

引用格式: Zhang Lu, Shi Runhe, Li Long. Retrieval of Aerosol Optical Depth Using HJ-1 Data over the Yangtze River Delta[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(2): 290-296. [张璐, 施润和, 李龙. 基于 HJ-1 卫星数据反演长江三角洲地区气溶胶光学厚度[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(2): 290-296.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2016.2.0290

基于 HJ-1 卫星数据反演长江三角洲地区 气溶胶光学厚度

张 璐^{1,2}, 施润和^{1,2}, 李 龙^{1,2}

(1. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241;
2. 华东师范大学环境遥感与数据同化联合实验室, 上海 200241)

摘要:探索利用我国 HJ-1 卫星 CCD 数据, 运用深蓝算法开展长江三角洲地区气溶胶光学厚度反演的可行性, 并将结果与其他气溶胶光学厚度产品进行比较。针对 HJ-1A 和 HJ-1B 数据, 反演结果分别与 MODIS 气溶胶光学厚度产品以及 AERONET 地基观测数据进行对比验证。结果表明: 深蓝算法得到 A 星、B 星的反演结果与 MODIS 气溶胶产品呈显著相关, 但在数值上普遍高于 MODIS 产品; 反演结果与 AERONET 站点数据之间的误差介于 0.008~0.364 之间, 研究时段内站点数据缺乏, 未对误差进行严格的统计分析。基于深蓝算法的 HJ-1 卫星数据反演结果虽然在数值上与 MODIS 气溶胶光学厚度产品存在系统性偏差, 但在空间上能够较好地反映长江三角洲地区大气气溶胶分布状况, 且具有空间分辨率高的优势。

关键词: 气溶胶光学厚度; 反演; HJ-1 卫星; 长江三角洲

中图分类号: X 513; P 407 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2016)02-0290-07

1 引 言

气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Depth, AOD) 是表征大气浑浊度的重要物理量之一, 能在一定程度上反映大气中的颗粒物污染程度。卫星遥感能够快速方便地获取大范围空间连续的气溶胶信息, 为大气环境的监测提供了一条快捷的途径。

目前常用的气溶胶光学厚度产品, 如 NASA 发布的 MODIS 10 km 分辨率的全球 AOD 产品, 空间分辨率较低, 很难满足小范围高精度 AOD 监测的需求。我国自主发射的环境与灾害监测预报小卫星 (HJ-1) 上搭载的 CCD 传感器分辨率为 30 m, 空间分辨率较高的优势使其在监测城市尺度的 AOD 中有广泛的应用前景。探索适合于 HJ-1/CCD 数据的气溶胶反演方法, 能够有效拓展我国自主卫星资

料在大气污染监测方面的应用。长江三角洲地区人口密度大、经济发展迅速, 社会经济快速发展带来的环境污染问题以及这些问题对人类生活的影响在此区域显得尤其突出, 空气污染已经成为该地区发展所面临的严峻问题。因而, 利用我国 HJ-1/CCD 卫星获取该地区 AOD 的详细空间分布信息, 有望能为该地区的环境评价、污染控制、产业布局等提供科学依据, 对该地区社会经济与环境的协调发展意义重大。

本文基于深蓝算法, 利用高空间分辨率的 HJ-1/CCD 遥感数据反演长江三角洲地区 AOD, 并与 MODIS 气溶胶产品 MOD04L2 和 AERONET 站点资料进行对比验证, 探讨基于 HJ-1/CCD 数据气溶胶反演在研究区的适用性。在此基础上, 对长江三角洲地区 AOD 的空间分布特征进行分析讨论。

收稿日期: 2015-01-14; 修订日期: 2016-02-03

基金项目: 上海市科委重点支撑项目 (13231203804), 国家自然科学基金项目 (41201358)。

作者简介: 张 璐 (1991—), 女, 安徽广德人, 硕士研究生, 主要从事大气遥感方面的研究。E-mail: zhl66ahgd@gmail.com。

通讯作者: 施润和 (1979—), 男, 上海人, 副教授, 主要从事定量遥感研究。E-mail: rhshi@geo.ecnu.edu.cn。

2 研究数据与数据预处理

2.1 研究数据

本文主要采用 HJ-1/CCD、HJ-1/IRS 以及相同时相的 MODIS 地表反射率产品 (MOD09A1) 来反演 AOD。此外,还使用 MODIS AOD(MOD04_L2) 和 AERONET AOD 对反演结果进行评价分析。

HJ-1/CCD 数据分为蓝光(0.43~0.52 μm)、红光(0.52~0.60 μm)、绿光(0.63~0.69 μm)和近红外(0.76~0.90 μm)4个波段,分辨率均为 30 m。由于长江三角洲地区云量较大,选取连续时相的无云遥感数据较难,文中使用了 2013 年 5 月 1 日、5 月 13 日和 8 月 9 日的 HJ-1A/CCD1 数据,8 月 7 日、8 月 11 日的 HJ-1B/CCD1 数据,数据为经辐射校正和系统几何校正的 2 级产品。本文也尝试使用 HJ-1A/B CCD2 数据进行了 AOD 反演,但是反演结果并不理想,查阅相关资料,其原因是自发射以来 CCD2 相机在轨辐射探测性能呈现了较大的衰减^[1],而 CCD1 相机的探测性能趋于稳定,因此只用了 CCD1 数据进行 AOD 的反演和分析。为了减小云层覆盖对 AOD 反演的影响,使用 8 月 7 日和 8 月 11 日的 HJ-1B/IRS 数据(5 月 1 日、5 月 13 日和 8 月 9 日 IRS 数据未覆盖长三角地区)热红外波段(第 4 波段,分辨率为 300 m)协同 HJ-1/CCD 数据进行去云处理。所有 CCD 和 IRS 数据的成像时间均在 10:30AM \pm 30 min 之间。

MOD09A1 为 500 m 分辨率的 8 d 合成地表反射率产品,获取与 HJ-1/CCD 数据相同时相的 MOD09A1,将其修正到 HJ-1/CCD 相机,建立蓝光波段地表反射率数据库。MOD04L2 是 MODIS 提供的 10 km 分辨率逐日气溶胶产品。使用该数据集基于改进的暗像元算法(算法版本号为 5.2)得到的 AOD 作为验证资料,改进后的算法在浓密植被地区比原算法更精确^[2]。

AERONET 是由 NASA 在全球范围 180 多个站点布设 CE318 太阳光度计、并与其他气溶胶观测网络和科研机构联盟而形成的地基气溶胶监测网^[3],可以提供高精度的气溶胶光学厚度数据,常被用于各种方法、各种传感器获得的气溶胶光学特征产品的验证研究。本文将反演结果与 AERONET 太湖站点(120°12'54"E,31°25'15"N)的 Level1.5 观测数据进行了对比分析。

2.2 数据预处理

针对 HJ-1/CCD 数据,图像预处理包括:

(1)辐射定标、表观反射率和亮温计算,计算了 CCD 相机蓝、红(1、3)波段、IRS 数据第 4(热红外)波段辐亮度,以及红光波段的表观反射率、热红外波段的亮温。

(2)影像镶嵌和裁切,得到研究区数据。

(3)投影转换和重采样。将 CCD、IRS 数据重采样至 0.001°,即 100 m 左右分辨率,以提高运算速度,减少噪声的影响^[4]。

(4)云检测。由于云层在短波通道高反射而在热红外波段低发射^[5],因此结合 IRS 热红外波段(10.5~12.5 μm)亮温数据和 CCD 红光波段表观反射率数据,在目视解译的基础上确定了 8 月 7 日、8 月 11 日的云检测阈值。对于无 IRS 数据的 5 月 1 日、5 月 13 日和 8 月 9 日,设定 CCD 红光波段的表观反射率大于 0.2 为阈值。

(5)提取卫星观测的几何数据,利用 CCD 数据中附带的观测角度文件,得到纬度、经度、卫星天顶角、卫星方位角数据,对这些数据进行几何重定位处理,使其与 CCD 数据在空间上相对应。

(6)计算太阳角度信息,获取逐像元的太阳天顶角数据和太阳观测角数据^[6],并根据太阳方位角和卫星方位角计算出两者之间的相对方位角。

针对 MOD09A1 数据,设定 MODIS 蓝光波段地表反射率为 0.08 作为云检测阈值,对其进行云掩膜处理。为避免云的干扰,仅选取两种卫星影像中均通过云检测的晴空像元进行 AOD 的反演。在与地基 AERONET 数据进行比较时,由于 AERONET 未提供 550 nm 通道处的 AOD 数据,利用 Angstrom 公式^[7]进行 AOD 波段插值,Angstrom 公式为:

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

其中: λ 为波长, α 为 Angstrom 指数,与气溶胶粒子平均半径有关^[8], β 为大气浑浊度系数。为了保证地基观测与卫星过境之间大气状况的稳定,选取时保证地基观测数据与卫星过境时间差小于 30 min^[9]。

3 气溶胶光学厚度反演

3.1 基本原理与算法

假设大气水平均一,地表为朗伯体,由卫星接收到的地表的表观反射率可以表示为^[10]:

$$\rho_{\text{TOA}} = \rho_0(\mu_s, \mu_v, \phi) + \frac{T(\mu_s)T(\mu_v)\rho_s(\mu_s)}{[1 - \rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi)]} \quad (2)$$

其中: ρ_{TOA} 为大气顶部反射率, ρ_0 为大气的路径辐射等效反射率, T 为大气透过率, ρ_s 为地表反射率,

S 为大气下界的半球反射率, μ_s 为太阳天顶角余弦, μ_v 为观测天顶角余弦, φ 为相对方位角。 ρ_0 、 $T(\mu_s)T(\mu_v)$ 、 S 3 个参数代表了大气状态, 从中得到大气的相关参数。

从式(2)可以看出, 传感器接收到的反射率信号是大气气溶胶、地表反射率的函数。 AOD 的反演就是要将卫星信号中大气气溶胶的贡献和地表的贡献分离开来^[11]。反演时, 通过辐射传输模型模拟不同大气条件和观测几何条件下 AOD 与 ρ_0 、 $T(\mu_s)T(\mu_v)$ 、 S 这 3 个大气参数之间的对应关系, 建立查找表, 利用地表反射率数据来达到地气解耦的目的, 进而得到 AOD^[12]。

深蓝算法由 Hsu 等^[13-14] 提出。蓝光波段大气

反射率高于地表反射率, 假设同期的地表反射率不变, 构建蓝光波段的地表反射率数据库可以实现 AOD 反演。与传统的暗目标法相比, 该算法克服了需要运用中红外波段确定可见光波段地表反射率的波段限制^[15], 并能够较好地反演亮地表状态下的大气气溶胶分布特征^[16]。该方法能够较好地应用于沙漠等干旱、半干旱地区的 AOD 反演^[17]。

根据深蓝算法的基本原理, 将 MOD09A1 获得的蓝光波段地表反射率值修正到 HJ-1/CCD, 通过 6S 模型建立查找表, 利用观测角度数据对查找表进行线性插值, 结合 HJ-1/CCD 第一波段(蓝光波段)数据, 即可实现 AOD 的反演。本文的技术路线如图 1 所示。

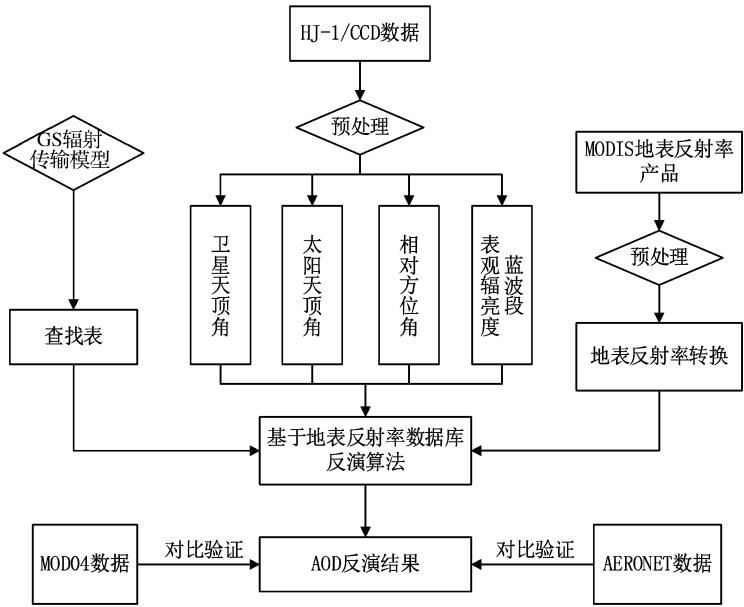


图 1 研究技术路线图

Fig.1 Schematic algorithm for retrieving AOD from HJ-1/CCD

3.2 构建地表反射率数据库

HJ-1/CCD 数据与 MOD09A1 数据在蓝光波段波长范围、波谱响应函数方面存在一定的差异, 直接将 MOD09A1 蓝光波段地表反射率作为反演时真实地表反射率输入可能带来较大误差, 因此需要进行转换。

王中挺等^[1] 基于 ASD 光谱仪观测数据、HJ-1/CCD 和 MODIS 蓝光波段光谱响应函数拟合的实验研究表明: 当反射率小于 0.02 时, HJ-1/CCD 和 MODIS 蓝光波段反射率的差异较小, 此时可以直接使用 MOD09 蓝光波段的数据替代 HJ-1/CCD 蓝光波段地表反射率; 而反射率大于 0.02 时, 两者存在一定的差异, 可以通过线性拟合将 MOD09A1 蓝

光波段数据修正为 HJ-1/CCD 蓝光波段对应的地表反射率:

$$r_{\text{CCD}}=a+b\cdot r_{\text{MODIS}}\tag{3}$$

其中: r_{CCD} 代表 HJ-1/CCD 的地表反射率, r_{MODIS} 代表 MODIS 的地表反射率。本研究采用该方法实现波段修正时, HJ-1A/CCD1 与 HJ-1B/CCD1 数据的拟合系数 a 、 b 和相关系数见表 1^[18]。

表 1 HJ-1/CCD 与 MODIS 地表反射率转换参数			
Table 1 The parameters used for correcting land surface reflectance from MODIS to HJ-1/CCD			
传感器	a	b	相关系数
HJ-1A/CCD1	0.012	0.918	0.941
HJ-1B/CCD1	0.014	0.921	0.922

3.3 构建查找表

基于 6S 辐射传输模型模拟不同观测几何和大气气溶胶参数下卫星接收到的辐射值的变化,构建

查找表。模型参数设置时,大气模式为中纬度夏季,气溶胶模式为大陆型气溶胶,其余参数设置如表 2 所示。

表 2 构建查找表的参数
Table 2 The parameters used in building the Look-Up Table

查找表参数	数目	参数值
波段	1	HJ-1/CCD 第一波段(0.43~0.52 μm)
AOD	8	0.0001,0.25,0.5,0.75,1.0,1.25,1.5,1.95
太阳天顶角	12	0、6、12、18、24、30、36、42、48、54、60、66
卫星天顶角	14	0、3、6、9、12、15、18、21、24、27、30、33、36、39
相对方位角	16	0、12、24、36、48、54、60、66、72、84、96、108、120、132、144、156、168、180

6S 模型可得到大气校正参数(x_a 、 x_b 、 x_c),3 个参数与辐射传输方程(式(2))中的 ρ_0 、 $T(\mu_s)T(\mu_v)$ 和 S 有固定的转换关系。将表 2 中的观测几何参数与 AOD 值组合代入 6S 模型,构建多维查找表。

3.4 反演 AOD

基于处理得到的 HJ-1/CCD 蓝光波段辐亮度数据、地表反射率数据库以及查找表,反演长江三角洲地区的气溶胶光学厚度,步骤如下:

(1)逐像元读入卫星天顶角、太阳天顶角、相对方位角数据,并利用这 3 个值对查找表进行线性插值,得到不同 AOD 值的大气校正参数。

(2)读入该像元在蓝波段地表反射率数据库中的对应值,基于大气校正参数,分别计算不同 AOD 值对应的表观辐射亮度值。

(3)读入 HJ-1/CCD 蓝光波段辐射亮度值,利用该值对步骤(2)得到表观辐射亮度值进行线性插值,即可得到该像元的 AOD 反演结果。

(4)对所有无云像元进行循环计算,得到整幅图像的 AOD。

4 精度验证与结果分析

4.1 反演精度验证

基于 HJ-1/CCD 数据的 AOD 反演结果与 AERONET 地基测量数据的对比验证结果如表 3 所示。

表 3 地基观测数据与 HJ-1/CCD 反演结果的比较
Table 3 Comparisons between retrieved AOD and AERONET AOD

站点	传感器	日期	AERONET AOD	HJ-1/CCD 反演值	绝对 误差
太湖	HJ-1A	2013/05/13	0.778	0.621	0.157
	CCD1	2013/08/09	0.504	0.512	0.008
	HJ-1B	2013/08/07	0.682	0.871	0.189
	CCD1	2013/08/11	1.025	1.389	0.364

研究时间范围内,研究区仅 AERONET 太湖站点公布了 AOD 数据,且 5 月 1 日的遥感数据未能覆盖太湖地区,因此对比数据只有 4 组。可以看出,HJ-1/CCD 数据的反演结果与太湖站点观测数据有一些差距,绝对误差最小为 0.008,最大为 0.364。

将反演得到的 100 m 分辨率的 AOD 数据重采样到 10 km 分辨率,与 MOD04L2 产品进行比较分析。由于二者的成像时间都约为 10:30am,所以认为二者的对比在时间尺度上是有效的。在重采样过程中,当 100×100 空间窗口中有效值占 40% 以上时,统计有效值的平均值,否则认为该窗口重采样后无值。图 2(a)、(b)分别给出了 HJ-1A/CCD、HJ-1B/CCD 反演得到的 10 km 分辨率 AOD 与 MODIS AOD 产品的散点图。

由图 2 可以看出,两个 CCD 数据反演结果与 MODIS AOD 都有显著的线性关系。MODIS AOD 与 HJ-1A/CCD 的相关系数 r 为 0.587($P<0.005$),与 HJ-1B/CCD 的相关系数 r 为 0.723($P<0.005$)。值得注意的是,虽然 A 星、B 星的反演结果都与 MODIS AOD 显著相关,但是两者相关性公式的斜率、截距都不同,A 星的斜率更平缓,纵截距较小,B 星的斜率更陡峭,横截距较大。对比分析两者原始数据和辐射定标后的数据,发现 5 d 的研究数据中 B 星原始数据以及辐射定标后数据的数值普遍较 A 星更加集中,数值覆盖范围跨度小,低值较少,反演结果的数据较集中。由于 HJ-1 卫星传感器辐射探测性能在在轨运行过程中不断发生变化,而目前对 HJ-1 卫星 CCD 相机的辐射定标次数相比于卫星运行周期明显不足^[1,19],HJ-1 卫星的定标效果有待验证,这些因素对基于 HJ-1 卫星反演 AOD 的稳定性存在一定的不利影响,导致反演结果与 MODIS 气溶胶产品之间呈现的关系需要得到进一步验证。

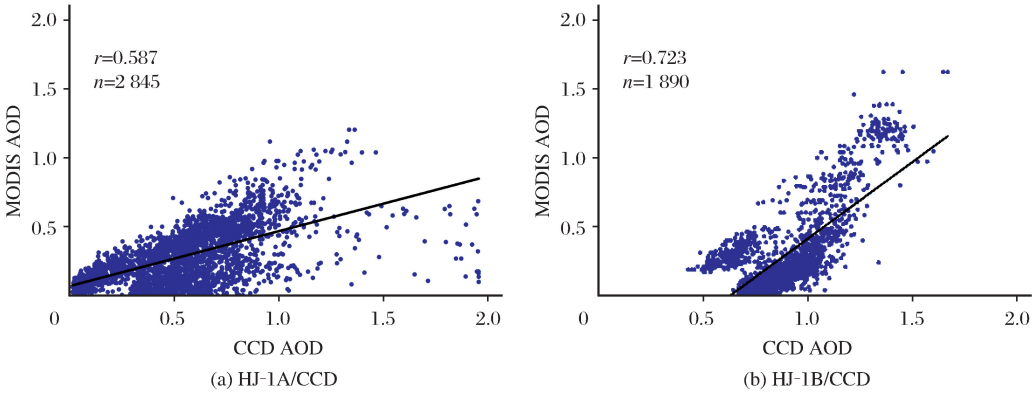


图 2 反演结果与 MODIS AOD 产品的散点图
Fig.2 Comparisons between the retrieved AOD and MODIS AOD

同时,图 2(a)、(b)也反映了基于 HJ-1A/CCD、HJ-1B/CCD 数据反演的 AOD 值普遍高于 MODIS AOD 值,反演结果与 MODIS AOD 产品之间存在一定的差异,这可能由以下两方面原因导致:①MOD09 地表反射率产品本身会有一定的误差,同时,在地表反射率产品重采样的过程中也会导致一定的误差,这都会对基于 HJ-1/CCD 数据 AOD 反演的精度造成一定的影响^[18];②MODIS 在运用暗像元法反演中国东部地区 AOD 时有不确定性^[20],忽略了复杂的地表状况,气溶胶模型也较单一,一定程度地影响了 MODIS 气溶胶产品的精度。

4.2 反演结果分析

在研究数据中,8 月 7 日的遥感数据能够较为完全地覆盖长江三角洲地区,且当天反演结果受云的影响最小,故以 8 月 7 日的反演结果为例,分析长江三角洲地区 AOD 反演结果。8 月 7 日的反演结果如图 3 所示(图中白色区域为无值区域,包括卫星影像未覆盖的地区和受云层覆盖影响而不进行反演的地区)。

从图 3 中可以看出,在研究时间段内,长江三角洲地区的气溶胶分布总体呈现西南部山区 AOD 值较低,而城市区域如上海、苏锡常、南京、杭州等地的 AOD 值显著高于其他地区的分布趋势。分析 AOD 的分布特征,认为与苏锡常等城市制造业发达,城市化程度高导致的大气颗粒物增多有关。可见,AOD 的空间分布图能够一定程度地反映长江三角洲地区的大气污染状况。

5 结 语

本文利用 HJ-1 卫星 CCD 数据通过深蓝算法反演了 2013 年 5 月 1 日、5 月 13 日以及 8 月 7 日、8 月 9 日和 8 月 11 日的长江三角洲地区 AOD,并与

MODIS 气溶胶产品、AERONET 地基观测数据进行比较分析。结果表明,该区域基于 HJ-1/CCD 反演的 AOD 结果较为理想,深蓝算法在长江三角洲地区有较好的适用性,反演结果能够很好地反映该区域的气溶胶污染状况。将反演的 AOD 与 AERONET 站点数据进行对比,反演结果的绝对误差在 0.008~0.364 之间。对比于 10 km 空间分辨率的 MODIS 气溶胶产品,HJ-1A/CCD1 和 HJ-1B/CCD1 与 MODIS AOD 都显著性相关,反演结果具有空间分辨率更高的明显优势。

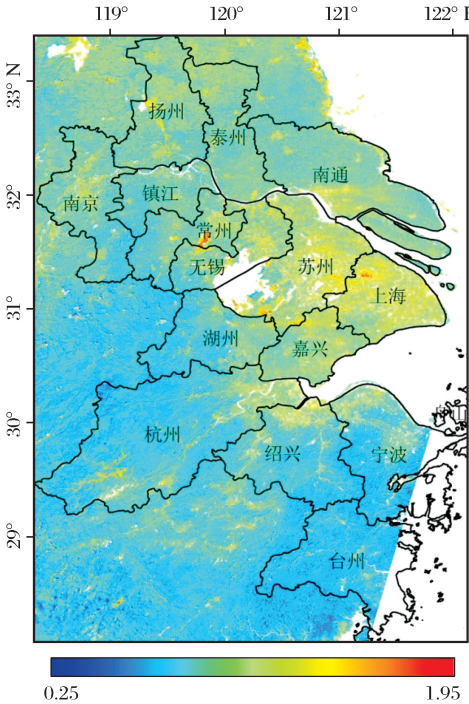


图 3 8 月 7 日长江三角洲地区 AOD 分布
Fig. 3 Distribution of AOD over Yangtze River Deltain Aug.7

需要指出,文中的反演过程存在不足,表现为去云算法有待改进,研究区内的薄云未能完全去除;对

于高亮水体的去除也需要进一步完善。此外,反演结果的精度对MOD09A1地表反射率产品的精度依赖较大,需要进一步分析地表反射率产品的精度;在将500 m空间分辨率的地表反射率数据重采样至100 m空间分辨率时,像元的尺度效应问题也在一定程度上影响了反演精度。同时,研究数据量较小、传感器辐射探测性能不稳定、定标次数相比于HJ-1卫星的运行周期明显不足,这些因素都导致了反演结果与MODIS气溶胶产品之间呈现的关系需要得到进一步验证。这也是将来研究需要解决的难点和重点。

参考文献(References):

- [1] Han Qijin, Fu Qiaoyan, Zhang Xuewen, *et al.* Validation and Analysis of In-flight Radiation Properties of CCD Camera on HJ-1A/B Satellite[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, 9(1): 29-36. [韩启金, 傅俏燕, 张学文, 等. HJ-1A/B星CCD相机在轨辐射性能检测分析[J]. *大气与环境光学学报*, 2014, 9(1): 29-36.]
- [2] Ren Jia, Wang Zhenhui, Sun Lin, *et al.* Retrieval of Aerosol Optical Depth over Jiangsu-Zhejiang-Anhui Areas Using MODIS Data[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(8): 167-171. [任佳, 王振会, 孙林, 等. 基于MODIS数据反演江浙皖地区气溶胶光学厚度[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(8): 167-171.]
- [3] 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.
- [4] Duan Wenju. Study on the Retrieval of Aerosol Optical Depth based on HJ-1 Satellite[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012. [段文举. 基于环境一号卫星的气溶胶光学厚度反演研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2012.]
- [5] Song Xiaoning, Zhao Yingshi. Cloud Detection and Analysis of MODIS Image[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, 8(9): 1079-1083. [宋小宁, 赵英时. MODIS图象的云检测及分析[J]. *中国图象图形学报*, 2003, 8(9): 1079-1083.]
- [6] Wang Bingzhong. Solar Radiance Calculating Lecture: the First Part Calculating the Astronomical Parameters in Solar Energy[J]. *Solar Energy*, 1999, 2: 8-10. [王炳忠. 太阳辐射计算讲座: 第一讲太阳能天文参数的计算[J]. *太阳能*, 1999, 2: 8-10.]
- [7] Angstrom A. The Parameters of Atmospheric Turbidity[J]. *Tellus*, 1964, 16(1): 64-75.
- [8] Li Xia, Hu Xiuqing, Cui Caixia, *et al.* Research on Dust Aerosol Optical Properties in South Tarim Basin and Classification of Different Dusty Weather in China[J]. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(4): 487-495. [李霞, 胡秀清, 崔彩霞, 等. 南疆盆地沙尘气溶胶光学特性及我国沙尘天气强度划分标准的研究[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(4): 488-495.]
- [9] Fang Li, Yu Tao, Gu Xingfa, *et al.* Aerosol Retrieval and Atmospheric Correction of HJ-1 CCD Data over Beijing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(1): 151-164. [方莉, 余涛, 顾行发, 等. 北京地区HJ-1卫星CCD数据的气溶胶反演及在大气校正中的应用[J]. *遥感学报*, 2013, 17(1): 151-164.]
- [10] Tanré D, Herman M, Deschamps P Y, *et al.* Atmospheric Modeling for Space Measurements of Ground Reflectances, Including Bidirectional Properties[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(21): 3587-3594.
- [11] Sun Lin. Remote Sensing of Aerosols over Urban Areas[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences, 2006. [孙林. 城市地区大气气溶胶遥感反演研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2006.]
- [12] Wang Zhongting, Chen Liangfu, Gong Hui, *et al.* Modified DDV Method of Aerosol Optical Depth Inversion over Land Surfaces from CBERS02B[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(6): 1047-1059. [王中挺, 陈良富, 巩慧, 等. CBERS-02B卫星CCD传感器数据反演陆地气溶胶[J]. *遥感学报*, 2009, 13(6): 1047-1059.]
- [13] Hsu C N, Tsay S C, King M D, *et al.* Aerosol Properties over Bright-reflecting Source Regions[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(3): 557-569.
- [14] Hsu C N, Tsay S C, King M D, *et al.* Deep Blue Retrievals of Asian Aerosol Properties During ACE-Asia[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(11): 3180-3195.
- [15] Chen Xiaoqiang. Study on the Retrieval of Aerosol Optical Thickness over Land based on HJ-1 Data[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2001. [陈骁强. 基于环境一号卫星的陆地气溶胶光学厚度反演方法研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2001.]
- [16] Hu Die. Aerosol Optical Depth based on Satellite Observations in China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012. [胡蝶. 中国地区大气气溶胶光学厚度的卫星遥感监测分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.]
- [17] Christina H N, Tsay S C, King M D, *et al.* Aerosol Properties over Bright-reflecting Source Regions[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(3): 557-569.
- [18] Wang Zhongting, Li Qing, Wang Qiao, *et al.* HJ-1 Terrestrial Aerosol Data Retrieval Using Deep Blue Algorithm[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(3): 596-610. [王中挺, 厉青, 王桥, 等. 利用深蓝算法从HJ-1数据反演陆地气溶胶[J]. *遥感学报*, 2012, 16(3): 596-610.]
- [19] Ma Xiaohong. Study on the Cross Calibration and Validation of CCD Cameras on HJ-1 Satellites[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2011. [马晓红. HJ-1星CCD相机交叉定标与真实性检验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2011.]
- [20] Wang Yi, Shi Hanqing, Huang Sixun. The Retrieval of Atmospheric Aerosol Optical Depth in Southeast China[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, 24(1): 13-21. [王毅, 石汉青, 黄思训. 中国东南地区及近海海域气溶胶反演遥感研究[J]. *遥感技术与应用*, 2009, 24(1): 13-21.]

Retrieval of Aerosol Optical Depth Using HJ-1 Data over the Yangtze River Delta

Zhang Lu^{1,2}, Shi Runhe^{1,2}, Li Long^{1,2}

(1.*Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200241, China;*

2.*Joint Laboratory for Environmental Remote Sensing and Data Assimilation, ECNU and CEODE, Shanghai 200241, China*)

Abstract: Aerosol Optical Depth is an important index in atmosphere monitoring. The distribution of AOD has a great practical significance for pollution control. Based on deep blue algorithm, AOD were retrieved from HJ-1/CCD over the Yangtze River Delta and validated by other AOD products. The retrieved results from HJ-1A and HJ-1B have good correlations with MODIS AOD products, and the retrieved values are generally higher. Compared with ground-based measurements from AERONET, the differences were between 0.008 and 0.364. Due to a lack of corresponding AERONET data, rigorous statistical analysis of the differences between them were ignored. Although there were systematic bias between the retrieved AOD and MODIS AOD products, monitoring AOD with HJ-1/CCD using the deep blue algorithm has a good application prospect. The retrieved data can reflect the distribution of AOD over Yangtze River Delta very well, which has a higher spatial resolution than MODIS AOD products.

Key words: Aerosol optical depth; Retrieve; HJ-1 satellite; Yangtze River Delta