

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2015.02.010

中高层红外光谱大气遥感研究进展

戴聪明¹, 刘 栋^{1,2}, 魏合理^{1,3}

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

2 中国科学院大学, 北京 100049;

3 中国科学技术大学环境光学学院, 安徽 合肥 230026)

摘 要: 中高层大气环境探测对理解全球中高层大气结构、化学和能量循环至关重要, 在临近空间光电工程中亦有重要应用。开展中高层大气红外光谱辐射信号的探测研究有助于理解其内部的物理化学机理, 据此反演该层结的大气参数是中高层大气红外遥感的重要研究内容。根据中高层大气环境特性, 对基于火箭和卫星的中高层大气红外光谱遥感探测进行了综述, 列举了一些重要探测任务的主要科学结果, 为我国的中高层大气红外遥感探测提供参考。

关键词: 中高层大气; 红外光谱辐射; 遥感反演; 大气参数

中图分类号: P426

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2015)02-0174-012

Advances in Infrared Spectral Remote Sensing of Upper Atmosphere

DAI Cong-ming¹, LIU Dong^{1,2}, WEI He-li^{1,3}

(1 Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10049, China;

3 School of Environmental Sciences and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The remote sensing of upper atmospheric environment is very important for understanding upper atmospheric structure, chemistry and energy cycle, and should be considered in some electro-optical engineering working within near space. The physical and chemical mechanism identified and the atmospheric parameters retrieved from upper atmospheric spectral radiance signal are important contents of upper atmospheric research. Based on rockets and satellites, the process of upper atmosphere sensed by the infrared spectra are reviewed, and some important results of remote sensing are summarized. These contents might be referenced in infrared remote sensing of the upper atmosphere.

Key words: upper atmosphere; infrared spectral radiation; remote retrieval; atmospheric parameters

收稿日期: 2015-01-04

基金项目: 国家自然科学基金 (61077081)、国家 863 高技术资助

E-mail: cmdai@aiofm.ac.cn

* 特约稿

1 引言

中高层大气通常指 30~120 km 的平流层上部、中间层和低热层, 针对研究的不同也会扩展到 300 km 的大气层结。随着探测技术和理论研究的发展, 人们逐渐认识到这一占大气总质量不到 10% 的层结对于地气系统能量收支平衡、全球气候与环境变化有着重要的影响。

中高层大气中的物理、化学和辐射等过程与日地空间环境、全球大气变化有着密切的关系, 为研究复杂的辐射与物质的相互作用、大气物理化学过程提供了良好的条件^[1,2], 如中高层大气的辐射发射和吸收过程将产生的辐射加热(或降温)效应, 碰撞及光化学反应等过程产生的化学加热均将影响该大气层的能量平衡。中高层大气温度、气压和中性大气分子浓度是参与这些物理化学过程的主体。因此, 掌握这些大气参数对于认知中高层大气环境至关重要。在卫星或火箭上, 探测来自太阳和地球高层大气的红外光谱辐射, 可用于识别和反演该高度大气成分的含量和环境信息的分布, 如大气温度、密度和气体组分浓度等。除了卫星和火箭外, 大口径的地基激光雷达通过测量中高层的大气分子后向散射或金属离子的荧光来探测该高度的大气环境参数也是一个重要的手段。

在中高层大气的中间层和低热层 (MLT) 区域, 开展大气红外遥感显得非常困难, 主要是因为: 分子振动、转动能级布居在 MLT 区域开始偏离局域热平衡状态, 即非局域热平衡 (non local thermodynamic equilibrium, non-LTE) 状态, 分子激发态的布局偏离波尔兹曼分布, 将影响其辐射带的辐射特性^[3-5]。利用遥感技术获取中高层大气温度及气体浓度时, 必须考虑 non-LTE 的影响^[6,7], 即需要采用 non-LTE 模式来精确计算振动态的布局数。如采用 15 μm 波段光谱辐射来遥感 70 km 以上区域的大气温度廓线, 就需要采用 CO_2 的 non-LTE 模式进行修正。由于中高层大气处在

气象探空气球或飞机难以达到的高度区域, 大气气体的浓度和总密度很低, 且在时间和空间上是高度变化的, 这些物理特性对 MLT 区域的光谱遥感探测提出了更高的要求。为更准确地建立辐射分子的能级跃迁机制并用模式解译中高层大气的基本过程, 国际上一些研究机构先后发射了一系列的箭载或星载探测器对中高层大气进行临边观测。之所以采用临边测量技术, 是因为高层的稀薄大气相比于低层稠密大气发射和吸收辐射都要弱得多, 临边探测可直接测量特定高度大气层节的辐射量而避开低层大气的干扰。

国内的陈洪滨、张晓芳等学者对中高层大气探测的各种技术手段、多种空间载荷进行了较为详细的综述研究^[8,9]。为此, 本文仅从中高层大气红外光谱辐射测量的角度, 对国际上历年的中高层探测试验进行综述, 给出一些重要的科学结果。将中高层大气探测分为火箭探测和在轨卫星遥感探测, 前者主要是早期用于识别中高层大气中的重要分子光谱带, 后者主要采用定量遥感方法来确定中高层大气参数。最后介绍了中高层大气的红外吸收光谱探测技术的优势和发展进程。

2 中高层大气红外光谱的火箭探测研究

从 1960 年代中期至上个世纪末, 美国空军实验室启动了红外天文观测计划, 红外天空背景是其重要内容。早期中高层大气红外光谱测量, 主要是基于平流层探空气球和火箭搭载光谱仪进行遥感探测, 获得宽波段的红外光谱辐射信号, 成为认知中高层大气成分的物理化学机理的一种重要手段。与此同时, 采集特定光学环境下的红外背景辐射, 如夜气辉、极光、曙暮光等, 为后续光电探测任务设计和研究提供数据参考。随着中高层大气辐射传输模式的发展, 尤其是大气分子 non-LTE 模式的构建, 实测的中高层大气光谱辐射可用于校验 non-LTE 正向辐射传输模式的准确性, 如识别活跃红外辐射分子的能级结构及其参

与的辐射、碰撞和光学反应等机理。而后根据已建立的中高层大气参数反演算法,能从测量的光谱辐射数据中反演得到中高层大气温度、密度及一些大气组分的浓度。

(1) 早期箭载探测实验

光谱红外火箭试验 SPIRE(Spectral Infrared Rocket Experiment) 是美国 1977 年 9 月 28 号在阿拉斯加州的 Poker Flat 发射的一次火箭探测试验,观测波段 $1.4\sim 16.5\ \mu\text{m}$,光谱分辨率 $\Delta\lambda=0.03\ \lambda$ [10]。该试验获得了夜晚、晨昏线和白天等 12 个不同时刻下的地球大气临边光谱辐射,视线切线高度从对流层顶到 200 km。为分析该试验光谱数据, Degges 和 A'Dagati 构建了相应的 non-LTE 计算模式 HAIRM [11],从中提取了 $\text{CO}_2(\nu_2)$ 、 $\text{O}_3(\nu_3)$ 、NO、OH、 H_2O 、 NO_2 等大气成分的光谱带的辐射信息。该实验还专门测量了晨昏线下大气 $2.7\ \mu\text{m}$ 辐射,结果发现夜晚 OH 自由基的辐射强度超过了白天太阳泵浦的 $\text{H}_2\text{O}(\nu_3)$ 带和 CO_2 两个荧光光谱带,且辐射峰值位于 $80\sim 85\ \text{km}$ 区域。该实验数据还表明 $\text{CO}_2\ 4.3\ \mu\text{m}$ 存在太阳泵浦辐射,证实了 James 和 Kumer 在 1973 年做出的预测,即白天 $\text{CO}_2\ 4.3\ \mu\text{m}$ 光谱带的辐射强度比夜晚强两个数量级 [12]。由于太阳泵浦的 $\text{CO}_2\ 4.3\ \mu\text{m}$ 荧光辐射易于被低层大气所吸收,因此只能在大气层外对其辐射进行测量。

在 1970 年代,美国核防卫局开展了战略高度效果评估 HAES(High Altitude Effects Simulation) 研究。红外化学试验-极光计划 ICE CAP(Infrared Chemistry Experiments-Coordinated Auroral Program) 是其中的一部分 [13,14]。1973 年,利用火箭搭载低温红外辐射计,对一次强极光活动(IBC III+) 的大气环境进行辐射测量,获得了极光辐射增强的光谱数据,包括 $1.5\sim 5.3\ \mu\text{m}$ 短波红外辐射谱。从辐射谱中发现 $2.8\ \mu\text{m}$ 、 $4.3\ \mu\text{m}$ 和 $5.3\ \mu\text{m}$ 三个主要辐射带。 $2.8\ \mu\text{m}$ 和 $5.3\ \mu\text{m}$ 发射来自于 NO 的 $\Delta\nu=1$ 和 $\Delta\nu=2$ 光谱带。 $4.3\ \mu\text{m}$ 发射主要来自 $\text{CO}_2(\nu_3)$ 光谱带,其辐射在明亮的极光环境中显著

增强,而少量 $4.3\ \mu\text{m}$ 带的发射辐射来自于 NO^+ 。从测量的辐射廓线中可计算极光条件下能量电子的存积速率。在非极光(静态大气)环境下,NO 的激发机理并不能使其辐射 $2.8\ \mu\text{m}$ 谱带,但在 $5.3\ \mu\text{m}$ 光谱带存在一定背景辐射 [15]。

高分辨率干涉光谱仪 HIRIS(High-Resolution Interferometer Spectrometer) 和宽视场干涉仪 FWI(Field-Widened Interferometer) 的探测波段分别为 $4\sim 22\ \mu\text{m}$ 和 $2.0\sim 7.5\ \mu\text{m}$,光谱分辨率 $1.8\ \text{cm}^{-1}$,比 SPIRE 或 ICECAP 要高 [16,17]。FWI 火箭实验观测到了 IBC II 型极光辐射谱,HIRIS 收集了极光和静态大气条件下, $70\sim 125\ \text{km}$ 区域内的光谱辐射数据。分析表明,极光和静态大气条件下的光谱辐射数据均包含 $\text{CO}_2(\nu_3)$ 、NO($\Delta\nu=1$)、 $\text{O}_3(\nu_3)$ 和 $\text{CO}_2(\nu_2)$ 等重要光谱带的辐射,其中 $\text{O}_3(\nu_3)\ 9.6\ \mu\text{m}$ 和 $\text{CO}_2(\nu_2)\ 15\ \mu\text{m}$ 的极光增强效应属于首次发现。根据光谱带的形状可判断激发态的振动分布,由其谱带强度可确定局域激发态的柱密度,结合探测高度、视场角和极光强度等信息来简化激发机理和极光激发效率,在与大气辐射传输模式模拟值比较时,可从实测光谱数据中推测相应的激发机理。如从实测 NO $5.3\ \mu\text{m}$ 临边光谱中发现它由 NO 六个最低振动能级间的跃迁组成,谱带的总强度与极光强度呈正相关。这些谱带的振转光谱可用来模拟 $70\sim 125\ \text{km}$ 高度分子 non-LTE 状态下振动态的分布特性。

为研究中间层和低热层的能量生成和损耗过程,国际气象组织在高纬度地区冬季开展地基、球基和箭载的 EBC(Energy Budget Campaign) 实验。其中火箭搭载了 $4.7\sim 23.6\ \mu\text{m}$ 波段的液氮制冷型光谱仪,探测波段为 $2.5\sim 100\ \mu\text{m}$,它对中间层和低热层主要大气成分的光谱辐射进行星下点探测。同时,EBC 采用了不同的探测技术测量大气温度和原子氧浓度,后者有助于研究 non-LTE 模式模拟。1983/84 年北欧开展了中层大气计划 MAP(Middle Atmosphere Program),目的在于研究中层大气的动态变化。该项目内容之一就是利用火箭搭载红

外光栅光谱仪, 对中层大气进行辐射测量, 获得主要大气成分中红外振转光谱带的天顶光谱, 如 CO_2 15 μm , O_3 9.6 μm 和 H_2O 6.3 μm 。ELC-1 火箭观测试验于 1983 年 10 月 25 日从白沙导弹靶场发射升空。ELC-1 辐射计是个低温红外探测器阵列, 4~29 μm 观测波段。火箭在发射后的 296 s 到达最高点 300 km 高度; 在发射后 230~256 s 进行了四次水平扫描测量; 发射后 353~478 s 进行了四次垂直扫描测量, 获得了大气红外辐射随高度的分布廓线。基于 ELC-1 观测的长波红外辐射数据, 首次从 $\text{CO}_2(\nu_2)$ 光谱带的发射辐射中反演得到中间层大气的温度廓线, 并从 23~29 μm 波段水汽转动发射光谱中反演得到水汽廓线。结果表明: 在 55~85 km 高度区间, ELC-1 的探测结果和先前在中纬度秋冬季测量(微波和太阳红外)结果相吻合, 并证明了利用卫星长距离遥感全球水汽的可行性^[18]。

(2) SPIRIT

空间红外光谱干涉仪 SPIRIT(Spatial sPectral Infrared Rocketborne Interferometer Telescope) 由美国核防卫局于 1986 年 4 月 8 日在阿拉斯加 Poker Flat 基地发射升空的火箭探测试验^[19]。它通过临边方式测量极光 IBC III 环境下的辐射。其上搭载的载荷主要是低温迈克尔逊干涉仪, 500~2000 cm^{-1} 波段, 观测的切线高度 40~225 km。该实验观测到了夜晚大气分子发射辐射, 如 $\text{CO}_2(\nu_2)$ 15 μm 、 $\text{O}_3(\nu_3)$ 9.6 μm 和 $\text{NO}(\Delta\nu=1)$ 5.3 μm 。与 SPIRE 探测结果相比, SPIRIT 1 探测的 $\text{CO}_2(\nu_2)$ 、 $\text{O}_3(\nu_3)$ 的辐射存在 2 倍差异, 观测的 NO 5.3 μm 辐射数据偏小 3~7 倍, 该实验证实了 $\text{CO}_2(\nu_2)$ 或 $\text{O}_3(\nu_3)$ 光谱带在极光条件下不存在辐射增强效应, 即 CO_2 的 ν_2 能级和 O_3 的 ν_3 能级在带电粒子环境中不存在光解离过程。

空间红外光谱干涉仪 II(SPIRIT II) 由一个 300 型探测空间辐射计和 6 型探测干涉光谱仪组成。它测量了 60~170 km 切线高度上的大气发射

辐射, 在探测方向的空间分辨率为 100 m, 光谱分辨率为 2 cm^{-1} 。该试验获得了地球临边长波红外辐射在空间和光谱上的分布特性^[20]。自然大气的背景辐射限制了真实目标的探测识别, 如限制了能够被识别的目标的类型; 降低了真实与虚假目标识别的能力; 降低了探测器的空间和光谱分辨率, 影响其探测灵敏度。因此, 上述试验测量的地球大气背景辐射数据有助于改进红外背景辐射计算模式, 提高各种大气条件下探测和跟踪目标的能力; 有助于建立起地球临边团簇辐射模型, 提高扰动自然条件下对大气辐射强弱变化的认知。

(3) CIRRIS

为探测地球中高层大气化学过程, 美国防卫部门将低温红外辐射计 CIRRIS(Cryogenic Infrared Radiance Instrumentation for Shuttle) 搭载在发现号航天飞机上, 于 1991 年 4 月 29 日发射升空, 在 260 km 的轨道上运行 3 天。迈克尔逊干涉仪的探测波段 2.5~25 μm , 光谱分辨率 1 cm^{-1} 。实验期间, 获得 30~150 km 切线高度上的静态大气发射的光谱辐射及其空间分布, 为中高层大气 non-LTE 辐射传输模型模拟视线路径辐射提供了基本参数^[21,22], 即测量数据用于分析 non-LTE 效应对大气分子振动和转动态的影响特性, 如 CO_2 15 μm 和 4.3 μm 、 O_3 9.6 μm 、 H_2O 6.3 μm 、 CO 4.6 μm 和 NO 5.4 μm 。分析 CIRRIS-1A 高分辨率地球临边光谱数据, 发现中间层和低热层的高振动激发双原子分子 (OH 、 NO 和 NO^+) 属于一类新的 non-LTE 发射, 即转动 non-LTE。同时从测量的红外光谱数据中还发现其他痕量气体, 如 CFC-11、CFC-12、 HNO_3 和 CH_4 。该次试验还获得了极光扰动大气下的光谱辐射, 为研究极光辐射增强作用机理积累了基础数据, 同时有助于对处于助推段和后助推段、轨道运行和再入段目标的探测识别^[23]。

3 中高层大气红外光谱的卫星遥感研究

早期的探空火箭红外测量任务, 主要在于获得中高层大气分子重要光谱带的辐射信号, 并将这些实测辐射数据用来校验中高层大气 non-LTE 辐射传输模式计算红外辐射的可靠性, 如 ARC、SHARC 等软件^[24,25]。同时, 也为发现和掌握其他分子光谱带的辐射特性提供了大量基础数据。随着探测技术的发展和中高层大气辐射传输建模水平的提高, 基于卫星平台的光谱仪或辐射计, 对中高层大气进行红外光谱探测成为可能。结合中高层大气辐射传输模式, 反演中高层大气参数成为新的研究手段。因此, 基于卫星遥感数据反演中高层大气参数是空间探测的热点。

(1) Nimbus7

Nimbus7 是 1978 年发射的太阳同步、近极地轨道卫星。平流层临边红外监测仪 LIMS(Limb Infrared Monitor of Stratosphere)、平流层和中间层探测器 SAMS(Stratospheric and Mesospheric Sounder) 是其上搭载的两个载荷, 采用多通道红外辐射计对昼夜大气进行临边探测。LIMS 采用光电导型探测器来观测大气的发射辐射, 垂直分辨率 1.8 km, 仅获取 7 个月的观测数据, 覆盖范围 64°S~84°N。目前, 从探测数据中反演得到了 O₃、NO₂、H₂O 和 HNO₃ 等少数组分浓度和大气温度的三维空间分布^[26]。SAMS 分别采用热释热探测器(长波通道)和辐射制冷的光电导探测器(短波通道), 后者用于观测 CO 和 NO 的红外辐射, 其垂直探测分辨率 10 km, 共获得近 5 年的观测数据。SAMS 测量了平流层至低热层(10~80 km, 50°S~70°N)的热辐射、荧光和近共振散射太阳光。Rodgers 建立了反演算法, 从 SAMS 测量数据得到 N₂O 和 CH₄ 浓度, 对理解中高层大气的 non-LTE 过程有重要作用^[27]。

光谱红外结构信息探查 SISSI(Spectroscopic Infrared Structure Signatures Investigation) 是搭载

在大气动力适应网络 DYANA(Dynamics Adapted Network for the Atmosphere) 上的一个载荷, 它采用光栅光谱仪获取大气辐射信号, 于 1990 年 6 月 6 日发射升空, 随后在 1990 年夏季和 1991 年春季分别在轨运行。该探测器测量了中间层和高层大气主要红外辐射谱带, 如 CO₂ 15 μm、O₃ 9.3 μm 和 NO 5.3 μm。由于关于该次试验任务的公开说明文档非常少, 对该次任务测量数据的质量尚不清楚。

(2) SPIRIT III / MSX

为了从陆地、大气和天空背景中识别有效目标, 美国在 1996 年发射了中段空间实验卫星 MSX(Midcourse Space Experiment), 其上搭载了红外光谱干涉望远镜 SPIRIT III (Spectral Infrared Interferometric Telescope)。该探测器包含 2 个中波(4.3 μm) 和 4 个长波红外(6.8~25.1 μm) 探测通道, 获得在切线高度 30~150 km 内的地球临边场景的红外背景辐射和空间结构。从测量的辐射场景中, 得到了云、重力波、夜气辉、曙暮光和极光等光学现象的红外辐射^[28,29]。SPIRIT III 是一次非常成功的实验, 它获得了大量关于地表和地球大气临边背景的红外光谱辐射数据。

(3) UARS

为在全球尺度上开展平流层和中间层的光化学、能量平衡和动力学过程的研究, 美国于 1991 年发射上层大气探测卫星 UARS(Upper Atmosphere Research Satellite)。它搭载了低温临边阵列标准光谱仪 CLAES(Cryogenic Limb Array Etalon Spectrometer) 和改进的平流层和中间层探测器 ISAMS(Improved Stratospheric and Mesospheric Sounder Spectrometer)。CLAES 探测波段为 3.5~12.9 μm, 获得地球大气 10~60 km 范围内(垂直分辨率 2.5 km)的临边红外辐射, 进而反演平流层温度廓线和 O₃、H₂O、CH₄、N₂O 及其他痕量气体的浓度, 在反演高高度区域的大气成分浓度时需要考虑其 non-LTE 效应。测量结果表明, 一些大气成分短波红外谱带的昼夜辐射差异显著, 这主要

是由其昼夜辐射及光化学反应等机理差异引起的^[30,31]。ISAMS 是个机械制冷的 4.6~16.6 μm 波段红外辐射计。该探测设备的主要目的在于反演平流和中间层大气温度和 O_3 、 CO 、 NO 、 CH_4 等痕量气体及气溶胶消光的垂直廓线。探测资料的全球覆盖范围 $34^\circ\text{S}\sim 80^\circ\text{N}$ 或 $34^\circ\text{N}\sim 80^\circ\text{S}$, 高度 15~80 km。在 1991 年 10 月到 1992 年 7 月, ISAMS 观测的 12.1 μm 消光显示气溶胶云沿赤道方向存在非对称分布特性, 且浓度最大值在 26 km 高度。在 CLAES 和 ISAMS 观测 non-LTE 辐射的同时, 微波临边探测器 MLS(Microwave Limb Sounder) 和宽角度多普勒成像光谱仪 (WINDII Wide-Angle Doppler Imager Interferometer) 同时可以探测大气成分浓度和大气温度, 后者可避免中高层大气的 non-LTE 模式。因此, 综合这些测量数据有助于理解发生在平流层中的辐射、碰撞和光化学过程。

(4) CRISTA

CRISTA(Cryogenic Infrared Spectrometers and Telescopes for the Atmosphere) 是个临边扫描辐射计, 观测波段 4~71 μm , 分别于 1994 年 11 月和 1997 年 8 月由航天飞机升空开展两次在轨测量, 获得低平流层到低热层的大气临边红外辐射, 覆盖范围 $57^\circ\text{S}\sim 68^\circ\text{N}$ 。Grossmann 将非局域热平衡模式和逐线积分辐射传输算法相耦合, 建立了上中间层至低热层大气参数反演算法, 从 CRISTA 观测数据中反演得到温度、 CO_2 和 O_3 浓度的全球分布特性^[32]。此外, 还得到了中间层大气中的 H_2O 、 CH_4 甲烷和 CO 等痕量气体的浓度。这其中最重要的发现是 CO_2 在 80~100 km 存在一个损耗机理、夜晚臭氧浓度存在第二极大值区域(上中间层)、在极地中间层中部, 冬季曙暮光区域内, 臭氧存在一个第三极大值。并从热层大气中得到了高达 180 km 的原子氧分布。CRISTA 温度反演结果表明, 在纬度 65°N 以上、高度 82 km 区域附近存在一个温度极低的区域, 这正是极地中层云 PMC(Polar Mesospheric Clouds) 所在位置, PMC 主要是由冰晶粒子组成, 其发射的宽带热辐射的

峰值区域在 11 μm 附近。

表 1 列出了这些探测设备测量的范围, 有助于进一步理解大气 non-LTE 过程。高分辨率动态红外探测器 HIRDLS(High Resolution Dynamics Limb Sounder) 是个红外临边扫描辐射计, 用于探测对流层上部、平流层和中间层温度和大气组分浓度, 如 O_3 、 H_2O 、 CH_4 、 N_2O 、 HNO_3 、 N_2O_5 、CFC11、CFC12、 ClONO_2 和气溶胶。它将 6.12~17.76 μm 波段分为 21 个通道, 四个通道测量 CO_2 发射辐射, 通过反演算法得到温度廓线。

(5) SABER/TIMED

为了增强对中间层和低热层结构、能量、化学和动力基本过程的认知, 美国 NASA 于 2001 年 12 月 7 号发射了热层-电离层-中间层能量和动力学卫星 TIMED(Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetic and Dynamic), 轨道高度 625 km, 倾角 74.1° , 轨道周期约为 1.6 h。该卫星搭载了一个 10 通道的宽带红外辐射计 SABER(Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry), 1.27~17 μm 探测波段。通过临边方式测量各探测通道辐射, 结合非局域热平衡反演算法, 可反演中高层大气中的温度、密度、 O_3 、 H_2O 和 CO_2 混合率的高度分布廓线, 垂直分辨率达 2 km。目前, SABER 数据资料网上公开发布运行, 包括一级产品探测通道的辐射廓线和二级产品大气参数廓线。

由于 SABER 数据集质量较高, 在发展和检验反演大气参数算法、开展科学调查、研究中高层大气环境特性方面有重要的应用价值。如 Xu 等利用多年的 SABER 温度廓线数据, 研究了中层顶高度和温度的全球纬度分布特性和时间变化特性^[33]。平流层突然增温现象解释中高层大气重力波作用机理, 如 Preusse 等利用 SABER 温度变化数据, 得到全球重力波的分布特性^[34]。高红等根据 SABER 一级辐射资料, 得到了 OH 和 $\text{O}_2(1.27 \mu\text{m})$ 夜气辉全球分布特性^[35]。Mlynczak 根据 2002 年太阳风暴中 $\text{NO}5.3 \mu\text{m}$ 辐射数据, 揭

示了太阳风暴时中高层大气能量传输机理^[36]。此外, SABER 观测数据, 在增强对气体 non-LTE 模式的物理机理的认知方面亦有重要的应用, 有

利于对改进中高层大气辐射传输模式, 如反演分子重要碰撞过程的碰撞速率常数^[37]。

表 1 non-LTE 发射辐射的测量试验

Table 1 The infrared remote sensing experiments of non-LTE region

分子 / 谱带 (μm)	年份	CO ₂ 15	CO ₂ 10	CO ₂ 4.3	CO ₂ 2.7	O ₃ 9.6	CO 4.7	H ₂ O 6.3	H ₂ O 2.7	NO 5.3	OH 1-3	NO ⁺ 4.3
ICECAP	1973	60-150	-	70-120	-	40-100	-	50-75	-	70-140	-	-
HIRIS	1976	70-120	-	80-105	-	70-110	-	-	-	70-125	-	-
SPIRE	1977	50-160	-	10-150	25-90	30-105	-	10-75	25-90	100-200	40-110	-
FWI	1983	-	-	85-140	-	-	90-95	-	-	85-140	✓	109
SPIRIT I	1986	125-200	-	-	-	67-105	-	-	-	120-170	-	-
EBC	1985	70-150	-	-	-	70-105	-	-	-	70-185	-	-
MAP/ WINE	1983	55-130	-	-	-	53-95	-	54-80	-	80-150	-	-
ELC	1983	50-100	-	-	-	✓	-	55-85	-	✓	-	-
LIMS	1978	-	-	-	-	50-70	-	20-70	-	-	-	-
SAMS	1978	-	-	30-110	-	-	30-70	-	40-95	-	-	-
SISSI	1990	60-140	-	60-120	-	60-110	-	✓	-	95-185	-	-
CIRRIS -1A	1991	80-170	✓	✓	-	60-110	70-150	-	-	100-170	✓	100-215
ISAMS	1991	30-90	-	50-120	-	30-70	30-90	30-70	-	30-150	80-90	120?
CLAES	1991	-	20-60	-	-	10-60	-	✓	-	-	-	-
CRISTA	1994	40-150	✓	15-120	-	15-90	20-80	15-80	-	100-180	-	-
SPIRIT III	1994	65-130	-	0-120	-	✓	-	✓	-	-	-	100-120
SABER	2002	10-130	-	85-150	-	15-105	-	15-80	-	90-180	80-100	-
MIPAS	2002	6-68	-	-	-	6-68	-	15-68	-	-	-	-

注: 第一列表示试验代号, 以上仅观测所包含的 non-LTE 区域, 测量的高度间隔为 km, “-”表示 non-LTE 发射数据未分析或者未公布高度范围, “?”表示仍存在疑问的 non-LTE 探测区域。

(6) MIPAS/ENVISAT

主动大气探测的迈克尔逊干涉仪 MIPAS(Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding) 是搭载在欧洲环境卫星 ENVISAT(European Environmental Satellite) 卫星上的高分辨率临边探测器, 于 2002 年 3 月 1 号发射

升空, 轨道 800 km, 倾角 98.55° ^[38]。在探测大气 non-LTE 发射辐射方面, 它具有以下优势: 1) 4.15~14.6 μm 宽光谱范围; 2) 0.035 cm^{-1} 高光谱分辨率, 可识别不同大气成分及其光谱带的发射; 3) 探测响应度高, 可测量高高度区域的大气发射辐射; 4) 探测区域光, 全球极地-极地的空间覆盖, 昼夜

时间覆盖; 5) 临边扫描的切向高度是 6~68 km, 高层大气观测模式下最高探测高度可达 170 km; 6) MIPAS 一天绕地球 14.3 圈, 每条轨道获取 72 条廓线。

KOPRA(Karlsruhe Optimised and Precise Radiative transfer Algorithm) 是计算 MIPAS 临边辐射的正向模式^[39], 该模式是基于逐层大气逐线积分辐射来计算大气透过率和光谱辐射, 其内部的 non-LTE 模式来自于通用辐射传输和 non-LTE 布局算法 GRANADA^[40], 它可计算行星大气中振动、转动、旋转和电子态的 non-LTE 布局数。从 CO₂ 15 μm 通道辐射中, 采用 IMK/IAA 反演算法得到的大气温度廓线具有较高的精度^[41], 在 50 km 以下区域, 温度误差在 0.5 K; 50~70 km 误差在 0.5~2 K 之间; 70 km 以上区域, 误差在 2~7 K。70 km 以下区域系统误差通常在 1 K, 70~85 km 处于 1~3 K, 85~100 km 则处于 3~11 K。垂直分辨率在 45 km 以下是 4 km, 354~50 km 是 3 km, 504~90 km 是 4~6 km。

4 中高层大气吸收光谱的观测研究

相比于对发射谱的测量, 大气红外吸收谱可以得到前者难以获得的信息, 比如对于分子高激发态能级的跃迁和一些红外波段不活跃的分子(各种氮化物、卤化物痕量气体)形成的发射谱线一般都很弱, 但外部光源的泵浦和长程吸收会使这些能级的信息被很好地提取出来。而且相比于大气发射谱观测, 吸收谱测量可以做到更高的信噪比和光谱分辨率。通过反演高分辨率大气吸收光谱可以提供大气参数路径分布的廓线信息。当前的所有大气吸收谱测量都是以太阳作为光源, 采用太阳掩星的方式临边测量其通过大气后的光谱; 从而可以根据所得到的临边吸收谱反演大气温度和微量成分的高分辨率垂直廓线。另一方面, 吸收谱测量的主要劣势是对于选定的区域、选定的季节只能在日出、日落这两段相当有限地时间进

行观测, 这样就不能反映一些大气成分的日变化特征, 比如 O₃、卤化物等。

(1) ATMOS

ATMOS (Atmospheric Trace Molecule Spectroscopy) 是一种搭载于航天飞机平台上、利用迈克尔逊干涉仪测量大气高分辨率吸收谱试验^[42]。它采用傅里叶变换技术, 光谱范围 2.5~16 μm, 光谱分辨率 0.01 cm⁻¹, 单次光谱扫描时间为 2 s, 可获得垂直分辨率为 4 km 的大气吸收谱。首次实验搭载在挑战者号航天飞机上, 于 1985 年 4 月 29 日发射升空; 在轨飞行三天时间, 在 28°N(日落)和 48°S(日出)附近共记录了 19 次完整的太阳掩星事件, 共获得 1474 个太阳光谱和 1192 个大气吸收谱。随后又搭载在其他航天飞机平台上分别在 1992 年、1993 年、1994 年开展了另外三次观测实验^[43], 获得了大量高质量的数据集。通过对 ATMOS 数据的反演, 可以获得 5~130 km 范围内的温度、压强、CO₂、O₃、H₂O、CH₄ 和各种氮化物成分体混合比率的垂直廓线, 对大气化学和动力学的研究产生重要影响, 同时也验证了卫星平台高分辨率大气吸收谱测量的可行性。

(2) HALOE

HALOE (HALogen Occultation Experiment)^[44,45]是搭载在 UARS(Upper Atmosphere Research Satellite) 卫星平台上的大气吸收谱测量辐射计, 采用太阳掩星模式。它采用了低分辨率红外滤波辐射计采集信号, 包含 4 个通道, 光谱范围在 2.45~10.04 μm; 常规观测覆盖 80°N~80°S, 在春季可以对南极地区进行扩展观测。业务观测从 1991 年 11 月开始, 数据一直持续到 2005 年 11 月。可以提供温度和 7 种大气成分的浓度(O₃、HF、HCl、H₂O、CH₄、NO、NO₂)廓线, 最大高度范围在 15~130 km, 垂直分辨率为 1.6 km。

(3) ACE-FTS

加拿大空间局从 1998 年启动地球大气遥感小卫星项目并设计了第一颗小卫星 SCISAT-1 或称 ACE, 其中 ACE-FTS (Atmospheric Chemistry

Experiment-Fourier Transform Spectrometer)^[46,47]是搭载在此平台上最主要的仪器。ACE-FTS的设计理念 and 测量方法基本继承 ATMOS, 同样采用太阳掩星模式测量大气吸收谱。可测量光谱范围在 2.2~13.3 μm , 光谱分辨率 0.02 cm^{-1} , 单次光谱扫描时间为 2 s, 可获得由地面到 150 km 高度、垂直分辨率为 4 km 的大气吸收谱。卫星于 2003 年 8 月 12 日发射升空, 从 2004 年 2 月开始业务观测; 为了覆盖 85°N~85°S 的观测范围, 卫星运行在 650 km 的地球圆形轨道上, 采用 74° 大倾角。此项观测的首要任务是观测全球 (尤其是北极地区) 对流层顶和平流层臭氧分布以帮助理解控制这一区域臭氧浓度的化学和动力学过程。但它依然可以提供包括温度、压强和 H_2O 、 O_3 、 NO 、 CH_4 、 HCN 、 CCl_2F 、 CCl_3F 等 24 种微量或痕量气体浓度在 10~100 km 范围内的廓线分布, 插值后的垂直分辨率可达到 1 km。当前此光谱仪仍在正常工作中, 已经积累了近 10 年的吸收谱和反演大气参数廓线数据集, 经过算法优化后最新的数据集为 3.0 版^[48]。这给中高层大气的化学和动力学过程的研究提供了前所未有的高质量资料。

5 小 结

随着空间活动的日趋活跃, 对中高层大气环境的遥感探测显得尤为必要。无论是在可见光、近红外波段, 通过中高层大气对太阳辐射的吸收光谱探测, 还是从携带更丰富、完整的大气信息的大气红外辐射信号, 都将获得大量中高层大气参数, 而后者更成为今后中高层大气探测研究的重点。为此, 本文对国际上中高层大气红外光谱探测的研究进展进行了较为深入的综述, 得到中高层大气各次探测实验活动情况, 结合中高层大气辐射传输模式以及遥感反演中高层大气参数的算法研究, 列举了红外光谱实验数据所包含的重要探测结果。

未来中高层大气红外探测研究的重点在于发展高精度的反演算法, 尤其是建立重要红外辐射

气体的 non-LTE 精细模式, 从测量的高精度红外光谱数据中反演出高质量的大气参数廓线。另外一个研究的重点在于根据已有的遥感卫星观测的红外辐射数据和反演的大气参数产品数据, 分析中高层大气在时间和空间尺度上的变化特性, 以及日地空间环境对中高层大气的影响特性, 如光辐射、动力的影响等, 这对全面掌握临近空间环境特性非常重要。由于我国在中高层大气环境的探测研究起步较晚, 许多领域尚处于空白区域。随着我国科学技术的发展和空间活动的日益增多, 全面开展中高层大气环境的遥感探测研究显得十分迫切。

参考文献:

- [1] Ree M H. *Physics and Chemistry of the Upper Atmosphere* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- [2] López-Puertas M, Taylor F W. *Non-LTE Radiative Transfer in the Atmosphere* [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2003.
- [3] Akmaev R A, Fomichev V I, Zhu X. Impact of middle-atmospheric composition changes on greenhouse cooling in the upper atmosphere [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2006, **68**(17): 1879-1889.
- [4] Zhu X. Carbon dioxide 15 μm band cooling rates in the upper middle atmosphere calculated by curtis matrix interpolation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**(6): 755-774.
- [5] Mlynczak M, Martin-Torres F J, Russell J, et al. The natural thermostat of nitric oxide emission at 5.3 μm in the thermosphere observed during the solar storms of April 2002 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**(21): SSC 2.1-SSC 2.5.

- [6] Mertens C J, Mlynczak M G, López-Puertas M, et al. Retrieval of mesospheric and lower thermospheric kinetic temperature from measurements of CO₂ 15 μm Earth limb emission under non-LTE conditions [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**(7): 1391-1394.
- [7] Mlynczak M G, Zhou D K. Kinetic and spectroscopic requirements for the measurement of mesospheric ozone at 9.6 μm under non-LTE conditions [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(5): 639-642.
- [8] Chen Hongbin. An overview of the space-based observations for upper atmospheric research [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, **24**(3): 229-241(in Chinese).
陈洪滨. 中高层大气研究的太空探测 [J]. *地球科学进展*, 2009, **24**(3): 229-240.
- [9] Zhang Xiaofang, Yan Wei. Advances in studies on the exploration of the middle and upper atmosphere [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2007, **27**(4): 457-463(in Chinese).
张晓芳, 严卫. 中高层大气探测技术的研究进展 [J]. *气象科学*, 2007, **27**(4):457-463.
- [10] Sharma R D, Healey R J. Earthlimb emission analysis of spectral infrared rocket experiment(SPIRE) datas at 2.7 μm -a 10 year update [C]. *SPIE*, 1540, Box 10, Bellingham, WA 98227, 1991.
- [11] Degges T C, D'Agti A P. A user's guide to the AFGL/Visidyne high altitude infrared radiance model [R]. AFGL-TR-85-0015, 1985, ADA161432.
- [12] Stair Jr A T, Sharma R D, Nadile R M, et al. Observations of limb radiance with Cryogenic Spectral Infrared Rocket Experiment [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 1985, **90**(A10): 9763-9775.
- [13] Baker K D, Baker D J r, Ulwick J C, et al. Rocketborne measurement of an infrared enhancement associated with a bright auroral breakup [R]. Air Force Geophysics Lab Hanscom AFB MA, 1977, AFGL-TR-77-0157, ADA046474.
- [14] Stair Jr A T, Ulwick J C, Baker K D, et al. *Rocketborne Observations of Atmospheric Infrared Emissions in the Auroral Region* [M]// Atmospheres of Earth and the Planets, Springer Netherlands, 1975: 335-346.
- [15] Degges T C. Vibrationally excited nitric oxide in the upper atmosphere [J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(8): 1856-1860.
- [16] Espy P J, Harris C R, Steed A J, et al. Rocketborne interferometer measurement of infrared auroral spectra [J]. *Planet. Space. Sci.*, 1988, **36**(6): 543-551.
- [17] Stair Jr A T, Pritchard J, Coleman I, et al. Rocketborne cryogenic (10 K) high-resolution interferometer spectrometer flight HIRIS: auroral and atmospheric IR emission spectra [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(7): 1056-1069.
- [18] Adler-Golden S M. Analysis of H₂O infrared radiance measured during the ELC-1 Rocket Experiment [R]. Space Science Instrumentation, 1992, PL-TR-92-2136.
- [19] Adler-Golden S M, Matthew M W, Smith D R. Upper atmospheric infrared radiance from CO₂ and NO observed during the SPIRIT 1 Rocket Experiment [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 1991, **96**(A7): 11319-11329.
- [20] Kemp J C, Huppi E R. SPIRIT II mission overview [C]. *Proc. SPIE*, 1993, **2019**: 300-311.
- [21] Stair Jr A T, Sharma R D, Nadile R M, et al. Observation of limb radiance with Cryogenic Spectral Infrared Rocket Experiment [J]. *J. Geophys. Res.*, 1985, **90**(A10): 9763-9775.
- [22] Wise J O, Smith D R, Wheeler N B, et al. Overview and summary of results and significant findings from the CIRRI-1A experiment [J]. *J. Spacecraft Rockets*, 2001, **38**(3): 297-322.

- [23] Adler-Golden S, Smith D R, Vail J, et al. Simulations of mesospheric and thermospheric IR radiance measured in the CIRRIS-1A shuttle experiment [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 1999, **61**(18): 1397-1410.
- [24] Wintersteiner P P, Picard R H, Sharma R D, et al. Line-by-line radiative excitation model for the non-equilibrium atmosphere: Application to CO₂ 15 μm emission [J]. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**(D16): 18083-18117.
- [25] Sharma R D, Ratkowsi A J, Sunderg R L, et al. Description of SHARC, The Strategic High-Altitude Radiance Code [R]. GL-TR-89-0229, 1989, ADA213806.
- [26] Gille J C, Russell J M. The limb infrared monitor of the stratosphere: Experiment description, performance, and results [J]. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**(D4): 5125-5140.
- [27] Rodgers C D, Jones R L, Barnett J J. Retrieval of temperature and composition from Nimbus 7 SAMS measurement [J]. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**(D4): 5280-5286.
- [28] O'Neil R R, Gardiner H A B, Gibson J J, et al. Midcourse space experiment (MSX):overview of mid-wave infrared atmospheric gravity waves in earth limb and terrestrial backgrounds [J]. *EO Propagation, Signature and System Performance Under Adverse Meteorological Conditions Considering Out-of-Area Operations*, 1998.
- [29] O'Neil R.R. Gardiner H A B, Gibson J J. MSX: Remotely sensed observations of atmospheric infrared radiance and spatial structure [C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4539**: 446-453.
- [30] Roche A E, Kumer J B. Cryogenic limb array etalon spectrometer (CLAES): experiment overview [C]. *Proc. SPIE 0973, Cryogenic Optical Systems and Instruments III*.
- [31] Kaye J A, Kumer J B. Nonlocal thermodynamic equilibrium effects in stratospheric NO and implications for infrared remote sensing [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(22): 4747-4754.
- [32] Grossmann K U, Gusev O, Kaufmann M, et al. A review of the scientific results from the CRISTA missions [J]. *Adv. Space Res.*, 2004, **34**(8): 1715-1721 .
- [33] Xu J, Liu H L, Yuan W, et al. Mesopause structure from thermosphere, ionosphere, mesosphere, energetic, and dynamics(TIMED)/sounding of the atmosphere using broadband emission radiometry(SABER) observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**(D9): D09102.1- D09102.11.
- [34] Gao Hong, Xu Jiyao, Chen Guangming, et al. Global distributions of OH and O₂ (1.27 μm) nightglow emissions observed by TIMED satellite [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2011, **41**(3): 374-384(in Chinese).
- 高红, 徐寄遥, 陈光明, 等. TIMED 卫星测量得到的 OH 和 O₂(1.27 μm) 夜气辉全球分布特性 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2011, **41**(3): 374-384.
- [35] Preusse P, Ern M, Eckermann S D, et al. Tropopause to mesopause gravity waves in August: Measurement and modeling [J]. *J. Atm. Solar Terr. Phys*, 2006, **68**(15): 1730-1751.
- [36] Mlynczak M G, Martin-Torres F J, Russell J M, et al. The natural thermostat of nitric oxide emission at 5.3 μm in the thermosphere observed during the solar storms of April 2002 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**(21): SSC 2-1 - SSC 2-5.
- [37] Feofilov A G, Kutepov A A. Infrared radiation in the mesosphere and lower thermosphere: energetic effects and remote sensing [J]. *Surv. Geophys.*, 2012, **33**(6): 1231-1280.
- [38] Fischer H, Birk M, Blom C, et al. MIPAS: an instrument for atmospheric and climate research [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2008, **8**(8): 2151-2188.

- [39] Stiller G P, von Clarmann T, Funke B, et al. Sensitivity of trace gas abundances retrievals from infrared limb emission spectra to simplifying approximations in radiative transfer modeling [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2002, **72**(3): 249-280.
- [40] Funke B, López-Puertas M, Garcí-Comas M. GRANADA: a generic radiative transfer and non-LTE population algorithm [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2012, **113**(14): 1771-1817.
- [41] Garcí-Comas M, Funke B, López-Puertas M, et al. On the quality of MIPAS kinetic temperature in the middle atmosphere [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2012, **12**(13): 6009-6039.
- [42] Farmer C B. High resolution infrared spectroscopy of the Sun and the Earth's atmosphere from space [J]. *Microchim. Acta*, 1987, **93**(1-6): 189-214.
- [43] Gunson M R, Abbas M M, Abrams M C, et al. The atmospheric trace molecule spectroscopy (ATMOS) experiment: Deployment on the ATLAS space shuttle missions [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**(17): 2333-2336.
- [44] Russell J M, Gordley L L, Park J H, et al. The halogen occultation experiment [J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**(D6): 10777-10797.
- [45] HALogen Occultation Experiment [OL]. <http://haloe.gats-inc.com/about/index.php>.
- [46] Bernath P F, McElroy C T, Abrams M C, et al. Atmospheric chemistry experiment (ACE): mission overview [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**(15): L15S01.1-L15S01.5.
- [47] Bernath P F. Atmospheric chemistry experiment (ACE): analytical chemistry from orbit [J]. *Trends Anal. Chem.*, 2006, **25**(7): 647-654.
- [48] ACD: Atmospheric Chemistry Experiment [OL]. <http://www.ace.uwaterloo.ca/index.html>.

作者简介: 戴聪明 (1987-), 江西抚州人, 博士, 助理研究员, 目前从事红外辐射大气传输特性研究。

魏合理 (1965-), 男, 安徽宁国人, 博士, 博士生导师, 研究员, 现主要从事大气辐射传输研究、卷云辐射传输特性研究。