0254-6124/2025/45(5)-1358-18 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LI Zheng, WU Xiaocheng, HU Xiong, YAN Zhaoai. Applications and Advances of Stellar Occultation Technique in Atmospheric Oxygen Density Measurement (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(5): 1358–1375. CSTR:32142.14.cjss.2025–0083. DOI:10.11728/cjss2025.05.2025–0083

恒星掩星方法在大气氧气密度探测中的应用与进展*

李 政[1] 吴小成[1,2] 胡 雄[1,2] 闫召爱[1,2]

1(中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气全国重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 临近空间大气氧气密度是研究地球大气结构、热力学特性和空间天气过程的关键参数, 对研究大气建模预报、空间目标轨道预测等具有重要科学和应用价值. 然而, 传统探测手段在垂直分辨率、全球覆盖和长期监测方面存在局限. 恒星掩星技术作为一种被动遥感方法, 通过分析日光或星光穿过大气时的吸收特征, 为氧气密度探测提供了解决方案. 该技术已发展出 140～160 nm 紫外舒曼龙格吸收带与 760 nm 红外 A 吸收带的双波段探测体系. 其紫外吸收带凭借强吸收特性适用于 130 km 以上高层大气探测, 而红外 A 波段通过高分辨率光谱分析实现了 10～85 km 范围内氧气密度、温度及气压的同步反演. 然而, 温度敏感性、星源信号强度等挑战仍需突破. 本文首次系统比较了紫外与红外波段在氧气探测中的互补优势, 分析了从 OAO-2 到 GOLD 等多代载荷的技术演进, 并对未来发展方向进行了展望. 该综述不仅为大气遥感研究提供了技术参考, 还揭示了双波段协同探测潜力, 为下一代大气探测任务的设计指明方向.

关键词 恒星掩星, 氧气密度, 大气遥感, 临近空间

中图分类号 P356

Applications and Advances of Stellar Occultation Technique in Atmospheric Oxygen Density Measurement

LI Zheng[1] WU Xiaocheng[1,2] HU Xiong[1,2] YAN Zhaoai[1,2]

1(*Sate Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather*, *National Space Science Center*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

2(*University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049)

Abstract Density of atmospheric oxygen in the near space is a key parameter for studying the Earth's atmospheric structure, thermodynamic properties, and space weather processes, offering significant scien-

* 太阳活动与空间天气全国重点实验室自主课题项目资助 (E5262QA2)

2025-05-29 收到原稿, 2025-07-30 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

tific and practical value for studying atmospheric modeling and space object orbit prediction. However, traditional observation methods have limitations in vertical resolution, global coverage, and long-term monitoring. Solar and stellar occultation, as a passive remote sensing technique, provides a unique solution for oxygen density measurement by analyzing the absorption features of sunlight or starlight passing through the atmosphere. This technique has developed a dual-band detection system operating in the ultraviolet Schumann-Runge absorption bands (140～160 nm) and the near-infrared A-band (760 nm). The ultraviolet band, with its strong absorption characteristics, is suitable for probing the upper atmosphere above 130 km, while the infrared A-band enables simultaneous retrieval of oxygen density, temperature, and pressure within the 10～85 km range through high-resolution spectral analysis. Nevertheless, challenges such as temperature sensitivity and effects of lower atmospheric turbulence still need to be addressed. This paper for the first systematically compares the complementary advantages of ultraviolet and infrared bands in oxygen detection, outlines the technical evolution across multiple generations of instruments from OAO-2 to GOLD, and discusses future development directions. Not only does this review provide a technical reference for atmospheric remote sensing research, but it also highlights the potential of dual-band synergistic detection, offering guidance for the design of next-generation atmospheric observation missions.

Key words　Stellar occultation, Oxygen density, Atmospheric remote sensing, Near space

0　引言

临近空间大气是地球空间环境的重要组成部分, 其动力学和光化学过程影响着全球气候系统、空间天气效应以及空间目标轨道预测精度. 氧气作为该区域的重要组分, 其密度分布不仅反映了大气环流和能量平衡状态, 还是研究太阳活动与人类活动对大气影响的重要指标. 氧气在海拔 80 km 以下大气中的占比稳定在 20.9%, 从平流层到中间层均匀分布, 因此, 根据氧气密度廓线能够计算总大气密度, 并进一步推导大气的温压参数. 然而, 由于受到探测手段的限制, 临近空间的大气和氧气密度观测长期面临垂直分辨率不足、全球覆盖有限等问题. 传统探空火箭和地基遥感难以实现全球覆盖, 而卫星原位测量则受限于时空采样率, 亟需发展新型探测技术, 在这样的背景下, 恒星掩星技术应运而生, 成为破解临近空间大气和氧气密度探测难题的一项关键技术.

恒星掩星技术利用恒星作为光源, 通过测量其光线穿过地球大气时因吸收和散射引起的光谱变化, 实现对多种大气成分以及温压参数的高精度垂直分布探测. 自 20 世纪 60 年代首次提出该技术构想以来[1], 其发展经历了从理论验证到多平台应用的跨越式进步. 早期研究通过火箭搭载的紫外光谱仪[2] 初步验证了通过氧分子的舒曼龙格 (SR) 140～160 nm, 紫外连续吸收带反演大气密度的可行性, 而 20 世纪 70 年代轨道天文台 OAO-2 的恒星掩星观测首次实现了大气氧分子密度剖面的系统性探测[3], 标志着该技术对氧气密度的探测从理论走向工程应用.

进入 21 世纪以来, 随着 NASA 长期地球观测项目和日本先进地球观测卫星 (ADEOS) 等国际空间探测任务的深入实施, 以 SAGE III (平流层气溶胶和气体实验)、ILAS (改进型临边大气光谱仪) 及恒星掩星氧气探测技术为代表的新型探测手段, 推动大气环境监测迈入多参数协同、高精度测量的新纪元. 例如, SAGE III 通过 14 个光谱通道对氧气吸收 A 带 (760 nm) 进行多光谱测量, 实现了从平流层到中间层 10～85 km 的温度、气压及氧气密度的同步反演[4]. ILAS 通过 0.17 nm 的高分辨率光谱分析, 揭示了平流层温度与气压耦合的垂直结构特征, 误差控制在 4 K 和 4% 以内[5]. GOLD (Global-scale Observations of the Limb and Disk) 任务通过恒星掩星观测发现低热层 O_2 密度的周日变化与模型预测存在显著差异, 为改进中性大气与电离层耦合模型提供了新约束[6].

当前, 恒星掩星氧气探测已形成紫外与红外两种波段的成熟技术体系, 但温度敏感性、星源信号强度等核心问题仍制约着反演精度和适用高度范围[7,8]. 本文系统梳理了该技术近 60 年的发展脉络并展望了未来发展方向 (见表 1), 旨在为下一代大气探测任务设

表 1 当前实施过氧气探测研究的掩星仪

Table 1 Occultation instruments that have conducted oxygen detection

探测波段	载荷名称	搭载卫星	实施机构	实施年份	轨道	探测方式	光谱分辨率/nm	其他主要探测内容	氧气探测高度/km	垂直分辨率/km
氧分子红外A吸收带	POAM II/III	SPOT 3/4	NASA	1993/1998	太阳同步轨道, 倾角98°, 822 km	掩日光度计	—	气溶胶, O_3, H_2O, NO_2	20～60	1～2
	ILAS	ADEOS	MOEJ	1996	太阳同步轨道, 倾角98°, 800 km	掩日光谱仪	0.17	气溶胶, O_3, H_2O, 氮氧化物	10～60	1
	GOMOS	ENVISAT	ESA	2002	太阳同步轨道, 倾角99°, 785 km	掩星光谱仪	0.2	O_3, H_2O, 氮氧化物, 气溶胶	15～80	1
	MAESTRO	SCISAT	CSA	2003	近地轨道, 倾角74°, 650 km	低分辨率掩日光谱仪	2	O_3, H_2O, 氮氧化物	30～80	1～2
	SAGE III	ISS	NASA	2017	近地轨道, 倾角52°, 420 km	掩日与掩月光谱仪	1.4	气溶胶, O_3, H_2O, 氮氧化物	10～85	1
氧分子紫外SR吸收带	Spectrometers	OAO-2	NASA	1968	近地轨道, 倾角35°, 750 km	掩星光度计与光谱仪	0.5	天体光谱, 星际介质, O_3	120～200	1.5
	UVISI	MSX	JHU	1996	近地轨道, 倾角99°, 900 km	掩星光谱仪	0.5	空间碎片, 天体光谱, 气辉, 气溶胶, O_3	130～200	1.5
	GOLD	SES-14	UCF	2018	地球静止轨道, 定点47.5° W, 35786 km	掩星光谱仪	0.2	电子密度, 气辉, O, N_2, NO	130～200	5～10

计提供技术参考, 推动恒星掩星技术在气候监测与空间天气研究中的深度应用.

1 恒星掩星技术原理

在恒星掩星探测中, 如图 1 所示[7], 日光或星光被视作点光源穿过大气, 在卫星运行过程中, 光线穿过不同的海拔高度被卫星上搭载的探测器接收, 得到大气光谱透过率. 大气中不同成分对光线不同波段的吸收、散射等作用使光谱透过率发生变化, 利用这些变化特性能够反演得到大气成分密度等参数.

定义恒星至卫星的连线到地球表面的最近距离为掩星切点高度. 随着卫星环绕运行, 掩星切点高度不断下降, 光线穿过大气的长度变长, 探测器接收到的光强逐渐衰减. 穿过大气的衰减光谱与未穿过大气的无衰减参考光谱的比值称为大气光谱透过率, 即

$$T_{\rm obs}(\lambda)=\frac{I(\lambda,z)}{I_0(\lambda)}. \tag{1}$$

其中, λ 为探测波长, I 为探测到的恒星光谱, I_0 为未被大气吸收的恒星光谱, z 为切点高度. $T_{\rm obs}$ 为光谱透过率.

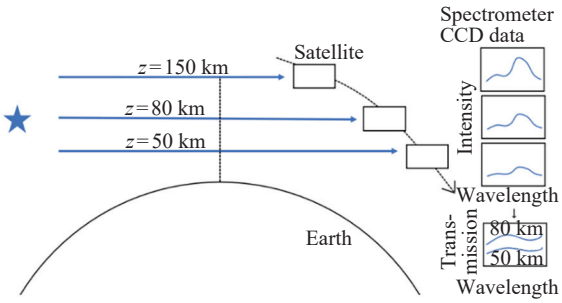


图 1 恒星掩星探测原理

Fig. 1 Principle of stellar occultation detection

根据朗伯比尔定律, 有

$$T_{\rm obs}(\lambda)=\exp\left[-\tau(\lambda)\right], \tag{2}$$

$$\tau(\lambda)=\sum_j\int\sigma_j(\lambda,\boldsymbol{l})\,\rho_j(\boldsymbol{l})\,{\rm d}s. \tag{3}$$

其中, τ为光学厚度, j为不同的大气成分, ρ为大气成分的密度, σ为吸收或散射截面, $\boldsymbol{l}$为沿光线路径. 当

卫星探测得到$T_{\rm obs}(\lambda)$数据后, 结合朗伯比尔定律和剥洋葱方法[9] 或阿贝尔积分方法对大气成分密度进行反演能得到式 (3) 里的ρ_j, 即大气成分 j 的密度. 氧气主要吸收截面如图 2 所示[10].

以上所述是恒星掩星技术的基本原理, 适用于探测多种大气吸收成分. 由于氧分子吸收截面的特殊性, 在实际反演氧气密度时需要针对不同的问题优化算法.

2　氧气探测难点

对于红外 760 nm 氧气吸收 A 带, 其吸收能力弱, 即使使用 2 nm 带宽观测该带吸收能力最强的部分, 在临边切点海拔高于 80 km 时, 吸收率小于 1%; 海拔高于 40 km 时, 吸收率小于 4%[7], 因此, 对仪器灵敏度和信噪比提出了很高的要求, 该波段的探测海拔范围基本限制在 80 km 以下. 另外, 氧分子在 A 带的吸收截面 $\sigma(\lambda)$ 是多条不连续且孤立的谱线, 单条谱线带宽约为 0.005 nm. 恒星掩星技术所使用的光谱仪或光度计, 其光谱分辨率都具有一定的带宽, 探测到的是带宽内的平均透过率, 所以在探测孤立不连续的吸收光谱时, 反演方法不同于反演 SR 吸收带、臭氧吸收带、瑞利散射等传统方法, 而是需要进行改进.

从公式推导中显示其特殊性, 设 N 为氧分子数, 探测器探测到的平均透过率$\overline{T}_{\rm obs}$为

$$\bar{T}_{\rm obs}=\frac{\int_{\Delta\lambda}Q(\lambda)I(\lambda)T_{\rm obs}(\lambda)\cdot{\rm d}\lambda}{\int_{\Delta\lambda}Q(\lambda)I(\lambda)\cdot{\rm d}\lambda}. \tag{4}$$

其中, $Q(\lambda)$ 和 $I(\lambda)$分别为光谱归一化曲线值和光强, 为了简化问题, 均设其为常数, 则

$$\overline{T}_{\rm obs}=\frac{1}{\Delta\lambda}\int_{\Delta\lambda}T_{\rm obs}(\lambda)\,{\rm d}\lambda=\frac{1}{\Delta\lambda}\int_{\Delta\lambda}\exp\left[-N\sigma(\lambda)\right]{\rm d}\lambda. \tag{5}$$

定义有效吸收截面为$\overline{\sigma}_{\Delta\lambda}$, 则有

$$\overline{T}_{\rm obs}=\exp\left(-N\overline{\sigma}_{\Delta\lambda}\right). \tag{6}$$

对于氧分子等具有孤立不连续吸收截面的吸收成分, 其平均透过率、透过率、吸收截面和有效吸收截面存在以下关系:

$$\overline{T}_{\rm obs}\neq T_{\rm obs}(\lambda)\,|_{\lambda\in\Delta\lambda}, \tag{7}$$

$$\exp\left(-N\overline{\sigma}_{\Delta\lambda}\right)\neq\exp\left[-N\sigma(\lambda)\right]|_{\lambda\in\Delta\lambda}, \tag{8}$$

$$N=\frac{-\ln\left(T_{\rm obs}(\lambda)\right)}{\sigma(\lambda)}=\frac{-\ln\left(\overline{T}_{\rm obs}\right)}{\overline{\sigma}_{\Delta\lambda}}\neq\frac{-\ln\left(\overline{T}_{\rm obs}\right)}{\sigma(\lambda)}. \tag{9}$$

由式 (9) 可以看出, 即使在反演前已知探测值$\overline{T}_{\rm obs}$和吸收截面$\sigma(\lambda)$, 仍不能计算分子量 N. 所以需要有效吸收截面$\overline{\sigma}_{\Delta\lambda}$先验数据, 获得先验数据的公式为

$$\overline{\sigma}_{\Delta\lambda}=\frac{-\ln\left(\overline{T}_{\rm obs}\right)}{N}=\frac{-\ln\left\{\int_{\Delta\lambda}\exp\left[-N\sigma(\lambda,T)\right]{\rm d}\lambda\right\}}{N}. \tag{10}$$

有效吸收截面$\overline{\sigma}_{\Delta\lambda}(N,T)$是分子数和温度的变量. 根据式 (10), 使用掩星正演算法[7] 计算氧分子吸收 A 带的有效吸收截面, 查找表网格, 带宽 $\Delta\lambda$ 设置为 760.5～761.5 nm, 网格结果如图 3 和图 4 所示.

在掩星剥洋葱分层中[9], 40～80 km 单层对应的

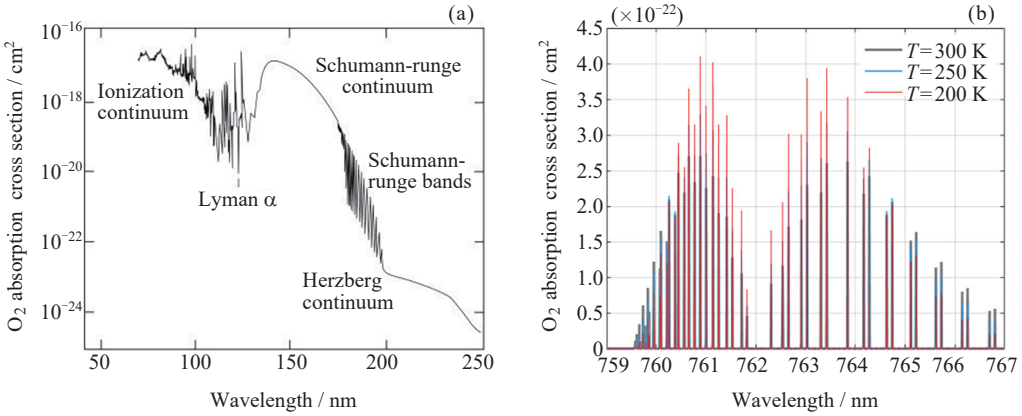


图 2　(a) 氧分子吸收截面, 150 nm 紫外氧气 SR 连续吸收带, (b) 受温度影响较大的 760 nm 红外氧气吸收 A 带

Fig. 2　Oxygen absorption cross-section: the 150 nm Schumann-Runge continuum absorption band (a) and the strongly temperature-dependent 760 nm oxygen A-band (b)

氧分子数量在 10^{21}～10^{23} cm^{-2} 数量级, 由图 3 看出, 分子量 N 和温度 T 的影响很大, 先验温度数据的准确度对反演精度影响非常大.

对于另一个波段, 紫外 140～160 nm 氧气 SR 吸收带的探测, 由于其吸收能力强, 因此临边观测的切点海拔低于 100 km 时光强会被全部吸收, 丢失信号; 在 100～130 km 海拔高度的信号也非常弱, 所以该波段只适合探测海拔 130 km 以上的氧气密度.

围绕氧气吸收带的特殊性, 多种不同的探测和反演方案研究不断深入, 这些方案与其他大气成分的探测所采用的方案有很大不同.

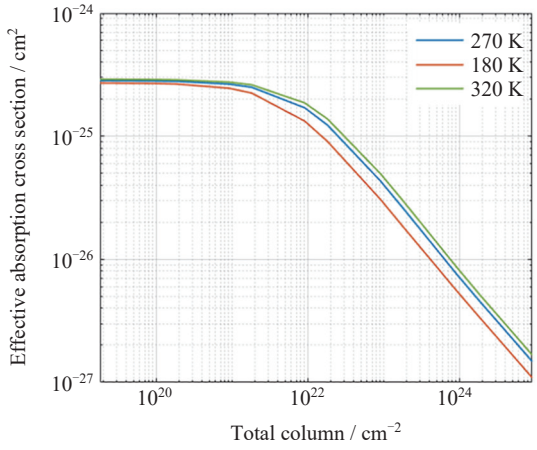


图 3 不同分子数对应有效吸收截面

Fig. 3 Effective absorption cross-section as a function of molecular number density

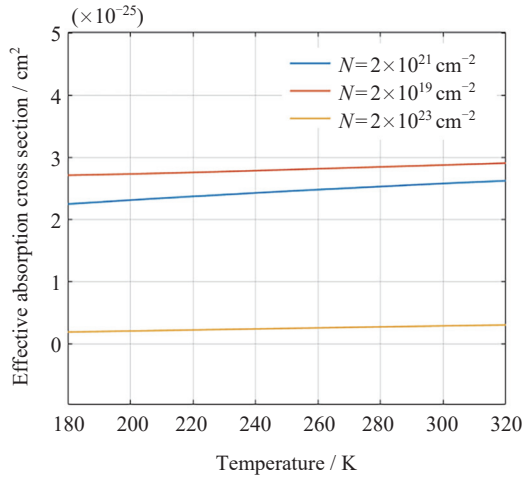


图 4 有效吸收截面随温度的变化

Fig. 4 Effective absorption cross-section as a function of temperature

3 红外探测方案

红外波段的 760 nm 氧气吸收 A 带是恒星掩星技术探测中低层大气 (15～85 km) 氧气密度的核心手段. 相较于紫外 SR 吸收带, 红外 A 带虽受温度敏感性高、吸收截面不连续等问题的制约, 但通过高分辨率光谱分析、多通道协同反演及温度–气压耦合建模, 已逐步实现了氧气密度、温度与气压的同步精确反演. 下面将系统给出 5 个典型红外掩星载荷的技术方案, 重点分析其针对弱吸收信号、温压干扰等难点的创新设计, 并展示红外探测在临近空间大气研究中的优势与局限性.

3.1 POAM 载荷

3.1.1 仪器介绍

POAM (Polar Ozone and Aerosol Measurement) 系列仪器是专为监测地球极地平流层的臭氧层和气溶胶分布而设计的卫星载荷, 利用太阳掩星技术, 重点关注臭氧损耗和大气化学过程. POAM II/III 均采用模块化设计, 由光学头部组件与主控电子模块构成, 如图 5 所示[11]. 其中光学头部组件作为外置单元, 包含九通道光度计、太阳跟踪器及云台, 尺寸为 22 cm×23 cm×34 cm, 质量 13.9 kg. 两代仪器均搭载于 SPOT 系列卫星上, 其中 POAM II 搭载于 SPOT 3 在 1993 年发射, POAM III 搭载于 SPOT 4 在 1998 年发射. 每日可观测 14.2 次极区日

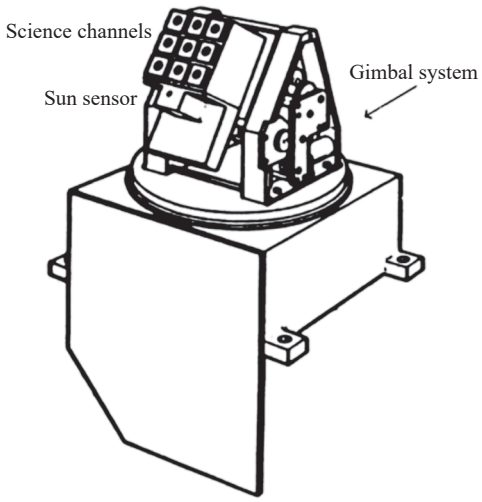


图 5 POAM 系列仪器光学头部组件

Fig. 5 Optical head assembly of the POAM instrument

出或日落事件, 单次事件记录 100 s 数据[11,12].

在光谱探测方面, POAM II/III 均采用九通道窄带滤光片设计, 覆盖紫外至近红外波段 (353～1059 nm), 通过太阳掩星法测量大气透过率. 其反演算法基于最优估计法, 可输出臭氧、水气、二氧化氮及气溶胶消光的 1～2 km 分辨率垂直剖面.

3.1.2　氧气探测与反演方法

POAM II 首次将氧气 A 吸收带 (760.8 nm, 带宽 2 nm) 纳入多通道探测体系, 通过通道 5 与通道 6 的差分吸收技术分离氧气吸收信号, 如图 6 所示[12]. 该设计利用氧气在近红外波段的吸收特性, 结合均匀混合假设反演大气密度与温度剖面[13].

POAM III 针对通道 5 氧气探测进行了多项改进. 首先, 将中心波长微调至 761.3 nm; 其次, 采用 6 阶贝塞尔滤波技术将信噪比提升至 10^4 量级; 此外, 通过铝化聚酯隔热材料将工作温度降至 25～30℃, 显著降低热噪声干扰. 这些改进使氧气密度反演精度在 20～40 km, 理论上能达到 5% 以内, 标准偏差降至 10% 以内.

POAM 的反演分两步进行, 分别是光谱反演和临边反演. 在光谱反演阶段, 仪器通过多通道光学厚度分解算法, 将总衰减信号解耦为臭氧、二氧化氮、水气、氧气及气溶胶消光的贡献. 总光学厚度表示为各成分贡献的线性组合, 即

$$\delta^i_{\rm meas} = \delta^i_{\rm aer} + \sum_\alpha \overline{\sigma}^i_\alpha N_\alpha. \tag{11}$$

其中, $\delta^i_{\rm meas} = -\ln\tau^i_{\rm meas}$为通道 i 的总光学厚度, $\delta^i_{\rm aer}$为通道 i 的气溶胶消光, $\overline{\sigma}^i_\alpha$为气体 α 的有效吸收截面 (温度、气压和柱密度的变量), $N_\alpha = \int n_\alpha(s)\,{\rm d}s$为斜路径柱密度.

模型基于高分辨率线型积分计算氧分子有效吸收截面, 并引入 Voigt 展宽效应以精确表征温度与气压依赖性, 通过构建雅可比矩阵与代价函数, 算法结合英国气象局 (UKMO) 先验数据迭代求解最优斜路径柱密度, 有效抑制了测量噪声与模型不确定性. 对于氧气有效吸收截面计算, 首先需要计算

$$\overline{\delta}^i_\alpha(T,P,N) = -\ln\frac{\int_{\Delta\nu} Q_i(\nu)\,{\rm e}^{-\sigma_\alpha(\nu,T,P)\cdot N}{\rm d}\nu}{\int_{\Delta\nu} Q_i(\nu)\,{\rm d}\nu}. \tag{12}$$

根据下式即可得到正演模型中使用的有效吸收截面:

$$\overline{\sigma}^i_\alpha(T_\alpha,P_\alpha,N_\alpha) = \frac{\overline{\delta}^i_\alpha(T_\alpha,P_\alpha,N_\alpha)}{N_\alpha}. \tag{13}$$

其中, $\overline{\delta}^i_\alpha$为物质 α 在通道 i 的有效光学厚度, Q_i为归一化滤波器透过率曲线, σ_α是物质 α 的吸收截面, $\overline{\sigma}^i_\alpha$是物质 α 在通道 i 的有效吸收截面, ν为光谱频率. 氧分子的有效吸收截面取决于三个参数 (T, P, N), 气压以及分子量覆盖了 POAM 测量值的预期范围 ($10^4 \leqslant P \leqslant 10^5$ Pa, $10^{18} \leqslant N \leqslant 10^{26}$ cm^{-2}). 对于每个 (T, P) 网格点, 选择积分的分辨率 0.005 cm^{-1} 能够充分解析最窄的线宽. 在三维网格上计算出有效吸收截面后, 每个 (P, N) 网格点的温度依赖性使用最小二乘法进行二次拟合, 拟合公式为

$$\overline{\sigma}^i_\alpha(T,P,N) = \sum_{n=0}^{2} a^i_{\alpha,n}(P,N)\,T^n. \tag{14}$$

这种参数化方法再现了真实的温度相关性. 得出的多项式系数二维数组$a^i_{\alpha,n}(P,N)$被存储在查询表

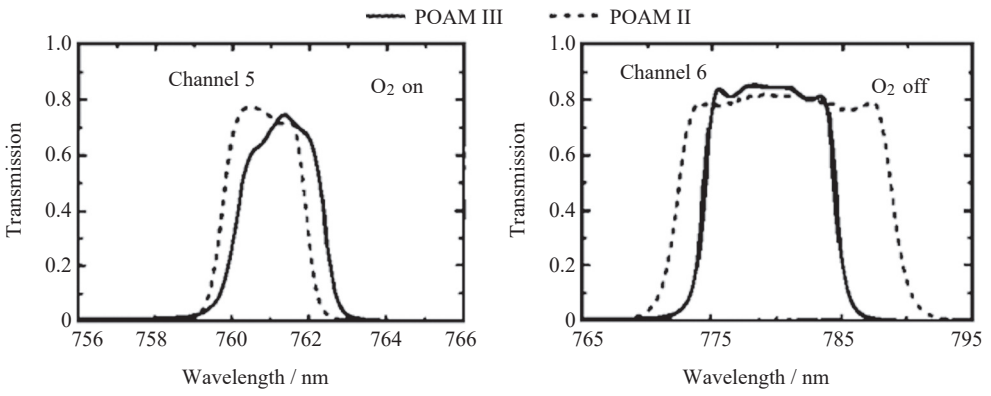


图 6　POAM 氧气探测通道波段设计

Fig. 6　POAM oxygen channel band design

中, 用于反演算法的输入[14].

在临边反演阶段, 斜路径积分量通过辐射传输模型转换为垂直密度廓线. 利用分层剥洋葱法, 大气被分为 1 km 厚的球壳, 结合折射效应修正的路径积分权重函数矩阵, 反演得到各成分的垂直分布. 算法通过平均核矩阵量化垂直分辨率, 并采用列文伯格–马夸尔特优化, 确保收敛稳定性.

3.1.3 探测结果

POAM 系列仪器在氧气探测中面临显著的技术困难. 尽管通道 5 专为直接测量 O_2 吸收设计, 但在 POAM II/III 的反演流程中均未耦合使用. 对 POAM III 第 3 版算法的分析表明, 正演模型的计算结果无法以合理精度拟合通道 5 的光学厚度测量值, 模型与实测值的系统性偏差达 5%～10%, 远超输入参数的预期不确定性. 通常推测核心问题源于滤光片透过率曲线的微小偏移, 或未标定的仪器非线性响应. 因此, POAM III 在反演中暂弃用通道 5 数据, 转而依赖 354 nm 通道 1 的瑞利散射信号反演大气或氧气密度, 并在 30～60 km 范围内取得可靠结果. 相比之下, POAM II 因硬件设计缺陷导致通道 5 在 30 km 以上信号饱和, 最终该通道也被弃用. 两代仪器均未将氧气密度剖面列为最终科学数据.

POAM 科学分析认为, 若未来能解决滤光片校准问题, 恢复 A 波段通道将显著提升大气密度反演精度, 通过直接测量氧分子吸收信号, 可减少对瑞利散射和外部气象数据的依赖.

3.2 ILAS 载荷

3.2.1 仪器介绍

ILAS 是日本环境厅开发的大气遥感仪器, 搭载于 1996 年 8 月发射的先进地球观测卫星 ADEOS 上. 该仪器采用太阳掩星技术, 主要用于监测极地地区平流层的大气成分. ILAS 由两个光栅光谱仪及一个太阳边缘传感器组成. 其中红外光谱仪覆盖 6.21～11.77 μm 波段, 用于测量臭氧、硝酸、一氧化二氮等气体的吸收光谱. 可见光光谱仪覆盖 753～784 nm 波段, 光谱分辨率为 0.17 nm, 重点观测分子氧 A 带, 以反演平流层温度与气压剖面. 其光学系统通过四透镜传输系统将太阳光聚焦到狭缝入口, 利用部分望远镜减少光强, 并优化成像质量[5]. 仪器设计如图 7 所示[15].

3.2.2 氧气探测和反演方法

ILAS 通过可见光波段对氧气吸收 A 带的光谱进行高精度测量, 反演大气中的氧气密度分布. 其探测原理基于太阳掩星技术, 一次典型的透过率探测结果如图 8 所示[15]. 由于氧气在大气中 20.9% 的混合比相对稳定, 且分布均匀, 其吸收光谱的强度与路径上的氧分子柱浓度直接相关, 因此, 可用于推导氧气密度垂直廓线.

ILAS 的可见光光谱仪采用 0.17 nm 高分辨率光栅分光系统, 能够精细分辨氧分子 A 带的转动吸收线结构. 在数据处理阶段, 首先对原始信号 Level 0 进行滤波和基线校正, 消除仪器噪声和背景干扰, 生成伪透过率 Level 1. 随后, 通过非线性最小二乘拟合方法, 将观测到的透过率光谱与理论模拟光谱进行比对, 反演各高度层的氧气密度. 理论光谱的计算基于逐线积分算法, 考虑 Voigt 线型, 结合洛伦兹和多普勒展宽效应, 并引入 Curtis-Godson 近似处理非均匀

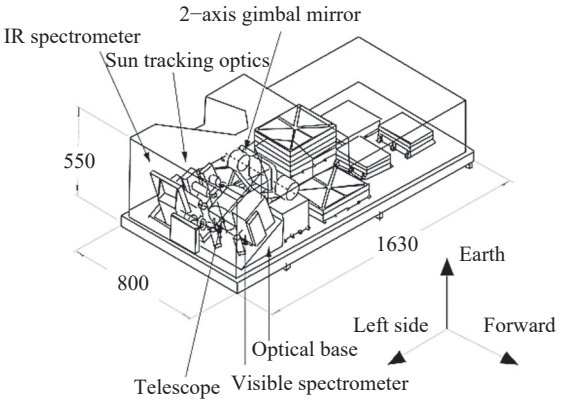


图 7 ILAS 仪器平面结果 (单位: mm)

Fig. 7 ILAS instrument planar structure (Unit: mm)

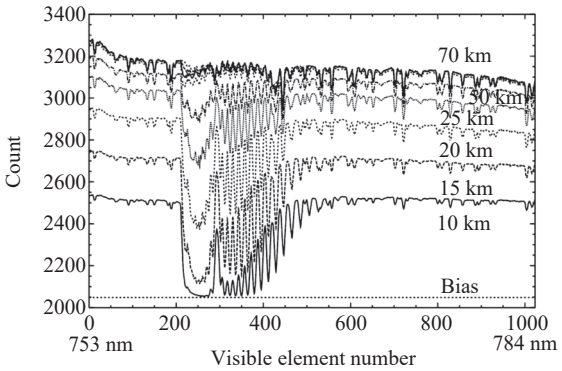


图 8 一次典型的不同切线海拔 ILAS 掩日红外光谱测量

Fig. 8 A typical ILAS occultation infrared spectral at different tangent altitudes

路径上的温度和气压变化. 温度和气压等先验数据来自英国气象局同化资料, 结合卫星轨道几何参数和大气折射修正, 确保切线高度定位的准确性.

在反演过程中, 氧气密度的计算依赖于温度、气压的协同反演. 由于氧分子 A 带的吸收线强度与温度呈指数关系, 而线宽受气压影响, 因此 ILAS 采用迭代优化方法, 通过雅可比矩阵分析透过率对温度、气压的敏感性, 逐步修正初始猜测值, 直至拟合残差最小化. 最终, 氧气密度通过理想气体定律从反演得到的气压和温度中导出[5].

3.2.3　探测结果

与 HALOE (Halogen Occultation Experiment) 的对比验证表明, ILAS 的氧气密度反演在南半球与理论预期吻合较好, 但在北半球出现显著偏差. 如图 9 所示[5], 1997 年 3 月的观测显示, 50 km 高度处密度反演值偏低, 可能与极涡边界动力学过程或光谱数据库的季节性、适用性不足有关.

误差分析指出, 系统误差和随机误差共同导致了 4 K 的温度误差和 4% 的气压误差. 在 40 km 以上区域, 由于光谱拟合的振荡问题, 结果需谨慎使用. 未来改进方向包括采用更高精度的太阳光谱数据库, 以进一步提升反演可靠性. 尽管存在挑战, ILAS 的氧气密度数据仍为平流层化学动力学研究提供了重要约束, 其结果被用于验证大气环流模型中的传输过程, 并辅助其他痕量气体的反演.

3.3　GOMOS 载荷

3.3.1　仪器介绍

GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars) 是搭载于欧洲空间局 2002 年发射的 Envisat 卫星上的高精度光谱仪, 专为监测地球平流层和中层大气成分而设计. 该仪器采用星光掩星方法, 通过分析恒星光线穿过大气层时的吸收特征, 实现对臭氧、二氧化氮、气溶胶、水气和氧气等成分的垂直分布探测, 覆盖高度范围为 5～100 km. 仪器由芬兰气象研究所和法国大气服务局于 1988 年提出构想, 并最终由 Astrium 公司主导研制[16].

GOMOS 的光学系统由 30 cm×20 cm 的望远镜、高精度指向系统和多波段探测器组成. 其核心包括紫外–可见光谱仪 (250～675 nm, 分辨率 1.2 nm)、近红外光谱仪 (756～773 nm 和 926～952 nm, 分辨率 0.2 nm) 以及蓝光和红光高速光度计, 光路设计图如图 10 所示[17]. 其中近红外光谱仪波段覆盖氧气的

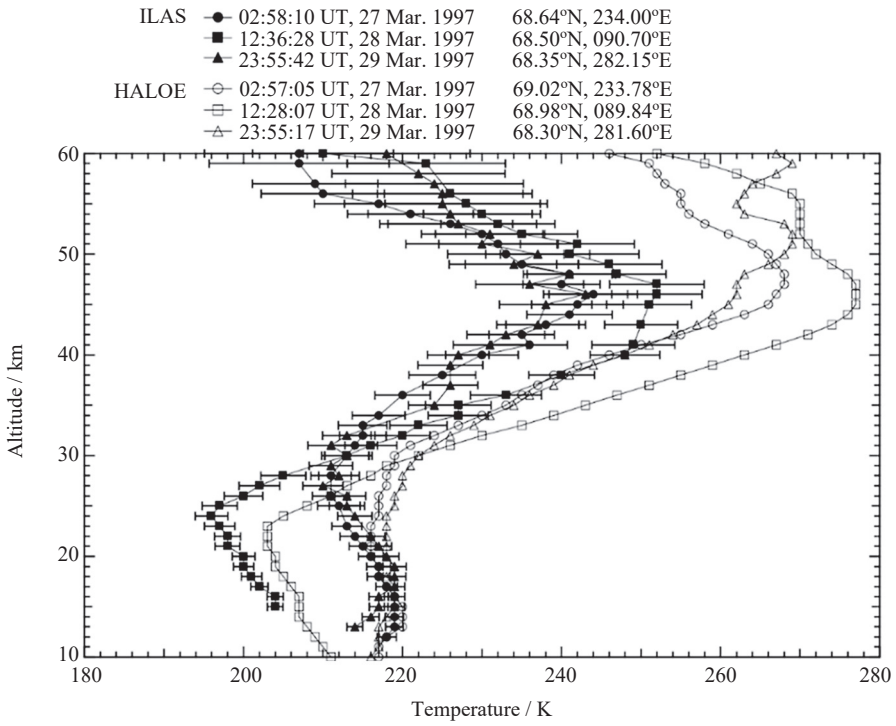


图 9　通过 ILAS 探测氧气得到的温度剖面与 HALOE 结果对比

Fig. 9　Comparison of temperature profiles derived from ILAS oxygen measurements with HALOE results

A 吸收带及其相关谱线可用于探测大气中的氧气含量.

GOMOS 采用分层反演策略: 首先通过有效截面法从透过率谱中解算成分的水平柱密度, 再结合球对称假设通过剥洋葱法重构垂直密度剖面. 光度计数据则用于提取大气湍流信息和高分辨率温度剖面. 尽管存在硬件和反演挑战, GOMOS 作为首个业务化运行的星光掩星仪器, 填补了太阳掩星观测的空间覆盖局限, 对理解平流层化学过程具有重要意义.

3.3.2 氧气探测和反演方法

GOMOS 基于星光掩星技术反演氧气的垂直分布. 在反演算法方面, GOMOS 利用瑞利散射信号和氧分子吸收 A 带进行联合分析, 并结合欧洲中期天气预报中心提供的先验温度、气压数据, 以提高反演精度.

在仪器的官方数据处理系统算法[17] 中, 通过对比探测到的光谱透过率与模型透过率来确定氧气密度. 然而, 该方法存在明显局限性, 如未考虑季节性变化的波长标定、被高估的光谱仪 SPB1 点扩散函数宽度、依赖于旧版光谱数据库等问题. 为改进反演精度, 法国的 ACRI-ST 公司开发了基于列文伯格–马夸尔特的 ALGOM 优化算法[18]. 该算法通过直接拟合模型谱与测量谱, 动态调整多个关键参数, 包括氧气斜路径密度、波长偏移、点扩散函数宽度以及基线修正系数. ALGOM 还创新性地利用 ECMWF+MSIS 大气模型生成透过率查找表, 进一步减少了温度剖面不确定性带来的误差.

3.3.3 探测结果

GOMOS 是当前唯一使用星光光源探测红外波段氧气吸收的掩星仪, 由于星光强度远小于日光, 并且氧气在红外波段的吸收能力有限, 所以其信噪比低, 探测结果存在较大的误差.

对于官方数据处理系统算法, GOMOS 的氧气反演结果存在显著的误差和不确定性. 在 2002 年 7 月南极地区的观测中, 使用较亮的视星等 0.8 的 Alp Tau 时的反演结果, 在 15～60 km 高度范围内与 POAM III 数据的偏差在 50% 以内, 而使用较暗的视星等 2.87 的 Eta Tau 时, 数据质量不理想, 出现超过 200% 的非物理振荡值, 如图 11 (不同曲线代表不同恒星) 所示[19].

相对于官方数据处理系统算法, ALGOM 的改进算法在多方面表现出优势. 首先, 其低空覆盖能力更强, 使氧气密度反演可延伸至更低高度. 其次, 反演精度显著提升, 尤其是对暗星的处理更为稳妥, 离散度减少 25%～30%. 然而, 研究也发现了一些未解问题, 例如在 40 km 以上, ALGOM 反演的氧气密度值系统性低于传统算法约 20%, 且与 ECMWF 大气密度的预期比值仍存在偏差, 使用最亮星天狼星的反演结果如图 12 所示[18], 预期值应为 0.209 (黑色虚线). 总体而言, ALGOM 算法通过多参数优化和模型更新显著提升了氧气密度反演的精度和可靠性, 但其在大气高层的系统性偏差仍需进一步研究, 未来可能需结合更精确的光谱数据库或独立观测数据开展验证.

总体而言, GOMOS 的氧气探测具备全球覆盖的优势, 但其反演精度受恒星类型、观测条件及算法局限性的显著制约. 尽管目前的探测数据存在一定局限性, GOMOS 的长期观测仍为大气密度、温度及气压

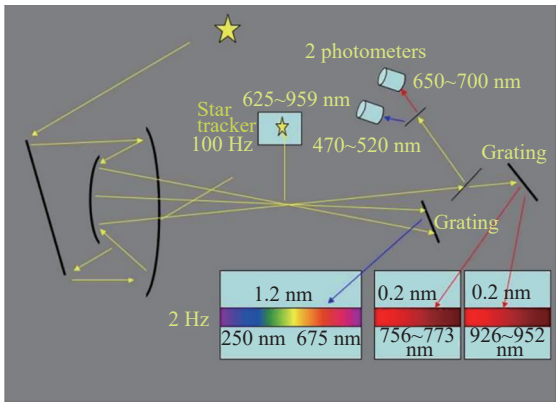


图 10 GOMOS 光路

Fig. 10 GOMOS optical path

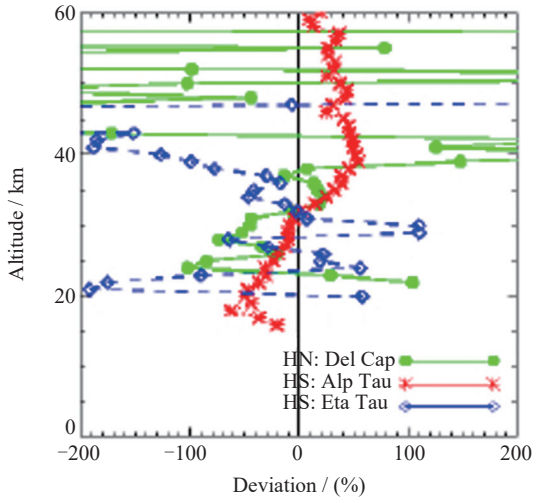


图 11 GOMOS 掩星探测结果与 POAM 结果对比

Fig. 11 Comparison of GOMOS measurements with POAM results

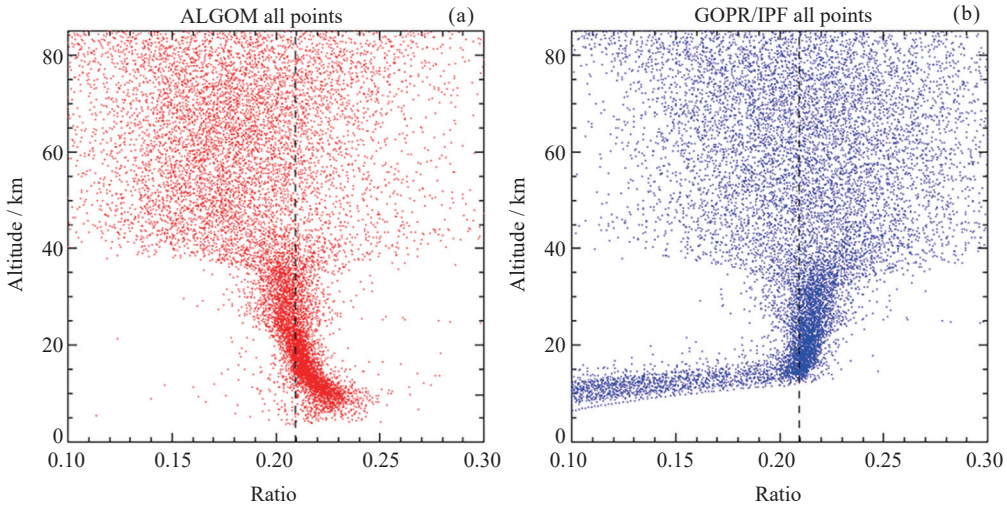


图 12　(a) ALGOM 氧气密度反演结果对 ECMWF 大气密度的比值, (b) GOMOS 官方氧气密度反演结果对 ECMWF 大气密度的比值

Fig. 12　(a) Ratio of ALGOM retrieved oxygen density to ECMWF air density, (b) ratio of GOMOS oxygen density product to ECMWF air density

的全球监测提供了宝贵的数据集, 未来结合更先进的反演方法, 有望进一步提高其数据的科学价值.

3.4　MAESTRO 载荷

3.4.1　仪器介绍

MAESTRO (Measurement of Aerosol Extinction in the Stratosphere and Troposphere Retrieved by Occultation) 是搭载于加拿大 SCISAT 卫星上的科学载荷, 于 2003 年 8 月发射. 该仪器由两个独立的紫外和可见光光谱仪组成, 分别覆盖 285～565 nm 和 515～1015 nm 波段, 光谱分辨率约为 1.5 nm 和 2 nm, 通过太阳掩星观测模式测量平流层和上对流层的气溶胶、臭氧、二氧化氮等痕量气体. MAESTRO 采用紧凑型二极管阵列光谱仪结构, 重量仅 8 kg, 功耗 14 W, 具有 1～2 km 的高垂直分辨率和每日约 30 次掩日的全球观测能力, 其仪器设计如图 13 所示[20].

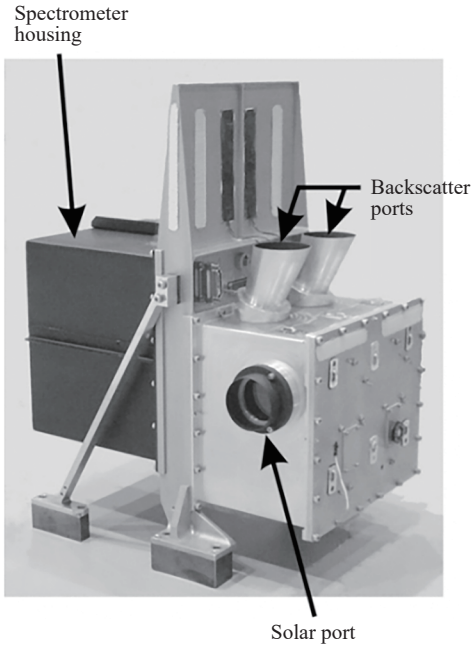


图 13　MAESTRO 掩日仪器照片

Fig. 13　Photo of MAESTRO solar occultation instrument

其搭载的可见光光谱仪能够有效探测氧气的吸收特征, 特别是在 760 nm A 带和 690 nm B 带波段. 这些吸收信号被用于反演大气中氧气的密度, 并结合温度信息间接推导气压剖面[21].

3.4.2　氧气探测和反演方法

MAESTRO 通过测量氧气 A 带和 B 带的太阳掩星吸收光谱来反演大气氧气密度剖面, 通过光谱拟合算法实现从光谱测量到氧气密度的直接反演. 反演过程采用迭代约束线性化 χ^2 最小化方法, 拟合所有切高点的光谱通道, 最小化测量值与正演模型计算值之间的差异. 在一次掩星事件中, 仪器在 0～100 km 记录 60 组不同切高的光谱及 20 组太阳参考光谱. 通过计算光学厚度, 提取氧气 A 带和 B 带的吸收特征[22].

为应对 2 nm 低分辨率光谱仪对高分辨率氧气吸

收线饱和效应的挑战, MAESTRO 采用快速逐线方法, 通过预计算不同温压条件下的氧气有效吸收截面表, 利用二维插值生成高分辨率吸收系数. 反演算法采用全局拟合迭代法, 结合二阶 Tikhonov 平滑约束抑制噪声引起的振荡. 利用代价函数最小化观测值与正演值的差异, 通过列文伯格–马夸尔特迭代更新密度剖面, 其初始猜测值依赖气象分析数据.

3.4.3 探测结果

MAESTRO 通过氧气 A 带和 B 带的吸收特性实现了从地表至 80 km 的大气密度、气压和温度剖面反演. 在 30 km 以下的低空, 由于 A 带信号饱和及狭缝函数不确定性等问题, 反演主要依赖 B 带数据, 其核心吸收区不易饱和且受仪器表征误差影响较小; 而在 30 km 高度以上则采用 A 和 B 带联合反演以提高信噪比.

反演结果显示, MAESTRO 与搭载于同一平台上的傅里叶变换光谱仪 ACE-FTS、加拿大气象中心等数据的气压差异普遍小于 5%, 温度差异在 10 K 内 (< 60 km), 理论误差分析表明低空密度反演精度可达 1%～2%, 如图 14 所示[21].

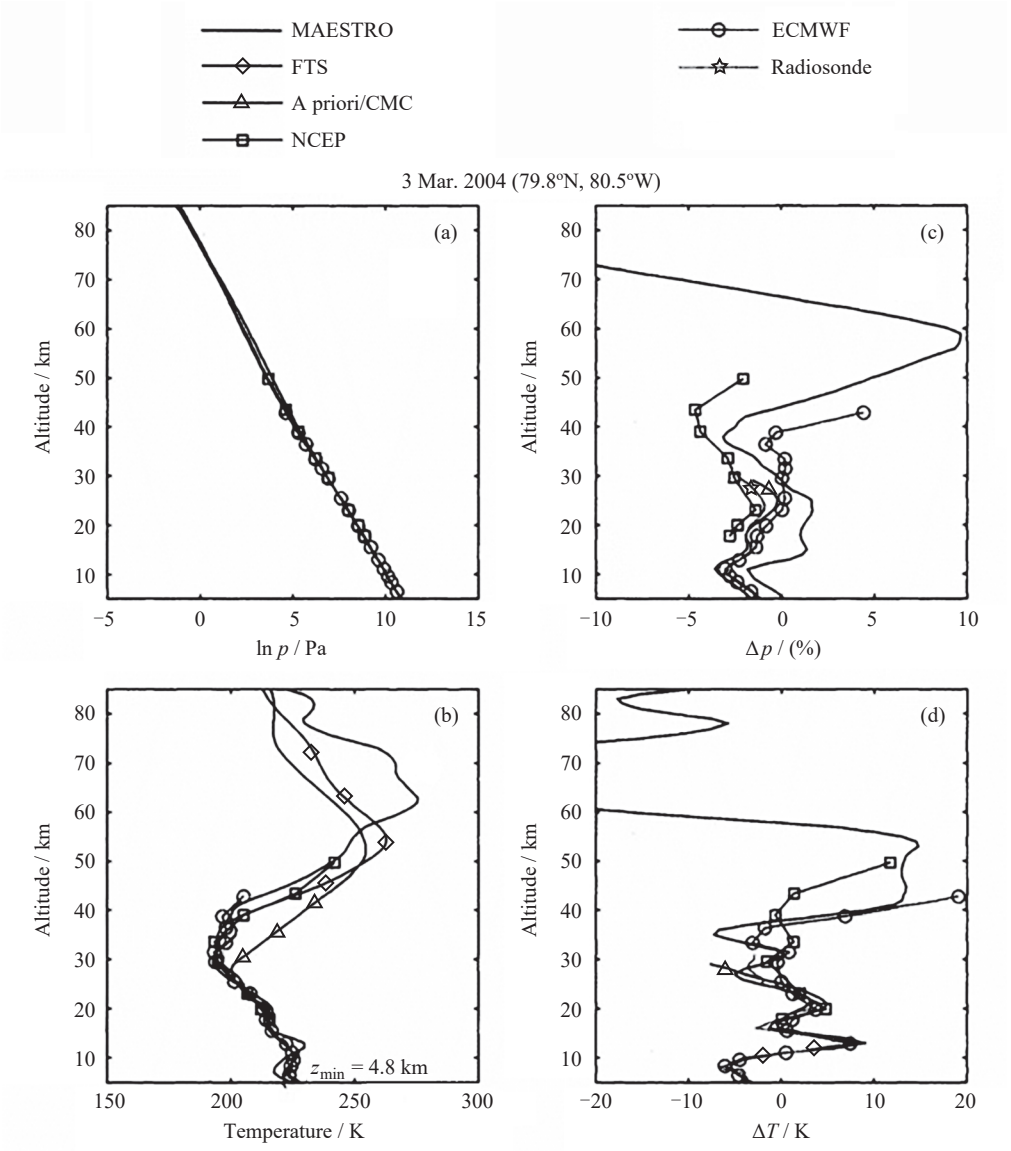


图 14 掩星编号 ss3004: MAESTRO 与其他探测数据的温压探测结果与差异

Fig. 14 Occultation ss3004: comparison of temperature/pressure profiles between MAESTRO and other measurements

误差来源分析显示, 系统误差主导气压反演误差, 而温度误差更易受密度梯度影响, 例如 30 km 处 0.4% 的气压误差可引发 2.5 K 的温度偏差. 与外部数据对比发现, MAESTRO 与 ACE-FTS 的密度均方根差异为 2%～5% (< 50 km), 温度差异 5～10 K, 如图 15 所示[21]. 值得注意的是, 不同气象分析数据在 40～50 km 高度的气压差异可达 10%, 温度差异达 10 K, 凸显了 MAESTRO 独立测量的价值. 尽管存在 20～30 km 异常信号成因未明、狭缝函数优化不足等局限, MAESTRO 的氧气探测结果为其他痕量气体的反演提供了基础支撑.

3.5　SAGE III 载荷

3.5.1　仪器介绍

SAGE III (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment III) 是美国国家航空航天局 (NASA) 开发的第五代高垂直分辨率大气成分监测光谱仪, 搭载于国际空间站开展科学观测. 该仪器覆盖 290～1550 nm 波长范围, 采用太阳掩星、月球掩星和临边散射三种测量模式, 可获取平流层与上对流层的臭氧、气溶胶、水蒸气、二氧化氮等痕量气体的垂直分布数据. 在对氧气密度的探测中使用分辨率为 1.4 nm 的 759～771 nm 吸收波段. SAGE III 仪器由传感器组件和电子控制单元构成, 如图 16 所示[23]. 该任务延续了自 20 世纪 70 年代开始的 SAGE 系列观测, 其历史数据集被公认为大气成分监测的国际标准. 通过国际空间站 51.6°倾角的轨道优势, SAGE III 实现了南北纬 70°范围内的近全球覆盖, 为气候模型和臭氧动力学研究提供了高精度、长期连续的观测数据.

3.5.2　氧气探测和反演方法

SAGE III 利用太阳掩星法对氧气 A 波段进行多光谱测量, 以反演大气温度和气压垂直廓线. 每次掩星事件可在 1～85 km 高度范围内以 1 km 间隔采集测量数据. 其光谱仪在 759～771 nm 范围内设置了 14 个离散通道, 每个通道的中心波长间隔为 1 nm, 光谱分辨率为 1.4 nm, 这意味着每个通道的测量实际上是对 1.4 nm 宽的光谱区间进行积分, 如图 17 所示[4]. 因此相邻通道的光谱响应会有部分重叠, 这种设计牺牲了精细光谱结构的分辨能力, 但可以捕捉 A 波段的整体吸收特征, 同时保证足够的信噪比.

反演采用 Carlotti 全局拟合法, 通过迭代调整初始的美国国家环境预报中心 (NCEP) 分析数据和 GRAM-95 气候模型温压廓线, 最小化实测与正演模拟吸收率的加权残差平方和, 其中正演模型考虑了氧气光谱参数、臭氧干扰以及辐射传输效应, 采用改进的列文伯格–马夸尔特非线性最小二乘法求解. 反演

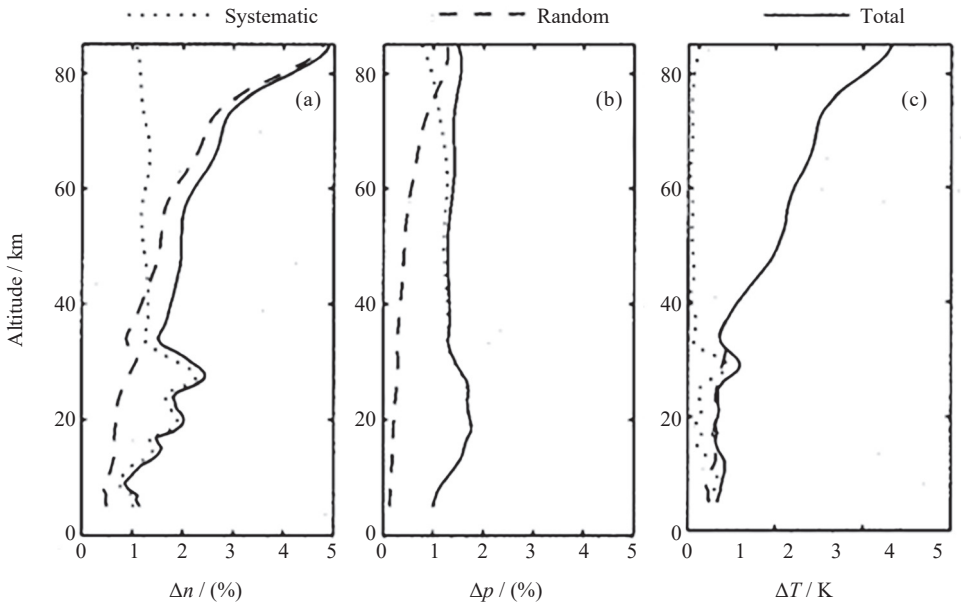


图 15　掩星编号 ss3004 的预期系统、随机和总误差

Fig. 15　Expected systematic, random, and total errors of occultation ss3004

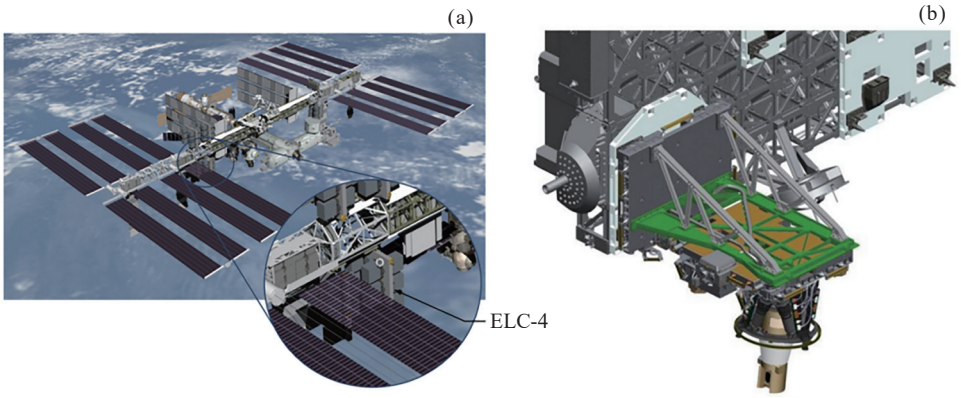


图 16 搭载在国际空间站 ELC-4 区域 (a) 的 SAGE III 掩日仪 (b)

Fig. 16 SAGE III solar occultation instrument (b) mounted on the International Space Station's ELC-4 platform (a)

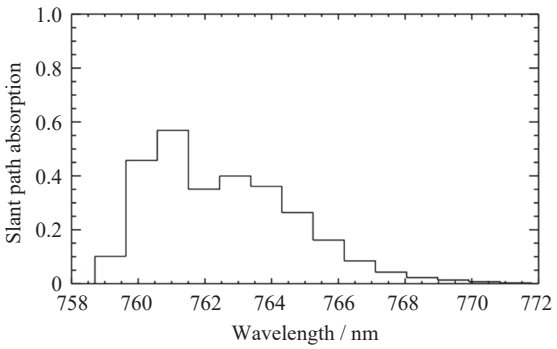


图 17 SAGE III 以 1 nm 分辨率探测切点海拔 20 km 吸收光谱

Fig. 17 SAGE III measured absorption spectra at 20 km tangent altitude with 1 nm spectral resolution

误差主要来源于测量噪声、光谱参数系统偏差以及辐射传输近似计算误差.

3.5.3 探测结果

SAGE III 通过高精度测量氧气 A 波段的吸收特征, 成功获取了 1～85 km 高度范围内的大气温度和压力垂直廓线. 反演结果表明在 20～60 km 高度范围内, 温压推导结果与 NCEP 分析数据及 HALOE 等卫星观测具有良好的一致性, 如图 18 所示[4]. 系统误差分析显示, 30～65 km 高度的温度反演主要受臭氧光谱参数不确定性和辐射传输近似的影响, 而 40 km 以上则以测量噪声为主导误差源.

尽管在低层大气 ($<$ 30 km) 受到气溶胶和臭氧干扰的影响较大, 但是通过多波长协同反演技术仍能获得可靠的温压信息. 这些氧气 A 波段探测结果不仅为大气动力学和气候变化研究提供了重要的约束, 还显著地提升了 SAGE III 气溶胶和痕量气体反演数据的准确性.

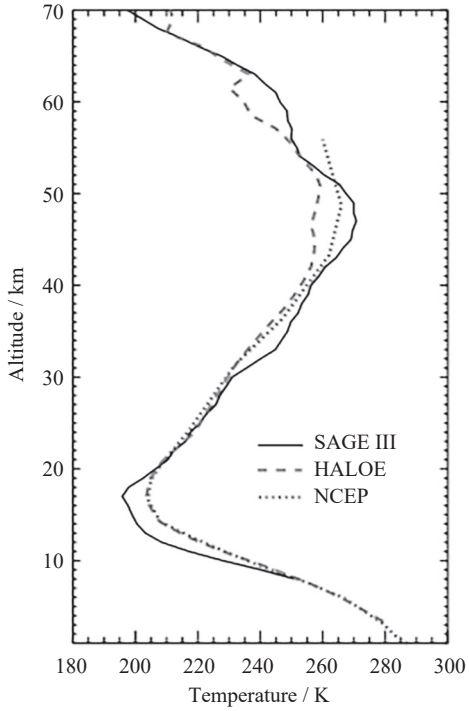


图 18 典型 SAGE III 温度探测结果对比

Fig. 18 Comparison of a typical SAGE III temperature retrieval results

4 紫外探测方案

紫外 140～160 nm 波段的氧分子 SR 吸收带凭

借其强吸收特性, 成为探测 130 km 以上高层大气氧气密度的关键手段. 相较于红外波段, SR 吸收带受温度影响较小, 且吸收截面连续, 适用于热层及低热层的高精度密度反演. 然而, 其过强的吸收能力导致在低层大气光信号被完全吸收, 限制了探测高度范围. 本章将重点介绍三个紫外掩星载荷的技术特点, 分析其在高层大气探测中的优势与挑战.

4.1　OAO-2 载荷

4.1.1　仪器介绍

NASA 于 1968 年发射 OAO-2. 其搭载的紫外望远镜系统采用主副镜组合结构, 主望远镜口径 16 英寸, 配合四台 8 英寸副望远镜构成复合光学系统, 如图 19 所示[24]. 光谱仪采用罗兰圆结构, 搭配光电倍增管阵列实现约 0.5 nm 的光谱分辨率. 针对氧分子探测, 仪器特别配置了中心波长 145 nm 的窄带滤光片, 其通带范围 130～175 nm, 恰好覆盖 SR 连续吸收带. 该系统首次采用 Abel 积分反演算法, 将切向柱密度数据转换为局部数密度剖面, 配合轨道几何参数反演. 仪器还整合了温度反演模块, 通过在 130 km 以上高度假设扩散平衡状态, 直接从氧气密度分布推导出中性大气温度场. OAO-2 首次突破了传统火箭探测和晨昏卫星观测的时空局限性, 实现了全时段热层成分的高分辨率、全天候探测, 为研究高层大气动力学过程提供了全新的观测手段.

4.1.2　氧气探测和反演方法

OAO-2 通过测量特定紫外波段的星光穿过地球大气时的衰减来反演氧气分布. 卫星搭载的紫外光度计利用中心波长约 145 nm 的 4-1 号滤光片观测分子氧在 SR 连续吸收带 130～175 nm 的特征吸收. 在星光被地球大气中的氧分子逐渐吸收的过程中, 仪器以约 1.5 km 的垂直分辨率记录 SR 吸收带波段的星光强度衰减. 这一衰减过程瑞利散射和其他成分的吸收可忽略不计. 反演过程首先需要利用卫星轨道参数精确确定每条观测射线对应的切向点高度和地理位置, 继而通过阿贝尔积分变换将切向柱密度剖面转换为局地氧气密度垂直分布.

4.1.3　探测结果

OAO-2 卫星成功观测到了 140～200 km 低热层的分子氧密度分布, 并获得了具有重要科学价值的探测结果. 其数据显示: 在 140～180 km 高度范围内, 实测氧气数密度比当时国际通用的 CIRA1965 模型预测值低约两倍, 如图 20 所示[3]. 这一差异不仅揭示了现有大气模型的局限性, 更首次为热层成分建模提供了直接的观测约束. OAO-2 的观测还证实了氧气密度存在显著的时空变化特征. 通过对 1970－1971 年间 14 次有效掩星事件的分析, 显示氧气密度与太阳活动呈现明显相关性. 随着太阳 $F_{10.7}$ 在 1970－1971 年间逐渐减弱, 相同高度上的氧气数密度同步降低, 这反映了太阳辐射对低热层结构的调制作用.

这些发现不仅验证了热层动力学的理论预测, 还确立了星光掩星技术作为探测中高层大气成分的有效手段. 因此, OAO-2 的氧气密度观测不仅在当时具有突破性意义, 其数据质量和方法学创新至今仍被后

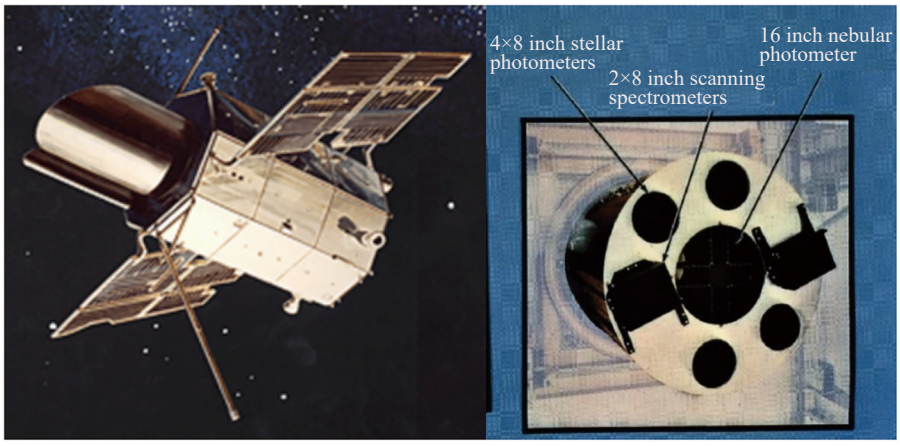


图 19　OAO-2 卫星平台 (a) 与紫外望远镜系统 (b)

Fig. 19　OAO-2 satellite platform (a) and the ultraviolet telescope system (b)

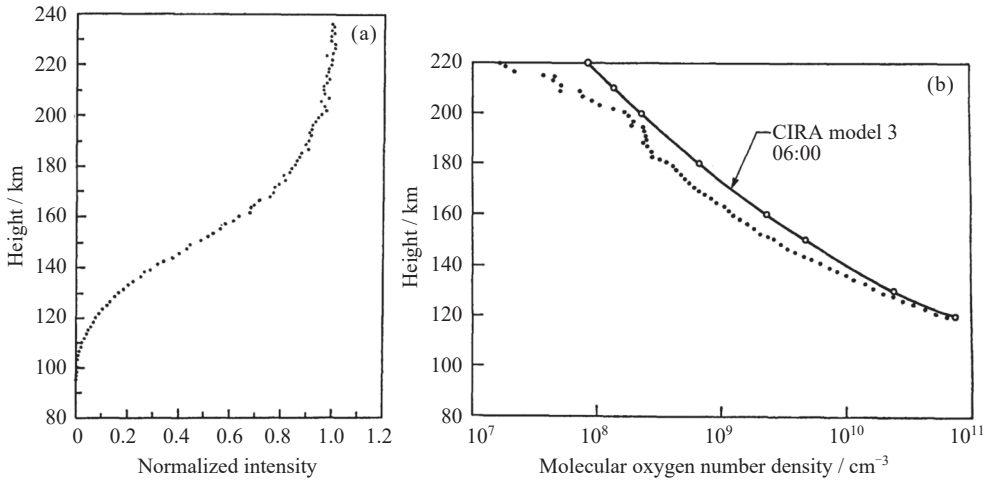


图 20 OAO-2 探测到的一次掩星事件归一化光强 (a) 及其氧气密度反演结果 (b)

Fig. 20 Normalized light intensity of an occultation event detected by OAO-2 (a) and its retrieved oxygen density profile (b)

续研究, 例如 TIMED 和 GOLD 等任务作为重要的参照基准.

4.2 UVISI 载荷

4.2.1 仪器介绍

UVISI (Ultraviolet and Visible Imagers and Spectrographic Imagers) 是搭载于 MSX 卫星上的多光谱遥感仪器, 由约翰霍普金斯大学应用物理实验室开发, 旨在实现从紫外到近红外波段的高精度大气观测. 该仪器由 4 个可见光/紫外成像仪和 5 个光谱成像仪组成, 光谱覆盖范围 120～900 nm, 如图 21 所示[25]. UVISI 的核心创新在于其结合了高光谱分辨率与高空间分辨率的能力, 通过星光掩星观测实现了大气吸收与折射效应的同步测量. 其中, 光谱成像仪采用狭缝式成像光谱设计, 具有 1.5 km 垂直分辨率, 而可见光成像仪能以 10 μrad 的指向稳定性追踪星光折射位移. 这种独特配置首次系统性验证了吸收/折射联合掩星技术, 成功反演了从热层到对流层的大气密度、温度及臭氧垂直剖面. UVISI 的实验成果为后续 GOMOS 等星载掩星仪器提供了关键技术验证, 其设计理念直接推动了 STARS 等新一代小型化大气遥感载荷的研发[26].

4.2.2 氧气探测和反演方法

UVISI 的五个光谱成像仪覆盖氧分子的 SR 吸收带和赫茨伯格吸收带, 并且创新性地将吸收测量与折射测量相结合, 从而修正低层大气中折射效应对光路

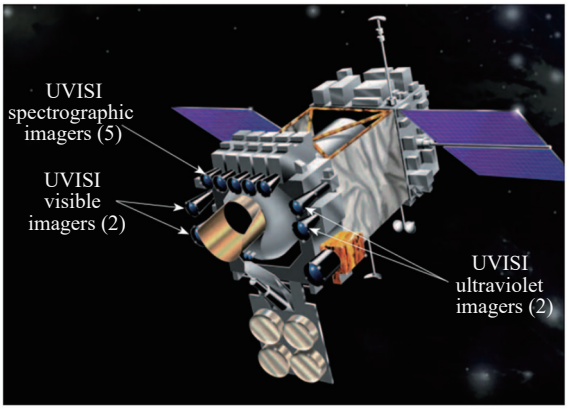


图 21 UVISI 仪器

Fig. 21 UVISI instrument

计算的影响, 显著提高了 30～50 km 高度区间氧气密度的反演精度. 此外, 仪器的高光谱成像能力实现了气辉信号与星光信号的时空分离, 克服了传统方法中气辉背景污染的难题[26].

4.2.3 探测结果

在 50～100 km 的中层大气区域, 得益于高光谱分辨率和气辉背景的有效去除, UVISI 获得了比早期星光掩星观测更精确的氧气密度数据. 值得注意的是, 在 30～50 km 高度区间, 由于氧气吸收截面随温度变化显著, UVISI 结合折射测量提供的温度剖面显著提高了反演精度. 在低于 30 km 的高度, 氧气密度通过折射测量获得的总密度剖面直接推算, 从而实现了从热层至对流层的完整覆盖. 图 22 是从 UVISI 掩

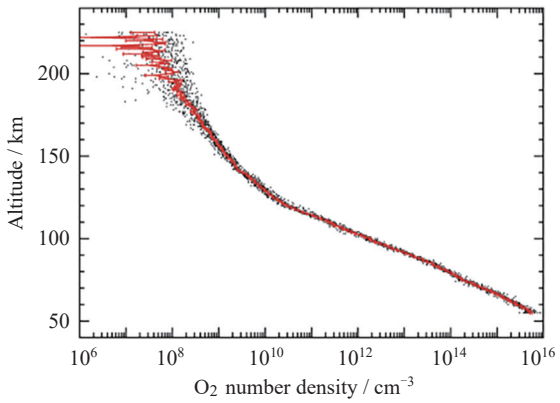


图 22　从 UVISI 掩星中反演得到的氧气密度剖面 (黑点表示单个剖面, 红线表示加权平均剖面及±1 标准差范围)

Fig. 22　UVISI retrieved O_2 density (The black dots represent individual profiles, while the red line denotes the weighted average profile along with the ±1 standard deviation range)

星中反演得到的氧气密度剖面. 观测数据与地基测量结果的对比验证表明, UVISI 反演的氧气密度在重叠高度范围内具有良好的一致性, 其中温度差异普遍小于 5 K.

4.3　GOLD 载荷

4.3.1　仪器介绍

GOLD 任务由美国佛罗里达中央大学牵头, 于 2018 年发射升空. GOLD 任务搭载的紫外成像光谱仪是一台具有创新设计的双通道光学仪器, 旨在对地球热层和电离层进行高时空分辨率的全球观测. 该仪器由两个独立且完全相同的通道组成, 每个通道均采用平面扫描镜、球面望远镜和凹面光栅光谱仪的组合设计, 工作波段覆盖 132～162 nm, 可同时获取原子氧 135.6 nm 和氮分子 LBH 带的发射光谱. 独特的双面倾斜扫描镜设计使单通道即可完成南北半球±60°纬度范围的覆盖, 配合地球静止轨道的持续观测优势, 可获得 30 min 时间分辨率的日侧热层温度和 O/N_2 柱密度比分布, 以及夜侧低纬度电离层峰值电子密度的演化特征[27]. GOLD 仪器光路设计图见图 23.

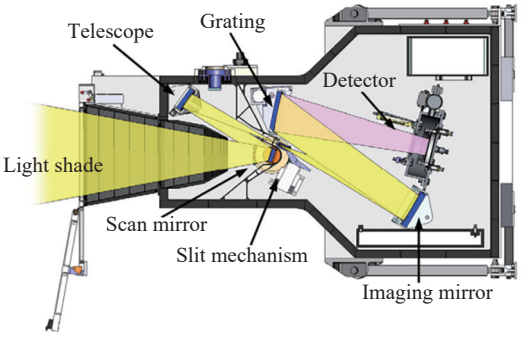


图 23　GOLD 仪器光路设计

Fig. 23　Optical path design of GOLD instrument

4.3.2　氧气探测与反演方法

GOLD 任务的掩星观测功能主要用于测量热层氧气的垂直密度分布. 当选定恒星在地球边缘升起或下降时, GOLD 利用宽视场狭缝连续记录星光紫外 SR 带光谱的衰减过程. 反演采用迭代最优估计算法, 通过拟合观测的透过率与理论计算的透过率差异, 反演出 130～200 km 高度范围内氧气密度的垂直分布, 垂直分辨率达 5～10 km, 精度优于 10% [6]. Lumpe 等[28] 开发的新版本数据进一步优化了反演算法, 通过引入温度依赖的吸收截面和非局部热力学平衡效应, 显著提升了低热层氧气密度的反演可靠性. 这些创新使 GOLD 成为能提供全地方时、长期连续氧气密度观测的数据源, 为热层–电离层耦合研究提供了前所未有的观测约束.

4.3.3　探测结果

GOLD 任务通过星光掩星观测获得了 130～200 km 低热层氧气密度, 其数据显示, 氧气密度在 170 km 高度呈现显著的单峰日变化结构, 在约 18:00 LT 时达到峰值, 而在 06:00 LT 时左右出现最小值, 日变化幅度高达 80%. 这一观测结果与现有热层模型的预测存在显著差异: MSIS 模型和 WACCM-X 数值模型均预测氧气密度呈现双峰日变化结构, 且 22%～35% 的日变化幅度远小于观测值. 在垂直结构方面, GOLD 反演的氧气密度剖面显示, 170 km 高度的密度值显著低于 MSISE-00 和 MSIS2.0 的预测, 如图 24 所示[6]. 这些系统性差异揭示了当前热层模型在氧气光化学–动力学耦合过程的刻画存在不足.

5　结论与展望

恒星掩星技术经过半个多世纪的发展, 已形成紫外与红外双波段氧气探测体系, 建立了从低层大气到热层的多尺度观测能力. 紫外 SR 吸收带凭借强吸收特性实现了 130～230 km 低热层氧气密度的高精度探测, 红外 A 吸收带通过高分辨率光谱解析和先进反

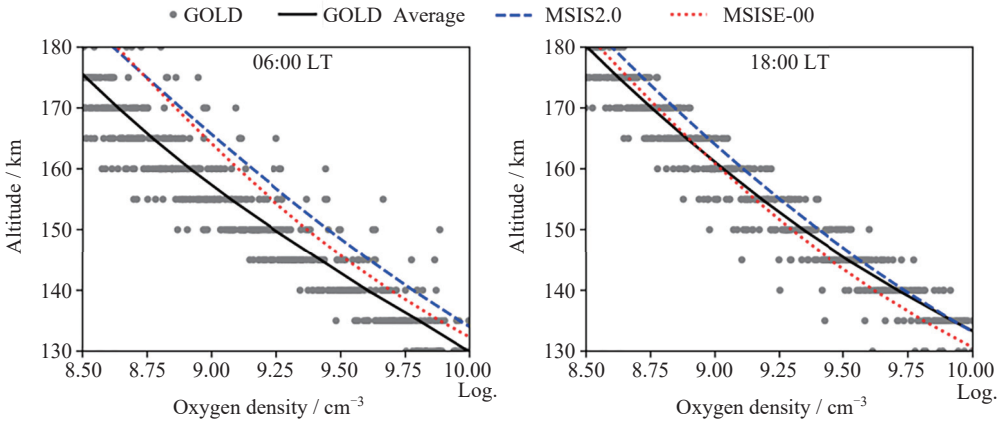


图 24 GOLD 观测的 2019−2021 冬至日 25°S−25°N 氧气密度曲线

Fig. 24 GOLD detected oxygen profiles at 25°S−25°N during December solstices from 2019 to 2021

演算法, 将探测范围下延至 10 km 平流层区域. 多代载荷的迭代优化显著提升了技术成熟度: 光谱分辨率从 OAO-2 的 0.5 nm 提升至 ILAS 的 0.17 nm; 垂直分辨率从早期的 5 km 改进至 SAGE III 的 1 km; 反演算法从简单的阿贝尔积分发展到基于列文伯格–马夸尔特算法的多参数优化方法.

尽管取得显著进展, 恒星掩星氧气探测技术在红外 A 带仍存在一些核心瓶颈. 一是吸收截面受温度和气压的非线性干扰问题, 吸收截面–温压的复杂耦合使反演精度存在不确定性; 二是 A 带吸收能力弱, 对信号源亮度的极高要求, 当前只有掩日方法对该波段进行了有效的探测, 而对于其他的恒星, 即使是最亮的天狼星, 其过低的信噪比导致探测数据仍然不足以形成有效的数据.

针对上述不足, 建议从以下方向寻求突破. 一是新型反演算法开发, 发展神经网络等人工智能算法, 建立吸收截面–温压的非线性映射模型, 降低对先验气象数据的依赖, 探索全波段光谱拟合技术, 提升孤立吸收线解析能力; 二是下一代载荷设计, 研制高信噪比的紫外–红外宽谱段高光谱成像仪, 实现 SR 带与 A/B 带同步观测, 并提升 A 带吸收探测精度.

随着微小卫星星座与人工智能技术的快速发展, 未来有望建成全球覆盖、高时空分辨的掩星观测体系. 通过深度融入空间天气监测网络, 恒星掩星氧气探测技术将在中高层大气建模与预报、空间目标轨道预测等领域发挥更重要作用, 为应对气候变化和保障空间活动安全提供关键技术支撑.

参考文献

[1] HAYS P B, ROBLE R G. Stellar spectra and atmospheric composition[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1968, **25**(6): 1141-1153

[2] FRIEDMAN H, LICHTMAN S W, BYRAM E T. Photon counter measurements of solar X-rays and extreme ultraviolet light[J]. *Physical Review*, 1951, **83**(5): 1025-1030

[3] HAYS P B, ROBLE R G. Stellar occultation measurements of molecular oxygen in the lower thermosphere[J]. *Planetary and Space Science*, 1973, **21**(3): 339-348

[4] PITTS M C, THOMASON L W. SAGE III temperature and pressure retrievals: initial results[C]//Proceedings of SPIE 4882, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere VII. Crete: SPIE, 2003: 62-70. DOI: 10.1117/12.463004

[5] SUGITA T, YOKOTA T, NAKAJIMA T, *et al*. Temperature and pressure retrievals from O_2 A-band absorption measurements made by ILAS: retrieval algorithm and error analyses[C]//Proceedings of SPIE 4150, Optical Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds II. Sendai: SPIE, 2001: 94-105. DOI: 10.1117/12.416949

[6] GREER K R, LASKAR F, EASTES R W, *et al*. The molecular oxygen density structure of the lower thermosphere as seen by GOLD and models[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(8): e2022GL098800

[7] LI Z, WU X C, TU C, *et al*. Research on stellar occultation detection with bandpass filtering for oxygen density retrieval[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(14): 3681

[8] LI Z, WU X C, TU C, *et al*. Oxygen and air density retrieval method for single-band stellar occultation measurement[J]. *Remote Sensing*, 2024, **16**(11): 2006

[9] ZHANG S M, WU X C, SUN M C, *et al*. Using onion-peeling method to inverse ozone density based on the stellar occultation technology in the near space region[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, **42**(1): 203-209 (张斯敏,

吴小成, 孙明晨, 等. 星光掩星剥洋葱法反演臭氧密度 [J]. 光谱学与光谱分析, 2022, **42**(1): 203-209)

[10] STAMNES K. RADIATION TRANSFER IN THE ATMOSPHERE | Ultraviolet radiation[M]//NORTH G R, PYLE J, ZHANG F Q. Encyclopedia of Atmospheric Sciences. 2nd ed. London: Academic Press, 2015: 37-44

[11] BEVILACQUA R M, SHETTLE E P, HORNSTEIN J S, *et al*. Polar ozone and aerosol measurement experiment (POAM-II)[C]//Proceedings of SPIE 2266, Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research. San Diego: SPIE, 1994: 374-382

[12] LUCKE R L, KORWAN D R, BEVILACQUA R M, *et al*. The Polar Ozone and Aerosol Measurement (POAM) III instrument and early validation results[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, **104**(D15): 18785-18799

[13] LUMPE J D, BEVILACQUA R M, HOPPEL K W, *et al*. POAM II retrieval algorithm and error analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, **102**(D19): 23593-23614

[14] LUMPE J D, BEVILACQUA R M, HOPPEL K W, *et al*. POAM III retrieval algorithm and error analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, **107**(D21): 4575

[15] NAKAJIMA H, SUZUKI M, MATSUZAKI A, *et al*. Characteristics and performance of the Improved Limb Atmospheric Spectrometer (ILAS) in orbit[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, **107**(D24): 8213

[16] KYRÖLÄ E, TAMMINEN J, LEPPELMEIER G W, *et al*. GOMOS on Envisat: an overview[J]. *Advances in Space Research*, 2004, **33**(7): 1020-1028

[17] Finnish Meteorological Institute. GOMOS Algorithm Theoretical Basis Document [R]. Helsinki: Finnish Meteorological Institute, 2012

[18] BLANOT L, BERTAUX J, HAUCHECORNE A, *et al*. ALGOM: improvements for GOMOS O2 and H2O Profiles Retrieval [R]. Sophia-Antipolis: ACRI-ST, 2017

[19] BAZUREAU A, GOUTAIL F. Validation of ENVISAT products using POAM III O_3, NO_2, H_2O and O_2 Profiles[R]. Italy: ESA Special Publication, 2003

[20] MCELROY C T, NOWLAN C R, DRUMMOND J R, *et al*. The ACE-MAESTRO instrument on SCISAT: description, performance, and preliminary results[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(20): 4341-4356

[21] NOWLAN C R. Atmospheric Temperature and Pressure Measurements from the ACE-MAESTRO Space Instrument[D]. Toronto: University of Toronto, 2006

[22] NOWLAN C R, MCELROY C T, DRUMMOND J R. Measurements of the O_2 A- and B-bands for determining temperature and pressure profiles from ACE-MAESTRO: forward model and retrieval algorithm[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2007, **108**(3): 371-388

[23] CISEWSKI M, ZAWODNY J, GASBARRE J, *et al*. The Stratospheric Aerosol and Gas Experiment (SAGE III) on the international space station (ISS) mission[C]//Proceedings of SPIE 9241, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XVIII. Amsterdam: SPIE, 2014: 924107

[24] WIESSINGER S, REDDY F. 50th Anniversary of NASA's OAO 2 Mission [OL]. GREENBELT: NASA's Goddard Space Flight Center. (2018-12-11) [2025-05-29]. https://svs.gsfc.nasa.gov/12916

[25] HEFFERNAN K J, HEISS J E, BOLDT J D, *et al*. The UVISI instrument[J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 1996, **17**(2): 198-214

[26] VERVACK JR R J, YEE J H, SWARTZ W H, *et al*. The MSX/UVISI stellar occultation experiments: proof-of-concept demonstration of a new approach to remote sensing of earth's atmosphere[J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 2014, **32**(5): 803-821

[27] EASTES R W, MCCLINTOCK W E, BURNS A G, *et al*. The Global-scale Observations of the Limb and Disk (GOLD) mission[J]. *Space Science Reviews*, 2017, **212**(1/2): 383-408

[28] LUMPE J D, MCCLINTOCK W E, EVANS J S, *et al*. A new data set of thermospheric molecular oxygen from the Global-scale Observations of the Limb and Disk (GOLD) mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(4): e2020JA027812

作者简介



李　政　男, 1996 年 9 月出生于浙江省丽水市, 现为中国科学院国家空间科学中心工程师, 主要研究方向为临近空间飞行环境光电遥感探测技术.
E-mail: lizheng182@mails.ucas.ac.cn



吴小成（通信作者）　男, 1981 年 1 月出生于安徽省合肥市, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为数据同化技术研究、掩星技术研究等.
E-mail: xcwu@nssc.ac.cn