

低植被覆盖区斑岩铜矿遥感找矿模型及其应用

——以环巴尔喀什-西准噶尔成矿带为例

王钦军¹⁾, 魏永明¹⁾, 陈玉¹⁾, 蔺启忠¹⁾, 周红英²⁾

1) 中国科学院遥感与数字地球研究所, 中科院数字地球重点实验室, 北京, 100094;
2) 中国石油勘探开发研究院, 北京, 100083

内容提要:针对遥感找矿过程中所面临的干扰因素多、地表覆盖类型多样导致的遥感找矿困难的问题, 提出了低植被覆盖区斑岩铜矿“小型侵入岩体异常+线性构造异常+蚀变矿物异常”的多尺度遥感找矿模型, 并系统总结了该模型的基本原理和技术流程。以环巴尔喀什-西准噶尔成矿带为研究区, 分析了研究区的成矿地质背景; 在遥感找矿模型的指导下, 依据遥感找矿技术流程提取了研究区的岩性、构造和蚀变矿物等控矿要素; 结合野外地表验证情况, 综合多源数据, 圈定了 5 处重点远景区; 结合大比例尺遥感蚀变矿物填图、地质、地球物理、地球化学和探槽取样的分析结果, 圈定 3 处遥感找矿靶区。

关键词: 遥感找矿; 模型; 环巴尔喀什-西准噶尔; 成矿带

遥感找矿是指通过遥感技术对工作区的控矿因素、找矿标志及矿床的成矿规律进行研究, 从中提取矿化信息而达到找矿目的的一种技术手段, 具有宏观、客观、近实时、多尺度的特点, 因其具有经济、快速的特点在低植被覆盖区得到了广泛应用 (Guo Huadong, 1993; Yang Jianmin et al., 2002; Wang Qinjun et al., 2006a; Geng Xinxia, 2008; Chen Xiqu et al., 2010; Wang Runsheng et al., 2011; Dai Jingjing, 2012; Yin Fang et al., 2014)。

目前, 研究人员根据研究区典型矿种所具备的成矿条件建立了相应的遥感找矿模型, 如西昆仑老并-赞坎沉积变质型铁矿遥感找矿模型 (Wang Junfeng, 2013)、西昆仑黑恰铁矿遥感找矿模型 (Jin Moushun et al., 2014)、冈底斯成矿带朱诺地区斑岩型铜矿遥感找矿模型 (Ye Jiaolong, 2013)、东昆仑-阿尔金变质热液型金矿遥感找矿模型 (Zhang Wei et al., 2010)、墨西哥埃莫西约-阿瓜普列塔铜、铅锌、金银多金属矿遥感找矿模型 (Hu Fei et al., 2013)、埃塞俄比亚西部岩浆熔离型铁矿遥感找矿模型 (Dai Jingjing, 2012) 等。它们大都从分析特定研究区的成矿条件入手, 基于多种遥感数据源提取控矿要素尤其是蚀变矿物的空间

展布情况, 并利用多元数据分析预测技术建立相应的矿产资源远景区预测模型并取得了一定效果 (Zhao Pengda, 1987; Chen Jianping et al., 2008; Sun Weidong, 2010; Yan Jining et al., 2011; Zhou Kefa et al., 2012)。尚未系统完整地阐明低植被覆盖区遥感找矿模型的内涵、技术流程及其应用案例。本文将以世界著名的环巴尔喀什-西准噶尔斑岩铜矿成矿带为研究区, 总结低植被覆盖区遥感找矿模型的构建过程及其应用情况, 以期对从事遥感找矿的同行提供参考。

环巴尔喀什-西准噶尔地区属于古亚洲洋构造成矿域, 在复杂而漫长的地质演化过程中, 形成了丰富的矿产资源, 造就了科翁腊德 (金属含量 790×10^4 t, 品位 0.61%)、阿克都卡 (金属含量 588×10^4 t, 品位 0.39%) (Shen Ping et al., 2010) 等一系列世界级大型、超大型斑岩型铜矿床。虽然, 在西准噶尔的包古图成矿带发育有包古图大型斑岩铜矿 (金属含量 63×10^4 t, 品位 0.28%) (Shen Ping et al., 2010), 但与中亚邻国相比, 中国新疆西准噶尔地区斑岩铜矿资源的研究与勘查程度仍然很低, 特别是在大型一超大型斑岩铜矿床发现方面尚存在明显差

注: 本文为国家自然科学基金项目 (编号 41171280), 中国科学院“西部之光人才培养计划”项目和国家科技支撑计划项目 (编号 2012BAH27B05) 联合资助的成果。

收稿日期: 2015-04-07; 改回日期: 2015-08-04; 责任编辑: 周健。

作者简介: 王钦军, 男, 1975 年生。博士, 研究员。地图学与地理信息系统专业, 通讯地址: 100094, 北京市海淀区邓庄南路 9 号, 中科院数字地球重点实验室; Email: qjwang@ceode.ac.cn。通讯作者: 陈玉, 男, 1983 年生。博士, 助理研究员。地图学与地理信息系统专业。Email: yuchen@ceode.ac.cn。

距。据此,合理选择遥感数据,在矿带、矿床、矿点等多尺度上构建相应的技术方法组合,开展环巴尔喀什-准噶尔成矿带的遥感找矿工作不仅具有重要的研究价值,而且还对发展区域经济具有实际经济价值。

1 遥感找矿模型

遥感找矿的基本途径是在分析研究区典型矿床成矿理论的基础上建立相应的遥感找矿模型,并基于该模型制定遥感找矿技术流程;通过发展矿产资源多元信息遥感找矿技术和系统,进行远景区的预测;在此基础上,通过地面验证圈定靶区,并结合大比例尺遥、地、物、化等资料进行靶区的筛选与评价。

1.1 成矿理论

矿产资源是指经过地质成矿作用而形成的,埋藏于地下或出露于地表,并具有开发利用价值的矿物或有用元素的集合体。矿产资源,尤其是固体矿产资源是地下岩浆活动的产物,讲究的是生、储、盖。生,也就是矿产资源的源,它们主要来自于地下岩浆中的有益成矿元素或岩浆上升过程中,受温度、压力的变化而造成壳幔混染,地壳中的有益元素得以活化,随着岩浆的上涌上升至地表,形成矿产资源的源;储,指的是有益矿物或元素通过运移通道向上运移并在有利容矿空间沉淀、聚集,形成矿体或矿床;盖,指的是盖层。相对而言,固体矿产资源的盖层没有油气藏对盖层的要求那么严格。然而,致密性完整的盖层有利于气态有益元素的富集,相反,疏松破碎的盖层不利于气态有益元素的富集,不利于成矿。直通下地幔的大型构造为有益元素提供了上升通道,但在大型构造形成的过程中,很容易造成盖层的极度破碎,不利于有益元素的富集,这也许就是在大断裂处很少直接出现矿床,而在与之临近的小断裂出现矿床的几率比较大的主要原因。

因此,矿产资源是岩浆和构造区域性大面积活动的结果,具有从面到点的多尺度分带特征。按照研究范围的大小,人们将研究对象在宏观尺度上称之为成矿带、成矿省,在中观尺度上称之为矿田、矿床,在微观尺度上称之为矿(化)点、矿体。

1.2 遥感找矿模型

找矿模型以发现矿床/矿体为目标,以地质特征、矿床成因和找矿标志为依据,结合经验模型与理论模型形成准则和判据指导找矿。根据研究的不同阶段,形成了区域概略普查、局部找矿和矿床找矿三个阶段。区域概略普查主要以寻找成矿带、大型矿

集区为目标;局部找矿模型以赋矿岩系和控矿构造的成矿标志和成矿特征为主要研究内容;矿床找矿模型则以矿体、矿化和成矿作用的各种标志、特征为主要依据发现矿化点或矿体(Shi Junfa et al., 2011)。

绝大部分矿产资源虽然深埋于地下,但在矿床形成过程中也因岩浆活动造成了地貌类型及其形态的变化,如断裂构造、侵入岩体、蚀变矿物分带等标志性产物。随着地下地质环境的改变,地表植被也因“中毒”而无法生长或减缓生长。矿区这些有别于周围环境的标志性地貌特征,构成了遥感找矿的“地貌异常”标志;在岩浆活动过程中,因温度、压力等成矿环境的改变造成岩石、矿物组分及其结构、构造的变化,形成了有别于周围岩石的蚀变矿物,并由此造成了光谱、色调和纹理的变化,形成了遥感找矿的“图像异常”标志。

因此,遥感找矿模型是基于典型矿床成矿理论,通过总结已知矿床(点)的控矿要素及其特点,建立数学模型来揭示控矿要素与已知矿床(点)间的关系;基于遥感找矿标志提取控矿要素的空间展布格局,并利用上述关系模型对远景区进行预测,实现找矿目的的一套技术方法组合。

1.3 遥感找矿技术流程

以发现矿体/矿(化)点为目标,在遥感找矿模型的指导下,结合成矿理论和多年的遥感找矿工作经验,总结遥感找矿的技术流程如下:①建立典型矿床成矿理论。通过调研研究区典型矿床,从生、储、盖等成矿条件的角度分析典型矿床与构造、地层、侵入岩、蚀变矿物等控矿要素间的关系,建立研究区典型矿床成矿理论。在该理论的指导下,分解研究内容,确保各项工作有条不紊、互相配合,最终形成一个统一的有机整体。②建立遥感找矿标志(识)。矿床及其与控矿要素间关系的结果表明:矿区往往呈现“地貌异常”和“图像异常”标志。如构造两侧的地貌、色调和纹理异常;侵入岩与围岩显著的物质成分差异造成它们在影像上的色调、纹理和环形构造异常;蚀变带中的蚀变矿物组分与周边围岩的物质成分差异造成了它们在遥感图像上的色调、光谱异常;矿区中毒植被与正常植被间的微量元素、含水量和水分含量的差异造成它们在图像上表现出色调和光谱变异。综上所述,矿区的地貌景观、物质成分及其属性的差异在遥感影像上表现出的光谱、色调和纹理异常,成为直接遥感找矿标志。③提取控矿要素。受地表覆盖、光谱混合等干扰因素的影响,这些遥感找矿标志在图像上

表现为弱信息。如何更好、更有效地提取这些弱信息,服务于找矿事业成为遥感找矿技术发展的源动力。基于它们在遥感图像上的特点,人们构建了掩膜+主成分变换的图像处理技术(Ma Jianwen,1997),发展了主成分变换、MNF 变换等弱信息突出技术(Andrew et al., 1988),研发了光谱角填图(Wang Zhigang,1999)、光谱能级匹配(Wang Qinjun et al., 2006b)等岩矿弱信息提取技术。因此,在建立遥感找矿标志的基础上,总结它们在遥感影像上的特点,发展岩矿弱信息提取技术与方法,为成矿远景区预测提供基础数据成为控矿要素信息提取的关键环节。④预测远景区。在控矿要素遥感信息提取的基础上,结合区域地球物理和地球化学资料,通过发展多元信息遥感综合预测分析技术(Huang Zhang et al., 2014),综合遥感、地质、地球物理和地球化学资料,圈定矿区异常,预测找矿远景区。⑤地面验证。在圈定远景区的基础上,通过野外考察采集样品,化验分析这些控矿要素的矿物、元素含量,评估控矿要素遥感信息提取的准确性、修正远景区预测模型,使预测结果更准确。⑥圈定靶区。在确定重点远景区的基础上,通过开展大比例尺遥感、地质、地球物理和地球化学化学填图,结合岩样实验室分析结果,圈定靶区,并根据矿化异常的大小及其工业可开采品位对靶区进行分类。

2 遥感找矿模型的应用

2.1 研究区概况

本次矿产资源遥感勘查的研究区主要位于准噶尔盆地的西北缘,地理坐标范围 82°20′~86°20′E, 45°20′~47°20′N,即南起艾比湖,北至斋桑湖,西起巴尔喀什,东至和布克赛尔,面积约 47×10⁴ km²。研究区隶属于著名的中亚成矿域,先后经历了陆缘

增生、后碰撞和陆内造山作用,形成了世界级的大型、超大型矿床(Xiao Wenjiao et al., 2008)。主要矿床类型包括:金、铬、铜、石棉、蛇纹石、水晶等。其中,该区的斑岩铜矿是世界闻名的成矿类型,如著名的环巴尔喀什斑岩铜、金矿带,西准包古图斑岩铜矿区等均属于此种类型。

研究区在地质历史上经历了大陆基底形成、古亚洲洋陆缘增生和滨西太平洋大陆边缘活动及陆内断块升降等多个阶段,形成了多期次、多类型的火山岩、花岗岩、基性岩、超基性岩、蛇绿岩带及变质岩带,造就了多种有利的成矿环境(Chen Xuanhua et al., 2009)。由于古生代地壳生长和演化的多阶段性、多旋回物质的活化一再活化、成矿环境的长期性和周期性,导致了中亚成矿域内成矿物质的多次迁移和聚集(Zhu Yongfeng et al., 2007);从弧后洋的构造背景(火山块状硫化物 Cu-Au 矿床)发展到受俯冲控制的钙碱性岩浆活动(斑岩型铜矿床),随后进入低程度部分熔融的地壳分异作用和广义的岩浆内部分离作用阶段(斑岩型钼矿床和石英脉—云英岩型钨钼矿床),最后形成非造山的二叠纪大陆裂谷(过碱性钠闪石花岗岩 REE-Zr-Nb 富集系统)(Chen Xuanhua et al., 2011)。

伴随着多期次的构造活动,形成了从外向内逐渐变化的多类型矿床:寒武纪—奥陶纪,在环巴尔喀什的外环地区形成了块状硫化物型矿床和各种铜—金矿床;志留纪—泥盆纪,形成了锡、钨、钼、铜、金矿床;石炭纪—二叠纪,在环巴尔喀什的内环地区形成了规模巨大的斑岩型铜、钼、金矿床,热液型钨、金、铜矿床和与碱性岩浆演化有关的稀有—稀土金属矿床。在空间上由外向内,时间上从早古生代逐渐变化到晚古生代,矿床类型从块状硫化物型演化到斑

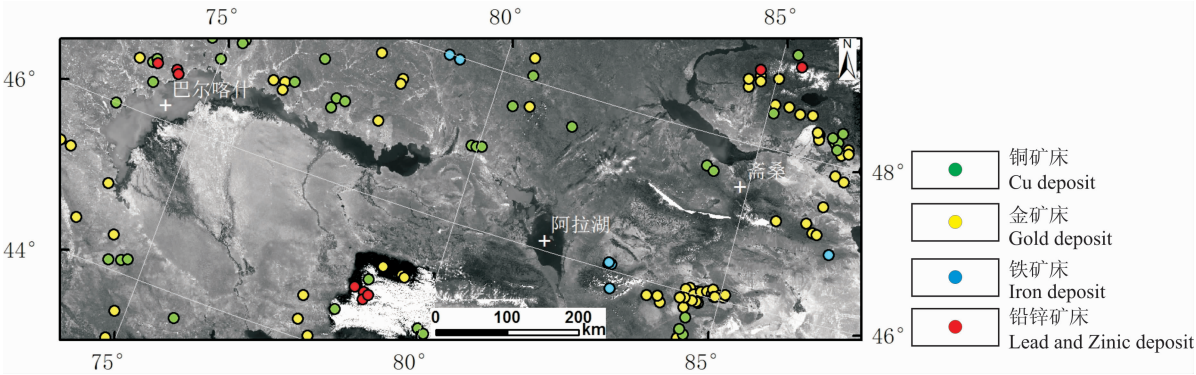


图 1 环巴尔喀什湖-准噶尔成矿带主要矿床空间分布图

Fig. 1 Mineral deposits distribution of Balkhash - Western Junggar metallogenic zones

岩型-矽卡岩型-中低温热液型,成矿环境从海底演化到大陆边缘(或者大陆弧),并最终发展到大陆内部(大陆裂谷)(Zhu Yongfeng et al., 2007)。

2.2 研究区典型斑岩铜矿矿床特征

斑岩铜矿是指与具有斑状结构的花岗岩类侵入体共生的浸染状、细脉浸染状和细脉状铜和钼-铜组分的富集体。它的形成条件是:发育一定规模的斑岩体,具有通达下地壳直至地幔的深大断裂、岩体中发育密集的节理及小断层和破裂裂隙,热液蚀变分带明显且面积较大。前人分别从成矿背景、成矿时代、含矿岩石、地质建造、蚀变组合等角度总结了科翁拉德、阿克都卡、包古图等典型斑岩铜矿的矿床特征(Shen Ping et al., 2010; Li Guangming et al., 2008; Yang Fuquan et al., 2010; Zhang Hongtao et al., 2013):

(1)构造控矿方面,研究区的斑岩铜矿主要分布在岛弧、火山-侵入岩带的大地构造环境中。区域内大型断裂较发育,成为控矿的主要因素:如科翁腊德矿床周围就发育中哈-纳伦断裂、博舍库利-乌赤别里山断裂、科翁腊德-塔城断裂、杰兹卡兹甘-斋桑-阿尔泰断裂等大断裂;阿克斗卡矿床位于捷克利-萨雷贾兹南北向断裂、科翁腊德-塔城东西向断裂和库拉马北东向断裂交汇处,且矿体内发育阿克斗卡断层和伊克巴斯断层;新疆西准的包古图斑岩铜矿床受达拉布特断裂的控制。众多斑岩矿床周围线性构造比较密集,多为树枝状展布,小型断层分布广泛,为成矿提供了有利容矿空间。

(2)地层和侵入岩方面,研究区的典型斑岩铜矿床主要集中在加里东-华力西期中浅层侵位的中酸性侵入岩-火山岩带的造山期建造发育地区,主要含矿岩石类型包括闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、闪长玢岩等。晚三叠世沉积层无论对于斑岩岩浆侵位或是伴随的喷气和温泉活动都有良好的屏蔽作用,它们使挥发组分和矿质不易散逸掉,使金属和硫化物大量堆积于斑岩体顶部和附近围岩。

(3)蚀变矿物方面,研究区典型斑岩铜矿床自岩体向围岩依次分为黑云母-钾长石化带、石英、绢云母-黄铁矿化带和绿帘石-钠长石化带;特征蚀变矿物包括黑云母、绢云母、黄铁矿、白云母、绿泥石、黝帘石、钠长石等。利用上述蚀变矿物的类型、蚀变强度和分带特征,不仅可以识别地面矿体的形态,而且还能指示地下盲矿体的存在。

2.3 研究区典型斑岩铜矿遥感找矿模型

在剖析典型矿床的基础上,通过分析研究区区

域成矿地质背景,总结研究区典型矿床的遥感找矿模型如下:①在构造方面,矿点与构造展布空间关系的结果表明,矿点大多分布在大型构造的周围;在大型构造控矿的背景下,与之平行或成羽状分布的次级断裂为矿物质的充填提供了容矿空间;多组构造的交汇处,尤其是北西西向构造与北东向构造、环形构造的交汇处成为大型矿床产出的有利部位;②在岩性方面,矿床多分布在多个侵入岩体的中间。华力西期的中酸性侵入岩、黑云母石英二长岩、花岗斑岩、石英斑岩是主要的成矿母岩,小型侵入岩体及其外围接触带是铜金属矿的直接找矿标志;③在蚀变矿物方面,矿点发育明显的矿化蚀变现象,如钾化、硅化、黄铁矿化、黄铜矿化、斑铜矿化、碳酸盐化、孔雀石化等。多类型蚀变矿物的叠加区成为找矿的有利区带。

据此,提出了“小型侵入岩体异常+线性构造异常+蚀变矿物异常”的遥感找矿模型,并通过建立“基于 GIS 的改进证据权重法”(Huang Zhang et al., 2014)实现遥感、地质、地球物理、地球化学等多元异常信息的叠加分析。在遥感找矿模型指导下,通过提取侵入岩体、构造和蚀变矿物等控矿要素的空间分布,结合地球物理、地球化学异常数据,通过叠加分析、计算成矿后验概率等方法预测遥感找矿远景区;最后,通过开展地面验证工作对远景区进行综合评价,圈定遥感找矿靶区。

2.4 远景区预测

成矿远景区是在成矿预测或区域地质矿产调查、矿产普查的基础上,根据成矿规律的研究结果而推测圈定的进一步矿产普查的重点地区,一般与四级成矿区带相对应。

2.4.1 控矿要素遥感图像识别标志

分别从宏观、中观和微观的多尺度、多空间分辨率的角度出发,总结构造(Wei Yongming et al., 2015)、岩性和蚀变矿物等控矿要素在遥感图像上的色调、纹理和光谱等异常。

2.4.2 控矿要素遥感信息提取

(1)侵入岩:基于 ASTER 数据,采用岩性信息突出技术(Wang Qinjun et al., 2009)进行侵入岩体信息增强的基础上,提取研究区的侵入岩(体)如图 2 所示。结果表明,研究区的中酸性侵入岩非常发育,面积约 $3.2 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占研究区总面积的 7%。早石炭世的花岗岩大面积分布于北巴尔喀什复背斜的边缘,中石炭世—晚石炭世是岩浆活动的鼎盛期,广泛分布的花岗闪长岩-花岗岩建造以及中

表 1 控矿要素遥感找矿标志表(构造部分引自 Wei Yongming et al. , 2015)

尺度	控矿要素遥感找矿标志			数据
	构造	岩性	蚀变矿物	
矿带	宏观构造:笔直或带弧形的线性行迹,地貌上表现为断裂破碎带及断层宽谷及断层陡坎;控制大型岩体、地层、水系、超基性岩的分布,有规律错断岩体及水系等;一级地貌单元的分界线;明显的色调异常	地表覆盖物大类:如火山岩、大型侵入岩体、第四纪沉积物、植被、水体等	无	MODIS、NOVAA、等空间分辨率低于100m的遥感数据源
矿床	中等尺度的构造:断裂两侧色调差异明显;地质体的错位、平移;水系及岩体被错断,次级地貌单元的分界线	标志性地层、中型侵入岩体等在色调、纹理上与围岩具有显著差异	根据光谱特征,进行波段运算,识别蚀变矿物大类:如铁染、羟基、碳酸盐化、硅化等	TM、ASTER、HJ 星等空间分辨率低于10 m 的数据源
矿点	小型断裂与环形构造:阴影效应显著,明显的线性或环形影纹特征;断裂两侧的色调变化明显	赋矿地层、小型侵入岩体,与围岩呈显著的色调差异	基于蚀变矿物大类,结合地表实测数据,根据纹理、色调和光谱特征划分蚀变矿物亚类,如 Al 羟基、石英-绢云母化、绿帘石化等	ALOS、QuickBird 等空间分辨率大于10 m 的数据源

浅成侵入的中酸性斑岩,构成最具潜力的成矿建造。已知矿点与侵入岩空间展布关系的结果表明,矿点大多分布在侵入岩体的周边,研究区成矿与花岗岩、花岗闪长岩建造有关,个别矿床成矿与碱性辉长岩有关。其中,闪长岩与铜矿化作用的关系最为密切,其次为花岗闪长岩。

(2)构造:基于 MODIS、ETM、ASTER 等数据,根据构造遥感解译标志对环巴尔喀什湖和西准噶尔地区的断裂构造及环形构造进行详细解译(图 3);对不同方向构造的规模、性质进行统计分析;结合区域已有地质矿产资料综合分析构造与矿化关系,结果表明:环巴尔喀什湖地区断裂构造以北西向断裂构造为主,西准地区以北东/近东西向的断裂居多。总体而言,北西向断裂控制研究区大的地貌格局、水系分布及成矿带的划分。矿床周围线性构造体比较密集,多为树枝状展布,小型断层分布较广,多组构造的交汇处成为有利矿集区。

(3)蚀变矿物:基于 ASTER 数据,利用主成分分析、比值等蚀变矿物信息的提取方法提取研究区的铁染、羟基、碳酸岩化、泥化和硅化等蚀变类空间分布(图 4):研究区的蚀变矿物普遍发育,尤其是在中国新疆的包古图、谢米斯台和哈萨克斯坦巴尔喀什湖北侧的科翁拉德、萨亚克、阿克斗卡等地的蚀变较为强烈。其中,科翁拉德矿床的蚀变为泥化和铁染组合,以泥化为主,铁染为辅;萨亚克矿床的蚀变表现为铁染和碳酸盐化组合,以铁染为主;阿克斗卡的蚀变以泥化为主。基于上述规律,在中哈交界处

的乌尔贾尔、乌恰拉尔及谢米斯台地区显示了较强的矿化蚀变,指示了良好的找矿前景。

2.4.3 远景区预测

基于控矿要素遥感信息的提取结果,利用研究区遥感找矿模型对成矿潜力进行综合分析,圈定 3 处重点遥感找矿远景区如图 5 所示。它们分别命名为 I、II 和 III。其中,第 I 和第 II 远景区分别位于新疆和布克赛尔蒙古自治县的谢米斯台和阿吾斯奇地区,其东侧呈北东走向的达拉布特大断裂为研究区成矿的主控矿构造。在达拉布特大断裂的西侧发育大量的铜、金矿床。根据研究区成矿地质背景,与之相交的近东西向次级断裂覆盖区为有利矿集区。再加上研究区的岩性和蚀变矿物条件:多处侵入岩体所围成的空白区以及蚀变矿物集中分布等条件,集中指示了这两处地区为遥感找矿远景区;第 III 远景区位于中亚的乌尔贾尔地区。根据研究区遥感找矿模型,北西向大型构造是控制成矿的主构造,北西向与近东西向构造的交汇处成为有利成矿区。根据上述规律,结合矿点与侵入岩间的关系(矿点分布在侵入岩体的周边),矿点与蚀变矿物间的关系(矿点分布在蚀变矿物集中分布区),圈定了该远景区。

2.4.4 地面验证

受地域及矿产资源敏感性的制约,仅对有条件的第 I 和第 II 远景区开展野外验证:分别于 2012 年 9 月、2013 年 7 月、2014 年 7 月和 2014 年 9 月开展了 4 次野外考察,野外行驶里程约 4000 km,检验示矿信息提取和远景区圈定的准确度。

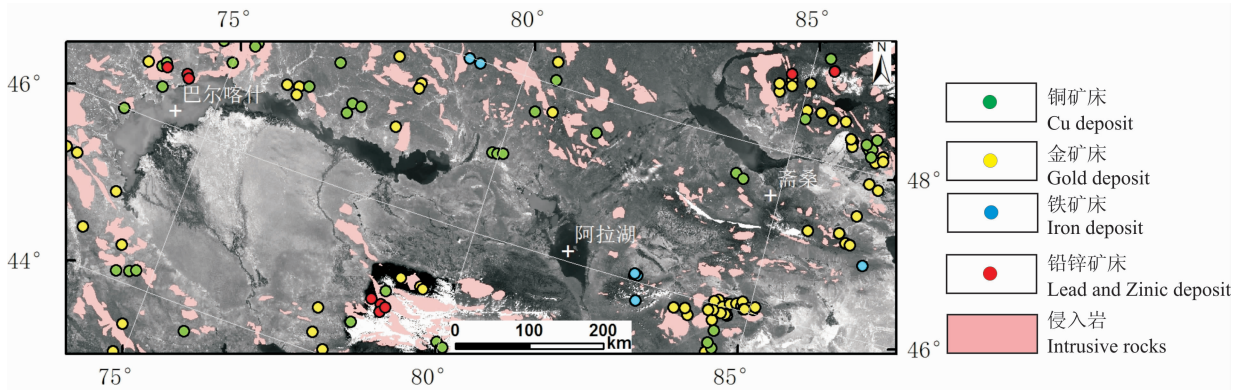


图 2 环巴尔喀什湖-西准噶尔侵入岩分布图

Fig. 2 Intrusive rocks distribution of Balkhash - Western Junggar metallogenic zones

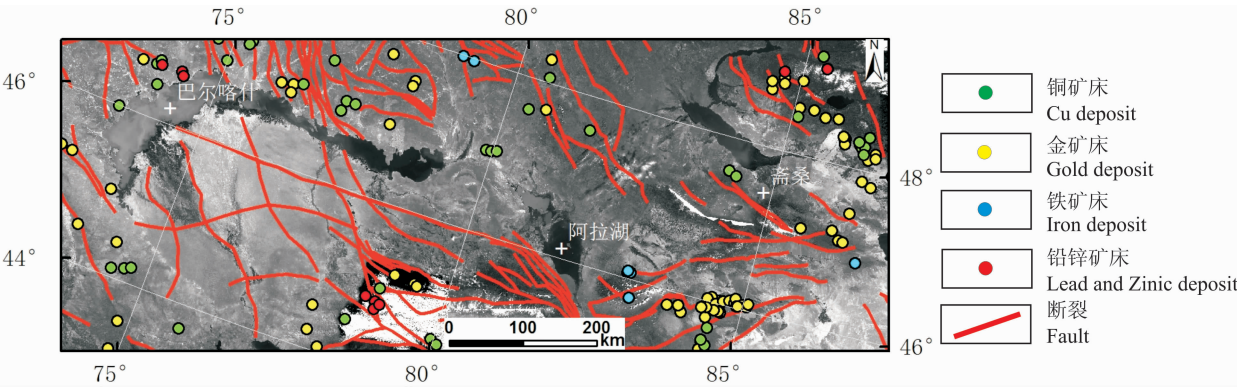


图 3 环巴尔喀什湖-西准噶尔构造空间分布图

Fig. 3 Structure distribution of Balkhash - Western Junggar metallogenic zones

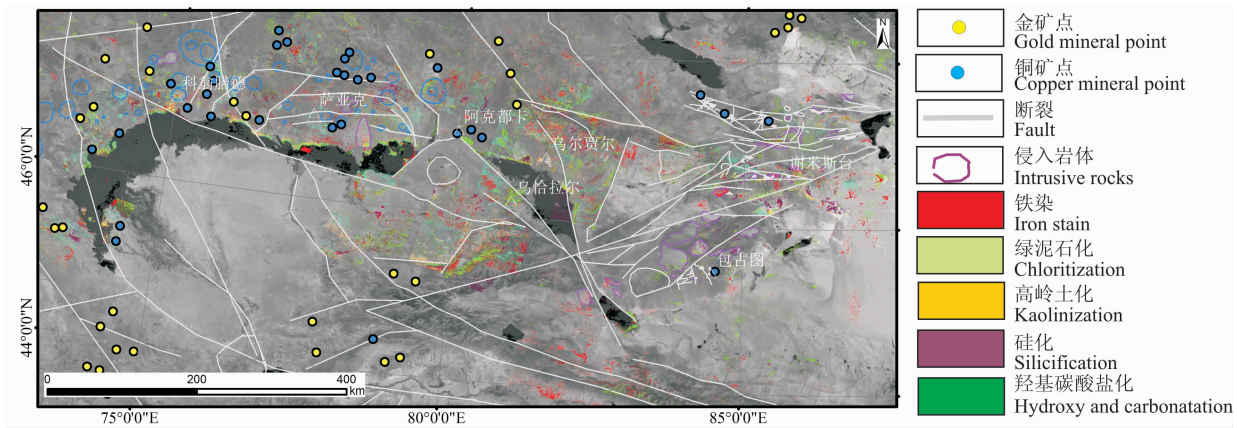


图 4 环巴尔喀什-西准噶尔蚀变矿物空间分布图

Fig. 4 Altered minerals distribution of Balkhash-Western Junggar metallogenic zones

野外考察结果表明,研究区的矿化以孔雀石化为主,伴生有褐铁矿化、硅化、钾化和泥化等蚀变;矿化主要发育在安山玢岩中,长度在 200~700 m 不等,产状近直立,走向受 NE 向构造的控制,NW 向与 NE 构造交汇处的矿化点尤为发育。根据野外矿

化类型及其发育情况,确定重点远景区的空间展布如图 6 所示。主要包括:阿吾斯奇矿化集中区、谢米斯台中矿化带、谢米斯台东矿化带、谢米斯台公路西矿化带和谢米斯台公路东矿化带。在此基础上,分别对 5 个重点远景区进行野外取样,委托具有 CMA

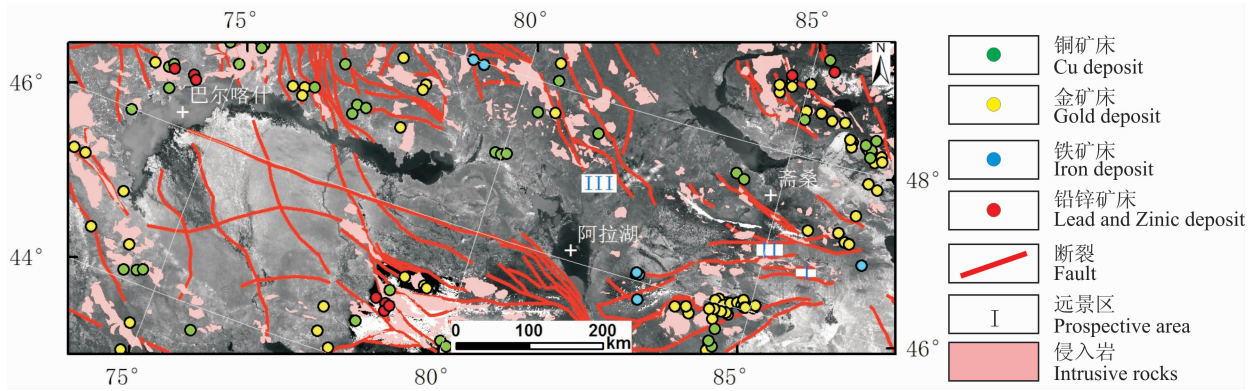


图 5 环巴尔喀什-西准噶尔远景区预测图

Fig. 5 Forecasted prospective areas in Balkhash-Western Junggar metallogenic zones

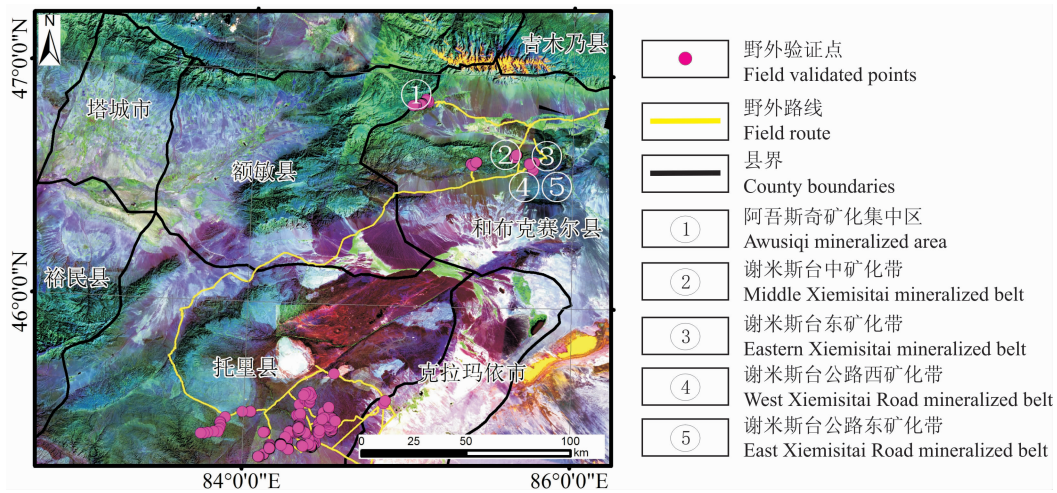


图 6 环巴尔喀什-西准噶尔重点远景区空间分布图

Fig. 6 Important prospective areas in Western Junggar metallogenic zones

计量认证资质的新疆中合地矿测试研究有限公司进行测试,结果如表 2 所示。

2.4.5 圈定靶区

样品的化验分析结果表明(表 2),谢米斯台中、谢米斯台东和谢米斯台公路东矿化带中的铜具有工业可开采价值,尤其是谢米斯台中远景区还有望在寻找金矿方面有所突破。根据中低温热液成矿理论,研究区的深部存在大型斑岩铜矿的可能性较大(Wang Juli et al., 2014)。结合地面矿化信息、遥感、地质、地球物理和地球化学异常、地面查证结果及岩矿测试化验结果,认为:谢米斯台中、谢米斯台东和谢米斯台公路东为今后有待深入评价的 3 处遥感找矿靶区。

3 结论与讨论

通过上述研究,在遥感找矿模型、矿产资源信息

遥感提取技术、地面验证等方面都取得了一定成果。

(1)提出了“小型侵入岩体异常+线性构造异常+蚀变矿物异常”的遥感找矿模型:通过调研分析研究区的成矿地质背景,明确了遥感找矿的主要控矿要素:岩性、构造和蚀变矿物。通过总结已知矿点与它们的空间展布格局,分析了有利矿集区的侵入岩、构造和蚀变矿物的成矿条件。在此基础上,建立了“小型侵入岩体异常+线性构造异常+蚀变矿物异常”的遥感找矿模型,为遥感找矿提供了模型指导。

(2)建立了遥感找矿技术流程:在遥感找矿模型的指导下,通过剖析已知典型矿床,建立典型矿床成矿理论;在此基础上,建立从宏观到微观的遥感找矿“地貌异常”和“图像异常”标志。基于上述标志,提取了岩性、构造和蚀变等控矿要素的空间展布规律;结合区域地球物理和地球化学资料,综合遥感、地质、地球物理和地球化学图件,预测了找矿远景区;

表 2 环巴尔喀什-西准噶尔重点远景区样品分析结果表

Table 2 Results of samples analysis from Western Junggar metallogenic zones					
远景区	样号	Au	Ag	Cu	Pb
		($\times 10^{-9}$)	($\times 10^{-6}$)		
阿 吾 斯 奇	TC-1-1-H1	2.9	0.065	53.7	27.8
	TC-1-1-H2	4.7	0.136	2987.1	2.4
	TC-1-1-H3	4.3	0.134	2500.4	11.6
	TC-1-1-H4	2.8	0.066	88.9	31.7
	TC-1-2-H1	18.2	0.102	9285.2	2.4
	TC-1-3-H1	40.1	0.361	2327.7	3.1
	TC-1-4-H1	11.2	0.187	1777.5	4.1
谢 米 斯 台 中	TC-2-1-H1	4.0	0.239	87.5	17.7
	TC-2-1-H2	319.3	>1	>10000	213.0
	TC-2-1-H3	2.7	0.227	104.4	25.4
	TC-2-2-H1	6.4	0.258	294.0	21.6
	TC-2-2-H2	451.7	>1	>10000	86.8
	TC-2-2-H3	63.4	>1	4186.3	56.8
	TC-2-3-H1	182.8	>1	>10000	54.9
谢 米 斯 台 东	TC-2-4-H1	898.9	>1	>10000	45.1
	TC-3-1-H1	8.1	0.911	6689.2	32.0
	TC-3-1-H2	20.6	>1	>10000	19.4
谢 米 斯 台 公 路 东	TC-3-2-H1	95.6	>1	2863.6	>1000
	TC-5-1-H1	49.9	>1	>10000	138.7
	TC-5-1-H2	42.6	>1	>10000	148.8
	TC-5-1-H3	137.9	>1	>10000	145.0
	TC-5-1-H4	62.5	>1	6059.5	100.9
	TC-5-1-H5	123.7	>1	>10000	93.4

在圈定远景区的基础上,通过野外考察,开展大比例尺遥感、地质、地球物理和地球化学化学填图,结合岩样的实验室分析结果,圈定靶区,并根据异常的大小及其工业可开采品位对靶区进行分类。

(3)通过野外考察,圈定了 5 处重点远景区,包括 3 处遥感找矿靶区:在遥感找矿模型的指导下,综合运用遥、地、物、化等多元信息进行远景区预测;根据野外调查的矿化发育情况圈定了 5 个重点远景区,包括:阿吾斯奇矿化集中区、谢米斯台中矿化带、谢米斯台东矿化带、谢米斯台公路西矿化带和谢米斯台公路东矿化带。结合大比例尺遥感蚀变矿物填图、地质、地球物理、地球化学和探槽揭露取样,圈定了具有工业可开采价值的谢米斯台中、谢米斯台东和谢米斯台公路东矿化带 3 个找矿靶区。

致谢:在遥感找矿项目执行过程中,得到了中国国土资源航空物探遥感中心王润生研究员,西安地质矿产研究所计文化高工,中科院遥感地球所田国良研究员、中国有色桂林矿产地质研究院有限公司黄理善、陆一敢总工,新疆中合地矿测试研究有限公司的大力支持,在此一并表示感谢!

References

Andrew A, Green A. 1988. Transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26(1):65~74.

Chen Jianping, Chen Yong, Wang Quanming. 2008. Study on synthetic informational mineral resource prediction using GIS a case study in Chifeng region, Inner Mongolia. *China Earth Science Frontiers*, 15~4): 18~26 (in Chinese with English abstract).

Chen Xuanhua, Chen Zhengle, Yang Nong. 2009. Study on regional mineralizations and ore-field structures: building of mineralizing tectonic systems. *Journal of Geomechanics*, 15(1): 1~19 (in Chinese with English abstract).

Chen Xuanhua, Yang Nong, Ye Baoying, Wang Zhihong, Chen Zhengle. 2011. Tectonic system and its control on metallogenesis in western Junggar as part of the Central Asia multi-core metallogenic system. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(3): 325~338 (in Chinese with English abstract).

Chen Xiqu, Li Jing, Dang Fuxing, Li Zhizhong. 2010. CBERS data for extracting mineralizing alteration information in Qincheng of east Tianshan. *Science of Surveying and Mapping*, 1: 64~66 (in Chinese with English abstract).

Dai Jingjing. 2012. Remote sensing model for Magma tic liquation iron deposit prediction in western Ethiopia. *Remote Sensing Technology and Application*, 3: 380~386 (in Chinese with English abstract).

Geng Xinxia. 2008. Spectral characteristics of rocks, information extraction of remote sensing data and optimize targets for finding deposits of Mengku-Abagong iron ore zone in Aletai, Xinjiang. Master Thesis of Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).

Guo Huadong. 1993. Progress of resources remote sensing research of gold deposits in northern Xinjiang, *Gold Science and Technology*, 1~4 (in Chinese with English abstract).

Hu Fei, Xu Bing, Li Yan, Jiang Tianfeng, Feng Wen, Zhu Lilin. 2013. Prospecting model of remote sensing in Hermosillo-Agua Prieta, Mexico. *Resources Environment & Engineering*, 27(5): 701~705 (in Chinese with English abstract).

Huang Zhang, Lin Qizhong, Wang Qinjun, Ding Haifeng, Chen Yu. 2014. Application of improved GIS-based weights of evidence for Cu-Au prospecting: a case study on Tuoli area, Xinjiang. *Remote Sensing Information*, 29(6): 110~116 (in Chinese with English abstract).

Jin Moushun, Wang Hui, Qiao Gengbiao, Zhang Shaopeng. 2014. The discovery of Heiqia iron mineralization belt in west Kunlun by high resolution remote sensing technology and its geological significance. *Northwestern Geology*, 47(4): 221~226 (in Chinese with English abstract).

Li Guangming, Qin Kezhang, Li Jinxiang. 2008. Geological features and tectonic setting of porphyry copper deposits rounding the

- Balkhash region, Central Kazakhstan, Central Asia. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2679 ~ 2700 (in Chinese with English abstract).
- Ma Jianwen. 1997. Methodology study of quickly identifying mineral bearing alterations from TM data. *Journal of Remote Sensing*, 1(3): 208~214 (in Chinese with English abstract).
- Shen Ping, Shen Yuanchao. 2010. A comparative study on ore-forming conditions and their models of the porphyry copper deposits in western Junggar, China and Circum-Balkhash, Kazakhstan. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2299 ~ 2316 (in Chinese with English abstract).
- Shi Junfa, Tang Jinrong, Zhou Ping, Jin Qinghua, Yang Zongxi, Zhu Lili, Jin Xi. 2011. A discussion on the exploration model. *Geological Bulletin of China*, 30(7): 1119 ~ 1125 (in Chinese with English abstract).
- Sun Weidong. 2010. The research of remote sensing abnormality extraction and copper mul-metal mine prediction in Tuwu and Huang shan region of Xinjinag. A dissertation submitted to China University of Geosciences (Beijing) for Doctor degree (in Chinese with English abstract).
- Wang Junfeng. 2013. Remote sensing study of metallogenic condition in West Kunlun Laobing-Zankan ore concentration area. *Northwestern Geology*, 46(2): 167~173 (in Chinese with English abstract).
- Wang Juli, Wang Jianqi, Hu Yang, Tu Yi'an, Wang Min, Ling Weiwei. 2014. The discovery of porphyry copper mineralization in Xiemisitai area of Xinjiang and its significance. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(3): 395~398 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qinjun, Lin Qizhong, Li Mingxiao, Wang Liming, Tian Qingjiu. 2009. A target-highlighting method in multispectral remote sensing. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 29(4): 1018~1022 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qinjun, Lin Qizhong. 2006a. Remote sensing lithology identification in baocer tu using aster image. *Geography and Geo-Information Science*, 22(2): 9 ~ 12 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qinjun, Lin Qizhong. 2006b. A new target detection algorithm: spectral sort encoding algorithm. *Geology and Prospecting*, 42(3): 91~96 (in Chinese with English abstract).
- Wang Runsheng, Xiong Shengqing, Nie Hongfeng, Liang Shuneng, Qi Zherong, Yang Jinzhong, et al. 2011. Remote Sensing Technology and its Application in Geological Exploration. *Acta Geologica Sinica*, 85(11): 1699~1743 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhigang. 1999. Applications of spectral angle mapping method in lithology identification. *Journal of Remote Sensing*, 3(1): 60~65 (in Chinese with English abstract).
- Wei Yongming, Lin Qizhong, Xiao Shang, Chen Yu, Wang Qinjun, Liu Qingjie, Wei Xianhu. 2015. Remote sensing identification of geological structures at different scales in Western Junggar, Xinjiang and its prospecting significance. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(1): 76 ~ 92 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Wenjiao, Shu Liangshu, Gao Jun, Xiong Xiaolin, Wang Jingbin, Guo Zhaojie, Li Jinyi, Sun Min. 2008. Continental dynamics of the central asian orogenic belt and its metallogeny. *Xinjiang Geology*, 26(1): 4 ~ 8 (in Chinese with English abstract).
- Yan Jining, Zhou Kefa, Wang Jinlin, Zhang Haibo, Cheng Wanwen, Liu Zhaoxia. 2011. Application of artificial neural network to ore-forming prediction. *Computer Engineering and Applications*, 47(36): 230 ~ 233 (in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan, Yan Shenghao, Liu Guoren, Zhou Gang, Zhang Zhixin, Liu Feng, et al. 2011. Geological characteristics and metallogenesis of porphyry copper deposits in Junggar, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 47(36): 230~233 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jianmin, Zhang Yujun, Chen Wei, Mao Jingwen, Wang Zhiliang, Jiang Lifeng, et al. 2002. Application for technigue in abstracting; remote alteration anomalies from ETM + (TM) data in eastern Tianshan, Xinjiang, China. *Mineral Deposits*, 21: 1225~1227 (in Chinese with English abstract).
- Ye Jiaolong. 2013. The study on remotely sensed information extraction of porphyry copper of Zhu Nuo district in Gangdese metallogenic. Master Thesis of Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Yin Fang, Liu Lei, Zhang Ji Rong, Zhou Jun. 2014. Remote sensing detection of mineralization related to small intermediate-acid intrusions in Xiemisitai area, Xinjiang. *Acta Geoscientica Sinica*, 5: 561~566 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongtao, Chen Renyi, Shu Siqi. 2013. Some problems concerning porphyry copper deposits in China's mainland. *Mineral Deposits*, 32(4): 672~684 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Yang Jinzhong, Fang Hongbin, Yu Jiangkuan, Chen Wei, et al. 2010. Remote sensing interpretation and metallogenic prediction in the metallogenic belts of East Kunlun and Altun Mts. *Northwestern Geology*, 43(4): 288 ~ 294 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Pengda. 1987. New progress in the study of quantitative prediction and evaluation of mineral resources. *Geological Science and Technology Information*, 6(1): 1~6 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Kefa, Chen Yanjing, Zhang Nannan, Wang Jinlin, Wang Wei, Liu Zhaoxia, Cheng Wanwen. 2012. Feature extraction and prediction methods for typical deposit in Central Asia. *Arid land Geography*, 35(3): 339 ~ 347 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongfeng, He Guoqi, An Fang. 2007. Geological evolution and metallogeny in the core part of the Central Asian metallogenic domain. *Geological Bulletin of China*, 26(9): 1167 ~ 1177 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

陈建平,陈勇,王全明. 2008. 基于 GIS 的多元信息成矿预测研究——以赤峰地区为例. 地学前缘(中国地质大学(北京):北京大学),15(4):18~25.

陈析廖,李静,党福星,李志忠. 2010. 中巴资源卫星的矿化蚀变信息提取研究——以东天山沁城地区为例. 测绘科学,1:64~66.

陈宣华,陈正乐,杨农. 2009. 区域成矿与矿田构造研究——构建成矿构造体系. 地质力学学报,15(1):1~19.

陈宣华,杨农,叶宝莹,王志宏,陈正乐. 2011. 中亚成矿域多核成矿系统西准噶尔成矿带构造体系特征及其对成矿作用的控制. 大地构造与成矿学,35(3):325~338.

代晶晶. 2012. 埃塞俄比亚西部岩浆熔型铁矿遥感找矿模型. 遥感技术与应用,3:380~386.

耿新霞. 2008. 新疆阿勒泰蒙库-阿巴宫铁矿成矿带岩石光谱特征、遥感信息提取及找矿靶区优选. 北京:中国地质科学院硕士学位论文.

郭华东. 1993. 新疆北部金矿资源遥感研究进展. 黄金科技动态,1~4.

胡飞,胥兵,李琰,江天风,冯稳,祝莉玲. 2013. 建立墨西哥埃莫西约-阿瓜普列塔地区遥感找矿模型. 资源环境与工程,27(5):701~705.

黄彰,蔺启忠,王钦军,丁海峰,陈玉. 2014. 基于 GIS 的改进证据权重法在新疆托里地区铜金矿预测中的应用. 遥感信息,29(6):110~116.

金谋顺,王辉,乔耿彪,张少鹏. 2014. 利用高分遥感技术发现西昆仑黑恰铁矿矿化带及其地质意义. 西北地质,47(4):221~226.

李光明,秦克章,李金祥. 2008. 哈萨克斯坦环巴尔喀什斑岩铜矿地质与成矿背景研究. 岩石学报,24(12):2679~2700.

马建文. 1997. 利用 TM 数据快速提取含矿蚀变带方法研究. 遥感学报,1(3):208~213.

申萍,沈远超. 2010. 西准噶尔与环巴尔喀什斑岩型铜矿床成矿条件及成矿模式对比研究. 岩石学报,26(8):2299~2316.

施俊法,唐金荣,周平等. 2011. 关于找矿模型的探讨. 地质通报,30(7):1119~1125.

孙卫东. 2010. 新疆土屋-黄山一带遥感异常提取及铜多金属找矿预测研究. 北京:中国地质大学(北京)博士学位论文.

王居里,王建其,胡洋,涂一安,王敏,令伟伟. 2014. 新疆谢米斯台地区斑岩型铜矿化的发现及其意义. 地球学报,35(3):395~398.

王俊峰. 2013. 西昆仑老井一赞坎矿集区铁矿成矿条件遥感研究. 西北地质,46(2):167~173.

王钦军,蔺启忠,黎明晓,王黎明,田庆久. 2009. 一种突出目标的多光谱遥感信息提取方法. 光谱学与光谱分析,29(4):1018~

1022.

王钦军,蔺启忠. 2006a. 包尔图地区 Aster 遥感岩性提取. 地理与地理信息科学,22(2):9~12.

王钦军,蔺启忠. 2006b. 一种岩性提取新方法——光谱排序编码法. 地质与勘探,3:91~96.

王润生,熊盛青,聂洪峰,梁树能,齐泽荣,杨金中,闫柏琨,赵福岳,范景辉,童立强,林键,甘甫平,陈微,杨苏明,张瑞江,葛大庆,张晓坤,张振华,王品清,郭小方,李丽. 2011. 遥感地质勘查技术与应用研究. 地质学报,85(11):1699~1743.

王志刚. 1999. 光谱角度填图方法及其在岩性识别中的应用. 遥感学报,3(1):60~65.

魏永明,蔺启忠,肖臻,陈玉,王钦军,刘庆杰,魏显虎. 2015. 新疆西准噶尔地区不同尺度地质构造的遥感标识特征及找矿意义. 大地构造与成矿学,39(1):76~92.

肖文交,舒良树,高俊,熊小林,王京彬,郭召杰,李锦轶,孙敏. 2008. 中亚造山带大陆动力学过程与成矿作用. 新疆地质,26(1):4~8.

阎继宁,周可法,王金林,张海波,程宛文,刘朝霞. 2011. 人工神经网络在成矿预测中的应用. 计算机工程与应用,47(36):230~233.

杨富全,闫升好,刘国仁,周刚,张志欣,刘锋,耿新霞,郭春丽. 2010. 新疆准噶尔斑岩铜矿地质特征及成矿作用. 矿床地质,29(6):956~971.

杨建民,张玉君,陈薇,毛景文. 2002. 矿产资源调查评价的现代化技术方法——以 ETM+蚀变遥感异常为主导的多元信息矿产评价方法. 矿床地质,21:1225~1227.

叶娇珑. 2013. 冈底斯成矿带朱诺地区斑岩型铜矿遥感找矿信息提取研究. 成都:成都理工大学硕士学位论文.

尹芳,刘磊,张继荣,周军. 2014. 新疆谢米斯台地区小岩体型矿化遥感探测. 地球学报,5:561~566.

张洪涛,陈仁义,舒思齐. 2013. 中国大陆斑岩铜矿若干问题. 矿床地质,32(4):672~684.

张微,杨金中,方洪宾,余江宽,陈微,孙卫东,于浩,常玲. 2010. 东昆仑-阿尔金地区遥感地质解译与成矿预测. 西北地质,43(4):288~294.

赵鹤大. 1987. 矿产资源定量预测及评价模型研究的新进展. 地质科技情报,6(1):1~6.

周可法,陈衍景,张楠楠,王金林,汪玮,刘朝霞,程宛文. 2012. 中亚地区典型矿床的特征提取技术及预测方法. 干旱区地理,35(3):339~347.

朱永峰,何国琦,安芳. 2007. 中亚成矿域核心地区地质演化与成矿规律. 地质通报,26(9):1167~1177.

**Remote Sensing Porphyry Copper Deposit Exploration Model
and Its Application in Low Vegetated Areas:**

An Example from the Taken Balkhash-Western Junggar Metallogenic Zones

WANG Qinjun¹⁾, WEI Yongming¹⁾, CHEN Yu¹⁾, LIN Qizhong¹⁾, ZHOU Hongying²⁾

1) *Key Laboratory of Digital Earth, Institute of Remote Sensing and Digital Earth,
Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100094;*

2) *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing, 100083*

Abstract

A multi-scale remote sensing porphyry copper deposit exploration model in low vegetation covered area named "abnormal little intrusive rocks + structures + altered minerals" was proposed to solve the difficulties in mineral exploration caused by multiple interfering factors. The geological background of mineralization was analyzed taken the Balkhash-Western Junggar metallogenic zones as the study area. Lithology, structures and altered minerals were analyzed according to the flow chart of remote sensing mineral exploration. Based on the results, five important prospective areas have been prospected. Among them, three target regions were delineated using large scale altered mineral map, geological map, geophysical map, geochemistry map and the results of the trench sampling.

Key words: Remote sensing mineral exploration; model; Balkhash-Western Junggar; metallogenic zones