

# GRAPES-TCM 业务试验结果分析

朱振铎<sup>1,2</sup> 端义宏<sup>2</sup> 陈德辉<sup>1</sup>

(1. 中国气象科学研究院,北京 100081; 2. 中国气象局上海台风研究所)

**提 要:** 应用数值模式 GRAPES-TCM2.1 (GT2.1) 的升级版 GRAPES-TCM2.6 (GT2.6) 对 2005 年西北太平洋及南海热带气旋路径进行了后报试验和性能检验。在检验预报路径时考察了平均距离误差、系统偏差、距离误差的地理分布和平均移速误差,并在总体检验的基础上,根据与热带气旋路径相关的重要因素(路径类型、强度、有无登陆过程以及有无移向或移速突变)进行了分类检验。结果表明,GT2.6 表现出良好的预报性能,其对所有样本的 24、48 和 72 小时平均距离误差分别为 135.8、230.7 和 336.0km,但前 12 小时距离误差较大(近 100km)。用系统偏差订正 GT2.6 对转向类样本的预报路径可获得明显的改进。GT2.6 对 130°E 以西区域特别是靠近我国东南沿海的热带气旋路径预报表现较好。GT2.6 的总体平均预报移速在 48 小时内都比最佳路径移速偏快,初始的 12 小时内偏快最多(近  $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),在 48 小时后转为偏慢。GT2.6 和 GT2.1 的前 48 小时路径预报性能的稳定性相当,总体误差特征相似,GT2.6 对所有样本的 48 小时预报有显著改进,平均距离误差减小 17km。初步分析表明,对 GT2.6 的改进应主要集中在数值预报初始场的改进方面,比如在初始化过程中采用较准确的涡旋分离方案、加入引导向量改进初始移动以及适当考虑加入非对称 Bogus 涡旋;扩大预报区域,并适当选取预报区域起始位置等。

**关键词:** GRAPES-TCM 数值模式 路径预报 性能检验

## An Analysis of GRAPES-TCM's Operational Experiment Results

Zhu Zhenduo<sup>1,2</sup> Duan Yihong<sup>2</sup> Chen Dehui<sup>1</sup>

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; 2. Shanghai Typhoon Institute, CMA)

**Abstract:** GRAPES-TCM2.6 (GT2.6), the updated version of the numerical model GRAPES-TCM2.1 (GT2.1), is used to post-forecast tracks of TCs occurred over the Northwestern Pacific and the South China Sea during 2005. A series of detailed performance verifications for the numerical prediction of tropical cyclone tracks is presented. The results show that GT2.6 has a good

本项研究受国家自然科学基金 40575030, 40333025 和国家科技部科研院所社会公益研究专项 2005DIB3J104 资助。

收稿日期: 2007 年 3 月 12 日; 修定稿日期: 2007 年 5 月 30 日

performance on TC track prediction. The total mean forecast errors (MFE) at 24, 48 and 72h are 135.8, 230.7 and 336.0 km, respectively. The result also shows that the MFE at 12h is somewhat large (about 100 km). The significant improvement of GT2.6's track prediction for the turning TC can be obtained through the modification of the forecast tracks with systematic bias. The model is found to have very good forecast skill for the cases that occurred in the west of 130°E, especially for those close to the southeast of China. In general, the forecast track of GT2.6 is faster (slower) before (after) 48 hours than the optimal track, and the speed bias at 12 hour is larger during the forecast period (approximately 1 m/s). In comparison with GT2.1, GT2.6 has similar performance stability and MFE characteristics on 0-48h TC track prediction, except that the 48h forecast of GT 2.6 is significantly better than that of GT 2.1.

Primary results indicate that several essential measures should be taken to further improve the track forecast skill of GT2.6. They are replacing the vortex-environment separation scheme with a stricter one, adding persistence vector to improve the initial motion and an asymmetric bogus vortex in the initial time, as well as enlarging the forecast domain and properly setting its position.

**Key Words:** GRAPES-TCM numerical model track forecast performance examination

## 引 言

近年来热带气旋数值预报模式发展迅速,路径数值预报的精度不断提高,其中较为先进的有 GFDL(美国海洋大气局地球流体动力实验室有限区域数值预报模式)、NOGAPS(美国海军全球大气预报谱模式)、UKMET(英国气象局全球谱模式),以及日本气象厅的有限区域谱模式 TYM 等。2005 年 GFDL 大西洋飓风预报的 24、48 和 72 小时误差分别为 97.1、162.8 和 252.9 km,上面提到的其它模式也稳定在 24 小时 120 km、48 小时 200 km 和 72 小时 300 km 左右<sup>[1-2]</sup>。而我国在台风数值预报模式研制和应用方起步比较晚,目前国家气象中心、上海台风研究所和广州热带海洋气象研究所都建立了台风模式并投入到业务使用。国家气象中心的台风模式为全球谱模式(T213L31),用最优差值法进行客观分析,在分析场中加入非对称人造台风,对西太平洋和中国南海区域的台风

每天进行 4 次 120 小时预报。该模式的预报能力已接近中央气象台的主观预报,有时甚至还好于主观预报,特别是 48 小时以上时效的客观模式较主观预报具有一定的优势<sup>[3]</sup>。上海台风研究所的台风模式是基于 MM5 发展起来的<sup>[4]</sup>,采用 Bogus 技术,对进入 18°N 以北、156°E 以西的台风进行一天二次的 72 小时路径预报。而广州区域气象中心的台风数值预报模式是在热带有限区业务模式(TC10)基础上发展起来的<sup>[5]</sup>,用最优插值法进行客观分析,通过加入人造台风方法得到初始场,对进入 15°N 以北、125°E 以西的台风进行一天二次的 48 小时预报。2005 年各家数值模式的平均距离误差 24 小时为 154.0 km,48 小时为 279.2 km<sup>[2]</sup>。

中国气象局气象数值预报创新基地开发了多尺度的同化与数值预报系统(简称 GRAPES, Global Regional Assimilation and Prediction System)<sup>[6]</sup>。该系统采用全可压原始方程组,集常规与非常规变分同化、静力平衡与非静力平衡、全球与区域模式、科研

与业务应用、串行与并行计算、标准化与模块化程序、理想试验与实际预报为一体,中小尺度与大尺度通用的数值预报系统<sup>[7]</sup>。现有的结果表明,GRAPES对天气形势和中尺度天气系统有较好的预报能力<sup>[8]</sup>。基于GRAPES的GRAPES-TCM<sup>[9]</sup>于2004年6月开始准业务预报试验。经过准业务试验和实际运行的结果看,它对热带气旋路径具有良好的预报精度和预报稳定性。

自GRAPES-TCM建立以来,GRAPES已进行了数次升级,涉及完善动力框架程序,添加新的物理过程等。其版本已由GRAPES 2.1更新为GRAPES 2.6。因此,需要将GRAPES-TCM的内核更新为GRAPES 2.6,并检验新版本模式对于热带气旋路径的预报性能。本文通过大样本检验,分析GRAPES-TCM 2.6(以下简称GT2.6)72小时内的路径预报性能,并与GRAPES-TCM 2.1(以下简称GT2.1)进行比较。

## 1 资料和方法

### 1.1 资 料

2005年GT2.1共进行了195次48小时准业务预报,受现有资料限制,本试验从中选取了20个热带气旋的共126个预报样本(见表1),占总样本数的64.6%。其中维持时间达到72小时的有97个,占有维持时间达到72小时样本的68.7%。本文使用的路径实际资料来自《西太平洋热带气旋年鉴》的最佳路径,图1为所选样本的路径图。可以看出,所有路径呈现出西或西北行和转向(均为向东北转向)两种形态。绝大部分样本位于30°N以南、150°E以西,130°E以东多出现转向路径,以西则多为西或西北行路径。本文将GT2.6的模拟时长设定为72小时,对生命史短于72小时的样本只作48小时模拟。与GT2.1一

样,GT2.6的样本模拟均采用AVN资料和涡旋重定位方案构建初始场,侧边界每12小时更新一次。GT2.6的基本属性和参数化设置与GT2.1相同,参看文献<sup>[9]</sup>。

表 1 模拟的热带气旋及样本数统计

台风名称	编号	样本数	72小时样本数
Roke	0502	6	0
Sonca	0503	5	5
Nesat	0504	14	13
Haitang	0505	14	12
Nalgae	0506	4	4
Banyan	0507	7	6
Matsa	0509	13	12
Sanvu	0510	1	1
Mawar	0511	4	2
Guchol	0513	1	0
Talim	0513	5	4
Nabi	0514	8	6
Khanum	0515	9	7
Saola	0517	4	3
Damrey	0518	10	7
Longwang	0519	8	8
Kirogi	0520	6	4
Kai-tak	0521	3	2
Tembin	0522	2	0
Bolaven	0523	2	1

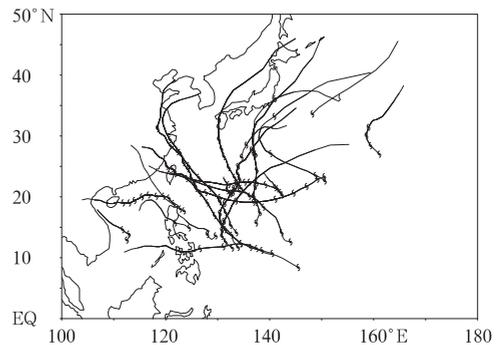


图 1 所有样本的最佳路径  
台风标志为起报位置

### 1.2 检验方法

本文主要分析GT2.6的平均距离误差、系统偏差、距离误差的地理分布和平均移速误差。距离误差的定义为模拟路径位置与最佳路径位置间的大圆弧长<sup>[10]</sup>。除了对总体

样本检验外,本文还将所有样本进行分类检验,包括路径类型、强度大小、有无登陆过程以及有无移向或移速突变。

## 2 GT2.6 路径预报性能检验

### 2.1 平均距离误差

总体平均:图 2 为 GT2.6 对所有热带气旋路径预报的样本和分类样本的距离误差比较。从图 2 看出,GT2.6 预报的 24、48 和 72 小时的总体平均误差分别为 135.8、230.7 和 336.0km。由式(1)可得 GT2.6 的预报技巧<sup>[11]</sup>,其中  $P$  为预报技巧, $E_C$  和  $E_G$  分别为

CLIPER<sup>[12]</sup>和 GT2.6 的平均距离误差。所有试验样本中 CLIPER 预报的有 76 个(预报时效均达 72 小时),基于它们算得 GT2.6 在 24、48 和 72 小时的预报技巧分别为 24.9%、38.7%和 47.4%。可见 GT2.6 的预报技巧随预报时间的增加而提高,其对热带气旋路径的预报特别是 72 小时的预报有很好的效果。值得注意的是,GT2.6 在 12 小时的预报平均误差较大,接近 100km,这可能是由于模式预报的初期受模式初始场影响较大<sup>[10]</sup>,由此看出,GT2.6 使用的初始化方案还需进一步改进。

$$P = 100(E_C - E_G)/E_C \quad (1)$$

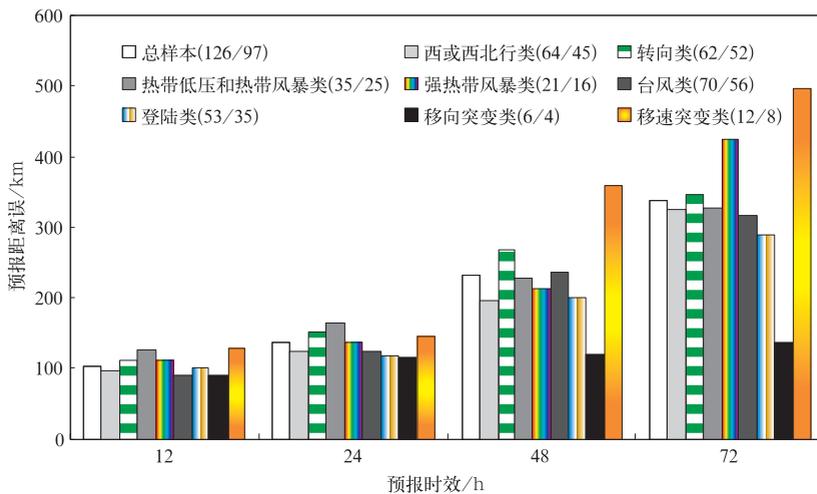


图 2 GT2.6 总样本和分类样本的距离误差  
括号里为预报时效达 48/72 小时的样本数

按热带气旋路径形态分类:据图 1,所用预报样本的路径可分为西或西北行和转向这两种类型。图 2 显示,西或西北行类样本的路径距离误差在 24、48 和 72 小时分别比总体平均小 13.8、35.8 和 13.4km,而转向类样本则相反,其距离误差在 24、48 和 72 小时分别比总体平均大 14.3、36.9 和 11.6km。这

说明 GT2.6 对西或西北行类样本的预报性能要优于对转向类样本的,这种优势在 48 小时尤其显著(72.7km)。

按热带气旋强度分类:根据预报时刻热带气旋强度(近中心最大风速用  $V_{max}$  表示)可将所有样本分为 3 种类型<sup>[9]</sup>:热带风暴和热带低压( $V_{max} < 24.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),强热带风暴

( $24.4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\leq V_{\max}<32.6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )和台风( $V_{\max}\geq 32.6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )。热带气旋强度达台风的样本最多,占总数的 55.6%;热带风暴和热带低压类次之,占总数的 27.7%;强热带风暴类最少,只占总数的 16.7%(图 2)。在 12 和 24 小时,热带低压和热带风暴类平均误差比强热带风暴类大 14 和 27km,强热带风暴类平均误差又比台风类大 20 和 13km。由此可见,在前 24 小时,这三类的误差随着强度的增大而减小。然而,在 48 和 72 小时却不存在这样的关系,在 48 小时台风类最大,而在 72 小时强热带风暴类的距离误差比其它两类大近 100km。这里分析的结果与文献[9]的结果不尽一致,文献[9]对于不同强度热带气旋路径预报有一定的规律性,但是那种规律性在 2005 年预报中表现得并不明显,这可能与模式的初始场以及 GRAPES-TCM 还不具备模拟热带气旋强度能力有关。

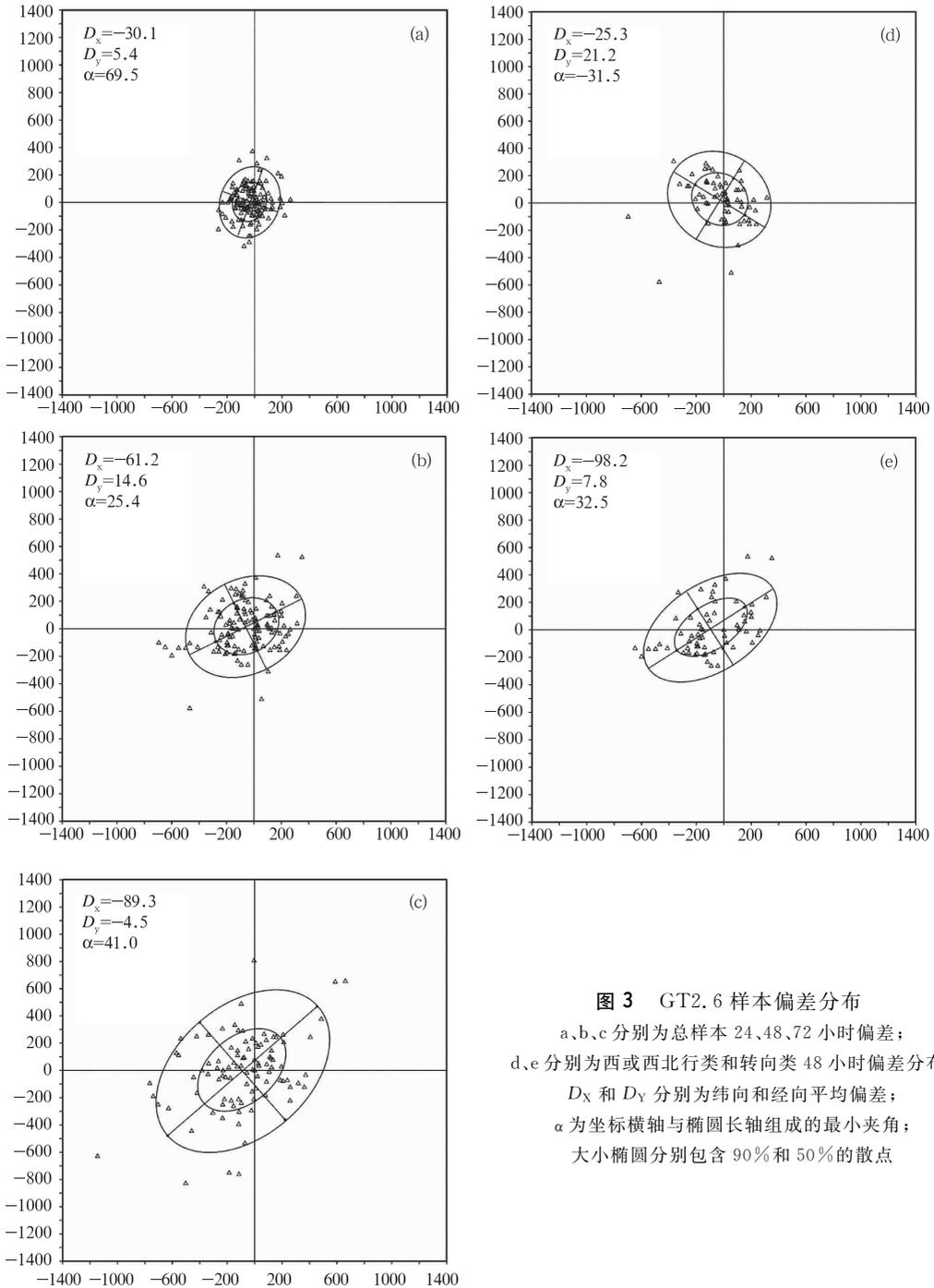
**登陆热带气旋样本:**本文定义的登陆样本是指在模拟时间内最佳路径中有登陆过程的样本。该类样本在 24、48 和 72 小时的距离误差为 117.7、200.1 和 287.8km,分别比总体平均小了 18.1、30.6 和 48.2km(图 2)。这说明 GT2.6 对登陆热带气旋的路径预报具有较高的参考价值。该类样本模拟比较好的可能原因是由于它靠近陆地,观测资料比较多,使得模式可以更准确地描述大尺度环流和涡旋环流<sup>[13]</sup>,因此便容易得到较准确的路径预报。

**热带气旋路径移向和移速突变类:**移向突变是指热带气旋前后 12 小时平均移向角度差左折 $\geq 30^\circ$ 或者右折 $\geq 45^\circ$ <sup>[14]</sup>。而移速突变是指热带气旋前后 12 小时移速变化绝对值 $\geq 15\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,若风速初速 $\leq 5\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,则前后 12 小时移速增加 $10\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 或以上也为移速突增<sup>[15]</sup>。图 2 显示,移向突变类的距离误差在 72 小时内都明显小于总体平均,其 48 和

72 小时的距离误差均不超过 140km。移速突变类则相反,12 小时的距离误差比总体平均大 24.0km,达到 127.0km,48 和 72 小时更是大了 127.4 和 160.2km,达到 358.1 和 496.2km。以上说明 GT2.6 对移向突变类样本有一定的预报能力,而对移速突变类的路径相对较差些。但是,由于这两类样本数目较少(10 个左右),上述结论有待以后用更多样本进行验证。

## 2.2 系统性偏差

为了考察 GT2.6 对路径的预报是否存在系统性的偏差,对每个样本计算其预报位置相对于最佳路径位置的经向和纬向距离。用这些距离绘成的散点图即为预报位置相对于最佳路径位置(原点)的分布图,然后在二元正态概率分布假设下,计算理论上包含 50% 和 90% 散点的概率椭圆<sup>[16]</sup>(图 3)。由图 3 可以看出,GT2.6 的概率椭圆在 72 小时内都是东北-西南向,这种分布型在 24 小时后表现更加突出。这意味着偏离较远的预报位置多位于观测位置的东北或西南侧,分别对应于对转向(通常向东北)的高估和低估<sup>[11]</sup>。不同路径类型的偏差分布也显示(见图 3),东北-西南向的误差主要来源于对转向样本的预报。这说明 GT2.6 的总体平均误差主要来源于对转向的预报。这与之前的分类比较结果一致。GT2.6 的概率椭圆随预报时间的增长而面积变大,这是因为模式的预报误差随预报时间增长而增大。由图 4a 可以看出,GT2.6 对所有样本、西或西北行类和转向类都有向西(稍偏北)的系统偏差。前 48 小时,所有样本和转向类的偏差随预报时间向西增大,48 小时后有所振荡,而西或西北行类的偏差在前 24 小时先增后减,之后持续增大,三类样本的 72 小时偏差都达到 90km 左右。这说明 GT2.6 的预报位置倾向于偏向最佳路径位置的西侧,且这种趋势大体上随预报时间的增长而变大。这与散点图



**图 3** GT2.6 样本偏差分布  
 a、b、c 分别为总样本 24、48、72 小时偏差；  
 d、e 分别为西或西北行类和转向类 48 小时偏差分布；  
 $D_x$  和  $D_y$  分别为纬向和经向平均偏差；  
 $\alpha$  为坐标横轴与椭圆长轴组成的最小夹角；  
 大小椭圆分别包含 90% 和 50% 的散点

反映的趋势是一致的。对于西或西北行样本,这意味着 GT2.6 的预报路径比最佳路径偏快。而对于转向样本则意味着 GT2.6 倾

向于低估转向<sup>[13]</sup>。用系统偏差订正上述三类样本的预报路径发现,所有样本、西或西北行类的距离误差在大部分时次有小幅减小;

而转向类则取得了较大的改进,18~48 小时改进超过了 10km,误差缩小达 5% 以上,这是因为转向类样本偏差分布的一致性较其它两个样本更强(图 3b、d、e)。建议业务应用中在参考 GT2.6 的路径预报时(特别是对转向类样本的 24~48 小时预报)考虑消去图 4a 所示的系统偏差。

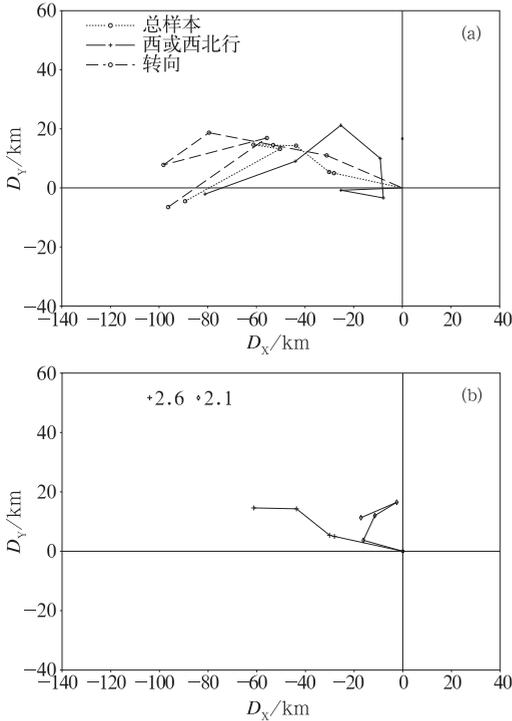


图 4 GT2.6 的系统偏差(a)及 48 小时内 GT2.6 和 GT2.1 的系统偏差对比(b)

### 2.3 路径距离误差的地理区域分布

为了考察 GT2.6 对不同地理区域内热带气旋的预报性能,将西太平洋热带气旋发生区域( $0\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $100\sim 170^{\circ}\text{E}$ )以 10 经/纬度为间隔划分为格点数为  $8\times 5$  的网格。然后按照初始涡旋的位置确定每个网格内的样本数目及相应的平均距离误差。图 5 为 48 小时的距离误差地理分布图(24 和 72 小时的分布情况与 48 小时相似,为节省篇幅未给

出)。从图 5 可以看出,平均距离误差的分布表现出很强的地域性, $130^{\circ}\text{E}$  以西大部分区域内的距离误差明显小于  $130^{\circ}\text{E}$  以东的。特别是在靠近我国台湾省( $20\sim 30^{\circ}\text{N}$ 、 $120\sim 130^{\circ}\text{E}$ )和菲律宾以西( $10\sim 20^{\circ}\text{N}$ 、 $110\sim 120^{\circ}\text{E}$ )这两个区域内,距离误差远小于总体平均(48 小时小 230.7km)。在  $10\sim 20^{\circ}\text{N}$ 、 $120\sim 130^{\circ}\text{E}$  内,GT2.6 的预报也相当不错。而  $30^{\circ}\text{N}$  以北, $10\sim 20^{\circ}\text{N}$ 、 $130\sim 140^{\circ}\text{E}$  以及  $20\sim 30^{\circ}\text{N}$ 、 $140\sim 170^{\circ}\text{E}$  的距离误差显著大于总体平均。由图 1 可以看出, $30^{\circ}\text{N}$  以南、 $130^{\circ}\text{E}$  以西的样本多为西或西北行类样本,而  $30^{\circ}\text{N}$  以北和  $30^{\circ}\text{N}$  以南(特别是  $20^{\circ}\text{N}$  以南)、 $130^{\circ}\text{E}$  以东转向样本数明显增多。从前面分析可知,GT2.6 对西或西北行样本的距离误差显著小于对转向样本的,这便在很大程度上造成了上述分布形态。而且, $30^{\circ}\text{N}$  以北的 7 个样本中有 5 个处在高纬度天气尺度系统(西风槽、高空冷涡、温带气旋、反气旋等)影响范围内(图未给出),与在中低纬相比,热带气旋与这些系统间的相互作用也更为复杂,模式对这些过程的移动特征往往难以作出准确的预报,因而会导致比较大的路径预报误差<sup>[17]</sup>。图 5 还需注意的是,登陆我国海南和大陆( $20\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $110\sim 120^{\circ}\text{E}$ )的 5 个样本平均距离误差较大,这主要是因为热带气旋登陆后,它的结构受到地形等作用,由于热带气

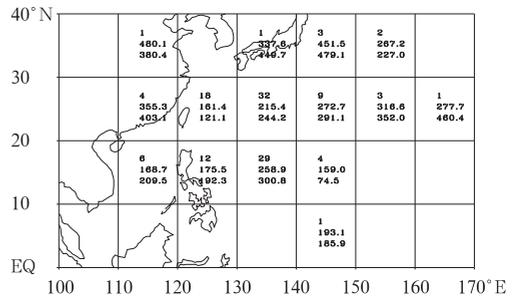


图 5 GT2.6 和 GT2.1 48 小时距离误差地理分布  
每格内数字从上到下为别表示样本数、GT2.6 的  
距离误差和 GT2.1 的距离误差(单位:km)

旋登陆后强度迅速减弱,而 GT2.6 模式对于这些过程还不能比较好地反映出来,这也是目前热带气旋研究领域中没有解决而需要加强研究的热带气旋登陆后的路径预报问题。由以上分析可知,GT2.6 对靠近我国台湾省和菲律宾的热带气旋的路径预报有较高的参考价值,但对于热带气旋进入中高纬度(30°N 以北)、太平洋东部和中南部(10~20°N、130~140°E 和 20~30°N、140~170°E)

以及登陆后(进入 20~40°N、110~120°E)的预报结果在实际应用中要慎重考虑。

## 2.4 移速偏差

由于最佳路径的时间分辨率为 6 小时,本文使用 6 小时间隔的距离计算移速。然后将路径以 12 小时为间隔分段,计算各段的平均移速。总体平均、不同路径类型和不同强度的最佳路径移速及模拟移速见表 2。

表 2 GT2.6 的移速偏差

时效	0~12		12~24		24~36		36~48		48~60		60~72		平均	
	$\bar{V}$	$\bar{D}$												
总样本	4.99	5.09	5.35	5.76	6.97	6.52	5.78	0.98	0.51	0.53	0.35	-0.45	-0.05	0.31
西或西北行	5.41	5.50	5.61	5.80	7.64	6.30	6.04	0.96	0.25	0.30	0.30	-1.76	-0.38	-0.05
转向	4.56	4.67	5.08	5.73	6.38	6.72	5.52	1.00	0.78	0.77	0.39	0.70	0.18	0.65
热带风暴、低压	4.69	4.88	5.04	5.20	6.53	6.41	5.46	1.35	1.21	1.28	0.13	-0.58	-0.33	0.51
强热带风暴	5.84	5.79	6.05	6.64	7.01	7.40	6.46	0.39	-0.23	-0.72	0.51	0.04	0.55	0.09
台风	4.89	4.99	5.30	5.78	7.15	6.32	5.74	0.97	0.38	0.53	0.41	-0.53	-0.10	0.28

注:V 为最佳移速,D 为 GT2.6 的偏差,单位  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,正值表示偏快。

从表 2 可以看出,GT2.6 的平均预报移速在 48 小时内都比最佳路径移速偏快,偏快程度随预报时间的增长而减小,48 小时后转为偏慢。前 48 小时偏快的样本占总数的约 55%,48 小时后偏慢的样本占总数的约 41%。其 72 小时平均移速偏快  $0.31\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。热带气旋的移速在很大程度上取决于引导流速(通常比引导流速快约  $1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )<sup>[18]</sup>,因此 GT2.6 的移速偏差主要是由其其对背景环流预报不准确造成的。值得注意的是,GT2.6 在初始的 12 小时内偏快最多(近  $1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),偏快样本的比例也很高(71.4%)。这意味着对大部分样本,在预报初始 12 小时,只移速偏差就可能产生近 40km 的距离误差。而初始阶段的预报移速受初始资料中的初始移速影响很大,因此很有必要在涡旋初始化过程中纠正其初始移速<sup>[10]</sup>。分类样本中,转向类和热带气旋和热带低压类的 72 小时内平均移速偏差较大,与它们较大的初始移速偏差对应,这也印证了初始化过程对 GT2.6 路径

预报的重要性。

以上分析可知,GT2.6 在前 12 小时距离误差较大,其预报技巧随预报时间的增加而显著提高,24 小时后表现出良好的路径预报性能。GT2.6 对西或西北行样本和登陆样本的路径有不错的预报效果,而对转向样本和强度较大样本的表现较差。向西的系统偏差使 GT2.6 对西或西北行样本的预报移速偏快,而对转向样本的预报则倾向于低估转向。用系统偏差订正 GT2.6 对转向类样本的预报路径可获得明显的改进。GT2.6 的预报移速在 48 小时内都比最佳路径移速偏快,48 小时后转为偏慢。有必要采取措施减小其显著的初始移速偏差。GT2.6 在 130°E 以西区域的误差明显小于 130°E 以东的,对靠近我国台湾省和菲律宾的热带气旋的路径预报有较高的参考价值,而对于在中高纬度(30°N 以北)、东部和中南部太平洋(10~20°N、130~140°E 和 20~30°N、140~170°E)以及登陆后(进入 20~40°N、110~120°E)的热

带气旋的路径预报结果在应用时要慎重参考。

### 3 GT2.6 和 GT2.1 路径预报性能比较

为了考察 GT2.6 的路径预报性能相对 GT2.1 的差异,对 GT2.1 在 2005 年的业务路径预报也做如上分析,选用样本保持一致。由于 GT2.1 的业务预报时效为 48 小时,只

比较两个版本的前 48 小时表现。

平均距离误差:表 3 为两版本的平均距离误差对比。48 小时内,两版本对所有样本预报误差的标准方差接近(未给出),说明两版本的预报稳定性相当<sup>[13]</sup>。前 24 小时,GT2.6 和 GT2.1 误差很接近。48 小时 GT2.6 比 GT2.1 改进达 17km,是 GT2.1 距离误差的 7%。

表 3 GT2.6 与 GT2.1 的距离误差对比

时效	12h		24h		48h	
	$\bar{D}$	$\Delta\bar{D}$	$\bar{D}$	$\Delta\bar{D}$	$\bar{D}$	$\Delta\bar{D}$
总样本	108.6	-5.6	138.4	-2.6	247.9	-17.2
西或西北行	104.7	-8.9	128.9	-6.9	219.8	-24.9
转向	112.6	-2.2	148.3	1.8	276.9	-8.9
热带风暴、低压	129.2	-4.6	166.9	-4.0	246.5	-17.0
强热带风暴	118.1	-7.6	136.6	-0.8	274.2	-61.3
台风	95.4	-5.4	124.8	-2.5	240.7	-4.1
登陆	106.4	-5.0	122.6	-4.9	205.2	-5.1
移向突变	104.3	-13.7	107.1	8.6	176.2	-56.0
移速突变	124.5	2.5	155.6	-9.9	365.2	-7.1

注: $\bar{D}$ 为 GT2.1 的平均距离误差, $\Delta\bar{D}$ 为 GT2.6 与 GT2.1 的距离误差的差值,单位:km,负值表示改进。

系统偏差对比:两版本在 48 小时内的偏差分布形态相似(只给出 48 小时的,图 6),且都有向西的系统偏差(图 4b)。GT2.6 的系统偏差随预报时间向西增大,48 小时达近

65km,GT2.1 则一直未超过 20km。

距离误差地理分布对比:GT2.6 和 GT2.1 的距离误差地理分布形态在前 24 小时基本一致(图未给出)。48 小时(图 5),GT2.6 在大部分区域都有所改进,在样本数最集中(占总数的 48.4%)的 10~30°N、130~140°E 内改进幅度接近 30km。

移速偏差对比:两版本的移速偏差对比见表 4。在 48 小时内,两版本的预报移速都比最佳路径移速偏快,在预报的前 12 小时二者接近,12~36 小时 GT2.6 比 GT2.1 偏慢,更接近于最佳路径移速,36 小时后则相反。两版本的 48 小时内平均移速偏差接近。

GT2.6 改进的显著性:从以上基于 2005 年样本的比较结果可以看出,GT2.6 对所有样本的 48 小时路径预报相对于 GT2.1 有改进。由配对  $t$  检验(信度水平设为 95%)知<sup>[10]</sup>,GT2.6 对所有样本改进达到了显著水平。

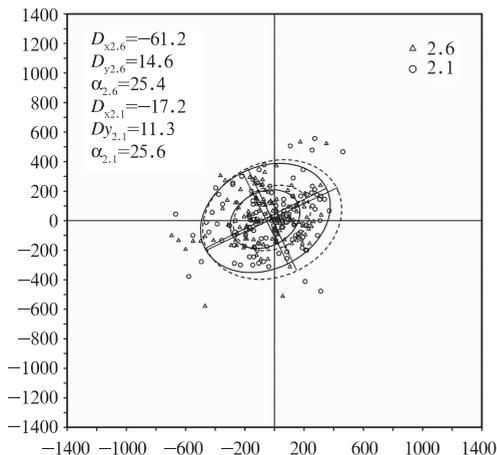


图 6 GT2.6 和 GT2.1 对所有样本的 48 小时偏差分布  
实线椭圆和虚线椭圆分别为 GT2.6 和 GT2.1 的概率椭圆,其余说明同图 3

表 4 GT2.6 和 GT2.1 的移速偏差对比。

时次	0~12h			12~24h			24~36h			36~48h			平均		
	V	D <sub>2.1</sub>	D <sub>2.6</sub>	V	D <sub>2.1</sub>	D <sub>2.6</sub>	V	D <sub>2.1</sub>	D <sub>2.6</sub>	V	D <sub>2.1</sub>	D <sub>2.6</sub>			
总样本	4.99	0.93	0.98	5.09	0.78	0.51	5.35	0.73	0.53	5.76	0.12	0.35	5.30	0.63	0.59
西或西北行	5.41	0.81	0.96	5.50	0.37	0.25	5.61	0.07	0.30	5.80	-0.34	0.30	5.58	0.22	0.45
转向	4.56	1.06	1.00	4.67	1.23	0.78	5.08	1.42	0.77	5.73	0.58	0.39	5.01	1.07	0.74
热带风暴、低压	4.69	1.60	1.35	4.88	1.01	1.21	5.04	1.24	1.27	5.46	0.30	0.51	5.02	1.04	0.98
强热带风暴	5.84	0.23	0.39	5.79	0.49	-0.23	6.05	0.03	-0.72	6.46	-0.47	0.09	6.04	0.06	-0.08
台风	4.89	0.80	0.97	4.99	0.74	0.38	5.30	0.69	0.53	5.74	0.17	0.28	5.23	0.60	0.54

注:V 为最佳路径移速, D<sub>2.1</sub> 为 GT2.1 的移速偏差, D<sub>2.6</sub> 为 GT2.6 的移速偏差, 其它说明同表 2。

#### 4 结论和讨论

本文使用 2005 年西太平洋和南海的热带气旋个例对 GRAPES-TCM2.1 的升级版 GRAPES-TCM2.6 从平均距离误差、系统偏差、距离误差的地理分布和平均移速误差等方面检验了其路径预报性能。结果表明, GT2.6 在前 12 小时距离误差较大, 其预报技巧随预报时间的增加而提高, 24 小时后表现出良好的路径预报性能。GT2.6 对西或西北行类及登陆类样本的预报效果不错, 而对转向类和强度为台风类个例的表现要比总体误差偏大。GT2.6 有向西的系统性偏差, 且基本上随预报时间的增长该偏差向西增大, 72 小时达到近 90km, GT2.6 对西或西北行样本的预报移速偏快, 而对转向样本则倾向于低估转向。用系统偏差订正 GT2.6 对转向类样本的预报路径可获得明显的改进。GT2.6 对 130°E 以西区域的样本预报表现较好, 特别对靠近我国台湾省和菲律宾的热带气旋的路径预报有较高的参考价值, 但对于在中高纬度(30°N 以北)、东部和中南部太平洋(10~20°N、130~140°E 和 20~30°N、140~170°E)以及登陆后(进入 20~40°N、110~120°E)的热带气旋, 预报员在参考 GT2.6 的预报路径时需要慎重考虑。GT2.6 的总体平均预报移速在 48 小时内都比最佳路径移速偏快, 初始 12 小时内偏快最多

(近  $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 48 小时后转为偏慢。GT2.6 对转向类和热带风暴和热带低压类的 72 小时平均移速偏差较大。

比较 GT2.6 和 GT2.1 的前 48 小时路径预报性能发现, 两版本的预报稳定性相当。前 24 小时两版本的距离误差接近, 在 48 小时 GT2.6 对所有样本有显著改进, 预报的平均距离误差减少 7%。两版本具有比较相似的系统偏差特征。

由性能检验可知, GT2.6 路径预报性能的主要不足有: 初始(12 小时)预报误差较大, 对转向类样本和强度较大样本(台风类)的预报效果改进不明显。初步分析表明, GT2.6 的初始移动的较大偏差, 对热带气旋环流预报偏差较大, 对背景环流的位置、强度预报还不够准确。因此, 下一步的工作应该围绕初始场的改进, 比如, 在初始场中加入引导向量改进初始移动、采用 GFDL 的涡旋分离方案<sup>[19]</sup>、加入非对称 Bogus 涡旋<sup>[13-20]</sup>、适当扩大预报区域, 并适当选取预报区域起始位置等均可以进一步提高 GT2.6 的路径预报技巧。

#### 参考文献

- [1] Franklin, J. L. . 2005 National Hurricane Center Forecast Verification Report [OL]. Available online at [http://www.nhc.noaa.gov/verification/pdfs/Verification\\_2005.pdf](http://www.nhc.noaa.gov/verification/pdfs/Verification_2005.pdf), 2006.
- [2] 李佳, 于润玲, 马雷鸣. 2005 年西北太平洋热带气旋综述[J]. 大气科学研究与应用, 2006, 01(01), 1-15.

- [3] 许映龙,刘震坤,董林,等. 2002年西北太平洋和南海热带气旋路径主客观预报评价[J]. 气象,2005,31(06), 43-46.
- [4] 殷鹤宝. 正规模初始化及其在东海台风模式中的实验[M]. 台风、暴雨业务数值预报方法和技术研究, 北京:气象出版社,1996,59-66.
- [5] 王康玲. 南海区域台风路径数值预报业务模式研究实验[M]. 台风、暴雨业务数值预报方法和技术研究, 北京:气象出版社,1996,44-512.
- [6] 陈德辉,薛继善,沈学顺,等. 新一代数值预报系统(GRAPES)研究及其初步应用试验[C]. 数值天气预报新理论新方法及应用学术研讨会,论文摘要汇编, 2004:87-91.
- [7] 陈建萍. 全球区域同化预报系统的使用及其数值模拟[J]. 江西气象科技, 2005, 28(2): 10-12.
- [8] 叶成志,欧阳里程,李象玉,等. GRAPES中尺度模式对2005年长江流域重大灾害性降水天气过程预报性能的检验分析[J]. 热带气象学报,2006,22(04),83-89.
- [9] 黄伟,端义宏,陈德辉,等. 热带气旋路径数值模式(GRAPES-TCM)业务试验性能分析. 提交《气象学报》.
- [10] Mark Demaria, Miles B. Lawrence, and James T. Kroll. An Error Analysis of Atlantic Tropical Cyclone Track Guidance Models[J]. Weather and Forecasting, 1990, 5:47-61.
- [11] Charles S. Neumann and Joseph M. Pelissier. An Analysis of Atlantic Tropical Cyclone Forecast Errors, 1970-1979[J]. Monthly Weather Review,1981,109, 1248-1266.
- [12] Neumann C. J. . An alternate to the HURRAN tropical cyclone forecast system[R]. NOAA Tech. Memo. NWS SR-62, 1972, 32 pp.
- [13] Johnny C. L. Chan and Wai-Kau Kay. Performance of the United Kingdom Meteorological Office Global Model in Predicting the Movement of Tropical Cyclones[J]. Weather and Forecasting, 1993, 8, 326-336.
- [14] 刘爱鸣. 台风移向突变诊断预报方法与1994年试用结果[M]. 台风及其灾害性天气业务预报方法的研究. 北京:气象出版社,1996,207-212.
- [15] 夏丽花. 一种台风移速突变的诊断预报方法[M]. 台风及其灾害性天气业务预报方法的研究. 北京:气象出版社,1996:231-235.
- [16] Tracy J D. Accuracy Of Atlantic Tropical Cyclone Forecasts[J]. Monthly Weather Review, 1966; 94, 407-418.
- [17] Lester E. Carr III and Russell L. Elsberry . Dynamical Tropical Cyclone Track Forecast Errors. Part II: Midlatitude Circulation Influences[J]. Weather and Forecasting, 2000, 15; 662-681.
- [18] Johnny C. L. Chan and William M. Gray. Tropical Cyclone Movement and Surrounding Flow Relationships [J]. Monthly Weather Review, 1982, 110; 1354-1374.
- [19] Yoshio Kurihara, Morris A. Bender, Robert E. Tuleya et al . Improvements in the GFDL Hurricane Prediction System [J]. Monthly Weather Review, 1995,123, 2791-2801.
- [20] Melinda S. Peng, Der-Song Chen, Simon W. Chang, et al. Improvement of Numerical Prediction of Typhoon Tracks in the Western North Pacific Basin near Taiwan [J]. Weather and Forecasting, 1995,10, 411-424.