

# 东海区域热带气旋路径统计动力预报研究\*

李慧武 金一鸣

(浙江省气象科学研究所, 杭州 310021)

## 提 要

文章主要介绍了东海区域热带气旋路径统计动力预报方案及其使用情况。该方案在原有台风路径统计动力预报方案的基础上调整了预报区域,重新选取了历史样本;延长了预报时效;对随机参数的相关因子,尤其是其中的天气经验因子进行了改进,并引进了欧洲中期数值预报中心的数值预报产品因子。另外,还对有关相关因子的重要性做了分析研究。

经独立样本检验和实时预报表明,该方案的热带气旋预报路径和实际路径相当吻合,各项误差比同类产品明显减小,对实际业务预报服务具有较好的参考价值。

**关键词:** 东海区域; 热带气旋路径; 统计动力预报。

## 引 言

70年代以来,我国气象科技工作者对热带气旋的客观预报方法研究作过许多尝试,建立了各种客观预报方法,取得了相当的成效,其中统计动力方法的客观预报已成为我国近年来业务预报服务的主要手段之一。当前,建立一个预报时效较长,预报准确率和自动化程度更高的统计动力预报方案是一个迫切的研究课题。本文在上海台风研究所的SD75方案<sup>[1]</sup>和浙江省气象科学研究所的ZM I-80方案<sup>[2]</sup>的基础上,结合近年来的预报实践研究建立了一个适用于东海区域的热带气旋路径统计动力预报方案。经1991~1993年的独立样本检验和1994年业务预报应用表明,预报结果稳定准确,是一个较好的预报服务参考依据。

## 1 热带气旋路径统计动力预报模式简介

### 1.1 热带气旋中心运动方程

将72 h热带气旋路径按时间等分成12个时段,每一个时段长度为6 h,并以每一时段的起始时刻的热带气旋中心位置为原点建立移动的直角坐标系。然后,对大气水平运动方程组各式的两端沿热带气旋涡旋范围进行积分取平均<sup>[3]</sup>,可得到第 $k$ 时段的热带气

\* 本研究得到“八五”国家科技攻关项目85-906-28的资助。  
1995-02-17收到,1995-05-10收到修改稿。

旋中心运动方程如下:

$$\begin{cases} \frac{du_k}{dt} - f_k v_k = F_1(k, t) \\ \frac{dv_k}{dt} + f_k u_k = F_2(k, t) \\ \frac{dx_k}{dt} = u_k \\ \frac{dy_k}{dt} = v_k \end{cases} \quad (t_k \leq t \leq t_{k+1}) \quad (1)$$

其中  $k=0, 1, 2, \dots, 11$ (下同),  $t_k(=6k)$ 时刻的初始条件由圆锥投影关系导出, 即

$$\begin{cases} x_k(t_k) = 0 \\ y_k(t_k) = 0 \\ u_k(t_k) = u_{k-1}(t_k)\cos\alpha_k + v_{k-1}(t_k)\sin\alpha_k \\ v_k(t_k) = -u_{k-1}(t_k)\sin\alpha_k + v_{k-1}(t_k)\cos\alpha_k \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\alpha_k = (\lambda_k - \lambda_{k-1}) / \sqrt{2}$ ,  $\lambda_k$  是  $t_k$  时刻热带气旋中心所在的经度;  $F_1(k, t)$  和  $F_2(k, t)$  是包括水平气压梯度力在内的所有其它作用力的积分平均, 这两个函数所含的变量比较复杂, 但考虑到这些变量终究是时间的函数, 根据文献[1]相当数量的实例分析, 取其为时间  $t$  的二次多项式来进行参数化处理, 即

$$\begin{cases} F_1(k, t) = B_1 + 2B_2t + 3B_3t^2 \\ F_2(k, t) = B_4 + 2B_5t + 3B_6t^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $B_i(i=1, \dots, 6)$  是与  $k$  无关的随机参数. 为了解方程求积分方便起见, 时间变量  $t$  和  $t^2$  前的系数分别采用  $2B_2$ 、 $2B_5$ 、 $3B_3$ 、 $3B_6$  的形式.

综合方程式(1)、(2)和(3)就是本文考虑的热带气旋路径统计动力预报模式.

## 1.2 热带气旋中心位置递推公式

以上给出的热带气旋中心运动方程实际上是一个简单的常系数线性微分方程的初值问题, 对其求解并略去其中的小项, 可得到热带气旋中心位移的递推公式(见文献[1]).

由此可见, 只要确定了随机参数, 就能够根据热带气旋中心的初始位置和移速, 求出各个时段的热带气旋中心的相对位移, 并可计算出  $t_{k+1}$  时刻热带气旋中心所在的经度  $\lambda(t_{k+1})$  和纬度  $\varphi(t_{k+1})$  的预报值<sup>[1]</sup>.

因此, 热带气旋路径的预报问题实际上已经通过热带气旋中心运动方程转化成了随机参数的确定问题.

## 1.3 随机参数的确定

### 1.3.1 随机参数样本值估算

每一个热带气旋路径历史样本可直接获取的资料包括每间隔 6 h 的正点中心所在的经度和纬度. 在文献[1]的递推公式中, 除随机参数外, 其余变量的值均可由热带气旋中心所在的经度和纬度导出. 因此, 利用递推公式和相对位移及初始条件, 再根据最小二乘法原理, 就能够估算出每个热带气旋路径历史样本的随机参数样本值.

我们利用第 2 节中选出的 170 个热带气旋路径历史样本的随机参数估算值, 计算了

对应的热带气旋拟合路径,其误差统计结果(表1)表明,热带气旋拟合中心位置与实际中心位置间的误差在定位误差范围以内。

表1 随机参数拟合热带气旋路径样本的距离误差分布

Table 1 The distance error distribution of tropical cyclone track fitting with stochastic variables

误差区间(km)	0~50	50~100	100~150	150~200	200~250	>250
次数(次)	1738	253	41	6	2	0
百分比(%)	85.2	12.4	2.0	0.3	0.1	0.0

1.3.2 预报热带气旋路径的随机参数值估算 应用前面给出的热带气旋中心运动方程预报热带气旋的未来路径,首先必须对其随机参数值做出估算.考虑到 $F_1(k, t)$ 和 $F_2(k, t)$ 主要包括水平气压梯度力等的作用,其中的随机参数应与天气状况有一定的相关,并可以通过建立回归方程来估算随机参数值.此外,经试验表明,逐段建立12组随机参数回归方程比整个72h路径只建立1组随机参数回归方程的效果要好得多.方案具体步骤如下:

首先,计算各个历史样本第 $k$ 时段对应于 $B_1, B_2, B_3$ 的 $\int_{t_k}^{t_{k+1}} F_1(k, t) dt$ 值,并以这个值为被回归量进行逐步回归,选出 $n_{1k}$ 个相关因子,即 $x_{kj}^{(1)} (j=1, 2, \dots, n_{1k})$ ,以保证该值的估计误差达到最小;然后,分别以随机参数 $B_1, B_2, B_3$ 作为被回归量,对入选的 $n_{1k}$ 个相关因子作全回归分析,算出回归系数 $A_{1kj}, A_{2kj}, A_{3kj}$ .同理,对应于 $B_4, B_5, B_6$ 的 $F_2$ 积分值可计算出回归系数 $A_{4kj}, A_{5kj}, A_{6kj}$ .于是,得到如下随机参数的回归方程:

$$B_{ki} = \begin{cases} A_{ik0} + \sum_{j=1}^{n_{1k}} A_{ikj} X_{kj}^{(1)} & (i = 1, 2, 3) \\ A_{ik0} + \sum_{j=1}^{n_{2k}} A_{ikj} X_{kj}^{(2)} & (i = 4, 5, 6) \end{cases} \quad (4)$$

式中 $B_{ki}$ 就是第 $k$ 时段第 $i$ 个随机参数的估计值。

## 2 热带气旋路径样本和随机参数相关因子的选取

### 2.1 热带气旋路径历史样本的选取

本文研究东海区域热带气旋路径的6~72h预报,所取的预报区域为 $17^\circ \sim 32^\circ \text{N}$ 、 $120^\circ \sim 130^\circ \text{E}$ .对1961~1990年6月15日到10月15日间的所有热带气旋路径进行了普查,总共选出了170个历史样本,包含134个热带气旋。

### 2.2 随机参数相关因子的选取

选取随机参数的可能相关因子的方法主要参照文献[1]和[2]的思路,吸取了原方案中表现较好的因子,以及前述预报模式中推导出来的因子等,同时也增加了一些新因子.对于天气经验因子,主要是加强对副热带高压活动特征的表达.本方案将原移动网格的范围向北、东两个方向扩展了一圈,移动网格的构造如图1所示.其中第21个网格

点是前 6 h 热带气旋中心位置，网格距为 5 个经度和纬度。然后用该网格上的 500 hPa 位势高度设计了如下因子：

①  $\sum_{i=0}^2 (\sum_{j=6i+4}^{6i+6} z_j - \sum_{j=6i+1}^{6i+3} z_j)$  表示热带气旋北面附近高度场的东西向差别；

②  $\sum_{i=0}^2 (\sum_{j=6i+22}^{6i+24} z_j - \sum_{j=6i+4}^{6i+6} z_j)$  表示热带气旋东面附近高度场的南北向差别；

③  $\sum_{i=0}^2 (\sum_{j=6i+22}^{6i+24} z_j - \sum_{j=6i+1}^{6i+3} z_j)$  表示热带气旋附近高度场的东南-西北向差别；

④  $z_1 + z_7 + z_{13}$  表示热带气旋西北面附近高度场的强度。

此外，方案按原固定网格点因子的制作方法<sup>[4]</sup>，采用欧洲中期数值预报中心给出的 500 hPa 位势高度数值预报产品制作了新的相关因子。

经相关系数检验，初选出了 52 个可能相关因子，按其物理意义大致可分为：热带气旋初始状态、副热带高压特征、大陆高度场特征、流场特征、温度场特征、引导气流地转风以及模式导出的因子等。

### 3 随机参数回归方程和方案拟合效果分析

本方案根据上述的随机参数估算方法和所选取的热带气旋路径样本和随机参数相关因子，建立了 72 h 路径的 12 个时段的各随机参数回归方程(共 72 个)。查看随机参数回归方程发现，52 个初选的可能相关因子中有 41 个被回归方程选中，其中选入频率最高的是模式导出因子，每个回归方程中都出现，其次是热带气旋初始状态因子和副热带高压特征因子等，而与数值预报产品有关的相关因子主要出现在 36 h 以后各时段的回归方程中。但是，作为第一个入选的因子，即在随机参数回归方程中权重最大的相关因子，大多是热带气旋初始状态因子，副热带高压特征因子和流场特征因子等。此外，模式导出因子都是最后选入回归方程，即在随机参数回归方程中贡献最小。

表 2 给出了预报方程拟合的平均误差，由表可见，本方案的拟合结果对实际路径的 24 h 和 48 h 的平均距离误差分别是 121 km 和 303 km，它们均小于国家科技攻关项目 200 km 和 400 km 的考核目标。此外，分析各时刻距离误差分布可知，24 h 的距离误差小于 200 km 的有 147 个历史样本，占总数的 86.5%，48 h 的距离误差小于 400 km 的有 130 个历史样本，占总数的 76.5%。

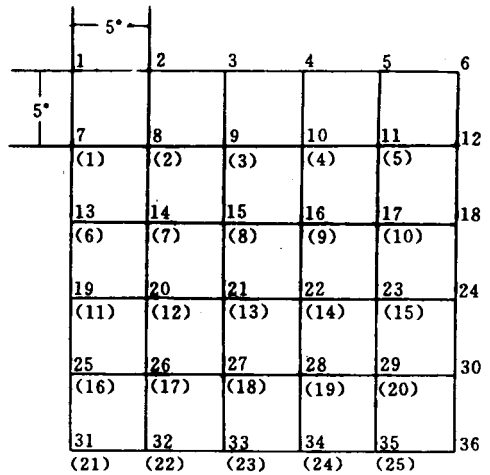


图 1 移动网格结构示意图(图中不加括号数字是新网格点的序号，加括号的数字是原网格点的序号)

Fig. 1 The structure diagram for moving grids (the number without brackets: ordinal number of new grids, and the number with bracketed: original)

表2 本方案预报方程拟合的平均误差

Table 2 The mean fitting errors of the scheme

预报时效(h)	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	平均
距离误差(km)	33	62	89	121	159	203	250	303	363	424	489	552	254
移向误差(纬距)	12	12	11	12	12	13	14	14	15	16	17	18	14

#### 4 独立样本检验和实际预报效果分析

为了检验上面介绍的热带气旋路径统计动力预报方案的实际应用效果,该方案对1991~1993年间选出的13个热带气旋共35个样本进行了独立样本检验,并在1994年6月15日至10月15日投入业务预报,对进入本方案预报区域的9406号、9413号、9414号、9415号、9417号、9418号、9430号等7个热带气旋共进行了34次实时路径预报.每次预报结果均及时提供给省气象台使用,为省台预报服务提供了有益的参考依据.

表3是1991~1993年独立样本检验和1994年实时预报的各项平均误差统计表.对照表2和表3可见,独立样本检验的平均距离误差比拟合误差略大,而平均移向误差却比拟合误差要小.然而,1994年实时业务预报的各项平均误差要比拟合误差和独立样本检验误差均明显减小,尤其是48h的平均距离误差仅为256km,而平均移向误差则随时效的延长有所减小.

表3 独立样本检验和实时预报的平均误差

Table 3 The mean errors of independent sample test and real time prediction

预报时效(h)		6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	平均
平均距离(km)	检验	35	76	130	169	213	266	324	388	446	518	615	699	296
	预报	41	77	121	168	195	226	231	256	252	286	305	397	186
平均移向(纬距)	检验	11	10	12	10	9	8	9	10	12	13	15	16	11
	预报	13	12	11	11	11	10	8	7	7	6	7	8	10

图2,3是热带气旋9414号、9417号的预报路径和实际路径对照图.由图可见,除少数几次预报外,总体上两者相当吻合.如9417号热带气旋在浙江省正面登陆,对浙江省造成了极大的危害.本方案较早就预报出在浙江省温州市沿海登陆,与实际登陆点温州的瑞安市相当接近,尤其是1994年8月19日02时和14时(北京时)的两次预报,此时热带气旋的中心位置尚在127°E以东的洋面上,本方案就预报出在温州附近登陆,最长预报时效达72h之久.

为了进一步了解本方案的实际预报性能,我们统计了相同热带气旋、相同预报时刻的本方案和浙江ZMI-80方案<sup>[2]</sup>的预报误差(表4),并进行了比较.由表可见,在预报时效30h以前,两者的平均距离误差、平均移向误差都基本一致;而在预报时效达36h以后本方案的所有误差均明显地小于ZMI-80方案,这说明本方案中数值预报产品有

一定实用价值。



图 2 9414 号热带气旋路径图 (黑点为实际中心位置, 实线为实际路径, 虚线为各次预报路径, 预报路径始、终处用相应数字表示, 三角点为第一次预报的起报时刻中心位置, 其右边数字即起报时刻, 以后每隔 12 h 有一个起报时刻)

图 3 9417 号热带气旋路径图 (说明同图 2)

Fig. 3 As in Fig. 2, but for No. 9417

Fig. 2 Tropical cyclone No. 9414 track chart (solid line: real track, dashed line: predictive track) (prediction intervals: 12 h)

表 4 两个方案的预报误差对照表

Table 4 The predictive error comparison between two schemes

预报时效 (h)		6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72
平均距离 (km)	本方案	51	91	132	183	225	241	262	254	266	276	350	462
	ZM I-80	49	87	126	173	222	276	316	353	373	/	/	/
平均移向 (纬距)	本方案	14	16	14	15	15	13	11	9	9	6	7	8
	ZM I-80	16	16	14	15	17	19	19	19	18	/	/	/

## 5 结 语

本方案是在原有热带气旋路径统计动力预报方案的基础上重新设计的, 同时还引进了欧洲中期数值预报中心的数值预报产品。

对随机参数回归方程的分析指出, 热带气旋初始状态, 副热带高压活动以及我国东部沿海流场等对东海区域的热带气旋的移动有相当重要的影响, 模式导出因子对东海区

域的热带气旋路径的预报也有着一定的作用,而数值预报产品因子的作用主要体现在对36 h以后各时段的热带气旋路径预报上。

独立样本检验和实时预报表明,本方案的热带气旋预报路径和实际路径相当吻合,各项误差比同类产品明显减小,对实际业务预报服务具有较好的参考价值。

### 参考文献

- 1 上海台风研究协作组. 预报台风路径的统计动力学方法. 《1976年台风会议文集》. 上海: 上海人民出版社, 1976. 12~20.
- 2 金一鸣, 周洪祥, 赵丽仙. 第二警界区台风路径的统计-动力学预报方法 ZM 1-80. 海洋学报, 1982, 4(6): 679~687.
- 3 笠原彰, 增田善信. 台风论. 朱抱真译. 北京: 科学出版社, 1958. 60~70.
- 4 上海台风研究协作组, 浙江台风研究协作组. 台风路径统计预报75年方案. 《1976年台风会议文集》, 上海: 上海人民出版社, 1976. 92~100.

## THE STATISTICAL-DYNAMIC PREDICTION OF TROPICAL CYCLONE TRACK ON THE EAST CHINA SEA

Li Huiwu     Jin Yiming

(*Zhejiang Meteorological Institute, Hangzhou 310031*)

### Abstract

The scheme of the statistical-dynamic prediction for the tropical cyclone track on the East China Sea and its application are described. Based on its original scheme, the forecasting area is adjusted and the historical samples are afresh selected; the period of validity is prolonged; the correlation factors of stochastic parameters are improved and the weather empirical factors are objective; and the products of numerical prediction are introduced from ECMWF.

The independent sample test and the real-time prediction show that the forecasting tracks of tropical cyclones are very similar to the real tracks, and every error of the forecasting products of the scheme is obviously less than that of other schemes

**Key words:** The East China Sea; Tropical cyclone track; Statistical-dynamic prediction.