

同化技术：数值天气预报突破的关键

——以欧洲中期天气预报中心同化技术演进为例

龚建东

(中国气象局数值预报中心, 北京 100081)

摘要: 国际先进业务数值预报中心未来几年的全球资料同化技术发展, 采用变分与集合混合的新同化技术方向更加明确, 遥感资料得到更广泛的使用, 特别是有云区卫星遥感资料的有效应用成为重点。欧洲中期天气预报中心作为资料同化技术的领跑中心, 其技术发展具有代表性。尝试从资料同化框架和卫星资料同化应用两个方面回顾欧洲中期天气预报中心的资料同化技术进展情况及对数值预报总体进步的贡献。介绍了其在长同化时间窗约束四维变分、集合资料同化、湿度与水凝物同化分析、线性化湿物理过程、晴空高光谱卫星资料、云雨条件下红外与微波资料同化等的关键技术进展。同时本文指出这些技术发展对我国GRAPES模式的资料同化系统发展的借鉴意义: 面向4DVAR业务化应用进行关键技术的优选, 解决关键技术问题。在发展3/4DVAR的同时, 提前考虑混合资料同化技术的发展问题, 做好技术准备和铺垫。

关键词: ECMWF, 资料同化, 技术进展, 变分框架, 卫星观测, 云雨条件

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.03.001

Data Assimilation: A Key Technology for NWP

—— Technical Review of Data Assimilation in ECMWF

Gong Jiandong

(Center for Numerical Weather Prediction of China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: Global data assimilation techniques developed in the world leading numerical weather prediction centers in the years to come are more clearly seen in the direction of combining variational data assimilation with ensemble information in model background error covariance, or hybrid data assimilation. The remote sense observations are used more efficiently. The effort will focus on the satellite radiance data assimilation in the area of cloud and rain covered regions. As the first leading numerical weather prediction center on data assimilation technique development, European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) technique development has representativeness. The progress on data assimilation technique in ECMWF is reviewed in this paper, specially focusing on the fields of variational data assimilation system development and satellite observation application. The key technical advances are introduced, including long-time window and weak-constraint four-dimensional variational data assimilation, ensemble data assimilation, moisture and cloud condensation analysis, linearizing moisture physics processes, assimilation of satellite infrared hyper-spectral observation in clear-sky, satellite infrared hyper-spectral and microwave observations under cloud and precipitation conditions. The technical review can be seen as a guidance for the development of Global and Regional Analysis and Prediction System (GRAPES) numerical weather model: priority should be given to the key technique selection of GRAPES 3/4DVAR operational application, and hybrid data assimilation technique should be considered and prepared in advance when the 4DVAR technique is being developed.

Keywords: ECMWF, data assimilation, technical advance, variational data assimilation system, satellite observation, cloud and precipitation conditions

1 引言

欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 一直是全球

数值天气预报技术研发与业务应用的领跑者, 其全球预报年平均可信预报时效 (距平相关系数达到0.60) 已经达到8d, 2010年2月的北半球第10天预报的月平均距平相关系数达到0.67, 达到历史上的最好水平, 全球模式可用时效首次突破10d^[1]。ECMWF也是第一个在业务中实践四维变分同化 (4DVAR) 技术的天气

收稿日期: 2011年12月24日; 修回日期: 2012年3月19日

作者: 龚建东 (1971—), Email: gongjd@cma.gov.cn

资助信息: 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201106008)

预报业务机构,其科学指导委员会在1986年预见到变分同化技术是一种有效的资料同化技术后,在1987年制定的4年发展计划时开始酝酿用4DVAR来取代最优插值技术^[2]。ECMWF在4DVAR资料同化技术上的巨大成功,激励其他数值中心效仿,目前已有英国、法国、加拿大、日本等国家在业务中实现了4DVAR^[3]。ECMWF也是世界上最早在业务中采用4DVAR系统直接同化所有晴空与云雨条件下的微波成像仪亮温资料,实现“全天候”微波资料同化能力的中心^[4,5]。

ECMWF也是较早的业务中实现将集合预报信息与4DVAR结合,通过混合资料同化技术改善初值分析效果的中心^[6],其所采用的集合资料同化方法(Ensemble of Data Assimilation, EDA),是继4DVAR之后第二次在资料同化框架方面取得的巨大成就,显著地提高了模式同化分析能力。与此同时,其他先进业务数值预报中心也在积极探索和实践混合资料同化技术。NCEP 2012年混合变分同化系统的业务应用取得了显著的效果,UKMO的全球同化系统也实现了混合4DVAR,加拿大正在发展集合变分(EnVAR)^[3]。ECMWF在变分资料同化框架和卫星资料同化技术方面的技术发展,代表了世界先进数值预报中心发展的核心关键技术。变分与集合结合的混合变分同化技术业务发展方向更加明确,遥感资料得到更广泛的使用,特别是有云区卫星遥感资料在数值预报中的有效应用成为重点。以四维变分同化为基础的集合-变分同化或混合资料同化技术将成为未来资料同化技术的主流发展方向。

2 四维变分同化技术简介

较为详细的三、四维变分同化技术的参考文献读者可以参阅Eugenia Kalnay^[7]撰写的《大气模式、资料同化和可预报性》一书,有详细的公式表达和不同方法间的比对。ECMWF业务四维变分资料同化的具体技术细节,可以参见ECMWF资料同化技术文档^[8]。本节仅给出4DVAR技术思路的简要介绍。

资料同化需要综合处理来自两个方面的信息:一是以前时刻的观测信息积累,通过预报模式时间积分到分析时刻而获得的分析时刻的背景场信息,其中背景场相对于真实大气的误差为背景误差;二是当前时刻的观测信息,其中观测值相对于真实大气的误差为观测误差。三维变分同化就是根据背景场信息、观测信息和各自的误差特征,将同化分析问题归结为所定义的一个反映分析场与模式预报结果之间及分析与实际观测值之间距离的目标函数的极小化问题,并采用恰当的最优化算法直接求解,使该目标函数达到极小

值,从而获得分析场。三维变分同化将同化时窗内的观测作为一个时次资料使用,连续观测资料只取与背景场最接近的时刻,其他时刻资料作为冗余观测被剔除掉。

四维变分是三维变分在时间上的扩展。四维变分目标函数的定义可以考虑同化时窗内任意时刻模式预报结果与实际观测值之间的距离,从而可以使用连续观测资料。另一个好处是由于模式预报积分过程中,背景误差结构随大气环流变化也在演变,信息更为准确。在四维变分目标函数的定义中,以整个数值预报模式作为约束条件,要求严格满足,因此约束条件是所谓的“强约束变分问题”。与之相对的“弱约束变分问题”是指数值模式以“准”观测的形式出现在目标函数定义中,要求模式约束条件近似满足。在四维变分中要将非线性预报模式进行线性化,获得基于模式演变状态的切线性模式,并由伴随理论可以获得切线性模式的伴随模式。利用该伴随模式,可以求得目标函数对初值的梯度。目标函数与梯度的计算是为了利用最优化方法来求使目标函数取极小值的模式初值,这种大规模的最优化问题一般都是迭代求解的。为了减小4DVAR计算量,一般采用增量分析策略,即高分辨率非线性模式积分只用来计算模式插值到观测位置的背景值与真实观测之差(称为新息向量),而最优化迭代中的切线性模式及其伴随模式的反复计算只在较低分辨率的网格中进行。在分析过程中,高分辨率非线性模式的迭代更新过程被称为外循环,低分辨率的切线性与伴随模式迭代循环被称为内循环。一个典型的四维变分同化包括这些基本步骤,如图1所示。

(1) 以高分辨率的背景场为初始场,正向积分高分辨率非线性预报模式,计算各观测时段的观测相当量与新息向量。从高分辨率向低分辨率插值获得预报轨迹,用于切线性与伴随模式时间积分。

(2) 在低分辨率网格上正向积分切线性模式,计算各观测时段的观测余差并累加计算目标函数。

(3) 反向积分伴随模式,并计算目标函数相对于初值的梯度。

(4) 重复计算步骤2~3,进行内循环,直到目标函数或梯度达到预定要求。

(5) 将分析增量从低分辨率插值到高分辨率,获得新的模式背景场,返回到步骤1,进行外循环更新,直到达到预定的精度要求。

3 技术与系统升级回顾

从1987年开始提出发展计划,ECMWF的4DVAR系统经过10年发展后逐步成熟,并于1997年11月业

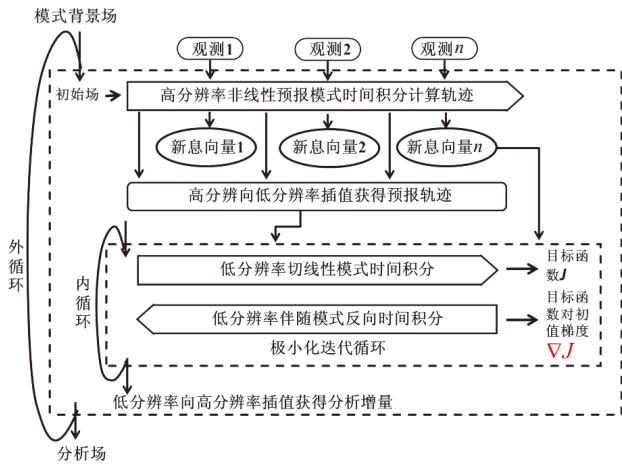


图1 四维变分资料同化的分析流程示意图

务运行^[2]。同化系统的外循环谱分辨率是T213，内循环为T63，同化时间窗口6h。内循环的切线性模式采用一组简化的物理过程参数化方案^[9]。业务化后4DVAR系统持续不断的升级改进，在背景误差协方差的优化方面，1999年采用了全新的背景误差协方差矩阵统计方案^[10]，2002年优化极小化迭代算法中的预解条件，加快迭代收敛速度。2003年在背景误差协方差中使用准地转 ω 方程和非线性平衡约束，并使用集合资料同化系统EDA的统计样本。2005年在背景误差协方差中使用小波展开算法考虑特征长度随纬度的变化^[11]。

对切线性模式的线性化物理过程参数化方案也在不断优化。2003年使用了新的线性化辐射方案和云物理过程方案^[12]，2004年改进垂直扩散方案，2008年改进湿物理过程，并实现了内外循环不同分辨率的守恒插值方案。2009年应用新的长波辐射方案。

4DVAR的内外循环设置也在不断优化中。2000年同化时窗从6h增加到12h，模式外循环分辨率T511，内循环T159。2001年实现12h同化时窗内逐小时卫星亮温资料的同化。2003年同化时窗内使用两重内循环，分辨率分别为T95和T159。2006年外循环分辨率为T799，内循环分辨率分别为T255和T95。2007年采用三重内循环方案，分辨率分别为T255，T159和T95。2010年外循环分辨率为T1279，内循环分辨率分别为T255，T255和T159^[13]。多次内循环能减缓同化分析中观测算子的非线性影响，并逐步减小同化分析的空间尺度，改善同化分析精度。

对常规观测资料的一个重点是探空、地面资料的同化改进。1998年使用探空仪的温度与气压资料进行同化分析以取代原有位势高度资料，并开始使用探空特性层资料。1999年对探空资料进行偏差订正，2005

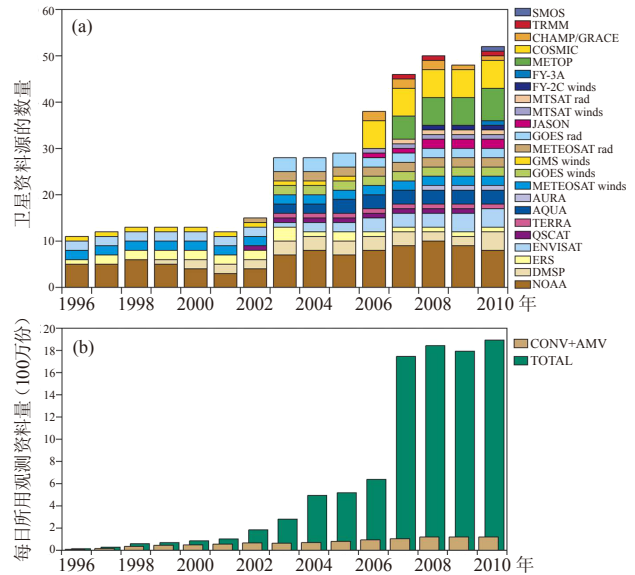


图2 ECMWF业务资料同化系统卫星资料源的数量 (a) 和每日所用观测资料量 (b) 的逐年变化情况

年更新了地面气压偏差订正方案。

对卫星资料，1998年全球卫星成像仪SSM/I资料通过1DVAR反演为大气柱水汽总量，并作为观测用于湿度的分析。同时陆地上的TOVS资料开始大量使用^[14]。1999年取代TOVS资料，开始同化全球ATOVS level-1C资料，并使用雷达风廓线资料、SSM/I反演的10m洋面风资料。增加卫星资料在陆地、冰、雪下垫面的使用，使用稠密ATOVS资料、QuikSCAT资料和臭氧资料，并开始同化晴空静止卫星水汽亮温资料。2003年直接同化SSM/I晴空资料、AIRS红外高光谱和AMSU-B资料。改进了AIRS资料的偏差订正与云检测方案，使用MSG静止卫星晴空水汽亮温资料，同化AQUA卫星 MODIS云导风资料，同化云雨影响的SSM/I亮温资料^[15]。2006年使用卫星亮温变分偏差订正方案^[16]。2007年IASI资料业务应用，2008年同化AMSR-E和TMI云雨影响的亮温资料。2009年应用陆表敏感卫星通道。并使用IASI和AIRS湿度通道资料，采用“全天候”微波成像仪直接同化方案^[4, 5]。图2给出ECMWF从1996年实现三维变分同化(3DVAR)业务以来检索和使用的卫星资料情况。

4 变分资料同化框架技术进展

4.1 长同化时间窗弱约束 4DVAR

ECMWF的4DVAR从2000年9月起应用12h同化时间窗以来，同化时间窗口一直稳定在12h^[17]。与此同时探索更长同化时间窗口的研究工作一直在不断开展。Lorenz的研究工作表明^[18]，对线性系统，4DVAR与固定时区的卡曼平滑在算法上等价。当同化时窗足

够的长,背景误差协方差有充足的时间演变发展,则在同化时窗终止处的4DVAR分析值对背景信息(包括背景场、背景误差协方差等)不再敏感,在所有观测信息加入后,4DVAR分析值与卡曼滤波结果等价。Fisher的研究工作表明^[19],同化时窗超过3d后分析值对背景信息不太敏感。受计算能力等因素限制,目前国际上业务4DVAR采用的同化时窗一般为6~12h。当同化时窗远超出现有的12h同化时窗时,可称为长同化时间窗口。由于预报模式非线性特征和模式误差的迅速增长,以及长同化时窗下模式积分的巨大计算量,长同化时窗的变分同化若采用传统的强约束4DVAR表达已不适当。需要将同化时窗划分为若干个较短的子同化时窗,在每个子同化时窗内将预报模式以弱约束的形式加入目标函数中,从而形成长同化时窗弱约束的4DVAR同化系统^[20],这时同化分析为整个同化时窗终止处的值。每个子同化时窗在模式积分、目标函数与梯度计算上可以独立进行,因此可以平行计算,方便采用更大规模的CPU核数,因此从计算墙钟上看与现有同化时窗的计算量基本相当,能够满足业务同化分析的需求。

利用两层准地转模式的数值试验表明,采用超过3d的长时效同化时间窗口和同化时窗重叠设置方式,相较于12h同化时窗,可以显著地改善分析的精度。但同化时窗超过4d后分析精度的进一步改善不大。为适应长同化时窗弱约束4DVAR的算法,ECMWF已着手开始设计新一代模式软件架构,采用目标对象的组织方式,将程序系统分为基本态、增量、观测等5个独立部分,使得程序组织更加灵活,并行度改善,方便增加新观测类型。在可以预见的未来,长同化时窗弱约束4DVAR将有可能成为ECMWF新一代业务资料同化分析系统。

4.2 4DVAR 框架可扩展性

4DVAR系统的巨大计算量始终是影响业务应用的主要因素。通过并行计算技术来提高计算效率是主要途径。在4DVAR中涉及到循环计算的有3个方面:极小化算法中循环过程(包括同化的内外循环)、模式(含线性/伴随模式)的时间积分,以及三维空间格点数。在目前的并行中仅在水平的经度、纬度方向进行了并行化处理,并行计算效率并不高。随着高性能计算机发展及“万核”计算机的出现,如何使得4DVAR系统应用更多的处理器来提高计算效率并具有更好的并行度和可扩展性成为关键,但单纯的依靠对资料同化系统的并行处理不能完全解决问题,需要对资料同化的算法进行重新设计。目前ECMWF发展的技术一

是采用模式弱约束的4DVAR,将模式弱约束在同化时窗内分成多个子同化时窗来分别独立计算,从而有利于模式时间积分方向的并行计算,能提高4~10倍的计算效率。另外对极小化算法的设计也在进行中,探索多个方向的同步搜索,能再提高3~10倍的计算效率。这些技术的成功应用将极大提高模式的并行度与可扩展性^[21, 22]。

4.3 集合资料同化方法

4DVAR在同化时窗内可以隐式演变背景误差协方差,但在下一次同化分析时,仅背景场信息可以使用,而隐式演变后的背景误差协方差因难于表达而不能使用,只能反复使用统计的气候背景误差协方差^[23]。Lorenz^[24]比较集合卡曼滤波和4DVAR方法后指出,利用“ α 控制变量方法”将集合卡曼滤波和4DVAR方法结合,利用集合卡曼滤波的背景误差协方差演变信息用于变分同化,即所谓的混合资料同化方法,能结合两者的长处,是未来业务资料同化发展的主流方向。实际上采用混合资料同化方法并不一定需要集合卡曼滤波,关键是集合预报样本统计特征能反映背景误差协方差的演变特征。ECMWF采用集合资料同化方法(EDA)。该方法用一组4DVAR同化样本来模拟背景误差的演变,也即对每个成员采用相同的4DVAR的同化分析循环,但对观测、模式、海温等加入随机扰动误差来表示观测误差、模式不确定性和海温不确定性。因此在若干次同化分析循环后,每个4DVAR同化样本代表了分析场的一种可能,样本的统计代表了分析场的不确定性和结构或分析误差协方差,每个分析的预报代表了背景场的一种可能,其样本的统计代表了背景场的不确定和结构或背景误差协方差。EDA方法的主要问题是每个样本都是一个单独的4DVAR,计算量巨大,因此往往样本数较少且采用较低分辨率配置的4DVAR。目前ECMWF采用10个样本成员,4DVAR的外循环分辨率为T399,内循环为T95和T159,而实际资料同化的外循环是T1279,内循环分别为T159, T255和T255。由于受到样本数的限制,统计出的背景误差方差噪音较大,采用了谱滤波的方式来滤除高频噪音,以保留有用的低频信息。EDA背景误差协方差的使用显著的改善了分析和模式预报技巧,对全球范围都有正贡献,且贡献在10 d 预报中都有效^[6, 25]。

4.4 水汽与水凝物同化分析

对水汽与云冰/云水等水凝物的同化分析一直是ECMWF的研究重点。其同化分析变量与控制变量之间的变量变换,与温度、风场等要素全然不同。后者预报误差的概率密度函数分布接近高斯分布,如温度

的控制变量为经过背景误差均方差归一化后的温度分析变量，其概率密度函数分布接近高斯分布。这是一种较为简单直接的线性变量变换关系。但对于水汽与水凝物的分析，分析变量的概率密度函数并不是高斯分布，而且由于水汽、水凝物的分析场有非负值等边界条件约束和过饱和产生凝结等物理过程约束，获得接近高斯分布的控制变量，其变量变换要复杂得多。ECMWF利用EDA系统3h预报的统计样本，计算不同相对湿度背景场所分别对应的相对湿度背景误差，并利用该背景误差来对相对湿度分析变量进行变量变换，获得湿度分析的控制变量。由于在同化分析中多次内循环的相对湿度背景场不断演变，其对应的背景误差也在不断变化，因此背景误差具备了随流型演变的特点。存在的问题是这种变量变换所获得的控制变量并不是高斯分布。ECMWF采用相对湿度的背景场与分析场的平均值，计算该平均值对应的相对湿度背景误差来进行变量变换，所获得控制变量是对称的高斯分布。因为采用了背景与分析场的平均值，而分析场本身是待分析求解的未知量，控制变量与分析变量关系不直接，需要通过隐式迭代的方法进行求解。Lorenz^[26]把这种变换称为非线性变量变换。ECMWF解决的办法是在同化的内循环中采用线性变量变换，计算相对湿度分析场。在随后的内循环中再次采用隐式非线性变量变换，对相对湿度分析场进行二次调整。此外考虑了在相对湿度接近饱和时由于水汽的蒸发—凝结产生的温度变化，作为湿度—温度之间的平衡关系考虑到变量变换中^[27]。对水凝物分析也采用了类似的线性、非线性变量变换技巧，在利用云冰、云水与温度的依赖关系来划分云冰、云水。这项研究工作正在进行中，已有初步的结果^[28,29]。

4.5 线性化湿物理过程

4DVAR的线性化物理过程参数化方案经过多年的发展，已经包括辐射、边界层垂直扩散、重力波拖曳、对流、大尺度凝结5个物理过程参数化方案。目前发展的重点是优化改进与云降水相关的边界层垂直扩散、对流、大尺度凝结方案，促进直接受云降水影响的卫星资料的同化应用。其中尤以对流过程参数化方案最具有挑战性^[30]。在实际同化系统中，需要考虑线性化物理过程参数化方案对原非线性方案的简化程度，对非线性方案中强非线性过程，特别是与湿过程有关的阈值（凝结、自动转化）、开关、不连续过程的处理。另外为节省计算量，4DVAR的内外循环所采用的模式分辨率相差较大，同化时窗内非线性模式的轨迹计算分辨率高，而极小化迭代的线性模式的分辨

率较低，相差可达10倍，而物理过程参数化方案的表现敏感的依赖于模式的分辨率。这几方面的近似不可避免。用线性模式模拟非线性模式中初始扰动的发展研究表明^[31]，由于边界层垂直扩散、对流、大尺度凝结方案的线性化方案和原非线性方案的差异，模拟结果相差显著，个别位置非线性模式中的扰动发展幅度相对较大，而线性模式扰动发展受到限制。线性模式的这种近似对观测资料同化应用产生不同的影响。研究表明，直接受云降水影响的观测，如卫星成像仪的微波亮温资料、雷达反演降水资料，其观测信息的同化显著受到线性模式近似的影响。

此外，云降水信息的同化还受到模式背景与观测匹配的影响。当模式背景有云降水信息而观测也有云降水信息时，线性化的湿物理过程参数化方案将被激活，观测信息能有效融入初值中改善分析效果，以使模式预报靠近观测。而当观测有云降水信息而模式背景没有云降水信息，则不能激活湿过程线性化方案，观测信息不能融入初值中。当观测中没有云降水信息，而模式背景有云降水信息，湿过程线性化方案被不恰当地激活，观测信息虽能进入同化中，但信息的使用并不恰当。因此目前的有云降水信息的观测资料仅当背景信息中也有云降水信息时才使用。

造成云降水信息使用受到限制的一个因素是在4DVAR同化中缺乏有效模拟水凝物的时间演变信息。以卫星资料为例，对有云降水信息的卫星观测，快速辐射传输算子的模式背景输入信息包括温度、湿度、水凝物等信息。而快速辐射传输算子仅计算观测目标函数对温度、湿度的梯度，并不计算对水凝物的梯度。其原因是水凝物不是分析变量，水凝物的调整通过调整温度、湿度来间接调整。这种方法的局限性一是来源于水凝物的误差被错误地解释到温度与湿度中，二是模式需要比较长的适应调整出与温度、湿度调整对应的水凝物，这对同化时窗起始位置的卫星观测是不利的。ECMWF的预报云方案的预报量是水凝物和云量，次网格湍流、对流卷出、降水是主要的源汇项。水凝物利用温度来划分为云冰、云水。ECMWF在2004年已经发展了预报云方案的线性与伴随算子，但因为水凝物分析变量的缺乏，没有用于水凝物的分析。目前的研究重点是将水凝物作为分析变量。这样初始的水凝物通过线性化的预报云方案，可以用于目标函数极小化的内循环中，水凝物就可以在同化时窗内随时间演变和调整，观测目标函数对水凝物的梯度可以通过伴随模式反馈到水凝物初值分析中。

5 卫星资料同化的发展

5.1 晴空红外高光谱卫星资料同化

AIRS、IASI红外高光谱资料通道数目分别达到2378与8461个，而目前ECMWF业务上使用的通道非常有限，大约200个左右，且主要集中在长波波段区的温度通道和水汽通道^[32, 33]。大量使用红外高光谱资料受到多种因素的限制，包括计算量过大通道选择不宜过多、通道之间的误差有相关性^[34]、部分通道的观测噪音幅度过大等因素。为降低通道数量，传统方案是采用通道选择的办法，利用信号自由度检验办法或其他表征在通道信息加入同化系统后能降低分析观察误差的检验办法，来选择能产生最大影响的通道^[35, 36]。有效提高卫星资料通道信息利用率的一种可行办法是选择预报因子对高光谱通道信息进行主分量展开，仅选取有显著代表意义的主分量，并对快速辐射传输模式进行改造，构建基于主分量的快速辐射传输算子^[37]。相较于传统的基于通道计算的快速辐射传输算子，其计算量主要源自于通道数目的多寡。而基于主分量的快速辐射传输算子的计算量主要源于预报因子和主分量的数量，受通道数量的影响较小。由于预报因子与主分量的数量多少影响到快速辐射传输算子模拟亮温的精度和计算量，需要在精度和计算量之间进行权衡。研究表明，当主分量的数量超过200个以后，进一步提高模拟精度的影响较小而计算量增加较快，预报因子超过300个后就能获得较高的精度。适当选择预报因子和主分量的数量，可以在模拟精度较高的情况下，较传统快速辐射传输方案计算效率提高8~21倍。此外，由于仅采用了前数百个主分量而舍弃了随后的主分量，也显著的降低通道的噪音，这为噪音较大的一些通道的同化应用奠定了基础。

5.2 云雨条件下的红外资料同化

卫星红外资料在云雨条件下的同化进展缓慢。Chevallier 等的试验表明^[38]，由于模式对云参数（水凝物分布、宏观云量等）的预报模拟能力较弱，背景云参数信息的误差非常大，而有云处卫星红外亮温资料对云参数的变化呈现出明显的非线性响应特征，即云参数变化产生的亮温变化幅度要远超过温度与湿度变化产生的幅度，因此在有云处卫星红外亮温资料还不能被同化。这一问题在AIRS、IASI等红外高光谱资料出现后有所缓解。由于高光谱资料通道众多，确定云高后可以实现云顶以上的卫星通道资料的同化。McNally等提出利用多个红外高光谱通道来确定云顶以上通道的办法^[39]，并开始在业务系统中同化有云区

域的高光谱资料。尽管这种办法选择避开了云参数对卫星红外资料的影响而不是直接解决云参数的作用，但由于对卫星红外观测约有90%的卫星像元被标识为有云^[40]，所以该方法极大地增加了红外资料全球区域的覆盖程度。

对完全被云覆盖的像元，云可以作为黑体来看待。McNally等提出并在业务中实现了直接同化云顶温度的能力^[41]。当云顶高度被红外窗区通道资料反演确定后，云对卫星红外观测的影响仅和云顶温度有关。红外亮温观测只是大气温湿廓线及云顶的高度和温度的函数，这种处理方法简化了云参数对卫星红外资料的非线性影响，云起到的作用实际上是作为黑体阻挡了云以下红外辐射对观测的影响，而通过自身红外辐射对观测产生影响。考虑完全为云覆盖的像元增加约5%的资料，资料量虽小，但这些资料对相关区域温度的分析产生了系统性的影响，并对随后的预报产生了正面的影响。这些资料对水汽和云参数的影响非常小，这是因为云作为黑体考虑时，并没有建立湿度、云参数、湿物理过程与云顶温度的物理关系。实际上，如果模式能够提供较为准确的云参数信息，则可以直接将水凝物、云量等信息输入快速辐射传输算子，来计算云参数对红外亮温观测的影响。这要求水凝物是可以被分析的，这将是下一步的发展方向。

5.3 云雨条件下的微波资料同化

ECMWF对云雨条件下的卫星微波资料的同化应用主要定位于微波成像仪资料。2005年开始，ECMWF将受到云雨影响的微波成像仪亮温资料加入4DVAR系统中。其做法是先采用1DVAR反演出云雨区的大气柱水汽总量，然后将反演值作为观测用于4DVAR同化。也即晴空与云雨条件下的卫星资料处理不同，分别按照亮温直接同化和反演大气柱水汽总量间接同化，采用不同的观测算子，即所谓的“1D+4DVAR”系统^[42]。随着技术的发展直接同化云雨区亮温资料的技术可以实现，2009年起采用4DVAR系统直接同化所有晴空与云雨条件下的微波成像仪亮温资料，取代原来的间接同化方式。这种系统被称为“全天候”微波资料同化系统^[4, 5]。这时系统不再预先区分晴空或云雨区的资料或模式背景，而是根据4DVAR系统中所包含的湿过程来调整大气的温度、湿度、云参数。2010年再次对系统的误差和偏差方案进行了优化^[43]。“全天候”系统的目标是改善湿度与云雨的分析，实际上这种分析对湿度有正效果，但除对持续云覆盖区域和深厚降水区域外，其对云降水的影

响非常有限，对风场的影响仅限于热带地区。其结果表明模式在预报过程中倾向于快速耗散在分析中所获得的湿度与云降水信息。这可能和湿过程的时间尺度较小，且初值中湿度与云降水信息对动力过程的影响较弱有关^[44]。

云雨区卫星微波成像仪资料的直接同化对湿度和云降水有调整，而对动力过程影响较弱，而红外资料对云顶附近的温度结构有调整，将这两种资料结合起来解决云降水区域的卫星资料同化问题是ECMWF探索云雨区卫星资料同化的一个重点方向。另外云雨区卫星微波与红外资料的同化，都与云参数有关，发展水凝物的直接同化方法，是两类资料的共性问题。

6 未来的发展重点

在未来4年中，ECMWF特别突出了资料同化系统发展的两个重点：一是使用更多的卫星仪器类型和卫星资料，二是突出强调集合资料同化系统（EDA）的发展^[45]。目前的业务系统中已经实现了约50种卫星仪器资料的同化应用。EDA与4DVAR结合的系统在2010年开始实施并在2011年走向业务。可以预见EDA系统将成为未来业务数值预报能力提高的主要途径之一。

卫星资料的发展主要突出了以下几个方面：

- ◆ 增加使用受云降水和气溶胶影响的洋面、陆地上的红外—微波卫星观测。

- ◆ 优化资料挑选、质量控制和观测误差的定义，考虑观测误差的时间、空间相关性。

- ◆ 优化先进垂直探测仪资料的使用，通过应用信息压缩方法和更为灵活的通道选择方法来更为完整地挖掘卫星观测信息。

资料同化的发展主要突出以下几个方面：

- ◆ 业务应用并发掘EDA系统，提高对分析和短期预报不确定性估计。

- ◆ 进一步发展弱约束的4DVAR系统，业务应用的目标是24~48h的同化时窗。由EDA系统提供模式背景随流型演变的特征。

- ◆ 扩展集合卡曼技术用于地面分析，并逐步增加卫星反演产品和亮温资料。

- ◆ 4DVAR中全面考虑观测误差的空间与通道间的相关性。优化随流型演变的资料选择与稀疏化方案。

在未来10年的发展战略中，重点面向两个方面的能力深化。一个是集合资料同化。集合资料同化技巧既能提供对分析误差、观测误差随流型演变的误差协方差结构，也能够提供随流型的资料质量控制和资料稀疏化。另一个发展方向是长时间窗的4DVAR，并在目标函数中考虑模式的误差。这将最终导致发展弱约

束4DVAR同化，并延长同化时间窗到几天。而将弱约束4DVAR方法与集合资料同化方法结合将作为未来10年战略发展期的主要研究推动方向^[46]。

7 总结及讨论

ECMWF在4DVAR框架完善、卫星资料同化应用等方面的进展，以及其未来发展的重点，有很多经验值得全球同行借鉴。

(1) 把握资料同化技术发展的前瞻性。ECMWF在资料同化技术的选择上高瞻远瞩，4DVAR和EDA的发展就是两个非常好的例子。变分同化系统的设计，从一开始就是朝着4DVAR实现而准备的，也即考虑模式约束在四维变分中的作用。因此3DVAR作为一个短暂的过渡，1996年1月实现3DVAR业务运行后，从1997年11月4DVAR业务运行，非常迅速地实现了从3DVAR到4DVAR的过渡。EDA技术的发展从2004年开始准备，到2011年与4DVAR结合形成混合同化技术，并走向业务，实现同化框架技术的二次飞跃。特别是这些技术包括了“全天候”微波同化技术、长时间窗——弱约束4DVAR技术等内容。借鉴这些经验，例如，我国的GRAPES模式变分同化的发展，起步就要围绕GRAPES模式4DVAR的业务应用进行任务组织，解决4DVAR中遇到的关键技术问题。

(2) ECMWF在认准发展目标后的提前技术铺垫，持续投入进行探索和改进。目前在ECMWF发挥作用的技术，都经过相当长时间的技术准备和铺垫。有些技术，如长时间窗弱约束4DVAR技术，技术准备和测试首先在Lorenz-96模型、两层准地转模式上进行大量的试验验证，设计方案，再考虑向复杂大气模式过渡。借鉴这些经验，GRAPES模式在发展4DVAR的同时，要在适当时候，提前考虑混合资料同化技术的发展问题，做好技术的准备和铺垫，这将有效缩短GRAPES模式从4DVAR升级到混合资料同化技术的时间。

(3) 科学的长中短结合的技术规划。ECMWF未来10年发展战略计划、4年发展规划、年度发展计划，技术规划科学合理，长中短结合，定期更新，有效地保证了模式的有序和持续发展。如1986年的4年发展规划提出4DVAR取代最优插值，到2011年的4年发展规划提出进一步发展弱约束的4DVAR系统，发展规划内容稳定，起到很好的保障作用。

此外ECMWF在卫星资料同化方面发展的重点和发展策略也值得我们借鉴，特别是卫星同化的一些成熟技术，如高光谱通道选择等等，可以直接借用，这将有助于我们缩短同化研发的周期。

参考文献

- [1] Erik A, David R. Forecast performance 2010. ECMWF Newsletter, 2011, 126.
- [2] Erik A, Thepaut J N. ECMWF's 4D-Var data assimilation system: The genesis and ten years in operations. ECMWF Newsletter, 2008, 115.
- [3] Andy B, Christain J. 28th session of the working group on numerical experimentation (WGNE-28). WGNE meeting report, 5-9 November 2012, Toulouse, France.
- [4] Bauer P, Geer A, Lopez P, et al. Direct 4D-Var assimilation of all-sky radiances. Part I: Implementation. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 2010, 136: 1868-1885.
- [5] Geer A, Bauer P, Lopez P. Direct 4D-Var assimilation of all-sky radiances. Part II: Assessment. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 2010, 136: 1886-1905.
- [6] Isaksen L, et al. The new ensemble of data assimilations, ECMWF Newsletter, 2010, 123.
- [7] Kalnay E 著. 蒲朝霞, 杨福全, 等译. 大气模式、资料同化和可预报性. 北京: 气象出版社, 2005.
- [8] ECMWF. ECMWF data assimilation documents. <http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs/CY36r1/ASSIMILATION/IFSPart2.pdf>.
- [9] Rabier F, et al. Recent experimentation of 4D-Var and first results from a simplified Kalman filter. ECMWF Tech Memo, 1997, 240.
- [10] Derber J, Bouttier F. A reformulation of the background error covariance in ECMWF global data assimilation system. *Tellus*, 1999, 51: 195-221.
- [11] Fisher M. Generalized frames on the sphere, with application to the background error covariance modelling. Proceedings of ECMWF seminar on recent developments in numerical methods for atmospheric and ocean modelling, 6-10 September 2004: 87-101.
- [12] Janiskova M, Mahfouf J, Morcrette J, et al. Linearized radiation and cloud schemes in the ECMWF model: Development and evaluation. *Quart J Meteorol Soc*, 2002, 128: 1505-1527.
- [13] Miller M, Buizza R, Haseler J, et al. Increased resolution in the ECMWF deterministic and ensemble prediction systems. ECMWF Newsletter 2010, 124.
- [14] McNally A, Andersson E, Kelly G, et al. The use of raw TOVS/ATOVS radiances in the ECMWF 4D-Var assimilation system. ECMWF Newsletter, 1997, 83.
- [15] Bauer P and Lopez P. Implementation of 1D+4D-Var assimilation of precipitation affected microwave radiances at ECMWF. Part I: 1D-Var. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 2006, 132: 2277-2306.
- [16] Auligne T, McNally A, Dee D. Adaptive bias correction for satellite data in a numerical weather prediction system. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 2007, 133: 631-642.
- [17] Bouttier F. The development of 12-hourly 4D-Var. ECMWF Tech Memo, 2000, 342.
- [18] Lorenc A. Modeling of error covariances by 4D-Var data assimilation. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 2003, 129: 3167-3182.
- [19] Fisher M. Long window 4DVAR. Proc of seminar on data assimilation for atmosphere and ocean, 6-9 September 2011, Reading, UK.
- [20] Tremolet Y, Fisher M. Weak constraint 4D-var. ECMWF Newsletter, 2010, 125: 12-16.
- [21] Tremolet Y, Fisher M, Salmond D, et al. 4D-Var, scalability and code design. Proc of 14th ECMWF workshop on high performance computing in meteorology, 1-5 November 2010, Reading, UK.
- [22] Isaksen L. Data assimilation on future computer architectures. Proc of seminar on data assimilation for atmosphere and ocean, 6-9 September 2011, Reading, UK.
- [23] Thepaut JN, Courtier P, Belaud G, et al. Dynamical structure functions in a four-dimensional variational assimilation: A case study. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 1996, 22: 535-561.
- [24] Lorenc A. The potential of the ensemble kalman filter for NWP—a comparison with 4D-Var. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 2003, 129: 3183-3203.
- [25] Bonavita M. Ensemble of data assimilations and uncertainty estimation. Proc of seminar on data assimilation for atmosphere and ocean, 6-9 September 2011, Reading, UK.
- [26] Lorenc A. Developments of variational data assimilation. Proc of seminar on data assimilation for atmosphere and ocean, 6-9 September 2011, Reading, UK.
- [27] Holm E, Andersson E, Beljaars A, et al. Assimilation and modelling of the hydrological cycle: ECMWF's status and plans. ECMWF Tech Memo, 2003, 383.
- [28] Holm E, Gong J. Use of cloud condensate in the background error formulation. Proc of ECMWF/JCSDA workshop on assimilating satellite observations of clouds and precipitation into NWP models, 15-17 June 2010, Reading, UK.
- [29] Gong J, Holm E. Development of cloud condensate background errors, ECMWF Newsletter, 2011, 128.
- [30] Tompkins M, Janiskov M. A cloud scheme for data assimilation: Description and initial tests. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 2004, 130: 2495-2517.
- [31] Lopez P. Linearized physics: Progress and issues. Proc of ECMWF/JCSDA workshop on assimilating satellite observations of clouds and precipitation into NWP models, 15-17 June 2010, Reading, UK.
- [32] McNally A, Watts D, Smith A, et al. The assimilation of AIRS radiance data at ECMWF. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 2006, 132: 935-957.
- [33] Collard A, McNally A. The assimilation of infrared atmospheric sounding interferometer radiances at ECMWF. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 2009, 135: 1044-1058.
- [34] Bormann N, Collard A, Bauer P. Estimates of spatial and interchannel observation-error characteristics for current sounder radiances for numerical weather prediction. II: Application to AIRS and IASI data. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 2010, 136: 1051-1063.
- [35] Fourrie N, Thepaut J N. Validation of the NESDIS near-real time AIRS channel selection. ECMWF Tech Memo, 2002, 390.
- [36] Collard A. Selection of IASI channels for use in numerical weather prediction. ECMWF Tech Memo, 2007, 532.
- [37] Matricardi M. A principal component based version of the RTTOV fast radiative transfer model. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 2010, 136: 1823-1835.
- [38] Chevallier F, Lopez P, Tompkins A, et al. The capability of 4D-Var systems to assimilate cloud-affected satellite infrared radiances. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 2004, 130: 917-932.
- [39] McNally A, WATTS P. A cloud detection algorithm for high-spectral-resolution infrared sounders. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 2003, 129: 3411-3423.
- [40] Dando M, Thorpe A, Eyre J. The optimal density of atmospheric sounder observations in the Met Office NWP system. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 2007, 133: 1933-1943.
- [41] McNally A. The direct assimilation of cloud-affected satellite infrared radiances in the ECMWF 4D-VAR. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 2009, 135: 1214-1229.
- [42] Bauer P, Lopez P. Implementation of 1D+4D-Var assimilation of precipitation affected microwave radiances at ECMWF. Part I: 1D-Var. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 2006, 132: 2277-2306.
- [43] Geer A, Bauer P. All-sky observations: Errors, biases, and Gaussianity. Proc of ECMWF/JCSDA workshop on assimilating satellite observations of clouds and precipitation into NWP models, 15-17 June 2010, Reading, UK.
- [44] Bauer P, et al. Status of cloud and rain assimilation at ECMWF. Proc of seminar on data assimilation for atmosphere and ocean, 6-9 September 2011, Reading, UK.
- [45] ECMWF. ECMWF four-year programme of activities 2011-2014, 2011. http://www.ecmwf.int/about/programmatic/four-year-programme/FYP_2011-2014.pdf.
- [46] ECMWF. The ECMWF strategy 2011-2020, scientific and technical basis. <http://www.ecmwf.int/about/programmatic/four-year-programme/Strategy-2011-20-S-T-v4.pdf>.