

对流天气系统自动站雨量资料同化对降雨预报的影响

丁伟钰 万齐林 闫敬华 蒙伟光 陈子通

中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080

摘 要 利用 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, 针对对流天气系统特点, 用改进的郭晓岚对流参数化方案作为观测算子, 同化广东省自动站记录的对流天气系统的雨量资料, 并且与同化探空资料进行了比较。在雨带有明显改进的区域, 分别同化这两种资料都可以调整大气低层水汽辐合增加(或辐散), 对流层中下层增暖增湿(或变冷变干), 从而增加(或减少)降水, 表明降水的同化方案对初始场的调整在一定程度上符合探空观测。进一步讨论同时同化这两种资料对暴雨预报的影响, 结果表明同化自动站降水资料对暴雨系统短时预报有正面影响, 同时同化这两种资料, 可以弥补资料的不足, 改进雨带位置和结构的预报

关键词 全球/区域同化预报系统 三维变分同化系统 自动站雨量 对流天气系统

文章编号 1006-9895(2006)02-0317-10

中图分类号 P457

文献标识码 A

Variational Assimilation of Automatic Weather Stations Rainfall in Convective Systems and its Impact on Rain Forecast

DING Wei-Yu, WAN Qi-Lin, YAN Jing-Hua, MENG Wei-Guang, and CHEN Zi-Tong

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

Abstract The lack of data over the tropical regions contributes greatly to the uncertainties in the initial state of numeric weather prediction models, which in turn limits their forecast skill. Because in tropical regions the atmospheric motions are driven largely by diabatic processes, precipitation observations could be a valuable data source for improving initial fields. In Guangdong Province, there are almost 600 automatic weather stations (AWS), providing hourly rainfall records. Focusing on the convective system, this study use the extension of the KUO cumulus parameter scheme as the observation operator to assimilate the AWS rainfall records in Guangdong Province on the GRAPES (Global and Regional Assimilation and Prediction Enhanced System) 3D variational assimilation system, and compares with the assimilation of sounding data. In the case of 1 April 2004, hourly AWS rainfall records are compared with the GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) infrared channel temperature, TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) rain rate data and flash location observations. Results show that the hourly AWS rain records can properly describe the convective system rain bands. Using WRF (Weather Research and Forecasting Model) as the forecast model, the control test shows that the initial rain bands are located in the northern part of the observation. Three assimilation experiments are designed to assimilate the AWS rain records sounding data and all the data respectively. Results show that in the regions where the initial rain bands are adjusted, assimilating the AWS rainfall and sounding data respectively both can adjust the low level atmosphere moisture convergence (or divergence), low and middle troposphere temperature and moisture increasing (or decreasing) to enhance (or weaken) the initial rainfall. The results mean that the adjustment by AWS rain assimilation scheme is

consistent with the sounding data assimilation to some extent. This paper also discusses the influence of AWS rainfall assimilation on the short-range rain forecast. Results show that AWS rainfall assimilation scheme has the positive impact on the convective system short-range rain forecast. Assimilating AWS rainfall and sounding data at the same time can eliminate the deficiency of both the data, improve the rain location and structure forecast.

Key words Global and Regional Assimilation and Prediction Enhanced System (GRAPES) 3D variational assimilation, automatic weather stations (AWS) rainfall, convective system

1 引言

热带地区由于缺少观测资料,很难订正数值模式初始场,而热带大气运动很大程度上受到热力过程影响,因此降水资料同化在热带地区尤为重要。国内外在降水同化方面开展了很多研究工作,Hou等^[1]采用一维连续变分同化的方法对 TMI (TRMM Microwave Imager, 热带降雨观测卫星微波成像仪)和 SSM/I(Special Sensor Microwave Imager, 特别微波成像辐射计)降水进行同化,针对台风 Bonnie 和 Floyd 的试验表明同化降水资料可以分析出更真实的台风结构,改进台风 5 天的路径预报和降水预报。Falkovich 等^[2]根据观测降水采用 Nudging 方法订正水汽。Zou 等^[3]采用 MM5 的四维变分同化系统,利用较简单的湿物理过程来同化降水,成功模拟出中尺度对流系统,结果表明在同化常规观测资料的同时,同化降水资料可以提高中尺度对流系统的降水预报水平。丁伟钰等^[4]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^[5]作为观测算子,来同化 TRMM 卫星反演的降水率资料,有效改进背景场的动力和热力结构,对台风的路径预报和降水预报都有改进。朱国富^[6]用牛顿连续松弛逼近技术和降水一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。目前,变分同化技术同化降水大多采用四维变分同化系统,现阶段四维变分同化系统还不适合作为同化业务的系统。中国气象科学研究院开发的 GRAPES 三维变分同化系统^[7],具有业务化运行能力,但目前没有开展利用该系统同化热带对流天气系统的自动站降水的研究工作。

广东省气象局已经建立了六百多个自动气象站(Automatic Weather Stations, 简称 AWS),资料

的密集程度已经居于国际先进行列,然而自动站资料在数值模式中的应用在国内外一直都是具有挑战性的工作,其难点在于自动站观测的风场和温度场受地表的影响非常大。随着珠江三角洲地区数值预报模式的发展,自动站观测资料如何为数值模式提供初始化信息,已经成为迫切需要解决的问题之一。广东省组建的自动站网络,可以持续稳定地提供每小时的累计降雨量,由于自动站降水资料的质量和代表性受地形影响相对其他物理量小,并且在多个台风登陆过程中与 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission, 热带降水监测计划)卫星反演的准实时、准全球降水率资料有很好的相关性^[8],在预报业务和科研工作中发挥了越来越重要的作用。本文针对热带地区常见的对流性天气系统,根据自动站雨量观测,在 GRAPES 三维变分同化系统的基础上,采用改进的郭晓岚对流参数化方案^[5]作为观测算子,分析了自动站雨量资料对对流系统降水预报的影响。

2 资料及同化方案

背景场资料采用 NCEP(National Centers for Environmental Prediction, 美国国家环境预报中心)的再分析资料,分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$,降水资料采用广东省地面自动站每小时的雨量观测资料。图 1 给出了 2004 年 4 月 1 日广东省自动站有效观测的站点的分布图。在这次天气过程中一共有 417 个自动站的纪录有效。由于广东省,尤其是珠江三角洲地区自动站非常密集,背景场原有的分辨率不足以描述自动站观测的中尺度天气系统,因此对背景场进行插值,处理成为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,控制试验以及同化分析都采用经过插值处理的背景场。另外,还采用全球常规探空观测数据,用来对比自动站雨量观测数据同化与常规探空数据同化的影响。

Loren^[9]提出气象资料三维变分同化可以归结为求目标函数 J 的极小化问题。定义目标函数 J

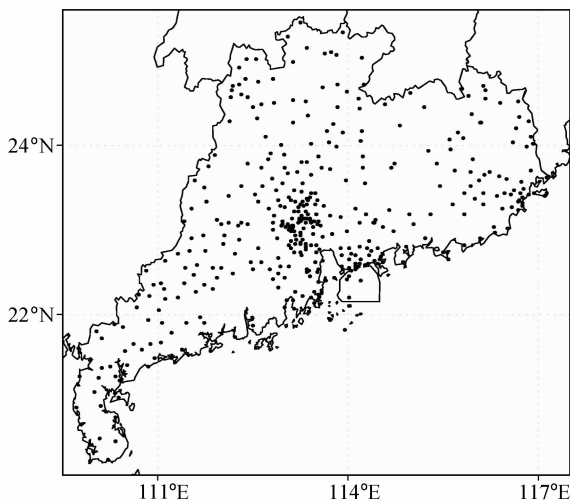


图1 2004年4月1日广东省自动气象站分布

Fig.1 Automatic Weather Stations (AWS) observation in Guangdong Province on 1 Apr 2004

及其梯度为

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}[(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + (\mathbf{y} - \mathbf{y}_o)^T \mathbf{O}^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{y}_o)], \quad (1)$$

$$\nabla J = (\mathbf{B}^{-1} + \mathbf{H}^T \mathbf{O}^{-1} \mathbf{H})(\mathbf{x} + \mathbf{x}_b) - \mathbf{H}'^T \mathbf{O}^{-1}(\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{y}_o), \quad (2)$$

其中, $\mathbf{x}$ 是 n 维的分析变量向量, $\mathbf{x}_b$ 是 n 维的背景场向量, $\mathbf{y}_o$ 是 m 维的观测向量, $\mathbf{y}$ 是由分析变量导出的 m 维的观测向量, $\mathbf{B}$ 是 $N \times N$ 维的背景误差协方差矩阵, $\mathbf{O}$ 是 $M \times N$ 维的观测误差协方差矩阵。定义 $\mathbf{y} = \mathbf{H}(\mathbf{x})$, $\mathbf{H}$ 称为观测算子, $\mathbf{H}' = \partial \mathbf{H} / \partial \mathbf{x}$, 称为观测算子的切线性算子。 $\mathbf{H}'^T$ 是切线性算子的转置(或伴随)算子。由中国气象科学研究院开发的 GRAPES 三维变分同化系统^[7]是适用于格点模式的三维变分分析方案, 该方案对目标函数采用增量形式^[10]来减少在极小化过程中代价函数的计算开销。通过变量变换对目标函数进行预调节, 避免直接计算背景误差协方差逆矩阵的困难, 而且在实际计算过程中收敛迅速。在目标函数 J 极小化过程中采用 LBFGS 方法^[11](有限内存的 BFGS 方法 LBFGS: Limited memory BFGS method)。BFGS 算法被认为是迄今最好的拟牛顿法, 它是由 Broyden^[12]、Fletcher^[13]、Goldfarb^[14]和 Shanno^[15]等在 1970 年给出的, LBFGS 算法^[11]是可以有效解决变量个数很大的无约束最优化问题。

在目标函数和梯度的公式中, 当 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{y}$ 是相同

的物理量时, $\mathbf{H}$ 算子只是空间插值。本文探空资料的同化就是采用 GRAPES-3DVAR 系统中已经开发好的线性空间插值算子。如果 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{y}$ 有不同的物理属性时, 观测算子为从模式空间到观测空间的映射算子, 例如 ATOVS 辐射资料同化就是属于分析向量和观测向量不同的情况。张华等^[16]利用辐射传输方程作为观测算子直接同化 ATOVS 资料, 改进了台风路径预报。本文中观测量是自动站 1 小时降水, 目前 GRAPES 三维变分同化系统中没有降水同化的观测算子。由于本文针对的是对流天气系统, 因此采用了对流参数化方案作为观测算子。Fillion 等^[17]利用 Kuo 参数化方案和 Arakawa-Schubert 参数化方案作一维降水变分同化研究, 改进了垂直方向上的温度和湿度廓线分布。考虑到郭晓岚对流参数化方案可以较好地刻画对流降水的总体特征, 因此本文的观测算子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^[5], 并构造了相应的切线性算子和伴随算子。FSU 对流参数化方案中, 降水表示为

$$R = I_1(1 + \eta)(1 - b), \quad (3)$$

其中,

$$I_1 = -\frac{1}{g} \int_{p_T}^{p_B} \omega \frac{\partial q}{\partial p} dp$$

表示水汽供给, p_T 、 p_B 分别为云顶和云底的气压, $I_1 \eta$ 表示中尺度水汽供给。 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。 ω 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, 因此可以将由对流参数化方案构造的观测算子定义为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}(u, v, q). \quad (4)$$

降水观测算子将 u 、 v 和 q 当作同化系统调整的变量。观测算子 $\mathbf{H}$ 对风场和比湿求偏导, 得到相应的切线性算子 $\mathbf{H}'$, 伴随算子 $\mathbf{H}'^T$ 的构造采用目前变分同化研究中常用的程序码转置法, 编写出伴随算子的程序码。根据已有研究对自动站降水资料误差的分析^[18], 本文降水观测误差取为其雨量的 20%, 在观测有降水的位置, 由分析变量经过观测算子计算出模拟的降水, 将观测的降水[公式(1)中的 $\mathbf{y}$]和模拟的降水[公式(1)中的 $\mathbf{y}_o$]代入目标函数 J 及其梯度[公式(1)、(2)], 通过 GRAPES 3D-

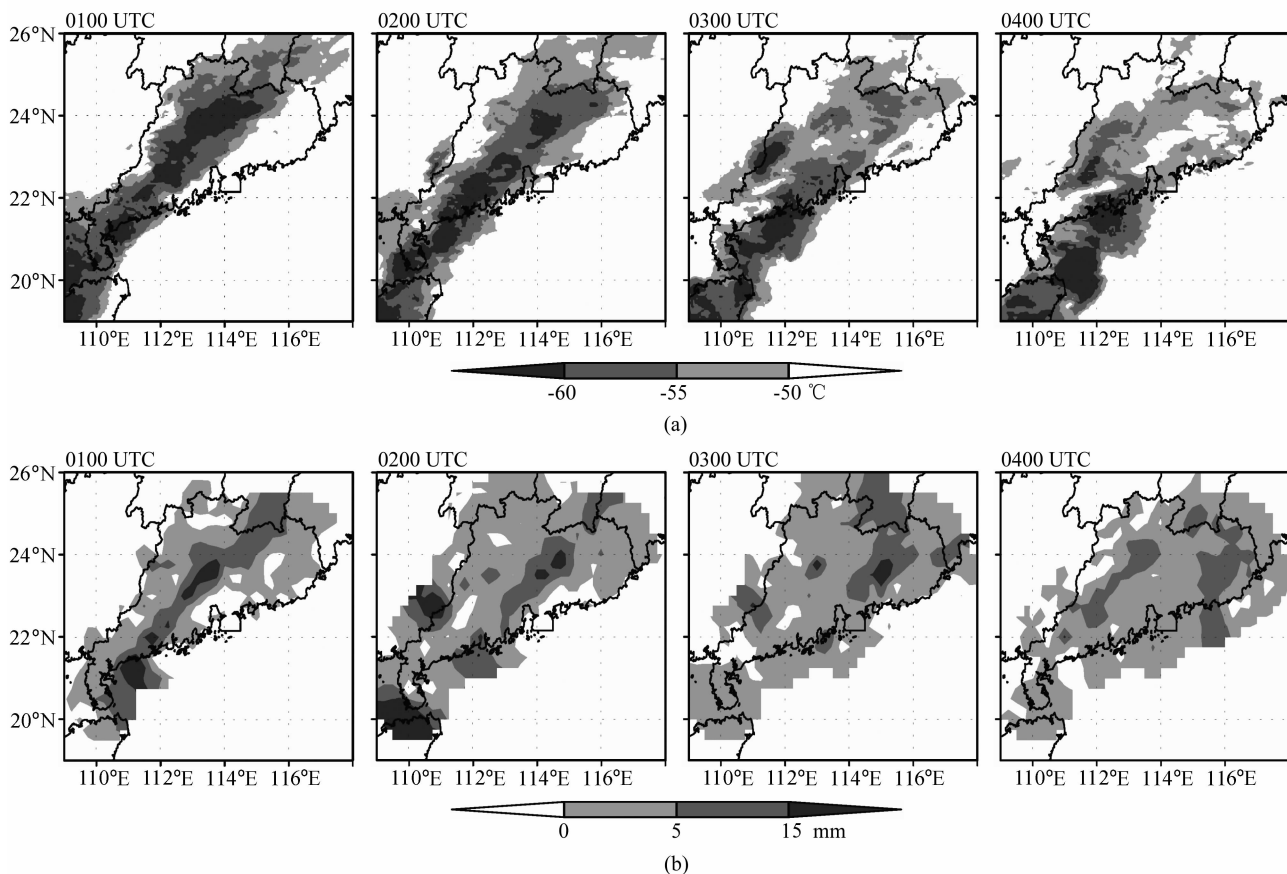


图2 2004年4月1日00~04时GOES-9 IR1通道逐时亮温分布(a)和自动站过去1小时累积降水分布(b)

Fig. 2 GOES-9 IR1 channel temperature (a) and AWS hourly accumulated rainfall (b) from 0000 UTC to 0400 UTC on 1 Apr 2004

VAR系统的最小算法及物理量的平衡关系,不断调整分析场,计算目标函数 J 最小时分析场的 u 、 v 、 q 和 T 的分布。

文献[4]采用该方案有效改进背景场的动力和热力结构,并通过同化单点降水观测资料的方式详细分析了同化方案如何通过降水观测来调整初始场结构。本文根据2004年4月1日00至01时(国际协调时,下同)自动站1小时累积降水(图2b)和模式计算的降水之间的差异,用以上同化方案调整模式背景场水汽辐合、辐散的垂直结构,从而改进模式初始的降水结构。将自动站降水同化对降水预报的改进与探空资料同化进行比较,并进一步分析了同时同化两种资料对降水预报的影响。

3 强对流天气过程及自动站降水观测质量分析

2004年3月30日至4月1日,由于受北方多股弱冷空气南下和低槽的共同影响,广东省上空出

现较长时间的冷暖空气交汇,致使广东省遭受强雷暴影响。从GOES-9的IR1通道亮温资料可以看出,4月1日00时至06时,有东北-西南向的强对流云系从西北向东南方向影响广东省。图2中给出01时至04时过去1小时地面自动站累积降水观测数据以及对应时刻的GOES-9卫星IR1通道亮温,可以看出自动站降水大的区域对应有卫星观测的低亮温区,即地面自动站观测的强降水区域对应于卫星观测到的强对流系统。03时51分至55分TRMM卫星经过广东省,图3中TRMM卫星观测轨道内广东省陆地上降水率分布与03~04时自动站记录的降水分布有很好的对应关系。自动站在粤东观测到有较为明显的降水;GOES-9卫星观测到该区域的对流开始减弱,附近的海洋上有强对流系统存在;而TRMM卫星在粤东也观测到了较为明显的降水,沿海区域附近的降水,特别是海南岛东北面的强降水,正好对应于GOES-9卫星资料观测的强对流系统。这三种资料的相互印证,表明自动

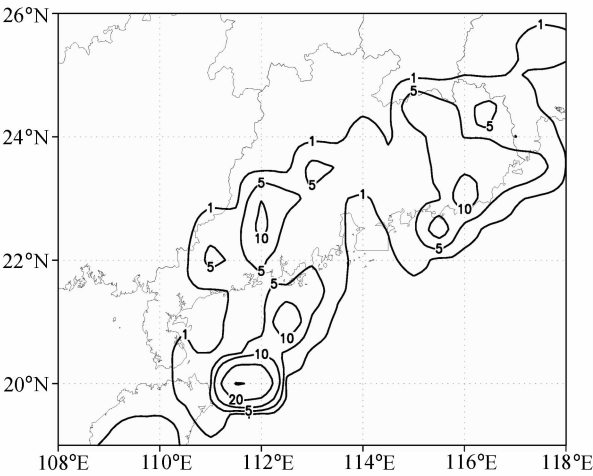


图 3 2004 年 4 月 1 日 03 时 51 分至 55 分 TRMM 卫星观测的降水率(单位: mm)
Fig. 3 TRMM rain rate observations from 0351 UTC to 0355 UTC on 1 Apr 2004 (units: mm)

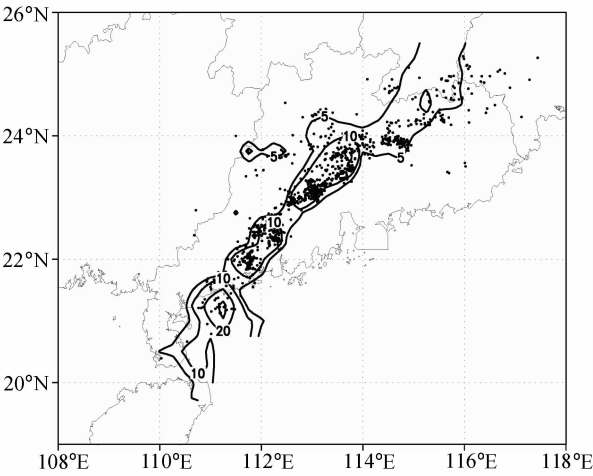


图 4 2004 年 4 月 1 日 01 时自动站 1 小时累积降水与闪电定位仪观测的闪电位置合成图。等值线: 降水(单位: mm); 黑点: 闪电的位置
Fig. 4 AWS hourly accumulated rainfall (contour, units: mm) and flash location observations (dot) at 0100 UTC 1 Apr 2004

站雨量观测是可信的。为了更进一步检验自动站降水资料的可信度以及这次降水过程是否由强对流天气系统造成, 将广东省闪电定位仪观测的闪电位置与广东省地面自动站的雨量观测进行了对比, 发现整个降水过程与观测的闪电位置有非常好的对应, 强降水出现的区域, 对应有密集的闪电发生。图 4 为 00~01 时自动站雨量观测与闪电位置的叠加, 可以看出闪电大部份发生于自动站 5 mm 以上雨量的区域, 雨量大的位置闪电发生的次数多。综合自

动站雨量观测与 GOES-9 卫星、TRMM 卫星以及闪电定位观测的对比, 发现广东省的自动站逐时雨量观测可以反映出强对流天气系统的降水分布特征。

4 对降雨预报的影响

为了比较同化自动站雨量观测资料和常规观测资料的影响, 设计了四组试验(表 1)。采用 WRF 模式, 空间分辨率 12 km, 每组试验前 4 小时内逐时降水预报如图 5a~d 所示。

4.1 对初始时刻雨带结构的影响

控制试验初始时刻(00~01 时)降水主要集中于 24°N 以北的粤北一带(图 5a), 与广东自动站记录的降水分布不同(图 2b)。同化试验 1 相对于控制试验在初始时刻降水明显受到自动站降水资料的影响, 在初始时刻两者的差值图(图 6a)上, 可以更清楚地看出同化试验 1 相对于控制试验雨带明显增加的位置与自动站观测的雨带位置基本一致, 而粤北由于自动站观测的降水弱, 控制试验在粤北有较大的降水, 因此同化自动站降水资料后, 同化试验 1 在粤北区域降水明显减弱。同化探空资料后, 同化试验 2 初始时刻粤北的降水也略有减少, 沿着自动站观测的雨带方向降水略有增加(图 6b)。比较同化试验 1 和 2 发现, 两者相对于控制试验都可以造成粤北地区降水减弱, 雨带向南移, 只是同化试验 1 这种趋势更加明显。由于分别同化自动站雨量资料和探空资料对初始时刻广东地区降水影响的趋势类似, 因此从同化试验 3 可以看出, 相对于控制试验(如图 6c), 初始时刻粤北的降水略有减弱, 南面雨带增强的位置与自动站观测的雨带基本一致。

从图 6 中发现三次同化试验都造成了粤北降水减弱, 雨带南移, 为了分析不同观测资料同化如何

表 1 各试验中同化的资料
Table 1 Data assimilated in the experiments

试验名称 Experiment name	同化观测资料 Assimilated data
控制试验 Control expt	无 None
同化试验 1 Expt 1	广东省自动站雨量资料 AWS rainfall records
同化试验 2 Expt 2	常规探空资料 Sounding data
同化试验 3 Expt 3	广东省自动站雨量和常规探空资料 AWS rainfall records and sounding data

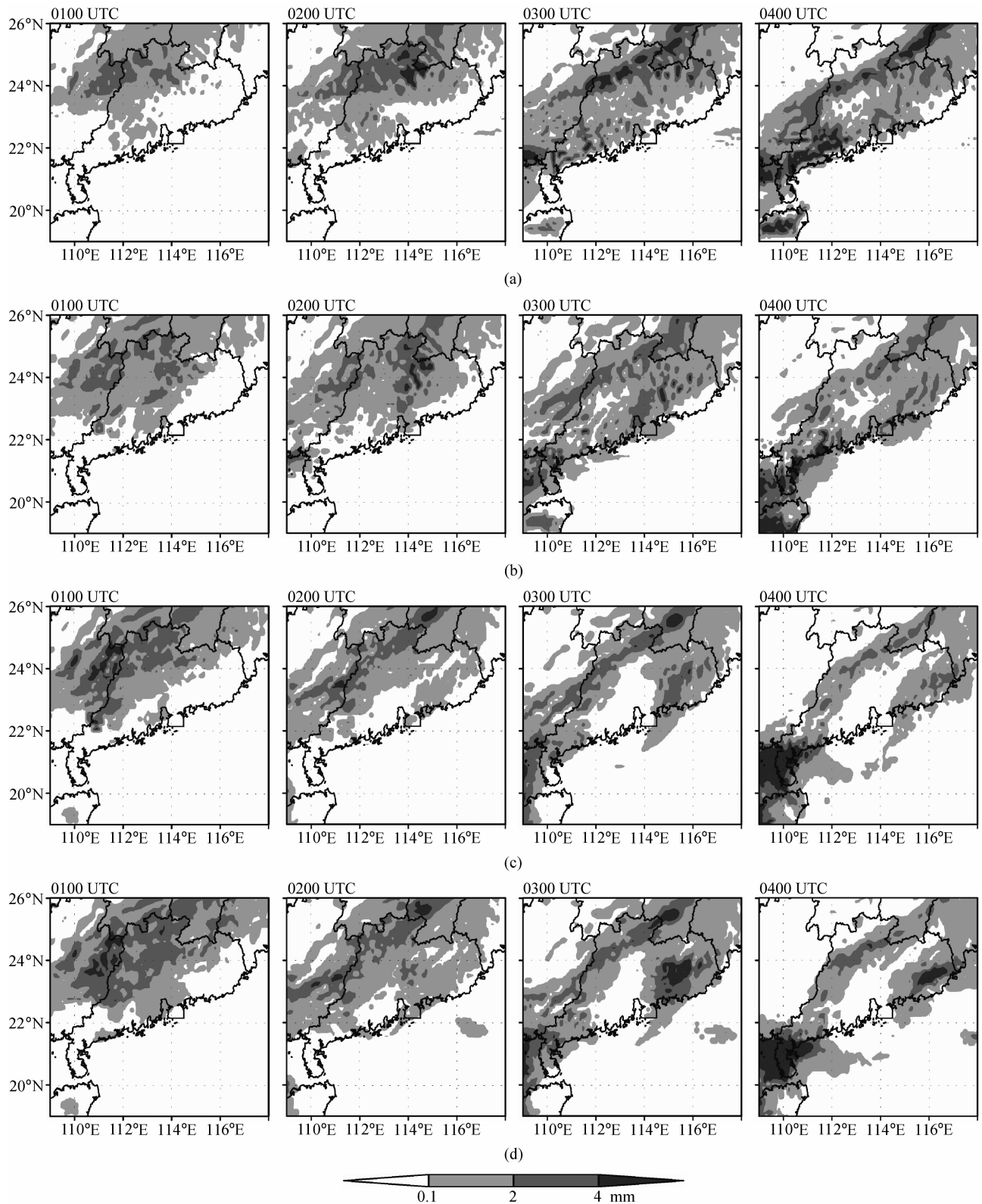


图5 四次试验前4小时逐时累积降水分布(单位: mm): (a)控制试验; (b)同化试验1; (c)同化试验2; (d)同化试验3

Fig. 5 Hourly accumulated rainfall in the assimilation experiments (units; mm): (a) Control experiment; (b) assimilation experiment 1; (c) assimilation experiment 2; (d) assimilation experiment 3

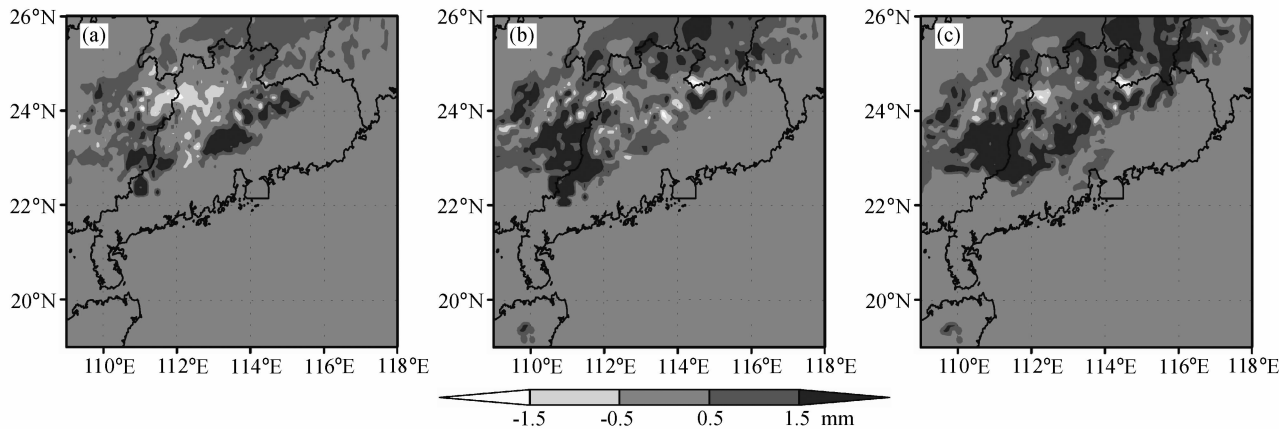


图 6 同化试验 1~3 相对于控制试验初始 1 小时累积降水的变化量(单位: mm): (a)同化试验 1 减去控制试验; (b)同化试验 2 减去控制试验; (c)同化试验 3 减去控制试验
Fig. 6 The difference of the initial 1-hour accumulated rainfall forecast (units: mm): (a) Expt 1 minus control expt; (b) expt 2 minus control expt; (c) expt 3 minus control expt

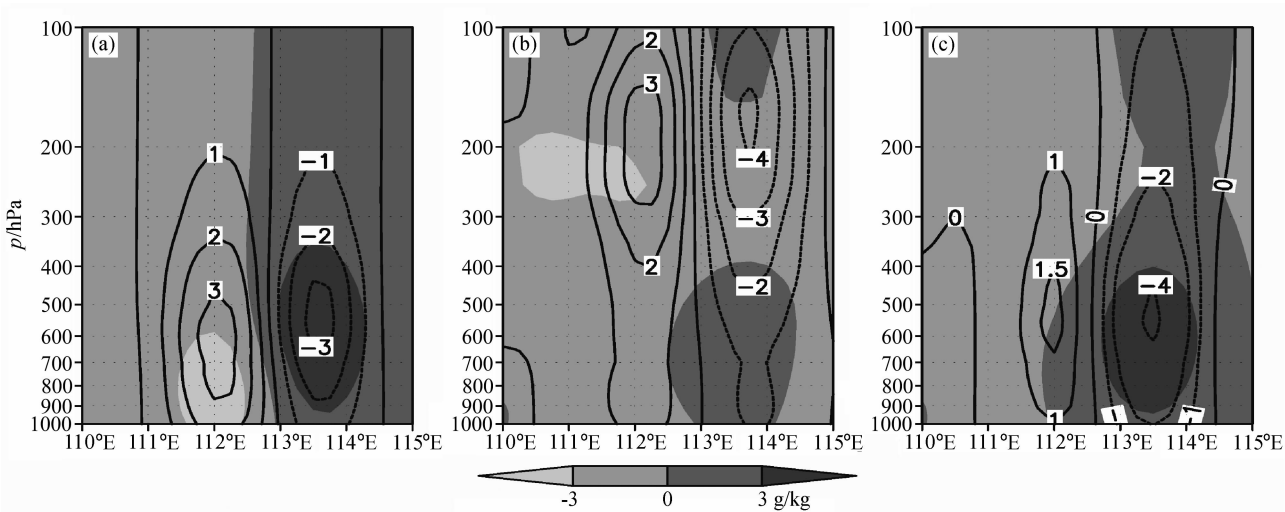


图 7 同化试验 1~3 沿(26°N, 110°E)至(22°N, 115°E)散度(等值线, 单位: 10^{-5} s^{-1})和比湿(阴影)相对于背景场的增量垂直剖面: (a)同化试验 1; (b)同化试验 2; (c)同化试验 3
Fig. 7 Vertical cross section of wind divergence increment (contour, units: 10^{-5} s^{-1}) and humidity increment (shaded) along (26°N, 110°E) and (22°N, 115°E): (a) Expt 1; (b) expt 2; (c) expt 3

影响初始雨带。沿(26°N, 110°E)至(22°N, 115°E)作西北-东南向的散度增量场和比湿增量场的剖面图, 剖面图的西北方降水减弱, 而东南方向降水增加。三次同化试验的散度增量场和比湿增量场的剖面图分别如图 7a~c 所示, 同化自动站降水资料(图 7a)导致西北方向水汽辐散增加、东南方向水汽辐合增加, 从而使得这两个区域的降水减弱或增加, 水汽辐合、辐散增量的中心位于中低层, 这种垂直廓线的调整是在参数化方案的前提下进行的, 因此有一定的假设性。同化探空资料(图 7b)同样

也增加了西北方向水汽辐散, 东南方向水汽辐合。这种调整完全是根据探空资料与背景场之间的差别来调整的, 其水汽辐合、辐散增量的垂直分布比较复杂, 从图 7b 来看增量的中心位于高层。图 7a 和 b 相比, 同化自动站降水对中层低层大气水汽辐合、辐散影响更强, 而大气中水汽主要集中于中低层, 因此不难理解图 6 中同化自动站降水资料导致的降水变化更加明显了。采用不同的同化方案来同化自动站降水以及探空资料都可以导致背景场西北方向水汽辐散增加、东南方向水汽辐合增加, 从而使得

初始时刻西北方向降水减弱、东南方向降水增加。但是,由于两种资料的同化方案不同,导致了水汽通量辐合、辐散增量的垂直分布不完全一致,同时,同化这两种资料(图 7c)可以同时考虑这两种资料的影响,图 7c 中低层的水汽辐合、辐散中心仍然维持,并且在高层维持了由于同化探空资料引起的西北面的水汽辐散。

为了进一步分析同化自动站降水资料对初始时刻降水的影响,以及相对于同化探空资料而言两者对初始时刻降水影响的异同,图 8 给出了同化试验 1~3 分析场相对于背景场的 1000 hPa 比湿场和散度场的增量。图 8a 为同化试验 1 中 1000 hPa 比湿场的增量场和风场增量场的散度,可以看出粤北有明显的水汽辐散,这表明由于自动站观测降水在该地区明显小于背景场计算的降水。同化试验 1 通过增加背景场低层的水汽辐散来减弱该地区降水,而珠江三角洲及其以东以及粤西地区由于有自动站的强降水观测,因此该区域有水汽辐合的增量,水汽辐合区域与自动站观测降水的位置一致。图 8b 给出同化试验 2 中 1000 hPa 比湿的增量场和风场增量场的散度场,图中黑点表示探空站所在位置。同化试验 2 在粤中以及雷州半岛、海南岛附近水汽增加,在粤北出现了风场的辐散增量,珠江三角洲及其东部和西部沿海有风场的辐合增量,这表明同化探空资料后在珠江三角洲东北部以及雷州半岛水汽辐合增加。与图 8a 相比,同化试验 1、2 这两种方案在广东中、东部地区造成的低层水汽辐合以及在

北部地区造成的低层水汽辐散类似,同化试验 2 由于探空资料少,没有像同化试验 1 那样在低层沿着雨带的位置增加水汽辐合的分量,但是由于探空资料分布的范围比广东省自动站广,因此对于广东省以外的背景场的同化有重要的补充作用。图 8b 中,海南岛附近水汽明显增加,而卫星云图(图 2a)上该时刻海南岛确实有强对流云系存在,这印证了同化探空资料而导致的海南岛水汽量增加是合理的。同化试验 3 同时将两种资料进行同化,由图 8c 可以看出广东省境内沿雨带方向低层的水汽辐合仍然与同化自动站资料造成的影响相似,但低层辐合区向南延伸到了海南岛,水汽增加的范围比单独同化一种资料的范围更广,粤北的低层风场仍然有辐散增量,但水汽却有增加,在广东省以外明显看出是受到探空资料的影响,例如海洋上的水汽辐散就是由于同化探空资料造成的。结合以上试验发现,同化广东省自动站雨量资料可以根据雨带的位置和强弱来调整背景场水汽辐合辐散的结构,而由于探空资料稀疏,无法刻画出雨带的位置和强弱,但是在局部地区(如珠江三角洲东北部、粤北),分别同化这两种资料带来的影响比较相似。探空资料在自动站覆盖区域以外可以有重要的补充作用。同时,同化这两种资料既可以引入自动站资料的雨带信息,又可以在自动站覆盖范围以外引入探空信息,因此同化试验 3 的资料信息量最大。

从(21.5°N, 109°E)至(24.5°N, 116°E)沿雨带方向,分别作同化试验 1~3 相对于控制试验 θ_{sc} 增

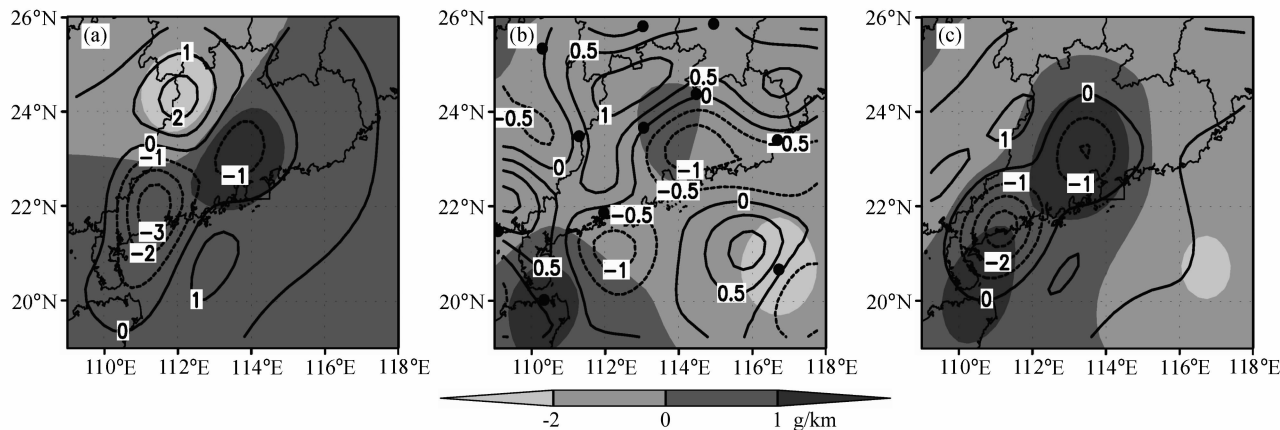


图 8 同化试验分析场相对于背景场 1000 hPa 比湿的增量(阴影,单位: g/kg)和风场增量的散度(等值线,单位: 10^{-5}s^{-1}): (a) 同化试验 1; (b) 同化试验 2, 黑点表示探空站所在位置; (c) 同化试验 3

Fig. 8 The increment of 1000 hPa wind divergence (contour, units: 10^{-5}s^{-1}) and humidity (shaded, units: g/kg): (a) Expt 1; (b) expt 2 (dots show sounding observation locations); (c) expt 3

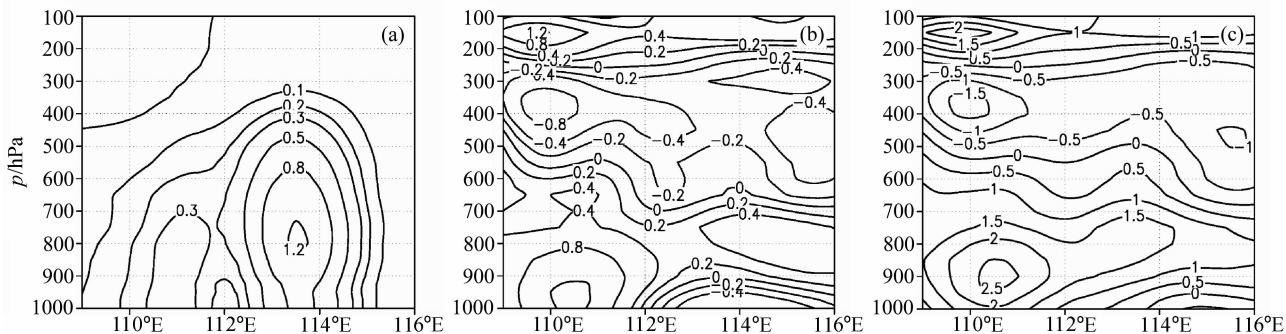


图9 同化试验沿(21.5°N, 109°E)至(24.5°N, 116°E) θ_{se} 相对于背景场的增量垂直剖面(单位: K): (a) 同化试验 1; (b) 同化试验 2; (c) 同化试验 3

Fig. 9 Vertical cross section of θ_{se} increment (units: K) along (21.5°N, 109°E) and (24.5°N, 116°E): (a) Expt 1; (b) expt 2; (c) expt 3

量的垂直剖面图(图 9)。同化试验 1 沿雨带方向 500 hPa 以下 θ_{se} 增加, 增量的最大值出现在 700 hPa 以下(图 9a)。这表明同化试验 1 导致 500 hPa 以下增暖增湿, 根据大气层结的稳定度判据可以知道, 同化试验 1 造成了大气中下层不稳定性增加, 这也是导致该方向降水增加的原因之一。同化试验 2, θ_{se} 增量的垂直剖面图(图 9b)上, 在广东西南部地区也同样导致了 600 hPa 以下 θ_{se} 增加。而广东中、东部地区在 900 hPa 至 700 hPa 之间也出现了增暖增湿, 因此, 同化探空资料同样造成了该方向大气中低层不稳定性增加, 这也解释了同化试验 2 在此方向上降水增加的原因。同化试验 3(图 9c)综合同化了两种资料, 在 θ_{se} 增量的垂直剖面图上可以看出, 同化两种资料仍然导致该方向中低层大气不稳定性增加, 因此在此方向上仍然降水增加。在粤北地区自动站没有观测到明显降水, 三次同化试验也使得该区域降水有所减弱, 在同化试验 1 中初始场粤北区域 θ_{se} 增量的垂直剖面图(图略)可以发现, 低层 θ_{se} 减小, 增加了大气层结的稳定性。同化试验 2 也有类似的结论(图略)。这也解释了分别同化两种资料以及同时同化两种资料都是导致该区域降水减弱的原因。同化降水资料以及同化探空资料都导致了初始场在降水增加的区域中低层增暖增湿, 降水减弱的区域中低层变得更干冷, 这表明降水的同化方案对初始场的调整在一定程度上符合探空观测。

4.2 对降雨短时预报的影响

从图 2 可以看出初始时刻的雨带自西向东移动, 在其北面有雨带发展, 在 4 月 1 日 03 时 GOES-9 卫星云图、自动站资料以及该时刻 TRMM 卫星资料

上都可以明显看出有两条东北-西南向的雨带存在。南面的雨带强度大, 海洋上的降水比陆地上更显著, 在陆地上粤东区域降水最明显, 粤东的降水是由初始时刻位于中部和东北部的雨带东移发展而来的。控制试验和同化试验 1~3 没有预报出南面海上雨带, 从卫星云图上发现南面海洋上的雨带是从北部湾地区发展并东移过来的, 因为初始时刻在北部湾地区没有任何观测资料, 而且初始时刻背景场在这个区域也没有降水, 因此控制试验和同化试验 1~3 都没有准确预报这条雨带的发展。从整体来看, 控制试验雨带预报位置偏北, 并且北面的降水比南面显著。同化试验 1 较好地描述了初始时刻位于广东中部偏西至东北部的雨带, 在随后 6 小时的逐时预报中这条雨带向粤东方向移动, 其位置和降水中心与自动站观测吻合, 广东东北部的降水相对于控制试验有所减弱, 也符合自动站观测。但是, 北面雨带的降水相比南面位于粤东雨带的降水仍然偏强(如图 5b 中 03 时和 04 时)。同化试验 2 从 02 时开始就在粤东预报明显降水, 并在广东境内形成南北两条雨带, 与自动站实况一致。但比较广东省境内的两条雨带发现, 南北两条雨带强度比较接近, 没有反映出自动站观测的粤东降水更为显著的特点。在 03 时和 04 时, 雷州半岛附近有强降水, 这与初始时刻在这个区域附近水汽增加有一定的关系。从卫星云图上看, 对应时刻雷州半岛东面的强降水的确是从其西面向东移动而来的, 只是由于缺少观测资料来刻画这条雨带的初始位置, 从而导致了预报雨带向东移动比实况慢, 但从 TRMM 卫星观测来看雷州半岛东面的雨带的确大于广东陆地上的降水, 因此这附近降水的显著增加是合理的。同

化试验 3 较好地保持了试验 2 总体的预报效果,并且刻画出粤东这条雨带的降水中心,反映出粤东有显著的降水。相对于同化试验 2,试验 3 更好地预报了粤东雨带的结构。相对于同化试验 1,试验 3 较好地预报了雨带的强度。因此,单独同化自动站降水资料对暴雨短时预报有正面影响,结合同化探空资料和自动站降水不仅可以在大范围调整雨带位置和强度预报,还刻画了雨带结构。

5 结论

在 GRAPES 三维变分同化系统基础上,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^[5]作为观测算子,可以通过自动站强对流系统降水观测资料调整初始场的结构,从而改善初始时刻强对流系统雨带结构,并对暴雨的短时预报有正面影响。比较降水资料和探空资料的同化,在初始时刻雨带有明显改进的区域,同化降水资料对初始场的调整在一定程度上符合探空观测,由于探空资料分布范围广却很稀疏,而自动站资料分布密集但只集中于广东省境内,同时同化两种资料可以互相弥补资料的不足,改进雨带位置和结构的预报。

参考文献 (References)

- [1] Hou A Y, Zhang S Q, Reale O. Variational Continuous Assimilation of TMI and SSM/I Rain Rates: Impact on GEOS-3 Hurricane Analyses and Forecasts. *Monthly Weather Review*, 2004, **132**(8): 2094~2109
- [2] Falkovich A, Kalnay E, Lord S, et al. A New Method of Observed Rainfall Assimilation in Forecast Models. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, **39**(8): 1282~1298
- [3] Zou X, Kuo Y H. Rainfall Assimilation through an Optimal Control of Initial and Boundary Conditions in a Limited-Area Mesoscale Model. *Monthly Weather Review*, 1996, **124**(12): 2859~2882
- [4] 丁伟钰, 万齐林, 端义宏. 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. *大气科学*, 2005, **29**(4): 600~608
Ding Weiyu, Wan Qilin, Duan Yihong. 3D-Var Assimilation of TRMM Rain Rate and Its Impact on the Typhoon Dujuan (0313) Forecast. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29**(4): 600~608
- [5] Krishnamurti N, Bounova L. *An Introduction to Numerical Weather Prediction Techniques*. CRC Press, 1996. 154~162
- [6] 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
- [7] 张华, 薛纪善, 庄世宇, 等. Grapes 三维变分同化系统的理想试验. *气象学报*, 2004, **62**(1): 31~41
Zhang Hua, Xue Jishan, Zhuang Shiyu, et al. Idea experiments of grapes three-dimensional variational data assimilation system. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62**(1): 31~41
- [8] 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
- [9] Lorenc A. Analysis methods for numerical weather prediction. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1986, **112**: 1177~1194
- [10] Courtier P, Thepaut J N, Hollingsworth A. A strategy for operational implementation of 4D-Var using an incremental approach. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1994, **120**: 1367~1387
- [11] J. Nocedal, Updating quasi-Newton matrices with limited storage, *Mathematics of Computation* 1980, **35**: 773~782
- [12] Broyden C G.. The convergence of a class of double rank minimization algorithm. *J. of Institute of Mathematics and its Applications*, 1970, **6**: 76~90
- [13] Fletcher R. A new approach to variable metric algorithms. *Computer Journal*, 1970, **13**: 317~322
- [14] Goldfarb D. A family of variable-metric methods derived by variational means. *Maths. Comp.*, 1970, **24**: 23~26
- [15] Shanno D F. Conditioning of quasi-Newton method for function minimization. *Maths. Comp.*, 1970, **24**: 647~656.
- [16] Zhang Hua, Xue Jishan, Zhu Guofu, et al. Application of direct assimilation of ATOVS microwave radiances to typhoon track prediction. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, **21**(2): 283~290
- [17] Fillion L, Errico R M. Variational assimilation of precipitation data using moist-convective parameterization schemes: A 1D-VAR study. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, **125**(11): 2917~2942
- [18] 郭锡钦, 曾书儿, 王金钊. 自动气象站的动态试验及其测量准确度. *应用气象学报*, 1994, **5**(2): 176~183
Guo Xiqin, Zeng Shuer, Wang Jinzhao. Field tests and measurements accuracy of automatic weather stations (AWS). *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1994, **5**(2): 176~183