

doi: 10.12029/gc20220116

黄理善, 李学彪, 荆林海, 丁海峰, 莫江平, 裴超, 曾晖. 2022. 基于遥感手段的高寒山区矿产资源远景区快速圈定与综合评价技术集成[J]. 中国地质, 49(1): 253-270.

Huang Lishan, Li Xuebiao, Jing Linhai, Ding Haifeng, Mo Jiangping, Pei Chao, Zeng Hui. 2022. Integration of rapid delineation and comprehensive evaluation technology of mineral resources prospect area in alpine mountainous area based on remote sensing[J]. *Geology in China*, 49(1): 253-270 (in Chinese with English abstract).

基于遥感手段的高寒山区矿产资源远景区快速圈定与综合评价技术集成

黄理善¹, 李学彪¹, 荆林海², 丁海峰², 莫江平¹, 裴超¹, 曾晖¹

(1. 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 广西 桂林 541004; 2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094)

摘要:【研究目的】新疆西昆仑地区是中国重要的成矿带, 海拔高、气候恶劣、地形切割强烈, 开展找矿工作极其困难, 急需一套高效找矿技术体系实现找矿突破。【研究方法】本文利用 TM、ETM+、OLI、ASTER、高分 1 号与 2 号、WorldView-2/3 等卫星数据, 采用雷达图像与光学图像的融合技术、改进的 Crosta 方法(iCrosta)、能谱-面积(S-A)分形滤波方法、图像滤波等一系列遥感蚀变异常提取方法提取矿化蚀变信息, 并利用证据权模型和模糊证据权模型方法将遥感信息与地质、地球化学数据进行信息融合, 圈定找矿远景区; 在重点远景区的找矿靶区内开展地面土壤/岩屑地球化学野外现场快速分析(XRF 和 LIBS)和轻便地球物理探测(AMT、IP 等), 快速追索、圈定和评价异常。【研究结果】结合成矿地质背景、成矿规律和找矿标志, 圈定了 24 处找矿远景区, 经地面地球化学、地球物理和浅部工程验证, 确认了黑山、平地等铅锌矿(化)点, 实现快速找矿。【结论】集遥感综合信息提取、多元地学信息融合及地面物化探快速评价方法为一体的矿产资源圈定与评价技术非常适合在高寒山区开展。

关键词: 遥感示矿信息提取; 地球物理勘探; 地球化学勘探; 矿产勘查工程; 高寒山区; 新疆西昆仑

创 新 点: 利用遥感技术提取矿化蚀变信息, 并利用证据权模型和模糊证据权模型方法将遥感信息与地质、地球化学数据进行信息融合, 快速圈定找矿远景区; 利用土壤/岩屑地球化学野外现场快速分析和轻便地球物理方法, 快速追索、圈定和评价找矿靶区。

中图分类号: P62 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)01-0253-18

Integration of rapid delineation and comprehensive evaluation technology of mineral resources prospect area in alpine mountainous area based on remote sensing

HUANG Lishan¹, LI Xuebiao¹, JING Linhai², DING Haifeng², MO Jiangping¹,
PEI Chao¹, ZENG Hui¹

(1. China Nonferrous Guilin Mineral Geology Research Institute Co., Ltd., Guilin, 541004, Guangxi, China;

2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100094, China)

收稿日期: 2019-09-25; 改回日期: 2020-02-10

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAB05B00)与新疆自治区科技厅“十三五”重大专项课题(2018A03004-3)联合资助。

作者简介: 黄理善, 男, 1985 年生, 硕士, 高级工程师, 从事金属矿山综合找矿方法的应用与研究; E-mail: 627006527@qq.com。

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective]The West Kunlun region of Xinjiang is an important metallogenic belt in China, with high altitude, bad climate and strong topographic cutting; it is extremely difficult to carry out prospecting. It is urgent to establish an efficient prospecting technology system to achieve a breakthrough in prospecting. **[Methods]** In this paper, TM, ETM+, OLI, ASTER, Gaofen1 and 2, WorldView-2/3 and other satellite data are used, and the fusion technology of radar image and optical image, improved crosta method (iCrosta) and energy spectrum area are adopted (S-A) a series of remote sensing alteration anomaly extraction methods such as fractal filtering method and image filtering are used to extract mineralization alteration information, and the remote sensing information is fused with geological and geochemical data by using evidence weight model and fuzzy evidence weight model, so as to delineate prospecting scenic spots; In the prospecting target areas of key prospective areas, field rapid field analysis (XRF and LIBS) and portable geophysical exploration (AMT, IP, etc.) of ground soil/debris geochemistry are carried out to quickly trace, delineate and evaluate anomalies. **[Results]** Combined with metallogenic geological background, metallogenic law and prospecting signs, 24 prospecting prospects were delineated. After verification of surface geochemistry, geophysics and shallow engineering, lead-zinc mineralization (mineralization) points such as Heishan and Pingdi were confirmed to realize rapid prospecting. **[Conclusions]**The mineral resource delineation and evaluation technology, which integrate remote sensing comprehensive information extraction, multiple geoscience information fusion and rapid evaluation method of surface geophysical and geochemical exploration, is very suitable to be carried out in Alpine mountainous areas.

Key words: remote sensing information extraction; geophysical prospecting; geochemical prospecting; mineral exploration engineering; alpine mountainous area; West Kunlun, Xinjiang

Highlights: The mineralization alteration information is extracted by remote sensing technology, and the remote sensing information is fused with geological and geochemical data by using evidence weight model and fuzzy evidence weight model, so as to quickly delineate the prospecting prospect; Rapid field analysis of soil/rock debris geochemistry and portable geophysical methods are used to quickly trace, delineate and evaluate prospecting targets.

About the first author: HUANG Lishan, male, born in 1985, master, senior engineer, engaged in the application and research of comprehensive prospecting methods in metal mines; E-mail: 627006527@qq.com.

Fund support: Supported by the National Science and Technology Support Plan Project of the 12th Five Year Plan (No.2015BAB05B00) and the Major Special Project of the 13th Five Year Plan of the Department of Science and Technology of Xinjiang Autonomous Region (No.2018A03004-3).

1 引 言

在地形地貌条件特殊的高寒山地、荒漠、戈壁、草原等地区,找矿工作越来越注重经济性和时效性。在区域找矿方法上,遥感技术已经得到广泛应用,利用遥感可以识别或提取多种矿物信息、绘制矿物分布图、圈定地质构造等,极大地提高了找矿效率和准确率;地球物理和地球化学等方法在矿(化)体评价方面具有经济、快速的特点,能大大节省找矿的经费投入,许多工作者采用遥感、地球物理、地球化学等方法在特殊地区找矿,取得了较好的成果,但针对不同地形地貌、不同矿种,采用的技术手段也各有差异。

刘磊等(2008)在云南思姑锡矿区通过对地质、遥感、地球化学等多元地学数据的找矿信息提取和

综合处理技术研究,选择Sn、Cu等元素,对矿区原生晕进行了R型聚类分析、因子分析等分析,并以化探确定异常下限圈定异常区域,取得良好找矿效果;雷天赐等(2012)在湖南永州南部地区也做过类似的研究工作。周灵洁等(2011)在西昆仑北部地区的铅锌铜矿带采集地表蚀变岩石样品,应用短波红外矿物分析技术对其矿物组合进行波谱分析,以ASTER和ETM+数据为基础提取矿化蚀变信息,圈定了7个成矿预测区;张微等(2016)在干旱一半干旱的中国东昆仑成矿带红水河地区进行过遥感地质解译和找矿预测;梁军等(2017)以新疆和田上其汗地区为研究区,选取WorldView-2高分辨率卫星遥感数据为数据源,进行地质构造解译,提取地质构造、铁化蚀变和泥化蚀变异常信息,圈定了12处遥感找矿远景区;黄爽等(2014)在南美地区、马鸿

霖等(2019)在沙特阿拉伯地区通过高空间分辨率遥感影像圈定找矿远景区,实现了快速找矿。

在地面物化探找矿工作中,很多工作者更青睐轻便、快捷、经济的方法。林延畅等(2002)利用手提式多元素X荧光仪在地质大调查中进行样品多元素快速测试,充分体现出该仪器和方法的轻便、快速、高效;杨海等(2014)将土壤X荧光测量等快速获取异常信息手段应用于航磁异常查证;张素荣等(2014)针对青藏高原的特殊环境和区域化探异常查证周期长的特点,选择便携台式X荧光仪,开展了现场分析测试的适应性研究,确定了一种及时提供分析结果的现场分析方法;马德锡等(2013)在内蒙古通过手提式X荧光仪圈定了新的矿体;丁高明等(2015)综合利用频谱激电法(SIP)和音频大地电磁法(AMT)两种物探方法在河南省夜长坪钼矿床预测、筛选出深部有利成矿区,通过钻孔得到了很好验证;黄理善等(2016)、李玉录(2018)在特殊地形地貌条件下利用多种方法进行联合勘查,取得良好的地质找矿效果;林方丽等(2016)利用高精度磁测、IP和CSAMT,推测矿体赋存位置和深度范围;宋丽蓉等(2017)在西藏雄巴地区进行了高精度重力和AMT,圈定出火山沉积型硼矿的发育有利区,取得了理想的找矿结果。

上述表明,遥感与地面物化探相结合的技术是实现快速找矿的高效手段,但目前还未系统地建立针对高寒山区的遥感、物探和化探的找矿集成技术体系。本文以新疆南部西昆仑高寒山区为例,针对其海拔高、气候恶劣、地形切割强烈、崩塌积物等特点,研究了遥感信息与地质、地球物理和地球化学信息的关联模式以及地质、地球物理、地球化学和遥感多元信息的融合技术,建立了主要矿床类型的找矿信息模型;通过遥感示矿信息提取结果及地质、地球物理和地球化学勘探的地面验证,圈定大型找矿靶区,并对靶区进行地质、物探、化探和浅部工程揭露的成矿潜力快速评价,建立了高寒山区高分辨率遥感、轻便高效物化探技术和地面钻探验证的轻便、高效的找矿靶区快速圈定与评价技术,并进行了相应的应用及推广。

2 研究区地质背景

2.1 地层

西昆仑地区,平均海拔在4000 m以上,属典型

的高原寒冷气候,具有低温寒冷,四季不分,空气稀薄、日照长、太阳辐射强、冬夏及昼夜温差大等特点。有数十座冰峰海拔达6000 m以上,相对高差1000~2500 m,世界第二高峰—乔戈里峰屹立于西南部的中、巴边境线上,海拔8611 m。区内的河流众多,水系发育,山系北部河谷深切,多峡谷,山系南部高而深切,奇峰林立,多角峰和悬谷,冰川粒雪盆地发育,地质工作条件十分恶劣。

西昆仑地层中前寒武系和古生界出露面积最大,其次是三叠系(图1)。西昆仑北带和中带具有相同的结晶基底,北带主要是出露晚古生代地层,中带以前寒武系结晶基底为主。西昆仑南带地层出露相对齐全且三叠系分布最广。

2.1.1 元古宇

西昆仑地区包括两套深变质岩系,变质略深的片麻岩为太古宙地层,而变质略浅的结晶片岩和大理岩为元古宙地层。长城系赛拉加兹塔格群变质程度浅,为一套细碧角斑岩夹细碎屑岩(陈哲夫等,1990)。蓟县系博查塔格群岩性为灰岩或白云岩,见磷块岩角砾及叠层石。青白口系丝路群,为碎屑岩和白云质灰岩。震旦系恰克马克力克组为碳酸盐岩及碎屑岩(陈哲夫等,1997)。长城系塞图拉群,为一套绿片岩相—角闪岩相地层(姜春发等,1992)。蓟县系桑株塔格岩群岩性为一套绿片岩相—角闪岩相变质岩,夹有中、基性火山岩。古元古界布伦阔勒群为中深变质岩系,长城系甜水海群为碎屑岩—碳酸盐岩建造(霍亮,2010)。

2.1.2 古生界

寒武系主要分布在西昆南带叶尔羌河上游,岩性为灰黑色厚层块状灰岩、变质砂岩。奥陶系岩性为弱变质碎屑岩、灰岩(张志德等,1987)。志留系相对发育,且是具有成矿潜力的矿源层,岩性为海相碎屑岩夹灰岩、碳酸盐岩夹砂页岩、砂砾岩,在麻扎东—黑恰地区,称为黑孜群(O_3-S_1),为一套复杂的浅变质岩系(霍亮,2010)。

2.1.3 上古生界

晚古生界泥盆系岩性主要为灰绿色碎屑岩,属陆缘扇—三角洲沉积。石炭系岩性为一套砂岩、板岩、灰岩、碳酸盐岩夹少量钙质粉砂岩等。二叠系岩性为一套紫红色陆相碎屑砂岩,不整合上覆于石炭系之上(霍亮,2010)。

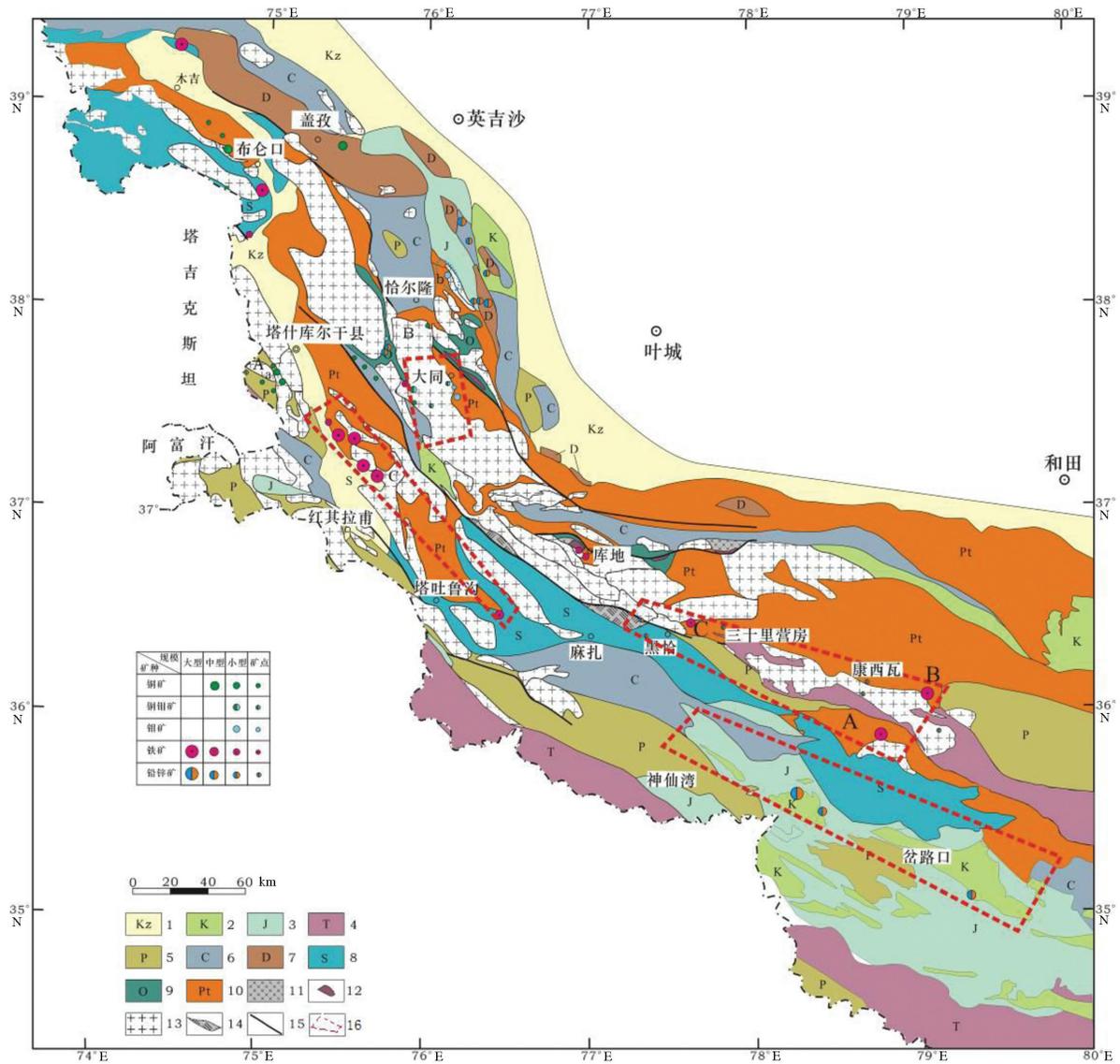


图1 西昆仑—帕米尔地质矿产略图(据1:25万区域地质图修编)

1—新生界;2—白垩系;3—侏罗系;4—三叠系;5—二叠系;6—石炭系;7—泥盆系;8—志留系;9—奥陶系;10—元古宇;11—基性侵入岩;12—超基性岩;13—花岗岩;14—麻扎构造混杂岩;15—深大断裂;16—研究区范围

Fig.1 Geological and mineral map of West Kunlun-Pamir (modified from 1:250000 regional geological map)

1—Cenozoic; 2—Cretaceous; 3—Jurassic; 4—Triassic; 5—Permian; 6—Carboniferous; 7—Devonian; 8—Silurian; 9—Ordovician; 10—Proterozoic; 11—Mafic intrusive rocks; 12—Ultramafic rocks; 13—Granite; 14—Maza tectonic mélange; 15—Deep fault; 16—Study area

2.1.4 中生界

三叠系在西昆仑北部主要是陆相砂砾岩,泥岩,夹有煤线。在西昆中部岩性为一套海相砂岩、粉砂岩、板岩夹大理岩滑塌岩块,与浊积岩相似。西昆南部的三叠系分布广,保存完整,假整合在老地层之上,主要为片理化灰岩、角砾状灰岩、粉砂岩夹硅质岩、生物灰岩等;侏罗系地层出露较全,上统库孜贡苏组和中下统叶尔羌群,是一套陆相沉积砂

岩和泥岩,西昆南部的侏罗系以乔尔天山为界分开海相和陆相,其北为陆相,为一套凝灰质页岩、砂岩和灰岩,其南是海相,主要岩性是中厚层、块状灰岩、生物灰岩和大量珊瑚、双壳、腹足等化石(霍亮, 2010)。喀喇昆仑—甜水海山间盆地一带也多为龙山组灰色—灰黑色中薄层的灰岩及粉晶灰岩。

2.1.5 新生界

古近—新近系和第四系分布面积较小。古近

一新近系在西昆北带和西昆中带,岩性为陆相砂砾岩和泥岩,分布于昆仑山山前和山间盆地中,西昆南带的古近—新近系零星分布于各小盆地内,不整合覆于老地层之上。第四纪西昆仑地区的火山活动发育(邓万明,1991),第四系主要为砂砾岩和未胶结的碎石、黏土,主要在河流、湖泊和冰川附近出现。

2.2 区域构造

西昆仑—喀喇昆仑地区是中央造山带的西延部分,位于古亚洲构造域和特提斯构造域的结合部、塔里木板块西南缘,以康西瓦—瓦恰缝合带为界,南部为喀喇昆仑构造带,北部为西昆仑构造带。该区北以他龙—库尔良断裂带与塔里木陆块相邻、东以库牙克断裂与东昆仑构造带相邻,西接塔吉克北帕米尔,呈东宽西窄的狭长带状延伸,组成了青藏高原的西北边缘。西昆仑地区可进一步分为昆南、昆中、昆北3个次级构造单元,3个构造单元向西依次消减,在叶尔羌河以西仅残留昆北构造带。成矿带属秦祁昆和特提斯两大构造岩浆成矿域的交接地段,处于青藏高原的西构造结,不同构造带优势矿种、成矿类型差异显著。对于西昆仑造山带的划分,主要依据西昆仑地区的断裂带或缝合带来划分,主要界限是西昆仑北部蛇绿岩带、康西瓦断裂带、西昆仑南断裂带。

2.3 岩浆岩

西昆仑造山带经历了多个构造旋回的复杂地质演化过程及其伴随的频繁的岩浆活动,发育着不同规模、不同时代的火山岩和侵入岩,各个构造单元均有火山岩和侵入岩分布,其中,昆仑地块最为发育,甜水海地块和南羌塘地块次之,铁克里克隆起带和巴颜喀拉地块发育规模最少。由于西昆仑造山带自然条件恶劣,该地区岩浆岩的研究程度普遍较低,并且该地区经历了复杂的地质演化过程,岩浆岩形成时代跨度较大,岩性复杂,超基性至超碱性岩均有出露,以酸性花岗岩和花岗闪长岩为主。

2.4 矿产资源

该区成矿地质条件优越,矿产资源丰富,矿化相对集中,以铁、铜、铅、锌、钨、锡、金、银为主,已经新发现了许多矿(化)点,其中部分矿产地有望成为大型、超大型的找矿基地,如火烧云超大型铅锌矿、大红柳滩—白龙山一带的锂矿、阿克萨依铁铅锌锰多金属矿、多宝山铅锌矿、黑孜干铁锌多金属矿、

百利铅矿、岔路口铅锌矿、落石沟铅锌矿等。其中,和田火烧云 Pb-Zn 矿床是一处超大型层控碳酸盐型铅锌矿床,其资源储量已超过 2100 万 t。受多种因素所限,本区矿产的发现、开发还不均衡:山势较低、交通条件好的地方工作程度和开发利用程度较高,其他地方的工作程度和开发利用程度较低。

3 遥感示矿信息提取技术

3.1 卫星数据及预处理

主要采用覆盖研究区的陆地卫星 5 号 TM、7 号 ETM+、8 号 OLI、ASTER、高分 1 号(GF-1)、高分 2 号(GF-2)、WorldView-2/3、哨兵 1 号、哨兵 2 号、天宫 1 号以及 Google Earth 等影像。陆地卫星 TM、ETM+、OLI 数据、哨兵 1 号等数据主要用于提取区域岩性、构造、蚀变等信息,WorldView-2/3 数据用于精细的多光谱蚀变矿物信息提取,天宫 1 号数据用于精细的高光谱矿物填图,Google Earth 影像主要用于构造解译以及其他影像的几何精校正。

选用的遥感数据具有几到十几个波段、米级和几十米等多种空间分辨率,具有不同的光谱和空间特点。其中,陆地卫星 8 号 OLI 数据的几何保真度、辐射分辨率和信噪比特性比陆地卫星 7 号 ETM+ 数据有大幅度的提高,特别是频带信噪比是 ETM+ 信噪比的 8 倍之多,可以作为背景图像,提供研究区宏观的构造、岩性、地貌等信息;哨兵 2A 数据的空间分辨率为 10~20 m,可以用来制作 1:10 万~1:5 万比例尺的遥感蚀变图(Fe³⁺铁染、Fe²⁺铁染、羟基蚀变)。ASTER 数据在可见光—短波红外光谱段包含较多的波段,空间分辨率为 15~30 m,可以用来制作 1:20 万~1:10 万比例尺的铁染、羟基、泥化、高岭土化、明矾石化、钙化等各类遥感蚀变矿物信息图,弥补 OLI、哨兵 2A 等多光谱数据在短波红外波段数目少、难以细分蚀变类型的缺陷。高分 1 号的多光谱和全色图像的空间分辨率分别为 8 m 和 2 m,高分 2 号的多光谱和全色图像的空间分辨率分别为 4 m 和 1 m,可以用来制作 1:5 万~1:2.5 万比例尺的遥感影像图和各类专题图(岩性、构造、蚀变等)。所有这些专题图将有助于探测与成矿相关的铁染、羟基等蚀变信息,并结合地质成矿背景预测遥感成矿远景区。

ASTER 数据是西昆仑地区蚀变信息提取选用

的两种主要遥感数据之一。ASTER数据在可见光—近红外(VNIR)范围有4个波段,空间分辨率为15 m;在短波红外(SWIR)范围有6个波段,分辨率为30 m;在热红外(TIR)范围有5个波段,分辨率为90 m。ASTER数据具有较多的短波红外波段,能够有效地提供蚀变矿物信息。本次研究共选用了50余景经过辐射校正和几何校正的ASTER数据。由于西昆仑地区平均海拔为4500 m以上,部分地区云雪覆盖严重,因此ASTER遥感数据中有部分区域被冰雪覆盖,部分区域被云覆盖,但多数工作区的ASTER影像质量较好,能够满足遥感岩性、构造解译、蚀变信息提取等工作的需要(图2)。

本次工作还采用了部分WorldView-2和WorldView-3数据进行探索性研究,WorldView-2能够提供一个0.46 m分辨率的全色图像和8个1.84 m分辨率的多光谱图像。WorldView-3除了提供0.31 m分辨率的全色影像和8波段多光谱影像外,还额外增加了8波段的短波红外影像。该卫星提供的极高空间分辨率,可以分辨更小、更细的地物,可以跟航空影像相媲美。拥有覆

盖可见光、近红外、短波红外的波谱特征,使WorldView-3拥有极强的定量分析能力,在植被监测、矿产探测、海岸/海洋监测等方面拥有广阔的应用前景。

为了有效地从遥感影像中提取地质成矿信息,对原始遥感图像进行了预处理和信息提取。图像的预处理又被称作图像纠正和重建,其主要目的是纠正原始图像中的几何变形和辐射变形,即通过对图像获取过程中产生的变形、扭曲、模糊和噪声的纠正,得到一个尽可能在几何和辐射上真实的图像。光学遥感图像的预处理主要包括辐射定标、大气纠正、几何纠正、坏边去除、干扰信息去除等步骤。

3.2 地物高光谱数据预处理

获得野外岩石、矿石样品的光谱反射率可以提高遥感光谱蚀变矿物信息的提取准确度,标本在室内进行高光谱测试和手持式X荧光元素测试,光谱仪为全光谱便携式地物光谱仪(ASD2500光谱仪),实验时选用的光谱采样间隔为1 nm,波长范围为350~2500 nm,共2151个波段。采用室内测试方式,用暗室内置固定光源,避免大气和阳光对于数据的影响。通过实

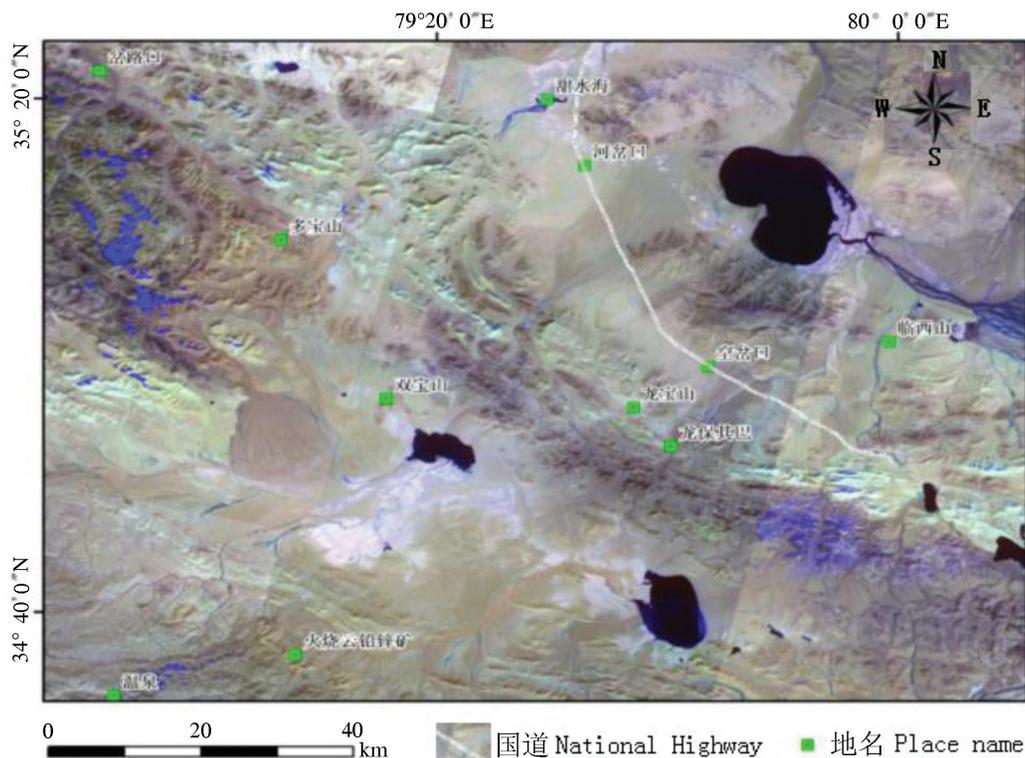


图2 甜水海地区ASTER数据假彩色合成图像[波段7(红)、3(绿)、1(蓝)]

Fig.2 False-color composite image of ASTER data in Tianshuihai area [band7 (red), band3 (green), band1 (blue)]

测地物光谱可以对蚀变矿物组合和元素进行反演研究,为遥感预测提供有效信息。

通过建立区域光谱库、平滑去噪、聚类分析、数据转换(微分、倒数、对数和平方根等)和分段滤波等数据预处理方法提高后续矿区组分提取精度。受到不同区域地质背景的控制,具体岩石矿物组成具有区域特征。根据需要建立区域光谱库不仅可以减少蚀变信息提取过程中的计算量,也有利于提高提取精度。虽然建立区域光谱库会减弱信息提取的普适性,但可以进一步提高光谱提取岩矿信息的准确性。其主要任务是根据区域地质成矿特征确定主要成岩矿物、蚀变矿物、成矿矿物种类及其组合,根据USGS光谱库建立区域光谱库以备。

由于岩石组成具有相当的复杂和多样性,所含矿物种类不同,会产生不同的光谱反射率曲线。这些光谱反射率曲线或者波段不同,或者整体反射率高低值不同。本研究将所有光谱曲线在ENVI软件中建立光谱库,进行统一分析,根据波峰波谷及整体反射率值进行聚类分析,并与岩性变化进行对比分析。

3.3 一种改进的蚀变信息提取方法(iCrosta)

遥感蚀变信息提取方法或技术有很多,本次研究主要采用主成分分析法(PCA)、SAR图像与光学图像的融合技术、基于S-A分形模型的遥感蚀变异常提取法、基于图像滤波的遥感蚀变异常提取法、波段比值法和Crosta技术。

波段比值法和Crosta技术是常用的两种蚀变信息提取方法或技术。波段比值方法要求输入的图像已经经过了精确的大气纠正,有效消除了大气的影。地形深切地区的遥感图像含有明显的地形阴影,如果这种图像的大气校正不甚精确,图像中阴影的某些波段的值有可能接近于0,在波段比值过程中产生异常结果,在高寒深切地区,波段比值技术提取铁染蚀变信息有可能失效。在覆盖严重的地区,Crosta技术提取铁染蚀变信息的效果会有明显降低,在这些地区,铁染蚀变信息会被其他地物遮挡而在图像中显示较弱,从而在主成分分析中会难以集中到单一的主成分中。

研究区如果属于深切地区,地形阴影会比较明显。利用常规的波段比值来提取铁染蚀变信息时,部分阴影区会得到极大增强,并与铁染信息较强的区域混淆,严重误导铁染蚀变信息的提取。如

果研究区内覆盖严重,铁染或羟基蚀变信息会被严重遮盖,在主成分分析中相关信息可能会分散在多个主成分中,不能集中于某一高阶主成分。在此情况下,这类蚀变信息就难以用常规的主成分分析(PCA)或Crosta方法来有效地提取。

为了利用PCA方法直接得到期望的蚀变信息,提出了一个改进的Crosta方法(iCrosta)。在该方法中,如果一种蚀变矿物的波段比值提取公式为 B_i/B_{i+1} (光谱反射峰和光谱吸收峰分别为 B_i 和 B_{i+1} ,图3),则这两个波段可以直接进行主成分分析,记做 $PCA(B_i, B_{i+1})$,得到的第二主成分(PC2)即为两个波段的差异,也即是目标蚀变信息。如果一种蚀变矿物的波段比值提取公式为 $(B_i/B_{i+1})+(B_{i+2}/B_{i+1})$ (光谱反射峰为 B_i 和 B_{i+2} ,光谱吸收峰为 B_{i+1}),则 B_i 与 B_{i+1} 波段、 B_{i+2} 与 B_{i+1} 可以分别进行主成分分析,得到的两个PC2包含了目标蚀变信息,可以再进行一次主成分分析,得到的新PC1将包含两个PC2中的共同成分,即目标蚀变信息。

对研究区S2图像进行iCrosta处理,得到的羟基蚀变信息如图4d所示。与图4b相比,新得到的蚀变图层与波段比值图像(图4c)非常类似,图像中部的蚀变条带得到了有效增强。

对OLI、高分1号、ASTER等其他数据用iCrosta技术进行了处理:从OLI数据中提取了 Fe^{3+} 铁染、 Fe^{2+} 铁染、羟基等蚀变信息;从高分1号数据中提取了 Fe^{3+} 铁染蚀变信息,从ASTER数据中提取了铝羟基、镁羟基、泥化、 Fe^{3+} 、铁帽、明矾石、绿泥石等精细的蚀变类型。

3.4 多元信息融合技术

与地球化学元素丰度图相反,遥感图像具有很

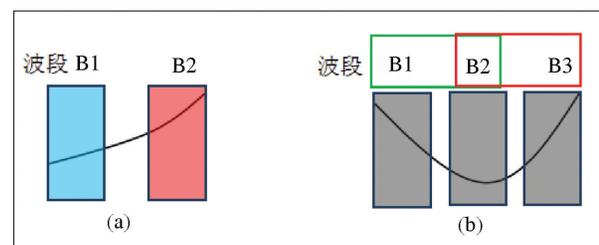


图3 iCrosta技术图示(a—双波段的情况;b—三波段的情况)

Fig.3 iCrosta technical illustration (a—Dual—bands case; b—Three—bands case)

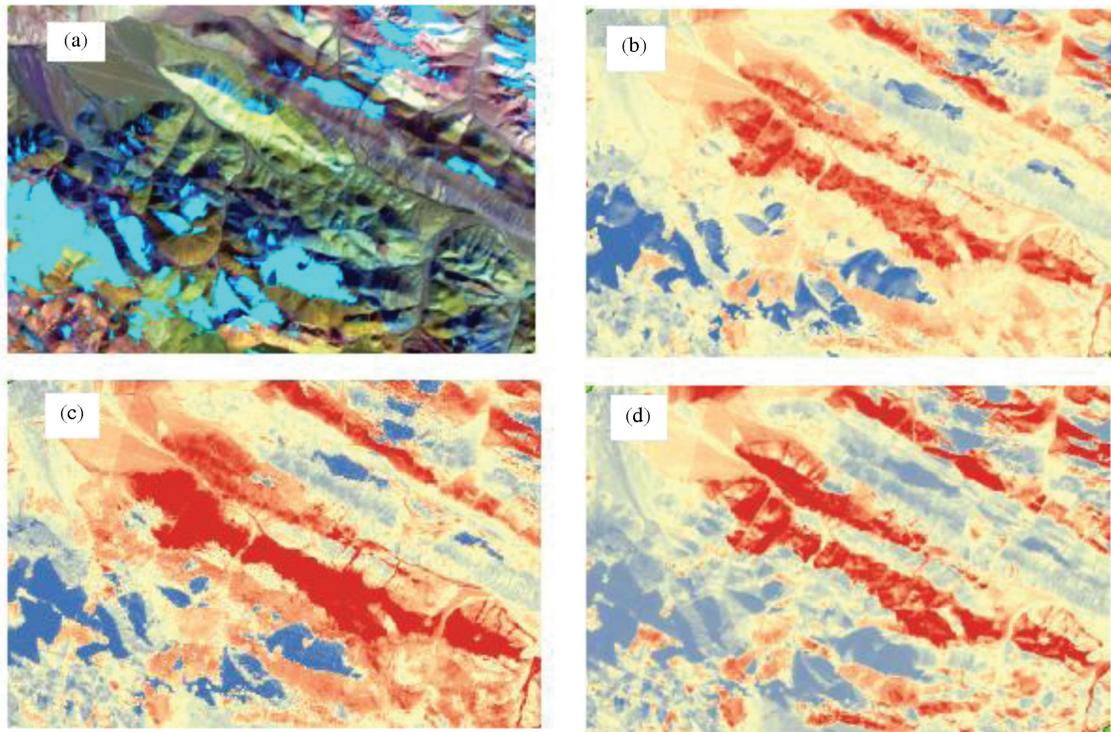


图4 S2子区图像及其羟基蚀变

a—原始S2图像(波段12、8、2 RGB假彩色合成); b—Crosta技术得到的羟基蚀变; c—波段比值(11/12)得到的羟基蚀变; d—iCrosta技术得到的铁染蚀变

Fig.4 S2 Subregion Image and Hydroxyl Alteration

a—Original S2 image (band 12, 8, 2RGB false-color composite); b—Hydroxyl alteration by Crosta technique; c—Hydroxyl alteration by band ratio (11/12); d—Iron staining alteration by iCrosta technique

高的空间分辨率,每个像元只代表地面几十米、几米甚至亚米范围内的地物。高分辨率的遥感图像包含了地表地质体丰富的、精确的光谱信息,表达了地表精细的岩性分布和蚀变矿物分布,可以用来高精度地定位地质体和矿化区域。但是,从遥感图像中得到的蚀变异常信息往往分布较广,在没有其他地质信息辅助的情况下往往难以准确、快速地确定其与局部矿化的空间联系。

通过分析近年来西昆仑发现矿床点位置与区域地球化学异常位置的关系,发现地球化学数据在高寒地区的元素迁移距离较小,对矿体指示效果非常明显,利用高效的分散流取样便可最大限度控制汇水盆地的地球化学数据强度以及分布状况。针对西昆仑高寒地区的特征,建立了“基于地球化学数据与遥感数据融合”方法,作为本研究中的多元信息融合技术中的核心。

地球化学元素丰度数据和遥感图像反映了地表地质体不同的属性:一个反映了地质体内的元素

含量,另一个反映地质体内所有矿物的混合光谱。尽管两者的尺度往往相差很大,例如,地球化学元素数据一般只有1:50万、1:25万、1:10万等较小的比例尺,而遥感图像的空间分辨率往往是十米级、米级、亚米级甚至厘米级,但都反映同一地物的属性,具有天然的联系。这种联系可以被用来将遥感图像中精细的地物光谱信息与小比例尺(低分辨率)的地球化学元素信息融合起来,合成大比例尺的地球化学元素图层。

基于这一图像融合的思想,开发了一个融合方法 RSGD (Remote Sensing and Geochemical Data) 来将遥感图像和地球化学元素数据合成为一个精细的地球化学元素图层。该方法的主要步骤如下:

(1)对原始遥感图像进行 k-means 非监督分类,分为 n 个类别 $C_i (i=1, \dots, n)$;

(2)利用拉普拉斯金字塔技术将遥感图像 MS 分解为一个低频的近似图像 MS_L 和一个高频的细节图像 MS_H 。 MS_L 与地化图层 GeoCh 具有相同的图像

大小,而 MS_H 与 MS 图像具有相同的图像大小;

(3)将地球化学图层 $GeoCh$ 和 MS_L 立方卷积重采样到与原始遥感图像相同的图像大小;

(4)在每一类地物范围内,建立 $GeoCh$ 与 MS_L 的关系 f_i :

$$GeoCh=f_i(b_{1,L},b_{2,L},\dots,b_{n,L}), \quad (\text{公式1})$$

其中, $b_{i,L}$ 代表近似图像 MS_L 的第 i 波段;

(5)在每一类地物范围内,将遥感图像的空间细节注入到地球化学图层 $GeoCh$ 中,得到合成的地化图层 $GeoCh_r$:

$$GeoCh_r=GeoCh+f_i(b_{1,H},b_{2,H},\dots,b_{n,H}) \quad (\text{公式2})$$

其中, $b_{i,H}$ 代表细节图像 MS_H 的第 i 波段。

图5a是1:20万地球化学Pb元素图层,该图层经过放大后得到图5b,后者与ASTER影像(图5c)进行RSGD融合后就得到了一个合成的地球化学图层(5d)。该合成图层与原始图层相比,具有更多的空间

细节,可以与地质体进行更好的空间关联与分析。

4 物化探快速评价技术

4.1 野外X荧光分析技术

西昆仑恶劣的气候条件和陡险的交通,致使该地区工作时间非常有限,每年仅有6—9月份能正常工作,再扣除雨雪天气,真正能野外开展工作的时间仅有2个月。加之该地区地处高寒深切割地区,岩石裸露地表,山坡上到处是岩屑,给野外施工和剖面穿越增加了不少困难。目前新发现的矿产地90%均处于1:50万地球化学图中的高值区域或者边部。虽然传统的地球化学有显著找矿效果,但却受样品加工、运输、和分析等不同环节在时间上的制约,致使大面积化探扫面在找矿时间上大打折扣。

对于常规的有色金属元素,野外便携式X荧光元素快速分析技术(XRF)恰好可以解决这一难题。

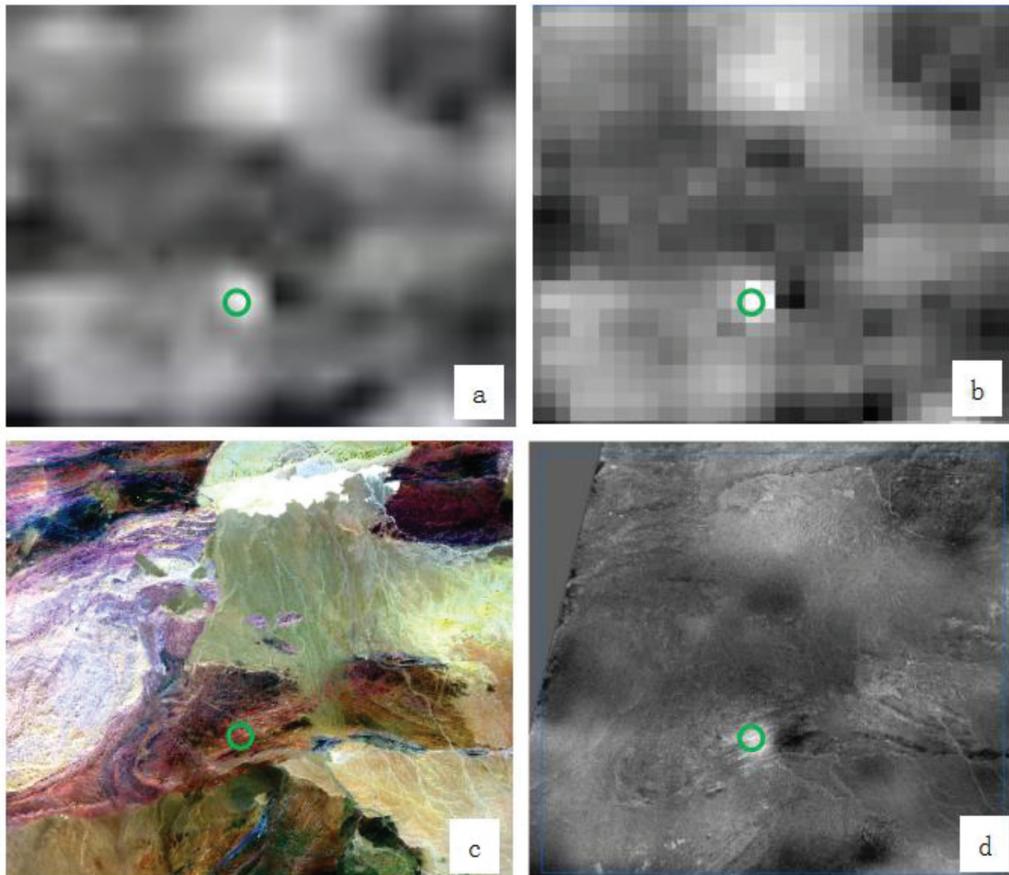


图5 地球化学Pb元素丰度(图中绿圈为钼矿所在的位置)

a—1:20万地球化学Pb元素图层;b—放大后的Pb元素丰度;c—ASTER影像;d—合成的Pb元素丰度

Fig.5 Geochemical Pb abundance (the green circle is located in molybdenum deposits)

a—1: 200000 geochemistry Pb layers; b—Magnified Pb abundances; c— Aster Images; d— Compositing Pb abundances

便携式X荧光分析仪具有高准确度高的元素有:Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Pb、Zn、W、Mo、Ga等11项,其中具有实验室级别的为:Cu、Pb、Zn、Co、Ni等5项。本次试验对Cu、Pb、Zn、As等元素进行了结果对比分析,发现野外X荧光分析结果具有与实验室分析结果一致的趋势曲线,准确度高的元素覆盖本次的研究目标元素,实际对比效果达到野外快速发现异常和矿(化)体的目标,是高寒地区找矿的必备仪器。在野外当天采样完毕即可测试,若发现有找矿意义的样品,第二天即可对这些有找矿意义的地段开展详细查证,及时确定矿化地段,指导野外矿化样品的刻槽取样。

对于轻金属元素,利用激光诱导击穿光谱(LIBS)快速分析技术进行测试(图6a)。LIBS快速分析技术主要是依靠高能量的激光脉冲(例如Nd:YAG激光器产生的1064 nm/532 nm波长激光)来加热样品表面,使得样品表面微粒获得足够的能量脱离表面进而击穿并得到等离子体,探测等离子体发射光谱(包括连续光谱、离子光谱、原子光谱和分子光谱)。LIBS是一种原子发射光谱仪,可以对固相、液相和气相基体中几乎所有元素进行定性和定量的分析。不同于传统的检测方法如ICP-OES或者XRF,LIBS在检测过程中无需进行复杂的样品制备。为了达到这个目的,LIBS采用高能量聚焦脉冲激光光束将样品激发至等离子态,对产生的对应元素发射谱进行分析。元素发射谱的波长与元素的种类直接相关,而元素谱线的强度则和元素的含量相关。本次工作利用LIBS元素快速分析仪,对已知矿体上采集的59个锂、铍、铷等稀有金属矿石、土壤样进行了分析测试,并与实验室ICP-OES分析结果进行了对比,发现LIBS野外分析结果与实验室分析结果曲线趋势一致,对矿体的指示明显,LIBS分析技术可以达到稀有金属野外现场快速分析的目的。

4.2 轻便物探方法

西昆仑地区高寒缺氧,从经济和劳动强度角度,地球物理的大型仪器、复杂的方法有时不太适合开展工作,加上地形切割强烈,岩石裸露地表,岩屑覆盖较厚,这对地球物理的电、电磁信号的发射和接收都造成了极大的困难。目前,较轻便快捷的物探方法有地面高精度磁测、激发极化法、AMT等。研究工作中,在对典型矿床开展物探试验工作的基础上,总结了物

探工作中的经验和教训,对物探方法的采集方式、仪器设备和数据处理方法进行了改进,以适应高寒深切地区物探方法工作要求。

如在开展激发极化法工作时,经常用到大型发电设备,在高寒深切地区,交通极为不便,大型发电设备无法运达工作区域,这大大阻碍了物探工作的开展。在工作中,对电源装置进行了改进和优化,利用锂电池直流电瓶(DC,12 V)-交流(AC,220 V)的电源逆变技术,获得了220 V的交流电,再利用升压技术,获得了600~1000 V的直流输出电压,电源信号稳定,整个电源装置重量不超过4 kg,极好地解决了高寒深切地区的物探电源仪器笨重的问题。

音频大地电磁测深法可以快速获得地下电性结构,设备轻便、施工快捷,适合在高寒深切地区开展工作,如EH-4设备、UltraEM Z4设备等。

5 应用实例

在大红柳滩—甜水海—火烧云研究区(77°36'16"~80°50'47"E,34°11'51"~36°07'14"N),利用开发的地质-地化-遥感示矿信息融合技术,将该地区的区域控矿断裂、1:50万(Pb、Zn、Cu)地球化学元素、多层遥感示矿信息(从ASTER得到的碳酸盐岩分布、从哨兵2号数据中得到的铁染和羟基蚀变)进行了信息融合,得到了全区的Pb、Zn、Cu矿后验概率分布,参照Pb、Zn、Cu矿后验概率图以及控矿地层和蚀变带的展布,圈定了24个遥感找矿远景区(图6)。

以甜水海重点远景区为例,该区位于喀喇昆仑山脉主脊北侧的高寒地区,地理位置为79°00'00"~80°00'00"E,34°40'00"~35°20'00"N,北部属于巴颜喀拉—红柳滩地层分区,而南部属于北羌塘地层区,该地层区又进一步分出北部的甜水海地层分区和南部的神仙湾地层分区。甜水海地区处于3个分区的接合部位。地层分区出露地层较全,从中元古界—中生界均可见。区内几乎无岩浆岩出露,仅有少量的基性岩脉和酸性岩脉出露。构造上处于阿克赛钦古生代陆缘盆地和喀喇昆仑中生代陆缘盆地的结合部位,两者之间以乔尔天山—岔路口断裂分隔,该断裂属喀喇昆仑深断裂,沿此断裂及两侧,构成新疆铅富集规模最大、强度最高、元素组合全的地区,同范围内叠加有锌、镉富集区,在更大范围

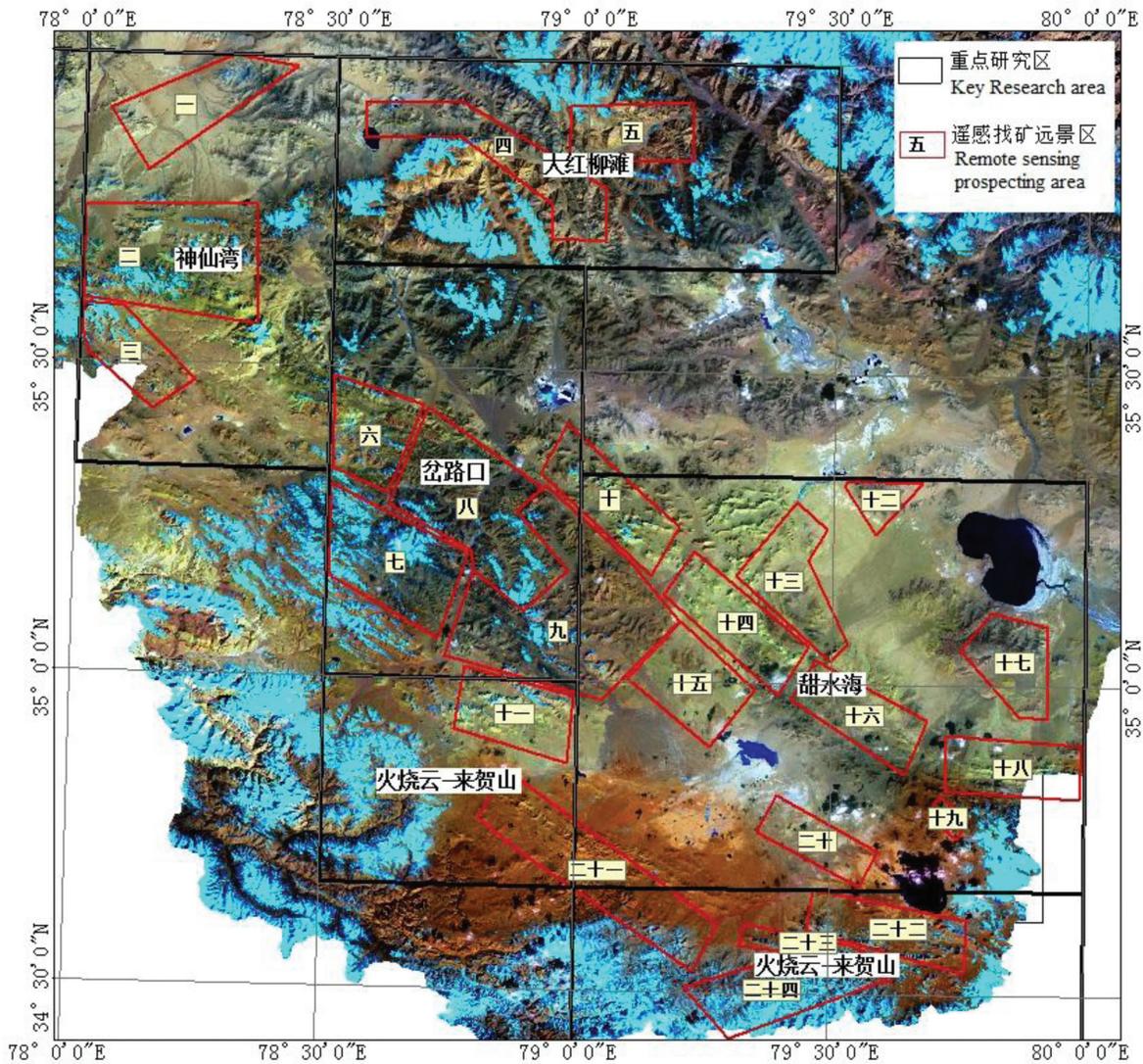


图6 神仙湾—岔路口—甜水海地区遥感找矿远景区分布(底图为S2波段12、8、2红绿蓝假彩色合成)

Fig.6 Distribution of remote sensing prospecting area in Shenxianwan-Biaokou-Tianshuihai area (bottom image is S2 band 12, 8, 2 red-green-blue pseudo-color composite)

内叠加锑、汞富集区。区域断裂主要为北西向的乔尔天山—岔路口断裂,总体构造线方向呈北西—南东向展布。区内有多个已知铅锌矿点,例如甜水海、多宝山、天柱山、长宝山、晚霞山等,这些矿点赋存在侏罗系龙山组和白垩系铁龙滩群碳酸盐岩性段等碳酸盐地层的铅锌矿,以及赋存在白垩系铁龙滩群砂砾岩岩性段内的砂砾岩性铅锌矿。

从ASTER遥感数据中利用比值和主成分分析等方法提取了该区的铁染、羟基、高岭土、绿泥石、碳酸盐等多种蚀变异常信息,从哨兵2号遥感数据中提取铁染、羟基蚀变信息。这些蚀变信息的空间

分辨率为10~20 m。图7为利用ASTER数据提取的铁染、羟基、碳酸盐化蚀变信息RGB假彩色合成图。图8为利用哨兵2号数据提取的铁染、羟基蚀变信息RG合成图。这些遥感蚀变分布图反映了该区主要遥感蚀变类型及蚀变强度,对后期遥感找矿远景区的圈定具有重要的指示作用。本区主要针对铅锌矿开展相关的预测分析研究,同时兼顾铜矿的找矿预测。根据具体分析,应重点集中在乔尔天山—岔路口断裂两侧的铁染、羟基、碳酸盐化蚀变高值地区,沿乔尔天山—岔路口断裂,铁染、羟基蚀变的叠加高值区和铁染、羟基、碳酸盐化蚀变的叠

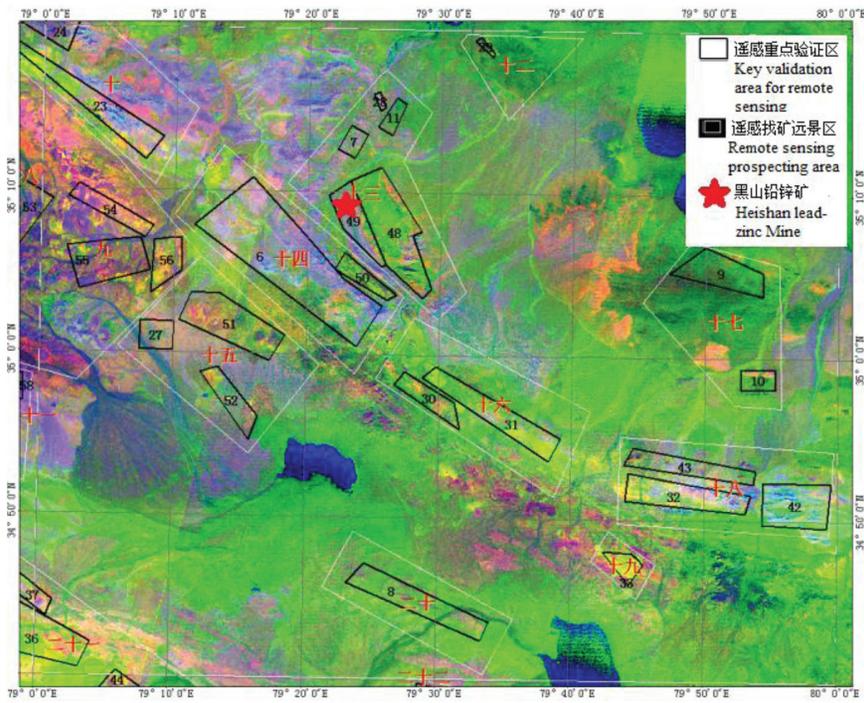


图7 甜水海地区ASTER提取遥感蚀变分布图(底图为铁染、羟基、碳酸盐化RGB假彩色合成图)
 Fig.7 Extraction of remote sensing alteration distribution maps by ASTER in Tianshuihai area (bottom maps are iron-stained, hydroxyl-carbonated RGB pseudo-color composite maps)

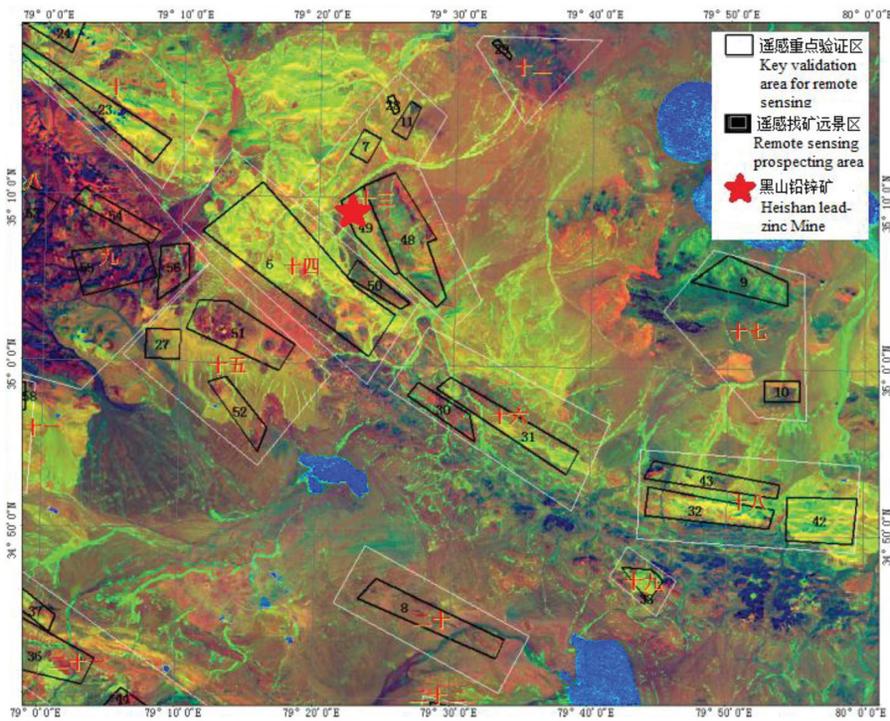


图8 甜水海地区哨兵2号提取遥感蚀变分布图(底图为铁染、羟基RG彩色合成图)
 Fig.8 Alteration distribution map extracted by Sentinel No. 2 in Tianshuihai Area (bottom image is iron stain and hydroxyl RG color composite map)

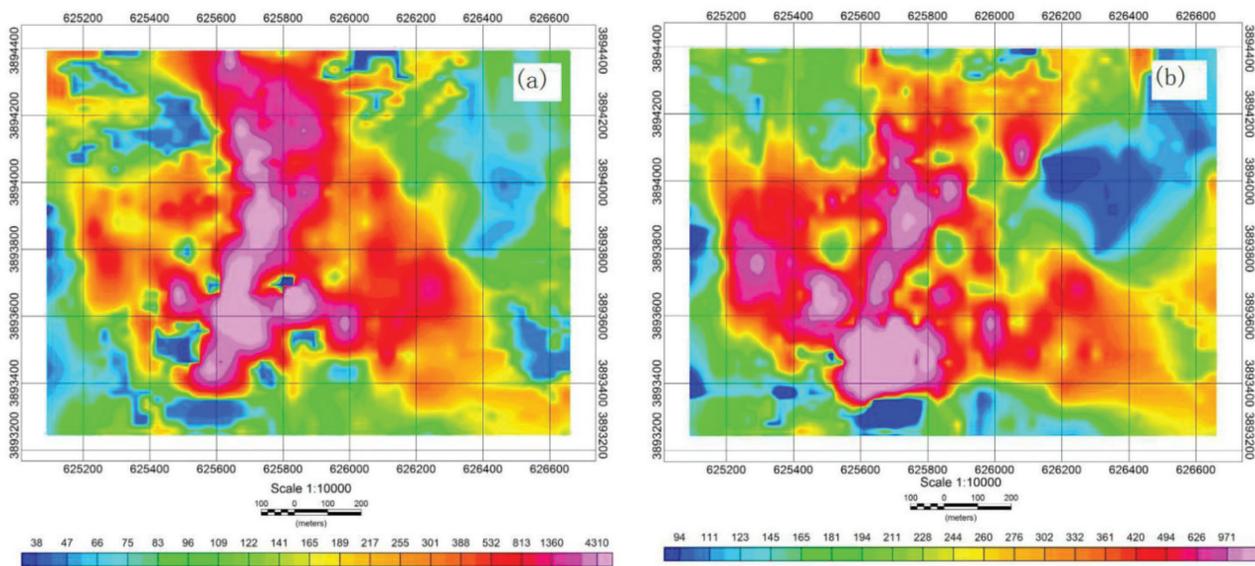


图9 黑山铅锌矿区Pb(a)和Zn(b)地球化学异常图(XRF法)(单位: 10^{-6})

Fig.9 Geochemical anomaly maps of Pb (a) and Zn (b) in Heishan lead-zinc mining area (XRF method) (unit: 10^{-6})

加高值区。

在前期区域地质成矿背景调研的基础之上,结合典型矿床区域地质成矿背景,开展了典型矿床遥感示矿信息分析及模型建立。结合小比例尺、低精度遥感示矿信息(岩性、构造和蚀变)提取结果,在甜水海地区共同圈定了成矿远景区11处(编号为九、十、十二至二十),遥感重点验证区24处。

以十三号遥感远景区的黑山铅锌矿为例。黑山异常区位于在长宝山西南侧,铁染与羟基较发育,异常模式与长宝山相似,区域化探Pb、Zn异常沿山脉展布,地面查证时在该山脉脊背发现一条黑色的铅锌矿伴生铁锰的矿化带,赋矿地层为上白垩统铁龙滩组灰白色灰岩、砾岩。随后开展了土壤/岩屑的化探(XRF)面积测量,线距100 m,点距10~30 m不等,共部署了12条化探剖面,查证结果见图8和图9。

化探扫面发现,沿山脊偏东一侧发育一条宽100~250 m,长1300 m的Pb、Zn、Cd异常带;在山脊的西侧200~350 m处还发育近平行的Zn异常带,宽40~80 m,长约400 m。总体上呈南侧Zn异常强,北侧弱,Pb异常贯彻异常带。化探数据统计显示:Pb极大值5.4%,Zn极大值2.2%,Mn极大值11.8%,Cu最大为 482×10^{-6} 。

选取露头良好且适合刻槽的C2剖面进行了刻

槽取样,初步控制了3条矿脉,倾向 $270 \sim 285^\circ$,倾角 $60 \sim 75^\circ$,如图10所示,其中:

①号脉厚3.94 m,Pb含量为0.66%~1.43%,平均1.02%,Zn含量为0.49%~0.82%,平均0.62%;②号脉厚7.4m,Pb含量为0.81%~1.49%,平均1.02%。Zn含量为0.13%~0.17%,平均0.15%;③号脉厚17.7 m,P含量b为0.59%~2.77%,平均1.53%。Zn含量为0.08%~0.22%,平均0.15%。

由于地表岩石破碎,无法判定矿化带的深部情况,进而开展了激电中梯和音频大地电磁测深测量,激电测量中AB距1000~1200 m,MN距40 m,音频大地电磁测深点距30~40 m,其成果见图12。

从图11中可以看出,测区内发育着一条近南北向展布的低阻高极化异常带,宽约150 m,长约500 m,南北走向两端均未封闭,视极化率异常范围1.5%~2.2%,视电阻率小于 $300 \Omega \cdot \text{m}$,异常位置上与地表出露的矿化带吻合,是矿化体在平面上的反映。

音频大地电磁测深电阻率剖面结果显示(图12),在剖面400~480 m位置出现一向西倾斜的低阻异常带,异常宽约100 m,延深约500 m,电阻率小于 $500 \Omega \cdot \text{m}$,该低阻异常带的地表位置与激电中梯低阻高极化异常位置吻合,推测该西倾斜的含矿构造带宽50~80 m,延深400~500 m,是理想的找矿部位。

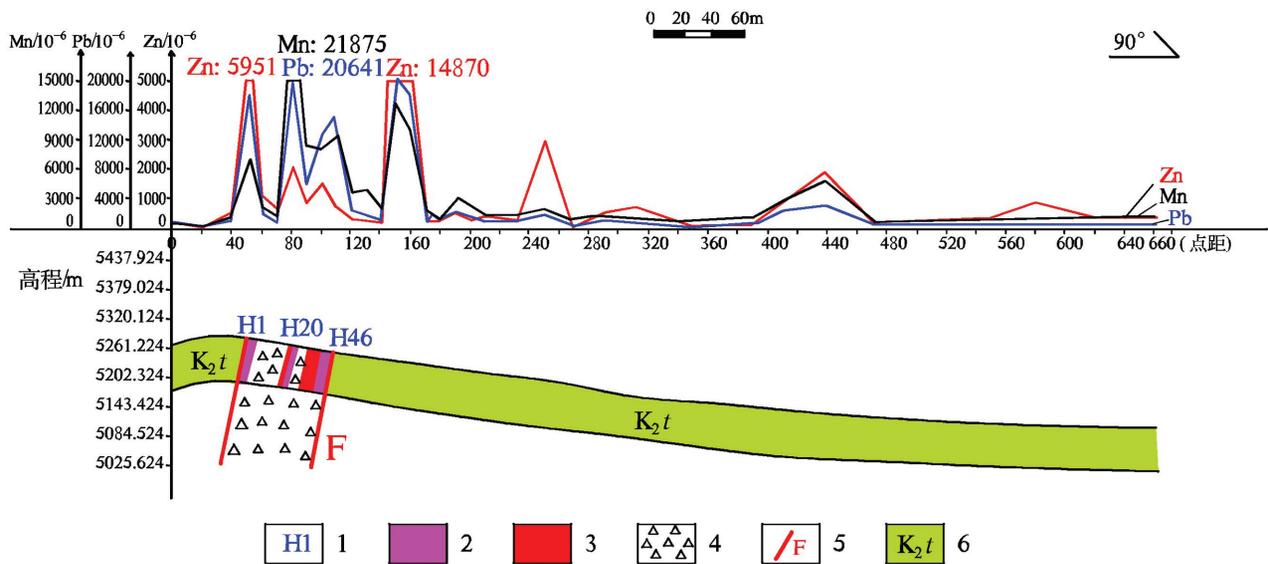


图 10 黑山铅锌矿 C2 剖面刻槽取样成果图

1—取样编号;2—矿化;3—矿体;4—破碎带;5—断层;6—上白垩统铁龙滩组

Fig.10 Sampling results of grooving on section C2 of Heishan lead-zinc mine

1—Sampling number; 2—Mineralization; 3—Orebody; 4—Fracture zone; 5—Fault; 6—Upper Cretaceous Tielongtan Formation

通过上述物化探地面查证,结合地质观测等,初步确定黑山铅锌矿具有进一步地质找矿的价值。

6 结论

新疆南部西昆仑地区气候地形条件特殊,工作环境条件恶劣,常规的遥感数据矿化信息提取方

法、物探与化探勘查方法难以充分发挥作用,通过3年的研究与实践,建立了一套面向高寒深切割山区矿产快速勘查的方法体系。

(1)采用雷达与光学图像融合技术、改进的Crosta方法、能谱-面积积分滤波方法、图像滤波等一系列遥感蚀变异常提取方法,解决覆盖区和阴影

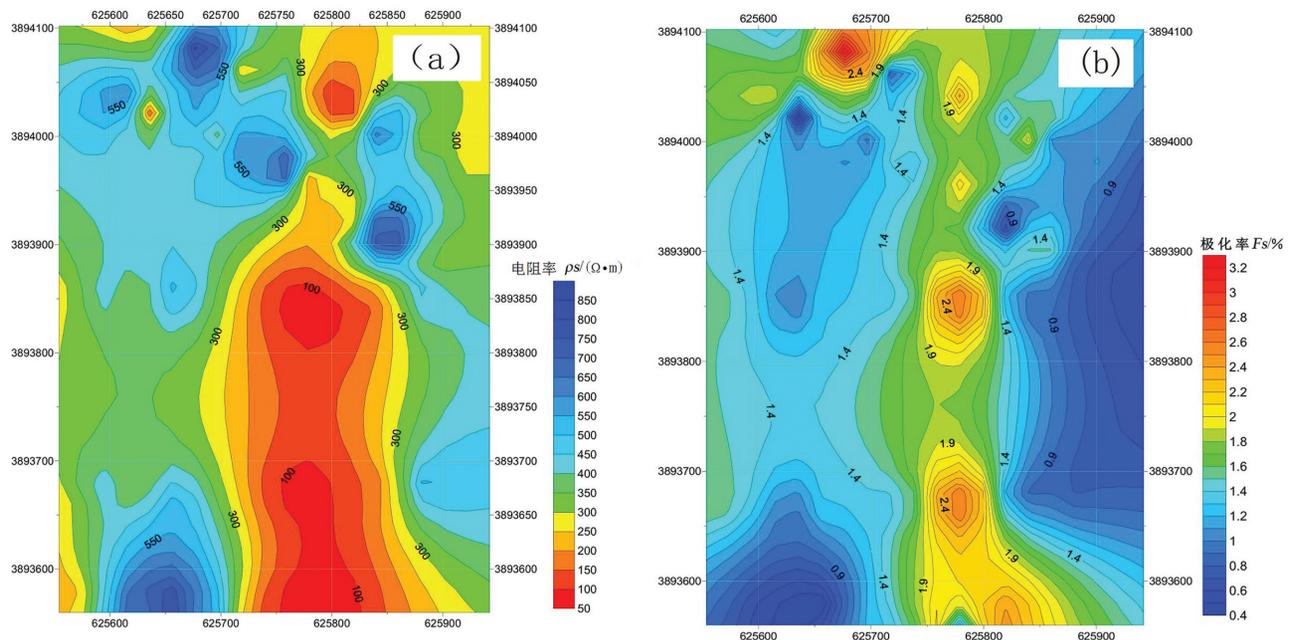


图 11 黑山铅锌矿物探激电中梯电阻率(a)和极化率(b)测量成果图

Fig.11 The results of resistivity (a) and polarizability (b) measurements of lead-zinc minerals in Heishan by IP

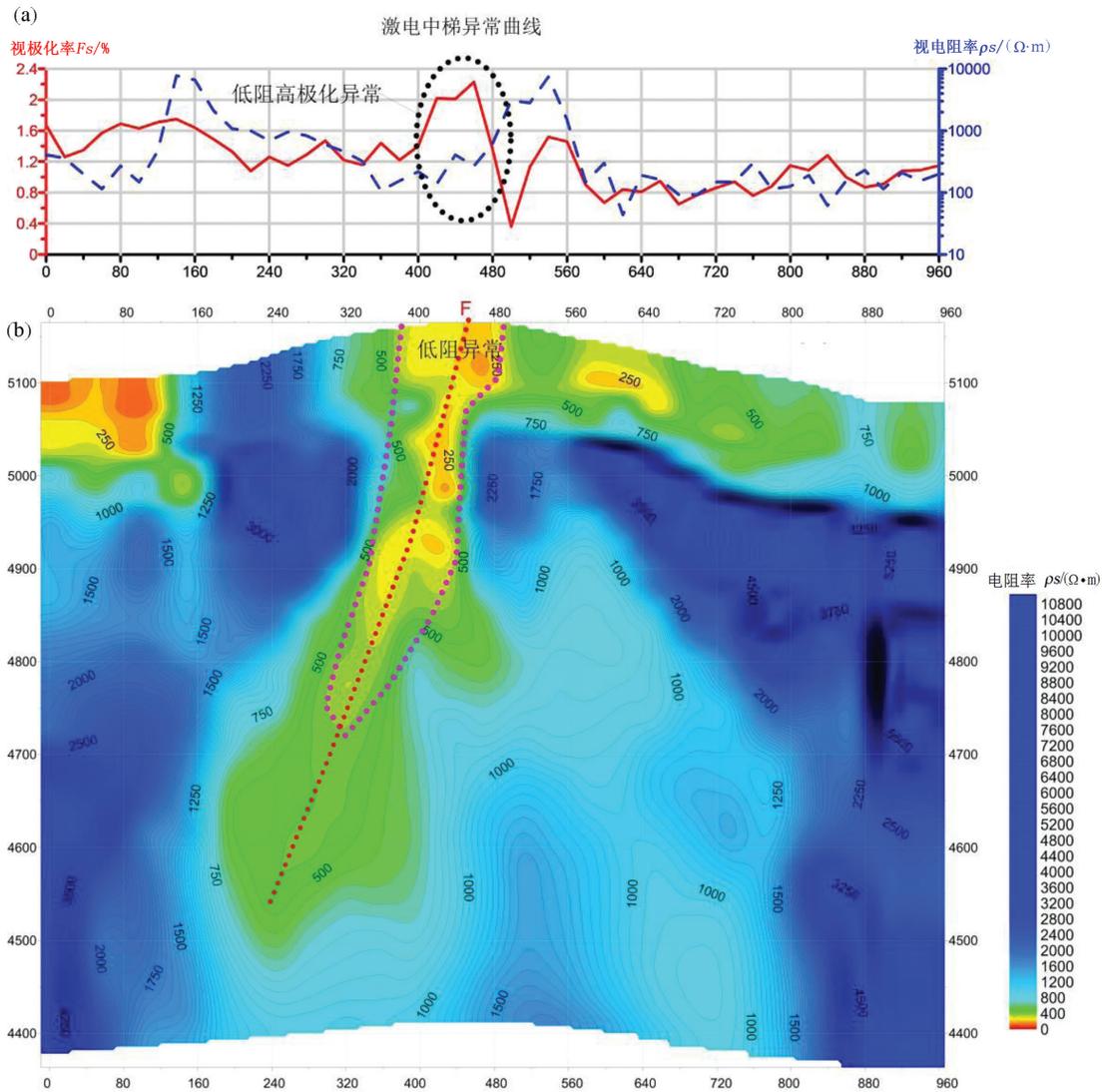


图12 黑山铅锌矿物探音频大地电磁测深(EH4)电阻率剖面(a)与激电中梯异常曲线综合图(b)

Fig.12 Comprehensive plot of audio-frequency magnetotelluric sounding resistivity profile (a) and induced polarization mid-ladder anomaly curve (b) for lead-zinc mineral exploration in Heishan

区构造信息显露不足、蚀变信息混杂和避免低缓蚀变异常遗漏等问题;基于地表地球化学元素分布与矿化、蚀变矿物之间的相关性,将高分辨率的遥感蚀变信息注入到小比例尺的地球化学图层中,合成大比例尺的地球化学图层,利用遥感、地质、地球化学信息融合技术,快速圈定找矿远景区。针对高寒山区特殊的自然条件,采用野外元素快速分析技术(XRF和LIBS)和轻便的地球物理方法可以进行异常追索、圈定和评价,实现快速找矿。

(2)甜水海地区黑山等铅锌矿点的发现证明,在新疆南部西昆仑高寒山区采用遥感蚀变信息提

取技术、多元信息融合技术、现场多元素快速分析、轻便地球物理探测设备进行综合找矿,是较经济、快捷和轻便的方法组合,可在该地区推广使用,也适用于非金属矿产的找矿勘查工作。

(3)圈定的24处遥感找矿远景区,目前仅验证了其中的少部分,且见矿效果良好,还有大部分远景区未开展验证工作,未来找矿工作部署应对圈定的远景区给予优先考虑。

致谢:中国科学院遥感与数字地球研究所荆林海老师的团队完成了遥感数据处理和解译工作,新疆维吾尔自治区人民政府国家305项目办公室在野外工作

和资料收集上给予了大力支持,在此一并表示真诚的感谢!

References

- Dai Jingjing, Wang Denghong, Dai Hongzhang, Liu Lijun, Wu Yanan. 2017. Geological mapping and ore-prospecting study using remote sensing technology in Jiajika area of Western Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 44(2): 389–398(in Chinese with English abstract).
- Ding Gaoming, Zhu Ziqiang, Chang Rongfeng, Yan Guolong, Zhang Pengcheng, Li Jianhui. 2015. Application of integrative geophysical methods to predicting deep ore body in Yechangping molybdenum deposit, Henan Province[J]. *Progress in Geophysics*, 30(1): 325–331 (in Chinese with English abstract).
- Dong Yongguan, Guo Kunyi, Xiao Huiliang, Zhang Chuanlin, Wang Aiguo, Zhao Yu. 2003. Ore prospects of the West Kunlun area in western China[J]. *Geology in China*, 30(2): 173–178(in Chinese with English abstract).
- Han Lele, Ding Weicui, Chen Xuanhua, Liu Meiling, Wang Ye, Xu Shenglin, Zhang Da, Cui Yanjun. 2019. Linear structure extraction and quantitative analysis of multi-source remote sensing information in West Junggar Basin[J]. *Geology in China*, 46(5): 1209–1223(in Chinese with English abstract).
- Huang Lishan, Jing Rongzhong, Pei Chao, Li Yuan, Zhang Jian, Zeng Hui. 2016. Geophysical characteristics and deep prospecting prediction of Xinjiang Zhaosu Aerqieletawu Pb–Zn deposit[J]. *Mineral Resources and Geology*, 30(6): 955–963(in Chinese with English abstract).
- Huang Shuang, Chen Shengbo, Zha Fengli. 2014. Research on remote sensing ore-prospecting model for iron deposit in South America[J]. *Global Geology*, 33(4): 946–951(in Chinese with English abstract).
- Jiao Ju, Zhan Xiuchun, Yang Xiaotao, Fan Xingtao, Liu Xiao. 2016. Present Situation and progress of rapid determination of potassium in field[J]. *Mineral Deposits*, 35(6): 1309–1310(in Chinese with English abstract).
- Liao Chonggao, Yang Wunian, Xu Ling, Pu Guoliang. 2002. Integrated analysis of remote sensing and geological anomalies in ore deposit prediction: A case study of the Lanping basin[J]. *Geology in China*, 29(4): 416–420(in Chinese with English abstract).
- Liu Lei, Zhang Bing, Zhou Jun, Wang Yu. 2008. Synthetic analysis of remote sensing, geochemical surveying and geology in the ore exploration in the SIGU tin deposit, Yunnan Province[J]. *Geology and Exploration*, 44(5): 70–75(in Chinese with English abstract).
- Lei Tianci, Cui Fang, Yu Fengmin. 2012. The application of multi-source information fusion based on remote sensing to ore prospecting prediction in southern Yongzhou of Hunan Province[J]. *Geology in China*, 39(4): 1069–1080(in Chinese with English abstract).
- abstract).
- Liang Jun, Zhang Xiao, Li Changjiang. 2017. Extraction of alteration information based on remote sensing image and ore prospecting in Shangqihan, Hetian, Xinjiang[J]. *China Mining Magazine*, 26(z2): 190–193, 198(in Chinese).
- Lian Changyun, Zhang Ge, Yuan Chunhua, Yang Kai. 2005. Application of SWIR reflectance spectroscopy in mapping of hydrothermal alteration minerals: A case study of the Tuwu porphyry copper prospect, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 32(3): 483–495(in Chinese with English abstract).
- Liu Yinfa, Chen Jianping, Hao Junfeng, Liang Lixin, Cui Laiwang. 2012. Researches on metallogenic remote sensing information extraction and metallogenic prediction in Zhulazhaga area of Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 39(4): 1062–1068(in Chinese with English abstract).
- Liu Qizhong, Guo Huadong, Wei Yongming, Chen Yu, Wang Mengfei, Li Qingting. 2010. Application of remote sensing rapid prospecting system to exploration of Xizhun porphyry copper deposit[J]. *Mineral Deposits*, 29(Z10): 685–686(in Chinese with English abstract).
- Lin Yanchang, Ge Liangquan, Lai Wanchang. 2002. The application of portable multi-element xrf analyzer to geological survey[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 26(4): 325–328(in Chinese with English abstract).
- Lin Fangli, Wang Guangjie, Yang Xiaoyong. 2016. Application of comprehensive electromagnetic study in deep mineralization mechanism—A case study of the Wuxi polymetallic ore deposit, south Anhui[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(11): 4323–4337 (in Chinese with English abstract).
- Li Xuebiao, Jing Linhai, Huang Lishan. 2018. Research on Delineation and Evaluation Technology of Prospecting Target Area for Large Deposits in Alpine Deep Cutting Mountainous Areas[R]. China Nonferrous Guilin Mineral Geology Research Institute Co., Ltd., Institute of Remote Sensing and Digital Earth Chinese Academy of Sciences.
- Li Yulu, Xing Lijuan, Bai Zhanhong, Liu Zhihua, Wang Zhen. 2018. The application of comprehensive geophysical prospecting method to the exploration of the Yuejinshan iron deposit in Qinghai[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 42(5): 889–895(in Chinese with English abstract).
- Ma Dexi, Yang Jin, Chen Xiaoqiang, Wang Chunsheng, Zhang Tingyan, Chen Ruilin. 2013. The application of portable X-ray fluorescence instrument to the polymetallic ore district[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 37(1): 63–66(in Chinese with English abstract).
- Ma Honglin, Jia Weijie, Fu Changliang, Li Wei. 2019. Extraction of geological structural and alteration information and the prediction of metallogenic favorable locations in northeastern Jeddah, Saudi Arabia[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 31(3): 174–182

- (in Chinese with English abstract).
- Ma Shengming, Zhu Lixin, Zhou Guohua, Zhang Jinbing. 2002. Geochemical techniques for rapid appraisal of ore prospecting targets in high mountain and canyon areas[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 26(3): 185–191(in Chinese with English abstract).
- Ren Guangli, Fan Tingbin, Yu Yuanjun, Yang Min, Liang Nan, Zhang Zhuan, Li Jianqiang, Yang Junlu. 2017. Application of multi-source remote sensing information to metallogenic prediction in the Huoshayun Region of Karakorum, Xinjiang[J]. Geology and Exploration, 53(6):1164–1173(in Chinese with English abstract).
- Sun Yongbin, Wang Ruijun, Wei Benzan, Wang Bing, Dong shuangfa, Li Cunjin, Li Mingsong. 2018. The application of hyperspectral remote sensing ground-air integrated prediction method to the copper gold deposit prospecting in Kalatag area, Xinjiang[J]. Geology in China, 45(1): 178–191(in Chinese with English abstract).
- Song Lirong, Yu Changqing, Zheng Mianping, Chen Wenxi, Wang Yongzhi, He Junjie, Li Guihua, Qian Peng. 2017. Exploration of volcanosedimentary boron deposit by geophysical methods—Application in the Ngari area, Tibet[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(4): 1584–1594(in Chinese with English abstract).
- Wang Hui, Qin Xuwen, Fan Yuhai, Yang Jinzhong, Jin Moushun, Zhang Shaopeng, Liao Youyun, Yang Chen, Cui Sheng, He Xiaolong, Kuang Jingshui, Guo Pengcheng. 2018. The application of high resolution remote sensing technology to ore-prospecting in Dahongliutan-Fulugou area of West Kunlun Mountains[J]. Geology in China, 45(6): 1289–1301(in Chinese with English abstract).
- Yun Jie, Gao Xiaofeng, Xiao Peixi, Kang Lei, Li Ping. 2015. Geochemical characteristics of the Lower Carboniferous volcanic rocks of the Wuluat Formation in the Western Kunlun Mountains and their geological significance[J]. Geology in China, 42(3): 587–600(in Chinese with English abstract).
- Yang Hai, Ge Liangquan, Xiong Shengqing, Gu Yi, Zhang Qingxian. 2014. A set of rapid prospecting methods based on X-ray fluorescence measurement[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 38(4):723–728(in Chinese with English abstract).
- Ye Junlin, Luo Yuchun. 2015. The method for improving the grounding resistivity of large-power IP prospecting in Gobi region of Xinjiang[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 39(6): 1156–1159(in Chinese with English abstract).
- Zhang Surong, Yang Fan, Zhang Hua, He Fuqing. 2014. The suitability of field analytical methods under the special conditions of Tibetan plateau[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 38(1): 100–105(in Chinese with English abstract).
- Zhou Jun, Wang Xuben, Yang Daibin, Wang Wenwen. 2013. The application of integrated geophysical methods to aeromagnetic anomaly inspection of Huidong area[J]. Geology in China, 40(4): 1290–1297(in Chinese with English abstract).
- Zhen Liang, Wang, Youmao Deng, Yinsheng Meng, Rui, De Liu. 2019. The application of integrated geophysical prospecting method to the prospecting for concealed orebodies in the northern area of the Weilasituo copper polymetallic deposit[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 43(5): 958–965(in Chinese with English abstract).
- Zhou Lingjie, Zhang Zhengwei, Cheng Yuan, Shen Nengping, Zhang Zhongshan, You Fuhua. 2011. The comprehensive interpretation of remote sensing information and prospecting for the Pb-Zn-Cu ore belts in the northern part of West Kunlun Orogen[J]. Geotectonica et Metallogenia, 35(4):603–611(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Jin Moushun, Zhang Shaopeng, Chen Ling, Zhong Chang, Dong Lina. 2016. Application of high resolution remote sensing data to ore-prospecting prediction in East Kunlun metallogenic belt[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 28(2):112–119(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 代晶晶, 王登红, 代鸿章, 刘丽君, 吴亚楠. 2017. 遥感技术在川西甲基卡大型锂矿基地找矿填图中的应用[J]. 中国地质, 44(2): 389–398.
- 丁高明, 朱自强, 常荣凤, 晏国龙, 张鹏程, 李建慧. 2015. 综合物探法在河南夜长坪铜矿深部找矿预测中的应用[J]. 地球物理学进展, 30(1): 325–331.
- 董永观, 郭坤一, 肖惠良, 张传林, 王爱国, 赵宇. 2003. 西昆仑地区成矿远景[J]. 中国地质, 30(2):173–178.
- 韩乐乐, 丁伟翠, 陈宣华, 刘美玲, 王叶, 徐盛林, 张达, 崔艳军. 2019. 西准噶尔地区多源遥感信息的线性构造提取与定量分析[J]. 中国地质, 46(5):1209–1223.
- 黄理善, 丁汝福, 敬荣中, 裴超, 李渊, 张建, 曾晖. 2016. 新疆昭苏阿尔恰勒他乌铅锌矿床地球物理特征与深部找矿预测[J]. 矿产与地质, 30(6):955–963.
- 黄爽, 陈圣波, 查逢丽, 李艳秋. 2014. 南美典型铁矿床遥感找矿模型研究[J]. 世界地质, 33(4):946–951.
- 焦炬, 詹秀春, 杨啸涛, 樊兴涛, 刘晓. 2016. 野外快速检测钾元素的技术现状与进展[J]. 矿床地质, 35(6):1309–1310.
- 刘颖璠, 陈建平, 郝俊峰, 梁丽新, 崔来旺. 2012. 内蒙古朱拉扎嘎地区成矿遥感信息提取及成矿预测研究[J]. 中国地质, 39(4): 1062–1068.
- 廖崇高, 杨武年, 徐凌, 濮国梁. 2002. 成矿预测中遥感与地质异常的综合分析——以兰坪盆地为例[J]. 中国地质, (4): 416–420.
- 刘磊, 张兵, 周军, 王钰. 2008. 云南思姑锡矿区地质、化探、遥感多元信息综合找矿研究[J]. 地质与勘探, 44(5):70–75.
- 雷天赐, 崔放, 余凤鸣. 2012. 基于遥感的多源信息融合在湖南永州南部地区找矿预测中的应用[J]. 中国地质, 39(4): 1069–1080.
- 蔺启忠, 郭华东, 魏永明, 陈玉, 王梦飞, 李庆亭. 2010. 遥感快速找矿系统在西准斑岩铜矿勘查中的应用[J]. 矿床地质, 29(210):685–686.

- 林延畅, 葛良全, 赖万昌. 2002. 新一代手提式多元素 X 荧光仪在地质普查中的应用[J]. 物探与化探, 26(4):325-328.
- 林方丽, 王光杰, 杨晓勇. 2016. 综合电磁法在矿区深部成矿机制中的应用研究——以皖南乌溪多金属矿区为例[J]. 地球物理学报, 59(11): 4323-4337.
- 连长云, 章革, 元春华, 杨凯. 2005. 短波红外光谱矿物测量技术在热液蚀变矿物填图中的应用——以土屋斑岩铜矿床为例[J]. 中国地质, 32(3):483-495.
- 梁军, 张晓, 李长江. 2017. 新疆和田上其汗一带遥感构造蚀变异常信息提取及找矿预测[J]. 中国矿业, 26(z2):190-193, 198.
- 李学彪, 荆林海, 黄理善. 2018. 高寒深切割山区大型矿床找矿靶区圈定与评价技术研究[R]. 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 中国科学院遥感与数字地球研究所.
- 李玉录, 邢利娟, 拜占红, 刘志华, 王震. 2018. 综合物探方法在青海省跃进山铁矿勘查中的应用[J]. 物探与化探, 42(5): 889-895.
- 马生明, 朱立新, 周国华, 张金炳. 2002. 高山峡谷区快速评价找矿靶区的化探方法技术[J]. 物探与化探, 26(3):185-191.
- 马鸿霖, 贾伟洁, 付长亮, 李伟. 2019. 沙特阿拉伯吉达东北部地质构造与蚀变信息提取及找矿有利部位预测[J]. 国土资源遥感, 31(3): 174-182.
- 马德锡, 杨进, 陈孝强, 王春生, 张廷彦, 陈瑞林. 2013. 便携式 X 荧光仪在多金属矿区的应用[J]. 物探与化探, 37(1): 63-66.
- 任广利, 范廷宾, 余元军, 杨敏, 梁楠, 张转, 李健强, 杨军录. 2017. 多源遥感信息在喀喇昆仑火烧云一带找矿预测中的应用[J]. 地质与勘探, 53(6):1164-1173.
- 宋丽蓉, 于常青, 郑绵平, 陈文西, 王永智, 何俊杰, 李桂花, 钱鹏. 2017. 利用地球物理方法探测火山沉积型硼矿——在西藏阿里地区的应用[J]. 地球物理学报, 60(4): 1584-1594.
- 孙永彬, 王瑞军, 魏本赞, 汪冰, 董双发, 李存金, 李名松. 2018. 高光谱遥感地空综合预测方法在新疆卡拉塔格地区铜金矿床找矿中的应用[J]. 中国地质, 45(1): 178-191.
- 王振亮, 邓友茂, 孟银生, 刘瑞德. 2019. 综合物探方法在维拉斯托铜多金属矿床北侧寻找隐伏矿体的应用[J]. 物探与化探, 43(5): 958-965.
- 王辉, 秦绪文, 范玉海, 杨金中, 金谋顺, 张少鹏, 廖友运, 杨晨, 崔胜, 贺小龙, 匡经水, 郭鹏程. 2018. 高分遥感技术在西昆仑大红柳滩一俘湾沟地区地质找矿中的应用[J]. 中国地质, 45(6): 1289-1301.
- 杨海, 葛良全, 熊盛青, 谷懿, 张庆贤. 2014. 一套基于 X 射线荧光测量的快速找矿方法[J]. 物探与化探, 38(4): 723-728.
- 负杰, 高晓峰, 校培喜, 康磊, 李平. 2015. 西昆仑下石炭统乌鲁阿特组火山岩地球化学特征及地质意义[J]. 中国地质, (3):587-600.
- 叶俊麟, 罗有春. 2015. 新疆戈壁地区大功率激电勘探接地电阻改善方法[J]. 物探与化探, 39(6):1156-1159.
- 张素荣, 杨帆, 张华, 贺福清. 2014. 青藏高原条件下现场分析方法的适应性[J]. 物探与化探, 38(1): 100-105.
- 周军, 王绪本, 杨代彬, 王闻文. 2013. 综合物探在会东航磁异常查证中的应用[J]. 中国地质, 40(4):1290-1297.
- 周灵洁, 张正伟, 程远, 沈能平, 张中山, 游富华. 2011. 西昆仑北部地区铅锌铜矿带遥感构造蚀变信息提取与成矿预测[J]. 大地构造与成矿学, 35(4):603-611.
- 张微, 金谋顺, 张少鹏, 陈玲, 钟昶, 董丽娜. 2016. 高分遥感卫星数据在东昆仑成矿带找矿预测中的应用[J]. 国土资源遥感, 28(2): 112-119.