

卢冰, 刘娟娟, 王斌, 等. 2013. DRP-4DVar 方法同化 AIRS 反演资料在一次江淮流域暴雨中的应用 [J]. 气候与环境研究, 18 (5): 562–570, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.11055. Lu Bing, Liu Juanjuan, Wang Bin, et al. 2013. Assimilation of AIRS sounding retrievals on a heavy rainfall over Changjiang and Huaihe River basin by using DRP-4DVar approach [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (5): 562–570.

DRP-4DVar 方法同化 AIRS 反演资料在 一次江淮流域暴雨中的应用

卢冰¹ 刘娟娟¹ 王斌¹ 李俊^{2,3}

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 国家卫星气象中心, 北京 100081

3 美国威斯康星大学麦迪逊分校气象卫星合作研究所, 美国麦迪逊 53706

摘 要 利用经济省时的降维投影四维变分同化方法 (DRP-4DVar), 在 2009 年 7 月 22~23 日江淮流域的一次大暴雨过程中同化晴空条件下高光谱大气红外探测仪 (AIRS) 反演温度、湿度廓线, 改进此次强降水过程的模拟。试验结果分析显示, 同化 AIRS 反演的温度及湿度场后, 基于四维变分同化系统的模式约束, 能够改进湿度场、高度场、高低层散度场。从累积降水量偏差图及同化试验增量图可以看到, 正降水量偏差对应于正湿度增量、负位势高度增量及低层负散度高层正散度增量, 负降水量偏差则与之相反。同化试验较参照试验可更好地模拟出暴雨的天气形势、对暴雨的落区及强度有更好的反映。此外, 从单次同化与连续同化的试验对比结果看出, 连续同化试验结果较单次同化结果有进一步的改进, 说明不断加入新的观测资料可以更好地模拟强降水过程。

关键词 降维投影 四维变分 高光谱大气红外探测仪 (AIRS) 反演资料 暴雨

文章编号 1006-9585 (2013) 05-0562-09

中图分类号 P456.7

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.11055

Assimilation of AIRS Sounding Retrievals on a Heavy Rainfall over Changjiang and Huaihe River Basin by Using DRP-4DVar Approach

LU Bing¹, LIU Juanjuan¹, WANG Bin¹, and LI Jun^{2,3}

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies, University of Wisconsin-Madison, Madison 53706, USA

Abstract Hyperspectral infrared sounders such as Atmospheric InfraRed Sounder (AIRS) provide unprecedented global atmospheric temperature and moisture soundings with high vertical resolution and accuracy. The dimension-reduced projection four-dimensional variational data assimilation (DRP-4DVar) approach has been used to assimilate clear-sky AIRS sounding retrievals in a heavy rainfall storm over Changjiang and Huaihe River basin from 0000 UTC 22 July to 0000 UTC 23 July 2009. Atmospheric soundings of temperature and moisture from AIRS improve the precipitation forecast. Three experiments have been performed to simulate the heavy rain process: A control experiment with the initial conditions from NCEP-FNL, a single assimilation experiment, and a cycle assimilation experiment using AIRS sounding

收稿日期 2011-05-11 收到, 2013-03-30 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2010CB951604, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY(QX)200906009, 美国国家海洋和大气局卫星与信息局 NESDIS 合作项目 NA10NES4400013

作者简介 卢冰, 女, 1985 年出生, 博士, 主要从事资料同化研究。E-mail: lubing@mail.iap.ac.cn

retrievals. Results from experiments show that humidity, geopotential height, and divergence of the initial field are enhanced through assimilating the AIRS temperature and moisture profiles. The 24-h increment in precipitation is consistent with the increment in humidity, geopotential height, and divergence. In this storm event, assimilation experiments have been able successfully simulate the synoptic situation leading to heavy rainfall; the location and intensity of the heavy rainfall event are better simulated when the AIRS data are assimilated. Furthermore, a cycle assimilation framework can absorb more observational data and performs better than a single assimilation framework.

Keywords Dimension-reduced projection, Four-dimensional variational data assimilation, AIRS retrieval data, Heavy rainfall

1 引言

夏季暴雨是我国严重自然灾害之一,提高暴雨预报的准确率成为近几十年来大气科学研究的一个重要方向。数值模式是暴雨模拟、预报的一个主要手段,在数值模式中,影响预报效果的因素除了模式本身的分辨率、动力框架及物理过程外,最大的预报误差往往来源于初始分析误差。由于湿度分布直接影响云和降水的形成,水汽的空间分布与强对流系统演变关系密切, Wolcott and Warner (1981) 指出,如果没有足够水汽的湿度场配合,与初始辐射场相应的上升运动将得不到潜热释放的支持,因而大气中的初始水汽条件对暴雨的数值模拟至关重要。但是由于湿度在时间和空间上的分布具有明显的中小尺度及非连续性特征,如何有效利用观测资料信息改进湿度场,是一项困难但有效的工作。在暴雨的湿度场初值同化研究中,国内外学者利用各种同化方法及各种观测资料开展了很多工作,通过同化累积降水量 (Zupanski and Mesinger, 1995; Zou and Kuo, 1996; 张昕等, 2003; Liu and Wang, 2009)、GPS (Guo et al., 2000)、先进的 TIROS 业务垂直探测器 ATOVS (Qi and Sun, 2006) 等资料,可以使初始场中水汽分布得到改进,产生一个动力上和热力上都与模式协调的初始场,进而改进降水预报。可以看到,在利用多源的观测资料、提高观测质量基础上,结合先进同化方案是改善初始场分析质量、提高暴雨数值预报准确率的一条有效技术途径。

卫星气象遥感探测能够不受自然条件的影响,特别是对测站稀少、资料分辨率较低的地区,可以提供高时空分辨率的大气结构信息,卫星资料的应用对于改进模式初始分析场起到重要作用。2002 年发射的 AQUA 卫星是组成美国国家航空航天局 (NASA) 地球观测系统 (EOS) 的卫星之一,其

中,高光谱大气红外探测仪 (Atmospheric InfraRed Sounder, AIRS) 是搭载在 AQUA 卫星上的一个探测器,具有 2378 个通道数,主要用于大气垂直探测,可以为数值预报模式提供大范围、高精度、高分辨率的大气温湿度廓线信息。但目前资料同化主要是直接同化辐射量,同化辐射量对于温度信息的利用非常有效,因为辐射量(例如红外 CO_2 吸收通道)和大气温度有比较好的对应关系,在微波波段大气温度和卫星观测亮温(例如 AMSU-A)之间的对应关系更好,而现有的同化系统对同化红外水汽吸收波段通道辐射量却面临很大的困难,原因是水汽吸收通道同时包含了水汽和温度信息,现有的变分同化系统很难把温度和水汽分开。Eyre and Hilton (2010) 研究了背景场误差估计不确定性对变分同化辐射量带来的影响,并指出同化水汽吸收通道辐射量的困难所在; Collard (2010) 总结了目前欧洲中心、美国、加拿大、英国及法国等业务预报中心使用 AIRS 的情况,指出目前各业务中心几乎没有用到陆地上的 AIRS 资料,水汽吸收通道用得极少而且在同化中权重很低,没有达到充分利用水汽资料的目的,有云区的资料也用的极少。总体来讲,所用的 AIRS 的通道主要是海洋上晴空区温度信息,同化辐射量方案对利用温度信息极其有效,但同化水汽信息却遇到了极大的困难,主要原因是红外遥感温度与水汽有本质的区别(曾庆存, 1974),而利用灵活多样的反演手段,从高光谱大气探测器中得到温、湿度廓线已比较成熟。

美国威斯康星大学麦迪逊分校气象卫星合作研究所 (Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies, CIMSS) 提出了视场内部分有云情况下的高光谱红外遥感单视场反演方法 (Li and Huang, 1999; Li et al., 2000; Weisz et al., 2007; Zhou et al., 2007), 从高光谱红外遥感中提取大气温湿度廓线信息,得到水平分辨率达到 13.5 km,垂直层达 101 层的高精度的反演温度、水汽廓线资料。目

前, 该 AIRS 反演资料已经应用到台风的预报研究中 (Li and Liu, 2009; Liu and Li, 2010), 由于水汽是台风形成发展的主要原动力, 高质量的 AIRS 反演水汽资料的同化使台风的预报得到显著改进。AIRS 资料也可以提供暴雨系统周围环境场的温度及水汽观测, 从而改进对暴雨系统的模拟, 但同化 AIRS 反演资料用于暴雨的研究工作却开展得很少, 这些工作为把 AIRS 资料应用到暴雨的研究提供经验和参考。因此, 如何利用有效的同化手段, 同化 AIRS 反演温湿度廓线来改进中国地区暴雨的模拟是本文的研究重点。

四维变分同化是为数值天气模式提供最优分析场最有效的方法之一。然而, 该方法基于伴随模式, 需要迭代求解, 其巨大的计算量极大地限制了它的广泛应用。针对此问题, 国内不少学者提出了一些改进方法。Wang and Zhao (2005) 提出了三维映射变分 (3DVM) 的概念, Qiu and Chou (2006) 提出一种基于预报集合的降维资料同化方法 (4DSVD), Cao et al. (2007) 提出了利用适当正交分解 (POD) 降维进行四维变分资料同化的方法, Tian et al. (2008) 也在开展基于本征正交分解的显式四维变分同化方法在陆面资料同化中的研究, Liu et al. (2008, 2009) 提出了集合四维变分同化方案。Wang et al. (2010) 也提出一种实现四维变分同化的经济算法, 该算法使用了降维投影 (DRP) 技术, 因而称为“降维投影四维变分同化 (DRP-4DVar)”。该方法主要思路是, 在低维数的样本空间里, 避开

迭代过程, 通过观测拟合样本来直接求得最优值, 因此在推导和应用中不再需要伴随模式, 实现经济快速的同化技术。目前, DRP-4DVar 已经被成功应用到台风、暴雨等高影响天气的同化研究中 (Liu and Wang, 2009)。

本文以 2009 年 7 月 22~23 日期间的暴雨过程为例, 在 AREM 模式中通过 DRP-4DVar 同化方法, 研究 AIRS 反演资料在暴雨模拟中的作用。

2 个例介绍

本文选取的个例为 2009 年 7 月 22~23 日的一次强降水过程, 此次降水过程主要集中在江淮流域一带, 呈东西走向, 是一次典型的锋面强降水过程。由 NCEP-FNL 分析资料看到 2009 年 7 月 22 日 00:00 (协调世界时, 下同) 的天气形势 (图 1a), 在 850 hPa 等压面中, 沿着 33°N 冷暖气团交界处, 从 111°E~123°E 有强的风切变线, 且切变线南部存在着一个水汽极大值区。切变线的存在, 使得切变线附近产生强烈的气流辐合, 沿切变线南侧输送的暖湿空气与北侧的冷空气在此交汇, 造成对流的产生和不稳定能量的释放, 从而沿着切变线方向产生强降水。由图 1b 可以看出, 沿着切变线降水呈西东 (东南) 带状分布, 最大降水中心位于安徽省西北部, 其中阜南县 24 h 累积降水量达 219.9 mm, 另外 3 个强降水中心位于分别位于河南鲁山 (33.75°N, 112.88°E)、江苏淮安地区 (33.23°N, 119.30°E) 和

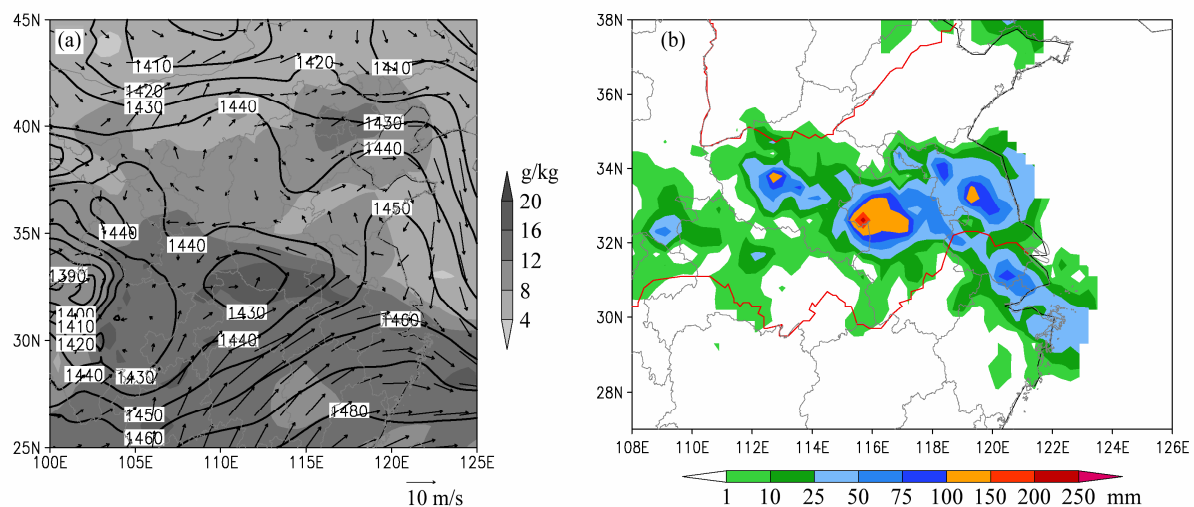


图 1 2009 年 7 月 22 日 (a) 00:00 850 hPa 等压面上的位势高度场 (等值线, 单位: gpm)、比湿场 (阴影) 及风场 (箭头) 和 (b) 江淮流域的 24 h 累积降水量实况

Fig. 1 (a) The geopotential height (isolines, units: gpm), the specific humidity (shaded), and wind field (vector) at 850 hPa at 0000 UTC and (b) the observed 24-h cumulative precipitation on 22 Jul 2009

浙江嘉兴, 其中前两个降水中心的 24 h 累积降水量分别达到 124.7 mm 和 138.5 mm。

3 模式、资料及同化方案

3.1 模式介绍

本文选用 AREM 2.3.1 版本作为数值研究工具。AREM 模式是基于中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG/IAP) REM 模式发展的新一代 ETA 坐标暴雨数值预报模式。目前, 该模式已在国内外多个从事气象、水文和环境的科研和业务单位推广使用, 是我国从事暴雨等中尺度研究和预报的主要工具之一。AREM 模式的一个重要特点是对水汽平流方程设计了简单而有效的保形正定平流差分方案 (Yu, 1994, 1995), 并解决了在 E 网格中的应用问题, 避免了大多数模式中常出现的负水汽现象或平滑耗散过强现象, 因此对降水预报具有很好的效果。在本次降水数值试验中, 模式水平分辨率约为 37 km, 垂直分层为 32 层, 模式模拟范围是 (14°N~54°N, 73°E~136°E), 网格点数为 121×161。模拟中, 模式包含了网格尺度凝结降水、Betts 积云对流参数化、CCM3 非局地边界层参数化和地面通量参数化等较为完善的物理过程。其中, 所有试验中的侧边界条件采用 NCEP-FNL 6 h 资料进行更新。

3.2 资料及其处理介绍

在 2009 年 7 月 22~23 日, 模式区域内能够接收到两条 AQUA 卫星轨道资料, 两条轨道数据的接

收时间分别是 2009 年 7 月 22 日 06:00 及 18:00 左右, 其晴空反演廓线点如图 2 所示。在模拟时间范围内, 江淮地区上空发展起深厚云团, 由于红外遥感受云层干扰, 要获取云层下的大气温度、湿度廓线比较困难, 因此可以用于同化的晴空廓线点主要位于云团周围, 可以为暴雨系统提供环境场的温湿信息, 同时四维变分同化方法用模式做为约束性, 可以得到全场最优的初始场, 进而提高降水预报。

高光谱红外遥感反演资料具有高水平及高垂直分辨率, 其水平分辨率为 13.5 km, 垂直方向有 101 层, 但研究表明, 当观测资料过多、过密时, 不仅浪费计算机资源, 也降低高质量观测点的使用价值。因此, 本文在把 AIRS 反演温湿度廓线用于同化时, 先对其做了稀疏化。在水平方向, 稀疏化到与模式网格点相当的密度, 即以网格点为中心, 取离网格点最近的观测用于同化; 在垂直方向上, 由于锋面降水及对流过程主要发生在对流层, 而平流层对短期降水预报影响较小, 因此在垂直方向上主要选取中低层 (大约间隔 50 hPa) 的观测, 用于同化的 18 个垂直层次依次为 103.0170、151.2660、200.9890、247.4080、300.0000、358.9660、407.4740、459.7120、496.6300、555.1670、596.3060、661.1920、706.5650、753.6280、802.3710、852.7880、904.8660、958.5910 hPa。在进行同化时, AIRS 反演温湿度廓线的观测误差取为: 700 hPa 以上的垂直层温度误差取 1 K, 水汽相对湿度误差取 20%; 700 hPa 以下温度误差为 1.5 K, 水汽相对湿度误差为 15%。

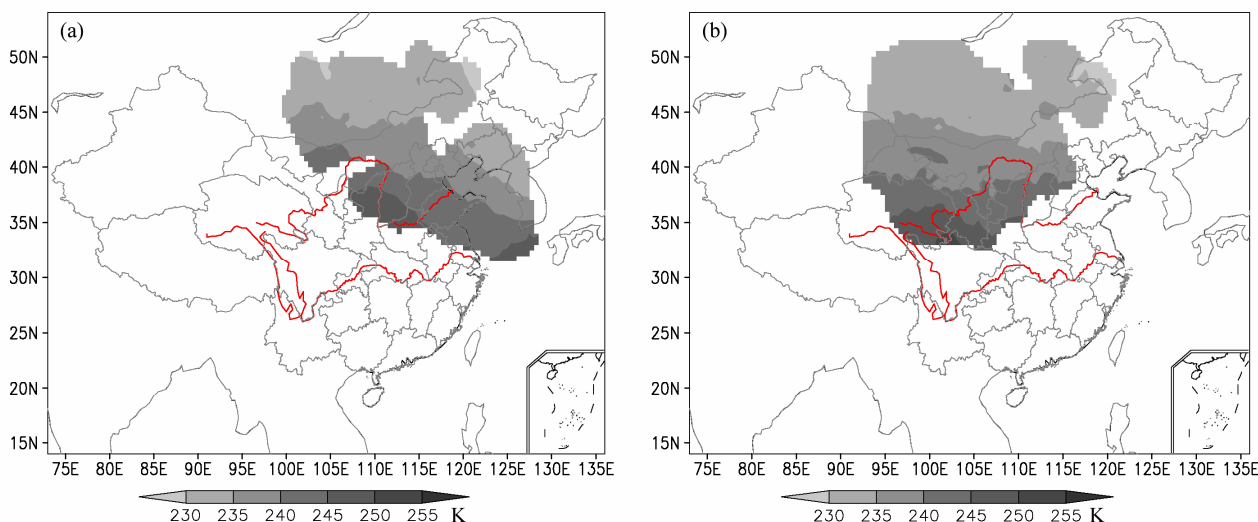


图 2 2009 年 7 月 22 日 (a) 06:00 及 (b) 18:00 左右的 AIRS 反演廓线点 (阴影代表 300 hPa 等压面上的反演温度值)

Fig. 2 Atmospheric InfraRed Sounder (AIRS) retrieval temperature at 300 hPa at (a) 0600 UTC and (b) 1800 UTC on 22 Jul 2009

3.3 同化方案设计

本文所用的同化方案是降维投影四维变分方法 (Wang et al., 2010)。为了考察 AIRS 反演资料在我国夏季暴雨数值模拟中的作用, 并检验 AREM_DRP 同化系统同化 AIRS 反演资料得到的初始场的质量, 本文设计了 3 组试验: 1) 参照试验: 以 NCEP-FNL 分析资料为初始场, 不同化任何资料, 向前预报 24 h; 2) 单次同化试验: 只在 2009 年 7 月 22 日 00:00 进行一次同化, 同化窗为 00:00 至 06:00, 资料位于同化窗末端; 3) 连续同化试验: 在单次同化基础上, 间隔 12 h 再同化一次反演资料, 第二次同化的同化窗为 12:00 至 18:00 (试验设计如表 1 所示)。

表 1 3 组试验设计

Table 1 Designs of three experiments

试验名称	背景场	观测资料及同化设计
单次同化试验	NCEP-FNL 分析资料	2009 年 7 月 22 日 06:00 的 AIRS 反演资料, 同化窗: 00:00 至 06:00
连续同化试验	NCEP-FNL 分析资料	2009 年 7 月 22 日 06:00 的 AIRS 反演资料, 同化窗: 00:00 至 06:00
	以第一次同化结果积分到 7 月 22 日 12:00 的预报场	2009 年 7 月 22 日 18:00 的 AIRS 反演资料, 同化窗: 12:00 至 18:00

4 试验结果及分析

4.1 试验结果

由图 3 明显可以看到, 连续同化试验的效果最优, 鉴于连续同化试验是在单次同化基础上再进行一次同化, 它们的前 12 h 累积降水量是相同的, 因此, 在本节中主要讨论连续同化试验与参照试验的对比分析, 连续同化与单次同化的对比在下一节中详细讨论。

实况的降水分布特征已经在上文中分析。在以 NCEP-FNL 分析资料为初始场、不同化任何资料的参照试验中, 能够把安徽北部, 即本次个例中最大的降水中心模拟出来, 但特大暴雨范围及强度略有偏小, 同时在安徽、河南交界处出现很强的虚假降水。此外, 在河南中西部鲁山一带、江苏淮安一带的强降水中心也没有能模拟出来。而从连续同化 AIRS 反演资料试验的结果不难看到, 连续同化试验对降水有很明显的正效果: 首先, 对河南中部的强降水中心能够模拟出来, 虽然强度没能达到特大暴雨级别, 但是也达到了暴雨等级, 而且降水中心位置和实况非常吻合; 其次, 对江苏淮安一带的降

水也有明显改进, 降水强度模拟与实况相当, 只是降水中心位置略为偏南; 第三, 对嘉兴一带的降水强度也略有改进; 最后, 对本次个例中的安徽中部最大降水中心也有改进, 首先能把强的虚假降水消除, 其次与参照试验相比, 整个特大暴雨区略为南移, 使得对于实况中特大降水中心阜南县 (219.9 mm) 的降水强度有改进, 且特大暴雨区面积稍稍增大, 但同时也把参照试验中强降水中心北部的降水消除, 所以与实况还有些差距。但是连续同化试验对长江入口即南通一带有些虚假降水。因此, 从 24 h 累积降水模拟中看到, 连续同化高光谱红外遥感反演温湿廓线对江淮暴雨的模拟有明显正效果。

4.2 同化影响降水结果的机理分析

以上分析了同化试验的降水结果, 接下来分析同化高光谱红外遥感反演温湿廓线后取得正效果的原因, 即通过改进模式初值中的哪些量从而改进降水预报。由于连续同化试验是分为两次同化过程, 即间隔 12 h 进行同化, 因此分为两步进行分析, 首先给出第一次同化对前 12 h 降水的影响, 然后再给出第二次同化对后 12 h 的影响。7 月 22 日 00:00 至 12:00, 连续同化试验 (图 4b) 能够改进河南省内的强降水中心及消除虚假降水中心, 以及在安徽境内对北部降水减弱, 雨带东南方向伸长, 在其他地方降水与参照试验略有不同。图 4d 给出第一次同化的同化窗始端 (2009 年 7 月 22 日 00:00) 850 hPa 等压面上的位势高度及湿度增量 (同化试验减去参照试验, 下同), 以安徽中东部为中心有一个位势高度增量负值, 即同化后低压槽强度增大, 利于降水的发生, 因此, 增量负值中心与安徽中东部的 12 h 累积降水量正偏差位置相符合; 河南中部的正偏差及河南东部、安徽北部的负偏差, 都与湿度场增量图中的两地附近的湿度增量正值及负值区相对应。图 4e 是在同化窗末端 (2009 年 7 月 22 日 06:00) 850 hPa 等压面上的散度增量, 图 4f 表示 300 hPa 等压面上的散度增量。低层辐合、高层辐散促进垂直运动的发展, 利于降水的发生。由于强烈的暴雨需要有在较短时间内快速的水汽供应和集中, 同时需要有较强的上升运动, 将这一大量的水汽输送向对流层中上层成云致雨 (赵思雄等, 2007), 因此, 在水汽增加、低层辐合加强、高层辐散加强的地方, 正对应着降水的正偏差; 降水负偏差也对应于辐合辐散的增量。图 5 给出的是第二次同化过程的降水偏差及分析增量结果, 情况与第

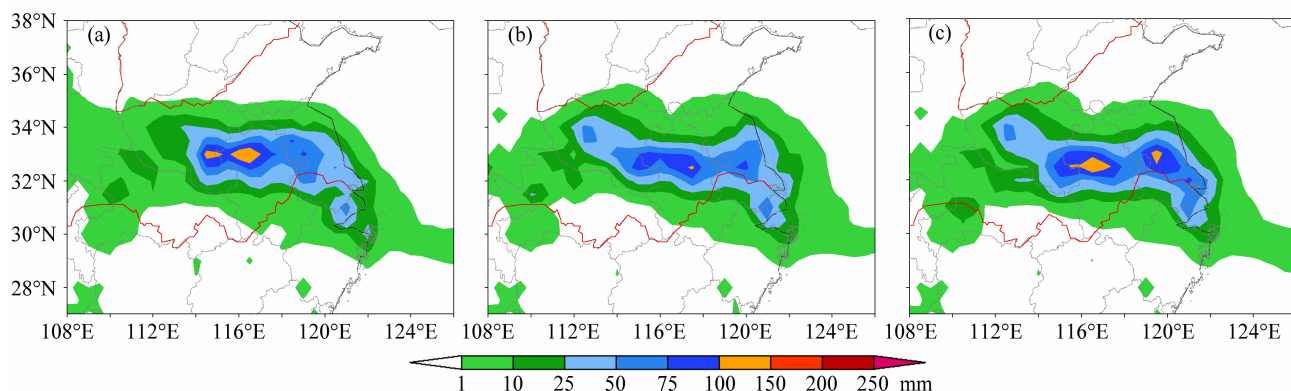


图3 2009年7月22日24 h 累积降水: (a) 参照试验; (b) 单次同化试验; (c) 连续同化试验

Fig. 3 The 24-h rainfall forecasts on 22 Jul 2009 from (a) the control run experiment, (b) the single assimilation of AIRS sounding retrievals, and (c) the cycle assimilation of AIRS sounding retrievals

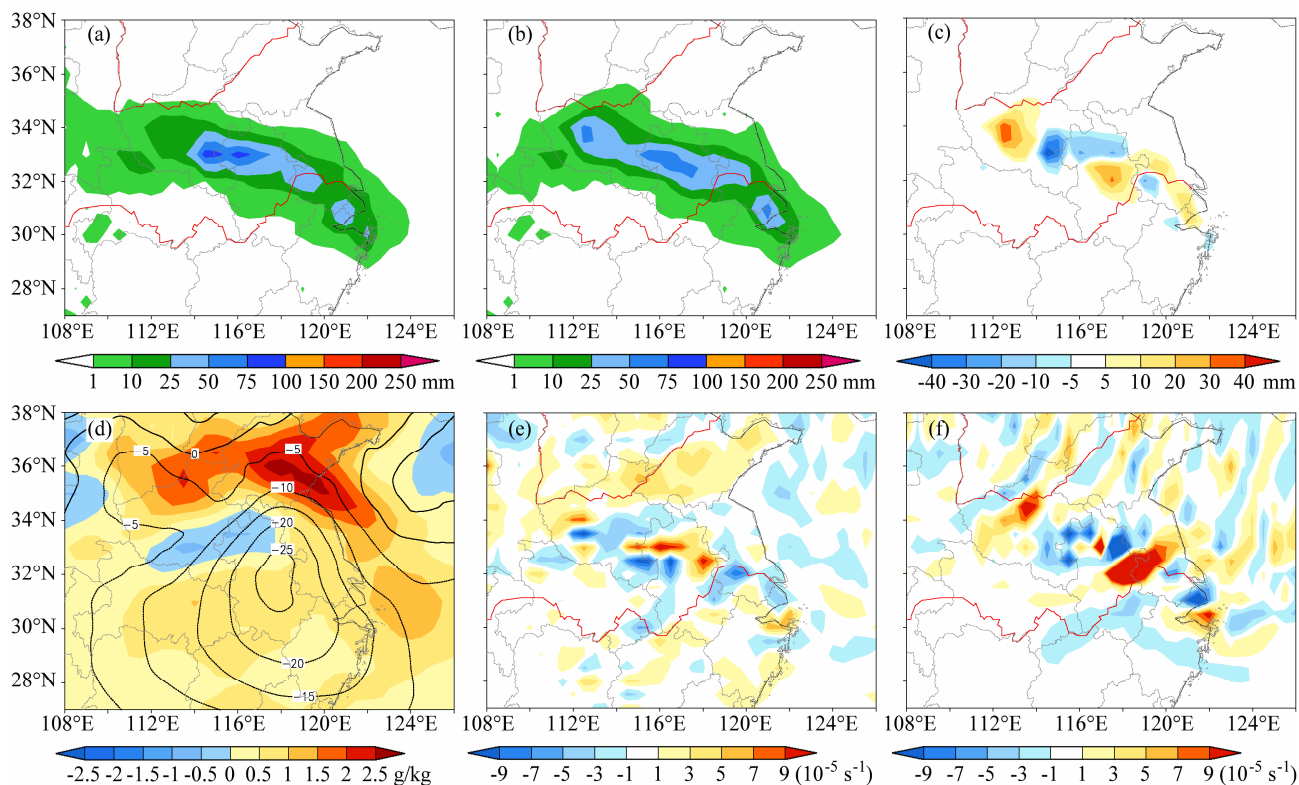


图4 2009年7月22日 (a) 参照试验及 (b) 连续同化试验 00:00 至 12:00 的累积降水量; (c) 为 (b) 与 (a) 之差, 即 12 h 累积降水量偏差; (d) 00:00 (第一次同化的同化窗始端) 850 hPa 等压面上的位势高度增量 (等值线, 单位: gpm) 及比湿增量 (填色); 06:00 (第一次同化的同化窗末端) (e) 850 hPa 及 (f) 300 hPa 的散度增量

Fig. 4 The 12-h rainfall forecasts from 0000 UTC 22 to 1200 UTC 22 Jul 2009 of (a) the control run experiment, (b) assimilation of AIRS sounding retrievals, and (c) the difference between (b) and (a); (d) the 850 hPa geopotential height increments (isolines, units: gpm) and specific humidity increments (shaded) at 0000 UTC on 22 Jul 2009, divergence increments at 0600 UTC on 22 Jul 2009 at (e) 850 hPa and (f) 300 hPa

一次同化结果相同。

由以上分析可知, 在锋面强降水中, 通过降维投影四维变分同化方法同化高光谱红外遥感反演温湿廓线, 依赖模式的动力及物理过程的约束与协调, 不仅调整模式初值的温度场和湿度场, 同时也调整模式的高度场及风场, 得到一个湿度场、辐合

辐散场及系统上升运动相协调匹配的全场最优初值, 从而提高降水模拟。

4.3 两组同化试验的比较

由于模式的累积误差, 观测信息在同化后随着预报的推进在逐渐消亡, 因此, 需要不断地同化新的观测资料来改进预报。在本节中, 主要分析单次

同化试验与连续同化试验的对比。连续两次同化是在单次同化基础间隔 12 h 再同化一次反演资料, 因此, 前 12 h 的降水结果是一样的, 可以看到, 单次同化对 12 h 的降水模拟有很大的改进。图 6a 是单次同化试验的 2009 年 7 月 22 日 12:00 到 23 日 00:00

的 12 h 累积降水量, 图 5b 是对应的连续同化试验的 12 h 累积降水量, 图 6b 是连续同化减去单次同化的累积降水量偏差, 可以看到, 单次同化对 12 h 以后更长时间的降水模拟效果有限。而经过再次同化新的观测, 则能够改进安徽西部及淮安一带的降

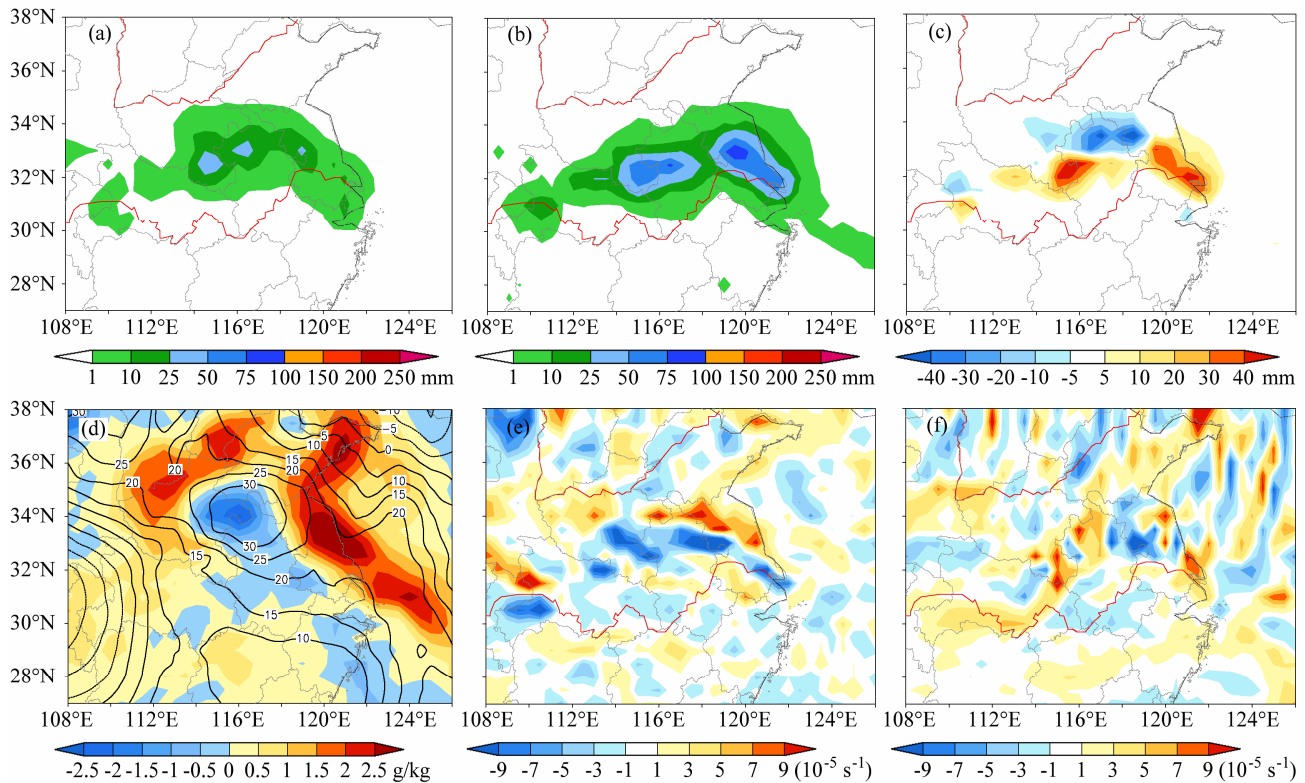


图 5 (a) 参照试验及 (b) 连续同化试验从 2009 年 7 月 22 日 12:00 至 23 日 00:00 的累积降水量, (c) 为 (b) 与 (a) 之差, 即 12 h 累积降水量偏差; (d) 7 月 22 日 12:00 (第二次同化的同化窗始端), 850 hPa 等压面上的位势高度增量 (等值线, 单位: gpm) 及比湿增量 (填色); 7 月 22 日 18:00 (第二次同化的同化窗末端) (e) 850 hPa 及 (f) 300 hPa 的散度增量

Fig. 5 The 12-h rainfall forecasts from 1200 UTC 22 Jul to 0000 UTC 23 Jul 2009 of (a) the control run experiment and (b) cycle assimilation of AIRS sounding retrievals, (c) the difference between (b) and (a); (d) the 850-hPa geopotential height increments (line, units: gpm) and specific humidity increments (shaded) at 1200 UTC on 22 Jul 2009, the divergence increments at 1800 UTC on 22 Jul 2009 at (e) 850 hPa and (f) 300 hPa

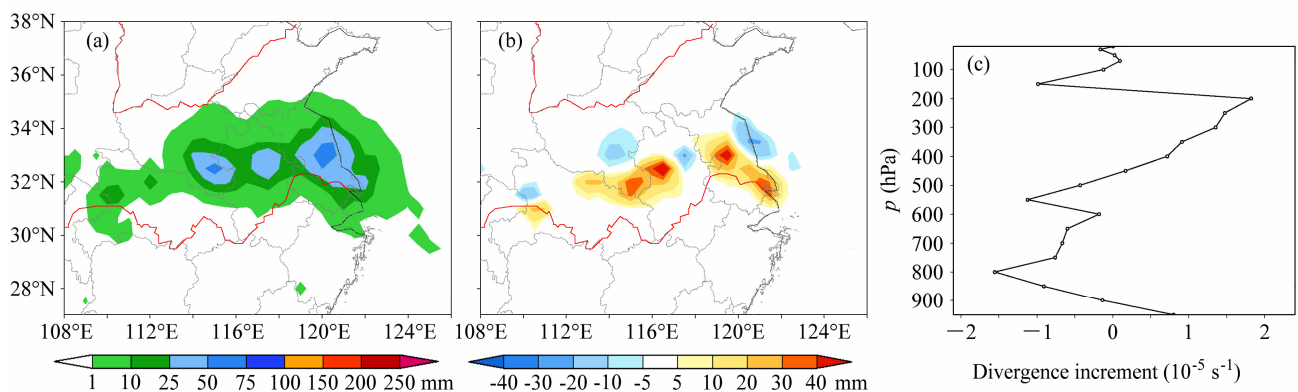


图 6 2009 年 7 月 22 日 12:00 至 23 日 00:00 (a) 单次同化试验的 12 h 累积降水量和 (b) 连续同化试验与单次同化试验的累积降水量偏差; (c) 22 日 18:00 (连续同化试验中第二次同化过程的同化窗末端) (119.5°E, 33°N) 处, 连续同化试验与单次同化试验散度差的垂直廓线

Fig. 6 The 12-h rainfall forecasts from 1200 UTC 22 Jul to 0000 UTC 23 Jul 2009 of (a) the single assimilation of AIRS sounding retrievals and (b) the difference between the cycle and single assimilations; (c) the vertical profile of divergence increments of cycle assimilation at the grid (33°N, 119.5°E) at 1800 UTC on 22 Jul 2009

水,虽然也带来南通附近的虚假降水,总体的改进效果还是很明显。同样的,再次同化 AIRS 反演资料后,会对模式的温湿风压场都有调整,其结果与上文所述类似(图略)。由于连续同化试验的降水最大改进在于淮安和安徽西部附近,因此,以淮安地区的最大降水偏差点进行散度的分析,图 6c 显示了在(33°N, 119.5°E)处,垂直方向上的散度增量(即连续同化减单次同化)。显而易见,该点的散度在低层辐合增强、高层辐散增强,非常有利于降水的发生,因此对应着正的降水偏差。两组对比试验说明循环同化能连续吸收更多观测资料从而不断改进降水模拟。

5 结论与讨论

数值预报十分依赖初值,初值的好坏直接影响预报效果。高光谱大气红外探测仪能够不受地理环境的影响,可以提供高时空分辨率的大气层温湿信息,美国威斯康星大学麦迪逊分校 CIMSS 开发的反演算法,能够从巨量的高光谱探测数据中提取高精度的温度廓线资料,以及与暴雨关系密切的水汽廓线资料。降维投影四维变分同化方法不需要伴随模式,通过在低维数样本空间求解最优值,计算量大大减小,可以实现快速同化。因此,本文在 AREM_DRP 系统中,对 2009 年 7 月 22 日江淮暴雨两个例进行 AIRS 反演廓线的同化研究,设计 3 组试验开展讨论。通过试验的降水结果比较,以及降水改进机理探讨,可以得到以下几个结论:1) 参照试验较好地模拟出本次降水过程,能抓住这次过程的主要强降水中心,但对于其余几个次降水中心没有好的表现;2) 连续同化 AIRS 反演资料能够明显地改进降水模拟,对此次过程中的 4 个暴雨中心都能很好地模拟,而且消除了参照试验中的强虚假降水中心;3) 单次同化对同化后 12 h 内的降水改进较大,对更长时间的降水模拟效果有限,而循环连续同化的模拟效果比单次同化有进一步的改进,也说明了循环同化能够不断引入新的观测信息从而使降水模拟不断得到改进;4) 通过四维变分同化系统的模式约束与协调性,同化反演温湿廓线后,对风压温湿场都进行了调整,改进暴雨发展的天气形势,从而提高暴雨的预报技巧。

本文只是针对一次暴雨过程进行同化分析,表明高光谱大气红外探测仪反演资料的同化对本次

降水过程的模拟有重要的作用。在今后的工作中继续研究更多降水过程,以揭示 DRP-4DVar 方法同化 AIRS 反演温湿廓线在降水模拟中的普遍作用。

致谢 本文所使用的 AIRS 反演资料是由威斯康星大学麦迪逊分校 CIMSS 的李金龙研究员提供,特此感谢。

参考文献 (References)

- Cao Y H, Zhu J, Navon I M, et al. 2007. A reduced-order approach to four-dimensional variational data assimilation using proper orthogonal decomposition [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 53 (10): 1571–1583.
- Collard A. 2010. An overview of the assimilation of AIRS and IASI radiances at Operational NWP Centres [C]// The 17th International TOVS Study Conference (ITSC-17). Monterey, CA, USA.
- Eyre J, Hilton F. 2010. Beyond optimal estimation: Sensitivity of analysis error to the specification of background error [C]// The 17th International TOVS Study Conference (ITSC-17). Monterey, CA, USA.
- Guo Y R, Kuo Y H, Dudhia J, et al. 2000. Four-dimensional variational data assimilation of heterogeneous mesoscale observations for a strong convective case [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128 (3): 619–643.
- Li J, Huang H L. 1999. Retrieval of atmospheric profiles from satellite sounder measurements by use of the discrepancy principle [J]. *Appl. Opt.*, 38: 916–923.
- Li J, Liu H. 2009. Improved hurricane track and intensity forecast using single field-of-view advanced IR sounding measurements [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36 (11): L11813, doi: 10.1029/2009GL038285.
- Li J, Wolf W W, Menzel W P, et al. 2000. Global soundings of the atmosphere from ATOVS measurements: The algorithm and validation [J]. *J. Appl. Meteor.*, 39(8): 1248–1268.
- Liu C S, Xiao Q N, Wang B. 2008. An ensemble-based four-dimensional variational data assimilation scheme. Part I: Technical formulation and preliminary test [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136 (9): 3363–3373.
- Liu C S, Xiao Q N, Wang B. 2009. An ensemble-based four-dimensional variational data assimilation scheme. Part II: Observing system simulation experiments with Advanced Research WRF (ARW) [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137 (5): 1687–1704.
- Liu H, Li J. 2010. An improvement in forecasting rapid intensification of typhoon Sinlaku (2008) using clear-sky full spatial resolution advanced IR soundings [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 49 (4): 821–827.
- Liu J J, Wang B. 2009. Assimilating amounts of precipitation using a new four-dimensional variational method [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2 (6): 357–361.
- Qi L L, Sun J H. 2006. Application of ATOVS microwave radiance assimilation to rainfall prediction in summer 2004 [J]. *Advance in Atmospheric Sciences*, 23 (5): 815–830.
- Qiu C, Chou J. 2006. Four-dimensional data assimilation method based on SVD: Theoretical aspect [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 83 (1–4): 51–57.
- Tian X J, Xie Z H, Dai A. 2008. An ensemble-based explicit four-dimensional variational assimilation method [J]. *J. Geophys. Res.*

- Atmos., 113 (D21): 1–13.
- Wang B, Liu J J, Wang S D, et al. 2010. An economical approach to four-dimensional variational data assimilation [J]. *Advance in Atmospheric Sciences*, 27 (4): 715–727.
- Wang B, Zhao Y. 2005. A new approach to data assimilation [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 63 (5): 694–701.
- Weisz E, Li J, Li J L, et al. 2007. Cloudy sounding and cloud-top height retrieval from AIRS alone single field-of-view radiance measurements [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (12): L12802, doi: 10.1029/2007GL030219.
- Wolcott S W, Warner T T. 1981. A moisture analysis procedure utilizing surface and satellite data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 109 (9): 1989–1998.
- Yu R C. 1994. A two-step shape-preserving advection scheme [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 11 (4): 479–490.
- Yu R C. 1995. Application of a shape-preserving advection scheme to the moisture equation in an E-grid regional forecast model [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 12 (1): 13–19.
- 曾庆存. 1974. 大气红外遥测原理 [M]. 北京: 科学出版社, 174pp. Zeng Qingcun. 1974. Principle of Atmospheric Infrared Remote Sensing [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 174pp.
- 张昕, 刘月巍, 王斌, 等. 2003. “98.7” 特大暴雨降水资料的四维变分同化研究 [J]. *自然科学进展*, 13 (12): 1329–1333. Zhang Xin, Liu Yuewei, Wang Bin, et al. 2003. Four-dimensional variational assimilation of precipitation data for “98.7” [J]. *Progress in Natural Sciences (in Chinese)*, 13 (12): 1329–1333.
- 赵思雄, 张立生, 孙建华. 2007. 2007 年淮河流域致洪暴雨及其中尺度系统特征的分析 [J]. *气候与环境研究*, 12 (6): 713–727. Zhao Sixiong, Zhang Lisheng, Sun Jianhua. 2007. Study of heavy rainfall and related mesoscale systems causing severe flood in Huaihe River basin during the summer of 2007 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 12 (6): 713–727.
- Zhou D K, Smith W L, Liu X, et al. 2007. Physically retrieving cloud and thermodynamic parameters from ultraspectral IR measurements [J]. *J. Atmos. Sci.*, 64 (3): 969–982.
- Zou X, Kuo Y H. 1996. Rainfall assimilation through an optimal control of initial and boundary conditions in a limited-area mesoscale model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 124 (12): 2859–2882.
- Zupanski D, Mesinger F. 1995. Four-dimensional variational assimilation of precipitation data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 123 (4): 1112–1127.