

引用格式: Xu Yuwen, Zhang Hao, Chen Zhengchao, *et al.* Retrieval of AOD from Sentinel-2 Data based on Deep Blue Algorithm[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(2): 372-380. [徐玉雯, 张浩, 陈正超, 等. 基于深蓝算法的 Sentinel-2 数据气溶胶光学厚度反演[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(2): 372-380.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.2.0372

基于深蓝算法的 Sentinel-2 数据气溶胶光学厚度反演

徐玉雯^{1,2}, 张 浩², 陈正超², 景海涛¹

(1. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000;

2. 中国科学院遥感与数字地球研究所 数字地球重点实验室, 北京 100094)

摘要: 中高分辨率气溶胶信息对于高精度地表反射率反演以及城市空气环境质量监测具有重大意义,但在城市及稀疏植被等高亮地表区域,气溶胶光学厚度(AOD)的高精度反演一直是定量遥感领域的难点之一。以北京城市区和包头沙漠区为例,利用 MODIS 地表反射率产品构建先验知识约束条件,基于深蓝算法实现了 13 景 Sentinel-2 高亮地表的 AOD 反演。为验证算法精度,将反演结果与全球气溶胶自动观测网(AERONET)站点实测值、Sentinel-2 官方插件 Sen2Cor 处理结果、Landsat-8 反演值作对比。结果表明:①采用深蓝算法反演的 AOD 值与 AERONET 实测值具有显著的相关性($R^2 > 0.9$, RMSE=0.056);②无论是沙漠高亮区还是植被较少的城市高亮区,Sen2Cor 插件反演的 AOD 值整景均为固定值,无空间分布,不符合实际情况;③ Sentinel-2 深蓝算法反演结果与准同步过境的 Landsat-8 反演的 AOD 产品在空间分布上具有高度一致性,较好地反映了人类活动特征。相比于目前官方产品,深蓝算法适合 Sentinel-2 数据高亮区域的气溶胶反演,在绝对精度和空间分布趋势方面均具有明显优势。

关键词: 气溶胶光学厚度(AOD);深蓝算法(Deep Blue Algorithm);Sentinel-2A/B

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2020)02-0372-09

1 引言

近年来,随着中高分辨率卫星日益增多,广大用户接触到的遥感数据源更加广泛,但是提供全球免费观测服务、具有较高几何精度和辐射精度的卫星却比较少,目前,最常用的有 Landsat-8 和 Sentinel-2。Sentinel-2 是全球环境与安全监测计划(GMES 计划)下的高空间分辨率卫星,包括 A、B 两星,分别于 2015 年 6 月和 2017 年 3 月发射成功,两者轨道运行高度均为 786 km,以相位差 180°的方式组成观测星座,双星重访周期 5 d。两星搭载的多光谱成像仪波段设置相似,实际成像与产品分发幅宽

分别为 290 km 和 109.8 km^[1]。自发射以来, Sentinel-2 凭借着其大幅宽、高精度、高空间分辨率、短周期观测的特点以及独特的‘红边’波段,在生物量估算、水质参数提取、土地覆盖监测以及植被变化检测、农作物识别分类等方面得到广泛应用^[2-6]。而开展这些定量化遥感应用的重要前提往往是需要去除大气效应的地表反射率数据。为此,欧空局针对 Sentinel-2 数据开发了业务化算法以供用户获取地表反射率产品,该算法主要分为两个部分^[7-8]:一是地表场景分类(SC, Scene Classification),主要原理是根据不同波段对典型地物的光谱响应特性进行波段组合以计算表征指数,并设置阈值实现对云、

收稿日期: 2018-11-27; 修订日期: 2020-02-15

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项“GF-6 卫星数据大气校正技术”(30-Y20A02-9003-17/18),国家自然科学基金项目“中高分辨率多源光学遥感图像辐射归一化模型与方法研究”(41771397)。

作者简介: 徐玉雯(1994—),女,河南鹤壁人,硕士研究生,主要从事大气校正、辐射归一化方面的研究。E-mail: 1277300408@qq.com

通讯作者: 张 浩(1982—),男,河南许昌人,博士,副研究员,主要从事光学遥感数据辐射定标、大气校正相关方面的研究。

E-mail: zhanghao612@radi.ac.cn

雪以及水体等特殊地物的检测;二是大气校正(S2AC, Sentinel-2 Atmospheric Correction),将表观反射率(TOA)通过查找表去除大气吸收与散射的影响转为地表真实反射率(BOA),该查找表采用LibRadtran4辐射传输模型建立并依据Sentinel-2光谱响应函数经过重采样,以提高计算效率。

气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)作为气溶胶最基本的光学特征之一,指的是沿辐射传输路径,单位截面上所有吸收和散射物质产生的总削弱^[9]。它不仅仅是研究大气浊度表征大气环境质量的因子,也是大气校正中最不可或缺的参数。在大气环境监测方面,气溶胶粒子可通过促进云雾的形成、改变大气中不同化学成分浓度、吸收和散射太阳短波和地球长波辐射等方式直接或间接的影响气候变化^[10-11],另外,AOD还经常与PM₁₀、PM_{2.5}共同作为评价大气环境质量的重要参数^[12-13];在大气校正方面,AOD与水汽含量作为影响上下行透过率最重要的两个因子,对地表反射率反演精度的保持具有不可忽视的作用。

暗像元法是利用遥感的手段反演气溶胶发展最早的方法^[14],也称为浓密植被法(Dense Dark Vegetation, DDV)。该算法原理是通过波段阈值判定图像中的暗像元,假设暗像元在短波红外气溶胶散射近似为0,忽略程辐射效应,再根据红蓝波段与短波红外地表反射率的线性关系反演气溶胶。后续诸多学者在估算暗像元以及红、蓝波段线性关系等方面不断改进,并在MODIS、OLI、HJ、GF等国内外传感器上得到验证和应用^[15-21]。但对于浓密植被覆盖率比较低的区域,2.1μm短波红外波段处表观反射率受地表影响较强,依据暗像元估算的地表反射率具有较大误差^[22]。再者,在城市、沙漠以及冬季落叶林覆盖较高的北方等高亮地表区域,整景影像无足够数量的暗像元,暗像元法不再适用。针对高亮地表气溶胶光学厚度反演问题,Hsu等根据蓝光波段气溶胶对卫星观测信号有较强贡献、地表反射较弱的特点提出深蓝算法,在沙哈拉沙漠以及中国西北沙漠带等高亮实验区得到验证,后续也应用到MODIS C6版本的10 km气溶胶产品反演中^[23-25]。王中挺等^[26-29]在Hsu等研究的基础上先后将深蓝算法扩展到HJ、GF1-WFV等国产卫星影像上,并取得较好的实验结果。另外,Sun等^[30]也利用深蓝算法在高亮地区实现了OLI时间序列影像的AOD反演。目前,诸多学者多采用官方提供的Sen2Cor插

件计算Sentinel-2地表反射率,反演结果中包含了基于改进DDV算法得到的气溶胶产品^[7],但是在高亮地表区域该产品的可靠性并未得到有效的验证。

基于深蓝算法,以2017年11月至2018年5月之间北京城市区和包头沙漠区13景冬季和初春季的Sentinel-2数据为例,开展高亮地表气溶胶反演的研究。结合算法原理,考虑数据源特点,提出有针对性的数据处理流程,并采用包含AERONET实测值在内的多源验证数据对反演结果的绝对值精度和空间分布趋势进行分析。

2 研究方法

假设地表是均一朗伯体,气溶胶和大气分子在水平方向上分布均一,沿垂直方向均匀变化,那么传感器接收到的大气层顶的表观反射率为^[31-32]:

$$\rho_{\text{TOA}}(\theta_s, \theta_v, \varphi) = t_g \cdot \left[\rho_{\text{path}}(\theta_s, \theta_v, \varphi) + \frac{\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi) T(\theta_s) T(\theta_v)}{1 - \rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi) S} \right] \quad (1)$$

其中: θ_s 、 θ_v 为太阳天顶角、观测天顶角; φ 为相对方位角,指的是太阳方位角与观测方位角之差; t_g 是以O₃、H₂O、CO₂等为代表的气体分子透过率; ρ_{path} 为大气路径程辐射项等效反射率; ρ_s 为地表二项反射率,当地表朗伯体时为 r ; $T(\theta_s)$ 、 $T(\theta_v)$ 分别代表上下行直射加散射的透过率; S 为大气下界半球反射率。将上式简化形式,可变换为:

$$\rho_s = \frac{\rho_{\text{TOA}} - t_g \rho_{\text{path}}}{S(\rho_{\text{TOA}} - t_g \rho_{\text{path}}) + t_g T(\theta_s) T(\theta_v)} \quad (2)$$

其中: ρ_{path} 、 $T(\theta_s)$ 、 $T(\theta_v)$ 、 S 是与气溶胶相关的函数,它们代表了整层大气对太阳辐射能量吸收和散射的能力。实际应用中,若要从影像中反演气溶胶,需借助辐射传输模型建立查找表,在已知表观反射率(或地表反射率)和几何参数的情况下模拟不同AOD值与以上4个参数的之间的对应关系,通过地气解耦以获取模拟的地表反射率或者表观反射率,并与实际的地表反射率或表观反射率进行比对,筛选出两者差值最小的一组所对应的大气参数,后经查找表查询、插值得到该组大气参数对应的AOD值。DDV算法与深蓝算法均是基于该原理,只是两者在地表反射率获取的方式上有所差别,DDV算法是依据影像自身波段之间的线性关系得到红、蓝波段的地表反射率,而深蓝算法需要借助外部高精度地表反射率产品来获取蓝波段的地表反射率。

采用MODIS 8 d合成的地表反射率产品构建

地表反射率数库。MODIS 蓝波段与 Sentinel-2A/B 深蓝波段的光谱响应函数如图 1 所示,从图中可以看出,MODIS band 3 与 Sentinel-2A/B band 1 的中心波长、光谱范围、光谱响应值均有较大的差异,由此造成的两传感器对相同地物成像时接收的辐射能量也具有一定的差异。研究表明,0.01 的地表反射误差会带来大于 0.1 的 AOD 估算误差^[33-35]。因而,在使用 MODIS 蓝波段反射率之前,需要先经过波段反射率修正将其转换为 Sentinel-2 深蓝波段的地表反射率。当缺少实测光谱数据时,光谱库在一定程度上可以解决该问题。统计 ENVI 光谱库中 USGS 以及 ASTER 文件夹下的所有地物类别,每类地物选用 20 条光谱(见表 1),重采样到 1 nm 间隔,分别与 MODIS band 3 和 Sentinel 2A/B band 1 的光谱响应函数卷积计算得到地物光谱等效值。由于 MODIS band 3 和 Sentinel 2A/B band 1 波宽近似,对两者相应地物的光谱等效值按照进行散点回归分析,如图 2,经拟合系数的校正,最终形成与 Sentinel-2A/B 相匹配的地表反射率库。

而查找表的构建一般借助于 6SV (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum vector code)辐射传输模型,它是在标量 6S^[36]的基础引入其他分量的计算发展起来的,相对于 6S 模型,它增加极化效应,提高了瑞利散射和气溶胶散射的计算精度,Kotchenova 等^[37]曾对比了 6SV 与其他几个高精度的辐射传输模型,验证了 6SV 的可靠性与精度。针对不同景的 Sentinel-2 影像,采用目前最新发布的 6SV2.1 建立查找表。其中,太阳和卫星观测几何信息设置参考影像自身几何波段;气溶胶类型设为大陆型,光学厚度值(550 nm 处)分为

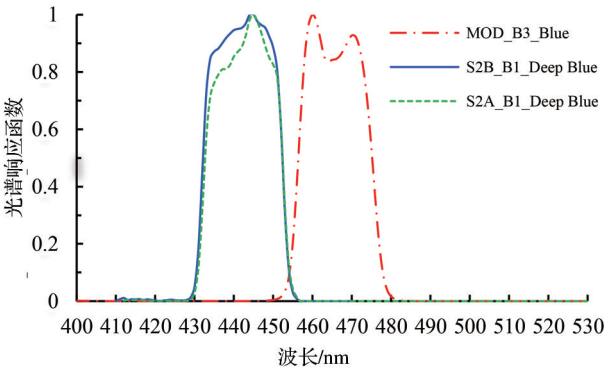


图 1 MODIS 蓝波段与 Sentinel-2A/B 深蓝波段
光谱响应函数图

Fig.1 The Spectral response function of MODIS blue
band and Sentinel-2A/B deep blue band

表 1 选用的光谱种类和名称

Table 1 The selected spectrum types and name

类别	光谱名称	光谱库	条数
coatings	coatings_beckman_440	USGS	7
	coatings_beckman_449	USGS	3
	coatings_beckman_3228	USGS	7
	coatings_beckman_3516	USGS	3
manmade	manmade_jhu_becknic_536	ASTER	20
mineral	mineral_usgs_perknic_2756	ASTER	20
mixtures	mixtures_beckman_3088	USGS	20
rock	rock_usgs_perknic_2530	ASTER	20
soil	soil_jhu_becknic_2844	ASTER	20
vegetation	vegetation_asd_2035	USGS	8
	vegetation_beckman_438	USGS	12
volatiles	volatiles_asd_2151	USGS	18
	volatiles_beckman_480	USGS	2

0.001、0.05、0.1、0.15、0.2、0.25、0.4、0.6、0.8、1.0、1.25、1.5、2.0;介于 6SV 中固定大气模式的水汽和臭氧的含量是固定不变的,而臭氧在波长较短的蓝

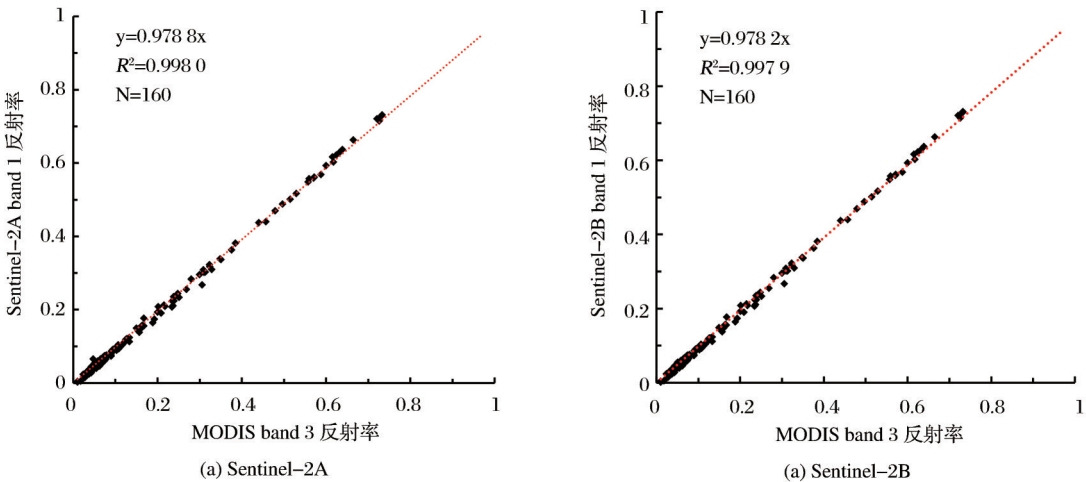


图 2 MODIS 与 Sentinel-2A/B 蓝波段地表反射率的线性拟合图

Fig.2 The linear fitting of land surface reflectance in blue band between MODIS and Sentinel-2A/B

波段的吸收作用比较明显,为减少大气模式带来的误差,采用自定义的大气模式,臭氧含量通过 <https://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/tools/ozonemap/> 网站依据经纬度和日期查询,水汽含量采用研究区内 AERONET 站点过境时间前后的平均值;同时,应程序要求,将 Sentinel-2A/B 的光谱响应函数重采样到 2.5 nm 间隔,输入相波长范围以及反射相函数。最后,读入每一个输出文件对应的一组几何信息和大气参数统一存储以建立查找表。

3 数据收集与预处理

采用的数据包括 Sentinel-2A/B L1C 影像数据、MODIS 8 d 合成的反射率影像数据(MOD09A1)以及 AERONET 地基站点同步观测数据。

首先,在 USGS 数据下载官网(<https://glovis.usgs.gov/app>)上筛选 2017 年 11 月至 2018 年 5 月之

间北京城市区和包头沙漠区可与 AERONET 站点数据时间和空间上配对的影像,符合条件的一共下载了 13 景,其中,北京城市区为 6 景,成像日期分别为 2017-11-24、2017-12-19、2018-01-13、2018-02-12、2018-03-24、2018-04-08,包头沙漠区 7 景,成像日期分别为 2017-11-30、2017-12-10、2017-12-28、2018-03-25、2018-04-02、2018-05-04、2018-05-14。对应地,在 NASA 官网(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>)上分别下载与 13 景 Sentinel-2 成像日期相近的、相同区域的 MOD09A1 影像。同时,考虑多源数据验证气溶胶反演结果,查询与 Sentinel-2 准同步过境的 Landsat-8 影像并下载。最后,在全球气溶胶自动观测网站(<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>)上获取 Sentinel-2 影像成像当天的 Level1.5 的 AERONET 地基站点数据。研究区与 AERONET 站点分布如图 3 所示。

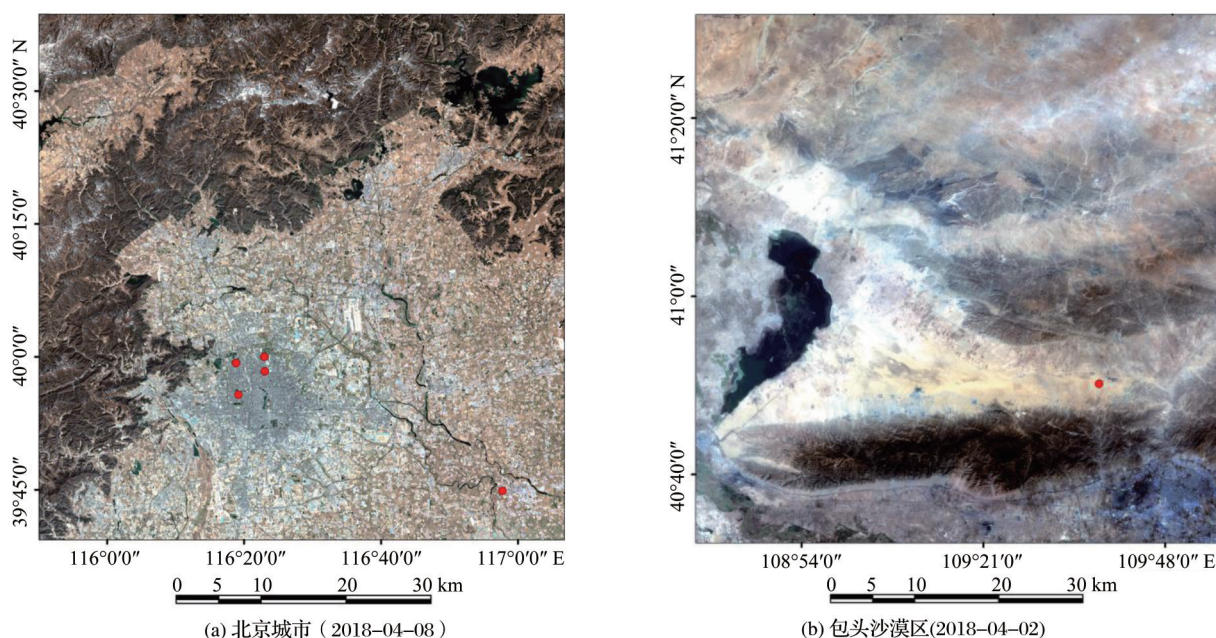


图3 研究区 RGB 图像与 AERONET 地基站点空间分布(红色点)

Fig.3 The RGB image of study area and the spatial distribution of five AERONET sites (red dots)

Sentinel-2 数据:下载得到的 L1C 的 Sentinel 影像数据是经正射校正和亚像元级几何精校正后的 TOA 产品,以 .safe 文件组织存储,包含了 0.4~2.4 μm 光谱范围内的 13 个光谱波段的数据,空间分辨率分为 10、20、60 m。每个光谱波段对应的成像几何波段,空间分辨率为 5 000 m。对 L1C 数据采用欧空局官方提供的 L2A_AtmosCorr 算法反演得到 60 m 空间分辨率的 Level-2A 地表反射率产品,该产品除了包含 13 个光谱波段外,还增加了 AOD、水汽、云掩模以及雪掩模等副产品波段。

掩模 Sentinel-2 影像中的云和水体。云和雪均属于高亮地表,反射率较高,Sentinel-2 官方云检测算法可以通过迭代阈值判断对影像中的云和雪进行很好的区分,所以直接使用 Level2 产品中的云掩模波段掩模云体;但是,从目视上看 Sentinel-2 水掩模波段对细碎水体的识别效果较差,所以使用 NDWI 指数进行提取,将 NDWI 大于 0.25 的像元判断为水体像元。对于掩模区域不进行反演,后续将无效值通过 ArcGIS 空间邻域插值进行填充。

$$NDWI = (\rho_2 - \rho_4) / (\rho_2 + \rho_4) \quad (3)$$

其中: ρ_2 代表绿波段, 对应 Sentinel-2 中的 band 3, ρ_4 代表近红波段, 对应 Sentinel-2 中的 band 8a。

MODIS 地表反射率数据: 利用与 Sentinel-2 过境时间最接近的 MODIS 8 d 合成的 500 m 分辨率三级地表反射率产品 (MOD09A1) 构建地表反射率库, 每一个 MOD09A1 的像素包含了 8 d 之内最有可能的 L2G 观测值, 考虑高观测覆盖、低视角无云以及气溶胶浓度等, 尽量降低了反射率短期变化以及云覆盖的影响。原始的 MOD09A1 采用正弦投影, 以每 $10^\circ \times 10^\circ$ 的区域为一景影像分幅存储。包头沙漠区一景 MOD09A1 影像则可覆盖, 北京城市区则涉及四景, 利用 NASA 提供的 MRT (MODIS Reprojection Tool) 工具从 MOD09A1 提取蓝波段的反射率, 并对其转投影、拼接、裁剪, 获得与研究区相一致的 MODIS 蓝波段地表反射率数据。

AERONET 站点数据: 为验证 AOD 反演精度, 利用 5 个北京城市区以及 1 个包头沙漠区的 AERONET (Aerosol Robotic Network) 地基观测站: Beijing 站 (116.381° E , 39.977° N)、Beijing_PKU 站 (116.310° E , 39.992° N)、Beijing_RADI 站 (116.379° E , 40.005° N)、Beijing-CAMS 站 (116.317° E , 39.933° N)、Xianghe 站 (116.962° E , 39.754° N) 和 AOE_Baotou (40.852° N , 109.629° E) 进行精度验证分析, 站点的空间分布如图 3 所示。根据数据质量控制的不同, AERONET 发布的产品包含 Level 1.0 (unscreened)、Level 1.5 (cloud-screened)、Level 2.0 (cloud-screened and quality-assured) 3 种不同等级。由于 2018 年中国区域的 Level 2.0 数据大部分仍未公布, 本文选用 Level 1.5 的产品作为观测站点的验证数据。AERONET 提供 340、380、440、500、675、870 和 1 020 共 7 个波段的气溶胶观测值, 选取最接近 550 nm 的 4 个波段 440、500、675、870 nm 的观测数据, 利用 Angstrom 公式^[38]通过插值获得 550 nm 处的 AOD。

$$\tau_a(\lambda) = \beta \times \lambda^{-\alpha} \quad (4)$$

其中: $\tau_a(\lambda)$ 为 λ 波长处的气溶胶光学厚度; β 为波长指数 Angstrom 混浊系数, 相当于波长为 1 μm 时的气溶胶光学厚度; α 是 Angstrom 指数, 与气溶胶的平均半径有关, 气溶胶粒子越大, α 越小。按照公式 (4) 计算成像时间前后 30 min 内距成像时间最邻近的 2 个时间点 550 nm 处 AOD, 平均后作为该站点在该成像时间点的 AOD 验证值。

4 结果验证与分析

假设城市亮目标区域地物覆盖类型在短时间不会发生变化, 基于深蓝算法原理反演 AOD。首先, 逐像元读入包含太阳天顶角、太阳方位角、卫星天顶角、卫星方位角在内的几何信息, 然后, 在查找表中查找与像元几何信息最为匹配的一组, 获取该组几何条件下不同 AOD 值对应的 ρ_{path} 、 $T(\theta_s)$ 、 $T(\theta_v)$ 、 S , 建立 AOD 与这些大气参数之间的对应关系。通过像元经纬度坐标查找深蓝波段地表反射率库, 和大气参数一起代入式 (1) 计算表观反射率, 并与真实 Sentinel-2 表观反射率比较, 最后通过线性插值获取最符合的大气参数所对应的 AOD 值。

在反演结果基础上, 采用多源数据对深蓝算法反演结果进行验证, 主要分为 3 个方面: 基于 AERONET 地面站点观测数据验证 AOD 反演结果精度; 利用 Sen2cor 插件对 Sentinel-2 数据进行大气校正获取气溶胶产品, 与深蓝算法反演结果对比; 结合 1 景成像时间相近的 Landsat-8 气溶胶产品对 AOD 空间分布状况进行分析。

4.1 与 AERONET 站点数据对比

为验证深蓝算法于 Sentinel-2 数据的可行性, 首先, 采用 AERONET 站点 550 nm 处 AOD 值对算法数值精度进行验证。对比研究区范围内 2017 年 11 月至 2018 年 5 月所有有效影像数据和站点数据, 对两者匹配筛选, 去除不符合条件的无效数据对, 最终获得北京城市区遥感监测与地面站点配对数有 24 对, 包头沙漠区有 7 对, 一共 34 对。另外, 为减少气溶胶在空间上的统计误差, 选取站点附近 1 km 范围的 17×17 个像元, 去除最大的 15% 与最小的 15%, 将中间 70% 进行平均。同时, 将最接近卫星成像前后的两个 550 nm 处的 AERONET 观测值进行平均, 对深蓝算法反演结果和站点数据实测结果的散点值进行拟合, 如图 4 所示。

从图中可以看出, 深蓝算法反演结果与地面站点观测数据有较好的相关性, 相关系数接近于 1, R^2 大于 0.9, 总体上与地面观测值有细微的差别。实验中发现反演结果接近于 0.1 时, 深蓝算法相对于地面观测数据, 出现偏低估计的效果, 这可能与查找表的建立以及 AOD 插值方式有关。另外, 地表反射率库质量的好坏直接影响了 AOD 反演结果, 比如 3 月 34 日前后的 MOD09A1 数据在城中心部分出现明显的补充值, 导致 3 月份的 AOD 普遍偏高。再者, Sentinel-2 深蓝波段分辨率为 60 m, 而

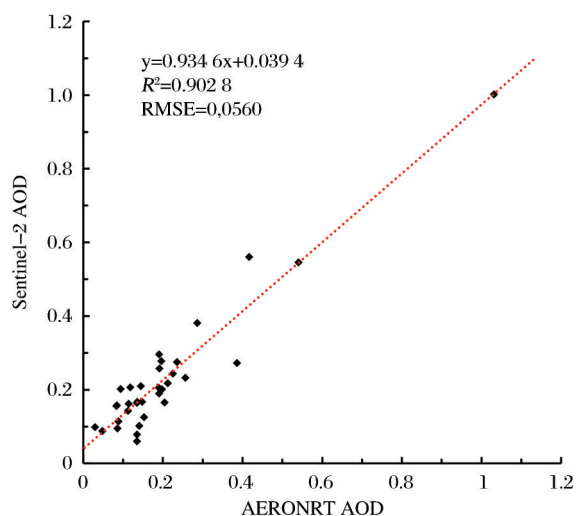


图 4 遥感反演 AOD 与 AERONET AOD 散点对比图

Fig.4 The Scatter plot of Sentinel-2-derived AOD at 550 against ground-based AERONET AOD

MOD09A1 的反射率为 500 m, 相当于 1 个 MODIS 反射率像元对应了 8 个不同的 Sentinel-2 像元, 若地表场景比较, 误差相对较小, 但是在城市区, 地表类型复杂, 分辨率越高, 成像易受邻近像元及建筑阴影的影像, 反演结果相对于均匀场景反演结果可能偏差。

4.2 Sentinel 官方算法反演气溶胶

ESA 官方反演气溶胶主要是基于改进的 DDV 算法, 提取暗像元时参照了 ACTOR 软件多阈值判断和迭代求解的思想^[39], 相对于最原始的 DDV 算法, 它通过迭代计算减少了负反射率值的出现, 在确定气溶胶类型方面更具灵活性, 并且改进查找表提高了计算效率和精度^[7]。对于暗像元较少的影像, 算法在查找暗像元时虽然已经放宽了设定条件, 将 2.1 μm 处判断暗像元的阈值从 0.05 提升至 0.1、0.12, 但是由于北方冬季和初春季节植被较少, 即便是利用改进的 DDV 算法并仍未找到符合数量和质量要求的暗像元。经直方图统计发现, 13 景中每景影像反演得到的 AOD 图像中所有像元值均一样, 为固定值(见表 2), 相当于每景影像采用了默认能见度值换算, 这是不符合实际的。这在一定程度上表明 Sentinel 官方反演算法得到的 AOD 在植被少的季节无空间变化, 而气溶胶在一定区域范围内的分布应具有空间特征。显然官方反演结果是有很大的误差的。

4.3 与 Landsat-8 的 AOD 产品对比

与 Sentinel-2 数据一样, Landsat 8 官方反射率产品中也包含了 AOD 反演结果, 分辨率为 30 m。从空间分辨率上看, 相对于 MODIS 10 km 分辨率的

表 2 Sentinel-2 官方算法反演的 AOD 统计值

Table 2 The statistical value of AOD retrieved by official algorithms

北京城市区域		包头沙漠区域	
日期	AOD 值	日期	AOD 值
2017-11-24	0.112	2017-11-30	0.112
2017-12-19	0.112	2017-12-10	0.165
2018-01-13	0.142	2017-12-28	0.165
2018-02-12	0.112	2018-03-25	0.201
2018-03-24	0.201	2018-04-02	0.201
2018-04-08	0.201	2018-05-04	0.201
		2018-05-14	0.201

气溶胶产品在空间分布的纹理上更具有对比性。若要与同时刻 Sentinel-2 深蓝算法反演得到 AOD 影像对比, 需查找几乎同时过境的 Landsat 8 影像进行大气校正。经筛选, 符合条件的只有 2018 年 4 月 8 日 1 景, 该日内 Landsat-8 在北京区域成像时间为 02:52:54, Sentinel-2B 成像时间为 03:05:39, 两者相差不过 10 min, 假定气溶胶在短时间内不发生变化, 对两者气溶胶空间分布状况进行对比。从图 5 可以看出, 虽然两幅 AOD 图在数值变化范围上有差异, 但是高低值在空间分布上具有一致性, 中部以及东南部分是城区, 建筑物密集, 人类活动影响较大, 所以 AOD 相对比较高, 而西北部分为郊区, AOD 相对比较低。另外, Sentinel-2B 北部山区受雪的影响, 致使反演的结果偏大。为进一步对比, 提取两者 AERONET 站点像元处的 AOD 值与 AERONET 实际值做比较。从总体上看, 采用深蓝算法反演得到的 AOD 比较接近于 AERONET 站点值, 而 Landsat 8 官方算法反演的 AOD 整体偏低, 这是由于该算法主要是借助于 MODIS CMA 等外部辅助数据并依据变形 DDV 算法反演 AOD^[40], 而辅助数据质量的好坏以及 DDV 在城市区的不适用直接或间接地影响了反演结果。由于 Landsat 8 与 Sentinel-2 在包头沙漠区成像位置相差较大, 并未找到沙漠区的对比数据。

表 3 5 个 AERONET 站点处 AOD 值比较

Table 3 The comparison of AOD values at five AERONET sites

站点名称	Beijing	Beijing_ PKU	Beijing_ RADI	Beijing_ CAMS	Xianghe
AERONET	0.191	0.196	0.204	0.191	0.144
Landsat-8	0.104	0.092	0.146	0.093	0.100
深蓝算法	0.210	0.241	0.236	0.203	0.189

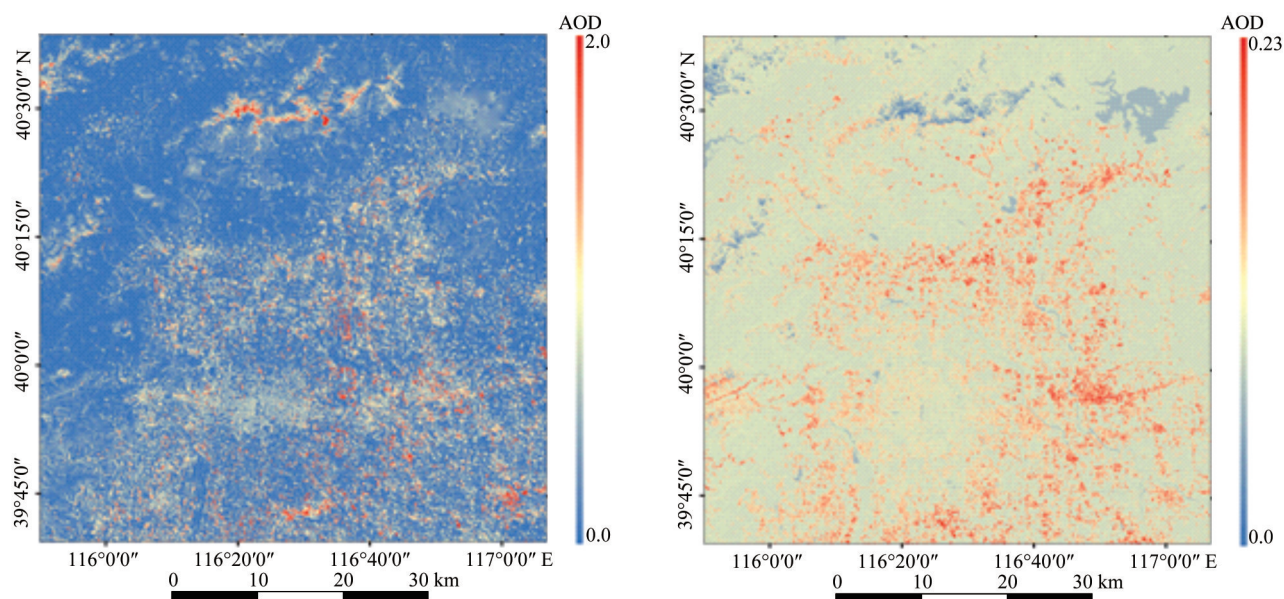


图5 2018年4月8日AOD反演结果

Fig.5 The retrieved AOD image in April 8, 2018

5 结 语

本文基于深蓝算法开展 Sentinel-2 数据高亮地表 AOD 反演研究,得到如下结论:①虽然 MODIS 和 Sentinel-2A/B 蓝波段的光谱范围和光谱响应函数具有差异,但是可以通过地物光谱卷积计算来拟合转换系数,以此来构建适用于 Sentinel-2A/B 蓝波段的地物光谱库并运用到深蓝算法中;②以 2017 年 11 月至 2018 年 5 月包含城市高亮区和沙漠高亮区的 13 景 Sentinel-2A/B 为例,采用深蓝算法反演 AOD,通过与 Sentinel-2 官方反演结果、Landsat 8 气溶胶反演结果对比发现,采用深蓝算法反演的 Sentinel-2 AOD 空间分布趋势与 Landsat 8 一致,明显优于官方软件在植被较少的高亮地表情况下为固定值的结果,较好地反映了 AOD 在城市区的空间分布;③本文实现的深蓝算法与 AERONET 站实测的 AOD 值具有较好的相关性,相关系数接近于 1 ($R^2 > 0.9$, RMSE=0.056),绝对误差控制在 ± 0.11 之内。

从大区域、长时间序列的反演角度看,范围性的地物类型更为复杂,季节更替带来的明暗地表对比更加明显,需要结合暗像元算法进一步考虑植被因素、气溶胶类型等因素的影响,提高 AOD 反演精度以及深蓝算法在 Sentinel-2 数据的适用性。另外,随着 MODIS 成像性能逐年衰减,以 MODIS 反射率为主构建 Sentinel-2A/B 地表反射率先验数据库可能带来亮目标地表反射率估算误差,可以考虑采用消除辐射归一化差异^[41]的 Landsat 8 构建高空

间分辨率、高辐射精度、分时间粒度的范围性的地表反射率数据库,在更大范围内进行精度验证。

参考文献 (References):

- [1] Suhet. Sentinel-2_User_Handbook. [EB/OL]. https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook, 2015, 2018.
- [2] Zheng Yang, Wu Bingfang, Zhang Miao. Estimating the above Ground Biomass of Winter Wheat Using the Sentinel-2 data[J]. Journal of Remote Sensing, 2017, 21(2): 318-328. [郑阳, 吴炳方, 张淼. Sentinel-2 数据的冬小麦地上干生物量估算及评价[J]. 遥感学报, 2017, 21(2): 318-328.]
- [3] Li Xuwen, Shi Hao, Zhang Yue, *et al.* Cyanobacteria Blooms Monitoring in Taihu Lake based on the Sentinel-2A Satellite of European Space Agency[J]. Environmental Monitoring in China, 2018, 34(4): 169-176. [李旭文, 侍昊, 张悦, 等. 基于欧洲航天局“哨兵-2A”卫星的太湖蓝藻遥感监测[J]. 中国环境监测, 2018, 34(4): 169-176.]
- [4] Guan Yuntong, Li Jinping. Land Use/Coverage Classification Based on Sentinel-1A and Sentinel-2A Integration: Take Chenggong District of Kunming Province as an Example[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2018, 41(7): 95-98. [关韵桐, 李金平. 基于 Sentinel-1A 与 Sentinel-2A 融合的土地利用/覆盖分类研究—以昆明市呈贡区为例[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(7): 95-98.]
- [5] Teltcher K, Fassnacht F E. Using Multispectral Landsat and Sentinel-2 Satellite Data to Investigate Vegetation Change at Mount St. Helens Since the Great Volcanic Eruption in 1980[J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(9): 1851-1867.
- [6] Wang Lijun, Guo Yan, He Jia, *et al.* Classification Method

- by Fusion of Decision Tree and SVM based on Sentinel-2A Image[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 146-153.[王利军, 郭燕, 贺佳, 等. 基于决策树和SVM的Sentinel-2A影像作物提取方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 146-153.]
- [7] Richter R, Louis J, Berthelot B. Sentinel-2 MSI-Level 2A Products Algorithm Theoretical Basis Document.[EB/OL]. https://earth.esa.int/c/document_library/get_file?folderId=349490&name=DLFE-4518.pdf, 2011, 2018.
- [8] Louis J. S2-PDGS-MPC-L2A-PDD-V14.2.[EB/OL]. <https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/S2+L2A+Product+Definition+Document/2c0f6d5f-60b5-48de-bc0d-e0f45ca06304>, 2017, 2018.
- [9] Liou K N. An Introduction to Atmospheric Radiation(2nd ed.) [M]. New York: Academic Press, 2002: 101-130.
- [10] Luo Y X, Zheng X B, Zhao T L, *et al.* A Climatology of Aerosol Optical Depth over China from Recent 10 Years of MODIS Remote Sensing Data[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(3): 863-870.
- [11] Tang Yuming, Deng Ruru, Liu Yongming, *et al.* Research Review of Remote Sensing for Atmospheric Aerosol Retrieval [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(1): 25-34.[汤玉明, 邓孺孺, 刘永明, 等. 大气气溶胶遥感反演研究综述[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(1): 25-34.]
- [12] Sun Xiaolei, Gan Wei, Lin Yan, *et al.* Validation of MODIS 3 km Aerosol Optical Depth Product and Its Air Quality Indication [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(6): 1657-1666.[孙晓雷, 甘伟, 林燕, 等. MODIS 3km气溶胶光学厚度产品检验及其环境空气质量指示[J]. 环境科学学报, 2015, 35(6): 1657-1666.]
- [13] Zhang Yuhuan, Mao Huiqin, Li Qing, *et al.* An AOD Monitoring of Air Pollution Process based on GOCI Data [J]. China Environmental Science, 2018, 38(10): 3647-3653.[张玉环, 毛慧琴, 厉青, 等. 基于静止卫星GOCI传感器的大气污染过程AOD监测[J]. 中国环境科学, 2018, 38(10): 3647-3653.]
- [14] Kaufman Y J, Sendra C. Algorithm for Automatic Atmospheric Corrections to Visible and Near-IR Satellite Imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 1988, 9(8): 1357-1381.
- [15] Li Shenshen, Chen Liangfu, Tao Jinhua, *et al.* Retrieval and Validation of the Surface Reflectance Using HJ-1-CCD Data [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(2): 516-520.[李莘莘, 陈良富, 陶金花, 等. 基于HJ-1-CCD数据的地表反射率反演与验证[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(2): 516-520.]
- [16] Li Ruibo, Sun Lin. An Improved DDV Method to Retrieve Aerosol Optical Depth for Landsat-8 OLI Image [J]. Remote Sensing Information, 2017, 32(1): 120-125.[李睿博, 孙林. 改进的浓密植被法反演Landsat 8 OLI气溶胶光学厚度[J]. 遥感信息, 2017, 32(1): 120-125.]
- [17] Li L, Yang J, Wang Y. An Improved Dark Object Method to Retrieve 500 m Resolution AOT (Aerosol Optical Thickness) Image from MODIS Data: A Case Study in the Pearl River Delta Area, China [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2014, 89(2): 1-12.
- [18] Richter R, Schlapfer D, Muller A. An Automatic Atmospheric Correction Algorithm for Visible/NIR Imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(10): 2077-2085.
- [19] Wang Zhongting, Xin Jinyuan, Jia Songlin, *et al.* Retrieval of AOD from GF-1 16 m Camera Via DDV Algorithm [J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(3): 530-538.[王中挺, 辛金元, 贾松林, 等. 利用暗目标法从高分一号卫星16 m相机数据反演气溶胶光学厚度[J]. 遥感学报, 2015, 19(3): 530-538.]
- [20] Masek J G, Vermote E F, Saleous N E, Wolfe, *et al.* A Landsat Surface Reflectance Dataset for North America, 1990~2000 [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(1): 68-72.
- [21] Chen Z C, Xu J F, Zhang H. Evaluation of HJ-1A/B CCD Surface Reflectance Products Using the VNIR and MODIS-based Atmospheric Correction Approaches [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12: 1-13. doi:10.1109/JSTARS.2018.2875263.
- [22] Li Shenshen, Chen Liangfu, Tao Jinhua, *et al.* Retrieval of Aerosol Optical Depth over Bright Targets in the Urban Areas of North China during Winter [J]. Science China Earth Science, 2012, 42(8): 1253-1263.[李莘莘, 陈良富, 陶金花, 等. 城市与冬季北方亮目标地区气溶胶光学厚度反演[J]. 中国科学:地球科学, 2012, 42(8): 1253-1263.]
- [23] Hsu N C, Tsay S C, King M D, *et al.* Aerosol Properties over Bright-reflecting Source Regions [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(3): 557-569.
- [24] Hsu N C, Tsay S C, King M D, *et al.* Deep Blue Retrievals of Asian Aerosol Properties during ACE-Asia [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(11): 3180-3195.
- [25] Hsu N C, Jeong M J, Bettenhausen C, *et al.* Enhanced Deep-Blue Aerosol Retrieval Algorithm: The Second Generation [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(16): 9296-9315.
- [26] Wang Z T, Li Q, Wang Q, *et al.* HJ-1 Terrestrial Aerosol Data Retrieval Using Deep Blue Algorithm [J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(3): 596-610.
- [27] Zhang Shengmin, Zhou Meiling, Si Yidan, *et al.* The Retrieval of Aerosol over Land Surface from GF-1 16 m Camera with Deep Blue Algorithm [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(4): 709-713.[张胜敏, 周美玲, 司一丹, 等. 深蓝算法应用于GF-1 16 m相机反演陆地气溶胶[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(4): 709-713.]
- [28] Sun K, Chen X, Zhu Z, *et al.* High Resolution Aerosol Optical Depth Retrieval Using Gaofen-1 WFV Camera Data [J]. Remote Sensing, 2017, 9(1): 89. doi:10.3390/rs9010089.
- [29] Jia Liangliang, Wang Xiaoqin, Su Hua, *et al.* Validation of Retrieving Aerosol over Taiwan Island Using GF-1 Satellite

- WV data[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(3): 1117-1127.[贾亮亮, 汪小钦, 苏华, 等. 台湾岛高分一号卫星WV数据气溶胶反演与验证[J]. 环境科学学报, 2018, 38(3): 1117-1127.]
- [30] Sun L, Wei J, Muhammad B, *et al.* Aerosol Optical Depth Retrieval over Bright Areas Using Landsat 8 OLI Images[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(1): 23. doi:10.3390/rs8010023.
- [31] Tanré D, Herman M, Deschamps P Y, *et al.* Atmospheric Modeling for Space Measurements of Ground Reflectances, Including Bidirectional Properties[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(21): 3587-3594.
- [32] Vermote E F, Saleours M N. Operational Atmospheric Correction of MODIS Visible to Middle Infrared Land Surface Data in the case of An Infinite Lambertian Target [J]. *Earth Science Satellite Remote Sensing*, 2006(1): 123-153.
- [33] Kaufman Y J, Tanré D, Remer L A, *et al.* Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from EOS-MODIS over the Land Using Dark Targets and Dynamic Aerosol Models[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D14): 17051-17067.
- [34] Kaufman Y J, Wald A E, Remer L A, *et al.* The MODIS 2.1 μm channel-Correlation with Visible Reflectance for Use in Remote Sensing of Aerosol[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(5): 1286-1298.
- [35] Kaufman Y J, Tanré D, Gordon H R, *et al.* Passive Remote Sensing of Tropospheric Aerosol and Atmospheric Correction for the Aerosol Effect[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D14): 16815-16830.
- [36] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, *et al.* Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1997, 35(3): 675-686.
- [37] Kotchenova S Y, Vermote E F, Matarrese R, *et al.* Validation of A Vector Version of the 6S Radiative Transfer Code for Atmospheric Correction of Satellite Data. Part I: Path Radiance [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(26): 6762-6772.
- [38] Angstrom A. The Parameters of Atmospheric Turbidity [J]. *Tellus*, 1964, 16(1): 64-75.
- [39] Richter R. ATCOR-2/3 User Guide, Version 9.0.2[M]. Zurich: ReSe Applications Schläpfer (RESE), 2016: 1-254.
- [40] Vermote E F, Justice C O, Claverie M, *et al.* Preliminary Analysis of the Performance of the Landsat 8/OLI Land Surface Reflectance Product [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016(185): 46-56. doi:10.1016/j.rse.2016.04.008.
- [41] Xu Yuwen, Zhang Hao, Chen Zhengchao, *et al.* A Case Study on Pixel-by-pixel Radiometric Normalization between Sentinel-2A and Landsat 8 OLI[J]. *测绘通报*, 2019(10): 61-66.[徐玉雯, 张浩, 陈正超, 等. Sentinel-2A与Landsat 8 OLI逐像元辐射归一化方法研究[J]. *测绘通报*, 2019(10): 61-66.]

Retrieval of AOD from Sentinel-2 Data based on Deep Blue Algorithm

Xu Yuwen^{1,2}, Zhang Hao², Chen Zhengchao², Jing Haitao¹

(1.School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University,
Jiaozuo 454003, China;

2.Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: Medium-to-high resolution aerosol information is of great significance for surface reflectance inversion and urban ambient air quality monitoring. However, the high-precision aerosol optical thickness (AOD) retrieval in bright areas, such as cities and sparse vegetation areas, has long plagued the quantitative remote sensing applications. Taking Beijing urban area and Baotou desert area as examples, using MODIS surface reflectance products to construct prior knowledge constraints, the AOD inversion of 13 scenes Sentinel-2 images in bright areas was realized based on the deep blue algorithm. To verify the accuracy of the algorithm, the result were compared with the Sentinel-2 official algorithm processing result, the Landsat-8 official aerosol products and the ground-measured AOD data from the Global Aerosol Automated Observing Network (AERONET). The results indicate that the retrieved AOD values from deep blue algorithm is significantly correlated with the measured value of AERONET ($R^2 > 0.90$, $\text{RMSE} = 0.0560$), and the AOD spatial distributions are also well consistent with those from Landsat-8, which reflects the characteristics of human activities. But, whether in desert bright area or urban bright area with less vegetation, the AOD values retrieved by Sen2Cor plug-in are fixed, no spatial distribution and do not conform to the actual situation. In general, compared with the current official products, the deep blue algorithm is suitable for aerosol retrieval in high-brightness areas of Sentinel-2 data, and has obvious advantages in terms of estimation accuracy and spatial distribution trend.

Key words: Aerosol Optical Thickness(AOD); Deep Blue Algorithm; Sentinel-2A/B