

doi: 10.11720/wtyht.2019.1436

杜玉龙,方维萱.玻利维亚盆山原镶嵌构造区特殊景观区沟系次生晕—遥感—构造岩相学综合评价技术组合研发与应用效果[J].物探与化探, 2019, 43(5): 932-947. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1436>

Du Y L, Fang W X. Research, development and application effect of comprehensive evaluation technique of valley system secondary halo-remote sensing-tectonic lithofacies in basin-orogen-plateau inlaid structure and special landscape zone, Bolivia [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(5): 932-947. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1436>

玻利维亚盆山原镶嵌构造区特殊景观区 沟系次生晕—遥感—构造岩相学综合评价 技术组合研发与应用效果

杜玉龙^{1,2}, 方维萱³

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650224; 2. 中色地科矿产勘查股份有限公司, 北京 100012; 3. 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012)

摘要: 在玻利维亚 Tupiza、Cuprita 盆山原镶嵌构造区特殊景观区, 开展沟系次生晕测量—遥感—构造岩相学解译填图的综合方法试验研究和推广应用, 结果显示: ①遥感—构造岩相学解译填图单元, 作为构造岩相学填图单位和沟系次生晕测量的工作底图, 能快速识别工作区地形地物、地质和景观特征等, 提高采样和综合地质填图的有效点率。②沟系次生晕采样层位以 B 层为主, 采样粗加工粒度以 -10~+60 目效果最佳。③方法技术应用效果良好, 显示该方法技术在安第斯盆山原镶嵌构造区特殊景观下为一种经济、高效、快速的综合评价技术方法组合, 为中资企业境外投资风险控制提供有效勘查途径。

关键词: 沟系次生晕; 遥感—构造岩相学解译(填图); 盆山原镶嵌构造; 玻利维亚高原特殊景观区

中图分类号: P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2019)05-0932-16



0 引言

近年来, 随着“一带一路”经济带建设、“亚洲基础设施投资银行”设立等国家“走出去”战略的推进, 越来越多企业跨出国门, 在境外开展资源勘查、矿业投资和开发活动。安第斯地区是全球重要的成矿省, 因其矿产资源极其丰富而成为研究、投资热点地区之一。然而, 安第斯地区复杂的地质背景、多变的景观条件和恶劣的自然环境, 大大延长了勘查周期, 增加了投资成本和风险。因此, 如何选择一种既经济又高效快速的综合评价方法技术体系, 成为了笔者团队关注的焦点和技术研发难点。

在勘查地球化学上, 新技术研发主要集中在深

度研发和广度综合方法应用上^[1-2]。近年来, 勘查地球化学更深度的研究和研发已进入到纳米水平^[3-4]、分子水平和全球尺度地球化学研究^[5-6], 未来地球化学发展还将与人类健康、生态资源环境、农业、国防更紧密结合在一起。地电化学和勘查植物地球化学^[7-21]等也得到长足发展^[22-23]和取得了显著应用效果^[24-30]。勘查地球化学广度综合方法的研发和应用越来越受到关注, 已有学者开始探索将遥感、物探与化探相结合的综合方法试验和实践应用^[31-34]。沟系次生晕(也称沟系土壤测量)方法在 20 世纪 70~80 年代得到充分发展^[38-39], 近年来在国内各种景观区和多金属矿区均得到广泛应用^[40-50], 其在找矿过程中起到了积极作用, 充分显示了沟系次生晕测量方法在评价分散流异常中具有

收稿日期: 2018-11-23; 修回日期: 2019-06-26

基金项目: 国土资源部行业性科研基金项目(201511016-1)、科技部转制科研院所技术开发研究专项(2014EG115019)、云南省矿产资源评价工程实验室(2010)、云南省地质过程与矿产资源创新团队(2012)和中战会(北京)矿业科技有限公司玻利维亚勘查项目联合资助。

作者简介: 杜玉龙(1984-), 男, 高级工程师, 主要从事境外矿产勘查工作。Email: sunnyman0511@163.com

通讯作者: 方维萱(1961-), 男, 从事矿产普查与矿山环境研究工作, 博士研究生导师。Email: 569026971@qq.com

快速、经济、高效、方法简便等优点。

随着中资企业走出国门,国内的地球化学勘查技术在老挝热带雨林景观区^[51-53]、缅甸热带风化壳强发育景观区^[54]和安第斯地区的秘鲁西海岸、智利中北部、阿根廷北部、玻利维亚等^[55-72]干旱荒漠区、高寒区得到大量试验和实践,甚至有学者对智利尾矿中元素富集规律等也进行了地球化学测量和研究^[73]。以上这些地球化学测量和试验研究工作均取得了一定效果,但也存在问题和不足,如勘查植物地球化学在南美地区虽然取得了一定效果,但与传统土壤测量相比较,其技术更为复杂,投入大、周期长,大面积普遍应用较为困难;又如,王明国等^[58]在智利塔拉帕卡土壤测量实践中指出,1:5万土壤测量对干旱荒漠景观区异常的控制作用有限,对于规模较小的矿体,宜采用更大比例尺的土壤测量。由此看来,笔者进行的沟系次生晕、遥感—构造岩相学解译(填图)组合方法研发和快速评价是亟待研究的热点方向。

本次试验研究区处于与我国新疆萨热克相类似的盆(山间盆地)—山(造山带)—原(高原)镶嵌构造区^[74],即安第斯造山带—山间盆地—玻利维亚 Altiplano(阿尔蒂普兰诺)高原镶嵌构造区,其地质背景、景观地球化学复杂,生态环境脆弱,自然环境恶劣,这在全球都是非常特殊的,也明显不同于国内各地球化学景观区,与安第斯其他国家已开展各类地球化学试验、应用的地区也有明显差异。所以,虽然沟系次生晕测量、地电化学、勘查植物地球化学以及其他地球化学方法在国内各类景观区与不同矿种找矿过程中均取得显著效果,在秘鲁、智利、阿根廷、玻利维亚等也进行了探索研究和初步应用,但是,在玻利维亚盆山原镶嵌构造区特殊景观区仍然需要进行试验研究和组合方法研发。本次注重方法技术组合研发,采用了沟系次生晕+遥感—构造岩相学解译(填图)相结合的方法组合,既是由单一方法到多方法组合的创新,也符合勘查地球化学广度综合研发和未来发展需求,又有绿色、经济、高效的综合优势。先在玻利维亚南部 Tupiza(图披萨)铜矿进行试验研究和同步应用,后在北部 Cuprita(古布利达)铜矿推广应用,旨在为复杂地质背景区、景观地球化学特殊、生态资源环境脆弱和自然环境恶劣的地区探索一种绿色、经济、高效、快速的综合评价方法,为中资企业在境外进行战略选区提供技术方法支撑,也为境外投资风险控制提供有效的勘查途径。

1 组合技术方法研发难点、创新点及工作思路

1.1 研发难点

玻利维亚处于全球第二高和仍在活动的中安第斯构造高原^[75]中心地带,是全球著名的大火成岩省与成矿集中区^[76-77],也是盆山原镶嵌构造区和生态环境脆弱区。本次试验研究区处于东科迪勒拉(Tupiza 试验研究区)、Altiplano 高原(Cuprita 推广应用区)等盆山原镶嵌构造区核心地带,其地质背景、景观地球化学复杂,生态环境脆弱,自然环境恶劣。正因如此,这给地质勘查施工带来困难,也是单一的沟系次生晕测量的技术难点,尤其对沟系次生晕采样点位布置、采样深度等提出了更高的挑战。该盆山原镶嵌构造区特殊性主要体现在:①为高寒多变景观区,地形地貌复杂,常出现孤立山峰、山脉、火山链、平坦洼地、开阔冲积区、深切沟谷在此镶嵌分布,往往几公里平距内高差可达千米。区内平均海拔3500 m以上,高海拔寒冷和缺氧的环境是地质工作人员面临的安全挑战,快速评价方法的研发应用显得极有价值。②为安第斯生态资源环境脆弱区,资源极其丰富,但干旱—半干旱、高海拔、强剥蚀环境导致生态环境更为脆弱,资源开发与生态保护矛盾突出,如 Uyuni(乌尤尼)盐湖始终未允许大规模开发,许多地段分布有野生驼羊等珍惜动植物。绿色、高效的评价方法研发极有优势。③为表生景观地球化学特殊区,复杂的地质、气候、生物等多因素耦合,形成了广泛发育的钙积层、膏岩层、盐晕和风化壳,影响元素表生富集和迁移,这些特殊景观的快速识别,对合理布样、采样至关重要。玻利维亚陆内盆山原镶嵌构造区这种高寒多变景观、生态资源环境脆弱性和表生景观地球化学特殊性显著不同于国内和安第斯其他国家。从智利海岸带→玻利维亚内陆,从秘鲁→玻利维亚→阿根廷,安第斯带景观地球化学在经度与纬度上均具有大幅度激变。本次试验区无论是气候、生态资源环境、土壤发育程度、植被类型、生物种类、水系分布、地形地貌景观等均与智利、秘鲁、阿根廷这些安第斯地区有显著差异。所以,虽然沟系次生晕方法在国内各类景观区与不同矿种找矿过程中均取得显著效果,在秘鲁—智利海岸干旱—半干旱热带荒漠区、阿根廷西北部高寒山区等也进行了探索研究和初步应用,但是玻利维亚盆山原镶嵌构造区特殊景观条件仍然需要进行试验研究和组合方法研发。

如前面所述,前人在安第斯地区开展一些地球化学测量和研究工作,具有以下共同特点,也存在一些未解决的科学技术问题:① 工作区景观地球化学相似,多为安第斯海岸山带干旱—半干旱热带荒漠景观区;② 为中低山丘陵—中高山区,海拔一般小于 3 000 m,多个研究区海拔在 1 000~2 000 m;③ 原生晕、土壤测量均采用的是正规网,这对地形破碎、起伏大、深切割地区野外采样工作困难极大,可能会造成采样有效点率较低;④ 对采样粒度和层位进行了试验,但对于生态土壤剖面详细的研究未见报道,尤其是采样深度、介质;⑤ 均为单一的一种地球化学测量方法应用,对于组合方法技术体系研究尚属空白。国内在综合技术方法方面,探讨了化探与遥感、地球物理相结合的方法^[31-32,35],但都是先开展传统的土壤测量、水系沉积物测量、岩石测量等化探工作,后期将化探异常结果尝试与遥感图像融合或与地球物理数据叠加,进行综合解释,圈定或预测成矿有利地段。由此看出,化探、遥感—构造岩相学解译(填图)组合方法研发和快速评价是亟待研究的热点方向,也符合盆山原镶嵌构造区特殊景观区勘查需求。

1.2 研发创新点及工作思路

本次注重方法技术组合研发,是由单一方法到采用沟系次生晕—遥感—构造岩相学解译(填图)的综合方法组合的创新,与以往明显不同,工作思路与流程为:① 遥感解译是沟系次生晕测量和构造岩相学填图的基础与工作底图,先期开展 1:5 万 ETM 遥感影像解译,了解区域景观全貌、构造格架、地展布等,其次开展 1:1 万真彩色高分辨率遥感影像解译,快速识别地形地物、水系分布特征,合理布置采样点位,以提高沟系次生晕采样有效点率。② 遥感解译圈定景观地球化学单元,研究不同景观下生态土壤剖面垂向结构,选择典型生态土壤剖面开展沟系次生晕采样粗加工粒级、深度和采样层位试验。③ 遥感解译能辅助建立构造岩相学填图单元,也是地质填图单元,如 Tupiza 矿区火山岩构造岩相学独立填图单元可划分为次火山侵入相辉绿辉长岩、火山爆发相安山质火山角砾岩、火山岩喷溢相杏仁状橄榄玄武岩、火山碎屑流相等,建立了含铜褪色化—黏土化(高岭石化、绿泥石化)—硅化蚀变岩相为找矿预测的构造岩相学蚀变岩相标志。这为后期化探异常的综合解译、快速预测成矿有利地段奠定了基础。④ 沟系次生晕—遥感—构造岩相学填图组合技术方法,具有将化探和遥感、地质信息高度融合的特点,有助于结合地质背景、遥感异常对化探异常进

行解释、查证和评价,提高找矿预测的可靠性。⑤ 本次先选择在玻利维亚 Tupiza 铜矿开展沟系次生晕—遥感—构造岩相学填图组合技术方法研发、试验研究和同步应用;其次,在 Cuprita 铜矿推广应用,进一步验证其应用效果和评价在安第斯盆山原镶嵌构造区特殊景观区的适用性。

2 研究区景观地质地球化学

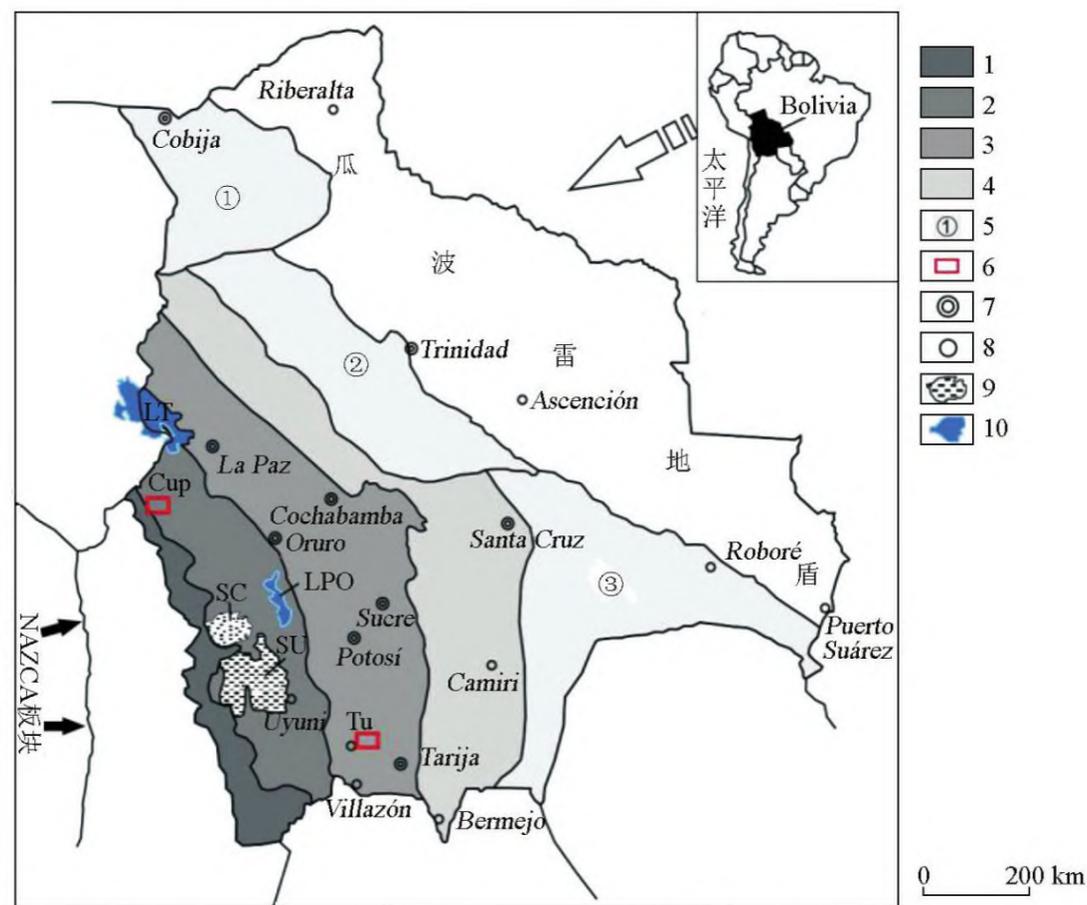
2.1 地质—遥感—构造岩相学特征

玻利维亚处于弧后环境的中安第斯^[78],是中—新生代火山—岩浆活动最活跃和成矿作用最强烈的区域^[76-77,79-84]。晚三叠世以来,由于 Nazca 板块不断向南美板块碰撞—俯冲,造成了岩浆弧向东逐渐迁移,形成了玻利维亚从西到东构造与成矿的明显分带(图 1),这也是玻利维亚盆山原镶嵌构造区形成的内动力因素。本次方法研发和应用的 Tupiza 与 Cuprita 地区更是处于玻利维亚盆山原镶嵌构造区的核心地带,具有复杂的地表生态环境、景观演化系统和明显的遥感—构造岩相学特征。先期开展遥感—构造岩相学解译,对后期沟系次生晕方法试验研究剖面选择、野外采样、异常综合解译和预测成矿有利地段起到重要作用。

2.1.1 试验研究区(Tupiza)地质—遥感—构造岩相学特征

Tupiza 矿区位于 Potosí(波多西)省南部 Tupiza 地区,处于东科迪勒拉 Zn-Pb(Ag-Au-Cu)多金属成矿带西部边缘,东为海拔 2 500~3 500 m 的次安第斯山带,向西进入平均海拔 4 000 m 的 Altiplano 高原区(图 1)。遥感—构造岩相学特征明显,在 1:5 万 ETM 遥感影像图上,盆地影像呈现光滑无凸起,整体色调为黄绿色、黄褐色、土黄色,显示具有较好的覆盖,局部耕地等人为扰动频繁区域呈现褐红色、紫红色色斑,线性构造不发育,可见到浑圆状孤立山包与平坦开阔的塬面镶嵌分布;而东科迪勒拉山脉遥感影像凸起明显,色调以淡蓝色、蓝灰色为主,清晰可见近 S-N 向构造线发育,通常沟谷为宽缓向斜核部,可见到明显的三角断面。

Tupiza 铜矿位于 Nazareno 中—新生代陆相红层盆地内,该盆地向南延伸直到阿根廷。下—中奥陶统(O_{1ci}、O_{1ob}、O_{2at}组)变形与浅变质的泥岩建造构成盆地基底构造层,阿瓜依都柔组(O_{2at})硅化菱铁矿化砂岩是区域上造山型铅锌银赋矿层位,遥感—构造岩相学填图单元特征为影像呈灰蓝色、稍带灰绿色、阴坡灰黑色色斑,地形切割较深,发育树枝状



1—西科迪勒拉山脉,平均海拔>4 500 m,现代安第斯主岩浆弧标志;2—Altiplano 高原,平均海拔约 4 000 m,由一系列山间盆地相连组成,为锡多金属成矿带;3—东科迪勒拉,为金锑、铅锌成矿带;4—次安第斯带(逆冲断褶带);5—克拉通平原(①—马德雷得蒂奥斯(Madre de Dios)平原,②—贝尼(Beni)平原,③—查克(Chaco)平原);6—研究区(Tu 为南部 Tupiza 铜矿试验研究及同步应用矿区,Cup 为北部 Cuprita 铜矿推广应用区);7—省会城市;8—其他城市;9—高原盐湖(SC 为 Coipasa 盐湖;SU 为 Uyuni 盐湖);10—高原湖泊(LT 为迪迪卡卡湖;LPO 为波波湖)

1—Western Cordillera, average altitude of more than 4 500 m, sign of modern Andean main magma arc; 2—Altiplano plateau, average altitude of 4 000 m, composed of a number of inter-mountain basins, belongs to Tin polymetallic ore belt; 3—Eastern Cordillera, Au-Sb and Pb-Zn belt; 4—Sub-Andean zone (thrust fold belt); 5—Craton (①Madre de Dios plains, ②Beni plains, ③Chaco plains); 6—study area(Tu is the experimental area, Cup is application area); 7—provincial Capital; 8—other city; 9—plateau salt lake (SC is Coipasa salt lake, SU is Uyuni salt lake); 10—plateau lake (LT is Titicaca lake, LPO is Poopó lake)

图 1 玻利维亚构造单元与试验研究区、推广应用区位置

Fig.1 Structural unit and the location of tentative and application area

水系。白垩系、新近系和第四系呈角度不整合覆盖在奥陶系之上。下白垩统昂勾斯度拉组(K_1ag)以紫红色石英砂岩和杂色砾岩为主,形成于海—陆沉积环境,局部夹有层状玄武岩,层状玄武岩影像呈淡蓝色色斑,带状分布,可见发育的劈理形成清晰的线状影像。

下白垩统塔拉帕雅组(K_1tr)为红褐色碎裂化砂岩与粉砂岩互层,形成于海—陆沉积环境,顶部凝灰质粉砂岩、泥岩是砂岩铜矿含矿层位。上白垩统阿诺依菲雅组(K_2ar)分为三个岩性段:第一岩性段(K_2ar^1)为紫红色粉砂质泥岩,为干旱条件下河流相河漫滩亚相,遥感—构造岩相学填图单元特征为分布于 Nazareno 盆地近中央位置,影像呈棕褐色色斑,具有清晰可见的线状影像特征,其为地层走向线在影像上的反应;第二岩性段(K_2ar^2)为浅紫红色中细粒砂岩与斑杂色砂砾岩互层,为干旱条件下冲积扇相中相,顶部砂砾岩为 $Cu(Co)$ 矿化层位,遥

感—构造岩相学填图单元特征为影像整体呈浅棕褐色—浅紫红色,镶嵌有浅灰白色—浅蓝灰色色斑,与上部火山岩蓝色—蓝灰色影像形影相随,具有灰白色条带和明显的层状特点,白色条带多为砾岩层中的砂质、高岭土等胶结物风化所致,中间夹有的蓝灰色、蓝色带状影像为砂砾岩层中夹的火山岩相形成的透镜体;第三岩性段(K_2ar^3)以碱性基性火山岩、蚀变次火山岩、侵入岩为主,局部发育紫红色沉凝灰岩,该岩性段是本区 Manto 型 $Cu(Ag)$ 矿体主要赋矿层位,遥感—构造岩相学填图单元特征为影像整体呈现蓝色色调,具有灰白色、淡蓝色、青绿色斑点镶嵌其中,灰白色色斑为黏土化蚀变或者本区广泛发育的钙积层(白垩土),是特殊的景观地球化学单元和生态土壤剖面,也是沟系次生晕采样特殊单元,孔雀石蚀变呈青蓝色,以及伴随其色斑周边采矿活动留下的老采坑(硐)亦清晰可见,可作为遥感解译、快速填图的标志色斑,影像上可见密集发育的 NW

向、NWW 向沟谷,沟谷将火山岩相体切割成一个个独立的浑圆状山包。新近系可划分为 N_1tu 、 N_1nz 、 N_1chm 和 N_1op 等 4 个组,是该地区沉积盆地的主要充填地体,遥感—构造岩相学填图单元特征为分布于盆地的中边部山间、河谷等地带,影像整体以土黄色、褐黄色为主,镶嵌有淡蓝色、灰褐色色斑,淡蓝色色斑显示的是具有火山物质加入,梳状、肋骨状冲沟发育,梳状沟谷一般发育有断层构造,有明显的三角面,多呈 NNE 向展布,其次为 NW 向。其中 N_1tu 组主要为河流冲积扇相砾岩,夹有安山岩层; N_1nz 组为棕红色黏土质砂岩、黏土岩,穿插有玫瑰棕色凝灰岩; N_1chm 组为英安岩、流纹英安岩、灰黄色凝灰岩; N_1op 组主要为冲积—湖积沉积体系,以砾岩夹杂古生代岩石碎屑和来自于临近区域的火成岩组成,指示河湖环境和新的沉积旋回开始。第四系 Q_{tw} 组以冲积物、坡积物和崩积物为主,为未固结—半固结的鹅卵石、砾石、砂、泥、黏土。

从遥感—构造岩相学填图单元分布特征可看出,断陷盆地内沉积从白垩系 K_1ag 组粗碎屑岩相(砾岩→砂砾岩→石英砂岩),到 K_1tr 组红褐色砂岩、粉砂岩,碎屑沉积物粒度不断变细,说明山间盆地不断沉降的过程,这与区域上晚白垩世中期 Peruna 构造运动开始、Tupiza 地堑进一步发展相吻合。这种砾岩→砂砾岩→石英砂岩沉积层序揭示了白垩纪山间断陷盆地发育初期的粗碎屑岩相沉积。白垩纪中晚期沿区域性 Tocloca NNE 向深大断裂带发生火山喷发,形成矿区 NNE 向主构造与火山—沉积岩相分布特征。在新生代以构造挤压环境下发育 NW 向、次为 NE 向逆冲断层和斜冲断裂带。自早侏罗世以来,本区发生了多期火山—构造—热事件^[84],为成矿提供了极为有利的地质条件。

2.1.2 应用区(Cuprita)地质—遥感—构造岩相学特征

Cuprita 矿区位于首都 La Paz(拉巴斯)西南方向 150 km 处,大地构造单元上处于 Altiplano 高原西部边缘与西接西科迪勒拉过渡带,是典型的盆山原镶嵌构造区山间盆地。区域上古老的基底为前寒武系地层。矿区出露地层主要为古近系—新近系砂岩、含砾砂岩等陆相沉积碎屑岩建造和火山岩岩席,第四系零星分布。遥感—构造岩相学填图单元特征为,1:5 万 ETM 影像为明显的环带状围绕火山口分布,围绕火山口发育有明显的放射状断裂系统,研究区位于火山口东部,处于近 EW 向深断裂上。整体色调为深蓝色、蓝色,揭示火山岩发育或者具有火山物质加入。渐新—中新统 Mauri 组下段出露于矿区

西部,主要为浅灰绿色、灰绿色、暗褐色凝灰质砂岩,紫红色、灰白色、深咖啡色中—细粒薄层状长石砂岩、长石石英砂岩,灰绿色黑云母砂岩,遥感—构造岩相学特征为影像以灰白色、浅灰蓝色色斑为主,反射率高,影像光滑。白色影像揭示发育的钙积层,浅蓝灰色色斑围绕沟沿分布;中新统 Mauri 组上段出露于矿区东部,为浅紫红色、浅灰绿色、浅灰白色火山质砂砾岩、砂岩、未焊接的流纹质凝灰岩、粉砂岩,呈互层产出,影像以浅灰色、浅蓝灰色为主,沟谷发育、地形破碎,揭示强烈的剥蚀作用,灰白色色斑镶嵌分布于浅蓝灰色色斑中,表现为火山物质发生的黏土化蚀变特征;Mauri 组上段与下段之间为整合产出的一套基性火山岩岩席,分布于矿区中部,呈 SN 向带状展布,主要为斑状安山岩、安山质火山角砾岩,遥感—构造岩相学填图单元特征为整体以棕褐色色斑为主,表面较为光滑,似有线状纹理分布,晚期近 EW 向断层对其有明显的限制和切割作用,呈断块状斑块分布,早期 NW 向断裂可能为岩浆上涌通道,对火山岩分布具一定控制作用,在断裂带或断裂交汇部位的火山角砾岩、角砾凝灰岩等高渗透性、高孔隙度地层中铜矿化富集。

2.2 景观地球化学与生态土壤剖面垂向结构

研究区均为盆山原镶嵌构造区,景观极为复杂。Tupiza 研究区处于 Nazareno 沉积盆地西部边缘,海拔 3 400~4 002 m,整体上地形西部高,向东进入山间盆地中心。矿区西部为走向 NNE($5^{\circ}\sim 10^{\circ}$)的绵延山脉,最高海拔 4 002 m,地形起伏较大,在 EW 向 2 km 平距内高差可达 600 m;东北部盆地中心地带平均海拔 3 450 m,为相对平坦的山间河谷冲—洪积区;东南部为 V 型沟谷发育的深切切割沟壑区(图 2a)。Cuprita 矿区海拔稍高,为 4 000~4 602 m,相对高差 600 m,整体上中部高、西北部和东南部略低,地形起伏相比 Tupiza 要平缓,呈现 Altiplano 高原向西科迪勒拉过渡的山间丘陵地貌,孤立山丘、火山链与山间盆地镶嵌分布(图 2b)。

两矿区气候类型相似,均属于高原山地气候,冬天干燥、寒冷,夏天相对凉爽,昼夜温差极大,因而物理风化强烈、机械搬运方式普遍。年降水量 100~400 mm,时间上分配不均衡,11 月至次年 3 月为雨季,但大量降水主要集中在 1~2 月,其他时间降水稀少或连续多个月降水都为零。一般 2 月份平均温度最高,平均为 23°C ;7 月最低,平均为 5°C 。水系不发育,交错纵横的沟谷多为干沟或只在雨季产生短暂径流或洪流。在断裂带或山前冲积扇扇缘偶有泉水出露,流量小,且蒸发强烈,径流不远便干涸。



a—真彩色遥感-构造岩相学解译与填图单元,作为沟系次生晕测量和构造岩相学填图工作底图;b—Cuprita 地貌景观;c—近水平产出的膏岩层(石膏);d—火山岩(含铜矿化)基岩区典型土壤剖面;e—砂岩基岩区典型土壤剖面,砂岩发生强烈褪色化蚀变,裂隙中见有氯铜矿化;f—冲沟揭露的紫红色粉砂岩基岩区典型土壤剖面;g—灰白色钙积层(白垩土层)与浅灰绿色、浅紫红色砂岩、粉砂岩互层产出;h—风化壳;i—盐晕

a—mapping units and interpretation on true-color remote sensing-tectonic lithofacies, which as base map of tectonic lithofacies mapping and secondary halo of valley systems; b—geomorphologic landscape in Cuprita mine; c—level gypsum rock; d—typical soil profile of volcanic terrain area (bearing copper); e—typical soil profile of sandstone area, strong fading alteration, atacamite filled fracture; f—typical soil profile of purplish red siltstone which was exposed in gully; g—interbedding of gray caliche with siltstone; h—weathering crust; i—saline halo

图2 试验区特殊景观及典型土壤剖面

Fig.2 Typical soil profile and special landscape in tentative area

植被类型稍有差异,Tupiza 植被类型多为高山草甸,沟谷、斜坡地带生长有少量低矮干旱半灌木类植被(如骆驼刺),少量灌木;而 Cuprita 矿区基本为高山草甸,灌木、半灌木类极少。

由于处于内陆干旱—半干旱、强蒸发和强剥蚀盆山原镶嵌构造特殊景观区,具有多样性的土壤剖面,不同基岩区生态土壤剖面具有一定差异性,然而强烈的物理风化作用使得元素在沟系的碎屑物中以机械晕的形式搬运是共同的方式。同时,区内广泛发育钙积层、膏岩层、盐晕和风化壳,这些都是沟系次生晕测量难点所在,也是本次进行组合方法研发

的必要性。为此,本次结合真彩色遥感解译(图2a)、路线踏勘,快速了解试验区地层岩性、构造格架、地形地貌、基岩出露情况,识别和圈定不同生态土壤剖面和特殊的微景观单元(如钙积层、风化壳),以此作为沟系次生晕测量工作底图,进行采样点合理布设,将大大提高采样有效点率、节省时间、降低成本。Tupiza 试验区共识别出5种不同基岩区土壤剖面:①砂岩、粉砂岩基岩区生态土壤剖面(图2f),主要分布于矿区中西部,遥感影像呈棕褐色、紫红色色斑,基岩裸露程度高,物理风化强烈。此剖面A层缺失,仅在斜坡、沟谷两侧发育B层,C层较完

整。② 火山岩(玄武岩、安山岩、火山角砾岩)基岩区生态土壤剖面(图 2d),呈明显的带状分布,遥感影像以蓝色色斑为主,A层基本缺失,B、C层发育程度好于砂岩、粉砂岩基岩区,本岩性层是区内铜主要矿化层位。③ 砂砾岩基岩区生态土壤剖面(图 2e),主要分布于矿区西部山脉,遥感影像呈浅黄绿色、浅黄褐色、浅紫红色色斑,影像有明显凸起点,在沟谷两侧、坡度不大的阴坡发育少量 A 层,其余地段缺失;除山脊局部地带外,B层发育连续。④ 奥陶系页岩夹砂岩基岩区生态土壤剖面,遥感影像以青色色斑为主,呈青灰色、青绿色、灰白色等,为沉积盆地的基底层,主要在矿区北部-东北部和中部局部山包上出露,A层缺失,采样以 B、C层为主。⑤ 古近系—新近系半固结砾岩基岩区生态土壤剖面,主要分布于矿区东南角,遥感影像以面状分布的淡蓝色、蓝灰色色斑为主,为沟壑区,A层缺失,B层普遍发育。综上所述,本区土壤发育程度低,基岩出露程度较好,残积、坡积物丰富。A层基本缺失,B层局部地段缺失,C层基本连续发育。

特殊景观地球化学单元对沟系次生晕测量具有不可忽视的影响,应当引起重视:① 钙积层,在 Tupiza 矿区普遍发育白垩土形成的钙积层,在盆地中央平坦地带发育厚度一般 5~50 cm,但在海拔较高地区(4000 m 以上)或山顶,最大厚度可达数米或数十米(图 2g)。在厚度较薄地方可以穿透钙积层采样,如果厚度过大则不宜采样。② 膏岩层(图 2c),Cuprita 区域山间盆地中广泛发育产状近水平的厚层状石膏层,厚度可达数十米,而 Tupiza 矿区见有几 cm 到十几 cm 的层状石膏。③ 在山间洼地、古河道、古浅湖、盆地中央等低洼地带,常有盐晕发育(图 2i)。④ 局部见有发育几米到数米厚的风化壳(图 2h)。

3 沟系次生晕测量技术与工作流程

3.1 试验研究

野外采样介质、层位、深度和样品粗加工粒度是沟系次生晕测量的关键环节。根据景观地球化学特征和典型土壤剖面研究,确定采样介质以残积、坡积物为主,层位以 B 层为主,与 C 层相结合。在火山岩基岩区典型生态土壤剖面上,进行样品粗加工粒度、采样深度方法试验,按照 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm 等 5 个不同深度各采集样品 1 件。现场将同一深度采集的样品加工筛分成-10~+20 目、-10~+40 目、-10~+60 目、-40 目和-60 目共 5 个粒度试验样。

从以上试验分析结果来看(表 1),当分别取-10~+20 目、-10~+40 目、-10~+60 目粒度时,元素含量呈明显增加;当取-40 目、-60 目粒度时,元素含量明显有降低趋势,说明元素在过细粒度和过粗粒度中分布是不均的。分析认为,颗粒太粗可能是由于强烈的物理风化形成的粗碎屑物所致,而粒度过细可能有高原风成沙的影响,所以当取-10~+60 目的混合粒度时效果最佳。采样深度上,明显可以看出元素总含量随深度增加而增加,在该典型剖面上 40~50 cm 深度元素含量最高,这也说明本区元素可能主要不是以离子形式迁移,而更多是以机械晕(重力作用)迁移,也有可能和地表广泛存在的白垩系钙积层有关,所以当钙积层厚度不大时采样要穿过钙积层。

综合以上,野外采样粗加工采用-10~+60 目混合粒度效果最佳,而采样介质为 B 层,深度较深时效果好,当局部 B 层缺失或者不发育时结合 C 层顶部物质采样。

表 1 Tupiza 试验区沟系次生晕采样粒度及深度试验结果

Table 1 Test results of valley systems secondary halo of sampling depth and roughing grain size in Tupiza

样号	深度/粒度	Au	Ag	Sn	As	Hg	Cu	Pb	Zn	Sb	Bi	Co	Ni	W	Mo
SS4-1	0~10 cm	0.78	0.13	2.38	28.9	25.8	282	128	241	0.95	0.11	35.3	50.8	1.06	1.38
SS4-2	10~20 cm	0.91	0.17	2.18	65.1	19.2	553	451	358	0.86	0.11	41.0	55.2	1.08	1.49
SS4-3	20~30 cm	0.75	0.17	2.45	100	21.6	870	702	537	0.80	0.11	43.2	55.7	1.12	1.65
SS4-4	30~40 cm	1.49	0.29	2.16	294	23.7	2154	769	1429	0.94	0.14	65.1	64.1	1.17	4.02
SS4-5	40~50 cm	1.43	0.42	2.06	436	39.8	3312	3623	2855	0.99	0.16	99.0	71.6	1.15	3.78
LS6-1	-10~+20 目	0.86	0.40	2.35	303	58.0	2118	2203	1579	0.87	0.13	64.4	63.9	1.10	3.06
LS6-2	-10~+40 目	0.83	0.33	2.15	447	26.2	2749	2978	1720	0.89	0.15	79.7	64.7	1.07	6.30
LS6-3	-10~+60 目	1.42	0.42	2.57	493	49.6	3045	3347	1804	0.99	0.16	78.0	65.3	1.11	3.73
LS6-4	-40 目	2.72	0.18	2.03	203	82.5	1472	1755	966	1.01	0.14	45.5	44.3	0.90	2.27
LS6-5	-60 目	2.84	0.16	2.27	114	61.5	1299	1454	934	1.08	0.15	30.8	39.9	0.82	1.53

注: Au、Hg 含量单位为 10^{-9} ; 其余元素为 10^{-6}

3.2 室内布样

样点布设:以 1:1 万真彩色遥感—构造岩相学解译图作为工作底图(图 2a),将长度 >50 m 的水系和微沟系(包括干沟、季节性溪流)详细勾绘。将采样点布在 I、II 级沟系及微沟系中,点位布设在沟的边坡,沿沟系点距约 50~100 m。沟系末梢的最后一个点距分水岭不得大于 50~100 m。沟系宽度大于 100 m 以上时,应在沟系两侧边坡交错布点。相邻两条沟系间的距离 >300 m,又没有明显的沟系分布不能采样时,可在山脊或山岗上适当增加布设采样点。采样点布设须均匀合理,布设检查无误后,以公里网方格(1 km×1 km)为采样单元,由上向下,从左到右用自然数 1、2、3...进行采样点编号。导出采样点坐标,以备野外采样 GPS 导航使用。

重采样布设:重采样数量 ≥ 总采样点的 2%。主要布置在根据遥感—构造岩相学解译可能出现地球化学异常地段或已发现的矿化及找矿标志部位,重采样点不得密集的布置在一个或几个地段,在图面上基本均匀分布。

密码样布设:密码样数量 ≥ 总采样点的 5%,在图面上基本均匀分布,允许实地采样时作适当调整。

3.3 野外样品采集

采样技术人员通过手持 GPS 导航和遥感—构造岩相学解译图,在野外找到室内布设的采样点位,用采样镐拨去浮土、腐殖质等杂物,选择 B 或 C 层土壤取样,取样时在采样点位上 3~5 m 的范围内采集 3~5 处组合为一个样,以筛选后的样品质量不少于 100 g(密码样 >200 g)为原则。填写记录卡片和进行必要的地质编录。如有弃点,则说明原因。最后,做醒目的采样标记以备检查及异常查证使用。

当采样点位附近不存在采样介质时,可沿沟系边坡前后 25 m 范围内采样。重采样在正常样采集完成后,由采样小组内另外一名队员或其他小组按上述同样的方法进行采集。

3.4 样品室内加工与分析测试

样品运回室内后,按记录卡清点、整理、晾晒,干燥后的样品用木棒或橡胶锤轻轻敲打,以使未解体的黏土胶结物中的颗粒充分解体。采用不锈钢网筛套筛筛分出 -10~+60 目粒级样品,单样质量 ≥ 100 g(密码样质量 ≥ 200 g),装入纸袋、密封,进行下一个样品加工前,必须将网筛用软毛刷(或吹风机)清理干净,以防交叉污染。填写样品加工记录表、送样单,送往目标实验室。

根据区域矿产特征、主供伴元素,选择分析测试元素。本次研究选择分析 Cu、Pb、Zn、Au、Ag、W、

Sn、Bi、Mo、As、Hg、Co、Ni、Sb、Nb、Ta 等 16 个成矿元素和伴生元素。用发射光谱法(ES)测定 Ag、Sn,氢化物—原子荧光光谱法(HG-AFS)测定 As,冷蒸气—原子荧光光谱法(CV-AFS)测定 Hg,泡沫塑料吸附—石墨炉原子吸收光谱法(GF-AAS)测定 Au,其余元素采用 ICP-MS 为主的分析方法。

3.5 质量控制

本次试验采取多环节、多方法进行质量监控:野外采样质量采用重采样监控,重采样数量 ≥ 样品总数的 2%;分析过程中,实验室按照规范每 1 个分析批次(100 个样品)插入 4 个国家标准物质,进行精密度和准确度控制;实验室按样品总数 5% 的比例抽取实验室内部抽查样品,以密码方式进行预先分析,以控制分析中的批次偏差;样品分析完成后,对数据低点或高点等异常点进行异常点抽查分析;试验研究组抽取密码内检样,对实验室化验分析进行外部监控,抽取比例 ≥ 分析样品总数的 5%。

4 异常圈定与评价

本次试验采用 1:1 万比例尺,采样点密度为 35 点/km²~40 点/km²,分别圈定了单元素异常、组合元素异常和综合元素异常。根据单元素异常的强度、规模、浓度分带、浓集中心特征,多元素组合异常的元素组合、异常展布特征,异常展布与矿(化)点、地层、断层等的对应特征,将综合异常分为甲、乙、丙三类:① 以金属元素为主的异常,或与已知矿(化)体有关,异常有一定规模,强度高,浓集中心明显,地质条件较有利;② 以金属元素为主的异常,异常有一定规模,强度较高,浓集中心较明显,地质条件较有利,但目前地表尚未见到矿(化)体,推断为矿异常或对解决其他地质问题有意义的异常;③ 元素异常发育较单一或各元素规模较小,零星分布,成矿地质条件相对较差,推断为岩性等因素引起的异常,浓集元素较少,作为下一步备选异常评价。

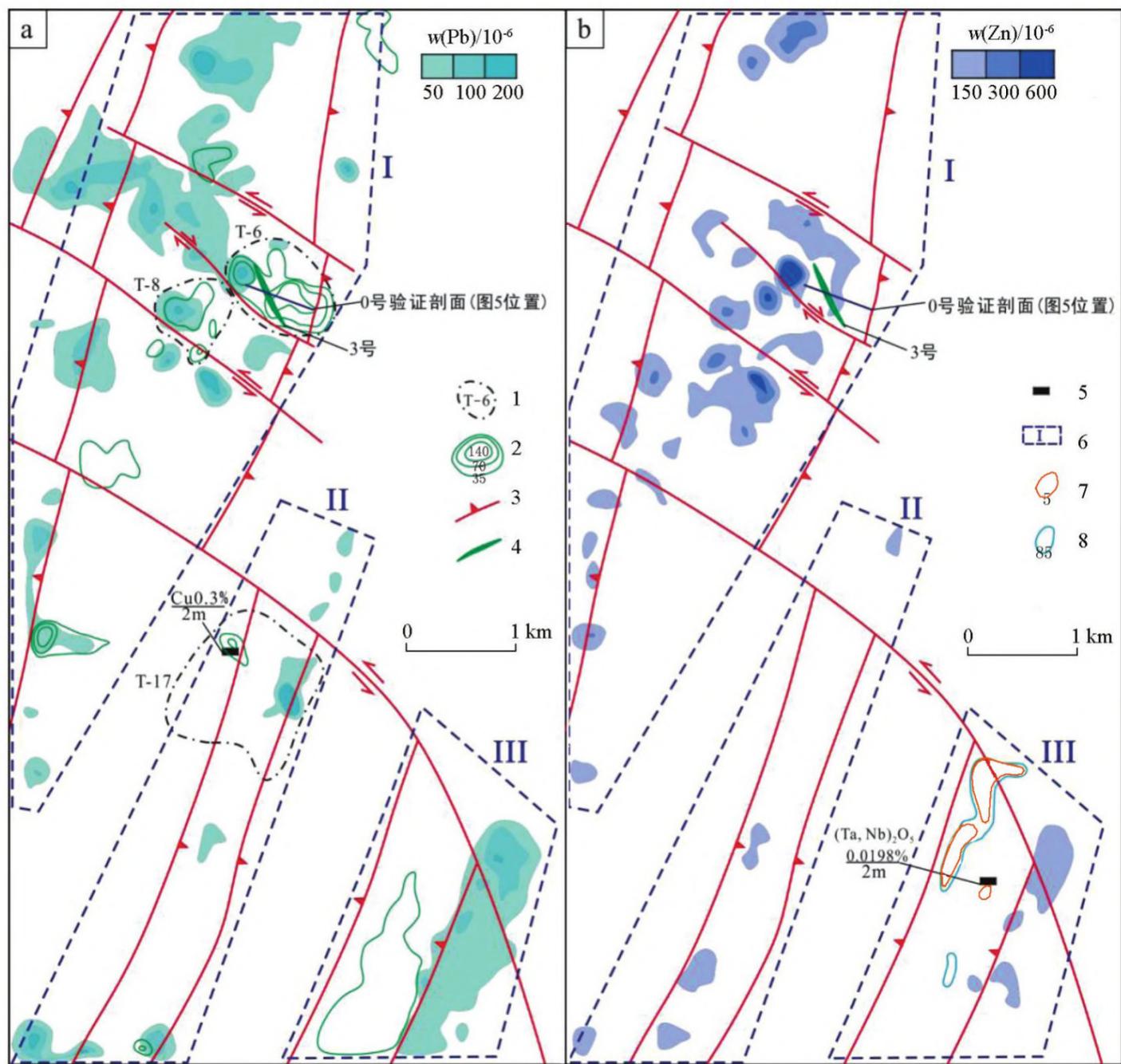
Tupiza 试验区获得单元素异常百余个,圈定综合异常 26 个,初步检查后排除非矿致假异常 5 个,剩余 21 个综合异常划分甲类异常 3 处(表 2)、乙类异常 13 处、丙类异常 5 处。综合异常分布大致呈西、中、东三个带(图 3),展布 NNE 向,与本区地层、构造走向相一致。综合异常中 Cu、Zn、Pb 等异常强度较高、规模大、浓集中心明显,形成从中心到外围具有 Cu→Zn→Pb 分带规律。单元素异常呈串珠状,沿 NNE 向构造带展布,揭示了 NNE 向盆地边界断裂带是深部热液活动的构造岩相学通道,也是本

表 2 甲类综合异常特征

Table 2 Characteristics of composite anomalies in Class A

矿区	异常编号	面积/km ²	ΣNAP	异常表达式	排序
Tupiza	T-6	0.5843	1.9628	$Cu^{0.9582} - Co^{0.3421} - Ni^{0.2648} - Zn^{0.1285} - Pb^{0.0972} - Ag^{0.065} - Sb^{0.0312}$	5
	T-8	0.3637	1.2496	$Co^{0.2586} - Ni^{0.2337} - Pb^{0.2002} - Zn^{0.1921} - Cu^{0.1506} - Ag^{0.0418} - Sb^{0.0405}$	9
	T-17	1.3494	1.2214	$As^{0.3474} - Au^{0.3452} - Ag^{0.1351} - Pb^{0.1268} - Hg^{0.1176} - Sb^{0.0638} - Cu^{0.0279}$	10
Cuprita	C-4	1.687	43.608	$Pb^{32.6971} - Cu^{2.8506} - Ag^{2.6543} - Sb^{2.17} - As^{1.5618} - Zn^{0.7472} - Mo^{0.3438}$	1
	C-5	0.9306	5.2920	$Pb^{1.882} - Cu^{1.4026} - Ag^{1.2199} - Co^{0.2745} - Sb^{0.2078} - As^{0.0654} - Ni^{0.0603}$	3
	C-6	1.3389	6.6474	$Cu^{4.0119} - Ag^{1.3609} - Pb^{0.8357} - Nb^{0.3067} - Hg^{0.0553} - Sb^{0.0197} - Mo^{0.0143}$	2

注: ΣNAP 为规格化面金属量之和;异常表达式中元素上角标为该元素的规格化面金属量



1—综合异常;2—Cu 异常等值线($\times 10^{-6}$);3—逆冲断层;4—铜矿化体;5—刻槽取样点;6—预测靶区;7—Ta 异常等值线($\times 10^{-6}$);8—Nb 异常等值线($\times 10^{-6}$)

1—composite anomaly; 2—anomaly contour of Cu($\times 10^{-6}$); 3—reverse thrust; 4—copper orebody and copper metallization; 5—channel sampling point; 6—forecasting target area; 7—anomaly contour of Ta($\times 10^{-6}$); 8—anomaly contour of Nb($\times 10^{-6}$)

图 3 Tupiza 铜矿区 Cu、Pb、Zn 异常剖析

Fig.3 The anomalies analyses of Cu, Pb and Zn in Tupiza copper deposit

区火山—岩浆通道,为成矿提供了极为有利的条件。重点对 T-6 号综合异常进行了地表查证,异常分布于蓝色色斑遥感影像上,是本区火山岩相遥感—构造岩相学填图单元,为白垩统阿诺依菲雅组第三岩性段(K_2ar^3),以碱性橄榄玄武、橄榄玄武粗面安山

岩和蚀变次火山辉绿辉长岩脉为主,局部发育紫红色沉凝灰岩。地表有古民采坑、硐分布,已揭露铜矿(化)体,主要产于基性火山岩的褪色化构造蚀变带中,追索矿化体延长,断续出露达 200 余 m,厚度几米至十多米,铜品位 0.5%~18%,铜矿物主要为氯

铜矿、孔雀石,充填于气孔或者沿裂隙分布;次有黄铜矿、斑铜矿,少量硅孔雀石和辉铜矿细脉;揭示了沟系次生晕对本区铜矿化体具有发现能力,暗示其他异常也是有潜力异常,需要进一步验证。

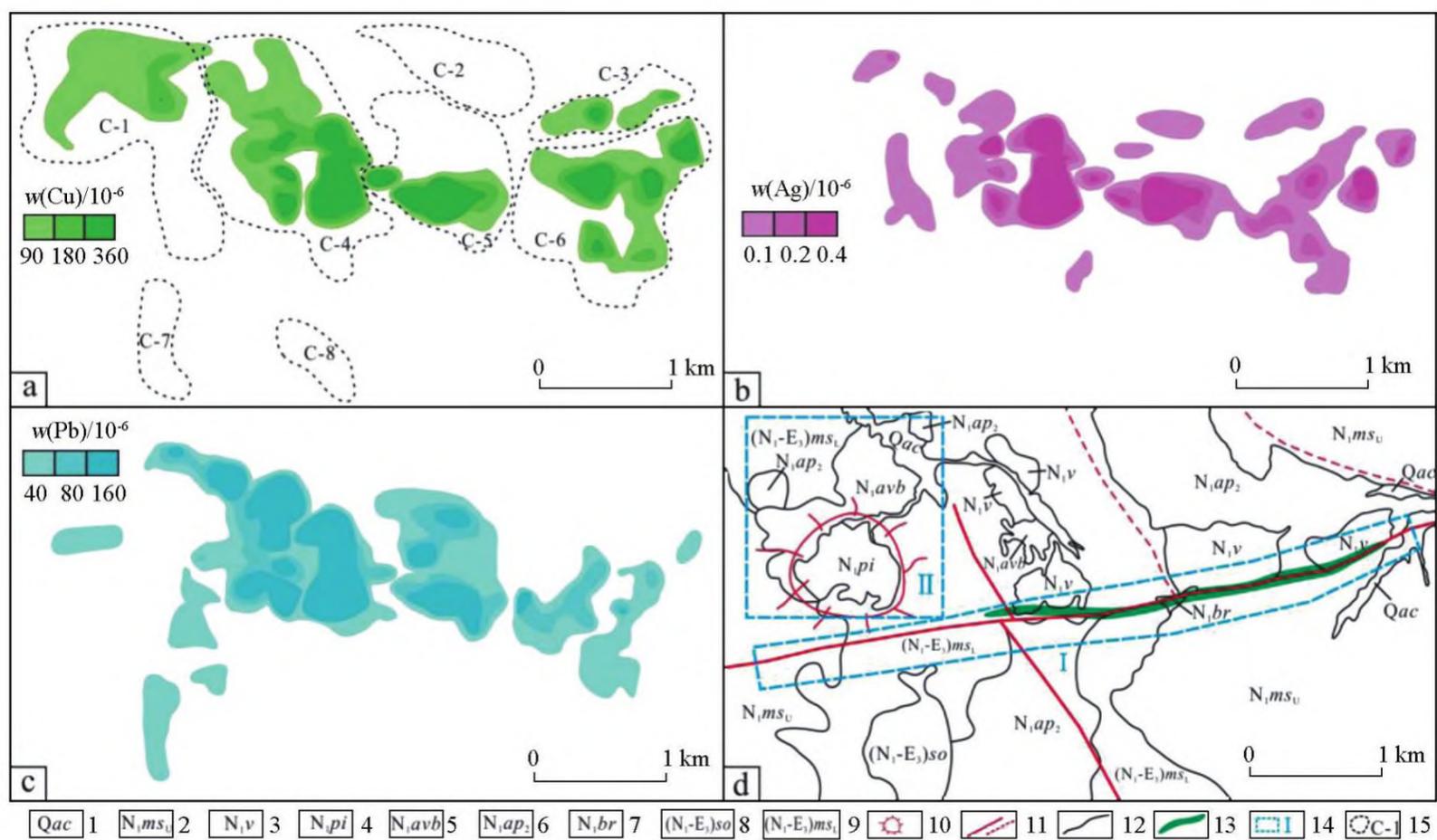
Cuprita 推广应用区获得多个单元异常,圈定综合异常 8 个,地表查证和综合研究后,分为甲类异常 3 个(表 2)、乙类异常 3 个、丙类异常 2 个。三个甲类综合异常呈串珠状分布于矿区中部(图 4a),遥感—构造岩相学填图单元色斑为棕褐色,与矿区近 EW 向断裂带叠合(图 4d)。Cu、Ag、Pb 等异常强度高、规模大、浓度分带清晰、浓集中心明显(图 4)。2015 年,地表检查时发现 C-5 异常中心与矿区小型古民采场完全吻合,该民采场揭露铜矿(化)体厚度 2 m 左右,尚未穿透,长度几十米,铜矿物主要为氯铜矿、孔雀石,少量黑铜矿、黝铜矿。异常浓集中心与已揭露矿体完全重合,也说明了沟系次生晕测量在本区可以有效圈定异常和发现矿化体。对应的异

常中心遥感—构造岩相学填图单元为火山溢流相斑状安山岩、次火山侵入相辉长闪长岩。

5 验证效果与靶区预测

5.1 Tupiza 试验区验证效果与靶区预测

T-6 综合异常中心老民采坑硐已揭露矿化体,2015 年在地表施工探槽对矿化体进行进一步验证和控制,揭露 NW 走向平行矿体数条,其中以 3 号矿体规模较大,控制延长 300 余 m(图 3),单工程厚度(真厚度)0.86~21.49 m,呈大透镜状产于 NW 向断裂带中,在与 NNE 向断裂交汇部位铜矿尤其富集。矿体平均厚度 6.91 m,铜平均含量 0.85%。矿体倾向 225°,倾角 60°。赋矿岩石为橄榄玄武岩,具有明显的褪色化、黏土化(绿泥石化、高岭石化)、硅化蚀变。铜次生富集作用明显,氯铜矿、孔雀石等充填于气孔中,揭示次火山热液蚀变明显,并形成矿体富集



1—未固结的崩积、冲积物;2—火山质砂砾岩、砂岩、未焊接的流纹质凝灰岩、粉砂岩;3—橄榄辉长岩;4—斜长斑岩;5—安山质火山角砾、火山集块岩;6—气孔状安山岩、玄武质粗安岩;7—含铜沉积砾岩(底砾岩);8—沉凝灰岩,粗粒薄-厚层状凝灰质砂岩和原地砾岩;9—长石砂岩、长石石英砂岩;10—推测火山机构;11—实测及推测断层;12—地质界线;13—地表验证的铜矿化体(采用了夸大表示);14—预测靶区;15—综合异常及编号

1—unconsolidated colluvial, alluvial deposits. 2—volcanogenic coarse-grained sandstones, gravelly sandstones, non-welded rhyolitic flow tuffs, reworked tuffs and silts; 3—olivine gabbro; 4—plagioclase porphyries; 5—andesite volcanic breccia and volcanic agglomerate; 6—vesiculate andesite and basaltic trachyandesite; 7—basal conglomerate of copper bearing; 8—sedimentary tuff, tuffaceous sands and in-situ conglomerates; 9—feldspar sandstone, feldspar quartz sandstone; 10—inferred volcanic apparatus; 11—measured and inferred faults; 12—line of geological limitation; 13—verification copper orebody at surface (exaggerated scale); 14—forecasting target area; 15—composite anomaly and its number

图 4 Cuprita 铜矿区 Cu、Ag、Pb 异常剖析

Fig.4 The anomalies analysis of Cu, Ag and Pb in Cuprita copper deposit

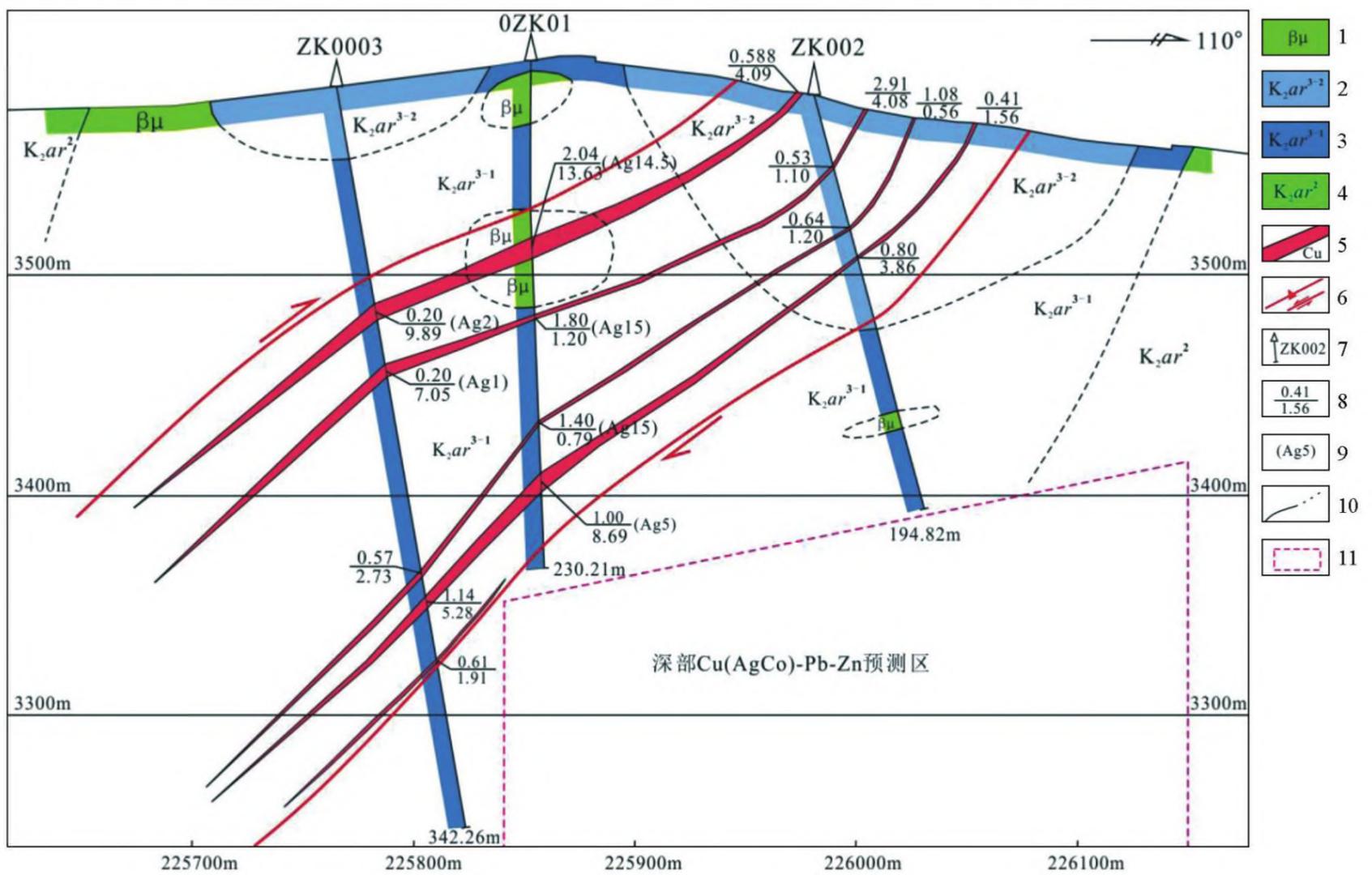
中心。2016年,利用钻探进行异常深部验证,揭露4条主要的铜(银)矿化体(图5),控制矿体斜深200余m,矿体有继续向深部延深趋势。铜矿(化)体单工程厚度0.56~13.63m,铜含量0.2%~2.9%,伴生银 $1 \times 10^{-6} \sim 15 \times 10^{-6}$ 。与探槽揭露地表情况相吻合,铜矿(化)体均受断裂带控制明显。

通过初步验证认为,沟系次生晕测量组合技术方法在本区有效,地表和深部异常验证揭露到厚大矿体,结合矿区遥感—构造岩相学特征圈定预测靶区3个(图3):① I号预测靶区,长约6km,宽1~3km,从内向外具有Cu→Zn→Pb分带规律,异常沿NNE向构造带展布,围绕已揭露和控制矿体,深部具有较大前景,有寻找隐伏Cu(Ag)-Pb-Zn的潜力;② II号预测靶区,长约3km,异常中心已经发现铜矿化体露头,取样长度2m,铜品位0.3%,Cu-Pb-Zn

异常值得深部验证;③ III号预测靶区,长约2km,具有Nb(Ta)和Cu-Pb-Zn异常,Nb(Ta)异常检查在黑云母花岗岩质砾岩层中发现Nb(Ta)新类型矿化体,(Ta,Nb)₂O₅品位0.0198%,达到工业品位要求(砂矿床)。

5.2 Cuprita 推广应用区验证效果及靶区预测

C-5综合异常中心民采坑已揭露矿化体,以此为中心对综合异常带进行地表探槽验证,从西部的C-4异常、C-5异常,到东部C-6异常,探槽揭露铜(银)主矿体1条(图4d),矿体走向延长3000余m(尚未封边),呈似层状、透镜状,局部具分支复合特点。矿体单工程厚度(真厚度)0.47~10.06m,平均厚度3.41m。矿体单工程铜含量0.677%~6.71%,平均含量2.52%。同体伴生Ag含量 $1 \times 10^{-6} \sim 112 \times 10^{-6}$,平均 10.33×10^{-6} 。矿体整体倾向170°,倾角



1—辉绿岩-辉长岩岩脉,次火山侵入相;2—上白垩统阿诺依菲雅组第三岩性段第二岩相层,火山溢流相;3—上白垩统阿诺依菲雅组第三岩性段第一岩性层,火山碎屑岩相;4—上白垩统阿诺依菲雅组第二岩性段;5—铜(银)矿(化)体;6—逆冲断层和断裂带及斜冲走滑方向;7—钻孔位置及编号;8—铜矿体品位(%)及厚度(m);9—伴生银品位(10^{-6});10—推测、实测地层界线;11—预测铜(钴)矿体

1—diabase-gabbro dikes, subvolcanic intrusion phase; 2—the second bed of the third member of Aroifilla formation, Upper Cretaceous, effusive facies; 3—the first bed of the third member of Aroifilla formation, Upper Cretaceous, volcanoclastic facies; 4—the second member of Aroifilla formation, Upper Cretaceous; 5—copper (silver) orebody and metallization; 6—thrust fault and fault zone and its strike direction; 7—drilling and its number; 8—copper orebody grade (%) and thickness (m); 9—associated silver at grade (10^{-6}); 10—measured and inferred line of geological limitation; 11—forecasting copper (cobalt) orebody

图5 玻利维亚Tupiza试验区异常深部钻探验证0号剖面

Fig.5 NO. 0 drill hole section for anomalies verification in Tupiza tentative area, Bolivia

48°~80°。矿体向深部尚未进行验证和控制,但矿体走向上厚度变化系数79%,铜品位变化系数90%,说明矿体厚度稳定,有用组分分布较均匀,深部找矿潜力不可忽视。

C-1综合异常发育在以斜长斑岩为火山颈相的火山机构周围(图4a、d),异常检查已发现铜矿化露头,采样长度3.6m,铜平均含量1.31%,铜矿物以孔雀石、硅孔雀石、黄铜矿为主,次为蓝铜矿和氯铜矿。除Cu异常外,Au-As异常明显,具有一定规模,值得进一步验证。

总之,本区圈定预测靶区2处(图4d):① I号预测靶区,以近EW向断裂带为中心,东西长约4000m,地表已揭露厚大铜(银)矿体,走向厚度稳定、品位高,深部值得验证;② II号预测靶区,Cu(Au、As)异常明显,已发现铜矿化露头,深部尚未进行验证,具有寻找火山机构控制的斑岩型Cu(Au)筒状矿体的潜力。

6 结论

1) 遥感—构造岩相学解译(填图),作为沟系次生晕工作底图,可快速了解工作区地形地物、地质概况,能快速识别和圈定不同景观单元,为沟系次生晕合理布设样品,提高有效采样点率。

2) 试验确定沟系次生晕采样层位以B层为主,采样深度越深,元素富集越明显;样品野外粗加工最佳粒级为-10~+60目。

3) 创新性将沟系次生晕、遥感—构造岩相学解译(填图)多方法组合研发,有助于结合地质、遥感,对化探异常进行解释、查证和评价,提高找矿预测的可靠性。

4) 组合技术方法应用圈定了多个异常,经工程验证揭露厚大铜(银)工业矿体,显示该技术方法组合在安第斯盆山原镶嵌构造区特殊景观区有效,为中资企业快速选区提供了可参考的技术方法。

致谢:本文研究工作得到了中战会(北京)矿业科技有限公司的大力支持和帮助,野外工作得到了田野、刘璐宁的协助,审稿专家给出了宝贵意见,在此一并表示感谢!

参考文献(References):

[1] 方维萱,徐国端. 勘查地球化学主要新进展与今后的重要发展领域[J]. 矿产与地质, 2005, 19(6): 599-605.
Fang W X, Xu G D. Latest major progresses and key orientations

exploration geochemistry [J]. Mineral Resources and Geology, 2005, 19(6): 599-605.

[2] 方维萱,郭玉乾. 基于风险分析的商业性找矿预测新方法与应用[J]. 地学前缘, 2009, 16(2): 209-226.
Fang W X, Guo Y Q. New ore prospecting methodologies based on risk analysis in commercial assessments and their applications [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(2): 209-226.

[3] 王学求,张必敏,刘雪敏. 纳米地球化学: 穿透覆盖层的地球化学勘查[J]. 地学前缘, 2012, 19(3): 101-112.
Wang X Q, Zhang B M, Liu X M. Nanogeochemistry: Deep-penetrating geochemical exploration through cover [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(3): 101-112.

[4] 王学求,张必敏,姚文生,等. 地球化学探测: 从纳米到全球[J]. 地学前缘, 2014, 21(1): 65-74.
Wang X Q, Zhang B M, Yao W S, et al. Geochemical exploration: From nanoscale to global-scale patterns [J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(1): 65-74.

[5] 王学求. 全球地球化学基准: 了解过去, 预测未来[J]. 地学前缘, 2012, 19(3): 7-18.
Wang X Q. Understanding the past and predicting the future [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(3): 7-18.

[6] 王学求,徐善法,程志中,等. 国际地球化学填图新进展[J]. 地质学报, 2006, 80(10): 1598-1606.
Wang X Q, Xu S F, Cheng Z Z, et al. Progress on international geochemical mapping [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(10): 1598-1606.

[7] Brooks R R. Geobotany and Biogeochemistry in Mineral Exploration [M]. New York: Harper & Row, 1972.

[8] 罗先熔. 再论地球电化学测量法寻找隐伏矿床[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1994, 14(3): 295-302.
Luo X R. Secondary discussion on prospecting buried ore by geoelectrochemical method [J]. Journal of Guilin College of Geology, 1994, 14(3): 295-302.

[9] 罗先熔,段冶. 我国地电提取测量法的应用现状及研究方向[J]. 桂林工学院学报, 1995, 15(1): 34-39.
Luo X R, Duan Z. The present situation of application of the geoelectrochemical exploration method in China and its research direction [J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 1995, 15(1): 34-39.

[10] McInnes Brent I A, Dunn Colin E, Cameron Eion E, et al. Biogeochemical exploration for gold in tropical rain forest regions of Papua New Guinea [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1996, 57: 227-243.

[11] 罗先熔,胡云沪. 云南宋家坡斑岩铜矿地电化学异常特征及机制[J]. 桂林工学院学报, 1998, 18(3): 42-47.
Luo X R, Hu Y H. The geoelectrochemical anomaly feature and mechanism of porphyry copper deposit in Songjiapo, Yunnan [J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 1998, 18(3): 42-47.

[12] 罗先熔,周涛发. 吉林红旗岭铜镍矿床地电化学异常特征、成晕机制及找矿预测[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2004, 34(2): 304-308.
Luo X R, Zhou T F. Feature and forming mechanism of geoelectrochemical anomaly of the Hongqiling copper-nickel deposit and its

- prediction, Jilin Province[J]. *Journal of Jinlin University: Earth Science Edition*, 2004, 34(2): 304 - 308.
- [13] Reeves R D, Baker A J M, Romero R. The ultramafic flora of the Santa Elena Peninsula, Costa Rica: A biogeochemical reconnaissance[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2007, 93(3): 153 - 159.
- [14] 张学洪, 杨文婷, 魏彩春, 等. 重金属超富集植物根际微生态研究进展[J]. *桂林工学院学报*, 2008, 28(4): 548 - 553.
Zhang X H, Yang W T, Wei C C, et al. Development of rhizosphere microecology in heavy metal hyper accumulators[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2008, 28(4): 548 - 553.
- [15] Reid Nathan, Hill Steven M, Lewis David M. Spinifex biogeochemical expressions of buried gold mineralization: The great mineral exploration penetrator of transported regolith [J]. *Applied Geochemistry*, 2008, 23(1): 76 - 84.
- [16] 宋慈安, 雷良奇. 我国勘查植物地球化学的研究现状及发展方向[J]. *桂林工学院学报*, 2009, 29(1): 1 - 11.
Song C A, Lei L Q. Research and orientation of exploration vegetation geochemistry in China [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2009, 29(1): 1 - 11.
- [17] 宋慈安, 杨仲平, 雷良奇, 等. 西双版纳南坡铜矿区植物地球化学特征及找矿有效指示植物[J]. *桂林理工大学学报*, 2010, 30(1): 1 - 14.
Song C A, Yang Z P, Lei L Q, et al. Characteristics of phytogeochemistry and prospecting effective indicator plant in Xishuangbanna Nanpo copper deposit [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2010, 30(1): 1 - 14.
- [18] 宋慈安, 宋玮, 雷良奇, 等. 干旱荒漠区勘查植物地球化学研究现状及关键科学问题[J]. *桂林理工大学学报*, 2014, 34(4): 595 - 605.
Song C A, Song W, Lei L Q, et al. Current research and critical scientific issues of exploration vegetation geochemistry in arid desert area [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2014, 34(4): 595 - 605.
- [19] 陈杨, 宋慈安, 杨仲平. 西双版纳南坡铜矿区土壤中元素的赋存形态及植物的有效性[J]. *桂林理工大学学报*, 2011, 31(4): 516 - 523.
Chen Y, Song C A, Yang Z P. Occurrence and bioavailability of elements from the soil of Nanpo Copper Area in Xishuangbanna [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2011, 31(4): 516 - 523.
- [20] 宋玮, 雷良奇, 宋慈安, 等. 新疆喀拉通克铜镍矿区植物地球化学特征及找矿有效植物和元素的选择[J]. *桂林理工大学学报*, 2016, 36(2): 195 - 206.
Song W, Lei L Q, Song C A, et al. Characteristics of phytogeochemistry and prospecting choices of effective plants and elements in Kalatongke Cu-Ni ore field, Xinjiang [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2016, 36(2): 195 - 206.
- [21] 刘攀峰, 罗先熔, 文美兰, 等. 近三十年来我国地电化学技术研究回顾与展望[J]. *桂林理工大学学报*, 2018, 38(1): 47 - 55.
Liu P F, Luo X R, Wen M L, et al. Retrospect and prospect for geo-electrochemical technology research in the past three decades of China [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2018, 38(1): 47 - 55.
- [22] 王学求. 勘查地球化学近十年进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2013, 32(2): 190 - 197.
Wang X Q. A decade of exploration geochemistry [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2013, 32(2): 190 - 197.
- [23] 王学求. 勘查地球化学 80 年来重大事件回顾[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 322 - 330.
Wang X Q. Landmark events of exploration geochemistry in the past 80 years [J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 322 - 330.
- [24] Brooks R R. Biological methods of prospecting for gold [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1982, 1(7): 109 - 122.
- [25] 罗先熔. 多种新方法寻找隐伏矿的研究及效果[J]. *地质与勘探*, 1995, 31(1): 44 - 49.
Luo X R. A few new methods to find out concealed deposit and their effect [J]. *Geology and Exploration*, 1995, 31(1): 44 - 49.
- [26] 罗先熔, 张学洪, 张力. 应用多种化探新方法寻找隐伏锑矿——以云南木利锑矿为例[J]. *桂林工学院学报*, 1997, 17(1): 42 - 48.
Luo X R, Zhang X H, Zhang L. The application of the various new methods in search for hidden stibium ore deposits: An example from Muli stibium mining area, Yunnan [J]. *Journal of Guilin Institute of Technology*, 1997, 17(1): 42 - 48.
- [27] 罗先熔, 陈三明, 杜建波, 等. 地球电化学勘查法寻找不同埋深隐伏金矿的研究[J]. *矿物岩石*, 2002, 22(4): 42 - 46.
Luo X R, Chen S M, Du J B, et al. Study of geoelectro-chemical method in search for different hidden deposit [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2002, 22(4): 42 - 46.
- [28] Dunn C E, Angélica R S. Evaluation of biogeochemistry as a tool in mineral exploration and in monitoring environmental mercury dispersion in the Tapljos gold district, Amazonia Brazil [R]. *Geological Survey of Canada. Ottawa: Natural Resources Canada Library*, 2000.
- [29] 王学求, 张必敏, 姚文生, 等. 覆盖区勘查地球化学理论研究进展与案例[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2012, 37(6): 1126 - 1132.
Wang X Q, Zhang B M, Yao W S, et al. New evidences for transport mechanism and case histories of geochemical exploration through covers [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(6): 1126 - 1132.
- [30] 王学求, 迟清华. 荒漠戈壁区地球化学调查方法取得重大进展[J]. *矿床地质*, 2002, 21(2): 158 - 158.
Wang X Q, Chi Q H. Significant progress from geochemical survey in desert and Gobi [J]. *Mineral Deposits*, 2002, 21(2): 158 - 158.
- [31] 周军, 陈明勇, 高鹏, 等. 新疆东准格尔蚀变矿物填图及多元信息找矿[J]. *国土资源遥感*, 2005, 17(4): 51 - 55.
Zhou J, Chen M Y, Gao P, et al. Alteration mineral mapping and multi-information ore prospecting in eastern Junggar, Xinjiang [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2005, 17(4): 51 - 55.
- [32] 刘磊, 施明, 周军, 等. 遥感、化探、地质信息综合在昌宁矿产勘查中的应用[J]. *地球科学与环境学报*, 2007, 29(4): 383 - 386.

- Liu L, Shi M, Zhou J, et al. Synthetic analyses of remote sensing, geochemical surveying data and geology in ore exploration in Changning[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2007, 29(4):383-386.
- [33] 刘磊,冯成贵,杨丰柱,等.新疆阿热勒托别地区遥感化探综合找矿研究[J]. *现代地质*, 2009, 23(3):564-568.
- Liu L, Feng C G, Yang F Z, et al. Synthetic analyses of remote sensing and geochemical surveying data in the ore exploration in Areltuobie, Xinjiang[J]. *Geoscience*, 2009, 23(3):564-568.
- [34] 张文秦,汪彩芳,刘成东,等.依据化探成果对东昆仑地质背景的讨论[J]. *现代地质*, 2002, 16(3):257-262.
- Zhang W Q, Wang C F, Liu C D, et al. A discussion on geological background of the east Kunlun area by geochemical exploration data[J]. *Geoscience*, 2002, 16(3):257-262.
- [35] 玉苏普艾力·喀迪尔,陈川,刘雷.新疆博格达东段多金属矿带化探原生晕与激电测量相结合的找矿效果[J]. *现代地质*, 2015, 29(3):713-720.
- Yusupu A K, Chen C, Liu L. Prospecting effect on geochemical primary halos of polymetallic ore belt in eastern Bogda, Xinjiang combined with induced polarization survey[J]. *Geoscience*, 2015, 29(3):713-720.
- [36] 吕国安,刘权清.快速评价分散流异常的沟系原、次生晕方法[J]. *地质与勘探*, 1987, 23(9):53-58.
- Lyu G A, Liu Q Q. The ravine system primary-second halo method for fast evaluation of dispersion train anomalies[J]. *Geology and Prospecting*, 1987, 23(9):53-58.
- [37] 吕国安.成矿区(带)异常评价选择的基本条件研究[J]. *有色金属矿产与勘查*, 1999, 8(6):363-367.
- Lyu G A. Prerequisite for choice of anomalies in metallogenic belts[J]. *Geological exploration for non-ferrous metals*, 1999, 8(6):363-367.
- [38] 吕国安.成矿区带地球化学异常评价方法[M].北京:冶金工业出版社,2002.
- Lyu G A. Evaluation method of geochemical anomalies in metallogenic belts[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002.
- [39] 张振邦.沟系次生晕测量在国土资源大调查中的应用效果[J]. *矿产与地质*, 2003, 17(增刊):479-481.
- Zhang Z B. Application result of the valleys heterochronogenous soil geochemical prospecting in national earth resources survey[J]. *Mineral resources and geology*, 2003, 17(S):479-481.
- [40] 刘增铁.北祁连地区金矿次生晕测量方法及找矿效果初探[J]. *地质与勘探*, 1993, 29(6):49-53.
- Liu Z T. Methods and effectiveness of secondary halo survey over Au-deposit in northern Qilian area, Qinghai province[J]. *Geology and Prospecting*, 1993, 29(6):49-53.
- [41] 胡宝群.安家营子金矿土壤地球化学的试验研究[J]. *矿产与地质*, 1998, 12(1):55-60.
- Hu B Q. Exploration study of gold by soil geochemistry in the An Jiayingzi gold deposit[J]. *Mineral resources and geology*, 1998, 12(1):55-60.
- [42] 夏广清.内蒙古东乌旗哈巴特盖银多金属矿土壤地球化学异常特征[J]. *地质找矿论丛*, 2006(S1):144-148.
- Xia G Q. Soil geochemical anomaly characteristics of Habategai silver polymetallic ore deposit, east Ujimqin county, inner Mongolia [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2006(S1):144-148.
- [43] 彭头平,彭冰霞,李晓勇,等.土壤地球化学找矿试验性研究[J]. *大地构造与成矿学*, 2002, 26(4):442-447.
- Peng T P, Peng B X, Li X Y, et al. A tentative study on soil geochemical for prospecting[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2002, 26(4):442-447.
- [44] 张国义,张连发.土壤地球化学测量在山东蓬莱地区普查找金的效果[J]. *地质找矿论丛*, 2003, 18(S1):141-145.
- Zhang G Y, Zhang L F. The effect of soil geochemistry survey on prospect in Penglai county, Shandong province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2003, 18(S1):141-145.
- [45] 高珍权,方维萱,王伟,等.沟系土壤测量在新疆乌恰县萨热克铜矿勘查中的应用效果[J]. *矿产与地质*, 2005, 19(6):669-673.
- Gao Z Q, Fang W X, Wang W, et al. Application effect of drainage soil survey in Sareke copper deposit prospecting[J]. *Mineral resources and geology*, 2005, 19(6):669-673.
- [46] 罗正传.沟系次生晕测量在青海东昆仑造山带沟里地区的应用效果[J]. *矿产与地质*, 2005, 19(6):679-682.
- Luo Z Z. Application effect of secondary halo measurement of drainage system in Gouli area of east Kunlun orogenic belt, Qinghai [J]. *Mineral resources and geology*, 2005, 19(6):679-682.
- [47] 吕军,王建民,王洪波,等.土壤地球化学测量在三道湾子金矿床的应用[J]. *物探与化探*, 2005, 29(6):515-518.
- Lyu J, Wang J M, Wang H B, et al. The application of soil survey to the Sandaowanzi gold deposit[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2005, 29(6):515-518.
- [48] 金浚,丁汝福,陈伟民.森林沼泽区矿产资源地球化学勘查[J]. *物探与化探*, 2003, 27(6):433-448.
- Jin J, Ding R F, Chen W M. Geochemical mineral exploration in forest-swamp areas[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2003, 27(6):433-448.
- [49] 郝百武,薛传东,韩润生,等.沟系土壤测量在贵州大厂矿田普晴锑金矿区地质找矿中的应用[J]. *地质与勘探*, 2008, 44(6):73-78.
- Hao B W, Xue C D, Han R S, et al. Application of soil geochemistry of drainage system for ore prospecting in the Puqing Sb-Au ore field[J]. *Geology and Prospecting*, 2008, 44(6):73-78.
- [50] 刁理品,韩润生,方维萱.沟系土壤地球化学测量在贵州普晴锑金矿勘查区应用与找矿效果[J]. *地质与勘探*, 2010, 46(1):120-127.
- Diao L P, Han R S, Fang W X. Application of soil geochemical survey in the Puqing antimony-gold exploration area deposit and prospecting effect[J]. *Geology and Prospecting*, 2010, 46(1):120-127.
- [51] 杨社锋,方维萱,胡瑞忠,等.老挝南部波罗芬高原玄武岩砖红壤风化壳微量元素地球化学特征[J]. *矿产与地质*, 2005, 19(6):723-727.
- Yang S F, Fang W X, Hu R Z, et al. Geochemical characteristics of trace elements of basalt laterite regolith section in Boloven plat-

- eau, south Laos [J]. *Mineral resources and geology*, 2005, 19 (6): 723 - 727.
- [52] Jia R X, Fang W X, Hu R Z. Geochemical characteristics and significance of major elements, trace elements and REE of NM copper polymetal deposit in Laos [J]. *Journal of Rare Earths*, 2010, 28 (2): 305 - 311.
- [53] 贾润幸, 方维萱. 热带雨林景观区土壤测量的应用效果 [J]. *物探与化探*, 2011, 35(4): 443 - 447.
- Jia R X, Fang W X. The application effect of soil survey in rainforest area of Laos [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2011, 35(4): 443 - 447.
- [54] 张道红, 孙媛. 缅甸达贡山含镍风化壳地质地球化学特征及成矿作用 [J]. *桂林理工大学学报*, 2010, 30(3): 332 - 338.
- Zhang D H, Sun Y. Geological-geochemistry characteristics and mineral genesis of nickel-bearing weathering crust in Taguang Taung, Myanmar [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2010, 30(3): 332 - 338.
- [55] 陈玉明, 王开天. 秘鲁胡斯塔铜矿原生晕地球化学特征及找矿效果 [J]. *物探与化探*, 2008, 32(2): 126 - 130.
- Chen Y M, Wang T K. Lithochemical characteristics of the Justa copper deposit in Peru and the ore-prospecting effect [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2008, 32(2): 126 - 130.
- [56] 陈玉明, 夏修展, 甘秋玲, 等. 阿根廷米纳毕戈塔地区水系沉积物采样粒度试验研究 [J]. *地质找矿论丛*, 2016, 31(2): 295 - 302.
- Chen Y M, Xia X Z, Gan Q L, et al. Test study on particle size sampling of stream sediment in Minas Pirquitas Area of Argentina [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2016, 31(2): 295 - 302.
- [57] 罗正传. 土壤地球化学测量在智利阿尔法矿区的应用效果 [J]. *物探与化探*, 2010, 34(4): 472 - 475.
- Luo Z Z. The effect of applying soil geochemical survey in the Aifa ore district, Chile [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2010, 34(4): 472 - 475.
- [58] 王明国, 白凤军, 张晓永, 等. 土壤地球化学测量在智利 Henan X 矿区应用效果 [J]. *物探化探计算技术*, 2013, 35(6): 727 - 732.
- Wang M G, Bai F J, Zhang X Y, et al. The applying effect on soil geochemical survey in the Henan X ore district, Chile [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2013, 35(6): 727 - 732.
- [59] 王明国, 张晓永, 白凤军, 等. 土壤地球化学测量在智利塔拉帕卡大区地质勘查中的应用 [J]. *物探与化探*, 2013, 37(3): 394 - 399.
- Wang M G, Zhang X Y, Bai F J, et al. The application of soil geochemical survey to geological prospecting in Tarapacá region, Chile [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2013, 37(3): 394 - 399.
- [60] 王晓辉, 王英超, 龙康华, 等. 土壤地球化学测量在智利 Iquique HN 矿区的应用效果 [J]. *黄金科学技术*, 2014, 22(1): 47 - 51.
- Wang X H, Wang Y C, Long K H, et al. The Application Effect of Soil Geochemical Survey in the Iquique HN Mining Area of Chile [J]. *Gold Science and Technology*, 2014, 22(1): 47 - 51.
- [61] 刘君安, 朱云鹤, 赵晓丹, 等. 秘鲁南部干旱荒漠戈壁残山景观区水系沉积物测量取样粒度研究 [J]. *矿床地质*, 2014, 33(S1): 1115 - 1116.
- Liu J A, Zhu Y H, Zhao X D, et al. Study of sampling size of stream sediment survey in arid desert Gobi, south Peru [J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(S1): 1115 - 1116.
- [62] 贺笑余, 王小高, 李丽, 等. 智利 AF 矿区土壤地球化学异常特征及找矿方向 [J]. *物探化探计算技术*, 2014, 36(5): 634 - 640.
- He X Y, Wang X G, Li L, et al. Soil geochemical anomalies characteristics and the exploration direction discussion of AF deposit in Chile [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, 36(5): 634 - 640.
- [63] 王英超, 王晓辉, 郭继霜, 等. 土壤地球化学测量在智利 HIGUERILLAS 铜矿区的应用效果 [J]. *矿产与地质*, 2015, 29(2): 237 - 242.
- Wang Y C, Wang X H, Guo J S, et al. The effect of applying pedochemical survey in Higuierillas Cu mining area Chile [J]. *Mineral resources and geology*, 2015, 29(2): 237 - 242.
- [64] Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants (Third Edition) [M]. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- [65] Dunn C E. Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry, Volume 9 (Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry) [M]. Canada: Elsevier Science, 2007.
- [66] Viladevall M, Puigserver D, Saavedra J, et al. Biogeochemical exploration using the thola shrub in the andean altiplano, Bolivia [J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2012, 12(1): 33 - 44.
- [67] Oyarzún J, Levi B, Nystrom J O. A Within-Plate Geochemical Signature and Continental Margin Setting for the Mesozoic-cenozoic Lavas of Central Chile, Second. ISAG, Oxford (UK), 1993, 419 - 422.
- [68] Oyarzún J. Andean metallogenesis: a synoptical review and interpretation [C] // Tectonic Evolution of South America, 31st International Geological Congress, Río de Janeiro, 2000.
- [69] Oyarzun R, Lillo J, Higuera P, et al. Strong arsenic enrichment in sediments from the Elqui watershed, Northern Chile: Industrial (gold mining at El Indio Tambo district) vs. geologic processes [J]. *Geochem. Explor*, 2004, 84: 53 - 64.
- [70] Oyarzun R, Guevara S, Oyarzún J, et al. The As-contaminated Elqui river basin: a long lasting perspective (1975 - 1995) covering the initiation and development of AueCueAs mining in the high Andes of northern Chile. *Environ [J]. Geochem*, 2006, 11th 28: 431 - 443.
- [71] Oyarzun R, Lillo J, Oyarzún J, et al. Strong metal anomalies in stream sediments from semiarid watersheds in northern Chile: when geological and structural analyses contribute to understanding environmental disturbances [J]. *Int. Geol. Rev.*, 2006, 48: 1133 - 1144.
- [72] Oyarzún J, Castillo D, Maturana H, et al. Abandoned tailings deposits, acid drainage and alluvial sediments geochemistry, in the arid Elqui River Basin, North-Central Chile [J]. *J. Geochem. Explor*, 2012, 115: 47 - 58.

- [73] Jorge O, Roberto O, Javier L, et al. Distribution of chemical elements in calc-alkaline igneous rocks, soils, sediments and tailings deposits in northern central Chile[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2016, 69:25–42.
- [74] 方维萱.塔西中—新生代盆—山—原镶嵌构造区与大陆动力成矿系统[C]//中国地球科学联合学术年会论文集,2017.
Fang W X. Mesozoic Cenozoic basin mountain original mosaic structure area and the continental dynamic metallogenic system in Taxi[C]//Proceedings of the China Earth Science Joint Academic Annual Conference, 2017.
- [75] 许志琴,赵中宝,彭森,等.论“造山的高原”[J].*岩石学报*, 2016,32(12):3557–3571.
Xu Z Q, Zhao Z B, Peng M, et al. Review of “orogenic plateau”[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(12): 3557–3571.
- [76] Sillitoe R H. Gold and copper Metallogeny of the central Andes: Past, present and future exploration objectives[J]. *Economic Geology*, 1992,87:2205–2216.
- [77] Jorge O M. Geología y Yacimientos Minerales Metalogénesis Andina[J].*Economic Geology*, 2008,103(4):1–6.
- [78] Volker J, Joachim M, Klaus W, et al. Hercynian deformation and metamorphism in the Cordillera Oriental of Southern Bolivia, Central Andes[J]. *Tectonophysics*, 2002,345:119–130.
- [79] Ewart A. The mineralogy and petrology of Tertiary-Recent orogenic volcanic rocks; with special reference to the andesite-basaltic compositional range[G]//Thorpe R S, ed. *Andesites*. New York: John Wiley and sons, 1982.
- [80] Ramiro S S. Compendio de Geología de Bolivia[J]. *Revista Tecnica de Yacimientos Petroliferos Fiscales Bolivia*, 2000, 18(1–2):1–127.
- [81] Friedrich L, Gerhard F, Rolf L R, et al. Pre-Cenozoic intra-plate magmatism along the Central Andes (17°S–34°S): Composition of the mantle at an active margin[J]. *Science Direct*, 2007,99:312–338.
- [82] 张潮,陈玉明,赵宏军.南美洲中安第斯地区构造——岩浆事件与成矿[J].*地质论评*, 2017,63(S):17–18.
Zhang C, Chen Y M, Zhao H J. The Tectono-magmatic events and mineralization in the central Andes of south america[J]. *Geological Review*, 2017,63(S):17–18.
- [83] 赵宏军,卢民杰,邱瑞照,等.浅谈安第斯成矿带铜矿时空分布规律[C]//中国地球科学联合学术年会会议论文,2014.
Zhao H J, Lu M J, Qiu R Z, et al. Discussion on the temporal and spatial distribution of copper deposits in the Andean metallogenic belt[C]// China Earth Science Joint Academic Annual Meeting, 2014.
- [84] 杜玉龙,方维萱.安第斯玻利维亚段金属成矿带及战略选区方向探讨[J].*矿物学报*, 2017,37(增刊):876–877.
Du Y L, Fang W X. Discussion on metallogenic belt and strategic selection direction in the Bolivian section of Andes[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2017, 37(S):876–877.

Research, development and application effect of comprehensive evaluation technique of valley system secondary halo-remote sensing-tectonic lithofacies in basin-orogen-plateau inlaid structure and special landscape zone, Bolivia

DU Yu-Long^{1,2}, FANG Wei-Xuan³

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China; 2. Sinotech Minerals Exploration Co., Ltd., Beijing 100012, China; 3. China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China)

Abstract: In this paper, the authors carried out tentative research and promotion application, which constitute an integrated approach to valley system secondary halo-remote sensing-tectonic lithofacies interpretation in basin-orogen-plateau inlaid structure and special landscape zone of the Tupiza and Cuprita copper deposits, Bolivia. Key points of combinational method and application effect are as follows: ① The key is interpreting mapping unit by remote sensing-tectonic lithofacies, which serves as base map of valley systems secondary halo and tectonic lithofacies mapping unit. Remote sensing-tectonic lithofacies interpreting can identify topography and landscape cell rapidly, and improve effective point ratio of geologic mapping and sampling of valley systems secondary halo. ② Sampling horizon and sampling depth were determined tentatively. It is known that the main sampling horizon is B soil and the best sampling size fraction is -10~+60 mesh grain size. ③ The technical method has achieved good results in application and promotion in the Tupiza and Cuprita copper deposits, which proves that the combination of technical methods is an economic, efficient and rapid comprehensive evaluation technique in basin-orogen-plateau inlaid structure and special landscape area of Andes. It also provides an effective exploration route of overseas investment, so as to control risk for Chinese-funded enterprises.

Key words: secondary halo of valley systems; remote sensing-tectonic lithofacies interpretation (mapping); basin-orogen-plateau inlaid structure; plateau special landscape area, Bolivia

(本文编辑:蒋实)