

单星多角度法同时反演气溶胶 光学厚度和地表反射率

茆佳佳^{1,2} 王振会^{1,2} 陈爱军²

摘要

尝试以单星多角度卫星观测数据同时反演晴空陆地的气溶胶光学厚度和地表反射率,并选取2009年5月的MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 1B资料进行了反演试验.结果表明:单星多角度法反演得到的气溶胶光学厚度结果与MODIS气溶胶产品(MOD04)平均值的相关系数为0.7914;反演的地表反射率结果与MODIS地表反射率产品(MOD09)也具有较好的一致性.对直接利用单星多角度观测数据反演获得一段时间内平均的气溶胶光学厚度进行了有益的尝试.

关键词

光学厚度; 地表反射率; 气溶胶; 反演; 中分辨率成像光谱仪

中图分类号 TP79

文献标志码 A

收稿日期 2010-11-03

资助项目 国家自然科学基金(40875015/D05-03); 公益性行业科研专项(GYHY200806-014)

作者简介

茆佳佳,女,硕士生,主要研究大气气溶胶卫星反演及时空分布特性.

maojiajia110@126.com

王振会(通信作者),男,教授,博士生导师,主要研究方向为大气探测与大气遥感.

eiap@nuist.edu.cn

0 引言

大气气溶胶不仅散射和吸收太阳辐射,而且影响云的形成及其性质,因而影响着地球-大气系统辐射收支平衡和全球气候变化^[1-3].气溶胶光学厚度是对卫星遥感数据进行大气校正的重要参数^[4].根据MODIS(中分辨率成像光谱仪)地表反照率产品提供的黑空和白空反照率产品计算反演周期内实际的地表反照率时,也需要利用反演周期内平均的气溶胶光学厚度获得天空漫射光比例^[5].然而,无论是地基太阳光度计观测^[6-7],还是卫星遥感反演^[8-17],通常只能获得单时段的气溶胶光学厚度信息,要获得一定时期内的气溶胶光学厚度信息,需要在这期间的气溶胶光学厚度做进一步处理^[18].

与地基观测相比,卫星遥感反演气溶胶具有更多优势,可以提供大范围气溶胶分布信息.目前,卫星遥感反演洋面气溶胶已经业务化,并获得了较好的精度和效果^[8-9].在陆地,由于地表反射率较大且具有非均一性,使卫星遥感反演陆地气溶胶遇到了一定的困难^[10].为了获得陆地气溶胶信息,许多学者先后提出了暗像元法(dark dense vegetation)、结构函数法(structure function,又叫对比法)、极化法(polarization)等多种气溶胶反演方法.暗像元法^[11-12]需要预知气溶胶类型,而且仅适用于地表反射率较低的区域,这在一定程度上限制了其应用范围,并影响了反演精度.对比法^[13-15]假定一段时间内同一地区的地表反射率不变,以清洁日大气作参考,对比反演污染日大气的气溶胶光学厚度,但是,清洁日大气选择的依据是图像的清晰程度,这具有一定的主观性,并且对大气清洁日图像气溶胶光学厚度的估计误差会直接影响反演结果的精度.极化法^[16-17]需要已知地表极化的二向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF),尽管洋面反演的光学厚度与地基观测结果有较好的一致性,在陆地上空仅限于反演相对较小的球形气溶胶时比较有效.随着新型多角度卫星探测器的出现,人们提出了一种利用多角度光谱反射信息定量反演气溶胶的多角度法.这种多角度法不仅可以反演气溶胶光学厚度,还能同时反演地表反照率^[19-23],并且较好地改善了陆地气溶胶的反演精度^[21],因而在卫星遥感反演陆地气溶胶方面具有一定的优势.但是,目前仅有多角度成像光谱辐射计(Multiangle Imaging

1 南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室,南京 210044

2 南京信息工程大学 大气物理学院,南京, 210044

Spectroradiometer, MISR) 和地球反射率极化和方向性探测器 (POLARization and Directionality of Earth Reflectance, POLDER) 等少数几种探测器可以直接获得多角度对地观测数据^[24-27].

本文尝试利用美国地球观测系统 (Earth Observing System, EOS) 卫星携带的中分辨率成像光谱辐射计 MODIS 多时次过境时卫星—地表—太阳相对位置的变化 (尤其是卫星天顶角的变化) 所形成的多角度对地观测数据, 采用多角度法反演陆地一段时期内的气溶胶光学厚度, 并同时获得地表反照率.

1 研究区域及数据

本文选择的研究区域介于 116 ~ 122°E, 26 ~ 33°N, 覆盖我国浙江省及周边的安徽、江苏、江西和福建等省的部分区域. 研究所用数据为南京信息工程大学中美遥感合作中心 EOS/MODIS 遥感数据接收和处理系统接收的 2009 年 5 月的 Terra MODIS 1B 数据, 选取数据的原则是晴空少云. 需要进行定标、定位、几何校正和云检测处理. 本文采用多光谱综合法^[28]进行云检测.

此外, 本文还应用了美国航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 提供的 MODIS 日气溶胶光学厚度产品 (MOD04) (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>) 和地表反射率产品 (MOD09GQK) (<https://wist.echo.nasa.gov/api>). MOD04 的空间分辨率为 1 km, 陆地地区的气溶胶产品通过暗象元法反演获得^[29]. MOD09GQK 提供的是 Terra MODIS 每天的地表反射率, 空间分辨率为 250 m.

2 方法

2.1 多角度卫星遥感数据反演气溶胶的基本原理

卫星接收的地表反射辐射由地表反射辐射和大气散射辐射共同组成, 反演气溶胶光学厚度的关键是使两者分离, 再由大气散射辐射获得大气气溶胶光学厚度. 如果地表为各向同性的朗伯体, 卫星在不同方向接收的辐射主要受大气散射的影响. 虽然实际地表并非朗伯体, 但应用二向反射分布函数 (BRDF) 可以准确地描述其各向异性的反射特性. 应用多角度卫星遥感数据反演气溶胶的基本思路是: 假设一个气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Depth, AOD) 估计值, 由此估计各方向的表现反射率, 再根据假设的气溶胶模型和大气基本参数, 通过辐射传

输模型可以计算出各方向地表反射率的估计值, 通过最小二乘法可以获得最佳的大气气溶胶光学厚度; 同时, 由各方向地表反射率的估计值, 通过最小二乘法可以获得最佳的地表 BRDF 模型参数, 并反演实际的地表反射率. 这样, 利用多角度卫星遥感数据并结合 BRDF 模型, 即可实现同时反演地表反射率和气溶胶光学厚度^[23].

2.2 获取多角度卫星遥感数据

本文参照 MODIS BRDF 和地表反照率产品 (MOD43) 反演算法^[29], 利用 MODIS 探测器在反演周期内多次过境时卫星—地表—太阳相对位置的变化 (尤其是卫星天顶角的变化) 获得同一个区域不同角度观测的数据形成多角度对地观测数据.

2.3 地表 BRDF 模型

本文采用最适合于地表 BRDF 反演的 Ross-Thick-LiSparse-R 核驱动的 BRDF 模型^[30]. 该模型将地表的各向异性散射分解为各向同性散射、几何光学散射和体积散射等 3 部分的线性组合, 即:

$$R(\theta_i, \theta_v, \varphi) = f_{iso} + f_{geo} K_{geo}(\theta_i, \theta_v, \varphi) + f_{vol} K_{vol}(\theta_i, \theta_v, \varphi). \quad (1)$$

其中: θ_i , θ_v 和 φ 分别是太阳天顶角、卫星天顶角和太阳/卫星相对方位角; f_{iso} , f_{geo} 和 f_{vol} 分别是各向同性散射、几何光学散射和体积散射的权重系数, 即所谓的 BRDF 参数; $K_{geo}(\theta_i, \theta_v, \varphi)$ 是几何光学核, $K_{vol}(\theta_i, \theta_v, \varphi)$ 是体积散射核. RossThick-LiSparse-R 核驱动 BRDF 的优势在于反演时只需有限的观测数据, 可反演性强, 且计算速度快, 适于业务化反演应用^[30-31].

2.4 建立气溶胶光学厚度查找表

为了节省计算时间, 提高反演效率, 本文事先应用 6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum) 大气辐射传输模型^[4]进行一系列辐射传输计算, 建立气溶胶光学厚度与观测几何角度、大气参数和地表参数的对应关系, 即气溶胶光学厚度查找表 (Look Up Table, LUT). 本文针对 MODIS 红光波段 (0.66 μm) 建立气溶胶光学厚度查找表: 气溶胶类型取大陆型; 大气参数取 6S 模式提供的中纬度夏季大气廓线 (包括大气温、压、湿廓线, 臭氧、水汽含量); 气溶胶光学厚度介于 0.1 ~ 1.5 之间, 步长为 0.1; 地表反射率介于 0.01 ~ 1.00, 步长为 0.01; 卫星和太阳天顶角均介于 0° ~ 75°, 步长为 5°; 卫星和太阳的相对方位角介于 0° ~ 180°, 步长为 10°.

2.5 反演流程

图 1 给出了单星多角度法同时反演气溶胶光学厚度和地表反射率的流程. 首先, 向 RossThick-LiSparse-R 核驱动的 BRDF 模型输入经过预处理的卫星观测数据(包括反射率和观测几何角度), 计算 RossThick 核和 LiSparse-R 核的值; 其次, 向 6S 模型计算的查找表输入气溶胶光学厚度的初值, 查找出地表反射率的值; 把 RossThick 核、LiSparse-R 核的值和地表反射率的值带入 BRDF 模型进行最小二乘拟合, 可以得到一组地表 BRDF 模型参数、拟合方差; 接着, 令气溶胶光学厚度在 0 ~ 1.5 之间以一定步长(0.01)不断变化, 当拟合方差(式(2))最小时, 表明对应的气溶胶光学厚度的估计值与真实情况最接近, 作为反演结果输出. 同时也得到了一组最佳的地表 BRDF 模型参数 f_{iso} 、 f_{geo} 、 f_{vol} , 代入式(1)可以计算出实际的地表反射率.

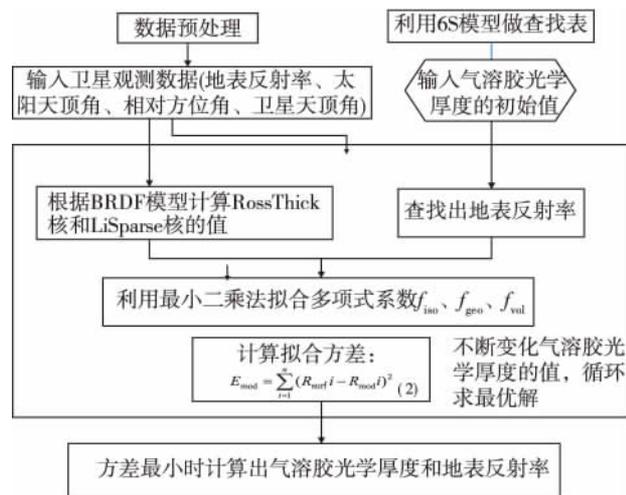


图 1 同时反演气溶胶光学厚度和反射率的流程

Fig. 1 Flow chart of retrieving aerosol optical depth and surface reflectance simultaneously

3 结果与讨论

3.1 气溶胶日变化分析

表 1 统计的是 2009 年 5 月 4—8 日气溶胶产品的相关性. 可以看出这几天的气溶胶光学厚度相关性都在 0.69 以上, 最大达到 0.91, 具有较强的相关性. 通过分析这期间的 NCEP 风场资料显示研究区域的风速较小, 因此气溶胶相对稳定; 但 5 月 5 日上海周边风速较大, 这会给上海周边的气溶胶带来较大变化, 不满足本研究的假设条件. 分析结果表明: 这期间的气溶胶光学厚度变化不大, 基本满足单星

多角度法反演的假设条件, 但在上海地区可能存在偏差.

表 1 2009 年 5 月 4—8 日气溶胶产品的相关性
Table 1 The correlation between different aerosol products on May 4—8 2009

日气溶胶产品	相关系数			
	MOD04: 2009-05-04	MOD04: 2009-05-06	MOD04: 2009-05-07	MOD04: 2009-05-08
MOD04: 2009-05-04	1.00	0.72	0.73	0.69
MOD04: 2009-05-06	0.72	1.00	0.89	0.84
MOD04: 2009-05-07	0.73	0.89	1.00	0.91
MOD04: 2009-05-08	0.69	0.84	0.91	1.00

3.2 气溶胶光学厚度反演结果

图 2a 给出了 2009 年 5 月 4—8 日的气溶胶光学厚度反演结果(5 月 5 日的晴空区较少, 计算中没有选用). 反演结果显示: 在反演区域内存在 2 个小值区和 1 个大值区. 其中一个小值区位于皖西大别山区, 该地区气溶胶光学厚度的值小于 0.3; 另一个小值区位于安徽、浙江和江西 3 省交界处, 主要位于以黄山、九华山为主的皖南山区, 其气溶胶光学厚度为 0.4 左右. 这 2 个小值区都位于山区, 人类活动很少, 而且四周分布着浓密的常绿植物、落叶林、混合灌木及农田等, 污染物相对较少, 空气比较清洁, 因而气溶胶的光学厚度普遍较低. 大值区位于江苏地区, 由于该地区城市发展迅速, 人口密度高, 空气污染物比较多, 气溶胶光学厚度普遍较高.

为了评价多角度法反演气溶胶光学厚度结果的准确性, 本文选择了 MODIS 日气溶胶光学厚度产品(MOD04)进行对比分析. 图 2b 显示的是 2009 年 5 月 4—8 日期间 MOD04 产品的气溶胶光学厚度平均值. 从图 2b 可以看出: 在反演区域内也存在 2 个小值区, 分别是皖西大别山区和皖赣浙 3 省交界处; 在江苏及周围大部分地区, 气溶胶光学厚度普遍较高. 对比图 2a 和图 2b, 可以看出两者气溶胶光学厚度的空间分布具有较好的一致性, 植被浓密的 2 个小值区一一对应, 但在亮地表地区还存在一定的偏差. 尽管 MOD04 产品也是一种卫星遥感反演产品, 其精度也有待进一步分析和验证^[32], 但对比结果表明单星多角度法获得的气溶胶光学厚度与其具有较好的一致性, 特别是植被较为密集的区域.

图 3 统计了单星多角度法反演结果与气溶胶产

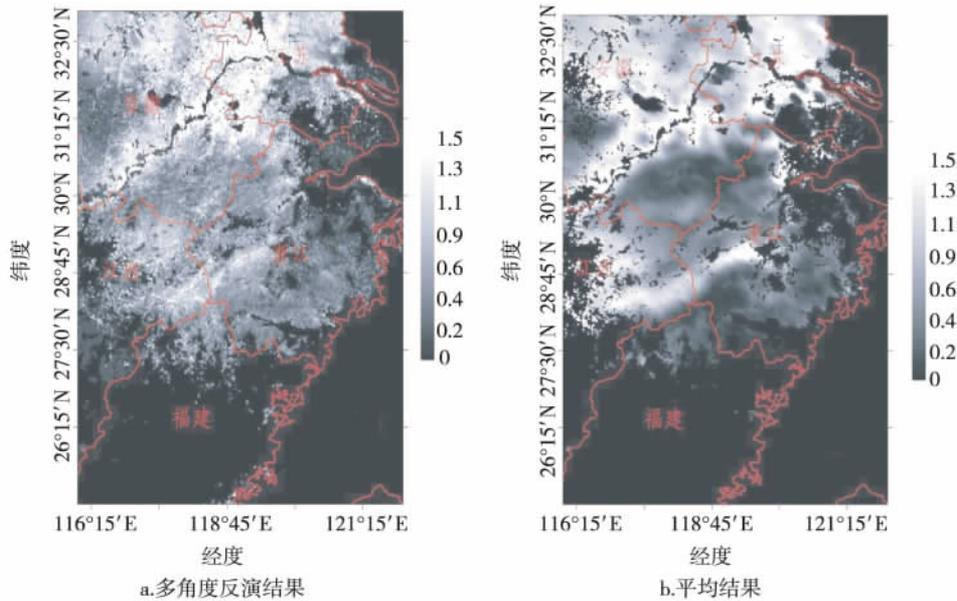


图2 气溶胶光学厚度多角度法反演结果(2009年5月4—8日)和MODIS气溶胶光学厚度产品平均结果(2009年5月4—8日)

Fig.2 AOD results retrieved by multi-angle method (a) and by MODIS products (b) on May 4—8 2009

品的相关性. 选取的样本是整个试验区(剔除云区和海洋区域), 大概30多万个样本, 两者的散点分析结果表明: 它们的相关系数约为0.7914, 具有较好的相关性; 单星多角度法反演的气溶胶光学厚度结果总体上略高于MOD04平均值, 且浓密植被地区的一致性比城市等亮地表地区的一致性要好.

图4给出了浓密植被地区和亮地表地区的气溶胶光学厚度频率分布. 分析结果表明: 在浓密植被地区(图4a), 频率最大时两者对应的气溶胶光学厚度都是0.2, 且两者的频率分布较为一致; 在亮地表地区(图4b), 频率最大时两者对应的气溶胶光学厚度都是0.5, 但是两者的频率分布存在一定的差别. 分析两者之间产生差异的原因, 可能有以下几方面: 1) 单星多角度法反演气溶胶光学厚度时, 假设一段时间内地表状态变化不大, 研究区域5月份降水较为频繁, 地表状态易于发生变化, 因而对气溶胶光学厚度反演结果的精度带来一定影响; 2) 单星多角度法反演气溶胶光学厚度时, 假设卫星过境时气溶胶光学厚度基本不变, 这与实际情况可能存在一定差异, 也会给反演结果带来一定误差; 3) MOD04气溶胶光学厚度产品采用的是暗像元法, 并不适于反演亮地表地区的气溶胶光学厚度, 这也是引起两者之间差异的一个重要原因; 4) 利用6S辐射传输模式进行模拟计算时, 各种输入参数的选择, 尤其是气溶胶类型的不确定性, 也会给单星多角度法气溶胶光学厚度

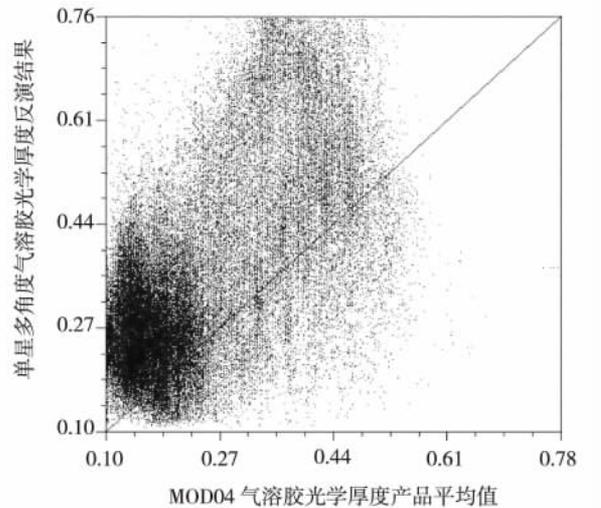


图3 散点统计

Fig.3 Scatter diagram of AOD

反演结果带来较大误差.

3.3 地表反射率反演结果

根据反演的气溶胶光学厚度, 由6S大气辐射传输模型可以计算出地表反射率.

从2009年5月4—8日的地表反射率结果来看, 各天的反演结果比较相似(图5). 图6a给出了2009年5月4日研究区域的地表反射率. 从图6a中可以看出: 在安徽、浙江和江西3省交界地区和皖西大别山区的地表反射率较低, 这些地区位于山区, 地

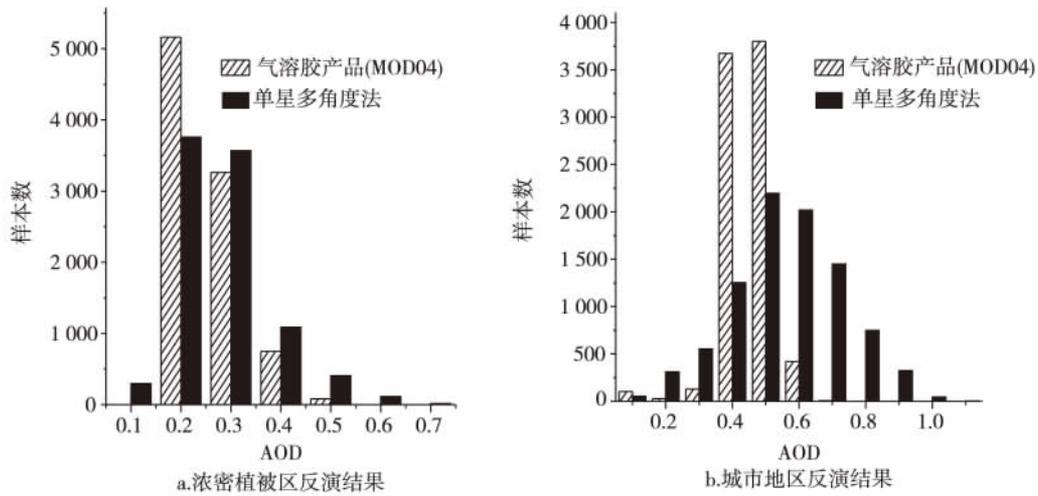


图 4 气溶胶光学厚度频数分布直方图

Fig.4 Frequency distribution of AOD retrieved from vegetation area (a) and urban area (b)

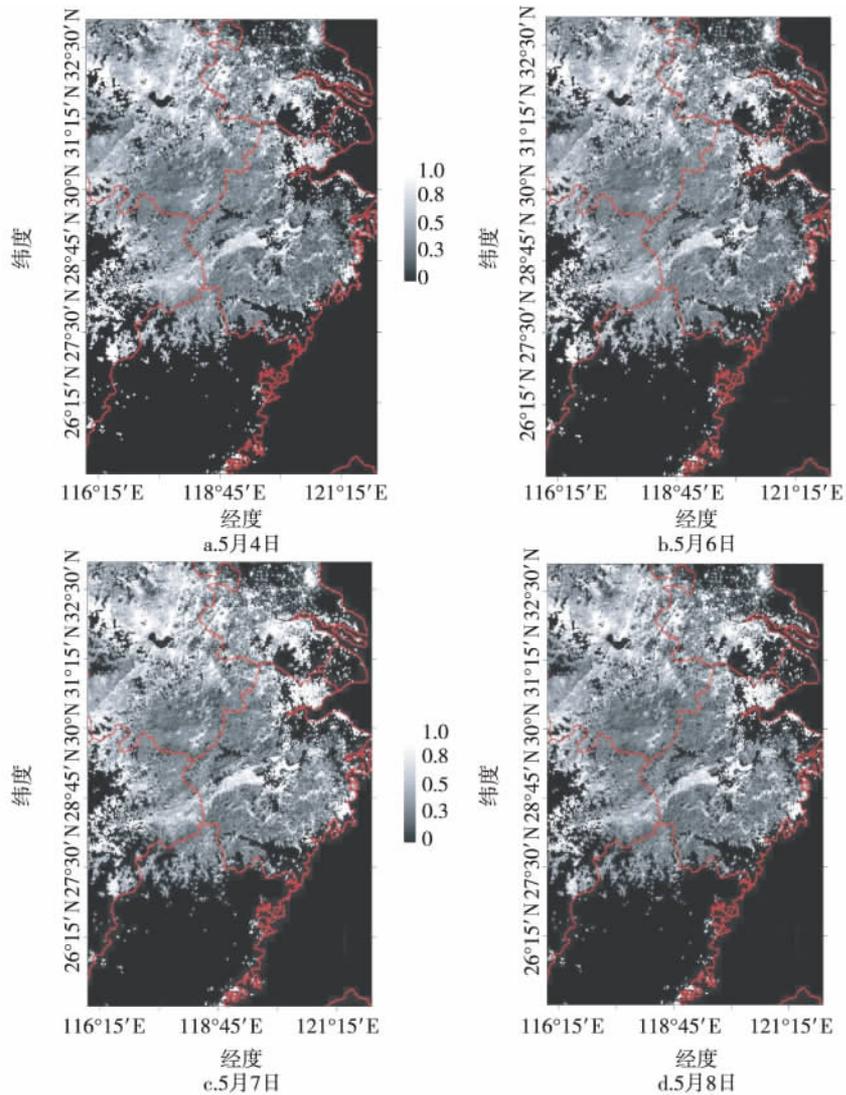


图 5 单星多角度法地表反射率反演结果

Fig.5 Surface reflectance results retrieved by multi-angle method on May 2009

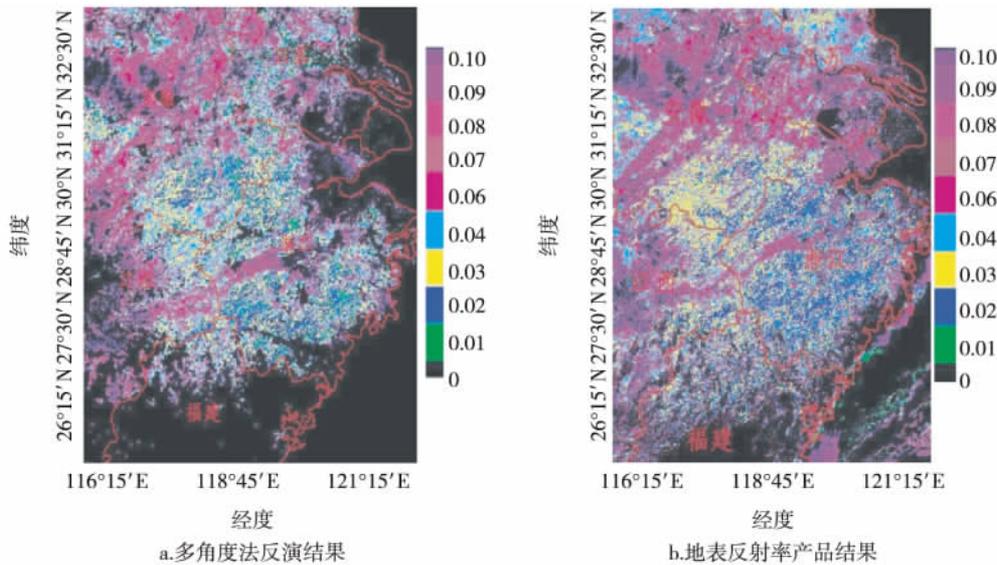


图6 2009年5月4日地表反射率多角度法反演结果和地表反射率产品结果

Fig. 6 Surface reflectance results retrieved by multi-angle method (a) and by MOD09 (b) on May 4 2009

表覆盖着浓密的常绿植物,如落叶林、混合灌木及农田等,因此在红光波段反射率较低.在江苏地区,地表反射率较高,这些地区以城乡居民区、工矿用地及交通用地为主,在红光波段反射率较高.

为了分析地表反射率反演结果的准确性,本文将地表反射率反演结果与经过大气校正的MODIS地表反射率的产品(MOD09)进行了对比分析.图6b给出的是对应时刻MOD09地表反射率,可以看出与图4之间存在较好的一致性:浙江、江西和福建这些植被浓密的地区,结果比较吻合;江苏、安徽等亮地表地区的结果存在一定偏差.其原因在于:试验选取的天数较少(4天4个角度),不能准确地获得BRDF参数,这会给反演结果带来一定影响,尤其是给亮地表地区反演结果的影响,因此,亮地表地区的地表反射率反演偏差较大;选择的是5月的数据,降水相对较多,雨水淋湿过的地表反射率会发生一定的变化,从而给结果带来一定的影响.

4 小结

本文应用MODIS探测器在多次过境时形成的多角度数据,采用多角度法同时反演气溶胶光学厚度和地表反射率,并以2009年5月4—8日华东地区Terra MODIS数据进行了初步的反演试验并对反演结果进行了初步分析.分析结果表明:采用该方法获得的气溶胶光学厚度分布情况与期间的MODIS气溶胶产品(MOD04)平均值比较一致,相关系数为

0.7914;反演的地表反射率与MODIS经过大气校正的地表反射率产品(MOD09)也具有较好的一致性.由于单星多角度卫星观测资料同时反演气溶胶光学厚度和地表反射率方法无须事先假设或估计地表反射率,因而利用MODIS探测器多次过境时太阳—地表—探测器之间相对位置的变化获得多角度观测资料进行反演.该方法对于同时反演得到气溶胶光学厚度较为稳定的区域的气溶胶光学厚度和地表反射率具有一定的应用价值.另外,目前国内多角度卫星遥感观测资料比较缺乏的情况下,也对进一步研究和应用MODIS资料进行了有益的探索.

当然,本文提出的这一方法要求在积累同一地物多角度数据的几天里该地区气溶胶光学特征变化不大时才能获得满意的反演效果,而对反演效果的评价,由于可比较资料的局限,本文仅进行了与MODIS产品的定性对比,希望以后能够收集到气溶胶光学特征的其他观测资料,并能够进行反演误差的定量计算.

参考文献

References

- [1] 韩志伟,杜世勇,雷孝恩,等.城市空气污染数值预报模式系统及其应用[J].中国环境科学,2002,22(3):202-206
 HAN Zhiwei, DU Shiyong, LEI Xiaoen, et al. Numerical model system of urban air pollution prediction and its application [J]. China Environmental Science, 2002, 22(3): 202-206

- [2] Arnold F ,Blanchet J P ,Durkee P ,et al. Group report: Connections between aerosol and properties and forcing of climate [M] // Charlson R J ,Heintzenberg J. Aerosol Forcing of Climate ,1995: 251-280
- [3] Hansen J ,Sato M ,Ruedy R. Radiative forcing and climate response [J]. Journal of Geophysical Research , 1997 ,102 (D6) : 6831-6864
- [4] 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 and Remote Sensing ,1997 ,35(3) : 675-686
- [5] Chen A J ,Bian L G ,Liu Y J. Deriving albedo over cloudy areas with composite inversion [C] // Chen J M ,Pu Y X. Proceedings of SPIE ,Geoinformatics 2007: Geospatial Information Science 2007 ,6753: 1-11
- [6] 刘玉杰 ,牛生杰 ,郑有飞. 用 CE318 太阳光度计资料研究银川地区气溶胶光学厚度特性 [J]. 南京气象学院学报 2004 ,27(5) : 615-622
LIU Yujie ,NIU Shengjie ,ZHENG Youfei. Optical depth characteristics of Yinchuan atmospheric aerosols based on the CE318 sun tracking spectrophotometer data [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology ,2004 ,27(5) : 615-622
- [7] 胡方超 ,张兵 ,陈正超 ,等. 利用太阳光度计 CE318 反演气溶胶光学厚度改进算法的研究 [J]. 光学技术 , 2007 ,33(增刊 1) : 38-43
HU Fangchao ,ZHANG Bing ,CHEN Zhengchao ,et al. Improved algorithm for the retrieval of aerosol optical depth using the sunphotometer CE 318 [J]. Optical Technique 2007 ,33(sup1) : 38-43
- [8] Rao C R N ,Stowe L L ,McClain E P. Remote-sensing of aerosols over the oceans using AVHRR data: Theory , practice and applications [J]. International Journal of Remote Sensing ,1989 ,10(4/5) : 743-749
- [9] 陈本清 ,杨燕明. 台湾海峡及周边海区 MODIS 气溶胶光学厚度有效性验证 [J]. 海洋学报 ,2005 ,27(6) : 170-176
CHEN Benqing ,YANG Yanming. Validation of MODIS aerosol optical thickness in the Taiwan Strait and its circumjacent sea area [J]. Acta Oceanologica Sinica ,2005 ,27(6) : 170-176
- [10] 孙林 ,柳钦火 ,刘强 ,等. 高反射率地区气溶胶光学厚度遥感反演: 现状及展望 [J]. 地理科学进展 2006 ,25(3) : 70-78
SUN Lin ,LIU Qinhuo ,LIU Qiang ,et al. Aerosol optical thickness retrieving over bright surface: Progress and prospect [J]. Progress in Geography 2006 ,25(3) : 70-78
- [11] Kaufman Y J ,Tanré 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 , 1997 , 102 (D14) : 17051-17067
- [12] Deuzé J L ,Breon F M ,Devaux C ,et al. Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS-1 polarized measurements [J]. Journal of Geophysical Research 2001 ,106(D5) : 4913-4926
- [13] Tanré D ,Devaux C ,Herman M ,et al. Radiative properties of desert aerosols by optical ground-based measurements at solar wavelengths [J]. Journal of Geophysical Research ,1988 ,93(D11) : 14223-14231
- [14] Holben B ,Vermote N E ,Kaufman Y J ,et al. Aerosol retrieval over land from AVHRR data-application for atmospheric correction [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing ,1992 ,30(2) : 212-222
- [15] 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 [J]. 气象学报 2003 ,61(5) : 580-592
LI Xiaojing ,LIU Yujie ,QIU Hong ,et al. Retrieval method for optical thickness of aerosols over Beijing and its vicinity by using the MODIS data [J]. Acta meteorologica sinica. 2003 ,61(5) : 580-592
- [16] Deuzé J L ,Breon F M ,Deschamps P Y ,et al. Analysis of the POLDER(POLarization and Directionality of Earth's Reflectances) airborne instrument observations over land surfaces [J]. Remote Sensing of Environment ,1993 ,45(2) : 137-154
- [17] Deuzé J L ,Goloub P ,Herman M ,et al. Aerosol remote sensing from POLDER measurements [C] // Proceedings of IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing 2003: 1273-1275
- [18] 任通 ,高玲 ,李成才 ,等. 利用风云 2C 静止卫星反演气溶胶光学厚度 [EB/OL]. (2010-04-28) [2010-12-27]. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/release-paper/content/42473>.
REN Tong ,GAO Ling ,LI Chengcai ,et al. Retrieval of aerosol optical depth over land from inversion of the visible channel spectral reflectance on the FengYun-2C geostationary satellite [EB/OL]. (2010-04-28) [2010-12-27]. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/content/42473>.
- [19] North P R J ,Briggs S A ,Plummer S E ,et al. Retrieval of land surface bidirectional reflectance and aerosol opacity from ATSR-2 multi-angle imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing ,1999 ,37(1) : 526-537
- [20] Veeffkind J P ,Leeuw G D ,Stammes P ,et al. Regional distribution of aerosol over land ,derived from ATSR-2 and GOME [J]. Remote Sensing of Environment ,2000 ,74(3) : 377-386
- [21] Diner D J ,Asner G P ,Davies R ,et al. New directions in Earth observing: Scientific applications of multiangle remote sensing [J]. Bulletin of the American Meteorological Society ,1999 ,80: 2209-2228
- [22] Xue Y ,Yu T. Aerosol optical depth determination from Along Track Scanning Radiometer (ATSR) data [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems 2003: 793-796
- [23] Grey W M F ,North P R J ,Los S O ,et al. Aerosol optical depth and land surface reflectance from multi-angle AATSR measurements: Global validation and inter sensor comparisons [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2006 ,44(8) : 2184-2197
- [24] Schaepman-Strub G ,Schaepman M E ,Painter T H ,et al. Reflectance quantities in optical remote sensing definitions and case studies [J]. Remote Sensing of Environment 2006 ,103(1) : 27-42

- [25] Sellers P J. Remote sensing of land surface climatology [R]// NASA/GSFC International Satellite Land Surface Climatology Project Report. Greenbelt, Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 1993
- [26] Deschamps P Y, Breon F M, Leroy M, et al. The POLDER mission: Instrument characteristics and scientific objectives [J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 1994, 32(3): 598-615
- [27] Diner D J, Beckert J C, Reilly T H, et al. Multiangle Imaging Spectro Radiometer (MISR) instrument description and experiment overview [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(4): 1072-1087
- [28] 宋小宁, 赵英时. MODIS 图象的云检测及分析 [J]. 中国图像图形学报, 2003, 8(9): 1079-1083
SONG Xiaoning, ZHAO Yingshi. Cloud detection and analysis of MODIS image [J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8(9): 1079-1083
- [29] 陈爱军, 卞林根, 刘玉洁, 等. 应用 MODIS 数据反演青藏高原地区地表反照率 [J]. 南京气象学院学报, 2009, 32(2): 222-229
CHEN Aijun, BIAN Linggen, LIU Yujie, et al. Using MODIS data to retrieve albedo over the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2009, 32(2): 222-229
- [30] 徐兴奎, 林朝晖. 青藏高原地表月平均反照率的遥感反演 [J]. 高原气象, 2002, 21(3): 233-237
XU Xingkui, LIN Zhaohui. Remote sensing retrieval of surface monthly mean albedo in Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology, 2002, 21(3): 233-237
- [31] Wanner W, Li X W, Strahler A H. On the derivation of the kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance [J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(D10): 21077-21089
- [32] 李晓静, 张鹏, 张兴赢, 等. 中国区域 MODIS 陆上气溶胶光学厚度产品检验 [J]. 应用气象学报, 2009, 20(2): 147-156
LI Xiaojing, ZHANG Peng, ZHANG Xingying, et al. Validation of aerosol optical thickness product over China with MODIS data operated at NSMC [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009, 20(2): 147-156

Simultaneous retrieval of aerosol optical depth and surface reflectance using single-satellite multi-angle method

MAO Jiajia^{1,2} WANG Zhenhui^{1,2} CHEN Aijun²

¹ Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

² School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract This paper attempts to retrieve aerosol and surface optical properties simultaneously from multi-angle data observed by single satellite. A case study was conducted using the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 1B data of May 2009. The resulting aerosol optical depth was consistent with that of the aerosol product (MOD04), the correlation coefficient is 0.7914. The comparison of the resulting land surface reflectance with that of the surface reflectance product (MOD09) also produced good consistency. The algorithm made a good attempt to retrieve the average of aerosol optical depth using single-satellite multi-angle observations data.

Key words optical depth; surface albedo; aerosol; retrieval; MODIS