

非常定自适应网格模式在台风路径 数值预报中的应用

刘 卓 曾庆存

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100080)

提 要

本文将作者在前文中介绍的非常定自适应网格模式用于台风路径的数值预报。由于自适应网格在台风中心附近安排了较密的网格, 有效地提高了网格的分辨率, 使得台风环流的结构在预报 48 小时以后仍能保持, 其预报的路径与实况相比令人鼓舞。

关键词: 局部区域; 加密网格; 网格非常定; 台风路径。

一、引 言

在台风路径的数值预报中遇到的一个问题就是台风环流中心附近的风速及气压梯度都很大, 因而要求有比较高的网格分辨率, 才不至于产生计算的紊乱。而台风环流本身是镶嵌在大尺度环境场范围内的中小尺度环流, 其路径受环境场的影响很大。因此, 数值预报台风路径就必须预报大范围环境场的变化, 预报的区域可比台风环流的尺度大得多。在大范围的数值预报中, 提高网格的分辨率意味着要缩小网格距, 均匀地缩小网格距将使预报区域内的网格点数量大量地增加, 从而使计算工作量成倍增长。在现有计算机条件的限制下, 应用细网格系统作大范围内的数值预报是不经济的; 如果不提高分辨率, 则台风环流难以在这样的网格系统中反映出来, 在数值预报一段时间后台风环流的强度就会大为减弱, 甚至难以确定其中心位置。因此, 网格的分辨率在台风路径的数值预报中占有很重要的地位。

目前, 为提高台风环流的分辨率, 采用得比较多的是粗细网格嵌套的套网格技术, 即在台风中心附近区域采用加密的细网格; 而在此区域外, 采用粗网格^[1-5]。它有效地提高了台风中心附近的网格分辨率, 并取得了较好的效果。但是, 在套网格模式的预报中, 粗细网格之间的内边界, 特别是流出处常易产生波的伪反射现象, 造成计算的不稳定。虽然 Davies 等提出过一些解决的办法, 但结果还不能令人完全满意。

为避免套网格中的内边界伪反射问题, 本文采用自适应网格, 在台风中心附近逐步加密网格。这样既可提高台风环流的网格分辨率, 又可避免内边界的伪反射问题。作者在文献[6]中介绍了自适应网格的原理及生成方法, 该网格具有以下几个特点:

(1) 与真实的计算区域边界相适应, 即边界相重合。这样可减小由于网格点与区

域边界不吻合所造成的边界误差。

(2) 与物理量的空间分布相适应,即可根据物理量的特性调节网格点的疏密程度。这样可以提高局部区域网格的分辨率,以反映出尺度比较小的系统。同时,在物理量变化剧烈的地方自动加密网格,而在物理量变化较缓的地方网格相对粗一些。其目的在于:在不增加或少量增加计算量的情况下,提高计算精度以克服不稳定性。

(3) 尽可能地保持网格曲线的正交性和光滑性。目的在于减小解在网格点上的截断误差。

(4) 网格随时间变的灵活性。在非常定解问题中,系统将随时间而变,物理量梯度大的地方随时间的不同其空间位置也不同,这就要求有一个控制网格密度的函数,可灵活地调节网格点的疏密程度。

(5) 有限差分法可直接在参数平面上的等距均匀的矩形网格上进行,而不用考虑边界的形状以及物理量的空间分布。

本文将文献[7]中介绍的网格非常定的自适应网格模式应用于台风路径的数值预报。结果表明,该模式是计算稳定的。预报的路径与实况相比是十分令人鼓舞的。

二、台风路径预报方案

本文的台风路径数值预报的区域取为:北起 50°N ,南至赤道,西从 90°E ,东到 165°E 。

台风的初始资料(500 hPa 等压面的风场、高度场)取自两个来源,1979 年的风场和高度场取自 FGGENIb,其网格分辨率为 $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$,1980 年以后的风场及高度场取自 ECMWF 的资料,其网格分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,初始时刻台风中心的位置以及台风中心海平面气压 P_0 均取自《台风年鉴》。

本文采用 Spline 插值公式将读出来的风场及高度场插值到自适应网格上去。

台风半径 R 根据初始时刻 500 hPa 高度场的台风中心到台风最外围一圈闭合等高线的平均距离来确定。

500 hPa 台风中心的高度 Z_0 。由海平面气压来确定^[8]:

$$Z_0 = \begin{cases} (-19.5 + 0.6000P_0) \times 10, & 1010 - 985 \text{ hPa}, \\ (-127.4 + 0.7095P_0) \times 10, & 985 - 860 \text{ hPa}. \end{cases} \quad (1)$$

首先,将输入的初始时刻 500 hPa 等压面的高度场及风场作为台风路径预报的环境场。由于环境场的尺度比较大,台风环流在这样的背景场中几乎不能明显地反映出来。因此,台风环流的嵌入是必不可少的。嵌入的方法很多,本文采用类似于上海台风所的方法^[2,3]:假设台风环流具有轴对称结构,根据初始时刻台风中心的位置以及台风中心的强度和影响半径,来确定台风环流的高度场:

$$Z_{\text{台}}(r) = \frac{Z_0 - Z(0)}{\exp(\alpha r / R)^2}, \quad (2a)$$

台风环流的风场取梯度风:

$$V_{\text{台}} = -\frac{rf}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + r \frac{\partial \varphi(r)}{\partial r}}, \quad \varphi(r) = g \cdot Z_{\text{台}}(r), \quad (2b)$$

其中 Z_0 为实际台风中心 500 hPa 高度, $Z(0)$ 为输入的 500 hPa 环境场台风中心高度, R 为台风的平均影响半径, r 为某格点到台风中心的距离, f 为科里奥利力参数, g 为重力加速度, α 为一参数, 与台风环流的结构有关, 如何选取 α 要视具体的台风而定。

将(2)式确定的台风环流直接嵌入到台风的环境场中去, 作为台风路径预报的初始场:

$$\begin{cases} Z_{\text{初}}(i,j) = Z_{\text{环}}(i,j) + Z_{\text{台}}(i,j), \\ u_{\text{初}}(i,j) = u_{\text{环}}(i,j) - V_{\text{台}}(i,j) \frac{y - y_c}{r}, \\ v_{\text{初}}(i,j) = v_{\text{环}}(i,j) + V_{\text{台}}(i,j) \frac{x - x_c}{r} \end{cases} \quad (3)$$

式中的 x_c, y_c 为台风中心位置。

台风环流结构参数 α 的选取十分重要, 从(2)式可以看出, 当 α 过小时, 台风的漏斗形状过宽, 最大风速区离台风中心的距离也比较远, 这与实际台风环流的结构不相符; 反之, 如果 α 过大, 则台风的漏斗形状过窄, 因而与周围的环境场不协调。对于不同的台风, α 的最佳选择也是不同的。因此, 本文选择 α 的原则是使得嵌入的台风环流与环境场比较协调。在一般情况下, 本文取 $\alpha = 3.0$ 。为了使嵌入的台风环流与周围环境场更好地协调起来, 可对初始场在 $R - \bar{d} \leq r \leq 2R + \bar{d}$ ($\bar{d}$ 为平均网格距) 的范围内, 用 5 点平滑进行若干次光滑化处理。

在确定了台风中心的位置以后, 就可以确定自适应网格, 确定网格疏密分布的权函数 $W(x,y,t)$ 文献[7]给出。

由文献[7]可知 $W(x,y,t)$ 在台风中心附近取值最大, 因而网格最密, 而在远离台风中心的区域 $W(x,y,t)$ 逐渐减小, 因而网格稀疏一些。

本文共取网格点数 65×49 , 因此平均网格距 $\bar{d} = (165 - 90) / 64 \times 111 \text{ (km)} \approx 130 \text{ (km)}$ 。自适应网格最密处的网格距为 70 km 左右, 最稀处为 145 km 左右。台风中心位置由上一时刻高度场最低点及周围 24 个点的高度来确定, 利用最小二乘法求其最低点, 即为台风中心位置。

在确定自适应网格以及初值以后, 就可用自适应网格模式数值预报台风路径。模式采用 Mercator 投影坐标下的方程[7], 时间积分方案采用蛙跳格式 (Leap-frog), 时间步长 $\Delta t = 2 \text{ min}$ 。具体步骤如下:

步骤一: 输入初始时刻 500 hPa 的高度场及风场, 确定台风中心位置 $(x_c(0), y_c(0))$ 和影响半径 R 以及 500 hPa 台风中心的实际高度 Z_0 。

步骤二: 由 $(x_c(0), y_c(0))$ 确定权函数 $W(x,y,0)$, 根据文献[6]提出的方法数值生成自适应网格, 通过 Spline 插值将输入的高度场及风场插值到自适应网格上去。

步骤三: 根据台风中心位置, 影响半径及台风中心的高度, 由(2)式求出台风环流, 将其嵌入初始场, 并进行协调性处理。

另一次预报的起始时刻是 8 月 24 日 8 时。图 4 给出了预报 72 小时的台风路径。这一次台风路径的转向报得比较好, 后 24 小时的预报路径与实况基本平行。但预报的转向点仍不够理想, 使得在预报的前 24 小时内台风先登陆再转向东北方向, 而实际台风未登陆就转向了。

图 5 给出了 8209 号台风 72 小时的预报结果。从图中可以看出, 前 48 小时的预报路径与实况基本一致, 第三天的预报路径有些波动, 这可能是受固定边界的影响。

图 6 给出了 8213 号台风 72 小时的

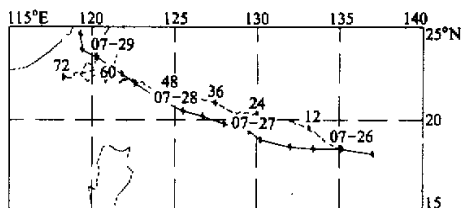


图 5 8209 号台风 72 小时路径预报结果

限, 仅以 7910 号台风为例 (初始时刻为 8 月 24 日 8 时)。对其他个例的分析对比, 结论大体相同。从预报的路径来看 (见图 4 与图 7), 24 小时的预报路径相差不大 (自适应网格结果稍好), 但自适应网格预报的路径比均匀网格的光滑, 这是因为其台风中心附近网格分辨率高, 因而判断中心位置较准; 预报 36 小时以后, 均匀网格预报的台风中心位置跳动很大, 而自适应网格预报 72 小时后, 台风中心的位置仍连续变化, 这说明均匀网格在预报 36 小时后已无法判断台风中心的位置。这一点从高度场和径向风速的剖面图中可以更清楚地看出 (图略): 自适应网格在预报 72 小时后, 台风环流的“漏斗”形状以

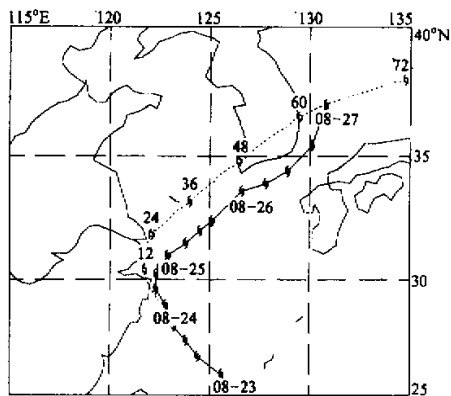


图 4 7910 号台风 72 小时路径预报结果
初始时刻: 24 日 8 时

预报结果。从图中可以看出: 前 48 小时的预报路径与实况比较吻合, 24 小时的移速稍快, 第三天的预报路径转向西北, 与实况不符合, 这可能与实际台风环流的不对称有关。

为了说明自适应网格对台风路径预报的有效性, 本文还与网格点数相同的均匀网格的结果进行了比较。因篇幅所

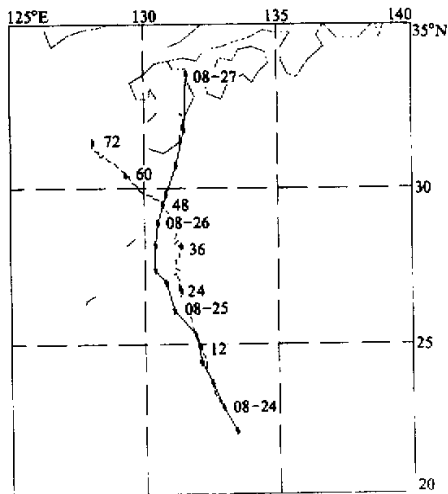


图 6 8213 号台风 72 小时路径预报结果

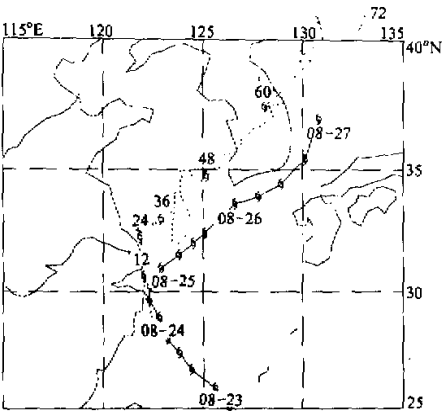


图 7 7910 号台风路径均匀网格预报结果
初始时刻: 24 日 8 时

及风场的结构仍能保持, 而均匀网格的结果在 36 小时后, 其“漏斗”形状已接近填平, 风速也大大减弱, 以至无法判断台风中心位置, 这正是由于网格分辨率低造成的后果; 从预报的风场来看(图略): 均匀网格的结果在台风中心经过的路径周围通常出现流场的紊乱, 造成对环境场的歪曲, 我认为这是由于网格分辨率不高造成的计算紊乱, 反过来它将影响台风路径的预报, 而自适应网格 72 小时的结果仍无此现象产生。综上所述, 我们认为自适应网格与相同点数的均匀网格相比有以下优越性: ①预报时效长, 可预报 72 小时以上; ②预报的路径更准确; ③台风环流的结构(强度)在预报 72 小时后仍可保持; ④未造成对环境场的歪曲。

四、小 结

本文给出了非常定的自适应网格模式在台风路径预报中的应用。从总的趋势来看, 其结果是令人鼓舞的, 预报的台风路径与实况比较一致, 特别是方向角的偏差比较小, 48 小的平均偏差只有 13°; 预报的 48 小时台风中心的移速较实况偏快, 距离的平均偏差为 161 km, 详情见表 1。

表 1 台风中心的移速

台风编号	初始时刻 (格林尼治)	12 小时偏差		24 小时偏差		36 小时偏差		48 小时偏差		60 小时偏差		72 小时偏差	
		距离 (km)	方向角 (°)	距离 (km)	方向角 (°)	距离 (km)	方向角 (°)	距离 (km)	方向角 (°)	距离 (km)	方向角 (°)	距离 (km)	方向角 (°)
7908	07-30 00Z	78.6	25.54	88.7	1.22	127.3	0.39	202.1	1.04	228.6	1.20	222.7	2.93
7909	08-14 00Z	92.0	41.07	77.0	4.48	66.7	21.00	39.1	4.55	47.4	5.04	149.3	13.85
7910	08-23 00Z	13.5	2.90	101.6	6.50	179.2	3.14	319.0	26.48	453.3	36.77	508.7	1.51
7910	08-24 00Z	65.9	16.37	129.4	19.10	168.1	8.68	134.7	8.34	240.0	12.37	363.4	40.20
8209	07-26 00Z	167.2	29.55	106.4	7.06	115.2	1.03	72.2	7.76	147.2	17.4	277.3	25.82
8213	08-24 00Z	46.1	4.50	88.8	15.02	107.4	10.68	198.9	30.18	179.3	64.17	433.0	57.29
平均偏差		77.2	16.23	98.6	8.90	127.3	7.48	161.0	13.6	216.0	22.82	325.7	23.60

台风路径的数值预报是一件非常困难的事情, 它有许多不确定的因素。例如, 初始时刻台风中心位置及其强度的确定就是一个很困难的事情。目前确定的方法有飞机探测, 雷达定位以及卫星云图定位等, 但由于种种主观和客观条件的限制, 无论哪一种方法, 都会有一些误差, 有时误差还比较大, 而数值预报的方法受初始定位的影响往往很

大。此外,初始场的不确定性也对台风的预报路径有影响。由于输入的 500 hPa 的环境场是由客观分析或其他一些方法得出,其网格点分辨率比较低,还需插值到更细的网格上,因此会带来一些误差。台风路径主要受大尺度引导气流的牵引,如果环境场的误差很大,其预报结果可想而知。目前本文采用的台风中心位置是根据《台风年鉴》得到的,环境场的资料得自 FGGEIIIb 或 ECMWF。由环境场所求出的台风中心位置往往与《台风年鉴》所得到的中心位置不一样,有时相差还很远,这样叠加上去的台风环流与环境场是很难协调的。

台风环流的结构本身对台风路径的预报也有影响。目前本文采用的是圆柱对称的台风模型,而实际台风环流往往是不对称的。从本文计算的个例来看,不对称的台风环流的路径预报往往效果要差一些。此外,台风环流结构参数 α 的选取带有人为性,取得不好,其结果也会相差很大。固定边界也是造成误差的一个来源,虽然取海绵边界条件可吸收一部分短波误差,但长时间的积分势必会有短波传入区域内部,从而影响台风路径。

另外,本文采用的是正压原始方程的模式,未考虑积云对流以及降水,是对问题的简化,因此它不能报出台风的发生、发展以及衰亡。当大尺度天气系统的斜压性比较强时,天气系统的变化不是正压模式所能预报的,则其台风路径肯定准确不了。

本文的目的是检验自适应网格模式预报的可行性。因此,上面提到的一些困难已超出了所考虑问题的研究范围。今后的发展方向是建立斜压的能量守恒的自适应网格模式,并考虑积云对流和降水,使自适应网格模式更趋完善。

参 考 文 献

- [1] 王达文、林致淳, 1983, 移动型套网格台风路径预报模式的初步试验, 气象学报, 41, No.1, 115—120.
- [2] 朱永捷、徐一鸣、胡富泉、丁荣富、倪允琪, 1982, 台风路径套网格预报模式的初步试验, 气象学报, 40, No.3, 257—270.
- [3] 郭宗汉、刘孝麟、朱云桂、王彰贵, 1983, 一种台风路径数值预报方法的试验, 台风会议文集, 上海科学技术出版社, 120—125.
- [4] 郭宗汉、范爱芬、刘孝麟、张 冰, 1985, 用原始方程套网格模式预报浙江台风路径的效果检验, 台风会议文集, 气象出版社, 339—403.
- [5] 朱永捷、殷鹤宝, 1985, 五层原始方程套网格台风路径预报方案, 台风会议文集, 气象出版社, 253—262.
- [6] 刘 卓、曾庆存, 1994, 自适应网格在大气海洋问题中的初步应用, 大气科学, 18, No.6, 641—648.
- [7] 刘 卓、曾庆存, 1995, 完全保持能量守恒的非常定自适应网格模式, 大气科学, 19, No.2, 129—139.
- [8] 王志烈、费 亮, 1987, 台风预报手册, 气象出版社, 356 页.
- [9] 陈联寿、丁一汇, 1979, 西太平洋台风概论, 科学出版社.
- [10] 郭永海, 1981, 一个改进的台风路径业务预报模式, 台风会议文集, 上海科学技术出版社, 289—292.
- [11] 王达文, 1981, 北上台风异常路径数值试验的初步探讨, 台风会议文集, 上海科学技术出版社, 317—320.
- [12] 丁荣富、朱永捷, 1983, 台风路径套网格模式的变更方案及其在一九八二年台风业务试验期的应用, 台风会议文集, 上海科学技术出版社, 126—128.

The Application of Time-dependent Adaptive Mesh Model in the Typhoon Track Prediction

Liu Zhuo and Zeng Qingcun

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

The time-dependent adaptive mesh model which introduced in the author's previous paper was applied to the numerical forecasting of typhoon track in this paper. Because the grid points of adaptive mesh are concentrated near typhoon center, which improves the resolution of grid points efficiently, the construction of typhoon circulation is still maintained after 48 hours prediction. The prediction results are exciting compared with the observed one.

Key words: local region; concentration grid points; time-dependent; typhoon track.

书 讯

《气候物理学》将出版

气象出版社今年 6 月份将出版《气候物理学》(*Physics of Climate*)一书,该书由在里斯本大学和普林斯顿大学任教的 J. P. Peixoto 和 A. H. Oort 合著,中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室的吴国雄、刘辉等合译。该书作者把他们多年研究和教学的成果与世界气候物理学研究的最新进展相结合,全面、系统地论述了气候物理学的基本问题。这部著作在世界气象学界得到广泛的关注和好评。

《气候物理学》全书约 74 万字,第一部分(2—6 章)介绍支配气候系统各分量以及辐射过程的物理数学方程;第二部分(7—10 章)介绍气候系统中三个最活跃的分量(大气圈、水圈及冰雪圈)的主要特征及其相互作用;第三部分(11—15 章)从整个气候系统的角度分析角动量、水份及能量的循环和熵的收支,还用有效能量的观点讨论大气—海洋的热机效率;作者以对气候变化性的讨论和数值模拟(16—17 章)结束本书,颇具匠心地突出了气候学科已成为“可实验学科”的特色。

《气候物理学》适合广大气象科技工作者尤其是从事气候工作的人员阅读,也适合大气科学有关专业研究生学习,还可供与气候变化有关的海洋、地球物理、地理和生态环境等学科的科研人员和教师参考。

(林雨晨)