

中高层大气廓线探测卫星载荷技术及展望

刘东¹, 谢婉怡², 王静松^{1,3}, 罗海燕¹, 司福祺¹, 冯玉涛⁴, 熊伟¹,
胡秀清⁵, 徐娜⁵, 陈林⁵, 段静波¹, 张瑞东², 阚瑞峰¹

1. 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230026;

2. 江淮前沿技术协同创新中心, 合肥 230000;

3. 中国科学技术大学 研究生院科学岛分院, 合肥 230026;

4. 中国科学院西安光学精密机械研究所 光谱成像技术研究室, 西安 710119;

5. 国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心) 中国气象局空间天气重点开放实验室, 北京 100081

摘要: 中高层大气作为地球大气重要组成部分, 同时受低层大气与空间环境作用共同影响, 存在着重要的多尺度动力学、化学及辐射传输过程等。卫星临边遥感能够提供全球范围中高层大气廓线探测数据, 对充分认识中高层大气物理学及化学具有重要意义。论文概述了目前中高层大气廓线探测卫星的发展历程, 较为全面地总结了卫星载荷技术参数指标。国外自20世纪80年代开始发射专用于中高层大气廓线探测卫星, 发展有天底观测、掩星观测以及临边观测载荷, 光谱覆盖范围包括极紫外至微波等观测波段, 大大提升了对中高层大气的科学认识。国内对中高层大气探测卫星载荷研究起步较晚, 技术实践仍显不足。结合临边观测优势, 简要介绍了中国发射的中高层大气探测临边遥感卫星“天路一号”, 搭载高光谱大气温度和成分廓线临边探测仪、大气密度廓线探测仪与多普勒差分风成像仪。探讨了中高层大气廓线探测卫星载荷发展建议以及未来发展趋势, 为中国后续中高层大气廓线探测卫星任务规划提供参考。同时, 探测数据也将为中国建立完整的中高层大气再分析数据集, 自主研发中高层大气数值预报模式与大模型提供重要的数据基础, 服务于气象预报与气候研究等众多领域。

关键词: 大气探测, 中高层大气, 卫星遥感, 廓线, 大气温度, 大气成分, 大气风场

中图分类号: P2

引用格式: 刘东, 谢婉怡, 王静松, 罗海燕, 司福祺, 冯玉涛, 熊伟, 胡秀清, 徐娜, 陈林, 段静波, 张瑞东, 阚瑞峰. 2025. 中高层大气廓线探测卫星载荷技术及展望. 遥感学报, 29(6): 1480-1501

Liu D, Xie W Y, Wang J S, Luo H Y, Si F Q, Feng Y T, Xiong W, Hu X Q, Xu N, Chen L, Duan J B, Zhang R D and Kan R F. 2025. Satellite payloads for middle and upper atmospheric profile detection: An overview and perspective. National Remote Sensing Bulletin, 29(6): 1480-1501 [DOI: 10.11834/jrs.20254322]

1 引言

中高层大气通常指高度范围位于20—120 km区间的大气层, 包括平流层、中间层和低热层, 有时其上限可达300 km (陈洪滨, 2009)。中高层大气虽没有低层大气强烈的对流天气现象, 但该区域存在复杂的物理、化学与辐射过程, 如以臭氧变化为中心的辐射—动力—光化学过程 (Haigh, 1994; Steinbrecht等, 2017; Bernhard等, 2023)、行星波与重力波及湍流等传播和生消的动力过程 (Fritts和Alexander, 2003; 胡雄等, 2005)、对流层与热层及太阳活动的外强迫过程等 (Smith, 2012),

使得中高层大气与低层大气以及空间天气系统有着重要的耦合与相互作用。

在过去几十年中, 受全球气候变暖影响, 中高层大气环境已发生显著变化, 对该区域大气探测也愈加迫切, 主要发展有地基探测、原位探测与卫星探测3种探测方式。地基探测设备, 如流星雷达、激光雷达 (Hu等, 2011; Bills等, 1991)、光学干涉仪等, 可以准确获取特定区域上空的中高层大气垂直廓线; 原位探测设备, 如探空气球、探空火箭等, 探测精度高, 但成本较高。针对中高层大气探测需求, 中国于2012年完成子午工程一期建设, 在中国境内120°E与30°N两条链上布

收稿日期: 2024-07-30; 预印本: 2025-04-16

第一作者简介: 刘东, 研究方向为大气光学及探测技术。E-mail: dliu@aiofm.cas.cn

置了15个中高层大气地面监测台站,并于2019年开展子午二期建设,新增16个地面台站,最终形成沿100°E与120°E、40°N与30°N“井”字型布局的空间环境监测网络,通过运用地磁(电)、无线电、光学和探空火箭等多种手段,获取中国上空电离层、中高层大气、地磁等网格化观测数据,并汇集至子午工程数据中心。

相比于地基测量,卫星遥感观测通过搭载主被动探测载荷,可有效获取全球中高层大气密度、温度、风场、成分与辐射等参数,且不受天气与地理情况的限制。主动观测载荷,如激光雷达等,主动向目标物发射不同波长激光,通过分析接收的后向散射信号特征,获取中高层大气参数信息;被动观测载荷,通过观测大气辐射谱线,如自然发光的气辉谱线频移与展宽等特征(Zhang等, 2011),反演获取中高层大气参数廓线。

20世纪80年代,太阳中间层探索卫星SME(Solar Mesosphere Explorer)发射入轨(Barth等, 1983),是最早一颗专门用于中高层大气探测的卫星。随后,高层大气研究卫星UARS(Upper Atmosphere Research Satellite)(Reber, 1993)、热层—电离层—中间层能量和动力学卫星TIMED(Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetic and Dynamics)(Yee等, 2003)及电离层连接探索卫星ICON(Ionospheric Connection Explorer satellite)(Immel等, 2018)等专门用于中高层大气探测计划的卫星陆续上天,为研究中高层大气电动力学与光化学等过程提供高质量卫星遥感资料。

面向中高层大气廓线探测,基于中高层大气环境性质,本文系统性综述了目前中高层大气探测卫星发展历程,总结了卫星载荷的技术参数,包括天底探测、掩星探测与临边探测技术,并简要介绍中国中高层大气探测临边遥感卫星“天路一号”,展望中国未来中高层大气探测卫星载荷发展趋势。

2 中高层大气环境特性

2.1 中高层大气环境特征

根据大气热力学特征,中高层大气主要包括平流层、中间层和低热层,其温度廓线如图1所示。平流层下部区域受下垫面影响较少,温度随高度变换缓慢,平流层上部由于存在高浓度臭氧

层对太阳紫外辐射的吸收加热,温度随高度显著增加,每千米约能升温2℃,直至50 km附近达到最大值,即为平流层顶,气温约为270—290 K。平流层顶其上为中间层,由于O₃稀少,而太阳辐射中能被氧分子吸收的波长极短的紫外辐射(<0.18 μm)已被热层大气吸收,并且该区域中存在CO₂在15 μm波段的红外辐射散热,导致中间层大气温度随高度逐渐降低,直至中间层顶达到最小值(盛裴轩等, 2013)。中间层顶的高度与温度范围变化较大,主要与纬度与季节有关,在低纬度冬季,常出现双中间层顶现象(She和von Zahn, 1998; 操文祥等, 2012)。中间层顶以上为热层大气,该区域内由于太阳辐射中强紫外辐射的光化学分解和电离反应,使得大气温度随高度迅速增加后逐渐变缓,热层顶高度能达到约1000 km。

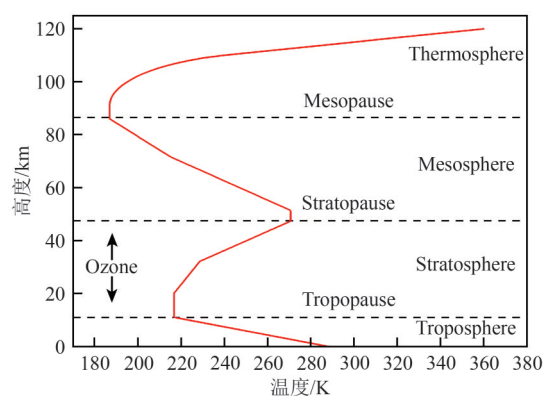


图1 1976年美国标准大气温度廓线(US Standard Atmosphere, 1976)

Fig. 1 1976 US standard atmospheric temperature profile (US Standard Atmosphere, 1976)

中高层空气极为稀薄,主要成分与对流层相似,仍以N、O等为主要成分,另有O₃、H₂O、Na、Fe等微量成分。根据大气化学成分分布特征,中高层大气主要包括均质层、过渡层与非均质层。均质层约86 km高度以下,该层内由于湍流与对流作用,大气处于完全混合的状态。尽管空气密度逐渐减小,但组成空气的各种气体比例保持不变。过渡层高度约90—100 km,在该高度区间,湍流混合作用、分子扩散作用和其他作用(分子的电离和光解等)并存,大气中的各组分逐渐从充分混合向扩散平衡过渡,大气各成分比例随高度而变化。100 km以上为非均质层。

在太阳电磁辐射(主要是短于0.1 μm的紫外线、X射线)和微粒辐射(从太阳发出的质子、电

子等及宇宙线粒子)作用下,空气分子和原子(N_2 , O_2 , O 等)被电离为正离子与自由电子,高度覆盖60—1000 km范围,即电离层区域,如图2所示。根据电子数密度,依次向上称为电离层的D区(60—90 km)、E区(90—140 km)以及F区(140—500或1000 km)。本文所探讨的中高层大气主要包括电离层D区与部分E区,该区域形成的主要原因为太阳紫外辐射对氧分子的电离,夜晚,光致电离作用停止,D区内氧离子与电子复合,D区消失。

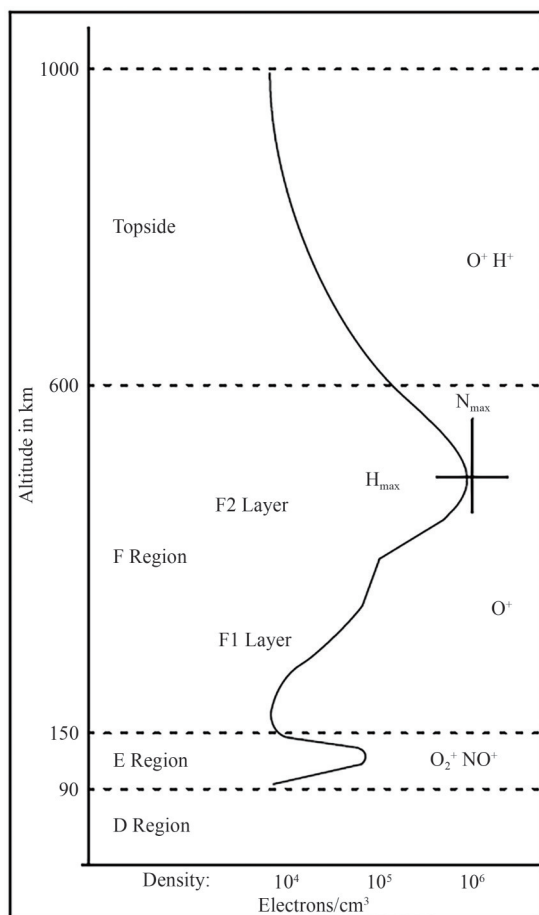


图2 电离层电子密度和离子组合物(Fuller-Rowell和Tim, 1999)

Fig. 2 Ionospheric electron density and predominant ion populations (Fuller-Rowell and Tim, 1999)

2.2 中高层大气经验模型

通过对中高层大气长期观测数据的分析归纳,结合有关控制大气基本物理过程的原理或半定量模型,众多学者开发了不同的中高层大气经验模型,尝试定量描述中高层大气动力学行为、成分分布规律以及电磁特性变化,为科研和应用提供重要的模型参考(吕达仁等, 2009)。

2.2.1 USSA1976模型

典型标准大气模型为1976年美国标准大气模型(USSA1976)(US Standard Atmosphere 1976),USSA1976提供一条随高度变化的大气温度、压力和密度廓线,高度覆盖0—1000 km。该廓线以无线电探空仪、火箭探空仪、卫星测量数据为基础,定义温度剖面,使得气压、密度和成分的垂直剖面与温度在规定的标准条件下与实验数据最为吻合。USSA1976为静态大气模型,不能体现大气参数随经纬度和季节等条件的变化特征。

2.2.2 NRLMSISE模型

NRLMSISE (US Naval Research Laboratory Mass Spectrometer and Incoherent Scatter Radar Extended)大气模型由美国海军实验室提出,最新版本为2.0版本(Emmert等, 2021),该模型描述了0—1000 km中性大气密度、温度、大气成分数密度等大气物理性质,输入时间与位置信息、太阳活动指数、磁场信息等数据,即可计算得到He、O、 N_2 、 O_2 、Ar、H、N等7种气体的数密度、中性大气温度、密度等结果。

2.2.3 HWM水平风场系列模型

HWM (Horizontal Wind Model)水平风场系列模型融合了卫星、火箭、流星雷达等数据,能够给出从对流层至热层的全球大气水平中性风场信息。

早期的HWM87模型(Hedin等, 1988)数据来源为大气探索者卫星AE-E (Atmospheric Explorer-E)与动力学探索者卫星DE 2 (Dynamics Explorer-2)观测数据,只能描述220 km以上的热层风,不具备高度依赖性,模型包括了地磁活动水平的基本参数化,但数据覆盖不足以参数化太阳活动周期效应。HWM90模型(Hedin等, 1991)则进一步结合了地面6300埃法布里—珀罗(Fabry-Pérot, FP)干涉仪(~250 km)和非相干散射雷达(90—400 km)观测数据,将HWM模型扩展至100 km,并包括了高度依赖性以及太阳活动周期效应。HWM93(Hedin等, 1996)继而加入了由中频雷达和流星雷达(75—110 km)数据、大量火箭和探空数据(20—100 km)推导出的纬向风以及从CIRA-86 (COSPAR International Reference Atmosphere)和MSISE-90模型(0—120 km)获取的梯度风,

在0—35 km区域,模型利用了美国国家环境预测中心(NCEP)4年统计结果,从而将HWM模型进一步扩展到地面。

HWM07模型(Drob等,2008)新增了高分辨率多普勒成像仪HRDI(High-Resolution Doppler Imager)、风成像干涉仪WINDII(Wind Imaging Interferometer)卫星载荷风场数据、地面雷达数据以及TIME-GCM模拟数据集,结合球谐函数拟合方式,模拟0—500 km高度范围的地球大气风场,能够给出指定时间、地理位置、高度、地磁活动指数下风场平均意义上的结果。最新版本HWM14(Drob等,2015)则新增了赤道与极地地区630 nm波长FP干涉仪测量数据,以及地球重力场和海洋环流探测卫星GOCE(Gravity Field and Steady State Ocean Circulation Explorer)提供的风场数据,对热层大气进行迭代更新。

2.2.4 Earth GRAM模型

Earth GRAM(Global Reference Atmosphere Model)全球参考大气模型(Leslie和Justus,2011;White和Hoffman,2021)由美国宇航局马歇尔太空飞行中心开发,该模型利用NCEP全球再分析数据库、全球上层大气气候图集等气候数据,可提供任意地区、任意高度(地面到轨道高度)大气参量,如大气密度、温度、风场、大气成分等。除了提供平均大气状态的月度差异变化外,该模型能够进一步模拟大气参数时空扰动。

2.2.5 中国参考大气模型

中国现存一些国军标大气参考模型,如GJB5601-2006中国参考大气(地面~80 km)、GJB 365.1-87北半球标准大气(-2—80 km)(陈昭,1987)、GJB 366.1-87航空与航天用参考大气(0—80 km)、GJB 544-88地球大气模式(90—2500 km)。但除GJB5601-2006之外,其他标准均是国际标准的引进。

GJB5601-2006中国参考大气(地面~80 km)(中国人民解放军总装备部,2006)给出了15°N—50°N,75°E—130°E中国范围内,5°×5°经纬度格点、地面至80 km高度内规定几何高度上大气温度、大气压力、空气湿度、大气密度、大气风场参量的月与年平均廓线。其中,地面至10 km范围内为0.5 km垂直分辨率,10—30 km内为1 km垂直分辨率,30—80 km内为2 km垂直分辨率。该模型

考虑了时间的变化,可反映大气参数随时间和空间变化。孙磊等(2016)利用GJB5601-2006参考大气数据,线性插值获取中国区任意地理位置中高层平均风矢量,研究风场变化特性和阵风幅值变化规律,并仿真分析了大气风场对飞行器弹道的影响。该参考大气数据也被用于生态环境和航空遥感(Zhu等,2022)等多应用领域。

3 中高层大气探测载荷与卫星

近些年来,中高层大气探测载荷不断发展,探测模式包括临边扫描、掩星探测、天底探测等多种观测方式,探测波段涵盖极紫外、紫外、可见光、红外、微波等波段,为获取中高层大气参数提供重要数据来源,对探索中高层区域物质—辐射—能量输送具有重要意义。

20世纪80年代以前,美国NIMBUS系列卫星(1964年—1978年,共7颗)已开始搭载中高层大气探测载荷,如SAMS(Stratospheric and Mesospheric Sounder)、LIMS(Limb Infrared Monitor of the Stratosphere)、SAM II(Stratospheric Aerosol Measurement-II)等设备,对平流层和中间层(80 km以下)大气温度和成分进行遥感探测(NASA Goddard Space Flight Center, n.d.)。20世纪80年代后,陆续开展了专用于中高层大气探测的卫星计划,同时,大量对地探测卫星也搭载了中高层大气探测载荷,获取了大量中高层观测数据,大大提升了人类对中高层大气的科学认知。陈洪滨等(2009)详细综述了2009年前国内外用于中高层大气研究的卫星任务和传感器载荷,如UARS(Reber, 1993; Ahmad等, 2003; Dessler等, 1998)、Odin(Murtagh等,2002)、TIMED(Yee等,2003)、ENVISAT(Louet和Bruzzi,1999)、Aura卫星(Schoeberl等,2006)等。自2009年后,不断有卫星发射入轨,对中高层大气进行监测。2019年10月,ICON卫星(Immel等,2018)由NASA发射,旨在理解大气与电离层耦合的基本问题,侧重于观测引起电离层变化的中低纬度地区的大气潮汐波;2022年11月,由瑞典研发的MATS(Mesospheric Airglow/Aerosol Tomography and Spectroscopy)卫星(Gumbel等,2020)发射,通过搭载临边成像仪与天底成像仪两台科学设备,测量中间层及低热层MLT(Mesosphere and Lower Thermosphere)区域发生的夜光云和来自O₂-A波段的大气气辉,以捕捉

中间层大气重力波；2023年8月，中国FY-3F星搭载紫外高光谱臭氧探测仪—临边/天底OMS-L/N（Ozone Monitoring Suite – Limb/Nadir）载荷，探测大气臭氧等廓线信息。

卫星与载荷信息。按照观测模式划分，卫星载荷可分为天底观测（Nadir observation）载荷、掩星观测（Occultation observation）载荷与临边观测（Limb observation）载荷，其观测模式如图3所示。

表1详细展示了截止目前为止中高层大气探测

表1 中高层大气廓线探测载荷和卫星

Table 1 Satellites for middle and upper atmosphere observation

卫星	运行时间	轨道参数	中高层大气探测载荷	任务目标
NIMBUS-7	1978-10—1994-10	近地点轨道高度941 km,远地点954 km;轨道倾角99°	臭氧总量探测光谱仪TOMS; 太阳后向紫外散射光谱仪SBUV/I; 平流层气溶胶测量SAM II; 平流层临边红外监测仪LIMS	探测和收集地球大气、海洋和冰冻圈各方面数据
SME	1981-10—1989-04	轨道高度534 km;轨道倾角97.5°	紫外臭氧光谱仪UVS; 1.27 um光谱仪; NO ₂ 光谱仪; 4通道红外辐射计	研究中层大气(50—80 km)中臭氧生成和损耗的过程
ERBS	1984-10—2005-10	轨道高度600 km;轨道倾角56.9°	平流层气溶胶和气体试验传感器SAGE II(其改进版SAGE III搭载于Meteor-3M,并在2017年搭载于国际太空站ISS)	主要研究来自太阳的能量被地球吸收与再辐射的过程;SAGE II探测获取O ₃ 、H ₂ O、NO ₂ 等廓线
UARS	1991-09—2011-09	轨道高度585 km;轨道倾角57°; 卫星总质量6526 kg,其中有效载荷2700 kg,卫星直径4.6 m,高度10.7 m	卤素掩星实验HALOE; 低温临边阵列标准光谱仪CLAES; 改进的平流层和中层探测器ISAMS; 微波临边探测器MLS; 高分辨率多普勒成像仪HRDI; 风成像干涉仪WINDII;	主要研究中高层大气化学对自然和人为扰动的响应、控制中高层大气结构和变率的化学和动力学过程以及在确定气候和气候变率方面起主要作用的中高层大气和低层大气的耦合过程
Odin	2001-02至今	轨道高度约620 km;轨道倾角98.2°; 升交点时间18:00;卫星总质量250 kg,高度2.0 m,直径1.1 m;	四波段亚毫米辐射计SMR; 光谱仪和红外成像仪OSIRIS	寻找来自域外物体的水和氧的发射以及对地球大气的观测,探究与臭氧消耗有关的成分分布
TIMED	2001-12至今	轨道高度625 km;轨道倾角74.1°; 卫星总质量660 kg,有效载荷153 kg	利用宽带发射辐射计的大气廓线测量仪SABER; TIMED多普勒干涉仪TIDI; 空间紫外成像仪GUVI	研究太阳和人为扰动对中间层和热层底部/电离层的影响,侧重于研究大约地表60—180 km以上大气区域
ENVISAT	2002-03—2012-04	太阳同步轨道,高度800 km;轨道倾角98°;卫星总质量8200 kg,有效载荷2050 kg,在轨尺寸26 m×10 m×5 m	掩星全球臭氧监测仪GOMOS; 迈克尔逊干涉被动大气探测仪MIPAS; 大气探测扫描成像吸收光谱SCIA-MACHY;	环境监测卫星,对地球表面和大气层进行连续的观测,供制图、资源勘查、气象及灾害判断之用
AURA	2004-07至今	轨道高度705 km;轨道倾角98.2°; 升交点时间13:45±15 min	臭氧监测仪OMI; 高分辨率动力学临边探测器HIRDLS; 微波临边探测器MLS; 对流层辐射光谱仪TES	监测臭氧与其他痕量气体,并监测全球对流层污染
FY-3A	2008-05—2018-02			
FY-3B	2010-11—2020-06	轨道高度836 km;轨道倾角98.75°	臭氧总量探测仪TOU; 紫外臭氧垂直探测仪SBUS	天气预报、生态环境、灾害监测等业务及研究
FY-3C	2013-09至今			
SNPP	2011-10至今	轨道高度824 km;轨道倾角98.7°	大气臭氧探测廓线仪OMPS	主要研究地球气候系统变化
ICON	2019-10—2022-11	轨道高度575 km,轨道倾角27.00°	全球高分辨率热层迈克尔逊成像干涉仪MIGHTI; 离子速度计IVM; 远紫外成像仪FUV; 极紫外光谱仪EUV	理解大气与电离层耦合的基本问题
MATS	2022-11至今	560 km 太阳同步轨道,过境时间为当地时间21:00;总质量50kg	临边成像仪Limb Imager; 天底成像仪Nadir Imager	中间层大气重力波
FY-3F	2023-08至今	836 km 近极地太阳同步轨道,轨道倾角98.75°;降交点地方时10:00±20 min	紫外高光谱臭氧探测仪—天底/临边OMS-N/L	天气预报、生态环境、灾害监测等业务及研究

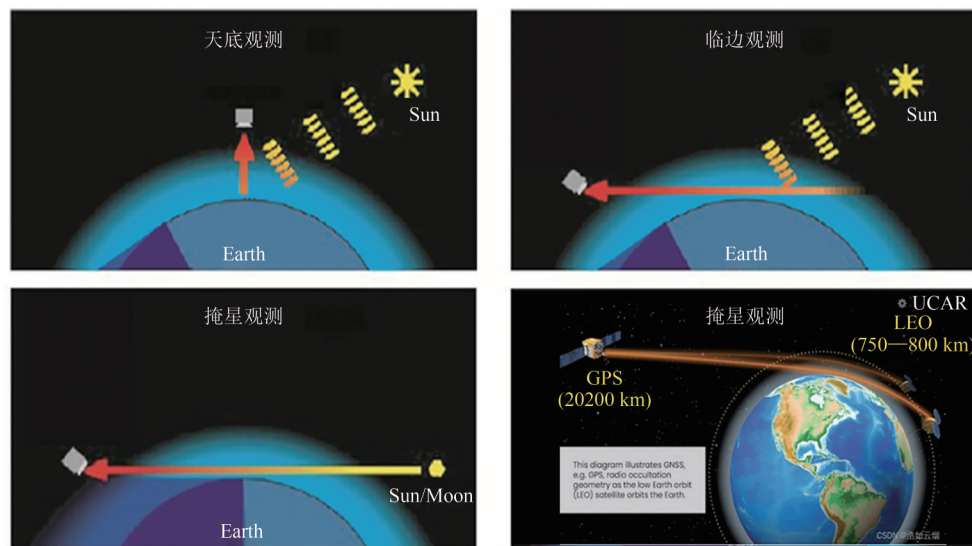


图3 天底、临边、掩星载荷观测模式(Zhang等,2007)

Fig. 3 Nadir, limb and occultation observation(Zhang et al., 2007)

天底观测直接对准地球表面进行观测,时空分辨率高,但被动遥感载荷无法直接获取大气廓线或大气廓线精度较差;掩星观测是通过监测星体(如恒星或卫星)的信号在穿过地球大气层时的变化来研究大气特性,常用于研究大气层的温度、压力和成分,可获取高垂直分辨率和高精度廓线,但受限于采样频率,数据量少,且水平积分路径长;临边观测则结合两者的优点,对准地球大气层的边缘区域,通过测量大气层的发射和吸收特性来研究大气成分和结构,既可以获取高垂直分辨率的大气廓线参数,又具备较好的采样率和时空分辨率。

3.1 天底观测

天底观测载荷通常用于观测云与气溶胶等低层大气或大气成分柱总量,时空分辨率较高,通过结合紫外或热红外等波段的高光谱探测,可进一步进行算法反演获取中高层大气成分廓线,但垂直分辨率较低。NIMBUS-7卫星搭载太阳后向紫外光谱仪SBUV(Solar Backscatter Ultraviolet)(Heath等,1975),通过太阳紫外线辐照度和来自地球的紫外线辐射反向散射,确定 O_3 的垂直分布。随后,第二代仪器SBUV2搭载于NOAA系列卫星,以检测与评估大气 O_3 变化。

1995年欧洲航天局发射的ERS-2卫星上,装载了全球臭氧监测仪GOME(Global Ozone Monitoring Experiment)(Burrows等,1999),测量大气240—

790 nm波长后向散射辐射,光谱分辨率为0.2—2.4 nm,其主要任务是监测 O_3 以及在对流层和平流层臭氧化学中具有重要影响的痕量气体,如 NO_2 、 BrO 、 $OCIO$ 和 SO_2 等全球分布,并获得 O_3 廓线产品,垂直分辨率达5 km。GOME后续搭载于MetopA/B/C卫星(Callies等,2000; Munro等,2016),持续提供 O_3 廓线数据。

2004年6月,Aura卫星发射入轨,搭载臭氧监测仪OMI(Ozone Monitoring Instrument)(Dobber等,2006; Schenkeveld等,2017),至今在轨工作超17年。OMI主要继承自SBUV与TOMS设备,采用天底成像模式,波长范围270—500 nm,光谱分辨率为0.5 nm,可反演获取 O_3 柱总量、 O_3 垂直剖面、UVB通量、 NO_2 柱总量以及 SO_2 、 BrO 、 CH_2O 与 ClO_2 等气体总量(Kleipool等,2022)。

中国风云三号极轨气象卫星FY-3A/B/C搭载了臭氧垂直探测仪SBUS(Solar Backscatter Ultraviolet Sounder),利用太阳紫外后向散射技术探测大气臭氧廓线(黄富祥等,2008),并且与NOAA/SBUV2反演产品进行对比评估,发现SBUS反演结果在多数高度层相对偏差百分率在 $\pm 10\%$ 之间,部分层相对偏差达到 $\pm 15\%$ (黄富祥等,2010)。2023年发射成功的FY-3F星上,搭载紫外高光谱臭氧天底探测仪OMS-N,提供高光谱分辨率的紫外到可见光波段地球散射辐射,光谱分辨率0.5—1 nm,空间分辨率可达 $7\text{ km} \times 7\text{ km}$,可精确探测大气 O_3 、 SO_2 、 NO_2 总量以及 O_3 垂直分布信息。

3.2 掩星观测

“掩星”是一种天文现象，诞生于18世纪，天文学中将一个天体在另一个天体与观测者之间通过而产生的遮蔽现象称为掩星。20世纪60年代，无线电掩星RO（Radio Occultation）技术作为主动探测手段，也是一种临边遥感观测技术，根据掩星信号与大气物理属性之间的联系，通过对大气进行水平切割获得垂直廓线信息（Fjeldbo等，1971；Spilker，1978）。该技术最早应用于对火星大气的研究，获得了包括大气折射率、温度、气压和电子密度等大气参数数据，美国斯坦福大学

和喷气推进实验室（JPL）合作团队在早期发展了RO技术的核心理论，奠定了该大气探测方法的基础（Fjeldbo和Eshleman，1968）。真正将RO技术应用于地球大气探测的是美国的GPS/MET项目，该项目通过发射一颗近地轨道卫星，持续跟踪GPS卫星信号，每天发生约250次的掩星事件，每次可持续1—2 min的观测。该项目首次利用GPS-RO技术获取地球大气数据资料，证明了GPS掩星资料的准确性，为后续GNSS掩星技术提供丰富的经验（Yunck等，2000）。表2列举了国际上RO大气探测载荷。

表2 国际上主要无线电掩星大气探测载荷
Table 2 Major international radio occultation atmospheric sounding loads

参量	卫星			
	CHAMP	COSMIC系列	MetOp系列	风云系列
国家和地区	德国	美国和中国台湾省	欧洲	中国
发射时间	2000年	2006年(COSMIC-1) 2019年(COSMIC-2)	2006年(MetOp-A) 2012年(MetOp-B) 2018年(MetOp-C)	2013年(FY-3C) 2017年(FY-3D) 2021年(FY-3E) 2023年(FY-3G/F)
载荷	BlackJack接收机	GPS掩星接收器	GRAS掩星接收器	GNOS
探测目标	大气折射率、密度、温度、湿度、压强廓线等	大气折射率、密度、温度、湿度、压强廓线等	大气折射率、密度、温度、湿度、压强廓线等	大气折射率、密度、温度、湿度、压强廓线等
探测高度	0—50 km	0—60 km	0—50 km	0—50 km
反演精度	ECMWF对比对流层顶以上的温度偏差小于1 K(标准偏差在1.5左右)10—35 km范围内的平均温度偏差小于0.4 K,折射率的平均偏差小于0.5% (Wickert等,2001;Wickert等,2004)	与探空数据相比折射率相对偏差标准差为1.5%—4.3%,反演温度和相对湿度均方根误差分别为1.3—2.2 K、10%—15% (薛子悦等,2022)	ECMWF对比,8—25 km折射率的标准偏差在1%以内(Zus等,2011)	ECMWF对比折射率的标准偏差在25 km以下在2%以内,温度在0—30 km标准偏差小于2 K,30 km以上标准偏差大于2 K(廖蜜等,2015)
垂直分辨率	0.5—1.5 km	50 m	20—100 m	150—300 m
水平分辨率	几百千米左右	几百千米左右	300 km	300 km

德国挑战小卫星载荷CHAMP（Challenging Minisatellite Payload）于2000年7月15日在俄罗斯发射升空，进入高度为454 km的圆轨道，主要任务是改善地球重力场和磁场模型，地球大气掩星探测是其附加任务。该计划使用BlackJack GPS接收机，相比较GPS/MET提高了信号质量，每天接收全球范围250个大气剖面信息，其掩星资料对于GPS RO技术和全球天气气候变化研究有着很大的提高（Wickert等，2001）。

由美国和中国台湾省合作发射的COSMIC系列卫星作为卫星星座首次应用于掩星探测任务，每天发生的掩星事件约1000—2000个，COSMIC-1在2020年正式退役，COSMIC-2的掩星载荷结合了GPS和GLONASS信号支持（Weiss等，2022），有

效提升了掩星观测数量，对数值天气预报、天气气候分析的精度提高作用明显（Anthes等，2008）。

欧洲气象业务卫星Metop系列分别于2006年、2012年和2018年发射上天，其上搭载掩星信号接收器GRAS（GNSS Receiver for Atmospheric Sounding），进一步提高了单颗接收机接收信号的能力和掩星资料的数量，单个GRAS掩星接收机每天能够获取600次观测廓线，丰富了数值天气预报系统（Montenbruck等，2008）。

中国的掩星大气探测计划开始于21世纪初，2013年9月23日FY-3C极轨气象卫星成功发射，其上搭载全球导航卫星掩星接收机GNOS（Global Navigation Satellite System Occultation Sounder），它是首个接收GPS信号和北斗导航卫星系统信号进

行掩星观测，摆脱了对GPS信号的依赖，同时增强掩星探测能力，采用开环跟踪（Open-loop）技术，跟踪信号能力到地面1—2 km。目前风云三号系列如FY-3C、FY-3D搭载GNOS-I型探测仪，FY-3E、FY-3F和FY-3G搭载GNOS-II型探测仪。可以对对流层和平流层大气的折射率、大气密度、大气温度和大气湿度等廓线进行测量，为数值天气预报和气候监测提供高精度、高垂直分辨率数据资料。

除无线电掩星星座探测中高层大气密度、温度等廓线信息外，掩星探测载荷在痕量气体监测方面也起到重要作用，通过掩日/月/恒星等自然光源，收集不同波段辐射数据，反演获取大气成分廓线信息。在掩日观测方面，早期，平流层气溶胶测量实验SAM II（Stratospheric Aerosol Measurement）搭载于NIMBUS-7卫星，可在日出和日落期间观察穿过地球大气层的一小部分太阳光线，反演获取平流层和对流层中气溶胶廓线。SAGE II搭载于ERBS卫星，利用太阳掩星技术，获取气溶胶衰减、 O_3 、 NO_2 和 H_2O 的廓线（McCormick, 1987），该设备的迭代版本SAGE III搭载于Meteor-3M卫星，2017年进一步搭载于国际空间站（Kovilakam等, 2023），扩展了近红外区域测量能力，增加了温度与气压廓线探测，并新增月球掩星模式，观测范围覆盖更为广泛的纬度。搭载于UARS卫星的卤素掩星实验HALOE（Halogen Occultation Experiment）采用太阳掩星观测模式，同时测量得到中高层大气温度以及 O_3 、 HCl 、 HF 、 CH_4 、 H_2O 、 NO 、 NO_2 等大气成分的垂直分布情况，垂直分辨率为1.6 km（Groß和Russell III, 2005）。日本先进地球观测卫星ADEOS上搭载的改进型临边大气传感器ILAS（Improved Limb Atmospheric Spectrometer）同样采用太阳掩星探测模式，测量 O_2 -A波段大气吸收光谱，采用层析法获取整个平流层的温度分布。除掩日、掩月等方式，2002年，ENVISAT卫星搭载全球恒星掩星臭氧检测仪GOMOS（Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars）（Kyrölä等, 2004），该载荷为UV/VIS/NIR光栅光谱仪，采用恒星掩星模式，监测平流层和中间层 O_3 、 NO_2 、 NO_3 、气溶胶等大气成分，获取中高层大气温度、密度等廓线数据，垂直分辨率为1.7 km，水平分辨率约300 km。通过掩日/月/恒星等探测方式，提供了中高层大气高垂直分辨率廓线，但受限于掩星事件

发生的频次，探测数据较少。

3.3 临边观测

临边探测载荷结合了天底观测高时空分辨率以及掩星观测高垂直分辨率的优势，逐渐发展成为中高层大气温度、风场以及成分探测的重要手段。

3.3.1 风场探测

风场作为表征中高层大气动力学特征的重要参数，其探测的基本原理是利用大气成分光谱随大气运动与温度变化产生的多普勒频移和展宽特性，进而反演出沿观测视线方向的风速、温度、辐射率等大气物理参数。表3展示了典型的中高层大气风场探测载荷。为了探测大气成分精细光谱辐射，目前在轨运行的中高层风场探测载荷主要采用干涉光谱技术，发展有FP干涉仪和迈克尔逊（Michelson）干涉仪以及多普勒非对称空间外差干涉仪DASH（Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne）等测风技术，均具有高光谱分辨率、高相位灵敏度和高通量特点（冯玉涛等, 2017；韩斌等, 2024）。FP干涉测风技术结构简单，但视场较小难以展宽，且标准具对制造工艺要求极高。Michelson干涉仪克服了FP干涉仪对制造工艺的高要求，可以通过扩视场技术提高光通量与信噪比，但Michelson干涉仪依赖四步相位法原理，需要获得相位不同的4幅干涉图进行反演计算，对机械结构和镀膜工艺要求较高，结构较为复杂（肖旻等, 2022）。

搭载于UARS卫星的HRDI仪器（Hays等, 1993）是首台对平流层、中间层和低热层（10—120 km）水平风场直接测量的仪器，另一台同样搭载于UARS卫星的测风设备WINDII则用于探测中间层、热层（80—300 km高度范围）大气风速、温度、气辉体发射率的探测。HRDI为FP干涉仪，具有高光谱分辨率（ 0.05 cm^{-1} ），良好的带外抑制和优异的稳定性，日间可以测量平流层（10—40 km）、中间层和低热层（~50—120 km）风矢量，夜间测量得到低热层风矢量（~95 km），准确率为5 m/s（Burrage等, 1993；Grassl等, 1995）。除风速外，HRDI可以反演温度、 O_2 体发射率、中间层和低热层 O_3 和 $O(1D)$ 混合比以及平流层气溶胶和分子消光系数。观测数据经纬度覆盖 40°S （N）— 76°N （S），偏航周期交替约36天。

表3 中高层大气风场测量载荷
Table 3 Payloads for middle and upper wind observation

参量	载荷			
	HRDI	WINDII	TIDI (Yee 等,2003)	MIGHTI
国家	美国	加拿大、法国	美国	美国
探测时间	1991-09—2005-04	1991-09—1997-09	2001-12—至今	2019-10—2022-11
探测目标	OI 630.0 nm	OI 557.7 nm	OI 557.7 nm	OI 557.7 nm
	O ₂ 690.0 nm	OI 630.0 nm	OI 630.0 nm	OI 630.0 nm
	O ₂ 762.0 nm	OH 734.1 nm	O ₂ 867.0 nm	
		O ₂ 763.2 nm		
探测高度	10—120 km	80—300 km	60—300 km	80—300 km(日间); 90—105 km, 210—300 km(夜间)
反演精度	5 m/s	5 m/s	3 m/s(中间层);15 m/s(低热层)	5 m/s
垂直分辨率	3 km	2 km	2.5 km(中间层);25 km(热层)	5 km
水平分辨率	300 km(沿视线方向)	300 km(沿视线方向)	750 km	<500 km
观测范围	40°N(S)—76°S(N)	<60°N(S)	—	—

WINDII 仪器 (Shepherd 等, 1993) 是带有两个无遮挡的 CCD 探测器的 Michelson 干涉仪, 两台望远镜分别位于卫星速度矢量方位的 45° 和 135° 方向, 一次测量即可实现对 80—300 km 高度范围气辉成像, 通过联合两正交视场方向的风速, 进一步获取矢量风场 (Shepherd 等, 2012)。

TIMED 卫星多普勒干涉仪 TIDI (TIMED Doppler Interferometer) 设备 (Killeen 等, 2006), 是在 HRDI 成功应用的基础上, 进一步研发的新一代高分辨率 FP 干涉式光谱成像仪, 首次应用环转线干涉仪光学系统将圆形干涉条纹转化成线型干涉条纹, 并采用高效率低噪声的 CCD 探测器进行干涉图采样。该设备首次实现了对与卫星速度方向成 ±45° 和 ±135° 等 4 个正交方向同时探测, 如图 4 所示。通过临边扫描方式监测由中性风引起的气辉辐射多普勒频移来测量风速, 白天观测 70—120 km 高度, 夜间观测 80—105 km 的高度范围。在 HRDI 与 WINDII 观测数据上, TIDI 进一步拓展了中高层风场的时序观测, 提供了更高纬度的风场数据。

全球高分辨率热层迈克尔逊成像干涉仪 MIGHTI (Michelson Interferometer for Global High-resolution Thermospheric Imaging) 搭载于 ICON 卫星上, 由美国海军研究实验室研制, 可通过地球临边测量高层大气的风速和温度 (Englert 等, 2017; Harlander 等, 2017)。设备采用 DASH 技术, 从 45°、135° 两个正交视场方向接收临边气辉辐射, 其观测通道包含 630.0 nm、557.7 nm 以及 5 个 O₂-A 通道 754.1 nm、760.0 nm、762.8 nm、765.2 nm、

780.1 nm。通过 OI 630.0 nm 波长与 OI 557.7 nm 波长的多普勒频移, 测量 90—300 km 风速, 并通过两视场的矢量结合, 获取风场矢量信息 (Harding 等, 2017)。除风速外, MIGHTI 通过 O₂-A 通道离散波长光谱线型, 从波段的旋转包络线反演大气温度, 日间能够探测 90—105 km 高度范围内温度, 测量精度为 1 K, 夜间 90 km 处温度测量精度为 1 K, 105 km 处为 3 K (Stevens 等, 2018)。

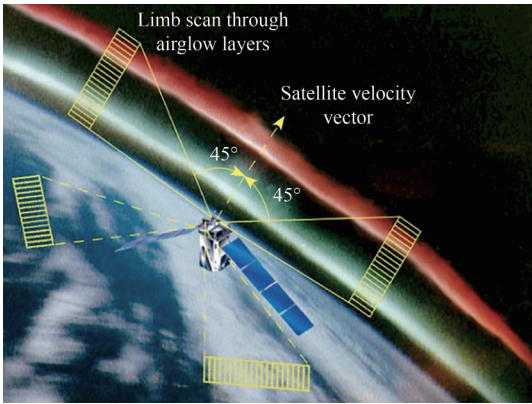


图4 TIDI设备4个正交观测方向
Fig. 4 TIDI views in four orthogonal directions

3.3.2 温度探测

中高层大气温度分布对于研究大气热力学结构具有重要意义, 其探测主要基于 CO₂ 或 O₂ 在大气中的均匀分布, 根据 CO₂ 波段 (16 μm 或 4.3 μm) 或 O₂ 波段的辐射光谱特征, 反演大气温度廓线。上述测风载荷 HRDI、WINDII、TIDI 以及 MIGHTI 载荷, 均可通过临边观测 O₂-A 带气辉光谱强度,

反演获取约 80—105 km 区间大气温度廓线。

利用宽带发射辐射计的大气廓线测量仪 SABER (The Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry) 载荷 (Russell III 等, 1999) 搭载于 TIMED 卫星, 为 10 通道宽带滤波辐射计, 每 58 s 完成 1 次平流层到低热层大气廓线临边扫描, 利用 CO₂ 在 4.3 μm 与 15 μm 波段的辐射信号反演大气温度。SABER 自 2001 年 12 月发射入轨后, 至今仍在轨稳定工作, 能够获取 15—120 km 的温度数据, 在中间层顶 (100 km) 附近的温度误差为 ±2 K, 但在 110 km 以上, 由于信号强度减小以及非局域热力学平衡 (non-LTE) 效应加剧, 温度反演误差迅速增大 (Mertens 等, 2001; Liu 等, 2021)。SABER 观测垂直分辨率约为 2 km, 水平分辨率约为 400 km, 观测范围覆盖 52°S (N)—83°N (S) (Mertens 等, 2009), 每隔 60 d 交换一次主副半球 (Cao 等, 2012)。

MATS 卫星 (Gumbel 等, 2020) 由瑞典国家空间委员会资助研发, 是第一颗基于 InnoSat 平台的小型卫星, 于 2022 年 12 月发射入轨, 主要搭载临边成像仪与天底成像仪, 如图 5 所示, 以捕捉 MLT 区域三维波结构。为了实现临边成像, 该载荷采用基于自由曲面的离轴三反望远镜, 结合二向色分束器和窄带滤波器, 成像至 6 个 CCD 通道, 其中 2 个紫外波段, 分别为 270 nm 与 305 nm, 用于夜光云的观测; 4 个近红外波段, 覆盖 750—775 nm 波长范围, 观测 O₂-A 气辉发射率反演获取大气温度廓线。MATS 临边成像仪提供了全球范围 75—100 km 高度大气温度、发射率等廓线信息, 温度的日间精度达 2—5 K, 夜间精度 5—20 K, 发射率精度指标达 1%—5%, 廓线垂直分辨率为 1 km, 水平分辨率约 60×20 km。

3.3.3 大气成分探测

中高层大气成分廓线临边探测载荷光谱覆盖范围较为广泛, 包括极紫外、紫外、可见光、近红外、红外与微波等波段, 表 4 列举了目前中高层大气成分探测的卫星载荷。

全球紫外成像仪 GUVI (Global UltraViolet Imager), 搭载于 TIMED 卫星, 通过临边与天底交替观测高层大气中的远紫外光, 监测高层大气成分 (氧族和氢族不同关键气体) 的变化。GUVI

扫描高度范围为 110—525 km, 垂直分辨率 20 km。有学者利用 OI 135.6 nm 波长夜气辉反演得到了电离层参量的高度分布 (DeMajistre 等, 2004; Kamalabadi 等, 2018)。同样地, ICON 卫星搭载远紫外成像仪 FUV, 通过对 O 的 135.6 nm 波长和 N₂ 157 nm 波长辐射观测, 获取日间大气密度成分观测和夜间电子密度分布; 并搭载极紫外光谱仪 EUV 设备, 通过测量 O⁺ 的辐射谱线得到电离层的密度和高度剖面。

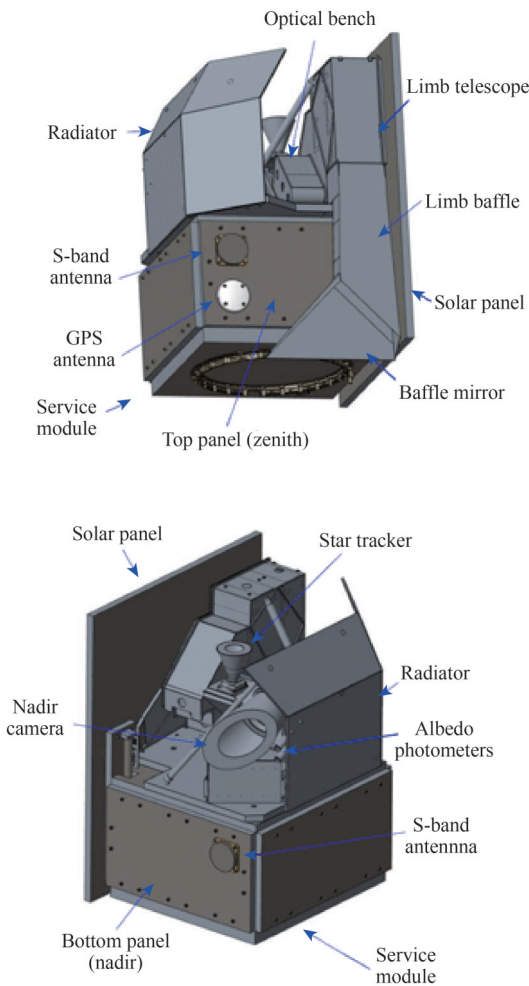


图 5 MATS 临边/天底成像仪
Fig. 5 Layout of the MATS satellite.

紫外高光谱臭氧探测仪—临边 OMS-L 搭载于 FY-3F 星, 于 2023 年 8 月发射, 是风云系列卫星第二代臭氧探测仪, 通过临边方式观测平流层 (15—60 km) 大气对太阳紫外和可见光的散射, 获取 O₃、NO₂、SO₂、平流层气溶胶廓线等 (国家卫星气象中心, 2023)。该设备为一台采用棱镜加光栅二次色散技术的光谱仪, 具有 3 个致冷型二维

CMOS 探测器，光谱波段分别为 286.8—402.1 nm（波段 1）、390.1—504.1 nm（波段 2）以及 289.8—503.9 nm（波段 3）。OMS-L 波段 3 为线偏振光，对波段 1、2 进行偏振订正。OMS-L 垂直探测分辨率为 3 km，水平空间分辨率在跨轨方向由瞬时视场决定，约为 100 km，在沿轨方向由探测器积分时间决定，积分时间可调，当积分时间为 1.2 s 时空间分辨率约为 8 km。

表 4 临边探测大气成分卫星载荷

Table 4 Satellite payload for atmospheric composition observation with limb mode

	载荷	工作时间	工作波段	探测目标	探测高度/km	垂直分辨率/km
极紫外	GUVI/TIMED	2001—12 至今	115—180 nm	测量 MLTI 区域的全球组成和温度分布以及它的极光能量输入	110—525	20
	OMS-L/FY-3F	2023-08 至今	290—500 nm (0.6 nm)	O ₃ 、NO ₂ 、SO ₂ 、平流层气溶胶廓线	15—60	3
	OMPS/SNPP	2011-10 至今	290—1000 nm	O ₃ 、NO ₂ 、SO ₂ 、等痕量气体柱浓度及 O ₃ 廓线	0—60	3
	OSIRIS/Odin	2001-02 至今	280—800 nm, 1.53 um, 1.27 um, 1.26 um	O ₃ 、NO ₂ 、SO ₂ 、CO、H ₂ O 等廓线	7—65	1—2
	SCIAMACHY/ENVISAT	2002-03—2012-04	240—2380 nm	O ₃ 、BrO、OCIO、ClO、SO ₂ 、H ₂ CO、NO、NO ₂ 、NO ₃ 、CO、CO ₂ 、CH ₄ 、H ₂ O、N ₂ O、气溶胶、辐射和云的性质	0—100	3
	MIPAS/ENVISAT	2002-03—2012-04	4.15—14.6 um	温度、H ₂ O、O ₃ 、CH ₄ 、N ₂ O、HNO ₃ 、NO ₂ 廓线	6—160	3—8
	HIRDLS/Aura	2004-08 至今	6—18 um	温度、O ₃ 、H ₂ O、CH ₄ 、N ₂ O、NO ₂ 、HNO ₃ 、N ₂ O ₅ 、CFC-11、CFC-12、ClONO ₂ 、气溶胶、极地平流层云及云顶高度	8—80	1
微波	SMR/Odin	2001-02 至今	118.25—119.25 GHz、486.1—503.9 GHz、541.0—580.4 GHz	气温、O ₃ 、ClO、N ₂ O、HNO ₃ 、H ₂ O、CO、NO 以及 H ₂ O 与 O ₃ 同位素	15—120	1.5—3
	MLS/UARS	1991-09—2005	63 GHz、183GHz、205 GHz；118 GHz、190 GHz、240 GHz、	大气成分、温度和冰云的垂直廓线	10—92	1.5
	MLS/AURA	2004-08 至今	640 GHz、2500 GHz			

大气臭氧探测廓线仪 OMPS（Ozone Mapping Profiler Suit）（Flynn 等，2006）搭载于美国 Suomi-NPP 卫星与 NOAA-20 卫星，该设备由 3 部分组成，分别为星下点探测仪 NM（Nadir Mapper）、星下点廓线仪 NP（Nadir Profiler）以及临边探测仪 LP（Limb Profiler）（Loughman 等，2018）。其中，OMPS-LP 是一种棱镜光谱仪，光谱覆盖 290—1000 nm 波段，能够探测平流层与对流层高垂直分辨率的臭氧廓线，垂直分辨率达 2 km（Flynn 等，2014）。

光谱仪和红外成像仪 OSIRIS（Optical, Spectroscopic and Infrared Remote Imaging System）搭载于 Odin 卫星，该设备核心部件为光栅光谱仪，由 3 个红外成像仪（红外波段）和 1 个光学光谱仪组成，光学光谱仪覆盖 280—800 nm 紫外到可见光波段范围（Llewellyn 等，2003）。该设备通过临边扫描模式，能够提供中高层大气垂直廓线。王维佳等（2021）利用 OSIRIS 在 2008 年间探测的 O₂-A 带夜气辉辐亮度观测数据，对气辉的高度变化和

季节变化等特征进行了统计分析，并对形成 O₂-A 带夜气辉的大气成分数据进行分析，以期进一步明确 O₂-A 带夜气辉的变化趋势和其影响因素。

大气成分探测扫描成像仪 SCIAMACHY（Scanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric Chartography）（Bovensmann 等，1999）是欧洲航天局在 2002 年 3 月发射的大型环境监测卫星 ENVISAT-1 上搭载的 10 大载荷之一。该设备探测紫外/可见光及近中红外光谱，覆盖 240—2380 nm 波段，光谱分辨率为 0.24—1.48 nm，能够实现对流层与平流层中痕量气体的全球测量，探测高度 0—100 km，垂直分辨率 3 km。同时较宽的光谱波段使得该设备也可进一步用于观测云与气溶胶。如图 6 所示，SCIAMACHY 对地模式和临边观测模式交替进行，扫描对地或临边测量反射和散射太阳光，进而反演大气微量成分和气溶胶浓度。在掩星事件发生时，进行掩日/月扫描，获取日光或月光散射光。

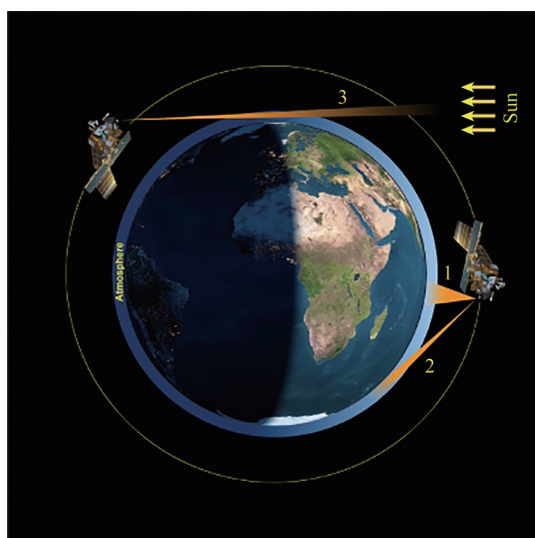


图6 SCIAMACHY的科学观测模式:1=天底观测,2=临边观测,3=掩星观测(ESA)

Fig. 6 SCIAMACHY's scientific observation modes:
1 = nadir, 2 = limb, 3 = occultation

迈克尔逊干涉被动大气探测仪 MIPAS (The Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding) (Louet 和 Bruzzi, 1999) 搭载于 ENVISAT 卫星, 于 2002 年 3 月发射成功, 采用临边探测方式对大气对流层上部到中间层之间的光化学相关痕量气体进行全球测量。探测高度 6—160 km, 垂直分辨率 3—8 km, 水平方向分辨率为 3 km×30 km。该载荷在中波和热红外波段 (4.15—14.6 μm) 光谱分辨率为 0.025 cm^{-1} , 通过大气中红外谱段辐射可反演中高层大气温度、压强和成分, 提供了全球范围大气温度与成分三维资料。

高分辨率动力学临边探测器 HIRDLS (High Resolution Dynamics Limb Sounder) 搭载于 Aura 卫星, 于 2004 年 7 月发射成功, 光谱范围为 6—18 μm 。与之前的红外临边探测器相比, 该仪器采用更窄且干扰最小的光谱通道, 使其具有更高的垂直分辨率 (1 km) 与水平分辨率 (10 km), 能探测对流层上部到平流层 (8—80 km) 的温度、 O_3 、 H_2O 、 CH_4 、 N_2O 、 NO_2 、 HNO_3 、 N_2O_5 、CFC-11、CFC-12、 ClONO_2 、气溶胶、极地平流层云及云顶高度。

亚毫米辐射计 SMR (Sub-Millimetre Radiometer) (Frisk 等, 2003; Olberg 等, 2003) 为 Odin 卫星的主载荷, 是第一个实现亚毫米波探测的星载临边探测器, 具有 4 个亚毫米波段与 1 个毫米波段。SMR 对天与对地 (临边观测) 观测时间各占一半, 临边观测时, 能够对 15—120 km 大气层进行测量,

反演获取 O_3 、 ClO 、 H_2O 、 N_2O 垂直廓线分布 (Baron 等, 2002)。

微波临边探测器 MLS (Microwave Limb Sounder) 载荷先后搭载于 UARS 与 Aura 卫星, 通过临边扫描测量地球大气微波热辐射, 获取温度、大气成分与冰云垂直廓线。MLS/UARS 工作波段为 63 GHz、183 GHz 和 205 GHz, MLS/Aura 为 118 GHz、190 GHz、240 GHz、640 GHz 和 2.5 THz 的热辐射, 用于测量大气成分及温度等大气参量。MLS 根据与氧原子谱线相近的 118 GHz 和 240 GHz 两个辐射探测器探测到热辐射结果反演得到温度廓线, 覆盖约 10—92 km 高度范围, 50 km 以下垂直分辨率约为 1.3 km, 50 km 以上逐渐增大至约 5 km。

4 中高层大气探测临边遥感卫星

中高层大气的变化直接或间接地影响着与人类生活息息相关的低层大气环境。对中高层大气温度、密度、风场等廓线探测的迫切需求, 促使中国急需发展自己的中高层大气廓线探测卫星。随着光学技术的日益发展, 新技术与新方法不断涌现, 为中高层大气廓线探测提供了更加有力的技术支撑。结合现有技术基础, 研制单位提出了中国中高层大气廓线探测卫星“天路一号”, 该卫星于 2025 年 1 月 17 日在酒泉卫星发射中心发射入轨, 运行于 520 km 高度太阳同步轨道, 轨道倾角 97.5°, 整星搭载三台临边遥感载荷, 如图 7 所示, 实现高时空分辨率与高垂直分辨率的大气密度、温度、风场与成分等廓线探测。

(1) 大气温度与成分测量。气辉是中高层大气重要的光化学现象, 受太阳辐射激发的粒子由较高能级跃迁到较低能级的过程中发射光子, 形成气辉, 其辐射强度与中高层大气温度等特性息息相关。 O_2 -A 带气辉是可见光及近红外气辉光谱区域内最为明亮的气辉样本, 是进行中高层大气温度探测的最佳观测目标之一, 其白天气辉主要存在于 40—200 km, 夜气辉存在于 80—100 km (McDade 和 Llewellyn, 1986)。 O_3 作为中高层大气重要成分之一, 主要存在于平流层区域, 其在紫外、可见光与近红外波段具有 4 个主要吸收通道, 分别为 Hartley 波段 (200—310 nm)、Huggins 波段 (310—380 nm)、Chappuis 波段 (400—650 nm) 以及 Wulf 波段 (600—1100 nm)。

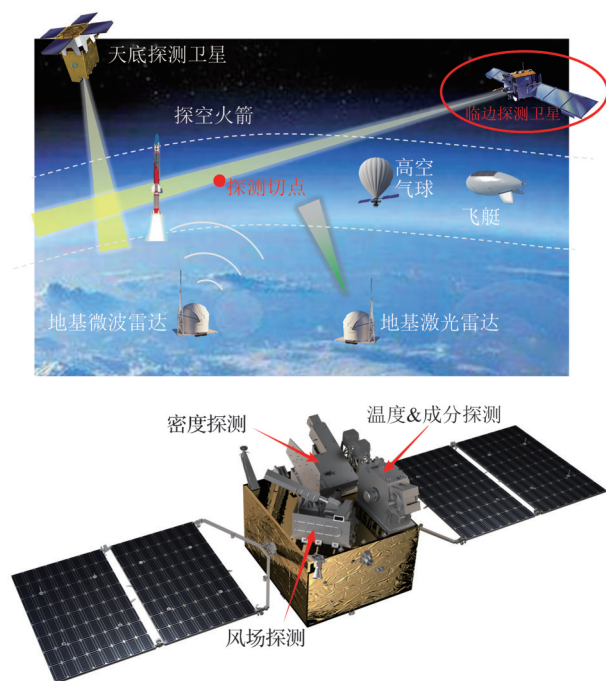


图7 中高层大气探测临边遥感卫星

Fig. 7 The satellite for middle and upper atmospheric profile limb observation

基于 O_3 分子在 Chappuis-Wulf 波段的吸收特性与 O_2 -A 气辉谱线的发射特性, 综合考虑 O_3 与 O_2 -A 气辉存在的不同高度区域, 开发高光谱大气温度和成分廓线临边探测仪载荷 TOPS (Temperature and Ozone Profile monitoring Spectrometer), 光谱范围覆盖 500—800 nm, 光谱分辨率小于 2 nm。TOPS 载荷采用光栅光谱技术, 结构简单, 光谱信号直观, 光谱覆盖范围广, 数据处理简便。如图 8 所示, 该载荷通过水平凝视及垂直方向快速扫描, 可获取 10—100 km 高度区域内辐射光谱, 水平多像元结构保证了水平幅宽及分辨率, 水平观测视场大于 4.5° 。结合辐射传输模式, 从辐射光谱中可进一步反演获取平流层臭氧廓线及部分中间层与低热层大气温度廓线, 廓线分辨率达 2 km。

(2) 大气密度测量。空间外差光谱仪 SHS (Spatial Heterodyne Spectrometer) 是 20 世纪 90 年代迅速发展起的新型超光谱分析技术, 具有干涉仪的高通量和光栅空间衍射特点, 在一定中心波长范围内可获得极高的光谱分辨率, 被广泛应用于大气检测、卫星遥感等领域 (汪钱盛等, 2023)。SHS 光学系统结构如图 9 (b) 所示, 衍射光栅代

替了传统迈克尔逊干涉仪中的两个平面反射镜 (方雪静等, 2019; 罗海燕等, 2016), 光束经透镜 L1 准直后入射到分束器进行分光, 经两光栅衍射后返回分束器, 在出射面上形成干涉条纹, 由 CCD 探测器记录, 通过一定算法即可复原入射光谱, 实现对目标的超光谱探测。中国首台基于 SHS 技术的星载超光谱大气探测载荷 GMI (Greenhouse gases Monitor Instrument) (熊伟, 2018) 搭载于高分五号, 采用天底和耀斑观测模式, 周期性对温室气体吸收光谱进行定量遥感, 获取 CO_2 、 CH_4 等大气成分浓度的全球分布。

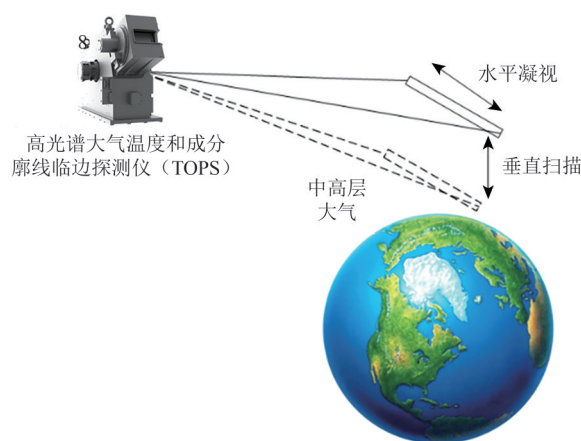


图8 高光谱大气温度和成分廓线临边探测仪扫描示意图

Fig. 8 Scanning mode of the temperature and ozone profile monitoring spectrometer

基于 SHS 技术具备高光谱分辨率、高通量、高信噪比且无活动部件等优势, 本文将 SHS 技术与临边观测模式相结合, 提出超分辨空间外差干涉成像探测仪, 进行中高层大气密度探测。由于氧分子在 70 km 以下高度区域存在强烈的自吸收效应, 利用 O_2 -A 带吸收光谱特性与大气背景压力 (密度) 相关性, 研制开发大气密度廓线探测仪载荷 HDI (Heterodyne atmospheric Density profile Imager)。该载荷光谱范围覆盖 759—769 nm O_2 -A 吸收带, 光谱分辨率优于 0.04 nm, 一次探测即可获取 20—70 km 区域高垂直分辨辐射信息, 进而反演获取全球大气密度廓线。如图 9 (a) 所示, HDI 载荷既可以进行高光谱探测, 又可无需扫描, 快速获取整幅中高层大气廓线探测信号, 同时, 仪器接收的辐射信号受背景辐射影响较小, 具有较高的探测精度。

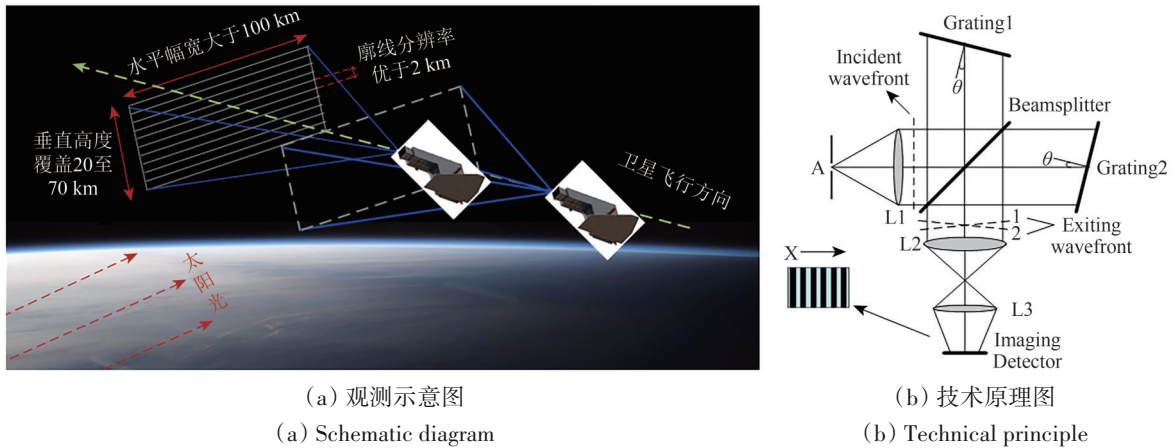


图9 大气密度廓线探测仪观测示意图与技术原理图
Fig. 9 Schematic diagram of spatial heterodyne spectroscopy and technical principle

(3) 大气风场探测。DASH干涉技术是在SHS基础上逐渐发展形成的一种针对行星大气风场探测的新型技术，2006年由美国海军实验室ENGLERT C R研究团队提出，该技术实质为一种非对称形式空间外差干涉仪，通过差频干涉获得高光谱分辨率，通过两臂非对称设计产生大基础光程差实现高相位灵敏度，其利用干涉图和入射光谱之间的完善傅里叶变换关系，通过计算复数干涉图相位来反演入射光谱的多普勒频移。相比于目前卫星所搭载的FP干涉仪与Michelson干涉仪测风，DASH干涉仪具有如下优点：1) 双光束等厚空间调制干涉，放宽了对元件光学指标的要求；2) 干涉图一次采集不需要步进扫描；3) 依靠干涉图与光谱图之间的傅里叶变换关系反演风速，不需要极窄带宽 ($<1\text{ nm}$) 的滤光片分离单一线光谱；4) 可实

现同步定标，定标光源标准谱线和探测源目标谱线同时引入干涉仪系统实时监测干涉仪状态变化，进一步提高测量精度 (Xiao 等, 2022)。

联合DASH干涉技术与临边观测模式，研制多普勒差分风成像仪载荷DWI (Doppler heterodyne Wind Imager)，探测80—150 km区域氧原子随中性大气运动产生的气辉 (OI 557.7 nm 波长) 多普勒频移。如图10所示，通过对载荷获取的干涉图进行多普勒相位反演，实现对80—150 km高度范围全球风场探测，分辨率优于2 km。DWI载荷采用单边正交双视场，视场方向与卫星运行方向夹角分别呈 45° 与 135° ，通过卫星运动实现同区域风场正交延时测量，最终进行矢量合成形成矢量风场数据。

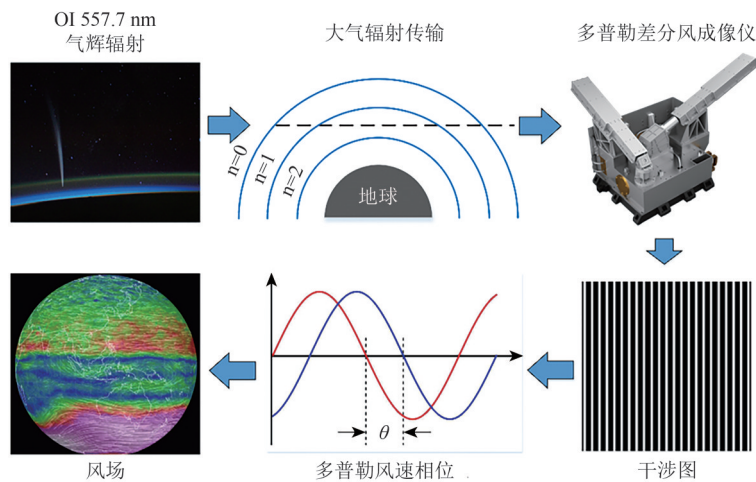


图10 多普勒差分风成像仪测风原理

Fig. 10 Doppler heterodyne wind imager for wind detection

5 结 语

中高层大气物理、化学和辐射过程等对于理解地球大气系统和气候变化至关重要。卫星遥感探测是获取全球中高层大气廓线的有效手段,对中高层大气动力学过程研究、空间环境监测、全球气候学研究等具有重要意义。本文基于中高层大气环境特性,回顾了目前中高层大气廓线探测卫星与载荷,简要介绍了中国中高层大气探测临边遥感卫星“天路一号”,并对中国后续中高层大气廓线探测卫星建设进行展望。

(1) 20世纪80年代前,国外NIMBUS系列卫星陆续搭载中高层大气探测有效载荷,20世纪80年代后,开始发射专用于中高层大气探测卫星,如UARS、Odin、TIMED、ICON、MATS等卫星,观测模式包括天底、掩星以及临边观测,观测波段包括极紫外至微波波段,积累了大量平流层、中间层与低热层大气温度、风场、成分等探测数据。中国风云卫星极轨系列搭载GNOS掩星观测载荷,能够获取中高层大气密度、折射率等参数,风云3F星上搭载OMS-L/N设备,通过临边/天底探测,获取平流层臭氧廓线。目前,中国在星载中高层大气探测领域仍与国际先进水平存在一定差距。

(2) 临边遥感结合了天底探测与掩星探测的优势,提供了高垂直分辨率和水平分辨率的中高层大气环境观测。研制单位发射的中国中高层大气廓线探测卫星“天路一号”采用临边探测方式,通过光栅光谱、SHS技术与DASH等先进的光学手段,获取高光谱甚至超光谱的中高层大气示踪物光谱信号,能够更加准确地反演获取中高层大气动力学与化学成分参数廓线,如温度、成分、密度、风场等。同时,采用的SHS与DASH光学手段,无需扫描部件,一次成像即可获取整层中高层大气观测数据,有效提升了观测的时空分布范围。所发射的中高层大气探测临边遥感卫星“天路一号”实现了中高层大气温度、密度、风场等动力学参数以及臭氧成分含量监测,对于理解中高层大气能量与物质输送、化学成分变化以及气候系统响应具有重要意义,可进一步推动气候变化研究、空间天气预报、通讯导航等多领域研究进展。

(3) 发展主被动结合探测载荷将是未来全球中高层大气参数探测的研究热点与趋势。相比于被动探测载荷,主动探测可以提高探测精度与垂

直分辨率。自20世纪60年代起,钠荧光激光雷达、钾荧光激光雷达、钙荧光激光雷达、铁激光雷达等逐渐被建立起来用于观测中间层顶及低热层大气,但多处于地基测量阶段。2018年8月,Aerolus卫星发射升空,搭载ALADIN 355 nm波长非相干多普勒测风激光雷达(Lux等,2020),提供全球范围30 km以下的水平视线方向三维风场信息(胡中昱和卜令兵,2023)。有学者提出星载多普勒混合体制测风激光雷达概念(Emmitt,2001),提高大气垂直风廓线的探测精度(陈炳龙等,2020)。考虑到建设成本及难度,目前对于中高层大气星载主动探测载荷仍处于仿真分析阶段,如星载钠荧光多普勒激光雷达的可行性研究(闫召爱等,2015),星载瑞利激光雷达探测中高层大气密度的模拟仿真(Wang等,2024)。未来仍需推动中高层大气温度、密度、成分、风场等主动探测载荷自主研发与实验应用,发展主被动结合探测卫星,实现中高层大气的精细探测。

(4) 建设中高层大气探测星座,实现高频次高分辨率中高层大气参数全高度覆盖。单一载荷仅能观测固定高度范围大气参数数据,如被动观测气辉时,气辉谱段所对应的高度并不统一,单一设备很难获取中高层全高度大气廓线参数,通过发展中高层大气探测星座,合理规划载荷设备需求,实现中高层大气参数探测全覆盖,与地面观测网相结合,形成天地一体化、协同高效的中高层大气探测网。

(5) 中高层大气廓线探测数据是中国自主研发中高层大气数值预报模式的重要前提。目前业务运行的中国气象局全球数值预报系统CMA-GFS(China Meteorological Administration – global forecast system)(Shen等,2023)可实现0.1 hPa (~60 km)以下气象预报,水平分辨率 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。结合多源中高层大气廓线数据,可进一步开发中高层大气数值预报模式,建立全面的中高层大气再分析数据集,为气象预报和气候研究提供重要依据。随着人工智能技术的迅猛发展,其在气象数值预报领域的应用也日益广泛(黄小猛等,2024),依托强大的计算资源和海量探测数据,开发更为智能的中高层大气预报模型,在数据驱动的基础上,引入中高层大气物理约束机制,确保预报结果的科学性和可靠性,提高中高层大气预报精度与时空分辨率,可为防灾减灾、天气与气候研究等领域提供更加有力的预报支持。

参考文献(References)

- Ahmad S P, Johnson J E and Jackman C H. 2003. Atmospheric products from the upper atmosphere research satellite (UARS). *Advances in Space Research*, 31(9): 2105-2110 [DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00127-3]
- Anthes R A, Bernhardt P A, Chen Y, Cucurull L, Dymond K F, Ector D, Healy S B, Ho S P, Hunt D C, Kuo Y H, Liu H, Manning K, McCormick C, Meehan T K, Randel W J, Rocken C, Schreiner W S, Sokolovskiy S V, Syndergaard S, Thompson D C, Trenberth K E, Wee T K, Yen N L and Zeng Z. 2008. The COSMIC/FORMOSAT-3 mission: early results. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(3): 313-334 [DOI: 10.1175/BAMS-89-3-313]
- Baron P, Ricaud P, de la Noë J, Eriksson J E P, Merino F, Ridal M and Murtagh D P. 2002. Studies for the Odin sub-millimetre radiometer. II. Retrieval methodology. *Canadian Journal of Physics*, 80(4): 341-356 [DOI: 10.1139/p01-150]
- Barth C A, Rusch D W, Thomas R J, Mount G H, Rottman G J, Thomas G E, Sanders R W and Lawrence G M. 1983. Solar Mesosphere Explorer: scientific objectives and results. *Geophysical Research Letters*, 10(4): 237-240 [DOI: 10.1029/GL010i004p00237]
- Bernhard G H, Bais A F, Aucamp P J, Klekociuk A R, Liley J B and McKenzie R L. 2023. Stratospheric ozone, UV radiation, and climate interactions. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 22(5): 937-989 [DOI: 10.1007/s43630-023-00371-y]
- Bills R E, Gardner C S and Franke S J. 1991. Na Doppler/temperature lidar: initial mesopause region observations and comparison with the Urbana medium frequency radar. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 96(D12): 22701-22707 [DOI: 10.1029/91JD02206]
- Bovensmann H, Burrows J P, Buchwitz M, Frerick J, Noë S, Rozanov V V, Chance K V and Goede A P H. 1999. SCIAMACHY: mission objectives and measurement modes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56(2): 127-150 [DOI: 10.1175/1520-0469(1999)056<0127:SMOAMM>2.0.CO;2]
- Burrage M D, Skinner W R, Marshall A R, Hays P B, Lieberman R S, Franke S J, Gell D A, Ortland D A, Morton Y T, Schmidlin F J, Vincent R A and Wu D L. 1993. Comparison of HRDI wind measurements with radar and rocket observations. *Geophysical Research Letters*, 20(12): 1259-1262 [DOI: 10.1029/93GL01108]
- Burrows J P, Weber M, Buchwitz M, Rozanov V, Ladstätter-Weißmayer A, Richter A, DeBeek R, Hoogen R, Bramstedt K, Eichmann K U, Eisinger M and Perner D. 1999. The global ozone monitoring experiment (GOME): mission concept and first scientific results. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56(2): 151-175 [DOI: 10.1175/1520-0469(1999)056<0151:TGOMEG>2.0.CO;2]
- Callies J, Corpaccioli E, Eisinger M, Hahne A and Lefebvre A. 2000. GOME-2-Metop's second-generation sensor for operational ozone monitoring. *ESA Bulletin*, 102: 28-36
- Cao W X, Zhang S D, Yi F and Huang C M. 2012. Variation of the mesopause observed by SABER/TIMED satellite. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(8): 2489-2497 (操文祥, 张绍东, 易帆, 黄春明. 2012. 中间层顶变化的SABER/TIMED卫星观测. *地球物理学报*, 55(8): 2489-2497 [DOI: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.08.001])
- Chen B L, Yang Z D, Min M, Liu J Q, Zhao Y M and Wang F. 2020. Application requirements and research progress of spaceborne doppler wind lidar. *Laser and Optoelectronics Progress*, 57(19): 190003 (陈炳龙, 杨忠东, 闵敏, 刘继桥, 赵一鸣, 王富. 2020. 星载多普勒测风激光雷达应用需求与研究进展. *激光与光电子学进展*, 57(19): 190003) [DOI: 10.3788/LOP57.190003]
- Chen H B. 2009. An overview of the space-based observations for upper atmospheric research. *Advances in Earth Science*, 24(3): 229-241 (陈洪滨. 2009. 中高层大气研究的太空探测. *地球科学进展*, 24(3): 229-241) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-8166.2009.03.002]
- Chen Z. 1987. GJB 365.1-87 Northern hemisphere standard atmosphere (-2~80 kilometers). Beijing: Commission of Science Technology and Industry for National Defense (陈昭. 1987. GJB 365.1-87 北半球标准大气(-2~80公里). 北京: 国防科学技术工业委员会)
- DeMajistre R, Paxton L J, Morrison D, Yee J H, Goncharenko L P and Christensen A B. 2004. Retrievals of nighttime electron density from Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED) mission Global Ultraviolet Imager (GUVI) measurements. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 109(A5): A05305 [DOI: 10.1029/2003JA010296]
- Dessler A E, Burrage M D, Grooss J U, Holton J R, Lean J L, Massie S T, Schoeberl M R, Douglass A R and Jackman C H. 1998. Selected science highlights from the first 5 years of the Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) Program. *Reviews of Geophysics*, 36(2): 183-210 [DOI: 10.1029/97RG03549]
- Dobber M R, Dirksen R J, Levelt P F, van den Oord G H J, Voors R H M, Kleipool Q, Jaross G, Kowalewski M, Hilsenrath E, Leppelmeier G W, Johan De vries N, Dierssen W and Rozemeijer N C. 2006. Ozone monitoring instrument calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(5): 1209-1238 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.869987]
- Drob D P, Emmert J T, Crowley G, Picone J M, Shepherd G G, Skinner W, Hays P, Niciejewski R J, Larsen M, She C Y, Meriwether J W, Hernandez G, Jarvis M J, Sipler D P, Tepley C A, O'brien M S, Bowman J R, Wu Q, Murayama Y, Kawamura S, Reid I M and Vincent R A. 2008. An empirical model of the Earth's horizontal wind fields: HWM07. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 113(A12): A12304 [DOI: 10.1029/2008JA013668]
- Drob D P, Emmert J T, Meriwether J W, Makela J J, Doornbos E, Conde M, Hernandez G, Noto J, Zawdie K A, McDonald S E, Huba J D and Klenzing J H. 2015. An update to the Horizontal Wind Model (HWM): the quiet time thermosphere. *Earth and Space Science*, 2(7): 301-319 [DOI: 10.1002/2014EA000089]
- Emmert J T, Drob D P, Picone J M, Siskind D E, Jones Jr M, Mlynarczyk M G, Bernath P F, Chu X, Doornbos E, Funke B, Goncharenko L P, Hervig M E, Schwartz M J, Sheese P E, Vargas F, Williams B P and Yuan T. 2021. NRLMSIS 2.0: a whole-atmosphere empirical model of temperature and neutral species densities. *Earth and Space Science*, 8(3): e2020EA001321 [DOI: 10.1029/2020EA001321]

- Emmitt G D. 2001. Hybrid technology Doppler wind lidar: assessment of simulated data products for a space-based system concept//Proceedings of SPIE 4153, Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring. Sendai: SPIE [DOI: 10.1117/12.417069]
- Englert C R, Harlander J M, Brown C M, Marr K D, Miller I J, Stump J E, Hancock J, Peterson J Q, Kumler J, Morrow W H, Mooney T A, Ellis S, Mende S B, Harris S E, Stevens M H, Makela J J, Harding B J and Immel T J. 2017. Michelson interferometer for global high-resolution thermospheric imaging (MIGHTI): instrument design and calibration. *Space Science Reviews*, 212(1): 553-584 [DOI: 10.1007/s11214-017-0358-4]
- Fang X J, Luo H Y, Shi H L, Li Z W, Hu G X, Jin W, Zhang J C and Xiong W. 2019. High-resolution scattered radiation measurement in ultraviolet band based on spatial heterodyne spectroscopy technique. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 39(2): 357-362 (方雪静, 罗海燕, 施海亮, 李志伟, 胡广晓, 金伟, 张纪承, 熊伟. 2019. 利用空间外差光谱技术进行紫外高分辨率大气散射信号探测. *光谱学与光谱分析*, 39(2): 357-362) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)02-0357-06]
- Feng Y T, Li J, Zhao Z L, Yuan X B, Yu T, Fu J G, Wu K J, Hao X B, Fu D, Sun J and Wang S. 2017. Development of interferometric spectroscopy for atmosphere wind observations based on satellite. *Aerospace Shanghai*, 34(3): 14-26 (冯玉涛, 李娟, 赵增亮, 原晓斌, 余涛, 付建国, 武魁军, 郝雄波, 傅颀, 孙剑, 王爽. 2017. 大气风场探测星载干涉光谱技术进展综述. *上海航天*, 34(3): 14-26) [DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2017.03.002]
- Fjeldbo G and Eshleman V R. 1968. The atmosphere of Mars analyzed by integral inversion of the Mariner IV occultation data. *Planetary and Space Science*, 16(8): 1035-1059 [DOI: 10.1016/0032-0633(68)90020-2]
- Fjeldbo G, Kliore A J and Eshleman V R. 1971. The neutral atmosphere of Venus as studied with the Mariner V radio occultation experiments. *Astronomical Journal*, 76: 123 [DOI: 10.1086/111096]
- Flynn L, Long C, Wu X, Evans R, Beck C T, Petropavlovskikh I, McConville G, Yu W, Zhang Z, Niu J, Beach E, Hao Y, Pan C, Sen B, Novicki M, Zhou S and Seftor C. 2014. Performance of the ozone mapping and profiler suite (OMPS) products. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(10): 6181-6195 [DOI: 10.1002/2013JD020467]
- Flynn L E, Seftor C J, Larsen J C and Xu P. 2006. The ozone mapping and profiler suite//Qu J J, Gao W, Kafatos M, Murphy R E and Salomonson V V, eds. *Earth Science Satellite Remote Sensing*. Berlin, Heidelberg: Springer: 279-296 [DOI: 10.1007/978-3-540-37293-6_15]
- Frisk U, Hagström M, Ala-Laurinaho J, Andersson S, Berges J C, Chabaud J P, Dahlgren M, Emrich A, Florén H G, Florin G, Fredrixon M, Gaier T, Haas R, Hirvonen T, Hjalmarsson Å, Jakobsson B, Jukkala P, Kildal P S, Kollberg E, Lassing J, Lecacheux A, Lehtikoinen P, Lehto A, Mallat J, Marty C, Michet D, Narbonne J, Nexon M, Olberg M, Olofsson A O H, Olofsson G, Origné A, Petersson M, Piironen P, Pons R, Pouliquen D, Ristorcelli I, Rosolen C, Rouaix G, Räisänen A V, Serra G, Sjöberg F, Stenmark L, Torchinsky S, Tuovinen J, Ullberg C, Vinterhav E, Wade-falk N, Zirath H, Zimmermann P and Zimmermann R. 2003. The odin satellite: I. Radiometer design and test. *Astronomy and Astrophysics*, 402(3): L27-L34 [DOI: 10.1051/0004-6361:20030335]
- Fritts D C and Alexander M J. 2003. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. *Reviews of Geophysics*, 41(1): 1003 [DOI: 10.1029/2001RG000106]
- Fuller-Rowell D A and Tim. 1999. The Ionosphere. *Space Environment Topics*. <https://solar-center.stanford.edu/SID/science/Ionosphere.pdf>. Accessed 15 Apr. 2025
- Grassl H J, Skinner W R, Hays P B, Gell D A, Burrage M D, Ortland D A, Marshall A R and Abreu V J. 1995. Atmospheric wind measurements with the high-resolution Doppler imager. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 32(1): 169-176 [DOI: 10.2514/3.26590]
- Grooß J U and Russell III J M. 2005. Technical note: a stratospheric climatology for O₃, H₂O, CH₄, NO_x, HCl and HF derived from HALOE measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5(10): 2797-2807 [DOI: 10.5194/acp-5-2797-2005]
- Gumbel J, Megner L, Christensen O M, Ivchenko N, Murtagh D P, Chang S, Dillner J, Ekebrand T, Giono G, Hammar A, Hedin J, Karlsson B, Krus M, Li A Q, McCallion S, Olentšenko G, Pak S, Park W, Rouse J, Stegman J and Witt G. 2020. The MATS satellite mission - gravity wave studies by Mesospheric Airglow/Aerosol Tomography and Spectroscopy. *Atmospheric Chemistry Physics*, 20(1): 431-455 [DOI: 10.5194/acp-20-431-2020]
- Haigh J D. 1994. The role of stratospheric ozone in modulating the solar radiative forcing of climate. *Nature*, 370(6490): 544-546 [DOI: 10.1038/370544a0]
- Han B, Feng Y T, Wang J S, Hu X Q, Zong W G, Xu N, Huang C, Mao T, Hao X B and Li Y. 2024. Overview of optical interferometer payloads for detecting wind fields in middle and upper atmosphere (Invited). *Acta Optica Sinica*, 44(18): 1800008 (韩斌, 冯玉涛, 王劲松, 胡秀清, 宗位国, 徐娜, 黄聪, 毛田, 郝雄波, 李勇. 2024. 中高层大气风场探测光学干涉仪载荷发展综述(特邀). *光学学报*, 44(18): 1800008) [DOI: 10.3788/AOS240679]
- Harding B J, Makela J J, Englert C R, Marr K D, Harlander J M, England S L and Immel T J. 2017. The MIGHTI wind retrieval algorithm: description and verification. *Space Science Reviews*, 212(1): 585-600 [DOI: 10.1007/s11214-017-0359-3]
- Harlander J M, Englert C R, Brown C M, Marr K D, Miller I J, Zastera V, Bach B W and Mende S B. 2017. Michelson interferometer for global high-resolution thermospheric imaging (MIGHTI): monolithic interferometer design and test. *Space Science Reviews*, 212(1): 601-613 [DOI: 10.1007/s11214-017-0374-4]
- Hays P B, Abreu V J, Dobbs M E, Gell D A, Grassl H J and Skinner W R. 1993. The high-resolution doppler imager on the Upper Atmosphere Research Satellite. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98(D6): 10713-10723 [DOI: 10.1029/93JD00409]
- Heath D F, Krueger A J, Roeder H A and Henderson B D. 1975. The solar backscatter ultraviolet and total ozone mapping spectrometer (SBUV/TOMS) for Nimbus G. *Optical Engineering*, 14(4): 144323 [DOI: 10.1117/12.7971839]

- Hedin A E, Biondi M A, Burnside R G, Hernandez G, Johnson R M, Killeen T L, Mazaudier C, Meriwether J W, Salah J E, Sica R J, Smith R W, Spencer N W, Wickwar V B and Virdi T S. 1991. Revised global model of thermosphere winds using satellite and ground - based observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 96(A5): 7657-7688 [DOI: 10.1029/91JA00251]
- Hedin A E, Fleming E L, Manson A H, Schmidlin F J, Avery S K, Clark R R, Franke S J, Fraser G J, Tsuda T, Vial F and Vincent R A. 1996. Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 58(13): 1421-1447 [DOI: 10.1016/0021-9169(95)00122-0]
- Hedin A E, Spencer N W and Killeen T L. 1988. Empirical global model of upper thermosphere winds based on Atmosphere and Dynamics Explorer satellite data. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 93(A9): 9959-9978 [DOI: 10.1029/JA093iA09p09959]
- Hu X, Yan Z A, Guo S Y, Cheng Y Q and Gong J C. 2011. Sodium fluorescence Doppler lidar to measure atmospheric temperature in the mesopause region. *Chinese Science Bulletin*, 56(4): 417-423 [DOI: 10.1007/s11434-010-4306-x]
- Hu X, Zhang X X and Zhang D Y. 2005. Effects of atmospheric gravity waves on the mesosphere and lower thermosphere circulations. *Chinese Journal of Space Science*, 25(2): 111-117 (胡雄, 张训械, 张冬娅. 2005. 重力波对中间层和低热层大气环流的影响. *空间科学学报*, 25(2): 111-117) [DOI: 10.11728/cjss2005.02.111]
- Hu Z Y and Bu L B. 2023. Review of the progress of Aeolus spaceborne wind measurement lidar. *Infrared and Laser Engineering*, 52(5): 20220691 (胡中昱, 卜令兵. 2023. Aeolus星载测风激光雷达进展综述. *红外与激光工程*, 52(5): 20220691) [DOI: 10.3788/IRLA20220691]
- Huang F X, Liu N Q, Zhang P, Zhao M X and Dong C H. 2010. Comparison and evaluation of retrieved ozone profiles from solar backscatter ultraviolet sounder on FY-3A satellite. *Optics and Precision Engineering*, 18(7): 1568-1576 (黄富祥, 刘年庆, 张鹏, 赵明现, 董超华. 2010. 风云三号A星紫外臭氧垂直探测仪反演产品的比较和评估. *光学精密工程*, 18(7): 1568-1576) [DOI: 10.3788/OPE.20101807.1568]
- Huang F X, Zhao M X, Yang C J and Dong C H. 2008. Ozone profile retrievals from FY-3 and validation. *Progress in Natural Science*, 18(10): 1136-1142 (黄富祥, 赵明现, 杨昌军, 董超华. 2008. 风云三号卫星紫外臭氧垂直廓线反演算法及对比反演试验. *自然科学进展*, 18(10): 1136-1142) [DOI: 10.3321/j.issn:1002-008X.2008.10.007]
- Huang X M, Lin Y L, Xiong W, Li J H, Pan J C and Zhou Y. 2024. Research on international developments of AI large meteorological models in numerical forecasting. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 47(1): 46-54 (黄小猛, 林岩奎, 熊巍, 李佳皓, 潘建成, 周勇. 2024. 数值预报AI气象大模型国际发展动态研究. *大气科学学报*, 47(1): 46-54) [DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20231201001]
- Immel T J, England S L, Mende S B, Heelis R A, Englert C R, Edelstein J, Frey H U, Korpela E J, Taylor E R, Craig W W, Harris S E, Bester M, Bust G S, Crowley G, Forbes J M, Gérard J C, Harlander J M, Huba J D, Hubert B, Kamalabadi F, Makela J J, Maute A I, Meier R R, Raftery C, Rochus P, Siegmund O H W, Stephan A W, Swenson G R, Frey S, Hysell D L, Saito A, Rider K A and Sirk M M. 2018. The ionospheric connection explorer mission: mission goals and design. *Space Science Reviews*, 214(1): 13 [DOI: 10.1007/s11214-017-0449-2]
- Kamalabadi F, Qin J Q, Harding B J, Iliou D, Makela J J, Meier R R, England S L, Frey H U, Mende S B and Immel T J. 2018. Inferring nighttime ionospheric parameters with the far ultraviolet imager onboard the ionospheric connection explorer. *Space Science Reviews*, 214(4): 70 [DOI: 10.1007/s11214-018-0502-9]
- Killeen T L, Wu Q, Solomon S C, Ortland D A, Skinner W R, Niciejewski R J and Gell D A. 2006. TIMED Doppler Interferometer: overview and recent results. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 111(A10): A10S01 [DOI: 10.1029/2005JA011484]
- Kleipool Q, Rozemeijer N, van Hoek M, Leloux J, Loots E, Ludewig A, van der Plas E, Adrichem D, Harel R, Spronk S, Ter Linden M, Jaross G, Haffner D, Veeckind P and Levelt P F. 2022. Ozone Monitoring Instrument (OMI) collection 4: establishing a 17-year-long series of detrended level-1b data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15(11): 3527-3553 [DOI: 10.5194/amt-15-3527-2022]
- Kovilakam M., Thomason L., and Knepp T. 2023. SAGE III/ISS aerosol/cloud categorization and its impact on GloSSAC, *Atmos. Meas. Tech.*, 16, 2709-2731 [DOI:10.5194/amt-16-2709-2023]
- Kyrölä E, Tamminen J, Leppelmeier G W, Sofieva V, Hassinen S, Bertaux J L, Hauchecorne A, Dalaudier F, Cot C, Korabely O, Fanton D'andon O, Barrot G, Mangin A, Théodore B, Guirlet M, Etanchaud F, Snoeij P, Koopman R, Saavedra L, Fraisse R, Fussen D and Vanhellemon F. 2004. GOMOS on Envisat: an overview. *Advances in Space Research*, 33(7): 1020-1028 [DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00590-8]
- Leslie F W and Justus C G. 2011. The NASA Marshall Space Flight Center Earth Global Reference Atmospheric Model-2010 Version. NASA
- General Armament Department of People's Liberation Army. 2006. GJB 5601-2006 China reference atmosphere (ground ~80 km). Beijing: General Armament Department of People's Liberation Army (中国人民解放军总装备部. 2006. GJB 5601 - 2006 中国参考大气(地面~80 km). 北京: 中国人民解放军总装备部)
- Liao M, Zhang P, Bi Y M and Yang G L. 2015. A preliminary estimation of the radio occultation products accuracy from the Fengyun-3C meteorological satellite. *Acta Meteorologica Sinica*, 73(6): 1131-1140 (廖蜜, 张鹏, 毕研盟, 杨光林. 2015. 风云三号气象卫星掩星大气产品精度的初步检验. *气象学报*, 73(6): 1131-1140) [DOI: 10.11676/qxxb2015.072]
- Liu X, Xu J Y, Yue J, Yu Y, Batista P P, Andrioli V F, Liu Z K, Yuan T, Wang C, Zou Z M, Li G Z and Russell III J M. 2021. Global balanced wind derived from SABER temperature and pressure observations and its validations. *Earth System Science Data*, 13(12): 5643-5661 [DOI: 10.5194/essd-13-5643-2021]
- Llewellyn E.J., Degenstein D., Lloyd N., Gattinger R., Petelina S., McDade I., Haley C., Solheim B., von Savigny C., Sioris C. and Evans, W.F.J., 2003. First Results from the OSIRIS Instrument on-

- board Odin. Sodankylä Geophysical Observatory Publications, 92, pp.41-47.
- Louet J and Bruzzi S. 1999. ENVISAT mission and system//Proceedings of the IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Hamburg: IEEE [DOI: 10.1109/IGARSS.1999.772059]
- Loughman R, Bhartia P K, Chen Z, Xu P, Nyaku E and Taha G. 2018. The Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS) Limb Profiler (LP) Version 1 aerosol extinction retrieval algorithm: theoretical basis. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(5): 2633-2651 [DOI: 10.5194/amt-11-2633-2018]
- Lü D R, Chen Z Y, Guo X and Tian W S. 2009. Recent progress in near space atmospheric environment study. *Advances in Mechanics*, 39(6): 674-682 (吕达仁, 陈泽宇, 郭霞, 田文寿. 2009. 临近空间大气环境研究现状. *力学进展*, 39(6): 674-682) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-0992.2009.06.008]
- Luo H Y, Li S, Shi H L, Xiong W and Hong J. 2016. Optical design of imaging system based on spatial heterodyne spectrometer. *Infrared and Laser Engineering*, 45(8): 0818005 (罗海燕, 李双, 施海亮, 熊伟, 洪津. 2016. 空间外差光谱仪成像光学系统设计. *红外与激光工程*, 45(8): 0818005) [DOI: 10.3788/IRLA201645.0818005]
- Lux O, Lemmerz C, Weiler F, Marksteiner U, Witschas B, Rahm S, Geiß A and Reitebuch O. 2020. Intercomparison of wind observations from the European Space Agency's Aeolus satellite mission and the ALADIN Airborne Demonstrator. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(4): 2075-2097 [DOI: 10.5194/amt-13-2075-2020]
- McCormick M P. 1987. Sage II: an overview. *Advances in Space Research*, 7(3): 219-226 [DOI: 10.1016/0273-1177(87)90151-7]
- McDade I C and Llewellyn E J. 1986. The excitation of O(¹S) and O₂ bands in the nightglow: a brief review and preview. *Canadian Journal of Physics*, 64(12): 1626-1630 [DOI: 10.1139/p86-287]
- Mertens C J, Mlyneczek M G, López-Puertas M, Wintersteiner P P, Picard R H, Winick J R, Gordley L L and Russell III J M. 2001. Retrieval of mesospheric and lower thermospheric kinetic temperature from measurements of CO₂ 15 μ m Earth Limb Emission under non - LTE conditions. *Geophysical Research Letters*, 28(7): 1391-1394 [DOI: 10.1029/2000GL012189]
- Mertens C J, Russell III J M, Mlyneczek M G, She C Y, Schmidlin F J, Goldberg R A, López-Puertas M, Wintersteiner P P, Picard R H, Winick J R and Xu X J. 2009. Kinetic temperature and carbon dioxide from broadband infrared limb emission measurements taken from the TIMED/SABER instrument. *Advances in Space Research*, 43(1): 15-27 [DOI: 10.1016/j.asr.2008.04.017]
- Montenbruck O, Andres Y, Bock H, van Helleputte T, van den Ijssel J, Loiselet M, Marquardt C, Silvestrin P, Visser P and Yoon Y. 2008. Tracking and orbit determination performance of the GRAS instrument on MetOp-A. *GPS Solutions*, 12(4): 289-299 [DOI: 10.1007/s10291-008-0091-2]
- Munro R, Lang R, Klaes D, Poli G, Retscher C, Lindstrot R, Huckle R, Lacan A, Grzegorski M, Holdak A, Kokhanovsky A, Livschitz J and Eisinger M. 2016. The GOME-2 instrument on the Metop series of satellites: instrument design, calibration, and level 1 data processing-an overview. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(3): 1279-1301 [DOI: 10.5194/amt-9-1279-2016]
- Murtagh D, Frisk U, Merino F, Ridal M, Jonsson A, Stegman J, Witt G, Eriksson P, Jiménez C, Megie G, Noë J D L, Ricaud P, Baron P, Pardo J R, Hauchcorne A, Llewellyn E J, Degenstein D A, Gattinger R L, Lloyd N D, Evans W F, McDade I C, Haley C S, Sioris C, Savigny C V, Solheim B H, McConnell J C, Strong K, Richardson E H, Leppelmeier G W, Kyrölä E, Auvinen H and Oikarinen L. 2002. An overview of the Odin atmospheric mission. *Canadian Journal of Physics*, 80(4): 309-319 [doi: 10.1139/p01-157]
- National Satellite Meteorological Center. 2023. Product document of FY-3F ozone monitoring suite - Limb (国家卫星气象中心. 2023. 风云三号F星紫外高光谱臭氧探测仪—临边L1产品使用说明. <https://satellite.nsmc.org.cn/FY3F/PORTAL/NSMC/DATASERVICE/OperatingGuide/2023.07.21-FY-3F-OMS-L.pdf>[2024-07-30])
- Olberg M, Frisk U, Lecacheux A, Olofsson H, Baron P, Bergman P, Florin G, Hjalmarson Å, Larsson B and Murtagh D. 2003. The Odin satellite. II. Radiometer data processing and calibration. *Astronomy and Astrophysics*, 402: L35-L38 [DOI: 10.1051/0004-6361:20030336]
- Reber C A. 1993. The upper atmosphere research satellite (UARS). *Geophysical Research Letters*, 20(12): 1215-1218 [DOI: 10.1029/93GL01103]
- Russell III J M, Mlyneczek M G, Gordley L L, Tansock Jr J J and Espin R W. 1999. Overview of the SABER experiment and preliminary calibration results//Proceedings of SPIE 3756, Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research III. Denver: SPIE [DOI: 10.1117/12.366382]
- Schenkeveld V M E, Jaross G, Marchenko S, Haffner D, Kleipool Q L, Rozemeijer N C, Veefkind J P and Levelt P F. 2017. In-flight performance of the Ozone Monitoring Instrument. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(5): 1957-1986 [DOI: 10.5194/amt-10-1957-2017]
- Schoeberl M R, Douglass A R, Hilsenrath E, Bhartia P K, Beer R, Waters J W, Gunson M R, Froidevaux L, Gille J C, Barnett J J, Levelt P F and Decola P. 2006. Overview of the EOS Aura mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(5): 1066-1074 [DOI: 10.1109/TGRS.2005.861950]
- She C Y and von Zahn U. 1998. Concept of a two-level mesopause: support through new lidar observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D5): 5855-5863 [DOI: 10.1029/97JD03450]
- Shen X S, Su Y, Zhang H L and Hu J L. 2023. New version of the CMA-GFS dynamical core based on the predictor-corrector time integration scheme. *Journal of Meteorological Research*, 37(3): 273-285 [DOI: 10.1007/s13351-023-3002-0]
- Shen P X, Mao J T, Li J G, Ge Z M, Zhang A C, Sang J G, Pan N X and Zhang H S. 2013. *Atmospheric Physics*. Beijing: Peking University Press (盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 葛正谟, 张霭琛, 桑建国, 潘乃先, 张宏升. 2013. *大气物理学*. 北京: 北京大学出版社)
- Shepherd G G, Thuillier G, Cho Y -M, Duboin M -L, Evans W F J, Gault W A, Hersom C, Kendall D J W, Lathuillère C, Lowe R P,

- McDade I C, Rochon Y J, Shepherd M G, Solheim B H, Wang D Y and Ward W E. 2012. The wind imaging interferometer (WINDII) on the upper atmosphere research satellite: a 20 year perspective. *Reviews of Geophysics*, 50(2): RG2007 [DOI: 10.1029/2012RG000390]
- Shepherd G G, Thuillier G, Gault W A, Solheim B H, Hersom C, Alunni J M, Brun J F, Brune S, Charlot P, Cogger L L, Desaulniers D L, Evans W F J, Gattinger R L, Girod F, Harvie D, Hum R H, Kendall D J W, Llewellyn E J, Lowe R P, Ohrt J, Pasternak F, Peillet O, Powell I, Rochon Y, Ward W E, Wiens R H and Wimperis J. 1993. WINDII, the wind imaging interferometer on the Upper Atmosphere Research Satellite. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98(D6): 10725-10750 [DOI: 10.1029/93JD00227]
- Smith A K. 2012. Interactions between the lower, middle and upper atmosphere. *Space Science Reviews*, 168(1): 1-21 [DOI: 10.1007/s11214-011-9791-y]
- Spilker Jr J J. 1978. GPS signal structure and performance characteristics. *Navigation*, 25(2): 121-146 [DOI: 10.1002/j.2161-4296.1978.tb01325.x]
- Steinbrecht W, Froidevaux L, Fuller R, Wang R, Anderson J, Roth C, Bourassa A, Degenstein D, Damadeo R, Zawodny J, Frith S, Mcpeters R, Bhartia P, Wild J, Long C, Davis S, Rosenlof K, Sofieva V, Walker K, Rahnepoe N, Rozanov A, Weber M, Laeng A, Von Clarmann T, Stiller G, Kramarova N, Godin-Beekmann S, Leblanc T, Querel R, Swart D, Boyd I, Hocke K, Kämpfer N, Mailard Barras E, Moreira L, Nedoluha G, Vigouroux C, Blumenstock T, Schneider M, García O, Jones N, Mahieu E, Smale D, Kotkamp M, Robinson J, Petropavlovskikh I, Harris N, Hassler B, Hubert D and Tummon F. 2017. An update on ozone profile trends for the period 2000 to 2016. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(17): 10675-10690 [DOI: 10.5194/acp-17-10675-2017]
- Stevens M H, Englert C R, Harlander J M, England S L, Marr K D, Brown C M and Immel T J. 2018. Retrieval of lower thermospheric temperatures from O₂ a band emission: the MIGHTI experiment on ICON. *Space Science Reviews*, 214(1): 4 [DOI: 10.1007/s11214-017-0434-9]
- Sun L, Lian P, Chang X F and Yan J. 2016. Near space atmosphere modeling and its effect on the aircraft. *Command Control and Simulation*, 38(5): 107-111 (孙磊, 廉璞, 常晓飞, 闫杰. 2016. 临近空间大气环境建模及其对飞行器影响. 指挥控制与仿真, 38(5): 107-111) [DOI:10.3969/j.issn.1673-3819.2016.05.023]
- US Standard Atmosphere. 1976. U.S. Standard Atmosphere, 1976. National Oceanic and Atmospheric Administration
- Wang J S, Liu D, Li C, Ji J, Deng Q, Xie W Y, Bai T Z and Wu D C. 2024. Simulation of atmospheric density detection by spaceborne Rayleigh lidar. *Atmospheric Environment*, 333: 120659 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2024.120659]
- Wang Q S, Luo H Y, Li Z W, Shi H L, Ding Y and Xiong W. 2023. Research progress of spaceborne passive remote sensing detection payload of greenhouse gases. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(4): 857-870 (汪钱盛, 罗海燕, 李志伟, 施海亮, 丁毅, 熊伟. 2023. 温室气体星载被动遥感探测载荷研究进展. 遥感学报, 27(4): 857-870) [DOI: 10.11834/jrs.20211149]
- Wang W J, Luo H Y, Li Z W, Xiong W and Ma J J. 2021. Spatial and temporal distribution of O₂ A-band night airglow in mesosphere and lower thermosphere. *Acta Optica Sinica*, 41(12): 1201001 (王维佳, 罗海燕, 李志伟, 熊伟, 麻金继. 2021. 中高层 O₂A 带夜气辉时空分布特征. 光子学报, 41(12): 1201001) [DOI: 10.3788/AOS202141.1201001]
- Weiss J P, Schreiner W S, Braun J J, Xia-Serafino W and Huang C Y. 2022. COSMIC-2 mission summary at three years in orbit. *Atmosphere*, 13(9): 1409 [DOI: 10.3390/atmos13091409]
- White P W and Hoffman J. 2021. Earth Global Reference Atmospheric Model (Earth-GRAM): User Guide. NASA
- Wickert J, Reigber C, Beyerle G, König R, Marquardt C, Schmidt T, Grunwaldt L, Galas R, Meehan T K, Melbourne W G and Hocke K. 2001. Atmosphere sounding by GPS radio occultation: first results from CHAMP. *Geophysical Research Letters*, 28(17): 3263-3266 [DOI: 10.1029/2001GL013117]
- Wickert J, Schmidt T, Beyerle G, König R, Reigber C and Jakowski N. 2004. The radio occultation experiment aboard CHAMP: operational data analysis and validation of vertical atmospheric profiles. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82(1B): 381-395 [DOI: 10.2151/jmsj.2004.381]
- NASA Goddard Space Flight Center. (n.d.). Table 2. Experimental Instrumentation on-board Nimbus satellites[EB/OL]. https://nssdc.gsfc.nasa.gov/earth/nimbus_sensor.html
- Xiao Y, Feng Y T, Wen Z Q and Fu D. 2022. Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometry for wind measurement in middle and upper atmosphere (Invited). *Acta Photonica Sinica*, 51(8): 0851516 (肖旸, 冯玉涛, 文镇清, 傅頔. 2022. 中高层大气风场探测多普勒差分干涉技术(特邀). 光子学报, 51(8): 0851516) [DOI: 10.3788/gzxb20225108.0851516]
- Xiong W. 2018. Hyperspectral greenhouse gases monitor instrument (GMI) for spaceborne payload. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 39(3): 14-24 (熊伟. 2018. 星载超光谱大气主要温室气体监测仪载荷. 航天返回与遥感, 39(3): 14-24) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2018.03.002]
- Xue Z Y, Bao Y S, Tang G S, Cheng W, Zhu M B and Yuan S. 2022. Quality analysis of COSMIC-2 radio occultation retrieval data. *Journal of Tropical Meteorology*, 38(3): 453-466 (薛子悦, 鲍艳松, 唐歌实, 成巍, 朱孟斌, 袁帅. 2022. COSMIC-2 掩星反演数据质量分析. 热带气象学报, 38(3): 453-466) [DOI: 10.16032/j.issn.1004-4965.2022.041]
- Yan Z A, Hu X, Guo S Y, Cheng Y Q, Guo W J and Pan Y S. 2015. Performance analysis of spaceborne sodium fluorescence Doppler lidar. *Journal of Radars*, 4(1): 99-106 (闫召爱, 胡雄, 郭商勇, 程永强, 郭文杰, 潘艺升. 2015. 星载钠荧光多普勒激光雷达性能分析. 雷达学报, 4(1): 99-106) [DOI: 10.12000/JR14140]
- Yee J H, Talaat E R, Christensen A B, Killeen T L, Russell J M and Woods T N. 2003. TIMED instruments. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 24(2): 156-164
- Yunck T P, Liu C H and Ware R. 2000. A history of GPS sounding. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 11(1): 1-20 [DOI: 10.3319/TAO.2000.11.1.1(COSMIC)]

Zhang C M, Zhu H C, Wang D Y, Zhao B C, Dai H S and Zhang L. 2011. Passive measurement technology used for upper atmosphere measurement. *Acta Optica Sinica*, 31(9): 0900136 (张淳民, 朱化春, 王鼎益, 赵葆常, 代海山, 张霖. 2011. 高层大气被动探测技术. *光学学报*, 31(9): 0900136) [DOI: 10.3788/AOS201131.0900136]

Zhang X Y, Zhang P, Fang Z Y, Qiu H, Li X J and Zhang Y. 2007. The progress in trace gas remote sensing study based on the satellite monitoring. *Meteorological Monthly*, 33(7): 3-14 (张兴赢, 张鹏, 方宗义, 邱红, 李晓静, 张艳. 2007. 应用卫星遥感技术监测大气

痕量气体的研究进展. *气象*, 33(7): 3-14) [DOI:10.3969/j.issn.1000-0526.2007.07.001]

Zhu Z S, Gao Y X, Tan H, Jia Y and Xu Q F. 2022. Research on a modeling method of wing deformation under the influence of separation and compound multi-source disturbance. *Journal of Navigation*, 75(4): 784-804 [DOI: 10.1017/S0373463321000618]

Zus F, Beyerle G, Heise S, Schmidt T, Wickert J and Marquardt C. 2011. Validation of refractivity profiles derived from GRAS raw-sampling data. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 4(2): 1825-1852

Satellite payloads for middle and upper atmospheric profile detection : An overview and perspective

LIU Dong¹, XIE Wanyi², WANG Jingsong^{1,3}, LUO Haiyan¹, SI Fuqi¹, FENG Yutao⁴, XIONG Wei¹,
HU Xiuqing⁵, XU Na⁵, CHEN Lin⁵, DUAN Jingbo¹, ZHANG Ruidong², KAN Ruifeng¹

1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China;

2. Jianghuai Advanced Technology Center, Hefei 230000, China;

3. Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

4. Key Laboratory of Spectral Imaging Technology, Xi'an Institute of Optics Precision Mechanic of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

5. Key Laboratory of Space Weather, National Satellite Meteorological Center (National Center for Space Weather), China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract: The middle and upper atmosphere, as a crucial component of the Earth's atmosphere, is influenced by both the lower atmosphere and the space environment. It exhibits significant multi-scale dynamic processes, chemical processes, and radiation transfer processes. Ground-based instrument, such as Lidar, optical interferometer, etc., can provide accurate middle and upper atmosphere profiles, but their observations are limited to specific locations. In contrast, satellite remote sensing offers global middle and upper atmospheric profile detection. To date, numerous satellite payloads have been launched to study the middle and upper atmosphere across multiple wavelengths and detection modes. This extensive satellite data has greatly enhanced our understanding of the physics and chemistry of the middle and upper atmosphere.

This article provides an overview of the satellites dedicated to middle and upper atmospheric profile detection, and comprehensively summarizes the technical parameters of their payloads. Based on the observation mode, these payloads can be categorized into nadir-viewing observation, occultation observation and limb-viewing observation. Nadir-viewing observation targets the Earth's surface directly, offering high spatial and temporal resolution, but it struggles to obtain accurate atmospheric profiles or delivers poor accuracy. Occultation observation studies atmospheric characteristics by monitoring changes in signals from celestial objects (such as the sun or satellites) as they pass through the Earth's atmosphere. This method achieves high vertical resolution and precision in profiles but is limited in frequency of occultation event. Limb-viewing observation combines the advantages of both above methods by observing the atmosphere diagonally through the halo that surrounds the Earth. This approach not only provides atmospheric profile parameters with high vertical resolution but also offers better sampling rates and spatio-temporal resolution.

This article reviews satellite payloads with nadir-viewing, occultation observation and limb-viewing observation for middle and upper atmosphere. By leveraging the benefits of limb-viewing observations, China has launched DAO-1, a pathfinder limb satellite dedicated to middle and upper atmosphere observation. The satellite is equipped with three advanced optical payloads: the Temperature and Ozone Profile monitoring Spectrometer, the Heterodyne atmospheric Density profile Imager, and the Doppler heterodyne Wind Imager. These instruments combine grating spectroscopy, Spatial Heterodyne Spectrometer technology, and Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne techniques to enhance the accuracy and efficiency of temperature, composition, density, and wind fields profiles. This paper further explores the future development of satellite payloads for middle and upper atmospheric profile detection, providing insights for the planning of China's subsequent satellite missions. The observation data will support the development of numerical forecasting models for the middle and upper atmosphere, and contribute to various applications, including weather forecasting and climate research.

Key words: atmospheric detection, middle and upper atmosphere, satellite remote sensing, atmospheric profile, atmospheric temperature, atmospheric composition, atmospheric wind field

附表 A1 缩略语
Table A1 Abbreviations

英文	缩略语	中文
Solar Mesosphere Explorer	SME	太阳中间层探索卫星
Upper Atmosphere Research Satellite	UARS	高层大气研究卫星
Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetic and Dynamics	TIMED	热层—电离层—中间层能量和动力学卫星
Ionospheric Connection Explorer satellite	ICON	电离层连接探索卫星
US Naval Research Laboratory Mass Spectrometer and Incoherent Scatter Radar Extended	NRLMSISE	—
Horizontal Wind Model	HWM	水平风场模型
Atmospheric Explorer	AE	大气探索者卫星
Dynamics Explorer	DE	动力学探索者卫星
COSPAR International Reference Atmosphere	CIRA	—
High-Resolution Doppler Imager	HRDI	高分辨率多普勒成像仪
Wind Imaging Interferometer	WINDII	风成像干涉仪
Gravity Field and Steady State Ocean Circulation Explorer	GOCE	地球重力场和海洋环流探测卫星
Global Reference Atmosphere Model	GRAM	全球参考大气模型
Stratospheric and Mesospheric Sounder	SAMS	—
Limb Infrared Monitor of the Stratosphere	LIMS	—
Stratospheric Aerosol Measurement-II	SAM II	—
Mesospheric Airglow/Aerosol Tomography and Spectroscopy	MATS	—
Mesosphere and lower thermosphere	MLT	中间层与低热层区域
Solar Backscatter Ultraviolet	SBUV	太阳后向紫外光谱仪
Global Ozone Monitoring Experiment	GOME	全球臭氧监测仪
Ozone Monitoring Instrument	OMI	臭氧监测仪
Solar Backscatter Ultraviolet Sounder	SBUS	臭氧垂直探测仪
Ozone Monitoring Suite - Limb/Nadir	OMS-L/N	紫外高光谱臭氧探测仪-临边/天底
Radio Occultation	RO	无线电掩星
Challenging Minisatellite Payload	CHAMP	挑战小卫星载荷
GNSS Receiver for Atmospheric Sounding	GRAS	掩星信号接收器
Global Navigation Satellite System Occultation Sounder	CHAMP	挑战小卫星载荷
Stratospheric Aerosol Measurement II	GRAS	掩星信号接收器
Halogen Occultation Experiment	GNOS	全球导航卫星掩星接收机
Improved Limb Atmospheric Spectrometer	SAM II	平流层气溶胶测量实验
Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars	HALOE	卤素掩星实验
Doppler Asymmetric Spatial Heterodyne	ILAS	改进型临边大气传感器
Michelson Interferometer for Global High-resolution Thermospheric Imaging	GOMOS	全球恒星掩星臭氧检测仪
TIMED Doppler Interferometer	DASH	多普勒非对称空间外差干涉仪
Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry	MIGHTI	全球高分辨率热层迈克尔逊成像干涉仪
Global UltraViolet Imager	TIDI	TIMED 卫星多普勒干涉仪
Far Ultra Violet Imaging Spectrograph	SABER	利用宽带发射辐射计的大气廓线测量仪
Extreme Ultraviolet Spectrograph	GUVI	全球紫外成像仪
Ozone Mapping Profiler Suit	FUV	远紫外成像仪
Optical, Spectroscopic and Infrared Remote Imaging System	EUV	极紫外光谱仪
Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography	OMPS	大气臭氧探测廓线仪
Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding	OSIRIS	光谱仪和红外成像仪
High Resolution Dynamics Limb Sounder	SCIAMACHY	大气成分探测扫描成像仪
Sub-Millimetre Radiometer	MIPAS	迈克尔逊干涉被动大气探测仪
Microwave Limb Sounder	HIRDLS	高分辨率动力学临边探测器
Greenhouse gases Monitor Instrument	SMR	四波段亚毫米辐射计
Microwave Limb Sounder	MLS	微波临边探测器
Greenhouse gases Monitor Instrument	GMI	温室气体监测仪