

TROPOMI 吸收性气溶胶指数反演算法及其应用

汤付颖^{1,2}, 周海金^{1*}, 王维和^{3,4}, 杨太平¹, 司福祺¹¹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, 安徽 合肥 230031;²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;³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;⁴中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

摘要 吸收性气溶胶指数(AAI)可用于表征紫外波段吸收性气溶胶成分占比,是卫星遥感探测的重要数据产品之一。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、地表高度、云高等参数,创建大气层顶反射率的查找表,结合 TROPOMI 的数据,反演吸收性气溶胶指数。由于仪器本身的特性,直接反演的 AAI 不能完全表征吸收性气溶胶的分布特征,需要扣除背景值,本研究通过统计法获取太平洋区域 AAI 的背景值。采用 2020 年 9 月美国加利福尼亚州山火时期数据进行分析,研究山火烟雾羽流的传输。结果显示了气溶胶的分布特征,取得的背景校正效果良好。反演结果与 TROPOMI 官方发布产品的空间分布特征基本一致,两者的平均相关系数达到 0.963。最后比较了卫星遥感 AAI 数据与地面 AERONET 站点气溶胶光学厚度(AOT)数据,可以看出两者的气溶胶变化趋势一致。

关键词 大气光学; 气溶胶; 吸收性气溶胶指数; 辐射传输模型; 反射率; 查找表; 背景值

中图分类号 O433

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1601001

Absorbing Aerosol Index Inversion Algorithm of TROPOMI and Its Application

Tang Fuying^{1,2}, Zhou Haijin^{1*}, Wang Weihe^{3,4}, Yang Taiping¹, Si Fuqi¹¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;³Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Center (NSMC), China Meteorological Administration (CMA), Beijing 100081, China;⁴National Satellite Meteorological Center (NSMC), China Meteorological Administration (CMA), Beijing 100081, China

Abstract The absorbing aerosol index (AAI), which can be used to characterize the proportion of absorbing aerosol components in the ultraviolet band, is one of the important data products for satellite remote sensing detection. The SCIATRAN radiative transfer model is employed to set solar zenith angle, viewing zenith angle, relative azimuth angle, surface altitude, and cloud altitude to draw up the lookup table of reflectance at the top of the atmosphere. The table is combined with the TROPOMI data to retrieve the AAI. Due to the characteristics of the satellite monitoring instrument, the directly retrieved AAI cannot fully characterize the distribution characteristics of absorbing aerosols, and the background value needs to be deducted. In this study, the background value of the AAI in the Pacific region was obtained by statistical methods. The data of the wildfire period in California, USA on

收稿日期: 2021-01-18; 修回日期: 2021-03-06; 录用日期: 2021-03-18

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC0214702)、国家自然科学基金(41975032)

通信作者: *hjzhou@aiofm, ac. cn

September 2020 was used to study the transmission of wildfire smoke plumes. The inversion results show the distribution characteristics of aerosols, with good background correction results, and they are basically consistent with the spatial distribution of the products officially released by TROPOMI, with an average correlation coefficient of 0.963. Finally, a comparison between the aerosol optical thickness (AOT) data at ground AERONET stations and the AAI data of satellite remote sensing indicates consistent aerosol changing trends of them.

Key words atmospheric optics; aerosol; absorbing aerosol index; radiative transfer model; reflectance; lookup table; background value

OCIS codes 010.1110; 010.1120; 280.1350; 290.5870

1 引言

气溶胶颗粒是大气的重要组成部分。根据气溶胶对紫外线的吸收程度,气溶胶可分为吸收性气溶胶和非吸收性气溶胶,其中,吸收性气溶胶不仅通过改变大气的辐射传输直接影响气候^[1-4],还通过影响云的成核和光学特性间接影响气候^[5-7]。吸收性气溶胶主要来源于森林大火、秸秆焚烧、火山喷发、沙尘暴、亚洲棕色云等。气溶胶颗粒悬浮在源区上空,并随大气传输进行长距离传输,不仅破坏地球环境,还时刻威胁着人类的健康。地基探测虽然能够得到较准确的气溶胶信息,但是受到区域限制,难以反映出气溶胶大范围、连续的时空变化,而卫星遥感监测可以弥补这个缺陷,实现对吸收性气溶胶排放、传输过程的监测^[8-11]。

AAI(Absorbing Aerosol Index)是一个定性指标,吸收性气溶胶在紫外波段两个波长处吸收的差异,表明大气中存在吸收性气溶胶^[12-14]。AAI作为一个长期的全球气溶胶监测指标^[15],对研究紫外吸收性气溶胶非常有用^[16],尤其是可应用于对沙尘气溶胶和生物质燃烧气溶胶的监测。例如,2005年,Darmenova^[17]利用中分辨率成像光谱仪(MODIS)气溶胶光学厚度和臭氧总量测绘光谱仪(TOMS)气溶胶指数重建沙尘事件的传输路径和覆盖范围;2010年,Guan等^[18]使用OMI和CALIPSO卫星的数据量化了气溶胶指数和生物质燃烧羽流的羽流高度的关系,这一关系为全球烟雾羽流高度提供了验证数据集;2018年,Sun等^[19]通过辐射传输模型模拟OMI测量的AAI,以此来获得固定区域野火羽流的单次反射反照率。

国际上多个卫星提供了AAI数据产品,例如TOMS^[20-21]、GOME^[14-22]、SCIAMACHY^[15-16,23]和OMI^[24-25]。欧洲航天局(ESA)于2017年10月13日发射了哥白尼哨兵-5先驱(Sentinel-5 Precursor)卫星,其中TROPOMI是目前空间分辨率最高的大气痕量气体遥感载荷,定期发布气溶胶指数官方产

品。国内,Fang等^[26]和Zhang等^[27]将利用风云三号卫星搭载紫外臭氧探测仪TOU的观测数据开发的AAI指数产品应用于监测大气污染过程及沙尘暴产生的吸收性气溶胶;2017年,赵富强等^[9]基于TOU观测仪器的数据,分析了青藏高原地区臭氧总量与吸收性气溶胶指数的关系。

本研究利用海洋干净区域计算仪器的背景值,扣除仪器本身对AAI反演的影响,利用TROPOMI数据对美国加利福尼亚州山火产生的气溶胶进行反演,得到的气溶胶指数能够准确反映气溶胶的分布特征。为验证反演算法的准确性,将反演结果与TROPOMI气溶胶官方产品和地基太阳光度计AERONET的监测结果进行了对比验证和分析。

2 方法

2.1 吸收性气溶胶指数的定义

气溶胶指数是一个与波长相关的变量,代表真实地气反射率(可能受到紫外吸收性气溶胶的影响)与模拟地气反射率(不含紫外吸收性气溶胶)之间的光谱对比度,可表示为^[12]

$$R_{AAI,\lambda} = -100 \left(\lg \frac{R_{\lambda}^{\text{meas}}}{R_{\lambda_0}^{\text{meas}}} - \lg \frac{R_{\lambda}^{\text{Ray}}}{R_{\lambda_0}^{\text{Ray}}} \right), \quad (1)$$

式中: R_{λ} 和 R_{λ_0} 分别为波长 λ 和 λ_0 处的反射率,上标meas和Ray分别表示实际测量结果和在无云、无气溶胶(只发生分子的瑞利散射、吸收以及地表反射和吸收)大气情况下的模拟结果。在本算法中,波长 λ 和 λ_0 分别为340 nm和380 nm。

反射率定义为

$$R = \frac{\pi I}{\mu_0 E_0}, \quad (2)$$

式中: I 是大气层顶部的辐亮度; E_0 是大气层顶部垂直于入射光方向的太阳辐照度; μ_0 是太阳天顶角 θ_0 的余弦值。

瑞利大气下方是均匀的朗伯表面,该朗伯表面的表面反照率 A_s 与波长无关。基于380 nm处 R^{meas} 计算获得的表面反照率 A_s 可用于计算380 nm处 R^{Ray} ,所以380 nm处 R^{meas} 和 R^{Ray} 是相

同的,则(1)式可简化为

$$R_{AAI,\lambda} = -100 \lg \frac{R_{\lambda}^{meas}}{R_{\lambda}^{Ray}} \quad (3)$$

AAI 为正值时,表示存在吸收性气溶胶,例如沙尘颗粒和烟雾羽流;AAI 为零或负值时,表示存在云或非吸收性气溶胶,例如海盐颗粒和硫酸盐气溶胶。

AAI 反演算法假设大气中无云,但实际大气中通常有云的存在。当有云时,TROPOMI 观测的 380 nm 处反射率出现较高值,从而导致异常的 AAI 值。为了计算云对 AAI 的影响,采用朗伯等效法对陆地表面、云表面和气溶胶表面的反射过程进行处理,通过比较卫星观测值与地表和全云的理论反射率计算值,获得各自的实际贡献比例。紫外波段范围内的反射率主要取决于有效云量和云顶反照率,所以有云情况下的紫外通道大气层顶(TOA)反射率可以表示为

$$R = R_s(A_s, P_s)(1 - f_c) + R_c(A_c, P_c)f_c, \quad (4)$$

式中: R 为整个像元的反射率; R_s 为像元内无云时的反射率; R_c 为像元内全云时的反射率; P_s 和 P_c 分别为地表压强和云顶压强; A_s 和 A_c 分别为地表和云顶反照率。有效云量参数 f_c 定义式为

$$f_c = \frac{R_{380}^{meas} - R_{surface}}{R_{cloudy} - R_{surface}}, \quad (5)$$

式中: R_{380}^{meas} 是波长为 380 nm 处的反射率测量值; $R_{surface}$ 是反照率为 0.08,无云、无气溶胶条件下的反射率; R_{cloudy} 是有云、无气溶胶条件下的反射率,云顶反照率设置为 0.8,通过引入有效云量 f_c ,可以判断像元是否受到云的影响。

本文使用 SCIATRAN 辐射传输模型计算波长 340 nm 和 380 nm 处的辐亮度,再通过(2)式计算得到连续反射率,创建查找表,然后对反射率进行计

算,得到球形反照率和大气透过率的查找表。通过 ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project)^[28] 全球云压数据转换插值得到统计云高 h_c ,代入太阳天顶角(SZA)、观测天顶角(VZA)、相对方位角(RAA)及地表高度 h_s 等参数值,并通过插值得到两个波长处的反射率计算值,最后结合反射率卫星测量值得到 AAI。算法流程图如图 1 所示。

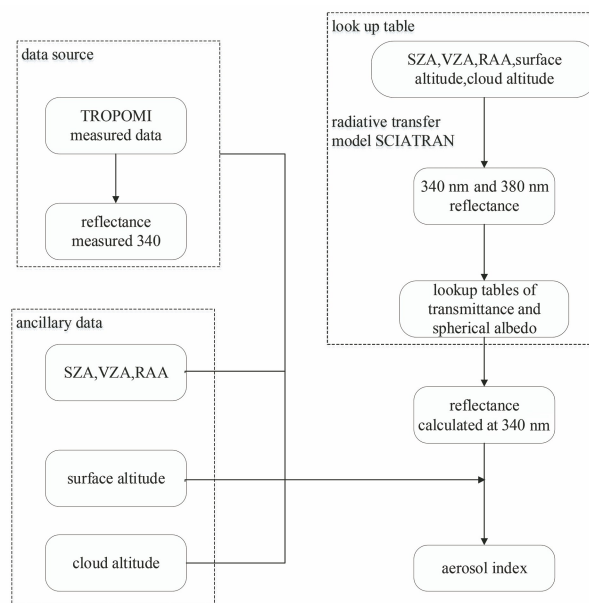


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of algorithm

2.2 查找表的创建

本文中使用的辐射传输模型(SCIATRAN),根据 SZA、VZA、RAA、 h_s 、 h_c 创建查找表。考虑到 TROPOMI 载包含退偏器件,其大气偏振敏感度非常低,模型计算中没有考虑偏振。通过模拟得到 340 nm/380 nm 波长对的反射率。表 1 列出了辐射传输模型的输入参数设置。

表 1 辐射传输模型的输入参数设置

Table 1 Input parameter setting of radiative transfer model

Parameter	Value
SZA / (°)	0.10, 10.00, 20.00, 30.68, 40.54, 45.57, 50.21, 55.94, 60.00, 65.17, 70.12, 72.54, 74.93, 76.11, 80.79, 84.26
VZA / (°)	0.10, 10.00, 20.00, 30.68, 40.54, 45.57, 50.21, 55.94, 60.00, 65.17, 70.12
RAA / (°)	0, 30, 60, 90, 120, 150, 180
$\frac{h_s}{h_c}$ / km	0, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0, 2.4, 2.8, 3.2, 3.6, 4.0, 4.6, 5.0, 5.6, 6.2, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 12.0, 14.0

3 背景值的计算

仪器定标误差等因素的影响^[29],导致 AAI 初

始反演结果存在异常。理论上深海区域通常为干净的区域,不受吸收性气溶胶以及其他污染气体的影响,AAI 是均一的。为了减小这些因素引起的 AAI

反演误差,更好地反映气溶胶的分布特征,本文采用统计方法计算载荷不同视场的背景干扰,提取背景值。本研究选择 2019 年 3 月太平洋干净区域的气溶胶指数结果进行分析,去除云量大于 0.3 的像素、耀斑污染像素;统计筛选出沿轨像元的最大值,得到最终的背景值。提取的背景值有很多的随机性,所以需要对其进行拟合以扣除 AAI 的随机性。图 2 给出了真实的背景值和拟合后的背景值。背景值随像元的变化体现了卫星轨道的不对称性,轨道两侧

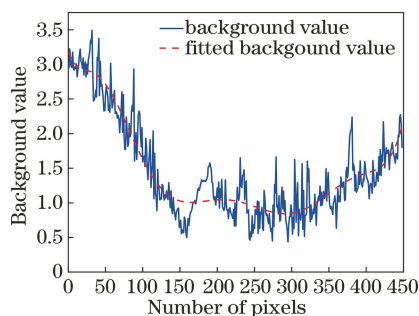


图 2 背景值随像素数的变化

Fig. 2 Variation of background value with number of pixels

均出现较高的 AAI 值。由于背景信号干扰的产生与地表场景无关,因此统计后的背景值可以应用于不同的场景目标,如分析典型的吸收性气溶胶事件。

4 结 果

4.1 与 TROPOMI 官方 AAI 产品的比较

2020 年 9 月美国加利福尼亚州发生森林山火,火灾产生的烟雾使大气中微小的有害颗粒增加,这些气溶胶颗粒严重影响空气质量。AAI 是监测烟雾气溶胶扩散的重要指标参数,根据气溶胶指数,可以获得 2020 年 9 月美国加利福尼亚州的气溶胶扩散特性。对山火中心的两个城市洛杉矶和旧金山区域展开了对烟雾羽流气溶胶传输的分析。

图 3 (a)~(i) 显示了 TROPOMI 官方产品,2020 年 9 月美国加州地区气溶胶指数结果,以及捕获的气溶胶羽流的主要特征。可以清楚地看到,2020 年 9 月 7—15 日,气溶胶羽流随着风的传输扩散至太平洋上空,向东横跨整个美国并传输至大西洋。2020 年 9 月 10—12 日,AAI 指数最高达到 16。

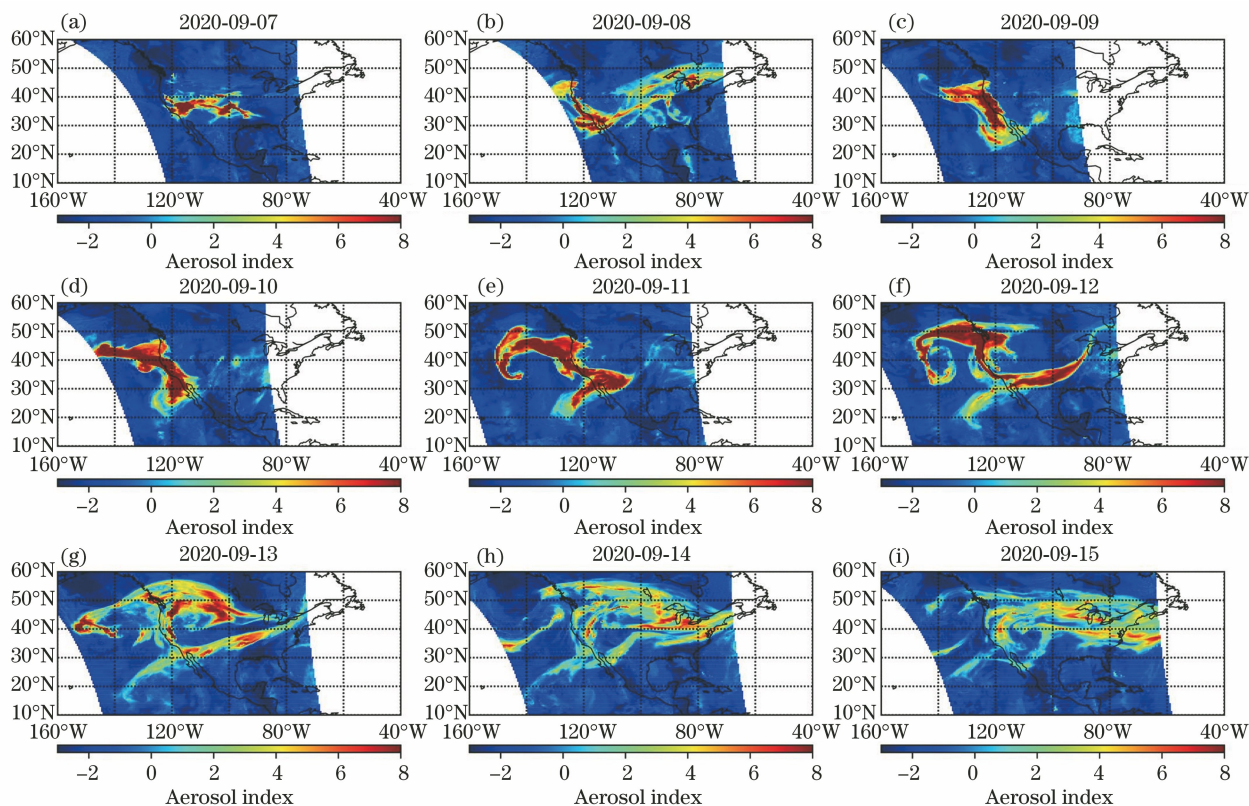


图 3 2020 年 9 月 7—15 日 TROPOMI 官方产品的吸收性气溶胶特征分布

Fig. 3 Characteristic distributions of absorbing aerosol of TROPOMI official products for September 7 to 15, 2020

基于查找表反演的 AAI 值得到的经背景值校正后的气溶胶分布图如图 4 (a)~(i) 所示,反演的

AAI 与 TROPOMI 官方产品的空间分布模式相似。AAI 的分布图清晰地显示了气溶胶的传输路径、传

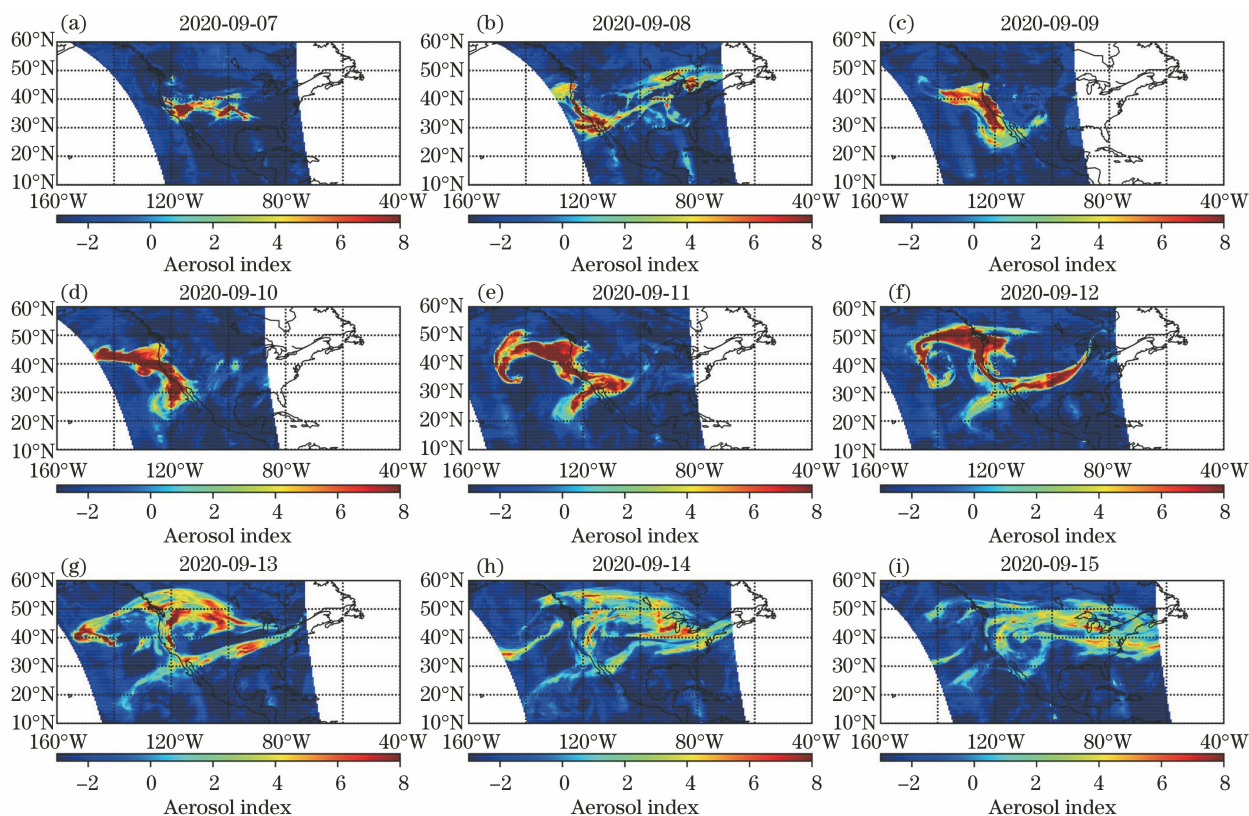


图 4 2020 年 9 月 7—15 日 TROPOMI 官方产品反演的吸收性气溶胶特征分布

Fig. 4 Retrieved characteristic distributions of absorbing aerosol of TROPOMI official products for September 7—15, 2020

输距离,以及气溶胶的地理分布。

为了更进一步地比较反演的 AAI 和 TROPOMI AAI 的相关性,将纬度 $10^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 和经度 $-160^{\circ}\sim -40^{\circ}$ 这个区域划分为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 的网格,求落在每个网格内的 AAI 平均值,去除区域内云量大于 0.8 的数据点,然后对每个网格反演的 AAI 和 TROPOMI AAI 平均值进行相关性分析,如图 5(a)~(i) 所示,两者的平均相关性为 0.963。

4.2 AAI 与 AERONET 气溶胶光学厚度的比较

对两个地基太阳光度计 AERONET 站点的气溶胶光学厚度(AOT)与 AAI 进行比较,结果如图 6 所示, AERONET 站点的位置分布在美国加利福尼亚州内。其中一个站点是接近洛杉矶的站点 Santa_Monica_Colg($34.017^{\circ}\text{N}, 118.47^{\circ}\text{W}$),此处数据缺失了 2020 年 9 月 8 日的日平均数据;另一个站点是接近旧金山的站点 NASA_Ames($37.42^{\circ}\text{N}, 122.057^{\circ}\text{W}$),此处数据缺失了 2020 年 9 月 9 日的日平均数据。对于 AAI 值,选择两个 AERONET 站点周围的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 区域,对所选区域的气溶胶指数数据取平均值。

图 6(a)、(b) 显示的是 2020 年 9 月美国加利福尼亚州地区的反演结果和 AERONET AOT 的每日变化。从图中可以看出 Santa_Monica_Colg 站点和 NASA_Ames 站点反演的 AAI 和 AERONET AOT 的变化趋势基本一致,两个站点在 2020 年 9 月 10 日都出现了 AOT 最大值,对应于 AAI 最大值,但是 NASA_Ames 站点在 2020 年 9 月 12 日这天的 AOT 变化与 AAI 的变化不同,可能的原因是地基观测站点靠近城市,城市污染增加了 AOT 的值。

5 结 论

开展了基于 TROPOMI 的吸收性气溶胶指数反演算法研究。该研究利用 SCIATRAN 辐射传输模型创建查找表,并选择海洋地区统计分析 AAI 背景值,解决了初始数据背景异常的问题。将开发的反演算法应用于美国加利福尼亚州大火对吸收性气溶胶分布、传输的影响分析,得到了气溶胶烟雾羽流的传输及分布,且反演结果与 TROPOMI 官方发布产品的平均相关系数为 0.963。最后将反演结果与两个 AERONET 站点

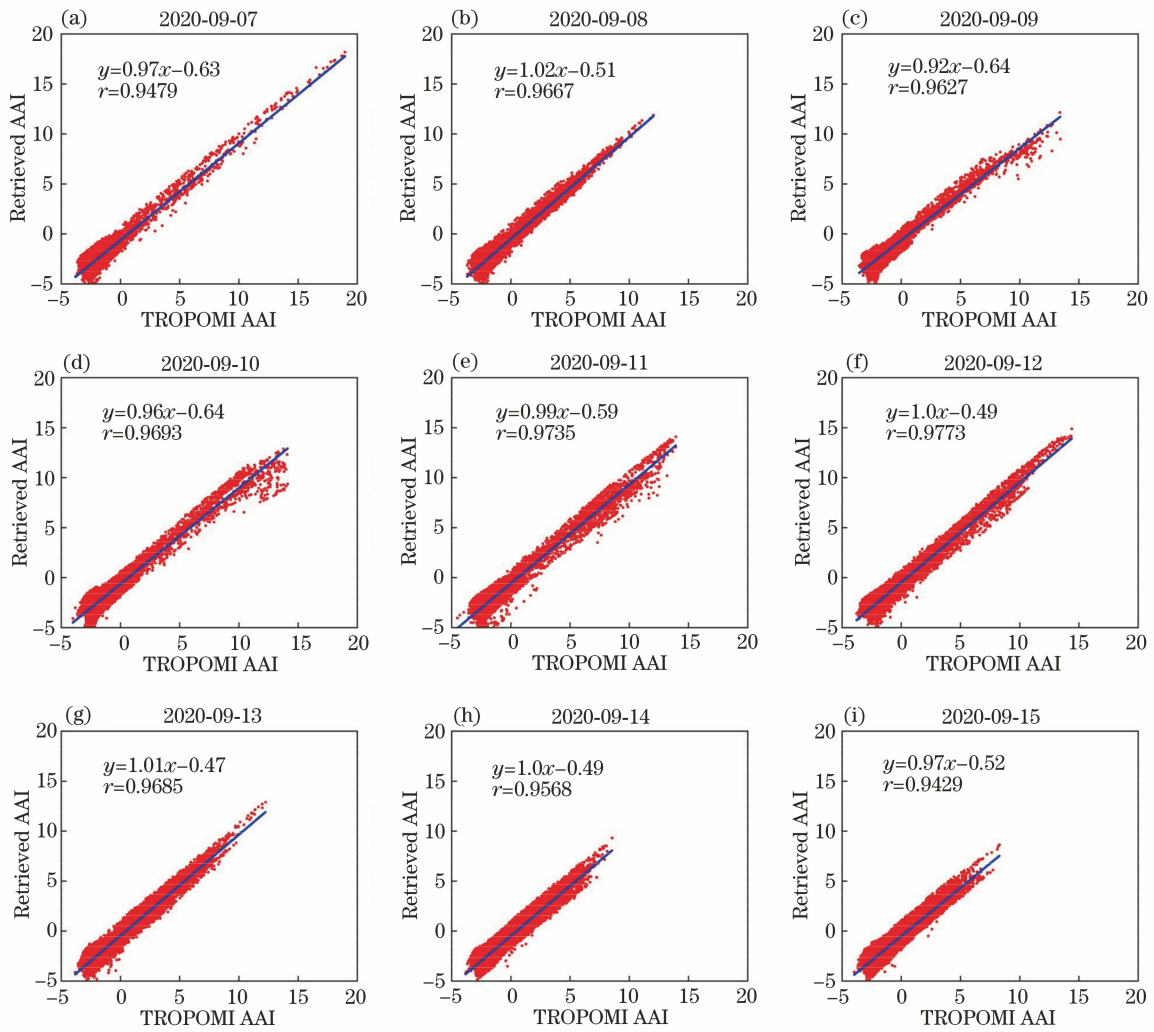


图 5 2020 年 9 月 7—15 日 TROPOMI AAI 产品与反演的 AAI 相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of TROPOMI and Retrieved AAI for September 7 to 15, 2020

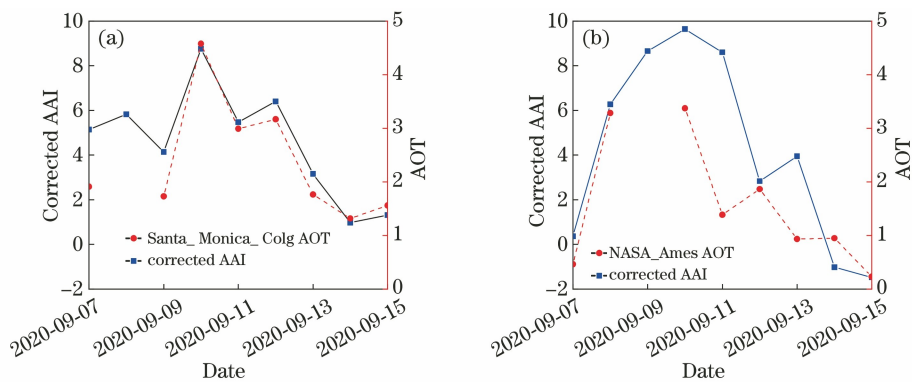


图 6 两个 AERONET 站点 AOT 与 AAI 的比较。(a) Santa_Monica_Colg 站点;(b) NASA_Ames 站点

Fig. 6 Comparison of AAI and AOT from two AERONET stations. (a) Santa_Monica_Colg station;

(b) NASA_Ames station

AOT 的每日平均值进行了对比,可以看出两者的每日变化趋势基本一致。

基于 TROPOMI 卫星载荷数据反演 AAI 算法的研究工作,为国内 AAI 产品反演提供了良好的

研究基础。后续研究将开展长期观测,进一步分析 TROPOMI 衰退对 AAI 结果的影响,同时开展对基于国产大气探测卫星载荷的 AAI 反演算法的研究工作。

参 考 文 献

- [1] Tegen I, Hollrig P, Chin M, et al. Contribution of different aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness: estimates from model results [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D20): 23895-23915.
- [2] Haywood J, Boucher O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: a review[J]. *Reviews of Geophysics*, 2000, 38(4): 513-543.
- [3] Harrison S P, Kohfeld K E, Roelandt C, et al. The role of dust in climate changes today, at the last glacial maximum and in the future[J]. *Earth-Science Reviews*, 2001, 54(1/2/3): 43-80.
- [4] Sokolik I N, Winker D M, Bergametti G, et al. Introduction to special section: outstanding problems in quantifying the radiative impacts of mineral dust [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D16): 18015-18027.
- [5] Levin Z, Ganor E, Gladstein V. The effects of desert particles coated with sulfate on rain formation in the eastern Mediterranean [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1996, 35(9): 1511-1523.
- [6] Wurzler S, Reisin T G, Levin Z. Modification of mineral dust particles by cloud processing and subsequent effects on drop size distributions [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D4): 4501-4512.
- [7] Gao J N, Li L P, Cui T W, et al. Retrieval of fine mode aerosol optical depth based on satellite polarization remote sensing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(3): 030101. 高迦南, 李丽萍, 崔廷伟, 等. 基于卫星偏振遥感的细粒子气溶胶光学厚度反演[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(3): 030101.
- [8] Zha Y, He J L, Cheng F, et al. Atmospheric aerosol retrieval and remote sensing of polluted environment monitoring[M]. Beijing: Science Press, 2020: 10-11. 查勇, 贺军亮, 程峰, 等. 大气气溶胶反演及其污染环境监测遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 10-11.
- [9] Zhao F Q, Wang W H, Deng X B, et al. Relationship between absorbing aerosol index and total column ozone[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(4): 500-508. 赵富强, 王维和, 邓小波, 等. 大气臭氧总量与吸收性气溶胶指数的关系[J]. *遥感学报*, 2017, 21(4): 500-508.
- [10] Xu J J, Bu L B, Liu J Q, et al. Airborne high-spectral-resolution lidar for atmospheric aerosol detection[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0710003. 徐俊杰, 卜令兵, 刘继桥, 等. 机载高光谱分辨率激光雷达探测大气气溶胶的研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0710003.
- [11] Luo H H, Chen Z Y, Zhang T S, et al. Comparison of aerosol vertical distribution based on CALIPSO satellite and ground observation data [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1201003. 罗卉卉, 陈臻懿, 张天舒, 等. 基于 CALIPSO 卫星和地面观测资料的气溶胶垂直分布对比[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1201003.
- [12] Herman J R, Bhartia P K, Torres O, et al. Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D14): 16911-16922.
- [13] Torres O, Bhartia P K, Herman J R, et al. Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation: theoretical basis [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103(D14): 17099-17110.
- [14] de Graaf M. Absorbing aerosol index: sensitivity analysis, application to GOME and comparison with TOMS [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D1): D01201.
- [15] de Graaf M, Stammes P. SCIAMACHY absorbing aerosol index: calibration issues and global results from 2002-2004 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, 5(3): 3367-3389.
- [16] Penning de Vries M J M, Beirle S, Wagner T. UV aerosol indices from SCIAMACHY: introducing the SCattering index (SCI) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(24): 9555-9567.
- [17] Darmenova K. Characterization of east Asian dust outbreaks in the spring of 2001 using ground-based and satellite data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D2): D02204.
- [18] Guan H, Esswein R, Lopez J, et al. A multi-decadal history of biomass burning plume heights identified using aerosol index measurements[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(14): 6461-6469.
- [19] Sun J, Veeffkind J P, van Velthoven P, et al. Quantifying the single-scattering albedo for the January 2017 Chile wildfires from simulations of the OMI absorbing aerosol index [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(9): 5261-5277.
- [20] Hsu N C, Herman J R, Torres O, et al. Comparisons of the TOMS aerosol index with sun-photometer aerosol optical thickness: results and applications [J]. *Journal of Geophysical Research:*

- Atmospheres, 1999, 104(D6): 6269-6279.
- [21] Mahowald N M. Sensitivity of TOMS aerosol index to boundary layer height: implications for detection of mineral aerosol sources [J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(3): L03103.
- [22] Tilstra L G, Tuinder O N E, Stammes P. GOME-2 absorbing aerosol index: statistical analysis, comparison to GOME-1 and impact of instrument degradation[EB/OL]. [2021-01-18]. <https://www.temis.nl/airpollution/absaai/>.
- [23] Tilstra L G, de Graaf M, Aben I, et al. In-flight degradation correction of SCIAMACHY UV reflectances and absorbing aerosol index[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117(D6): D06209.
- [24] Buchard V, da Silva A M, Colarco P R, et al. Using the OMI aerosol index and absorption aerosol optical depth to evaluate the NASA MERRA aerosol reanalysis[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(10): 5743-5760.
- [25] Hammer M S, Martin R V, Li C, et al. Insight into global trends in aerosol composition from 2005 to 2015 inferred from the OMI ultraviolet aerosol index [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(11): 8097-8112.
- [26] Fang L, Wang S P, Yu T, et al. Changes in aerosol optical and micro-physical properties over northeast Asia from a severe dust storm in April 2014 [J]. Remote Sensing, 2016, 8(5): 394.
- [27] Zhang X Y, Wang L, Wang W H, et al. Long-term trend and spatiotemporal variations of haze over China by satellite observations from 1979 to 2013 [J]. Atmospheric Environment, 2015, 119: 362-373.
- [28] Rossow W B, Schiffer R A. Advances in understanding clouds from ISCCP[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, 80(11): 2261-2287.
- [29] Ludewig A, Kleipool Q, Bartstra R, et al. In-flight calibration results of the TROPOMI payload on board the sentinel-5 precursor satellite [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2020, 13(7): 3561-3580.