

高郁东, 万齐林, 薛纪善, 等. 同化雷达估算降水率对暴雨预报的影响. 应用气象学报, 2015, 26(1): 45-56.  
doi:10.11898/1001-7313.20150105

## 同化雷达估算降水率对暴雨预报的影响

高郁东<sup>1)2)\*</sup> 万齐林<sup>1)2)</sup> 薛纪善<sup>1)2)3)</sup> 丁伟钰<sup>1)2)</sup>  
李昊睿<sup>1)2)</sup> 张诚忠<sup>1)2)</sup> 黄燕燕<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup>(区域数值天气预报重点实验室, 广州 510080) <sup>2)</sup>(中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080)

<sup>3)</sup>(中国气象科学研究院, 北京 100081)

### 摘 要

选取 2009 年 3 月 28 日广东省广州市大暴雨过程, 考察了变分校准前后  $Z-I$  关系估算雷达降水率的区别。变分校准后的降水率资料具有较高的单点精度与合理的梯度分布。降水率资料能够反映大气动力特征和水汽分布等重要信息, 是模拟中小尺度系统的关键因子。基于 GRAPES(Global/Regional Analysis and Prediction System) 区域三维变分系统, 将 FSU(Florida State University) 对流参数化方案作为观测算子的同化试验指出, 同化降水率资料后同时增强了低层大气的辐合和高层大气的辐散, 从而使整层气柱的不稳定能量增加。沙氏指数和  $K$  指数诊断分析也表明, 同化降水率资料后有利于触发强对流天气。此外, 低空辐合有利于水汽垂直输送, 维持对流发展, 改进降水模拟。逐小时数值模拟结果表明: 同化校准后的雷达估算降水率不仅可以改进降水分布, 而且使中尺度对流系统的发展和消亡清晰地表现出来。

**关键词:** 暴雨; 校准雷达估算降水率; 降水率同化; 数值预报

### 引 言

暴雨往往由强对流天气系统产生, 具有局地性强、生命期短、尺度小等特点, 不仅是预报难点, 也很难被常规大气探测技术捕获。常规观测站网密度过于稀疏, 很难准确观测或者计算一定区域的降水率, 其结果缺乏代表性。多普勒天气雷达观测有很高的时间分辨率 (5 ~ 10 min) 和空间分辨率 (125 ~ 1000 m), 是探测中小尺度天气系统的有力工具<sup>[1-3]</sup>。雷达反射率因子和降水率存在定量关系, 因此, 可以采用雷达作为间接测量降水的工具。这类高分辨率降水率资料能弥补常规观测分辨率不足的缺点。

雷达定量估算降水率的方法有多种。在日常工作中,  $Z-I$  关系最常用。但  $Z-I$  关系的计算精度有限, 需对其结果进行校准。20 世纪 70 年代 Wil-

son<sup>[4]</sup> 提出了平均校准方法, 认为整个降水场的校准因子相同, 降水分布被过分平滑。人们在此基础上进行改进<sup>[5-6]</sup>, 计算校准因子时考虑降水的空间分布, 减小了雷达估算降水的误差。Sasaki<sup>[7]</sup> 将变分法引入气象领域, 用于研究数值模式初始场的客观分析。Ninomiya 等<sup>[8]</sup> 运用变分原理研究暴雨发生时雷达估算降水和雨量计资料的客观分析, 结果令人满意。此后, 变分法被我国很多气象学家用于校准雷达估算降水率<sup>[9-10]</sup>, 获得了很好的成果。万齐林<sup>[11]</sup> 提出了一种不需要将校准参照量整场插值到遥测资料格点上的变分校准方案。该方案既避免了对稀疏校正参照量进行客观分析的困难, 也避免了校正参照量在资料稀缺区域插值分析带来的不利影响, 使遥感资料的整体偏差被修订的同时, 能够更好地保持遥测资料空间分布形态不变。本文将该方法运用于校准雷达估算降水率, 考察雷达估算降水率是否能准确表达暴雨的分布特征。

2014-05-06 收到, 2014-10-13 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目(41475102), 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006016), 广东省气象局科学技术研究项目(2013Q02)

\* email: gaoyd@grmc.gov.cn

降水率不仅能表示降水的瞬时分布,还包含大气动力特征以及水汽分布等信息。如何通过降水率资料改善初始场,已成为亟需解决的问题。近几十年,随着大气探测技术的不断发展,国内外同化的降水率资料主要包含3类:第1类是同化自动气象站计算的降水率资料。丁伟钰等<sup>[12]</sup>同化自动气象站降水率资料有效改进了降水预报。虽然自动气象站资料精度较高,但受站点分布限制易漏测,很难获得完整的降水分布。第2类是同化卫星反演的降水率资料。2002年初,日本气象厅将 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)降水率资料应用在四维变分同化系统中,对降水预报有明显改进。Marécal 等<sup>[13]</sup>提出先一维变分再四维变分的方法同化卫星降水率资料。Bauer 等<sup>[14]</sup>对其进行改进,重新计算水汽误差。大量数值试验证明,同化卫星降水率资料能有效提高预报质量。在国内,丁伟钰等<sup>[15]</sup>在 GRAPES(Global/Regional Analysis and Prediction System)三维变分(3DVar)同化系统的基础上,采用 FSU(Florida State University)对流参数化方案作为观测算子,同化 TRMM 卫星降水率资料,结果表明:同化后的初始场对台风的路径和降水预报皆有正效果。第3类则是基于多普勒天气雷达定量估算的降水率。相对于卫星资料,雷达估算降水率有较高的时间和空间分辨率,能连续探测暴雨等短时段天气系统。早在20世纪60年代,英国气象局就已经将雷达估算降水率资料应用在数值预报业务中,同化影响时效超过12h,甚至达到15h<sup>[16]</sup>。Stephan 等<sup>[17]</sup>将雷达估算的降水率加入 COSMO(Consortium for Small Scale Modeling)模式,修改其初始场的潜热加热。Wang 等<sup>[18]</sup>采用 Kain-Fritsch 对流参数化方案,通过先一维变分再四维变分的方法将雷达估算降水率资料加入初始

场,很好地模拟出1996年美国芝加哥大暴雨。但目前国内对于雷达估算降水率同化的研究工作较少,更没有业务运行。

本文利用 FSU 对流参数化方案作为观测算子,通过 GRAPES 区域 3DVar 同化系统,研究同化变分校准后的雷达估算降水率资料对暴雨预报的影响。

## 1 GRAPES 区域 3DVar 系统中降水率资料的同化方法

### 1.1 变分法校准雷达估算降水率

雷达反射率因子  $Z$  和降水率  $I$  关系密切,因此可以利用雷达反射率因子资料估算降水率。本文参考张培昌等<sup>[19]</sup>给出的  $Z-I$  关系计算降水率,

$$Z = 200 I^{1.6}. \quad (1)$$

式(1)中, $Z$ 的单位为  $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$ , $I$ 的单位为  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

为了提高雷达估算降水率的精度,采用基于模糊逻辑的分布式地物回波识别法<sup>[20]</sup>控制雷达反射率因子资料质量。根据式(1),雷达估算出的是瞬间降水率,而自动气象站观测的是一段时间的降水量。为了统一,本文利用自动气象站2h累积降水量计算该时段中间时刻的降水率。假设各自动气象站的观测记录独立,以广州雷达站为中心,将75km半径范围内的自动气象站资料分为两批。为了避免人为分批所导致的系统偏差,先将研究区域划分为若干子区域(子区域取为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ,共49个子区域),每一子区域中的所有自动气象站按降水量大小降序排列,再依次分为两批(图略)。一批用于校准雷达估算降水率,共107个站;另一批用于检验校准结果,共105个站。图1a中的阴影区域是2009年3

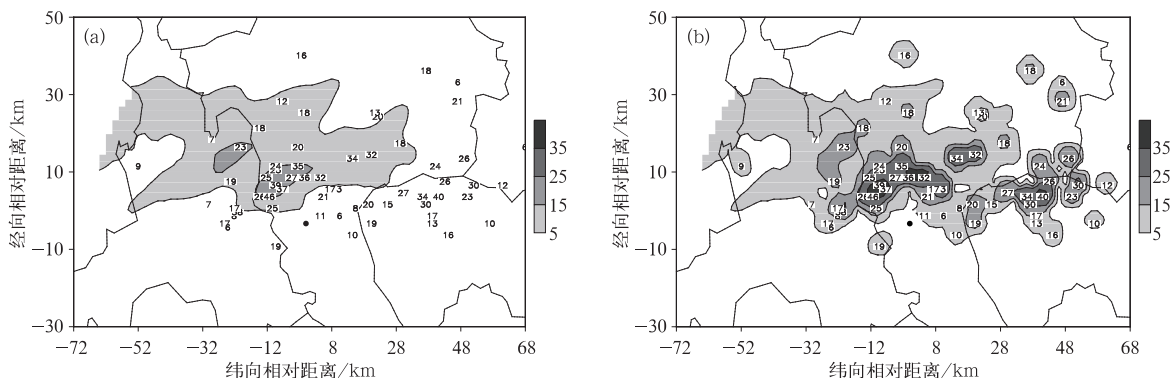


图1 2009年3月28日10:00广州雷达估算降水率(填色图)与自动气象站降水率(数字)(降水率单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )  
(a)变分校准前,(b)变分校准后

Fig. 1 Guangzhou radar estimations of rainfall rate(the shaded) and automatic weather station rainfall rate(number)(unit: $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ ) at 1000 UTC 28 May 2009 (a)before variational calibration,(b)after variational calibration

月 28 日 10:00(世界时,下同)水平分辨率为 2 km 的 1 km 高度的广州雷达等高面回波资料(CAPPI)估算的降水率。横、纵坐标分别表示格点相对于广州雷达站的纬向(向东为正)、经向(向北为正)距离。3 月 28 日 10:00 雷达估算的最大降水率位于雷达站西北侧 10 km 附近,呈狭长的东北—西南向带状分布,中心宽度不足 10 km,长度约 20 km,强度不足  $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。自动气象站记录的降水率最大值超过  $40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,强降水中心有两个,分别位于雷达站的西北侧和东侧(图 1a 中的数字)。通过对比自动气象站的降水率发现,两种资料所表现出的中心位置基本一致,证明  $Z-I$  关系估算的降水率在在一定程度上可以反映强降水的落区,但仍然存在明显偏差。这种偏差主要来自于大气折射、雷达参数、局地雨滴谱分布以及暴雨时衰减增大等因素。虽然根据雷达反射率因子计算的降水率单点精度不高,但保留了中小尺度降水系统的分布特征,降水率分布可信度较高,能合理反映大气中与降水相关的气象要素的分布,这也是气象遥感资料的特点。

若将雷达估算降水率作为观测资料同化进模式,受其单点探测精度影响,可能会使初始场与实际大气状态偏差变大,给模式积分带来负面影响。考虑到自动气象站资料是单站记录,虽然单点值准确度高,但受站点分布所限,不能很好地反映降水的梯度变化。这两种资料可以互补,在单点上保留自动气象站降水率资料,而降水的空间分布采用雷达估算降水率梯度进行外推,拟合出单点精度高、空间分布准确的降水场。

本文将运用文献[11]中的方案校准雷达估算降

水率资料,该方案不需将站点资料进行整场插值,对于分析暴雨这类局地性强、梯度变化大的气象要素具有一定优势。

变分校准后的雷达估算降水率如图 1b 所示。降水率有两个中心,分别位于雷达站的西北和东侧,其强度均超过  $35 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,中心位置与自动气象站资料一致。特别是雷达站东侧的降水中心,变分校准前雷达探测降水率不足  $1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,仅靠雷达资料不能正确估算出降水率,利用自动气象站资料变分校准后改进明显。从整体分布来看,校准后的降水率只是在自动气象站附近修改降水率大小,降水分布的整体形势仍然保持东西向的狭长带状特征,两个最强中心自西向东依次排列在带状系统内。

变分校准后的相对误差  $E$  由式(2)计算:

$$E = \begin{cases} (I_g - I_r)/I_g \times 100\%, & I_r \leq I_g; \\ I_r/I_g \times 100\%, & I_r > I_g. \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, $I_r$  代表雷达估算降水率, $I_g$  代表自动气象站降水率。在自动气象站密集区域,存在相邻两个站的降水率梯度很大的可能性。如果将式(2)直接插值到站点上,插值误差很大。因此,本文采用格点平均法检验。将 CAPPI 资料任意网格内所有自动气象站降水率之和作为该区域的实际降水率,对应的雷达估算降水率用最近的 4 个格点平均值代表。如果格点值缺测,令  $E = 100\%$ 。根据式(2), $E < 100\%$  时,表明降水率被低估,值越小,雷达估算降水率和自动气象站观测越接近,反之差别越大;若  $E > 100\%$ ,则表明降水率被高估,值越大,高估程度越严重,反之,精度越高。计算结果如图 2 所示。变分校准前,雷达站西北侧  $E$  为  $60\% \sim 90\%$ ,降水率在该

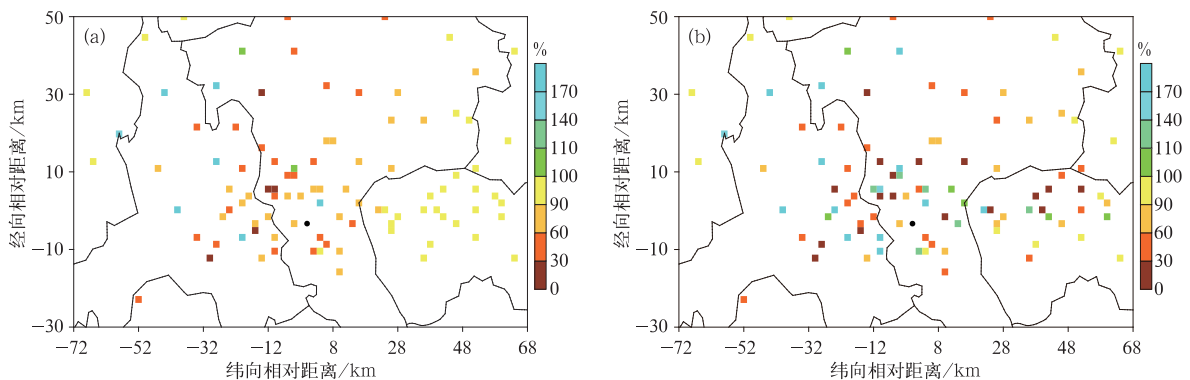


图 2 2009 年 3 月 28 日 10:00 雷达估算降水率与自动气象站降水率的相对误差  
(a)变分校准前,(b)变分校准后

Fig. 2 Relative errors between radar estimation of rainfall rate and automatic weather station rainfall rate at 1000 UTC 28 Mar 2009  
(a) before variational calibration, (b) after variational calibration

区域被低估。由于雷达资料没有正确估算出东侧降水,故雷达东侧  $E$  几乎全是 100%,与图 1a 的结果一致。变分校准后,整个区域内  $E$  下降明显,特别是两个降水率中心的  $E$  下降至 30%~60%。但也产生了一些大于 100% 的区域,使局地降水率被高估,其原因是这些区域内自动气象站降水率资料梯度较大,导致分批后用于检验的降水率资料和用于变分校准的降水率资料差别太大。

综上所述,雷达估算降水率资料精度虽不高,但表现稳定,对是否有降水和强降水中心有一定的指示意义,其分布特征符合实际观测。通过自动气象站资料变分校准后,整体精度得到提高,强降水中心更明显,但对于极小量级降水存在高估的可能。在同化试验中,仅挑选  $5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq I < 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的资料进行同化,观测误差以同化自动气象站降水率的观测误差为基准,取为  $1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,略大于文献[12]中的  $0.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。可以将经过自动气象站资料变分校准后的雷达估算降水率资料看作各自独立的随机事件,假设其不相关,稀疏成站点形式输入同化系统。

## 1.2 降水率同化观测算子简介

佛罗里达州立大学(FSU)利用 GATE(Global Atmospheric Research Program Atlantic Tropical Experiment)试验结果,通过多元回归统计使 Kuo 对流参数化方案成为闭合方程组,提出了 FSU 对流参数化方案。Anthes<sup>[21]</sup>和 Krishnamurti 等<sup>[22]</sup>研究指出对流所需的水汽供给由整层大气的大尺度水汽辐合提供,产生云滴的水汽主要来自于大气垂直方向的输送,与实际观测相比,其计算结果偏小<sup>[22-23]</sup>。FSU 方案认为在对流系统中,水汽供给可以分为两部分:一部分通过中尺度辐合产生降水,另一部分用于大气系统的增湿。因此,可以将对流参数化方案构造的观测算子简写为

$$y = H(\omega, q). \quad (3)$$

降水率观测算子  $H$  将大气风场和比湿当作同化系统调整的变量,通过 GRAPES 区域 3DVar 系统<sup>[24-25]</sup>的极小化算法及物理量的平衡关系<sup>[26-27]</sup>,计算目标函数最优时水平风场、比湿、位势高度和温度的分布。

虽然 FSU 对流参数化方案计算简单,但包含了触发强对流天气的基本原理——强辐合与高湿度,且对于 GRAPES 区域 3DVar 同化系统,式(3)中仅  $\omega$  和  $q$  为自变量,切线性和伴随算子容易编写。定

义切线性算子诊断量  $D_1$  与  $D_2$  为

$$D_1 = \frac{|H'(x) + H'(\partial x)|}{|H'(x + \partial x)|}, \quad (4)$$

$$D_2 = \frac{|H'(x) + H'(\partial x)|}{|H(x + \partial x)|}. \quad (5)$$

其中,  $H'$  为对应的切线性算子,  $x$  为切线性算子的背景场,  $\partial x$  为其扰动量。  $D_1$  表示切线性算子的线性化程度,如果切线性算子线性化程度高,则  $D_1$  近似等于 1。经验证,  $\omega$  和  $q$  的  $D_1$  误差为 0.99(图略)。  $D_2$  表示切线性算子相对观测算子的近似程度,如果两者近似程度越高,则  $D_2$  与 1 越接近。图 3 横坐标为扰动量  $\partial x$  相对于背景场  $x$  的大小,纵坐标为  $D_2$  的值。随着扰动的增大,垂直速度的  $D_2$  从 1 迅速减小;比湿的  $D_2$  变化较小,从 0.53 下降至 0.37,但出现多次跳跃,这是 FSU 观测算子中比湿的非线性较强导致的。观测算子的线性化近似成立,是变分同化方法在求解目标函数极小化时的必要条件。如图 3 所示,本文在同化变分校准后的降水率资料时,将新息(观测减去背景场)的绝对值超过背景场 10% 的资料剔除。观测算子的伴随利用变分系统常用的程序码转置法编写程序构造,这里不再进行详细介绍。

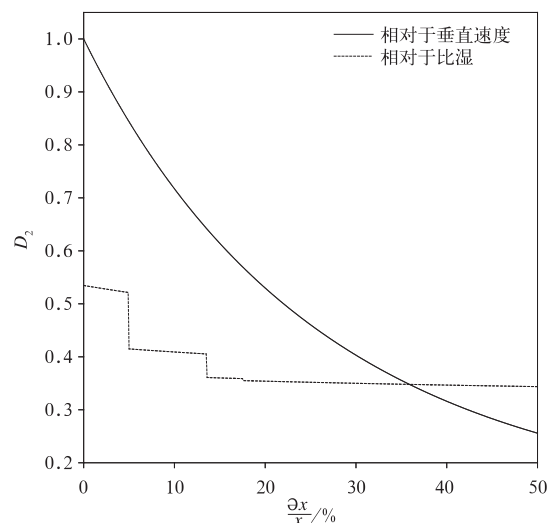


图3 切线性观测算子相对于比湿和垂直速度的扰动程度

Fig. 3 Disturbance of linear observational operator with respect to specific humidity and vertical velocity

FSU 对流参数化方案抓住了中尺度系统的基本特征,用简单的计算便可建立降水率与水汽和辐散辐合的联系,高效简便。本文拟运用此方案同化



校准后的雷达估算降水率资料,研究高空间分辨率降水资料对暴雨模拟的改进。

## 2 个例模拟试验

资料同化是为数值模式提供初始场,使模式的计算结果更准确。本文将以 2009 年 3 月 28 日广东省广州市大暴雨为例,考察同化雷达估算降水率资料对暴雨模拟的改进。这次暴雨过程时间短、雨量大、强降水集中,造成广州城区严重内涝,是一次局地强对流过程。本次过程 3 月 28 日 10:00 突然爆发(单站累积降水强度超过  $70 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ),向西移动,至 15:00 减弱(单站降水强度小于  $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ),所以主要考察 10:00—15:00 强对流的降水模

拟情况,并设计了两个数值试验。

同化试验(ExpA):以 2009 年 3 月 28 日 06:00 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)  $1^\circ \times 1^\circ$  格点分析资料作为背景场。GRAPES 模式在粗网格(36 km)上积分 12 h,每小时的模式结果作为细网格(12 km)的边界条件。在细网格上,模式从 3 月 28 日 06:00 冷启动,积分 4 h。然后同化上述校准的雷达估算降水资料,从 10:00 积分至 15:00。

非同化试验(ExpC):GRAPES 模式在粗网格上积分与同化试验相同,在细网格上 10:00 不同化任何观测资料。

### 2.1 同化结果

图 4a 和图 4b 给出了同化前后水平风场和水汽

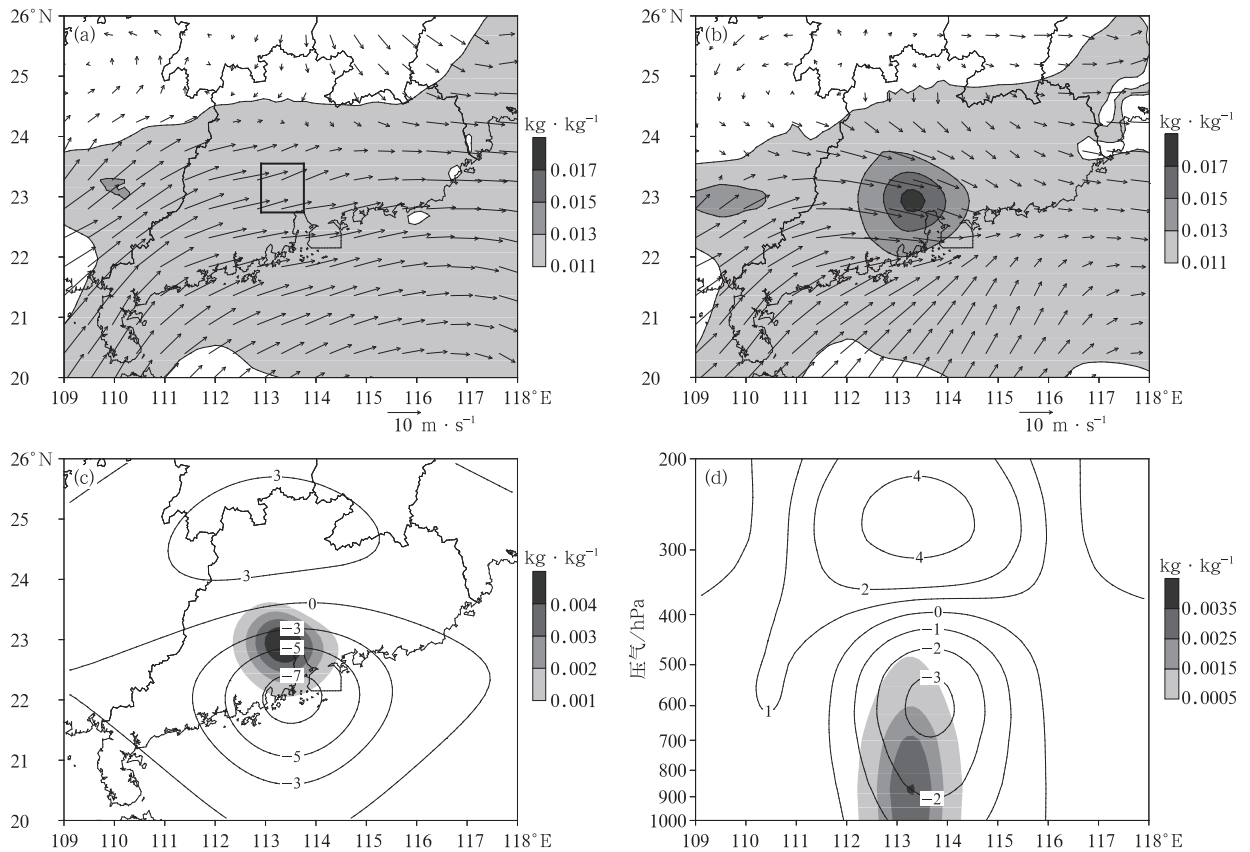


图 4 同化前后比湿(阴影)、散度(等值线,单位: $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )以及风场(矢量)分布  
 (a)背景场 850 hPa 水平风场和比湿分布,(b)分析场 850 hPa 水平风场和比湿分布,  
 (c)850 hPa 散度和比湿增量水平分布,(d)散度和比湿增量沿  $23^\circ \text{N}$  垂直分布

Fig. 4 The distribution of specific humidity(the shaded), divergence(contour, unit: $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) and horizontal wind(vector) before and after assimilation

(a)850 hPa horizontal distribution of background wind and specific humidity,(b)850 hPa horizontal distribution of analysis wind and specific humidity,(c)850 hPa horizontal distribution of increment divergence and specific humidity,(d)vertical distribution of increment divergence and specific humidity along  $23^\circ \text{N}$

分布。背景场中暴雨发生区域(图4a中黑色方框)没有偏北气流,辐合线位于 $24^{\circ}\text{N}$ 附近,与实际暴雨发生地点相距较远,且比湿分布均匀,不存在强中心。对比图4b,分析场中水平风速变化不明显,但南、北风分量明显增加,该经向气流不仅增强暴雨区的辐合,还使ExpA的暴雨中心偏南;湿度增加同样显著,中心强度超过 $0.017\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,呈准正圆形向四周散开。降水率资料包含的散度与湿度信息由FSU对流参数化方案引入模式初始场,图4b中的风场辐合是由于观测资料在动力平衡约束下,求解目标函数极小化的结果;湿度呈准正圆形向四周递减是因为湿度分析仅求解极小化、没有动力平衡约束的结果。

图4c给出了散度和比湿增量的水平分布。在暴雨发生区域,低空有强水汽增量,南侧则是风场辐

合。在低空,水汽辐合增强,为暴雨的发生、加强提供了必要的物质条件。在高空,对应的是一个强的辐散中心,最大值位于 $350\text{ hPa}$ 附近,辐合中心的最大值位于 $600\text{ hPa}$ 附近,量级可达到 $10^{-5}\text{ s}^{-1}$ ,这样的高低空配置将在大气中层造成强烈的垂直运动,是本次暴雨过程的启动机制。

为了更详细地说明同化雷达估算降水率资料对初始水汽输送的影响,图5a和图5b分别给出了 $850\text{ hPa}$ 上ExpC和ExpA的水汽平流,ExpA中珠江口附近出现较强的水汽正平流,中心强度保持在 $0.3\times 10^{-6}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 以上。为了维持动力学平衡,在其西侧出现很强的负平流。而ExpC中几乎观察到明显平流,证明背景场中水汽沿风场方向分布均匀,水汽输送小。水汽的通量散度和流线分布如图5c和图5d所示,未同化雷达估算降水率时,暴雨区

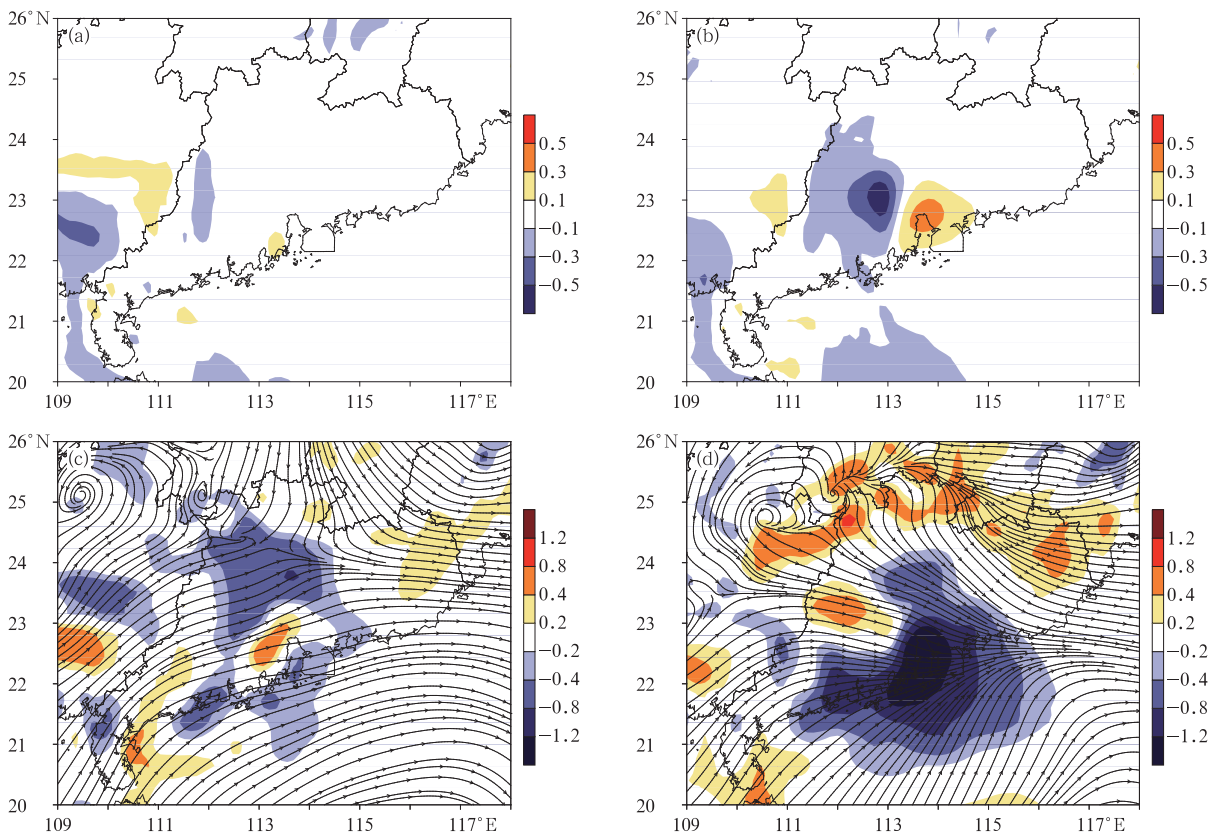


图5 同化前后 $850\text{ hPa}$ 水汽平流(填色,单位: $10^{-6}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ )、水汽通量散度(填色,单位: $10^{-6}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s}$ )以及流场(流线)分布 (a)ExpC水汽平流,(b)ExpA水汽平流,(c)ExpC水汽通量散度和流线,(d)ExpA水汽通量散度和流线

Fig. 5 The distribution of moisture advection(the shaded, unit:  $10^{-6}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ), moisture flux divergence(the shaded, unit:  $10^{-6}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s}$ ) and flow field(streamline) at  $850\text{ hPa}$  before and after assimilation

(a)moisture advection of ExpC,(b)moisture advection of ExpA,(c)moisture flux divergence and flow field of ExpC,(d)moisture flux divergence and flow field of ExpA

域(23°N,113°E 附近)为弱的正水汽通量散度,且风场辐合线位于 24°N 以北。在暴雨区内有弱的水汽输出。同化后,水汽由辐散转变为辐合,与暴雨区域一致。从流场上看,经向风分量加强,大气沿着流场方向增湿,是造成暴雨的原因之一。

暴雨发生必然伴随着大气不稳定能量的释放。图 6 分别给出了 ExpA 与 ExpC 的沙氏指数和 K 指数的分布。沙氏指数是判断对流性天气稳定度的一种重要指标,值越小越不稳定。暴雨发生前沙氏指数为负值,表示大气处于不稳定状态。K 指数表明大气的对流潜力,能指示对流性天气,数值越大对流

发生的可能性越大。对比图 6a 和图 6b 不难看出,ExpA 的沙氏指数更小,同时对比图 6c 和图 6d 可知,ExpA 中 K 指数在暴雨区增大。这说明同化雷达估算降水率资料后,调整了背景场的辐合、辐散结构,使大气中低层的不稳定能量加大,对流发生、发展的潜势增加,给暴雨产生提供了有利的动力和热力条件。

综上所述,同化后初始场的水汽分布、辐合与辐散结构及不稳定性均有明显改进,更有利于暴雨的发生。

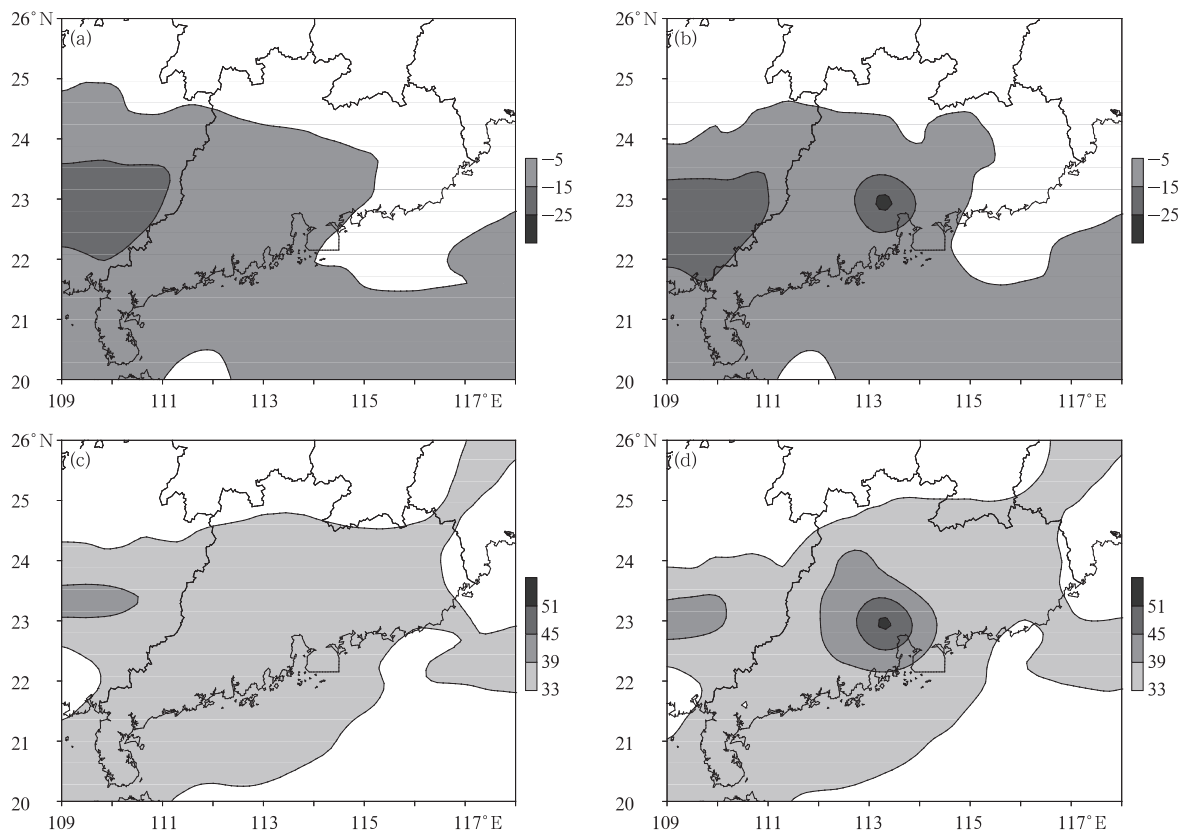


图 6 沙氏指数和 K 指数

(a)ExpC 的沙氏指数,(b)ExpA 的沙氏指数,(c)ExpC 的 K 指数,(d)ExpA 的 K 指数

Fig. 6 Showalter index and K index

(a)Showalter index of ExpC,(b)Showalter index of ExpA,(c)K index of ExpC,(d)K index of ExpA

## 2.2 模拟结果

图 7 给出了模拟降水与观测对比。自动气象站雨量计记录的 5 h 最大降水量位于 23°N,113.8°E 附近,落区主体呈东西向分布,存在两个强降水中心,最大值超过 80 mm,主要降水均集中在最大中心附近,说明本次暴雨过程有很强的局地性。ExpC

与其对比有较大差别,降水量级远小于实况观测,仅为观测的 20%,中心位置偏东 2 个经度,向北偏 0.5 个纬度。ExpC 模拟降水落区也没有呈现出狭长的东西向分布。ExpA 的模拟结果与观测较为相似,最大值超过 80 mm,中心位置比观测稍微向东偏半个经度,分布类似“<”形式。

由图 7c 的自动气象站降水量可以发现,在粤东北地区有明显的零星降水,这些零星的降水和暴雨的主体呈“<”形分布。这样的分布是有可能存在

的,因为在粤东北,自动气象站的密度低于珠江三角洲地区,降水有漏测情况。这也表明,同化雷达估算降水率有利于改善降水分布。

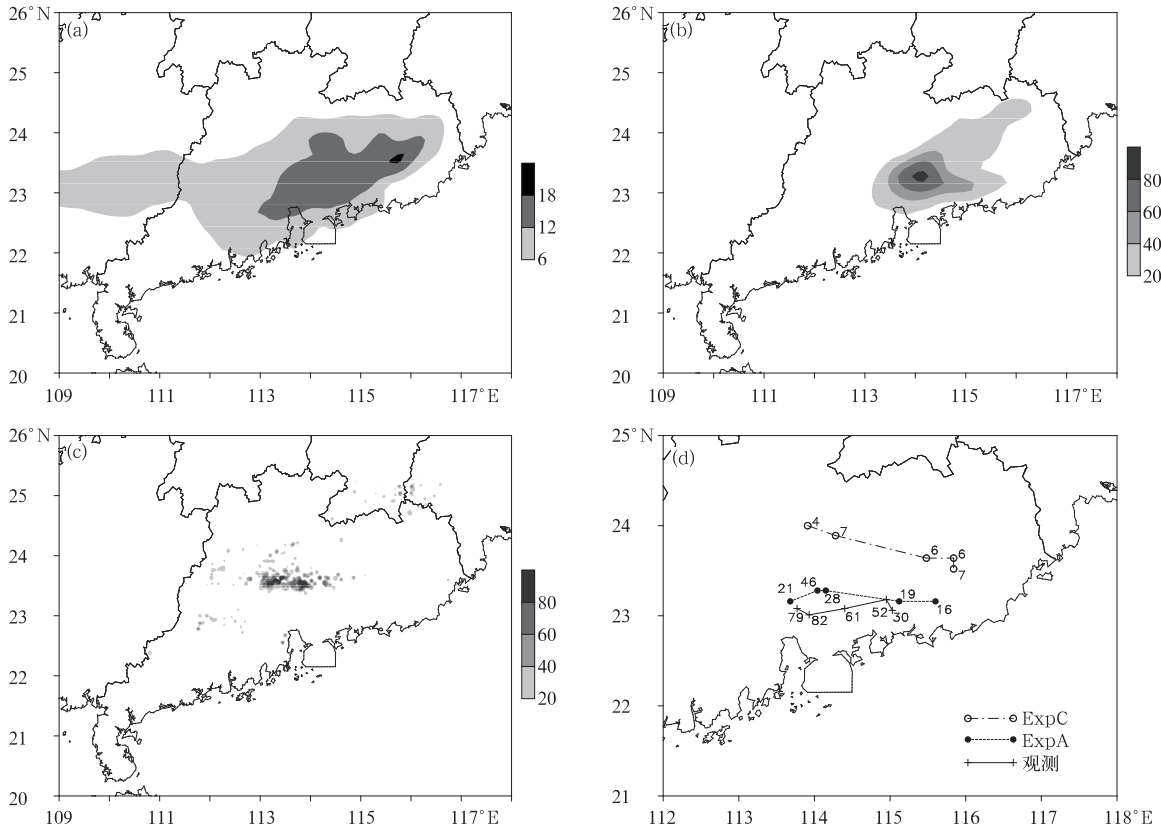


图 7 2009 年 3 月 28 日 10:00—15:00 累积降水量(单位:mm)

(a)ExpC,(b)ExpA,(c)观测,(d)逐小时最大降水量

Fig. 7 Precipitation from 1000 UTC to 1500 UTC on 28 Mar 2009(unit:mm)

(a)ExpC,(b)ExpA,(c)observation,(d)hourly maximum precipitation

如图 7d 所示,2009 年 3 月 28 日 10:00—15:00 观测的降水中心大致沿  $23^{\circ}\text{N}$  向东移动,12:00 开始减弱,路径可近似为一条沿  $23^{\circ}\text{N}$  的自西向东的直线,降水最强时可达  $82\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。ExpA 模拟的降水移动路径偏北  $0.25$  个纬度,但也是沿纬圈的自西向东的直线,中心强度偏小,最强时约为  $46\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,同样在 12:00 降水开始减弱。ExpC 模拟的效果不理想,路径大致为西北西—东南东,强度不超过  $10\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,且中心降水未出现先增大后减小的变化趋势。不论是整体降水分布还是逐小时暴雨中心的移动路径,相对于 ExpC 而言,ExpA 降水模拟更偏南,与观测更接近。这与图 5 所示 ExpA 的水汽输送中心位于珠江口一致,ExpA 模拟的降水量级远大于 ExpC,与图 6 所示的不稳定能量对应。因此,同化高分辨率的降水率资料可以明显改进模式

的动力学和湿度场特征,将背景场没有的中小尺度信息合理地加入背景场,从而提高模拟质量。

中尺度暴雨时间尺度短,降水量随时间变化很大。仅考察累积降水量不足以证明中尺度天气系统的发展和消亡,然而逐小时的降水模拟结果能清晰地反映出强降水中心的结构和演变特征。图 8 为两次模拟试验和自动气象站观测的地面逐小时降水分布。ExpC 在积分的第 1 小时(图 8a),观测到的降水中心位于  $23.5^{\circ}\text{N}, 113.8^{\circ}\text{E}$  附近,超过  $30\text{ mm}$ 。对比 ExpA 与观测,ExpA 有明显改进,不仅降水中心位置与实际观测更接近,而且降水量级由  $4\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  提升至  $15\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,在积分的前 5 h 均有这样的特点。其次,从实况降水随时间演变特征来看,强降水区域自西向东移动,强度先增强后减弱。ExpA 的演变与实况几乎一致,强降水区域沿  $23^{\circ}\text{N}$  一直



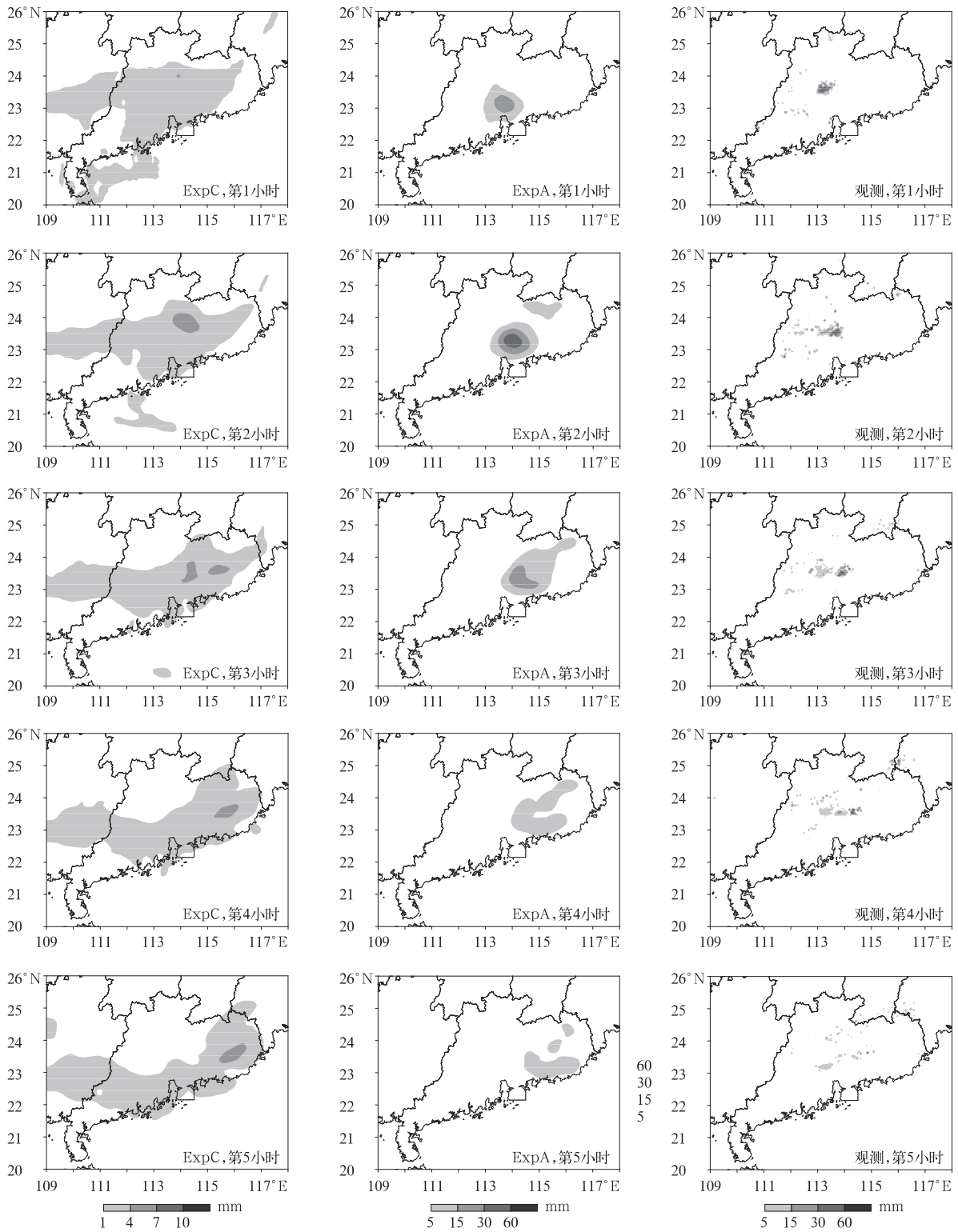


图 8 逐小时地面降水分布

Fig. 8 The distribution of hourly rainfall at surface

向西移动,积分的前 2 h 增强,后 3 h 减弱。ExpC 同样经历了先增强后减弱的过程,但是其降水量不

到实况的 10%,强降水区域也明显偏北。从积分第 2 至第 4 小时,粤东北(24.5°N,117.5°E)也有明显

的降水出现,强度弱于珠江口的强中心。ExpA 在粤东北也有降水出现,虽未形成降水中心,但仍优于 ExpC 的模拟结果。东北侧的降水模拟结果不理想,与同化资料覆盖区域太小有关。

同化雷达估算降水率对逐小时的降水模拟同样优于非同化试验,主要体现在以下几个方面:①逐小时降水量增大,更接近于实况,这是由于同化雷达估算降水率后,底层辐合与水汽增强,模式中水汽垂直输送增强;②暴雨中心的移动路径和速度大致与实际观测相吻合;③逐小时的降水分布也有改善;④从逐小时降水量的变化可以看出,同化雷达估算降水后,暴雨的发展和消亡更符合观测。

### 3 小 结

本文首先采用  $Z-I$  关系估算雷达降水率。由于气象遥感资料普遍具有单点探测精度低,梯度分布合理的特点,采用万齐林<sup>[11]</sup>提出的一种不需要对订正资料进行全场插值的变分校准方案,结合自动气象站降水资料的优势,订正雷达估算降水。以 2009 年 3 月 28 日广东省广州市大暴雨为例,FSU 对流参数化方案为观测算子,设计了一组数值试验考察雷达资料对初始场的影响以及对暴雨模拟的改进,得到以下主要结论:

1) 利用自动气象站降水率资料变分校准雷达估算降水率提高了降水率资料的单点精度,而且保留了其梯度分布合理的优势,与自动气象站降水率资料形成互补。虽然校准后出现对极小量级降水的高估,但随着降水增强,误差迅速减小。

2) 同化雷达估算降水率后,初始风场调整明显,不仅增强了低层辐合,还使高层大气辐散增强。这样的高低空配置有利于垂直运动产生,使不稳定能量得到释放。同时,低空的水汽含量增加明显,为水汽的垂直输送提供了有利条件。

3) 从逐小时模拟结果看,同化试验的暴雨中心强度和移动路径与实际观测相近,也反映了中尺度对流系统的发生和消亡。

变分校准后的雷达估算降水率资料单点精度高、梯度分布合理,同化后可以调整大气的辐合辐散结构和水汽分布。但其中还存在一些问题:首先,本文采用 FSU 对流参数化方案作为观测算子,即用对流参数化描述模式中的网格降水和次网格降水,使模式变量到观测变量的投影变得模糊,观测算子存

在明显误差。其次,对广东省广州市一次大暴雨两个例研究表明,FSU 对流参数化方案得到的垂直运动的垂直分量过大,不能反映中尺度斜升气流的特点。另外,虽然本文所用的同化系统已业务化,业务时效可以得到保障,但在同化过程中可能会使分析场的水汽处于过饱和状态,对于强对流天气有较好的效果,其他天气系统误差可能较大。这些问题的解决还有待于进一步研究。

**致 谢:**中国气象局广州热带海洋气象研究所数值预报团队的陈子通研究员对本工作给予了有益的建议,张艳霞副研究员和戴光丰高级工程师协助准备了自动气象站资料和雷达资料,在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 王楠,刘黎平,徐宝祥,等. 利用多普勒雷达资料识别低空风切变和辐合线方法研究. *应用气象学报*, 2007, 18(3): 314-320.
- [2] 王改利,刘黎平,阮征. 多普勒雷达资料在暴雨临近预报中的应用. *应用气象学报*, 2007, 18(3): 388-395.
- [3] 王飞,张义军,赵均壮,等. 雷达资料在孤立单体雷电预警中的初步应用. *应用气象学报*, 2008, 19(2): 153-160.
- [4] Wilson J W. Integration of radar and raingagedata for improved rainfall measurement. *J Appl Meteor*, 1970, 9(3): 489-497.
- [5] Brandes E A. Optimizing rainfall estimates with the aid of radar. *J Appl Meteor*, 1975, 14(7): 1339-1345.
- [6] Brandes E A, Sirmans D. Convective Rainfall Estimation by Radar-experimental Results and Proposed Operational Analysis Technique. Preprint Volume of Conference on Hydrometeorology, Amer Meteor Soc, 1976: 54-59.
- [7] Sasaki Y. Some basic formalisms in numerical variation analysis. *Mon Wea Rev*, 1970, 98(12): 875-883.
- [8] Ninomiya K, Akiyama T. Objective analysis of heavy rainfalls based on radar and gauge measurement. *J Meteor Soc Japan*, 1978, 50: 206-210.
- [9] 张培昌,戴铁丕,伍志方,等. 用变分方法校准数字化天气雷达成定区域降水量基本原理和精度. *大气科学*, 1992, 16(2): 248-256.
- [10] 王叶红,崔春光,赵玉春,等. 变分技术在校准数字化天气雷达成定量估测降水中的应用. *气象*, 2001, 27(10): 3-7.
- [11] 万齐林. 气象遥感资料变分校准方案改进及应用试验. *气象*, 2006, 32(11): 19-24.
- [12] 丁伟钰,万齐林,闫敬华,等. 对流天气系统自动站雨量资料同化对降雨预报的影响. *大气科学*, 2006, 30(2): 317-326.
- [13] Marécal V, Mahfouf J F. Four-dimensional variational assimilation of total column water vapor in rainy areas. *Mon Wea Rev*, 2002, 130(1): 43-58.
- [14] Bauer P, Mahfouf J F, Olson W S, et al. Error analysis of TMI rainfall estimates over ocean for variational data assimilation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2002, 128(584): 2129-2144.
- [15] 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.
- [16] Macpherson B. Operational experience with assimilation of rainfall data in the met office mesoscale model. *Meteor Atmos Phys*, 2001, 76(1-2): 3-8.
- [17] Stephan K, Klink S, Schraff C. Assimilation of radar derived rain rates into the convective scale model COSMO-DE at DWD. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2008, 134(634): 1315-1326.
- [18] Wang X B, Yau M K, Nagarajan B, et al. The impact of assimilating radar-estimated rain rates on simulation of precipitation in the 17-18 July 1996 Chicago Floods. *Adv Atmos Sci*, 2010, 27(2): 195-210.
- [19] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学. 北京: 气象出版社, 2001: 181-186.
- [20] 江源, 刘黎平, 庄薇. 多普勒天气雷达地物回波特征及其识别方法改进. *应用气象学报*, 2009, 20(2): 203-213.
- [21] Anthes R A. A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. *Mon Wea Rev*, 1977, 105(3): 270-286.
- [22] Krishnamurti T N, Low-Nam S, Pasch R. Cumulus parameterization and rainfall rates II. *Mon Wea Rev*, 1983, 111(4): 815-828.
- [23] Krishnamurti T N, Ramanathan Y, Pan H L, et al. Cumulus parameterization and rainfall rates I. *Mon Wea Rev*, 1980, 108(4): 465-472.
- [24] 庄世宇, 薛纪善, 朱国富, 等. GRAPES 全球三维变分同化系统——基本设计方案与理想试验. *大气科学*, 2005, 29(6): 872-884.
- [25] 李华宏, 薛纪善, 王曼, 等. 多普勒雷达风廓线的反演及变分同化试验. *应用气象学报*, 2007, 18(1): 50-57.
- [26] 万齐林, 薛纪善. 曲率修正线性平衡方程及其在变分同化风压约束中的应用. *热带气象学报*, 2007, 23(5): 417-423.
- [27] 王瑞春, 龚建东, 张林. GRAPES 变分同化系统中动力平衡约束的统计求解. *应用气象学报*, 2012, 23(2): 129-138.

## Effects of Assimilating Radar Rainfall Rate Estimation on Torrential Rain Forecast

Gao Yudong<sup>1)2)</sup> Wan Qilin<sup>1)2)</sup> Xue Jishan<sup>1)2)3)</sup> Ding Weiyu<sup>1)2)</sup> Li Haorui<sup>1)2)</sup>  
Zhang Chengzhong<sup>1)2)</sup> Huang Yanyan<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup> (Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, Guangzhou 510080)

<sup>2)</sup> (Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510080)

<sup>3)</sup> (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

### Abstract

Meso-scale weather system, such as torrential rain, is neither easily detected nor effectively simulated. Main causes consist of the insufficient observation and the inaccurate initial field, which are prepared for the routine weather prediction and the hazardous weather simulation. To solve these problems, high resolution rainfall rate data estimated by doppler radar  $Z-I$  relationship is calibrated with AWS data by variational method. The forecast experiment on a torrential rain case captured by the radar in Guangzhou indicates that the east center of precipitation omitted in the original  $Z-I$  estimation is forecasted after the calibration. Even though the minor amount of rainfall rate is inclined to be overestimated, relative errors of calibration significantly decline as the increase of rain rate value. As a result, high resolution datasets of calibration rain rate are demonstrated to possess a more accurate single point value than the estimation of  $Z-I$  relationship and a more reasonable gradient than AWS data. Meanwhile, according to the distribution of instantaneous precipitation, calibration rainfall rate datasets imply lots of information on the atmospheric dynamic and moisture, which are the major factors to arouse a convective rainstorm.

To verify various advantages of mixed characteristics, a set of experiments are performed using FSU (Florida State University) cumulus parameterization scheme as the observational operator, based on GRAPES (Global/Regional Analysis and Prediction System) Regional Three Dimensional Variation System. Compared with NCEP (National Centers for Environmental Prediction) global analysis data, the convergence in lower level and the divergence in higher level after assimilation are conspicuously strengthened, which sequentially lead the unstable energy in atmosphere to be elevated. Showalter index and  $K$  index diagnose indicate a heavy rain in the dense data region as well. In addition, the vertical transportation of moisture forced by the convergence sustains a strong convection and ameliorates the cumulative precipitation. The storm path prediction is obviously improved. Results of simulation experiment express that not only the hourly distribution and center of precipitation are similar to the observation, also, the meso-scale convective system development and demise are impressively depicted.

**Key words:** torrential rain; calibrated radar estimates of rainfall rate; rainfall rate assimilation; numerical weather prediction