

中国区域 MODIS 陆上气溶胶光学厚度产品检验^{*1}

李晓静 张 鹏 张兴赢 孙 凌 齐 瑾 张 艳

(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 国家卫星气象中心,北京 100081)

摘 要

以我国 MODIS 共享网站积累的 MODIS L1B 数据和美国威斯康辛大学提供的 IMAPP 软件包气溶胶产品软件为基础,经过产品运行本地化改进处理,在国家卫星气象中心建立了气溶胶产品业务化生成和发布机制。为支持气溶胶遥感产品算法改进以及潜在用户对产品的合理应用,给出对国家卫星气象中心运行的 MODIS 气溶胶遥感产品质量检验分析结果。利用 2005 年 1 月—2007 年 5 月 AERONET 地基气溶胶监测网的 L2.0 级气溶胶光学厚度产品作为真值,用它匹配 MODIS 陆上气溶胶光学厚度产品开展检验。检验结果表明:以卫星过境前后 30 min 地基观测时间平均值匹配地基点位置 10 km 半径范围内的卫星反演结果空间平均值开展检验,总体样本的气溶胶光学厚度均方根误差约为 0.25;满足产品误差要求($\pm 0.05 \pm 0.20\tau$)的样本占总样本数的 44%;气溶胶光学厚度反演结果精度具有季节和地域差异,干季(秋、冬、春)的气溶胶光学厚度误差较小,而雨季气溶胶光学厚度误差较大,云是雨季气溶胶光学厚度反演结果误差较大的主要影响因素。

关键词: MODIS; 气溶胶光学厚度; 误差检验; 数据共享

引 言

利用卫星平台观测获取对流层气溶胶信息广泛采用的观测资料是紫外-可见光-近红外光谱区的大气顶后向散射辐射。国外利用卫星观测数据反演的气溶胶产品主要有 NASA 的 TOMS 气溶胶指数产品、NOAA/NESDIS 的 AVHRR 海洋气溶胶光学厚度产品、NASA 的 MODIS 海/陆气溶胶光学厚度产品、NASA 的 OMI 多参数气溶胶产品、ESA 的 AATSR 气溶胶光学厚度产品^[1-4]。

我国气象卫星也正在着力实现对全球气溶胶的遥感监测。FY-1C/D 气象卫星遥感产品业务系统提供全球海洋气溶胶光学厚度遥感产品,此遥感产品类似 NOAA/NESDIS 的 AVHRR 海洋气溶胶光学厚度产品^[5]。全球陆上气溶胶的遥感监测随着 FY-3A 气象卫星的发射得以实现。FY-3A 上搭载的中分辨率光谱成像仪(MERSI)类似于 MODIS,可以实现对全球海上和陆上气溶胶的遥感监测。

2005 年开始运转的国家 MODIS 数据中心负责

我国主要 MODIS 数据接收站的数据汇集、处理、保存和发布工作。利用 MODIS 数据中心业务分发的 MODIS L1B 级观测数据和美国威斯康辛大学提供的 IMAPP 软件包气溶胶产品软件开展了气溶胶光学厚度遥感产品的业务流程开发和产品制作。业务制作的气溶胶遥感产品在国家 MODIS 数据中心网站(<http://satellite.cma.gov.cn/eos/index.html>)实时滚动发布近期的产品结果。

高精度的气溶胶卫星遥感产品制作是大气遥感算法研究的重要目标;利用气溶胶卫星遥感产品开展气候变化和大气化学研究也是气溶胶气象学的重要手段^[6-8]。对于气溶胶遥感产品的提供者和应用者来说,产品精度是首先需要明确的指标。

利用 MODIS 实测资料研究气溶胶光学厚度暗像元算法的研究者首先开展了对 MODIS 产品的检验工作。2002 年前后,我国气溶胶地基观测资料有限,卫星产品检验采用的地基观测数据多为研究者利用自有太阳光度计观测的单站或几站的实验结果。这些检验结果虽然有限,但也提供了改进暗像元算法有价值的认识,研究者普遍发现,原有算法在

* 中国气象局 2007 年气候变化专项项目(CCSF2007-11)、中国气象局新技术推广重点项目(CMATG2006Z02)及国家重点基础研究发展计划项目(2006CB403702)共同资助。

2008-04-16 收到,2008-08-04 收到再改稿。

地表反射率计算和气溶胶模型假定方面造成反演结果的明显误差^[9-11]。我国是全球大气气溶胶含量高值区,地基气溶胶观测资料不足,限制了气溶胶卫星遥感产品检验工作的开展,以及算法进一步改进和产品应用工作。

2004年后,地基气溶胶观测研究有了较大发展,使得MODIS气溶胶产品开展了深入的检验工作。夏祥鳌等利用AERONET观测网数据检验了NASA公开发布的MOD04气溶胶光学厚度产品,指出云检测和地表参数设定误差等造成了产品结果误差^[12-13],MOD04产品在东亚地区有较大的反演误差。王跃思等开展了中国地区气溶胶光学厚度和Ångström参数联网观测(2004年8—12月),获取了全国不同地表类型的19个典型区域站的观测结果。这些观测结果提供了我国森林、城市、农业生态区,沿海地区等不同下垫面及不同大气特征条件下的大气气溶胶光学厚度和粒子尺度分布信息^[14],并被用于验证美国C4版和改进后的C5版气溶胶光学厚度产品反演精度^[15-16]。在TERRA卫星发射后7年,美国MODIS气溶胶产品完成了C4版向C5版算法的改进^[17]。C5版新算法改进了地表参数计算方法,引入了新的气溶胶模型气候数据集。C4版采用 $2.13\ \mu\text{m}$ 近红外通道固定比例关系计算可见光通道地表反射率,C5版算法改进为采用依赖于散射角和NDVI变化的比率系数确定;C4版气溶胶模型采用1类清洁型、1类粗粒子,2类细粒子模型,C5版采用2类清洁型,1类粗粒子,3类细粒子模型,并且粗粒子考虑非球形散射。新的全球气溶胶类型气候分布数据集的建立借助了AERONET观测网提供的地基气溶胶遥感观测数据^[18],此数据库的引入极大提高了MODIS产品的精度。这些研究结果都对卫星气溶胶遥感算法研究和产品应用提供帮助。

为了支持对气溶胶遥感产品算法的改进以及产品潜在用户对本产品的合理应用,本文给出对国家卫星气象中心运行的MODIS气溶胶遥感产品开展质量检验的分析结果。利用2005年1月—2007年5月AERONET地基气溶胶监测网的L2.0级气溶胶光学厚度产品匹配MODIS气溶胶光学厚度产品开展检验,主要检验陆上气溶胶算法生成的466,550,658 nm陆上气溶胶光学厚度。

1 数据说明

1.1 MODIS气溶胶光学厚度产品

利用在国家卫星气象中心建立的MODIS气溶胶产品生成机制,制作了自2005年1月—2007年5月TERRA/MODIS气溶胶光学厚度产品数据集。此气溶胶产品数据集是利用国外卫星仪器、国外产品的遥感软件,在国内卫星数据处理业务环境下生成的产品。开展这项工作的目的是解决目前国内没有陆上气溶胶产品提供业务用户应用的问题。

气溶胶光学厚度产品制作的原始观测数据来自我国MODIS数据共享平台发布的北京站、新疆站、拉萨站、广州站接收处理的MODIS L1B级轨道数据,这4个站接收数据拼接的每日3轨观测数据可以覆盖我国全境及周边部分国家(蒙古、印度、泰国、越南、朝鲜、韩国等)。

产品制作采用的气溶胶光学厚度遥感软件是IMAPP软件包中的MODIS气溶胶光学厚度反演软件,它由美国威斯康辛大学CIMSS研究所(Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies/University of Wisconsin)提供。IMAPP中的MODIS气溶胶反演软件算法与NASA业务产品C4版算法一致^[2]。算法在1999年发布以后,已做过较多改进^[13],本文用的是CIMSS研究所V1.6版气溶胶产品软件。

为了提供用户在日常业务工作中正确使用这一气溶胶产品,应用2005年1—5月的轨道产品,开展产品质量检验。

规模性的产品数据集制作和产品质量检验工作还有助于充分掌握MODIS气溶胶业务产品制作各环节对最终产品质量的影响信息,为改进FY-3卫星MERSI陆上气溶胶产品算法及提高产品质量提供依据。

1.2 AERONET监测网气溶胶光学厚度产品

AERONET气溶胶监测网是在全球布站的气溶胶特性地基观测网。它以法国CEMEL公司生产的全自动CE318太阳光度计为观测仪器,利用此太阳光度计获取的太阳直射光和天空漫射光反演气溶胶光学厚度(AOT)(消光AOT、吸收AOT)、单次散射反照率和粒子尺度分布等气溶胶特性参数。由于利用地基太阳光度计观测反演气溶胶参数不受地表参数影响,它反演的AOT精度可以达到0.01~

0.02,足以作为真值用于检验卫星反演的 AOT 值(C4 版 MODIS 产品不确定性要求是 $\pm 0.05 \pm 0.20\tau$)。

本文分析选择的 AERONET 数据为完成云检测和质量检验的 L2.0 级气溶胶产品。观测时间及观测站点为 2005 年 1 月—2007 年 5 月有 L2.0 级气溶胶产品发布的亚洲站点。为与卫星观测比较,还根据式(1)将 AERONET 观测的 AOT(AERONET/AOT)结果(包括 AERONET 产品中 870,675,440 nm 波段的 AOT 和根据 440,870 nm AOT 计算的 Ångström 波长指数)折算到 MODIS 的反演波长 466,550,658 nm 上。

$$\tau_{\lambda} = \beta \lambda^{\alpha} \quad (1)$$

式(1)中, τ_{λ} 是波长为 λ 的 AOT, β 是浑浊度系数, α 是 Ångström 指数。

MODIS 气溶胶光学厚度(MODIS/AOT)反演时,采用 10×10 个 1 km 分辨率观测像元中检测有效的暗像元来计算观测反射率平均值,以观测平均

值参与反演计算,得到的光学厚度反演结果作为最优 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 区域的反演值(轨道边缘大于此分辨率),这一反演思路设计可提高反演准确度,反演结果代表 10×10 像元区域的 AOT 平均状态。地基观测采用太阳光度计的直射光观测反演气溶胶光学厚度,以气溶胶层高 3 km,估计卫星过境时间段的仪器最大仰角 60° 计算,地基观测代表的范围为观测光路在地表的投影距离,即观测点向南方向 1.7 km 范围。本文检验样本匹配的规则为:以卫星过境前后 30 min 地基观测结果的时间平均值匹配地基站点位置 10 km 半径范围内的 MODIS 卫星反演结果空间平均值。这一规则最大化的保证卫星和地基观测二者间在观测区域和观测时间上的契合度,卫星观测空间平均最大取样点为 4 个产品格点,地基观测时间平均最大取样点为 6 个观测时次。本研究采用的 AERONET 产品与 MODIS 产品共匹配到 22 个地基观测站 1440 组可供分析应用的样本(表 1)。

表 1 AERONET 站点观测 AOT 与 MODIS 反演 AOT 的比较

Table 1 Intercomparisons between MODIS and sun-photometer estimates of AOT respectively

序号	站点位置	观测时段	样本 个数	466 nm AOT 均方根误差	550 nm AOT 均方根误差	658 nm AOT 均方根误差
1	泰国 Pimai 遗址 (15.18°N,102.56°E,220.0 m)	2005-10-20—2006-11-24	106	0.2294	0.2317	0.1423
2	泰国穆达汉 (16.61°N,104.68°E,166.0 m)	2005-01-02—2006-12-09	170	0.3074	0.2205	0.1861
3	中国香港理工大学 (22.30°N,114.18°E,30.0 m)	2005-11-04—2006-05-14	30	0.2319	0.2205	0.1861
4	中国台湾台中 (24.11°N,120.49°E,10.00 m)	2005-10-13—2005-11-07	15	0.1634	0.2435	0.2244
5	中国台湾国立中央大学 (24.97°N,121.19°E,138.0 m)	2005-01-07—2006-10-25	29	0.5068	0.3576	0.3126
6	中国台湾台北中央气象局 (25.03°N,121.50°E,26.0 m)	2005-01-03—2006-05-01	42	0.3314	0.3188	0.3166
7	印度坎普尔 (26.45°N,80.35°E,142.0 m)	2005-01-04—2006-11-15	194	0.1463	0.1893	0.2086
8	尼泊尔喜马拉雅山 南侧(EV-K2-CNR 建) (27.96°N,86.81°E,5050.0 m)	2006-03-27—2007-02-09	1	0.0188	0.0047	0.0192
9	中国太湖 (31.42°N,120.21°E,20.0 m)	2005-09-01—2006-11-06	83	0.1731	0.1739	0.1121
10	韩国高山郡首尔大学 (33.29°N,126.16°E,72.0 m)	2005-01-06—2006-10-03	84	0.2937	0.1960	0.1545
11	日本白滨 (33.69°N,135.36°E,10.0 m)	2005-01-01—2005-09-02	44	0.2024	0.2766	0.1937
12	日本大阪 (34.65°N,135.59°E,50.0 m)	2005-03-25—2006-08-04	37	0.1573	0.2285	0.2211
13	韩国光州科学技术院 (35.13°N,126.50°E,60.0 m)	2005-01-03—2006-09-07	93	0.4256	0.2771	0.3045

续表 1

序号	站点位置	观测时段	样本 个数	466 nm AOT 均方根误差	550 nm AOT 均方根误差	658 nm AOT 均方根误差
14	中国北京榆堡 (39.31°N, 116.18°E, 20.0 m)	2006-08-14—2006-09-09	9	0.3236	0.2910	0.3159
15	中国北京大学 (39.59°N, 116.18°E, 66.0 m)	2006-08-14—2006-09-10	10	0.2101	0.1803	0.1970
16	中国香河 (39.75°N, 116.96°E, 36.0 m)	2005-01-02—2006-06-18	166	0.1257	0.1266	0.1098
17	中国北京 (39.98°N, 116.38°E, 92.0 m)	2005-01-01—2006-12-20	144	0.2853	0.1825	0.1405
18	中国兴隆 (40.396°N, 117.59°E, 970.0 m)	2006-02-19—2006-07-23	61	0.2238	0.2791	0.1850
19	中国辽中 (41.51°N, 122.70°E, 15.0 m)	2005-04-06—2005-07-05	25	0.1550	0.2237	0.2204
20	蒙古乌兰扎达嘎德 (43.58°N, 104.42°E, 1470.0 m)	2005-01-02—2007-03-10	6	0.3501	0.2066	0.2991
21	俄罗斯符拉迪沃斯托克 (43.70°N, 132.16°E, 280.0 m)	2005-01-02—2006-11-30	46	0.3171	0.2669	0.3154
22	俄罗斯伊尔库茨克 (51.80°N, 103.09°E, 670.0 m)	2005-07-08—2006-11-18	45	0.4726	0.1773	0.2043

2 检验结果与分析

夏祥鳌^[13]指出,气溶胶产品误差来源于 4 个方面,分别是:观测数据误差,用于反演的 MODIS 视场残留云的影响,地表反射率估计误差,气溶胶模式设定误差(相函数和单次散射反照率)。式(2)是气溶胶反演的基本方程,以它为基础说明用查找表方式实现的暗像元算法反演误差源。基于查找表的解算过程误差源来自两个方面,一是卫星实际观测,二是模式模拟的卫星观测值。实际观测值误差源于以下 2 个因素:① 星载仪器观测误差,观测误差总是存在的,好的卫星定标过程可以减小观测误差,就像 MODIS 有星上定标系统,可见光观测精度可以做到 2% 左右^[13],它对反演结果造成的影响可忽略;② 云检测误差,式(2)描述的卫星观测要求是晴空像元,当像元被薄云或部分云覆盖,难以被判识为云像元排除在反演过程之外时,云的消光作用被认为是气溶胶的消光作用引入卫星实际观测值,反演计算时被作为气溶胶消光作用处理,从而造成高估气溶胶光学厚度,这类误差可以通过提高云检测能力来减小影响。卫星观测模拟值引入的误差源于以下 3 个因素:① 吸收透过率计算误差,式(2)描述分子气体吸收,分子散射和气溶胶消光(散射+吸收)过程,对气体吸收过程的模拟处理涉及到辅助气体含量观测的准确性以及吸收透过率快速计算公式的准确性,在可见光波段,气体吸收作用很小,所以气体吸收透过率计算误差可以忽略;② 地表反射率估计误

差,它是算法的主要误差源,可从两个方面理解,一方面是采用近红外通道判识暗像元时将积雪/冰、水体误判为植被暗像元造成地表反射率误差,另一方面是计算植被暗像元地表反射率的方案本身存在计算误差(见式(3)),前者可以通过提高地表分类能力减小影响,后者是算法本身的问题,此因素造成的误差过大就需要改进算法;③ 气溶胶模型指表达特定气溶胶类型的物理和光学参数,它的设定误差是气溶胶反演算法中参数假定误差,是算法本身的问题,此因素造成的误差过大也需要改进算法来提高精度。就上述误差源来说,评价植被暗像元地表反射率计算方案和气溶胶模式设定误差是反演算法自身的需要,评价结果有助于改进算法过程,提高反演精度。本文希望了解的误差源特征主要是除观测误差外可以在产品反演软件中调整的其他误差源。

$$\rho^* = T_g(\rho_a + \frac{\rho}{1 - \rho S} T_d T_u) \quad (2)$$

式(2)中,等式左端 ρ^* 代表实际卫星观测;右端代表辐射传输模式模拟的卫星观测, T_g 代表大气气体吸收透过率, ρ_a 为大气中分子和气溶胶散射产生的反射率, T_d 和 T_u 分别为向下和向上整层大气透过率(直射+漫射); S 为大气的球面反照率; ρ 为朗伯表面地表反射率。

$$\rho_{0.47}^S = \rho_{2.1}^S \times C_{\text{slope}0.47/2.1}, \quad C_{\text{slope}0.47/2.1} = 0.25 \quad (3)$$

$$\rho_{0.66}^S = \rho_{2.1}^S \times C_{\text{slope}0.66/2.1}, \quad C_{\text{slope}0.66/2.1} = 0.50$$

式(3)中, C_{slope} 为比例系数。

利用上述 1440 组样本,检验 MODIS 产品中陆

上气溶胶 466,550,658 nm AOT。检验工作将针对 MODIS 反演产品精度随时间和空间的变化,受地表参数和大气参数的影响程度方面开展误差源特征分析。

2.1 产品误差的季节变化

将 1440 组样本按月分组,计算逐月均方根误差(图 1)。根据逐月均方根误差的比较发现,MODIS/AOT 在干季(冬季)的误差最小,而雨季(夏季)的误差最大。当以最优误差要求选取样本(绝对误差 $\leq |\pm 0.05 \pm 0.20\tau|$),并计算逐月均方根误差,结果误差的季节变化趋势不复存在,最优样本均方根误差均小于 0.1(图 2)。这说明 MODIS/AOT 的较大误

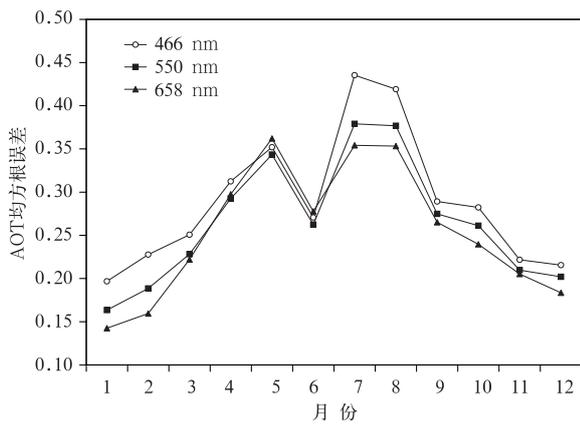


图 1 以 AERONET/AOT 为真值检验的 MODIS/AOT 均方根误差季节分布
Fig. 1 Seasonal change of RMSE of MODIS/AOT compared to AERONET/AOT

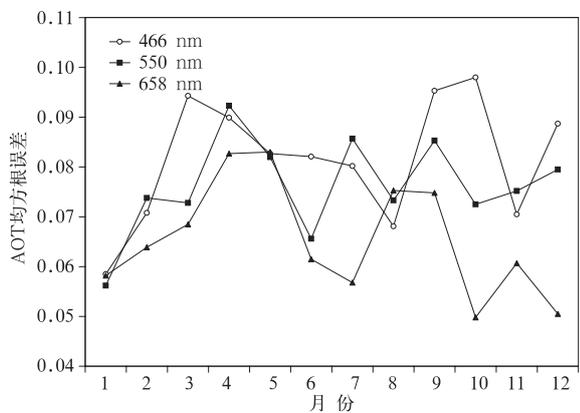


图 2 以 AERONET/AOT 为真值检验的满足误差要求的 MODIS/AOT(AOT 绝对误差 $\leq |\pm 0.05 \pm 0.20\tau|$) 的均方根误差随季节变化
Fig. 2 Seasonal change of RMSE of MODIS/AOT compared to AERONET/AOT sampled on the condition of absolute error of AOT $\leq |\pm 0.05 \pm 0.20\tau|$

差与季节变化因素有关。

首先,考虑地表因素的季节变化作用。由于冬季北方植被覆盖度较差,由地表反射率误差造成的 AOT 反演误差应该在冬季最大,所以对于图 1 中的 AOT 误差季节变化趋势不应该由地表因素主控。

此外,考虑大气因素(云的影响、大气吸收气体的影响、还有气溶胶模型的影响)对反演结果误差季节变化的影响。大气因素中云对反演结果误差的影响与图 1 中 MODIS/AOT 误差的季节变化趋势最为一致。夏天雨季,云区覆盖一半以上观测区域的情况较为常见,AOT 反演在云区边缘常常得到极端偏高的反演值;而冬季,云的大量减少,使得云造成的反演误差大为减少。大气吸收气体对可见光波段观测的影响很小,反演中考虑了订正吸收气体作用,它的影响不会造成明显的季节变化;气溶胶模型在反演中以动态气溶胶模型方式引入,东亚地区方案基本一致,可以认为气溶胶模型对于任何一个地方的 AOT 反演都是随机因素,不会造成明显的季节变化。因此,MODIS/AOT 反演误差在干季(冬季)的误差小,而雨季(夏季)误差大主要受云的季节变化影响。

2.2 产品误差的区域特征

根据站点的纬度分布和样本的观测季节把观测样本分为 4 类,用以分析区域特征造成的地表因素影响。分析中,根据样本观测季节分类,目的是排除大气因素以后来分析 MODIS/AOT 误差受区域地表特征的影响规律。

表 2 中以 30°N 作为南方常绿区和北方季候区的分界线;将 6—10 月的样本归为雨季,其他各月样本归为干季。根据这两组标准划分出 4 类样本。由 MODIS/AOT 的均方根误差对比可以看出,无论是在雨季还是干季,南方的 MODIS/AOT 比北方的 MODIS/AOT 反演结果好;从绝对误差平均值来看,在南方反演结果出现负误差的可能性高于北方。南、北方两类误差分布规律首先可以说明,MODIS 算法在茂密植被区偏高估计地表反射率的现象除了由比例系数造成外,还与 2.1 μm 观测受气溶胶等大气因素影响有关^[19-20]。比例系数造成了南北方一致的偏高估计相关性,而 2.1 μm 观测值受气溶胶影响的规律不同可能使得南方地表反射率的估计误差低于北方地区。

根据表 1 中各站的 MODIS/AOT 均方根误差除了季节和区域的总体特征外,由于各站所处位置

的地表类型特征,以及大气受人为因素影响程度的大小差异,误差特征具有非常大的差异。以北京附近香河站(Xianghe)、北京站(Beijing)和兴隆站(Xinglong)为例来看:首先,香河站的卫星反演结果在亚洲区22个站中检验最优,蓝通道AOT均方根误差为0.126,红通道AOT均方根误差为0.110,这与香河站地处乡村,远离北京城市中心,地表特征符合反演算法,大气气溶胶特征变化幅度较小等条件密不可分;北京站地处城市边缘,地表植被覆盖有限,大气气溶胶特征受城市排放源的影响巨大,所以它的卫星反演结果误差较大,蓝通道AOT均方根

误差为0.285,红通道AOT均方根误差为0.183;兴隆站是山区森林站,它的观测仅取到2006年春、夏季节的地基观测作检验,卫星反演蓝通道AOT均方根误差为0.224,红通道AOT均方根误差为0.185,春夏季较多的局地对流云对卫星反演结果的影响可能是该森林站检验误差偏高的原因。这3个站红、蓝通道误差的巨大差异说明:下垫面特征和大气气溶胶特征,以及云的影响共同决定着卫星气溶胶产品的局地质量;城市周边大气因素的影响作用较大,可以造成蓝通道的反演误差大于红通道的反演误差。

表2 以AERONET/AOT为真值检验的MODIS/AOT的均方根误差(RMSE)分类误差统计

Table 2 Statistics of classed RMSE and absolute error of MODIS/AOT compared to AERONET/AOT by season and terrain

时段	AOT 波长	30°N 以北(北方)			30°N 以南(南方)		
		样本数	RMSE	绝对误差平均值	样本数	RMSE	绝对误差平均值
6—10月(雨季)	466 nm	260	0.3347	0.0226	111	0.2682	-0.1568
	550 nm		0.3154	0.0870		0.2514	-0.0470
	658 nm		0.3064	0.1445		0.2506	0.0964
11月、12月和 1—5月(干季)	466 nm	593	0.2850	0.0853	476	0.2275	-0.1652
	550 nm		0.2808	0.1230		0.1931	-0.0656
	658 nm		0.2789	0.1558		0.2096	0.0644

地表反射率计算误差一直是陆上气溶胶反演过程研究的重要问题,可见光地表反射率误差不仅是直接误差源,在MODIS/AOT算法中还可以导致在动态确定气溶胶模型过程中出现气溶胶模型选择错误或大小粒子模型分配比例的计算误差,从而间接影响AOT反演结果。为了减小地表反射率计算误差,利用2.1 μm通道反射率确定可见光0.47 μm和0.66 μm通道反射率的比例系数确定方案不断得到更新。研究一致认为,该比例系数随着观测角度和季节变化而变化^[17,20]。文献[20]认为,为了得到AOT估计误差小于0.1,可见光地表反射率的计算误差要求小于0.01,该研究在不改变原有固定比例系数的前提下(见式(3)),通过确定更符合该比例关系的像元参与反演计算来达到提高AOT反演精度目的,例如:除了一般有效像元检测外(参与计算的像元要求全部通过云监测、符合暗像元确定标准 $\rho_{2.1}^* < \rho_{\text{cutoff}} = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25$,滤除最亮的60%和最暗的10%可见光观测像元),如果再加入剔除前向散射像元的方案后,可使符合可见光地表反射率计算误差要求的计算比例由60%提高到75%。C5版气溶胶产品的地表反射率确定方案同样考虑了比例系数随观测角度和季节的变化因素,

不过,改进方案是采用2.1 μm通道表观反射率确定0.66 μm通道地表反射(式(4)),然后再以0.66 μm通道地表反射率确定0.47 μm地表反射率($\rho_{0.47}^S = \rho_{0.66}^S \times C_{\text{slope}0.47/0.66} + y_{\text{int}0.47/0.66}$),比例系数 C_{slope} 和截距 y_{int} 是观测角度和植被指数NDVI的函数,具体确定方案可参见文献[17]。

$$\rho_{0.66}^S = \rho_{2.1}^S \times C_{\text{slope}0.66/2.1} + y_{\text{int}0.66/2.1} \quad (4)$$

$$\rho_{0.47}^S = \rho_{0.66}^S \times C_{\text{slope}0.47/0.66} + y_{\text{int}0.47/0.66}$$

利用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提供的地表反射率数据集初步理解C4版地表反射率确定方案的不足,以及C5版产品的调整根据,选取地表反射率数据集79条植被下垫面反射率光谱曲线,以权重为1计算了各类植被在MODIS 2.1, 0.47 μm和0.66 μm通道的地表反射率。根据2.1 μm通道的地表反射率按式(3)计算0.47 μm和0.66 μm地表反射率,再与地基实际观测比较,比较结果主要有0.47 μm通道有61个样本为负误差,占总数的77%;0.66 μm通道有44个样本为负误差,占总数的56%;0.47 μm通道有47个样本的误差小于0.01,占总数的79%;0.66 μm通道仅有31个样本的误差小于0.01,占总数的39%。总体评价来看,0.47 μm通道偏低估计的比

例较大但幅度很小,可以造成的 AOT 反演误差偏高估计不会很大;0.66 μm 通道地表反射率偏低估计的样本比例小于蓝通道,但大误差的样本比例很高,所以 0.66 μm 通道地表反射率估计误差对 AOT 反演结果的影响会很大。用 3 个通道实测地表反射率分析它们之间的相关性 ($y = Bx$, 见图 3)。0.47 μm 与 2.1 μm 通道地表反射率之间有 0.2977 的比例关系,相关系数 R 为 0.5977;0.66 μm 与 2.1 μm 通道之间有 0.5141 的比例关系,相关系数 R 为 0.6858;0.47 μm 与 0.66 μm 通道间有 0.5742

的比例关系,相关系数 R 为 0.8643。这一结果说明,0.66 μm 与 2.1 μm 通道地表反射率之间 1/2 的比例关系具有统计意义,二者间相关性优于蓝通道;0.47 μm 与 0.66 μm 通道地表反射率之间有比其与 2.1 μm 通道更高的相关性。推论下来,C5 版产品采用 2.1 μm 通道地表反射率计算 0.66 μm 通道地表反射率,再以 0.66 μm 通道地表反射率计算 0.47 μm 通道地表反射率的思路确实比 C4 版产品都以 2.1 μm 通道地表反射率计算可见光两个通道地表反射率的思路更具有物理学和统计学基础。

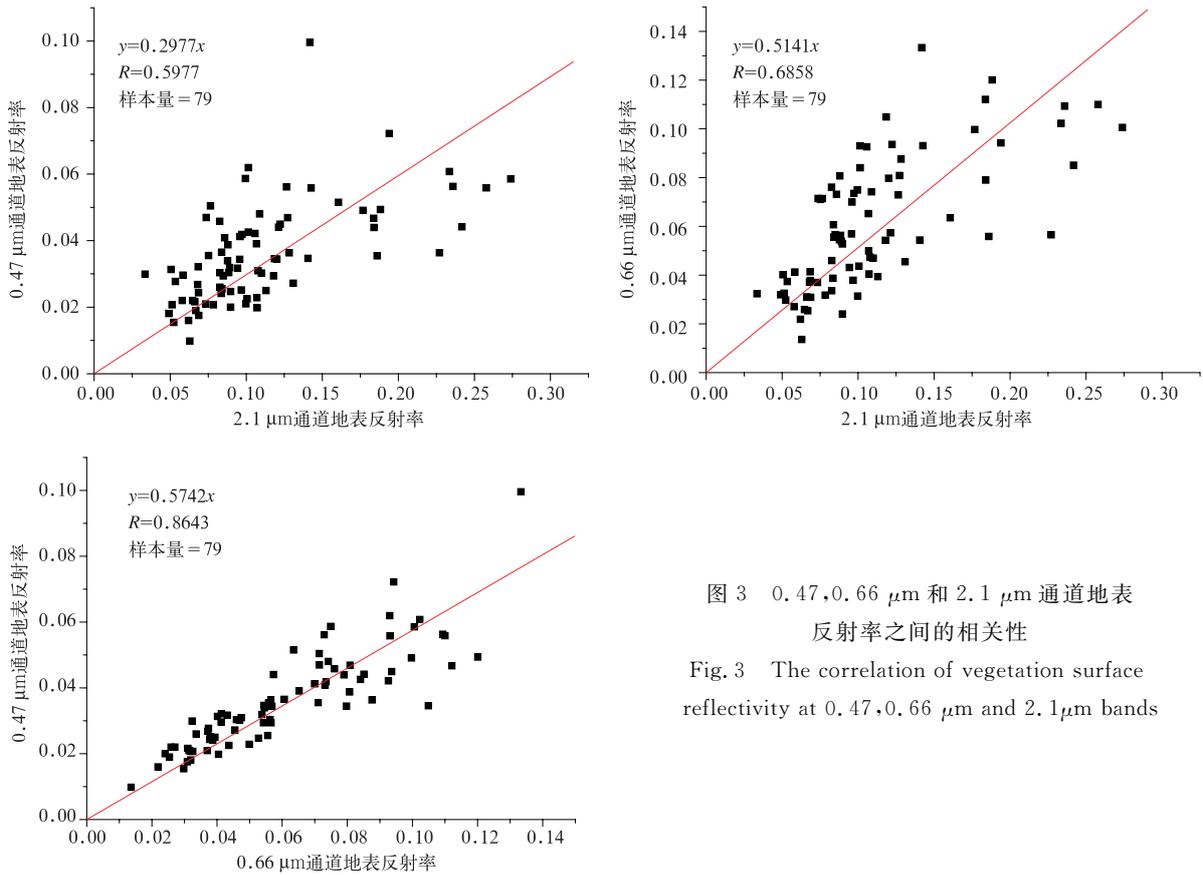


图 3 0.47,0.66 μm 和 2.1 μm 通道地表反射率之间的相关性
Fig. 3 The correlation of vegetation surface reflectivity at 0.47,0.66 μm and 2.1 μm bands

2.3 产品误差随 AOT 值域的变化

本文所取 1440 组样本的 550 nm AOT 均小于 4.0。将检验样本以地基观测 550 nm AOT 按 0.2 为间隔分组至 AOT 为 1.6,将 550 nm AOT 大于 1.6 的样本分为一组,统计 9 组检验样本的 AOT 均方根误差(图 4),并计算绝对误差平均值(图 5)。

550 nm MODIS/AOT 均方根误差在 AOT 小于 1.0 时平稳增加,符合统计学规律;但当 550 nm MODIS/AOT 大于 1.0 后,AOT 均方根误差跳跃式急剧增加,分析原因认为,这与云对 MODIS/AOT 反演造成的影响有关。一般条件下,地基观测

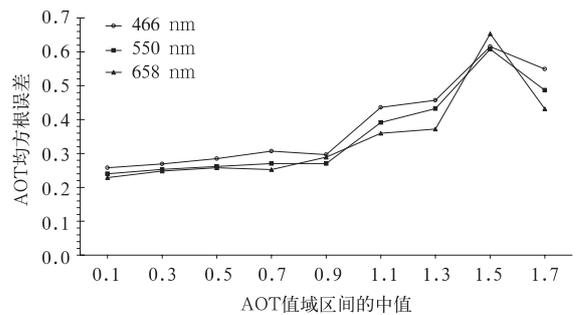


图 4 MODIS/AOT 均方根误差随 AERONET/AOT 值域变化(AERONET/AOT 间隔为 0.2)
Fig. 4 Change of RMSE of MODIS/AOT calculated by step of 0.2 of AERONET/AOT

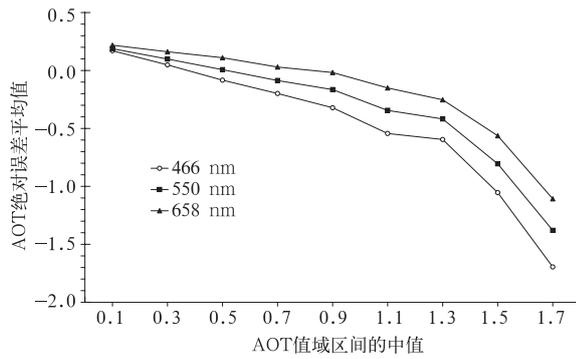


图5 MODIS/AOT 绝对误差平均值随 AERONET/AOT 值域变化 (其他说明同图4)

Fig. 5 Change of average absolute error of MODIS/AOT calculated by step of 0.2 of AERONET/AOT

的 550nm AOT 小于 1.0, 大于 1.2 的值多有云的影响, 云容易造成反演 MODIS/AOT 出现异常高值, 550 nm AOT 大于 1.0 以后反演结果误差异常增大与云的影响值域吻合。

表 3 MODIS/AOT 样本检验结果

Table 3 Statistics of MODIS/AOT sample error

样本分类	466 nm AOT			550 nm AOT			658 nm AOT		
	样本数	RMSE	绝对误差平均值	样本数	RMSE	绝对误差平均值	样本数	RMSE	绝对误差平均值
总体样本	1440	0.2909	-0.0275	1440	0.27	0.0411	1440	0.2644	0.1190
正误差样本	673	0.2431	0.2442	798	0.2328	0.2367	1002	0.2291	0.2435
负误差样本	767	0.2041	-0.2660	642	0.1724	-0.2022	438	0.1456	-0.1660
满足 $\pm 0.05 \pm 0.20\tau$ 要求的样本	596	0.0852		635	0.0787		612	0.0690	

模型误差比红通道敏感得多。

对于满足 $\pm 0.05 \pm 0.20\tau$ 误差要求的样本, MODIS/AOT 与 AERONET/AOT 的相关性超过 90% (466, 550, 658 nm AOT 分别是 91.13%, 90.61%, 90.58%), 均方根误差在 0.07 左右, 达到这样要求的观测结果占检验样本的 44% 左右, 这一结果指出目前运行的产品结果可以提供有价值的信息。MODIS/AOT C5 版产品提高的误差要求是 $\pm 0.05 \pm 0.15\tau$, 这对 FY-3 卫星 MERSI/AOT 产品质量也同样提出了更高的要求。

本数据集产品的均方根误差总体为 0.2~0.3, 误差水平大于文献[11]给出的对 NASA/MODIS C4 版产品全球范围的检验结果(总体小于 0.2, 亚洲区为 0.1~0.2)。较高的误差与样本选择方案有一定关系, 文献[13]选择站点位置 5×5 MODIS 像元平均值匹配地基观测, 而本文选择站点位置 10 km 半径范围内的卫星观测样本平均值, 样本数为 1~4 个, 匹配样本可能存在较大的随机误差。来

MODIS/AOT 绝对误差平均值随 AOT 的增加而减小, 负误差随 AOT 的增加逐渐取代正误差的主导地位。AOT 负误差可以由反演所取模型过高的描述实际大气气溶胶散射特性时引入, 而且 AOT 越大反演中对模型误差越敏感, 这能解释图 5 中曲线特征。关于气溶胶模型误差的程度尚需地基观测试验的研究结果来进一步分析, 目前我国许多研究机构和业务机构都投入人力和物力开展气溶胶地基观测, 期待着这些观测结果提供改进气溶胶卫星反演算法有价值的先验知识。

2.4 总体样本检验

总体样本检验结果见表 3。

表 3 数据显示, 红通道由其地表反射率的明显低估造成了较大的反演正误差, 69.58% 的样本为正误差; 而蓝通道反演的 466nm AOT 的正、负误差均很大, 它的高误差由云和气溶胶类型等大气因素造成, 反演研究证实蓝通道反演 AOT 对大气气溶胶

自样本匹配随机误差对检验结果的影响是下一步的工作; 此外, MODIS L1B 数据定标误差对反演结果的影响也是需要评价的工作。

3 结果与讨论

对我国及周边区域 1440 组观测样本的误差分析表明:

1) MODIS 气溶胶光学厚度反演结果的精度具有季节变化, 干季的反演结果优于雨季, 大气因素中云检测误差造成了雨季较大的反演结果误差; 当气溶胶反演结果大于 1.2 时, 需要考虑是否有云的影响。

2) 地表因素也造成 MODIS 气溶胶光学厚度反演结果在南方优于北方。MODIS 对 658 nm 气溶胶光学厚度的明显偏高估计, 源于反演过程中对红通道地表反射率的系统性偏低估计。对我国植被地表反射率研究的结果证实, 红通道地表反射率与 $2.1 \mu\text{m}$ 地表反射率的 1/2 比例关系具有统计意义,

但是利用此系数会偏低估计红通道地表反射率。

3) 气溶胶模型误差在反演过程中,可以抵消地表反射率误差带来的系统性 AOT 偏高估计,这种作用随着 AOT 的增大而加强,因为在 AOT 反演过程中对气溶胶模型误差的敏感度随 AOT 增大而加强。

4) 利用蓝通道反演 466 nm AOT 的过程中,地表反射率估计误差较小,蓝通道对气溶胶模型等大气因素的影响尤为敏感,所以 466 nm AOT 反演结果的特征是正负误差参半,均方根误差较大,反演过程中存在明显的大气参数误差。

5) 应用 MODIS/AOT 产品,选择 466 nm 气溶胶光学厚度需注意大气因素带来的随机误差影响,选择 658 nm AOT 需注意地表因素引起的系统误差影响。

通过对国家卫星气象中心制作的 3 年中国区域 MODIS/AOT 产品的检验结果可知,MODIS/AOT C4 版产品的算法在可见光地表反射率计算环节上存在较大误差,并因此有可能会导致在动态确定气溶胶模型过程中出现气溶胶模型选择错误或大小粒子模型分配比例计算误差,造成地表反射率误差对 AOT 反演结果的直接和间接影响;原有 C4 版气溶胶模型参数,及模型气候分布规则也会由于近些年大气气溶胶状态改变而不同,模型本身的误差会造成 AOT 反演结果误差,在东亚地区尤为突出。MODIS/AOT C5 版产品算法使地表参数和气溶胶模型处理方案均有明显改进,这得益于航空与地基地表参数和气溶胶参数系统性的观测研究,地基与航空观测研究得到的先验知识帮助改进了卫星反演算法中的重要参数处理方案。

致 谢: 本文地基观测数据采用 AERONET 观测网产品,感谢 AERONET 观测网亚洲区观测站研究人员提供地基气溶胶产品。感谢美国威斯康辛大学 CIMSS 研究所提供遥感软件。感谢国家卫星气象中心张玉香老师编辑整理地表反射率数据集并提供本研究使用。

参 考 文 献

- [1] King M D, Kaufman Y J, Tanré D, et al. Remote sensing of tropospheric aerosols from space: Past, present, and future. *Bull Amer Meteor Soc*, 1999, 80(11): 2230-2259.
- [2] Kaufman Y J, Tanré D. Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from MODIS Product ID: MOD04. NASA Goddard Space Flight Center, USA, 1998.
- [3] Stammes P, Noordhoek R. OMI Algorithm Theoretical Basis Document Volume III Clouds, Aerosols, and Surface UV Irradiance. ATBD-OMI-03, Version 2.0, 2002:47-69.
- [4] William M F G, Peter R J N, Sietse O L, et al. Aerosol optical depth and land surface reflectance from multiangle AATSR measurements: Global validation and intersensor comparisons. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2006, 44(8):2184-2197.
- [5] 胡秀清, 卢乃锰, 邱红. FY21C/1D 全球海上气溶胶业务反演算法研究. *海洋学报*, 2006, 28(2):56-65.
- [6] 李成才, 刘启汉, 毛节泰, 等. 利用 MODIS 卫星和激光雷达遥感资料研究香港地区的一次大气气溶胶污染. *应用气象学报*, 2004, 15(6):641-650.
- [7] 徐祥德, 丁国安, 卞林根. 北京城市大气环境污染机理与调控原理. *应用气象学报*, 2006, 17(6):815-828.
- [8] 丁国安, 郑向东, 马建中, 等. 近 30 年大气化学和大气环境研究回顾——纪念中国气象科学研究院成立 50 周年. *应用气象学报*, 2006, 17(6):796-814.
- [9] 毛节泰, 李成才, 张军华, 等. MODIS 卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度与地面光度计遥感对比. *应用气象学报*, 2002, 13(特刊): 127-135.
- [10] 李成才. MODIS 遥感气溶胶光学厚度及应用于区域环境大气污染研究. 北京:北京大学大气科学系, 2002.
- [11] 李晓静, 刘玉洁, 邱红, 等. 利用 MODIS 资料反演北京及其周边地区气溶胶光学厚度的方法研究. *气象学报*, 2003, 61(5):580-591.
- [12] Xia X A, Chen H B, Wang P C. Validation of MODIS aerosol retrievals and evaluation of potential cloud contamination in East Asia. *J Environ Sci*, 2004, 16: 832-837.
- [13] 夏祥鳌. 全球陆地上空 MODIS 气溶胶光学厚度显著偏高. *科学通报*, 2006, 51(19):2297-2303.
- [14] 王跃思, 辛金元, 李占清, 等. 中国地区大气气溶胶光学厚度与 Angstrom 参数联网观测(2004-08~2004-12). *环境科学*, 2006, 27(9):1703-1711.
- [15] Li Zhanqing, Niu Feng, Lee Kwon-Ho, et al. Validation and understanding of moderate resolution imaging spectroradiometer aerosol products (C5) using ground-based measurements from the handheld sun photometer network in China. *J Geophys Res*, 112, D22S07, doi:10.1029/2007JD008479, 2007: 1-16.
- [16] Mi Wen, Li Zhanqing, Xia Xiangao, et al. Evaluation of the moderate resolution imaging spectroradiometer aerosol products at two aerosol robotic network stations in China. *J Geophys Res*, 112, D22S08, doi:10.1029/2007JD008474, 2007: 1-14.
- [17] Robert C Levy, Lorraine A Remer, Shana Mattoo, et al. Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of moderate resolution imaging spectroradiometer spectral reflectance. *J Geophys Res*, 112, D13211, doi: 10.1029/2006JD007811, 2007:1-21.
- [18] Robert C Levy, Lorraine A Remer, Oleg Dubovik. Global aerosol optical properties and application to moderate resolution imaging spectroradiometer aerosol retrieval over land. *J Geophys Res*, 112, D13210, doi: 10.1029/2006JD007815, 2007:1-15.
- [19] 张杰, 王介民, 郭妮. 应用 6S 模式对 EOS-MODIS 可见光到中红外波段的大气订正. *应用气象学报*, 2004, 15(6): 651-657.

[20] Lorraine A Remer, Andrew E Wald, Yoram J Kaufman. Angular and seasonal variation of spectral surface reflectance ra-

tios: Implications for the remote sensing of aerosol over land. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2001, 39(2):275-283.

Validation of Aerosol Optical Thickness Product over China with MODIS Data Operated at NSMC

Li Xiaojing Zhang Peng Zhang Xingying Sun Ling Qi Jin Zhang Yan

(Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract

The aerosol optical thickness producing software provided by Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies (CIMSS) of University of Wisconsin has been modified and operationally run at NSMC. And the MODIS/AOT product is shared at National MODIS Data Center. The MODIS aerosol optical thickness product has been validated with AERONET Level 2.0 aerosol optical thickness product so that the product can be improved and popularized. The MODIS/AOT product from January 2005 to May 2007 has been matched with L2.0 AOT product from AERONET stations in east Asia during the same period. The spacial average value of the MODIS/AOT within the 10 km distance from the site of AERONET station have been compared with the temporal average value of the AERONET/AOT within 30 minutes period the satellite passing the station. The validation result show that RMSE of all validation AOT samples over land is near 0.25, and about forty-four percent of the test samples meet the expected uncertainty of $\pm 0.05 \pm 0.20\tau$. The precision of MODIS/AOT is different according to seasons and areas. Usually, RMSE of MODIS/AOT is smaller at drought season than that at rain season. Cloud is the main factor impacted on the large RMSE at rain season. At south evergreen vegetable area, MODIS/AOT RMSE is better than that of north seasonal changed area. MODIS/AOT at 658 nm has obviously systematical over-retrieval since the surface reflectivity of red band is over-estimated. Absolute error of MODIS/AOT at 466 nm retrieved with blue band data has about half of the positive value and RMSE of MODIS/AOT at 466 nm is higher than that of 658 nm. The cause is that MODIS/AOT obtained with blue band is more sensitive for aerosol model used in retrieval process than it done with red band, though the estimated surface reflectivity of blue band has smaller error than that of red band. In a word, error from aerosol model is main cause of high random error of MODIS/AOT at 466nm.

Correlation among the surface reflectivity at 0.47, 0.66 μm and 2.1 μm bands are discussed using selected 79 items of vegetation spectrum reflectivity observed in China by LRCVES/CMA, in order to analyze effects of surface reflectivity for retrieval MODIS/AOT and get some ideas that could improve the precision of MODIS/AOT. The vegetation spectrum reflectivity is obtained from different vegetations and from different growing period of the same vegetation. The analysis show that there is high linear correlation (86.43%) between reflectivity at 0.47 μm bands and reflectivity at 0.66 μm bands for the vegetations. And linear correlation between vegetation reflectivity at 2.1 μm and vegetation reflectivity at 0.66 μm is 68.58%. Linear correlation between vegetation reflectivity at 2.1 μm and vegetation reflectivity at 0.47 μm is 59.79%. It can be concluded that the scheme which decides vegetation surface reflectivity of two visible bands in algorithm of Collection 5 MODIS aerosol products agrees well with the statistics, and is instrumental for algorithm of AOT retrieval with other similar satellite sensors.

Key words: MODIS; AOT; validation; data share