

文章编号: 1672-8785(2012)07-0020-05

基于线性光谱分解的遥感图像大气灰霾 环境效应去除技术

姚佛军

(中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

摘 要: 灰霾环境对遥感图像具有非常严重的影响。主要分析了太阳光在灰霾环境中的传输方法。根据太阳光的传输方式, 把灰霾层看作是一个不均匀的半透明-透明层。然后通过 SMACC 算法提取灰霾的端元信息, 并利用最小二乘法反演去除灰霾后的遥感图像。本文所述的线性光谱分解去霾方法对遥感图像中气溶胶浓度低/高的灰霾的去除效果都比较好, 而且较大幅度地保留了图像的光谱信息。最后把本文方法和大气校正去霾方法进行了对比。结果表明, 线性光谱分解的去霾效果较好。

关键词: 灰霾; 辐射传输; 大气校正; 线性光谱分解; 端元

中图分类号: P407.8 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.07.005

A Method for Removing Atmospheric Haze in Remote Sensing Images Based on Linear Spectral Decomposition

YAO Fo-jun

(MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Haze has great influence on remote sensing images. The transmission of sunlight in haze environment is analyzed mainly. Firstly, according to the transmission of sunlight, the haze is considered as a non-uniform translucent-transparent layer. Then, the end-member of the haze is extracted by using the SMACC algorithm and the haze in a remote sensing image is removed by using a least-square method. The haze removal method using linear spectral decomposition is very effective for the removal of the haze with either high or low aerosol concentration in remote sensing images and can retain the spectral information in remote sensing images maximally. Finally, the method is compared with the atmospheric correction method. The result shows that this linear spectral decomposition method is better for the removal of haze.

Key words: haze; radiative transfer; atmospheric correction; linear spectral decomposition; end-member

0 引言

空气污染和沙尘等多种因素会造成空气中

的溶胶浓度增加, 这种现象被称为灰霾天气。我国是全球灰霾污染最严重的国家之一。其中, 中东地区特大城市的大气灰霾现象日趋严重, 华

收稿日期: 2012-05-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41102205); 国家“973”计划项目 (2007CB411406-06); 科技支撑专题项目 (2006BAB07B00-7-2); 地质大调查项目 (1212011120994)

作者简介: 姚佛军 (1980-), 男, 山西大同人, 助理研究员, 主要研究方向为遥感地质。E-mail: fjyao@sina.com

北、华南、华东等地区已呈现明显的区域性灰霾现象^[1-2]。如 2010 年 3 月 17 日至 22 日, 珠三角地区发生了为期一周的灰霾天气^[3]。由于能见度差, 灰霾天气会严重影响遥感图像质量和遥感图像的使用, 特别是对于利用遥感技术进行实时监测的情况。为了去除或者减弱灰霾对遥感图像的影响, 研究人员研发了很多处理技术。在遥感大气校正处理中, 他们就研发了许多基于大气辐射传输方程的校正模型, 如 6S 模型、FLAASH 模型、ACORN 模型和 ACTOR2 模型等。这些模型已经得到了广泛应用^[4-6]。另一些灰霾去除方法主要有空域内的多项式法^[8]和频域内的同态滤波法^[9]。常用的大气校正模型都基于复杂的大气传输模型, 其中许多已被嵌入到现成的软件中。例如, 基于 MODTRAN4 模型的 FLAASH 大气校正工具被嵌入到 ENVI 软件中^[10], ACTOR2 模型被嵌入到 PCI 和 ERDAS 等软件中^[11]。但这些模型需要设置许多参数才能正确反演, 如 FLAASH 算法需要设置图像中心点坐标、传感器类型、海拔高度、数据获取日期和卫星过境时间、大气模型以及气溶胶模型等参数。多项式法的主要缺点是要求达到精确配准的同时还需要以相同地理位置的无灰霾图像作参考, 不能进行实时处理。同态滤波算法复杂度高, 会带来大量冗余信息, 容易破坏无霾区域的图像并造成严重的边界效应。本文拟用线性光谱分解来实现遥感图像灰霾影响的减弱。我们认为遥感图像中灰霾下的影像像元是包含灰霾信息和地物信息的混合像元。因此我们先通过凸锥分析进行端元提取^[12-15], 然后进行像元分解来反演各端元组分的丰度, 接着再利用端元组分丰度进行像元分解。

1 主要原理

首先分析太阳光在灰霾下的传输情况。太阳光穿透灰霾后经地面反射又会穿透灰霾到达传感器。在传感器获得的遥感图像中, 含灰霾的部分既包含有灰霾的信息又包含有地面的信息:

$$L = \frac{RT_{\phi}}{\pi} E_0 T_{\theta} T_{\rho} S \cos \theta + \frac{RT_{\phi}}{\pi} T_{\rho} S E_D$$

$$+ SL_p + \frac{R_{\rho} T_{\phi}}{\pi} E_0 S \cos \theta \quad (1)$$

式中, 第一项为入射光 E_0 穿过透过率为 T_{ϕ} 的大气层和透过率为 T_{ρ} 的灰霾层, 经反射率为 R 的地物反射后, 又穿过透过率为 T_{θ} 的大气和透过率为 T_{ρ} 的灰霾层, 最后进入传感器的反射部分; θ 为入射方向的天顶角; S 为系统的增益系数因子。

第二项为经大气散射后, 以漫入射形式经地物反射, 又穿过透过率为 T_{θ} 的大气和透过率为 T_{ρ} 的灰霾层, 最后进入传感器的部分。

第三项为程辐射, 又称径辐射, 它是散射光方向上通过大气直接进入传感器的部分。

第四项为入射光 E_0 穿过透过率为 T_{ϕ} 的大气层后, 经反射率为 R_{ρ} 的灰霾层反射, 又穿过透过率为 T_{θ} 的大气, 最后进入传感器的反射部分。

假设遥感图像经过预处理后, 除大气的影响被去除外, 程辐射部分也被去除, 我们则可得:

$$L^p = R_d T_{\rho} + R_y \quad (2)$$

把 R_y 变换成 $T_y \times R'_y$, 使得 $T_y + T_{\rho} = 1$ 。其中, L^p 为包含灰霾层信息和地物信息的混合信息。根据电磁波在频率域上有累加信息的情况, 若灰霾层没有透射的临界完全反射率为 R'_y , 地物的反射率为 R_d , 则灰霾层所占像元的反射率为 $T_y \times R'_y$, 而此时地物所占像元的反射率为 $R_d \times T_{\rho}$ 。根据电磁波的性质, 得出 $T_y + T_{\rho} = 1$ 。式 (2) 可改写成

$$L^p = R_d (1 - T_y) + T_y R'_y \quad (3)$$

那么去除灰霾层后, 地物反射率为

$$R_d = (L^p - T_y R'_y) / (1 - T_y) \quad (4)$$

在上述公式中, L^p 是已知的, 而需要解决的参数有 T_y 和 R'_y 。 R'_y 为灰霾层的端元信息, T_y 为灰霾层丰度。目前有多种端元 (R'_y) 提取和丰度 (T_y) 反演方法^[12-15], 本文采用 SMACC 方法进行端元提取和丰度反演。

2 试验方法及结果

试验采用 TM5 的数据, 景号为 124035, 接收日期为 2011 年 12 月 6 日, 时间为 08:56:48。数据是从美国地调局网站 (<http://glovis.usgs.gov/>) 上下载的。为了便于运算, 从整景图像中切出子图。子图的像素范围为 (3051:3451, 6232:6632), 大小为 400×400 像素。图 1 所示为主要的试验方法和流程。

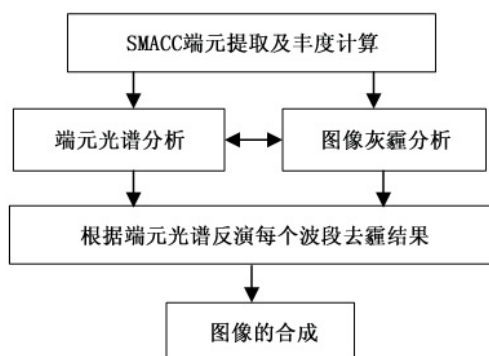


图 1 试验方法和流程简图

2.1 端元提取及丰度反演

目前, 端元提取已经有多种算法可以选择, 主要包括纯净像元指数 (PPI) 提取算法^[16]、最大体积单形体 (N-FINDR) 提取算法^[17]、迭代误差分析 (IEA) 提取算法^[18]、投影追踪法 (PP) 提取算法^[19]、模拟退火 (SAA) 提取算法^[20]、凸追分析 (CCA) 提取算法^[12] 和逐次最大角凸锥 (SMACC) 提取算法^[13] 等。本文选用逐次最大角凸锥 (SMACC) 提取算法来进行端元提取和丰度计算。这种算法能够提取任意的端元数, 不依赖

单形体, 而且运算速度快, 全过程自动化 (能够自动地快速提取出灰霾的端元和计算各端元的丰度)。该算法主要根据极点确定凸锥模型来生成第一个端元, 再逐次生成下一个端元。也就是说, 先确定影像中的最亮点, 然后找到与最亮点像元差别最大的像元, 接着再找出与前两种像元差别最大的像元, 依次类推^[13,21]。根据 SMACC 方法, 将子图像的条件限定为线性光谱统一求和和 8 个端元数, 随后进行端元提取与丰度计算。

2.2 端元光谱与图像灰霾分析

用 SMACC 算法提取出 8 个端元。根据 GOOGLE EARTH 高分辨图像和图像实际采样点光谱曲线, 分析出这几个端元所代表的地物信息。其中, 第一端元为灰霾的光谱, 第二端元和第八端元分别为水域和湿地的光谱, 第三端元、第四端元、第五端元和第六端元分别为城市

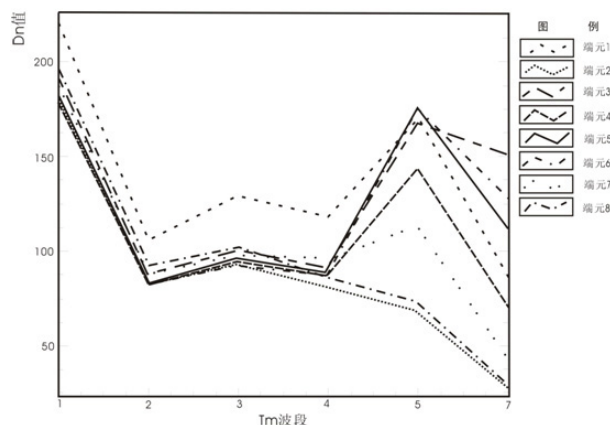


图 2 8 个端元的光谱曲线

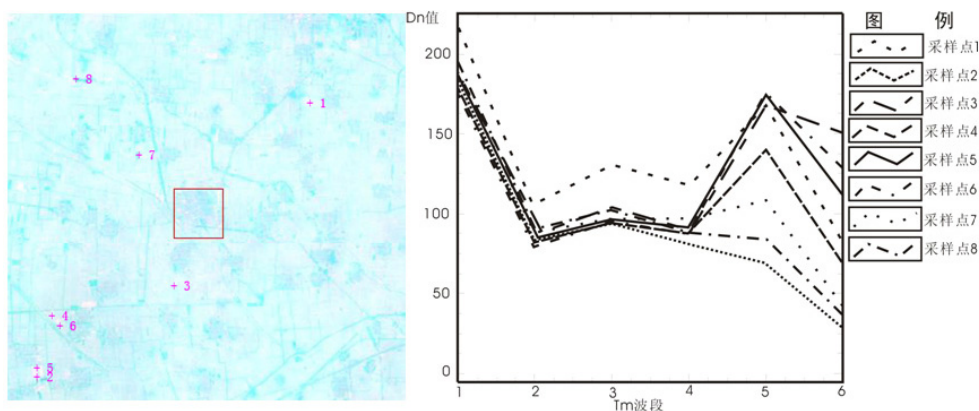


图 3 图像采样点位置与对应的光谱曲线。左图为图像 743 合成假彩色图像, 右图为对应 8 个采样点的光谱

中建筑物、裸露的土和岩石的光谱, 第七端元为植被的光谱。

通过对图像上的几个位置进行光谱采样, 可以看出这几个位置的光谱曲线与 8 个端元的光谱曲线的对应关系非常好。采样点 1 是灰霾天气中气溶胶浓度较高的位置, 其光谱对应于端元 1 的光谱。我们就采样端元 1 计算出的丰度作为灰霾的丰度来进行图像灰霾去除。

2.3 灰霾去除与图像合成

把图像上的灰霾看作是一个浓度不同的半透明-透明层, 并把地物看作是另一个层。假设灰霾和地物是按线性叠加的, 根据最小二乘法, 图像灰霾的去除主要采用:

$$R_d = (L^p - T_y R_y') / (1 - T_y) \quad (5)$$

据此反解 TM 图像的每一个波段, 需要对灰霾光谱在 TM 值每个波段的 DN 值进行计算。各

个波段的 DN 值减去灰霾所占的图像丰度后再除以地物丰度, 就能得出每个波段去除灰霾后的结果。表 1 列出了灰霾光谱在 TM 各个波段对应的 DN 值及去霾算法。

表 1 TM 各波段的 DN 值及对应算法

TM 波段	DN 值	算法 (b1 为各波段 DN 值, b2 为灰霾丰度)
TM1	221	$(b1-221*b2)/(1-b2)$
TM2	106	$(b1-106*b2)/(1-b2)$
TM3	129	$(b1-129*b2)/(1-b2)$
TM4	118	$(b1-118*b2)/(1-b2)$
TM5	170	$(b1-170*b2)/(1-b2)$
TM6	86	$(b1-86*b2)/(1-b2)$

去除灰霾后的图像仍然采用 743 波段的假彩色合成。从图 4 中可以看出, 去除灰霾后的地物信息都能清晰地表现出来。

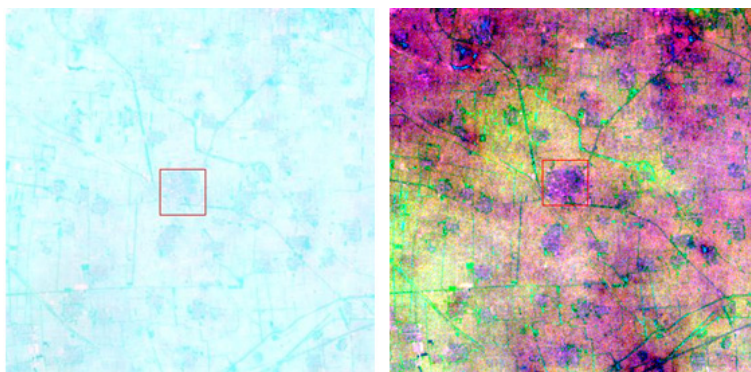


图 4 去霾前后的图像对比。其中, 左图为原始图像, 右图为去霾图像 (均采用 743 假彩色合成)

3 分析与评价

为了对比线性光谱分解的去霾结果, 我们分别使用了 ENVI 的 FLAASH 算法、ERDAS 的 HAZE REDUCTION 算法和 PCI 的 ACTOR2 算法。FLAASH 算法的各个参数如下: 大气模式为中纬度冬季; 气溶胶环境为城市; 能见度为 200 m; 中心坐标为 (35°21'31.32"N, 113°35'43.51"E); 传感器类型为 TM5; 地面高度为 84 m; 数据接收日期为 2011 年 12 月 6 日, 时间为 08:56:48; 采样 6 和 3 波段作 K-T 变换。HAZE REDUCTION 算法选择高霾环境。ACTOR2 算法的各个参数如下: 气溶胶环境为城市, 能见度为 5 km; 高程为 500 m; 天顶角为 65.8884°。下面介绍各种

算法的计算结果。

对比线性光谱分解结果后可知, FLAASH 算法和 ACTOR2 算法在高霾环境下对气溶胶浓度高的霾去除不了, 两者的结果相近; Haze Reduction 算法采用了缨帽变换, 其变换后的图像产生了失真且对高气溶胶的霾去除不了; 而线性光谱分解既可使图像失真变小, 又可比较彻底地去除灰霾。

4 结论

通过对灰霾环境下的光进行分析, 选用线性光谱分解进行了灰霾去除, 同时把其结果与采用常规软件得出的大气校正去霾结果进行了对比, 发现线性光谱分解的去霾效果最好。

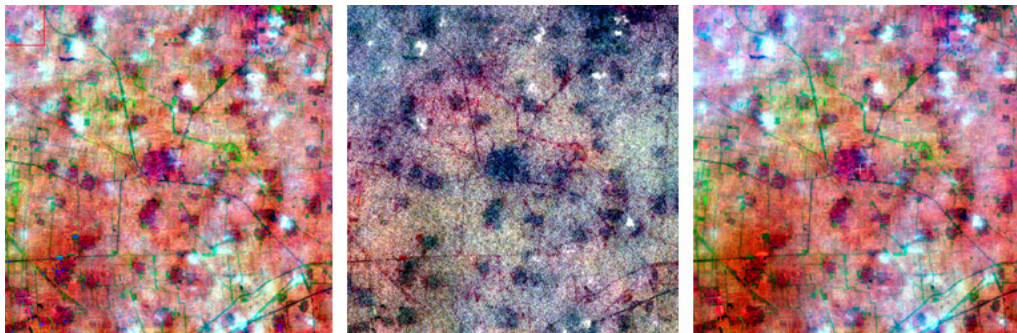


图5 三种算法的去霾结果。其中,左图为FLAASH算法的结果,中图为HAZE REDUCTION算法的结果,右图为ACTOR2算法的结果(均采用743假彩色合成)

SMACC算法提取端元的运送速度快且自动化程度高,在灰霾端元提取上具有较高精度。但对其提取出的端元结果需要进行分析,结合图像上实际采样点光谱进行对比,分析各端元所代表的地物。文中两者光谱的对应关系非常好。

采用最小二乘法进行计算,并把灰霾层看作是一个不均匀的半透明-透明层。将其与地物的混合光谱简化为线性光谱。这样简化后仅仅是对灰霾和地物进行最小二乘法计算,达到了去霾效果。

光谱分解去霾技术能够用于实时分析且不限于具体的数据类型,对于时间性要求高且有灰霾的地区的遥感数据应用具有实际意义。

参考文献

- [1] 唐孝炎,王如松,宋豫秦.我国典型城市生态问题的现状与对策[J].*国土资源*,2005,15(5):4-9.
- [2] 吴兑,吴晓京,朱小详.雾和霾[M].北京:气象出版社,2009.
- [3] 吴兑,吴晨,李海燕,等.以珠三角典型灰霾天气为例谈资料分析方法[J].*环境科学与技术*,2011,34(6):80-84.
- [4] 石广玉.大气辐射学[M].北京:科学出版社,2007.
- [5] 梁顺林.定量遥感[M].北京:科学出版社,2009.
- [6] Richter R. A Fast Atmospheric Correction Algorithm Applied to Landsat TM Images [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(1): 159-166.
- [7] Berk A, Bernstein L S, Anderson G P, et al. MODTRAN Cloud and Multiple Scattering Upgrades with Application to AVIRIS [J]. *Remote Sensing of the Environment*, 1998, 65(3): 367-375.
- [8] 王惠,谭兵,沈志云.多源遥感影像的去云层处理[J].*测绘学院学报*,2001,18(3):195-198.
- [9] 赵忠明,朱重光.遥感图像中薄云的去层方法[J].*环境遥感*,1996,11(3):195-199.
- [10] 邓书斌. ENVI 遥感图像处理办法[M].北京:科学出版社,2010.
- [11] 阮建武,邢立新.遥感数字图像的大气辐射校正应用研究[J].*遥感技术与应用*,2004,19(3):206-208.
- [12] Ifarraguerri A, Chang C I. Multispectral and Hyperspectral Image Analysis with Convex Cone [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(2): 756-770.
- [13] Gruninger J H, Ratkowski A J, Hoke M L. The Sequential Maximum Angle Convex Cone (SMACC) Endmember Model [C]. *SPIE*, 2004, 5425: 1-14.
- [14] Nascimento J M P, Dias J M B. Vertex Component Analysis: A Fast Algorithm to Unmix Hyperspectral Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(4): 898-910.
- [15] 褚海峰,翟中敏,赵银娣,等.一种多光谱/高光谱遥感图像端元提取的凸锥分析算法[J].*遥感学报*,2007,11(4):460-467.
- [16] Boardman J W. Automating Spectral Unmixing of AVIRIS Data Using Convex Geometry Concepts [C]. JPL Pub: the 4th Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, 1993.
- [17] Winter M E. N-FINDR: An Algorithm for Fast Automatic Spectral End-member Determination in Hyperspectral Data [C]. SPIE Pub: Proc SPIC Imaging Spectrometry V, 1999.
- [18] Staenz K, Szeredi T, Schwarz J. ISDAS-A System for Processing/Analyzing Hyperspectral Data [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1998, 24: 99-113.
- [19] Ifarraguerri A, Chang C I. Unsupervised Hyperspectral Image Analysis with Projection Pursuit [J]. *IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(6): 2529-2538.
- [20] Penn B S. Using Simulated Annealing to Obtain Optimal Linear Endmember Mixtures of Hyperspectral Data [J]. *Computer & Geosciences*, 2002, 28: 809-817.
- [21] 赵文吉,段福州,刘晓萌,等. ENVI 遥感影像处理专题与实践[M].北京:中国环境科学出版社,2007.