

风云三号卫星气溶胶光学厚度产品的适用性验证

刘智超¹, 王健², 张鹏¹, 张磊¹, 齐男¹, 汪潏海², 贺千山^{3*}

(1. 蒙东协合新能源有限公司, 内蒙古 通辽 028000; 2. 国家电投风电产业创新中心, 上海 200030;
3. 上海市气象局, 上海 200030)

摘要: 利用长三角地区浦东、东滩、太湖 3 个测站的太阳光度计 CE318 地基遥感观测得到的气溶胶光学厚度 (AOD) 数据对风云三号气象卫星 FY-3A/B MERSI 反演的 550 nm 波长 AOD 进行有效性验证。结果表明, FY-3A 的反演结果相关系数高于 0.96, 仅有 20% 的样本表现出较大的偏差。FY-3B 的相关系数最高为 0.77, 均方根误差 (RMSE) 最大为 0.35。太湖站点的相关系数比浦东大, 说明 MERSI 的反演算法在太湖更适用。FY-3A/B MERSI 反演结果总体上偏小, 存在一定的系统偏差, 主要由气溶胶模型的假设、设备标定、选择像素比例等原因造成。

关键词: 气溶胶光学厚度; 风云三号; 太阳光度计; 验证; 长三角地区

中图分类号: TP79 文献标志码: B 文章编号: 1006-2009(2023)02-0018-05

Verification of Aerosol Optical Depth Observed by FY-3 Satellite

LIU Zhi-chao¹, WANG Jian², ZHANG Peng¹, ZHANG Lei¹, QI Nan¹, WANG Ying-hai², HE Qian-shan^{3*}

(1. Mengdong Xiehe New Energy Co. Ltd., Tongliao, Inner Mongolia 028000, China;
2. State Power Investment Wind Power Industry Innovation Center, Shanghai 200030, China;
3. Shanghai Meteorological Service, Shanghai 200030, China)

Abstract: In this paper, the validity of aerosol optical depth (AOD) of 550 nm wavelength retrieved by FY-3 meteorological satellite FY-3A/B MERSI was verified by AOD obtained from sun photometer CE318 ground-based remote sensing at three stations in Pudong, Dongtan and Taihu Lake in the Yangtze River Delta region. The results showed that the correlation coefficient of the inversion results by FY-3A was higher than 0.96. Only 20% of the samples had a large deviation. The maximum correlation coefficient of FY-3B was 0.77, and the maximum root mean square error (RMSE) was 0.35. The correlation coefficient in Taihu Lake station was larger than that in Pudong station, indicating that MERSI inversion algorithm was more suitable for Taihu Lake. The FY-3A/B MERSI inversion results were small on the whole, and there were some systematic deviations, which were mainly caused by aerosol model assumption, equipment calibration and pixel-scale selection.

Key words: Aerosol optical depth; FY-3 satellite; Sun photometer; Validation; Yangtze River Delta

人类活动引起的大气污染物因子变化, 由于其气候效应和环境效应近年来成为科学家们广泛关注的一个重要领域。利用卫星遥感可以定量获得陆地上空气溶胶光学特征和分布状况, 从而揭示近地面的大气污染形势, 为治理和控制提供依据具有可行性^[1-2]。风云三号 (FY-3) 系列卫星是我国第二代太阳同步极轨气象卫星系列, 利用其搭载的中分辨率光谱成像仪 (MERSI) 建立起来的一套业务化算法, 每天可以反演得到空间分辨率为 1 km ×

1 km 的海洋上空气溶胶光学厚度 (AOD) 和有效半径, 以及陆地上空 AOD。

卫星反演算法中需要对几个关键的气溶胶参

收稿日期: 2022-01-21; 修订日期: 2022-12-24

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (2017YFC1501701)

作者简介: 刘智超 (1972—), 男, 吉林四平人, 工程师, 硕士, 主要从事大气辐射与能源开发相关研究工作。

* 通信作者: 贺千山 E-mail: oxeye75@163.com

数进行假设,因而可能导致反演结果有很大的不确定性^[3]。国外关于卫星反演 AOD 产品的评估验证工作主要集中于 EOS-MODIS 反演的 AOD 产品^[4-10],国内也有一些研究针对 FY-3A/B MERSI 反演的 AOD 产品进行过验证。如周永波等^[11]验证了 FY-3A MERSI 海上沙尘天气 AOD;陈辉等^[12]对 FY-3B MERSI 在京津冀及周边区域的精度作了验证分析;张婕等^[13]利用地基观测和 MODIS 对沈阳地区的 MERSI 气溶胶产品做了对比研究。虽然上述研究普遍认为 MERSI 反演的 AOD 产品具有较高的可信度,但是验证工作均在我国北方,而南方的下垫面特征及气溶胶属性与北方显著不同,目前 FY-3A/B MERSI 反演的 AOD 产品在南方地区的有效性尚缺乏验证。今以长江三角洲(简称长三角)为研究区域,利用该区内东滩、浦东和太湖 3 个太阳光度计数据对 AOD 进行有效性验证,为今后 MERSI 气溶胶遥感资料在该区域的应用研究提供依据,也可为 FY-3 系列后续的 C 星、D 星 AOD 反演算法改进提供参考。

1 数据与方法

1.1 太阳光度计观测 AOD

法国 CEMEL 公司生产的 CE318 太阳光度计具有通过获取太阳直射光和天空漫射光来反演 AOD、单散射反照率和粒子尺度分布等气溶胶特性参数的能力。该太阳光度计白天每 15 min 观测 1 次,得到 870 nm、675 nm、440 nm 等波长的观测数据,由此得到的 AOD 精度可以达到 0.01~0.02,是目前气溶胶遥感监测中最准确的方法,可以作为真值来验证卫星 AOD 遥感的结果。

在上海地区有 2 个 CE318 太阳光度计在业务运行,分别位于浦东和东滩。浦东的观测点位于城市市区,观测点易受城市建设和交通扬尘所产生的气溶胶影响;东滩的观测点位于郊区,下垫面以植被为主,人类活动较少,周围植被密集,气溶胶以大陆性尘粒子为主。上述两个站点的太阳光度计于 2008

年 11 月 5 日—2009 年 1 月 10 日受故障影响送修维护。距离上海市区 110 km 左右的太湖观测点位于郊区,下垫面以低矮建筑和植被为主,该站点属于 AERONET 业务框架,设备在 2012 年 5 月—11 月期间无有效数据。3 个站点的海拔高度均 < 100 m,其地理信息和数据描述见表 1。

1.2 卫星 AOD 产品

FY-3A/B MERSI 反演 AOD 算法借鉴了 MODIS 气溶胶遥感原理,采用基于红通道 0.65 μm 、蓝通道 0.47 μm 和 2.1 μm 短波红外通道的暗像元算法反演陆上 AOD 参数^[14]。今采用的数据时段为 2008 年 11 月—2009 年 3 月(FY-3A)和 2010 年 12 月—2013 年 9 月(FY-3B),AOD 空间分辨率为 1 km \times 1 km,时间分辨率为每日 1 次。获得 FY-3A 有效 AOD 产品 142 d, FY-3B 有效 AOD 产品 995 d。

1.3 验证方案

对于 FY-3A MERSI 反演的 AOD 产品,比较时选取以光度计站点为中心,对其周围 20 km \times 20 km 范围内的卫星反演 AOD 进行平均;而对于光度计观测的 AOD,选择卫星过境时刻 ± 30 min 内的光度计 AOD 数据的平均值。利用相匹配的 FY-3A MERSI 空间平均 AOD 与太阳光度计的时间平均 AOD 作比较,进行线性回归分析并计算均方根误差(RMSE)。

尽管 FY-3A 和 FY-3B 的 MERSI 性能区别不大,但由于 FY-3B 是下午星,卫星过境时辐射较上午更强,该时段边界层发展较高,气溶胶分布受下垫面影响更大。因此,对于 FY-3B 的 AOD 产品,采用以下 3 种方式与光度计观测的 AOD 作比较,以便考察空间平均对 AOD 产品精度的影响:①严格选取光度计站点所在位置的卫星最大分辨率的 AOD,这时的 AOD 仅代表覆盖到光度计的 1 km \times 1 km 的范围;②采用光度计为中心的 10 km \times 10 km 范围内的 AOD 平均值代表测站上空的卫星 AOD,这时的卫星 AOD 与 MODIS 的业务产品分辨

表 1 地基气溶胶观测设备的地理信息和数据描述

Table 1 Geographic information and data description of ground-based aerosol observation equipment

站点	经纬度	海拔高度 h/m	地形特征	主要气溶胶类型	有效观测时段	有效样本数 $n/\text{个}$
东滩	E121.96°,N31.53°	5	郊区、农田、海岸	大陆和海洋气溶胶	2008 年 11 月—2009 年 3 月	1 683
浦东	E121.53°,N31.23°	14	城市、路边、高层建筑、绿地	城市工业和道路扬尘气溶胶	2008 年 11 月—2012 年 11 月	13 634
太湖	E120.22°,N31.42°	20	郊区、农田、湖岸	矿物沙尘气溶胶	2010 年 12 月—2013 年 9 月	21 920

率一致;③采用光度计为中心周围 $40 \text{ km} \times 40 \text{ km}$ 范围内的 MERSI 反演的 AOD 进行平均,而地基观测选择卫星过境时刻 $\pm 30 \text{ min}$ 内的光度计 AOD 数据的平均值。对于 MERSI AOD 数据验证结果可以通过回归分析的线性相关系数(r)、截距、斜率和 RMSE 来评价。

2 验证结果与分析

2.1 FY-3A MERSI AOD 验证

2.1.1 FY-3A MERSI AOD 比较

虽然 FY-3A 的验证时段是 2008 年 11 月—2009 年 3 月,但由于卫星一天仅 1 次过境,同时该时段受云遮挡影响及光度计故障的限制,用于验证的样本数量较少。图 1(a)(b)分别为浦东和东滩太阳光度计观测的 AOD 与 FY-3A MERSI 反演的 AOD 比较。由图 1 可见,两站点的相关系数都超过 0.96(通过了 99%置信度的显著性检验)。从图中的散点可以看出,FY-3A MERSI 反演的 AOD 与太阳光度计观测的 AOD 总体上比较一致。尽管有些点落在 $\Delta\tau = \pm 0.05 \pm 0.2\tau$ 的误差范围之外,但偏差也许是由比较方法或时空匹配造成的。从两个站点比较的散点拟合直线看,两站的斜率均不等于 1,表明在长三角地区 FY-3A MERSI 反演 AOD 普遍存在系统偏差。对于浦东,斜率 <1 ,即当实际 AOD 较大时,FY-3A MERSI 的反演结果会偏小,这可能是由于气溶胶模型假设不正确或单次散射反射比的估计值偏小所造成的。这与 Zhu 等^[6]对北京的 AOD 比较结果相一致,在十分清洁的天气时 FY-3A MERSI 反演的 AOD 较光度计观测的 AOD 要大,而在十分浑浊的天气时刚好相反。

总的来看,FY-3A MERSI 反演结果与光度计相比偏小,存在一定的系统偏差,主要由以下几个原因造成:气溶胶模型的假设(占比 0~20%)、设备标定(占比 2%~5%)、选择像素比例(占比 0~10%)。

东滩观测的拟合直线斜率是 1.28,截距为 -0.27,7 个点中有 2 个落在 $\Delta\tau = \pm 0.05 \pm 0.2\tau$ 误差范围外,占总样本的 29%,相关系数为 0.98, RMSE 为 0.14,相对于浦东的观测(RMSE 为 0.10)比较离散。表明,靠近海岸处 FY-3A MERSI 反演时随机误差增大。美国国家航空航天局(NASA)的研究认为,内陆地区 RMSE 一般 <0.1 ,而靠近海岸地区可达 0.30^[4]。东滩观测点周围覆

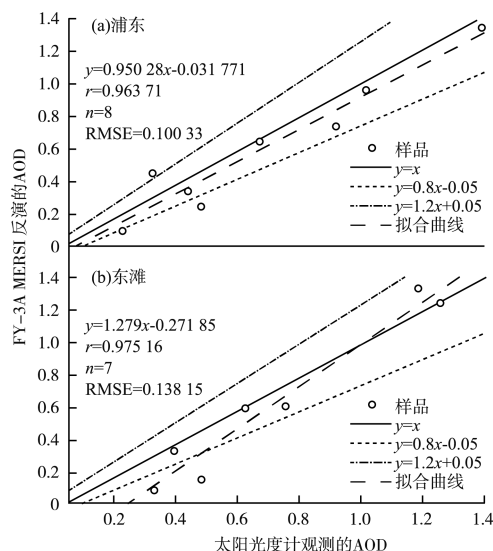


图 1 浦东和东滩太阳光度计观测的 AOD 与 FY-3A MERSI 反演的 AOD 比较

Fig. 1 Comparison of AOD from sun photometer in Pudong and Dongtan with FY-3A MERSI inversion

盖着浓密的植被,紧邻东海,下垫面类型不均一,尤其是近年来受长江口泥沙污染的影响,水色变化较大,这对水体表面反射率的估计有很大影响。故可以认为,陆地下垫面不均匀或网格像素中存在水体是大陆地区 FY-3A MERSI 遥感气溶胶反演的最大误差来源。

2.1.2 FY-3A MERSI 反演误差来源分析

图 2(a)(b)分别为各时刻浦东和东滩太阳光度计观测的 AOD 与 FY-3A MERSI 反演的 AOD 比较的相对误差。图中柱状代表以光度计观测的 AOD 为标准值计算得出 FY-3A MERSI 反演的 AOD 相对于该值的相对误差, >0 表示 FY-3A MERSI 反演的 AOD 值偏大, <0 则表示反演结果偏小。圆点代表最大相对误差允许范围。由图 2 可见,浦东站 FY-3A MERSI 反演 AOD 的最大相对误差出现在 2009-03-15T03:05,达到 -43%,这时光度计的观测值为 0.49,而 FY-3A MERSI 反演结果为 0.28。东滩的最大相对误差出现在前一天,为 -60%(MERSI 为 0.19,光度计为 0.48)。

考察 FY-3A MERSI 反演 AOD 的相对误差出现的时间变化,可以看出,同一站点误差符号的出现在时间上具有一定的连续性,即连续几天 FY-3A MERSI 反演结果误差符号一致。这表明,气溶胶模型的选择对 FY-3A MERSI 反演 AOD 有很大的影响。同时,大多数误差结果在允许范围内,

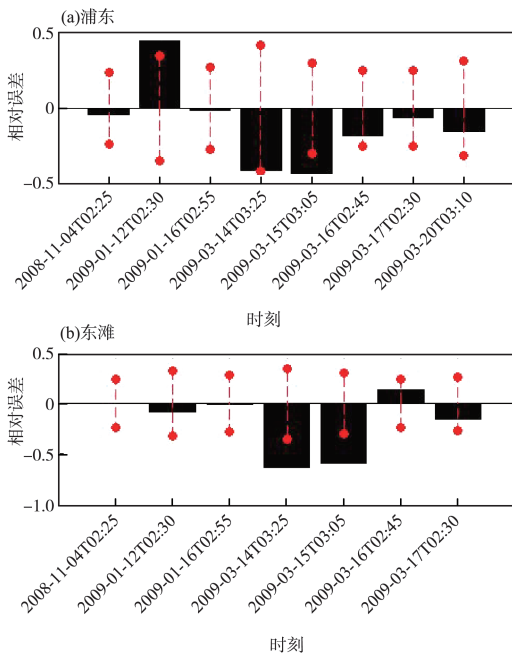


图 2 各时刻浦东和东滩太阳光度计观测的 AOD 与 FY-3A MERSI 反演的 AOD 比较的相对误差

Fig. 2 Relative error of AOD from sun photometer in Pudong and Dongtan and FY-3A MERSI inversion at each time

说明模型的选择与实际比较相符。由此推断,若连续几天某个站点以同一种气溶胶类型为主,则反演结果表现出同时为正(负)的变化趋势。

从所有的反演异常情况来看,反演误差由以下 3 个原因引起:①对比方案导致的误差。FY-3A AOD 平均范围是 $20\text{ km} \times 20\text{ km}$,在该范围内分布着若干离散的气溶胶反演值,用作比较的 AOD 就是这些离散点的平均值;而光度计的 AOD 值是卫星过境 1 h 内测站观测值的时间平均,在这 1 h 内光度计仅能观测到经过测站上空的 1 条空气带的 AOD,由此可见,两者的比较是线与面的比较。由于云的影响或气溶胶空间分布的复杂性,线上 AOD 往往具有明显的局地性,气溶胶在小尺度空间和时间上的局地变化会引起比对的较大差异。②云的影响引起的误差。在太阳光度计遥感过程中,虽然太阳直射路径上是否有云可以靠滤云程序来判断,但滤云程序对一些特殊情况不能做出合理的判断,如大的湿度会使雾和霾之间的界定变得模糊,仅靠滤云算法得到的 AOD 不能表征真实大气情况。③气溶胶模型选择及地表反射率估计带来的误差。从卫星遥感的角度来看,地表反照率通过近红外方法也会带来一定的误差,按照 Kaufman

等^[5]的估计,这种误差与地表植被的密集程度有关,暗背景密集植被地区误差较小。采用“6S”模式对城市型气溶胶进行敏感性实验^[6],结果表明,在 AOD 较小的情况下,对地面反射率的偏小估计会导致卫星反演的 AOD 结果偏大。另外,城市建设和道路扬尘等人类活动产生的沙尘性气溶胶粒子的有效半径较大,对红外通道和近红外通道足以产生影响,导致对地面反射率的估计偏高,使得在 AOD 较大的情况下,卫星遥感反演的 AOD 值偏低^[15]。Levy 等^[16-17]利用全球 AERONET 数据集改进了地表反射率和气溶胶模型,进而减少了卫星反演 AOD 值的系统偏差。Mi 等^[18]利用位于太湖北部的 AERONET 太阳光度计观测的 AOD 值评估了近 2 年的 MODIS 气溶胶产品,发现在中国东部较温暖潮湿的地区气溶胶模型假设的不确定性是反演结果的最大误差来源。

2.2 FY-3B MERSI AOD 精度验证结果分析

表 2 为两个站点的光度计对比验证参数统计。两站点的相关系数除了太湖 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 对比结果外,都通过了 99% 置信度的显著性检验。由表 2 可知,浦东站的对比结果随着平均范围扩大,有效比较样本增加,最大平均范围的对比结果具有最大的相关系数。与浦东相比,太湖的拟合斜率更小,表明 AOD 的反演更趋于平缓。太湖不同平均范围的相关系数都比浦东大,说明太湖站点的 MERSI AOD 反演结果与实际比较接近,MERSI 的反演算法在太湖更适用。FY-3B MERSI AOD 系统偏差的主要原因与 FY-3A MERSI 相似。

FY-3B MERSI 反演 AOD 的平均范围是 $40\text{ km} \times 40\text{ km}$,与 FY-3A MERSI 反演 AOD 的验证结果类似,浦东的平均相对误差为 42%,最大相对误差为 293%(2011 年 7 月 29 日,MERSI 为 0.94,光度计

表 2 两个站点的光度计对比验证参数统计
Table 2 Statistics of comparison verification parameter of photometer in two stations

站点	范围	样本数 <i>n</i> /个	相关 系数	线性拟合		RMSE
				斜率	截距	
浦东	$1\text{ km} \times 1\text{ km}$	40	0.52	0.67	0.31	0.26
	$10\text{ km} \times 10\text{ km}$	90	0.53	0.58	0.33	0.30
	$40\text{ km} \times 40\text{ km}$	107	0.65	0.66	0.23	0.26
太湖	$1\text{ km} \times 1\text{ km}$	10	0.77	0.58	0.20	0.23
	$10\text{ km} \times 10\text{ km}$	98	0.67	0.49	0.36	0.34
	$40\text{ km} \times 40\text{ km}$	114	0.74	0.52	0.33	0.35

为 0.24)。太湖的平均相对误差为 45%，最大相对误差为 472% (2012 年 7 月 31 日, MODIS 为 0.58, 光度计为 0.10)。FY-3B MERSI 反演 AOD 的相对误差出现的时间变化也反映出气溶胶模型的选择对 FY-3B MERSI 反演气溶胶结果有一定的影响。

虽然气溶胶模型选择影响了反演结果,但还应该看到,一次散射反射比的变化和反演结果的误差并不是紧密相关,表明还有其他因素影响了反演精度。由于云对卫星反演气溶胶的影响较大,尤其高空空间分辨率波段识别云存在更多困难。因此,把云比例也叠加在反演误差上考察其影响。云比例的计算通过平均区域内 MERSI 识别的云的像素数占区域总像素数得到。若平均区域内有效晴空反演较少,则云比例接近 1。相对误差为负值时,通常云比例很高,几乎接近 1,也就是说,MERSI 的去云算法过于严格,把一些 AOD 较高的像素误认作云而剔除,从而影响了真实的对比结果。

3 结论

利用长三角地区浦东、东滩、太湖 3 个测站的太阳光度计 CE318 地基遥感观测得到的 AOD 与风云三号气象卫星 FY-3A/B MERSI 反演的 550 nm 波长 AOD 进行对比验证,结果发现。

(1) FY-3A MERSI 反演的 AOD 与太阳光度计观测的 AOD 之间的相关系数高于 0.96,表明,尽管 FY-3A MERSI 反演 AOD 在长三角地区较为合理,但其算法仍然有一定的局限性。

(2) 气溶胶模型的选择对 FY-3B MERSI 反演气溶胶结果有一定的影响,而 FY-3B MERSI 的去云算法过于严格,把一些 AOD 较高的像素作为云而剔除出有效结果。另外,FY-3B 的 AOD 产品在地理定标上存在一定的偏差,进一步影响了其与地面观测的对比结果。

(3) 总体来看,FY-3A/B MERSI 反演 AOD 结果由于气溶胶模型的假设(占比 0~20%)、设备标定(占比 2%~5%)、选择像素比例(占比 0~10%)等方面原因存在系统偏差。

[参考文献]

[1] 喻义勇,陆晓波,朱玉霞. 基于环境一号卫星的气溶胶光学厚度反演技术研究[J]. 环境监测管理与技术,2015,27(4):30-34.
 [2] 宋挺,黄君,严飞,等. 无锡市 MODIS 气溶胶光学厚度与 PM_{2.5} 质量浓度的相关性分析[J]. 环境监测管理与技术,2015,27(1):57-59.

[3] 宁海涛,江鹏,吴艳兰. 基于深度全连接网络 Himawari-8 卫星气溶胶反演研究[J]. 环境监测管理与技术,2021,33(1):8-12.
 [4] CHU D A, KAUFMAN Y J, ZIBORDI G, et al. Global monitoring of air pollution over land from the earth observing system-terra moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108(D21): 4661-4678.
 [5] KAUFMAN Y J, REMER L A, VERMOTE E F, et al. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 1997, 102(D14): 17051-17067.
 [6] ZHU A H, LI C C, LIU G Q, et al. Validation and application of MODIS remote aerosol information in Beijing [J]. Acta Scientiarum Circumstantiae, 2004, 24(1): 86-90.
 [7] REMER L A, TANRE D, KAUFMAN Y J, et al. Validation of MODIS aerosol retrieval over ocean [J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(12): 1-4.
 [8] 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及与地面光度计遥感的对比[J]. 应用气象学报, 2002, 13(S1): 127-135.
 [9] LI C C, MAO J T, LAU K H, et al. Characteristics of distribution and seasonal variation of aerosol optical depth in eastern China with MODIS products [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(22): 2488-2495.
 [10] 刘桂青,李成才,朱爱华,等. 长江三角洲地区大气气溶胶光学厚度研究[J]. 环境保护,2003(8):50-54.
 [11] 周永波,白洁,周著华,等. FY-3A/MERSI 海上沙尘天气气溶胶光学厚度反演[J]. 遥感学报,2014,18(4):771-787.
 [12] 陈辉,厉青,王中挺,等. MERSI 和 MODIS 卫星监测京津冀及周边地区 PM_{2.5} 浓度[J]. 遥感学报,2018,22(5):822-832.
 [13] 张婕,刘昊野,辛金元,等. 沈阳地区 MODIS 与 MERSI 气溶胶产品对比研究[J]. 遥感学报,2016,20(4):549-560.
 [14] 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.
 [15] LEVY R C, REMER L A, MARTINS J V, et al. Evaluation of the MODIS aerosol retrievals over ocean and land during CLAMS [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2005, 62(4): 974-992.
 [16] LEVY R C, REMER L A, DUBOVIK O, et al. Global aerosol optical models and application to MODIS aerosol retrieval over land [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112: D13210.
 [17] 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): 7811-7829.
 [18] MI W, LI Z Q, XIA X G, et al. Evaluation of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer aerosol products at two Aerosol Robotic Network stations in China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112(D22): D22S08.