

肖婷, 廖菲, 傅桂文, 等. 热带气旋快速加强与海表温度分布统计特征研究[J]. 海洋学报, 2023, 45(9): 1–9, doi:10.12284/hyxb2023130  
Xiao Ting, Liao Fei, Fu Guiwen, et al. An analysis of tropical cyclones rapid intensification and the statistical characteristics of sea surface temperature distribution[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(9): 1–9, doi:10.12284/hyxb2023130

# 热带气旋快速加强与海表温度分布统计特征研究

肖婷<sup>1,3</sup>, 廖菲<sup>1\*</sup>, 傅桂文<sup>2</sup>, 高晓荣<sup>1,3</sup>

(1. 广州市气象台, 广东 广州 511430; 2. 广东省佛山市高明区气象局, 广东 佛山 528500; 3. 中国气象局广州热带海洋气象研究所/广东省区域数值天气预报重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:** 为加强海表温度对热带气旋快速加强影响的认识, 利用中国气象局上海台风研究所整编的热带气旋最佳路径数据集和欧洲中尺度天气预报中心提供的海温数据, 选取 1979–2019 年期间的西北太平洋热带气旋, 统计分析了海温和热带气旋强度快速变化的特征。研究结果表明: (1) 约 90% 的热带气旋快速加强发生在夏季和秋季, 分别占快速加强总次数的 32.8% 和 56.4%, 绝大部分热带气旋以跨越 1 个强度等级的快速加强为主, 由强热带风暴快速加强到台风和由台风快速加强到强台风是出现次数较多的两种情况。(2) 夏季大于 28°C, 秋季大于 27.5°C 的海表温度条件有利于热带气旋快速加强, 较低强度等级的热带气旋需要更高的海表温度 (> 29°C) 才易出现快速加强; 热带气旋快速移动有利于其中心处海温维持较高状态。(3) 海温的时间变率在  $\pm 0.2^\circ\text{C}/(6\text{ h})$  内, 水平空间梯度低于  $0.4^\circ\text{C}/^\circ$  是热带气旋快速加强的有利条件; 热带气旋强度越强, 越需要平稳的海表温度环境。(4) 热带气旋处于强热带风暴及以上级别时, 仅利用海表温度条件对其是否发生快速加强的判断准确性较好。这一工作量化了有利于热带气旋加强的海表温度环境, 为业务上基于海表温度定量预报热带气旋强度演变提供了一种技术参考。

**关键词:** 热带气旋; 海表温度; 快速加强

中图分类号: P731.11; P444

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)09-0001-09

## 1 引言

热带气旋是一个有组织的大尺度涡旋系统, 也是一种破坏力非常强的天气系统, 常伴随暴雨、大风以及风暴潮等灾害, 因而受到科学界的广泛关注。对于其预报问题主要集中在热带气旋路径预报和强度预报两个方面。随着现代气象综合探测体系的建设以及数值预报模式的不断进步和完善, 热带气旋路径业务预报水平进展显著<sup>[1]</sup>。但由于在热带气旋整个生命史中有着剧烈的水汽、动量和热量交换, 使得对热带气旋强度演变机理的认识仍然存在许多未知的科学

问题, 热带气旋强度的预报技术提升并不明显<sup>[2]</sup>。张守峰等<sup>[3]</sup>通过对 2001–2012 年中央气象台的台风强度综合预报水平分析发现, 热带气旋强度预报误差呈逐年波动状态, 强度稳定的热带气旋预报误差最小, 迅速加强的热带气旋预报误差最大。因而, 如何提高快速加强型的热带气旋预报水平或成为当前台风业务预报中的难点问题。

热带气旋发生快速加强时除受西南季风、越赤道气流、东风波、弱冷空气、西风槽等天气系统影响<sup>[4]</sup>外, 还与其下垫面海洋环境有着密切关系。这是由于热带气旋自身发展所需的大量熵通量主要取决于海

收稿日期: 2022-11-01; 修订日期: 2023-06-07。

基金项目: 广东省自然科学基金(2019A1515011813); 广州市科技计划(202102080664); 中国气象局广州热带海洋气象研究所/广东省区域数值天气预报重点实验室开放基金(J201804)。

作者简介: 肖婷(1990—), 女, 湖北省随州市人, 工程师, 从事台风预报技术研究。E-mail: 578452106@qq.com

\* 通信作者: 廖菲(1979—), 男, 江西省赣州市人, 博士, 主要从事海洋气象研究。E-mail: fliao@gd121.cn

表温度(简称海温),由此 Emanuel<sup>[5]</sup> 基于海温给出了热带气旋最大可能强度(Maximum Potential Intensity, MPI)的理论计算公式。但由于海温降低的负反馈作用在过去一直被低估<sup>[6]</sup>,所以很少热带气旋能达到其MPI的80%<sup>[7]</sup>,可见热带气旋中心的海温变化对强度变化有直接影响<sup>[8]</sup>。热带气旋强度变化与相对海温和绝对海温密切相关<sup>[9]</sup>,在不同海域,海温对热带气旋强度变化的影响有着不同的表现。在西北太平洋地区,当海温在27~30℃之间时热带气旋加强最快<sup>[10]</sup>,热带气旋加强和快速加强主要发生在海温介于28.5~30℃的洋面上<sup>[11]</sup>,海温高于28℃时热带气旋出现强度加强的比例达84.4%<sup>[12]</sup>。而在大西洋上,约92%突然加强的热带气旋出现在海温高于27℃的洋面上<sup>[13]</sup>。不过,热带气旋的发展与不同海温环境的关系是复杂的<sup>[14]</sup>,海温高于28℃只是西北太平洋热带气旋突然加强的必要条件<sup>[15]</sup>。

西北太平洋是热带气旋的活跃区,南海是热带气旋迅速加强多发的海域<sup>[16-17]</sup>,高海温环境、海表混合层降温小等因素有利于热带气旋加强<sup>[18-20]</sup>。以往研究较多地讨论了海温和上层海洋热容量在热带气旋加强与否过程中的差异<sup>[21]</sup>,但是,关于不同强度的热带气旋发生加强时海温时空特征的研究仍然缺乏。广东省是我国受登陆热带气旋影响最多的内陆省份<sup>[22]</sup>,生成于西北太平洋后向西北移动的热带气旋尤其容易发生快速加强<sup>[23]</sup>,为此,本文试图分析不同强度等级热带气旋发生快速加强的海温特征,研究有利于热带气旋快速加强的海温条件,并通过实际个例进行检验讨论,以期提高对南海热带气旋强度快速变化的预报能力。

## 2 资料和方法

热带气旋最佳路径数据集是由中国气象局上海台风研究所整编,选取了1979-2019年期间的数据,该数据包含西北太平洋(含南海、赤道以北、180°经线以西)海域热带气旋每6h的强度等级、经纬度、中心最低气压、中心最大风速等信息。海温的数据来自欧洲中尺度天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的第五代再分析产品(ERA5)。ERA5再分析资料在时空分辨率、观测数据量、辐射传输模式和同化方法等方面都有了较大的升级和进步<sup>[24]</sup>,海温数据时间分辨率为1h/次,水平分辨率为0.25°×0.25°。

热带气旋强度的变化采用廖菲等<sup>[25]</sup>的方法,即用6h气压的变化 $\Delta P$ 来定义热带气旋强度变化的快慢。

例如8:00的气压变化 $\Delta P$ 为8:00与2:00台风中心最低气压的差值,若 $\Delta P < 0$ 则表示热带气旋强度加强。 $\overline{\Delta P}$ 、 $S$ 分别代表 $\Delta P$ 的平均值和标准差,定义快速加强的标准为 $\Delta P < \overline{\Delta P} - S$ 。

据统计,1979-2019年间共有9572个加强样本,所有加强样本的 $\overline{\Delta P}$ 为-4.77 hPa/(6h), $S$ 为3.51 hPa/(6h)。因此快速加强的标准为 $\Delta P < -8.28$  hPa/(6h),同时,热带气旋快速加强还必须满足其强度向更高一等级跨越的要求,由此统计得到符合热带气旋强度快速加强的个例。

## 3 统计分析特征

### 3.1 总体特征

表1从两个方面统计了不同强度等级的热带气旋快速加强的统计特征:一是针对路径中有经过南海的全部西北太平洋热带气旋,讨论其总体强度快速加强的情况;二是由于海温的状况与季节密切相关,不同季节的海温存在差异,因此对快速加强的情况按季节进行了分类。

经统计,1979-2019年西北太平洋海域中途径南海的热带气旋共有550个,按照上述热带气旋快速加强的标准,共有152个热带气旋快速加强,约占热带气旋总数的27.6%;发生快速加强的总次数为250次,平均每个热带气旋快速加强1.6次。其中发生1次、2次、3次及以上快速加强的热带气旋个数分别为82个、44个、26个,占全部快速加强热带气旋总数的比例分别为54.0%、28.9%、17.1%。表明对于途径南海的西北太平洋热带气旋而言,大约每4个当中会有1个发生快速加强,并且以发生1~2次快速加强较常见。

按快速加强发生的季节来看,约90%的快速加强发生在夏季(6-8月)和秋季(9-11月),分别占快速加强总次数的32.8%和56.4%。其中绝大部分热带气旋以跨越1个强度等级的快速加强为主,分别占夏季和秋季快速加强总次数的96.3%和98.6%,仅有不到4%的快速加强跨越了2级或2级以上。即绝大部分热带气旋只能从当前强度等级快速发展为更强的上一个等级,例如:从热带低压快速加强到热带风暴、从热带风暴加强到强热带风暴、从强热带风暴加强到台风、从台风加强到强台风、从强台风加强到超强台风。在强度跨越1个等级的个例中,由强热带风暴快速加强到台风和由台风快速加强到强台风是最多的两种情况,在夏季和秋季分别出现了48次和102次,分别约占总发生次数的59%和72%,因此,当热带气旋处于强热带风暴或台风等级时,其快速加强的

表1 热带气旋强度快速加强的统计特征

Table 1 Statistical characteristics of the rapid intensification of tropical cyclones

快速加强次数	占全部快速加强TC总数的比例/%	强度跨越等级数	变化类型	夏季			秋季		
				夏季次数	上一等级平均持续时间/h	夏季平均移速/(km·h <sup>-1</sup> )	秋季次数	上一等级平均持续时间/h	秋季平均移速/(km·h <sup>-1</sup> )
1次	54.0	1个等级	热带低压→热带风暴	3	22.0	19.9	0	0	0
			热带风暴→强热带风暴	17	14.5	16.1	14	22.7	17.6
			强热带风暴→台风	23	19.0	20.4	53	19.8	19.3
2次	28.9		台风→强台风	25	19.0	18.9	49	22.7	19.6
			强台风→超强台风	11	12.5	22.7	23	9.7	21.4
3次及以上	17.1	2个及以上等级	略	3	8.0	21.9	2	12.0	26.2

可能性更高。对于热带低压快速加强到热带风暴,强台风快速加强到超强台风的情况,无论夏季或秋季均是小概率事件,占总数的比例仅为16%~17%,即当热带气旋当前强度较弱或较强时,发生快速加强的可能性较小,且强度越弱,发生快速加强的可能性越小。

另外值得关注的是,虽然由强台风快速加强到超强台风和快速加强跨越2个及以上等级的情况是小概率事件,但其在上一等级的平均持续时间明显偏短(少于13h),而且平均移速偏快(大于21km/h)。

### 3.2 快速加强时的海温特征

本文中夏季和秋季热带气旋快速加强的个例分别有82个和141个,剔除海温缺测的个例后分别有79个和139个,由ERA5逐小时海温再分析数据可得到发生快速加强时刻的热带气旋中心位置的海温值,以此研究热带气旋从不同强度等级向更强等级发生快速加强时的海温区间和不同区间的频次。

夏季和秋季西北太平洋热带气旋发生快速加强时,海温总体变化区间为26.0~31.0℃,夏季高频区间为28.0~30.0℃(图1a),秋季则为27.5~30.0℃(图1b)。由热带低压快速加强到热带风暴时,夏季仅有3个个例,且海温分布较分散,秋季则无此类个例,该类热带气旋快速加强时海温分布特征没有明显的规律。当热带气旋从热带风暴快速加强至强热带风暴时,热带气旋中心海温在夏季集中分布在28.9~29.5℃,而在秋季主要集中在28.1~29.5℃。当热带气旋从强热带风暴快速加强至台风时,夏、秋两季此类情况下海温主要分布在28.5~29.9℃和27.5~29.6℃,其中,夏季海温为29.3~29.9℃时,对应的此类快速加强个例最多,秋季时海温在28.7~29.6℃时此类快速加强个例最多。夏季和秋季热带气旋由台风快速加强到强台

风时,28.3~29.7℃均是出现最多加强个例的海温条件。由强台风快速加强到超强台风时,海温为28.0~30.5℃是夏季出现高频次强度加强的条件,对应秋季时快速加强主要出现在海温为28.1~29.8℃的条件下。由此可见,夏季大于28℃,秋季大于27.5℃的海温条件是有利于热带气旋强度变化的。

另外,有研究表明<sup>[21]</sup>,热带气旋的移动速度可能对其快速加强的发展过程存在影响,这主要是因为热带气旋移动速度越快,海洋冷水上翻的时间越短,导致海温受冷却影响越小,海温越高。以秋季台风快速加强至强台风的情况为例(图1c),统计结果表明,当热带气旋的移动速度小于10km/h时,此类情况个例较少,其中心位置所处海温有2个个例约为26.8℃,还有2个个例约为28.8℃。当移动速度增大后,达到10~30km/h时,海温都有明显升高,大部分的个例所处海温基本分布在28~30℃。而当移动速度加强到30km/h以上时,其所处海温环境更加集中,主要分布在(29±0.5)℃。不难看出,对于快速加强的热带气旋,移动速度越快,其下垫面海温降温将变缓,这有利于热带气旋中心处维持高海温。

### 3.3 快速加强前的海温特征

研究表明,热带风暴、强热带风暴、台风、强台风这4类热带气旋发生快速加强之前的24h是其后来能发生突变的关键时期<sup>[25]</sup>,海温作为影响热带气旋强度变化的重要因子,其在热带气旋强度变化前的分布是分析热带气旋能否加强的重要参考。为此,图2给出了这4类热带气旋快速加强前24h、18h、12h、6h、0h的海温分布。

在热带气旋出现快速加强的前24h内,4类热带气旋的发展过程中都是在较高的海温环境中,其中心强度越强,对应的海温相对越低。例如,在快速加强

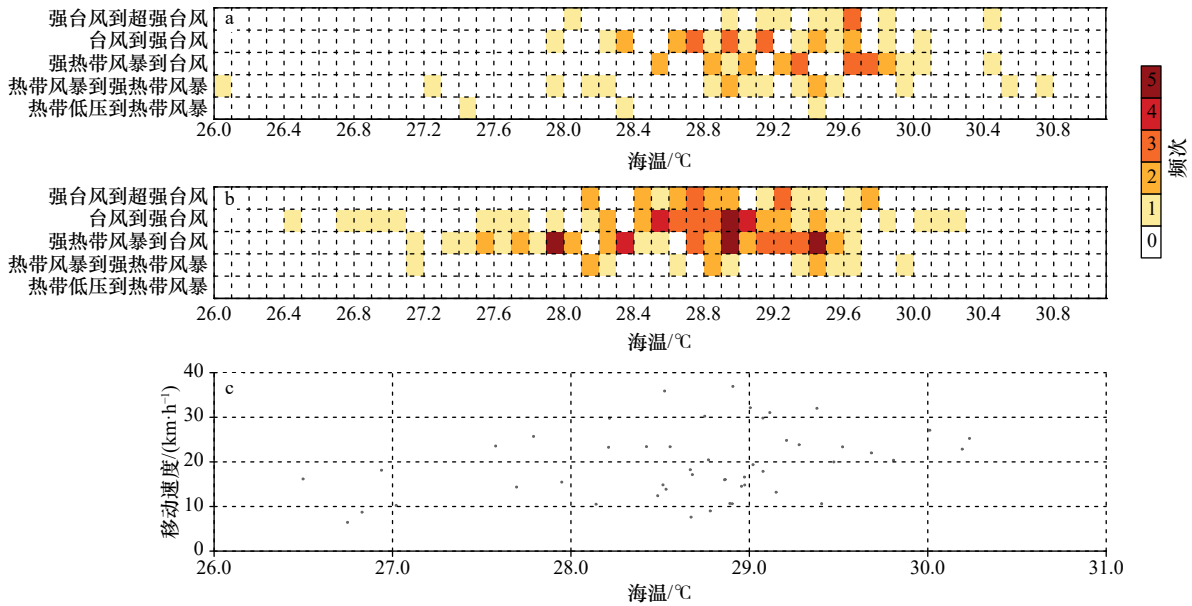


图 1 夏季(a)和秋季(b)热带气旋向更高一等级强度快速加强时海温的频次及秋季台风快速加强至强台风时海温与移动速度分布(c)

Fig. 1 Frequency of sea surface temperature when tropical cyclones are rapidly intensifying to upper level in summer (a) and autumn (b), and the distribution of sea surface temperature and translation speed in autumn when typhoons intensify rapidly to severe typhoons (c)

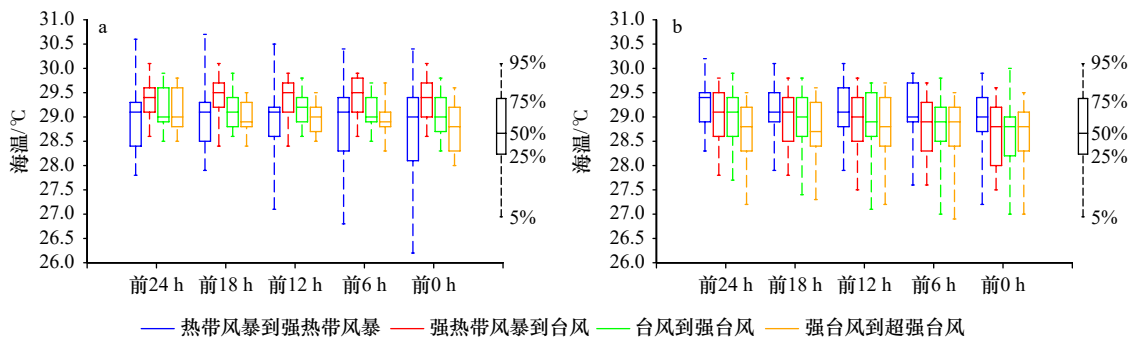


图 2 夏季(a)和秋季(b)热带气旋强度快速加强前 24 h 内海温分布

Fig. 2 Distribution of sea surface temperature within 24 h before tropical cyclones rapid intensification in summer (a) and autumn (b)

前 24 h, 夏(秋)季热带风暴、强热带风暴、台风、强台风对应所处的海温(单位: °C, 下同)中位数分别为 29.1(29.4)、29.4(29.1)、29.0(29.1)、29.0(28.8); 前 12 h, 夏(秋)季 4 类热带气旋所处的海温中位数则分别为 29.1(29.1)、29.5(29.0)、29.2(28.9)、29.0(28.8); 在前 0 h(发生快速加强时刻), 夏(秋)季 4 类热带气旋所处的海温中位数分别为 29.0(29.0)、29.4(28.8)、29.0(28.8)、28.8(28.8)。

将热带气旋发生快速加强时刻的海温值与快速加强前 6 h 的海温值之差定义为海温变率。与其他 3 类热带气旋的海温变率不同, 热带风暴在快速加强前 24 h 内, 海温 6 h 变率的绝对值较大; 夏季在前 18~12 h, 海温变率的绝对值最大为 0.8°C/(6 h), 秋季则在前 24~18 h, 最大为 0.4°C/(6 h)。对于强热带风暴、台风和强台风而言, 在其快速加强前 0~24 h 内

海温值则相对稳定, 每 6 h 的变率都较小, 其绝对值一般不超过 0.3°C/(6 h)。

上述结果表明, 热带气旋强度越小, 在其发展过程中需要更高的海温(> 29°C)才易出现快速加强的情况, 相对平稳的高海温是强热带风暴、台风、强台风发生快速加强的有利条件。

### 3.4 海温变率特征

为研究海温的时间变化规律, 图 3 给出了夏季和秋季热带气旋由不同强度等级向上一更高等级发生快速加强时海温变率的频次。在热带气旋的发展和快速加强过程中, 受湍流混合引起的海表面冷却效应和强降水的冲刷作用<sup>[26]</sup>, 热带气旋中心的海温势必会有所降低, 夏季和秋季热带气旋发生快速加强时, 海温负变率较多见, 夏季和秋季分别占各自总数的 59.5% 和 61.9%。由于目前很难排除各种因素对海温的影响,

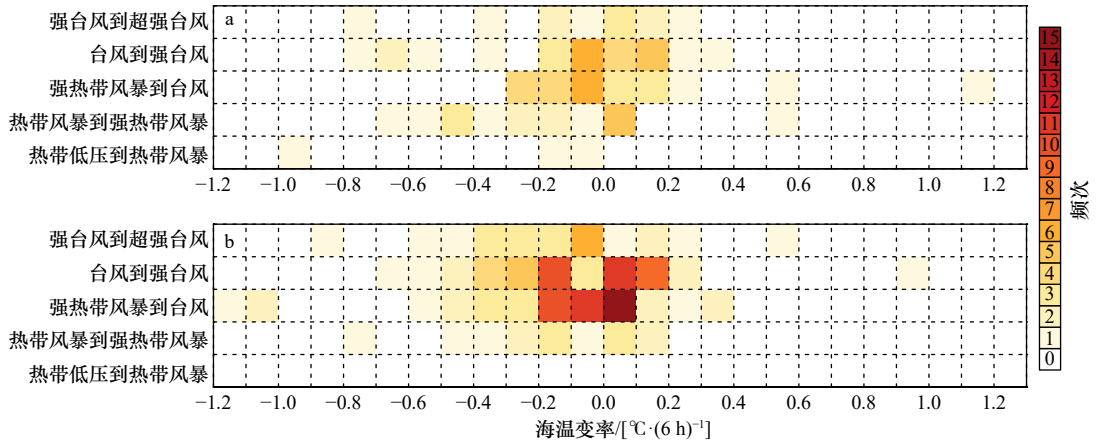


图3 夏季(a)和秋季(b)热带气旋向其更高等级强度快速加强时海温变率与发生频次的关系

Fig. 3 The relationship between sea surface temperature variability and occurrence frequency when tropical cyclones are rapidly intensifying to upper level in summer (a) and autumn (b)

就海温与热带气旋强度的统计分布特征来看,热带气旋发生快速加强时的海温变率分布具有一定的规律。

夏季和秋季热带气旋发生快速加强时,海温的变率总体变化区间为-1.2~1.2°C/(6 h)。对于热带低压而言,当夏季海温变率为-1.0~-0.9°C/(6 h)和-0.2~0°C/(6 h)时,均出现快速加强;秋季无快速加强个例。由热带风暴快速加强至强热带风暴时,夏季海温变率在0~0.1°C/(6 h)区间时的频次最多,秋季为-0.2~0.1°C/(6 h)。由强热带风暴快速加强至台风时,夏季海温变率为-0.3~0.2°C/(6 h)时快速加强最为频发,秋季为-0.2~0.1°C/(6 h)。由台风快速加强到强台风时,夏季和秋季海温变率均在-0.2~0.2°C/(6 h)时出现快速加强的频次最多。对于强台风快速加强到

超强台风的个例,夏季常见发生在海温变率为-0.2~0.2°C/(6 h)的情况下,而秋季为-0.4~0°C/(6 h)。

为进一步分析不同强度等级的热带气旋在不同的海温变率区间发生快速加强的概率(不同海温不同强度热带气旋发生快速加强的次数除以该强度等级的热带气旋发生快速加强的总次数),图4给出了相应的概率分布图。夏季热带低压发生快速加强时,海温变率全为负值。夏季和秋季超过60%的热带风暴发生快速加强时,海温变率为负值,且多集中在-0.8~0°C/(6 h)。50%~70%的强热带风暴、台风、强台风出现快速加强时,海温变率为-0.2~0.2°C/(6 h),说明当海温变化趋于缓慢时,强度较大的热带气旋(强热带风暴、台风、强台风)易出现强度快速加强。

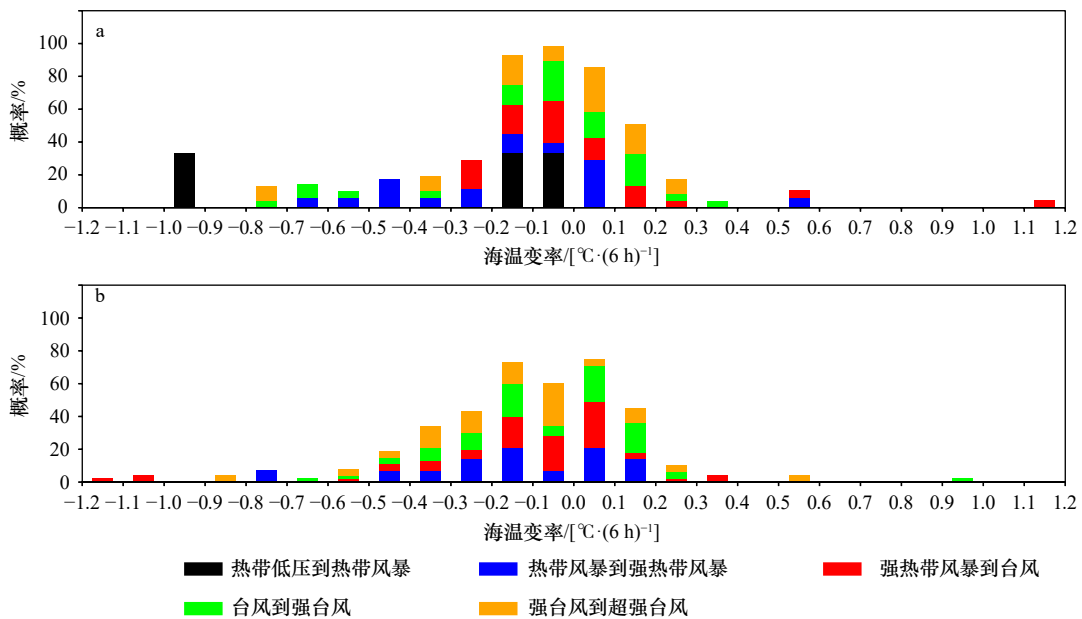


图4 夏季(a)和秋季(b)热带气旋在不同海温变率下强度快速加强的概率

Fig. 4 Probability of tropical cyclones rapid intensification under different sea surface temperature variability in summer (a) and autumn (b)

热带气旋在突变前后发生了时间变化,空间位置也同样发生了改变,为研究热带气旋快速加强时海温的空间变化特征,定义海温的水平空间梯度为 $d_{SST}$ ,其计算公式为

$$d_{SST} = \sqrt{\left(\frac{SST_x}{d_x}\right)^2 + \left(\frac{SST_y}{d_y}\right)^2}, \quad (1)$$

$$\frac{SST_x}{d_x} = \frac{SST_A - SST_C}{lon_A - lon_C}, \quad (2)$$

$$\frac{SST_y}{d_y} = \frac{SST_A - SST_D}{lat_A - lat_D}, \quad (3)$$

$$d_{SST} = \sqrt{\left(\frac{SST_A - SST_C}{lon_A - lon_C}\right)^2 + \left(\frac{SST_A - SST_D}{lat_A - lat_D}\right)^2}, \quad (4)$$

式中, $SST_x$ 和 $SST_y$ 分别代表海温在 $x$ 和 $y$ 方向的变化; $d_x$ 和 $d_y$ 分别代表在 $x$ 和 $y$ 方向的变化距离; $SST$ 代表海温; $lon$ 和 $lat$ 分别代表经度和纬度,下标字母代表所在格点,所得到的单位为 $^{\circ}/(^{\circ})$ 。假设热带气旋在由 $A1$ 位置移动至 $B1$ 位置的过程中发生了快速加强, $A1$ 为发生快速加强前6h的位置, $B1$ 为发生快速加强时刻的位置。由于海温数据的空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ,所以 $A1$ 或 $B1$ 位置海温数据可能会缺测,如果存在缺测,则以 $A1(B1)$ 最邻近的格点 $A(B)$ 的海温值代替 $A1(B1)$ 位置的海温,因此海温的水平空间梯度 $d_{SST}$ 可以进一步细化式(4)(图5)。

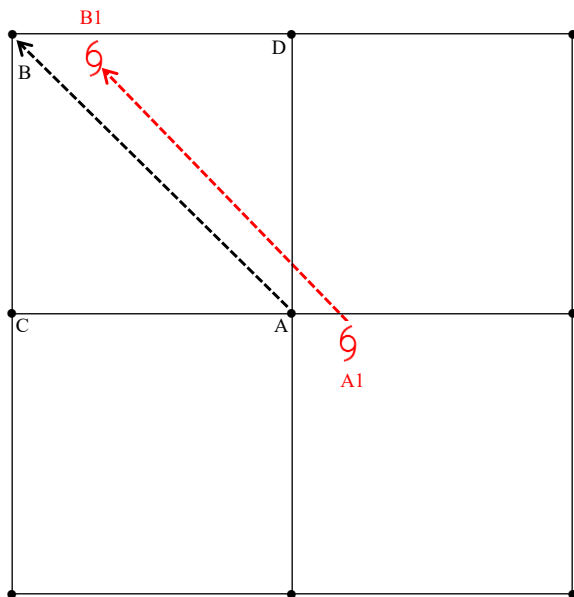


图5 移动位置  
Fig. 5 Shift position

由上述方法可计算得到海温水平空间梯度的分布(图6)。对于夏季和秋季热带气旋而言,当其发生快速加强时,海温水平空间梯度在 $0 \sim 2.2^{\circ}/(^{\circ})$ ,但约90%的热带气旋发生强度快速加强时,对应的海温水

平空间梯度在 $0 \sim 0.8^{\circ}/(^{\circ})$ ;约70%的热带气旋发生强度快速加强时,对应的海温水平空间梯度在 $0 \sim 0.4^{\circ}/(^{\circ})$ 。

从不同强度的热带气旋发生快速加强的情况来看:(1)夏季热带低压发生快速加强时,海温水平空间梯度为 $0.1 \sim 0.4^{\circ}/(^{\circ})$ ;(2)夏季和秋季热带风暴发生快速加强时,海温水平空间梯度变化区间为 $0 \sim 1.7^{\circ}/(^{\circ})$ ,但70%以上出现在 $0 \sim 0.4^{\circ}/(^{\circ})$ 区间;(3)夏季和秋季强热带风暴发生快速加强时,海温水平空间梯度变化区间为 $0 \sim 2.2^{\circ}/(^{\circ})$ ,其中 $0 \sim 0.8^{\circ}/(^{\circ})$ 区间内出现加强的次数占该级别的90%以上, $0 \sim 0.4^{\circ}/(^{\circ})$ 区间占比约为60%~70%;(4)台风、强台风发生快速加强的情况与强热带风暴类似, $0 \sim 0.8^{\circ}/(^{\circ})$ 区间发生的频次占90%以上, $0 \sim 0.4^{\circ}/(^{\circ})$ 区间占比约70%。由此可见,对于快速加强次数占比较多的热带风暴、强热带风暴、台风、强台风4种热带气旋,海温水平空间梯度都高度集中在 $0 \sim 0.4^{\circ}/(^{\circ})$ 。

不难看出,海温水平空间梯度的分布与热带气旋加强有着密切的关系,低于 $0.8^{\circ}/(^{\circ})$ 的海温水平空间梯度的分布,集中了绝大多数的热带气旋发生快速加强的情况。可见,热带气旋发生快速加强时海温不仅保持了一定的温度,而且其时间和空间的梯度变化都较小,相对平稳的高海温分布是热带气旋发生快速加强的有利环境。

## 4 个例检验

基于以上研究结论,选取2022年第16号台风“奥鹿”(Noru, 超强台风级)进行检验。“奥鹿”于2022年9月23日在菲律宾以东的西北太平洋洋面生成,稳定西行进入南海,强度逐渐加强,从24日起在18h内连升3级,由强热带风暴快速加强为超强台风。由表2可知,“奥鹿”从生成到快速加强为超强台风阶段,海温稳定维持较高水平,始终大于 $29.2^{\circ}\text{C}$ ,超过秋季各等级热带气旋快速加强的海温中位数(图2),且海温6h变率在 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}/(6\text{h})$ 附近,海温空间梯度不超过 $0.4^{\circ}/(^{\circ})$ ,海温条件非常有利于其发生快速加强。

如果仅按照前述所得到热带气旋快速加强时的海温、海温时间变率、海温空间变率的最佳条件,对“奥鹿”各等级时所处海温环境进行预报判定,8个时次预报共有3次命中,命中率约38%。但从具体对每个级别的判断来看,除对“奥鹿”从热带风暴加强为强热带风暴预报失败以外,9月24日00时“奥鹿”从强热带风暴快速加强为台风,以及后续的2次继续快速加强都成功判断。廖菲等<sup>[25]</sup>指出,热带风暴快速加强

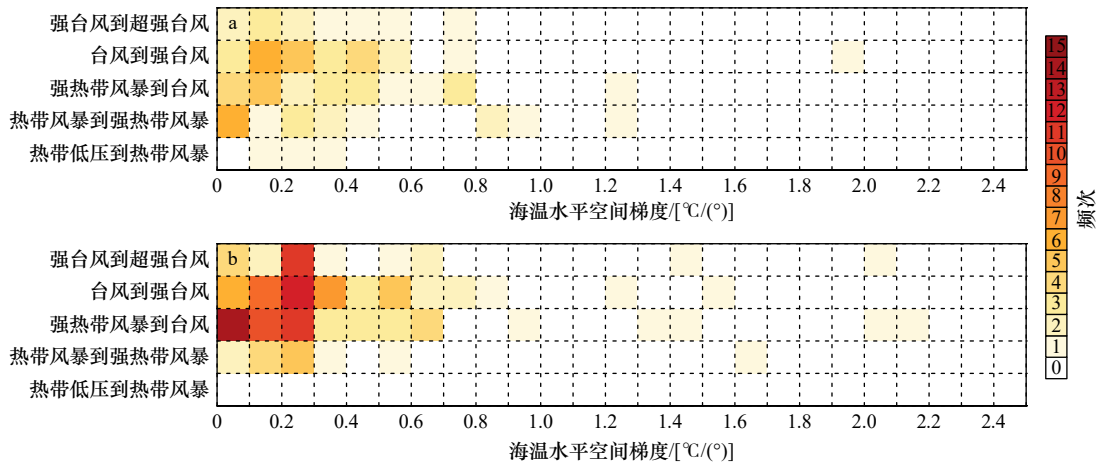


图6 夏季(a)和秋季(b)热带气旋向其更高等级强度快速加强时海温水平空间梯度与发生频次的关系

Fig. 6 The relationship between the horizontal spatial gradient of sea surface temperature and occurrence frequency when tropical cyclones are rapidly intensifying to upper level in summer (a) and autumn (b)

表2 超强台风“奥鹿”快速加强的统计特征

Table 2 Statistical characteristics of rapid intensification of Super Typhoon “Noru”

时间(世界时)	级别	中心气压/hPa	是否发生快速加强	海温/°C	海温变率[°C·(6 h) <sup>-1</sup> ]	空间梯度[°C·(°) <sup>-1</sup> ]	预报情况	预报效果
2022-09-22 18:00	热带风暴	998	否	29.6	0.0	0.0	快速加强至强热带风暴	空报
2022-09-23 00:00	热带风暴	998	否	29.6	0.0	0.2	快速加强至强热带风暴	空报
2022-09-23 06:00	热带风暴	998	否	29.5	-0.1	0.1	快速加强至强热带风暴	空报
2022-09-23 12:00	热带风暴	995	否	29.4	-0.1	0.2	快速加强至强热带风暴	空报
2022-09-23 18:00	热带风暴	990	否	29.6	0.2	0.2	快速加强至强热带风暴	空报
2022-09-24 00:00	强热带风暴	985	是	29.3	-0.3	0.4	快速加强至台风	命中
2022-09-24 06:00	台风	975	是	29.4	0.1	0.2	快速加强至强台风	命中
2022-09-24 12:00	强台风	955	是	29.4	0.0	0.2	快速加强至超强台风	命中

往往出现在前 24 h,若此期间不能发生强度快速加强的情况,则 24 h 后强度快速加强的可能性更低,而“奥鹿”从热带风暴加强为强热带风暴的时间经历 30 h,可见,仅利用海温判断强度较低的热带气旋出现快速加强时还存在难度,但对于热带气旋强度较强时能否出现快速加强的判断仍然具有较好的指导。

### 5 结论

海温在热带气旋发展中起着重要的作用,以往的工作主要集中在将海温作为影响因子开展气候学统计分析,对热带气旋快速加强下海温环境特征缺乏细致了解。为此,基于中国气象局上海台风研究所整编的 1979-2019 年的热带气旋最佳路径数据集和 ECMWF 的高分辨率海温数据,统计分析了热带气旋快速加强时海温的分布特征,结果表明:

(1) 1979-2019 年西北太平洋海域中途径南海的热带气旋约 90% 的快速加强发生在夏季和秋季,分

别占快速加强总次数的 32.8% 和 56.4%。其中绝大部分热带气旋以跨越 1 个强度等级的快速加强为主,分别占夏季和秋季快速加强总次数的 96.3% 和 98.6%。由强热带风暴快速加强到台风和由台风快速加强到强台风是出现次数最多的两种情况。

(2) 高海温是热带气旋快速加强的有利环境,夏季大于 28°C,秋季大于 27.5°C 的海温条件是有利于热带气旋快速加强的,但热带气旋强度越小,在其发展过程中需要更高的海温(> 29°C)才易出现快速加强。热带气旋移动较慢往往导致更多的海洋冷水上翻,其中心的海温较低,快速移动有利于其中心处维持较高海温。

(3) 热带气旋发生强度快速加强时海温的时间和水平空间梯度往往较小,时间的变率在 ±0.2°C/(6 h) 内,水平空间梯度低于 0.4°C/(°) 是热带气旋快速加强的有利条件;热带气旋强度越强,则越需要平稳的海温环境。

(4) 热带气旋强度趋势预报的个例检验结果表明, 当热带气旋处于强热带风暴及以上级别时, 仅利用海温条件判断是否发生快速加强的准确性较好, 这为业务上基于海温定量预报热带气旋强度演变提供了一种技术参考。

通过本文的分析, 进一步细化了海温时间、空间

分布与热带气旋快速加强的关系, 丰富了对海温条件影响热带气旋发展的认知, 从量化的角度提供了一种判定海温是否有利于热带气旋加强的方法。然而, 受热带气旋数据样本和海温数据分辨率的限制, 还需利用更多的数据进行丰富和完善, 这也是从观测角度继续细化开展此类研究的主要方向。

#### 参考文献:

- [1] 许映龙, 张玲, 高拴柱. 我国台风预报业务的现状及思考[J]. 气象, 2010, 36(7): 43-49.  
Xu Yinglong, Zhang Ling, Gao Shuanzhu. The advances and discussions on China operational typhoon forecasting[J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(7): 43-49.
- [2] Montgomery M T, Smith R K. Recent developments in the fluid dynamics of tropical cyclones[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2017, 49(1): 541-574.
- [3] 张守峰, 余晖, 向纯怡. 中央气象台台风强度综合预报误差分析[J]. 气象, 2015, 41(10): 1278-1285.  
Zhang Shoufeng, Yu Hui, Xiang Chunyi. Error analysis on official typhoon intensity forecasts of CMO from 2001 to 2012[J]. *Meteorological Monthly*, 2015, 41(10): 1278-1285.
- [4] 林良勋, 梁巧倩, 黄忠. 华南近海急剧加强热带气旋及其环流综合分析[J]. 气象, 2006, 32(2): 14-18.  
Lin Liangxun, Liang Qiaoqian, Huang Zhong. Analysis of circulation pattern of rapidly intensified offshore tropical cyclones of South China[J]. *Meteorological Monthly*, 2006, 32(2): 14-18.
- [5] Emanuel K A. The maximum intensity of hurricanes[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1988, 45(7): 1143-1155.
- [6] Schade L R. Tropical cyclone intensity and sea surface temperature[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2000, 57(18): 3122-3130.
- [7] Demaria M, Kaplan J. Sea surface temperature and the maximum intensity of Atlantic tropical cyclones[J]. *Journal of Climate*, 1994, 7(9): 1324-1334.
- [8] Cione J J, Uhlhorn E W. Sea surface temperature variability in hurricanes: Implications with respect to intensity change[J]. *Monthly Weather Review*, 2003, 131(8): 1783-1796.
- [9] Ramsay H A, Sobel A H. Effects of relative and absolute sea surface temperature on tropical cyclone potential intensity using a single-column model[J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(1): 183-193.
- [10] Chan J C L, Duan Yihong, Shay L K. Tropical cyclone intensity change from a simple ocean-atmosphere coupled model[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2001, 58(2): 154-172.
- [11] 杨诗琪, 李英, 陈联寿. 西北太平洋热带气旋强度变化的若干特征[J]. 热带气象学报, 2017, 33(5): 666-674.  
Yang Shiqi, Li Ying, Chen Lianshou. The characteristics of tropical cyclone intensity change in western North Pacific[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2017, 33(5): 666-674.
- [12] Xu Jing, Wang Yuqing. Dependence of tropical cyclone intensification rate on sea surface temperature, storm intensity, and size in the western North Pacific[J]. *Weather and Forecasting*, 2018, 33(2): 523-537.
- [13] Kaplan J, DeMaria M. Large-scale characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the North Atlantic basin[J]. *Weather and Forecasting*, 2003, 18(6): 1093-1108.
- [14] Evans J L. Sensitivity of tropical cyclone intensity to sea surface temperature[J]. *Journal of Climate*, 1993, 6(6): 1133-1140.
- [15] Holliday C R, Thompson A H. Climatological characteristics of rapidly intensifying typhoons[J]. *Monthly Weather Review*, 1979, 107(8): 1022-1034.
- [16] 陈乾金. 我国近海台风突然加强和眼结构变化及其与环流背景关系的统计研究[J]. 海洋学报, 1996, 18(3): 121-127.  
Chen Qianjin. Statistical study on sudden intensification and eye structure changes of typhoons in the nearshore waters of China and their relationship with circulation background[J]. *Haiyang Xuebao*, 1996, 18(3): 121-127.
- [17] 郑峰, 曾智华, 雷小途, 等. 中国近海突然增强台风统计分析[J]. 高原气象, 2016, 35(1): 198-210.  
Zheng Feng, Zeng Zhihua, Lei Xiaotu, et al. A statistical study of rapid intensification of typhoons over coastal water of China[J]. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(1): 198-210.
- [18] Wang Xidong, Wang Chunzai, Zhang Liping, et al. Multidecadal variability of tropical cyclone rapid intensification in the western North Pacific[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(9): 3806-3820.
- [19] Wada A. Verification of tropical cyclone heat potential for tropical cyclone intensity forecasting in the western North Pacific[J]. *Journal of Oceanography*, 2015, 71(4): 373-387.
- [20] Wu C C, Tu W T, Pun I F, et al. Tropical cyclone-ocean interaction in Typhoon Megi (2010)—A synergy study based on ITOP observations and atmosphere-ocean coupled model simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(1): 153-167.
- [21] Chih C H, Wu C C. Exploratory analysis of upper-ocean heat content and sea surface temperature underlying tropical cyclone rapid intensification in the western North Pacific[J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(3): 1031-1050.

- [22] 胡娅敏, 宋丽莉, 罗晓玲. 近58年登陆广东热带气旋位置和生成源地的变化[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2011, 50(4): 113–120.  
Hu Yamin, Song Lili, Luo Xiaoling. The variation of the location and source region of tropical cyclones making landfall in Guangdong over the past 58 years[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2011, 50(4): 113–120.
- [23] Chan J C L. Decadal variations of intense typhoon occurrence in the western North Pacific[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2008, 464(2089): 249–272.
- [24] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999–2049.
- [25] 廖菲, 李文婷, 张子然, 等. 1949–2017年南海海域热带气旋强度和路径快速变化统计特征[J]. 海洋学报, 2019, 41(9): 126–135.  
Liao Fei, Li Wenting, Zhang Ziran, et al. Analysis of rapid changes of tropical cyclones over the South China Sea for 1949–2017[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(9): 126–135.
- [26] 薛根元, 张建海, 陈红梅, 等. 超强台风Saomai(0608)加强成因分析及海温影响的数值试验研究[J]. 第四纪研究, 2007, 27(3): 311–321.  
Xue Genyuan, Zhang Jianhai, Chen Hongmei, et al. Analysis on causes of strengthening of super strong typhoon Saomai (0608) and numerical experiments of the impact of SST on its intensity[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(3): 311–321.

## An analysis of tropical cyclones rapid intensification and the statistical characteristics of sea surface temperature distribution

Xiao Ting<sup>1,3</sup>, Liao Fei<sup>1</sup>, Fu Guiwen<sup>2</sup>, Gao Xiaorong<sup>1,3</sup>

(1. *Guangzhou Meteorological Observatory, Guangzhou 511430, China*; 2. *Gaoming District Bureau of Meteorology, Foshan 528500, China*; 3. *Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration/Guangdong Provincial Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, Guangzhou 510640, China*)

**Abstract:** To better understand the influence of sea surface temperature (SST) on tropical cyclones rapidly intensifying, the characteristics of rapid changes in sea surface temperature and intensity of tropical cyclones in the western North Pacific during 1979–2019 were statistically analyzed using the tropical cyclones best track data compiled by the Shanghai Typhoon Research Institute of the China Meteorological Administration and the sea surface temperature data provided by European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. The results indicate the following: (1) About 90% of the rapid intensification of tropical cyclones occurred in summer and autumn, accounting for 32.8% and 56.4% of the total number of rapid intensification respectively. Most tropical cyclones are dominated by rapid intensification across one intensity level, rapid intensification from a severe tropical storm to a typhoon and rapid intensification from a typhoon to a severe typhoon are the two conditions that occur more frequently. (2) The SST conditions greater than 28°C in summer and 27.5°C in autumn are conducive to the rapid intensification of tropical cyclones. Lower intensity of tropical cyclones require higher SST (> 29°C) for rapid intensification. The faster translation speed of tropical cyclones is conducive to maintaining high SST environment at its center. (3) When the time variation of SST is within  $\pm 0.2^\circ\text{C}/(6\text{ h})$ , the horizontal spatial gradient is less than  $0.4^\circ\text{C}/(^\circ)$ , which is the favorable condition for the rapid intensification of tropical cyclone; the stronger the tropical cyclone is, the more stable the SST environment is needed. (4) When tropical cyclone is a severe tropical storm or above, it is better to judge whether rapid intensification occurs by using only the SST conditions. This work quantifies the SST environment conducive to tropical cyclone intensification and provides a technical reference for quantitative prediction of tropical cyclone intensity evolution based on SST.

**Key words:** tropical cyclones; sea surface temperature; rapid intensification