

热红外高光谱成像仪(ATHIS)对矿物和气体的 实验室光谱测量

李春来^{1,2}, 刘成玉¹, 金健¹, 徐睿¹, 谢佳楠¹, 吕刚¹, 袁立银¹, 柳潇³,
徐宏根^{3*}, 王建宇^{1,2*}

(1. 中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024;

3. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205)

摘要: 首先介绍了热红外高光谱成像应用的独特优势, 然后论述了机载热红外高光谱成像仪(Airborne Thermal-Infrared Hyperspectral Imaging System, ATHIS)灵敏度优化设计方法, 结合仪器特点介绍了实验室矿物发射光谱和气体吸收光谱测量的辐射模型, 分析了样本红外光谱与温度分离的数据处理流程。在此基础上, 利用ATHIS开展了矿物发射光谱和气体红外吸收光谱的实验室测量, 结果表明, 利用ATHIS仪器和本文建立的数据方法具备准确反演矿物发射率光谱和气体吸收光谱的能力, 后续将利用该仪器开展多平台的遥感应用试验, 为未来开展星载热红外高光谱相机研制和数据处理奠定基础。

关键词: 热红外高光谱成像; 绝对温度; 探测灵敏度; 矿物发射率光谱; 气体吸收光谱

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Spectral measurement of minerals and gases based on airborne thermal-infrared hyperspectral imaging system

LI Chun-Lai^{1,2}, LIU Chen-Yu¹, JIN Jian¹, XU Rui¹, XIE Jia-Nan¹, LYU Gang¹, YUAN Li-Yin¹, LIU
Xiao³, XU Hong-Gen^{3*}, WANG Jian-Yu^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Space Active Optoelectronic Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai Institute
of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China;

3. Wuhan Center of China Geological Survey, Central South China Innovation Center for Geosciences, Wuhan
430205, China)

Abstract: In this paper, we introduced the unique advantages of the thermal infrared hyperspectral imaging in many applications, and then discuss the design to optimize sensitivity of the airborne thermal-infrared hyperspectral imaging system (ATHIS). Additionally, we establish emission spectrum of laboratory minerals and build the radiation model to measure the absorption spectrum of gas, with which the procession of separation of spectrum and temperature is analyzed. Finally, ATHIS is used to carry out laboratory measurements of mineral emission spectrum and gas infrared absorption spectrum. The results show that the data method we proposed for ATHIS can accurately invert mineral emissivity spectrum and gas absorption spectrum. In the future, ATHIS will be used to carry out multi-platform remote sensing application experiments, which will lay the foundation for future development of space-borne thermal infrared hyperspectral camera and data processing methods.

Key words: thermal infrared hyperspectral imaging, absolute temperature, detection sensitivity, mineral emissivity

收稿日期: 2020-05-06, 修回日期: 2020-10-14

Received date: 2020-05-06, Revised date: 2020-10-14

基金项目: 中国科学院青年创新促进会项目(2016218), “十三五”民用航天预研项目(D040104)”

Foundation items: Supported by Youth Innovation Promotion Association CAS (2016218), and the National Defense Pre-Research Foundation of China during the 13th Five-Year Plan Period (D040104)

作者简介(Biography): 李春来(1982-), 男, 汉族, 湖北当阳人, 博士, 研究员, 主要研究方向为高分辨率红外高光谱成像技术、新型计算光谱成像技术等. E-mail: lichunlai@mail. sitp. ac. cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: honggen_xu@163. com, jywang@mail. sitp. ac. cn

spectrum, gas absorption spectrum

PACS:95.55Fw

引言

温度和发射率反演是热红外高光谱数据从辐射物理量到地表参数转换的关键,也是热红外高光谱遥感的应用核心分支。与单波段、双波段、多波段热红外遥感不同,热红外高光谱遥感能够获取数百个波段的地物图像,具有丰富的光谱信息。理论研究表明,依靠热红外高光谱遥感数据可以更准确地提取像元级别的大气参数。同时,通过合理的假设,可以大幅减少地表热红外辐射传输方程组中的未知数个数,使不适定态问题变得相对适中,从而得到更为准确的地表真实温度和发射率。除了获取更准确的地表的真实温度满足全球气候变化、城市热岛效应、冷岛效应、遥感干旱指数、地震红外辐射预测等地球科学领域应用需求之外。通过热红外高光谱所反演的发射率光谱还可以用于地物的识别,如矿物填图,污染气体监测也是热红外高光谱常用的领域。

因此,在常规的反射谱段(可见光、近红外、短波红外)高光谱遥感发展日趋成熟的今天,热红外高光谱遥感也越来越受到国内外专家学者和相关应用行业的关注。然而,受背景辐射抑制、制冷技术、探测器等技术发展的约束,热红外高光谱成像仪一直处于缓慢发展的起步阶段。目前,还没有星载的热红外高光谱成像仪^[1],只有少量的星载热红外光谱仪用于气象遥感,如美国NASA的大气红外探测仪(Atmospheric Infrared Sounder, AIRS)、中国风云四号气象卫星的大气垂直探测仪^[2]。尽管如此,在国内外热红外高光谱成像载荷相关研制机构的努力下,已有十余台各具特色的机载热红外高光谱成像仪面世。这些载荷也通过实验室实验、外场实验、机载实验等多种方式展示了热红外高光谱遥感的强大魅力。

本文简要介绍了热红外高光谱成像技术的发展,针对新研制热红外高光谱成像仪(ATHIS)^[3-4],建立了实验室对典型矿物和污染气体进行发射率光谱和红外吸收光谱测量的模型,并联合中国地质调查局武汉地质调查中心利用ATHIS仪器在实验室进行了典型矿物样本发射率光谱和部分气体红外吸收光谱的测量实验,结果表明所得发射率光谱与标准光谱库中的红外光谱一致,验证了ATHIS仪

器的实用性和建立模型方法的正确性,为ATHIS的推广应用建立了基础和实施案例。

1 热红外高光谱成像技术发展

表1列出了热红外高光谱成像仪发展历程中国内外的主要载荷。对比表中的研制机构可以看出,国外的热红外高光谱成像仪发展要远早于国内。

1996年,美国宇航公司(Aerospace Corporation)率先成功研制了空间增强型宽谱段阵列光谱仪(Spatially enhanced broadband array spectrograph system, SEBASS)^[5],SEBASS光谱分辨率为46 nm,在7.6~13.5 μm范围内共128个波段。它设计了一套全光路制冷的低温光学系统,系统整体用液氮制冷到10 K,以此来降低光机背景辐射的影响,提高仪器的整体性能。随后,美国夏威夷大学(University of Hawaii)于1998年研制了机载红外高光谱成像仪(Airborne infrared hyperspectral imager, AHI)^[6],AHI采用采用了平面光栅进行分光,制冷渐变滤光片镶嵌在焦平面表面进行背景辐射抑制。AHI系统的光谱仪并未采用低温光学制冷,其实现的波段数为32个,光谱分辨率为125 nm。2003年,美国诺格(Northrop Grumman)公司研制了长波高光谱成像仪(Long-Wave Hyperspectral Imaging Spectrometer, LWHIS)^[7],为了抑制光机背景辐射,LWHIS安装在表面镀金的真空室内,并且将光机系统制冷到100 K以下。LWHIS采用了平面光栅分光,光谱波段达到256个(为提高信噪比可合成128波段),光谱分辨率为35 nm。LWHIS还配备了机上实时定标装置,其绝对辐射定标精度优于6%。

在SEBASS的基础上,美国宇航公司先后于2010和2011年研制了两台高性能的热红外高光谱成像仪MAKO^[8]和MAGI(Mineral and Gas Identifier)^[9]。MAKO的光谱范围为7.8~13.4 μm,波段数为128个。该仪器采用主动制冷的方式抑制光机系统的背景辐射,光谱仪整体制冷到10 K左右。MAGI只有32个波段,它是一个星载热红外高光谱成像仪的预研的原型样机。2016年,美国宇航公司又对MAKO从电子学、光学和焦平面热控三方面进行了升级改造,改造后的电子学系统帧频可达3255 Hz,更换了凹面衍射光栅的镀膜,提高了在热红外短波区的光学响应效率,采用了新的PID焦平面制冷方

法,使焦平面温控精度达到 $1\text{ mK}^{[10]}$ 。MAKO升级版可实现 $\pm 56.4^\circ$ 的摆扫,提高了数据获取效率。2011年法国国防采购局委托法国国家航天局研制了一款包括中波红外($3\sim 5.3\ \mu\text{m}$)和长波红外($8\sim 11.5\ \mu\text{m}$)的成像光谱仪-SIELETERS^[11]。SIELETERS使用傅里叶变换成像方式,在分光方式上与上述仪器存在本质差异,该仪器采用液氮制冷,光谱分辨率在中波红外优于 13 cm^{-1} ,在长波红外优于 6 cm^{-1} 。从以上仪器的介绍可以看出,抑制红外背景辐射是热红外高光谱成像仪的发展中的一个重要议题。随着制冷技术的发展和轻量化需求,热红外高光谱成像仪的制冷也从以传统的低温液态气体为主转换到以斯特林制冷为主的多种背景抑制方式相结合。

2010年,NASA的JPL实验室开始使用低温光学制冷的红外光谱仪(含狭缝和探测器)方案,制冷温度在 40 K 附近,望远镜则设计为常温,其优势在于可以将需要制冷的光谱仪设计的非常精巧,从而降低仪器的体积和复杂度。JPL实验室于2015年研制成功了机载热红外高光谱成像仪HyTES^[12],该仪器几乎代表了热红外高光谱成像仪研制的最高水平,其技术难度甚至超过了同期的大部分航天高光谱相机,在应用方面也取得了一些成绩^[12]。

除了以上一些国外著名的研究机构和公司研制的仪器之外。国外也有一些公司推出了自己的商用红外成像光谱仪,主要有TASI-600、AISA OWL和Hyper-Cam。TASI-600是加拿大ITRES公司推出了第一款商用红外高光谱成像仪,它在 $8\sim 11.5\ \mu\text{m}$ 光谱范围内有32个波段,为了减小重量和体积,TASI优化了光学设计,并采用了低温制冷的MCT探

测器。AISA OWL是芬兰Specim公司推出的一款红外高光谱成像仪,在 $7.7\sim 12.5\ \mu\text{m}$ 光谱范围内有96个波段,光谱分辨率达到 $100\text{ nm}^{[13]}$ 。AISA OWL成像仪采用制冷型的碲镉汞阵列探测器,背景辐射抑制是通过专门的滤光片技术实现,并在芯片上增加了背景监视校正功能。Hyper-Cam是由加拿大Telops公司推出的一款傅里叶变换热红外高光谱成像仪,Hyper-Cam具有两个型号,分别为HYPER-CAM MW($3\sim 5\ \mu\text{m}$)和HYPER-CAM LW($7.7\sim 11.8\ \mu\text{m}$),最新型号长波红外成像光谱仪HYPER-CAM XLW光谱范围为 $7.35\sim 13.5\ \mu\text{m}^{[14]}$ 。

国内从事热红外高光谱成像仪研制的单位数量较少,2016年,中科院上海技术物理研究所成功研制了机载热红外高光谱成像系统(ATHIS)^[3-4]。ATHIS采用了类似HyTES的光谱仪制冷方案,制冷温度为 $100\text{ K}^{[3-4]}$,仪器利用平面闪耀光栅分光^[15],覆盖波长 $8.0\sim 12.5\ \mu\text{m}$,空间分辨率达为 1 mrad ,光谱分辨率优于 $40\text{ nm}^{[16]}$,观测视场角为 42° 。

从热红外光谱仪发展的过程来看,为了尽可能的减小仪器整体的体积和重量,抑制背景辐射从以整机制冷为主,逐步发展到局部制冷。制冷方式也以液氮制冷转换到斯特林主动机械制冷。同时较大的观测视场角也已成为一个必备指标。

2 ATHIS的灵敏度优化方法

ATHIS仪器于2016年研制完成,开展了实验室性能测量和飞行试验^[3]。一般而言,灵敏度是高光谱成像仪最为重要的技术指标,在文献^[4]中对灵敏度的计算方法进行了详细分析和计算,仪器设计有140个光谱通道,探测灵敏度平均优于 $0.17\text{ K}@300$

表1 国内外主要热红外高光谱成像仪

Table 1 Main thermal infrared hyperspectral imagers at home and abroad

Instrument	Spectral range / μm	Spectral resolution	Bands	IFOV / mrad	TFOV / $^\circ$	Sensitivity	Spectral-splitting
SEBASS	7.6~13.5	46 nm	128	1.1		0.05 K	曲线棱镜
AHI	7.5~11.5	125 nm	32	2		0.1 K	平面光栅
LWHIS	8~12.5	35 nm	256/128	0.9	6.5	0.035 K	平面光栅
MAKO	7.8~13.4	47 nm	128	2	14.7	0.05 K	凹面光栅
MAGI	7.1~12.7	100 nm	32		± 42		凹面光栅
MAKO升级版	7.8~13.4	44 nm	128	2	± 56.4	—	凹面光栅
AISA-OWL	7.7~12.3	100 nm	96	1.1		$20\text{ mW}/(\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{m})$	P-G-P结构
Hyper-Cam	7.35~13.5	$<0.25\text{ cm}^{-1}$	256	0.35		$20\text{ nW}/(\text{cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{cm})$	傅里叶变换
HyTES	7.5~12.0	18 nm	256	1.7		0.2 K	凹面光栅
ATHIS	8~12.5	38 nm	155	1		0.17 K	平面闪耀光栅

K,为实现该指标 ATHIS设计有多个创新方法。

根据分析^[4],仪器光谱分辨率进一步提升主要受限于探测器的暗电流,仪器采用的HgCdTe焦平面组件在60 K低温工作时暗电流水平在 1×10^{-11} A,虽然设计有100 K低温光谱仪,暗电流的存在仍成为限制焦面积分时间增加的主要因素。

系统设计方面采用了3个方法进行仪器探测灵敏度的优化。首先是将仪器的狭缝宽度设定为45 μm (理论设计应为30 μm),狭缝的宽度是限制进入仪器的目标能量的最直接因素,狭缝增宽到45 μm 后可以使探测器接收到的目标能量提升1倍,带来的影响是光谱分辨率的降低,光谱仪设计光谱采样间隔为29 nm,在论文中^[17]针对本系统详细分析了狭缝宽度、光谱采样间隔以及实际的光谱分辨率之间的关系,并开展了试验验证,结果表明当狭缝增加到45 μm 时,即像元尺寸宽度1.5倍的情况下,光谱分辨率并非降低1.5倍,而是约1.2倍,经测试当狭缝为30 μm 宽时,140个光谱通道平均分辨率为32.1 nm,更换45 μm 狭缝后ATHIS仪器140个光谱通道的分辨率平均为38.7 nm。

第二是光学望远镜设计选择了较小的相对孔径,系统接收到的目标能量与光学相对孔径和探测元尺寸存在直接关系,在像元尺寸确定情况下,与光学相对孔径成反比^[4],ATHIS仪器设计光学相对孔径为2,相对常规可见短波高光谱仪器这个数值要小很多,能够有效增加目标辐射能量。

最后一个方法是对目标信号进行多次累加,该方法是红外系统提升灵敏度的常用方法,能够将该技术应用于遥感实际作业的前提就是在一个地面像元的驻留时间内可以实现多次曝光采样,ATHIS仪器设计空间分辨率2m@2000m,按飞行速度200 Km/h计算,ATHIS仪器具备6次以上的累加能力,在实际的飞行应用中也是这样设计的,经测试该方法提升了仪器探测灵敏度2.5倍^[4]。

3 基于实验室内ATHIS成像数据的矿物发射率反演模型与方法

热红外高光谱成像技术在矿物填图和气体监测方面有重要用途^[18],目前业务单位主要采用国外仪器进行测试,在处理模型上主要尚未建立标准信息模型和数据处理方法。本节结合研制的ATHIS仪器及其辐射传输特性,在实验室条件下进行矿物发射率光谱和气体吸收光谱的测量,并建立了辐射传输模型和数据获取方法。

3.1 实验室矿物热红外辐射传输模型

在实验室利用ATHIS仪器进行典型矿物的热红外光谱发射率测量时,示意图如图1所示。

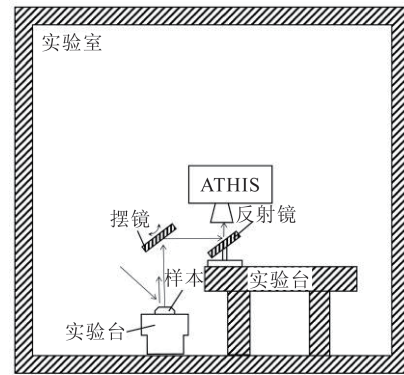


图1 实验室内矿物成像热红外辐射传输过程

Fig. 1 The process of thermal infrared radiation transmission in mineral imaging in the laboratory

在实验室条件下,由于测量距离较近,可忽略长路径传输时的大气影响,包括大气吸收和大气程辐射,故在实验室条件下辐射传输方程可表示为:

$$L_{\text{lab}}(\lambda) = B(T, \lambda) \varepsilon(\lambda) + [1 - \varepsilon(\lambda)] L_{\text{lab, bg}}(\lambda), \quad (1)$$

其中, $L_{\text{lab}}(\lambda)$ 为仪器的入瞳辐射亮度; T 为待探测目标的温度, $B(T, \lambda)$ 为温度 T 所对应的黑体辐射亮度, $\varepsilon(\lambda)$ 为目标辐射波长 λ 时对应的发射率; $L_{\text{lab, bg}}(\lambda)$ 为实验室内墙壁、实验台等周围物体形成的背景辐射。与机载、星载、塔基等遥感观测不同,实验室条件下红外背景辐射并没有大气下行辐射所谓的“毛刺”特征,导致了温度发射率分离算法无法用于实验室测量数据的反演。因此,要准确从实验室测量数据中反演成像目标的发射率,除了需要测量仪器入瞳的辐亮度之外,还需要测量目标温度 T 。

3.2 实验室内矿物发射率光谱测量方法

实验室背景是温度相对稳定的具有较高发射率的墙壁、天棚等人造目标,而户外晴空大气背景具有较低的发射率。因此,实验室测量实验中,背景温度与样本温度接近时,容易形成“假黑体”现象。为避免该现象,需要对样本进行升温或者降温。本文在实验室测量过程中采取的实验步骤如下:

(1) 仪器预热和仪器参数配置:首先开启ATHIS仪器工作电源,低温光学制冷开始工作。待仪器低温系统温度稳定到100 K后,开启数据采集软件,配置采集数据时的各类参数。

(2)进行辐射定标:采用 CES200-06 低温黑体对 ATHIS 仪器进行辐射定标。CES200-06 低温黑体辐射面尺寸为 20 cm×20 cm,能够覆盖仪器光学孔径,均匀性指标优于±0.05 °C(@23 °C),温度精度±0.15%(满量程),稳定性±0.05 °C/30 min。分别将黑体温度设置为 20 °C、40 °C、60 °C 和 80 °C,记录成像数据,用于计算辐射定标系数。

(3)样本测量辅助:为尽可能的增加样本和实验室背景之间的温差,在对样本测量之前,将样品矿物放置在加热盘上进行加热至 50°C 左右。在测量时,对样本进行控温,保证样本辐射的稳定。

(4)背景辐射测量:在测量每个样本之后,将事先准备好的金板放到仪器视场内,并保证金板辐射面充满仪器的光学孔径,数据采集完毕后,用接触式测温仪测量金板温度,并记录其物理温度。

3.3 实验室内矿物发射率反演流程

图 2 给出了实验室条件下,从 ATHIS 测量数据中反演处典型矿物样本的光谱发射率的步骤。首先根据异常像元掩膜修复原始数据中的盲元,然后根据黑体数据进行辐射定标,之后根据金板数据计算实验室背景辐射亮度,最后结合背景辐射亮度和测量的样本温度,计算得到样本的光谱发射率。

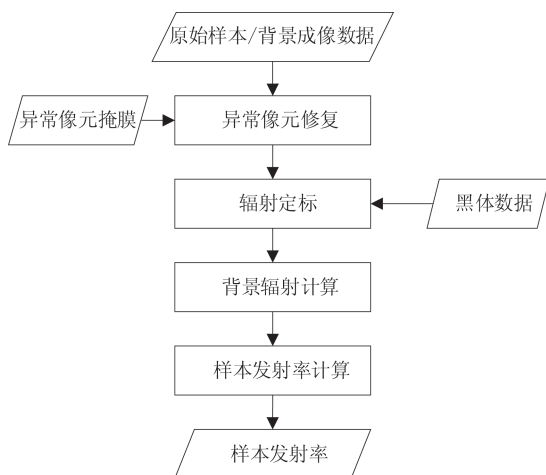


图2 实验室内矿物发射率反演的数据处理流程

Fig. 2 The data processing flow of mineral emissivity inversion in the laboratory

3.3.1 异常像元修复

异常像元是指响应不正常的像元,可在实验室内仪器对不同温度黑体成像提取异常像元,形成异常像元掩膜。根据异常像元掩膜,对异常像元进行修复。异常像元修复按照成像帧的顺序,在一帧数据中选择每个异常像元 3×3 邻域中的非盲元像元的

均值作为异常像元的值。如果 3×3 邻域内没有非异常像元,则扩大搜索窗口,直至可获得非盲元像元的均值为止。

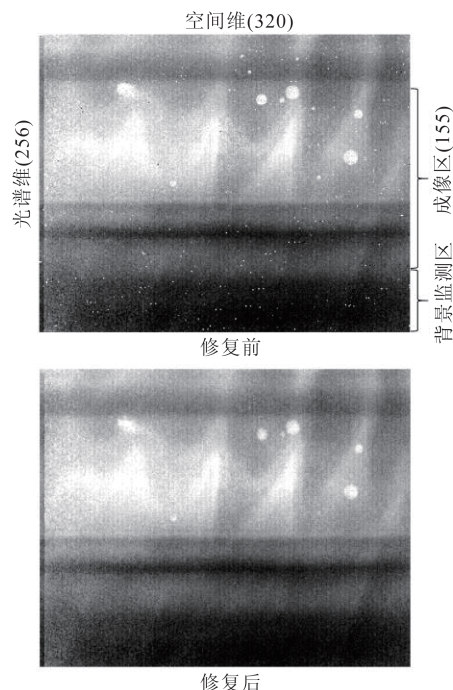


图3 ATHIS 仪器焦平面像元异常修复前后对比

Fig. 3 Comparison of focal plane images of ATHIS before and after abnormal pixel restoration

3.3.2 辐射定标

在辐射定标中,将相对辐射定标和绝对辐射定标过程合并为一个过程,将系统获取的 DN 值直接转换为辐亮度数据,方法如下:

$$L_{\text{lab}}(i,j,k) = a_{\text{lab}}(i,k) \times DN_{\text{lab}}(i,j,k) + b_{\text{lab}}(i,k), \quad (2)$$

其中, i,j,k 分别为高光谱数据的列、行、波段序号; $L_{\text{lab}}(i,j,k)$ 为测量样本或金板得到的辐射亮度; $DN_{\text{lab}}(i,j,k)$ 为原始数据的 DN 值; $a_{\text{lab}}(i,k)$ 和 $b_{\text{lab}}(i,k)$ 为辐射定标系数,由采集仪器对应不同温度黑体目标得到。

3.3.3 背景辐射测量

在实验室条件下测量矿物的发射率光谱,一般会同步测量金板的辐射特性作为参考用于后续计算,金板测量过程的辐射传输方程可表示为:

$$L_{\text{lab,panel}}(k) = B(T_{\text{panel}}, \lambda_k) \varepsilon_{\text{panel}}(k) + [1 - \varepsilon_{\text{panel}}(k)] L_{\text{lab,bg}}(k), \quad (3)$$

其中, $L_{\text{lab,panel}}(\lambda)$ 为仪器接收到的第 k 波段的镀金漫反射板辐射亮度; λ_k 为波长为第 k 波段的中心波长; T_{panel} 为金板温度; $\varepsilon_{\text{panel}}(k)$ 为镀金漫反射板第 k 波段

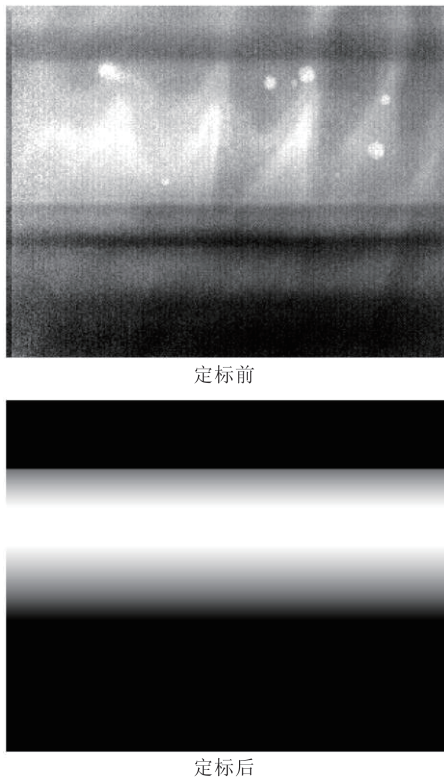


图4 ATHIS仪器辐射定标前后焦平面图像对比
Fig. 4 Comparison of focal plane images of ATHIS before and after radiation calibration

的发射率; $B(T_{\text{panel}}, \lambda_k)$ 为温度 T_{panel} 时所对应的黑体辐射亮度; $L_{\text{lab, bg}}(k)$ 为实验室第 k 波段的背景辐射亮度, 通过测量金板辐射亮度、金板温度得到:

$$L_{\text{lab, bg}}(k) = \frac{L_{\text{lab, panel}}(k) - B(T_{\text{panel}}, \lambda_k) \varepsilon_{\text{panel}}(k)}{1 - \varepsilon_{\text{panel}}(k)} \quad (4)$$

本文在实验室测量过程中, 使用了蓝菲光学镀金漫反射板, 其发射率为 $\varepsilon_{\text{panel}}(k) = 0.06$ 。

3.3.4 矿物样本的发射率光谱计算

在实验室测量得到矿物样本入瞳辐亮度和温度后, 再结合所计算的背景辐射, 就可以根据(1)式计算得到待测试矿物的光谱发射率:

$$\varepsilon(i, j, k) = \frac{L_{\text{lab}}(i, j, k) - L_{\text{lab, bg}}(k)}{B(T, \lambda_k) - L_{\text{lab, bg}}(k)} \quad (5)$$

其中, $\varepsilon(i, j, k)$ 为矿物样本成像数据中某像元对应的的光谱发射率。

4 基于实验室内 ATHIS 成像数据的气体浓度反演

2016年, Nature 子刊撰文^[19]指出具备米级分辨率的热红外高光谱成像技术在温室气体和危险气体监测方面具有独一无二的优势, 能在远距离条件

下, 实现对温室气体排放的几何形态、气体种类、浓度等信息进行精确测量, 甚至通过几何形态和浓度信息能够分析得到气体的扩散趋势, 这对于目前日益严重的危险气体泄漏引发的安全事故进行早期预警提供了一种最具潜力的技术手段。

本文利用 ATHIS 在实验室对几类典型的气体成分进行了红外吸收光谱测量, 并与标准吸收谱进行了一致性比对。

4.1 实验室气体红外辐射传输模型

如图5所示, 实验室中对气体开展吸收光谱测量时, 将气体放置于气体池中, 测量距离较近, 可以认为在实验室内环境中空气的透过率为1, 程辐射为0。从而一定程度上简化系统模型。

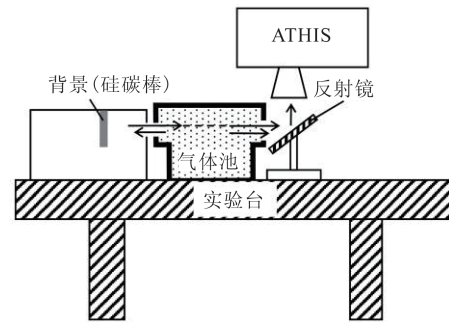


图5 实验室内气体成像热红外辐射传输过程
Fig. 5 The process of thermal infrared radiation transmission of gas imaging in laboratory

依据图3模型, 对于实验室开展气体吸收光谱测量, 仪器入瞳辐射亮度可以表示为:

$$L_{\text{lab}}(\lambda) = L_{\text{bg}}(\lambda) t_{\text{gas}}(\lambda) + L_{\text{gas}}(\lambda) = \varepsilon_{\text{bg}}(\lambda) B(T_{\text{bg}}, \lambda) t_{\text{gas}}(\lambda) + L_{\text{gas}}(\lambda) \quad (6)$$

其中, $L_{\text{bg}}(\lambda)$ 为气体的背景辐射亮度; $t_{\text{gas}}(\lambda)$ 为待测量气体池里边气体的透过率; $L_{\text{gas}}(\lambda)$ 为气体自身的热辐射; $\varepsilon_{\text{bg}}(\lambda)$ 为背景发射率; $B(T_{\text{bg}}, \lambda)$ 为背景的黑体辐射亮度; T_{bg} 为背景的温度。当采用黑体或硅碳棒等作为背景辐射时, 可以认为 $\varepsilon_{\text{bg}}(\lambda) = 1$, 背景不反射气体自身的辐射, 式(6)可以等效为:

$$L_{\text{lab}}(\lambda) = B(T_{\text{bg}}, \lambda) t_{\text{gas}}(\lambda) + L_{\text{gas}}(\lambda) \quad (7)$$

其中, $B(T_{\text{bg}}, \lambda)$ 为背景对应的黑体辐射亮度, 根据基尔霍夫定律和朗伯比尔定律, $L_{\text{gas}}(\lambda)$ 可以表示为黑体辐射和发射率的乘积:

$$L_{\text{gas}}(\lambda) = [1 - t_{\text{gas}}(\lambda)] B(T_{\text{gas}}, \lambda) = [1 - e^{-n_{\text{gas}} a_{\text{gas}}(\lambda)}] B(T_{\text{gas}}, \lambda) \quad (8)$$

其中, T_{gas} 为气体的等效温度; n_{gas} 为气体池内气体的柱密度; $a_{\text{gas}}(\lambda)$ 为气体的吸收系数。将式(8)代入式

(7),可以得到:

$$L_{\text{lab}}(\lambda) = B(T_{\text{bg}}, \lambda) e^{-n_{\text{gas}} a_{\text{gas}}(\lambda)} + [1 - e^{-n_{\text{gas}} a_{\text{gas}}(\lambda)}] B(T_{\text{gas}}, \lambda_i) \quad (9)$$

当气体温度较低时,可忽略气体自身的热辐射,即式(9)中的第二项近似为0,可简化为:

$$L_{\text{lab}}(\lambda) = B(T_{\text{bg}}, \lambda) e^{-n_{\text{gas}} a_{\text{gas}}(\lambda)} \quad (10)$$

此时,透过气体池的辐射符合理想的朗伯比尔定律。从该公式看所计算的气体透过率包含了气体的吸收系数 $a_{\text{gas}}(\lambda)$ 的光谱特征,通过气体透过率(或吸收率)的光谱特征可以判断气体的类型,再结合气体类型所对应的吸收系数可以反演气体传输路径上的柱浓度。

4.2 实验室内气体吸收光谱测量方法

很多气体对人体或多或少都具有一定的危害性,有些气体甚至会危害实验室其他设施的安全。然而,实验室对气体测量实验往往是气体监测仪器研制的必经之路。因此,在实验室内一般将气体注入安全密闭的气体池内开展测量实验,如图2所示。本文在实验室测量过程中采取的实验步骤如下:

(1) 仪器预热和仪器参数配置:开启 ATHIS 仪器电源,低温光学稳定到 100 K 后开启数据采集软件,配置相关参数。

(2) 仪器的辐射定标:与测量矿物发射率过程类似。分别将黑体温度设置为 20 °C、40 °C,记录成像数据,用于计算辐射定标系数。

(3) 背景测量:完成辐射定标后,将作为背景的黑体或硅碳棒放入仪器视场内进行数据采集。

(4) 气体测量:将装有待测气体的气体池放入背景和仪器之间,调整光路并记录带有吸收光谱特性的成像数据。

4.3 气体种类和浓度反演流程

如图6所示,与矿物发射率反演流程类似,从实验室内 ATHIS 测量的数据中反演气体浓度的数据处理流程主要包括以下步骤,首先根据异常像元掩膜修复原始热红外高光谱数据中的盲元;然后,根据实验室黑体数据进行辐射定标;最后,结合背景辐射亮度和气体吸收系数,从气体成像数据中得到待测试气体的种类信息并计算气体浓度。

4.3.1 异常像元修复

与实验室内矿物发射率反演流程中的异常像元修复类似,也是按照成像帧的顺序,在一帧数据中选择每个异常像元邻域中的非盲元像元的均值作为异常像元的值。

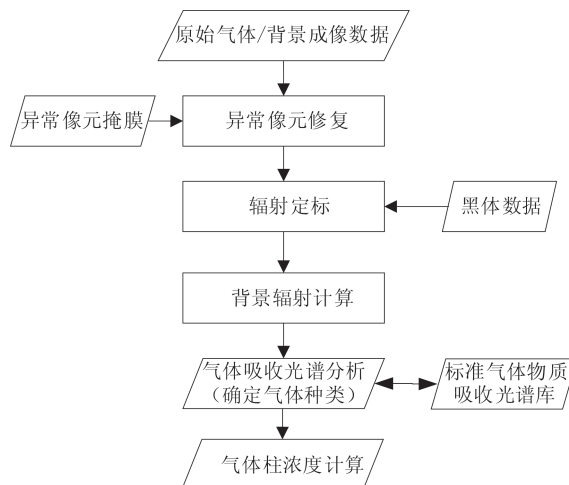


图6 实验室内气体浓度反演的数据处理流程

Fig. 6 The data processing flow of gas concentration inversion in the laboratory

4.3.2 辐射定标

该过程与与实验室内矿物发射率反演流程中的辐射定标相同,使用式(2)中的计算方法进行辐射定标。

4.3.3 气体种类分析和浓度计算

根据实验室气体红外辐射传输模型,对式(10)进行变换,可以得到气体浓度的计算方法为:

$$n_{\text{gas}} = -\frac{1}{a_{\text{gas}}(\lambda)} \ln \left[\frac{L_{\text{lab}}(\lambda) - B(T_{\text{gas}}, \lambda_i)}{B(T_{\text{bg}}, \lambda) - B(T_{\text{gas}}, \lambda_i)} \right], \quad (11)$$

上式中的 $a_{\text{gas}}(\lambda)$ 是待测试气体的标准吸收光谱,可以通过仪器获得光谱特性进行光谱库查询获得气体种类,从而利用已知的吸收光谱数据。当气体温度很较低时 $B(T_{\text{gas}}, \lambda_i) \rightarrow 0$, 浓度计算方法为:

$$n_{\text{gas}} = -\frac{1}{a_{\text{gas}}(\lambda)} \ln \left[\frac{L_{\text{lab}}(\lambda)}{B(T_{\text{bg}}, \lambda)} \right] \quad (12)$$

5 结果与分析

5.1 矿物样本光谱发射率测试

按照上文所论述的测量步骤,用 ATHIS 开展了实验室矿物发射率测量,矿物样本由中国地质调查局武汉地质调查中心提供。采用文中所介绍的方法,对实验室所获取的矿物热红外高光谱成像数据进行了处理,获得了矿物的发射率曲线。图7为试验现场的照片。

图8给出了实验室测量得到的部分典型矿物的光谱发射率,从光谱的走势和特征来看,除个别波段存在以下小的差异之外,ATHIS 测量的得到的矿物发射率光谱和 Model 102F 傅里叶变换红外光谱

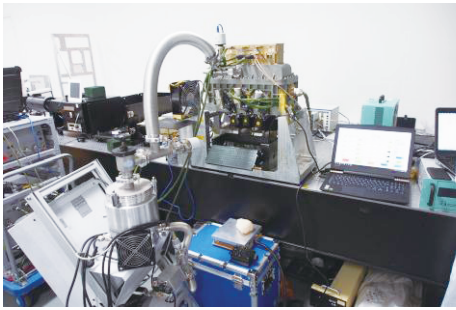


图7 实验室内矿物发射率测量现场照片

Fig. 7 Photo showing mineral emissivity measurement in the laboratory

测量的发射率曲线基本保持一致。经计算, ATHIS和Model 102F傅里叶变换红外光谱仪测量的四种矿物发射率光谱之间的光谱角余弦值分别为0.999 9、0.999 9、0.999 7和0.999 8。尤其是图8(a)中的石英光谱曲线,除去因光谱分辨率不同而导致的个别曲线拐点和极值点形状有微小差异之外,二者测得的发射率光谱曲线的拐点和极值点完全重合(如8.638 μm 附近的发射峰)。本文测量的发射率数值与采用Hypercam^[15]的测量结果接近。图9所示为与亚利桑那大学(Arizona State University, ASU)发布的热红外波谱库中的细粒石英颗粒(粒径125~2 mm)的发射率光谱对比,同样具有相似的特征光谱吸收带和相近的峰值位置(仅相差0.010 μm)。形态上差别可能是实际测量过程中样本形态(本次利用ATHIS测量的是块状石英)与光谱库中所使用样本存在差异造成的,另外仪器之间的光谱分辨率差异也是产生误差的因素之一。

通过该测试可认为ATHIS已经具备了准确测量矿物光谱发射率的能力。图10为还给出了在测量过程中ATHIS仪器不同列成像数据所反演的石英发射率光谱一致性比对,从图中可以看出,不同列所得发射率光谱差异较小,仅存在由噪声引起的极小的波动,峰值和位置完全吻合。这也说明经过本文所采用的数据处理流程,ATHIS各列响应的非均匀性得到了较好地校正,可用于后续开展甘肃柳园地区典型地质成矿带的红外高光谱成像遥感飞行示范。

5.2 气体透过光谱测量和浓度反演

对于气体的透过光谱测量和浓度反演参考4.2节给出的实验室内气体吸收光谱测量方法。图11为试验现场照片,在实验过程中,将气体注入气体池中,背景辐射源采用硅碳棒,为了提高背景辐射

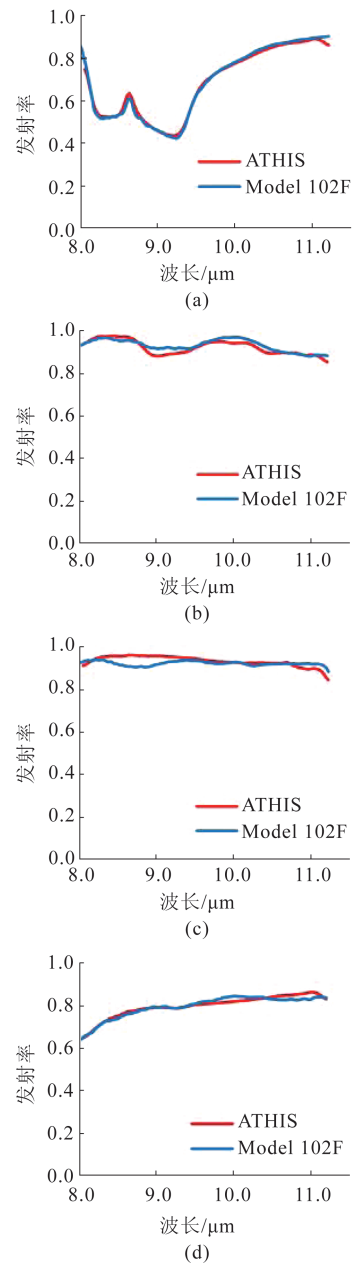


图8 实验室测量矿物发射率光谱曲线

Fig. 8 Spectrum of mineral emissivity measured in the laboratory

均匀性,放置硅碳棒于平行光管焦面处,使得其发出均匀的背景辐射。

用文中所介绍的方法对实验室所获取的气体热红外高光谱数据进行处理,获得了气体的透射率光谱曲线,图12和图13分别给出了ATHIS测量的气体透光率曲线与标准光谱库NIST中的氨气透光率光谱和光学厚度光谱的对比。可以看出,ATHIS和NIST的两组光谱曲线高度相似,经计算光学厚度光谱角余弦值为0.94,由此可以确定气体池中的待

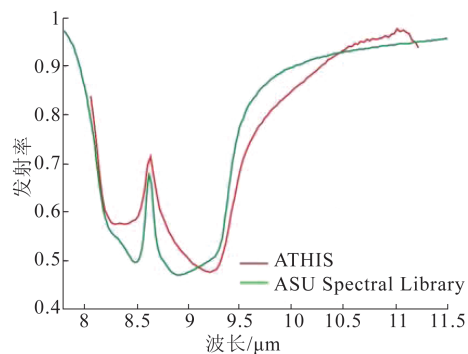


图9 ATHIS反演的石英发射率光谱与ASU光谱库中石英光谱的对比

Fig. 9 Inversed spectrum of quartz emissivity from ATHIS measurements compared with spectral library

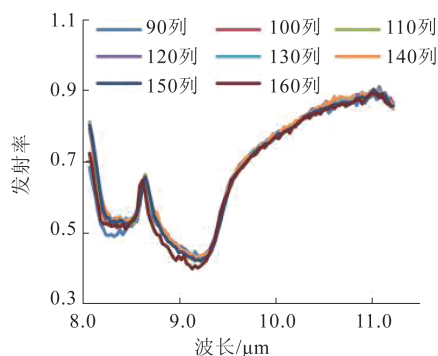


图10 ATHIS仪器不同空间维数据反演石英发射率光谱一致性对比

Fig. 10 Comparison of spectral consistency of quartz emissivity retrieved from different spatial dimensions of ATHIS

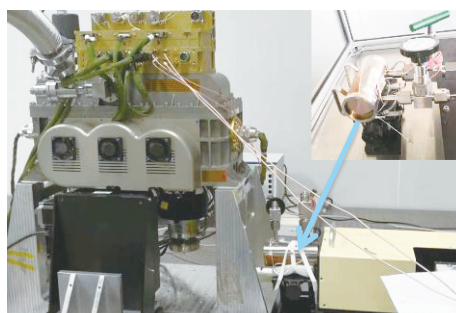


图11 实验室内气体吸收光谱测量现场照片
Fig. 11 Photo showing gas absorption spectrum measurement in the laboratory

测气体为氨气。

图14为用探测数据根据式(12)所计算的氨气浓度值的直方图。理论上来说,只要气体具有吸收作用(吸收截面大于0)的波段都可以用来反演气体浓度,且反演的浓度值应该保持一致。实际上,图14所反演的氨气浓度值从1.0 g/m²增长到5.3 g/m²。

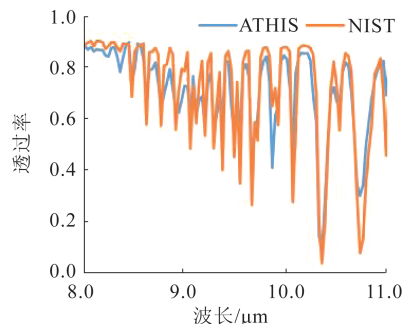


图12 测量结果和NIST光谱库氨气透过率对比
Fig. 12 Comparison between measured transmission rate of ammonia and NIST spectral library

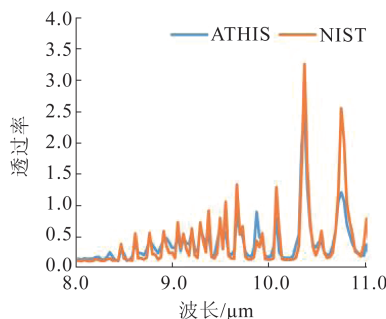


图13 测量结果和NIST光谱库氨气光学厚度对比
Fig. 13 Comparison between measured optical thickness of ammonia and NIST spectral library

出现这种状况的原因,一方面可能是背景辐射源和气体池中间的光程中存在与测试目标气体相同吸收波段,导致存在重复吸收测量现象;另一方面可能是仪器自身影响,当气体在某波段的吸收率较小时,其吸收量级产生的信号差异可能和仪器的探测灵敏度水平相当,这时的反演结果容易受到仪器噪声的影响。因此,在实际反演气体浓度时,需要根据气体的浓度、背景气体的辐射特性选择适宜的波段进行目标气体浓度的反演。值得注意的是,由于热红外波段数量多,可包含对目标气体具有不同吸收能力的多个波段,也可以认为真实的气体浓度应该包含在用所有波段的成像数据所反演的气体浓度集合中。即使不能确定反演目标气体浓度的最佳波段,也可以根据所反演的气体浓度集合给出一个气体浓度的可靠估值或估值范围。

利用热红外高光谱成像仪进行气体透过率光谱曲线和浓度反演的工作尚属国内首次,传统的气体红外光谱透过率测量和浓度反演一般采用傅里叶红外光谱法,它具备较高的光谱分辨率,能够定量反演路径中的气体成份和浓度,但难以具备高分辨率成像能力。本文利用ATHIS仪器开展气体测

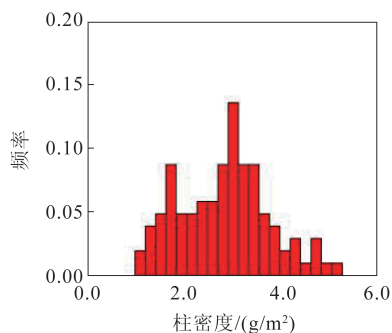


图14 不同波段估算的氨气浓度直方图

Fig. 14 Histogram of ammonia concentration estimated in different bands

量的结果表明热红外高光谱成像技术也能应用于气体的成份与浓度探测,由于其同时具备高分辨率成像能力,未来有望应用于大气环境污染气体精细监测的最有利技术。

6 结论

本文总结了 ATTHIS 仪器在实验室条件下针对矿物发射率光谱和气体透过率光谱测量的传输模型。在矿物发射率测量方面,无论是与商用傅里叶红外光谱仪测量结果对比,还是与标准光谱库数据对比,测量结果都保持高度一致性。在气体透过率光谱测量方面,设计有氨气气体池在实验室进行了测量实验,处理的结果能够准确反映氨气的梳状光谱透过率特性,并与标准光谱库谱形一致,并初步反演了浓度信息,上述测量工作及数据处理得到的准确结果充分证实了 ATTHIS 仪器可应用于后续的遥感业务飞行。

对于实际的遥感应应用而言,在辐射传输模型方面和实验室存在诸多差异。无论是航空还是航天平台,热红外高光谱成像均受大气吸收的影响,在信息反演过程中,不可避免的需要首先获得准确的大气信息,计算辐射传输中方程中的部分参数。在热红外高光谱成像数据处理领域,相对于已有许多解决方案的发射率和温度分离方法而言,目前热红外高光谱遥感数据的大气校正仍未得到很好的解决。综上所述,ATTHIS 仪器已具备开展遥感业务应用的能力,后续将在进一步的应用中,持续改进仪器性能。

References

[1] WANG Jian-Yu, LI Chun-Lai, JI Hong-Zhen, *et al.* Status and prospect of thermal infrared hyperspectral imaging technical[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王建宇, 李春来, 姬弘

楨, 等. 热红外高光谱成像技术的研究现状与展望, *红外与毫米波学报*), 2015, **34**(1): 51-58.

- [2] 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应用, *红外与毫米波学报*) 2019, **38**(3): 284-289.
- [3] WANG Jian-Yu, LI Chun-Lai, LV Gang, *et al.* The calibration of an infrared hyperspectral imager and its flight test validation in laboratory [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王建宇*, 李春来, 吕刚, 等. 红外高光谱成像仪的系统测试标定与飞行验证, *红外与毫米波学报*), 2017, **36**(1): 69-74.
- [4] WANG Jian-Yu, LI Chun-Lai, WANG Yue-Ming, *et al.* Sensitivity model and system design for thermal infrared hyperspectral imager [J]. *Infrared and Laser Engineering* (王建宇*, 李春来, 王跃明, 等. 热红外高光谱成像仪的灵敏度模型与系统研制, *红外与激光工程*), 2017, **46**(1): 0102001-1-0102001-7.
- [5] Hackwell J A, Warren D W, Bongiovi R P, *et al.* LWIR/MWIR imaging hyperspectral sensor for airborne and ground-based remote sensing [J]. *Proc. SPIE*, 1996, **2819**: 102-107.
- [6] Lucey P G, Williams T J, Mignard M, *et al.* AHI: an airborne longwave infrared hyperspectral imager [J]. *Proc. SPIE*, 1998, **3431**: 36-43.
- [7] Shepanski J, Sandor-Leahy P S. The NGST long wave hyperspectral imaging spectrometer: sensor hardware and data processing [J]. *Proc. SPIE*, 2006, **6206**: 62062B-1-12.
- [8] Warren D W, Boucher R H, Gutierrez D J, *et al.* MAKO: a high-performance, airborne imaging spectrometer for the long-wave infrared [J]. *Proc. SPIE*, 2010, **7812**: 78120N-1-10.
- [9] Hall J L, Boucher R H, Buckland K N, *et al.* MAGI: A new high-performance airborne thermal-infrared imaging spectrometer for Earth science applications [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, **53**(10): 5447-5457.
- [10] Hall J L, Boucher R H, Buckland K N, *et al.* MAKO airborne thermal infrared imaging spectrometer: performance update [J]. *Proc. SPIE*, 2016, **9976**: 997604.
- [11] Coudrain C, Bernhardt S, Caes M, *et al.* SIELETTERS, an airborne infrared dual-band spectro-imaging system for measurement of scene spectral signatures [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(12): 16164-16176.
- [12] Johnson W R, Hook S J, Mouroulis P, *et al.* HyTES: Thermal imaging spectrometer development [J]. *Proc. SPIE*, 2011, pp. 1-8.
- [13] Achal S, McFee J E, Ivanco T, *et al.* A thermal infrared hyperspectral imager (tasi) for buried landmine detection [J]. *Proc. SPIE*, 2011, **6553**: 655316-1-11.
- [14] Puckrin E, Turcotte C S, Lahaie P, *et al.* Airborne measurements in the infrared using FTIR-based imaging hyperspectral sensors [J]. *Proc. SPIE*, 2009, **7482**: 73240R-1-12.
- [15] Yuan L, He Z, Lv G, *et al.* Optical design, laboratory test, and calibration of airborne long wave infrared imaging spectrometer [J]. *Optics Express*, 2017, **25**(19): 22440-22454.
- [16] LI Chun-Lai, LV Gang, YUAN Li-Yin, *et al.* Laboratory

- calibration and application of the airborne thermal infrared hyperspectral imager (ATHIS) [J]. *Infrared and Laser Engineering* (李春来, 吕刚, 袁立银, 等。机载热红外高光谱成像仪的光谱性能测试与初步应用, *红外与激光工程*), 2020, **49**(5):20190117.
- [17] MENG Qing-Peng, LIU Shi-Jie, LI Chun-Lai, *et al.* Effect of slit on energy received by pixel of thermal infrared hyperspectral imager [J]. *semiconductor optoelectronics* (孟庆鹏, 刘世界, 李春来, 等。成像狭缝对热红外高光谱成像仪接收能量的影响, *半导体光电*) 2019, **40**(5): 714-718
- [18] Schlerf M, Rock G, Lagueux P, *et al.* A hyperspectral thermal infrared imaging instrument for natural resources applications [J]. *Remote Sensing*, 2012, **4**(12): 3995-4009.
- [19] Galfak M, Olofsson G, Crill *Pet al.* Making methane visible [J]. *Nature Climate Change*, 2016, **6**:426-430.