doi: 10.12097/gbc.2022.04.005

遥感技术在阿根廷西北部米纳皮基塔斯地区斑岩型铜金矿找矿调查中的应用

李汉武[1]，赵宇浩[1*]，方针[2]，郑璐[1]，朱意萍[1]
LI Hanwu[1], ZHAO Yuhao[1*], FANG Zhen[2], ZHENG Lu[1], ZHU Yiping[1]

1. 中国地质调查局南京地质调查中心，江苏 南京 210016；
2. 阿根廷汉纳克矿业公司，阿根廷 胡胡伊 Y4643
1. *Nanjing Center*, *China Geological Survey*, *Nanjing* 210016, *Jiangsu*, *China;*
2. *Hanaq Mining Resources Ltd*., *Jujuy* Y4643, *Argentina*

摘要：阿根廷西北部的铜金多金属成矿带是南美安第斯成矿带的主要组成部分。该成矿带主要发育斑岩型铜金矿，是阿根廷最主要的铜金多金属矿产资源分布区，但该区交通差、地形地质构造复杂、岩性多样，极大地影响了地质找矿的进展。以阿根廷西北部胡胡伊省的米纳皮基塔斯地区为研究区，以 ETM+卫星影像为数据源，进行环形构造、菱形构造、深大断裂和破碎带的遥感解译；基于 Aster 遥感影像数据开展了成像光谱法和主成分分析法矿化蚀变异常信息提取分析。结果显示，铝羟基类蚀变矿物组合和铁染蚀变矿物异常区与主要控矿构造较一致，通过分析认为该区域成矿条件优越。在此基础上，结合斑岩型矿床成矿地质条件等资料，建立该地区遥感地质找矿模型，划分出了重要找矿远景区。该方法具有良好的找矿效果，对阿根廷西北部地区的找矿调查工作具有重要指导作用。

关键词：阿根廷；ETM+；Aster；蚀变异常信息提取；斑岩型铜金矿
中图分类号：P618.41; P618.51; P627 **文献标志码：**A **文章编号：**1671−2552(2024)04−0582−12

Li H W, Zhao Y H, Fang Z, Zheng L, Zhu Y P. Application of remote sensing technology in prospecting and exploration of porphyry copper-gold deposits in Mina Pirquitas, Northwest Argentina. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(4): 582−593

Abstract: The copper-gold polymetallic metallogenic belt in northwestern Argentina is the main component of the Andean metallogenic belt in South America. This metallogenic belt mainly develops porphyry copper-gold deposits and is the main distribution area of copper-gold polymetallic mineral resources in Argentina. This paper focuses on the Minapiquitas region of Jujuy Province in northwestern Argentina, using ETM+ satellite images as the data source, to carry out remote sensing interpretation of annular structures, rhombus structures, deep faults and broken zones; based on Aster remote sensing image data information extraction and analysis of mineralization alteration anomalies by imaging spectroscopy and principal component analysis. The results show that the anomalous area of aluminum-hydroxy-type altered minerals and iron-stained altered minerals is relatively consistent with the main ore-controlling structures, and it is considered that this area has favorable metallogenic conditions. On this basis, combined with the metallogenic geological conditions of porphyry deposits, a remote sensing geological prospecting model was established in this area, and important prospecting areas were divided. This method has a good prospecting effect and plays an important guiding role in the prospecting and investigation work in northwestern Argentina.

Key words: Argentina; ETM+; Aster; alteration anomaly information extraction; porphyry copper-gold deposits

收稿日期：2022−04−06；**修订日期：**2022−07−06
资助项目：中国地质调查局项目《美洲大洋洲国际合作地质调查》(编号：DD20230129)
作者简介：李汉武(1985−)，男，硕士，高级工程师，从事矿床方面的工作。E−mail: javierlhw@foxmail.com
* **通信作者：**赵宇浩(1989−)，男，硕士，高级工程师，从事矿床地质研究。E−mail: zhao61060427@126.com

阿根廷西北部胡胡伊(Jujuy)省的米纳皮基塔斯(Mina Pirquitas)地区是南美安第斯斑岩成矿带(尤其是斑岩型铜金矿)的主要组成部分(段俊斌等, 2019)(图 1), 该成矿带发育众多大型—超大型矿床, 例如塔卡塔卡(Taca Taca)和下德拉阿伦布雷拉(Bajo de la Alumbrera)斑岩铜金矿床(Sillitoe et al., 2001; Proffett et al., 2003)。该区平均海拔为 5300 m, 道路交通不便, 气候恶劣极端, 地质工作程度较低, 极大地影响了该区的地质找矿进展。

近年来, 遥感技术在国内外斑岩型矿床找矿工作中得到广泛应用, 并取得了较好的找矿成果。毛晓长等 (2005) 对比植被不发育地区的 Aster 数据和 ETM+数据提取矿化蚀变信息找矿; 张婷婷 (2014) 运用高光谱数据对西藏甲玛矿区进行蚀变信息提取, 取得了理想的效果; 张玉君等 (2012) 应用遥感技术对西藏冈底斯地区的斑岩铜矿区进行研究, 精准地开展了地质勘查工作, 最终确定冈底斯地区斑岩铜矿带采用 Aster 数据在矿化蚀变信息提取中效果更佳。在国外, 智利勘探公司利用遥感技术在斑岩型矿床成矿带上圈定与之相关的矿化蚀变带, 并通过进一步地质填图、化探、钻探等工作, 发现了一批重要的斑岩型铜矿, 例如科亚瓦西 (Collahuasi)、埃斯康迪达 (Escondida) 等矿床(刘凤等, 2009; 张瑞江等, 2010)。

本次研究主要利用 Landsat-7 卫星和 Aster 遥感影像数据, 开展阿根廷西北部胡胡伊省米纳皮基塔斯地区构造解译和矿物蚀变异常提取工作, 并对构造解译和矿物蚀变异常结果进行地质成矿分析, 结合分析成矿有利地质单元, 建立遥感地质找矿模型, 划分主要成矿远景区(赵福岳等, 2000; 王润生等, 2011)。该成果可为中资企业在该地区的找矿勘查提供技术支撑。

1　区域成矿地质特征

1.1　区域地质特征

阿根廷位于乌拉圭−巴西地盾南部和安第斯褶皱山系之中, 东部为弧后拉张环境。新生代, 该区火山活动频繁(卢民杰等, 2016)。研究区的主干线性大断裂大致走向为近 NNW 向、NNW 向及 SN 向。米纳皮基塔斯地区位于阿根廷西北端, 区内分布着奥陶纪、中生代—第四纪地层和岩浆岩。奥陶系阿科德 (Acotte) 组沉积岩为区内出露的最古老地质单元。阿科德组沉积岩主要为砂岩、粉砂岩、页岩、灰岩等。白垩系主要由皮瓜 (Pirgua)群、巴布纳 (Balbuena) 群的亚可达特 (Yacoraite) 组及萨尔达 (Salta) 群沉积地层构成。其中, 皮瓜群岩性为砂岩、

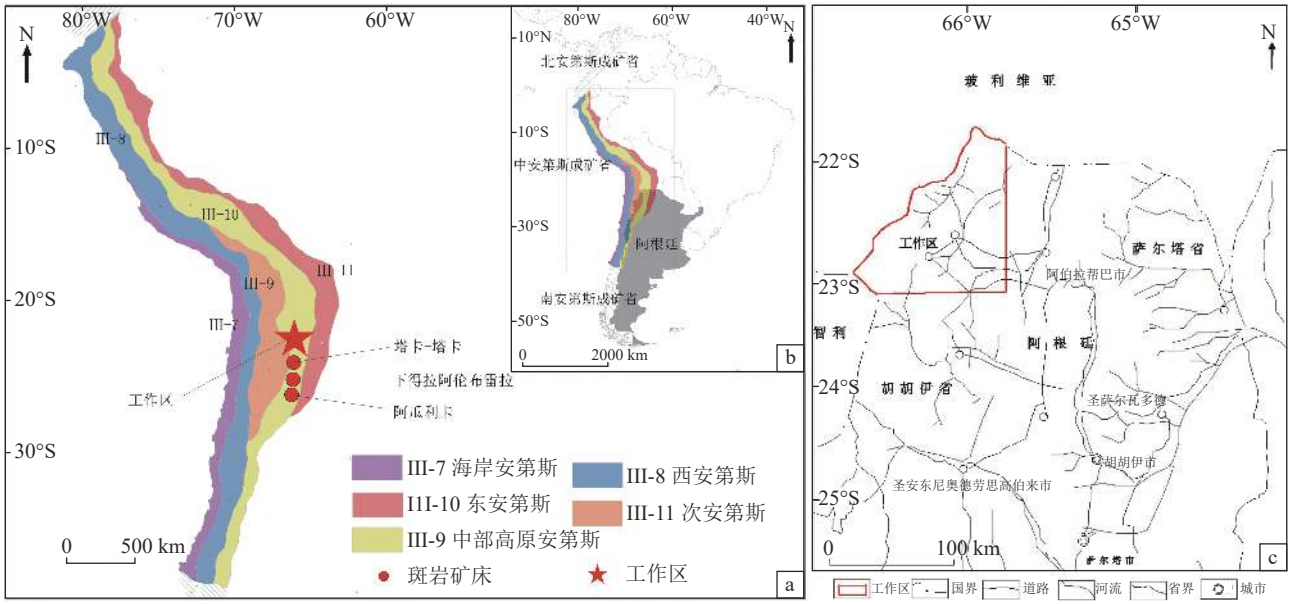

图 1　成矿区带图及米纳皮基塔斯地区区位图

Fig. 1　Metallogenic belt map and location map of Mina Pirquitas area

a—中安迪斯成矿带; b—成矿带区位; c—米纳皮基塔斯区位图

泥岩和少量砾岩等；巴布纳群亚可达特组岩性为钙质砂岩、灰岩、泥灰岩、页岩等；萨尔达群主要为砂岩、灰岩、粘土岩等。古近系主要包括贝纳恩纳科罗娜达 (Pena Enacolorada) 组和摩特塔 (Moreta) 组，摩特塔组岩性为砂岩、页岩、砾岩等，贝纳恩纳科罗娜达组为砂岩、石灰岩、泥岩等。新近系主要由卡布特迪亚 (Cabreria) 组、迪欧玛雅 (Tiomayo) 组和布尔塔斯佩德罗(Puertas Pedro)组 3 个地层岩组及维拉玛(Vilama)等火山杂岩单元组成，其出露面积约占研究区总面积的 30%，主要分布在研究区西部和南部。古近纪和新近纪的英安质火山碎屑熔岩、安山质熔结凝灰岩、英安质-安山质熔岩、安山质火山集岩块、角砾岩等主要分布在研究区中部和中南部地区，并有较大面积的古近纪—新近纪安山玢岩和花岗斑岩出露；根据野外地质探勘，隐爆角砾岩在区内分布广泛(图 2)。此外，有大量的泥沙、洪冲积及砾石，风成沉积及蒸发沉积等沉积物在第四纪沉积。

1.2 研究区斑岩型矿床

阿根廷西北部位于Ⅲ_10 东安第斯金、银多金属成矿带(图 1)。该成矿带是阿根廷最重要的铜、银、金、钼等矿产分布区，在阿根廷西部呈 SN 向带状展布(瞿泓滢等，2013；卢民杰等，2016)(图 1)。在

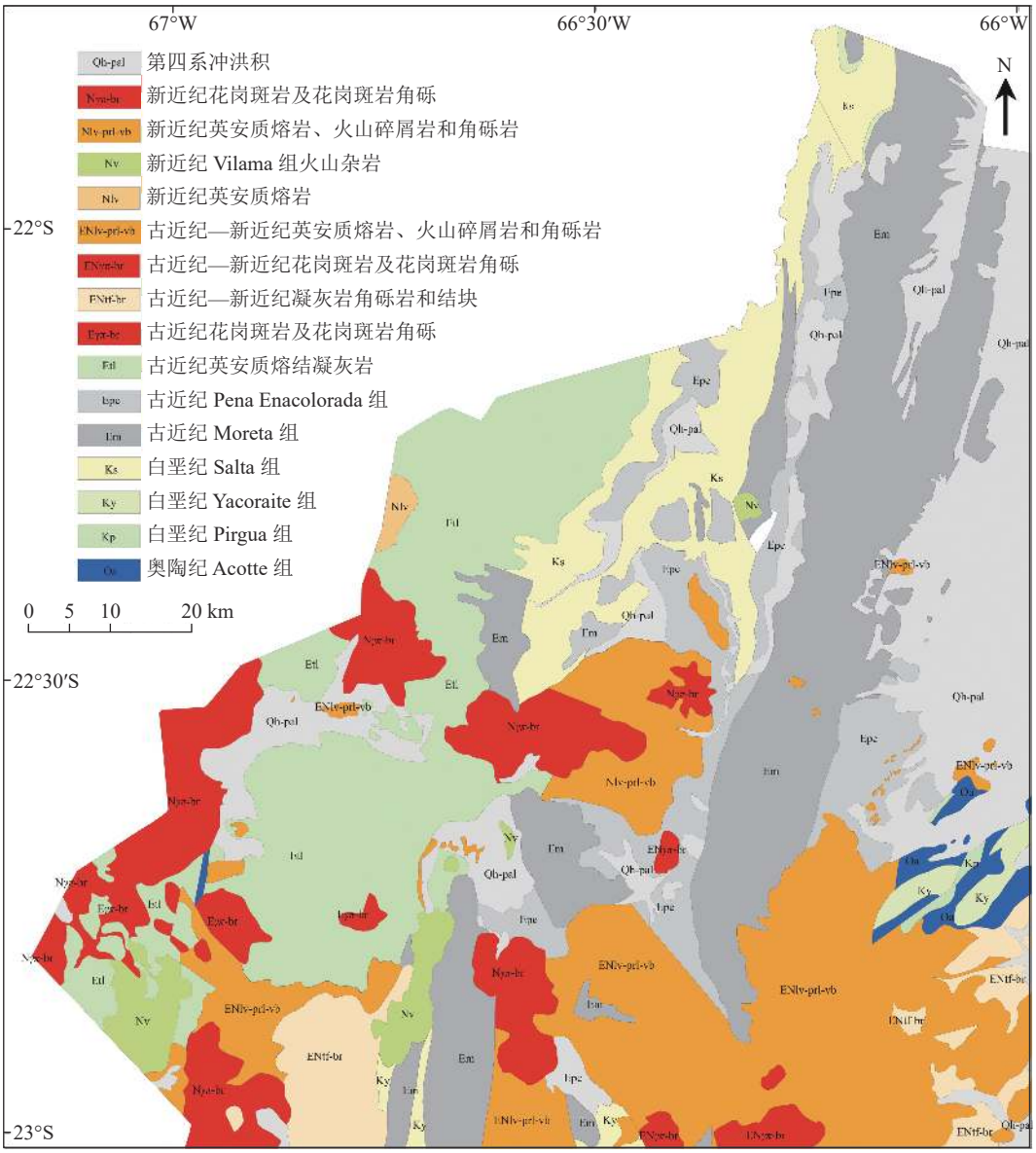

图 2 阿根廷西北部米纳皮基塔斯地区地质简图

Fig. 2 Geological map of Mina Pirquitas area in northwestern Argentina

斑岩型铜金矿成矿方面，侏罗纪铜成矿亚带、白垩纪铜−钼−金多金属成矿亚带、新近纪铜−钼−金多金属成矿亚带和古近纪铜−钼−金多金属成矿亚带为主要的斑岩型成矿亚带，铜金矿找矿远景突出，是世界最著名的铜、金多金属成矿带(赵文津等, 2007; 瞿泓滢等, 2013; 卢民杰等, 2016)。阿根廷西北部出露的铜金矿床，被广泛地认为属于该成矿亚带的斑岩型矿床，如塔卡塔卡、阿瓜利卡(Agua rica)和下德拉阿伦布雷拉世界级斑岩铜金矿床(图 1)(Proffett et al., 2003; 赵文津等, 2007; 瞿泓滢等, 2013)。

阿根廷西北部斑岩型铜金矿床的成矿母岩大都与浅成—超浅成复式侵入杂岩体有关，赋矿围岩可以是岩浆岩，也可以是与岩浆活动无关的沉积岩(聂凤军等, 2000)。相比经典的斑岩成矿模型，阿根廷西北部的斑岩成矿系统有时伴生浅成低温热液型矿床，如塔卡塔卡矿床(张潮等, 2017)，形成斑岩-浅成低温热液成矿系统(Ford et al., 2015; 郭晓宇等, 2018)。阿根廷西北部地区与斑岩型铜金成矿相关的岩性主要为奥陶纪、中生代、古近纪及更新的岩性; 尤其是中新世和渐新世，智利北部和阿根廷西部的安第斯造山带火山活动频繁，是阿根廷西北部地区斑岩型铜金矿床的主要成矿期(聂凤军等, 2000; Ford et al., 2015; 张潮等, 2017)。在阿根廷西北部斑岩型铜金矿田或矿区范围内，各类岩脉和角砾岩分布极广泛。花岗斑岩和花岗闪长岩体为主要的赋矿岩体; 黄铜矿、辉钼矿、黄铁矿、磁铁矿、赤铁矿、闪锌矿、方铅矿等为主要的矿石矿物; 从矿床热液蚀变分带看，矿体的核部为钾化带，向外为石英、绢云母、碳酸盐、黄铁矿(千枚岩化)，最外侧为绿泥石、碳酸盐、绿帘石-青磐岩化(瑞刚等, 2013)。阿根廷西北部典型斑岩型铜金矿的特点见表 1。

2　数据源和处理

选择 Landsat 7 卫星 ETM+增强型专题制图仪(2000—2002 年)遥感解译的卫星影像为底图，选择区内植被覆盖度最低的季节。以 Landsat 7-ETM+为数据源(RGB 波段合成方案: Landsat 7- ETM+B7、B 4 和 B2)，以机助、目视和图像增强处理遥感解译方法，结合成矿地质条件进行综合解译，建立解译标志，解译区域构造、矿区构造和成矿有关构造、地层、斑岩体(范三伏等, 2011; 陈玉明等, 2015; 杨晓勇等, 2021)，着重解译分析线(线性构造)、环(环形构造/岩体等)、块和呈长条状的超基性岩体或岩脉。

选择下载覆盖米纳皮基塔斯研究区的 9 景 Terra 卫星 Aster 多光谱高分辨率(2008—2010 年)的遥感数据为主要数据源，利用 ENVI 软件和主成分分析技术对研究区 Terra-Aster 遥感数据构建不同的提取模型(杨日红等, 2015; 侯照房等, 2021)，进行矿区及其周围地区矿化蚀变信息异常提取，主要提取的蚀变类型为铁染类和羟基化物类两大类。在提取白(绢)云母、蒙脱石、伊利石、高岭石等铝羟基类的蚀变矿物信息时，蒙脱石、明矾石、白(绢)云母、高岭石、伊利石等铝羟基类蚀变矿物信息的标准吸收谷在 2. 2 μm 附近(李根军等, 2011)，对应 Aster 数据 Band 6，以此构建了 4 波段 (Band 1, Band 4, Band 6, Band 7) 的主成分分析模型。其异常主分量(PC4)的本特征向量具有 Band 4 和 Band 7 的贡献系数与 Band 6 的贡献系数符号是相反的，而且 Band 4 和 Band 6 绝对值相对较高(李根军等, 2011)。根据 PC4 统计出象元灰度值平均值和标准离差(σ)，分别按照 2σ、2.5σ 和 3σ 设立不同的阈值，切割出羟基类三级蚀变信息。在提取铁染类的蚀变矿物信息时，掩膜主分量分析采用 Band 1、Band 2、Band 3、

表 1　阿根廷西北部典型斑岩矿床特征(卢民杰等, 2016)

Table 1　Characteristics of typical porphyry deposits in northwestern Argentina

成矿时代	成矿母岩	侵入岩构造	角砾岩	热液蚀变	矿体	典型斑岩矿床
中生代—新近纪为主，尤其是中新世和渐新世	斑岩体连续的多期次侵位，有大量的浅侵位斑岩脉，常有石英脉	沿深大断裂或在构造交会部位产出，常形成环形构造	极为特征，分布广泛; 主要有隐爆角砾岩、侵入角砾岩。早期角砾岩多已矿化	围绕侵入岩体，钾化、千枚岩化和青磐岩化呈环状分布	矿体呈环状或穹隆状分布于斑岩体旁侧，具明显分带。各矿带内均见黄铁矿，矿化核为黄铜矿，最外是黄铁矿晕圈	塔卡塔卡(Taca Taca)、阿瓜利卡(Agua rica)和下德拉阿伦布雷拉(Bajo de la Alumbrera)

Band 4 波段，主分量输出的动态范围以±4σ 为主，铁染蚀变矿物在 Band 2 波谱范围与 Band 1 和 Band 3 比在反射波谱特征上相对较高。异常主分量本征向量具有如下特点：Band 1 和 Band 3 的贡献系数与 Band 2 的贡献系数符号相反（李根军等，2011），研究区的所有数据 PC4 符合这一条件，根据 PC4 统计出了象元灰度值平均值和标准离差（σ），根据标准离差再分别按照 1.5σ、2σ 和 2.5σ 设立不同的阈值，分别切割出铁染类强中弱三级不同的蚀变信息，并添加上差异化的颜色（李根军等，2011）。经过去干扰后处理编制研究区铝羟基类和铁染类蚀变矿物组合信息分布图。

3 构造及蚀变信息解译结果

3.1 线-环-菱形构造与成矿意义

3.1.1 线-环-菱形构造

根据成矿地质资料与遥感影像特征，参考异常区 1∶10 万地质图，基于 ETM+卫星影像图，建立相应的遥感地质解译标志；采用人机交互解译技术，在米纳皮基塔斯研究区解译出线–环–菱形的构造组合（图 3）。

在米纳皮基塔斯研究区，除分布有 3 条 SN 向的挤压主干断层外，在其旁侧分布有与其平行或相交的次级线性构造，呈对称排列，与其相交的次级线性构造多呈等距性排列，形成菱形的区块构造，它们共同构成了区域性的线性-菱形构造带。再结合 1∶10 万区域地质图，米纳皮基塔斯研究区的环状构造解译表现为大小环块呈现多层状环和寄生式环形的影像组合特征。这一特征在区域航磁异常图上亦表现明显（图 4），沿大环形构造两侧接触带，航磁总值与激发极化值的低值与中值的梯度区、中值与高值的梯度区具有明显的平滑边界，磁梯度明显的位置与环形构造位置相吻合；在大环形构造内部的小环形构造，高值与低值梯度异常值明显，异常梯度值较高，分布位置与小环形构造吻合。在米纳皮基塔斯研究区航磁异常证实环形构造的存在，与地质构造特征吻合。

从线性构造产生的应力状态分析看，米纳皮基塔斯研究区控制的主干线性构造多呈挤压性质，而与之相交的横向线形-菱形构造主要呈张性，属次级线性构造。米纳皮基塔斯研究区的环形构造的轴线为 NNE 向，其轴线方向与区域主干断裂走向一致，主干断裂与环形构造在成因上密切相关，在环形构造南、北两端的位置主要表现为张性。

3.1.2 线-环-菱形构造成矿意义

在线性构造成矿方面，斑岩铜矿带的展布和产出通常直接受主干线性构造控制，米纳皮基塔斯研究区次级横向断裂与平行主干线性构造的次级线性构造呈现线形排列，在交会处沿这种区域线性构造带及其旁侧，形成贯通性构造，导致深部钙碱性岩浆及含矿热液沿其上升，形成火山断陷盆地及岩浆岩带，控制斑岩系列火山–岩浆成矿带的展布。真正直接控制大型斑岩铜矿床热液蚀变和金属矿化的，还是更次一级线性构造（周正武等，1996），往往在主干边缘线性构造与次级线性构造交会部位形成斑岩铜矿田。矿床主要分布于次级横向张性构造与主干线性构造交会部位或交会锐角区内（周正武等，1996）（图 5，以德兴铜矿为例）。这些部位岩石常易破碎，形成大量裂隙，并与主干线性构造贯通，为热液和岩浆活动提供了最有利的通道。

在环形构造成矿方面，中国 45 个斑岩铜矿中有 43 个矿床分别与不同环块构造有关。其中与直径 50~500 km 环块相关的矿床占 1/3 多（周正武等，1996）。在斑岩铜矿分布区，由于与铜矿化有密切联系的斑岩体及火山构造多数是圆形、椭圆形地质体，在遥感图像上多呈环形影像特征。米纳皮基塔斯研究区大小多层状环带反映了出露地表和隐伏的斑岩体、岩株、火山构造、火山杂岩体的轮廓构造信息（图 3）（张广平等，2014）。小型环形影像组合多为上覆围岩中以岩株群、火山口及隐爆角砾岩筒为主的多层状或寄生式环形构造组合，以及可能下伏的环块岩基和隐伏小岩体；大环显示下部存在较大规模的中、酸性侵入岩基（图 6）（聂凤军等，2000），大环套小环叠加在一起形成的寄生式环块，形成环隆、火山环块。根据遥感构造解译的环（带）边、环–环重叠带、环线交会处及内切小环边缘，为沿岩体、火山岩颈外接触带部位形成的接触破碎带、角砾岩带及与次火山岩有关的环状断裂带。这些破裂均为含矿热液渗透和交代活动提供了有利的条件，这样的构造形式与成矿关系最密切，是大型矿床赋存的有利指示标志。除这些环形构造接触带易于成矿外，含矿的下伏岩基和隐伏小岩体也可能出现在多层状构造环块的层环界面上或其中心部位，斑岩铜矿床也可能出现在环带中或层环界面位置。但是当米纳皮基

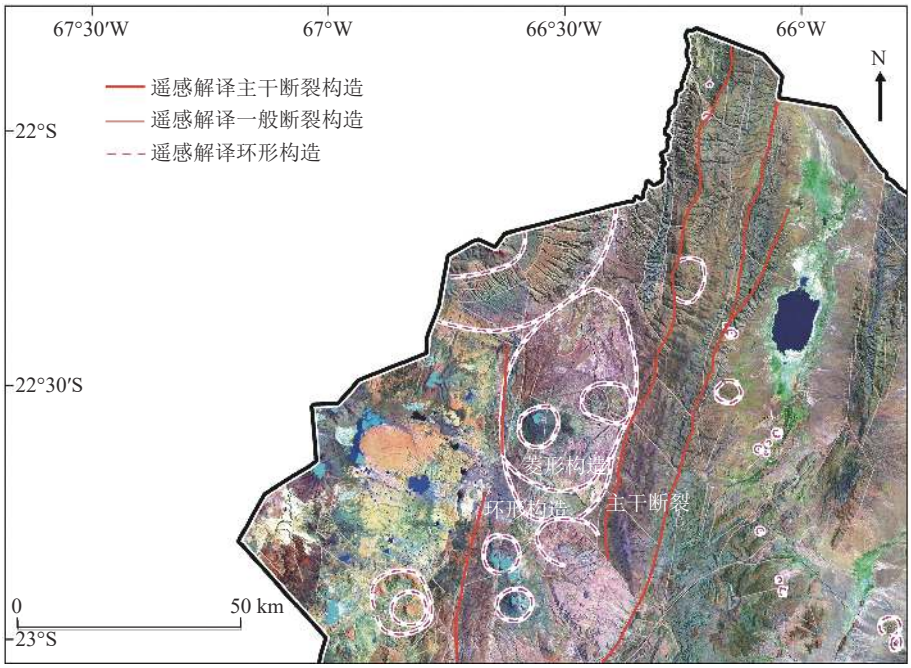

图 3　阿根廷西北部地区线-环-菱形构造遥感解译分布图

Fig. 3　Remote sensing interpretation of annular tectonic distribution map in northwestern Argentina

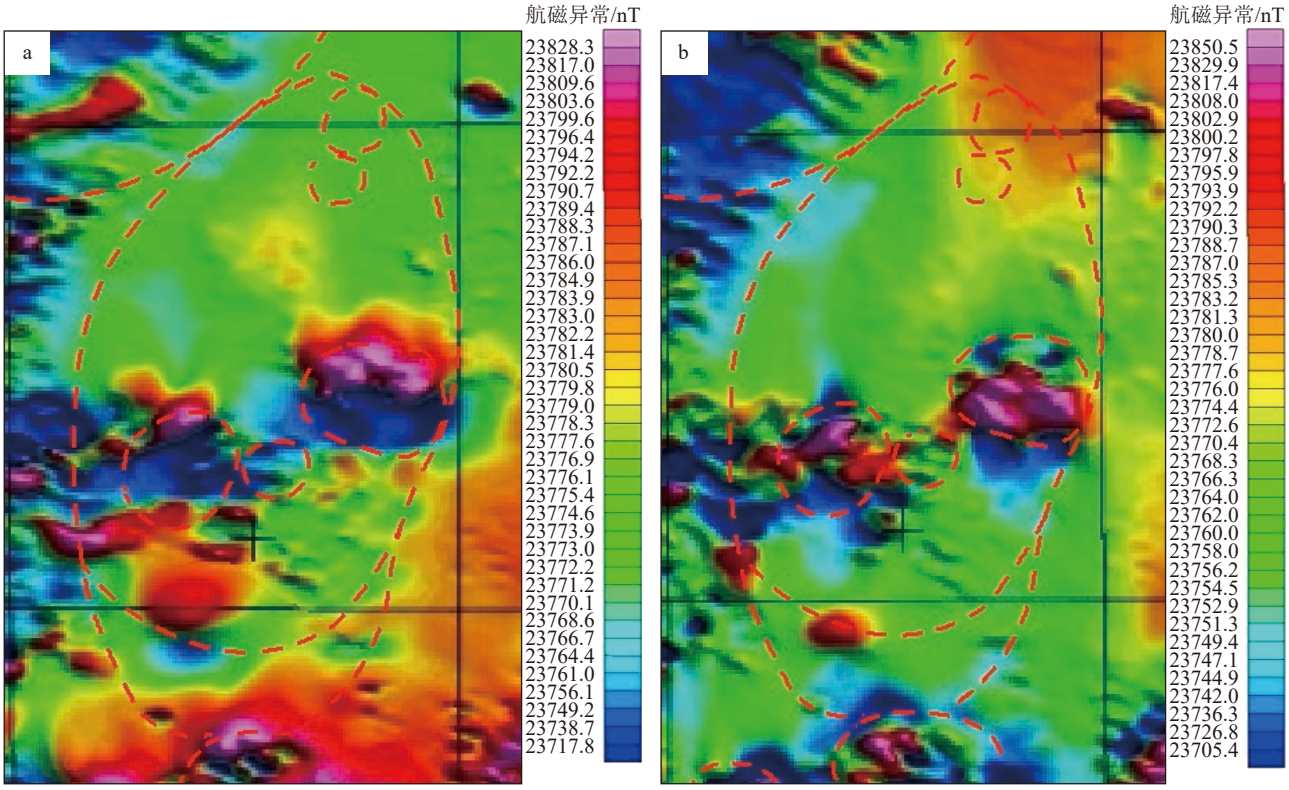

图 4　航磁异常分布图

Fig. 4　Aeromagnetic anomaly map

a—总磁异常分布; b—激发极化异常分布

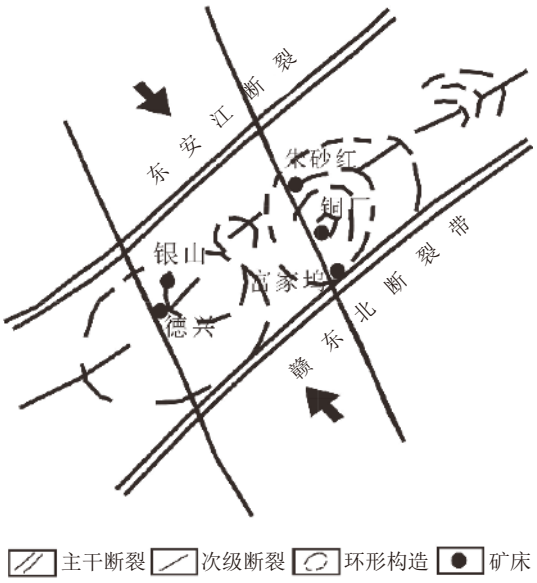

图 5 德兴铜矿线性构造应力分析及线-环构造控矿示意图（周正武等, 1996）

Fig. 5 Tectonic stress analysis and sketch map of line-ring structure ore control in Dexing copper mine

塔斯研究区环形构造和线性构造同时控制成矿时，含矿热液通常沿裂隙贯通；赋矿构造可以是环缘和环内侧部位的环状断裂带、破碎带等次级线性构造，也可以是主干断裂、平行断裂、切线断裂等线性构造与环块构造交会形成的裂隙构造。

米纳皮基塔斯研究区的线–环复合构造型式是斑岩铜矿成矿有利部位的指示标志。这样的线–环形构造组合控矿见于江西德兴斑岩铜矿带，多层状环块由深部相连的小斑岩体群构成，多层状环形影像反映了深部隐伏岩体的特征构造信息，朱砂红、富家坞、铜厂 3 个矿床分别处在三重环的中心构造部位和层环界面部位（图 5）（张广平等, 2014）。

米纳皮基塔斯研究区线–环–菱形构造中的菱块构造是成矿前盖层 (围岩) 构造的反映（周正武等, 1996），在线性构造和环块构造的交切复合部位，线性构造的频繁活动为中酸性岩浆的侵入或深部地质体的上升创造了条件，使上覆岩层上升，而上覆岩层的破裂导致内部产生密集线性构造网络。在遥感图像上显示的菱环构造说明盖层不厚、隐伏岩体埋藏浅，是斑岩铜矿有利地质构造背景的综合反映，因此该地区是寻找斑岩铜矿的有利部位。

3.2 矿物蚀变信息提取

3.2.1 矿物蚀变信息

阿根廷西北部米纳皮基塔斯研究区位于干旱—半干旱区，植被不发育、岩石裸露，是提取遥感矿化蚀变信息的理想场所。围绕斑岩体，环状、环带状色彩异常或多或少有反映，这是斑岩型铜矿的显著遥感标志之一。

米纳皮基塔斯研究区的蚀变地质过程，受到了线–环构造的控制作用，沿大环形构造西侧蚀变较强烈，受右侧主干线性断裂构造控制，呈半环带状围绕环状构造分布（图 7）。在米纳皮基塔斯研究区，与铁

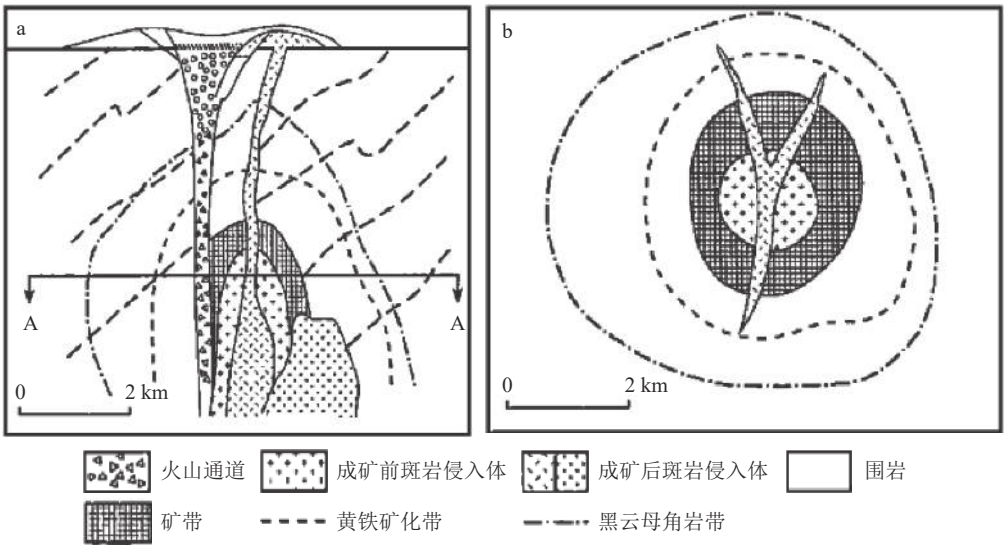

图 6 经典斑岩型铜金矿床模式

Fig. 6 Model of classic porphyry copper-gold deposits

a—纵剖面;b—A 横剖面

离子有关的蚀变矿物和与羟基有关的蚀变异常明显，具有蚀变分带的特点，矿床常赋存在蚀变信息环带内。

从阿根廷地质调查局网站下载收集的米纳皮基塔斯地区已知矿床/点分布数据显示，在蚀变强烈分布区范围，有已知矿床/点的分布(图 7；表 2)。区域内分布有金矿、铜矿、铅锌矿和矽卡岩锡矿，赋矿围岩以早奥陶世、上新世、渐新世和全新世沉积岩为主，在破碎带和花岗斑岩、火山岩内亦有产出，区域内各个矿床/点的地质情况如表 2 所示，具有显著的成矿意义。由于研究区地质勘探程度低，该地区针对斑岩型矿床具有进一步勘探的潜力。

研究区成矿带典型斑岩型矿床特征(表 1)、区域地质图信息(图 2)及已知矿床/点的地质信息(表 2)显示，米纳皮基塔斯研究区内的蚀变主要为钾化、黄铜矿化、黄铁矿化、青磐岩化、高岭土化等；蚀变主要发育在花岗斑岩(含花岗斑岩角砾)、熔结凝灰岩、砾岩、砂岩等沉积围岩及构造破碎带(角砾岩)中。

3.2.2　蚀变成矿意义

在斑岩型铜矿勘查中，认识其蚀变程度和热液矿化中心极为重要(杨日红等，2015)。在米纳皮基塔斯研究区定位热液矿化中心，圈定热液矿化蚀变带，进而确定成矿作用的规模和强度。

Cu 是亲铁元素，在铁的氧化物或氢氧化物中都会有铜伴生，斑岩体外缘通常发育角岩化并伴有大面积的黄铁矿化，黄铁矿经氧化淋滤作用成褐铁矿，铁染异常常分布在斑岩体的接触带上，对斑岩铜金找矿具有非常重要的意义(张红红等，2013；高帅等，

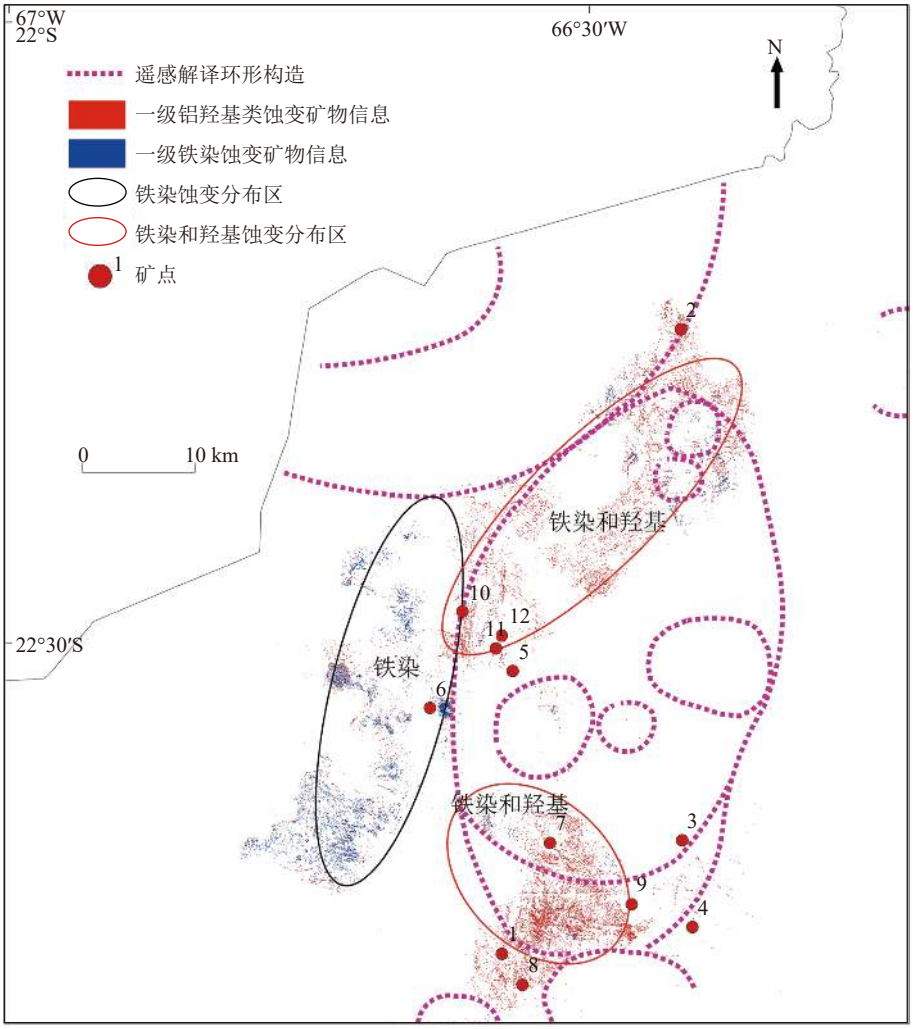

图 7　研究区一级强蚀变分布图及矿点分布图

Fig. 7　Distribution map of the first-level intense alteration and mine in the study area

表 2 已知矿床/点地质情况

Table 2 The geology of the present deposit (occurrence)

序号	矿床/点名称	矿种	赋矿围岩	年代	矿石矿物/
1	CAMPANA-RIO	铜-硫	迪欧玛雅组砾岩、砂岩等沉积岩	下中新世	硫化物、黄铜矿
2	PENASQUINA	锡-银	贝纳恩纳科罗娜达组砾岩、砂岩等沉积岩	渐新世	矽卡岩锡石
3	CHIRICO-YA	金	阿科德组沉积岩	早奥陶世	自然金
4	SAN MARCOS	金-锡	迪欧玛雅组沉积岩和熔结火山岩	上中新世	矽卡岩锡石
5	SANTA BARBARA	锡	英安斑岩和熔结凝灰岩	上新世	矽卡岩锡石
6	CONSTAN ClA	锡	破碎带和脉状英安斑岩	上新世	矽卡岩锡石
7	GRUPO MINERO PIRQUITAS	金-银-锡	阿科德组沉积岩	早奥陶世	自然金、方铅矿和矽卡岩锡石
8	EDlTH	硼	迪欧玛雅组	全新世	钠钙石
9	PIRCAS	金-锡	砾岩、砂岩等沉积岩	全新世	矽卡岩锡石
10	QDA. DELGADA CHICA	钡-铅-锌	阿科德组砾岩、砂岩等沉积岩	早奥陶世	重晶石、闪石和方铅矿
11	CAUCANIA	锡	英安斑岩和熔结凝灰岩	上新世	矽卡岩锡石
12	MIYUYO I-ll-lll	金-锡	阿科德组沉积岩	早奥陶世	锑矿

2017; 侯照房等, 2021)。斑岩型铜金矿具有蚀变分带特征, 由斑岩体内向外, 分别为石英钾长石化 (钼−铜矿床、铜−金矿床)、石英绢云母化 (铜−钼矿床) 和伊利石水白云母化或青磐岩化 (铅−锌−银−金床) 等。理想的蚀变分带由内向外依次为含有大量 Fe^{3+} 矿物 (如褐铁矿、赤铁矿等) 蚀变的钾长石化, 含 Fe^{3+} 和 OH^- 离子的绢英岩化, 含 OH^- 离子基团的绿泥石、伊利石、高岭石、地开石等矿物蚀变的青磐岩化, 绿泥石化(Bierlein et al.,2006; 李得林等, 2015; 刘宏丽等, 2016; 杨晓勇等, 2021)。越是靠近铁染的区域, 越可能是热液矿化中心。

但是, 由于米纳皮基塔斯研究区地表受到差异风化剥蚀等外动力地质作用的影响, 图 7 提取的地表分布的蚀变信息中心未必是斑岩矿蚀变分带的中心。结合 1∶10 万地质图及遥感构造解译, 米纳皮基塔斯研究区的热液矿化蚀变带中心可能位于环形构造带接触之上, 地表高强度 OH^- 离子蚀变带可能叠加于中心区域的 Fe^{3+} 蚀变分布带之上。

Fe^{3+}的蚀变强度, 可由区域内地球化学分析结果得出(图 8)。将提取的遥感蚀变信息与该区域水系沉积物化探异常对比, 提取的蚀变信息与金、铜的异常系数较高的区域都有较好的对应关系; 沿大环形构造的接触带位置分布有 Cu 和 Au 异常区域(图 8)。整个环形构造区域 Cu 的平均品位为 20×10^{-6} 左右, Au 的平均品位为 2.5×10^{-9} 左右。在环形构造的南北两端位置, 高羟基离子蚀变区域 Cu 品位极值最高达到 54×10^{-6}, Au 品位极值最高达到 8.4×10^{-9}。在环形构造区的东侧, Cu 和 Au 也出现了异常区域, 但是在这些区域未出现极值或较高异常值的情况, 可能是由地表差异风化剥蚀导致的。在这 2 个羟基强烈蚀变的区域, 地表之下可能下伏有更强烈的铁染及含矿岩体, 具有良好的找矿潜力。

4 遥感地质找矿模型建立与找矿远景区优选

根据阿根廷西北部典型斑岩铜钼矿成矿模型(表 1), 区域内赋矿岩体为渐新世、中新世花岗斑岩或闪长玢岩; 结合米纳皮基塔斯研究区的成矿地质背景条件及区域内线性-环形-菱形构造成矿条件, 认为米纳皮基塔斯研究区斑岩铜矿成矿与德兴铜矿成矿模式(图 5)具有相似性, 德兴铜矿的成矿模式可指导该地区的找矿调查。参考德兴铜矿成矿模式, 以遥感技术为手段, 优选在线性-环形-菱形构造密集相交相切部位出现强蚀变信息的区域, 建立米纳皮基塔斯研究区的斑岩型铜金矿遥感地质找矿模型(表 3), 圈划找矿远景区(图 9)。

Z1 找矿远景区: 区域内出露的岩性以奥陶系阿科德组和全新统迪欧玛雅组沉积岩及英安质火山碎屑熔岩为主, 位于沉积岩与岩浆岩的接触带位置; 区域内环形构造轴线方向与大断裂走向一致, 该区域位于环形构造末端侧位置, NW 横向次级断裂发育, 线–环–菱形构造特征明显, 为张性空间位置, 容矿构造条件优越; 铝羟基蚀变与铁染蚀变相互叠加, 为区

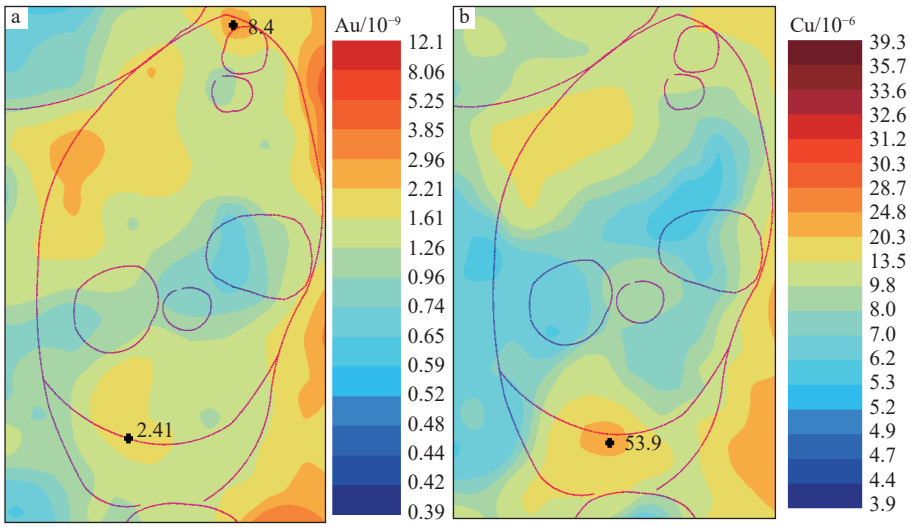

图 8　化探异常分布图

Fig. 8　The distribution map of geochemical anomalies

a—Au 异常; b—Cu 异常

域内蚀变最强烈最集中的区域; 区域内 Au、Cu 异常明显, 尤其是 Cu 的极值达到了 54×10^{-6}; 区域内还分布了金–铜–硫–锡等矿种的已知矿床/点。

Z2 找矿远景区: 区域内出露的岩性以奥陶系阿科德组沉积岩与英安质火山碎屑熔岩为主, 位于沉积岩与岩浆岩的接触带位置; 该区域位于环形构造侧端, 为大环形与小环形的叠加位置; 铝羟基和铁染蚀变为一级强蚀变区域, 在区域内出露范围较少但非常集中; 区域内地球化学显示 Au、Cu 异常; 区域内还分布了金–铅–锌–锡等矿种的已知矿床/点。

表 3　研究区斑岩型铜金矿遥感地质找矿模型

Table 3　Remote sensing geological prospecting models of porphyry copper-gold deposits in the study area

斑岩体遥感影像	色调	遥感影像上斑岩体裸露面呈淡铁红色、红褐色
	纹理	以粗条纹为主, 表面有粗糙斑点, 岩石裸露面相对光滑, 山脊较凌乱, 坡体上冲沟短粗, 较发育。岩石中构造发育, 岩石两侧有深铁红色, 表面较光滑的岩石出露
构造条件	主干断裂	主干断裂为NNE向及SN向, 控制区域成矿构造条件(图3、图5)
	次级横断裂	赋矿构造主要为NNE向及SN向大断裂两侧的次级横断裂(图3、图5)
	主干-次级断裂构造	着重考虑NNE向、NE向主干断裂与NW向横断裂次生断层断裂交会处的锐角区域(图3、图5)
	环形构造	环(带)边、环–环重叠带、环线交会处, 构造形式与成矿关系最密切, 是大型矿床赋存的有利指示标志(图3、图5)
	菱形构造	优选盖层不厚、隐伏岩体埋藏浅有菱环构造的区域(图3)
蚀变异常	铁染	对Aster数据1、2、3、4波段采用基于目标特征的PCA法提取铁染异常信息, 优选铁染异常明显区域(图7)
	铝羟基	对Aster数据1、4、6、7波段采用基于目标特征的PCA法提取泥化和青磐岩化异常信息, 优选羟基异常明显区域(图7)
	蚀变分带特征	考虑斑岩体蚀变异常信息的分带现象, 铁染位于羟基的内层, 越是靠近铁染的区域, 越可能是热液矿化中心(图7)
	地表差异风化剥蚀	地表差异风化导致地表蚀变圈层与典型模型有差异(图7)
构造-蚀变复合控矿	蚀变异常分布受主干线性构造控制, 呈半圆弧状, 在环形构造西侧蚀变强烈(图3、图7)	
已知矿床/点	考虑已知矿床/点的分布(图7)	

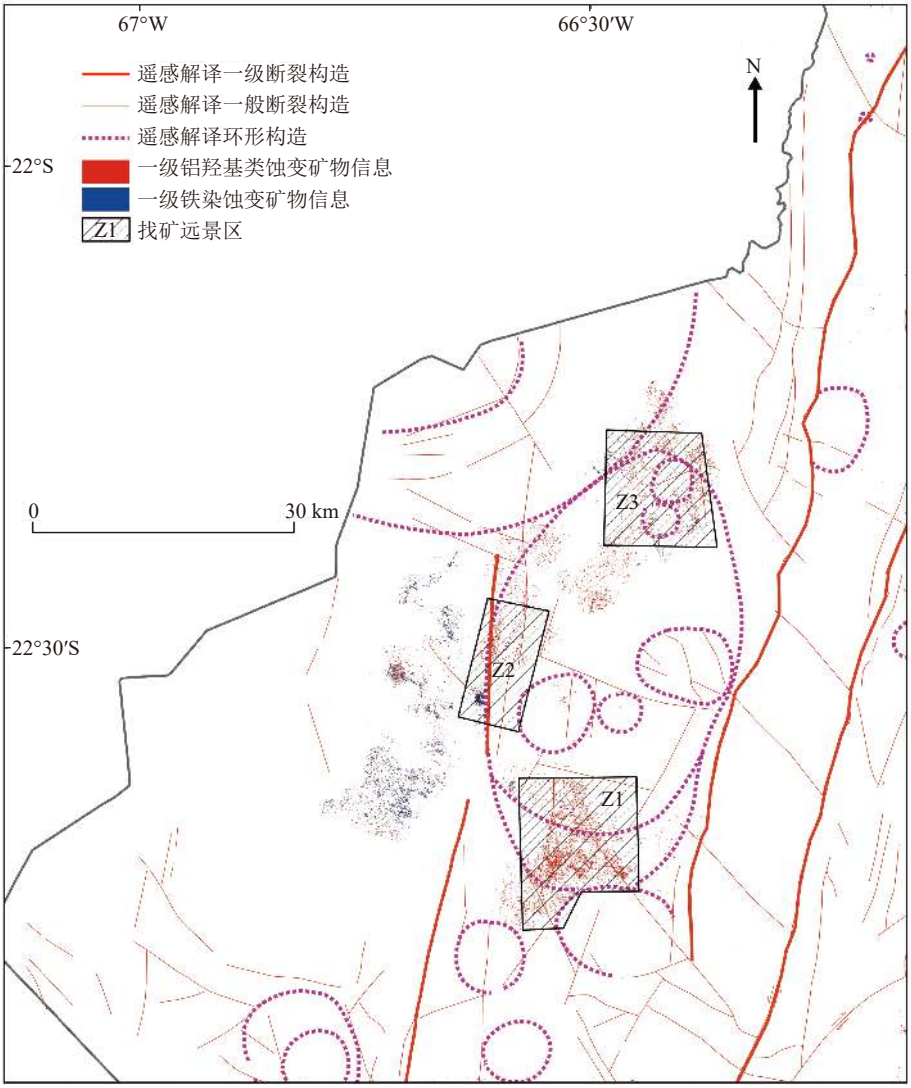

图 9 找矿远景区分布图

Fig. 9 Distribution map of preferred target areas

Z3 找矿远景区：区域内出露的岩性以渐新统贝纳恩纳科罗娜达组沉积岩为主,位于沉积岩与岩浆岩的接触带位置附近；区域内小环形构造较发育，岩浆活动强烈，该区域位于环形构造顶侧位置，大环构造的张性空间位置，小环形构造叠加，容矿构造条件优越，成矿构造条件优越；区域附近出露有英安斑岩体和英安斑岩角砾岩；区域内铝羟基蚀变为一级强蚀变，分布范围广且集中；区域内 Au 异常明显，极值最高达到了 8.4×10^{-9}。

5 结 论

（1）以 ETM+卫星影像图为底图，进行了与斑岩矿成矿相关的线–环–菱形遥感构造解译；以 Aster 遥感影像为数据源，应用成像光谱法和主成分分析法提取矿化蚀变异常信息；再结合成矿地质背景建立米纳皮基塔斯研究区找矿模型，该方法在阿根廷西北部实际的找矿工作是行之有效的。

（2）在米纳皮基塔斯研究区以遥感地质技术手段，结合区域地质成矿模型，圈定了 3 个具有找矿潜力的远景区，其成矿模式可能与德兴铜矿一致。其中 Z1 和 Z2 已勘探出部分的矿床/点，但勘探程度低，具有进一步勘探的潜力。Z3 目前为空白区域，为今后的重点预测区域。

（3）米纳皮基塔斯研究区地表出露的岩浆岩以火山岩为主，出露的安山玢岩和花岗斑岩体较少，遥感分析揭示在地下具有大量隐伏斑岩体存在的可

能,深部也可能含矿。该地区的斑岩型矿床以深部找矿为方向,但需要进行深入的实地调查。

参考文献

Ford A, Hagenabb S G, Fogliata A S, et al. 2015. Porphyry, epithermal, and orogenic gold prospectivity of Argentina[J]. Ore Geology Reviews, 71: 655−672.

Proffett J M. 2003. Geology of the Bajo de la Alumbrera porphyry copper−gold deposit, Argentina[J]. Economic Geology, 12: 1535−1574.

Sillitoe R H, Devine F A M, Sanguinetti M I, et al. 2001. Geology of the Josemaría porphyry copper−gold deposit, Argentina: Formation, exhumation, and burial in two million years[J]. Economic Geology, 120(3/4): 407−426.

BierleinF P, Stein H J, Coira B, et al. 2016. Timing of gold and crustal evolution of the Palaeozoic south central Andes, NW Argentina−implications for the endowment of orogenic belts[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 245: 702−721.

陈玉明, 杨汇群. 2015. 阿根廷的矿产资源和矿业开发[J]. 国土资源情报, (2): 22−27.

段俊斌, 彭鹏, 杨智, 等. 2019. 基于 ASTER 数据的多金属成矿有利区预测[J]. 国土资源遥感, 31(3): 193−200.

范三伏, 徐桂林, 张计东, 等. 2011. 西藏阿里地区哥布弄巴铁及多金属矿床成矿地质特征[J]. 河北地质, 41(1): 102−105.

高帅, 曾庆栋, 于昌明, 等. 2017. 遥感及综合物探方法用于山东招远南部隐伏成矿侵入体的空间定位[J]. 黄金科学技术, 42(3): 147−159.

郭晓宇. 2018. 斑岩-浅成低温热液成矿系统基本特征与研究进展[J]. 世界有色金属, 8: 256−259.

侯照房, 王安迪, 王昭, 等. 2021. 安徽庐江黄屯铜金矿床原生晕特征及矿床成因[J]. 华东地质, 42(3): 339−349.

李根军, 姜琦刚, 杨佳佳, 等. 2011. 基于遥感控矿信息的成矿环境分析——以克夫拉达布兰卡斑岩铜矿为例[J]. 科学技术与工程, (4): 11−17.

李得林, 李宗仁, 张兴, 等. 2015. 高分数据在造山带复理石岩性及构造中的应用[J]. 地理空间信息, (2): 12−15.

刘凤, 胡东滨. 2009. 国外矿产资源开发选区风险评价研究[D]. 中南大学硕士学位论文: 126−128.

刘宏丽, 付长亮, 杨日红. 2016. 遥感示矿信息在阿根廷西北部成矿预测的应用[J]. 遥感信息, 21(2): 155−162.

卢民杰, 朱小三, 郭维民. 2016. 南美安第斯地区成矿区带划分探讨[J], 矿床地质, 35(5): 1073−1083.

毛晓长, 刘文灿, 杜建国, 等. 2005. ETM+和 ASTER 数据在遥感矿化蚀变信息提取应用中的比较——以安徽铜陵凤凰山矿田为例[J]. 现代地质, 19(2): 309−314.

聂凤军, 江思宏, 赵省民. 2000. 斑岩型铜金矿床研究新进展[J]. 内蒙古地质, 95(2): 1−11.

瞿泓滢, 裴荣富, 梅燕雄, 等. 2013. 国外超大型—特大型铜矿床成矿特征[J]. 中国地质, (2): 371−390.

瑞刚, 陈谷宁, 张晓, 等. 2013. 安妥岭斑岩型钼矿地质特征及成矿模式[J]. 现代矿业, 9: 7−20.

王润生, 熊盛青, 聂洪峰, 等. 2011. 遥感地质勘查技术与应用研究[J]. 地质学报, (11): 1699−1743.

杨日红, 靳娟, 陈秀法. 2015. 秘鲁中南部奥马斯地区铜多金属遥感找矿预测研究[J]. 遥感技术与应用, 30(1): 33−42.

杨晓勇, 蔡逸涛, 徐敏成. 2021. 西环太平洋菲律宾群岛中酸性岩浆活动与斑岩型铜金成矿: 兼论埃达克岩与斑岩型铜金成矿[J]. 华东地质, 42(3): 247−259.

张潮, 陈玉明, 陈熹峰, 等. 2017. 阿根廷金矿床时空分布规律[J]. 地质通报, 12: 2154−2163.

张广平, 沈建海, 李假广, 等. 2014. TM 遥感影像岩矿信息提取及构造解译在地质勘查中的应用[J]. 新疆有色金属, (1): 2−7.

张红红, 李任时, 林楠, 等. 2013. 新疆喀什地区遥感地质信息提取[J]. 吉林地质, (2): 7−10.

张瑞江. 2010. 基于遥感技术的成矿预测方法和程序研究[J]. 国土资源遥感, 22(3): 58−64.

张婷婷.2014.西藏冈底斯东段甲玛式斑岩-矽卡岩型铜多金属矿定量预测[D].中国地质科学院博士学位论文:68−75.

张玉君, 曾朝铭. 2012. 西藏冈底斯地区斑岩铜矿识别的最佳多光谱遥感异常判据研究[J]. 矿床地质, 31(4): 671−698.

赵福岳. 2000. 矿源场-成矿节-遥感信息异常找矿模式法[J]. 国土资源遥感, 12(4): 28−33,49.

赵文津. 2007. 大型斑岩铜矿成矿的深部构造岩浆活动背景[J]. 中国地质, (2): 179−205.

周正武, 张建枢, 王卫东. 1996. 大型斑岩铜矿的遥感信息探讨[J]. 国土资源遥感, (2): 10−20.