



引文格式: 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. DOI: 10.12401/j.nwg.2024002

Citation: SHI Dongyan, ZHANG Yupeng, ZHANG Kun, et al. Study on Geochemical Prospecting Methods in Forest Swamp Area of Northeast Daxing'an Mountains: Example from Erdaokan Silver Polymetallic Mine Area in Heilongjiang Province[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(2): 107-120. DOI: 10.12401/j.nwg.2024002

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

史冬岩^{1,2,3}, 张玉鹏^{4,*}, 张坤¹, 孙景贵², 常翔鲲¹, 王秋阳¹, 李文龙⁴

(1. 黑龙江省矿业集团有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150036; 2. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061; 3. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550081; 4. 黑龙江省自然资源调查院, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘要: 在黑龙江省二道坎森林-沼泽浅覆盖区, 采用 B、C 层不同样品粒级对照分析方法, 开展了土壤、岩屑测量采样方法技术剖面试验研究, 选择采取的-5~+20 目、-20~+60 目和-60 目 3 种粒级试验样品, 并对比不同粒级样品中各元素在地球化学特征、元素组合以及异常圈定等方面存在的差异。结果表明, 不同粒级样品所圈定的成矿元素地球化学异常都具备 Ag-Pb-Zn-Mn 多元素异常组合的特征, 且异常分布范围与深部矿体较为一致, 元素浓集中心与深部矿体空间位置吻合较好。具体表现为岩屑、土壤测量皆可以有效地指示银铅锌矿体, 可作为该区寻找银铅锌矿的有效手段。而 C 层-20~+60 目粒级岩屑测量效果更好, 表现在元素含量更高, 异常强度更强, 元素组合指示意义更明显, 定位矿体更精准, 可以强化土壤微弱异常, 有利于发现和识别弱的矿化信息。因此, 在研究区内开展地球化学测量适宜采用-20~+60 目粒级岩屑采样方法, 其可为森林-沼泽覆盖区如二道坎地区以及多宝山矿集区开展 1:1 万化探详查和找矿预测提供了技术依据。

关键词: 岩屑测量; 土壤测量; 试验研究; 地球化学特征; 元素组合特征; 二道坎村

中图分类号: P632

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)02-0107-14

Study on Geochemical Prospecting Methods in Forest Swamp Area of Northeast Daxing'an Mountains: Example from Erdaokan Silver Polymetallic Mine Area in Heilongjiang Province

SHI Dongyan^{1,2,3}, ZHANG Yupeng^{4,*}, ZHANG Kun¹, SUN Jinggui², CHANG Xiangkun¹, WANG Qiuyang¹, LI Wenlong⁴

(1. Heilongjiang Mining Group Corporation Ltd, Harbin 150036, Heilongjiang, China; 2. College of Earth Science, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China; 3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, Guizhou, China; 4. Heilongjiang Institute of Natural Resources, Harbin 150036, Heilongjiang, China)

Abstract: In the shallow forest-swamp overlying area of Erdaokan, Heilongjiang Province, the experimental study on the technical profile of soil and rock debris measurement and sampling methods was carried out by us-

收稿日期: 2023-09-20; 修回日期: 2023-11-30; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 黑龙江省重点研发计划项目(GA21A204), 黑龙江地质勘查公益项目(GY-2018003)联合资助。

作者简介: 史冬岩(1983-), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事资源勘查与评价方面的研究。E-mail: shidongyan77@163.com。

* 通讯作者: 张玉鹏(1985-), 男, 高级工程师, 从事地质矿产勘查工作。E-mail: yupeng0310@163.com。

ing the method of comparative analysis of different sample sizes in B and C layers. The samples of $-5\sim+20$ mesh, $-20\sim+60$ mesh and -60 mesh were selected. The differences in geochemical characteristics, element combination and anomaly delineation of each element in different sample sizes were also compared. The results show that the geochemical anomalies of ore-forming elements delineated by different sized samples have the characteristics of Ag-Pb-Zn-Mn multi-element anomaly combination, and the distribution range of anomalies is consistent with the deep ore body, and the element concentration center is in good agreement with the spatial location of the deep ore body, indicating that the ore-body can be effectively indicated by rock debris and soil survey. It can be used as an effective means to find silver-lead-zinc deposits in this area. Through the study, the measurement results of C- $20\sim+60$ mesh rock cuttings collected in the mining area are higher and better, which are manifested in higher element content, stronger anomaly intensity, more obvious indication of element combination, and more accurate ore body positioning, which can strengthen the weak soil anomaly, and is conducive to the discovery and identification of weak mineralization information. Therefore, the sampling method of $-20\sim+60$ mesh cuttings is suitable for geochemical survey in the study area, which provides a technical basis for the detailed survey of 1 : 10 000 geochemical exploration in forest-swamp overlying region including the Erdaokanzi and Duobaoshan ore concentration areas.

Keywords: rock debris survey; soil survey; experimental study; geochemical characteristics; element combination characteristics; Erdaokan village

随着矿产勘查工作的深入,发现地表矿、浅表矿的几率日趋减少,覆盖区找矿已经成为当前找矿预测工作的重要方向,而如何有效提取成矿元素地球化学异常是制约找矿预测的关键之一(陈虹等, 2022; 林俞亨等, 2024),这对新一轮找矿突破战略行动的全面推进,加强对浅覆盖区地球化学勘查技术创新及推广应用,实现找矿重大突破具有重要意义。黑龙江省二道坎地区是典型的浅覆盖区,处在该省重要的多宝山矿集区,具备天然的研究条件。前人在研究区进行过水系、土壤地球化学测量工作(鲍希波等, 2019)。由于该区受自然气候、大气降水、繁茂植被、丰富的有机质等各种复杂因素影响,给研究区找矿勘查工作带来了诸多障碍,导致找矿信息复杂且难以解读。针对东北森林沼泽这一特定类型的浅覆盖区,需要加强科技创新,找到更有效的地球化学测量方法,精确地揭示覆盖层下的矿产信息,提高找矿勘查的效率和精度,以期在复杂的自然环境中准确、高效地找到矿产资源。

二道坎村银多金属矿床位于黑龙江省嫩江市 NE 向 150 km 处,是黑龙江省发现的首个大型银铅锌多金属矿床,填补了省内尚未发现独立银多金属矿床的空白,对大兴安岭的区域银多金属成矿研究及找矿工作具有重要意义(徐文喜等, 2019; Yuan et al., 2019, 2021)。徐文喜等(2019)初步研究该矿床特征、蚀变

类型、成矿阶段,认为其是晚三叠世形成的浅成低温热液型矿床;刘国卿等(2020)通过研究其矿石的矿物组合、组构特征等,初步查明了银的赋存状态;Yuan 等(2019, 2021)则重点研究了天然沥青及其他矿物的矿物学特征、形成时代、成矿物质来源及矿床成因等问题,探讨了沥青对该矿床金属成矿作用的贡献;Deng 等(2021)对该矿床的 Hg 同位素地球化学进行研究,为矿床金属来源提供直接约束;董娟等(2022)对矿石中的菱锰矿矿物学属性及地球化学特征进行了系统研究,认为其形成于还原性环境,成矿物质来源具有混源特征。鲍希波等(2019)在化探调查工作中,发现与本矿床有关的重点异常星罕 11Hs-24 号异常主要由 Au、As、Mo、Cu、Sb、Hg 等元素组成,并未见 Ag 异常,异常内却验证圈定出多条银矿体,因此如何有效识别矿致异常,采样介质的一致性成为化探工作的关键因素。An 等(2023)认为在矿区详查阶段开展化探测量时,首先应查明元素在不同粒级土壤、岩屑中的分布特征、成矿及成矿指示元素的富集粒级,以此制定合理的样品采集方案,从而有效突出元素地球化学弱异常,获取清晰的、突出的成晕和成矿信息。

笔者以二道坎村银多金属矿床为研究对象,对采样深度、粒级进行剖面试验研究,了解成矿元素在垂向剖面中的分布规律以及在何种粒级样品中最佳富

集, 确定适合二道坎村浅覆盖区地球化学测量的最佳技术方法, 以获得真实、可靠的各元素地球化学信息; 明确成矿元素在该区的元素组合、分布特征以及富集规律, 为圈定找矿靶区提供依据, 为进一步找矿勘查指出方向, 为多宝山矿集区及其他森林-沼泽覆盖区地球化学勘查工作提供借鉴。

1 区域背景

1.1 区域成矿背景

研究区大地构造位置处于兴安地块东北缘的大兴安岭弧盆系扎兰屯—多宝山岛弧内(Meng et al., 2022)(图 1a), 受古亚洲洋、蒙古—鄂霍茨克洋和古太平洋 3 大构造体系的共同影响(Tang et al., 2019; Wu et al., 2021)。成矿带隶属于多宝山成矿带东段乌珠穆沁旗—嫩江铜铅锌金钨锡铬Ⅲ级成矿亚带, 是黑龙江省最重要的铜、金多金属及煤成矿勘查区, 成矿构造环境优越, 成矿作用强烈(Hao et al., 2015; 史冬岩等, 2021)。近年来, 区内相继发现铜山铜矿、三矿沟铁铜矿、争光岩金矿、二道坎银矿、关鸟河白钨矿和三合屯金矿等一批大中型矿床及众多矿(化)点, 区内成矿潜力巨大(Liu et al., 2017; Sun et al., 2021; Chen et al., 2023)。

区内地层从志留系至第四系均有出露(图 1b), 其中顶志留统—中泥盆统为多宝山弧盆系的火山—沉积组合(Wang et al., 2020), 主要为泥盆河组(S_4D_2n), 大面积分布于研究区中南部, 为浅海相碎屑岩夹碳酸岩, 局部发育有火山岩, 陆源碎屑岩主要为粉砂岩、板岩、细砂岩、碳质泥岩、砾岩及灰岩夹层, 局部的火山岩主要为英安岩, 安山岩, 其碳质泥岩及灰岩中富含有机质, 与银多金属矿关系较为密切(袁茂文, 2020; 鲁涛等, 2021); 晚石炭系—早二叠系为后碰撞构造背景环境形成的陆相中酸性火山岩, 主要是宝力高庙组(C_2P_1bl)火山熔岩、火山碎屑岩和正常沉积火山碎屑岩组合(Chai et al., 2020); 晚三叠世地层为鄂霍茨克洋盆南向俯冲形成的火山弧建造, 主要是上三叠统清水河火山岩(T_3qs)、紫灰色安山岩、角闪安山岩、辉石安山岩、安山质晶屑凝灰岩、安山质含角砾晶屑凝灰岩、英安岩。早白垩统晚期分布于东亚陆缘弧后伸展背景形成的火山—沉积盆地, 包括龙江组(K_1l)中性火山岩、光华组(K_1gn)酸性—中酸性火山岩、九峰山组(K_1j)河湖相含煤沉积夹火山碎屑岩、甘河组(K_1g)中基性熔岩为主的火山岩, 早白垩统与区内金银多金属

成矿关系密切(Cai et al., 2020); 第四纪地层为大陆裂谷属性玄武岩与河流相沉积, 包括下更新统大熊山玄武岩(βQp^1d)及上更新统一阶地堆积物(Qp^3)、第四系河流堆积物(Qh)。

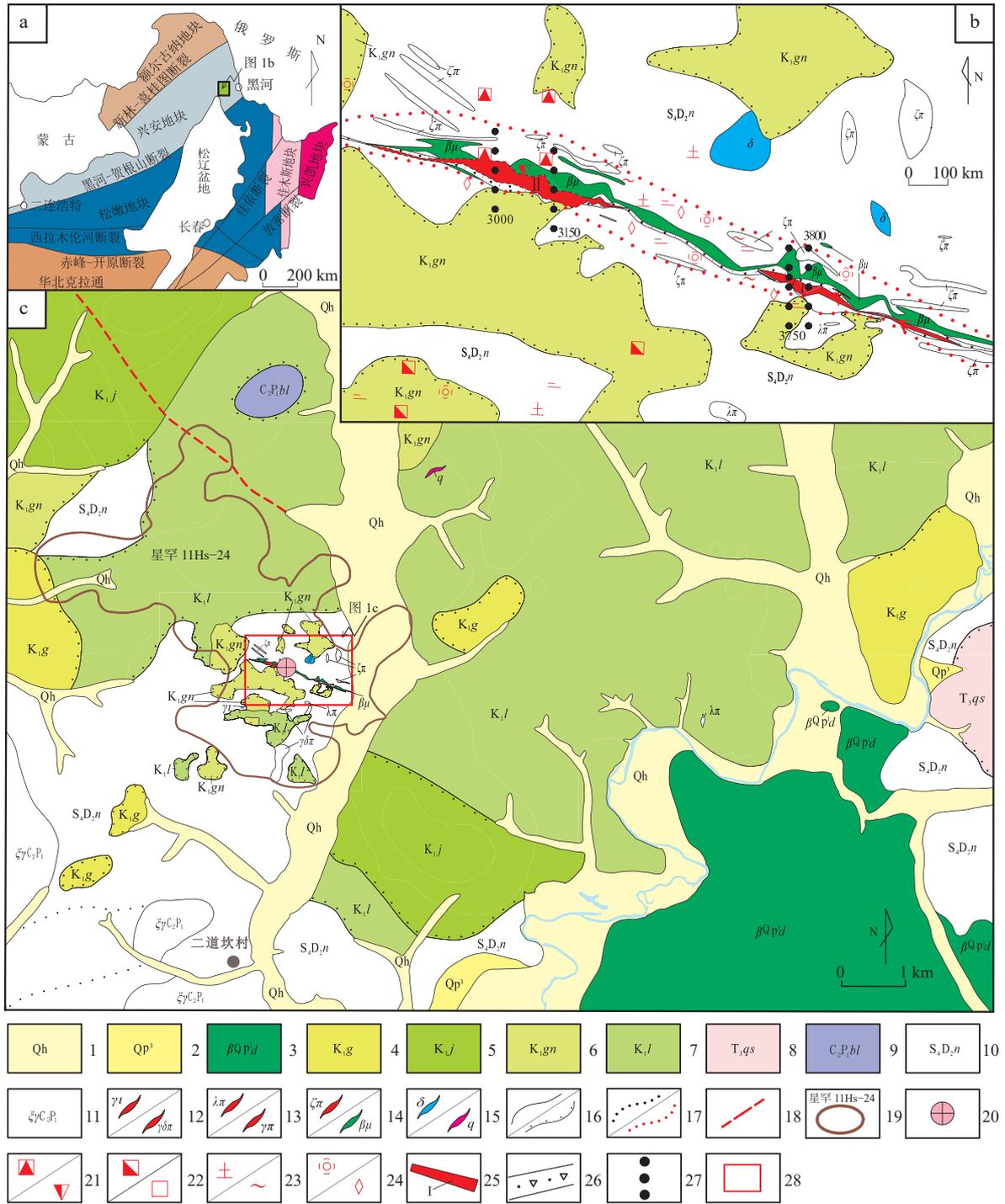
区内岩浆活动多与多宝山岛弧活动及兴蒙造山带的多阶段地质演化有关, 主要有早石炭世侵入岩、晚石炭世—早二叠世侵入岩。早石炭世侵入岩为中细粒碎裂花岗闪长岩($\gamma\delta C_1$), 在区域西北部零星出露。晚石炭世—早二叠世侵入岩($\xi\gamma C_2P_1$)呈岩株状, 主体分布于区域西南部, 侵入泥盆河组, 其 U-Pb 同位素年龄为(298.9±1.81) Ma; 脉岩较为发育, 从基性到酸性皆有出露, 主要岩性为花岗细晶岩(γt)、花岗闪长斑岩($\gamma\delta\pi$)、流纹斑岩($\lambda\pi$)、花岗斑岩($\gamma\pi$)、英安斑岩($\zeta\pi$)、辉绿岩($\beta\mu$)、闪长岩(δ)等, 充填于构造裂隙或在地层中顺层发育。

区内断裂构造发育, 以 NE 向和 NW 向断裂构造为主, 其中 NE 向断裂构造为区域性深大断裂, 控制着区域火山岩地层的展布; 区内 NW 向断裂为控矿构造, 矿体沿 NW 向构造带展布(徐文喜等, 2019; Yuan et al., 2019, 2021)。

1.2 矿区地质

矿区地层主要见顶志留统—中泥盆统泥盆河组、下白垩统龙江组安山岩、安山质屑凝灰岩、下白垩统光华组流纹岩、英安岩及其火山碎屑岩(图 1c)。其中泥盆河组为银矿体主要赋存地层, 在地表多见含铁质细砂岩、含凝灰质长石屑砂岩、变质中细粒长石砂岩、中粗粒砂岩等沉积岩, 在钻孔中见细碧岩、角斑岩、安山岩、英安岩、流纹岩、凝灰质砂岩等罕达气火山岩。矿区构造以断裂为主, 表现为 NWW 向的构造破碎带及辉绿岩墙。围岩蚀变主要类型有硅化、锰碳酸盐化、碳酸盐化、绢云母化、绿泥石化、绿帘石化、高岭土化; 矿化主要有黄铁矿化、磁铁矿化、白铁矿化、方铅矿化、闪锌矿化、赤铁矿化及硬锰矿化等, 其中黄铁矿化、硅化及碳酸盐化与银矿化关系最为密切。

矿区内圈出两条主要银矿体(I、II号), 两者形态一致, 矿石类型相似。其中, I号银矿体延长 356 m, 延深为 151 m, 平均真厚度为 6.24 m, 倾角为 83°~87°, 为楔形脉状, Ag 品位为 42.80~10 940.97 g/t, 平均为 558.76 g/t, 同时伴生有益组分铅、锌、锰(Pb 平均品位为 0.47%, Zn 平均品位为 0.54%, Mn 平均品位为 8.82%); II号银矿体延长为 462 m, 延深为 225 m, 平均真厚度为 14.10 m, 倾角为 87°到直立。Ag 矿体品位



1. 河流堆积物; 2. 一阶阶地堆积物; 3. 大熊山玄武岩; 4. 甘河组; 5. 九峰山组; 6. 光华组; 7. 龙江组; 8. 清水河组; 9. 宝力高庙组; 10. 泥鳅河组; 11. 晚石炭世—早二叠世正长花岗岩; 12. 花岗细晶岩/花岗闪长斑岩; 13. 流纹斑岩/花岗斑岩; 14. 英安斑岩/辉绿岩; 15. 闪长岩/石英脉; 16. 整合/不整合地质界线; 17. 岩性界线/蚀变界线; 18. 推测断层; 19. 化探异常及编号; 20. 银矿床; 21. 方铅矿/闪锌矿; 22. 褐铁矿化/黄铁矿化; 23. 黏土化/绿泥石化; 24. 硅化/碳酸盐化; 25. 银矿体及编号; 26. 构造破碎带; 27. 试验样品点位; 28. 研究区

图1 研究区大地构造位置图(a)、区域地质图(b)和矿区地质图(c)

Fig. 1 (a) Geotectonic location map, (b) regional geological map and (c) geological sketch map in study area

为 42.24~6 704.66 g/t, 平均品位为 505.82 g/t, 同时伴生有益组分铅、锌、锰(Pb 平均品位为 0.70%, Zn 平均

品位为 0.41%, Mn 平均品位为 7.65%)。矿石构造主要为星散状、稀疏浸染状构造、浸染状构造、细脉状

构造、团块状和块状构造; 矿石中金属硫化物以黄铁矿为主, 次为少量方铅矿、闪锌矿和磁铁矿。

1.3 地理景观

研究区地处黑龙江省中北部大兴安岭北东段, 地貌为低山丘陵类型, 地形总体上起伏不大、坡度较缓, 地势东西两侧高, 向中部河谷倾斜, 海拔为 523~355 m, 相对高差约为 168 m。气候属寒温带大陆性季风气候, 冬季严寒, 夏季温热(刘国卿等, 2020), 年平均气温为 0.5 °C, 最高可达 31.5 °C, 最低可达 -37 °C。霜期自当年 9 月至来年 5 月, 无霜期平均为 123 天; 风向多为 N、WN 风, 风速平均为 3.2 m/s, 年最大风速 15 m/s。年平均降雨量约为 558.5 mm, 年平均蒸发量为 859.5 mm。区内有季节性冻土、岛状多年冻土(Zhang et al., 2021), 季节性深度为 1.5~2.2 m, 多年性冻土主要分布于沟谷或山地北坡, 层厚为 2~7 m。矿区东部有泥鳅河支流, 自北向南流入泥鳅河, 属嫩江水系。区内森林资源丰富、植被较发育, 丘陵山地多为森林覆盖, 低洼地处为沼泽和草地, 部分地段已开辟为耕地。研究区内的风化作用总体上以物理风化为主, 化学风化、生物风化次之(耿卫华等, 2006)。地表基岩风化破碎, 土壤层位较齐全, 残坡积层较厚、土壤颗粒变细、土壤成熟度高等特征。根据研究区的气候、地形地貌、土壤、植被、水系和介质类型等, 划分为低山丘陵亚景观类型。由于景观区地球化学异常成因复杂、影响因素众多, 导致获得的地球化学异常特征存在较大差异。通过选取典型剖面, 对矿(体)化岩石碎屑以及对应的土壤的开展系统采样分析, 确定次生(原生)异常元素组合与指示元素含量变化规律, 为研究区大比例尺网格化(50 m×50 m)地球化学异常筛选与评价提供依据, 对相同景观区内的异常追踪和查证方法研究具有重要的实际意义。

2 样品采集与分析方法

区内土壤垂直剖面可划分为 A、B 和 C 层。A 层为腐殖土, 褐黑色, 深度为 0.1~0.4 m; B 层土壤呈黄褐色, 深度为 0.40~0.70 m, 以黏土为主, 含有少量基岩风化产生的碎屑和残坡积碎石; C 层为土壤母质层, 深黄色, 深度为 0.70~1.00 m, 主要由基岩风化产生的碎屑组成, 所含黏土量较少。

样点布设: 为研究地球化学勘查方法的有效性, 探索在不同层位、不同粒级的样品含矿性和元素异常

特征, 在穿越矿体上方选择有代表性的剖面, 开展化探测量的试验研究, 按点距 50 m 采样, 矿化蚀变较强地段加大采样密度(图 1c), 在同一试验点, 对应采集 B 层、C 层样品。本次工作共采取 21 个试验点, 完成 4 条试验剖面, 其中在 I 号矿体为 3 750、3 800 线(11 个点), 在 II 号矿体为 3 000、3 150 线(10 个点)。

采样方法: 在土壤垂向截面上, 依次在采样点 B、C 层采集样品, 避开坡积物和冲积物的干扰, 采集风化残积层、风化基岩, 在 B、C 层内筛取不同粒级的样品。对用于不同粒级土壤(岩屑)中元素含量研究的样品(简称粒级试验样品)则不使用混合样。

样本加工: 样品经过自然风干后, 对不同层位粒级试验样品进行 3 级筛分, 分别过 5 目、20 目、60 目不锈钢筛, 取 5~20 目(4~0.83 mm)编为 B1、C1 级, 20~60 目(0.83~0.25 mm)编为 B2、C2 级, <0.25 mm)编为 B3、C3 级。提交实验室的每个样品重量至少 500 g, 必须放入坚固的塑料袋或塑料瓶中并密封, 且须用样品标识符清晰标记。

依据研究区矿体的矿物特征、含矿岩体、富矿围岩和地层等, 确定分析的主量和微量元素为 Al_2O_3 、CaO、 K_2O 、MgO、 Na_2O 、 SiO_2 、TFe、Au、Ag、As、Ba、Bi、Co、Cu、F、Hg、Mo、Mn、Ni、Pb、Sb、Sn、Te、W、Zn。所有样品分析均在黑龙江省地质矿产测试应用研究所进行, 其中 X 射线荧光光谱法(XRF)测定 Al_2O_3 、CaO、 K_2O 、MgO、 Na_2O 、 SiO_2 、TFe、Cu、Mn、Pb、Zn, 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定 Au、Ba、Bi、Co、Ni、W、Mo, 发射光谱法(ES)测定 Ag、Sn, 原子荧光光谱法(AFS)测定 As、Hg、Sb、Te, 离子选择电极法(SIE)测定 F。各元素检出限如表 1 所示。实验室使用内部、外部质量控制, 以确保其报告的检测结果符合目的。实验室的报告表明该方法的精密性、准确度和下限均能满足样品分析的要求。质控项目的报告率: 各元素准确度合格率 100%, 各元素精密性合格率 100%, 各元素报告率均为 100%, 其他各项技术指标均能满足相关规范要求。

3 地球化学参数特征

样品分析的主微量元素包括了区内主要的成矿元素和控矿岩体、地层的化学组分, 研究这些元素的统计特征、空间分布特征、元素组合特征和异常分布规律能够有效地指导区域找矿。参照以往矿产勘

表1 各项指标的分析方法及检出限表

Tab. 1 The analysis method and detection limit of target elements

分析指标	实测检出限	规范要求	分析指标	实测检出限	规范要求
Al ₂ O ₃	0.044	0.05	Cu	0.859	1
CaO	0.045	0.05	F	50	100
K ₂ O	0.05	0.05	Hg	0.000 5	0.003
MgO	0.05	0.05	Mn	5.48	10
Na ₂ O	0.1	0.1	Mo	0.044	0.3
SiO ₂	0.095	0.1	Ni	0.000 06	2
TFe	0.048	0.05	Pb	1.86	2
Au	0.1	0.3	Sb	0.05	0.05
Ag	0.02	0.02	Sn	0.5	1
As	1	1	Te	0.016	0.02
Ba	8.5	10	W	0.015	0.4
Bi	0.01	0.05	Zn	1.78	4
Co	0.221	1			

注：化合物含量为%，Au含量为10⁻⁹，其余元素含量均为10⁻⁶。

查地球化学数据数理统计方法(刘汉粮等, 2018; 史冬岩等, 2021; 张津瑞等, 2023), 计算元素平均值、标准差和变异系数(Cv)等统计参数。为了方便试验数据的计算和对比, 本次分别计算各粒级、B层、C层、总体数据的均值(表2), 以代表各元素在不同层位、不同粒级样品中的浓度。

3.1 地球化学参数统计

根据表2显示, 样品中Al₂O₃、SiO₂、K₂O、Na₂O等氧化物的平均含量分布相对均匀, 与中国土壤背景值差异不大, 仅CaO的浓度降低、贫化。

研究区内, 在成矿元素中具有极强分异(Cv>1.5)的元素有Ag、Mn、Pb、Zn、Sb; 分异强(1.5>Cv>0.8)的元素有Hg。与中国土壤平均值相比, 全区强富集(K>1.5)元素由强至弱有Ag、As、Co、Sb、Pb、Mn、Zn、Ni、Cu, 其中Ag富集系数高达318.09, 富集强烈, 成矿可能性极大; 局部地段富集(1.5>K>1.2)的元素有TFe、Mo; 全区极强叠加(D>100)的元素有Mn、Pb、Zn、Ag, 其遭受后期热液活动的叠加, 更易成矿; 强叠加型元素有(100>D>30)Ba、F、Ni, 而As、Sb、Cu具有一定的叠加性。综合以上特征参数可以得出, 区内主成矿元素为Ag、Pb、Zn、Mn。

3.2 元素组合特征

通过SPSS19软件主成分分析法对试验样品主要成矿元素进行统计分析, KMO值为0.764, Bartlett's

sphericity检验结果具有统计学意义(P<0.001), 表明数据很适合因子分析(雷自强等, 2022); 共提取3个主成分因子(表3)的累计方差贡献率分74.14, 包含原始变量的大多数信息。

F1因子占方差的43.07%, Pb、Mn、Sb、Mo、As、Ag、Zn、W、Hg、TFe、Sn的载荷较高, 属于亲硫成矿元素组合。该组合与Ag、Pb、Zn成矿作用密切, 代表了热液主成矿期的石英-含银多金属硫化物阶段(Li et al., 2016; 徐文喜等, 2019); F2因子占方差的21.13%, 载荷因子Bi、Au、F元素为正相关, Co、Cu、Ni元素为负相关, 为亲硫亲铜元素组合, 代表了热液硫化物阶段(Li et al., 2022)。Co、Cu、Ni组合与岩浆型铜镍硫化物矿床成矿作用关系密切(王亚磊等, 2023), 可能是深部岩浆热液成矿系统的远端体现(徐文喜等, 2019); F3因子占方差的9.93%, 载荷因子Te、Ba元素为正相关, 与碱性岩浆成矿作用有关(Kelley et al., 2020)。此外, Te和主成矿元素呈负相关, 并反映了Te在矿化阶段存在显著的贫化。

因子分析结果表明, Pb、Mn、Sb、Mo、As、Ag、W、Zn、Hg、Sn、TFe等元素异常与构造、矿体关系较密切, 并在有利的构造部位通过沉淀、富集成矿; Cu、Ni、Co易在局部富集, 形成异常和矿化体; 而Te、Ba、Au、Bi、F未与主要成矿元素叠加, 表明区内银多金属矿体剥蚀程度较低。

表 2 研究区不同粒级样品分析元素(化合物)地球化学参数统计表

Tab. 2 Geochemical parameters for analysis of elements (compounds) at different grain levels in the samples of this study area

特征	化学场			背景场			中国土壤	K	D	均值		标准差		各粒级平均值					
	Xsum	Ssum	Cvsum	Xo	So	Cvo				B总	C总	B总	C总	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Al ₂ O ₃	15.35	1.58	0.10	15.35	1.10	0.07	12.5	1.23	1.44	15.44	15.27	1.27	1.85	15.4	15.5	15.5	15.2	15.3	15.4
CaO	0.70	0.87	1.24	0.55	1.39	2.53	2.2	0.32	0.80	0.56	0.84	0.15	1.22	0.53	0.57	0.6	0.85	0.82	0.86
K ₂ O	2.11	0.47	0.22	2.05	1.28	0.62	2.3	0.92	0.38	2.24	1.98	0.26	0.59	2.24	2.25	2.24	1.97	1.98	2
MgO	1.24	0.43	0.35	1.17	1.42	1.21	1.3	0.96	0.32	1.16	1.32	0.25	0.55	1.14	1.17	1.17	1.33	1.32	1.32
Na ₂ O	1.19	0.34	0.28	1.16	1.32	1.14	1.5	0.79	0.26	1.23	1.15	0.22	0.42	1.21	1.21	1.26	1.14	1.13	1.17
SiO ₂	61.33	5.74	0.09	61.56	1.09	0.02	65	0.94	5.26	63.32	59.35	4.58	6.13	62.3	63.3	64.4	59.2	59.1	59.8
TFe	6.08	1.85	0.30	58.4	13.23	0.23	4.2	1.45	0.01	5.40	6.76	1.32	2.06	5.71	5.37	5.13	6.82	6.78	6.68
Au	1.63	0.57	0.35	1.54	1.41	0.92	1.4	1.17	0.43	1.73	1.54	0.55	0.57	1.7	1.7	1.8	1.4	1.5	1.7
Ag	25.45	101.84	4.00	0.94	11.27	11.99	0.08	318.09	244.7	18.44	32.45	65.90	128.32	25.93	17.96	11.43	37.47	36.85	23.04
As	52.05	37.98	0.73	41.94	1.67	0.04	1	52.05	28.29	48.14	55.95	21.68	49.07	56	46.8	41.6	57.2	56.6	54.1
Ba	422.52	105.52	0.25	409.6	1.29	0.003	500	0.85	84.70	436.9	408.11	85.01	121.65	463	427	420	409	409	406
Bi	0.26	0.08	0.31	0.25	1.46	5.86	0.3	0.87	0.06	0.30	0.22	0.05	0.09	0.29	0.31	0.3	0.2	0.22	0.24
Co	25.00	11.79	0.47	22.6	1.60	0.07	1.3	19.23	8.13	21.83	28.18	10.68	12.06	27.4	21.9	16.2	28.2	29	27.3
Cu	46.98	21.89	0.47	42.7	1.48	0.03	24	1.96	16.31	37.80	56.17	11.52	25.72	37.9	38.5	37	54.2	56.4	57.9
F	532.8	76.8	0.14	527.4	1.15	0.002	480	1.11	67.34	547.94	517.67	70.4	80.5	544	549	552	523	521	510
Hg	0.89	1.21	1.35	0.43	3.32	7.73	40	0.02	0.75	0.61	1.17	0.82	1.45	0.59	0.61	0.63	1.23	1.14	1.15
Mn	7 814.2	20 496.0	2.62	1 654.0	3.37	0.002	600	13.02	28 758	5 068	10 559.9	13 124	25 678	7 658	4 919	2 629	12 094	11 479	8 107
Mo	1.14	0.67	0.59	0.97	1.42	1.47	0.8	1.43	0.56	1.18	1.10	0.55	0.78	1.33	1.16	1.05	1.07	1.16	1.08
Ni	66.76	46.40	0.69	54.60	1.85	0.03	26	2.57	30.66	52.47	81.06	30.28	54.85	55	52	50	82	82	80
Pb	320.8	779.8	2.43	55.7	4.97	0.09	23	13.95	903.9	238.0	403.59	531.2	964.3	329.9	245.8	138.3	432.4	447.7	330.7
Sb	13.71	21.48	1.57	7.80	2.13	0.27	0.8	17.14	17.69	9.55	17.87	12.17	27.32	11.21	9.24	8.19	18.16	18.21	17.24
Sn	2.24	0.60	0.27	2.15	1.27	0.59	2.5	0.89	0.49	2.44	2.04	0.50	0.62	2.38	2.45	2.47	1.99	2.05	2.07
Te	0.06	0.02	0.34	0.06	1.45	26.40	40	0.00	0.01	0.06	0.06	0.01	0.02	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06
W	1.88	1.33	0.71	1.57	1.54	0.98	1.8	1.05	1.03	2.02	1.74	1.23	1.41	2.32	1.9	1.84	1.59	1.79	1.84
Zn	260.8	449.8	1.72	136.1	2.27	0.02	68	3.84	379.6	160.7	360.97	169.1	599.1	184.2	159.8	138.1	408.5	374.6	299.8

注: 化合物含量为%, Au含量为10⁻⁹, 其余元素含量均为10⁻⁶; 富集系数K=X/中国土壤, D=(X×S)/(Xo×So)。

表 3 研究区土壤样品元素含量因子分析正交旋转因子载荷矩阵表

Tab. 3 Orthometric rotating factor loading matrix of factor analysis of elemental content of soil samples in study area

元素	F1	F2	F3
Pb	0.965	0.08	0.048
Mn	0.955	0.088	-0.178
Sb	0.954	0.06	-0.126
Mo	0.905	0.314	-0.012
As	0.87	0.228	0.042
Ag	0.845	0.225	-0.367
Zn	0.816	-0.182	0.292
W	0.805	0.147	0.109
Hg	0.788	-0.241	0.205
TFe	0.758	-0.534	-0.072
Sn	0.642	0.58	-0.001
Co	0.077	-0.843	-0.244
Cu	0.138	-0.83	0.105
Ni	-0.065	-0.817	-0.322
Bi	0.022	0.667	0.59
Au	0.298	0.54	0.011
F	0.117	0.452	0.048
Te	-0.205	0.102	0.814
Ba	0.207	0.21	0.608
累计方差%	43.07	64.21	74.14

注: 主成分已提取了3个成分; 旋转法具有 Kaiser 标准化的正交旋转法, 旋转在5次迭代后收敛。

4 对比研究与讨论

地球化学测量被广泛应用在地质找矿勘查中(谈艳等, 2019; 李文明等, 2021; 史冬岩等, 2021; 张玉鹏等, 2022); 近年来前人利用化探方法在黑龙江省寻找金矿(史冬岩等, 2021)、银矿(邓昌州等, 2015; 鲍希波, 2019)取得了很好的效果。地球化学测量的关键技术问题是采样深度和样品粒度, 其直接影响着地球化学找矿信息的提取。前人在浅覆盖区开展采样层位识别与采样、采样粒度选择等方法技术试验(蒋艳明, 2009; 刘汉粮等, 2018; 段星星等, 2019; 王乔林, 2021), 结果表明采样层位、加工粒度对地球化学测量结果均有显著影响。因此, 在地球化学测量前对采样深度、样品粒度进行对比试验研究, 掌握研究区内成矿元素含量变化特征与采样深度与样品粒度之间的关系(丁兆举, 2021), 可为下一步开展面积性地球化学测量提供更为准确和可靠的数据支持(李重阳, 2020)。

4.1 粒度与风化程度关系

采用X射线荧光(XRF)法测定了所采21份样品中的主要元素氧化物, 并利用化学蚀变指数(*CIA*)、化学风化指数(*CIW*)、帕克风化指数(*WIP*)和Ruxton指数(*R*)等多种指数(吴蓓娟等, 2016)表征其化学风化程度, 以评估颗粒大小对化学风化程度的影响(Primus et al., 2022)。其中*CIA*、*CIX*指数值越高, 表示风化程度越高; *WIP*、*R*指数值越低, 表示风化程度越高(Sorokina, 2019; Dinis et al., 2021)。通过对二道坎银床不同粒度土壤和岩屑样品风化过程中主要氧化物行为的研究(表4, 图2), 样品粒度的粗细能较好地反映其风化程度的差异。

由表4可知, 与岩屑(C层)均值相比, 土壤(B层)显示出较低的*CIA*值、*CIX*值, 而*WIP*值和*R*值都较高, 表明土壤样品化学风化强度比岩屑低(Zhou et al., 2015; Bhat et al., 2022)。由图2可以直观看出, B层的*CIA*值和*CIX*值随着粒度的减小而减小, 而*WIP*值和*R*值随着粒度的减小而增大, 结果表明土壤(B层)的

表4 研究区土壤样品粒度与风化指数关系表

Tab. 4 Relationship between granularities and weathering indexes

指标	计算公式	B层 (n=63)				C层 (n=63)			
		B1	B2	B3	B总	C1	C2	C3	C总
<i>CIA</i>	$[Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] \times 100$	79.5	79.3	79.0	79.3	79.3	79.5	79.2	79.4
<i>CIX</i>	$[Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + K_2O)] \times 100$	81.7	81.7	81.5	81.7	83.0	83.1	82.9	83.0
<i>WIP</i>	$[2Na_2O / 0.35 + 2K_2O / 0.25 + MgO / 0.9 + CaO / 0.7] \times 100$	26.8	27.0	27.3	27.0	24.9	24.9	25.4	25.1
<i>R</i>	Al_2O_3 / SiO_2	4.05	4.09	4.16	4.10	3.90	3.87	3.89	3.89

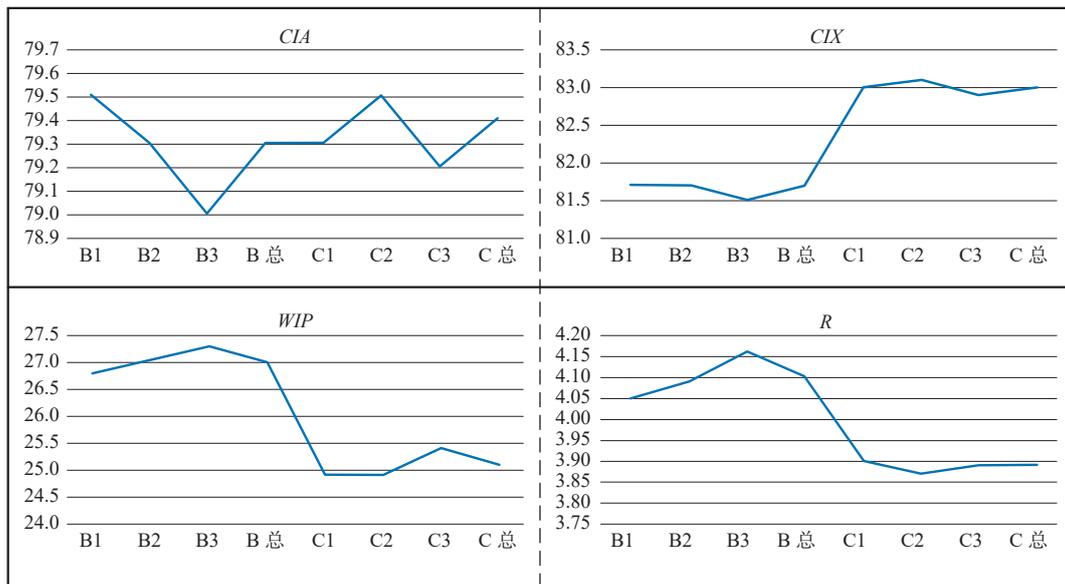


图2 研究区粒度与风化指数关系图

Fig. 2 Relationship between granularities and weathering indexes in study area

化学风化程度随着土壤颗粒度的减小而减小。C 层各粒级的风化指数随粒级折线变化, 其 CIA 值、CLX 值随粒级增大先增大后减小, WIP 值、R 值随粒级增大先减小而增大。当 C 层样品颗粒在 20~60 目 (0.83~0.25 mm) 时, 其 CIA 值、CLX 值最高, WIP 值、R 值最低, 氧化物含量突然增加或降低, 变化程度较大, 表明在此阶段样品的风化机制可能发生了明显改变。

结果表明, 各元素含量和化学风化作用程度岩屑样品大于土壤样品, 说明在岩石风化成土过程中, 元素再分配和迁移使土壤中大多数元素(氧化物)含量产生明显的“均一化”。且 B 层的“均一化”程度比 C 层更高, 表明 C 层岩屑的化学风化程度更强。因此, 在本区采集化探样品时, 应尽量采集岩石碎屑样品进行分析, 以突出显示元素异常信息。

4.2 成矿元素富集粒级研究

为进一步分析成矿元素在各粒级中的富集特征, 笔者引入相对富集系数的概念, 即研究组的元素实测值与参照组的元素实测值的比值。在计算相对富集系数时, 可选用 Al₂O₃ 作为参考因子进行数据校正, 可以消除自然风化作用的影响(张沁瑞等, 2022)。表 2 显示, 各粒级组 Al₂O₃ 均值为 15.2%~15.5%, 受风化作用影响较小。

$$Kz = (Gx / Gx A1) / (Gy / Gy A1)$$

式中: Kz 为校正后的富集系数; Gx 为研究组元素的实测值, Gx A1 为研究组常量元素 A1 的实测值; Gy 为参照组元素的实测值, Gy A1 为参照组常量元素 A1 的实测值。

4.2.1 相同介质、不同粒级对比研究

以相同介质样品的数据为基准, 计算不同粒级土壤样品均值/土壤均值、不同粒级岩屑样品均值/岩屑均值的相对富集系数, 并将其绘图(图 3)。

与全部土壤样品元素均值相比, 在 B1 粒级样品中 Ag、Mn、Pb 相对富集系数在 1.2 倍以上, 属相对富集元素, 极易成矿; As、Co、Mo、Sb、W、Zn 相对富集系数为 1.1~1.2, 属相对高背景元素, 局部可能成矿。在 B2 粒级样品中各元素相对富集系数为 0.9~1.0, 属相对背景, 与 B 层全量样品成矿属性一致; 在 B3 粒级样品中 Ag、Mn、Pb、Co 的相对富集系数在 0.8 以下, 属相对贫化元素, 成矿属性相对差;

与全部岩屑样品元素均值相比, 在 C1 粒级样品中, Ag、Mn、Zn 相对富集系数为 1.1~1.2, 属相对高背景元素, 易成矿; Au、Bi、W 相对富集系数为 0.90~0.95, 属相对低背景元素, 成矿性较低; 在 C2 粒级样品中, Ag、Pb 相对富集系数为 1.1~1.2, 属相对富集元素, 易成矿; 其他元素相对富集系数为 0.97~1.09, 属相对背景, 与 C 层全量样品成矿属性一致; 在 C3 粒级样品中, Au 相对富集系数为 1.11, 属相对高背景元素, 局部

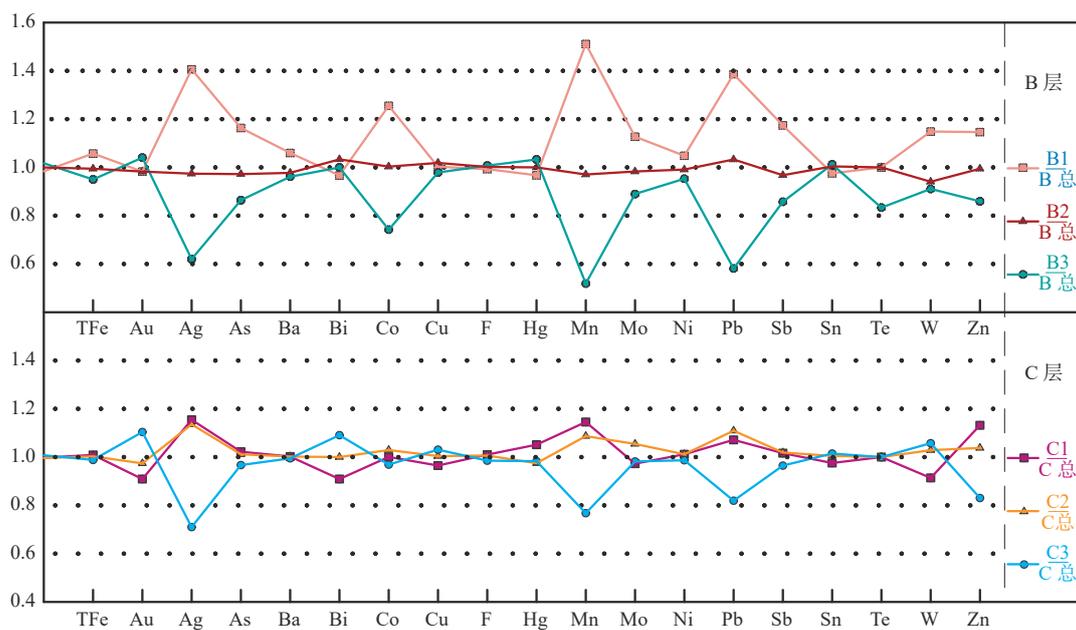


图3 研究区不同粒级试验样品中成矿元素相对富集系数图

Fig. 3 Enrichment coefficient of relative metallogenic elements in samples of different grain sizes in study area

可能成矿; Ag、Mn 相对富集系数分别为 0.71、0.77, 属相对贫化元素, 成矿属性相对差; Pb、Zn 相对富集系数分别为 0.82、0.83, 属相对低背景贫化元素, 成矿属性相对一般。

4.2.2 相同粒度、不同介质的对比研究

分别计算相同粒度、不同介质样品的相对富集系数并将其绘图。图中显示(图 4), 除 Mn、Pb、Ag 及 Co 局部较为突出, 整体趋势基本一致。

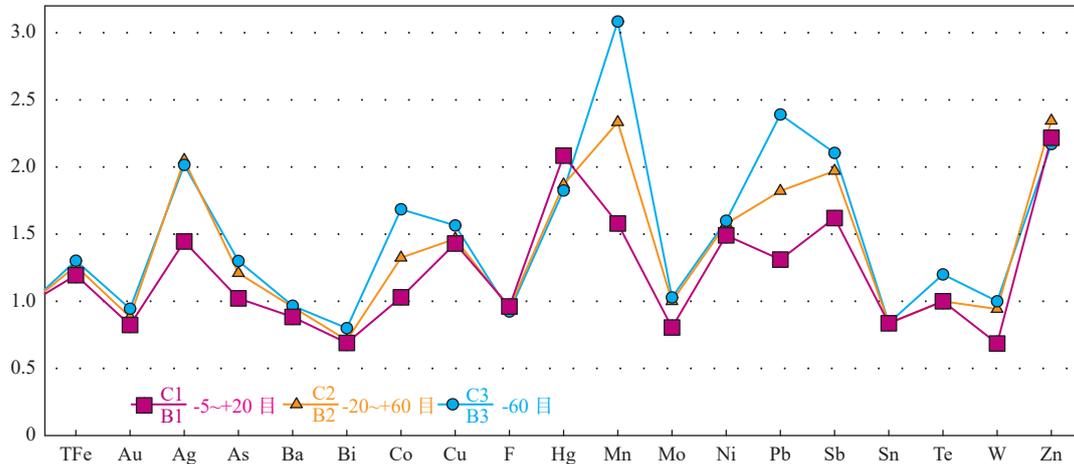


图4 研究区不同介质试验样品中成矿元素相对富集系数图

Fig. 4 Enrichment coefficient of relative metallogenic elements in samples of different textures sizes in study area

在-5~+20目粒度段, 不同介质样品 Zn、Hg、Sb、Mn、Ni 为极强相对富集, Ag、Cu、Pb、TFe 为强相对富集; 在-20~+60目粒度段, 不同介质样品 Zn、Mn、Ag、Sb、Hg、Pb、Ni 为极强相对富集, Cu、Co 为强相对富集; 在-60目以下粒度段, 不同介质样品 Mn、Pb、Zn、Sb、Ag、Hg、Co、Ni、Cu 为极强相对富集, TFe、As 为强相对富集。

对比分析认为, B层中成矿元素 Ag、Pb、Zn、Mn 及相关伴生元素 As、Sb、Ba、Mo、W 的含量多在-5~+20目粒度段富集。C层中, 这些元素则大多富集在-20~+60目粒度段; 主成矿元素 Ag、Pb、Zn、Mn 不论在 B层还是 C层均在-60目细粒度段贫化。考虑到-60目的细粒样品中风成砂对样品含量的影响, 区内不适合开展细粒度测量工作(范红科, 2010)。C层各个粒度段的样品中主成矿元素 Ag、Pb、Zn、Mn 及相关伴生元素 As、Sb、Bi、Mo、W 的含量明显高于 B层, 异常峰值明显且变化幅度大, 仅 Bi、Sn、W 含量 B层高于 C层。

因此, 区内采集的样品应选 C层, 采样深度 0.7~1.0 m, -20~+60目粒度段的样品, 称为“岩屑测量”, 比较直观反映笔者针对黑龙江森林沼泽浅覆盖区特点的勘查找矿的思路。

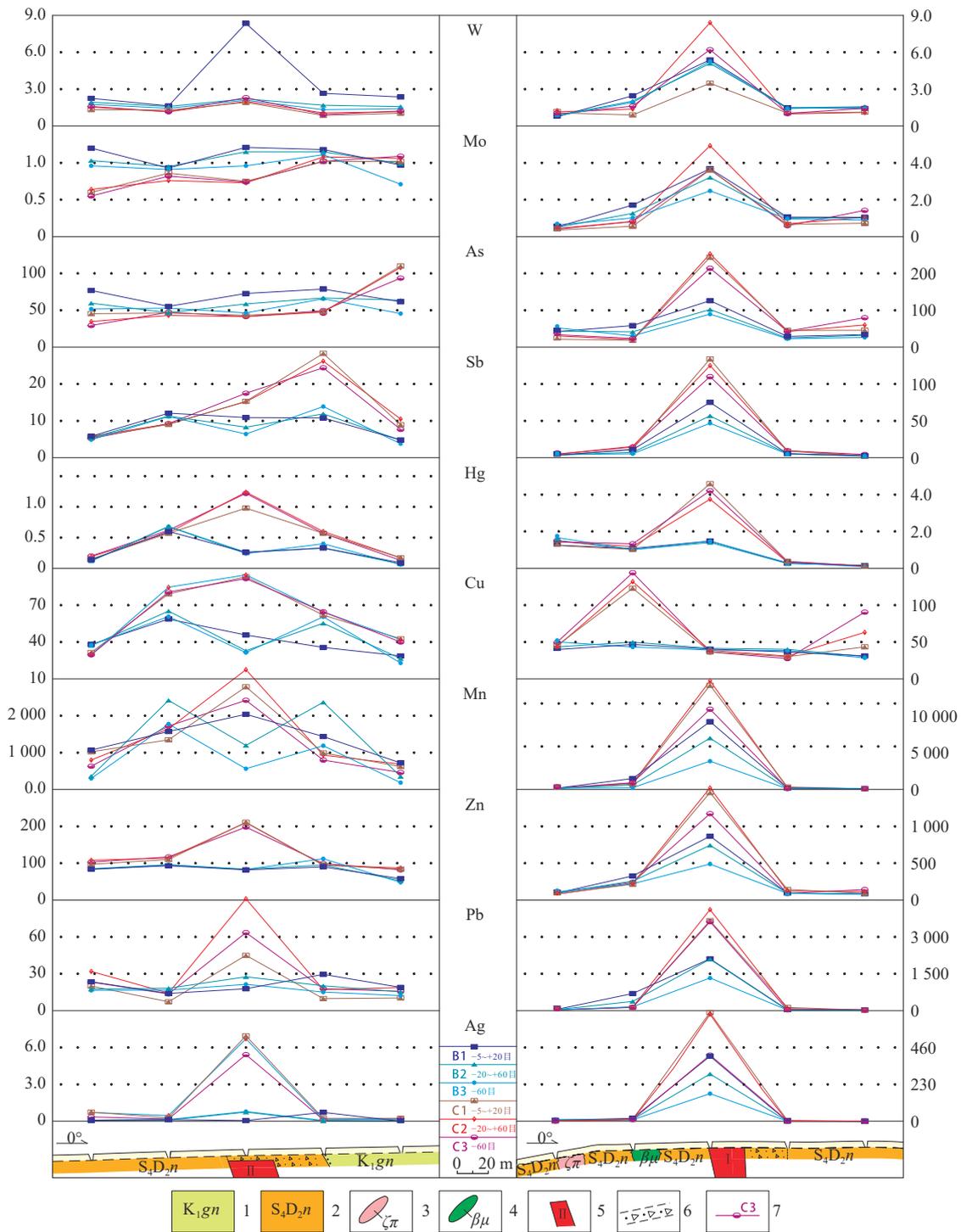
4.3 试验剖面对比研究

选取矿体上试验剖面(3 000线、3 800线)的部分

主要成矿元素制作含量折线图(图 5), 从图中可以看出:

在 I号矿体剖面 3 800线, 银矿体、泥鳅河组沉积砂岩上所采集的样品中, 均呈现出 Ag、Pb、Zn、Mn、As、Sb、Hg、W、Mo 异常。特别注意的是, 岩屑(-20~+60目)样品中的主成矿元素 Ag、Pb、Zn、Mn 的异常值尤为显著, 元素异常叠加明显, 具有明显浓集中心, 与 I号矿体的空间位置高度吻合, 客观、清晰地反映了银多金属矿体元素组合特征。As、Sb、Hg、W、Mo 与主成矿元素异常空间分布形态相类似, As、Sb、Hg 异常值在岩屑样品中较高, 为银多金属矿体的指示元素。在矿体的南侧辉绿岩脉的岩屑样品中, Cu 显示出明显的高值, 仅铜单元素异常出现, 可能反映辉绿岩脉中的 Cu 背景值高, 表明辉绿岩对 Cu 的富集和迁移起到了关键作用。

在 II号矿体剖面 3 000线上, 泥鳅河组沉积砂岩上所采集的样品中, 呈现出 Ag、Pb、Zn、Mn、Cu、Hg、W 异常。岩屑(-20~+60目)样品中的主成矿 Ag、Pb、Zn 异常值略高, 浓集中心明显, Mn、Cu 个别粒度出现相对贫化, 与 II号矿体埋藏深有关; As、Sb、Mo 含量较低, 异常较弱, 与寒温带地表淋滤环境有关。在矿体的北侧光华组英安质火山碎屑岩的岩屑样品中, As、Sb 显示出明显的高值, As 异常更偏北, 揭示了该区可能存在与光华期火山活动相关的矿化现象。



1. 光华组; 2. 泥鳅河组; 3. 英安斑岩; 4. 辉绿岩; 5. 银矿体及编号; 6. 构造角砾岩带; 7. 各粒级折线及编号

图5 研究区 I、II 号银矿体剖面主要成矿元素含量折线图

Fig. 5 Line chart of main metallogenic element content of the test section on I、II silver ore bodies in study area

剖面上的各成矿元素异常规模和强度不同, 从而对银多金属矿体指示程度也有所不同。其中 Ag、Pb、Zn 的异常规模与矿体宽度相一致, 异常强度较高, 能准确反映矿体位置和规模, 为一类指示元素, 可以用于准确定位矿体; Mn、Sb、Hg、W 的异常规模比矿体

实际宽度稍大, 异常强度高, 能够较好的反映矿体的位置, 为二类指示元素, 可用于勘查矿区的深部和外围矿体; As、Mo、Cu 的异常规模大, 异常强度一般, 位置相对矿体有一定的位移, 属三类指示元素, 可作为区域化探扫面指示元素, 指导区域找矿方向。

总体来看,各剖面上的元素分布特征与矿区实际地质情况相吻合,均可以反映矿体所产生的异常信息。对比而言,中粒岩屑测量效果更好,表现在元素含量更高,异常强度更强,由此便能强化土壤微弱异常,有利于发现和识别弱的矿化信息。

5 结论

(1)探讨了试验样品地球化学参数和元素组合特征,确定了区内主成矿元素为 Ag、Pb、Zn、Mn,并利用主成分分析提取了与成矿作用密切相关的 F1 因子,对指导区内矿产勘查具有重要意义。

(2)以二道坎银矿床为例,研究了不同颗粒度土壤和岩石碎屑在风化过程中的主要元素(氧化物)行为,利用 CIA、CIX、WIP 和 R 等风化指数来描述和评价各粒级样品的风化程度,为分析区域地球化学数据提供了依据。

(3)通过对比研究,各元素在不同粒径、不同深度的土壤、岩屑样品中的含量特征均不相同,各地球化学样品地球勘查方法均能反映矿体所产生的异常信息,但相比较而言,岩屑中粒介质采样方法(采集 C 层岩屑-20~+60 目的粒级样品)的地球化学测量效果更好,表现在元素含量更高,异常强度更强,可以突出反映微弱异常,有利于发现和识别弱的矿化信息,为隐伏矿体的发现提供方向。

参考文献(References):

- 鲍希波,尹国良,于献章.黑龙江省嫩江县二道坎村银多金属矿床地质特征及找矿标志[J].黄金,2019,40(7):20-23.
- BAO Xibo, YIN Guoliang, YU Xianzhang. Geological Characteristics of Erdaokancun Silver Polymetallic Deposit, Nenjiang County, Heilongjiang Province and Its Prospecting Indicators [J]. Gold, 2019, 40(7): 20-23.
- 陈虹,杨晓,田世攀,等.覆盖区智能地质填图的探索与实践——以森林沼泽区为例[J].地质通报,2022,41(2-3):218-241.
- CHEN Hong, YANG Xiao, TIAN Shipan, et al. Technical innovation and practice of intelligent geological mapping in the coverage area: a case study in the forest-swamp area [J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(2-3): 218-241.
- 邓昌州,张立东,孙梓耀,等.黑龙江翠峦石英脉型银矿的发现及意义[J].物探与化探,2015,39(2):240-244.
- DENG Changzhou, ZHANG Lidong, SUN Ziyao, et al. The discovery of the Cuiluan quartz type silver deposit in Heilongjiang Province and its significance [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(2): 240-244.
- 董娟,袁茂文,李成禄.黑龙江多宝山矿集区二道坎银铅锌矿床热液菱锰矿地球化学特征及其指示意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(3):855-865.
- DONG Juan, YUAN Maowen, LI Chenglu. Geochemical Characteristics of Hydrothermal Rhodochrosite in Erdaokan Ag-Pb-Zn Deposit Duobaoshan Metallogenic Belt, Heilongjiang Province and Its Indications [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(3): 855-865.
- 段星星,黑欢,梁楠,等.新疆东天山玉海铜矿外围浅覆盖区1:5万化探方法技术及应用[J].西北地质,2019,52(3):143-150.
- DUAN Xingxing, HEI Huan, LIANG Nan, et al. 1:50,000 Geochemical Prospecting Techniques and their Applications in Shallow Covered Area outside the Yuhai Copper Deposit in East Tianshan Mountains, Xinjiang [J]. Northwestern Geology, 2019, 52(3): 143-150.
- 丁兆举,常昊,张年生,等.热带雨林景观土壤测量采样深度与样品粒级试验研究——以加纳国雅卡锰金矿为例[J].地质与勘探,2021,57(3):554-562.
- DING Zhaoju, CHANG Hao, ZHANG Niansheng, et al. Experimental study on sampling depth and sample granularity of soil survey in tropical rainforest landscape: Taken the Yakau Mn-Au deposit in Ghana as an example [J]. Geology and Exploration, 2021, 57(3): 554-562.
- 范红科.岩屑地球化学测量方法在找矿中的应用——以内蒙古白音查干银(金)多金属矿为例[J].黄金科学技术,2010,18(1):32-35.
- FAN Hongke. Application of Debris Geochemical Survey Method in Ore Prospecting: A Case Study of Baiyinchagan Silver (gold) Polymetallic Deposit in Inner Mongolia [J]. Cold Science and Technology, 2010, 18(1): 32-35.
- 耿卫华,杨乃峰,马晓阳.黑龙江森林沼泽区地球化学亚景观类型划分[J].物探与化探,2006,30(4):18-20.
- GENG Weihua, YANG Naifeng, MA Xiaoyang. The Preliminary Classification of Geochemical Sublandscape Types in The Forest-swamp Area of Heilongjiang Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 30(4): 18-20.
- 蒋艳明.黑龙江省三道湾子金矿土壤和岩石地球化学异常特征及其意义[D].长春:吉林大学,2009:1-67.
- JIANG Yanming. Soil and Rock Geochemical Anomalies of Sandaowanzi Gold Deposit and Their Significance, Heilongjiang Province [D]. Changchun: Jilin University, 2009: 1-67.
- 刘国卿.黑龙江省二道坎银多金属矿床矿石特征及银的赋存状态研究[D].长春:吉林大学,2020:1-66.
- LIU Guoqing. Ore Characteristics and Occurrence of Silver of the Erdaokan Silver Polymetallic Deposit in Heilongjiang Province [D]. Changchun: Jilin University, 2020, 1-66.
- 刘汉粮,张必敏,王学求,等.土壤微细粒测量地球化学模式的再现性与可对比性[J].物探与化探,2018,42(3):506-512.
- LIU Hanliang, ZHANG Bimin, WANG Xueqiu, et al. The Reproducibility and Comparability of The Fine Particle Soil Survey Geochemical Patterns [J]. Geophysical and Geochemical Ex-

- ploration, 2018, 42(3): 506–512.
- 李文明, 刘拓, 孙吉明, 等. 新疆北山白山地区地球化学特征及找矿远景预测[J]. 西北地质, 2021, 54(4): 42–48.
- LI Wenming, LIU Tuo, SUN Jiming, et al. Geochemical Characteristics and Prospecting Prognosis in Baishan Area of Xinjiang Beishan[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(4): 42–48.
- 李重阳, 刘宗彦, 王辉, 等. 豫西黄土覆盖区土壤地球化学测量粒度试验研究[J]. 矿产勘查, 2020, 11(7): 1553–1561.
- LI Chongyang, LIU Zongyan, WANG Hui, et al. Experimental study of soil size of the loess coverage area in geochemical survey, west Henan Province[J]. *Mineral Exploration*, 2020, 11(7): 1553–1561.
- 林俞亨, 王立立, 欧阳永棚, 等. 基于浓度–面积分形模型和模糊证据权的铜矿资源潜力评价: 以江西九瑞地区为例[J]. 西北地质, 2024, 57(1): 165–178
- LIN Yuheng, WANG Lili, OUYANG Yongpeng, et al. Evaluation of Copper Mineral Resource Potential Using Concentration–Area Fractal Model and Fuzzy Evidence Weighting: A Case Study of the Jiurui Region in Jiangxi[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(1): 165–178
- 雷自强, 陈杰, 陈世明, 等. 岩屑地球化学测量在甘肃北山干旱戈壁荒漠区的找矿效果——以三白墩地区金矿矿的发现为例[J]. 物探与化探, 2022, 46(3): 585–596.
- LEI Ziqiang, CHEN Jie, CHEN Shiming, et al. Application of Geochemical Survey of Lithic Fragments in Ore Prospecting in Arid Gobi Desert of The Beishan Area, Gansu Province: A Case Study of The Discovery of The Gold-arsenic Deposit in Sanbaidun Area[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2022, 46(3): 585–596.
- 鲁涛, 孙刚, 袁茂文. 大兴安岭东北部多宝山矿集区二道坎银铅锌矿床有机质特征及对成矿作用的影响[J]. 世界地质, 2021, 40(2): 1–9.
- LU Tao, SUN Gang, YUAN Maowen. Organic Matter Characteristics and Influence on Mineralization of Erdaokan Ag–Pb–Zn Deposit in Duobaoshan Ore Concentrated Area, Northeast Great Xing'an Range[J]. *Global Geology*, 2021, 40(2): 1–9.
- 史冬岩, 张坤, 张玉鹏, 等. 黑龙江省浅覆盖区地物化特征与找矿标志—以黑河市340高地金矿化区为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(4): 1042–1053.
- SHI Dongyan, ZHANG Kun, ZHANG Yupeng, et al. Geophysical and Geochemical Characteristics and Prospecting Criteria of Shallow Overburden Area in Heilongjiang Province: A Case study of 340 Highland Gold Mineralization Area in Heihe City[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2021, 51(4): 1042–1053.
- 史冬岩, 张坤, 张玉鹏, 等. 因子分析在土壤地球化学测量中的应用: 以大兴安岭北段呼中地区为例[J]. 世界地质, 2021, 40(1): 1–11.
- SHI Dongyan, ZHANG Kun, ZHANG Yupeng, et al. Application of Principal Component Analysis in Soil Geochemical Survey: A Case Study of Huzhong Area in North of Great Xing'an Range[J]. *Global Geology*, 2021, 40(1): 1–11.
- 谈艳, 张鑫利, 王泰山, 等. 青海三岔河北金多金属矿地球化学异常特征及找矿潜力分析[J]. 西北地质, 2019, 52(4): 170–181.
- TAN Yan, ZHANG Xinli, WANG Taishan, et al. Geochemical Anomaly Characteristics and Prospecting Potential of Gold Polymetallic Deposits in Sanchahebei Area, Qinghai Province[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(4): 170–181.
- 吴蓓娟, 彭渤, 张坤, 等. 黑色页岩化学风化程度指标研究[J]. 地球学报, 2016, 90(4): 818–832.
- WU Beijuan, PENG Bo, ZHANG Kun, et al. A New Chemical Index of identifying the Weathering Degree of Black Shales[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2016, 90(4): 818–832.
- 王乔林, 孔牧, 韩伟, 等. 土壤地球化学测量在甘肃北山白头山钨矿找矿中的应用[J]. 地质与勘探, 2021, 57(1): 110–121.
- WANG Qiaolin, KONG Mu, HAN Wei, et al. Application of Soil Geochemical Survey in The Baitoushan Rubidium Deposit, Beishan Area, Gansu Province[J]. *Geology and Exploration*, 2021, 57(1): 110–121.
- 王亚磊, 李文渊, 林艳海, 等. 金川超大型铜镍矿床钴的赋存状态与富集过程研究[J]. 西北地质, 2023, 56(2): 133–150.
- WANG Yalei, LI Wenyuan, LIN Yanhai, et al. Study on the Occurrence State and Enrichment Process of Cobalt in Jinchuan Giant Magmatic Ni–Cu Sulfide Deposit[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(2): 133–150.
- 徐文喜, 李成禄, 鲍希波, 等. 大兴安岭东北部首个三叠纪银矿床地质特征及矿床成因分析[J]. 矿产与地质, 2019, 33(3): 434–441.
- XU Wenxi, LI Chenglu, BAO Xibo, et al. Geological characteristics and genesis analysis of the first Triassic silver deposit discovered in Northeast of Da Hinggan Mountains[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2019, 33(3): 434–441.
- 袁茂文. 天然沥青与非层控金属成矿关系研究: 以二道坎银铅锌矿床为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020: 1–123.
- YUAN Maowen. The Contribution of the Bitumen to the Mineralization of the Non-stratabound Metal Deposit: A Case Study from the Erdaokan Ag–Pb–Zn Deposit [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020: 1–123.
- 张津瑞, 陈华, 任军平, 等. 矿产资源潜力评价方法对比及其发展趋势探讨[J]. 西北地质, 2023, 56(2): 292–305.
- ZHANG Jinrui, CHEN Hua, REN Junping, et al. Mineral Resource Assessment Methods Comparison and Its Development Trend Discussion[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(2): 292–305.
- 张玉鹏, 史冬岩, 吕明奇, 等. 岩屑地球化学测量在黑龙江省三道湾子浅覆盖区的找矿应用效果[J]. 黄金科学技术, 2022, 30(5): 651–663.
- ZHANG Yupeng, SHI Dongyan, LV Mingqi, et al. Application Effect of Rock Debris Geochemical Survey in Prospecting in Sandaowanzi Shallow Overburden Area, Heilongjiang Province [J]. *Gold Science and Technology*, 2022, 30(5): 651–663.
- 张沁瑞, 李欢, 邓宇飞, 等. 北京东南郊土壤重金属元素分布及其在表层土壤中的富集特征[J]. 物探与化探, 2022, 46(2): 490–501.
- ZHANG Qinrui, LI Huan, DENG Yufei, et al. Distribution of Heavy Metal Elements in Soil of the Southeastern Suburbs of Beijing

- and their Enrichment Characteristics in Surface Soil[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2022, 46(2): 490–501.
- An Y L, Yin X L, Gong Q J, et al. Classification and Provenance on Geochemical Lithogenes: A Case Study on Rock-Soil-Sediment System in Wanquan Area of Zhangjiakou, North China[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(2): 1–12.
- Bhat N A, Ghosh P, Ahmed W, et al. Comparative Evaluation of Weathering Indices of Rock-Soil Sequences in parts of Peninsular Gneissic Complex, Western Dharwar Craton, Karnataka, India[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(11): 1087.
- Cai W Y, Wang K Y, Li J, et al. Geology, geochronology and geochemistry of large Duobaoshan Cu-Mo-Au orefield in NE China: Magma genesis and regional tectonic implications[J]. *Geoscience Frontiers*, 2020, 12(1): 265–292.
- Chai H, Ma Y F, M. Santosh, et al. Late Carboniferous to Early Permian oceanic subduction in central Inner Mongolia and its correlation with the tectonic evolution of the southeastern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 2020, 84: 245–259.
- Chen J C, Wang K Y, Cai W Y, et al. Fluid evolution and genesis of the Sankuangou Fe-Cu skarn deposit, Duobaoshan ore field, Northeast China: Evidence from fluid inclusions and H-O-S-Pb isotopes[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2023, 252.
- Deng C Z, Li C L, Rong Y M, et al. Different Metal Sources in the Evolution of an Epithermal Ore System: Evidence from Mercury Isotopes Associated with the Erdaokan Epithermal Ag-Pb-Zn Deposit, NE China[J]. *Gondwana Research*, 2021, 95: 1–9.
- Dinis Pedro A., Sá Pereira José, Ivo Alves Eduardo, et al. Compositional variability of regoliths on equatorial highlands (East Timor). Source-rock control and competing effects of weathering and denudation[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2021, 207: 104658.
- Hao Y J, Ren Y S, Duan M X, et al. Metallogenic events and tectonic setting of the Duobaoshan ore field in Heilongjiang Province, NE China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 97: 442–458.
- Li Y Q, Zhang D H, Dai L, et al. Characteristics of structurally superimposed geochemical haloes at the polymetallic Xiasai silver-lead-zinc ore deposit in Sichuan Province, SW China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, 169: 100–122.
- Li L, Sun F Y, Li B L, et al. Identification of Hydrothermal Alteration and Mineralization in The Sancha Magmatic Cu-Ni-Au Sulfide Deposit, NW China: Implications for Timing and Genesis of Mineralization[J]. *Geology Reviews*, 2022, 143: 104770.
- Liu J, Li Y, Zhou Z H, OuYang, et al. The Ordovician igneous rocks with high Sr/Y at the Tongshan porphyry copper deposit, satellite of the Duobaoshan deposit, and their metallogenic role[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 86: 600–614.
- Meng F W, Liu Y H, Han J T, et al. Paleozoic suture and Mesozoic tectonic evolution of the lithosphere between the northern section of the Xing'an Block and the Songnen Block: Evidence from three-dimensional magnetotelluric detection[J]. *Tectonophysics*, 2022, 823: 229210.
- Kelley K D, Spry P G, Virginia V T, et al. Alkalic-type epithermal gold deposit model[R]. Reston: U.S.Geological Survey Scientific Investigations Report, 2020: 1–74.
- Primus A T, Jean P T, Emile T, et al. Characteristics, Source Area-weathering, Sedimentary Processes, Tectonic Setting and Taxonomy of Vertisols Developed on Alluvial Sediments in the Benue Trough of North Cameroon[J]. *Journal of Geosciences and Geomatics*, 2022, 10(1): 1–17.
- Sorokina O A. Reconstruction of Sources in River Sediments in the Lower Part of the Bureya River Based on Geochemical Indices[J]. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2019, 13(2): 176–185.
- Sun Q F, Wang K Y, Wang Y C, et al. Superimposing mineralization in the Zhengguang Au-Zn deposit, NE China: Evidence from pyrite Re-Os geochronology, fluid inclusion, and H-O-S-Pb isotopes[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 137: 104307.
- Tang Z Y, Sun D Y, Mao A Q, et al. Timing and evolution of Mesozoic volcanism in the central Great Xing'an Range, northeastern China[J]. *Geological Journal*, 2019, 54(6): 3737–3754.
- Wang L, Qin K Z, Song G X, et al. Geology and genesis of the Early Paleozoic Zhengguang intermediate-sulfidation epithermal Au-Zn deposit, northeast China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 124: 103602.
- Wu Z J, Yang X Y, Ma Y S, et al. A Synthesis of Geochemistry of Mesozoic Igneous Rocks in NE China and Tectonic Superposition and Transformation of the Easternmost Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2021, 227: 105032.
- Yuan M W, Li L, Li S R, et al. Mineralogy, Fluid Inclusions and S-Pb-H-O Isotopes of the Erdaokan Ag-Pb-Zn Deposit, Duobaoshan Metallogenic belt, NE China: Implications for Ore Genesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 113: 103074.
- Yuan M W, Li L, Li S R, et al. Bitumen Sm-Nd, Pyrite Rb-Sr and Zircon U-Pb Isotopes Constrain Timing of Ore Formation and Hydrocarbon Deposition in the Erdaokan Ag-Pb-Zn Deposit, NE China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 134: 104161.
- Yuan M W, Li L, Li C L, et al. The Genesis of Bitumen and its Relationship with Mineralization in the Erdaokan Ag-Pb-Zn Deposit from the Great Xing'an Range, Northeastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 139: 104464.
- Zhang Z Q, Wu Q B, Hou M T, et al. Permafrost change in Northeast China in the 1950s–2010s[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2021, 12(1): 18–28.
- Zhou X J, Li A C, Jiang F Q, et al. Effects of grain size distribution on mineralogical and chemical compositions: a case study from size-fractional sediments of the Huanghe (Yellow River) and Changjiang (Yangtze River)[J]. *Geological Journal*, 2015, 50(4): 414–433.