

DOI:10.11737/j.issn.1003-0239.2026.01.008

# CMA数值模式对超强台风“摩羯”(2411)早期路径预报偏差分析

吴敏<sup>1,2</sup>, 吴俞<sup>1,2\*</sup>, 刘炳杰<sup>3</sup>, 魏晓雯<sup>1,2</sup>

(1. 海南省气象台, 海南海口 570203; 2. 南海气象防灾减灾重点实验室, 海南海口 570203; 3. 河北省沧州市气象局, 河北 沧州 061000)

**摘要:** 重点检验中国气象局数值模式在台风“摩羯”路径预报中的表现。结果显示: 中国气象局区域台风预报系统(CMA\_TYM)、中国气象局南海台风模式(CMA\_TRAMS)和中国气象局全球同化预报系统(CMA\_GFS)3套模式均存在系统性偏北偏东的路径误差, 且误差随预报时效的延长呈递增趋势, 其中, CMA\_TRAMS在48 h内预报最优, CMA\_TYM则在72~120 h中长期预报中误差最小。研究表明, 台风生成初期, 副热带高压的预测偏差是长时效预报失准的主因, 具体表现为对台风东侧扰动的预报偏强、对西风槽的预报偏弱; 另外, 模式在台风快速增强阶段存在滞后效应, 加上海气相互作用模拟不足, 共同导致副热带高压形态的预测偏差, 显著影响48 h以上路径预报的准确性。

**关键词:** 超强台风“摩羯”; 模式预报偏差; 副热带高压

**中图分类号:** P457.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2026)01-0079-10

## 0 引言

热带气旋路径和强度预测一直是全球气象预报中的难点, 也是气象学研究的重大挑战, 特别是超强台风路径和降水分布的准确预报, 对防灾减灾工作至关重要<sup>[1]</sup>。当前, 数值模式已成为台风预测的核心工具, 随着数值预报模式和客观方法的持续发展, 台风路径预报误差不断减小, 预报时效不断延长<sup>[2-4]</sup>。然而, 受大气系统复杂性和数值模式中物理过程不确定性的影响, 各模式在台风路径预测中仍存在显著偏差。例如, 欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium - Range Weather Forecasts, ECMWF)模式的路径预测稳定性较高(尤其在西北太平洋区域), 但仍存在路径南偏的问题<sup>[5-6]</sup>。中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)常用的数值模式在路径预测中常常表现出偏东偏北趋势<sup>[7]</sup>, 特别是对于快速增强的超

强台风, 偏差问题尤为突出<sup>[8]</sup>。基于这些挑战, 徐道生等<sup>[9]</sup>对中国气象局南海台风模式(China Meteorological Administration Tropical Regional Assimilation Model for the South China Sea, CMA\_TRAMS)进行技术改进, 形成TRAMS 3.0版本, 并对2017年的台风进行评估, 结果表明TRAMS 3.0在台风72 h路径预报中取得明显改进。麻素红等<sup>[10]</sup>基于2017年升级版中国气象局区域台风预报系统(China Meteorological Administration - Regional Mesoscale Typhoon Numerical Prediction System, CMA\_TYM)模式对2014—2016年生命周期超过48 h的热带气旋进行了回算, 结果显示模式对台风路径的预报能力不断提升, 但在130°~150°E、25°N以南的区域, 仍存在较大的误差。总的来说, 随着数值预报模式和客观方法的不断发展, 台风路径预报的误差逐渐减小。

尽管当前台风路径预报技术已取得显著进展,

收稿日期: 2025-02-07。

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金(U21A6001); 全国暴雨研究开放基金(BYKJ2025M24)。

作者简介: 吴敏(1992-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事模式检验和海气相互作用研究。E-mail: hawkingm@163.com

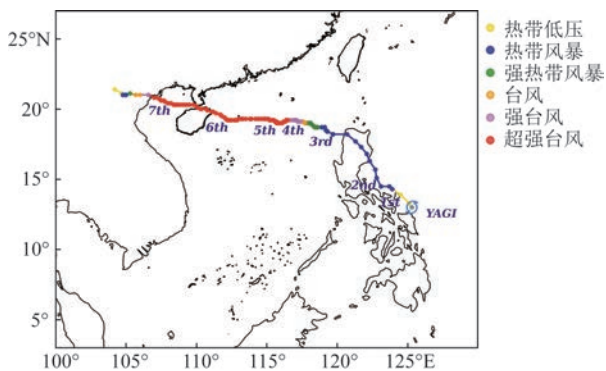
\*通信作者: 吴俞(1983-), 女, 正高级工程师, 硕士, 主要从事模式检验评估和释用研究。E-mail: wuyuyx1025@163.com

但在长时效尺度上仍存在较大误差,尤其是在台风生成初期,其路径预报误差依然是国际上公认的技术难点之一<sup>[11-13]</sup>。然而,实际业务中往往需要在台风初生阶段就提供尽可能精准的预报和决策支撑,以便政府相关部门及时部署防灾减灾措施。因此,提升台风生成初期的长时效路径预报能力,已成为当前预报业务中最为迫切、最需攻克的关键问题之一。然而,包括CMA\_TYM、CMA\_TRAMS和中国气象局全球同化预报系统(China Meteorological Administration Global Forecast System, CMA\_GFS)在内的多套业务模式在台风“摩羯”生成初期起报的长时效路径预报均存在较大偏差。

基于此,本文将系统分析CMA\_TYM、CMA\_TRAMS、CMA\_GFS 3套中国气象局模式对超强台风“摩羯”路径的预报性能,重点探讨台风生成初期的长时效路径预报偏差特征及可能成因,揭示3套模式在路径预报中的优势与局限,积累典型个例经验,为提升我国台风路径预报的准确性提供技术支撑,并为优化防灾减灾决策体系提供科学依据。

## 1 超强台风“摩羯”概况

超强台风“摩羯”(Yagi)是1949年以来秋季登陆我国的最强台风,为仅次于台风“威马逊”登陆海南的第二强台风,但其对海南的破坏力远超台风“威马逊”,给我国近海、沿海和内陆地区造成了剧烈的风雨影响。由图1可见,台风“摩羯”于9月1日14时(北京时,下同)在菲律宾以东海面生成并向西



注:1st,2nd...代表第一天、第二天……

图1 台风“摩羯”路径图

Fig.1 Track of Typhoon "Yagi"

北方向移动;3日上午进入南海,4日10时在迅速增强为强台风级后,稳定地向偏西方向移动;6日10时起转为西北方向移动并靠近海南岛,于当日16时20分前后在海南省文昌市翁田镇沿海地区登陆(超强台风级),登陆后穿过海口市移入琼州海峡,当晚22时20分前后在广东省徐闻县角尾乡再次登陆(超强台风级),之后移入北部湾海面;7日15时30分前后第三次在越南广宁省南部沿海登陆(超强台风级),随后迅速减弱。

超强台风“摩羯”强度强,且维持超强台风级别时间长长达约66h(4日23时—7日17时),在我国台风历史中较为罕见。由图2可见,台风“摩羯”于3日20时加强为强热带风暴级,随后快速发展。4日08时增强为台风级,14时达到强台风级,至4日23时进一步加强为超强台风级。自5日05时起,其中心附近最大风力达17级(风速 $\geq 56.1$  m/s),6日05时最大风速升至68 m/s,达到其生命史中的峰值强度。之后,分别以65 m/s和58 m/s的速度(均为超强台风级)先后登陆海南省文昌市与广东省徐闻县。

超强台风“摩羯”移动速度整体较慢。在其生命史中(见图2),前期(3日05时—5日16时)台风移动速度维持在8~12 km/h,之后略有加快,5日17时—7日04时,移动速度保持在15~20 km/h,后期移动速度又降到15 km/h以下。

综上所述,台风“摩羯”强度强、移动较慢且路径稳定,其台风内核影响海南岛陆地时间长达约9h,实际破坏力显著超过台风“威马逊”。

## 2 数据和方法

### 2.1 数据

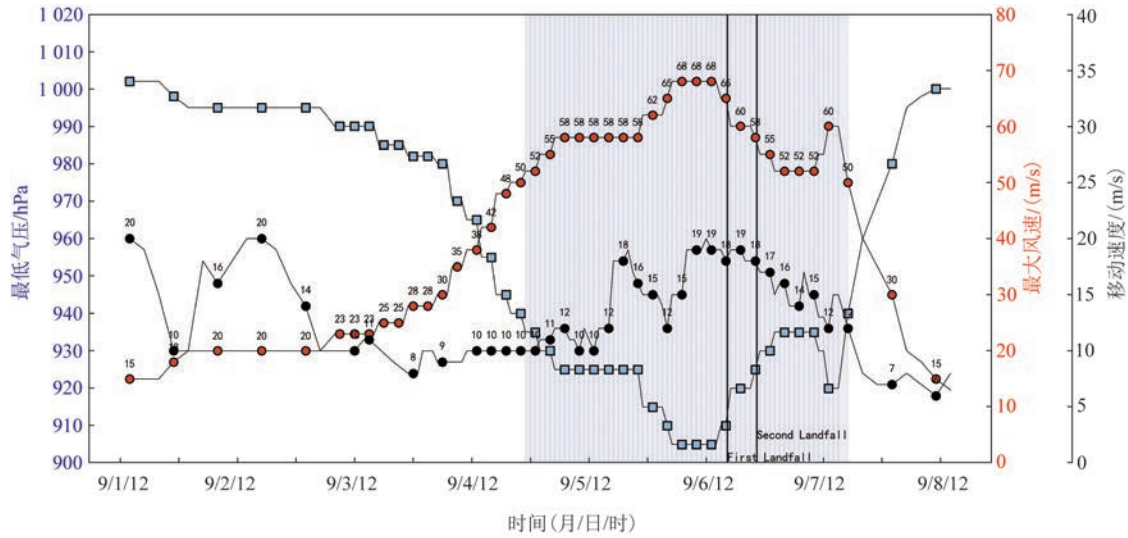
#### 2.1.1 观测和再分析资料:

台风“摩羯”定位资料取自中央气象台台风实时定位资料,该资料包括台风中心经纬度、中心最低气压、移动速度及近中心最大风力等参数。

位势高度、水平风场等数据资料来源于欧洲中期天气预报中心第五代大气再分析数据集(European Centre for Medium - Range Weather Forecasts Reanalysis v5, ERA5)。

#### 2.1.2 模式预报数据

本研究所使用的数值预报资料主要来自中国



注:蓝色正方形表示最低海平面气压,红色圆形表示最大风速,黑色圆形表示移动速度

图2 台风“摩羯”的演变特征

Fig.2 Evolution characteristics of Typhoon "Yagi"

气象局的3套数值预报模式,具体包括:CMA\_TYM,分辨率为 $0.09^{\circ} \times 0.09^{\circ}$ ;CMA\_GFS,分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ;CMA\_TRAMS,覆盖范围为 $0.8^{\circ} \sim 50.5^{\circ}N$ 、 $81.6^{\circ} \sim 160.8^{\circ}E$ ,分辨率为9 km。

模式起报时次共9个,分别为:2024090208、2024090220、2024090308、2024090320、2024090408、2024090420、2024090508、2024090520、2024090608。

## 2.2 方法

模式台风中心定位需同时满足以下3个条件:搜索海平面气压的最小值;至少存在一条闭合的等压线;鉴于台风“摩羯”强度较大,中心最小气压不超过1 000 hPa。

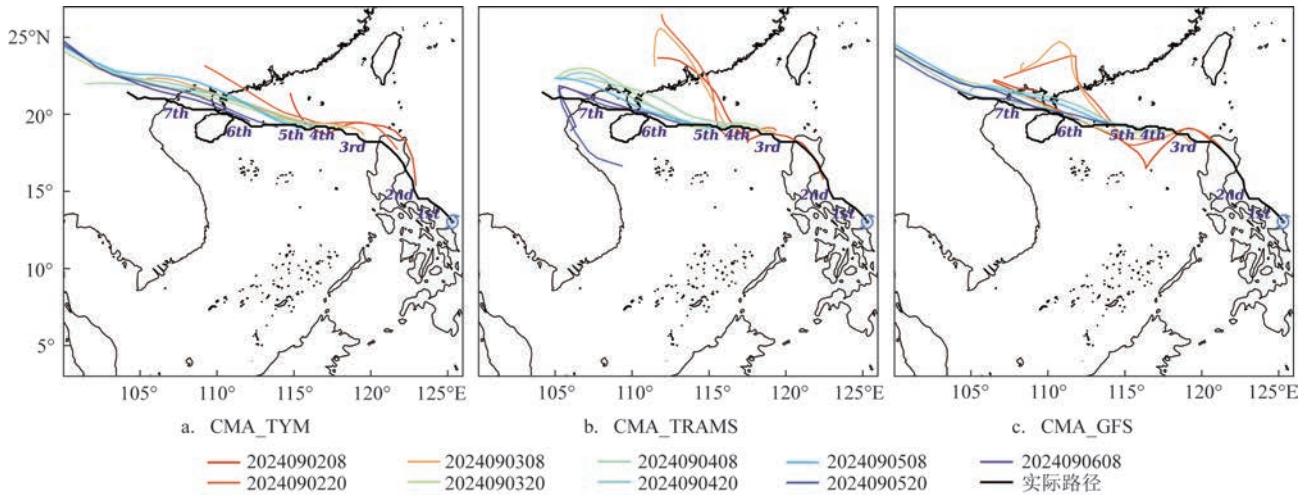
## 3 模式路径预报误差分析

图3为3套模式对台风“摩羯”的路径预报。可见,对于台风生成初期(早期)起报时次(包括2024090208时、2024090220时和2024090308时),CMA\_TYM和CMA\_TRAMS对台风中后期的路径预报与实际路径存在显著偏差,二者一致预报台风“摩羯”在穿过菲律宾后将向北移动或登陆广东省。然而,实际情况是,台风“摩羯”进入南海后稳定地向偏西方向移动,最终登陆海南省文昌市。

CMA\_GFS的路径偏差特征类似,但需要注意的是,其在首个起报时次(2024090208时)的后期路径预报和实际路径比较接近,之后两个起报时次的长时效路径预报才出现显著偏北和偏东特征。

2024090308时起报时次之后,3套模式的路径预报逐渐向偏西即实际路径方向调整,但依旧较实际路径偏北和偏东。在调整速度上,CMA\_TYM的路径调整较为迅速,早在2024090308时起报时次,路径已显著向西调整;而CMA\_GFS和CMA\_TRAMS的调整相对滞后,直到2024090320时起报时次,才明显向西调整。

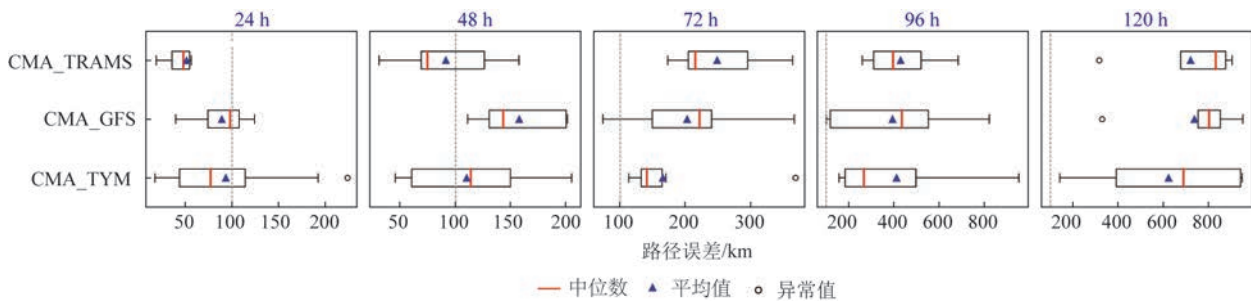
由模式的路径平均误差箱线图可见(见图4),各模式的路径预报误差均随预报时效延长而增大,但在不同预报时效上,各模式的表现存在差异。CMA\_TRAMS在24 h和48 h预报时效中表现最佳,尤其是24 h预报时效的平均误差仅为49.47 km;而CMA\_TYM在72~120 h预报时效中路径误差最小,对于长时效预报具备一定的优势,该结果与前人的研究<sup>[10]</sup>也是一致的。此外,CMA\_TYM在48 h内路径误差较大,这与其离散度较大有关,尤其是在24 h时效内。进一步分析可发现,其2024090208时和2024090220时起报的24 h路径偏差分别为223.4 km和192.2 km,其余起报时次的24 h预报时效误差为18~83 km。这也说明CMA\_TYM的短时



注:黑色为台风实际路径,不同颜色代表模式不同起报时刻的预报

图3 台风“摩羯”路径预报

Fig.3 Forecast tracks of Typhoon "Yagi"



注:箱体的左边和右边分别为第一四分位数(Q1)和第三四分位数(Q3);箱体的两端延伸线分别代表5%和95%的百分位数

图4 CMA\_TRAMS、CMA\_GFS和CMA\_TYM对“摩羯”路径预报误差箱线图

Fig.4 Box plots of Typhoon "Yagi" track forecast errors from the CMA\_TRAMS, CMA\_GFS, and CMA\_TYM

效预报较不稳定。相较于以上两套模式, CMA\_GFS表现偏差,但24 h预报时效的平均预报误差也在100 km以内。

### 4 预报难点及偏差成因分析

由上述分析可见,中国气象局模式对台风“摩羯”生成初期的长时效预报存在显著偏差,这是本次过程的预报难点,下面将围绕该难点开展具体分析。事实上,台风“摩羯”在约18.3°N这一较高纬度进入南海,最终登陆海南岛的路径,在以往台风案例中并不常见。据统计(见表1),1980—2023年间,共有45个西北太平洋台风登陆海南岛,其中仅有12个台风是从北纬18°N以北登陆,占比约26.7%。这一不典型路径的形成,主要与台风“摩羯”进入南海

表1 1980—2023年登陆海南岛台风个数

Tab.1 Number of Typhoons Making Landfall in Hainan Island during 1980—2023

类别	登陆台风个数
18°N以北	12 (10月:2个;9月:4个;8月:3个;7月:2个;5月:1个)
18°N以南	33个
总个数	45个

后稳定地向偏西方向移动密切相关。

#### 4.1 台风“摩羯”稳定偏西移动的主要原因

西北太平洋地区台风路径主要受环境引导气流控制<sup>[14]</sup>。此外,台风的移动受到多种因素共同影响<sup>[15-18]</sup>,包括大尺度环境背景流场、β效应、海陆热力

差异、地形、垂直风切变、非绝热加热以及海温等。本文主要从引导气流特征与大尺度环流背景两个方面进行分析。

#### 4.1.1 台风“摩羯”引导气流与环流背景

根据 Velden 等<sup>[14]</sup>的计算方法,选取距台风中心 3°~7°的经纬度距离环,计算 1 000~100 hPa 各层引导气流,并对 850~100 hPa 引导气流进行垂直平均,得到整层引导气流。结果表明(见图 5a),4 日之后,由于台风“摩羯”强度强,其移动路径与 850~100 hPa 的整层引导气流高度一致,这一特征不同于大多数台风与 850~200 hPa 引导气流一致的特征。在台风“摩羯”偏西方向移动缓慢的阶段(4—5 日),整层引导气流以偏东风为主,风速较弱(普遍低于 3 m/s),引导台风以缓慢速度向偏西方向移动。整层引导气流不仅解释了台风“摩羯”早期缓慢偏西移动的特点,也揭示了其后期偏西北转向和加速的原因。自 6 日起(见图 5b),低层(850~700 hPa)逐渐转为偏南—东南风,中高层(500~300 hPa)偏东南风显著增强,整体引导气流增强为东南风,引导台风转向偏西北方向并加速移动。因此,台风“摩羯”进入南海后(4 日 10 时—6 日 09 时)稳定偏西的

路径是整层引导气流作用的结果。当然,引导气流是高层和中低层共同配合的结果。

在对应大尺度环流可见(见图 6),100 hPa 的南亚高压 1680 线的南界始终保持在 25°N 附近,在台风中心附近存在偏东风和东北风两支流出气流。200 hPa,台风中心附近东北风出流较为明显,随着南亚高压中心逐渐东移,台风中心附近出现了向偏北方向的流出气流,南北两支出流为台风“摩羯”长时间维持超强台风级提供了非常好的出流条件。500 hPa,中高纬的西风槽较弱,环流较为平缓。副热带高压(简称“副高”)强盛且范围广,其西侧脊线位置基本稳定在东经 110°以西,稳定维持在台风“摩羯”北侧。此外,台风“摩羯”东北侧有扰动发展。850 hPa,台风南侧的西—西南气流明显,为台风带来持续的水汽输送和不稳定能量的补充。因此,各层引导气流的变化特征是大尺度环流作用的结果。另外,从单层引导气流矢量时间演变来看(见图 5b),台风“摩羯”移动方向的变化和中高层(500~300 hPa)更为一致。且不少研究表明<sup>[14-18]</sup>,西太平洋副高是影响台风路径的关键引导系统之一。因此,下文重点分析模式的 500 hPa 环流特征。

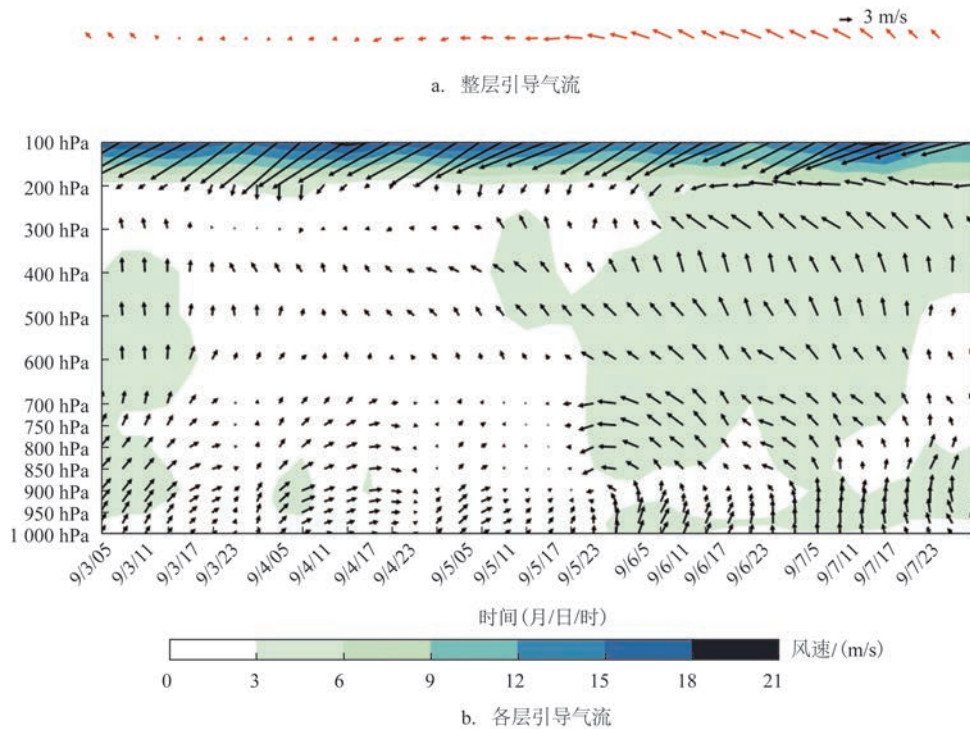
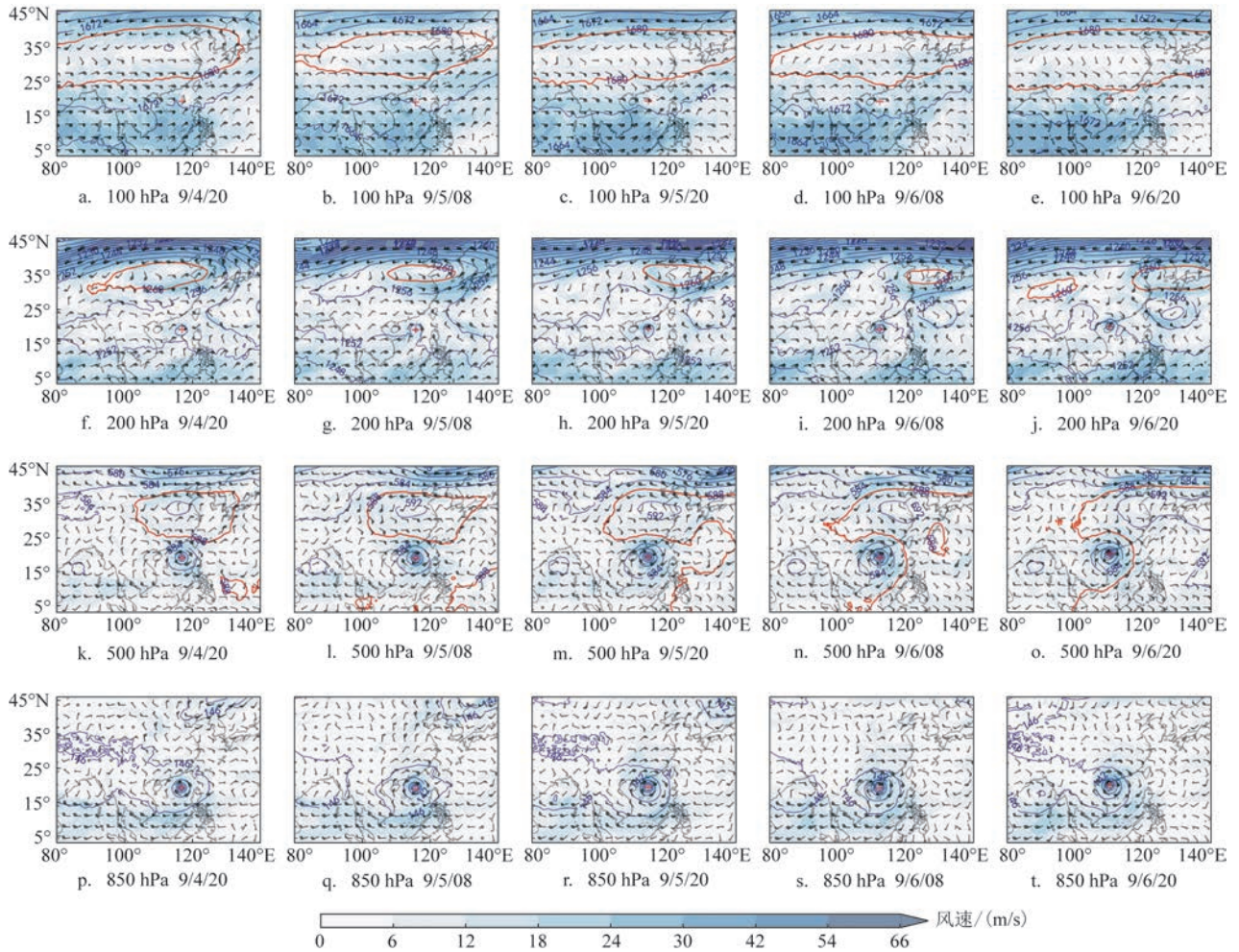


图5 2024年9月3—7日台风“摩羯”引导气流的时间演变  
Fig.5 Steering flow of Typhoon "Yagi" during 3—7 September 2024



注:填色和风向杆表示风速(单位:m/s),等值线表示位势高度场(单位:dagpm),“+”号表示台风中心位置。

图6 台风“摩羯”不同高度层的风场与位势高度场

Fig.6 Wind fields and geopotential height fields of Typhoon "Yagi" at different pressure levels

### 4.2 模式路径偏差成因分析

CMA\_TYM 在 48~96 h 时效中存在中高纬度西风槽位置偏北、槽深偏弱的特征,导致副热带高压 588 线(红色线)整体较实况(蓝色线)范围更加偏西(见图 7c—7e)。CMA\_TRAMS(见图 7i—7l)和 CMA\_GFS(图 7o—7q)也有类似特征,但与 CMA\_TYM 不同的是,CMA\_TRAMS 和 CMA\_GFS 预报的副高强度较实况偏弱(位势高度偏差场为负值),该结果可能和模式对台风“摩羯”东侧的低压扰动偏差有关。可见,CMA\_TRAMS 和 CMA\_GFS 对台风“摩羯”以东扰动系统预报偏强(偏差场为正值),较强的扰动环流导致副高南侧临近扰动的 588

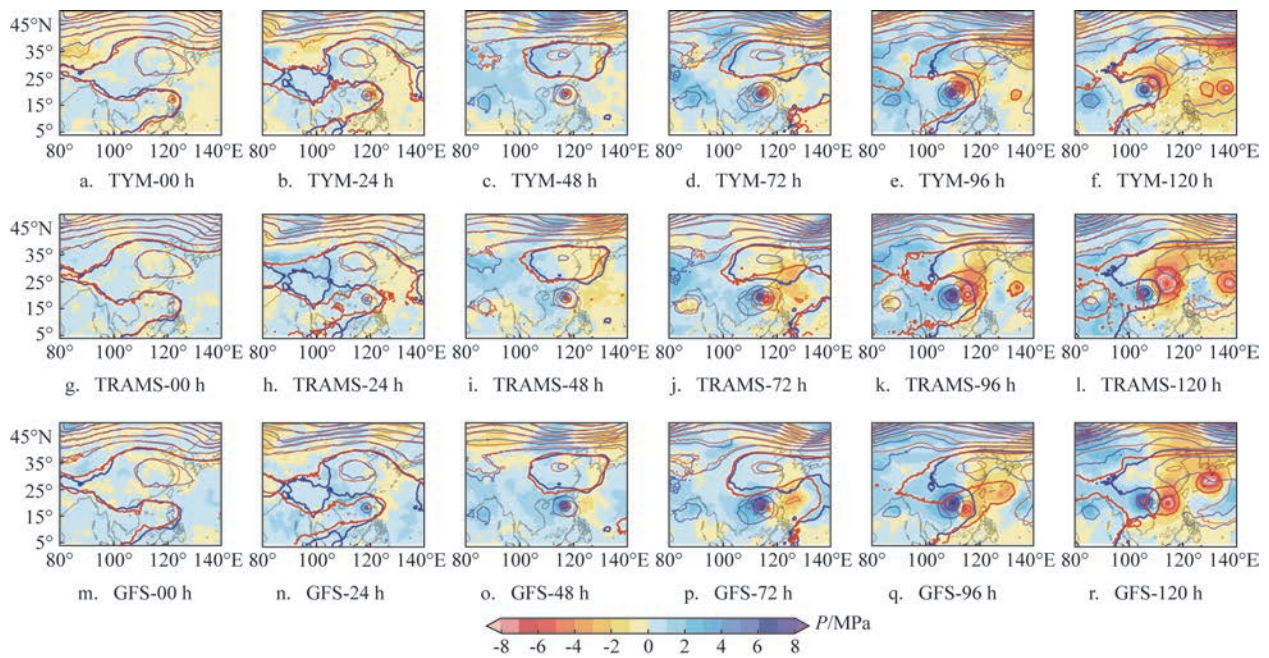
线向北向东移动,与前人的研究<sup>[19]</sup>一致,因此台风“摩羯”北侧副高的 588 线南部形态近似西南—东北走向,有利于台风向偏北方向移动(见图 3)。相比之下,CMA\_TYM 对台风“摩羯”以东扰动偏强的程度略小,对应台风东北侧的副高形态偏差也相对小些,再配合其预报的副高强度偏强,因此 CMA\_TYM 路径预报较其余两家模式更加偏西,接近实际路径(见图 3)。

综上,主要是副高强度和形态的预报偏差导致路径预报北偏,而副高强度和形态偏差与中纬度西风槽、台风“摩羯”以东扰动的预报误差有关。此外,有研究表明<sup>[20]</sup>,模式常对台风快速增强存在滞后性,这可能也是副高预报偏差的重要原因。

进一步分析发现,3套模式对台风“摩羯”增强都具有一定的预报能力,但对其快速增强存在显著滞后性(见图8):台风“摩羯”自4日起快速加强,6日05时达到鼎盛期,14时开始波动减弱;而CMA\_TYM、CMA\_TRAMS和CMA\_GFS分别在6日20时、7日08时和7日14时的台风强度持续减弱阶段才达到最强。这一结果会导致模式在中后期预报台风强度持续加强,进而引起副高强度偏弱或靠近台风北侧的588线南侧位置偏北,最终导致预

报路径偏北。当台风进入南海后快速增强时,模式未能及时捕捉这一变化,强度快速增强的滞后性导致副高预报偏弱,从而影响了后期路径预报的准确性。

另外,垂直风切变是台风强度的重要环境指标<sup>[21-23]</sup>,且对热带气旋的影响有一定的提前性,总体来说大概为12~36 h<sup>[24]</sup>。从垂直风切变也能看到这一特征(见图9),台风“摩羯”4—6日在南海北部快速增强并维持超强台风级(见图8),与低层和高层



注:红色等高线表示模式预报;蓝色等高线为ERA5再分析资料;填色表示CMA各模式与ERA5的偏差场(CMA-ERA5), 单位:dagpm

图7 自9月2日20时起报的逐24 h 500 hPa高度场预报

Fig.7 Forecasts of the 500 hPa geopotential height field at 24-hour intervals, initialized at 20:00 on 2 September

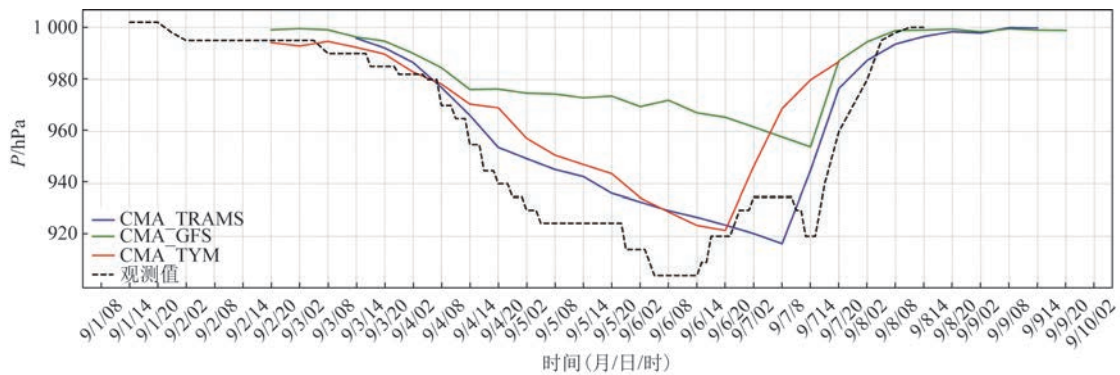


图8 台风“摩羯”海平面气压时序图

Fig.8 Evolution of the minimum sea level pressure of Typhoon "Yagi"

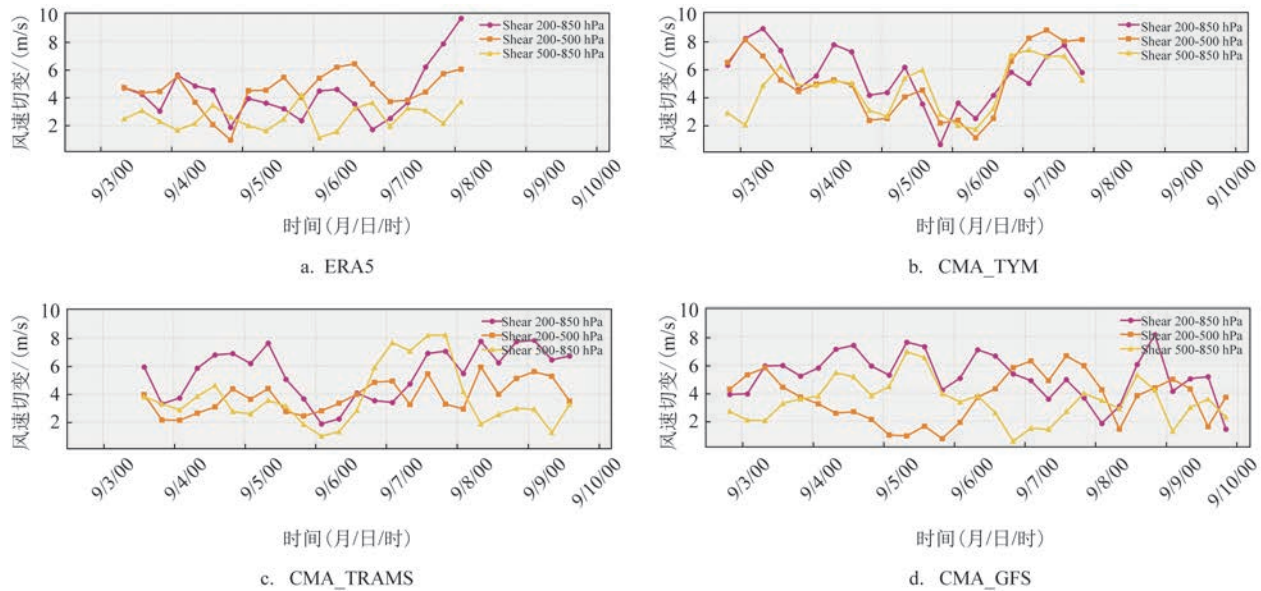


图9 垂直风切变时间序列

Fig.9 Time series of vertical wind shear

风切变环境密切相关,该时段内台风“摩羯”处在较小的深层风切变环境(200~850 hPa切变小于6 m/s)。尤其在4日,台风“摩羯”各层垂直风切变快速下降(见图9a),但此时CMA模式垂直风切变都一致地呈上升趋势(见图9b—9d)。反之,5日08时—6日08时,实际垂直风切变已是波动逐渐上升,而模式各层垂直风切变几乎一致地呈现逐渐减小的趋势。

## 5 总结与讨论

本文分析了2024年第11号超强台风“摩羯”(Yagi)的特点,重点检验了中国气象局数值模式(CMA\_TRAMS、CMA\_TYM、CMA\_GFS)在该台风路径预测中的表现。主要结论如下:

①台风“摩羯”具有南海快速加强、强度极强、超强台风级维持极久和破坏力极大等特点,其台风内核影响海南岛陆地时间长达约9 h,实际破坏力显著超过台风“威马逊”。

②从所有起报时次平均来看,CMA\_TRAMS在48 h预报时效内的路径预报效果最佳;而CMA\_TYM在48 h预报时效内的路径预报能力不稳定,反之在72~120 h预报时效内误差最小。

③台风“摩羯”发展至强台风级后,其移动方向

和速度与850~100 hPa整层引导气流较为一致,该结果与其强度强、发展高度高有关。

④台风“摩羯”生成初期的长时效路径预报存在显著偏差,是这次过程的预报难点。CMA\_TRAMS、CMA\_TYM和CMA\_GFS均一致预报台风“摩羯”进入南海后向北移动或登陆广东省,而实际上台风进入南海后始终稳定向偏西方向移动,先后登陆海南岛和广东省徐闻县。其主要原因是对副热带高压位置和形态预测存在偏差,该偏差和模式对台风“摩羯”东侧的扰动预报偏强、西风槽预报偏弱有关;尤其是在台风快速增强阶段,模式响应滞后,即模式对台风快速增强的预报存在滞后性,最终导致副热带高压强度预报偏差,从而影响了中长期路径预报的准确性。

另外,黄燕燕等<sup>[20]</sup>研究发现,CMA\_TRAMS对台风“利奇马”快速增强的预测能力有限,且对强度变化的时间预报较实际滞后,这主要与采用气候态海温有关。实际上,台风“摩羯”所经过区域的海表温度较高,4日台风核心路径周围海域的SST超过了30℃,较气候态海温偏高1.0~1.5℃(图略)。因此,模式对海温预报不足,可能也是模式对快速增强台风响应偏慢的可能原因,这部分工作将在后续的工作中予以研究。

## 参考文献:

- [1] TAN J K, CHEN S, LEE C Y, et al. Projected changes of typhoon intensity in a regional climate model: development of a machine learning bias correction scheme[J]. *International Journal of Climatology*, 2021, 41(4): 2749-2764.
- [2] 陈国民, 张喜平, 白莉娜, 等. 2016年西北太平洋和南海热带气旋预报精度评定[J]. *气象*, 2018, 44(4): 582-589.
- CHEN G M, ZHANG X P, BAI L N, et al. Verification on forecasts of tropical cyclones over Western North Pacific in 2016[J]. *Meteorological Monthly*, 2018, 44(4): 582-589.
- [3] YU H, CHEN G M, ZHOU C, et al. Are we reaching the limit of tropical cyclone track predictability in the Western North Pacific? [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2022, 103(2): E410-E428.
- [4] CHEN G M, LI T M, YANG M Q, et al. Evaluation of Western North Pacific typhoon track forecasts in global and regional models during the 2021 typhoon season[J]. *Atmosphere*, 2023, 14(3): 499.
- [5] TANG C K, CHAN J C L, YAMAGUCHI M. Large tropical cyclone track forecast errors of global numerical weather prediction models in western North Pacific Basin[J]. *Tropical Cyclone Research and Review*, 2021, 10(3): 151-169.
- [6] 钱奇峰, 毛冬艳. 2010-2019年ECWMF和NCEP集合模式对热带气旋路径预报的性能评估[J]. *气象*, 2023, 49(2): 224-234.
- QIAN Q F, MAO D Y. Evaluation of tropical cyclone track forecast performance of ECMWF and NCEP ensemble models from 2010 to 2019[J]. *Meteorological Monthly*, 2023, 49(2): 224-234.
- [7] GUO R, YU R L, YANG M Q, et al. Analysis of characteristics and evaluation of forecast accuracy for Super Typhoon Doksuri (2023) [J]. *Tropical Cyclone Research and Review*, 2024, 13(3): 219-229.
- [8] HUANG Y Y, ZHANG Y X, ZHANG C Z, et al. An assessment of model capability on rapid intensification prediction of tropical cyclones in the South China Sea[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2024, 106: 101431.
- [9] 徐道生, 陈子通, 张艳霞, 等. 南海台风模式TRAMS3.0的技术更新和评估结果[J]. *气象*, 2020, 46(11): 1474-1484.
- XU D S, CHEN Z T, ZHANG Y X, et al. Updates in TRAMS 3.0 model version and its verification on typhoon forecast[J]. *Meteorological Monthly*, 2020, 46(11): 1474-1484.
- [10] 麻素红, 张进, 瞿安祥, 等. 垂直分层加密和预报区域扩大对GRAPES\_TYM台风预报的影响[J]. *气象学报*, 2021, 79(1): 94-103.
- MA S H, ZHANG J, QU A X, et al. Impacts to tropical cyclone prediction of GRAPES\_TYM from increasing of model vertical levels and enlargement of model forecast domain[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2021, 79(1): 94-103.
- [11] QI L B, YU H, CHEN P Y. Selective ensemble-mean technique for tropical cyclone track forecast by using ensemble prediction systems[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2014, 140(680): 805-813.
- [12] 王靖, 许映龙, 董林, 等. 2012-2021年中央气象台台风3~5d路径预报误差分析[J]. *海洋预报*, 2022, 39(6): 25-33.
- WANG Q, XU Y L, DONG L, et al. Analysis of typhoon track forecast errors for 3~5 days by Central Meteorological Observatory from 2012 to 2021[J]. *Marine Forecasts*, 2022, 39(6): 25-33.
- [13] 王靖, 钱传海, 董林, 等. 台风“梅花”(2212)的主要特点和路径预报难点分析[J]. *海洋气象学报*, 2023, 43(1): 52-62.
- WANG Q, QIAN C H, DONG L, et al. Analysis on main characteristics of Typhoon Muifa (2212) and difficulties in its track forecast[J]. *Journal of marine Meteorology*, 2023, 43(1): 52-62.
- [14] VELDEN C S, LESLIE L M. The basic relationship between tropical cyclone intensity and the depth of the environmental steering layer in the Australian Region[J]. *Weather and Forecasting*, 1991, 6(2): 244-253.
- [15] TAO C, JIANG H Y, ZAWISLAK J. The relative importance of stratiform and convective rainfall in rapidly intensifying tropical cyclones[J]. *Monthly Weather Review*, 2017, 145(3): 795-809.
- [16] WANG Y Q, HOLLAND G J. The beta drift of baroclinic vortices. Part I: adiabatic vortices[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1996, 53(3): 411-427.
- [17] GEORGE J E, GRAY W M. Tropical cyclone motion and surrounding parameter relationships[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1976, 15(12): 1252-1264.
- [18] 毕鑫鑫, 陈光华, 周伟灿. 超强台风“天鹅”(2015)路径突变过程机理研究[J]. *大气科学*, 2018, 42(1): 227-238.
- BI X X, CHEN G H, ZHOU W C. A mechanism study on the sudden track change of super Typhoon "Goni" (2015)[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(1): 227-238.
- [19] 麻素红. 涡旋强度调整半径对2016年第18号热带气旋路径预报的影响[J]. *气象学报*, 2019, 77(4): 662-673.
- MA S H. Impact of radius of TC intensity correction on No.1618 TC track prediction[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2019, 77(4): 662-673.
- [20] 黄燕燕, 陈子通, 冯业荣, 等. 南海台风模式对台风利奇马快速增强预报能力研究[J]. *气象*, 2024, 50(5): 532-546.
- HUANG Y Y, CHEN Z T, FENG Y R, et al. Research on the forecasting capability of CMA-TRAMS model for rapid intensification of typhoon Lekima[J]. *Meteorological Monthly*, 2024, 50(5): 532-546.
- [21] 吕心艳, 许映龙, 黄焕卿. 台风“威马逊”(1409)在南海北部急剧增强的环境因子分析[J]. *海洋预报*, 2021, 38(3): 1-10.
- LYU X Y, XU Y L, HUANG H Q. Analysis on environmental factors of the extremely rapid intensification of typhoon "Rammasun" (1409) in the northern South China Sea[J]. *Marine*

- Forecasts, 2021, 38(3): 1-10.
- [22] ZHANG F Q, TAO D D. Effects of vertical wind shear on the predictability of tropical cyclones[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2013, 70(3): 975-983.
- [23] LI X, DAVIDSON N E, DUAN Y H, et al. Analysis of an ensemble of high-resolution WRF simulations for the rapid intensification of super typhoon "Rammasun" (2014)[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2020, 37(2): 187-210.
- [24] PATERSON L A, HANSTRUM B N, DAVIDSON N E, et al. Influence of environmental vertical wind shear on the intensity of hurricane-strength tropical cyclones in the Australian region[J]. Monthly Weather Review, 2005, 133(12): 3644-3660.

## Analysis of early path forecast bias of CMA numerical models for super Typhoon "Yagi"

WU Min<sup>1,2</sup>, WU Yu<sup>1,2\*</sup>, LIU Bingjie<sup>3</sup>, WEI Xiaowen<sup>1,2</sup>

(1. Hainan Meteorological Observatory, Haikou 570203, China; 2. Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, China Meteorological Administration, Haikou 570203, China; 3. Hebei Cangzhou Meteorological Bureau, Cangzhou 061000, China)

**Abstract:** The super Typhoon "Yagi" (2024, No. 11) made landfall at its peak intensity in Hainan and Guangdong provinces, causing catastrophic damage. This study focuses on evaluating the performance of numerical models operated by the China Meteorological Administration (CMA) on forecasting the track of Typhoon "Yagi". The results show that the China Meteorological Administration-Regional Mesoscale Typhoon Numerical Prediction System (CMA\_TYM), the China Meteorological Administration Tropical Regional Assimilation Model for the South China Sea (CMA\_TRAMS), and the China Meteorological Administration Global Forecast System (CMA\_GFS) all exhibit systematic track biases toward north and east, with the forecast errors increasing as the lead time extends. Among them, the CMA\_TRAMS provides the most accurate forecast within 48 hours, while the CMA\_TYM has the smallest error in the medium-range forecast of 72~120 hours. The forecast errors of the subtropical high in the early development stage of the typhoon are the primary causes of long-term track prediction inaccuracies. Specifically, the models tend to overestimate disturbances on the east side of the typhoon and underestimate the approaching westerly trough. In addition, a delayed response to the typhoon's rapid intensification and insufficient simulation of air-sea interactions contribute to errors in forecasting the structure of the subtropical high, significantly affecting track forecasts beyond 48 hours.

**Key words:** super Typhoon "Yagi"; model forecast evaluation; subtropical high