

不同频次海温强迫对台风“利奇马”模拟的影响

易侃¹, 姚佳伟^{2*}, 李响², 杜梦蛟¹, 张蕴斐², 罗嘉琪², 王晨琦²

(1. 中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京 101199; 2. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081)

摘要: 基于WRF气象模式, 利用不同时间频次的海温强迫场对2019年超强台风“利奇马”个例开展模拟研究。结果表明: 不同时间频次海温强迫对台风“利奇马”路径模拟的影响较小, 而对台风强度和结构的模拟有较大影响。高频海温强迫场相较于日平均海温场保留了海温与台风相互作用之前的信号, 使其在台风路径上的暖涡更暖, 导致模拟的台风强度更强, 特别是在快速增强阶段与中国气象局台风最佳路径数据更为接近。通过对台风过程中的热力和动力过程分析发现, 高频海温强迫场会使更多的水汽进入台风中心, 释放凝结潜热, 增强台风次级环流。对流增强使得内核区域下沉气流增强, 进而加强台风暖心, 导致中心气压降低, 台风增强; 同时, 入流的增强使得更多的涡度和角动量向台风中心输送, 台风结构紧致, 平均切向风增大, 台风增强。

关键词: 海温; 台风强度; 时间分辨率; 次级环流

中图分类号: P731.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)02-0071-12

0 引言

台风是西北太平洋频繁发生的灾害性天气系统之一, 随着台风向陆地移动, 往往会给沿海地区带来巨大的生命和财产损失^[1-5]。另外, 随着我国能源结构的变革和海上风电技术的日臻完善, 我国在东海和南海区域建立了大量的风电场, 台风天中风机的运转和维护也依赖于台风的预报^[6-8]。因此, 提高台风路径和强度预报和模拟的准确性, 对我国的防灾减灾以及能源经济发展意义重大。

台风的预报和模拟主要依赖于中尺度的数值模式。随着数值模式的改进、资料同化技术的优化、观测水平的提高, 台风路径的预报准确性已经得到了明显的改善。然而, 台风强度的预报水平仍然停滞不前^[9]。EMANUEL等^[10]使用耦合飓风强度预测系统(Coupled Hurricane Intensity Prediction System, CHIPS)^[11]研究指出在台风过程的初始阶

段, 初始强度误差是台风强度误差的主要来源, 但随着预报时效的增加, 路径误差和垂直风切变误差对台风强度误差的发展起主要作用。另一些研究工作发现积云参数化方案的选取对台风强度预报模拟技巧的影响较大^[12-14]。这些研究工作主要考虑了大气不确定性以及参数不确定性对台风强度预报误差的影响, 忽略了海温不确定性的作用; 另外, 当前大部分数值模式都是采用固定的或者日平均的下垫面海温强迫来对台风进行预报和模拟, 忽略了台风和海洋之间的相互作用。

实际上, 海洋作为大气的外强迫, 它既是台风主要的能量来源, 也会与台风发生剧烈的相互作用, 对台风强度上限及强度变化有着巨大的影响^[15-20]。TORN^[9]通过一系列的集合敏感性试验指出, 尽管在预报初始阶段, 台风强度误差主要受大气不确定性的影响, 但在长时效的预报中, 海温不确定性对台风强度误差的影响与大气不确定性的

收稿日期: 2022-09-08。

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科研项目(202103460); 国家自然科学基金项目(42205064)。

作者简介: 易侃(1992-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事海上风电研究。E-mail: yi_kan@ctg.com.cn

*通信作者: 姚佳伟(1993-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事热带气旋强度可预报性研究。E-mail: yaojiawei15@mails.ucas.ac.cn

影响相当。尽管如此,仍然有些研究认为海温对台风强度的影响不大^[14,21]。因此,海温对台风强度到底有多大的影响仍然是一个值得深入研究的问题。众所周知,随着计算机技术的不断进步,海气耦合模式逐步完善成熟。相比于单个大气模式,耦合模式能够用高时间分辨率的海温强迫场驱动大气模拟,更好地刻画台风和海洋的相互作用过程。然而,由于耦合模式的复杂性,用其对台风进行预报、模拟需要花费更多的计算资源。因此,如果海温对台风具有较大的影响,使用耦合模式能够在多大程度上改善台风强度预报效果,为了回答这个问题,本研究拟采用不同时间分辨率的海温场去强迫大气,探究高时间分辨率的海温场对台风强度模拟预报的影响。

1 数据和试验设计

1.1 数据和个例说明

本研究的台风最佳路径资料来自于中国气象局(Chinese Meteorology Agency, CMA)的西北太平洋台风最佳路径数据集^[22-23],相比于日本气象厅和美国台风联合预警中心的最佳路径数据,CMA的最佳路径资料对严重影响我国的台风记录更准确,且时间分辨率更高。

大气资料来自美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的全球最终分析和预报数据(Final Operational Global Analysis and Forecast Data, FNL),其水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$;地形高度也是采用NCEP提供的高精度地形数据。

海温数据来自于国家海洋环境预报中心(National Marine Environmental Forecasting Center, NMEFC)研制的MLSST(Mixed-Layer model Sea Surface Temperature)海温数据,水平分辨率为 $0.3^\circ \times 0.3^\circ$,时间分辨率为逐小时。MLSST是由LING等^[24]开发的上层海洋混合层模式计算得到,与热带大气海洋观测计划(Tropical Atmosphere Ocean Array, TAO)和美国国家数据浮标中心(National Data Buoy Center, NDBC)的浮标观测数据对比,平均偏差为 $-0.26 \sim 0.40$,总体偏差为 $-0.1 \sim 0.1$,均方根误差为 $0.16 \sim 0.69$,其在天气和气候尺度上均具

有较好的刻画能力^[25]。日平均海温通过对逐小时海温计算日平均获得。

2019年9号超强台风“利奇马”于8月4日06时(世界时,下同)在(131.90°E , 17.40°N)形成风力为8级的热带风暴,随后向西北移动。快速增强一般定义为在24 h内最大风速(风场的最大风速值)增大30 kt(15.4 m/s)^[26]或者最小海平面气压下降42 hPa^[27]。8月6日18时—8月7日18时,台风发生了快速增强(最低中心气压下降了50 hPa,大于42 hPa,最大风速增加了22 m/s,大于15.4 m/s)。台风“利奇马”的最低中心气压为915 hPa,最大风速为62 m/s(最佳路径参考了CMA的数据)。8月9日17时45分前后,台风“利奇马”在浙江台州登陆,随后在内陆肆虐,一路北上,对浙江、江苏和山东的沿海地区造成巨大影响,直至8月13日台风进入渤海后消亡。本研究将选取8月5日00时—8月10日00时台风“利奇马”在海上活动的时段进行模拟研究。

1.2 模式简介

WRF(The Weather Research and Forecasting)模式被广泛应用于中小尺度天气现象的模拟和预报,对中尺度的天气过程具有较好的刻画能力^[28]。本文模式的积分范围见图1,采用兰伯特投影方式,水平分辨率为 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$,垂直为61层,时间步长为20 s,共积分120 h。主要的参数化方案选取如下:积云

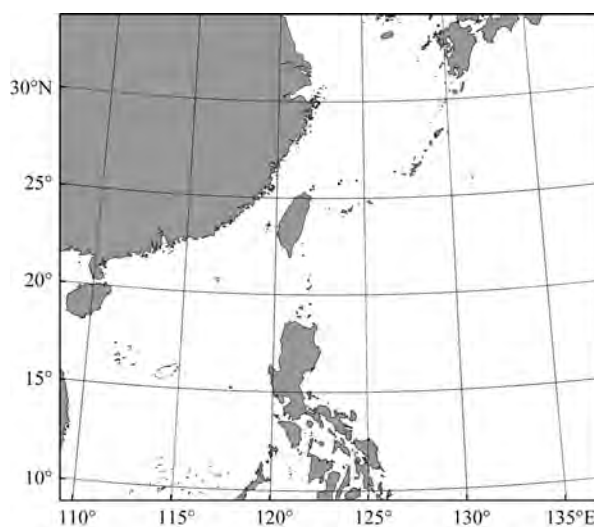


图1 WRF模式积分区域

Fig.1 WRF model domain

对流参数化采用 Kain-Fritsch 方案^[29];云微物理采用 Eta (Ferrier)方案^[30];短波和长波辐射分别是 Dudhia 方案^[31]和 RRTM 方案^[32];边界参数化方案则是应用 Yonsei University 方案^[33]。

1.3 试验设计

为了探究不同时间频次的海温强迫对台风模拟的影响,本文设计以下两组数值试验:

①“hourly-SST”试验:采用逐小时海温资料生成逐小时的海温强迫场模式,模拟台风“利奇马”在8月5日00时—8月10日00时期间的发展过程。

②“daily-SST”试验:利用逐小时海温资料计算获得日平均海温强迫场模式,模拟台风“利奇马”在8月5日00时—8月10日00时期间的发展过程。

两组试验的主要区别是海温强迫场的时间分辨率不同,其余的参数设置完全一致。

2 试验结果分析

2.1 台风的路径和强度

本研究中的台风路径根据最低中心气压 (Minimum Sea Level Pressure, MSLP) 确定,参考 KANADA 等^[34]的定位方法。具体为:①首先,确定当前时刻最低中心气压的位置(X, Y);②计算以($X \pm i \text{ grid}, Y \pm k \text{ grid}$)为中心、60 km 为半径内所有格点总的气压值(其中 $0 \leq i \leq 20, 0 \leq k \leq 20$);③选取 60 km 半径内所有格点总气压值最小的格点作为当前时刻的气旋中心。

两组试验模拟的台风“利奇马”路径和 CMA 的最佳路径的对比见图2。从图中可以看到,与最佳路径相比,两组试验都较好地模拟出了台风的移向,但是模拟的台风移速均相对较慢,这主要是由于对大尺度引导气流的模拟能力相对较弱,通常是由模式本身误差引起。另外,由于模式初始阶段动力不协调以及台风强度相对较弱,按 KANADA 等的定位方法确定的中心位置变化较大,会造成台风路径在模拟的初期阶段与 CMA 的最佳路径有一定的偏差。尽管如此,两组试验模拟的台风移动路径几乎一致,由此可见,不同频次的海温强迫对台风

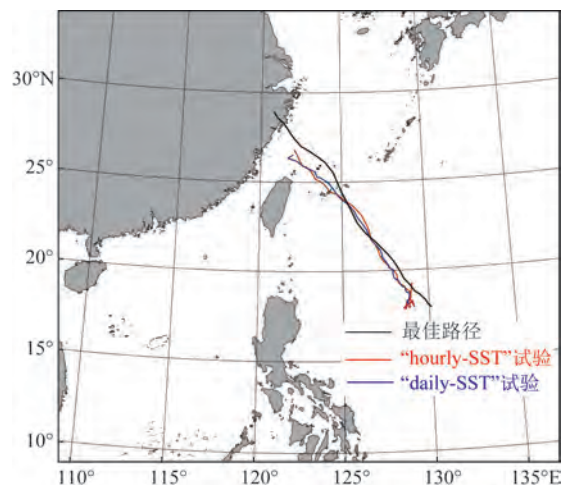


图2 “利奇马”台风路径分布情况。

Fig.2 The track of Typhoon "Lekima"

路径的影响较小。

图3a和图3b分别给出了两组试验模拟的台风“利奇马”最低中心气压和最大风速随时间的演变及其与观测的对比。根据 CMA 的最佳路径结果来看,0~42 h 时台风处于缓慢的增强阶段,最低中心气压从 995 hPa 下降到 975 hPa 左右;随后,42~66 h 时台风快速增强,在此期间,最低中心气压下降了 50 hPa,最大风速增加了 22 m/s;66~84 h 时台风处于成熟阶段,强度几乎维持不变;84 h 以后,台风越来越接近陆地,强度逐渐衰减。

模式对于台风“利奇马”强度变化过程的模拟存在一定的偏差,主要表现为在 0~42 h 台风缓慢增强阶段,台风强度模拟结果略强于最佳路径结果。在快速增强阶段,模式对于快速增强建立的时间(48 h 左右)晚于最佳路径结果(42 h),快速增强的速率偏小。对比“daily-SST”试验和“hourly-SST”试验可以看出,两者对台风缓慢增强阶段的模拟基本上是一致的;从 30 h 开始,“hourly-SST”的模拟结果逐渐强于“daily-SST”;在快速增强阶段,“hourly-SST”试验的最大风速于 60 h 左右开始迅速增强,先于“daily-SST”试验 3 h,且台风增强速率更大,与最佳路径的台风强度变化速率更接近;最终,“hourly-SST”试验模拟的台风强度也强于“daily-SST”试验。那么,不同时间分辨率的海温强迫场是如何造成这样的台风强度差异的呢?接下来,我们将从热力和动力角度进行分析。

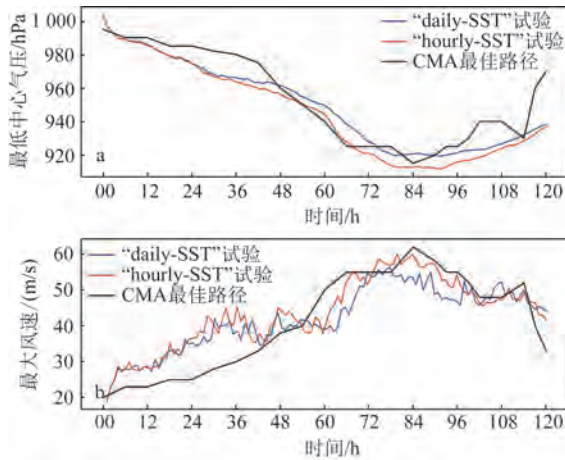
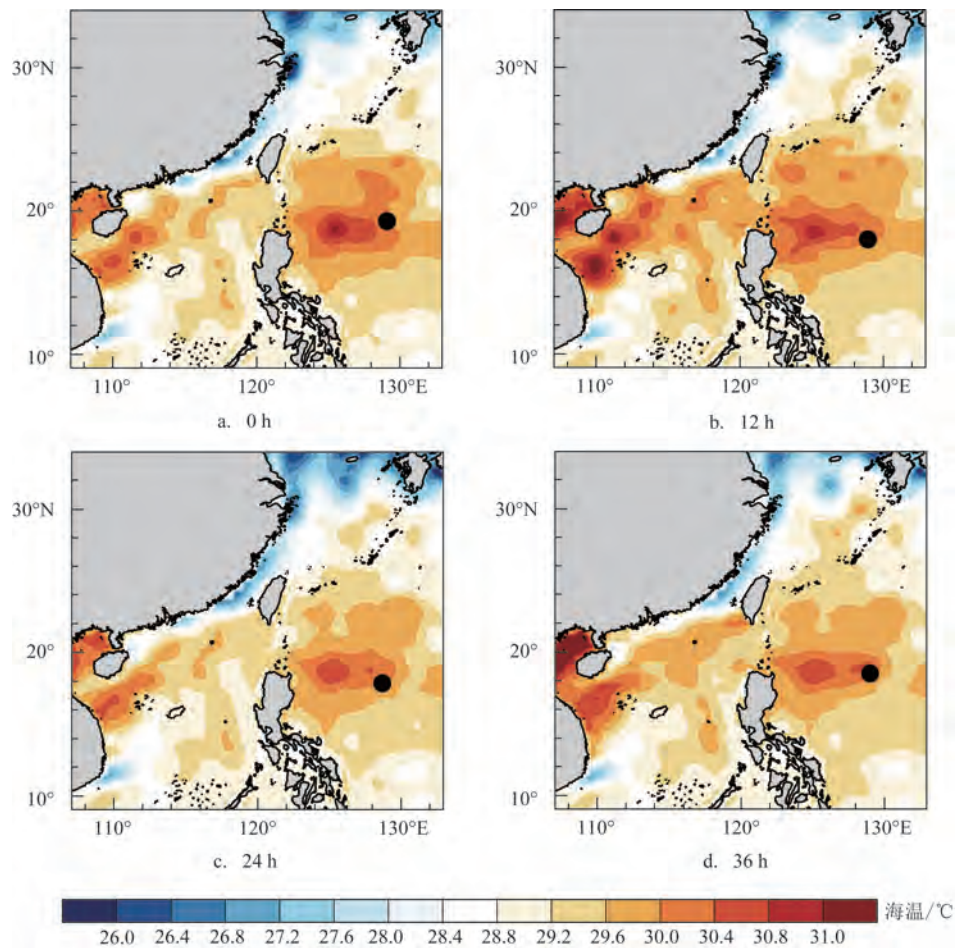


图3 台风“利奇马”最低中心气压(a)和最大风速(b)随时间的变化曲线

Fig.3 Time series of minimum sea level pressure (a) and maximum wind speed (b) of Typhoon "Lekima"

2.2 海温影响台风强度的热力过程

两组试验最根本的差异为采用了不同频次的海温资料,因此首先对比分析两组试验的海温分布差异。图4为台风“利奇马”发生发展期间MLSST资料逐时海温分布情况。从图中可以看到,在初始时刻的台风路径上,西北太平洋上存在一个30℃以上的巨型暖涡,这为台风的发展成熟尤其是快速增强提供了充足的能量。随着台风的移动发展,海温逐渐下降,暖涡减弱,但始终保持在29℃以上。图5是“hourly-SST”试验与“daily-SST”试验中对应时刻的海温差异,从中可以看出,在0 h、24 h、48 h、72 h和96 h,“hourly-SST”试验对应的海温高于“daily-SST”试验(在6 h、30 h、54 h、78 h和102 h也有对应特征,图略)。另外,在12 h、36 h、60 h、84 h和108 h,



注:黑点代表“hourly-SST”试验中对应时刻台风“利奇马”所在位置

图4 “hourly-SST”试验中逐12 h的海温分布

Fig.4 The distributions of SST at every 12 hours in the "hourly-SST" experiment

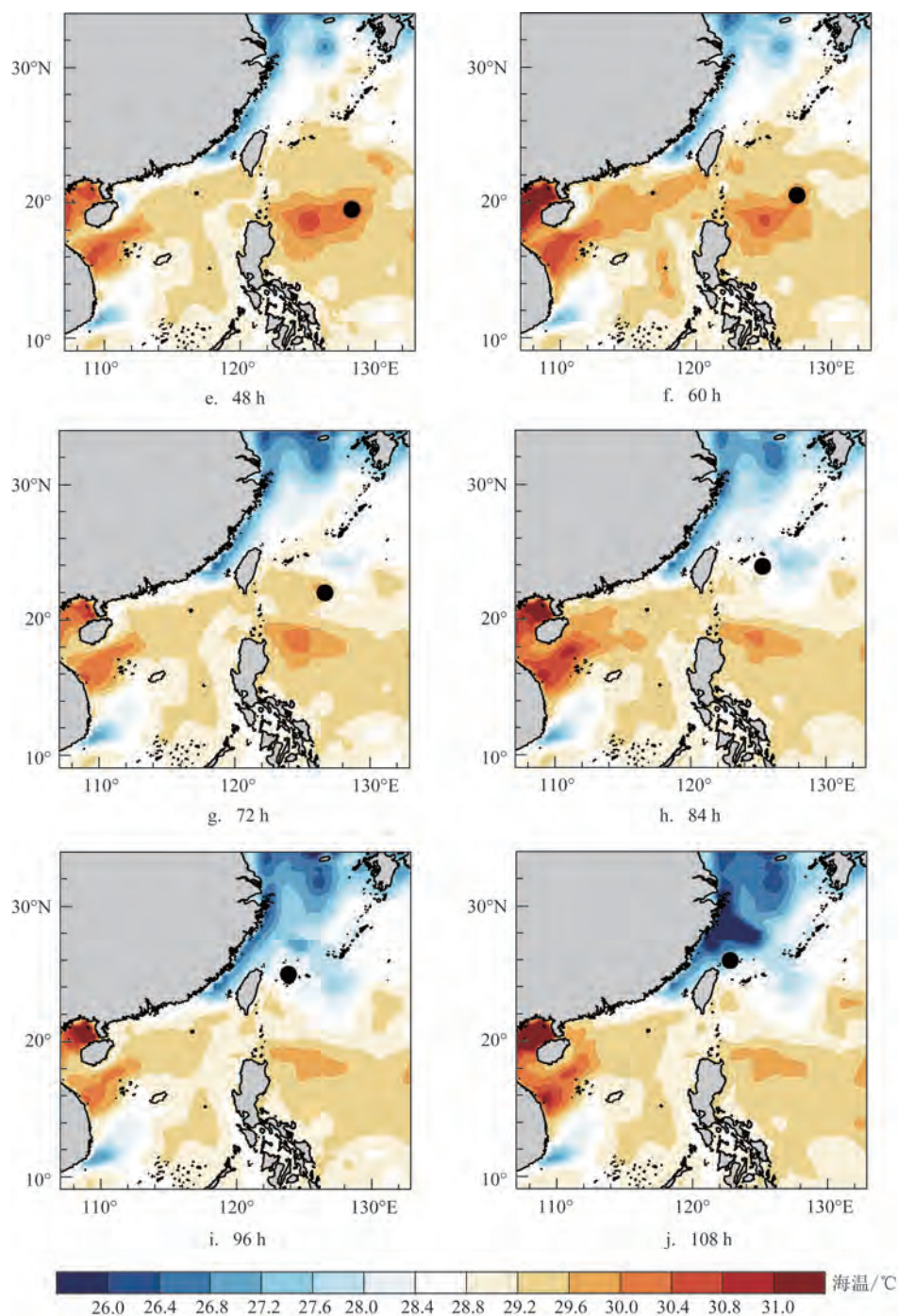


图4 (续)

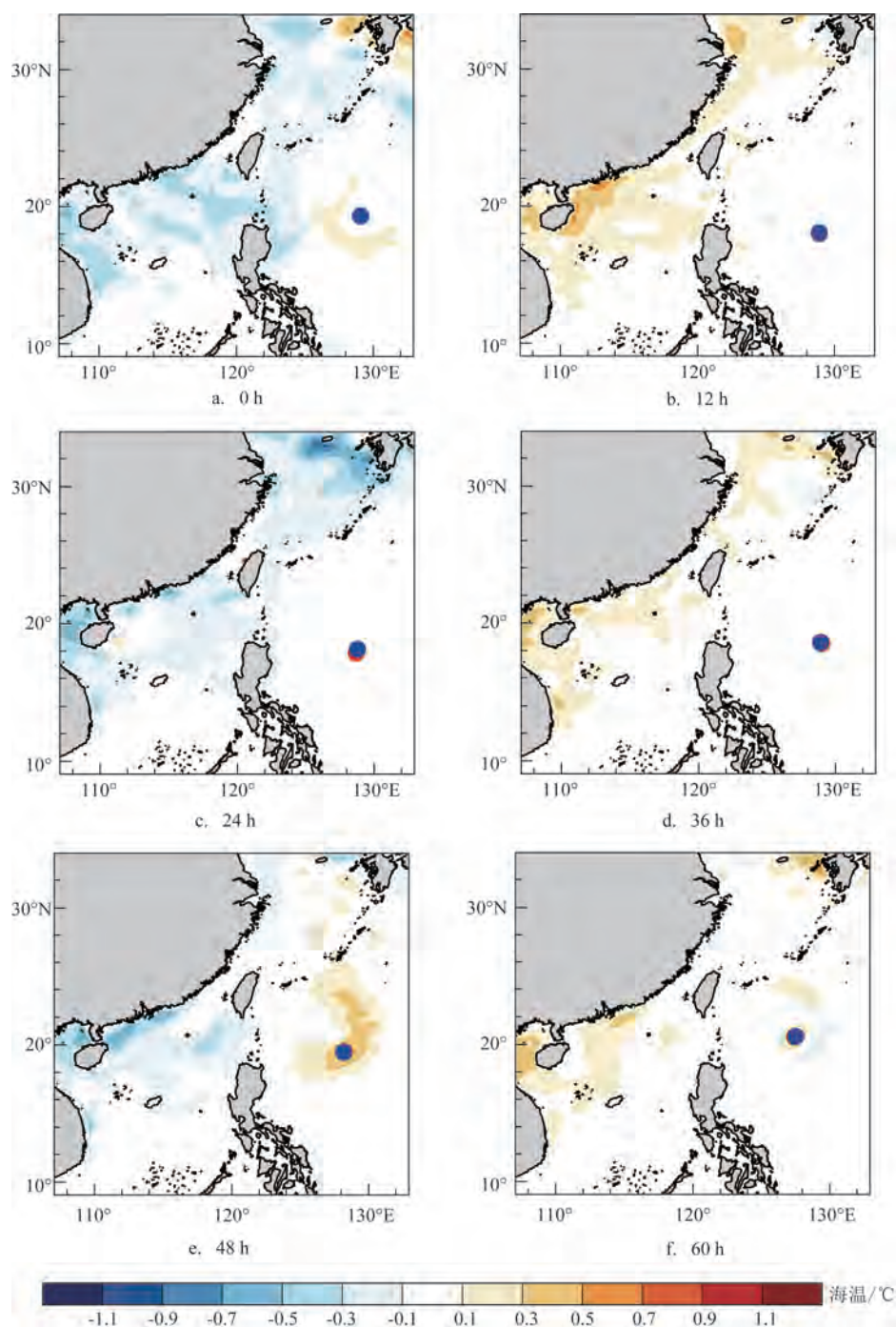
Fig.4 (Continued)

“hourly-SST”试验中大部分区域的海温略低于“daily-SST”试验,特别是在台风位置的后侧(在18 h、42 h、66 h、90 h和114 h也有对应特征,图略)。这种差异除了海温日变化的原因外,实际上是由于在台风影响区域存在强烈的海气相互作用,“hourly-

SST”的海温更能反映出台风和海温相互作用过程前后的信号,在台风经过之前,暖涡更暖,而台风移动过去后,其后侧的冷尾迹也更明显。前人的研究指出,局地区域的海温对台风强度具有较大影响,因此我们提取距台风中心100 km半径以内的平均

海温时间序列进行分析。图6a展示的是两组试验的局地平均海温随时间的变化情况。从图中可以看出,0~30 h中两组试验的局地海温并不存在明显差异,因此,两组试验模拟的台风强度在这段时间基本吻合;30~84 h中“hourly-SST”试验的局地海

温基本高于“daily-SST”试验,最大海温差达到0.5℃,这也恰好对应了“hourly-SST”试验的台风增强速率和台风强度大于“daily-SST”试验的阶段。那么,更高的下垫面海温强迫是如何对台风强度造成影响的呢?



注:红点(蓝点)代表“hourly-SST”试验(“daily-SST”试验)对应时刻台风“利奇马”所在位置

图5 “hourly-SST”试验和“daily-SST”试验逐12 h的海温差异分布

Fig.5 Patterns of the difference between the SST of the "hourly-SST" and "daily-SST" experiments at every 12 hours

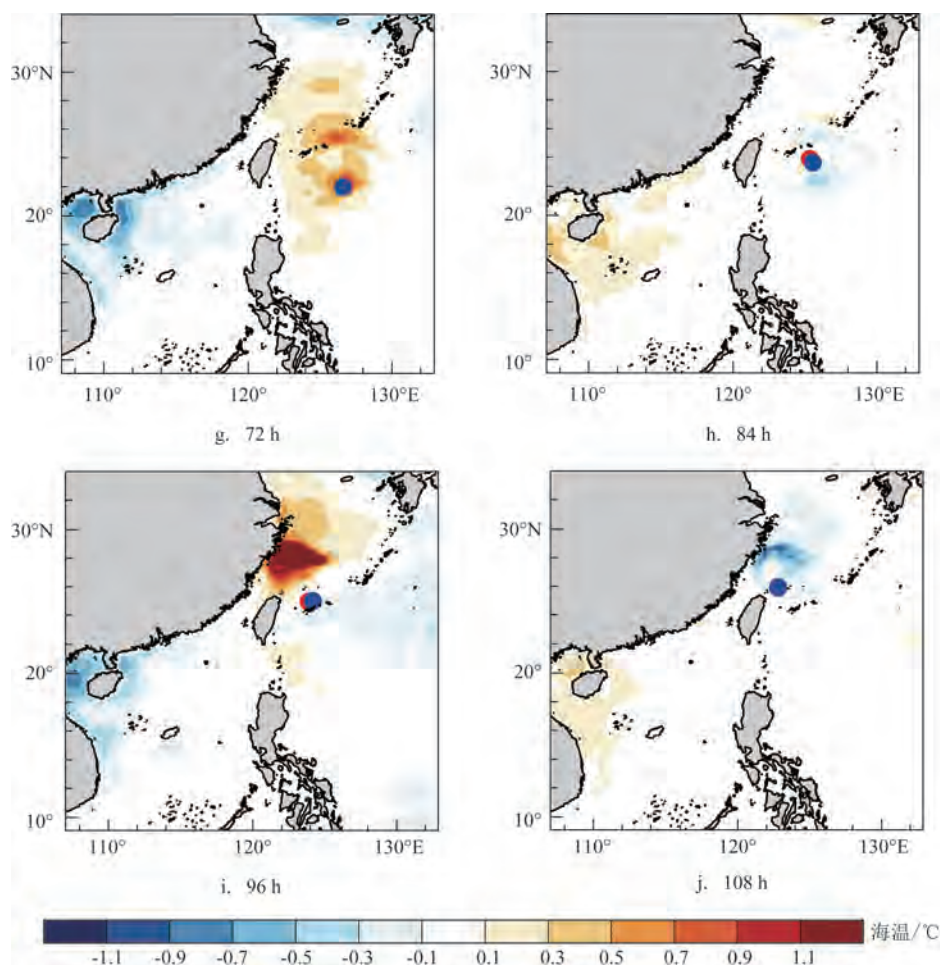


图5 (续)

Fig.5 (Continued)

海温差异会直接导致海气界面热通量的不同。图 6b 和图 6c 分别给出了两组试验中距台风中心 100 km 半径以内的平均感热和潜热通量随时间的变化情况。从图中可以明显看出,在 30 h 以后,“hourly-SST”试验的局地热通量高于“daily-SST”试验,这意味着“hourly-SST”试验中有更多的水汽和热量进入涡旋系统。图 7a 展示的是两个试验在 30~84 h 平均水汽差异的径向垂直剖面图。从图中可以看到,较高的海温向大气输送了更多水汽,这些水汽会被平流到台风的对流区域。增多的水汽会导致对流区域有更多的凝结潜热释放,进而造成对流加强(见图 7b),也就是次级环流的增强。随后,上层的辐合会使得内核区域的下沉速度加强,并进一步使得高层的高熵气体被拖曳到中层。CHANG 等^[35]利用静力方程计算了台风内核区域垂

直方向的位温扰动与地表气压的关系,并指出台风的中心气压与中上层的位温扰动具有一致的变化关系。图 7c 展示的是 30~84 h 位温的径向垂直剖面图,图中可以明显看到,在“hourly-SST”试验中,6~15 km 高度处的内核暖心明显更强,最终使得台风中心气压降低,台风强度更强。

2.3 海温影响台风强度的动力过程

前文分析了海温影响台风强度的热力过程,除此之外,海温还可以从动力途径影响台风强度。图 8 展示的是两组试验中最大风速半径随时间的变化情况。从图中可以看出,0~30 h 台风的最大风速半径逐渐收缩,由于在此期间两组试验的海温差异不大,所以两者的最大风速半径基本变化一致。30 h 以后,台风“利奇马”的最大风速半径维持在 50 km

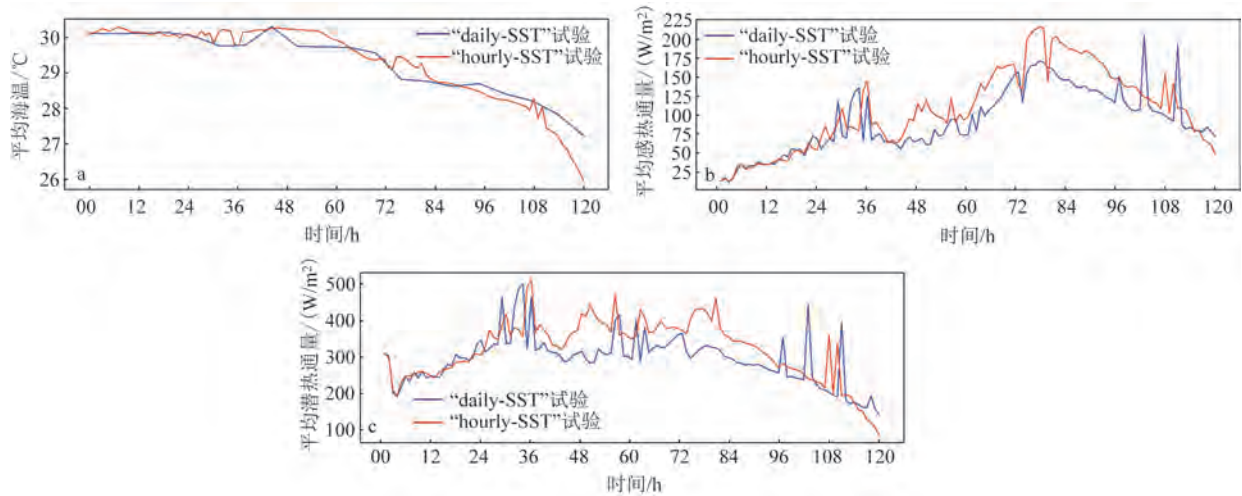


图6 台风“利奇马”100 km半径内平均海温(a)、平均感热通量(b)以及平均潜热通量(c)随时间的变化曲线

Fig.6 Time series of the mean SST (a), sensible heat flux (b) and latent heat flux (c) within the radius of 100 km for Typhoon "Lekima"

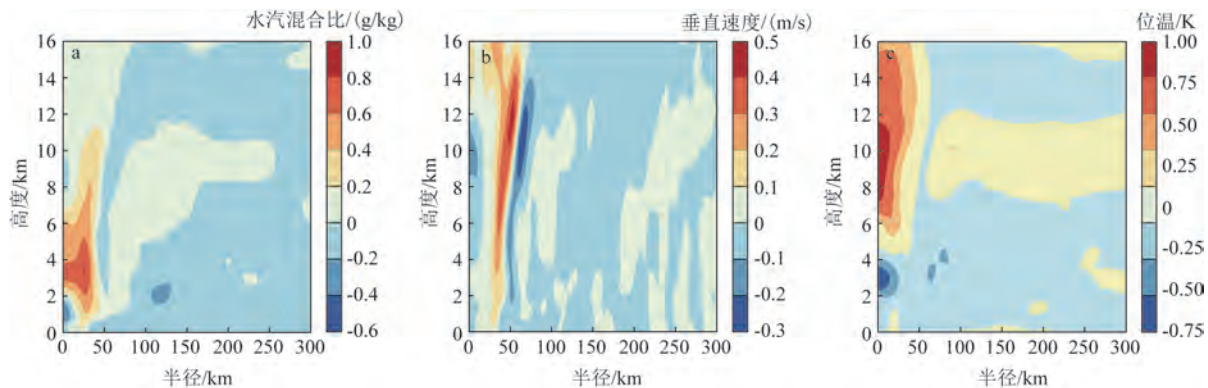


图7 “hourly-SST”试验和“daily-SST”试验在30~84 h期间平均水汽(a)、垂直速度(b)和位温(c)差异的径向垂直剖面

Fig.7 The radius-height section of the difference of water vapor (a), vertical velocity (b) and potential temperature (c) averaged during 30~84 h between the "hourly-SST" and "daily-SST" experiments

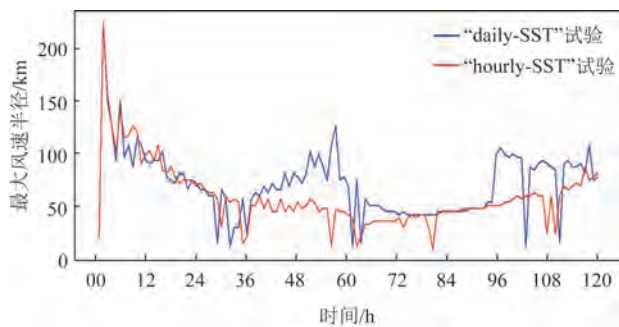


图8 “hourly-SST”试验和“daily-SST”试验模拟的台风“利奇马”最大风速半径随时间的变化

Fig.8 Time series of the radius of max wind speed for Typhoon "Lekima" in the "hourly-SST" and "daily-SST" experiments

左右,台风随后出现了快速增强过程。值得注意的是,在台风快速增强过程中,“hourly-SST”试验的最大风速半径维持不变,但是“daily-SST”试验的最大风速半径却增大了,这意味着较低的海温强迫场使得台风的结构变得宽松,导致向外输送涡度,不利于台风快速增强的发展。

在“hourly-SST”试验中,由于30~84 h的海温相对较高,使得台风在此期间获得更多的潜热能量,次级环流加强,表现为对流加强以及内核区域下沉增强,随后导致内核暖心增强,最终使得台风具有更大的强度。台风的次级环流还包括入流部分,次级环流的增强也会使得入流增强,这就会将外部涡度和角动量向内核输送,进而导致台风增强。

图9为两组试验模拟的30~84 h台风“利奇马”周围平均涡度的径向分布。相比于“daily-SST”试

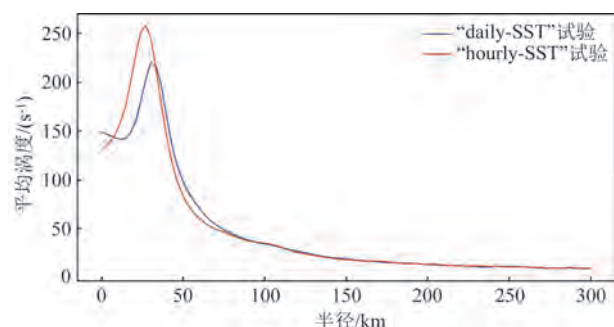


图9 “hourly-SST”试验和“daily-SST”试验模拟的30~84 h台风“利奇马”周围平均涡度的径向分布图

Fig.9 The radius dependent curves of vorticity centered on Typhoon "Lekima" averaged during 30~84 h simulated by the "hourly-SST" and "daily-SST" experiments

验,“hourly-SST”试验模拟的台风系统的涡度峰值更大且更靠近内核。涡度向台风中心富集有利于台风结构的维持,使得台风更强。图10展示的是两组试验在36~96 h期间逐12 h的角动量差异径向垂直分布。径向平流使得更多的角动量被输送到内核区域,进而使得平均切向风速增大,台风增强。

3 结论与展望

本文基于WRF模式,采用不同频次的海温强迫场对2019年的超强台风“利奇马”进行了模拟,探讨了不同频次海温强迫场对台风模拟的影响。结果表明:

①不同频次的海温强迫场对台风“利奇马”路径模拟的影响相对较小,两组试验模拟的台风路径

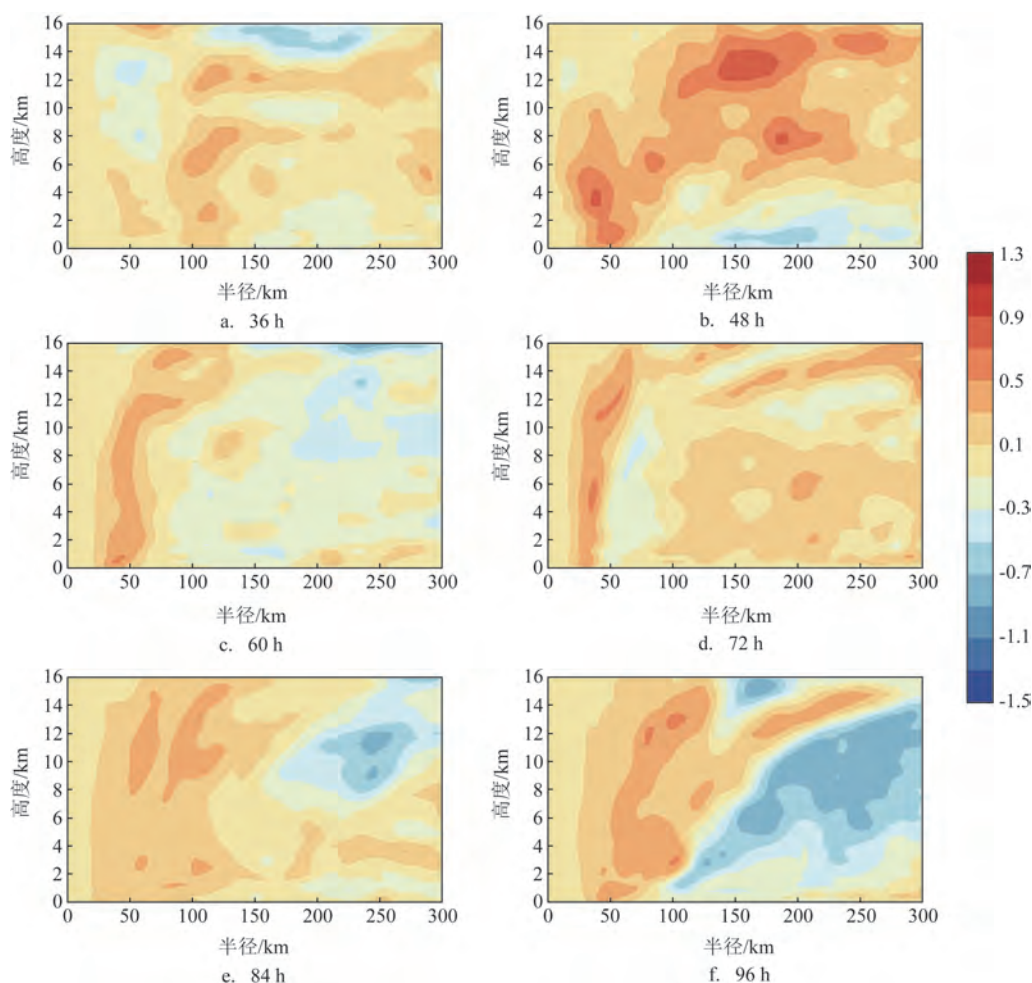


图10 “hourly-SST”试验和“daily-SST”试验在36~96 h期间逐12 h的角动量差异分布(单位: m^2/s)

Fig.10 The radius-height sections of differences of angular momentum at every 12 hours during 36~96 h between the "hourly-SST" and "daily-SST" experiments (unit: m^2/s)

几乎一致,但是对台风强度的模拟影响较大,尤其是在台风快速加强阶段,高频海温强迫试验模拟的台风强度与观测更加接近。

②两组试验本质的差别是采用了不同频次的海温强迫场。相比于“daily-SST”试验,“hourly-SST”试验保留了海温日变化的信号,其在近台风中心区域的海温相对更高,导致试验中台风中心附近的海气界面处潜热通量和感热通量更大,进而导致了更多的水汽进入台风中心,使得凝结潜热释放的能量增加,次级环流增强。次级环流的增强一方面使台风内核区域的下沉增强,从而将高层的高熵气体带下来,加强了6~12 km高度处的台风暖心,使得中心气压降低,台风增强;另一方面,次级环流增强使台风的入流加强,进而将涡度和角动量向台风中心输送,从而使台风的平均流场加强,使得台风具有更大的风速,模拟的台风强度更强。

本文的研究表明,高频海温强迫对台风“利奇马”发展过程(特别是在台风增强阶段)的强度模拟比日平均海温试验更加接近观测,因此,采用高时间分辨率的海温场或者耦合模式可能是改进台风强度预报的潜在手段之一。但是,本文的研究仅是台风“利奇马”单一个例结果,其他台风是否具有相同的结果还有待进一步的研究。此外,台风的快速增强研究是当前的热点和难点,其发生发展的机制大部分是从大气的角度进行研究,而海洋作为主要的能量来源,海温对于台风快速增强的建立和发展到底具有怎样的贡献,也是未来值得深入研究的问题。

参考文献:

- [1] PEDUZZI P, CHATENOUX B, DAO H, et al. Global trends in tropical cyclone risk[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(4): 289-294.
- [2] 周磊, 陈大可, 雷小途, 等. 海洋与台风相互作用研究进展[J]. *科学通报*, 2019, 64(1): 60-72.
ZHOU L, CHEN D K, LEI X T, et al. Progress and perspective on interactions between ocean and typhoon[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(1): 60-72.
- [3] YE J Y, LIN G F, ZHANG M F, et al. Hazard analysis of typhoon disaster-causing factors based on different landing paths: a case study of Fujian Province, China[J]. *Natural Hazards*, 2020, 100(2): 811-828.
- [4] 罗金炎, 徐飞, 李燕, 等. 福建省台风灾害损失分布分析[J]. *沈阳师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 38(5): 417-421.
- LUO J Y, XU F, LI Y, et al. Analysis on the distribution of typhoon disaster losses in Fujian province[J]. *Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2020, 38(5): 417-421.
- [5] 闫绪娴, 范玲, 阮嘉璐. “一带一路”沿线国家台风灾害关联经济损失研究——以2018年“山竹”台风灾害为例[J]. *灾害学*, 2021, 36(1): 7-12.
- YAN X X, FAN L, RUAN J J. The relational economic losses assessment of typhoon disaster among the belt and road countries: taking the typhoon Mangkhut in 2018 as an example[J]. *Journal of Catastrophology*, 2021, 36(1): 7-12.
- [6] 戎晓洪. 海上风电场防台风措施研究[J]. *南方能源建设*, 2016, 3(S1): 77-81.
- RONG X H. Study on typhoon prevention measures of offshore wind farm[J]. *Southern Energy Construction*, 2016, 3(S1): 77-81.
- [7] 高晓霞, 罗茜. 水电巨头布局广东海上风电产业——三峡集团打造海上风电新蓝图[J]. *海洋与渔业*, 2018(5): 37-40.
- GAO X X, LUO Y. Hydropower giants lay out Guangdong's offshore wind power industry ——Three Gorges group creates a new blueprint for offshore wind power[J]. *Ocean and Fishery*, 2018(5): 37-40.
- [8] 芦直跃, 马宏旺, 李玉韬, 等. 台风对海上风电单桩基础累积变形影响试验研究[J]. *海洋技术学报*, 2019, 38(6): 75-82.
- LU Z Y, MA H W, LI Y T, et al. Experimental study on the effect of typhoons on accumulated deformation of the monopile foundation for offshore wind turbines[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2019, 38(6): 75-82.
- [9] TORN R D. Evaluation of atmosphere and ocean initial condition uncertainty and stochastic exchange coefficients on ensemble tropical cyclone intensity forecasts[J]. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(8): 3487-3506, doi: 10.1175/MWR-D-16-0108.1.
- [10] EMANUEL K, ZHANG F Q. On the predictability and error sources of tropical cyclone intensity forecasts[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73(8): 3739-3747.
- [11] EMANUEL K, DESAUTELS C, HOLLOWAY C, et al. Environmental control of tropical cyclone intensity[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2004, 61(7): 843-858.
- [12] NASROLLAHI N, AGHAKOUCHAK A, LI J L, et al. Assessing the impacts of different WRF precipitation physics in hurricane simulations[J]. *Weather and Forecasting*, 2012, 27(4): 1003-1016.
- [13] SHEPHERD T J, WALSH K J. Sensitivity of hurricane track to cumulus parameterization schemes in the WRF model for three intense tropical cyclones: impact of convective asymmetry[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2017, 129(4): 345-374.
- [14] PARKER C L, LYNCH A H, MOONEY P A. Factors affecting the simulated trajectory and intensification of Tropical Cyclone Yasi (2011)[J]. *Atmospheric Research*, 2017, 194: 27-42.
- [15] PRICE J F. Upper ocean response to a hurricane[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1981, 11(2): 153-175.
- [16] EMANUEL K A. The maximum intensity of hurricanes[J].

- Journal of the Atmospheric Sciences, 1988, 45(7): 1143-1155.
- [17] SCHADE L R. Tropical cyclone intensity and sea surface temperature[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2000, 57(18): 3122-3130.
- [18] SHAY L K, GONI G J, BLACK P G. Effects of a warm oceanic feature on Hurricane Opal[J]. Monthly Weather Review, 2000, 128(5): 1366-1383.
- [19] ČRNIVEC N, SMITH R K, KILROY G. Dependence of tropical cyclone intensification rate on sea-surface temperature[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2016, 142(697): 1618-1627.
- [20] 陶静雯, 万莉颖, 陈莉. 高分辨率海温数据对1810号台风“安比”WRF数值模拟的影响[J]. 海洋预报, 2022, 39(1): 80-90.
- TAO J W, WAN L Y, CHEN L. The impact of high resolution sea surface temperature data on typhoon "Ampil" (1810) simulation using WRF model[J]. Marine Forecasts, 2022, 39(1): 80-90.
- [21] EVANS J L. Sensitivity of tropical cyclone intensity to sea surface temperature[J]. Journal of Climate, 1993, 6(6): 1133-1140.
- [22] YING M, ZHANG W, YU H, et al. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(2): 287-301.
- [23] LU X Q, YU H, YING M, et al. Western north pacific tropical cyclone database created by the China meteorological administration[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(4): 690-699.
- [24] LING T J, XU M, LIANG X Z, et al. A multilevel ocean mixed layer model resolving the diurnal cycle: development and validation[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2015, 7(4): 1680-1692.
- [25] LI X, LING T J, ZHANG Y F, et al. A 31-year global diurnal sea surface temperature dataset created by an ocean mixed-layer model[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2018, 35(12): 1443-1454.
- [26] 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.
- [27] HOLLIDAY C R, THOMPSON A H. Climatological characteristics of rapidly intensifying typhoons[J]. Monthly Weather Review, 1979, 107(8): 1022-1034.
- [28] SKAMAROCK W C, KLEMP J B, DUDHIA J, et al. A description of the advanced research WRF version 3[R]. No. NCAR/TN-475+STR, Boulder: University Corporation for Atmospheric Research, 2008: 113.
- [29] KAIN J S. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2004, 43(1): 170-181.
- [30] ROGERS E, BLACK T, FERRIER B, et al. Changes to the NCEP Meso eta analysis and forecast system: increase in resolution, new cloud microphysics, modified precipitation assimilation, modified 3DVAR analysis[J]. NWS Technical Procedures Bulletin, 2001, 488: 15.
- [31] DUDHIA J. Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1989, 46(20): 3077-3107.
- [32] MLAWER E J, TAUBMAN S J, BROWN P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102(D14): 16663-16682.
- [33] HONG S Y, NOH Y, DUDHIA J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes[J]. Monthly Weather Review, 2006, 134(9): 2318-2341.
- [34] KANADA S, WADA A. Numerical study on the extremely rapid intensification of an intense tropical cyclone: Typhoon Ida (1958) [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2015, 72(11): 4194-4217.
- [35] CHANG C C, WU C C. On the processes leading to the rapid intensification of Typhoon Megi (2010) [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2017, 74(4): 1169-1200.

Effect of sea surface temperature forcing with different frequency on the simulation of Typhoon "Lekima"

YI Kan¹, YAO Jiawei^{2*}, LI Xiang², DU Mengjiao¹, ZHANG Yunfei², LUO Jiaqi², WANG Chenqi²

(1. Science and Technology Research Institute of China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 2. Key Laboratory of marine disaster prediction technology, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of natural resources, Beijing 100081, China)

Abstract: Utilizing the sea surface temperature (SST) forcing fields with different time resolution, the super Typhoon "Lekima" is simulated by the Weather Research and Forecasting model. The result shows that, the effect

of SST forcing with different time resolution on the track of the typhoon can be ignored, but the effect on the intensity of typhoon is significant. Compared with the daily averaged SST forcing field, the SST forcing with high time resolution contains the signal before the SST-TC interaction which induces one warmer eddy on the track of the typhoon, and finally leads to a stronger typhoon. The simulated track with high time resolution SST is closer to the best track of Typhoon "Lekima" of CMA, especially during rapid intensification phase. Through the analysis of thermodynamic and dynamic processes during Typhoon "Lekima", it is found that: SST forcing field with high time resolution generates increased water vapor into the typhoon center and releases the latent heat of condensation, leading to the enhancement of the secondary circulation. The enhancement of convection makes the downdraft in the core region stronger, then strengthens the warm core, decreases the sea level pressure of the typhoon center, finally leads to the intensification of the typhoon. Meanwhile, the enhancement of inflow makes more vorticity and angular momentum transport to the typhoon center, which leads to compact typhoon structure and increases the mean tangential wind, finally produces a stronger typhoon.

Key words: sea surface temperature; intensity of typhoon; time resolution; secondary circulation