

# 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

杨晓君<sup>1, 2, 3, 4</sup>, 王后茂<sup>1, 2, 3\*</sup>, 李叶飞<sup>5</sup>, 王咏梅<sup>1, 2, 3, 4</sup>, 胡秀清<sup>6</sup>

1. 中国科学院国家空间科学中心, 空间环境探测研究室, 北京 100190
2. 天基空间环境探测北京市重点实验室, 北京 100190
3. 中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190
4. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049
5. 上海卫星工程研究所, 上海 200240
6. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

**摘要** 基于氧气 A 波段的临边辐射强度模拟数据对临近空间高度(60~110 km)的大气温度反演进行了研究及结果分析。首先, 基于正演模型分别模拟了无噪声和加入噪声情况下的临边辐射强度模拟值, 基于这两种模拟数据分别进行了临近空间大气温度反演, 并对氧气 A 波段中的所有谱线的反演结果进行了分析, 确定了氧气 A 波段各谱线权函数变化规律可作为温度观测的判断依据。温度通过影响线强和自吸收两部分来影响辐射强度, 且温度对它们的影响正好相反, 权函数就是用来表示温度对辐射强度影响大小的函数, 而反演结果的差距可从其权函数中得到规律。在无噪声情况下, 当温度对自吸收的影响小于对线强的影响时, 权函数未发生正负翻转, 温度反演精度较高, 平均反演偏差为 4.1 K; 当温度对自吸收的影响大于对线强的影响时(主要位于 60~80 km 高度), 权函数发生正负翻转, 原因是自吸收降低了辐射强度对温度的灵敏度, 此时温度的反演精度较差, 平均反演偏差达到 34.9 K。此外, 在有噪声的情况下, 强线比弱线的抗干扰能力更强, 反演精度更高, 在实际观测中也更适合用于温度的反演, 所以线强的强弱也是谱线选择的另一个重要的依据。基于辐射弱线, 进一步通过人为提高信噪比来分析辐射强度对反演精度的影响, 结果表明: 辐射越强, 信噪比越大, 温度的反演精度越高, 反之则越低。当气辉谱线线强达到  $10^{-26}$  时, 也可以用于 80 km 以上的温度反演并获得较好的反演结果, 反演精度  $< 5$  K。

**关键词** 氧气 A 带; 温度反演; 临近空间

**中图分类号:** P356

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)01-0005-06

## 引言

地球大气临近空间区域的物理和化学特性研究需要准确的了解该区域的温度分布, 在临近空间区域发生的许多过程都具有明显的温度依赖性。此外, 临近空间大气参数很大程度上也影响着空间天气预报以及航天器发射与再入轨过程的安全性预估等<sup>[1]</sup>, 因此对临近空间大气的观测与研究具有重要的科学意义和应用价值。虽然火箭和地面测量已经可以获得准确的温度廓线, 但很难用它们建立一个全球的温度分布数据库, 星载探测可以在较短时间内进行全球或者区域的大范围观测。美国空间物理研究实验室基于搭载在 URAS 卫星

上的高分辨率多普勒成像仪 HRDI(The high-resolution Doppler imager)通过观测氧气 A 波段的发射谱线进行温度的测量<sup>[2]</sup>, 采用基于扰动理论的最优估计法对 80~100 km 高度的大气进行反演, 利用三条谱线协同反演得到误差约为 7 K 的温度廓线, 首次提供了该高度范围全球温度测量结果。之后, 2001 年搭载在 TIMED 卫星上的 TIDI(TIMED Doppler Interferometer)多普勒成像仪基于氧气 A 波段发射谱线对 60~300 km 高度的临近空间大气温度进行了遥感观测, 基于谱线的观测值采用约束非线性最小二乘拟合得到温度廓线<sup>[3]</sup>。2001 年 2 月 20 日, 搭载在 Odin 卫星上的光谱仪和红外成像系统 OSIRIS(optical spectrograph and infraRed imaging system)对氧气 A 带的发射光谱进行了探测, 将 90

收稿日期: 2019-11-18, 修订日期: 2020-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41704178)资助

作者简介: 杨晓君, 1992 年生, 中国科学院国家空间科学中心博士研究生 e-mail: 569653045@qq.com

\* 通讯作者 e-mail: hmwang@nssc.ac.cn

~110 km 内的氧气 A 波段光谱与模拟光谱进行逐像素比较, 用最小二乘法使波段谱差的平方和最小, 从而得到中层-低热层区域的温度, 在 90 km 附近的温度反演精度约为  $\pm 2$  K, 在较高高度的精度为  $\pm 6$  K<sup>[4]</sup>。先进地球观测卫星 ADEOS 上搭载的大气光谱仪 ILAS 测量了包括以 762 nm 为中心的分子氧 A 波段在内的 753~784 nm 波段的大气吸收光谱, 通过卫星太阳掩星对氧气 A 波段吸收光谱的测量, 采用层析法获得了整个平流层的温度分布<sup>[5]</sup>, 与仪器功能相关的误差是系统不确定性中最大的误差源, 与所考虑的系统不确定性相关的温度的均方根误差估计为 4 K。全球高分辨率热层成像迈克尔逊干涉仪 MIGHTI (Michelson Interferometer for Global High-resolution Thermospheric Imaging) 搭载在 NASA 的电离层连接探测器 ICON 上于 2019 年 10 月 11 日发射<sup>[6]</sup>, MIGHTI 被用来测量地球热层的中性温度<sup>[7]</sup>, 反演方法是使用离散波长测量 A 波段的光谱形状, 从波段的旋转包络线推断出环境温度, 在白天 90~105 km 之间的测量精度为 1K, 而在夜间, 测量精度在 90 km 时为 1 K, 在 105 km 时增加到了 3 K<sup>[8]</sup>。

以上仪器选取的谱线都不同, 而影响反演结果非常重要的一点就是谱线的选择。我们在氧气 A 带所有谱线中对比不同谱线特性, 寻找谱线选择的判断条件, 然后选取合适的谱线基于最优估计的方法进行温度的反演, 并进一步探讨了谱线线强对反演结果的影响。

## 1 正演模型

产生氧气 A 波段的激发态氧气分子是由一系列复杂的光化学反应产生的, 当激发态氧气分子自发辐射产生氧气 A 波段时会发出光子, 波数  $\nu$  处的特定转动谱线发出的光子数可以表示为  $fD\eta$ ,  $D$  是多普勒线型,  $\eta$  是体发射率,  $f$  是谱线强度, 是温度的函数

$$f = f_{\text{ref}} \frac{T_{\text{ref}}}{T} \exp\left(\frac{1.439E'(T - T_{\text{ref}})}{TT_{\text{ref}}}\right) \quad (1)$$

式(1)中,  $f_{\text{ref}}$  是在参考温度  $T_{\text{ref}} = 296^\circ\text{K}$  时的谱线强度,  $E'$  是转动谱线的上能级能量。式(2)是以  $\nu_c$  为谱线中心的多普勒线型

$$D(\nu) = \frac{1}{\alpha_D \sqrt{\pi}} \exp\left[-\left(\frac{\nu - \nu_c}{\alpha_D}\right)^2\right] \quad (2)$$

$$\alpha_D = \frac{\nu_c}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (3)$$

其中,  $k$  是玻尔兹曼常数,  $c$  是光速,  $m$  是氧气分子量。

综上所述, 卫星观测到的光谱亮度可以从切点高度  $Z_i$  沿视线进行路径积分得到

$$B(\nu, z_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \eta(s) f(s) D(\nu, s) \cdot \exp\left[-\int_s^{\infty} n(s') \sigma(s') D(\nu, s') ds'\right] ds \quad (4)$$

其中,  $s$  是视线路径,  $n$  为氧气数密度,  $\sigma$  为吸收截面。由式(4)可得, 光谱辐射主要由氧气体发射率和温度决定, 而光谱辐射对温度的依赖主要是通过自吸收截面等的作用<sup>[9]</sup>。

为了更真实的模拟星载测量, 引入仪器函数, 因此模拟的仪器计数值用式(5)获得

$$C = \int_{-\infty}^{\infty} I(\nu) B(\nu) d\nu \quad (5)$$

式(5)中,  $I$  为卷积的归一化仪器函数, 是半高宽(FWHM)为  $20 \text{ cm}^{-1}$  的高斯函数。

## 2 反演模型

### 2.1 扰动理论

卫星的观测结果可表示为

$$C = KT + \epsilon \quad (6)$$

式(6)中,  $C$  是卫星观测的辐射强度向量;  $T$  是待反演的温度向量;  $K$  是描述大气物理过程正演模型的权函数矩阵;  $\epsilon$  是测量误差向量。

首先, 分别模拟临近辐射强度测量值和用体发射率廓线、温度廓线初值计算得到的正演模型值。模拟过程中的谱线线强、上能级能量等参数均来自 2004 年的 HITRAN 光谱数据库<sup>[10]</sup>, 而大气分子浓度和温度廓线数据均来自 MISIS-00 模型<sup>[11]</sup>, 体发射率廓线是由光化学模型利用温度各组分数密度廓线计算得到<sup>[12]</sup>。测量值  $C_{\text{meas}}$  和用初始温度、体发射率廓线计算得到的正演模型值  $C_{00}$  之间的差值可以用线性积分算子表示

$$\Delta C = C_{\text{meas}} - C_{00} = \int_{z_0}^{\infty} K_T(z) \left(\frac{\Delta T(z)}{T_{00}(z)}\right) dz \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta C_{110} \\ \vdots \\ \Delta C_{60} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{110-110} & K_{110-119} & \cdots & K_{110-61} & K_{110-60} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{60-110} & K_{60-109} & \cdots & K_{60-61} & K_{60-60} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta T_{110}/T_{00} \\ \vdots \\ \Delta T_{60}/T_{00} \end{bmatrix}$$

其中  $z$  为切点高度(km); 矩阵中  $C$  和  $T$  下标为视线切点高度(km); 矩阵  $K$  下标为所在行视线积分的高度和依次改变温度值所对应的高度;  $\Delta T = T_{\text{true}} - T_{00}$  为真实温度值与初始温度值的差值;  $C_{\text{meas}}$  是输入温度为  $T_{00} + \Delta T$  的模拟值;  $C_{00}$  是输入温度为  $T_{00}$  的模拟值。

以 1 km 为格点对温度廓线加入扰动, 每改变一个格点就产生一条新的扰动廓线  $\Delta T/T_{00}$ , 51 条廓线就可以用  $\Delta T/T_{00}$  组成的矢量  $T_i$  来表示。为了得到更高的精确度, 式(7)中的积分与正演模型中的一样, 积分步长都为 1 km。将模拟临近扫描的所有测量计数值作为  $C$  矢量, 这样就得到了一个矩阵方程  $\Delta C = KT_i$  用来求解未知量  $T_i$ 。

### 2.2 反演算法

理论上, 温度可以直接利用氧气 A 波段的观测辐射光谱通过求解辐射传输方程来获得, 然而事实上求解这一方程是不可能的, 这主要是因为其解是不唯一且不稳定的; 同时由于观测误差的存在, 使得简单的单步反演法在实际应用时容易导致较大的反演误差, 抗干扰能力比较低。基于贝叶斯理论的最优估计法是一种求解有噪声反演问题的非常好的手

段,用实时探测数据替代非待反演参数,并利用先验信息对反演结果进行约束和修正,得到待反演参数最合理的解,提高了反演精度和抗干扰能力。

在 2.1 扰动理论的基础上,选择了基于贝叶斯理论的最优估计法进行温度的反演。假定测量误差和先验信息误差服从高斯分布,将求解辐射传输方程转化为使概率函数最大化的最优化数学问题,求解这个概率问题就可以获得温度的最优解。

将  $T$  看做一个多维随机变量,其概率密度函数为

$$P(T_f) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^M | S_a |}} \exp\left[-\frac{1}{2}(T_f - T_0)' S_a^{-1} (T_f - T_0)\right] \quad (8)$$

条件概率密度函数可表示为

$$P(C | T_f) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^M | S_e |}} \exp\left[-\frac{1}{2}(C - KT_f)' S_e^{-1} (C - KT_f)\right] \quad (9)$$

其中,  $S_a$  是描述  $T_0$  不确定性的先验信息误差协方差矩阵; 对角矩阵  $S_e$  是从观测值得到的测量噪声协方差矩阵,是描述  $C$  和正演模型不确定性的观测误差协方差矩阵。假设测量误差的总体方差和探测器上的计数值一样服从泊松分布。先验估计协方差矩阵  $S_a$  可以模拟为

$$S_a = \alpha_T J$$

$$J = \exp\left(-\frac{(z_i - z_j)^2}{4}\right) \quad (10)$$

式(10)中,  $z$  是反演的网格高度,  $\alpha_T = 10^3 K^2$ 。先验估计协方差矩阵表示了一个预期的均方根变化约为 5% (~10 K) 的先验温度廓线。

根据贝叶斯定理,最有可能的大气状态剖面是使式(11)最大化<sup>[13]</sup>

$$P(T_f | C) = P(T_f)P(C | T_f)/P(C) \quad (11)$$

其中,  $P(T_f)$  是温度参数分数变化的先验概率分布;  $P(C)$  观测数据的先验概率分布,其为常数;  $P(C | T_f)$  给定温度参数分数变化条件下具体观测数据的似然概率;  $P(T_f | C)$  是组合先验信息和似然概率得到的温度参数分数变化后验概率。

将式(8)和式(9)相乘,最有可能的  $T$  值是质式(12)最小化

$$\Phi(T_f) = (T_f - T_0)' S_a^{-1} (T_f - T_0) + (C - KT_f)' S_e^{-1} (C - KT_f) \quad (12)$$

式(12)最小化时的  $T$  的估计值为

$$T_{\text{est}} = (K' S_e^{-1} K + S_a^{-1})^{-1} (K' S_e^{-1} C + S_a^{-1} T_0) \quad (13)$$

其中,  $T_0 = 0$ , 所以方程可化为

$$T_{\text{est}} = (K' S_e^{-1} K + S_a^{-1})^{-1} K' S_e^{-1} C \quad (14)$$

再由  $T_{\text{est}}$  求得温度廓线的最优估计值  $T_{\text{true}}$ 。

## 3 反演结果及讨论

### 3.1 正演模型

为了验证上述反演方法的可行性和精确度,利用构建的正演模型来模拟实测值进行温度的反演研究。首先利用一组

温度输入值  $T_{00}$  作为初始值来获得一组正演模拟值,然后在  $T_{00}$  的基础上加上一组随机温度变量得到新的温度廓线  $T_{\text{true}} = T_{00} + \Delta T$ ,再由新的温度廓线模拟一组实测辐射值,最后由该两组辐射模拟测量值组合进行温度反演,将反演得到的结果与初始温度输入值进行比较。图 1 就是正演模型所用的温度廓线初始值( $T_{00}$ )和模拟的实际测量值所用的温度廓线(即温度真实值:  $T_{\text{true}}$ )。

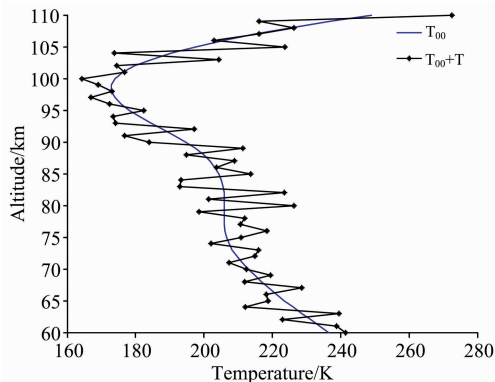


图 1 温度廓线初始值和实际测量值对比

Fig. 1 The comparison between the initial value and the actual measurement value of the temperature profile

### 3.2 无噪声时的反演结果分析

基于 HITRAN 数据库中氧气 A 带(759~767 nm)内包含的几十条谱线参数,我们将所有的谱线进行了辐射模拟与温度反演分析,结果表明不同谱线的反演结果精度不同,精度较好的谱线主要集中在 759~760 和 764~766 nm 这两个波段范围,图 2 为氧气 A 带中无噪声情况下 60~110 km 范围内的温度反演精度较高的谱线。如图 2 所示,  $\Delta T = T_{\text{true}} - T_{00}$  为真实温度值与初始温度值的差值,其他折线为利用不同谱线反演  $\Delta T$  的结果,17 条氧气 A 波段的温度反演结果在 60~110 km 高度范围内效果较好,平均反演偏差为 4.1 K。

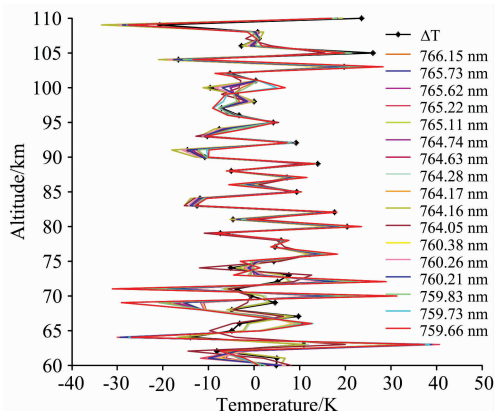


图 2 无噪声条件下谱线在 60~110 km 范围内的温度反演结果对比

Fig. 2 Comparison of temperature retrieval results of spectral lines in the range of 60~110 km without measurement noise

但有些谱线的反演误差在 80 km 以上较小, 80 km 以下却较大, 如图 3 所示, 764.28 和 764.17 nm 为图 2 中反演精度较高的谱线, 另外两条为反演精度较差的谱线(761.72 和 761.25 nm)。将他们的反演结果进行进一步的对比分析, 如图 3 所示, 80 km 以上四条谱线显示了较好的反演精度, 平均反演误差  $< 5$  K; 而在 80 km 以下, 761.72 和 761.25 nm 的反演结果与真实值存在较大的偏差, 平均偏差达到了 34.9 K。原因如下: 由式(4)可以看出, 温度通过影响线强和自吸收两部分来影响辐射强度, 且温度对它们的影响正好相反,

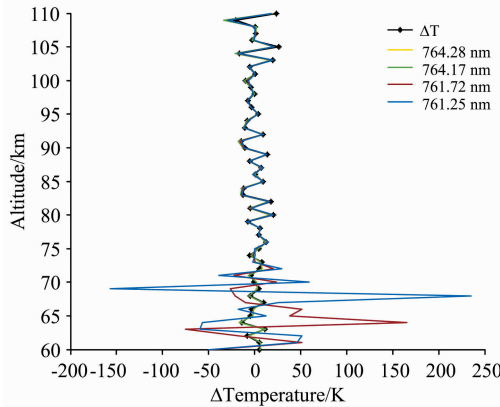


图 3 无噪声条件下四条谱线在 60~110 km 范围内的温度反演结果对比

Fig. 3 Comparison of temperature retrieval results by using four spectral lines in the range of 60~110 km without measurement noise

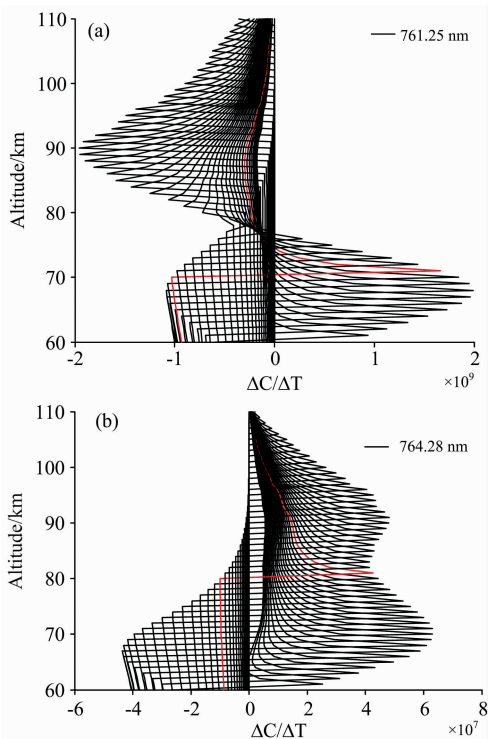


图 4 权函数矩阵

Fig. 4 Weight function matrix

权函数就是用来表示温度对辐射强度影响大小的, 而反演结果的差距可从其权函数中得到规律。图 4 为两条谱线 761.25 和 764.28 nm 的权函数, 为方便对比各选取一条代表线标记为红色(71 和 80 km), 图中每一点代表的都是对应高度处的温度变动对卫星辐射强度观测的影响与温度的扰动量的比值, 即  $\Delta C/\Delta T$ , 温度扰动  $\Delta T$  设置为 5 K, 由图 4(a)可以看出, 当温度对自吸收的影响所占比重大于对线强的影响时,  $\Delta C/\Delta T$  会发生正负翻转, 反演精度会变差; 从图 4(b)可以看出, 影响因素占主导地位的是线强, 温度主要通过线强的影响来改变辐射强度, 其对自吸收的影响比重较小,  $\Delta C/\Delta T$  未发生正负翻转, 反演效果比较好。同时, 我们将其他谱线的反演结果进行比较得出相同的结论, 因此可以根据这个规律, 从氧气 A 波段众多谱线中筛选适用于温度反演的谱线, 即温度对自吸收影响相对较小的谱线。

### 3.3 添加噪声后的反演结果分析

在实际的观测中, 除了上述考虑的因素外, 还需要考虑信噪比的影响。因此, 本文将图 3 中的四条谱线模拟值加入随机噪声并进行了反演及结果分析, 结果如图 5 所示。764.28 和 764.17 nm 两条谱线的反演结果与真实值基本吻合, 说明噪声对这两条谱线的影响非常小, 该谱线的辐射强度能够满足温度反演的要求。而 761.72 和 761.25 nm 这两条谱线在 80 km 以下的反演偏差变得更大, 最大偏差达到几百 K, 原因是这两条谱线本身在 80 km 以下反演误差就非常大, 微小扰动就会造成较大的误差, 所以加入噪声后使得反演偏差变得更大。

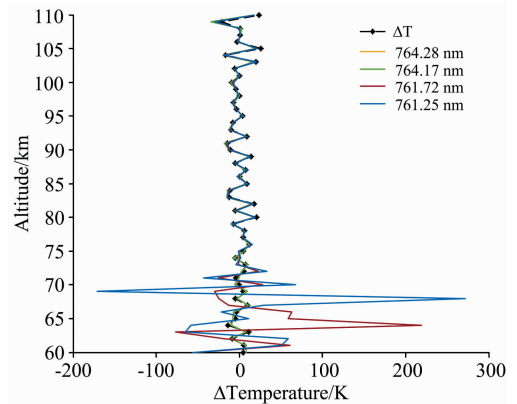


图 5 加入噪声情况下四条谱线在 60~110 km 范围内的温度反演误差

Fig. 5 Comparison of temperature retrieval results of four spectral lines in the range of 60~110 km with measurement noise

为了进一步分析噪声对反演结果的影响, 本文选择了四条较强谱线和一条弱谱线, 如表 1 所示, 其中 762.2 nm 为弱谱线, 反演结果如图 6 所示。图 6 是 762.2 nm 无噪声情况和加入噪声时的反演结果比较, 蓝线为无噪声情况下的结果, 红线为加入噪声的结果。无噪声情况下, 弱线 762.2 nm 与强线 764.28 和 764.17 nm 的反演结果相对一致且都比较好; 加入噪声后, 由于本身辐射强度弱, 所以信噪比低, 反演效

果变得比较差。原因是弱线容易受噪声的干扰,抗干扰能力低。因此,谱线选择时,线强也是另一个重要的判断依据,强线更有利于提高反演精度。

表 1 模型中用到的谱线参数

Table 1 Constants of rotational lines of model

波长/nm	线强/ $[\text{cm}^{-1} \cdot (\text{分子} \cdot \text{cm}^{-2})^{-1}]$	$E'/\text{cm}^{-1}$
764.28	$7.487 \times 10^{-24}$	190.77
764.17	$6.728 \times 10^{-24}$	188.85
762.20	$3.590 \times 10^{-29}$	2.08
761.72	$3.587 \times 10^{-24}$	2.08
761.25	$6.325 \times 10^{-24}$	44.21

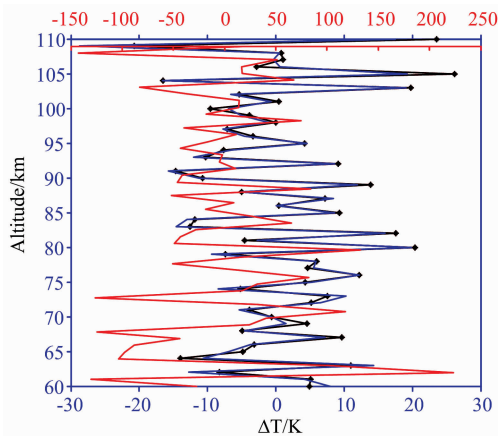


图 6 谱线 762.2 nm 在无噪声情况和加入噪声时 60~110 km 范围内的温度反演误差

Fig. 6 Comparison of the temperature retrieval results of 762.2 nm spectral lines in a ideal hypothesis and the noise included case in the range of 60~110 km

为了进一步确定线强对反演结果的影响,我们选择通过增加线强的方式进行反演精度分析,图 7 为分别将线强增加 1~5 个量级后得到的反演结果。由图可得,80 km 以上,随

着线强量级的增大,反演精度增加,反演结果更接近初始输入值;线强增加三个量级时,反演精度可以达到 5 K。由此得出:弱线 762.2 nm 在信噪比足够大,也就是线强达到  $10^{-26}$  的量级时,也可用来反演 80 km 以上的温度并获得精确的反演结果。

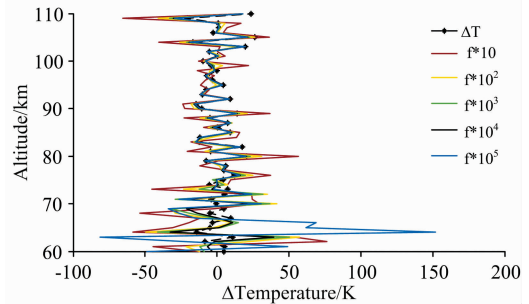


图 7 增加谱线 762.2 nm 线强量级对反演结果的影响  
Fig. 7 The influence of increasing 762.2 nm line strength on the retrieval temperature profile

## 4 结论

在临近空间大气温度反演中,不同的谱线反演精度不同,基于贝叶斯反演理论选取了不同的谱线进行一系列反演试验及结果分析,并基于权函数和谱线线强与反演精度差异的关系进行了分析。

具体结果如下:

(1)当温度对自吸收的影响所占比重大于对线强的影响时,权函数会发生正负翻转,反演精度变差,原因是自吸收降低了辐射强度对温度的灵敏度,因此,权函数变化规律可以作为谱线选择的判断依据。

(2)在有噪声的情况下,强线比弱线的抗干扰能力更强,反演精度较高,更适合用于温度的反演,所以线强也是谱线选择的另一个重要的依据。根据分析结果,当谱线线强达到  $10^{-26}$  的量级时,谱线的辐射强度较强,此时谱线可用于 80 km 以上的温度反演。

## References

- [1] WANG Ying-jian(王英鉴). SCIENCE IN CHINA (Series A)(中国科学·A辑), 2000, 30(S1): 17.
- [2] Zarbo A, Bender S, Burrows J P, et al. Atmospheric Measurement Techniques, 2018, 11: 473.
- [3] Killeen T L, Wu Q, Solomon S C, et al. Geophys. Res., 2006, 111: A10S01.
- [4] Sheese P E, Llewellyn E J, Gattinger R L, et al. Canadian Journal of Physics, 2010, 88(12): 919.
- [5] Sugita T, Yokota T, Nakajima T, et al. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2001, 4150(4): I1759.
- [6] Immel T S, England S L, Mende S B, et al. Space Science Reviews, 2018, 214: 13.
- [7] Englert C R, Harlander J M, Brown C M, et al. Space Science Reviews, 2017, 212(1-2): 553.
- [8] Stevens M H, Englert C R, Harlander J M, et al. Space Science Reviews, 2018, 214(1): 4.
- [9] Ortland D A, Hays P B, Skinner W R. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, 103(D2): 1821.
- [10] Rothman L S, Jacquemart D, Barbe A, et al. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2005, 96(2): 139.
- [11] Picone J. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(A12): 1468.
- [12] Bucholtz A, Skinner W R, Abreu V J, et al. Planetary & Space Science, 1986, 34(11): 1031.
- [13] Ofland D A, Hays P B, Skinner W R, et al. The Upper Mesosphere and Lower Thermosphere: A Review of Experiment and Theory, Geophysical Monograph 87 Series, Volume, 1995. 329.

# Temperature in the Near Space From the Emission Spectra of Oxygen A Band

YANG Xiao-jun<sup>1, 2, 3, 4</sup>, WANG Hou-mao<sup>1, 2, 3\*</sup>, LI Ye-fei<sup>5</sup>, WANG Yong-mei<sup>1, 2, 3, 4</sup>, HU Xiu-qing<sup>6</sup>

1. Laboratory of Space Environment Exploration, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. Beijing Key Laboratory of Environment Exploration, Beijing 100190, China
3. Key Laboratory of Science and Technology on Environmental Space Situation Awareness, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
4. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
5. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China
6. National Satellite Meteorological Center, China Meteorology Administration, Beijing 100081, China

**Abstract** Based on the simulation data of the edge radiation intensity of the oxygen A-band, the atmospheric temperature inversion of the adjacent space height (60~110 km) is studied and analyzed. Firstly, based on the forward model, the limb radiation intensity under noiseless and noise-added conditions are simulated respectively to derive the temperature profile, and the inversion results of all spectral lines were analyzed. The inversion results were analyzed, and the variation law of the weight function of each line in the oxygen A-band was determined as the basis for the judgment of temperature observation. Temperature influences the radiation intensity through line strength and self-absorption, and the influence of temperature on them is opposite. The weight function is used to express the influence of temperature on radiation intensity, and the difference of inversion results can be obtained from the weight function. In an ideal situation, when the effect of temperature on self-absorption is less than the influence on line strength, the weight function does not flip, the temperature inversion accuracy is higher, and the average inversion deviation is 4.1 K; when the effect of temperature on self-absorption is greater than the influence on line strength (mainly located at the height of 60~80 km), the weight function reverses because self-absorption reduces the sensitivity of radiation intensity to temperature, and the average inversion deviation reaches 34.9 K. In addition, the strong line has stronger anti-interference ability than the weak line in the presence of noise, and the inversion precision is higher, and it is more suitable for temperature inversion. In the practical observations, the line strength is also another line selection. Based on the weak line, this paper further analyzes the effect of radiation intensity on the inversion accuracy by improving the signal-to-noise ratio. The results show that the stronger the radiation, the larger the signal-to-noise ratio, the higher the accuracy of temperature inversion, and vice versa. When the line strength of the airglow spectrum reaches  $10^{-26}$ , it can be used for temperature inversion above 80 km and obtain better inversion results, with the inversion accuracy  $< 5$  K.

**Keywords** Oxygen A-band; Temperature retrieval; Near space

(Received Nov. 18, 2019; accepted Mar. 21, 2020)

\* Corresponding author