

高分遥感技术在塔什库尔干铁矿带中的应用

王辉¹, 范玉海^{1,2}, 杨金中³, 张少鹏^{1,2}, 金谋顺¹, 杨晨¹,
梁敏¹, 崔胜¹, 贺小龙¹, 潘春娟¹

(1. 中煤航测遥感局西安煤航地质勘察院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学地球科学与国土资源学院,
陕西 西安 710054; 3. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要:以西昆仑塔什库尔干地区为研究区, 以 WorldView-2 高空间分辨率数据为主要信息源, 在标准影像图制作基础上, 针对性地进行图像增强处理, 突出相关控矿要素和矿化信息, 开展地质矿产遥感解译; 利用 ASTER 和 WorldView-2 数据开展矿化蚀变有关的遥感异常信息提取, 配合适量的野外调查验证, 最终圈定了 11 处遥感找矿靶区。其中, A 级遥感找矿靶区 5 处, B 级遥感找矿靶区 3 处, C 级遥感找矿靶区 3 处, 其为后续区域地质矿产调查项目规划部署和矿产资源勘查评价提供依据; 高分遥感技术在西昆仑地区矿产地地质综合调查中作用显著, 可实现找矿工作的快速突破, 值得在相同或类似区域进一步推广应用。

关键词: 高分遥感技术; 磁铁矿; 地质找矿; 塔什库尔干地区; 西昆仑

中图分类号: P627

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2017)02-0231-13

The Application of High Resolution Remote Sensing Technology in the Taxkorgan Iron Ore Belt, West Kunlun Mountains

WANG Hui¹, FAN Yuhai^{1,2}, YANG Jinzhong², ZHANG Shaopeng^{1,2}, JIN Moushun¹,
YANG Chen¹, LIANG Min¹, CUI Sheng¹, HE Xiaolong¹, PAN Chunjuan¹

(1. Geological Exploration Institute of Aerial Photogrammetry and Remote Sensing Bureau,
Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. School of Earth Science and Land and Resources, Chang'an University,
Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Aero-geophysical Survey and Remote Sensing Center under Ministry of
Land and Mineral Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: In this paper, the Taxkorgan area of West kunlun Mountains has been selected as a study object, the WorldView-2 remote sensing images have been used as major data source to make standard image map and as the adopting methods to enhance the image for protruding the information of ore-controlling factors and mineralization, and the interpretation of remote sensing for mineral resources has been carried out. After using ASTER and WorldView-2 data to carry out alteration anomaly information extraction, 11 remote sensing prospecting targets have been

收稿日期: 2017-01-10; 修回日期: 2017-03-17

基金项目: 中国地质调查局“西昆仑成矿带矿产资源遥感地质调查”(1212011120888), 西昆仑成矿带黑恰至三十里营房地区矿产地质调查(12120113046100), 国家重点基础研究发展计划“973”项目“中国北方巨型砂岩 Y 成矿带陆相盆地沉积环境与大规模成矿作用”(2015CB453000)

作者简介: 王辉(1971-), 男, 陕西澄城人, 1993 年毕业于西北大学地质学系, 高级工程师, 长期从事遥感地质、矿产地质、区域地质研究工作。E-mail: wanghui.rock@163.com

circled on through implementing a right amount of field investigation verification, including 5 of A - class, 3 of B - class and 3 of C - class, which are used as the basis for deploying mineral resources survey project and exploration and evaluation of mineral resources. Therefore, the high precision remote sensing technology is worth to be further promoted and applied in the same or similar area of West Kunlun, because it can realize the rapid breakthrough of ore prospecting work in the mineral geological survey.

Keywords: high precision remote sensing technology; magnetite; geological prospecting; Taxkorgan area; West Kunlun

西昆仑地区地处青藏高原西北缘与塔里木盆地西南缘之间,是秦祁昆构造带的重要组成部分(姜春发等,1992),沉积作用(姜春发等,1992;杨经绥等,2004)、构造作用(许志琴等,2004;李文渊等,2008)、变质作用和岩浆活动等多种成矿地质条件优越,已发现的矿床种类繁多,矿种齐全,找矿前景广阔(贾群子,1999;董永观等,2003;李博秦等,2007)。近年来,在塔什库尔干地区古元古界布伦勒岩群发现老并、赞坎、叶里克铁矿床和吉尔铁克沟等磁铁矿床(新疆自治区地质矿产局,1993;程裕淇,1994;孙海田等,1997;王书来等,2000;姚建新等,2006;崔建堂等,2006;陈守建等,2007)、田地区火烧云中侏罗统龙山组超大型 SEDEX 型碳酸盐岩型 Pb - Zn 矿(西安地质矿产研究所,2006;冯荣昌等,2011)、切列克其下志留统温泉沟群 SEDEX - 受变质改造 - 热液加富型含铜铅锌的赤铁-菱铁矿(王辉等,2016)、玛尔坎地区石炭系大型海相沉积型优质锰矿床等(燕长海等,2012)。

研究区隶属新疆喀什地区塔什库尔干县管辖,面积约为 3 960 km²。研究区高寒缺氧,地形切割强烈,人烟稀少,交通极为不便,面积性的野外矿产地质调查工作面临挑战,难以获取系统、全面、翔实的资料。区内成矿事实众多,结合带以北以赋存于上石炭统的铅锌铜矿为主(欠孜拉夫铅锌铜矿床),以南以赋存于布伦勒岩群中的磁铁矿为主(老并、赞坎、叶里克铁矿床、吉尔铁克沟)(西安地质矿产研究所,2006;冯荣昌等,2011;燕长海等,2012),已成为西昆仑地区近年来重要找矿成果之一,有望成为中国西北地区今后重要的磁铁矿基地。虽然已发现的磁铁矿床较多(王书来等,2000;冯荣昌等,2011;王俊峰,2013),但难免存在漏矿现象。笔者在分析典型矿床成矿背景、矿床地质特征及成矿要素的基础上,利用高分遥感数据在塔什库尔干地区开展磁铁矿遥感地质调查和遥感矿化蚀变异常信息提取,建

立该地区遥感找矿模型,快速圈定遥感找矿靶区,为在该区进一步扩大找矿成果提供依据。

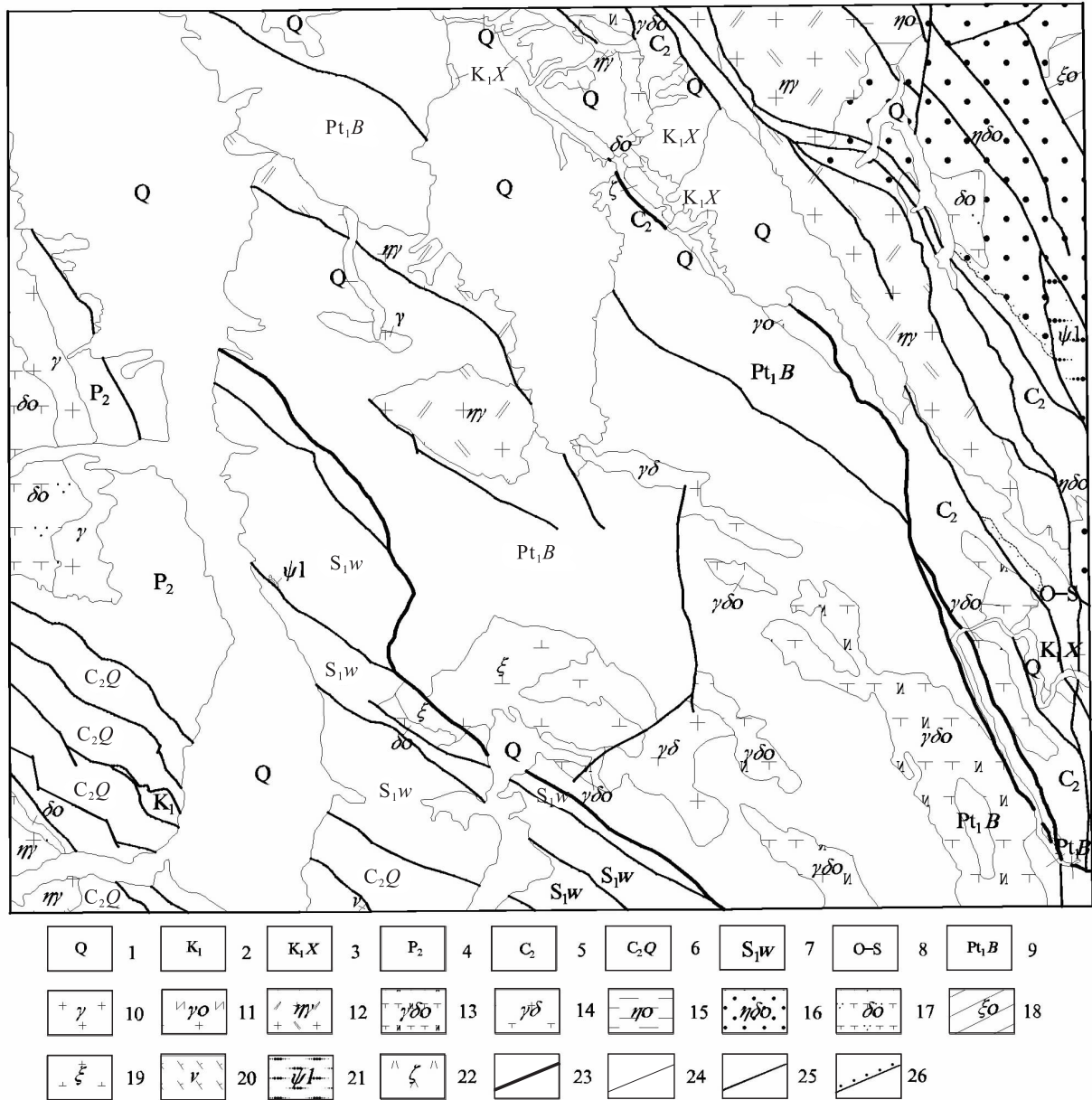
1 研究区地质背景

以康西瓦-苏巴什-阿尼玛卿晚古生代结合带为界,将研究区划分为北侧的北昆仑(北祁漫塔格)早古生代岩浆弧带和南侧北羌塘-唐古拉地块。北侧以出露上石炭统(未分)为特征,奥陶系—志留系零星分布,南侧以广泛出露古元古界布伦勒岩群为特征,不同地层间均呈断裂接触关系。结合带以北岩浆活动十分强烈,中酸性岩体分布广泛,结合带以南岩浆活动较频繁,中酸性岩体分布较前者少。区内褶皱、断裂发育,构造优势方位为 NW 向。结合带以北属中昆仑(中央地块)Fe - Cu - Pb - Zn 矿带(四级),以南属慕士塔格-阿克赛钦(陆缘盆地)Fe - Cu - Au - Pb - Zn - RM 矿带(四级)。区内出露的地层主要有古元古界布伦勒岩群,呈北西南东向展布,与周围地层多呈断层接触,为一套高绿片岩相的硅铁建造(图 1)。

2 研究区赞坎典型铁矿床地质特征

2.1 成矿地质背景

铁矿区位于康西瓦-瓦恰结合带和塔阿西-色克布拉克结合带之间的塔什库尔干陆块(北羌塘-唐古拉地块(Ⅱ8)的组成部分)。以出露古元古界布伦勒岩群(Pt₁B)为特征,沿塔阿西—赞坎一带呈 NW 向产出,为一套高角闪岩相的富含石榴子石、矽线石等特征变质矿物的副变质岩系,由于变质程度不均,不同地段岩石组合差异迥然,原岩以碎屑岩为主,次为碳酸盐岩和膏盐,夹少量安山岩,属浅海-半深海相沉积环境。区域构造环境复杂,受多期构造影响,



1. 第四系;2. 下白垩统;3. 下拉夫底群;4. 中二叠统;5. 上石炭统;6. 恰提尔群;7. 温泉沟组;8. 奥陶—志留系;9. 布伦纳勒岩群;10. 花岗岩;11. 斜长花岗岩;12. 二长花岗岩;13. 英云闪长岩;14. 花岗闪长岩;15. 石英二长岩;16. 石英二长闪长岩;17. 石英闪长岩;18. 石英正长岩;19. 正长岩;20. 辉长岩;21. 辉石岩;22. 英安岩;23. 区域断裂;24. 主干断裂;25. 地层界线;26. 不整合界线

图1 研究区地质简图

Fig. 1 Geological sketch of the study area

地层变形强烈,褶皱、断裂发育。岩浆活动较频繁,自元古宙至喜马拉雅构造运动期均有,岩性复杂,超基性至酸性岩均有出露,其中以燕山构造运动期中酸性花岗岩和花岗闪长岩为主。

2.2 含矿建造与赋矿层位

含矿岩系为古元古界布伦纳勒岩群,岩性为一套富含石榴子石、矽线石等特征变质矿物的变质岩

系,变质程度达高角闪岩相。主要岩石类型有黑云石英片岩、磁铁石英岩、角闪斜长片麻岩、石榴斜长角闪片麻岩、石榴黑云斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩、矽线石榴黑云斜长片麻岩和大理岩及斜长石英岩等。可分为含铁岩段、(含石榴)斜长角闪片麻岩段、矽线石榴片麻岩-石英岩段和大理岩段等4套变质建造组合,其中含铁岩段是区内重要的含铁层位。

岩性为(似)层状-条带状磁铁矿、磁铁石英岩、(含磁铁)黑云斜长片麻岩、黑云石英片岩夹斜长角闪片(麻)岩。含铁岩段在区域上主要分布于老井、乔普卡里莫、塔合曼等地。

2.3 矿体特征

区内共发现 9 条规模较大矿体,矿体产状与顶底板围岩产状基本一致,走向 NW—SE,倾角为 $17^{\circ} \sim 88^{\circ}$ 。矿体走向延伸长度均在 750 m 以上,各矿体厚度均在 5 m 以上。其中 I 号矿体最大,走向延伸长度近 6 000 m,平均厚度达 32.63 m,工程控制斜深均在 200 m 以上。地表呈似层状带状或不规则形态展布,顶板岩性多为(铁染)黑云石英片岩。

2.4 围岩蚀变

可见大理岩化、阳起石化、绿泥石化、绢云母化和褐铁矿化等。

2.5 矿石特征

矿石呈自形-半自形、他形-半自形、粒状变晶、鳞片变晶、碎裂结构,浸染状、块状、条带状构造为主,角砾状构造次之。矿石工业类型为磁铁矿富矿、磁铁矿低品位矿。矿石矿物有磁铁矿、磁赤铁矿、赤铁矿、黄铁矿、褐铁矿、微量黄铜矿和孔雀石,辉钼矿极少。脉石矿物有石英、角闪石、阳起石、透辉石、透闪石、黑云母、方解石、更钠长石、电气石、绿泥石和石膏。

2.6 矿石品位

矿石平均品位 TFe_3 为 $7.3\% \sim 58.69\%$, SiO_2 为 $10.33\% \sim 30.27\%$, $\text{S} < 0.08\%$, $\text{P}_2\text{O}_5 < 0.21\%$, 块状磁铁矿石中常伴有钒、钛稀有元素。

2.7 矿床类型

对于矿床成因类型不同矿产学者有不同观点,主要有沉积变质型、海相火山沉积-受变质改造型(“帕米尔式”铁矿床)之争,但二者均认为是裂谷裂陷背景,海底火山活动间歇期喷流沉积成矿,后来受区域变质变形改造。前者为主流观点,为多数学者所接受,后者观点新颖,研究程度更趋深入。

关键成/控矿要素:①矿体层控特征明显,严格受地层控制,产于古元古界布伦勒岩群(Pt_1B)含铁岩段(a段)。岩性为(铁染)黑云母石英片岩为主,次为二云母石英片岩、绢云母石英片岩、(含磁铁)黑云斜长片麻岩,夹磁铁矿及少量斜长角闪片(麻)岩等。其中(铁染)黑云母石英片岩和(含磁铁)黑云斜长片麻岩与磁铁矿空间关系最为密切,往往构成铁矿体的上下盘围岩。②矿体

与构造关系密切,区内构造活动强烈,次级断裂及褶皱发育,矿体除了严格受地层控制外,在次级断裂发育部位和褶皱构造的轴部有利于矿体厚度增大和矿石品位提高。此外,区内燕山构造运动期岩浆活动虽较强烈,但岩浆侵入活动期明显晚于铁矿形成期,故铁矿形成与岩浆侵入活动关系不大,仅在成矿期后对铁矿体与岩体的接触带附近进行改造或破坏。

3 图像增强处理方法及遥感矿化蚀变信息提取

以 WorldView-2 高分数据为主要信息源,在标准影像图制作(图像预处理、几何纠正、图像融合处理、图像增强、图像镶嵌等)的基础上,通过典型矿床地质特征分析,总结成/控矿要素,以矿石和近矿蚀变围岩波谱测试数据与波谱特征为依据,针对性地进行图像增强处理(波段组合变换、主成分变换信息分解、多重主成分分析、差别化拉伸等),突出关键控矿要素和矿化信息,建立磁铁矿遥感找矿模型,开展矿产地质遥感综合解译;利用 ASTER 数据开展矿化蚀变有关的遥感异常信息提取(杨金中等,2015),配合适量的野外调查验证和必要的岩矿测试,发现了新的矿致异常和找矿线索,在遥感综合分析的基础上,圈定一批遥感找矿靶区。

3.1 基础遥感图像制作

以 WorldView-2 高分卫星遥感数据为主要信息源(局部为 Quickbird 数据),首先,按照波段辐射量的方差越大越好和波段间相关性越小越好的波段选取原则,通过最佳指数(OIF)计算, $\text{B8(R)}\text{B4(G)}\text{B3(B)}$ 波段组合 OIF 值最大(表 1),所含信息量最丰富,能突出不同岩性间的差异,故选用 $\text{B8(R)}\text{B4(G)}\text{B3(B)}$ 波段组合(Quickbird 数据选用 $\text{B3(R)}\text{B3(G)}\text{B1(B)}$ 波段组合),分别采用 IHS 变换、主成分变换及 PANSARP 等方法进行图像融合;然后,利用 1:5 万地形图和 DEM 数据,选用 RPC 参数纠正模型,进行正射纠正和三次立方卷积法重采样;最后,采用无痕镶嵌法进行图像镶嵌,制作遥感解译基础影像图。

3.2 图像增强处理关键技术

(1)波段组合变换识别岩性信息。对于 WorldView-2 多光谱数据,根据不同岩性对应的吸收/反射

表 1 研究区不同波段组合的最佳指数计算结果表

Tab. 1 The best index calculation results for different combinations of bands in the study area

波段组合	843	841	861	842	753	832	851	732	852	752	532
OIF	200.3	183.6	182.7	175.8	172.5	163.3	161.0	158.0	154.7	149.8	142.7

谱带特征,通过进行一系列的波段代数运算,从而达到增强岩性信息的目的。例如,通过 WorldView - 2 数据 band8、band4/band1、band5/band3 的组合,可以识别闪长岩、大理岩、片岩等,突出不同岩性差异,提高岩性解译准确度(图 2a)。

(2)主成分变换信息分解技术识别岩性信息。采用 532 主成分变换信息分解和 681 主成分变换信息分解,将两者结果进行融合得到新图像,既包含多个波段信息,又使得不同波段相关性较小,增强了不同岩性之间的反差。因片岩中氧化铁、黑云母、白云母、长石和石英等矿物含量不同而呈现出不同色调的条带状影纹,其中呈橘红色色调含铁量高,为含磁铁矿石英岩或磁铁矿化带(图 2b)。

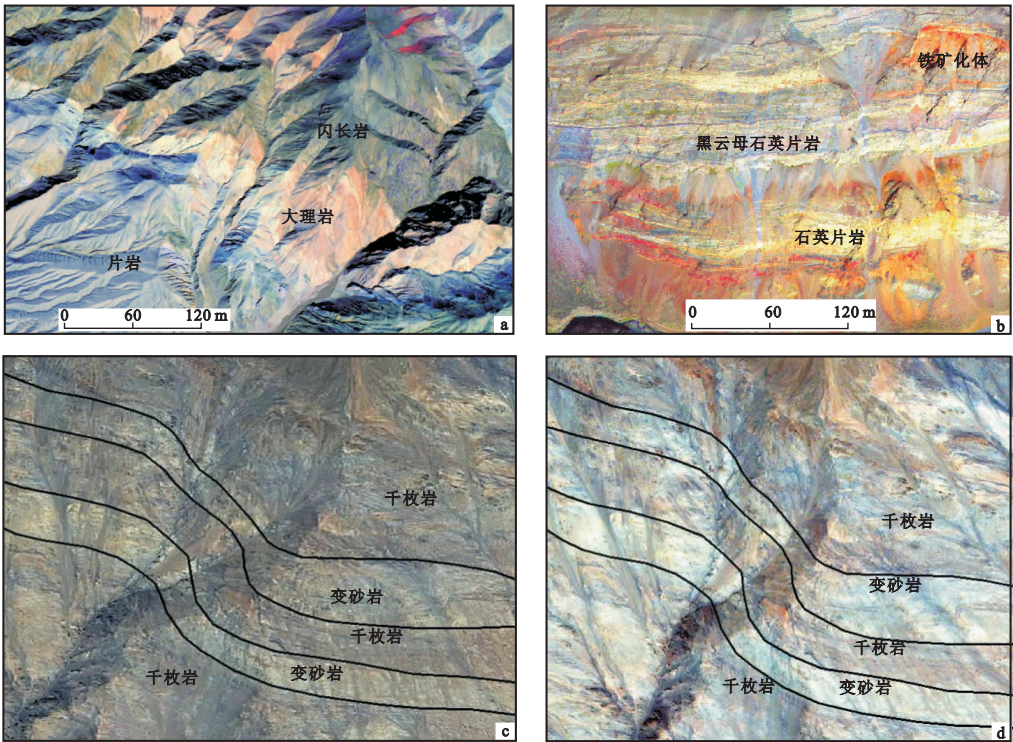
(3)多重主成分分析法。应用主成分分析、波段

差值、比值等方法,尽可能提取图像的较弱的地质构造信息,然后提取信息量最丰富的组合,进行二次处理或选取对专题信息最有利的结果再次进行主成分分析,进行地质信息的二次增强。

(4)差别化拉伸。WorldView - 2 高分遥感图像上,不同岩性区分不明显,如千枚岩与变砂岩均呈浅蓝色,区分不明显(图 2c);采用差别化拉伸后,千枚岩呈浅蓝色,变砂岩呈白色,区分明显(图 2d)。

3.3 WorldView - 2 成/控矿信息遥感解译

本研究采用 WorldView - 2 高分遥感数据经过 B8(R)B4(G)B3(B)波段组合,利用 DEM 数据进行正射校正,经全色波段融合处理,使融合影像分辨率达到 0.46m,并针对性的对其进行增强变换处理,以突出地层岩性、构造、铁矿(化)带(体)信息。



a. 比值法增强岩性信息;b. 主成分变换增强岩性信息;c. 差别化拉伸之前影像;
d. 差别化拉伸之后千枚岩与变砂岩互层信息

图 2 图像增强处理效果图

Fig. 2 Effect of image enhancement

(1)地层岩性信息。研究区磁铁矿赋存于布伦廓勒岩群(Pt_1B)含铁岩段内,主要岩性以(铁染)黑云母石英片岩为主,(含磁铁)黑云斜长片麻岩、磁铁石英片岩、二云母石英片岩、绢云母石英片岩次之,夹磁铁矿、少量斜长角闪片(麻)岩、绿泥片石岩及大理岩等。在 WorldView-2 高分数据 B8(R)B4(G)B3(B)波段组合影像上,(铁染)黑云母石英片岩呈暗灰黑色色调,条带状影纹,抗风化能力中等,多形成缓坡微地貌,与磁铁矿空间关系最为密切,常构成矿体上盘围岩(图 3a)。(含磁铁)黑云斜长片麻岩为暗灰-深灰色色调,条带状影纹,抗风化能力较强,多形成带状陡坎微地貌,与磁铁矿空间关系紧密,常构成重要的赋矿围岩;磁铁石英片岩呈灰-灰白色色调,窄条带状影纹,抗风化能力强,多形成正地形,与磁铁矿空间关系密切,常位于磁铁矿化带内;二云母石英片岩呈亮灰-深灰色或杂色色调,条带状影纹,抗风化能力中等,多形成缓斜坡微地貌;绢云母石英片岩呈亮灰白色调,细条带状影纹,抗风化能力中等,多形成缓斜坡微地貌;斜长角闪片(麻)岩呈暗灰-暗灰绿-灰黑色色调,色调较暗,带状或块状影纹,弱显或不显片理;绿泥片石岩呈暗灰绿-暗灰色色调,细条带状影纹,抗风化能力较弱,多形成缓斜坡或负地形微地貌;大理岩色彩呈亮灰黄-灰白色色调,带状、不规则格块状影纹,抗风化能力较强,一般以正地形为主(图 3b)。

(2)构造信息。研究区地处古亚洲和特提斯两大构造域的结合部位,构造位置独特,位于塔什库尔干陆块内。南北分别以塔阿西-色克布拉克结合带和康西瓦-瓦恰结合带为界与其他构造单元相接。区内断

裂和褶皱构造十分发育,优势构造方位为 NW 向,与南北边界断裂走向基本一致。断裂构造多以压(扭)性为主,影像上线性构造特征明显,可形成线状色调影纹异常带,多形成线状负地形;断裂两侧色调、纹理等特征也显著不同,往往构成不同影像体分界线(图 4a),区内部分磁铁矿体受到次级断裂构造的改造,具体表现为 2 种情况:一是在热液($>300^{\circ}\text{C}$)配合下,矿体厚度加大,矿石品位加富;二是无热液配合下或热液温度较低情况下($<300^{\circ}\text{C}$),矿石组构发生变化,多呈碎裂状结构,角砾状构造,矿体的连续性也受到不同程度的破坏;褶皱构造在影像图上表现为同一套带状影像体或某一影像标志层在空间上呈镜像对称重复分布,并沿向形扬起端或背形倾伏端连续,特征明显,易于识别(图 4b)。铁矿体作为地层的组成部分,在纵弯褶皱作用下,与赋矿围岩发生同步变形,并在压扁作用下,向顶厚褶皱发育,翼部矿体厚度变薄,转折端矿体厚度增大,矿石品位加富。

(3)矿体、矿化带信息。根据野外观测结果,磁铁矿矿石多为铁黑色、灰黑色,矿体呈厚层块状、似层状、透镜状、不规则形态展布,矿体产状与顶底板围岩产状基本一致。赋矿围岩主要为黑云母石英片岩,黑云斜长片麻岩、磁铁石英片岩、石英片岩等次之。因不同程度含磁铁矿,在地表遭受风化作用后,普遍有褐铁矿化现象(铁染)。在 WorldView-2 高分数据 B8(R)B4(G)B3(B)波段组合影像上,磁铁矿呈亮米黄色-黄绿色为主间灰(白)色调,在 Quickbird 高分数据 B3(R)B2(G)B1(B)波段组合影像上,磁铁矿呈亮橘红色-黄褐色为主间灰(白)色调。因矿体地表规模、产状、出露程度差异,形态和

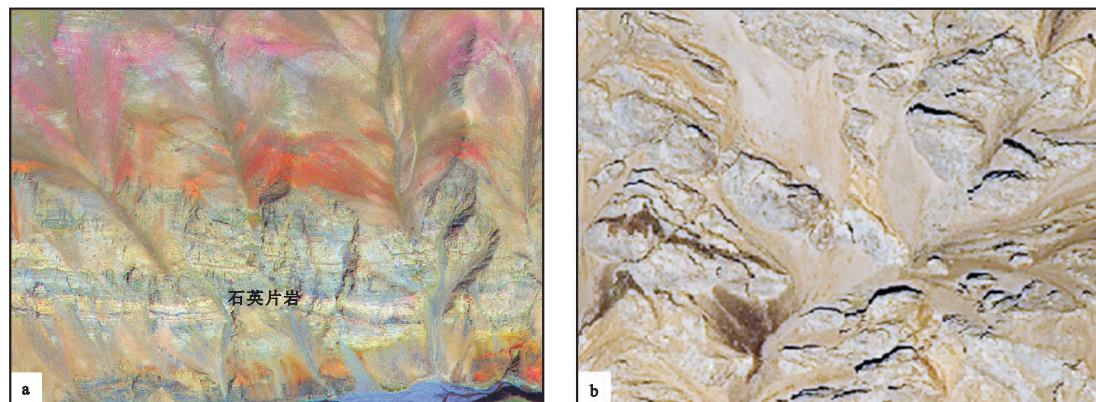
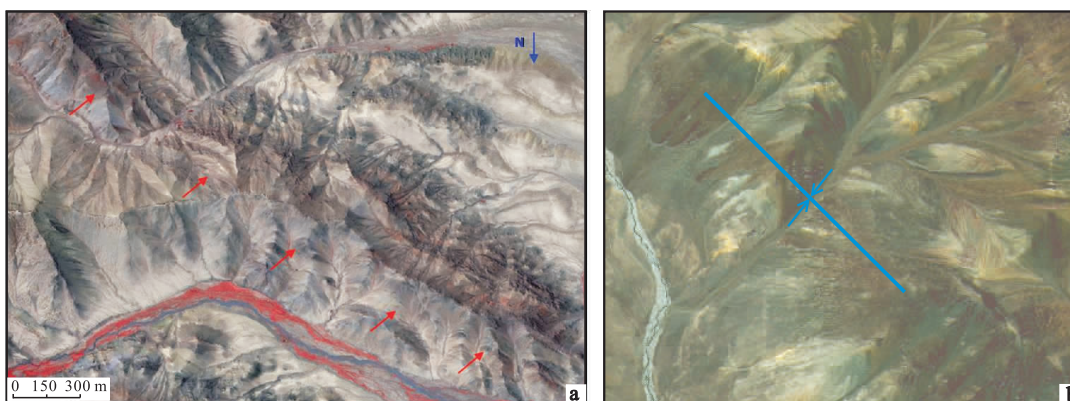


图 3 (a)石英片岩、(b)大理岩影像特征图

Fig. 3 Image features of (a)Quartz schist,(b)Marble



a. 塔阿西-色克布拉克构造带; b. 吉尔铁克复式向形构造

图 4 构造带遥感影像特征图

Fig. 4 Remote sensing image features of tectonic belt

影纹结构也不尽相同。老井一带铁矿体沿片理走向呈斑块(点)状、串珠状断续分布(图 5a); 吉尔铁克沟铁矿体一带, 沿片理走向呈扁豆状、条带状延伸; 走克本沟铁矿化带连续性较好, 呈规则细条带状分布(图 5b)。

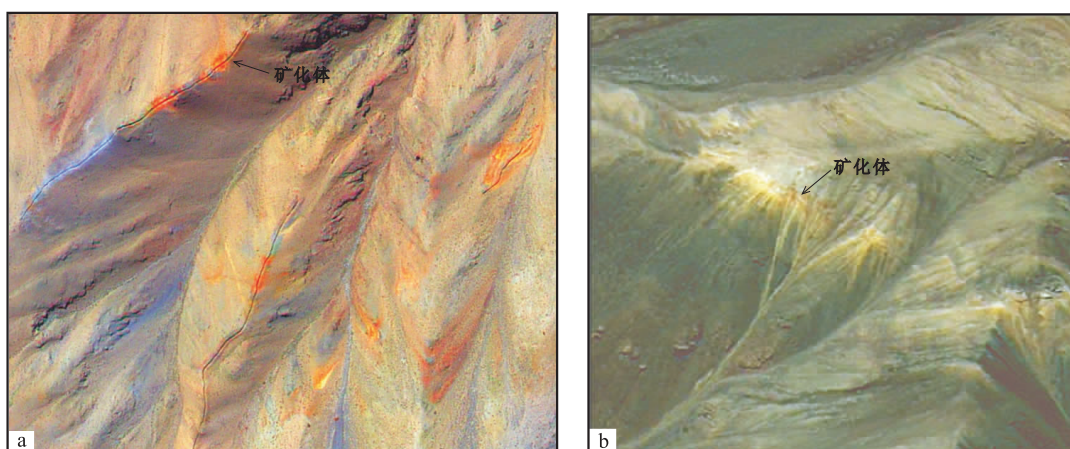
3.4 遥感矿化异常信息提取

3.4.1 基于 ASTER 数据遥感矿化异常信息提取

提取遥感(矿化)蚀变异常信息的方法有多种, 常用主要包括主成分分析、比值分析和光谱角分析 3 种, 如果提取遥感异常的原则是以大型矿(常含有高值异常)为主要目标, 提取方法首选主成分分析法。根据各种异常的特征吸收波谱与 ASTER 波段

的对应关系, 通过主成分变换分别提取铁染、羟基与碳酸根异常。区内主要矿种为沉积变质型磁铁矿, 铁染异常是与铁矿最为直接的遥感异常信息, 而羟基与碳酸根异常与沉积变质型磁铁矿关系不甚密切, 故在此重点讨论铁染遥感异常提取。

Fe^{2+} 在 $1.0 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 附近产生一个强而宽的谱带; Fe^{3+} 在 $0.45 \mu\text{m}$ 、 $0.55 \mu\text{m}$ 、 $0.85 \mu\text{m}$ 、 $0.90 \mu\text{m}$ 、 $0.94 \mu\text{m}$ 吸收较强, 在 $0.9 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 有很强的吸收谱带, 在 $0.6 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 反射相对较强。根据铁染异常吸收光谱特征与 ASTER 数据波段对应关系(表 2)可知, 铁染信息主要反映在 B1—B4 波段, 在 B1 和 B3 波段吸收较强, 在 B2 和 B4 波段反射较强。



a. Quickbird 影像; b. WorldView-2 影像

图 5 铁帽及铁矿体遥感影像特征图

Fig. 5 Image features of Quartz schist(a), Marble(b)

表 2 铁染异常重要吸收谱带表
Tab. 2 Abnormal absorption band of iron, hydroxyl and carbonates

离子、基团	特征吸收波谱(μm)	对应 ASTER 波段	典型矿物
Fe ²⁺ 、Fe ³⁺	Fe ²⁺ :1.10~2.40	Band1、Band3	褐铁矿、赤铁矿、针铁矿、黄钾铁矾、磁铁矿
	Fe ³⁺ :0.45、0.55、0.85、0.90、0.94		

铁染异常(FCA)提取:采用 ASTER 数据的 B1、B2、B3、B4 波段进行主成分变换,以均值+4s(标准离差)作为主分量输出的动态范围。铁染信息在 Aster 数据波段 1、3 呈吸收,在波段 2、4 呈反射,故异常主分量的本征向量特点是波段 1、3 与波段 2、4 的贡献系数符号相反。通过对 1、2、3、4 主成分变换,得到特征矩阵(表 3),发现第四主分量波段 2 与波段 1 和波段 3 符号相反,与波段 4 符号相同,可以作为铁染异常主分量。

表 3 B1、B2、B3、B4 主成分变换特征矩阵表
Tab. 3 Feature matrix of principle component transform(B1、B2、B3、B4)

特征向量	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4
PC1	0.39	0.48	0.53	0.59
PC2	0.52	0.34	0.16	-0.77
PC3	0.68	-0.14	-0.67	0.26
PC4	0.33	-0.80	0.50	-0.02

阈值选取:提取后的异常主分量直方图往往呈正态分布,为了减小人为误差,阈值处理采取异常强度分级的办法,以σ做为尺度,以均值加 n 倍标准离差作为主分量输出的动态范围。铁染异常(FCA)门限值:一级异常为 2.5σ,二级异常为 2σ,三级异常为 1.5σ。目的是对异常区域进行强度划分,对异常信息逐层分离,获得矿化蚀变异常强度分级图。

异常筛选:采取滤波的方法,去掉图中过于孤立分布的异常像元,或将孤立像元归并到包围或与之相邻的较连续分布的异常中。根据波谱特征、异常特征、成矿地质条件等,对研究区所有遥感异常区(带)进行筛选与找矿意义分析,采用光谱特征识别、不同类型异常相互验证、光谱角法优选、异常的地质解译识别等多种方法对干扰信息进行二次去除,得到遥感异常图(图 6)。

3.4.2 基于 WorldView-2 高分数据矿化蚀变遥感异常信息提取研究

铁染信息是铁矿(化)体特征的遥感异常信息,

其吸收特征波谱中心分别为 0.45 μm、0.55 μm、0.85 μm 和 0.90 μm,反射特征波谱为 0.60~0.80 μm。对应于 WorldView-2 数据的 B1、B2、B3 和 B7、B8 呈吸收特征,B4、B5、B6 呈反射特征。其中在 B1 和 B8 呈强吸收,在 B4 呈强反射。主成分分析是通过对特定的几个波段进行正交变换,去除波段间的相关性,降低数据的维数,使尽可能多的有用信息集中到少量的波段图像中。各个主分量常常代表一定的独特地质意义,且互不重复。

采用主成分分析法进行 WorldView-2 数据遥感异常的提取研究(王辉等,2016)。WorldView-2 数据 B1、B4、B8、B6 等 4 个波段进行主成分变换,对代表铁染主分量的判断准则是构成该主分量的本征向量,其 B4 系数应与 B1、B8 系数相反,一般与 B6 系数相同(表 4)。

表 4 铁染异常特征矩阵表
Tab. 4 The matrix of ferric contamination anomaly

特征向量	Band 1	Band 4	Band 8	Band 6
PC 1	0.276	0.548	0.545	0.572
PC 2	0.813	0.234	-0.520	-0.120
PC 3	0.508	-0.590	0.582	-0.234
PC 4	0.076	-0.545	-0.306	0.777

本研究对区内已知铁矿体采用主成分分析法进行铁矿化(铁染)遥感异常信息提取,PC3 是铁染异常的特征主分量,低值地区是铁染异常的高值区。按照均值+3δ(标准差)确定异常下限,提取出的铁染异常特征明显,与已知铁矿体吻合度较高(图 7)。

依据已有的矿产资料,结合野外验证验证情况,对 2 种矿化蚀变遥感异常提取方法进行对比,结果表明,ASTER 等低分数据由于空间分辨率较低,只能识别大范围的蚀变异常,识别精度不如 WorldView-2 数据。WorldView-2 数据所含信息量更丰富,空间分辨率更高,不仅能识别出大范围的蚀变异常,而且能直接识别矿体和铁帽等露头,遥感异常提取精度和效果均优于 ASTER 等低分数据,值得推广应用。

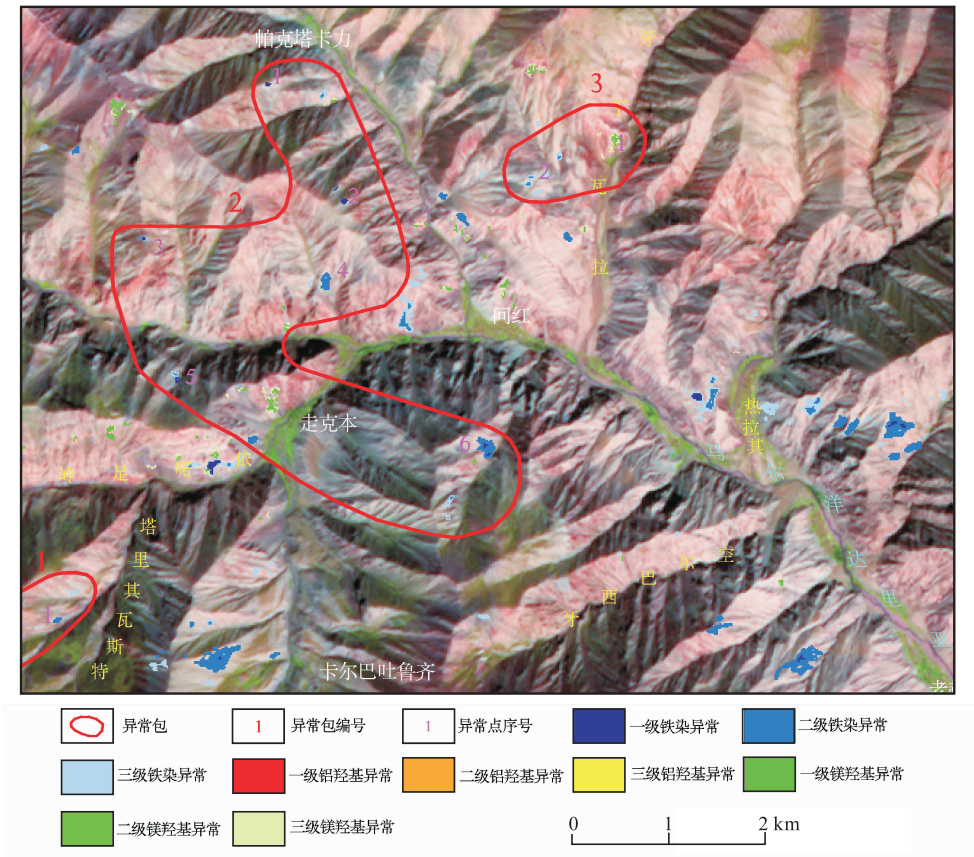
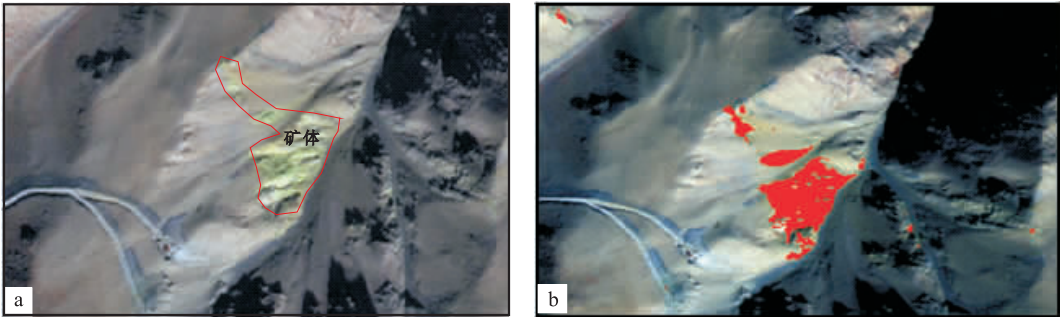


图 6 研究区铁矿区(部分)ASTER 异常强度图

Fig. 6 ASTER anomaly intensity map of the iron ore district (part) of the study area



a. 矿体高分影像;b. 铁染异常

图 7 铁矿 WorldView-2 异常提取对比图

Fig. 7 WorldView-2 anomaly extraction of iron ore

4 塔什库尔干磁铁矿遥感找矿模型表

在对研究区典型矿床成矿地质特征分析、控矿要素高分遥感解译及遥感矿化蚀变异常信息提取的基础上,通过野外验证和修正,建立了基于研究区沉积变质型磁铁矿遥感找矿模型(表 5)。

5 遥感找矿预测与找矿靶区圈定

在典型矿床分析与典型岩矿波普测试、高分遥感精细解译及野外调查验证的基础上,经综合分析归纳,圈定遥感找矿靶区 11 处,其中 A 级遥感找矿靶区 5 处,B 级遥感找矿靶区 3 处,C 级遥感找矿

靶区 3 处(图 8、表 6)。推荐的 A 级找矿靶区有已知典型矿床或矿点,B 级找矿靶区有矿(化)点,C 级找矿靶区以前人矿化点、找矿线索或化探资料为定级依据。所圈定的靶区为下一步工作提供了依据。

表 5 研究区沉积变质型磁铁矿遥感找矿模型表
Tab.5 Remote sensing model of sedimentary metamorphic type magnetite deposits in the study area

成矿要素	成 矿 特 征
矿床类型	沉积变质型/海相火山沉积-受变质改造型
构造背景	塔什库尔干陆块裂谷裂陷构造环境
成矿环境	早期浅海-半深海沉积环境,海底火山活动间歇期喷流沉积成矿,成矿期后受区域变质变形改造
容矿岩系	古元古界布伦勒岩群 a 岩段(含铁岩段)
高分图像解译特征	WorldView-2 图像上矿体呈米黄色-黄绿色调,条带状、豆荚状、串珠状断续延伸(图 5)
遥感异常特征	以铁染一、二级异常为主,次为羟基一、二级异常
野外找矿标志	磁铁矿(化)体抗风化能力强,其露头或转石是最直接的找矿标志;矿(化)体从远处看为黑色、黑灰色,近看呈酱褐色,矿石中的黄铁矿组分风化易形成黄钾铁矾和褐铁矿

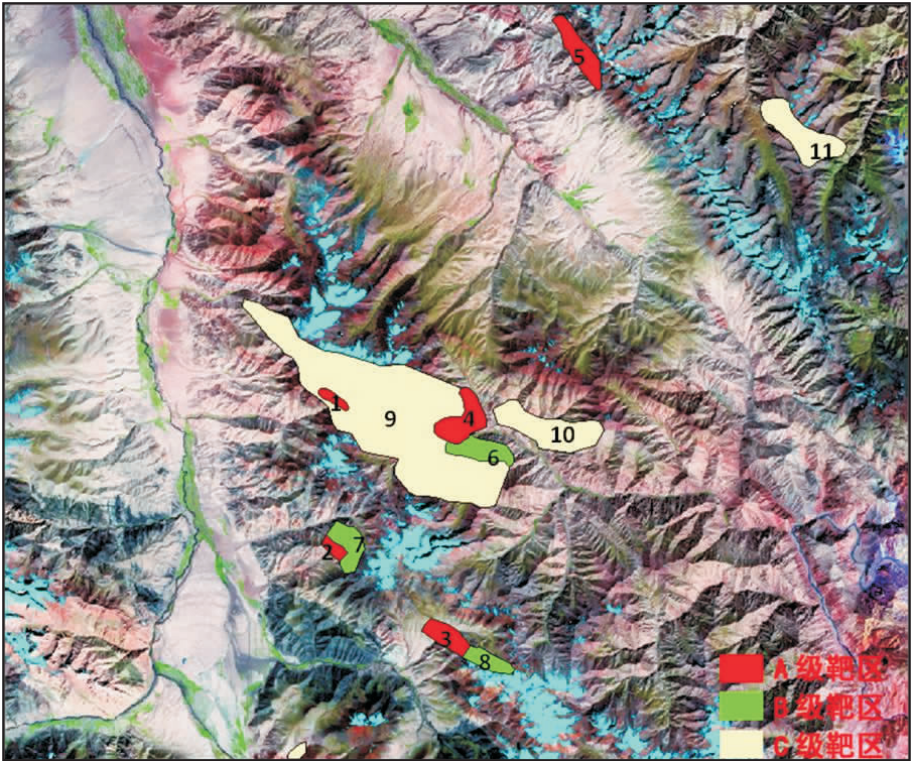


图 8 塔什库尔干地区铁矿带遥感找矿靶区分布图
Fig.8 Taxkorgan area iron ore zone remote sensing prospecting target area distribution map

6 结论

(1)通过本次高分遥感解译与遥感综合分析,圈定并推荐遥感找矿靶区 11 处。其中,A 级遥感找矿靶区 5 处,B 级遥感找矿靶区 3 处,C 级遥感找矿靶

区 3 处,为在塔什库尔干地区继续寻找新的磁铁矿产地提供了找矿方向和依据。
(2)采用主成分分析法对 WorldView-2 数据进行铁染异常的提取研究结果表明,WorldView-2 数据所含信息量更丰富,空间分辨率更高,遥感异常提取效果佳、精度高,往往能直接找到铁矿(化)体,值得推广应用。

表 6 研究区推荐的遥感靶区一览表

Tab.6 The statistical table of recommended remote sensing prospecting target areas

序号	靶区名称	矿产地质特征	靶区分级依据	遥感异常特征	找矿意义
1	老井-走克本铁矿 A 级找矿靶区	位于塔什库尔干陆块;含矿岩系为布伦阔勒岩群含铁岩段,主要岩性为磁铁矿、磁铁矿石英岩、(含磁铁)黑云斜长片麻岩、黑云石英片岩夹斜长角闪片(麻)岩。成矿地质条件良好,赋矿岩系保存完整	化探异常明显,有 HS-34-乙 3 塔米尔铁族元素异常;已有老井铁矿,已发现数十个磁铁矿体,其中 M1、M6、M7、M13 为主要矿体,TFe 为 21.60%~58.80%,查明资源量 4 800 余万 t	遥感异常明显,以一、二级铁染异常为主	找矿前景良好,值得进一步工作,建议优先开展
2	吉尔铁克铁矿 A 级找矿靶区	位于塔什库尔干陆块;含矿岩系为布伦阔勒岩群含铁岩段,主要岩性为磁铁矿、磁铁矿石英岩、(含磁铁)黑云石英片岩。成矿地质条件良好,赋矿岩系保存完整	已有吉尔铁克铁矿,发现矿体 1 条,矿体长度大于 1 000 m,平均厚度约为 60 m,以块状和稠密浸染状矿石为主,矿石矿物主要为磁铁矿,矿石品位 TFe 为 26.10%~69.00%,估算资源量约 4 500 万 t	遥感异常明显,以铁染二级异常为主	找矿前景良好,值得进一步工作,建议优先开展
3	赞坎铁矿 A 级找矿靶区	位于塔什库尔干陆块;含矿岩系为布伦阔勒岩群含铁岩段,主要岩性为磁铁矿、磁铁矿石英岩、(含磁铁)二云石英片岩、斜长角闪片岩夹大理岩。岩浆活动频繁,主要岩性为石英闪长岩,断裂构造发育。具备成矿条件。成矿地质条件良好,赋矿岩系保存完整	已有赞坎大型铁矿床。共发现 6 条矿带,20 余条磁铁矿(化)体,其中 9 条规模较大。其中 I 号最大,长度为 6 000 m,平均厚度为 32.63 m,TFE 品位为 27.58%。矿区内累计查明矿石资源量约 8 000 余万 t	遥感异常明显,以铁染二级异常为主。	找矿前景良好,值得进一步工作,建议优先开展
4	叶里特铁矿 A 级找矿靶区	位于塔什库尔干陆块;含矿岩系为布伦阔勒岩群含铁岩段,主要岩性为磁铁矿、磁铁矿石英岩、(含磁铁)黑云石英片岩。成矿地质条件良好,赋矿岩系保存完整	化探异常明显,有 HS-34-乙 3 塔米尔铁族元素异常;有已知磁铁矿点 1 处,含矿体 2 条,其中最大的一条长度大于 1 100m,平均厚度约为 20 m,以块状和稠密浸染状矿石为主,矿石矿物主要为磁铁矿,平均品位 TFe 为 38.45%,mTe 为 35.62%	遥感异常明显,异常点与矿点吻合度高。主要为铁染一、二级异常	找矿前景良好,值得进一步工作,建议优先开展
5	欠孜拉夫铅锌铜矿 A 级找矿靶区	位于塔什库尔干县瓦恰乡东北欠孜拉夫沟,地层主要为上石炭统,岩浆岩发育。铅锌铜矿化主要产于大理岩中	靶区内有欠孜拉夫铅锌铜矿矿点,矿床类型为华力西期热液脉型,出露地层为石炭系灰色变质砂岩夹变凝灰质砂岩及白色、灰白色大理岩,矿石矿物为方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、孔雀石、蓝铜矿等。蚀变类型主要有绢云母化、绿泥石化、硅化等	遥感异常明显,异常点与矿点吻合度高。主要有铁染一级异常,羟基一级异常	找矿前景良好,值得进一步工作
6	老井铁矿 B 级找矿靶区	位于塔什库尔干陆块;含矿岩系为布伦阔勒岩群含铁岩段,主要岩性为黑云石英片岩、斜长角闪片岩。成矿地质条件良好,赋矿岩系保存完整	化探异常明显,有 HS-34-乙 3 塔米尔铁族元素异常;发现磁铁矿化点 3 处	遥感异常明显,以铁染一、二级异常为主	找矿前景较好,有进一步工作的价值
7	沙依地库拉沟 B 级找矿靶区	位于塔什库尔干陆块;含矿岩系为布伦阔勒岩群含铁岩段,主要岩性为黑云石英片岩、斜长角闪片岩。中酸性超浅成岩体发育。成矿地质条件良好,赋矿岩系保存较完整	有已知磁铁矿化点 2 处。地表规模不详,以块状和稠密浸染状矿石为主,矿石矿物主要为磁铁矿,捡块样品品位 TFe 为 21.36%、34.68%	遥感异常明显,主要为铁染一、二级异常	找矿前景较好,有进一步工作的价值
8	赞坎东找 B 级矿靶区	位于塔什库尔干陆块;含矿岩系为布伦阔勒岩群含铁岩段,主要岩性为黑云石英片岩、斜长角闪片岩。中酸性超浅成岩体发育。成矿地质条件良好,赋矿岩系保存较完整	有已知磁铁矿化点 2 处。地表规模不详,以块状和稠密浸染状矿石为主,矿石矿物主要为磁铁矿,捡块样品品位 TFe 为 19.47%、34.68%。	遥感异常明显,主要为铁染一、二级异常	找矿前景较好,有进一步工作的价值

续表 6

序号	靶区名称	矿产地质特征	靶区分级依据	遥感异常特征	找矿意义
9	老井-走克本-叶里特铁矿 C 级找矿靶区	位于塔什库尔干陆块;含矿岩系为布伦阔勒岩群,主要岩性为黑云石英片岩、斜长角闪片岩。成矿地质条件良好,赋矿岩系保存完整	化探异常明显,有 HS-34-乙 3 塔米尔铁族元素异常;目前尚未发现矿点	遥感异常较明显,主要为铁染一、二、三级异常	具有一定找矿意义
10	热拉其铁矿 C 级找矿靶区	位于塔什库尔干陆块;含矿岩系为布伦阔勒岩群,主要岩性为黑云石英片岩、斜长角闪片岩夹大理岩。南部有花岗闪长岩岩体。成矿地质条件良好,赋矿岩系保存完整	化探异常明显,有 HS-34-乙 3 塔米尔铁族元素异常;目前尚未发现矿点	遥感异常较明显,主要为铁染一、二、三级异常	具有一定找矿意义
11	拉依布拉克铜矿 C 级找矿靶区	位于塔什库尔干县大同乡西拉依布拉克沟地区	靶区有已知矿点 2 处:夏麦兹铜钼矿和拉依布拉克铜钼矿	见羟基一、二、三级异常	具有一定找矿意义

(3)高分遥感技术在植被稀少、基岩出露条件好的地区能快速有效的获取相关成矿信息和矿化异常信息。特别是在自然条件恶劣,工作环境艰险地区,能发挥不可替代的作用,值得在相同或类似地区进一步推广应用。随着中国国产高分、高光谱卫星不断成功发射和国土资源遥感技术的飞速发展,相信遥感技术在矿产资源勘查中必将具有更加良好的找矿效果和更加广阔的应用前景。

参考文献(References):

陈守建,李荣社,计文化,等. 昆仑造山带晚泥盆世沉积特征及构造古地理环境[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(1):44-51.

CHEN Shoujian, LI Rongshe, JI Wenhua, et al. The deposition characteristics and tectono-plaeogeographic environment of Kunlun orogenic belt in late devonian [J]. Geotectonicaet Metallogenia, 2007, 31(1):44-51.

程裕淇. 中国区域地质概论[M]. 北京:地质出版社, 1994.

CHENG Yuqi. Outline to the Regional Geology of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.

崔建堂,边小卫,王炬川,等. 西昆仑康西瓦南部甜水湖一带下志留统与中泥盆统不整合界面的发现[J]. 地质通报, 2006, 25(12):1437-1440.

CUI Jiantang, BIAN Xiaowei, WANG Juchuan, et al. Discovery of an unconformity between the Lower Silurian and Middle Devonian in the Tianshuihu area, southern Kangxiwar, West Kunlun, China[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(12):1437-1440.

董永观,郭坤一,肖惠留,等. 西昆仑地区成矿远景[J]. 中国地质, 2003, 30(2):173-178.

DONG Yongguan, GUO Kunyi, XIAO Huiliu, et al. Ore prospects of the West Kunlun area in western China[J]. Geology in China, 2003, 30(2):173-178.

冯荣昌,吴海才,陈勇. 新疆塔什库尔干县赞坎铁矿地质特征及成因浅析[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(3): 404-409.

FENG Changrong, WU Haicai, CHEN Yong. Geological characteristics and genesis of the Zankan iron deposit in Taxkorgan, Xinjiang[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2011, 35(3):404-409.

贾群子. 新疆西昆仑块状硫化物铜矿床[M]. 北京:地质出版社, 1999.

JIA Qunzi. Massive Sulfide Copper Deposits of West Kunlun, Xinjiang [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999.

姜春发,杨经绥,冯秉贵,等. 昆仑开合构造[M]. 北京:地质出版社, 1992, 161-168.

JIANG Chunfa, YANG Jingsui, FENG Binggui, et al. Opening and Closing Structure of Kunlu[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992:161-168 .

李博秦,姚建新,高联达,等. 西昆仑麻扎-康西瓦一带温泉沟群的形成时代及物源区分析[J]. 地质通报, 2007, 26(4):457-465.

LI Boqin, YAO Jianxin, GAO Lianda, et al. Age and source regions of the Wenquangou Group in the Mazar-Kangxiwar area, West Kunlun Mountains [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(4):457-465.

李文渊,张照伟,高永宝,等. 秦祁昆造山带重要成矿事件及其构造演化响应[A]//陈毓川,薛春纪,张长青. 主攻深部挺进西部放眼世界—第九届全国矿床会议论文集[C]. 北京:地质出版社, 2008, 15-16.

LI Wenyuan, ZHANG Zhaowei, GAO Yongbao, et al. ,

- The important mineralization events and tectonic response of Qinling, Qilian and Kunlun orogenic belts [A]//CHEN Yuchuan, XUE Chunji, ZHANG Changqing. Endeavoring Deep Marching West Scanning World-Symposium of the Ninth Mineral Deposit Conference in China[C]. Beijing: Geological Publishing House, 2008, 15-16.
- 孙海田, 李纯杰, 李锦荣, 等. 新疆西昆仑盖山地区铜矿资源找矿地质条件[J]. 中国地质, 1997, 24(11): 29-30.
- SUN Haitian, LI Chunjie, LI Jinrong, et al. The ore-forming prospecting of copper deposit in Kungaishan area of west Kunlun, Xinjiang[J]. Geology in China 1997, 29-30.
- 王辉, 范玉海, 张少鹏, 等. 运用高分遥感技术圈定西昆仑黑恰铁多金属矿化带[J]. 中国地质调查, 2016, 3(5): 13-20.
- WANG Hui, FAN Yuhai, JING Moushun, et al. Delineation of Heiqiairon polymetallic mineralization zone in West Kunlun region by using high resolution remote sensing technology[J]. Geological Survey of China, 2016, 3(5): 13-20.
- 王俊峰. 西昆仑老井-赞坎矿集区铁矿成矿条件遥感研究[J]. 西北地质, 2013, 46(2): 167-173.
- WAND Junfeng. Remote sensing study of metallogenic condition in West Kunlun Laobing-Zankan ore concentration area [J]. Northwestern Geology, 2013, 46(2): 167-173.
- 王书来, 汪东波, 祝新友. 新疆西昆仑金(铜)矿找矿前景分析[J]. 地质找矿论丛, 2000, 15(3): 224-229.
- WANG Shulai, WANG Dongbo, ZHU Xinyou. Ore-searching prospecting analysis of gold(copper) deposits in the West Kunlun[J]. Contribution to Geology and Mineral Resources Research, 2000, 15(3): 224-229.
- 西安地质矿产研究所. 西北地区矿产资源找矿潜力[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources. The prospecting potential of mineral resources in Northwest China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.
- 新疆自治区地质矿产局. 新疆自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1-841.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Autonomous Region. Regional Geology of Xinjiang Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 1-841.
- 许志琴, 戚学祥, 刘福来, 等. 西昆仑康西瓦加里东期孔兹岩系及地质意义[J]. 地质学报, 2004, 78(6): 733-743.
- XU Zhiqin, QI Xuexiang, LIU Fulai, et al. The Kangxiwar Caledonian Khondalite series in West Kunlun, China, and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(6): 733-743.
- 燕长海, 陈曹军, 曹新志, 等. 新疆塔什库尔干地区“帕米尔式”铁矿床的发现及其地质意义[J]. 地质通报, 2012, 31(4): 549-557.
- YAN Changhai, CHEN Caojun, CAO Xinshi, et al. The discovery of the “Pamir-type” iron deposits in Taxkorgan area of Xinjiang and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(4): 549-557.
- 杨金中, 赵玉灵. 遥感技术的特点及其在地质矿产调查中的作用[J]. 矿产勘查, 2015, 6(5): 529-534.
- YANG Jinzhong, ZHAO Yuling. Technical features of remote sensing and its application in the geological survey and mineral resources survey[J]. Mineral Exploration, 2015, 6(5): 529-534.
- 杨经绥, 王希斌, 史仁灯, 等. 青藏高原北部东昆仑南缘德尔尼蛇绿岩: 一个被肢解了的古特提斯洋壳[J]. 中国地质, 2004, 31(3): 225-239.
- YANG Jingsui, WANG Xibin, SHI Rendeng, et al. The Dur'ngoi ophiolite in East Kunlun, northern Qinghai-Tibet Plateau: a fragment of paleo-Tethyan oceanic crust [J]. Geology in China, 2004, 31(3): 225-239.
- 姚建新, 肖序常, 高联达, 等. 西昆仑地区志留系温泉沟群的疑源类和几丁虫[J]. 古生物学报, 2006, 45(4): 528-532.
- YAO Jianxin, XIAO Xuchang, GAO Lianda, et al. Silurian acritarchs and chitinozoans in Wenquangou Group from The West Kunlun region [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2006, 45(4): 528-532.