

基于一维变分算法的红外高光谱(IASI)卫星遥感 大气温湿廓线研究

官元红^{①②},任杰^①,鲍艳松^{②*},陆其峰^③,刘辉^③,肖贤俊^③

① 南京信息工程大学 数学与统计学院,江苏 南京 210044;

② 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/中国气象局气溶胶与云降水开放重点实验室,江苏 南京 210044;

③ 中国气象局 中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室/国家卫星气象中心,北京 100081

* 联系人,E-mail:ysbao@nuist.edu.cn

2018-01-02 收稿,2018-03-09 接受

国家重点研发计划项目(2017YFC1501704;2016YFA0600703);国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(61661136005);中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室开放课题;上海航天科技创新基金(F-201509-0066)

摘要 大气温湿度廓线是大气重要参数,在数值天气预报及天气预警中具有重要的应用价值。为获得高精度的大气温度与水汽混合比廓线数据,研究了基于 Metop-A/IASI 红外高光谱资料的大气温度与水汽混合比廓线变分反演方法。利用 IASI 高光谱传感器温度和水汽探测通道资料,结合 CRTM 模式和 WRF 模式预报技术,使用一维变分方法,研究了卫星资料质量控制、背景误差协方差本地化、观测误差协方差计算等方法,构建了大气温度及水汽混合比廓线变分反演系统,并在北京、青岛、沈阳 3 个地区开展了反演试验。以探空为标准的反演结果对比显示,使用 WRF 模式预报值作为背景场,温度的平均误差绝对值小于 0.6 K,均方根误差为 0.89 K;水汽混合比的平均误差绝对值小于 0.021 g/kg,均方根误差为 0.02 g/kg。试验结果表明:基于一维变分方法,可以利用 Metop-A/IASI 红外高光谱资料进行大气温度与水汽混合比廓线高精度探测。

关键词

Metop-A/IASI;

温湿廓线;

一维变分;

反演

大气温湿廓线是大气的重要参数,准确的大气温湿廓线数据对于提高数值天气预报精度具有重要意义(鲍艳松等,2016),并且对于短期的天气预警也有一定改善(Li et al.,2011)。大气温湿廓线的反演研究经过几十年的发展,已取得长足的进步。由于气象卫星遥感资料能够有效补充海洋、荒漠以及高原等常规观测匮乏地区的资料(马旭林等,2017),在 20 世纪中期开始被用于大气温湿度廓线等参数的研究。King(1956)最早根据卫星热红外辐射的观测来推算大气温湿廓线。之后,随着光学器件关键技术的突破,使得红外高光谱遥感探测技术获得了飞速发展(黄威等,2015),有关大气温湿

廓线卫星遥感反演方法也随之发展。目前主要的反演方法有特征向量统计法、人工神经网络法、变分法等。一些学者(官莉,2005;蒋德明等,2006;刘辉,2006)利用特征向量统计法反演 AIRS(Atmospheric Infrared Sounder)大气温湿廓线,表明高光谱大气垂直探测仪器可以改善对流层中上层以及对流层顶的反演精度。马鹏飞等(2014)用特征向量统计法反演得到初始大气廓线,再利用非线性牛顿迭代法进一步提高了反演的精度,使得温度均方差在 100~700 hPa 间小于 1 K,湿度均方差在 300~900 hPa 间小于 20%。官莉等(2010)在模拟分析表明人工神经网络算法反演的大气温度廓线均方根误差小于特

引用格式:官元红,任杰,鲍艳松,等,2019.基于一维变分算法的红外高光谱(IASI)卫星遥感大气温湿廓线研究[J].大气科学学报,42(4): 602-611.

Guan Y H, Ren J, Bao Y S, et al., 2019. Research of the infrared high spectral (IASI) satellite remote sensing atmospheric temperature and humidity profiles based on the one-dimensional variational algorithm[J]. Trans Atmos Sci, 42(4): 602-611. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20180102003. (in Chinese).

征向量统计法的基础上,运用实况 AIRS 观测资料进行反演,结果显示两种算法在计算时间和精度上相当。Devendra and Bhatia(2006)利用神经网络法反演了大气温湿廓线,并将微波和高光谱红外反演的结果进行对比,发现两者具有很好的一致性,但是在 850 hPa 以下两者温湿差异分别为 4 K 和 3 mg/kg。张雪慧等(2009)用人工神经网络的算法反演晴空条件下的大气温度廓线,其误差在 200~300 hPa 上小于 1 K。李俊和曾庆存(1997a,1997b)利用一维变分原理得到了 AIRS 模拟资料在晴空条件下大气温度和水汽权重函数的解析形式,得到线性化的辐射传输方程,然后通过牛顿非线性迭代得到大气温湿廓线,发现 AIRS 模拟反演结果达到了温度 1 K,水汽混合比 10%的反演精度。

大气温湿廓线特征向量统计反演方法计算速度快、算法简单,但是其本身不考虑大气辐射传输过程的物理本质,因此反演精度不够理想。大气温湿廓线神经网络反演方法具有很强的非线性问题处理能力和良好的容错力,但是其依赖于样本训练,需要大样本训练数据集,建立较有代表性的反演模型,这在实际工作中难以得到满足(Cimini et al.,2006;王云等,2014)。相比于前两种方法,变分方法考虑了大气辐射传输过程,且不依赖于样本的训练,可以结合观测值、先验值以及误差信息反演大气温度与湿度垂直分布信息(官元红等,2007;毕研盟等,2013)。因此,本文利用 IASI(Infrared Atmospheric Sounding Interferometer)红外高光谱传感器温度和水汽探测通道资料,结合 WRF(the Weather Research and Forecast)模式预报技术,使用一维变分方法,重点解决卫星资料质量控制、背景误差协方差本地化、观测误差协方差计算等关键技术,构建一维变分反演系统。为检验该系统反演大气温度及水汽混合比廓线的能力,在北京、青岛、沈阳 3 个地区开展反演试验,利用探空资料检验反演结果的精度,评价 IASI 红外高光谱传感器对大气温度及水汽混合比廓线探测的能力。

1 模式与数据集

1.1 模式介绍

结合卫星资料,利用一维变分方法反演大气温度及水汽混合比廓线。试验中观测算子使用了美国国家海洋和大气管理局(NOAA)开发的快速辐射传输模式(CRTM, Community Radiation Transfer Model)。CRTM 是一种用于紫外、可见光、红外、微

波波段卫星观测资料模拟的快速辐射传输模式,该模式根据给定的大气温湿度廓线、各种气体浓度、云、气溶胶和地表特征,结合卫星传感器通道响应函数,可以模拟卫星传感器接收到的辐射值。CRTM 模式主要由前向模块、切线性模块、伴随模块及 K 矩阵模块组成(Han et al.,2005),本文主要使用了前向模块和 K 矩阵模块。

一维变分反演系统中采用的背景场由中尺度数值预报模式(WRF)提供。WRF 模式是由美国国家大气研究中心(NCAR)、美国国家环境预报中心(NCEP)、Oklahoma 大学的风暴分析和预报中心(CAPS)等多家科研机构共同研制,目前广泛应用于台风、热带气旋、暴雨等重要天气过程的模拟和预报研究。WRF 模式程序设计具有结构化、易用性等优点,主要包括 4 个模块:标准初始化模块(WPS)、资料同化模块(WRF-DA)、预报模块(WRF ARW)、后处理模块(Post-processing)。本文主要使用了标准初始化模块和预报模块。

1.2 数据集

试验中使用了 2017 年 2 月 1 日至 4 月 30 日北京、青岛和沈阳每日的 00:00(世界时,下同)的探空资料、Metop-A/IASI 红外高光谱资料和再分析资料。其中探空数据是探空站每日 00:00 通过探空气球,观测其站点上空的大气气压、海拔、温度、相对湿度、露点、温度露点差、风向、风速等气象要素所记录的资料,试验中将探空资料视为真实值(刘亚亚等,2010;黄兴友等,2013)。研究中的卫星观测资料来自欧洲极轨卫星 Metop-A 上搭载的红外高光谱垂直探测仪器 IASI,它是一台基于迈克尔逊干涉仪且附有一个成像系统的傅里叶变换光谱仪,共有 8 461 个通道,辐射分辨率 0.1~0.5 K,IASI 的光谱范围包含了 CO_2 、 H_2O 、 CO 、 O_3 、 CH_4 和 N_2O 吸收带(张磊等,2008)。研究中参考了 Collard(2007)选取的 300 个通道,提取了 70 个观测误差较小的通道用于温度反演试验,89 个观测误差较小的通道用于水汽混合比反演试验。由于卫星扫描点和扫描时间的不确定性,试验中将临近时刻的卫星资料通过距离插值法插值到与探空资料相应的经纬度位置进行计算。再分析资料是由美国气象环境预报中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)联合制作的数据集,他们采用了当今最先进的全球资料同化系统和完善的数据库,对各种资料来源(地面、船舶、无线电探空、测风气球、飞机、卫星等)的观测资料进行质量控制和同化处理,所获得的一套完整的

再分析资料集,其时间分辨率为一天4次(赛瀚和苗峻峰,2015),它不仅包含的要素多,范围广,而且延伸的时段长,是最早发展的、也是时间尺度最长的全球最终分析资料(刘宁微等,2017)。

2 一维变分反演系统的构建

2.1 算法简介

变分同化方法可以有效克服单纯反演计算不适定的困难,实现用正演方法求解反问题(张建伟等,2011)。本文使用的反演方法为一维变分反演方法,其代价函数为(李俊和曾庆存,1997a):

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \cdot [(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \cdot \mathbf{B}^{-1} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + (\mathbf{Y} - \mathbf{F}(\mathbf{x}))^T \cdot \mathbf{O}^{-1} \cdot (\mathbf{Y} - \mathbf{F}(\mathbf{x}))]. \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}_b$ 为背景场,这里采用 WRF 模式的预报值; $\mathbf{F}$ 为观测算子,即为辐射传输模式(CRTM); $\mathbf{Y}$ 为观测场,采用 IASI 红外高光谱资料; $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{O}$ 分别表示背景误差协方差矩阵和观测误差协方差矩阵; $\mathbf{x}$ 为待反演的温度以及水汽混合比廓线。

极小化(1)式即可得到反演的温度和水汽混合比廓线。常用的极小化算法有最速下降法、共轭梯度法、牛顿法、拟牛顿法等。这里采用的是牛顿法,它是一种借助偏导信息寻求目标函数极小值的方法,其迭代公式为:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n - \left(\frac{\partial^2 J(\mathbf{x}_n)}{\partial \mathbf{x}_n^2} \right)^{-1} \cdot \frac{\partial J(\mathbf{x}_n)}{\partial \mathbf{x}_n}. \quad (2)$$

式(2)中,代价函数一阶和二阶偏导分别为:

$$\frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{B}^{-1} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) - \mathbf{K}^T \cdot \mathbf{O}^{-1} \cdot (\mathbf{Y} - \mathbf{F}(\mathbf{x})), \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} = \mathbf{B}^{-1} + \mathbf{K}^T \cdot \mathbf{O}^{-1} \cdot \mathbf{K} - \frac{\partial^2 \mathbf{F}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} \cdot \mathbf{O}^{-1} \cdot (\mathbf{Y} - \mathbf{F}(\mathbf{x})). \quad (4)$$

其中 $\mathbf{K} = \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}$, 即雅可比矩阵。鉴于在迭代过程中 $\mathbf{Y}$ 和 $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ 越来越接近,为了减小运算量,因此常将二阶偏导中带有 $(\mathbf{Y} - \mathbf{F}(\mathbf{x}))$ 的一项忽略(李俊和曾庆存,1997a)。

将式(3)、(4)代入(2)式,得到迭代公式为:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + (\mathbf{B}^{-1} + \mathbf{K}^T \cdot \mathbf{O}^{-1} \cdot \mathbf{K})^{-1} \cdot [\mathbf{B}^{-1} \cdot (\mathbf{x}_b - \mathbf{x}_n) + \mathbf{K}^T \cdot \mathbf{O}^{-1} \cdot (\mathbf{Y} - \mathbf{F}(\mathbf{x}_n))]. \quad (5)$$

式中, $\mathbf{x}_n$ 和 $\mathbf{x}_{n+1}$ 分别表示迭代过程中第 n 和第 $n+1$ 步的大气温度和水汽混合比廓线,迭代的终止条件

为 $\|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_{n+1}\|_2 < 0.05$ 。

2.2 系统构建及主要参数设置

本研究利用牛顿法对目标函数进行极小化,结合辐射传输模式(CRTM),构建了基于 IASI 红外高光谱资料的大气温度及水汽混合比廓线一维变分反演系统。整个系统流程(图1)如下:首先,将探空资料提供给 CRTM,得到模拟亮温,结合 IASI 红外高光谱资料计算得观测误差协方差矩阵 $\mathbf{O}$;其次,将 NECP 再分析资料提供给 WRF 模式得到的预报值作为背景场(王云等,2014),提取与探空资料相同时刻和经纬度的数据,计算背景误差协方差矩阵 $\mathbf{B}$;最后把 IASI 红外高光谱资料、背景误差协方差矩阵 $\mathbf{B}$ 、观测误差协方差矩阵 $\mathbf{O}$ 、WRF 模式的预报值(背景场)输入一维变分反演系统中,得到反演结果。

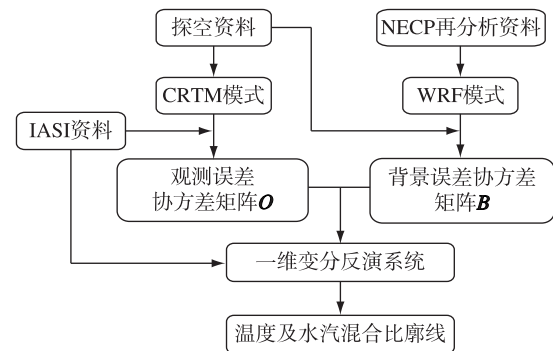


图1 变分反演系统的流程图

Fig.1 Flow chart of variational retrieval system

1) 资料质量控制

本研究主要针对晴空条件下的大气温度和水汽混合比廓线反演,因此需要进行无云样本的筛选:首先参考相邻时间的卫星云图,剔除有云的样本资料;其次计算剩余样本的探空数据与背景场数据之间的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE),剔除探空数据与背景场数据的绝对误差大于2倍RMSE的样本(王云等,2014)。此外,将有缺测数据的样本去除。

2) 背景误差协方差本地化

由于一维变分反演只考虑垂直方向上的误差相关,故背景误差协方差矩阵 $\mathbf{B}$ 表示为:

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{i1} & \cdots & b_{ij} \end{pmatrix}.$$

式中: b_{ij} 表示第 i 层与第 j 层背景场的误差协方差(潘宁和郁凡,2006),计算协方差的公式为:

$$b_{ij} = \text{cov}(\mathbf{X}^i, \mathbf{X}^j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [(\mathbf{X}_k^i - E(\mathbf{X}^i)) \cdot (\mathbf{X}_k^j - E(\mathbf{X}^j))]. \quad (6)$$

其中: $\mathbf{X}$ 表示WRF模式预报值(背景场)与探空值(真实场)的误差,即背景误差; $\mathbf{X}_k^i$ 表示第*i*层第*k*个样本的数据; $E(\mathbf{X}^i)$ 表示第*i*层的预报值误差均值,*n*表示样本数。

3) 观测误差协方差

变分同化理论假设观测是无偏的,然而由于观测误差和模式误差,观测场常存在系统误差(鲍艳松等,2014),这些偏差的存在可能会制约了对观测资料的充分使用(李刚等,2016)。因此需要对观测误差进行偏差订正,再计算观测误差协方差(鲍艳松等,2015),其步骤如下:

首先,计算误差的均值:

$$E = \frac{\sum (Y - F(x))}{n}. \quad (7)$$

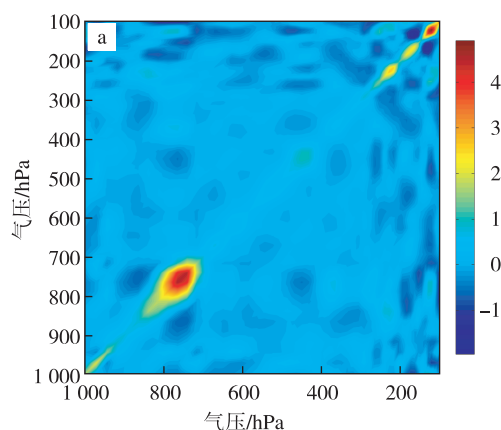
式中: $F(x)$ 表示CRTM辐射传输模式计算得到的亮温; x 是探空资料; Y 为IASI红外高光谱资料;*n*为样本数。

观测误差协方差矩阵 $\mathbf{O}$ 为一个对角矩阵,若数据为无偏,即 $E=0$ 时,矩阵 $\mathbf{O}$ 对角线上元素 o 计算公式如下:

$$o = \sqrt{\frac{\sum (Y - F(x))^2}{n - 1}}. \quad (8)$$

而若数据为有偏时,则需要利用误差均值 E 进行订正,再计算观测误差协方差矩阵 $\mathbf{O}$ 的对角线上元素 o :

$$o = \sqrt{\frac{\sum (Y - F(x) - E)^2}{n - 1}}. \quad (9)$$



将上述计算得到的背景误差协方差矩阵及观测误差协方差矩阵导入变分系统中,其中当使用式(9)计算观测误差协方差时,迭代公式为:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + (\mathbf{B}^{-1} + \mathbf{K}^T \cdot \mathbf{O}^{-1} \cdot \mathbf{K})^{-1} \cdot [\mathbf{B}^{-1} \cdot (\mathbf{x}_b - \mathbf{x}_n) + \mathbf{K}^T \cdot \mathbf{O}^{-1} \cdot (\mathbf{Y} - \mathbf{F}(\mathbf{x}_n) - \mathbf{E})]. \quad (10)$$

3 大气温度及水汽混合比廓线反演试验

3.1 大气温度反演

根据式(6)计算大气温度的背景误差协方差矩阵(图2a),背景误差协方差矩阵对角线上的数值较大。在对流层低层(766 hPa)附近,背景误差协方差有一个峰值,约为4.5 K²;在对流层高层,229~100 hPa背景误差协方差出现3个峰值,其中120 hPa附近峰值最大,约为4.9 K²。

图2b是根据第2节中的计算方法得到的卫星观测资料在各通道上的误差协方差。可见两种情形下算得的观测误差协方差变化趋势基本相似,但进行了资料的偏差订正后得到的观测误差协方差小于订正前,且23~25通道有更明显的差异。

研究中,使用与计算背景误差的样本相互独立的37组样本资料进行温度反演试验,图3为部分试验结果,可以看出,WRF预报值(背景场)与探空有较为明显的差异,而由IASI资料反演后的大气温度廓线与探空值更为接近,且对观测误差进行偏差订正后的结果优于订正前。

以探空为标准,统计了所有37组大气温度反演结果的平均误差(图4a)和均方根误差(图4b)。可以发现,整体上对观测误差进行偏差订正后得到的结果均好于偏差订正前。在对流层底层,即890 hPa附近,订正后的结果平均误差绝对值大于0.5 K,而

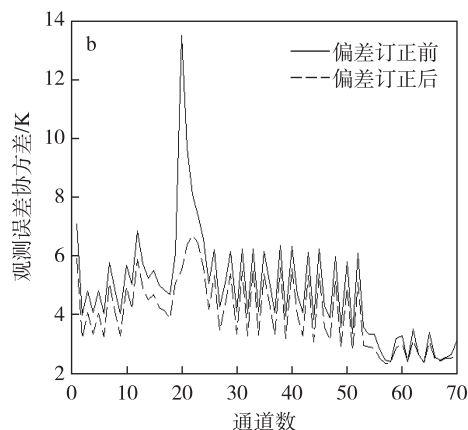


图2 温度背景误差协方差矩阵(a;单位:K²)和观测误差协方差(b)

Fig.2 (a) Background error covariance matrix (units: K²) and (b) observational error covariance of temperature

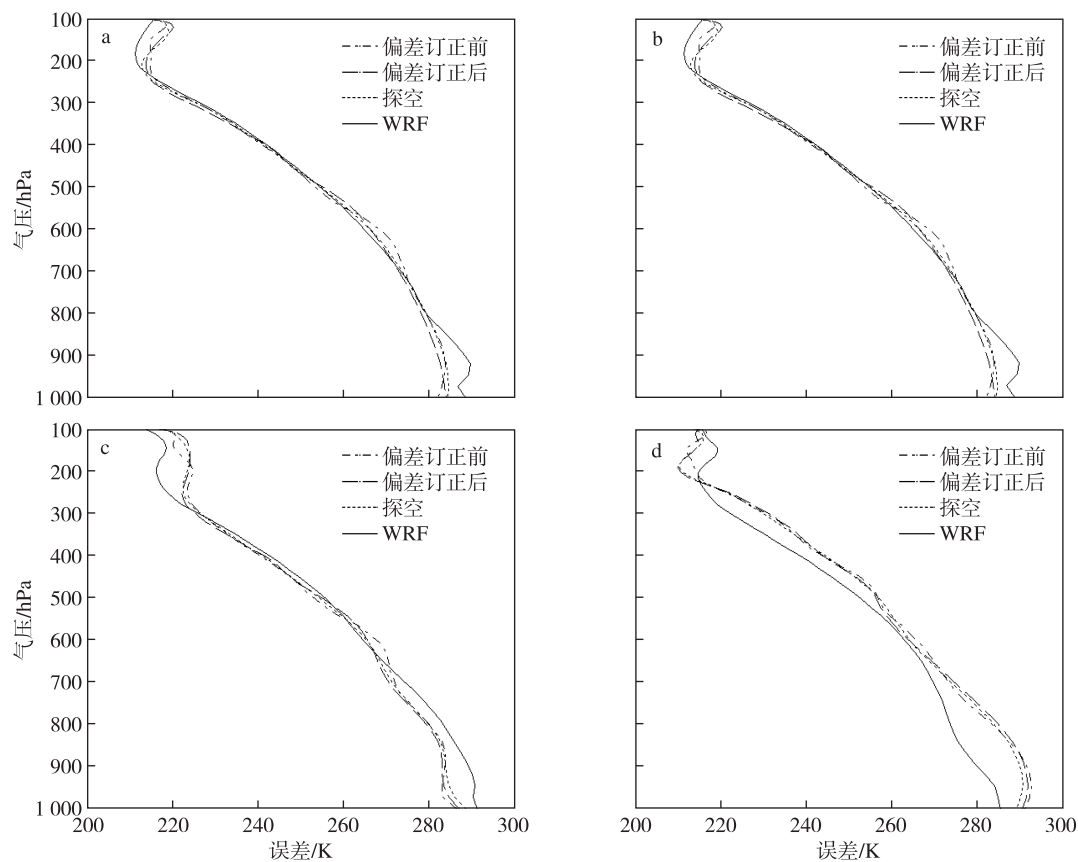


图 3 00 时温度廓线的比较:(a)4 月 12 日;(b)4 月 28 日;(c)5 月 4 日;(d)5 月 27 日
Fig.3 Comparison of temperature profiles at 0000 UTC:(a) 12 April;(b) 28 April;(c) 4 May;(d) 27 May

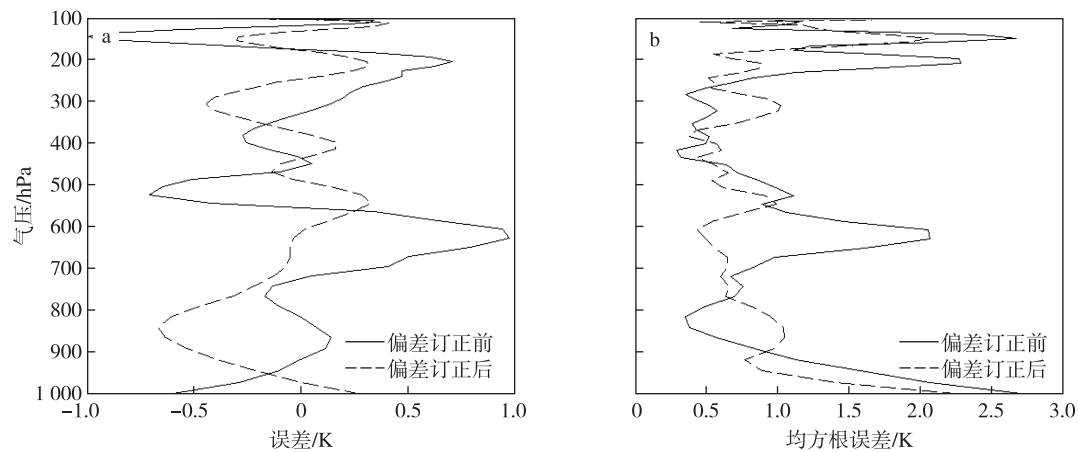


图 4 温度的平均误差 (a) 和均方根误差 (b)
Fig.4 (a) Average error and (b) root mean square error (RMSE) of temperature

其余部分平均误差绝对值基本小于 0.5 K,可见,利用一维变分方法,基于 IASI 红外高光谱资料基本可实现大气温度廓线的高精度反演。对比均方根误差(图 4b),在对流层高层,即 229 hPa 以上的部分,两种方法的 RMSE 都较大,最大值超过 2 K;在对流层中高层到中层即 229 hPa 到 840 hPa 范围内均较小且趋于稳定,但是订正前的结果在对流层底层

(650 hPa)附近又出现一个峰值;在对流层底层,即 892 hPa 以下,离地面越近均方根误差越大。总体来看,偏差订正前总的 RMSE 为 1.2 K,偏差订正后总的 RMSE 为 0.89 K,这说明试温度反演验前对观测误差进行偏差订正结果较好。

3.2 水汽混合比反演

根据式(6)计算了水汽混合比的背景误差协方

差矩阵(图 5a),可见,与大气温度的背景误差协方差阵类似,背景误差协方差较大值集中在对角线上。在对流层中低层即 750 hPa 附近有一个较小的峰值,约为 0.07 (g/kg)^2 ;在 900 hPa 附近有一个较大的峰值,约为 0.17 (g/kg)^2 ;整体来看,误差主要集中在 672~1 000 hPa 之间,即对流层中层到近地面的范围内,而在高空由于本身水汽含量少,因此误差协方差几乎为 0。

观测误差协方差的计算结果,如图 5b 所示,偏差订正前后计算的观测误差协方差变化趋势基本相似,但前 20 个通道的观测误差协方差有明显的差异,偏差订正前得到的观测误差协方差偏大。

研究中使用了独立于计算背景误差的另外 32 组资料进行水汽混合比反演试验,图 6 为部分试验结果。可以看出,WRF 预报值(背景场)与探空之间在对流层中层以下部分有很明显的偏差,而利用 IASI 红外高光谱资料通过一维变分反演后得到的水汽混合比与探空非常接近,走势也吻合的很好,且进行偏差订正后的结果优于订正前。

为了进一步对比对观测误差偏差订正前后的结果,类似温度反演,这里仍以探空为标准,统计了 32 组反演试验的水汽混合比平均误差(7a)以及均方根误差(7b)。如图 7a 所示,在对流层高层到中低层,即 890 hPa 以上部分,进行偏差订正后得的平均误差较小,而 890 hPa 以下即对流层底层则是订正前的平均误差较小。对比整层的均方根误差(图 7b),两种方法的均方根误差从对流层高层(100 hPa)到底层(1 000 hPa)均呈现出增大的趋势,但整体上看,偏差订正后得到的结果的均方根误差均小于偏差订正前。这也再次说明,不论是对温度还是

水汽混合比而言,反演前有必要对观测资料进行偏差订正。

4 结论与讨论

首先利用统计方法,计算得到背景误差协方差矩阵;其次,针对观测误差协方差矩阵的计算,采用了无偏差订正和有偏差订正两个步骤分别进行计算并比较结果;最后,基于 Metop-A/IASI 红外高光谱资料,结合 CRTM 模式以及 WRF 模式,根据一维变分方法和牛顿法,构建了一套大气温度与水汽混合比廓线变分反演系统。通过对北京、青岛和沈阳 3 个地区的大气温与水汽混合比廓线反演试验,验证了该方法的可靠性和稳定性,得到以下主要结论:

1) 基于 IASI 红外高光谱资料,使用一维变分方法,可以实现大气温度与水汽混合比廓线的精确反演。反演的结果表明:温度平均误差绝对值小于 0.6 K,水汽混合比平均误差绝对值小于 0.022 g/kg ;其中温度反演结果显示,在大气对流层高层(100~229 hPa)以及对流层底层(892 hPa 以下),反演结果误差相对其他气压层较大且不稳定,反演温度 RMSE 出现了大于 2 K 的值;而对流层中层和低层(229~892 hPa)的 RMSE 基本小于 1.0 K;水汽混合比反演结果表明,从对流层顶到近地面,均方根误差不断增大,从 0 增加到 0.07 g/kg 。

2) 通过分析卫星资料偏差订正对温度与水汽混合比廓线反演结果的影响,发现卫星资料偏差订正能提高大气温度及水汽混合比的反演精度。偏差订正前,温度误差绝对值小于 1.0 K,均方根误差为 1.2 K,水汽混合比误差绝对值小于 0.024 g/kg ,均方根误差为 0.03 g/kg ;偏差订正后,温度误差绝对

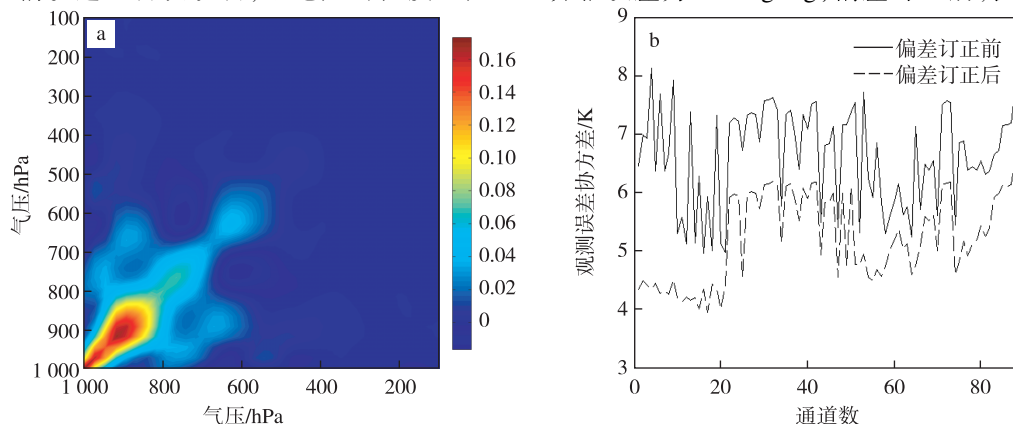


图 5 水汽混合比的背景误差协方差矩阵(a;单位: $(\text{g/kg})^2$)和观测误差协方差(b)

Fig.5 (a) Background error covariance matrix (units: $(\text{g/kg})^2$) and (b) observational error covariance of water vapor mixing ratio

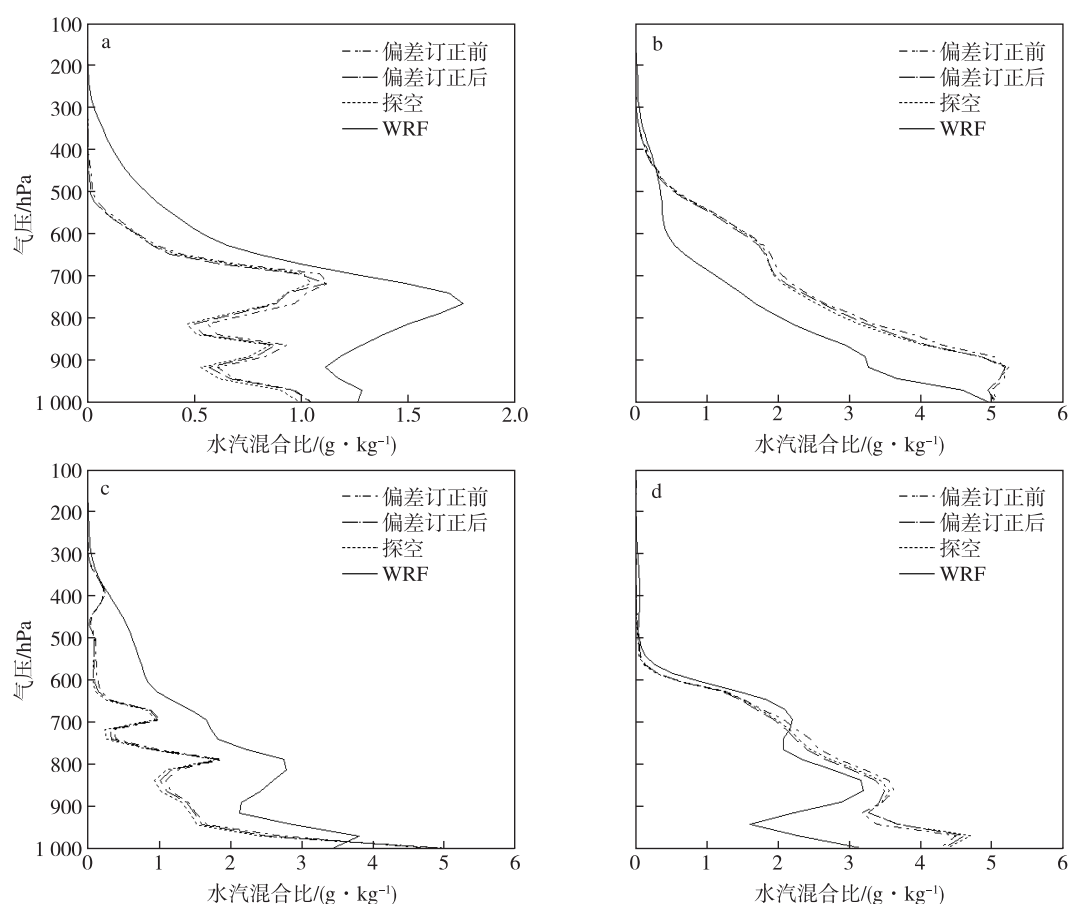


图6 00时水汽混合比廓线的比较:(a)4月12日;(b)4月28日;(c)5月4日;(d)5月27日

Fig.6 Comparison of water vapor mixing ratio profiles at 0000 UTC: (a) 12 April; (b) 28 April; (c) 4 May; (d) 27 May

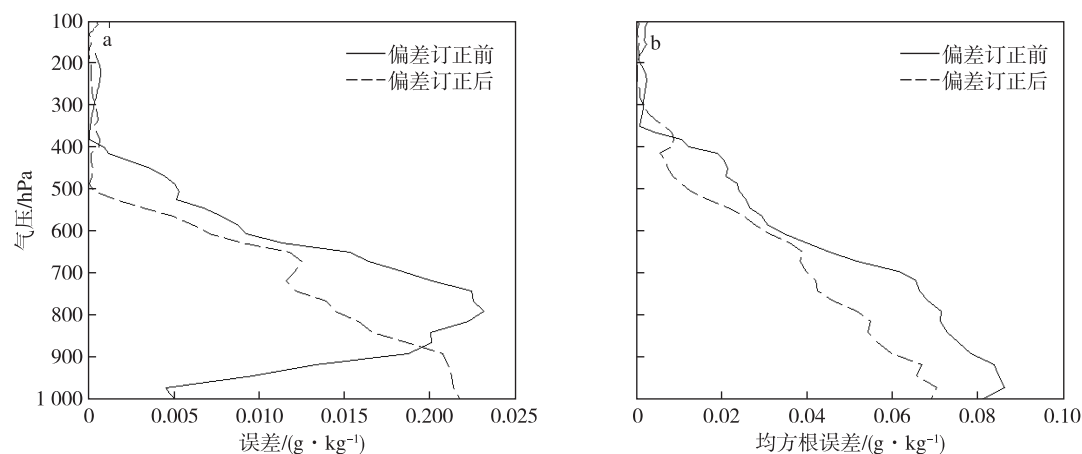


图7 水汽混合比平均误差(a)和均方根误差(b)

Fig.7 (a) Average error and (b) RMSE of water vapor mixing ratio

值小于 0.6 K, 均方根误差为 0.89 K, 水汽混合比误差绝对值小于 0.021 g/kg, 均方根误差为 0.02 g/kg。

本文构建的大气温度与水汽混合比廓线变分反演系统虽然能够得到较高精度的反演结果, 但是两个误差协方差矩阵的计算依赖于探空资料, 而全球

地面探空站点的分布比较稀疏, 因此文中的误差协方差矩阵有一定的局限性, 为了使得此反演系统具有更加广泛的适用性, 误差协方差矩阵的改进工作正在进行中。

致谢: NCEP/NCAR 提供了再分析资料, Wyoming 大学天气数据网提供了探空资料, NOAA 网站提供了 Metop-A/IASI 红外高光谱资料, 审稿专家提出了中肯合理的修改建议, 谨致谢意。

参考文献(References)

- 鲍艳松, 王晓丽, 闵锦忠, 等, 2014. 风云三号卫星微波大气温度探测仪资料偏差订正方法研究[J]. 热带气象学报, 30(1): 145-152. Bao Y S, Wang X L, Min J Z, et al, 2014. Study on the revised method of data deviation of satellite microwave atmosphere temperature detector of FY-3[J]. J Trop Meteor, 30(1): 145-152. (in Chinese).
- 鲍艳松, 殷佳研, 陆其峰, 2015. FY-3A MWSH 资料偏差订正方法研究[J]. 热带气象学报, 31(6): 757-765. Bao Y S, Ying J Y, Lu Q F, 2015. Study on the revised method of FY-3A MWSH data[J]. J Trop Meteor, 31(6): 757-765. (in Chinese).
- 鲍艳松, 钱程, 闵锦忠, 等, 2016. 利用地基微波辐射计资料反演 0~10 km 大气温湿廓线试验研究[J]. 热带气象学报, 32(2): 163-171. Bao Y S, Qian C, Min J Z, et al., 2016. Study of retrieving 0—10 km atmospheric temperature and humidity profiles by Ground-based microwave radiometer data[J]. J Trop Meteor, 32(2): 163-171. (in Chinese).
- 毕研盟, 廖蜜, 张鹏, 等, 2013. 应用一维变分法反演 GPS 掩星大气温湿廓线[J]. 物理学报, 62(15): 576-582. Bi Y M, Liao M, Zhang P, et al., 2013. Using 1D-Var method to retrieve GPS occultation atmospheric temperature and humidity profiles[J]. Acta Physica Sinica, 62(15): 576-582. (in Chinese).
- Cimini D, Hewison T J, Martin L, et al., 2006. Temperature and humidity profile retrievals from ground-based microwave radiometers during TUC[J]. Meteorologische Zeitschrift, 15(1): 45-56.
- Collard A D, 2007. Selection of IASI channels for use in numerical weather prediction[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 133(629): 1977-1991.
- Devendra S, Bhatia R C, 2006. Study of temperature and moisture profiles retrieved from microwave and hyperspectral infrared sounder data over Indian regions[J]. Indian of Radio & Space Physics, 35: 286-292.
- 官莉, 2005. 卫星红外超光谱资料及其在云检测、晴空订正和大气廓线反演方面的应用[D]. 南京: 南京信息工程大学. Guan L, 2005. Satellite infrared hyperspectral data and its applications in cloud detection, clear sky correction and atmospheric profile inversion[D]. Nanjing: Nanjing University of information Science & Technology. (in Chinese).
- 官莉, 刘畅, 张雪慧, 2010. 人工神经网络算法在红外高光谱资料反演大气温度廓线中的应用[J]. 大气科学学报, 33(3): 341-346. Guan L, Liu Y, Zhang X H, 2010. Application of artificial neural network algorithm in retrieving atmospheric temperature profiles from hyperspectral infrared data[J]. Trans Atmos Sci, 33(3): 341-346. (in Chinese).
- 官元红, 周广庆, 陆维松, 等, 2007. 资料同化方法的理论发展及应用综述[J]. 气象与减灾研究, 30(4): 1-8. Guan Y H, Zhou G Q, Lu W S, et al., 2007. The theoretical development and application review of data assimilation[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 30(4): 1-8. (in Chinese).
- Han Y, Delst P V, Liu Q, et al., 2005. User's guide to the JCSDA community radiative transfer model(Beta Version)[R]. NIST TN-1442.
- 黄威, 高太长, 刘磊, 2015. 地基红外高光谱遥感大气温湿廓线反演研究综述[J]. 红外, 36(11): 1-6. Huang W, Gao T Z, Liu L, 2015. A review of the research on the retrieval of the ground-based infrared high spectral remote sensing atmospheric temperature and moisture profile[J]. Infrared, 36(11): 1-6. (in Chinese).
- 黄兴友, 张曦, 冷亮, 等, 2013. 基于 MonoRTM 模型的微波辐射计反演方法研究[J]. 气象科学, 33(2): 138-145. Huang X Y, Zhang X, Leng L, et al., 2013. Research on microwave radiometer retrieval method based on MonoRTM model[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 33(2): 138-145. (in Chinese).
- 蒋德明, 董超华, 陆维松, 2006. 利用 AIRS 观测资料进行红外高光谱大气探测能力试验的研究[J]. 遥感学报, 10(4): 586-592. Jiang D M, Dong C H, Lu W S, 2006. A study of infrared hyperspectral atmospheric detection capability based on AIRS observations data[J]. Journal of Remote Sensing, 10(4): 586-592. (in Chinese).
- King J I F, 1956. The radiative heat transfer of planet earth[M]//Scientific uses of earth satellites. Ann Arbor: University of Michigan Press: 133-136.
- 李刚, 吴兆军, 张华, 2016. 偏差订正方法在 IASI 辐射率资料同化中的应用研究[J]. 大气科学学报, 39(1): 72-80. Li G, Wu Z J, Zhang H, 2016. Application of deviation correction method in IASI radiation data assimilation[J]. Trans Atmos Sci, 39(1): 72-80. (in Chinese).
- 李俊, 曾庆存, 1997a. 晴空时大气红外遥感及其反演问题: I. 理论研究[J]. 大气科学, 21(3): 1-9. Li J, Zeng Q C, 1997a. Atmospheric infrared remote sensing and its retrieval problems in clear sky: I. theoretical study[J]. Chin J Atmos Sci, 21(3): 1-9. (in Chinese).
- 李俊, 曾庆存, 1997b. 晴空时大气红外遥感及其反演问题研究: II. 反演试验研究[J]. 大气科学, 21(2): 87-95. Li J, Zeng Q C, 1997b. Atmospheric infrared remote sensing and its retrieval problems in clear sky: II. research on retrieval test[J]. Chin J Atmos Sci, 21(2): 87-95. (in Chinese).
- Li J, Otkin J, Schmit T J, et al., 2011. Warning information in a preconvective environment from the geostationary advanced infrared sounding system: a simulation study using the IHOP case[J]. J Appl Meteor Climatol, 50(3): 776-783.
- 刘辉, 2006. 利用超高光谱分辨率大气红外探测(AIRS)进行大气温度廓线反演试验研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院. Liu H, 2006. The study of atmospheric temperature profile retrieval test by using ultra-high spectral resolution atmospheric infrared detection(AIRS)[D]. Beijing:

- Chinese Academy of Meteorological Sciences. (in Chinese).
- 刘宁微, 马建中, 伍湘君, 等, 2017. 两个模式对平流层温度模拟的比较与分析[J]. 大气科学学报, 40(6): 721-728. Liu N W, Ma J Z, Wu X J, et al., 2017. Comparison and analysis of stratospheric temperature simulated by two models[J]. Trans Atmos Sci, 40(6): 721-728. (in Chinese).
- 刘亚亚, 毛节泰, 刘钧, 等, 2010. 地基微波辐射计遥感大气廓线的 BP 神经网络反演方法研究[J]. 高原气象, 29(6): 1514-1523. Liu Y Y, Mao J T, Liu J, et al., 2010. Study on the BP neural network retrieval method for the remote sensing atmospheric profile of the ground-based microwave radiometer[J]. Plateau Meteorology, 29(6): 1514-1523. (in Chinese).
- 马鹏飞, 陈良富, 陶金花, 等, 2014. 用红外高光谱资料 CrIS 反演大气温湿廓线的模拟研究[J]. 光谱学与光谱分析, 34(7): 1894-1897. Ma P F, Chen L F, Tao J H, et al., 2014. Study on Simulation of infrared hyperspectral CrIS data retrieval of atmospheric temperature and humidity profiles [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 34(7): 1894-1897. (in Chinese).
- 马旭林, 姜胜, 于月明, 等, 2017. COSMIC 掩星反演大气温湿资料的质量特征分析[J]. 大气科学学报, 40(6): 841-849. Ma X L, Jiang S, Yu Y M, et al., 2017. Analyzing the quality of data for temperature and humidity using COSMIC radio occultation observations[J]. Trans Atmos Sci, 40(6): 841-849. (in Chinese).
- 潘宁, 郁凡, 2006. 用一维变分法校正卫星资料反演湿度的试验研究[C]//全国优秀青年气象科技工作者学术研讨会论文集. 长沙. Pan N, Yu F, 2006. The study of correcting satellite data and retrieving humidity by 1D-var method[C]//Proceedings of the national excellent youth meteorological science and technology workers symposium. Changsha. (in Chinese).
- 赛瀚, 苗峻峰, 2015. 基于 NECP FNL 资料的环渤海地区低空急流的时空分布特征[J]. 大气科学学报, 38(5): 599-610. Sai H, Miao J F, 2015. Spatial and temporal characteristics of low-level jet over the Bohai rim from the NECP FNL global analysis data[J]. Trans Atmos Sci, 38(5): 599-610. (in Chinese).
- 王云, 王振会, 李青, 等, 2014. 基于一维变分算法的地基微波辐射计遥感大气温湿廓线研究[J]. 气象学报, 72(3): 570-582. Wang Y, Wang Z H, Li Q, et al., 2014. Study on remote sensing of atmospheric temperature and humidity profiles of ground-based microwave radiation based on one-dimensional variational algorithm[J]. Acta Meteorologica Sinica, 72(3): 570-582. (in Chinese).
- 张建伟, 王根, 张华, 等, 2011. 基于主成分累计影响系数法的高光谱大气红外探测器的通道选择试验[J]. 大气科学学报, 34(1): 36-42. Zhang J W, Wang G, Zhang H, et al., 2011. Experiment on hyper-spectral atmospheric infrared sounder channel selection based on the cumulative effect coefficient of principal component[J]. Trans Atmos Sci, 34(1): 36-42. (in Chinese).
- 张磊, 董超华, 张文建, 等, 2008. 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[J]. 气象科技, 36(5): 639-642. Zhang L, Dong C H, Zhang W J, et al., 2008. METOP spaceborne interferometric ultra high spectral resolution infrared atmospheric sounder (IASI) and its products[J]. Meteorological Science and Technology, 36(5): 639-642. (in Chinese).
- 张雪慧, 官莉, 王振会, 等, 2009. 利用人工神经网络方法反演大气温度廓线[J]. 气象, 35(11): 137-142. Zhang X H, Guan L, Wang Z H, et al., 2009. Retrieval of atmospheric temperature profiles using artificial neural networks[J]. Meteor Mon, 35(11): 137-142. (in Chinese).

Research of the infrared high spectral (IASI) satellite remote sensing atmospheric temperature and humidity profiles based on the one-dimensional variational algorithm

GUAN Yuanhong^{1,2}, REN Jie¹, BAO Yansong², LU Qifeng³, LIU Hui³, XIAO Xianjun³

¹School of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

²Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD)/Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Join International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Key Laboratory of the China Meteorological Administration Aerosol and Cloud Precipitation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

³Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites/National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Atmospheric temperature and humidity profiles are important atmospheric parameters and play an important role in numerical weather forecasting and weather warning. In order to obtain high-precision profile data of atmospheric temperature and water vapor mixing ratio, this paper studied a variational retrieval method of atmospheric temperature and water vapor mixing ratio profiles based on the Metop-A/IASI infrared hyperspectral data. Based on the radiance data of IASI hyperspectral sensors, combined with the forecasting technology of CRTM model and WRF model, using one dimensional variational method, this paper studied the quality control of satellite data,

background error covariance localization and observation error covariance methods, constructed a variational retrieval system for atmospheric temperature and water vapor mixing ratio profiles, and carried out the retrieval tests in Beijing, Qingdao and Shenyang. Comparison of retrieval results with sounding data as a standard shows that, using the WRF model forecast values as the background field, the average absolute error of temperature (water vapor mixing ratio) is less than 0.6 K (0.021 g/kg), and the root mean square error is 0.89 K (0.02 g/kg). The experimental results show that based on the one dimensional variational method, the Metop-A/IASI infrared hyperspectral data can be used for the high-precision detection of atmospheric temperature and water vapor mixing ratio profiles.

Metop-A/IASI; temperature and humidity profiles; one dimensional variational; retrieval

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20180102003

(责任编辑:张福颖)