

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^{* 1}

盛春岩^{1,2,3} 薛德强² 雷 霆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 山东省气象台, 济南, 250031

3 中国科学院研究生院, 北京, 100049

摘 要

为对比雷达资料同化与提高模式水平分辨率对短时数值预报的影响, 利用美国 Oklahoma 大学风暴分析和预测中心开发的 ARPS(The Advanced Regional Prediction System)模式及其资料分析系统 ADAS(ARPS Data Analysis System), 对一次华北暴雨过程进行了 18, 15, 9, 6, 3 km 5 种不同水平分辨率的数值对比试验, 并对比了使用雷达资料进行云分析时 5 种分辨率的模拟结果, 结果表明, 仅使用常规观测资料的情况下, 通过提高模式水平分辨率, 可以改进 6 h 内的短时预报, 模拟的锋面结构更为细致, 降水尤其是强降水预报评分提高了。而使用雷达资料改进模式初始场后, 能明显改进模式 6 h 内的预报尤其是降水强度和落区预报, 使得 18 km 上使用雷达资料同化的预报结果好于 3 km 不使用雷达资料同化的结果, 表明雷达资料同化比单纯提高模式水平分辨率更为有效。不同分辨率上使用雷达资料同化的对比发现, 对于 40 mm 以下的一般性降水, 从 18—3 km 的模拟结果差别不大, 而对于强降水, 仍然需要提高模式的水平分辨率。但无论初始场是否使用雷达资料同化, 但当分辨率由 6 km 提高到 3 km 时, 模拟结果无明显改进, 因此, 提高模式分辨率有一定的限度, 而在适当提高模式分辨率的同时使用雷达资料同化改进模式初始场, 则是提高模式短时预报的一个非常有效的途径。

关键词: 雷达资料同化, 提高模式分辨率, 对比试验, 短时预报。

1 引 言

近年来, 大型计算机并行技术的发展, 各种非常规资料的增加以及数值模式中云微物理过程和参数化方案的改进, 促进了高分辨率数值模式以及资料同化技术的极大发展, 业务数值预报的分辨率已大大提高。美国国际环境预测中心(NCEP)计划在近年将 Eta 模式的水平分辨率提高到 10 km 以下; 美国俄克拉荷马大学风暴分析和预测中心开发的 ARPS 模式, 实时运行最高水平分辨率达 3 km; 美国华盛顿大学运行的区域 MM5 模式自 1999 年底最高分辨率已达 4 km; 北京市气象局业务运行的中尺度 MM5 模式最高分辨率为 3 km; 而中国国家气

象中心数控室计划将新一代中尺度 WRF 模式的分辨率提高到 1 km, 为 2008 年奥运服务, 这些事实说明, 数值模式的分辨率已大大提高了。

许多研究表明, 提高模式分辨率对于改进模式预报有重要作用, 但以往关于提高模式分辨率的敏感性试验多集中在几十公里的尺度上, 近些年来, 人们更为关注 20 km 以下的较高分辨率对预报的影响。对比试验结果表明, 提高模式水平分辨率能够改进模式预报结果, 当水平分辨率提高到 3 km 以下时, 无论是锋面结构^[1], 还是中小尺度特大暴雨^[2]或强对流天气^[3,4]的预报均得到了明显改进。然而, 也有研究发现^[5,6], 在一定范围内提高模式分辨率会改进预报效果, 但当分辨率提高到 3 km 以下时,

^{*} 初稿时间: 2005 年 8 月 2 日; 修改稿时间: 2005 年 9 月 9 日。

资助课题: 国家自然科学基金重点项目(40433007), 山东省气象局 2005 年一期重点项目(2005sdqxzl9), 中国科学院海外杰出学者基金(2004-2-7)。

作者简介: 盛春岩, 女, 博士生, 研究方向为中小尺度动力及数值模拟。E-mail: scy9186@yahoo.com.cn

对模拟结果改进不大。有的对比试验甚至发现^[7],当分辨率提高到一定程度时,再提高分辨率反而会使模拟结果变差。Chow 等^[8]利用 ARPS 模式进行了阿尔卑斯山区晴空大涡模拟,分辨率从 9 km 提高到 150 m,结果发现,仅提高模式分辨率对模拟结果改进不大,而在提高模式分辨率的同时提高土壤下垫面资料的分辨率时,则大大改进了模式的预报结果。这些研究结果表明,提高模式水平分辨率在一定程度上能提高天气系统的中小尺度信息特征,但提高分辨率并非与预报结果成正比,使用天气尺度的观测进行云尺度(3 km 以下)预报未必会改进模式预报效果。由于初始场信息的不足,提高模式分辨率只能预报出模式积分过程中的中尺度系统,根本办法是在提高模式分辨率的同时增加观测资料的密度^[9]。

随着美国 NEXRAD WSR-88D 多普勒雷达网的建设,如何将雷达资料同化到中尺度数值模式中,成为气象学家特别关注的方向之一。研究表明,雷达资料同化能明显改进模式 6 h 内的短时预报^[10,11]。盛春岩等^[12]将国内 CINRAD-SA 雷达资料同化到中尺度 ARPS 模式中,通过对比试验发现,雷达反射率和径向风资料同化均能改进模式的短时降水预报,但雷达反射率同化要比径向风同化对降水预报的改进效果更明显。进一步采用新的复杂云分析方案和 30 与 6 km 双重单向嵌套网格,盛春岩等^[13]对 ADAS 云分析系统中有无非绝热初始化方案进行了对比,结果发现 ADAS 复杂云分析中的温度调整方案对降水预报有重要作用。李柏^[14]利用四维变分同化方法,将多普勒雷达估计的降水资料同化到中尺度 MM5 中,对比试验表明,在同化的 6 h 时间窗内,同化结果与控制试验结果具有较大的差异,明显改进了模式的降水预报。那么,雷达资料同化与提高模式水平分辨率,哪一个对预报的改进更为有效? 雷达资料同化在不同分辨率上的效果如何? 基于此,本文将利用 ARPS 模式及其云分析系统,通过一次华北暴雨过程的数值试验,对比提高模式分辨率以及有无雷达反射率资料同化对 6 h 内短时预报的影响。

2 模式简介、个例选取及试验设计

本文使用的是美国 Oklahoma 大学风暴分析和预测中心开发的 ARPS(The Advanced Regional

Prediction System)模式^[15],它是一个多尺度可压缩的非静力平衡模式,已成功运用于强风暴、龙卷以及暴雨等多种天气的模拟。其资料分析模块 ADAS(ARPS Data Analysis System)包括一个复杂云分析系统,可以利用地面云观测资料、多普勒雷达反射率资料以及卫星红外和可见光资料进行三维复杂云分析,ADAS 也可以只利用雷达反射率资料进行云分析。ADAS 在处理雷达资料时,首先将雷达资料插值到模式网格坐标上,在雷达扫描范围内将网格点上的反射率值与阈值进行比较,如果反射率低于阈值,视为晴空;高于阈值,则根据 Smith, Myers 和 Orville 等^[16]提出的方案在三维空间上反演降水类型(雨、雪、霰),并通过假设云内为湿绝热上升得到绝热液态水含量(ALWC),从而估计出云水混合比 q_c 和云冰混合比 q_i ,最后根据潜热加热廓线在云内进行温度调整,关于 ADAS 复杂云分析系统的介绍参见文献[17-20]。本文只使用了雷达资料,目的是检验雷达资料同化对数值预报的影响。

本文选取的个例是 2003 年 10 月 11 日发生在华北地区的暴雨过程^[13],影响系统主要是地面冷锋、倒槽以及 850 hPa 低涡和切变线。模式采用双层嵌套网格,外层网格格距为 30 km,覆盖区域约 3000 km×3000 km,中心位于(36°N,116°E),垂直分 43 个 σ 层,垂直方向平均格距为 500 m。在内层网格上分别作了 18,15,9,6,3 km 5 种水平分辨率的对比试验,内层网格的中心都位于(36.8°N,116.8°E),覆盖的区域大致为 700 km×700 km,以保持内层网格的模拟结果不受区域大小的影响。在对比时,只考虑了水平方向网格距的影响,垂直方向分辨率较高,分 53 个 σ 层,平均格距为 400 m。两层网格在垂直方向均采用双曲正切曲线向上伸展,近地面最小距离为 20 m。所有的试验都采用了两层的土壤植被模式,TKE 次网格混合和 PBL 参数化,大气辐射传输参数化以及冰微物理方案。18 和 15 km 网格上使用了 Kain-Fritsch 积云参数化方案,9 km 以下的网格未使用积云参数化方案(9 km 上使用参数化方案后模拟的结果不变)。模式外层网格采用 6 h 间隔的 1°×1°的 NCEP 分析资料作为初始场和侧边界条件,内层网格上的初始资料与外层网格的相同,以 30 km 模拟的 3 h 间隔的模式输出资料作为侧边界条件。

本文采用的多普勒雷达资料是 11 日 08 时(北

京时)位于济南齐河的 CINRAD-SA 雷达反射率资料,在内层网格上进行了 18—3 km 有无雷达反射率资料同化的对比试验。齐河雷达站位于(36.8°N,116.8°E),海拔高 72.8 m,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,模式试验设计见表 1。模式开始积分的时间为 2003 年 10 月 11 日 08 时,共积分 6 h。

表 1 模拟试验方案
Table 1 Schemes for comparative experiments

试验名称	是否使用常规资料	是否使用雷达资料进行云分析	是否使用积云参数化	格点数
18 km	是	否	是	70×70
18 km_rd	是	是	是	70×70
15 km	是	否	是	83×83
15 km_rd	是	是	是	83×83
9 km	是	否	否	111×115
9 km_rd	是	是	否	111×115
6 km	是	否	否	151×151
6 km_rd	是	是	否	151×151
3 km	是	否	否	231×231
3 km_rd	是	是	否	231×231

3 不使用雷达资料同化的模拟结果分析

3.1 模拟的环流形势分析

分析模式模拟的形势场和流场发现,模式积分 2 h 时,在对流层中低层山东西部模拟出了一个中尺度的低涡,该低涡随时间向北偏东方向移动,于 14 时位于山东西北部约 38°N,117°E 附近。18—3 km 分辨率均模拟出了相似的结果。图 1 给出了积分 6 h 后的 18—3 km 分辨率模拟的 1500 m 高度上的流场,可以发现,不同分辨率模拟的流场形势是一致的,都较好地模拟出了山东西南部的低涡,与 NCEP 分析场相比,此低涡中心略偏北。模式模拟的山东西北部的中尺度低涡,在常规天气图上反映不出来(图 1f)。从这一低涡的位置和强降水区的配置来看,鲁北地区的 6 h 达 79 mm 的强降水是由这一低涡直接造成的(见图 4f)。

为分析模式模拟的锋的位置和结构,这里给出了模式模拟的 11 日 14 时南风 v 以及气温沿 117.5°E(11 日 14 时地面锋面的大概位置)的经向-高度剖面图(见图 2,3)。从图 2 可以清楚地看出锋面的垂直结构:在约 1.5 km 以下、约 36°N 以北的边界层内为偏北风(图中阴影区),南面的暖湿空气沿冷空气爬升,阴影区的边界即冷空气的前沿。随着水平分辨率的提高,模拟的锋的结构更为细致,模拟的冷锋前沿略偏北,精细地描绘出地面锋的位置。

当分辨率提高到 9 km 以下时,在 37°N 上空向上约 2.5 km 高度上的大片南风区里出现了一个窄的北风带,从垂直运动来看(图略),这一狭窄的北风带正好对应着下沉气流,属于近地面层两低涡之间的下沉气流,当模式分辨率提高到 6 km 以下时,这一北风带变得非常清楚。对比 NCEP 资料分析场来看,18—3 km 分辨率上模拟的冷空气的前沿及锋面影响的高度都非常好,但南北风分量的最大值中心位置有一定的偏差。由于 NCEP 分析场的分辨率是 1°×1°,只能定性地给出锋面的位置。

对比图 3 中的各图可以发现,18—3 km 模拟都大致相似地模拟出了与冷空气相配合的近地面层的冷空气及温度梯度,即锋面的位置。随着水平分辨率的提高,模式模拟的 1.5 km 以下近地面层的温度结构更为细致。当分辨率提高到 9 km 以下时,在 37°N 上空约 1 km 以下,模拟出了一个单独的闭合暖空气堆,结合图 2 可以发现,此暖空气堆与窄的北风带和下沉运动相对应,与下沉气流增温有关。当模式分辨率提高到 6 km 以下时,这一闭合的暖中心更加清楚。图 3f 为 NCEP 分析资料温度场沿 117.5°E 的经向-高度剖面,对比来看,NCEP 分析资料大致给出了与锋面相关的温度场特征,模式模拟的冷空气的位置与 NCEP 分析场的非常接近,但却更为细致地模拟出了大气温度的垂直结构特征。

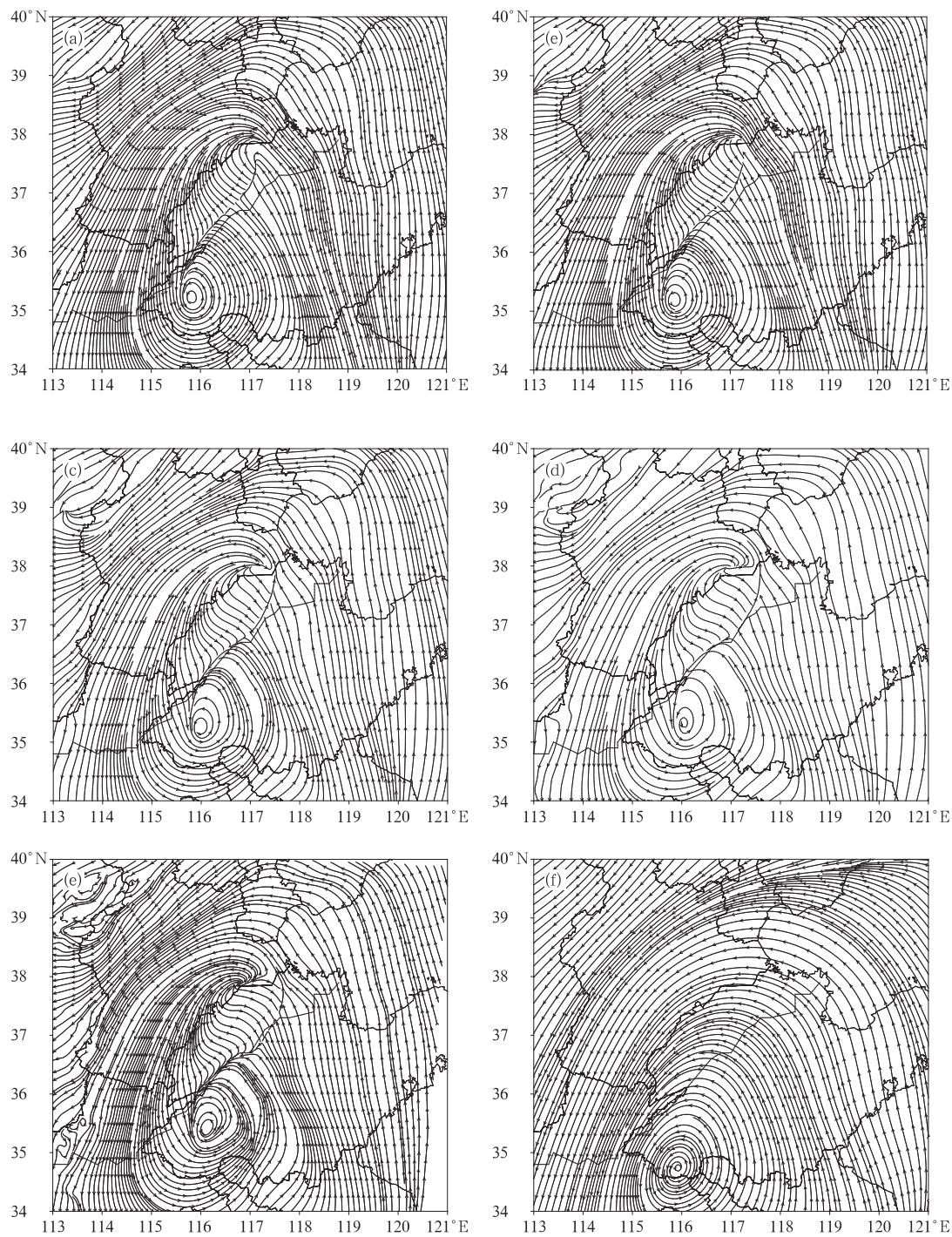


图1 不使用雷达资料同化时模拟的11日14时1500 m高度上的流场以及相应的NCEP分析场
(a. 18 km, b. 15 km, c. 9 km, d. 6 km, e. 3 km, f. NCEP)

Fig.1 Simulated streamline fields at 1500 m at 14:00 BST 11 October 2003 using different resolutions
(a, 18 km; b, 15 km; c, 9 km; d, 6 km; e, 3 km) without initial radar data assimilation, and the
corresponding real time analysis field of NCEP(f)

3.2 模拟的6 h降水结果对比分析

图4为18—3 km模拟的6 h降水量。很明显,随着模式水平分辨率的提高,模拟的6 h降水分布

变化不大,但降水强度逐渐增强,尤其是山东北部低涡附近的降水明显增强,最大降水值由18 km分辨率的50 mm逐渐增强到3 km分辨率时的90 mm,

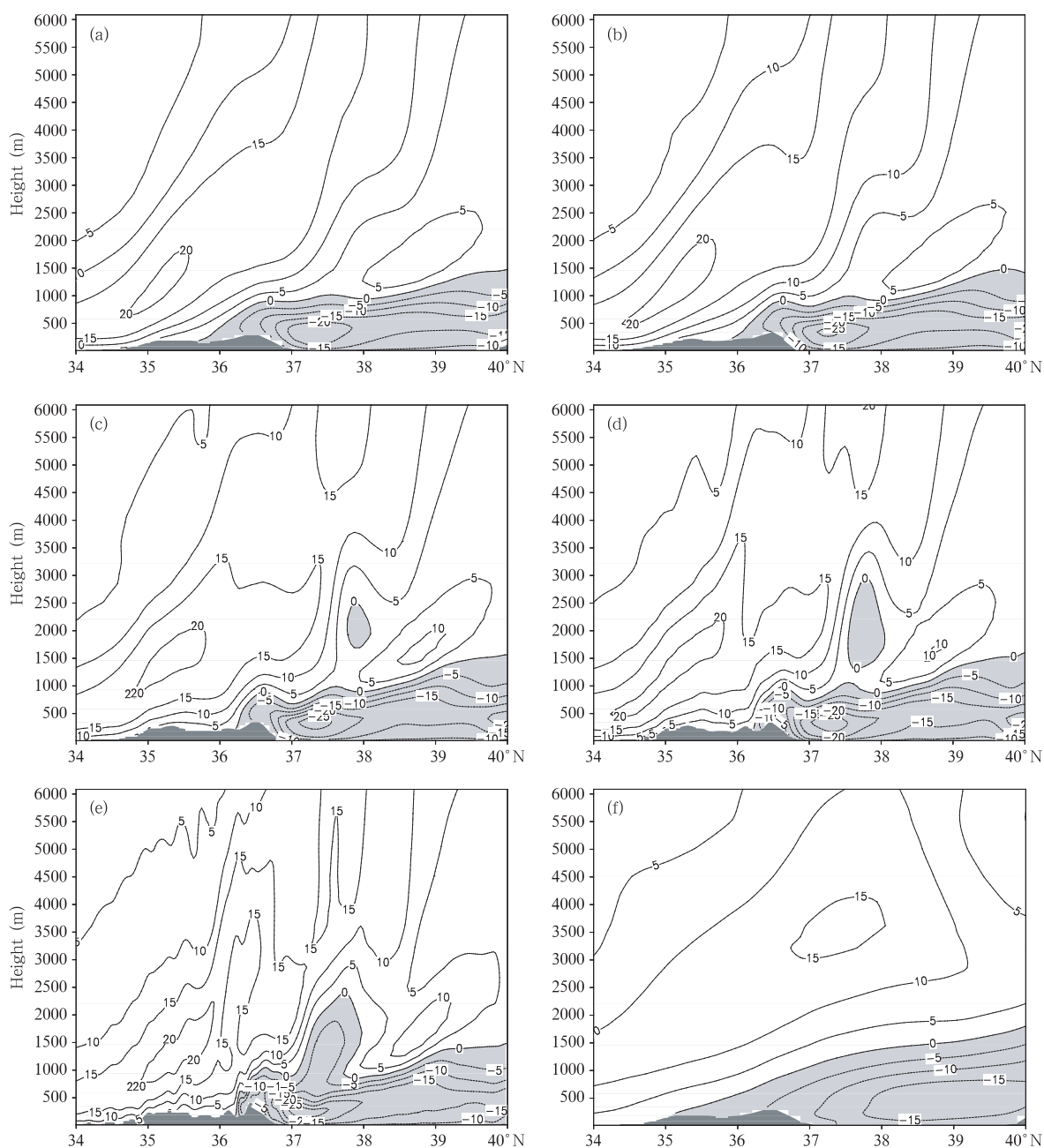


图2 不使用雷达资料同化时模拟的11日14时南风 v 沿 117.5°E 的
经向-高度剖面及NCEP分析资料南风剖面

(a. 18 km, b. 15 km, c. 9 km, d. 6 km, e. 3 km, f. NCEP)

Fig. 2 Latitude-height cross-sections of simulated v (m/s) using different resolutions

(a. 18 km, b. 15 km, c. 9 km, d. 6 km, e. 3 km) without initial radar data assimilation
and NCEP real-time analysis v (f) at 14:00 BST 11 October 2003 along 117.5°E

同时,模拟的其他地区的降水更为细致。实况6 h最大降水为79 mm(图4f),出现在鲁西北地区的庆云站,另一个降水中心位于鲁西南地区黄河入口处,6 h降水量为56 mm,整体来看,随着分辨率的提

高,模式模拟的6 h降水与实况更为接近,但对鲁西南地区黄河山东入口处的降水模拟结果明显偏弱。3 km分辨率模拟的最大降水量达100 mm,看起来似乎较实况79 mm的最大降水偏大,但由于地面测

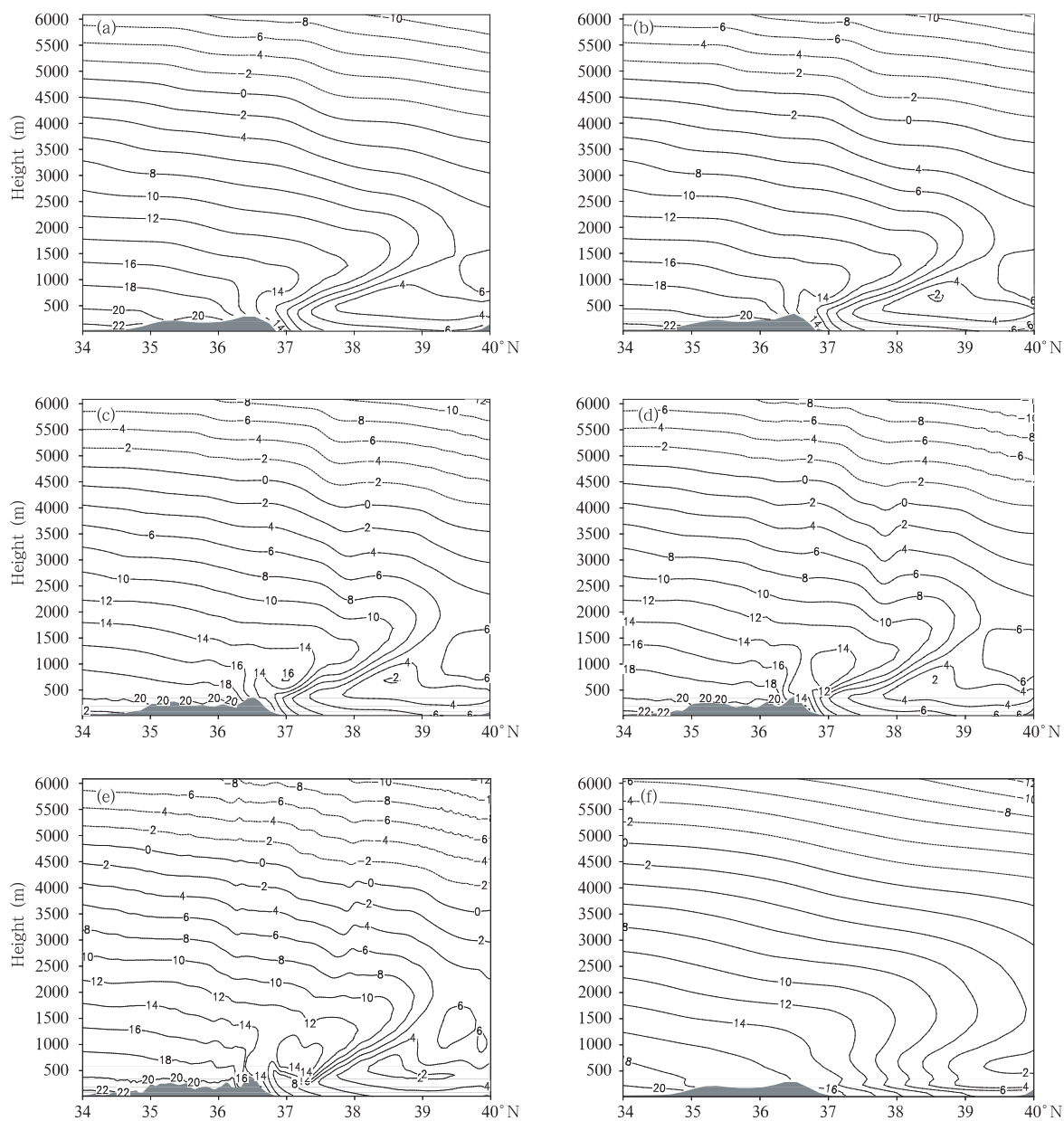


图3 不使用雷达资料同化时模拟的11日14时大气温度沿117.5°E的

经向-高度剖面及NCEP分析资料大气温度剖面

(a. 18 km, b. 15 km, c. 9 km, d. 6 km, e. 3 km, f. NCEP)

Fig. 3 Latitude-height cross-sections of simulated temperature ($^{\circ}\text{C}$) using different resolutions

(a, 18 km; b, 15 km; c, 9 km; d, 6 km; e, 3 km) without initial radar data assimilation and

NCEP real-time analysis temperature (f) at 14:00 BST 11 October 2003 along 117.5°E

站分布不均匀,测站的空间距离较大,在模式模拟的强降水中心附近缺少观测站,无法确定其正确性,为此,我们对模式模拟的6 h降水进行了插值(图略),结果发现,3 km模拟的降水插值到地面测站上的最大站点降水量仅为60 mm,因此,可以认为3 km分辨率并没有模拟出过强的降水。

4 雷达资料同化对短时预报的影响

4.1 雷达资料同化对初始场的改进

以上结果表明,虽然常规观测资料的水平分辨率不高于18 km,但是,在初始场资料不变的情况下,提高模式水平分辨率确实改进了预报效果。而

多普勒雷达反射率资料的径向分辨率达 1 km(这里用的是基数据资料),如此高分辨率的资料同化到模式中后,对模式水平分辨率的敏感性如何,下面将作进一步分析。

图 5(见彩页)首先给出了 11 日 08 时济南齐河多普勒雷达组合反射率图以及经雷达资料同化后模式输出的初始时刻的雷达组合反射率图,可以发现,随着模式水平分辨率的提高,插值到模式网格上的

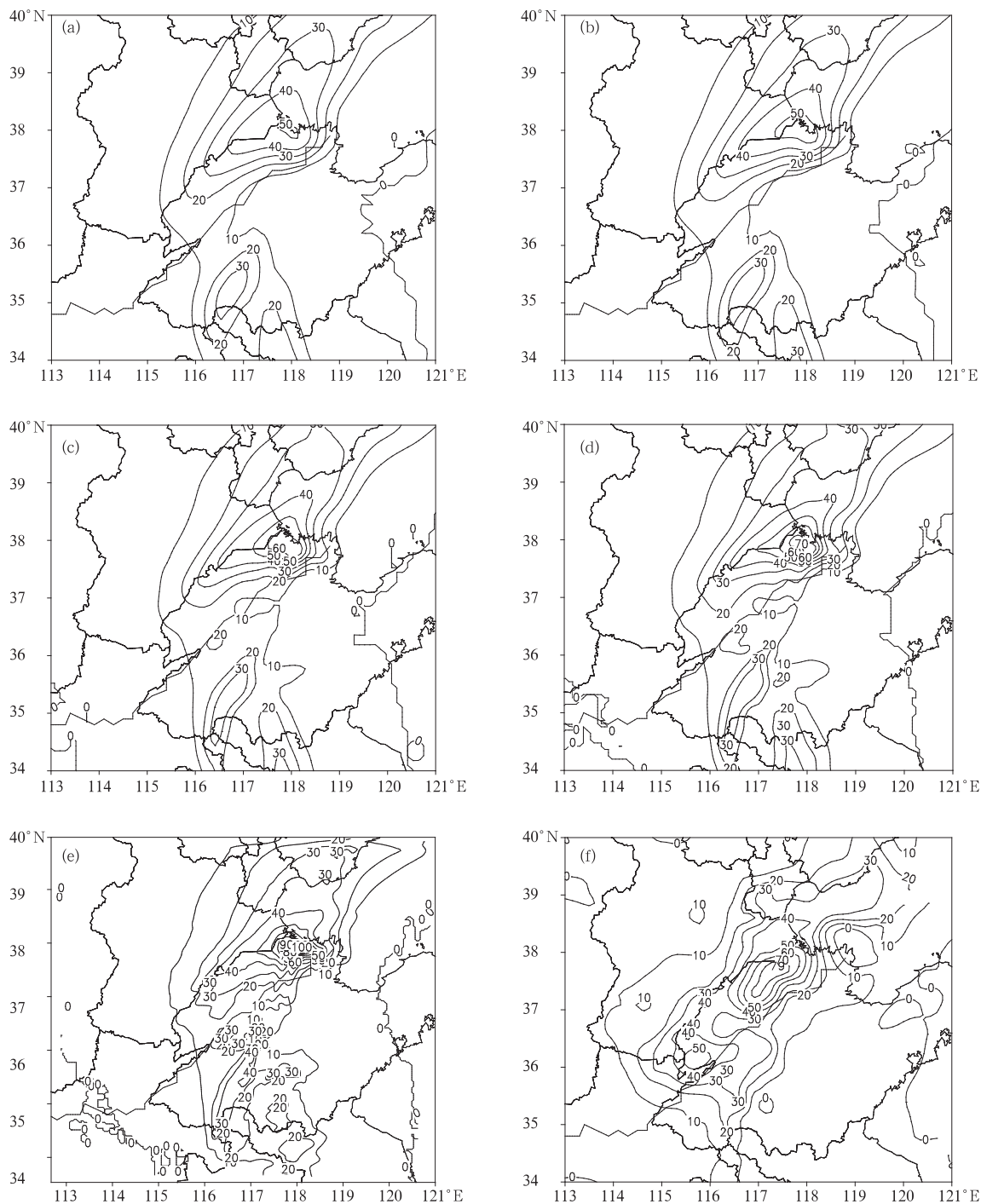


图 4 不使用雷达资料同化时模拟的 11 日 08—14 时 6 h 降水量及实况

(a. 18 km, b. 15 km, c. 9 km, d. 6 km, e. 3 km, f. 实况)

Fig. 4 Simulated 6 h rainfall (mm) without initial radar data assimilation using different resolutions (a. 18 km, b. 15 km, c. 9 km, d. 6 km, e. 3 km) and the corresponding rain gauge observed rainfall (f) from 08:00 to 14:00 BST 11 October 2003

雷达资料更为精确,3 km 分辨率上输出的雷达组合反射率图与实况非常接近。值得指出的是,18—3 km 分辨率上插值的雷达反射率资料最强回波都在山东北部远离雷达站的区域,与雷达观测到的反射率不符,这是由于在远离雷达站的区域,雷达只能探测到较高高度上的回波,而 ADAS 在进行云分析时进行了外推插值的结果。

图 6 给出了使用雷达资料进行云分析前后的云

水混合比 q_c 的分布情况(这里以 4 km 代表云内)。使用雷达资料同化前,模式初始场中的 q_c 是从 NCEP 分析资料中得到的,18—3 km q_c 的分布是不同的,这里只给出 18 km 上 q_c 的分布(图 6a)。使用雷达资料进行云分析后,初始场中的 q_c 明显得到了改进,18—3 km 上(图 6b—f) q_c 都得到了较大的调整,最大中心调整到了山东省内沿黄河一带,正好是锋区附近。此时初始场中 q_c 的分布与雷达反射率

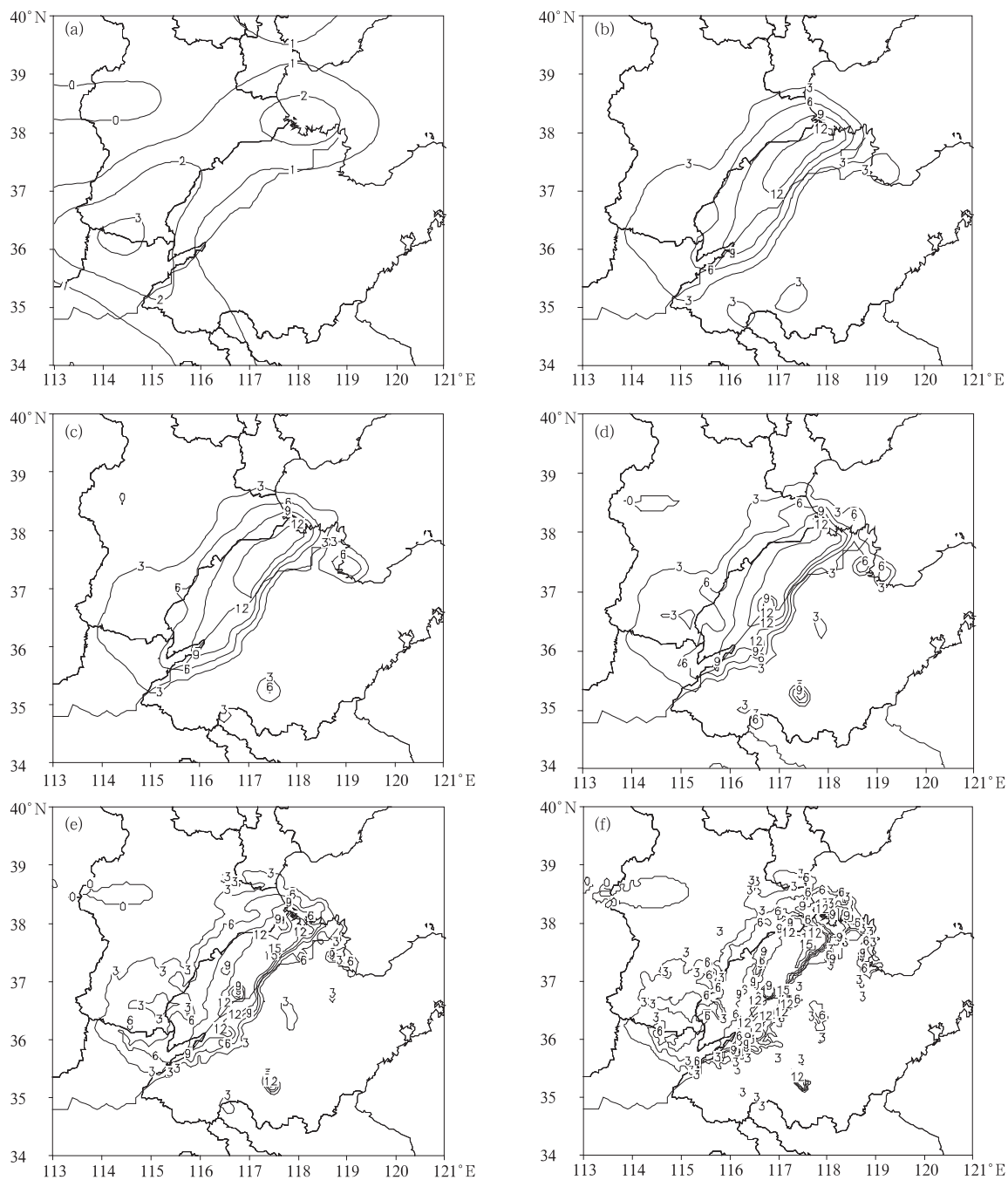


图 6 ADAS 云分析前后 4 km 高度上的 q_c 分布(a. 18 km 云分析前的 q_c , b—f. 分别为 18—3 km 云分析后的 q_c)

Fig. 6 q_c at 4 km height at the 18 km resolution before (a. NCEP reanalysis) and after the ADAS cloud analysis at different resolutions (b. 18 km, c. 15 km, d. 9 km, e. 6 km, f. 3 km)

的分布类似,但随着水平分辨率的提高,云分析后 q_c 的结构越来越细致。

4.2 使用雷达资料同化模拟的环流形势分析

图7为初始场上使用雷达资料同化模拟的11日14时沿117.5°E南风 v 的经向-高度剖面。与图2相比,使用雷达资料进行云分析后,模式模拟的11日14时的南风 v 的经向-高度剖面更为细致。尤其

值得指出的是,模拟的37°N上空近地面层向北倾斜的北风带更加清楚。不使用雷达资料同化时,模式分辨率需达到9 km以下才能模拟出这一倾斜下沉气流,而使用雷达资料同化后,18 km分辨率即可模拟出此下沉支,且模拟的此下沉气流较不使用雷达资料同化的更强一些。

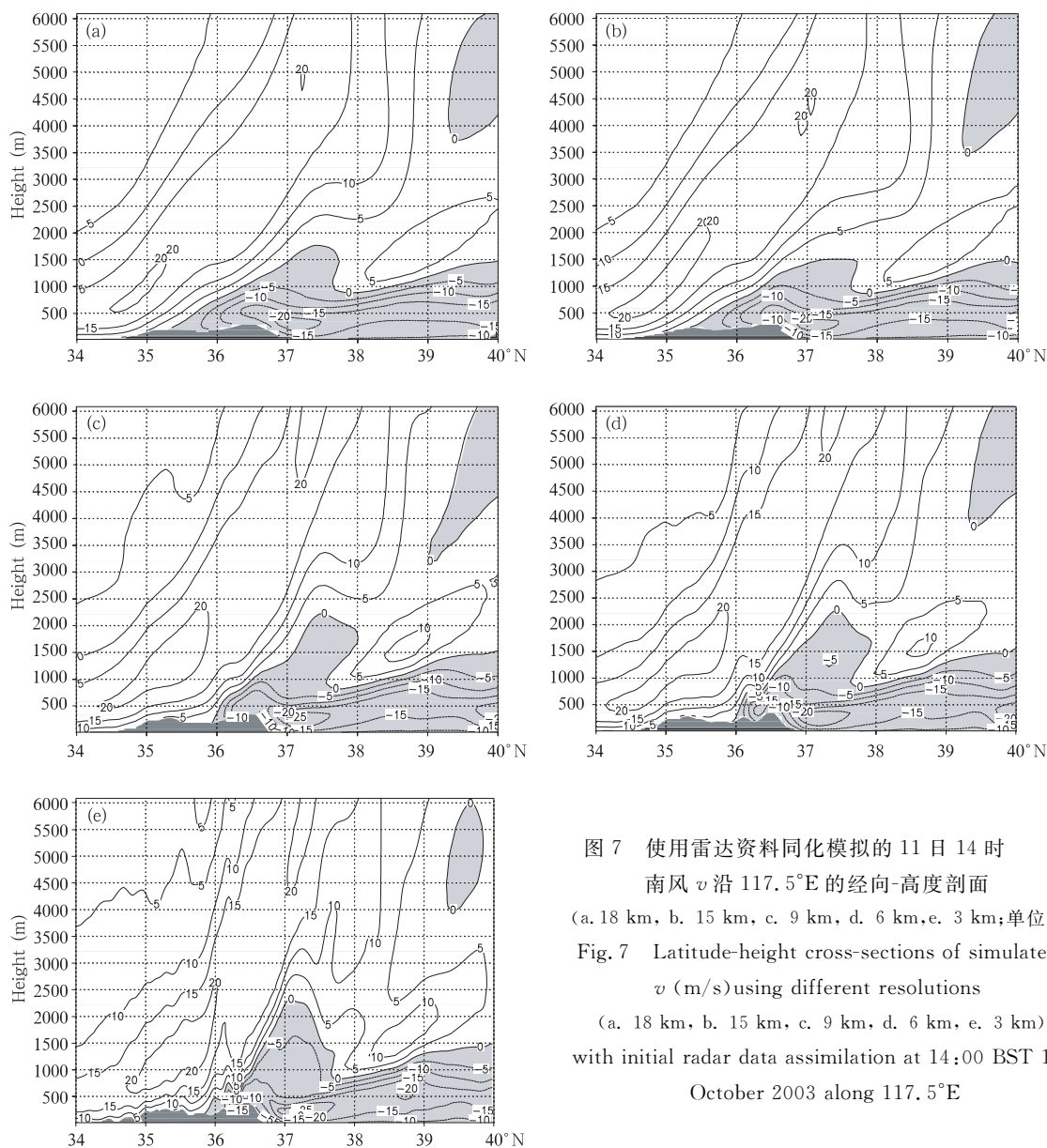


图7 使用雷达资料同化模拟的11日14时
南风 v 沿117.5°E的经向-高度剖面
(a. 18 km, b. 15 km, c. 9 km, d. 6 km, e. 3 km; 单位: m/s)
Fig. 7 Latitude-height cross-sections of simulated
 v (m/s) using different resolutions
(a. 18 km, b. 15 km, c. 9 km, d. 6 km, e. 3 km)
with initial radar data assimilation at 14:00 BST 11
October 2003 along 117.5°E

图8为初始场上使用雷达资料同化后模拟的11日14时沿117.5°E的气温经向-高度剖面。与图3相比,使用雷达资料同化后模拟的大气温度场与不使用雷达资料同化的也非常相似,但对近地面层37°N上空的闭合暖中心模拟得更清楚,即不使用

雷达资料同化时,模式需要达9 km以下的分辨率才能模拟出来此闭合暖空气堆,而同化雷达资料后,18 km即可清楚地模拟出此闭合的暖中心。因此,同化雷达资料后模拟的锋面结构较不使用雷达资料的更为细致。

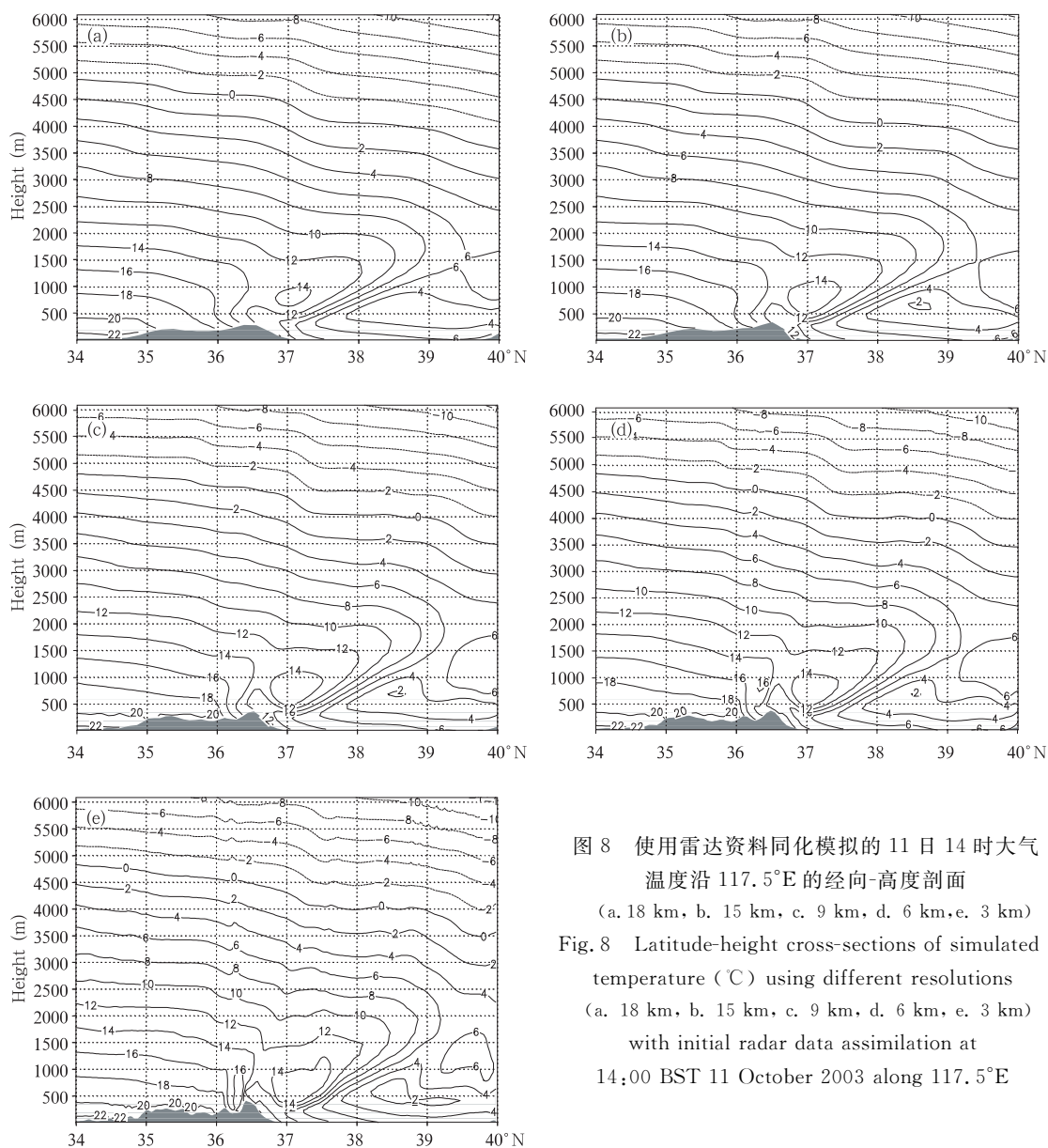


图8 使用雷达资料同化模拟的 11 日 14 时大气温度沿 117.5°E 的经向-高度剖面

(a. 18 km, b. 15 km, c. 9 km, d. 6 km, e. 3 km)

Fig. 8 Latitude-height cross-sections of simulated temperature ($^{\circ}\text{C}$) using different resolutions

(a. 18 km, b. 15 km, c. 9 km, d. 6 km, e. 3 km)

with initial radar data assimilation at

14:00 BST 11 October 2003 along 117.5°E

4.3 模拟的 6 h 降水结果对比分析

图 9 给出了初始场中使用雷达资料同化后模拟的 6 h 降水量,可以发现,模拟的降水量均较不使用雷达资料同化的有明显改进,这种改进不仅表现在降水强度上,还表现在降水落区上,即不使用雷达资料同化时模拟的山东西北部的降水走向为东东北—西西南(图 4),而使用雷达资料同化后模拟的降水走向变为东北-西南向,模拟的强降水中心增强了,18 km 上使用雷达资料同化后模拟的 6 h 最大降水量达 70 mm 以上,与 6 km 不使用雷达资料同化模

拟的最大降水量相当,模拟的鲁西南地区的降水也增强了,因此,降水落区更接近实况。随着模式水平分辨率的提高,模拟的最大降水量由 70 mm 增加到了 120 mm。这里 3 km 分辨率模拟的 6 h 最大降水量达 120 mm,似乎较实况明显偏强。同样,我们分析了模式输出的降水插值到站点后的结果发现,3 km 分辨率模拟的最大站点降水为 81 mm,与实况最大降水量 79 mm 较接近。因此,雷达资料同化明显改进了短时降水预报,这种改进比在常规资料下单纯提高模式分辨率更为有效。

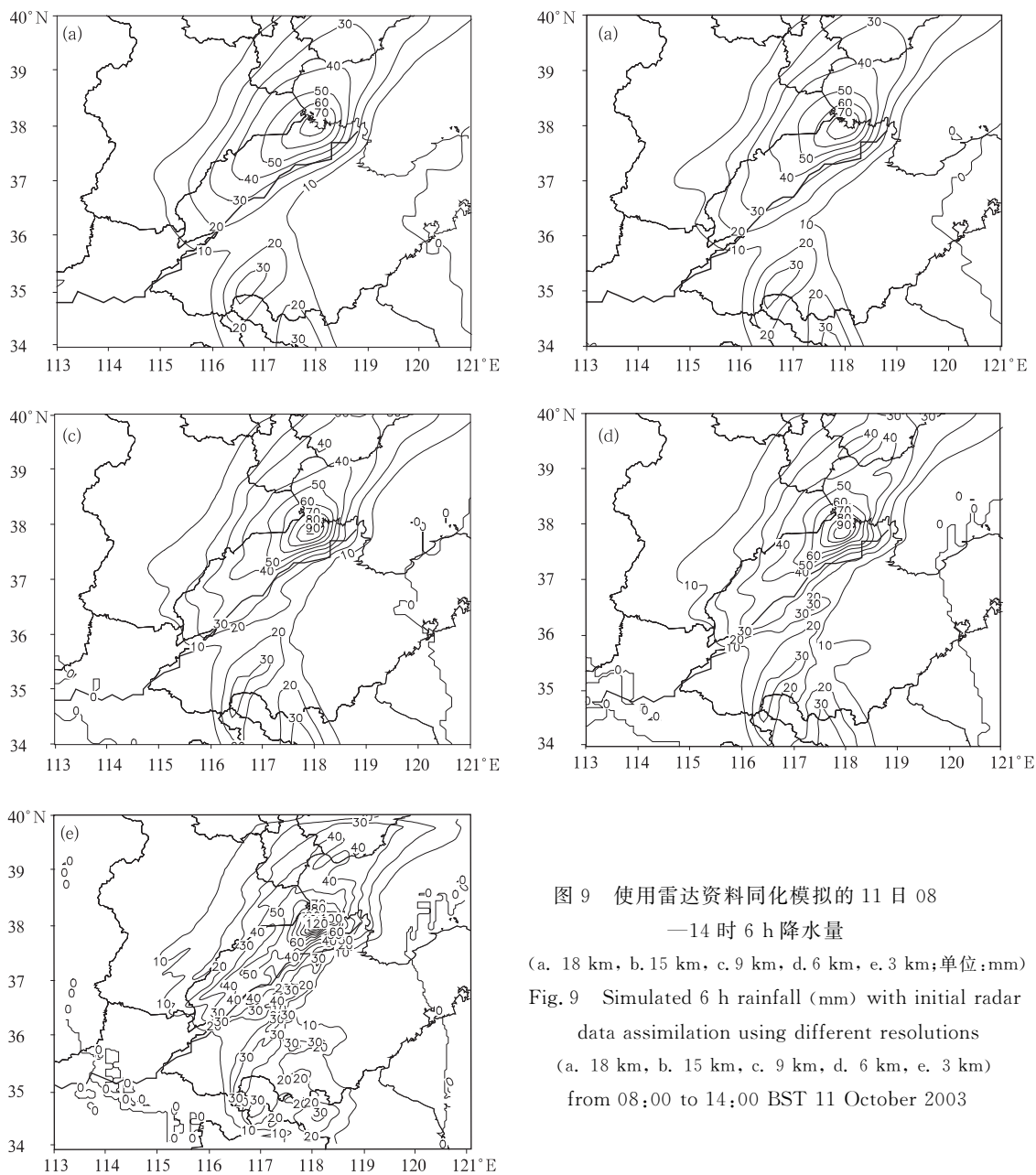


图9 使用雷达资料同化模拟的11日08—14时6 h降水量

(a. 18 km, b. 15 km, c. 9 km, d. 6 km, e. 3 km; 单位:mm)
Fig. 9 Simulated 6 h rainfall (mm) with initial radar data assimilation using different resolutions (a. 18 km, b. 15 km, c. 9 km, d. 6 km, e. 3 km) from 08:00 to 14:00 BST 11 October 2003

5 不同分辨率模拟的6 h降水评分

5.1 TS评分检验

考虑到降水主要出现在山东省,本文利用山东省地面123个站观测的降水资料,对模式模拟的降水进行了TS评分,评分时首先将模式预报的降水插值到地面观测站,然后分别按照小雨(0.1—9.9 mm)、中雨(10—24.9 mm)、大雨(25—49.9 mm)和暴雨(50 mm以上)四个等级进行。

图10给出了18—3 km分辨率模拟的6 h降水的TS评分,可以发现,不使用雷达资料同化时(图

10a),模式模拟的小雨TS评分非常高,18—3 km小雨TS评分都超过92分,且不同的水平分辨率对小雨的TS评分结果相当。但对于中雨以上的降水,随着模式分辨率的提高,TS评分逐渐提高。尤其是暴雨预报,18—9 km的暴雨TS评分均为0,而当分辨率提高到6 km时,才能够模拟出50 mm以上的强降水。使用雷达资料同化后(图10b),18—3 km分辨率模拟的小雨TS评分依然维持相当高的评分,但较不使用雷达资料同化的TS评分略有增加(15 km的TS评分几乎不变),对中雨以上的降水,使用雷达资料同化后的TS评分有明显提高,随着

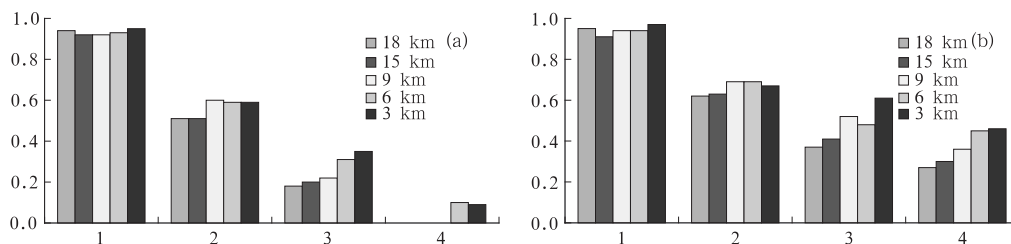


图 10 18—3 km 分辨率模拟的 6 h 降水的 TS 评分

(横坐标分别为: 1-小雨, 2-中雨, 3-大雨, 4-暴雨 (a) 不使用雷达资料 (b) 使用雷达资料)

Fig. 10 TS scores of simulated 6 h rainfalls without (a)/with (b) initial radar data assimilation using different resolutions (18, 15, 9, 6, and 3 km) from 08:00 to 14:00 BST 11 October 2003
(Abscissa: 1-light rain, 2-moderate rain, 3-heavy rain, 4-torrential rain)

降水强度的增强,使用雷达资料同化模拟的降水提高得更加明显,对于暴雨预报,18—3 km TS 评分都超过 27,较不使用雷达资料同化的有明显改进。

5.2 B 评分和 ETS 评分检验

为了更好地评价各种不同方案模拟的降水预报情况,本文分别对以上各种模拟试验的结果进行了倾向性评分(Bias score,简称 B 评分)和 ETS 评分(equitable threat score)^[21]检验。B 评分可以表示为:

$$B = \frac{F}{O}, \text{ 其中 } F \text{ 为预报达到和超过某一临界值的}$$

的站数, O 为实况达到和超过某一临界值的站数。B 评分能够反映出预报站数和实况降水站数之间的比例关系,最理想的 B 评分应为 1,当 B 大于 1 时表示预报偏多, B 小于 1 时表示预报偏少。

ETS 评分定义为:

$$T = \frac{C - D}{F + O - C - D}, \text{ 这里 } D = \frac{F \cdot O}{N}$$

C 是预报和实况均大于等于临界值的站数, D 表示能够随机得到的正确预报数, F 和 O 与 B 评分中定义的相同, N 是评分区域内的站点数。ETS 评分与 TS 评分的最大区别是, TS 评分只考虑了出现降水的站,因此, TS 评分的结果与降水出现的频率有直接关系,而 ETS 评分不仅考虑了评分区域内出现降水的站,还考虑了未出现降水的站,因此, ETS 评分更能客观地评价降水预报。

图 11 给出了 18—3 km 分辨率模拟的 6 h 降水的 B 评分和 ETS 评分。可以发现,不使用雷达资料同化时(图 11a, b),对于 10 mm 以下的降水,18—3 km 模拟的降水 B 评分几乎为 1, ETS 评分也相当高,表明对于小雨的预报非常好。随着降水强度的增加,评分逐渐下降, B 评分的降低表明,对于强降

水的预报漏报得偏多。同时,随着分辨率的提高,模式模拟的 6 h 降水的 B 评分和 ETS 评分也是逐渐提高的,但当分辨率由 6 km 提高到 3 km 时,对于 40 mm 以上的强降水评分, 3 km 预报的 ETS 评分并不比 6 km 的高。而使用雷达资料同化后(图 11c, d), 18—3 km 模拟的降水 B 评分和 ETS 评分都得到明显改进,对于 40 mm 以下的一般性降水, 18—3 km 分辨率的模拟结果差别已不大,而对于 40 mm 以上的强降水的评分,依然是高分率模拟的降水评分高。

为了进一步分析雷达资料同化对降水的改进效果与提高模式分辨率之间的关系,图 12 分别将 3 km(图 12a)、6 km(图 12b)不加雷达资料模拟的降水 ETS 评分与其他较低分辨率上使用雷达资料同化模拟的降水 ETS 评分绘制在一起,从图中可以清楚地看出,不论是小雨还是暴雨, 18—3 km 分辨率只要初始场使用雷达资料同化,模拟的 6 h 降水的 ETS 评分均高于 3, 6 km 上不使用雷达资料同化模拟的结果。由此可见,使用高分率的雷达资料同化改进初始场,对于提高降水短时预报效果非常明显,比单纯提高模式水平分辨率更为有效。

值得指出的是,即使使用雷达资料同化,当分辨率由 6 km 提高到 3 km 时,降水预报评分结果并无明显改进,这一方面可能是由于本文选取的个例是大范围降水过程,另一方面,正如 Brooks 等^[21]指出的,提高模式水平分辨率,一定程度上能提高天气系统的中小尺度信息特征,但由于提高分辨率时造成模拟结果在位相和时间上的偏差,可能反而降低了预报评分。

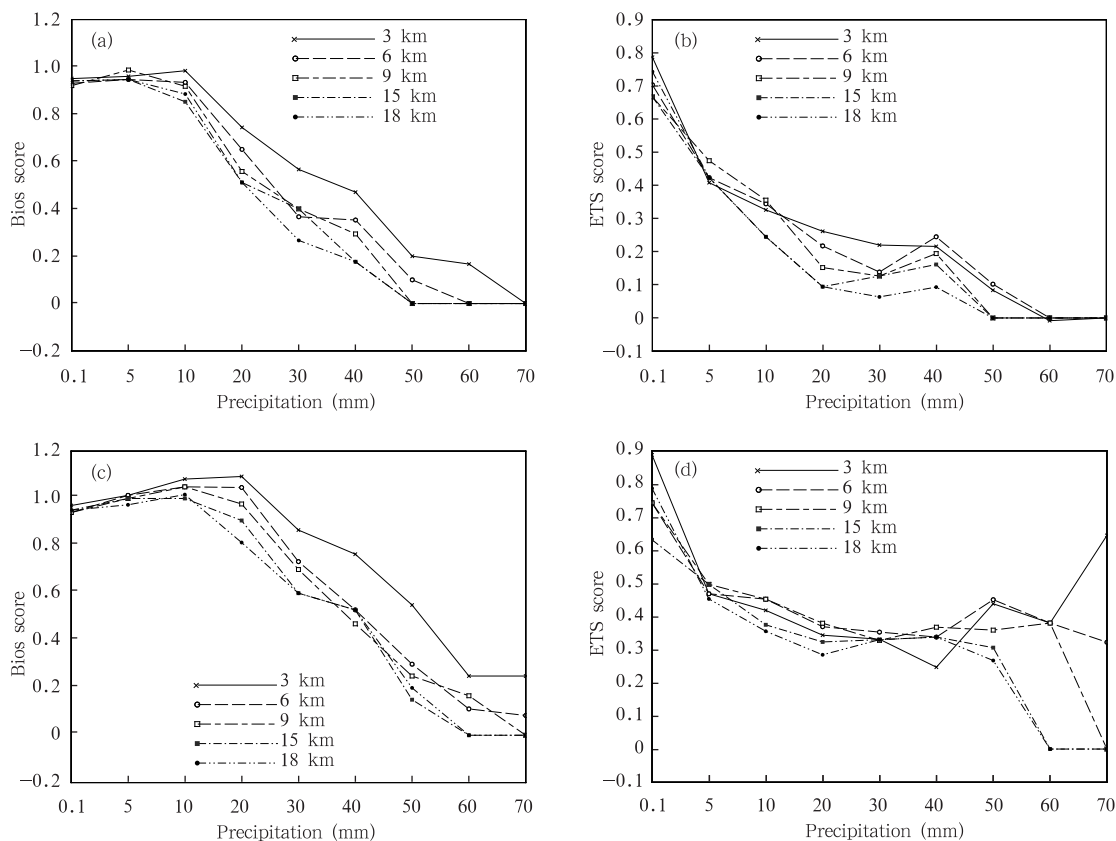


图 11 18—3 km 模拟的 6 h 降水的 B(a,c)和 ETS(b,d)评分

(a, b. 不使用雷达资料同化; c, d. 使用雷达资料同化)

Fig. 11 Bias scores (a, c) and ETS scores (b, d) for simulated 6 h rainfalls without (a, b)/with (c, d) initial radar data assimilation using different resolutions (18, 15, 9, 6, and 3 km) from 08:00 to 14:00 BST 11 October 2003

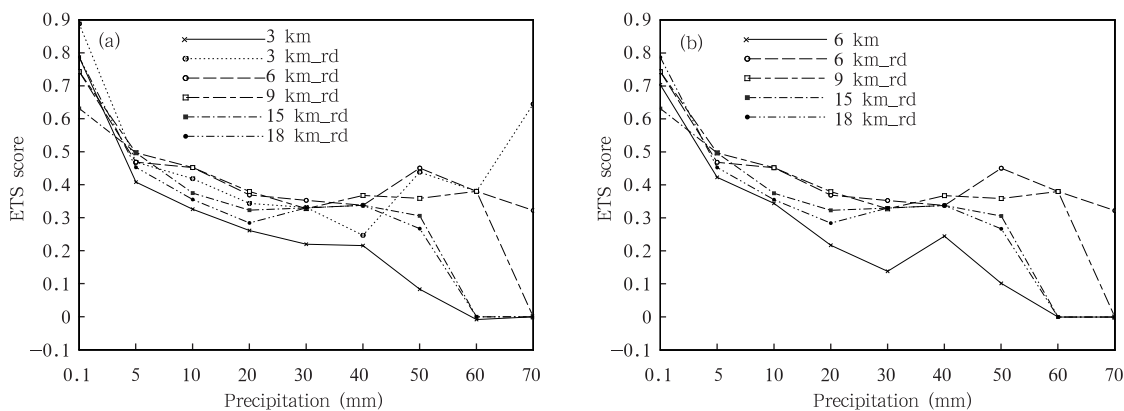
图 12 3 km(a)、6 km(b)不加雷达资料模拟的 6 h 降水与较低分辨率使用
雷达资料同化模拟的 6 h 降水 ETS 评分比较

Fig. 12 ETS score comparison of simulated 6 h rainfalls without initial radar data assimilation using 3 and 6 km resolutions and with initial radar data assimilation using lower resolutions from 08:00 to 14:00 BST 11 October 2003

6 小 结

本文通过一次华北暴雨过程的数值模拟,对比

分析了不同模式水平分辨率对 6 h 内短时预报的影响,并与使用雷达资料同化的模拟结果进行了对比分析,可以得出以下结论:

(1) 在常规观测资料的情况下,通过提高模式水平分辨率,可以改进 6 h 内的短时预报,模拟的锋面结构更为细致,降水尤其是强降水预报评分提高。

(2) 使用雷达资料进行云分析改进初始场,能够通过增加初始场中的云降水信息和非绝热初始化减少模式的 spin-up 时间,明显改进模式 6 h 内的短时预报尤其是强降水强度和落区预报。从本文结果看,18 km 分辨率上的降水预报较 3 km 不使用雷达资料同化的更接近实况。因此,利用高分辨率的雷达资料改进模式初始场,比单纯提高模式分辨率更为有效,是改进模式预报的一个重要手段。

(3) 不同水平分辨率上进行雷达资料同化的模拟结果表明,对于 40 mm 以下的一般性降水,使用雷达资料同化后,18—3 km 的模拟结果差别不大,而对于强降水的预报,依然需要提高模式的分辨率。但无论初始场上是否使用雷达资料同化,当分辨率从 6 km 提高到 3 km 时,模拟结果改进不大,因此,提高模式水平分辨率有一定的限度,而在适当提高模式分辨率的同时使用雷达资料同化改进模式初始场,则是提高模式短时预报的一个非常有效的途径。

(4) 本文只是一次华北暴雨个例对比试验的结果,其结论尚有一定的局限性。

致谢:澳大利亚气象局培训中心的 Yuelong Miao 博士对本文的修改给予了有益的建议和帮助,在此表示感谢。

参考文献

- [1] Chien F C, Mass C F, Neiman P J. An observational and numerical study of an intense landfalling front along the north-west coast of the U. S. during COAST IOP2. *Mon Wea Rev*, 2001, 129: 934-955
- [2] 程麟生,冯伍虎. “98. 7”暴雨 β 中尺度低涡生成发展结构演变: 双向四重嵌套网格模拟. *气象学报*, 2003, 61(4): 385-395
Cheng Linsheng, Feng Wuhu. Structural evolution of the genesis and development of meso- β vortex for the “98. 7” heavy rainfall: simulation of two-ways with quartet nested grid. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2003, 61(4): 385-395
- [3] Bernadet L R, Grasso L D, Nachamkin J E, et al. Simulating convective events using a high-resolution mesoscale model. *J Geophys Res*, 2000, 105: 14963-14982
- [4] Colle B A, Mass C F. Windstorms along the western side of the Washington Cascade Mountains. Part I: A high-resolution observational and modeling study of the 12 February 1995 event. *Mon Wea Rev*, 1998, 126: 28-52
- [5] Colle B A, Mass C F. The 5-9 February 1996 flooding event over the Pacific Northwest: Sensitivity studies and evaluation of the MM5 precipitation forecasts. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 593-617
- [6] Zhang F, Snyder C, Rotunno R. Predictability of the 24-25 January 2000 snowstorm with respect to grid resolution and initial state. Preprints. Tenth PSU/NCAR Mesoscale Model Users Workshop, Boulder, CO, PSU/NCAR, 2000. 50-53
- [7] 王春明,王元,伍荣生. 模式水平分辨率对梅雨锋降水定量预报的影响. *水动力学研究与进展*, 2004, 19(1): 71-80
Wang Chunming, Wang Yuan, Wu Rongsheng. The effect of model horizontal resolution on quantitative precipitation forecast for Meiyu front torrential rainfall. *J Hydrodynamics (in Chinese)*, 2004, 19(1): 71-80
- [8] Chow F K, Weigel A P, Street R L, et al. High-resolution large-eddy simulations of flow in a steep Alpine valley. Part I: Methodology, verification and sensitivity experiments. *J Appl Meteor*, 2005, accepted.
- [9] 廖润贤. 大气数值模式的设计. 北京: 气象出版社, 1999. 291pp
Liao Dongxian. Design of Atmospheric Numerical Model. Beijing: China Meteorological Press, 1999. 291pp
- [10] 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(2): 244-249
Qiu Chongjian, Yu Jinxiang, Xu Qin. Use of Doppler radar data in improving short-term prediction of mesoscale weather. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2000, 58(2): 244-249
- [11] 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 field using radar data. *J Nanjing Institute of Meteor (in Chinese)*, 2003, 26(5): 661-667
- [12] 盛春岩,浦一芬,高守亭. 多普勒天气雷达资料对中尺度模式短时预报的影响. *大气科学*, 2006, 30(1): 93-107
Sheng Chunyan, Pu Yifen, Gao Shouting. The effect of Chinese Doppler radar data on nowcasting of mesoscale model. *Chinese J Atmos Sci (in Chinese)*, 2006, 30(1): 93-107
- [13] Sheng C Y, Gao S T, Xue M. Short-range prediction of a heavy precipitation event by assimilating Chinese CINRAD-SA radar reflectivity data using complex cloud analysis. *Meteor Atmos Phy*, under review
- [14] 李柏. 多普勒天气雷达资料分析及同化在暴雨中尺度天气系统数值模拟中的应用: [博士学位论文]. 中国气象科学研究院与南京信息工程大学联招, 2005. 155pp
Li Bai. Application research of Doppler weather radar data analysis and assimilation in mesoscale synoptic system numerical simulation: [Ph. D. Dissertation]. Chinese Academy of Meteorological Sciences and Nanjing University of Information Science and Technology, 2005. 155pp
- [15] Xue M, Droegemeier K K, Wong V, et al. ARPS Version 4.0 User's Guide, Center for Analysis and Prediction of

- Storms, University of Oklahoma, 1995. 380pp
- [16] Smith P L, Jr Myers C G, Orville H D. Radar reflectivity factor calculations in numerical cloud models using bulk parameterization of precipitation process. *J Appl Meteor*, 1975, 14: 1156-1165
- [17] Zhang J, Carr F, Brewster K. ADAS cloud analysis. Preprints, 12th Conf Num Wea Pred Phoenix, AZ, Amer Meteor Soc, 1998. 185-188
- [18] Zhang J. Moisture and Diabatic Initialization based on Radar and Satellite Observations:[Ph. D. Dissertation]. University of Oklahoma, 1999. 194pp
- [19] Brewster K. Recent advances in the diabatic initialization of a non-hydrostatic numerical model. Preprints, 15th Conf Num Wea Pred, San Antonio, TX, Amer Meteor Soc, 2002. J6.3
- [20] 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: Cloud analysis and its impact. *Mon Wea Rev*, Accepted
- [21] Schaefer J T. The critical success index as an indicator of warning skill. *Wea Forecasting*, 1990, 5: 570-575
- [22] Brooks H E, Maddox R A. On the use of mesoscale and cloud-scale models in operational forecasting. *Wea Forecasting*, 1992, 7: 120-132

COMPARATIVE EXPERIMENTS BETWEEN EFFECTS OF DOPPLER RADAR DATA ASSIMILATION AND INCEASING HORIZONTAL RESOLUTION ON SHORT-RANGE PREDICTION

Sheng Chunyan^{1,2,3} Xue Deqiang² Lei Ting¹ Gao Shouting¹

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

² *Meteorological Center of Shandong Province, Jinan 250031*

³ *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract

To examine effects of radar data assimilation and increasing horizontal resolution on the short-range numerical weather prediction of precipitation, comparative numerical experiments are conducted for a Hua-bei torrential rainfall event using the Advanced Regional Prediction System (ARPS) and its Data Analysis System (ADAS). The experiments differ in five different horizontal grid-spacings of 18, 15, 9, 6 and 3 km and two initial fields with/without initial radar data assimilation. Results show that, when the radar data are not used in the initial fields (i. e. , using the conventional observation data only), increasing horizontal resolution can improve the short-range prediction within six hours with better representation of the frontal structure and higher scores of rainfall prediction, especially heavy rain prediction. The initial radar data assimilation is able to significantly improve the precipitation location and intensity prediction within the first six hours such that the 6 h precipitation prediction of the ARPS at 18 km resolution with initial radar data assimilation is better than that of the APRS at 3 km resolution without initial radar data assimilation. This suggests that the radar data assimilation is more effective in improving the short-range precipitation prediction than increasing the horizontal resolution alone. Under the condition of initial radar data assimilation, experimental results of different resolutions show that differences of prediction results among among different resolution schemes are not evident for ordinary precipitation (≤ 40 mm/(6 h)), but prediction of higher resolution experiment scheme for extraordinary precipitation (> 40 mm/(6 h)) is better than other schemes. However, when the resolution increases from 6 km to 3 km, there is no evident improvement in precipitation prediction whether the initial radar data assimilation is performed or not. Therefore, the effect of increasing resolution is limited, and combining an adequate higher resolution with the initial radar data assimilation might be an effective way to improve the short-range prediction of precipitation.

Key words: Radar data assimilation, Increasing horizontal resolution, Comparative experiments, Short-range prediction.

盛春岩等：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

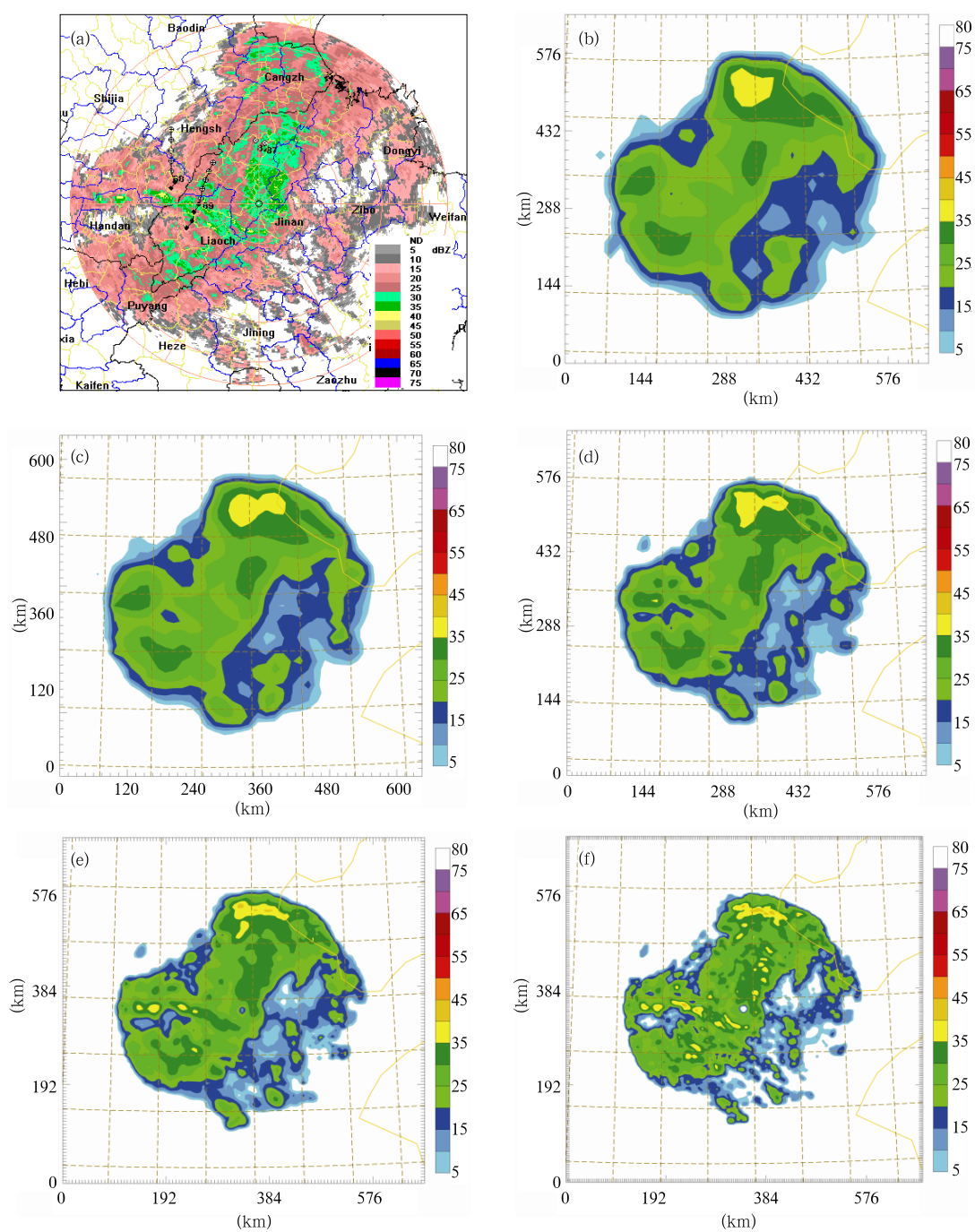


图5 11日08时济南齐河18-3 km分辨率上初始时刻模式输出的多普勒雷达组合反射率图

(a. 实况, b. 18 km, c. 15 km, d. 9 km, e. 6 km, f. 3 km)

Fig.5 Radar composite reflectivity images observed by Jinan Qihe Doppler radar (a) and output from model initial fields at different resolutions (b. 18 km, c. 15 km, d. 9 km, e. 6 km, f. 3 km) at 08:00 BST 11 October 2003