

多普勒天气雷达资料对中尺度模式短时预报的影响

盛春岩^{1,2,3} 浦一芬¹ 高守亭¹

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

2 山东省气象中心, 济南 250031

3 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘 要 利用中尺度模式 ARPS (The Advanced Regional Prediction System) 及其资料分析系统 ADAS (ARPS Data Analysis System), 将国内新一代多普勒雷达(CINRAD)反射率及径向风资料直接用于中尺度数值模拟, 通过一次华北地区暴雨过程的模拟对比试验, 分析了雷达资料对初始场的改进效果及其对模拟结果的影响, 结果表明: (1) 利用雷达径向风资料对初始风场进行调整后, 自近地面到对流层顶的 u , v , w 都发生了变化, 调整后的初始风场在对流层中层变化最大。(2) 利用雷达反射率进行微物理调整和云分析能调整初始场中的云水信息, 使得雷达回波附近 3 km 以下的水汽混合比(q_r)增加, 4 km 以下的雨水混合比(q_r)增加, 对流层(约 10 km 以下)的云水混合比(q_c)增加, 4~9 km 的对流层上部云冰混合比(q_i)和雪混合比(q_s)增加。ADAS 通过非绝热初始化调整温度场, 从而得到了一个动力和热力上平衡的初始场。(3) 模拟的 1 h 雨量与实况的对比表明, 同时利用雷达反射率和径向风改进过的初始场能明显增强 3 h 内的降水强度和落区预报, 改善中尺度数值模式短时定量降水预报。模拟的 1 h 流场对比分析表明, 经雷达径向风调整后, 能够在初始场中增加气旋性涡旋等中小尺度风信息, 明显减少模式的 spin-up 时间。(4) 通过对雷达径向风和反射率对模式初始场和模拟结果影响的对比分析发现, 雷达径向风主要是改进初始风场, 而雷达反射率主要是改进初始场中的湿度参数, 增加初始场中云水等的含量, 调整温度场。通过模拟的 6 h 降水对比发现, 利用雷达径向风调整初始场后, 对降水模拟有一定的改进, 但效果不甚明显, 而雷达反射率资料对定量降水预报改进效果明显, 同时使用雷达径向风和反射率资料改进初始场后对降水的模拟效果最明显。

关键词 ARPS 模式 雷达资料同化 初始场 3 h 短时预报

文章编号 1006-9895(2006)01-0093-15

中图分类号 P456

文献标识码 A

Effect of Chinese Doppler Radar Data on Nowcasting Output of Mesoscale Model

SHENG Chun-Yan^{1, 2, 3}, PU Yi-Fen¹, and GAO Shou-Ting¹

1 Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Shandong Meteorological Center, Jinan 250031

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Abstract The Advanced Regional Prediction System (ARPS) is a multi-scale model developed by the Center for Analysis and Prediction of Storms (CAPS), the complex cloud analysis system in the ARPS data analysis system (ARPSDAS or ADAS) can construct a three-dimensional cloud in the initial field with Doppler radar reflectivity,

收稿日期 2004-10-19, 2004-12-21 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40433007 和 40333034, 中国科学院奥运科技项目 KACX 1-02 及山东省气象局气象科学技术研究项目 2005sdqxz19

作者简介 盛春岩, 女, 1972 年出生, 在读博士生, 高级工程师, 研究方向为中小尺度动力学及数值模拟。E-mail: scy@mail.iap.ac.cn

cloud base and fraction, and satellite image data to adjust the initial cloud and rain water, and ADAS still can adjust the initial wind field directly with radar radial velocity. In order to test the effect of Doppler radar data on mesoscale model, a North China torrential rain event is studied with Chinese Doppler radar data only. Four control experiments are conducted. The 1st experiment is performed without Chinese Doppler radar data analysis, the 2nd is done with Doppler radar reflectivity only to construct a three-dimensional cloud analysis, the 3rd is conducted with radar radial velocity only to adjust the initial wind field, and the last experiment is done with both radar reflectivity and radial velocity. The main results are as follows: 1) The wind components u , v , and w in the initial field adjusted by Doppler radar radial velocity can be modified under 10 km near the radar observing range, and the most drastic modification of u , v happens in the central troposphere. 2) Assimilation of Doppler radar reflectivity can increase the cloud and moisture contents in the strong reflectivity region of the initial field. The adjustment of the water vapor mixture ratio (q_v) is mainly below 3 km, the rainfall mixture ratio (q_r) below 4 km, cloud vapor mixture ratio (q_c) in the troposphere (below 10 km level) and cloud ice (q_i) and snow (q_s) mixture ratio at around 4–9 km level in the troposphere. Diabatic initialization of ADAS will adjust the temperature to balance the cloud microphysical adjustment. 3) The comparison between simulated hourly rainfall and observations shows that the assimilation of both reflectivity and radial velocity can improve rainfall forecasting significantly, especially within 3 hours; while the comparison of simulated hourly streamline fields shows that radar radial velocity can increase the mesoscale wind circles in the initial fields and mitigate the model's spin-up time significantly. 4) Comparison between radar radial velocity and reflectivity assimilation on the initial field and the simulation shows that Doppler radar radial velocity assimilation can mainly improve the initial wind field while radar reflectivity assimilation can increase the cloud and water contents in the initial field and adjust the temperature. Simulated 6-h rainfall indicates that radar reflectivity assimilation has greater positive effects than radial velocity on the rainfall simulation, although adding radial velocity data results in further improvement in the rain simulation.

Key words ARPS model, Doppler radar data assimilation, initial field, 3-hour nowcasting

1 引言

由于受观测资料的限制,无法为数值预报提供一个能够完全描述大气真实状态的初始场,初始场信息的不足造成了几乎所有的数值模式都存在着一个预报起转延迟(spin-up)的问题^[1],这是影响短期定量降水预报的一个重要因子。20 世纪 70 年代以来,气象学家们就开始使用非绝热初始化的方法来改进模式初始场。20 世纪 90 年代以后,随着美国 NEXRAD WSR-88D 雷达网的建设 and 各种卫星遥感资料的增加,气象学家们开始关心如何利用高分辨率的雷达资料,通过反演、同化以及各种非绝热初始化等有效手段来改进初始场,进行高分辨率的数值天气预报,提高数值预报水平。雷达资料四维变分同化^[2~4]和集合卡尔曼滤波技术^[5~7]均在理论和实际个例试验中得到了较好的结果,是目前较为理想的同化方法,其缺点是太耗机时。通过反演、三维变分同化手段从雷达资料中反演出风场等,为模式提供一个分辨率较高的初始场,这方面的工作也取得了较好的结果^[8~12],由于具有省机时的特

点,非常适合业务运行。近年来,有不少直接利用雷达资料进行初始场调整的工作,如 Rogers 等^[13]利用 WSR-57 数字雷达反射率资料直接对初始场进行调整,通过个例试验发现雷达资料能改进 24 h 内的降水、风、形势场及温度场等预报。Zhang^[14]利用雷达反射率进行云分析和非绝热初始化,个例试验表明,湿度调整能明显提高定量降水预报。Xue 等^[15]利用 ARPS 模式,用 WSR-88D 多普勒雷达资料进行初始场调整和云分析,发现雷达资料能减少模式的 spin-up 时间,更精确地模拟出初始时刻的风暴。

国内在多普勒雷达反演及各种外推临近预报应用技术方面已有不少研究^[16~20],但在多普勒雷达资料四维同化方面的研究还刚刚起步^[21, 22],在将雷达资料加到中尺度模式方面,如王叶红等^[23]利用数字雷达估测的降水资料作了一维变分同化的敏感性试验,托亚等^[24]利用多普勒雷达资料反演的降水对模式进行了动力和热力非绝热初始化调整,通过 MM5 模式试验发现雷达资料能提高 0~6 h 的降水落区和强度预报,这些工作在雷达产品应用

到数值模式中作出了有意义的探索。但整体来看,在将多普勒雷达资料应用到中尺度模式方面,与国外相比还有相当的差距。

本文采用的是美国 Oklahoma 大学风暴分析预测中心 CAPS(the center for Analysis and Prediction of Storms)中心开发的中尺度 ARPS(The Advanced Regional Prediction System)模式,利用其中的资料分析系统 ADAS(ARPS Data Analysis System),直接将雷达资料应用到数值模式中。ADAS 模块在处理雷达资料时,不需要进行降水反演,而是直接利用雷达反射率和径向风对初始场在三维空间上进行风场、湿度场调整和复杂云分析,得到一个热力和动力上平衡的初始场。目前美国 Oklahoma 大学风暴分析预测中心利用各种加密观测资料、多普勒雷达及卫星资料,实现了 ARPS 模式的实时运行,在韩国、香港及西班牙等都已实现 ARPS 模式业务化^[25]。本文将国内敏视达 CINRAD 多普勒雷达资料应用于 ARPS 模式,通过华北地区一次大范围的暴雨过程的对比试验,以检验国内敏视达 CINRAD 多普勒雷达资料在改进模式初始场及数值模拟中的作用。

2 ARPS 模式及 ADAS 简介

2.1 ARPS 模式简介

ARPS 模式是美国 Oklahoma 大学 CAPS 中心在 20 世纪 90 年代初期开始开发的中尺度非静力平衡模式,它是一个高分辨率的多尺度模式,适合风暴尺度的数值模拟。它基于完全可压缩的 Navier-Stokes 方程,采用广义的 $z-\sigma$ 地形追随坐标,包括多种物理过程和参数化方案。有关 ARPS 模式的详细介绍参见文献^[26]。

2.2 ARPS 模式的资料分析系统 ADAS 简介

ARPS 模式的资料分析模块 ADAS 采用的分析方法是一种连续迭代方案^[27],由于不需要进行大矩阵求解,这种方案非常节省机时。ADAS 首先将雷达体扫资料进行水平和垂直插值,转化成类似一个个探空资料、模式三维网格空间上的值,然后进行处理。ADAS 对雷达资料的处理包括利用径向风进行风场调整、微物理调整和复杂云分析系统。

风场调整是将雷达探测的径向风转化成 u 、 v 风分量的增量进行的。微物理调整主要是根据雷达

反射率在三维空间上进行湿度、云水、雨水、冰、雪和雹等湿度量进行局地调整,即若某一点的反射率超过某一临界值,该点就调整,再通过客观分析将这种局地调整进行空间上的传播。

ADAS 模块中还包含了一个复杂云分析系统,它实际上是一个独立于 ARPS 模式的一个简单云模式。该模块是从美国的 LAPS(Local Analysis and Prediction System)模式移植过来,并经改进和优化。该云分析系统中,根据地面观测的云、雷达反射率资料和卫星资料构建了一个高分辨率的三维初始云场和降水场,并通过非绝热初始化方案进行热力调整(相关的详细介绍参见文献^[28])。本文仅使用多普勒雷达资料,目的是检验雷达资料在改进模式初始场中的效果。

3 个例选取及模式设计

3.1 个例选取

本文选取的是 2003 年 10 月 10~12 日发生在山东、河北、天津等地的一次秋季大暴雨过程。本次过程的影响系统主要是地面冷锋、倒槽和 850 hPa 低涡切变线。过程最大降水量为 254 mm,出现在山东省德州地区的宁津站,突破了近 50 年以来历史同期最高记录。从 11 日 08 时(北京时,下同)济南齐河 CINRAD-SA 多普勒雷达回波分析来看,整个降水过程中基本以层状云降水回波和偏南风为主[图 1(见文后彩图)]。

3.2 试验设计及资料

控制试验采用 27 km、9 km 双重单向嵌套网格,外层网格距为 27 km,中心位置(35°N, 116°E),水平方向取 101×109 个格点,垂直方向取 35 层,垂直平均分辨率取 500 m。内层网格距取 9 km,中心位置(36.8°N, 116.8°E),水平方向取 111×115 个格点,垂直方向取 35 层,垂直平均分辨率取 400 m。两层嵌套都选择了冰微物理方案和 Kain-Fritsch 积云参数化方案。采用 6 h 间隔的 1°×1° NCEP 分析资料作为 27 km 模拟的初始场和侧边界条件,初始时刻加入了地面和探空资料对初始场进行订正。9 km 网格的模拟以 27 km 模拟的 3 h 间隔的模式输出资料作为侧边界条件,初始场资料同 27 km。模式开始积分的时间为 11 日 08 时,共积分 12 h。

对比试验有三组,分别在 9 km 嵌套网格的初始场上加进了济南齐河 CINRAD-SA 多普勒雷达

径向风、反射率以及同时使用反射率和径向风对初始场进行调整,其他方案与控制试验同。济南齐河 CINRAD 多普勒雷达位于(36.8°N, 116.8°E),文中采用的是 9 个仰角的多普勒雷达体扫资料,体扫方式为降水模式(21),在雷达资料进行分析同化之前进行了去除地物杂波和超折射的质量控制。

4 雷达资料对初始场的改进效果分析

对比加雷达资料前后的初始场发现,利用雷达资料进行调整后,初始场发生了明显变化,但雷达反射率和径向风对初始场的调整效果不同。利用雷达径向风对初始场进行调整后,在对流层 u 、 v 、 w 都发生了变化,但水汽混合比 q_v 、雨水混合比 q_r 、云冰混合比 q_i 、雪混合比 q_s 无变化。雷达反射率对初始场各湿度量的调整较明显。不加雷达资料时,

初始场中云水混合比(q_c)、雨水混合比(q_r)、云冰混合比(q_i)、雪混合比(q_s)和雹混合比(q_h)整层皆为 0,加雷达资料后,在中高层 q_c 、 q_r 、 q_i 、 q_s 的值均明显提高,变化最明显的地方大约在(37°N, 117°E)附近,正是回波较强的区域。垂直方向上, q_c 、 q_r 、 q_i 、 q_s 的值均随高度增加,范围扩大,到顶层范围又逐渐减小,在中层调整最明显。同时,温度场(这里以位温 θ 代表)也有明显变化,但雷达反射率资料对初始场的 u 、 v 、 w 无影响,调整前后风场无变化,而同时使用雷达反射率和径向风调整后,初始场的各湿度参数和风场、温度场都发生了不同程度的变化。下面,给出加雷达前后初始场中的风场、温度场和云水信息的变化。

首先,给出了雷达径向风沿 37°N 的剖面[图 2 (见文后彩图)]。由图 2 可见,雷达能探测到的径

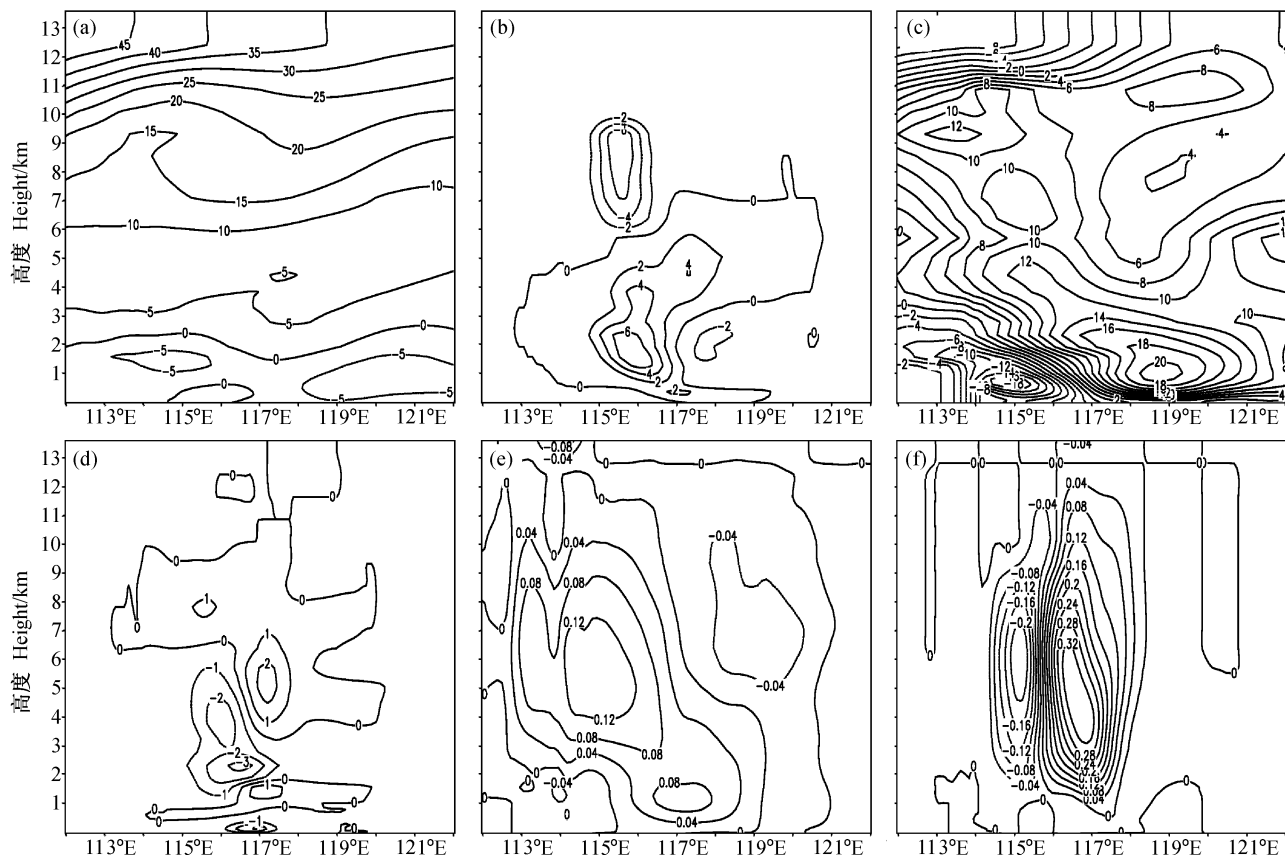


图 3 加雷达径向风前的初始 u 、 v 、 w 沿 37°N 的经度-高度剖面图及调整后与调整前的差(单位: m/s): (a) 加雷达径向风前的 u ; (b) 调整后与调整前的 u 差; (c) 加雷达径向风前的 v ; (d) 调整后与调整前的 v 差; (e) 加雷达径向风前的 w ; (f) 调整后与调整前的 w 差

Fig. 3 Cross-section of initial u , v , w with/without radar radial velocity assimilation along 37°N (units: m/s): (a) u without radar data assimilation; (b) the difference of u with radar radial velocity assimilation; (c) v without radar data assimilation; (d) the difference of v with radar radial velocity assimilation; (e) w without radar data assimilation; (f) the difference of w with radar radial velocity assimilation

向风主要位于 9 km 以下,中心值位于雷达站附近约 3~6 km 的高度上。从雷达径向风调整前后 u 、 v 、 w 的剖面图对比看,调整前后 u 、 v 、 w 的分布形势相似,但局部的值经调整后发生了变化。图 3a~f 分别是经雷达径向风调整前的 u 、 v 、 w 及调整后与调整前 u 、 v 、 w 差的剖面图。从径向风调整后与调整前 u 剖面的差可以清楚地看出(图 3b), u 的变化主要在 114°E~119°E, 10 km 以下的范围内,在 116°E 上空离地面 2 km 和 8~9 km 处分别有一个正中心和负中心。同样,图 3d 中在 117°E 上空分别为负、正、负、正值中心,表明 v 从近地面向上到 10 km 高度都得到了调整,因此,从 u 、 v 的变化可以发现,经雷达径向风调整后,在 2 km 高度上约 116°E~117°E 处增加了气旋性风。由图 3f 可以看出, w 的变化主要在 1~10 km,在 u 、 v 最大中心处为 w 正中心,中心值达 0.32 m/s,表明此处上

升运动增强。同时在正的 w 中心西侧有一个负 w 中心,表明上升区西侧有增强了的下沉运动。

图 4(见文后彩图)给出了雷达反射率沿 37°N 的剖面。由图 4 可见,雷达反射率主要位于 8 km 以下的高度,回波较均匀,强中心位于 5 km 以下靠近雷达站附近。图 5 为利用雷达反射率资料进行微物理调整和云分析后 θ 、 q_v 、 q_r 、 q_c 、 q_i 、 q_s 的变化剖面。在加雷达前后的位温 θ 差剖面图上(图 5a), 2 km 以上 θ 的值均明显增加,最大中心位于 117°E 上空约 6~7 km 处,中心最大值为 0.3 K。由图 5b 可见,水汽混合比 q_v 的变化主要在近地面层,变化最大是在 117°E 上空,加雷达前后 q_v 的差达 0.7 g/kg,表明用雷达反射率调整后,在对流层低层水汽的含量明显增加。雨水混合比 q_r 的变化主要在 117°E 上空到 4 km 高度处(图 5c),最强变化达 0.27 g/kg。云水混合比 q_c 的变化范围要大些(图

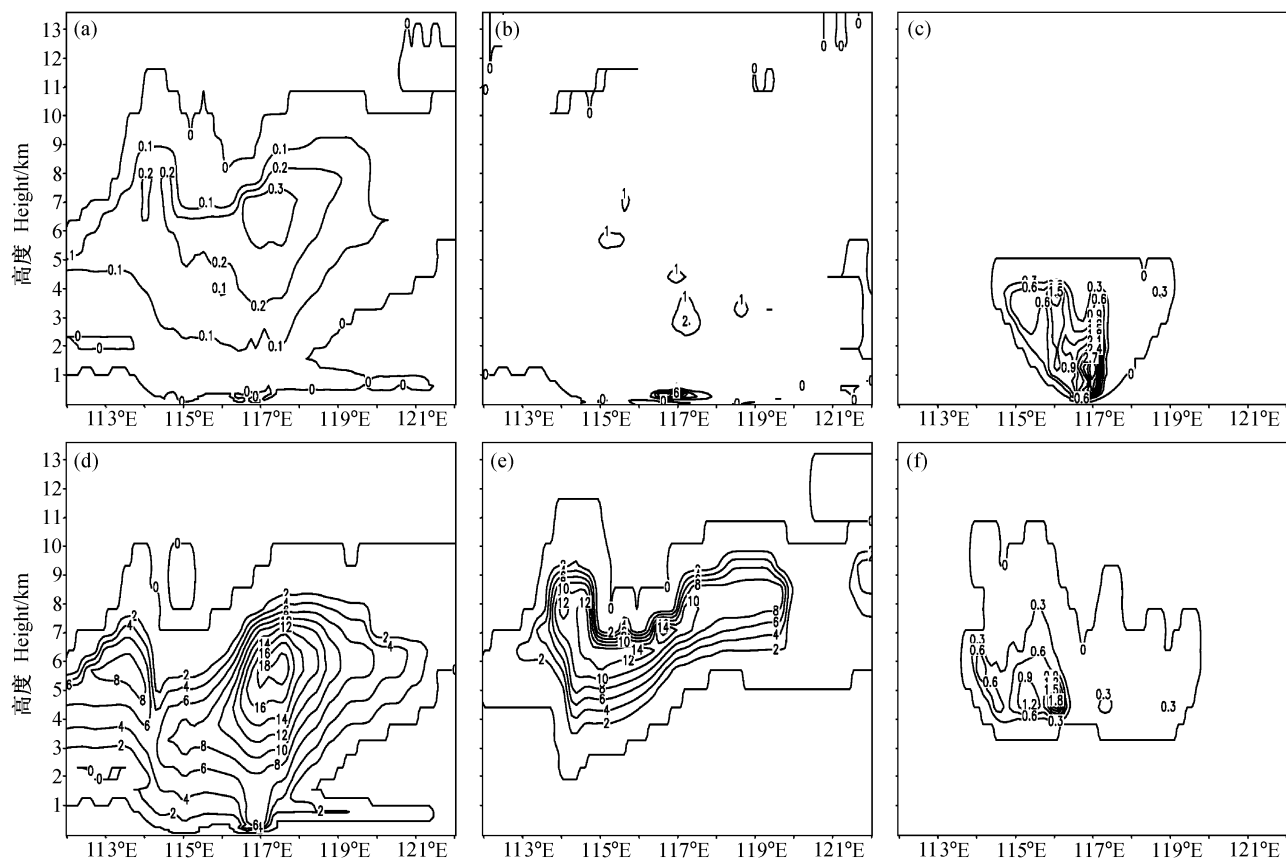


图 5 加雷达反射率后调整后与调整前初始各物理量的差沿 37°N 的经度-高度剖面图:(a) θ ; (b) q_v ; (c) q_r ; (d) q_c ; (e) q_i ; (f) q_s 。(a) 的单位: K, (b)~(f) 的单位: 10^{-1} g/kg

Fig. 5 Longitude-time cross-section of the differences between initial fields with and without radar reflectivity assimilation for (a) initial θ , (b) q_v , (c) q_r , (d) q_c , (e) q_i , (f) q_s along 37°N (units in (a): K; units in (b)~(f): 10^{-1} g/kg)

5d), 从地面向上到 10 km 处的对流层顶均有增加, 水平变化范围也较大, 最大变化在 117°E 上空 6 km 处, 中心值达 1.8 g/kg。云冰 q_i (图 5e) 和雪混合比 q_s (图 5f) 的变化主要在 4~9 km 的对流层中上层, 最大变化出现在 116°E 上空。这样, 经雷达反射率调整后, 在 3 km 以下的近地面层增加了水汽(q_v), 4 km 以下增加了雨水(q_r), 10 km 以下增加了云(q_c), 4~9 km 的对流层顶增加了云冰(q_i)和雪(q_s), 因此, 雷达调整区整个对流层的水汽含量都增加了。可以看出, 位温 θ 的变化与云水 q_c 的变化非常一致。

5 9 km 模拟的结果对比分析

5.1 9 km 模拟的降水量对比分析

首先, 我们对三组对比试验模拟的逐小时降水

量进行了对比分析, 发现在 1~12 h 内各种方案模拟的降水量都有差异, 但差异较大的时间主要是前三小时, 在随后的积分时间内, 不同方案模拟的降水量虽在降水量上有差异, 但差异非常小, 强降水中心差在 2 mm 以下。下面, 我们主要讨论 1~3 h 内模拟的 1 h 降水情况。

根据山东省地面 1 h 雨量资料, 对 11 日 08~11 时模拟的逐小时降水与实况降水量进行了对比分析。图 6~8 给出了 1~3 h 内的加雷达资料前后模拟的降水量及降水实况。由图 6a 可以看出, 不加雷达模拟的 08~09 时 1 h 降水很小, 降水分两个中心, 一个在鲁北地区, 降水最大为 3.5 mm, 另一个在鲁西南地区, 降水最大为 2 mm, 显然降水预报延迟。加雷达径向风调整后 (图 6b), 模拟的 08~09 时 1 h 降水量有所增加, 在 (37.2°N, 117°E)

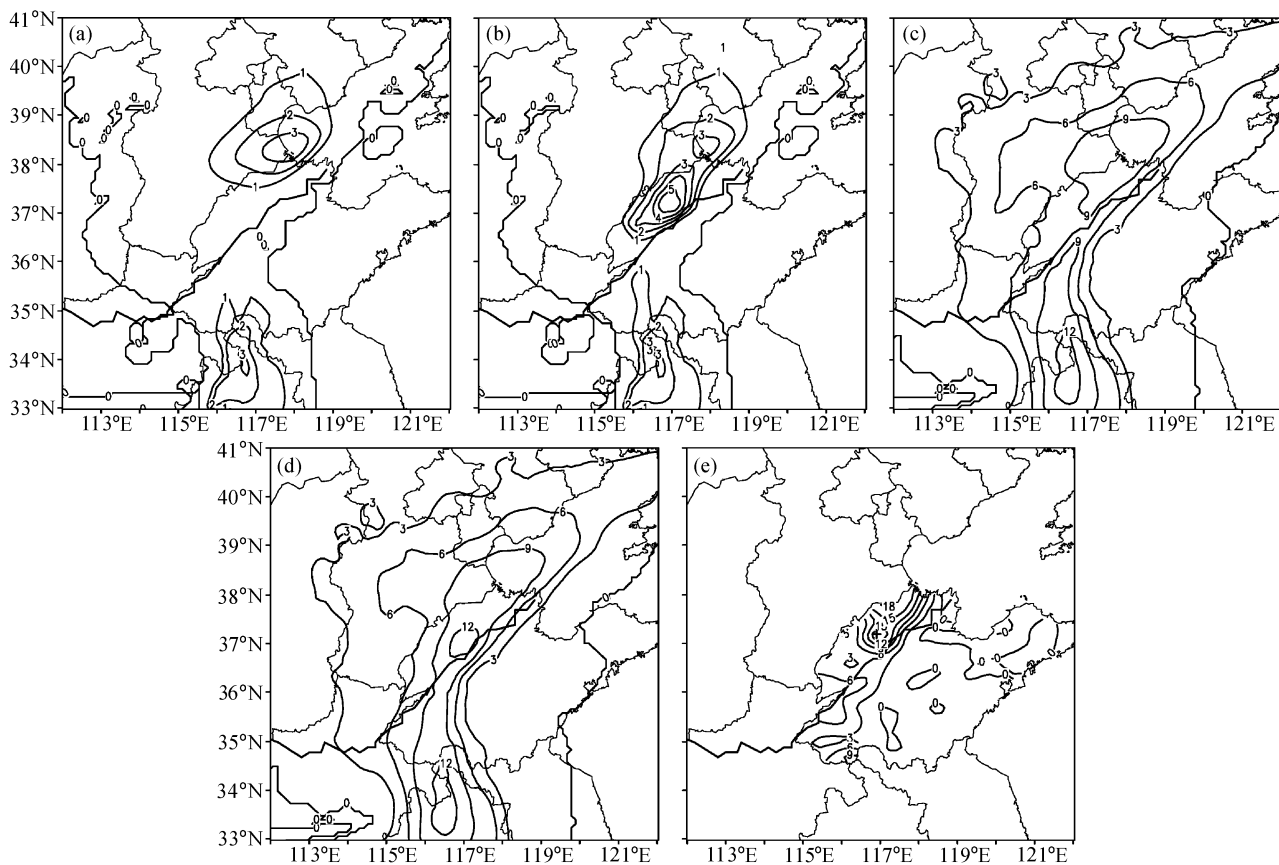


图 6 9 km 分辨率模拟的 11 日 08~09 时 1 h 雨量及实况 (单位: mm): (a) 不加雷达资料; (b) 加雷达径向风; (c) 加雷达反射率; (d) 同时加雷达径向风和反射率; (e) 实况, “+”处为最大降水中心

Fig. 6 Simulated and observed rainfall at 9 km grid from 0800 to 0900 BT 11 Oct 2003 (units: mm): (a) Without radar data assimilation; (b) only with radar radial velocity assimilation; (c) only with radar reflectivity assimilation; (d) assimilation with both radar radial velocity and reflectivity; (e) observed rainfall, “+” is the location of maximum rainfall

附近的降水明显增强,出现了新的降水中心,中心值达 5.5 mm,鲁北地区的降水与不加雷达的接近,鲁西南地区的降水中心达 3 mm,变化不大;加雷达反射率调整后(图 6c),降水量增加得较明显,自鲁北-鲁西-鲁西南降水连成带状,但中心依然分南北两个,鲁北地区的降水中心达 11,鲁西南地区的降水中心达 11 mm(但中心在安徽)。同时加雷达反射率和径向风进行调整后(图 6d),降水量增加最大,模拟的降水分布与雷达反射率调整的结果相似,但降水最大中心出现在(37.2°N, 117°E)附近,中心最大值达 13 mm,鲁西南地区的降水中心达 11 mm(中心在安徽),与加雷达反射率的模拟变化不大。从 08~09 时 1 h 的降水实况(图 6e)来看,降水主要在鲁北-鲁西-鲁西南地区,最强降水在位于(37.18°N, 116.87°E)的临邑站(图中“+”位置),1 h 降水为 19.1 mm。鲁西南地区有一个降水次大中心达 9 mm,但该降水中心不在山东。可以发现,同时加雷达反射率和径向风进行调整后模拟的降水在落区和强度上都与实况比较接近,而仅利用雷达径向风进行调整模拟的降水量改进最小,而反射率同时对定量降水预报和降水落区都有改进。

积分 2h 后(图 7),不加雷达资料(图 7a)模拟的 09~10 时鲁北地区 1 h 降水中心达 15 mm,鲁西南地区降水中心达 12 mm,降水明显分为南北两个中心;加雷达径向风调整后(图 7b),模拟的 09~10 时 1 h 降水量与不加雷达的模拟结果相似,不同之处是在鲁北地区 6 mm 雨量线的范围稍偏南,表明该地区降水增加了;加雷达反射率调整后(图 7c),鲁北和鲁西南地区的降水均增强了,鲁北地区降水中心达 18 mm,鲁西南地区的降水中心达 12 mm;同时加雷达反射率和径向风进行调整后(图 7d),降水量增加最大,模拟的降水分布与利用雷达反射率调整后模拟的结果相似,但鲁北地区降水最大中心值达 18 mm,鲁西南地区的降水中心达 15 mm。09~10 时 1 h 的降水实况(图 7e)图上,最强降水在位于(37.65°N, 117.57°E)的阳信站(图中“+”位置),1 h 降水为 18 mm,降水由鲁北-鲁西-鲁西南呈带状分布,中心在鲁北地区,显然同时加雷达反射率和径向风模拟的降水效果最好。

积分 3 h 后(图 8),不加雷达资料(图 8a)模拟

的鲁北地区 10~11 时 1 h 降水中心为 20 mm,鲁西南地区降水最强达 25 mm;加雷达径向风(图 8b)、反射率(图 8c)以及同时利用雷达反射率和径向风(图 8d)模拟的 10~11 时 1 h 降水分布和降水量都比较接近,鲁北地区降水最强达 25 mm,鲁西南地区降水最强达 25 mm,但同时使用雷达反射率和径向风模拟的鲁西南地区降水稍强,鲁西南地区降水最强达 30 mm;实况(图 8e)10~11 时 1 h 最强降水为 15.2 mm,位于(37.72°N, 117.18°E)的乐陵站(图中“+”位置),可以发现,加雷达前后各方案模拟的第三小时降水均较实况偏强,模拟的鲁北地区降水中心略偏东北,但加雷达资料较不加雷达模拟的降水强,此时加雷达反射率和径向风模拟的降水已差别不大。

图 9 给出了四种方案模拟的 6 h 降水量之和,由图可见,加雷达径向风模拟的降水(图 9b)与不加雷达模拟的降水(图 9a)几乎一样,其差异主要在鲁西地区,加雷达径向风模拟的鲁西地区降水中心达 20 mm,鲁北地区降水最强为 70 mm,鲁西南地区降水最强为 40 mm。加雷达反射率后模拟的鲁北地区降水(图 9c)中心达 90 mm,鲁南地区降水为 50 mm,同时使用雷达反射率和径向风模拟的降水(见图 9d)与使用雷达反射率模拟的结果基本相同。实况图(图 9e)上测站的最大降水量为 79 mm(图中“+”位置)。从模拟的降水中心位置来看,四种方案模拟的鲁北地区降水中心位置均较实况略偏东北,加雷达模拟的降水量较实况略偏强,不加雷达的较实况略偏弱。但加雷达资料前后模拟的鲁西南地区均有一块偏强的降水,这里不再讨论。

上面的 6 h 降水模拟结果对比,似乎说明加雷达资料模拟的降水反而过强了,那么,6 h 模拟的降水偏强是否是由于加雷达资料对初始场“过量”调整的结果呢?为此,我们分别给出了两种方案模拟的后 3 h(11 日 11~14 时)降水量之和(图 10)。从图 10 中可以清楚地看到,四种方案后 3 h 模拟的降水落区和强度几乎完全一致,尤其是鲁北地区的降水,加雷达前后模拟的降水中心都是 50 mm,模拟的鲁西南地区降水中心虽有点差异,但整体来看较一致。而实况 11 日 11~14 时鲁北地区的最强降水为 40.2 mm,出现在庆云站(37.76°N, 117.38°E)(图中“+”位置),鲁西南地区降水却在 10 mm 以

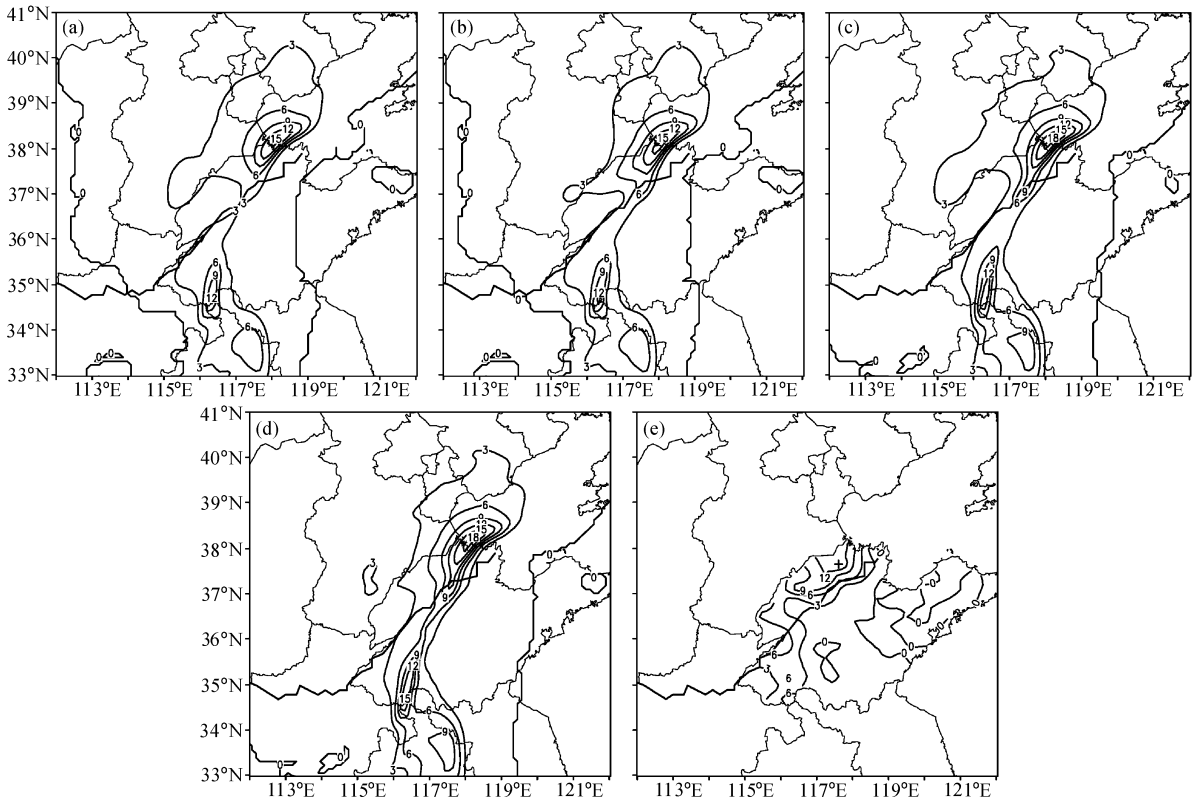


图 7 9 km 分辨率模拟的 11 日 09~10 时 1 h 雨量及实况(单位: mm), 其余同图 6
Fig. 7 Same as in Fig. 6, but from 0900 to 1000 BT 11 Oct 2003

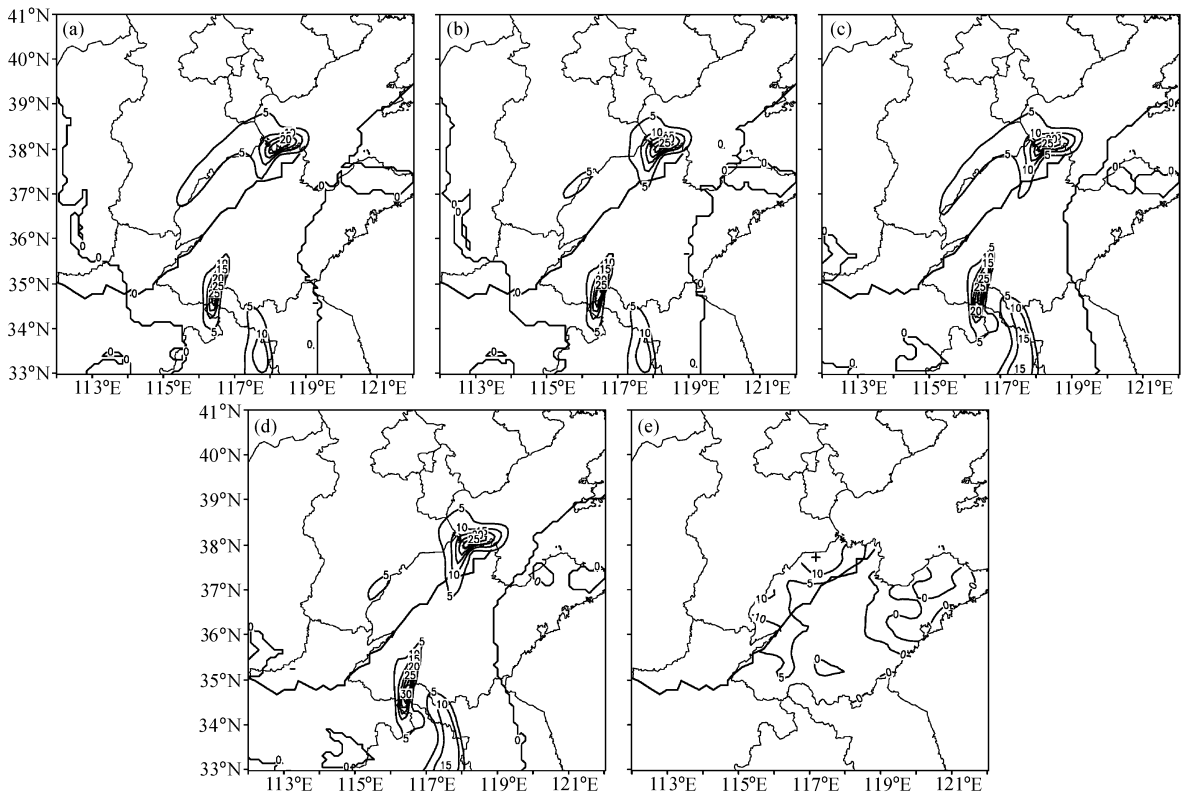


图 8 9 km 分辨率模拟的 11 日 10~11 时 1 h 雨量及实况(单位: mm), 其余同图 6
Fig. 8 Same as in Fig. 6, but from 1000 to 1100 BT 11 Oct 2003

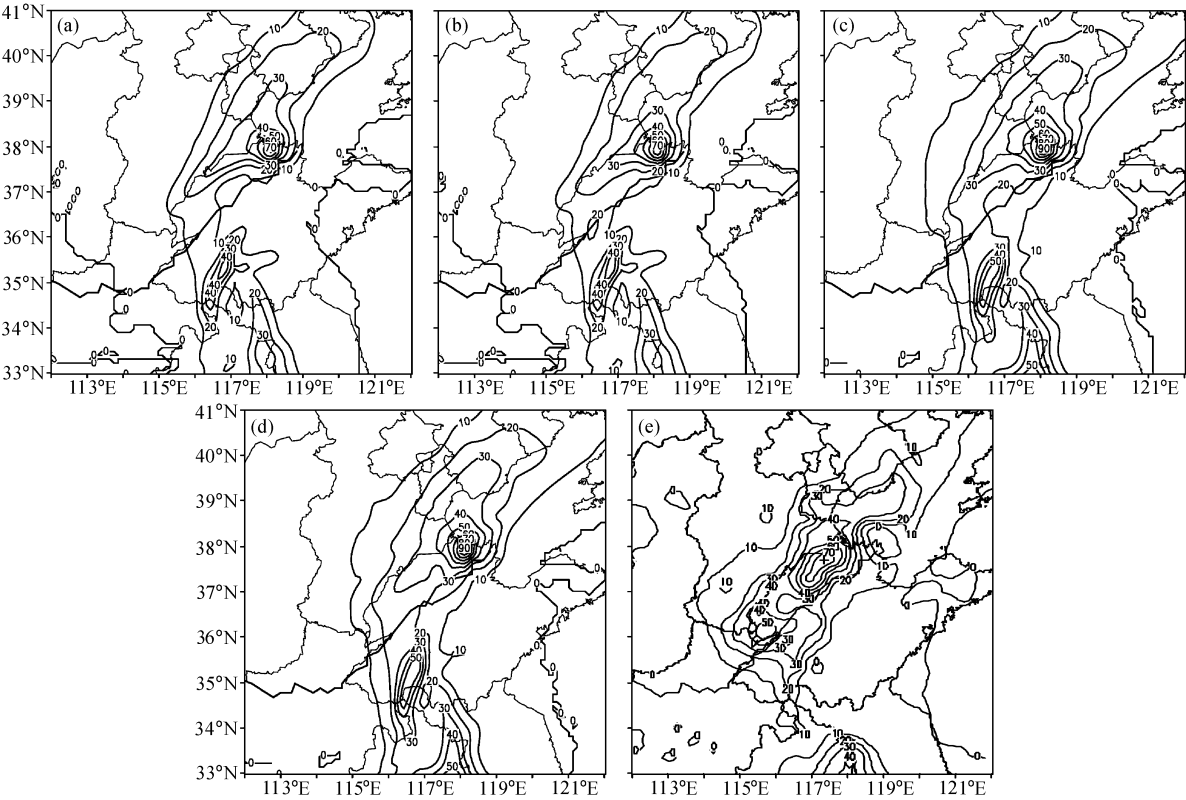


图 9 9 km 分辨率模拟的 11 日 08~14 时 6 h 雨量及实况 (单位: mm), 其余同图 6
Fig. 9 Same as in Fig. 6, but for 6 h rainfall from 0800 to 1400 BT 11 Oct 2003

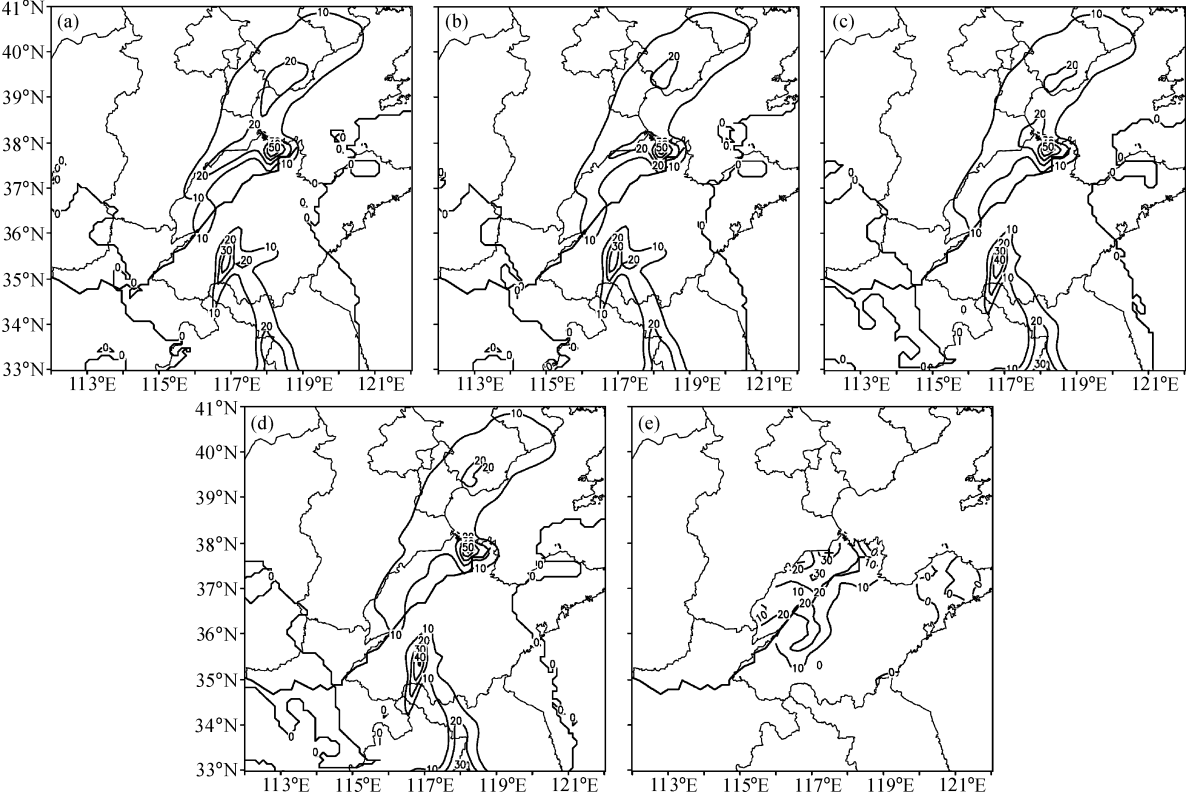


图 10 9 km 分辨率模拟的 11 日 11~14 时 3 h 雨量及实况 (单位: mm), 其余同图 6
Fig. 10 Same as in Fig. 6, but for 3 h rainfall from 1100 to 1400 BT 11 Oct 2003

下,显然,加雷达前后模拟的第4~6 h降水差异已经很小。这一方面说明,模式模拟的较实况偏强的降水,并非是由于加雷达资料引起的,同时也说明,雷达资料改进初始场后,主要是改进了3 h内的降水预报。

5.2 6 h内模拟的风场对比

进一步分析了加雷达和不加雷达模拟的6 h内风场的演变情况,我们以模式输出的1600 m(接近850 hPa)高空风资料进行了对比。图11是11日08时不加雷达资料时的初始流场(图11a),加雷达径向风后的初始流场(图11b),加雷达反射率后的初始流场(图11c)和同时加雷达反射率和径向风调整后的初始流场(图11d),可以看出,经雷达径向风资料调整后的初始风场在鲁西地区增加了一个中尺度低涡,同时加雷达反射率和径向风调整后的初始流场与加雷达径向风调整的初始流场分布相同,也在鲁西地区增加了一个中尺度低涡,而不加雷达资料的初始风场中却无此低涡,仅利用雷达反射率进行调整的初始流场也无此低涡出现,显然,该低涡

的出现是由于雷达径向风对初始场进行调整后产生的。积分1 h(图12)后,各方案模拟的流场变化不大,与初始场相似。积分2 h后(图13),不加雷达模拟的流场(图13a)上,在安徽北部的低涡中心北部,气旋性曲率明显增大,加雷达反射率模拟的流场(图13c)与图13a的变化相似,安徽北部的低涡中心北部气旋性曲率也明显增大,而加雷达径向风(图13b)和同时加雷达反射率和径向风模拟的流场(图13d)依然变化不大。积分3 h(图14)后,不加雷达模拟的流场(图14a)上,在安徽北部的低涡中心北部的鲁西地区也出现了一个小的低涡,加雷达反射率模拟的流场上也同样出现了低涡(图14c),这时四种方案模拟的流场很相似。积分6 h后,四种方案模拟的流场分布相似(图略)。

这一结果表明,加雷达径向风调整后,增加了初始场中的中小尺度环流,这种风场上的变化主要是由于雷达径向风调整初始场的结果,而雷达反射率对风场无影响。如果不加雷达径向风资料,这种增加的中小尺度环流需要模式积分3 h左右才能模

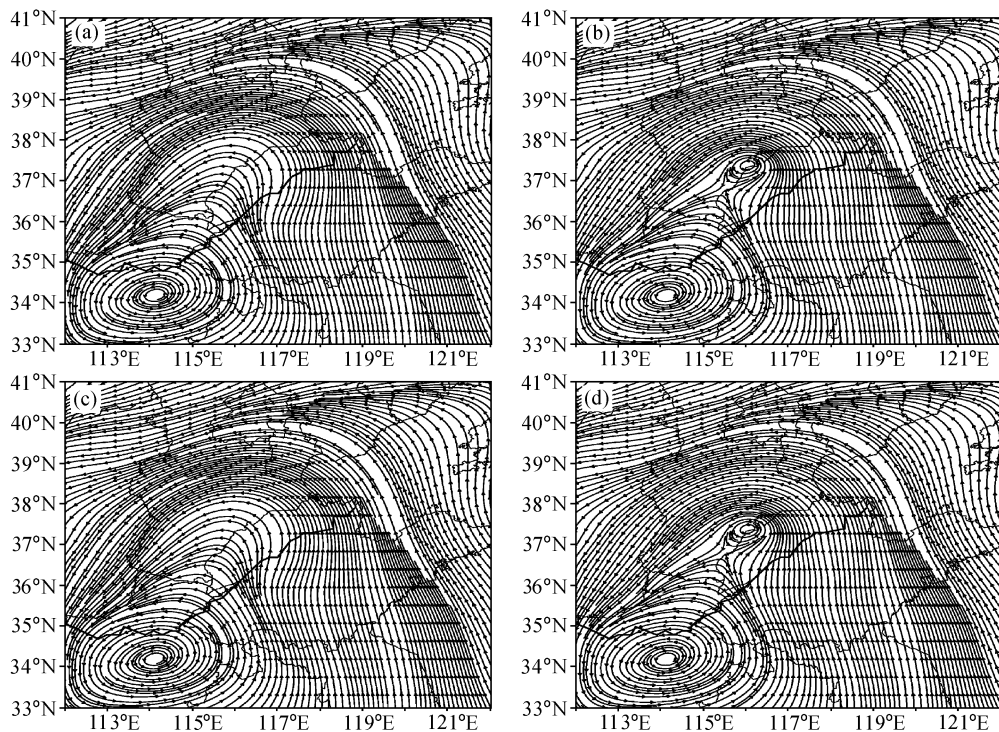


图11 9 km分辨率模拟的1600 m高度上的初始流场分布:(a)不加雷达资料;(b)加雷达径向风;(c)加雷达反射率;(d)同时加雷达径向风和反射率

Fig. 11 Simulated initial stream field at 1600 m height with 9 km resolution; (a) Actual data objective analysis without radar data assimilation; (b) objective analysis with radar radial velocity assimilation; (c) objective analysis with radar reflectivity assimilation; (d) objective analysis with both radar radial velocity and reflectivity assimilation

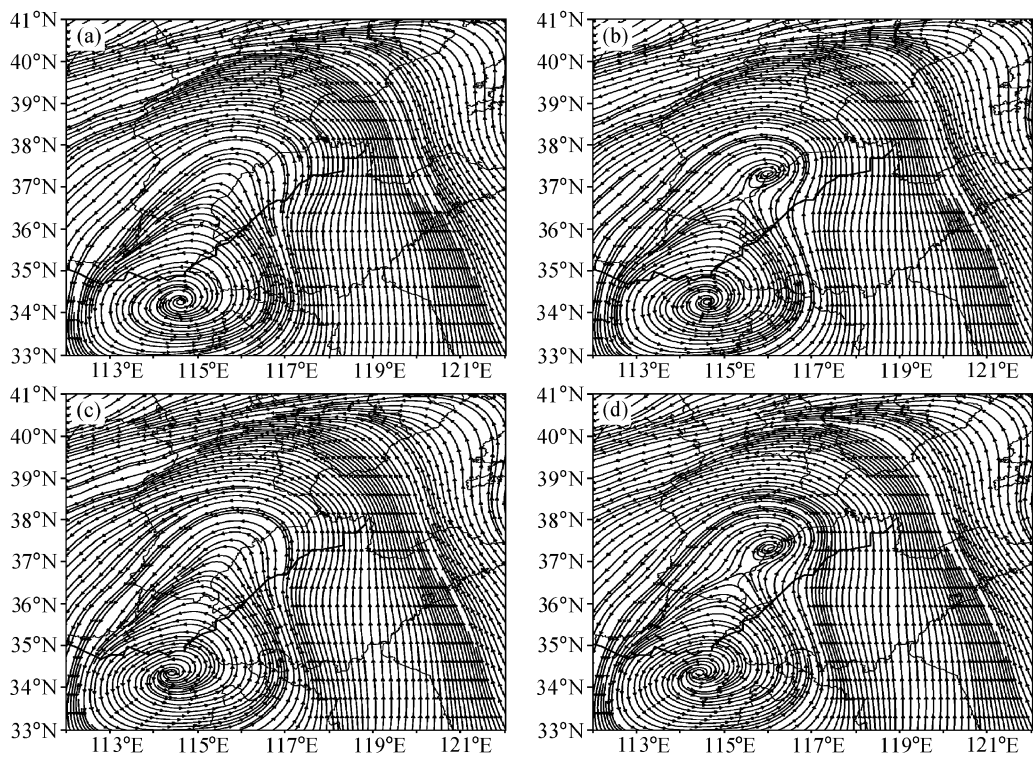


图 12 积分 1 h 后 9 km 分辨率模拟的 1600 m 高度上的流场分布，其余同图 11

Fig. 12 Simulated stream field after 1-h integration at 1600 m height, explanation is the same as in Fig. 11

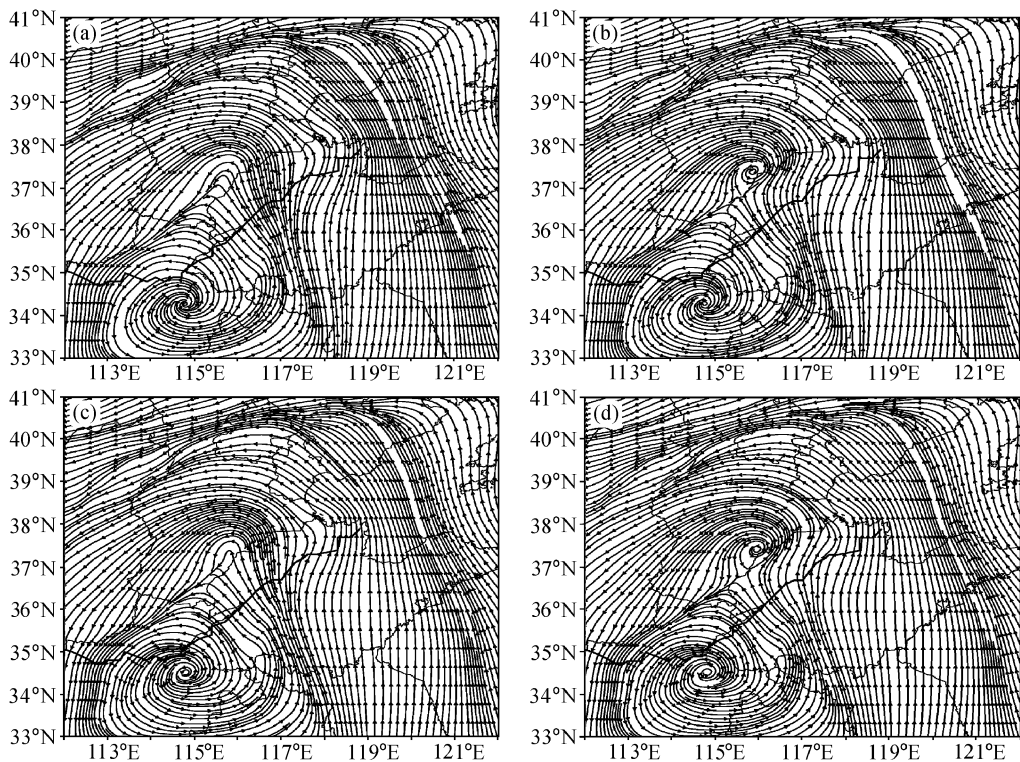


图 13 积分 2 h 后 9 km 分辨率模拟的 1600 m 高度上的流场分布，其余同图 11

Fig. 13 Simulated stream field after 2-h integration at 1600 m height, explanation is the same as in Fig. 11

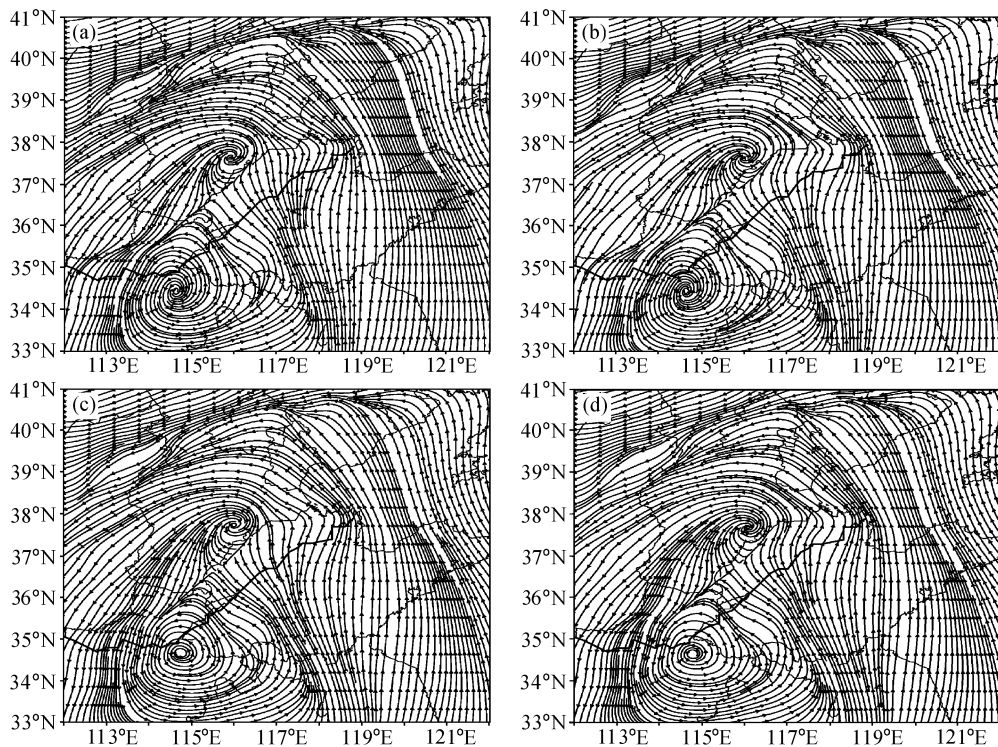


图 14 积分 3 h 后 9 km 分辨率模拟的 1600 m 高度上的流场分布, 其余同图 11

Fig. 14 Simulated stream field after 3-h integration at 1600 m height, explanation is the same as in Fig. 11

拟出。这一方面说明了雷达径向风资料对风场调整的合理性, 另一方面也表明这种风场上的调整在模拟的 3 h 内效果是非常明显的。

值得注意的是, 本文利用 ADAS 直接加入雷达径向风调整可能会产生虚假的辐合辐散, 这里仅给出径向风对预报的影响效果作为对比, 对径向风同化可能带来的影响未做分析。

6 结论及展望

本文利用 ARPS 模式及其资料分析模块 ADAS, 将国内敏视达 CINRAD 多普勒雷达资料用于中尺度数值模拟, 通过一次华北地区暴雨过程的试验, 可以得出以下结论:

(1) ARPS 模式的资料分析系统 ADAS 可以合理、有效地利用国内 CINRAD 多普勒雷达反射率和径向风资料对初始场进行动力、热力和云微物理调整。这种调整增加了初始场中对流层中层的云水含量, 并在初始场中增加了中小尺度风的信息, 通过非绝热初始化并使初始场在动力和热力上达到平衡。

(2) 雷达径向风主要是调整模式的初始风场,

反射率主要是调整初始场中的云水信息和温度场, 通过雷达径向风和反射率对模式模拟结果的影响看, 雷达径向风资料对降水预报影响较小, 反射率对定量降水预报改进明显, 但同时使用雷达径向风和反射率资料对模拟的降水量影响最大。

(3) 模拟的 6 h 内降水和风场对比表明, 利用雷达反射率和径向风改进过的初始场能明显增强 3 h 内的降水强度和落区预报, 提高中尺度数值模式短时定量降水预报。经雷达径向风调整过的初始风场, 能够在初始场中增加气旋性涡旋等中小尺度风信息。如果不用雷达径向风资料, 这种风的调整需要模式积分 3 h 左右才能模拟出, 因此, 雷达资料加进模式后, 明显地减少了模式的 spin-up 时间。

(4) 本文仅用了一次华北地区大范围暴雨过程进行了个例试验, 不同性质的天气过程是否会有同样的结论还需进一步检验。

致谢 美国 Oklahoma 大学的薛明教授曾给予作者热情的帮助, 山东省气象中心的朱君鉴同志为本文提供了高质量的多普勒雷达资料, 在此表示感谢。

参考文献 (References)

[1] Kasahara A, Balgovid R C, Katz B. Use of satellite radio-

- metric imagery data for improvement in the analysis of divergent wind in the tropics. *Mon. Wea. Rev.*, 1988, **116**: 866~883
- [2] 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
- [3] 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
- [4] Sun J, Crook N A. Real-time low-level wind and temperature analysis using single WSR-88D data. *Wea. Forecasting*, 2001, **16**: 117~132
- [5] Synder C, Zhang F. Assimilation of simulated Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, 2003, **131**: 1663~1677
- [6] Zhang F, Synder 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] Tong M, Xue M. Ensemble Kalman filter assimilation of Doppler radar data with a compressible nonhydrostatic model: OSSE experiments. *Mon. Wea. Rev.*, 2005, **133**: 1789~1807
- [8] Qiu C J, Xu Q. A simple adjoint method of wind analysis for single-Doppler data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1992, **9**: 588~598
- [9] Qiu C J, Xu Q. A spectral simple adjoint method for retrieving low-altitude winds from single-Doppler data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1994, **11**: 927~936
- [10] Gao J D, Xue M, Shapiro A, et al. Three-dimensional simple adjoint velocity retrievals from single-Doppler radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2001, **18**: 26~38
- [11] Gao J D, Xue M., Brewster K, et al. A three-dimensional variational data analysis method with recursive filter for Doppler radars. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2004, **21**: 457~469
- [12] Hu M, Xue M, Gao J D, et al. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D Level-II data for the prediction of fort worth tornadic thunderstorms. Part II: Impact of radial velocity analysis via 3DVAR. *Mon. Wea. Rev.*, 2005, Accepted
- [13] Rogers R F, Fritsch J M, Lambert W C. A simple technique for using radar data in the dynamic initialization of a mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128**: 2560~2574
- [14] Zhang J. Moisture and diabatic initialization based on radar and satellite observations. Ph. D. dissertation, University of Oklahoma, 1999
- [15] Xue M, Wang D H, Gao J D, et al. The advanced regional prediction system (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation. *Meteor. Atmos. Phys.*, 2003, **82**: 139~170
- [16] 陶祖钺. 从单 Doppler 速度场反演风矢量场的 VAP 方法. 气象学报, 1992, **50**: 82~93
Tao Zhuyi. The VAP method to retrieve the wind vector field based on single-Doppler velocity field. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1992, **50**: 82~93
- [17] 肖艳姣, 汤达章, 李中华, 等. 风暴的自动识别、跟踪与预报. 南京气象学院学报, 1998, **21**: 223~229
Xiao Yanjiao, Tang Dazhang, Li Zhonghua, et al. Storm automatic identifying, tracking and forecasting. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1998, **21**: 223~229
- [18] 邱崇践. 由单个多普勒雷达探测资料反演风矢量场的变分方法. 兰州大学学报, 1999, **35**: 183~188
Qiu Chongjian. The variational method for retrieval of wind vector field from single Doppler radar. *Journal of Lanzhou University* (in Chinese), 1999, **35**: 183~188
- [19] 邱崇践, 余金香, Xu Qin. 多普勒雷达资料对中尺度系统短期预报的改进. 气象学报, 2000, **58**: 244~249
Qiu Chongjian, Yu Jinxiang, Xu Qin. Use of Doppler-radar data in improving short-term prediction of mesoscale weather. *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, **58**: 244~249
- [20] 王峰云, 王燕雄, 陶祖钺. 单多普勒天气雷达的中尺度风场探测技术研究. 热带气象学报, 2003, **19**: 292~298
Wang Yunfeng, Wang Yanxiong, Tao Zhuyi. The study of mesoscale wind field detection technique for single Doppler weather radar. *Journal of Tropical Meteorology*, 2003, **19**: 292~298
- [21] 顾建峰, 薛纪善, 颜宏. 多普勒雷达四维变分分析系统概述. 热带气象学报, 2004, **20**: 1~13
Gu Jianfeng, Xue Jishan, Yanhong. A summarization of four-dimensional variational Doppler radar analysis system. *Journal of Tropical Meteorology*, 2004, **20**: 1~13
- [22] 杨艳蓉, 李柏, 张沛源. 多普勒雷达资料四维变分同化. 应用气象学报, 2004, **15**: 95~110
Yang Yanrong, Li Bai, Zhang Peiyuan. Doppler radar data's four dimensional variational assimilation. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2004, **15**: 95~110
- [23] 王叶红, 赵玉春, 崔春光. 雷达降水资料一维变分同化的敏感性研究. 气象, 2004, **30**(4): 6~10
Wang Yehong, Zhao Yuchun, Cui Chunguang. Sensitivity research on one-dimensional variational assimilation of radar derived precipitation data. *Meteorology Monthly*, 2004, **30**(4): 6~10
- [24] 托亚, 梁海河, 马淑芬, 等. 用雷达观测资料改进 MM5 初始场的初步试验研究. 南京气象学院学报, 2003, **26**(5): 661~667
Tuo Ya, Liang Haihe, Ma Shufen, et al. A preliminary research on improving MM5 initial fields using radar data.

- Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2003, **26**(5): 661~667
- [25] Souto M J, Balseiro C F, Pérez-Muñuzuri V, et al. Impact of cloud analysis on numerical weather prediction in the Galician region of Spain. *J. Appl. Meteor.*, 2003, **42**: 129~140
- [26] Xue M, Droegemeier K K, Wong V, et al. Advanced Regional Prediction System(ARPS) Users Guide. Center for Analysis and Prediction of Storms, 1995
- [27] Sashegyi K D, Harms D E, Madala R V, et al. Application of the Bratseth scheme for the analysis of GALE data using a mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**: 2331~2350
- [28] Zhang J, Carr F H, Brewster K. ADAS cloud analysis. 12th Conference on Numerical Weather Prediction, Phoenix, Amer. Meteor. Soc., 1998, 185~188

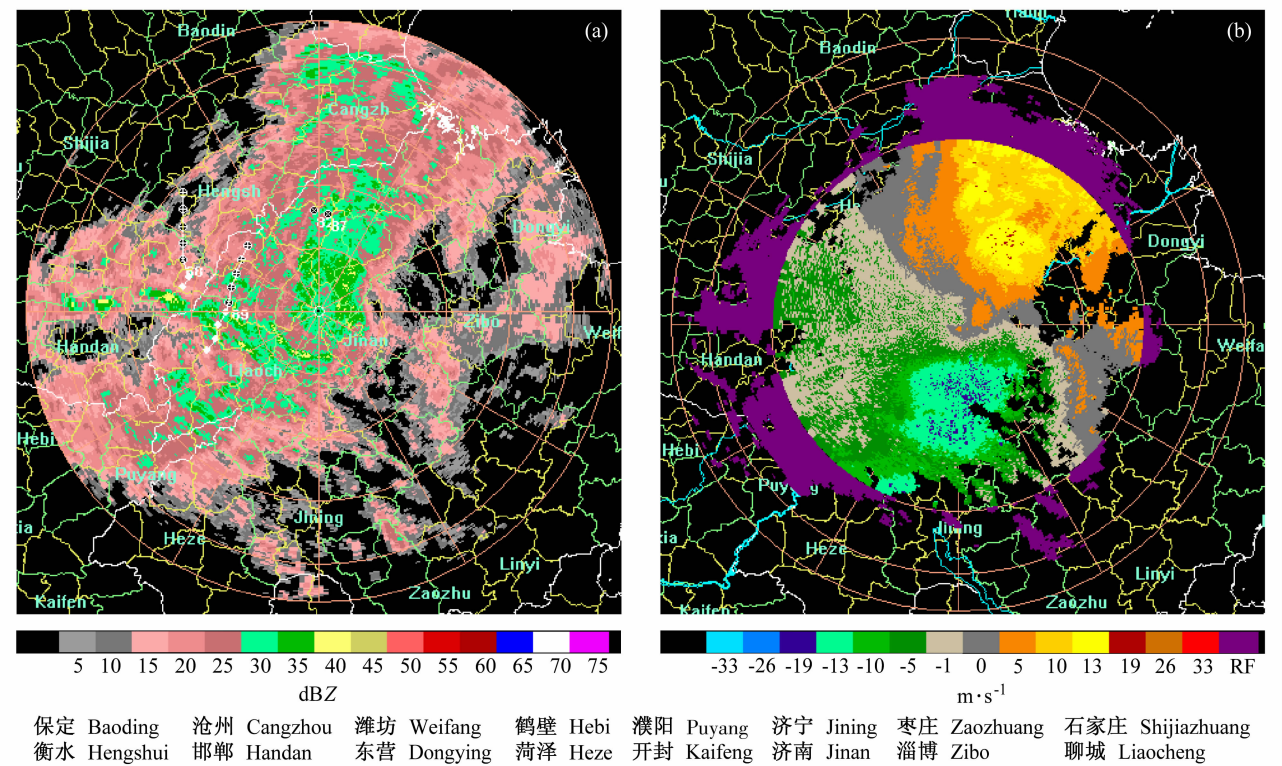


图 1 2003 年 10 月 11 日 08 时济南齐河多普勒雷达图：(a) 组合反射率图；(b) 1.5°仰角的径向速度图

Fig. 1 Qihe Doppler radar pictures at 0800 Beijing Time (BT) 11 Oct 2003; (a) Composite reflectivity; (b) radial velocity at elevation angle 1.5°

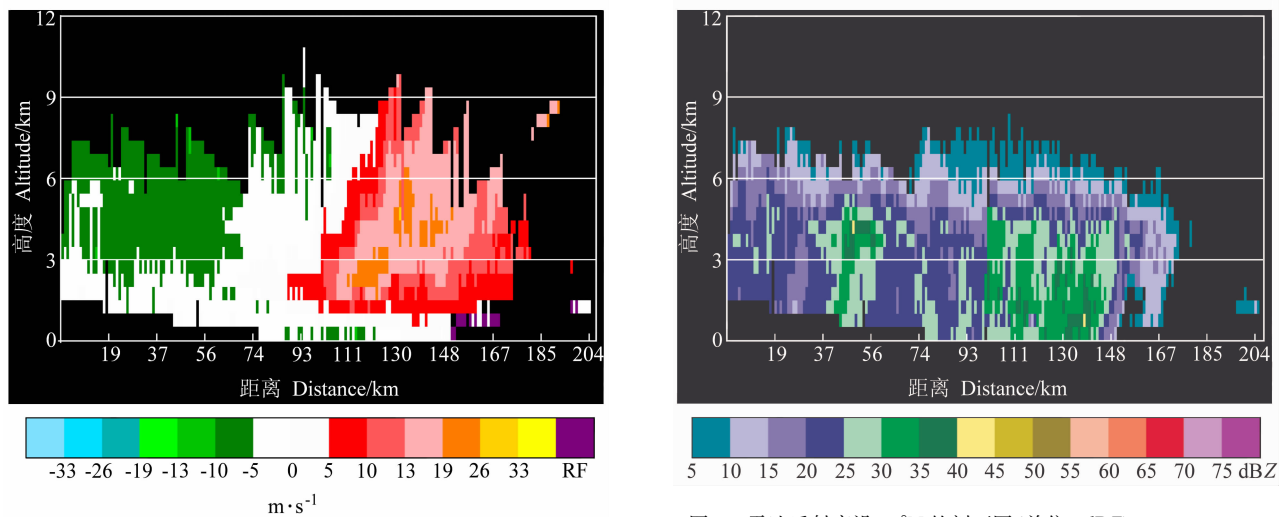


图 2 11 日 08 时济南齐河多普勒雷达径向风沿 37°N 的剖面图

Fig. 2 Cross-section of radial velocity along 37°N at 0800 BT 11 Nov 2003

图 4 雷达反射率沿 37°N 的剖面图(单位：dBZ)

Fig. 4 Cross-section of reflectivity along 37°N at 0800 BT 11 Nov 2003 (units: dBZ)