

## 综合利用环境星 CCD 和红外数据 反演大气气溶胶光学厚度

盛莉<sup>1,2</sup>, 黄敬峰<sup>1,3</sup>, 郭瑞芳<sup>1,2</sup>, 王秀珍<sup>4\*</sup>

- (1. 浙江大学 农业遥感与信息技术应用研究所, 浙江 杭州 310058;  
2. 浙江大学环境与资源学院 污染环境修复与生态健康教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058;  
3. 浙江大学环境与资源学院 浙江省农业遥感与信息技术重点研究实验室, 浙江 杭州 310058;  
4. 杭州师范大学 遥感与地球科学研究院, 浙江 杭州 311121)

**摘要:**采用遥感技术监测大气气溶胶可实现整个研究区域的全覆盖,对区域生态环境的研究具有十分重要的意义.环境与灾害监测预报小卫星于2008年9月6日成功发射,是我国第一个专门用于环境与灾害监测预报的小卫星星座,较目前常用于反演大气气溶胶光学厚度(AOD)的遥感数据源具有一定时间分辨率和空间分辨率的优势.为了促进环境星在陆地气溶胶监测领域的应用,提出一种综合利用环境星同台获取的 CCD 和红外(1.6  $\mu\text{m}$ )数据反演 AOD 的方法,该方法利用 CCD 近红外波段和 AFRI 植被指数提取非阴影区域浓密植被为暗目标像元、通过 6S 模型模拟来构建查找表、基于暗目标像元红和蓝波段地表反射率具有较好的线性关系这一原理反演 AOD.反演结果误差分析表明该方法比较稳定和可靠,反演结果合理.

**关键词:**环境星;气溶胶光学厚度;AFRI 指数;6S 模型  
**中图分类号:**TP7 **文献标识码:**A

## Aerosol optical depth determined by integration of the HJ CCD and IRS data

SHENG Li<sup>1,2</sup>, HUANG Jing-Feng<sup>1,3</sup>, GUO Rui-Fang<sup>1,2</sup>, WANG Xiu-Zhen<sup>4\*</sup>

- (1. Institute of Agricultural Remote Sensing & Information Application, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;  
2. Key Laboratory of Polluted Environment Remediation and Ecological Health, Ministry of Education, College of Natural Resources and Environmental Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;  
3. Key Laboratory of Agricultural Remote Sensing and Information System, Hangzhou 310058, China;  
4. Institute of Remote Sensing and Earth Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China)

**Abstract:** Monitoring of aerosols in a large-region can be achieved by remote sensing, which is very important to the regional ecology and environment study. Data obtained from environment and disaster monitoring and forecasting satellite, which was launched in September 2008, has the advantages of high temporal resolution and spatial resolution in comparison with the common remote sensing data which are used to estimate AOD like TM, MODIS and so on. In order to promote the application of HJ data in land aerosol area, a method combining the HJ CCD data and IRS (a sensor which is also carried by HJ satellite) 1.6  $\mu\text{m}$  data to estimate AOD was presented.

**Key words:** HJ satellite; aerosol optical depth; AFRI; 6S model  
**PACS:** 42.68. Wt

### 引言

大气气溶胶不仅对地球辐射收支、区域气候以

及水循环等产生重要影响<sup>[1]</sup>,甚至威胁人体健康<sup>[2]</sup>.近年来,环保部门逐步加强了对大气气溶胶的监测(PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>),该监测系统一般通过地面

收稿日期:2012-03-05,修回日期:2012-05-02

Received date: 2012-03-05, revised date: 2012-05-02

基金项目:国家自然科学基金(41171276);杭州师范大学遥感与地球科学研究院开放基金(PDKF2012YG09)

Foundation items: Supported by The National Natural Science Foundation of China (41171276); Remote Sensing and Earth Sciences, Hangzhou Normal University Fund (PDKF2012YG09)

作者简介(Biography): 盛莉(1986-),女,安徽滁州人,博士研究生,主要从事资源环境遥感方向研究. E-mail: llandll070701@163.com.

\* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: wxz05160516@126.com.

站点获取连续动态数据,其监测范围和覆盖区域仍相对有限.采用遥感技术监测大气气溶胶可实现整个研究区域的全覆盖,有效弥补传统监测系统的不足,对区域生态环境的研究具有十分重要的意义.2008年9月6日我国成功发射了环境与灾害监测预报小卫星(以下简称“环境星”),环境星A星搭载了 CCD 相机和高光谱成像仪(HSI),B星搭载了 CCD 相机和红外相机(IRS),CCD 相机地面像元空间分辨率为 30 m,两台 CCD 相机组网后重访周期为 2 天,较目前常用于反演大气气溶胶光学厚度(以下简称 AOD)的遥感数据(如 TM、MODIS 等)具有一定时间分辨率和空间分辨率的优势.2.1  $\mu\text{m}$  的中红外波段可用于估算地表反射率和选择暗目标像元是利用暗目标法反演 AOD 的一个重要特征,而环境星缺少了这一波段,王中挺等<sup>[3,4]</sup>针对 CBERS02B 星以及环境星数据在缺少该波段的情况,通过改进暗目标法实现了 AOD 的反演.在此基础上,本文进一步考虑了如何构建合理的查找表以及如何选取暗目标像元的问题,提出了一种综合利用 CCD 和红外(1.6  $\mu\text{m}$ )数据反演 AOD 的方法,以期促进环境星在陆地气溶胶监测领域的应用.

## 1 数据与方法

### 1.1 AOD 反演原理

在地表朗伯体、大气水平均一的假设条件下,卫星接收到的大气顶层反射率可以表达为<sup>[5]</sup>:

$$\rho_{\text{toa}}(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) = \rho_0(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) + \frac{T(\theta_s)T(\theta_v)\rho_s(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)}{1 - \rho_s(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)S} \quad (1)$$

式中  $\theta_s, \theta_v, \phi_s, \phi_v$  分别为太阳天顶角、观测天顶角、太阳方位角以及观测方位角; $\rho_{\text{toa}}(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)$  为传感器在大气顶层观测到的反射率; $\rho_0(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)$  为大气程辐射率; $\rho_s(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)$  为地表反射率; $S$  为大气底层向下的半球反射率; $T(\theta_s)$  为下行大气透过率; $T(\theta_v)$  为上行大气透过率. $\rho_0, S, T(\theta_s)T(\theta_v)$  这三个参数与 AOD 有关,可通过大气辐射传输模型构建查找表得到,因此地表反射率可以表达为:

$$\rho_s = \frac{\rho_{\text{toa}} - f_1(\tau)}{f_2(\tau) + f_3(\tau)(\rho_{\text{toa}} - f_1(\tau))} \quad (2)$$

式中  $\tau$  为 AOD 值,  $f_1(\tau) = \rho_0, f_2(\tau) = T_s f_3(\tau) = S$ .

Kaufman *et al.* (1997) 提出暗目标像元(浓密植被或黑土)的红光、蓝光波段的反射率和 2.1  $\mu\text{m}$  附近中红外波段的反射率具有很强的线性相关性,鉴

于 2.1  $\mu\text{m}$  附近中红外波段的反射率几乎不受气溶胶的影响,依据该线性关系可求出红、蓝波段的反射率<sup>[6]</sup>,继而利用大气顶层反射率和地表反射率值估算 AOD.然而环境星缺少 2.1  $\mu\text{m}$  这一波段,因此无法通过该方法直接获取地表反射率数据,本文根据 Kaufman 提出的理论,利用浓密植被的红、蓝波段反射率比值系数为 2 这一相关关系,首先采用大气辐射传输模型模拟不同  $\tau$  值的红、蓝波段反射率,得到与  $\tau$  值相对应的红、蓝波段反射率的模拟比值,使得该比值最接近 2 的  $\tau$  值即为 AOD 反演结果.

$$\frac{\rho_{\text{toa}}^{\text{red}} - f_1^{\text{red}}(\tau)}{f_2^{\text{red}}(\tau) + f_3^{\text{red}}(\tau)(\rho_{\text{toa}}^{\text{red}} - f_1^{\text{red}}(\tau))} = k(\tau) \frac{\rho_{\text{toa}}^{\text{blue}} - f_1^{\text{blue}}(\tau)}{f_2^{\text{blue}}(\tau) + f_3^{\text{blue}}(\tau)(\rho_{\text{toa}}^{\text{blue}} - f_1^{\text{blue}}(\tau))} \quad (3)$$

$$e = \min(|k(\tau) - 2|) \quad (4)$$

式中  $k(\tau)$  为模拟比值,  $e$  为模拟误差.

### 1.2 大气顶层反射率计算

大气顶层反射率的计算公式为:

$$\rho_{\text{toa}}^\lambda = \frac{\pi L_\lambda d^2}{\text{ESUN}_\lambda \cos \theta_s} \quad (5)$$

式中  $L_\lambda$  为大气顶层辐亮度,  $d$  为天文单位的日地距离,  $\text{ESUN}_\lambda$  为是大气层外太阳辐照度,  $\theta_s$  为太阳天顶角.

原始遥感影像记录的是表征辐亮度大小的 DN 值,首先需要对原始 DN 值影像进行定标获取大气顶层辐亮度,计算公式如下:

$$L_\lambda = \frac{DN}{A} + L_0 \quad (6)$$

式中  $A$  为绝对定标系数增益,  $L_0$  为绝对定标系数偏移量  $A$  和  $L_0$  可以在影像的头文件中查找得到.

$\text{ESUN}_\lambda$  计算公式如下:

$$\text{ESUN}_\lambda = \frac{\int (RSR_\lambda SI) d\lambda}{\int RSR_\lambda d\lambda} \quad (7)$$

式中  $RSR_\lambda$  为各波段的光谱响应函数,  $SI$  为太阳辐照度(本文采用 ASTM 的 E-490 数据)(图 1).

### 1.3 查找表构建

采用大气辐射传输模型模拟不同  $\tau$  值对应的红、蓝波段的地表反射率及其比值,实质是建立不同的大气条件和观测条件与大气程辐射率、大气底层向下的半球反射率以及大气透过率的对应关系.本文采用大气辐射传输模型是 6S 模型,其输入参数包括几何参数、大气模式、气溶胶模式、气溶胶浓度(550 nm 处 AOD)、地面高度、探测器高度、探测器

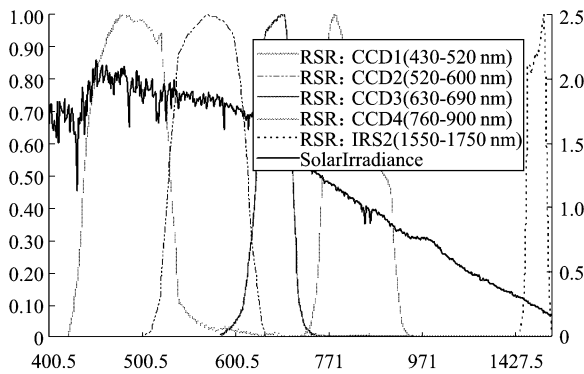


图1 环境星 CCD 和 IRS2 光谱响应函数  
Fig. 1 The RSR of HJ CCD and IRS2

的光谱条件以及地表特性. 大气模式和气溶胶模式根据影像特征选择, 探测器高度为星上传感器 ( $xpp = -1000$ ), 探测器的光谱条件根据光谱响应函数输入, 地表特性为均一化植被类型, 同一景影像上不同的像元的太阳高度角、太阳方位角、观测方位角变化较小, 而观测天顶角以及地面高度差异较为明显, 因此对于不同像元, 查找表中变动的输入参数为气溶胶浓度、观测天顶角以及地面高度. 为了提高运算效率, 需要为变动参数在查找表中设置合适的间隔.

1.4 暗目标像元提取方法

通常设置一个较低的反射率阈值找出中红外波段 (TM7:  $2.1 \mu\text{m}$ ) 的暗像元, 这些被选择的像元不是浓密的植被就是水体或潮湿的土壤, 然后结合植被指数, 提取浓密植被作为用于反演气溶胶浓度的暗目标像元<sup>[7]</sup>. 然而环境星缺少  $2.1 \mu\text{m}$  这个波段, 因此该方法并不完全适用于环境星数据. 植被指数与植被覆盖度有较好的相关关系, 因此植被指数可以作为判断浓密植被的标准, 但是基于遥感影像计算的 NDVI 由于受到大气的影 响, 其值随气溶胶浓度增大而减小<sup>[4]</sup>, 因此很难据此判断植被的实际覆盖状况. Karnieli et al. (2001) 在其研究中提出了 AFRI 植被指数 (公式 8), 该指数基于短波红外波段 ( $1.6 \mu\text{m}$ ), 具有较好的穿透大气和云雾的能力, 且几乎不受气溶胶的影响, 能够较好地反应地表植被的实际覆盖状况<sup>[8]</sup>. 环境星同台搭载了 CCD 相机和红外相机, 其中 IRS2 为短波红外波段 ( $1.6 \mu\text{m}$ ), 可用于计算 AFRI 指数, 因此可以通过设置 AFRI 阈值提取浓密植被作为暗目标像元. 另外需要考 虑的问题是阴影区域 (图 2), 由于没有足够的光能 量, 阴影区域的植被指数和反射率数值往往是不准 确的, 在选取暗目标像元时应予以去除. 遥感影像 阴影的一个根本特征就是信息弱, 近红外波段在产 生阴影的

波段范围内波长最长、散射光最小, 阴影区域与非阴影区域目标辐射能量差值最大, 因此可以通过设置近红外波段阈值去除阴影.

$$AFRI = \frac{\rho_{NIR} - 0.66\rho_{1.6}}{\rho_{NIR} + 0.66\rho_{1.6}} \quad (8)$$

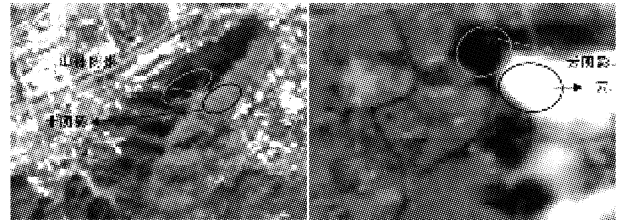


图2 阴影区域和非阴影区域示意图 (假彩色合成 (R4, G3, B2))  
Fig. 2 The schematic diagram of shadow and non-shadow region

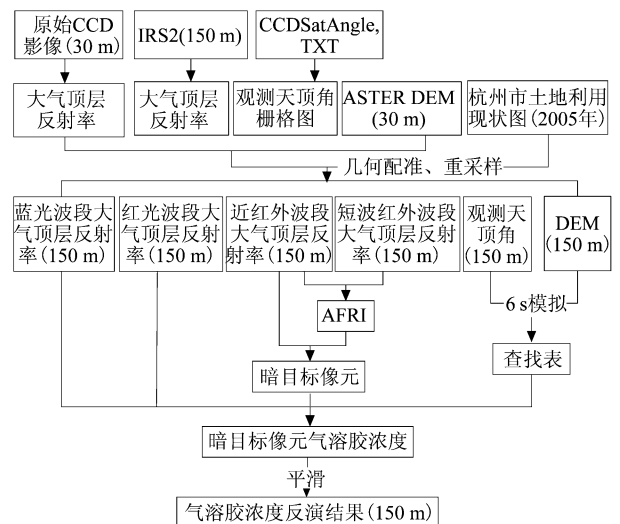


图3 环境星 AOD 反演技术流程图  
Fig. 3 Flow chart of AOD inversion of HJ

1.5 总体流程图

综上所述, 本文综合利用环境星同台搭载的 CCD 和 IRS 数据反演 AOD, 流程图如图 3 所示.

2 结果与分析

2.1 查找表参数间隔设置

采用 6S 模型模拟不同的 AOD 值 ( $550 \text{ nm}$  处) 所对应的大气程辐射率、大气底层向下的半球反射率以及大气透过率随地面高度和观测天顶角的变化情况 (图 4). 总体来看: 随着 AOD 增大, 大气程辐射率、半球反射率增大, 大气透过率减小; 大气程辐射率随高程的增大而减小, 随观测天顶角的增大而增

大;大气透过率随高程的增大而增大,随观测天顶角的增大而减小;半球反射率随高程的增大而减小,随观测天顶角的增大保持不变. 大气程辐射率、半球反射率、大气透过率是计算经大气校正后的地表反射率的参数(如公式 3 所示),对于大气顶层反射率为 0.1 的像元而言,每 0.002 的大气程辐射率将引起校正后地表反射率约 0.002 的误差,比例为 2%;每 0.02 的大气透过率将引起约 2% 的地表反射率误差;每 0.10 的半球反射率将引起约 2% 的地表反射率误差. 本文拟将地面高度和观测天顶角变化引起的误差控制在 2% 以内,据此进行合理的查找表间隔划分. 约每 300 m 的高程间隔将引起 0.002 的大气程辐射率变动,每 1200 m 的高程间隔将引起 0.02 的大气透过率变动,1 000 m 以内的高程变动不足以引起 0.10 的半球反射率变动,因此查找表中高程的间隔设置为 300 m. 当观测天顶角小于 25 时大气程辐射率变化幅度较小,大约每 5 ~ 10 度的观测天顶角变化可引起 0.002 的大气程辐射率变动,当观测天顶角大于 25 时大气程辐射率的变化速度突然变快,尤其是随着 AOD 的增大变化幅度越大,当 AOD 为 1.5 时,每 0.5 ~ 3 度的观测天顶角的变化可引起 0.002 的大气程辐射率变动,每大约 10 度的观测天顶角的变化可引起 0.02 的大气透过率变动,半球反射率随着观测天顶角的变动保持不变,因此经综合考虑将查找表中观测天顶角小于 25 度时间间隔设置为 5 度,大于 25 度时间间隔设置为 0.5 度.

**2.2 提取暗目标像元阈值设置**

以 2011 年 5 月 18 日 Path450/Row80 为例,通过目视解译在遥感影像上随机选取阴影区浓密植被和非阴影区浓密植被像元各数百个样点. AFRI 指数和 NDVI 指数相似,能够在一定程度上反应植被的生长状况,植被越茂盛 AFRI 值越高,根据样点统计,非阴影区域浓密植被 AFRI 最小值为 0.43,此处阈值设为 0.43,但是在该阈值范围内仍然可能包含了大量阴影区域浓密植被,需要予以去除. 统计表明阴影和非阴影区域样点在可见光波段反射率差异较小,在近红外波段、NDVI 以及 AFRI 指数差异显著(图 5\_a),在 NDVI 和 AFRI 处有一定的混合现象(图 6\_b),在近红外波段反射率有明显的分隔阈值(如图 5\_a, Line1 所示),因此采用近红外波段阈值法可有效地区分阴影区域与非阴影区域浓密植被,此处阈值设为 0.3. 综合起来,本文提取暗目标像元(非阴影区浓密植被)阈值为 CCD4 ge 0.3 and AFRI ge 0.43.

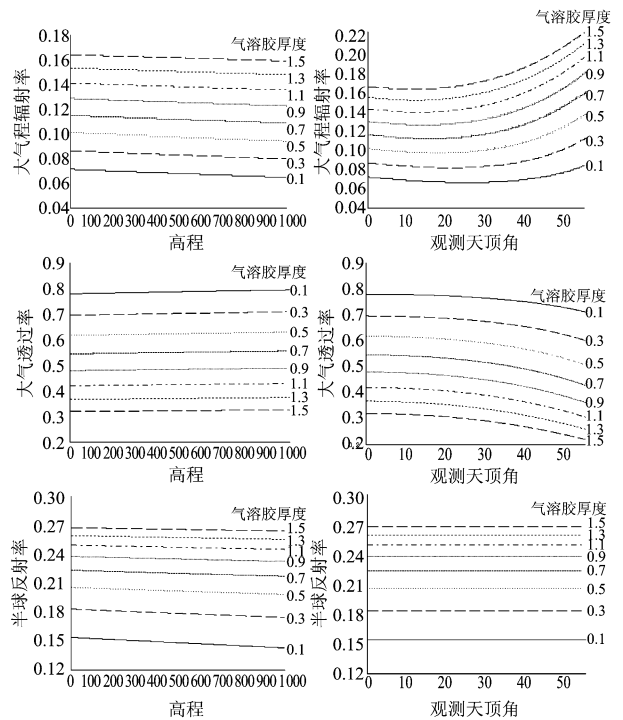


图 4 6S 模拟参数随高程和观测天顶角的变化图  
Fig 4 The diagrams of changing 6S simulation

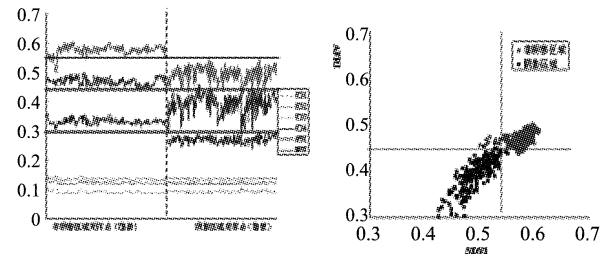


图 5 阴影区域和非阴影区域浓密植被比较  
Fig.5 The comparison of dense vegetation in shadow and non-shadow

**2.3 精度评价以及反演结果分析**

本文对反演结果的精度评价从两方面开展:一、模拟误差;二、相对误差. 模拟误差是经模拟后的地表反射率线性比例与实际地表反射率比例之间的差值的绝对值,模拟误差越小表明模拟方法精度越高,反之在一定程度上反应像元可能是错误的暗目标像元或者模拟精度较差,反演结果误差越大. 相对误差是指遥感反演的 AOD 值与实际测量值之间的误差, Kaufman *et al.* (1997) 提出不确定性因素如地表反射率、气溶胶模型等的存在,将导致遥感反演气溶胶浓度产品可能存在的期望误差<sup>[9]</sup>,气溶胶产品相对误差控制在期望误差范围以内即可满足实际应用的需求. 本文尝试反演全部或部分覆盖杭州地区的

不同时间段的两景影像(2011年5月18日 Path450/Row80 以及 2011年7月28日 Path448/Row80),以及全部或部分覆盖北京地区的不同时间段的两景影像(2011年7月9日 Path456/Row68, 2011年9月22日 Path457/Row68). 比对数据北京(39.977N/116.381E)、香河(39.754N/116.962E)、太湖(31.421N/120.215E)3个 Aeronet 站点数据由 <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> 提供,临安站点数据(30.324N/119.440E)由国家科技基础条件平台建设项目地球系统科学数据共享网([www.geodata.cn](http://www.geodata.cn))提供,然而经遥感反演的气溶胶产品与 Aeronet 站点数据并不十分吻合,二者之间存在一定的线性相关关系,如果在进行误差分析时直接与 Aeronet 站点数据进行比较来评价其精度,将引入一定的不确定性<sup>[10]</sup>,因此本文首先采用 MODIS 气溶胶产品/Aeronet 的 550nm 处 AOD 的关系方程,将 Aeronet 站点数据进行变换,然后与本文反演结果进行比较,得到相对误差。

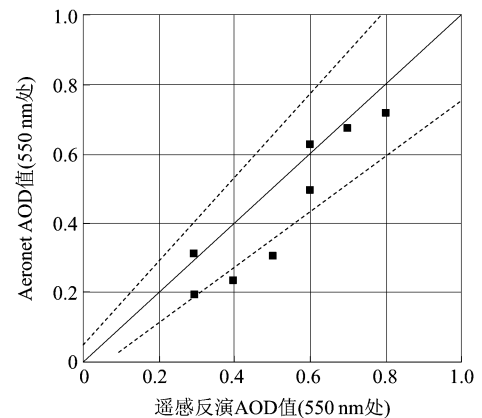
由统计可得,四景影像 92% 以上的暗目标像元模拟误差小于 0.1,表明模拟方法较为稳定和可靠. AOD 反演结果与 Aeronet 站点对比结果如表 1 所示,反演结果较 Aeronet 站点值偏高,相对误差的绝对值最大为 0.197,最小为 0.006,如图 6 所示,6 个样点的相对误差在期望误差范围以内,另外 2 个样点的相对误差接近期望误差,可满足实际应用的需求。

表 1 AOD 反演结果和 Aeronet 站点值比较

Tab. 1 The comparison of Aeronet value and corresponding inversion result

日期	站点	Aeronet 550nm 处 AOD	Aeronet 转换后 550nm 处 AOD	550nm 处 AOD 反演结果	相对误差
2011.05.18	临安	0.685	0.717	0.800	0.084
2011.05.18	太湖	0.634	0.671	0.700	0.029
2011.07.28	临安	0.435	0.492	0.600	0.109
2011.07.28	太湖	0.580	0.622	0.600	-0.022
2011.07.09	北京	0.226	0.303	0.500	0.197
2011.07.09	香河	0.229	0.306	0.300	-0.006
2011.09.22	北京	0.150	0.235	0.400	0.165
2011.09.22	香河	0.103	0.193	0.300	0.107

以 2011 年 5 月 18 日 Path450/Row80 为例,图 7\_a 为杭州行政区域范围内 550nm 处 AOD 反演结果,白色区域为非暗目标像元区域,AOD 统计结果(表 2)显示 AOD 值集中在 0.7、0.8,部分区域为 0.5、0.6 以及 0.9、1.0,过高和过低反演结果可能是特殊的环境造成,也不排除原始影像奇异值的影响。



图中虚线为期望误差  $\Delta\tau = \pm 0.05 \pm 0.2\tau$   
图 6 遥感反演 AOD 值和 Aeronet AOD 值对比图  
Fig. 6 Comparison of AOD derived from HJ with those from Aeronet data

从 AOD 的空间分布上我们可以看出,AOD 较高的地方多集中在城市及其周围区域,远离人类活动的区域 AOD 则相对较低(图 7\_b),这与人类活动对大气气溶胶浓度的影响相吻合,也从一定程度上反映了反演方法和反演结果的可靠性。

表 2 AOD 统计结果(2011 年 5 月 18 日杭州区域)

Tab 2 The statistics of AOD inversion result on 5/8/2011 in the region of Hangzhou

AOD	比例(%)	AOD	比例(%)	AOD	比例(%)
0.10	0.007	0.60	6.237	0.11	0.011
0.20	0.006	0.70	43.728	0.12	0.002
0.30	0.010	0.80	45.69	0.13	0.000
0.40	0.020	0.90	4.010	0.14	0.000
0.50	0.140	1.00	0.130	0.15	0.010

### 3 结论与讨论

本文针对环境星缺少暗目标法反演 AOD 的重要波段—— $2.1 \mu\text{m}$ ,提出了一种综合利用环境星同台搭载的 CCD 和红外( $1.6 \mu\text{m}$ )数据反演 AOD 的方法.利用 CCD 近红外波段和 AFRI 植被指数提取非阴影区域浓密植被为暗目标像元,通过 6S 模型模拟来构建查找表,基于暗目标像元红和蓝波段地表反射率具有较好的线性关系这一原理反演 AOD. 本文主要结论有:

(1) 为了提高运算速率,为查找表中变换的参数设置合理的间隔:高程间隔 300m,观测天顶角小于 25 度间隔为 5 度,大于 25 度间隔为 0.5 度。

(2) 用 AFRI 指数替代 NDVI 指数选取暗目标像元可有效弥补 NDVI 易受气溶胶浓度干扰带来的

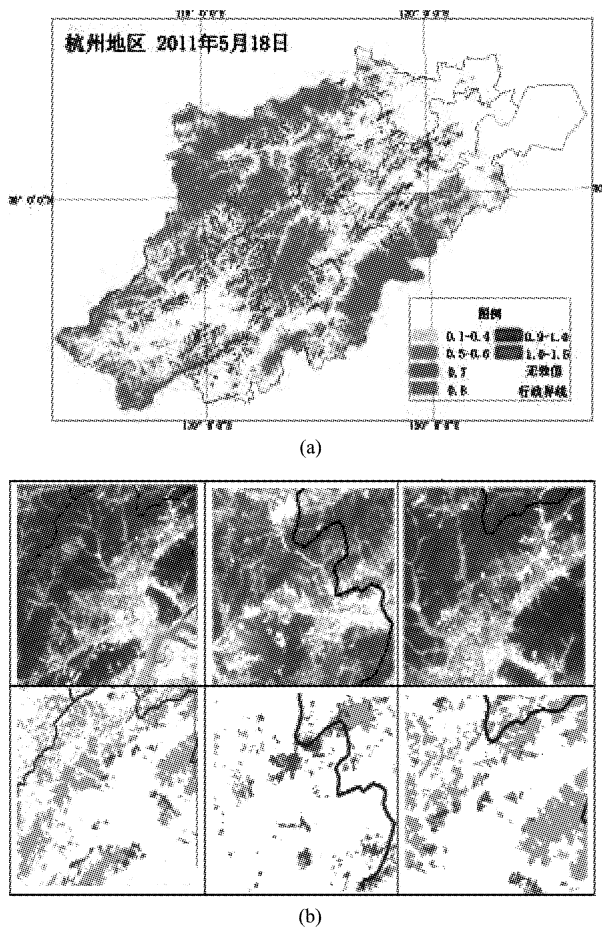


图7 AOD反演结果(2011年5月18日杭州区域)  
Fig.7 The AOD inversion result on 5/8/2011 in the region of Hangzhou

影响,并且采用近红外波段阈值法去除阴影对提取暗目标像元的影响。

(3)对4景影像进行AOD反演,误差分析表明,模拟方法较为稳定和可靠,反演结果较Aeronet站点值偏高,相对误差在期望误差范围内,满足实际应用的需求。

本文提出的综合利用环境星CCD和红外数据反演大气气溶胶光学厚度方法是基于浓密的植被地表类型,因此并不适用于中高纬度地区冬季及沙漠地区。本文的研究仍然存在一定的不足,主要有:

(1)暗目标像元红、蓝波段地表反射率比例的设置是基于前人的研究所得,而环境星暗目标像元这一比例需要地基观测数据进行进一步的确定。

(2)气溶胶光学厚度随波长而变化,变化系数遵从光学厚度的Anstrom关系,然而在6S模型中气溶胶光学厚度是通过输入550nm光学厚度来自动

计算其他相应波长的光学厚度,这个变化系数是固定的。在未来的研究中,更加精准的大气辐射传输模型的出现,能够提高反演的精度。

(3)反演结果的验证数据有限,有待计算更多地区不同季节的影像对这一方法进行进一步的验证。

## 致谢

本文感谢中国资源环境应用中心提供环境星数据,感谢NASA LAADS以及地球系统科学数据共享网提供AERONET站点气溶胶资料。

## REFERENCES

- [1] Kaufman Y J, Tanre D, Boucher O. A Satellite view of aerosols in the climate system[J]. *Nature*, 2002, 419, 215 - 223.
- [2] Kennedy I M. The health effects of combustion-generated aerosols[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2), 2757 - 2770.
- [3] Wang Zhong-ting, Chen Liang-fu, Gong Hui, et al. Modified DDV method of aerosol optical depth inversion over land surfaces from CBERS02B[J]. *Journal of Remote Sensing* (王中挺,陈良富,巩慧,等. CBERS02B卫星CCD传感器数据反演陆地气溶胶. *遥感学报*) 2009a, 13(6): 1053 - 1059.
- [4] Wang Zhong-ting, Li Qing, Tao Jing-hua, et al. Monitoring of aerosol optical depth over land surface using CCD camera on HJ-1 satellite[J]. *China Environmental Science* (王中挺,厉青,陶金花,等. 环境一号卫星CCD相机应用于陆地气溶胶的监测. *中国环境科学*), 2009b, 29(9): 902 - 907.
- [5] Vermote E, Tanre D, Deuze J L, et al. 6S User Guide Version3[R], College Park: Department of Geography, University of Maryland, 2006.
- [6] Kaufman Y J, Wald A E, Remer L A. The MODIS 2.1  $\mu\text{m}$  Channel-Correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997a, 35(5): 1286 - 1297.
- [7] Liang S, Fallash-Adl H, Kalluri S, et al. An operational atmospheric correction algorithm for landsat Thematic Mapper imagery over the land[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 17173 - 17186.
- [8] Karnieli A, Kaufman Y J, Remer L, et al. AFRI-aerosol free vegetation index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 77(1): 10 - 21.
- [9] Kaufman Y J, Tanre 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*, 1997b, 102(14): 17051 - 17067.
- [10] 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*, 2007, 112, D13211.