TRMM 降水率资料的三维变分同化及其对 "杜鹃" (0313) 台风预报的改进

丁伟钰1 万齐林1 端义宏2

1 中国气象局广州热带海洋气象研究所,广州 510080 2 中国气象局上海台风研究所,上海 200030

摘要在GRAPES(Global and Regional Assimilation and Prediction Enhanced System,全球/区域同化预报系统)三维变分同化系统的基础上,用改进的郭晓岚对流参数化方案作为观测算子,来同化TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission,热带降水监测计划)卫星反演的降水率资料。单点试验表明该方案通过调整背景场的水汽 辐合和辐散的垂直结构,使得同化后观测算子计算的降水率更接近实况。对台风"杜鹃"(0313)的同化试验表明,该方案有效改进背景场的动力和热力结构,使台风的初始风场、降水结构更接近实况。通过控制试验和同化 试验的对比,表明同化TRMM 卫星降水率资料对台风的路径预报和降水预报都有改进。

关键词 TRMM 卫星降水率 三维变分同化 台风预报

文章编号 1006 - 9895(2005) 04 - 0600 - 09 中图分类号 P444 文献标识码 A

3D-Var Assimilation of TRMM Rain Rate and Its Impact on the Typhoon Dujuan (0313) Forecast

DING Wei-Yu¹, WAN Qi-Lin¹, and DUAN Yi-Hong²

Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080
 Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030

Abstract The GRAPES (Global and Regional Assimilation and Prediction Enhanced System) 3D-VAR assimilation system has been released by Chinese Academy of Meteorological Sciences. This study uses the extension of the KUO cumulus parameter scheme as the observation operator to assimilate the TRMM rain rate on the GRAPES 3D-VAR system. Single observation tests show that this algorithm can adjust the vertical background structure of the moisture convergence depending on the difference between the observation operator calculation and the TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) rain rate. After the assimilation, the observation operator can obtain more accurate rain rate using the analysis field. In the experiment of forecasting typhoon Dujuan (0313), the assimilation algorithm can adjust the dynamic and thermodynamic structure of the background field and obtain more realistic wind and precipitation structure. Compared with the control test, assimilating TRMM rain rate can improve the typhoon Dujuan's track and precipitation forecast.

Key words TRMM rain rate, 3D variational assimilation, typhoon forecast

1 引言

热带地区以对流性降水为主, 对流性降水直接

影响了大气中热量交换、水汽辐合等物理过程,然 而海洋上缺乏常规观测资料,无法对数值模式的初 始场进行订正。近年来,以 TRMM (Tropical

收稿日期 2003-12-15, 2004-06-08 收修定稿

基金项目 "十五"国家重点科技攻关计划项目 2001BA607B、科技部重点公益性研究项目 2001DIA20026 和台风研究基金课题

作者简介 丁伟钰, 男, 1973年出生, 硕士, 主要从事热带气象预报技术研究。E-mail: wyding@grmc. gov. cn

Rainfall Measuring Mission, 热带降水监测计划) 卫星为代表的微波观测降水取得了很大进展。卫星 观测的降水数据广泛地被应用于台风的数值模 拟[1]、降水监测[2]等许多领域,因此,热带海洋地 区充分利用卫星反演的降水信息是改善模式的初始 场结构的重要途径。目前,国内外有不少降水资料 同化的研究工作,如 Fiorino 等^[3]和 Donner 等^[4]通 过降水资料来调整模式热力学方程中的对流加热 项, Krishnamurti 等^[5,6]调整温度场和湿度场的垂 直结构以产生特定的对流加热率,朱国富[7]用牛顿 连续松弛逼近技术和降水-湿度场调整方案来改进 模式的初期降水预报,认为结合两种方法可以取得 好的效果。另外,采用变分同化的技术同化降水资 料也取得很多成果, Zupanski 等^[8]认为采用四维变 分的方法同化降水资料效果优于最优插值, Xiao Qingnong 等^[9]利用 MM5 的四维变分同化系统同 化了 SSM/I(Special Sensor Microwave Imager, 特 别微波成像辐射计)反演的降水率和可降水,指出 可降水和降水率资料在改善中尺度模式初始条件方 面有巨大的潜力,敏感性试验也指出同化结果对降 水率的位置误差比降水率大小误差更为敏感。

中国气象科学研究院开发的 GRAPES(Global and Regional Assimilation and Prediction Enhanced System,全球/区域同化预报系统)三维变分同化系 统最近被正式发布,但这个系统还不能进行降水率 资料的同化。本文以 GRAPES 3D-VAR 同化系统 框架为基础,以改进的郭晓岚对流参数化方案^[10] 为观测算子,研究了降水率资料三维变分同化的方 法。针对 2003 年登陆广东省,并且严重影响珠江 三角洲的台风"杜鹃"(0313),利用 TRMM 卫星 反演的降水率资料,探讨了降水率资料同化对台风 数值预报的改进。

2 降水率三维变分同化方案及资料

在 GRAPES 3D-VAR 同化系统中,目标函数 J 的计算公式如下:

$$J(\mathbf{X}) = \frac{1}{2} [(\mathbf{X} - \mathbf{X}_{b})^{\mathrm{T}} \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{X} - \mathbf{X}_{b}) + (\mathbf{Y} - \mathbf{Y}_{o})^{\mathrm{T}} \mathbf{O}^{-1} (\mathbf{Y} - \mathbf{Y}_{o})], \qquad (1)$$

其中, *X* 是分析变量; *X*_b 是背景场; *Y*_o 是观测值, 本文 *Y*_o 为 TRMM 卫星观测的降水率; *Y* 是由分析 变量导出的观测值, 定义*Y*=*H*(*X*), *H* 称为观测算 子,本文Y为背景场通过H 算子计算出的降水率; B 是背景误差协方差;O 是观测误差协方差。

降水资料的三维变分同化归结为求公式(1)的 极小化问题,在用最优化方法求解分析变量时,需 要用到目标函数的梯度作为搜索方向。

$$\nabla J = (\boldsymbol{B}^{-1} + \boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{O}^{-1}\boldsymbol{H})(\boldsymbol{X} - \boldsymbol{X}_{\mathrm{b}}) -$$

$$\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{O}^{-1}[\boldsymbol{H}(\boldsymbol{X}) - \boldsymbol{Y}_{\mathrm{o}}], \qquad (2)$$

其中, $H'=\partial H/\partial X$,称为观测算子的切线性算子。 H'T是切线性算子的转置(或伴随)算子。本文采用 改进的郭晓岚对流参数化方案——FSU(Florida State University)对流参数化方案^[10],作为联系卫 星反演的降水率和模式变量之间的观测算子。FSU 对流参数化方案中,降水用如下公式表示:

$$R = I_1(1+\eta)(1-b),$$
 (3)
其中,

$$I_{1} = -\frac{1}{g} \int_{P_{t}}^{P_{b}} \omega \frac{\partial q}{\partial p} \mathrm{d}p$$

表示水汽供给, P_t 、 P_b 分别为云顶和云底的气压。 η 为中尺度幅合因子, b为湿度因子。 η 和b与气柱的平均垂直速度和 700 hPa 相对涡度有关。因此对流参数化方案的输入参数为垂直各层的气压(p), 温度(T),垂直速度(ω),比湿(q)以及 700 hPa 涡度。将垂直速度(ω)和比湿(q)当作同化系统调整的变量,定义降水的观测算子:

$$Y = H(\omega, q), \qquad (4)$$

H 算子即为公式(3)定义的对流参数化方案,由于 观测算子中的垂直速度可以通过水平风场(*u*, *v*)及 地面气压计算,700 hPa 涡度也可以通过水平风场 计算,所以公式(4)可以改写为

$$Y = H(u, v, q).$$
(5)

观测算子 H 对风场和比湿求偏导,得到相应的切线性算子 H'及其伴随算子 H'。对于伴随算子的构造,采用了目前变分同化研究中常用的程序码转置法,直接从观测算子 H 的程序码入手,利用 共轭转置的方法,编写出伴随算子的程序码。代入 公式(1)和(2),可以求出目标函数及其梯度。所以 通过 GRAPES 3D-VAR 系统的最小算法及物理量 的平衡关系,计算目标函数 J 最小时初始场的风场 (u,v)、水汽场(q)和温度场(T)的分布。在 TRMM 卫星观测的降水区域,通过以上方法,用 观测算子调整模式背景场水汽辐合的垂直结构,使 得模式初始场结构更接近实况。

本文的降水率资料为 TRMM 准实时、多卫星 降水分析资料(TRMM Real-Time Multi-Satellite Precipitation Analysis Data Set), 来源于 NASA 的 哥达德航天飞行中心大气实验室(Laboratory for Atmospheres, NASA Goddard Space Flight Center), 该资料是将 TMI(TRMM Microwave Imager, 热带降雨观测卫星微波成像仪)和 SSM/I 微波 通道估测的3小时降水和静止卫星红外通道估测的 每小时降水进行合成[11],估测3小时降水(指该时 刻 90 分钟前和 90 分钟后, 3 小时内平均降水强 度),覆盖范围(50°S~50°N,0°~360°E),分辨率 0.25°。通过用 2002 年 3 个热带气旋登陆广东的过 程中广东省自动站的降水资料对其进行的检验表 明,该资料与地面三小时降水有很好的相关性,可 以反映出热带气旋3小时降水变化的特征[12]。背 景场为 NCEP (National Centers for Environmental Prediction,美国国家环境预报中心)的 AVN (NCEPs Aviation Model, NCEP 航空模式)提供, 空间分辨率 0.625°。预报模式采用 WRF(Weather Research and Forecasting Model, 天气研究预报模式)。

3 结果分析

3.1 单点同化试验

2003 年 8 月 30 日 12 时(国际协调时间,下 同),台风"杜鹃"(0313)中心位于(17.5°N, 133.4°E),降水集中于中心附近,其中(21°N, 132.25°E)附近降水率达到 15.6 mm・h⁻¹,而背景 场通过观测算子 H 计算所得的降水率为 1.579× 10^{-4} mm・s⁻¹(约 0.568 mm・h⁻¹),明显小于观测 降水率,其中对流抬升高度为 1000 hPa,云顶高度 为 400 hPa。通过变分同化之后的背景场再用观测 算子 H 计算所得到的降水率为 2.087×10⁻³ mm・s⁻¹(约 7.512 mm・h⁻¹),该点的降水明显增 加(见表 1)。同化后与同化前相比,风场在该点辐 合量增加,造成上升运动加强,在中心位置的辐合 区以外,有相应的辐散区。图 1a 为 1000 hPa 散度 和水汽的增量场,可以看出中心附近水汽辐合加 强。图 1b 为沿 21°N 纬度线的剖面图,在对流抬升 高度至云顶,水汽增加,主要增湿区域是在低层, 云顶至 250 hPa 湿度无明显变化, 250 hPa 以上湿 度无变化。中心附近整层的风场辐合加强,其中辐 合增量最大的位置是在 500 hPa 至 600 hPa 之间, 在风场的辐合增量区域以外,相应有辐散的增量区 域。该点经过同化之后,在对流抬升高度至云顶, 水汽辐合加强,并向上抬升,所以降水增加。同样 如表1所示,在(16°N,136°E)附近,观测算子H 计算的背景场降水率为 4.328 mm • h⁻¹,明显大于 TRMM 观测降水率 0 mm • h^{-1} , 经过以上方案同 化之后,对流发生区域的水汽辐散分量加强,垂直速 度的下沉分量增加,降水率减少至0.453 mm · h⁻¹ (图略)。从单点同化试验看出,该方案根据观测降 水率与观测算子 H 计算的背景场降水率的差异, 有效调整背景场的水汽辐合、辐散垂直结构,同化 后观测算子 H 计算背景场的降水率比同化前接近 观测值。

3.2 台风"杜鹃"初始场同化分析

控制试验用 WRF 模式对 2003 年 8 月 30 日 12 时刻 AVN 初始场作 72 小时预报, 然后用本方案同 化该时刻前后 1.5 小时内 TRMM 降水率, 同化资 料的范围是(0°~35°N, 70°E~170°E)。用同化后 的资料也作 72 小时预报, 作为同化试验。由于卫 星观测到的降水并不完全由对流产生,本文中仅仅 对观测降水率大于 5 nm • h⁻¹的资料进行了同化。 另外,由于本文涉及的区域主要为低纬度地区,该 区域以对流性降水为主,因此,可以认为同化中采 用的降水率资料为对流降水。考虑到卫星观测无降 水或降水很小的区域, 初始场有可能存在较大的降 水,因此, 对于背景场观测算子 H 计算的降水率在 3.5 nm • h⁻¹以上的区域, TRMM 卫星观测的降 水率不论大小都将作为观测数据参与同化。

表 1 单点同化试验前后观测算子计算的降水率及 TRMM 卫星观测降水率

Table 1 TRMM rain rate observation and rain rate calculated before and after assimilation in the single observation test

坐标	TRMM 卫星观测降水率	同化前计算的降水率	同化后计算的降水率
Coordinate	TRMM rain rate observation/	Rain rate calculated before assimila-	Rain rate calculated after as-
	$\mathrm{mm} \cdot \mathrm{h}^{-1}$	tion /mm • h^{-1}	similation /mm $\cdot \ h^{-1}$
(21°N,132.25°E)	15.6	0.568	7.512
(16°N,136°E)	0.0	4.328	0.453



图 1 单点试验 1000 hPa 散度和比湿的增量场 (a) 以及散度和比湿的增量沿 21°N 纬度线的剖面图 (b)。阴影部分为比湿,单位: g•m⁻³;等值线为散度,单位: 10⁻⁶s⁻¹

Fig. 1 In the single observation test the increment of 1000 hPa wind divergence (contour, units: $10^{-6} s^{-1}$) and water vapor (shadow, units: $g \cdot m^{-3}$)(a), and vertical cross section of wind divergence and water vapor along $21^{\circ}N(b)$



图 2 1000 hPa 散度(等值线,单位: 10⁻⁶ s⁻¹)和比湿(阴影,单位: g•m⁻³)的增量场

Fig. 2 The increment of 1000 hPa wind divergence (contour, units: $10^{-6}s^{-1}$) and water vapor (shadow, units: $g \cdot m^{-3}$)

图 2 为 1000 hPa 散度和比湿的增量场,可以 发现,台风"杜鹃"所在位置附近水汽辐合加强, 另外,在中国东部、日本南部、中南半岛南部、菲 律宾附近以及太平洋上部分区域水汽辐合加强,对 比这个时刻的 TRMM 降水观测资料可以发现,这 些区域都有比较大的降水观测值,并且大于初始场 通过观测算子 H 计算的降水率。经过同化之后, 这些区域的降水率都明显增加了。中国大陆上大部 分区域水汽辐散增加,使得这些区域同化之后的降 水率减少。 3.2.1 同化前后"杜鹃"初始场风场结构的变化 图 3a、b 为同化前后台风中心附近 1000 hPa 的流场以及风速大小,可以看出,同化后(图 3b)最 大风速区位于台风中心的东北侧,风速超过 14 m・s⁻¹,最大达到 15.2 m・s⁻¹,其次是中心的 东南方向。风速达 12~14 m・s⁻¹。同化前东北侧 和东南侧最大风速都约为 12 m・s⁻¹(图 3a)。与同 化前相比,在中心北侧辐合风量增加,风速增大 1.5~3.5 m・s⁻¹,导致东北侧最大风速大于西南 方向。从流场图也可以看出同化后台风中心及其北



图 3 初始时刻风场分布(阴影部分为风速大小): (a)同化前; (b)同化后; (c)QuikScat 卫星反演的风场 Fig. 3 The wind field at the initial time (wind speed shown in shadow): (a) Before assimilation; (b) after assimilation; (c) QuikScat wind field

侧流线密度更大,表明该区域风速增大。图 3c 为 30 日 12 时 QuikScat 反演的风场分布,东北和东南 各有两个大风区,风速都在 12 m • s⁻¹以上,其中 东北侧最大风速达 15.1 m • s⁻¹,大于西南侧的最 大风速。因此,同化之后风场分布更接近实况。 3.2.2 同化前后"杜鹃"初始时刻降水结构变化

图 4c 为 TRMM 卫星反演的 30 日 12 时"杜鹃" 降水率结构,此时"杜鹃"的中心位置位于(17.5°N, 133.4°E),雨带集中于中心附近西侧,西北和西南分别 有两个降水中心,部分区域的降水率在8 mm•h⁻¹以 上,中心最大降水率达到 15 mm•h⁻¹,在台风外 围菲律宾岛及其东部的太平洋上也有两个雨带,其 中菲律宾岛局部降水率超过 12 mm•h⁻¹。图 4a 为 控制试验 30 日 12 时至 15 时三小时累积降水,此 时网格降水为零,降水完全由对流产生,外围雨带 降水比中心附近大,外围雨带主要位于菲律宾岛及 其以东、以及台风的东部,最大降水8~12 mm,台 风中心西北和东南侧也有降水,量级6~8 mm,西 北侧个别点的降水达到8~10 mm。同化试验中 (图4b),降水也是由对流产生,中心附近西北侧降 水明显变大,大部分区域的降水超过12 mm,8 mm 降水等值线向南延伸至台风的东南侧。外围雨带在 菲律宾岛上局部增强,雨带位置变化较小。对比同 化前后,初始时刻3小时降水结构由外围大、中心附 近小,调整为中心附近西北侧大、外围小,更接近 TRMM卫星观测的降水率分布。

3.2.3 同化前后"杜鹃"初始场动力、热力结构变化 由以上分析发现,经同化后台风"杜鹃"的初



图 4 控制试验和 (a) 同化试验 (b) 初始时刻 3 小时累积降水;初始时刻 TRMM 卫星降水率 (c) Fig. 4 3-h rain forecast at the initial time in the control test (a) and the assimilation test (b); TRMM rain rate (c)



图 5 同化前(a)和同化后(b)散度(阴影,单位: $10^{-5}s^{-1}$)和相对湿度(等值线,单位: %)沿 $A(25^{\circ}N, 125^{\circ}E)$ 和 $B(10^{\circ}N, 142^{\circ}E)$ 的垂直剖面图 Fig. 5 Vertical cross section of wind divergence (shadow, units: $10^{-5} \cdot s^{-1}$) along $A(25^{\circ}N, 125^{\circ}E)$ and $B(10^{\circ}N, 142^{\circ}E)$ and relative humidity (contour, units: %)

始时刻降水结构产生了变化,特别是台风中心附近的西北侧,降水变化最为明显,沿点 A(25°N, 125°E)、B(10°N, 142°E),经过台风中心,作西北-东南向剖面图,下面从动力学和热力学方面,分析降水变化的原因。

4期 No.4

这个剖面上同化前后散度场和相对湿度场的垂 直结构如图 5 所示,图中等值线为相对湿度,阴影 部分为散度场分布,可以看出,同化前(图 5a),台 风中心附近风场从低层到高层辐合辐散相间排列, 低层的水汽输送只能向上输送到 800 hPa 至 500 hPa, 500 hPa 至 200 hPa 之间有一条水平方向 的水汽输送带,对比图 4a 中台风中心东北方向 131°E~133°E之间有雨带存在,图 5a 中该位置 700 hPa 对应有较强的辐散中心,800 hPa 以下水 汽辐合,低层向上输送的水汽有限,500 hPa 至 300 hPa之间也有水汽辐合,200 hPa 附近辐散,因此 该区域的降水与低层的水汽向上输送和高层水汽辐 合输送有关。同化后(图 5b),在中心附近形成强 烈的辐合上升区,最高延伸到 200 hPa,中心位于 400~500 hPa之间,相对湿度增加,低层向上输送 的水汽增加,中高层东侧的水汽输送带减弱,台风 中心东北方向 131°E~133°E 之间, 散度场的垂直 结构与同化之前类似,但低层向上输送的水汽增 加,500 hPa 至 300 hPa 之间水汽辐合也加强,可 以看出,台风中心向上输送的水汽是这部分水汽输

送的重要来源。同化后,台风中心西北方向水汽向 上输送增加,这是导致该位置降水显著增加的原因 之一。

计算同化之后初始场的假相当位温(θ_{se}),并沿 点 A(25°N, 125°E)、B(10°N, 142°E)作剖面图,如 图 6 中等值线所示。图 6 中阴影部分为 θ_{se}相对于 原来初始场的增量。台风中心西北侧低层 θ_{se}显著 增加,表明这个区域与同化前相比温度升高、湿度 增大,由 θ_{se}的分布可以看出,在台风中心西北侧



图 6 同化后沿 *A*(25°N, 125°E)和 *B*(10°N, 142°E)*θ*_{se}(等值线) 及 *θ*_{se}的增量(阴影)剖面图(单位: K)

Fig. 6 Vertical cross section of θ_{se} (contour) after assimilation and its increment (shadow) along $A(25^{\circ}N, 125^{\circ}E)$ and $B(10^{\circ}N, 142^{\circ}E)$ (units: K) 500 hPa 以下为对流不稳定,因此,同化之后在台风中心的西北侧降水增大。

4 对台风数值预报的改进

4.1 台风路径预报的改进

将控制试验和同化试验分别作 72 小时预报, 根据 850 hPa 高度场定位台风"杜鹃"的路径,如 图 7 所示,其中,带台风符号的实线为国家气象 中心发布的台风每三小时定位,空心方框是控制 试验每三小时的台风位置,实心圆点是同化试验 每三小时的台风位置。每隔 12 小时在图上用台 风符号表示台风的位置。控制试验中台风路径有 几次明显的向南偏折、然后再向北的过程,如 8 月 31 日 00~06 时、9 月 1 日12~18 时、9 月 2 日 06 ~12 时这三个时段,但实况中并没有出现这种 偏折。同化试验中这几个时段都没有明显的偏折 现象。图 8a 为控制试验和同化试验每三小时的预 报误差,可以看出在包括初始位置在内的 25 次台 风定位中,同化试验有 15 次的误差小于控制试 验,其中 21 小时预报(8月 31 日 09 时)开始至 54 小时预报(9月1日 18 时),连续 12 次预报中,同 化试验有 10 次误差小于控制试验。图 8b 为 24 次 预报的移向误差,同化试验有 14 次误差小于控制 试验。控制试验有 6 次移向误差超过 40°,个别时 刻超过 50°,而同化试验移向误差都在 40°以下。 从两次试验的路径误差统计来看,两者中心位置 误差的绝对值整体相差并不大,但同化试验优于 控制试验。表明该方案同化 TRMM 卫星反演的 降水资料对台风"杜鹃"的路径预报有正面影响。

4.2 对台风降水预报的改进

如前文所述,同化试验改善了初始时刻台风中 心附近西北侧的降水结构。随着台风向西推进,控 制试验和同化试验中台风的西侧降水迅速发展,并 逐步向南发展卷入台风中心,同化试验台风中心降



图 7 台风"杜鹃"路径预报 Fig. 7 Typhoon Dujuan's track forecast





Fig. 8 Typhoon Dujuan's forecasted position error (a) and direction error (b) in the control test and the assimilation test

水的组织结构更为明显,从 TRMM 卫星反演的降 水率图上可以看出,台风中心附近一直维持较强的 降水(图略)。图9为31日09~12时3小时累积降 水,控制试验(图9a)和同化试验(图9b)在台风西 侧都有明显的雨带,两次试验台风西侧降水的量级 和位置都差别不大,在台风中心附近,同化试验的 雨带组织结构性更强,并且量级也大于同化试验, 从 TRMM 卫星的观测来看,这个时刻在台风中心 偏东侧及西北侧都有结构性很强的雨带(图略),同 化试验更接近卫星观测实况。

同化试验对 24 小时累积降水的预报比控制试验也有改进,图 10a 为控制试验 24 小时累积降水,

台风降水主要在外围的南部,台风中心位置附近降水只有很小的区域超过 50 mm,而同化试验(图 10b),台风南部的外围雨带和控制试验基本一样,中心位置降水明显增加,50 mm 以上的降水区域范围增大,而 TRMM 卫星反演降水率的 24 小时累积降水主要集中于台风中心附近(图 10c)。因此,同化试验改进了台风中心附近的 24 小时累积降水的预报。

综上所述,同化试验24小时降水预报的效果 优于控制试验,无论是3小时累积降水还是24小 时累积降水,降水结构都更接近卫星观测实 况。





Fig. 9 Precipitation forecast from 0900 UTC to 1200 UTC on 31 Aug in (a) the control test (b) the assimilation test



图 10 24 小时累积降水预报: (a) 控制试验; (b) 同化试验; (c) TRMM 卫星实况 Fig. 10 24-h precipitation forecast: (a) Control test; (b) assimilation test; (c) TRMM observation

5 结论

本文在 GRAPES 三维变分同化系统的基础上, 用改进的郭晓岚对流参数化方案^[10]作为观测算子, 根据观测降水率与观测算子计算的背景场降水率的 差异,调整背景场水汽辐合、辐散的垂直结构,对 TRMM 卫星反演的降水率资料进行了变分同化, 结果表明:

(1) 单点试验表明该方案可以有效调整背景场 水汽辐合、辐散的垂直结构,同化后观测算子计算 的降水率更接近 TRMM 卫星观测值;

(2)可以有效地改进背景场的动力和热力结构,台风的初始风场更接近QuikScat卫星反演的风场,初始时刻3小时降水的结构更接近TRMM卫星反演降水率结构;

(3)对台风"杜鹃"控制试验和同化试验的对 比分析,表明同化降水率资料对台风的路径预报和 降水预报都有改进。

参考文献(References)

- [1] Pu Zhaoxia, Tao Wei-Kuo, Braun S, et al. The impact of TRMM data on mesoscale numerical simulation of Supertyphoon Paka. Mon. Wea. Rev., 2002, 130(10): 2448~2458
- [2] 丁伟钰,林爱兰. GMS5 多通道数据与 TRMM 资料估测华 南地区热带气旋降水.热带气象学报,2003,19(增刊): 74~80

Ding Weiyu, Lin Ailan. Using GMS5 multispectral data and TRMM rain rate to estimate tropical cyclone rain rate in South China. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2003, **19**(suppl.): $74 \sim 80$

[3] Fiorino M, Warner T T. Incorporating surface winds and rainfall rates into the initialization of a mesoscale hurricane model. Mon. Wea. Rev., 1981, 109(9): 1914~1929

- [4] Donner L J. An initialization for cumulus convection in numerical weather prediction models. Mon. Wea. Rev., 1988, 116(2): 377~385
- [5] Krishnamurti T N, Ingles K, Cocke S, et al. Details of low latitude medium-range numerical weather prediction using a global spectra model. Part II: Effects of orography and physical initialization. J. Meteor. Soc. Japan, 1984, 62: 613~ 649
- [6] Krishnamurti T N, Bedi H S. Cumulus parameterization and rainfall rates: Part III. Mon. Wea. Rev., 1988, 116(3): 583~599
- [7] 朱国富. 观测资料同化与有限区模式初期降水预报. 北京大 学学报(自然科学版), 1999, 35(1): 81~88
 Zhu Guofu. Observation data assimilation and precipitation prediction of the limited-area numerical model in the early stage. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese), 1999, 35(1): 81~88
- Zupanski D, Mesinger F. Four-dimensional variational assimilation of precipitation data. Mon. Wea. Rev., 1995, 123 (4): 1112~1127
- [9] Xiao Qingnong, Zou X, Kuo Y-H. Incorporating the SSM/I-Derived precipitable water and rainfall rate into a numerical model: A case study for the ERICA IOP-4 cyclone. Mon. Wea. Rev., 2000, 128(1): 87~108
- [10] Krishnamurti N, Bounova L. An Introduction to Numerical Weather Prediction Techniques. CRC Press, 1996. 154~162
- [11] Kummerow C, Olsen W S, Giglio L. A simplified scheme for obtaining precipitation and vertical hydrometeor profiles from passive microwave sensors. *IEEE Transactions on Geoscience* and Remote Sensing, 1998, 34(5): 1213~1232
- [12] 丁伟钰,陈子通.利用 TRMM 资料分析 2002 年登陆广东的 热带气旋降水分布特征.应用气象学报,2004,15(4): 436~444
 Ding Weiyu, Chen Zitong. Using TRMM data to analyse the precipitation distributions of tropic cyclones' landfall in

Guangdong, Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 2004, **15**(4): 436~444