

文章编号 1004-924X(2014)05-1120-09

电离层远紫外日辉辐射反演 O/N₂ 技术

张永超^{1,2}, 张效信^{3*}, 何 飞¹, 陈 波¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国气象局 国家空间天气监测与预警中心, 北京 100081)

摘要:探索了如何从空间对远紫外日辉辐射进行遥感观测,以便为检测高层大气状态提供新的监测方法。针对风云三号(FY-3)气象卫星有效载荷观测结果的数据处理,研究了利用 140~180 nm 波段的 LBH(Lyman-Birge-Hopfield)日辉辐射与 OI 135.6 nm 日辉辐射进行 O/N₂ 反演的方法。通过研究这两个远紫外日辉观测信号的辐射特性,验证了二者的柱辐射率之比 135.6/LBH 与太阳活动呈相关关系。检验了太阳活动对 O/N₂ 反演曲线的影响,结果表明:太阳活动的变化会造成 O/N₂ 反演曲线之间存在比较大的偏差,因此在 O/N₂ 的反演技术中必须考虑如何消除太阳活动的影响。本文的工作为 FY-3 载荷仪器的 O/N₂ 图像反演技术的研究奠定了基础。

关键词:大气光学;远紫外辐射;135.6/LBH 日辉辐射;O/N₂ 反演

中图分类号:P422.6;P407 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142205.1120

Retrieving O/N₂ technique from ionospheric FUV dayglow emissions

ZHANG Yong-chao^{1,2}, ZHANG Xiao-xin^{3*}, HE Fei¹, CHEN Bo¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: xxzhang@cma.gov.cn

Abstract: How to observe the far ultraviolet (FUV) dayglow emission from space in remote sensing was explored to provide a method for monitoring of the upper atmosphere. On the basis of data processing for observation signals of payloads on the meteorological satellite FY-3, an O/N₂ retrieval method by use of the Lyman-Birge-Hopfield (LBH) band in the range of 140–180 nm and the OI 135.6 nm dayglow emissions was researched. By analysis of the characteristics of 140–180 nm and the OI 135.6 nm dayglow emissions, it proves that the 135.6/LBH is correlated with solar activity. Then, the effects of the solar activity on the O/N₂ retrieval curves were investigated, and the results

收稿日期:2013-08-30;**修订日期:**2013-10-07.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2012AA121000);国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2012CB957800, No. 2011CB811400);国家自然科学基金资助项目(No. 10878004, No. 41274147, No. 41204102)

show that there are large deviations between the retrieval curves with different solar activities, so the solar activity effect must be removed in the O/N₂ retrieval method. This work provides a solid basis for the development of the O/N₂ retrieval method prepared for data processing of instruments on FY-3.

Key words: atmospheric optics; Far Ultraviolet (FUV) emission; 135.6/LBH dayglow emission; O/N₂ retrieving

1 引言

电离层远紫外日辉辐射是由光电子与高层大气碰撞激发产生的^[1],它包括电离层中主要的中性成分(N₂, O, O₂)的光学辐射信号^[2]。由于低层大气对远紫外辐射吸收严重而无法实现地面观测,从空间对电离层远紫外日辉辐射进行观测可以获得主要中性成分的密度及空间分布等信息^[2-3],从而为高层大气状态的监测提供了一种强有力的方法^[4-5]。目前,国际上已有众多卫星遥感仪器^[6-10]对远紫外日辉进行了空间观测,如 DE1/SAI^[6],它观测了 120~170 nm 宽通带内的所有远紫外辐射信号,包括 HI 121.6 nm, OI 130.4 nm, OI 135.6 nm, 以及 140~170 nm 波段的 LBH(Lyman-Birge-Hopfield)辐射,其目的主要是探测全球尺度的极光及气辉的形态。为了定量地研究电离层的中性成分、电子密度、粒子浓度等空间环境参数,卫星遥感仪器要单独观测各个远紫外信号,比如 Polar BEAR/AIRS^[7](OI 135.6 nm, 155~170 nm 波段的 LBH), IMAGE/WIC^[8](140~180 nm 波段的 LBH), DMSP/SSUSI^[9]与 TIMED/GUVI^[10](HI 121.6 nm, OI 130.4 nm, OI 135.6 nm, 140~150 nm 波段的 LBH 及 165~180 nm 波段的 LBH)。其中氧原子 135.6 nm(记作 OI 135.6 nm)与 LBH 是最为重要的 2 个观测信号,因为 OI 135.6 nm 被认为是遥感监测氧原子的最佳辐射信号,而 LBH 是电离层中所有远紫外辐射中最强的分子辐射信号^[1-2]。单独利用远紫外波段的 LBH 或者 OI 135.6 nm 观测数据,不仅可以监测极光及电离层气辉的辐射强度变化,还可以估计氮气分子或者氧原子的密度^[1-2]。此外,联合使用远紫外波段的 LBH 与 OI 135.6 nm 观测数据能够反演电离层 O/N₂ 的信息^[1]。

目前,利用 LBH 和 OI 135.6 nm 这两个远

紫外日辉辐射信号进行 O/N₂ 的反演是国内外研究的热点问题^[11-15]。O/N₂ 是电离层中具有重要指示性作用的物理化学参数^[1, 11]。Strickland 等人^[12]利用 DE1/SAI 的宽通带光谱数据(OI 130.4 nm, OI 135.6 nm, 以及 140~170 nm 波段的 LBH 辐射)进行了 O/N₂ 的反演。Y. Zhang 等人^[13]利用 TIMED/GUVI 的分立型光谱数据(OI 135.6 nm, 140~150 nm 波段的 LBH)进行了 O/N₂ 反演。他们都是利用 O/N₂ 的变化来研究磁暴等空间天气事件对电离层的中性成分的扰动情况。此外,Strickland 等人^[14-15]还利用了 Polar BEAR/AIRS 的分立型光谱数据(OI 135.6 nm, 155~170 nm 波段的 LBH)进行了 O/N₂ 的反演,用来研究 O/N₂ 的变化对底部热层的升降等动力学状态的指示情况。

电离层远紫外日辉辐射的探测方式主要有宽带型光谱探测和分立型光谱探测两种。对于宽带型光谱探测,如 DE1/SAI^[6, 12],采取的 O/N₂ 反演方法是从第一性原理出发,通过计算分离出各种光谱成分在总光谱信号中所占的组分,然后得出 O/N₂ 与总光谱强度的对应关系,最后根据此对应关系及观测量(总光谱强度)来估计 O/N₂ 的值。但该方法得出的 O/N₂ 反演结果的不确定性较大(大约为 10%),这是因为第一性原理的物理计算过程强烈依赖于碰撞截面参数、假定的太阳 EUV 光通量以及仪器定标精度等因素。对于分立型光谱探测,如 TIMED/GUVI^[10],是通过载荷仪器对各个远紫外日辉辐射信号分别进行观测,然后采用远紫外日辉的柱辐射率之比来反演 O/N₂。该方法能有效降低碰撞截面参数、仪器定标精度等系统误差的影响,因此是 O/N₂ 反演的主流方法。

事实上,不同的电离层远紫外日辉观测波段具有不同的辐射特性,这种特性依赖于太阳活动的扰动性。太阳极紫外(Extreme Ultraviolet, EUV)光谱通量的变化能够显著地影响高层大气

密度的海拔分布情况^[14, 16-17],特别是在海拔高度为 90~500 km(远紫外日辉的辐射产生区域)处电离层中性成分(N₂, O, O₂)的密度分布情况^[16-17],从而影响远紫外日辉的海拔分布情况。氧气分子的 SR 吸收带对不同的 LBH 波段的吸收作用是不同的^[1, 17];对 140~160 nm LBH 短波段的吸收作用强^[1, 17],而对 160~180 nm LBH 长波段的吸收作用弱^[1, 17]。当太阳 EUV 光谱通量显著变化时,氧气分子的密度也会发生较大的变化,它对不同波段的 LBH 的吸收作用也会发生较大变化,从而造成远紫外波段的 LBH 日辉辐射的海拔分布情况发生改变。因此,不同的远紫外日辉观测波段具有不同的辐射特性,需要重新考虑 135.6/LBH 与太阳活动之间的关系。到目前为止,所进行的 N/O₂ 反演都假定太阳活动对远紫外日辉柱辐射率之比 135.6/LBH 没有影响。但是针对 FY-3 气象卫星载荷仪器的观测数据,即 OI 135.6 nm 与 140~180 nm 波段的 LBH,其辐射特性以及太阳活动如何影响 135.6/LBH 未见有系统的研究报道。

中国 FY-3 气象卫星即将搭载广角极光成像仪与电离层光度计对极光活动及电离层的空间天气状况进行监测预报。其中广角极光成像仪的观测波信号为 140~180 nm 波段的 LBH 辐射,其视场角为 130°×130°,星下点空间分辨率为 10 km,时间分辨率为 2 min;而电离层光度计的观测信号为 OI 135.6 nm,其视场角约为 3.5°,星下点空间分辨率约为 30 km,时间分辨率约为 10 s,观测方向始终是天底方向。本文采用上述两台仪器星下点观测信号(OI 135.6 nm 与 140~180 nm 波段的 LBH)反演了 O/N₂,并对这两个远紫外日辉辐射信号的辐射特性,太阳活动如何影响 135.6/LBH 进行了研究,最后根据太阳活动的影响获得了精确的 O/N₂ 反演结果。

2 远紫外日辉与太阳活动的关系

2.1 远紫外日辉辐射计算

2.1.1 OI 135.6 nm 辐射计算

OI 135.6 nm 辐射是电离层在远紫外波段辐射中非常重要的遥感信号,通常被看作是监测电离层中氧原子密度的最佳辐射信号^[1-2]。OI

135.6 nm 辐射是由自旋禁止跃迁过程产生的,此辐射来自(³P₂ - ⁵S₂)与(³P₁ - ⁵S₂)两个跃迁过程。这两个跃迁过程分别对应 135.56 nm 与 135.85 nm 两个辐射谱线,通常将这两个辐射谱线的总和记作 OI 135.6 nm 辐射^[1]。

Strickland 等人^[14, 18]首先提出了从空间观测 OI 135.6 nm 柱辐射率的理论计算公式(单位为 Rayleighs),如式(1)所示。

$$I_{\text{OI 135.6 nm}} = 10^{-6} \int_{Z_1}^{Z_u} j(z) \left[\frac{5}{8} T_5(z) + \frac{3}{8} T_3(z) \right] \cdot e^{-t(z)} dz / \mu, \quad (1)$$

式中:Z_u, Z₁ 分别为 OI 135.6 nm 日辉辐射产生区域的上边界和下边界;j(z)为体辐射率,包括多次散射效应的贡献;T(z)表示氧原子自吸收效应的透过率函数;t(z)为氧气分子的吸收光学厚度;dz/μ为积分路径的微分形式,μ为观测天顶角的余弦值。

OI 135.6 nm 柱辐射率的计算分为体辐射率计算(即激发产生机制)和辐射传输过程计算两部分。电离层 OI 135.6 nm 日辉辐射主要是由光电子与氧原子发生碰撞激发而产生的^[1, 14],这部分贡献称作初始辐射率,表示为:

$$j_0(z) = \rho_0(z) \int_{E_0}^{E_{\max}} \sigma^{\text{ex}}(E) \phi(z, E) dE, \quad (2)$$

式中:积分项通常称作 g 因子;E₀ 表示激发势能阈值, E₀ = 9.45 eV^[17], E_{max} 表示光电子能量上限, E_{max} = 800 eV^[17];φ(z, E)表示光电子通量,采用 Strickland 等人的光电子通量模型^[17]来计算;σ^{ex}(E)表示氧原子激发态⁵S₂ 的激发截面,本文采用的激发截面数据^[17]如图 1 所示。

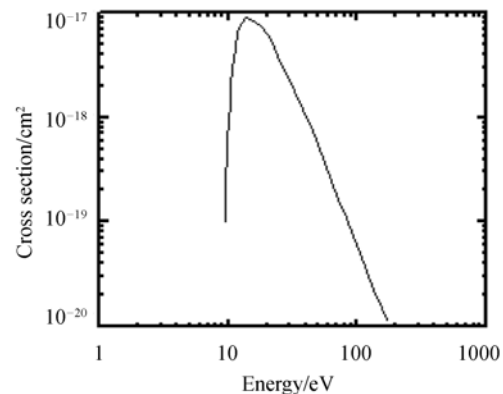


图 1 氧原子激发截面数据

Fig. 1 Cross section of excitation for atomic oxygen

此外, 电离层 OI 135.6 nm 日辉辐射还来自多次散射效应^[14, 17-18]。该部分辐射通过 AURIC 代码来计算^[17]。

对于 OI 135.6 nm 日辉的辐射传输过程的处理, 需要考虑氧原子的自吸收效应和氧气分子的吸收^[14, 17-18]。氧原子的自吸收效应可通过透过率函数 $T(z)$ 来计算, 而氧气分子的吸收可通过计算吸收光学厚度 $t(z)$ 来解决。氧原子的透过率函数的计算公式^[18]为:

$$T(z) = 1/\pi \int_{-\infty}^{\infty} \phi(x) \exp\{-[\Delta\tau(z)\phi(x) + \Delta t(z)]\} dx, \quad (3)$$

式中: $\phi(x)$ 为多普勒频率线型函数, 即:

$$\phi(x) = \exp(-x^2); \quad (4)$$

$\Delta\tau(z)$ 为氧原子的自吸收光学厚度; $\Delta t(z)$ 为氧气分子的吸收光学厚度。

在计算氧原子透过率函数、自吸收光学厚度以及氧气分子吸收光学厚度时, 需要将 OI 135.6 nm 辐射还原为 135.85 nm 与 135.56 nm 两条谱线。其计算公式分别为:

$$T(z) = \frac{5}{8} T_5(z) + \frac{3}{8} T_3(z), \quad (5)$$

$$\tau(z) = \int_{z_1}^z \sigma_{O}^{abs} \rho_O(z) dz/\mu, \quad (6)$$

$$t(z) = \int_{z_1}^z \sigma_{O_2}^{abs} \rho_{O_2}(z) dz/\mu, \quad (7)$$

式中: $T_5(z)$ 与 $T_3(z)$ 分别表示 135.56 nm 与 135.85 nm 两条谱线的透过率函数, $\frac{5}{8}$ 和 $\frac{3}{8}$ 为两条谱线的组分。式(6)、式(7)中所用到的吸收截面数据^[1, 18]如表 1 所示。

表 1 吸收截面数据

Tab. 1 Data for absorption cross sections

λ/nm	$\sigma_{O}^{abs}/\text{cm}^2$	$\sigma_{O_2}^{abs}/\text{cm}^2$
135.56	3.5×10^{-18}	7.1×10^{-18}
135.85	1.8×10^{-18}	7.1×10^{-18}

2.1.2 LBH 日辉辐射计算

电离层 LBH 日辉辐射是由光电子与氮气分子碰撞激发产生的, 是电离层在远紫外辐射波段中最强的分子辐射信号^[1, 19]。从空间观测 LBH 日辉辐射, 观测量同样为 LBH 日辉柱辐射率, 其计算公式^[14]为:

$$I_{\lambda} = 10^{-6} \int_{z_1}^{z_u} j_{\lambda}(z) \cdot \exp(-t_{\lambda}) dz/\mu, \quad (8)$$

$$t_{\lambda} = \sigma_{O_2}^{abs}(\lambda) \int_{z_1}^{z_u} \rho_{O_2}(z) dz/\mu, \quad (9)$$

式中: j_{λ} 表示某个波长的体辐射率; t_{λ} 表示氧气分子对某个 LBH 波长吸收的光学厚度; $\sigma_{O_2}^{abs}(\lambda)$ 表示氧气分子对某个 LBH 波长的吸收截面。同理, LBH 日辉柱辐射率的计算也分为体辐射率计算与辐射传输计算两部分。

某个 LBH 带的体辐射率为:

$$j_{\lambda}(z) = f_{\lambda} \cdot j(z), \quad (10)$$

式中: f_{λ} 表示某个 LBH 带占总的 LBH 带系的辐射组分^[20], $j(z)$ 表示 z 海拔高度处的激发态氮气分子的产生速率。

激发态氮气分子的产生速率 $j(z)$ 采用电子碰撞直接激发理论来计算^[17, 19], 其值等于 g 因子与氮气分子密度的乘积, 即:

$$j(z) = \rho_{N_2}(z) \cdot g(z). \quad (11)$$

$$g(z) = \int_{E_0}^{E_{max}} \phi(E, z) \cdot \sigma^{ex}(E) dE, \quad (12)$$

式中: 电子通量 $\phi(E, z)$ 同样采用光电子通量模型^[17]来计算; $\sigma^{ex}(E)$ 表示激发截面, 其数据^[17]如图 2 所示; E_0 为激发态的激发势能阈值, $E_0 = 8.7 \text{ eV}$ ^[17], E_{max} 为光电子能量的上限, $E_{max} = 800 \text{ eV}$ ^[17]。

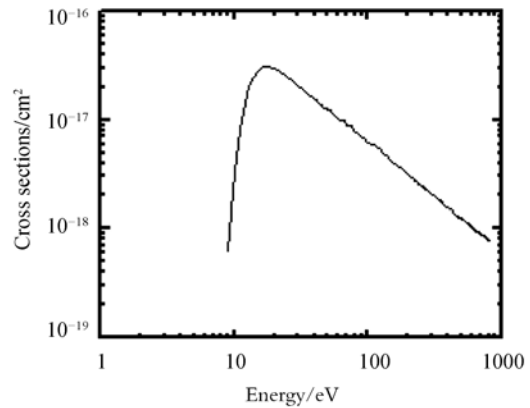


图 2 激发态的激发截面数据

Fig. 2 Cross sections of excitation

LBH 带的辐射传输过程主要受氧气分子 Schumann-Runge 吸收带的影响, 而氮气分子自身的吸收作用可忽略不计^[1, 21]。在计算 140 ~ 180 nm 波段的 LBH 日辉辐射时, 所采用的氧气分子吸收截面数据^[17]如图 3 所示。

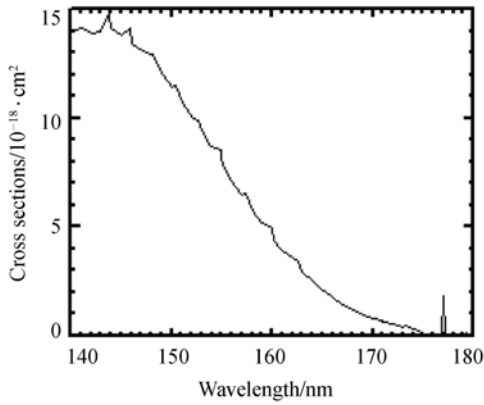


图 3 氧气分子的吸收截面

Fig. 3 Absorption cross sections of oxygen molecule

2.2 135.6/LBH 与太阳活动的关系

本文研究的两个远紫外日辉辐射信号均是由高层大气与光电子碰撞激发产生的,而光电子是高层大气在太阳 EUV 光谱的电离作用下产生的^[1, 14, 17],因此首先要研究其柱辐射率强度与太阳活动的关系。

太阳活动从低到高时的 EUV 光谱可通过 Hinteregger 模型来描述^[14, 17],而太阳活动的高低由太阳 10.7 cm 射电通量值 $F_{10.7}$ 来描述。两个远紫外信号的辐射计算问题已经在上节中解决,这里在 FY-3 气象卫星的轨道高度(830 km)计算两个信号天底方向上的柱辐射率,针对的是太阳活动从低到高的一系列状态($F_{10.7}$ 为 80~350),结果如图 4 所示。由图可知,两个辐射信号的柱辐射率强度都随太阳活动的增加而增加,但它们的增幅并不一致。因此,本文又研究了柱辐射率之比 135.6/LBH 与太阳活动的关系,结果如图 5 所示。

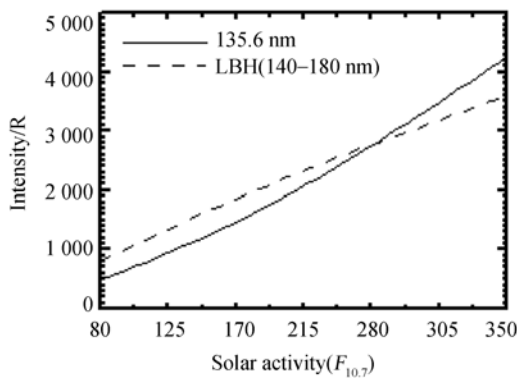


图 4 柱辐射率强度与太阳活动关系

Fig. 4 Column emission rates vs. solar activity

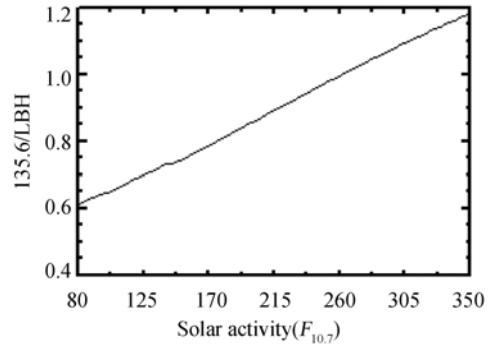


图 5 135.6/LBH 与太阳活动关系

Fig. 5 135.6/LBH vs. solar activity

由图 5 看出,135.6/LBH 与太阳活动呈相关关系。基于此结论,135.6/LBH 与 O/N_2 之间不再是唯一对应的关系,它还与太阳活动的变化有关。因此,在利用 135.6/LBH 反演计算 O/N_2 时,必须考虑太阳活动的影响。

3 O/N_2 反演

3.1 O/N_2 反演理论

由 135.6/LBH 来反演 O/N_2 的理论基础由 Strickland 等人^[14]提出,为了清楚地阐释柱辐射率与柱密度之间的关系,本文讨论针对的都是天底观测方向。

由式(1)与式(8)求柱辐射率之比可得:

$$\frac{135.6}{LBH} = \frac{\int_{N_T}^0 f_O(N_T) g_{O135.6}(N_T) dN_T}{\int_{N_T}^0 f_{N_2}(N_T) g_{LBH}(N_T) dN_T}, \quad (13)$$

式中: N_T 为总垂直柱密度, f_l 为 l 成分在总成分中所占的比率。

为建立柱辐射率之比 135.6/LBH 与柱密度之比 O/N_2 之间的对应关系,给定一个氮气分子的参考深度,记作 $N_{N_2}^{ref}$ 。此时的柱密度之比为:

$$\frac{O}{N_2} = \frac{\int_{N_T(N_{N_2}^{ref})}^0 f_O(N_T) dN_T}{\int_{N_T(N_{N_2}^{ref})}^0 f_{N_2}(N_T) dN_T}. \quad (14)$$

在氮气分子参考深度 $N_{N_2}^{ref}$ 为 10^{17} cm^{-2} 时,135.6/LBH 与 O/N_2 之间存在唯一性对应关系且不确定度最小(不大于 2%)^[14],即利用 135.6/LBH 来反演 O/N_2 的曲线是唯一的。此结论的前提条件是柱辐射率之比与太阳活动无关,针对

的是 PolarBEAR 卫星的观测信号: OI 135.6 nm 与 LBH(155~170 nm) 辐射。然而, 本文针对的是 FY-3 气象卫星载荷广角极光成像仪与电离层光度计的观测数据, 即 140~180 nm 波段的 LBH 辐射与 OI 135.6 nm 辐射。

不同的仪器对应不同的观测波段, 而不同的观测波段具有不同的辐射特性。本文已经研究这两个远紫外日辉辐射与太阳活动的关系, 发现柱辐射率之比 135.6/LBH 与太阳活动呈相关关系, 所以不能单独依据 O/N₂ 的变化来解释 135.6/LBH 的变化, 即利用 135.6/LBH 来反演 O/N₂ 的曲线不再唯一。因此, 在利用 LBH(140~180 nm) 与 OI 135.6 nm 两个远紫外辐射信号进行 O/N₂ 反演曲线计算时, 必须考虑太阳活动的影响。

3.2 O/N₂ 反演计算流程

利用 LBH(140~180 nm) 与 OI 135.6 nm 两个远紫外辐射观测信号进行 O/N₂ 反演, 计算流程如图 6 所示。

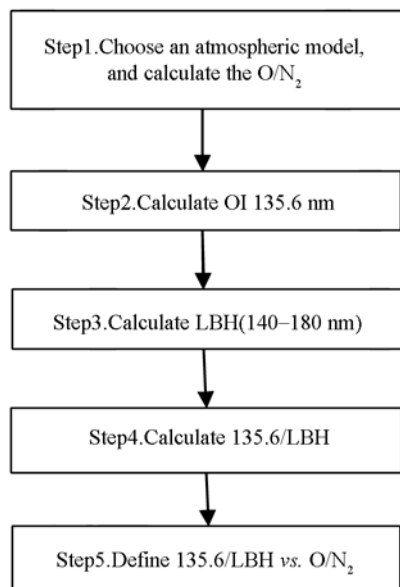


图 6 O/N₂ 反演计算流程

Fig. 6 Flowchart of calculation of O/N₂ retrieval curve

首先, 选择一个大气模型计算 O/N₂。本文选择的大气模型是国际上通用的 MSISE-00 模式, 该模式的输入参数包括日期 (Year、Day)、时间 (UT)、地磁活动参数 (A_p)、太阳 10.7 cm 射电通量值 (F_{10.7}) 及其 81 天的平均值 (<F_{10.7}>),

如表 2 所示。用表 2 中的第一组参数 Group₁ 计算氧原子与氮气分子的柱密度 (其他 3 组参数在验证时使用)。需要注意的是: 选取 10¹⁷ cm⁻² 作为给定的氮气分子的参考深度^[14]; 设置氧原子的密度标定因子 (Scale Factor), 使 O/N₂ 处于 0.4~1.2^[14]。

表 2 MSISE-00 模型参数

Tab. 2 Parameters of MSISE-00 model

Parameters	Group ₁	Group ₂	Group ₃	Group ₄
Year	1980	1985	1987	1992
Day	81	82	82	81
UT	43 200	43 200	43 200	43 200
F _{10.7}	162.40	77.30	75.50	166.40
<F _{10.7} >	186.64	73.67	77.31	177.78

其次, 计算 OI 135.6 nm 与 LBH(140~180 nm) 的日辉辐射。

然后, 选取一系列不同的太阳天顶角 (SZA = 0, 40, 50, 60, 75°) 来计算两个远紫外日辉辐射信号的柱辐射率值, 进而计算 135.6/LBH 的值, 同时记录相应的太阳天顶角。

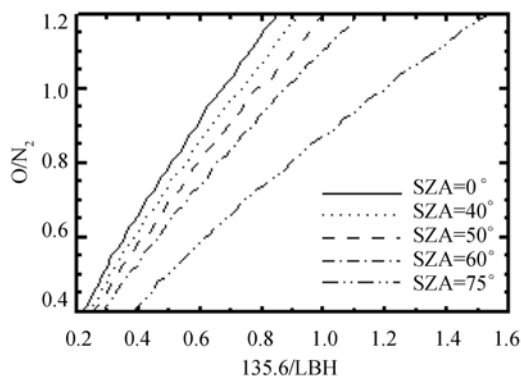


图 7 O/N₂ 反演曲线

Fig. 7 O/N₂ retrieval curves

最后, 确定 135.6/LBH 与 O/N₂ 的对应关系。O/N₂ 的值由太阳天顶角 SZA 与 135.6/LBH 共同确定, 因此可以建立 O/N₂ 与 SZA、135.6/LBH 的二维数组, 从而得到在一定太阳天顶角下 O/N₂ 与 135.6/LBH 的对应关系, 即

O/N₂ 反演曲线, 如图 7 所示。

通过上述计算, 得到了两个远紫外日辉信号 OI 135.6 nm 辐射与 LBH(140~180 nm)辐射所对应的 O/N₂ 反演曲线。依据此反演曲线, 通过插值计算方法就可以在已知观测量 135.6/LBH 及其太阳天顶角的情况下推算 O/N₂。

3.3 O/N₂ 反演计算验证

由于 FY-3 气象卫星载荷广角极光成像仪与电离层光度计目前处于研制阶段, 还没有实际的在轨观测数据, 因此, 本文只能通过模式计算数据来验证 O/N₂ 反演计算。

为了验证太阳活动对 O/N₂ 反演曲线的影响, 本文选取了 4 组大气模型参数, 其中 Group₁ 与 Group₄ 太阳活动水平一致且比较高, Group₂ 与 Group₃ 太阳活动水平一致且比较低, 如表 2 所示。通过计算得到了 4 组参数下的反演曲线, 如图 8 所示。从图 8 可以看出, 4 组参数在不同的太阳活动状态下的反演曲线并不一致, 出现了一定的偏差; 但太阳活动比较一致的两组参数的反演曲线的一致性很好, 偏差几乎可以忽略。

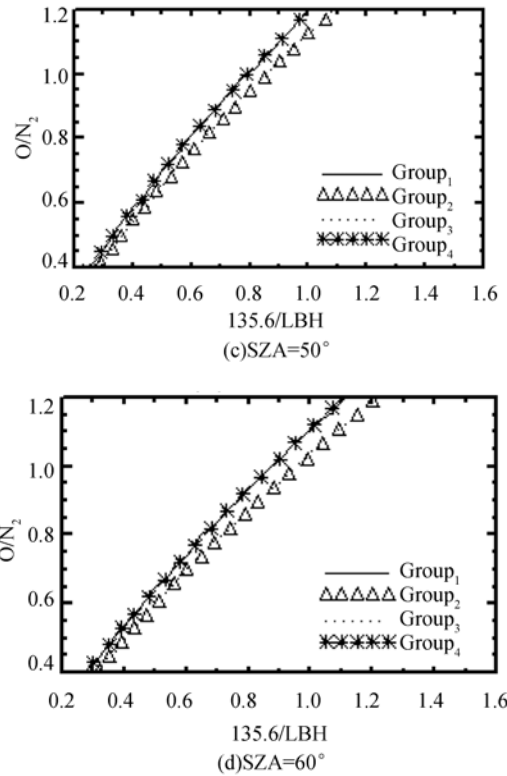


图 8 4 组反演曲线比较

Fig. 8 Comparison of retrieval curves among four groups with different parameters

为了定量地描述两组参数之间的偏差, 计算它们之间的平均数值偏差, 得到:

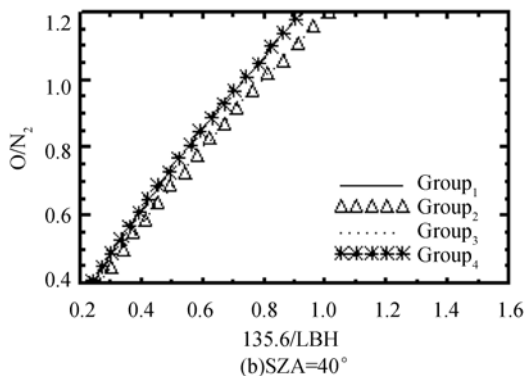
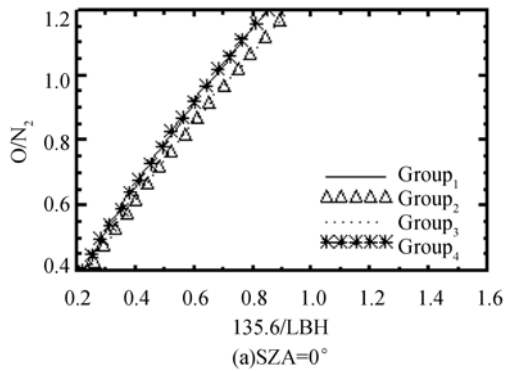
$$\delta_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{(O/N_2)_i - (O/N_2)_j}{(O/N_2)_i} \right| \times 100\%, \quad (15)$$

其中: (O/N₂)_i 表示第 i 组反演曲线中 O/N₂ 的值, N 为取样点数。通过式(15)分别计算了图 8 中的 Group₁ 与 Group₄, Group₂ 与 Group₃, Group₁ 与 Group₂ 以及 Group₃ 与 Group₄ 4 组反演曲线之间的数值偏差, 结果如表 3 所示。

表 3 数值偏差结果

Tab. 3 Results of numerical deviation (%)

SZA/(°)	δ ₁₄	δ ₂₃	δ ₁₂	δ ₃₄
0	0.5	0.4	2.1	6.8
40	0.5	0.4	9.5	7.6
50	0.7	0.5	9.5	6.3
60	0.5	0.3	7.3	6.9
70	0.5	0.33	13.3	6.7
75	0.3	0.6	3.8	6.1



由表3可知,Group₁与Group₄、Group₂与Group₃两组太阳活动的水平比较一致,二者之间的偏差非常小,几乎可以忽略;而Group₁与Group₂、Group₃与Group₄两组太阳活动的水平不一致,反演曲线之间的偏差比较大,因此必须考虑太阳活动的影响。

综上所述,在利用LBH(140~180 nm)与OI 135.6 nm两个远紫外辐射信号进行O/N₂反演计算时,必须考虑太阳活动的影响;同时,为了消除太阳活动不一致对O/N₂反演计算的影响,可以根据太阳射电通量值F_{10.7}的大小,选取太阳活动水平比较一致时的大气模型来进行反演计算,这样得到的O/N₂反演结果比较精确。

4 结 论

针对FY-3气象卫星载荷广角极光成像仪与

电离层光度计的两个远紫外观测信号:LBH(140~180 nm)与OI 135.6 nm辐射,本文首先解决了两个远紫外辐射观测信号的辐射计算问题,然后研究了二者柱辐射率之比135.6/LBH与太阳活动之间的关系,得出135.6/LBH与太阳活动之间呈相关关系,最后通过计算检验了太阳活动对O/N₂反演计算的影响,证明在利用两个远紫外日辉辐射信号进行O/N₂反演计算时必须考虑太阳活动的影响。

目前,本文的研究工作仅针对天底观测方向上的反演问题。要开发针对FY-3气象卫星载荷仪器的远紫外辐射图像数据的反演技术,还需要考虑其他的观测方向^[22]以及两台仪器在轨观测数据的同化问题^[23],因此,本课题组还要进一步研究其他观测方向的远紫外辐射的反演问题。本文的研究工作为FY-3载荷仪器的O/N₂图像反演技术奠定了基础。

参考文献:

- [1] MEIER R R. Ultraviolet spectroscopy and remote sensing of the upper atmosphere[J]. *Space Science Reviews*, 1991, 58(1):1-185.
- [2] HUFFMAN R E. *Atmospheric Ultraviolet Remote Sensing* [M]. Academic Press, 1992.
- [3] MEIER R R, PICONE J M. Retrieval of absolute thermospheric concentrations from the far UV dayglow: an application of discrete inverse theory [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(A4): 6307-6320.
- [4] PAXTON L J, MORRISON D, STRICKLAND D J, et al.. The use of far ultraviolet remote sensing to monitor space weather [J]. *Advances in Space Research*, 2003, 31(4):813-818.
- [5] GERMANY G A, TORR M R, TORR D G, et al.. Use of FUV auroral emissions as diagnostic indicators [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(A1):383-388.
- [6] FRANK L A, CRAVEN J D, ACKERSON K L, et al.. Global auroral imaging instrumentation for the dynamics explorer mission [J]. *Space Science Instrumentation*, 1981, 5:369-393.
- [7] MENDE S B, HEETDERKS H, FREY H U, et al.. Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft. 2. wideband FUV imaging [J]. *Space Science Reviews*, 2000, 91(1):271-285.
- [8] ISRAEL O, RAVITZ A, MOSHE T, et al.. Far ultraviolet remote sensing of ionospheric emissions by Polar BEAR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(5):931-945.
- [9] PAXTON L J, MENG C I, FOUNTAIN G H, et al.. Special sensor ultraviolet spectrographic imager (SSUSI): an instrument description [J]. *SPIE*, 1992, 1745:2-15.
- [10] PAXTON L J, CHRISTENSEN A B, HUMM D C, et al.. Global Ultraviolet Imager (GUVI): measuring composition and energy inputs for the NASA thermosphere ionosphere energetics and dynamics (TIMED) mission [J]. *SPIE*, 1999, 3756:265-276.
- [11] KIL H, LEE W K, SHIM J, et al.. The effect of the 135.6 nm emission originated from the ionosphere on the TIMED/GUVI O/N₂ ratio [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118(A018112):1-7.
- [12] STRICKLAND D J, COX R J, MEIER R R, et al.. Global O/N₂ derived from DE 1 FUV dayglow data: technique and examples from two storm periods [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 104(A3):4251-4266.

- [13] ZHANG Y, PAXTON L J, MORRISON D, *et al.*. O/N₂ changes during 1-4 October 2002 storms: IMAGE SI-13 and TIMED/GUVI observations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(A10308):1-16.
- [14] STRICKLAND D J, EVANS J S, PAXTON L J. Satellite remote sensing of thermospheric O/N₂ and solar EUV, 1. theory [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100 (A7): 12, 217-12, 226.
- [15] EVANS J S, STRICKLAND D J, PAXTON L J. Satellite remote sensing of thermospheric O/N₂ and solar EUV, 2. data analysis [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(A7):12, 227-12, 233.
- [16] HEDIN A E. MSIS-86 thermospheric model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(A5): 4649-4662.
- [17] STRICKLAND D J, BISHOP J, EVANS J S, *et al.*. Atmospheric Ultraviolet Radiance Integrated Code (AURIC): theory, software architecture, inputs, and selected results [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 1999, 62:689-742.
- [18] STRICKLAND D J, ANDERSON D E. Radiation transport effects on the OI 135. 6-a limb intensity profile in the dayglow [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, 88(A11):9260-9264.
- [19] EASTES R W. Emissions from the N₂ Lyman-Birge-Hopfield bands in the earth's atmosphere [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2000, 25(5-6):523-527.
- [20] AJELLO J M, SHEMANSKY D E. A reexamination of important N₂ cross sections by electron impact with application to the dayglow: the Lyman-Birge-Hopfield band system and NI (119. 99 nm) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 99 (A10):9845-9861.
- [21] ROBERT R. Conway, self-absorption of the Lyman-Birge-Hopfield bands in the far ultraviolet dayglow [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 87(A2):859-866.
- [22] 张晶, 王淑荣, 黄煜, 等. 临边成像光谱仪的发展现状与进展 [J]. *中国光学*, 2013, 6(5):692-700. ZHANG J, WANG SH R, HUANG Y, *et al.*. Status and development of limb imaging spectrometers [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5):692-700. (in Chinese)
- [23] 薛旭成, 傅瑶, 韩诚山. TDI CCD 相机的卫星姿态稳定度确定 [J]. *中国光学*, 2013, 6(5):767-772. XUE X CH, FU Y, HAN CH SH. Confirmation of satellite attitude stabilization for TDI CCD camera [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5):767-772. (in Chinese)

作者简介:



张永超(1986—),男,山东淄博人,博士研究生,2009年于烟台大学获得学士学位,主要从事空间短波段光学成像技术与图像反演技术的研究。E-mail: zyc09optics@sina.com



张效信(1963—),男,山东昌乐人,研究员,博士生导师,1987年于吉林大学获得学士学位,1990年于中科院空间科学与应用研究中心获得硕士学位,2003年于美国 Auburn 大学获得博士学位,主要从事空间物理学及其空间天气效应的研究。E-mail: xxzhang@cma.gov.cn

导师简介:



陈波(1961—),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,1984年于吉林大学获得学士学位,1990年,2003年于长春光机所分别获得硕士、博士学位,主要从事软 X 射线-极紫外波段光学和空间光学研究。E-mail: chenb@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)