

台风过程研究中四维资料同化方法的探讨及应用

马 艳^{1,2}, 张庆华^{1,2}

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061)

关键词: 中尺度模式; 四维资料同化; 台风

中图分类号: P413

文献标识码: A

文章编号: 0253- 4193(2002) 03- 0128- 08

1 引言

与把任意分布的观测值通过空间和时间插值分析到网格点的方法相比较, 结合动力关系分析大气场问题的方法, 其优势十分明显. Charney 等^[1] 建议在一个能提供时间连续和动力耦合的模式预报方程中, 有机地结合现在和过去的资料. 后来这个概念被发展为众所周知的四维资料同化(FDDA). 起初, 四维资料同化主要应用于全球尺度, 现在, 无论是动力初始化还是作为一个分析或者研究工具, 四维资料同化都有效地应用中尺度模式上^[2,3].

大多传统的四维资料同化方法是直接用于一个显式动力模式, 而不是作为四维变分方法的一部分. 目前, 主要有两种方法在使用和研究当中. 第 1 种是对预报模式初始化的间断过程: 预报模式通常把 3~ 12 h 的预报结果作为客观分析的第一猜测场, 并在下一个预报循环中重复这个过程; 第 2 种四维资料同化方法是连续动力同化. 连续动力同化就是在控制模式过程中加入强迫函数, 使模式结果逐渐地逼近观测结果^[4,5]; 这些小的强迫项逐渐修正模式场, 数值模式也在每个时间步上能近似保持平衡. 在本文中我们使用连续四维同化的研究方法.

建立在 Newtonian 松弛基础上的四维资料同化方案所用的资料可以是任何类型的, 或分析到格点上, 或作为独立的观测值插入. 本文将通过两个台风过程, 研究四维资料同化方法在中尺度模式系统 MM5 中的应用, 确定对什么气象场的四维资料同化会对中尺度模式模拟的精度具有显著影响.

2 模式系统

应用 PSU/NCAR 中尺度模式系统(MM5), 它主要包括两个部分: 模式初始化和预报模

收稿日期: 2000- 02- 03; 修订日期: 2002- 01- 15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(49906002); 国家海洋局青年基金项目(99304).

作者简介: 马 艳(1970-), 女, 宁夏回族自治区陶乐县人, 副研究员, 博士, 从事海洋气象研究.

式.

2.1 模式初始化

插值分析全球分析场 $T_{63}(1.875^\circ \times 1.875^\circ)$ (对 9608 号台风个例) 和 $T_{106}(1.125^\circ \times 1.125^\circ)$ (对 9711 号台风个例) 到模式网格点上, 获得模式的初始和边界条件. 标准等压面的资料按照研究要求插值到非标准层上作为第一猜值场, 然后第一猜测场通过一系列相关的客观分析与标准探空资料和地面观测场结合. 最后, 所有的三维场被插值到 σ 垂直坐标上.

2.2 预报模式描述

三维、有限区域的基本模式方程采用地形追随 σ 坐标:

$$\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t}$$

式中, p 是气压; p_t 是模式层顶气压; p_s 是地面气压, $p^* = p_s - p_t$. 模式方程的具体表达式详见文献[6].

本文运用了高分辨率的边界层过程, 包括了地面热量通量, 水汽能量和动量通量. 地面温度用地面能量平衡方程预报, 海表温度在模式中保持不变, 地表系数(粗糙度、反射率等)在格点上是变化的, 定义为地表资料的函数. 所有的试验均在 61×61 网格区域上进行, 水平分辨率为 30 km, 时间步长为 60 s.

3 逼近技术

Newtonian 松弛方法通过在一个或多个预报方程中增加建立在两种状态之间差异基础上的人为倾向项, 使模式状态趋向观测状态. 模式分辨率即能逼近格点分析, 又能逼近在观测期间附近的个别观测值.

3.1 分析逼近

一个给定变量的分析逼近是在模式模拟和在每个格点上计算每个时间步上观测与分析之间的差. 变量 $\alpha(x, t)$ 的预报方程的一般形式为:

$$\frac{\partial p^* \alpha}{\partial t} = F(\alpha, x, t) + G_\alpha \cdot \omega_\alpha(x, t) \cdot p^* (\alpha_0 - \alpha) + G_p^* \cdot \omega_p^* \cdot \varepsilon_p^*(x) \cdot \alpha(\hat{p}_0 - p^*), \quad (1)$$

所有模式的物理强迫项(平流、科氏力等)都用 F 表示, 其中 α 是模式独立变量, x 为空间变量, t 是时间. 式(1)中第 2 和第 3 项分别是对 α 和 p^* 的逼近项. 逼近因子 G_α 和 G_p^* 决定于 F 项中所有其他模式过程相关项的振幅大小, 它的空间和时间变化很大一部分取决于四维权重函数 ω , 四维权重函数 $\omega = \omega_x \omega_y \omega_z \omega_t$, 取决于空间和时间权重. 分析质量因子 ε 由进行同化分析的资料的质量和分布决定, 大小在 0 到 1 之间变化, 同化资料质量越好, ε 的取值也就越大. α_0 是每个时刻 α 分析到格点上的观测估计值.

在选择逼近因子 G_α 时, 模式中最慢物理调整过程的时间尺度和逼近项是相似的, 并满足稳定性判据:

$$G_\alpha \leq \frac{1}{\Delta t},$$

对气象系统而言, G_α 的值在 10^{-4} 到 10^{-3} s^{-1} 之间变化; G_α 的值太大将会迫使模式结果过于趋

近观测值. 这是不希望看到的, 因为: (1) 模式方程调整质量- 动量不平衡性的能力将会减弱; (2) 由于强行插入观测分析, 模式产生它本身的中尺度气象结构的能力被削弱. 因为分析场不可能解决中尺度的问题, 或者被观测和分析误差所诱导. 另一方面, 如果 G_α 太小, 对模式状态的演变影响则很小.

由于预报方程以通量形式出现, 当逼近连续方程中的气压时, 在静力大气中方程(1)中的第3项消失, 于是方程(1)简化为:

$$\frac{\partial p^* \alpha}{\partial t} = F(\alpha, x, t) + G_\alpha \cdot \omega_\alpha(x, t) \cdot \epsilon_\alpha(x) \cdot p^* (\alpha_0 - \alpha), \quad (2)$$

3.2 观测逼近

由于观测逼近方法不要求观测场的格点分析, 较好地适用于具有高频率、非天气尺度资料的情形. 它的形式与方程(1)相似, 并且只使用落在每个模式时间步上的预先确定好的网格点上. 变量 $\alpha(x, t)$ 的倾向方程表示为:

$$\frac{\partial p^* \alpha}{\partial t} = F(\alpha, x, t) + G_\alpha \cdot p^* \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i^2(x, t) \cdot r_i \cdot (\alpha_0 - \alpha)_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i(x, t)}, \quad (3)$$

F 和 G_α 的定义前面已描述过, 这里下标 i 表示在预先设定的半径内的 N 个观测值中的第 i 个观测点, α_0 是 α 同一时刻的局地观测值, α 是此时刻在三维场中插值到观测点上的模式预报变量. 观测质量因子 r 在 0~ 1 之间变化, 解释了观测系统和模式系统之间的特征误差. 四维权重函数 ω_i 表明了在一个给定格点和给定时间步上第 i 个观测点的空间和时间变化. 观测逼近方法是建立在一系列校正客观分析技术之上的, 这些客观分析方法在低资料密度区域具有好的代表性.

4 试验设计

本文分别对 9608 和 9711 号两次台风过程进行了四维同化数值分析, 对 9608 号台风过程进行了 5 个试验: 1 个控制试验(没有同化, CNTL); 3 个分析逼近试验(AWTQ, ATQ, AW), 同时进行风场和质量场逼近的 AWTQ 试验, 只进行质量场同化的 ATQ 和只进行风场同化的

表 1 试验设计

试验	逼近变量
CNTL	-
AWTQ	分析逼近 U, V, T, Q
ATQ	分析逼近 T, Q
AW	分析逼近 U, V
IWT	观测逼近 U, V, T

AW 试验; 1 个进行风场和温度场的观测逼近试验(IWT) (表 1). 而对 9711 号台风过程, 只进行了两个试验: 1 个控制试验(CNTL)和 1 个分析逼近试验(AWTQ). 我们对所有试验均采用同样的中尺度物理过程, 并且物理过程的选择也是全面细致的, 使模拟结果尽可能接近实际. 通过上述试验设计, 检验模式大气对只有风场的同化, 质量场(温度场加湿度场)同化以及风场- 质量场同化的响应.

在所有试验中, 有关 U, V, T 的逼近因子 $G_\alpha = 3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 而对于比湿 Q , 其逼近因子 $G_\alpha = 1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. 对所有分析逼近试验, 分析场是经过客观分析的中尺度气象场. 式(2)的四维权重函数定义为: $\omega(x, t) = 1$, 随着对分析场的大量检验, 认为用于分析逼近的分析场是完善的($\epsilon = 1$), 那么逼近项与分析场和模式场之间的差成

比例,并随空间和时间变化.对观测逼近试验,观测场是经过质量检验的12 h一次的标准探空资料,认为是完好的($r = 1$).我们发现在9711号台风过程中,由于计算区域大部分为海面,经过质量检验用于观测逼近的12 h探空资料只有3个站,分辨率极低,因此在此过程中,我们没有进行观测逼近方案的试验.式(3)对每个观测站*i*的四维权重因子重新写为: $\omega(x, t) = \omega_{xy} \cdot \omega_b \cdot \omega_t$, ω_{xy} 为水平权重函数,是一个Cressman类的空间权重函数,定义为:

$$\omega_{xy} = \frac{R^2 - D}{R^2 + D^2} \quad 0 \leq D \leq R,$$

$$\omega_{xy} = 0 \quad D > R,$$

式中, R 是影响半径(这里为240 km); D 是第*i*个观测点到格点的距离(km).垂直权重函数 ω_b 同样也是距离的函数,定义为:

$$\omega_b = 1 - \frac{|\sigma_{obs} - \sigma|}{R_\sigma} \quad |\sigma_{obs} - \sigma| \leq R_\sigma;$$

$$\omega_b = 0 \quad |\sigma_{obs} - \sigma| > R_\sigma,$$

其中, R_σ 是垂直影响半径; σ_{obs} 是第*i*个观测点的垂直位置.从经济的角度出发, R_σ 定义的很小(0.01),这样在每个模式层的逼近项只使用落在那个层上的观测资料.由于在模拟之前,探空资料已插值到每个模式层上,因此,垂直权重函数在这里有效地定义为: $\omega_b = 1$.

对于时间权重 ω_t ,它表示为:

$$\omega_t = 1 \quad |t - t_0| < \tau/2;$$

$$\omega_t = \frac{\tau - (t - t_0)}{\tau/2} \quad \tau/2 \leq |t - t_0| \leq \tau;$$

t 是模式相对时间, t_0 是第*i*个观测点的模式相对时间, τ 是一个观测值将影响模式预先确定的时间窗的半个周期.

5 结论和讨论

由于台风给海上交通运输、军事活动以及海上开发造成极大的危害和破坏^[8],本文旨在发展一个能有效地应用不同来源的资料,进行四维资料同化分析台风海面风场预报的中尺度模式,因此选择两个台风过程,9608号和9711号进行研究,乃是笔者的初步尝试.

9608号台风1996年7月23日生成于155°E附近的中太平洋,31日后在台湾基隆登陆,登陆时中心最大风速达45 m/s,中心最低气压为950 hPa,于8月4日凌晨消失在鄂豫交界处.在9608号台风过程试验中,我们选择的过程是1996年8月10日0时至2日0时,模拟24 h,模拟分析台风登陆减弱过程;9711号台风于1997年8月8日在11.2°N,158.9°E处生成,18日子夜登陆浙江温岭,登陆时中心最大风速达40 m/s,中心最低气压为960 hPa.在9711号台风研究过程中,以1997年8月17日0时为模式初始时间,模拟36 h.

5.1 模式模拟分析

分析模式模拟场不仅很好地说明模式本身的模拟能力,而且能更好地解释利用不同四维资料同化方案,不同同化资料进行统计分析的结果.由于海平面气压(SLP)不是同化逼近变量,因此通过分析SLP可以很客观地了解模式对同化资料(风场和质量场)的响应.图1是9608号台风研究过程的初始时刻,即8月1日0时(世界时),海平面气压场的分布情况,其最

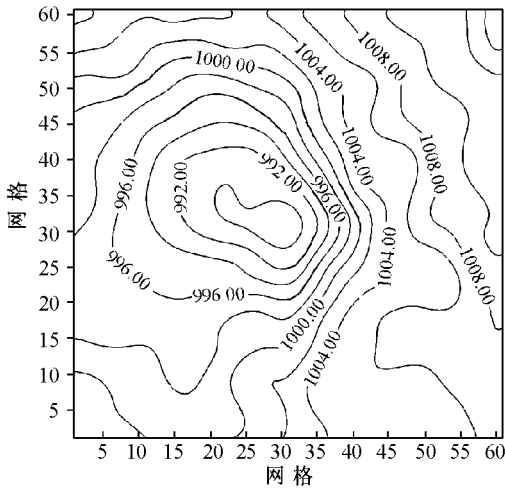


图1 1996年8月1日0时(世界时)
海平面气压(hPa)分布

低海平面气压值为 975 hPa. 图 2 是利用不同研究方法, 9608 号台风过程中, 模拟 24 h 的海平面气压场.

1996年8月2日0时(世界时)模式地面分析表明: 9608号台风逐渐减弱, 在24h内, 海平面最低气压减小了5hPa, 形成一个最低气压为980hPa的气旋(图2a), 这一分析是基于此时的客观分析场, 然而此时的CNTL指出, 闭合低压的中心最低值仅为992hPa, 位置相比于客观分析结果明显向西北方向移动, 东西相差约450km; 试验AWTQ略微纠正了中心位置的偏差, 并且加深了低压中心约2hPa. 试验AW产生了与AWTQ相似的气压结构, 虽然中心气压比较弱, 只有996hPa; 另一方面, 逼近质量场的试验ATQ也对海平面气压场的强度产生了比较好的作用, 中心低压值达到了987hPa, 只是其中心位置过于偏离.

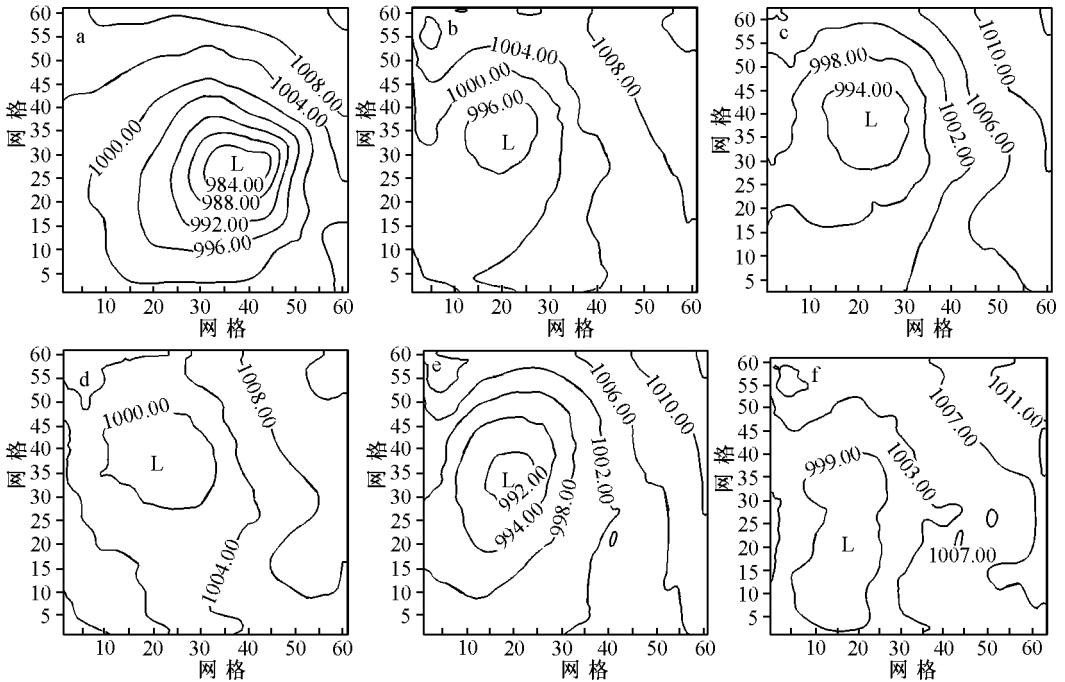


图2 1996年8月2日0时(世界时) SLP分布(等值线间隔: 4 hPa)

a. 客观分析 b. CNTL c. AWTQ d. AW e. ATQ f. IWT

对 9608 号台风过程来讲, 各试验都形成了闭合低压中心, 对 SLP 的强度而言, 质量场(ATQ) 优于风场(AW), 这和海平面气压与温度场的动力关系是一致的. 综合分析 SLP 的强度和位

置,此时最好的海平面气压场应是由同化风场-质量场资料产生.

5.2 误差分析

对模式模拟的海平面气压场(SLP)、风场、温度场进行模式误差检验. 表2是9608号台风研究过程中850 hPa风场、温度场以及海平面气压和地面风场在整个模式区域的每个格点上计算的标准差值. 本文所考虑的变量标准差(RMS)值由下式获得:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (z_f - z_0)_{ij}^2}$$

式中, $n = i \times j$; z_f 为预报值; z_0 则是同一时刻的客观分析值, 在控制试验 CNTL 中, 对海平面气压, 12 时(世界时)的 RMS 差值比 0 时(世界时)的高出约 4 hPa. 显然, 模式在白天热量循环过程中正确地模拟质量场有很大的困难. 试验 ATQ 和 IWT, 与 CNTL 相比较, 对 SLP 的影响很小; 而试验 AW 和 AWTQ 则对 SLP 的 RMS 差值有明显的减小, 减小约为 16% 和 7%.

表2 9608号台风不同试验中各变量的 RMS 值

时间类别	12 h				24 h			
	W_{850}	T_{850}	SLP	W_{1001}	W_{850}	T_{850}	SLP	W_{1001}
CNTL	5.98	3.27	4.05	11.03	8.00	3.35	6.72	9.67
AWTQ	3.54	2.31	3.39	7.36	7.86	2.49	6.41	8.35
ATQ	6.35	2.33	3.99	11.62	8.82	2.43	6.78	12.04
AW	3.52	3.19	3.73	7.33	7.88	3.54	7.23	8.09
IWT	5.69	3.12	4.10	7.18	9.43	3.39	6.92	6.74

对 SLP 来说, 同时同化风场和质量场的 AWTQ 试验所获得的 RMS 24 h 平均值比只同化质量场的 ATQ 所得到的 24 h 平均偏差值减小了 8%, AWTQ 显著地提高了对 SLP 的模拟精度; 分析比较同化质量场的 ATQ 和同化风场的 AW 对 SLP 的响应, 看到在模式模拟 24 h 后, 中层动力强迫增大时, 质量场信息在减小模拟的气压场误差方面起到了关键性的作用. 这一点与前面对气压场强度的模拟分析结果是一致的. 观测逼近试验 IWT, 松弛逼近模式结果到风场和质量场的站点观测资料. 与 AWTQ 和 AW 相比较, 并没有很好地达到同化预期目的, SLP 的 RMS 值比控制试验的还要高. 这可能归因于所考虑的各变量的 RMS 差值是在整个域中进行的, 而用于 IWT 同化的探空观测资料只分布在陆地上的缘故.

对于其他变量, 如 850 hPa 风和地面风场的同化分析中, 同样 AWTQ 得到的偏差值远小于 ATQ 的结果, 只有在同化 850 hPa 的温度场时, 两者才大致相近. 仅同化质量场的试验(ATQ)对 850 hPa 的风场及地面风场具有负面影响, 即其偏差值大于小控制试验(CNTL)时的情形, 这可能是在近地面温度同化资料对模式日变化和低层稳定度具有不利的影响. 这与 Stauffer 等^[10]的分析结果相一致. 试验 AWTQ 和 AW 获得的风场偏差约为 CNTL 时的 59%. 而风场-质量场对风场同化效果却略低于单独进行风场同化时的情况, 试验 AWTQ, AW 和 ATQ 都表明在风场同化中只有非常少的质量场诱导信息.

IWT 在同化地面风场时有非常好的表现, 模拟 12 h 时, 地面风场的 RMS 值比控制试验时的减小了 3.85 m/s, 24 h 时减小了 2.93 m/s. 这表明同化经过检验的探空观测资料有效地

提高了地面风场的模拟精度。

在对 850 hPa 温度场进行同化分析时, 我们得到以下结论: 除 24 h 的风场同化, 即试验 AW, 偏差大小相应时刻 CNTL 时的值, 其余试验都减小了 850 hPa 温度场的偏差值。尤其以 AWTQ, ATQ 以及 IWT 显著。ATQ 和 IWT 只有在进行温度场的同化时才发挥其正面影响。这里, 仅同化风场信息的 AW, 对任何层的温度场都没有显著的改善。

通过对 9608 号台风研究过程进行的 5 个试验分析, 风场在四维资料同化分析中优于质量场, 但是同时吸收风场和质量场信息会产生最好的风场和质量场, 有效地提高模式预报水平, 降低预报量的偏差。因此在 9711 号台风过程中我们仅进行了 36 h 的控制试验和风场-质量场同化试验, 统计分析了 850 hPa 风场、温度场以及海平面气压场和地面风场, 如图 3 所示。图例 w850c 和 w850a 分别表示控制试验和分析同化试验下的 850 hPa 风场, 其余图例依次类推。

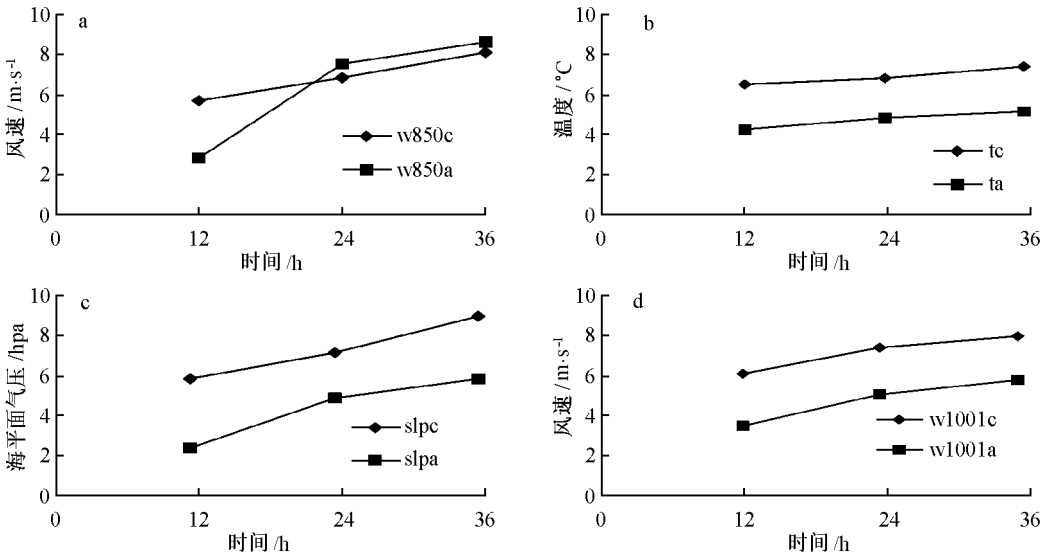


图 3 9711 号台风过程数值试验 RMS 值

a. 850 hPa 风场 b. 850 hPa 温度场 c. 海平面气压场 d. 海面风场

除 850 hPa 风场之外, 其余各物理场的偏差值与 CNTL 相比较, 都有显著地降低, 如对 850 hPa 温度场来说, 控制试验中, 其 RMS 偏差平均值为 2.8 °C, 而分析同化(AWTQ)的偏差平均值为 1.9 °C; CNTL 中 SLP 的偏差平均值是 7.2 °C, AWTQ 的是 4.4 °C, 同样对海面风场, 相应的平均值分别为 6.1 和 4.1 hPa。

从以上分析可知, 观测逼近技术对分析逼近而言, 是一种可行的变化, 对同化吸收非天气尺度的资料是一种极有吸引力的手段, 尽管这种方法对观测不确定性有较大敏感性。我们应该在今后的研究中, 不断地发掘此类资料在观测逼近中的潜力。

参考文献:

- [1] CHARNEY J G. Use of incomplete historical data to infer the present state of the atmosphere[J]. J Roy Meteor Soc, 1969, 103: 225-245.

- [2] HOKE J E, ANTHES R A. The initialization of numerical models by a dynamical initialization technique[J]. *Mon Wea Rev*, 1976, 104: 1 551—1 556.
- [3] PIELKER A. 中尺度气象模拟[M]. 张杏珍, 杨长新译. 北京: 气象出版社, 1990. 135—258.
- [4] ANTHES R A. Data assimilation and initialization of hurricane prediction models[J]. *J Atmos Sci*, 1974, 31: 702—719.
- [5] DAVIES H C, TURNER R E. Updating prediction models by dynamical relaxation: an examination of the technique[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1977, 103: 225—245.
- [6] GRELL G A, DUDHIA J, STAUFFER D R. A description of the fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale model (MM5). NCAR Technical Note, NCAR/TN- 398+ STR[Z]. 1994. 117.
- [7] STAUFFER D R, NELSON L S. Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I : Experiments with synoptic-scale data[J]. *Mon Wea Rev*, 1990, 118: 1 250—1 277.
- [8] 世界气象组织编. 全球热带气旋预报指南[M]. 裘国庆, 方维模译. 北京: 气象出版社, 1995. 168—172.
- [9] STAUFFER D R, NELSON L S. Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part II : Effects of data assimilation within the planetary boundary layer[J]. *Mon Wea Rev*, 1990, 119: 734—754.
- [10] WANG W, WARNER T T. Use of four-dimensional data assimilation by Newtonian relaxation and latent heat forcing to improve a mesoscale-model precipitation forecast: a case study[J]. *Mon Wea Rev*, 1988, 116: 2 593—2 613.

The study of typhoon process: discussion and application of four-dimensional data assimilation

MA Yan^{1,2}, ZHANG Qing-hua^{1,2}

(1. *First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*; 2. *Key Lab of Marine Science and Numerical Modeling, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*)

Key words: mesoscale numerical model; four-dimensional data assimilation; typhoon