

多源卫星观测数据在全球四维变分同化系统中的 应用

曹小群* 张卫民 刘柏年 宋君强

国防科学技术大学计算机学院 湖南 长沙 410073

摘要 首先描述了高分辨率全球四维变分资料同化系统的基本软件框架,并对多源卫星资料同化的关键技术作了阐述;其次通过观测数据的统计分析,说明了新型卫星观测数据的引入不但能够增加同化系统中的信息量,而且能够提高其它种类观测数据的同化利用率;然后通过一个月完整的统计检验结果,说明:无论是从距平相关还是均方根误差而言,新型卫星观测数据(无线电掩星和卫星风)的引入和有效同化后,对高分辨率同化预报系统预报技巧的提高是十分明显的;最后,通过一个强降水个例的分析结果,表明说明基于新的初始场全球模式 YH GSM 降水预报准确性较高,就强降水中心区域的预报而言, YH GSM 模式预报和观测实况较为一致,优于国外模式降水预报.

关键词 数值天气预报; 四维变分资料同化; 卫星观测数据; 切线性/伴随方程; 变分偏差订正; 质量控制

中图分类号 P405 文献标识码 A

The Application of Multi-source Satellite Observations in the Global 4D-VAR System

Caoxiaqun Zhangweiming Liubainian Songjunqiang

*(School of Computer Science, National University of Defense Technology,
Changsha 410073, China)*

Abstract At first, the infrastructure software frame of a high-resolution global four-dimensional variational data assimilation system (YH4DVar) is described, and the key technologies for assimilation of multi-source satellite data are also introduced. Secondly, it is shown that the new types of satellite data not only increase the amount of information in the assimilation system, but also raise the rate of

收稿日期: 年-月-日; **收到修改稿日期:** 年-月-日

基金项目: 国家自然科学基金(41105063)资助课题。

作者简介: 曹小群(1980—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事数值天气预报技术、计算机应用技术、反问题方面的研究。E-mail:caoxiaoqun@nudt.edu.cn

*通信联系人。E-mail:caoxiaoqun@nudt.edu.cn

utilization for other kinds of observations from statistics analyses. Then, according to abnormal correlation and rms error from a complete month's statistical verification, it is concluded that the introduction and effective assimilation of new satellite data (GPS RO and AMV) can greatly improve the skill score of high-resolution numerical weather prediction (NWP) system. At last, the global spectral forecast model (YHGSF) can predict the strength and location of a heavy rain weather process more accurately with the new initial field. The rain accumulation from YHGSF forecast agrees very well with observations and is superior to rain forecast of NWP model abroad.

Keywords numerical weather prediction; 4D-Var; satellite observation; tangent linear/adjoint equation; variational bias correction; quality control

1 引言

从气象水文观测系统中获得的观测资料在时空上都是离散分布的,在某些地理区域甚至存在“信息盲区”,但许多实际应用需要完整的规则分布的地球物理场。因此,一般需要将观测资料从测量空间(或观测空间)映射到状态空间(或模式空间,例如数值天气预报模式格点空间)中。资料同化的目的是以最优方式填补“信息盲区”,以非数学语言可以描述如下:通过融合可获得的各种已知信息(包括先验量、观测数据、动力预报模式和相应的误差统计量等),最优估计出非线性物理系统模式在某时刻状态向量值的过程^[1]。

目前遥感数据已成为大气观测的主要手段,资料同化的主要对象由常规观测数据变为天基、空基和地基等多源遥感探测数据。我国正在发展的高分辨率对地观测系统中多种载荷能够提供全球范围内的大气、海洋和地表等的气象水文观测信息,特别是为海洋和高原等缺乏常规观测资料的区域提供高精度的红外、微波和掩星探测等多种类型的观测数据。因此高分辨率对地观测系统将完善我国的气象水文观测网,丰富气象水文资料同化系统的观测资料源,从而提

高我国业务数值天气预报的预报准确率。与常规气象水文观测资料相比较,多源遥感观测资料具有准连续性、空间分辨率高、观测范围广等优点。目前国外众多的数值预报业务和研究单位都努力将多源遥感观测资料应用到数值天气预报系统中,遥感资料已经成为资料同化系统可用观测资料的主体。但是遥感观测数据往往是一定波长的电磁辐射,因而不能像传统的常规观测一样直接应用于预报系统中,同时存在系统性偏差;另外,遥感探测资料的数据量十分巨大,对这些资料的处理、误差统计、质量控制和资料同化将会带来十分巨大的存储量和计算量。卫星观测资料的这些特点要求发展类似四维变分^[2-6]同化这样的复杂资料同化技术。

国防科学技术大学计算机学院于 1987 年开始从事数值天气预报技术的研究,在多源数据气象水文同化方面具有深厚的技术积累和坚实的研究基础。2005 年 9 月,完成全球气象资料三维变分同化原型系统的设计和实现,并突破四维变分同化的一系列关键技术;2010 年 6 月实现了四维变分同化系统的业务化^[3, 6],实现了 ATOVS 卫星辐射资料的直接同化。最近几年,在多源卫星遥感资料同化技术方面,已经在四维变分同化框架内实现了辐射率资料筛选、变分偏差订正、变分质量控制等关键技术,新增对无线电掩星观测和卫星风等观测资料的同化,同时在高光谱红外辐射通道资料同化、散射计风场观测资料同化和云水污染微波资料同化等方面开展了一系列的理论研究工作。本文首先将介绍国防科大计算机学院开发的高分辨率全球四维变分资料同化系统(YH4DVAR)的框架结构,并描述一些多源卫星资料同化技术;其次对多源卫星资料同化效果进行了分析,说明了新卫星观测的引入能够显著提高同化预报评分;最后是结束语。

2 YH4DVAR 多源卫星资料同化

高分辨率全球四维变分资料同化系统(YH4DVAR)是在其三维变分同化系统的基础上通过增加预报模式的不同分辨率切线性/伴随模式发展而来,采用了多

分辨率增量变分同化框架^[6-7]、小波背景场误差模型^[1, 8]、卫星辐射率资料直接同化、切线/伴随模式等技术^[2, 5]，利用 Fortran90 程序设计语言、MPI/OpenMP 混合并行计算实现。在 YH4DVAR 中每一种新型遥感数据的引入，需要在同化框架内研究和设计一系列新的模块，如新型观测数据预处理模块、质量控制^[9]模块和观测算子的正模式和切线性/伴随模式等。YH4DVAR 的框架关键技术描述如下。

2.1 同化框架的描述

四维变分同化设计的首要问题是要确定目标函数。YH4DVAR 的目标函数拟由背景场项 J_b 、观测项 J_o 和数值滤波重力波控制项 J_c 三项组成，即目标函数为 $J=J_b+J_o+J_c$ 。关于 J_c 的处理这里不做讨论，忽略 J_c 项后的目标函数的具体形式为：

$$J(x_0) = \frac{1}{2}(x_0 - x_b)^T \mathbf{B}^{-1}(x_0 - x_b) + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^N \{H_i[M_{t_0,t_i}(x_0)] - y_i^o\}^T \mathbf{O}_i^{-1} \{H_i[M_{t_0,t_i}(x_0)] - y_i^o\}$$

其中的 x_0 是非线性预报模式的初始状态，也称为分析场， y_i^o 是位于第 i 个时间槽内的观测资料，而 H_i 是观测 y_i^o 所对应的观测算子， M_{t_0,t_i} 算子表示将非线性正模式从初始时刻 t_0 积分到 t_i 时刻，因此 $x_i = M_{t_0,t_i}(x_0)$ 是由模式积分得到的 t_i 时刻模式状态。由于 t_i 时刻模式状态是从上一个时刻 t_{i-1} 到当前时刻的向前积分，一般的预报问题可表示为： $x_i = M_{t_{i-1},t_i}(x_{i-1})$ 。表达式 $y_i = H_i[M_{t_0,t_i}(x_0)]$ 的含意是将 t_i 时刻的模式状态映射为观测空间中的值。另外，为了有效地实施变分偏差订正^[10]，在目标泛函中引入了观测偏差估计参数和观测资料偏差订正项，因篇幅所限，这里不再赘述。

分析变量直接定义为模式变量涡度 ζ 、散度 η 、温度和地面气压 (T, p_{surf}) 以及比湿 q ，垂直分层与模式分层完全一致，目标函数中的分析场 x_0 是由分析变量在空间网格上的分布组成。内循环的分辨率随着外循环的迭代增长，由上一

步低分辨率的迭代得到的代价函数信息为接下来的高分辨率迭代提供了有效的预处理，这样做可以减少迭代的次数。内循环中的模式算子和观测算子进行了线性化处理，确保目标函数是完全二次型，从而在内循环中采用了共轭梯度法有效地求解极小化，非线性的影响集中在外循环中。

为了有效减少计算量，高分辨率全球四维变分资料同化系统(YH4DVAR)采用多增量方法。在计算的组织上，同化系统分为外循环和内循环两个部分。外循环在 T799 分辨率下进行，主要由模式轨迹计算和更新向量计算两部分组成，模式轨迹计算直接采用非线性完全模式，更新向量是在与非线性模式相同的分辨率下进行计算。内循环完成最优化算法的迭代计算，主要由四维变分框架、切线性/伴随模式组成，内循环迭代在较低分辨率（T159/T255）下进行，采用 12 小时连续模式状态（“轨迹”）附近进行线性化的切线性模式的伴随模式计算目标函数的梯度，极小化算法采用共轭梯度法。最内层循环低分辨率 T159 的迭代能够为较高分辨率 T255 的迭代提供有效的预处理，以减少迭代的次数。内循环的模式轨迹由 T799 模式轨迹插值得到，计算流程如图 1 所示。

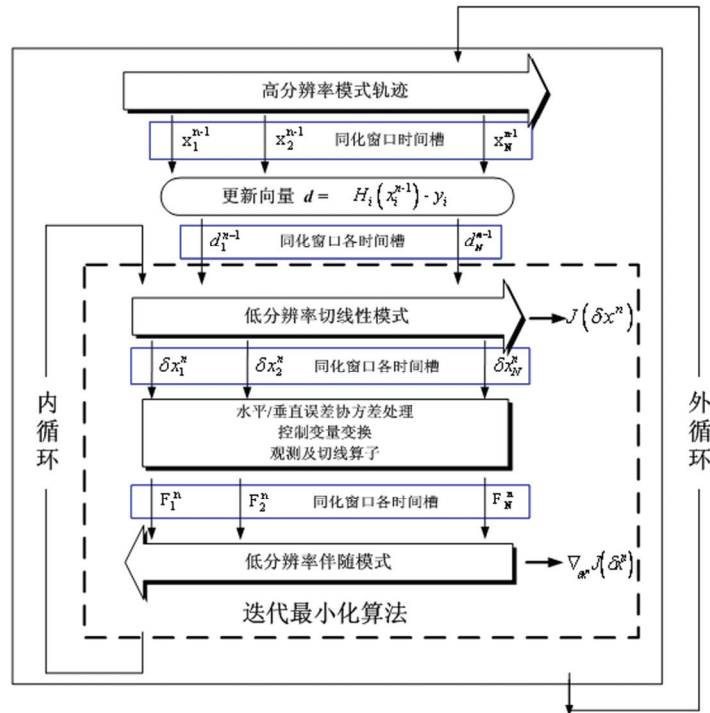


图 1 YH4DVAR 系统的计算流程

YH4DVAR 的主要作业步骤包括：

1) 计算高分辨率的背景场与观测的差值，得到更新向量，并存储在同化输入输出管理 ODB 中，然后进行观测资料筛选，决定在极小化过程中哪些观测是可用的。模式轨迹被插值到下一个作业步的分辨率上并输出。

2) 在低分辨率上的第一次极小化利用简化的切线性物理过程和切线性观测算子产生初步的低分辨率上分析增量。计算出分析 Hessian 矩阵的特征向量，并用于接下来最内层循环迭代的预处理。该作业步还计算出用于误差协方差循环所需的分析误差和背景误差。

3) 更新高分辨率的轨迹，以考虑非线性的影响。新的大气状态对观测的偏差存储在 ODB 中，分析问题在已更新的模式状态附近重新被线性化。计算变分质量控制，得到的 QC 权重用于接下来的极小化。更新后模式轨迹被插值到下一个作业步的分辨率上并输出。

4) 在提高的分辨率上，用较完整的切线性物理过程，作第二次主要的极小化计算。

5) 生成高分辨率的分析场，计算所有观测与分析值的差值（包括没有用于分析的观测资料与分析场的差，主要用于诊断）。

2.2 多源卫星观测同化技术

与常规观测不同，卫星观测的同化需要研究新的技术，否则很难改进分析场和预报场的质量。首先卫星观测数据基本上都不是模式量，因此在观测、传输、预处理和模拟过程中都会引入系统性的偏差。如果不将偏差的大小控制在观测误差水平之下，则通过同化这些资料对数值预报产生正效果是不可能的。因此偏差订正是多源卫星观测数据气象水文同化中的关键技术之一。另外，在变分资料同化中，由于采用二次形式的目标泛函，因此通常假设观测误差是高斯分布的；而实际资料的统计结果表明，非常规观测资料中通常包含非高斯型的显著误差，同样由高分辨率对地观测系统的探测仪器所引入的观测误差很大

程度上不满足高斯分布。显著误差的存在将导致非二次型目标函数，同时质量控制过程将剔除大部分好的观测资料，这是导致非常规资料同化中资料利用率低和同化效果不好的重要原因之一。因此与常规观测数据的同化方法不同，对每种卫星观测数据都需要发展卫星观测预处理和同化技术，图 2 中显示了 YH4DVAR 系统中的主要模块和卫星观测同化技术。

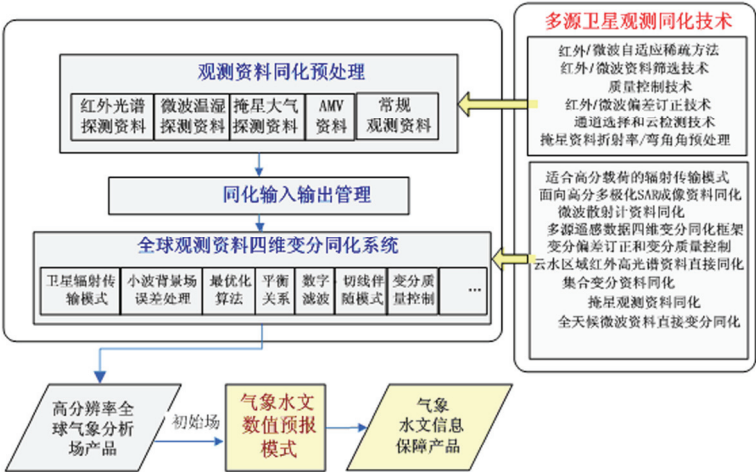


图 2 YH4DVAR 系统中的主要模块和卫星观测同化技术

首先在 YH4DVAR 系统中研究和实现了一种能自动感知传感器上每个通道的偏差变化，并对偏差参数进行相应调整的偏差订正技术。变分偏差订正关键技术的解决方案设计如下：首先对不同种类卫星的不同类型的探测仪器定义不同的变分偏差订正模型，主要包括偏差预报因子和回归统计系数等，并对有关偏差变量进行初始化；其次读入前一个同化时次生成的变分偏差订正系数文件；接着计算卫星观测资料的偏差量，在两个最小化过程中，将偏差模型中的参数作为控制变量的一部分，即同化过程中对偏差参数进行调整，并应用到常规观测资料和卫星观测资料同化中，从而影响和改善卫星资料同化效果；然后将最后的偏差参数写入变分偏差订正系数文件中供下一个同化时次使用。

其次在 YH4DVAR 系统中实现了观测数据的变分质量控制（VarQC）技术。VarQC 以贝叶斯概率理论为基础，把显著误差纳入到观测误差中，使质量控制具备处理非高斯型误差性质的观测。VarQC 通过质量控制权重对目标函数观测项进行修正，从而将质量控制融入到变分同化中。VarQC 是在分析过程中

完成质量控制，而不是分析之前的一个预处理过程。VarQC 是对观测和分析之间的距离的检验，如果资料与周围的资料很不一致就可以有效地拒绝该资料，不过在 VarQC 分析之前还需要作各种质量控制检验，其中背景场检验 BgQC 是最重要的。

另外，在 YH4DVAR 系统中钟对红外波段卫星观测数据实现了云检测算法。目前，大多数的数值天气预报系统主要集中在同化晴空辐射率。由于完全无云的资料是非常稀少的（约 10%），对于多数地区而言，尽管存在云影响，但是有些通道对于云不敏感（如：通道的权重函数完全位于云顶以上），如果能够检测出这些通道，则可以有效提高卫星资料的利用率，也能避免潜在的可用信息的丢失（对于红外高光谱资料而言，可能导致成千上万个通道资料的损失）。在 YH4DVAR 中依据 McNally 云检测方案设计了红外光谱仪器观测数据的云检测算法。McNally 云检测方法基于波段分离、通道排序和数字滤波等技术，利用红外观测亮温和背景场模拟亮温之差（通常由数值模式 6 小时预报场提供），查找不受云污染影响通道。

3 多源卫星观测资料同化效果分析

3.1 多源观测数据同化结果统计分析

采用上面的多源卫星观测同化技术后，在高分辨率全球四维变分资料同化系统中目前已经能够对多种卫星观测数据进行同化，主要包括：常规观测数据、卫星辐射率资料、无线电掩星观测资料和卫星风观测数据等，具体如表 1-4 所示。卫星辐射率资料主要是晴空微波温湿辐射率和红外探测资料，包括的仪器有先进微波探测单元 A/B(AMSU-A/B)、微波湿度探测仪(MHS)和红外探测仪 3/4 型(HIRS-3/4)。对于云雨区域、陆地和冰面的辐射率观测数据目前还不能进行有效同化。无线电掩星观测资料的同化主要是利用一维弯曲角观测算子对弯曲角观测元素进行有效同化，同化的观测数据包括从 CHAMP、COSMIC-1、COSMIC-2、COSMIC-4、COSMIC-5、COSMIC-6 等 GPS 卫星收集的数据。由

于 GPS 掩星观测在垂直方向具有非常高的分辨率，一个观测报文中包含了 200~300 个垂直层，为了减小垂直相关的影响，在对 GPS RO 弯角进行同化之前，在垂直方向进行了稀疏。同化的卫星风观测来源于静止星和极轨星两个系列，静止卫星包括：METEOSAT-7 卫星、MTSAT-2 卫星(GMS 后继卫星)、GOES-13/15 卫星，极轨卫星包括 EOS TERRA 卫星和 AQUA 卫星。METEOSAT-7 卫星风观测主要来自红外通道、可见光通道、微波图像通道和微波水汽通道。MTSAT-2 卫星风观测主要来自红外通道和微波图像通道。GOES-13/15 卫星风观测主要来自红外通道、可见光通道和微波图像通道。极轨卫星包括：EOS TERRA 卫星和 AQUA 卫星，其卫星风观测主要来自 MODIS 仪器上的红外通道、可见光通道、微波图像通道和微波水汽通道，极轨卫星在高纬度和极地地区高频扫描观测，从而也能够有效导出卫星风观测，对解决该区域观测稀少问题具有一定作用。

通过对比表 1 和 2 可知，无线电掩星和卫星风观测的引入能够极大地丰富了高分辨率全球四维变分资料同化系统中的观测信息，从单一的辐射率同化增加为辐射率、弯角观测和风矢量观测；被同化观测数据量从接近 80 万增加到 93 万个；非常规观测资料的比例大幅增加，由 62.569%增加到 68.204%。另外从表中可知，由于无线电掩星和卫星风观测同化的引入，改善了常规观测和卫星辐射率的同化，使二者的被同化观测数量有所增加，观测利用率有所提高。原因是新观测数据的引入进一步填补了观测信息“盲区”，使得分析场和背景场的质量进一步提高，增加了与观测实况的一致性，从而使得原来不能被同化的观测能够被同化，对分析场产生正贡献。

表 1 不加无线电掩星和卫星风观测时被同化的观测数据量(2013080500)

种类统计	常规观测	卫星辐射率	观测总量
数量	297699	497621	795320
百分比	37.431%	62.569%	

表 2 增加无线电掩星和卫星风观测后被同化的观测数据量(2013080500)

种类统计	常规观测	卫星辐射率	无线电掩星	卫星风	观测总量
数量	297794	497762	71630	69378	936564
百分比	31.796%	53.148%	7.648%	7.408%	

表 3 YH4DVAR 中观测报文筛选结果(2013091000-12 小时同化窗口)

观测类型	原始报文数量	同化报文数量	利用率(%)
SYNOP	93242	69133	74.14
AIREP	50804	36406	71.66
TEMP	782	777	99.36
PILOT	468	418	89.32
AMV	732029	30463	4.16
GPS RO	1051	1046	99.52
RADIANCE	521852	79271	15.19
Total	1400228	217514	15.53

表 3 显示的是 2013 年 9 月 10 日 00 时 12 小时同化窗口内不同种类的观测报文总数量、被同化利用的报文数量及报文利用率。在一个观测报文中只要有一个观测元素(例如、温度、压强、风矢量、辐射率和弯曲角等)被同化,则认为整个观测报文是被 YH4DVAR 系统接受利用的,在 YH4DVAR 系统中报文是以 BUFR 编码中一个“Message”为单位的。从表 3 中可知,无线电掩星观测、无线电探空和测风报三类观测报文的利用率最高,远远高于其它种类的观测报文,说明这三类观测报文的总体质量较好。辐射率和卫星风两类观测报文利用率最低,虽然原始报文数量巨大,但能通过 YH4DVAR 系统严格质量控制和筛选步骤后留下来对分析场产生贡献的观测报文非常少。

表 4 YH4DVAR 中观测元素筛选结果(2013091000-12 小时同化窗口)

观测类型	观测数据量	同化数据数量	利用率(%)
SYNOP	2399099	88695	3.7%
AIREP	254020	107419	42.3%
TEMP	434448	90167	20.8%
PILOT	45975	15100	32.8%
AMV	3660145	60926	1.7%
GPS RO	71468	65938	92.3%
RADIANCE	7140980	461766	6.5%
Total	14006135	890011	6.4%

表 4 显示的是 2013 年 9 月 10 日 00 时 12 小时同化窗口内不同类型观测数

据元素总数量、被同化利用的观测数量及观测利用率。目前在 YH4DVAR 系统中，对于 SYNOP 观测，同化的观测要素包括 2 米湿度、2 米温度、地表气压和 10 米风矢量；对于飞机报观测，同化的观测要素包括温度和风分量；对于 AMV 观测，同化的观测要素主要是风分量；对于探空观测 TEMP，同化的观测要素包括湿度、温度和风分量；对于测风报 PILOT，同化的观测要素主要是风分量；对于 RADIANCE 观测，同化的观测要素主要是辐射率；对于 GPS RO 观测，同化的观测要素主要是弯曲角。从表 4 中可知，就被同化的观测要素而言，无线电掩星观测、飞机报和测风报三类观测数据的利用率最高。辐射率、卫星风和地面报三类观测数据利用率较低，大部分观测数据不能通过 YH4DVAR 系统严格的质量控制和筛选步骤。在 YH4DVAR 系统的下垫面分析中使用最优插值对地面报观测进行再一次同化分析。

表 5 2013 年 7 月 00 时 500hPa 位势高度距平相关系数比较

实验名称	区域	24H	48H	72H	96H	120H	144H	168H
不同化 GPSRO 和卫星风	北半球	0.984	0.957	0.917	0.868	0.800	0.722	0.634
	南半球	0.988	0.958	0.908	0.832	0.729	0.627	0.529
同化 GPSRO 和卫星风	北半球	0.986	0.965	0.939	0.897	0.836	0.765	0.682
	南半球	0.993	0.975	0.940	0.883	0.807	0.706	0.592

为了客观评价 YH4DVAR 系统对 GPS RO 和卫星风两种观测的同化能力，利用 2013 年 7 月 1 日到 2013 年 8 月 10 日为期 41 天的观测资料，对 YH4DVAR 和高分辨率全球谱模式组成的系统进行同化预报试验，然后利用 WMO 规定的标准统计检验程序对分析预报结果进行统计检验。表 5 反映了在 2013 年 7 月北半球和南半球两个区域的 500pha 高度场预报对分析距平相关系数的月平均统计检验结果，可以看出无论是北半球还是南半球，在同化 GPSRO 和卫星风观测数据后，24H~168H 的距平相关系数都有明显提高。虽然在 7 月份由于台风天气系统较多，对 GPSRO 和卫星风观测进行有效同化后，在北半球第 7 天的预报对分析的距平相关仍然达到了 0.682。表 6 反映的是 2013 年 7 月北半球和南

半球两个区域的 500pha 高度场预报对分析均方根误差的月平均统计检验结果，容易得出结论：无论是北半球还是南半球，在同化 GPSRO 和卫星风观测数据后，24H~168H 的均方根误差都有大幅度减小。因此可以得出结论，无论是从距平相关还是均方根误差而言，多源卫星观测数据的引入和有效同化后，对高分辨率同化预报系统预报技巧的提高是十分明显的。

表 6 2013 年 7 月 00 时 500hPa 位势高度均方根误差比较

实验名称	区域	24H	48H	72H	96H	120H	144H	168H
不同化 GPSRO 和卫星风	北半球	8.184	14.284	20.619	27.097	34.026	41.023	47.835
	南半球	14.323	27.594	42.510	58.474	75.139	90.210	102.326
同化 GPSRO 和卫星风	北半球	7.513	12.513	17.768	24.145	31.545	38.490	45.058
	南半球	10.958	21.152	33.632	48.165	63.048	77.813	92.061

3.2 强降水个例同化预报结果

2013 年 7 月初至 8 月中旬，我国东北地区出现了多次较强降雨过程，松花江嫩江流域比常年同期降水偏多 3~6 成，嫩江流域局地偏多 1 倍以上，黑龙江上游额尔古纳河流域及俄罗斯结雅河流域降水也较常年偏多 5 成至 1 倍,部分地区偏多 1 倍以上。在 7 月 14 日~16 日，受北方冷空气东移南下与南部暖湿气流相互作用影响，我国西北、华北、东北自西向东出现了一次移动性较强降水过程，这里通过对全球模式 YHGSM(T799L91)与其它多家模式的预报效果对比分析来检验模式对强降水的预报能力。

降水是一种很重要的天气现象，是数值天气预报的一项关键任务。因此，对降水预报结果如何自然成为检验模式性能的一个很重要方面。下面通过将 7 月 15 日 08 时起报的全球模式 YHGSM、日本模式、和德国模式预报至 42 小时的逐 6 小时累积降水预报与实况对比，来检验两模式对降水的预报性能。全球模式 YHGSM 预报产品的生成利用了 YH4DVAR 系统在同化多种卫星资料之后的初始场。

从 2013 年 7 月 15 日 08 时起报的 14 时~20 时小时降水量（图 3）可看到，与实际降水量相比（图 3a），从三个模式对强降水中心的预报区域可见，YHGSM 模式预报和观测实况较为一致，且预报结果相对较好。YHGSM（图 3b）对华北及北京地区的强降水位置预报范围基本与实际一致，且河北北部的强降水中心位置和强度与实际降水强度符合，但北京东北部的强降水中心点略有差异，内蒙东部的强降水中心位置和强度预报也有较好的反映；日本模式（图 3c）对华北地区的强降水预报的位置和强度都有一定的偏差，实际强降水区域内的降水强度预报偏差较大，降水强度偏弱较多，基本没有强降水中心预报，另外，对蒙古东部的强降水预报偏差也较大，位置较实际偏东较多；德国模式（图 3d）对此时段的降水预报情况与日本模式较为相似，没有预报出实际强降水区域内的降水，降水预报强度较实际偏弱较多，对内蒙东部的强降水虽有所反映，但降水强度预报也偏弱。由此可见，对前 12 小时的降水预报，YHGSM 模式预报的相对最好，其次是德国模式和日本模式。

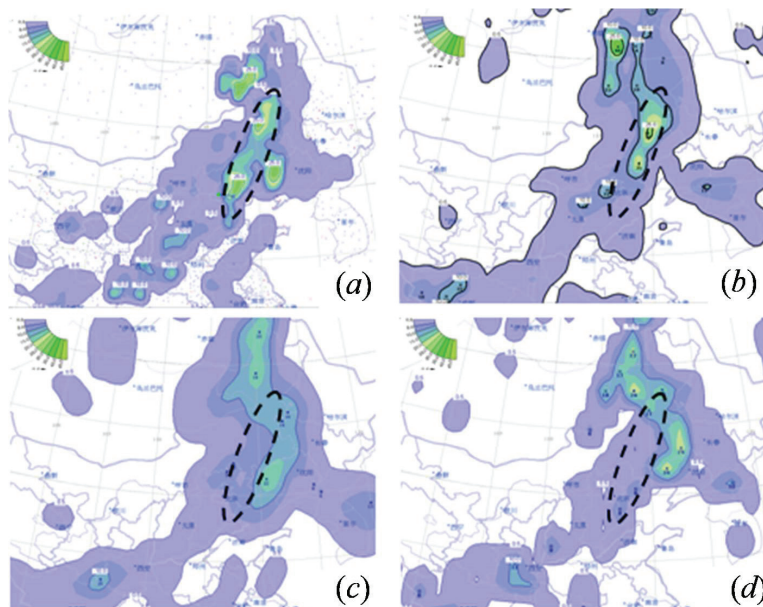


图 3 2013 年 7 月 15 日 08 时起报的 7 月 15 日 14 时~20 时降水量。（a）2013 年 7 月 15 日 14 时~20 时降水量实况；（b）YHGSM 模式降水预报；（c）日本模式降水预报；（d）德国模式降水预报；

4 结论

本文描述了高分辨率全球四维变分资料同化系统的基本框架，并对其中重要的多源卫星资料同化技术作了阐述；其次通过被同化观测数据的统计分析，说明了新型卫星观测数据的引入不但能够增加 YH4DVAR 中的信息量，而且能够促进和提高已同化观测数据的利用率；然后通过一个月完整的统计检验结果，说明：无论是从距平相关还是均方根误差而言，新型卫星观测数据(无线电掩星和卫星风)的引入和有效同化后，对高分辨率同化预报系统预报技巧的提高是十分明显的；最后，通过一个选定的强降水个例的分析，说明了采用 YH4DVAR 系统的初始场后，全球模式 YHGSM 降水预报准确性较高，就对强降水中心区域的预报而言，YHGSM 模式预报和观测实况较为一致，优于国外模式降水预报。随着高分辨率对地观测系统新型气象水文载荷的在轨运行和业务化，其提供的多源卫星观测数据将有效提高数值天气预报的准确度。

参考文献：

- (1) Cao Xiaoqun, Huang Sixun, Du Huadong. The new method of modeling horizontal error functions in variational assimilation with orthogonal wavelet[J]. ActaPhysicaSinica, 2008, 57(3):1984~1989
曹小群, 黄思训, 杜华栋. 变分同化中水平误差函数的正交小波模拟新方法[J]. 《物理学报》, 2008, 57(3): 1984~1989
- (2) Cao Xiaoqun, Song Junqiang, Zhang Weimin et al. Estimating parameters of chaotic system with variational method[J]. ActaPhysicaSinica, 2011, 60(7): 5035~5043
曹小群, 宋君强, 张卫民等. 基于变分方法的混沌系统参数估计[J]. 物理学报, 2011, 60(7): 5035~5043
- (3) Zhang Weimin, Cao Xiaoqun, Xiao Qinnong. Variational Data Assimilation Using Wavelet Background Error Covariance: Initialization of Typhoon KAEMI(2006) [J]. Journal Of Tropical Meteorology, 2010, 16(04):333~340

- (4) Song Junqiang, Cao Xiaoqun, Zhu Xiaoqian et al. Generalized variational principles for three kinds of atmospheric waves[J]. ActaPhysicaSinica, 2012, 61(7): 070401

宋君强, 曹小群, 朱小谦等. 三类大气基本波动的广义变分原理[J]. 物理学报, 2012, 61(7): 070401
- (5) Song Junqiang, Cao Xiaoqun, Zhang Weimin et al. Estimating parameters for coupled air-sea model with variational method[J]. ActaPhysicaSinica, 2012, 61(11): 110401

宋君强, 曹小群, 张卫民等. 厄尔尼诺和南方涛动海气耦合模型中参数估计的变分方法[J]. 物理学报, 2012, 61(11): 110401
- (6) Zhang Weimin, Cao Xiaoqun, Song Junqiang. Design and implementation of four-dimensional variational data assimilation system constrained by the global spectral model[J]. ActaPhysicaSinica, 2012, 61(24): 249202

张卫民, 曹小群, 宋君强. 以全球谱模式为约束的四维变分资料同化系统 YH4DVAR 的设计和实现[J]. 物理学报, 2012, 61(24): 249202
- (7) Courtier, P., Thepaut, J.-N. and Hollingsworth, A. A strategy for operational implementation of 4D-Var, using an incremental approach[J]. Q. J. R. Meteorol. Soc. 1994, 120: 1367~1388
- (8) Fisher, M. Background error covariance modeling[J]. In Proc. ECMWF Seminar on Recent Developments in Data Assimilation for Atmosphere and Ocean, Reading, 8-12 Sept 2003: 45~64
- (9) Andersson, E. and Jarvinen, H. Variational quality control[J]. Q. J. R. Meteorol. Soc., 1999, 125: 697~722
- (10) Dee, D. Variational bias correction of radiance data in the ECMWF system[J]. In Proc. of the ECMWF Workshop on Assimilation of High Spectral Resolution Sounders in NWP, Reading, 28 June-1 July, 2004: 97~112