

基于谱逼近探究台风初始场误差对路径误差的影响

梁东^{1,3}, 来志刚^{2*}, 英晓明^{1,3}, 曾志豪², 高娜³, 赵明利^{1,3}

(1. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广东广州 510300; 2. 广东省海洋资源与近岸工程重点实验室, 中山大学海洋科学学院, 广东广州 510275; 3. 自然资源部南海发展研究院, 广东广州 510300)

摘 要: 针对多层嵌套中尺度天气研究与预报模式(WRF), 以1713号台风“天鸽”为例, 研究不同的热启动方式对台风模拟精度的影响, 并以1614号台风“莫兰蒂”、1822号台风“山竹”和2309号台风“苏拉”为例进行模拟验证。结果表明: 使用谱逼近能够减少大尺度环境场误差, 改善台风周围环境场, 减小多层嵌套WRF模式的初始场误差; 此技术能避免由于垂直风切变的增强和累积降雨量的增大, 减弱了非对称对流活动的强度; 如果不使用该技术, 加热项将削弱水平平流项对台风的引导作用, 导致24~72 h台风路径模拟误差增加。结果揭示: 采用谱逼近技术可有效缩小大尺度环境场的误差, 优化台风周边环境场, 并降低多层嵌套WRF模式初始场的误差, 防止垂直风切变过度增强和累积降雨量异常增加, 从而减轻非对称对流活动的强度, 避免加热项削弱水平平流项对台风的导向作用, 提高台风路径模拟准确性。

关键词: 初始场误差; 非对称对流; 位涡趋势诊断; 路径误差

中图分类号: P457.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)01-0071-10

0 引言

据统计, 2011—2020年间我国因台风造成的直接经济损失累计达6 651.8亿元^[1]。因此, 为了保障人民生命财产安全, 减少台风灾害带来的损失, 有必要加强台风预报模拟准确性的研究。

大量研究表明, 初始场的准确程度是影响台风模拟精度的主要因素之一^[2-6]。台风再分析资料的水平分辨率较低, 将其直接作为模型的初始场往往导致台风路径和强度预报达不到理想的效果。因此, 前人使用多种技术对台风初始场进行了改进, 其中具有代表性的包括动力初始化^[2]、人工造涡^[3]、基于虚假涡旋的资料同化^[4]、集合卡尔曼滤波同化^[5]和三维变分同化^[6]等。

谱逼近方法(Spectral Nudging)也可以用于台风初始场的改进^[7-8]。ROCKEL等^[9]研究发现, 谱逼近方法不仅能确保区域模型模拟的大尺度环境场

与观测或分析结果相似, 还能减少模型中小尺度环境场的变异性。FESER等^[10]在对台风“Winnie”(1997)的模拟中使用了谱逼近技术, 结果表明, 该技术可以改善对台风移动路径的预测。王淑莉等^[11]应用谱逼近技术模拟了2008年的持续性降水过程, 证实该技术可以提高模型模拟经向风场的能力。WANG等^[12]在模拟2010年台风“Megi”时对边界层以上的风场采用了谱逼近技术, 明显提高了台风轨迹与强度的模拟效果。CHA等^[13]为考察台风模拟中谱逼近时间间隔的敏感性, 设置了不同实验, 发现较短的时间间隔能更好地模拟台风路径。在台风实际预报中, CHA等^[2]使用天气研究预报模式(Weather Research and Forecasting Model, WRF)建立了一个包含西北太平洋的预报系统, 在模型热启动过程中对第一层网格使用谱逼近技术, 并叠加动力初始化技术改善台风内核, 实践证明台风的路径与强度预测结果优于主流机构的模拟结果。张兴

收稿日期: 2023-11-19。

基金项目: 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室自主设立课题(MESTA-2022-C005); 国家重点研发计划(2022YFC3106203)。

作者简介: 梁东(1996-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事台风海气耦合模型的研究与构建。E-mail: liangdong.96@qq.com

*通信作者: 来志刚(1977-), 男, 教授, 博士, 主要从事海洋科学计算及海洋模型研究等工作。E-mail: laizhig@mail.sysu.edu.cn

海^[14]使用了与CHA等^[2]类似的方法,对2014年台风“威马逊”的路径和快速增强过程进行了准确模拟。

前人的研究表明谱逼近技术可以减小台风初始场误差,但对于台风初始场误差如何影响台风模拟路径误差的研究较少,且初始场误差导致路径误差的作用机理有待进一步研究。因此,本文通过设计不同的热启动方案并比较不同方案的初始场,分析研究其对台风路径模拟的影响,从而为改进台风路径预报的准确度提供参考。

1 台风介绍

为了简化实验,避免使用动力初始化来增强台风的初始强度,本文选择经过一次热启动计算即能达到观测强度的1713号台风“天鸽”为例进行分析。台风“天鸽”于2017年8月19日18时(世界时,下同)在吕宋岛东部形成热带低气压,并向西南偏西方向移动;22日,台风“天鸽”从热带风暴升级为台风^[15];23日台风在广东省珠海市金湾区附近沿海登陆,登陆时中心附近最大风力为14级,最大风速达45 m/s,中心最低气压为950 hPa^[16];登陆后台风“天鸽”继续向西北方向移动,强度迅速减弱,24日在我国境内消散。

2 资料与实验设计

2.1 资料与方法

本文所模拟台风的气象资料选自美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的最终再分析数据(Final Reanalysis Data, FNL),数据的时间间隔为6 h,水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,垂直方向为32层。海温选取NCEP的全球实时海表面温度(Real Time Global Sea Surface Temperature, RTG_SST, 网址: ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/pub/history/sst/rtg_high_res/)资料。本文验证所使用的台风数据来自中国气象局热带气旋资料中心(网址: http://tcdata.typhoon.org.cn/zjljsjj_zlhp.html)。

结合大气运动基本方程组,可推导 p 坐标系下位涡倾向(Potential Vorticity Tendency, PVT)方程^[17-18]:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)_1 = \Lambda_1 \left\{ -V \cdot \nabla P - \omega \frac{\partial P}{\partial p} - \frac{g}{P_s} \nabla_3 \cdot \left(-\frac{Q}{c_p \pi} \mathbf{q} + \nabla \theta \times \mathbf{F} \right) \right\} \quad (1)$$

式中: ω 为 p 坐标系下垂直速度; Λ_1 为一波算子; \mathbf{q} 为三维绝对涡度矢量; Q 为加热项; \mathbf{F} 为摩擦项; P_s 为位涡对称分量; g 和 c_p 分别为重力加速度和干空气比定压热容; $\pi = \left(\frac{p}{1000}\right)^{R/c_p}$; ∇_3 为 p 坐标系下三维梯度算子。式(1)右侧从左到右分别为位涡水平平流项(Horizontal Advection, HA)、位涡垂直平流项(Vertical Advection, VA)、加热项(Diabatic Heating, DH)和摩擦项(Friction, FR)。在此需要说明的是,完整的PVT计算方法包含7个步骤,其中位涡趋势速度(台风移速)是在台风中心附近挑选一定的区域(将台风包含在内)并使用最小二乘法计算得到。本文篇幅有限,不展开介绍PVT方法,具体步骤见WU等^[17-18]。

2.2 实验设计

本文选用海气浪耦合模式(Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport, COAWST)^[19]中的WRF V4.0.3进行台风数值模拟实验。台风“天鸽”选取“lat-lon”地图投影,其中,区域中心为 117.2°E , 17.0°N ,第一层网格范围为 $92^\circ \sim 143^\circ\text{E}$, $3^\circ\text{S} \sim 37^\circ\text{N}$,第二层和第三层网格随台风中心移动。表1为模型的参数设置,对流参数化方案在小于6 km的网格中不使用,这样可以更精确地解析对流特性(DOYLE等^[20]);垂直分层为50层,在边界层和台风的流出层进行加密(KIMBALL等^[21]和BENDER等^[22]);近地面层使用Monin-Obukhov方案(GREEN等^[23]);3个网格中边界层方案、云微物理方案、长波辐射方案、短波辐射方案、近地层方案和陆面模式的选取均相同。台风“天鸽”的模拟时间段为2017年8月21日18时—23日12时。

共设置4组实验对不同启动方案进行比较(见图1),0 h表示模型的正式启动时间,-6 h表示提前6 h启动计算,Nudging grid1表示只对第一层网格实行谱逼近技术,子网格层的初始场由上一网格层插值得到。实验A和实验B为分析初始场一致性,实验C为分析谱逼近技术的效果,实验D为模型冷启

表 1 模型参数设置表

Tab.1 Model parameter table

设置类别	d01	d02	d03
网格数	311×251	271×271	211×211
水平分辨率/km	18	6	2
垂直层	50	50	50
模式顶层/hPa	10	10	10
对流参数化方案	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch	无
边界层方案	BouLac	BouLac	BouLac
云微物理方案	WSM6	WSM6	WSM6
长波辐射方案	RRTM	RRTM	RRTM
短波辐射方案	Dudhia	Dudhia	Dudhia
近地层方案	Monin-Obukhov	Monin-Obukhov	Monin-Obukhov
陆面模式	Noah	Noah	Noah

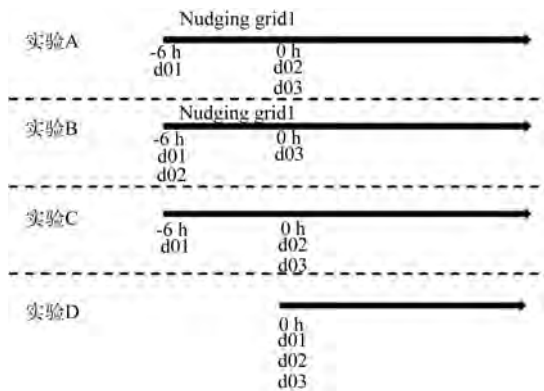


图 1 实验设计图

Fig.1 Experimental design

动。谱逼近技术被应用于模拟边界层上的风场和温度场,尤其针对波长超过 1 000 km 的波,nudging 系数为 2×10^{-4} ,运行时间为 6 h,松弛时间为 1 h。实验 A 为控制实验,即对 d01 启动计算并使用谱逼近技术,d02 和 d03 网格的台风初始场由计算了 6 h 的 d01 网格结果插值得到,这样 3 个网格层的初始场在 0 h 时刻都是经过谱逼近技术处理后的结果,保持了一致性。实验 B 为实验 A 的对照实验,是在对 d01 使用谱逼近技术的同时启动 d02 的计算,6 h 后启动 d03。实验 C 为实验 A 和 B 的对照实验,不采用谱逼近技术。实验 D 为常见的冷启动,即模型直接启动运行。

3 模拟结果分析

3.1 模拟结果验证

针对台风“天鸽”的数值实验结果开展分析。首先检验不同实验设置下的台风路径预报结果。从图 2 可以看出,虽然 4 个数值实验均获得台风向西北方向移动的特征,但只有实验 A 模拟的台风移动路径与观测结果一致,且始终保持最小的路径误差,台风登陆时,实验 A 中登陆点的误差为 12 km,其余 3 个实验登陆误差均大于实验 A。另外 3 个实验模拟的台风移动速度明显慢于观测结果,且台风路径整体偏南,其中实验 C 的误差最大,D 次之,B 最小。从图 3 可以看出,在台风强度模拟上,4 个实验都能够很好地捕捉到台风“天鸽”在南海的增强过程,但是在预测台风最低气压和最大风速出现的时间上,实验 A 的结果优于其他 3 个实验,且平均强度误差基本维持在 10 hPa 左右,是 4 个实验中误差最小的。实验 B 和实验 C 的台风预测明显偏强,实验 D 最低气压的出现时间明显落后于观测结果。由此可以看出,对照实验中的台风强度预测误差与路径误差有关。PUN 等^[24]研究发现,近海区域的高海表面温度是促进台风“天鸽”增强的主要原因之一。与控制实验 A 相比,对照实验中台风在海上停留的时间更长,海洋加热对台风“天鸽”的贡献明显比控制实验大,从而强度偏大。

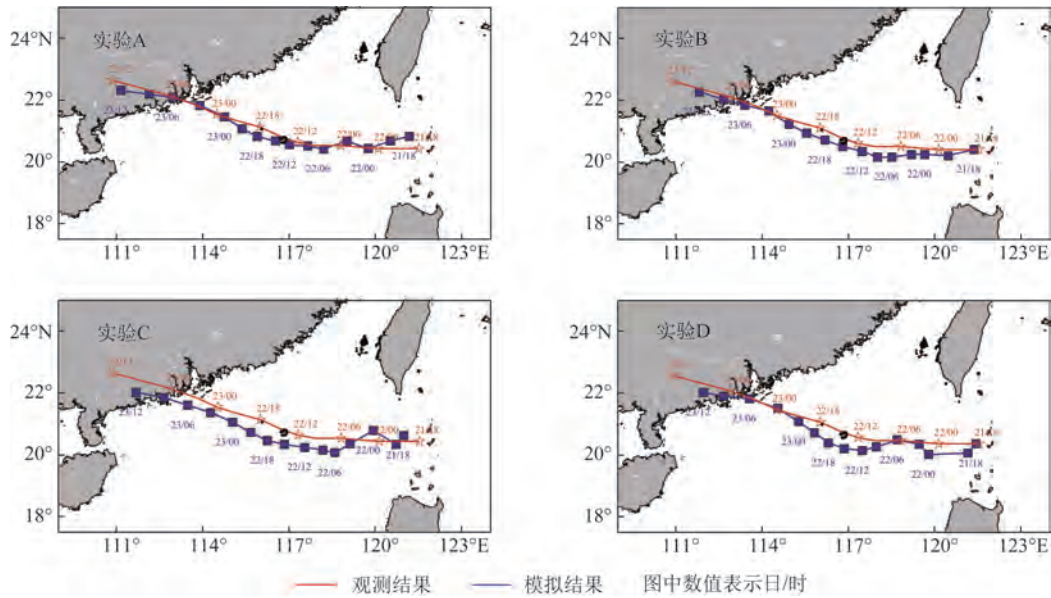


图2 台风“天鸽”模拟路径对比图

Fig.2 Comparison of simulated tracks of Typhoon "Hato"

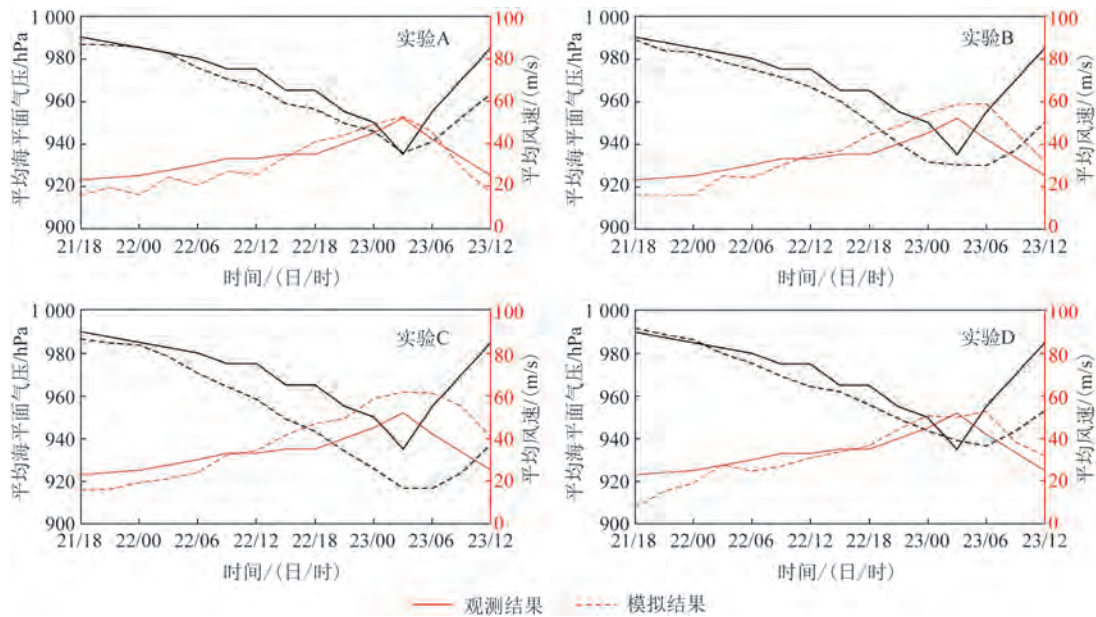


图3 台风“天鸽”模拟强度对比图

Fig.3 Comparison of simulated intensity of Typhoon "Hato"

3.2 初始场

表2列出0时刻实验A、B、C在d01网格的风速和气压与再分析资料的均方根误差,由于实验D的0时刻初始场为再分析资料插值场,因此不需要再进行误差比较。实验A和B在850 hPa、500 hPa和

200 hPa的风场与气压场误差明显小于实验C,这主要归因于实验A和B使用了谱逼近技术,有效减小了大尺度环境场的误差。然而,在使用相同的参数、初始场和谱逼近技术的条件下,实验A的初始场误差小于实验B,是3组实验中最小的。

进一步对模拟台风涡旋内核周围200~600 km

表 2 台风“天鸽”在 0 时刻位于 d01 网格层的风速、气压的均方根误差

Tab.2 Root mean square error of wind speed and pressure for Typhoon "Hato" at the d01 grid level in 0 h

实验	850_u	850_v	850_p	500_u	500_v	500_p	200_u	200_v	200_p
A	1.123	1.122	5.704	1.055	0.987	4.914	1.719	1.564	5.811
B	1.162	1.235	5.661	1.081	1.022	4.946	1.864	1.770	5.802
C	1.432	1.407	6.207	1.249	1.130	4.973	2.243	2.018	6.973

注:850_u、850_v、850_p 分别代表 850 hPa 下风速的 u 分量、 v 分量和气压

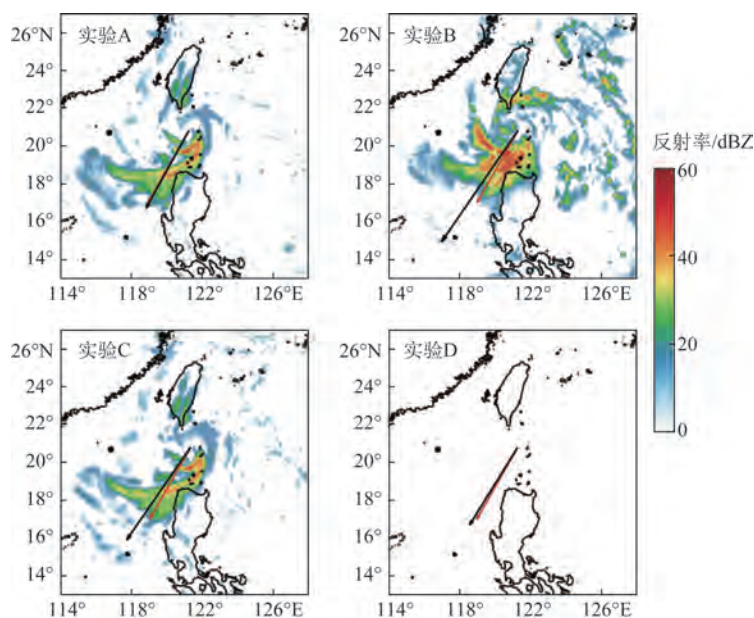


图 4 “天鸽”初始场最大雷达反射率和垂直风切变

Fig.4 Maximum radar reflectance and vertical wind shear in the initial field of Typhoon "Hato"

的环境场进行分析。图 4 为台风“天鸽”初始场(0 时刻)最大雷达反射率和垂直风切变结果,其中垂直风切变为 200~700 km 半径范围内 200 hPa 与 850 hPa 两层环境风的差,FNL 的垂直风切变是经过 WRF 前处理(WRF Preprocessing System, WPS)后再进行计算得到,与 WRF 的输出结果保持一致。从垂直风切变的大小和方向来看,实验 A 的模拟结果最好,实验 B 和 C 的结果明显变差。从雷达反射率来看,实验 A 的台风内核结构相对完整,实验 B 的台风内核相对不完整且南部的对流明显偏强,实验 C 有台风内核,但小对流活动的发展更加显著。实验 D 由于采用冷启动,因此无雷达反射率。

3.3 非对称结构

台风初始场的差异会导致台风在后续发展中

呈现不同的非对称结构。实验 B 和 C 的初始场存在较强的垂直风切变(见图 5),并在后续发展中一直保持;实验 D 的初始场垂直风切变最初与再分析资料一致,但在后续发展中明显增大;相比之下,实验 A 的垂直风切变维持相对平稳的变化,并且与再分析资料最接近。由于垂直风切变会导致台风向顺切变左侧倾斜,引发非对称的对流活动^[14,25],其显著程度与垂直风切变的大小成正比^[26]。图 6 的累积降雨量基本呈现类似特征,即实验 A 的累积降雨量最小,其余 3 个实验有更强的垂直风切变,因此非对称降雨也更强,累积降雨量甚至超过了 300 mm。此外,与观测到的台风路径相比,只有实验 A 的累积降雨量能够贴合台风的移动路径,另外 3 个实验则出现降雨量偏大且降雨中心偏南的现象。

贺海晏^[27]曾提出关于台风中心移动的基本方

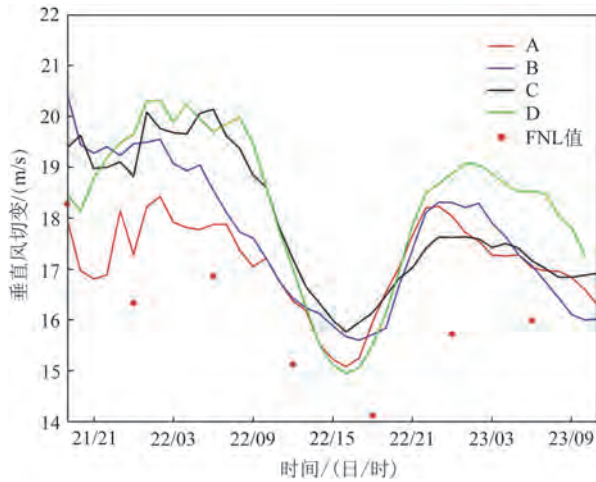


图5 “天鸽”垂直风切变变化图

Fig.5 Time series of vertical wind shear of Typhoon "Hato"

程,该方程将台风中心的移动分解为10项因子,并着重讨论非绝热加热(主要是积云对流加热)对台风移动的影响。表达式为:

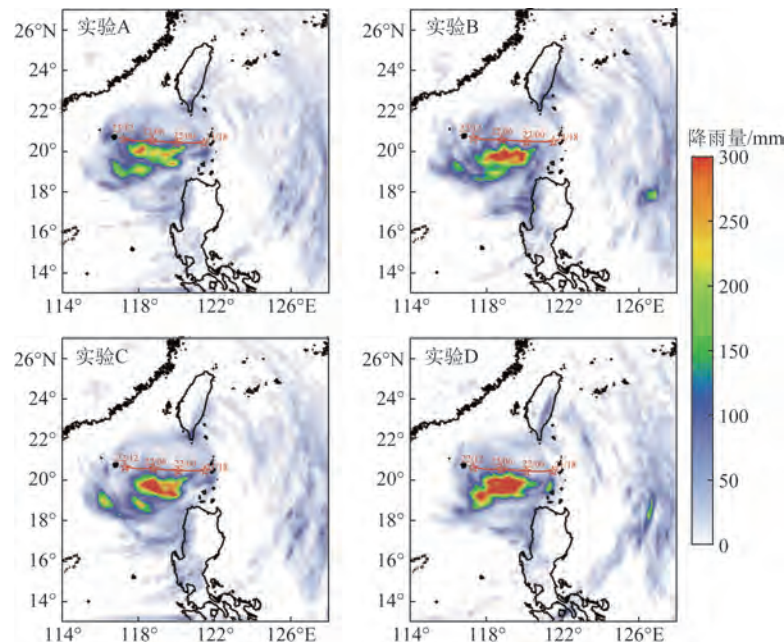
$$\frac{d\vec{V}_0}{dt} = \frac{1}{MC_p \langle T \rangle} \int_r Q\vec{V} \rho d\tau \approx \frac{1}{C_p \langle T \rangle} \overline{(Q\vec{V})} \quad (2)$$

式中:矢量 $Q\vec{V}$ 是非绝热加热率与局地引导速度的乘积,也被称为“非绝热引导速度”,其大小与加热率和局地引导速度的大小成正比,方向取决于

加热性质,即当 $Q>0$ (加热) 时,其方向与局地引导速度方向一致,当 $Q<0$ (冷却) 时,两者方向相反。若非绝热引导速度相对于台风中心呈轴对称,则不论加热程度如何也不会改变台风的运动方向。贺海晏还定性总结了积云对流加热对台风移动的影响,即当主要雨区位于台风前进方向的右侧时,非绝热加热将促使台风加速前进;当主要雨区出现在台风左侧时,则有利于台风减速;而台风正前方(后方)的降水将有利于台风发生左折(右折)。在实验B、C、D中左侧的降水明显大于实验A,非绝热加热的减速作用更加明显,导致3个实验的台风移动速度慢于实验A。该结论与图2的结果一致,证明实验A的台风移动速度更符合观测结果,另外3个实验的台风移速慢于观测值。

3.4 PVT 诊断分析

结合贺海晏^[27]的定性分析,进一步量化分析非绝热加热和水平平流等因素对台风的影响。式(1)提到,完整的PVT方程包含水平平流项(HA)、垂直平流项(DH)、加热项(DH)和摩擦项(FR),由于摩擦项在这里可以忽略不计,因此主要分析前3项。图7的结果显示,HA和DH在台风移动中起主



注:红线为观测路径,数值表示日/时

图6 “天鸽”0~15 h 累积降雨量

Fig.6 Cumulative rainfall of Typhoon "Hato" for 0~15 hours

导作用,这与WU等^[17]的发现一致。总体来看,HA、VA和DH对台风的移动起促进作用,但促进程度存在很大不同。从平均PVT来看,只有实验A的PVT是西偏北方向,其他实验表现为西偏南方向。实验A的PVT值最大,说明其台风移速最快,这与图2中实验A台风路径没有偏南且移速快相符合。从平均HA来看,HA的方向基本趋近于PVT的方向,实验A中HA值最大。4个实验的DH对比结果表明,实验A的DH值最大,其对台风移速的贡献也大于其他实验;图6中主要雨区出现在台风左侧,左侧降雨越多则台风的减速作用越强,DH对台风移速贡献为小值,则实验A的DH对台风移速贡献为大值,上述定性分析与定量分析结论一致。另外,VA的贡献最小,其与HA和DH共同构成PVT。

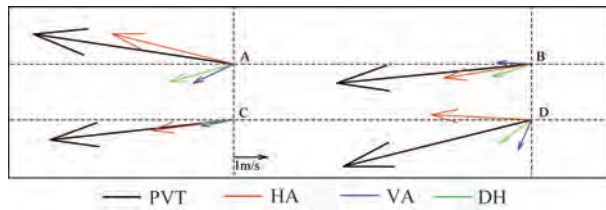


图7 “天鸽”0~15 h位涡趋势诊断的平均台风移速变化图
Fig.7 Average typhoon moving velocity variation based on potential vorticity tendency diagnosis in Typhoon "Hato" from 0 h to 15 h

为了比较4个实验中非绝热加热项一波分量(Azimuthal Wave number 1 of Diabatic Heating, WN-1 DH)的大小,计算了4个实验的WN-1 DH的平均值(对台风中心往外扩60 km的区域值先取绝对值后再进行时间上的平均)。实验A—D的WN-1 DH分别为 $2.77 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{K} / (\text{s}^2 \cdot \text{kg})$ 、 $3.16 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{K} / (\text{s}^2 \cdot \text{kg})$ 、 $3.59 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{K} / (\text{s}^2 \cdot \text{kg})$ 和 $3.34 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{K} / (\text{s}^2 \cdot \text{kg})$;实验A—D的WN-1 DH的方差分别为

1.188×10^{-19} 、 1.725×10^{-19} 、 2.157×10^{-19} 和 2.119×10^{-19} 。同时,计算该时间段台风“天鸽”自身位涡的一波分量,4个实验的平均值和方差与WN-1 DH的表现一致,说明实验A的位涡一波的波形、波峰及波谷的量值变化均小于其他3个实验。位涡一波的快速变化反映台风自身非对称环流的快速发展。水平平流项一波分量的平均值分别为 $5.14 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{K} / (\text{s}^2 \cdot \text{kg})$ 、 $5.02 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{K} / (\text{s}^2 \cdot \text{kg})$ 、 $6.03 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{K} / (\text{s}^2 \cdot \text{kg})$ 和 $5.55 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{K} / (\text{s}^2 \cdot \text{kg})$,方差分别为 3.62×10^{-19} 、 2.31×10^{-19} 、 5.08×10^{-19} 和 5.18×10^{-19} 。4个实验中垂直平流项的一波分量变化与WN-1 DH的表现一致。

CHAN^[28]指出,如果对流是相对对称的,则WN-1 DH的量级应该较小,以确保HA项占主导地位。实验A位涡一波分量的平均值与方差均较小,垂直风切变也最小,台风自身非对称环流的发展小于其他3个实验,因此实验A的相对对称性高于其他3个实验。实验A中WN-1 DH的量级较小,有利于HA项起主导作用,使HA项移速最大;相反,其他3个实验的WN-1 DH项量级较大,阻碍了HA项的主导作用。

3.5 案例验证

台风“天鸽”的数值实验说明方案A为最佳方案。为了检验其适用性,进一步选取1614号台风“莫兰蒂”和1822号台风“山竹”做验证。在台风“莫兰蒂”模拟的路径误差中(见图8a),实验A的误差整体最少,且72 h后能够维持在25 km,96 h后为53 km。在台风“山竹”模拟的路径误差中(见图8a),实验A的误差同样整体最少,72 h后能够维持在27 km,而实验B的72 h路径误差为90 km,实验C为315 km,实验D为85 km。在台风“莫兰蒂”和“山竹”的模拟中,均出现了垂直风切变增大和累积降雨量变大的

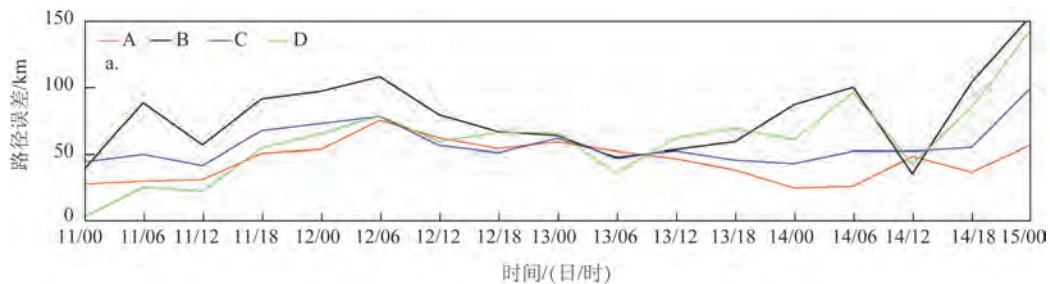


图8 台风“莫兰蒂”(a)和台风“山竹”(b)的模拟路径误差

Fig.8 Simulated track error diagram of Typhoon "Meranti" (a) and Typhoon "Mangkhut" (b)

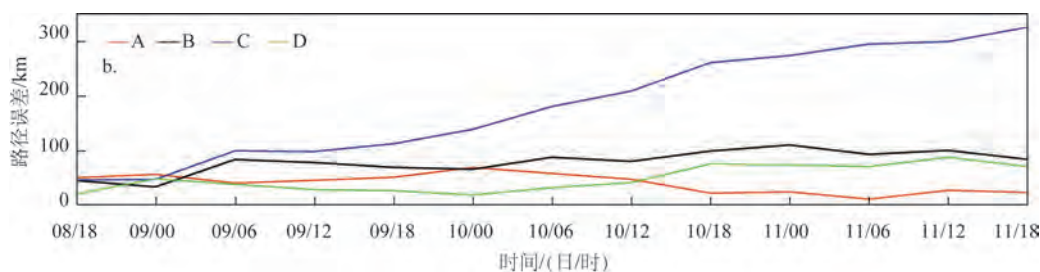


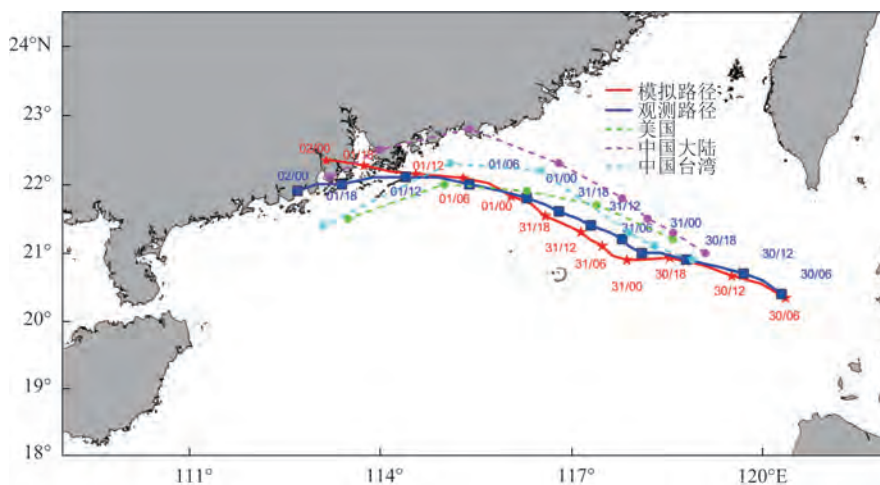
图8 (续)

Fig.8 (Continued)

情况,这些特征与台风“天鸽”的主要特征相符,本文篇幅有限,不再展开讨论。

使用全球预报系统(Global Forecast System, GFS)资料来预报2309号台风“苏拉”,其路径模拟

见图9,采用实验A启动方式的模拟结果好于其他机构的预报路径,24 h路径误差为27 km,48 h为26 km,72 h为68 km,较好地预报出了台风“苏拉”的移动路径。



注:图中数值代表日/时

图9 台风“苏拉”模拟路径图

Fig.9 Simulated track of Typhoon "Saolina"

4 结论

本文使用 FNL 资料和高分辨率海温资料作为模型的初始场和边界条件,用 COAWST 中的 WRF 模式对 1713 号台风“天鸽”、1614 号台风“莫兰蒂”、1822 号台风“山竹”和 2309 号台风“苏拉”进行模拟,设计了两种谱逼近技术启动方式和两种不考虑谱逼近技术的对照启动方式,从初始场、非对称结构、台风路径和台风强度 4 个方面评估不同初始场误差下台风模拟结果的差异。主要结论如下:

①使用谱逼近技术模拟的路径与强度都明显更准确,这是因为谱逼近技术对大尺度场有一定的改善作用。

②谱逼近技术虽然能够改善模型的大尺度环境场,但台风周围的环境场也很重要。从台风“天鸽”模拟实验 A 和 C 的初始场对比可以看出,谱逼近技术也会对台风周围的环境场起到改善作用。

③对模型进行热启动明显好于冷启动。模式冷启动时,虽然风场和气压场等与再分析资料相符合,但是模型的初始场中并没有云、降雨和冰等信息。

④若初始场误差较大,将导致台风在后续模拟中垂直风切变增大、非对称对流增强、WN1-DH 项量级增大。非对称对流增强会使累积降雨量过大,并影响台风的移动速度与方向,从而削弱 HA 项的主导作用,最终导致台风路径的模拟误差增大。

本文提出的启动方法在一定程度上依赖 FNL 再分析资料的准确性,如何摆脱这一问题,进一步提高台风路径预报的准确性将是值得后续研究的课题。

致谢:感谢复旦大学大气科学研究院吴立广老师(liguang@nuist.edu.cn)提供的 PVT 计算方法,同时感谢冯也骋博士的指导。

参考文献:

- [1] 张恺, 杨隆浩, 高建清, 等. 基于累积置信规则库推理的台风灾害直接经济损失预测[J]. 灾害学, 2024, 39(1): 64-68.
ZHANG K, YANG L H, GAO J Q, et al. Typhoon disaster direct economic losses prediction based on cumulative belief rule-based system[J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(1): 64-68.
- [2] CHA D H, WANG Y Q. A dynamical initialization scheme for real-time forecasts of tropical cyclones using the WRF model[J]. Monthly Weather Review, 2013, 141(3): 964-986.
- [3] KWON I H, CHEONG H B. Tropical cyclone initialization with a spherical high-order filter and an idealized three-dimensional bogus vortex[J]. Monthly Weather Review, 2010, 138(4): 1344-1367.
- [4] WANG D L, LIANG X D, ZHAO Y, et al. A comparison of two tropical cyclone bogussing schemes[J]. Weather and Forecasting, 2008, 23(1): 194-204.
- [5] 冯佳宁. 集合卡尔曼滤波(EnKF)岸基雷达资料同化对登陆台风数值模拟的影响研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2017.
FENG J N. Study on ground-based radar data assimilation through Ensemble Kalman Filter on landing typhoon[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2017.
- [6] 顾建峰. 多普勒雷达资料三维变分直接同化方法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2006.
GU J F. Study on the direct assimilation method of three-dimensional variational data of Doppler radar[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2006.
- [7] WALDRON K M, PAEGLE J, HOREL J D. Sensitivity of a spectrally filtered and nudged limited-area model to outer model options[J]. Monthly Weather Review, 1996, 124(3): 529-547.
- [8] STORCH H V, LANGENBERG H, FESER F. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes[J]. Monthly Weather Review, 2000, 128(10): 3664-3673.
- [9] ROCKEL B, CASTRO C L, PIELKE SR R A, et al. Dynamical downscaling: assessment of model system dependent retained and added variability for two different regional climate models[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113(D21): D21107.
- [10] FESER F, VON STORCH H. Regional modelling of the western Pacific typhoon season 2004[J]. Meteorologische Zeitschrift, 2008, 17(4): 519-528.
- [11] 王淑莉, 徐祥德, 康红文, 等. 应用谱逼近方法模拟 2008 年初南方持续性降水过程及其水汽通道周期特征分析[J]. 大气科学, 2016, 40(3): 476-488.
WANG S L, XU X D, KANG H W, et al. Simulation of continuous rainfall over South China in early 2008 with the spectral nudging method and the periodicity characteristics of the water vapor channel[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2016, 40(3): 476-488.
- [12] WANG H, WANG Y Q, XU H M. Improving simulation of a tropical cyclone using dynamical initialization and large-scale spectral nudging: a case study of Typhoon Megi (2010)[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2013, 27(4): 455-475.
- [13] CHA D H, JIN C S, LEE D K, et al. Impact of intermittent spectral nudging on regional climate simulation using weather research and forecasting model[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116(D10): D10103.
- [14] 张兴海. 南海热带气旋迅速增强的数值模拟[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2017.
ZHANG X H. A numerical study of tropical cyclone rapid intensification in South China Sea[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2017.
- [15] 许冬梅, 束艾青, 李泓, 等. FY-2G 云导风资料同化在台风“天鸽”数值预报中的应用[J]. 海洋预报, 2022, 39(1): 56-66.
XU D M, SHU A Q, LI H, et al. Application of FY-2G AMVs data assimilation in typhoon "Hato" numerical forecasting[J]. Marine Forecasts, 2022, 39(1): 56-66.
- [16] 贾宁, 刘强, 石先武, 等. 基于现场调查的台风“天鸽”(1713)和台风“山竹”(1822)风暴潮灾害影响和致灾对比分析[J]. 海洋预报, 2022, 39(5): 94-99.
JIA N, LIU Q, SHI X W, et al. Comparative analysis of the impact of typhoon storm surge disaster and the disaster-causing difference between typhoon "Hato" (1713) and "Mangkhut" (1822) based on field survey[J]. Marine Forecasts, 2022, 39(5): 94-99.
- [17] WU L G, WANG B. A potential vorticity tendency diagnostic approach for tropical cyclone motion[J]. Monthly Weather Review, 2000, 128(6): 1899-1911.
- [18] WU L G, CHEN X Y. Revisiting the steering principal of tropical cyclone motion in a numerical experiment[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(23): 14925-14936.
- [19] WARNER J C, ARMSTRONG B, HE R Y, et al. Development of a Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COA-WST) Modeling System[J]. Ocean Modelling, 2010, 35(3): 230-

- 244.
- [20] DOYLE J D, HODUR R M, CHEN S, et al. Tropical cyclone prediction using COAMPS-TC[J]. *Oceanography*, 2014, 27(3): 104-115.
- [21] KIMBALL S K, DOUGHERTY F C. The sensitivity of idealized hurricane structure and development to the distribution of vertical levels in MM5[J]. *Monthly Weather Review*, 2006, 134(7): 1987-2008.
- [22] BENDER M A, GINIS I, TULEYA R, et al. The operational GFDL coupled hurricane-ocean prediction system and a summary of its performance[J]. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(12): 3965-3989.
- [23] GREEN B W, ZHANG F Q. Impacts of air-sea flux parameterizations on the intensity and structure of tropical cyclones[J]. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(7): 2308-2324.
- [24] PUN I F, CHAN J C L, LIN I I, et al. Rapid intensification of Typhoon Hato (2017) over shallow water[J]. *Sustainability*, 2019, 11(13): 3709.
- [25] ROGERS R, REASOR P, LORSOLO S. Airborne Doppler observations of the inner-core structural differences between intensifying and steady-state tropical cyclones[J]. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(9): 2970-2991.
- [26] 沈阳. 垂直风切变对大西洋飓风波尼(1998)结构与强度的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- SHEN Y. Effects of vertical wind shear on the structures and intensity of Hurricane Bonnie (1998) [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2012.
- [27] 贺海晏. 台风移动规律的研究 I. 非绝热加热与水平温度分布的影响[J]. *热带气象学报*, 1995, 11(1): 1-9.
- HE H Y. A study on typhoon movement I. the effect of diabatic heating and horizontal temperature distribution[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 1995, 11(1): 1-9.
- [28] CHAN J C L. The physics of tropical cyclone motion[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2005, 37(1): 99-128.

An exploration of the influence of typhoon initial field error on path error based on spectral nudging

LIANG Dong^{1,3}, LAI Zhigang^{2*}, YING Xiaoming^{1,3}, ZENG Zhihao², GAO Na³, ZHAO Mingli^{1,3}

(1. Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510300, China; 2. Key Laboratory of Marine Resources and Coastal Engineering in Guangdong Province, School of Marine Sciences Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 3. South China Sea Development Research Institute, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510300, China)

Abstract: Based on multi-layer nested Weather Research Forecasting Model (WRF), the effects of different hot initializing methods on the simulation accuracy of No.1713 Typhoon "Hato" were studied, and No.1614 Typhoon "Meranti", No.1822 Typhoon "Mangkhut" and No.2309 Typhoon "Saola" are chosen as verification cases. The results showed that spectral nudging method could reduce the errors of large scale environment and initial field of the WRF model, and improve the environment field of the typhoon, which can avoid the elevation of vertical wind shear and cumulative rainfall, and weaken the intensity of the asymmetric convective activity of the typhoon. Otherwise, the diabatic heating would weaken the guidance of the horizontal advection to the typhoons, leading to an increase in the simulation error of typhoon paths within 24~72 hours.

Key words: initial field error; asymmetric convection; potential vorticity tendency diagnosis; typhoon track error