

基于 ASTER 数据的遥感蚀变信息提取 ——以西天山穆龙套地区为例

茹菲娜·阿力木江¹⁾, 陈川^{1,2)*}, 高玲玲^{1,2)}, 李顺达^{1,2)}

1)新疆大学地质与矿业工程学院, 新疆乌鲁木齐 830047;

2)新疆中亚造山带地球动力学过程与成矿预测重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830047

摘要: 西天山是“丝绸之路经济带”和“亚洲金腰带”的核心区和重要组成部分, 世界级的穆龙套金矿床是西天山成矿带内最重要的金矿床之一。作者将前人成果与自身研究结果结合, 形成该篇以穆龙套地区为例的基于 ASTER 数据的遥感蚀变信息提取的论文。含碳质细碎屑岩是穆龙套地区的溶矿岩层, 矿体受韧性-脆性断裂系统的严格控制。穆龙套地区热液蚀变类型丰富, 黑云母化、硅化、钠长石化、绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化等蚀变信息与金矿化关系极为密切, 且 ASTER 数据 VNIR-TIR 波段可提取多种蚀变矿物信息, 本文使用 ASTER 数据, 对穆龙套金矿床及其外围地区开展遥感蚀变异常提取: 利用波段比值法、矿物指数法提取硅化蚀变, 利用主成分分析法提取 Mg-OH、铁染和碳酸盐化蚀变信息。最后基于 ArcGIS 平台, 将提取出的遥感异常信息、搜集到的已知矿点及重砂异常叠加分析, 结果表明遥感异常密集区与已知矿点吻合度较高, 这对研究及寻找同类型矿床有一定的参考价值。

关键词: ASTER; 穆龙套; 蚀变信息; 主成分分析

中图分类号: P627 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2021.052401

The Extraction of Remote Sensing Alteration Information Based on ASTER Data: A Case Study of Muruntau Area in Western Tianshan Mountains

Rufeina ALIMUJIANG¹⁾, CHEN Chuan^{1,2)*}, GAO Ling-ling^{1,2)}, LI Shun-da^{1,2)}

1) College of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830047;

2) Xinjiang Key Laboratory of Geodynamic Process and Metallogenic Prediction of Central Asian Orogenic Belt, Urumqi, Xinjiang 830047

Abstract: West Tianshan is the core area and an important part of "Silk Road Economic Belt" and "Asian Gold Belt". The world-class Muruntau gold deposit is one of the most important gold deposits in the West Tianshan metallogenic belt. The authors combined the previous achievements with his own research results to form this paper on remote sensing alteration information extraction based on ASTER data, with Muruntau area of West Tianshan Mountains as an example. Carbonaceous fine clastic rock is the ore soluble stratum in Muruntau area. The orebody is strictly controlled by the ductile - ductile brittle fracture system. Hydrothermal alteration types in Muruntau area are rich in biotite, silicification, albitization, chloritization, epidotization, carbonation and other alteration information, which is closely related to gold mineralization. Moreover, a variety of alteration mineral information can be extracted from the ASTER data in VNIR-TIR band. Remote sensing extraction of alteration anomalies in the Muruntau gold deposit and its peripheral areas was carried out: the silicified alteration was extracted by band ratio method and mineral index method, and the alteration information of Mg-OH, iron staining

本文由中国科学院战略性先导科技专项(A类)“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”子课题“矿产资源分布及其潜力评估”项目(编号: XDA20070304)资助。

收稿日期: 2021-03-16; 改回日期: 2021-05-17; 网络首发日期: 2021-05-26。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 茹菲娜·阿力木江, 女, 1995年生。硕士研究生。研究方向为地球探测与信息技术。E-mail: 103908489@qq.com。

*通讯作者: 陈川, 男, 1972年生。副教授, 硕士生导师。从事资源遥感图像数字处理、综合信息成矿预测、地球探测与信息技术方向研究。通讯地址: 830047, 乌鲁木齐市天山区延安路1230号。E-mail: xjzycc2017@163.com。

and carbonation was extracted by principal component analysis method. Finally, on the basis of the ArcGIS platform, the extracted remote sensing anomaly information, the collected known ore spots and the heavy sand anomaly were superimposed upon each other and analyzed. The results show that the remote sensing anomaly intensive area has a high coincidence degree with the known ore spots, which has a certain reference value for the study and search of the same type of deposits.

Key words: ASTER; Muruntau; alteration information; Principal Component Analysis (PCA)

金矿是国家重点勘查和开采的一种矿床类型,对经济发展具有重要意义。穆龙套金矿位于乌兹别克斯坦卡拉库姆板块北缘,克孜尔库姆沙漠腹地,是全球黄金储量最大的金矿床(薛春纪等, 2014a, b, 2020; 李志丹等, 2017), 金储量已达 6137 t, 平均品位 3.5 g/t, 该矿床产于南天山北段的海西造山带, 并且还在不断地勘查开发之中, 有巨大的找矿前景。

矿产勘探工作随着科学技术的发展得到了不同程度的技术支撑。利用遥感技术, 可以在最短的时间内获取大范围的数据, 跟传统的地质勘查相比, 省时省力, 近年来受到了地质工作者的重视。如多光谱卫星 ASTER 数据具有 14 个波段, 对岩性及矿物识别具有良好的应用效果。国内外许多学者把多光谱遥感技术成功地应用于遥感找矿研究中。如林腾等(2011)利用 ASTER、Landsat-7 数据以及主成分分析法和波段比值法, 成功的圈定了蚀变异常区域, 并为该区域的找矿提供了重要的理论基础; 刘道飞等(2015)提出 ASTER 热红外遥感硅化信息提取方法; Adiri et al.(2016)使用 ASTER 和 OLI 遥感影像数据, 利用主成分分析、波段比值及 SVM 技术进行岩性填图研究, 并发现前两种技术结果优于 SVM 技术; Bohon et al.(2018)使用 ASTER 遥感数据 TIR 波段, 进行岩性填图, 较好的区分出不同岩性; Nino-miya and Fu(2019)通过光谱测量方法、对比标准光谱与从遥感数据中提取光谱, 总结了提取岩性、矿物信息各种光谱指数; 段俊斌等(2019)利用 ASTER 数据对蚀变异常和控矿因子进行提取; Noori et al.(2019)基于 ASTER 数据, 通过 BR、PCA 处理, 对伊朗北部多金属热液脉型蚀变带中进行蚀变提取。ASTER 数据因波谱连续性好、频段多等优越性, 在矿化信息提取方面有更大的优势(黄宇飞等, 2019)。

本文以穆龙套金矿及其外围为重点研究区, 基于 ASTER 数据的热红外波段, 利用矿物指数法, 波段比值法提取硅化信息并进行对比, 基于 ASTER 数据的短波红外波段, 利用主成分分析法提取 Mg-OH、铁染、碳酸盐化等矿化蚀变信息, 并最后综合各类信息, 结合已知矿点, 分析遥感技术在此地区的应用潜力, 以期同类型矿床研究提供可靠依据。

1 研究区地质背景

穆龙套金矿位于西天山成矿带的西端(薛春纪等, 2014a, b, 2020; 李志丹等, 2017), 乌兹别克斯坦卡拉库姆板块北缘, 地理坐标为北纬 41°15′、东经 64°15′。在区域构造上, 位于南天山北段的海西造山带(图 1), 形成于卡拉库姆板块北缘大型韧性变形带(薛春纪等, 2014a, b, 2020; 李志丹等, 2017)。

奥陶系—志留系别萨潘组含碳复理石建造是穆龙套矿床的主要赋矿地层, 且在区域造山过程中发生绿片岩相浅变质(薛春纪等, 2014a, b, 2020; 李志丹等, 2017; 图 2)。浅变质的粉砂岩、砂岩和泥岩组成了别萨潘组, 从新到老划分为 4 个岩性段, 即绿色别萨潘(Bs4)、杂色别萨潘(Bs3)、灰色别萨潘(Bs2)和黑色别萨潘(Bs1); 其中杂色别萨潘(Bs3)是穆龙套矿床主要含金层位, 主要由碳质片岩夹中薄层变粉砂岩、含绢云母片岩组成, 金背景值明显高于外围层和其他岩层(Wilde et al., 2001; Bierlein and Wilde, 2010; 薛春纪等, 2014a, b, 2020; 李志丹等, 2017)。

矿体产出受剪切带及衍生的韧性-韧性断裂系统的严格控制。主要有 3 组构造裂隙带: ①NW 向片理-流劈理构造带, 带内岩石片理化和流劈理发育, 主要金矿体都产在该构造带; ②EW 向构造裂隙带, 带内裂隙多属张性裂隙, 常被石英脉、电气石脉或石英电气石脉充填; ③SN 向剥离构造带, 带中有含金石英脉产出(孟广路等, 2013)。

矿石中主要金属矿物为黄铁矿、毒砂、白钨矿和自然金, 次要金属矿物为磁黄铁矿、辉钼矿、闪锌矿、白铁矿、方铅矿、黄铜矿。石英、长石和黑云母为主要的脉石矿物, 还有少量碳酸盐矿物等(薛春纪等, 2014a, b, 2020; 李志丹等, 2017)。穆龙套金矿中热液蚀变类型丰富, 黑云母化、硅化、钠长石化、绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化等蚀变信息与金矿化关系极为密切(孟广路等, 2013; 薛春纪等, 2014a, b, 2020; 李志丹等, 2017)。

2 遥感数据源及数据预处理

2.1 遥感数据简介

本次研究中采用的遥感数据源是 2001 年 5 月 17 日获取的 ASTER 遥感数据, 编号为

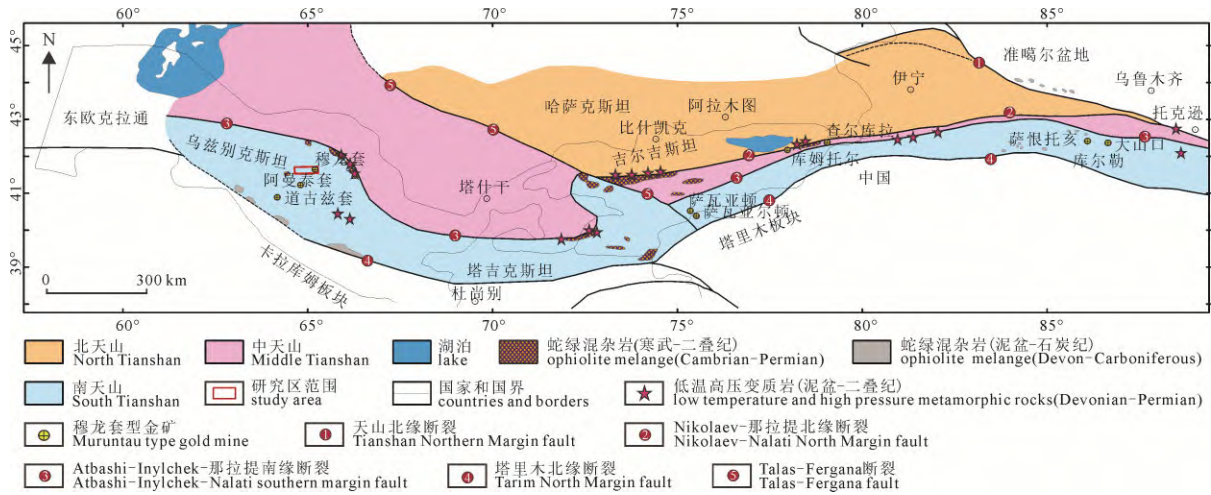


图 1 研究区构造位置图(据文献薛春纪等, 2014a, b, 2020; 李志丹等, 2017 修改)

Fig. 1 Structural location map of the study area (modified after Xue et al., 2014a, b, 2020; Li et al., 2017)

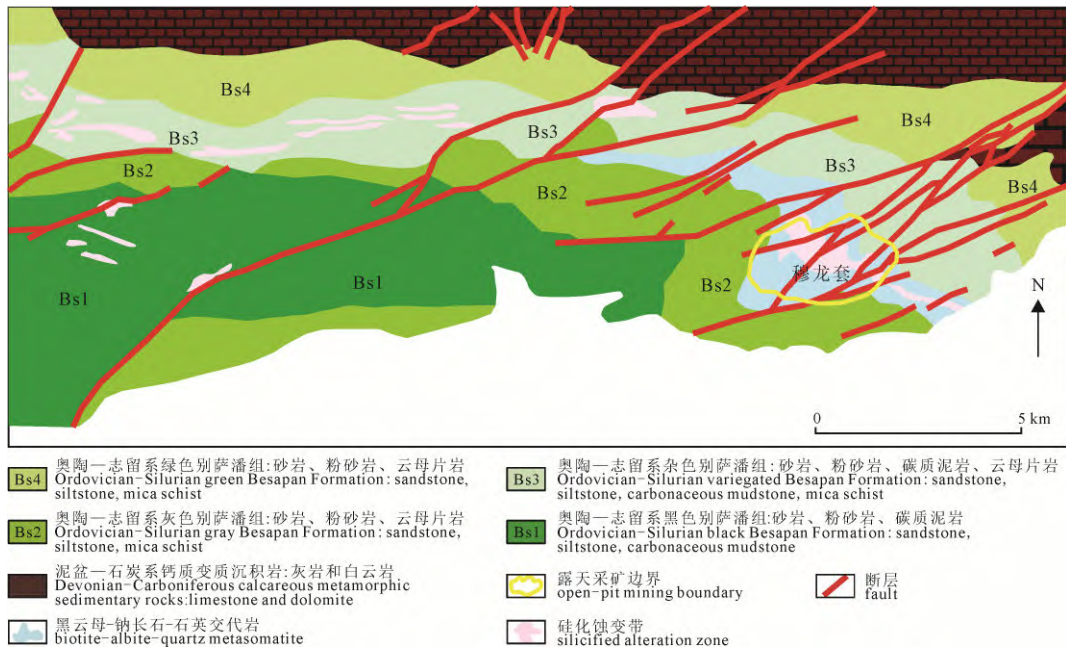


图 2 穆龙套金矿区域地质图(据 Wilde et al., 2001; Bierlein and Wilde, 2010; 薛春纪等, 2020 修改)

Fig. 2 Regional geological map of the Muruntau gold deposit (modified after Wilde et al., 2001; Bierlein and Wilde, 2010; XUE et al., 2020)

AST_LIT_00305172001065021_20150416 042153_90289。ASTER 数据的空间分辨率及光谱分辨率较高, 并且可以接收从 VNIR 到 TIR 光谱的图像数据。ASTER 光谱范围从 0.52~11.65 μm , 共有 14 个波段影像数据。

2.2 数据预处理

2.2.1 VNIR 及 SWIR 数据预处理

首先对 VNIR 波段和 SWIR 波段分别做辐射定标, 消除传感器本身所带来的误差, 进一步确定入口处的准确辐射值(图 3), 再将 SWIR 波段重采样至 15 m 后, 并把 VNIR 波段和 SWIR 波段叠加, 再对数据进行大气校正处理。

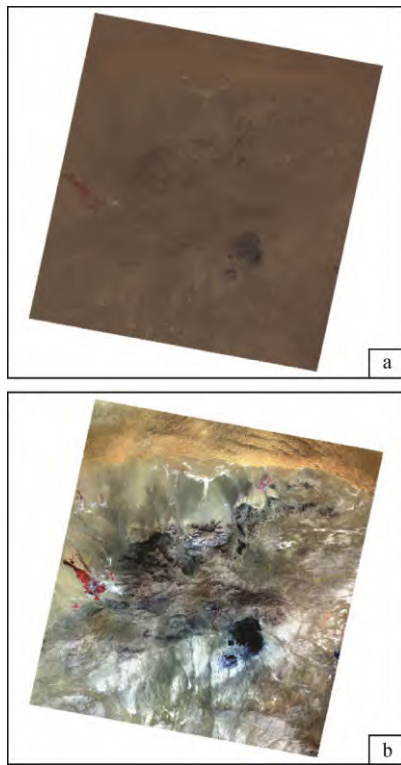
为消除由大气反射、吸收和散射引起的误差,

在 ENVI 软件中的 FLAASH 模块中进行大气校正, 该模型是基于 MODTRAN4 模型, 是目前校正精度最高的大气校正模型(周君亚, 2018)。大气校正后, 选取典型地物为对象, 如植被, 来验证校正效果, 对校正前后的波谱曲线进行对比(图 4)。

从图 4 中可以看出大气校正后的波谱曲线得到了明显改善, 可见光波段的反射率普遍下降, 近红外波段的反射率达到峰值。

2.2.2 TIR 数据预处理

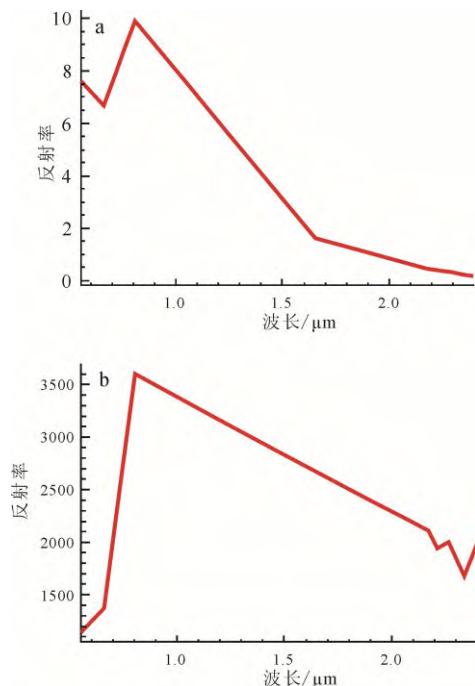
TIR 数据的预处理包括辐射定标、大气校正。辐射定标上文所说的一致, 大气校正本文利用 ENVI 提供的 Thermal Atm Correction 模块中进行校正, 以消除大气对地物发射率信息的影响。



a—原始影像; b—辐射定标后。
a—original image; b—after radiometric calibration.

图3 ASTER 辐射定标前后对比图

Fig. 3 Comparison of ASTER before and after radiometric calibration



a—大气校正前; b—大气校正后。
a—before atmospheric correction;
b—after atmospheric correction.

图4 波谱曲线

Fig. 4 Spectral curve

2.2.3 干扰信息去除

干扰地物通常是指具有较高反射率的地物类型如云雪、植被、水体、阴影和盐碱地等。本文采

表1 ASTER 数据去干扰方法列表

Table 1 ASTER data anti-interference method list

地物	去除方法	备注
阴影	B9/B1	可能会去掉暗色岩体信息
水体	B9 低端切割或 B9/B1	注意阈值选取
植被	B4/B3	可能会去掉暗色岩体信息
盐碱地	B2 或 B3 高端切割	

用高端或低端切割法及比值法去除干扰信息。高端或低端切割法通过干扰地物在遥感图像上某个波段具有高反射或强吸收的特征,即某波段干扰地物具有较高或较低值;比值法通过某两个波段的反射率比值结果可以清楚地区分开干扰及目标地物,将对结果输入适合的阈值可以去除干扰物(别小娟, 2014),如表1所示。

3 遥感蚀变信息提取

3.1 蚀变信息的遥感特征

围岩蚀变是在热液成矿过程中,近矿围岩与热液之间发生化学反应引起的一系列构造、物质成分和结构的变化,是一种重要的找矿标志。由于围岩蚀变分布的范围比矿体要大,因此在找矿中容易发现,而且越接近矿体,围岩遭受的蚀变越发强烈,因此它能指示地面上的矿体形态和位置,也能指示地下盲矿体的存在。

穆龙套金矿是属于以浅变质含碳质碎屑岩系为容矿岩石的矿床,主要发育绿泥石化、绿帘石化、硅化、黑云母化、钠长石化、碳酸盐化等蚀变(薛春纪等, 2014a, b, 2020; 李志丹等, 2017)。一般情况下,因离子和离子基团的不同(孙娅琴, 2017),可分为7种蚀变矿物,分别为硫酸盐、碳酸盐、铁染、硅化、Fe-OH、Mg-OH 和 Al-OH 蚀变矿物等。根据研究区蚀变特点,本文主要讨论含 Mg-OH、铁染、硅化以及碳酸盐蚀变矿物的波谱特征。ASTER 数据可以识别从 VNIR 到 TIR 的不同光谱范围内的部分矿物见表2(耿新霞等, 2008; 赵芝玲等, 2016)。

表2 ASTER 光谱范围与可识别矿物
(据赵芝玲等, 2016 修改)

Table 2 ASTER spectral range and identifiable mineral
(modified after ZHAO et al., 2016)

波段	波长/ μm	可识别矿物
VNIR	0.5 ~ 0.8	铁的氧化物
	1.3 ~ 2.5	碳酸盐、氢氧化物
	1.47 ~ 1.82	硫酸盐类、明矾石
	2.16 ~ 2.24	白云母、高岭石
	2.24 ~ 2.30	绿脱石、黄钾铁矾
	2.26 ~ 2.32	方解石等碳酸盐类矿物
SWIR	2.30 ~ 2.40	绿泥石、绿帘石
	8.0 ~ 14.0	石英、长石、黑云母等 硅酸盐类矿物

3.2 硅化信息提取

硅化异常作为野外重要的找矿标志之一, 与许多金矿的形成密不可分。研究区赋矿岩石为区域低温动力变质热液作用产物, 主要特征为变形强、变质弱。有利的成矿地段岩石因经历了动力变质作用(孟广路等, 2013), 硅化蚀变明显。根据矿物的波谱特征, 选择两个具有特征吸收带和高反射率(李海疆, 2019)波段相除, 以此达到增强蚀变矿物等弱信息的目的, 此为波段比值法。而矿物指数法是通过各种不同的波段比值组合来提取具有相同岩性的矿物, 这些波段比值复杂组合被称为矿物指数(李进波, 2019)。本文综合分析 USGS 波谱库中主要硅化蚀变矿物的波谱特征, 如石英、黑云母和钠长石, 发现它们在 9.0 μm 附近有吸收特征, 对应 ASTER 数据热红外波段的 B12, 在 10.65 μm 处有反射特征, 对应 ASTER 数据热红外波段的 B13(图 5)。

陈江和王安建(2007)对 TIR 波谱库进行研究, 得出了 SiO₂ 含量与 ASTER 热红外波段的函数关系, 公式如下:

$$SiO_2 = 28.760503921704 \log_{10} [6.560448646402 \times b_{13} \times b_{14} / (b_{10} \times b_{12})] \quad (1)$$

公式(1)中 b₁₀、b₁₂、b₁₃ 和 b₁₄ 分别对应 ASTER 热红外波段的辐射亮度值。

通过公式(1)利用 Band Math 工具得到 SiO₂ 含量图, 并对 SiO₂ 含量图进行密度分割, 注意选择合适的阈值, 以遥感影像为底图将提取的异常信息叠加到影像上(图 6a)。

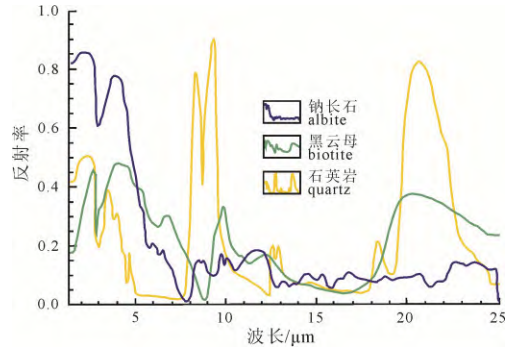
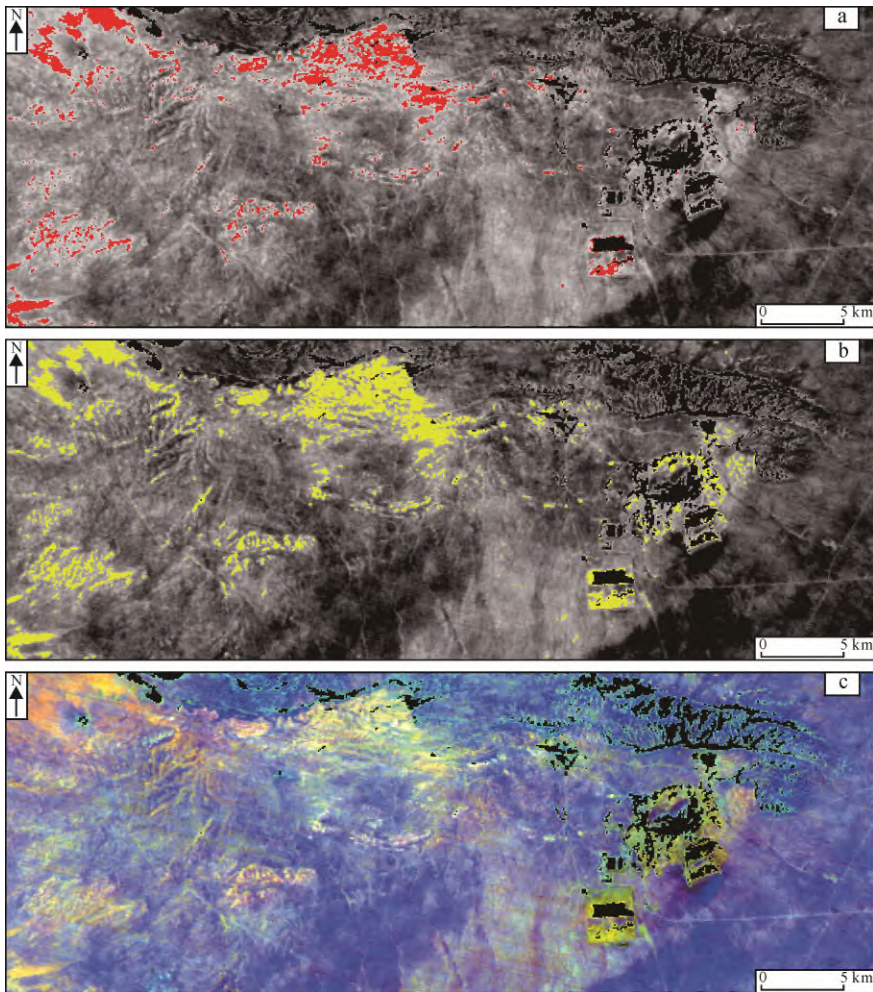


图 5 硅化蚀变矿物波普曲线(来源于 USGS 波谱库)
Fig. 5 Pop curve of silicified altered minerals (after USGS spectral library)



a—SiO₂ 含量提取异常; b—波段比值提取异常; c—SiO₂ 矿物指数图。
a—abnormal extraction of SiO₂ content; b—abnormal extraction of band ratio; c—SiO₂ mineral index diagram.

图 6 硅化蚀变异常图
Fig. 6 Abnormal diagram of silicification alteration

通过比值法,根据上文所说的硅化蚀变矿物波谱特征,对 ASTER 热红外波段 B13/B12 进行比值运算,得到突出硅化信息的影像图,统计图像的标准差及平均值后提取异常信息,并叠加到遥感影像底图上(图 6b)。

通过矿物指数法处理后的遥感影像可以区分出二氧化硅含量不同的地质体,因此能达到增强解译效果的目的。选取 ASTER 三种识别 SiO₂ 的矿物指数见表 3。根据以下 3 种矿物指数的彩色合成图(图 6c),可以看出提取到的异常区域大致相符,彩色合成后的图 6c 中可以看出异常区呈浅黄色,金黄色。

3.3 Mg-OH、铁染、碳酸盐类蚀变信息提取

主成分分析是消除波段之间冗余信息的技术手段。通过正交变换,原始图像的各个波段中包含的信息都集中在前几个主成分中,因此新组成的图像各波段间互不相关,每个中包含的特征信息也不同(宋晚郊, 2013)。本文利用 USGS 波普数据库,通过波谱规律分析研究区蚀变类型(图 7)。

3.3.1 Mg-OH 蚀变信息提取

绿泥石是穆龙套金矿核部主要蚀变矿物(孟广路等, 2013), Mg-OH 可以提出绿泥石, 绿帘石等蚀变矿物。2.30~2.40 μm 是 Mg-OH 蚀变矿物的特征吸收范围, 对应 ASTER 数据 B8, 故选择 B1, B3, B4 和 B8 主成分分析模型作为含 Mg-OH 蚀变信息提取模型。根据含 Mg-OH 的蚀变矿物波谱特征(图 7a), 该类蚀变矿物在 B3 波段和 B8 波段表现为吸收特征,

在 B1 波段和 B4 波段表现为反射特征, 根据表 4 中, B1 与 B3、B4 与 B8 波段的贡献系数应分别具有相反的符号, 满足上述要求的最佳分量是第四分量, 故选 PC4 提取该类蚀变。

3.3.2 铁染蚀变信息提取

地表见有氧化形成的黄褐色铁染、黄钾铁矾的铁帽带亦为野外直接找矿标志之一(孟广路等, 2013)。含铁染蚀变信息的提取包括黄铁矿、磁黄铁矿等矿物蚀变信息。据该吸收特征(图 7b), Fe³⁺特征吸收位置出现在 0.5 μm 和 0.9 μm 附近, 因此选择 ASTER 数据 B1、B2、B3 和 B4 为铁染蚀变矿物主成分分析模型, 诊断特征为 B3 和 B4 符号相反, 作为反射谷的 B3 符号为负, 作为反射峰波段的 B4 符号为正, 得到统计特征矩阵(表 5)中, 满足上述要求的最佳分量为第三分量, 因此故选 PC3 进行铁染蚀变信息提取。

3.3.3 碳酸盐类蚀变信息提取

碳酸盐化带的存在是中温中深成金矿化的重要指示, 表明地壳深部富含 CO₂ 流体的大量流动(孟广路等, 2013)。1.85~2.20 μm 和 2.30~2.35 μm 是碳酸盐类蚀变矿物的特征吸收范围(图 7c), 故选择 B1、B3、B4、B5 进行主成分分析提取该类蚀变。根据该类蚀变矿物波谱特征可知, 在 B4 具有反射, B5 具有吸收特征, 故在该模型主成分特征矩阵(表 6)中, 满足上述要求的最佳分量为取反后的第四分量, 故选 PC4 进行该类蚀变信息提取。

表 3 SiO₂ 指数计算方法
Table 3 Calculating method of SiO₂ index

指数名称	R	G	B
SiO ₂ 指数	(Band14/Band12)	(Band13/Band10)	(Band11/Band10)
备注	用于提取硅酸盐类矿物	能够识别硅质岩	识别二氧化硅含量高的地质体

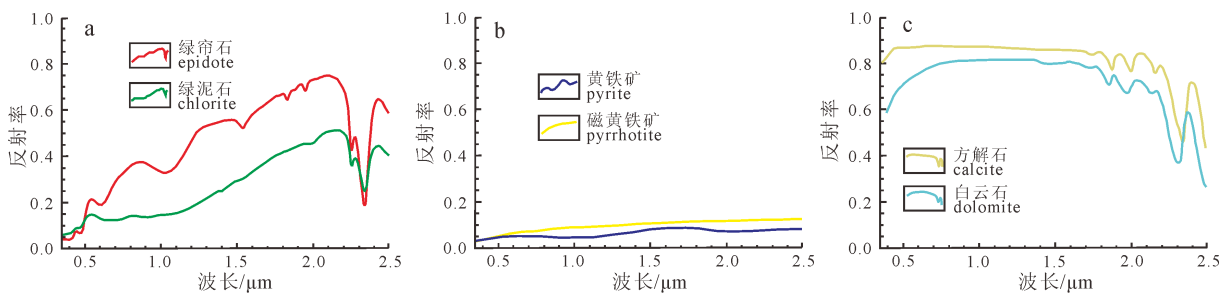


图 7 典型蚀变矿物波谱曲线(来源于 USGS 波谱库)

Fig. 7 Spectral curves of typical altered minerals (after USGS spectral library)

表 4 ASTER 1、3、4、8 PCA 特征矩阵
Table 4 Feature matrix of PCA of ASTER 1, 3, 4, 8

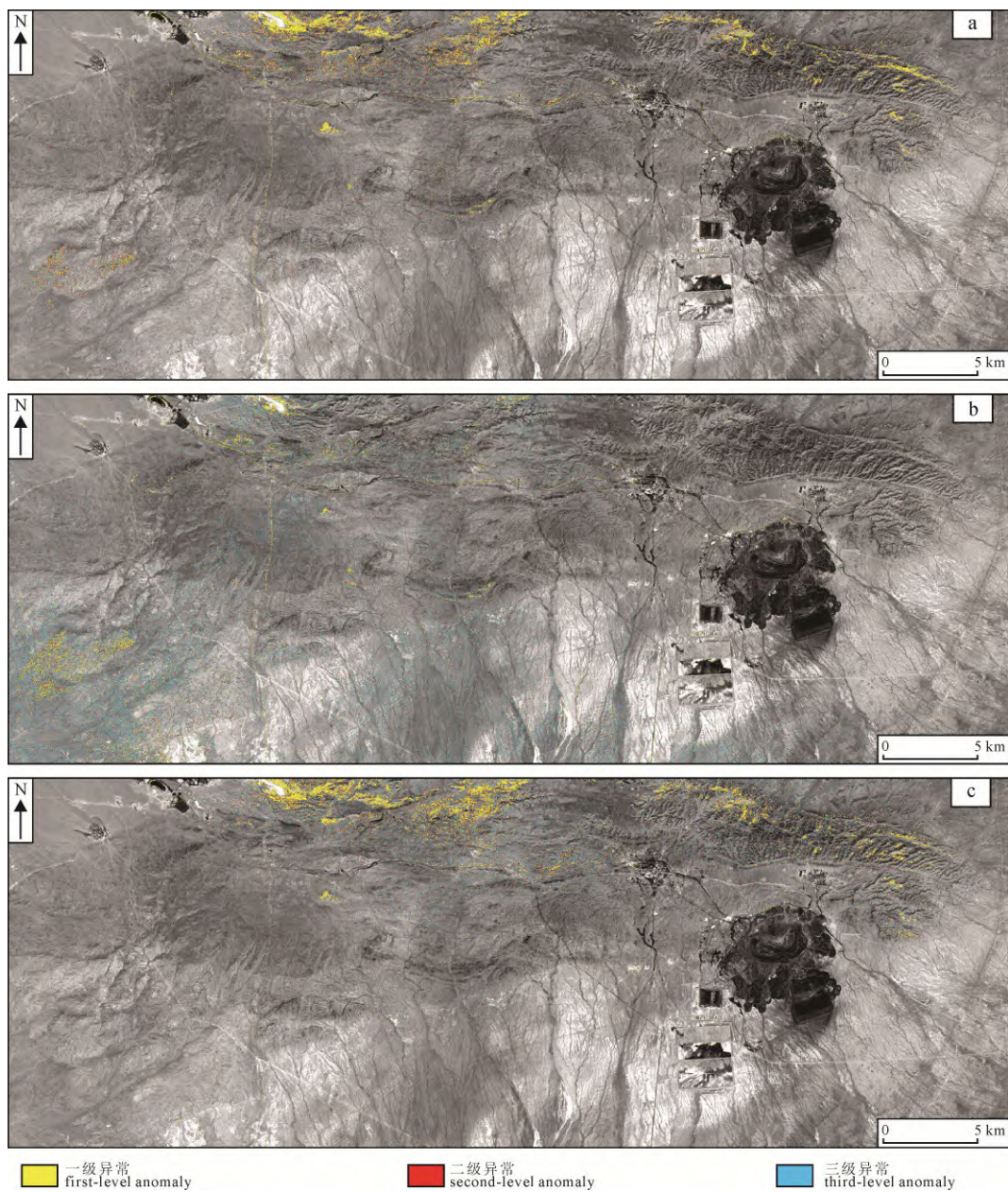
主成分分量	B1	B3	B4	B8
PC 1	-0.347 924	-0.499 827	-0.605 543	-0.512 288
PC 2	-0.679 549	-0.447 296	0.415 406	0.406 912
PC 3	0.378 228	-0.391 100	-0.477 916	0.689 624
PC 4	0.523 550	-0.630 191	0.482 029	-0.310 488

表 5 ASTER1、2、3、4 PCA 特征矩阵
Table 5 Feature matrix of PCA of ASTER 1, 2, 3, 4

主成分分量	B1	B2	B3	B4
PC 1	-0.359 359	-0.463 779	-0.515 858	-0.624 227
PC 2	0.487 659	0.469 808	0.117 006	-0.726 484
PC 3	0.403 091	0.233 238	-0.837 257	0.286 563
PC 4	0.685 979	-0.713 995	0.138 566	0.021 055

表 6 ASTER 1、3、4、5PCA 特征矩阵
Table 6 Feature matrix of PCA of ASTER 1, 3, 4, 5

主成分分量	B1	B3	B4	B5
PC 1	-0.342 316	-0.491 819	-0.595 933	-0.534 600
PC 2	-0.680 720	-0.456 118	0.393 736	0.416 591
PC 3	0.568 702	-0.621 348	-0.244 693	0.480 239
PC 4	-0.309 866	0.404 964	-0.655 715	0.556 799



a—Mg-OH 蚀变信息; b—铁染蚀变信息; c—碳酸盐类蚀变信息。
a—Mg-OH alteration information; b—iron stain alteration information; c—carbonate alteration information.

图 8 遥感蚀变异常信息

Fig. 8 Remotely sensed alteration anomaly information

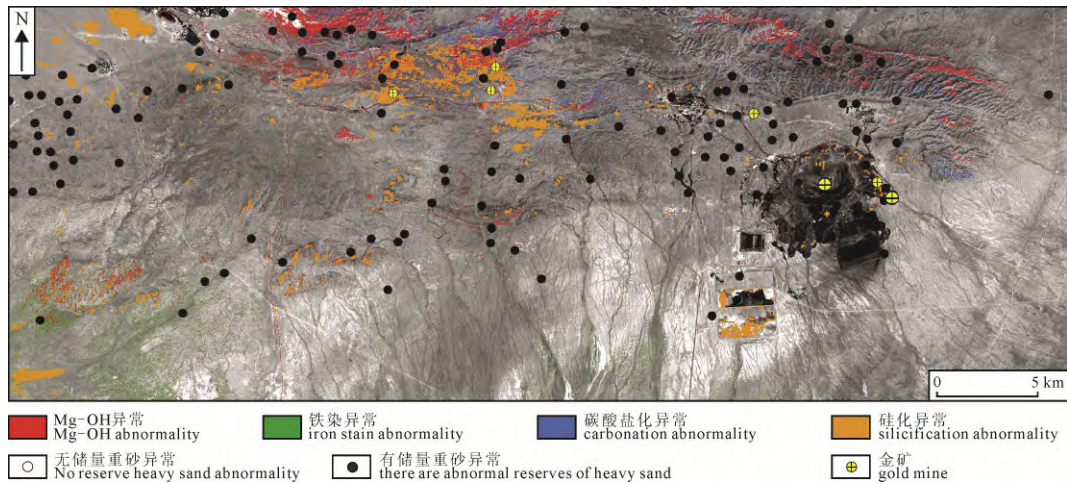


图 9 综合分析图
Fig. 9 Comprehensive analysis diagram

3.3.4 遥感蚀变信息提取成果图

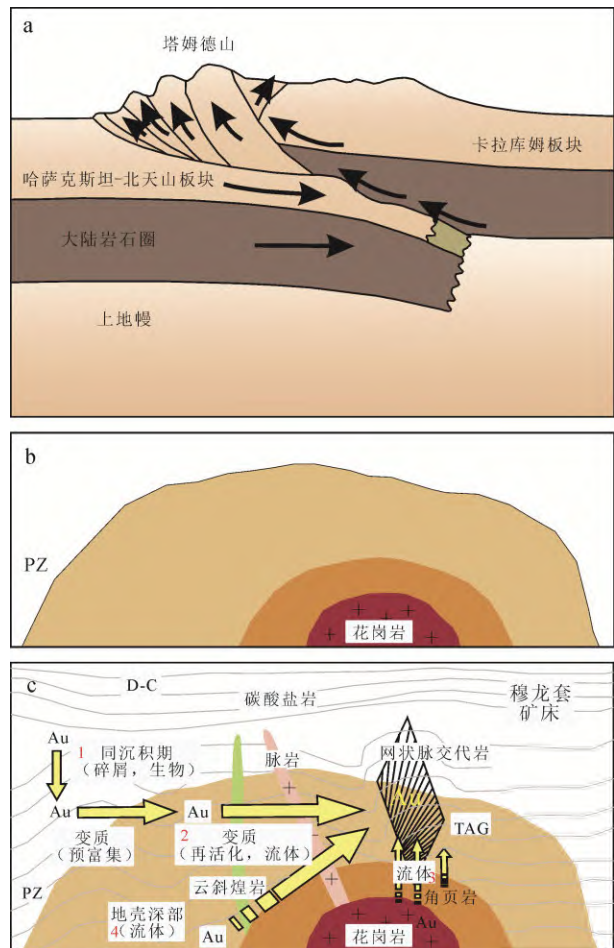
对前文选中的主成分分量灰度图分别进行低通滤波处理、线性拉伸增强处理、彩色等密度分割处理。根据主分量统计结果,以标准偏差为阈值 δ ,并按照 2、2.5、3 倍标准偏差设立阈值(其中铁染按照 1.5、2.0、2.5)(张玉君等, 2003),最大值为 255,将蚀变异常分为 3 个等级,并分别赋予蓝色,红色和黄色。以遥感影像为底图并将彩色等密度分割图叠置到影像上,得到遥感蚀变异常信息图(图 8)。

3.4 遥感蚀变异常与地质信息叠加分析

基于 ArcGIS 平台,以遥感影像为底图,将提取的 Mg-OH、铁染、碳酸盐化、硅化四种蚀变异常信息做叠加分析,并结合收集到的已知矿点及重砂异常等资料,得出综合分析图(图 9)。硅化异常主要反映了石英、黑云母、钠长石的大体位置; Mg-OH 反映了绿泥石化、绿帘石化等蚀变岩石; 铁染异常反映了黄铁矿等矿石; 碳酸盐类异常反映了研究区碳酸盐化矿物的信息。从图 9 中可以看出,异常大多分布在研究区的北部,也有少许分布在西南部。根据提取出的蚀变信息以及收集到的地质资料(图 9),硅化异常密集区主要分布在研究区的北部,蚀变程度较强,且对矿体的指示作用较明显,中部及西南部也有零星分布,蚀变异常较弱; Mg-OH 异常在研究区内呈近东西向分布及断续延伸,主要密集区分布在研究区的北部,推测其为围岩蚀变的大体部位; 铁染异常在研究区分布较少西南部及北部零星分布,蚀变异常较弱; 碳酸盐化异常在研究区的东北部呈条带状断续分布,且在北部大多分布在硅化及 Mg-OH 异常附近。因研究区东部部分已知矿床开采规模较大,已产生较大污染,对本次研究影响匪浅,因此提取蚀变时对其做掩膜处理,不做参考。

根据分析结果与已知矿点进行对比,吻合度较

高,这说明可以在这些异常区域寻找同类型金矿床以及本研究方法对同类研究提供借鉴。



a—晚古生代碰撞造山运动; b—海西期花岗岩侵入;
c—成矿阶段。

a-Late Paleozoic collision orogeny; b-Hercynian granite intrusion; c-metallogenic stage.

图 10 穆龙套金矿成矿模式图

(据 Kempe et al., 2016 修改)

Fig. 10 Metallogenic model map of the muluntao gold deposit (modified after Kempe et al., 2016)

4 讨论

穆龙套金矿矿体往往处于 NWW 向断裂和 NEE 向断裂交汇位置(李志丹等, 2017), 断裂对成矿提供了溶矿空间和导矿通道作用, 因此断裂交汇部位是成矿最优地段。热液蚀变发生在断裂内及其邻近地区(Kempe et al., 2016)主要类型有绿泥石化、绿帘石化、硅化、钠长石化、黑云母化、碳酸盐化等。矿石类型主要在石英脉和硫化物脉中, 所以提取了硅化, 蚀变矿物是石英、黑云母和钠长石。通过这些蚀变可以判断出构造, 也可以判断出矿体的位置和矿化的强弱。

穆龙套金矿位于塔姆德山的南部。古生代晚期(石炭—二叠纪), 卡拉库姆板块与哈萨克斯坦—北天山板块开始碰撞, 卡拉库姆板块挤压隆升(鲍庆中等, 2003; Kempe et al., 2016)见图 10a, 发育形成北西向的桑格龙套—塔姆德套(韧-脆性变形)和横向的穆龙套—道古兹套(脆性变形)两个区域性剪切带(鲍庆中等, 2003; 薛春纪等, 2014a, b, 2020; Kempe et al., 2016; 李志丹等, 2017)。赋矿岩石时代为奥陶—志留系别索潘组, 主要有含碳质细碎屑岩组成, 它对金矿化有预富集作用, 也是金成矿的物质基础, 更是最突出的找矿标志(李志丹等, 2017)。海西期深部花岗质岩浆沿断层上升, 岩浆热液过程导致了巨大的穆龙套矿床的形成, 并提供了充足的热源(薛春纪等, 2014a, b; Kempe et al., 2016; 李志丹等, 2017)见图 10b。因此应该对岩浆作用引发的蚀变提起重视, 并且碳质细碎屑岩分布区的侵入体分布区是找矿最优地段(李志丹等, 2017)。

有些学者认为, 金富集的主要过程发生在同沉积作用之时, 该作用先于变质作用、岩浆作用和脉形成。根据这一观点, 所有后期的变质作用、岩浆作用、交代蚀变和脉状形成过程都只是对已存在的金进行再分配和最终富集(Kempe et al., 2016)。从图 10c 中可以看出穆龙套金矿床形成的模式: 1)碎屑或溶解金在生物碳上吸附的同沉积作用; 区域变质过程中金的后续预富集; 2)构造-变质作用过程中, 金在脉系中的再活化和沉淀; 3)花岗岩类侵入体产生的流体或岩浆热晕驱动下的脉系和交代岩中沉淀金; 4)金的来源可能与地幔岩浆作用有关(薛春纪等, 2014a, b; Kempe et al., 2016; 李志丹等, 2017)。以上分析可以总结出, 穆龙套金矿的成矿关键因素是“碳质细碎屑岩+构造变形+岩浆热液”(薛春纪等, 2014a, b, 2020; 李志丹等, 2017)。

穆龙套金矿的成矿关键因素之一是围岩蚀变, 本文充分利用遥感技术, 在穆龙套地区进行蚀变信息提取。跟传统的地质勘查相比, 遥感技术具备省

时省力的特点, 可以在最短的时间内获取大范围的数据, 并有效圈定蚀变异常分布范围, 从而预测有利成矿区, 极大缩小工区范围, 为地质找矿指明方向, 提高工作效率和节省成本。

5 结论

本文以穆龙套金矿矿区及其外围为研究区, 通过分析研究区矿化蚀变特征, 主要讨论了含 Mg-OH 蚀变矿物、铁染蚀变矿物、碳酸盐蚀变矿物与硅化蚀变矿物的波谱特征, 进行蚀变信息提取, 取得了以下几点认识。

穆龙套金矿床的蚀变与金矿化关系极为密切, 研究区内硅化蚀变、Mg-OH 蚀变、铁染蚀变及碳酸盐蚀变异常是找矿的有利标志。因此基于 ASTER 遥感数据, 利用比值法、矿物指数法提取硅化蚀变, 根据 SiO₂ 含量对硅化信息进行对比, 丰富了利用遥感技术对硅化信息提取的手段; 运用主成分分析法提取了研究区 Mg-OH、铁染和碳酸盐等矿化蚀变信息, 根据主分量统计结果, 以标准偏差为阈值将蚀变异常分为 3 个等级; 将各类蚀变信息在 ArcGIS 平台上叠加处理得到综合遥感蚀变异常进行了遥感地质分析, 结果表明提取的蚀变异常跟已知矿点进行对比吻合度较高, 为遥感地质找矿方向提供有利的帮助及寻找同类型的金矿床提供参考。

遥感蚀变信息提取过程中, 不足之处有以下几种: (1)由于研究区内水体、植被、阴影的覆盖度不一样, 导致信息在高度干扰区被屏蔽, 因此信息损失严重, 后续研究中依旧需要加强对弱信息增强的相关措施。(2)由于研究条件的限制, 本文提取的遥感蚀变信息仅以已知矿点和重砂异常进行了验证分析, 在一定程度上为矿产勘查提供理论指导, 具有先验性和前瞻性。

Acknowledgements:

This study was supported by Chinese Academy of Sciences (No. XDA20070304).

参考文献:

- 鲍庆中, 沙德铭, 王宏. 2003. 也谈南天山古生代造山带内穆龙套型金矿床的控矿因素和找矿方向[J]. 地质与资源, (03): 159-165.
- 别小娟. 2014. 西藏斑岩型铜矿遥感找矿模式研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 陈江, 王安建. 2007. 利用 ASTER 热红外遥感数据开展岩石化学成分填图的初步研究[J]. 遥感学报, 11(4): 601-608.
- 段俊斌, 彭鹏, 杨智, 刘乐. 2019. 基于 ASTER 数据的多金属成矿有利区预测[J]. 国土资源遥感, 31(03): 193-200.
- 耿新霞, 杨建民, 张玉君, 姚佛军. 2008. ASTER 数据在浅覆盖

- 区蚀变遥感异常信息提取中的应用——以新疆西准噶尔包古图斑岩铜矿岩体为例[J]. 地质论评, 54(2): 184-191, 291.
- 黄宇飞, 李智慧, 宁慧, 胡震岳, 曹海翔. 2019. 应用 ASTER 遥感图像的岩矿信息提取研究[J]. 航天器工程, 28(06): 130-135.
- 李海疆. 2019. 航空磁放与遥感综合方法在地质找矿中的应用研究: 以安康地区为例[D]. 北京: 中国地质大学.
- 李进波. 2019. 基于 ASTER 影像的滇东北灰岩岩性提取方法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学.
- 李志丹, 薛春纪, 张祺, 李效广, 董新丰, 张国震. 2017. 中亚南天山穆龙套型金矿地质背景、成矿特征和找矿策略[J]. 地质找矿论丛, 32(04): 509-525.
- 林腾, 高光明, 刘容秀, 肖娟. 2011. ETM+和 ASTER 数据在遥感信息提取中的对比研究[J]. 遥感信息, (01): 65-69.
- 刘道飞, 陈圣波, 陈磊, 马明. 2015. 以 SiO₂ 含量为辅助因子的 ASTER 热红外遥感硅化信息提取[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 40(08): 1396-1402.
- 孟广路, 王斌, 李宝强, 曹积飞, 范堡程. 2013. 乌兹别克斯坦穆龙套金矿床研究进展[J]. 地质科技情报, 32(05): 160-166.
- 宋晚郊. 2013. 基于 ASTER 与 HYPERION 数据的驱龙甲玛玛集区蚀变矿物信息提取研究[D]. 北京: 中国地质大学.
- 孙娅琴. 2017. WorldView-3 数据处理与蚀变信息提取方法研究[D]. 北京: 中国地质大学.
- 薛春纪, 赵晓波, 莫宣学, 陈毓川, 董连慧, 顾雪祥, 张招崇, NURTAEV B, PAK N, 李志丹, 王新利, 张国震, 亚夏尔亚力坤, 冯博, 俎波, 刘家瑛. 2014a. 西天山巨型金铜铅锌成矿带构造成矿演化和找矿方向[J]. 地质学报, 88(12): 2490-2531.
- 薛春纪, 赵晓波, 莫宣学, 董连慧, 顾雪祥, NURTAEV B, PAK N, 张招崇, 王新利, 俎波, 张国震, 冯博, 刘家瑛. 2014b. 西天山“亚洲金腰带”及其动力背景和成矿控制与找矿[J]. 地学前缘, 21(05): 128-155.
- 薛春纪, 赵晓波, 赵伟策, 赵云, 张国震, NURTAEV B, PAK N, 莫宣学. 2020. 中-哈-吉-乌天山变形带容矿金矿床: 成矿环境和控矿要素与找矿标志[J]. 地学前缘, 27(02): 294-319.
- 张玉君, 曾朝铭, 陈薇. 2003. ETM+(TM)蚀变遥感异常提取方法研究与应用——方法选择和技术流程[J]. 国土资源遥感, (02): 44-49, 78.
- 赵芝玲, 王萍, 荆林海, 孙彦峰. 2016. 用 ASTER 数据提取植被覆盖区遥感铁矿化蚀变信息[J]. 金属矿山, (10): 109-115.
- 周君亚. 2018. 内蒙古满洲里地区矿化蚀变信息提取及找矿模型研究[D]. 北京: 中国地质大学.
- Resources, (3): 159-165(in Chinese with English abstract).
- BIE Xiao-juan. 2014. Research on the exploration model of remote sensing in porphyry copper belt, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- BIERLEIN F P, WILDE A R. 2010. New constraints on the polychronous nature of the giant Muruntau gold deposit from wall-rock alteration and ore paragenetic studies[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 57(6): 839-854.
- BOHON W, HODGES K V, TRIPATHY-LANG A, ARROWSMITH J R, EDWARDS C. 2018. Structural relationship between the Karakoram and Longmu Co fault systems, southwestern Tibetan Plateau, revealed by ASTER remote sensing[J]. Geosphere, 14(4): 1837-1850.
- CHEN Jiang, WANG An-jian. 2007. The pilot study on petrochemistry components mapping with ASTER thermal infrared remote sensing data[J]. Journal of Remote Sensing, 11(4): 601-608(in Chinese with English abstract).
- DUAN Jun-bin, PENG Peng, YANG Zhi, LIU Le. 2019. Prediction of polymetallic metallogenic favorable area based on ASTER data[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 31(3): 193-200(in Chinese with English abstract).
- GENG Xin-xia, YANG Jian-min, ZHANG Yu-jun, YAO Fo-jun. 2008. The application of ASTER remote sensing data for extraction of alteration anomalies information in shallow overburden area: a case study of the Baoguto porphyry copper deposit intrusion in Western Junggar, Xinjiang[J]. Geological Review, 54(2): 184-191, 291(in Chinese with English abstract).
- HUANG Yu-fei, LI Zhi-hui, NING Hui, HU Zhen-yue, CAO Hai-yi. 2019. Research on rock and mineral information extraction based on ASTER remote sensing image[J]. Spacecraft Engineering, 28(6): 130-135(in Chinese with English abstract).
- KEMPE U, GRAUPNER T, SELTMANN R, BOORDER H D, DOLGOPOLOVA A, EMMICHOVEN M Z V. 2016. The Muruntau gold deposit(Uzbekistan)—A unique ancient hydrothermal system in the southern Tien Shan[J]. Geoscience Frontiers, 7(3): 495-528.
- LI Hai-qiang. 2019. The application of integrated method using aeromagnetic, aeroradiometric, and remote sensing in geology and mineral resources: A case study of Ankang area[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- LI Jin-bo. 2019. Research on lithology extraction method of limestone in Northeast Yunnan Based on ASTER image[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology(in Chinese with English abstract).
- LI Zhi-dan, XUE Chun-ji, ZHANG Qi, LI Xiao-guang, DONG Xin-feng, ZHANG Guo-zhen. 2017. Metallogenic background, characteristics and prospecting strategy of Muruntau-type gold deposit in Southern Tianshan, Central Asia[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 32(4): 509-525(in Chinese with English abstract).
- LIN Teng, GAO Guang-ming, LIU Rong-xiu, XIAO Juan. 2011.

References:

- ADIRI Z, HARTI A E, JELLOULI A, MAACHA L, BACHAOUI E M. 2016. Lithological mapping using Landsat 8 OLI and Terra ASTER multispectral data in the Bas Drâa inlier, Moroccan Anti Atlas[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 10(1): 1-14.
- BAO Qing-zhong, SHA De-ming, WANG Hong. 2003. A new discussion on the formation and exploration of Muruntau-type gold deposits in South Tianshan orogenic belt[J]. Geology and

- Comparison between ETM + and ASTER data for extraction of alteration information[J]. *Remote Sensing Information*, (1): 65-69(in Chinese with English abstract).
- LIU Dao-fei, CHEN Sheng-bo, CHEN Lei, MA Ming. 2015. Silicification information extraction based on the content of SiO₂ from ASTER TIR data[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 40(8): 1396-1402(in Chinese with English abstract).
- MENG Guang-lu, WANG Bin, LI Bao-qiang, CAO Ji-fei, FAN Bao-cheng. 2013. Research progress of the Muruntau gold deposit in Uzbekistan[J]. *Geological Science and Technology Information*, 32(5): 160-166(in Chinese with English abstract).
- NINOMIYA Y, FU B. 2019. Thermal infrared multispectral remote sensing of lithology and mineralogy based on spectral properties of materials[J]. *Ore Geology Reviews*, (108): 54-72.
- NOORI L, POUR A B, ASKARI G, TAGHIPOUR N, PRADHAN B, LEE C W, HONARMAND M. 2019. Comparison of different algorithms to map hydrothermal alteration zones using ASTER remote sensing data for polymetallic vein-type ore exploration: Toroud-Chahshirin Magmatic Belt (TCMB), North Iran[J]. *Remote Sensing*, 11(5): 1-24.
- SONG Wan-jiao. 2013. Extracting alteration anomalies based on the ASTER and HYPERION data in Qulong and Jiama ore concentration area[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- SUN Ya-qin. 2017. Method research of WorldView-3 data on data processing and alteration information extraction--A case study of Pobei district in Xinjiang Province[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- WILDE A R, LAYER P, MERNAGH T, FOSTER J. 2001. The giant Muruntau gold deposit: geologic, geochronologic, and fluid inclusion constraints on ore genesis[J]. *Economic Geology*, 96(3): 633-644.
- XUE Chun-ji, ZHAO Xiao-bo, MO Xuan-xue, CHEN Yu-chuan, DONG Lian-hui, GU Xue-xiang, ZHANG Zhao-chong, NURTAEV B, PAK N, LI Zhi-dan, WANG Xin-li, ZHANG Guo-zhen, YALIKUN Y, FENG Bo, ZU Bo, LIU Jia-ying. 2014a. Tectonic-Metallogenic evolution of Western Tianshan giant Au-Cu-Zn-Pb metallogenic belt and prospecting orientation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2490-2531(in Chinese with English abstract).
- XUE Chun-ji, ZHAO Xiao-bo, MO Xuan-xue, DONG Lian-hui, GU Xue-xiang, NURTAEV B, PAK N, ZHANG Zhao-chong, WANG Xin-li, ZU Bo, ZHANG Guo-zhen, FENG Bo, LIU Jia-ying. 2014b. Asian Gold Belt in western Tianshan and its dynamic setting, metallogenic control and exploration[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(5): 128-155(in Chinese with English abstract).
- XUE Chun-ji, ZHAO Xiao-bo, ZHAO Wei-ce, ZHAO Yun, ZHANG Guo-zhen, NURTAEV B, PAK N, MO Xuan-xue. 2020. Deformed zone hosted gold deposits in the China-Kazakhstan-Kyrgyzstan-Uzbekistan Tian Shan: metallogenic environment, Controlling parameters, and prospecting criteria[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 294-319(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yu-jun, ZENG Zhao-ming, CHEN Wei. 2003. The methods for extraction of alteration anomalies from the ETM+(TM) data and their application: method selection and technological flow chart[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, (2): 44-49, 78(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Zhi-ling, WANG Ping, JING Lin-hai, SUN Yan-feng. 2016. Extraction method of iron mineralized alteration information in vegetation covered areas based on remote sensing ASTER data[J]. *Metal Mine*, (10): 109-115(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Jun-ya. 2018. Information extraction and prospecting model for mineralization alteration in Hulun sheep station to Manchuria area, Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).