

doi: 10.6046/zrzyyg.2022349

引用格式: 李娜,董新丰,王靖岚,等. 面向地质应用的ZY-1 02D 高光谱数据大气校正方法对比[J]. 自然资源遥感,2023,35(4):17-24. (Li N, Dong X F, Wang J L, et al. Comparative study on atmospheric correction methods for ZY-1 02D hyperspectral data for geological applications[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(4): 17-24.)

# 面向地质应用的ZY-1 02D 高光谱 数据大气校正方法对比

李娜<sup>1</sup>, 董新丰<sup>1,2</sup>, 王靖岚<sup>3</sup>, 陈理<sup>1</sup>, 甘甫平<sup>1</sup>, 李彤彤<sup>2</sup>, 张世凡<sup>2</sup>

(1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 四川水利职业技术学院, 成都 610000)

**摘要:** 高光谱数据凭借其在光谱维的技术优势,在地物精细识别尤其是矿物信息精准识别方面应用广泛。高光谱反射率产品是开展矿物识别的基础数据依据,使用合适的大气校正方法获取能够满足应用需求的高精度的地表反射率产品至关重要。为此,采用 ATCOR, FLAASH 和 QUAC 这3种应用相对较广的大气校正模型,对资源一号 02D (ZY-1 02D) 卫星高光谱数据进行大气校正处理,并从目视效果、典型地物波谱分析和矿物信息提取3个方面开展了对比分析。分析结果表明:在目视效果上,3种大气校正模型均能有效提升影像清晰度,ATCOR 模型略优于 FLAASH 和 QUAC 模型;3种模型典型地物光谱与 ASD 实测光谱相关系数平均值  $R^2$  达 0.7 以上,吻合度较好,精度较高,ATCOR 模型反演结果的影像光谱更接近 ASD 实测光谱;对绿泥石识别结果三者一致性较好,绢云母一致性则稍差,对比发现 FLAASH 和 QUAC 模型在地表绢云母含量较低区域漏识率较高。综上所述,3种模型大气校正效果均比较理想,但在矿物识别应用中 ATCOR 模型较 FLAASH 和 QUAC 模型总体上有优势。

**关键词:** 资源一号 02D; 大气校正; ATCOR; FLAASH; QUAC; 矿物识别

**中图法分类号:** TP 79; P 627 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)04-0017-08

## 0 引言

高光谱数据凭借其狭窄波段和近似连续的谱形,可供详细和定量地分析地物特征,在地质调查尤其是地质找矿领域拥有得天独厚的技术优势<sup>[1-6]</sup>。以往限于高光谱遥感数据的匮乏,主要是利用机载高光谱遥感数据开展小面积调查应用;随着国产高光谱卫星的陆续发射,极大丰富了高光谱遥感数据源。资源一号 02D (ZY-1 02D) 卫星于 2019 年 9 月 12 日发射升空,该星作为中国自主建造并成功运行的首颗民用高光谱业务卫星,是国家民用空间基础设施中新型对地观测卫星发展的又一重要成果。其高光谱载荷可实现 166 个谱段的数据同时获取和下载,在矿物信息提取和岩性-构造识别等地质调查应用评价中取得了较好的应用效果<sup>[7]</sup>。具有同样高光谱载荷的 ZY-1 02E 卫星已于 2021 年 12 月 26 日发射升空,目前已经完成在轨测试分析工作,

并已投入在轨业务运行,这将进一步提高地质应用的卫星高光谱数据源保障。利用高光谱遥感数据开展地质应用,特别是矿物识别,主要是依据高光谱遥感反射率产品,根据不同岩矿反射光谱诊断特征的差异,对其进行区分和识别。因此,反射率产品的精度直接影响矿物识别的精度和效果。

卫星传感器接收的地面目标的总辐射亮度并不是地表真实反射率的反映,其中包含了由大气吸收,尤其是散射作用造成的辐射量误差。而大气校正就是消除这些由大气影响所造成的辐射误差,反演地物真实的表面反射率的过程<sup>[8]</sup>。因此,遥感影像大气校正的好坏直接决定了反射率产品精度,进而影响后续的定量反演和应用效果。大气校正的方法主要有基于影像特征的相对大气校正<sup>[9]</sup>、基于地面测量数据的经验线性法<sup>[10]</sup>和基于辐射传输模型改正方法<sup>[11]</sup>,其中比较成熟的模型有 MODTRAN, 6S, FLAASH, QUAC 和 ATCOR 等<sup>[12-14]</sup>。

收稿日期: 2022-08-30; 修订日期: 2023-02-07

基金项目: 国家重点研发计划项目“中空间分辨率光谱地球研发与应用技术研究”(编号: 2019YFE0127300)、民用航天项目(编号: D040102)和中国地质调查局项目“全国遥感地质调查与监测”(编号: DD20221642)共同资助。

第一作者: 李娜(1989-),女,硕士,工程师,主要从事高光谱遥感研究。Email: 942750607@qq.com。

通信作者: 董新丰(1986-),男,博士研究生,高级工程师,主要从事高光谱遥感地学应用研究。Email: dongxin Feng229@163.com。

在高光谱遥感数据矿物信息识别应用中,对短波红外精细光谱特征识别和提取具有很高的要求,而不同的大气校正模型因原理和参数设置等方面的不同,其大气校正结果会有所差异,对后续的应用产生一定影响。王正海等<sup>[15]</sup>基于线性回归经验模型和辐射传输模型(FLAASH 和 ACORN)对 Hyperion 数据进行大气校正,评价其校正效果认为辐射传输模型更简便、实用和精确; Kruse<sup>[16]</sup>分别利用 ATREM, ACORN 和 FLAASH 等 3 种基于辐射传输模型的大气校正方法对 AVIRIS 机载高光谱数据进行大气校正,发现 FLAASH 模型在确保反演精度的同时使用更灵活,对数据格式、数据大小等限制较少; Rani 等<sup>[17]</sup>评价了 FLAASH 和 QUAC 这 2 种大气校正模型对于 Hyperion 数据矿物填图的影响,认为 FLAASH 模型能获得较好的大气校正效果,但当缺少相应的参数时,QUAC 模型更适合; 田青林等<sup>[18]</sup>在利用 WorldView-3 影像对比分析 FLAASH 和 ATCOR 大气校正效果时,得出了 ATCOR 模型优于 FLAASH 模型的结论,但对比分析重点集中在目视效果、光谱整体谱形及分类精度方面,对地质应用尤其重要的局部光谱吸收特征及对矿物信息提取的影响则尚未提及。因此,本文在以往研究的基础上,采用精度相对较高的 FLAASH, QUAC 和 ATCOR 等 3 种大气校正模型,对 ZY-1 02D 高光谱数据进行大气校正; 并从校正影像的目视效果、典型地物波谱特征分析以及矿物信息识别精度 3 个层次进行对比分析,以较全面地评估 3 种大气校正模型的应用效果,为后续 ZY-1 02D 和 02E 业务高光谱卫星数据的推广应用提供技术支持。

## 1 研究区概况与数据源

### 1.1 研究区概况

研究区位于新疆东天山哈密市东南(图 1),总体地势南高北低,海拔在 500~1 500 m 左右,属丘陵、沙漠、砾石戈壁地貌,干燥少雨,植被稀疏。区内基岩裸露,由于受内生及表生地质作用的影响较大,侵入岩普遍蚀变较强,其中基性岩和超基性岩的褐铁矿化、绿泥石化、绿帘石化或蛇纹石化等较发育,而中酸性岩体的白云母化、绢云母化、绿泥石化、高岭石化和黄铁矿化等也较发育<sup>[19]</sup>。矿产资源相对丰富,主要为铜镍硫化物矿床、钒钛磁铁矿和金矿。也正因为研究区较独特的自然地貌和地质特征,被建设为国内第一个遥感地质试验场,用于遥感技术基础理论研究、技术试验、有效载荷指标的论证及评价、遥感影像质量的评价等<sup>[20]</sup>。因此,本文特选取

该区域作为研究区。

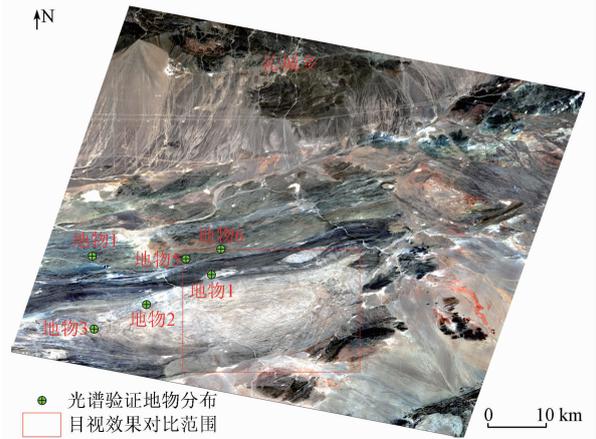


图 1 研究区范围

Fig. 1 Extent of study area

### 1.2 数据源

ZY-1 02D 光学卫星搭载了可见光—近红外相机和高光谱相机,平均轨道高度为 778 km,幅宽为 60 km,空间分辨率为 30 m,共获取波段数 166 个,其中可见光—近红外波段范围 76 个波段,光谱范围为 395~1 040 nm,光谱分辨率为 10 nm; 短波红外波段范围 90 个波段,光谱范围为 1 005~2 501 nm,光谱分辨率为 20 nm。

## 2 研究方法

### 2.1 FLAASH 模型

FLAASH(fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes)基于 MODTRAN4 + 辐射传输模型,涵盖可见光、近红外及短波红外波段。通过对辐射定标后的影像进行大气校正,精确补偿大气影响,并引入大气点扩散函数有效消除邻域效应,获得较高的地物反射率精度。FLAASH 模型假设地表为标准平面朗伯体,传感器接收的像元光谱辐射亮度的计算公式为<sup>[21]</sup>:

$$L = \left( \frac{A\rho}{1 - \rho_e S} \right) + \left( \frac{B\rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_\alpha, \quad (1)$$

式中:  $L$  为传感器处像元接收到的总辐射亮度;  $\rho$  为像元表面反射率;  $S$  为大气球面反照率;  $L_\alpha$  为大气后向散射辐射率(大气程辐射);  $A$  和  $B$  分别为取决于大气条件和几何条件的 2 个独立系数;  $\rho_e$  为像元周围平均表面反射率。本次研究用于 FLAASH 大气校正模型的参数大部分可以从影像数据头文件中获取。

### 2.2 QUAC 模型

QUAC 模型是以经验为依据,通过影像像元光

谱特征估计大气状况;不需要额外的参数信息,只需要在参数设置中选择传感器类型,便可自动从影像内收集不同地物的波谱信息以获取大气补偿参数和经验值,实现快速大气校正。在理想情况下,其计算结果绝对精度近似 FLAASH 或者其他基于辐射传输模型的大气校正方法<sup>[22]</sup>。本次试验中传感器类型选择 Unknown,其他参数选择默认设置。

### 2.3 ATCOR 模型

ATCOR 大气校正模型最早由德国 Wessling 光电研究所 Richter 博士于 1990 年研究提出,并且是经过大量验证的一种快速大气校正算法。ATCOR 模型包含 2 种模式:一种是 ATCOR4 模式,适用于航空遥感影像的大气校正;另一种是 ATCOR2/3 模式,适用于卫星遥感影像的大气校正。本次研究使

$$\theta_{X,Y} = \arccos \frac{\mathbf{X} \cdot \mathbf{Y}}{|\mathbf{X}| \cdot |\mathbf{Y}|} = \arccos \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_i^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n Y_i^2}}, \quad (2)$$

式中:  $\theta$  为 2 个  $N$  维空间向量  $X$  和  $Y$  之间的夹角;  $n$  为所采用数据的波段数;  $X_i$  和  $Y_i$  分别为光谱向量  $X$  和  $Y$  在第  $i$  个波段上的像元值。

## 3 结果与分析

### 3.1 目视效果

为了更好地对比 3 种不同大气校正模型处理后的 ZY-1 02D 高光谱数据目视效果,选取纹理复杂、色调差异较大的高亮岩体地区(图 1 红框范围),大气校正后结果如图 2 所示。相较于原始影

用的 ATCOR2 模型,其算法核心是一个以 MODTRAN4 程序计算辐射传输方程的数据库,通过输入传感器的几何条件、光谱特征及成像时气溶胶等参数,对生成的动态查找表进行插值计算,从而实现快速准确的大气校正<sup>[23]</sup>。

### 2.4 矿物信息提取方法

采用光谱角(spectral angle mapping, SAM)矿物信息提取算法,进行研究区的典型矿物信息提取。SAM 是把影像中每个像元的光谱视为一个  $N$  维向量,通过计算 2 个向量间的夹角来度量光谱间的相似性,夹角越小,2 个光谱越相似,属于同类地物的可能性越大,因而可根据 SAM 的数值大小来辨别未知数据的类别<sup>[24]</sup>。其计算公式为:

像,大气校正后的影像在视觉效果上均有所提升,尤其是在反射率较强的高亮岩体区域,原始影像由于受大气气溶胶、水汽等因素的影响,影像整体偏亮,地物的明暗差异对比度较低,细小的条状纹理特征模糊,与背景较难区分;FLAASH(图 2(a))和 QUAC(图 2(b))大气校正效果有所改善,但相较于原始影像改善效果不明显;ATCOR(图 2(c))大气校正目视效果略微优于 FLAASH 和 QUAC,影像整体信息更丰富一些,色调差异明显加强,纹理更清晰,影像上发育的大面积复杂节理等岩性信息更易于识别,对后续的岩性—构造解译等工作实用性较强。



(a) FLAASH 模型

(b) QUAC 模型

(c) ATCOR 模型

图 2 3 种模型大气校正后真彩色影像

(ZY-1 02D B29(R), B19(G), B8(B) 真彩色合成影像)

Fig. 2 True color images after atmospheric correction for the FLAASH, QUAC and ATCOR models

### 3.2 地物波谱分析

在研究区地质背景较均且具有一定分布面积区域随机选取 6 个地物验证点(具体点位如图 1 所示)进行 ASD 光谱测量,对比分析其影像光谱和地面实测 ASD 光谱的相关关系。为了更好地对比大气校正的效果,需要将 ASD 实测光谱重采样到 ZY-

1 02D 高光谱数据光谱分辨率。6 个地物验证点中,地物 1—3 为亮地物(光谱分析发现矿物分布以绢云母为主),地物 4—6 为暗地物(光谱分析发现矿物分布以绿泥石为主)。分别统计 3 种模型每种地物影像光谱与 ASD 光谱的相关系数(表 1)。

表 1 典型地物影像光谱与 ASD 光谱相关系数对比分析

Tab. 1 Comparison analysis of typical feature image spectra with ASD spectra

模型	地物 1	地物 2	地物 3	地物 4	地物 5	地物 6	平均值	标准差
FLAASH	0.937	0.636	0.633	0.939	0.979	0.985	0.851 5	0.154 5
QUAC	0.791	0.372	0.340	0.893	0.954	0.949	0.716 5	0.260 6
ATCOR	0.926	0.775	0.775	0.954	0.962	0.965	0.892 8	0.084 3

FLAASH 和 ATCOR 大气校正结果较好,6 种地物相关系数平均值达到 0.85 以上,以绿泥石为主的暗地物(地物 4—6)相关系数更是在 0.9 以上。QUAC 大气校正结果稳定性较差,暗地物验证点(地物 4—6)影像光谱与 ASD 光谱的相关系数也达到 0.9 左右,但亮地物验证点相关系数较低,地物 2 和地物 3 只有 0.3 左右。

地物验证点影像光谱与 ASD 光谱对比如图 3 所示,地物 1—3(亮地物)FLAASH 大气校正和 ATCOR 大气校正影像光谱与实测 ASD 光谱相比整体谱形具有较高的一致性,但在可见光—近红外波段范围,FLAASH 大气校正结果较准确,ATCOR 影像光谱在 1 000 nm 左右陡坎现象严重,QUAC 影像光谱表现出与 ASD 光谱不一致的高反射现象,两者结

果均会影响铁染矿物的识别。2 100 ~ 2 400 nm 短波红外波段范围内,3 种方法在 2 199 nm 处均表现出绢云母的吸收特征,但特征吸收深度有所差异,ATCOR 大气校正效果要优于 FLAASH 和 QUAC。地物 4—6(暗地物)3 种大气校正影像光谱与实测 ASD 光谱相比整体谱形相似性也较高,可见光—近红外波段范围与亮地物类似,FLAASH 大气校正结果较准确,ATCOR 影像光谱在 1 000 nm 左右依然存在陡坎现象,QUAC 影像光谱虽然反射率较高,但谱形和 ASD 光谱保持一致。2 100 ~ 2 400 nm 短波红外波段范围内,3 种大气校正模型在 2 250 nm 和 2 334 nm 处表现出绿泥石矿物特有的双吸收特征,且吸收深度相差不大。

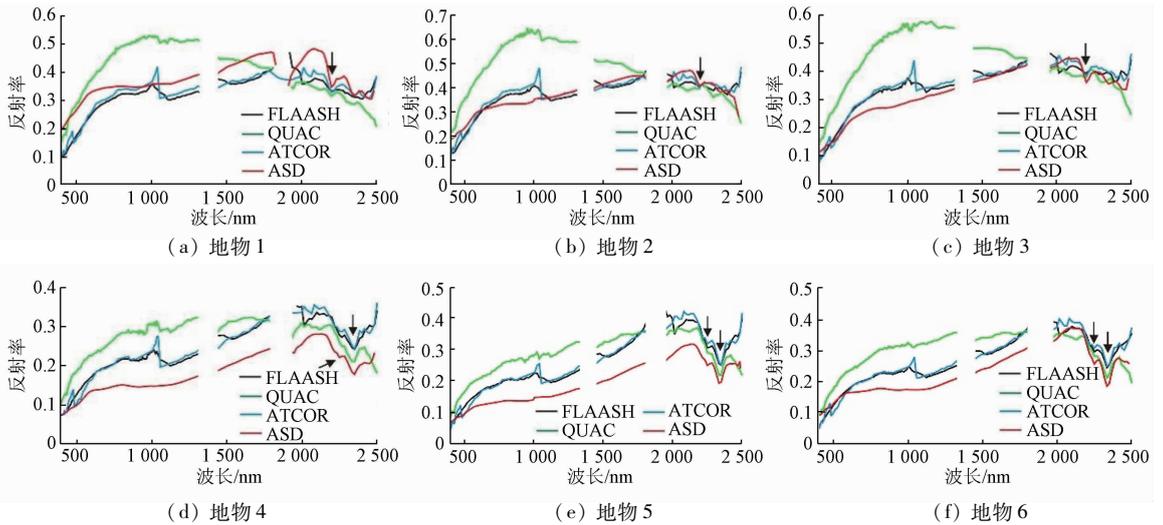


图 3 地物验证点 ASD 光谱与大气校正后光谱对比

Fig. 3 Comparison of ASD spectra of ground objects with atmospherically corrected spectra

综上所述,3 种大气校正模型均能得到具有一定精度的典型亮、暗地物的反射率反演产品,可为地质调查应用提供可靠的基础反射率数据。然而,利用高光谱反射率数据开展矿物识别时,矿物的诊断特征吸收深度是矿物含量的一种直观反映,且诊断特征吸收深度越深越利于识别;因此,从这个角度来看,结合以上分析,当识别矿物吸收特征位于可见光—近红外波段时,可选择 FLAASH 大气校正模型;当识别矿物吸收特征位于短波红外波段,ATCOR 模型较则略有优势。

### 3.3 典型矿物信息提取

研究区绢云母和绿泥石较为发育,因此,本文利

用 SAM 矿物信息提取算法,采用相同的阈值和参数设置,对 3 种模型大气校正后影像进行绢云母和绿泥石矿物信息识别和提取,结果分别如图 4 所示。为了验证 2 种矿物信息识别的正确性,在矿物分布区域随机选取验证点 P1—P6,其中 P1—P3 为绿泥石信息验证点,与 USGS 标准波谱库中绿泥石光谱对比发现(图 5 中 P1—P3),3 种模型大气校正后影像光谱与标准波谱谱形相似度较高,绿泥石双吸收特征明显。P4—P6 为绢云母信息验证点,同样与 USGS 标准波谱库中绢云母光谱对比分析发现(图 5 中 P4—P6),2 199 nm 波段处绢云母吸收特征明显,也表现出较强的相关性。

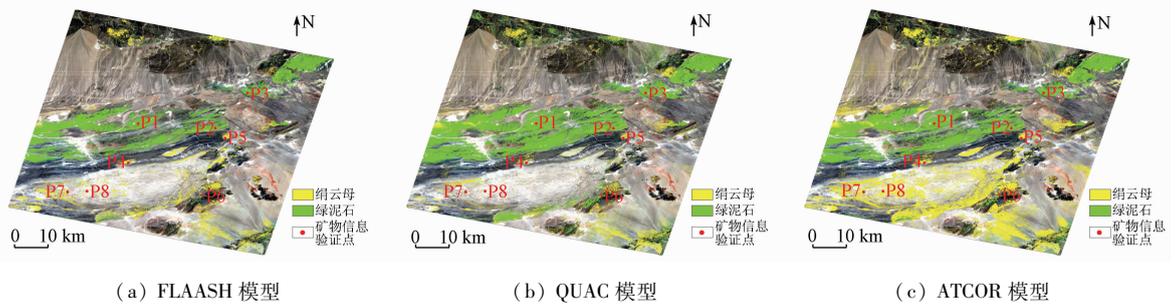


图 4 3 种模型大气校正矿物信息提取

Fig. 4 Mineral information extraction by three atmospheric correction models

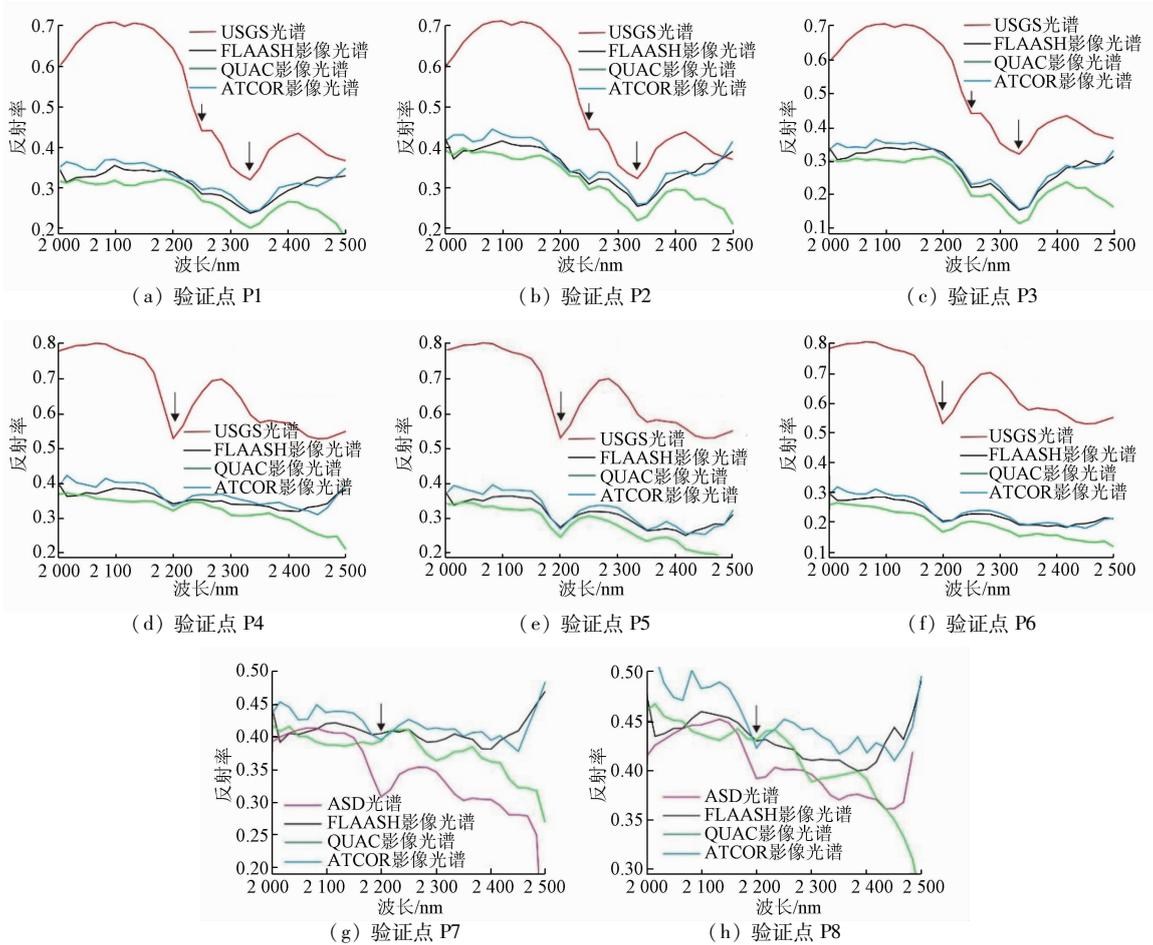


图 5 影像光谱与 USGS 光谱及 ASD 光谱对比

Fig. 5 Comparison of image spectra with USGS spectra and ASD spectra

综上,3 种模型大气校正后影像提取的绢云母和绿泥石矿物信息准确率较高。但是观察三者的矿物分布情况发现,绿泥石矿物信息提取结果分布范围大致相同,而绢云母信息提取结果有明显差异,ATCOR 模型提取的绢云母信息明显要比 FLAASH 和 QUAC 模型提取的绢云母信息分布范围广。因此,在 FLAASH 和 QUAC 模型未提取出绢云母但 ATCOR 模型提取出绢云母区域,选取 2 个验证点 P7 和 P8 进行野外实测 ASD 光谱验证。经分析发现(如图 5 中 P7 和 P8 所示),ASD 光谱和 ATCOR 模型影像光谱均具有绢云母吸收特征,而 FLAASH

和 QUAC 模型影像光谱绢云母特征很微弱,因此会造成在相同阈值和参数设置的条件下,FLAASH 和 QUAC 大气校正模型会造成部分绢云母信息的漏提。

### 3.4 讨论

1) 利用 FLAASH,QUAC 和 ATCOR 等 3 种大气校正模型提取的绿泥石和绢云母 2 种矿物信息较准确,其中绿泥石信息与 ASD 光谱一致性较高,而绢云母信息一致性偏低。与地面测试光谱对比发现,FLAASH 和 QUAC 模型大气校正后影像会有部分绢云母信息的漏提。通过分析 3 种大气校正模型的绢

云母信息相对浓度(图 6)可以看出,FLAASH 和 QUAC 模型大气校正绢云母信息漏提的区域基本为绢云母浓度较低的区域,在这些区域 FLAASH 和 QUAC 模型相比 ATCOR 大气校正结果,其影像光谱

对绢云母的诊断吸收光谱特征表现较弱(图 5 中 P7 和 P8),因此在相同的阈值和参数设置条件下,会造成 3 种大气校正模型不同的矿物信息提取结果。

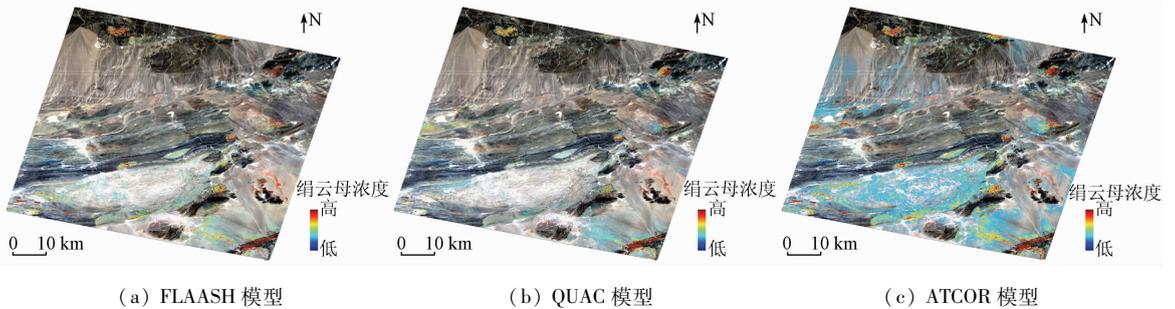


图 6 3 种模型大气校正绢云母浓度

Fig. 6 Sericite concentration by three atmospheric correction models

2)从大气校正策略差异上分析,认为造成上述现象的原因可能是:ATCOR 模型在大气、几何等参数反演过程中,采用循环迭代的方式,查找表动态更新<sup>[23]</sup>,反演的参数可能更接近相同大气环境的实测数据。因此,ATCOR 大气校正的反演结果比 FLAASH 和 QUAC 模型在一些波段的准确性略高,如文中对比发现的 2 199 nm 波段。

3)矿物的诊断光谱特征吸收深度对于矿物识别具有重要指示或参考意义,反演的遥感反射率数据的光谱谱形特征和诊断光谱特征吸收深度均越接近地物真实光谱特征,就更易于被识别,同时矿物定量反演精度更高。如 2 199 nm 波段是绢云母等矿物的诊断特征吸收波长位置,不同的大气校正反演结果,在识别结果上表现出较明显的差异。

4)本研究中对比发现 FLAASH 和 QUAC 模型在 2 199 nm 波段位置的反演精度相较 ATCOR 略低,致使地面绢云母含量较低区域的漏识率较高。因此,在开展矿物填图应用中,ATCOR 模型大气校正结果对矿物弱信息识别更具优势。

## 4 结论

1)通过影像大气校正的目视效果分析,ATCOR,FLAASH 和 QUAC 等 3 种模型均能有效消除大气气溶胶、水汽等因素的影响,而 ATCOR 模型要优于 FLAASH 和 QUAC 模型。

2)通过对比研究区典型亮暗地物反射率光谱,发现对于亮地物的大气校正 ATCOR 模型和 FLAASH 模型要优于 QUAC 模型,对于暗地物的大气校正则 3 种模型精度均比较高。且当识别矿物吸收特征位于可见光—近红外波段时,可选择

FLAASH 大气校正模型;当识别矿物吸收特征位于短波红外波段时,ATCOR 模型则略有优势。

3)从提取的绿泥石和绢云母 2 种矿物信息分析,绿泥石提取结果一致性较高,绢云母提取结果一致性偏低。其主要原因是 FLAASH 和 QUAC 模型在 2 199 nm 波段吸收深度相较 ATCOR 模型略低,致使在绢云母含量较低区域,会有部分信息漏识别。

综上所述,3 种模型对 ZY-1 02D 高光谱反射率反演结果均能较好地满足地质调查应用需求。本研究结合研究区发育的典型矿物,对比了 ATCOR,FLAASH 和 QUAC 模型的矿物识别应用效果,虽然对比发现在部分具有矿物诊断吸收特征波段位置,ATCOR 模型较 FLAASH 和 QUAC 模型总体上反演结果更准确,但后续还需要开展多种矿物、多区域实验验证,从不同地貌、不同大气模式以及模型处理效率等多个方面进一步综合、全面地评价 3 种模型在不同场景应用中的适用性。

## 参考文献 (References):

- [1] 王茜,任广利. 高光谱遥感异常信息在阿尔金索拉克地区铜金矿找矿工作中的应用[J]. 自然资源遥感,2022,34(1):277-285. doi:10.6046/zrzyyg.2021036.  
Wang Q, Ren G L. Application of hyperspectral remote sensing data-based anomaly extraction in copper-gold prospecting in the Solake area in the Altyn metallogenic belt, Xinjiang[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(1): 277-285. doi: 10.6046/zrzyyg.2021036.
- [2] 王瑞军,张春雷,孙永彬,等. 高光谱在甘肃红山多金属找矿模型构建中的应用[J]. 国土资源遥感,2020,32(3):222-231. doi:10.6046/gtzyyg.2020.03.29.  
Wang R J, Zhang C L, Sun Y B, et al. Application of hyperspectral spectroscopy to constructing polymetallic prospecting model in Hongshan, Gansu Province[J]. Remote Sensing for Land and Re-

- sources,2020,32(3):222-231. doi:10.6046/gtzyyg.2020.03.29.
- [3] 董新丰,闫柏琨,李娜,等. 基于航空高光谱遥感的沉积变质型铁矿找矿预测——以北祁连山地区为例[J]. 地质与勘探,2018,54(5):1013-1023.
- Dong X F, Yan B K, Li N, et al. Prospecting prediction of sedimentary metamorphic type iron deposits based on airborne hyperspectral remote sensing: A case study of the Jingtianshan area in the northern Qilian Mountains[J]. *Geology and Exploration*, 2018, 54(5): 1013-1023.
- [4] Van Ruitenbeek F, Cudahy T J, van der Meer F, et al. Characterization of the hydrothermal systems associated with Archean VMS-mineralization at Panorama, Western Australia, using hyperspectral, geochemical and geothermometric data[J]. *Ore Geology Reviews*, 2012, 45: 33-46.
- [5] Bell J H, Bowen B B, Martini B A. Imaging spectroscopy of jarosite cement in the Jurassic Navajo Sandstone[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(10): 2259-2270.
- [6] Carrino T A, Crósta A P, Toledo C, et al. Hyperspectral remote sensing applied to mineral exploration in southern Peru: A multiple data integration approach in the Chapi Chiara gold prospect[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 64: 287-300.
- [7] 李娜,董新丰,甘甫平,等. 资源一号02D卫星高光谱数据地质调查应用评价[J]. 航天器工程,2020,29(6):186-191.
- Li N, Dong X F, Gan F P, et al. Application evaluation of ZY-1-02D satellite hyperspectral data in geological survey[J]. *Spacecraft Engineering*, 2020, 29(6): 186-191.
- [8] Molkov A, Fedorov S, Pelevin V. Toward atmospheric correction algorithms for Sentinel-3/OLCI images of productive waters[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(15): 3663.
- [9] Kaufman Y J, Gao B C. Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 871-884.
- [10] Smith G M, Milton E J. The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(13): 2653-2662.
- [11] Goetz A, Calvin W M. Imaging spectrometry: Spectral resolution and analytical identification of spectral features[C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1987, 834: 158-165.
- [12] Ostrikov V N, Plakhotnikov O V, Kirienko A V. Estimation of spectral resolution of imaging spectrometers from Fraunhofer lines with the MODTRAN atmospheric model[J]. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2019, 32(6): 622-627.
- [13] Yang M M, Hu Y, Tian H Z, et al. Atmospheric correction of airborne hyperspectral CASI data using polymer, 6S and FLAASH[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(24): 5062.
- [14] Maher A, Ghazzl N K. Removing atmospheric effects for multi spectral images (OLI 8) using ATCOR model[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 757(1): 012072.
- [15] 王正海,段建军,耿欣. 基于波谱匹配的Hyperion数据大气校正方法对比研究[J]. 遥感技术与应用,2011,26(4):432-436.
- Wang Z H, Duan J J, Geng X. Comparative study on atmospheric correction methods of Hyperion data based on spectral matching[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(4): 432-436.
- [16] Kruse F A. Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH atmospheric corrections using low-altitude AVIRIS data of Boulder, CO [J/OL]. *JPL Airborne Geoscience Workshop*, 2014(2014-05-26)[2022-04-14]. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.569.8864&rep=rep1&type=pdf>.
- [17] Rani N R, Mandla V R, Singh T. Evaluation of atmospheric corrections on hyperspectral data with special reference to mineral mapping[J]. *Geoscience Frontiers*, 2017, 8(4): 797-808.
- [18] 田青林,秦凯,陈雪娇,等. WorldView-3卫星影像大气校正方法应用对比研究[J]. 世界核地质科学,2021,38(2):229-236.
- Tian Q L, Qin K, Chen X J, et al. Comparison research on the application of atmospheric correction methods for WorldView-3 satellite imagery[J]. *World Nuclear Geoscience*, 2021, 38(2): 229-236.
- [19] 梁树能,甘甫平,魏红艳,等. 哈密遥感地质资源评价综合应用野外试验场建设进展[J]. 国土资源遥感,2015,27(2):8-14. doi:10.6046/gtzyyg.2015.02.02.
- Liang S N, Gan F P, Wei H Y, et al. Progress in construction of remote sensing and geological test field for comprehensive application and resources evaluation in Hami, Xinjiang[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2015, 27(2): 8-14. doi:10.6046/gtzyyg.2015.02.02.
- [20] 梁树能,甘甫平,张振华,等. 国内外遥感试验场建设进展[J]. 地质力学学报,2015,21(2):129-141.
- Liang S N, Gan F P, Zhang Z H, et al. Introduction of the remote sensing test field site construction progress at home and abroad[J]. *Journal of Geomechanics*, 2015, 21(2): 129-141.
- [21] Matthew M W, Adler-Golden S M, Berk A, et al. Atmospheric correction of spectral imagery: Evaluation of the FLAASH algorithm with AVIRIS data[C]//Applied Imagery Pattern Recognition Workshop. IEEE, 2003: 157-163.
- [22] Maher A. Evaluation of atmospherically gases using models FLAASH and QUAC to hyper-spectral imagery[J]. *Karbala International Journal of Modern Science*, 2019, 5(4): 213-225.
- [23] 刘安伟. 基于模拟多光谱遥感影像的大气校正方法比较研究[J]. 矿山测量,2018,46(2):10-13,26.
- Liu A W. Comparison of atmospheric correction methods based on simulated multi-spectral remote sensing images[J]. *Mine Surveying*, 2018, 46(2): 10-13, 26.
- [24] Wang C L, Yang F, Wang H W, et al. Urban house detection using SAM and SIFT on hyperspectral remote sensing images[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1237(3): 032029.

## Comparative study on atmospheric correction methods for ZY - 1 02D hyperspectral data for geological applications

LI Na<sup>1</sup>, DONG Xinfeng<sup>1,2</sup>, WANG Jinglan<sup>3</sup>, CHEN Li<sup>1</sup>, GAN Fuping<sup>1</sup>, LI Tongtong<sup>2</sup>, ZHANG Shifan<sup>2</sup>

(1. *China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China;*

2. *School of Earth Sciences and Resource, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083,*

*China; 3. Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chengdu 610000, China)*

**Abstract:** Hyperspectral data, exhibiting technical advantages in the spectral dimension, have been extensively used for accurately identifying surface features, particularly mineral information. Mineral identification relies on hyperspectral reflectance products, necessitating the application of proper atmospheric correction methods to obtain high - precision surface reflectance products that meet application requirements. Hence, three commonly used atmospheric correction models, ATCOR, FLAASH, and QUAC, were utilized to correct the hyperspectral data acquired by the ZY - 1 02D satellite. Moreover, a comparative analysis was conducted on their visual effects, spectral analysis of typical surface features, and extraction of mineral information. The results are as follows: ① All three atmospheric correction models can effectively enhance image clarity in terms of visual effects. Specifically, the ATCOR model slightly outperformed the FLAASH and QUAC models; ② The correlation coefficients ( $R^2$ ) between the typical surface feature spectra of the three models and the ASD - measured spectra showed average values exceeding 0.7, suggesting high consistency and accuracy. Especially, the imaging spectra derived from the inversion results of the ATCOR model were more similar to the ASD - measured spectra; ③ The three models yielded relatively consistent results in chlorite identification but divergent results in sericite identification. Comparatively, the FLAASH and QUAC models exhibited high omission rates in surface regions with low sericite content. Overall, all three models can achieve satisfactory atmospheric correction effects, but the ATCOR model is superior to the other two models in mineral identification.

**Keywords:** ZY - 1 02D; atmospheric correction; ATCOR; FLAASH; QUAC; mineral identification

(责任编辑: 陈 理)