

雷达资料同化方法：回顾与前瞻

孙娟珍^{1, 2} 陈明轩² 范水勇²

(1 美国国家大气研究中心, 博尔德, CO 80307; 2 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089)

摘要: 自20年前第一个业务天气雷达观测网在美国建立以后, 气象界在多普勒天气雷达资料同化方面的研究和应用已取得了显著成果。中国在21世纪初也完成了一个覆盖大多数地区的多普勒天气雷达观测网, 在实时监测及预警对流天气、降水及台风等方面起到了重要作用。但是, 中国在同化雷达资料以改进细网格数值模式的初始化精度方面的研究及应用仍然处在起步阶段。对数值模式中同化雷达资料利用方法的研究和应用进行了简短回顾, 也对未来该领域研究的重点研究方向提出建议。

关键词: 雷达资料, 资料同化, 对流天气, 降水

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.002

Radar Data Assimilation Methods: Review and Future Perspective

Sun Juanzhen^{1, 2}, Chen Mingxuan², Fan Shuiyong²

(1 National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO 80307 2 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089)

Abstract: Since the first operational Doppler radar network was established in the United States of America in the early 1990's, significant progress has been made on the research and application of radar data assimilation. China installed its operational Doppler radar network in the early 2000's, and has widely used for real-time detecting and warning the convective weather, precipitation and tropical cyclone. However, the attempt to assimilate Doppler radar data into numerical weather prediction (NWP) models for the improvement of model initial conditions is just begun. In this paper, we review the past effort and progress on assimilating radar data into NWP models, in order to promote the research and development in this important field.

Keywords: radar data, data assimilation, convective weather, precipitation

0 引言

雷达资料在对流天气监测和基于外推的雷暴临近预报方面的应用已经有数十年的历史, 但是直到近年来才尝试应用于业务数值预报模式。将多普勒天气雷达资料同化到数值模式中以改进雷暴预测的提议始于1990年, 当时美国正在兴建世界上第一个业务多普勒天气雷达观测网 (NEXRAD)。此观测网涵盖整个美国大陆, 提供对流天气的实时观测, 为未来改进灾害天气的预报预警带来了新希望。Lilly^[1]发表了以“Numerical prediction of thunderstorms-has its time come?” (雷暴数值预报: 现在是时候了吗?) 为题目的论文, 从几个方面阐述了未来数值预报的新方向“对流尺度数值预报”的可行性以及面临的挑战。除

了雷达观测网为此目标提供了必要条件, 他还指出快速增长的计算机速度、云尺度数值模拟技术的进步, 以及先进资料同化方法的开创都为对流尺度数值预报的实现和应用提供了可能性。

自20世纪50年代基于计算机的数值天气预报诞生以来, 数值天气预报主要应用于预报大尺度天气形势, 而降水预报仍需依赖于预报员的经验。虽然随着数值模式的不断改进和模式分辨率的不断提高, 数值模式降水预报的参考价值也不断提升, 但对于对流降水的定时、定量、定点预报仍然差距很远。传统的数值预报模式的初始条件分析场是基于大尺度观测网得到的, 中小尺度环流和其产生的降水的模拟必须经过模式自身的“Spin-up”调整。如果这些中小尺度环流及降水能够存在于模式初始条件中, 它们的短期预报精度就有可能提高。所以能否成功的同化中小尺度观测资料 (如雷达资料), 是未来对流尺度数值预报的关键。

收稿日期: 2015年8月5日; 修回日期: 2016年4月11日

第一作者: 孙娟珍 (1961—), Email: sunj@ucar.edu

资助信息: 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201506004; GYHY201306008)

雷达资料虽然具有高时空分辨率，能够及时监测雷暴的发生及位置，但将其定量的应用于数值预报，却存在很多的挑战。第一，多普勒雷达观测的径向速度和反射率因子都不是模式常规量，不能直接用于模式初始化。因此，成功反演模式所需要的气象场是同化雷达资料的一个很重要的目标。第二，雷达资料的覆盖区域有限。以S波段雷达为例，反射率因子一般只有230km的有效覆盖半径，径向速度只有165km的有效覆盖半径。虽然目前世界上美国和中国两个最大的天气雷达网，都各有超过150部雷达，但却均不能达到全面的覆盖，尤其是径向速度场。第三，雷达资料量大并且有很多质量控制方面的难点，需要准确、高效率的预处理和质量控制专业软件。第四，雷达观测反映的是对流尺度现象，受对流尺度动力规律支配，与其他类型天气尺度的大气观测资料有很大的不同，在同化中怎样同时保证不同尺度的匹配与平衡，是成功同化雷达资料的一个重要挑战。

自Lilly的论文^[1]发表开始，国际上展开了许多研究，致力于解决雷达资料同化各方面的挑战，开发雷达资料同化的技术和系统，并且已取得了非凡的成果^[2-9]。中国自1998年开始建立的全国范围的雷达观测网，也促进了雷达资料同化及对流天气短临预报的研究和技术开发^[10-13]。本文对国际、国内雷达资料同化的进展做一个综合性回顾，并对未来的发展所面临的挑战阐述我们的观点。

1 雷达资料同化进展的回顾

1.1 天气雷达资料反演分析

虽然多普勒天气雷达能够观测到高解析度的风场，但此风场只是径向速度场，传统方法是靠双雷达才能得到水平风场。但业务雷达网几乎很少有双雷达覆盖，那么，仅靠单雷达是否能够反演水平风场？在尝试雷达资料同化的初期，很多的研究致力于开发单雷达的风场反演方法。这些方法从简单的反射率因子轨迹跟踪^[14]，到使用反射率守恒方程（只适用于晴空回波）的变分方法及移动坐标方法^[15-17]，到更加复杂的四维变分同化方法（4DVar）^[2, 18]。这些研究都表明了从单雷达反演水平风场的潜力和可行性。其中，4DVar同化方法^[2]因使用一个边界层模式做约束，可以同时反演动力平衡的三维风场及温度场，为未来单雷达资料同化展示了可行的前景。Sun等^[3, 19]将此系统中的边界层“干”模式扩展成为一个“湿”云模式，以致同时成功获得三维风场、温度场及微物理场的反演，并将该系统命名为VDRAS（Variational Doppler Radar Analysis System）。

VDRAS实际上是一个以三维数值云模式及其伴随模式为主体的4DVar同化系统。它的主要特征是使用较小的同化窗（十几分钟）同化快速更新的雷达资料及地面自动站资料以得到对流尺度的三维动力和热动力结构，而大尺度环境特征则由中尺度模式预报（比如WRF）提供。以云模式为约束的四维变分同化有能力自动反演所有雷达未观测的模式变量，产生快速更新的三维动力和热动力结构分析，包括三维风、温度、湿度、微物理变量等，并且能够进一步诊断得到与强对流天气生消发展密切相关的变量场。在国际上，VDRAS系统不仅已经广泛应用在雷达资料同化及对流天气机理和预报的研究方面^[2-3, 19-27]，而且自2001年以来在多地应用于实时业务当中^[28-30]，为强对流天气临近预报提供重要信息。

VDRAS系统自2005年引进到北京地区后，经过一系列的研究和测试，并且对VDRAS系统进行了进一步改进^[21-22, 30-32]。2008年，同化北京和天津两部新一代天气雷达资料的VDRAS系统在北京奥运会和世界气象组织北京2008预报示范项目（B08FDP）期间的强天气临近预报中得到成功的实时示范应用，作为强对流天气临近预报预警的辅助工具^[32-33]。VDRAS系统每15min左右更新的三维风场、温度场和湿度场帮助预报员建立了北京地区局地突发强对流天气的一些概念模型。图1—3展示的是一个VDRAS分析的强对流个例。此个例发生在2006年8月1日，是在B08FDP示范项目前的试验阶段。图1是这个个例的对流演变过程，由北京雷达（BJRS）的反射率因子展现。北京时间15:15，在北京东北地区可以清楚看到两条线状对流（图1a）。将近1h后，这两条对流线合并为一条很强的对流带（图1c）。在此对流带的南部有新的对流单体生成（图1d），并在接近北京市区的西北方发展成为一条强对流带（图1e—f）。图2所展示的是VDRAS系统分析（反演）的扰动温度场、辐合/辐散场和水平风向量。VDRAS清楚地分析出了从15:15（北京时）到16:09（北京时）的强对流系统由两个冷池合并为一个冷池的过程。图2星号处为图1d新生对流的地点，此新生对流产生在接近冷暖交接处的暖舌区。在此暖舌附近，由西北冷池的出流和暖区的东南风造成了很强的低层辐合以及很大的温度梯度，触发出北京市区西南部的强对流带（图1e—f）。图3所示为此对流带的垂直速度场和1h后的35dBz以上雷达反射率因子所指示的风暴位置（黑线条）。两者很好地吻合，表明垂直速度场对风暴的发生具有预警作用。

最近，通过对VDRAS系统的进一步改进和优

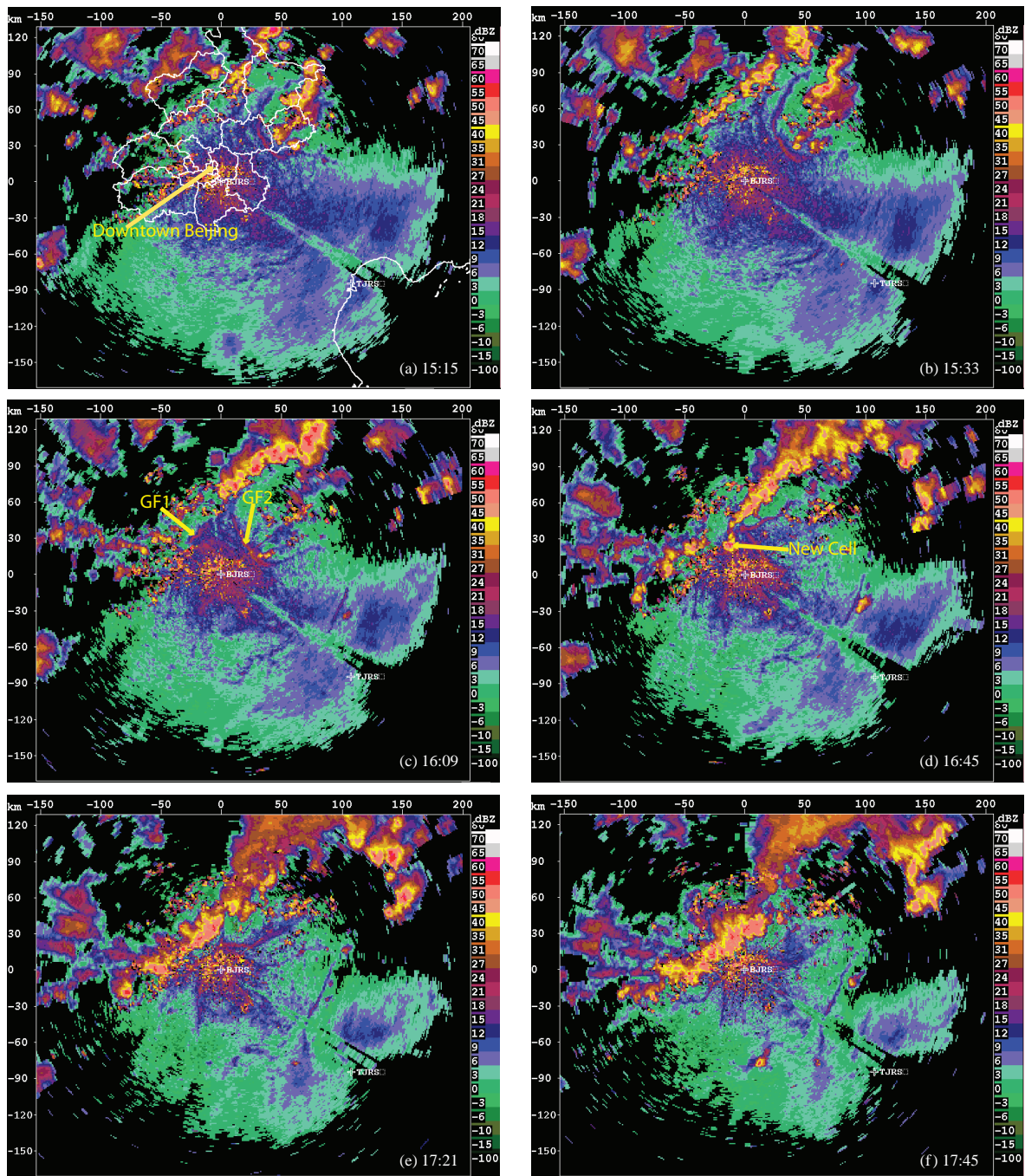


图1 北京雷达反射率因子指示的发生在2006年8月1日的雷暴个例随时间的演变
(所标时间为北京时间, 图1a中给出北京各行政区的地图^[30])

Fig. 1 Evolution of the storm case occurred on 1 August 2006 according to the radar reflectivity from the Beijing S-band radar. The map of districts in Beijing is shown in Fig.1a^[30]

化, 已经形成了一个完全适合于帮助北京地区预报员进行局地突发强对流天气临近预报和预警业务的对流尺度三维特征快速更新分析系统。系统同时对京津冀区域7部新一代天气雷达径向速度和反射率因子资料进行快速更新4DVar同化, 并融合区域近1000个5min自动站观测、雷达VAD风廓线及中尺度数值模式结果

形成中尺度背景场, 可快速分析得到12~18min间隔的低层大气三维动力、热动力和微物理场的精细结构特征。并且, 利用该系统, 对京津冀地区不同类型对流风暴的动力和热动力特征进行了成功的对流尺度数值模拟分析^[34-40]。VDRAS系统已经成为目前国际上多普勒天气雷达资料反演分析方面的代表性工具。

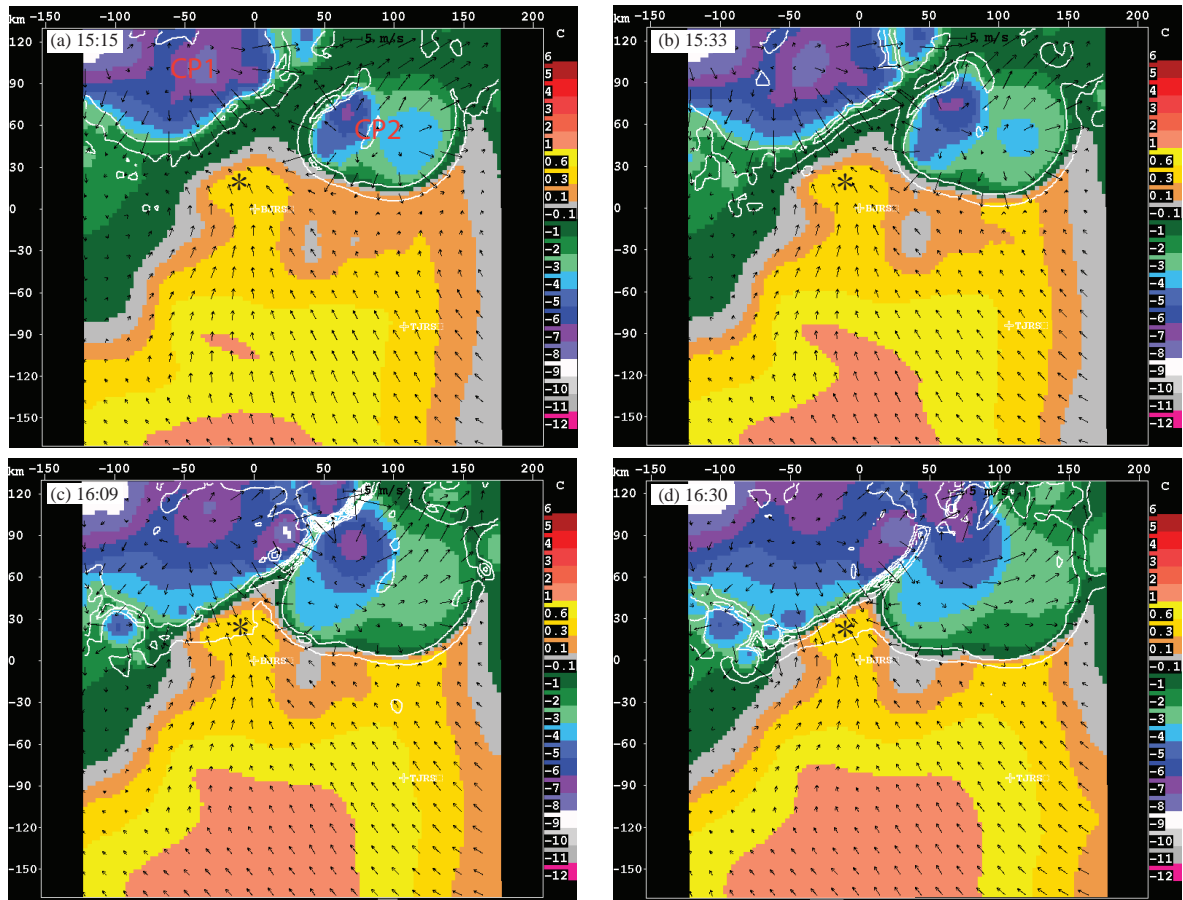


图2 VDRAS分析出的在离地面0.1875km的扰动温度场、水平辐合场（白色曲线）和水平风矢量（时间分别为北京时间2006年8月1日15:15（a），15:33（b），16:09（c），16:30（d）；辐合场的曲线从 $0.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 开始，间距为 $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ；图2d中的黑色星号是在图1d中的新对流发生地点）^[30]

Fig. 2 Perturbation temperature, horizontal divergence (white contours starting from $0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ with an interval of $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$), and horizontal wind vectors at the height of 0.1875km above surface from VDRAS, for 4 different times of 15:15 (a), 15:33 (b), 16:09 (c) and 16:30 (d) (Beijing Time) respectively on 1 August. The black asterisk in (d) indicates the location of the new initiation in Fig. 1d^[30]

总之，VDRAS从初期的一个单雷达反演系统，已经逐渐扩充成为一个以中尺度模式为背景，可以同时同化多部雷达和地面稠密观测资料，并具有临近预报能力的分析和预报系统。最近几年来，在VDRAS的云模式中加入了考虑冰相的微物理过程，考虑复杂地形效应的模拟方案也正在开发之中。另一方面，正在进行的研究是在VDRAS中加入闪电资料的同化。这些新的研究开发有助于提高VDRAS在强对流天气临近预报方面的能力。

1.2 以“热启动”为目标的反射率因子同化方法

虽然单雷达反演的成功为在业务中深入使用雷达资料奠定了基础，但要将雷达资料成功应用于业务数值预报模式中还存在很多实用上的难度。尽管同时同化雷达径向速度和反射率因子是最有利于对流尺度初始化，但因雷达径向速度质量控制难度较大以及对同

化方法的要求也较高，同化反射率因子通常是许多业务系统的首选。另一方面，业务预报系统在降水预报上的一个首要问题是不可避免的“Spin-up”，这使得数值预报前几个小时的降水预报无使用价值。因雷达反射率因子能够实时观测到对流降水的位置和强度，若将其同化在数值模式初始条件中，也就是所谓的“热启动”，就有可能解决“Spin-up”问题。如果只是同化反射率因子（或从其推导出的雨水混合比），在无动力场匹配的情况下，模式预报开始后，初始场中的雨水会很快降到地面上。一个简单的动力匹配方法就是从雨水混合比推导出气—水或气—雪转换时所释放的潜热，再将该潜热同化到模式中。

虽然有多种以“热启动”为目标的同化反射率因子的方法，这里只介绍两种方法。一种是基于观测资料“张弛法（nudging）”的RTFDDA（Real

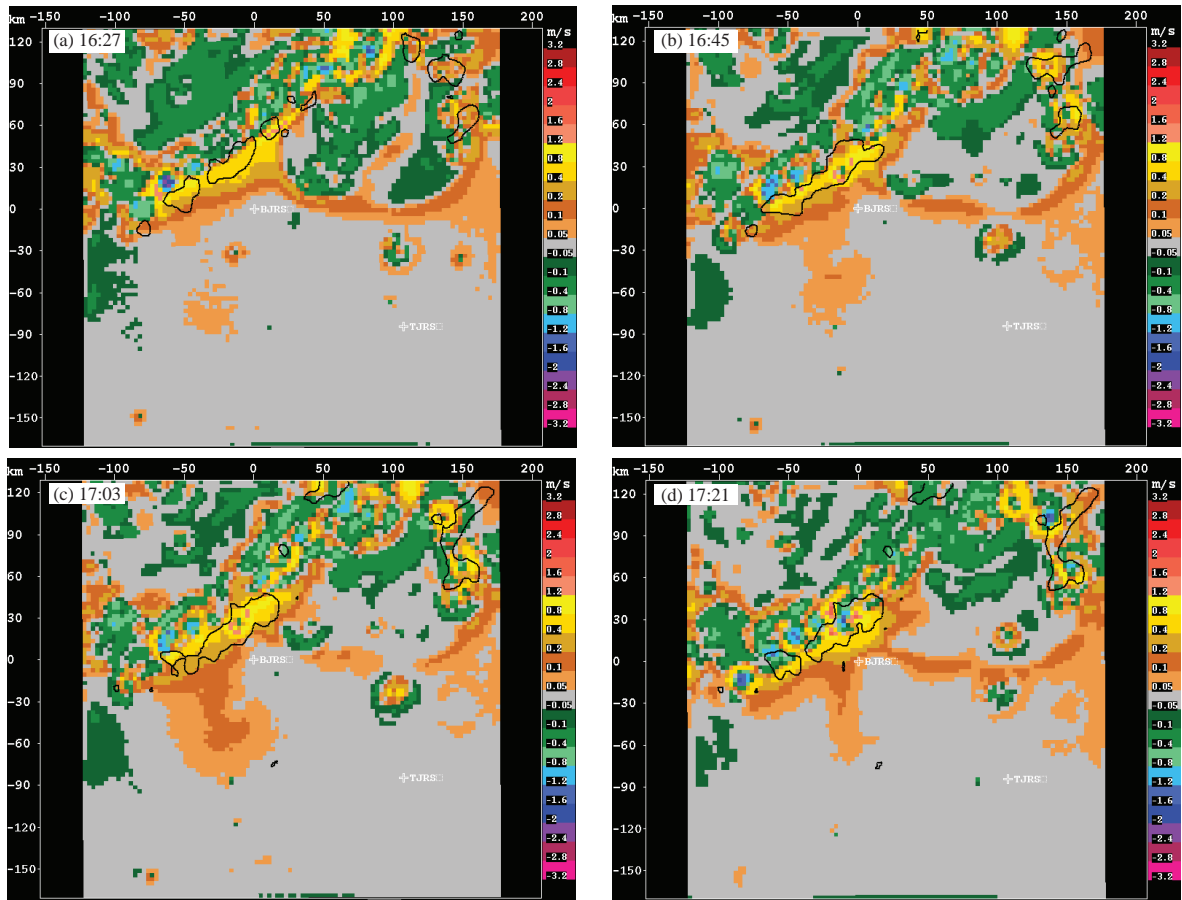


图3 VDRAS分析出的在离地1.6875km高度上的垂直速度场；为了表示垂直速度的预警作用，1h后的35dBz反射率因子（黑线条）叠加在垂直速度场上（时间分别为北京时间2006年8月1日16:27 (a), 16:45 (b), 17:03 (c) 和17:21 (d)）^[30]
 Fig. 3 Vertical velocity from VDRAS at the height of 1.6875km above surface, for 4 different times of 16:27 (a), 16:45 (b), 17:03 (c), and 17:21 (d) (Beijing Time) respectively on 1 August 2006. The one-hour-later 35 dBz reflectivity (black contours) is overlaid to show that the role of the vertical velocity in predicting the storm^[30]

Time Four Dimensional Data Assimilation) 系统中的雷达反射率因子同化方法^[41]。另一种是HRRR (High Resolution Rapid Refresh) 系统中的DDFI (Diabatic Digital Filter Initialization) 方法^[5]。在RTFDFA的雷达反射率因子同化方法中，先将反射率因子转换成雨水混合比，然后基于模式和观测的雨水混合比之差推导潜热，最后将该潜热作为观测以“nudging”的方法同化到模式中。图4所示是基于RTFDFA初始化的天气研究预报模式 (RTFDFA-WRF) 3km分辨率降水一个星期的预报评分，比较有和无雷达反射率因子同化的差别。可以看出，雷达反射率因子同化明显地改进了前几小时的预报，但预报评分随时间下降得很快，反映出单同化反射率因子虽然产生了“热启动”，但其效果不能持续很久。HRRR采用的DDFI方法是在用GSI (Gridpoint Statistical Interpolation) 进行了大尺度资料同化之后，在预报之前的DFI (Digital Filter

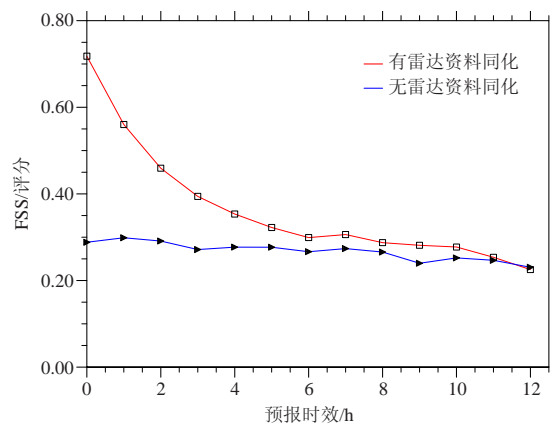


图4 RTFDFA-WRF有 (红线) 和无 (蓝线) 雷达资料同化的评分对比；评分统计是基于一个星期28次预报结果
 Fig. 4 Comparison of fractions skill scores between two RTFDFA-WRF forecasts with (red curve) and without (blue curve) radar data assimilation respectively. The statistics are based upon 28 forecasts in that week

Initialization) 过程中将有反射率因子推导出来的潜热代替模式原本的对流热能以达到热启动的效果。

1.3 同时同化径向速度和反射率因子的方法

雷达径向速度观测含有重要的对流动力特征(比如,与局地对流突发密切相关的低层辐合和上层辐散,与局地强下沉气流和对流性大风密切相关的中层辐合,与对流风暴组织、演变、传播及生命史密切相关的中低层切变,以及与对流风暴相伴随的出流和入流等)。那么,怎样有效地同化雷达径向速度观测信息以改进对流性降水的预报,是很重要的研究课题。虽然 Sun等^[2]已经展示了4DVar方法可以同化雷达径向速度以及反射率因子,对数值模式的“强约束”能够提供多变量之间的相关,可以获得动力平衡的气象场,从而提供用于初始化数值模式。但4DVar同化系统的建立难度很大,特别是对于复杂的业务预报模式,所以直到最近,以中尺度预报模式为约束的雷达4DVar同化系统才得以实现。因为三维变分(3DVar)仍然在业务上被广泛应用,怎样将雷达资料同化加入业务同化模式有很实际的应用价值。Gao等^[4]和Xiao等^[7]分别在ADAS(ARPS Data Analysis System)和WRFDA(WRF Data Assimilation)3DVar同化系统中加入了雷达径向速度的同化。之后又分别加入了反射率因子的同化方案^[42-43]。

虽然在3DVar同化系统中同时同化径向速度和反射率因子比只同化反射率因子有一定的优势,但因为该方法在获取对流尺度多变量之间相关性方面有其局限性,多位作者指出仍然有必要加入基于雷达反射率的云分析方案。Hu等^[44]发表的试验结果表明,以雷达、地面资料和卫星资料结合的云分析对有效的启动对流起着重要作用。Wang等^[45]发现在云内反射率因子高于设定阈值以上强迫空气饱和并将其放在价函数中同化,可以减少强降水的“Spin-up”时间。在国内,许多学者也开展了基于云分析和3DVar的雷达资料同化技术研究和试验,目标是提升暴雨和强对流等的数值预报能力,结果表明,同化我国的新一代天气雷达资料在提升对流尺度数值预报水平方面具有广阔的应用前景^[10, 12-13, 46-50]。基于3DVar的雷达资料同化因其简单快速,已经被广泛应用于业务。在基于WRF模式的华北区域高分辨率快速更新循环业务数值预报系统(BJ-RUC)中,通过很多的技术改进和试验^[51-52],目前已经成功实现了京津冀区域雷达资料(包括反射率因子和径向速度)的逐3h更新的3DVar同化,改进了对流性降水强度和落区的短时预报能力,特别是对前12h的降水预报精度有所提高(图5)。

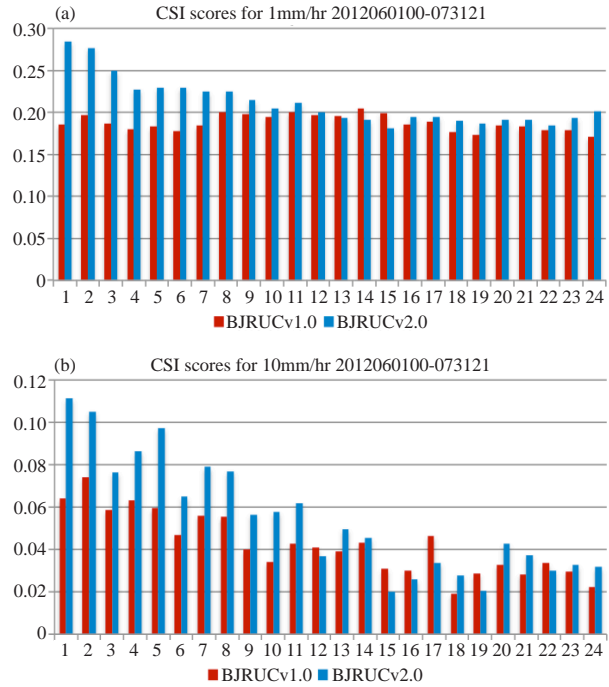


图5 BJ-RUCv1.0和BJ-RUCv2.0的降水评分比较(BJ-RUCv2.0中加入了雷达资料同化;评分统计是基于2012年6月和7月的业务预报)

Fig. 5 Comparison of CSI scores between BJ-RUCv1.0 and BJ-RUCv2.0. Only the BJ-RUCv2.0 has radar data assimilation. The statistics are based on operational forecasts in June and July, 2012

因为开发中尺度业务预报模式的4DVar同化具有相当大的难度,近年来才得以真正实现具有业务应用前景的中尺度模式4DVar同化技术。Wang等^[9]描述了以WRF为约束的雷达4DVar同化系统,在此论文中,作者特别检验了是否以切线性模式为约束可以应用于

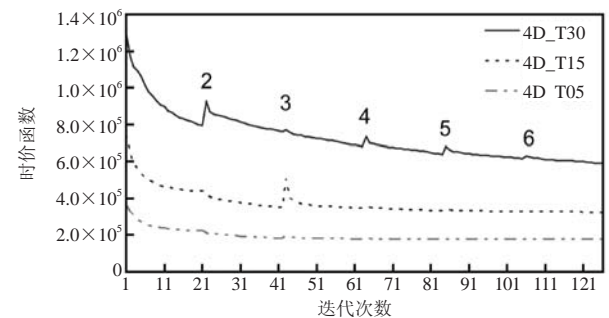


图6 在WRF 4DVAR中使用不同的同化窗长度(5min, 15min, 30min)时价函数随迭代次数的变化(图中所标的数字代表外循环的次数)^[9]
Fig. 6 Changes of the cost function with respect to number of total iterations accumulated by the 6 outer loops, in three experiments with different 4DVAR lengths of assimilation window (5min, 15min, 30min). The numbers in figure denote the number of total iterations accumulated by the 6 outer loops,^[9]

雷达资料同化。使用切线性模式是业务模式变分同化系统中的通常选择，原因是线性模式使得价函数更规则化，且易于简化（例如采用粗网格迭代优化）。他们的结论是只要使用小于30min的同化窗，以线性模

式可以达到很好的收敛效果（图6）。Sun等^[53]比较了4DVar和3DVar同化雷达资料的表现，他们发现4DVar同化比3DVar同化有明显优势（图7—8）。从图7和8中也可以看到，在3DVar同化系统中加入从反射率因

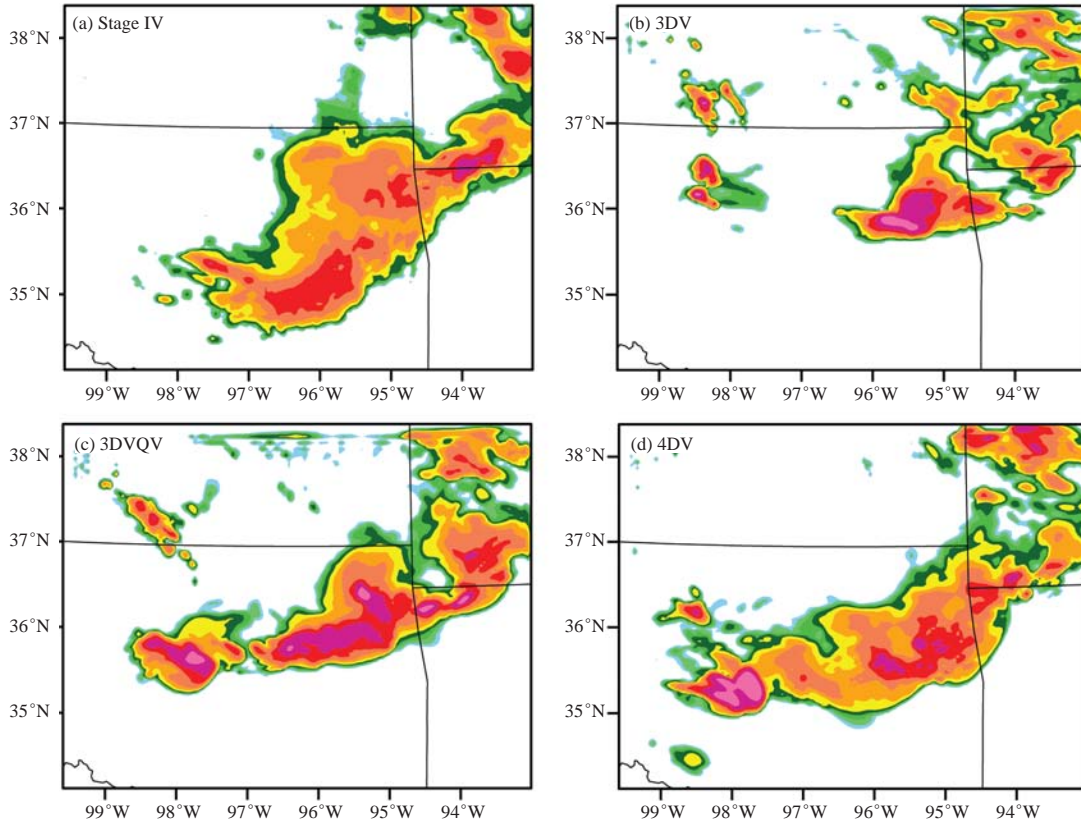


图7 比较使用WRF 3DVAR (b, c) 和 WRF 4DVAR (d) 的6h降水预报的区别； (c) 使用了^[45]的同化方案，即从雷达反射率因子推导的湿度同化方案； (a) 为降水观测

Fig. 7 Comparison of 6h forecasts of hourly accumulated precipitation (mm) between schemes of using two 3DVAR schemes (b, c) and WRF 4DVAR scheme (d). The upgraded 3DVAR in the scheme ^[45] is applied in (c). The observed precipitation is shown in (a)

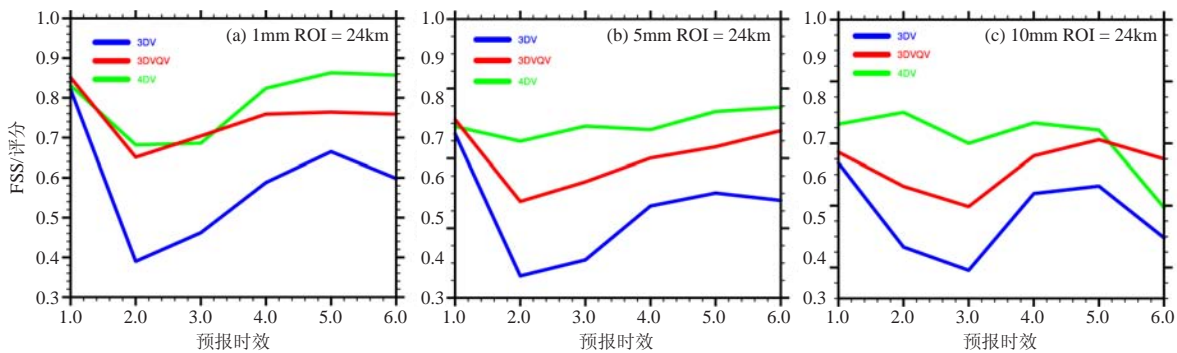


图8 比较使用WRF 3DVAR (蓝线对应图7b, 红线对应图7c) 和 WRF 4DVAR (绿线) 的6h降水预报评分 (FSS评分, 24km影响半径)

Fig. 8 Comparison of the 6h precipitation forecast skills using FSS between the two 3DVAR schemes (blue corresponds to Fig. 7b; red corresponds to Fig. 7c) and the 4DVAR (green) scheme

子递推的湿度场^[9]，对预报也有明显改进。

集合卡尔曼滤波方法 (EnKF) 也在雷达资料同

化方面有广泛的应用。自Snyder 等^[54]首先将此方法应用于雷达资料同化以后，多位学者也相继针对不同的

问题进行了研究^[6, 8, 55-60]。EnKF系统相对4DVar系统而言, 开发代码的难度较小, 因为不需要伴随模式, 所以特别有利于对复杂物理参数化的研究。Xue等^[61]展示了以EnKF和二阶微物理参数化过程同化雷达资料可以得到各种微物理量以及雨滴密度。Jung等^[62]也使用二阶微物理参数化过程展示了同化雷达资料可以成功反演双偏振雷达参数。对使用EnKF同化雷达资料的国际最新研究进展的更详细回顾和讨论, 读者可以参考Sun等^[63]的描述。在国内, 徐小永等^[64]利用EnKF在数值云模式中同化模拟多普勒雷达资料, 考察了不同条件下EnKF同化方法的性能。兰伟仁等^[65-66]利用多普勒雷达资料进行了一系列风暴天气尺度的EnKF同化试验, 检验了EnKF在风暴天气尺度资料同化方面的效果, 并验证了各EnKF参数和模式误差对同化效果的影响, 表明了EnKF能有效应用于风暴尺度的资料同化。秦琰琰等^[67]将EnKF同化技术应用到对流尺度系统中, 实施了基于WRF模式的同化单部多普勒雷达径向速度和反射率因子的观测系统模拟试验, 验证了其在对流尺度数值模拟中应用的可行性和有效性。

2 雷达资料同化的未来展望

虽然过去几十年在将雷达资料同化加入数值模式中已取得显著成果, 但目前仍面临各种困难和挑战。这里仅列举作者认为比较重要的几方面。

2.1 雷达资料前处理和质量控制

要使雷达资料同化在业务上得到广泛应用, 一个自动、可靠的前处理质量控制系统是必需的。中国的雷达网有不同的型号和波段, 前处理和质量控制的难度更大。虽然雷达资料质量控制并不是新的研究课题, 但开发适用于业务雷达资料同化的自动前处理系统却远远达不到要求。在华北区域高分辨率快速更新循环业务数值预报系统(BJ-RUC)中, 为有效同化京津冀区域7部不同型号(4部SA和2部CB)的雷达观测, 采取了基于北京自动临近预报系统(BJ-ANC)^[33]和基于上述VDRAS系统^[32]的两步雷达资料预处理和质量控制方案, 包括超折射地物回波和地物杂波的自动识别和剔除、径向速度退模糊处理, 以及雷达资料的插值、填充、平滑和阈值界定处理等^[52]。除了雷达资料前处理和质量控制的普通技术问题外, 观测误差的估计对于资料同化是不可缺少的。观测误差统计是气象观测资料同化最为重要的方面之一^[68]。对于雷达资料, 观测误差主要的来源包括雷达本身的硬件标定误差、多普勒频移偏差、取样误差、观测“漏洞”及距离折叠、速度模糊等。Sun等^[69]给出了比较详细的有关雷达资料同化方面的各种讨论, 读者

可以进一步参考该文献。近年来, 国外学者针对雷达径向速度和反射率因子资料同化的观测误差统计又开展了大量的深入研究^[70-73], 这在业务模式中有效同化各种型号的雷达观测资料起到了重要的促进作用。

对于径向风同化而言, 正确的处理速度模糊问题是雷达质量控制的关键之一。大致有两种方法对雷达径向速度场进行退模糊处理。第一种方法是逐像素的顺序退模糊法^[74-77], 第二种是依据参考风的全场退模糊法^[78-82]。但是准确的雷达径向速度退模糊, 仍然具有很大的挑战, 特别是对于C波段等波长较短的雷达以及遇到台风等天气现象时, 退模糊变得更加困难。

虽然实时的雷达质量控制软件已经被开发及在部分地区使用, 但一个综合性的适合中国雷达网的实时雷达质量控制系统将有利于加快雷达资料在数值预报中的使用。因为中国的雷达网规格不统一, 雷达质量控制系统必须考虑到不同雷达不同地区的需要。这样一个系统的开发虽然具有挑战性, 但其意义重大, 是有效使用业务雷达改进灾害性天气预报不可缺少的一个步骤。

2.2 分析场的多尺度动力平衡

天气尺度和对流尺度的动力平衡有很大的不同, 它们的空间尺度和时间尺度也有很大的差异, 所以在雷达资料同化中往往会强调一种平衡而忽略了另一种。若强调分析场离雷达观测很近, 要小心周围的环境场被扭曲。雷达资料代表的是对流尺度的环流特征, 而常规观测代表的是大尺度环流特征, 两者很难被同时优化, 因为它们的观测误差特征不同。因此, 可以采用多步优化, 或在价函数中增加约束条件。最近, VendraSCO等^[83]尝试在同化雷达资料时用大尺度分析场做约束, 得到了令人鼓舞的结果。另外, 混合气候背景误差和“流依赖”背景误差也可以达到同样的效果。

2.3 改进背景误差

3DVar同化目前仍然是世界上区域业务数值预报中的主要分析和模式初始化系统, 因为该方法计算快速, 分析结果稳定。但它最大的缺点就是背景场误差是基于气候统计, 无法反映误差的“流依赖”。近年来, 很多研究采用了集合与变分混合的同化方法, 以改进过于简单的变分背景误差^[84-87]。另一方面, 混合同化方法与EnKF同化方法相比, 具有更稳定、更易收敛的优点, 但混合方法在雷达资料同化方面的应用还需要大量开发和研究工作。

2.4 双偏振雷达资料同化

近几年来, 很多业务雷达已经更新为双偏振观

测模式,但对于双偏振观测资料同化的研究还刚刚起步。双偏振雷达观测资料可以区分微物理变量的相态,对于更准确地估计各微物理变量有所帮助。双偏振雷达资料同化可以采用直接法或间接法。直接法要求复杂的观测算子,可以将模式中的微物理变量与雷达的双偏振观测变量进行直接转换^[60]。直接法的优势在于准确的观测算子,但缺点是此观测算子的非线性化有可能给基于线性假定的变分法带来计算误差。间接法是先双偏振观测变量转为微物理变量再进行同化^[88]。对于双偏振雷达资料同化,还需要更进一步的研究,检验双偏振雷达资料同化对流尺度的分析和预报的影响。

2.5 4DVar 同化方法的业务应用

无论是在大尺度的全球模式还是对流尺度的区域模式,4DVar同化方法的优越性都已经被大量的研究和应用证明。但将4DVar同化系统应用在高分辨率(小于3km)的业务模式中,仍然受到计算资源的限制。于是,怎样提高4DVar同化的计算速度,同时又保持它的精度,也是一个重要的研究课题。近年来所流行的四维集合变分方案(4DEnVar)就是简化4DVar同化的方法之一^[89]。怎样能够将4DVar同化方法应用在对流尺度数值分析和预报中并与集合方法相结合,又具有业务实用能力,特别是针对雷达等高时空分辨率的观测资料同化,是未来一个重要的研究方向。

2.6 与其他资料的有效混合同化

虽然雷达观测是对流尺度同化最重要的资料来源,但其他对流尺度观测资料的作用也不可忽视。比如闪电观测、高密度的卫星观测以及自动站观测等资料。目前大多数的研究着眼于单种资料对同化和对流预报的影响。怎样能够有效地将各种高分辨率(空间和时间)资料共同同化,以达到相互补充的作用,是未来对流尺度资料同化和对流尺度数值预报的一个重要的研究课题。随着卫星遥感资料的快速增加,特别是高解析度新一代卫星资料的开发,发展结合雷达和卫星资料同化的新技术以补充雷达资料的不足(比如云观测,卫星反演水汽和闪电观测等)已成为当务之急。要有效的结合不同类型的观测资料,首要的一步是对各种资料的代表性误差特征有充分了解和估计。

3 结语

强对流是引起气象灾害的主要天气现象,包括洪水、强风、冰雹及龙卷风等。这些灾害对生命和经济都会带来巨大威胁,特别是在中国人口密集的中大城市,所以提高强对流天气的预报水平是当务之急。强对流天气的特点是非线性地快速发展和消亡,可预

报时效短。6h之内的短时临近预报是强对流天气预报的重点时段。目前,以雷达回波外推技术为核心的临近预报系统的有效预报时效基本在1h左右,而且对预报对流的局地快速新生几乎无能为力、而由于雷达资料同化技术的不断发展,以及数值模式研究的不断进步,基于数值模式的对流尺度短时临近预报为未来强对流天气预报精度的提高和时效的延长带来了希望。但是,由于强对流天气预报本身的难度,预报水平的提高取决于扎实的科研、各种资源的匹配和管理层面的重视。

参考文献

- [1] Lilly D K. Numerical prediction of thunderstorms-has its time come? *Quart J Roy Meteor Soc*, 1990, 116: 779-798.
- [2] Sun J, Flicker D W, Lilly D K. Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from single-Doppler radar data. *J Atmos Sci*, 1991, 48: 876-890.
- [3] Sun J, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint: Part I. model development and simulated data experiments. *J Atmos Sci*, 1997, 54: 1642-1661.
- [4] Gao J D, Xue M, Brewster K, et al. A three-dimensional variational data analysis method with recursive filter for Doppler radars. *J Atmos Ocean Technol*, 2004, 21: 457-469.
- [5] Weygandt S S, Benjamin S G, Smirnova T G, et al. Assimilation of radar reflectivity data using a diabatic digital filter within the rapid update cycle. Preprint, 2008, 12th Conf on IOAS-AOLS, Amer Meteor Soc.
- [6] Zhang F, Snyder C, Sun J. Impacts of initial estimate and observations on the convective-scale data assimilation with an ensemble Kalman filter. *Mon Wea Rev*, 2004, 132: 1238-1253.
- [7] Xiao Q, Kuo Y-H, Sun J, et al. Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3D-Var system: Impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case. *J Appl Meteor*, 2005, 44: 768-788.
- [8] Tong M, Xue M. Simultaneous estimation of microphysical parameters and atmospheric state with radar data and ensemble square-root Kalman filter. Part II: Parameter estimation experiments. *Mon Wea Rev*, 2008, 136: 1649-1668.
- [9] Wang H, Sun J, Zhang X, et al. Radar data assimilation with WRF-4DVAR: Part I. system development and preliminary testing. *Mon Wea Rev*, 2013, 141: 2224-2244.
- [10] 万齐林, 薛纪善, 庄世宇, 等. 多普勒雷达风场信息变分同化的试验研究. *气象学报*, 2005, 63(2): 129-145.
- [11] 张林, 倪允琪. 雷达径向风资料的四维变分同化试验. *大气科学*, 2006, 30(3): 433-440.
- [12] 刘红亚, 薛纪善, 顾建峰, 等. 三维变分同化雷达资料暴雨个例试验. *气象学报*, 2010, 68(6): 779-789.
- [13] 高郁东, 万齐林, 何金海. 三维变分同化雷达视风速的改进方案及其数值试验. *气象学报*, 2011, 69(4): 631-643.
- [14] Tuttle J D, Foote G B. Determination of the boundary layer airflow from a single Doppler radar. *J Atmos Oceanic Technol*, 1990, 7: 218-232.
- [15] Laroche S, Zawadzki I. A variational analysis method for the retrieval of three-dimensional wind field from single-Doppler data. *J Atmos Sci*, 1995, 52: 2664-2682.
- [16] Shapiro S, Ellis S, Shaw J. Single-Doppler velocity retrievals with Phoenix II data: clear air and microburst wind retrievals in the planetary boundary layer. *J Atmos Sci*, 1995, 52: 1265-1287.
- [17] Liou Y C. Single radar recovery of cross-beam wind components using a modified moving frame of reference technique. *J Atmos Oceanic Technol*, 1999, 16: 1003-1016.
- [18] Qiu C, Xu Q. A simple adjoint method of wind analysis for single-

- Doppler data. *J Atmos Oceanic Technol*, 1992, 9: 588-598.
- [19] Sun J, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint: Part II. Retrieval experiments of an observed Florida convective storm. *J Atmos Sci*, 1998, 55: 835-852.
- [20] Sun J, Crook N A. Wind and thermodynamic retrieval from single-Doppler measurements of a gust front observed during Phoenix-II. *Mon Wea Rev*, 1994, 122: 1075-1091.
- [21] Sun J. Initialization and numerical forecasting of a supercell storm observed during STEPS. *Mon Wea Rev*, 2005, 133: 793-813.
- [22] Sun J, Zhang Y. Analysis and prediction of a squall line observed during IHOP using multiple WSR-88D observations. *Mon Wea Rev*, 2008, 136: 2364-2388.
- [23] Caya A, Sun J, Snyder C. A comparison between the 4D-Var and the ensemble Kalman filter techniques for radar data assimilation. *Mon Wea Rev*, 2005, 133: 3081-3094.
- [24] Tai S L, Liou Y C, Sun J, et al. Precipitation forecasting using Doppler radar data, a cloud model with adjoint, and Weather Research and Forecasting model -real case studies during SoWMEX in Taiwan. *Wea Forecasting*, 2011, 26: 975-992.
- [25] Chang S F, Sun J, Liou Y C, et al. The influence of erroneous background, beam-blocking and microphysical nonlinearity on the application of a four-dimensional variational Doppler radar data assimilation system for quantitative precipitation forecasts. *Met Apps*, 2013, 21: 444-458.
- [26] Friedrich K, Kalina E, Atkins J, et al. Raindrop size distribution and rain characteristics during the 2013 Great Colorado Flood. *J Hydrometeo*, 2016, 17: 53-72.
- [27] Gochis D, Schumacher R, Friedrich K, et al. The Great Colorado Flood of September 2013. *Bull Amer Meteor Soc*, 2015, 96: 1461-1487.
- [28] Sun J, Crook N A. Real-time low-level wind and temperature analysis using single WSR-88D data. *Wea Forecasting*, 2001, 16: 117-132.
- [29] Crook N A, Sun J. Assimilating radar, surface and profiler data for the Sydney 2000 forecast demonstration project. *J Atmos Oceanic Technol*, 2002, 19: 888-898.
- [30] Sun J, Chen M, Wang Y. A frequent-updating analysis system based on radar, surface, and mesoscale model data for the Beijing 2008 forecast demonstration project. *Wea Forecasting*, 2010, 25: 1715-1735.
- [31] Chen M, Sun J, Wang Y. A Frequent-updating High-resolution Analysis System Based on Radar Data for the 2008 Summer Olympics. Preprint, 2007, The 33rd International Conference on Radar Meteorology, Cairns, Australia.
- [32] 陈明轩, 王迎春, 高峰, 等. 基于雷达资料4DVar的低层热动力反演系统及其在北京奥运期间的初步应用分析. *气象学报*, 2011, 69(1): 64-78.
- [33] 陈明轩, 高峰, 孔荣, 等. 自动临近预报系统及其在北京奥运期间的应用. *应用气象学报*, 2010, 21(4): 395-404.
- [34] 陈明轩, 王迎春. 低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飑线过程发展维持的数值模拟. *气象学报*, 2012, 70(3): 371-386.
- [35] 陈明轩, 王迎春, 肖现, 等. 基于雷达资料四维变分同化和三维云模式对一次超级单体风暴发展维持热动力机制的模拟分析. *大气科学*, 2012, 36(5): 929-944.
- [36] 陈明轩, 王迎春, 肖现, 等. 北京“7.21”暴雨雨团的发生和传播机理. *气象学报*, 2013, 71(4): 569-592.
- [37] 孙继松, 何娜, 郭锐, 等. 多单体雷暴的形变与列车效应传播机制. *大气科学*, 2013, 37(1): 137-148.
- [38] 肖现, 王迎春, 陈明轩, 等. 基于雷达资料四维变分同化技术对北京地区一次下山突发性增强风暴热动力机制的模拟分析. *气象学报*, 2013, 71(5): 797-816.
- [39] 肖现, 陈明轩, 高峰, 等. 弱天气系统强迫下北京地区对流下山演变的热动力机制. *大气科学*, 2015, 39(1): 100-124.
- [40] 刘莲, 王迎春, 陈明轩. 京津冀一次飑线过程的精细时空演变特征分析. *气象*, 2015, 41(12): 1433-1446.
- [41] Liu Y, Warner T T, Bowers J F, et al. The operational mesogamma-scale analysis and forecast system of the U.S. Army Test and evaluation command. Part I: overview of the modeling system, the forecast products, and how the products are used. *J Appl Meteor Climatol*, 2008, 47: 1077-1092.
- [42] Gao J, Stensrud D J. Assimilation of reflectivity data in a convective-scale, cycled 3DVar framework with hydrometeor classification. *J Atmos Sci*, 2011, 69: 1054-1065.
- [43] Xiao Q, Kuo Y H, Sun J, et al. An approach of Doppler Reflectivity Data assimilation and its assessment with the inland QPF of Typhoon Rusa (2002) at Landfall. *J Appl Meteor*, 2007, 46: 14-22.
- [44] Hu M, Xue M, Brewster K. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level-II data for the prediction of Fort Worth tornadic thunderstorms. Part I: Cloud analysis and its impact. *Mon Wea Rev*, 2006, 134: 675-698.
- [45] Wang H, Sun J, Fan S. Indirect assimilation of radar reflectivity with WRF 3D-Var and its impact on prediction of four summertime convective events. *J Appl Meteor Climatol*, 2013, 52: 889-902.
- [46] 盛春岩, 薛德强, 雷霆, 等. 雷达资料同化与提高模式水平分辨率对短时预报影响的数值对比试验. *气象学报*, 2006, 64(3): 293-307.
- [47] 杨毅, 邱崇践, 龚建东, 等. 三维变分和物理初始化方法相结合同化多普勒雷达资料的试验研究. *气象学报*, 2008, 66(4): 479-488.
- [48] 徐道生, 邵爱梅, 邱崇践. SVD-En3DVar方法同化多普勒雷达速度观测资料 I. 模拟资料试验. *大气科学*, 2011, 35(4): 753-766.
- [49] 徐道生, 邵爱梅, 邱崇践. SVD-En3DVar方法同化多普勒雷达速度观测资料 II. 实际资料试验. *大气科学*, 2011, 35(5): 818-832.
- [50] 李媛, 刘健文, 董佩明, 等. GRAPES-3Dvar雷达资料直接同化对江淮暴雨数值预报影响的分析研究. *气象*, 2011, 37(4): 403-411.
- [51] 范水勇, 王洪利, 陈敏, 等. 雷达反射率资料的三维变分同化研究. *气象学报*, 2013, 71(3): 527-537.
- [52] 陈敏, 陈明轩, 范水勇. 雷达径向风观测在华北区域数值预报系统中的实时三维变分同化应用试验. *气象学报*, 2014, 72(4): 658-677.
- [53] Sun J, Wang H. Radar data assimilation with WRF-4D-Var: Part II. Comparison with WRF 3D-Var. *Mon Wea Rev*, 2013, 141: 2245-2264.
- [54] Snyder C, Zhang F. Assimilation of simulated radar observations with an ensemble Kalman filter. *Mon Wea Rev*, 2003, 131: 1663-1677.
- [55] Tong M. Ensemble Kalman filter assimilation of Doppler radar data for the initialization and prediction of convective storms. PhD thesis, 2006, School of Meteorology, University of Oklahoma.
- [56] Dowell D, Zhang F, Wicker L J, et al. Wind and temperature retrievals in the 17 May 1981 Arcadia, Oklahoma supercell: Ensemble Kalman filter experiments. *Mon Wea Rev*, 2004, 132: 1982-2005.
- [57] Lei T, Xue M, Yu T. Multi-scale analysis and prediction of the 8 May 2003 Oklahoma City tornadic supercell storm assimilating radar and surface network data using EnKF. Extended abstract, 2009, 13th Conf of IOAS-AOLS, AMS Meetings 2008, Paper 6.4.
- [58] Aksoy A, Dowell D C, Snyder C. A multi-case comparative assessment of the ensemble Kalman filter for assimilation of radar observations. Part II: Short-range ensemble forecasts. *Mon Wea Rev*, 2010, 138: 1273-1292.
- [59] Snook N, Xue M, Jung Y. Analysis of a tornadic mesoscale convective vortex based on ensemble Kalman filter assimilation of CASA X-band and WSR-88D radar data. *Mon Wea Rev*, 2011, 139: 3446-3468.
- [60] Jung Y, Xue M, Zhang G. Simultaneous estimation of microphysical parameters and atmospheric state using simulated polarimetric radar data and ensemble Kalman filter in the presence of observation operator error. *Mon Wea Rev*, 2010, 138: 539-562.
- [61] Xue M, Jung Y, Zhang G. State estimation of convective storms with a two-moment microphysics scheme and an ensemble Kalman filter: Experiments with simulated radar data. *QJ Roy Meteor Soc*, 2010, 136: 685-700.
- [62] Jung Y, Xue M, Tong M. Ensemble Kalman filter analyses of the 29-30 May 2004 Oklahoma tornadic thunderstorm using one- and two-moment bulk microphysics schemes, with verification against

- polarimetric data. *Mon Wea Rev*, 2012, 140: 1457-1475.
- [63] Sun J, Xue M, Wilson J W, et al. Use of NWP for nowcasting convective precipitation: recent progress and challenges. *Bull Amer Met Soc*, 2014, 95: 409-426.
- [64] 许小永, 刘黎平, 郑国光. 集合卡尔曼滤波同化多普勒雷达资料的数值试验. *大气科学*, 2006, 30(4): 712-728.
- [65] 兰伟仁, 朱江, Xue Ming, 等. 风暴尺度天气下利用集合卡尔曼滤波模拟多普勒雷达资料同化试验 I. 不考虑模式误差的情形. *大气科学*, 2010, 34(3): 640-652.
- [66] 兰伟仁, 朱江, Xue Ming, 等. 风暴尺度天气下利用集合卡尔曼滤波模拟多普勒雷达资料同化试验 II. 考虑模式误差的情形. *大气科学*, 2010, 34(4): 737-753.
- [67] 秦球球, 龚建东, 李泽椿. 集合卡尔曼滤波同化多普勒雷达资料的观测系统模拟试验. *气象*, 2012, 38(5): 513-525.
- [68] Tsuyuki T, Miyoshi T. Recent progress of data assimilation methods in meteorology. *J Meteor Soc Japan*, 2007, 85B: 331-361.
- [69] Sun J. Convective-scale assimilation of radar data: progress and challenges. *Q J R Meteorol Soc*, 2005, 131: 3439-3463.
- [70] Xu Q, Nai K, Wei L. An innovation method for estimating radar-velocity observation error and background wind error covariance. *Q J R Meteor Soc*, 2007, 133: 407-415.
- [71] Rihan F A, Collier C G, Ballard S P, et al. Assimilation of Doppler radial winds into a 3D-Var system: Errors and impact of radial velocities on the variational analysis and model forecasts. *Q J R Meteor Soc*, 2008, 134: 1701-1716.
- [72] Simonin D, Ballard S P, Li Z. Doppler radar radial wind assimilation using an hourly cycling 3D-Var with a 1.5 km resolution version of the Met Office Unified Model for nowcasting. *Q J R Meteor Soc*, 2014, 140: 2298-2314.
- [73] Wattrelot E, Caumont O, Mahfouf J-F. Operational implementation of the 1D+3D-Var assimilation method of radar reflectivity data in the AROME model. *Mon Wea Rev*, 2014, 142: 1852-1873.
- [74] Ray P, Ziegler C. Dealiasing first-moment Doppler estimates. *J Appl Meteor*, 1977, 16: 563-564.
- [75] Bergen D W, Brown R C. Interactive radar velocity unfolding. Preprints, 1980, 19th Conf on Radar Meteorology, Miami, FL, Amer Meteor Soc, 278-283.
- [76] Bergen W R, Albers S C. Two- and three-dimensional dealiasing of Doppler radar velocities. *J Atmos Oceanic Technol*, 1988, 5: 305-319.
- [77] He G, Li G, Zou X, et al. A velocity dealiasing scheme for synthetic C-band data from China's new generation weather radar system (CINRAD). *J Atmos Oceanic Technol*, 2012, 29: 1263-1274.
- [78] Eilts M D, Smith S D. Efficient dealiasing of Doppler velocities using local environment constraints. *J Atmos Oceanic Technol*, 1990, 7: 118-128.
- [79] Tabary P, Scialom G, Germann U. Real-time retrieval of the wind from aliased velocities measured by Doppler radars. *J Atmos Oceanic Technol*, 2001, 18: 875-882.
- [80] Gong J, Wang L, Xu Q. A three-step dealiasing method for Doppler velocity data quality control. *J Atmos Oceanic Technol*, 2003, 20: 1738-1748.
- [81] Gao J, Droegemeier K K, Gong J, et al. A method for retrieving mean horizontal wind profiles from single-Doppler radar observations contaminated by aliasing. *Mon Wea Rev*, 2004, 132: 1399-1409.
- [82] Lim E, Sun J. A velocity dealiasing technique using rapidly updated analysis from a four-dimensional variational Doppler radar data assimilation system. *J Atmos Oceanic Technol*, 2010, 27: 1140-1152.
- [83] Vendraasco E P, Sun J, Herdies D L, et al. Constraining a 3DVar radar data assimilation system with large-scale analysis to improve short-range precipitation forecasts. *J Appl Meteor Climatol*, 2016, 55: 673-690.
- [84] Hamill T M, Snyder C. A hybrid ensemble Kalman filter-3D variational analysis scheme. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 2905-2919.
- [85] Wang X, Barker D M, Snyder C, et al. A hybrid ETKF-3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. Part I: Observing system simulation experiment. *Mon Wea Rev*, 2008, 136: 5116-5131.
- [86] Wang X, Barker D M, Snyder C, et al. A hybrid ETKF-3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. Part II: Real observation experiments. *Mon Wea Rev*, 2008, 136: 5132-5147.
- [87] Zhang F, Zhang M, Poterjoy J. E3DVar: Coupling an ensemble Kalman filter with three-dimensional variational data assimilation in a limited-area weather prediction model and comparison to E4DVAR. *Mon Wea Rev*, 2013, 141: 900-917.
- [88] Li X, Mecikalski J. Impact of the dual-polarization Doppler radar data on two convective storms with a warm-rain radar forward operator. *Mon Wea Rev*, 2012, 140: 2147-2167.
- [89] Liu C, Xiao Q, Wang B. An ensemble-based four-dimensional variational data assimilation scheme. Part I. Technical formulation and preliminary test. *Mon Wea Rev*, 2008, 136: 3363-3373.