

高分五号大气痕量气体差分吸收光谱仪 观测数据的火山喷发SO₂总量反演

闫欢欢¹, 王后茂², 王维和¹, 张兴赢¹

1. 国家卫星气象中心 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081;

2. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

摘要: 火山喷发产生的高浓度SO₂气体及其远距离输送会对全球气候变化和航空飞行安全产生重要影响。卫星遥感技术以大面积连续观测、高时空分辨率等优势成为大气SO₂监测的重要手段之一。作为中国第一颗紫外可见光波段的高光谱载荷, 高分五号卫星大气痕量气体差分吸收光谱仪(GF-5 EMI)通过探测地球大气或表面反射、散射的紫外辐射来解析SO₂总量的分布和变化。本文首先基于大气辐射传输模型SCIATRAN, 选择中低纬地区地表类型均一的海洋区域像元, 模拟了典型大气条件下的晴空天顶反照率, 用以评价EMI载荷天顶观测光谱的精度。其次, 基于TROPOMI L1 Radiance辐亮度数据和DOAS反演原理, 经477 nm O₄云筛选、光谱定标、慢变剔除、斜柱转垂直柱等步骤后, 获得同一火山喷发区域的SO₂总量反演结果并与TROPOMI官方offline L2 SO₂产品进行对比分析。最后, 利用GF-5 EMI UV-2通道观测数据, 采用DOAS算法反演获得GF-5 EMI大气SO₂总量, 并将反演结果与国际同类载荷S5P/TROPOMI SO₂总量结果进行比较分析, 评判GF-5 EMI在全球火山活动SO₂变化监测方面的能力。结果显示, 300—400 nm波段范围内, 海洋区域采样点EMI观测光谱值低于SCIATRAN模拟光谱值, EMI与TROPOMI观测光谱呈现出相似的系统性偏差。基于高空间高光谱分辨率的TROPOMI L1 Radiance辐亮度数据、315—327 nm、325—335 nm和360—390 nm共3个波段窗口、以及上述DOAS反演原理获得的SO₂结果与TROPOMI官方发布的offline L2 SO₂产品结果相关性较高, 两者的相关系数可达到0.97—0.99, 相对偏差在3%—9%。GF-5 EMI能够获取火山喷发SO₂排放的时空分布特征, 并与国际同类载荷TROPOMI反演结果具有较高的空间一致性, 能够满足全球火山喷发监测、预警及其气候影响研究的应用需求。

关键词: 遥感, GF-5 EMI, 火山, SO₂总量, DOAS, TROPOMI

引用格式: 闫欢欢, 王后茂, 王维和, 张兴赢. 2021. 高分五号大气痕量气体差分吸收光谱仪观测数据的火山喷发SO₂总量反演. 遥感学报, 25(11): 2326—2338

Yan H H, Wang H M, Wang W H and Zhang X Y. 2021. Volcanic SO₂ retrieved from GF-5 Environmental trace gas Monitoring Instrument. National Remote Sensing Bulletin, 25(11): 2326—2338 [DOI: 10.11834/jrs.20211088]

1 引言

大气中SO₂来源主要有有人为源(燃煤电厂、炼钢厂等工业排放)和自然源(火山和含硫矿石的分解等)。城市地区近地表高浓度SO₂不仅会引发眼睛、鼻子和喉咙等一系列不适疾病(Benkovitz等, 2006)、破坏生态系统平衡(Jernelov, 1983; Larssen等, 2006; Zhao和Sun, 1986), 而且气态SO₂向固体硫酸盐的二次化学转化增加了城市霾天

气的发生频率(He等, 2002, 2012; Jiang等, 2012; Yang等, 2013; Zhang等, 2012; 陈良富等, 2009)。自然界火山喷发短时间内产生大量SO₂气体、其后SO₂的远距离传输及气粒转换生成的硫酸盐颗粒物不仅影响全球辐射能量平衡(Mccormick等, 1995), 而且易造成对流层顶或平流层航空飞行事故(Sigurdsson等, 2000), 例如1989—12—15阿拉斯加州Redoubt火山SO₂引起的飞机引擎熄火迫降事件(Casadevall, 1994)。

收稿日期: 2021-03-23; 预印本: 2021-07-22

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2019YFC0214603); 高分辨率对地观测系统重大项目(编号:05-Y20A16-9001-15); 许建民气象卫星创新中心

第一作者简介: 闫欢欢, 1986年生, 女, 副研究员, 研究方向为大气成分卫星遥感反演算法、反演产品精度评估、污染气体对大气化学和气候影响分析等。E-mail: yanhuanhuan136@126.com

卫星遥感技术具有覆盖范围广、周期观测能力强、空间尺度连续等优点, 由于SO₂在紫外波段的强吸收特征, 卫星天顶观测光谱中包含了大气SO₂含量信息。因此卫星遥感技术可应用于城市群和区域尺度SO₂的动态监测和短临预报 (Fishman等, 2008; Martin, 2008), 也可用于监测火山喷发前后的SO₂浓度时空分布及扩散趋势, 以弥补地面监测的局限性 (Krueger, 1983; Carn等, 2005, 2007, 2009), 如仪器维护、设备成本和空间连续性等。随着GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) (Burrows等, 1999; Khokhar等, 2005; Eisinger和Burrows, 1998)、SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectrometer for Atmospheric CHartographY) (Gottwald等, 2006; Richter等, 2006)、OMI (Ozone Monitoring Instrument) (Levelt等, 2006)、GOME-2 (Global Ozone Monitoring Experiment-2) (Heue等, 2010; Munro等, 2006; Richter, 2009)、OMPS (Ozone Mapping and Profiler Suite) (Yang等, 2013; Flynn等, 2006)、TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument) (Theys等, 2019; Voors等, 2017)和GF-5/EMI (孙允珠等, 2018; 周海金等, 2012)等一系列高光谱紫外探测仪的发射, 使得卫星探测被广泛应用于全球SO₂气体变化的监测以及气候变化、大气化学以及大气环境研究。其中EMI载荷作为中国第一颗紫外可见光波段的高光谱载荷, 其SO₂产品的精度和应用情况受到国内外广泛关注。

2 卫星观测

2.1 GF-5 EMI

大气痕量气体差分吸收光谱仪 (EMI) 搭载在高分五号 (GF-5) 卫星上 (孙允珠等, 2018; 周海金等, 2012), 于2018-05-09在太原卫星发射中心使用长征四号丙运载火箭成功发射。EMI采用太阳同步轨道的天底测量方式, 本地赤道过境时间约为13:30 pm, 轨道覆盖114°大视场, 通过探测地球大气或表面反射、散射的紫外/可见光辐射来解析痕量气体成分NO₂、SO₂、O₃等的全球/区域分布和变化。EMI采用Offner成像光谱仪, 仪器光谱范围为240—710 nm, 光谱分辨率 (半宽) 为0.3—0.5 nm (视波长和观测角度而定), 光栅分光, 4个光谱通道设计 (UV1: 240—315 nm、UV2: 311—

403 nm、VIS1: 401—550 nm、VIS2: 545—710 nm), 每个通道采用一个面阵CCD探测器, 同时记录空间和光谱信息, 空间分辨率为48 km×13 km, 可实现对NO₂、SO₂、O₃等关键大气成分的每日全球观测。2020-05高分五号在轨运行突发故障, 导致无法获得后续GF-5 EMI观测数据。

2.2 TROPOMI

TROPOMI是搭载在太阳同步轨道卫星“哨兵5号”先驱卫星S5P (Sentinel-5 Precursor) 上的单一有效载荷, 本地赤道过境时间约为13:30 pm。它是一种推扫式成像光谱仪, 具有紫外—可见—近红外8个光谱波段的全球日覆盖探测能力。其中紫外波段的光谱分辨率0.5 nm (与OMI相当), 紫外和可见光通道的空间分辨率可达3.5 km×5 km, 可有效的观测全球大气痕量气体组分, 包括NO₂、O₃、SO₂、HCHO、CH₄、CO和气溶胶等重要的与人类活动密切相关的指标。本文所用TROPOMI数据的下载地址为[https://s5phub.copernicus.eu/\[2021-03-23\]](https://s5phub.copernicus.eu/[2021-03-23])。

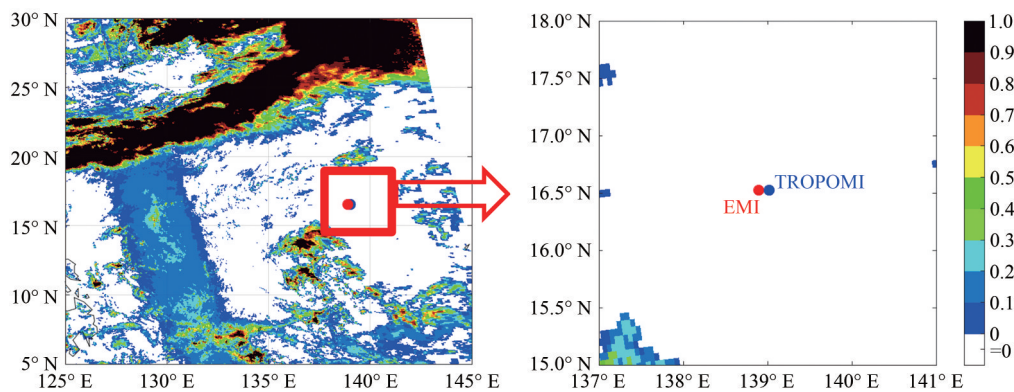
2.3 EMI、TROPOMI观测光谱与SCIATRAN模拟光谱的比较

选择中低纬地区地表类型均一的海洋区域像元, 基于大气辐射传输模型SCIATRAN V4.1 (Rozanov等, 2005), 设置与卫星过境时刻采样像元相同的日期、经纬度和观测几何角度, 光谱分辨率设置为0.5 nm, 地表反射率设置为0.03 (Tilstra等, 2017), 选用Chance和Kurucz (2010) 光谱作为太阳输入光谱, 模拟了4月份15°N典型大气条件下的晴空天顶反照率, 用以评价EMI和TROPOMI载荷天顶观测光谱的精度。这里选择晴空像元的方法为, 首先避开sun glint太阳耀斑区域, 其次依据TROPOMI云量产品和FY-3D真彩图寻找无云区, 挑选无云采样像元点。针对海洋区域, 本文选择2019-04-17无云区的两个采样像元点进行光谱比较分析。本文只针对2019-04-17两个采样点进行了比较分析, 但载荷光谱数据的对比评估仍需要不同日期、不同地点、不同观测角度等条件下的大量比较分析。

(1) 北纬15°海洋区。该无云区范围大概为经度: 137°E—141°E, 纬度: 15°N—18°N, 挑选出离中心位置处距离最近的EMI和TROPOMI像元,

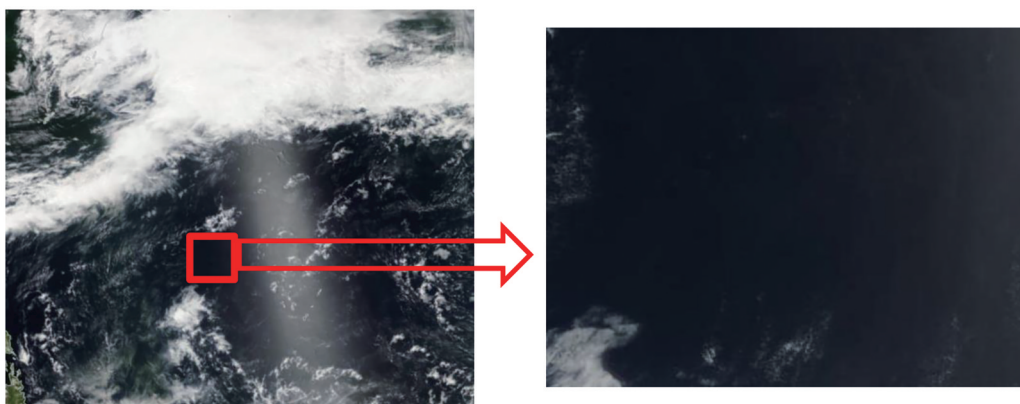
如图1红点和蓝点所示。图1中挑选EMI像元的位置和角度信息如下：轨道行号为776，轨道列号为8，太阳天顶角为 11.0323° ，卫星观测天顶角为 52.7386° ，相对方位角为 19.1445° ，纬度为 16.5264°N ，经度为 138.8970°E 。图1中挑选

TROPOMI像元的位置和角度信息如下：轨道行号为1642，轨道列号为391，太阳天顶角为 27.1495° ，卫星观测天顶角为 48.2061° ，相对方位角为 177.2560° ，纬度为 16.5241°N ，经度为 139.0214°E 。



(a) TROPOMI云量分布图,红点为EMI选择像元位置,蓝点为TROPOMI选择像元位置

(a) TROPOMI cloud fraction distribution, in which red dot represent EMI pixel location and blue dot represent TROPOMI pixel location



(b) FY-3D真彩图

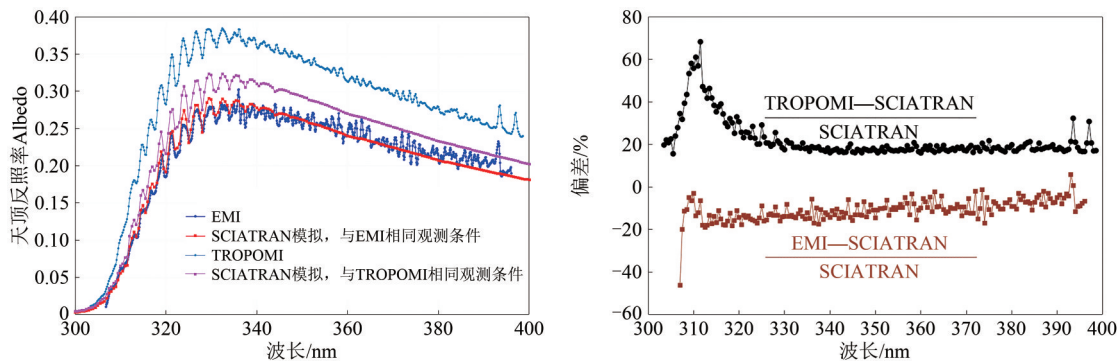
(b) FY-3D true color picture

图1 基于TROPOMI云量产品和FY-3D真彩图挑选海洋区域区域采样点1

Fig. 1 Selected sampling point 1 in the ocean region based on TROPOMI cloud products and FY-3D true-color maps

图2为EMI、TROPOMI观测光谱与SCIATRAN模拟光谱的比较,图2中EMI辐亮度和辐照度所用数据文件名为GF5_EMI_20190417_005003_L10000_006644_UV2.h5和GF5_EMI_20180612_000510_L10_000000000_UV2_Irradiance.h5, TROPOMI辐亮度和辐照度所用数据文件名为S5P_OFFL_L1B_RA_BD3_20190417T034122_20190417T052252_07814_01_010000_20190417T070855.nc和S5P_OFFL_L1B_IR_UVN_20190417T015952_20190417T034122_07813_01_010000_20190417T052845.nc。在该采样

点, 300—400 nm波段范围内, EMI与SCIATRAN模拟光谱的偏差较多在 -20% — 0 范围内, EMI观测光谱值低于SCIATRAN模拟光谱值, 而TROPOMI与SCIATRAN模拟光谱的偏差较多在 18% — 20% 范围内, TROPOMI观测光谱值高于SCIATRAN模拟光谱值。300—400 nm波段范围内, EMI和TROPOMI观测光谱具有相似的系统性偏差。相较于EMI, 320—390 nm波段范围内TROPOMI与SCIATRAN的偏差值波动范围较小。



(a) 300—400 nm 波段范围内 EMI、TROPOMI 天顶观测光谱与 SCIATRAN 模拟光谱
(a) EMI and TROPOMI TOA albedo and SCIATRAN simulated spectra in the band range of 300—400 nm

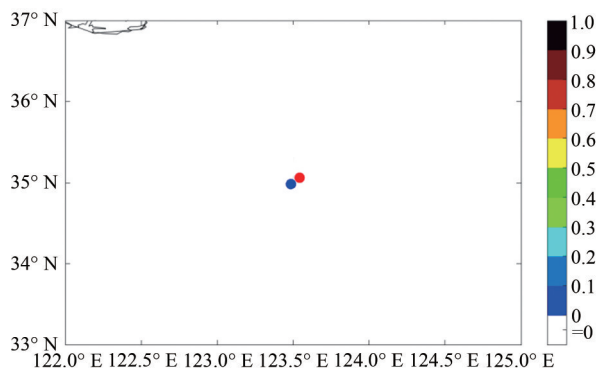
(b) EMI、TROPOMI 天顶观测光谱与 SCIATRAN 模拟光谱的偏差
(b) Deviation between the TOA albedo of EMI and TROPOMI and the simulated spectra of SCIATRAN

图2 EMI、TROPOMI 天顶观测光谱与 SCIATRAN 模拟光谱比较, 采样点 1

Fig. 2 Comparison of EMI and TROPOMI Top-Of-Atmosphere (TOA) albedo and SCIATRAN simulated spectra at sampling point 1

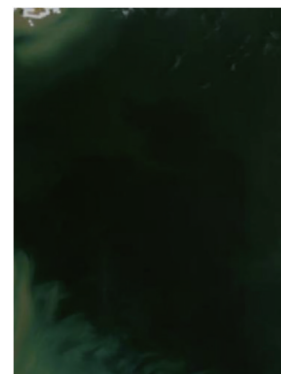
(2) 渤海区域。该无云区范围大概为纬度 33°N—37°N, 经度 122°E—125°E, 挑选出离中心位置处距离最近的 EMI 和 TROPOMI 像元, 如图 3 红点和蓝点所示。图 3 中挑选 EMI 像元的位置和角度信息如下: 轨道行为 904, 轨道列号为 141, 太阳天顶角为 30.5887°, 卫星观测天顶角为 26.2937°, 相对方位角为 146.6795°, 纬度为 35.0604°N, 经度为 123.5435°E。图 3 中挑选 TROPOMI 像元的位置和角度信息如下: 轨道行为 1961, 轨道列号为 149, 太阳天顶角为 27.379°, 卫星观测天顶角为 21.9472°, 相对方位角为 43.5483°, 纬度为 34.9826°N, 经度为 123.4837°E。

相对方位角为 146.6795°, 纬度为 35.0604°N, 经度为 123.5435°E。图 3 中挑选 TROPOMI 像元的位置和角度信息如下: 轨道行为 1961, 轨道列号为 149, 太阳天顶角为 27.379°, 卫星观测天顶角为 21.9472°, 相对方位角为 43.5483°, 纬度为 34.9826°N, 经度为 123.4837°E。



(a) TROPOMI 云量分布图, 红点为 EMI 选择像元位置, 蓝点为 TROPOMI 选择像元位置

(a) TROPOMI cloud fraction distribution, in which red dot represent EMI pixel location and blue dot represent TROPOMI pixel location



(b) FY-3D 真彩图
(b) FY-3D true color picture

图3 基于 TROPOMI 云量产品和 FY-3D 真彩图筛选海洋区域区域, 采样点 2

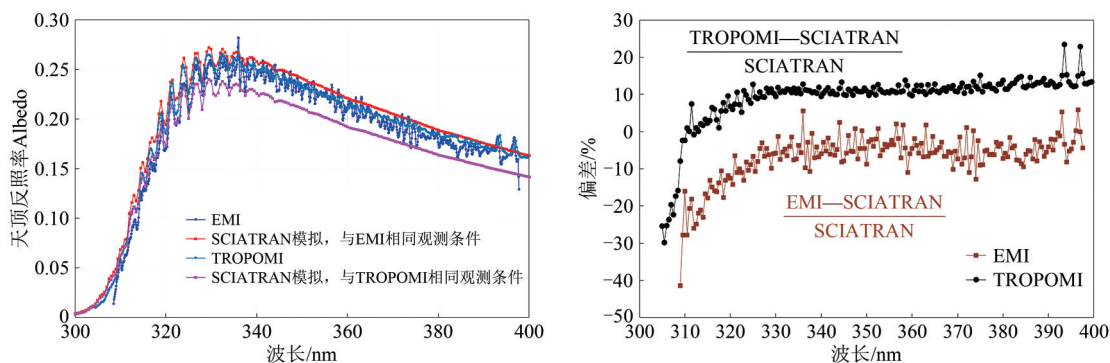
Fig. 3 Selected sampling point 2 in the ocean region based on TROPOMI cloud products and FY-3D true-color maps

图 4 为 EMI、TROPOMI 观测光谱与 SCIATRAN 模拟光谱的比较, 图 4 中 EMI 辐亮度和辐照度所用数据文件名为 GF5_EMI_20190417_005005_L10000_006757_UV2.h5 和 GF5_EMI_20180612_000510_L1000000000_UV2_Irradiance.h5, TROPOMI 辐亮度和辐照度所用数据文件名为 S5P_OFFL_L1B_RA_

BD3_20190417T034122_20190417T052252_07814_01_010000_20190417T070855.nc 和 S5P_OFFL_L1B_IR_UVN_20190417T015952_20190417T034122_07813_01_010000_20190417T052845.nc。在该采样点, 300—400 nm 波段范围内, EMI 与 SCIATRAN 模拟光谱的偏差大部分在 -10%—0 范围内, EMI 观

测光谱值低于 SCIATRAN 模拟光谱值（与采样点 1 一致），而 TROPOMI 与 SCIATRAN 模拟光谱的偏差大部分在 10%—15% 范围内，TROPOMI 观测光

谱值高于 SCIATRAN 模拟光谱值（与采样点 1 一致）。在该采样点，EMI 和 TROPOMI 观测光谱也呈现出相似的系统性偏差。



(a) 300—400 nm 波段范围内 EMI、TROPOMI 天顶观测光谱与 SCIATRAN 模拟光谱

(a) EMI and TROPOMI TOA albedo and SCIATRAN simulated spectra in the band range of 300—400 nm

(b) EMI、TROPOMI 天顶观测光谱与 SCIATRAN 模拟光谱的偏差

(b) Deviation between the TOA albedo of EMI and TROPOMI and the simulated spectra of SCIATRAN

图 4 EMI、TROPOMI 天顶观测光谱与 SCIATRAN 模拟光谱比较, 采样点 2

Fig. 4 Comparison of EMI and TROPOMI Top-of-Atmosphere (TOA) albedo and SCIATRAN simulated spectra at sampling point 2

3 GF-5 EMI SO₂ 总量反演算法简介

本文针对火山喷发 SO₂ 排放卫星监测，选用差分光学吸收光谱法 DOAS 算法进行 SO₂ 总量的遥感反演。反演过程具体详述如下。

3.1 云参数反演

对于 SO₂ 总量的定量遥感反演而言，云参数的精度直接影响 SO₂ 反演的精度，因此云像元的判识及云量估算是 SO₂ 卫星遥感反演过程的首要步骤。本研究依据 477 nm 波段的 O₂-O₂ 吸收带云参数反演算法进行云量估算 (Acarreta 等, 2004; Veeffkind 等, 2016)。该算法假设云为不透明的朗伯反射表面，充分考虑大气的偏振效应和大气廓线的影响，

基于高光谱分辨率大气辐射传输模型 SCIATRAN 在紫外—可见光波段的天顶反照率构建关于观测角度、地表反射率、云量、云压等要素的云高和云量查找表 (表 1)，利用云参数查找表和卫星实际观测差分反演获得的 O₂-O₂ 总量及其他参数，获得卫星实际观测处的云量信息。此外，卫星反演云顶高度和等效辐射云量结果也可作为辐射传输模型输入，进行卫星入瞳处天顶辐射和大气质量因子 AMF 的计算。图 5 为基于 OMI L1B 数据和上述 477 nm 反演算法获得的云量产品与 OMI 官方 L2 云量产品空间分布图比较，大部分地区云量反演结果较一致，可一定程度上说明本研究中所用云参数反演算法的有效性。

表 1 辐射传输模型的输入参数节点设置

Table 1 Nodes for the radiative transfer calculations used for the O₂-O₂ cloud fraction algorithm

参数	数值
Solar zenith angle 太阳天顶角/(°)	0.0, 9.3, 21.2, 32.9, 44.2, 54.9, 64.8, 73.5, 80.8, 86.1
Viewing zenith angle 观测天顶角/(°)	0.0, 9.3, 21.2, 32.9, 44.2, 54.9, 64.8, 73.5
Relative azimuth angle 相对方位角/(°)	0, 30, 60, 90, 120, 150, 180
Surface albedo 地表反射率	0.0, 0.01, 0.025, 0.05, 0.075, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.325, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0
Surface/cloud pressure 地表和云压/hPa	1013, 963, 913, 863, 813, 763, 713, 663, 613, 563, 513, 463, 413, 363, 313, 263, 213, 163, 113, 63
Cloud fraction 云量	-0.1, -0.05, 0.0, 0.01, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.125, 0.15, 0.175, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.95, 1.0, 1.1, 1.2

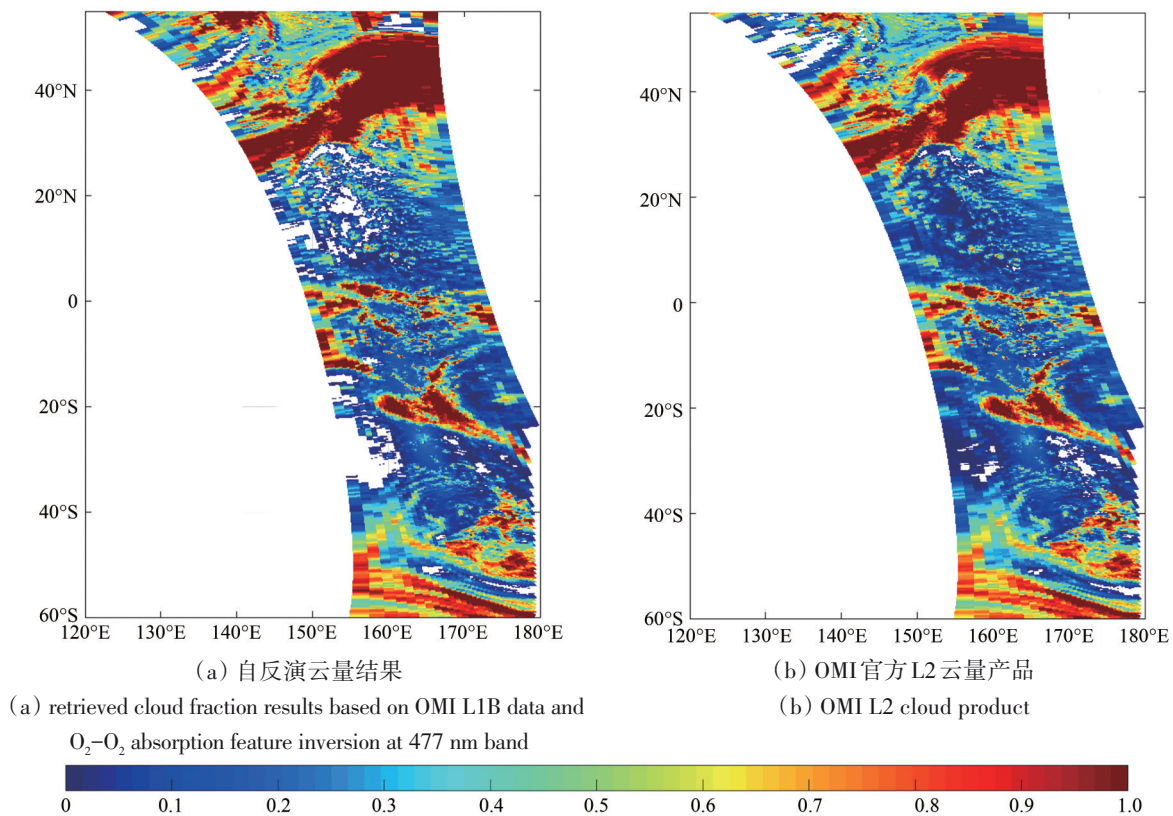


图5 基于OMI L1B数据和477 nm波段 O₂-O₂吸收特征反演的云量产品与OMI官方L2云量产品空间分布图比较 (轨道缺失数据为无效反演值)

Fig. 5 Comparison of cloud fraction retrievals between retrieved cloud fraction results based on OMI L1B data and O₂-O₂ absorption feature inversion at 477 nm band and OMI L2 cloud product (The missing data in the figure are invalid inversion values)

3.2 光谱定标

利用太阳光谱中的夫琅禾费线(暗线)对EMI辐亮度观测进行光谱定标处理(van Geffen和van Oss, 2003)。需要注意的是因本文反演过程中使用海洋参考区域作为背景值,因此实际反演中未对辐照度观测值进行光谱定标,仅对辐亮度观测数据进行光谱定标处理。具体过程为,(1)选择高分辨率的太阳参考光谱(Chance和Kurucz, 2010),将参考光谱与EMI仪器的狭缝函数进行卷积;(2)将太阳参考光谱与对地辐亮度观测光谱的比值进行低阶多项式拟合,对辐亮度观测光谱值进行加强处理;(3)在SO₂反演通道内,对每条对地辐亮度观测光谱,通过高斯寻峰处理,将特征谱线峰位像元编号和对应波长进行一一配对,采用最小二乘法对谱线波长和峰位编号数据进行三阶多项式拟合分析,得到每个观测像元的光谱定标方程,完成EMI辐亮度观测的光谱定标。

3.3 SO₂斜柱总量反演

基于差分光学吸收光谱法DOAS算法(Platt和

Stutz, 2008; 闫欢欢等, 2016),利用紫外315—327 nm(低浓度)或325—335 nm(中浓度)或360—390 nm(高浓度)窗口或以其为中心的扩展窗口的卫星天顶高光谱探测量,获得太阳辐射以及反射到卫星传感器的对地观测辐射来反演整个光路的SO₂斜柱总量。这里需要注意的是,由于GF-5 EMI太阳辐照度观测数据较少且存在一定的不确定性,因此实际反演过程中,选择近赤道太平洋海洋区域的日平均辐亮度观测数据作为太阳参考光谱,代入DOAS反演公式进行SO₂总量反演。由于探元在沿轨方向上具有相同的衰减系数和系统偏差,该方法可一定程度上降低探测器不均匀性和定标误差带来的条带偏差和系统误差。

首先根据探测仪器的狭缝函数和半宽,将各气体吸收截面数据(315—327 nm和325—335 nm窗口: SO₂+O₃, 360—390 nm窗口: SO₂+NO₂+O₄)卷积到与仪器相同的光谱分辨率,将来源不同的吸收截面与卫星观测光谱进行波长匹配。其次,将大气消光分为随波长快速变化的部分和随波长缓慢

变化的两部分,用低阶多项式表示随波长缓慢变化的部分。利用基于 N_2 和 O_2 散射截面与太阳辐射光谱卷积获得的有效Ring截面算法对Ring效应进行剔除(韩冬等,2011)。最后,对卫星观测值和气体吸收系数进行差分处理,建立大气消光多项式,通过最小二乘拟合,得到大气 SO_2 斜柱总量。

3.4 斜柱总量转换为垂直柱总量

采用德国不莱梅大学环境物理学院设计开发的高光谱分辨率大气辐射传输模型SCIATRAN(Rozanov等,2005),建立关于 SO_2 廓线、 O_3 廓线、观测几何角度、地表反射率、气溶胶、云等多个参数的大气质量因子AMF查找表,计算卫星对应角度的大气质量因子AMF(Air Mass Factor),将反演斜柱总量转换为垂直柱总量。最后使用参考区域方法(Khokhar等,2005;Yan等,2012)来校正随纬度和观测角度变化的背景误差,该方法通常选择太平洋海上区域(假定的 SO_2 排放零值

区)的反演值作为背景校正偏差值,然后其他地区的反演值减同纬度的海上背景偏差值。

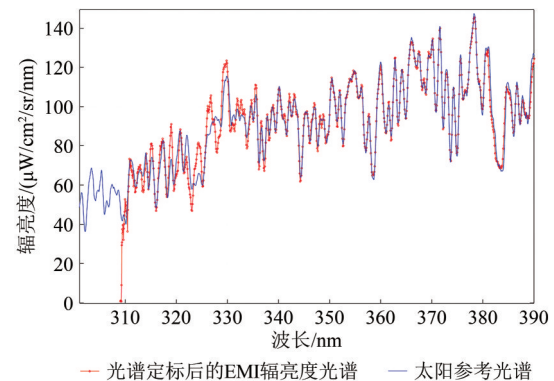


图6 光谱定标后的EMI辐亮度光谱(数据来源为GF5_EMI_20190622_005961_L10000008210_UV2.h5文件,像元行号=100,像元列号=100。需要注意的是,这里EMI辐亮度经低阶多项式加强处理)

Fig. 6 EMI radiance spectrum after spectral calibration(The data source is GF5_EMI_20190622_005961_L10000008210_UV2.h5, row number =100, column number =100. Note that here the EMI radiance is enhanced by a low-order polynomial)

表2 反演设置参数信息

Table 2 Parameter settings for SO_2 column retrieval

参数信息	EMI DOAS	TROPOMI DOAS
反演波段	315—327 nm(低浓度)或325—335 nm(中浓度)或360—390 nm(高浓度)	312—326 nm(低浓度)或325—335 nm(中浓度)或360—390 nm(高浓度)
参考太阳光谱	近赤道太平洋海洋区域平均 SO_2 (Bogumil等,2003) O_3 (Bogumil等,2003)	近赤道太平洋海洋区域平均 SO_2 (Bogumil等,2003;Hermans等,2009) O_3 (Brion等,1998)
反演中包含的吸收气体截面数	NO_2 (Bogumil等,2003) O_4 (Greenblatt等,1990)	NO_2 (Vandaele等,1998) O_4 (Greenblatt等,1990)
Ring效应	基于 N_2 和 O_2 散射截面与太阳辐射光谱卷积	利用辐射传输模型LIDORT-RRS计算
多项式	3—5阶	4—5阶
背景校正	选择太平洋海上区域(假定的 SO_2 排放零值区)的反演值作为背景偏差值	目标区域斜柱总量平均作为背景偏差值

4 反演算法精度评价

闫欢欢等(2016)基于上述反演算法原理和OMI载荷L1B天顶辐射观测数据,实现了DOAS SO_2 反演,并与官方发布L2 BRD(Band Residual Diffeence Algorithm)算法 SO_2 产品进行了比对,结果表明DOAS自反演结果与官方 SO_2 产品的空间分布范围较一致,针对2007-04-07留尼汪岛火山喷发两者监测结果的相关性可达到0.97。同时,基

于大气辐射传输模型SCIATRAN在典型大气和垫面反射率条件下,通过改变 SO_2 浓度信息,仿真模拟 SO_2 反演波段的天顶反照率变化,最后通过仿真模拟实验数据评估了上述DOAS算法的 SO_2 反演不确定性。结果表明随着 SO_2 浓度的增大(20—100 DU),使用反演通道315—327 nm的 SO_2 反演误差约在2%—14%范围内。

为进一步评价上述整个DOAS算法反演流程,本文基于高空间高光谱分辨率的TROPOMI offline

L1B Radiance 辐亮度数据和上述 DOAS 反演原理, 获得同一火山区域的 SO₂ 总量反演结果并与 TROPOMI 官方 offline L2 DOAS SO₂ 产品进行对比分析 (参考 S5P/TROPOMI SO₂ ATBD)。为抑制 SO₂ 吸收饱和而导致反演低估的情况, 这里使用 315—327 nm、325—335 nm 和 360—390 nm 等 3 个波段窗口进行不同浓度情况下的反演。在高浓度 SO₂ 情况下, 短波紫外强烈的吸收易造成观测信号饱和, 降低观测路径上其他 SO₂ 分子对大气层顶观测辐射的贡献, 加上紫外短波段散射强烈及辐射能量较低, 易导致高浓度 SO₂ 情况下反演结果的低估, 因此对于火山高浓度 SO₂ 情况可使用更长紫外波段观测光谱进行反演, 例如 325—335 nm 和 360—390 nm (参考 S5P/TROPOMI SO₂ ATBD)。

结果表明 (图 7), 基于高空间高光谱分辨率的 TROPOMI L1 Radiance 辐亮度数据、315—327 nm、325—335 nm 和 360—390 nm 3 个波段窗口, 以及上述 DOAS 反演原理获得的 SO₂ 结果与 TROPOMI 官方发布的 offline L2 SO₂ 产品结果相关性较高。该图中所用 TROPOMI L1B Radiance 示例数据为

S5P_OFFL_L1B_RA_BD3_20190622T01245820190622T030628_08749_01_010000_20190622T044841.nc, 黑色直线为 Y=X 线, 红色直线为相关性线性回归拟合线。当 SO₂ 斜柱总量在 0—2500 DU 之间时, 3 个反演窗口内两者的相关系数可达到 0.97—0.99。低浓度 SO₂ 情况下 (0 DU < SO₂ 斜柱总量 < 100 DU), 315—327 nm 波段反演结果的平均相对偏差 (|TROPOMI offline L2 SO₂—自反演结果|/TROPOMI offline L2 SO₂) 为 7%。中等浓度 SO₂ 情况下 (100 DU < SO₂ 斜柱总量 < 500 DU), 325—335 nm 波段反演结果的平均相对偏差为 9%, 定量值上两者的一致性较好, 高值区 TROPOMI 反演值大于 EMI。高浓度 SO₂ 情况下 (SO₂ 斜柱总量 > 500 DU), 360—390 nm 波段反演结果的平均相对偏差约为 3%, 随着 SO₂ 浓度增大自反演结果存在一定程度的偏低。基于 TROPOMI L1B Radiance 辐亮度数据的自反演结果与官方发布 L2 SO₂ 结果的差异可能与反演过程中吸收截面的来源、光谱定标精度、Ring 计算、反演具体公式、背景误差校正等多因素的差异有关。

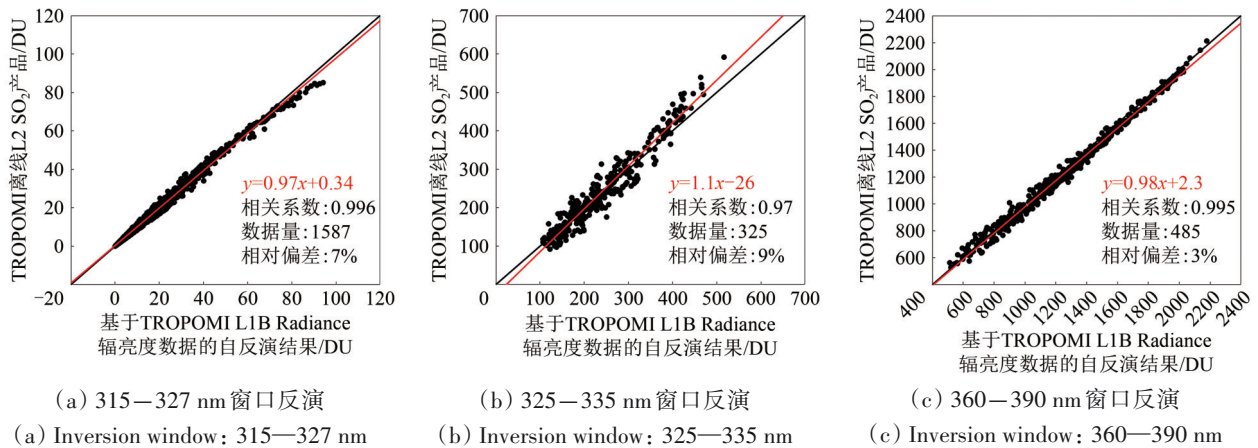


图 7 不同浓度情况下, 基于 TROPOMI L1B Radiance 辐亮度数据的自反演结果与官方发布 L2 SO₂ 结果比较 (1 DU = 2.69×10¹⁶ 分子数/cm²)

Fig. 7 Comparison of SO₂ column retrievals at different SO₂ concentrations (1 DU = 2.69×10¹⁶ molec./cm²)

5 GF-5 EMI 火山喷发 SO₂ 监测及比较分析

将上述星载 SO₂ 反演算法及参数化方案应用于高分五号大气痕量气体差分吸收光谱仪 EMI 观测数据, 利用紫外波段观测反演获得全球火山活动 SO₂ 排放监测的空间分布图。通过与国际同类载荷 TROPOMI offline L2 SO₂ 遥感反演结果的比较, 评

判 GF-5 EMI 在全球大气 SO₂ 变化监测方面的能力。

5.1 千岛群岛火山喷发监测

在经历了 95 a 的休眠后, 2019-06-22 俄罗斯千岛群岛附近的 Raikoke 火山爆发 (全球火山监测网站 <https://volcano.si.edu/> [2021-03-23])。喷发产生了含有大量 SO₂ 成分的火山灰柱 (图 8 (d) 真彩图), 喷发高度达到 10—13 km, 造成多架航班

改变航线。

图8(a)显示,利用EMI紫外UV2波段数据反演监测出2019-06-22北半球千岛群岛上空有高浓度的火山喷发 SO_2 排放。图8(b)为欧洲TROPOMI在同日相同区域观测到的火山高浓度 SO_2 排放情况。从图8中可以看出,GF-5 EMI SO_2 总量反演结果与TROPOMI具有较一致的空间分布特征,都显示出夹杂着大量 SO_2 成分的火山灰柱在高空急气流和气旋作用下飘向东北方向。为便于不同载荷反演结果的定量比较,对TROPOMI和EMI载荷轨道反演结果进行 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ 等经纬度网格化重采样插值处理,以减少不同载荷空间分辨率

和地面经纬度位置差异带来的影响。然后筛选EMI SO_2 总量大于0和TROPOMI SO_2 总量大于0的像元,进行研究区域不同载荷反演结果的逐像元比较。EMI与TROPOMI在千岛群岛及附近区域反演结果的逐像元比较结果显示(图9),在海洋 SO_2 低浓度区,EMI SO_2 总量反演结果存在零星分散的噪声高值,这可能与云像元漏筛有关;在火山喷发 SO_2 高浓度区,EMI SO_2 总量反演结果高于TROPOMI,高值区约77%比例的像元差值在100 DU以内,这可能与EMI与TROPOMI官方产品 SO_2 反演具体策略和不同载荷成像机理的差异有关。

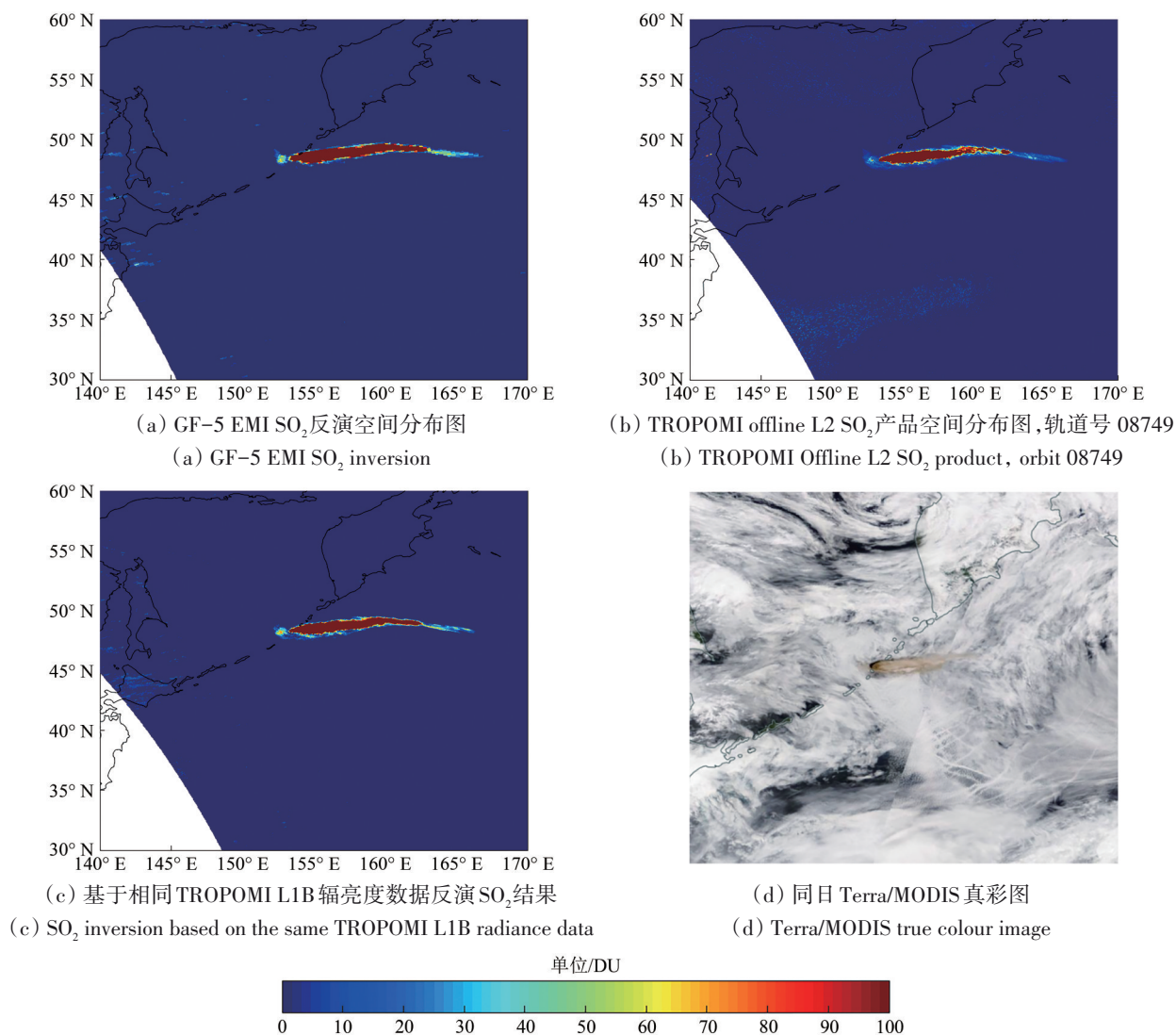


图8 卫星遥感监测千岛群岛火山喷发 SO_2 空间分布图,2019-06-22(对于云遮挡像元以背景值进行填充)

Fig. 8 Spatial distribution of volcanic SO_2 in Kuril Islands monitored by satellite remote sensing on June 22, 2019

(The cloud cover pixel in the figure is filled with background values)

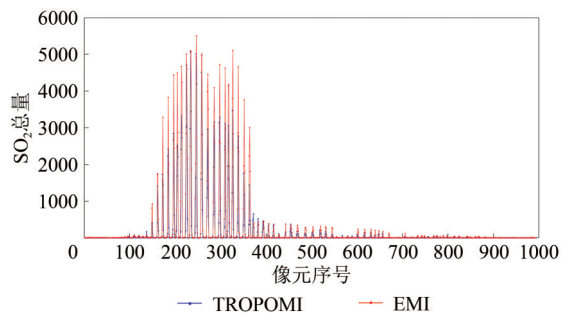


图9 EMI与TROPOMI在千岛群岛火山喷发附近区域反演结果的逐像元比较(缺失数据为无效反演值。2019-06-22, 研究区域为 150°E—170°E, 43°N—51°N)

Fig. 9 Comparison of inversion results between EMI and TROPOMI in the area near volcanic eruption in Kuril Islands (The missing data in the figure are invalid inversion values. June 22, 2019, the study area is longitude: 150°E—170°E, latitude: 43°N—51°N)

不同载荷 SO₂ 总量反演结果的比较可表明, 虽然中国 GF-5 EMI SO₂ 反演结果与国际上同类载荷 TROPOMI 反演结果有些差异, 但 GF-5 EMI 高光谱遥感测量具有高的空间分辨率和探测精度, SO₂ 总量反演精度能够满足全球火山喷发监测、预警及其气候影响研究的应用需求。

5.2 秘鲁 Ubinas 火山监测

IGP (Instituto Geofísico del Perú) 报告显示, 自 2019-07-19 起, 秘鲁 Ubinas 火山活动持续加强, 火山喷发高度达 9.4 km。GF-5 EMI 载荷在 Ubinas 火山周围监测到高浓度的 SO₂ 排放, 且次日的卫星结果显示高浓度 SO₂ 气体向东南方向飘移(图 10)。2019-07-21, GF-5 EMI 监测到南半球大西洋海域出现高浓度的 SO₂ 气团。

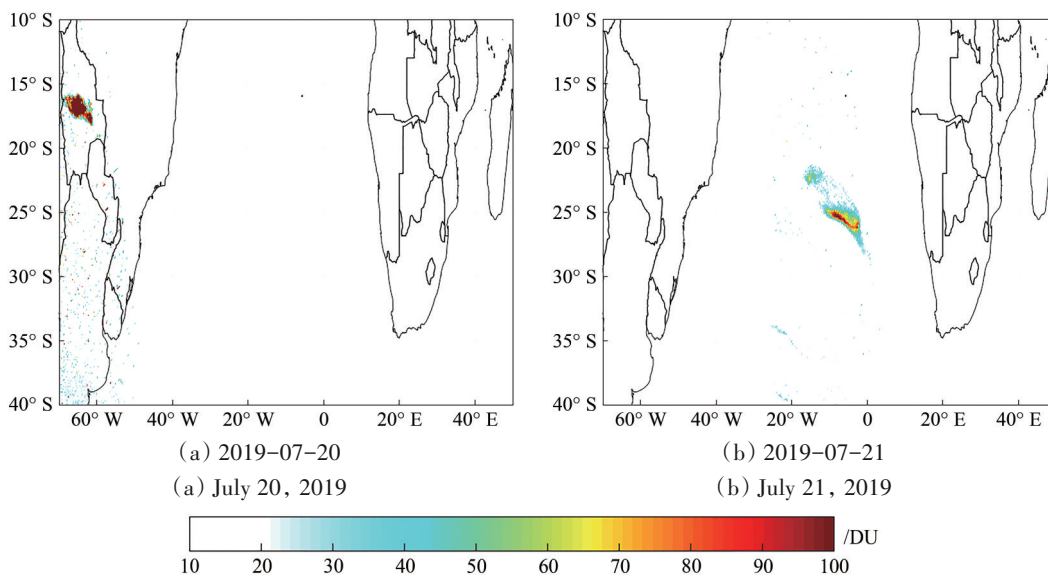


图 10 GF-5 EMI 卫星遥感监测秘鲁 Ubinas 火山喷发 SO₂ 空间分布图

Fig. 10 Spatial distribution of SO₂ in Ubinas volcano eruption monitored by GF-5 EMI satellite remote sensing

6 结 论

本文基于高分五号大气痕量气体差分吸收光谱仪 EMI 天顶反照率观测数据和差分光学吸收光谱法 DOAS 算法, 利用 SO₂ 在紫外波段差分吸收特征反演获得大气 SO₂ 总量。通过与大气辐射传输模型 SCIATRAN 仿真模拟和国际同类载荷 S5P/TROPOMI SO₂ 总量产品的比较分析, 结果表明 (1) 相同一级辐亮度数据源下, 本文反演算法 SO₂ 结果与 TROPOMI offline L2 SO₂ 产品结果相关性较高, 两者的相关系数可达到 0.97—0.99, 相对偏差在 3%—9%; (2) 300—400 nm 波段范围内, 海洋

区域采样点 EMI 观测光谱值低于 SCIATRAN 模拟光谱值, EMI 与 TROPOMI 观测光谱呈现出相似的系统性偏差; (3) EMI SO₂ 反演结果可应用于全球火山喷发实时监测、预警及其气候影响研究中。

然而, EMI 载荷对于低浓度 SO₂ 的高精度遥感反演仍存在一定的难度。紫外大气辐射传输过程受大气分子、气溶胶和云粒子散射影响以及平流层 O₃ 强烈吸收, 近地面 SO₂ 吸收作用只是卫星探测信号中的弱信号, 因此高精度的 SO₂ 浓度卫星遥感反演算法一直是大气污染监测的重点和难点, 其精度直接决定了卫星反演产品的应用研究范围。

EMI载荷对于城市群与区域尺度人类活动主导的SO₂动态监测和预报存在一定的难度,原因可能在于(1)EMI仪器在轨运行后,由于发射震动、热真空环境、应力释放、衰变等因素影响,探元均匀性和仪器函数及波长可能发生变化,加上实际在轨运行期间随机引入的杂散光和暗电流噪声也无法准确定量评估,从而导致EMI仪器对城市区域低浓度SO₂反演存在很大的不确定性;(2)DOAS反演方案有待优化,反演结果的精度受多种因素影响,例如云量反演误差、光谱定标和辐射定标误差、O₃吸收影响、AMF误差、气溶胶影响误差等因素。国产卫星对于全球SO₂总量定量遥感监测,特别是城市区域人类排放SO₂浓度监测方面,还需要在反演算法和定标方法上进一步的研究。

志 谢 感谢TROPOMI研究团队在一级和二级产品数据等方面的支持。感谢中国科学院安徽光学精密机械研究所EMI研究团队在一级数据方面的支持。感谢德国不莱梅大学在高光谱分辨率大气辐射传输模型SCIATRAN模拟方面提供的支持和帮助。感谢韩冬博士和余超博士在遥感反演DOAS算法和Ring效应计算方面的帮助。感谢杨太平博士在云参数反演方面的帮助。

参考文献(References)

- Acarreta J R, De Haan J F and Stammes P. 2004. Cloud pressure retrieval using the O₂-O₂ absorption band at 477 nm. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D5): D05204 [DOI: 10.1029/2003JD003915]
- Benkovitz C M, Schwartz S E, Jensen M P and Miller M A. 2006. Attribution of modeled atmospheric sulfate and SO₂ in the Northern Hemisphere for June-July 1997. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(12): 4723-4738 [DOI: 10.5194/ACP-6-4723-2006]
- Bogumil K, Orphal J, Homann T, Voigt S, Spietz P, Fleischmann O C, Vogel A, Hartmann M, Kromminga H, Bovensmann H, Frerick J and Burrows J P. 2003. 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. *Journal of Photochemistry & Photobiology A Chemistry*, 157: 167-184. [DOI: 10.1016/S1010-6030(03)00062-5]
- Brion J, Chakir A, Charbonnier J, Daumont D, Parisse C and Malicet J. 1998. Absorption spectra measurements for the ozone molecule in the 350—830 nm region. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 30: 291-299. [DOI: 10.1023/A:1006036924364]
- Burrows J P, Weber M, Buchwitz M, Rozanov V, Ladstätter-Weißmayer A, Richter A, DeBeek R, Hoogen R, Bramstedt K, Eichmann K U and Eisinger M. 1999. The global ozone monitoring experiment (GOME): mission concept and first scientific results. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56(2): 151-175 [DOI: 10.1175/1520-0469(1999)056<0151:TGOMEG>2.0.CO;2]
- Carn S A, Krueger A J, Krotkov N A, Yang K and Evans K. 2009. Tracking volcanic sulfur dioxide clouds for aviation hazard mitigation. *Natural Hazards*, 51(2): 325-343 [DOI: 10.1007/s11069-008-9228-4]
- Carn S A, Krueger A J, Krotkov N A, Yang K and Levelt P F. 2007. Sulfur dioxide emissions from Peruvian copper smelters detected by the Ozone Monitoring Instrument. *Geophysical Research Letters*, 34(9): L09801 [DOI: 10.1029/2006GL029020]
- Carn S A, Strow L L, de Souza-Machado S, Edmonds Y and Hannon S. 2005. Quantifying tropospheric volcanic emissions with AIRS: the 2002 eruption of Mt. Etna (Italy). *Geophysical Research Letters*, 32(2): L02301 [DOI: 10.1029/2004GL021034]
- Casadevall T J. 1994. The 1989-1990 eruption of Redoubt Volcano, Alaska: impacts on aircraft operations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 62(1/4): 301-316 [DOI: 10.1016/0377-0273(94)90038-8]
- Chance K and Kurucz R L. 2010. An improved high-resolution solar reference spectrum for earth's atmosphere measurements in the ultraviolet, visible, and near infrared. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 111(9): 1289-1295 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2010.01.036]
- Chen L F, Tao J H, Wang Z F, Li S S, Han D, Zhang Y, Yu C and Su L. 2009. Monitoring of air quality during haze days in Beijing and its surround area during Olympic games. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 4(4): 256-265 (陈良富, 陶金花, 王子峰, 李莘莘, 韩冬, 张莹, 余超, 苏林. 2009. 奥运期间北京及周边地区霾天空气质量监测. *大气与环境光学学报*, 4(4): 256-265) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2009.04.002]
- Eisinger M and Burrows J P. 1998. Tropospheric sulfur dioxide observed by the ERS-2 GOME instrument. *Geophysical Research Letters*, 25(22): 4177-4180 [DOI: 10.1029/1998GL900128]
- Fishman J, Bowman K W, Burrows J P, Richter A, Chance K V, Edwards D P, Martin R V, Morris G A, Pierce R B, Ziemke J R, Al-Saadi J A, Creilson J K, Schaack T K and Thompson A M. 2008. Remote sensing of tropospheric pollution from space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(6): 805-822 [DOI: 10.1175/2008BAMS2526.1]
- Flynn L E, Seftor C J, Larsen J C and Xu P. 2006. The ozone mapping and profiler suite//Qu J J, Gao W, Kafatos M, Murphy R E and Salomonson V, eds. *Earth Science Satellite Remote Sensing*. Berlin, Heidelberg: Springer [DOI: 10.1007/978-3-540-37293-6_15]
- Gottwald M, Bovensmann H, Lichtenberg G, Noel S, von Bargaen A, Slijkhuys S, Piters A, Hoogeveen R, von Savigny C and Buchwitz M. 2006. Sciamachy, Monitoring the Changing Earth's Atmosphere. Germany: DLR
- Greenblatt G D, Orlando J J, Burkholder J B and Ravishankara A R. 1990. Absorption measurements of oxygen between 330 and 1140 nm. *Journal of Geophysical Research*, 95(D11): 18577-18582. [DOI: 10.1029/JD095iD11p18577]
- Han D, Chen L F, Tao J H, Su L, Li S S, Yu C, Zhang Y and He B H. 2011. A convolution algorithm to calculate differential cross sec-

- tions of the Ring effect in the Earth's atmosphere based on rotational Raman scattering. *Scientia Sinica: Earth Sciences*, 54(9): 1407-1412 (韩冬, 陈良富, 陶金花, 苏林, 李莘莘, 余超, 张莹, 贺宝华. 2011. 基于转动拉曼散射的大气 Ring 效应差分截面卷积算法研究. *中国科学: 地球科学*, 41(10): 1524-1529) [DOI: 10.1007/s11430-011-4226-x]
- He H, Li C, Loughner C P, Li Z Q, Krotkov N A, Yang K, Wang L, Zheng Y F, Bao X D, Zhao G Q and Dickerson R R. 2012. SO₂ over central China: measurements, numerical simulations and the tropospheric sulfur budget. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D16): D00K37 [DOI: 10.1029/2011JD016473]
- He K B, Huo H and Zhang Q. 2002. Urban air pollution in China: current status, characteristics, and progress. *Annual Review of Energy and the Environment*, 27: 397-431 [DOI: 10.1146/annurev.energy.27.122001.083421]
- Hermans C, Vandaele A and Fally S. 2009. Fourier transform measurements of SO₂ absorption cross sections: I. Temperature dependence in the 24 000-29 000 cm⁻¹ (345-420 nm) region. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 110: 756-765. [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2009.01.031]
- Heue K P, Brenninkmeijer C A M, Wagner T, Mies K, Dix B, Frieß U, Martinsson B G, Slemr F and van Velthoven P F J. 2010. Observations of the 2008 Kasatochi volcanic SO₂ plume by CARIBIC aircraft DOAS and the GOME-2 satellite. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(10): 4699-4713 [DOI: 10.5194/acp-10-4699-2010]
- Jernelov A. 1983. Acid-rain and sulfur-dioxide emissions in China. *Ambio*, 12(6): 362
- Jiang J, Zha Y, Gao J and Jiang J J. 2012. Monitoring of SO₂ column concentration change over China from Aura OMI data. *International Journal of Remote Sensing*, 33(6): 1934-1942 [DOI: 10.1080/01431161.2011.603380]
- Khokhar M F, Frankenberg C, Van Roozendaal M, Beirle S, Kühl S, Richter A, Platt U and Wagner T. 2005. Satellite observations of atmospheric SO₂ from volcanic eruptions during the time-period of 1996-2002. *Advances in Space Research*, 36(5): 879-887 [DOI: 10.1016/j.asr.2005.04.114]
- Krueger A J. 1983. Sighting of El Chichón sulfur dioxide clouds with the nimbus 7 total ozone mapping spectrometer. *Science*, 220 (4604): 1377-1379 [DOI: 10.1126/science.220.4604.1377]
- Larssen T, Lydersen E, Tang D G, He Y, Gao J X, Liu H Y, Duan L, Seip H M, Vogt R D, Mulder J, Shao M, Wang Y H, Shang H, Zhang X S, Solberg S, Aas W, Okland T, Eilertsen O, Angell V, Li Q R, Zhao D W, Xiang R J, Xiao J S and Luo J H. 2006. Acid rain in China. *Environmental Science and Technology*, 40(2): 418-425 [DOI: 10.1021/es0626133]
- Levelt P F, van den Oord G H J, Dobber M R, Malkki A, Visser H, de Vries J, Stammes P, Lundell J O V and Saari H. 2006. The Ozone monitoring instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(5): 1093-1101 [DOI: 10.1109/TGRS. 2006. 872333]
- Martin R V. 2008. Satellite remote sensing of surface air quality. *Atmospheric Environment*, 42(34): 7823-7843 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.07.018]
- McCormick M P, Thomason L W and Trepte C R. 1995. Atmospheric effects of the Mt Pinatubo eruption. *Nature*, 373(6513): 399-404 [DOI: 10.1038/373399A0]
- Munro R, Eisinger M, Anderson C, Callies J, Corpaccioli E, Lang R, Lefebvre A, Livschitz Y and Albiñana A P. 2006. GOME-2 on MetOp//Proceedings of the 2006 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference: 12-16
- Munro R, Eisinger M, Anderson C, Callies J, Corpaccioli E, Lang R, Lefebvre A, Livschitz Y and Albiñana A P. 2006. GOME-2 on MetOp//Proceedings of the 2006 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference. Helsinki: Eur. Org. for the Exploit of Meteorol. Satell.: 12-16
- Platt U and Stutz J. 2008. *Differential Optical Absorption Spectroscopy: Principles and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer
- Richter A. 2009. Algorithm theoretical basis document for the GOME-2 rapid volcanic SO₂ product[EB/OL]. http://www.doas-bremen.de/so2_alerts/gome2_so2_atbd_091005.pdf
- Richter A, Wittrock F and Burrows J P. 2006. SO₂ measurements with SCIAMACHY//Proceedings of the Atmospheric Science Conference. [s.l.]: [s.n.]: 8-12
- Richter A. 2009. Algorithm theoretical basis document for the GOME-2 rapid volcanic SO₂ product[EB/OL]. SAVAA Project. <http://savaa.nilu.no/PublicArchive.aspx>
- Rozanov A, Rozanov V, Buchwitz M, Kokhanovsky A and Burrows J P. 2005. SCIAMACHY 2.0 - A new radiative transfer model for geophysical applications in the 175-2400 nm spectral region. *Advances in Space Research*, 36(5): 1015-1019 [DOI: 10.1016/j.asr.2005.03.012]
- Sigurdsson H, Houghton B F, McNutt S R, Rymer H, Stix J and Ballard R D. 2000. *Encyclopedia of Volcanoes*. San Diego: Academic Press: 915-930
- Sun Y Z, Jiang G W, Li Y D, Yang Y, Dai H S, He J, Ye Q H, Cao Q, Dong C Z, Zhao S H and Wang W H. 2018. GF-5 satellite: overview and application prospects. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 39(3): 1-13 (孙允珠, 蒋光伟, 李云端, 杨勇, 代海山, 何军, 叶擎昊, 曹琼, 董长哲, 赵少华, 王维和. 2018. “高分五号”卫星概况及应用前景展望. *航天返回与遥感*, 39(3): 1-13) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2018.03.001]
- Theys N, Hedelt P, De Smedt I, Lerot C, Yu H, Vlietinck J, Pedergnana M, Arellano S, Galle B, Fernandez D, Carlito C J M, Barrington C, Taisne B, Delgado-Granados H, Loyola D and Van Roozendaal M. 2019. Global monitoring of volcanic SO₂ degassing with unprecedented resolution from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor. *Scientific Reports*, 9(1): 2643 [DOI: 10.1038/S41598-019-39279-Y]
- Tilstra L G, Tuinder O N E, Wang P and Stammes P. 2017. Surface reflectivity climatologies from UV to NIR determined from Earth observations by GOME-2 and SCIAMACHY. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(7): 4084-4111 [DOI: 10.1002/2016JD025940]
- van Geffen J H G M and van Oss R F. 2003. Wavelength calibration of spectra measured by the Global Ozone Monitoring Experiment by use of a high-resolution reference spectrum. *Applied Optics*, 42 (15): 2739-2753 [DOI: 10.1364/AO.42.002739]
- Vandaele A C, Hermans C, Simon P C, Carleer M, Colins R, Fally S, Mérianne M F, Jenouvrier A and Coquart B. 1998. Measurements of the NO₂ absorption cross-sections from 42000 cm⁻¹ to 10000 cm⁻¹

- (238—1000 nm) at 220 K and 294 K. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 59: 171-184. [DOI: 10.1016/S0022-4073(97)00168-4]
- Veefkind J P, de Haan J F, Sneep M and Levelt P F. 2016. Improvements to the OMI O₂-O₂ operational cloud algorithm and comparisons with ground-based radar-lidar observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(12): 6035-6049 [DOI: 10.5194/amt-9-6035-2016]
- Voors R, de Vries J, Bhatti I S, Lobb D, Wood T, van der Valk N, Aben I and Veefkind P. 2017. TROPOMI, the Sentinel 5 precursor instrument for air quality and climate observations: status of the current design//*Proceedings of SPIE 10564, International Conference on Space Optics — ICSO 2012. Ajaccio: SPIE* [DOI: 10.1117/12.2309017]
- Yan H, Chen L, Tao J, Su L, Huang J, Han D and Yu C. 2012. Corrections for OMI SO₂ BRD retrievals influenced by row anomalies. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(11): 2635-2646 [DOI: 10.5194/amt-5-2635-2012]
- Yan H H, Li X J, Zhang X Y, Wang W H, Chen L F, Zhang M G and Xu J. 2016. Comparison and validation of band residual difference algorithm and principal component analysis algorithm for retrievals of atmospheric SO₂ columns from satellite observations. *Acta Physica Sinica*, 65(8): 084204 (闫欢欢, 李晓静, 张兴赢, 王维和, 陈良富, 张美根, 徐晋. 2016. 大气 SO₂ 柱总量遥感反演算法比较分析及验证. *物理学报*, 65(8): 084204) [DOI: 10.7498/aps.65.084204]
- Yang K, Dickerson R R, Carn S A, Ge C and Wang J. 2013. First observations of SO₂ from the satellite Suomi NPP OMPS: widespread air pollution events over China. *Geophysical Research Letters*, 40(18): 4957-4962 [DOI: 10.1002/GRL.50952]
- Zhang Q, He K B and Huo H. 2012. Cleaning China's air. *Nature*, 484(7393): 161-162 [DOI: 10.1038/484161a]
- Zhao D W and Sun B Z. 1986. Air pollution and acid rain in China. *Ambio*, 15(1): 2-5
- Zhou H J, Liu W Q, Si F Q, Zhao M J, Jiang Y and Xue H. 2012. Spectral calibration for space-borne differential optical absorption spectrometer. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 32(11): 2881-2885 (周海金, 刘文清, 司福祺, 赵敏杰, 江宇, 薛辉. 2012. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪光谱定标技术研究. *光谱学与光谱分析*, 32(11): 2881-2885) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)11-2881-05]

Volcanic SO₂ retrieved from GF-5 Environmental trace gas Monitoring Instrument

YAN Huanhuan¹, WANG Houmao², WANG Weihe¹, ZHANG Xingying¹

1. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;
2. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: Sulfur dioxide (SO₂) from volcanic eruption and its long-distance transportation has a significant impact on global climate change and aviation safety. Satellite remote sensing technology provides an unprecedented advantage for continuous, large spatial and short-revisit monitoring for atmospheric SO₂. GF-5 Environmental trace gas Monitoring Instrument (EMI) with high spatial resolution is the China's first instrument of hyper spectral measurements with wavelength range from 240 nm to 710 nm, and makes daily global observations of key atmospheric constituents, including ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide.

In this paper, based on the atmospheric radiation transfer model SCIATRAN, the clear sky albedo under typical atmospheric conditions is simulated by selecting the ocean area pixels with uniform surface types in the middle and low latitudes to evaluate the accuracy of the EMI Top-of-Atmosphere (TOA) albedo.

Secondly, based on the S5P/TROPOMI L1 Radiance data and the DOAS algorithm, after 477nm O₄ cloud screening, spectral calibration, slant column to vertical column conversion, the inversion results of total SO₂ columns over volcanic eruption areas were obtained and compared with TROPOMI offline L2 SO₂ products.

Finally, GF-5/EMI SO₂ columns were retrieved by using GF-5 EMI UV-2 band observations and DOAS algorithm, and then the retrieved GF-5/EMI SO₂ columns were compared with similar S5P/TROPOMI SO₂ columns to evaluate the ability of GF-5/EMI on monitoring global SO₂ change from volcanic activity.

Results show that, in the band range of 300—400 nm, the EMI spectra of the sampling points in the ocean area are lower than the simulated spectra of SCIATRAN, and EMI and TROPOMI spectra show similar systematic biases. SO₂ obtained by using TROPOMI L1 Radiance data, three band windows of 315—327 nm, 325—335 nm and 360—390 nm, and DOAS inversion algorithm are compared with the TROPOMI offline L2 SO₂ products, which show high correlations (correlation coefficient between 0.97—0.99, relative deviation between 3% and 9%). Therefore, GF-5/EMI can obtain the daily distribution of SO₂ from volcanic eruption. The accuracy of GF-5/EMI SO₂ columns can meet the needs of application of global volcano monitoring.

Key words: remote sensing, GF-5 EMI, volcano, SO₂ column, DOAS, TROPOMI

Supported by National Key Research and Development Program (No. 2019YFC0214603)