

徐道生, 邵爱梅, 邱崇践. 2011. SVD-En3DVar 方法同化多普勒雷达速度观测资料 II. 实际资料试验 [J]. 大气科学, 35 (5): 818–832. Xu Daosheng, Shao Aimei, Qiu Chongjian. 2011. Assimilation of Doppler radar velocity observations with SVD-En3DVar method. Part II: Real data experiments [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (5): 818–832.

SVD-En3DVar 方法同化多普勒雷达速度观测资料 II. 实际资料试验

徐道生 邵爱梅 邱崇践

半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

摘 要 文章的第 I 部分 (徐道生等, 2011) 将基于 SVD (singular value decomposition) 技术和预报集合的三维变分同化方法 (SVD-En3DVar) 用于同化模拟的雷达速度观测资料, 试验表明, 通过 3DVar (three-dimensional variational technique) 方法产生预报集合的初始扰动场, 可以缩短 SVD-En3DVar 中预报样本的积分时间, 同化对改进暴雨的短期预报有一定好处。本文进一步将这一方法用于同化实际观测资料。选择 2008 年 6 月华南地区和 2003 年 7 月江淮地区的两个暴雨个例进行同化试验, 并将其与 WRF-3DVar (3DVar based on the weather research forecasting model) 的同化结果进行比较。结果表明, 同化雷达径向风资料以后, 在模式初始场中包含了更多的小尺度信息。对于使用了 13 部雷达资料的第一个个例, 经 SVD-En3DVar 同化以后对 18 小时内每 6 小时一次的累计降水预报都有所改进, 而 WRF-3DVar 的同化效果则不明显。对于只同化 1 部雷达观测资料的第二个个例, WRF-3DVar 和 SVD-En3DVar 方法同化以后对前 6 小时的降水预报都有所改进, 但对于第 6~18 小时的降水预报, 两种方法都没有改进。

关键词 Doppler 雷达 集合同化 3DVar SVD

文章编号 1006-9895 (2011) 05-0818-15

中图分类号 P413

文献标识码 A

Assimilation of Doppler Radar Velocity Observations with SVD-En3DVar Method. Part II: Real Data Experiments

XU Daosheng, SHAO Aimei, and QIU Chongjian

Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

Abstract In part I of this study (Xu et al., 2011), The ensemble-based 3DVar (three-dimensional variational technique) method with SVD (singular value decomposition) technique (SVD-En3DVar) is used for assimilation of the simulated radar velocity data and the results demonstrate that using the initial perturbation samples produced with 3DVar method in SVD-En3DVar can shorten the time interval of assimilation cycle and improve the short-term forecast of precipitation. In the current study the feasibility of using SVD-En3DVar for assimilating radar velocity observations is tested with the real observational data. Two torrential rain cases (June 2008 in South China and July 2003 in the Changjiang-Huaihe region) are chosen for the test and the 18-hour forecast of rainfall is compared with that by WRF-3DVar (3DVar based on the weather research forecasting model) assimilation. For the first case (2008)

the observational data from 13 radars are assimilated and the forecast of rainfall within 18 hours is improved after assimilation with SVD-En3DVar, but the improvement is not evident with WRF-3DVar assimilation. For the second case (2003), only single-radar observations are used and the forecast of rainfall is improved in the first 6 hours after assimilation with SVD-En3DVar, however the forecasts are not improved by using either SVD-En3DVar or WRF-3DVar in the subsequent 12 hours.

Key words Doppler radar, ensemble assimilation, 3DVAR, SVD

1 引言

在这项研究的第 I 部分, 我们进行了用 SVD-En3DVar 方法(基于 SVD 技术和预报集合的三维变分同化方法)同化模拟的雷达径向速度观测的试验。在该项研究中, 我们提出采用 WRF-3DVar (three-dimensional variational technique based on the weather research forecasting model) 系统来生成建立预报集合所需要的初始扰动场, 具体做法是只给出温度和比湿的随机扰动场, 将它们作为观测, 通过 3DVar (three dimensional variational technique) 同化得到其它变量(风和气压)的扰动场。试验表明, 这样得到的初始扰动场各个变量间比较协调, 可以减少模式积分的调整时间, 缩短同化循环的时间间隔, 从试验结果看, 通过同化对降水的短期预报有一定改进。

在理想资料的试验中, 模式误差并没有被考虑, 而在实际情况下, 模式误差对同化的影响是不可忽视的(Lu Chungu and Browning, 1998; Snyder and Zhang, 2003; 王铁等, 2006; 兰伟仁等, 2010a, 2010b)。另外, 实际的背景场误差结构和我们在理想试验中给出的误差结构也可能不相同。在理想试验中虽然我们设定的有效观测的位置是和实际雷达观测一致的, 但是所给的观测误差是随机的和相互独立的, 这些也可能和实际不符。试验同时使用了 10 部雷达观测资料, 如果只采用一部雷达的观测资料是否同化仍然有效也还需要检验。因此还有必要根据实际的雷达观测资料来检验 SVD-En3DVar 的同化效果。

本文选取两次暴雨过程进行同化试验。一次是 2008 年 6 月发生在华南地区的前汛期降水, 同化了分布在我国华南地区的 13 部雷达观测资料。对于这次降水过程彭新东等(2010)用 GRAPES 模式及其 3DVAR 系统进行了同化雷达径向风和探空资料的试验, 结果表明模式较好的模拟能力。另一次

是 2003 年 7 月发生在江淮地区的梅雨锋暴雨, 只同化合肥一个雷达站的径向速度观测。对于这次降水过程过去已经有不少研究。杨毅和邱崇践(2006)利用由多普勒雷达资料反演得到的风场对该次暴雨过程进行了分析。杨毅等(2007)利用 WRF-3DVar 对反演风场和径向风资料进行同化以后对比发现, 同化反演风场的效果较好。李柏等(2007)采用 MM5-4DVar 技术同化了包括雷达反演资料在内的多种观测资料, 使得模拟结果得到改进。徐广阔等(2009)利用雷达资料和 ARPS (advanced regional prediction system) 的资料分析系统(ADAS) (ARPS data analysis system) 对初始场进行调整, 然后利用 WRF 模式对这次暴雨过程进行数值模拟, 结果发现加入雷达资料后有利于改进模拟的效果。针对这两个个例, 本文进一步采用 SVD-En3DVar 进行同化雷达速度观测资料的试验。基于我们先前的研究结果(徐道生等, 2011), 同化时采用 WRF-3DVar 系统来生成初始扰动场, 样本积分时间设定为 1 小时, 利用连续同化三次后得到的分析场作为预报的初始场, 比较同化前后 18 小时内的降水预报。为了检验 SVD-En3DVar 方法的同化效果, 我们在同样的环境下也利用目前广泛使用的 WRF-3DVar 系统进行了同化试验, 将二者的所得结果进行比较。

2 SVD-En3DVar 和 3DVar 同化方法

2.1 WRF-3DVar 同化方案

本文采用的 3DVar 系统为 wrfvar_v2.2beta 系统, 它的控制变量包括流函数(ψ')、非平衡速度势(χ'_u)、非平衡温度(T'_u)、相对湿度(r')以及非平衡地面气压(p'_{su})。质量场和风场增量之间的平衡是通过旋转风平衡实现。采用的背景误差协方差矩阵是用 NMC (the National Meteorological Center, USA) 方法(Parish and Derber, 1992)得到的, 在水平均匀和各向同性的假设下在水平方向采

用递归滤波运算模拟,垂直方向用经验正交函数展开表示。

2.2 SVD-En3DVar 同化方案

SVD-En3DVAR 方法的具体做法已经在本研究第 I 部分里做了详细介绍。同化采用了局地化方案,对第一个个例,局地分块方案是水平 21 格点,垂直 20 层,第二个个例是水平 25 格点,垂直 20 层。采用本研究第 I 部分提出的通过 WRF-3DVar 系统生成初始扰动场的方法,样本积分时间均为 1 小时。样本数为 30,截断阶数为 20。

3 个例 1——2008 年 6 月一次华南前汛期暴雨

3.1 天气形势

2008 年 5 月 28 日到 6 月 19 日期间华南地区出现了多次暴雨过程。在这期间孟加拉湾地区低压槽活跃,有利于孟加拉湾水汽向我国华南地区输送,西太平洋副热带高压其西界和北界明显偏东、偏南,冷暖空气多交汇于华南和江南地区,850 hPa 上的低涡切变线长时间维持在江南和华南地区,导致江南、华南出现致洪暴雨。这 20 天内,长江以南地区降水普遍达到了 100 mm 以上,其中江南(湘、赣、浙)和华南分别为两个降水大值中心,降水达 200 mm 以上,特别是珠江三角洲地区,降水总量在 500 mm 以上。这次暴雨洪水过程降雨范围广、强度大、历时长,造成的灾害严重,其中,6 月 7 日至 6 月 10 日期间暴雨中心主要位于广东境内。

3.2 模式设置

采用 WRF 模式进行模拟,格点数是 180×180 ,水平格距为 7 km,垂直方向分为不等距的 28 层,模式层顶气压为 50 hPa。模拟区域中心 (22.8°N , 112.8°E)。使用 NCEP 1° 分辨率的再分析资料提供边界条件,微物理方案采用 Ferrier 方案。

3.3 雷达资料

采用华南地区的海口、桂林、柳州、南宁、阳江、龙岩、汕头、梅州、韶关、广州、厦门、永州、深圳一共 13 部 S 波段多普勒雷达提供的的径向风观测资料。雷达体扫包括 9 个仰角,分别为 0.5° 、 1.5° 、 2.4° 、 3.4° 、 4.3° 、 6.0° 、 9.9° 、 14.6° 、 19.5° 。资料做退模糊处理后插值到模式网格点上,将高于模式第 20 层高度(200 hPa 左右)的资料丢弃不用。如果在一个点有多部雷达观测资料,同化时这

些资料会同时使用。

3.4 同化试验

对同样的观测资料,采用 SVD-En3DVar 和 WRF3DVar 两种方法进行同化。选择 2008 年 6 月 6 日 10 时(协调世界时,下同)作为第一次同化分析时刻,背景场是以 NCEP 1° 分辨率的再分析资料为初值,由 2008 年 6 月 6 日 00 时开始预报得到。SVD-En3DVar 所需要的预报样本由分析时刻前 1 小时的背景场叠加扰动后预报至分析时刻得到。两种方法都是每小时同化一次,经过三次同化循环后得到预报需要的 6 日 12 时的初始场。

下面首先对两种同化方法产生的分析增量进行比较。图 1 是两种方法经过三次同化后得到的 $\sigma=0.86$ 平面上的分析增量。可以看到对于水平风场, WRF-3DVar 得到的分析增量范围要比 SVD-En3DVar 更大一些,但是两种方法得到的分析增量在强降水发生的地区比较接近。由于 SVD-En3DVar 中采用了局地化处理,当以某一分析格点为中心的局地块内观测点数少于某一规定的数目时,就不再对这个格点进行同化,所以在观测量的边缘区域没有分析增量出现。而 WRF-3DVAR 中是通过 B 矩阵将一个点的观测增量“扩散”到周围格点,有平滑的作用,同化以后在观测点周围的一定范围内都会有明显的分析增量出现,增量场也会比较光滑。所以 WRF-3DVAR 的分析增量分布范围要大一些,主要表现在在观测量的边缘区域。而对于温度和比湿,两种方法得到的增量场的正负区域分布形式大体一致,但具体形态有较大的差别。WRF-3DVar 得到的温度分析增量在福建南部,江西南部区域出现了一个范围较大的正值中心,而 SVD-En3DVar 得到的温度增量仅仅在福建东南部有一个范围很小的正值中心。另外, SVD-En3DVar 得到的温度增量负值区也不如 WRF-3DVar 那么明显。对于比湿场的分析增量,主要区别在于 WRF-3DVar 在福建和江西交界处产生一个较强的负值中心,而 SVD-En3DVar 得到的这个负值中心出现在福建东南部。在海南东部 WRF-3DVar 得到有一个较强的正值区,而 SVD-En3DVar 没有出现这个正值区。

将 $\sigma=0.86$ 平面上 6 月 6 日 12 时同化后的水平风场和背景场进行比较(图 2),可以看到同化前在广东中部有一个比较明显的气旋性弯曲,经过

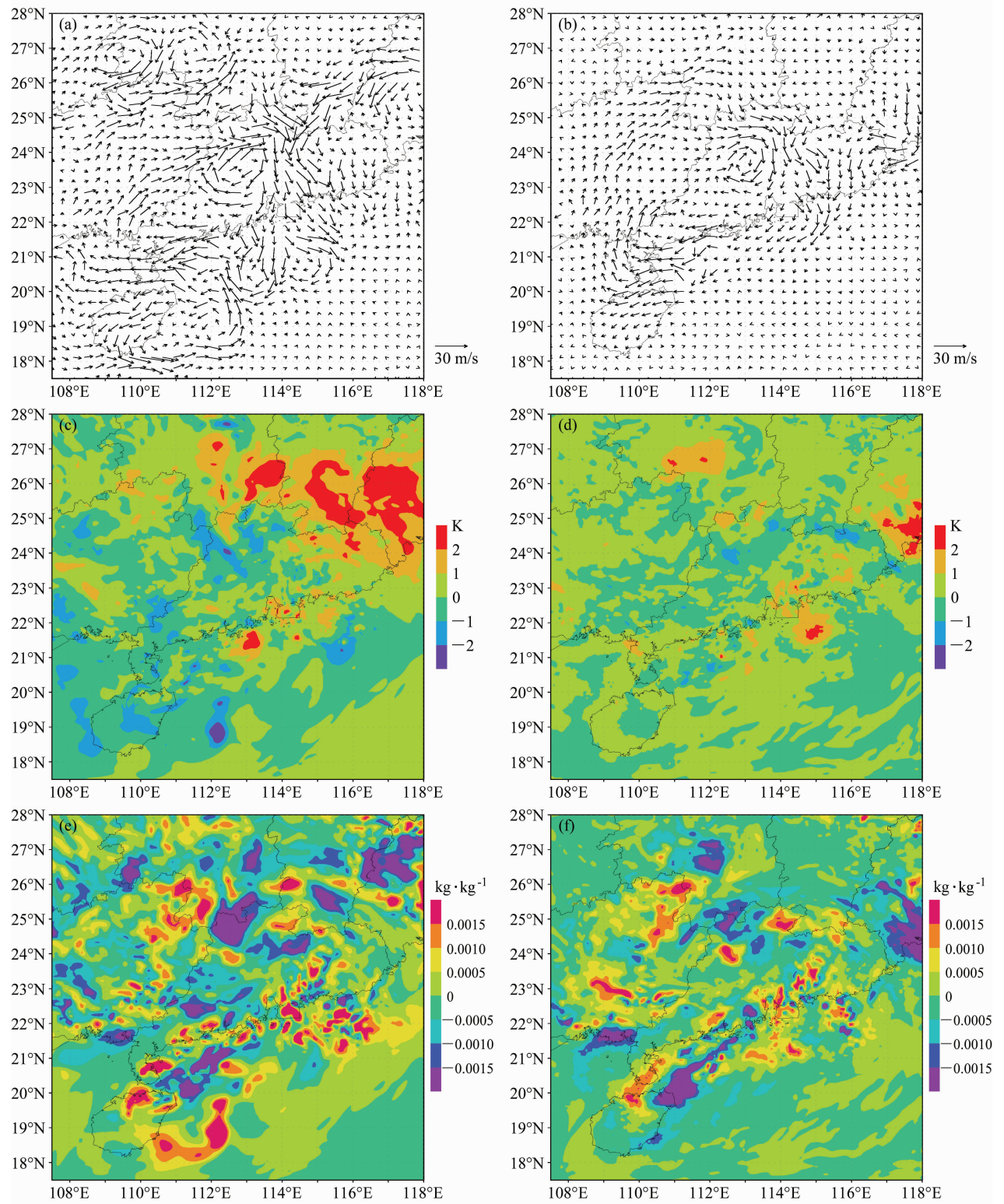


图1 2008年6月6日12时 $\sigma=0.86$ 平面上同化三次以后得到的(a、b)水平风、(c、d)温度和(e、f)比湿的分析增量场比较:(a、c、e) WRF-3DVar; (b、d、f) SVD-En3DVar

Fig. 1 The analysis increments of (a, b) horizontal wind, (c, d) temperature, and (e, f) specific humidity on level $\sigma=0.86$ at 1200 UTC 6 Jun 2008 after three assimilation cycles: (a, c, e) WRF-3DVar; (b, d, f) SVD-En3DVar

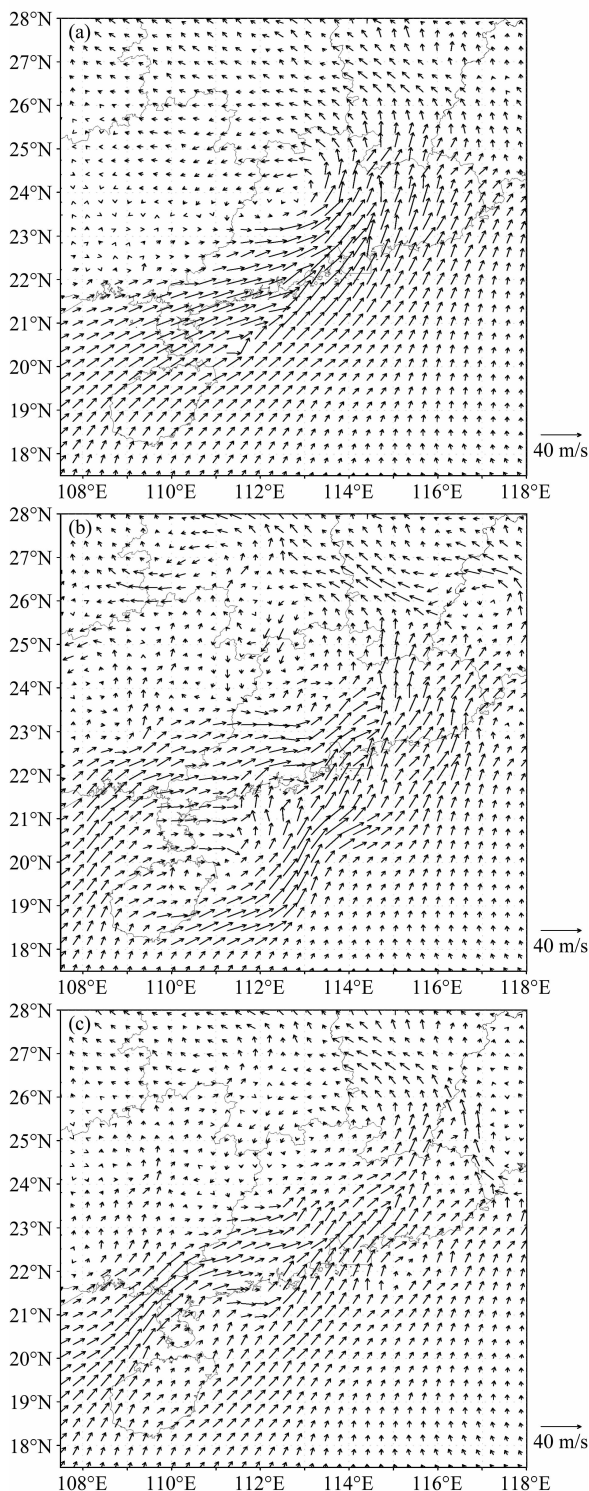


图2 2008年6月6日12时 $\sigma=0.86$ 平面上的水平风场:(a)背景场;(b)WRF-3DVar同化得到的分析场;(c)SVD-En3DVar同化得到的分析场

Fig. 2 Horizontal wind field on level $\sigma=0.86$ at 1200 UTC 6 Jun 2008: (a) Background field; (b) via WRF-3DVar assimilation; (c) via SVD-En3DVar assimilation

WRF-3DVar 同化后气旋性减弱了,而在广东以南的海洋上南风明显增强。同时广西东部出现了较强的西南风,海南境内的西南风明显减弱了。SVD-En3DVar 方法得到的分析场与 WRF-3DVar 的结果比较接近,但是广东以南的海洋上没有出现南风加强的情况,另外,在福建与广东交界处的风场由原来的西南风变成了东南风。从 850 hPa 风场的分析增量来看,在福建与广东交界处 WRF-3DVAR 方法的分析增量很小,而 SVD-En3DVar 方法同化后出现了较明显的东风增量,由于这个地区所用的观测资料主要是龙岩雷达站 (25.03°N , 117.11°E) 的资料,而这部雷达所处的海拔高度非常高,达到了 1505.7 m,要远高于其它 12 部雷达,所以这部雷达的观测资料分布主要在很高的高度上,850 hPa 高度上的观测会比较少,这个高度上的分析增量主要依靠背景误差协方差关系来推测得到。而两种同化方法的背景误差协方差是完全不同的,所以即使是同化同样的径向速度,得到的分析增量也会相差很大。

将两种同化方法得到的每 6 小时一次累积的降水预报和实测降水进行比较(图 3~5),可以看到在第 1 个 6 小时,实测降水主要集中在广东中南部(图 3a)。同化前预报的雨区范围比较大,降水中心从广东东部一直延伸到广东南部沿海。经过 WRF-3DVar 同化后的预报,降水范围和同化前大体相仿,但强度明显减小,特别是广东东部虚假的强降水有所减弱,同化对降水预报有一定好处。SVD-En3DVar 同化后得到的预报较好的模拟出了广东中南部地区的强降水中心,和同化前相比雨区范围有明显缩小,在福建南部的虚假降水明显减弱了,但广东中部预报的降水仍然过强。从当时的天气形势来看,这一高度上以西南风为主,形成降水的水汽主要来自广东南部的海洋。而雷达观测主要分布在陆面上,在广东南部的海面上观测很少,同化后的分析增量也主要分布在陆面上,没有对海面上的风场,温湿度场进行改进。而且从广东沿海的分析增量来看,主要是北风增量,这说明背景场中这个区域南风分量要比实际偏强。当同化结束后做预报时,海面上的西南风可能会比实际更强一些,一方面带来了过多的水汽,另一方面也使得辐合更强,所以会使得广东中部预报的降水仍然过强。同化对降水预报有一定改进。在第 2 个 6 小时,在广东中

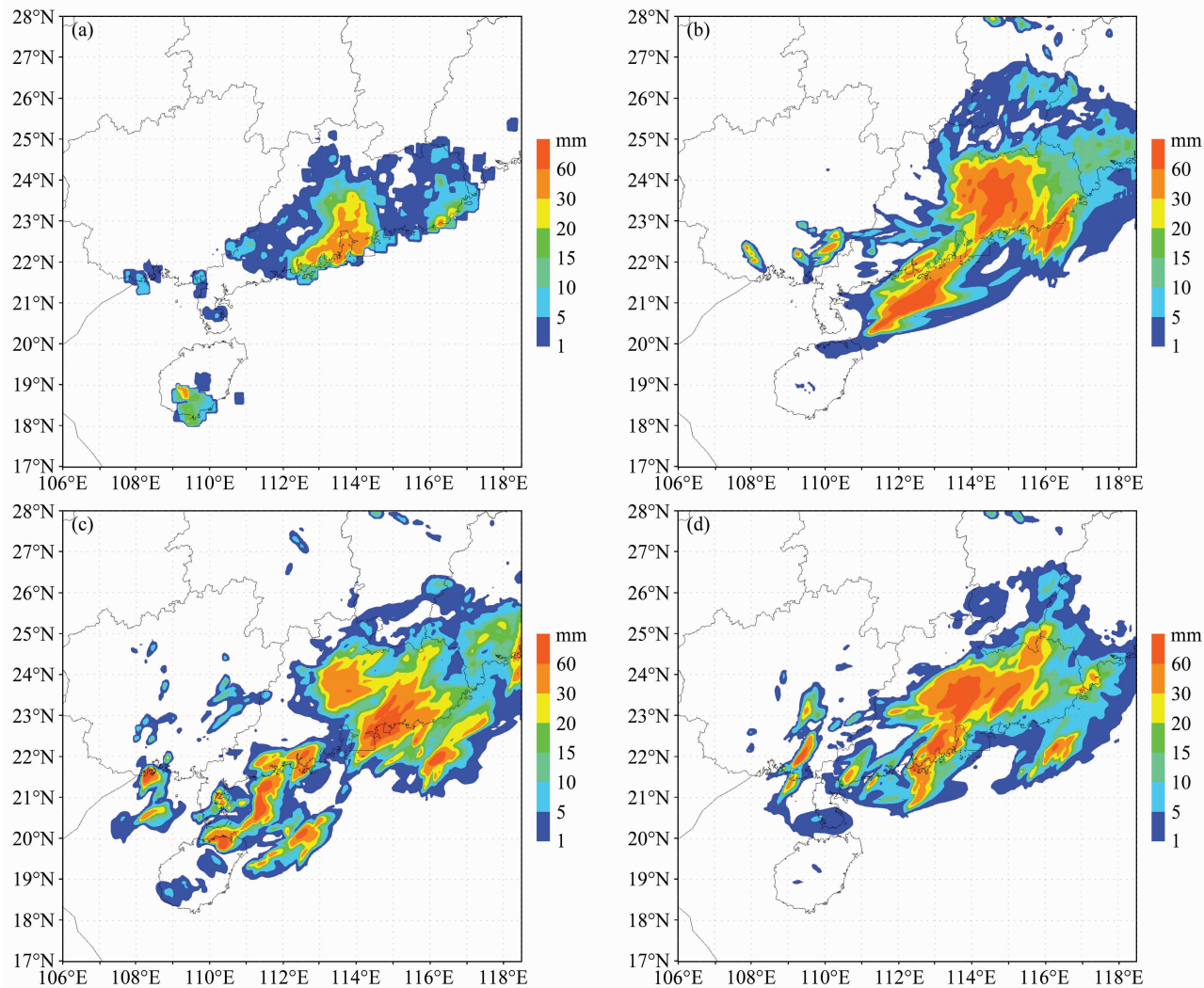


图 3 2008 年 6 月 6 日 12 时至 6 日 18 时同化前后预报降水与实测降水的比较：(a) 实况；(b) 同化前预报；(c) WRF-3DVar 同化后预报；(d) SVD-En3DVar 同化后预报

Fig. 3 Comparison of 6-h precipitation from 1200 UTC to 1800 UTC on 6 Jun 2008: (a) Observation; (b) forecast before assimilation; (c) forecast after assimilation with WRF-3DVar; (d) forecast after assimilation with SVD-En3DVar

南部实测的强降水中心向东移动了，范围有所加大，在广西的东南部也有较强的降水出现（图 4a）。同化前预报的降水范围仍然要比实测降水偏大，在广东东部的强降水区比实况偏东达到福建南部。经过 WRF-3DVar 同化后，预报的广东地区强降水区过于偏南，SVD-En3DVar 同化后预报的强降水区强度和范围则与实况更接近，对降水预报有较明显的改进。在第 3 个 6 小时，实测的强降水主要有三片，一片主要分布在广西东南部，另外一片分布在广东的东部和南部，还有一片在海南南部（图 5a）。同化前预报的降水在广西境内与实测降水比较一致，而广东境内的降水则明显偏北，同时福建境内

出现了大片虚假降水，海南南部没有降水。经过 WRF-3DVar 同化后的预报，海南南部仍然没有降水，广东中南部的强降水区比实况偏南，比同化前的预报有所改进。SVD-En3DVar 同化后得到的预报，广东中南部的强降水区和实况更加接近，不过在广西的强降水区范围比实况大，海南南部仍然没有降水。总体来说，SVD-En3DVar 同化后得到的 18 小时内的降水预报要比 WRF-3DVar 同化后的预报改进更加明显一些。

从对降水预报的 TS 评分的比较也可以看到这一点。图 6a 是对 1 mm 以上三个时段的 6 小时降水预报 TS 评分的比较，可以看到对第 1 个和第 3

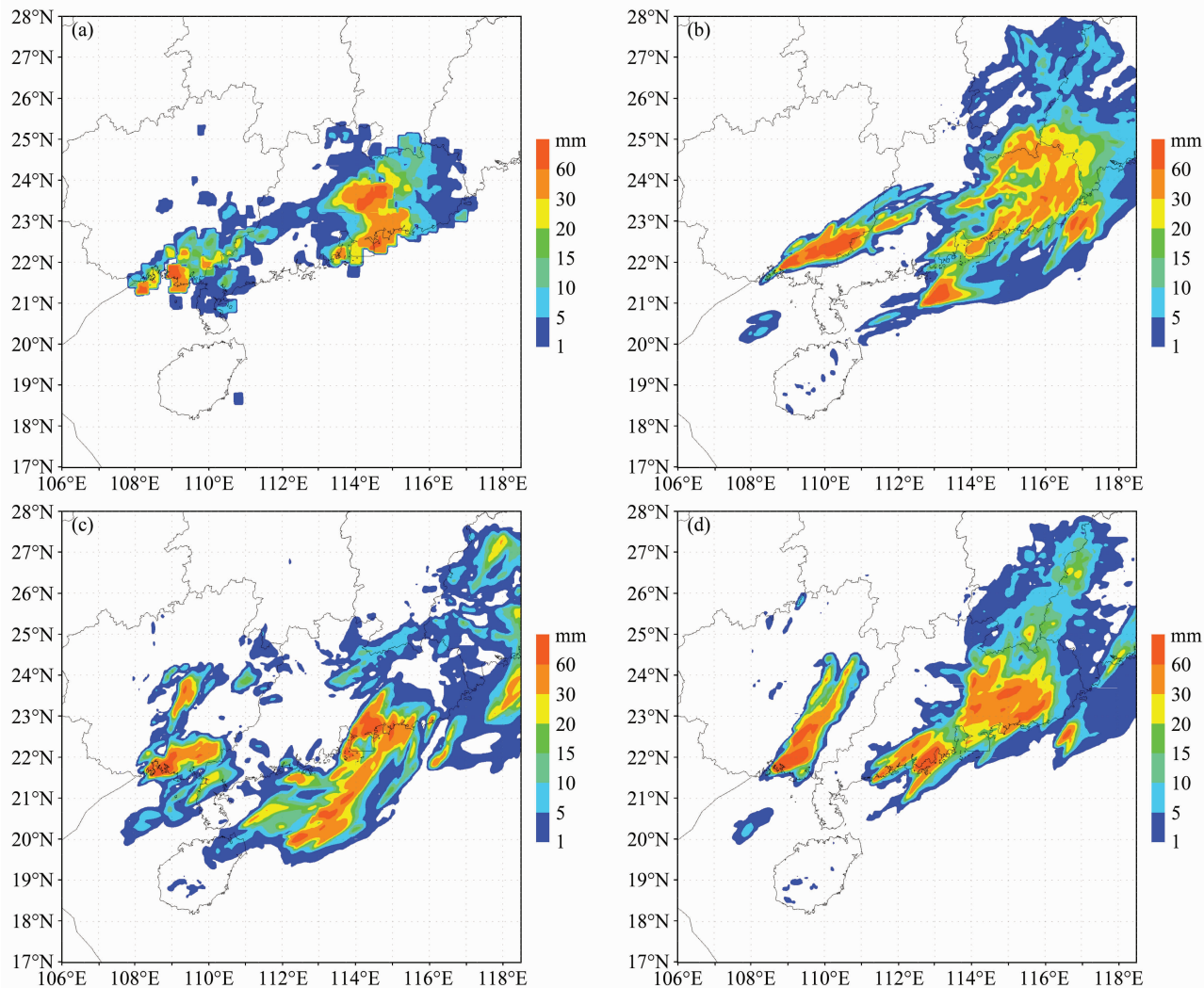


图4 同图3, 但为2008年6月6日18时至7日00时

Fig. 4 Same as Fig. 3, but from 1800 UTC 6 Jun 2008 to 0000 UTC 7 Jun 2008

个6小时累计降水, SVD-En3DVar方法同化后都有改进, 但WRF-3DVar同化后的降水预报评分则比同化前降低了, 对于第2个6小时累计降水, 两种方法同化后都没有提高降水预报评分, 但是SVD-En3DVar方法同化后评分与同化前很接近, 而WRF-3DVar同化后的降水预报评分则比同化前降低了很多。图6b是对15 mm以上降水预报的TS评分结果, 可以看到, SVD-En3DVar方法对3个6小时累计降水预报都有改进, 而WRF-3DVar方法只对第3个6小时降水预报有改进。总的来说, 对于1 mm以上和15 mm以上的降水, SVD-En3DVar方法同化以后的预报评分都要比WRF-3DVar方法更好一些。

WRF-3DVar使用的是不随空间位置变化的在

水平面上各向同性的预报误差协方差矩阵, SVD-En3DVar使用的是依流形而变的背景误差协方差关系, 对于像暴雨之类的中小尺度天气系统, 发展变化很快, 使用固定不变的B矩阵来进行同化是很不合理的。在同化雷达径向速度观测资料时, WRF-3DVar采用了旋转风和质量场的平衡关系来给出风场和质量场的相关, 这对中尺度系统来说也是一个缺陷(从WRF-3DVar得到的温度分析增量场也可以看到这一点), 而SVD-En3DVar是通过预报集合来得到风场和质量场的关系, 这种关系是由大气控制方程决定的, 只要模式误差不是很大, 积分时间足够长, 样本容量足够大, 所得到的这种关系就会更可靠。这应该是SVD-En3DVar方法同化后预报降水好于WRF-3DVar的原因。

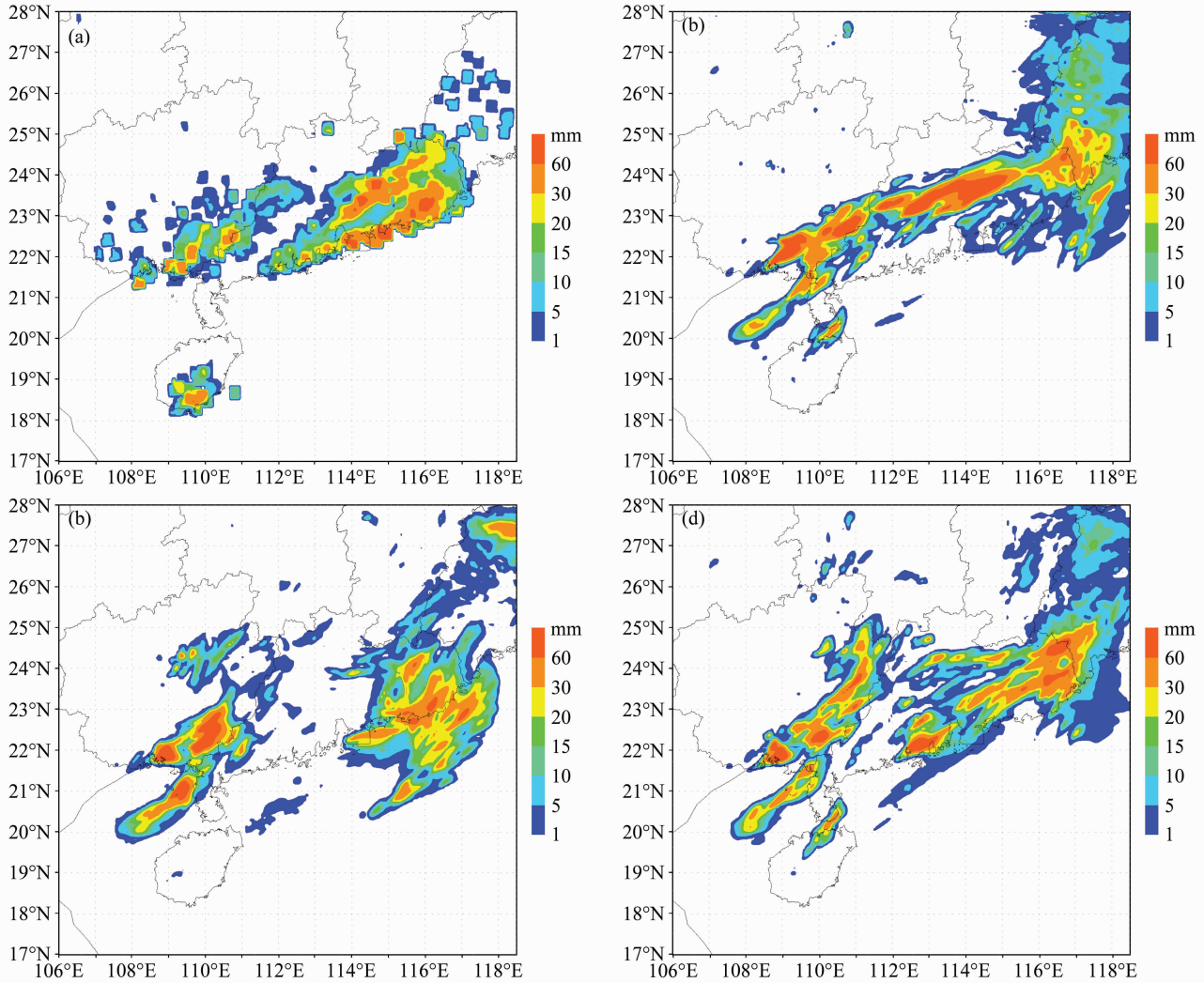


图 5 同图 3，但为 2008 年 6 月 7 日 00 时至 7 日 06 时
Fig. 5 Same as Fig. 3, but from 0000 UTC 7 Jun 2008 to 0600 UTC 7 Jun 2008

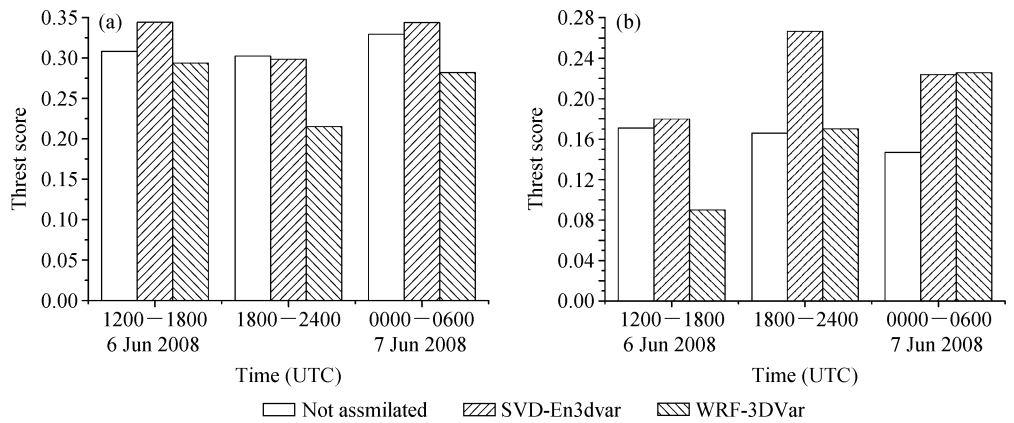


图 6 同化前及两种方法同化后对三个时段的 6 小时累积降水预报的 TS 评分：(a) 1 mm 以上降水评分；(b) 15 mm 以上降水评分
Fig. 6 Threat score of 6-h rainfall forecast before and after the assimilation; (a) Rainfall over 1 mm; (b) rainfall over 15 mm

4 个例 2——2003 年 7 月一次江淮地区梅雨锋暴雨

4.1 天气过程

2003 年 7 月 4~5 日, 江淮流域普降暴雨到大暴雨, 从 7 月 4 日 10 时到 7 月 5 日 06 时滁州市累积降水量达到 379.3 mm, 全椒为 209 mm, 来安为 155 mm。在 7 月 4 日 18 时~7 月 5 日 00 时期间, 江苏省也出现了暴雨, 南京站 6 小时累积降水强度达到 94 mm。

4.2 雷达资料和模式设置

对于本次过程我们只采用位于合肥的一部 S 波段雷达观测资料进行同化, 以检验 SVD-En3DVar 方法对单部雷达资料的同化效果。该雷达采用 14 个仰角的 VCP11 观测模式进行连续体积扫描观测, 体扫的时间间隔平均为 5~6 分钟, 仰角在 0.5° 到 19.5° 之间。资料同样被插值到模式网格点上, 高于模式第 20 层高度 (200 hPa 左右) 的资料也丢弃不用。

WRF 模式模拟的格点数是 180×180 , 水平格距为 5 km, 垂直方向为不等距的 28 层, 模式层顶气压为 50 hPa。模拟区域中心是 (31.5°N , 117.0°E)。使用 NCEP_1°分辨率的再分析资料提供初边界条件。微物理方案采用 WSM6 方案。

4.3 同化试验

下面, 先对两种同化方法产生的分析增量进行比较。图 7 是两种方法三次同化后得到的 $\sigma=0.86$ 平面上的分析增量, 可以看到对于水平风场, 两种方法得到的分析增量大体上比较接近, 在雷达东北方都为东北风增量, 在雷达西边主要是东风或东南风增量。WRF-3DVar 方法得到的增量场和 SVD-En3DVar 同化相比较平滑, 幅度也要小一些, 在雷达南面也不像 SVD-En3DVar 同化那样出现东风增量。与观测的径向风和径向风观测增量 (观测的径向风和背景场径向风之差) 比较 [图 8 (见文后彩图)] 看到, 观测的风大体应为西南风, 背景场有高估这种基本气流的倾向, 特别是在雷达的东北面。来验证两种方法得到的水平风场分析增量是否合理。图 8a 是分析时刻 $\sigma=0.86$ 平面上的实测径向风, 图 8b 为相应观测点上实测径向风和由背景场计算出来的径向风相减后得到的径向风观测增量。从增量图中大致可以看到, 背景场的西南风过强,

特别是雷达的东北方, 所以水平风场的分析增量主要应该是东北风。这与图 7 中两种方法得到的结果比较一致。

对于温度和比湿, 两种方法得到的增量场在整个模拟区域都有着很大的差别。WRF-3DVar 得到的温度场分析增量在江苏境内主要是负的, 而 SVD-En3DVar 得到的温度场分析增量主要是正的, 出现了完全相反的情况。由于 WRF-3DVar 实质上是按照风场和质量场之间的平衡关系由风的信息给出温度分析增量场, 这种平衡关系很难说适合中尺度系统, 而 SVD-En3DVar 是由预报集合得到的统计关系来推断温度场, 因此出现这种不一致的情况也不难理解。在安徽西部, WRF-3DVar 的增量场出现了一块面积较大的负值区, 而 SVD-En3DVar 的增量场只是出现了一块面积很小的负值区。两种方法得到的比湿分析增量在结构上比较一致, 在安徽西部主要为正的增量, 在安徽东部主要为负的增量, 但是 SVD-En3DVar 得到的增量场正负中心的量级要更大一些。

将 7 月 4 日 18 时 $\sigma=0.86$ 平面上同化后的水平风场和背景场比较 (图 9) 看到, 同化前风场比较平滑均匀, 在 33°N 以南主要为均匀的西南风, 而以北风速则较弱。经过雷达资料同化以后, 风场结构发生了明显的变化, 安徽中部的西南风明显减弱了。不过 WRF-3DVar 同化以后对背景场的改变较小, 得到的风场比较平滑, 看不到很明显的中小尺度结构出现, 而 SVD-En3DVar 同化以后雷达西北方出现了较强的西南风, 而雷达东北方转为西北风, 增强了安徽中东部风场辐合。

将两种方法同化后得到的每 6 小时一次累积的降水预报和实测降水比较 [图 10、11、12 (见文后彩图)] 可以看到, 在第一个 6 小时, 实测降水 (图 10a) 由湖北东北部穿过安徽中部再延伸到江苏中南部地区, 同化前预报的降水区大部分移到了江苏境内, 雨量要比实测值大, 在安徽东部只留下很小范围的降水, 湖北境内则已经没有降水, 经过 WRF-3DVar 同化以后, 在安徽中东部出现了很强的降水, 雨带位置与实际情况较一致, 在江苏境内的雨区位置和同化前比强度也有所减弱, 相比同化前更接近实际了, SVD-En3DVar 同化以后, 安徽中部出现的强降水区, 位置与强度都与实际情况很相似, 不过江苏境内的降水范围变得更小了, 与实

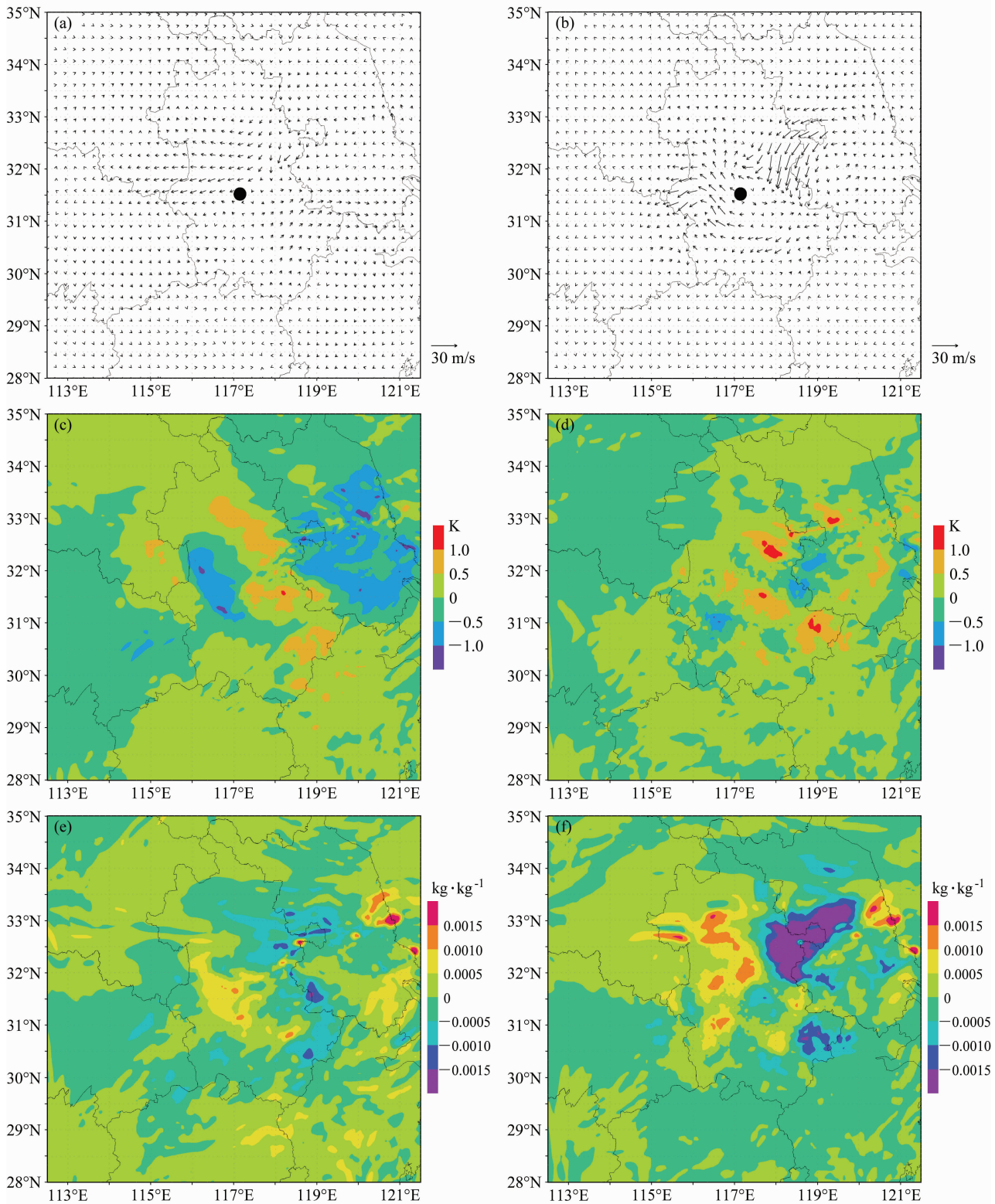


图 7 2003 年 7 月 4 日 18 时 $\sigma=0.86$ 平面同化三次以后得到的 (a、b) 水平风、(c、d) 温度和 (e、f) 比湿的分析增量场比较: (a、c、e) WRF-3DVar; (b、d、f) SVD-En3DVar

Fig. 7 The analysis increments of (a, b) horizontal wind, (c, d) temperature, and (e, f) specific humidity on level $\sigma=0.86$ at 1800 UTC 4 Jul 2003 after three assimilation cycles: (a, c, e) WRF-3DVar; (b, d, f) SVD-En3DVar

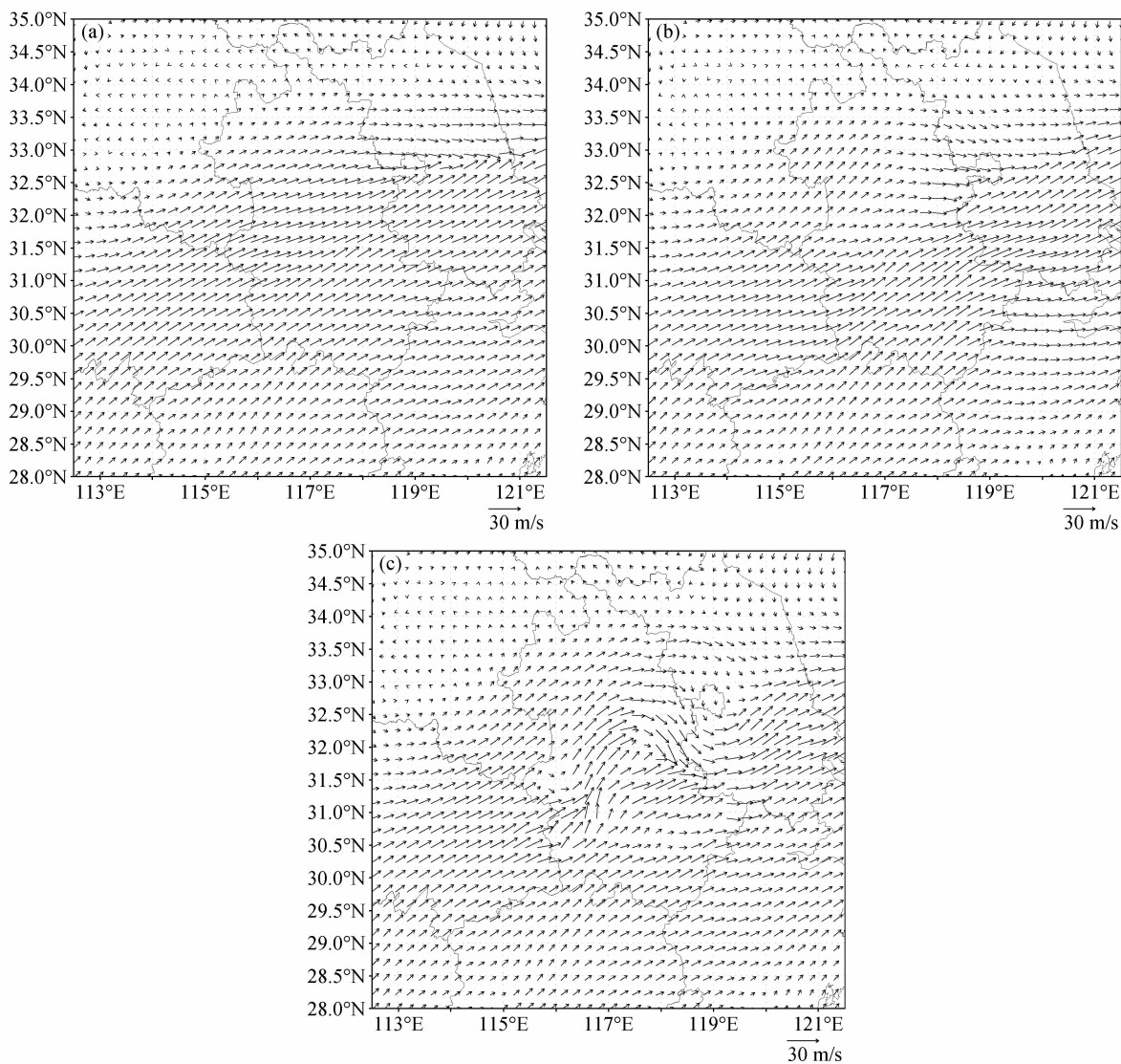


图9 2003年7月4日18时 $\sigma=0.86$ 平面上的水平风场: (a) 背景场; (b) WRF-3DVar 同化得到的分析场; (c) SVD-En3DVar 同化得到的分析场

Fig. 9 Horizontal wind field on level $\sigma=0.86$ at 1800 UTC 4 Jul 2003: (a) Background field; (b) via WRF-3DVar assimilation; (c) via SVD-En3DVar assimilation

测结果差别较大。

图13是对这6小时内5 mm以上和15 mm以上降水预报TS评分的比较,可以看到,对于5 mm以上的降水,两种方法同化以后降水预报评分都提高了,其中WRF-3DVar要比SVD-En3DVar稍好一些,对于15 mm以上的降水,两种方法对TS评分都没有改进,SVD-En3DVar同化以后评分比同化前略低,WRF-3DVar同化以后与同化前接近。出现WRF-3DVar要比SVD-En3DVar稍好的原因可能与使用的雷达观测资料较少有关,从分析增量来看,WRF-3DVAR的分析增量要比SVD-En3DVar

平滑得多,SVD-En3DVar的分析增量边缘地区可能会出现不连续的现象,当观测资料较少时,这种影响就会比较明显。在第2个6小时,从实测降水(图11a)来看,主要的降水带向东移到江苏中部,安徽境内的降水减弱,而湖北境内的降水加强了。同化前预报的安徽东部到江苏中部的降水与实况相当接近,而湖北境内的降水仍然没有预报出来。经过WRF-3DVar和SVD-En3DVar同化以后预报的降水强度明显比实况弱,位置也偏南,湖北境内的降水也没有预报出来,同化使降水预报变差了。在第3个6小时,实测的主要降水区(图12a)仍然停

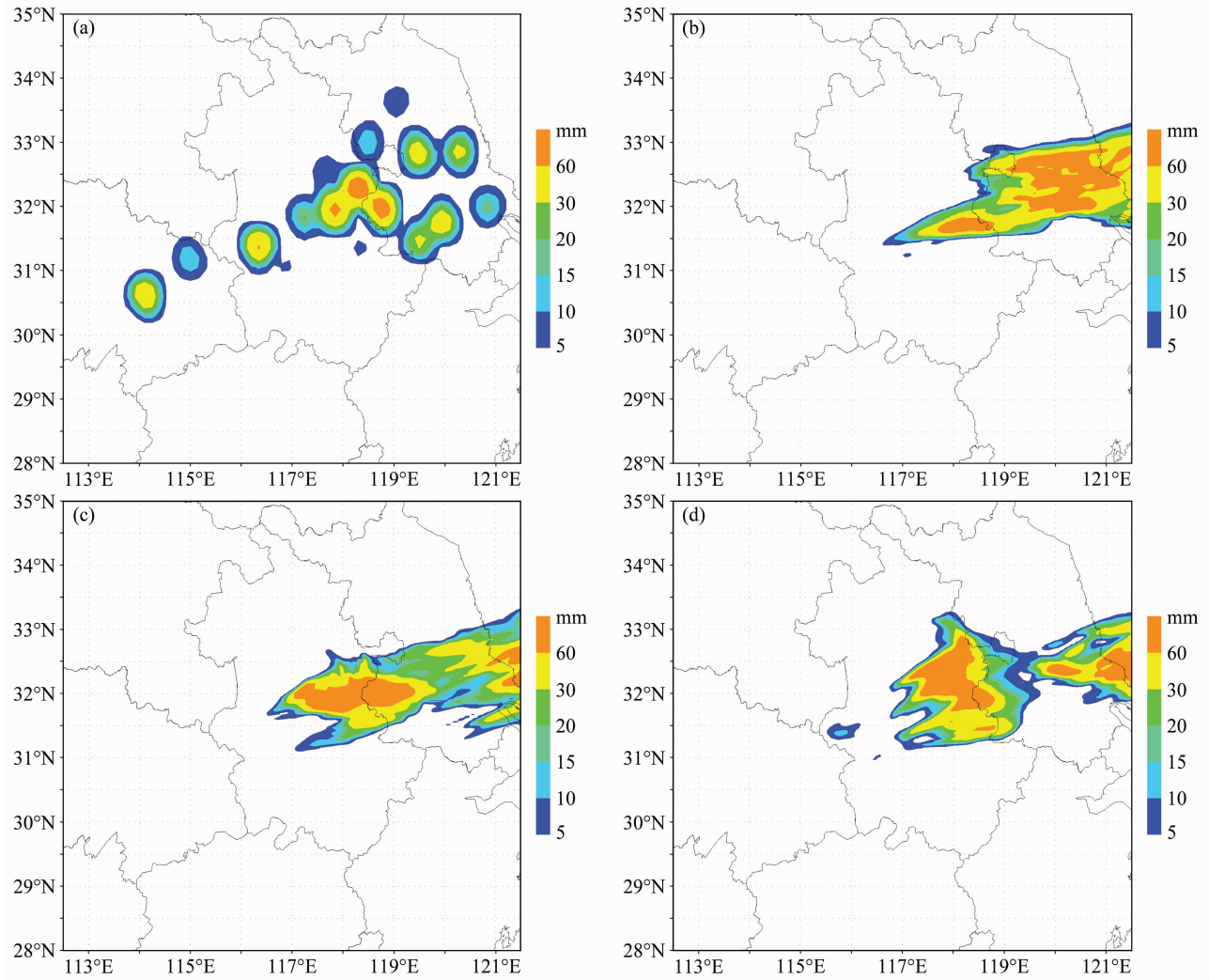


图 10 2003 年 7 月 4 日 18 时至 5 日 00 时 6 小时期间同化前后预报降水与实测降水的比较：(a) 实况；(b) 同化前预报；(c) WRF-3DVar 同化后预报；(d) SVD-En3DVar 同化后预报

Fig. 10 Comparison of 6-h precipitation from 1800 UTC 4 Jul 2003 to 0000 UTC 5 Jul 2003: (a) Observation; (b) forecast before assimilation; (c) forecast after assimilation with WRF-3DVar; (d) forecast after assimilation with SVD-En3DVar

留在江苏南部，但强度大大减弱了。同化前预报的降水则又回到了安徽中南部，在江苏境内几乎没有降水出现，这与实际情况相差很大。WRF-3DVar 同化以后预报的降水仅仅分布在安徽中部的一块非常小的区域，而且强度很小。SVD-En3DVar 同化以后预报的降水与同化前的预报结果很接近，看不到同化对降水预报有改进。据此，我们推测雷达资料覆盖区域太少可能是造成同化后预报效果不好的重要原因。为了检验这一点，对第一个个例我们比较了同化 13 部雷达和只同化其中 4 部雷达（阳江、广州、梅州、韶关）后的降水预报（图略），发现只同化 4 部雷达资料的降水预报远不如同化 13 部雷

达资料的预报，特别是对于 12~18 时的 6 小时降水预报，同化 4 部雷达没有改进。这也说明由于雷达资料太少，初始场只在一个小范围内被改进，对预报改进的持续时间就不长，因此这里只同化了 1 部雷达的观测资料，只对前 6 小时的降水预报有改进。

5 总结与讨论

选择 2008 年 6 月一次华南前汛期暴雨和 2003 年 7 月一次江淮地区梅雨锋暴雨两个个例检验了用 WRF-3DVar 和 SVD-En3DVar 两种方法同化实测雷达径向风资料的效果，将同化前后所作的 18 小

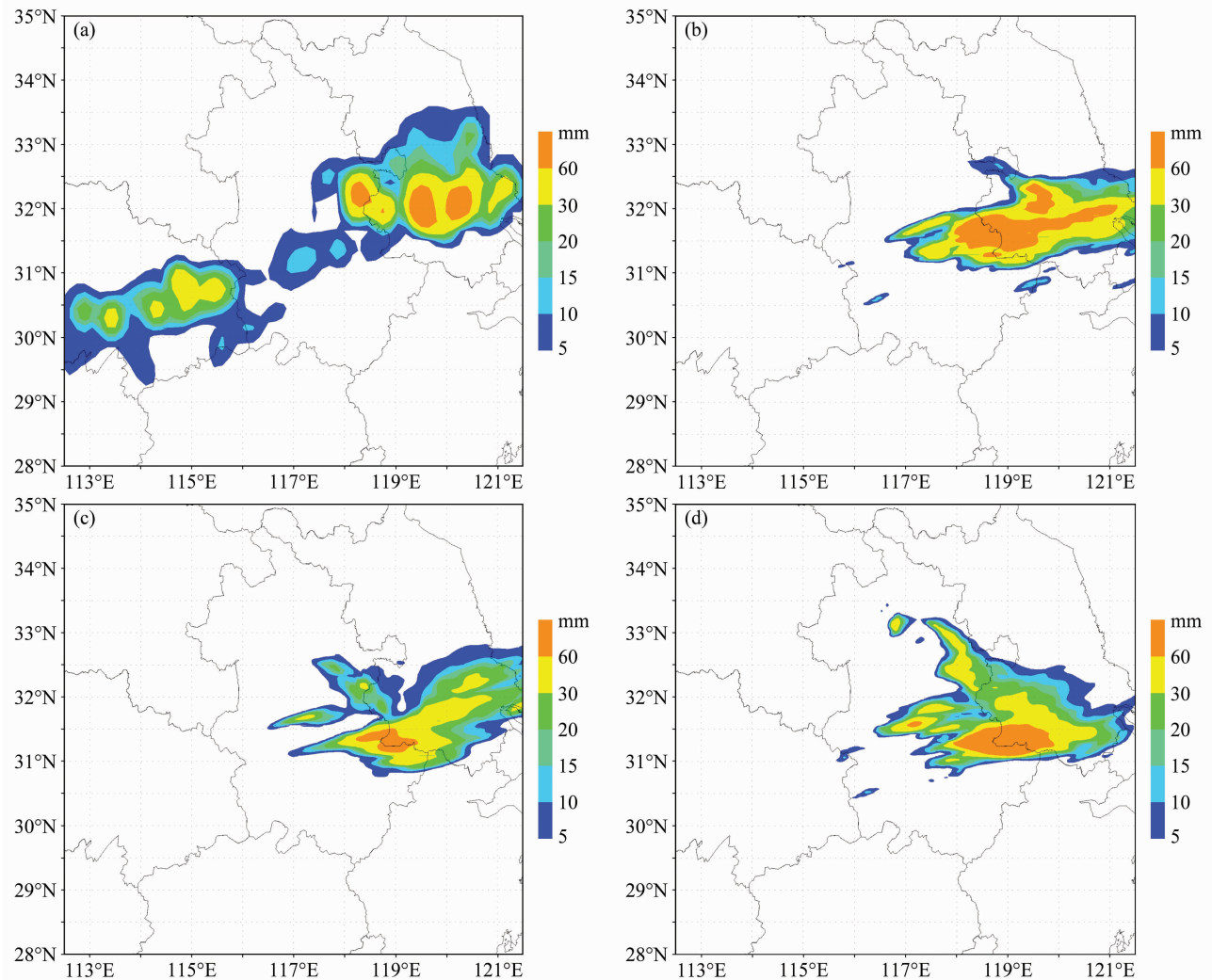


图 11 同图 10, 但为 2003 年 7 月 5 日 00 时至 5 日 06 时

Fig. 11 Same as Fig. 10, but from 0000 UTC 5 Jul 2003 to 0600 UTC 5 Jul 2003

时内每 6 小时一次的累计降水量预报和实况比较得到结论: 对于第一个个例 (2008 年), 因同化了 13 部雷达观测资料, 同化后得到的分析增量覆盖区域大, 两种方法同化后产生的水平风分析增量比较接近, 而温度和湿度的分析增量差别较大。这是由于风场是直接和观测的径向风相联系, 但是温度和湿度场是间接推断出来的, 两种方法的推断方式不同。两种方法同化后对降水预报都有所改进, SVD-En3DVar 同化的效果明显好于 WRF-3DVar。在前两个 6 小时, WRF-3DVar 同化对降水预报没有改进, 只是在最后一个 6 小时对预报才又有改进, 然而 SVD-En3DVar 同化对 3 个 6 小时降水的预报都有改进。这可能说明 WRF-3DVar 对初始温度场和湿度场的修正并不好, 因此开始一段时间的

预报不好。对于第二个个例 (2003 年), 由于只同化 1 部雷达观测资料, 同化后初始场只在一个小范围内被改进, 对预报改进的持续时间就不长, 两种方法同化后只对第一个 6 小时的降水预报有所改善, 对于后面两个 6 小时降水的预报完全没有改进, 预报结果还不如同化前。从这两个个例的试验结果看, 当观测资料比较多时, SVD-En3DVar 方法同化雷达资料对降水预报作用明显, 维持的时间也较长, 同化效果要优于 WRF-3DVar。但是只同化 1 部雷达资料时, 只会对短时间 (6 小时) 的降水预报起作用, 效果不够好。不过因为研究的个例不够多, 上面的结论还需要进行更多个例的测试来检验。

本文也只是进行了同化雷达径向速度观测资料

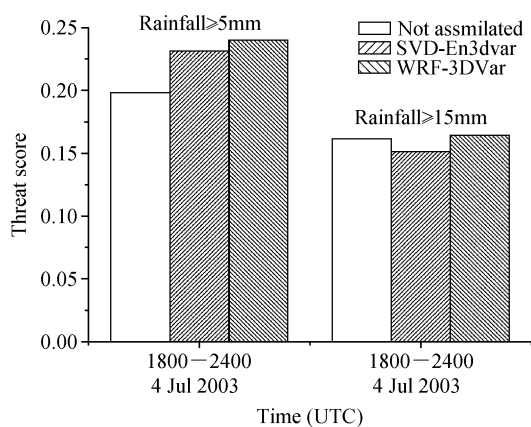


图 13 同化前及两种方法同化后对前 6 小时累积降水预报的 TS 评分

Fig. 13 Threat score of 6-h rainfall forecast before and after the assimilation

的研究,如果同时同化其他资料,例如雷达反射率因子、探空资料、卫星资料等,是否可能进一步改进预报也还有待研究。在将本方法运用于业务时,除了需要注意尽量选择较多的雷达资料外,对雷达资料的质量控制也是一个很重要的方面,本文没有在这方面做认真研究,也可能是同化效果不够理想的一个原因。另外,如果要增加样本容量就需要增加计算量,虽然本文在产生初始扰动时利用 3DVar 技术可以缩短扰动样本的积分时间,但总的来说,同化还是需要花费较多的机时,这也是将这一方法用于业务时需要进一步研究解决的问题。

参考文献 (References)

Lu Chungu, Browning G L. 1998. The impact of observational and model errors on four-dimensional variational data assimilation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55 (6): 995–1011.

兰伟仁, 朱江, Xue Ming, 等. 2010a. 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 [J]. *大气科学*, 34 (3): 640–652. Lan Weiren, Zhu Jiang, Xue Ming, et al. 2010a. Storm-scale ensemble Kalman filter data assimilation experiments using simulated Doppler radar data. Part I: Perfect model tests [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 34 (3): 640–652.

兰伟仁, 朱江, Xue Ming, 等. 2010b. 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 [J]. *大气科学*, 34 (4): 737–753. Lan Weiren, Zhu Jiang, Xue Ming, et al. 2010b. Storm-scale ensemble Kalman filter data

assimilation experiments using simulated Doppler radar data. Part II: Imperfect model tests [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 34 (4): 737–753.

李柏, 周玉淑, 张沛源. 2007. 新一代天气雷达资料在 2003 年江淮流域暴雨模拟中的初步应用: 模拟降水和风场的对比 [J]. *大气科学*, 31 (5): 826–838. Li Bai, Zhou Yushu, Zhang Peiyuan. 2007. Application of the China new generation weather radar data to the terrestrial rain simulation over the Yangtze River–Huaihe River basin in 2003: Contrast of precipitation and wind [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 31 (5): 826–838.

Parish D F, Derber J C. 1992. The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 120: 1747–1763.

彭新东, 常燕, 王式功. 2010. GRAPES 模式对 2008 年两次强降水过程的数值预报检验 [J]. *高原气象*, 29 (2): 321–330. Peng Xindong, Chang Yan, Wang Shigong. 2010. Numerical validation of GRAPES model with two severe precipitation processes in 2008 [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 29 (2): 321–330.

Snyder C, Zhang F Q. 2003. Assimilation of simulated Doppler radar observation with an ensemble Kalman filter [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131: 1663–1677.

王铁, 段晚锁, 郑琴. 2006. 数值模式误差对降水四维变分资料同化及预报的影响 [J]. *气候与环境研究*, 11 (5): 605–615. Wang Tie, Duan Wansuo, Zheng Qin. 2006. The effect of model errors on the 4D-Var and forecast of rainfall [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (5): 605–615.

徐道生, 邵爱梅, 邱崇践. 2011. SVD-En3DVar 方法同化多普勒雷达速度观测资料 I. 模拟资料试验 [J]. *大气科学*, 35 (4): 753–766. Xu Daosheng, Shao Aimei, Qiu Chongjian. 2011. Assimilation of Doppler radar velocity observations with SVD-En3DVar method. Part I: Simulated data experiments [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (4): 753–766.

徐广阔, 孙建华, 赵思雄. 2009. 基于雷达资料同化的 2003 年 7 月一次暴雨过程的数值模拟及分析 [J]. *热带气象学报*, 25 (4): 427–434. Xu Guangkuo, Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2009. The numerical simulation and analysis of a heavy rainfall in July 2003 based on radar data assimilation [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 25 (4): 427–434.

杨毅, 邱崇践. 2006. 利用多普勒雷达资料分析一次强降水的中尺度流场 [J]. *高原气象*, 25 (5): 925–931. Yang Yi, Qiu Chongjian. 2006. Analysis on mesoscale circulation within a heavy rain system using Doppler radar data [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 25 (5): 925–931.

杨毅, 邱崇践, 龚建东, 等. 2007. 同化多普勒雷达风资料的两种方法比较 [J]. *高原气象*, 26 (3): 547–555. Yang Yi, Qiu Chongjian, Gong Jiandong, et al. 2007. Comparison of two methods of assimilating Doppler radar wind data [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 26 (3): 547–555.

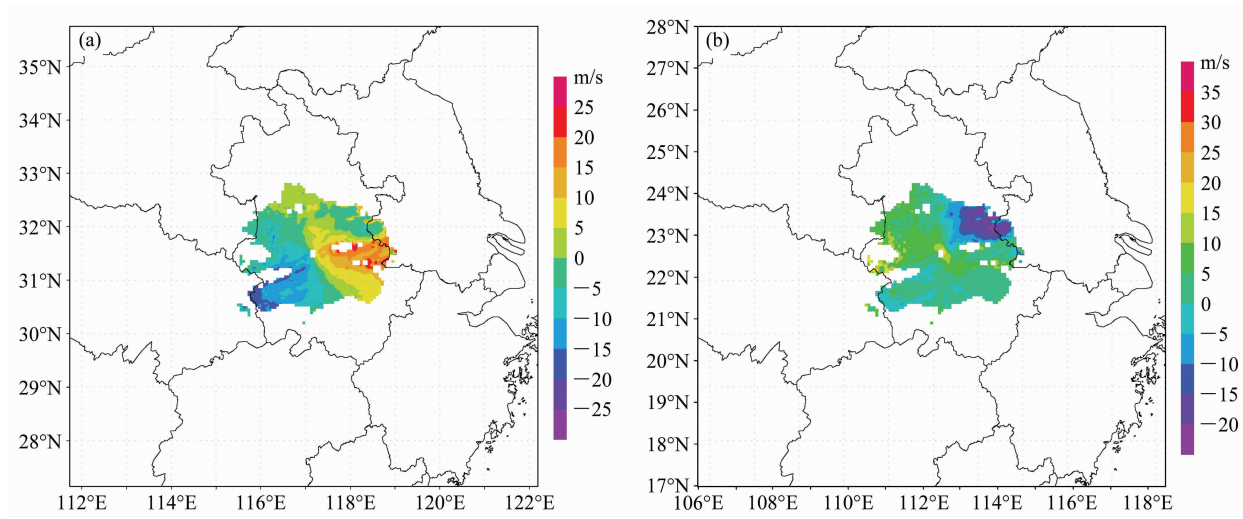


图 8 2003 年 7 月 4 日 18 时 $\sigma=0.86$ 平面上的 (a) 实测径向风和 (b) 径向风观测增量
Fig. 8 (a) Observed radial wind velocity and (b) the observation increment of radial wind velocity (observation minus background) at 1800 UTC 4 Jul 2003 on level $\sigma=0.86$

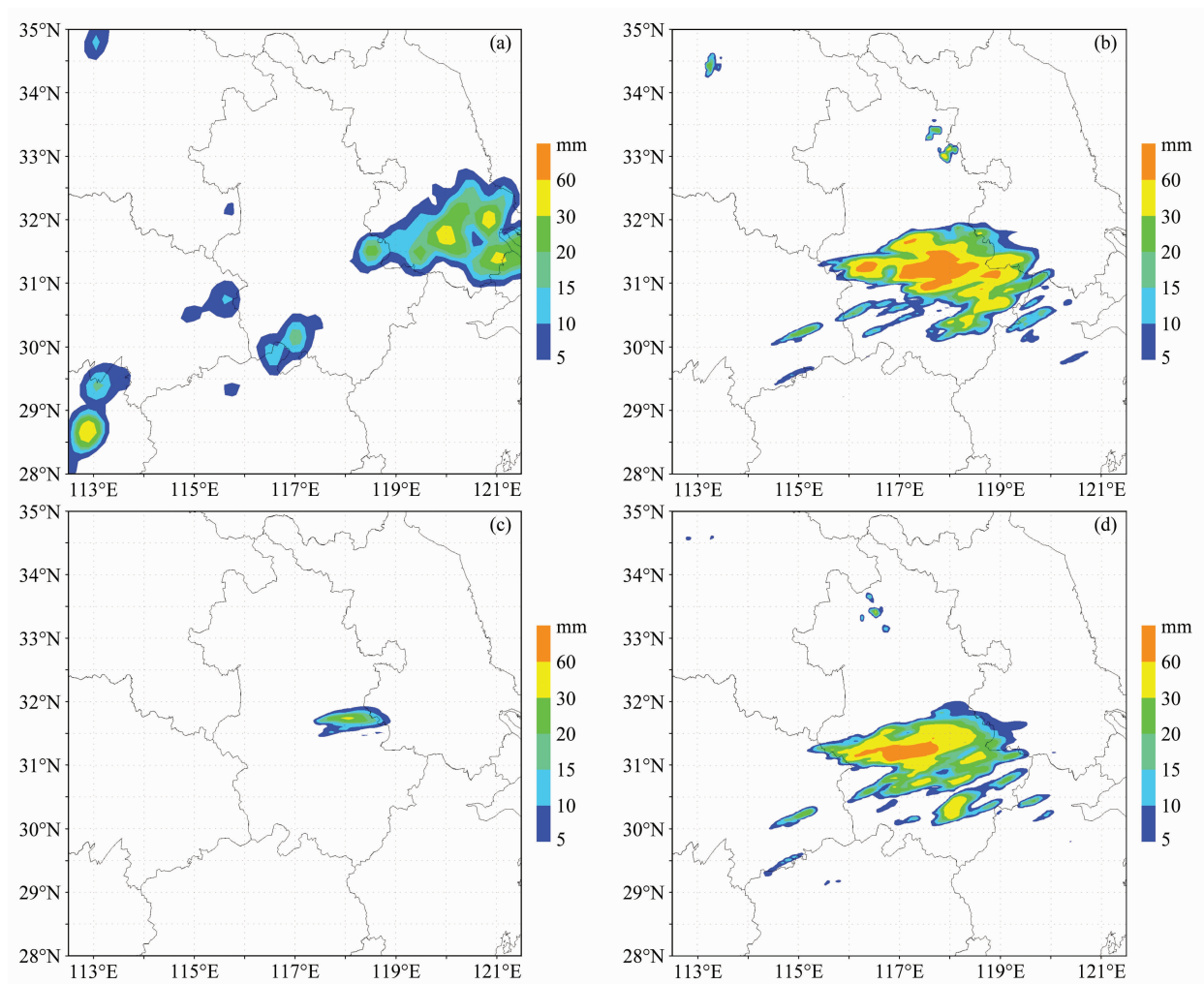


图 12 同图 10, 但为 2003 年 7 月 5 日 06 时至 5 日 12 时
Fig. 12 Same as Fig. 10, but from 0600 UTC 5 Jul 2003 to 1200 UTC 5 Jul 2003