

台风路径统计-动力预报 的一个改进方案*

金一鸣 周洪祥

(浙江省气象科学研究所)

(浙江省计算技术研究所)

台风路径预报是台风预报的关键,近年来国内外从不同途径,建立了不少客观预报模式,特别是统计学和动力学方法相结合已成为目前台风路径预报中比较有成效的一种客观预报方法。美国的 NHC-73^[1],上海的 SD₇₆^[2],浙江的 ZMI-80^[3],在业务预报中都证明比单纯的统计预报要好,但由于模式中对随机函数的确定,精度还不高,又受到台风初始定位误差的影响,有时使预报路径与实况路径的偏离较大,因此,目前如何去提高随机函数的预报精度和排除初始定位误差的影响是建立比较完善的统计-动力学方法的一个十分重要的研究课题。

当前,由于国内数值预报资料的不足,以及预报模式的变动和预报的不稳定性,再加上各地使用时计算条件的限制,因此,台风路径的统计-动力预报,主要采用吴中海等人提出的方案^[2]。

将台风中心作为座标原点, x 轴向东, y 轴向北,对水平运动方程的两端沿台风涡旋范围进行积分取平均就可以得到下列方程组^[2]:

$$\begin{cases} \frac{dU_K}{dt} - f_K V_K = F_1(K, t) \\ \frac{dV_K}{dt} + f_K U_K = F_2(K, t) \\ \frac{dx_K}{dt} = U_K \\ \frac{dy_K}{dt} = V_K \end{cases} \quad (t_K < t \leq t_{K+1}) \quad (1)$$

式中 $F_1(K, t)$ 、 $F_2(K, t)$ 表示包括气压梯度力在内的影响台风运动的所有外力沿台风涡旋范围的平均,这些力显然目前还难以确定,它们是两个随机函数,它们和初始场一起,决定了这个动态系统的性质。显然(1)是一个随机微分方程,通过对随机函数 $F_1(K, t)$ 、 $F_2(K, t)$ 的简单逼近,我们可以求解一个确定性的常微分方程,初始条件确定后,就可以逐步求解。当然求出的解是否能比较合理地符合于台风的实际路径,将取决于我们对随机函数 $F_1(K, t)$ 、 $F_2(K, t)$ 的处理和它的初始场的确定。

* 本文于 1982 年 2 月 19 日收到, 1982 年 8 月 16 日收到修改稿。

1. 随机参数的确定

对随机过程 $F_1(K, t), F_2(K, t)$ 的处理, 吴中海等人经过相当多个例的分析研究^[2], 指出在 60 小时时段以内, 可以取 F_1, F_2 为时间 t 的二次多项式:

$$F_1 = B_1 + 2 B_2 t + 3 B_3 t^2$$

$$F_2 = B_4 + 2 B_5 t + 3 B_6 t^2$$

因此, 只要确定 B_1, B_2, \dots, B_6 这六个随机参数, 利用导出的台风路径预报公式就可以作一步计算。但是, 在应用逐步回归方法计算 B_1, B_2, \dots, B_6 这六个随机参数时, 却常常发现有些物理意义很清楚又能反映老预报员经验的预报因子, 在筛选时往往不能进入回归方程, 或者入选了又被剔除, 以致在方程中包含了一些在物理意义上和统计上不显著的预报因子, 从而使预报方程常常带来比较大的随机误差。另外, 由于气象要素场是各种尺度运动的综合表现, 天气预报的复杂性使我们认识到, 针对预报对象的每个预报因子, 都存在着主要的或次要的预报信息, 这些主要和次要的因素相互作用, 导致了大气物理过程的不同特征。为了使每个可预报因子的主要信息和次要信息都能得到充分的考虑, 同时又能避免各种气象“噪声”的干扰, 我们在确定 B_1, B_2, \dots, B_6 这六个随机参数时, 采用了可对预报因子的自然正交函数分解方法。

我们的做法是将统计预报中所用的天气图预报因子和从动力学方程中推导出来的动力学因子, 分别进行自然正交函数分解。根据分解误差的要求, 各取有足够精确度的最大几个特征值所对应的少数几项的时间系数作为预报因子, 然后与随机参数 B_1, B_2, \dots, B_6 之间建立回归方程。

自然正交函数的原理、求法及其优点, 前人已有详细的介绍^[4, 5]。利用自然正交函数分解方法可将 i 个样本 j 个因子的原始资料矩阵分解为 T 和 ϕ 两部分, 于是原始场便可表示成自然正交函数的线性组合。

$$X_{i,j} = \sum_{k=1}^n T_{i,k} \phi_{k,j} \quad (2)$$

式中 $X_{i,j}$ 为第 i 年的预报因子场, $\phi_{k,j}$ 为其第 k 个特征向量场, 它只随空间位置而变, 称为自然正交函数, $T_{i,k}$ 为第 i 年第 k 个特征向量场的权重系数(也即时间系数)。

利用(2)式我们对 [3] 中 222 个样本的 34 个天气图预报因子和 20 个动力学方程中推导出来的预报因子, 分别进行自然正交展开, 并以 $T_k^{(1)}$ 和 $T_k^{(2)}$ 分别表示对 34 个因子和对 20 个因子展开后的时间系数。

分解误差由下式估计

$$R = \frac{\sum_{k=1}^P \lambda_k}{\sum_{k=1}^n \lambda_k} \quad (3)$$

$$k=1, 2, \dots, n \quad P < n \text{ 当 } P=n \text{ 时 } R=1$$

式中 n 为自然正交分解后全部特征值的个数, P 为所选取的若干个最大特征值的个数。

计算结果, 对于 34 个天气图因子的情况, 当 $P=4$ 时, $R=92\%$, 对于 20 个动力学因

子的情况,当 $P = 3$ 时, $R = 85\%$ 。这说明原始的因子样本,用自然正交函数分解后收敛很快,只要选出数目不大的组合,剩下的线性组合之方差就已很小,所以只需利用对应于前面若干个最大特征值 λ_k 的那些组合,就足够精确地描写出原来的因子资料样本。

于是得到 B_i 的表达式:

$$B_i = B_{i0} + \sum_{k=1}^4 a_{ik} T_k^{(1)} + \sum_{k=1}^3 b_{ik} T_k^{(2)} \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (4)$$

其中回归系数 a_{ik}, b_{ik} 和 B_{i0} 由最小二乘法求得。

为了将(4)式与原来的 B_i 表达式^[3]进行比较,我们列出了它们在不同预报时段的复相关系数(表1)。

表1 B_i 的二种不同表达式在不同预报时段复相关系数的比较

复相关系数 R	24		36		48		60	
	B_i 表达式 (4)	原 B_i 表达式 ^[3]	B_i 表达式 (4)	原 B_i 表达式 ^[3]	B_i 表达式 (4)	原 B_i 表达式 ^[3]	B_i 表达式 (4)	原 B_i 表达式 ^[3]
B_1	0.94	0.89	0.93	0.88	0.63	0.42	0.80	0.71
B_2	0.61	0.50	0.68	0.55	0.40	0.24	0.48	0.37
B_3	0.48	0.34	0.52	0.36	0.34	0.15	0.30	0.20
B_4	0.92	0.87	0.72	0.60	0.91	0.88	0.58	0.33
B_5	0.40	0.32	0.36	0.27	0.45	0.36	0.28	0.19
B_6	0.30	0.16	0.50	0.44	0.44	0.34	0.51	0.41

从表1可知,采用自然正交分解后的 B_i 表达式(4),从24—60小时 B_1, B_2, \dots, B_6 预报方程的复相关系数 R 都大于原来的表达式^[3],值得指出的是,原 B_i 表达式只有 B_1, B_4 的复相关系数较大,其余 B_2, B_3 和 B_5, B_6 的复相关系数均很小,而采用自然正交分解后的(4)式,除 B_1 和 B_4 有相应的增大外, B_2, B_3 和 B_5, B_6 的复相关系数也有了比较明显的增大,这说明了因子样本经自然正交分解后的时间系数既包含了一些因子的主要信息,也包含了另一些因子的次要信息。因此,由它所建立的 B_i 回归方程,对 B_1, B_2, \dots, B_6 的预报来讲,具有比原表达式^[3] 要好的性能,而 B_1, B_2, \dots, B_6 这六个随机参数的确定,却又是[2,3]等统计-动力模式的关键。

为了进一步了解经自然正交分解采用 B_i 表达式(4)后整个方案的预报性能,我们同时给出了采用自然正交分解后 B_i 表达式(4)和采用原 B_i 表达式^[3] (即原方案)二种不同情况对222个历史台风样本的拟合结果(表2)。

表2显示了采用自然正交分解后 B_i 表达式(4)的拟合误差,明显的小于采用原 B_i 表

表2 B_i 的二种不同表达式对历史样本拟合的绝对平均误差(单位: 纬距)

误差	24		36		48		60	
	$\Delta\lambda$	$\Delta\varphi$	$\Delta\lambda$	$\Delta\varphi$	$\Delta\lambda$	$\Delta\varphi$	$\Delta\lambda$	$\Delta\varphi$
B_i 表达式(4)	0.76	0.69	1.32	1.22	2.19	1.78	2.68	2.47
原 B_i 表达式 ^[3]	0.80	0.72	1.41	1.32	2.40	1.93	2.92	2.64

达式^[3](即原方案)的拟合误差,虽然拟合不能代替预报,然而,拟合的好坏毕竟也是反映预报性能的一个标志。因此,表2说明了由于 B_1, B_2, \dots, B_6 这六个随机参数预报的改进,也提高了台风路径统计-动力方案^[2,3]的预报性能。

2. 初始场的平滑处理和预报位置的逐步修正

台风中心的初始位置和初始移动速度(相对于起报点来说)对台风路径预报有很大的影响。对于路径比较曲折的台风,初始定位误差通常也比较大。因此容易使预报路径造成较大的偏差,为了得到比较准确的初始位置和初始速度,我们作了如下修正。

对起报前 N 个实测位置 (λ_i, φ_i) 进行最小二乘方的滤波^[6],将 λ_i, φ_i 订正为 $\bar{\lambda}_i, \bar{\varphi}_i (i=1, 2, \dots, N)$,然后由中心差分求得 U_i, V_i ,再由 U_i, V_i 求出台风的初始移动方向和速度:

$$\alpha_i = \arctg\left(\frac{V_i}{U_i}\right) \quad (5)$$

$$|\mathbf{V}| = \sqrt{V_i^2 + U_i^2}$$

为了减小采样误差,利用三点平滑公式^[6]对方向 α_i 进行平滑处理。若以 $N-1$ 点位置作为起报原点,则

$$\begin{aligned} V_0 &= |\mathbf{V}_{N-1}| \sin \bar{\alpha}_{N-1} \\ U_0 &= |\mathbf{V}_{N-1}| \cos \bar{\alpha}_{N-1} \end{aligned} \quad (6)$$

作为起报时的初始移动速度。

起报以后每6小时分别求出 $U_k, V_k, |\mathbf{V}_k|$ 和 α_k ,并且每6小时我们采用低通递推滤波对 α_k 进行适当修正,即

$$\bar{\alpha}_k = (1-a)\alpha_k + \bar{\alpha}_{k-1} \cdot a \quad (7)$$

我们称(7)式为循环低通数字滤波器^[7],然后,由 $\bar{\alpha}_k$ 再对 V_k 和 U_k 进行修正,即

$$\begin{aligned} \bar{V}_k &= |\mathbf{V}_k| \cdot \sin \bar{\alpha}_k \\ \bar{U}_k &= |\mathbf{V}_k| \cdot \cos \bar{\alpha}_k \end{aligned} \quad (8)$$

利用(7)式和(8)式,每6小时预报进行一次修正,直至60小时,这样就得到了经过初始场的订正和预报位置逐步修正以后的台风预报路径。

表3给出了修正以后对222个历史台风样本的拟合结果。

表3 初始场平滑和预报位置逐步修正以后对历史台风样本的拟合结果

预报时段(小时)	24		36		48		60	
	$\Delta\lambda$	$\Delta\varphi$	$\Delta\lambda$	$\Delta\varphi$	$\Delta\lambda$	$\Delta\varphi$	$\Delta\lambda$	$\Delta\varphi$
绝对平均误差 (单位: 纬距)	0.71	0.64	1.21	1.10	2.10	1.72	2.61	2.39

比较表3和表2,可见初始场平滑和预报位置逐步修正后的拟合误差(见表3)不但比原方案 B_i 表达式^[3]的拟合误差(见表2)有很大的改进,就是与采用自然正交分解后的 B_i 表达式(4)的拟合(见表2)相比,拟合误差也有减小,这说明了采用初始场的平滑和预报位置的逐步修正确实有利于预报误差的减小。因此,和自然正交函数分解方法一起应用,将使台风路径预报的统计-动力学模式^[2,3]得到有效的改进。

3. 效果 检 验

为了检验采用自然正交函数分解方法和初始场的平滑处理以及预报位置的逐步修正以后改进方案的预报效果,我们将改进方案与原方案^[3](ZMI-80)进行了实时预报的比较,我们分别以这二个方案对1980年和1981年7—9月进入预报区域的8006,8007,8009,8012,8013,8015和8107,8114,8116等9个台风进行了34次同台风同时次的预报,现将它们的绝对平均误差比较如下(表4)。

表 4 二个方案 34 次预报的绝对平均误差(单位: 纬距)

预报误差 预报量	预报方案							
	λ_{24}	φ_{24}	λ_{36}	φ_{36}	λ_{48}	φ_{48}	λ_{60}	φ_{60}
改进方案	0.8	0.7	1.5	1.3	2.1	1.8	2.6	2.4
原方案(ZMI-80)	1.0	0.8	1.7	1.4	2.5	2.1	3.0	2.7

从表4我们看到,改进后的方案,预报的绝对平均误差都比原方案有所改进,值得注意的是,从48—60小时比较长的预报时段,改进得比较明显。

为了进一步了解改进方案与原方案的差异,我们还分别计算了二个方案对34次台风路径预报的方向误差和距离误差(表5),以便从移向、移速和总的趋势上进行对比。

表 5 二个方案预报的方向误差和距离误差的比较

预报时段 误差	方 向 误 差 (度)		距 离 误 差 (纬距)	
	改进方案	原方案(ZMI-80)	改进方案	原方案(ZMI-80)
24(小时)	10.7°	11.4°	1.1	1.3
48(小时)	13.2°	16.3°	2.8	3.3

两个方案对34次台风的预报路径,在总的方向趋势上和实际路径基本上都是一致的,然而,从表5并参考预报路径图(图略),我们可以清楚地看到,改进方案无论在方向和速度上都比原方案要好。尤其是对于台风初始时第1—2次的预报和预报时效比较长的情况。由于起始时受台风初始定位误差的影响,所以原方案预报的方向误差随着预报时效的延长而明显增大,预报的速度也往往偏快或偏慢,容易造成比较大的距离误差,而经过改进后的方案,在方向误差上随着预报时效的延长反而有明显的减小,并且在移动速度上也部分克服了偏快偏慢的缺陷,因此,随着预报时效的延长,距离误差也有了相应的减小。

以上分析说明,在台风路径的统计-动力预报^[2,3]中采用对预报因子的自然正交函数分解方法和初始场的平滑处理以及预报位置的逐步修正是确有成效的,且具有实际的预报意义。

参 考 文 献

- [1] Neumann, J., and B. Lawrence, *Mon. Wea. Rev.*, 103,665—673, 1975.
- [2] 吴中海、许绍溥, 科学通报, 25,548—551,1980.
- [3] 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 ZMI-80, 海洋学报 4, 6, 1982.
- [4] Sellers, W. D., A statistical-approach to numerical weather prediction, AD 117231, 1957.
- [5] 王宗皓, 李麦村等, 天气预报中的概率统计方法, 科学出版社, 1974.
- [6] 冯康等编, 数值计算方法, 国防工业出版社, 1978,147—207.
- [7] Bendat, J. S., and A. G. Piersol, *Random data analysis and Measurement procedures*, Wiley-Interscience, 1971, 322—325.

《气象学报》征稿简则

1. 《气象学报》主要刊登下列各种稿件:
 - (1) 气象科学各个方面的创作性论文;
 - (2) 重要的技术经验;
 - (3) 综合评述国内外气象科学的新理论、新技术;
 - (4) 短论和科学技术工作简报;
 - (5) 气象文献或书籍的评论。
2. 来稿请附作者单位介绍信, 以便联系。
3. 来稿文字一律采用中文语体文, 文字要精炼, 每篇不超过八千字(包括图表资料), 并请附简明扼要的中外文提要各一份(外文提要需用印刷体, 作者姓名用汉语拼音)。
4. 来稿需用方格稿纸横写, 文字及表格须誊写端正和清晰, 标点符号置于文字行内, 凡注释等项按先后标上序号, 并分别置于本页文稿的横线下方。
5. 插图用黑墨绘在透明描图纸上, 图的大小比预计制版尺寸放大半倍至一倍, 文稿中应标明插图位置并附图题(写在图框下面)。制图力求清楚美观, 图中字体须书写端正。
6. 外文字母符号须批注大、小写, 正、斜体, 黑、白体, 批明英、希(腊)、俄或其他外文种。有些外文字母形状相似, 书写时务请注意分清字形。
7. 参考文献请按一定次序标号, 置于正文之后, 并依次写明作者的姓名(姓在前, 名在后)、论文题目, 杂志名称(或出版社)卷期数和发表年份等。外文参考文献需用印刷体书写。
8. 科技术语和名词的译名, 用国内通用的译名, 如系作者自译的新名词, 第一次使用时请注出原文, 外国人名和地名除已常用者外请注原文。
9. 请勿一稿两投。凡经登载的论文, 酌给稿酬。不登之稿, 妥予退还。
10. 来稿请寄北京西郊中国气象学会《气象学报》编辑部。