

文章编号: 1007 4619(2006) 05 0770-07

# 环境与减灾小卫星高光谱成像仪 陆地气溶胶光学厚度反演

孙 林<sup>1,2</sup>, 柳钦火<sup>1</sup>, 陈良富<sup>1,3,4</sup>, 刘 强<sup>1</sup>

(1 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2 中国科学院 研究生院, 北京 100049  
3. 国家航天局 航天遥感论证中心, 北京 100101; 4. 江西师范大学 地理学院, 江西 南昌 330027)

**摘 要:** 环境与减灾小卫星高光谱成像仪是搭载在中国将于 2007 年发射的环境与减灾小卫星 A 星(HJ-1A)上的传感器之一, 在 0.45—0.95 $\mu\text{m}$  波段范围内设置了约 135 个通道, 空间分辨率为 100m, 回访周期约为 96h。本文根据传感器的参数设置, 使用 HYPERDN 数据仿真模拟了 HJ-1A 高光谱数据, 探讨了它在陆地气溶胶光学厚度探测中的应用。文中使用浓密植被算法反演了模拟数据的气溶胶光学厚度。结果表明, HJ-1A 高光谱成像仪能够很好地应用于陆地气溶胶光学厚度的反演。

**关键词:** 环境与减灾小卫星 A 星; 高光谱成像仪; 气溶胶光学厚度

**中图分类号:** TP701      **文献标识码:** A

## The Application of HJ-1 Hyperspectral Imaging Radiometer to Retrieve Aerosol Optical Thickness over Land

SUN Lin<sup>1,2</sup>, LIU Qin-huo<sup>1</sup>, CHEN Liang-fu<sup>1,3,4</sup>, LIU Qiang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China  
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
3. The Center for National Spaceborne Demonstration, Beijing 100101, China  
4. Geography and Environment College, Jiangxi Normal University, Jiangxi Nanchang 330027, China)

**Abstract** HJ-1 Hyperspectral image radiometer is on the HJ-1A satellite to be launched in 2007. It will provide images in about 135 spectral bands between 0.45 and 0.95 $\mu\text{m}$ , with spatial resolution of 100 meters. HJ-1 Hyperspectral image radiometer will give a return visit every 96 hours. Aerosol optical thickness retrieval is discussed in this paper. The aerosol optical thickness retrieval is always conducted over the dense dark vegetation, because green vegetation are dark in the red (around 0.66 $\mu\text{m}$ ) and blue (around 0.46 $\mu\text{m}$ ) spectral region. The radiance measured by the sensor increases with the aerosol optical depth increases, the aerosol information can be easily separated from the land surface. We simulated the HJ-1 high-spectral data using HYPERDN data, then selected the algorithm of Dense Dark Vegetation to retrieve aerosol optical thickness from the simulated data. For lacking of short wave infrared and mid infrared bands, the dense dark vegetation pixels detected by NDVI (normalized difference vegetation index), the reflectance of the dense dark vegetation pixels is 0.035 in blue band and 0.055 in red band. The results show that the HJ-1 high-spectral data can be

收稿日期: 2006-04-10 修订日期: 2006-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 40371087), 中国科学院知识创新工程重点方向性项目 (编号: KZCX3-SW-338-2, KZCX3-SW-334), 中国科学院百人计划项目 (编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目 (编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目 (编号: KJSX0401)。

作者简介: 孙 林 (1975—), 男, 博士。主要从事大气探测方面的研究。E-mail: sunlin@lab.isa.ac.cn

well applied in aerosol optical thickness retrieval

**Key words** HJ 1A satellite; hyperspectral image radiometer; aerosol optical thickness

## 1 引言

陆地气溶胶主要来源于工业生产、生物燃烧、土地利用等人为源及沙尘、海洋粒子等自然源。研究表明,气溶胶对全球及区域的气候变化有着重要的影响<sup>[1-5]</sup>。它通过两种机制对气候变化产生影响,一是气溶胶通过散射和吸收太阳辐射及地面辐射直接影响着地-气系统的辐射收支平衡;二是大量的气溶胶粒子作为云凝结核,可以使单位体积的云粒子数量增加、云滴半径减小,增加云的短波反射率,同时增加云的生命时间,这种变化影响地-气系统的短波辐射和长波辐射。当前气溶胶的监测主要以地面监测为主,主要使用太阳分光光度计<sup>[6]</sup>、激光雷达<sup>[7]</sup>等仪器对天观测,但由于气溶胶的分布具有强烈的空间变化性和时间变化性<sup>[8]</sup>,因此,尽管地面监测可以得到较为准确的气溶胶信息,但仅靠少数孤立的站点来观测气溶胶,很难详细刻画其空间分布状态。卫星遥感可以实现对气溶胶进行大面积、快速、动态监测,因此利用卫星遥感监测全球及区域气溶胶的性质、分布、变化等变得日益重要。

国际上已经有多种传感器用于大气气溶胶的探测,如,从1978年就开始例行探测海洋气溶胶的5波段的AVHRR传感器<sup>[9]</sup>;装载在1978年发射的Nimbus 7卫星上,使用紫外波段探测气溶胶的TOMS传感器<sup>[10]</sup>;1996年发射的ADEOS卫星上装载的感光偏振的POLDER传感器<sup>[11]</sup>;NASA于1999年和2002年相继发射的Terra星和Aqua星上携带的中等空间分辨率(250—1000m),36个波段的MODIS传感器等<sup>[12,13]</sup>,这些传感器在气溶胶性质的监测中,各有优势,发挥着重要的作用。HJ 1A高光谱成像仪是搭载在中国将于2006年年底发射的HJ 1A卫星上的传感器。它的空间分辨率为100m,在0.45—0.95 $\mu\text{m}$ 波段范围内以86.7 $\text{cm}^{-1}$ (在0.45 $\mu\text{m}$ 处约1.8nm,在0.95 $\mu\text{m}$ 处约7.9nm)的光谱分辨率连续设置约135个通道,设计信噪比为50—100,回访周期为96h。

当前陆地气溶胶光学厚度反演比较常用的方法是浓密植被算法。浓密植被算法是Kaufman和Sendra<sup>[14]</sup>最初提出的,用于在可见光到近红外波段4通道设置的MSS传感器,Kaufman和Walsh<sup>[15]</sup>等在

此基础上改进以后用于具有36个通道的MODIS传感器。本文将主要探讨浓密植被算法在HJ 1A高光谱成像仪陆地气溶胶光学厚度反演中的应用。

## 2 气溶胶遥感探测原理

卫星传感器接收到的辐射值 $L$ ,可以由下式表示:

$$L(\tau_a, \mu_s, \mu_v, \phi) = L_0(\tau_a, \mu_s, \mu_v, \phi) + F_d(\tau_a, \mu_s) \times T(\tau_a, \mu_v) \rho [1 - s(\tau_a) \rho] \quad (1)$$

式中, $\tau_a$ 为大气的光学厚度,包括气体分子散射的光学厚度和气溶胶粒子散射的光学厚度,其中不同波段气体分子散射的光学厚度值可以根据经验公式直接获得<sup>[16]</sup>; $\mu_s$ 为太阳天顶角的余弦值; $\mu_v$ 为传感器天顶角的余弦值; $\phi$ 为相对方位角;方程右边第一项 $L_0$ 是整层大气反射的太阳辐射,主要来自于大气中分子和气溶胶的散射贡献;第二项为地表和大气的共同贡献项; $s$ 为大气半球反照率, $\rho$ 为地表反射率; $T(\tau_a, \mu_v)$ 是传感器和目标物之间的透过率; $F_d(\tau_a, \mu_s) = \mu_s F_0 T(\tau_a, \mu_s)$ 是太阳下行总辐射; $F_0$ 是大气层顶的太阳辐照度; $T(\tau_a, \mu_s)$ 为大气透过率。因此,传感器接收到的辐射,既是气溶胶光学厚度的函数,又是下垫面地表反射率的函数。当地表反射率很小时,卫星观测的辐射值主要是大气的贡献,气溶胶的作用是使卫星接收的辐射值增大,浓密植被算法就是利用浓密植被地区红蓝波段的辐射值和气溶胶光学厚度的这种关系反演气溶胶光学厚度的。浓密植被算法反演气溶胶光学厚度首先要确定地表的反射率,地表反射率确定以后,就可以根据辐射传输方程计算出气溶胶的光学厚度。实际的反演中是用辐射传输模型,如6S、MODTRAN等,计算不同的大气参数、几何参数和气溶胶光学厚度条件下,地表反射率和卫星测得的辐射值(反射率)之间的对应关系,据此建立查找表,通过查找表获取气溶胶光学厚度。

## 3 HJ 1A 高光谱成像仪数据仿真模拟

HJ 1A卫星计划于2006年年底发射,目前没有高光谱成像仪数据,为了研究HJ 1A高光谱数据的气溶胶光学厚度反演方法,本文使用HYPERDN数据模拟HJ 1A高光谱数据。HYPERDN传感器有242个

通道,通道设置覆盖了 0.4—2.5 $\mu\text{m}$  波谱区,包含了 HJ 1A 高光谱成像仪的波段范围。HYPERDN 传感器的光谱分辨率约为 10nm,空间分辨率为 30m。选用的 HYPERDN 数据是 2004 年 8 月 31 日获取的北京地区的图像。在卫星过境的同时进行了典型地物光谱测量、气溶胶光学厚度测量等地面同步实验。图 1 为几种典型地物在环境与减灾小卫星高光谱传感器通道设置的波段范围内的反射率曲线图,图 2 为太阳分光光度计测量的 HYPERDN 过境时间附近波长分别为 1.02 0.87 0.67 和 0.44 $\mu\text{m}$  的气溶胶光学厚度。

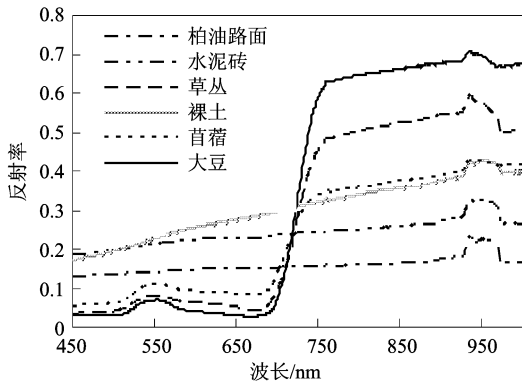


图 1 典型地物反射率曲线图

Fig 1 The reflectance graphs of six surface objects

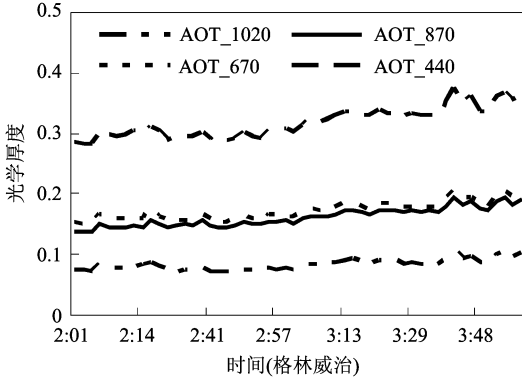


图 2 多波段太阳分光光度计测量的气溶胶光学厚度  
Fig 2 AOT measured by the multi spectral sunphotometer

### 3 1 HYPERION 数据的大气纠正

为模拟 HJ 1A 高光谱数据,首先对 HYPERDN 的 0.45—0.95 $\mu\text{m}$  之间的通道 (对应 HYPERDN 10 到 82 通道) 数据做大气纠正,获取各像元在各通道的地表反射率。由 (1) 式,可以解出地表反射率  $\rho$

$$\rho = \frac{L(\tau_a, \mu_s, \mu_v, \phi) - L_0(\tau_a, \mu_s, \mu_v, \phi)}{F_d(\tau_a, \mu_s)T(\tau_a, \mu_v) + s(L(\tau_a, \mu_s, \mu_v, \phi) - L_0(\tau_a, \mu_s, \mu_v, \phi))} \quad (2)$$

使用大气辐射传输模型 MODTRAN 4<sup>[17]</sup> 对 HYPERION 数据做大气纠正,在 MODTRAN 4 中根据 HYPERDN 数据获取时的几何参数及大气参数 (气溶胶参数根据图 2 中太阳分光光度计同步测量的气溶胶光学厚度确定,其他大气参数选用 MODTRAN 4 中的中纬度夏季大气参数),通过改变地表反射率和传感器的位置进行 5 次模拟,拟合出公式 (2) 中大气纠正所需的参数,据此计算出各像元的地表反射率。这样获取的地表反射率是对应于 HYPERDN 传感器各通道的离散的地表反射率,将离散的地表反射率通过线性插值,获取从 0.45—0.95 $\mu\text{m}$  的连续的反射率值。图 3 是从大气校正后的 HYPERDN 数据中提取的某一植被像元的地表反射率和对应该点 ASD 光谱仪同步测量的地面反射率的比较,可以看出这两种地表反射率具有很好的一致性,尤其在可见光波段,通过这两种方法获取的地表反射率非常接近。

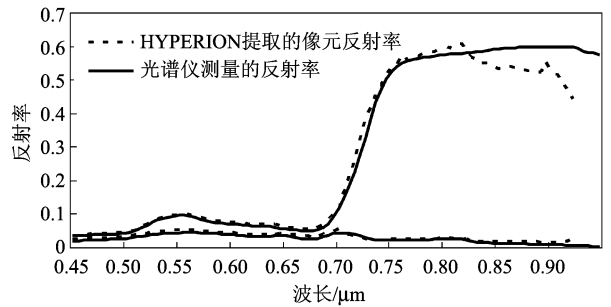


图 3 HYPERDN 数据提取和光谱仪测量的植被和水的反射率曲线

Fig 3 Reflectance of water and vegetation measured by spectrometer and HYPERION data

### 3 2 HJ 1A 高光谱成像仪数据仿真模拟

为模拟 HJ 1A 高光谱成像仪数据,首先用获取的 HYPERDN 图像各像元的连续的反射率曲线,计算出对应的 HJ 1A 高光谱成像仪各通道的地表反射率  $R$ ,

$$R = \frac{\sum_{\lambda=\lambda_{min}^j}^{\lambda=\lambda_{max}^j} f(\lambda)r(\lambda)}{\sum_{\lambda=\lambda_{min}^j}^{\lambda=\lambda_{max}^j} f(\lambda)} \quad (3)$$

式中,  $\lambda$  为波长,  $\lambda_{min}$  为通道的起始波长,  $\lambda_{max}$  为通道终止波长,  $r(\lambda)$  为对应  $\lambda_i$  波长的地表反射率,  $f(\lambda)$  为波谱响应函数,这里是利用高斯函数模拟的高光谱成像仪 135 个通道的光谱响应函数,

$$f(\lambda) = \frac{s}{\sqrt{\pi}} e^{-s^2(\lambda-\lambda_0)^2}; \quad s = \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\Delta} \quad (4)$$

式中,  $\lambda_0$  为中心波长,  $\Delta$  为高光谱传感器的光谱分辨率。这样获得的是空间分辨率为 30m 的地表反射率数据, 对获取的数据进行空间尺度转换, 将其转为 100m 分辨率的地表反射率, 作为 HJ 1A 高光谱数据的地表反射率。

获取 HJ 1A 高光谱成像仪各像元的地表反射率以后, 通过辐射传输模型 MODTRAN 4 模拟 HJ 1A 高光谱成像仪各通道在不同的气溶胶光学厚度条件下的辐射亮度值, 这里模拟了气溶胶光学厚度为 0.2 和 0.6 时的 HJ 1A 高光谱成像仪数据, 用于气溶胶光学厚度反演方法研究。

### 4 HJ 1A 高光谱数据的气溶胶光学厚度反演

当前陆地气溶胶光学厚度反演的主要方法是浓密植被法, 浓密植被算法已经成功应用于 AVHRR<sup>[18]</sup>, TM<sup>[19]</sup> 等多种数据的气溶胶光学厚度反演, MODIS 数据用这种算法进行全球气溶胶的遥感监测<sup>[15]</sup>, 由于对浓密植被像元的依赖性, 该算法在高分辨率图像的气溶胶光学厚度反演中具有较强的应用效果, 浓密植被算法具有较高的稳定性和精度。

#### 4.1 地表反射率的确定

浓密植被算法气溶胶光学厚度反演的关键是地表反射率的精确确定, 浓密植被算法常用的地表反射率的确定方法主要有 4 个<sup>[9]</sup>: (1) 基于归一化差分植被指数 (NDVI) 的方法, 这个方法是使用红波段和近红外波段的差和比值的植被指数, 提取图像中

的最浓密的植被像元, 对提取的浓密植被像元直接确定地表反射率; (2) 基于 2.1 $\mu$ m 通道反射率的方法, Kaufman 等利用经过对大气校正的卫星资料 and 地面、飞机探空的光谱资料的分析, 得出红、蓝通道与 2.1 $\mu$ m 通道地表反射率之间存在着一定的线性关系, 而 2.1 $\mu$ m 通道基本不受气溶胶的影响, 据此确定红、蓝波段的地表反射率; (3) 基于 3.75 $\mu$ m 通道辐射值的方法, 依据是 3.75 $\mu$ m 通道对茂密的森林地区的敏感特性; (4) 综合利用 2.1 $\mu$ m 通道和 3.75 $\mu$ m 通道来确定地表反射率。以上各种方法确定地表反射率各有优势和不足。

HJ 1A 高光谱成像仪的波段范围在 0.45—0.95 $\mu$ m 之间, 由于没有中红外通道, 通过对图 1 中同步测量的植被的地表反射率曲线的分析, 将蓝光波段 (0.46 $\mu$ m) 的地表反射率定为 0.035 红光波段的地表反射率定为 0.055 浓密植被像元使用 NDVI 指数来确定, NDVI 的计算如 (5) 式所示<sup>[20]</sup>,

$$NDVI = (L_{nir} - L_{red}) / (L_{nir} + L_{red}) \quad (5)$$

式中,  $L_{nir}$  和  $L_{red}$  分别为近红外和红光波段的辐射值 (反射率)。图 4 是用 HYPERDN 数据模拟的 HJ 1A 地表反射率图像中, NDVI 值大于 0.6 和 0.7 时红光通道 (中心波长为 0.66 $\mu$ m) 和蓝光通道 (中心波长为 0.46 $\mu$ m) 的地表反射率直方图 (这里的 NDVI 是通过模拟的地表反射率数据计算的, 没有大气影响), (a) 图为蓝光通道地表反射率直方图分布, (b) 图为红光通道地表反射率直方图分布。从图 4 中可以看出, 当 NDVI > 0.7 时, 蓝光通道的地表反射率集中分布在 0.025—0.045 之间, 红光通道的地表反射率集中分布在 0.04—0.07 之间。King<sup>[6]</sup> 等认为, 为了进行陆地气溶胶光学厚度的反演, 要求地表反射率的精度在 0.005—0.01 之间, 这个精度带来的光学厚度误差小于 0.10 本文将蓝光通道的地表

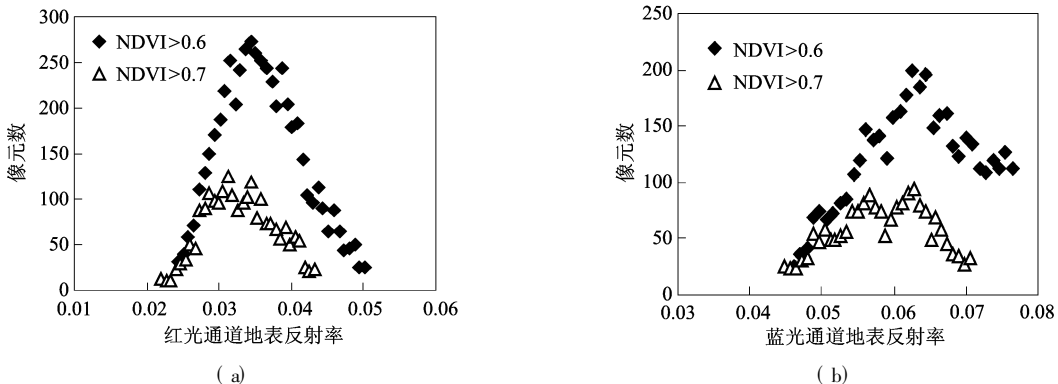


图 4 不同的 NDVI 值对应的红蓝波段的地表反射率直方图

Fig 4 Surface reflectance histogram in different NDVI

反射率确定为 0.035 红光通道的地表反射率确定为 0.055 蓝光通道所有像元的地表反射率误差在 0.01 以内, 红光通道大部分像元的地表反射率误差小于 0.01。

### 4.2 气溶胶光学厚度反演结果

为分析 HJ 1A 高光谱成像仪气溶胶光学厚度反演的精度, 分别使用模拟的气溶胶光学厚度为 0.2 和 0.6 的 HJ 1A 高光谱传感器的红光通道和蓝光通道数据, 反演了浓密植被像元的气溶胶光学厚

度。反演时仅对 NDVI 值大于 0.7 的像元进行反演。红光通道的地表反射率确定为 0.055 蓝光通道的地表反射率确定为 0.035。反演结果如图 5 所示, (a) 图为模拟的气溶胶光学厚度为 0.6 的红、蓝通道的气溶胶光学厚度反演结果, (b) 图为模拟的气溶胶光学厚度为 0.2 的红、蓝通道的气溶胶光学厚度反演结果。可以看出, 在这两个气溶胶光学厚度条件下, 参与反演的蓝光通道的所有像元的气溶胶光学厚度的反演精度均大于 0.1 红光波段大部分点的精度在 0.1 以内, 有部分点的精度小于 0.1。

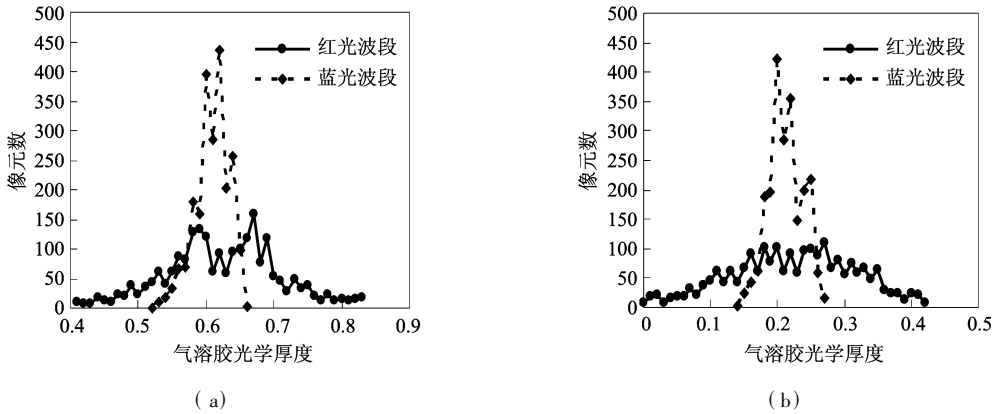


图 5 模拟的气溶胶光学厚度为 0.2 和 0.6 的高光谱数据气溶胶光学厚度反演结果直方图

Fig 5 A aerosol optical thickness retrieved from the simulated HJ 1A High spectral Spectrometer data

## 5 不确定性分析

### 5.1 地表反射率的影响

根据公式 (1), 传感器测量的辐射值既与大气相关, 又与地表反射率有关。对于浓密植被像元, 不同的植被类型或者同一植被类型在不同的生长期, 由于叶绿素以及水分含量的不同, 地表反射率存在

差异。地表反射率的确定精度, 直接影响气溶胶光学厚度反演的精度。图 6 是利用辐射传输模型 MODTRAN 4 模拟的红、蓝波段的地表反射率分别为 0.03 0.04 和 0.05 时, 传感器测量的辐射值随气溶胶光学厚度的变化, 其中气溶胶模型取标准辐射大气乡村气溶胶模型, 观测模式选择垂直观测。从图 6 中可以看出, 1% 的地表反射率误差带来的气溶胶光学厚度的误差在 0.1 左右。

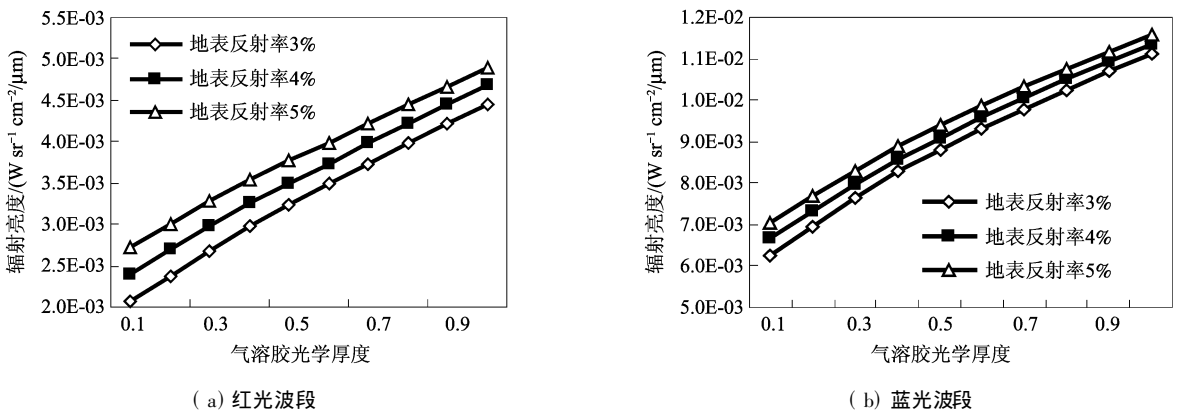


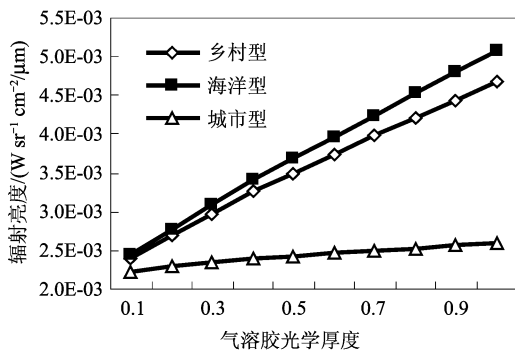
图 6 不同地表反射率条件下, 传感器测量的辐射值随气溶胶光学厚度的变化

Fig 6 The radiance function as a function of aerosol optical thickness under different surface reflectance

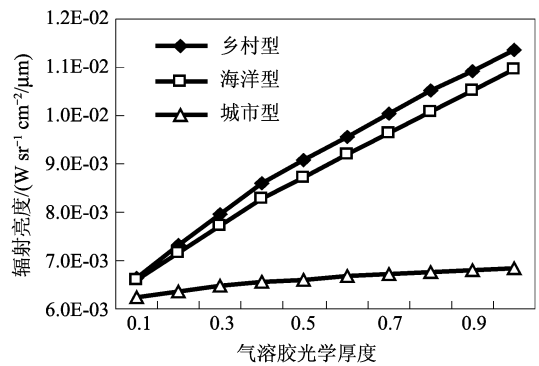
## 5.2 气溶胶类型的影响

不同的气溶胶类型由于化学成分、粒子谱分布等特性不同, 导致辐射特性差别很大, 因此, 对于气溶胶光学厚度反演来说, 气溶胶模型的选择非常重要。根据国际气象与大气物理协会 (IAMAP) 定义的标准辐射大气 (SRA) 中的气溶胶模型, 在对流层它是由水溶性、沙尘性、海洋性、煤烟 4 种基本气溶胶组分组成, 同时根据 4 种组分百分比含量的不同, 定义了乡村型、城市型及海洋型三种基本气溶胶模型。图 7 是模拟的乡村型、城市型、海洋型气溶胶在地表反射率为 0.04 时, 传感器测得的辐射亮度值随光学厚度的变化情况。在红光和蓝光波段, 对于海

洋型和乡村型气溶胶, 当地表反射率为 0.04 时, 传感器测得的辐射亮度值随气溶胶光学厚度的增加而迅速增加; 对于城市型气溶胶, 在地表反射率为 0.04 时, 传感器测得的辐射亮度值随气溶胶光学厚度的增加缓慢。因此, 在气溶胶光学厚度反演时, 乡村型气溶胶与海洋型气溶胶确定错误, 带来的辐射值误差比较小, 尤其在气溶胶光学厚度小于 0.2 时, 二者确定错误带来的反演误差基本可以忽略; 在地表反射率为 0.04 气溶胶光学厚度为 1.0 时, 蓝光波段最大误差约为 0.03 红光波段约为 0.06。而对于城市型气溶胶, 其光学性质与海洋型气溶胶和乡村型气溶胶有较大的差异, 如果城市型气溶胶和其他两种气溶胶类型确定错误会带来非常大的误差。



(a) 红光波段



(b) 蓝光波段

图 7 不同气溶胶模型条件下, 传感器辐射值随气溶胶光学厚度的变化

Fig 7 The radiance function as a function of aerosol optical thickness under different aerosol model

## 5.3 水汽及其他气体组分的影响

气溶胶反演方法中, 由于大气中各种气体组分是处于不断的变化之中的, 尤其是水汽, 它是大气中最活跃的成分, 一年中最大水汽含量可以达到最小水汽含量的 10 倍以上。对于气溶胶反演波段具有吸收特性的气体组分, 其含量的变化会导致气溶胶光学厚度反演的误差。在蓝光和红光波段, 具有吸收特性的气体组分有水汽、臭氧和二氧化氮, 二氧化氮在空气中的含量相对稳定, 6S 或 MODTRAN 中的缺省值基本能够比较精确的描述其在空气中的含量, 水汽和臭氧在蓝光以及红光波段的吸收较弱, 通过辐射传输模型模拟得出, 在这两种气体可能的变化范围内, 能够引起的气溶胶光学厚度的反演误差小于 1%。

## 6 结论

本文的研究表明, HJ1A 高光谱数据能够使用

浓密植被算法有效地探测气溶胶光学厚度。浓密植被算法探测气溶胶光学厚度时, 首先使用 NDVI 指数确定浓密植被像元, 浓密植被像元的蓝光通道的地表反射率确定为 0.035 红光通道的地表反射率确定为 0.055, 对这一方法确定的地表反射率, 蓝光波段的误差小于 0.01 红光波段有部分点的误差大于 0.01。蓝光通道反演的气溶胶光学厚度的误差在 0.1 以内, 红光通道大部分浓密植被像元反演的气溶胶光学厚度的误差小于 0.1 部分点大于 0.1。

本文使用模拟数据评价浓密植被算法用于 HJ1A 高光谱数据气溶胶光学厚度的反演, 模拟过程中的大气纠正、波谱转换、空间尺度转换等过程的精度会影响最终的评价结果; 数据模拟时仅考虑了波谱范围和空间尺度的转换, 没有对成像机理、噪声等因素进行深入研究, 这会在一定程度上影响评价结果, 更合理的评价方法有待于进一步的研究。

## 参 考 文 献 (References)

- [ 1 ] Charlson R J Langner J Rodhe H *et al* Perturbation of the Northern Hemisphere Radiative Balance by Backscattering from Anthropogenic Sulfate Aerosols[ J]. *Tellus* 1991 **43**: 152—163
- [ 2 ] Sokolik I N Toon O B Direct Radiative Forcing by Anthropogenic Airborne Mineral Aerosols[ J]. *Nature* 1996 **381**: 681—683
- [ 3 ] Rosenfeld D Suppression of Rain and Snow by Urban and Industrial Pollution[ J]. *Science* 2000 **287**: 1793—1796
- [ 4 ] Toon O B How Pollution Suppresses Rain[ J]. *Science* 2000 **287**: 1763—1764
- [ 5 ] Berico M Luciani A Fomignani M Atmospheric Aerosol in Urban Area measurements of TSP and PM10 Standards and Pulmonary Deposition Assessment[ J]. *Atmospheric Environment* 1997 **31**: 3659—3665
- [ 6 ] Holben B N Eck T F Slutsker J *et al* AERONET: A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization[ J]. *Remote Sensing of the Environment* 1998 **66**( 1): 1—16
- [ 7 ] He Q S Mao J T. Micro pulse Lidar and Its Applications[ J]. *Meteorological Science and Technology* 2004 **32**( 4): 219—224 [ 贺千山, 毛节泰. 微脉冲激光雷达及其应用研究进展 [ J]. *气象科技*, 2004 **32**(4): 219—224 ]
- [ 8 ] Charlson R J Schwartz S E Hales J *et al* Climate Forcing by Anthropogenic Aerosols[ J]. *Science* 1992 **255**: 423—430
- [ 9 ] King M D Kaufman Y J Tané D *et al* Remote Sensing of Tropospheric Aerosols from Space: Past Present and Future [ J]. *Bulletin of the American Meteorological Society* 1999 **80**: 2229—2259
- [ 10 ] Tomes O Bharti P K Heman J R *et al* Derivation of Aerosol Properties from Satellite Measurements of Backscattered Ultraviolet Radiation: Theoretical Basis [ J]. *Journal of Geophysical Research* 1998 **103**: 17099—17110
- [ 11 ] Deschamps P Y Béon F M Leroy M *et al* The POLDER Mission: Instrument Characteristics and Scientific Objectives [ J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing* 1994 **32**: 598—615
- [ 12 ] Liu Y J Yang Z D. The Principle and Arithmetic of MODIS [ M]. Beijing: Science Press, 2001. [ 刘玉洁, 杨志东. MODIS 遥感信息处理原理与算法 [ M]. 北京: 科学出版社, 2001 ]
- [ 13 ] King M D Kaufman Y J Menzel W B *et al* Remote Sensing of Cloud Aerosol and Water Vapor Properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer ( MODIS ) [ J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 1992 **30**: 2—27
- [ 14 ] Kaufman Y J Sendra C. Algorithm for Automatic Atmospheric Corrections to Visible and Near IR Satellite Imagery [ J]. *International Journal of Remote Sensing* 1988 **9**: 1357—1381
- [ 15 ] Kaufman Y J, Wald A E Remer L A *et al* The MODIS 2.1 Micron Channel correlation with Visible Reflectance for use in Remote Sensing of Aerosol[ J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 1997 **35**: 1286—1298
- [ 16 ] Hansen J E Travis L D. Light Scattering in Planetary Atmospheres[ J]. *Space Sci. Rev.* 1974 **16**: 527—610
- [ 17 ] Bek A Anderson G P Acharya P K *et al* MODTRAN4 User's Manual. Air Force Research Laboratory Space Vehicles Directorate Air Force Materiel Command Hanscom AFB MA 01731-3010 1999
- [ 18 ] Holben B N Vermote E Kaufman Y J *et al* Aerosol Retrieval over Land from AVHRR Data—Application for Atmospheric Correction[ J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing* 1992 **30**: 212—222
- [ 19 ] Ouaidrani H Eric F V. Operational Atmospheric Correction of Landsat TM Data[ J]. *Remote Sensing of Environment* 1999 **70**: 4—15
- [ 20 ] Deering D W. Rangeland Reflectance Characteristics Measured by Aircraft and Spacecraft Sensors[ D]. Ph.D. Dissertation Texas A&M University College Station TX 1978