

文章编号: 1001-8166(2011)02-0224-11

MODIS 气溶胶光学厚度在长江三角洲地区适用性分析*

郑有飞¹, 董自鹏², 吴荣军², 李占清^{3,4}, 江洪^{5,6}

- (1. 江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室, 江苏 南京 210044; 2. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210044; 3. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 4. 马里兰大学大气与海洋科学学院, 马里兰 20782; 5. 南京大学国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093; 6. 浙江林学院国际空间生态与生态系统生态研究中心, 浙江 杭州 311300)

摘要:利用太湖、浙江林学院和千岛湖站点 AERONET 数据对 MODIS 气溶胶光学厚度适用性进行验证表明, 长江三角洲地区 MODIS 气溶胶光学厚度反演精度具有较大的地域差异, 太湖站点显著偏高, 达到 MODIS 精度设计范围 ($\pm 0.05 \pm 0.15\tau$) 的数据仅占 30.0% 左右, 不具有显著适用性, 地表反射率估计不足是造成太湖 MODIS 反演误差的主要原因。浙江林学院站点整体偏低, AQUA/MODIS 和 TERRA/MODIS 主要误差分别来源于对气溶胶单次散射反照率和对地表反射率的估计不足, 两颗卫星分别有 81.8% 和 53.3% 的数据满足 MODIS 设计精度, 具有较好的适用性。千岛湖站点 MODIS/AOT 显著偏低, MODIS 极大地高估了气溶胶单次散射反照率, 然而缺乏 2.0 级数据对其进行有力的验证。目前, 长江三角洲地区 MODIS 产品存在较大的误差订正空间, 对气溶胶模式进行进一步的精细划分以及根据具体的地表状况拓展更准确的卫星反演算法, 是 MODIS 产品广泛应用的必要前提。

关键词: MODIS; AERONET; 气溶胶光学厚度; 验证

中图分类号: P407 **文献标志码:** A

1 前言

卫星遥感是监测全球气溶胶收支状况和气候效应的基本手段^[1], 利用卫星平台探测全球范围的气溶胶组成、谱分布和总含量等特性对全面了解气溶胶对大气辐射的影响过程及影响程度有重要意义。NASA 自 1991 年开始实施地球观测系统计划 (EOS)^[2], 太阳同步极轨卫星 Terra (EOSAM) 和 Aqua (EOS-PM) 先后于 1999 年 12 月 18 日和 2002 年 5 月 4 日发射成功, 搭载在 2 颗卫星上的中分辨率成像光谱仪 (Moderate-resolution Imaging Spectro-

radiometer, MODIS) 传感器用来在 36 个可见光和红外谱带进行分辨率为 0.25 ~ 1 km 的观测, 每天覆盖全球一次。由于在仪器定标、空间分辨率、光谱分辨率等方面比以往类似星载辐射计有很大改进, 并且 Terra 和 Aqua 分别于每日地方时上午和下午过境, 在时间上形成了很好的互补, MODIS 为反演气溶胶、云、水汽等产品提供了丰富的信息, 这些遥感产品成为开展气溶胶理化特性、辐射强迫、大尺度污染输送及气溶胶气候模式参数化等研究的重要资料来源。

卫星反演气溶胶光学厚度 (AOT, τ) 主要基于

* 收稿日期: 2010-04-07; 修回日期: 2010-09-14.

* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目“中国大气气溶胶及其效应研究”第五课题组“气溶胶直接辐射效应”(编号: 2006CB403705) 资助。

作者简介: 郑有飞 (1959-), 男, 江苏无锡人, 教授, 主要从事环境气候变化和农业气象研究。E-mail: zhengyf@nuist.edu.cn

太阳反射波段的卫星观测数据和气溶胶粒子对太阳辐射的散射机制。由于地表反射率的差异,MODIS在陆地和海洋上采取了不同的算法进行AOT的空间反演^[3]。为了使MODIS产品具有更好的使用价值,国内外学者利用地基观测资料对其进行了大量的验证工作,Chu等^[4]利用30个AERONET站点资料对陆上MODIS AOT的验证结果表明,除了海岸地区,MODIS陆上AOT基本满足 $\pm 0.05 \pm 0.2 \tau$ 的精度范围,内陆地区均方根小于0.1,海岸地区均方根可以上升到0.3。Levy等^[5]对海上MODIS AOT验证表明,MODIS 0.66 μm AOT最接近于地基反演结果,0.47和0.55 μm AOT偏高,0.87 μm AOT偏低。毛节泰等^[6]对比北京地区MODIS AOT和地面多波段光度计反演结果,证实MODIS气溶胶产品在该地区达到了一定精度,可以反映气溶胶的区域分布。Li等^[7]对北京和香港地区MODIS AOT验证表明,北京地区MODIS反演结果与地基资料之间的差异要大于香港地区,这主要由前者植被覆盖较少造成。Xia^[8]对比全球MODIS AOT和AERONET AOT表明,除非洲和东南亚少数站点MODIS结果偏低之外,在其他站点MODIS均高估了气溶胶光学厚度,并建议使用0.47 μm MODIS气溶胶光学厚度。申彦波等^[9]利用气溶胶船基观测资料对MODIS气溶胶产品进行了对比与订正,并研究了我国东部海域气溶胶光学厚度与沙尘天气的关系。He等^[10]利用2007年7~10月AERONET资料对长江三角洲地区7个站点MODIS AOT进行了对比验证,结果表明在植被覆盖密集区两者相关性较好,下垫面复杂的地区两者则有一定的差异,总体上两者拟合斜率和截距分别为0.75和0.13。

本文主要致力于MODIS AOT在长江三角洲地区的适用性验证工作。首先,分别利用AERONET太阳直射算法以及太阳等高圈算法反演获得的1.5级和2.0级AOT与MODIS AOT进行对比,分析不同类型AERONET数据对MODIS AOT的验证结果是否有显著差异,其次,探讨MODIS遥感长江三角洲地区AOT系统偏差的原因所在。

2 资料与方法

2.1 AERONET 站点介绍

AERONET气溶胶监测网是在全球布站的气溶胶特性地基观测网^[11]。它以法国CIMEL公司生产的全自动CE318太阳光度计为观测仪器,该仪器扫描获得的太阳直射辐射数据可以用于反演气溶胶光

学厚度、大气可降水量等,当其进行天空扫描时,所获得的数据可以用于反演气溶胶粒子谱分布及气溶胶散射相函数,Nakajima等^[12]和Dubovik等^[13]先后对气溶胶尺度谱和相函数的反演算法进行了改进并发展形成不同的版本。利用朗伯比尔定律和CE318观测的直射太阳辐射可以反演340、380、440、500、670、870、1 020 nm 7个波段的气溶胶光学厚度,由于地基太阳光度计观测反演气溶胶参数不受地表参数影响,在大于440 nm的波段,它反演的AOT精度能够达到 ± 0.015 ^[14],可以作为真值用于检验MODIS/AOT。

本文进行MODIS AOT适用性检验的站点包括太湖(Taihu, 120.22°E, 31.42°N)、千岛湖(Qiandao-hu, 119.73°E, 30.26°N)和浙江林学院(Hangzhou-ZFU, 119.05°E, 29.56°N)。图1给出了上述站点的地理位置,其中太湖观测站位于无锡市南郊、太湖北岸,气溶胶来源复杂并且AOT全年较高,550 nm AOT和440 nm单次散射反照率(SSA)年均值分别为0.77和0.90^[15],站点周围25 km区域内下垫面主要由水体和林地构成,还包含小部分的建筑群。浙江林学院站点位于临安市北郊浙江林学院内,2007—2008年该地区550 nm气溶胶光学厚度均值为0.70^[16],略低于太湖地区,其周围25 km范围内植被覆盖密集。千岛湖站点位于杭州市西南方向千岛湖中,距杭州市区130 km,被水体和林木环绕。文中分别利用上述3个站点2007—2009年AERONET太阳直射算法以及太阳等高圈算法反演

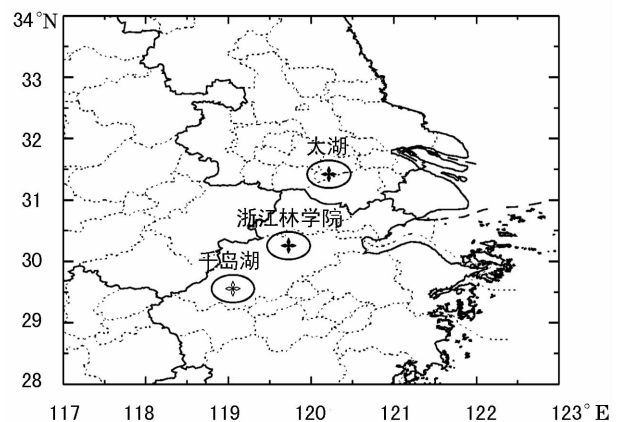


图1 站点地理位置和MODIS数据空间选取范围
Fig.1 AERONET sites over Yangtze Delta region and the selection method of MODIS/AOT

其中“+”为站点地理位置,椭圆为MODIS数据空间选取范围
+ denotes geographical position of the sites Ellipse denotes the selection method of MODIS/AOT

获得的 1.5 级和 2.0 级 AOT 与 MODIS AOT 进行对比分析。AERONET 550 nm AOT 通过 440 ~ 870 nm 配对波段的 AOT 和 Angstrom 波长指数插值求取。

2.2 MODIS 资料

MODIS 陆地 AOT 反演以查找表 (Lookup Table, LUT) 方法为基础实现。地表反射和发射的辐射能量在穿透大气的过程中会携带丰富的大气信息,通过对这些辐射能的多波段、多角度和偏正测量,卫星传感器可以获取多种大气特性^[1]。虽然 MODIS 传感器不能分辨地表和大气对到达探测器辐射通量的贡献量,但是,幸运的是,在晴空无云的暗像元上空,卫星观测蓝通道(0.47 μm)和红通道(0.66 μm)表观反射率随大气气溶胶光学厚度单调增加,短波红外通道(2.13 μm)表观反射率却几乎不受气溶胶影响,因此,可以用 2.13 μm 通道表观反射率代替该通道地表反射率,进一步利用 Kaufman 等^[17,18]建立的谱反射率间的经验关系确定红通道和蓝通道地表反射率,并通过卫星观测的程辐射数据选择气溶胶类型,实现 0.47 和 0.66 μm 气溶胶信息的独立反演。在单次散射近似前提下,气溶胶光学厚度与 MODIS 表观反射率以及地表反射率之间存在以下关系^[8]:

$$\tau_a = 4\mu_s\mu_v \frac{\rho - \rho_R - \rho_s T}{\omega P_a} \quad (1)$$

其中, τ_a 表示气溶胶光学厚度; ρ , ρ_R , ρ_s 和 T 分别表示 MODIS 表观反射率、分子散射、地表反射率和大气透射率, ω 和 P_a 表示气溶胶单散射反照率和相函数, μ_s 和 μ_v 分别是太阳和卫星天顶角余弦。

本文所用卫星数据为 2007—2009 年 TERRA/MODIS 和 AQUA/MODIS L2 气溶胶产品。站点资料与卫星资料匹配方法为:以卫星过境前后 30 min 地基观测结果的时间平均值验证以地基站点为中心,球面距离为 25 km 的 MODIS/AOT 空间平均值,MODIS 空间选取范围如图 1 中椭圆所示。

3 结果与讨论

根据公式(1)和已有的研究可知^[7,8,10], MODIS 反演 AOT 的误差来源主要有 2 项:①气溶胶模式假定产生的误差,即气溶胶 SSA 选取不当造成的误差,当 MODIS 高估 SSA 时,卫星反演 AOT 将偏小,用卫星反演结果与真值进行线性拟合获得的斜率小于 1.0;②地表反射率估计不足产生的误差,当卫星高估地表反射率时,卫星反演 AOT 将偏小,用卫星反演结果与真值进行拟合产生负的截距。为了能够

客观地分析 MODIS 误差原因,首先给出研究区域内气溶胶 SSA 情况(图 2)和地表反射率情况(图 3)。

图 2 给出 2007—2009 年 AERONET 675 nm SSA 的滑动平均,从左到右分别为太湖、浙江林学院和千岛湖,其中空心点和实心点分别代表 1.5 级和 2.0 级数据。整体来看,2.0 级 SSA 变化范围小于 1.5 级,并且 3 个站点 SSA 具有显著差异,由大至小依次为:太湖(0.80 ~ 0.96) > 浙江林学院(0.72 ~ 0.92) > 千岛湖(0.51 ~ 0.83),由公式(1)可知,对于单一的 MODIS SSA 设定,当 SSA 真值越大时,设定的 SSA 偏小越严重,MODIS AOT 与 AOT 真值的拟合斜率越大,SSA 真值越小时,拟合斜率越小,由此可以大胆预测, AERONET/AOT 与 MODIS/AOT 拟合斜率应当从太湖至千岛湖依次减小,并且由于站点间 SSA 差异显著,那么, MODIS 在长江三角洲地区采用同样的 SSA 设定值必定不能使所有的站点都取得理想的反演效果。

图 3 给出 2007—2009 年太湖、浙江林学院和千岛湖站点 MODIS 2 130 nm 地表反射率滑动平均情况,其中, a, c, e 为 AQUA 数据, b, d, f 为 TERRA 数据,从上到下分别为太湖、浙江林学院和千岛湖,图中短竖线为标准偏差。从图 3 可以清楚地看到,太湖地区 2 130 nm 地表反射率 > 浙江林学院 > 千岛湖。虽然太湖站点周围水体面积最大,按照一般规律,其地表反射应该较低,然而,严重的水体污染使其地表反射率显著上升,蔡启铭等^[19]研究表明,太湖湖面反照率随着水体中悬浮质浓度的增加而递增,并且这一递增趋势在太阳天顶角小于 60° 时更为明显。TERRA 和 AQUA 星当地过境时间一般在 10:30 和 13:30 左右,此时太阳天顶角较小,湖面反照率受悬浮质浓度影响严重,使卫星接收到的表观反射率比洁净水体的反射率高。与之相反,千岛湖站点区域为洁净水体,地表反射率最低。地表反射率标准偏差可以反映下垫面的复杂程度,下垫面越复杂标准偏差越大,从图 3 中可以看出,太湖站点反射率标准偏差 > 千岛湖 > 浙江林学院,这是因为太湖区域包括了污染水体、林地和城市建筑物,下垫面情况最为复杂,千岛湖为清洁水体和林地,下垫面复杂程度居中,浙江林学院则大部分为林地,下垫面最为单一。

图 4 给出卫星过境前后 30 min AERONET 太阳直射算法 1.5 级 AOT 与 MODIS AOT 的对比结果。总体来看,除千岛湖站点 AERONET 与 MODIS 拟合效果较差外($R=0.76, 0.87$),其他站点拟合效果都

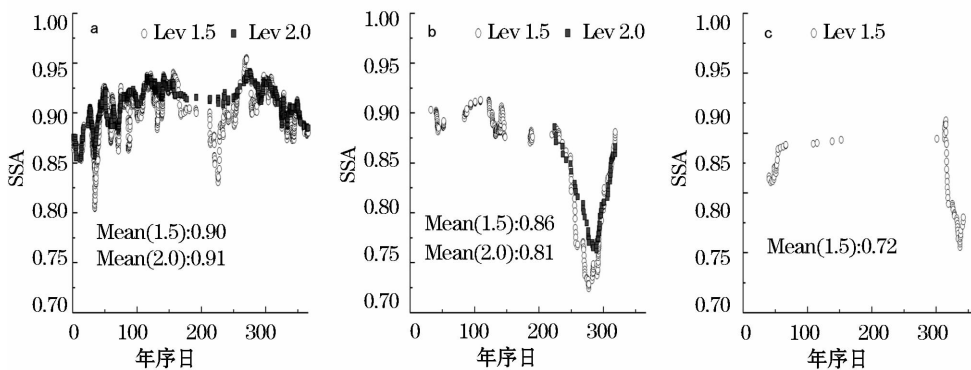


图 2 AERONET 太湖 (a)、浙江林学院 (b) 和千岛湖 (c) 站点 675 nm SSA 滑动平均

Fig.2 Moving average of aerosol single scattering albedo of 675 nm retrieved from AERONET at (a) Taihu, (b) Hangzhou-ZFU and (c) Qiandaohu

图中空心点为 1.5 级数据, 实心点为 2.0 级数据

Open circles: level 1.5 AERONET data; Solid circles: level 2.0 AERONET data

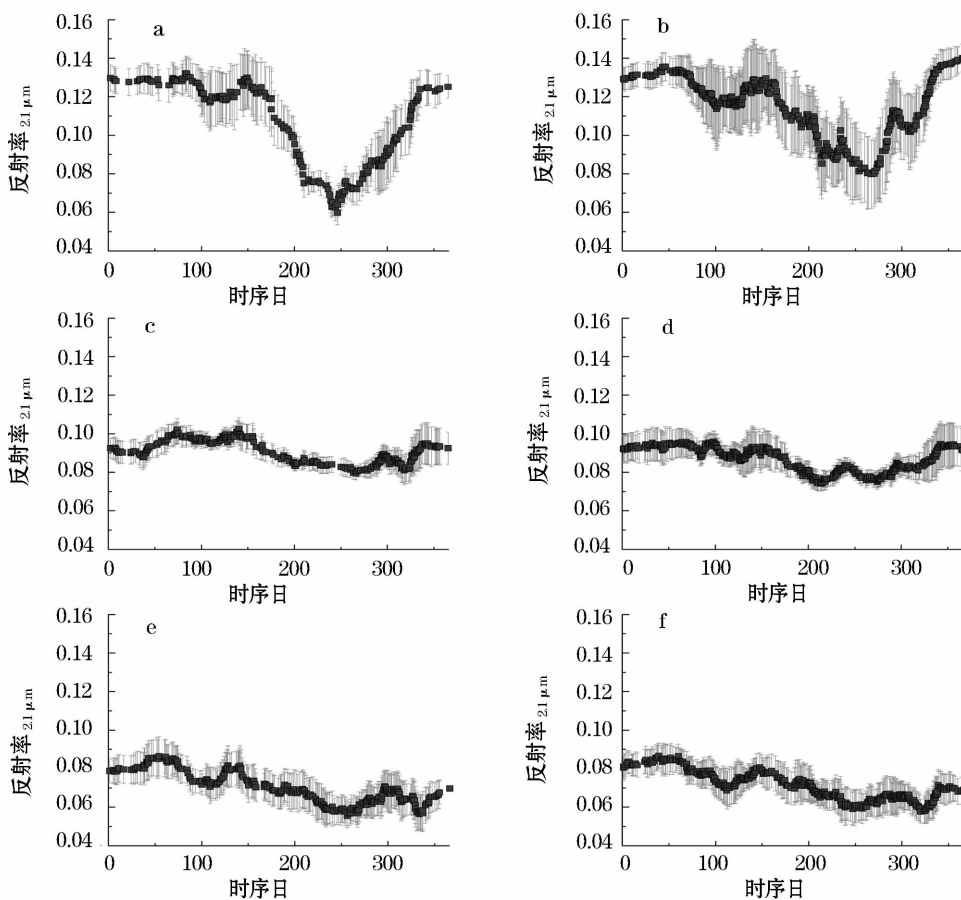


图 3 图 3 MODIS 2130 nm 地表反射率滑动平均

(a), (b) 太湖站点 AQUA、TERRA 反射率, (c), (d) 浙江林学院站点 AQUA、TERRA 反射率 (e), (f) 千岛湖 AQUA、TERRA 反射率

Fig.3 Moving average of surface reflectance of 2130 nm retrieved from AQUA/MODIS and TERRA/MODIS at Taihu (a,b), Hangzhou-ZFU (c,d) and Qiandaohu (e,f)

图中竖线为标准偏差

The short vertical lines indicate the standard deviation

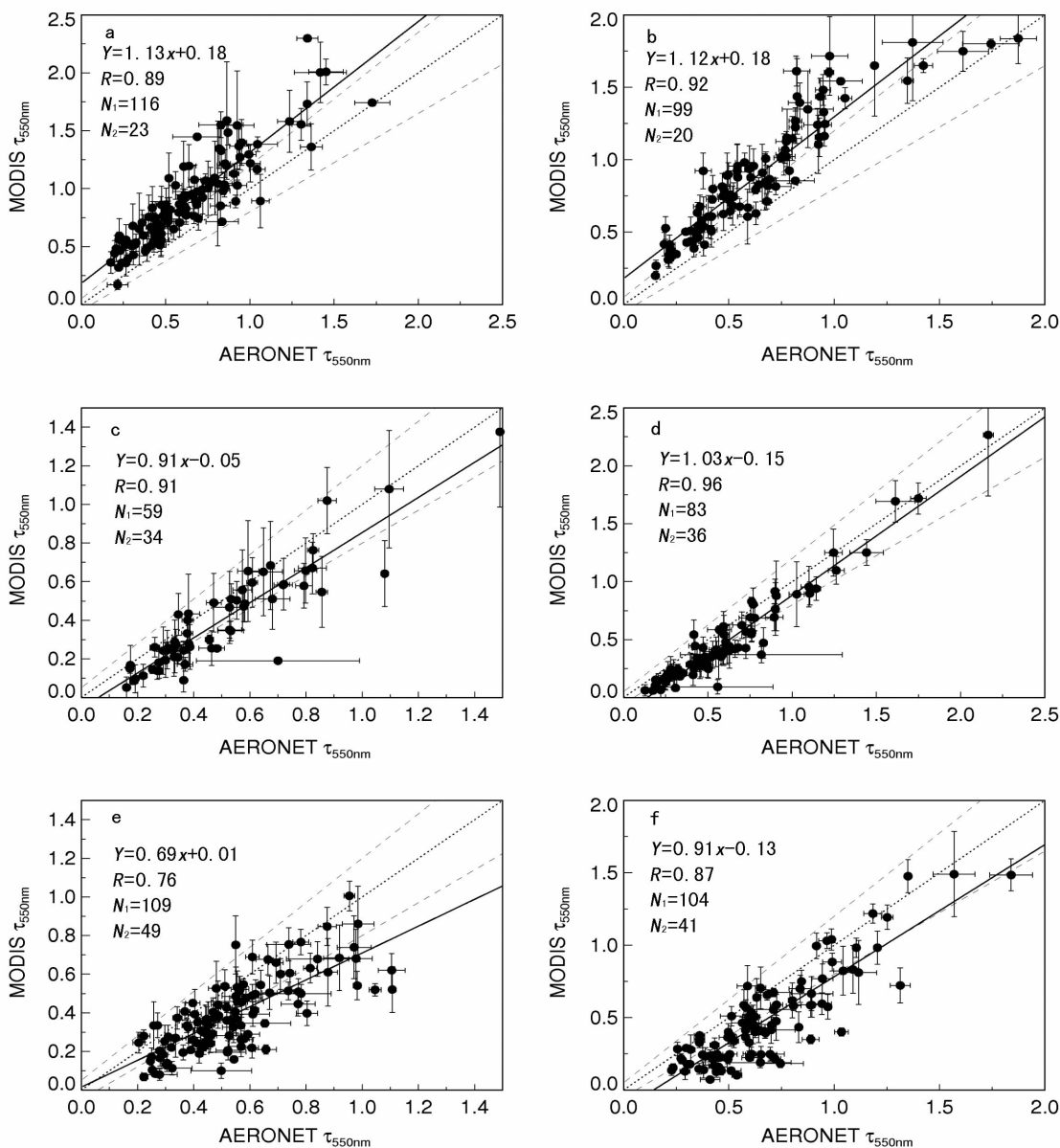


图 4 ± 30 min AERONET 太阳直射算法 1.5 级 AOT 和 MODIS/AOT 散点图

Fig. 4 Comparison of AODs retrieved from AERONET direct sun algorithm (level 1.5) and AQUA, TERRA/MODIS at Taihu (a, b), Hangzhou-ZFU (c, d) and Qiandaohu (e, f)

a, b 太湖站点 AQUA/TERRA; c, d 浙江林学院站点 AQUA/TERRA; e, f 千岛湖 AQUA/TERRA

图中长虚线为 MODIS C5 产品设计精度 ($\pm 0.05 \pm 0.15\tau$); N_1 为数据匹配数量; N_2 为符合设计精度的数据量

The dotted lines border the uncertainties in MODIS ($\pm 0.05 \pm 0.15\tau$); N_1 : sample number; N_2 : number of samples falling within the expected uncertainty

较好, 相关系数 R 范围在 0.89 ~ 0.96 之间。下面分别分析 3 个站点的验证结果。

在太湖站点, AERONET 与 AQUA/MODIS 和 TERRA/MODIS 线性拟合斜率分别为 1.13 和 1.12, 截距均为 0.18。MODIS AOT 整体上大于地面观测结果, 符合设计精度 ($\pm 0.05 \pm 0.15\tau$) 的数据量分

别占 19.8% 和 20.2%, AQUA/MODIS 和 TERRA/MODIS 反演结果都存在较大的系统误差, 不具有显著适用性。根据公式(1)可以知道, 设定的 SSA 偏小将使卫星反演的 AOT 偏大, 而且偏大的程度随光学厚度变大而增大, 太湖站拟合斜率远大于 1, 说明 MODIS 严重低估了 SSA, 造成 AOT 显著偏高; 其次,

太湖区域水体污染使卫星接收到的表观反射率远高于洁净水体,污染对表观反射率的贡献量被误认为是气溶胶的贡献,从而导致 MODIS 反演结果进一步偏高,线性拟合中表现出较大的正截距,扩大了卫星反演误差;再次,从图 4a 和 4b 中可以看出,AOT 的纵向标准偏差大于横向标准偏差,说明太湖站点 AOT 空间差异大于时间差异,这是因为太湖站点复杂的下垫面,即较大的反射率标准偏差,使 AOT 空间差异显著。太湖地区 MODIS AOT 适用性较差,反演的精度仍需进一步提升。以上结果与太湖地区已有的验证结果相似,Wang 等^[20]利用 CSHNET (Chinese Sun Hazemeter Network) LED 手持光度计 AOT 验证版本 4 MODIS/AOT,指出太湖地区 MODIS/AOT 偏高,与 LED AOT 拟合结果较差。Mi 等^[21]研究也表明版本 4 MODIS/AOT 产品在太湖地区长期偏高,但该研究中对版本 5 MODIS/AOT 与 AERONET/AOT 拟合斜率 1.03 优于图 4 中的结果,同样的,Pan 等^[16]所得拟合斜率 0.96 也优于图 4 中的结果,He 等^[10]的研究结果则显著区别于前两者的研究,斜率仅为 0.63,不同研究斜率差异较大的原因将在下文中进行探讨。值得指出的是,以上所有研究都表明 MODIS 严重低估了太湖站点地表反射率(拟合截距 0.15 ~ 0.27)。

浙江林学院站点 AERONET 与 AQUA/MODIS 和 TERRA/MODIS 拟合斜率分别为 0.91 和 1.03,截距分别为 -0.05 和 -0.15,TERRA/MODIS SSA 估计不足造成的误差小于 AQUA,具体表现为拟合斜率 1.03 与 1.0 的偏移量较小,相反,其地表反射率估计不足造成的误差大于 AQUA,即截距 -0.15 与 0.0 的偏移量较大,并且两者截距都小于 0.0,说明两颗卫星均高估了地表反射率。MODIS AOT 整体上小于地面观测结果,其中某些值显著低于 AERONET AOT,从图 4c 和 4d 中可以看出这些点横向标准偏差相对较大,说明这一时期 AOT 发生了急剧的时间变化,从而与 MODIS 数据有较大的差异。AQUA/MODIS,TERRA/MODIS 符合设计精度的数据量分别占 57.6% 和 43.4%,在这一区域,MODIS/AOT 具有较好的适用性,这一结果符合已有的森林地区的验证结论。然而,值得注意的是,在 He 等^[10]的研究中,浙江林学院拟合斜率和截距分别为 0.74 和 0.095,两者都与图 4 中的结果有较大差异,该文同时对位于浙江林学院 5 km 远的临安站点进行了验证,拟合斜率和截距分别为 0.546 和 0.194。Pan 等^[16]同样对临安站点进行了适用性分析,拟合斜率

和截距则分别为 0.81 和 -0.03。从对比来看,两篇报道中差异显著。基于公式(1),显而易见地,对于同样的 MODIS SSA 设定值,太湖地区 SSA 真值大于浙江林学院(或临安)SSA 真值,因此,太湖地区拟合斜率理论上要大于浙江林学院(或临安)的拟合斜率,图 4 中太湖斜率 1.13 和 1.12 均大于浙江林学院的 0.91 和 1.03,Pan 等^[16]的研究具有同样的结果(0.96 > 0.81),而在 He 等^[10]的研究中太湖斜率 0.629 明显小于浙江林学院斜率 0.744。

千岛湖地区 AERONET 与 AQUA/MODIS 和 TERRA/MODIS 拟合斜率 0.69 和 0.91 均小于 1.0,说明 MODIS 在这一地区高估了 SSA。两颗卫星对地表反射率的估计相差较大,AQUA 截距 0.01 较接近于 0.0,TERRA 截距 -0.13 则严重偏离 0.0。MODIS/AOT 整体偏低,AQUA 和 TERRA 分别有 45.0% 和 39.4% 的产品满足 NASA 误差标准,MODIS 产品在该地区适用性一般。在 He 等^[10]的研究中,千岛湖地区斜率和截距分别为 0.746 和 0.126,其斜率与图 4 中较接近,但是截距 0.126 与图 4 的结果 0.01 和 -0.13 差异显著。千岛湖周围为清洁水体和林地覆盖,在 Wang 等^[20]的研究中,森林地区拟合截距都非常接近于 0.0(北京森林 -0.013,西双版纳 -0.013),千岛湖区域由于水体的介入,使 MODIS 假定地表反射率与地表反射率真值之间的关系有较大的不确定性,截距波动范围很大。

图 5 给出卫星过境前后 30 min AERONET 太阳直射算法 2.0 级 AOT 与 MODIS AOT 的拟合结果。对比图 5 与图 4 可以发现,太湖地区两者间无任何差异(图 4a ~ b 和图 5a ~ b),而浙江林学院站点 AERONET 2.0 级 AOT 与 MODIS 的拟合结果明显优于 1.5 级数据。AQUA/MODIS 和 TERRA/MODIS 分别有 81.8% 和 53.3% 的产品满足 NASA 误差标准,远高于图 4 中的 57.6% 和 43.4%。另外,图 4c ~ d 中 MODIS 显著偏低的值已被剔除,可以看出,在浙江林学院站点利用 1.5 级数据验证 MODIS 并不准确。

图 6 给出卫星过境前后 30 min AERONET 太阳等高圈反演 1.5 级 AOT 与 MODIS/AOT 的对比结果,与图 4 对比可以发现,除太湖站点相关系数 R 稍微下降外,其他站点 R 均上升,总体来看,所有站点 AERONET AOT 与 MODIS AOT 拟合效果都较好,相关系数 R 范围在 0.90 ~ 0.98 之间。太湖站点 AERONET 与 AQUA/MODIS 和 TERRA/MODIS 相匹配时期内,拟合截距分别为 1.16 和 1.12,说明

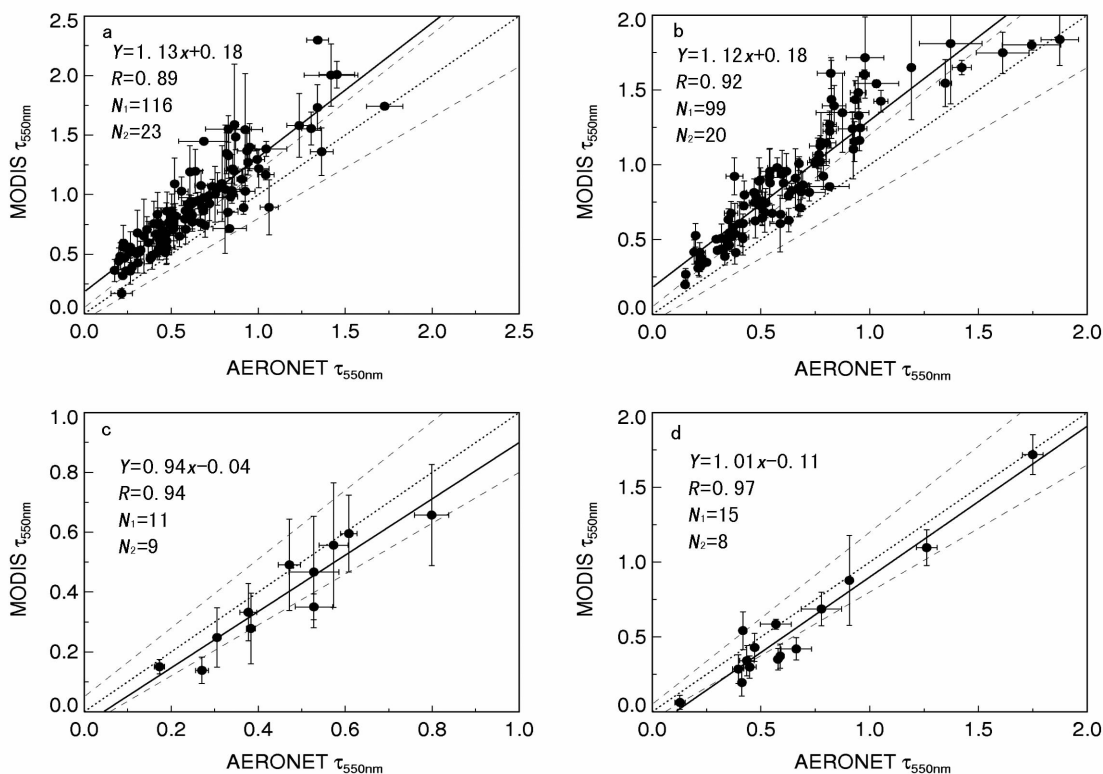


图 5 ±30 min AERONET 太阳直射算法 2.0 L AOT 和 MODIS/AOT 散点图

Fig. 5 Comparison of AODs retrieved from AERONET direct sun algorithm (level 2.0) and AQUA, TERRA/MODIS at Taihu (a,b) and Hangzhou-ZFU (c,d)

a,b 太湖站点 AQUA、TERRA;c,d 浙江林学院站点 AQUA、TERRA;图中长虚线为 MODIS C5 产品设计精度 ($\pm 0.05 \pm 0.15\tau$)

N_1 为数据匹配数量; N_2 为符合设计精度的数据量

The dotted lines border the uncertainties in MODIS ($\pm 0.05 \pm 0.15\tau$); N_1 : sample number; N_2 : number of samples falling within the expected uncertainty

MODIS SSA 的设定值低于地基反演值 0.88 和 0.91。与图 4a ~ b 相比,图 6a ~ b 拟合斜率有所上升,而拟合截距略有下降,符合 NASA 误差标准的数据分别占 23.2% 和 19.2%,与直射算法 1.5 级数据验证结果有一定的差别。

在浙江林学院站点,AQUA/MODIS 和 TERRA/MODIS 反演得到的 AOT 与 AERONET 对比结果差异较大,前者拟合斜率和截距分别为 0.88 和 -0.02,反演误差主要来源于 SSA 选取不当,后者拟合斜率和截距分别为 1.03 和 -0.16,反演误差主要来源于地表反射率估计不足。AQUA 过境期间,地基反演 SSA 为 0.80,低于 TERRA 过境期间的 0.84,从而造成其斜率较小。从图 3c ~ d 可以看出,TERRA 过境期间反射率标准偏差远大于 AQUA,这是造成 TERRA 截距较大的原因。MODIS/AOT 整体上低于 AERONET/AOT,满足 NASA 误差标准的数据分别占 85.7% 和 57.1%,这一结果与图 4 中相

应的结果差异显著。

千岛湖地区 AERONET 与 MODIS 拟合斜率小于 1.0,MODIS 在这一地区 SSA 设定值高于实际值 0.85。AERONET 与 TERRA/MODIS 拟合截距为 -0.24,与图 4 相比,千岛湖地区由地表反射率估计不足造成的系统误差显著上升,与直射算法 1.5 级数据验证结果差异显著。

图 7 给出卫星过境前后 30 min AERONET 太阳等高圈反演 2.0 级 AOT 与 MODIS 的对比结果,在所选的 3 个站点中仅太湖站点具有长期的数据可用。从图 7 可以看出,AERONET 与 AQUA/MODIS 和 TERRA/MODIS 拟合斜率分别为 1.03 和 0.99,截距均为 0.14,相关系数 R 分别为 0.92 和 0.98,表明太湖地区 MODIS SSA 设定值较为合理,地表反射率估计不足是造成 MODIS 反演结果偏高的主要原因。AQUA/MODIS 和 TERRA/MODIS 符合 NASA 误差标准的数据分别占 38.1% 和 28.6%。对比图

7 与图 6 可以发现,图 7 中拟合斜率明显低于前者的结果,而截距则无显著变化。利用图 7 中的结果再次与 Mi 等^[21]和 Pan 等^[16]的研究进行对比可以发现,图 7 中性线拟合斜率 1.03 与 0.99 和 Mi 的结果(1.03)及 Pan 的结果(0.96)非常接近,并且截距 0.14 同样非常接近 Mi 中的 0.154。值得注意的是,无论利用 1.5 级数据还是 2.0 级数据对太湖地区进

行验证,匹配时期内 SSA 均值变化并不大(0.88 和 0.91,0.89 和 0.87),然而拟合斜率则变化显著(1.16 和 1.12,1.03 和 0.99),足以说明 1.5 级数据与 2.0 级数据存在显著的差异,不同类型的 AERONET 数据对 MODIS 的验证结果有较大影响,在 MODIS 验证过程中需要考虑到 AERONET 数据本身的质量,虽然 1.5 级数据经过云剔除,但是仍建议使用

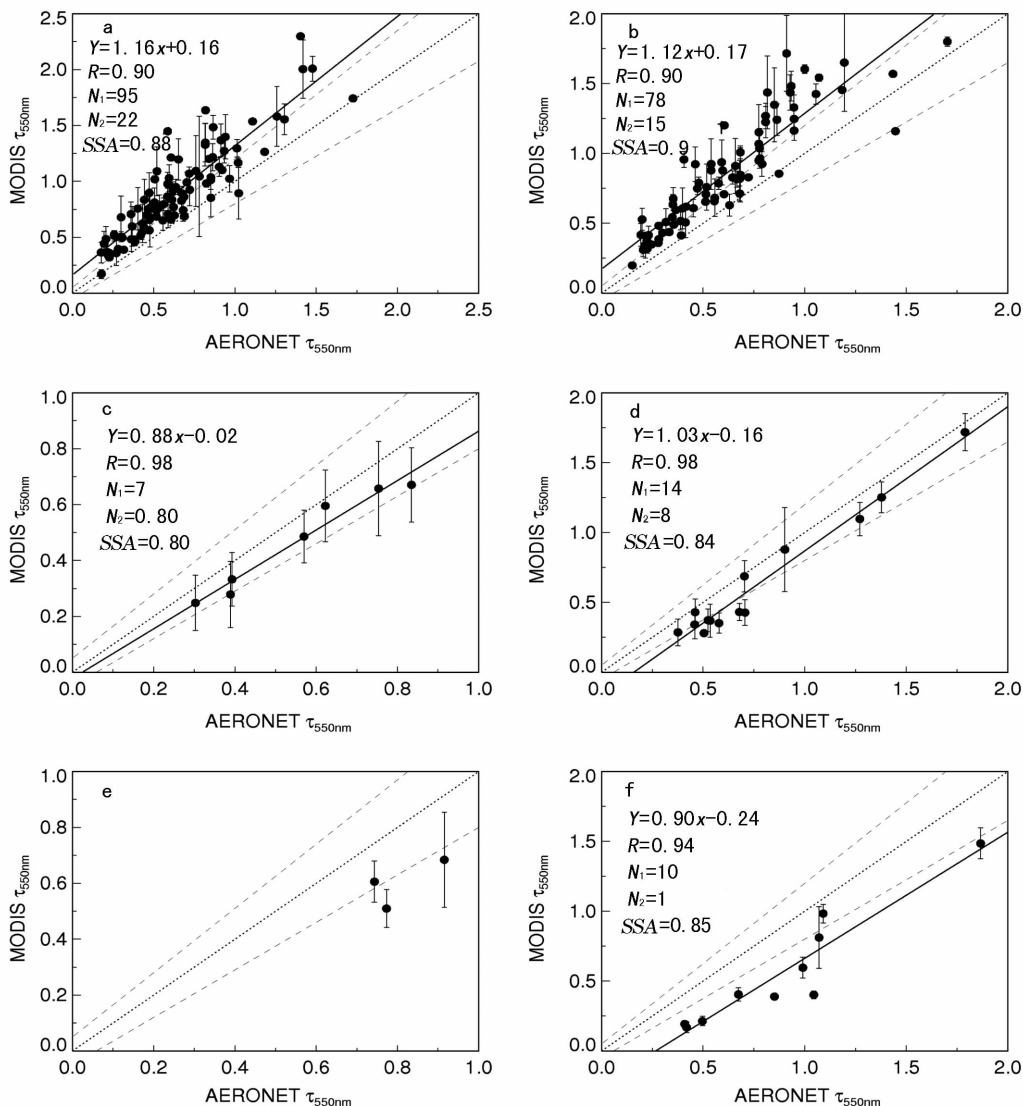


图 6 ±30 min AERONET 太阳等高圈反演 1.5 级 AOT 和 MODIS/AOT 散点图

Fig. 6 Comparison of AERONET level 1.5 almucantar retrievals and AODs retrieved from AQUA, TERRA/MODIS at Taihu (a, b), Hangzhou-ZFU (c, d) and Qiandaohu (e, f) The dotted lines border the uncertainties in MODIS ($\pm 0.05 \pm 0.15\tau$)

a, b 太湖站点 AQUA、TERRA, c, d 浙江林学院站点 AQUA、TERRA, e, f 千岛湖 AQUA、TERRA

图中长虚线为 MODIS C5 产品设计精度 ($\pm 0.05 \pm 0.15\tau$); SSA 为匹配期间 AERONET 反演的 440nm 单次散射反照率平均值,

N_1 为数据匹配数量, N_2 为符合设计精度的数据量

SSA denotes the average value of aerosol single scattering albedo of 440 nm retrieved from AERONET; N_1 : sample number;

N_2 : number of samples falling within the expected uncertainty

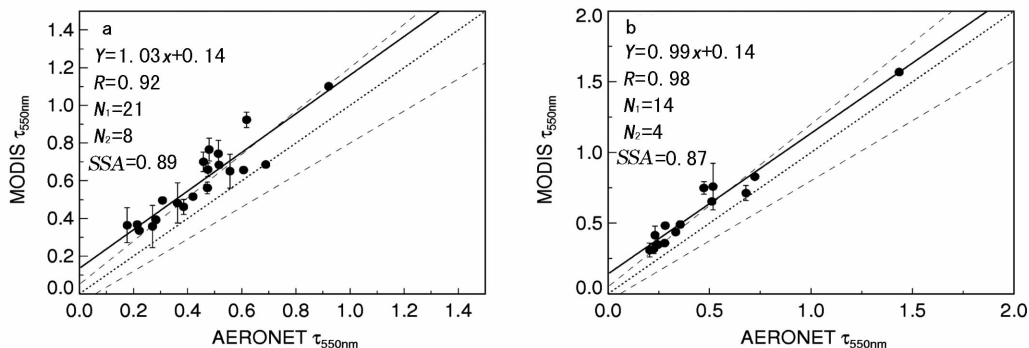


图 7 ± 30 min AERONET 太阳等高圈反演 2.0 级 AOT 和 MODIS/AOT 散点图

Fig. 7 Comparison of AERONET level 2.0 almucantar retrievals and AODs retrieved from AQUA, TERRA/MODIS at Taihu (a, b) The dotted lines border the uncertainties in MODIS ($\pm 0.05 \pm 0.15\tau$)

a、b 太湖站点 AQUA、TERRA 图中长虚线为 MODIS C5 产品设计精度 ($\pm 0.05 \pm 0.15\tau$); SSA 为匹配期间 AERONET 反演的单次散射反照率平均值; N_1 为数据匹配数量, N_2 为符合设计精度的数据量

SSA denotes the average value of aerosol single scattering albedo of 440 nm retrieved from AERONET; N_1 : sample number, N_2 : number of samples falling within the expected uncertainty

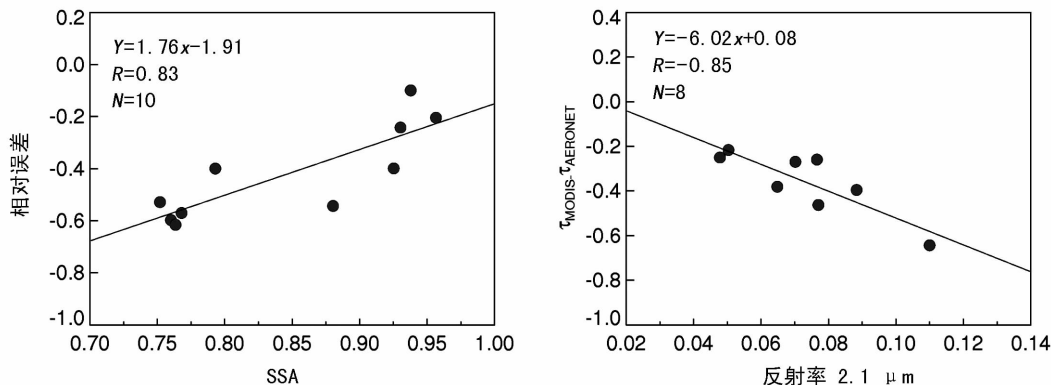


图 8 SSA (左)、地表反射率 (右) 与 MODIS 反演误差关系

Fig. 8 Relationship between MODIS retrieval errors and SSA (left), surface reflectance (right)

2.0 级数据进行验证分析。长江三角洲地区 2.0 级数据的缺乏是 MODIS 验证中急需解决的问题。

图 8 中给出千岛湖地区 SSA、地表反射率与 MODIS 反演误差的关系,从图 8 可以看出,MODIS 相对误差随 SSA 增大而减小,进一步说明 MODIS 高估了千岛湖地区 SSA,当 SSA 较小时,其与 SSA 设定值相差较大,因此相对误差较大。MODIS 反演绝对误差则随地表反射率上升而增加,在地表反射率较大时,MODIS AOT 显著小于 AERONET/AOT,说明 MODIS 高估了地表反射率,这与千岛湖地区拟合得到的负载距相吻合。虽然在千岛湖地区 MODIS 反演误差与 SSA 和地表反射率表现出良好的相关性,然而对太湖和浙江林学院进行相同的分析并未得到类似的结果。

4 结 论

不同类型的 AERONET 数据对 MODIS 的验证结果有较大影响,在 MODIS 验证过程中需要考虑到 AERONET 数据本身的质量,虽然 1.5 级数据经过云剔除,但是仍建议使用 2.0 级数据进行验证分析。长江三角洲地区站点较少以及 2.0 级数据的缺乏是 MODIS 验证中急需解决的问题,进行长期的地基观测以获取足够的地基资料仍然非常必要。以下结论基于 2.0 级 AERONET 数据对 MODIS 的验证结果。

通过对比长江三角洲地区不同站点 AERONET 与 MODIS 气溶胶光学厚度,表明该地区 MODIS/AOT 反演精度具有较大的地域差异,太湖站点 MODIS/AOT 显著偏高,达到 MODIS 精度设计范围 ($\pm 0.05 \pm 0.15\tau$) 的数据仅占 30.0% 左右,不具有

显著适用性,地表反射率估计不足是造成 MODIS 反演误差的主要原因。浙江林学院地区 MODIS/AOT 整体偏低,AQUA/MODIS 和 TERRA/MODIS 反演得到的 AOT 与 AERONET 拟合结果差异较大,这主要是因为两颗卫星过境期间内气溶胶单次散射反照率和地表反射率发生了变化,前者反演误差主要来源于气溶胶单次散射反照率选取不当,后者主要来源于 MODIS 对地表反射率估计不足,两颗卫星分别有 81.8% 和 53.3% 的数据满足 MODIS 设计精度,具有较好的适用性。千岛湖地区 MODIS/AOT 整体偏低,MODIS 极大地高估了气溶胶单次散射反照率,然而缺乏 2.0 级数据对其进行有力的验证。目前,长江三角洲地区 MODIS 产品存在较大的误差订正空间,对气溶胶模式进行进一步的细化以及根据具体的地表状况拓展更准确的卫星反演算法,是 MODIS 产品广泛应用的必要前提。

致谢:感谢 NASA 研究人员提供的 MODIS 气溶胶数据,感谢 AERONET 站点负责人对于 CE318 数据的维护、收集和處理。

参考文献 (References):

[1] Kaufman Y J, Tanre D, Boucher O. A satellite view of aerosols in climate system[J]. *Nature*,2002, 419: 215-223.

[2] King M D, Reynold Greenstone. A Guide to NASA's Earth Science Enterprise and the Earth Observing System[Z]. EOS Reference Handbook, 1999.

[3] Remer L A, Kaufman Y J, Tanre D, et al. The MODIS aerosol algorithm, products and validation[J]. *Atmospheric Science*, 2005, 62: 947-973.

[4] Chu D A, Kaufman Y J, Ichoku C, et al. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land[J]. *Geophysical Research Letter*,2002, 29(12), 10. 1029/2001GL0 13205.

[5] Levy R C, Remer L A, Tanre D, et al. Evaluation of the Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) retrievals of dust aerosol over the ocean during PRIDE[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 (8594), 13, doi: 10. 1029/2002JD002460.

[6] Mao Jietai, Li Chengcai, Zhang Junhua, et al. The comparison of remote sensing aerosol optical depth from MODIS data and ground sun photo meter observations[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*,2002, 13: 127-135. [毛节奏,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*,2002,13:127-135.]

[7] Li Chengcai, Mao Jietai, Lau Kai, 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): 2 488-2 495.

[8] Xia Xiang'ao. Significant overestimation of global aerosol optical thickness by MODIS over land [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(23):2 905-2 912.

[9] Shen Yanbo, Wang Biao, Shi Guangyu. Aerosol optical depth and dusty weather over eastern China seas in spring of 2006[J]. *Advances in Earth Science*,2008, 23(3):290-298. [申彦波,王标,石广玉. 2006 年春季我国东部海域气溶胶光学厚度与沙尘天气[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(3):290-298.]

[10] He Qianshan, Li Chengcai, Tang Xu, et al. Validation of MODIS derived aerosol optical depth over the Yangtze River delta in China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114:1 649-1 661.

[11] 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, 66:1-16.

[12] Nakajima T, Tonna G, Rao R, et al. Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions[J]. *Applied Optics*,1996,35: 2 672-2 686.

[13] Dubovik O, King M D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from sun and sky radiance measurements[J]. *Geophysical Research*,2000,105:1 072-1 087.

[14] Eck T F, Holben B N, Dubovik O, et al. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols [J]. *Geophysical Research*, 1999, 104, 31: 333-350.

[15] Xia Xiangao, Li Zhanqing, Holben B, et al. Aerosol optical properties and radiative effects in the Yangtze delta region of China[J]. *Journal of Geophysical Research*,2007, 112, D22S12, doi:10. 1029/2007JD008859

[16] Pan Liang, Che Huizheng, Geng Fuhai, et al. Aerosol optical properties based on ground measurements over the chinese Yangtze delta region[J]. *Atmospheric Environment*,2010, 44:2 587-2 596.

[17] Kaufman Y J, Tanré D, Remer L A. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer [J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 102(17): 51-67.

[18] Kaufman Y J, Wald A E, Remer L A, et al. The MODIS 2.1 mm channel correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*,1997, 35: 1 286-1 298.

[19] Cai Qiming, Yang Ping. Effects of suspended particles in Taihu Lake on albedo and absorptiom[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*,1999, 22(5): 458-466. [蔡启铭,杨平. 太湖悬浮质对湖面反照率及水体光吸收的影响[J]. *海洋与湖沼*, 1999, 22(5): 458-466.]

[20] Wang Lili, Xin Jinyuan, Wang Yuesi. Evaluation of the MODIS aerosol optical depth retrieval over different ecosystems in China during EAST-AIRE [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(33): 7 138-7 149.

[21] Mi Wen, Li Zhanqing, Xia Xiangao. Evaluation of the moderate resolution imaging spectroradiometer aerosol products at two Aero-

Validation of Modis Aerosol Optical Thickness Retrieval Over Yangtze Delta Region of China

Zheng Youfei¹, Dong Zipeng², Wu Rongjun², Li Zhanqing^{3,4}, Jiang Hong^{5,6}

(1. *Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing 210044, China*; 2. *Department of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*;

3. *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*;

4. *Department of Atmospheric and Oceanic Science, University of Maryland, College Park, Maryland, MD 20782, USA*;

5. *International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China*;

6. *International Research Center of Spatial-Ecology & Ecosystem Ecology, Zhejiang Forestry University, Hangzhou 311300, China*)

Abstract: This paper presents a comparison of aerosol optical thickness (AOT) retrieved from MODIS (both terra and aqua) collections with in situ ground-based data at three Aerosol Robotic Network (AERONET) sites over Yangtze Delta region from 2007 to 2009. The validation results show that the performances of the MODIS AOT retrievals have significant regional differences. MODIS is found to overestimate AOT observably at Taihu site, with only about 30% of retrieval data falling within the expected uncertainty. The systematic biases are mainly due to incorrect assumptions in the surface reflectance. There is a poor MODIS retrieval in this region. On the other hand, AQUA and TERRA MODIS derived AOTs are negatively biased at Zhejiang Forestry University (ZFU) site with 81.8% and 53.3% of retrieval data falling in the expected uncertainty, and the dominant sources of MODIS aerosol retrieval errors are aerosol models and surface reflectance estimations, respectively. The MODIS algorithm can deal well with this area. For Qiandaohu site, the MODIS data are significantly underestimated due to the overestimation of aerosol single scattering albedo. Unfortunately, there is no sufficient level 2.0 AERONET data to take a more reliable validation at this site. The analysis in this paper indicates the need for systematic modification of the MODIS algorithm over Yangtze delta region of China.

Key words: MODIS; Aeronet; AOT; Validation.