

西太平洋台风路径业务数值预告模式 及其初步使用结果*

倪允琪 金汉良 薛宗元
(南京大学气象系) (上海台风研究所)

提 要

本文介绍一个西太平洋台风路径业务数值预告模式及其初步使用结果。该模式利用逆平滑算子提高了计算精度,应用最小二乘方原理引进初始时刻后六小时台风位置,从而改进了预告结果。69次试验性预报以及1977—1979年台风季节的48次业务预告的结果表明,该模式对西太平洋台风路径具有一定的预告能力。本文还指出了该模式存在的缺点与进一步改进的途径。

一、前 言

用正压原始方程模式作西太平洋台风路径的数值预告于1976年在上海气象台投入业务使用,并列为我国正式广播的台风路径客观预报方法之一。

本文用内含台风的正压原始方程模式预告台风路径,克服通常的引导气流模式由于挖掉台风环流,不考虑台风对大尺度流场反馈的缺陷。但这种模式的困难首先是在内含台风的高度场中采用地转风作初始风场积分正压原始方程,在数值积分的最初几个步次就会激发出强烈的虚假惯性重力波^[2,3],很快导致计算不稳定。要抑制这种初始风压场不平衡所引起的计算不稳定以及在整个积分过程中始终存在的非线性计算不稳定,必须在计算方案中采用一系列抑制短波的措施,这样势必影响计算精度,从而导致台风及其它大尺度天气系统的移动预告偏慢。对此,本文采用逆平滑算子来提高计算精度,并用适合于该模式的、与高度场相平衡的初始风场。另外,经验表明,初始时刻后六小时的台风位置对改进预报是一个重要的信息。因此,本文采用最小二乘方原理^[3,4],引入这个信息来改进预报。我们对69个历史个例的试报以及1977—1979年48次业务预告结果表明,本模式对西太平洋台风具有一定的预告能力。

二、物理模式及其差分方案

具有自由表面的无粘性不可压缩流体的二维运动方程和连续方程可以写为

1979年10月收到修改稿。

* 南京大学气象系范佩芬、李湘同志参加了部份计算工作。石宗祥同志绘制了本文中所有插图。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \frac{\partial \phi}{\partial x} + v \frac{\partial \phi}{\partial y} + \phi \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.3)$$

其中 u, v, ϕ 均为常规符号.

令网格步长 $\Delta x = \Delta y = \Delta s$, 任意变量 α 一阶导数的四阶精度差分式为:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial x} = \frac{2}{3\Delta s} [\alpha_{j+1,k} - \alpha_{j-1,k}] - \frac{1}{12\Delta s} [\alpha_{j+2,k} - \alpha_{j-2,k}] + O(\Delta s^4) \quad (2.4)$$

其中 j, k 分别为 x, y 方向上的网格序号.

引入下列差分算子:

$$\alpha_x = \frac{1}{2\Delta s} [\alpha_{j+1,k} - \alpha_{j-1,k}]$$

$$\alpha_{2x} = \frac{1}{4\Delta s} [\alpha_{j+2,k} - \alpha_{j-2,k}]$$

$$\therefore \frac{\partial \alpha}{\partial x} = \frac{4}{3} \alpha_x - \frac{1}{3} \alpha_{2x} + O(\Delta s^4) \quad (2.5)$$

正平滑算子和逆平滑算子为:

$$\int_+ (\alpha) = \alpha_{j,k} + r_1(\alpha_{j+1,k} + \alpha_{j-1,k} + \alpha_{j,k+1} + \alpha_{j,k-1} - 4\alpha_{j,k}) \quad (2.6)$$

$$\int_- (\alpha) = \alpha_{j,k} - r_1(\alpha_{j+1,k} + \alpha_{j-1,k} + \alpha_{j,k+1} + \alpha_{j,k-1} - 4\alpha_{j,k}) \quad (2.7)$$

其中 r_1, r_2 为平滑系数.

这样, (2.1)–(2.3) 式的差分方程可写为:

$$\begin{aligned} u_t + \int_+ \int_- \left\{ \int_+ \int_- (u) \left[\frac{4}{3} \left(\int_+ \int_- (u) \right)_x - \frac{1}{3} \left(\int_+ \int_- (u) \right)_{2x} \right] \right. \\ \left. + \int_+ \int_- (v) \left[\frac{4}{3} \left(\int_+ \int_- (u) \right)_y - \frac{1}{3} \left(\int_+ \int_- (u) \right)_{2y} \right] - f \int_+ \int_- (v) \right. \\ \left. + \frac{4}{3} \left(\int_+ \int_- (\phi) \right)_x - \frac{1}{3} \left(\int_+ \int_- (\phi) \right)_{2x} \right\} = 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} v_t + \int_+ \int_- \left\{ \int_+ \int_- (u) \left[\frac{4}{3} \left(\int_+ \int_- (v) \right)_x - \frac{1}{3} \left(\int_+ \int_- (v) \right)_{2x} \right] \right. \\ \left. + \int_+ \int_- (v) \left[\frac{4}{3} \left(\int_+ \int_- (v) \right)_y - \frac{1}{3} \left(\int_+ \int_- (v) \right)_{2y} \right] + f \int_+ \int_- (u) \right. \\ \left. + \frac{4}{3} \left(\int_+ \int_- (\phi) \right)_y - \frac{1}{3} \left(\int_+ \int_- (\phi) \right)_{2y} \right\} = 0 \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \phi_t + \int_+ \int_- \left\{ \int_+ \int_- (u) \left[\frac{4}{3} \left(\int_+ \int_- (\phi) \right)_x - \frac{1}{3} \left(\int_+ \int_- (\phi) \right)_{2x} \right] \right. \\ \left. + \int_+ \int_- (v) \left[\frac{4}{3} \left(\int_+ \int_- (\phi) \right)_y - \frac{1}{3} \left(\int_+ \int_- (\phi) \right)_{2y} \right] \right\} \end{aligned}$$

$$+ \left\{ \int_+ \int_- (\phi) \left[\frac{4}{3} \left(\int_+ \int_- (u) \right)_x - \frac{1}{3} \left(\int_+ \int_- (u) \right)_{2x} + \frac{4}{3} \left(\int_+ \int_- (v) \right)_y - \frac{1}{3} \left(\int_+ \int_- (v) \right)_{2y} \right] \right\} = 0 \quad (2.10)$$

差分方程 (2.8)–(2.10) 式中的时间差分方案为

$$\begin{cases} \alpha^{(1)} = \alpha^{(0)} + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial t} \right)^{(0)} \times \Delta t \\ \alpha^{(i+1)} = \alpha^{(i-1)} + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial t} \right)^{(i)} \times 2\Delta t \end{cases} \quad (2.11)$$

(2.8)–(2.11) 式是本模式的差分方案。在整个预告域内有 $40 \times 50 = 2000$ 个格点, 空间步长 $\Delta x = 200$ 公里, 时间步长 $\Delta t = 900$ 秒。

为了讨论上述差分方程中平滑算子对台风以及不同波长波动移速的影响, 把 (2.1)–(2.3) 式写成简化的一维平流方程, 即

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + c \frac{\partial \alpha}{\partial x} = 0 \quad (2.12)$$

其中 α 为 u 、 v 或 ϕ , c 为波速。

为了控制计算稳定性, 在计算方案中引进一维正平滑算子, 因此, 可以把 (2.12) 式的差分方程写为

$$\alpha_t + \int_+ \left\{ c \left[\frac{4}{3} \left(\int_+ (\alpha) \right)_x - \frac{1}{3} \left(\int_+ (\alpha) \right)_{2x} \right] \right\} = 0 \quad (2.13)$$

设

$$\alpha_n^m = A e^{i(km\Delta t + \beta n\Delta x)} \quad (2.14)$$

其中 m 为积分步次标号, n 为网格序数标号, A 为振幅, k 为频率, β 为波数。

(2.14) 式代入 (2.13) 式, 又 $c_\beta = k/\beta$, 则有

$$c_\beta = \frac{1}{\beta \Delta t} \arcsin \left[\frac{c \Delta t}{3 \Delta x} (4 - \cos \beta \Delta x) \left(1 - 4r_1 \sin^2 \frac{\beta \Delta x}{2} \right) \sin \beta \Delta x \right] \quad (2.15)$$

根据 (2.15) 式计算得图 1 中的曲线 I。不采用平滑算子的四阶差分近似计算 (2.12) 式得图 1 中曲线 II。比较曲线 I 和 II 表明前者比后者在各个波段上的计算误差都要大。

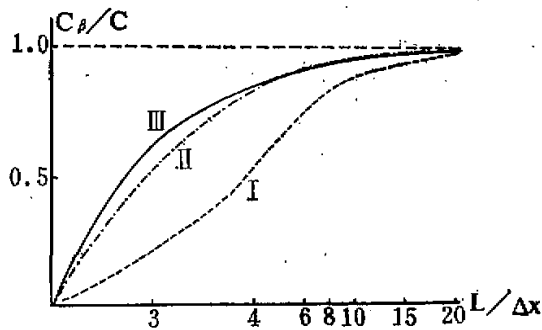


图 1 计算误差对各种波长的响应曲线

由(2.15)式看到,若 $\sin \beta \Delta x$ 的系数为1,则 $c_\beta = c$ 。显然, k 为实数时, $|\sin k \Delta t| \leq 1$,此时,(2.14)式中振幅 A 与时间 t 无关,计算是稳定的。又由于 $c_\beta \beta \Delta t = k \Delta t$, $\left(1 - 4r_1 \sin^2 \frac{\beta \Delta x}{2}\right)^2 < 1$ (其中 $0 < r_1 < 0.25$),因此,要确保(2.13)式计算稳定(即 $|\sin k \Delta t| \leq 1$),只要适当地选择 $\Delta t, \Delta x$,使 $\frac{c \Delta t}{3 \Delta x} (4 - \cos \beta \Delta x) \leq 1$ 。可见,要使 $\sin \beta \Delta x$ 的系数等于或接近于1(但又不能超过1),只要乘上一个略大于1的数,若这系数选为 $\left(1 + 4r_1 \sin^2 \frac{\beta \Delta x}{2}\right)^2$,则(2.15)式可改写为

$$c'_\beta = \frac{1}{\beta \Delta t} \arcsin \left\{ \left[\frac{c \Delta t}{3 \Delta x} (4 - \cos \beta \Delta x) \left(1 + 4r_1 \sin^2 \frac{\beta \Delta x}{2}\right)^2 \right] \cdot \left(1 + 4r_2 \sin^2 \frac{\beta \Delta x}{2}\right)^2 \sin \beta \Delta x \right\} \quad (2.16)$$

由(2.16)得图1中曲线III,曲线III表明在所有波段范围内与曲线II接近。为了得到(2.16)式,相当于在(2.13)式中再引进逆平滑算子,即

$$\alpha_i + \int_+ \left\{ c \left[\frac{4}{3} \left(\int_+ \right)_x (\alpha) \right] - \frac{1}{3} \left(\int_+ \right)_{xx} (\alpha) \right\} = 0 \quad (2.17)$$

根据上述分析设计了目前使用的业务预告方案(2.8)–(2.10)式。这一计算方案既保证计算稳定,又达到了一定的精度。

在求解方程组(2.8)–(2.10)时,边界条件采用定常边界,初始化方案采用欧拉后差往返迭代(恢复输入的初始高度场)16–24次,由此得到的平衡风场作为初始风场^[1]。低于 25°N 的 f 值均以 25°N 的值取代。

三、引入初始时刻后六小时台风中心位置

在初始时刻后六小时(以下简称后六小时)的形势预告场中应用最小二乘方原理引进该时刻的台风实测位置。但是在低纬洋面上缺少台风流场的观测资料,仅有台风中心实测位置,故需对台风流场作若干假定。

(1) 台风影响半径 R 的选取

从台风中心到台风场最外圈闭合等高线的平均距离为 R' ,则台风影响半径 $R = R' + d$ (d 为格距)。

(2) 台风高度场呈圆对称,则台风高度场为

$$\phi_r = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \phi_i(r) - \phi(R) \quad (4.1)$$

其中 r 为 R 内任一格点到台风中心的距离。而且假定 R 和 ϕ_r 在后六小时内不变。

(3) 建立后六小时“正确”高度场 $\phi(t_k)$,分三个步骤:首先,设后六小时预告高度场为 $\hat{\phi}(t_k/t_{k-1})$,则后六小时预告基本场为

$$\hat{\phi}(t_k/t_{k-1}) = \hat{\phi}(t_k - t_{k-1}) - \phi_r \quad (4.2)$$

其次,假定台风在基本气流引导下移动,因此,在 R 内,把台风后六小时移向、移速作为基本风场 $\hat{u}, \hat{v}$. 求解方程

$$\nabla^2 \Phi(t_k) = f \left(\frac{\partial \hat{v}}{\partial x} - \frac{\partial \hat{u}}{\partial y} \right) \quad (4.3)$$

得后六小时“正确”基本场 $\Phi(t_k)$. 最后在 $\Phi(t_k)$ 上迭加 ϕ_r , 台风中心放在后六小时台风位置上,这样得到 $\phi(t_k)$.

(4) 在 $\phi(t_k)$ 上迭加一随机扰动作为后六小时“观测”高度场 $\phi'(t_k)$.

在上述高度场假定下,则有

$$\phi(t_k) = \phi'(t_k) + \varepsilon(t_k) \quad (4.4)$$

$$\phi(t_k) = \hat{\phi}(t_k/t_{k-1}) + E(t_k) \quad (4.5)$$

其中 $\varepsilon(t_k)$ 为观测误差, $E(t_k)$ 为预告误差.

假定对同一时刻 t_k , j 格点上的 $\varepsilon_j(t_k)$ 与其它格点上的 $\varepsilon_L(t_k)$ 无关, $E_j(t_k)$ 与 $\varepsilon_L(t_k)$ 也无关,则有

$$\overline{\{\varepsilon_j(t_k)\varepsilon_L(t_k)\}} = \sigma^2 \delta_{jL} \quad (4.6)$$

$$\sigma^2 = \overline{\{\varepsilon_j^2(t_k)\}} \quad \text{且 } \delta_{jL} = \begin{cases} 0 & j \neq L \\ 1 & j = L \end{cases} \quad (4.7)$$

$$\overline{\{E_j(t_k)\varepsilon_L(t_k)\}} = 0 \quad (4.8)$$

其中“——”表示 $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ()_i$, N 为格点数.

我们选取使

$$p = \overline{\{[\hat{\phi}_i(t_k/t_k) - \phi_i(t_k)]^2\}} \quad (4.9)$$

达到最小的估计 $\hat{\phi}(t_k/t_k)$ 为最佳估计值.

估计值 $\hat{\phi}(t_k/t_k)$ 表示为

$$\hat{\phi}(t_k/t_k) = \hat{\phi}(t_k/t_{k-1}) + A(t_k)[\phi'(t_k) - \hat{\phi}(t_k/t_{k-1})] \quad (4.10)$$

式中 $A(t_k)$ 为待定的增益矩阵.

(4.10) 式代入 (4.9) 式,应用 (4.8) 式,然后采用极值原理最小化 p , 即得

$$\sum_k a_{iL} (\overline{E_j E_L} + \sigma_L^2) = \overline{E_j E_i} \quad (4.11)$$

由 (4.11) 式求得增益矩阵 $A(t_k)$, 然后代入 (4.10) 式,即可得到最佳估计 $\hat{\phi}(t_k/t_k)$.

我们仅在以台风中心为区域中心,边长为 $2(R+d)$ 的正方形区域内计算最佳估计值,而且仅考虑周围八点和自身一点对 i 格点的影响,即在九点上求增益矩阵 $A(t_k)$. 根据 58 个个例试算,增益系数在自身格点上为最大,达 0.48—0.49,周围格点对 i 格点的权重较小.

经过上述处理后,台风邻域内的高度场与周围环境场的联结处光滑,处理后的台风中心位置与后六小时的实测位置十分接近.

相应于这种高度场的风场仍由上述初值化方案计算得到. 然后继续进行六小时以后各时段的数值计算.

当两个台风相近,或台风与西风带系统接近时,就不引进后六小时的台风位置。当预告域内有两个以上的台风时,且它们的距离较远,则仅对我们所关心的一个台风作上述引入后六小时位置的处理。

四、计算结果分析

上述方案在计算中发现第一个 12 小时的台风预报移速总是偏慢,为了提高业务预报的精度,我们在引进台风后六小时位置以后的 6 小时数值计算中增加计算 24 个步次,即把 18 小时的计算结果作为 12 小时的业务预报,在以后时段的计算中均不作上述处理,使用上述方案做了 69 次历史个例的试验性预报(其中西进或西进登陆类台风 25 次;转向台风 29 次;北上或北上西折类台风 12 次;双台风 3 次),在 1977—1979 年的三年台风季节中正式使用该方案共发布了 48 次预报(其中西进或西进登陆类台风 10 次;转向台风 22 次;北上或北上西折类台风 6 次;双台风 4 次;南海台风 6 次)。在实际预报中,根据线性插值原理,人工确定台风预报高度场的极值点作为预报的台风中心位置。计算结果表明(表 1):

第一,24 小时台风预告位置平均误差为 117 海里,随着预报时效增长,平均误差相应增大,但误差增长率比较缓慢。

第二,业务预告的 12、24、36、48 小时平均误差明显地比历史个例试报的误差要小,60 小时误差略大一些。而且,在这 48 次业务预报中包括了路径比较难报的 7708、7710、7805(前期路径)、7806、7810 和 7910 号台风的 25 次预报,即使在比较难报的台风路径占 52% 的情况下,业务预报仍然取得上述结果。这表明本方案对路径比较难报的台风尚有一定的预报能力,尤其是 36 小时前的预报是有参考价值的。

表 1

		N	12hr 预告 位置误差	N	24hr 预告 位置误差	N	36hr 预告 位置误差	N	48hr 预告 位置误差	N	60hr 预告 位置误差
历史个例试算		69	83	69	124	68	169	58	227	44	267
业务 预告	1977 年	11	62	11	109	10	198	9	265	5	328
	1978 年	21	54	21	104	16	119	14	203	9	302
	1979 年	16	79	16	111	14	147	11	161	8	200
	平 均	48	64	48	108	40	148	34	206	22	271
总 平 均		117	75	117	117	108	162	92	219	66	269

注: 1) N 表示预报次数;误差单位海里

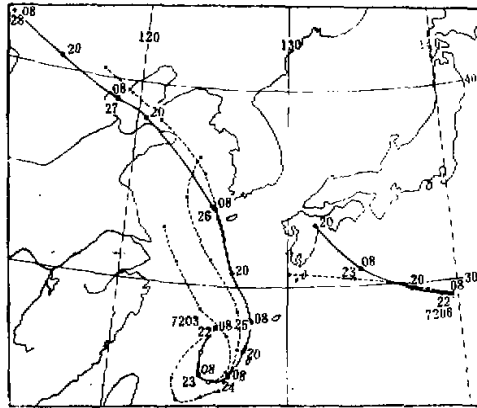
2) 凡引进后六小时台风位置的计算个例,其误差均已作订正(原 12、24、36、48、60 小时计算误差分别乘上 2、4/3、6/5、8/7、10/9)

第三,当台风的初始位置在 30°N 以北、 19°N 以南,或 120°E 以西时预告误差较大(见表 2)。其情况是: 1,当台风位于东西风气流过渡地带,或处于西风气流控制下,台风预告移速偏慢,方向偏差有时也会较大。例如 7203 号台风,1972 年 7 月 25 日 20 时(北京

表 2

台风初始位置	N	24hr 预告 位置误差	N	48hr 预告 位置误差
30°N 以北 120°E 以东	7	190	4	372
19°N 以南或 120°E 以西	12	181	11	333

说明同表 1

图 2 7203、7206 台风路径图
实线为实况, 虚线为预告

时)的24小时预告误差达4.3个纬距(图2); 2, 边界效应和资料稀少也常使预告效果不好, 例如, 7710号台风即为一例(图略)。

第四, 对于半径小于或等于一个格距的小台风, 其预告移速偏慢较大。台风半径在2—3个格距内最为合适。

下面给出应用本方案预报 7806 号和 7203 号台风的情况:

7806 号台风于 1978 年 7 月在太平洋上生成。25—27 日副高一直伸展到长江中上游, 轴线在 35°N 一线, 台风沿副高南侧向西北方向移动, 移速逐渐加快, 7 月 27 日 20 时台风已以每小时大约 14 海里的速度冲向浙江北部。但是, 7 月 27 日 20 时, 贝加尔湖西北方有一低槽东移, 以后副高开始减弱。29 日 20 时, 副高分裂, 大陆上为弱的高压, 主体东撤到日本以东。相应于这种变化, 台风从 29 日 08 时以后移速逐渐减慢, 且于 125°E 附近转向正北。30 日 08 时台风处于两环高压之间, 停滞达 40 小时之久。8 月 1 日 08 时台风在另一个槽前向东然后折向东北移去。本方案于 7 月 27 日 20 时较早地报出了副高在 36 小时内减弱、断裂, 中心东撤的趋势。接着还算出了台风的突然减速和向东北方向移去的这一关键性预报(图 3—8)。但是, 每次预报的后期移向与实况有较大误差。对这个台风共做了 5 次预报, 24 小时的平均预报误差为 69 海里, 36 小时为 121 海里, 48 小时为 231

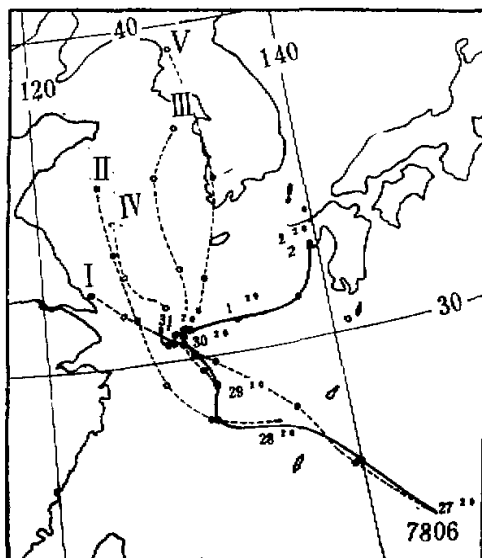


图 3 7806 路径图
实线为实况,虚线为预告

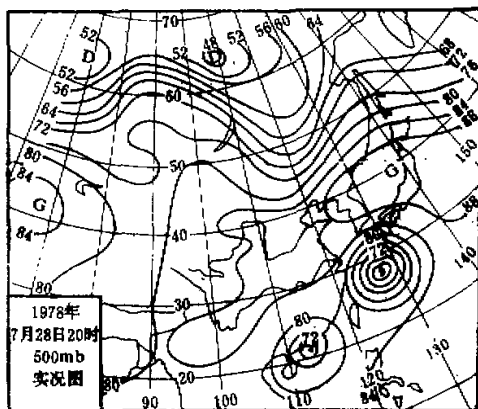


图 4 7806 初始场

海里, 60 小时为 315 海里。

7203、7206号台风是一次双台风过程(图 2)。这次台风预报的难点是:(1)7203 号台风的打转和打转后北上;(2)后期,7203 号台风突然西折,在胶东半岛登陆。这两个关键性预报,本方案的试报趋势与实况比较接近,但移速比实况偏慢,预报登陆时间比实况推迟达12小时。

上述表明,本方案确有一定的预报能力,但是,必须指出,还存在一些缺点,在某些情

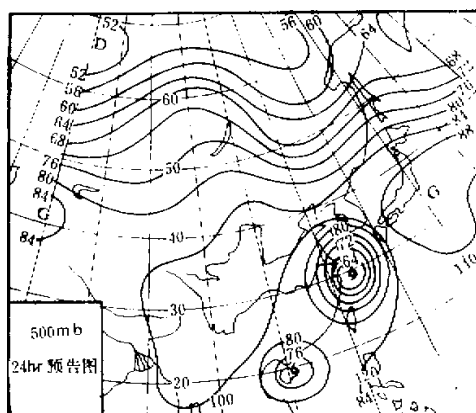


图5 7806 24小时预告图

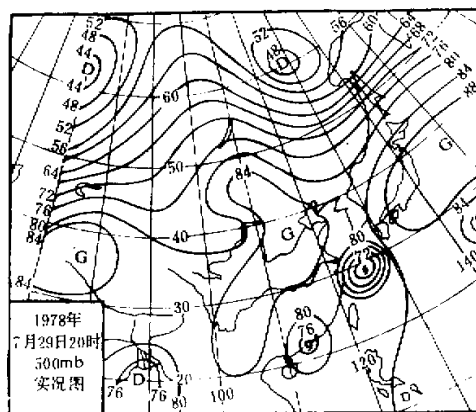


图6 7806 24小时实况图

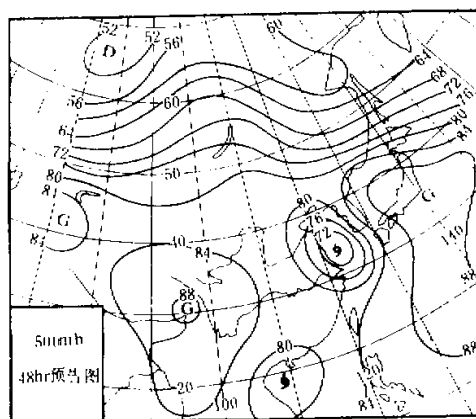


图7 7806 48小时预告图

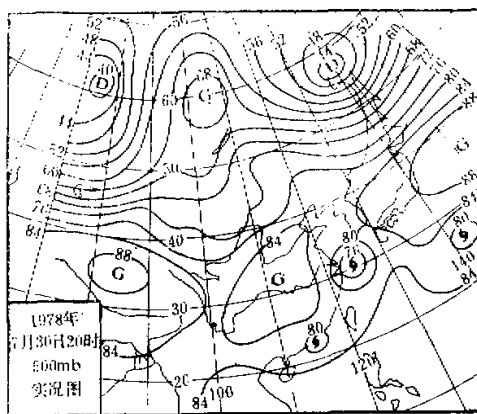


图 8 7806 48 小时实况图

况下对预报造成很大影响。首先,本方案反映赤道低纬系统,如赤道高压、缓冲带等以及预报中高纬度大尺度环流调整的能力较弱;其次,热力因子对副高盛衰作用很重要^[7-8],而本方案没有考虑热力因子对大气运动的影响;另外,广阔低纬洋面上缺少探空资料,使高度场分析带来很大误差,往往使预报失败。显然,采用多层斜压模式或粗细网格嵌套模式,引进卫星资料,可望使预报进一步改进。

致谢:在工作过程中,曾得到中国科学院大气物理研究所叶笃正先生的热情指导,并得到上海台风研究所朱永堤,郭永润,徐一鸣同志以及电子计算机组的帮助和支持,均在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 倪允琪,薛宗元,金汉良,第二次全国数值天气预报会议论文集,科学出版社,137-152,1980.
- [2] 倪允琪,薛宗元,一种适合于台风路径数值预报的正压原始方程模式的初值化方案,(1977),待发表.
- [3] 王恩平,数学实践和认识,第6期,1972.
- [4] G. Temperton, *Quart. J. R. Met. Soc.*, Vol. 99, 303-319, 1973.
- [5] G. J. Haltiner, *Numerical weather Prediction*, Wiley, New York, 1971.
- [6] Miyakoda, K. and Olivier Talagrand, *Tellus*, Vol. 23, 310-317, 1971.
- [7] 黄士松,汤明敏,南京大学学报(自然科学版),第一期,1977.
- [8] 黄士松,汤明敏,南京大学学报(自然科学版),第一期,1978.

AN OPERATIONAL NUMERICAL FORECASTING SCHEME OF TYPHOON TRACKS OVER THE WESTERN PACIFIC AND ITS PRELIMINARY RESULTS

Ni Yun-qi Jin Han-liang

(Department of Meteorology, Nanjing University)

Xue Zong-yuan

(Shanghai Typhoon Institute)

Abstract

In this paper, an operational numerical forecasting scheme of typhoon tracks over the Western Pacific is proposed. In this scheme, the accuracy of computations is raised by applying the inverse smooth operator, and the prediction is improved by introducing the position of typhoon 6 hours after the initial time with application of least square method. 69 historical cases were experimentally forecasted and 48 cases in the typhoon season of 1977---1979 were forecasted routinely by this scheme with certain success. Finally, the further improving approach of this scheme is discussed.