ CHEN Lianshou⁵ LI Ying⁵

1. 江苏省气候中心, 南京, 210041
2. 中国气象局交通气象重点开放实验室, 南京, 210041
3. 广西水利电力职业技术学院, 南宁, 530023
4. 江苏省气象台, 南京, 210041
5. 中国气象科学研究院, 北京, 100081

1. *Jiangsu Climate Center, Nanjing 210041, China*
2. *Key Laboratory of Transportation Meteorology of China Meteorological Administration, Nanjing 210041, China*
3. *Guangxi Vocational College of Water Resources and Electric Power, Nanning 530023, China*
4. *Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210041, China*
5. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2024-09-01 收稿, 2024-12-01 改回.

张雪蓉, 廖一帆, 濮梅娟, 陈联寿, 李英. 2025. 穿过江苏热带气旋活动及潜在破坏力的时空分布特征. 气象学报, 83(5): 1202-1216
Zhang Xuerong, Liao Yifan, Pu Meijuan, Chen Lianshou, Li Ying. 2025. Spatiotemporal distributions of tropical cyclones passing through Jiangsu province and their destructive potential. *Acta Meteorologica Sinica*, 83(5):1202-1216

Abstract In this study, 67 Tropical Cyclones (TCs) crossing Jiangsu province are identified from a total of 2440 western North Pacific TCs during the 73 a period of 1949–2021 using the best-track data archived at the China Meteorological Administration's Shanghai Typhoon Institute (CMA-STI). Temporal and spatial characteristics of activities and potential destructiveness associated with TCs crossing Jiangsu province are investigated. Results show that TCs crossing Jiangsu province, which mainly generated in July and August over a broader region, account for 2.7% and 10.2% of TCs over the western North Pacific and those making landfall in China, respectively. TCs crossing Jiangsu province made landfall in China mainly in June–November, with the highest landfalling frequency and widest landfalling distribution in August. The landfalling routes of TCs crossing Jiangsu are categorized into 14 types (T_1 – T_{14}), of which the route T_4 for TCs that made landfall first in Taiwan, China and then in Fujian accounts for the highest proportion. The TC tracks crossing Jiangsu are classified into four types. The moving directions in Jiangsu and overall track morphologies of TCs corresponding to these four types are closely related to the westward extension and northward shift of the western Pacific subtropical high. TCs entered and left mainly from the southeast and east coast of Jiangsu respectively during July–September. The entering locations of TCs crossing Jiangsu shift northward from June to August and retreat southward in September–October, while leaving locations shift westward and then retreat eastward, due to seasonal adjustments of large-scale systems, such as the western Pacific subtropical high and monsoon circulation. The track density of TCs in Jiangsu generally decreases from southeast to northwest, with most of the TCs moving northward or northeastward. Spatial distributions of track density and average velocity vectors of TCs crossing Jiangsu are characterized by significant monthly variations. There is a significant increase in potential destructiveness of TCs in Jiangsu (JS-PDI) during the period of 1949–2021, corresponding to

* 资助课题: 国家自然科学基金项目(41805036)、江苏省气象学会青年科研基金项目(KQ201908)、广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2023KY1135)。

作者简介: 张雪蓉, 主要从事热带气旋机理研究。E-mail: zhangxueronghua@sina.com

通信作者: 濮梅娟, 主要从事天气动力与大气物理研究。E-mail: pumeijuan@126.com

increases in their landfall intensity and average intensity in Jiangsu. The JS-PDI in August is considerably higher than in other months. In agreement with the distribution of average TC intensity in Jiangsu, larger JS-PDI values are mainly distributed in the coastal region and Southeast of Jiangsu, and the locations of maximum JS-PDI agree well with the TC track density.

Key words Tropical cyclone activities, Tropical cyclone tracks, Jiangsu province, Potential destructiveness

摘要 利用中国气象局上海台风研究所(CMA-STI)西北太平洋海域热带气旋(TC)最佳路径数据集,选取路径穿过江苏省的TC,采用统计分析与合成分析等方法,揭示了穿过江苏的TC活动及潜在破坏力的时空分布。结果表明,1949—2021年西北太平洋TC中共有67个穿过江苏,分别占西北太平洋和登陆中国TC总数的2.7%和10.2%,7和8月生成频数最多、源地分布范围最广。从生成到进入江苏,穿过江苏TC主要在6—10月登陆,8月登陆频次最多、登陆点南北跨度最大,登陆路线共有14种,其中以登陆中国台湾后二次登陆福建省经陆上进入江苏的登陆路线占比最高。穿过江苏的TC其4类路径的整体形态和穿过江苏时的运动方向与西太平洋副热带高压西伸北抬程度密切相关。TC主要发生在7—9月,从江苏东南部进入,于江苏东部沿海离开,西太平洋副热带高压和季风环流等大尺度系统的季节性调整使得TC进入和离开江苏的位置随月份分别发生北上-南落和西进-东退的分布变化。江苏TC路径频率总体上表现为由江苏东南部向西北方向减少的分布特征,TC平均移动方向以偏北或北偏东为主,路径频率和移速矢量的空间分布存在明显的月际变化。由于1949—2021年穿过江苏TC的登陆强度和在江苏境内平均强度均显著增大,江苏区域TC潜在破坏力(JS-PDI)存在显著上升趋势。JS-PDI存在明显月际变化,其中8月JS-PDI明显高于其他月份。JS-PDI大值区主要分布于沿海区域和苏南东部,与江苏区域TC平均强度大值区分布较为一致,同时JS-PDI大值中心与江苏省TC路径频率大值中心存在较好的对应关系。

关键词 热带气旋(TC)活动,热带气旋(TC)路径,江苏省,潜在破坏力

中图法分类号 P444

1 引言

中国是受热带气旋(TC)影响最多、最严重的国家之一,自南向北整条海岸线均在TC的袭击范围之内,每年约有7.2个TC给中国造成大风、暴雨、洪涝、风暴潮等灾害(陈联寿等,1979;雷小途等,2009;端义宏等,2014;Zhang, et al, 2018),特别是华南和华东沿海省份所受威胁和破坏更大,江苏在沿海省份中纬度较高,处于中高纬度和低纬度天气系统过渡带,该区域受多时空尺度系统相互作用影响,是TC北上后路径发生转向和异常变化的关键区,这使得江苏不仅受到中纬度近海TC直接登陆的威胁,也受到较低纬度登陆北上和转向TC的影响(Lander, 1996; Zhang, et al, 2018),其中不乏路径直接穿过江苏的TC,令江苏遭受狂风暴雨侵袭的同时,准确预报这些TC的路径也更具挑战性(王美苏,2010;潘威等,2012;魏章进等,2017)。

TC路径及活动特征是TC研究的重要方面之一(Chen, et al, 2022; Guo, et al, 2022),对TC路径及活动特征的准确认识是进一步掌握其引发的大风、降水、风暴潮灾害发生与发展规律并准确预报的重要基础(Cheung, et al, 2021)。诸多研究发现,TC引发的风雨、风暴潮、海浪等发生位置与其移动路径密切相关(陈联寿等,1979;沈树勤,1990;

Chen, et al, 2010; 丛春华等,2011; Meng, et al, 2012; 何倩倩等,2015),不同类型路径TC在江苏引发的暴雨、风暴潮、海浪等也往往具有不同的分布和发展特征(田辉等,1999;钮学新等,2005;于华,2014;张雪蓉等,2021,2022)。对华东地区各类台风路径的降水分析发现,华东登陆西行、华东登陆北上、华南登陆和近海北上4类不同路径台风在江苏产生降水的量级、分布、影响因子等特征各不相同(钮学新等,2005)。此外,不同类型路径TC在江苏沿海引起的风暴增水也具有不同的分布、振荡周期、海浪形状等特征,其中又以正面登陆型、登陆北上型和近海活动型对江苏产生的影响最为严重(刘金芳等,2002;俞亮亮等,2013;高清清等,2014;于华,2014;谭家辉等,2022)。

目前江苏省TC引起的风雨、风暴潮、海浪等灾害的发生、发展机理的研究已较为全面(陶祖钰等,1994;朱洪岩等,2000;沈树勤等,2001;孟智勇等,2002;濮梅娟等,2002),且诸多研究发现,TC穿越江苏过程中,其本体及本体与周围天气系统相互作用产生的风雨等灾害的分布与路径联系更为紧密,对江苏影响也更强(丁治英等,1996;李英等,2004;何立富等,2006;蒋义芳等,2011,2013;刘佳等,2013;吴海英等,2015;Wu, et al, 2015;陆逸等,2016;陈燕等,2019),这就需要通过对穿过江苏TC的

路径及活动特征有详细、系统的定量认识,但目前针对这方面的系统研究不多。同时,研究发现近几十年影响中国的西北太平洋 TC 的盛行路径、最大强度位置及登陆点存在显著北移的趋势(Zhao, et al, 2014a, 2014b; Chen, et al, 2022; Guo, et al, 2022),江苏在华东沿海省份中虽所处纬度较高,但在西北太平洋 TC 活动北移且强度和强台风占比显著上升的背景下(Park, et al, 2014; Li, et al, 2017; Wang, et al, 2022),TC 对江苏潜在破坏力的长期变化趋势也值得关注。故文中针对 1949—2021 年穿过江苏 TC 的生成、登陆、路径分类、环流背景等特征进行细致分析,并进一步揭示其穿越江苏过程中的移动路径及潜在破坏力的时空分布特征,以期沿海防台减灾提供有益参考。

2 资料和方法

2.1 资料

所用资料包括:(1)CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集 (<http://tcdata.typhoon.org.cn>) 中 1949—

2021 年(共 73 a)的西北太平洋海域 TC 路径资料(Ying, et al, 2014; Lu, et al, 2021),包括 TC 每 6 h 的位置(经度、纬度)和强度,同时参考国家气象中心 2004 年开始发布的 TC 报文资料;(2)对应年份和区域的欧洲中期天气预报中心(ECMWF)第 5 代再分析资料(ERA5),时间分辨率为 1 h,水平空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

选取路径经过江苏的所有 TC 作为穿过江苏 TC 的统计样本(包含所有强度、命名及未命名的 TC),1949—2021 年西北太平洋生成的所有 TC 中穿过江苏的 TC 共 67 个(其中包括 3 个进入江苏后填塞消亡的 TC)(图 1a、b),平均每年有 0.92 个 TC 穿过江苏,分别占西北太平洋和登陆中国 TC 总数的 2.7% 和 10.2%,其中 1994 年频数最多(4 个),其次是 1956、1959、1962、1985 和 2018 年,均有 3 个 TC 穿过江苏(图 1c)。

2.2 方法

TC 潜在破坏力(Power Dissipation Index, PDI)定义为

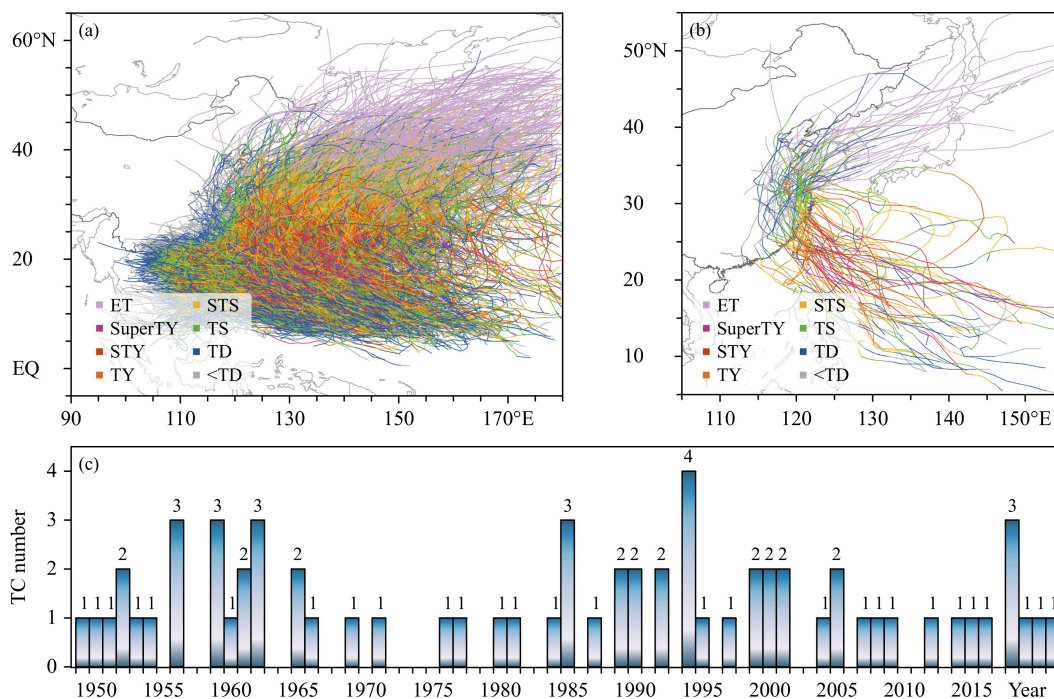


图 1 1949—2021 年西北太平洋所有 TC 路径 (a) 和穿过江苏 TC 路径 (b) 及穿过江苏 TC 频数的时间序列 (c) (ET: 台风变性, SuperTY: 超强台风, STY: 强台风, TY: 台风, STS: 强热带风暴, TS: 热带风暴, TD: 热带低压, 下同)

Fig. 1 TC Tracks over the western North Pacific (a) and crossing Jiangsu province (b), and interannual distribution of TCs crossing Jiangsu province (c) from 1949 to 2021 (ET: extratropical transition, SuperTY: super typhoon, STY: severe typhoon, TY: typhoon, STS: severe tropical storm, TS: tropical storm, TD: tropical depression; the same hereafter)

$$PDI \equiv \int_0^{\tau} V_{\max}^3 dt$$

式中, V_{\max} 为 TC 近中心最大风速, τ 为 TC 生命期 (Emanuel, 2005), 分析江苏区域 TC 潜在破坏力时, τ 为 TC 在江苏境内的停留时间。

文中运用合成方法 (Chan, et al, 1980; Hodanish, et al, 1993) 分析 TC 穿过江苏时的环流特征; 基于 CMA-STI 最佳路径数据中 TC 每 6 h 的经度和纬度, 结合 haversine 公式计算得到 TC 移速矢量 (Xu, et al, 1982); 运用 t 检验检测变量序列趋势的显著性。

3 穿过江苏 TC 的生成及登陆特征

3.1 穿过江苏 TC 生成的时空特征

1949—2021 年穿过江苏 TC 主要生成于 7 月 (26 个) 和 8 月 (25 个), 其次是 9 月 (13 个) 和 6 月 (3 个) (图 2), 其余月份生成于西北太平洋的 TC 路径不会进入江苏, 往往由其外围环流形成的风雨对江苏产生影响。穿过江苏的 TC 多生成于 7 和 8 月, 一方面是由于 7 和 8 月西北太平洋赤道辐合带及季风槽中热带扰动活动最为活跃, TC 生成频数达到峰值 (Lander, 1994), 另一方面是由于 7 和 8 月西太平洋副热带高压 (西太副高) 环流北跳、夏季风北上, 在上述两个条件的共同作用下中国沿海 TC 活动频数增多, 且在环境气流引导下北上移动至较高纬度进入江苏 (Lander, 1996)。

穿过江苏 TC 的生成源地多位于西北太平洋 TC 生成的高频区, 即西北太平洋中部 (7° — 17° N, 128° — 150° E) 的热带洋面上 (图 2 中绿色方格区

域), 且生成位置分布跨度较大。受西太副高环流及季风环流的活动变化影响, 穿过江苏 TC 的生成源地分布在各月具有不同的特征 (图 2), 6 月西太副高及夏季风尚处在第一次季节性北进阶段, 副高脊线位于 20° N 附近, 西南季风尚未发展为闭合环流, 故穿过江苏 TC 在 6 月的生成源地均分布在 15° N 以南; 7—8 月西太副高第二次季节性北跳, 夏季风也进一步北推, 副高脊线北进至 27° — 30° N, 西南季风发展形成闭合环流, 且 7 月西太副高西伸脊点达到 130° E 附近, 故生成于 7—8 月的穿过江苏 TC 的源地分布范围最广; 9 月西太副高开始南落东退, 夏季风南撤减弱, 西太副高西伸脊点东移至 139° E 附近, 故生成于 9 月的穿过江苏 TC 源地分布较 7—8 月偏南, 且生成位置最偏东的 TC 出现在 9 月。

3.2 穿过江苏 TC 登陆时空特征

1949—2021 年穿过江苏的 TC 从生成到进入江苏在中国沿海 7 个省级行政区登陆 106 次 (图 3), 其中登陆江苏 6 次 (占 5.7%), 登陆其他省级行政区 (台湾、福建、浙江、上海、广东、香港) 100 次 (占 94.3%), 登陆台湾次数最多 (31 次), 其次为福建 (29 次) 和浙江 (25 次)。登陆均发生在 6—10 月 (图 4), 其中 8 月 (26 个 TC, 39 次) 登陆 TC 数量及频次最多、登陆点分布南北跨度最大, 其次是 7 月 (19 个 TC, 32 次) 和 9 月 (19 个 TC, 31 次), 且 9 月登陆点分布较 7、8 月略偏南。

穿过江苏 TC 仅登陆中国 1 次的有 30 个, 登陆 2 次的有 35 个, 登陆 3 次的仅有 2 个; 根据 TC 由不同省级行政区登陆的具体情况, 表 1 列出了穿过江

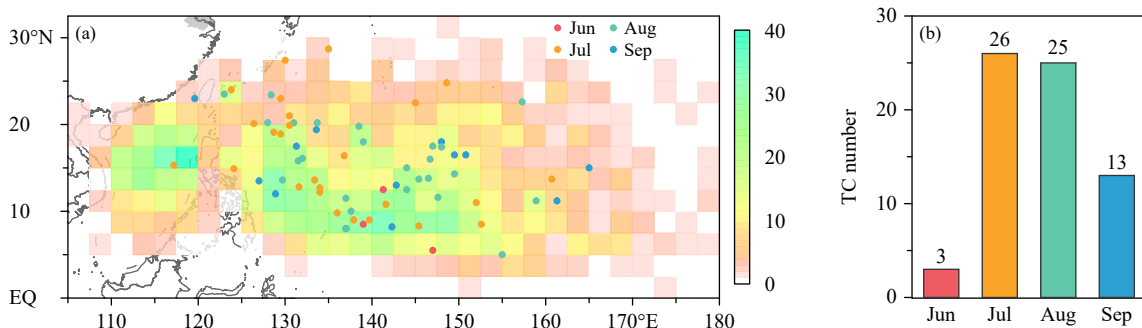


图 2 1949—2021 年穿过江苏 TC 生成源地空间分布 (a) 及生成频数月变化 (b) (彩色方格: 西北太平洋 TC 在 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 网格内的生成频数, 彩色点: 穿过江苏 TC 的生成位置)

Fig. 2 Spatial distribution of genesis locations (a) and monthly distribution (b) of TCs crossing Jiangsu province from 1949 to 2021 (colored grids: genesis numbers of TCs over the western North Pacific within $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ grid; colored point: genesis locations of TCs crossing Jiangsu province)

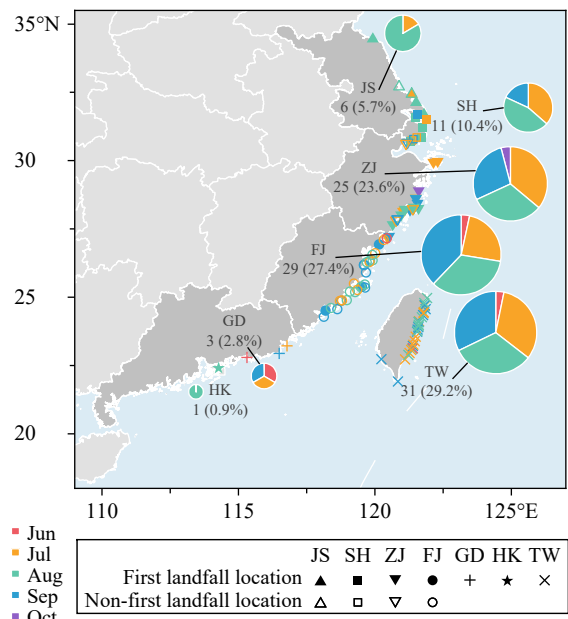


图3 1949—2021年穿过江苏TC登陆点空间分布(深灰色区域:穿过江苏TC登陆的省级行政区;JS、SH、ZJ、FJ、GD、HK、TW分别为江苏、上海、浙江、福建、广东、香港、台湾;省级行政区名称下方数字为登陆该省级行政区频次及其所占比例,饼图表示穿过江苏TC登陆各省级行政区频次月变化;▲和△表示江苏首次和非首次登陆点,■和□表示上海首次和非首次登陆点,▼和▽表示浙江首次和非首次登陆点,●和○表示福建首次和非首次登陆点,+表示广东首次登陆点,★表示香港首次登陆点,×表示台湾省首次登陆点)

Fig. 3 Spatial distribution of landfall locations of TCs crossing Jiangsu province from 1949 to 2021 (dark grey areas: provinces where TCs crossing Jiangsu made landfall; JS, SH, ZJ, FJ, GD, HK, TW: acronyms for Jiangsu, Shanghai, Zhejiang, Fujian, Guangdong, Hong Kong, Taiwan; numbers under acronyms: landfalling frequencies and corresponding percentages in each province; pie charts: monthly distributions of landfalling frequencies in each province; ▲ and △: first and non-first landfall locations in Jiangsu, ■ and □: first and non-first landfall locations in Shanghai, ▼ and ▽: first and non-first landfall locations in Zhejiang, ● and ○: first and non-first landfall locations in Fujian, +: first landfall locations in Guangdong, ★: first landfall location in Hong Kong, ×: first landfall locations in Taiwan)

苏TC的14种登陆路线(编号 T_1-T_{14}),并给出了每种登陆路线的登陆TC数量、频次、月份、登陆省级行政区具体顺序以及首次登陆到进入江苏的平均路径长度和平均时长,其中登陆月份列内加星号(*)月份为登陆频次最高的月份。如表1所示 T_1-T_3 路线(6个TC,登陆8次)从海上登陆江苏,其中 T_1 路线在生成后由海上直接登陆江苏, T_2 和 T_3 路线分别先登陆台湾或浙江后再由海上登陆江

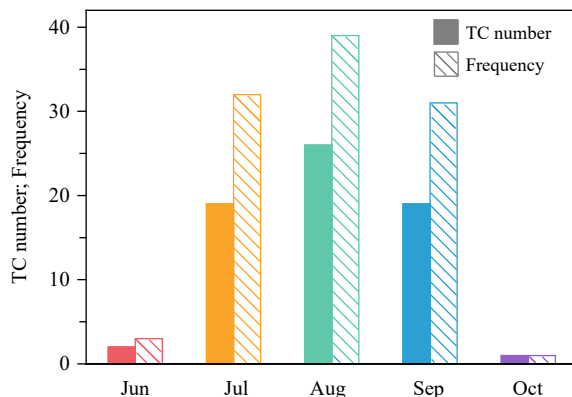


图4 1949—2021年穿过江苏TC登陆TC数量(彩色柱)和登陆频次(斜纹柱)月变化

Fig. 4 Monthly distributions of the landfalling number (color bar) and corresponding frequency (diagonal stripe bar) of TCs crossing Jiangsu province from 1949 to 2021

苏; T_4-T_{14} 路线(61个TC,登陆98次)由其他省份登陆后经陆上进入江苏,其中以登陆台湾后二次登陆福建再经陆上进入江苏的 T_4 路线占比最高(37.3%,登陆50次),其次是由浙江登陆经陆上进入江苏的 T_8 路线(占19.4%);14种登陆路线中有7种登陆峰值发生在8月(T_1-T_4 、 T_8 、 T_{11} 、 T_{14}),另外7种登陆峰值发生在7月或9月(T_5-T_7 、 T_9-T_{10} 、 $T_{12}-T_{13}$);TC登陆中国各省级行政区到进入江苏的平均时长和路径长度由南向北逐渐缩短,除了 T_1 路线在生成后从海上直接登陆江苏,穿过江苏TC首次登陆中国其他省份到进入江苏的平均路径长度和时长分别为795.9 km和39.3 h,其中 T_{11} 路线从首次登陆上海到进入江苏的平均路径和时长最短, T_2 路线仅有1例,即9414号强台风Doug在登陆台湾岛东北角后沿近海北上登陆江苏,是首次登陆到进入江苏时长最长(116.8 h)、路径第2长(1627.7 km)的TC。

4 穿过江苏TC路径分类及其环流特征

根据TC整体路径形态,结合穿过江苏时的移动方向和环流特征,将穿过江苏TC路径分为4类,分别为抛物线转向路径、北上直行路径、西北行路径和突然西折路径(图5)。

第一类,抛物线转向路径为西北太平洋TC的典型路径,以该类路径穿过江苏的TC共43个,占比最高(64.2%),6—9月广泛生成于台湾岛以东的中国近海至 165°E 附近的西北太平洋热带洋面,

表1 1949—2021年穿过江苏TC的14种登陆路线
Table 1 List of 14 types of landfalling routes of TCs crossing Jiangsu province

路线	TC数量 (占比)	登陆 总频次	登陆月份 (*标识峰值月份)	登陆路线 (登陆省级行政区先后顺序)	首次登陆到进入江苏 平均路径长度(km)	首次登陆到进入江苏 平均时长(h)
T ₁	4(6.0%)	4	7, 8*	江苏	0	0
T ₂	1(1.5%)	2	8*	台湾—江苏	1627.7	116.8
T ₃	1(1.5%)	2	8*	浙江—江苏	396.6	8.2
T ₄	25(37.3%)	50	6, 7, 8*, 9	台湾—福建	1160.3	55.2
T ₅	1(1.5%)	3	9*	台湾—福建—上海	971.1	59.5
T ₆	3(4.5%)	6	7, 9*	台湾—浙江	935.4	43.8
T ₇	1(1.5%)	3	7*	台湾—浙江—上海	931.2	26.3
T ₈	13(19.4%)	13	7, 8*, 9, 10	浙江	513.0	30.1
T ₉	3(4.5%)	6	7*, 8	浙江—上海	372.6	15.5
T ₁₀	2(3.0%)	4	7*, 9*	浙江—浙江	279.8	22.2
T ₁₁	6(9.0%)	6	7, 8*, 9	上海	51.3	2.8
T ₁₂	3(4.5%)	3	9*	福建	692.3	25.4
T ₁₃	3(4.5%)	3	6*, 7*, 9*	广东	1140.4	53.3
T ₁₄	1(1.5%)	1	8*	香港	1342.5	66.0

6—10月在中国上海、浙江、福建、广东、香港、台湾沿海登陆,登陆点分布南北、东西跨度均较大,登陆路线中T₄路线最多(20个TC),其次是T₈路线(10个TC),多由江苏南部和西部进入江苏,从江苏东部和北部离开,其中79.1%直接从江苏沿海三市(连云港、盐城、南通)入海(图5a)。TC以抛物线转向路径进入江苏时TC环流中心的平均位置位于苏南地区(31.3°N, 120.3°E)附近,江苏处于低压槽内受TC北部环流影响,中纬度西风气流带平直且南压明显,其南缘位于37°N附近,西太副高呈东西带状分布,西伸脊点位于124°E附近,副高西侧偏南气流超过20 m/s,副高北侧与中纬度西风带之间的西风气流超过18 m/s,TC受西太副高西侧偏南气流引导完成转向穿过江苏,之后在中纬度西风带引导下向东北方向移动离开江苏。

第二类,北上直行路径共11个TC(占16.4%),多在7月前后生成于140°E以西的菲律宾以东洋面,生成位置较其他类型路径偏西。生成后该类路径TC基本保持向偏北方向移动,并主要以T₄、T₆、T₈登陆路线在台湾东部以及闽北、浙南沿海登陆,继续北上后多由苏南进入江苏,此类TC的72.7%从江苏沿海直接入海(图5b)。TC以北上直行路径进入江苏时,TC环流中心的平均位置位于(31.2°N, 120.2°E)附近,江苏也处于低压槽内,影响江苏的主要是TC东北象限和低压槽前的偏南气

流,同时中纬度西风气流明显较第一类路径北抬减弱,西太副高西伸脊点稍偏东(126°E附近),副高西侧到江苏上空是一条北缘到达40°N附近的宽阔偏南气流带(最大风速超过18 m/s),TC在这条偏南气流带的引导下持续北上穿过江苏。

第三类,西北行路径TC共10个(占14.9%),均在7月中旬至8月中旬生成于西北太平洋15°N以北海域,生成位置较其他类型偏北。该类路径TC生成后向西北方向移动过程中,由海上直接登陆江苏(T₁登陆路线)或是先登陆上海、浙北沿海(T₈、T₁₀、T₁₁登陆路线),之后多由江苏东南部进入江苏,又从江苏东北部或西部离开(图5c)。TC以西北行路径进入江苏时,TC环流中心的平均位置位于苏南地区东南部(31.2°N, 121.0°E)附近,江苏受TC西北象限环流影响,西太副高略有西伸且明显北抬,西伸脊点位于(40°N, 123°E)附近,由于副高呈明显的西北—东南向分布,副高南侧的东海北部及黄海海域上空均为稳定的东南气流(最大风速超过16 m/s),TC受东南气流引导向西北穿过江苏后逐渐填塞消亡或是继续北上进入西风带变性转向。

第四类,突然西折路径穿过江苏的TC共3个,仅占穿过江苏TC路径的4.5%,却是4类路径中最特别的,该类路径TC均生成于8月,在中国近海及其附近海域北上至30°N以北后,不像抛物线路径那样向东转向远离中国而是突然西折从海上或是

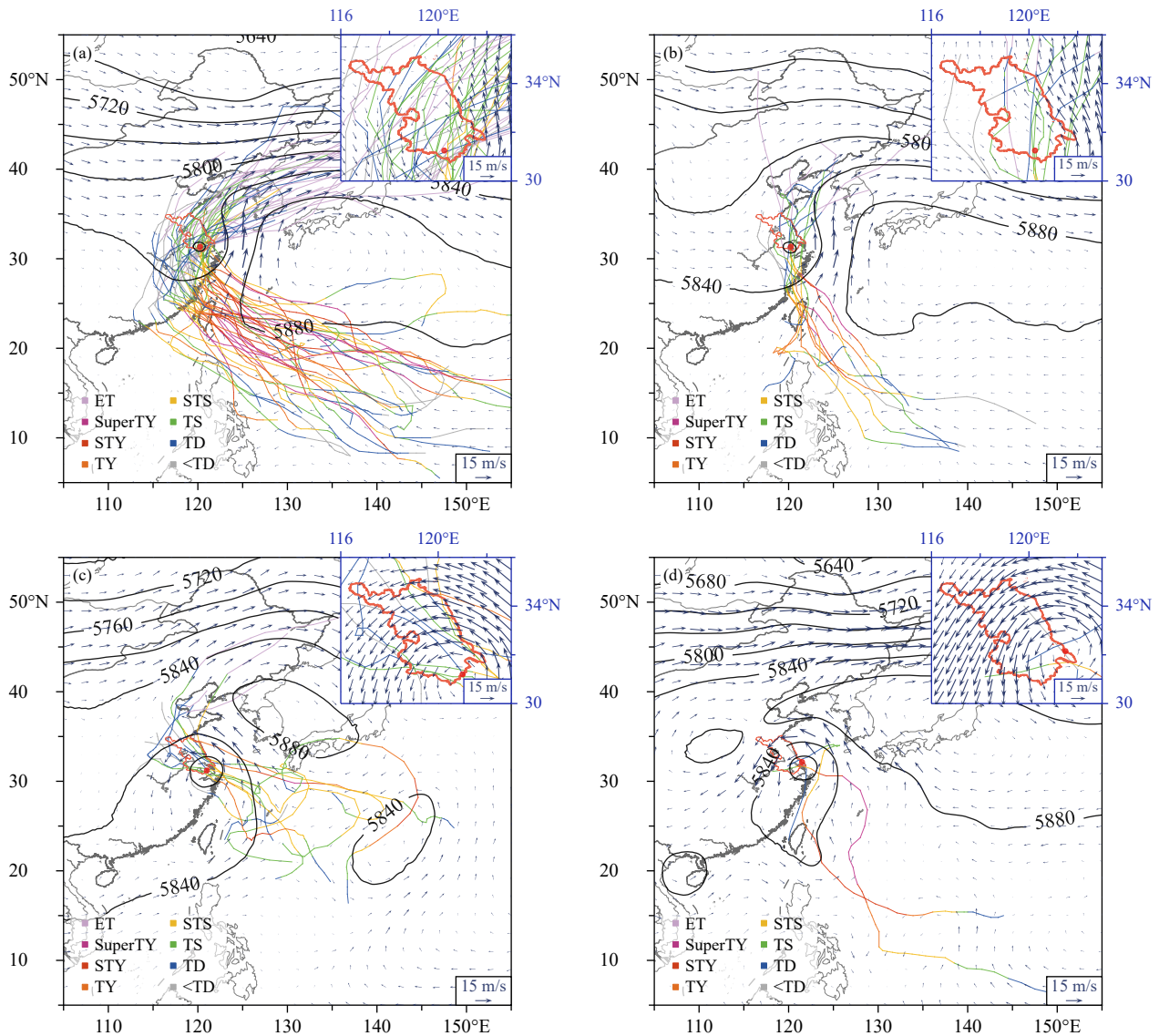


图5 1949—2021年穿过江苏TC的4类路径(a.抛物线转向路径,b.北上直行路径,c.西北行路径,d.突然西折路径)及其进入江苏时500 hPa平均合成高度场(等值线,单位:gpm)、风场(箭矢)(红色圆点为TC中心所在平均位置;右上角为放大后的江苏)

Fig. 5 Four types of tracks (a. parabola recurving tracks, b. northward straight moving tracks, c. northwestward moving tracks, d. sharp westward-turning tracks) and corresponding average geopotential height (contour, unit: gpm) and wind (vector) at 500 hPa of TCs crossing Jiangsu province from 1949 to 2021 (red point: average TC center locations; the enlarged view of Jiangsu province is shown at the top right corner)

短暂掠过崇明岛后直接袭击江苏东南部(T_2 、 T_3 、 T_{11} 登陆路线),增加了沿海TC业务预报和防灾、减灾的难度与压力,属于异常TC路径(图5d)。TC以突然西折路径进入江苏时,西太副高北抬且西伸至中国大陆,西伸脊点位于 117.5°E 附近,TC环流中心的平均位置位于 $(32.2^\circ\text{N}, 121.5^\circ\text{E})$ 附近,江苏处于副高南侧受TC西侧环流影响,强势西伸的西太副高阻挡了TC继续北上而发生转向,在

其南侧偏东气流(最大风速超过 16 m/s)引导下,TC突然西折穿过江苏。

5 穿过江苏TC移动特征

5.1 穿过江苏TC进入和离开江苏的时空分布特征

1949—2021年TC主要于7—9月进入和离开江苏,占穿过江苏TC总数的95.5%,其中8月最多

(进入和离开均为 26 个), 9 月次之(进入和离开均为 20 个), 7 月生成的穿过江苏 TC 多在中旬和下旬, 故 7 月进入(18 个)和离开(15 个)江苏的 TC 频数略少于 8 和 9 月。4 类路径中, 抛物线转向路径穿过江苏的峰值出现在 9 月, 北上直行路径的峰值在 7 月, 西北行和突然西折路径的峰值均在 8 月(图 6)。

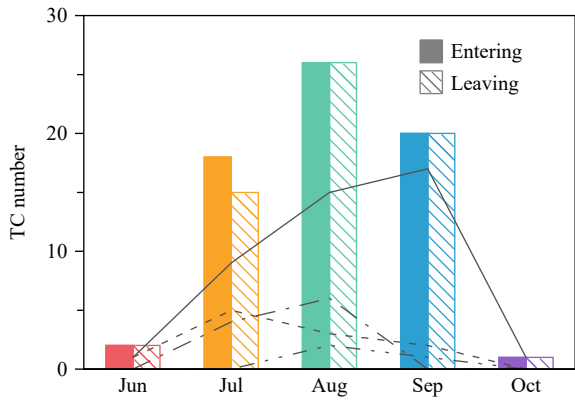


图 6 1949—2021 年穿过江苏 TC 进入(彩色柱)和离开(斜纹柱)江苏频数月变化(实线:抛物线转向路径 TC 频数;虚线:北上直行路径 TC 频数;点划线:西北行路径 TC 频数;双点划线:突然西折路径 TC 频数)

Fig. 6 Monthly distributions of TCs entering (color bars) and leaving (diagonal stripe bars) Jiangsu province from 1949 to 2021 (solid line: parabola recurving tracks; dashed line: northward straight-moving tracks; dash-dot line: northwestward moving tracks; dash-double-dot line: sharp westward-turning tracks)

TC 进入和离开江苏既具有不同的时间变化特征, 也表现出不同的空间分布特征(图 7)。TC 进入江苏频次的空间分布上, TC 主要从江苏东南部进入, 占总频次的 58.8%(40 次); 从江苏西部进入频次占总频次的 39.7%(27 次), 分布较为分散; 从江苏东北部进入的概率很小, 1949 年至今仅有 1 个 TC 由盐城响水进入江苏(1210 号台风达维), 占总频次的 1.5%。从 TC 离开江苏频次的空间分布看, TC 从江苏东部沿海离开的频次最高(共 44 次, 占 67.7%), 其次是江苏淮西北部地区(共 21 次, 占 32.3%), 从苏南离开的频次较少, 仅占总数的 6.2%(4 次), 从江苏江淮之间西部离开仅有 2 次。由于穿过江苏占比最高的抛物线转向路径多由江苏西南向东北方向移动, TC 从江苏东部沿海直接进入海离开的次数(44 次)明显多于从江苏东部沿海登陆进入的次数(6 次)。

西太副高和季风环流等大尺度系统的季节性调整(Lander, 1996), 使得 TC 进入和离开江苏的位置随月份分别发生北上-南落和西进-东退的分布变化(图 7)。进入位置: 6 月仅分布在苏南地区太湖附近, 7—8 月由苏南向北分布至江苏淮北西北部和淮东北部沿海, 9 月江苏东、西部进入位置分别向南回落至长江入海口北岸和淮河以南; 离开位置: 6 月分布于江苏江淮之间东部沿海, 7—8 月向北、向西扩展, 在江苏整个东部沿海、淮北地区和江苏西南部均有分布, 9 月向东退回至江苏东部沿海一线。

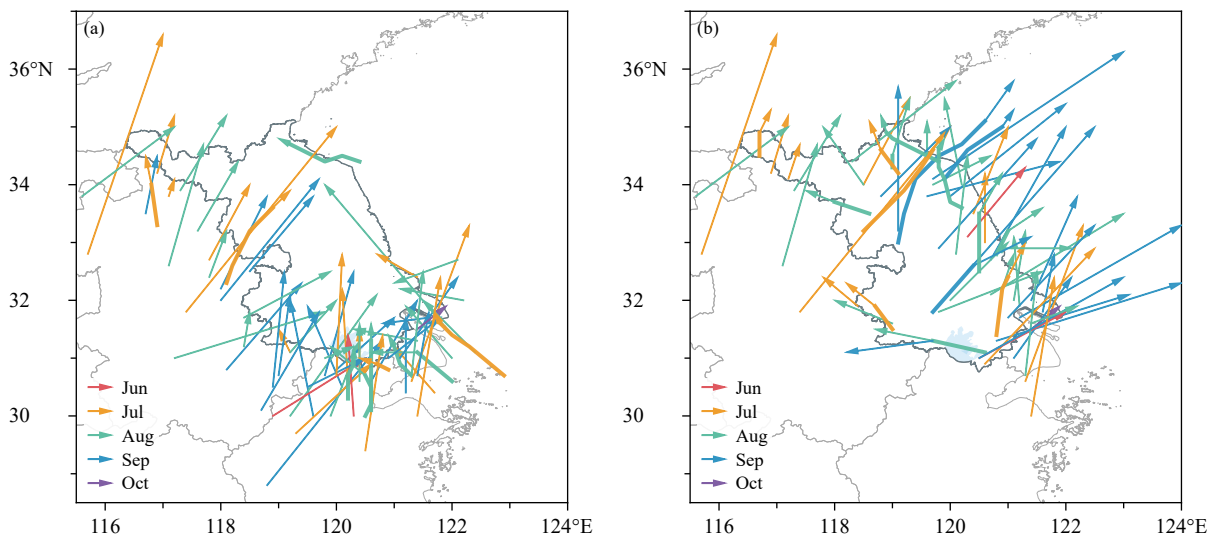


图 7 1949—2021 年 TC 进入 (a) 和离开 (b) 江苏的 6 h 路径(彩色矢量)

Fig. 7 Spatial distributions of 6 h TC tracks (color vector) entering (a) and leaving (b) Jiangsu province from 1949 to 2021

5.2 穿过江苏 TC 路径频率及移速特征

江苏区域 TC 路径频率总体上表现为由江苏东南部向西北方向减少的分布特征,其中东南部频率最高($0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 网格内频次最高达 17 次),其次是沿淮地区($0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 网格内频次最高达 10 次),TC 平均移动方向以偏北或北偏东为主(图 8a)。图 8b—d 显示穿过江苏 TC 路径频率和移速矢量的空间分布存在明显的月际变化,7 月江苏沿淮地区均为向北偏东方向移动的抛物线路径,平均移速最大超过 50 km/h,江苏西北部和淮河以南东部多为向偏北方向移动的抛物线路径和北上直行路径,其

中淮河以南东部平均移速最大超过 40 km/h,江苏西北部除 9406 号超强台风以 73.2 km/h 移速掠过外,平均移速为 10—17 km/h。8 月由于西太副高进一步北抬,西北行和突然西折路径增多,江苏东南部 TC 路径频率明显增加并高于其他区域($0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 网格内频次最高达 9 次),江苏东部沿海形成一条移动方向为北偏西的移速大值带,平均移速最大超过 48 km/h。9 月路径频率分布向东南方向回落至江苏沿淮及以南区域,TC 多以抛物线路径向北偏东方向移动,且在沿淮地区和东南部路径频率较高,江苏沿淮地区、江淮之间和东南部各形成一条

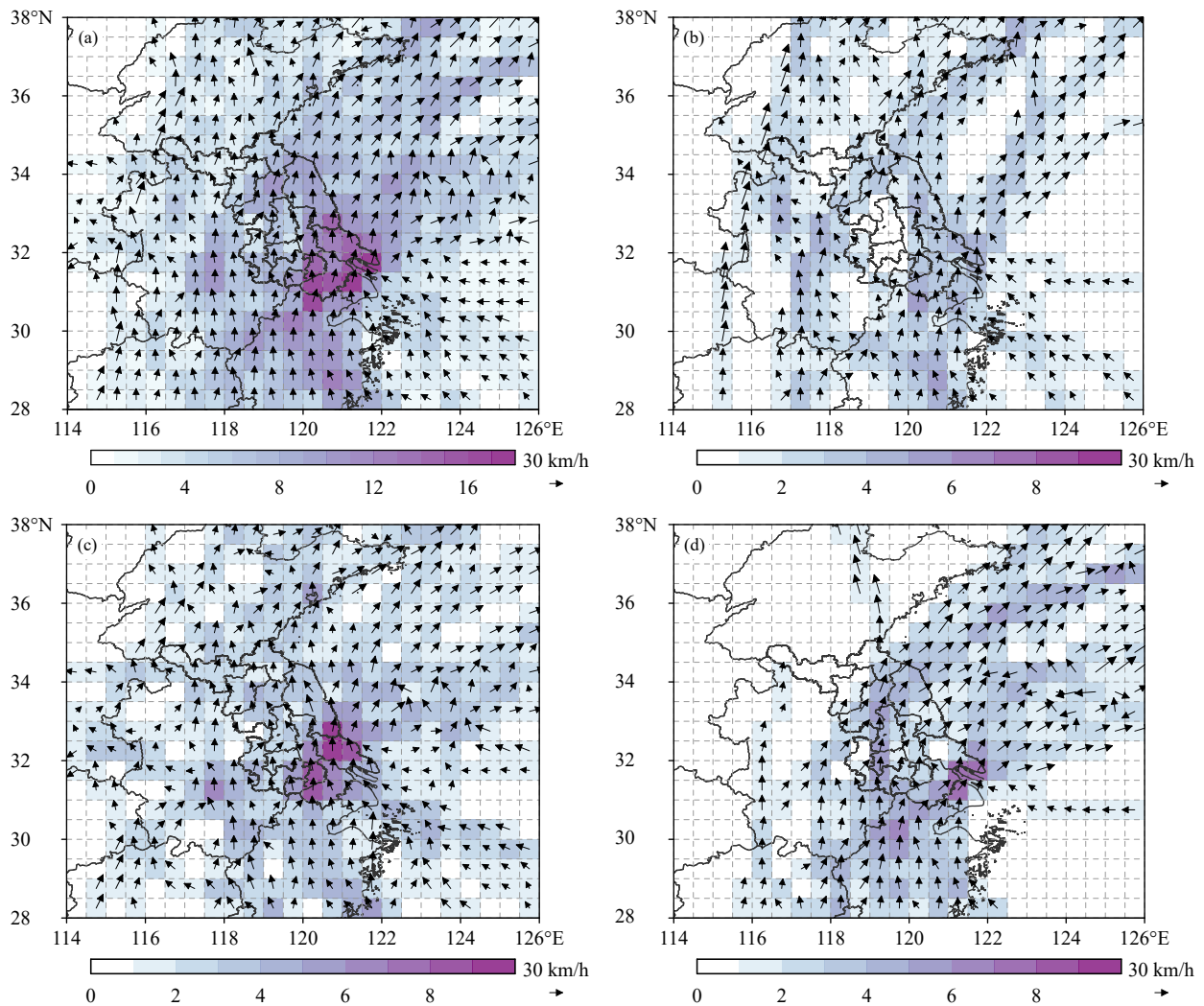


图 8 1949—2021 年穿过江苏 TC 路径频率 (a) 及其 7—9 月 (b—d) 空间分布 (彩色方块: TC 路径在 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 网格内的通过次数; 矢量: TC 在 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 网格内的平均移速矢量)

Fig. 8 Spatial distributions of track density of TCs crossing Jiangsu province (a) and TCs crossing Jiangsu province in July—September (b—d) from 1949 to 2021 (color grid: TC frequencies within $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ grid; vector: average velocity vectors of TCs within $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ grid)

西南—东北走向的移速大值带(平均移速最大分别超过 51、57、40 km/h)。

6 穿过江苏 TC 潜在破坏力特征

Emanuel(2005)提出用 TC 潜在破坏力反映 TC 频数、影响时长以及影响期间 TC 强度造成的综合影响,较单独的 TC 频率或强度更能体现 TC 的威胁。分析江苏区域 TC 潜在破坏力(以下简称为 JS-PDI)发现,1949—2021 年 JS-PDI 呈现显著上升趋势,线性趋势系数 $0.0035 \times 10^9 \text{ m}^3/(\text{s}^2 \cdot \text{a})$ 通过了显著性水平为 0.05 的统计检验,与 Emanuel(2005)和 Li 等(2017)指出的西北太平洋及登陆华东热带气旋 PDI 自 1975 年开始显著增长的结论一致,1975—2021 年 JS-PDI 增长了约 110%(图 9a)。由于 1949—2021 年穿过江苏 TC 频数和江苏区域停留时间无显著变化趋势(图略),JS-PDI 显著增长主要来源于穿过江苏 TC 强度的增强,图 9b、c 显示 1949—2021 年穿过江苏 TC 在江苏境内平均强度及登陆强度均显著增长,线性趋势系数均通过了显

著性水平为 0.05 的统计检验,其中 1975—2021 年分别增长了 17.3% 和 18.6%。虽然中国观测站网的发展以及 20 世纪 70 年代起卫星资料的运用等对 CMA-STI 最佳路径数据集中包括 TC 强度在内的数据时间均一性和趋势分析存在一定影响(Ying, et al, 2014; Lu, et al, 2021),但运用 RSMC-Tokyo 和 JTWC 最佳路径数据集分析西北太平洋 TC 气候特征的研究也发现,20 世纪 70、80 年代起,西北太平洋尤其是登陆华东 TC 的强度、强台风和超强台风数量及占比、TC 强度增长率均存在显著上升趋势(Kang, et al, 2012; Kishtawal, et al, 2012; Holland, et al, 2014; Park, et al, 2014; Li, et al, 2017),这与上文分析结果吻合。并有研究(Emanuel, 2005; Chen, et al, 2011; Holland, et al, 2014; Zhao, et al, 2014a, 2014b; Mei, et al, 2016)指出,这与西北太平洋 TC 生成位置东移、全球变暖造成的热带海表温度上升以及东海南部及其附近区域水平风速垂直切变减弱等因素有关。

江苏区域 TC 潜在破坏力存在明显的月际变化

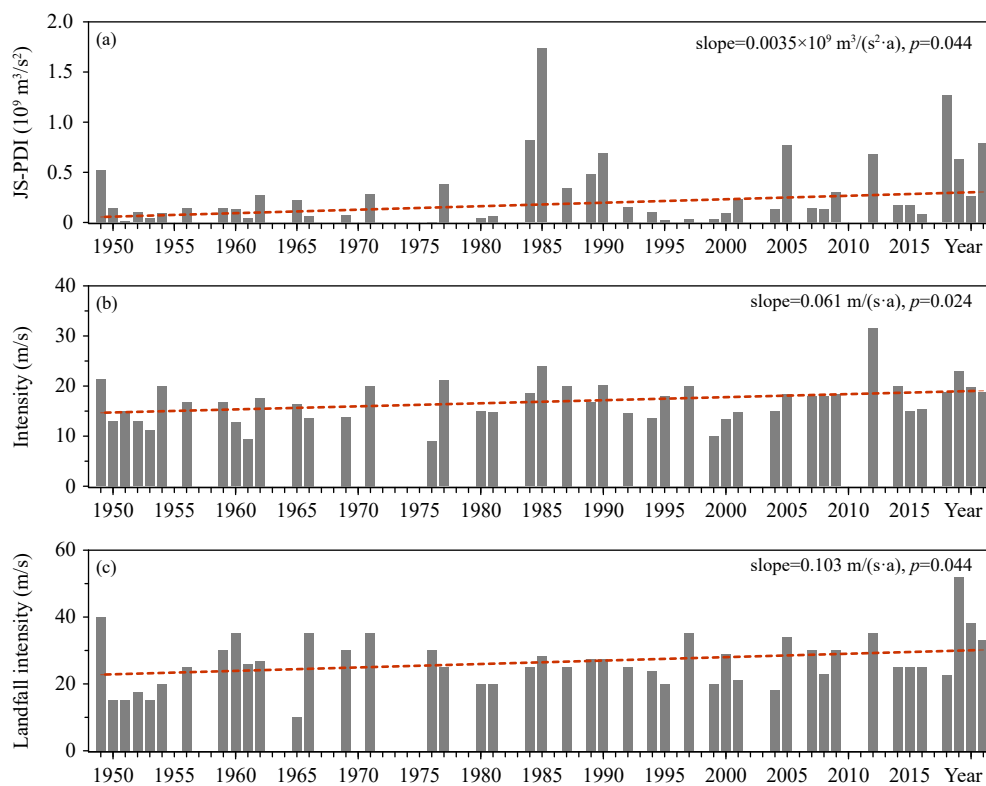


图 9 1949—2021 年江苏区域 TC 潜在破坏力 (a)、平均强度 (b) 以及穿过江苏 TC 登陆强度 (c) 的时间序列 (灰色柱) 和线性趋势 (红色虚线)

Fig. 9 Time series (gray bar) and linear trends (red dashed line) of the potential destructiveness (a) and average intensity (b) of TCs in Jiangsu province and the landfall intensity (c) of TCs crossing Jiangsu province from 1949 to 2021

(图 10)。8月穿过江苏 TC 频数最多,在江苏区域 TC 停留时间平均可达 9.1 h,强度达热带风暴等级及以上的 TC 频数最多(17个),相应地,8月 JS-PDI 达 $6.0 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{s}^2$,明显高于其他月份,即江苏区域 8月的 TC 潜在破坏力最高。9月穿过江苏 TC 频数略多于7月,但7月江苏区域 TC 停留时间较9月长,强度达热带风暴等级及以上的 TC 频数也较9月多,相应地,7月 JS-PDI 约为9月的 1.6倍,这是由于9月西太副高所处平均位置较7月偏南、偏西,在环境引导气流影响下7月西北太平洋 TC 路径较9月偏北(Yao, et al, 2020),其中7月穿过江苏 TC 北上直行和西北行路径明显较9月多,登陆点也较9月略偏北(图 2),故虽然9月西北太平洋生成超强台风最多、登陆 TC 平均强度最强,但 TC 进入江苏时强度较7月弱,变性为温带气旋的数量最多,且在江苏停留时间较7月短,使得9月 JS-PDI 明显弱于7月。

江苏区域 TC 潜在破坏力也存在明显的空间分布特征,JS-PDI 大值区主要分布于沿海区域和苏南东部,与江苏区域 TC 平均强度大值区分布较为一致(图 11a),与江苏区域 TC 灾害危险性等级较高及以上区域分布也基本一致(图略),同时 JS-PDI 大值中心(图 11a—d)与江苏 TC 路径频率大值中

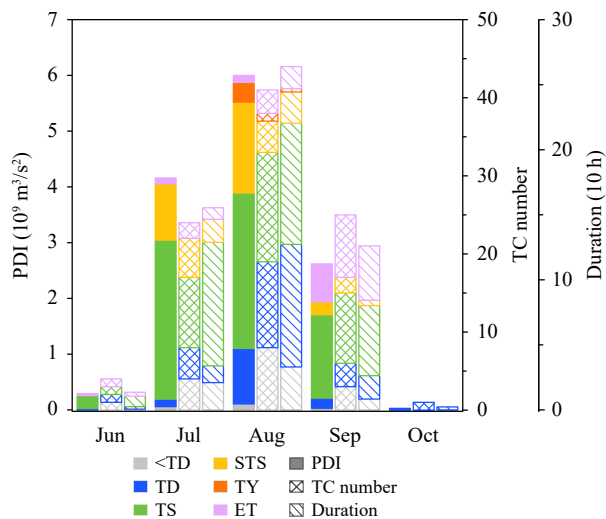


图 10 1949—2021 年江苏区域不同强度等级 TC 潜在破坏力(彩色柱)及其频数(格纹柱)和在江苏区域停留时间(斜纹柱)月变化

Fig. 10 Monthly distributions of the potential destructiveness (color bar), number (diagonal grid bar) and duration (diagonal stripe bar) of TCs at different intensity stages in Jiangsu province from 1949 to 2021

心(图 8a—d)存在较好的对应关系,其中7月 JS-PDI 大值区和大值中心位于江淮之间东南部和苏南东部,8月由于穿过江苏的西北行和突然西折 TC 路径增多,沿海 JS-PDI 大值区和大值中心向北伸展分布至淮北东部。结合图 8 分析发现,对江苏区域存在较大潜在破坏力的 TC 主要经由 3 种路径进入江苏:(1)TC 自启东角附近由南通进入江苏;(2)TC 自杭州湾经沪浙交界处附近由苏州进入江苏;(3)TC 登陆浙江省沿海中部,之后北上穿过浙江省经由太湖附近进入江苏。以上 3 种路径的 TC 进入江苏前陆上路径的长度和时间较短或是直接登陆江苏,较进入江苏前陆上路径的长度和时间较长而强度明显减弱的 TC 对江苏存在更大的潜在破坏力。

7 结论与讨论

利用 CMA-STI 西北太平洋海域 TC 最佳路径数据集,选取路径穿过江苏的 TC,分析得到穿过江苏 TC 活动、路径分类、环流背景特征,以及穿过江苏 TC 过程中的路径移动及潜在破坏力的时空分布特征。主要结论如下:

(1)1949—2021 年西北太平洋生成的穿过江苏 TC 共 67 个(其中包括 3 个进入江苏后填塞消亡的 TC),平均每年 0.92 个,分别占西北太平洋和登陆中国 TC 总数的 2.7% 和 10.2%。穿过江苏 TC 生成于 6—9 月,受西北太平洋赤道辐合带、西太副高和季风环流共同活动的影响,7 和 8 月生成频数最多、源地分布范围最广。

(2)1949—2021 年穿过江苏 TC 从生成到进入江苏在中国沿海 7 个省级行政区登陆 106 次,其中登陆江苏省 6 次(占 5.7%),登陆台湾省(31 次)和福建省(29 次)次数较多,登陆各省级行政区到进入江苏的平均时长和路径长度由南向北逐渐缩短。登陆均发生在 6—10 月,8 月登陆 TC 数量及频次最多,登陆点分布南北跨度最大;9 月登陆点分布较 7 和 8 月略偏南。穿过江苏 TC 登陆路线共 14 种,其中以登陆台湾后二次登陆福建再经陆上进入江苏的 T_4 登陆路线占比最高。

(3)穿过江苏 TC 路径可分为 4 类,分别为抛物线转向路径、北上直行路径、西北行路径和突然西折路径,其中抛物线转向路径占比最高(64.2%),是西北太平洋 TC 穿过江苏的典型路径。西太副高和

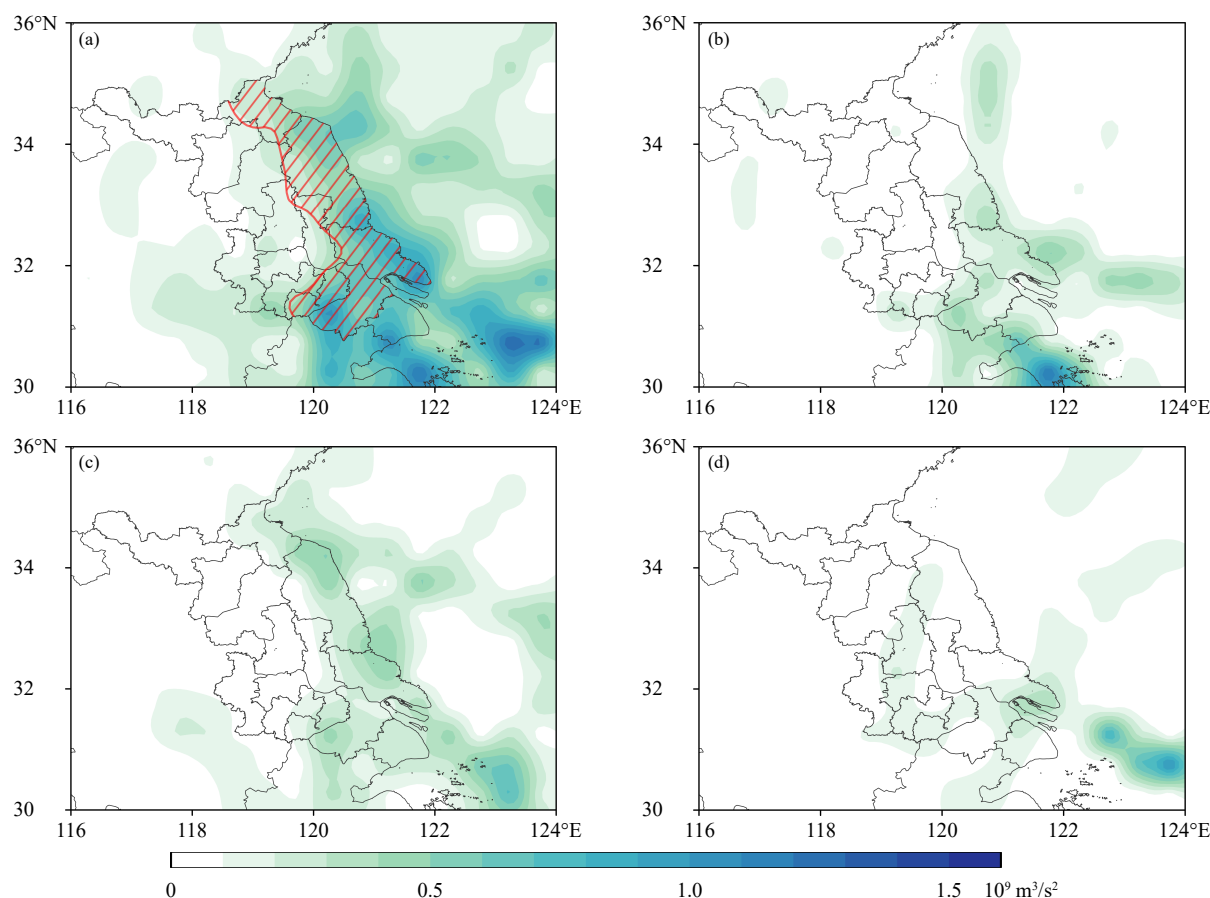


图 11 1949—2021 年穿过江苏 TC 的潜在破坏力 (a) 及其 7—9 月 (b—d) 空间分布 (色阶; 江苏区域内红色斜线部分表示 TC 平均强度达热带风暴等级及以上)

Fig. 11 Spatial distributions of the potential destructiveness (shaded) of TCs crossing Jiangsu province (a) and TCs crossing Jiangsu province in July—September (b—d) from 1949 to 2021 (red line stripe area in Jiangsu province denotes the average TC intensity in this area reaches at least tropical storm intensity)

中纬度西风气流的不同配置形态是影响 TC 以 4 类不同路径穿过江苏的主要原因。

(4) TC 主要于 7—9 月进入和离开江苏, 占穿过江苏 TC 总数的 95.5%, 其中 8 月最多, 9 月次之。TC 从江苏东南部进入的频次最多, 从江苏西部进入频次稍低, 从江苏东北部进入的概率很小。TC 从江苏东部沿海离开的频次最多, 其次是江苏淮北北部地区, 从苏南和江淮之间西部离开的频次较少。西太副高和季风环流等大尺度系统的季节性调整, 使得 TC 进入和离开江苏的位置随月份分别发生北上-南落和西进-东退的分布变化。

(5) 江苏区域 TC 路径频率总体上表现为由江苏东南部向西北方向减少的分布特征, 其中东南部频率最高, 其次是沿淮地区, TC 平均移动方向以偏北或北偏东为主, 路径频率和移速矢量的空间分布

存在明显的月际变化。

(6) 1949—2021 年穿过江苏 TC 的登陆强度和江苏境内平均强度均显著增长, 使江苏区域 TC 潜在破坏力 (JS-PDI) 呈显著上升趋势。JS-PDI 存在明显月际变化, 其中 8 月 JS-PDI 明显高于其他月份, 7 月穿过江苏 TC 频数略少于 9 月, 但 7 月 JS-PDI 约为 9 月的 1.6 倍。JS-PDI 大值区主要分布于沿海区域和苏南东部, 与江苏区域 TC 平均强度大值区分布较为一致, 同时 JS-PDI 大值中心与江苏区域 TC 路径频率大值中心存在较好的对应关系。

本研究得到的穿过江苏 TC 活动、环流及潜在破坏力特征, 有助于进一步加深 TC 对江苏影响的认识, 虽然 TC 穿过江苏时强度多数已减弱或变性为温带气旋, 但对江苏造成的影响不容忽视(陈联

寿等, 1979), 1949 年以来 JS-PDI 呈显著上升趋势, 故后续工作中将对江苏 TC 风雨分布及影响机制进行更深入的研究。

致谢: 感谢江苏省气象局“海洋天气预报技术”培育团队在研究过程中的帮助和支持。

参考文献

- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论. 北京: 科学出版社, 491pp. Chen L S, Ding Y H. 1979. An Introduction to Typhoons over the Western North Pacific. Beijing: Science Press, 491pp (in Chinese)
- 陈燕, 张宁. 2019. 江苏沿海近地层风阵性及台风对其影响. *应用气象学报*, 30(2): 177-190. Chen Y, Zhang N. 2019. The wind turbulence of the near-surface layer of Jiangsu coastal area and its response to typhoon. *J Appl Meteor Sci*, 30(2): 177-190 (in Chinese)
- 丛春华, 陈联寿, 雷小途等. 2011. 台风远距离暴雨的研究进展. *热带气象学报*, 27(2): 264-270. Cong C H, Chen L S, Lei X T, et al. 2011. An overview on the study of tropical cyclone remote rainfall. *J Trop Meteor*, 27(2): 264-270 (in Chinese)
- 丁治英, 陈久康. 1996. 台风中- α 尺度重力惯性波的发展与暴雨增幅. *热带气象学报*, 12(4): 333-340. Ding Z Y, Chen J K. 1996. The relation between the development of meso- α scale internal inertial gravity wave and the enhancement of rainstorm. *J Trop Meteor*, 12(4): 333-340 (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. *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. *Acta Meteor Sinica*, 72(5): 969-986 (in Chinese)
- 高清清, 曹兵, 高鑫鑫等. 2014. 南通沿海台风风暴潮分析及其经验预报初探. *海洋预报*, 31(1): 29-35. Gao Q Q, Cao B, Gao X X, et al. 2014. Analysis of the typhoon storm surge in the Nantong coastal zone and the forecasting formulas. *Mar Forecasts*, 31(1): 29-35 (in Chinese)
- 何立富, 尹洁, 陈涛等. 2006. 0509 号台风麦莎的结构与外围暴雨分布特征. *气象*, 32(3): 93-100. He L F, Yin J, Chen T, et al. 2006. Analysis of structure and heavy rain of landing typhoon Maisha. *Meteor Mon*, 32(3): 93-100 (in Chinese)
- 何倩倩, 杨娟, 王卫远. 2015. 台风“达维”影响期间江苏海域台风浪研究. *海洋通报*, 34(5): 592-599. He Q Q, Yang J, Wang W Y. 2015. Study on the simulated typhoon waves off Jiangsu coast during typhoon DAMREY. *Mar Sci Bull*, 34(5): 592-599 (in Chinese)
- 蒋义芳, 尹东屏, 刘安宁等. 2011. 一次特大暴雨过程的多普勒天气雷达资料分析. *气象科学*, 31(3): 347-353. Jiang Y F, Yin D P, Liu A N, et al. 2011. Analysis on Doppler weather radar data of an extraordinarily heavy rainfall. *J Meteor Sci*, 31(3): 347-353 (in Chinese)
- 蒋义芳, 李超, 曹璐等. 2013. 热带低压倒槽引发江苏东北部大暴雨过程分析. *气象科学*, 33(6): 671-677. Jiang Y F, Li C, Cao L, et al. 2013. Analysis on heavy rainfall event triggered by inverted typhoon trough in the northeast region of Jiangsu province. *J Meteor Sci*, 33(6): 671-677 (in Chinese)
- 雷小途, 陈佩燕, 杨玉华等. 2009. 中国台风灾情特征及其灾害客观评估方法. *气象学报*, 67(5): 875-883. Lei X T, Chen P Y, Yang Y H, et al. 2009. Characters and objective assessment of disasters caused by typhoons in China. *Acta Meteor Sinica*, 67(5): 875-883 (in Chinese)
- 李英, 陈联寿, 徐祥德. 2004. 登陆热带气旋维持的次天气尺度环流特征. *气象学报*, 62(3): 257-268. Li Y, Chen L S, Xu X D. 2004. The characteristics of sub-synoptic scale circulation of tropical cyclones sustaining over land. *Acta Meteor Sinica*, 62(3): 257-268 (in Chinese)
- 刘佳, 沈新勇, 张大林等. 2013. 台风“麦莎”的强度对台风前部飑线发展过程影响的研究. *大气科学*, 37(5): 1025-1037. Liu J, Shen X Y, Zhang D L, et al. 2013. Impact of typhoon intensity on the development of a pre-tropical cyclone squall line. *Chinese J Atmos Sci*, 37(5): 1025-1037 (in Chinese)
- 刘金芳, 郝培章, 俞慕耕等. 2002. 东南沿海台风风暴潮特点及其变化规律. *海洋预报*, 19(1): 81-88. Liu J F, Hao P Z, Yu M G, et al. 2002. Feature and varied rule of typhoon storm surge along the coast of South East China Sea. *Mar Forecasts*, 19(1): 81-88 (in Chinese)
- 陆逸, 朱伟军, 任福民等. 2016. 1980—2014 年中国台风大风和台风极端大风的变化. *气候变化研究进展*, 12(5): 413-421. Lu Y, Zhu W J, Ren F M, et al. 2016. Changes of tropical cyclone high winds and extreme winds during 1980—2014 over China. *Adv Climate Change Res*, 12(5): 413-421 (in Chinese)
- 孟智勇, 徐祥德, 陈联寿. 2002. 9406 号台风与中纬度系统相互作用的中尺度特征. *气象学报*, 60(1): 31-39. Meng Z Y, Xu X D, Chen L S. 2002. Mesoscale characteristics of the interaction between TC Tim (9406) and mid-latitude circulation. *Acta Meteor Sinica*, 60(1): 31-39 (in Chinese)
- 钮学新, 董加斌, 杜惠良. 2005. 华东地区台风降水及影响降水因素的气候分析. *应用气象学报*, 16(3): 402-407. Niu X X, Dong J B, Du H L. 2005. Climatic analysis on typhoon rainfall of East China and affecting factors of the precipitation. *J Appl Meteor Sci*, 16(3): 402-407 (in Chinese)
- 潘威, 王美苏, 满志敏等. 2012. 1644—1911 年影响华东沿海的台风发生频率重建. *长江流域资源与环境*, 21(2): 237-241. Pan W, Wang M S, Man Z M, et al. 2012. Reconstruction of the affecting East China typhoon frequency, 1644—1911 AD. *Resour Environ Yangtze Basin*, 21(2): 237-241 (in Chinese)
- 濮梅娟, 沈树勤, 曾明剑等. 2002. 地面中- β 尺度强锋区激发的特大暴雨过程分析. *气象科学*, 22(4): 450-460. Pu M J, Shen S Q, Zeng M J, et al. 2002. Analysis on a course of storm rainfall caused by strong meso- β scale front on surface. *Scientia Meteor Sinica*, 22(4): 450-460 (in Chinese)
- 沈树勤. 1990. 台风前部龙卷风的一般特征及其萌发条件的初步分析. *气象*, 16(1): 11-15. Shen S Q. 1990. Analysis of the general characteristics and genesis conditions of tornado in front of typhoon. *Meteor Mon*, 16(1): 11-15 (in Chinese)
- 沈树勤, 曾明剑, 吴海英. 2001. 特大暴雨的中- β 尺度系统研究. *气象*, 27(12): 33-37. Shen S Q, Zeng M J, Wu H Y. 2001. A study on meso- β scale system during an excessive heavy rain. *Meteor Mon*, 27(12): 33-37

- (in Chinese)
- 谭家辉, 潘毅, 于普兵等. 2022. 江苏沿海台风暴潮过程中的波浪增水分布研究. *海洋预报*, 39(1): 48-55. Tan J H, Pan Y, Yu P B, et al. 2022. Study on the distribution of wave-induced setup along the coast of Jiangsu province during typhoon processes. *Mar Forecasts*, 39(1): 48-55 (in Chinese)
- 陶祖钰, 田佰军, 黄伟. 1994. 9216 号台风登陆后的不对称结构和暴雨. *热带气象学报*, 10(1): 69-77. Tao Z Y, Tian B J, Huang W. 1994. Asymmetry structure and torrential rain of landing Typhoon 9216. *J Trop Meteor*, 10(1): 69-77 (in Chinese)
- 田辉, 马开玉, 林振山. 1999. 华南、华东沿海登陆台风暴雨和大风的分析. *应用气象学报*, 10(S1): 149-153. Tian H, Ma K Y, Lin Z S. 1999. Analysis of the heavy rain and strong wind of landing typhoon on the coasts of South and East China. *J Appl Meteor Sci*, 10(S1): 149-153 (in Chinese)
- 王美苏. 2010. 清代入境中国东部沿海台风事件初步重建[D]. 上海: 复旦大学. Wang M S. 2010. A reconstruction of historical typhoon event invading the coast of East China from historical documentary: 1644-1911[D]. Shanghai: Fudan University (in Chinese)
- 魏章进, 马华铃, 唐丹玲. 2017. 基于改进熵值法的台风灾害风险趋势评估. *灾害学*, 32(3): 7-11. Wei Z J, Ma H L, Tang D L. 2017. Trend assessment of typhoon disasters based on the improved entropy method. *J Catastrophol*, 32(3): 7-11 (in Chinese)
- 吴海英, 曾明剑, 王卫芳等. 2015. 1211 号“海葵”台风登陆后引发两段大暴雨过程的对比分析. *大气科学学报*, 38(5): 670-677. Wu H Y, Zeng M J, Wang W F, et al. 2015. Comparative analysis on two rainstorm processes caused by typhoon Haikui (1211) after landfall. *Trans Atmos Sci*, 38(5): 670-677 (in Chinese)
- 于华. 2014. 气候变暖背景下风场对江苏近海海平面的影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学. Yu H. 2014. The impacts of wind fields on sea level at Jiangsu off shore under the climate warming conditions[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese)
- 俞亮亮, 陆培东, 陈可锋. 2013. “梅花”台风期间江苏辐射沙洲海域风暴潮增水研究. *海洋工程*, 31(3): 63-69. Yu L L, Lu P D, Chen K F. 2013. Research on storm surge during typhoon "Muifa" in radial sand ridges off Jiangsu coast. *Ocean Eng*, 31(3): 63-69 (in Chinese)
- 张雪蓉, 王丽芳, 王博妮等. 2021. 干冷空气对江苏热带低压倒槽大暴雨影响的数值试验. *气象*, 47(7): 791-804. Zhang X R, Wang L F, Wang B N, et al. 2021. Numerical study on the effect of cold dry air on a rainstorm caused by tropical depression inverted trough in Jiangsu province. *Meteor Mon*, 47(7): 791-804 (in Chinese)
- 张雪蓉, 王丽芳, 王博妮等. 2022. 台风远距离影响下江苏两次梅雨期暴雨过程对比分析. *气象*, 48(12): 1550-1564. Zhang X R, Wang L F, Wang B N, et al. 2022. Comparison of two rainstorms related to distant typhoons affecting Jiangsu province during Meiyu period. *Meteor Mon*, 48(12): 1550-1564 (in Chinese)
- 朱洪岩, 陈联寿, 徐祥德. 2000. 中低纬度环流系统的相互作用及其暴雨特征的模拟研究. *大气科学*, 24(5): 669-675. Zhu H Y, Chen L S, Xu X D. 2000. A numerical study of the interactions between typhoon and mid-latitude circulation and its rainfall characteristics. *Chinese J Atmos Sci*, 24(5): 669-675 (in Chinese)
- Chan J C L, Gray W M, Kidder S Q. 1980. Forecasting tropical cyclone turning motion from surrounding wind and temperature fields. *Mon Wea Rev*, 108(6): 778-792
- Chen L S, Li Y, Cheng Z Q. 2010. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones. *Adv Atmos Sci*, 27(5): 967-976
- Chen T, Chen S M, Zhou M S, et al. 2022. Northward shift in landfall locations of tropical cyclones over the western North Pacific during the last four decades. *Adv Atmos Sci*, 39(2): 304-319
- Chen X Y, Wu L G, Zhang J Y. 2011. Increasing duration of tropical cyclones over China. *Geophys Res Lett*, 38(2): L02708
- Cheung H M, Ho C H, Chang M, et al. 2021. Development of a track-pattern-based medium-range tropical cyclone forecasting system for the western North Pacific. *Wea Forecasting*, 36(4): 1505-1518
- Emanuel K. 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436(7051): 686-688
- Guo Y P, Tan Z M. 2022. Influence of track change on the inconsistent poleward migration of typhoon activity. *J Geophys Res: Atmos*, 127(14): e2022JD036640
- Hodanish S, Gray W M. 1993. An observational analysis of tropical cyclone recurvature. *Mon Wea Rev*, 121(10): 2665-2689
- Holland G, Bruyère C L. 2014. Recent intense hurricane response to global climate change. *Climate Dyn*, 42(3): 617-627
- Kang N Y, Elsner J B. 2012. Consensus on climate trends in western North Pacific tropical cyclones. *J Climate*, 25(21): 7564-7573
- Kishtawal C M, Jaiswal N, Singh R, et al. 2012. Tropical cyclone intensification trends during satellite era (1986-2010). *Geophys Res Lett*, 39(10): L10810
- Lander M A. 1994. Description of a monsoon gyre and its effects on the tropical cyclones in the western North Pacific during August 1991. *Wea Forecasting*, 9(4): 640-654
- Lander M A. 1996. Specific tropical cyclone track types and unusual tropical cyclone motions associated with a reverse-oriented monsoon trough in the western North Pacific. *Wea Forecasting*, 11(2): 179-186
- Li R C Y, Zhou W, Shun C M, et al. 2017. Change in destructiveness of landfalling tropical cyclones over China in recent decades. *J Climate*, 30(9): 3367-3379
- Lu X Q, Yu H, Ying M, et al. 2021. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration. *Adv Atmos Sci*, 38(4): 690-699
- Mei W, Xie S P. 2016. Intensification of landfalling typhoons over the Northwest Pacific since the late 1970s. *Nature Geosci*, 9(10): 753-757
- Meng Z Y, Zhang Y J. 2012. On the squall lines preceding landfalling tropical cyclones in China. *Mon Wea Rev*, 140(2): 445-470
- Park D S R, Ho C H, Kim J H. 2014. Growing threat of intense tropical cyclones to East Asia over the period 1977-2010. *Environ Res Lett*, 9(1): 014008

- Wang S, Toumi R. 2022. More tropical cyclones are striking coasts with major intensities at landfall. *Sci Rep*, 12(1): 5236
- Wu H Y, Chen H S, Zeng M J, et al. 2015. Analysis of the cold air effect on an extreme precipitation event triggered by an inverted trough of typhoon Haikui (1211). *J Trop Meteor*, 21(3): 211-221
- Xu J M, Gray W M. 1982. Environmental Circulations Associated with Tropical Cyclones Experiencing Fast, Slow and Looping Motion. Fort Collins: Department of Atmospheric Science, Colorado State University, 273pp
- Yao X P, Zhao D J, Li Y. 2020. Autumn tropical cyclones over the western North Pacific during 1949–2016: A statistical study. *J Meteor Res*, 34(1): 150-162
- Ying M, Zhang W, Yu H, et al. 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database. *J Atmos Oceanic Technol*, 31(2): 287-301
- Zhang X R, Li Y, Zhang D L, et al. 2018. A 65-yr climatology of unusual tracks of tropical cyclones in the vicinity of China's coastal waters during 1949–2013. *J Appl Meteor Climatol*, 57(1): 155-170
- Zhao H K, Wu L G. 2014a. Inter-decadal shift of the prevailing tropical cyclone tracks over the western North Pacific and its mechanism study. *Meteor Atmos Phys*, 125(1): 89-101
- Zhao H K, Wu L G, Wang R F. 2014b. Decadal variations of intense tropical cyclones over the western North Pacific during 1948–2010. *Adv Atmos Sci*, 31(1): 57-65

欢迎订阅 2026 年度《气象学报》

《气象学报》中文版创刊于 1925 年，是由中国气象局主管，中国气象学会主办的全国性大气科学学术期刊，主要刊载有关大气科学及其交叉科学研究的具有创新性的论文；国内外大气科学发展动态的综合评述；新观点、新理论、新技术、新方法的介绍；研究工作简报及重要学术活动报道；优秀大气科学专著的评介以及有关本刊论文的学术讨论等。

《气象学报》中文版 2003 年和 2005 年连续两次荣获中华人民共和国新闻出版总署颁发的第二届、第三届“国家期刊奖百种重点学术期刊”奖；2013、2021 年获“中国出版政府奖期刊奖提名奖”；2013、2015、2017 年入选国家新闻出版广电总局“百强报刊”；2007—2011 年和 2015—2017 年获得中国科学技术协会精品科技期刊工程项目的资助，2008、2011、2014、2017、2020、2023 年被评为“中国精品科技期刊”；2024 年入选中国科技期刊卓越行动计划二期“中文梯队期刊”；2003—2007、2009、2016、2019、2020、2022、2023 年被中国科学技术信息研究所评为“百种中国杰出学术期刊”；2012、2013、2014、2015 年获评“中国最具国际影响力学术期刊”；2016、2017、2018、2019、2020、2021、2024 年获评“中国国际影响力优秀学术期刊”。

《气象学报》为大气科学研究提供了学术交流平台，一直致力于推动中国大气科学基础研究和理论研究的发展，服务于中国气象现代化建设事业。作者和读者对象主要为从事气象、海洋、地理、环境、地球物理、天文、空间及生态等学科的科研人员、高校师生。

《气象学报》中文版为双月刊，国内外公开发行。

2026 年全年共 6 期，定价 240 元/年。

邮发代号：2-368（国内） BM329（国际）

通信地址：北京市中关村南大街 46 号 中国气象学会《气象学报》编辑部

邮政编码：100081

联系电话：010-68406942，68408571（传真）

邮 箱：cmsqxxb@263.net, qxxb@cms1924.org

期刊主页：<http://qxxb.cmsjournal.net>

开户银行：北京建行白石桥支行

户 名：中国气象学会

帐 号：11001028600059261046