地球环境学报
JEE
Journal of Earth Environment
Vol.12 No.1 | Feb. 2021
DOI: 10.7515/JEE202016
研究论文
ARTICLE

我国东部沿海热带气旋演化特征研究

张广迎[1,2]，方克艳[1,2]，陈　平[1,2]，白毛伟[1,2]，赵　正[1,2]
1. 福建师范大学　福建省湿润亚热带山地生态重点实验室——省部共建国家重点实验室培育基地，福州　350007
2. 福建师范大学　地理科学学院，福州　350007

摘　要：我国是遭受热带气旋灾害最为严重的国家之一。其年际年代际演化特征仍不清晰。采用中国气象局公布的 1949—2018 年的最佳路径数据集、登陆热带气旋名录以及 HadlSST 数据，探讨近 70 a 以来我国东部沿海热带气旋的时空演化特征及其与海表温度变化的内在关联。结果表明：（1）70 a 间，热带气旋生成个数以及登陆我国东部沿海地区的个数略有波动，但超强热带气旋个数生成以及登陆我国的个数呈现明显增加趋势；登陆我国东部沿海地区的热带气旋大多生成于 7、8、9 月份，但 4 月以及 11 月也存在热带气旋生成并登陆现象。（2）登陆我国东部沿海地区的热带气旋主要生成于西北太平洋海域（432 个）、南海海域（199 个）和东海海域（28 个），且主要在我国广东（220 个）、海南（153 个）、台湾（146 个）、福建（47 个）登陆。（3）热带气旋生成及登陆我国气旋与全球海表温度具有高度相关性；与西太平洋海温呈正相关，与东太平洋与印度洋海温呈负相关。

关键词：热带气旋；东部沿海；演化特征；海表温度

A study on the evolution characteristics of tropical cyclones in the eastern coast of China

ZHANG Guangying[1,2], FANG Keyan[1,2], CHEN Ping[1,2], BAI Maowei[1,2], ZHAO Zheng[1,2]
1. State Key Laboratory of Subtropical Mountain Ecology (Funded by Ministry of Science and Technology and Fujian Province), Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China
2. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: ***Background, aim, and scope*** Tropical cyclones are strong warm low-pressure vortex systems formed on the surface of tropical or subtropical oceans, and distributed in the western Pacific and its adjacent waters (typhoons), the Atlantic and northeastern Pacific (hurricanes), and the Indian and South Pacific (cyclones). In its formation, development, and activities, it is often accompanied by strong winds, heavy rain, and huge waves. It is one of the most destructive natural disasters in the world. The Northwest Pacific is the only sea area in the world where tropical cyclones are generated all year round. Being close to the Northwest Pacific, China is one of the

收稿日期：2020-06-30；**录用日期：**2020-11-02；**网络出版：**2020-11-13
Received Date: 2020-06-30; **Accepted Date:** 2020-11-02; **Online first:** 2020-11-13
基金项目：国家优秀青年基金项目（41822101）；中组部“万人计划”“青年拔尖人才”项目；国家自然科学基金面上项目（41471172）；福建省“青年拔尖创新人才计划”项目
Foundation Item: National Excellent Young Scientists Fund (41822101); “Young Top Talents” Project of the “Ten Thousand Talents Program” of the Organization Department of the Central Committee of the CPC; General Projects of National Natural Science Foundation of China (41471172); Fujian “Young Top Innovative Talents Program”
通信作者：方克艳，E-mail: kfang@fjnu.edu.cn
Corresponding Author: FANG Keyan, E-mail: kfang@fjnu.edu.cn
引用格式：张广迎，方克艳，陈　平，等. 2021. 我国东部沿海热带气旋演化特征研究 [J]. *地球环境学报*, 12(1): 84–92.
Citation: Zhang G Y, Fang K Y, Chen P, et al. 2021. A study on the evolution characteristics of tropical cyclones in the eastern coast of China [J]. *Journal of Earth Environment*, 12(1): 84–92.

countries most seriously affected by tropical cyclones. At present, with the rapid social and economic development, the losses caused by tropical cyclones are also increasing rapidly. Therefore, the accuracy of the tropical cyclone activity path and its intensity forecast accuracy is extremely critical to reduce the disaster caused by typhoons. Based on the existing tropical cyclone records in China, this paper discusses the evolution characteristics of tropical cyclones along the eastern coast of China in the past 70 years, with a view to providing scientific reference value for future tropical cyclone monitoring and forecasting, and thus reducing the losses caused by tropical cyclone disasters. ***Materials and methods*** This paper employs the best path data set from 1949 to 2018 published by China Meteorological Administration, the Landing Tropical Cyclone List and the Hardley Center HadlSST data set published on the UK Met Office Ocean Database (MDB) website. The statistics of the Pacific Ocean and the tropical cyclones that landed in China were analyzed to discuss the spatio-temporal evolution characteristics of tropical cyclones along the eastern coast of China (1949—2018) and their internal correlations with sea surface temperature changes. ***Results*** In terms of time, a total of 2355 tropical cyclones (including sub-centers) were generated during the 70 years, with an average of 33 generated each year. From the perspective of space, the tropical cyclones generated in East China Sea mainly landed in east China region, of which, those in South China Sea account for 43.56% and those in the Northwest Pacific Ocean for 55.67%. Tropical cyclones that landed in the northeast China were mainly generated in the Northwest Pacific Ocean. ***Discussion*** Tropical cyclone activities and their changes have received great attention from domestic meteorologists who have conducted studies from different angles such as the formation, movement, and effects of tropical cyclones. However, these efforts are basically directed to the meteorology and dynamics of tropical cyclones. The current research on the impact of sea surface temperature on tropical cyclones mainly focuses on the case of tropical cyclones, the internal relationship between sea surface temperature and tropical cyclones at the annual scale, the changes in regional sea surface temperature and tropical cyclone evolution characteristics at the 70-year long scale. Relevance studies are rarely reported. ***Conclusions*** (1) The number of tropical cyclones and their landing times in the eastern coastal areas of China have fluctuated slightly over the 70 years, but the number of super-strong tropical cyclones and their landing times in China showed a significant increase; tropical cyclones landing in the eastern coastal areas of China mostly occurred in July, August and September, but there were also tropical cyclone formation and land phenomenon in April and November. (2) Tropical cyclones that landed on the eastern coastal areas of China were mainly generated in the Northwest Pacific Ocean (432), East China Sea (28) and South China Sea (199), and landed mainly in Guangdong (220), Hainan (153), Taiwan (146) and Fujian (47). (3) The occurrence and landfall of tropical cyclones in China are highly correlated with global sea surface temperature; they are positively correlated with the western Pacific Ocean while negatively correlated with the East Pacific and Indian Ocean. ***Recommendations and perspectives*** This paper adopts the China Meteorological Administration (CMA) published in 1949—2018 of the best path data sets and the tropical cyclone name list and HadlSST data to study China's eastern coastal space-time evolution characteristics of tropical cyclone and its inner relation of sea surface temperature changes in the past 70 years. With more meteorological data (air pressure, wind speed, etc.), a more comprehensive comparison research can be carried out to reach more accurate conclusions.

Key words: tropical cyclone; east coast; evolutionary characteristics; sea surface temperature (SST)

热带气旋主要生成在海表温度（sea surface temperature，SST）26℃以上的洋面上（Gray，1998），是危害性巨大的自然灾害之一，严重威胁着人民的财产与人身安全，造成的经济损失随着经济的快速发展逐年增加（魏章进等，2012；Wu et al，2020）。每年的夏秋两季，我国东部沿海地区在每年的夏秋两季都会或多或少受到热带气旋的影响，伴随热带气旋而来的是大量的瞬时降水、狂风、风暴潮天气。大量的瞬时降水常常会诱发一系列的次生灾害，如滑坡、泥石流、洪

DOI: 10.7515/JEE202016

涝灾害等，同时也给沿海地区带来大量的淡水资源；为热带、亚热带地区如春城昆明、四季长青的广州等地驱散热量；同时热带气旋过境时，使得海洋翻腾，海底富含营养的物质抵达海洋表层，促进沿海渔业的发展（叶海军等，2014；吴祖立等，2018）。我国经济重心位于东部沿海地区，深受西北太平洋影响，因此探索登陆我国东部沿海的热带气旋演化特征以及强度预测，对减轻其带来的灾害极为关键。

西北太平洋是全球热带气旋生成最多的海域，其中高达半数影响我国，且每年登陆我国东部沿海地区的热带气旋大约有 7 个左右，热带气旋活动及其变化受到国内气象工作者的高度关注，从热带气旋的生成、运动及其影响等不同角度进行了研究（梁军等，2020；杨舒楠和端义宏，2020；朱义青和王庆华，2020），这些工作基本针对热带气旋个例的天气学和动力学展开。海表温度是热带气旋生成及发展的重要热力条件，海表面温度作为大气外强迫因子之一，其异常将改变海洋向大气输送的水汽、潜热通量等，致使局地对流活动和高低层流场改变，并通过大气遥相关作用进而影响全球的大气环流，导致气候异常（陈丽娟等，2005）。许多国外学者早在 20 世纪 60 年代就利用观测数据研究了 SST 对热带气旋的响应，近年来，对海表温度与热带气旋变化关系的研究取得了新的进展（Ren et al，2014；Katsube and Inatsu，2016；宋攀等，2017）。IPCC（2013）第五次评估报告（AR5）指出气候变暖是毋庸置疑的，1880—2012 年全球海陆表面平均温度升高了 0.85℃。全球变暖引起的海表温度上升会显著增强未来热带气旋的强度（Holland，1997）；刘贝等（2019）以南海为研究区域，建立台风强化值与 SST 之间的回归模型，平均而言，平均 SST 每增加 1℃，台风强度强化度增加 12.5%；Katsube and Inatsu（2016）研究发现，西北太平洋海表温度增加，热带气旋加速移动。雷小途等（2009）研究了全球变暖对热带气旋活动的影响，发现 1970 年以来，超强热带气旋比例明显增大。目前关于海表温度对热带气旋影响的研究主要针对热带气旋个案（张守文等，2017；Zhang et al，2020）或者年内尺度下海表温度与热带气旋的内在联系，而对较长时间尺度下，区域海表温度变化与热带气旋演化特征的相关性研究鲜有报道。

本文利用 1949—2018 年中国气象局热带气旋最佳路径数据集资料、登陆热带气旋资料，分析了我国近 70 a 东部沿海地区热带气旋的演化特征，并结合英国气象局所公布的海温数据，将其与西北太平洋海温做相关性检测，以期发现近 70 a 我国东部沿海地区的热带气旋年际年代际演化特征，以及西太平洋海表温度与登陆我国热带气旋的相关性，并对今后的热带气旋监测和预报工作提供科学的参考价值，从而减少热带气旋灾害带来的损失。

1 资料与方法

为研究影响我国东部沿海地区的热带气旋演化特征以及与海表温度的相关关系，根据所获取资料中登陆我国热带气旋的生成地范围，确定热带气旋数据空间范围为 4°—30°N、105°—175°E，时间尺度为 1949—2018 年。本文所涉及的热带气旋资料全部来自于中国气象局热带气旋资料中心（https://www.typhoon.org.cn）所发布的最佳路径数据集与登陆热带气旋资料（Ying et al，2014）。其中最佳路径数据集包含 1949—2018 年生成于西太平洋（南海，赤道以北，东经 180° 以西）海域完整的热带气旋路径、每隔 6 h 的中心位置、中心最低气压（hPa）、2 min 平均近中心最大风速（MSW，$m \cdot s^{-1}$）、编号、名称等资料，中心位置以地理坐标（经度和纬度）给出，精确到 0.1°。近年来，随着全球数值模式和区域模式的发展，我国热带气旋预报时效逐步延长，预报准确率逐步提高（Duan，2014）。

登陆热带气旋资料是指登陆我国的热带气旋。沿海岛屿除台湾、舟山群岛、香港和海南岛以外，都不作为登陆地点处理。其中有部分热带气旋于东北三省登陆我国，资料中并未给出，因此本文结合最佳路径数据集，基于 ArcGIS 10.5 平台，将最佳路径数据集每隔 6 h 中心位置进行数字化，通过与我国矢量边界对比，补充登陆热带气旋资料中所未列出的登陆地点，并对以上热带气旋数据进行标准化处理与统计。

本文热带气旋等级划分，参考中国气象局所公布资料，即根据《热带气旋等级》国家标准（GB/T 19201—2006），将热带气旋登陆时刻的强度分为：TD（热带低压）、TS（热带风暴）、STS（强热带风暴）、TY（热带气旋）、STY（强

DOI: 10.7515/JEE202016

热带气旋）、SuperTY（超强热带气旋），为表述方便，本文将 TD、TS、STS、TY 统称热带气旋。

2　热带气旋的时间演化特征

2.1　年际变化

热带气旋在我国东部沿海以及西北太平洋海域活动频繁，从图 1 中可以看出，1967 年、1970 年左右在西北太平洋上生成的热带气旋个数出现峰值，生成频数在 20 世纪 50 年代末期至 60 年代初期呈现明显的上升趋势，60 年代末期至 70 年代末呈现下降趋势，此后又趋于平均。

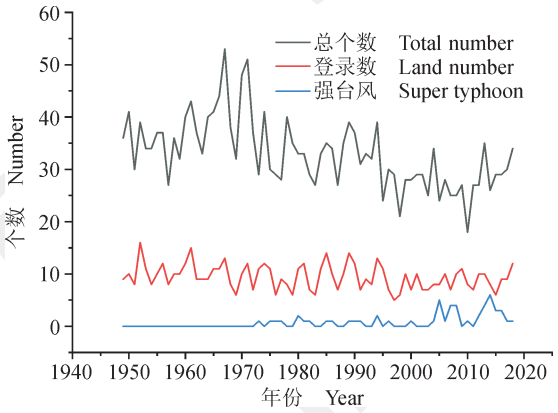


图 1　1949—2018 年热带气旋个数统计
Fig. 1　Statistics of the number of tropical cyclones from 1949 to 2018

对 1949—2018 年共 70 a 的热带气旋资料进行统计，研究表明：70 a 内西北太平洋及我国沿海海域共生成 2355 个热带气旋（包含副中心），平均每年生成 33 个，年生成频数最大值出现在 1967 年，生成 55 个，生成频数最小值出现在 2010 年，为 18 个。但值得注意的是，近 10 a 强热带气旋（STY、SuperTY）个数在增加。其中有 659 个热带气旋登陆我国东部沿海地区，占生成总数的 28.52%。平均每年有 9 个左右登陆我国，其中 1997 年为此阶段最少的年份，登陆 5 个热带气旋。1952 年登陆 16 个热带气旋，是 70 a 来登陆个数最多的年份。

影响我国东部沿海地区的热带气旋在穿过菲律宾吕宋岛、我国台湾岛、日本群岛等岛屿地形时，热带气旋与地形相互作用，分裂产生新的具有闭合环流结构、低压中心的副中心（鲍旭炜等，2013）。统计表明，70 a 间共生成 53 个副中心，1998 年至今没有副中心生成（图 2）。由于发展成熟的副中心往往具备“暖心”结构（Lee et al，2008），与热带气旋内核非常相似，致使其在后续发展过程中，出现“双中心”或者“多中心”结构，甚至会出现副中心替代原有热带气旋中心的现象，此情况会对沿海地区热带气旋预报、强度评估和降水预报造成一定困难（阎敬华和董克勤，1997）。

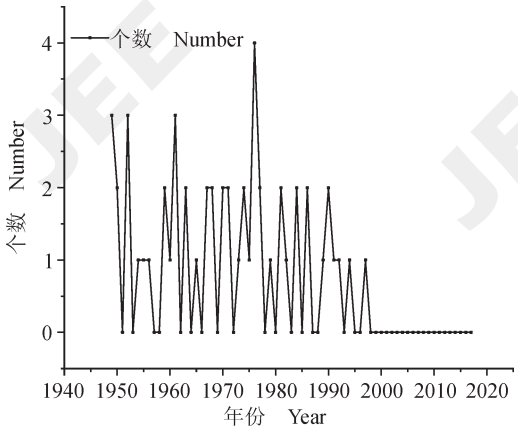


图 2　1949—2018 年热带气旋副中心个数统计
Fig. 2　Statistics of the number of tropical cyclone centers from 1949 to 2018

2.2　年代际变化

为进一步明确我国东部沿海地区热带气旋的演化趋势，将近 70 a 以来登陆我国的热带气旋划分为 7 个阶段进行统计，具体结果如表 1 所示。结果表明，登陆我国的热带气旋频次年代际变化较为明显。1959—1968 年期间登陆个数最多（106 个），占比达 16.08%。1999—2008 年登陆个数最少，占所有登陆个数的 12.75%。平均每 10 a 登陆 94 个左右，1949—1958 年、1959—1968 年登陆个数相对较多，但从近 20 a 登陆我国热带气旋个数来看，登陆个数略有减少趋势。

表 1　热带气旋登陆情况统计
Tab. 1　Statistics of tropical cyclone landings

阶段 Period	登陆个数 Number of landing tropical cyclones	登陆比例 Landing proportion /%
1949—1958	102	15.48
1959—1968	106	16.08
1969—1978	92	13.96
1979—1988	93	14.11
1989—1998	92	13.96
1999—2008	84	12.75
2009—2018	90	13.66

DOI: 10.7515/JEE202016

2.3 年内变化

通过对 1949—2018 年登陆热带气旋的生成月份频次统计发现，登陆我国东部沿海地区的热带气旋多生成于第三季度，占总数的 77.69%，1 月、2 月、3 月、12 月没有热带气旋登陆（图 3）。4 月、5 月、11 月也有少数热带气旋生成并登陆我国，4 月份生成并且登陆的 4 个热带气旋分别分布在 1971 年、1991 年、1999 年和 2008 年。

3 热带气旋的空间演化特征

3.1 生成地分布特征

为明确影响并登陆我国的热带气旋的地区分布以及占比情况，根据最佳路径数据集资料以及登陆热带气旋资料，基于 ArcGIS 10.5 平台将最佳路径数据进行可视化，本资料中，热带气旋生成地主要为南海海域、东海海域以及西北太平洋海域。本文所选取的东海海域空间范围为 22°30′N—33°06′N、117°06′36″E—131°E，南海海域空间范围为 4°N—22°30′N、105°E—123°E。

如图 4 所示，东海海域、南海海域、西北太平洋海域的生成点分别用紫色、绿色、粉色圆点标记。有部分热带气旋登陆后，受地形影响，分裂产生新的具有闭合环流结构、低压中心的副中心，将其剔除后，统计得到 2337 个热带气旋的生成点（图 5）。其中生成于西北太平洋海域的热带气旋个数最多，并且其登陆我国东部沿海地区的个数为 432 个，占比高达 65.55%；于东海海域、南海海域生成并登陆我国的热带气旋个数分别为 28 个、199 个，生成于东海海域并登陆我国的热带气旋最少（4.25%），30.20% 的热带气旋生成于我国南海海域（图 4）。

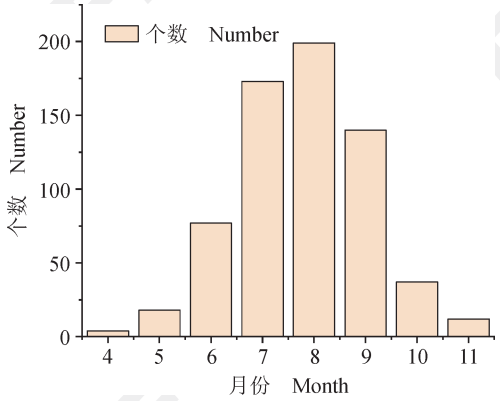
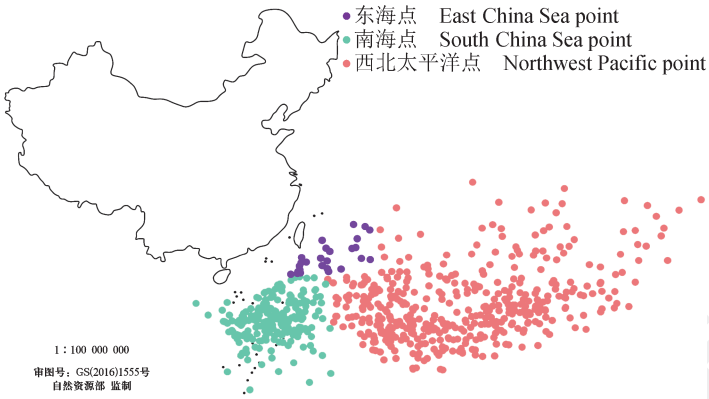


图 3 登陆热带气旋在各月份的分布情况

Fig. 3 Distribution of landing tropical cyclones in each month



生成地 Generating area	个数 Number	占比 Proportion/%
东海 East China Sea	28	4.25
南海 South China Sea	199	30.20
西北太平洋 Northwest Pacific	432	65.55

本图基于自然资源部标准地图服务网（http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/）下载的审图号为 GS(2016)1555 号的标准地图制作，底图无修改。

图 4 1949—2018 年登陆我国热带气旋生成地分布图

Fig. 4 Distribution map of tropical cyclones that landed in China from 1949 to 2018

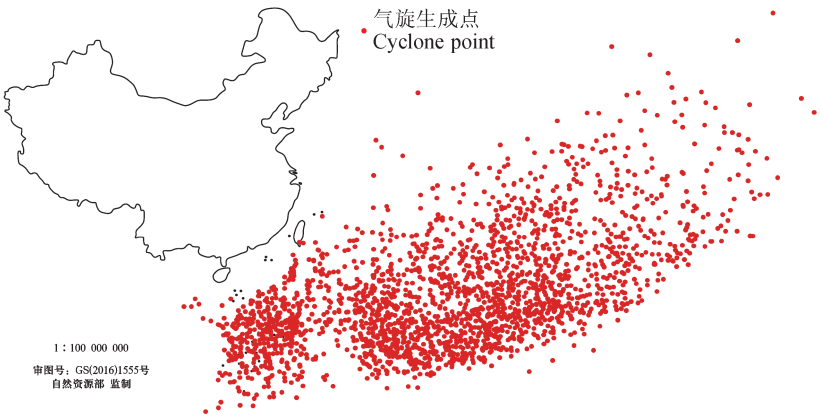
3.2 登陆地分布特征

热带气旋对我国东部沿海地区影响较大，过境时会造成一定的经济损失，为防御热带气旋带来灾害，需要充分了解其登陆地的变化，根据登陆热带气旋资料，对 1949—2018 年的热带气旋在我国登陆地点的次数进行统计，共统计 659 个热带气旋，共 865 次登陆，涉及 15 个登陆地区，其中存在热带气旋二次、三次、甚至四次登陆现象（表 2）。

如表 2 所示，一个热带气旋最多可四次登陆，且主要在我国广东、海南、台湾、福建等地登陆。在广东登陆的热带气旋个数最多，登陆次数高达 263 次（其中首次登陆的热带气旋个数为 220

DOI: 10.7515/JEE202016

个），占登陆总次数的 30.40%；热带气旋登陆海南的次数为 162 次，位居第二；热带气旋登陆天津、云南的次数较少，均为 1 次，且登陆天津的热带气旋为二次登陆。



本图基于自然资源部标准地图服务网（http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/）下载的审图号为 GS(2016)1555 号的标准地图制作，底图无修改。

图 5　1949—2018 年热带气旋生成地分布图
Fig. 5　Distribution of tropical cyclones from 1949 to 2018

表 2　70 a 间热带气旋登陆地区统计
Tab. 2　Statistics of areas where tropical cyclones landed in 70 years

地区 Area	一 First	二 Second	三 Third	四 Fourth	总计 Total	比例 Proportion/%
广东　Guangdong	220	35	8	0	263	30.40
海南　Hainan	153	7	2	0	162	18.73
台湾　Taiwan	146	3	0	0	149	17.23
福建　Fujian	47	79	1	1	128	14.80
浙江　Zhejiang	38	9	2	0	49	5.66
香港　Hong Kong	12	2	0	0	14	1.62
山东　Shandong	10	3	7	0	20	2.31
吉林　Jilin	9	0	0	0	9	1.04
辽宁　Liaoning	6	8	1	0	15	1.73
黑龙江　Heilongjiang	6	0	0	0	6	0.69
江苏　Jiangsu	5	2	0	0	7	0.81
上海　Shanghai	4	1	0	1	6	0.69
广西　Guangxi	2	26	7	0	35	4.05
云南　Yunnan	1	0	0	0	1	0.12
天津　Tianjin	0	1	0	0	1	0.12
总计　Total	659	176	28	2	865	100.00

热带气旋登陆后强度会减弱并消亡，如表 2 中所示，大多数首次登陆后逐渐消亡，但有部分存在二次、三次、甚至四次登陆的现象。值得注意的是，其中有 176 个热带气旋存在二次登陆现象，占总次数的 20.35%，福建省、广东省是二次登陆的高发地，原因为热带气旋穿过台湾省、海南省分别在福建省、广东省二次登陆。其中仅有 2 个热带气旋存在四次登陆现象。

为充分了解登陆我国的热带气旋特征，将上述登陆地划分为华东地区（福建、台湾、浙江、上海、江苏、山东）、华南地区（广东、广西、海南、香港、云南）、东北地区（黑龙江、吉林、辽宁），结合其生成海域，统计分析得到表 3。

根据表 3：生成于东海海域的热带气旋主要在华东地区登陆，由此可知东海海域生成的热带气旋西行登陆我国；登陆华南地区的热带气旋大部分生成于南海海域和西北太平洋海域，其中 43.56% 生成于南海海域，55.67% 生成于西北太平

DOI: 10.7515/JEE202016

洋海域，生成于南海海域的热带气旋北上登陆我国，生成于西北太平洋海域的热带气旋西行登陆我国；登陆东北地区的热带气旋主要生成于西北太平洋海域。

表 3 热带气旋登陆地与生成地统计
Tab. 3 Statistics of tropical cyclone landing and generating areas

登陆地区 Landing area	生成地 Generating area							
	东海海域 East China Sea		南海海域 South China Sea		西北太平洋海域 Northwest Pacific Ocean		合计 Total	
	个数 Number	比例 Proportion /%	个数 Number	比例 Proportion /%	个数 Number	比例 Proportion /%	个数 Number	比例 Proportion /%
华东 East China	24	85.71	30	15.08	196	45.37	250	37.94
华南 Southern China	3	10.71	169	84.92	216	50.00	388	58.88
东北 Northern China	1	3.57	0	0.00	20	4.63	21	3.19
合计 Total	28	4.25	199	30.20	432	65.55	659	100.00

4 热带气旋与全球海温的相关性分析

海表温度对热带气旋生成以及发展具有重要的意义，且海表温度对台风生成以及发展的影响是一个叠加的过程。

海温数据来自英国气象局（UK Met Office）海洋数据库（MDB）网站中公布的 Hardley 中心 HadlSST 数据集，该资料为 1987—2018 年的全球海表温度的月平均数据，空间分辨率为 1°。据此统计发现，登陆我国的热带气旋主要生成于 4—11 月，因此提取 1949—2018 年 4—11 月的海表温度数据，并对其取平均值。计算可得，70 a 间平均海表温度在 25.9—22.3℃，温差为 3.6℃，其中 1989 年 4—11 月平均海表温度最高，为 25.9℃，1955 年出现最低平均海表温度，为 22.3℃。

基于 KNMI Climate Explorer 数据平台，将热带气旋总数、登陆我国的热带气旋总数与全球海表温度分时段做相关性检测，发现热带气旋的生成不仅与当年其生成季的海表温度相关，并且与当年春季（1—3 月）海表温度相关性最高（图 6）。

在西太平洋海域，热带气旋生成个数及登陆我国的个数与其海表温度呈高度正相关，该海域海表温度上升会使气旋生成个数以及登陆我国东部沿海地区的气旋个数上升。由于受到厄尔尼诺 - 拉尼娜机制的影响，热带气旋生成及登陆我国的个数与东太平洋海域、印度洋海域海表温度呈高度负相关。表明全球海表温度是影响热带气旋生成以及登陆我国气旋个数的一个重要影响因素，其影响机制值得深入探讨。

5 结论

采用最佳路径数据集结合登陆热带气旋资料，统计整理出 70 a 间热带气旋的相关信息，并将其与热带气旋生成海域的海表温度做相关分析。结果表明：

（1）时间上，70 a 内共生成 2355 个热带气旋（包含副中心），平均每年生成 33 个；从热带气旋生成个数年代际看，1959—1968 年生成个数占比最大，高达 16.08%；其中有 659 个热带气旋登陆我国东部沿海地区，占生成总数的 28.52%，平均每年有 9 个左右登陆我国。登陆我国东部沿海地区的热带气旋多生成于第三季度，占总数的 77.69%；登陆我国的热带气旋会在经过台湾等地时，由于地形的原因产生副中心，副中心会对沿海地区台风预报、强度评估和降水预报造成一定困难，70 a 间共生成 53 个副中心，近十几年内没有副中心生成。

（2）空间上，生成于西北太平洋海域的热带气旋个数最多，并且其后登陆我国东部沿海地区的个数为 432 个，占比高达 65.55%。于东海海域、南海海域生成并登陆我国的热带气旋个数分别为 28 个、199 个。一个热带气旋最多可四次登陆，且主要在我国广东、海南、台湾、福建等地登陆，在广东登陆的个数最多，登陆次数高达 263 次（其中首次登陆个数为 220 个）。生成于东海海域的热带气旋主要在华东地区登陆；登陆华南地区的热带气旋有 43.56% 生成于南海海域，55.67% 生成于西北太平洋海域；登陆东北地区的热带气旋主要生成于西北太平洋海域。此统计结果可以为防御灾情提供科学的参考价值。

DOI: 10.7515/JEE202016

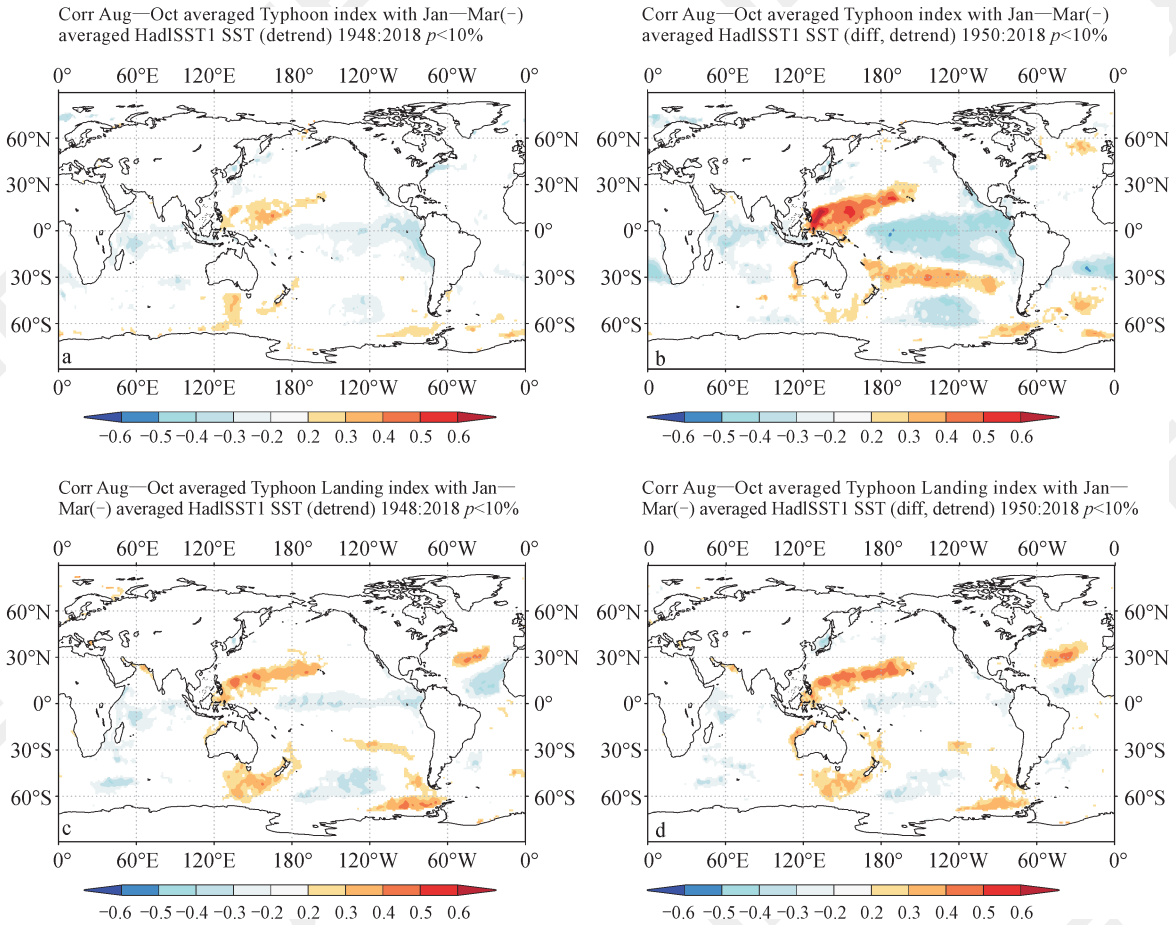


图 6　热带气旋总数与当年春季（1—3 月）全球海表温度相关性检测（a），热带气旋总数一阶差分与当年春季（1—3 月）全球海表温度相关性检测（b），登陆我国热带气旋总数与当年春季（1—3 月）全球海表温度相关性检测（c），登陆我国热带气旋总数一阶差分与当年春季（1—3 月）全球海表温度相关性检测（d）

Fig. 6　Correlation detection of total number of tropical cyclones with the spring (January—March) global sea surface temperature (a), correlation detection of first-order difference of total number of tropical cyclones with the spring (January—March) global sea surface temperature (b), correlation detection of total number of tropical cyclones landing in China with the spring (January—March) global sea surface temperature (c), correlation detection of first-order difference of total number of tropical cyclones landing in China with the spring (January—March) global sea surface temperature (d)

（3）对 70 a 的热带气旋生成个数、登陆我国个数及其一阶差分与全球海表温度分时段做相关性分析，发现热带气旋的生成不仅与当年其生成季的海表温度相关，更与当年春季（1—3 月）海表温度有最高相关性。表明当年春季海表温度可能是此海域热带气旋生成、登陆我国的一个重要因素，这对后续夏季热带气旋生成及登陆具有深远影响，值得深入探讨其影响机制。

参考文献

鲍旭炜，雷小途，唐　碧，等. 2013. 热带气旋过台湾岛引起的副中心特征分析 [J]. *热带气象学报*，29(5): 717–726. [Bao X W, Lei X T, Tang B, et al. 2013. An analysis on the features of secondary center produced by the tropical cyclones crossing Taiwan [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 29(5): 717–726.

陈丽娟，许　力，江　滢. 2005. 2004 年北半球大气环流及对中国气候异常的影响 [J]. *气象*，31(4): 27–31. [Chen L J, Xu L, Jiang Y. 2005. General circulation over the Northern Hemisphere in 2004 and its impact on the climate in China [J]. *Meteorological Monthly*, 31(4): 27–31.]

雷小途，徐　明，任福民. 2009. 全球变暖对台风活动影响的研究进展 [J]. *气象学报*，67(5): 679–688. [Lei X T, Xu M, Ren F M. 2009. A review on the impacts of global warming on tropical cyclone activities [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(5): 679–688.]

梁　军，冯呈呈，张胜军，等. 2020. 台风“温比亚”（1818）影响辽东半岛的预报分析 [J]. *干旱气象*，

38(2): 280–289. [Liang J, Feng C C, Zhang S J, et al. 2020. Analysis on operational forecast of typhoon Rumiba (1818) affecting Liaodong Peninsula [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 38(2): 280–289.]

刘 贝, 周倩莹, 付东洋. 2019. 海面温度对南海台风强度的影响 [J]. *广东海洋大学学报*, 39(1): 97–104. [Liu B, Zhou Q Y, Fu D Y. 2019. Effect of sea-surface temperature on the South China Sea typhoon intensification [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 39(1): 97–104.]

宋 攀, 钟 中, 齐琳琳, 等. 2017. 局地海表温度异常影响热带气旋路径的模拟研究 [J]. *气象科学*, 37(6): 735–741. [Song P, Zhong Z, Qi L L, et al. 2017. A numerical study on the influence of abnormal local sea surface temperature on the track of tropical cyclone [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 37(6): 735–741.]

魏章进, 隋广军, 唐丹玲. 2012. 台风灾情评估及方法综述 [J]. *灾害学*, 27(4): 107–113. [Wei Z J, Sui G J, Tang D L. 2012. An overview of assessment and approaches on typhoon disaster [J]. *Journal of Catastrophology*, 27(4): 107–113.]

吴祖立, 崔雪森, 张胜茂, 等. 2018. 南海台风活动特征及其对渔业活动的影响 [J]. *海洋渔业*, 40(5): 548–559. [Wu Z L, Cui X S, Zhang S M, et al. 2018. An analysis of characteristics of typhoons and their impacts on fishery activities in the South China Sea [J]. *Marine Fisheries*, 40(5): 548–559.]

阎敬华, 董克勤. 1997. 台湾附近地形对台风影响的数值模拟 [J]. *热带气象学报*, 13(3): 217–226. [Yan J H, Dong K Q. 1997. Numerical simulation study on the effects of Taiwan terrain on typhoon dot [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 13(3): 217–226.]

杨舒楠, 端义宏. 2020. 台风温比亚（1818）降水及环境场极端性分析 [J]. *应用气象学报*, 31(3): 290–302. [Yang S N, Duan Y H. 2020. Extremity analysis on the precipitation and environmental field of typhoon Rumbia in 2018 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 31(3): 290–302.]

叶海军, 唐丹玲, 潘 刚. 2014. 强台风鲶鱼对中国南海浮游植物及渔业资源的影响 [J]. *生态科学*, 33(4): 657–663. [Ye H J, Tang D L, Pan G. 2014. The contribution of typhoon Megi on phytoplankton and fishery productivity in the South China Sea [J]. *Ecological Science*, 33(4): 657–663.]

张守文, 王 辉, 姜 华, 等. 2017. 厄尔尼诺和台风共同影响下的 7 月份黄、东海海温变化 [J]. *海洋学报*, 39(12): 32–41. [Zhang S W, Wang H, Jiang H, et al. 2017. Sea surface temperature variations of the Yellow Sea and East China Sea influenced by both ENSO and typhoons in July [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 39(12): 32–41.]

朱义青, 王庆华. 2020. 台风“摩羯”螺旋雨带中衍生龙卷的非超级单体特征 [J]. *干旱气象*, 38(2): 263–270. [Zhu Y Q, Wang Q H. 2020. Non-supercell characteristics of tornadoes derived from spiral rain belt of the typhoon “YAGI” [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 38(2): 263–270.]

Duan Y H. 2014. Current status and challenges of typhoon forecasting and warning systems in China [J]. *Engineering*, 12(4): 48–50.

Gray W M. 1998. The formation of tropical cyclones [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 67(1/2/3/4): 37–69.

Holland G J. 1997. The maximum potential intensity of tropical cyclones [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 54(21): 2519–2541.

IPCC. 2013. Summary for policymakers of climate change 2013: the physical science basis [R]. Contribution of Working Group Ⅰ to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Katsube K, Inatsu M. 2016. Response of tropical cyclone tracks to sea surface temperature in the western North Pacific [J]. *Journal of Climate*, 29(5): 1955–1975.

Lee C S, Liu Y C, Chien F C. 2008. The secondary low and heavy rainfall associated with typhoon mindulle (2004) [J]. *Monthly Weather Review*, 136(4): 1260–1283.

Ren D D, Lynch M, Leslie L M, et al. 2014. Sensitivity of tropical cyclone tracks and intensity to ocean surface temperature: four cases in four different basins [J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 66(1): 24212. DOI: 10.3402/tellusa.v66.24212.

Wu J S, Zhao Y H, Yuan T, et al. 2020. Evolution of typhoon disasters characteristics and non-structural disaster avoidance measures in the China coastal main functional area [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 46: 101490. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2020.101490.

Ying M, Zhang W, Yu H, et al. 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31(2): 287–301.

Zhang Z, Zhang W M, Zhao W J, et al. 2020. Radial distributions of sea surface temperature and their impacts on the rapid intensification of typhoon Hato (2017) [J]. *Atmosphere*, 11(2): 128. DOI: 10.3390/atmos11020128.