

基于 ETM⁺ 的青海省拉陵灶火下游 地质找矿遥感应用研究

陈金群¹, 王得玉¹, 王进寿², 庄永成²

(1. 南京邮电大学地理与生物信息学院, 江苏 南京 210003)
(2. 青海省地质调查院, 青海 西宁 810012)

[摘要] 基于 ETM⁺ 数据提取岩矿石蚀变异常信息在新疆东天山荒漠戈壁等地区矿产勘查中有着成功的应用. 本文研究的青海省拉陵灶火下游地貌为荒漠戈壁区, 植被稀疏, 基岩裸露, 具有与东天山地区极为相似的景观, 很适合于应用遥感信息找矿. 在本研究区矿产勘查中, 分析已知矿床(点)的矿化蚀变类型及其岩石蚀变波谱信息特征, 通过将其与研究区内未知矿床点的地物遥感异常信息波谱对比研究, 结合地质分析的方法, 进行遥感矿化蚀变异常成因解析与预测找矿. 本文以基于 ETM⁺ 数据的地质遥感蚀变信息异常提取技术在铁多金属矿找矿中的有效应用为例, 说明基于 ETM⁺ 数据的遥感蚀变信息提取技术在矿产勘查领域中具有广泛的应用前景.

[关键词] ETM⁺, 蚀变信息提取, 铁多金属矿床, 成矿预测

[中图分类号] P627 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2013)03-0073-08

The Application of Geological Remote Sensing Prospecting Based on ETM⁺ Data in the Downstream of Lalingzaohuo River

Chen Jinqun¹, Wang Deyu¹, Wang Jinshou², Zhuang Yongcheng²

(1. School of Geographic and Biologic Information, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)
(2. Qinghai Geological Survey Institute, Xi'ning 810012, China)

Abstract: Extracting rock and ore alteration anomaly information with ETM⁺ data has a wide range of successful applications in mineral exploration in the East Tianshan Mountains, Xinjiang Gobi desert region of Qinghai Province. This paper focuses on the downstream of Lalingzaohuo River, Qinghai Province, which belongs to Gobi desert area lacking of vegetation and bedrock-exposed and is similar to the landscape of the Eastern Tianshan mountains, and is suitable for applying remote sensing in mineral prospecting. In the mineral exploration, the type of mineralization and alteration of the known deposits (points) and their spectral characteristics have been acquired. With geological analysis method and comparing it with unknown deposits in research area, genesis of mineralization and alteration is well resolved, and the location of the ore is well predicted. Taking as an example the successful application of geological remote sensing extraction technology of the abnormal alteration information based on ETM⁺ data, this paper makes the conclusion that this method has broad application prospects in the field of mineral exploration.

Key words: ETM⁺, altered information extraction, Fe-polymetallic deposits, Metallogenic prediction

拉陵灶火下游铁多金属矿床位处青海省格尔木市西南侧东昆仑拉陵灶火地区, 大地构造位置属祁漫塔格-都兰新元古代-早古生代缝合带^[1]或东昆仑弧盆系^[2], 挟持于北部柴达木陆块和南侧东昆仑陆块之间, 经历了早古生代和晚古生代-早中生代的复合造山作用, 发育多期(次)岩浆作用和成矿作用^[3]. 自上世纪 60 年代至今, 在该矿床西侧的同一成矿带内发现大量与中酸性侵入岩有关的矽卡岩型 Fe、Cu、Pb、Zn 等多金属矿床(点)^[4,5], 如野马泉铁多金属矿^[5]、索拉吉尔铜钼矿^[6]、鸭子沟及卡尔却卡多金属矿^[7,8]. 随

收稿日期: 2013-04-28.
基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(1212010818048).
通讯联系人: 王得玉, 博士, 讲师, 研究方向: 水质遥感, 海洋遥感. E-mail: gisnju@126.com

着新一轮国土资源大调查的持续推进,该成矿带东段的拉陵灶火地区矿产勘查获得了突破性进展,相继发现了一批规模不等的矿产资源,如铜多金属、铁、铅锌^[9]和铜镍硫化物等矿床点.该带内矿床类型以矽卡岩型矿床为主^[10-12],因此,以往对包含拉陵灶火地区在内的东昆仑成矿带地质矿产勘查方法及找矿模型仍较倚重于传统的地、物、化等技术手段,如以矽卡岩类型的研究作为判别不同矿化类型的重要标志^[10],对尕斯库勒矽卡岩型铁多金属矿床建立地质-地球物理模型用以指引本地区同类型矿产的找矿^[13]等.但截止目前,该地区未曾有过利用遥感技术方法对矽卡岩型铁多金属矿床找矿及预测的工作尝试.本文应用 ETM⁺遥感蚀变异常信息识别技术对拉陵灶火下游矽卡岩型铁多金属矿床进行研究探讨.该矿床所在地区地貌为荒漠戈壁区,植被稀疏,基岩裸露,岩石机械崩解作用强烈,与东天山地区景观极为相似,很适合于应用遥感信息找矿^[14,15].

1 矿区地质特征

矿区地层属华北地层大区昆仑山-祁漫塔格分区,出露的主要地层为:奥陶纪-志留纪滩间山群砂岩夹硅质岩组(OST₁)、玄武岩组(OST₂)和白云质结晶灰岩夹薄层大理岩组(OST₃);晚泥盆世牦牛山组砾岩段(D₃m¹)和安山岩段(D₃m²);早石炭世石拐子组(Cs)微晶灰岩夹砂岩;早石炭世大干沟组砂岩段(C₁dg¹)和砂屑生物碎屑灰岩段(C₁dg²);晚三叠世鄂拉山组(T₃e)流纹岩及第四系(如图 1 所示).区内矽卡岩型铁多金属矿床主要产出于大干沟组砂屑生物碎屑灰岩中^[9].

矿区断裂构造发育,褶皱微弱.断裂分两组,即 NW 向压性断裂和 NE 向走滑平移断裂.其中 NW 向断裂为矿区主要控矿构造^[16],沿此组断裂两侧岩石普遍碎裂岩化,常见硅化、黄钾铁矾及褐铁矿化,网状方解石细脉发育,局部形成冰洲石矿点.褶皱主要为轴向 NW 向的向斜构造.矿区因第四系覆盖、断层破坏及岩浆侵吞,褶皱形态不清.

区内岩浆岩属晚三叠世构造活动的岩浆记录^[17],主要呈小岩株状产出的灰白色二长花岗岩(T₃ηγ),西南侧分布少量的花岗闪长岩(T₃γδ)和闪长岩(T₃δ),另在东北部零星见钾长花岗岩(T₃ξγ)脉出露.多被第四系覆盖呈孤岛状.其中二长花岗岩与围岩接触处普遍发育矽卡岩化、角岩化、大理岩化,局部见黄铁矿化、磁铁矿化、黄铜矿化等,是控制铁多金属矿床形成的成矿母岩.

研究区内目前分布 3 处铁多金属矿床(见图 1),其中 K1 和 K2 矿床点为已有矿床.郭世珍等对 K1 进行研究,发现矿体产于二长花岗岩与碳酸盐岩围岩接触外带矽卡岩中,矿石主要为磁铁矿,其次为方铅矿、闪锌矿等,围岩以矽卡岩化为主,认为其成因类型为接触交代矽卡岩型矿床^[18].鲁海峰等对拉陵灶火地区北成矿带总结成矿地质背景、矿床形成条件及控矿因素研究表明,该地区包括拉陵灶火下游等铁多金属矿床属矽卡岩型,矿床主要赋存于印支期二长花岗岩和早石炭世大干沟组灰岩接触带中^[16].对青海西部柴达木盆地南缘祁漫塔格一带的铁、铜多金属矿床类型的总结研究也提出属矽卡岩型的认识^[10,11].总体上,目前对该地区铁多金属矿床研究程度不高.

2 数据选取

本次工作中选取 Landsat7 卫星的 ETM⁺数据,数据景号为 137/35,时相为 2002 年 8 月 28 日.地面分辨率 1、2、3、4、5、7 波段为 30 m,6-1、6-2 波段为 60 m,8 波段为 15m. ETM⁺数据因其单景覆盖面积大、价格适宜、分辨率适中,是目前我国在矿产资源调查、预测与评价工作中使用最多的数据之一.

3 ETM7418 融合影像特征及地质构造解译

在对拉陵灶火地区下游铁多金属矿床深入调查之前,先期研究遥感找矿模型中遥感地质找矿、遥感蚀变信息和矿床改造信息 3 项标志^[19].选取从 ETM⁺遥感数据中提取微弱矿化蚀变信息的方法进行矿产资源预测与评价研究,以现代成矿预测理论为指导,将蚀变遥感异常与地质构造、成矿带分布、容矿围岩、岩浆岩等多元信息进行综合分析.以地面分辨率为 15 m 的 ETM7418 融合影像为基础图件,研究区在 ETM⁺影像上可辨识程度高,这对基于红外、近红外波段的遥感蚀变异常信息提取较为有利.影像上反映的空间及波谱信息(如纹形、色调等)对不同岩石组合、结构构造的地质体有明显不同的影像特征组合,如侵入岩呈浅色调,具椭圆形轮廓或不规则边界,斑块状纹形;表面相对光滑圆浑,具稀疏的树枝状水系,发育尖棱

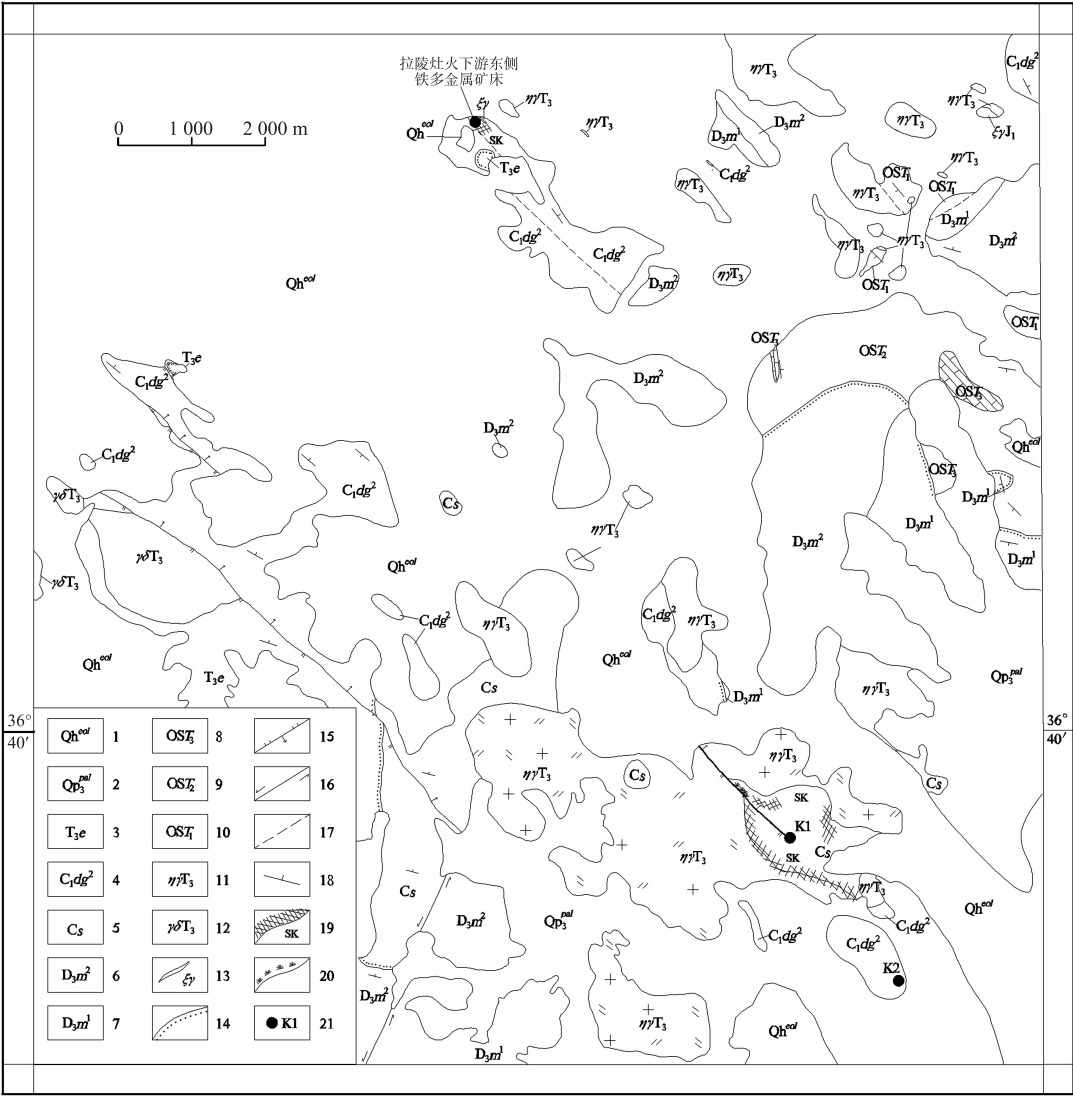


图 1 研究区地质矿产简图

Fig. 1 Geological and mineral resources sketch map of study area

1. 全新世风积物;2. 晚更新世洪冲积物;3. 晚三叠世鄂拉山组;4. 早石炭世大干沟组砂屑生物碎屑灰岩段;5. 石炭世石拐子组微晶灰岩夹砂岩;6/7. 晚泥盆世牦牛山组安山岩段/砾岩段;8/9/10. 奥陶纪-志留纪滩间山群白云质结晶灰岩夹薄层大理岩组/玄武岩组/砂岩夹硅质岩组;11. 晚三叠世二长花岗岩;12. 晚三叠世花岗闪长岩;13. 钾长花岗岩脉;14. 角度不整合接触界线;15. 正断层;16. 走滑断层;17. 性质不明断层;18. 地层产状;19. 砂卡岩化;20. 孔雀石化;21. 矿床点及编号

的弧状山脊和凹形坡面,缺少沉积地层具有的层理影像特征;砂岩等碎屑岩类呈较浅的中间色或暖色调,爪状、斑点状纹形发育,山脊线多呈直线状、折线状,冷色区少。

本文提取了矿区遥感地质构造信息、侵入体信息及遥感数据中赋存的蚀变信息等找矿信息,进行遥感地质解译和成矿有利地质因子的判别。构造提取信息如图 2 所示,其中一般线形构造 7 条,小线形构造 62 条,环形构造 2 个。遥感地质构造信息中线性构造以 NW 向为主,与基岩出露好的区段地质实测吻合,但由于区域内沙地严重覆盖,野外可识别的实测断层较少,致使地质图中与遥感解译的 NE 向及多数小型线性构造不符;1 处环形构造与实地验证调查的二长花岗岩体穹状隆起地貌明显一致。

4 ETM⁺遥感找矿蚀变异常信息的提取

4.1 矿床遥感蚀变异常信息提取的理论依据

遥感找矿信息提取主要包括构造信息提取、蚀变遥感信息和特殊岩性提取。所有地物在可见光和短波红外波段内具有与其组分有关的光谱吸收特征,许多地物的光谱吸收特征具有专一性,据此可精确地鉴别地物。美国 Landsat7(ETM)遥感探测卫星包含专为地质勘查而设计 TM5(1.55~1.75 μm)和 TM7(2.08~

2.35 μm) 波段. 在 TM7 波段内, 羟基和碳酸盐矿物形成明显的特征吸收带, 是探测含 Al-OH、Fe-OH、Mg-OH 基团的矿物与碳酸盐类最理想的遥感波段之一. 而含铁矿物在 TM1 和 TM4 波段有较强吸收带^[20]. 总之, 从 ETM⁺ 图像中可提取出铁染强度、岩石土壤中的羟基和碳酸盐类矿物等 3 种基本的光谱信息^[14]. 通常内生成矿作用过程中热液流体活动常形成一定规模的蚀变围岩, 围岩蚀变是成矿的重要指示信息^[21], 蚀变岩类往往与内生矿产伴生, 有时其本身就是含矿体^[22]. 热液蚀变矿物在短波近红外波段具有诊断性强吸收特征, 它们是纯矿物本身固有的特征^[23]. 这种蚀变矿物(岩石)特有的波谱特性使得利用遥感数据增强提取矿化蚀变信息, 进而评价矿产资源的潜力成为可能^[24]. 因此, 利用遥感技术识别和提取矿床地表蚀变异常信息进而指导找矿勘查非常有效.

4.2 矿床 ETM⁺ 蚀变遥感增强信息异常提取

岩石蚀变信息提取方法有很多种, 常见的有比值法、主成分分析法、光谱角填图等. 本实验采用 Crosta 法, 即选择主成分分析法, 同时辅以比值法, 并对提取的铁染和羟基的蚀变信息进行阈值分级处理, 赋以不同颜色, 获得分级异常图(如图 2 所示).

波段比值法是根据代数运算的原理, 当波段间差值相近但斜率不同时, 用反射波段与吸收波段的比值处理增强各种岩性之间的波谱差异, 抑制地形的影响, 并显示出动态的范围^[25]. 因而, 以矿物的特征光谱为基础, 选用适当的波段比值进行彩色合成, 可增强弱信息.

主成分分析法(PCA)是现在广泛采用的提取岩石蚀变信息的方法. 这种方法是对图像数据的集中和压缩, 它将多光谱图像中各个波段中高度相关的信息集中到少数的几个波段, 并尽可能地保证这些波段的信息互不相干. 即用几个综合性波段代表多波段的原图像, 使处理的数据量减少.

4.2.1 铁染蚀变信息提取

由于本研究区矽卡岩型铁矿以磁铁矿、黄铁矿及褐铁矿等为常见矿种, 其蚀变岩均含有 Fe²⁺ 或 Fe³⁺, 他们在 ETM⁺ 1、2、4 波段均有吸收特征, 而在 5 波段具有高反射特征^[26]. 经过一系列实验, 采用比值和选择主成分结合的方法提取铁化蚀变信息, 即用 ETM⁺ 5/ETM⁺ 4、ETM⁺ 3/ETM⁺ 4、PCA(1、3、4、5) 分别增强铁化信息. 由于植被在 ETM⁺ 4 的高反射特征, 通过 ETM⁺ 3/ETM⁺ 4 即可去除部分植被的影响. 对于 PCA(1、3、4、5), 特征向量如表 1 所示.

由特征向量表可知, 在特征向量表 PC3 中, 由于 4 波段的贡献系数最大, 说明它对 PC3 的贡献最大, 也即 PC3 的信息主要来源于 ETM⁺ 4 波段, 这与蚀变铁化蚀变离子在 4 波段具有高吸收的特点有关. 由于 ETM⁺ 4 处恰好为负值, 因此该主成分可作为是铁化蚀变信息的指示分量.

4.2.2 羟基和碳酸盐类蚀变信息提取

根据粘土类矿物蚀变均含有 OH⁻、CO₃²⁻ 离子或离子基团, 它们在 ETM⁺ 5 波段均具有高反射, 而在 ETM⁺ 7 波段具有强吸收的特征^[27]. 因此采用选择主成分分析法, 对 ETM⁺ 1、4、5、7 波段做 PCA 处理来提取 OH⁻ 和 CO₃²⁻ 泥化信息, 各特征向量如表 2 所示.



基于 ETM⁺ 影像的线环构造类型

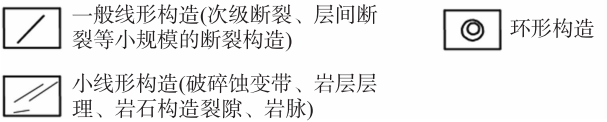


图 2 遥感构造信息提取图

Fig2 Extracting remote sensing structure information

表 1 ETM⁺ 第 1、3、4、5 波段主成分分析的特征向量表

| Table 1 The Eigenvector of PCA with ETM ⁺ band 1,3,4,5 | | | | |
|---|-----------|------------|------------|------------|
| Eigenvector | Band 1 | Band 3 | Band 4 | Band 5 |
| PC1 | 0.285 911 | 0.588 432 | 0.408 133 | 0.636 734 |
| PC2 | 0.704 005 | 0.308 776 | 0.055 639 | -0.637 133 |
| PC3 | 0.334 594 | 0.084 378 | -0.877 136 | 0.334 006 |
| PC4 | 0.557 386 | -0.742 486 | 0.246 911 | 0.277 616 |

在特征向量表 PC4 中,由于 5 和 7 波段的贡献系数最大,说明它们对 PC4 的贡献最大,即 PC4 的信息主要来源于 ETM⁺ 5、7 波段,且 ETM⁺ 5 为负值,ETM⁺ 7 为正值,具有相反的贡献标志. 所以 PC4 主要反映 5 和 7 波段信息,这与蚀变阴离子在 5 波段具有高反射,在 7 波段具有高吸收的特点相符合,因此该主成分可以作为羟基和碳酸盐类蚀变信息的指示分量.

4.2.3 蚀变信息进行阈值分级

为了改善遥感异常图的直观性和突出遥感异常的浓度中心位置和强度分布带,本实验采取平均值+K 倍标准差的方法对羟基蚀变信息进行分级^[28],以 K 取羟基 3.3、2.8、2.3,铁染 3.0、2.5、2.0 作为阈值,限定异常水平,对异常进行分割处理,赋以不同颜色,获得分级异常图,如图 3、图 4 所示.

表 2 ETM⁺第 1、4、5、7 波段主成分分析的特征向量表

Table 2 The Eigenvector of PCA with ETM⁺ band 1,4,5,7

| Eigenvector | Band 1 | Band 4 | Band 5 | Band 7 |
|-------------|------------|------------|------------|------------|
| PC1 | 0.242 964 | 0.375 967 | 0.633 891 | 0.630 713 |
| PC2 | 0.789 040 | 0.435 942 | -0.161 330 | -0.401 676 |
| PC3 | 0.553 584 | -0.704 467 | -0.192 580 | 0.400 229 |
| PC4 | -0.109 220 | 0.415 126 | -0.731 483 | 0.529 787 |

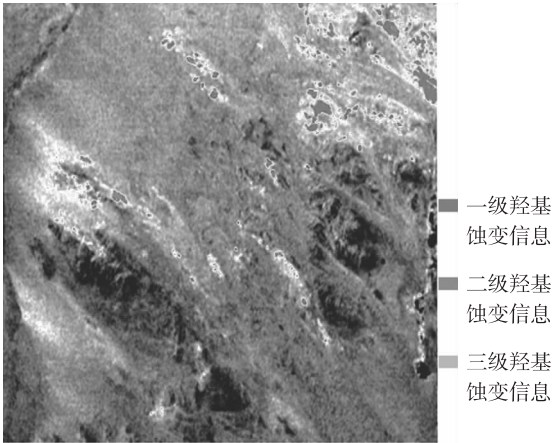


图 3 羟基蚀变异常分级图

Fig.3 Hydroxyl alteration anomaly classification

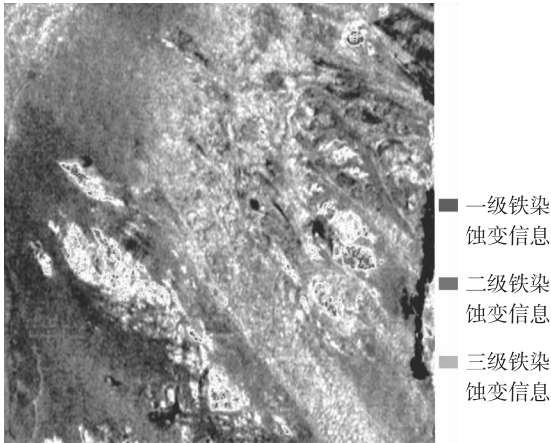


图 4 铁染蚀变异常分级图

Fig.4 Iron alteration anomaly classification

4.3 信息提取效果分析

从图 2 可以看出,研究区 ETM⁺ 遥感蚀变异常信息由较为醒目的铁染和羟基组成,具明显的团块状、带状分布规律,多数地区铁染和羟基蚀变呈北西-南东向延伸,与该区构造线方向一致. 两者常叠加出现,强度为二~三级.

解译中选择已知的 K1、K2 矿床为典型矿床蚀变遥感信息异常作参照. 对 K1 矿床的蚀变遥感数据处理结果仅得到了微弱的三级铁染蚀变信息,K2 中未得到有效信息显示,究其原因,K1 和 K2 矿床均为半隐伏矿床,地表露头多被风沙埋没,砂中高含量长英质矿物的波谱特征曲线极可能掩盖了蚀变岩石,对蚀变岩信息提取造成严重干扰. 但在这两个矿床周围邻近区域提取出了大范围的二、三级及零散一级铁染蚀变信息,伴随零星的一~三级羟基蚀变信息,经区域控(成)矿条件分析,尽管不能完全排除“沙漠漆”、岩石表面“氧化铁膜”^[26]的存在,但成矿事实使笔者谨慎看待这些识别出的弱蚀变信息异常,依据现今拉陵灶火下游铁多金属矿床范围的遥感构造解译及蚀变信息提取,判断沿线性构造分布的二、三级羟基蚀变信息为岩石中蚀变矿物在可见及近红外区中形成的岩石优势谱带,其应当是构造热液活动及围岩蚀变的地表反映,推断该位置可能会有较好的找矿发现.

4.4 成矿远景区的预测与靶区的圈定

根据遥感蚀变信息,结合其地质特征分析找出拉陵灶火下游-小灶火下游铁、铅、铜锌成矿远景区,如图 5 所示. 该区位于拉陵灶火下游东侧-小灶火下游一带,是研究区主要的金属矿化集中区,已有多处金属矿床. 根据资料分析,该区出露地层主要是早石炭世大干沟组砂屑灰岩并被酸性二长花岗岩侵入,接触带蚀变强烈,尤其是砂卡岩比较强. 根据资料分析,大干沟组是多金属成矿带的主要成矿围岩,从已有矿床看,该地层与中酸性花岗岩侵入接触时往往形成砂卡岩型铁、铅、锌等多金属矿床^[29]. 且该区遥感蚀变异常强度较强烈,区内有一条 NM-SE 向的较大断裂构造通过,因此,本文认为该区具有较大的找矿前景,可

作为进一步找矿的远景区。

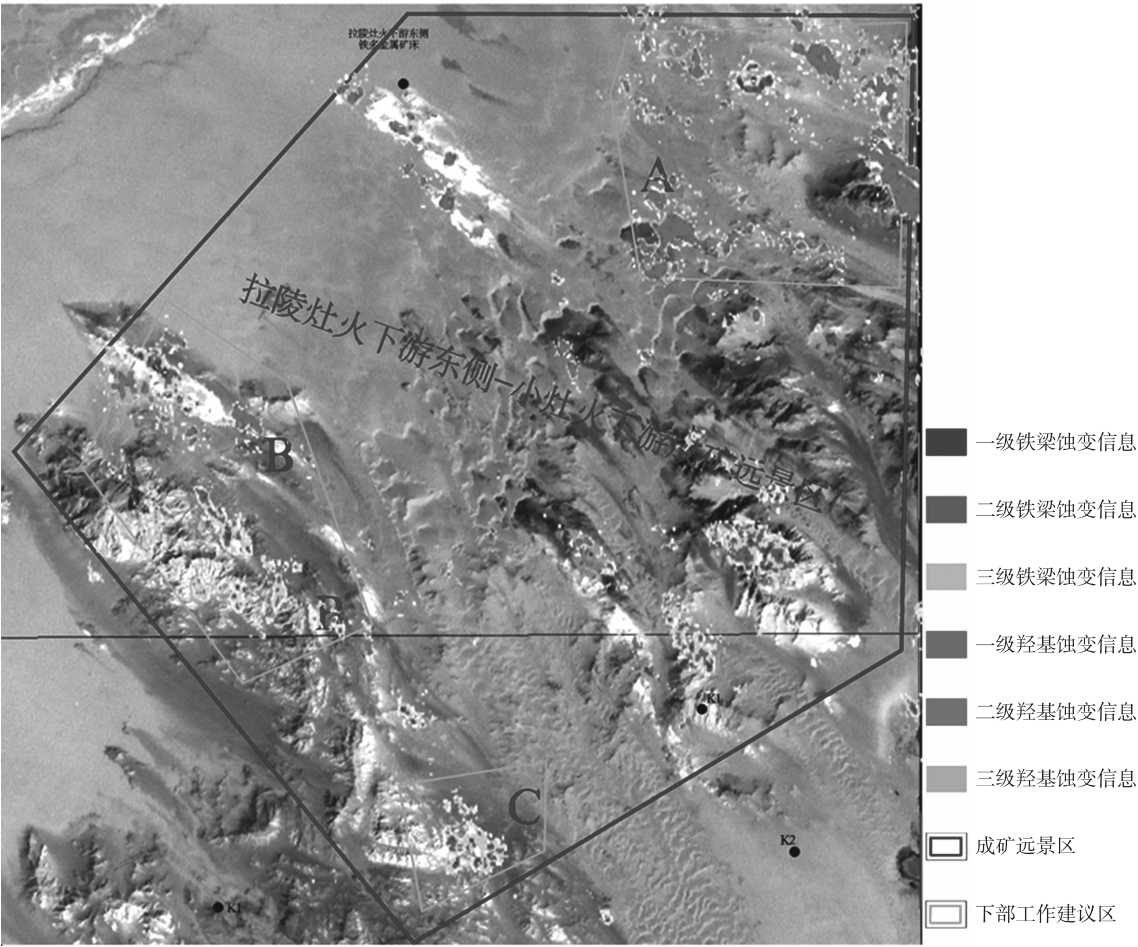


图 5 拉陵灶火下游地区遥感蚀变成矿预测图

Fig. 5 Remote sensing alteration mineralization prediction in the downstream of Lalingzaohuo

经对研究区卫星遥感影像数据的处理,发现在区内东北方向遥感异常以羟基二三级异常为主,也见有少许一级异常,强弱异常套合较好,呈斑点状分布;其次见有三级铁染异常,呈斑点状分布. 异常分布于奥陶纪-志留纪滩间山群砂岩夹硅质岩组的变砂岩钾灰质岩. 在区内中部遥感异常以铁异常为主,仅见二、三级异常分布,强弱套合较好,呈斑点状分布,异常主要沿北西向断裂发育,分布于大干沟岩组灰岩夹砂岩和二长花岗岩岩体的接触带附近,均与已知铁磁矿化点相吻合. 因此推测 A、B、C 三处具有一定的铁多金属成矿潜力,可作为进一步开展铁多金属矿产勘查的靶区。

5 结论

- (1)以遥感技术制作出的拉陵灶火下游地区地面分辨率为 15m 的 ETM7418 融合影像为基础,进行线环构造信息以及矿化蚀变异常信息提取,影像图色彩鲜艳、清晰直观,可辨识程度高,有利于遥感地质解译和成矿有利地质因子的判别.
- (2)在拉陵灶火下游地区 ETM⁺地质遥感蚀变信息提取图中,以 K1、K2 矽卡岩型铁多金属矿床具有的地质遥感蚀变信息特征为典型研究对象,将蚀变遥感异常信息与控(成)矿条件综合考虑,圈定成矿远景区.
- (3)ETM⁺遥感技术在拉陵灶火下游矽卡岩型铁多金属矿床勘查中的应用实例表明,荒漠化风沙覆盖区提取的遥感弱异常信息很可能是半隐伏矿床蚀变的标识,应在地面验证中给予足够的重视;同时也表明利用地质遥感蚀变异常信息提取技术在柴南缘寻找半隐伏金属是可行的.
- (4)据拉陵灶火下游地区 ETM⁺地质遥感蚀变信息图中提取到的羟基和铁染蚀变信息特征分析,预测拉陵灶火下游地区 A、B 两处可作为进一步开展铁多金属矿产勘查的靶区.

[参考文献](References)

- [1] 张雪亭,杨生德. 青海省板块构造研究[M]. 北京:地质出版社,2007:105-130.
Zhang Xueting, Yang Shengde. Study of Plate Tectonics in Qinghai Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 105-130. (in Chinese)
- [2] 潘桂棠,肖庆辉,陆松年,等. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质,2009,36(1):1-28.
Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian. Tectonic unit division of China[J]. Geology in China, 2009, 36(1): 1-28. (in Chinese)
- [3] 张德全,丰成友,李大新,等. 柴北缘-东昆仑地区的造山型金矿床[J]. 矿床地质,2001,20(2):137-146.
Zhang Dequan, Feng Chengyou, Li Daxin, et al. Orogenic gold deposits in the north Qaidam and East Kunlun orogen, west China[J]. Mineral Deposits, 2001, 20(2): 137-146. (in Chinese)
- [4] 胡正国,刘继庆,钱壮志,等. 东昆仑区域成矿规律初步研究[J]. 黄金科学技术,1998,6(5/6):6-13.
Hu Zhengguo, Liu Jiqing, Qian Zhuangzhi, et al. A study of the regional metallogenic regularity in East Kunlun Mountain[J]. Gold Science and Technology, 1998, 6(5/6): 6-13. (in Chinese)
- [5] 刘云华,莫宣学,张雪亭,等. 东昆仑野马泉地区矽卡岩矿床地质特征及控矿条件[J]. 华南地质与矿产,2005(3):18-23.
Liu Yunhua, Mo Xuanxue, Zhang Xueting, et al. Geological feature and ore-control condition of skarn type deposits in Yemaquan area, Eastern Kunlun[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2005(3): 18-23. (in Chinese)
- [6] 丰成友,李东生,屈文俊,等. 青海祁漫塔格索拉吉矽卡岩型铜钨矿床辉钨矿-钼同位素定年及其地质意义[J]. 岩矿测试,2009,28(3):223-227.
Feng Chengyou, Li Dongsheng, Qu Wenjun, et al. Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Suolajier skarn-type copper-molybdenum deposit of Qimantage Mountain in Qinghai Province and its geological significance[J]. Rock and Mineral Analysis, 2009, 28(3): 223-227. (in Chinese)
- [7] 李世金,孙丰月,丰成友,等. 青海东昆仑鸭子沟多金属的成矿年代学研究[J]. 地质学报,2008,20(7):949-955.
Li Shijin, Sun Fengyue, Feng Chengyou, et al. Geochronological study on Yazigou polymetallic deposit in Eastern Kunlun, Qinghai Province[J]. Journal of Geology, 2008, 20(7): 949-955. (in Chinese)
- [8] 李世金,孙丰月,王力,等. 青海东昆仑卡尔却卡多金属矿区斑岩型铜矿的流体包裹体研究[J]. 矿床地质,2008,27(3):399-406.
Li Shijin, Sun Fengyue, Wang Li, et al. Fluid inclusion studies of porphyry copper mineralization in Kaerqueka polymetallic ore district, East Kunlun Mountains, Qinghai Province[J]. Mineral Deposits, 2008, 27(3): 399-406. (in Chinese)
- [9] 潘彤,拜永山,孙丰月,等. 青海省东昆仑地区有色、贵金属矿产成矿系列与成矿预测[M]. 北京:地质出版社,2011:220-226.
Pan Tong, Bai Yongshan, Sun Fengyue, et al. East Kunlun area of Qinghai Province nonferrous metal, precious metal mineral deposit metallogenic series and metallogenic prediction[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 220-226. (in Chinese)
- [10] 丰成友,赵一鸣,李大新,等. 青海西部祁漫塔格地区矽卡岩型铁铜多金属矿床的矽卡岩类型和矿物学特征[J]. 地质学报,2011,85(7):1108-1115.
Feng Chengyou, Zhao Yiming, Li Daxin, et al. Skarn types and mineralogical characteristics of the Fe-Cu-polymetallic skarn deposits in the Qimantage area, Western Qinghai Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(7): 1108-1115. (in Chinese)
- [11] 吴健辉,丰成友,张德全,等. 柴达木盆地南缘祁漫塔格-鄂拉山地区斑岩-矽卡岩矿床地质[J]. 矿床地质,2010,29(5):760-774.
Wu Jianhui, Feng Chengyou, Zhang Dequan, et al. Geology of porphyry and skarn type copper polymetallic deposits in southern margin of Qaidam basin[J]. Mineral Deposits, 2010, 29(5): 760-774. (in Chinese)
- [12] 刘云华,莫宣学,张雪亭,等. 东昆仑野马泉地区矽卡岩矿床地球化学特征及其成因意义[J]. 华南地质与矿产,2006(3):31-36.
Liu Yunhua, Mo Xuanxue, Zhang Xueting, et al. The geochemical characteristics and the meaning of skarn-type deposits in Yemaquan Area, Eastern Kunlun[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2006(3): 31-36. (in Chinese)
- [13] 寇玉才,李战业,王英孝,等. 尕斯库勒矽卡岩型铁多金属矿床地质-地球物理模型[J]. 西北地质,2010,43(2):20-31.
Kou Yucai, Li Zhanye, Wang Yangxiao, et al. Geologic-geophysical model of skarn iron-polymetallic deposit in galinge region[J]. Northwestern Geology, 2010, 43(2): 20-31. (in Chinese)
- [14] 杨建民,张玉君,陈薇,等. ETM⁺(TM)蚀变遥感异常技术方法在东天山戈壁地区的应用[J]. 矿床地质,2003,22(3):278-286.
Yang Jianmin, Zhang Yujun, Chen Wei, et al. Application of ETM⁺(TM) remote sensing alteration anomaly extraction technique to Gobi area, East Tianshan Mountains[J]. Mineral Deposits, 2003, 22(3): 278-286. (in Chinese)

- [15] 徐元进. 面向找矿的高光谱遥感岩矿信息提取方法研究[D]. 武汉:中国地质大学数字地质遥感地质研究所,2009:1-53.
Xu Yuanjin. Research of prospecting-oriented approaches to information extraction of rocks and minerals using hyperspectral remote sensing data[D]. Wuhan: Institute of Mathematical and Remote Sensing Geology, China University of Geosciences, 2009:1-53. (in Chinese)
- [16] 鲁海峰,李积清,殷占虎. 青海格尔木拉陵灶火地区矿产分布规律及找矿远景区划分[J]. 中国矿业,2011,20(7):66-68.
Lu Haifeng, Li Jiqing, Yin Zhanhu. The distribution of mineral and the partition of ore prospective area in Qinghai Ge-ermu Lalingzaohuo region[J]. China Mining Magazine, 2011, 20(7):66-68. (in Chinese)
- [17] 王秉璋,罗照华,李怀毅,等. 东昆仑祁漫塔格走廊域晚古生代一早中生代侵入岩岩石组合及时空格架[J]. 中国地质, 2009,36(4):769-782.
Wang Bingzhang, Luo Zhaohua, Li Huaiyi, et al. East Kunlun Qimantage corridor late Paleozoic-Early Mesozoic intrusive rock combination and space-time trellis[J]. Geology in China, 2009, 36(4):769-782. (in Chinese)
- [18] 郭世珍,刘永乐,李恒恒,等. 青海省杂羊沟地区铁多金属矿点地质特征及找矿标志[J]. 青海科技,2009(6):93-97.
Guo Shizhen, Liu Yongle, Li Hengheng, et al. Geological characteristics and prospecting criteria of iron polymetallic ore in Gayanggou Qinghai Province[J]. Qinghai Science and Technology, 2009(6):93-97. (in Chinese)
- [19] 赵玉灵. 遥感找矿模型的研究进展与评述[J]. 国土资源遥感,2003,3(57):1-4.
Zhao Yuling. The advances in the study of the remote sensing exploration model: A review[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2003, 3(57):1-4. (in Chinese)
- [20] 阎积惠,康慧. TM 图像地质应用原理与方法[M]. 北京:冶金工业出版社,1993:45-72.
Yan Jihui, Kang Hui. TM Image Geological Application Principle and Method[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993:45-72. (in Chinese)
- [21] 王日冬,邢立新. 矿床蚀变信息的遥感提取方法[J]. 世界地质,2000,19(4):397-401.
Wang Ridong, Xin Lixin. The alteration information extraction by remote sensing[J]. World Geology, 2000, 19(4):397-401. (in Chinese)
- [22] 马建文. 利用 TM 数据快速提取含矿蚀变带方法研究[J]. 遥感学报,1997,1(3):208-213.
Ma Jianwen. Methodology study of quickly identifying mineral bearing alterations from TM data[J]. Journal of Remote Sensing, 1997, 1(3):208-213. (in Chinese)
- [23] 杨建民,张玉君,姚佛军. 利用 ETM⁺ 遥感技术进行尾亚杂岩体的岩性识别[J]. 岩石学报,2007,23(10):2 397-2 402.
Yang Jianmin, Zhang Yujun, Yao Fujun. Lithology identification of the Weiya complex by means of ETM⁺ remote sensing[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(10):2 397-2 402. (in Chinese)
- [24] 张守林. 基于 ETM 数据矿化蚀变信息定量提取方法研究[D]. 北京:中国地质大学地球科学与资源学院,2001:1-10.
Zhang Shoulin. A study on methods used to quantitatively extract mineralized alteration information from ETM data[D]. Beijing: School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, 2006:1-10. (in Chinese)
- [25] 梅安新,彭望球. 遥感导论[M]. 北京:高等教育出版社,2001:124-127.
Mei Anxin, Peng Wanglu. Introduction to Remote Sensing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001:124-127. (in Chinese)
- [26] 张玉君,杨建民. 基岩裸露区蚀变遥感信息的提取方法[J]. 国土资源遥感,1998,50(2):46-53.
Zhang Yujun, Yang Jianmin. The method of abstracting remote sensing information of altered rocks in the uncoverd bed rocks area[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 1998, 50(2):46-53. (in Chinese)
- [27] 张玉君,杨建民,陈薇. ETM+(TM) 蚀变遥感异常提取方法研究与应用—地质依据和波谱前提[J]. 国土资源遥感, 2002(4):30-37.
Zhang Yujun, Yang Jianmin, Chen Wei. The methods for extraction of alteration anomalies from the ETM+(TM) data and their application: Geologic Basis and Spectral Precondition[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2002(4):30-37. (in Chinese)
- [28] 张玉君,曾朝铭,陈薇. 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, 2003(2):44-49.
Zhang Yujun, Zeng Chaoming, Chen Wei. The methods for extraction of alteration anomalies from the ETM+(TM) data and their application: method selection and techological flow chart[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2003(2):44-49. (in Chinese)
- [29] 姚佛军,杨建民,张玉君,等. 三种不同类型矿床分类型蚀变遥感异常提取及其应用[J]. 岩石学报,2009,25(4): 971-976.
Yao Fujun, Yang Jianmin, Zhang Yujun, et al. Extraction of remote sensing alteration anomalies of three types of ore deposits and its application[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(4):971-976. (in Chinese)

[责任编辑:严海琳]