

三维变分映射资料同化技术在台风数值模拟上的应用实验^{*}

赵颖^{**1,3} 宇如聪¹ 王斌²

1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室 (LaSW), 北京 100081;

2. 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 (LASG), 北京 100029;

3. 中国人民解放军理工大学理学院, 南京 211101

摘要 台风移动路径及登陆是台风预报中的关键问题, 提高台风初始分析场质量是改进台风数值预报效果的重要途径之一. 文中首先对目前国际上占优势的变分资料同化方法: 三维变分资料同化(3DVar)、四维变分资料同化(4DVar)和作者近年提出的三维变分映射资料同化方法(3DVM)的理论进行了简单的比较分析; 然后基于MM5-4DVar的系统构建了MM5-3DVM系统; 最后以9914号台风Dan为例, 利用该系统设计了17组同化卫星AMSU-A反演的温度和风场资料及人造涡旋海平面气压场资料的数值实验, 初步探讨3DVM技术对提高台风初始场质量的有效性. 与4DVar的对照实验表明: 通过文中3DVM系统得到的初始台风结构相对更合理, 更能改善台风的模拟, 特别是路径预报. 敏感性研究表明: 初始涡旋的大小、同化时间窗口的长短和信息量的强弱对台风路径和强度变化的敏感性, 3DVM比4DVar技术更为稳定. 特别地, 3DVM利用历史资料只需低廉的计算代价进行初始化, 这是符合业务预报需求的.

关键词 资料同化 4DVar 3DVM 台风

天气直接影响人类的生命安全和社会活动, 有效预报未来天气对于所有的人来说都非常重要. 数值天气预报的误差主要来源于初值与模式的不确定性. 减少初值的不确定性, 提高初始分析场质量是改进数值预报效果的重要途径之一.

变分资料同化是数值天气预报最有效的初始化方法之一. 目前在数值业务预报中占优势的是以最优控制技术的共扼方程理论为基础的变分同化方法(Var)^[1,2]; 三维变分资料同化(3DVar)^[3,4]和四维变分资料同化(4DVar)^[5,6]. 相对3DVar, 4DVar具有模式约束, 在假定数值模式准确无误差的前提下, 在同化窗口内通过一种最优的方式把观测资料和背景场信息有机地结合起来形成与模式协调的最佳初值. 但是, 描述大气(海洋)发展变化的模式所具有的非线性和复杂

性使得实际的预报模式M确实存在误差 $W(t)$, 且由于物理过程描述的不准确以及一些物理过程自身的不确定性, 模式的误差 $W(t)$ 并不见得比初值的误差小, 这会导致初值误差与模式误差相互作用, 并随时间发展增大. 因此, 4DVar的目标函数实际上应为如下形式:

$$\begin{aligned}
 J_{4DVar}(x_0^a) &= \min_{x_0} J_{4DVar}(x_0) \\
 J_{4DVar}(x_0) &= J_b + J_o = \\
 &1/2(x_{t_0} - x_0^b)^T B^{-1}(x_{t_0} - x_0^b) + \\
 &1/2 \sum_{r=0}^n (y_r - H(M_{t_0 \rightarrow t_r}(x_0, \tau) + w(t_r)))^T \cdot \\
 &O_r^{-1}(y_r - H(M_{t_0 \rightarrow t_r}(x_0, \tau) + w(t_r))) \quad (1)
 \end{aligned}$$

2007-08-17 收稿, 2007-10-26 收修改稿

^{*} 国家重点基础研究发展计划(编号: 2005CB321703)和中国科学院重要方向(编号: KZCX3-SW-230)资助项目

其中 J_b 为背景场误差项, J_o 为观测场误差项. τ 为模式积分步长, x_0^b 为背景场, x_0^o 为模式的初始场, x_0^b 和 x_0^o 均位于同化窗口 $[t_0, t_R]$ 的初时, x_0^a 为模式通过 4DVar 得到的最优初始场, y_r 为同化窗口内 t_r 时的观测场, H 为观测算子, B 为背景场误差协方差, O 为观测场误差协方差. 在公式(1)中模式误差 $w(t)$ 是从初始时刻开始积累的, 越远离起始点, 模式积累误差越大; 当模式误差与观测误差在同一个量级时, 则该时刻观测贡献给目标函数的信息就变得很微弱了. 这种情况下, 在同化窗口内, 只有位于窗口初时的最优初值最多地吸收了同化窗口内各时刻的观测信息; 而其他时刻由于模式误差的存在, 越远离起始点, 被同化的观测信息就越少, 模拟效果就越差; 因此, 尽管 4DVar 改进了同化窗口内的预报, 但在同化窗口末时同化的效果已经不明显了, 严重影响了窗口外的预报质量. 因此理论上 4DVar 虽然得到了与观测和模式相协调的最优初值, 但由于目前模式无误差的假设在实际中不成立, 使得宝贵的有限观测资料的作用在业务中没有得到充分发挥, 这也是有些模式(具有比较大的模式误差)对相同资料的处理利用 3DVar 初始化有时反而比利用 4DVar 初始化好的原因. 因此如何充分发挥有限观测资料的作用、合理减弱模式误差对初值的影响、提高资料同化计算效率及提高模式可预报时间成了数值预报业务的一个十分紧迫和意义重大的问题.

最近提出的一种新资料同化方法^[7], 即三维变分映射资料同化技术(3DVM), 基于映射观测的理念, 将形成最优初值的时刻从同化窗口的始端移至窗口的末端. 理论上假设模式所有自由度上的变量都有观测, 在同化窗口末端得到了一个有机结合观测资料和背景场信息的显式解析表示的最佳模式初值, 该初值吸收了同化窗口内过去或现在的经过预报模式映射后的所有映射观测资料信息. 特别地, 3DVM 不需要伴随模式, 这不仅避免了 4DVar 伴随模式中对于不连续的物理过程的“开关”问题, 而且同化的计算代价不会太大. 下面我们利用该技术建立同化系统, 设计一系列实验吸收 AMSU-A 反演的温度资料或和水平风场资料^[8] 或人造台风涡旋的海平面气压场, 初步探讨 3DVM 技术对 9914 号台风(Dan)的路径和强度模拟的影响.

1 三维变分映射资料同化系统简介^[7]

假设模式误差可忽略, 定义同化窗口 $[t_0, t_R]$ 的 3DVM 方案的目标函数如下:

$$J_{3DVM}(x_{t_R}^a) = \min_{x_{t_R}} J_{3DVM}(x_{t_R})$$

$$J_{3DVM}(x_{t_R}) = \frac{1}{2}(x_{t_R} - x_{t_R}^b)^T B_{t_R}^{-1}(x_{t_R} - x_{t_R}^b) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (M_{t_i \rightarrow t_R}(x_i^{obs}, \tau) - x_{t_R})^T \tilde{Q}^{-1} (M_{t_i \rightarrow t_R}(x_i^{obs}, \tau) - x_{t_R}) \quad (2)$$

其中背景场 $x_{t_R}^b$ 和模式初始场 x_{t_R} 均位于同化窗口 $[t_0, t_R]$ 的末时, $x_{t_R}^a$ 为模式通过 3DVM 得到的最优初始场, B_{t_R} 为背景场误差协方差, x_i^{obs} 为同化窗口 $[t_0, t_R]$ 内 t_i 时的满秩观测场(即预报模式所有自由度上变量都有观测), 映射观测误差协方差矩阵 $\tilde{Q} = M_{t_i \rightarrow t_R}(E_i, \tau) \circ M_{t_i \rightarrow t_R}^T(E_i, \tau)$, $E_i \circ E_i^T = O_i$. 比较目标函数(1)和(2), 不难发现 4DVar 中变量 x_0 在(1)中是隐式表示的; 而 3DVM 中变量 x_{t_R} 在(2)中是显式表示的, 且可求得 3DVM 在同化窗口末端的最优初值为

$$x_{t_R}^a = \left[B_{t_R}^{-1} + \sum_{i=1}^N \tilde{Q}^{-1} \right]^{-1} \cdot \left[B_{t_R}^{-1} x_{t_R}^b + \sum_{i=1}^N \tilde{Q}^{-1} M_{t_i \rightarrow t_R}(x_i^{obs}, \tau) \right] \quad (3)$$

在实际科研和业务中, 观测资料种类各异, 有的稀少, 有的密集, 时空分布也很不规则, 几乎不存在完整的观测资料. 目前, 我们利用 3DVar 技术和模式隐式调整将这些不规则的观测资料映射到模式格点上去得到映射观测资料, 即首先利用 3DVar 将实际观测 y_i^{obs} 映射到模式格点上, 得到模式状态变量形式的映射观测 x_i^{obs*} :

$$\begin{cases} J_{3DV}(x_i^{obs*}) = \min_x J_{3DV}(x) \\ J_{3DV}(x) = \frac{1}{2}(x - x_i^b)^T B_i^{-1}(x - x_i^b) + \frac{1}{2}(H_i(x) - y_i^{obs})^T O_i^{-1}(H_i(x) - y_i^{obs}) \end{cases} \quad (4)$$

其中 $x_i^b = M_{t_0 \rightarrow t_i}(x_{i_0}^b, \tau)$. 由于实际观测的不完整, 由(4)式获得的增量 $x'_{obs} = x_i^{obs*} - x_i^b$ 中有很多元素是零, 即表示模式状态变量在这些地方没有得到观测信息, 需要“补缺”; “补缺”的办法利用模式隐式调整:

$$\begin{cases} (x_{i_0}^{n+1}, x_{i_{obs}}^{n+1}) = x_i^{n+1} = M(x_i^n, \tau) \\ x_i^n = (x_{i_0}^n, x_{i_{obs}}^n) \\ x_i^0 = x_i^{obs*} = (x_{i_0}^0, x_{i_{obs}}^0) \end{cases} \quad (5)$$

即利用模式积分, 每一积分步的初始场中在有观测信息的格点保持观测信息. 这样通过预报模式的动力约束和物理约束把观测信息传播到没有观测信息的元素, 最终使得每个元素都具有“观测”信息. 当误差 $\|x_i^{n+1} - x_i^n\|$ 不再下降时, 经过上述调整得到的最终结果就是我们所期待的完整“观测” x_i^{obs} , 它已经能够满足 3DVM 的假设了, 这种分析过程与 3DVar 循环 (即 3DVar-Circle) 非常类似. 尽管 3DVM 同化过程在操作上与 3DVar 循环类似, 但它们的理论基础及同化公式是完全不同的, 而且 3DVM 通过模式隐式调整、在窗口内整体拟合各时刻的观测而得到与模式协调的最佳初值.

为了检验 3DVM 的实际应用效果, 我们基于 MM5-4DVar 系统的框架构造了 MM5-3DVar 系统和 MM5-3DVM 系统.

2 资料同化实验方案的设计

为了初步探讨 3DVM 的同化效果和计算代价,

我们以 9914 号台风 (Dan) 为例, 设计了 17 组与 4DVar 对照的实验 (表 1) 进行 72 h 台风路径和强度模拟. 预报模式取为两层嵌套网格的 MM5V3 系统, 粗网格格距 36 km, 细网格格距 12 km, 垂直方向为不等距的 15 层, 模式顶为 100 hPa. 考虑到 4DVar 的计算代价, 同化实验均在粗网格上进行, 数值模拟的细网格初始场从粗网格初始场插值而得. 17 组实验中 4DVar 同化实验所用的伴随模式为 MM5-4DVar 模式, 3DVM 同化实验应用上述 MM5-3DVM 系统, 各实验在不同的同化系统和预报系统中所选取的物理过程一致, 各系统中所用误差协方差一致, 均简单地定义为对角矩阵. 由于各同化实验所取同化窗口内所用观测资料只有一个时次, 为了加强观测资料的信息, 在 2 min 或 10 min 的同化窗口进行 4DVar 或 3DVM 实验时, 每积分一步吸收一次相同的资料, 在 30 min 的同化窗口, 每积分三步吸收一次相同的资料, 积分步长为 1 min, 这与文献[9]的做法是类似的.

第 1 组实验 CTRL 为对比实验, 其初值直接采用背景场, 由 NCEP/NCAR 再分析资料插值而来. 第 2—9 组为 4DVar 同化实验, 其初值通过 4DVar 提供. 第 10—17 组实验为 3DVM 同化实验, 其初值通过 3DVM 产生. 第 2 组和第 10 组进行同化实验的资料均为 AMSU-A 反演的温度资料, 第 3 组和第 11 组进行同化实验的观测资料均为 AMSU-A 反演的温度资料和水平风场资料^[8], 其他各组进行同化实验的观测资料均为人造台风涡旋的海平面气压场.

表 1 实验方案简介

数值实验名称	观测资料	同化窗口 (年-月-日-时分→日-时分)	模式初始场 (1999-10-06-00)
(1) CTRL			NCEP 分析场
(2) 4DVar-T	AMSU-A 反演的温度 (T)	1999-10-06-0000→06-0010	
(3) 4DVar-TUV	AMSU-A 反演的温度 (T) 和水平风场 (UV)	1999-10-06-0000→06-0010	
(4) BDA 2m-R90	p_{bogus} , $R=90$ km	1999-10-06-0000→06-0002	
(5) BDA 10m-R90	p_{bogus} , $R=90$ km	1999-10-06-0000→06-0010	4DVar 优化场
(6) BDA 30m-R90	p_{bogus} , $R=90$ km	1999-10-06-0000→06-0030	
(7) BDA 2m-R200	p_{bogus} , $R=200$ km	1999-10-06-0000→06-0002	
(8) BDA 10m-R200	p_{bogus} , $R=200$ km	1999-10-06-0000→06-0010	

续表

数值实验名称	观测资料	同化窗口 (年-月-日-时分→日-时分)	模式初始场 (1999-10-06-00)
(9) BDA 30m-R200	P^{bogus} , $R=200\text{ km}$	1999-10-06-0000→06-0030	
(10) 3DVM - T	AMSU-A 反演的温度(T) 的映射观测	1999-10-05-2350→06-0000	
(11) 3DVM - TUV	AMSU-A 反演的温度(T) 和水平风场(UV)的映射 观测	1999-10-05-2350→06-0000	
(12) BM DA 2m-R90	x_p^{obs} , $R=90\text{ km}$	1999-10-05-2358→06-0000	
(13) BM DA 10m-R90	x_p^{obs} , $R=90\text{ km}$	1999-10-05-2350→06-0000	3DVM 优化场
(14) BM DA 30m-R90	x_p^{obs} , $R=90\text{ km}$	1999-10-05-2330→06-0000	
(15) BM DA 2m-R200	x_p^{obs} , $R=200\text{ km}$	1999-10-05-2358→06-0000	
(16) BM DA 10m-R200	x_p^{obs} , $R=200\text{ km}$	1999-10-05-2350→06-0000	
(17) BM DA 30m-R200	x_p^{obs} , $R=200\text{ km}$	1999-10-05-2330→06-0000	

台风涡旋的海平面气压场是依据 Fujita 经验公式^[10] 计算得到的, 邹晓蕾和肖庆农等^[9] 利用 4DVar 方法将人造涡旋作为观测成功进行飓风初始化, 即 BDA 方案(bogus data assimilation), 它的优点是利用少数观测变量可以达到对模式所有变量的调整. Xiao 等^[11] 对飓风 Fran (1996) 的敏感性实验结果表明构造人造海平面气压场的最大气压梯度半径的选取影响飓风的路径和强度模拟, 当最大气压梯度半径为模式水平分辨率 3 倍以上时, BDA 方案能很好地改进路径和强度预报. 本文利用 3DVM 方法将人造涡旋的映射观测 x_p^{obs} 作为观测进行台风初始化, 命名为 BM-DA 方案(bogus mapped data assimilation), 并设计简单实验初步探讨初始涡旋的大小及窗口内观测信息对台风模拟的敏感性. 第 4—6, 12—14 组同化实验构造人造台风涡旋的海平面气压场(P^{bogus})时最大气压梯度半径 R 取定为 90 km, 第 7—9, 15—17 组同化实验构造人造台风涡旋的海平面气压场(P^{bogus})时最大气压梯度半径 R 取定为 200 km.

3 实验结果和分析

3.1 对照实验的模拟结果

17 组实验分别用 17 种不同的初值作同样的 72 h 模拟, 实验结果分析均取自细网格的数值模拟结果. 图 1 是实验模拟的 9914 号台风 Dan 的路径与观测^[12] 的对比, 相比 CTRL 实验, 3DVM 和 4DVar 同化实验均不同程度地改进了台风路径的预报. 由于只同化 AMSU-A 反演的温度场, 观测资料太少, 3DVM -T 和 4DVar-T 的模拟效果改进均

不大, 3DVM 实验积分 48 h 后才稍显优越性(图 1(b)). 增加了由 AMSU-A 反演温度场得到的水平风场资料后^[8], 3DVM 模拟的后期路径要优于 4DVar(图 1(a)). 若仅同化人造台风涡旋的海平面气压场, BM DA 方案比 BDA 方案显著地改进了路径模拟, 尤其是 BM DA 30m-R200 实验的路径模拟更靠近实际路径, 登陆地点和时间与观测一致(图 1(c)).

对照 4DVar 同化实验, 再来分析 3DVM 模拟台风强度的能力. 由于缺少气压场的观测资料, 同化 AMSU-A 反演的温度场或/和水平风场的 4DVar 实验的强度模拟效果略优于 CTRL 实验, 而 3DVM 实验模拟的台风强度略优于 4DVar 实验, 但两者模拟的强度都与实际强度还有较大的差距^[7]. 但同化人造台风涡旋的海平面气压场后, 两种技术方案均大大提高了台风的强度预报. 图 2 显示了同化时间窗口为 30 min 的 3DVM 方案和 4DVar 方案所模拟的台风强度与观测的对比. 对两种同化方案来说, 同化比较真实的 90 km 最大气压梯度半径的人造台风涡旋时, 3DVM (BM DA 30m-R90) 和 4DVar (BDA 30m-R90) 模拟的台风强度相当; 当人造台风涡旋人为加大, 取最大气压梯度半径取 200 km 时, 4DVar (BDA 30m-R200) 实验模拟前 60 h 的台风海平面中心气压接近于观测(图 2(b)), 3DVM (BM-DA 30m-R200) 实验积分 6 h 以后模拟的低层最大风速($\sigma=0.975$)接近于观测(图 2(a)); 随着人造台风涡旋最大气压梯度半径的增加, 两种同化方案所模拟的台风强度都有不同程度的改善.

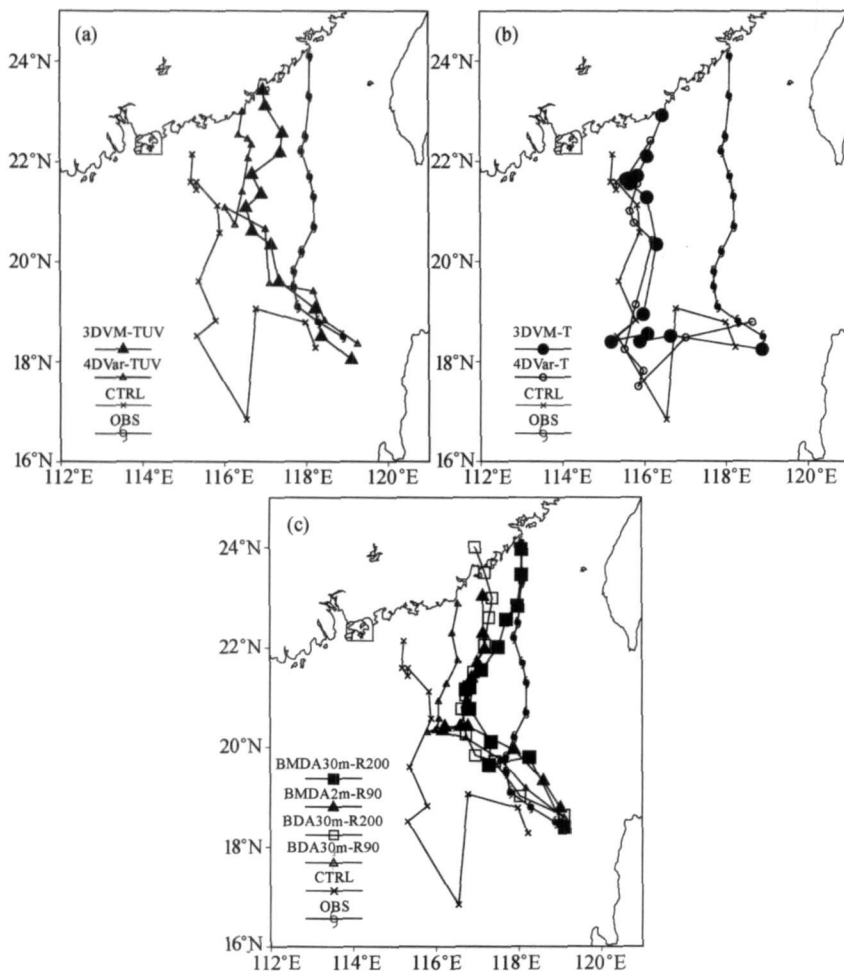


图 1 同化不同资料后, 台风 Dan 的 72 h(00UTC 6-00UTC 9 October, 1999)路径预报, 间隔 6 h
 (a) 同化 AMSU-A 反演的温度场和风场资料后的第 3, 11 组实验与 CTRL 的模拟路径; (b) 同化 AMSU-A 反演的温度场资料后的第 2, 10 组实验与 CTRL 的模拟路径; (c) 同化人造台风涡旋的海平面气压场后的第 6, 9, 14 和 17 组实验与 CTRL 的模拟路径

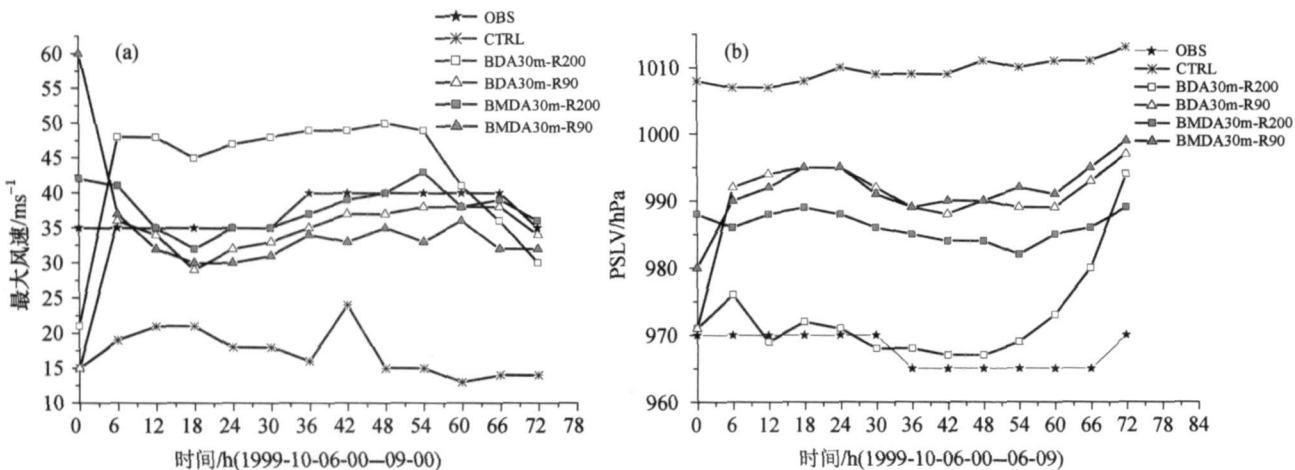


图 2 台风 Dan 的 72 h 低层($\sigma=0.975$)最大风速预报(单位: ms^{-1})

(a) 和海平面气压强度预报(单位: hPa)(b), 间隔 6 h

3.2 敏感性实验的模拟结果

有很多因素影响数值模拟热带气旋路径和强度变化, 例如初始涡旋的大小^[12], 涡旋的结构及其变化^[13-15], 中心附近最大风速及其半径^[16]等等. 为了进一步探讨新同化技术的有效性, 本文简单设计了 3DVM 方案同化人造台风涡旋海平面气压场时初始涡旋的大小、同化窗口的长短和信息量的强弱对台风路径和强度变化的敏感性实验. 图 1(c)和图 2 说明: 随着人造涡旋最大气压梯度半径的增大, BM DA 方案和 BDA 方案均能改善台风的路径和强度模拟; 但与 3DVM 的 BM DA 方案比较, 4DV ar 的 BDA 方案中初始台风涡旋的大小对强度的模拟更为敏感. 图 3 是同化时间窗口分别为 2, 10 和 30 min 的 BM DA 和 BDA 实验的路径. 图 3 显示随着人造涡旋的增大, 两种同化方案均改进了路径预报, 但在 4DV ar 方案中台风的移动速度也随之加快, 而 3DVM 方案中台风的移动速度比较稳定. 图 4 显示的是 BM DA 和 BDA 实验中台风 Dan 的 72 h 模拟的平均路径误差(图 4(a)), 平均海平面中心气压(图 4(b))和平均低层($\sigma = 0.975$)最大风速(图 4(c)), 其中 BDA-R90 代表同化 90 km (R90)最大气压梯度半径的人造台风涡旋, 同化时间窗口分别为 2 min (BDA 2m-R90), 10 min (BDA 10m-R90) 和

30 min (BDA 30m-R90) 的 4DV ar 方案组(从左到右的顺序), BDA-R200、BM DA-R90 和 BM DA-R200 的意义类似. 我们发现当吸收相同大小的人造涡旋信息时, 同化窗口的长短和信息量的强弱对 BDA 实验改进台风预报效果比较敏感, 特别是强度预报; 随着人造涡旋的增大, 这种敏感性就更为显著. 当每积分一步就吸收一次资料时, BDA 方案并没有因为信息量的增加而改善路径, 同化窗口 2 min 的 72 h 模拟实验的路径平均误差小于同化窗口 10 min 的实验; 当信息量相同而同化资料的频率不同时, 同化窗口 30 min 的实验模拟的 72 h 路径和强度均明显优于同化窗口 10 min 的实验, 特别是 BDA 30m-R200 的台风强度接近于观测, 模拟出强台风的变化. 然而, 对照 BDA 方案, 利用 BM DA 进行初始化模拟台风时, 人造涡旋的大小、同化窗口的长短和信息量的强弱对模拟的台风路径和强度变化的影响不十分明显, 相对比较稳定.

上述对模拟结果的分析说明 3DVM 在台风模拟效果上优于 4DV ar, 而且其计算代价远远小于 4DV ar, 例如在单 CPU 上, 3DVM 同化 AMSU-A 反演的温度或和风场资料时所需计算时间为 4DV ar 的 $1/7^7$, 模拟效果较好的 30 min 同化窗口的 BM DA 方案也只需 BDA 的 $1/9$ (表 2).

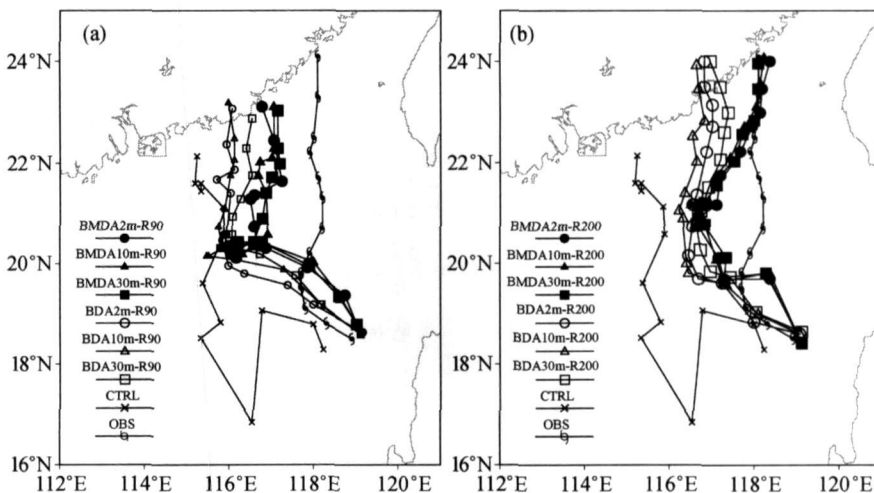


图 3 敏感性实验中, 台风 Dan 的 72 h (00UTC 6—00UTC 9 October, 1999) 路径预报, 间隔 6 h
 (a) 人造台风涡旋最大气压梯度半径为 90 km 的各 BM DA 实验和 BDA 实验的模拟路径比较;
 (b) 人造台风涡旋最大气压梯度半径为 200 km 的各 BM DA 实验和 BDA 实验的模拟路径比较

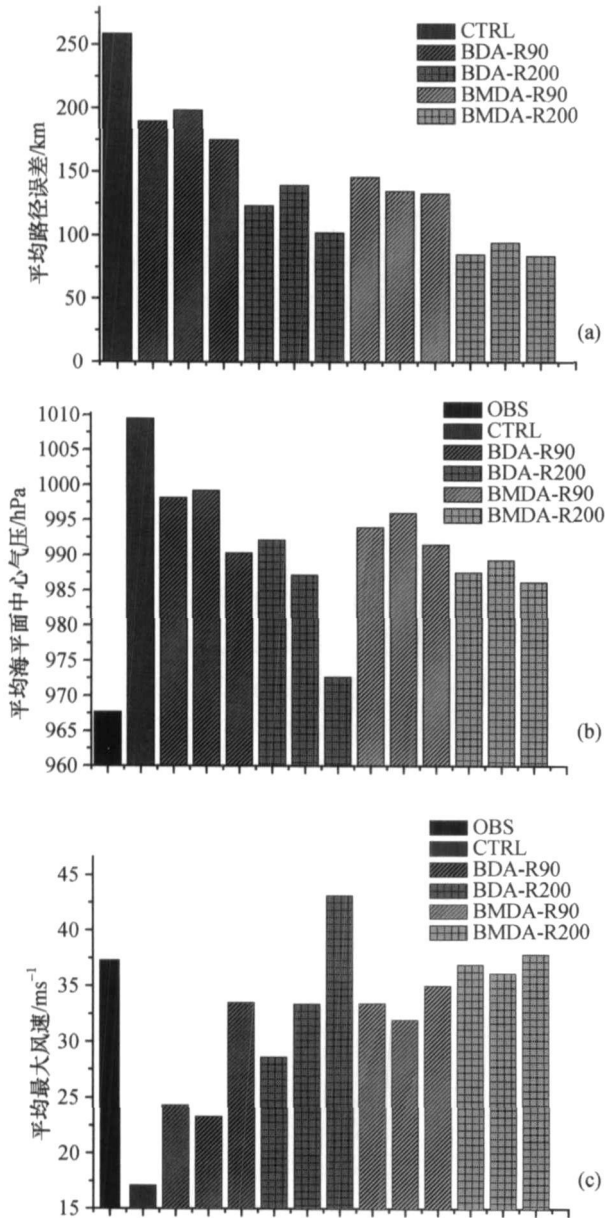


图 4 BMDA 和 BDA 实验中台风 Dan 的 72 h 模拟

(a) 平均路径误差, 其中 BDA-R90 代表同化 90 km (R90) 最大气压梯度半径的人造台风涡旋, 同化时间窗口分别为 2 min (BDA 2m-R90)、10 min (BDA 10m-R90) 和 30 min (BDA 30m-R90) 的 4DV_{ar} 方案组 (从左到右的顺序), BDA-R200、BMDA-R90 和 BMDA-R200 的意义类似; (b) 平均海平面中心气压; (c) 平均底层 ($\sigma = 0.975$) 最大风速

表 2 同化所需计算时间

4DV _{ar}		3DVM	
同化实验	计算代价 / min	同化实验	计算代价 / min
BDA 2m-R90	120	BMDA 2m-R90	90
BDA 10m-R90	292	BMDA 10m-R90	90
BDA 30m-R90	878	BMDA 30m-R90	91

3.3 台风结构的简单比较

通过 4DV_{ar} 优化所得的台风初始场能够在不同程度上改进台风的结构, 下面对照 4DV_{ar} (BDA 30m-R90), 我们以 BMDA 30m-R90 为例分析利用 3DVM 技术改进台风结构的能力. 图 5 显示了同化实验 BDA 30m-R90 和 BMDA 30m-R90 取得的台风气压扰动场在初始和积分 6 h 后的垂直剖面. 尽管 BDA 30m-R90 的初始海平面气压的强度达到了 972 hPa, 而 BMDA 30m-R90 的初始海平面气压的强度只达到了 980 hPa (图 2(b)), 但 BDA 方案 (图 5(a)) 除了底层, 其余各层气压扰动在初始台风中心附近几乎没有得到调整, 而 BMDA 方案 (图 5(b)) 几乎各层气压扰动在初始台风中心附近都得到了调整, 而且垂直结构比较协调. 积分 6 h 后, 两种方案的气压扰动都有了调整, 结构相似, 但 BMDA 方案的台风强度稍强 (图 5(c) 和 (d)).

图 6 显示了 BDA 30m-R90 和 BMDA 30m-R90 实验的初始时刻和积分 6 h 后垂直剖面的温度调整. BDA 30m-R90 得到的初始温度场在 550 hPa 附近存在非常明显的暖心结构 (图 6(a)), 而 BMDA 30m-R90 得到的初始温度场在 200 hPa 附近存在非常明显的暖心结构 (图 6(b)), 温度调整均达 12 °C; 但是, BDA 方案的初始温度场在低层偏高, 不真实; 而 BMDA 方案的初始温度场在低层的不真实性明显减弱了, 并且优化得到的初始台风结构中台风眼壁外产生了云雨水的分布 (图 7), 最大值出现在 300 hPa 附近. 模式积分 6 h 后, 两种方案低层的温度场都得到了合理调整, BDA 方案的温度场变化比较快, 其暖心的温度 (图 6(c)) 还略低于 BMDA 方案的暖心 (图 6(d)).

上述这些充分显示 BMDA 方案的初始台风结

构比 BDA 方案的更具合理性, 说明利用 3DVM 技术对台风初始化的准确性比 4DVar 的高. 好的台风

初始场必定改善模拟的台风结构, 其合理性也是影响台风路径的重要因子.

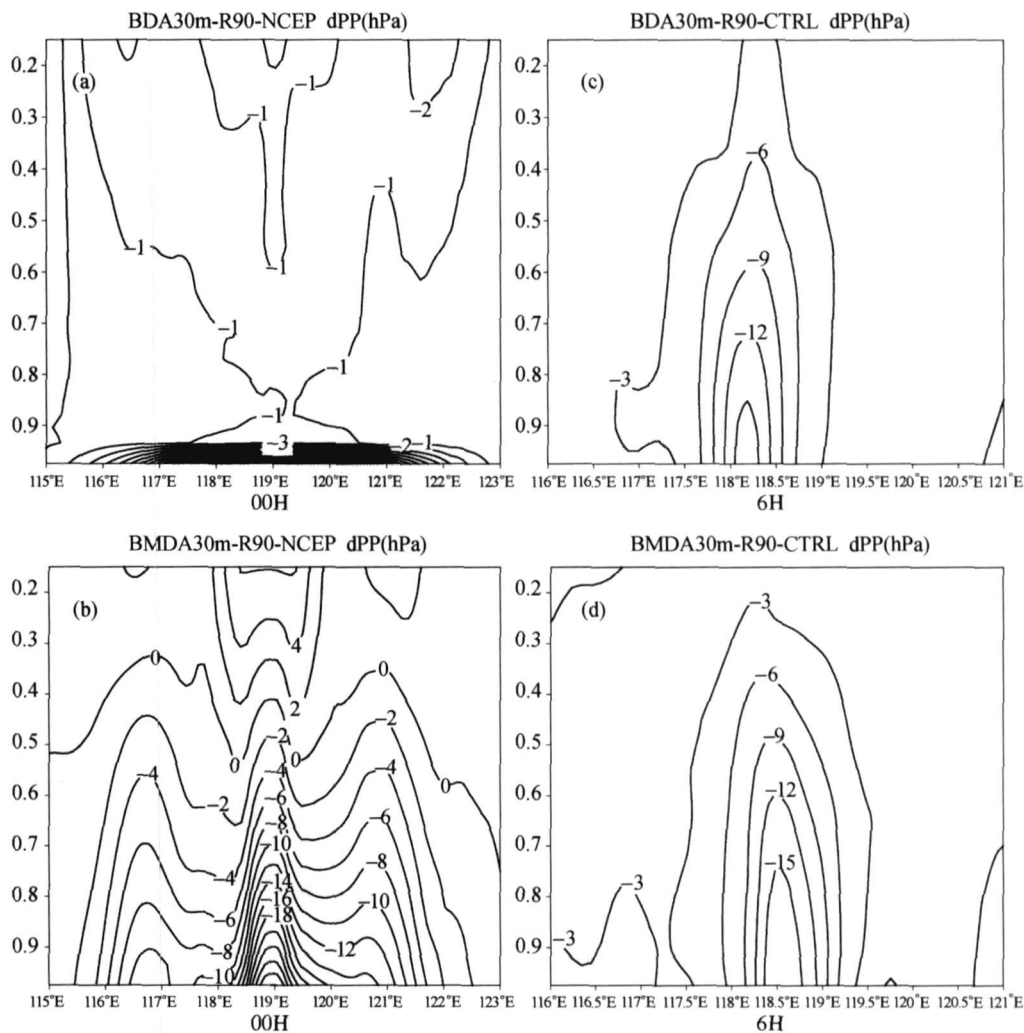


图 5 (a), (b) 初始时刻气压扰动调整(即与 NCEP 再分析资料的差值)的垂直剖面图和 (c), (d) 模拟 6 h 后的气压扰动调整(即与 CTRL 的差值)的垂直剖面图
 (a), (c) BDA 30m-R90, 图中等值线的间隔分别是 1 hPa 和 2 hPa;
 (b), (d) BMDA 30m-R90, 图中等值线的间隔分别是 3 hPa

4 结论和讨论

高效率地进行资料同化提供高质量的初值是有效开展准确的数值天气预报的重要条件之一. 本文对照国际上占优势的 4DVar 方法, 从理论和台风的实际应用上探讨了三维变分映射资料同化方法(3DVM)的合理性和实用性. 理论分析显示 3DVM 使用历史资料具体给出初值的显示解析表达式, 不再使用伴随模式, 预示其计算代价比较低廉. 为了

公平地探讨 3DVM 的实际应用价值, 基于 MM5-4DVar 的系统构建了 MM5-3DVM 系统, 在相同的模式框架和物理过程基础上对 9914 号台风 Dan 进行了 8 组对照 4DVar 的数值实验. 实验结果说明利用相同的观测资料在同样大小的同化窗口内, 3DVM 所给出的初始台风结构更合理, 从而更能改善台风的模拟, 特别是路径预报. 敏感性研究也说明相对于 4DVar 技术, 利用 3DVM 技术同化人造台风涡旋的海平面气压场资料时, 人造涡旋的大小、

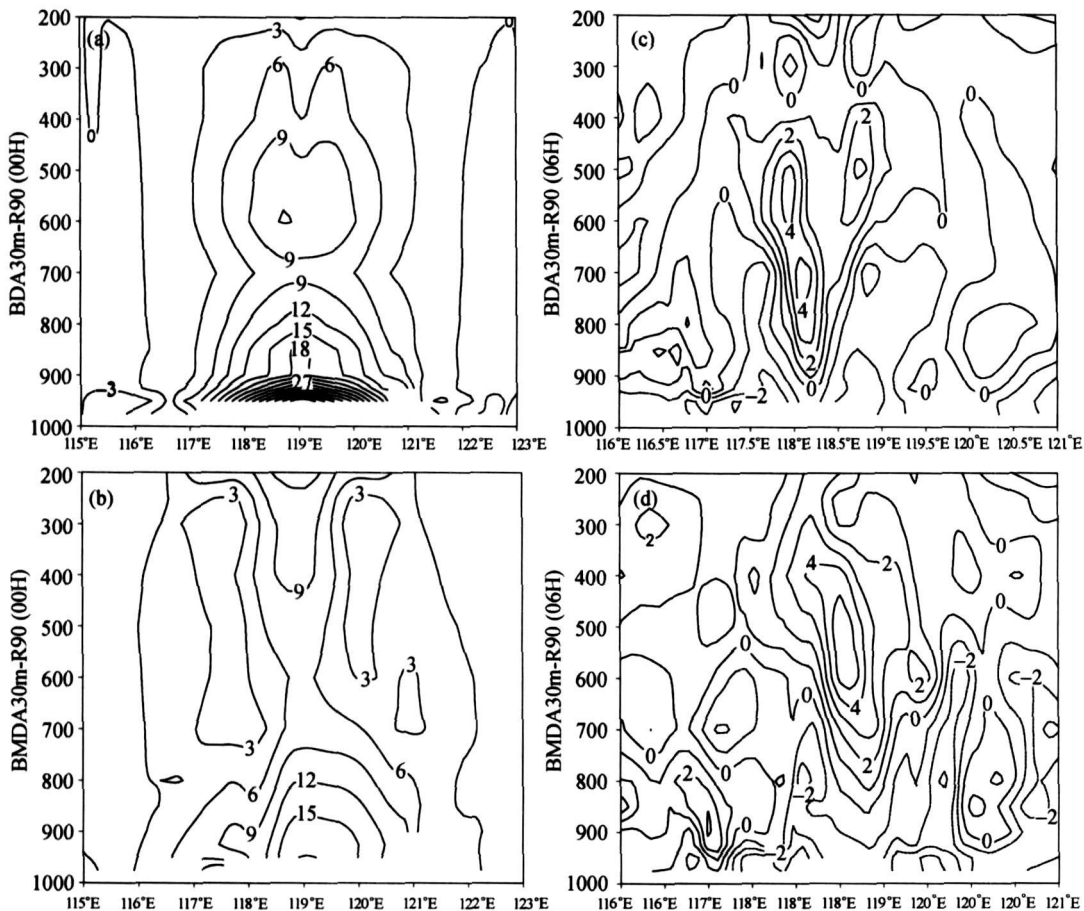


图 6 (a), (b) 初始时刻温度调整(即与 NCEP 再分析资料的差值)的垂直剖面图, (c), (d) 模拟 6 h 后的温度调整(即与 CTRL 再分析资料的差值)的垂直剖面图
 (a), (b) 图中等值线的间隔是 3°C; (c), (d) 图中等值线的间隔是 1°C.
 (a), (c) BDA30m-R90; (b), (d) BMDA30m-R90

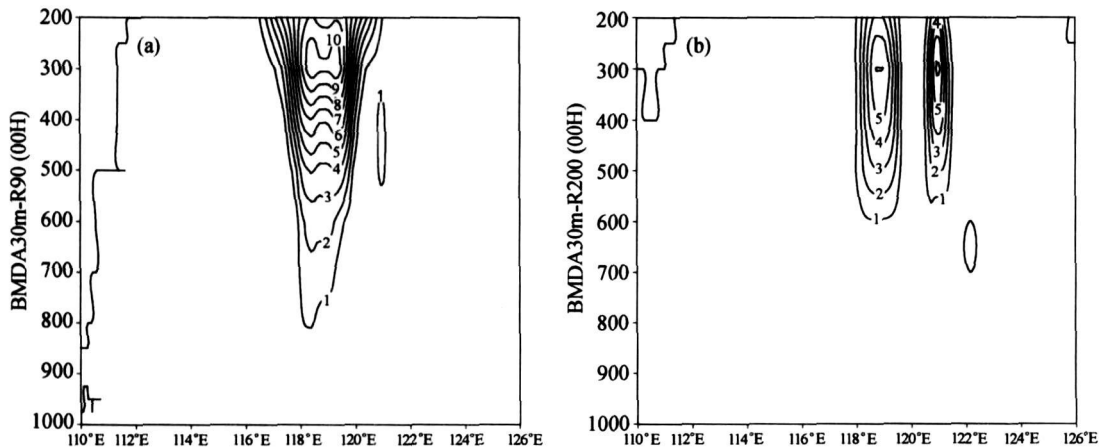


图 7 初始时刻云雨水(clw+rnw)的垂直剖面图

图中等值线的间隔是 1 g · kg⁻¹ (a) BMDA30m-R90 (b) BMDA30m-R200

同化窗口的长短和信息量的强弱对台风的路径和强度预报的影响比较稳定,更能满足业务预报的需求。

本文构建的3DVM同化系统比较简单,实际上是一种改进的3DVar-circle,主要改进的是3DVar-circle优化的初值与预报模式的不协调性。今后还需在误差协方差的映射技术及同时同化不同时空观测资料的技术等方面继续深入地研究和改善3DVM技术。

参 考 文 献

- 1 Le Dimet F, Talagrand O. Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: Theoretical aspects. *Tellus*, 1986, 38(A): 97—110
- 2 Courtier P. Variational methods. *J Met Soc Japan*, 1997, 75(1B): 211—218
- 3 Lorenc AC, Ballard SP, Bell R S, et al. The Met. office global three-dimensional Variational data assimilation scheme. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2000, 126: 2991—3012
- 4 Gustafsson N, Berre L, Hrnquist S, et al. Three-dimensional variational data assimilation for a limited area model. Part I: General fomulation and the background error constraint. *Tellus A*, 2001, 53: 425—446
- 5 Courtier P, Thépaut JN, Hollingsworth A. A strategy for operational implementation of 4D-Var, using an incremental approach. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1994, 120: 1367—1387
- 6 Zou X, Vandenberghe F, Ponca M, et al. Introduction to the Adjoint Techniques and the MM5 Adjoint Modelling System. NCAR Technical note NCAR/TN-435STR, available from NCAR, 1997
- 7 Wang B, Zhao Y. A new data assimilation approach. *ACTA Meteorological Sinica*, 2006, 20(3): 275—282
- 8 Zhao Y, Wang B, Ji ZH, et al. Improved track forecasting of a typhoon reaching landfalling from four-dimensional variational data assimilation of AMSU-A retrieved data. *J Geophys Res*, 2005, 110: D14101
- 9 Zou X, Xiao Q. Studies on the initialization and simulation of a mature hurricane using a variational bogus data assimilation scheme. *J Atm Sci*, 1999, 57(6): 836—860
- 10 Fujita T. Pressure distribution within a typhoon. *Grophys Mag*, 1952, 23: 437—451
- 11 Xiao Q, Zou X, Wang B. Initialization and simulation of a land-falling Hurricane using a variational bogus data assimilation scheme. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 2252—2269
- 12 中国气象局. 热带气旋年鉴. 北京: 气象出版社, 1999
- 13 陈联寿. 热带气旋运动研究和业务预报的现状和发展. 台风会议文集(1985). 北京: 气象出版社, 1987, 6—30
- 14 Ueno M. A study on the impact of asymmetric components around tropical cyclone center on the accuracy of bogus data and the track forecast. *Meteor Atmos Phys*, 1995, 56: 125—134
- 15 Wang Y. On the bogusing of tropical cyclones in numerical models: The influence of vertical structure. *Meteor Atmos Phys*, 1998, 65: 153—170
- 16 徐祥德, 解以扬. 热带气旋运动曲率的数学模型与路径异常的月尖突变判据. *热带气象学报*, 1993, 9(4): 308—316