

高分五号痕量气体差分吸收光谱仪的地表UV-B辐照度初步反演

麻文杰^{1,2}, 周海金², 赵欣², 司福祺², 罗宇涵², 杨东上²,
杨太平², 钱园园², 汤付颖²

1. 安徽大学 物质科学与信息技术研究院, 合肥 230601;

2. 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所 环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031

摘要: 地表UV-B辐照度会对地球生态系统产生非常重要的影响。利用卫星遥感探测, 可实现全球地表UV-B辐照度的长期探测, 对于生态系统评估和大气科学研究等具有重要意义。目前基于国产卫星的地表UV-B辐照度产品较少, 因此本文开展了高分五号卫星大气痕量气体差分吸收光谱仪(EMI)的地表UV-B辐照度的初步反演。首先基于地表UV-B辐照度的敏感性分析结果, 建立无气溶胶情况下晴空地表UV-B辐照度查找表。随后提出了云、气溶胶场景下的校正方法, 实现了全球地表UV-B辐照度的反演。最后, 为验证该算法的准确性, 将EMI结果分别与欧洲OMI卫星数据、WOUDC地面站点数据进行了对比, 其中与OMI数据的相关系数大于0.9, 与WOUDC地面站点数据的相关系数达到0.91。研究结果表明EMI载荷的地表UV-B辐照度产品准确性高, 为后续地表UV-B辐照度等相关产品的发布提供研究基础, 也证明了该载荷在全球地表紫外辐射时空分布监测应用中的能力。

关键词: 遥感, 痕量气体差分吸收光谱仪, 地表UV-B辐照度, SCIATRAN模型, 查找表

中图分类号: TP79/P2

引用格式: 麻文杰, 周海金, 赵欣, 司福祺, 罗宇涵, 杨东上, 杨太平, 钱园园, 汤付颖. 2023. 高分五号痕量气体差分吸收光谱仪的地表UV-B辐照度初步反演. 遥感学报, 27(8): 1856-1865

Ma W J, Zhou H J, Zhao X, Si F Q, Luo Y H, Yang D S, Yang T P, Qian Y Y and Tang F Y. 2023. Preliminary inversion of surface UV-B irradiance based on GF-5 environmental trace gas monitoring instrument. National Remote Sensing Bulletin, 27(8): 1856-1865 [DOI:10.11834/jrs.20210603]

1 引言

太阳辐射是地球大气运动的主要能量源泉, 也是地球光热能的主要来源(张学海等, 2015)。其中紫外辐射为太阳辐射中很小的一部分, 并且大部分紫外辐射会在大气传输过程中被吸收。太阳的紫外辐射根据其生物效应可以分为3个部分: UV-A (320—400 nm)、UV-B (280—320 nm)、UV-C (200—280 nm)(王普才等, 1999)。在大气传输过程中, UV-C的破坏性最强, 会被平流层的臭氧和氧分子完全吸收; UV-B破坏性较强, 大部分被臭氧层吸收, 只有少量到达地表, 但会对

人类及生态环境带来显著影响, 是皮肤癌变、作物产量减少等诱因之一; UV-A影响较小, 大部分能够到达地表。在工业化进程中, 人类活动导致大气系统发生了显著变化, 如平流层臭氧量减少、臭氧空洞出现、对流层大气复合污染等现象, 导致全球地表UV-B辐照度也发生相应的变化。因此, 监测地球表面的UV-B辐照度具有重要的意义。

目前, 很多国家已经建立了地面紫外辐射观测网络, 如加拿大的世界臭氧与紫外辐射数据中心WOUDC(World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Center), 积累了大量可靠的紫外辐射数据。但是基于地基平台地表紫外辐射的监测存在站点

收稿日期: 2021-01-08; 预印本: 2021-04-13

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2019YFC0214702); 国家自然科学基金(编号: 41941011)

第一作者简介: 麻文杰, 研究方向为卫星地表UV-B辐照度算法研究。E-mail: 949039736@qq.com

通信作者简介: 赵欣, 研究方向为环境光学监测仪器及光学遥感电子学技术研究。E-mail: xzhao@aiofm.ac.cn

分布稀疏,运行时间短,且地面测量仪器校准过程复杂等缺点(Lindfors等,2017)。随着卫星遥感技术的发展,相比于地基观测,卫星遥感技术可以实现全球地表紫外辐射的长期观测,在地表UV-B辐照度的监测中发挥了重要作用。在20世纪70年代,国际上就开始利用卫星遥感技术来监测地表紫外辐射。1978年—2005年共有3个卫星搭载臭氧总量测绘分光仪TOMS(Total Ozone Mapping Spectrometer)用于监测臭氧及紫外辐射情况。Krotkov等(1998)第一次提出基于TOMS数据估算地球表面紫外辐射的算法。该算法首先通过臭氧总量和地表反照率计算出晴空无云下的地表紫外辐射通量,然后乘以云校正因子以消除云导致的紫外辐射衰减,最后根据气溶胶指数进行气溶胶校正。目前搭载于美国航天局EOS(Earth Observation System) Aura卫星的臭氧检测仪OMI(Ozone Monitoring Instrument),其地表紫外辐射算法与TOMS非常类似,使用了正向模型建立晴空辐照度查找表,并增加了吸收性气溶胶校正算法,以校正吸收性气溶胶引起的衰减。OMI和TOMS地表紫外辐射算法的区别在于两者所用的地表反射率不同,TOMS采用了360 nm处的最小地表朗伯体等效反射率,而OMI采用了移动时间窗口技术(moving time-window technique)计算的地表反射率,对于高纬度地区OMI地表紫外辐射算法会更为精确(赵莹等,2014; Tanskanen等,2003)。TROPOMI搭载于哨兵5号先驱卫星(Sentinel-5 Precursor)于2017年10月成功发射,其地表紫外辐射算法中使用了VLIDORT模型,将354 nm处测量的反射率应用于云对紫外辐射衰减的计算(Lindfors等,2017)。目前基于国产卫星仪器的地表UV-B辐照度产品较少,中国于2018年5月9日成功发射高分五号(GF-5)卫星,其中大气痕量气体差分吸收光谱仪EMI(Environmental Trace Gases Monitoring Instrument)是中国第一个痕量气体探测专用载荷,包含4个通道,探测光谱范围宽,覆盖240—710 nm,目前已成功获取全球臭氧、NO₂、云等产品(闫欢欢等,2019; 杨太平等,2020; Cheng等,2019),EMI同样具备了地表UV-B辐照度的探测能力。本文利用EMI紫外波段数据开展了地表UV-B辐照度反演算法研究,目标是提供高质量的国产卫星地表UV-B辐照度产品。

研究过程中,首先通过臭氧、地表反照率、

海拔高度和太阳天顶角计算出晴空无云下的地表紫外辐照度,然后基于气溶胶指数AI(Aerosol Index)和朗伯等效反照率LER(Lambertian Equivalent Reflectivity)的两个阈值进行选择性的校正。最后为检验EMI UV-B产品精度,将EMI结果与OMI UV-B产品以及地面监测数据进行对比验证。

2 数据和模型

2.1 卫星和地面数据

EMI载荷采用推扫方式获取来自地球的人射辐射。地面大气散射/反射的光(太阳光、卤素标准灯光)经宽视场前置光学系统、中继光学系统后,由分色片分光,然后根据波段不同进入通道1—4光谱仪,经光谱仪分光、聚焦、成像于光谱仪的面阵背照帧转移型探测器的成像面。4个光谱通道的范围分别为240—315 nm、311—403 nm、401—550 nm、545—710 nm。本文所用的卫星数据为EMI UV2通道(311—403 nm),光谱分辨率为0.3—0.5 nm,空间采样分辨率可达到7.5 km×13 km,光谱采样间隔为0.091 nm/pixel。本文地表UV-B辐照度的反演过程中,利用了EMI L1光谱数据、EMI反演的气溶胶指数、臭氧数据。

采用OMI数据作为对比卫星数据,其UV-B产品中包含305 nm、310 nm、324 nm和380 nm处的光谱辐照度,星下点空间分辨率为13 km×24 km,光谱分辨率约为0.5 nm。

地面实测数据从世界臭氧与紫外线辐射数据中心WOUDC获取。地面站点采用Brewer臭氧分光光度计测量数据。Brewer臭氧分光光谱仪是世界气象组织推荐使用的测量大气臭氧总量和紫外辐射光谱的仪器,全天每隔一小时观测一次,光谱分辨率为0.5 nm(张学海等,2015)。

2.2 SCIATRAN模型

SCIATRAN辐射传输模型功能强大,旨在以矢量或标量模式对适用于紫外—可见—全波段反射光谱范围的大气遥感观测的辐射光谱进行快速和准确的模拟(赵莹,2014)。本文使用SCIATRAN 3.8.1版本,通过修改主控制文件、观测几何文件参数和痕量气体文件参数,来模拟各个条件下的地表UV-B辐照度。主控制文件各参数设置如表1所示。

表1 主控制文件参数设置
Table 1 The main parameters setting of control.inp

参数名	值
RTM_Mode	flux
RTM_TYPE	pp_scatt
Spectral segment info	2, 290, 325, 0.5
Advanced profile settings	t
Clouds present	f
Aerosol settings	off

3 研究方法

地表UV-B辐照度强弱是由大气分子的瑞利散射、臭氧的吸收、云和气溶胶的散射和吸收以及地表反照率决定的。EMI的地表UV-B辐照度算法研究路线如图1所示。首先使用SCIATRAN模型对海拔高度、地表反照率、太阳天顶角和臭氧总量等因素进行敏感性分析，确定晴空地表UV-B辐照度查找表的参数节点。然后将EMI的测量数据和太阳几何观测信息带入查找表，采用多维插值的方法，计算出EMI晴空地表UV-B辐照度。最后根据气溶胶指数和朗伯等效反照率的两个阈值进行云和气溶胶的校正。本文中地表UV-B辐照度整体算法思路较为成熟，在TOMS、OMI中均得到应用。但不同载荷的仪器特性不同，导致算法设计存在差异。本研究中，考虑到EMI载荷空间采样位置、采样半高宽等差异，并深入分析地表UV-B辐照度敏感性，建立了适用于EMI载荷的晴空地表UV-B辐照度查找表；云校正过程，由于定标水平差异，发现EMI载荷采用380 nm处朗伯等效反照率具有最佳校正效果，不同于OMI选择的360 nm处的朗伯等效反射率。

3.1 晴空地表UV-B辐照度查找表的建立

为减少构建查找表和插值查找消耗的时间，需要合理确定地表UV-B辐照度查找表输入参数的节点数量，首先采用控制变量法来研究地气参数配置对地表UV-B辐照度的敏感性，根据敏感性分析确定输入参数节点。然后将EMI像元对应的海拔高度、地表反照率、太阳天顶角、臭氧总量等数据带入查找表中进行多维线性插值，计算出全球的晴空地表UV-B辐照度。

3.1.1 敏感性分析

采用控制变量法对地表UV-B辐照度的敏感

性进行分析，分析参数包括太阳天顶角、臭氧总量、海拔高度、地表反照率，背景参数取值如表2所示。

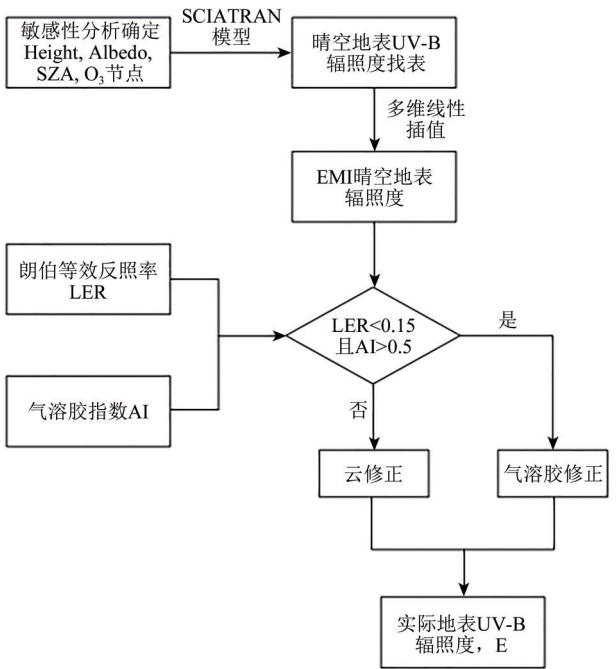


图1 本文研究路线

Fig. 1 Research route of this paper

表2 地表UV-B辐照度敏感性分析背景参数设置
Table 2 Background parameters setting of surface UV-B irradiance sensitivity analysis

参数名	背景值
臭氧(O ₃)	337 DU
太阳天顶角(SZA)	30°
地表反照率(Albedo)	0.2
海拔高度(Height)	0

图2 (a) 显示了太阳天顶角分别为10°、20°、30°、40°、50°、60°、70°、80°时地表UV-B辐照度随波长的变化情况。太阳天顶角越小时，辐射到达地面穿过的大气路径越短，地表UV-B辐照度就越大。太阳天顶角从30°到80°，320 nm处地表UV-B辐照度减少了329 mW/m²/nm，可见太阳天顶角是影响地表UV-B辐照度的重要因素之一。图2 (b) 显示了臭氧总量分别为337 DU、337 DU±10%和337 DU±25%时地表UV-B辐照度随波长的变化情况。臭氧总量越低时，地表UV-B辐照度越大。臭氧总量由原来的90%减少到75%时，310 nm处地表UV-B辐照度增加了近3倍；而臭氧总量从增加10%到增加25%，地表UV-B辐照度减少了约

50%。可见当臭氧总量减少时,地表UV-B辐照度变化的更为显著,也表明臭氧空洞对地表UV-B辐

照度的影响很大。

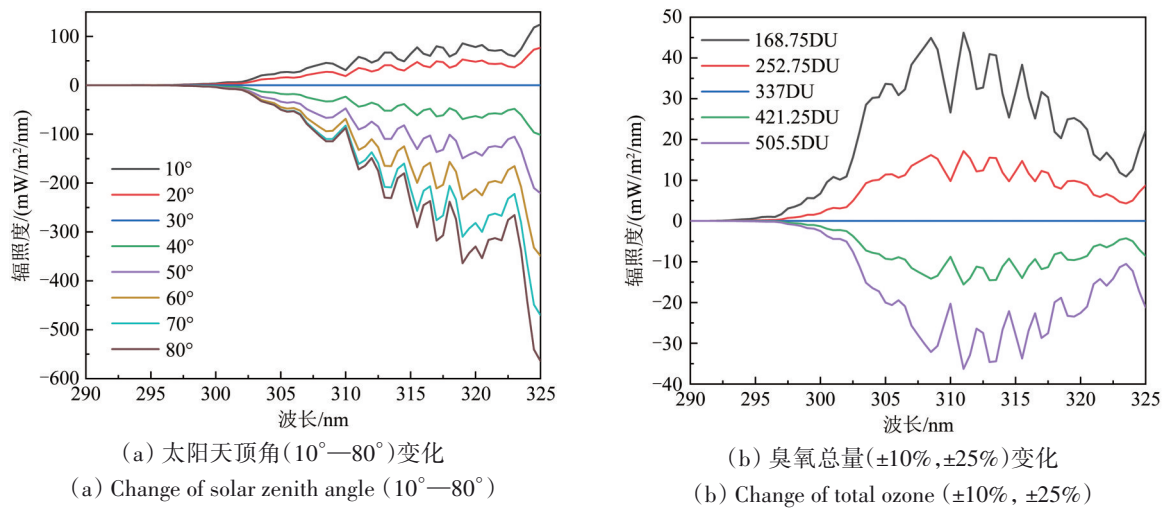


图2 地表UV-B辐照度随太阳天顶角和臭氧总量变化情况

Fig. 2 Variation of surface UV-B irradiance with solar zenith angle and total ozone

图3 (a) 显示了海拔高度分别为0 km、1 km、2 km、3 km、4 km、5 km、6 km、7 km、8 km时地表UV-B辐照度随波长的变化情况。海拔高度越高,太阳辐射到达地表的光路就越短,地表UV-B辐照度越强。图3 (b) 显示了地表反照率分别为

0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8时地表UV-B辐照度的变化。随着地表反照率的增加,地表UV-B辐照度也不断增大,300 nm以上时地表UV-B辐照度变化尤为明显。

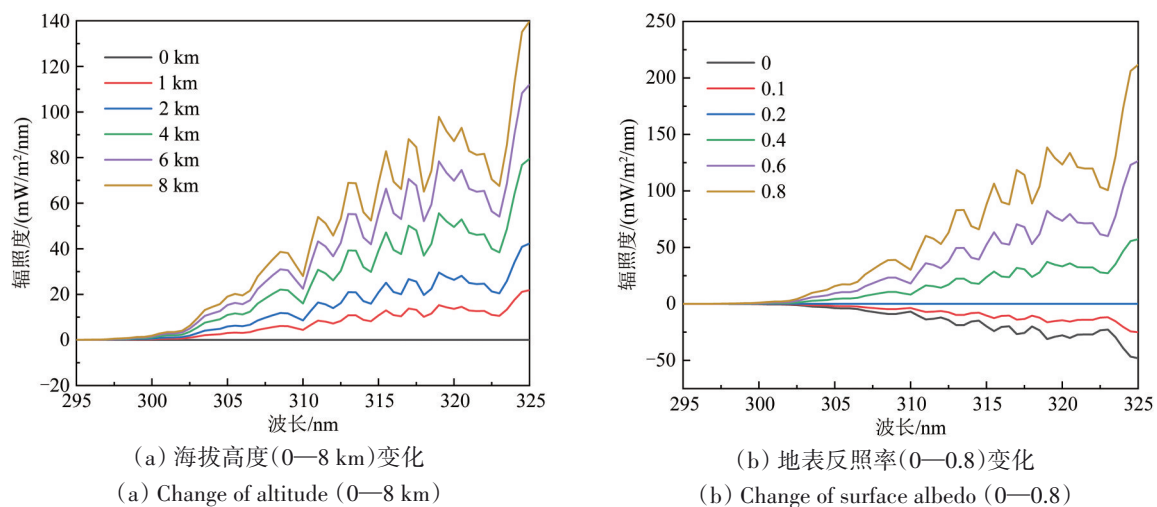


图3 地表UV-B辐照度随海拔高度和地表反照率变化情况

Fig. 3 Variation of surface UV-B irradiance with altitude and surface albedo

3.1.2 输入节点设置

根据第3.1.1节的敏感性分析,各个参数设置的节点如表3所示。将模型的计算结果保存在一个五维的查找表中,保存为HDF5格式。

3.1.3 查找表插值

利用EMI逐像元的太阳天顶角、臭氧总量、海拔高度、地表反照率数据作为晴空地表UV-B辐照度查找表的输入参数,多维线性插值得到晴

空地表 UV-B 辐照度。本文以 2018 年 11 月 2 日和 2019 年 8 月 17 日的 EMI 数据带入查找表中进行插值, 得到的结果如图 4 所示。图 4 可以看出 EMI 地

表 UV-B 辐照度高值区域主要分布在赤道附近, 呈现出较为明显的纬向分布规律, 随着纬度的升高, 地表 UV-B 辐照度逐渐降低。

表 3 SCIATRAN 模型输入参数节点
Table 3 Input parameter nodes of SCIATRAN model

参数名	节点设置
臭氧/DU	190—490, 间隔:20
太阳天顶角/(°)	0—90, 间隔:5
地表反照率	0.000, 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
海拔高度/km	0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00, 2.25, 2.50, 2.75, 3.00, 4.00, 5.00, 6.00, 7.00, 8.00
波长/nm	290—325, 间隔:0.5

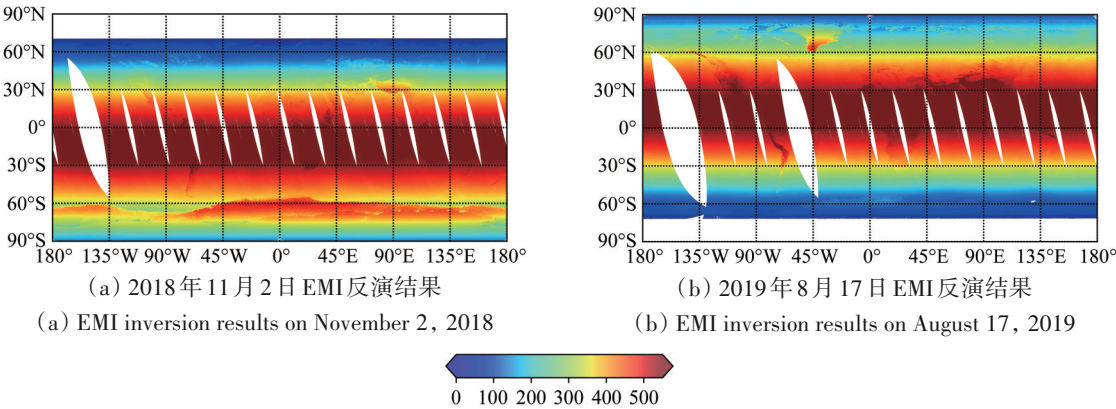


图 4 EMI 在 324 nm 处的晴空地表 UV-B 辐照度全球分布图(单位: mW/m²/nm)
Fig. 4 A global distribution map of EMI surface UV-B irradiance at 324 nm in the clear sky (Unit: mW/m²/nm)

3.2 云校正

晴空地表 UV-B 辐照度基于无云、无气溶胶条件, 实际应用过程中, 对于有云场景需要对晴空地表 UV-B 辐照度进行校正。云校正过程中, 需要引入云校正因子。通过计算晴空下地表 UV-B 辐照度 (E_{clear}), 乘以云校正因子获得实际的地表 UV-B 辐照度的估计值 (E_{cloud}), 公式如下:

$$E_{cloud} = E_{clear} C_T \tag{1}$$

式中, E_{clear} 是晴空下的地表 UV-B 辐照度, 即 3.1 节利用查找表插值获取的结果; E_{cloud} 是考虑云的影响下的实际的地表 UV-B 辐照度, C_T 是云校正因子。

云校正因子的计算有两种方法: (1) 采用朗伯等效反射率转化, 可利用卫星观测辐亮度分析获取。该方法评估了观测瞬时视场内云、地表等下垫面反照的综合效应, 不需要云量、云顶高、云厚等云参数的先验知识。如果无云, 则朗伯等效反射率等效于地表反照率。(2) 输入准确的云

量、云顶高、云厚等云参数, 采用辐射传输模型计算校正因子。Krotkov 等 (2001) 对比了两种方法的校正因子结果, 并与地基站点分析数据进行了对比。结果表明在无雪情况下, 朗伯等效反射率方法与地基结果相关性系数达到 0.9, 标准差为 0.1。辐射传输模型方法同样具有很高的相关性, 但存在 7% 左右的系统偏差。两种方法均在有雪场景下存在较大误差。考虑到 EMI 的云相关产品尚未得到实际的应用, 采用其他来源云产品数据则需要繁琐的地面像元匹配、时间匹配等处理过程, 本文云校正因子的计算使用了 Krotkov 等 (1998) 提出的朗伯等效反射率的方法。朗伯等效反射率越高, 云引起的表面紫外线辐射的衰减越强。通过考虑地表与云之间的多次散射的影响, 得出云校正因子计算公式:

$$C_T = (1 - R_{380}) / (1 - R_s) \tag{2}$$

式中, R_{380} 是 380 nm 处的朗伯等效反射率, 通过 EMI 载荷数据在 380 nm 处的辐亮度和太阳辐照度数据计算得到; R_s 是地表反照率, 取自 OMI 每月

最小朗伯等效地表反射率 (OMI monthly minimum LER) 数据。由于定标水平差异, 发现EMI载荷采用 380 nm 处朗伯等效反射率具有最佳校正效果, 相比OMI的校正波段存在微小调整。

3.3 气溶胶校正

为了估计气溶胶对地表UV-B辐照度的影响, 气溶胶校正过程中分别考虑吸收性气溶胶和非吸收性气溶胶。其中非吸收性气溶胶减少了太阳直接辐射, 但增加了漫射辐射, 它们对地表UV-B辐照度的影响相对较小, 可以忽略其影响。而吸收性气溶胶会减弱直接辐射和漫射辐射。因此在相同的光学厚度下, 吸收性气溶胶导致地表UV-B辐照度的衰减比非吸收性气溶胶多很多。如果将吸收性气溶胶视为非吸收性气溶胶, 会低估其对紫外辐射的衰减, 导致地表UV-B辐照度被高估。为校正吸收性气溶胶影响, 研究中使用气溶胶指数构建了一个较为简单的吸收性气溶胶校正模型, 该模型假设在地表高度2—4 km之间存在单一类型(如沙浮尘)的吸收性气溶胶层, 公式如下:

$$\frac{E_{\text{aerosol}}}{E_{\text{clear}}} = e^{-g(H_A)AI} \quad (3)$$

式中, 转换因子 g 是气溶胶高度 H_A 、观测几何和气溶胶类型的函数, 此处令 $g=0.25$ (Tanskanen等, 2003); AI 是气溶胶指数。该假设模型重点针对沙

浮尘、森林大火等强吸收性气溶胶存在的场景。对于其他气溶胶情况则统一采用云校正。云校正采用朗伯等效反射率法, 并未严格区分气溶胶和薄云。对于硫酸盐气溶胶、海盐气溶胶, 会导致云校正因子 C_T 存在2%的系统误差。对于地表重气溶胶污染情况, 云校正方法也会高估地表UV-B辐照度 (Krotkov等, 2001)。在获取更为准确的气溶胶观测数据基础上, 后续将进一步优化算法, 减小气溶胶校正误差。

3.4 云和气溶胶校正阈值选择

EMI晴空地表UV-B辐照度数据校正过程中, 需要判断各个像元是采用云还是吸收性气溶胶校正。校正阈值主要基于气溶胶指数 AI 和朗伯等效反射率 LER 。为了区分云和吸收性气溶胶对地表UV-B辐照度的影响, 我们认为 $AI > 0.5$ 时存在强吸收性气溶胶吸收, $LER < 0.15$ 时为晴空无云环境。由于气溶胶校正简化模型仅针对强吸收性气溶胶, 因此只有当这两个条件同时满足时, 才采用吸收性气溶胶校正, 其余情况使用云校正方法。

基于以上设置, 最终校正后的EMI全球地表UV-B辐照度结果如图5所示, 可以看出全球地表UV-B辐照度呈现出较为明显的纬向分布规律, 由于南北极的常年积雪造成的地表反照率较大, 导致地表UV-B辐照度在南北极也存在高值区域。

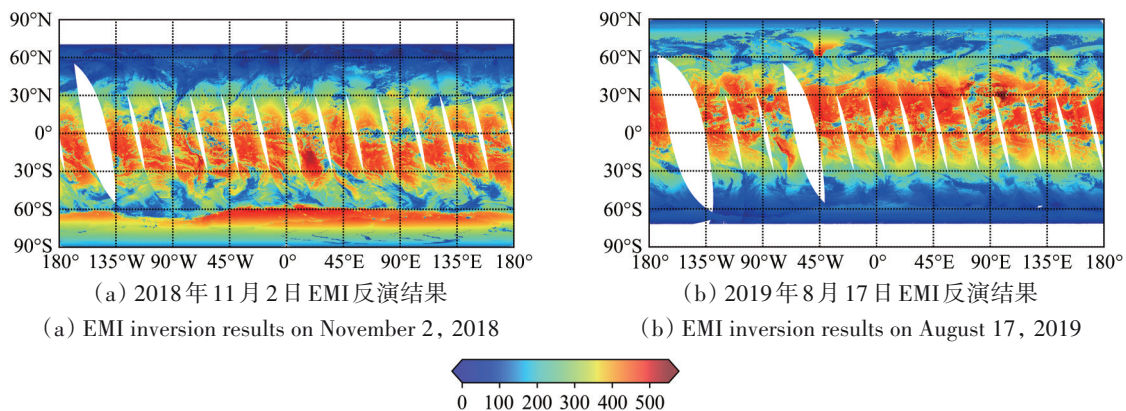


图5 EMI在324 nm处的地表UVB辐照度全球分布图(单位: mW/m²/nm)

Fig. 5 A global distribution map of OMI surface UV-B irradiance at 324 nm (Unit: mW/m²/nm)

4 结果与分析

4.1 EMI与OMI产品对比分析

为了验证上述算法结果的正确性, 本文选择了

在相同日期下OMI的UV-B产品进行比较分析。在分析之前, 首先要对EMI和OMI数据进行筛选, 剔除了OMI行异常数据, 由于卫星轨道边缘像元的空间分辨率过大, 将卫星轨道边缘数据设为无效值。然后再进行栅格化, 将数据投影到 $1^\circ \times 1^\circ$ 的格点上。

由于两极高纬度地区较多数据缺失，并且本文算法没有进行高地表反照率（积雪、冰等）的校正，这里重点关注南北纬60°之间的区域。将2018年11月2日和2019年8月17日EMI和OMI在324 nm处的地表UVB辐照度进行相关性分析。如图7所示，二者的线性拟合曲线的斜率为0.97和0.89，对应的截

距为38.33 mW/m²/nm和28.63 mW/m²/nm，相关性系数分别达到0.93和0.92。表明OMI和EMI的地表UV-B辐照度数据具有很高的一致性。通过对比验证，也将为后续不同卫星数据资料统一，开展长期气候研究提供依据。

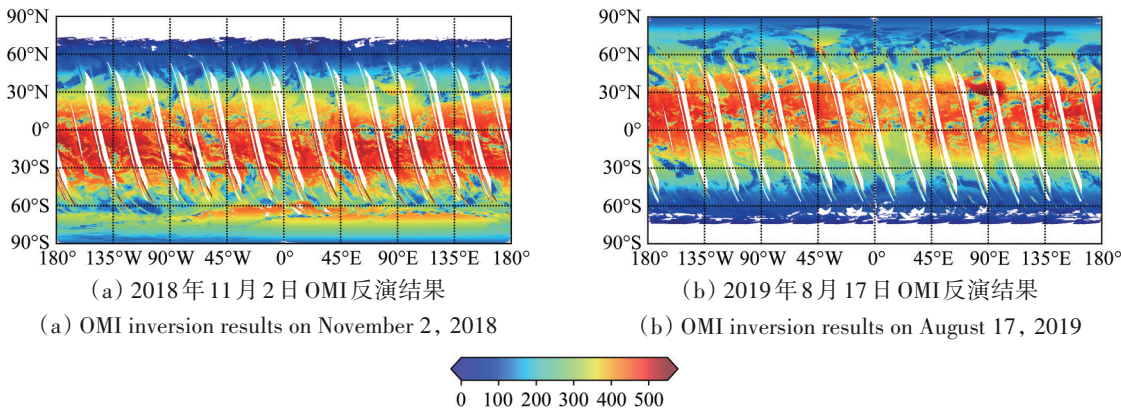


图6 OMI在324 nm处的地表UV-B辐照度全球分布图(单位:mW/m²/nm)
Fig. 6 A global distribution map of OMI surface UV-B irradiance at 324 nm (Unit: mW/m²/nm)

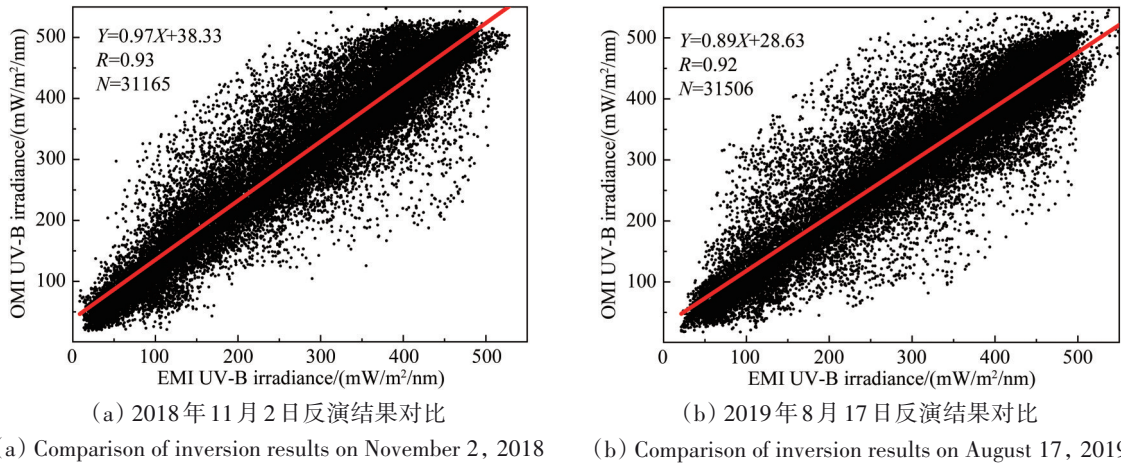


图7 EMI和OMI在324 nm处地表UV-B辐照度的格点数据散点图
Fig. 7 Scatter plot of surface UV-B irradiance grid point data of EMI and OMI at 324 nm

4.2 EMI与地面实测数据分析

WOUDC 站点可以提供地表UV-B辐照度的高精度数据，本文开展了EMI与地面实测数据的对比分析。数据对比过程中，未进行晴空像元的筛选，但地面站点Brewer仪器一般在少云和晴空条件下运行，为了与EMI数据在时间和空间上能够匹配，本文选取2018年11月2日的正午时刻WOUDC等4个站点的地表UV-B辐照度数据，站点的经纬度和地表反照率等数据如表4所示。

表4 站点信息
Table 4 Site information

站点	纬度/°N	经度/°E	地表反照率
Mauna Loa (HI)	19.54	-155.58	0.041
Saturna Island	48.77	-123.13	0.039
Goose Bay	53.31	-60.36	0.142
Churchill	58.74	-94.07	0.815

地面站点数据的波段范围为290—325 nm，步长为0.5 nm，共70个点。由于305 nm之前的辐照度

值几乎为0，我们选取305—325 nm波段的各站点数据与EMI结果进行比较，对比情况见图8。二者的线性拟合曲线的斜率为0.95、1.10、0.91和1.34，对应的截距分别为-1.67 mW/m²/nm、-4.82 mW/m²/nm、-3.18 mW/m²/nm和-3.38 mW/m²/nm，相关性系数都达到0.91以上。但在地表反照率较高的Churchill站点，EMI的地表UV-B辐照度明显大于地面站点

观测值。4个站点的对比结果表明该算法适用于地表反照率值较低的情况，在地表反照率较高时存在较大偏差。本算法仅利用380 nm处的等效朗伯反射率来考虑云的影响，并未考虑到积雪和冰等复杂情况，导致高估了实际的地表UV-B辐照度。未来该算法还需要对地表反照率较高的情况进行区分，实现积雪校正。

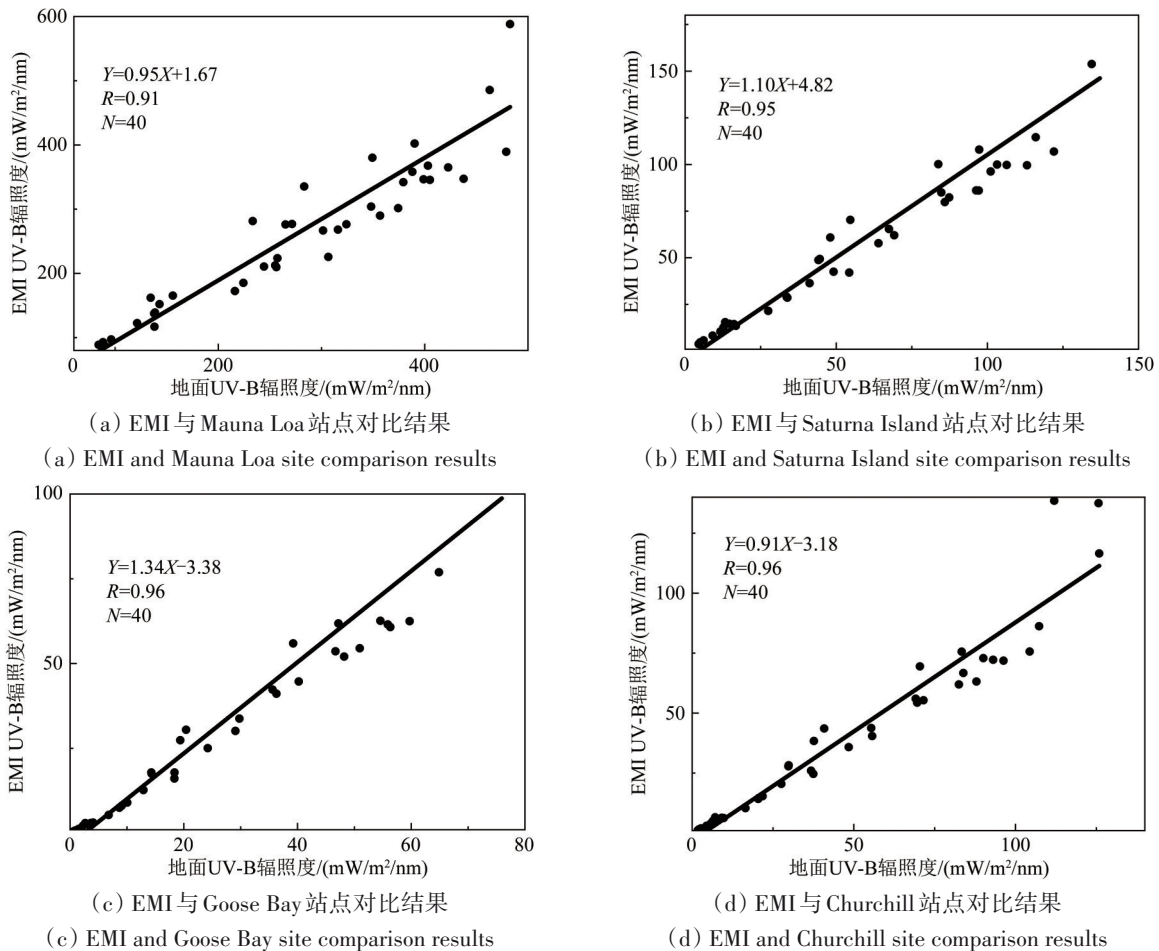


图8 EMI反演值与地面实测值的比较

Fig. 8 Comparison between EMI inversion values and ground measured values

5 结论

本文开展了基于EMI载荷的地表UV-B辐照度反演方法初步研究。研究中利用辐射传输模型建立了晴空UV-B辐照度的查找表，并将EMI的太阳天顶角、臭氧总量、海拔高度、地表反照率数据带入查找表中进行多维线性插值，最后进行云和气溶胶的校正，最终完成了EMI地表UV-B辐照度的算法构建。本文获取了EMI载荷地表UV-B辐照度全球分布数据，分别与同天OMI数据

和地面站点观测数据进行了对比。结果显示利用该算法得到的结果与OMI数据具有良好的一致性，与地面观测结果也有较高的相关性。但仍然存在一定的不足：(1) 在高纬度地区，没有考虑到积雪和冰带来的影响，高估了云校正因子，导致地表UV-B辐照度偏大；(2) 在吸收性气溶胶修正时，考虑的气溶胶种类较少，需要进一步进行优化算法。

总体来说，本研究实现了基于EMI载荷的地表UV-B辐照度反演，为后续发布基于国产卫星的

地表UV-B辐照度产品提供研究基础,有助于后续进一步研究地表UV-B辐照度的长期时空变化。

志 谢 感谢美国国家航天航空局(NASA)提供的OMI OMUVB产品数据和世界臭氧与紫外线辐射中心(WOUDC)提供的地面数据,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References)

- Cheng L X, Tao J H, Valks P, Yu C, Liu S, Wang Y P, Xiong X Z, Wang Z F and Chen L F. 2019. NO₂ retrieval from the environmental trace gases monitoring instrument (EMI): preliminary results and intercomparison with OMI and TROPOMI. *Remote Sensing*, 11(24): 3017 [DOI: 10.3390/rs11243017]
- Krotkov N A, Bhartia P K, Herman J R, Fioletov V and Kerr J. 1998. Satellite estimation of spectral surface UV irradiance in the presence of tropospheric aerosols: 1. Cloud-free case. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D8): 8779-8793 [DOI: 10.1029/98JD00233]
- Krotkov N A, Herman J R, Bhartia P K, Fioletov V and Ahmad Z. 2001. Satellite estimation of spectral surface UV irradiance: 2. Effects of homogeneous clouds and snow. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D11): 11743-11759 [DOI: 10.1029/2000jd900721]
- Lindfors A V, Kujanpää J, Kalakoski N, Heikkilä A, Lakkala K, Mielonen T, Sneep M, Krotkov N A, Arola A and Tamminen J. 2017. The TROPOMI surface UV algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(2): 997-1008 [DOI: 10.5194/amt-11-997-2018]
- Tanskanen A, Arola A and Kujanpää J. 2003. Use of the moving time-window technique to determine surface albedo from TOMS reflectivity data//Proceedings of SPIE 4896, Ultraviolet Ground-and Space-based Measurements, Models, and Effects II. Hangzhou: SPIE: 239-250 [DOI: 10.1117/12.483407]
- Wang P C, Wu B Y and Zhang W X. 1999. Analysis on the factors affecting surface UV radiation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 23(1): 1-8 (王普才, 吴北婴, 章文星. 1999. 影响地面紫外辐射的因素分析. *大气科学*, 23(1): 1-8) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1999.01.01]
- Yan H H, Wang W H and Zhang X Y. 2019. Ozone column retrieved from GF-5 satellite environmental trace gas monitoring instrument. *Aerospace Shanghai*, 36(S2): 200-204, 210 (闫欢欢, 王维和, 张兴赢. 2019. 高分五号卫星大气痕量气体差分吸收光谱仪臭氧总量反演方法研究. *上海航天*, 36(S2): 200-204, 210) [DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.S.030]
- Yang T P, Si F Q, Wang P, Luo Y H, Zhou H J and Zhao M J. 2020. Research on cloud fraction inversion algorithm of environmental trace gas monitoring instrument. *Acta Optica Sinica*, 40(9): 0901001 (杨太平, 司福祺, Wang P, 罗宇涵, 周海金, 赵敏杰. 2020. 大气痕量气体差分吸收光谱仪云量反演算法研究. *光学学报*, 40(9): 0901001) [DOI: 10.3788/AOS202040.0901001]
- Zhang X H, Zhang T L and Chen S G. 2015. Mapping the UV radiation in the Western Pacific Ocean with the simplified UV radiation model from OMI satellite sensor data. *Remote Sensing Technology and Application*, 30(1): 163-169 (张学海, 张亭禄, 陈树果. 2015. 简化紫外辐射模型在基于OMI卫星传感器数据反演西太平洋海面紫外辐射中的应用. *遥感技术与应用*, 30(1): 163-169) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2015.1.0163]
- Zhao Y. 2014. Spatio-Temporal Variation of Earth Surface UV-B Irradiance and Sensitivity Analysis. Jilin: Jilin University (赵莹. 2014. 地表UV-B辐照度时空变化及其敏感性分析. 吉林: 吉林大学)
- Zhao Y, Chen S B and Zhang Y. 2014. Comparison between ultraviolet irradiation data of TOMS and OMI. *Science Technology and Engineering*, 14(16): 195-199 (赵莹, 陈圣波, 张莹. 2014. 臭氧总量测绘分光仪和臭氧监测仪紫外辐照度数据的对比研究. *科学技术与工程*, 14(16): 195-199) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2014.16.036]

Preliminary inversion of surface UV-B irradiance based on GF-5 environmental trace gas monitoring instrument

MA Wenjie^{1,2}, ZHOU Haijin², ZHAO Xin², SI Fuqi², LUO Yuhan², YANG Dongshang²,
YANG Taiping², QIAN Yuanyuan², TANG Fuying²

1. Institutes of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China;

2. Key Lab of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China

Abstract: Surface UV-B irradiance can have a very important impact on the ecosystem. In the modern industrialization process, human activities have led to significant changes in the atmospheric system, such as the reduction of stratospheric ozone, emergence of ozone holes, tropospheric atmospheric composite pollution, and other phenomena, and changes in the global surface UV-B irradiance, all of which significantly affect human health (e.g., skin cancers) and ecological environment (e.g., reduced crop yields). Therefore, monitoring the

surface UV-B irradiance has become essential.

Surface UV-B irradiance can be monitored in two ways, namely, by ground-based monitoring and satellite monitoring. Ground-based platform surface UV-B irradiance monitoring faces several disadvantages, including its sparse site distribution and short operation time. Meanwhile, satellite remote sensing technology can realize a long-term monitoring of global surface UV-B irradiance, which is important for ecosystem assessment and atmospheric science research. Given the availability of few surface UV-B irradiance products based on domestic satellites, this paper carries out a preliminary inversion of the surface UV-B irradiance from the environmental trace gas monitoring instrument (EMI) on the GF-5 satellite.

First, a sensitivity analysis of those factors influencing surface UV-B irradiance was performed using the SCIATRAN model to reduce the time consumed in lookup table construction and lookup interpolation. On the basis of the results of the sensitivity analysis of surface UV-B irradiance, the input parameter nodes of the clear-sky surface UV-B irradiance lookup table are reasonably determined, and the surface UV-B irradiance of EMI under clear-sky conditions is calculated. Second, the correction methods applied in the presence of clouds and aerosol scenarios were examined. The surface UV-B irradiance under clear sky conditions was corrected by using the cloud correction method based on Lambert equivalent reflectance, and the aerosol correction method based on aerosol index was used to obtain the surface UV-B irradiance under actual conditions. After applying these corrections, the global surface UV-B irradiance was eventually inverted. Third, to verify its correctness, the results of the EMI surface UV-B irradiance algorithm were compared with the European OMI satellite and Woudc site data at the same time by using a linear fitting method. The correlation coefficient R with the OMI data exceeded 0.9, and the correlation coefficient R with the Woudc site data exceeded 0.91, thereby suggesting that the results of the proposed algorithm show high agreement with both the OMI and Woudc data. However, several shortcomings were noted. For example, the surface UV-B irradiance inversion algorithm of EMI shows high accuracy in the region with low surface albedo, while the results are large in the region with high surface albedo.

The surface UV-B irradiance products of EMI are highly accurate and can provide a research basis for the subsequent releases of surface UV-B irradiance and other related products. These results also demonstrate the capability of the payload in global surface UV radiation spatial and temporal distribution monitoring applications and provide a basis for the long-term monitoring of the spatial and temporal variations of surface UV-B irradiance.

Key words: remote sensing, environmental trace gas monitoring instrument, surface UV-B irradiance, SCIATRAN, lookup table

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2019YFC0214702); National Natural Science Foundation of China (No. 41941011)