

· 地质与测量 ·

基于土壤化探数据信息挖掘的湘南坪宝矿集区 找矿预测

雷 镇¹ 李 波¹ 郭 海² 王康盛² 龚述清² 胡 迁^{1,3} 王新富¹

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 湖南省湘南地质勘察院, 湖南 郴州 423000;

3. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550081)

摘 要 坪宝矿集区是湘南最重要的铅锌多金属矿产集中区, 因区内宝山铜铅锌、黄沙坪铜锡多金属矿床而著称, 具备良好的找矿潜力。由于长期大规模的矿业开发活动, 造成地表超常富集成矿元素, 地表开展化探工作已不具备条件。通过收集坪宝矿集区内 192 件土壤化探数据, 基于 7 条物探线, 绘制了 Cu、Pb、Zn、Sn 4 种成矿元素地球化学剖面, 分析其空间分布规律; 并选取 W、Sn、Mo、Pb、Ag、As、Bi、Cu、Hg、Sb、Zn、Cd、Co、Cr、Ni、V 等微量元素进行聚类分析和因子分析, 利用原数据进行找矿信息的深入挖掘, 绘制了因子组合地球化学异常图; 结合成矿地质条件, 圈定了 6 个找矿靶区。目前, 宝山矿区已在②号靶区的 165 号线进行钻孔验证, ZK16508 深钻于 1 664. 83~1 699. 84 m 处揭露到铜矿体, 厚度达 35 m, 验证了该靶区的深部找矿潜力, 为区内深部找矿勘探提供了方向。研究表明: 在不具备开展化探工作条件的部分地区, 通过上述方法对已有数据进行信息挖掘, 能有效提取深部矿化信息, 可实现找矿预测。

关键词 土壤化探 聚类分析 因子分析 深部找矿预测 坪宝矿集区

中图分类号 TD11, P612 文献标志码 A 文章编号 1001-1250(2022)-08-161-012

DOI 10. 19614/j. cnki. jsks. 202208023

Prospecting Prediction of Pingbao Ore Concentration Area in Southern Hunan Based on Soil Geochemical Data Information Mining

LEI Zhen¹ LI Bo¹ GUO Hai² WANG Kangsheng² GONG Shuqing² HU Qian^{1,3} WANG Xinfu¹

(1. Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Hunan Xiangnan Geological Survey Institute, Chenzhou 423000, China; 3. Institute of Geochemistry, Chinese

Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

Abstract Pingbao ore concentration area is the most important lead-zinc polymetallic ore concentration area in Southern Hunan. It is famous for Baoshan copper-lead-zinc and Huangshaping copper-tin polymetallic deposits, and has good prospecting potential. Due to the long-term large-scale mining development activities, the surface is extremely rich in ore-forming elements, and the conditions for surface geochemical exploration work are no longer available. In this paper, 192 soil geochemical data in Pingbao ore concentration area were collected. Based on seven geophysical prospecting lines, the geochemical profiles of Cu, Pb, Zn and Sn were plotted, and their spatial distribution was analyzed. The trace elements such as W, Sn, Mo, Pb, Ag, As, Bi, Cu, Hg, Sb, Zn, Cd, Co, Cr, Ni and V were selected for cluster analysis and factor analysis. The original data were used for in-depth mining of prospecting information, and the factor combination geochemical anomaly map was drawn. Combined with the metallogenic geological conditions, six prospecting targets were determined. At present, the Baoshan mining area has been drilled in 165 lines of No. 2 target area, 35 m thick copper ore body was discovered in the 1 664. 83~1 699. 84 m of ZK16508 deep drilling, which verifies the deep prospecting potential of the target area and provides a direction for deep prospecting and exploration of other targets in the area. This study showed that deep mineralization information was effectively extracted and prospecting prediction was realized through information mining of existing data, in some areas that have no working conditions for geochemical exploration.

收稿日期 2021-07-26

基金项目 “十三五”国家重点研发计划项目(编号:2018YFC0603903);国家自然科学基金项目(编号:41862007);云南省万人计划青年拔尖人才项目(编号:YNWR-QNBJ-2018-093);昆明理工大学重点学科建设项目(编号:14078384)。

作者简介 雷 镇(1994—),男,硕士研究生。通信作者 李 波(1981—),男,教授,博士,硕士研究生导师。

Keywords soil geochemical exploration, cluster analysis, factor analysis, deep prospecting prediction, Pingbao ore concentration area

坪宝矿集区位于湖南省南部的郴州地区,以宝山产出 Cu、Mo、Pb、Zn、Ag 矿,黄沙坪产出 W、Sn、Cu、Mo、Pb、Zn 矿等矿床为代表,拥有丰富的矿产资源,为湖南省最重要的铅锌多金属矿产集中区;同时也是钦杭成矿带^[1-3]和南岭成矿带^[4]的核心组成部分,一直是国内外学者所关注的热点研究地区之一^[4-5]。前人对坪宝矿集区所处的钦杭成矿带^[5-6]、南岭成矿带的构造演化^[7-8]及成矿作用^[9-11]进行了大量研究,认为坪宝矿集区找矿潜力较好,并进行了区域成矿规律^[12-13]、矿床地质^[14-15]、成矿作用^[16-18]、成矿模式^[19-20]以及找矿预测^[21-23]等方面的研究,坪宝矿集区现有的勘探工程仅控制了矿集区的中浅部,而深部的找矿潜力巨大。为此,国家科技部立项实施了国家重点研发计划——“钦杭成矿带湘南段铜锡多金属矿产深部探测技术示范”深地资源勘查开发项目,旨在实施单孔 3 000 m 深钻、基本摸清深部资源潜力。

笔者所在团队承担了国家重点研发计划项目(“钦杭成矿带湘南段铜锡多金属矿产深部探测技术示范”)子课题“宝山、黄沙坪矿区深部构造地球化学测量”的研究工作,任务是通过坪宝矿集区的地表

和坑道的地球化学填图工作,为三维精细探测与钻孔定位提供化探证据。由于坪宝矿集区植被覆盖良好、基岩出露极少,且数十年来大规模的矿业开发活动造成了地表土壤中超常富集成矿元素,地表开展化探工作已不具备条件。故本研究系统收集了坪宝矿集区原土壤化探数据,进行二次开发利用,旨在挖掘更多找矿预测信息。通过分析,采用该方法能够缩小元素组合异常区域,使地球化学异常更为明显;结合矿集区的地质特征,可以更有效地提取找矿信息,更容易圈定地球化学异常区域,为找矿预测提供重要依据。

1 地质概况

坪宝矿集区位于湘南地区(图 1),出露地层为古生代泥盆系、石炭系和二叠系。泥盆系至石炭系主要为碳酸盐岩,其中以石炭系分布最广,为一套浅海相碳酸盐岩夹海陆交互相砂页岩建造,是矿集区内 Cu、Pb、Zn 矿床的重要含矿层位^[19,24]。二叠系主要为页岩和砂岩,是区内 Cu、Pb、Zn、Ag 矿床的重要赋矿层位^[21,25]。矿集区内有色金属矿产的赋矿层位和岩性主要为石炭系石磴子组(C₁sh)灰岩、测水组(C₁c)砂页岩、梓门桥组(C₁z)白云岩^[20,26-27]。

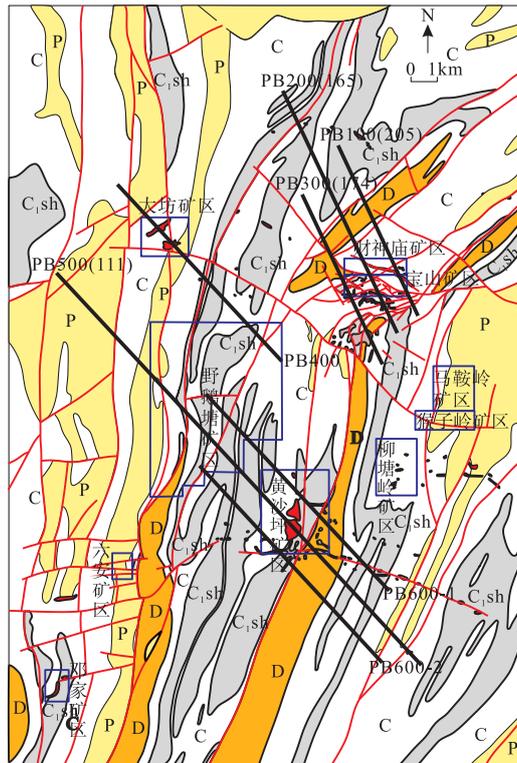


图 1 坪宝矿集区地质特征^[28]

Fig. 1 Geological characteristics of Pingbao ore concentration area

■—二叠系; □—石炭系; ▨—下石炭统石磴子组; ▩—泥盆系; ■—花岗岩长斑岩; ▨—凝灰岩; ▨—断层;
□—矿区范围; ▨—地质界线; ▨—物探线及编号

自新元古代扬子地块与华夏地块完成拼合以来,坪宝矿集区经历了加里东期、海西期、印支期以及燕山期的构造活动,形成了一系列SN、NNE—NE向的复式褶皱和逆冲断裂,构成了向北撒开、向南收敛、北宽南窄的构造格架^[29-31],在平面上呈“帚状”形态,在剖面上则显示一系列叠瓦状构造^[26,32-33]。矿集区内断裂以SN向或NNE向压扭性断裂为主,EW向或NW向张性或张扭性断裂次之,NW向扭性断裂更次之。其中,SN向或NNE向压扭性断裂中的Ⅲ级断裂为有利的容矿场所;近EW向或NW向张性或张扭性断裂多为控岩导矿构造,控制着坪宝矿集区岩体的产出;NW向断裂一般不含矿,是区内主要的控岩导矿构造^[23,34]。区内褶皱由一系列走向近SN—NNE向复式倒转向、背斜组成,常被NW、EW向断裂错断,这种“褶皱加一刀”式的构造复合部位常为成矿的有利部位,是坪宝矿集区内主要的赋矿构造^[35-37]。

矿集区内发育有两类燕山期花岗岩:一类为花岗闪长质小岩体,与铜、铅、锌、金银等多金属矿床有关,例如水口山、宝山等矿床,属于与富钾的花岗岩类有关的成矿系统;另一类为花岗岩体,与钨、锡、稀土、铌、钽多金属矿床有关,如黄沙坪、柿竹园等矿床,属于与陆壳重熔型花岗岩类有关的成矿系统^[25,38-39]。

坪宝矿集区的矿产分布与岩浆岩密切相关,多产于岩体接触带及其附近^[30]。矿集区内分布有邓家矿区、六合矿区、大坊矿区、野鹅塘矿区、财神庙矿区、宝山矿区、黄沙坪矿区、柳塘岭矿区、马鞍岭矿区和猴子岭矿区(图1)。矿集区内主要存在8种矿床类型:①花岗斑岩型铷矿床,主要产于长城岭矿区,区内构造发育,发育有花岗斑岩、辉绿岩及斜斑玄武岩等,含铷花岗岩体多分布在近EW向骑田岭—九峰山花岗岩带内^[40],目前尚不具备开发利用价值;②矽卡岩型铁(锡)矿床,如香花岭矽卡岩型锡矿床,出露地层主要有寒武系浅变质岩、泥盆系中统跳马涧组碎屑岩、棋梓桥组碳酸盐岩,矿区内NE向和NW向两组断裂组成共轭扭断裂,矿区岩浆岩主要为癞子岭花岗岩体,围岩蚀变为矽卡岩化、角岩化、硅化和绿泥石化^[41];③矽卡岩型钨钼矿床,如黄沙坪钨钼多金属矿床,矿区出露地层为石炭系测水组灰岩和石磴子组灰岩,区内发育有与成矿关系密切的隐伏花岗斑岩体^[42];④矽卡岩型铜钼矿床,主要产于宝山矿区中部,出露地层为泥盆系—二叠系,矿体主要受宝岭倒转背斜控制,出露岩浆岩为花岗闪长斑岩^[26];⑤热液脉型铅锌银矿床,如宝山东部中—中低温、财神庙中低温和宝山西部中低温热液型铅锌银矿床,受断裂破碎带及其旁侧羽状裂隙控制,为岩体(脉)边缘接

触处的冷凝收缩破碎带及褶皱轴部的层间剥离破碎带和挤压破碎带控制^[26];⑥热液蚀变岩型金银矿床,如大坊金矿,矿区出露地层主要为石炭系—二叠系,其中石炭系梓门桥组和壶天群组为主要赋矿层位^[43];⑦红土型金矿床,主要见于大坊矿区,矿区出露地层岩性主要为石炭系梓门桥组白云岩和壶天群白云岩,构造以EW向、SN向、NW向断裂为主,有花岗闪长斑岩出露,绢云母化、碳酸盐化、硅化和矽卡岩化愈复杂强烈,对成矿愈有利^[30,39];⑧风化淋滤堆积型锰矿床,该类矿床规模小,如桂阳六合锰矿,矿区出露下二叠统当冲组岩层,经风化淋积和热水迁移聚集而成^[44]。

2 地球化学数据处理及分析

本研究在湖南省湘南地质勘察院的协助下,系统收集了坪宝矿集区192件土壤化探数据^[45],选取W、Sn、Mo、Pb、Ag、Au、As、Bi、Cu、Hg、Sb、Zn、Cd、Co、Cr、Ni、V等17种成矿元素,进行R型聚类分析和Q型因子分析。

2.1 R型聚类分析

聚类分析又称集群分析,是按“物以类聚”原则,根据变量之间的相似性或亲疏关系,将变量进行分类^[46]。本研究利用Statistica软件进行R型聚类分析,得到R型聚类分析谱系图(图2)。

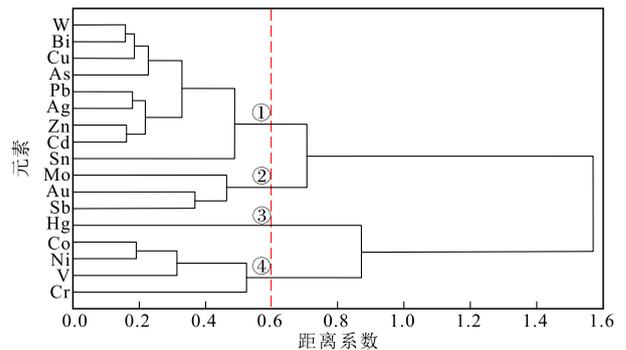


图2 坪宝矿集区土壤地球化学样品R型聚类分析谱系图
Fig. 2 R-type cluster analysis pedigree of soil geochemical samples in Pingbao ore concentration area

由图2可知:当距离系数为0.6时,可分为4组元素组合,第①组为W、Bi、Cu、As、Pb、Ag、Zn、Cd、Sn,可能为中高温—中温成矿元素组合;第②组为Mo、Au、Sb,为高温成矿元素组合;第③组为Hg,代表低温成矿元素;第④组为Co、Ni、V、Cr,可能代表围岩中与基性岩有关的成矿元素组合。

2.2 Q型因子分析

因子分析是从多个复杂变量中依据某种内在联系,而选择出少量综合变量的一种降维多元统计分析方法,用以达到数据简化的目的^[47]。在地球化学勘查中,通过因子得分值绘制的元素组合异常图,有助

于了解元素运移富集规律,从而指导找矿预测^[48-49]。本研究选取坪宝矿集区土壤地球化学样品中的 17 种成矿元素进行 Q 型因子分析,当累计方差贡献率达 77.31%时,得到 4 个主因子元素组合(表 1):① Fa₁ 因子,Zn、As、Pb、Ag、Cd、W、Sn、Bi、Cu、Mo、Sb、(Au);② Fa₂ 因子,Ni、V、Co、Cr、Mo²、(Sb²);③ Fa₃ 因子,(Bi²、Cd²)、-Hg;④ Fa₄ 因子,(Sb³、W²、Au²)。

表 1 坪宝矿集区土壤地球化学样品方差极大旋转因子载荷矩阵

Table 1 Maximum variance rotation factor loading matrix of soil geochemical samples in Pingbao ore concentration area

元素	主因子			
	Fa ₁	Fa ₂	Fa ₃	Fa ₄
W	0.785 942	0.141 967	0.158 571	0.423 565
Sn	0.783 908	0.009 109	-0.186 740	0.017 110
Mo	0.625 006	0.564 594	0.156 493	0.117 953
Pb	0.878 614	-0.101 190	0.256 328	-0.004 210
Ag	0.822 199	0.0736 570	0.259 955	0.057 562
Au	0.498 201	0.248 378	0.323 539	0.400 143
As	0.879 446	0.029 173	0.079 797	0.263 053
Bi	0.776 724	-0.012 390	0.457 525	0.291 329
Cu	0.757 921	0.373 247	0.307 287	0.278 985
Hg	-0.28 312	0.259 459	-0.638 970	-0.06 015
Sb	0.563 169	0.490 803	-0.003 840	0.472 463
Zn	0.907 462	0.141 028	0.166 297	0.009 903
Cd	0.791 314	0.224 974	0.419 695	-0.046 140
Co	0.141 813	0.829 974	0.057 810	-0.106 740
Cr	-0.056 520	0.650 421	-0.316 850	0.225 091
Ni	0.013 665	0.935 041	-0.094 230	-0.064 720
V	0.101 322	0.855 573	0.002 049	0.309 750
特征值	7.150 936	3.653 601	1.357 307	0.980 220
所占比例	0.420 643	0.214 918	0.079 842	0.057 660

结合坪宝矿集区的地质特征,研究认为 Fa₁ 因子代表铅锌等中温成矿元素组合,Fa₂ 因子代表围岩与基性岩有关的成矿元素组合,Fa₃ 因子代表低温成矿元素组合,Fa₄ 因子代表与 Au、W 有关的高温元素组合。

3 地球化学异常分析

3.1 剖面地球化学

本研究选取 Cu、Pb、Zn、Sn 4 种成矿元素,绘制了 PB100(205)、PB200(165)、PB300(174)、PB400、PB500(111)、PB600-1、PB600-2 物探线的地球化学剖面图,可以直观地反映成矿元素的空间变化规律。

由 PB100(205)线地球化学剖面图(图 3)可以清楚看到,Cu、Pb、Zn、Sn 4 种成矿元素含量在财神庙、宝山矿区叠加较好,整体上 4 种成矿元素含量沿 PB100(205)线自 NNW→SSE 呈现增高的趋势,反映

了这些成矿元素在该区的富集,Cu、Zn 含量基本呈同步消长的变化规律。在宝山矿区 SSE 侧,Pb、Zn、Sn 含量值较高,其中 Pb 含量达到 2 600×10⁻⁶ 以上,Sn 含量达到 15×10⁻⁶,仍有升高的趋势。该处 NE 向断裂发育,为成矿的有利场所,南部出露石炭系石磴子组(C₁sh)灰岩,是铅锌矿的重要赋矿层位,矿区内发育的细脉状花岗闪长斑岩可为成矿提供物质来源。

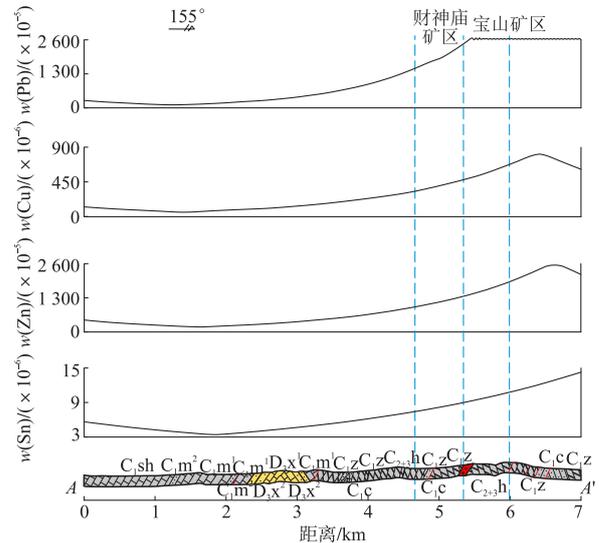


图 3 坪宝矿集区 PB100(205)线地球化学剖面
Fig. 3 Geochemical profile of PB100 (205) line in Pingbao ore concentration area

—灰岩;—白云岩;—砂岩;—泥岩;—页岩;
—花岗闪长斑岩;—断层;—地质界线

由图 4 可知:Cu、Pb、Zn、Sn 成矿元素含量总体上自物探线 PB200(165) NNW→SSE 呈现逐渐升高的特点,局部出现小峰值,推测可能与该区 NE 向断裂及中酸性岩枝有关。Cu、Pb、Zn 成矿元素含量自宝山矿区往 SSE 侧有继续升高的趋势,在 SSE 侧达到峰值后开始减小,反映宝山矿区 SSE 侧存在元素浓度异常区,且宝山矿区南部发育花岗闪长斑岩岩体、SSE 侧有石炭系石磴子组(C₁sh)灰岩出露,具备 Cu、Pb、Zn 富集成矿的地层、岩性及岩浆岩条件,显示出较好的找矿潜力。

在图 5 中,Cu、Pb、Zn 成矿元素含量存在双峰值,且 Cu、Zn 含量异常重合性较好,呈同步消长的变化规律。宝山矿区 NNW 侧 Cu、Pb、Zn 3 种元素存在峰值,可能与 NW 向 F₁₃₂ 断裂和出露的少量花岗闪长斑岩有关,推测 NW 向 F₁₃₂ 断裂为成矿流体运移通道。Pb、Zn 含量在宝山矿区内表现为自 NNW→SSE 减少的趋势,Cu、Zn 含量在宝山矿区 SSE 侧存在一个峰值,可能与狮子岭出露的凝灰岩有关,反映宝山矿区边部铅矿化减弱,铜、锌和锡矿化增强。综合分析图 3 至图 5 可知,Sn 含量变化基本一致,总体上沿 3 条物探线自 NNW→SSE 升高的趋势,异常不明显;平

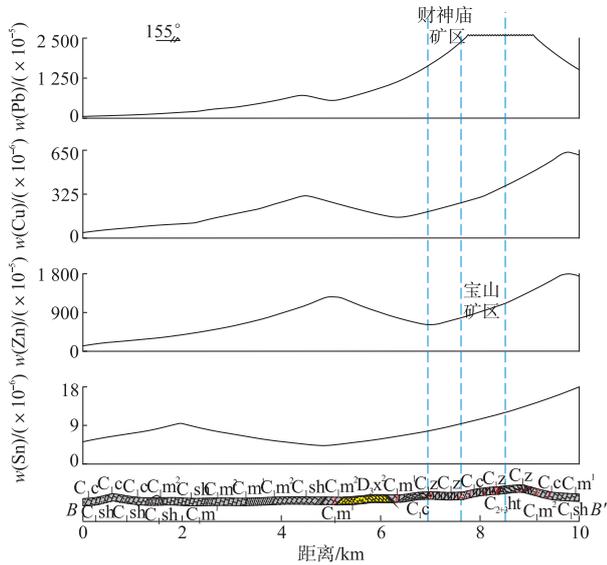


图4 坪宝矿集区 PB200(165)线地球化学剖面

Fig. 4 Geochemical profile of PB200 (165) line in Pingbao ore concentration area

—灰岩; —白云岩; —砂岩; —泥岩; —页岩;
—花岗岩闪长斑岩; —断层; —地质界线

面上,Cu、Pb、Zn、Sn 4种成矿元素含量在宝山矿区内由E→W呈现减少的趋势,反映成矿元素受NW、NE向断裂组严格控制。

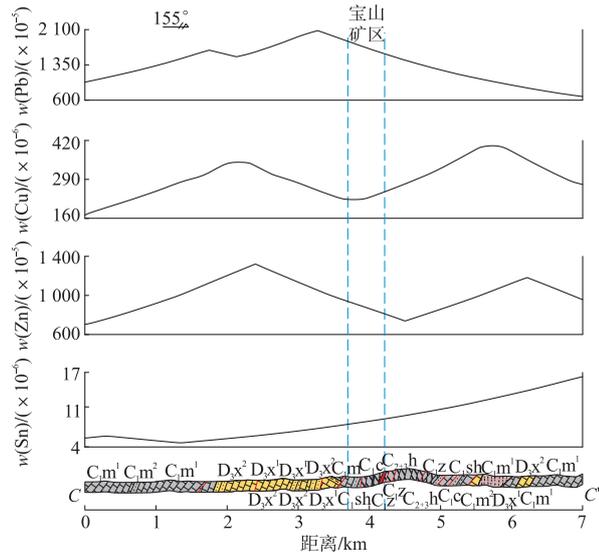


图5 坪宝矿集区 PB300(174)线地球化学剖面

Fig. 5 Geochemical profile of PB300 (174) line in Pingbao ore concentration area

—灰岩; —白云岩; —砂岩; —泥岩; —页岩;
—花岗岩闪长斑岩; —英安质岩屑凝灰岩; —断层; —地质界线

PB400线主要穿过野鹅塘矿区、大坊矿区,Cu、Pb、Zn、Sn 4种成矿元素含量变化范围不大(图6),其中,Cu、Zn、Sn 3种元素的变化规律基本一致,沿PB400线自NW向SE逐渐降低,至野鹅塘矿区又逐渐升高;Pb含量总体上沿PB400线自NW→SE呈现逐渐升高,在大坊矿区SE侧达到峰值后开始降低,至野鹅塘矿区SE侧又逐渐升高。大坊矿区Pb含量

高,可能与花岗闪长斑岩以及SN向、近EW向断裂有关。

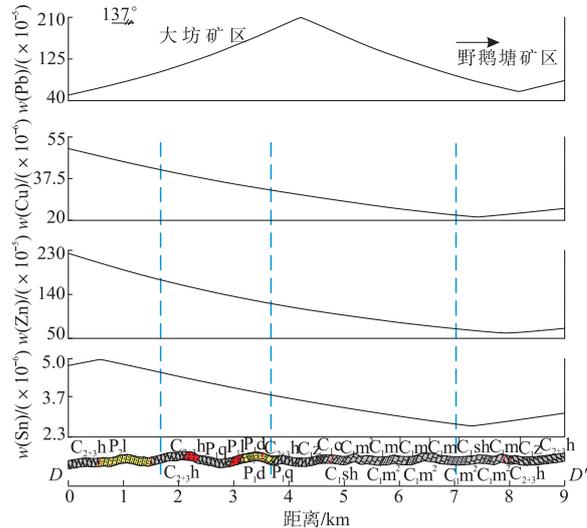


图6 坪宝矿集区 PB400线地球化学剖面

Fig. 6 Geochemical profile of PB400 line in Pingbao ore concentration area

—灰岩; —白云岩; —砂岩; —泥岩; —页岩;
—硅质岩; —花岗岩闪长斑岩; —断层; —地质界线

PB500(111)线主要穿过野鹅塘矿区、黄沙坪矿区(图7),Cu、Pb、Zn、Sn 4种成矿元素含量总体上沿PB500(111)线自NW向SE逐渐升高,在黄沙坪矿区达到峰值后,向矿区SE侧逐渐减少后又具缓慢升高。黄沙坪矿区出露与成矿最为密切的花岗斑岩岩体,NNE向断裂为元素富集提供有利场所,近EW向断裂控制成矿流体运移,造成黄沙坪矿区的成矿元素含量最高。Cu、Pb、Zn、Sn 4种成矿元素含量在野鹅塘矿区呈现逐渐升高的特点,可能与出露大面积石炭系石磴子组(C₁sh)灰岩及深部隐伏岩体有关。

PB600-1线位于PB500(111)线NE侧,穿过黄沙坪矿区及野鹅塘矿区的中东部(图1),Cu、Pb、Zn、Sn 4种成矿元素含量变化规律一致,且空间重合性较好,均在黄沙坪矿区达到峰值,元素含量变化规律总体上与PB500(111)线相似(图8)。

PB600-2线位于PB500(111)线SW侧,穿过黄沙坪矿区的SW部及野鹅塘矿区的南部(图1),Cu、Pb、Zn、Sn成矿元素含量的变化规律总体上与PB500(111)线、PB600-2线的元素含量变化规律一致(图9)。综合PB600-1、PB500(111)、PB600-2线元素地球化学剖面图,可以看出Cu、Pb、Zn、Sn 4种成矿元素含量具有明显的分带性,以黄沙坪矿区为中心,元素含量向两侧呈现降低的趋势,含量异常中心往往是有利的赋矿部位,具有较好的找矿潜力。

3.2 因子组合地球化学异常

本研究在R型聚类分析和Q型因子分析的基础

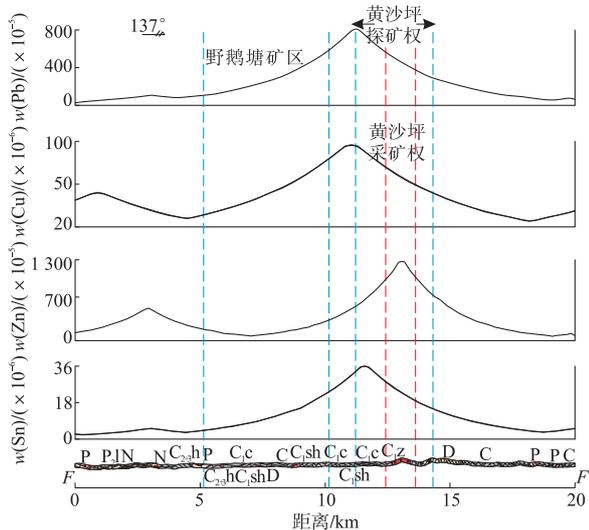


图 7 坪宝矿集区 PB500(111)线地球化学剖面

Fig. 7 Geochemical profile of PB500 (111) line in Pingbao ore concentration area

一泥灰岩; 一白云质灰岩; 一灰岩; 一白云岩; 一砂岩;
 一泥岩; 一页岩; 一硅质岩; 一长石英砂岩;
 一流纹斑岩; 一断层; 一地质界线

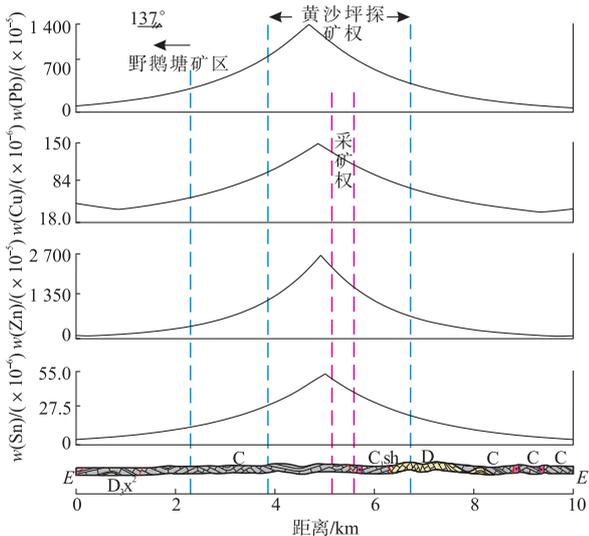


图 8 坪宝矿集区 PB600-1 线地球化学剖面

Fig. 8 Geochemical profile of PB600-1 line in Pingbao ore concentration area

一泥灰岩; 一白云质灰岩; 一灰岩; 一白云岩;
 一砂岩; 一页岩; 一流纹斑岩; 一断层; 一地质界线

上,绘制了坪宝矿集区的土壤地球化学 Fa_1 因子、 Fa_2 因子、 Fa_3 因子和 Fa_4 因子的等值线异常图(图 10),并将 Fa_1 因子、 Fa_3 因子和 Fa_4 因子等值线叠加在地质图上(图 11),从因子得分等值线异常—地质图上可以清楚看出元素组合异常区域,具有明显的浓度集中区,特别是宝山—黄沙坪一带。

图 10(a)、图 11(b)为 Fa_1 因子等值线异常图,反映的是铅锌等中温成矿元素异常。坪宝矿集区内明显形成了 2 个异常区, I 异常区位于黄沙坪矿区,呈 NNE—SSW 向展布,向 SSE 发散; II 异常区位于桂

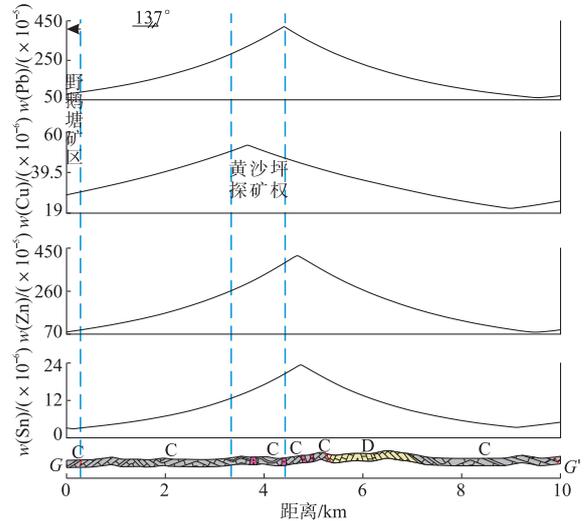


图 9 坪宝矿集区 PB600-2 线地球化学剖面

Fig. 9 Geochemical profile of PB600-2 line in Pingbao ore concentration area

一泥灰岩; 一白云质灰岩; 一灰岩; 一白云岩;
 一砂岩; 一页岩; 一流纹斑岩; 一断层; 一地质界线

阳县—宝山矿区东侧,异常走向呈 NNW—SSE 向,向 SWW 发散。总体上两个异常区走向基本一致,与矿集区 NNE 向的构造基本平行,表明异常受构造控制作用明显;但两个异常区不连续,可能与 SN—NNE 向复式倒转背、向斜被 NW 向断裂错断有关。沿 PB200(165)线自 NNW 向 SSE,中温成矿元素组合异常加强,与 Cu、Pb、Zn、Sn 成矿元素含量等值线变化趋势基本一致;PB600-1、PB600-2 线自 NW 向 SE,中温成矿元素组合异常呈现出由弱到强再减弱的特征,在黄沙坪矿区内异常最明显,平面上与 Cu、Pb、Zn、Sn 成矿元素含量呈北高南低的变化趋势基本一致。

图 10(b)为 Fa_2 因子等值线异常图,反映的是围岩中与基性岩有关的成矿元素。因子组合中的镍(Ni)和钴(Co)均为铁族元素,地球化学性质相似,具有亲铁和亲硫的双重性质;在地质作用过程中,两者具有正相关关系。因子组合正异常显示坪宝矿集区的围岩地层空间分布,负异常则反映中酸性岩体的空间展布特征,与地质事实基本一致。坪宝矿集区内的岩体在深部为一个近 SN 向展布的岩基,呈现 2 个负异常区: III 异常区在宝山矿区和大坊矿区的中间位置, IV 异常区位于黄沙坪矿区,异常大致呈“S”形态,宝山矿床、黄沙坪矿床分别位于岩体的转折部位(图 10(b))。

图 10(c)、图 11(c)为 Fa_3 因子等值线异常图,反映的是低温成矿元素异常。由于元素组合中 Hg 为负值,故其负异常代表低温成矿元素异常。矿集区内的黄沙坪矿区形成了明显异常,可细分为 3 个异常区: V 异常区位于黄沙坪矿区, VI 异常区位于黄沙坪

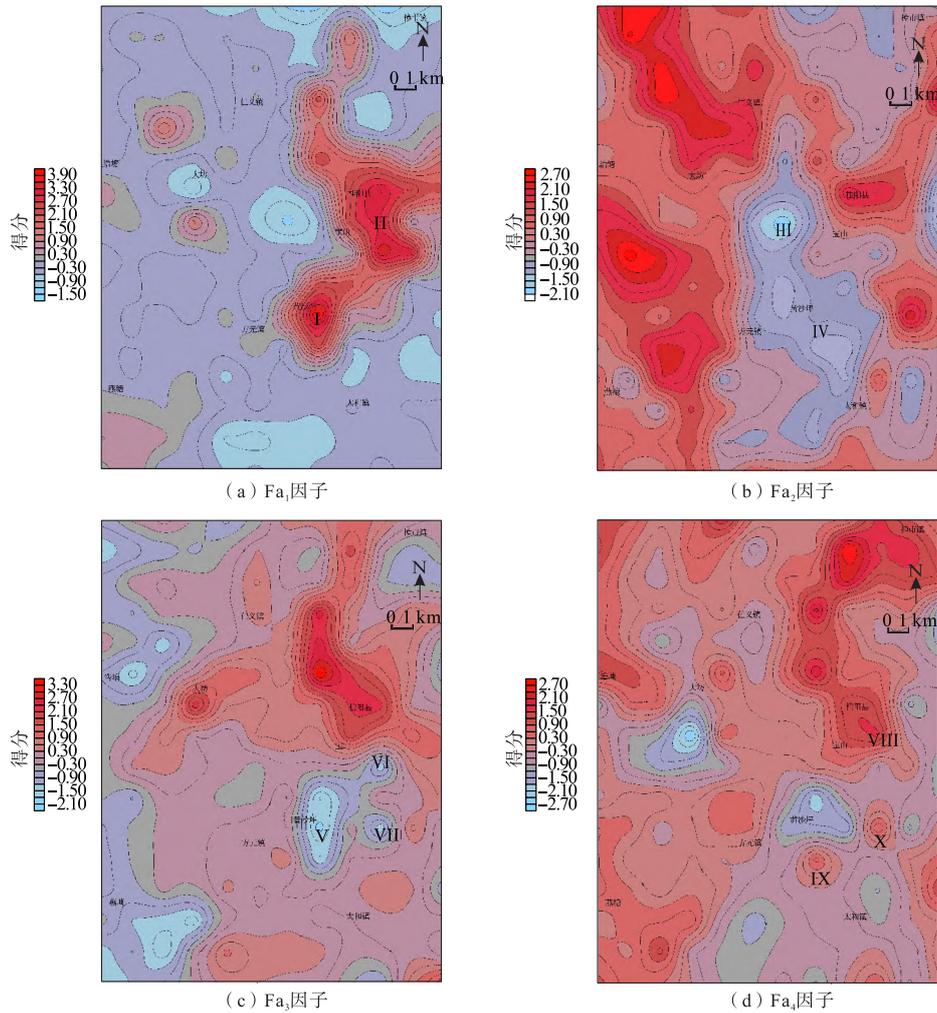


图 10 坪宝矿集区因子得分等值线异常图

Fig. 10 Isoline anomaly plot of factor scores in Pingbao ore concentration area

矿区 NE 侧, VII 异常区位于黄沙坪矿区 E 侧, 异常总体走向呈 NE—SW 向展布, 向 SE 发散。V 异常区的 Fa_3 因子得分值整体上以黄沙坪矿区为中心, 分别向 NW 和 SE 方向升高, 推测与近 EW 向断裂切穿 NE 向断裂有关。

图 10(d)、图 11(a) 为 Fa_4 因子等值线异常图, 反映的是高温成矿元素异常。坪宝矿集区内可圈定 3 个异常区: VIII 异常区位于宝山矿区, IX 异常区位于黄沙坪矿区 S 侧, X 异常区位于黄沙坪矿区 E 侧。VIII 异常面积较大, 走向总体呈近 SN 向展布, 向 W 发散, 异常区的 Fa_4 因子得分值总体上具有自 NW→SE 呈现升高的趋势, 该处有花岗闪长斑岩, 呈岩株、岩脉状产出, 为宝山矿床的形成提供了成矿物质^[30]。IX 异常和 X 异常走向呈近 EW 向展布, 向 N 或 S 发散, IX 异常和 X 异常区的 Fa_4 因子得分值总体上自 NW 向 SE 逐渐升高, 推测与 NWW 向断裂有关, 该处也发育有斑岩体。

因子分析结果显示, 高温成矿元素异常 (IX、X)、中温成矿元素异常 (I、II)、低温成矿元素异常

(V) 范围及延伸方向明显受到坪宝矿集区内 NWW 向、NNE 向和近 EW 向断裂控制, 中酸性岩体元素异常 (III、IV) 与近 SN 向断裂有关, 指示异常空间展布明显受构造控制。

4 找矿预测

4.1 成矿流体运移方向

高温、中温、低温地球化学异常分布的空间相对位置, 可以大致反映成矿流体的运移方向。宝山矿区北部自 NNW 侧依次出现了中酸性岩体元素异常 (III)→高温成矿元素异常 (VIII)→中温成矿元素异常 (II)→低温成矿元素异常 (VI), 反映了成矿流体自 NNW 向 SSE 运移 (图 12), 推测宝山矿区北部 NNW 侧为重点找矿靶区。宝山矿区西南部自 NW 侧依次出现了中酸性岩体元素异常 (III)→高温成矿元素异常 (VIII)→中温成矿元素异常 (II)→低温成矿元素异常 (VI), 反映成矿流体自 NW 向 SE 运移, 推测宝山矿区西南部的 NW 侧也为重点找矿靶区。需要说明的是, 宝山矿区的高温成矿元素异常 (VIII)、中温成矿元素异常 (II) 在空间上呈现近乎重叠的特征, 反映

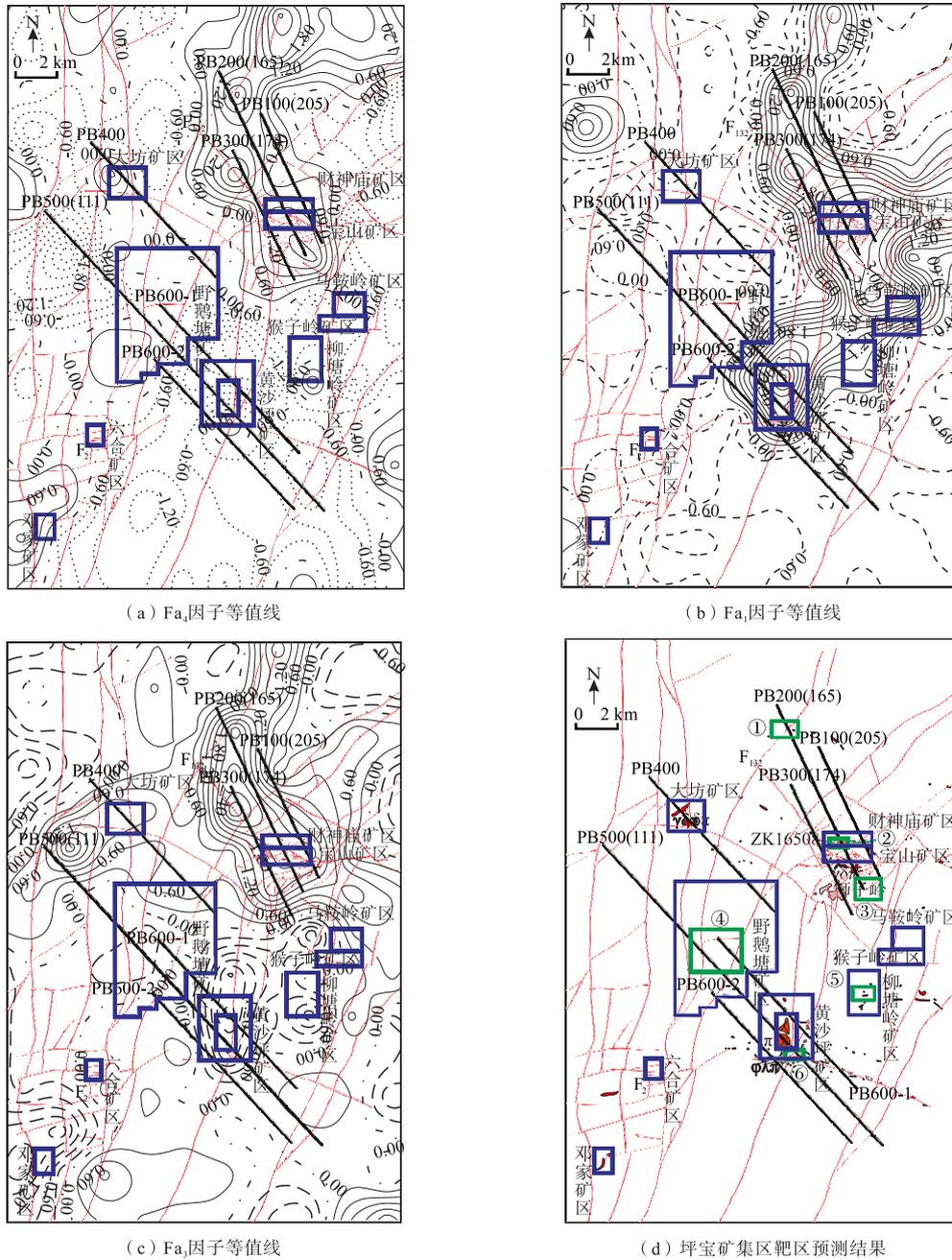


图 11 坪宝矿集区因子得分等值线异常及地质叠合简图

Fig. 11 Factor score contour anomalies and geological overlay diagram of Pingbao ore concentration area

■—斑岩; □—凝灰岩; ▨—物探线; ▩—断层; □—矿区名称; ▭—因子等值线; □—预测靶区及编号

出成矿流体在水平方向上的转移距离不大,推测深部矿体的产状较陡,与宝山矿区深部揭露的矿体产状一致。

柳塘岭矿区内发育有花岗闪长斑岩岩株、岩枝,矿区中部自东侧异常依次呈现中酸性岩体元素异常(IV)→高温成矿元素异常(X)→低温成矿元素异常(VII)→中温成矿元素异常(I)→低温成矿元素异常(V),反映成矿流体自E向W运移(图12)。柳塘岭矿区内低温成矿元素异常(VII)与高温成矿元素异常(X)在空间上大致重合,反映成矿流体的水平运移

距离不大,推测与岩体的产状较陡有关,因此柳塘岭矿区的中部是重点找矿靶区。

黄沙坪矿区本身就处于中酸性岩浆岩分布区,整体位于中酸性岩体元素异常(IV)内,其流体运移方向并不明显(图12)。自黄沙坪矿区中部向北,依次出现高温成矿元素异常(IX)→中温成矿元素异常(I)→低温成矿元素异常(V),反映成矿流体自SSE向NNW运移,因此黄沙坪矿区南侧是寻找高温矿体的重点找矿靶区。同时,黄沙坪矿区北侧,出现了中酸性岩体元素异常(IV)、低温成矿元素异常

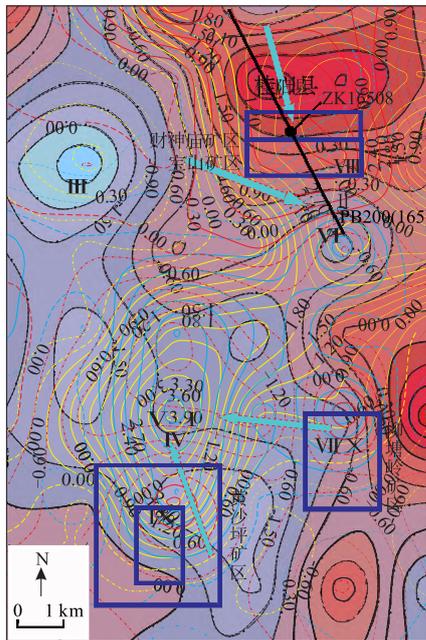


图 12 坪宝矿集区成矿流体运移示意

Fig. 12 Schematic of ore-forming fluid migration in Pingbao ore concentration area

—Fa₁因子等值线; —Fa₂因子等值线; —Fa₃因子等值线;
 □—Fa₁因子等值线; □—成矿流体运移方向; □—钻孔及编号;
 □—矿区范围

(V)与中温成矿元素异常(I)的空间重叠,也反映出成矿流体的水平运移距离不大,推测与岩体的侵位产状较陡有关。但此处并未出现高温成矿元素异常,推测与岩浆岩的成矿专属性有关,此处深部是寻找Cu-Pb-Zn矿体的重点找矿靶区。

4.2 找矿靶区

根据前人研究成果,坪宝矿集区石炭系石磴子组(C₁sh)灰岩为有利的赋矿层位^[33];坪宝矿集区内SN向或NNE向压扭性断裂是有利的容矿场所,近EW向、NW向断裂或NNW向张性或张扭性断裂多为控岩导矿构造,区内走向近SN—NNE向复式倒转向斜、背斜是坪宝区内主要的赋矿构造^[23,35-36]。宝山矿床发育的岩浆岩为燕山期花岗闪长质小岩体,与铜、铅、锌、金银等多金属矿床有关,黄沙坪矿床发育的岩浆岩为燕山期花岗岩体,与钨、锡、稀土、铌、钽多金属矿床有关。通过对土壤地球化学数据的信息挖掘,本研究圈定了6个找矿靶区,如图11(d)所示。

①号靶区位于宝山、财神庙矿区NW侧,预测依据主要为:出露地层为石炭系石磴子组(C₁sh)灰岩,为有利的赋矿地层;该处存在NNE向压扭性断裂,是有利的容矿空间;区内发育有少量花岗闪长斑岩,可为成矿提供成矿物质来源;高、中、低温成矿元素组合异常在此处均出现,且基本重合;反映该处成矿潜力较大、且深部矿体产状较陡。

②号靶区位于财神庙矿区以南、宝山矿区以北,

大致在两矿区的交界处,预测依据主要有:靶区西侧的地层岩性为石炭系石磴子组(C₁sh)灰岩,地层和岩性利于成矿;该处断裂发育,存在NE、NW向断裂组,NW向F₁₃₂断裂穿过靶区,为成矿提供了有利的构造条件;区内花岗闪长斑岩呈岩脉、岩株状产出,为有利的岩浆岩条件。Cu、Pb、Zn、Sn成矿元素含量在两矿区边界处呈明显升高的趋势。该处依次出现了中酸性岩体元素异常(III)→高温成矿元素异常(VIII)→中温成矿元素异常(II)→低温成矿元素异常(VI),反映成矿流体自NNW向至SEE向运移。反映该处深部具备较好的找矿潜力,推测可能为宝山矿区已知矿体的深部延深。

③号靶区位于宝山矿区SE侧,预测依据主要为:该处地层岩性为石炭系石磴子组(C₁sh)灰岩,该处发育有NE、NW向断裂;Cu、Zn含量自宝山矿区向SSE侧继续升高,II、VI、VIII异常在空间上基本重合(图10),反映成矿流体的运移距离不大。考虑到此处临近桂阳县城,已列为县城建设规划区域,不宜开展深部探矿工作。

④号靶区位于野鹅塘矿区,预测依据为:出露地层为石炭系石磴子组(C₁sh)灰岩,区内发育有近SN向和EW向断裂,可为成矿提供有利场所;Cu、Pb、Zn、Sn成矿元素含量在野鹅塘矿区呈现升高趋势,平面上呈现S高N低,反映成矿元素含量明显受构造控制。此处并未出现各类元素组合因子的明显异常,推测与该区地表未出露岩浆岩有关。根据宝山、黄沙坪矿区的岩浆岩展布情况,推测该区深部可能存在隐伏岩体,隐伏矿体亦埋藏较深。

⑤号靶区位于柳塘岭矿区中北部,预测依据主要为:其W侧及南部出露地层为石炭系石磴子组(C₁sh)灰岩;矿区E、W侧均发育有近SN向断裂,北部有NW向断裂错断这两条断裂,可为成矿提供容矿空间;区内花岗闪长斑岩呈岩株、岩枝状产出,可为成矿提供成矿物质来源。柳塘岭矿区同时出现了高温成矿元素异常(X)、低温成矿元素异常(VII),矿区中部东侧成矿流体自E向W运移,但运移距离不大。

⑥号靶区位于黄沙坪矿区SE侧,预测依据主要为:出露地层为泥盆系锡矿山组(D₃x²)灰岩和石炭系石磴子组(C₁sh)灰岩;NE向和近EW向断裂在此交汇,其中NE向压扭性断裂可为成矿提供有利的容矿场所,近EW向张性或张扭性断裂为控岩导矿构造;区内有凝灰岩呈岩株和岩脉状产出;Cu、Pb、Zn、Sn成矿元素含量以黄沙坪矿区为中心,向四周减少,指示黄沙坪矿区具有较好的找矿潜力。黄沙坪矿区南侧呈现高温成矿元素异常(IX)→中温成矿元素异

常(I)→低温成矿元素异常(V),反映成矿流体自 SSE 向 NNW 运移,中温成矿元素异常(I)与低温成矿元素异常(V)基本重合,反映成矿流体运移距离不大,深部隐伏矿体产状较陡。

目前,矿山已经在②号靶区的 165# 勘探线进行钻探工作,ZK16508 深钻于 1 664.83~1 699.84 m 处揭露到铜矿体,厚度达 35 m,验证了该靶区的深部找矿潜力,其他找矿靶区还有待于下一步的工程验证。

5 结 论

(1) 由于地表不具备开展化探工作的条件,本研究收集了坪宝矿集区土壤地球化学数据,基于 7 条物探线,选取 Cu、Pb、Zn、Sn 4 种成矿元素绘制了地球化学剖面。研究表明:宝山矿区 4 种成矿元素明显受 NW、NE 向断裂组严格控制;大坊矿区 Pb 含量高,可能与花岗闪长斑岩以及 SN 向、近 EW 向断裂有关;黄沙坪矿区 4 种成矿元素具有明显的分带性,以黄沙坪矿区为中心,元素含量向两侧呈现降低的趋势,指示黄沙坪矿区仍具有较好的找矿潜力。

(2) 坪宝矿集区 Fa_1 、 Fa_2 、 Fa_3 和 Fa_4 的因子得分等值线异常图显示 10 个地球化学异常区域,即高温成矿元素异常(VIII、IX、X)、中温成矿元素异常(I、II)、低温成矿元素异常(V、VI、VII)和围岩中与基性岩有关的成矿元素异常(III、IV)。宝山矿区北部成矿流体自 NNW 向至 SSE 向,西南部成矿流体自 NW 向至 SE 向运移;柳塘岭矿区中部东侧成矿流体自 E 向 W 运移,但运移距离不大;黄沙坪矿区中部向北,成矿流体自 SSE 向至 NNW 向运移。

(3) 综合坪宝矿集区地质特征、成矿元素空间分布规律、不同因子元素组合,推测成矿流体运移方向,本研究圈定了 6 个找矿靶区,②靶区找矿效果明显,施工钻孔揭露到厚达 35 m 的铜矿体,为区内深部隐伏矿勘探提供了依据。不足的是,本研究缺少与物探信息的综合分析,今后将结合相关物探资料,建立物化探综合找矿方法,为深部找矿预测进一步提供可靠依据。

参 考 文 献

[1] 毛景文,陈懋弘,袁顺达,等. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. 地质学报,2011,85(5):636-658.
MAO Jingwen, CHEN Maohong, YUAN Shunda, et al. Geological characteristics and spatial and temporal distribution of ore deposits in Qinhang metallogenic belt, South China[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(5):636-658.

[2] LI H, KONG H, ZHOU Z K, et al. Ore-forming material sources of the Jurassic Cu—Pb—Zn mineralization in the Qin-Hang ore belt, South China: constraints from S—Pb isotopes (Article)[J]. Chemie

Der Erde Geochemistry, 2019, 79(2):280-306.

- [3] LI T F, XIA Q L, CHANG L H, et al. Deposit density of tungsten polymetallic deposits in the Eastern Nanling metallogenic belt, China [J]. Ore Geology Reviews, 2018, 94:73-92.
- [4] LI D F, TAN C Y, MIAO F Y, et al. Initiation of Zn-Pb mineralization in the Pingbao Pb—Zn skarn district, South China: constraints from U-Pb dating of grossular-rich garnet[J]. Ore Geology Reviews, 2019, 107:587-599.
- [5] 徐述腾,周永章,郑义,等. 钦杭成矿带南段盘龙铅锌矿成矿体系环境分析——来自矿石组构的限定[J]. 地质与勘探, 2018, 54(4):674-688.
XU Shuteng, ZHOU Yongzhang, ZHENG Yi, et al. Analysis on metallogenic system environment of Panlong Lead-zinc Deposit in southern Qinhang metallogenic belt [J]. Geology and Exploration, 2018, 54(4):674-688.
- [6] 周永章,曾长育,李红中,等. 钦州湾—杭州湾构造结合带(南段)地质演化和找矿方向[J]. 地质通报, 2012, 31(S1):486-491.
ZHOU Yongzhang, ZENG Changyu, LI Hongzhong, et al. Geological evolution and prospecting direction of Qinzhou Bay—Hangzhou Bay structural juncture belt (southern section) [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(S1):486-491.
- [7] 杨文采. 揭开南岭地壳形成演化之谜[J]. 地质论评, 2016, 62(2):257-266.
YANG Wencai. Uncover the mystery of crustal formation and evolution in Nanling [J]. Geological Review, 2016, 62(2):257-266.
- [8] XIONG Y Q, SHAO Y J, MAO J W, et al. The polymetallic magmatic-hydrothermal Xiangdong and Dalong systems in the W—Sn—Cu—Pb—Zn—Ag Dengfuxian Orefield, SE China: constraints from geology, fluid inclusions, H—O—S—Pb isotopes, and sphalerite Rb—Sr geochronology [J]. Mineralium Deposita, 2019, 54(8):1101-1124.
- [9] YUAN S D, MAO J W, ZHAO P L, et al. Geochronology and petrogenesis of the Qibaoshan Cu-polymetallic deposit, Northeastern Hunan Province: implications for the metal source and metallogenic evolution of the intracontinental Qinhang Cu-polymetallic belt, South China [J]. Lithos, 2018, 302(1):519-534.
- [10] 陈毓川,裴荣富,张宏良. 南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色、稀有金属矿床地质[J]. 中国地质科学院院报, 1990(1):79-85.
CHEN Yuchuan, PEI Rongfu, ZHANG Hongliang. Geology of non-ferrous rare metal deposits related to Mesozoic granitoids in Nanling area [J]. Journal of Chinese Academy of Geological Sciences, 1990(1):79-85.
- [11] 郑伟,欧阳志侠,陈友良,等. 钦杭成矿带南段旗鼓岭铜钨钼多金属矿床的辉钨矿 Re—Os 同位素年龄及成矿物质来源[J]. 地质学报, 2018, 92(1):94-106.
ZHENG Wei, OUYANG Zhixia, CHEN Youliang, et al. Molybdenite Re—Os isotopic age and source of ore-forming materials of the Qiguling Cu—W—Mo polymetallic deposit in the southern Qinhang metallogenic belt [J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(1):94-106.
- [12] 廖廷德. 论宝山西部铜铅钨银矿床地质特征及找矿预测[J]. 湖南有色金属, 2009, 25(3):1-7.

- LIAO Tingde. Geological characteristics and prospecting prediction of Cu—Mo—Pb—Zn—Ag deposit in Western Baoshan[J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2009, 25(3): 1-7.
- [13] 黄富年,李茂平. 湘南坪宝多金属矿田成矿规律及成矿模式[J]. *矿产勘查*, 2019, 10(5): 1124-1135.
- HUANG Funian, LI Maoping. Metallogenic regularity and metallogenetic model of polymetallic ore field in South Pingbao, Hunan[J]. *Mineral Exploration*, 2019, 10(5): 1124-1135.
- [14] 付胜云,陈启亮,安江华,等. 湖南省银矿资源概况及成矿规律[J]. *中国地质*, [2020-06-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20200601.1804.020.html>.
- FU Shengyun, CHEN Qiliang, AN Jianghua, et al. Overview of silver resources and metallogenetic regularity in Hunan Province[J]. *China Geology*, 2020 [2020-06-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20200601.1804.020.html>.
- [15] 刘锋平,蒋年生. 坪宝矿田银矿床地质特征及成矿规律[J]. *湖南地质*, 1999(S1): 41-45.
- LIU Fengping, JIANG Niansheng. Geological characteristics and metallogenetic regularity of Pingbao Orefield Ag deposit[J]. *Hunan Geology*, 1999(S1): 41-45.
- [16] QI F U, ZHANG Z, LI Y S, et al. The characteristics of ore-controlling structure in Baoshan Cu—Pb—Zn polymetallic deposit, Hunan Province[J]. *Journal of Minerals*, 2011, 31(S1): 823-824.
- [17] HU X L, GONG Y J, PI D H, et al. Jurassic magmatism related Pb-Zn-W-Mo polymetallic mineralization in the central Nanling Range, South China: geochronologic, geochemical, and isotopic evidence from the Huangshaping deposit[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 91: 877-895.
- [18] XUAN Y S, YUAN S D, YUAN Y B. Preliminary comparative studies on the metallogenesis of two types of Pb—Zn-polymetallic deposits in Huangshaping-Baoshan Area, Southern Hunan Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2014, 88(S2): 54-55.
- [19] 蒋年生. 水口山—坪宝地区热液矿床综合成矿模式探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 1995(3): 289-290.
- JIANG Niansheng. Discussion on the comprehensive metallogenetic model of hydrothermal deposit in Shuikou Pingbao area[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 1995(3): 289-290.
- [20] 张志. 湖南省黄沙坪钨多金属矿床成矿地质作用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- ZHANG Zhi. Study on Metallogenetic Geology of Huangshaping Tungsten Polymetallic Deposit in Hunan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- [21] 游先军. 湘南成矿预测和靶区优选[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
- YOU Xianjun. Metallogenetic Prediction and Target Selection in Southern Hunan[D]. Changsha: Central South University, 2005.
- [22] 李茂平,黄富年. 南岭成矿带坪宝矿田地质物化探异常综合研究及找矿预测[J]. *湖南有色金属*, 2020, 36(4): 5-8, 23.
- LI Maoping, HUANG Funian. Comprehensive study on geological geophysical and geochemical exploration anomalies and prospecting prediction of Pingbao ore field in Nanling metallogenetic belt[J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2020, 36(04): 5-8, 23.
- [23] 韩润生,赵冻,吴鹏,等. 湘南黄沙坪铜锡多金属矿床构造控岩控矿机制及深部找矿勘查启示[J]. *地学前缘*, 2020, 27(4): 199-218.
- HAN Runsheng, ZHAO Dong, WU Peng, et al. Structural rock control and ore control mechanism of Huangshaping copper-tin polymetallic deposit in Southern Hunan and its implications for deep prospecting and exploration[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(4): 199-218.
- [24] 谢银财. 湘南宝山铅锌多金属矿区花岗闪长斑岩成因及成矿物质来源研究[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- XIE Yincui. Genesis of Granodiorite Porphyry and Origin of Metallogenetic Materials in Baoshan Lead-zinc Polymetallic Ore Deposit, Southern Hunan Province[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.
- [25] 弥佳茹. 湘南铜钨矿成矿岩体差异性研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- MI Jiaru. Study on the Differentiation of Metallogenetic Rocks in Southern Hunan Copper and Tungsten Deposit[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [26] 唐朝永. 湖南宝山多金属矿田构造控矿特征[J]. *矿产与地质*, 2005, 19(1): 43-47.
- TANG Chaoyong. Structural ore-controlling characteristics of Baoshan polymetallic orefield, Hunan Province[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2005, 19(1): 43-47.
- [27] 丁腾,马东升,陆建军,等. 湖南宝山矿床花岗岩类硫-铅同位素和流体包裹体研究及其成因意义[J]. *矿床地质*, 2016, 35(4): 663-676.
- DING Teng, MA Dongsheng, LU Jianjun, et al. Study on sulfur and lead isotopes and fluid inclusions of granitoids in Baoshan gold deposit, Hunan Province and their genetic significance[J]. *Mineral Deposits*, 2016, 35(4): 663-676.
- [28] 湖南省有色地质勘查局一总队. 湖南省桂阳县宝山铅锌银矿接替资源勘查报告[R]. 郴州: 湖南省有色地质勘查局一总队, 2010.
- First Team of Hunan Nonferrous Metals Geological Exploration Bureau. Exploration Report on Replacement Resources of Baoshan Lead-zinc-silver Deposit, Guiyang County, Hunan Province[R]. Chenzhou: First Team of Hunan Nonferrous Metals Geological Exploration Bureau, 2010.
- [29] 刘邦定. 湖南宝山地区水系沉积物地球化学特征及找矿预测[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2015.
- LIU Bangding. Geochemical Characteristics and Prospecting Prediction of Stream Sediments in Baoshan Area, Hunan Province[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2015.
- [30] 许以明,龚述清,江元成,等. 湖南黄沙坪铅锌矿深部找矿前景分析[J]. *地质与勘探*, 2007, 43(1): 38-43.
- XU Yiming, Gong Shuqing, JIANG Yuancheng, et al. Analysis on the prospecting prospect of the deep margin of the Huangshaping lead-zinc deposit in Hunan Province[J]. *Geology and Exploration*, 2007, 43(1): 38-43.
- [31] 弥佳茹,袁顺达,轩一撒,等. 湖南宝山一大坊矿区成矿花岗闪长斑岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素及微量元素组成对区域成矿作用的指示[J]. *岩石学报*, 2018, 34(9): 2548-2564.
- MI Jiaru, YUAN Shunda, XUAN Yisa, et al. Zircon U-Pb age and Hf isotopes of zircon in the mineralization of granodiorite porphyry

- in Baoshan-Dafang ore deposit, Hunan Province, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(9): 2548-2564.
- [32] 黄富年, 鲁艺, 段华辉. 湖南宝山西部铅锌银矿床地质特征及找矿方向[J]. *国土资源导刊*, 2015, 12(1): 24-28.
HUANG Fuman, LU Yi, DUAN Huahui. Geological characteristics and prospecting direction of Pb-Zn-Ag deposit in Western Baoshan, Hunan Province [J]. *Land and Resources Guide*, 2015, 12(1): 24-28.
- [33] 刘邦定, 陈新跃, 罗小亚, 等. 湘南坪宝地区水系沉积物地球化学特征及找矿靶区预测[J]. *地质与勘探*, 2015, 51(4): 722-730.
LIU Bangding, CHEN Xinyue, LUO Xiaoya, et al. Geochemical characteristics of stream sediments and prediction of prospecting targets in Pingbao area, Southern Hunan [J]. *Geology and Exploration*, 2015, 51(4): 722-730.
- [34] 刘悟辉. 黄沙坪铅锌多金属矿床成矿机理及其预测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
LIU Wuhui. Study on Metallogenic Mechanism and Prediction of Huangshaping Pb-Zn Polymetallic Deposit [D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [35] 谌鹏远, 吴鹏, 韩润生, 等. 湖南宝山铜铅锌多金属矿床构造控岩控矿模式[J]. *地质力学学报*, 2020, 26(3): 405-418.
CHEN Pengyuan, WU Peng, HAN Runsheng, et al. Structural rock-controlling and ore-controlling model of Baoshan Cu-Pb-Zn polymetallic deposit, Hunan Province [J]. *Chinese Journal of Geomechanics*, 2020, 26(3): 405-418.
- [36] 王杰亨, 刘争, 赵海玲. 湖南宝山花岗岩闪长质岩石混合成因证据探讨[J]. *地质找矿论丛*, 2017, 32(4): 604-611.
WANG Jietering, LIU Zheng, ZHAO Hailing. Probing into the genetic evidence of granodiorite mixing in Baoshan, Hunan Province [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2017, 32(4): 604-611.
- [37] 陈泽锋. 湘南宝山铅锌矿床的板内构造环境与矿床成因研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
CHEN Zefeng. Study on Intraplate Tectonic Environment and Deposit Genesis of Baoshan Pb-Zn deposit in Southern Hunan [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [38] 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 华南中-新生代与花岗岩类有关的成矿系统[J]. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(4): 335-343.
HUA Renmin, CHEN Peirong, ZHANG Wenlan, et al. Metallogenic systems related to granitoids in Mesozoic and Cenozoic in South China [J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(4): 335-343.
- [39] 齐钊宇. 湖南宝山铜铅锌多金属矿床岩浆—流体成矿作用及其演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
QI Fanyu. Mineralization and Evolution of Magmatic Fluid in Baoshan Cu-Pb-Zn Polymetallic Deposit, Hunan Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.
- [40] 王雷, 蒋宗和, 韩润生, 等. 湘南长城岭矿区首次发现超大型铷矿床[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 44(4): 1-4.
WANG Lei, JIANG Zonghe, HAN Runsheng, et al. The First Discovery of Super-large-sized Rb Deposit in Changchengling Mining Area of Southern Hunan China [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science)*, 2019, 44(4): 1-4.
- [41] 钟江临, 李楚平. 湖南香花岭砂卡岩型锡矿床地质特征及控矿因素分析[J]. *矿产与地质*, 2006, 20(2): 147-151.
ZHONG Jianglin, LI Chuping. Geological characteristics and ore-controlling factors of Xianghualing skarn type tin deposit, Hunan Province [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2006, 20(2): 147-151.
- [42] 潘卓. 湖南黄沙坪矿区南部钨钼多金属矿床地质特征、控矿因素及矿床成因[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
PAN Zhuo. Geological Characteristics, Ore-controlling Factors and Genesis of Tungsten-molybdenum Polymetallic Deposit in Southern Huangshaping Mining Area, Hunan Province [D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [43] 卢友月, 付建明, 谭仕敏, 等. 湘南大坊金银铅锌矿床花岗岩闪长斑岩锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素组成及其找矿指示意义[J]. *华南地质与矿产*, 2017, 33(3): 262-274.
LU Youyue, FU Jianming, TAN Shimin, et al. Zircon U-Pb dating, Hf isotopic composition of granodiorite porphyry in Dafang gold-silver lead-zinc deposit in Southern Hunan and its prospecting significance [J]. *Geology and Mineral Resources in Southern China*, 2017, 33(3): 262-274.
- [44] 夏长庚. 湖南富锰矿床地质特征及找矿预测[J]. *地质找矿论丛*, 1987(3): 50-58.
XIA Changgeng. Geological characteristics and prospecting prospecting of manganese rich ore deposits in Hunan [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 1987(3): 50-58.
- [45] 李玉生, 龚述清, 江元成, 等. 湖南省桂阳县黄沙坪铅锌矿接替资源找矿研究报告[R]. 郴州: 湖南省湘南地质勘察院, 2006.
LI Yusheng, GONG Shuqing, JIANG Yuancheng, et al. Study on Prospecting of Substitute Resources of Huangshaping Lead-zinc Deposit in Guiyang County, Hunan Province [R]. Chenzhou: Hunan Xiangnan Geological Survey Institute, 2006.
- [46] 洪楠. *Statistica for Windows 统计与图表分析教程* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
HONG Nan. *Statistica for Windows: Tutorial for Statistics and Chart Analysis* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [47] 徐振邦, 娄元仁. *数学地质基础* [M]. 北京: 北京大学出版社, 1994.
XU Zhenbang, LOU Yuanren. *The Foundation of Mathematical Geology* [M]. Beijing: Peking University Press, 1994.
- [48] 李波, 韩润生, 文书明, 等. 滇东北巧家松梁铅锌矿床构造特征及构造地球化学[J]. *大地构造与成矿学*, 2014, 38(4): 855-865.
LI Bo, HAN Runsheng, WEN Shuming, et al. Tectonic characteristics and tectonic geochemistry of the Qiaojiasongliang lead-zinc deposit, northeastern Yunnan Province [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2014, 38(4): 855-865.
- [49] 李波, 杨懿霆, 韩润生, 等. 黔西北小河边铁多金属矿床构造特征与找矿预测[J]. *矿物学报*, 2020, 40(4): 483-501.
LI Bo, YANG Yiting, HAN Runsheng, et al. Structural characteristics and prospecting prediction of the Xiaohebian iron polymetallic deposit in Northwest Guizhou [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2020, 40(4): 483-501.