

# 卫星红外高光谱资料同化技术及研究现状

余意<sup>1,2</sup>, 张卫民<sup>1</sup>, 朱孟斌<sup>1</sup>, 白祖义<sup>2</sup>

(1, 国防科技大学, 长沙, 410073)

(2, 中国人民解放军空军 94936 部队, 杭州, 310016)

**摘要:** 介绍卫星红外高光谱大气探测资料在数值天气预报 (NWP) 资料同化中的应用现状, 详细描述同化红外高光谱资料在云检测、水汽带的资料同化、通道信息提取、辐射传输模式等方面存在的技术难点, 对目前国内外的主要研究成果做了介绍, 并给出了红外高光谱资料同化可能的发展方向。

**关键词:** 红外高光谱; 资料同化; 通道; 云检测; 辐射传输模式

## 1 引言

卫星红外高光谱资料具有高精度、高光谱分辨率、高空间分辨率等优良特点, 已经在改善数值天气预报 (NWP) 资料同化的温度、湿度以及其他要素的初始场质量方面起到了重要作用[1]。美国和欧洲气象卫星组织率先发展了红外高光谱探测仪器并在资料同化业务系统中大量同化红外高光谱资料, 我国的红外高光谱探测仪器也在计划之中。

随着越老越多的高光谱探测器 (AQUA 上的大气红外探测气器 AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), METOP-A 和 B 上的红外大气干涉仪 IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer), NPP 上的干涉式红外大气探测器 CrIS (Cross-track Infrared Sounder), FY-4 上的干涉式红外探测器) 升空运行, 研究适用于它们的高效观测数据处理和同化方法具有重要的科学意义和使用价值。图 1 是欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 业务运行时使用的各类卫星资料的比例, 表明红外高光谱资料的使用远远高于其他类型的观测资料, 超过了卫星微波和高空资料[2]。

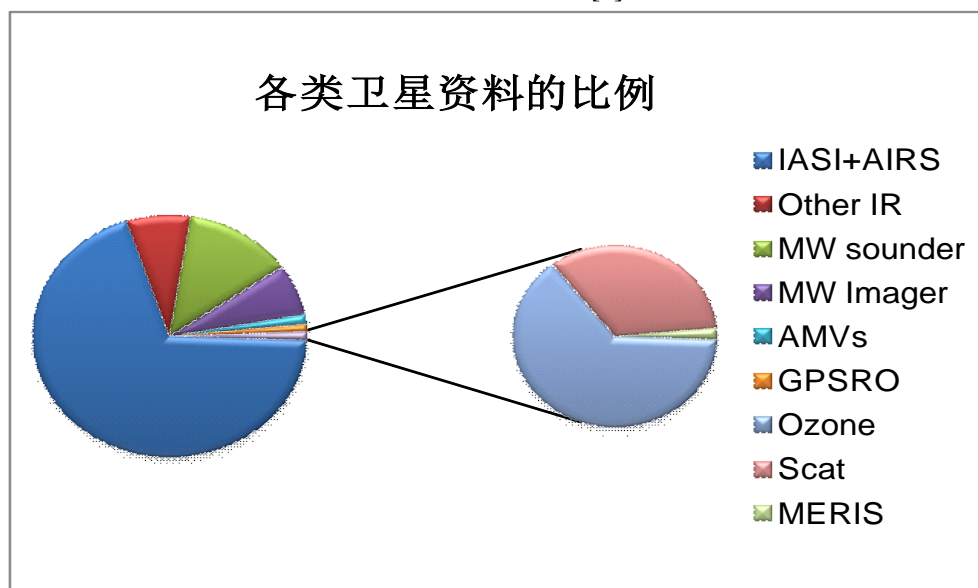


图 1 ECMWF 使用各类卫星资料的比例

国外学者在研究同化卫星红外高光谱遥感资料提高数值预报质量等方面做了大量的工作, 并取得巨大的进展。2003 年 10 月 ECMWF 成功将 AIRS 辐射资料引入四维变分资料同化系统, 首次实现红外高光谱遥感资料的业务同化。统计结果表明: 红外高光谱资料能够改善数值预报模式的预报评分, 南半球尤为明[3][4]。LeMarshall 等研究表明, AIRS 辐射率明显提高了卫星同化联合中心 (Joint Center for Satellite Data Assimilation) GFS 模式整齐预报的 500hPa 距平相关[5]。McCarty 等通过在区域尺度上利用 AIRS 辐射率, 一定程度上提高了 NCEP 北大西洋模式 (NAM) 的 0-48 小时预报距平相关[6]。2007 年 6 月 ECMWF 开始对 IASI 资料进行了同化实验, 随后实现业务化应用[7][8]。英国气象局等中心基于传统的辐射率直接同化方法, 也实现了红外高光谱卫星观测的业务同化[9][10]。Collard 详细介绍了 ECMWF 同化 AIRS 和红外大气干涉仪 IASI 通道选择、云检测和偏差订

正等资料同化技术和方法[11]。最近 Collard 等提出采用主成分分析方法同化红外高光谱观测资料用于数值天气预报[12]。随后, ECMWF 对从 165 个 IASI 长波通道辐射率转换得到的 20 个主成分分数进行了直接四维变分(4D-Var)同化测试, 结果表明: 在数据量减小为原来 1/8 和同化总计算代价减小 25% 的优势下, PC 分数同化方法获得了与红外高光谱辐射率直接同化方法相当的分析和预报效果, 而且在与探空观测拟合比较方面前者在一定程度上优于后者[13]。

国内还没有卫星红外高光谱仪器投入使用, 已经开展的对于红外高光谱资料的反演和初步同化试验为未来卫星红外高光谱资料的同化研究打下了基础。官莉对红外超光谱观测资料在云检测、晴空订正和大气廓线反演方面进行了一系列研究[14][15][16], 采用特征向量统计反演法从 AIRS 资料中反演大气温度、湿度垂直廓线[17]。蒋德明等综合利用经验正交函数展开法(特征向量法), 基于 EOS Aqua 卫星的 AIRS 实际观测资料进行了大气温度、湿度廓线的反演误差对光谱覆盖、通道覆盖、通道宽度等的敏感性试验研究, 为发展中国自己的红外高光谱分辨率探测技术提供科学依据[18]。官莉等用人工神经网络算法从红外高光谱大气探测器 AIRS 实况观测资料反演晴空大气的温度垂直廓线, 并与目前已经发展比较成熟的特征向量统计反演算法进行了比较[19]。陈靖等借鉴 Goldberg 云检测的思想, 通过 AIRS 通道和相应微波通道的经验组合进行云检测, 并在 GRAPES-3DVar 系统中成功进行了红外高光谱观测的同化[20][21]。目前, 国内还没有红外高光谱观测资料的直接四维变分同化技术的相关报道。

## 2 卫星红外高光谱大气探测仪

20 世纪 70 年代开始美国先后研发了不同类型的大气探测仪器, 如 VTPR(Vertical Temperature Profile Radiometer)、HIRS(High Resolution Infrared Radiation Sounder)和 VISSR (Visible Infrared Spin-Scan Radiometer) 大气探测仪[22], 但受滤光片式分光技术限制其光谱分辨率难以提高, 最多 20 个探测通道。这使得探测精度和垂直分辨率远远不能满足日益发展的大气科学研究及气象、气候业务应用和服务的需求。

为彻底改进仪器技术知识, 高光谱大气探测器成为研发重点, 越来越多的高光谱探测器搭载在气象卫星上。例如, 2002 年 5 月, 随着 NASA 地球观测系统(EOS)第二课卫星 Aqua 成功发射, 大气红外探测器 AIRS 投入在轨对地观测。作为第一台超高光谱大气探测仪, AIRS 采用红外光栅阵分光术, 探测 2378 个通道, 覆盖 650~2700cm<sup>-1</sup>(3.715.4μm)红外光谱区域, 其光谱分辨率  $v/\Delta v$  高于 1200, 扫描宽度约为 1650km, 星下点分辨率约为 13 km, 垂直分辨率约为 1 km; 辐射绝对精度优于 0.2 K, 温度垂直探测精度在 1 km 垂直分辨率可达 1K, 而湿度垂直探测精度在 2 km 垂直分辨率可达 10%[23]。2006 年 10 月, 欧洲

表 1.1 国外主要红外高光谱大气探测仪的光谱参数

遥感器名称	分光方式	光谱范围 (μm)	光谱分辨率 (cm <sup>-1</sup> )	星下点空间分辨率(km)	灵敏度 (NET或 NEN)	通道数
AIRS	光栅	长波15.4-8.80 中波8.22-6.20 短波4.61-3.74	0.55 1.2 2.0	13.5	0.15-0.35K (280K)	2378
IASI	干涉	长波15.50-8.26 中波8.26-5.0 短波5.0-3.62	0.25	12	0.20-0.35K (280K)	8461
CrIS	干涉	长波15.38-9.13 中波8.26-5.71 短波4.64-3.92	0.625 1.25 2.5	14	0.1-0.5K (250K)	1305

METOP-A 卫星上的红外大气干涉仪 IASI, 在 3.62~15.5μm 红外光谱范围内进行连续观测, 每个通道的光谱分辨率相等 (0.25cm<sup>-1</sup>), 共 8461 个通道, 辐射分辨率 0.1~0.5K[24]。2011 年 10 月, 随美国 NPP 发射升空的干涉式红外大气探测器 CrIS, 提供了

1305 个光谱通道, 覆盖了长波红外 LWIR (9.14 - 15.38 $\mu\text{m}$ )、中波红外 MWIR (5.71 - 8.26 $\mu\text{m}$ ) 和短波红外 SWIR (3.92 - 4.64 $\mu\text{m}$ ) 3 个波段范围, 光谱分辨率分别为 0.625 $\text{cm}^{-1}$ , 1.25 $\text{cm}^{-1}$  和 2.5  $\text{cm}^{-1}$ 。新一代的卫星红外高光谱大气探测仪, 对大气温湿廓线、大气化学成分遥感达到了前所未有的高精度和高分辨率, 成为目前各国学者研究的热点[25]。表 1 描述了国外主要红外高光谱大气探测仪的光谱参数。

### 3 卫星红外高光谱资料同化的关键技术

研究适用于卫星红外高光谱大气探测仪的高效观测数据处理和同化方法具有重要的科学意义和实用价值。虽然许多业务中心已将红外高光谱仪器的部分晴空通道观测成功同化到数值预报系统中, 并取得了较好的正效果, 但是在红外高光谱卫星资料的同化应用过程中任然存在着一些关键问题需要研究。

#### 3.1 红外高光谱云检测

云检测是利用卫星资料研究云对气候系统作用至关重要的第一步, 云量的空间、时间变化强烈影响着行星反照率梯度和地表能量交换, 进一步影响区域、全球气候。研究云的辐射特性首先要确定何时、何地有云, 或者何时何地晴空无云, 由于地基云量观测资料很有限, 因此必须借助卫星资料进行检测[26], 这正是卫星观测的优势。

云对于热红外辐射观测值影响很大, 直接同化受云污染的红外观测非常困难; 同时在星载测量仪器的瞬时视场中, 大气完全晴空视场大约只占整个观测视场数量的 10%; 所以对于全球预报模式来说, 仅利用完全晴空地区的卫星观测是远远不够的。其次在大部分有云影响区域, 会存在一些通道对于云不敏感(如权重函数峰值位于云顶以上); 如果能够检测出这类通道, 可以有效提高卫星资料利用率, 避免潜在有用信息的丢失。另外有研究表明, 数值天气预报误差主要发生在有云区域; 因此尽可能保留云敏感区域的观测资料, 将有益于数值天气预报效果的改进[27]。

红外遥感资料不能穿透云。解决红外辐射资料的云污染问题有如下几种: (1) 只选择晴空 (Clear-sky) [28]; (2) 把云污染影响去除 (Cloud-cleared) [29]; (3) 选择不受云污染的通道 (Clear-channel) [30]; (4) 发展能计算云对红外辐射影响的辐射模式和它的伴随算子, 从而, 所有资料都可以同化 (Greenwald) [31]。

在卫星气象学领域的国内外学者专家在云检测方法上开展了一系列卓有成效的研究工作。Menzel 等通过  $\text{CO}_2$  切片方法计算云顶气压和有效发射率来反演云导风[32]; Smith 等使用相同方法计算了云顶气压和有效发射率并对 ATOVS 大气红外探测资料进行云检测[33]。McNally 等对 AIRS 观测云检测提出了一种寻找不受云影响的通道云检测方案, 通过利用有云区域不受云影响的通道增加了可供使用的卫星资料量[34]。以上三种云检测方法都需要用到大气温度、湿度、臭氧和地表温度等先验信息。Goldberg 等提出了适用于 AIRS 资料的 NESDIS-Goldberg 云检测方案, 分别对陆地和海洋表面的视场进行云检测[35][36]。官莉等运用与 AIRS 观测空间匹配的 MODIS 的 L2 级产品云掩膜来确定受云污染的视场[1]。陈靖等借鉴 Goldberg 的云检测的思想, 通过 AIRS 通道和相应微波通道的经验组合来进行云检测, 并应用到 GRAPES-3DVar 系统中[20], [21], [37]。张卫民等借鉴 McNally 云检测方案的基本思想[27], 基于通道排序、波段分离、数值滤波和云识别等技术设计和实现了一种红外高光谱探测资料云检测算法, 并将该云检测算法实现到中尺度区域天气预报模式的变分同化系统 WRFDA 中。

在“高分辨率对地观测系统”红外高光谱卫星载荷的辐射率资料同化中, 云检测能有效提高卫星资料利用率和避免潜在可用信息的丢失, 因此是一个必须解决的关键技术。云检测后的辐射率是校正的产品而非纯辐射率观测, 其误差相对晴空辐射率较大并且通道间高度相关, 使用该产品时质量控制和指定观测误差将很重要, 同时还需要考虑先验资料的影响。同化过程中增加了去除云污染的辐射率, 则需要调整背景依赖、光谱相关的误差, 而且需要重点考虑基于云方案的质量控制过程。

#### 3.2 水汽带的资料同化

有效使用红外高光谱水汽通道同样是红外高光谱资料同化的一个技术难点。AIRS 仪器噪声在  $6.3\mu\text{m}$  水汽带约为  $0.2\text{K}$ ，ECMWF 假设该水汽带的观测误差为  $2\text{K}$ ，实验得出当观测误差低于  $2\text{K}$  时，将降低 AIRS 资料对其他观测如先进的微波探测器 AMSU-B 辐射率的拟合，其他 NWP 中心也得出相似结论：美国国家环境预报中心 NECP 使用  $2.5\text{K}$ ，而英国气象局 Met. Office 假设观测误差为  $4\text{K}$ [38]。

此外，云检测的过程中，AIRS 通道  $6.3\mu\text{m}$  水汽带依赖于水汽带第一猜值偏差，这将导致在模式水汽误差水平高的区域，大量水汽观测将被排除在外。云检测的过程干扰了水汽观测的处理，同化过程中仅同化了最拟合模式背景场的水汽观测。

Collard 分析使用 AIRS 时，误差变大可能是因为：相关观测和正向模式误差通过假设对角误差协方差来逼近，以及模式的约束项抑制了高分辨率垂直结构且错误地发散了水平、垂直方向的增量。另外一个可能的原因是，水汽通道对温度非常敏感，受到温度增量的影响。假定的水汽通道误差权重远小于水汽观测误差表征的含义，调整误差结构能给影响预报评分带来小幅度的正效应，表明这一块具有更积极使用资料的潜质。如果充分发挥高垂直分辨率的红外高光谱资料优势，需要使用大量的具有低真实噪音和假定噪音的通道[11]。

### 3.3 通道信息提取方法

以前由于技术的限制，一般的卫星探测仪器只能提供数量有限的通道，在这种情况下通道选择的原理是通过利用通道的光谱响应特性（如通道的中心频率、带宽等），控制通道的权重函数，使得观测结果能最有效地对大气参数进行反演，此时求解的问题是欠定的[23]。随着探测技术的发展，真正实现了高精度探测和高光谱分辨率，用来探测精细的大气温度、湿度廓线等，此时求解的问题是超定的。

红外高光谱虽然拥有上千个光谱通道，但是这些通道中包含大量相似信息，从信息内容的角度分析，红外高光谱仅包含远小于通道数目的几十个独立信息块，存在大量的信息冗余。通常，一套通道中有多少相互独立的信息片，就意味着该通道包含有多少“有效信息量”，曾庆存指出，并不能无条件地不断提高测量精度和增加通道数目而无限准确地间接推断出气温垂直分布[39]。用这几十种信息描述观测，当大量减少使用的资料容量时，仍然能够保存主体信息。

为了有效使用红外高光谱观测资料上千通道所包含的信息，必须研究有效提取信息的方法，即通过使用较小数的通道辐射率包含绝大部分信息（这里通道指被同化的离散参量）[40]。提取红外高光谱信息的方法包括直接通道选择方法、超级通道、反演方法、主成分分析方法、重构辐射率方法：

- 直接通道选择方法：考虑每一个通道的 Jacobians 宽度、仪器噪声、其余通道对其的干涉程度，从完整光谱中选取部分检测通道，再从这些检测通道中选择出积极用于同化的通道子集。这样重新获得的光谱资料集降低了观测光谱的噪声，达到仪器噪声的程度。这种方法是目前各 NWP 中心业务使用最成熟的一种方法，具体的同多选择过程，国内外学者做了较深入的研究[41][42][43][44]。ECMWF 在业务资料同化中仅选择 155 个 AIRS 和 168 个 IASI 通道。
- 超级通道：对光谱中相似的通道计算平均值以产生能相似性质的一个通道，去掉大量退化的随机噪声[11]；
- 反演方法：用大气状态如温度廓线、湿度廓线等表示遥感光谱。
- 主成分分析方法（PCA）：使用 IASI 辐射率资料集推导出光谱变量的主成分模式，主成分对应于真实大气变量，而非随机噪声信息，而且光谱中的大量大气信息压缩为起始的 100-200 个主成分[45]。
- 重构辐射率方法：将光谱主成分重构成通道再进入同化系统，这种方法能够估计每一通道的真实辐射率，并且较大程度降低了噪声。这种方法可以看做是另一种超级通道方法，每一个重构的辐射率是对大量通道线性组合计算出真实通道辐射率的估计值[11]。

### 3.4 红外高光谱辐射传输模式

辐射传输模式将红外高光谱遥感辐射率与数值模式预报变量 ( $t, q, p, u, v, w$ ) 联系起来, 用于计算给定地气系统状态参数 (如: 温度、湿度廓线, 吸收气体分布, 地表特性, 云特性, 等等) 条件下的到达卫星探测器的辐射值以及辐射值关于大气和地表参数的导数 (Jacobian), 是红外高光谱资料同化系统中一个至关重要的环节。相应于卫星遥感仪器的科学算法, 美国、日本、欧洲等国家, 一般需要提前在仪器上天前的 5~10 年开始研究和开发。我们国家历史上对卫星仪器的开发和研制相当重视, 但与仪器配套的科学算法的提前开发比较薄弱, 导致对卫星数据的利用徘徊在看图和定性分析的水平, 间接降低了对卫星数据的有效利用, 因此, 发展与仪器配套的科学算法应该是一项重点工作[46]。

模拟大气辐射传输的方法有很多, 主要可以分为精确的逐线积分 (LBL) 和快速的参数化方法两类[47]。逐线积分方法就是逐条计入大气气体吸收谱线贡献的一种精确的透过率计算方法。该方法的有点是可以直接对波数进行积分, 可以有效处理大气非均匀路径和不同气体的重叠吸收带, 并可以同时处理吸收与散射问题, 计算精度高, 目前可以达到 0.5% [48]。逐线积分方法有 4A [49]、HARTCODE [50]、LBLRTM [51]、ARTS [52]。但是, 计算量相当巨大和费时, 即使一个相当简单的问题也会因为需要耗费大量的计算时间而变得不切实际。逐线积分方法逐渐成为快速算法精度检验的标准, 同时还是发展和建立这些快速方法的基础和依据。

快速参数化的特点是计算速度快, 专为各种实际应用开发完成, 适用实际应用的需要。现在各类快速参数化方法在实际中获得了非常广泛地应用, 如数值天气预报 (NWP) 和气候模式中常用的 RTTOV [53],  $\sigma$ -IASI [54], OSS [55], PCRTM [56], CRTM [57] 等。当前应用最广和最具代表性的两个快速辐射传输模式即欧洲中期数值天气预报中心 ECMWF 开发的 RTTOV 模式和美国卫星资料同化联合中心 JCSDA 开发的 CRTM 模式。目前, RTTOV9.3 和 CRTM1.2 这两个快速辐射传输模式都已通过较为统一的接口接入了中国气象局开发建立的 GRAPES 数值预报系统的资料同化系统中, 两者可以选择使用, 成为开展卫星资料同化工作的一个基础。

2007 年国际 TOVS 工作组对模拟 AIRS 和 IASI 辐射率的多种辐射传输模式进行了比较, 得出诸多重要的经验: AIRS 和 IASI 资料促进了 ATOVS 辐射传输模式的发展, 在原有框架基础上包含模拟高光谱资料的模块; AIRS 提供的高精良的大气顶红外辐射率促进了辐射传输模式大气遥感在热红外光谱段的应用; 快速辐射传输模式的误差精度达到了逐线模式的误差水平, 其误差源于光谱学的基本假设和使用的线参数, 而非快速模式公式本身。

## 4 主成分方法同化卫星红外高光谱资料

红外高光谱的上千通道给通信带宽、资料存储、辐射模式、同化计算等多方面带来了

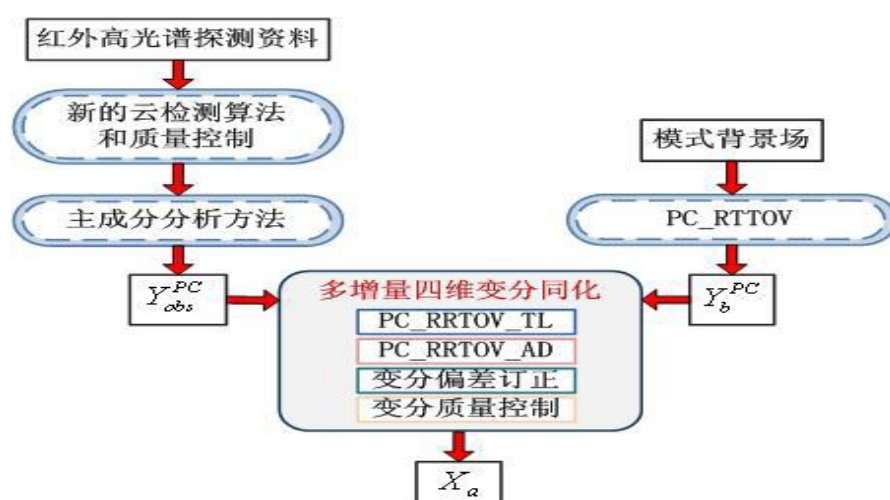


图 2 直接同化红外高光谱主成分的四维变分同化系统框架



巨大的挑战。NOAA/NESDIS 基于通信带宽的原因,从 AIRS2378 个通道中仅挑选出 324 个传送给 ECMWF,而 ECMWF 仅从这 324 个通道最多选取 155 个进行近实时业务同化[58]。与 ATOVS 仅有 20 个通道相比, AIRS 在实际中使用 155 个通道仍然显太多,由此引入新的问题,一个是计算量太大,另一个是通道之间存在的相关性。计算量太大不利于业务应用,通道之间的相关性会造成同化的不适定性。Collard 等使用主成分方法重构出辐射率与观测的辐射率计算出残差,进行红外高光谱资料同化[59]。Martricardi 等提出在 ECMWF 4D-Var 同化系统中直接同化 IASI 光谱的主成分。这种方法用主成分方法对观测的红外高光谱辐射率和由背景场资料模拟出的辐射率都同时提取出主成分信息,计算残差后在同化系统中直接同化红外高光谱主成分[60]。

主成分方法从卫星红外高光谱观测数据中获取主要信息,用数目相当少的主成分代替原有上千通道辐射率,以寻找原通道之间的相关关系,产生互不相关的主成分,且不损失原光谱的主要信息[61],降低了求解红外高光谱问题空间的维度。目前各 NWP 中心调整资料同化系统框架结构以及辐射传输模式等相关环节,采用主成分方法有效同化红外高光谱观测资料。图 2 为直接同化红外高光谱主成分的四维变分同化系统框架。

## 5 总结

红外高光谱大气探测仪的发展使大气遥感观测进入了一个新的时代,其高精度、高光谱分辨率和高空间分辨率的探测资料使大气探测达到前所未有的水平,目前的资料同化应用也表明,红外高光谱资料能给资料同化尤其是资料稀缺的南半球区域的资料同化带来明显的积极影响,提高了数值天气预报的准确度。

自 2003 年 10 月 ECMWF 首次对 AIRS 资料实现业务同化以来,红外高光谱在提高数值预报准确率方面发挥了重要作用,相比资料稀缺的南半球,同化 AIRS 资料对 500hPa 位势高度反相关预报相比北半球有更为显著的改善,如图 3 所示。

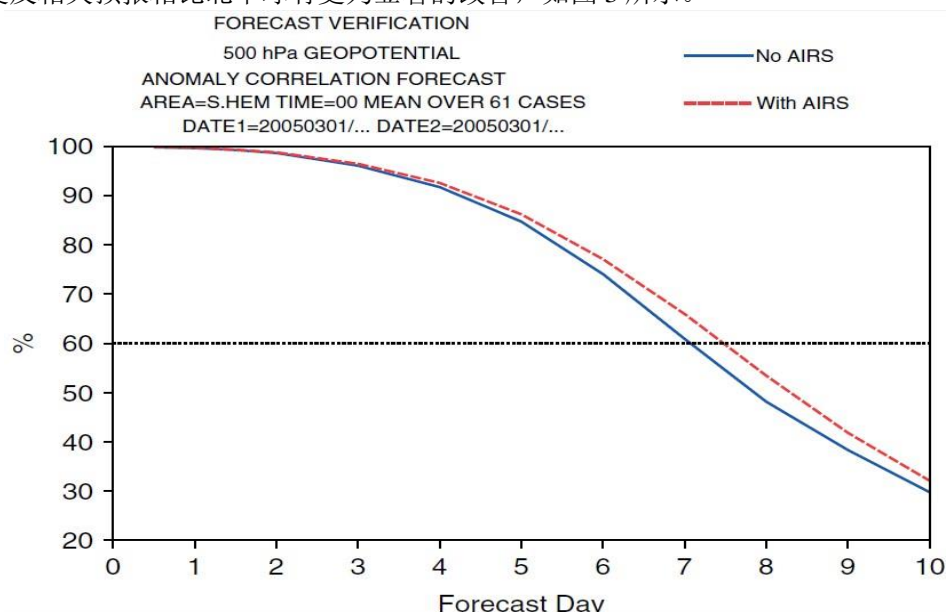


图 3 引自 wileyonlinelibrary.com/journal/qj

但是,红外高光谱探测的上千通道,使问题空间的维度非常大,计算和求解过程复杂,给资料同化过程带来了极大的挑战,如何合理有效地利用红外高光谱还有很多问题等待我们去探索。

(1) 红外高光谱仪器 AIRS 和 IASI 能够提供高精度和高垂直分辨率的信息,在资料同化系统中起非常关键性的作用。但是这些仪器获得的大量资料带来了许多挑战和问题:在红外高光谱资料观测、传输、预处理和模拟过程中会引入系统性偏差,如果不能将偏差订正到一定水平之下,则会导致同化失败;红外高光谱资料的观测算子是非线性的,在背景场非常准确的区域,变分同化方法效果较好,但在大气运动变化剧烈和背景场不精确的

区域,高质量的观测可能会被质控程序剔除。

(2) 目前ECMWF 业务上使用的AIRS 和IASI 辐射率仅限于光谱长波区域选定的温度遥感通道和红外光谱带的有限湿度遥感通道。通道的选择通常受陆地和海冰面约束,或者根据质量控制来剔除一些观测,如不使用对陆面敏感的通道。其次现有同化方法对卫星遥感资料进行了大幅度的稀疏化,而且只选择200 来个通道(主要集中在长波CO<sub>2</sub> 带)。上述局限导致大量可用的有效信息丢失,影响了红外高光谱资料的应用。

(3) 高分辨率红外遥感光谱区域包含了许多非常相似的光谱信号通道。这些通道在内容上高度相关,从而存在大量信息冗余。由于辐射传输模式全光谱模拟的计算代价巨大,全光谱同化代价很大且效率很低。同时大气红外探测器具有几千甚至上万通道,问题的求解变成了超定的。ECMWF 基于通道Jacobian 宽度、仪器噪声、冗余通道的干涉程度等因素,从IASI 的8461 个通道中检索出366 个通道用于业务同化运行,但是通道仍然显太多。由此引起新的问题:一个是计算量太大,不利于业务应用;二个是通道之间存在相关性,会造成反演或同化的不适定。如何尽可能多地提取有用信息和去除通道间的相关性,对于红外高光谱资料同化至关重要。

尽管红外高光谱资料的应用已取得了较大成就,由于同化系统中观测算子云雨粒子辐射效应、湿物理过程等问题的复杂性,目前同化系统中真正使用的红外资料大约仅占现有红外高光谱资料的5%,红外高光谱资料应用还需要进一步深入研究,同时也具有很大的潜力[62][63]。

## 6 参考文献

- [1] 官莉,星载红外高光谱资料的应用,北京:气象出版社,2008.6
- [2] Cardinali C, Daescu D, Healy S, Dahoui M, Radnoti G, Fouilloux A 2011 ECMWF Seminar.
- [3] Collard A., Saunders R., Cameron J., Harris B., et al. Assimilation of data from AIRS for improved numerical weather prediction. Proceeding Of the 13<sup>th</sup> International TOVS Study Conference, 2003.
- [4] McNally, A.P., P.D. Watts, J. A. Smith, et al. 2006: The assimilation of AIRS radiance data at ECMWF. Q. J. R. Meteorol. Soc. 132,935-957.
- [5] Le Marshall, J., J. Jung, J. Derber, M. Chahine, et al. 2006: Improving Global Analysis and Forecasting with AIRS. B. Amer. Met. Soc., 87,891-894.
- [6] McCarty, W.M.,2009: The Impact of the Assimilation of AIRS Radiance Measurements on Short-term Weather Forecasts. J. Geophys. Res., in review.
- [7] Collard, A. D., McNally, A. P., 2009: The assimilation of Infrared Atmospheric Sounding Interferometer radiances at ECMWF. Q. J. R. Meteorol. Soc. 135:1044-1058.
- [8] Hilton, F. I., Collard A. D., Guidard V, Randriamampianina R, Schwaetz M. 2009b. Assimilation of IASI Radiance at European NWP Centers. In Proc. of the ECMWF/EUMETSAT NWP-SAT Workshop on the assimilation of IASI in NWP,6-8 May 2009. ECMWF: Reading, UK.
- [9] James C., Andrew C., English S. Operation use of AIRS observation at the Met Office. 14<sup>th</sup> Internet Tows Study Conference, Beijing, China, 2005.
- [10] Hilton, F. I., Atkinson, N. C. English, S. J. Eyre, J. R. 2009a. Assimilation of IASI at Met Office and assessment of its impact through observing system experiments. Q. j. R. Meteorol. Soc. 135: 495-505.
- [11] Collard, A. D., 2007: Assimilation of AIRS and IASI at ECMWF. 3-7 Sept. 2007. ECMWF Report, Reading, U. K.
- [12] Collard, A. D., McNally, A.P., Hilton, F. I., et al. 2010b: The use of principal component analysis for assimilation of high-resolution infrared sounder observations for numerical weather prediction. Q. j. R. Meteorol. Soc. 136: 2038-2050.
- [13] Matricardi M., McNally A.P., 2012: The direct assimilation of principal components of IASI Spectra in the ECMWF 4D-Var. Technical memorandum 690(submitted to Q J Roy Meteor Soc ).
- [14] 官莉. 红外超光谱资料的使用及其在云检测、晴空订正和大气廓线反演方面的应用. 南京: 南京信息工程大学理学博士学位论文, 2005.
- [15] 官莉, HUANG H L, 李俊. 用 EOS/AIRS 观测值反演大气廓线的初步研究. 气象学报英文版,2005, 19(1): 11-18.
- [16] 官莉,王振会. 用空间匹配的 MODIS 云产品客观确定 AIRS 云检测. 气象科学, 2007, 27(5):516-521.
- [17] 官莉. 利用 AIRS 卫星资料反演大气廓线 I. 特征向量统计反演法. 南京气象学院学报, 2006,29(6): 756-761.
- [18] 蒋德明,董超华,陆维松. 利用 AIRS 观测资料进行红外高光谱大气探测能力视野研究. 遥感学报, 2006, 10 (4): 586-592.
- [19] Guan Li, Liu Yang, Zhang Xue-hui. Application of artificial neural network algorithm in retrieving atmospheric temperature profiles from hyperspectral infrared data. Trans. Atmos. Sci, 2010, 33 (3) :341-346.
- [20] 陈靖,李刚,张华. 云检测在高光谱大气红外探测器辐射率直接同化中的应用. 气象, 2011, 37(5):36-42.

- [21] 陈靖. 云检测在高光谱大气红外探测器辐射率资料直接同化中的应用研究. 南京: 南京信息工程大学理学硕士学位论文, 2005.
- [22] 刘辉, 董超华, 张文建. 国际卫星红外大气探测器发展新特点. 气象科技. 2006, 34(5):599-605.
- [23] 张建伟, 王根, 张华, 等. 2011. 基于主成分累影响系数法的高光谱大气红外探测器的通道选择试验, 大气科学学报, 34 (1): 36-42
- [24] 张磊, 董超华, 张文建, 张鹏. METOP 星载干涉式超高光谱分辨率红外大气探测仪 (IASI) 及其产品. 气象科技. 2008, 36(5):639-642.
- [25] Bloom, H. J. (2001) The-track infrared sounder (CrIS): a sensor for operational meteorological remote sensing. Proc. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. 3, 1341-1343.
- [26] Liu Y H, Key J R, Frey R A, et al. 2004. Nighttime polar cloud detection with MODIS. Remote Sensing of Environment, 92: 181-194.
- [27] 张卫民, 吴忠元, 曹小群. 红外高光谱探测资料云检测算法研究. 2012.
- [28] Collard, A. D., 2004: Assimilation of AIRS observations at the Met Office. Proc. Workshop on Assimilation of High Spectral Resolution Sounders in NWP, Reading, United Kingdom, ECMWF, 63-71.
- [29] Derber J C, Wu W S. 1998. The use of TOVS cloud-cleared radiances in the NCEP SSI analysis system. Monthly weather review. 124:2287-2299.
- [30] McNally A P, Watts P D. 2003. A cloud detection algorithm for high-spectral- resolution infrared sounders. Q. J. R. Meteorol. Soc., 129: 2422-2323.
- [31] Greenwald, T. J., & Christopher, S. A. (2002). Effect of cold clouds on satellite measurements near 183 GHz. Journal of geophysical research, 107(D13), 4170.
- [32] Menzel, Smith M, Stewart T. Improved cloud motion wind vector and altitude assignment using VAS[J]. J Appl Meteor, 1983, 22: 377-384.
- [33] Smith, Frey R. On cloud altitude determinations from high resolution interferometer sounder bservations[J]. J Appl Meteor, 1990, 29: 658-662.
- [34] McNally A P, Watts P D. A cloud detection algorithm for high-spectral-resolution infrared sounders[J]. Q J Roy Meteor Soc, 2003, 129: 3411-3423.
- [35] Goldberg M D, Zhou. AIRS clear detection flag[e]. 2002, Presentation Material at a Meeting.
- [36] Goldberg M D, Qu Y. AIRS near real time products and algorithms in support of operational numerical weather prediction[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2003, 41(2): 379-388.
- [37] 陈靖, 李刚, 王根. 一个基于视场的 AIRS 云检测方案[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(7):3848-3853.
- [38] Cameron, J., A. Collard and S. English (2005). Operational use of AIRS observations at the Met. Office. Proceeding of the Fourteenth International TOVS Study Conference, Beijing, China. 25<sup>th</sup>-31<sup>st</sup> May 2005.
- [39] 曾庆存. 大气红外遥测原理. 北京: 科学出版社, 1974.
- [40] 余意. 主成分方法在红外高光谱资料同化中的应用. 长沙: 国防科技大学计算机学院工学硕士学位论文, 2011.
- [41] Rogers C D. 1996. Information content and optimization of high spectral resolution measurements [R] //Paul B H, Wang Jinxue. Optical spectroscopic techniques and Instrumentation for atmospheric and space research II: 136-147.
- [42] Florence R, Fourrie N, Ourrie D, et al. 2002. Channel selection methods for infrared atmospheric sounding interferometer radiance [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 128 (581):1011-1027
- [43] Fourrie N, Jean-Noel thepaut research department. 2002. Validation of the NESDIS near real time AIRS channel selection [C] //ECMWF Tech. Memo. European Center for Medium Range.
- [44] 杜华栋, 黄思训, 石汉青. 2008. 高光谱分辨率遥感资料通道最优选择方法及实验. 物理学报. 57 (12): 7685-7692.
- [45] Schlusel, P. (2005). Super-channel selection for IASI retrievals. Proceedings of the Fourteenth International TOVS Study Conference, Beijing, China. 25<sup>th</sup>-31<sup>st</sup> May 2005.
- [46] 冯绚, 高光谱分辨率大气辐射传输模式的研究, 博士毕业论文, 中国科学院合肥物质研究院. 2007.
- [47] 马刚, FY3 大气垂直探测器辐射资料的同化应用研究, 博士毕业论文, 兰州大学. 2008.
- [48] Clough S A, Shephard M W, Mlawer E J, et al. Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the AER codes[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2005, 91(2): 233-244.
- [49] Scott, N. A., and A. Chedin (1981), A fast line-by-line method for atmospheric absorption computation: The Automated Atmospheric Absorption Atlas, J. Appl. Meteorol., 20, 802-812.
- [50] Miskolczi, F., R. Rizzi, R. Guzzi, and M. Bonzagni (1989), A new high resolution atmospheric transmittance code and its application in the field of remote sensing, in IRS '88: Current Problems in Atmospheric Radiation, vol. 121, A. Deepak, Hampton, Va.
- [51] Clough, S. A., M. J. Iacono, and J. L. Moncet (1992), Line-by-line calculation of atmospheric fluxes and cooling rates: 1. Application to water vapor, J. Geophys. Res., 97, 15,761- 15,780.
- [52] Buehler, S. A., P. Eriksson, T. Kuhn, A. von Engeln, and C. Verdes (2005), ARTS, The Atmospheric Radiative Transfer Simulator, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 91, 65- 93.
- [53] Saunders, R. W., M. Matricardi, and P. Brunel (1999), An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations, Q. J. R. Meteorol. Soc., 125, 1407-1426.
- [54] Amato, U., G. Masiello, C. Serio, and M. Viggiano (2002), The sigma-IASI code for the calculation of infrared atmospheric radiance and its derivatives, Environ. Modell. Software, 17(7), 651-667.
- [55] Moncet, J.-L., G. Uymin, and H. E. Snell (2004), Atmospheric radiance modeling using the optimal spectral sampling (OSS) method, Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., 5425, 368- 374.



- [56] Liu, X., W. L. Smith, D. K. Zhou, and A. Larar (2006), Principal component-based radiative transfer model for hyper-spectral sensors: Theoretical concept, Appl. Opt., 45(1), 201– 209.
- [57] Han Yong, Van Deist P, Liu Quanhua, et al. 2006. User's guide to the JCSDA community radiative transfer model. ftp://ftp.emc.ncep.noaa.gov/jcsda/CRTM/.
- [58] McNally A P, Watts P D, Smith J A, Engelen R, Kelly G A, Thepaut J N, Matricardi M. 2006. The assimilation of AIRS radiance data at ECMWF. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 132:935-957.
- [59] Collard A D, McNally A P, Hilton F I, et al. 2010. The use of principal component analysis for the assimilation of high-resolution infrared sounder observation for numerical weather prediction[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 136:2038-2050.
- [60] Matricardi M., McNally A.P., 2012: The direct assimilation of principal components of IASI Spectra in the ECMWF 4D-Var. Technical memorandum 690(submitted to Q J Roy Meteor Soc ).
- [61] 胡庆军. 高等工程数学. 国防科技大学出版社.2006.
- [62] 董佩明;薛纪善;黄兵,数值天气预报中卫星资料同化应用现状和发展[期刊论文]-气象科技 2008(01)
- [63] 薛纪善,气象卫星资料同化的科学问题与前景[期刊论文]-气象学报 2009(06)

## Assimilation Technology and Develop Status of Satellite Infrared Hyperspectral Data

Yu Yi<sup>1,2</sup>, Zhang Weimin<sup>1</sup>, Zhu Mengbin<sup>1</sup>, Bai Zuyi<sup>2</sup>

(1. Computer Science, University of National Defense Technology, Changsha, 410073)

(2. NO.94936 Troops of Chinese People's Liberation Army, Hangzhou, 310016 )

**Abstract:** The Kilochannel infrared hyperspectral sounders are important contributors to data assimilation system in NWP centers. This article introduces the application status of the satellite infrared hyperspectral data and makes a detailed description of key technology such as cloud detection, data assimilation of water vapor band, extraction of the channel information, and radiative transfer model. The main research results at home and abroad is presented, and also the development direction of infrared hyperspectral data assimilation.

**Keywords:** infrared hyperspectral; data assimilation; channels; cloud detection; radiative transfer model