

巴林左旗碧流台铅锌矿床物化探特征及找矿方向

张代昕¹, 杨言辰^{1*}, 刘宇轩², 王贤伟³, 陈四末¹, 景泓斐¹

(1. 吉林大学地球科学学院; 2. 吉林大学《吉林大学学报(地球科学版)》编辑部;
3. 万城商务东升庙有限责任公司)

摘要:碧流台铅锌矿床是大兴安岭南段新发现的铅锌矿床,位于黄岗—甘珠尔庙—乌兰浩特成矿带东部,赋存于二叠系林西组浅变质岩系中,主要受到北东向构造控制。通过对矿区1:1万土壤地球化学数据进行参数统计,以及单元素异常分析、聚类分析、因子分析、因子异常分析处理,确定F1因子(Ag-Pb-Zn-Mn组合)异常区为重要的银铅锌找矿标志。通过对高精度磁法测量数据进行化极、延拓、水平一阶导数、垂向二阶导数处理,提取结构面/线性构造、地质体/环形构造。在地质勘查工作的基础上,结合土壤地球化学异常和高精度磁法测量解译结果,提取地质、地球化学、地球物理找矿标志,为进一步找矿方向的确定及工程布置提供依据。

关键词:铅锌矿床;土壤地球化学;因子分析;高精度磁法测量;中低温热液脉型;找矿标志;找矿方向

中图分类号:TD11 P618.4
文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)03-0072-08
doi:10.11792/hj20250313

引言

铅和锌不仅是重要的战略资源,也是重要的生产资料,广泛应用于军事、机械和医疗等领域。大兴安岭地区先后受到古亚洲构造域、蒙古—鄂霍次克构造域和太平洋构造域的影响,成矿条件优越,是中国重要的铅、锌、银、铜、锡和钼多金属矿集区^[1-5],区域先后发现了白音诺尔、拜仁达坝、双尖子山等大型、超大型铅锌银多金属矿床。碧流台铅锌矿床是大兴安岭南段近年来新发现的小型铅锌矿床,前人对该区进行了成矿地质条件、矿床成因、成矿时代等方面的研究和讨论^[6-7],但在综合信息预测方面较薄弱。本文通过对碧流台铅锌矿床1:1万土壤地球化学数据进行参数统计,以及单元素异常分析、聚类分析、因子分析、因子异常分析,初步圈定综合异常区。对高精度磁法测量数据进行化极处理、不同高度上延、水平一阶导数、垂向二阶导数处理,提取结构面/线性构造、地质体/环形构造。结合铅锌矿化地质特征及分布规律,提取地质、地球化学、地球物理找矿标志,以期确定进一步找矿方向,为后续勘查工程布置提供依据。

1 区域地质概况

碧流台铅锌矿床位于黄岗—甘珠尔庙—乌兰浩

特成矿带东部,其北部以贺根山断裂为界与兴安地块相邻,南部以西拉木伦断裂为界与华北陆块北缘相邻,东部以嫩江断裂为界与松辽盆地西缘相邻(见图1-A)。区域出露地层为二叠系、侏罗系和第四系。其中,二叠系上统林西组、侏罗系中统新民组和第四系为矿区主要出露地层^[8]。区域形成以断裂为主、褶皱为辅的构造格架。其中,以北东向、北西向断裂最为发育,北北东向和东西向断裂次之,南北向断裂少见^[9-10]。区域岩浆活动频发,主要为中生代花岗岩(见图1-B),大致可划分为华力西期和燕山期。华力西期侵入岩主要岩性为辉长岩、角闪闪长岩、石英闪长岩、英云闪长岩和花岗闪长岩;燕山期侵入岩主要为石英二长斑岩和黑云母花岗岩,还有少量正长花岗岩和碱长花岗岩^[11],主要沿北东向呈岩基或岩株状产出。

2 矿区地质概况

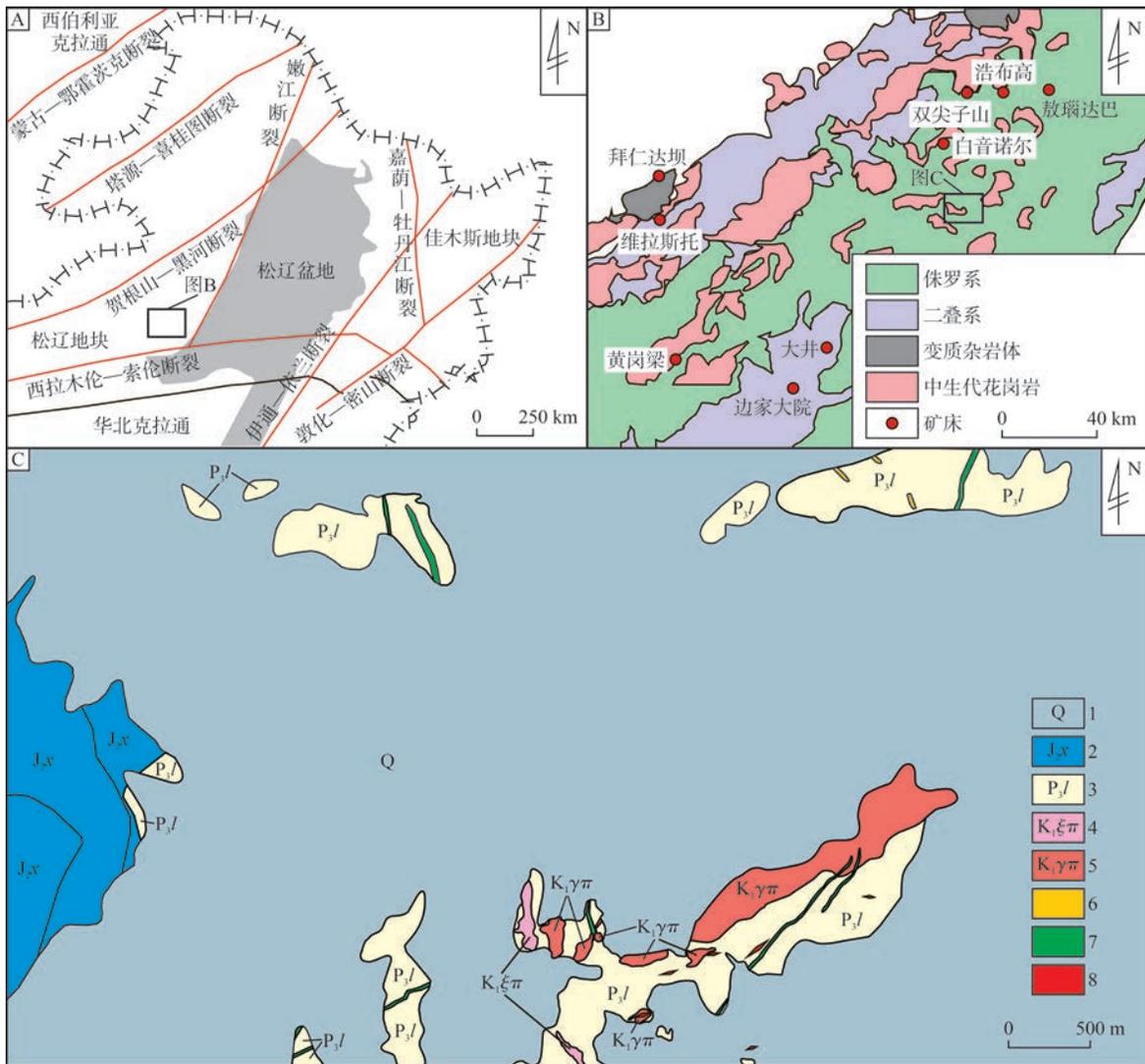
矿区内地层出露较简单,二叠系林西组主要出露在矿区的北部及南部(见图1-C),整体呈东西向和北东向展布,岩性主要为灰绿色、灰色、灰黑色杂砂岩、变质砂岩、砂质板岩;侏罗系新民组出露于矿区西部,以角度不整合覆盖于林西组之上,岩性主要为紫灰色、紫色流纹质凝灰岩,局部含火山角砾、灰黄色中粗

收稿日期:2024-10-25; 修回日期:2024-12-10

基金项目:中化地质矿山总局地质科技项目(ZHD202302);中国地质调查局发展研究中心项目(中地调研合同[2020]第296号)

作者简介:张代昕(1998—),男,硕士研究生,研究方向为矿床学;E-mail:975317209@qq.com

*通信作者:杨言辰(1965—),男,教授,博士,从事矿床学、矿产普查与勘探方面的研究工作;E-mail:yye@jlu.edu.cn



1—第四系 2—新民组 3—林西组 4—早白垩世正长斑岩 5—早白垩世花岗岩 6—石英脉 7—流纹岩 8—矿体
 图1 大兴安岭及邻区构造简图(A)、大兴安岭南段重要矿产分布简图(B)及碧流台铅锌矿区地质简图(C)

Fig. 1 Sketches for tectonics of the Greater Khingan Mountains and surrounding areas (A), distribution of important mineral deposits in the southern section of the Greater Khingan Mountains (B), and geology of the Biliutai Pb-Zn mining district (C)

粒砂岩及深灰色砂砾岩、砾岩；第四系冲击砂、砾、黄土、腐殖土大面积出露。矿区发育的侵入岩主要为花岗斑岩、正长斑岩、钾长花岗岩，其中前两者在矿区东南部出露，形成时代为早白垩世，后者仅在钻孔中可见，为隐伏岩体。矿区内出露的断裂主要为北东向构造，为主要的控矿及容矿构造。矿区蚀变与矿化主要为绿帘石化、绿泥石化、硅化、铅锌矿化和褐铁矿化，局部发育绢云母化、磁黄铁矿化和黄铁矿化。矿区内共圈定17条矿体，矿体规模以中型为主，形态为脉状、透镜状。矿体围岩为砂质板岩，二者界线清楚^[8]。

3 土壤地球化学特征

3.1 土壤地球化学参数统计

利用Geochem Studio化探处理软件，对原始数据进行参数统计，统计内容包括最小值、平均值(X_1)、最大值、标准离差和变异系数(Cv_1)及迭代剔除特异值

数据的平均值(X_2)、变异系数(Cv)，将各元素平均值(X_1)与中国土壤丰度的比值作为富集系数，来反映各元素的相对富集贫化程度^[12-17]，结果见表1。

由表1可知：Mn、Pb、Mo、Sn、Ag、Zn、As元素的富集系数大于1，这表明这8种元素处于高背景场，局部相对富集；Au、W元素富集系数小于1，表明这2种元素在矿区相对贫化。

1:1万土壤地球化学数据变异系数(Cv_1)可以反映数据的离散程度^[13]。Ag(8.92)、Pb(3.08)、Zn(1.2)3种元素变异系数较高，表明这3种元素分布不均匀，具有显著次生富集的地球化学特征。通过迭代剔除特异值的方法可以基本消除特异值对离散程度的影响，结果显示各元素的变异系数(Cv_2)均小于1。

通过 Cv_1/Cv_2 值可以反映背景拟合处理时对于极值的削平程度^[18]。Ag(31.82)、Pb(14.43)、Zn(7.06)3种元素的 Cv_1/Cv_2 值均大于2.5，表明局部富集的可能

表1 土壤地球化学元素参数特征

Table 1 Soil geochemical element parameter characteristics

数据类别	参数	Au ¹⁾	Mn	Pb	Mo	Sn	Cu	Ag	Zn	W	As
原始数据	最小值/ $\times 10^{-6}$	0.10	63	10.20	0.44	1.50	9.30	0.01	43	0.12	0.70
	平均值(X_1)/ $\times 10^{-6}$	1.20	603	29.90	1.92	3.20	23.90	0.08	73.70	1.67	12.80
	最大值/ $\times 10^{-6}$	24.40	10 000	5 000	23.75	16.8	202.5	50	5 000	9.59	162.70
	标准差/ $\times 10^{-6}$	0.80	229	92.20	1.16	0.80	6.50	0.75	88.30	0.55	6.60
	变异系数(Cv_1)	0.67	0.38	3.08	0.60	0.25	0.27	8.92	1.20	0.33	0.51
迭代剔除特异值数据	平均值(X_2)/ $\times 10^{-6}$	1.13	589.13	27	1.79	3.16	23.29	0.07	69.86	1.61	12.36
	变异系数(Cv_2)	0.50	0.26	0.21	0.38	0.21	0.19	0.28	0.17	0.25	0.23
	中国土壤丰度/ $\times 10^{-6}$	1.40	600	23	0.80	2.50	24	0.08	68	1.80	10
	Cv_1/Cv_2	1.35	1.47	14.43	1.57	1.19	1.44	31.82	7.06	1.34	2.26
	富集系数	0.86	1.01	1.30	2.40	1.28	1.00	1.05	1.08	0.93	1.28

注:1) $w(\text{Au})/\times 10^{-9}$ 。

性较高。将 Cv_1 与 Cv_1/Cv_2 值制作成变异系数散点图(见图2),进而评价元素成矿性。由图2可知:Ag、Pb、Zn 3种元素高强数据占比大,分异程度高,富集成矿潜力大;Au、Mo、W、As、Mn、Sn、Cu 7种元素高强数据占比小,分异程度低,富集成矿潜力较小。

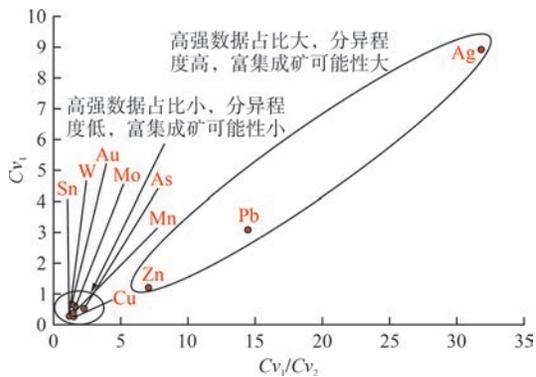


图2 变异系数散点图

Fig. 2 Scatter plot of variation coefficient

3.2 单元素异常

地球化学异常对于区域找矿具有重要指示意义,将地球化学异常准确高效地从背景中提取出来,对于找矿突破有重要意义。

Ag、Pb、Zn 3种成矿潜力较大的元素。Ag异常(见图3-a)整体沿北东向及东西向呈串珠状分布,主要分布在矿区南部,浓集中心明显,具有三级异常带,在矿区北部零星存在异常较弱。Pb异常(见图3-b)主要分布在矿区东南部,浓集中心明显,具有三级异常带,整体沿北东向及东西向呈串珠状分布。Zn异常(见图3-c)整体沿北东向及东西向呈串珠状分布,主要分布在矿区东南部,浓集中心明显,具有三级异常带,在矿区东北部较大面积存在,在矿区西部零星存在。Ag、Pb、Zn异常展布可能受北东向断裂影响。

3.3 多元素组合特征

通过SPSS软件对原始数据进行KMO检验分析和Bartlett球度检验,KMO值为0.743,在自由度为45

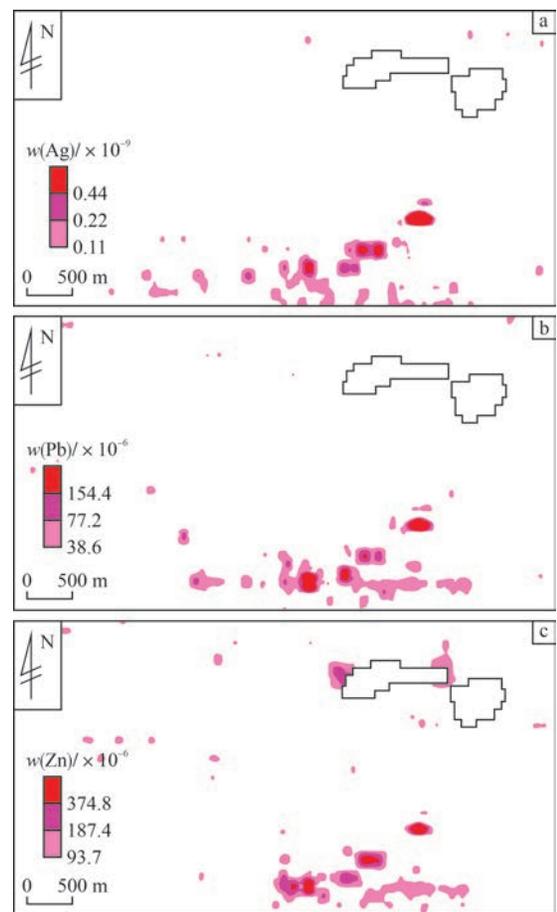


图3 Ag、Pb、Zn异常图

Fig. 3 Diagrams of Ag, Pb, and Zn anomalies

的条件下Sig值为0,表明数据适合进行因子分析^[19-21]。以特征值大于1为限定条件,分出4个因子组合,结果见表2。4个因子的累计方差贡献率达73.097%,说明元素信息相对集中。综合地质特征及元素分布特征,F1因子组合为矿区的重点。F1因子方差贡献率为31.601%,元素组合为Ag-Pb-Zn-Mn,反映中低温热液成矿过程可能伴随Mn富集。F2因子方差贡献率为16.864%,元素组合为Sn-Cu,为中高温元素组合。F3因子方差贡献率为13.998%,元

素组合为高温元素 W、Mo 和低温元素 As,表明富集成矿过程中可能有多期次岩浆热液参与。 F_4 因子方差

贡献率为 10.633%,该因子为 Au 元素的反映,表明其富集成矿过程与其他元素呈弱相关或不相关。

表 2 成矿因子旋转成分矩阵

Table 2 Matrix of rotational components of metallogenic factors

因子	Zn	Ag	Pb	Mn	Sn	Cu	W	Mo	As	Au	累计方差贡献率/%
F_1	0.948	0.938	0.937	0.652	0.04	0.27	0.008	0.064	-0.003	0.014	31.601
F_2	0.164	0.048	0.087	0.467	0.834	0.74	-0.151	0.407	0.007	0.02	48.465
F_3	0.059	-0.002	0.039	-0.051	0.017	-0.013	0.740	0.663	0.635	0.036	62.463
F_4	-0.033	0.016	-0.032	0.131	-0.02	0.04	-0.038	-0.242	0.324	0.937	73.097

聚类分析是一种将变量元素按照其类型分类的方法,通过将具有相似特征和性质的元素归为一类,来找出可以代表矿区地球化学性质特征的元素组合,主要根据各元素之间的成因、性质、相关性及其相关程度来确定^[22]。

运用 SPSS 软件获得聚类分析谱系图(见图 4),土壤地球化学元素可分成 3 个多元素组合和 1 个单独元素组合。第一个元素组合为 Zn-Ag-Pb-Mn,对应 F_1 因子,代表了中低温铅锌银成矿作用,此外可能伴随有 Mn 的富集。第二个元素组合为 Sn-Cu,对应 F_2 因子,反映了中低温热液成矿作用。第三个元素组合为 W-Mo-As,对应 F_3 因子,表明元素间具有多期热液叠加活动的特点。第四个元素组合为 Au 独立元素,对应 F_4 因子,形成异常较弱,在该区具有较高的独立性。

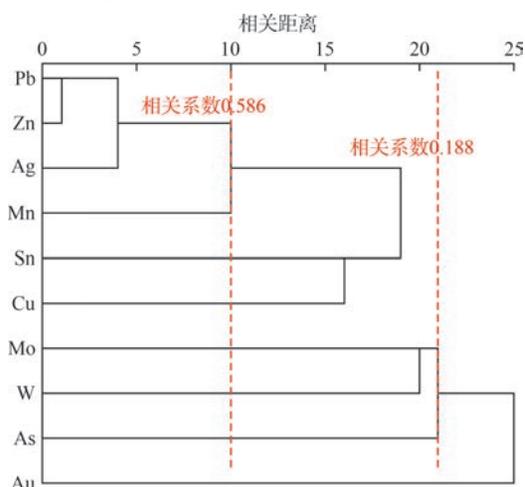


图 4 聚类分析谱系图

Fig. 4 Cluster analysis pedigree

3.4 成矿因子异常特征

利用成矿元素因子得分可确定成矿元素组合空间分布特征,成矿因子地球化学异常图反映成矿元素组合的分布特征及找矿标志。

F_1 因子地球化学异常(见图 5-a)反映的元素组合为 Ag-Pb-Zn-Mn,表明中低温热液成矿过程可能伴随 Mn 的富集并受构造影响,整体呈北东向及北西向展布,与出露的二叠系地层及中生代花岗岩分布情况套合较好。 F_2 因子地球化学异常(见图 5-b)反映

的元素组合为 Sn-Cu,异常呈串珠状沿北西向和北东向展布。 F_3 因子地球化学异常(见图 5-c)反映的元素组合为 W-Mo-As,表明在富集成矿过程中可能存在多期热液活动,异常主要分布在二叠系和侏罗系地层,在矿区东南部与出露地层走向一致,整体呈北东向展布。 F_4 因子地球化学异常(见图 5-d)较弱,呈星点状分布于矿区北部及西北部。

3.5 综合异常特征

综合分析单元素分布特征、聚类分析和因子分析结果,结合地质特征,在矿区共圈出 5 个综合异常区(见图 6)。HT-1 综合异常面积约为 0.832 km²,部分见矿钻孔位于该异常区内,与因子异常套合较好。该综合异常区为 F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_4 4 个因子异常叠加区域。其中, F_1 因子为该区域的优势成矿因子,共有 5 个异常区域,具有三级浓度分带,成矿前景很好。HT-2 综合异常面积约为 0.278 km², F_2 因子具三级浓度分带,为该区最具优势的元素组合; F_1 因子也具有三级浓度分带,成矿前景较好。HT-3、HT-4 和 HT-5 综合异常具有多个成矿因子组合异常叠加,同样具有较好的成矿前景。

4 地球物理特征

近年来,磁法测量在隐伏岩体、矿体、地下构造探测等方面得到了广泛应用^[23-25]。高精度磁法测量结果可以直接反映不同地质体磁性特征。影响磁性的因素有很多,除与当时的沉积环境、物源成分有关外,后期的断裂活动、热液活动、变质改造和蚀变作用等也会改变其磁性矿物的性质和分布。根据磁异常特征及综合信息构造解译结果,可以获得大量地质体及构造信息。通过对 1:1 万高精度磁法测量数据进行化极处理、各方向水平一阶导数处理、各深度垂向二阶导数处理,提取结构面与地质体边界^[26-28]。

4.1 磁异常特征

矿区磁异常分布相对简单,可划分为正磁异常场区、弱异常场区和负磁异常场区,总体呈现东南高西北低的特点。在矿区西北部正磁异常呈团块状小范

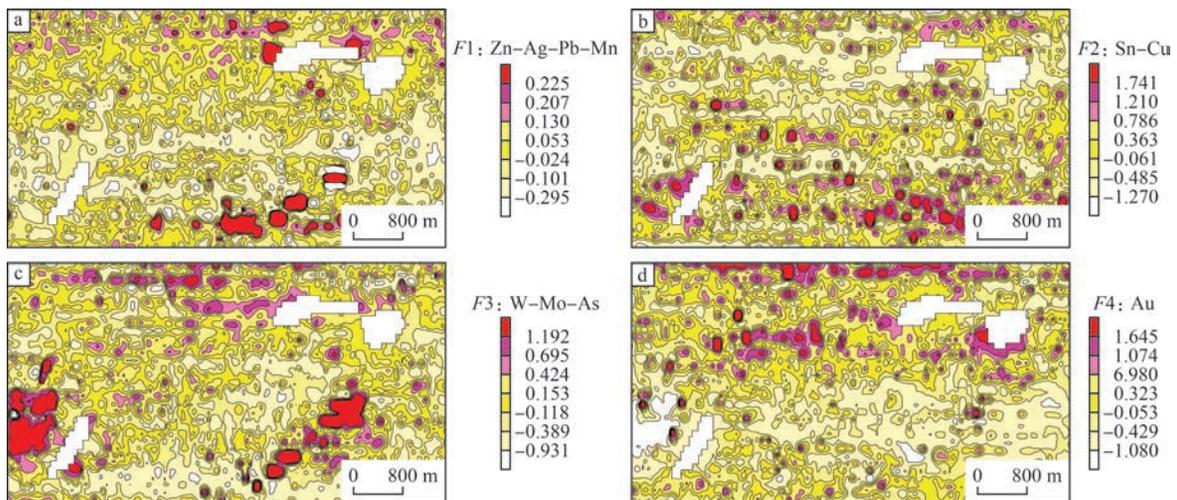


图5 成矿因子地球化学异常图

Fig. 5 Map of geochemical anomalies of metallogenic factors

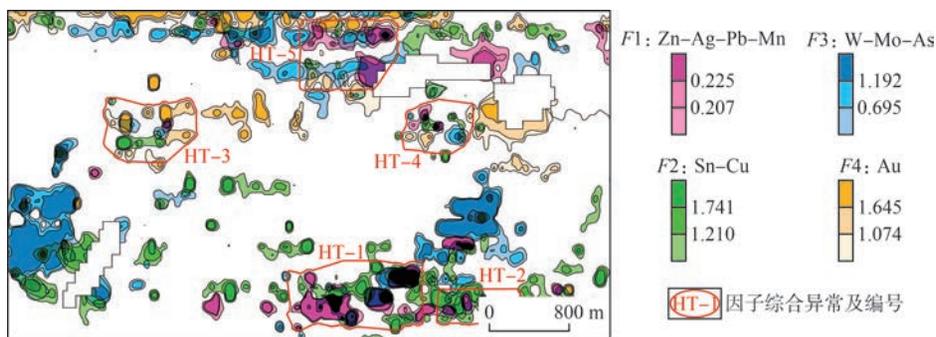


图6 综合异常图

Fig. 6 Map of comprehensive anomaly

围存在(见图7-a)。为消除斜磁化影响,更好地反映磁异常的形态特征,对磁异常进行化极处理。化极后的正磁异常场区面积变大,并且整体向西北方向移动(见图7-b)。已探明矿体主要分布在正磁异常场区。

4.2 结构面与地质体解译

将化极磁异常沿 0° 、 45° 、 90° 、 135° 4个方向进行水平方向一阶导数处理。依据各方向水平导数极值轴或串珠状异常带,结合地质资料推断构造线^[29-30]。通过向上延拓压制浅部干扰,反映不同深度磁性体的特征;通过垂向导数削减背景场影响,突出浅源异常的边界特征^[31]。

1)结构面(线性构造)解译。不同线型代表不同高度,由浅到深依次为实线、虚线、点虚线(见图8)。总体由北东向线性构造与北西向线性构造构成构造格架,叠加东西向线性构造与南北向线性构造。矿区主要发育北东向构造,与区域燕山期的北东向、北北东向构造相似。已探明矿体主要沿北东向断裂及构造蚀变带发育,北东向构造为主要的控矿构造。

2)地质体(环形构造)解译。地质勘查验证结果显示,分布在砂质板岩与杂砂岩之间的花岗斑岩和花岗岩及矿体是引起高磁异常的成矿地质体。通过对化极磁异常进行各上延高度的垂向二阶导数处理,提

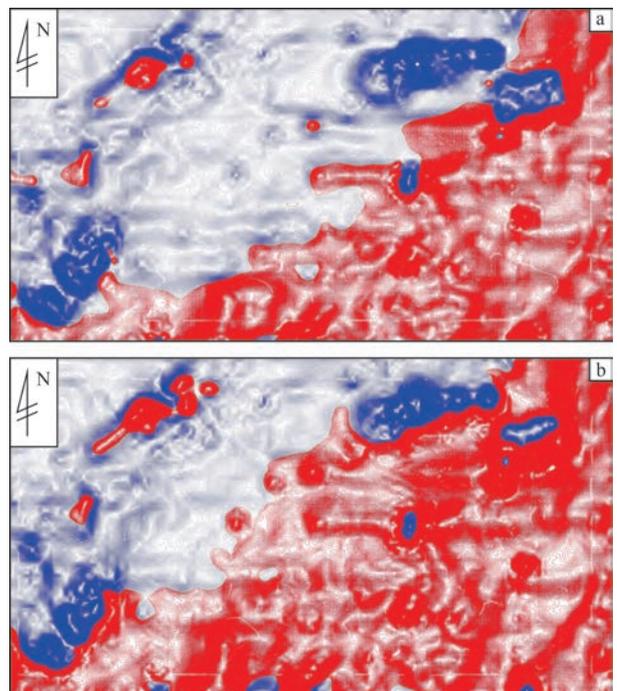


图7 高精度磁法测量等值线图(a)与化极等值线图(b)

Fig. 7 High-precision magnetic survey contour (a) and chemical polarization contour (b)

取零等值线作为各上延高度和剖面中高磁性地质体边界,从而确定其分布情况。随着上延高度的增

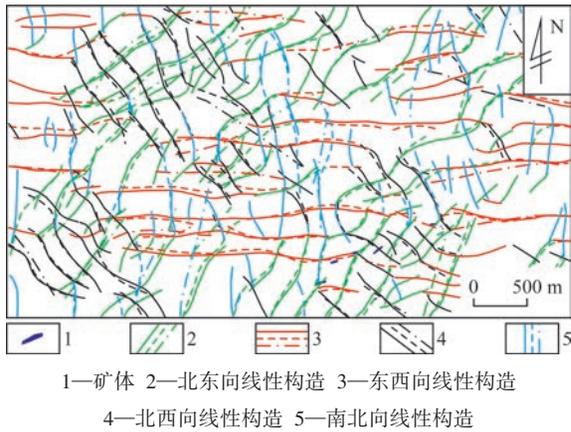


图8 矿区线性构造解译图

Fig. 8 Map for interpretation of linear structures in the mining area
加,高磁性异常地质体之间汇合并于向上延拓600 m (标高200 m)附近消失(见图9、图10)。

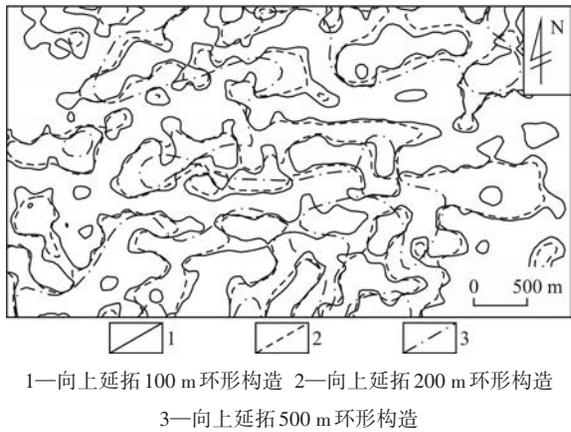


图9 环形构造解译图

Fig. 9 Map for interpretation of ring structures

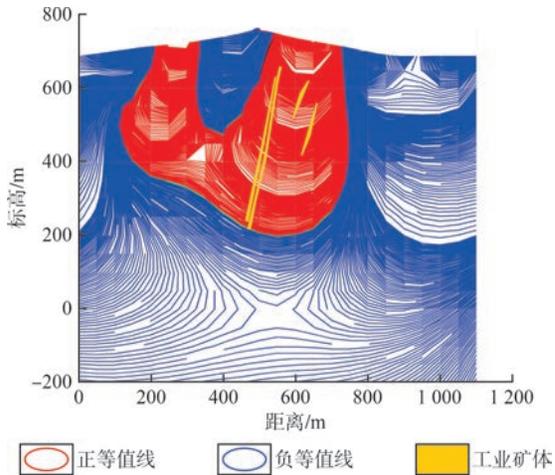


图10 高精度磁法测量剖面图与勘探线矿体位置对比图
Fig. 10 Comparison of high-precision magnetic survey profile with orebody positions on the exploration line

5 找矿标志与找矿方向

5.1 找矿标志

1)地质标志:野外勘查及工程验证显示,花岗斑

岩与林西组的外接触带为主要的赋矿部位;林西组地层为主要赋矿层位;北东向构造为主要控矿及容矿构造,矿体多呈脉状赋存于北东向构造蚀变带内;硅化、绢云母化、绿泥石化和绿帘石化与铅锌矿化关系密切。

2)地球化学标志:根据土壤测量结果,Ag、Pb、Zn为矿区的主要成矿元素,这些元素异常及组合异常是矿区铅锌矿找矿的地球化学标志;根据系统聚类及因子分析结果,确定矿区发育银多金属主成矿阶段(形成Ag-Pb-Zn-Mn组合, F_1 因子)、铜多金属成矿阶段(形成Sn-Cu组合, F_2 因子)和多期热液成矿阶段(形成W-Mo-As组合, F_3 因子),与区域成矿作用特征一致。各成矿阶段的成矿因子异常区为其找矿标志,成矿因子叠加区为进一步找矿有利地段。

3)地球物理标志:高精度磁法测量剖面图与勘探线矿体位置对比图(见图10)显示,矿体主要位于正磁异常的极值轴(线构造)或异常变化迅速的部位,以及磁性地质体(环构造)边界处。高精度磁法测量解译北东向构造产状变化部位、北东向与北西向构造的交会部位,高磁性地质体形态产状复杂变化部位,线性构造与环形构造互相切割部位等为高精度磁法测量找矿标志。

5.2 找矿方向

根据成矿地质条件的有利程度和找矿标志的明显程度,进行预测区圈定。具备明显的断裂构造、岩脉及围岩蚀变等成矿条件,发育Ag、Pb、Zn等异常或成矿因子Ag-Pb-Zn-Mn、Sn-Cu及W-Mo-As异常,尤其是因子异常叠加,深部北东向及北西向成矿结构面(成矿断裂)规模较大且空间产状变化的部位和与成矿地质体交会复合的部位,高磁异常地质体的形态、产状复杂变化的部位等,为寻找工业矿体、扩大资源储量的潜力地段。由此,共圈定3个预测区(见图11)。

预测区 I:出露的地层主要为林西组,并发育大量早白垩世花岗斑岩、正长斑岩。共包含2个综合异常(HT-1和HT-2)。HT-1综合异常面积约为0.833 km²,以Ag、Pb、Zn为主成矿元素, F_1 因子为主成矿因子, F_2 、 F_3 、 F_4 因子与其叠加,异常套合较好,具有三级浓度分带,异常点数61个。HT-2综合异常面积约为0.278 km²,以Cu、Ag、Pb、Zn为主成矿元素, F_1 、 F_2 因子为主成矿因子,异常套合较好,具有三级浓度分带,异常点数53个。高精度磁法测量解译结果显示,北东向及北西向构造组成该预测区的构造格架,北东向构造规模较大,具有分支复合特征。根据工程揭露,矿体大部分位于该预测区内,见矿钻孔多位于异常叠加部位,矿体呈脉状、透镜状沿北东向展布,与高精度磁法测量解译的北东向构造形态、产状比较吻合。

预测区 II:出露地层主要为林西组。共包含2个

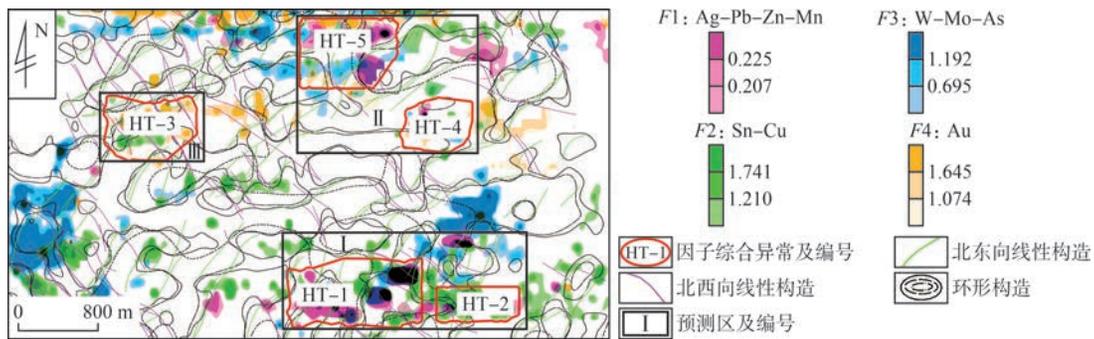


图 11 综合信息预测图

Fig. 11 Map for comprehensive information prediction

综合异常区(HT-4和HT-5)。HT-4综合异常面积为0.635 km², Ag、Pb、Zn为主成矿元素, F1因子为主成矿因子, F3因子与其叠加, 异常套合较好, 具有三级浓度分带, 异常点数40个。HT-5综合异常面积约为0.316 km², 以W、Mo等高温元素, 以及Cu、Sn、Ag、Pb、Zn、As等中低温元素为主成矿元素, F1、F2、F3因子为主因子, 异常套合较好, 具有三级浓度分带, 异常点数18个。高精度磁法测量解译结果表明, 随着该预测区内高磁性地质体向深部延伸, 规模逐渐变大。后续可考虑在成矿因子异常叠加较好及高磁性地质体形态、产状复杂变化部位进行工程布置。

预测区Ⅲ: 第四系大面积出露。HT-3综合异常面积约为0.494 km², Au、Cu为主成矿元素, F2、F4因子为主因子, F1因子与其叠加, 具有三级浓度分带, 异常点数21个。高精度磁法测量解译结果表明, 该预测区以北西向构造为主, 叠加北东向构造, 高磁性地质体形态、产状变化明显。后续可考虑在北西向构造与北东向构造交会部位及构造与环形构造相交部位布置探矿工程。

6 结论

1) 通过对1:1万土壤地球化学数据进行参数统计, 以及单元素异常分析、聚类分析、因子分析、因子异常分析处理, 结果表明, 成矿因子(Ag-Pb-Zn-Mn组合, F1因子)异常为重要的银铅锌找矿标志。

2) 通过对化极处理后的高精度磁法测量数据进行不同高度上延、水平一阶导数、垂向二阶导数处理, 提取结构面/线性构造、地质体/环形构造, 确定北东向及北西向构造构成矿区构造格架, 叠加南北向构造及东西向构造。构造产状变化部位、构造交会部位、高磁性地质体形态产状复杂变化部位、线环构造互相切割部位等为高精度磁法测量找矿标志。

3) 对土壤地球化学数据和高精度磁法测量数据进行深度剖析, 提取了地质、地球化学、地球物理找矿标志, 圈定3个预测区, 为后续布置探矿工程提供依据。

[参考文献]

- [1] WU F Y, SUN D Y, GE W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41(1): 1-30.
- [2] 毛景文, 周振华, 武广, 等. 内蒙古及邻区矿床成矿规律与成矿系列[J]. 矿床地质, 2013, 32(4): 716-730.
- [3] ZHAI D G, LIU J J, ZHANG A L, et al. U-Pb, Re-Os, and ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of porphyry Sn ± Cu ± Mo and polymetallic (Ag-Pb-Zn-Cu) vein mineralization at Bianjiadayuan, Inner Mongolia, Northeast China: Implications for discrete mineralization events [J]. Economic Geology, 2017, 112(8): 2 041-2 059.
- [4] ZHAI D G, WILLIAMS A E, LIU J J, et al. Evaluating the use of the molybdenite Re-Os chronometer in dating gold mineralization: Evidence from the Haigou Deposit, Northeastern China [J]. Economic Geology, 2019, 114(5): 897-915.
- [5] TANG S, LI S C, ZHANG X M, et al. Late Triassic tectonic setting in northeastern margin of North China Craton: Insight into sedimentary and apatite fission tracks [J]. Minerals, 2023, 13(7): 975.
- [6] 邵晓勇, 李永飞, 孙守亮. 内蒙古东部碧流台地区辉长岩锆石 U-Pb 测年、地球化学特征及其成因[J]. 地质与资源, 2015, 24(3): 184-192.
- [7] 常卫军, 周晓江, 胡志远, 等. 巴林左旗碧流台地区侏罗纪地层地球化学特征及地质意义[J]. 新疆有色金属, 2024, 47(1): 3-5.
- [8] 常海彬, 康微. 内蒙古巴林左旗碧流台村北铅锌矿地质特征及远景预测[J]. 矿产勘查, 2020, 11(3): 488-495.
- [9] 赵胜金, 张忠, 朴丽丽, 等. 内蒙古巴林左旗中段铅锌矿地质特征及成因[J]. 矿产与地质, 2015, 29(6): 740-743, 753.
- [10] 赵青. 大兴安岭南段中酸性岩浆活动与铅锌成矿作用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [11] 贾力, 吴昌志, 焦建刚, 等. 大兴安岭南段北大山岩体的年代学和地球化学: 对岩石成因及成矿潜力的指示[J]. 岩石学报, 2024, 40(3): 961-986.
- [12] 罗恒, 李欢, 戴进玲, 等. 鄂东南张海金矿床地质地球化学特征及找矿模型[J]. 地质与勘探, 2021, 57(5): 994-1 007.
- [13] 梁鸣, 罗先熔, 刘永胜, 等. 冀北小梨树沟地区土壤地球化学异常特征及其找矿预测[J]. 地质与勘探, 2022, 58(2): 312-325.
- [14] 秦丹鹤, 胡新茁, 李昊璐, 等. 内蒙古敖其格放包地区土壤地球化学特征及找矿效果[J]. 黄金, 2023, 44(6): 85-89.
- [15] 王永德, 冶晓平, 秦泗伟. 东昆仑造山带向阳沟金矿床地质-化探综合找矿模型及找矿效果[J]. 黄金, 2023, 44(11): 69-75.
- [16] 武葆源, 裴世嘉. 内蒙古鄂尔格地区矿化蚀变、地球化学异常特征及找矿前景[J]. 黄金, 2023, 44(5): 73-77.
- [17] 王学阳, 杨言辰, 刘志宏, 等. 长江中下游成矿带大金山地区综

- 合信息找矿效果及深部找矿潜力分析[J/OL]. 吉林大学学报(地球科学版), 1-16[2024-07-06]. <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20230239>.
- [18] 袁和, 罗先熔, 李武毅, 等. 西藏邦卓玛地区土壤地球化学特征及找矿预测[J]. 地质与勘探, 2017, 53(3): 472-481.
- [19] 尹志刚, 姜然, 陈军典, 等. 黑龙江省木兰县六块地南土壤地球化学异常特征及成矿预测[J]. 地质通报, 2023, 42(12): 2 015-2 027.
- [20] 胡兆鑫, 罗为群, 谢运球, 等. 基于因子分析的广西平果市土壤地球化学分区[J/OL]. 地质通报, 1-16[2024-07-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20240425.1424.004.html>.
- [21] 史冬岩, 张玉鹏, 张坤, 等. 大兴安岭北东段森林沼泽区地球化学找矿方法研究: 以黑龙江省二道坎村银多金属矿区为例[J]. 西北地质, 2024, 57(2): 107-120.
- [22] 李明, 代鸿章, 丁晓平, 等. 川西观音桥地区土壤地球化学特征及锂矿找矿方向[J]. 矿产勘查, 2024, 15(8): 1 456-1 465.
- [23] ZHENG W B, LIU B L, TANG J X, et al. Exploration indicators of the Jiama porphyry-skarn deposit, southern Tibet, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2022, 236(2): 106982.
- [24] LI H, GAN J, GAN Y, et al. Coupling mechanism of the concealed rock body and metallogenic structure of the sarakan gold deposit in Laos investigated using magnetic and electrical methods[J]. Minerals, 2023, 13(7): 912.
- [25] 王开虎, 杨言辰, 陈天文, 等. 高精度磁法测量在矽卡岩型铜锌矿床深部找矿预测中的应用——以大兴安岭南布高铜锌矿床为例[J]. 黄金, 2024, 45(10): 9-15.
- [26] 柳建新, 郭振威, 童孝忠, 等. 地面高精度磁法在新疆哈密地区磁铁矿勘查中的应用[J]. 地质与勘探, 2011, 47(3): 432-438.
- [27] 谢天月, 杨言辰, 韩世炯, 等. 高精度磁测在吉林辉南石棚沟金矿区找矿中的应用[J]. 黄金, 2024, 45(1): 69-74.
- [28] 李效港, 杨继峰, 杨言辰, 等. 吉中地区新安屯钼矿综合地质、物化探特征及找矿潜力分析[J/OL]. 吉林大学学报(地球科学版), 1-20[2024-07-08]. <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20230184>.
- [29] 李怀远, 袁杰, 吴文贤, 等. 高精度磁测在内蒙古额济纳旗苦泉山铁矿勘查中的应用[J]. 中国地质调查, 2024, 11(2): 37-42.
- [30] 任玖, 白云, 徐云峰. 东昆仑西段杂克达坂地区高精度磁测异常特征[J]. 中国矿业, 2024, 33(增刊1): 587-594.
- [31] 王见荣, 李晨晶, 张仲猛, 等. 内蒙古巴彦巴彥银铅锌多金属矿区物化探勘查效果[J]. 矿产与地质, 2023, 37(5): 1 010-1 016.

Geophysical and geochemical characteristics and prospecting direction of the Biliutai Lead-Zinc Deposit in Bairin Left Banner

Zhang Daixin¹, Yang Yanchen¹, Liu Yuxuan², Wang Xianwei³, Chen Simo¹, Jing Hongfei¹

(1. College of Earth Sciences, Jilin University;

2. Editorial Office of Journal of Jilin University (Earth Science Edition), Jilin University;

3. Wancheng Business Dongshengmiao Co., Ltd.)

Abstract: The Biliutai Lead-Zinc Deposit, a newly discovered deposit in the southern section of the Greater Khingan Mountains, is located in the eastern part of the Huanggang-Ganjur Temple-Ulanhot metallogenic belt. It is hosted in the shallow metamorphic rock series of the Permian Linxi Formation and primarily controlled by NE-trending structures. By analyzing 1:10 000 soil geochemical survey data through parameter statistics, single-element anomaly analysis, cluster analysis, factor analysis, and factor anomaly analysis, the F1 factor anomaly zone (Ag-Pb-Zn-Mn assembly) was identified as a critical prospecting indicator for silver-lead-zinc mineralization. High-precision magnetic survey data were processed using reduction-to-pole, continuation, horizontal first derivative, and vertical second derivative methods to extract structural planes/linear structures and geological bodies/ring-shaped structures. Building on geological exploration, combined with soil geochemical anomalies and high-precision magnetic survey interpretations, this study integrates geological, geochemical, and geophysical prospecting indicators to provide a basis for determining further prospecting directions and engineering layouts.

Keywords: lead-zinc deposit; soil geochemistry; factor analysis; high-precision magnetic survey; medium-low temperature hydrothermal vein type; prospecting indicator; prospecting direction