

## 红外高光谱遥感成像的技术发展与气体探测应用 (特邀)

李春来<sup>1,2</sup>, 刘成玉<sup>1</sup>, 金健<sup>1</sup>, 徐睿<sup>1</sup>, 吕刚<sup>1</sup>, 谢嘉楠<sup>1</sup>, 袁立银<sup>1</sup>, 刘世界<sup>2</sup>, 王建宇<sup>1,2\*</sup>

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;
2. 国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024)

**摘要:** 相对可见光和短波红外谱段来说, 在红外谱段进行高光谱遥感成像具有独特优势, 特别是在资源勘查、地表环境监测、大气环境监测、军事侦察方面。尽管当前红外高光谱成像仪主要以机载为主, 还未实现星载, 然而国内外相关机构从未放弃推进红外高光谱遥感的星载化。文中首先分析了国内外典型的红外高光谱成像仪的设计、实现与技术指标, 从光谱分辨率、空间分辨率、辐射分辨率三个核心指标总结了现有红外高光谱成像仪的技术特点、存在问题和解决途径。未来很长的一段时间内, 红外精细分光、低暗电流焦平面探测器、低温光学与背景抑制仍然是红外高光谱成像仪研制所要解决的核心问题。在此基础上, 文中重点介绍了在远距离气体探测方面的应用, 并分析了其独特优势。最后, 展望了红外高光谱成像技术的发展方向。

**关键词:** 红外高光谱遥感; 光谱分辨率; 瞬时视场角; 灵敏度; 气体探测

**中图分类号:** TN215      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20210866

## Development of infrared hyperspectral remote sensing imaging and application of gas detection (*invited*)

Li Chunlai<sup>1,2</sup>, Liu Chengyu<sup>1</sup>, Jin Jian<sup>1</sup>, Xu Rui<sup>1</sup>, Lv Gang<sup>1</sup>, Xie Jianan<sup>1</sup>,  
Yuan Liyin<sup>1</sup>, Liu Shijie<sup>2</sup>, Wang Jianyu<sup>1,2\*</sup>

- (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)

**Abstract:** Compared with the visible to short wave infrared spectrum, hyperspectral remote sensing imaging in the infrared spectrum has unique application advantages, especially in resource exploration, surface environment monitoring, atmospheric environment monitoring and military reconnaissance. Although the infrared hyperspectral imagers are mainly airborne at present, the domestic and foreign institutions have never given up promoting the spaceborne application of infrared hyperspectral remote sensing. Therefore, based on the detailed analysis of the design, implementation and specifications of the primary infrared hyperspectral imagers, this paper first summarizes the characteristics, existing problems and solutions of the current infrared hyperspectral imagers from the three key indexes of spectral resolution, spatial resolution and radiometric resolution. That is, breaking

收稿日期: 2021-11-20; 修订日期: 2022-03-10

基金项目: 173 基础研究重点项目: 基于计算的高空间、光谱分辨率成像技术; 上海市科学仪器研发专项 (20142200700)

作者简介: 李春来, 男, 研究员, 博士, 主要从事空间红外与光谱技术方面的研究。

通讯作者: 王建宇, 男, 中国科学院院士, 教授, 博士, 主要从事空间光电技术和系统方面的研究。

through the technologies of fine spectroscopy, high-sensitivity detectors, low-temperature optics and background radiation suppression are the main technical problems to be solved in the development of infrared hyperspectral imagers in the future. Based on the above, the application of infrared hyperspectral imaging in long distance gas detection is overviewed, and its unique advantages are also analysed. Finally, the development direction of infrared hyperspectral remote sensing imaging is depicted.

**Key words:** infrared hyperspectral remote sensing; spectral resolution; instantaneous field of view; sensitivity; gas detection

## 0 引言

物质的红外辐射或吸收光谱由其分子振动产生,可准确反映物质的组成和结构信息,广泛应用于物质识别与定量分析。在地球遥感领域,红外高光谱仪器接收到的辐射能量大部分来自于地表自身热辐射,精细的光谱有利于准确客观地反演地物自身的属性。区别于单波段、双波段或多波段红外成像遥感,热红外高光谱无须事先对待探测的物质设定假设的发射率参数,从这一角度来说,红外高光谱遥感理应成为地球热红外遥感最基础的信息获取手段。受制于仪器开发的难度,在空间红外高光谱领域,主要是用于气象和大气环境监测的基于傅里叶体制的非成像红外高光谱探测仪<sup>[1]</sup>。目前国际上还没有星载红外高光谱成像仪入轨实现对地观测。尽管如此,国内外相关机构从未有放弃红外高光谱成像仪的研制。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)<sup>[2]</sup>。到目前为止,红外高光谱成像仪的发展已有30多年,各种类型的红外高光谱成像仪层出不穷,这些仪器获取的红外高光谱遥感数据在资源勘查<sup>[3]</sup>、地表环境监测<sup>[4-7]</sup>、大气环境监测<sup>[2]</sup>等领域展示了其独特的优

势。仪器是获取高质量的红外高光谱遥感数据的根本,红外高光谱成像遥感的发展已明显表现出了理论先行,传感器发展严重滞后的特点。文中以红外高光谱成像仪的技术发展为主题,首先介绍了国内外红外高光谱成像仪的发展历程,总结了红外高光谱成像传感器的特色和难点,并探讨了可能的解决途径。在此基础上,介绍了红外高光谱成像在气体探测中的机理、模型和部分实例,指出红外高光谱成像技术是未来有望解决大气环境精细监测和工业领域应急管理最有利的手段之一。最后,还展望了红外高光谱成像技术的发展趋势。

## 1 红外高光谱成像传感器的发展

传统的高光谱成像遥感一般指覆盖0.4~2.5 μm的高光谱成像仪,传感器接收的能量主要是地表反射的太阳辐射。红外高光谱则通常覆盖3.0~12.5 μm谱段的高光谱成像仪。不同于0.4~2.5 μm谱段的高光谱成像仪围绕精细分光组件和高性能面阵探测器的发展而开展,红外高光谱成像仪的发展则重点关注如何抑制红外背景辐射。从成像仪的组成来说,抑制红外辐射的低温制冷模块和红外分光模块占据了主要空间和质量。表1和图1分别列出了国内外典型的红外高光谱成像仪的技术指标及照片。

表 1 国内外典型的红外高光谱成像仪参数列表<sup>[2, 8-17]</sup>

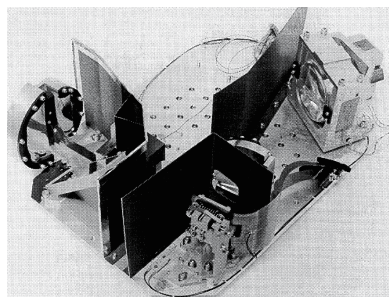
Tab.1 Parameters of domestic and foreign infrared hyperspectral imagers<sup>[2, 8-17]</sup>

Instrument	Year/ Country	Spectral range/ μm	Spectral resolution	Bands	IFOV/ mrad	FOV/ (°)	Sensitivity	Spectral- splitting	Background radiation suppression
SEBASS	1995/USA	MWIR: 2.0-5.2 LWIR: 7.8-13.5	MWIR: 25 nm LWIR: 50 nm	MWIR: 128 LWIR: 128	1.0	7.3	MWIR: 0.008 W·μm <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup> LWIR: 0.012 W·μm <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup>	Spherical prism/conical mirror	Liquid helium refrigeration
AHI	1998/USA	7.5-11.5	125 nm/100 nm	32/256	1.8	13.0	<0.1 K	Flat grating	Cooled linear variable filter/The upgraded version with liquid nitrogen refrigeration

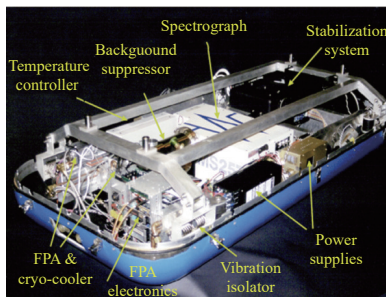
续表 1

Continued Tab.1

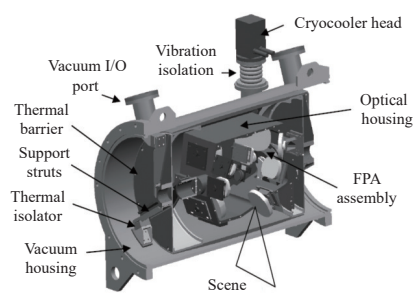
Instrument	Year/ Country	Spectral range/ $\mu\text{m}$	Spectral resolution	Bands	IFOV/ mrad	FOV/ ( $^{\circ}$ )	Sensitivity	Spectral- splitting	Background radiation suppression
LWHIS	2003/USA	8-12.5	35 nm	256/128	0.9	6.5	0.035 K	Flat grating	Cool the whole system with liquid nitrogen refrigeration
Hyper-Cam	2009/Canada	MWIR: 3-5 LWIR: 8-11.8	$<0.25\text{ cm}^{-1}$	256	0.35	$6.4 \times 5.1$	MWIR: $4\text{ nW/cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1}$ LWIR: $20\text{ nW/cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1}$	Fourier transform spectrometer	No refrigeration
MAKO	2010/USA	7.8-13.4	47 nm	128	2	14.7	0.05 K	Concave grating	Cool the spectrometer with liquid helium
MAGI	2011/USA	7.1-12.7	100 nm	32	0.53	$\pm 42$	—	Concave grating	Cool the spectrometer with a refrigerator
Sieleters	2011/France	MWIR: 3-5.3 LWIR: 8-11.5	MWIR: $11\text{ cm}^{-1}$ LWIR: $5\text{ cm}^{-1}$	—	0.25	—	—	Fourier transform spectrometer	Cool the spectrometer with liquid nitrogen
AISA-OWL	Finland	7.7-12.3	100 nm	84	0.084	32.3	0.2 K	Prism-Grating-Prism	Filter suppresses background radiation
HyTES	2016/USA	7.5-12.0	18 nm	256	1.7	50	0.2 K	Concave grating	Cool the spectrometer with a refrigerator
MAKO Updated	2016/USA	7.8-13.4	44 nm	128	2	$\pm 56.4$	$6\text{ mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$	Concave grating	Cool the spectrometer with liquid nitrogen
ATHIS	2016/China	8-12.5	38 nm	155	1	40	0.17 K	Flat grating	Cool the spectrometer with a refrigerator
SIHIS	2020/China	MWIR: 3-5 LWIR: 8-12.5	MWIR: 30 nm LWIR: 50 nm	MWIR: 167 LWIR: 163	1	14	MWIR: 0.05 K LWIR: 0.15 K	Flat grating	Cool the spectrometer with a refrigerator



(a) SEBASS



(b) AHI



(c) LWHIS

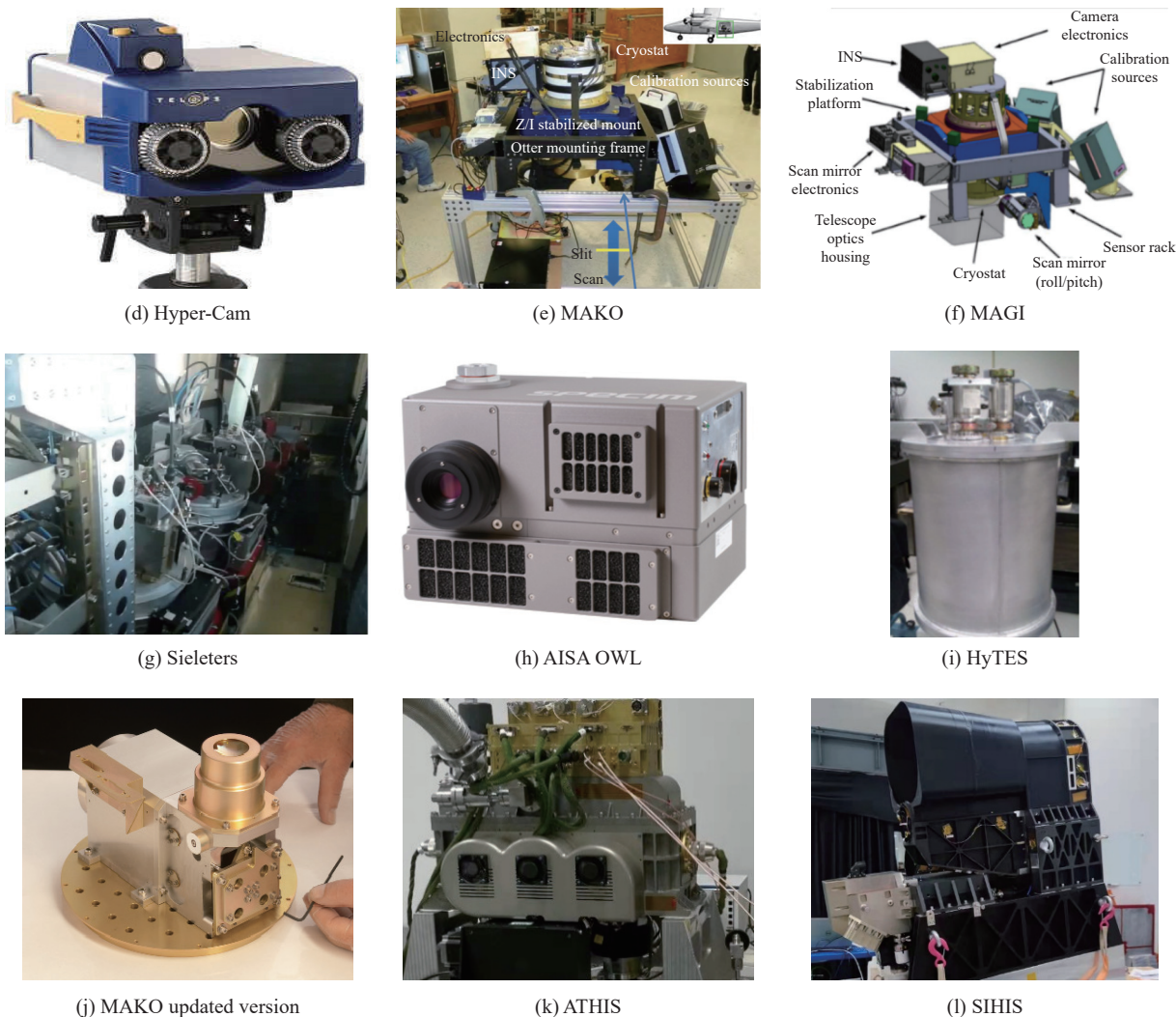


图 1 国内外主要红外高光谱成像仪照片

Fig.1 Photos of domestic and foreign infrared hyperspectral imagers

1.1 国外的典型传感器

在高光谱成像仪传感器的发展史上,早期的仪器主要集中于欧美国家。1986年,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)下属的喷气动力实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)成功研制经典仪器机载可见光近红外成像光谱(Airborne Visible Infra-Red Imaging Spectrometer, AVIRIS),相比传统多光谱的遥感,AVIRIS在光谱解析方面表现出了巨大优势,推动了遥感定量化的发展。随着实际应用的深入,地质勘查科学家们也逐渐意识到仅依靠0.4~2.5 μm的反射光谱在解析全部地表矿物种类方面仍有提升空间,红外高光谱成像仪便应运而生。

(1) SEBASS<sup>[2]</sup>

增强型宽波段阵列光谱仪(Spatially Enhanced

Broadband Array Spectrograph System, SEBASS)是国外最早公开报道的红外高光谱成像仪,由美国宇航公司(Aerospace Corporation)研制成功<sup>[5]</sup>。该红外高光谱成像仪于1995年首次开展了航空遥感实验,SEBASS光谱分辨率为46 nm,在7.6~13.5 μm范围内共128个波段。它采用棱镜分光,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。

(2) AHI<sup>[8]</sup>

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)<sup>[6]</sup>。为了抑制仪器背景辐射,AHI在探测器前面放置了线性可变滤波器,用于降低进入探测器的仪器背景辐射,并对线性可变滤波器进

行制冷。AHI 采用平面光栅分光,并用液氮制冷光学部件,采用斯特林制冷对探测器制冷。整机灵敏度达到了 0.1 K 以下,取得了良好的成像性能。

### (3) LWHIS<sup>[9]</sup>

长波高光谱成像仪 (Long-wave Hyperspectral Imaging spectrometer, LWHIS) 由美国诺格 (Northrop Grumman) 公司于 2003 年研制<sup>[7]</sup>。为了抑制仪器自身背景辐射, LWHIS 将光机系统制冷到 100 K 以下,灵敏度可达 0.035 K。LWHIS 采用平面光栅分光,光谱分辨率为 35 nm,为提高信噪比可将 256 波合成为 128 波段。LWHIS 还装配有实时定标器,定标器的绝对辐射定标精度优于 6%。

### (4) Hyper-Cam<sup>[10]</sup>

Hyper-Cam 是由加拿大 Telops 公司推出的一款商用傅里叶变换热红外高光谱成像仪, Hyper-Cam 具有两个型号,为 Hyper-Cam MW(3~5  $\mu\text{m}$ ) 和 Hyper-Cam LW(7.7~11.8  $\mu\text{m}$ ),最新型号长波红外成像光谱仪 HYPER-CAM XLW 光谱范围为 7.35~13.5  $\mu\text{m}$ 。

### (5) MAKO<sup>[11]</sup>

MAKO 是在 SEBASS 的基础上,美国宇航公司研制的又一款高性能红外高光谱成像仪,于 2010 年研制成功。MAKO 的光谱范围为 7.8~13.4  $\mu\text{m}$ ,波段数为 128 个。MAKO 采用凹面光栅分光,光谱仪部分为制冷 Dyson 光谱仪。该仪器设计了一套液氮制冷系统用于抑制光机仪器的背景辐射,光谱仪整体制冷到 10 K 左右,整机灵敏度可达 0.05 K。

### (6) MAGI<sup>[12]</sup>

矿物与气体识别仪 (Mineral and Gas Identifier, MAGI) 为美国宇航公司为适应星载红外高光谱成像仪需求于 2011 年研制的原型样机。MAGI 实际上为 MAKO 的简化版,它只有 32 个波段,光谱分辨率为 100 nm,总视场角比 MAKO 提升了很多,从 14.7° 提升至  $\pm 42^\circ$ 。制冷方式由液氮制冷系统改为用斯特林制冷器对探测器和光谱仪制冷。

### (7) Sieleters<sup>[13]</sup>

Sieleters 是 2011 年法国国防采购局委托法国国家航天局 Onera 实验室研制的包括中波 (3~5.3  $\mu\text{m}$ ) 和长波 (8~11.5  $\mu\text{m}$ ) 的红外成像光谱仪。Sieleters 使用傅里叶变换方式,采用液氮制冷,光谱分辨率在中波红外谱段,优于 13  $\text{cm}^{-1}$ ,在长波红外谱段优于 6  $\text{cm}^{-1}$ 。

在具体的应用方面关于该仪器的报道不多。

### (8) AISA OWL

AISA OWL 是芬兰 Specim 公司推出的一款商用红外高光谱成像仪,在 7.7~12.5  $\mu\text{m}$  光谱范围内有 96 个波段,光谱分辨率达到 100 nm。AISA OWL 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实现,并在芯片上增加了背景监视校正功能。AISA OWL 的另一个特点是质量轻,仅有 13.1 kg。这也是为了适应机载需求而使用滤光片抑制背景辐射的结果。为适应无人机遥感的需求,Specim 公司在 AISA OWL 基础上又推出了轻量版的基于非制冷探测器的热红外高光谱成像仪 LWIR HS。其质量为 3.1 kg,可搭载于普通无人机上,光谱采样间隔 100 nm,光谱分辨率为 400 nm,共有 44 波段。LWIR HS 虽然质量较小,但是器灵敏度下降较大,仅为 1 K。

### (9) HyTES<sup>[14]</sup>

高光谱热辐射光谱仪 (Hyperspectral Thermal Emission Spectrometer, HyTES) 是美国 JPL 实验室于 2016 年研制成功的经典仪器,该仪器采用了光谱仪制冷 (含狭缝和探测器) 的背景抑制方案,制冷温度在 40 K 附近,望远镜则设计为常温。这种方案的优势在于可以将需要制冷的光谱仪设计得非常精巧,从而降低仪器的体积和复杂度。HyTES 采用了先进的量子阱探测器,在响应的非均匀性方面性能优异。HyTES 几乎代表了红外光电传感器研制的最高水平,其技术难度甚至超过了同期的大部分空间光电系统,在应用方面 HyTES 取得了较大成绩,特别是在工业污染气体排放领域展现了独特优势。HyTES 也是支持美国红外高光谱成像仪计划 (Hyperspectral Infrared Imager, HypIRI) 的机载试验样机。

### (10) MAKO 2016<sup>[15]</sup>

2016 年,美国宇航公司对 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 FPA 热控循环,使温控误差达到 1 mK。通过摆扫机构的优化设计,MAKO 升级版可实现  $\pm 56.4^\circ$  的观测视场,能够提高数据获取效率。

## 1.2 国内的典型传感器

我国红外高光谱遥感的发展要晚于欧美国家。

从“十五”计划开始, 国家科技部开始支持热红外高光谱成像技术研究。“十二五”期间, 在科技部的支持下, 中国科学院上海技术物理研究所研制了我国第一台热红外高光谱成像仪样机<sup>[18]</sup>。在“高分”专项航空全谱段多模态成像光谱仪项目的支持下, 项目组进一步完善了热红外高光谱成像样机的工程化水平, 形成了机载热红外高光谱成像系统 (Airborne Thermal-Infrared Hyper-spectral Imaging System, ATHIS)<sup>[16-17, 19]</sup>。在原有技术体系基础上, 2020 年, 项目组成功研制了空间高分辨红外高光谱成像仪 (Space-borne Infrared Hyper-spectral Imaging System, SIHIS) 的研制, SIHIS 覆盖了包括中波 (3~5  $\mu\text{m}$ ) 和长波 (8~12.5  $\mu\text{m}$ ) 的红外区主要大气窗口。

### (1) 机载热红外高光谱成像系统 ATHIS<sup>[16-17]</sup>

ATHIS 前身为 2015 年研制的原理样机, 2015 年 6 月成功实现航空成像<sup>[20]</sup>。于 2016 年研制成功, 并在海南省东方市、河北雄安新区、浙江省东阳市横店镇等多个区域开展了航空遥感应用实验。ATHIS 仪器设计为三台指标相同的热红外高光谱相机以视场外拼接方式实现 40° 观测视场, 其单台相机的光学视场在 14° 左右。在分光技术路线的选择上采用了平面闪耀光栅分光, 为了减小光谱仪体积, 设计为 RT 光谱仪结构。三台同样设计的 RT 光谱仪共同放置在一个低温 100 K 制冷的冷箱内。ATHIS 设计有机上定标装置, 用于飞行过程中的仪器的辐射定标。ATHIS 采用探测器/光谱仪斯特林制冷方案, 波段平均灵敏度为 0.17 K。

### (2) 空间高分辨红外高光谱成像仪 SIHIS

SIHIS 在光学设计、结构设计、背景抑制方案和探测器上均与 ATHIS 保持一致, 主要是采用了大口径离轴三反式望远镜, 结合视场拼接技术实现了空间分辨率 30 m@708 km, 观测幅宽 60 km 的综合指标。SIHIS 将谱段覆盖拓展到了中波红外谱段, 共包括 328 个成像波段。在中波谱段, 光谱分辨率设计达到 30 nm, 光谱采样间隔为 14 nm, 灵敏度实测平均达到 0.05 K; 在长波谱段, 光谱分辨率设计达到 50 nm, 光谱采样间隔为 29 nm, 灵敏度实测平均达到 0.15 K。SIHIS 的总视场角为 4.84°, 未来有望开展空间演示验证。

## 1.3 技术发展趋势

对于高光谱成像仪器而言, 光谱分辨率、空间分

辨率、辐射分辨率 (也称灵敏度) 集中体现了仪器在光谱、空间、辐射三方面的性能, 这三个技术指标直接决定了高光谱仪器的最终应用效果。对传感器的系统设计而言, 也往往是结合具体的应用场景对这三个指标的综合权衡过程。

从光谱分辨率来看, 已有的大部分红外高光谱成像仪光谱分辨率均在 50 nm 附近, 该指标在地矿领域可以满足矿物精确解析的需求。当需要开展气体探测时, 光谱分辨率一般要优于 20 nm, 并且光谱绝对精度要优于 1 nm。

从空间分辨率来看, 机载设备的空间分辨率一般在毫弧度级, 星载仪器方面, 太阳同步星载的空间分辨率一般在 10~50 m 分辨率量级。星载仪器的空间分辨率较高, 一般需要较大口径的红外望远镜, 这种情况下, 只能采用光谱仪制冷的背景辐射抑制方案。和空间分辨率相关的另外一个指标是仪器观测视场, 为了保证高作业效率 (即幅宽), 星载仪器都要求有较大的总视场角。从表 1 可以看出, 针对这一问题, 美国的星载样机 MAGI 设计有摆扫机构增大光学总视场角, SIHIS 则是通过三个视场拼接的方式来增大总视场。

从辐射分辨率来看, 对于光栅分光的仪器来说, 采用液氮或液氦制冷的仪器辐射分辨率一般都优于 0.1 K, 采用斯特林制冷的仪器一般在 0.1~0.2 K 之间, 采用傅里叶分光技术体制的仪器的辐射灵敏度一般都好于光栅分光体制的仪器。在成像波段方面, 中波红外的辐射分辨率一般都优于长波波段。这也说明长波的红外高光谱成像仪研制难度更大, 无论是当前流行的 MCT 探测器, 还是新兴的量子阱探测器和二类超晶格探测器, 背景辐射都是影响仪器辐射分辨率的主要原因。除了继续探索降低背景辐射的技术之外, 超低暗电流的新型探测器发展是红外高光谱成像仪发展的驱动之一。

总体来说, 目前已有的红外高光谱成像技术, 其光谱分辨率和空间分辨率已基本能满足地矿领域的应用需求, 但在光谱分辨率要求更高的气体探测领域仍然有较大应用需求驱动。在民用领域, 目前发展的基于无人机平台的非制冷探测器型红外高光谱成像仪, 辐射分辨率往往只能到 1 K 量级, 在很多领域都难以应用。

综上所述,红外高光谱成像仪的发展应继续集中在突破红外精细分光、低暗电流高灵敏度探测器、低温光学与背景辐射抑制技术,研制出体积质量更小,光谱分辨率、空间分辨率、辐射分辨率更加优异的传感器。

## 2 红外高光谱成像气体探测

在几乎所有的红外高光谱成像技术的有关研制和应用报道中,地质勘探和大气环境监测都是必不可少的需求。从 HyTES 仪器的实际应用效果来看,红外高光谱成像可以在远距离、大范围的约束下实现对气体的种类、形态、浓度等进行综合探测,尤其是具备几何形态的成像能力,相比傅里叶红外光谱,在精细环境监测领域具有独特优势。

### 2.1 红外高光谱气体探测机理

当红外波段的光线穿透气体时,如果入射红外光由频率决定的光子能量与气体分子中两能级的能量之差相等时,气体分子将吸收光子能量,从初始能级跃迁到能量更高的能级,从而使得入射红外光的特定频率成份被吸收,也使得不同成份的气体拥有不同的气体吸收光谱。几乎所有的气体都有这样的“指纹”光谱谱线,这也是光学手段开展气体成份识别的基本物理原理,图 2 给出了不同气体成份对应的红外吸收光谱谱线。通常,3~14 μm 的中长波红外是气体分子跃迁的“基频”谱线段,相对位于可见光或者短波谱段的“合频”、“倍频”谱线段,其吸收深度要比前者深 1~3 个量级,利用该谱段开展气体探测具有天然优势。一般而言,利用 3~14 μm 开展气体成份定量探测需要的光谱分辨率应当优于 λ/500 甚至更高。

除了气体的“指纹”光谱谱线位于中长波外,由于波长较长,在辐射传输过程中,大气对其辐射的散射

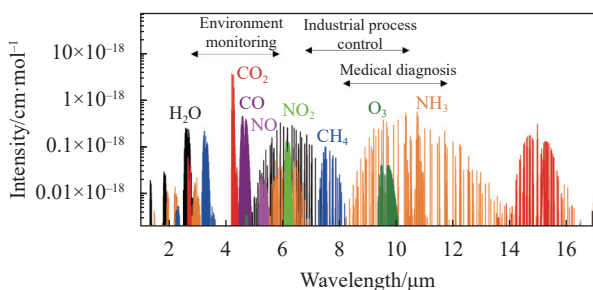


图 2 不同气体红外吸收光谱<sup>[21]</sup>

Fig.2 Infrared absorption spectra of different gases<sup>[21]</sup>

作用相对于紫外可见等波段影响较小,辐射传输过程中的环境影响参量减少,有利于提高反演气体浓度的精准度。

### 2.2 气体烟羽检测与浓度反演

理想的红外气体探测过程以朗伯定律作为基本定律,只要背景和气体存在温差,就可实现探测。如图 3 和 4 所示,红外高光谱探测气体的方式主要有空基和地基两种。空基探测一般是直视或斜视,地基探测一般是平观测。无论采用哪种探测方式,它们的辐射传输过程都基本相同。文中以长波红外为例介绍气体探测所涉及的辐射传输过程,这里为了区别于常规大气,特别用污染气体特指在探测路径中希望探测的气体成份。在背景和传感器连线之间存在额外的污染气体时,热红外辐射传输就会受到气体吸收和辐射影响,在入瞳辐射亮度中累计了污染气体的吸收效应。在探测元探测路径上存在有污染气体的像元的入瞳辐射亮度可以表示为<sup>[22]</sup>:

$$L_{gas}(\lambda_i) = L_{g, gas}(\lambda_i)t_1(\lambda_i)t_2(\lambda_i)\tau_{gas}(\lambda_i) + L_p(\lambda_i) + L_{p, gas}(\lambda_i)t_2(\lambda_i) \quad (1)$$

式中:  $L_{gas}(\lambda_i)$  为路径存在气体污染像元的入瞳辐射亮度;  $L_{g, gas}(\lambda_i)$  为受气体污染情况下的离地辐射亮度;

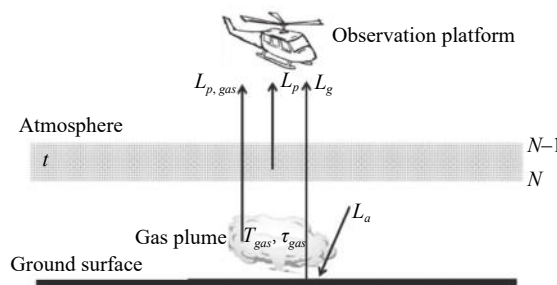


图 3 空基平台气体烟羽探测示意图

Fig.3 Schematic map of airborne detection of gas plume

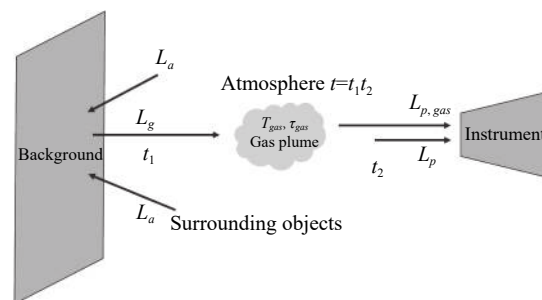


图 4 地基平台气体烟羽探测示意图

Fig.4 Schematic map of ground detection of gas plume

$\tau_{gas}(\lambda_i)$ 为污染气体的透过率;  $t_1(\lambda_i)$ 为背景至污染气体之间的大气透过率;  $t_2(\lambda_i)$ 为污染气体至传感器之间的大气透过率;  $L_{p,gas}(\lambda_i)$ 为污染气体的上行辐射;  $L_p(\lambda_i)$ 为大气程辐射;  $t(\lambda_i)$ 为总大气路径透过率。根据基尔霍夫定律和朗伯比定律, 最终可以表示为:

$$L_{gas}(\lambda_i) = [1 - \tau_{gas}(\lambda_i)] [B_{gas}(\lambda_i, T_{gas}) - L_{g,gas}(\lambda_i)t_1(\lambda_i)] \cdot t_2(\lambda_i) + L_{g,gas}(\lambda_i)t_1(\lambda_i)t_2(\lambda_i) + L_p(\lambda_i) \quad (2)$$

式中:  $T_{gas}$ 为气体的温度;  $B_{gas}(\lambda_i, T_{gas})$ 为温度  $T_{gas}$ 对应的黑体辐射亮度。对上式进行线性化后, 可以得到

$$L_{gas}(\lambda_i) = n_{gas}a_{gas}(\lambda_i)t_2(\lambda_i)[B_{gas}(\lambda_i, T_{gas}) - L_{g,gas}(\lambda_i)t_1(\lambda_i)] + t_2(\lambda_i)t_1(\lambda_i)L_{g,gas}(\lambda_i) + L_p(\lambda_i) \quad (3)$$

式中:  $n_{gas}$ 为污染气体的柱密度;  $a_{gas}(\lambda_i)$ 为污染气体的吸收系数。这样, 辐射传输方程可以简化为一个线性组合<sup>[23]</sup>:

$$\vec{x} = n_{gas}\vec{s} + \vec{v} \quad (4)$$

式中:  $\vec{x}, \vec{s}, \vec{v}$ 分别为光谱向量。

如图 5 所示, 红外高光谱技术气体探测流程主要包括数据获取、数据预处理、气体烟羽检测、气体浓度反演这几个过程。其中, 红外高光谱成像是开展气体探测的基础, 气体烟羽的检测和气体浓度的反演则是气体探测的关键, 国内外专家学者也投入了大量的精力对该问题进行了深入研究。

从辐射传输可以看出, 气体像元光谱实际上是背景辐射光谱和气体辐射光谱的有机线性组合。从这一角度来说, 可以基于混合像元分解的思想来提取气

体烟羽<sup>[24-26]</sup>。在混合像元分解过程中, 可以采用气体吸收光谱、黑体辐射光谱、大气吸收光谱等作为端元进行解混。通过判断气体吸收光谱的丰度, 确定是否为气体烟羽像元。这种方法可以从辐射亮度光谱入手直接进行解混; 也可以在对辐射亮度进行大气校正和温度发射率分离后, 从发射率光谱入手进行解混, 物理意义比较明确。存在的不足是对于极端情况下的背景发射率光谱变化没有过多的考虑, 对于大多数背景出射辐射光谱接近黑/灰体的情况效果较好。

一般情况下, 气体像元只占整幅图像中的少数像元。气体烟羽的检测也可以认为是一种异常检测, 一些异常检测方法也常用于气体烟羽检测。这些异常检测方法主要可以分为三类, 一类是基于最大似然估计的方法, 主要有光谱匹配滤波<sup>[27-30]</sup>、聚类增强匹配滤波<sup>[31]</sup>、非线性贝叶斯算法<sup>[32]</sup>、自适应匹配子空间检测<sup>[33]</sup>、自适应余弦估计<sup>[34]</sup>、对数变化匹配滤波<sup>[35]</sup>等; 另一类是基于低维空间表达的方法, 主要有主成分分析<sup>[28]</sup>、低秩表达<sup>[36]</sup>、基于流形空间气体检测<sup>[37]</sup>等。异常检测的基本原理是估计出准确的背景信号实现异常检测, 这类方法在背景相对均匀时可以取得很好的检测效果, 如均匀的天空背景。对于复杂或多变的背景, 其检测精度会有所降低; 第三类是超像元检测方法, 主要有二叉树层次分析<sup>[38]</sup>。

除了基于混合像元分解和异常检测这两种思想实现气体烟羽检测之外, 一些图像分类方法也用于气体烟羽检测。如分裂层次聚类算法<sup>[39]</sup>、支持向量机分类<sup>[40]</sup>。基于图像的分类方法主要是基于背景和气体烟羽在图像空间特征和光谱特征上的区别实现气体烟羽的检测。尤其是监督分类中的机器学习图像分类算法, 可以充分“学习”气体烟羽扩散过程中的特有图像特征和气体烟羽的窄带吸收光谱特征获得更好的检测效果。

在气体烟羽提取之后, 所要进行的则是气体浓度的反演。由于仪器测量得到的信号仅包含了辐射传输路径上的吸收信息, 因此红外高光谱数据反演得到的气体浓度是辐射传输路径上的柱浓度。气体浓度反演具有明确的遥感物理模型支持, 主要的工作是背景辐射亮度光谱、大气参数和目标气体温度的确定。这些参数的确定, 一方面可以充分发挥红外高光谱的光谱分辨率高、测量数多的优势, 适度运用先验信息,

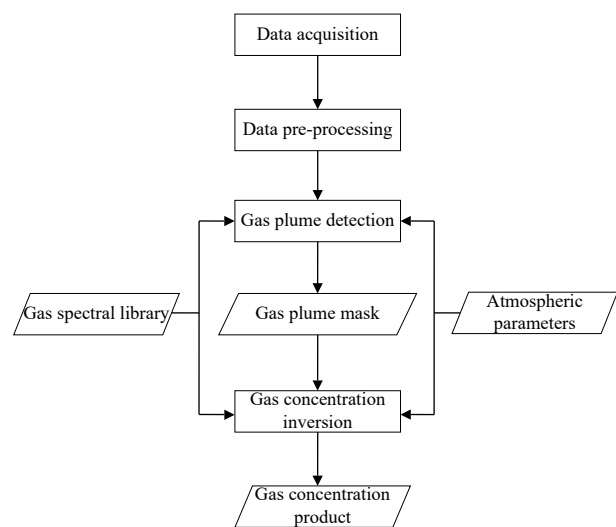


图 5 红外高光谱技术气体探测流程

Fig.5 Process of gas detection using infrared hyperspectral technology



尽可能地以测量数据为基础反演更多的参数。在这方面非线性贝叶斯是一个很好的技术手段,另一方面就是借助可靠的气象预报或测量数据及大气辐射传输软件实现更准确的大气参数估算。

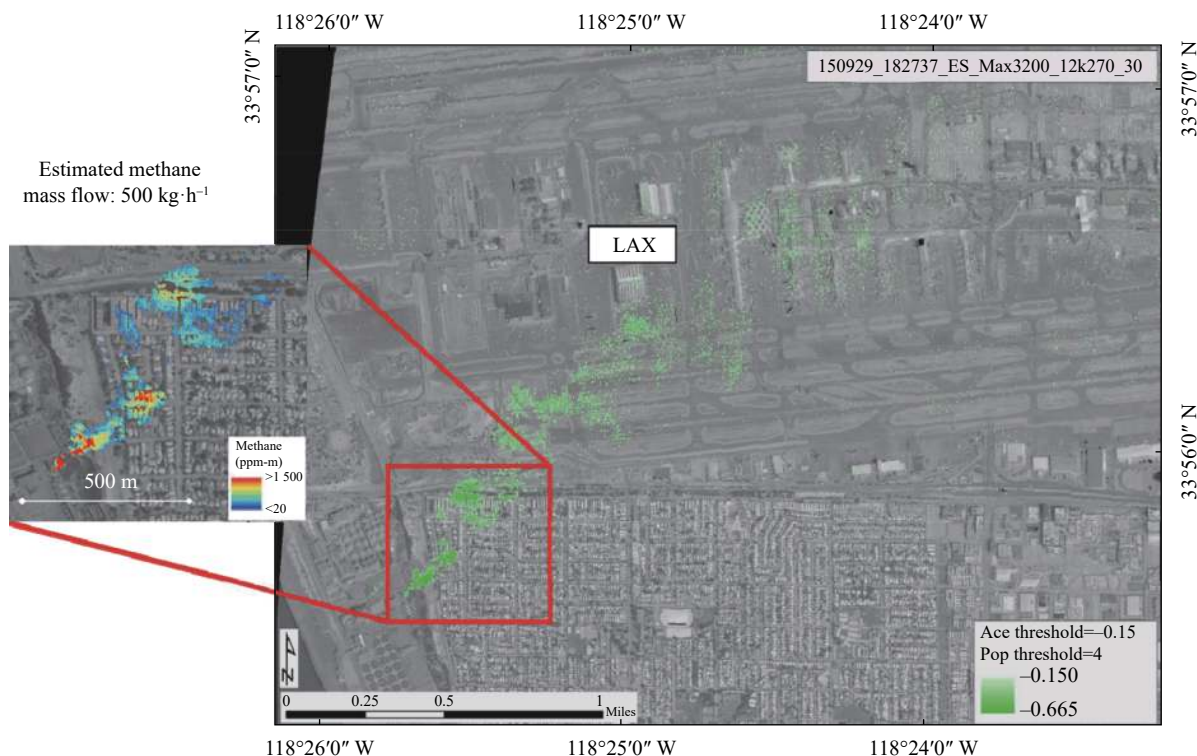
除了气体烟羽检测和气体浓度反演技术方法的研究之外,具有参考价值的气体光谱库的建立和外场自由扩散场景下的气体浓度反演精度验证也是重要的研究课题。目前,比较全面的气体光谱库主要以国外的为主,如美国国家标准委员会的 Chemistry Web-Book、哈弗大学的 HITRAN、Nicolet 公司的 FT-IR Vapor Phase Spectral Library、美国西北太平洋国家实验室的 Gas-phase Database、法国动态气象实验室的 GEISA。国内还未见具有相当规模的气体光谱库,气体浓度反演验证方面的研究则相对较少。主要是 2021 年 Hirsch 等所提出的采用气体扩散模型模拟得到的气体浓度分布数据验证反演的气体柱浓度<sup>[41]</sup>,这或许为红外高光谱反演气体浓度验证和数据同化研究打开了一条新的思路。

### 2.3 红外高光谱成像气体探测效果

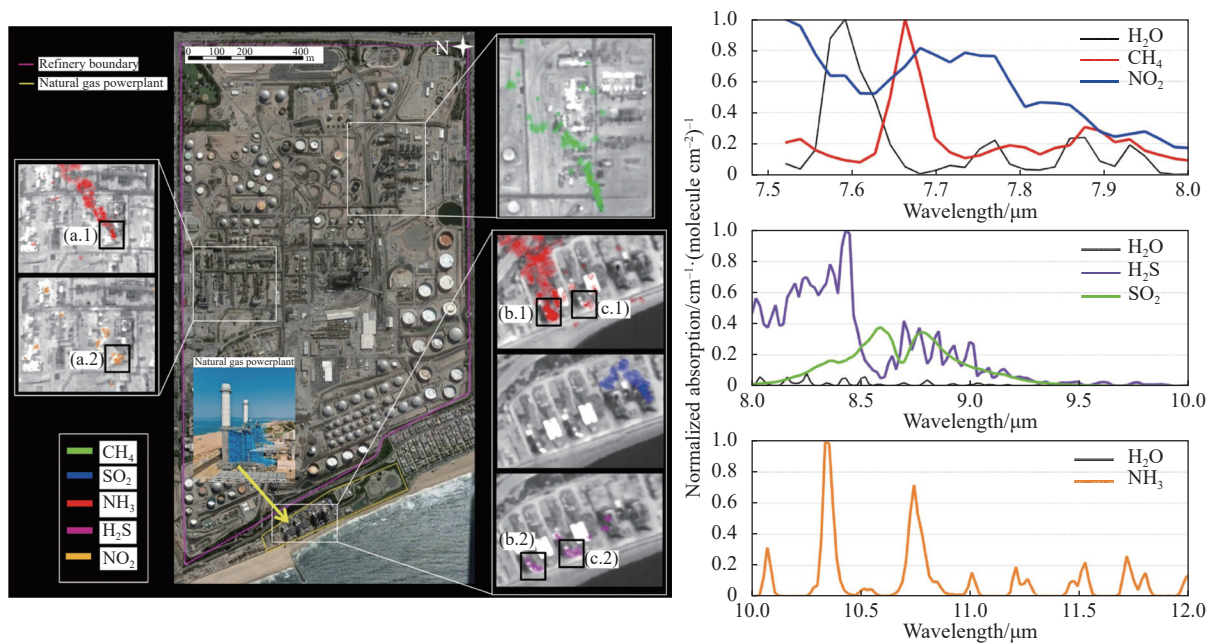
从理论上来说,用于气体探测的红外高光谱成像仪和用于对地观测的仪器在基本原理上并没有很大

的区别。主要区别在于被探测气体的状态一般处于动态变化中,要求仪器具有高时间分辨率,甚至是视频级别的。气体探测场景既有自然界中偶然发生的火山爆发喷出的二氧化硫(SO<sub>2</sub>)气体<sup>[42-43]</sup>,也有人为设施排放的污染气体<sup>[44-45]</sup>,可谓多种多样。无论从理论上来说,还是从测试结果来说,红外高光谱都展示了其在气体探测方面的优势。不过,同样受限于仪器技术、成本等因素的影响,市场化的仪器并不多,真正专用于气体探测的产品级红外高光谱成像仪更是有待于技术的提升和成熟。目前,比较成熟的主要是红外高光谱成像技术的简化版——红外多光谱成像技术产品,如美国的 Rebellion GCI(Gas Cloud Imaging),其时间分辨率可以达到 15 Hz,已接近视频级。红外高光谱成像仪则更多的是用于实验测试研究。

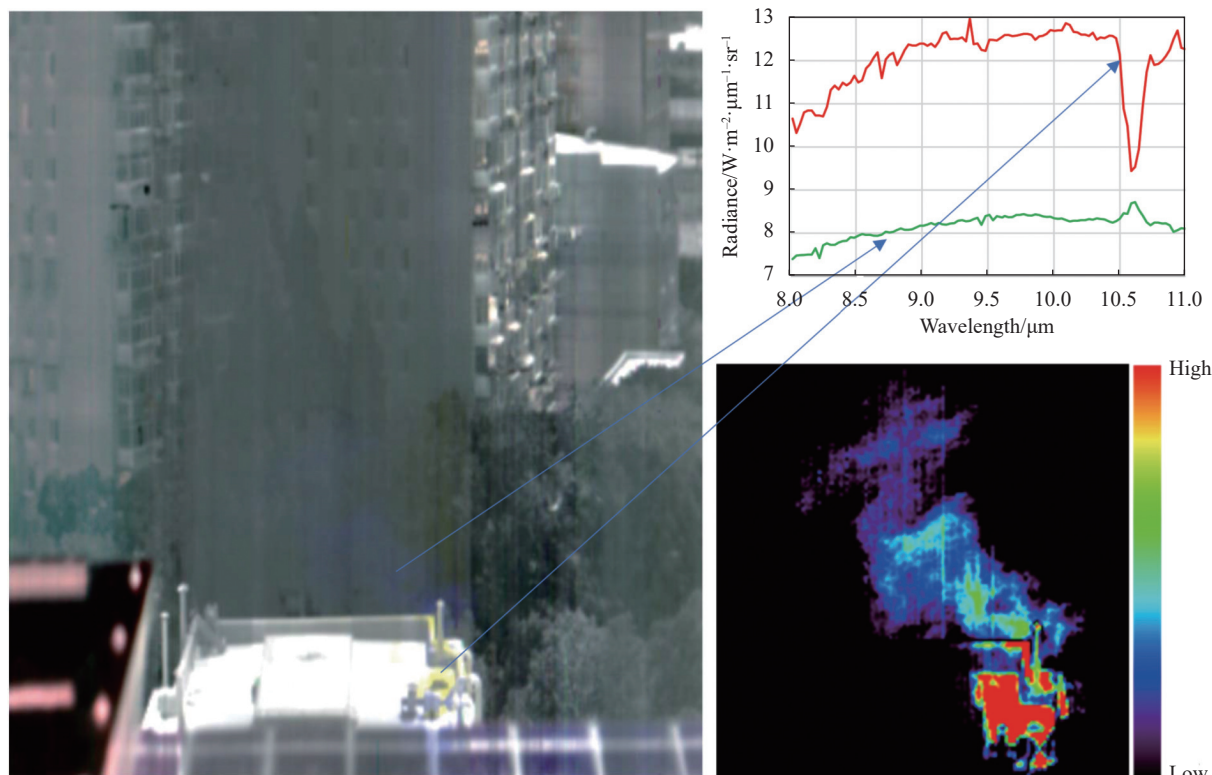
图 6 展示了 MAKO、HyTES 和 ATHIS 在气体探测方面的应用案例。从图中可以看出,通过对红外高光谱成像数据的分析,既可以清晰地看到污染气体扩散的空间几何轮廓,也可以通过获得的光谱曲线反演出气体的种类,以及通过强度反演出气体的浓度。图 6(b)和 (c)中的气体光谱展现出了高光谱成像技术对气体吸收光谱特征的解析能力。图 6(c)是利用课题组研



(a) MAKO update version<sup>[11]</sup>



(b) HyTES<sup>[22]</sup>



(c) ATHIS

图 6 红外高光谱成像仪气体探测的实际案例

Fig.6 Actual cases of gas detection with infrared hyperspectral imager

制的机载热红外高光谱成像仪对六氟化硫 (SF<sub>6</sub>) 的释放进行探测, 探测距离约 200 m, 当 SF<sub>6</sub> 气体从气罐中放出后, 基于得到的红外高光谱数据立方体数据分析, 可以看到 SF<sub>6</sub> 气体从低于背景温度而表现出的吸收光谱形状到温度升高后表现出的发射光谱形状的

变化趋势。这种解析能力与传统单波段、多光谱红外成像遥感相比, 除了大大扩展了可探测识别的气体种类的数量, 也一定程度上使检测污染气体的像元处理方式变得简单, 从而使得反演得到的气体浓度准确度大大提高。

### 3 结束语

尽管存在诸多问题,经过 20 多年的发展,红外高光谱成像技术已取得了重要成果。行百里者半九十,作为一种通用的高技术遥感手段,在未实现星载传感器的全球定量观测前都不能算是质的飞越。随着应用需求的推进,特别是目前我国“双碳”计划的深入实施,对大气环境的精细监测需求越来越迫切,未来红外高光谱成像技术的发展将由技术推进型逐步迈向应用推进型。一方面,突破红外精细分光、低暗电流红外面阵探测器、深低温光学系统等核心技术,研制出光谱分辨率达到甚至超过  $\lambda/500$  的星载高性能遥感仪器,获取可用的星载高光谱红外遥感数据。另一方面,继续深挖红外高光谱遥感数据处理<sup>[1,46]</sup>,拓展应用模式,深入研究红外高光谱信息与待探测物质成分的深入内在物理联系,提升探测准确度。在大数据分析技术飞速发展的今天,红外高光谱成像技术将大有可为。

#### 参考文献:

- [1] Wu Hua, Li Xiujuan, Li Zhaoliang, et al. Hyperspectral thermal infrared remote sensing: Current status and perspectives [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(8): 24. (in Chinese)
- [2] Hackwell J A, Warren D W, Bongiovi R P, et al. LWIR/MWIR imaging hyperspectral sensor for airborne and ground-based remote sensing [C]//Imaging spectrometry II. International Society for Optics and Photonics, 1996, 2819: 102-107.
- [3] Dai Jingjing, Zhao Longxian, Jiang Qi, et al. Review of thermal-infrared spectroscopy applied in geological ore exploration [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(8): 2520-2533. (in Chinese)
- [4] Li Z L, Wu H, Wang N, et al. Land surface emissivity retrieval from satellite data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(9-10): 3084-3127.
- [5] Raissouni N, Sobrino J A. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(2): 353-366.
- [6] Guo G, Liu B, Liu C. Thermal infrared spectral characteristics of bunker fuel oil to determine oil-film thickness and API [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(2): 135.
- [7] Vaughan R G, Calvin W M, Taranik J V. SEBASS hyperspectral thermal infrared data: Surface emissivity measurement and mineral mapping [J]. *Remote Sensing Environment*, 2003, 85: 48-63.
- [8] Lucey P G, Williams T J, Mignard M, et al. AHI: an airborne long-wave infrared hyperspectral imager [C]//Airborne Reconnaissance XXII. International Society for Optics and Photonics, 1998, 3431: 36-43.
- [9] Shepanski J, Sandor-Leahy S. The NGST long wave hyperspectral imaging spectrometer: sensor hardware and data processing [C]//Infrared Technology and Applications XXXII. International Society for Optics and Photonics, 2006, 6206: 62062B.
- [10] Puckrin E, Turcotte C S, Lahaie P, et al. Airborne measurements in the infrared using FTIR-based imaging hyperspectral sensors [C]//Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications III. International Society for Optics and Photonics, 2009, 7482: 74820S.
- [11] Warren D W, Boucher R H, Gutierrez D J, et al. MAKO: a high-performance, airborne imaging spectrometer for the long-wave infrared [C]//Imaging Spectrometry XV. International Society for Optics and Photonics, 2010, 7812: 78120N.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Hook S J, Johnson W R, Abrams M J. NASA's Hyperspectral Thermal Emission Spectrometer (HyTES) [M]//Thermal Infrared Remote Sensing: Sensors, Methods, Applications. Dordrecht, Holland: Springer, 2013: 93-115.
- [15] Li Chunlai, Liu Chengyu, Jin Jian, et al. Spectral measurement of minerals and gases based on airborne thermal-infrared hyperspectral imaging system [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2020, 39(6): 767-777. (in Chinese)
- [16] Liu C, Xu R, Xie F, et al. New Airborne thermal-infrared hyperspectral imager system: Initial validation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 4149-4165.
- [17] Hall J L, Boucher R H, Buckland K N. Mako airborne thermal infrared imaging spectrometer: performance update [C]//Imaging Spectrometry XXI. International Society for Optics and Photonics. 2016, 9976: 997604.
- [18] The first airborne thermal infrared hyperspectral imager in China

- has been successfully developed [J]. *Infrared*, 2016, 37(5): 50. (in Chinese)
- [19] 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.
- [20] Wang Jianyu, Li Chunlai, Lv Gang, et al. The calibration of an infrared hyperspectral imager and its flight test validation in laboratory [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, 36(1): 69-74. (in Chinese)
- [21] Popa D, Udrea F. Towards integrated mid-infrared gas sensors [J]. *Sensors*, 2019, 19(9): 2076.
- [22] Hulley G C, Duren R M, Hopkins F M, et al. High spatial resolution imaging of methane and other trace gases with the airborne Hyperspectral Thermal Emission Spectrometer (HyTES) [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9: 2393-2408.
- [23] Manolakis D, Pieper M, Truslow E, et al. Longwave infrared hyperspectral imaging: Principles, progress, and challenges [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2019, 7(2): 72-100.
- [24] Harsanyi J C, Chang C I. Hyperspectral image classification and dimensionality reduction: An orthogonal subspace projection approach [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(4): 779-785.
- [25] Pogorzala D R, Messinger D W, Salvaggio C, et al. Gas plume species identification by regression analyses [C]//Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery X. SPIE, 2004, 5425: 583-591.
- [26] Lee J H, Yu H G, Park D J, et al. Characterization of hazardous gases using an infrared hyperspectral imaging system [J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2015, 43(4): 469-484.
- [27] Sabbah S, Harig R, Rusch P, et al. Remote sensing of gases by hyperspectral imaging: system performance and measurements [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(11): 111717.
- [28] Williams D J, Feldman B L, Williams T J, et al. Detection and identification of toxic air pollutants using airborne LWIR hyperspectral imaging [C]//Multispectral and Hyperspectral Remote Sensing Instruments and Applications II. International Society for Optics and Photonics, 2005, 5655: 134-141.
- [29] Scafutto R D P M, Souza Filho C R, Riley D N, et al. Evaluation of thermal infrared hyperspectral imagery for the detection of onshore methane plumes: Significance for hydrocarbon exploration and monitoring [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 64: 311-325.
- [30] Scafutto R D P M, Souza Filho C R. Detection of heavy hydrocarbon plumes (Ethane, propane and Butane) using airborne longwave (7.6–13.5  $\mu\text{m}$ ) infrared hyperspectral data [J]. *Fuel*, 2019, 242: 863-870.
- [31] Funk C C, Theiler J, Roberts D A, et al. Clustering to improve matched filter detection of weak gas plumes in hyperspectral thermal imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(7): 1410-1420.
- [32] Patrick H, Christian P, Jeff H, et al. Nonlinear Bayesian algorithms for gas plume detection and estimation from hyperspectral thermal image data [J]. *Sensors*, 2007, 7(6): 905-920.
- [33] Broadwater J B, Spisz T S, Carr A K. Detection of gas plumes in cluttered environments using long-wave infrared hyperspectral sensors [C]//Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing IX. SPIE, 2008, 6954: 193-204.
- [34] Pieper M L, Manolakis D, Lockwood R, et al. Hyperspectral detection and discrimination using the ACE algorithm [C]//Imaging Spectrometry XVI. SPIE, 2011, 8158: 92-103.
- [35] Schaum A. A uniformly most powerful detector of gas plumes against a cluttered background [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 260: 112443.
- [36] Xu Y, Wu Z, Wei Z, et al. GAS plume detection in hyperspectral video sequence using low rank representation [C]//2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). IEEE, 2016: 2221-2225.
- [37] Marrinan T, Beveridge J R, Draper B, et al. Flag-based detection of weak gas signatures in long-wave infrared hyperspectral image sequences [C]//Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XXII. International Society for Optics and Photonics, 2016, 9840: 98401N.
- [38] Tochon G, Chanussot J, Dalla Mura M, et al. Object tracking by hierarchical decomposition of hyperspectral video sequences: Application to chemical gas plume tracking [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(8): 4567-4585.
- [39] Hirsch E, Agassi E. Detection of gaseous plumes in IR hyperspectral images—Performance analysis [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2010, 10(3): 732-736.
- [40] Nam H, Kim J S, Kim H J, et al. Development of a radiative transfer model for the determination of toxic gases by Fourier transform–infrared spectroscopy with a support vector machine algorithm [J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2019, 47(3): 264-277.
- [41] Hirsch E, Agassi E, Manor A. Using longwave infrared

- hyperspectral imaging for a quantitative atmospheric tracer monitoring in outdoor environments [J]. *International Journal of Geosciences*, 2021, 12(03): 233.
- [42] Gabrieli A, Wright R, Porter J N, et al. Applications of quantitative thermal infrared hyperspectral imaging (8–14  $\mu\text{m}$ ): Measuring volcanic  $\text{SO}_2$  mass flux and determining plume transport velocity using a single sensor [J]. *Bulletin of Volcanology*, 2019, 81(8): 1-11.
- [43] Gabrieli A, Wright R, Lucey P G, et al. Characterization and initial field test of an 8–14  $\mu\text{m}$  thermal infrared hyperspectral imager for measuring  $\text{SO}_2$  in volcanic plumes [J]. *Bulletin of Volcanology*, 2016, 78(10): 1-13.
- [44] Farley V, Vallières A, Chamberland M, et al. Performance of the FIRST: A long-wave infrared hyperspectral imaging sensor [C]//Optically Based Biological and Chemical Detection for Defence III. International Society for Optics and Photonics, 2006, 6398: 63980T.
- [45] Savary S, Gagnon J P, Gross K, et al. Standoff identification and quantification of flare emissions using infrared hyperspectral imaging [C]//Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies VIII. SPIE, 2011, 8024: 165-172.
- [46] Cao Xifeng, Li Xiaoying, Luo Qi, et al. Review of temperature profile inversion of satellite-borne infrared hyperspectral sensor [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(2): 577-598. (in Chinese)