

卫星遥感资料在台风数值预报中的应用

杨学联 季晓阳 黄润恒 凌铁军

(国家海洋环境预报中心, 北京)

摘 要 本文将卫星遥感资料应用在台风数值预报中, 并用变分调整方法对客观分析场进行变分调整, 最终形成台风数值预报模式的初始场。台风数值预报模式采用 σ 坐标系中通量形式原始方程组, 垂直方向分为三层, 水平方向采用三重嵌套网格方案, 细网格随台风中心位置的变化而移动。

关键词: 台风数值预报; 卫星遥感资料; 变分调整; 初始化

中图分类号: P456 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003 - 0239 (2001) 04 - 0001 - 08

1 引言

台风路径、强度和海平面风压场的分布及变化是做好海浪、风暴潮等预报的重要因素。由于海洋上观测资料稀少, 使得仅根据常规观测资料而做出的客观分析结果, 很难正确地反映出台风中心位置、强度及周围环境各要素场的分布, 这给台风数值预报带来很大困难。提高台风预报准确率的主要障碍是资料问题, 卫星遥感资料的应用为我们解决这一问题提供了一条可行之路。

2 初始场

2.1 基本要素场

国家海洋环境预报中心北半球业务客观分析, 是应用逐步订正法分析等压面重力位势, 其格距为 381km, 分析结果在描述台风结构方面, 还不能够完全满足台风数值模式的要求。为此需要在客观分析场中加入理想台风模型风压场, 形成模式初值。与客观分析相配合, 本文对基本要素场采用以高度场为主的静力初始化方法。即由标准等压面重力位势, 通过分别求解平衡方程和 ω 方程, 得到流函数和势函数。再按照台风模式的要求进行内插, 形成基本要素场。

本文于 2001 年 8 月 13 日收到。

作者简介: 杨学联 (1955-), 男, 副研究员, 多年从事海洋大气和台风风场数值预报工作, 承担多项国家科技公关项目。

2.2 理想台风模型风压场

目前国内外所提出的各种理想台风模型风压场,都是建立在梯度风或旋衡风等基础上。为同台风模式一致,本文采用了“原口勘助”的理想台风模型风压场。台风影响区域地面风压场为

$$P'(r) = P(r) - \frac{1000 - P_{\min}}{1 + c \cdot r/R} \cdot \exp[-(r/R)^2] \quad (1)$$

式中 r 为台风计算半径, R 为台风影响半径, P 为客观分析气压场, c 为经验参数,由台风强度来决定。台风影响区域地面风场由三部分组成,即

$$V' = V + C_1 V_g + C_2 V_r \quad (2)$$

其中 V 为客观分析场, V_g 为地转风场, V_r 为径向风场, C_1 、 C_2 为经验系数。

上述根据经验确定的台风模型风压场,其本身之间的气压场同风场显然是不适应的,而且嵌套后的台风场与周围环境场也不协调。用它作为台风预报的初始场,在以后计算中,容易出现计算不稳定现象。故需调整,形成一个新的初始场。

3 变分调整

根据变分原理,采用水平原始方程组作为约束条件,对上述初始场进行变分调整。

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \vec{\tau}}{\partial z} = -c \vec{V} \quad (3)$$

调整时考虑了非常规观测资料和湍流摩擦作用。利用 Guldbery-Mohn 假定,取式中 c 为摩擦系数。地面场调整所采用的约束方程为

$$-\frac{\partial u'}{\partial t} = A - f v' + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \frac{\partial Z}{\partial x} + c u' \quad (4)$$

$$-\frac{\partial v'}{\partial t} = B + f u' + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + g \frac{\partial Z}{\partial y} + c v' \quad (5)$$

式中, $u' = \frac{u}{m}$, $v' = \frac{v}{m}$, $A = u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}$, $B = u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}$, 其中 m 是地图投影因子, Z 为海拔高度,其它均为气象常用符号,这时我们有泛函数

$$I = \sum_{i,j} \left[\alpha (u - u_0)^2 + \alpha (v - v_0)^2 + \beta (P - P_0)^2 + \gamma \left(A - f v' + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \frac{\partial Z}{\partial x} + c u' \right)^2 \right. \\ \left. + \gamma (B + f u' + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + g \frac{\partial Z}{\partial y} + c v')^2 \right] \quad (6)$$

其中 α, β 是依赖于客观分析精度的权重函数, γ 是拉格朗日乘数。下标 “0” 表示客观分析值, u, v, P 表示调整后的值。为了使调整程度达到最小, 我们要求 $I = \min$, 于是, 需

$$\frac{\partial I}{\partial u} = \frac{\partial I}{\partial v} = \frac{\partial I}{\partial P} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial I}{\partial P_x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial I}{\partial P_y} \right) = 0 \quad (7)$$

这样就得到下列 Euler 方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial u} = & \alpha(u - u_0) + \gamma(A - fv' + \frac{1}{\rho} P_x + gZ_x + cu') \left(\frac{\partial A}{\partial u} + \frac{c}{m} \right) \\ & + \gamma(B + fu' + \frac{1}{\rho} P_y + gZ_y + cv') \left(\frac{\partial B}{\partial u} + \frac{f}{m} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial v} = & \alpha(v - v_0) + \gamma(A - fv' + \frac{1}{\rho} P_x + gZ_x + cu') \left(\frac{\partial A}{\partial v} - \frac{f}{m} \right) \\ & + \gamma(B + fu' + \frac{1}{\rho} P_y + gZ_y + cv') \left(\frac{\partial B}{\partial v} - \frac{c}{m} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial P} = & 2\beta(P - P_0) \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial I}{\partial P_x} \right) = & 2 \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\gamma}{\rho} (A - fv' + \frac{1}{\rho} P_x + gZ_x + cu') \right] \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial I}{\partial P_y} \right) = & 2 \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\gamma}{\rho} (B + fu' + \frac{1}{\rho} P_y + gZ_y + cv') \right] \end{aligned} \quad (10)$$

为方便起见, 取

$$\begin{aligned} f_0 &= f(\varphi_0), & \rho_0 &= \rho(z) \\ A_0 &= u_0 \frac{\partial u_0}{\partial x} + v_0 \frac{\partial u_0}{\partial y}, & B_0 &= u_0 \frac{\partial v_0}{\partial x} + v_0 \frac{\partial v_0}{\partial y} \end{aligned}$$

并用增加调整循环次数来考虑非线性作用, 计算整理 (8) ~ (10) 式后有

$$\nabla^2 P - \frac{1}{\gamma} \rho_0^2 \beta P = F \quad (11)$$

$$u = \frac{m^2}{am^2 + \gamma(c^2 + f^2)} \left[\alpha u_0 - \frac{\gamma}{m} (cG + fH) \right] \quad (12)$$

$$v = \frac{m^2}{am^2 + \gamma(c^2 + f^2)} \left[\alpha v_0 + \frac{\gamma}{m} (fG + cH) \right] \quad (13)$$

其中

$$F = -\frac{1}{\gamma} \rho_0^2 \beta P_0 + \rho_0 f_0 (\dot{v}_x^* - \dot{u}_y^*) - \rho_0 (A_x - B_y) - c \rho_0 (\dot{u}_x^* + \dot{v}_y^*) - g \rho_0 (Z_{xx} + Z_{yy})$$

$$G = A_0 + \frac{1}{\rho_0} P_x + g Z_x, \quad H = B_0 + \frac{1}{\rho_0} P_y + g Z_y$$

采用超松弛迭代法, 求解 (11) 得到 P , 代入 (12)、(13), 即可求出 u 、 v 。

4 卫星观测资料的加入及订正

如何将卫星观测资料, 特别是客观分析后 3 或 6 小时台风观测资料应用到数值预报中, 是一个急需解决的问题。本文采用逐步订正法, 把上述初始场 (预报场) 作为预报场, 按下面公式进行订正

$$Z_g^{n+1} = Z_g^n + C_g^n \quad (14)$$

$$C_g^n = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (15)$$

$$C_i = W_i (Z_0 - Z_{g0}^n) \quad (16)$$

$$W_i = \begin{cases} (R^2 - r_i^2)/(R^2 + r_i^2), & \text{当 } r_i < R \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } r_i \geq R \text{ 时} \end{cases} \quad (17)$$

式中, r_i 为某一确定网格点与第 i 个测站之间的距离, R 为 $W_i = 0$ 的距离, 是事先给定的, 下标 0 表示观测值, g 表示网格点上的值, g_0 表示由网格点值内插到测站上的值。订正结束后, 再对全场进行一次变分调整。

5 台风数值预报模式简介

该台风模式采用 σ 坐标系中通量形式的原始方程组, 垂直方向分为三层, 变量分别交叉置于不同高度上, 水平方向采用三重嵌套网格方案, 网格 A 固定不动, 网格 B、C 随台风中心位置的变化而移动, 网格 A、B、C 的格距分别为 381.00km、190.50km、95.25km, 格点数均为 31×31 点, 变量分布取 Arakawa B 格式, 差分格式按动量和总能量守恒等原则设计, 时间积分方案采用显示分离解法, 粗细网格交界的边值处理采用双向插值方法。

6 试验结果

本文采用变分调整方法, 对加有卫星遥感资料的台风 T9605、T9608、T9611、T9615、T9616、T9623、T9714、T9802、T9804、T9807、T9808 等 13 个个例做了 48h 台风数值预报对比试验, 表 1 是加有卫星遥感资料和变分调整的 13 个个例的平均方向角(单位: 度)及距离误差(单位: km); 表 2 是未加卫星遥感资料和变分调整的 13 个个例的平均方向角及距离误差。对比表 1、表 2 可以看出, 对台风中心位置而言, 加有卫星遥感资料和变分调整的预报结果略好于没有加的, 它们之间的 24h、48h 预报距离误差分别为 23km 和 31km。多年台风初始观测定位误差大约为 50km, 台风 T9616 在 9 月 13 日 20 时初始观测定位误差大约为 100km, 加有卫星遥感资料和变分调整的 24h、48h 预报距离误差分别为 103km 和 279km, 未加卫星遥感资料和变分调整的 24h、48h 预报误差分别为 118km 和 374km。由此可见卫星遥感资料在台风初始观测定位误差较大时所起的作用。

表 1 加有卫星遥感资料和变分调整方向角及距离误差

12h 预报		24h 预报		36h 预报		48h 预报	
方向角	距离	方向角	距离	方向角	距离	方向角	距离
11°	103km	16°	151km	25°	245km	27°	381km

表 2 未加卫星遥感资料和变分调整方向角及距离误差

12h 预报		24h 预报		36h 预报		48h 预报	
方向角	距离	方向角	距离	方向角	距离	方向角	距离
13°	110km	19°	174km	26°	259km	28°	412km

对台风周围环境各要素场的分布而言, 加有卫星遥感资料和变分调整与未加之间的差别就十分明显, 这可从图 1a-4c 中看出。下面给出其中台风 T9804 个例加以讨论, 初始预报时间是 1998 年 8 月 27 日 08 时。图 1a-1b 分别是网格 C 上加有卫星遥感资料和变分调整的初始地面场和风场 u 、 v 分量, 图 1c 是它们的全风速矢量场, 图 2a-2c 分别是它们的 48h 预报场。对比这些图, 可以清楚地看到, 经过变分调整后的台风场, 在描述台风风压场基本特征和台风变化过程方面, 例如在风场 u 、 v 分量与地面气压场配置及强度方面均比没加变分调整的更合理, 更接近实际。

为了进一步考察卫星遥感资料和变分调整在台风数值预报中的作用, 我们还分别计算了 C 网格区域内的平均动能随时间的变化及台风位置和强度误差(图表略)。其结果表明, 加有卫星遥感资料和变分调整后的平均动能, 随时间的变化基本上是处于稳定状态, 而没加卫星遥感资料和变分调整的平均动能, 在前 24h 下降, 以后缓慢上升。而且对于台风位置和强度的误差, 也大于加入变分调整后相应的台风位置强度误差约 10%。

数值预报中的初值处理, 历来受到人们重视。在初始化过程中对卫星遥感资料的处理变得十分重要, 变分调整方法物理意义清楚, 采用原始方程组为约束条件, 能较好地描述风压场关系, 调整后的初始场, 尤其是在台风数值预报中, 容易同预报模式相协调。

本试验只是做了二维空间的变分调整, 今后还需在三维方面做更多工作。

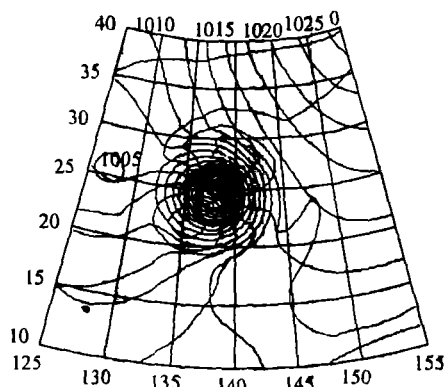


图 1a 加有卫星遥感资料和变分调整的气压场和风场 u 分量(初始场)

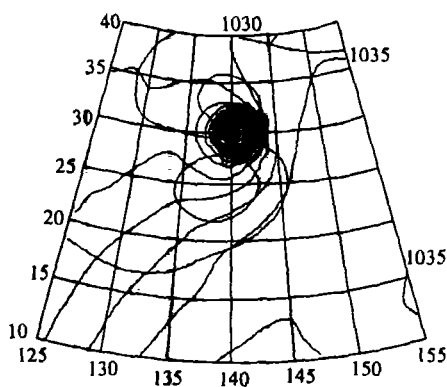


图 2a 加有卫星遥感资料和变分调整的气压场和风场 u 分量(48h 预报场)

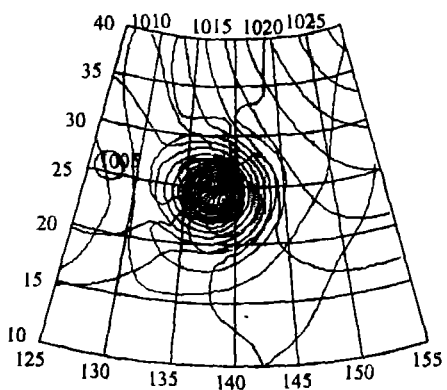


图 1b 加有卫星遥感资料和变分调整的气压场和风场 v 分量(初始场)

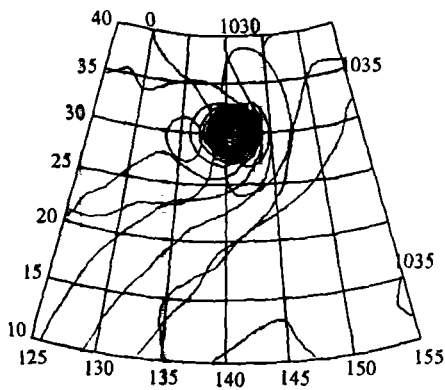


图 2b 加有卫星遥感资料和变分调整的气压场和风场 v 分量(48h 预报场)

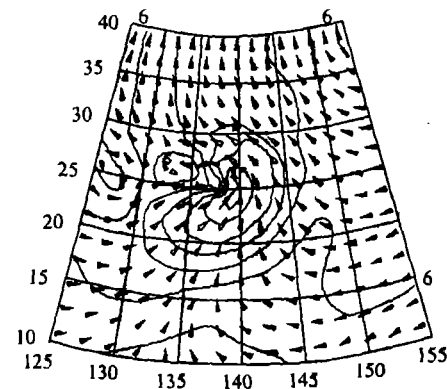


图 1c 加有卫星遥感资料和变分调整的全风速矢量场(初始场)

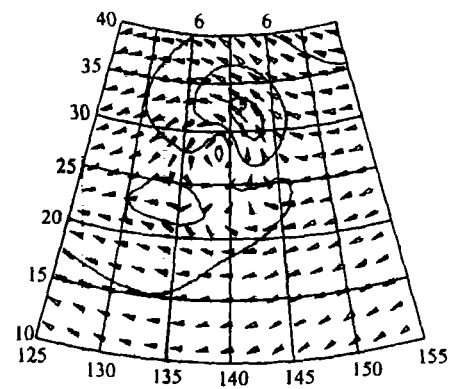


图 2c 加有卫星遥感资料和变分调整的全风速矢量场(48h 预报场)

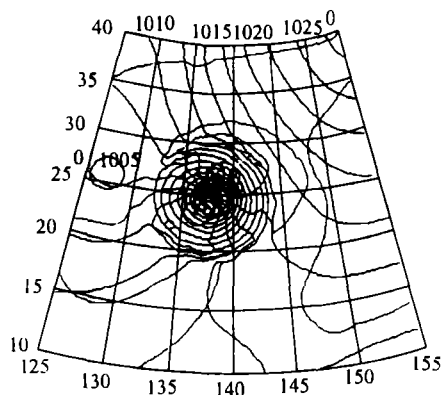


图 3a 没加卫星遥感资料和变分调整的气压场和风场 u 分量(初始场)

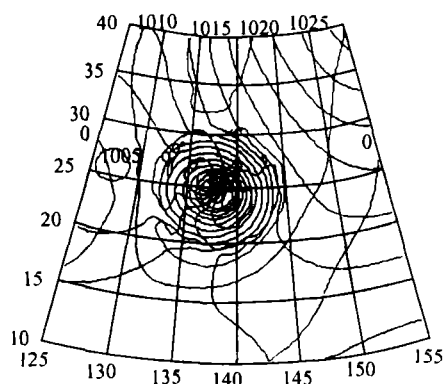


图 3b 没加卫星遥感资料和变分调整的气压场和风场 v 分量(初始场)

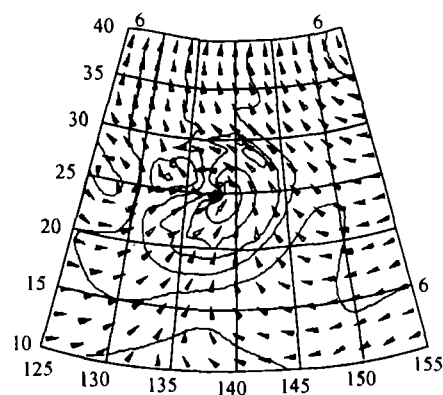


图 3c 没加卫星遥感资料和变分调整的全风速矢量场(初始场)

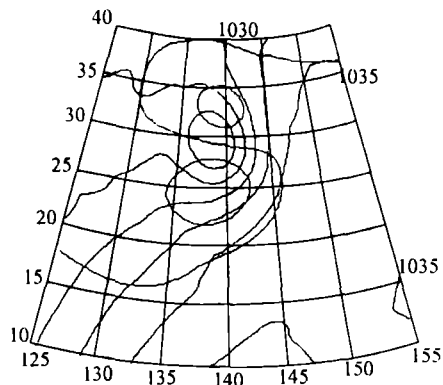


图 4a 没加卫星遥感资料和变分调整的气压场和风场 u 分量(48h 预报场)

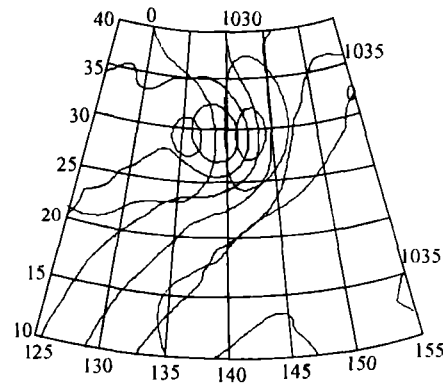


图 4b 没加卫星遥感资料和变分调整的气压场和风场 v 分量(48h 预报场)

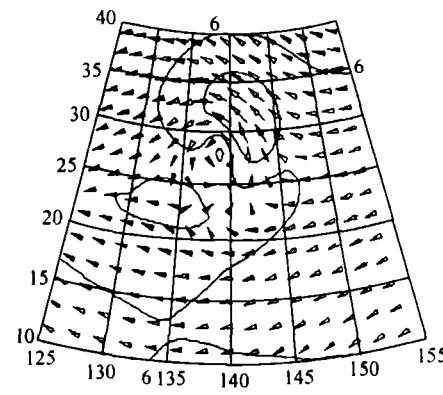


图 4c 没加卫星遥感资料和变分调整的全风速矢量场(48h 预报场)

参考文献

- [1] 吴辉旋, 杨学联, 白珊. 三维斜压台风模式—I. 数值方法. 海洋学报, 1998, 20 (4):
- [2] 大河内芳雄. 移动式多重格子系 (MNG) 应用いた台风预报. 研究时报, 39: 7-9 号, 173~198.
- [3] 张玉玲, 吴辉旋, 王晓林. 数值天气预报. 科学出版社, 472.
- [4] Arakawa, A.. Computational design for long-term numerical integration of the equation of atmospheric motion. J. Computational Phys., 1, 119-143.
- [5] Winninghoff, F. J. On the adjustment toward a geostrophic balance in a simple primitive equation model with application to the problem of initialization and objective analysis. Ph. D. Thesis, University of California, Los Angeles, 161.
- [6] Blumberg A. F. and G. L. Mellor: A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, Coastal and Estuarine Science 4, Three-Dimensional Coastal Ocean Models, (Heaps, N. S. Ed.), AGU Washington D. C., 1~16.
- [7] Mesinger, F. and A. Arakawa. Numerical Methods Used in Atmospheric Models, 1, GARP Publications Series, 17, 64.