

# 热带气旋路径趋势数值预报的试验研究

王 琴 朱永提

(上海台风研究所, 上海, 200030)

## 提 要

给出了一个嵌套于欧洲中期天气预报中心全球谱模式中的套网格模式,用于预报热带气旋路径趋势;提出了一种以欧洲中期天气预报中心提供的时距为24小时的预报场为基础的“接力预报”方法;设计了五种不同的“接力预报”方案;并对8507号和8509号两个热带气旋就各种不同预报方案进行了数值预报试验。结果表明,本模式对热带气旋路径趋势具有较强的预报能力,对疑难路径也具有一定的预报能力,为开展热带气旋的路径趋势预报提供了一个新的途径。

文中还对影响热带气旋路径趋势的一些主要因子结合各预报结果进行了分析,为模式尽早投入业务提供了一定的依据。

## 一、引 言

热带气旋路径的预报始于40年代末,50年代以来,随着数值天气预报的发展,热带气旋路径的数值预报已有很大进展,从简单的引导气流外推发展到用正压模式直至斜压模式,但路径预报正确率的提高却并不理想。数值预报模式,尤其是多层斜压原始方程模式(如美国的MFM、QLM)对较长时效(48—72小时)的预报占有优势,平均预报误差最小,然而,运算量较大,须有巨型机才能实现。目前这些模式只提供72小时的预报路径,至于更长时效的路径预报除T. N. Krishnamurti等作过一些数值试验外,在业务预报中尚未见实例。

根据我们目前的条件,发展较复杂的多层斜压原始方程模式,用以作热带气旋的中期路径或路径趋势预报显然是既不经济又不现实的。ECMWF全球谱模式具有较好的预报效果已为气象界所公认,而我们所能收到的资料仅为 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 的较粗网格资料( $20^{\circ}N$ 以北),往往难以直接确定热带气旋的正确位置,但对于大尺度的环流形势场预报却有较高的使用价值。如果利用ECMWF提供的预报场作为热带气旋路径预报的环境形势场,其路径预报则有可能得到较大改进。为此,我们提出了一种“接力预报”方法,即以欧洲中心的中期数值预报产品为基础,采用单向嵌套方法,用内含热带气旋的正压原始方程模式作

24 小时的数值积分,以确定热带气旋中心的 24 小时预报路径。然后,以此为基础,用 ECMWF 的预报场更新正压模式的预报场,仅保留热带气旋范围的环流或在更新场上重新嵌入热带气旋环流,在此基础上继续积分正压原始方程组,求 24 小时以后到 48 小时的热带气旋移动路径。如此继续积分,直到获得 144 小时 ECMWF 格点预报时刻后 24 小时,即可以据此求得 168 小时热带气旋中期路径趋势预报。个例实验表明,效果是令人满意的。

## 二、模式结构

### 1. 正压模式基本方程组

我们采用通量形式的正压原始方程组作为正压模式的预报方程组,且考虑热带气旋范围内垂直运动较强,将由此引起的效应作为一种设定的强迫源函数  $Q$  引入连续方程和动量方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{a \cos \theta} \left[ \frac{\partial}{\partial \lambda} (Uu) + \frac{\partial}{\partial \theta} (V u \cos \theta) \right] - V \left( f + \frac{u \operatorname{tg} \theta}{a} \right) + \frac{\phi}{a \cos \theta} \frac{\partial \phi}{\partial \lambda} = uQ \\ \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{a \cos \theta} \left[ \frac{\partial}{\partial \lambda} (Uv) + \frac{\partial}{\partial \theta} (V v \cos \theta) \right] + U \left( f + \frac{u \operatorname{tg} \theta}{a} \right) + \frac{\phi}{a} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} = vQ \\ \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{a \cos \theta} \left[ \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial \theta} (V \cos \theta) \right] = Q \end{cases}$$

式中  $\theta, \lambda, \phi, u, v$  分别为纬度、经度、位势高度和风的纬向、经向分量,且设  $U = u\phi, V = v\phi, f$  为柯氏参数。上述方程以 Arakawa A 型格式差分,并采用 Grimmer 和 Shaw (1967) 提出的总质量和总能量守恒的差分格式。

模式预报区域:  $20^{\circ} - 50^{\circ} \text{N}, 90^{\circ} - 150^{\circ} \text{E}$ ; 格距  $\Delta \lambda = \Delta \theta = 1.25^{\circ}$ ; 格点数  $49 \times 25$ ; 时间步长  $\Delta t = 300 \text{s}$ 。时间积分采用蛙跃格式,起步用 Euler 后差方案,为避免计算波的发展,从第三步开始对各预报量进行弱的时空平滑处理。

### 2. 套网格技术

模式边界采用异模式单向嵌套处理,即将上述球面网格的正压原始方程模式嵌套于 ECMWF 全球谱模式中。粗网格经纬距  $\Delta \lambda = \Delta \theta = 5^{\circ}$ ; 有限域细网格距  $\Delta \lambda = \Delta \theta = 1.25^{\circ}$ 。

为防止有限域边界值与域内预报值不连续导致波动反射或折射,采用了对边界的每个时步进行一次由外及里的绕圈平滑处理。

### 3. 初始嵌入的热带气旋模型

初始嵌入热带气旋为一理想轴对称涡旋,位势分布为:

$$\phi(r) = \phi_e - \Delta \phi_0 \frac{\exp[-4(r/R_0)^2]}{\sqrt{1 + 1.55(r/r_m)^2}}$$

式中  $\phi_e$  为涡旋外围环境位势高度,  $\Delta \phi_0 = \phi_e - \phi_0$  为外围环境位势  $\phi_e$  与涡旋中心位势高度  $\phi_0$  之差,  $r_m$  为涡旋最大风速处半径,  $R_0$  为涡旋环流的平均半径,  $r$  为热带气旋中心至某格点距离,涡旋范围内风初值取梯度风。

### 三、试验方案

为寻求一种有效计算方案,我们拟对 8507 号与 8509 号两个热带气旋取不同起报时刻,采用六种方案进行对比试验。

方案一:以 ECMWF 提供的时距为 24 小时的预报场更新正压原始方程模式的预报场,同时,根据正压原始方程模式对热带气旋中心的预报位置重新嵌入理想轴对称热带气旋模型,继续进行预报。

方案二:在以 ECMWF 提供的时距为 24 小时的预报场更新正压原始方程模式预报场的同时,保留热带气旋范围内的环流,并对两种预报值进行衔接协调处理,继续进行预报。

方案三:在方案二中,随着预报时效的延长,热带气旋强度会不断减弱,对某一定强度的热带气旋,尽管在整个时间积分过程中其中心均可辨认,但气旋强度的虚假减弱却可能使热带气旋与环境场的相互作用有所减弱。为此,我们对热带气旋强度采用定时“增强”的方法维持其强度,这里采用郭永润所用过的逆平滑方法,计算公式如下:

$$\bar{A}_{i,j} = A_{i,j} - S(A_{i+1,j} + A_{i-1,j} + A_{i,j+1} + A_{i,j-1} - 4.0A_{i,j}) \quad \text{当 } r < R_r \text{ 时}$$

其中,  $R_r$  为热带气旋外围半径,  $A$  代表  $u$ 、 $v$ 、 $\phi$ ,  $S$  为逆平滑系数,取  $S=0.125$ ,  $\bar{A}_{i,j}$  为平滑后的值,  $i, j$  为空间网格点标号。试验表明,以上处理每隔 6 小时进行一次便可基本达到维持热带气旋强度的目的。

方案四:在方案二的基础上,采用随热带气旋中心一起移动的轴对称强迫源函数,使其强度得以维持。强迫项取为:

$$Q(r) = -k\Delta\phi_0 \frac{\exp[-4(r/R_0)^2]}{\sqrt{1+1.55(r/r_m)^2}}$$

其中,  $k$  为强迫系数。试验表明,当  $k=10^{-3}$  时即可维持热带气旋的强度。

方案五:用非对称的参数化强迫取代方案四中的轴对称强迫。计算公式为:

$$Q_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{当 } r \geq R_i \text{ 或 } \nabla^2\phi \leq 0 \\ -k_r \frac{1}{f} \nabla^2\phi & \text{当 } r < R_i \text{ 且 } \nabla^2\phi > 0 \end{cases}$$

$k_r$  为经验系数,  $\frac{1}{f} \nabla^2\phi$  为地转涡度,计算时  $k_r$  取为  $10^2$ ,  $R_i$  为热带气旋内圈半径。

方案六:为对比分析而设计的非“接力预报”方案,即用正压原始方程模式独立地进行路径预报。

### 四、结果与分析

以 8507 号和 8509 号两个热带气旋为试验个例,取不同起报时刻,用上述各方案进行路径趋势预报试验。

#### 1. 8507 号热带气旋的试验

8507 号热带气旋的前期路径属通常所定义的疑难路径,各业务预报模式的预报(见

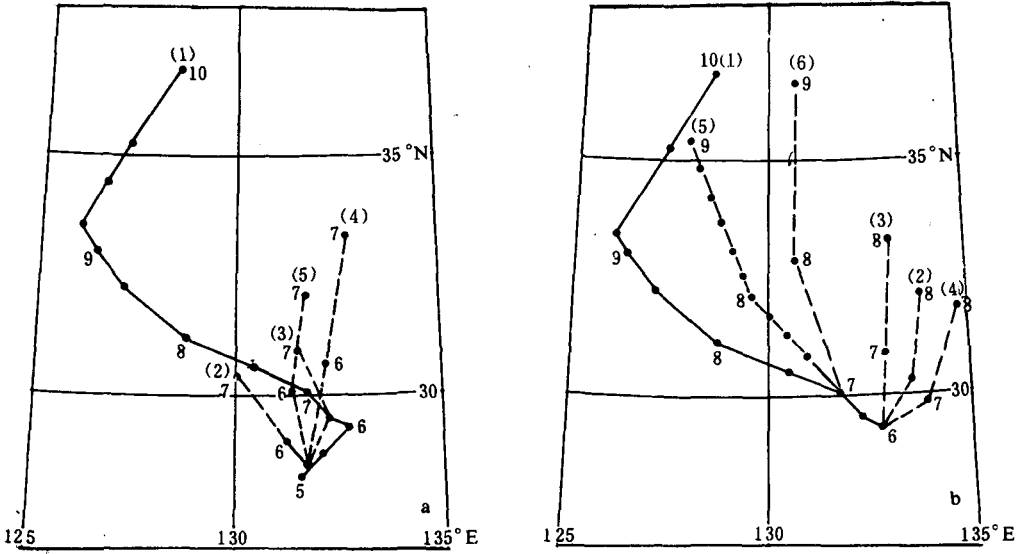


图1 各种业务预报模式的路径预报

(a)8月5日12Z起报:(1)实况 (2)SD75法 (3)PC法 (4)上海复合预报法 (5)关岛  
 (b)8月6日12Z起报:(1)实况 (2)PC法 (3)上海复合预报法 (4)关岛  
 8月7日12Z起报:(5)PC法 (6)关岛(图中路径旁数字(5,6……10)为日期)

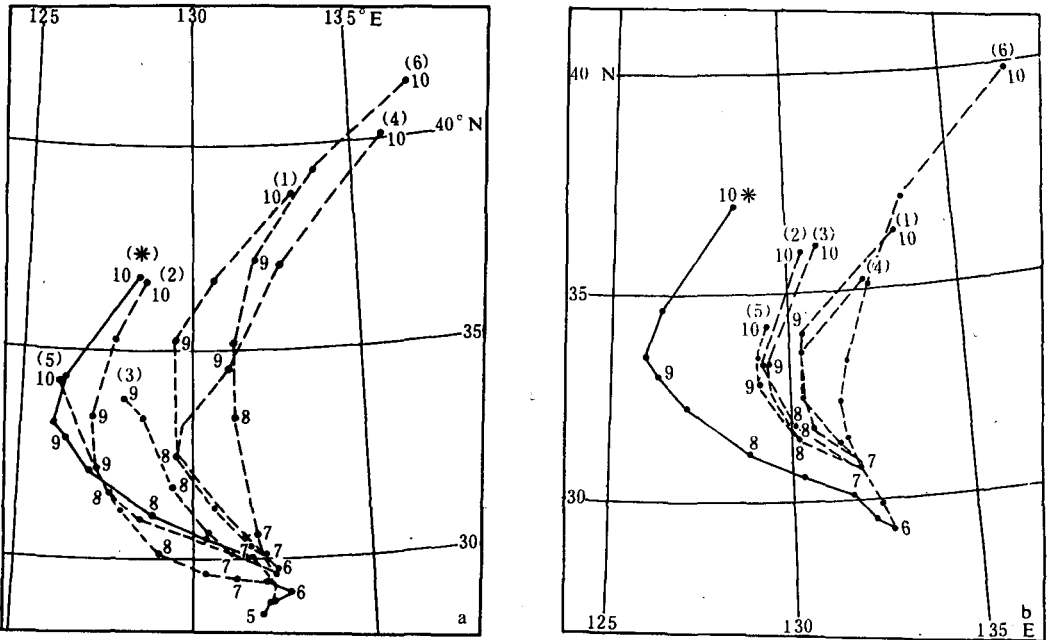


图2 本文各方案对8507号热带气旋路径趋势预报结果

(a)8月5日12Z起报 (b)8月6日12Z起报  
 (图中(1)、(2)、……(6)代表预报方案,\*为实况路径,其它说明同图1)

图1)均是失败的。由图可见,就目前热带气旋预报水平而论,现有的预报模式不但预报时效短,而且对这类疑难路径的预报几乎无能为力。

我们以8月5日及6日12Z(世界时,下同)为起报时刻,分别采用上述各方案对此气

旋路径趋势进行预报试验,结果见图 2。

图 2a 中,各方案前 24 小时预报路径基本重合,这主要是所有方案均以轴对称涡旋嵌入 ECMWF 所提供的客观分析场作为初始场进行预报的缘故。但各方案具有各自特点,所以,24 小时以后的预报路径有所差异。其中,方案二的预报与实况最为接近,各时效的预报大圆距离误差均在 200km 以内,更值得指出的是 120 小时预报位置与实况位置仅差 20.6km,尽管这可能带有一定的偶然性,但它仍可说明,非对称结构的作用是不可忽视的。

方案一所报路径位置明显偏东偏北,移速偏快。这一方面是由于前期热带气旋预报位置的偏差造成后期涡旋模型嵌入位置有一定偏差,另一方面则可能是方案一中每隔 24 小时重新嵌入轴对称涡旋模型而大大削弱了  $\beta$  漂移作用的缘故。方案四采用随热带气旋中心一起移动的轴对称强迫,这使得在时间积分过程中热带气旋基本维持准对称结构,故  $\beta$  漂移作用对路径影响较方案一更难体现,预报路径位置更为偏东偏北。这再一次表明,保留热带气旋非对称结构对路径趋势预报的改进是有帮助的。

方案三采用逆平滑处理方法定时增强热带气旋中心强度,预报结果与方案二相差不多,只是预报位置较方案二略偏东偏北一个纬距。这一方面可能是由于采用逆平滑处理后,气旋非对称性稍有削弱,另一方面则可能是因为气旋强度在整个时间积分过程中基本得以维持,从而向极漂移较方案二稍大。

方案五采用随热带气旋中心一起移动的非对称参数化强迫,在时间积分过程中,热带气旋强度不但得以维持,而且其非对称性也被增强,这使得热带气旋向西漂移的分量增大。由此可见,对热带气旋路径趋势预报,如何在模式中恰当地描述其非对称结构是有待解决的重要的问题。

方案六所报路径位置较其它所有方法均偏东偏北,与实况偏差最大。这充分说明了环境形势场在路径预报中的重要地位。同时也说明,正压模式对环境形势场演变的预报能力较 ECMWF 全球谱模式差得多,对较长时效的预报其差距更为明显。

虽然各方案均较好地报出路径趋势,但却存在一系统性偏差——预报路径均偏东偏北(方案五例外)。图 3 给出了 8 月 5 日 12Z 起报的 24、48 小时预报场与实际客观分析场

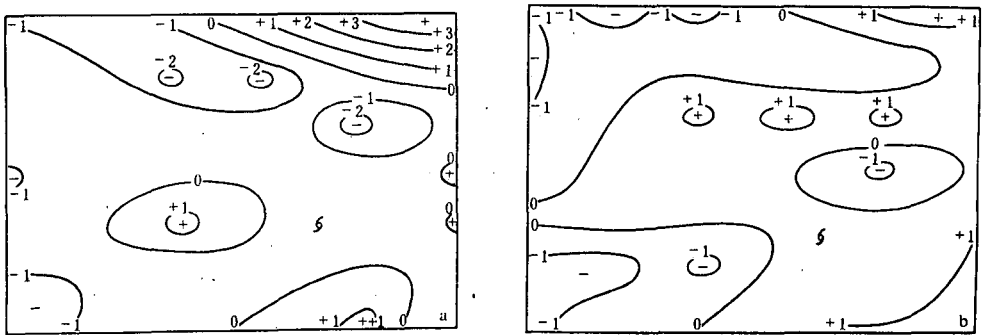


图 3 ECMWF8 月 5 日 12Z 起报的预报场与实际客观分析场的高度场偏差分布(a)24 小时 (b)48 小时 (等值线间距为 1.0 位势什米)

的偏差分布。由图3可见,热带气旋所在位置东北侧的副高所在区域均为一致的负偏差,这说明ECMWF对西太平洋副高强度的预报略微偏弱,而天气事实告诉我们,热带气旋的转向很大程度取决于副高的强度和位置。一般情况下,副高强时,热带气旋转向点偏西,反之,转向点偏东。所以,造成系统性偏差的原因正是ECMWF谱模式对副高强度预报偏弱的缘故。

图2b中,以方案二、三为优,方案一、四所报路径偏东,方案六最差。这再次说明,作热带气旋路径趋势预报,尤其是较长时效的预报,采用ECMWF提供的预报场进行“接力预报”是有效途径之一。表1给出了六种方案预报位置与实况位置的偏差。

表1 六种方案对8507号热带气旋的预报位置与实况距离偏差 (单位:km)

起报	方案	12h	24h	36h	48h	60h	72h	84h	96h	108h	120h
8月 5日 12Z	1	14.6	58.9	22.4	58.8	96.8	157.3	241.3	390.2	467.3	479.5
	2	14.6	58.9	133.7	203.2	196.3	131.4	9.6	94.9	162.3	20.6
	3	14.6	53.1	53.0	48.1	14.6	96.4	215.8	173.3		
	4	22.2	48.4	44.4	34.6	86.7	177.4	272.1	462.2	654.1	751.4
	5	9.3	44.6	24.2	86.4	100.5	100.6	143.9	110.5	100.5	351.0
	6	14.6	58.9	72.2	72.6	193.0	341.2	526.4	698.6	867.9	894.8
8月 6日 12Z	1	53.0	72.6	141.1	241.9	322.6	396.5	476.8	423.4		
	2	53.0	72.6	102.4	145.9	259.6	300.1	331.7	195.9		
	3	58.8	58.7	110.5	144.2	266.9	298.9	334.7	203.4		
	4	58.8	73.4	118.9	196.5	316.9	387.2	436.0	377.4		
	5	53.0	62.6	102.4	148.8	257.6	289.8	311.3	364.3		
	6	53.0	72.6	173.7	277.3	456.7	609.0	736.1	828.8		
8月 7日 12Z	1	22.0	56.3	124.3	249.1	354.0	349.1				
	2	22.0	56.3	94.7	43.4	95.4	335.4				
	3	22.0	67.3	76.1	158.7	266.7	226.3				
	4	22.0	78.4	95.6	150.3	270.2	—				
	5	22.0	67.3	113.0	158.7	253.5	178.8				

表2 各方案对8509号热带气旋预报位置与实况的距离偏差 (单位:km)

方案	12h	24h	36h	48h	60h	72h
1	10.8	80.3	65.0	82.6	105.2	104.4
2	10.8	80.3	45.5	14.6	11.2	171.4
3	10.8	91.5	38.4	38.2	75.9	169.0
4	10.8	88.4	66.1	49.9	75.8	70.5
5	14.6	77.1	58.0	80.0	112.9	133.7

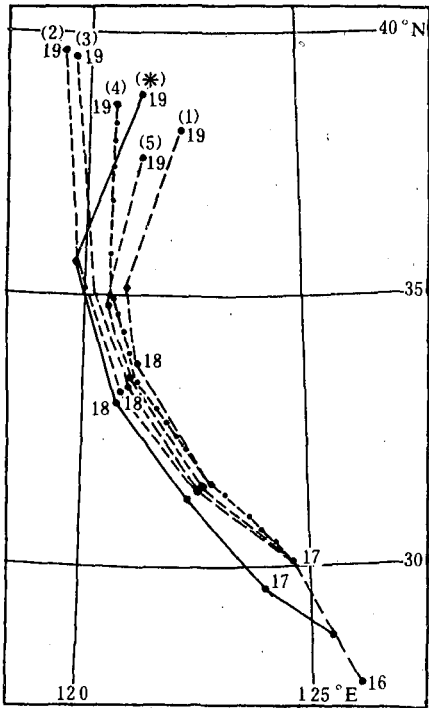


图 4 8 月 16 日 12Z 起报的各方案 72 小时路径  
(说明同图 2)

8 月 5 日、6 日及 7 日是环流形势处于较大调整的阶段,以上预报结果表明即使在环流形势存在较大调整时期,ECMWF 仍具有相当的预报能力。而这种环流形势的调整对热带气旋路径预报的准确性是至关重要的。因此,本文所提出的“接力预报”方法对某些疑难路径预报的改进是显而易见的。

### 2. 8509 号热带气旋路径趋势预报试验

8509 号热带气旋强度强,影响大,对我国造成的灾害异常严重。其路径虽属正常路径,但各业务预报模式对其路径预报误差仍很大。

图 4 为以 8 月 16 日 12Z 为起报时刻,方案一至六所作的 72 小时路径趋势预报图。各方案结果均与实况极为相近,表 2 给出的是预报位置与实况的距离偏差。

由此可看出,对于象 8509 号热带气旋这类正常路径,本模式具有较强的预报能力。

## 五、结 论

1. ECMWF 的形势预报,在热带地区仅可使用 2—3 天,但对较长时效的预报,本模式(范围为:20°—50°N,90°—150°E)对所选个例显示出它独到的优势和使用价值。但对于偏南和西行路径的预报还需作进一步的试验与分析。

2. 由 ECMWF 提供的 500hPa 高度场及地面气压场,虽能粗略估计热带气旋大致所在位置,但却难以直接确定热带气旋中心位置,这说明本模式具有相当的实际应用价值。

3. “接力预报”方案对不同起报时刻的预报路径具有较好的稳定性,而其它方法的路径预报变化则较大(见图 1),这对业务应用更具参考价值。

4. “接力预报”方法的预报效果强烈地依赖于 ECMWF 形势预报的准确性。如果能进一步考虑对 ECMWF 提供的形势预报场进行误差订正,效果也许还会有所改善。

5. 当环境场的引导作用不明显或引导作用不稳定时,影响热带气旋路径趋势的其它因子的作用(如热带气旋本身的结构,非对称性,热力与动力的外源强迫等)则会明显地表现出来。如能恰当描述主要因子的作用,路径预报可望有进一步的改善。

上述结论均是基于个例实验的结果,其普遍性有待进一步试验证实,但已展示了“接力预报”方法未来应用的前景。

## 参 考 文 献

- [1] Neuman, C. J. Tropical cyclone motion and surround environmental statistical relationships, Reports of WMO International Workshop on Tropical Cyclone, Volume II, 1985.
- [2] 朱永褪, 丁荣富, 8211号台风路径数值预报的初步剖析, 气象科学技术集刊, 5(台风), 142—152, 气象出版社, 1985年。
- [3] Authes, R. A., The development of asymmetrics in a three-dimensional numerical model of the tropical cyclone, *Mon. Wea. Rev.*, **100**, 461—476, 1972.
- [4] 李天明, 朱永褪, 热带气旋移动的分析 and 模拟, (一)非对称结构和路径突变, 中国科学(B辑), 第一期, 1990年。
- [5] 朱永褪, 殷鹤宝, 五层原始方程模式套网格台风路径预报方案, 1985年台风会议文集, 253—262, 气象出版社, 1987年。
- [6] Grimmer and Shaw, Energy-preserving integrations of the primitive equations on sphere, *Quart. J. R. Met. Soc.*, **93**, 337—349, 1967.
- [7] Perkey, D. J., and C. W. Kreitabery, A time-dependent lateral boundary scheme for limited-area primitive equation models, *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 744—755, 1976.
- [8] Phillips, N. A. and J. Shukla, On the strategy of combining coarse and fine grid meshes in numerical weather prediction, *J. Appl. Meteor.*, **12**, 763—770, 1973.

## A STUDY ON THE NUMERICAL PREDICTION OF TROPICAL CYCLONE TRACK TENDENCY

Wang Qin   Zhu Yongti

(Shanghai Typhoon Institute, Shanghai, 200030)

### Abstract

A one-way nested barotropic model used for predicting tropical cyclone track tendency is developed. The so-called "relay forecasting" time integral method is suggested. That is the grid data supplied by ECMWF through GTS are used not only for determining the boundary value of fine-mesh forecasting domain, but also for updating large scale circulation during integral time. Five different "relay forecasting" schemes are designed and are all tested on tropical cyclones No. 8507 and No. 8509. After comparing and analysing the results obtained from various forecasting schemes, the main factors which caused the forecast errors are identified.

The experimental results show that "relay forecasting" method has great capability for predicting tropical cyclone track tendency. It may forecast not only the normal tracks more accurately than the operational models, but also the anomalous tracks and erratic paths of tropical cyclones. The longer the integral time is, the more obvious the superiority of this method is. This shows that the "relay forecasting" method has not only suggested a new possible way for predicting tropical cyclone track tendency, but also has made a first encouraging step to develop a medium-range forecasting method of tropical cyclone tracks.

Furthermore, the results from various forecast schemes indicate that they can be used to facilitate the operational forecast.