

引用格式: Wei Haining, Wang Weizhen, Huang Guanghui, *et al.* Retrieval of Aerosol Optical Depth based on Himawari-8[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(4): 797-807. [韦海宁, 王维真, 黄广辉, 等. 基于Himawari-8的气溶胶反演研究[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(4): 797-807.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.4.0797

基于 Himawari-8 的气溶胶反演研究

韦海宁^{1,2}, 王维真^{1,3}, 黄广辉¹, 徐菲楠^{1,2}, 冯姣姣^{1,2}, 董磊磊^{1,2}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 中国科学院黑河遥感试验研究站, 甘肃省遥感重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为获取中国区域高时空分辨率、高精度的气溶胶光学厚度(AOD)产品。基于Himawari-8卫星数据和MODIS地表反射率产品,反演了中国区域2018年4月~2019年4月逐10分钟的AOD,该方法可同时对暗像元、亮像元区域进行反演。依托全球气溶胶观测网(AERONET)中国境内的6个观测站数据,对反演结果进行一致性检验,同时将AOD反演结果与Himawari-8官方最新发布的AOD产品(020版)进行对比。结果表明:①红蓝比值法AOD反演结果与AERONET AOD之间相关性很高,除包头站外,其余5个站点的相关系数R在0.728~0.863之间,EE(误差期望)范围内样本点百分比在47.7%~68.6%之间,与Himawari-8 AOD产品相比有很大优势;②红蓝比值法AOD反演结果与AERONET AOD在时间序列走势上基本一致,但在AOD>1时,反演结果较AERONET AOD偏高。Himawari-8 AOD春夏季走势相对于AERONET AOD较为一致,但由于秋冬季Himawari-8 AOD有明显的日变化,且日变化较大,其走势与AERONET AOD偏离较大;③红蓝比值法AOD反演结果与MODIS AOD产品空间分布基本一致,AOD反演结果总体较MODIS AOD略为偏低。在冬季时红蓝比值法反演范围较MOD04_3K AOD的反演范围广;④红蓝比值法AOD在冬春季的北方高反射率地表区域的反演结果精度和反演范围较Himawari-8 AOD产品和MOD04_3K产品有很大优势。

关键词: 气溶胶光学厚度;Himawari-8;AERONET;MODIS;验证

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2020)04-0797-11

1 引言

大气气溶胶是悬浮在大气中的固体和液体粒子的总称,其主要来源于自然界产生的矿物质气溶胶和人为排放的细粒子气溶胶,大气气溶胶对地球辐射平衡、气候变化、大气环境、人类健康等有重要影响^[1]。气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)定义为气溶胶的消光系数在垂直方向上的积

分,是气溶胶最基本的光学特性,也是评估气候变化中气溶胶辐射强迫的关键因子。地面站点太阳光度计可获取详细的气溶胶光学参数,但由于大气气溶胶的化学组成、尺度分布、生命周期等的时空多变性,地面站点不足以准确观测和评估大范围的大气气溶胶的分布特征。卫星遥感反演气溶胶产品的出现,为认识和研究气溶胶的气候效应和区域大气污染监测提供了强有力的数据支撑。

收稿日期:2019-09-23;修订日期:2020-06-13

基金项目:中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA19040500),国家自然科学基金项目(41671373,41701418),中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室自主研究课题(LPCC2019)。

作者简介:韦海宁(1994—),男,广西崇左人,硕士研究生,主要从事大气遥感研究。E-mail:hainingwei@lzb.ac.cn

通讯作者:王维真(1967—),男,山西万荣人,研究员,主要从事气象水文学研究。E-mail:weizhen@lzb.ac.cn

AOD反演的关键在于如何将大气信号从卫星接收到的表观信号中分离出来,Kaufman等^[2-3]研究发现在浓密植被等反射率较低的暗目标区,受大气影响较弱的近红外波段与红、蓝波段的反射率有很好的线性关系,据此关系可实现暗目标区域的地气解耦并能很好地反演得到较准确的气溶胶光学厚度,暗像元法被广泛应用于各类卫星的气溶胶光学厚度反演,其中MODIS利用2.1 μm 波段反射率推算可见光波段地表反射率从而实现AOD反演,且已经实现业务化运行并对外发布产品^[4]。王宏斌等^[5]对中国地区MODIS气溶胶产品进行精度验证,结果表明MODIS产品在我国东部地区的精度较高,同时还对误差来源进行了分析,得出MODIS误差来源主要是地表反射率关系、气溶胶模型的不适应。基于暗像元法的气溶胶反演算法近年来在不断改进^[6-7],但其基本思想并没有改变,暗像元法依然存在两个主要问题:①暗像元法的波段比值关系在城市、裸地等高地表反射率的亮地表区域不适用;②由于不同时段、不同地物的光谱反射率存在差异,短波红外、红、蓝通道的地表反射率关系并不是固定的。为了弥补暗像元法在亮地表区域的AOD反演问题,Hsu等^[8-10]提出的深蓝算法可以应用于城市、沙漠和裸地等区域的AOD反演,但其反演精度低于暗像元法。Huang等^[6]结合最小反射率法和双星协同反演算法对MODIS进行AOD反演,在暗像元区域反演结果与MODIS AOD结果接近,但在亮地表区域的反演能力有很大提升。

极轨卫星的低轨道高度和全球观测的能力在全球尺度的气溶胶研究中有较大优势。但极轨卫星较长的重访周期对于持续监测区域性大气污染变化显得无能为力,且极轨卫星对不同地区反演AOD的时间不同,导致同一天不同地点的AOD缺乏可比性。大气气溶胶的分布可能与边界层日变化,天气系统影响等因素有关,大气气溶胶含量和分布在一天内变化较大,故需要高时空分辨率的观测才能较准确地获得其变化趋势及较细致的分布特征,对于同一区域的观测而言,静止轨道气象卫星的重访周期相对于极轨卫星来说有非常大的优势,但受限于静止轨道卫星光谱波段过少、光谱范围较宽、空间分辨率和定标精度较低等因素,以往的研究中静止轨道卫星一般用于海面或湖面等的气溶胶反演,在陆地上反演效果较差^[11-13]。

Himawari-8搭载的AHI传感器可见光波段达

到0.5~1 km,中短波红外达到2 km。Yu等^[14]将AHI和极轨卫星NPP VIIRS数据进行交叉对比,发现两者在用于反演AOD的波段上吻合度较高,说明AHI传感器拥有较高的空间分辨率和定标精度。由此可见,Himawari-8卫星在区域大气污染监测领域有很大的应用潜力。Yoshida等^[15]基于最小表观反射率和暗像元法对Himawari-8进行了气溶胶光学厚度反演,同时利用韩国的2个AERONET站点(Baeksa、Taehwa)的观测资料对反演结果进行验证,反演结果($R=0.56$, $RMSE=0.174$)表明该算法仍有待改进,但目前Himawari-8对外发布的AOD产品仍采用该算法。本文基于Himawari-8 AHI卫星数据和MOD09A1地表反射率产品,利用改进的红蓝波段比值反演方法,反演了中国区域2018年4月~2019年4月逐10分钟的AOD。利用中国地区西北、华北、华东、华南等6个AERONET地基观测资料对AOD反演结果进行精度验证,同时将反演结果与Himawari-8官方发布的AOD产品以及MODIS AOD产品进行时间序列、空间分布一致性对比,检验反演结果的可靠性。以期了解中国地区大气气溶胶的时空变化规律和全天时的大气污染监测方法提供新的参考。

2 数据

2.1 AERONET地基观测数据

AERONET (Aerosol Robotic Network)是由NASA组织发起的全球气溶胶监测网络^[32],AERONET网站(<https://aeronet.gsfc.nasa.gov>)提供了全球范围内多个站点的气溶胶光学厚度、水汽等数据。其发布的数据有3个质量等级:level 1.0为原始数据,level 1.5为云掩膜处理后的数据,level 2.0经过了云掩膜和质量控制,地基观测资料一般每小时有4~5次观测。由于中国地区提供level 2.0数据的站点较少,因此采用了经过云掩膜处理的level 1.5级数据。表1列出了用于AOD产品验证的站点的详细信息,站点主要分布在西北、华北、华东、华南等地。

AERONET AOD观测误差小于0.02^[16],可以用于验证和评估卫星反演AOD的精度。但由于AERONET缺少550nm波段的观测,无法与550nm AOD反演结果进行直接对比,因此需要利用AERONET其他观测波段的AOD值推算550nm处的AOD值。有研究表明,气溶胶光学厚度的对数

表1 AERONET 站点信息

Table 1 The Information of the AERONET Station

站点	海拔/m	经度/°E	纬度/°N	数据时间范围
北京	106	116.317	39.933	201804~201904
香港	40	114.117	22.483	201804~201904
台北	50	120.217	23.000	201804~201904
徐州	59	117.142	34.217	201804~201904
香河	36	116.962	39.754	201804~201904
包头	1275	109.629	40.852	201804~201904

与波长的对数之间有非常好的二次多项式拟合关系,拟合误差小于0.02^[17],本文利用AERONET 440、500、675和870nm 4个波段观测的AOD求得拟合方程进而推算出550nm处的AOD值。由于Himawari-8反演的AOD为500 nm波处的AOD,因此可直接与AERONET 500nm AOD进行对比。

2.2 遥感数据

2.2.1 Himawari-8 数据

Himawari-8号卫星发射于2014年10月7日,其搭载的AHI(Advanced Himawari Imager)传感器相比上一代静止气象卫星有了很大的改进^[18],其时间分辨率达到了分钟级,全圆盘观测仅需10 min,区域加密观测时间分辨率达到2.5 min。空间分辨率方面,其中红波段为500 m×500 m,其他可见光波段为1 km×1 km,近红外和红外波段为2 km×2 km。Himawari-8观测数据和产品由日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)发布(<https://www.eorc.jaxa.jp/ptree>)。

Himawari-8 L1圆盘数据时间分辨率为10 min,空间分辨率已重采样至5 km×5 km。L1数据存储格式为NetCDF格式,其中包含了可见光和近红外波段的反照率、中红外波段的亮度温度、卫星天顶角、卫星方位角、太阳天顶角、太阳方位角、观测时间等数据。

Himawari-8 CLP产品时间分辨率为10 min,空间分辨率为5 km×5 km。数据集包含有云光学厚度、云顶温度、云顶高度、云属性(ISCCP Definition)等产品。在反演AOD过程中,本文利用CLP产品中的云属性进行云掩膜。

Himawari-8 AOD产品分为L2级和L3级,L2级AOD产品实际分辨率为10 min,L3级AOD产品有1小时、1天和1个月3种时间分辨率,L2和L3级AOD产品空间分辨率均为5 km×5 km。数据集包含有Angstrom指数、500 nm处气溶胶光学厚度、QA质量文件等数据。本文采用L2级产品与反演

结果进行对比。

2.2.2 MODIS 数据

地表反射率比值库基于MOD09A1地表反射率产品,MOD09A1产品提供经过大气校正后的MODIS Band1-Band7的地表反射率产品以及QA质量文件,产品空间分辨率500米,时间分辨率为8天。MOD09A1 8天合成地表反射率产品考虑了高观测覆盖、低视角、无云及云的阴影以及气溶胶浓度等多种因素,选取8天内最合适的地表反射率。本研究基于Google Earth Engine平台对MOD09产品进行月最小值合成、重采样等处理,获得每个月的红蓝波段的最小地表反射率的比值,空间分辨率重采样至5 km×5 km。

MOD/MYD04_3K是NASA发布的Level 2级第6版气溶胶产品^[4],其空间分辨率为3 km,其较第5版的10 km分辨率有较大提升,MOD04_3K原始数据储存格式为HDF-4,其中包含了气溶胶光学厚度、Angstrom指数、质量控制等51个波段信息。MODIS AOD产品是目前应用最为广泛的AOD数据之一,其AOD反演精度在浓密植被区较高。

3 方法

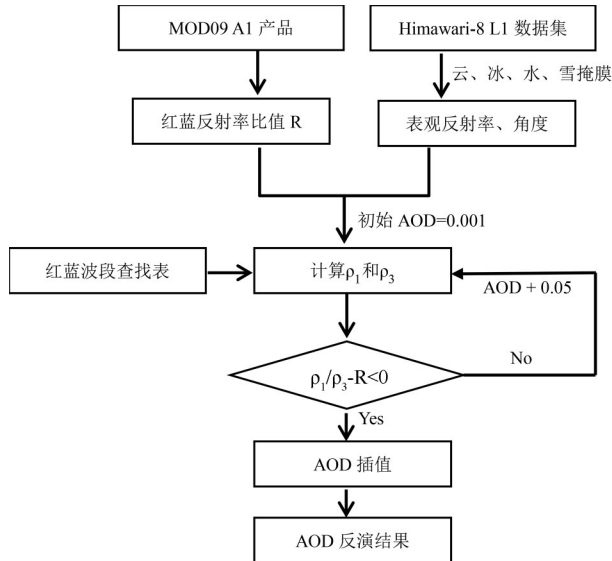
卫星传感器观测的辐射值主要来自于地表贡献和大气贡献,在假设地表为朗伯体且大气均一的前提下,卫星观测到的表观反射率可表示为:

$$\rho_{TOA}(\mu_s, \mu_v, \varphi) = \rho_0(\mu_s, \mu_v, \varphi) + \frac{T(\mu_s) \cdot T(\mu_v) \rho_s(\mu_s, \mu_v, \varphi)}{[1 - \rho_s(\mu_s, \mu_v, \varphi) S]} \quad (1)$$

其中: μ_s 与 μ_v 分别为太阳天顶角 θ_s 的余弦值、观测天顶角 θ_v 的余弦值, φ 为相对方位角,T表示大气透射率, ρ_s 为地表反射率, ρ_0 为路径程辐射项,S为大气下界的半球反照率。

AOD反演的关键在于如何精确计算出地表反射率,从而去除地表贡献获取大气贡献进而反演得到AOD。在反演过程中为加快反演速度,一般采用查找表方式进行反演。在构造查找表时,本文中气溶胶模式被假定为普适性较强的大陆型气溶胶模式,借助6S大气辐射传输模型构造不同卫星观测条件、不同波段、不同大气模式、不同AOD条件下的大气参数查找表。传统的基于地表反射率库反演AOD的方法^[19-20],是假设短时间内地表反射率没有发生太大改变,将MOD09A1地表反射率代表真实地表反射率,利用生成的查找表和Himawari-8表观

反射率,迭代计算不同 AOD 条件下蓝波段地表反射率 ρ_{blue} ,当 ρ_{blue} 与 MODIS 对应蓝波段地表反射率最为接近时,当前迭代的 AOD 值即为反演的 AOD 值(图 1)。



(ρ_1 和 ρ_3 分别是 Himawari-8 蓝(0.46 μm)、红(0.64 μm)波段地表反射率, R 为 MOD09A1 红(0.64 μm)蓝(0.46 μm)波段地表反射率比值库)

图 1 红蓝比值法流程图

Fig.2 Flow chart of RB algorithm

反演过程中,先对 Himawari-8 L1 数据集进行云、冰、水、雪掩膜,读取筛选后的晴空像元的表观反射率和太阳天顶角、卫星天顶角等角度信息。将 MOD09A1 地表反射率产品重采样至和 Himawari-8 L1 数据一致的空间分辨率,读取 MOD09A1 红蓝地表反射率并合成红蓝比值。初始 AOD 条件设置为 0.001, AOD 增加步长为 0.05,将 Himawari-8 表观反射率和角度信息以及 AOD 条件代入式(1)计算得到 ρ_1 和 ρ_3 ,由于卫星接收到的红蓝表观反射率会随着 AOD 的增大而增大,波长越短的波段对气溶胶的增加越敏感,因此随着 AOD 的增加, ρ_1/ρ_3 会逐渐减小,在迭代过程中当 $\rho_1/\rho_3 - R < 0$ 时停止计算,此时迭代的 AOD 和计算得到的 ρ_1 和 ρ_3 的比值分别记为 aod^+ 和 rb^+ ,前一个迭代 AOD 值和 ρ_1 和 ρ_3 的比值分别记为 aod^- 和 rb^- ,根据权重公式(5)插值得到最终 AOD 结果。

$$\text{AOD} = \text{aod}^+ (\text{rb} - \text{rb}^+) (\text{rb}^+ - \text{rb}^-) + \text{aod}^- (\text{rb} - \text{rb}^-) (\text{rb}^+ - \text{rb}^-) \quad (2)$$

基于红蓝地表反射率比值库的反演方法反演了中国地区 2018 年 4 月~2019 年 4 月逐 10 min 的气溶胶光学厚度,共计 19 840 景数据。将验证站点所处位置对应的 AERONET AOD(地基站点实测

AOD)、RB AOD(红蓝比值法反演的 AOD)、H8AOD(JAXA 发布的 Himawari-8 AOD 产品)进行提取和匹配,在匹配过程中要求三者观测时间间隔小于 5min 且三者均有观测值或反演值。

4 结果分析与讨论

4.1 基于地基站点观测对比验证 AOD 反演结果和 Himawari AOD 产品

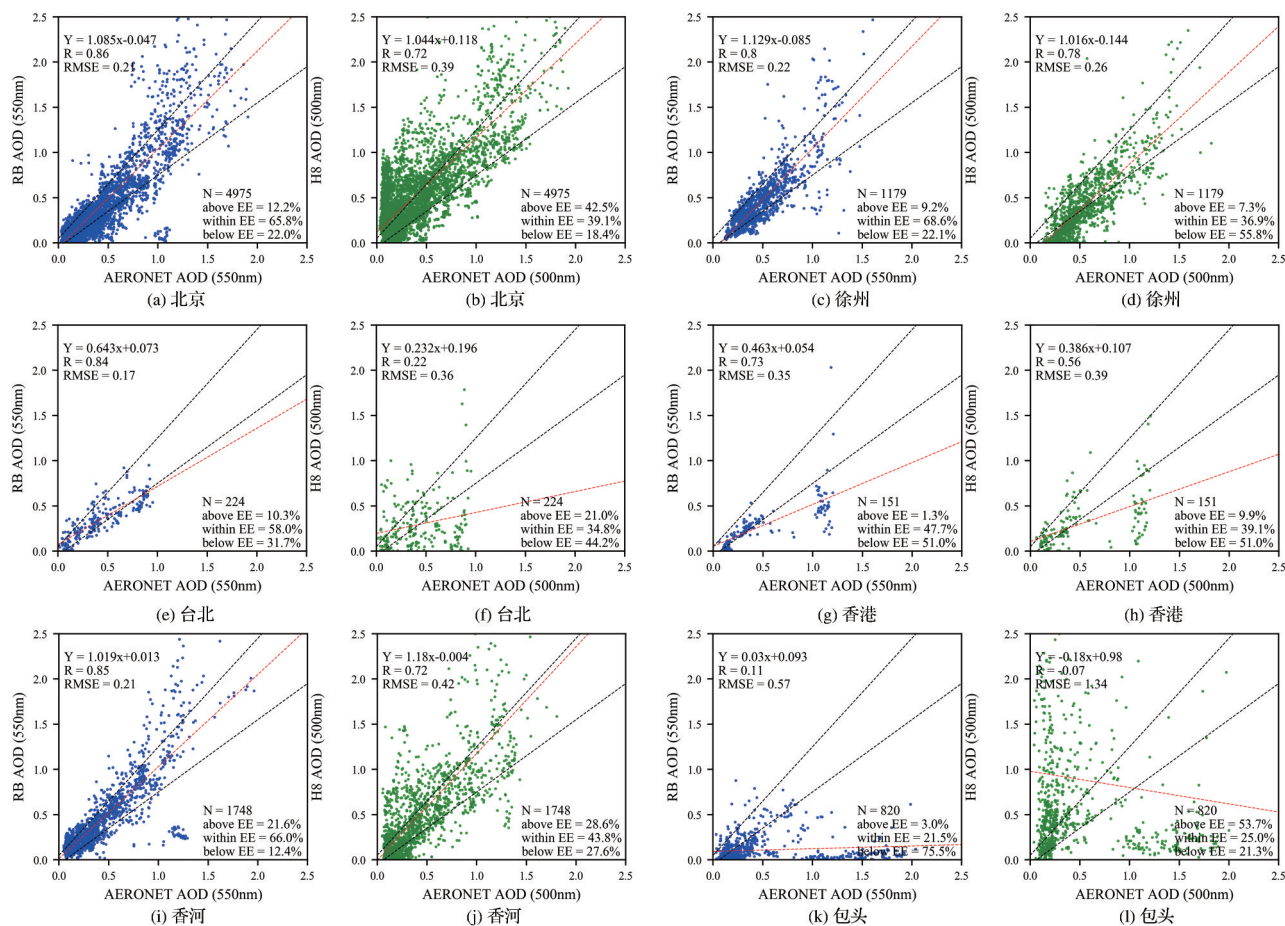
图 2 为 6 个 AERONET 站点的地基观测 AOD 与 RB AOD 和 H8 AOD 的线性拟合散点图。由于卫星可见光波段受云的影响较大,因此北方站点较南方站点匹配的样本点多。

对比 RB AOD 与 AERONET AOD 结果(图 2(a)、(c)、(e)、(g)、(i)、(k))表明:包头站 ($R=0.11$ 、 $\text{RMSE}=0.57$) 的反演效果较差,其余 5 个站点反演效果较好。除香河站外, RB AOD 在其余站点都有不同程度的低估,尤其是南方站点香港、台北站低估较为严重,分别有 51%、31.7% 的样本点被低估;北京、徐州、低估样本点数量占比分别为 22% 和 22.1%。北京、徐州、香河站拟合直线斜率接近于 1,而台北、香港站拟合直线斜率分别为 0.643 和 0.463。另一方面,对比 H8 AOD 与 AERONET AOD(图 2(b)、(d)、(f)、(h)、(j)、(l))结果表明:包头站 ($R=0.07$ 、 $\text{RMSE}=1.34$) 和台北站 ($R=0.22$ 、 $\text{RMSE}=0.36$) 的反演效果非常差,其余 4 个站点反演结果相对较好。与 RB AOD 不同的是,北京站有较为严重的高估(42.5%),而南方站点徐州、台北、香港站低估较为严重,低估样本点占比分别为 55.8%、44.2%、51%,香河站高估和低估的样本点占比接近。北京站和徐州站拟合直线斜率接近于 1 效果较好,而台北、香港站拟合直线斜率分别为 0.232 和 0.386 效果较差。

总体而言, RB AOD 的反演精度较 H8 AOD 产品精度高。虽然 RB AOD 在包头站整体精度很低,当 AOD 较大时,反演效果差,但在 AOD 较小时, RB AOD 与地基站点 AOD 较为接近。

4.2 AOD 反演结果时空序列一致性检验

本研究选取北京站 AERONET AOD 验证 RB AOD 和 H8 AOD 数据在不同季节的时间变化一致性。图 3 分别给出了 2018 年 4 月(图 3(a),春季)、8 月(图 3(b),夏季)、10 月(图 3(c),秋季)、12 月(图 3(d),冬季)地面观测 AERONET AOD 与 RB AOD 和 H8 AOD 时间序列变化曲线。春季的 RB AOD 与



(黑色虚线为误差线 $EE = \pm 0.05 + (0.15 \times \text{AERONET})$, 红色虚线为拟合曲线)

图2 RB AOD和H8 AOD与AERONET AOD精度对比

Fig.2 Comparison of RB AOD and JAXA AOD with AERONET AOD

地基站点 AERONET AOD 的走势较为一致,在 $AOD > 1$ 时,小部分时段的 RB AOD 较 AERONET AOD 出现了明显高估;H8 AOD 与 AERONET AOD 的走势也较为一致,但 H8 AOD 总体相对 AERONET AOD 偏高,且 AOD 值跳动较大。图 3(b) 为 8 月份的时间序列对比,与 4 月份相似的,当 $AOD > 1$ 时, RB AOD 较 AERONET AOD 依然会出现明显高估,当 $AOD < 1$ 时, RB AOD 较 AERONET AOD 走势基本重合;8 月份的 H8 AOD 总体相对 AERONET AOD 依然偏高, H8 AOD 时间序列趋势较地基 AERONET AOD 较为一致,但走势不平稳, AOD 值跳动较大。在秋冬季的 10 月(图 3(c))和 12 月(图 3(d)), AERONET AOD 显示北京站的 AOD 值总体为较低水平,大部分时段 AOD 值在 0.1 水平以下,部分时间段 AOD 值有一个急剧升高的过程,可能对应有过过程性雾霾天气。RB AOD 与 AERONET AOD 的走势基本重合,但 RB AOD 在 $AOD > 0.7$ 时会出现明显高估。而

H8 AOD 与 AERONET AOD 的走势偏离较大,当 AERONET AOD 值较低时, H8 AOD 会出现很明显的高估,且有很明显的日变化特征,日际变化大,其总体 AOD 水平较 AERONET AOD 出现了明显的高估。

MODIS AOD 产品因为其具有较高的精度,常用于检验其他卫星的 AOD 产品。选取华北区域 MODIS 过境时刻的 H8 遥感影像,利用红蓝比值法反演 AOD,将 AOD 反演结果与 MOD04_3k AOD 产品进行空间分布一致性检验。图 4 为 2018 年 11 月 1 日、2019 年 4 月 3 日、1 月 2 日 MODIS 过境时刻的 Himawari-8 真彩色合成、RB AOD、MOD04_3K AOD 的空间分布对比图。

从图 4(a) 的 H8 RGB 真彩色合成图可见,2018 年 11 月 1 日华北地区有区域性雾霾天气过程,特别是河北南部、河南北部一带灰霾较为严重,华北北部和华中地区能见度较高,图 4(b) 和图 4(c) 分别是对应时段的 RB AOD 反演结果和 MODIS AOD 产

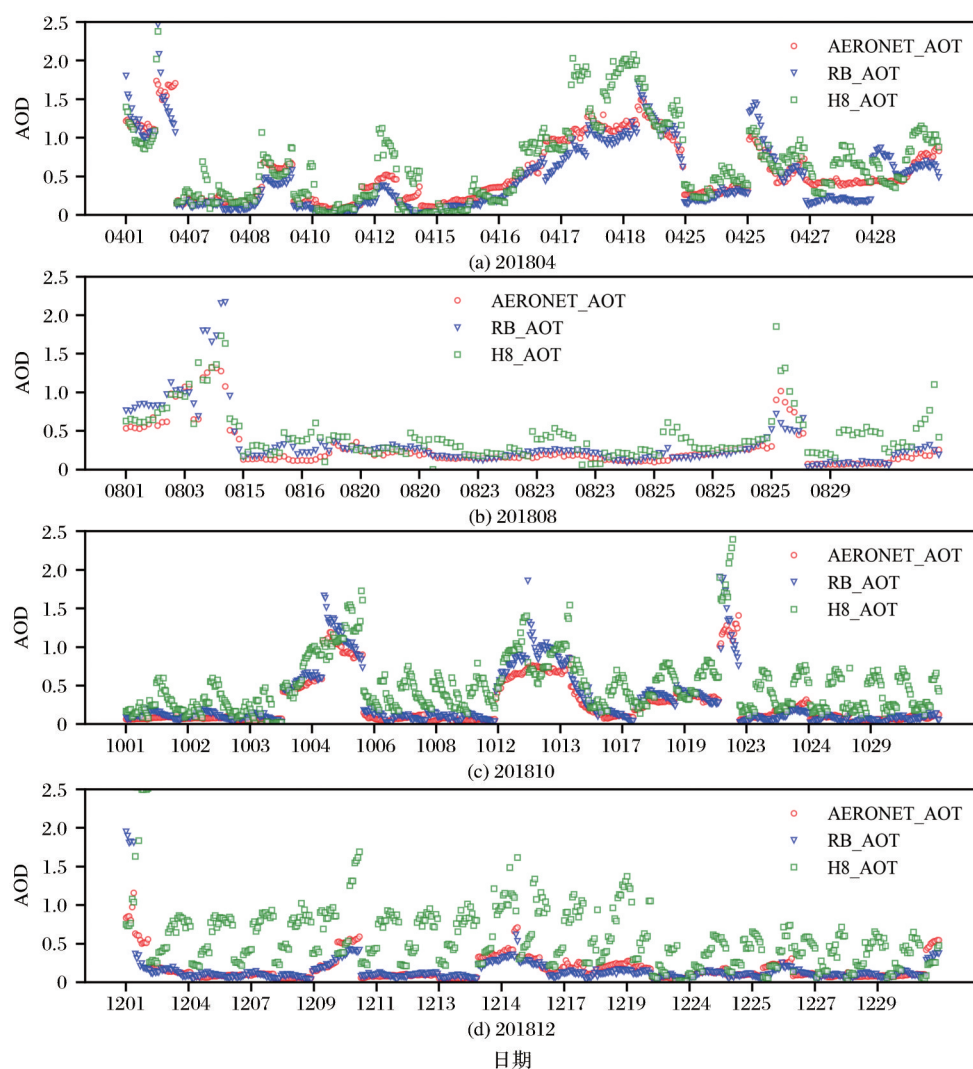


图3 AERONET AOD与RB AOD和Himawari-8 AOD时间序列对比

Fig.3 Comparison of AERONET AOD with RB AOD and Himawari-8 AOD time series

品的空间分布,从图中可见,两者AOD空间分布一致性很高,河北南部的AOD高值区($AOD > 1.2$)分布基本一致,华北北部和华中地区AOD值均较小,当 $AOD > 0.7$ 时,RB AOD相对MOD04_3K AOD值略偏小。MOD04_3K AOD在河北南部AOD高值区有部分缺值,可能是由于强雾霾天气下的大气散射作用导致 $2.1\ \mu\text{m}$ 处反射率较大,被误判为亮地表,因此无法使用暗像元法反演AOD。

从春季2019年4月3日反演结果来看,RB AOD与MOD04_3K AOD的空间、分布一致性也较好,AOD高值区主要分布在河南安徽等地,AOD低值区主要分布在山东半岛和华北北部。由于MODIS幅宽有限,因此在同一时刻下,处在另一轨道的河北西北部以及内蒙古一带没有AOD值,其他地域MOD04_3K AOD产品缺失值较多,AOD空间分布连续性较差。得益于Himawari-8卫星的大范围

观测能力,RB AOD在这些地区反演能力较强,空间分布连续性较高,范围范围能覆盖更多区域。

从冬季2019年1月2日反演结果可以看出,由于冬季北方地区植被稀少、地表反射率高,暗像元法的MOD04_3K AOD产品在华北区域几乎没有反演值,而基于地表反射率比值库反演的RB AOD依然有能力反演得到大范围的AOD分布,对比图3(h)的真彩色影像,其反演得到的AOD空间分布能反映出华北地区的灰霾分布特征。

4.3 不同站点不同季节的检验

对4个站点按季节分别进行检验,季节划分标准为:春季(3~5月)、夏季(6~8月)、秋季(9~11月)、冬季(12~2月)。利用AERONET AOD按季节划分分别对RB AOD和H8 AOD进行对比检验,表2列出了各站点季节检验统计参数。

从相关系数R来看,除徐州站秋季的H8 AOD

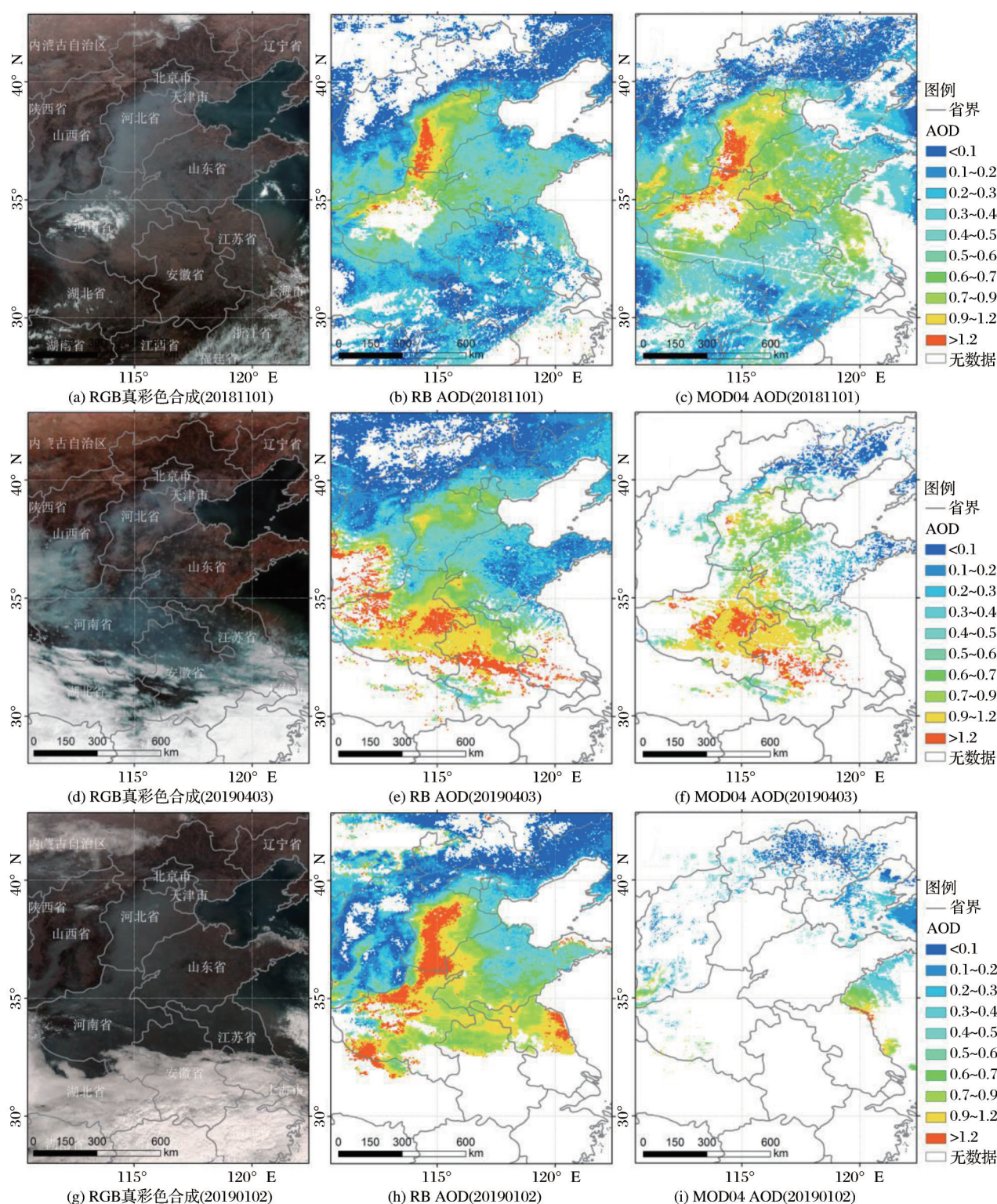


图4 RB AOD反演结果和MODIS AOD产品空间分布对比

Fig.4 Comparison of RB AOD and MODIS AOD product spatial distribution

结果较好外,其余站点各季节RB AOD的相关系数R均较H8 AOD的相关系数高。包头站的H8 AOD在4个季节的反演结果都很差($-0.36 < R < 0.14$),但RB AOD在包头站的夏季和秋季的相关系数($0.74 < R < 0.8$)较H8 AOD的相关系数($-0.36 < R$

< -0.06)有很大提升,秋冬季RB AOD反演结果和H8 AOD一样差。位于华北的北京、香河站的RB AOD在秋冬季的的反演结果($0.77 < R < 0.94$)大大优于H8 AOD结果($0.32 < R < 0.82$),北方地区冬季反演效果较差的原因可能是冬季地表反射率发生了

较大改变,根据气溶胶反演公式(式1),卫星接收到的大气层顶表观反射率 ρ_{TOA} 与路径程辐射项 ρ_0 和地表反射率 ρ_s 有关。对于短光波段,在 ρ_s 很小的情况下,路径辐射项对 ρ_{TOA} 的贡献比较大,当 ρ_s 很高时,地表反射率成为主要贡献,冬季北方地区植被较少,裸露地表的反射率较高,使用传统暗像元法反演的H8 AOD对亮地表区域的地表反射率估计能力不足,导致AOD反演误差较大。徐州站在秋季时H8 AOD反演结果较好,其他季节RB AOD反演结果较好。南方站点香港和台北站4个季节的RB AOD反演结果均优于H8 AOD,由于春夏季华南地区大气水汽含量较高,因此H8 AOD反演能力不足效果较差,秋冬季华南地区植被覆盖率依然较高且大气水汽含量较少,暗像元法反演的H8 AOD结果与RB AOD结果相差不大。

从RMSE来看,北京、香河站除夏季时的H8 AOD的RMSE较小外,其他季节均较RB AOD的RMSE高,尤其是春季和冬季大幅偏高。香港、台北站春季RB AOD和H8 AOD的RMSE均较高,表明南方地区站点春季可能容易受残云的影响,其反演结果与地基站点相比离散较大。徐州站在春夏季时RB AOD与H8 AOD的RMSE相近且较高,在秋冬季时RB AOD的RMSE(0.15~0.16)优于H8 AOD(0.23~0.28)。包头站的H8 AOD的RMSE全年都很大(0.87~1.49),RB AOD春季RMSE也很大(0.78),但在其他季节的RMSE较小(0.13~0.14),表明RB AOD在西北干旱区的反演结果较H8 AOD产品有很大的优势。

5 讨 论

为减小单波段地表反射率的误差,在反演过程中,与直接采用蓝波段地表反射率与地表反射率库对比不同的是,本文采用MODIS红蓝波段地表反射率的比值 R_1/R_3 与Himawari-8红蓝波段地表反射率的比值 ρ_{red}/ρ_{blue} 做对比,以减小单波段反演可能造成的误差,该方法也被用于极轨卫星NPP的VIIRS传感器的气溶胶光学厚度反演^[21],相比于目前NPP-VIIRS业务化运行的AOD产品结果有一定改进,反演结果尤其是在亮地表区域改善明显。图5为亮地表区域2018年2月~12月的逐8天的红波段(RED)地表反射率、蓝波段(BLUE)地表反射率、红/蓝(Red/Blue)地表反射率比值曲线,从图中可以看出,单波段的地表反射率年内月内变化较波段

表 2 AERONET 站点季节检验统计参数

Table 2 Seasonal statistical parameter of AERONET

		station				
站点	季节	N	R (RB)	R (H8)	RMSE (RB)	RMSE (H8)
北京	春季	2115	0.85	0.8	0.23	0.46
	夏季	600	0.94	0.9	0.23	0.16
	秋季	1309	0.92	0.79	0.19	0.37
	冬季	951	0.77	0.32	0.18	0.44
香港	春季	85	0.73	0.61	0.46	0.50
	夏季	32	0.82	0.74	0.12	0.14
	秋季	27	0.78	0.67	0.07	0.19
	冬季	7	0.95	0.95	0.12	0.20
台北	春季	114	0.68	0.21	0.21	0.45
	夏季	15	0.39	0.04	0.14	0.38
	秋季	67	0.67	0.4	0.09	0.20
	冬季	28	0.8	0.74	0.14	0.16
徐州	春季	623	0.81	0.76	0.25	0.29
	夏季	166	0.9	0.9	0.23	0.23
	秋季	42	0.9	0.93	0.16	0.28
	冬季	348	0.75	0.69	0.15	0.23
香河	春季	1009	0.81	0.72	0.23	0.51
	夏季	166	0.96	0.87	0.2	0.19
	秋季	395	0.93	0.82	0.23	0.27
	冬季	178	0.94	0.6	0.1	0.36
包头	春季	420	0.13	-0.06	0.78	1.37
	夏季	242	0.8	0.14	0.13	1.49
	秋季	145	0.74	0	0.14	0.87
	冬季	13	-0.41	-0.36	0.13	1.36

比值的变化大。研究表明,0.01的地表反射率误差会带来0.1的AOD反演误差^[3],AOD反演精度高度依赖地表反射率的精确度。因此红/蓝地表反射率比值库可减小单波段地表反射率库的误差,有利于提高AOD的反演精度和稳定性。

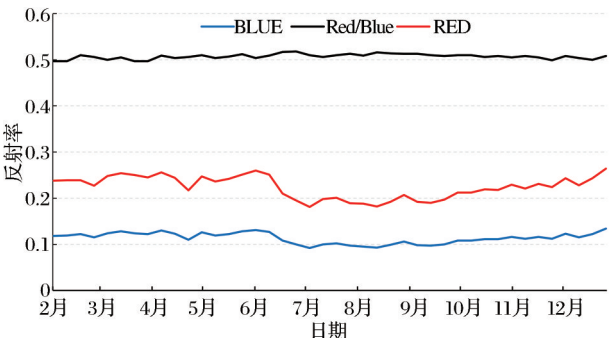


图 5 亮地表区域MOD09A1的红、蓝地表反射率和红/蓝比值时间序列对比

Fig.5 Time series of red and blue surface reflectance and red - blue ratio of MOD09A1 in bright surface area

图6为Himawari-8和MODIS红蓝波段光谱响应函数曲线对比,从图中可以看出MODIS红蓝波段的光谱响应函数曲线与Himawari-8 AHI红蓝波段的光谱响应函数曲线较为接近,中心波长也较为接近,因此将MOD09A1地表反射率产品作为先验地表反射率库反演Himawari-8 AOD是可行的。

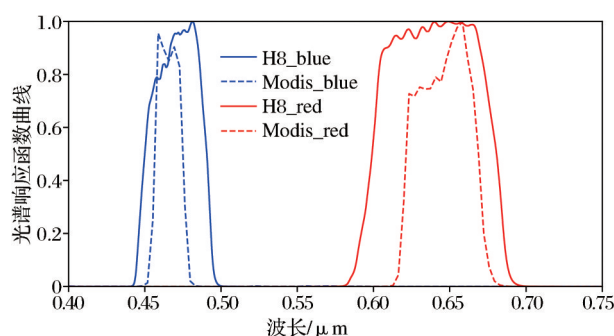


图6 Himawari-8和MODIS红蓝波段光谱响应函数曲线
Fig.6 Red and blue spectral response function curves of Himawari-8 and MODIS

6 结 论

本文基于Himawari-8 AHI卫星数据和MOD09A1地表反射率产品,基于改进的地表反射率库的红蓝波段比值库反演方法,反演了中国区域2018年4月~2019年4月逐10 min的AOD。利用位于中国地区西北、华北、华东、华南等地的6个AERONET地基观测资料对AOD反演结果进行精度验证,同时将反演结果与Himawari-8官方发布的AOD产品以及MODIS AOD产品进行时间序列、空间分布一致性对比,得出以下结论:

(1)红蓝比值库反演方法反演的RB AOD在6个站点整体效果均优于H8 AOD产品。冬春季时RB AOD在北方反演效果较H8 AOD有很大改进,弥补了暗像元法在高地表反射率区域反演能力不足的缺点,提升了冬春季AOD反演精度和反演区域范围。夏秋季节RB AOD和H8 AOD的反演效果都较好,RB AOD略优于H8 AOD结果。

(2)RB AOD与MOD04_3K AOD产品在空间分布上有很好的-致性,且RB AOD在空间上的连续性更好,弥补了MODIS暗像元法在高反射率地表无法反演的缺点,RB AOD在冬季时的反演能力较MOD04_3K AOD产品有很大提升,扩大了反演范围,同时相较于MODIS 1 d的重访周期,RB AOD 10分钟的高时间分辨率在监测区域性污染天气的变化有很大优势。

(3)在构建查找表时气溶胶类型仅选择了大陆型气溶胶类型,虽然大陆型气溶胶类型有较好的普适性,但不同地区不同季节的气溶胶类型是不同的,气溶胶类型的选择对AOD反演精度的影响较大,后期研究可考虑建立多种气溶胶类型查找表,在反演过程中根据多种气溶胶类型反演结果选择误差最小结果。

参考文献(References):

- [1] Zhang Xiaoye, Liao Hong, Wang Fenjuan. The Effects of Aerosols and Clouds on Climate Change and Their Responses [J]. Climate Change Research, 2014, (1): 37-39. [张小曳, 廖宏, 王芬娟. 对IPCC第五次评估报告气溶胶-云对气候变化影响与响应结论的解读[J]. 气候变化研究进展, 2014, (1): 37-39.]
- [2] Kaufman Y, Wald A, Remer L, *et al.* Remote Sensing of Aerosol over the Continents with the Aid of a 2.2 m Channel [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens, 1997, 35: 1286-1298.
- [3] Kaufman Y J, Tanre D, Remer L A, *et al.* Operational Remote Sensing of Tropospheric Aerosol over Land from EOS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1997, 102 (D14): 17051-17067.
- [4] Levy R, Hsu C. Modis Atmosphere L2 Aerosol Product, NASA MODIS Adaptive Processing System, Goddard Space Flight Center [EB/OL]. http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MYD04_3K.061. 2017.
- [5] Wang Hongbin, Zhang Lei, Jiao Shengming, *et al.* Evaluation of the MODIS Aerosol Products and Analysis of the Retrieval Errors in China [J]. Plateau Meteorology, 2016, 35 (3): 810-822. [王宏斌, 张镭, 焦圣明, 等. 中国地区MODIS气溶胶产品的验证及反演误差分析[J]. 高原气象, 2016, 35(3): 810-822.]
- [6] Huang G, Huang C, Li Z, *et al.* Development and Validation of a Robust Algorithm for Retrieving Aerosol Optical Depth over Land from MODIS Data [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations Remote Sensing, 2015, 8(3): 1152-1166.
- [7] Levy R C, Remer L A, Mattoo S, *et al.* Second-Generation Operational Algorithm: Retrieval of Aerosol Properties over Land from Inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Spectral Reflectance [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2007, 112(D13). doi:10.1029/2006JD007815.
- [8] 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.
- [9] Hsu N C, Tsay S-C, King M D, *et al.* Aerosol Properties over Bright-Reflecting Source Regions [J], 2004, 42 (3):

- 557-569.
- [10] 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 Remote Sensing, 2006, 44(11): 3180-3195.
- [11] Bai L, Xue Y, Cao C, *et al.* Quantitative Retrieval of Aerosol optical thickness from FY-2 VISSR data[C]// Sixth International Symposium on Digital Earth: Models, Algorithms, and Virtual Reality, 2010: 784022.
- [12] Zhang Junhua, Si Zhaojun, Mao Jietai, *et al.* Remote Sensing Aerosol Optical Depth over China with GMS-5 Satellite[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(1): 23-35. [张军华, 斯召俊, 毛节泰, 等. GMS 卫星遥感中国地区气溶胶光学厚度[J]. 大气科学, 2003, 27(1): 23-35.]
- [13] Gao Ling, Ren Tong, Li Chengcai, *et al.* A Retrieval of the Atmospheric Aerosol Optical Depth from MTSAT [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(3): 598-608. [高玲, 任通, 李成才, 等. 利用静止卫星 MTSAT 反演大气气溶胶光学厚度[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 598-608.]
- [14] Yu F F, Wu X Q. Radiometric Inter-calibration between Himawari-8 AHI and S-NPP VIIRS for the Solar Reflective Bands [J]. Remote Sensing, 2016, 8(3): 165. doi: 10.3390/S8030165
- [15] Yoshida M, Kikuchi M, Nagao T M, *et al.* Common Retrieval of Aerosol Properties for Imaging Satellite Sensors [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 2018, 96(B): 193-209.
- [16] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, *et al.* AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 66(1): 1-16.
- [17] Eck T F, Holben B, Reid J, *et al.* Wavelength Dependence of the Optical Depth of Biomass Burning, Urban, and Desert Dust Aerosols [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1999, 104(D24): 31333-31349.
- [18] Bessho K, Date K, Hayashi M, *et al.* An Introduction to Himawari-8/9—Japan's New-generation Geostationary Meteorological Satellites [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2016, 94(2): 151-183.
- [19] Li S S, Chen L F, Tao J H, *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.]
- [20] Tian Xinpeng, Sun Lin, Liu Qiang, *et al.* Retrieval of High-Resolution Aerosol Optical Depth Using Landsat 8 OLI Data over Beijing [J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(1): 51-63. [田信鹏, 孙林, 刘强, 等. 北京地区 Landsat 8 OLI 高空间分辨率气溶胶光学厚度反演[J]. 遥感学报, 2018, 22(1): 51-63.]
- [21] Zhang H, Kondragunta S, Laszlo I, *et al.* An Enhanced VIIRS Aerosol Optical Thickness (AOT) Retrieval Algorithm over Land Using a Global Surface Reflectance Ratio Database [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121(18): 10717-10738.

Retrieval of Aerosol Optical Depth based on Himawari-8

Wei Haining^{1,2}, Wang Weizhen^{1,3}, Huang Guanghui¹, Xu Feinan^{1,2},
Feng Jiaojiao^{1,2}, Dong Leilei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Remote Sensing of Gansu Province, Heihe Remote Sensing Experimental Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To obtain Aerosol Optical Depth (AOD) products with high spatial and temporal resolution and high precision in China. We enhance the AOD retrieval algorithm by applying the MODIS red and blue surface reflectance ratio database in the algorithm. The enhanced algorithm is able to retrieve AOD over both dark and bright surfaces. , we retrieve the 10-minute AOD of China from April 2018 to April 2019. The AOD retrievals from the enhanced red-blue ratio algorithm (RB AOD) were validated by the Level 1.5 AERONET (Aerosol Robotic Network) sunphotometer measurements and MOD04_3K AOD , and the retrieval of AOD were com-

pared with the latest AOD product (version 020) released by Himawari-8. The results show that : (1) The AOD retrievals from the enhanced algorithm agreed well with those from the AERONET. Except Baotou station, the correlation coefficient R of the other five stations is between 0.728–0.863, and the percentage of sample points within the range of EE (Expectation of Error) is between 47.7% and 68.6%, which has great advantages over Himawari-8 AOD products. (2) The RB AOD are basically consistent with AERONET AOD in time series trend. the RB AOD results are higher than those of AERONET AOD when $AOD > 1$. The spring and summer trend of Himawari-8 AOD is relatively consistent with that of AERONET AOD. However, due to the obvious diurnal change of Himawari-8 AOD in autumn and winter, and the diurnal change is relatively large, its trend deviates greatly from AERONET AOD. (3) The spatial distribution of RB AOD is basically consistent with that of MODIS AOD products, and the retrieved results are slightly lower than those of MODIS AOD. In winter, the inversion range of red-blue ratio method is wider than that of MOD04_3K AOD. (4) the red-blue ratio retrieval algorithm has great advantages over Himawari-8 AOD and MOD04_3K in precision and range of retrieval results of high-reflectance surface area in north China in winter and spring.

Key words: Aerosol Optical Depth(AOD);Himawari-8;AERONET;MODIS;Evaluation