

# 大气痕量气体差分吸收光谱仪云量反演算法研究

杨太平<sup>1,2</sup>, 司福祺<sup>1\*</sup>, Ping Wang<sup>3</sup>, 罗宇涵<sup>1</sup>, 周海金<sup>1</sup>, 赵敏杰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学研究中心, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

<sup>3</sup>Royal Netherlands Meteorological Institute, KNMI, 荷兰 De Bilt, 3731GA

**摘要** 主要讨论 O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 在 477 nm 处吸收带反演的有效云量。首先通过差分吸收光谱(DOAS)算法反演 460~490 nm 内的 O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 斜柱浓度, 并对 O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 斜柱浓度中出现的条带进行修正; 然后通过 SCIATRAN 辐射传输模型设置太阳天顶角、观测天顶角、相对方位角、地表反照率、地面高度、云量、云压等参数的不同节点, 创建 O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 斜柱浓度和反射率的查找表, 进一步对查找表进行转换得到云量的查找表; 最后对 O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 斜柱浓度、连续反射率及相关太阳几何信息进行多维插值, 得到大气痕量气体差分吸收光谱仪(EMI)有效云量。为验证所提算法的准确性, 将 EMI 结果与 OMI(ozone monitoring instrument)云量进行比较, 两者均呈由低云量到高云量频数递减的趋势, 其中云量为 0 和云量为 1 均出现频数高值现象, 云量相关性  $R$  为 0.82, 相关性表现良好。

**关键词** 大气光学; O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>; 反射率; 查找表; 辐射传输模型; 有效云量

中图分类号 O433

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0901001

## Research on Cloud Fraction Inversion Algorithm of Environmental Trace Gas Monitoring Instrument

Yang Taiping<sup>1,2</sup>, Si Fuqi<sup>1\*</sup>, Ping Wang<sup>3</sup>, Luo Yuhan<sup>1</sup>, Zhou Haijin<sup>1</sup>, Zhao Minjie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centre of Environmental Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

<sup>3</sup>Royal Netherlands Meteorological Institute, KNMI, De Bilt, 3731GA, The Netherlands

**Abstract** In this study, we discuss the O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> inversion effective cloud fraction of the absorption band observed at 477 nm. First, the O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> slant column densities are retrieved in 460–490 nm using the differential optical absorption spectroscopy (DOAS) algorithm, and the stripes occurring in the O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> slant column densities are corrected. Second, the SCIATRAN radiative transfer model is used to set different nodes with respect to solar zenith angle, viewing zenith angle, relative azimuth angle, surface albedo, surface altitude, cloud fraction, and cloud pressure to establish the lookup table of the O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> slant column densities and reflectance. Subsequently, we invert the aforementioned lookup table to obtain the lookup table of cloud fraction. Finally, we use the O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> slant column densities, continuum reflectance, and related solar geometry information to perform multi-dimensional interpolation for obtaining the effective cloud fraction for the environmental trace gas monitoring instrument (EMI). The EMI results are compared with the OMI (ozone monitoring instrument) cloud fraction to verify the accuracy of the proposed algorithm and both denote that the frequency percentages decrease from low cloud cover to high cloud cover. When the cloud fractions are 0 and 1, their frequency percentages are observed to be considerably high. The OMI and EMI cloud fractions are in good agreement and have a high correlation coefficient ( $R$ ) of 0.82.

**Key words** atmospheric optics; O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>; reflectance; lookup table; radiative transfer model; effective cloud fraction

**OCIS codes** 010.1290; 300.6320; 010.1615; 280.4788

收稿日期: 2019-12-16; 修回日期: 2020-01-14; 录用日期: 2020-01-19

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0503901, 2016YFC0200401)、国家自然科学基金(41705016)

\* E-mail: sifuqi@aiofm.ac.cn

## 1 引 言

卫星遥感技术凭借精确度高、非接触、每日全球覆盖等优势成为重要的大气探测技术之一。搭载大气痕量气体差分吸收光谱仪(EMI)的GF-5号卫星于2018年5月9日发射,EMI由中国科学院安徽光学精密机械研究所研制。EMI是一种凸面光栅分光天底推扫型成像光谱仪,包含4个通道,波长覆盖240~710 nm,光谱分辨率为0.3~0.5 nm,空间分辨率优于48 km×24 km,主要用于监测NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>等大气成分<sup>[1-2]</sup>。云和气溶胶等会影响光子传输路径,导致云层上方的痕量气体浓度被高估,云层下方的痕量气体浓度被低估,进而影响痕量气体浓度的准确性<sup>[3]</sup>,所以EMI云产品的开发对EMI痕量气体的准确反演具有重要意义。

1994年Kuze等<sup>[4]</sup>基于卫星数据,通过紫外可见波段反演云特性,提出了GOME(global ozone monitoring experiment)云反演算法IFCA(initial fitting cloud algorithm),该算法不考虑瑞利散射和气溶胶散射,将云作为朗伯面进行处理,将大气辐射传输模型模拟的758~778 nm的光谱和GOME观测光谱相结合来反演云量。Loyola等<sup>[5-9]</sup>基于阈值方法开发了OCRA(optical cloud recognition algorithm)云反演算法,使用紫外可见光谱的双色辐射取代传统的紫外、可见及近红外光谱的三色辐射,对OCRA进行改进并将其应用于TROPOMI云产品开发中。Koelemeijer等<sup>[10-13]</sup>避免了IFCA需要输入先验云顶高度的问题,通过O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>A带的吸收研究了FRESCO(fast retrieval scheme for clouds from the oxygen A band)云反演算法。Wang等<sup>[14-15]</sup>考虑单次瑞利散射,提出FRESCO+算法,该算法提高了云压反演的可靠度。Desmons等<sup>[16]</sup>利用687 nm吸收带,基于GOME-2数据提出了FRESCO-B算法。Acarreta等<sup>[17-18]</sup>利用OMI(ozone monitoring instrument)数据,基于O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>在477 nm的吸收带,提出了OMCLDO2云反演算法。Veefkind等<sup>[19]</sup>考虑温度校正,对OMCLDO2算法进行了改进。改进后的OMCLDO2算法使用大气辐射传输模型(DAK)进行相关参数设置节点模拟光谱并创建云量云压查找表。Rozanov等<sup>[20]</sup>基于O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>A带的吸收,开发了SACURA(semi-analytical cloud retrieval algorithm)云反演算法,该算法主要反演云顶高度和云层厚度。相比国外成熟的云反演算法,我国的紫外可见波段大气成分探测星载仪器

正处于起步发展阶段,相应算法的研究也非常有限。EMI是我国重要的星载紫外可见波段大气成分探测仪之一,为其提供准确的云量信息是痕量气体准确反演的重要前提条件。因为EMI监测波段范围不包含O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>A带的吸收波段,而且EMI的过境点与OMI比较接近,可比性较高,所以本文主要基于O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>在477 nm的吸收带对EMI的云产品算法进行研究,并且对O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>斜柱浓度中的条带现象进行修正。

## 2 研究方法

使用不透明朗伯面代替云,可以准确定义朗伯云的高度,进而通过朗伯面的压强得到云压,在计算中忽略了云层厚度和云微物理性质等信息,但朗伯面能够提供在大气层顶与真实云相同的光谱特性。该光谱特性可以由连续反射率和O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>斜柱浓度(SCD)表征<sup>[21]</sup>。本算法使用SCIATRAN辐射传输模型进行光谱模拟,通过差分吸收光谱(DOAS)<sup>[22]</sup>算法拟合得到O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>斜柱浓度;再计算得到连续反射率以创建查找表,并对查找表进行转换,得到云量的查找表;进而代入EMI实测数据得到的O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>斜柱浓度、连续反射率、太阳天顶角(SZA)、观测天顶角(VZA)及相对方位角(RAA)等参数值,插值得到有效云量。算法流程如图1所示。

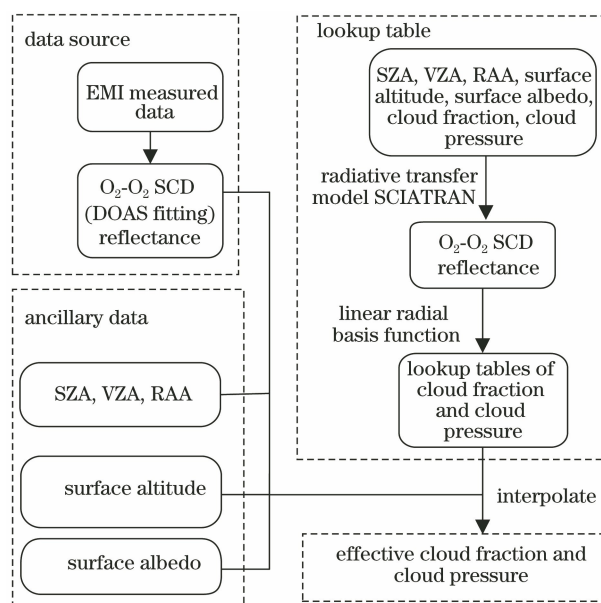


图1 本算法流程图

Fig. 1 Flowchart of proposed algorithm

## 2.1 研究数据

主要选取2018年8月9日(本算法对其他日期数据也适用,这里为任选一天)EMI可见通道1数据,

可见通道 1 数据维为  $1471 \times 111 \times 1286$ , 其中 1471 表示从南到北推扫的时间维, 111 表示从西到东的像元维, 1286 表示光谱维<sup>[1]</sup>。推扫方式如图 2 所示。

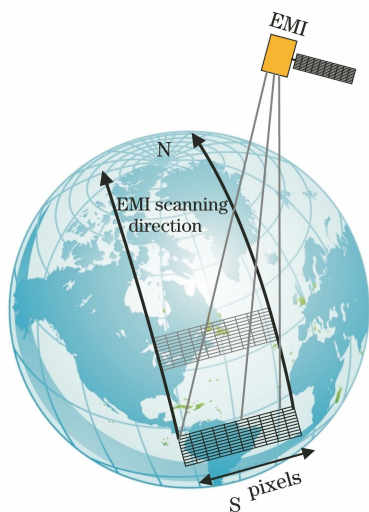


图 2 EMI 天底推扫示意图

Fig. 2 Push-broom diagram of EMI in a nadir

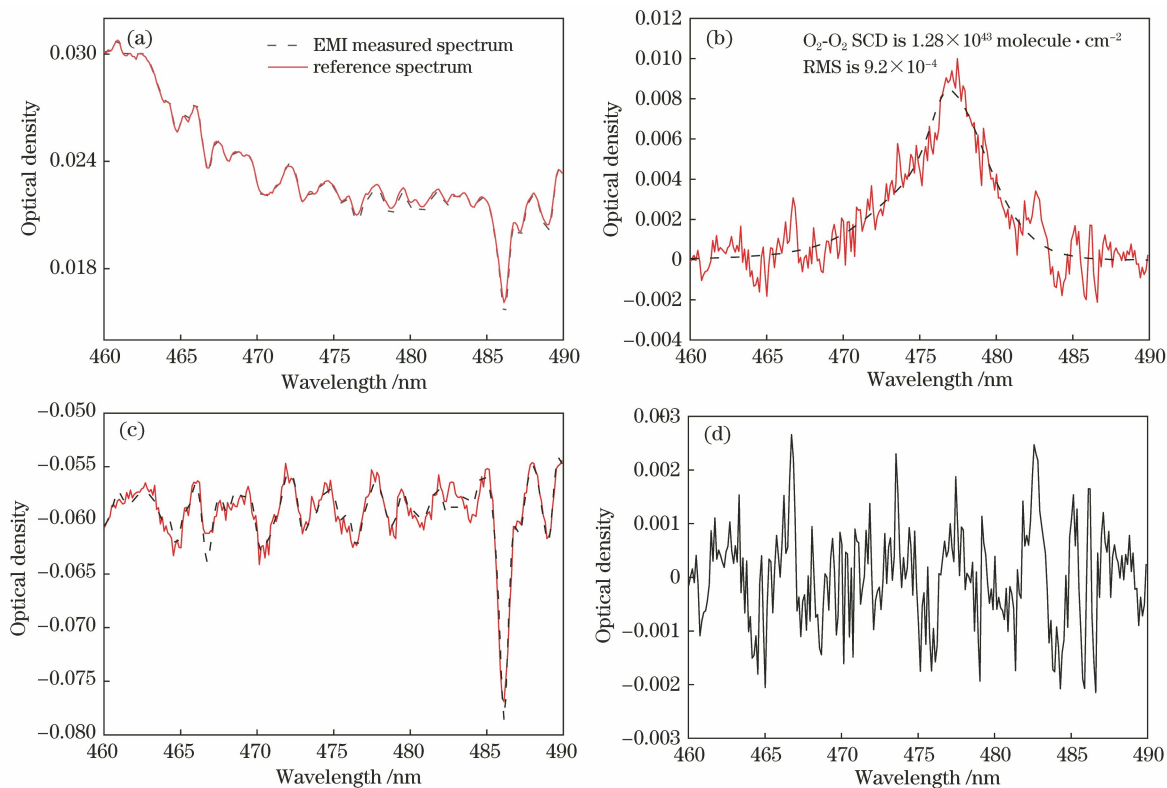


图 3  $O_2-O_2$  DOAS 拟合实例。(a) EMI 实测光谱(虚线)与参考光谱(实线);(b)  $O_2-O_2$  参考截面(虚线)与吸收截面(实线);(c) Ring 参考截面(虚线)与吸收截面(实线);(d) 剩余结构拟合

Fig. 3 Examples of  $O_2-O_2$  DOAS fitting. (a) EMI measured spectrum(dashed line) and reference spectrum(solid line); (b) reference cross section (dashed line) and absorption cross section (solid line) of  $O_2-O_2$ ; (c) reference cross section (dashed line) and absorption cross section (solid line) of Ring effect; (d) residual structure fitting

## 2.2 光谱拟合

由 QDOAS 软件在 460~490 nm 内对光谱反演获得  $O_2-O_2$  斜柱浓度。其中选择 EMI 测量的太阳谱作为参考谱, 为了去除其他气体吸收的干扰, 拟合过程中包含了温度为 243 K 和 293 K 的  $O_3$ 、293 K 的  $O_2-O_2$ 、220 K 和 298 K 的  $NO_2$  的吸收截面, 以及通过 QDOAS 软件中 Ring.exe 拟合得到的 Ring 截面<sup>[23]</sup>, 具体信息如表 1 所示。光谱反演实例如图 3 所示。连续反射率的表达式<sup>[17]</sup>为

$$R_c(\lambda) = \frac{\pi I(\lambda)}{\cos \theta_0 E(\lambda)}, \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为波长;  $\theta_0$  为太阳天顶角;  $I(\lambda)$  为大气顶的反射辐亮度;  $E(\lambda)$  为太阳辐照度。

## 2.3 查找表的创建

EMI 云反演算法中采用独立像元近似 (IPA) 法, 该方法假设将一个地面像元划分为若干个全云子像元和无云子像元, 并且忽略水平方向上的净辐射传输, 只考虑垂直方向上的传输情况, 该像元测量

表 1 O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> DOAS 拟合参数配置

Table 1 Parameter settings for O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> DOAS fitting

| Parameter                                     | Content   |
|---|---|
| Temperature of NO <sub>2</sub>                | 298 K, 220 K<br>(Vandaele et al, 1996) <sup>[24]</sup>                      |
| Temperature of O <sub>3</sub>                 | 293 K (Bogumil et al, 2003),<br>243 K (Bogumil et al, 2000) <sup>[25]</sup> |
| Temperature of O <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> | 293 K (Thalman et al, 2013) <sup>[26]</sup>                                 |
| Temperature of H <sub>2</sub> O               | 297 K (hitran) <sup>[27]</sup>  |
| Ring  | Ring.exe  |
| Order of polynomial                           | 5   |
| Offset  | Constant (0th order)  |
| Fitting interval                              | 460–490 nm  |

的反射率为这些子像元反射率的平均值。因此,假设每个全云子像元为单层云,它们的云光学厚度、云顶高度、云底高度相同,并且每个子像元的地表反照率也相同,通过独立像元近似法,可以得到每个地面像元的反射率<sup>[17]</sup>。独立像元近似法示意图如图 4 所示。在该模型中,一个地面像元被近似为有云部分和无云部分的权重和,其中有云部分视为一个压强为  $P_{\text{cld}}$ 、反照率为  $A_{\text{cld}}$  的朗伯面,无云部分视为压强为  $P_{\text{sfc}}$ 、反照率为  $A_{\text{sfc}}$  的朗伯面。将云量  $c_f$  作为权重,计算有云部分和无云部分的权重平均值,进而得到大气层顶的反射率,表达式为

$$R(\lambda) = (1 - c_f)R^{\text{clear}}(\lambda, A_{\text{sfc}}, P_{\text{sfc}}) + c_f R^{\text{cloud}}(\lambda, A_{\text{cld}}, P_{\text{cld}}), \quad (2)$$

式中: $A_{\text{sfc}}$  为地表反照率; $P_{\text{sfc}}$  为地表压强; $A_{\text{cld}}$  为云反照率; $P_{\text{cld}}$  为云压; $R^{\text{cloud}}$  为有云部分反射率; $R^{\text{clear}}$  为无云部分反射率。

本研究使用 SCIATRAN 辐射传输模型,通过设置太阳天顶角、观测天顶角、相对方位角、地表反

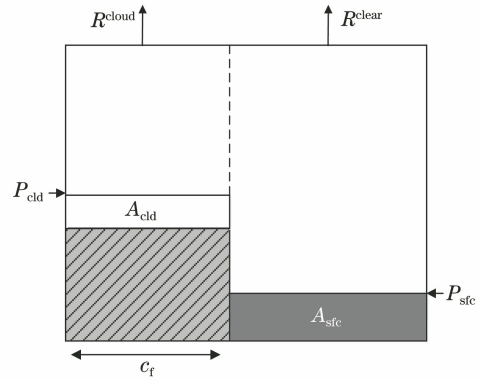


图 4 独立像元近似法示意图

照率、地面高度、云量、云压等参数节点模拟光谱,各参数节点设置如表 2 所示。通过模拟的光谱得到 O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 斜柱浓度  $N_{\text{s},\text{O}_2-\text{O}_2}$  和连续反射率  $R_c$ , 由此创建查找表。查找表参数关系分别为

$$N_{\text{s},\text{O}_2-\text{O}_2} = f_1(\theta_{\text{SZA}}, \theta_{\text{VZA}}, \theta_{\text{RAA}}, c_f, A_{\text{sfc}}, P_{\text{cld}}, P_{\text{sfc}}), \quad (3)$$

$$R_c = f_2(\theta_{\text{SZA}}, \theta_{\text{VZA}}, \theta_{\text{RAA}}, c_f, A_{\text{sfc}}, P_{\text{cld}}, P_{\text{sfc}}). \quad (4)$$

因为本算法需要创建云量云压的查找表,这里需要对由(3)、(4)式得到的查找表进行转换,转换后得到

$$c_f = g_1(\theta_{\text{SZA}}, \theta_{\text{VZA}}, \theta_{\text{RAA}}, R_c, N_{\text{s},\text{O}_2-\text{O}_2}, A_{\text{sfc}}, P_{\text{sfc}}), \quad (5)$$

$$P_{\text{cld}} = g_2(\theta_{\text{SZA}}, \theta_{\text{VZA}}, \theta_{\text{RAA}}, R_c, N_{\text{s},\text{O}_2-\text{O}_2}, A_{\text{sfc}}, P_{\text{sfc}}). \quad (6)$$

因此,通过对  $R_c$  和  $N_{\text{s},\text{O}_2-\text{O}_2}$  设置不同节点(节点设置如表 3 所示),并使用径向基函数对由(5)、(6)式得到的查找表进行转换,最终得到云量  $c_f$  和云压  $P_{\text{cld}}$  的查找表。

表 2 辐射传输模型的输入参数节点设置

Table 2 Input parameter node settings of radiative transfer model

| Parameter                        | Node   |
|----------------------------------|--|
| $\theta_{\text{SZA}} / (^\circ)$ | 0.1, 7.2, 13.1, 23.1, 33.7, 44.4, 55.3, 65.9, 76.6, 87.1   |
| $\theta_{\text{VZA}} / (^\circ)$ | 0.1, 7.2, 13.1, 23.1, 33.7, 44.4, 55.3, 65.9   |
| $\theta_{\text{RAA}} / (^\circ)$ | 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180   |
| Surface albedo                   | 0, 0.010, 0.025, 0.050, 0.075, 0.100, 0.150, 0.200, 0.250, 0.325, 0.400, 0.500, 0.600, 0.700, 0.800, 0.900, 1.000  |
| Surface or cloud pressure /hPa   | 1013, 963, 913, 863, 813, 763, 713, 663, 613, 563, 513, 463, 413, 363, 313, 263, 213, 163, 113, 63   |
| Cloud fraction                   | -0.100, -0.050, 0, 0.010, 0.020, 0.040, 0.060, 0.080, 0.100, 0.125, 0.150, 0.175, 0.200, 0.250, 0.300, 0.350, 0.400, 0.450, 0.500, 0.550, 0.600, 0.650, 0.700, 0.750, 0.800, 0.850, 0.950, 1.000, 1.100, 1.200 |

Note: cloud fraction smaller than 0 and larger than 1 is included to enlarge the parameter space.

表 3 云量查找表中  $N_{s,O_2-O_2}$  和  $R_c$  节点设置  
Table 3 Node settings for  $R_c$  and  $N_{s,O_2-O_2}$  in look-up table of cloud fraction

| Parameter   | Node  |
|---|---|
| $R_c$ at 468 nm   | 0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75, 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 1.00, 1.05, 1.10, 1.15, 1.20, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00 |
| $N_{s,O_2-O_2} / (10^{14} \text{ molecule}^2 \cdot \text{cm}^{-5})$ | 0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75, 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 1.00, 1.10, 1.20                                     |

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 $O_2-O_2$ 斜柱浓度反演结果分析

通过光谱拟合 DOAS 算法对  $O_2-O_2$  斜柱浓度进行反演,结果如图 5 所示。从图 5 可知,每轨直接反演的  $O_2-O_2$  斜柱浓度都存在明显的条带现象,条带现象是由多传感器的不同响应引起的,所以不能直接对其进行下一步计算。针对这一现象,本算法主要通过 SCIATRAN 辐射传输模型模拟无云情况

下的  $O_2-O_2$  斜柱浓度和相应的大气质量因子 (AMF),通过垂直柱浓度 (VCD) 和斜柱浓度对应公式计算得到模拟的  $O_2-O_2$  垂直柱浓度。把像元维中由每个像元模拟的  $O_2-O_2$  VCD 与由 EMI 实际测量光谱反演得到的  $O_2-O_2$  VCD 相减来获取差异值,如图 6 所示。将这个差值代入到实测数据中进行校正,校正之后条带现象消失,如图 7 所示。由于两极区冰雪覆盖、地表反照率较大、太阳天顶角较大等原因,会出现两极区  $O_2-O_2$  VCD 明显偏大的现象。

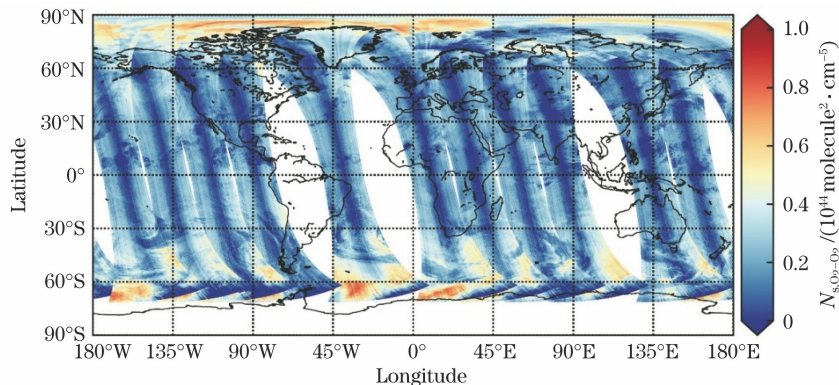


图 5 EMI 测量的  $N_{s,O_2-O_2}$  分布

Fig. 5 EMI measured  $N_{s,O_2-O_2}$  distribution

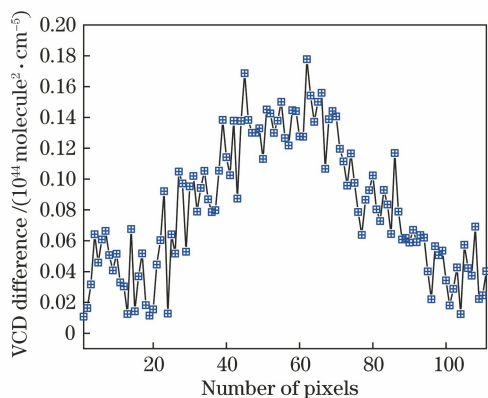


图 6 模拟与 EMI 测量的  $O_2-O_2$  VCD 的差异  
Fig. 6 Difference between simulated and EMI measured  $O_2-O_2$  VCD

#### 3.2 云量反演结果

使用 EMI 云量反演算法对 2018 年 8 月 9 日 EMI 数据进行反演,得到云量分布图,如图 8 所示。由于该算法对高纬度和两极地等冰雪覆盖较多地区的敏感性较差,这里仅展示  $-60^\circ \sim 60^\circ$  纬度范围内的云量分布图,其中由深到浅的颜色表示云量从少到多。

为了证明 EMI 云量反演算法的准确性,选择了同一天同经度范围内 OMI 的云产品数据进行比较,如图 9 所示。结合图 8、9 可以看出,二者云量高值和低值分布区域非常一致。图 10 为两者云量频数的统计,两者都呈现出大部分云量为低云量,少部分云量为高云量的现象,从低云量到高云量频数呈

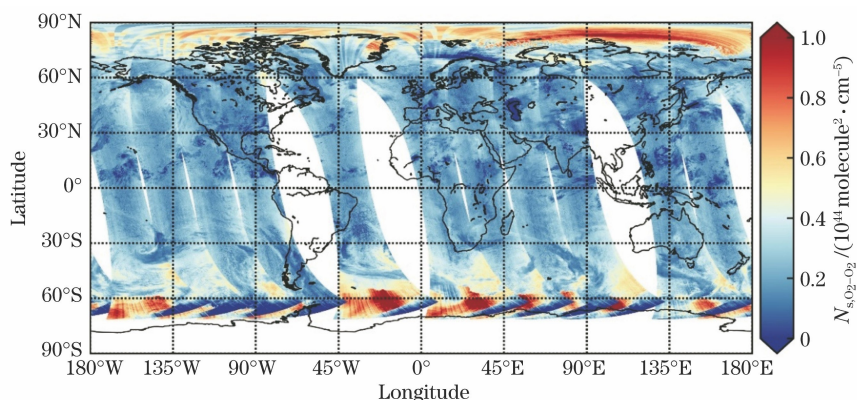


图 7 校正之后的  $N_{s,O_2-O_2}$  分布

Fig. 7  $N_{s,O_2-O_2}$  distribution after correction

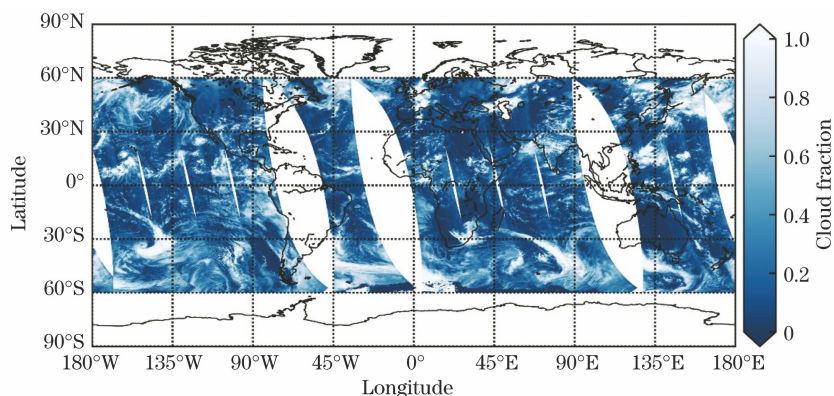


图 8 EMI 测量的云量分布

Fig. 8 EMI measured distribution of cloud fraction

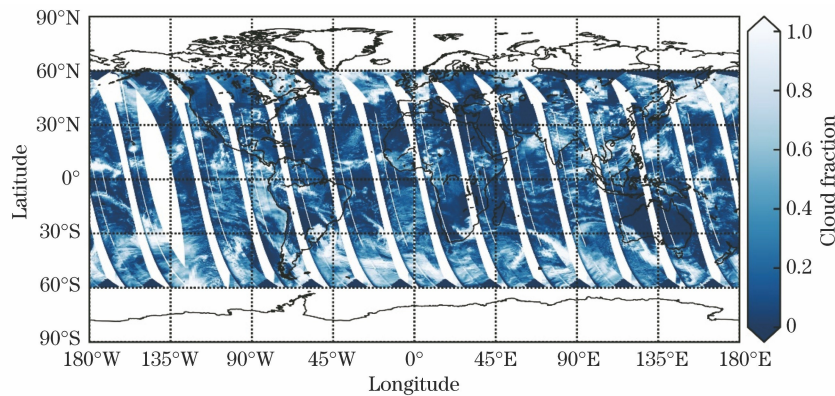


图 9 OMI 测量的云量分布

Fig. 9 OMI measured distribution of cloud fraction

递减趋势,其中 EMI 和 OMI 云量为 0 和云量为 1 处均出现高频数现象,EMI 和 OMI 频数分别为 12.32%、14.01%和 4.97%、5.04%。

为了更进一步比较 EMI 与 OMI 两个星载仪器云量的相关性,将纬度  $-60^{\circ} \sim 60^{\circ}$  和经度  $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$  范围划分为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  的网格,求落在每个网格内的云量平均值,并对每个网格 OMI 与 EMI 云量平

均值进行相关性分析,如图 11 所示,两者相关性  $R$  为 0.82,相关性良好。研究得出,造成 EMI 与 OMI 云量结果存在一定差异的主要原因是:EMI 与 OMI 过境时间虽然相近但并非一模一样,云会随时间变化而移动;OMI 服役时间长而出现的运行异常现象,导致缺失值较多;EMI2018 年 8 月 9 日由于通讯原因,轨道 4 数据缺失。

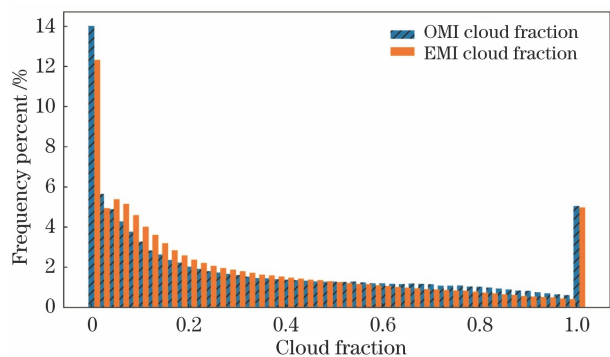


图 10 云量频数分布

Fig. 10 Frequency percent distribution of cloud fraction

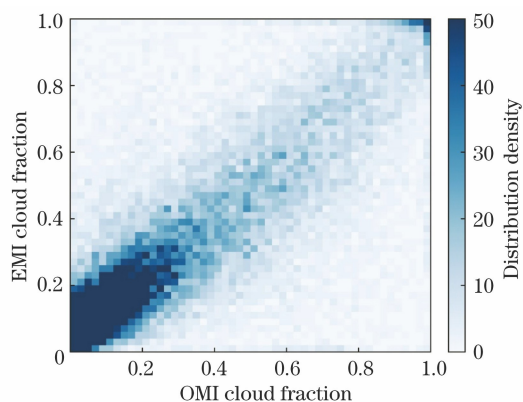


图 11 OMI 与 EMI 云量相关性分析

Fig. 11 Correlation analysis of OMI and EMI cloud fraction

## 4 结 论

依据  $O_2-O_2$  在 477 nm 带的吸收,采用独立像元近似法,利用 SCIATRAN 辐射传输模型创建查找表,通过径向基函数对查找表进行转换,结合 EMI 实测数据得到  $O_2-O_2$  斜柱浓度和连续反射率,进而得到全球云量的分布。利用 SCIATRAN 模拟光谱避免了  $O_2-O_2$  斜柱浓度条带现象。结果表明:结合模拟光谱和实测光谱,可以有效避免条带现象;EMI 云量反演算法可以有效反演 EMI 的有效云量,云量频数分布一致性高,并且与 OMI 有效云量有良好的相关性。该结果对 EMI 云产品的开发具有重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] Zhao M J, Si F Q, Zhou H J, et al. Preflight calibration of the Chinese environmental trace gases monitoring instrument (EMI) [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(9): 5403-5419.
- [2] Zhao M J, Si F Q, Lu Y H, et al. Spectral image correction method for space-borne differential optical absorption spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1230002.
- [3] Boersma K F, Eskes H J, Brinksma E J. Error analysis for tropospheric  $NO_2$  retrieval from space [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D4): D04311.
- [4] Kuze A, Chance K V. Analysis of cloud top height and cloud coverage from satellites using the  $O_2$  A and B bands [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, 99(D7): 14481-14491.
- [5] Loyola D, Ruppert T. A new PMD cloud-recognition algorithm for GOME [J]. *ESA Earth Observation Quarterly*, 1998, 58: 45-47.
- [6] Loyola D. Cloud retrieval for SCIAMACHY [EB/OL]. (2009-07-28)[2019-12-16]. [http://wdc.dlr.de/sensors/gome/gdp4/loyola\\_2000.pdf](http://wdc.dlr.de/sensors/gome/gdp4/loyola_2000.pdf).
- [7] Rodriguez D G L, Thomas W, Livschitz Y, et al. Cloud properties derived from GOME/ERS-2 backscatter data for trace gas retrieval [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(9): 2747-2758.
- [8] Loyola D G, Gimeno García S, Lutz R, et al. The operational cloud retrieval algorithms from TROPOMI on board Sentinel-5 precursor [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(1): 409-427.
- [9] Loyola D, Lutz R, Argyrouli A, et al. S5P/TROPOMI ATBD cloud products [EB/OL]. (2018-04-30)[2019-12-16]. <https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/2476257/Sentinel-5P-TROPOMI-ATBD-Clouds>.
- [10] Koelemeijer R B A, Stammes P, Hovenier J W, et al. A fast method for retrieval of cloud parameters using oxygen A-band measurements from the global ozone monitoring experiment [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D4): 3475-3490.
- [11] Koelemeijer R B A, Stammes P, Hovenier J W, et al. Global distributions of effective cloud fraction and cloud top pressure derived from oxygen A band spectra measured by the global ozone monitoring experiment: comparison to ISCCP data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107(D12): 4151.
- [12] Fournier N, Stammes P, de Graaf M, et al. Improving cloud information over deserts from SCIAMACHY oxygen A-band measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6(1): 163-172.
- [13] Lelli L, Kokhanovsky A A, Rozanov V V, et al. Seven years of global retrieval of cloud properties using space-borne data of GOME [J]. *Atmospheric*

- Measurement Techniques, 2012, 5(7): 1551-1570.
- [14] Wang P, Stammes P, van der A R, et al. FRESCO+: an improved O<sub>2</sub> A-band cloud retrieval algorithm for tropospheric trace gas retrievals [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2008, 8(3): 9697-9729.
- [15] Wang P, Stammes P. Evaluation of SCIAMACHY oxygen A band cloud heights using Cloudnet measurements[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2014, 7(5): 1331-1350.
- [16] Desmons M, Wang P, Stammes P, et al. FRESCO-B: a fast cloud retrieval algorithm using oxygen B-band measurements from GOME-2[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2019, 12(4): 2485-2498.
- [17] Acarreta J R, de Haan J F, Stammes P. Cloud pressure retrieval using the O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> absorption band at 477 nm[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, 109(D5): D05204.
- [18] Stammes P, Sneep M, de Haan J F, et al. Effective cloud fractions from the ozone monitoring instrument: theoretical framework and validation[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113(D16): D16S38.
- [19] Veefkind J P, de Haan J F, Sneep M, et al. Improvements to the OMI O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> operational cloud algorithm and comparisons with ground-based radar-lidar observations[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2016, 9(12): 6035-6049.
- [20] Rozanov V V, Kokhanovsky A A. Semianalytical cloud retrieval algorithm as applied to the cloud top altitude and the cloud geometrical thickness determination from top-of-atmosphere reflectance measurements in the oxygen A band[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, 109(D5): D05202.
- [21] Zhang W Q. Development and application of HECORA cloud retrieval algorithm based on hyperspectral satellite data[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019: 9-13.
- 张文强. 基于高光谱卫星数据的 HECORA 云反演算法开发和应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019: 9-13.
- [22] Platt U. Differential optical absorption spectroscopy (DOAS) in air monitoring by spectroscopic techniques [M]//Sigrist M W. Air monitoring by spectroscopic techniques. New York: John Wiley & Sons, 1994: 27-84.
- [23] Chance K V, Spurr R J D. Ring effect studies: Rayleigh scattering, including molecular parameters for rotational Raman scattering, and the Fraunhofer spectrum[J]. Applied Optics, 1997, 36(21): 5224-5230.
- [24] Vandaele A C, Hermans C, Simon P C, et al. Fourier transform measurement of NO<sub>2</sub> absorption cross-section in the visible range at room temperature [J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 1996, 25(3): 289-305.
- [25] Bogumil K, Orphal J, Homann T, et al. Measurements of molecular absorption spectra with the SCIAMACHY pre-flight model: instrument characterization and reference data for atmospheric remote-sensing in the 230-2380 nm region[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2003, 157(2/3): 167-184.
- [26] Thalman R, Volkamer R. Temperature dependent absorption cross-sections of O<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> collision pairs between 340 and 630 nm and at atmospherically relevant pressure[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2013, 15(37): 15371-15381.
- [27] Liu J, Si F Q, Zhou H J, et al. Measurement of atmospheric water vapor column density with passive differential optical absorption spectroscopy technology [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0801002.
- 刘进, 司福祺, 周海金, 等. 被动差分吸收光谱技术测量大气中水汽垂直柱浓度[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0801002.