

基于信息容量的FY-4A/GIIRS红外光谱探测能力研究

罗双^{1,2*}, 狄迪³, 崔林丽¹

(1. 上海市生态气象和卫星遥感中心, 上海 200030;

2. 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;

3. 南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 利用LBLRTM逐线积分模式开展不同大气状况条件下各大气参数在FY-4A/GIIRS红外通道的光谱敏感性分析, 在此基础上, 以信息熵和自由度为判据, 对FY-4A/GIIRS高光谱探测资料所包含的温度、水汽、臭氧等大气参数信息容量进行定量化描述, 从而评估FY-4A/GIIRS对大气参数的可反演能力. 研究结果表明: (1) FY-4A/GIIRS长波波段对温度和水汽的敏感性与大气状况相关, 而对臭氧的敏感度的不同大气状况条件下差异不大; (2) 初步揭示了FY-4A/GIIRS具备大气温湿和臭氧廓线反演的应用潜力, 在相同大气条件下, FY-4A/GIIRS红外光谱所包含的温度信息容量最大, 水汽其次; (3) 在热带大气条件下, FY-4A/GIIRS所包含的温度和水汽信息容量最丰富.

关键词: FY-4A; 红外高光谱; 信息熵; 自由度

中图分类号: P407 **文献标识码:** A

Study on FY-4A/GIIRS infrared spectrum detection capability based on information content

LUO Shuang^{1,2*}, DI Di³, CUI Lin-Li¹

(1. Shanghai Ecological Forecasting and Remote Sensing Center, Shanghai 200030, China;

2. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

3. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The spectral sensitivities of FY-4A/GIIRS (Geosynchronous Interferometric Infrared Sounder) in various atmospheric conditions are analyzed using Line-By-Line Radiative Transfer Model (LBLRTM). On that basis, the information contents of temperature, humidity and ozone in FY-4A/GIIRS are measured by Entropy Reduction (ER) and the Degrees of Freedom for Signal (DFS), which could evaluate the retrieve capabilities for atmosphere parameters of FY-4A/GIIRS. The results are shown as follows: (1) The sensitivity of temperature and humidity in long wave band of GIIRS are both varied with atmosphere condition, while there is little difference in the sensitivity of ozone under different atmospheric conditions. (2) The application potential for FY-4A/GIIRS with temperature, humidity and ozone profiles inversion is preliminary revealed. Therefore, temperature information content of FY-4A/GIIRS is the largest, followed by humidity under the US Standard atmosphere. (3) The information content of temperature and water vapor in tropical atmosphere is bigger than middle lati-

收稿日期: 2019-05-06, 修回日期: 2019-09-09

Received date: 2019-05-06, Revised date: 2019-09-09

基金项目: 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课题, 上海市气象局气象新苗人才培养计划 (2018-2020年), 上海市自然科学基金 (18ZR1434100)

Foundation items: Supported by the Opening Project of Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Center, Xinniao Talent Development Plan of Shanghai Meteorological Service (2018-2020), and the Natural Science Foundation of Shanghai (18ZR1434100)

作者简介 (Biography): 罗双 (1988-), 女, 湖南浏阳人, 硕士, 主要研究领域为卫星遥感数据处理与应用

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: luoshuang_2010@163.com

tude atmosphere.

Key words: FY-4A, infrared hyperspectral, entropy reduction, degrees of freedom for signals

PACS:07.07.Df, 33.20.Ea, 42.68.Ay, 92.60.-e

引言

气象卫星以其观测频次高、成像范围广的独特优势,成为综合观测体系中不可或缺的一部分.从90年代初开始,国外开始发展红外高光谱大气垂直探测研究,通过不断提高红外探测仪器的光谱分辨率,可以获得较窄且更陡峭的大气探测权重函数,直接提高了卫星探测大气的垂直分辨率,并可以较清晰地分辨 O_3 、 H_2O 和其他微量气体的辐射影响^[1].

全球多个数值天气预报中心报告显示,目前的业务同化预报系统中,就单个仪器资料对模式的贡献率而言,高光谱红外探测仪对同化预报效果的影响最大^[2].目前,高光谱大气探测仪观测数据已被广泛应用于全球和区域数值预报模式,并获得了非常明显的正效果^[3].因此红外高光谱大气垂直探测仪是一种拥有巨大应用潜力的探测仪器,在提升数值预报效果和改善天气预报质量上起着重要作用.

星载遥感资料所反演的大气温湿廓线及大气成份参数的精度之所以不同,从信息论角度来讲,是由于不同遥感器能够探测到的大气信息量不同.1949年,香农提出了“信息熵”的概念^[4],解决了对信息的量化度量问题.曾庆存院士在其专著《大气红外遥测原理》中解释了“有效信息量”的意义,由于高光谱通道之间存在相关性,因此高光谱仪器反演大气参数的精度并非单纯地随着通道数量增多而成比例的提高,独立通道的数目才表征了有效信息量的大小^[5].Rodgers曾指出,在反演理论中信号自由度(Degrees of Freedom for Signals, DFS)和信息熵(Entropy Reduction, ER)是两个重要参数^[6],之后两者被广泛应用于卫星观测系统的分析,如星载大气探测仪的设计、评估及探测资料的应用等.例如杜华栋等对AIRS (Atmospheric Infrared Sounder)、IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer)、AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit)、HIRS (High resolution Infrared Radiation Sounder)等仪器所包含的不同大气状态下温度、湿度的信息容量进行计算来评估仪器特征^[7];Fourrie等以信息熵和自由度为指标,对AIRS通道优选前后的信息容量进行评估,并对比了高光谱AIRS和多光谱HIRS仪器性能的差异^[8];侯伟真等以信号自由度为参数,对未来

静止轨道高光谱探测对流层污染排放监测遥感气溶胶的能力进行预研^[9];郑逢勋等引入信息量分析工具,讨论了高分五号多角度偏振相机对观测角度的依赖和对观测的反演能力,并对反演不确定性进行了系统的定量描述^[10];杨雨晗等应用信息熵-分步迭代法^[11]对风云四号A星(FY-4A)干涉式大气垂直探测仪(Geosynchronous Interferometric Infrared Sounder, GIIRS)温度探测通道进行优选,以信息熵为判据,每次迭代挑选出包含温度信息最丰富的一个通道,直至信息熵贡献增量趋于平缓,即该通道配置能够反映仪器所探测的温度信息^[12].

只有充分了解FY-4A/GIIRS光谱范围内所包含的信息,才能最大程度地挖掘资料的应用潜力.因此,本论文将对不同大气状况条件下FY-4A/GIIRS的光谱敏感性进行分析,并从信息论的角度对该高光谱探测仪所包含的关于不同大气廓线参数的观测信息熵和自由度进行研究,以期更直观地认识和理解卫星高光谱探测仪对大气参数的可反演能力.研究成果对仪器的设计、资料的应用以及大气参量反演通道的选择等方面有重要意义,对于尽快地用好、用足FY-4A/GIIRS在轨高光谱大气垂直探测资料具有重要作用.

1 国内外星载红外高光谱大气垂直探测仪介绍

近年来,随着探测技术的发展,越来越多的高光谱探测仪被搭载在气象卫星上.美国已于2002年在EOS-Aqua卫星上搭载了红外高光谱大气垂直探测仪AIRS^[13-14];欧洲于2006年在MetOp-A上搭载了高光谱红外大气探测仪器IASI^[15],而后分别在2012年和2018年发射的MetOp-B/C上同样搭载了该仪器;2011年,美国新一代极轨气象卫星Suomi NPP成功发射,其搭载的高光谱红外大气探测仪CrIS^[16](Cross-track Infrared Sounder)未来将取代AIRS继续在数值天气预报和气候研究方面发挥重要作用.此外,2017年11月,我国FY-3D上携带了干涉式红外高光谱探测仪HIRAS (High Spectral Infrared Atmospheric Sounder),较FY-3A/B/C上的红外分光计而言,其光谱通道数量增加了70倍,可以提高大气温度和湿度廓线反演精度1倍以上^[17].这

些极轨卫星上高光谱仪器的运行使我们能够获得更精确的全球地表和大气垂直结构信息。

2016年底,我国成功发射新一代地球静止轨道气象卫星风云四号A星,其国际上首次搭载了静止卫星高光谱干涉式大气垂直探测仪,实现了从赤道上空三万多千米高空对地球大气的三维定量高频次观测^[18]。表1列举了目前国内外在轨运行的五种星载红外高光谱大气垂直探测仪基本参数。

FY-4A/GIIRS由中国科学院上海技术物理研究所研制,可提供长波700~1 130 cm^{-1} (8.85~14.29 μm)、短中波1 650~2 250 cm^{-1} (4.44~6.06 μm)光谱范围的辐射亮温资料,实测光谱分辨率为0.625 cm^{-1} ,可获得5 000 km×5 000 km天气尺度和1 000 km×1 000 km中小尺度,空间间隔16 km的红外高精度定量垂直廓线数据^[19]。FY-4A成功发射之后,围绕GIIRS开展了一系列的在轨定标和性能评价工作,最新研究结果表明其光谱定标精度达到10 ppm,辐射定标精度小于1 K^[20]。FY-4A/GIIRS垂直探测能力可提供高时空分辨率的大气三维温度和湿度结构分析,弥补常规探空资料的不足^[21],且首次实现了大范围、高频次针对敏感区的卫星高光谱探测和实时资料同化应用^[22]。

地球大气主要由几类气体组成,有 N_2 、 O_2 、 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等比较稳定的气体,也有 H_2O 和 O_3 等随时空变化较大的气体^[23]。要实现FY-4A/GIIRS资料的有效利用,必须首先了解该资料能够提供哪些重要的遥感信息。图1是模拟计算的FY-4A/GIIRS红外高光谱探测亮温,从该图可以识别出FY-4A/GIIRS红外高光谱仪器的光谱覆盖范围及大气探测的

各吸收气体谱线。从图1可以看出FY-4A/GIIRS光谱分辨率较高,谱线很密集。利用美国空军研究实验室公开发布的高分辨率透过率分子光谱数据集HITRAN^[24],并结合FY-4A/GIIRS频谱覆盖域进行分析,FY-4A/GIIRS的光谱范围内包含了 CO_2 强吸收带(14 μm 附近)、水汽吸收带(8~14 μm 和6.3 μm 附近),同时还包含 O_3 (中心在9.6 μm 附近)、 N_2O (4.5 μm 附近)、 CO (4.66 μm 附近)等微量气体吸收带。大气混合比稳定的 CO_2 红外吸收带主要用来探测大气温度,水汽吸收带用于反演大气湿度和云的特性; O_3 、 N_2O 、 CO 等吸收带可以探测相应的 O_3 和其他微量气体含量。

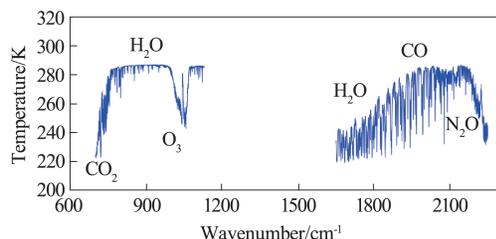


图1 FY-4A/GIIRS红外光谱覆盖范围及主要分子吸收带
Fig. 1 Infrared spectral coverage of FY-4A/GIIRS and main molecular absorption zones

2 FY-4A/GIIRS观测光谱敏感性模拟分析

由上述理论分析可知,FY-4A/GIIRS具有较高的光谱分辨率,且观测谱段覆盖了红外 H_2O 、 CO_2 、 O_3 、 CO 、 N_2O 等吸收波段,可以用于温湿度廓线和大气成分的反演。那么这些通道能否对大气状况的微小变化有所响应呢?这就需要对所有通道进行各

表1 星载红外高光谱大气垂直探测仪基本参数

Table 1 Basic parameters of satellite hyperspectral infrared atmosphere vertical sounder

探测仪名称	卫星名称	卫星轨道	分光方式	光谱范围/ μm	波数范围/ cm^{-1}	光谱分辨率/ cm^{-1}	通道数目/个	星下点分辨率/ km
AIRS	Aqua	太阳同步	光栅	8.80~15.41	649~1 136	~0.5	2 378	13
				6.20~8.22	1 217~1 613			
IASI	MetOp-A/B/C	太阳同步	干涉	3.74~4.61	2 169~2 674	0.25	8 461	12
				3.62~15.50	645~2 760			
CrIS	Suomi NPP	太阳同步	干涉	9.13~15.38	650~1 095	0.625	1 305	14
				5.71~8.26	1 210~1 750	2.5		
HIRAS	FY-3D	太阳同步	干涉	3.92~4.64	2 155~2 550	0.625	2 287	16
				8.80~15.38	650~1 136			
GIIRS	FY-4A	地球同步	干涉	5.71~8.26	1 210~1 750	0.625	1 650	16
				3.92~4.64	2 155~2 550			
				8.85~14.29	700~1 130	0.625	1 650	16
				4.44~6.06	1 650~2 250			

大气参数敏感性分析.

LBLRTM (Line-By-Line Radiative Transfer Model)是国际上公认的精确逐线积分计算程序,光谱范围覆盖紫外波段到亚毫米波段,模式中使用 HITRAN 的线数据库参数,并包含了 H_2O 、 CO_2 、 O_3 在内的 47 种分子. 它能够按照光谱顺序,依次、逐条地计算大气气体吸收谱线的贡献,是计算大气分子吸收最精确的方法. 相较于快速模型,它的计算精度较高,约为 0.5%,适用于计算高光谱分辨率的大气分子吸收^[25-26]. 在不同高度逐条计入对某频率有贡献的所有大气分子吸收谱线的贡献,累加得到该频率处大气分子的吸收,通过对每一层大气分子的吸收和一些连续吸收的计算,进而得到高精度的透过率、模拟亮温、辐亮度等物理量.

本文采用目前的 AER 线数据库(版本 aer_v_3.4)作为输入数据,吸收线性采用 Voigt 线型,可以同时考虑压力增宽和 Doppler 增宽. 大气廓线选择具有普适的 1976 年美国标准大气,考虑到 FY-4A/GIIRS 观测范围主要是热带和中纬度地区,因此还选取了热带大气、中纬度夏季和中纬度冬季三种不同大气状况条件下的参数,在垂直方向上从 0 到 1 013 hPa 共 46 层. 利用 LBLRTM 作为前向模型,通过设置光谱分辨率、温度、吸收气体含量等可以计算大气辐射量. 在此基础上,对温度廓线、湿度廓线、臭氧廓线分别进行微扰动,获得大气参数变化后的模拟辐亮度变化百分比,以定量描述 FY-4A/GIIRS 红外通道对各大气参数变化的响应能力. 此外,该敏感性试验还可用于反演误差分析的讨论.

具体来说,用模拟辐亮度变化百分比 $S_j(\nu)$ 表示各通道相对于大气参数扰动的响应,用下式表示:

$$S_j(\nu) = \frac{R(X_0 + \delta X_j) - R(X_0)}{R(X_0)}, \quad (1)$$

其中 R 是利用 LBLRTM 精确辐射传输模式模拟计算的辐亮度, X_0 代表未被扰动的大气状态, δX_j 表示参数 j (温度/水汽/臭氧) 的扰动量,辐亮度的变化 $S_j(\nu)$ 表示每个通道对于某种大气参数的敏感性.

2.1 温度敏感性试验

在 LBLRTM 模式中对所有高度层的温度均变化 1 K,分析不同大气背景下 FY-4A/GIIRS 各通道对温度的敏感性. 由图 2 可知,长波波段对温度敏感的通道在 700 cm^{-1} 和 $1\ 050\text{ cm}^{-1}$ 波段附近,最大可达 2%;在短中波红外谱区,对水汽较为敏感的谱段分布较宽,其中 $1\ 650\sim 1\ 900\text{ cm}^{-1}$ 波段和 $2\ 200\sim 2\ 150\text{ cm}^{-1}$ 波

段辐射对温度的敏感性均在 4% 以上. 不同大气状况而言,长波波段的温带大气对温度扰动的响应最强烈,其次是中纬度夏季,而中纬度冬季敏感度最低. 不同纬度和季节的大气廓线在短中波波段敏感度差异较小.

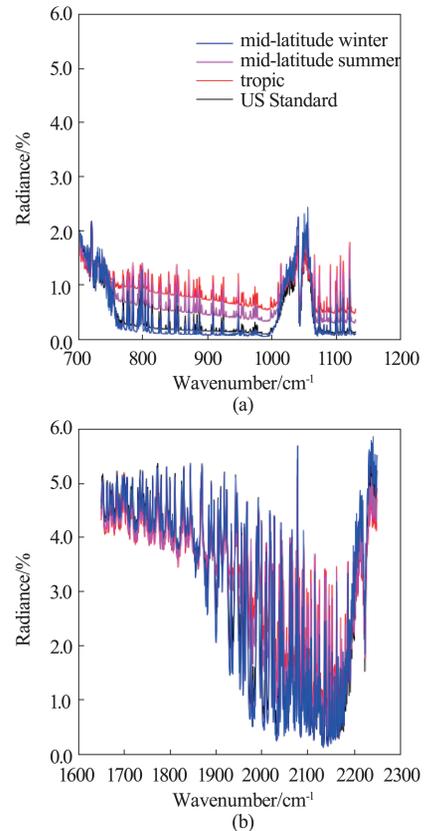


图 2 FY-4A/GIIRS 温度敏感性模拟分析 (a) 长波, (b) 短中波

Fig. 2 Temperature sensitivity simulation analysis of FY-4A/GIIRS (a) long wave, (b) short-medium wave

2.2 水汽敏感性试验

H_2O 是大气中一种重要的吸收气体,水汽含量尽管不大,但在大气辐射收支中起重要作用. 考虑湿度反演精度 10%~20%,在原始廓线上分别加入 10% 的扰动,计算 FY-4A/GIIRS 各光谱通道对 H_2O 变化的敏感性. 由图 3 可知,在长波红外区域,水汽敏感性在 $700\sim 750\text{ cm}^{-1}$ 范围内较小, $750\sim 1\ 130\text{ cm}^{-1}$ 波段敏感度有所增加. 在短中波红外谱区,除 $2\ 150\sim 2\ 250\text{ cm}^{-1}$ 波段敏感度较小外,短中波水汽的敏感度整体大于长波红外谱区,说明水汽扰动对此波段影响明显,10% 的水汽廓线变化会引起 2%~4% 的辐亮度变化. 此外,在长波波段,不同大气状况下对水汽敏感度的模拟情况与温度情况一致,也是热带

扰动响应最大,中纬度冬季最不敏感.而短中波波段,不同大气状况略有差异,整体上中纬度冬季对温度的敏感度略小.

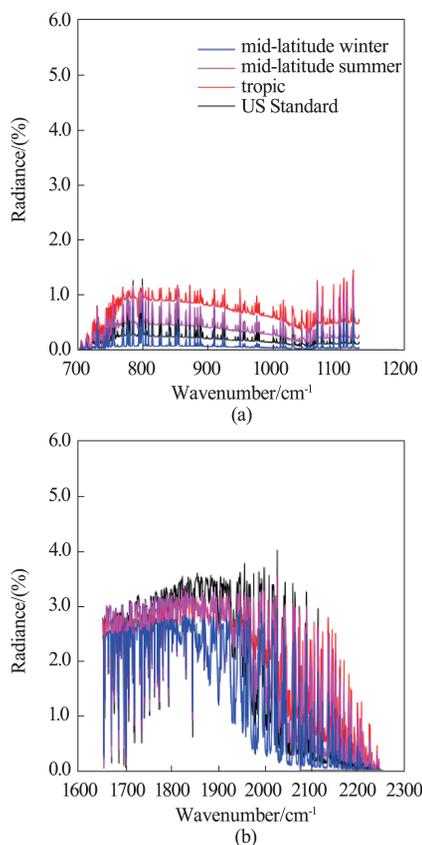


图3 FY-4A/GIIRS水汽敏感性模拟分析(a)长波,(b)短中波
Fig. 3 Humidity sensitivity simulation analysis of FY-4A/GIIRS (a) long wave, and (b) short-medium wave

2.3 臭氧敏感性试验

O_3 在大气中占的比例较小,但它是非常重要的微量成分.臭氧探空仪测量 O_3 廓线的准确度随高度变化,一般情况下,对流层中的误差为 $\pm 10\%$,平流层10 hPa以下的误差为 $\pm 5\%$.为了研究FY-4A/GIIRS对 O_3 的敏感性,在原始廓线中加入10%的干扰,计算 O_3 的变化对辐射量的影响.由图4可知,除了1000~1070 cm^{-1} 和2070~2130 cm^{-1} 波段,其他波段通道对臭氧敏感性较小.其中1050 cm^{-1} 波段的臭氧敏感度值在3%以上,2120 cm^{-1} 波段的臭氧敏感度值在2%左右.对比不同大气状况,臭氧敏感度差异性较小.

3 FY-4A/GIIRS自由度和信息熵

3.1 物理概念

前面提到,信号自由度和信息熵被广泛用于卫

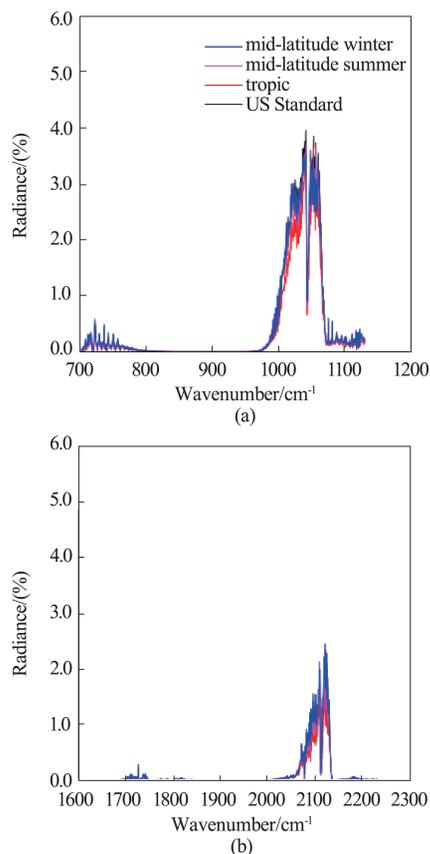


图4 FY-4A/GIIRS臭氧敏感性模拟分析(a)长波,(b)短中波
Fig. 4 Ozone sensitivity simulation analysis of FY-4A/GIIRS (a) long wave, and (b) short-medium wave

星观测系统的信息分析^[27-28].信号自由度表明在测量矢量(或测量空间)中有用的独立信号,信号信息熵则能定量描述观测中信息量的多少.两个指标是基于最优化估计反演框架对卫星观测能力的定量化评价,自由度和信息熵越高,观测包含的目标信息越充分,卫星遥感器对参数观测能力/可反演能力越强.下面给出两个指标的具体描述.

Menke (1984)定义平均核函数^[29]:

$$A = (K^T S_e^{-1} K + S_a^{-1})^{-1} K^T S_e^{-1} K \quad (2)$$

其中, K 为Jacobian矩阵,它表示各通道观测值相对于大气参数(温度、水汽、臭氧等)的敏感性; S_e 为观测误差协方差矩阵,主要来源于仪器误差和辐射传输模式误差; S_a 是大气背景场的误差协方差矩阵. T 和 -1 分别代表矩阵的转置和矩阵的逆.观测系统对某一参数的自由度是矩阵 A 对角线元素之和,即矩阵 A 的迹.

Rodgers (1996)定义观测前的误差协方差即背景场误差协方差为 S_a ,观测后误差协方差矩阵为 \hat{S} ,则观测过程所包含的信息熵为^[30]:

$$ER = \frac{1}{2} \ln |S_a| - \frac{1}{2} \ln |\hat{S}| \quad , \quad (3)$$

即

$$ER = \frac{1}{2} \ln |S_a \cdot \hat{S}^{-1}| \quad , \quad (4)$$

公式中的绝对值符号表示矩阵的行列式. 信息熵的显著变化体现了观测中所获得信息量的多少, 从而表明该次观测的作用大小, 信息熵越大的观测越重要. 理论研究中, 背景场的误差协方差矩阵 S_a 可通过统计背景场的特征得到, 但由于卫星遥感观测到的是辐射率或亮温, 属于间接观测, 因此无法利用观测信息直接求出 \hat{S} , 这就需要根据贝叶斯估计法集合背景场信息, 将观测的概率密度函数与大气参数的概率密度函数联系起来, 实现将观测概率密度函数映射到大气参数状态空间, 可得 \hat{S}^{-1} 的估计为:

$$\hat{S}^{-1} = K^T S_e^{-1} K + S_a^{-1} \quad . \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)即可得到观测过程所包含的信息熵:

$$ER = \frac{1}{2} \ln |S_a \cdot (K^T S_e^{-1} K + S_a^{-1})| \quad . \quad (6)$$

因此, 要以自由度(式(2))和信息熵(式(6))为依据对仪器各通道的观测能力进行描述, 必须先求出 Jacobian 矩阵 K 、背景场误差协方差矩阵 S_a 和观测误差协方差矩阵 S_e .

3.2 Jacobian 矩阵

利用辐射传输模式 LBLRTM 对美国标准大气廓线依次逐层改变同等量, 每一次改变就模拟一次探测器接收到的辐射亮温, 在此基础上, 采用解析方法^[31]计算得到整层大气参数的 Jacobian 矩阵, 虽然费时, 但精度较高. 对于温度来说, 因为温度在辐射传输方程中比较线性, 其权重函数的计算相对简单, 温度 Jacobian 矩阵即为 dY/dT , 单位是 K/K. 而水汽在辐射传输中呈非线性, 因此水汽的 Jacobian 矩阵为 $dY/d\log(q)$, 单位是 $K/\log(\text{ppmv})$. 类似地, 臭氧的 Jacobian 矩阵为 $dY/d\log(O_3)$, 单位为 $K/\log(\text{ppmv})$. 此外, 温度的 Jacobian 矩阵可覆盖地表到数值模式层顶 10 hPa. 由于大气中水汽含量随气压下降而迅速减少, 水汽主要集中在 200 hPa 以下, 平流层上层水汽含量几乎为 0, 因此湿度的垂直高度范围由 100 hPa 到地面, 对于 100 hPa 以上的大气湿度不予求解. 臭氧主要分布在对流层上部至平流层, 因此本文对臭氧的分析从 10 hPa 至 300 hPa.

图 5 至图 7 是模拟计算的标准大气下大气温

度、水汽和臭氧的 Jacobian 矩阵, 横坐标代表波数, 纵坐标为压强, 左图是长波, 右图是短中波. 图中灰度深浅代表了 Jacobian 矩阵值的大小, 即对各层大气温度、水汽、臭氧的敏感程度. 从计算结果可以看到, 红外波段温度和水汽权重函数峰值主要集中在中低层 (100 hPa 以下), 即卫星观测的最佳信息层集中在中低层. 臭氧 Jacobian 矩阵有效值主要集中在 $1\ 000 \sim 1\ 100\ \text{cm}^{-1}$ ($9.6\ \mu\text{m}$) 和 $2\ 100\ \text{cm}^{-1}$ ($4.75\ \mu\text{m}$) 附近的红外吸收波段. 温度、水汽和臭氧的敏感波谱段与第二部分分析较为一致, 证实了模式计算的可靠性.

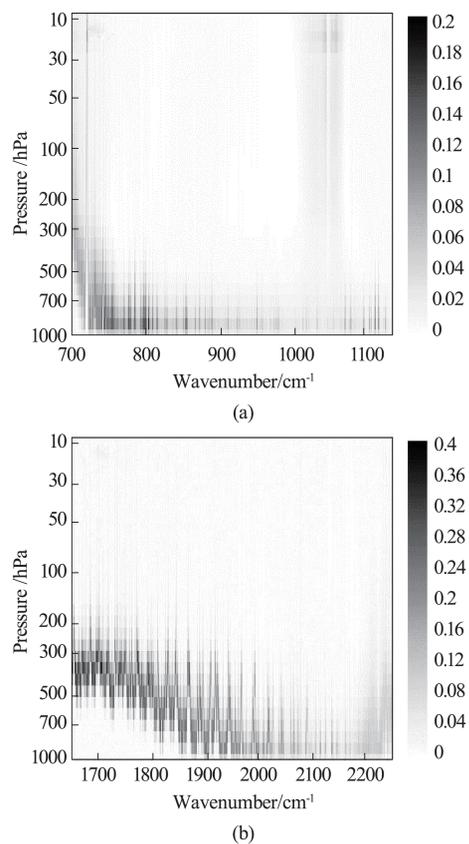


图 5 FY-4A/GIIRS 红外光谱段内大气温度的 Jacobian 矩阵
Fig.5 The jacobian matrix of temperature in FY-4A/GIIRS infrared spectral

3.3 背景场误差协方差矩阵

本文采用的大气背景场廓线资料集为欧洲中尺度数值预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 发布的 5 000 条大气廓线, 涵盖了全球不同区域、不同季节和下垫面, 主要用于辐射传输模拟以及大气廓线遥感反演算法研究. 该数据集是建立在由 ECMWF 模拟的 TI-GR (Thermodynamic Initial Guess Retrieval database)

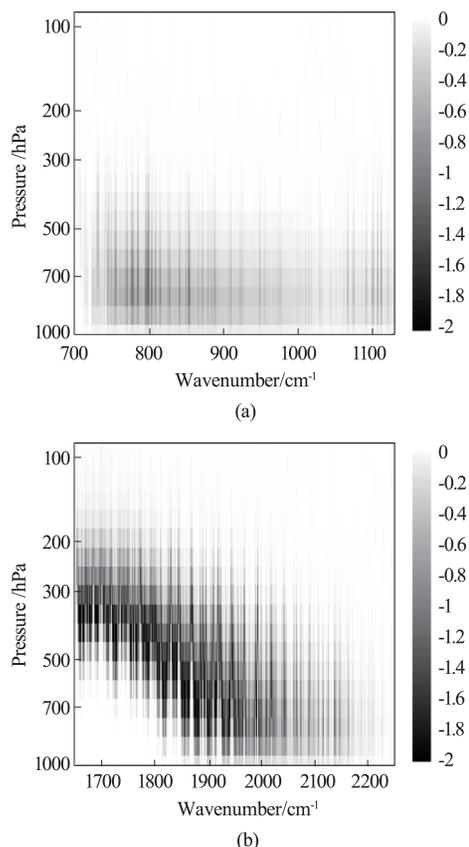


图6 FY-4A/GIIRS 红外光谱段内水汽的 Jacobian 矩阵
Fig.6 The jacobian matrix of humidity in FY-4A/GIIRS infrared spectral

数据基础之上,形成了一系列多样化大气模拟资料集.同时还为每个数据集提供了数据存储算法,使其足够小,适用于计算量庞大的辐射传输模式,例如逐线积分模式.目前数据不断更新,以便提高EC-MWF的建模和分析能力.从1998年建立的31层廓线集,完善为50层(1999年)和60层(2002年).2006年起,升级至91层,从0.01~1 013.25 hPa.特别要说明的是,在后续信息熵和自由度求解时,为了便于矩阵运算,需要对背景场误差协方差矩阵插值匹配到美国标准大气高度层.此外,还需要把水汽和臭氧的单位由kg/kg转化为ppmv.

对大气廓线集中所有廓线进行平均,得到气候平均值作为大气背景场,再将大气廓线集中每条廓线减去气候平均值,得到廓线样本距平,进而对该距平求取协方差,得到背景场误差协方差矩阵 S_e .图8~图10的左图是欧洲5 000条大气温度、比湿、臭氧廓线统计,图中最外侧两条曲线代表大气廓线集的最大值和最小值廓线,中间曲线是平均值,与中间曲线垂直的各水平横线代表标准偏差.由图8左可知,各高度层温度的最大值、最小值和平均值均

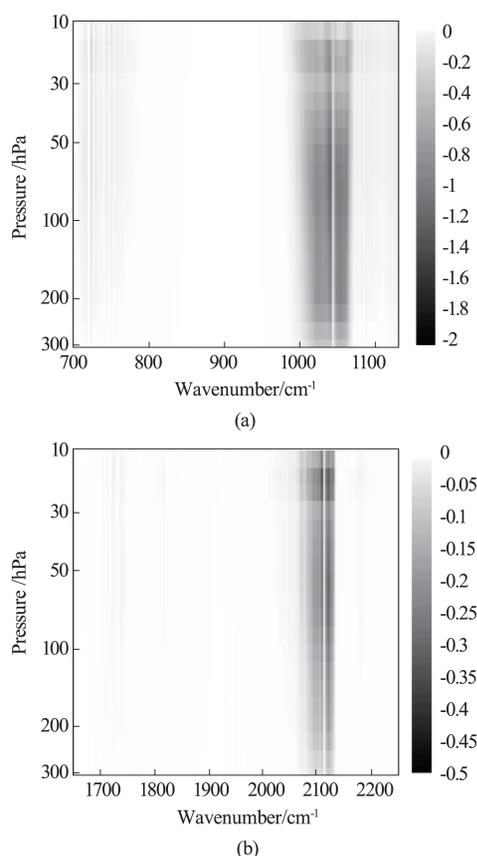


图7 FY-4A/GIIRS 红外光谱段内臭氧的 Jacobian 矩阵
Fig.7 The jacobian matrix of ozone in FY-4A/GIIRS infrared spectral

随高度先增大后减小,呈现此变化的原因主要是在大气低层,地面是大气的主要热源,所以离地面越远时,气温逐渐降低,到一定高度温度降到极值,此后大气温度随高度上升而显著增加^[32].在大气的底层,多年的温度波动较大,随着高度的上升温度波动先减小,大约达到300 hPa之后增大.由图9左可知,大气湿度从地面随高度呈指数形式逐渐减小,到200 hPa以上湿度趋于0,高层大气干燥.比湿标准偏差在底层较大,随高度逐渐减小.由图10左可知,臭氧在对流层臭氧浓度很低,随高度逐渐增加,其峰值高度出现在10~100 hPa,因此大部分 O_3 分布在平流层的中上层.

图8~图10右分别是温度、湿度和臭氧的背景场误差协方差矩阵,横坐标和纵坐标均为气压,为便于显示,水汽和臭氧的背景场误差协方差矩阵取自然对数.从图中可以看到,协方差矩阵是一个对称的矩阵,且高值区均分布在对角线上,从协方差矩阵定义可知该对角线元素是各个维度的方差.

3.4 观测误差协方差矩阵

在卫星遥感探测中,观测误差主要来源于观测

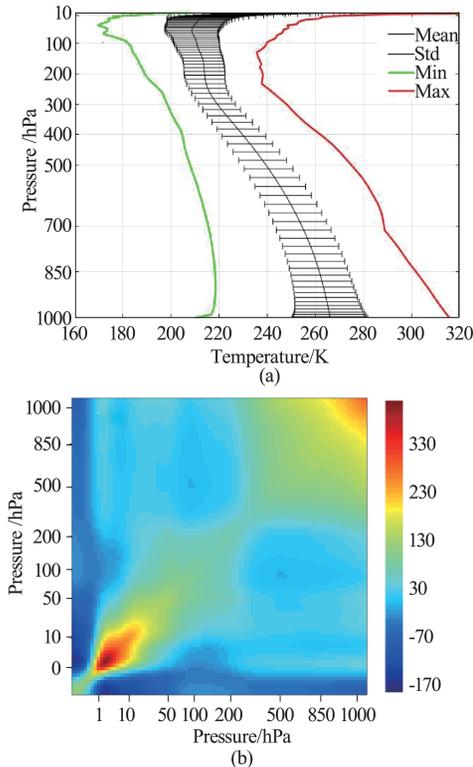


图8 (a)欧洲5000条大气温度廓线统计量,(b)其背景场误差协方差矩阵

Fig.8 (a) Statistics of ECMWF dataset, and (b) background covariance matrix of temperature

资料误差(仪器误差)和观测算子误差(辐射传输模式误差),各通道通常认为是互不相关的,因此观测误差协方差矩阵为对角线矩阵,且对角线各元素取值为各通道均方根误差的平方.若忽略正演模式的误差,则可用探测器中心像元数据的噪声等效温差(Noise Equivalent Difference of Temperature, NEDT)代表FY-4A/GIIRS各通道的观测误差.其具体取值可由噪声等效辐射(Noise Equivalent Difference of Radiance, NEDR)以普朗克公式为基础转换获得,FY-4A/GIIRS各通道NEDT如图11所示.可以看到,长波波段的噪声等效温差较小,基本在0.2 K以内,而短中波波段的噪声等效温差较大,尤其是 $2\ 200\sim 2\ 250\text{ cm}^{-1}$ 可达1 K以上.

4 信息容量计算结果及与同类仪器对比分析

4.1 FY-4A/GIIRS 不同大气状况条件下信息容量

基于第3部分计算的Jacobian矩阵、背景场误差协方差矩阵和观测误差协方差矩阵,依据式(2)和式(6)计算信号自由度和信息熵.美国标准大气条件下FY-4A/GIIRS所包含的温度、水汽和臭氧的信息熵和自由度如表2所示.从表中可看出,美国标

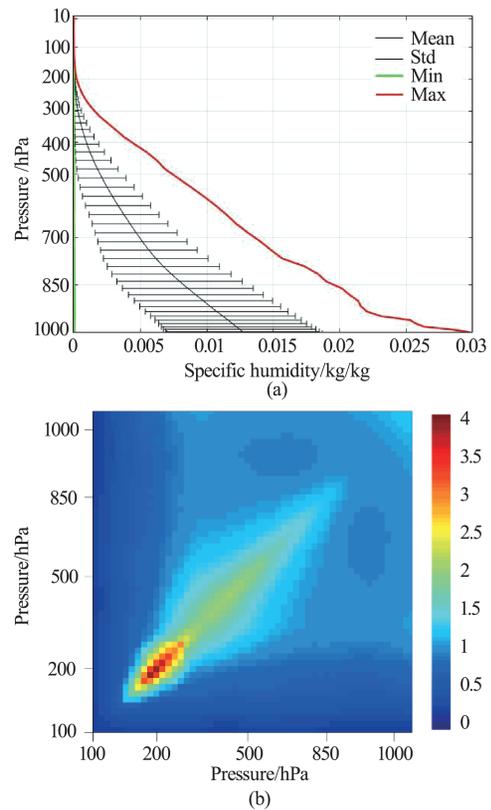


图9 欧洲5000条大气湿度廓线统计量(a)及其背景场误差协方差矩阵(b)

Fig.9 (a) Statistics of ECMWF dataset, and (b) background covariance matrix of humidity

准大气条件下,FY-4A/GIIRS红外光谱通道包含温度的信息熵最大(37.53),其次是水汽的信息熵(28.79),FY-4A/GIIRS探测谱段内所包含臭氧的信息熵为12.95.自由度也呈现类似的特点.

利用星载红外高光谱探测仪器对大气进行遥感时,由于仪器Jacobian矩阵要随大气状态矢量变化的影响等原因,使得在不同地区、不同天气条件下探测到的信息熵和自由度发生变化.考虑到FY-4A/GIIRS观测区域包括热带和中纬度地区,因此本文还比较了不同大气状况条件下FY-4A/GIIRS对温度、比湿和臭氧观测的信息容量.将热带、中纬度夏季、中纬度冬季大气廓线代替美国标准大气廓线,输入LBLRTM逐线积分模式计算不同大气状况下的Jacobian矩阵,并进一步计算FY-4A/GIIRS关于温度、湿度和臭氧的信息熵和自由度.

由表3和表4可以看出,不同大气状况条件下,臭氧的信息熵主要分布在12~14之间,自由度约为4,不同纬度和季节条件下差异较小.而温度和水汽的信息熵和自由度随着大气状况的变化略有差异.

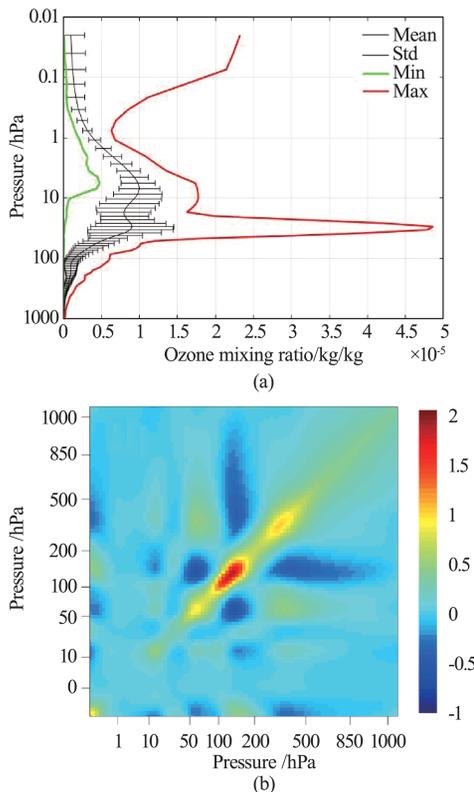


图 10 欧洲 5000 条大气臭氧廓线统计量(a)及其背景场误差协方差矩阵(b)
Fig.10 (a) Statistics of ECMWF dataset, and (b) background covariance matrix of ozone

表 2 美国标准大气条件下 FY-4A/GIIRS 红外光谱通道信息容量

Table 2 Information contents of FY-4A/GIIRS under US Standard atmosphere condition

	自由度	信息熵
温度	10.78	37.53
水汽	8.08	28.79
臭氧	4.28	12.95

表 3 不同大气条件下 FY-4A/GIIRS 红外光谱通道信息熵
Table 3 ER of FY-4A/GIIRS infrared spectral under various atmosphere condition

	温度	水汽	臭氧
热带大气	42.43	36.20	13.57
中纬度夏季大气	41.17	33.51	13.99
中纬度冬季大气	36.24	24.00	12.06

具体来说,热带大气条件下,温度和水汽的信息熵和自由度均最大,其次是中纬度夏季,而中纬度冬季最小.这与 2.1 和 2.2 部分分析的不同大气状况条件下大气参数的敏感性结果较为一致,总体表现为敏感度越高,信息容量越大,理论上而言,对目标物可反演能力越强,但最终的反演精度还受其他多

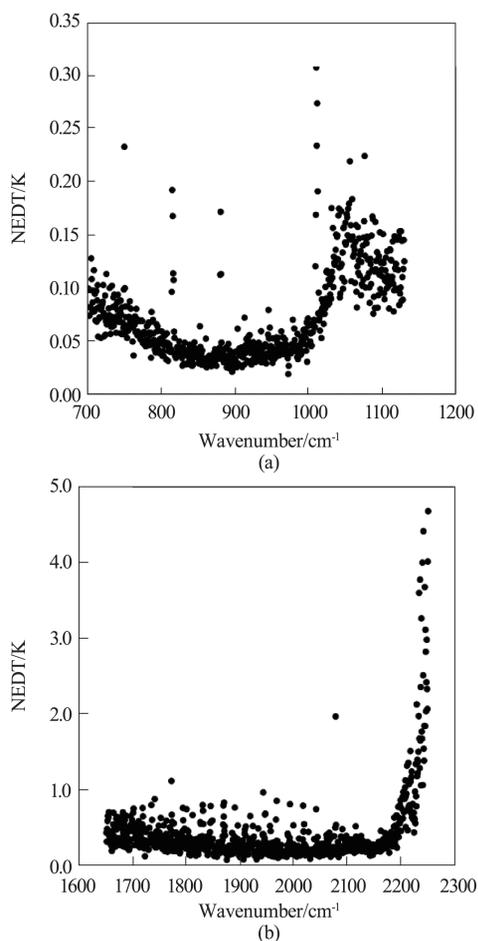


图 11 FY-4A/GIIRS 各通道噪声等效温差
Fig.11 NEDT of FY-4A/GIIRS

种因素的影响.总之,随着大气廓线由湿热到干冷变化, FY-4A/GIIRS 所包含的温度和水汽的信息容量依次减小.

表 4 不同大气条件下 FY-4A/GIIRS 红外光谱通道自由度
Table 4 DFS of FY-4A/GIIRS infrared spectral under various atmosphere condition

	温度	水汽	臭氧
热带大气	12.06	9.86	4.35
中纬度夏季大气	11.57	9.25	4.49
中纬度冬季大气	10.73	7.59	3.92

4.2 FY-4A/GIIRS 与 FY-3D/HIRAS 信息容量比较

为了与同类星载高光谱仪器红外光谱覆盖范围所包含的各大气参数信息容量进行横向比较,本文还根据 FY-3D/HIRAS 仪器光谱参数(表 1),利用逐线积分模式 LBLRTM 模拟计算美国标准大气条件下该仪器的 Jacobian 矩阵.图 12 中横坐标代表波

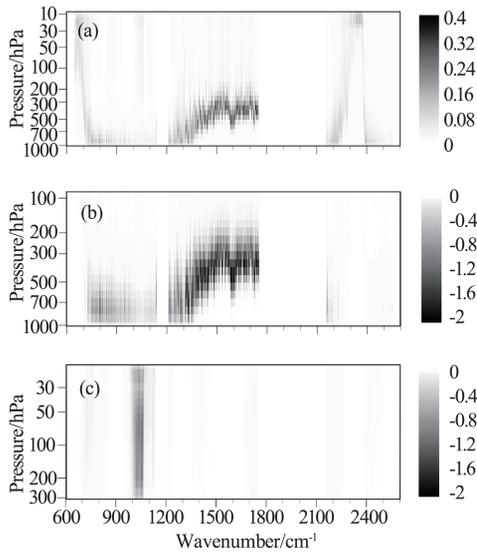


图12 FY-3D/HIRAS (a)温度,(b)水汽,(c)臭氧的jacobian矩阵

Fig.12 The jacobian matrix of (a) temperature, (b) humidity, and (c) ozone in FY-3D/HIRAS

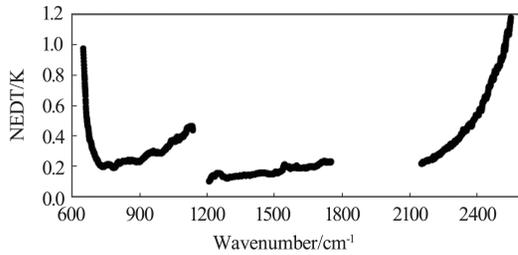


图13 FY-3D/HIRAS 的噪声等效温差

Fig.13 NEDT of FY-3D/HIRAS

数,纵坐标为压强,颜色越深代表该波长对温度/水汽/臭氧参数越敏感.由计算结果可知,FY-3D/HIRAS对温度敏感的通道主要集中在 $650\sim 800\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\ 300\sim 1\ 750\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\ 200\sim 2\ 400\text{ cm}^{-1}$,对水汽最敏感的通道是 $1\ 210\sim 1\ 750\text{ cm}^{-1}$,对臭氧敏感的通道主要是 $1\ 000\sim 1\ 100\text{ cm}^{-1}$.在此基础上,利用国家卫星气象中心在轨实测的仪器噪声等效温差^[33-34]代表FY-3D/HIRAS观测误差.由图13可知,该仪器 $1\ 210\sim 1\ 750\text{ cm}^{-1}$ 波谱段内噪声等效温差低于 0.3 K ; $2\ 155\sim 2\ 550\text{ cm}^{-1}$ 短波波段随着波长的减小NEDT有所增大,最大约为 1.2 K ;而 $650\sim 1\ 136\text{ cm}^{-1}$ 随着波长增加NEDT先减小后迅速增加,在 650 cm^{-1} 处达到 1.0 K .

充分考虑仪器敏感性,以及背景场误差和观测误差,利用信息熵和自由度定义对FY-3D/HIRAS所包含的温度、水汽、臭氧的信息容量进行了计算(表5).对比表2和表5,FY-3D/HIRAS所包含的温度信

息熵(自由度)比FY-4A/GIIRS大 $6.61(1.93)$,占FY-4A/GIIRS所有通道温度信息熵(自由度)的 $17.61\%(17.9\%)$.同时,FY-3D/HIRAS所包含的水汽信息熵(自由度)比FY-4A/GIIRS大 $2.83(0.6)$,占FY-4A/GIIRS水汽信息熵(自由度)的 $9.8\%(7.4\%)$.而FY-4D/GIIRS所包含的臭氧信息熵(自由度)比FY-3D/HIRAS大 $4.44(1.14)$,占FY-3D/HIRAS红外光谱通道臭氧信息熵(自由度)的 $52.17\%(36.3\%)$.

表5 美国标准大气条件下FY-3D/HIRAS红外光谱通道信息容量

Table 5 Information contents of FY-3D/HIRAS under US Standard atmosphere condition

	自由度	信息熵
温度	12.71	44.14
水汽	8.68	31.62
臭氧	3.14	8.51

分析两种星载高光谱仪器的光谱覆盖范围,FY-3D/HIRAS较FY-4A/GIIRS而言,具备 $650\sim 700\text{ cm}^{-1}$ 、 $2\ 250\sim 2\ 550\text{ cm}^{-1}$ 的温度敏感波段和 $1\ 210\sim 1\ 650\text{ cm}^{-1}$ 的温度、水汽敏感波段.而FY-4A/GIIRS具备FY-3D/HIRAS所缺乏的 $2\ 070\sim 2\ 130\text{ cm}^{-1}$ 的臭氧探测波段.综上所述,FY-3D/HIRAS所包含的温度和水汽信息更多,对两种大气参数的可反演能力更强,而FY-4A/GIIRS所包含的臭氧信息更丰富,因此对臭氧的探测能力更强.

风云四号02星上搭载的干涉式大气垂直探测仪在FY-4A/GIIRS的基础上,新增了 $680\sim 700\text{ cm}^{-1}$ 波段,为了评估该波谱段的贡献,本文还单独计算了FY-3D/HIRAS的 $680\sim 700\text{ cm}^{-1}$ 所包含的各参数信息容量.计算结果表明,该波段包含了温度信息熵为 13.11 ,水汽和臭氧信息熵均低于 1 .因此,从信息量的角度分析, $680\sim 700\text{ cm}^{-1}$ 波谱段的增加可以提高干涉仪对温度的探测能力.

5 结论

本文利用精确辐射传输模式LBLRTM对我国先进的红外高光谱大气垂直探测仪FY-4A/GIIRS开展不同大气状况条件下红外通道的光谱敏感性分析,模拟其大气信息的获取能力.此外,基于对信息熵和自由度的物理认识,并借助贝叶斯估计理论,将上述两种指标引入FY-4A/GIIRS红外高光谱大气探测资料信息容量进行定量分析,研究其对温

度、湿度和臭氧等大气参数的可反演能力. 初步研究结果表明:

(1) FY-4A/GIIRS长波波段对温度和水汽的敏感度与大气状况相关,其中FY-4A/GIIRS对热带大气扰动最敏感,其次是中纬度夏季,而中纬度冬季敏感度最低;FY-4A/GIIRS对臭氧的敏感谱段集中在 $1\ 000\sim 1\ 070\ \text{cm}^{-1}$ 和 $2\ 070\sim 2\ 130\ \text{cm}^{-1}$,且不同大气状况条件下敏感度差异不大;

(2) 研究揭示了FY-4A/GIIRS在反演温度、水汽和臭氧廓线方面具有一定的应用潜力,相同大气条件下,FY-4A/GIIRS红外光谱所包含的温度信息容量最大,水汽其次,臭氧信息信息熵(自由度)为12.95(4.28);

(3) 不同大气状况条件下,温度和水汽的信息熵和自由度略有差异,且热带大气条件下,温度和水汽的信息熵和自由度均最大.

本研究仅聚焦在探索FY-4A/GIIRS红外光谱覆盖范围是否包含以及包含多少大气温度、水汽和其他大气成分的信息,但是如何提取这些信息,用好这些信息,还有待进一步研究.

致谢:感谢中国科学院上海技术物理研究所和中国气象局国家卫星气象中心提供卫星高光谱仪器详细参数;感谢上海市气象局尹球老师对研究工作的指导.

References

- [1] DONG Chao-Hua, LI Jun, ZHANG Peng. *The principle and application of satellite hyperspectral infrared atmospheric remote sensing (in Chinese)* [M]. Beijing: Science press, (董超华,李俊,张鹏,等.卫星高光谱红外大气遥感原理和应用.北京:科学出版社),2013.3.
- [2] LI Jun, FANG Zong-Yi. The development of satellite meteorology—challenges and opportunities [J]. *Meteorological Monthly*, (李俊,方宗义.卫星气象的发展—机遇与挑战.气象),2012,38(02):129-146.
- [3] Di D, Li J, Han W, et al. Enhancing the fast radiative transfer model for FengYun-4 GIIRS by using local training profiles [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(22): 12,583-12,596.
- [4] Shannon C E, Weaver W. *The mathematical theory of communication* [M]. Illinois: University Illinois Press, 1949.79.
- [5] ZENG Qing-Cun. *The principle of atmospheric infrared remote sensing (in Chinese)* [M]. Beijing: Science Press, (曾庆存.大气红外遥测原理.北京:科学出版社),1974.1-174.
- [6] C D. Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice. Singapore: WorldScientific, 2000.82-89.
- [7] DU Hua-Dong, HUANG Si-Xun, FANG Han-Xian, et al. Study of the information contained in remote sensing data of atmosphere [J]. *Acta Physica Sinica*, (杜华栋,黄思训,方涵先,等.星基大气探测资料信息容量研究.物理学报),2010,59(01):683-691.
- [8] Fourri'E N, Thépaut J N. Evaluation of the AIRS near-real-time channel selection for application to numerical weather prediction [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010, 129(592):2425-2439.
- [9] Hou W, Wang J, Xu X, et al. An algorithm for hyperspectral remote sensing of aerosols: 2. Information content analysis for aerosol parameters and principal components of surface spectra [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, 192:14-29.
- [10] ZHENG Feng-Xun, HOU Wei-Zhen, LI Zheng-Qiang. Optimal estimation retrieval for directional polarimetric camera onboard Chinese Gaofen-5 satellite: an analysis on multi-angle dependence and a posteriori error [J]. *Acta Physica Sinica*, (郑逢勋,侯伟真,李正强.高分五号卫星多角度偏振相机最优化估计反演:角度依赖与后验误差分析.物理学报),2019,68(04):192-207.
- [11] Collard A D. Selection of IASI channels for use in numerical weather prediction [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007, 133(629): 1977-1991.
- [12] YANG Yu-Han, YIN Qiu, SHU Jiong. Channel selection of atmosphere vertical sounder (GIIRS) onboard the FY-4A geostationary satellite [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (杨雨晗,尹球,束炯.FY-4A大气垂直探测仪(GIIRS)温度探测通道优选.红外与毫米波学报),2018,37(05):545-552.
- [13] Aumann H H, Chahine M T, Gautier C, et al. AIRS/AM-SU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(2): 253-264.
- [14] Carn S A, Strow L L, de Souza-Machado S, et al. Quantifying tropospheric volcanic emissions with AIRS: The 2002 eruption of Mt. Etna (Italy) [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(2): L02301.
- [15] Clerbaux C, Boynard A, Clarisse L, et al. Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(16): 6041-6054.
- [16] Gambacorta A, Barnet C D. Methodology and information content of the NOAA NESDIS operational channel selection for the Cross-Track Infrared Sounder (CrIS) [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(6): 3207-3216.
- [17] QI Cheng-Li, GU Ming-Jian, HU Xiu-Qing, et al. FY-3 Satellite infrared high spectral sounding technique and potential application [J]. *Advances in Met S&T*, (漆成莉,顾明剑,胡秀清,等.风云三号卫星红外高光谱探测技术及潜在应用.气象科技进展),2016, 6(1):88-93.
- [18] DONG Yao-Hai. FY-4 meteorological satellite and its application prospect [J]. *Aerospace Shanghai*, (董瑶海.风云四号气象卫星及其应用展望.上海航天),2016,33(2):1-8.
- [19] ZHANG Peng, GUO Qiang, CHEN Bo-Yang, et al. The Chinese next-generation geostationary meteorological satellite FY-4 compared with the Japanese Himawari-8/9

- satellite [J]. *Advances in Met S&T*, (张鹏, 郭强, 陈博洋, 等. 我国风云四号气象卫星与日本 Himawari-8/9 卫星比较分析. *气象科技进展*), 2016, 6(01): 72-75.
- [20] FENG Xuan, LI Li-Bing, CHEN Bo-Yang, *et al.* Post-launch calibration and validation of the Geostationary Interferometric Infrared Sounder (GIIRS) on FY-4A [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (冯绚, 李利兵, 陈博洋, 等. 风云四号A星干涉式大气垂直探测仪在轨定标及性能评价. *红外与毫米波学报*), 2019, 38(5): 648-654.
- [21] ZHANG Zhi-Qing, LU Feng, FANG Xiang, *et al.* Application and development of FY-4 meteorological satellite [J]. *AEROSPACE SHANGHAI*, (张志清, 陆风, 方翔, 等. FY-4 卫星应用和发展. *上海航天*), 2017, 34(04): 8-19.
- [22] CHEN Ren, GAO Cong, WU Xiao-Wei, *et al.* Application of FY-4 atmospheric vertical sounder in weather forecast [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (陈仁, 高聪, 吴晓唯, 等. 风云四号大气垂直探测仪在气象预报中的应用. *红外与毫米波学报*), 2019, 38(3): 285-289.
- [23] GUAN Li. *Application of astroborne infrared hyperspectral data (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, (官莉. 星载红外高光谱资料的应用. 北京: 气象出版社), 2007. 1-15.
- [24] Hill C, Gordon I E, Rothman L S, *et al.* A new relational database structure and online interface for the HITRAN database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 130: 51-61.
- [25] Clough S A, Iacono M J, Moncet J L. Line-by-line calculations of atmospheric fluxes and cooling rates: Application to water vapor [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992, 97(D14): 15761-15785.
- [26] Turner D D, Tobin D C, Clough S A, *et al.* The QME AERI LBLRTM: A closure experiment for downwelling high spectral resolution infrared radiance [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2004, 61(22): 2657-2675.
- [27] Aires F, Chedin A, Scott N A, *et al.* A regularized neural net approach for retrieval of atmospheric and surface temperatures with the IASI instrument [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2002, 41(2): 144-159.
- [28] Coheur P F, Barret B, Turquety S, *et al.* Retrieval and characterization of ozone vertical profiles from a thermal infrared nadir sounder [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D24).
- [29] W. Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory [M]. New York: Academic Press: 1984. 160.
- [30] Rodgers C D. Information content and optimisation of high spectral resolution remote measurements [J]. *Advances in Space Research*, 1996, 21(97): 136-147.
- [31] Li J. Temperature and water vapor weighting functions from radiative transfer equation with surface emissivity and solar reflectivity [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1994, 11(4): 421-426.
- [32] LUO Shuang, YIN Qiu. Statistical characteristics analysis of global temperature vertical profile [J]. *Journal of tropical meteorology*, (罗双, 尹球. 全球大气温度廓线的统计特性分析. *热带气象学报*), 2019, 35(4): 556-566.
- [33] Lee L, Zhang P, Qi C, *et al.* HIRAS noise performance improvement based on principal component analysis [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(20): 5506-5515.
- [34] Qi C L, Wu C Q, Hu X Q, *et al.* FengYun 3D HIRAS ground processing system, on-orbit performance and L1 product validation, submitted to IEEE TGRS, 2019.