

几个典型台风路径的同化试验

蔡其发^{1,2}, 黄思训¹, 项 杰¹, 兰伟仁²

(1 解放军理工大学气象学院, 南京, 211101; 2 总参气象水文中心, 北京, 100081)

摘 要: 本文从上海台风所的台风路径统计动力预报模型 SD-90 出发, 利用变分同化方法结合反问题正则化思想和最优控制技巧(而非统计方法), 反演出台风所受到的除科氏力以外所有力的合力及台风的初始速度, 用实际台风定位资料分析不同的正则化参数及最优控制参数的组合对同化结果的影响, 分析不同台风路径特征的拟合效果。该方法具有模式简单、应用资料少、拟合精度高等优点, 为台风路径的预报提供了新的思路。

关键词: 台风路径, 变分同化, 正则化方法, 最优控制

中图分类号: P731 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2006)1-0020-07

1 引言

台风是一种发生在热带洋面上、活动于热带和副热带洋面、岛屿和陆地的气旋性强烈低压环流, 因其伴随的强风、暴雨以及登陆时的风暴潮会产生巨大的破坏性, 当这种风暴移近大陆时或登陆后, 将给人类带来灾害, 严重的可能造成巨大的灾难^[1]。当然, 台风也有有利的方面, 它的大量降水可以有效地缓解旱情。因此准确地预测台风的影响, 事先做好防风、排涝或蓄水等工作, 就可以趋利避害。

台风预报的核心问题是路径和强度的预报。我们主要讨论与台风路径有关的问题。研究表明, 台风的移动主要受大尺度环境场的引导(引导原理)^[2], 同时大尺度环境场、气旋环流以及它们之间的相互作用也会引起台风偏离引导气流(称为漂移)^[3]; 此外, 台风周围的中小尺度系统、台风的非对称结构(包括动力的和热力的)、地形、边界层的动力学特征等对台风的移动也有重要影响。实际的台风正是在这众多因素的共同影响下移动的。

目前台风移动路径的业务预报系统大体上可分为三类: 数值预报方法、统计方法以及包含多种预报方法综合的集成预报方法。它们都可以达到比较高的预报精度。如 1994 年后日本数值预报模式 24h 和 48h 的平均误差分别为 157.0km 和 297.5km, 而美国国家飓风中心的 NHC90 是一个集 Cliper 方法, 以初始场客观分析资料为基础的统计预报方案(简称 SP)和以数值预报高度场为基础的统计释用方案(简称 PP)为一体的综合预报模式, 其 24h 和 48h 的平均误差分别为 115.6km 和 245.4km 里。一般而言, 对正常路径台风, 各种方法的预报效果都比较好; 而对异常路径台风, 如突然加(减)速、突然转向、停滞

收稿日期: 2005-10-31; 修订日期: 2005-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(90411006)

作者简介: 蔡其发(1973-), 男, 博士, 主要从事数值天气预报和气象数据可视化的研究。

不前、打转等, 预报效果则比较差, 甚至会失败。

我国在台风的理论研究和业务预报方面也取得了许多创造性的成果。在台风路径预报的统计方法中, 有一种是上海台风所提出的统计动力预报方法(SD-90)^[4], 其思想是从台风的水平运动方程出发, 视台风为一个点涡, 并将台风中心作为坐标系的原点, 将各种外力的综合表示为时间的二次多项式, 并用大尺度环境场因子通过统计回归的办法确定多项式的系数, 再由运动方程组得出台风移动的预报。这种方法实质上是利用了“引导气流”的原理, 它至今还在业务预报中使用着, 特别对正常路径台风, 能够取得很好的预报效果。

最近二十年来, 资料变分同化方法一直是全球气象学和物理海洋学中的一个热点问题。资料变分同化作为初始化的一个方法, 通过把观测资料与模式结合起来, 向数值天气预报模式提供合理的初始场, 从而显著提高了数值天气预报的质量。目前, 国内外的许多数值天气预报模式, 大气环流模式, 海洋环流模式, 暴雨预报模式等在初始化中都应用了资料变分同化技术。Zou 等把资料变分同化方法应用于台风数值预报模式, 提出了伪数据同化(Bogus Data Assimilation, 简称 BDA)方案^[5], 用来提供合理逼真的台风初始场。

我们利用资料变分同化方法确定 SD-90 统计动力预报模式中台风所受到的除科氏力以外的力的合力(以下简称合力)。利用前面诸时刻台风中心的定位资料反演出除科氏力以外的合力(而不是用统计方法), 为台风路径的预测提供新的思路。同时在反演过程中由于多参数(合力及初始速度)、模式较大的简化等都将导致反演的不适定, 结合数学中反问题正则化思想及最优控制思想^[6], 对台风的合力及初始速度进行反演以去除问题的不适定性、提高预报精度、减少迭代次数、提高运算效率。

2 变分同化方法的实施

台风相对于东风带、西风带和副热带高压等行星尺度系统来说, 是一个较小的涡旋, 甚至可以看作是一个点涡。在 β 平面上, 台风中心的移动满足下面的常微分方程组的初值问题^[4]:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = u \\ \frac{dy}{dt} = v \\ \frac{du}{dt} = (f_0 + \beta y)v + F_x(t) \\ \frac{dv}{dt} = (f_0 + \beta x)u + F_y(t) \\ x|_{t=0} = x_0, y|_{t=0} = y_0, u|_{t=0} = u_0, v|_{t=0} = v_0, \end{cases} \quad (1)$$

这里, $0 \leq t \leq T$, 而 (x, y) , (u, v) 分别是台风中心的坐标和速度, f_0 是坐标原点处的科

氏参数, $F_x(t)$, $F_y(t)$ 是除了科氏力之外的其它所有力的合力。设在时间段 $0 \leq t \leq T$ 内, 台风中心路径的观测值为 $X = X_{obs}(t)$, $Y = Y_{obs}(t)$ 。现在的任务是: 利用观测值, 确定最优的初始速度 u_0 , v_0 及力 $F_x(t)$, $F_y(t)$, 使得方程组 (1) 对应解 $x(t)$, $y(t)$, $u(t)$, $v(t)$ 满足目标泛函 (即路径的总误差):

$$J[u_0, v_0, F_x(t), F_y(t)] = \frac{1}{2} \int_0^T [(x(t) - X_{obs}(t))^2 + (y(t) - Y_{obs}(t))^2] dt \quad (2)$$

取极小值。分析可知, 这样得到的对外力的估计及对初始速度的反演不是唯一的, 因为合力和初始速度的不同组合可以得到相同的台风移动速度, 为保证得到物理上意义合理、数学上适定的唯一解的估计, 受数学物理反问题中正则化思想及最优控制的启发, 引进“改进的极小模”解, 在目标泛函中增加约束, 在众多可能的解中寻找“模”最小的解。对位置的变化要求具有充分的光滑性, 以对正常路径加以限制。对速度的变化 (及加速度) 要求连续性, 即对异常路径的曲率进行限制。同时应用最优控制的思想对台风数值模拟的末端位置进行限制, 以期将数值模拟值“拉回”与观测值接近。则新目标泛函定义为:

$$J[u_0, v_0, F_x(t), F_y(t)] = \frac{1}{2} \int_0^T [(x(t) - X_{obs}(t))^2 + (y(t) - Y_{obs}(t))^2] dt + \frac{\gamma_1}{2} \int_0^T [u^2 + v^2] dt + \frac{\gamma_2}{2} \int_0^T \left[\left(\frac{du}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dv}{dt} \right)^2 \right] dt + \delta [x(T) - X_{obs}(T)]^2 + \delta [y(T) - Y_{obs}(T)]^2 \quad (3)$$

其中 γ_1 , γ_2 分别为正则化参数, δ 为最优控制的末端约束参数。在确定了最优的初始速度 u_0 , v_0 及力 $F_x(t)$, $F_y(t)$ 后, 利用 (1) 对应的解就可预报 T 时刻台风的位置及速度。

通过一系列的推导^[7]可以得到伴随方程及其初始条件:

$$\begin{cases} -\frac{d}{dt}P = x(t) - X_{obs} \\ -\frac{d}{dt}Q - \beta(vR - uS) = y(t) - Y_{obs} \\ -\frac{d}{dt}R - P + (f_0 + \beta y)S = \gamma_1 u - \gamma_2 \frac{d^2 u}{dt^2} \\ -\frac{d}{dt}S - Q - (f_0 + \beta x)R = \gamma_1 v - \gamma_2 \frac{d^2 v}{dt^2} \\ P(T) = \delta(x(T) - X_{obs}(T)), \quad Q(T) = \delta(y(T) - Y_{obs}(T)) \\ R(T) = \gamma_2 u \frac{du}{dt} \Big|_{t=T}, \quad S(T) = \gamma_2 v \frac{dv}{dt} \Big|_{t=T} \end{cases} \quad (4)$$

而目标泛函关于 u_0 , v_0 , $F_x(t)$, $F_y(t)$ 的梯度为:

$$\begin{aligned} \nabla_{u_0} J &= R(0) - \gamma_2 \frac{du}{dt} \Big|_{t=0}, & \nabla_{v_0} J &= S(0) - \gamma_2 \frac{dv}{dt} \Big|_{t=0}, \\ \nabla_{F_x} J &= R(t), & \nabla_{F_y} J &= S(t) \end{aligned} \quad (5)$$

设 $R = (R_1, R_2, R_3, R_4) = (u_0, v_0 F_x(t), F_y(t))$, 在各参变量的泛函梯度求出之后, 选择合

适的下降算法, 对各参变量进行迭代:

$$R_j^{i+1} = F_j^i - \nabla_{R_j} J|_{R^*} \cdot \rho_j^{i+1} \quad (6)$$

可以获得最优的参数值^[8]。这里当 $i=0$ 时代表初始猜测值; ρ_j^{i+1} , ($j=1, 2, 3, 4$)为第 i 次迭代步长, 其具体大小由下降算法决定。总体来说, 应用变分同化方法对台风路径的预报可以分为以下五步。

(1) 给出待反演量 $u_0, v_0, F_x(t), F_y(t)$ 的初始猜测值。

(2) 利用 $u_0, v_0, F_x(t), F_y(t)$ 正向积分(1), 得到 $x(t), y(t), u(t), v(t), F_x(t), F_y(t)$, 并存储。

(3) 由得到的 $x(t), y(t), u(t), v(t)$ 及 X_{obs}, Y_{obs} 反向积分, (4)式得到伴随变量 $P(t), Q(t), R(t), S(t)$ 。

(4) 由(5)得目标泛函关于 $u_0, v_0, F_x(t), F_y(t)$ 的梯度, 由(3)计算目标泛函。

(5) 由(6)式计算新的 $u_0, v_0, F_x(t), F_y(t)$, 如果满足条件(如目标泛函达到一定的精度, 搜索步数达到给定值等)中止程序, 否则转到第2步, 用新的 $u_0, v_0, F_x(t), F_y(t)$ 进行下一轮迭代。

3 数值试验

本部分选择有代表意义的四次不同路径特征的台风进行研究, 资料选择为三小时一次的台风定位资料, 通过变分同化方法反演出台风所受的合力及台风每小时的位置。一方面是检验方法的可行性, 检验正则化参数及最优控制参数的不同组合对同化结果的影响; 另一方面对不同类型台风的合力演化特征进行分析, 为预报提供依据, 其中下降算法采用拟牛顿算法程序包 M1qn3^[9]。

表 1 四次台风的基本特征

台风编号	起始时间	中止时间	起始经纬度	中止经纬度	路径特征
9804	08-25-14:00	09-07-14:00	24.1N、132.9E	48.1N、166.0E	蛇行
9806	09-16-20:00	09-20-12:00	21.2N、132.8E	29.5N、12.9E	东北转西行
9807	09-18-14:00	09-23-2:00	16.1N、118.8E	41.8N、143.5E	东北行
0004	07-06-08:00	07-11-8:00	19.6N、119.9E	38.3N、123.7E	中转向

3.1 不同的正则化参数与最优控制参数对同化反演结果的影响

以 9804 号台风为例来说明不同参数的组合对同化结果的影响, 分别取参数组合 (a) $\gamma_1=0, \gamma_2=0, \delta=0$, (b) $\gamma_1=1e-3, \gamma_2=1e-3, \delta=3dt$, 其中 dt 为积分时间步长, (a)组相当于没有进行正则化以及未加最优控制的情形。对比结果如图 1~2。可见不同的参数组合所得到的外力反演结果以及由此积分得到的路径数值模拟值、目标泛函的下降速度以及数值模拟精度都不相同, 其中(b)组合的反演参数的路径数值模拟精度要高于(a)组合, 目标泛函的所能达到的最小值也是(b)组合优于(a)组合, 同时目标泛函的下降规律也是(b)优于(a), 进一步用验证了反问题正则化方法和最优控制思想的在台风路径同化的数值模拟中起到相当重要的作用。另对 9806、9807、0004 三次台风的同化反演(见图 3~5)。所以, 接下来对其它三次台风的讨论主要以(b)组合为主。

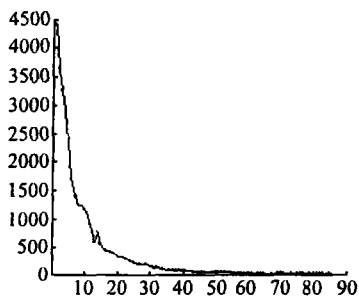
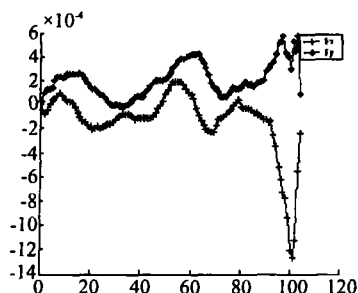
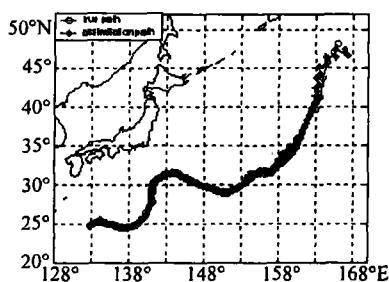


图 1 9804 号台风的“极小模”反演结果

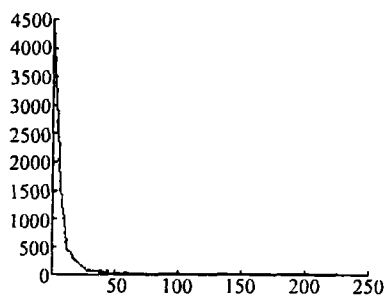
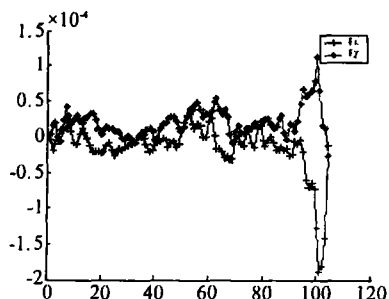
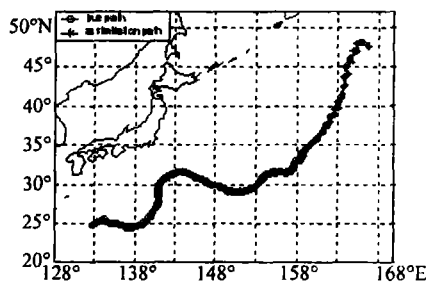


图 2 9804 台风的反演结果

3.2 反演结果的分析

四次台风过程的路径数值模拟误差结果如表 2, 9804 号台风正则化和最优控制参数 (b) 组合较 (a) 组合的数值模拟精度高, 其它三次台风的数值模拟过程也有类似的结果。进一步验证了方法的可行性。对于参数的演变过程, 数值试验表明, 在转折点附近 F_1 , F_2 呈现反位相变化, 而其它地方位相变化相同, 且转向点附近合力比较弱。但此结果尚需进一步验证, 在文中也未列出相应的图表。

表 2 四次台风过程的路径数值模拟误差 (单位: 度)

台风标号	经度均方误差	经度最大误差	纬度均方误差	纬度最大误差
9804 (a)	0.069	0.256	0.065	0.204
9804 (b)	0.054	0.222	0.051	0.184
9806	0.011	0.020	0.012	0.025
9807	0.020	0.064	0.021	0.039
0004	0.010	0.015	0.010	0.023

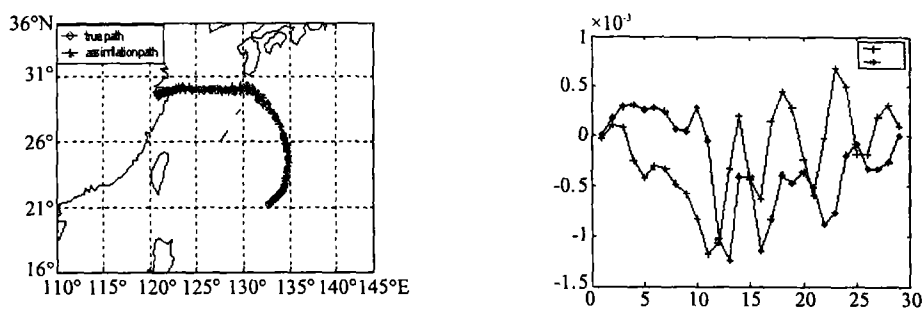


图3 9806号台风的反演结果

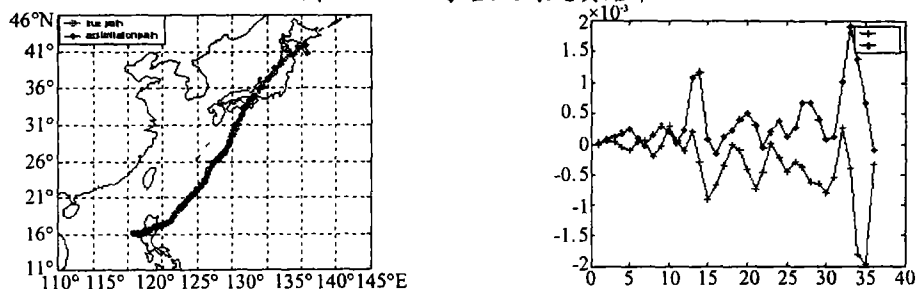


图4 9807号台风的反演结果

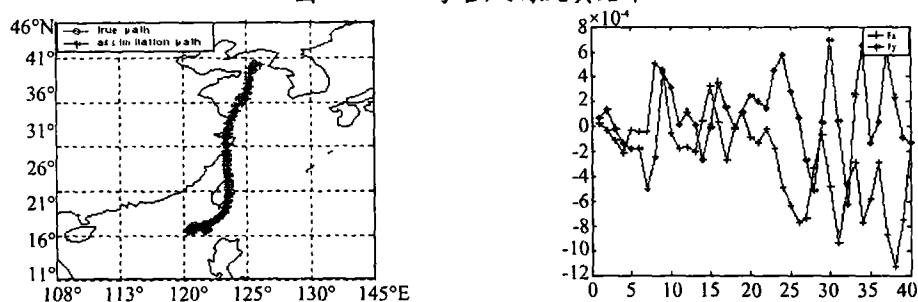


图5 0004号台风的反演结果

4 结论

本文利用变分同化结合反问题正则化思想和最优控制技巧反演出台风所受到的除科氏力以外的所有外力的合力和台风的初始速度, 并进一步数值模拟出台风路径。用两组不同的参数组合证明正则化和最优控制思想的效用, 通过四次不同路径特征的台风路径数值模拟, 验证了该方法的精度与可行性。且该方法具有模式简单、需要资料少、数值模拟精度高等优点。为台风路径预报提供了新的思路。

我们目前只是对路径的数值模拟进行了研究, 并未涉及到路径的预报问题。如何对台风的合力进行预报, 此问题涉及到参数预报的问题, 一般的外推法很难达到要求, 选择一种合理的参数预报方法是作者下一步将要进行的工作。另外, SD-90 统计预报模式过于简单, 未包含热力过程, 如何在模式中引入热力过程、以及如何将卫星资料等非常规资料引入到模式中, 都是需要进一步研究的问题, 也是非常重要非常有意义的研究。

参考文献:

- [1] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概述 [M]. 科学出版社, 1979.
- [2] 陈联寿, 孟智勇. 我国热带气旋研究十年进展 [J]. 大气科学, 2001, 25: 420~432.
- [3] 王 斌, 等. 台风运动的动力学研究进展 [J]. 大气科学, 1998, 22: 535~547.
- [4] 钮学新. 台风动力学, 1992.
- [5] Zou X, Q Xiao. Studies on the initialization and simulation of a mature hurricane using a variational bogus data assimilation scheme. J Atmos Sci, 2000, 67: 836~860.
- [6] 黄思训, 等. 结合反问题技巧对一维海温模式变分资料同化的理论分析及数值试验. 中国科学, 2003.
- [7] 黄思训, 伍荣生. 大气科学中的数学物理问题. 2001.
- [8] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论和方法 [M], 科学出版社, 1999.
- [9] GILBERT J C, C LEMARECHAL. Some numerical experiments with variable storage quasi-Newton algorithms [J]. Math. Programming, 1990, B45: 407~435.

SOME TRIALS OF TYPHOON TRACKS USING ASSIMILATION METHOD

CAI Qi-fa^{1,2}, HUANG Si-xun¹, XIANG Jie¹, LAN Wei-ren²

(1 Meteorological College, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101; 2 Head General Staff Hydrometeorological Center, Beijing, 100081)

Abstract: In this paper, the adjoint method is applied to the statistical-dynamic model (SD-90) of typhoon tracks prediction along with the regularization thinking and optimal control techniques. For 4 typical typhoons, the forces and the initial velocity can be retrieved well, and these typhoon tracks are accurately fitted for an appropriate regularization parameter and optimal control parameter.

Keywords: typhoon tracks; variational assimilation; regularization methods; optimal control