

Sensitivity Analysis of Typhoon Intensity to Initial Value and Terrain with Adjoint Model

Xiying Liu

College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China

Email: liuxynj@gmail.com

Abstract

After numerical simulation experiment of typhoon 0601 (the Typhoon Pearl) has been carried out with a barotropic primitive model, its adjoint model was developed and employed to study the sensitivity of landing typhoon intensity to the initial value and terrain. It's shown that the intensity of landing typhoon center is influenced by the intensity of typhoon center and its peripheral circulation in the initial value; the higher the terrain of landing area and Taiwan Island, the weaker the intensity of the landing typhoon center, but it may not be the case in other area influenced by the landing typhoon circulation.

Keywords: Typhoon; Initial Value; Terrain; Adjoint Model

台风强度对初值和地形敏感性的伴随方法分析^{*}

刘喜迎

解放军理工大学 气象海洋学院, 江苏 南京 211101

摘要: 本文在利用正压原始方程模式对 0601 号台风“珍珠”个例开展数值模拟试验的基础上, 利用其伴随模式研究了登陆台风强度对初值和地形的敏感性。结果表明, 登陆台风中心强度受初值中台风中心强度及台风中心外围环流影响, 登陆区域及台湾岛地形高度越高则登陆台风中心强度越弱, 但登陆台风涡旋影响区域其它地区的地形可有与此不同的作用。

关键词: 台风; 初值; 地形; 敏感性; 伴随模式

引言

我国是世界上台风登陆最多的国家之一, 台风所经之处常带来严重灾害, 台风强度及路径研究是气象学领域的重要课题。台风运动由外部强迫、内部过程及其相互作用共同作用。除内部动力学过程外, 影响台风路径和强度的因子可分为两类。一是环境流场的引导作用; 一是外部强迫, 包括洋面加热、对流凝结潜热加热及地形强迫等。因而, 影响台风强度及移动的因子主要有: 大尺度环境、 β 效应、台风内部结构、不同尺度天气系统间的相互作用、中低纬度系统相互作用及地形作用等。在弱引导气流条件下, 地形效应是影响台风移动的重要因子。地形通过影响气流爬升、绕流、地表热力作用及波动性质而造成台风强度及路径的改变。

可利用资料分析^[1]、理论探讨^[2-3]及数值模拟^[4-5]方法研究地形(如台湾岛)对台风的影响。在数值模拟研究中一般采用增高、削减甚至去除地形方式^[6-7]研究台风对人为地形变化的响应。由于变动后的地形是虚假的, 所得结果只对定性探索地形影响具有帮助作用。而且, 所能研究的是变动处地形的影响, 如欲研究其它区域地形影响需重新设计数值试验。由于地形数据集间存在差异, 模式地形存在误差是不可避免的, 研究台风强度及路径对地形敏感性对加深认识影响台风预报质量因素具有重要意义。此类问题适宜用伴随模式研究。伴随模式是分析输出对输入敏感性的有力工具, 可应用于最优化问题、稳定性分析和参数估计

^{*}基金资助: 受国家自然科学基金项目“基于伴随方法的 2007-2011 北极海冰变化原因研究”(41276190)支持资助。

等研究中^[8]。在过去 20 多年里, 伴随方法已经在大气科学、计算流体力学及工程设计优化等许多领域得到应用^[9-10]。利用伴随方法, 可在一次数值试验中得到台风强度对模式初值及模拟范围内各处地形的敏感性, 而无需针对不同区域设计不同的试验。

正压大气原始方程组是在静力平衡条件下把大气流体视为有一自由面的均匀不可压缩流体所得到的简化结果。正压原始方程组虽然形式简单, 但解中包含非线性效应以及与斜压原始方程组解中相似的波动结构, 因而在地球物理流体力学研究以及数值算法的试验中得到广泛的应用^[11]。

本文将利用正压大气原始方程模式(正演数值模式)的伴随模式开展台风强度对初值和地形敏感性研究。文章第 2 部分给出正压大气原始方程模式及其伴随模式, 第 3 部分给出数值试验及结果, 最后部分(第 4 部分)为论文总结和结论。

1 正演数值模式及其伴随模式

1.1 正压原始方程模式

在正形地图投影坐标系下, 正压原始方程组形式为^[12]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + m(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) - f^* v + mg \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + m(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}) + f^* u + mg \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + m^2[u \frac{\partial}{\partial x}(\frac{h-h_s}{m}) + v \frac{\partial}{\partial y}(\frac{h-h_s}{m}) + \frac{h-h_s}{m}(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y})] = 0 \quad (3)$$

其中, m 为地图投影放大系数, u 和 v 为水平速度, g 为重力加速度, $f^* = f + m^2[v \frac{\partial}{\partial x}(\frac{1}{m}) - u \frac{\partial}{\partial y}(\frac{1}{m})]$, f 为科氏参数, h 为位势高度, h_s 地形高度。

采用标准波型法^[12]对(1)–(3)构成的方程组(取 $m=1$)进行线性化分析可知, 方程组可描写缓慢移动的 Rossby 波、地形 Rossby 波和快速移动的重力外波

在 Arakawa A 网格^[12]条件下采用有限差分法对方程组(1)–(3)进行空间数值离散, 非线性平流项采用半动量格式(满足一次和二次守恒格式), 其余项采用中央差分格式, 忽略地图投影放大系数对空间微分项, 得半离散方程组为

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -m(\overline{u^x u_x^x} + \overline{v^y u_y^y}) + fv - mgh_x^x \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -m(\overline{u^x v_x^x} + \overline{v^y v_y^y}) - fu - mgh_y^y \quad (5)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -m(\overline{u^x (h-h_s)_x^x} + \overline{v^y (h-h_s)_y^y}) - m(h-h_s)(\overline{u_x^x} + \overline{v_y^y}) \quad (6)$$

这里, 算符 $()_x$ 和 $()_y$ 为格距中央差, $\overline{()^x}$ 和 $\overline{()^y}$ 为格距平均。时间积分采用欧拉后差格式(也称为松野格式)与中央差格式(也称为蛙跃格式)交替进行方式。在一次积分循环过程中, 先用欧拉后差格式积分 1 小时, 再用中央差格式积分 5 小时。使用中央差格式积分时采用三步法起步。为简单起见, 积分过程中侧边界保持不变。风场初值为地转风。

1.2 正压原始方程模式的伴随模式

为研究登陆台风强度对初值和地形的敏感性, 在正压原始方程模式中构造代价函数:

$$JC = P_c \quad (7)$$

其中, P_c 为台风(或登陆减弱后的热带气旋)中心气压。代价函数 JC 对初值和地形的梯度分别反映了台风强度对初值和地形的敏感性。

伴随方法是求取代价函数梯度的有效方法。获得伴随方法有两种，分别称为连续伴随和离散伴随。在地球科学领域，往往前期研究中已发展出了数值模式（离散形式方程的计算机程序实现），所以一般采用后一种方法。由正压原始方程模式得出的离散伴随称为正压原始方程模式的伴随模式。编写离散伴随程序可采用手工或自动方法，利用自动微分工具可由正演数值模式程序自动生成伴随模式程序。本文利用自动微分工具 TAPENADE (<http://www-tapenade.inria.fr:8080/tapenade/index.jsp>) 生成伴随模式程序。

通过反向积分伴随模式即可求出代价函数对初值和地形的梯度。

2 数值试验及结果

针对 0601 号台风“珍珠”个例开展数值模拟试验。台风“珍珠”是 2006 年第一次登陆我国的台风。其形成于 5 月 10 日，在 15 日发展为强台风（根据海平面气压来判断）。随后转为向偏北的方向移动，17 日午后强度开始减弱，18 日凌晨在我国广东登陆，之后逐渐减弱为热带低压。台风涡旋在对流层的各个高度层次上均有体现。根据 MACC (Monitoring Atmospheric Composition and Climate) 数据集 (http://apps.ecmwf.int/datasets/data/macc_reanalysis/) 结果，在 500 百帕等压面上，5 月 17 日 20 时涡旋中心处于北纬 22.1 度、东经 116.6 度位置，12 小时后涡旋中心移至北纬 24.8 度、东经 117.5 度处，强度明显减弱（见图 1）。

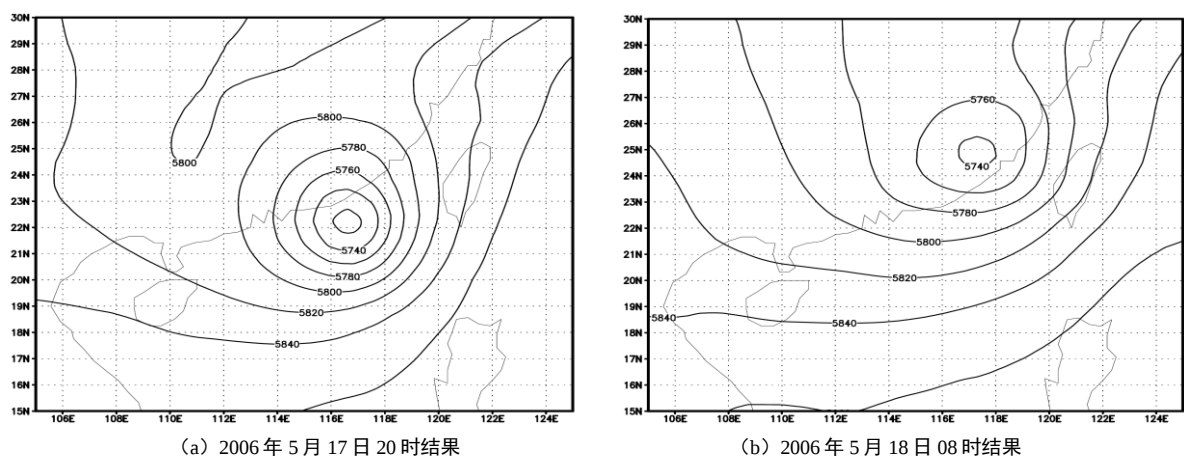


图 1 500 百帕等压面位势高度分布，等值线间隔为 20 gpm

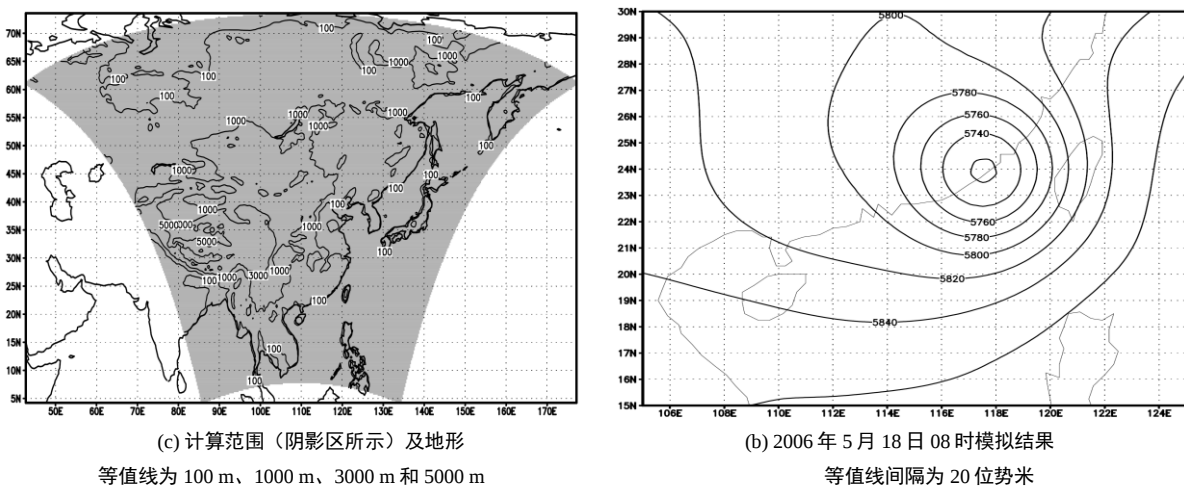


图 2 模式计算范围及模拟结果

以 5 月 17 日 20 时 MACC 数据集 500 百帕等压面资料为初值，利用正演模式及其伴随模式进行了模拟试验。试验中，网格距取为 50 km，计算区域为 Lambert 地图投影平面上以北纬 40 度、东经 110 度为中心的 131 x 151 网格范围（见图 2a）。12 小时积分结果如图 2b 所示（这里只给出了台风中心附近区域结果），

与 MACC 数据集结果相比（见图 1b），模拟的涡旋偏强，移动速度略偏慢。

积分伴随模式 12 小时，得到代价函数（7）对初值和地形的梯度（如图 3 所示）。由图 3a 可知，2006 年 5 月 18 日 08 时登陆台风中心位势高度对 2006 年 5 月 17 日 20 时台风中心位势高度的梯度为正值，而对 2006 年 5 月 17 日 20 时台风中心西南和东北方向的外围区域位势高度的梯度为负值。这表明，数值模拟初值中台风强度越强则登陆台风中心强度越强；初值中台风中心外围不同方位环流对登陆台风中心强度影响是不一样的，西南和东北方位环流越强则登陆台风中心强度越强，而台风中心北部和南部环流越强则登陆台风中心强度越弱。由图 3b 可知，2006 年 5 月 18 日 08 时登陆台风中心位势高度对登陆区域及台湾岛地形高度的梯度为正值，对 113 E-115 E 陆地区域地形高度的梯度为负值。这表明，登陆区域及台湾岛地形高度越高则登陆台风中心强度越弱，但登陆台风涡旋影响区域其它地区的地形可有与此不同的作用。

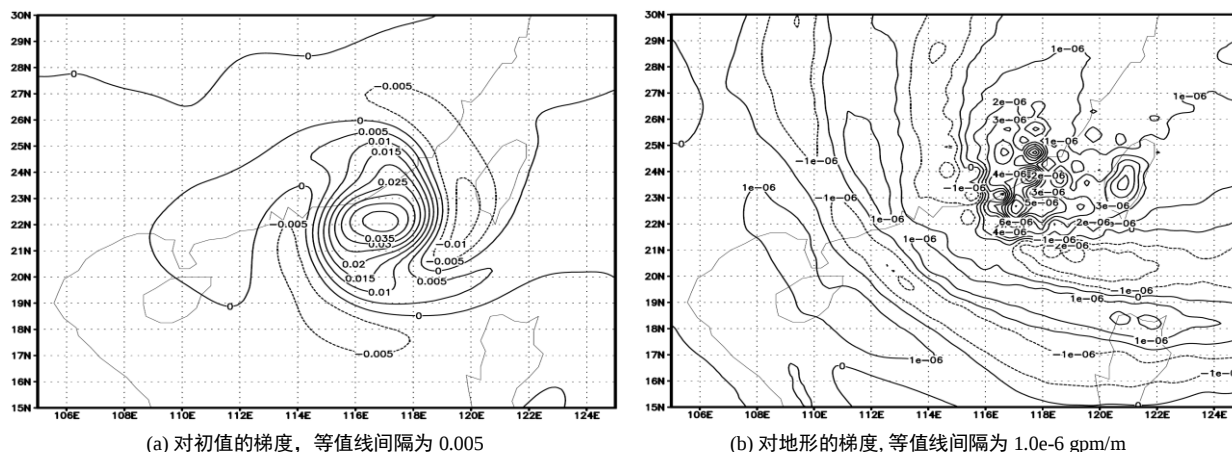


图 3 代价函数对初值和地形的梯度

3 小结与结论

登陆台风强度变化问题是气象学领域的重要课题，本文在这方面进行了探讨。论文首先利用正压原始方程模式对 0601 号台风“珍珠”个例开展数值模拟试验，模拟了 5 月 17 日 20 时至 2006 年 5 月 18 日 08 时时段内台风登陆前后的强度变化。在此基础上，利用自动微分工具生成了正压原始方程模式的伴随模式，利用伴随模式求出登陆后台风中心位势高度对模式初值及地形高度的梯度信息，探讨了台风强度对初值和地形的敏感性。结果表明：数值模拟初值中台风强度越强则登陆台风中心强度越强；初值中台风中心外围不同方位环流对登陆台风中心强度影响是不一样的，西南和东北方位环流越强则登陆台风中心强度越强，而台风中心北部和南部环流越强则登陆台风中心强度越弱；登陆区域及台湾岛地形高度越高则登陆台风中心强度越弱，但登陆台风涡旋影响区域其它地区的地形可有与此不同的作用。

REFERENCES

- [1] Pan, C. J., K. Krishna Reddy, H. C. Lai, S. S. Yang, and C. J. Wong. “Wind profiler observations on orographic effects of typhoon wind structure modification over Taiwan(120.38E,22.6 N).” *Ann. Geophys.* **28**(2010): 141-147
- [2] Qian Weihong. “The topographical friction effect on movements of typhoon.” *Marine Forecasts.***10**(1993):1-7
- [3] Luo Zhexian and Chen Lianshou. “Effect of the Orography of Taiwan Island on Typhoon Tracks.” *Chinese Journal of Atmospheric Sciences.* **19**(1995):701-706
- [4] Yu Zifeng, Yu Hui and Gao Shouting. “Terrain impact on the precipitation of landfalling typhoon TALI.” *Journal of Tropical Meteorology*, **16**(2010):115-124
- [5] Huang, Y.-S., C.-C. Wu, and Y. Wang. “The influence of the island topography on typhoon track deflection.” *Mon. Wea. Rev.* **139**(2011):1708-1727
- [6] Yang, M.-J., D.-L. Zhang and H.-L. Huang. “A modeling study of Typhoon Nari (2001) at landfall. Part I: Topographic effects.” *J.*

Atmos. Sci. **65**(2008):3095-3115

- [7] Jian, G.-J., and C.-C. Wu. "A numerical study of the track deflection of Super typhoon Haitang (2005) prior to its landfall in Taiwan." *Mon. Wea. Rev.* **136**(2008):598-615
- [8] R. M. Errico. "What is an adjoint model?" *Bulletin of the American Meteorological Society.* **78**(1997):2577-2591
- [9] M.B. Giles and N.A. Pierce. "An introduction to the adjoint approach to design. Flow, Turbulence and Control." **65**(2000):393-415
- [10] C. Homescu and I. M. Navon. "Numerical and theoretical considerations for sensitivity calculation of discontinuous flow." *Systems and Control Letters on Optimization and Control of Distributed Systems.* **48**(2003):253-260
- [11] Liu Xiyang. "Numerical simulation of typhoon movement with a regional spectral element barotropic atmospheric model." *Chinese Journal of Computational Physics.* **28**(2011):35-40
- [12] Zhang Yuling, Wu Huiding and Wang Xiaolin eds. *Numerical Weather Prediction*. Beijing: Science Press, 1986

【作者简介】

刘喜迎（1970-），男，汉族，博士，解放军理工大学气象海洋学院副教授，研究方向为大气动力学与数值模拟。

Email: liuxynj@gmail.com