武魁军，王治华，王道琦等. 2024. 基于 $O_2$ 大气带及近红外大气带气辉的临近空间温度廓线联合反演. 地球物理学报，67(9)：3265-3276，doi：10.6038/cjg2024R0805.

Wu K J, Wang Z H, Wang D Q, et al. 2024. Joint retrieval of near space temperature profiles based on the atmospheric and near-infrared atmospheric bands of $O_2$ airglow. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 67(9): 3265-3276, doi: 10.6038/cjg2024R0805.

# 基于 $O_2$ 大气带及近红外大气带气辉的临近空间温度廓线联合反演

武魁军[1]，王治华[1]，王道琦[1]，宿家瑞[1]，于光保[2]，李发泉[2]，何微微[1*]

1 烟台大学物理与电子信息学院，山东烟台 264005

2 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院，武汉 430071

**摘要** 临近空间大气温度廓线信息对于支撑临近空间开发与利用具有重要的学术意义和工程价值. 基于 $O_2$ 分子气辉光谱理论及大气辐射传输机理提出了利用 $O_2$ 大气带及近红外大气带气辉光谱信号联合反演临近空间温度廓线的方法. 利用“剥洋葱”算法，处理扫描成像吸收光谱仪(SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHartographY，SCIAMACHY)在临边观测模式下测量得到的 $O_2(a^1\Delta_g)$ 波段和 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段的气辉辐射光谱信号，采用最优化算法分别反演得到了 50～110 km 以及 80～130 km 的温度廓线信息，并通过与宽带辐射大气测量仪(Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry，SABER)、大气化学实验傅里叶变换光谱仪(Atmospheric Chemistry Experiment Fourier transform spectrometer，ACE-FTS)、迈克尔逊被动大气探测干涉仪(Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding，MIPAS)等遥感卫星的温度产品数据对比，验证了 $O_2(a^1\Delta_g)$ 波段和 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段气辉反演温度的可靠性与合理性. 研究结果表明，利用 $O_2$ 大气带及近红外大气带气辉联合反演温度可以有效覆盖中间层-低热层的临近空间区域(50～130 km)；$O_2(a^1\Delta_g)$ 及 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段气辉光谱在 80～100 km 高度范围内存在交叠区域，温度反演结果的相关系数优于 99.9%；自吸收效应与大气散射，以及光谱污染及信噪比降低分别是导致 50 以下及 130 km 以上区域温度反演结果出现偏差的主要原因.

**关键词** 温度反演；卫星遥感；气辉辐射；临边观测；剥洋葱算法；最优化算法

doi：10.6038/cjg2024R0805 **中图分类号** P351 **收稿日期** 2023-11-27，2024-02-28 收修定稿

# Joint retrieval of near space temperature profiles based on the atmospheric and near-infrared atmospheric bands of $O_2$ airglow

WU KuiJun[1], WANG ZhiHua[1], WANG DaoQi[1], SU JiaRui[1], YU GuangBao[2], LI FaQuan[2], HE WeiWei[1*]

1 *School of Physics and Electronic Information, Yantai University, Yantai Shandong* 264005, *China*

2 *Institute of Precision Measurement Science and Technology Innovation, Chinese Academy of Sciences, Wuhan* 430071, *China*

**Abstract** The atmospheric temperature profile information of near space has important academic significance and engineering value for supporting the development and utilization of near space. Based on the theory of $O_2$ airglow spectroscopy and the mechanism of atmospheric radiation transfer, a

**基金项目** 国家自然科学基金项目(62305283，41975039，41704178)，山东省高校青年创新技术项目(2021KJ008)，山东省自然科学基金项目(ZR2021QD088)，烟台大学研究生科研创新基金项目(GGIFYTU2313)资助.

**第一作者简介** 武魁军，男，博士，教授，主要从事光学遥感及空间物理方面的研究. E-mail：wukuijun@ytu.edu.cn

* **通讯作者** 何微微，女，博士，副教授，主要从事光学遥感及空间物理方面的研究. E-mail：heweiwei@ytu.edu.cn

method is proposed to jointly retrieve near space temperature profiles using $O_2$ atmospheric and near-infrared atmospheric band airglow spectral signals. Using the "onion-peeling" algorithm, we process the airglow radiation spectral signals in the $O_2(a^1\Delta_g)$ and $O_2(b^1\sum_g^+)$ bands measured by the SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHartographY (SCIAMACHY) in the limb-viewing mode, and retrieve them using the optimization algorithm to obtain the temperature profiles in the ranges of 50～110 km and 80～130 km, respectively. The reliability and rationality of temperature from the airglow retrieval in the $O_2(a^1\Delta_g)$ and $O_2(b^1\sum_g^+)$ bands are verified by comparing the data from remote sensing satellites such as Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry (SABER), Atmospheric Chemistry Experiment Fourier transform spectrometer (ACE-FTS) and Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding (MIPAS). The results indicate that the joint retrieval of temperature using $O_2$ atmospheric band and near-infrared atmospheric band airglow can effectively cover the near space of the mesosphere-lower thermosphere (50～130 km). The $O_2(a^1\Delta_g)$ and $O_2(b^1\sum_g^+)$ bands have overlapping regions in the altitude range of 80～100 km, and the correlation coefficient of temperature retrieval results is better than 99.9%. Self-absorption effect and atmospheric scattering, spectral pollution and signal-to-noise ratio decrease are the main reasons for the deviation of temperature retrieval results in the region below 50 km and above 130 km, respectively.

**Keywords** Temperature retrieval; Satellite remote sensing; Airglow radiation; Limb observation; Onion peeling algorithm; Optimization algorithm

## 0 引言

临近空间通常指距地面 20～120 km 的空间区域,位于空天连接处,是太空和航空的重要补充(马俊等,2022).凭借其独特的空间地理优势,临近空间在军事和民用领域的应用需求不断提升,在"海陆空天电"五位一体战场中的战略地位也愈加重要,已经成为大国战略博弈的重要领地(何微微等,2019b).

临近空间大气环境的认知程度是支撑临近空间开发与利用的重要因素,而该区域处于卫星的最低轨道高度与传统航空器的最高飞行高度之间,受探测平台技术的限制,临近空间大气环境研究长期以来一直处于科研"盲区"(马俊等,2022).

在诸多气象参数中,高时空分布的温度廓线信息是表征临近空间大气环境的最为重要的物理量之一.临近空间跨越平流层、中间层及部分热层,包括电离层和非电离层,存在重力波、行星波、大气放电、电磁辐射,以及光化学反应等特殊现象,有着特殊而又复杂的温度空间分布和时间演化特征(Yin et al., 2023; 杨晓君等,2021).

目前,国际上针对临近空间温度信息的探测手段主要有地基和天基两种.其中地基探测手段主要为激光雷达技术,瑞利散射激光雷达(王煜等,2023)和钠荧光激光雷达(郭商勇等,2022)相结合可以获取整个临近空间区域的大气温度信息,且具有测量精度好,垂直分辨率高等优点,但存在难以实现全球覆盖的技术局限.近年来,由于航天水平的提高以及遥感技术的发展,临近空间温度信息的天基探测手段展现出显著优势,其不受地理条件限制,能够在全球大尺度条件下对临近空间的温度场信息进行长期连续观测.

卫星遥感大气温度场探测技术可分为主动探测和被动探测两种方式.其中主动探测方式是指探测过程中主动引入示踪源或辐射源,通过探测示踪物或回波信号变化来反演大气的温度场信息,但是由于临近空间区域空气稀薄,主动方式的卫星遥感技术普遍存在回波信号小等问题,难以实现整个临近空间区域的温度场高时空分辨探测.而被动探测技术是以大气成分精细辐射光谱为探测源,通过测量特征发射谱线的多普勒展宽或者谱线强度比反演大气温度场的空间分布和时间演化.被动式的大气温度卫星遥感载荷主要利用迈克尔逊干涉仪、多普勒成像仪、Fabry-Perot 干涉仪等高光谱分辨仪器测量大气中的原子或分子的气辉辐射信号或散射吸收信号实现温度探测,具有探测精度高、覆盖范围广、占用资源少等优点,是当前大气遥感领域的研究热点(冯玉涛等,2023).被动式大气温度场卫星遥感载荷

的典型代表有 2002 年发射的热层-电离层-中间层能量动力学卫星(Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics Dynamics,TIMED)上搭载的宽带辐射大气测量仪(Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry,SABER),通过探测 $CO_2$ 红外辐射,实现了 15～110 km 高度范围的大气温度探测,误差为 1～2 K(宫晓艳等,2013);2003 年,搭载于 SCISAT-1 卫星上的大气化学实验傅里叶变换光谱仪(Atmospheric Chemistry Experiment Fourier transform spectrometer,ACE-FTS),通过测量 $CO_2$ 透射率实现了 15～140 km 区域的温度反演,精度达 1～3 K(Boone et al., 2020);2002 年,搭载于 Envisat 卫星上的迈克尔逊被动大气探测干涉仪(Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding,MIPAS)通过标准临边模式扫描 15 μm 处 $CO_2$ 大气辐射反演获得 6～70 km 高度范围大气温度,误差为 0.5～2 K(曹西凤等,2021).

除 $CO_2$ 之外,大气中的 $O_2$ 分子也可以作为大气探测的目标源.相较于 $CO_2$,$O_2$ 在临近空间区域的浓度更加稳定,光化学反应比较活跃,其气辉具有更加显著的辐射光谱特征,适合用作临近空间大气温度探测的示踪剂(Sun et al., 2022).

$O_2$ 分子的 $a^1\Delta_g \rightarrow X^3\sum_g^-$ 跃迁产生的 1.27 μm 波段气辉以及 $b^1\sum_g^+ \rightarrow X^3\sum_g^-$ 跃迁产生的 0.76 μm 波段气辉具有较强的体辐射率和较宽的空间覆盖范围,对于实现临近空间温度探测具有显著优势(Sun et al., 2022).其中,$O_2(b^1\sum_g^+)$ 气辉通常用于 80 km 以上的大气温度场探测,如 NASA 在 2019 年发射的电离层连接探测器 ICON 上搭载的迈克尔逊全球高分辨率热层成像干涉仪(Michelson Interferometer for Global High-resolution Thermospheric Imaging,MIGHTI),其通过测量 $O_2$ 分子在 0.76 μm 波段的气辉光谱形状,反演 90～140 km 区域内的大气温度廓线,精度达 1～3 K(胡向瑞等,2023).与 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段相比,$O_2(a^1\Delta_g)$ 波段具有较弱的自吸收效应,能够探测临近空间较低区域的大气温度,如加拿大 StaSci 计划部署的迈克尔逊中层成像干涉仪(Mesospheric Imaging Michelson Interferolmeter,MIMI)以及 NASA 的 MIDEX 计划支持的波成像迈克尔逊干涉仪(Waves Michelson Interferometer,WAMI)均采用 $O_2(a^1\Delta_g)$ 波段探测 45～90 km 的大气风场及温度场信息(Ward et al., 2001).

综上所述,在临近空间大气温度反演过程中,使用单一目标源难以实现对整个临近空间区域的有效覆盖.为此,本文提出联合使用 $O_2$ 分子在 $(a^1\Delta_g)$ 和 $(b^1\sum_g^+)$ 两个波段的气辉辐射信号,利用扫描成像吸收光谱仪(SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHartographY, SCIAMACHY)仪器的临边观测数据,实现整个临近空间大气温度的反演.本文首先介绍 SCIAMACHY 仪器的临边观测数据及处理方法,然后基于光谱理论阐述利用气辉信号反演温度的物理原理,并利用 SCIAMACHY 在 0.76 μm 及 1.27 μm 波段的临边观测数据分别反演得到中高空及中低空的大气温度廓线,最后通过与 SABER、ACE-FTS、MIPAS 等卫星载荷的温度数据产品对比,验证 $O_2(a^1\Delta_g)$ 波段和 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段联合反演温度廓线的可靠性与准确性.

## 1　数据与反演方法

### 1.1　SCIAMACHY 临边观测

SCIAMACHY 是一个八通道光栅光谱仪,能够以临边、对地、掩星三种模式测量 240～2380 nm 范围内地球大气和地表的散射、反射、吸收及辐射过程的光谱信息(Sun et al., 2018).该仪器搭载于 Envisat 卫星,并在 2002 年 3 月到 2012 年 4 月期间在太阳同步轨道上运行.SCIAMACHY 在标称临边模式下能够观测从地表到 93 km 高度的大气;而在中间层-低热层(Mesosphere Lower Thermosphere, MLT)临边观测模式下可以覆盖 50～150 km 高度的 MLT 区域.对于标称和 MLT 临边观测模式,SCIAMACHY 的沿轨水平分辨率约为 400 km,跨轨水平分辨率为 240 km.本研究使用 SCIAMACHY 数据集 8.02 版本的 1b 级光谱数据,并借助 SCIAMACHY 命令行工具 SciaL1c 对临边观测光谱数据进行校准.

为了有效覆盖 $O_2(a^1\Delta_g)$ 在 1240～1300 nm 波段和 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 在 759～772 nm 波段的特征光谱,待反演的临边观测光谱数据从 SCIAMACHY 仪器的第 6 光谱通道(990～1750 nm)和第 4 光谱通道(597～789 nm)中提取.由于临边观测模式下采集的光谱数据中除了气辉辐射信号外,还存在来自地表和云层的反射以及地球大气的瑞利散射和米散射等光谱成分.因此,为获得纯净的气辉辐射信号,需要从每个临边光谱中减去同一探测切线高度上无气辉辐射波段的信号平均值.为进一步降低大气散射对 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段气辉光谱的影响,在每次扣除背景信号后,需对 130～150 km 空间范围内的背景值

进行缩放,从而确保背景值与要校准的气辉辐射光谱的带外辐射值相匹配,即校正后带外辐射强度为零.根据 Zarboo 等(2018)的研究,一般认为对于 $O_2$ ($b^1\sum_g^+$)波段 750～759 nm 及 767～780 nm 为带外辐射;而对于 $O_2$ ($a^1\Delta_g$)波段,背景信号可由 1210～1240 nm 及 1300～1340 nm 处的带外辐射进行拟合获得.

### 1.2 温度反演原理

对于中间层及低热层大气区域,分子氧的两个最低电子态 $b^1\sum_g^+$ 及 $a^1\Delta_g$ 到基态 $X^3\sum_g^-$ 的跃迁是氧气气辉辐射信号的主要来源,$a^1\Delta_g \rightarrow X^3\sum_g^-$ 跃迁辐射光谱带的中心波长大概为 1.27 μm,$b^1\sum_g^+ \rightarrow X^3\sum_g^-$ 跃迁辐射光谱带的中心波长大概为 762.0 nm,分别被称为 $O_2$ 的红外大气带气辉辐射和 A 大气带气辉辐射.在热平衡状态下,两波段气辉辐射的谱线强度均受温度影响,服从玻尔兹曼分布.

$O_2$ 分子的 1.27 μm 及 762.0 nm 光谱带中每条转动谱线的辐射速率 $\varepsilon(J',J'')$ 均可由激发态到基态跃迁的爱因斯坦系数 $A_{J',J''}$(Li et al., 2023)结合配分函数及统计权重计算得到(He et al., 2019a)

$$\varepsilon(J',J'') = A_{J',J''}\frac{g'\cdot\exp(-hcE'_v(J')/kT)}{Q_{\mathrm{tot}}^{\mathrm{up}}(T)}, \quad (1)$$

其中,$J'$ 和 $J''$ 分别表示上、下能级的转动角动量;$g'=2J'+1$ 为上能级的统计权重;$h$ 是普朗克常量;$c$ 是光速;$E'_v(J')$ 为上能级能量;$k$ 是玻尔兹曼常数;$T$ 是分子气体的温度.

$Q_{\mathrm{tot}}^{\mathrm{up}}(T)$ 为上能级在温度为 $T$ 时的振-转态配分函数,可表示为(Sun et al., 2018)

$$Q_{\mathrm{tot}}^{\mathrm{up}}(T) = \sum_{J'} g'\cdot\exp(-hcE'_v(J')/kT_{\mathrm{R}}), \quad (2)$$

其中,$T_{\mathrm{R}}$ 是假定大气温度处于热平衡状态的旋转温度.

图 1 显示了在 100 K 和 400 K 两种不同温度下,$O_2$ ($a^1\Delta_g$)波段和 $O_2$ ($b^1\sum_g^+$)波段的辐射光谱强度随跃迁波长的变化情况.可以看出,气辉辐射光谱分布随着温度变化而发生变化,波段中心处的谱线强度随温度的升高而降低,谱带两翼则相反.这表明温度决定光谱带的形状,因此可以通过气辉辐射光谱带的形状随温度的变化关系反演得到大气的温度信息.

临边观测模式下,卫星测得的信号强度是地球大气各层辐射信息在其视线方向上沿路径的积分.假设由大气层和视线路径相交所定义的路径段具有相同的辐射和吸收特性,则在逐层积分的基础上,任意转动量子数 $J$ 的光谱亮度 $L$ 作为波数 $v$ 的函数可以表示为(Wu et al., 2020)

$$L(v) = \int_{-\infty}^{\infty}\eta(s)D(v,s)\exp\left[-\int_{-s}^{\infty}p(s')\varphi(s')\mathrm{d}s'\right]\mathrm{d}s, \quad (3)$$

其中 $\eta(s)$ 为体辐射率,$D(v,s)$ 为谱线的多普勒线形,$p(s)$ 为 $O_2$ 分子的数密度,$\varphi(s)$ 为吸收截面,$s$ 为沿视线的距离.其中,$O_2$ 分子数密度和吸收截面参数均来自 MSIS 2.0 模型(Emmert et al., 2021).

### 1.3 “剥洋葱”算法

卫星载荷在临边观测模式下采集到的信号是体

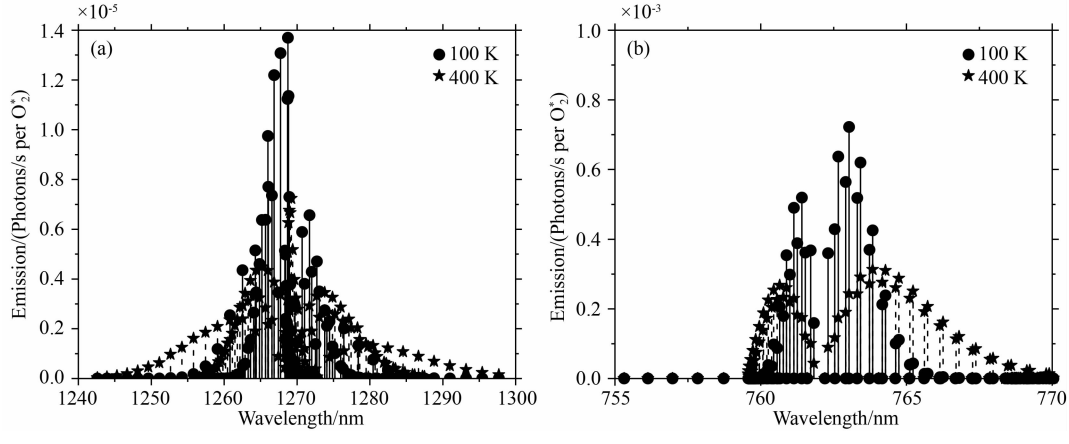


图 1 在 100 K 和 400 K 两种不同温度下 $O_2$ 分子的气辉辐射光谱

(a) $O_2$ ($a^1\Delta_g$)波段气辉辐射光谱;(b) $O_2$ ($b^1\sum_g^+$)波段气辉辐射光谱.

Fig. 1 $O_2$ airglow radiation spectrum at two different temperatures of 100 K and 400 K

(a) $O_2$ ($a^1\Delta_g$) band airglow radiation spectrum; (b) $O_2$ ($b^1\sum_g^+$) band airglow radiation spectrum.

辐射率沿视线方向上的数值积分. 由于观测方法的几何特性,该行信号包含有目标层及其上层空间高度大气的贡献. 临边观测模式的几何模型如图 2 所示,假设每个路径段内的大气层具有相同且均匀的吸收和辐射特性,则视向运算可由等效均匀路径的代数求和运算表示(武魁军等,2023). 采用"剥洋葱"算法获得某一特定切线高度大气层的强度信息,是从积分总量中去除该高度层以上所有高度层的气辉辐射的几何量化贡献,得到目标层辐射信号. 上一层的气辉辐射强度从下一层观测信号中"剥离",自上而下,从而获得每一切线高度的辐射强度.

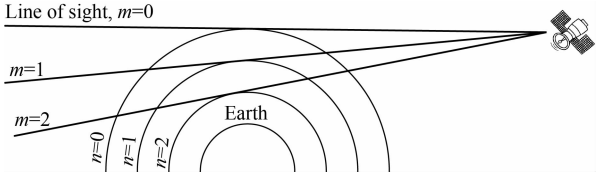


图 2　临边观测几何结构

Fig. 2　Limb observation geometry

基于地球大气是球对称的前提假设,定义特定高度处的单位长度的辐射强度为 $R(\nu, s)$,则 SCIAMACHY 仪器的第 $m$ 临边视线路径观测到的光谱强度 $I_m$ 可以用沿该行视线上辐射强度的积分表示,即

$$I_m = \int_0^{\infty} R(\upsilon, s)\mathrm{d}s. \tag{4}$$

通过将各高度层的辐射强度作离散化积分处理,可将公式(4)中的积分近似表示为代数求和的形式:

$$B_m(\upsilon) = \sum_{n=0}^{N-1} R_n(\upsilon)w_{mn}, \tag{5}$$

其中,$B_m$ 为离散化处理后 SCIAMACHY 第 $m$ 临边视线路径所观测到的气辉辐射强度,$n$ 代表某高度层,$N$ 是高度层的数量,$w_{mn}$ 是临边观测几何模型决定的权重,其具体表达式为

$$w_{mn} = 2(\sqrt{(Q+H_{mn})^2-(Q+H_m)^2} - \sqrt{(Q+H_{m(n-1)})^2-(Q+H_m)^2}), \tag{6}$$

其中,$Q$ 是地球半径,$H_{mn}$ 是第 $m$ 临边视线路径中第 $n$ 个高度层的高度,$H_m$ 是第 $m$ 临边视线路径中切点处的高度,$H_{m(n-1)}$ 是第 $m$ 临边视线路径中第($n$−1)个高度层的高度.

在数据反演时,可以通过"剥洋葱"算法反置换求得公式(5)中的非线性方程组的解. "剥洋葱"算法的数学处理过程是,从最上层视线开始求解,上一层的求解结果作为下一层的输入,依次向下求解. 由于没有其他高度的贡献,顶层高度的目标层信号强度可以直接求得. 然后,从第二层测量值中去除顶层高度的贡献,即可得到第二层目标段的信号强度. 依此类推,即可得到各临边高度目标层的信号强度信息. "剥洋葱"算法的数学表示式可以写为

$$\begin{cases} R_0(\upsilon) = \dfrac{1}{w_{00}}B_0(\upsilon), \\ R_m(\upsilon) = \dfrac{1}{w_{mm}}\left(B_m(\upsilon) - \sum\limits_{n=0}^{N-1}R_n(\upsilon)w_{mn}\right), \end{cases} \tag{7}$$

反演过程从 $m=0$ 开始,依次迭代进行. 需要指出的是,为简化计算过程,本算法未考虑气辉的自吸收效应,因此对于低空大气,温度信息的反演精度将受到一定影响.

图 3a 所示为 2011 年 3 月 3 日 SCIAMACHY 在 MLT 临边模式下测得的 $O_2(a^1\Delta_g)$ 波段日间气辉辐射光谱,$O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段采用相同轨道的 MLT 模式临边探测,并随着 $(b^1\sum_g^+)$ 波段的气辉辐射进一步向热层延伸,切线高度的上限增加到 140 km 左右,如图 3b 所示. 通过完成背景强度校正处理,临边光谱信号去除了来自地表和云层的反射以及地球大气的瑞利散射和米散射等光谱成分,获得了较为纯净的气辉辐射信号如图 3(c、d)所示. 此外,对于 $O_2(a^1\Delta_g)$ 波段 1262.267 nm 和 1282.128 nm 处测量光谱的两个坏点可以通过数值替换的方式校正处理,即将它们该点的坏数据用相邻两个像素的平均值替换,以减小后期反演温度时的系统误差.

图 4 所示为采用"剥洋葱"算法对视线方向上的临边观测光谱信号进行处理得到的 $O_2(a^1\Delta_g)$ 波段和 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段目标层气辉光谱辐射效率. 由图可见,日间气辉在不同切线高度下呈现出的光谱形状有所差异,这是因为不同的切线高度的大气温度不同. 温度决定分子能级跃迁的玻尔兹曼分布,从而导致气辉辐射光谱带的形状随大气高度变化,大气温度越高,谱带中心处的辐射强度相对越低,而两翼处的辐射强度相对越高. 因此,利用气辉辐射光谱带的形状可以反演得到大气温度廓线信息.

### 1.4　最优化算法

为确保温度廓线反演精度,本文采用经典的最优化算法对 $O_2(a^1\Delta_g)$ 及 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段的光谱数据进行处理. 具体措施为:首先采用"剥洋葱"算法获取 $O_2(a^1\Delta_g)$ 波段和 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段在目标层的气辉光谱辐射,同时利用 HITRAN 数据库(Gordon et al., 2022)中给出的谱线强度、跃迁波长、辐射寿命等分子能级信息,结合气辉光化学反应模型及大气

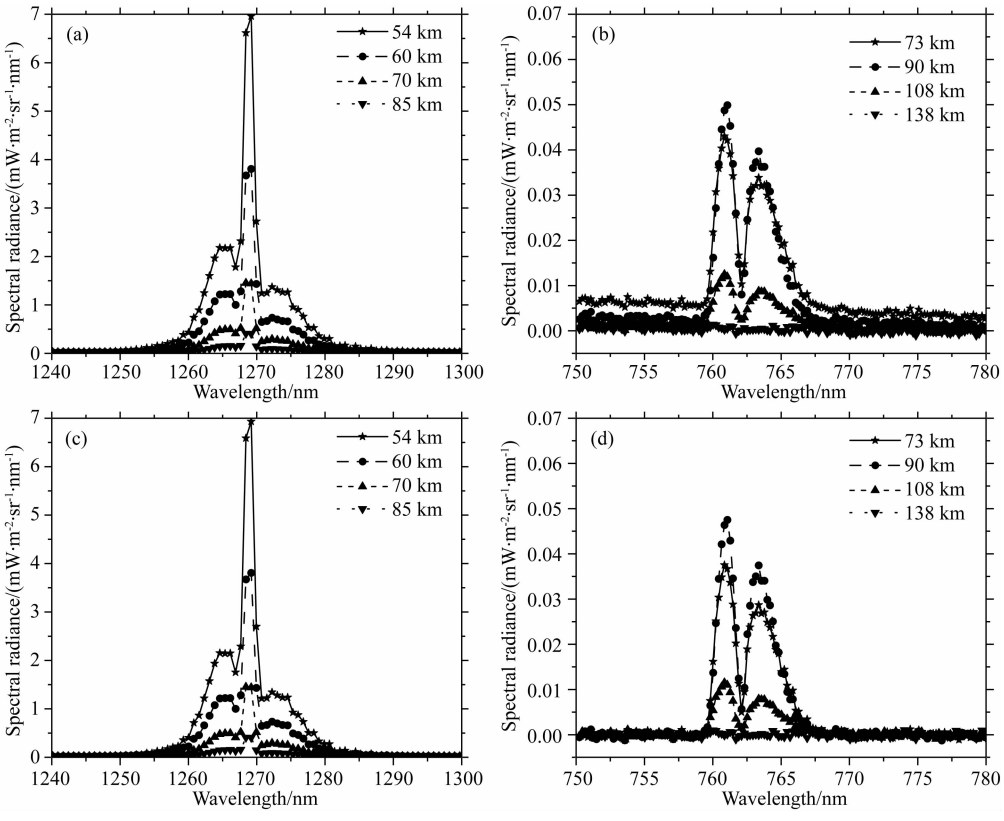


图 3 $O_2$ 分子气辉在不同切线高度下的气辉光谱辐射强度

(a)$O_2(a^1\Delta_g)$波段在去除背景前不同切线高度下气辉光谱辐射强度；(b) $O_2(b^1\sum_g^+)$波段在去除背景前不同切线高度下气辉光谱辐射强度；(c) $O_2(a^1\Delta_g)$波段在去除背景后不同切线高度下气辉光谱辐射强度；(d) $O_2(b^1\sum_g^+)$波段在去除背景后不同切线高度下气辉光谱辐射强度.

Fig. 3 $O_2$ airglow spectral radiation intensity at different tangent heights

(a) $O_2(a^1\Delta_g)$ band airglow spectral radiation intensity at different tangent heights before background removal; (b) $O_2(b^1\sum_g^+)$ band airglow spectral radiation intensity at different tangent heights before background removal; (c) $O_2(a^1\Delta_g)$ band airglow spectral radiation intensity at different tangent heights after background removal; (d) $O_2(b^1\sum_g^+)$ band airglow spectral radiation intensity at different tangent heights after background removal.

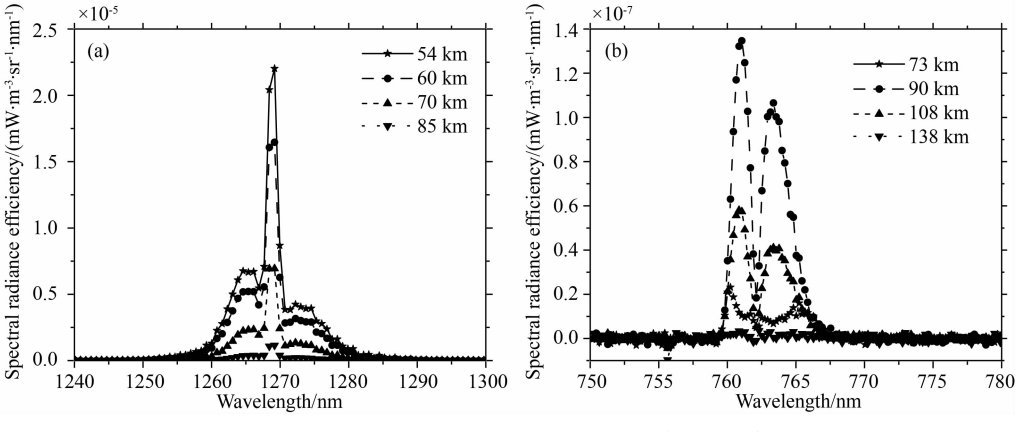


图 4 $O_2$ 分子气辉不同目标层的气辉光谱辐射效率

(a) $O_2(a^1\Delta_g)$波段不同目标层的气辉光谱辐射效率；(b) $O_2(b^1\sum_g^+)$波段不同目标层的气辉光谱辐射效率.

Fig. 4 $O_2$ airglow spectral radiation efficiency at different target layers

(a) $O_2(a^1\Delta_g)$ band airglow spectral radiation efficiency at different target layers;

(b) $O_2(b^1\sum_g^+)$ band airglow spectral radiation efficiency at different target layers.

模式,构建代价函数,然后最优化策略使得代价函数最小化,即比较计算结果与观测值之间的数据差异,采用迭代算法产生一组温度廓线数据使得计算结果向观测值无限逼近,以此得到最优的温度廓线信息解.

为了有效评估实测光谱与观测光谱是否达到最优拟合,在模拟过程中采用了非线性最小二乘的最优化算法,以最小化加权残差平方和,其中残差表示实测光谱与模拟光谱之间的差异.算法通过不断调整参数向量 $x$,以最小化残差平方和,从而输出最优解.其数学表达式可表示为

$$\min_x \| G_i - F_i(x) \|_2^2 = \min_x \left( \sum_{i=1}^{M} \frac{(G_i - F_i(x))^2}{\sigma_i^2} \right), \tag{8}$$

式中,$G$ 为采用"剥洋葱"算法获取的目标层气辉辐射光谱,$F(x)$ 为模拟计算的气辉辐射光谱,$x$ 为待估计的参数向量,$\sigma$ 为误差项的标准偏差,$M$ 为气辉辐射光谱所对应波长点的数目.

图 5 展示了 SCIAMACHY 在 $O_2(a^1\Delta_g)$ 波段和 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段的观测光谱,经过"剥洋葱"算法后获得的目标层气辉辐射光谱(划线)与模拟计算的气辉辐射光谱(实线)的拟合结果及残差.其中图 5(a、c)为 60 km、70 km 切点高度处 $O_2(a^1\Delta_g)$ 气辉辐射的拟合结果及残差,而图 5(b、d)对应 90 km、108 km 切点高度处 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 气辉辐射的拟合结果及残差.可以看出,实测光谱和模拟光谱表现出良好的吻合性,残差值相对较小.由于气辉辐射光谱带的形状随大气高度变化,而不同高度的大气温度也存在差异.因此,每个切线高度处的气辉辐射光谱都对应一个特定的大气温度值.在拟合过程中,实测光谱和模拟光谱的最优匹配将产生相应的大气温度值.通过这一过程,即可获得临近空间区域的大气温度廓线.

## 2　温度反演结果与验证

将 $O_2(a^1\Delta_g)$ 及 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 两波段反演得到的温度信息进行融合,可以获得较大垂直覆盖范围的温度廓线信息.在 80 km 以下的空间区域,可以采用 $O_2(a^1\Delta_g)$ 波段反演的温度结果;100 km 以上区域,则依赖 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段反演的温度结果;而对于 80～100 km 重叠区域,将对两波段的温度廓线信息进行平均处理,以实现两波段温度反演结果平滑的连接并保证结果的准确性.为评估利用 SCIAMACHY 临边观测模式下获得的 $O_2(a^1\Delta_g)$ 波段和 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段气辉光谱数据反演温度廓线的准确性与可靠性,本节将利用 SABER、ACE-FTS 以及 MIPAS 等卫星的遥感数据对温度反演结果进行对比验证.通过多源数据对比分析,详细验证 SCIAMACHY 在不同波段的温度反演结果,进而更全面、更准确地评估 $O_2(a^1\Delta_g)$ 波段和 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段联合反演温度的合理性.

### 2.1　与 SABER 卫星数据比较

TIMED 卫星上搭载的 SABER 自 2002 年以来一直在轨运行,并通过扫描测量 15 μm 和 4.3 μm $CO_2$ 红外辐射反演获得 15～110 km 高度范围的大气温度,数据可靠性高,覆盖范围广.本文采用 SABER v2.07 温度数据,其垂直分辨率为 2 km,温度误差在平流层下部为±1.4 K,平流层中部为±1 K,平流层上部和中间层为±2 K,可以用来验证 SCIAMACHY 临边观测的温度反演结果.

SCIAMACHY 和 SABER 两个航天器是独立运行的,时空交汇概率比较低.图 6 绘制了 2011 年 3 月 3 当地时间 7 时,SCIAMACHY 和 SABER 的温度廓线的测量结果.从图中可以看出,SCIAMACHY 与 SABER 的温度反演结果在 60～110 km 范围内表现出较好的一致性,两个仪器的温度剖面偏差优于 10%.在 80 km 以下区域,$O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段自吸收效应随高度降低而迅速增加,导致温度反演结果不再准确.相对而言,1.27 μm 的 $O_2(a^1\Delta_g)$ 波段的自吸收效应弱很多,可以用来反演较低海拔区域(50～110 km)的温度信息.对于 85～105 km 的重叠区域,$O_2(a^1\Delta_g)$ 波段和 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段的气辉具有较高的信号强度,且几乎不受自吸收效应影响,因此两波段均可独立反演得到该区域的温度廓线信息.从图中可以看出,两波段在重叠区域的温度反演结果表现出较好的一致性,证明了 SCIAMACHY 在该区域的温度反演结果具有较好的内禀性.

### 2.2　ACE-FTS 卫星数据比较

为在更大空间高度范围内实现对 $O_2(a^1\Delta_g)$ 波段和 $O_2(b\sum_g^+)$ 波段联合反演温度廓线的对比验证,并避免 SABER 验证 SCIAMACHY 反演结果时出现的偶然性,本文同时采用搭载于加拿大 SCISAT-1 卫星上的 ACE-FTS 的温度产品数据进行验证.ACE-FTS 仪器以高分辨率(0.02 $cm^{-1}$)在 750～4400 $cm^{-1}$ 波长范围内工作,通过太阳掩星探测地球大气,实现了近乎全球的覆盖,其可通过测量 $CO_2$

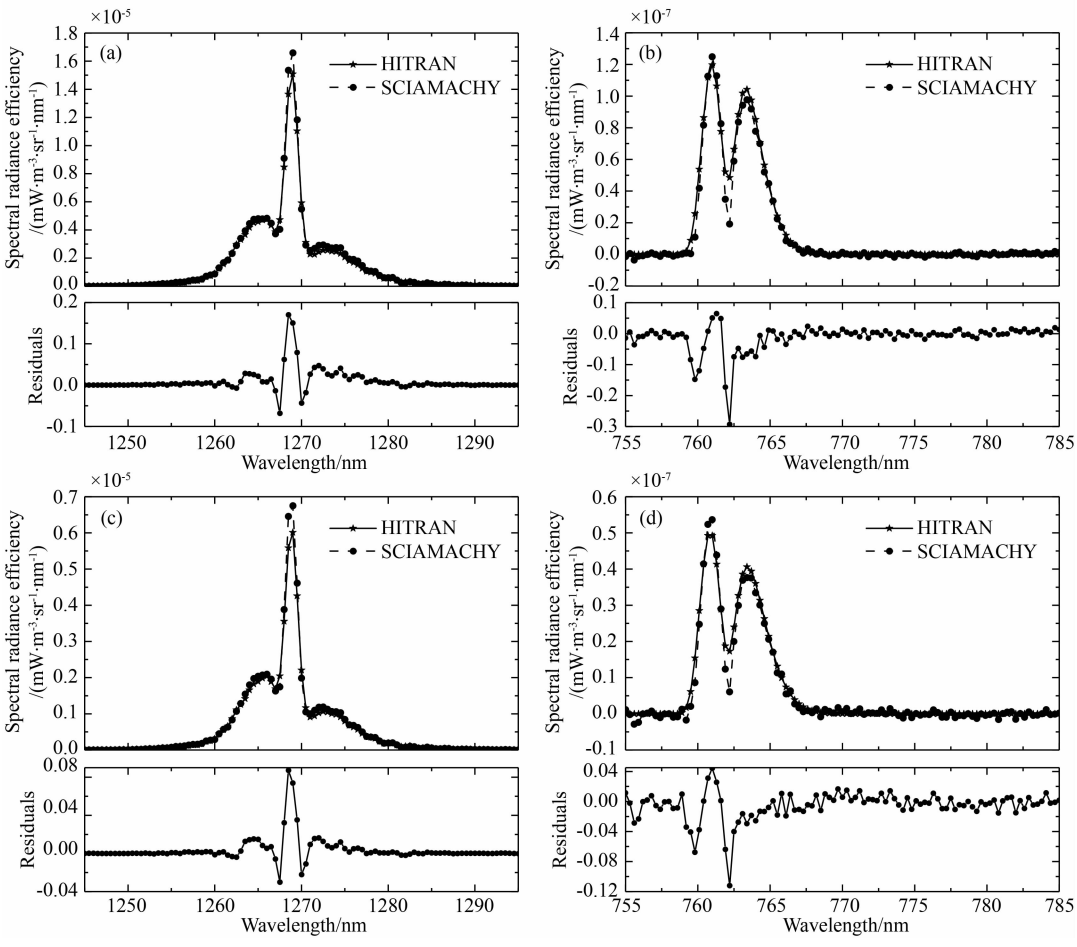


图 5 $O_2$ 分子气辉在不同切线高度下气辉辐射实测光谱与模拟光谱的拟合结果和残差

(a) $O_2(a^1\Delta_g)$波段 60 km 处气辉光谱辐射拟合结果和残差;(b) $O_2(b^1\sum_g^+)$波段 90 km 处气辉光谱辐射拟合结果和残差;(c) $O_2(a^1\Delta_g)$波段 70 km 处气辉光谱辐射拟合结果和残差;(d) $O_2(b^1\sum_g^+)$波段 108 km 处气辉光谱辐射拟合结果和残差.

Fig. 5 Fitting results and residuals of measured and simulated radiation spectra of $O_2$ airglow at different tangent heights

(a) Fitting results and residuals of airglow spectral radiation at 60 km in the $O_2(a^1\Delta_g)$ band; (b) Fitting results and residuals of airglow spectral radiation at 90 km in the $O_2(b^1\sum_g^+)$ band; (c) Fitting results and residuals of airglow spectral radiation at 70 km in the $O_2(a^1\Delta_g)$ band; (b) Fitting results and residuals of airglow spectral radiation at 108 km in the $O_2(b^1\sum_g^+)$ band.

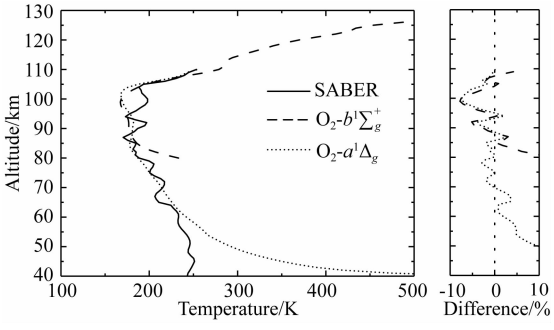


图 6 SCIAMACHY $O_2(a^1\Delta_g)$波段及 $O_2(b^1\sum_g^+)$波段气辉反演温度结果与 SABER 温度廓线对比

Fig. 6 SCIAMACHY temperature retrieval results using $O_2(a^1\Delta_g)$ band and $O_2(b^1\sum_g^+)$ band airglow compared with SABER temperature profiles

透射率实现 15～140 km 区域的温度反演.在其温度反演过程中,将大气分为两个高度区域,并在大约 50 km 的高度处进行交叉.在 50 km 以下,假定 $CO_2$ 混合比保持不变,而在 50 km 以上,采用经验函数来描述 $CO_2$ 混合比,以确保反演结果呈平滑性.这里采用 ACE-FTS 数据 4.1 版本的温度剖面对 $O_2(a^1\Delta_g)$波段和 $O_2(b\sum_g^+)$波段的联合反演结果进行验证,其垂直分辨率限制为 3～4 km,精度达 1～3 K.

图 7 所示为 ACE-FTS 的温度产品数据(实线)以及利用 SCIAMACHY 在 $O_2(a^1\Delta_g)$波段(短点线)及 $O_2(b\sum_g^+)$波段(划线)反演得到温度廓线的对比.两卫星的数据时间均为 2011 年 3 月 3 日,其中 SCIAMACHY数据对应的临边切线地理位置为

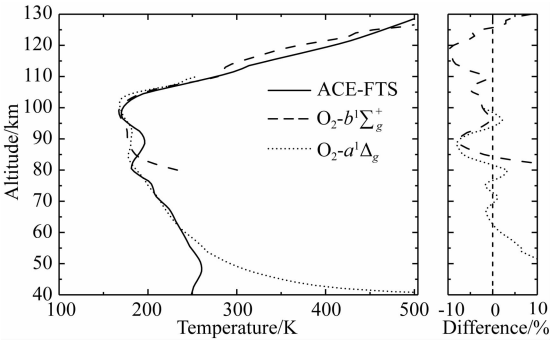


图 7　SCIAMACHY $O_2(a^1\Delta_g)$波段及 $O_2(b^1\sum_g^+)$波段气辉反演温度结果与 ACE-FTS 温度廓线对比

Fig. 7　SCIAMACHY temperature retrieval results using $O_2(a^1\Delta_g)$ band and $O_2(b^1\sum_g^+)$ band airglow compared with ACE-FTS temperature profiles

32.4°S,115°E,ACE-FTS 卫星对应的观测点位于 34.3°S,113.4°E,二者时间间隔为 1:57 h.从图中可以看出,在中间层区域,利用 SCIAMACHY 卫星的 $O_2(a^1\Delta_g)$波段气辉辐射反演获取的温度与 ACE-FTS 温度廓线非常吻合,温度偏差在 5%左右.但 $O_2(a^1\Delta_g)$波段气辉反演得到的温度廓线只能达到 110 km 左右,这是因为在低热层区域,$O_2(a^1\Delta_g)$波段气辉辐射信号较弱,导致温度反演结果的误差偏大.而 $O_2(b^1\sum_g^+)$波段气辉可以进一步向热层延伸,其温度反应的上限能够增至 130 km,并且在低热层区域与 ACE-FTS 温度表现出较好的一致性,温度偏差优于 10%.

图 8 所示为利用 2011 年 4 月 19 日的 SCIAMACHY 临边观测数据中 $O_2$ 大气带及近红外大气带气辉联合反演温度结果(短点线)与 ACE-FTS 实测温度结果(实线)的对比.可以看出,二者在 50～130 km 范围内表现出具有显著的一致性.图 8 的子图展示了联合反演温度结果与 ACE-FTS 温度廓线的相对均方根误差,可以看出,对于 50～120 km 的空间区域联合反演温度廓线与 ACE-FTS 实测温度廓线的偏差在 10%以内,在 130 km 附近偏差增大至约 20%,而在 50 km 以下的空间区域,温度偏差急剧增大.

### 2.3　与 MIPAS 卫星数据比较

MIPAS 仪器与 SCIAMACHY 同搭载于 Envisat 卫星上,具有大量同步观测数据,可用于进行纬向温度的相互比较.MIPAS 采用高分辨率(0.025 $cm^{-1}$)的傅里叶变换光谱技术,用于临边探测中高层大气的辐射光谱.本研究中,我们选用了由欧洲空间局提供的 MIPAS 2 级数据的第 8 版温度曲线,其误差范围在 70 km 以下为 0.5～2 K,在 70 km 以上为 2～7 K.

为研究利用 $O_2$ 大气带及近红外大气带气辉反演临近空间区域大气温度特性,在纬向上以 10°为间隔,绘制了 66°S 到 66°N 范围内的纬向温度分布,并与 MIPAS 反演结果进行了对比.图 9 为 2011 年 4 月 19 日当地时间 10—11 时,利用 $O_2$ 大气带及近红外大气带气辉联合反演得到的温度分布与 MIPAS 的对比结果,值得注意的是,由于受限于 MIPAS 提供的温度数据产品的海拔高度范围,对比高度范围的上限被限制在 120 km.图 9a 为 MIPAS 在 50～120 km 高度范围内的纬度分布,图 9b 为 $O_2$ 大气带及近红外大气带气

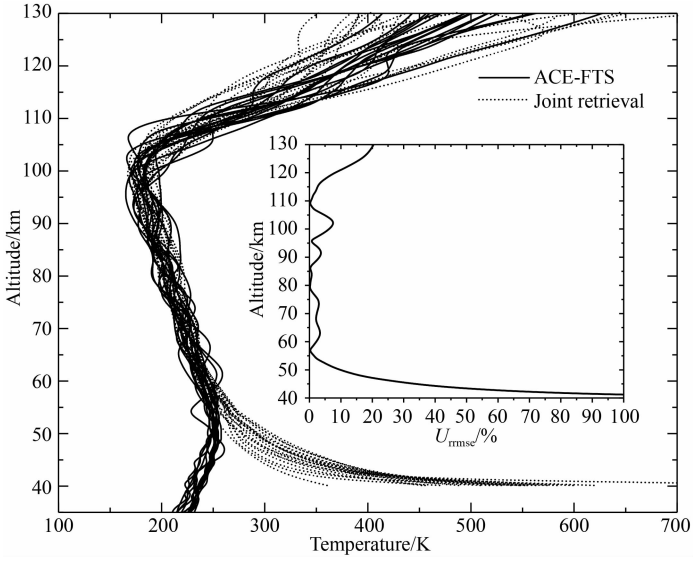


图 8　SCIAMACHY $O_2(a^1\Delta_g)$波段和 $O_2(b^1\sum_g^+)$波段气辉联合反演温度结果与 ACE-FTS 温度廓线对比

Fig. 8　SCIAMACHY temperature joint retrieval results using $O_2(a^1\Delta_g)$ band and $O_2(b^1\sum_g^+)$ band airglow compared with ACE-FTS temperature profiles

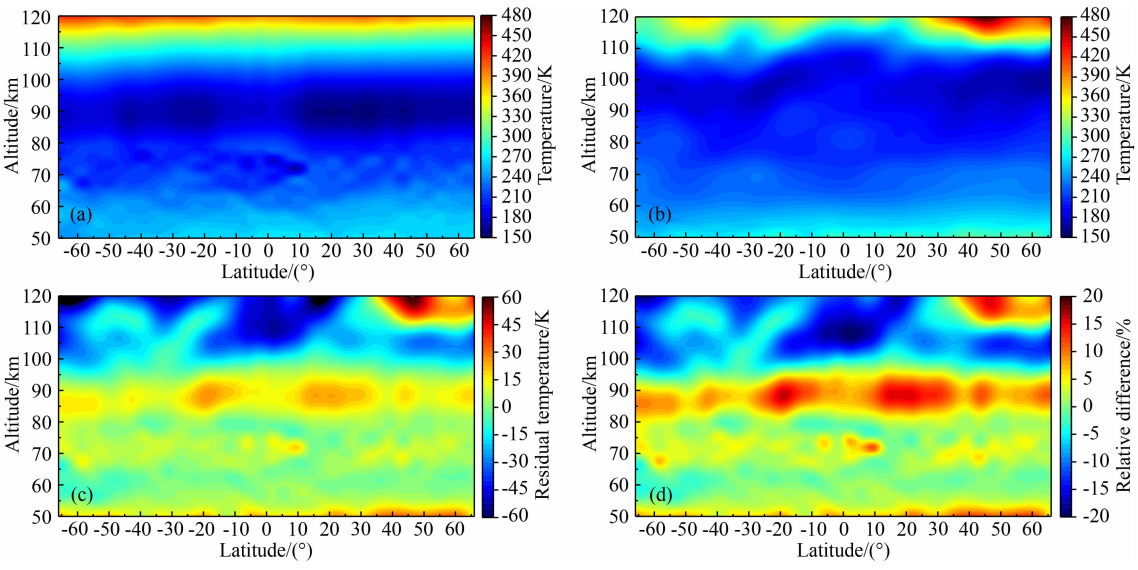


图 9 SCIAMACHY $O_2(a^1\Delta_g)$波段和 $O_2(b^1\sum_g^+)$波段气辉联合反演温度和 MIPAS 纬向对比

(a) MIPAS 纬向温度分布;(b) $O_2(a^1\Delta_g)$波段和 $O_2(b^1\sum_g^+)$波段联合反演温度纬向分布;(c) 联合反演温度与 MIPAS 的残差;(d) 联合反演温度结果与 MIPAS 残差的相对偏差.

Fig. 9 SCIAMACHY joint retrieval temperature results using $O_2(a^1\Delta_g)$ band and $O_2(b^1\sum_g^+)$ band airglow compared with MIPAS temperature profiles in latitude direction

(a) MIPAS temperature profiles in latitude direction; (b) Joint retrieval temperature results in latitude direction; (c) The residuals between joint retrieval temperature results and MIPAS; (d) The relative difference between joint retrieval temperature results and MIPAS.

辉联合反演温度的纬度分布,而图 9c、图 9d 分别为两者残差以及相对偏差. 可以看出,在 50～120 km 区域,联合反演温度分布与 MIPAS 的温度分布基本一致,相对偏差在 15%以内,验证了 SCIAMACHY 临边 MLT 模式下 $O_2$ 大气带及近红外大气带气辉在全球尺度的联合温度反演的可靠性.

## 3 分析与讨论

$O_2(a^1\Delta_g)$波段和 $O_2(b^1\sum_g^+)$波段气辉在垂直高度覆盖范围上存在相互重叠的一段区域,两者反演得到的温度结果均具有较好的精度. 由于这两个波段属于同一仪器的不同通道,不存在时间间隔,且测量的是相同空间区域的温度信息,因此,对比两波段重叠区域反演得到的大气温度廓线数据的一致性也可验证反演算法的准确性.

图 10 所示为利用 SCIAMACHY 于 2010 年 1 月 19 日在 41239—41246 轨道测量的 $O_2(a^1\Delta_g)$及 $O_2(b^1\sum_g^+)$波段气辉光谱,分别反演得到的 80～100 km 高度范围内温度信息,其中横轴所示为 $O_2(b^1\sum_g^+)$波段的温度反演结果,纵轴为 $O_2(a^1\Delta_g)$波段的温度反演结果,温度数据对应的海拔高度信息由颜色柱标记. 图中清晰地展示了 $O_2(a^1\Delta_g)$波段和

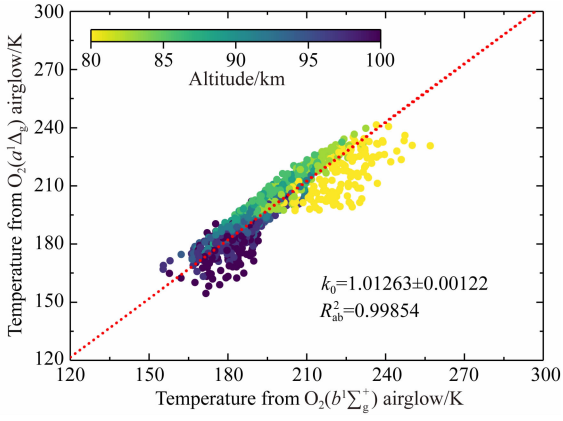


图 10 SCIAMACHY 在 $O_2(a^1\Delta_g)$波段和 $O_2(b^1\sum_g^+)$波段温度反演结果的对比

Fig. 10 Internal comparison of temperature retrieval results between $O_2(a^1\Delta_g)$ band and $O_2(b^1\sum_g^+)$ band

$O_2(b^1\sum_g^+)$波段反演温度结果之间的紧密相关性,拟合结果显示曲线斜率 $k_0=1.012$、皮尔逊相关系数 $R^2_{ab}=0.999$,表明在重叠区域两波段温度反演的可靠性与合理性.

$O_2$ 大气带及近红外大气带气辉联合反演温度结果在高低两端存在较大的不确定性. 在低空区域(50 km 以下),随着海拔高度降低,$O_2$ 近红外大气带气辉的温度反演结果的偏差急剧增大,其原因主要是受到低空区域 $O_2$ 自吸收效应以及大气散射的

影响，未考虑自吸收效应的“剥洋葱”算法在自上而下的反演过程中引起的误差传递不可避免地导致反演误差随海拔降低而急剧增高；对于较高海拔区域（120～130 km），温度反演误差随高度增加而增大，其原因主要来自两个方面：首先，在 120 km 附近及以上空间区域，由于存在 $N_2$ 1Pg 3-1 波段的气辉辐射，与 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段的气辉光谱区域重叠，导致光谱信号受到污染，进而影响了温度反演的不准确；此外，随着海拔高度的增加，$O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段气辉辐射逐渐减弱，导致数据质量降低，这也是反演结果不准确的原因之一.

## 4　总结

本文利用 SCIAMACHY 在临边模式下观测的气辉辐射光谱信号，采用“剥洋葱”算法并结合最优化算法，对 $O_2(a^1\Delta_g)$ 波段和 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段气辉联合反演，获得了临近空间区域（50～130 km）的大气温度廓线信息. 通过与 SABER、ACE-FTS、MIPAS 等遥感卫星的温度产品数据进行对比，验证了 $O_2$ 大气带及近红外大气带气辉联合反演温度的可靠性与合理性.

首先，阐述了利用 $O_2(a^1\Delta_g)$ 波段和 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段气辉光谱反演大气温度的物理机理，采用“剥洋葱”算法提取目标层光谱信息的计算方法，并在此基础上介绍了通过最优化算法获取温度信息的具体流程. 然后，分别利用 SCIAMACHY 观测到的 $O_2(a^1\Delta_g)$ 波段和 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段气辉辐射光谱信号反演得到了 50～110 km 以及 80～130 km 的温度廓线信息，两波段联合反演有效覆盖中间层-低热层这一临近空间区域（50～130 km）. 最后，对 $O_2(a^1\Delta_g)$ 和 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 气辉反演温度结果进行验证，通过与 SABER、ACE-FTS、MIPAS 等遥感卫星的温度产品数据的对比结果表明，$O_2$ 大气带及近红外大气带气辉的临近空间温度廓线联合反演方法的偏差分别优于 10%、5%以及 15%，此外，$O_2(a^1\Delta_g)$ 及 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段气辉光谱在 80～100 km 高度范围内存在交叠区域，两波段均可反演大气温度信息，对比结果显示，两波段反演结果的相关系数优于 99.9%.

$O_2$ 大气带及近红外大气带气辉在临近空间区域联合反演温度的优越性能表明了其巨大的科学价值和工程意义，将成为研究低热层这一物理与化学过渡区域的温度遥感的有利工具，并有助于促进对中间层与低热层耦合机制的理解. 在未来的工作中，我们将重点解决 SCIAMACHY 在 50 km 以下区域 $O_2(a^1\Delta_g)$ 波段气辉受自吸收效应影响以及 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段气辉在 130 km 以上受 $N_2$ 1Pg 3-1 光谱污染影响两个技术难题，开发一种消除自吸收效应和光谱污染影响的反演算法，以进一步完善利用 $O_2(a^1\Delta_g)$ 波段和 $O_2(b^1\sum_g^+)$ 波段气辉反演温度的精度.

**致谢**　非常感谢欧洲航天局 SCIAMACHY 卫星系统提供的气辉辐射光谱数据，感谢加拿大纽布朗什维克大学高级研究员 Wang Dingyi 老师在理论及数据处理方面给予的指导和帮助.

## References

Boone C D, Bernath P F, Cok D, et al. 2020. Version 4 retrievals for the atmospheric chemistry experiment fourier transform spectrometer (ACE-FTS) and imagers. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 247: 106939, doi: 10.1016/j.jqsrt.2020.106939.

Cao X F, Li X Y, Luo Q, et al. 2021. Review of temperature profile inversion of satellite-borne infrared hyperspectral sensors. *National Remote Sensing Bulletin* (in Chinese), 25(2): 577-598, doi: 10.11834/jrs.20210009.

Emmert J T, Drob D P, Picone J M, et al. 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.

Feng Y T, Fu D, Zhao Z L, et al. 2023. An overview of spaceborne atmospheric wind field measurement with passive optical remote sensing. *Acta Optica Sinica* (in Chinese), 43(6): 0601011, doi: 10.3788/AOS221462.

Gong X Y, Hu X, Wu X C, et al. 2013. Comparison of temperature measurements between COSMIC atmospheric radio occultation and SABER/TIMED. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(7): 2152-2162, doi: 10.6038/cjg20130702.

Gordon I E, Rothman L S, Hargreaves R J, et al. 2022. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 277: 107949, doi: 10.1016/j.jqsrt.2021.107949.

Guo S Y, Hu X, Yan Z A, et al. 2022. Studies for mesopause temperature distribution characteristics based on the sodium lidar data. *Chinese Journal of Space Science* (in Chinese), 42(5): 913-918, doi: 10.11728/cjss2022.05.210901096.

He W W, Wu K J, Feng Y T, et al. 2019a. The radiative transfer characteristics of the $O_2$ infrared atmospheric band in limb-viewing geometry. *Remote Sensing*, 11(22): 2702, doi: 10.3390/rs11222702.

He W W, Wu K J, Wang S N, et al. 2019b. Observation technology of wind and temperature by onboard imaging interferometer with 1.27 μm air glow. *Optics & Optoelectronic Technology* (in Chinese), 17

(2): 72-78, doi: 10.19519/j.cnki.1672-3392.2019.02.012.

Hu X R, Li F Q, Wang H M, et al. 2023. Retrieval and verification of mid upper atmospheric temperature from MIGHTI/ICON satellite. *Acta Optica Sinica* (in Chinese), 43(12): 1201006, doi: 10.3788/AOS221914.

Li H T, Feng Y T, Li F Q, et al. 2023. A new Einstein coefficient method for mesopause-lower thermosphere atmosphere temperature retrieval under a non-local thermal equilibrium situation. *Optics Express*, 31(19): 30413-30434. doi: 10.1364/OE.498765.

Ma J, Zhu M, Wang C X, et al. 2022. Technology and development prospect of electro-optical detection in near space. *Aerospace Technology* (in Chinese), (2): 85-96, doi: 10.16338/j.issn.2097-0714.20220616.

Sun K, Gordon I E, Sioris C E, et al. 2018. Reevaluating the use of $O_2$ $a^1\Delta_g$ band in spaceborne remote sensing of greenhouse gases. *Geophysical Research Letters*, 45(11): 5779-5787, doi: 10.1029/2018gl077823.

Sun K, Yousefi M, Chan Miller C, et al. 2022. An optimal estimation-based retrieval of upper atmospheric oxygen airglow and temperature from SCIAMACHY limb observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15(12): 3721-3745, doi: 10.5194/amt-15-3721-2022.

Wang Y, Zhang X Z, Wu T, et al. 2023. Research on atmospheric temperature retrieval based on rayleigh lidar using optimal estimation method. *Chinese Journal of Space Science* (in Chinese), 43(4): 627-639, doi: 10.11728/cjss2023.04.2022-0035.

Ward W E, Gault W A, Shepherd G G, et al. 2001. Waves Michelson interferometer: a visible/near-IR interferometer for observing middle atmosphere dynamics and constituents. //Proceedings Volume 4540, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites V. Toulouse, France: SPIE, 100-111.

Wu K J, He W W, Feng Y T, et al. 2020. Effect of OH emission on the temperature and wind measurements derived from limb-viewing observations of the 1.27 μm $O_2$ dayglow. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(4): 1817-1824, doi: 10.5194/amt-13-1817-2020.

Wu K J, Wu C H, Hu X R, et al. 2023. Hyperspectral-resolved radiative transmission theory of $O_2$ ($a^1\Delta_g$) dayglow on Mars. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 66(5): 1864-1875, doi: 10.6038/cig2022Q0592.

Yin X H, Qin J Q, Paxton L J. 2023. A new strategy for ionospheric remote sensing using the 130.4/135.6 nm airglow intensity ratios. *Earth Planet. Phys.*, 7(4), 445-459. doi: 10.26464/epp2023042.

Yang X J, Wang H M, Li Y F, et al. 2021. Temperature in the near space from the emission spectra of oxygen A band. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (in Chinese), 41(1): 5-10, doi: 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)01-0005-06.

Zarboo A, Bender S, Burrows J P, et al. 2018. Retrieval of $O_2(^1\Sigma)$ and $O_2(^1\Delta)$ volume emission rates in the mesosphere and lower thermosphere using SCIAMACHY MLT limb scans. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(1): 473-487.

## 附中文参考文献

曹西凤, 李小英, 罗琪等. 2021. 星载红外高光谱传感器温度廓线反演综述. 遥感学报, 25(2): 577-598, doi: 10.11834/jrs.20210009.

冯玉涛, 傅頔, 赵增亮等. 2023. 星载被动光学遥感大气风场探测技术进展综述. 光学学报, 43(6): 0601011, doi: 10.3788/AOS221462.

宫晓艳, 胡雄, 吴小成等. 2013. COSMIC 大气掩星与 SABER/TIMED 探测温度数据比较. 地球物理学报, 56(7): 2152-2162, doi: 10.6038/cjg20130702.

郭商勇, 胡雄, 闫召爱等. 2022. 基于钠激光雷达观测数据的中间层顶大气温度分布特性研究. 空间科学学报, 42(5): 913-918, doi: 10.11728/cjss2022.05.210901096.

何微微, 武魁军, 王姝娜等. 2019b. 1.27μm 气辉的星载成像干涉仪风温探测技术. 光学与光电技术, 17(2): 72-78, doi: 10.19519/j.cnki.1672-3392.2019.02.012.

胡向瑞, 李发泉, 王后茂等. 2023. MIGHTI/ICON 卫星的中高层大气温度反演与验证. 光学学报, 43(12): 1201006, doi: 10.3788/AOS221914.

马俊, 朱猛, 王才喜等. 2022. 临近空间光电探测技术与发展展望. 空天技术, (2): 85-96, doi: 10.16338/j.issn.2097-0714.20220616.

王煜, 张献中, 吴同等. 2023. 基于最优估计法的瑞利激光雷达反演大气温度研究. 空间科学学报, 43(4): 627-639, doi: 10.11728/cjss2023.04.2022-0035.

武魁军, 吴传航, 胡向瑞等. 2023. 火星 $O_2(a^1\Delta_g)$气辉高光谱分辨辐射传输特性研究. 地球物理学报, 66(5): 1864-1875, doi: 10.6038/cig2022Q0592.

杨晓君, 王后茂, 李叶飞等. 2021. 基于氧气 A 波段发射谱线临近空间大气温度的反演及分析. 光谱学与光谱分析, 41(1): 5-10, doi: 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)01-0005-06.

(本文编辑 胡素芳)