

# 利用高分四号数据监测“京津冀”地区陆地气溶胶

王中挺 张玉环 袁淑云 赵少华 周春艳 陈辉 马鹏飞

(环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094)

**【摘要】** 高分四号卫星是我国发射的新型高分辨率对地观测静止轨道卫星, 在大气环境遥感监测方面有着广阔的前景。本文针对高分四号卫星的数据特点, 以当前较为成熟的暗目标法为基础, 利用浓密植被在红光和蓝光波段的线性关系, 去除地表贡献, 实现气溶胶光学厚度的反演, 构建了应用于高分四号卫星数据的陆地气溶胶反演算法。在此基础上, 利用2016年5月10日和20日过境“京津冀”地区的高分四号时间进行了反演试验, 并利用地面CE318的观测结果进行了验证。结果表明, 本算法能较好的反映气溶胶的空间分布, 与地面结果有较高的相关性, 但整体高于地面观测值。

**【关键词】** 高分四号, 京津冀, 气溶胶, 遥感

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 1673-288X(2016)05-0113-04

## 1 引言

2015年12月29日, “高分四号”卫星在西昌卫星发射中心搭载长征三号乙运载火箭成功发射。经过半年的在轨运行测试, 2016年6月13日, 高分四号正式投入使用。高分四号重约5吨, 设计寿命8年, 运行在距地3.6万公里的地球静止轨道, 定位于东经105.6度的赤道上空, 能够对地球表面约三分之一的区域进行大范围观测, 且能长期对某一地区持续观测。高分四号搭载有一台可见光/中波红外面阵相机, 采用面阵凝视方式成像, 可见光波段分辨率50米, 中波红外波段分辨率400米, 分辨率在50米以内。

高分四号卫星的研制开辟了我国高轨高分辨率对地观测技术的新领域, 代表我国静止轨道卫星的最高水平, 也处于国际先进行列<sup>[1]</sup>。高分四号卫星的载荷设计使之能够在监测森林火灾、洪涝灾害等方面发挥重要作用, 同时对同一地区的持续观测使高分四号在观测大气环境的快速变化方面也有着广阔的应用前景。

大气气溶胶是遥感获取PM<sub>2.5</sub>、灰霾、沙尘等大气环境参数的关键参数。目前, 从可见光波段反演陆地气溶胶的算法主要有:

(1) 暗目标法。利用浓密植被在红光、蓝光波段的地表反射率较低, 构建暗目标在这两个波段的线性关系, 从卫星观测的信号中去除地表反射贡献, 提取气溶胶信息。该算法已成功应用于TM、高分一号等国内外

传感器<sup>[2-3]</sup>。

(2) 深蓝算法。假定地表反射率随时间变化较小, 利用清晰天的地表反射率<sup>[4-6]</sup>去除地表贡献, 从蓝光波段反演气溶胶, 该算法已成功应用于干旱半干旱区域。

(3) 多角度算法。根据同一地物在不同观测角度的地表反射率比值不随波长变化, Diner等<sup>[7]</sup>从MISR的多角度数据反演得到气溶胶, Hagolle等<sup>[8]</sup>、张玉环等<sup>[9]</sup>则利用不同天的卫星多角度数据计算价值函数反演得到气溶胶。

但是, 上述陆地气溶胶反演算法主要是针对极轨卫星数据, 而针对高分四号等静止卫星数据开展的气溶胶反演研究较少。主要有, Mei等<sup>[10]</sup>利用欧洲的MSG静止卫星SERVI数据研究了气溶胶反演。

因此, 为了拓展国产卫星的应用, 本文针对国产先进的高分四号卫星数据, 以暗目标法为基础, 研究了气溶胶的反演算法, 并在京津冀地区进行了反演试验。

## 2 算法原理

在大气水平均一假设条件下, 卫星接收到的大气顶部的表现反射率 $\rho_{TOA}$ 可以表达为<sup>[11]</sup>:

$$\rho_{TOA} = (\theta_s, \theta_v, \varphi) = \rho_0(\theta_s, \theta_v, \varphi) + \frac{T(\theta_s)T(\theta_v)\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi)}{[1 - \rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi)S]} \quad (1)$$

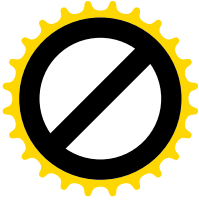
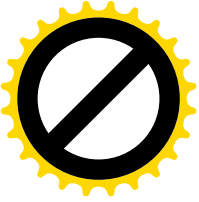
式中,  $\theta$ 为天顶角, 下标s表示太阳入射方向, v表示观测方向;  $\varphi$ 为相对方位角; S为大气底层向下的

项目资助: 国家自然科学基金(批准号: 41301358)

作者简介: 王中挺, 博士, 高级工程师, 主要从事气溶胶、颗粒物、灰霾等环境遥感方面的工作

通讯作者: 张玉环, 博士, 工程师, 主要从事大气环境遥感研究

引用文献格式: 王中挺 等. 利用高分四号数据监测“京津冀”地区陆地气溶胶 [J]. 环境与可持续发展, 2016, 41(5): 113-116.



半球反射率,  $T$  为大气整层的透过率,  $\rho_0$  是大气程辐射的等效反射率,  $\rho_s$  为地表反射率。公式中,  $\rho_0$ 、 $S$  和  $T$  等三个参数不受地表影响仅与大气状况相关, 遥感反演一般是去除地表  $\rho_s$  的影响建立这三个参数与大气信息(包括大气分子与气溶胶)的函数关系, 从而实现气溶胶的反演。

针对高分四号卫星的波段特征, 本文采用目前较为成熟的暗目标法实现陆地气溶胶的反演。暗目标法就是浓密植被法, 其原理是对于植被密集的地表(即暗目标), 红蓝波段不仅有较小的反射率, 并且红、蓝反射率之间具有很好的线性相关, 因此根据暗目标的红蓝波段的地表反射率的线性关系从红蓝波段的表观反射率去除地表贡献, 获得大气参数  $S$ 、 $\rho_0$ 、 $T$ , 进而得到气溶胶光学厚度。

$$\rho_{red}^2 = k\rho_{blue}^2 \quad (2)$$

式中,  $\rho_{red}^s$ 、 $\rho_{blue}^s$  分别表示红光和蓝光波段浓密植被(暗目标)的地表反射率,  $k$  为红蓝地表反射率比率, 要根据高分四号探测器的光谱响应特征, 结合地面观测数据设定。

暗目标的识别采用计算 NDVI 设定阈值的方法实现。归一化植被指数(NDVI)能够较好的反映地表植被分布状况而且能够去除部分的大气影响, 通过 NDVI 一般就能较好的区分植被、水体、土壤等地表类型。

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (3)$$

式中,  $\rho_{nir}$  和  $\rho_{red}$  分别表示近红外波段和红波段反射率。但 NDVI 也会受到大气影响, 使暗目标的识别出现错判, 需要根据气溶胶反演结果做进一步的处理以去除伪暗目标<sup>[3]</sup>。

在识别出暗目标后, 将暗目标的蓝光和红光波段的表观反射率代入(1)式, 同时与(2)式结合得到方程组:

$$\begin{cases} \rho_{blue}^{TOA}(\mu_s, \mu_v, \varphi) = \rho_0(\mu_s, \mu_v, \varphi) + \frac{T(\mu_s)T(\mu_v)\rho_{blue}^s}{[1 - \rho_{blue}^s S]} \\ \rho_{red}^{TOA}(\mu_s, \mu_v, \varphi) = \rho_0(\mu_s, \mu_v, \varphi) + \frac{T(\mu_s)T(\mu_v)\rho_{red}^s}{[1 - \rho_{red}^s S]} \\ \rho_{red}^s = k\rho_{blue}^s \end{cases} \quad (4)$$

在具体反演过程中, 我们利用辐射传输模型建立  $\rho_0$ 、 $S$  和  $T$  等大气参数与气溶胶光学厚度之间的对应关系, 代入高分四号卫星的蓝光和红光波段的表观反射率, 可实现气溶胶光学厚度的反演。具体数据处理流程参见下节。

### 3 数据处理流程

基于上述原理, 我们设计了如下的数据处理流程,

从高分四号卫星数据获取气溶胶的反演信息。数据处理采用 IDL8.3 语言实现。

#### 3.1 大气参数与气溶胶光学厚度对应关系的构建

使用 6S 软件设定相应的参数进行辐射传输计算得出大气参数与气溶胶光学厚度的对应关系。6S (the Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum) 是利用连续阶散射 (Successive Orders of Scattering) 的方法对大气辐射传输过程进行计算的软件, 预设了大气廓线、气溶胶类型、传感器参数等常用参数, 是目前应用比较广泛的辐射传输软件<sup>[11]</sup>。

利用 6S 进行辐射传输计算时, 观测几何参数、气溶胶参数、波段等参数设定如下: ①太阳天顶角 9 个 ( $0 \sim 66^\circ$ ), 相对方位角设为  $12^\circ$  等 ( $0 \sim 180^\circ$ ), 由于高分四号为静止卫星, 对同一地点观测角度不变, 根据观测区域将其设为固定值; ②气溶胶设为大陆型气溶胶,  $0.55\mu\text{m}$  的光学厚度从  $0 \sim 2$  变化; ③由于我们暂未获得高分四号的波段响应函数, 假设其波段响应为高斯分布, 利用中心波长和波段宽带建立波段响应函数暂时作为真实波段响应函数输入 6S 中进行计算。

#### 3.2 数据预处理

利用在进行气溶胶反演时, 需要对获得的图像进行预处理, 包括两个方面的工作:

(1) 辐射定标。采用如下的公式完成绝对辐射定标, 获取表观辐亮度:

$$L = (DN - b) / a \quad (4)$$

式中,  $a$ 、 $b$  为定标系数,  $\theta_s$  由中国资源卫星中心提供。

然后, 根据 GF-4 星数据附带的 XML 文件太阳高度角参数, 利用下式, 将获得的表观辐亮度转换为表观反射率  $\rho$ 。

$$\rho = \frac{\pi L}{E_\lambda \cos \theta_s} \quad (5)$$

其中,  $E$  为大气层顶太阳辐照度,  $\theta_s$  为太阳天顶角。

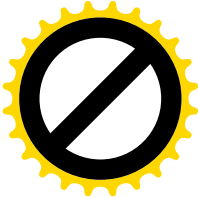
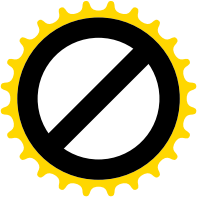
(2) 云处理与水陆分离。根据高分四号卫星的波段特点, 云去除则是采用红波段反射率结合 NDVI 的方法识别云象元<sup>[12]</sup>; 水陆分离则是采用 NDVI 的方式分离水体, 将 NDVI 为负值的像元识别为水体。

#### 3.3 气溶胶光学厚度的反演

在高分四号卫星红光和蓝光波段的表观反射率数据后, 按照下面的步骤进行气溶胶反演计算:

(1) 大气参数提取。从图像的 XML 文件中读取的太阳高度角, 进行转换得到太阳天顶角, 按照太阳天顶角进行线性插值, 得到各个气溶胶光学厚度下模拟计算的、和等大气参数。

(2) 计算暗像元气溶胶。按照式(3), 从图像红光和近红外波段的表观反射率计算图像的 NDVI, 根据阈



值选取暗目标。将各个气溶胶光学厚度下的大气参数，代入式(4)中计算红光和蓝光波段地表反射率比率 $k$ ；与经验设定的 $k$ 相差最小的气溶胶光学厚度值即为所求。

#### 4 结果与验证

我们选取了2016年5月10日、5月20日期间过境京津冀地区的高分四号卫星数据在完成以上处理后，得到了反演结果如图1、图2所示。可以看出，5月10日，京津冀地区气溶胶光学厚度整体较低，整体在0.5以下，呈北低南高的分布状况，北部的承德、张家口光学厚度较低，北京市区稍高，在南部的石家庄、邯郸等工业较为集中的地区出现部分高值；5月20日，京津冀地区气溶胶光学厚度整体较高，在北京及承德南部出现高值区，部分地区光学厚度超过了1，在南部的邢台、邯郸等地由于云影响未获得反演结果。

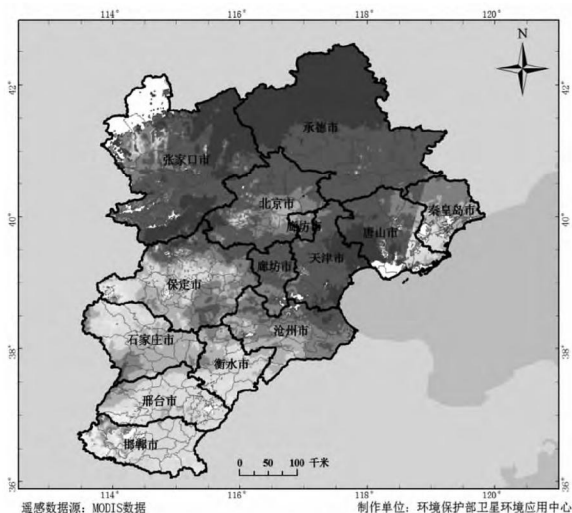


图1 2016年5月10日京津冀地区气溶胶反演图

为定量验证本文的反演结果，我们利用地面CE318获取了卫星过境期间的气溶胶光学厚度。该仪器架设在卫星环境应用中心楼顶。为便于比较，地面获得的气溶胶光学厚度利用Ångström公式<sup>[13]</sup>转化为550nm，地面观测数据采用卫星过境时间2小时内平均值，高分四号卫星反演的气溶胶结果采用地面CE318观测点10公里范围内的区域平均值。

2016年5月期间北京地区的高分四号数据，共有3天有相应的地面观测数据。如图3所示，虽然本算法所获得的结果与地面CE318观测结果有着较高的相关性，相关系数大于0.9，但整体明显高于地面CE318观测结果偏大，可能是本文所采用的数据还在在轨测试当中，尚不稳定所致。

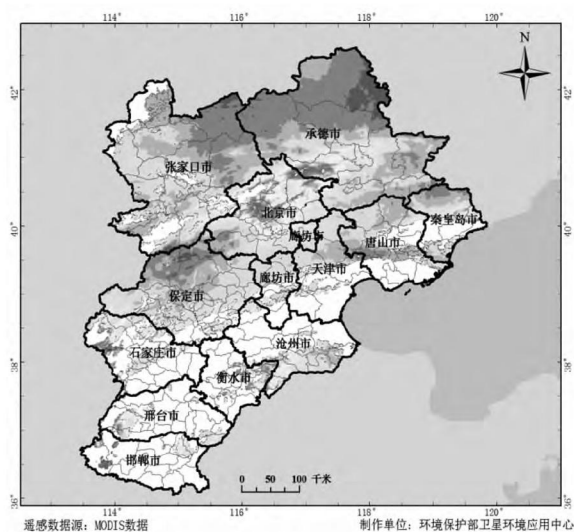


图2 2016年5月20日京津冀地区气溶胶反演图

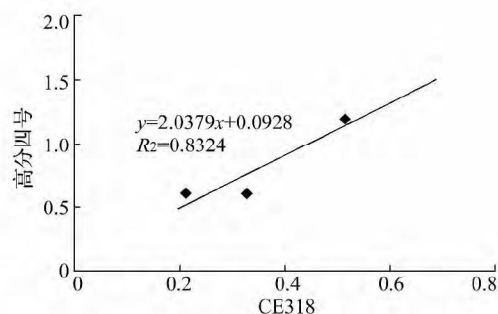


图3 高分四号气溶胶反演结果地基验证图

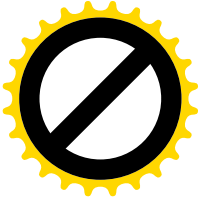
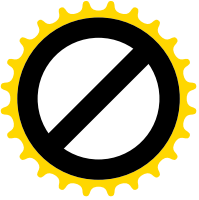
#### 5 结论

本文详细描述了暗目标法对高分四号卫星数据进行气溶胶光学厚度反演的应用，并进行了反演试验、结果的地基验证。可以看出：由于高分四号卫星设置有蓝光、红光、近红外波段，暗目标法能够适用于高分四号卫星数据的陆地气溶胶光学厚度的反演；高分四号卫星在京津冀地区的气溶胶反演实验表明，本算法可以较好的反映陆地气溶胶的空间分布；通过与地基CE318观测结果的验证，本算法与地面结果有较高的相关性，但数值整体偏大。

随着高分四号卫星在轨测试的结束，定标系数、波段响应函数等参数会更加精确，数据质量也会更好，本算法获得的陆地气溶胶反演精度也将会有进一步提高，高分四号卫星数据将在我国未来大气环境监测方面发挥更大的作用。

参考文献：

[1] 范一大，吴玮，“高分四号”发射成功助力防灾减灾事业[J]．中国减灾，



- 2016, 2: 48–49.
- [2] Kaufman Y J and Sendra C. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 1988, 9: 1357–1381.
- [3] 王中挺, 辛金元, 贾松林, 等. 利用暗目标法从高分一号卫星 16 m 相机数据反演气溶胶光学厚度 [J]. 遥感学报, 2015, 19(3): 530–538.
- [4] Hsu C N, Tsay S C, King M D and Herman J R. Aerosol properties over Bright-Reflecting source regions [J]. IEEE Trans. actions on Geoscience. and Remote Sensing, 2004, 42(3): 557–569.
- [5] Hsu C N, Tsay S C, and King M D and Herman J R.. Deep blue retrievals of aAsian aerosol properties during ACE-Asia [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote SensingTrans. Geosci. Remote Sens., 2006, 44(11): 3180–3195.
- [6] 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): 615–629.
- [7] Diner D J, Martonchika J V, Kahna R A, Pinty B, Gobron N, Nelson D L and Holben B N. Using angular and spectral shape similarity constraints to improve MISR aerosol and surface retrievals over land [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(2005): 155–171.
- [8] Hagolle O, Dedieu G, Mougenot B, Debaecker V, Duchemin B and Meygret A. Correction of aerosol effects on multi-temporal images acquired with constant viewing angles: a Application to Formosat-2 images [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(4): 1689–1701.
- [9] 张玉环, 李正强, 侯伟真, 许华. 利用 HJ-1 CCD 高分辨率传感器反演灰霾气溶胶光学厚度 [J]. 遥感学报, 2013, 17(4): 959–969.
- [10] Mei L, Xue Y, Leeuw G et al. Retrieval of aerosol optical depth over land based on a time series technique using MSG/SERVI data [J]. Atmos. Chem. Phys. Discuss., 2012, 12: 4031–4071.
- [11] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, Herman M and Morcrette J. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum 6S: An overview [J]. IEEE Transactions onTrans. Geoscience and Remote SensingGeosci. Remote Sens., 1997, 35(3): 675–686.
- [12] 韩杰, 杨磊库, 谢玉娟, 梁洪有. 基于多光谱分析的 HJ-1B 数据云检测算法 [J]. 测绘科学, 2013, 38(1): 150–152.
- [13] Ångström A. The parameters of atmospheric turbidity [J]. Tellus, 1964, 16(1): 64–75.

## The aerosol monitoring over Beijing–Tianjin–Hebei region from GF-4 data

WANG Zhongting ZHANG Yuhuan YUAN Shuyun ZHAO Shaohua ZHOU ChunyanCHEN Hui Ma Pengfei

(Satellite Environmental Center, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Beijing 100094)

**Abstract:** GF-4 is Chinese new high resolution geostationary satellite of earth observing, and it has a wide prospect in air environment monitoring. In the paper, aimed to the characteristics of GF-4, based on the Dark Dense Vegetation method, the surface contribution is removed by the linear relation of surface reflectance between blue and red band, and the aerosol is retrieved, then the aerosol retrieving method is built for GF-4 data. Finally, the retrieving experiment is processed in May 10 and May 20 over over Beijing–Tianjin–Hebei region, and the result is validated by the measurements of ground-based CE318. The result shows that, our method can monitor the spatial distribution of aerosol, the correlation coefficient with CE318 is large, but our result is larger than CE318.

**Keywords:** GF-4, Beijing–Tianjin–Hebei region, aerosol, remote sensing

## 《环境与可持续发展》2016 年学术影响因子 位列全国收录 68 种环境科学类期刊第九名

据知网 2016 年 9 月刚刚发布的《中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术(2016 版))》，我刊期刊综合影响因子为 1.339，位列全国环境科学类期刊第 9 名，复合影响因子为 1.626，位于全国环境科学类期刊第 11 名。另据知网发布的《2015 年发行与传播统计报告》：我刊机构用户总计近 5000 个，遍布于 11 个国家和地区，如美国国会图书馆、代顿 ITS 公司、美国海军军事学院、法国国防部、牛津大学、韩国最高法院、韩国最高检察院、日本国会图书馆、新加坡国家图书馆、伊士曼化学公司、陶氏化学、NSD 生物技术咨询、南澳大利亚大学等国外机构，我刊已成为国际平台上展示我国环保成就和研究成果的重要窗口。

## 《环境与可持续发展》在中国人民大学 “2015 年度复印报刊资料转载学术论文指数排名”中喜获佳绩

从 2016 年 3 月 29 日中国人民大学人文社会科学学术成果评价中心主办的《2015 年复印报刊资料转载指数排名研究报告》发布会上获悉，全国 242 种全文被转载的理论经济学学科期刊中，我刊(环境保护部主管和环境保护部环境与经济政策研究中心主办)全文被转载 12 篇，转载数量位列第五名，综合指数排名第七名。仅次于《政治经济学评论》、《中国经济史研究》、《经济研究》、《中国人口资源与环境》、《世界经济》和《经济动态》。