

黑龙江霍龙门沟地区土壤地球化学特征及找矿潜力分析

乔锴¹, 赵忠海¹, 陈军典², 梁杉杉¹, 陈俊¹, 李成禄³

(1. 辽宁工程技术大学, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁省物测勘查院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110031; 3. 黑龙江省自然资源调查院, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘要: 黑龙江霍龙门沟地区位于东乌珠穆沁旗-嫩江多金属成矿带的南段, 具有较好的找矿前景。本文以1:10000土壤地球化学测量成果为依据, 利用元素变异系数、浓集系数及分形特征等方法对黑龙江霍龙门沟地10种元素地球化学特征进行了统计, 运用聚类分析、因子分析及分形方法对元素的共生组合关系进行了分析, 结果表明: 区内Au、Ag、Cu、As、Mo等元素具有较高的找矿潜力, Au元素可能是研究区主要的成矿矿种。根据元素异常组合分布规律及成矿地质条件, 共圈定综合异常7处, 并与区域典型的永新浅成低温热液型金矿床和多宝山斑岩型铜-钼-(金)矿床的成矿地质背景及地球化学特征进行对比研究, 划分出大狼沟Au-Ag成矿远景区和霍龙门沟Cu-Au成矿远景区, 为研究区下一步找矿勘查部署提供科学依据。

关键词: 土壤地球化学; 综合异常; 成矿远景区; 霍龙门沟地区; 黑龙江

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.01.005

中图分类号: TD98 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2023)01-0031-14

近年来, 在黑龙江霍龙门沟地区及周边发现了众多斑岩型铜矿和浅成低温热液型金矿, 如多宝山斑岩型铜-钼-(金)矿^[1-4]、铜山斑岩型铜矿^[5]、二道坎银矿^[6]、争光金矿^[7]、三道湾子金矿^[8-9]、科洛金矿^[10]、永新金矿^[11-13]等(图1)。黑龙江霍龙门沟地区属于中低程度山地浅切割区, 具有明显的浅覆盖特性, 覆盖层的厚度大致为1~3 m, 局部地区的覆盖层能够达到3 m以上。

土壤地球化学测量是寻找浅覆盖区矿体的一种直接、有效、快速的勘查方法^[14-15], 被广泛应用于寻找隐伏矿体中, 如印度尼西亚Buti铜矿^[16]、南秦岭夏家店金矿^[17]、青海丘吉东沟金矿^[18]、新疆阿舍勒铜锌矿床^[19]、云南大坪金矿^[20]、山东曲家金矿^[21]等均采用土壤地球化学测量取得了较为显著的找矿效果。为进一步优选找矿靶区, 笔者旨在以霍龙门沟地区1:1万土壤地球化学测量为基础, 并通过聚类分析和因子分析等方法对区内Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Bi、Mo、W等十种元素的成矿潜力进行评价, 将变异系数图解

与分形理论相结合进行研究, 总结成矿元素的分散、富集规律, 圈定异常靶区并进行工程验证, 为研究区下一步的找矿勘查工作指明方向。

1 地质概况

1.1 区域地质背景

研究区位于西伯利亚板块南缘早古生代陆缘增生带与华北地台北缘兴蒙造山带的东段, 大兴安岭弧盆系之扎兰屯-多宝山岛弧带、贺根山-黑河北东向构造混杂岩带通过本区。该区遭受多次强烈的构造运动, 发育北东向、南北向和北西向断裂构造。区内晚石炭世二长花岗岩、花岗闪长岩、中奥陶世花岗闪长岩与成矿关系最为密切^[1], 具有优良的成矿构造环境和良好的成矿潜力。

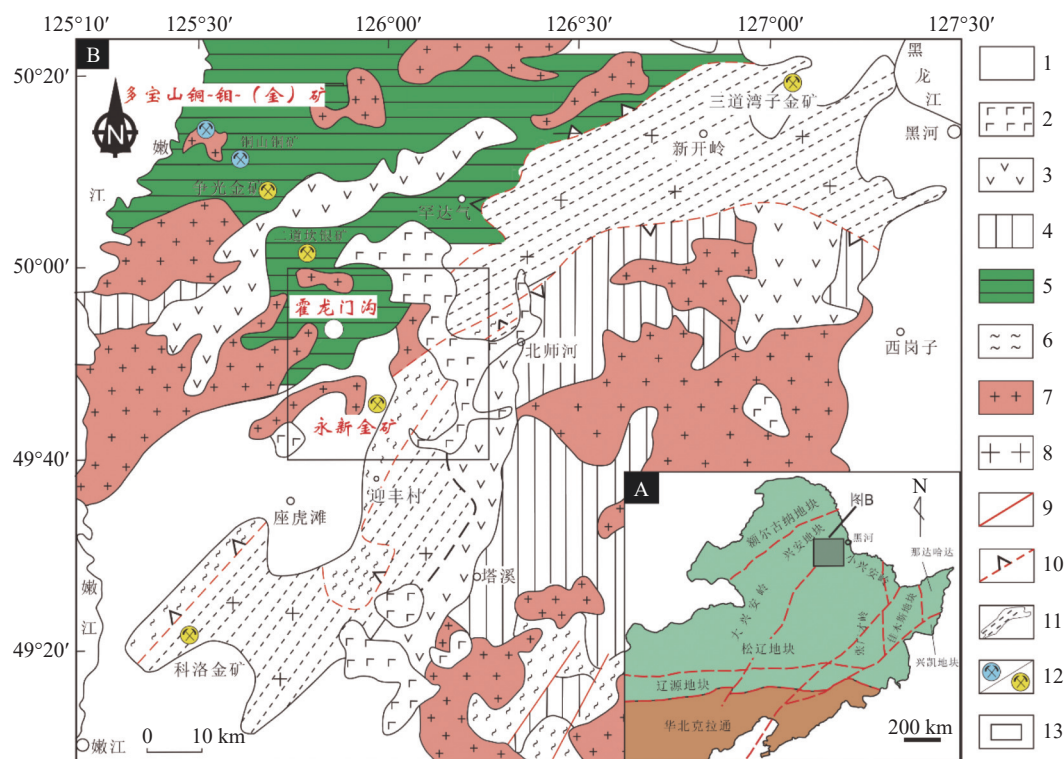
区域出露地层单元多, 分布范围广, 主要包括古生代、中生代地层以及新生代地层。其中, 古生代地层大面积分布于区域的西北部, 区域的西南部集中分布有中生代地层, 而新生代地层则是主要分布于区域的东部。区域古生代地层包括

收稿日期: 2021-12-30

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(2020-BS-258); 辽宁省教育厅科学研究经费项目(LJ2020JCL010); 辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD-14); 黑龙江重点研发计划项目(GA21A204)

作者简介: 乔锴(1998-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事矿产资源定量预测研究工作。

通信作者: 赵忠海(1984-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事区域成矿作用及找矿预测研究工作。



1. 中生代沉积物; 2. 新生代火山岩; 3. 中生代火山沉积岩; 4. 上古生界; 5. 下古生界; 6. 构造片岩; 7. 花岗-片麻岩; 8. 花岗岩; 9. 断层; 10. 拆离断层; 11. 韧性剪切带; 12. 典型矿床; 13. 研究区域; 据李成禄等^[10]修改

图1 大地构造位置图(A)及嫩江-黑河地区区域地质矿产简图(B)

Fig.1 Tectonic location map (A) and regional geology and mineral resources schematic map of Nenjiang-Heihe Area (B)

多宝山组 ($O_{1-2}d$)、裸河组 (O_3l)、泥鳅河组 (S_3D_{2n}) 及腰桑南组 (D_2y)；中生代地层包括龙江组 (K_1l)、光华组 (K_1gn)、九峰山组 (K_1j) 及甘河组 (K_1g)；区域新生代地层主要为第四系高、低河漫滩堆积层 (Qh) (图2)。

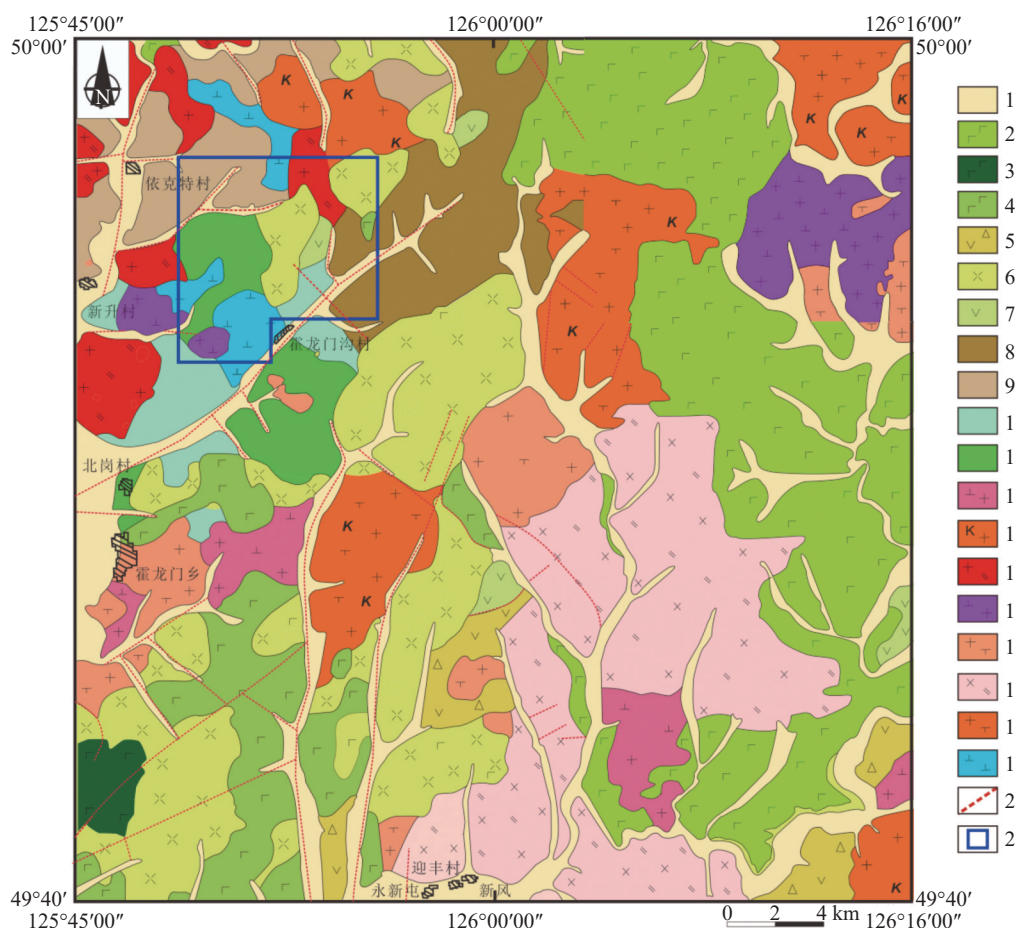
区域构造-岩浆活动频繁，活动期次多，加里东期、华力西期和燕山期均有不同规模的岩浆活动，岩石类较复杂，其中华力西期岩浆活动最为强烈且频繁。侵入岩分布广泛，岩石类型较复杂，从中性到酸性岩均有出露，以中深成的花岗岩为主。形成时代依次为：中奥陶世、石炭纪、中侏罗世、早白垩世。由于本区位于贺根山-黑河蛇绿混杂岩带与扎兰屯-多宝山岛弧交接处，侵入岩浆活动与多宝山岛弧活动的多阶段演化有关，具有造山带侵入岩成因复杂、来源多样等特征^[22]。

1.2 研究区地质概况

研究区主要出露地层包括：①下-中奥陶统多宝山组，岩性主要为灰绿色片理化蚀变安山岩、变质中性火山岩夹变质中酸性含砾火山岩及凝灰岩和绢云板岩。多宝山组是多宝山斑岩型铜-钼-（金）矿主要的赋矿围岩，岩石普遍铜、金丰度值较高，被认为是多宝山矿集区的矿源层，形成

时代集中在 497~460 Ma^[3, 23]；②上奥陶统裸河组上部主要以粉砂岩夹细砂岩和变质凝灰细砂-粉砂岩为主，下部主要以含铁杂砂岩和变质凝灰砂岩为主，底部与多宝山组整合接触，多见有腕足、三叶虫、牙形石化石，这些化石组合绝大多数代表了裸河组沉积形成时间在中-晚奥陶世时代^[24]；③下白垩统龙江组由中性火山岩及少量中酸性火山岩组成，主要分布在霍龙门沟北山附近，总体上呈现北东向展布，火山作用方式多以喷发、喷溢、爆溢为主，火山岩相多见空落相、溢流相、火山碎屑流相等。岩性主要为灰黑色角闪安山岩、灰黑色灰绿色安山岩，偶见有英安岩等酸性火山岩，成岩时代为 117~125 Ma^[25-27]；④早白垩世光华组主要由酸性火山岩及少量的中酸性火山岩组成，受到基底断裂及区域深大断裂控制，厚可达 1540 m 以上，火山作用方式多以喷发、喷溢、爆溢为主，火山岩相多见空落相、溢流相等。岩性主要为灰白色流纹岩、灰色流纹质复成分角砾岩、火山角砾岩等，成岩时代为 101~125 Ma^[28] (图2)。

研究区内侵入岩较为发育，出露面积约占研究区的一半，主要岩性为中奥陶世闪长岩、早石



1.第四系；2.大熊山玄武岩；3.西山玄武岩；4.甘河组；5.九峰山组；6.光华组；7.龙江组；8.腰桑南组；9.泥鰲河组；10.裸河组；11.多宝山组；12.中侏罗世花岗闪长岩；13.晚石炭世碱长花岗岩；14.晚石炭世二长花岗岩；15.晚石炭世花岗闪长岩；16.晚石炭世正长花岗岩；17.晚石炭世花岗质杂岩；18.早石炭世正长花岗岩；19.中奥陶纪闪长岩；20.推断断层；21.研究区范围；据赵忠海等^[19]，修改

图2 霍龙门沟区域地质简图

Fig.2 Regional geological sketch of Huolongmengou

炭世正长花岗岩和晚石炭世二长花岗岩，局部见有花岗闪长斑岩脉和石英脉等。

研究区内褶皱构造不发育，构造形迹主要以断裂形式出现，断裂构造主要以北东向、北西向和近东西向断裂为主。其中北东向断裂属于区域性黑河-嫩江断裂带北西向延伸部分，断裂走向为45°，为隐伏断裂；北西向断裂主要为北东向断裂的次一级张性断裂，断裂走向为320°，倾角55°左右。近东西向断裂为北西向更次一级张性断裂，断裂走向为274°，倾角65°左右，该近东西向断裂规模较小，多以断层破碎带形式出现，该近东西向断裂在中生代活动较明显。

2 土壤地球化学样品采集和分析方法

2.1 样品采集

根据研究区地质情况，本次研究区的样品采

集以规则测网形式布设，网度为100×20 m。侧线方向为0°，基线方向90°，土壤样品粒级为0.25~1.70 mm。采样深度一般在30~50 cm，采集部位为B层（淋积层）下部、C层（母质层）上部的细粒级的黄褐色粉砂土。土壤测量点位误差要求小于5 m，以保证过筛后样品重量>150 g。野外样品一般经自然风吹或日光照晒自然风干，经常用木棒敲打，以防固结。样品加工严格按规范加工流程执行，粒级0.25~1.70 mm，过筛后，过筛率要85%以上，然后用四分法缩分，按照实验室规定的要求将收样品细碎加工至0.074 mm。为防止样品污染，样品采用无污染的磨样机进行加工，部分采用玛瑙乳钵手工研磨加工，化探样品的加工应和实验室内的矿石加工完全分开。

2.2 分析方法

本次土壤地球化学测量工作共送检样品

15207 个, 其中重复分析样品 (密码样) 339 个, 标准样 1354 个, 野外质量检查点 608 个。样品分析测试由黑龙江齐齐哈尔矿产勘查开发总院测试中心完成, 分析测试 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Bi、Mo、W 等十种元素, 其中 Au 分析采用活性碳吸附-化学光谱法; Ag、Pb、Mo 采用光谱定量法、As、Sb、Bi 采用原子荧光法、W 采用极谱法、Zn 采用等离子发射光谱法。

3 土壤地球化学特征

3.1 元素含量特征

利用 SPSS 和 Excel 等软件对研究区范围内采集的 15207 件土壤样品元素分析结果进行统计, 根据元素含量平均值、标准离差、变异系数、富集系数等 (表 1) 参数讨论地球化学特征和规律^[12, 29]。计算公式如下:

表 1 霍龙门地区土壤地球化学测量数据统计

Table 1 Statistics of soil geochemical measurements in Huolongmengou area

元素	平均值 $\bar{X}$	背景值 $\bar{X}$	最小值 X_{min}	最大值 X_{max}	标准离差 S	剔除前变 异系数 Cv_1	剔除后变 异系数 Cv_2	区域1:20万地球 化学元素背景值 K	富集系数 C	异常下限 T
Au	1.00	0.8	0.10	100.80	1.60	1.56	0.41	0.48	1.67	5.60
Ag	0.11	0.10	0.01	1.26	0.08	0.68	0.34	0.04	2.23	0.32
As	9.56	8.89	2.38	122.86	3.57	0.37	0.13	7.29	1.22	13.50
Sb	0.57	0.55	0.09	7.93	0.13	0.23	0.12	0.32	1.71	0.82
Bi	0.36	0.36	0.04	2.89	0.07	0.19	0.12	0.11	3.39	0.44
Cu	21.50	19.9	8.99	201.66	9.00	0.42	0.23	17.18	1.16	35.90
Pb	21.40	21.00	4.42	83.77	5.90	0.28	0.24	17.70	1.18	32.70
Zn	69.30	67.6	32.30	244.36	12.30	0.18	0.13	24.20	2.78	91.80
W	2.25	2.21	0.84	36.60	0.46	0.21	0.10	0.615	3.59	2.83
Mo	1.15	1.10	0.26	24.05	0.51	0.44	0.26	0.78	1.41	1.68

注: Au元素含量为 $\times 10^{-9}$, 其他元素为 $\times 10^{-6}$; 数据来源于黑龙江省地质调查研究总院

$$(1) \text{ 平均值: } \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$(2) \text{ 标准离差: } S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}$$

$$(3) \text{ 变异系数: } Cv = \frac{S}{\bar{X}}$$

$$(4) \text{ 异常下限: } T = \bar{X} + 3S$$

$$(5) \text{ 富集系数: } C = \frac{\bar{X}}{K}$$

本次研究区背景值及异常下限的确定采用了剔除法, 根据公式 (1)、(2)、(3) 计算全区各元素原始数据的平均值 ($\bar{X}$)、标准离差 (S) 及变异系数 (Cv_1), 按照 $\bar{X} - 3S \leq X_0 \leq \bar{X} + 3S$ 的条件对特低值 (高值) 数据进行剔除, 保留下来的数据形成新的数据集, 经过多次剔除后, 求出最终数据的平均值 ($\bar{X}$) 及变异系数 (Cv_2), 将平均值 ($\bar{X}$) 作为背景值^[30-31]。再根据公式 (4) 将正态检验值最大的均值参与理论异常下限的计算, 综合考虑计算值、累计频率值及圈定效果等确定实用异常下限。根据公式 (5) 将元素的背景值与区域 1:20 万地球化学元素背景值进行对比, 从而得出元素的富集系数。富集系数和变异系数可以反应土壤中不同元素矿化富集程度和均匀程度^[32]。其中研究区 Au 的变异系数 (Cv_1) 大于

1.5, 表现出较强分异性分布, Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Bi、Mo、W 等元素富集系数均大于 1, 表明这些元素成矿物质基础较好, 呈高背景分布, 显示较强的地球化学活性。

从区域地质单元来看 (表 2), 在各地质子区中, Au 元素分异性强, 变异系数相对较高, 是成矿的有力侵入体。研究区内各元素的原始数据的变异系数 (Cv_1) 和剔除后的变异系数 (Cv_2) 反映了数据处理前后的相对离散程度。其中 Cv_1 和 Cv_1/Cv_2 分别反映原始数据集的变化幅度和背景拟合处理时对离散值的削平程度^[33-35]。因此可以根据 Cv_1 和 Cv_1/Cv_2 制作变异系数图解, 从变异系数图解 (图 3) 中可以看出研究区内 Au 的含量变化幅度和离散程度最大, 高强度数据最多, 易于成矿。而其他元素在土壤中的分布较为均匀, 其高值点较少, 富集的程度较低。表明 Au 元素为研究区成矿有利因素, 是研究区主要的成矿矿种。

3.2 多元统计分析

在地学中通常运用数学统计的方法来对矿体成矿元素组合特征进行研究^[17]。为了解研究区成矿元素及共伴生组合规律, 本次研究工作采用聚类分析、因子分析等数理统计学方法对元素分析结果进行研究。

表 2 霍龙门沟地区不同地质子区土壤元素参数特征
Table 2 Characteristics of soil element parameters in different geological regions of Huolongmengou areas

地质子区	参数	Ag	As	Au	Bi	Cu	Mo	Pb	Sb	W	Zn
多宝山组	$\bar{X}$	92.7	9.5	1.2	0.34	29.6	1.12	22.7	0.6	1.96	83.4
	S	25.3	1.7	0.5	0.06	7.5	0.28	2.3	0.1	0.28	14.5
	C_V	0.3	0.2	0.5	0.2	0.3	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2
裸河组、泥鳅河组、腰桑南组	$\bar{X}$	92.6	9.8	1.2	0.34	27.2	1.00	23.8	0.6	1.96	82.3
	S	27.7	2.3	0.5	0.06	6.5	0.25	3.9	0.2	0.31	13.8
	C_V	0.3	0.2	0.5	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2
龙江组、光华组、九峰山组	$\bar{X}$	78.9	9.7	0.9	0.32	20.6	1.09	24.9	0.6	1.85	74.8
	S	17.8	2.6	0.4	0.06	5.3	0.32	3.6	0.1	0.26	16.0
	C_V	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.3	0.1	0.2	0.1	0.2
甘河组、西山玄武岩、大熊山玄武岩	$\bar{X}$	73.6	11.5	1.1	0.34	22.8	0.93	27.2	0.6	2.01	66.7
	S	12.3	2.7	0.4	0.05	3.7	0.22	3.5	0.1	0.32	11.5
	C_V	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2
早世炭世花岗质糜棱岩-奥陶纪侵入岩	$\bar{X}$	91.9	8.9	1.0	0.35	20.4	1.11	25.0	0.5	1.93	75.9
	S	29.1	2.0	0.5	0.08	5.8	0.36	3.3	0.1	0.43	16.2
	C_V	0.3	0.2	0.5	0.2	0.3	0.3	0.1	0.2	0.2	0.2
早世炭世正长花岗岩-中石炭世花岗岩	$\bar{X}$	88.3	9.3	0.9	0.33	17.9	1.13	24.5	0.5	1.91	70.9
	S	28.3	2.6	0.4	0.08	5.3	0.37	4.5	0.1	0.45	17.7
	C_V	0.3	0.3	0.5	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3
早白垩世、中侏罗世侵入岩	$\bar{X}$	79.7	9.0	0.9	0.36	18.0	1.03	26.1	0.5	1.91	66.9
	S	19.6	2.4	0.3	0.09	5.1	0.30	3.7	0.1	0.40	15.5
	C_V	0.2	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.1	0.2	0.2	0.2
全区	$\bar{X}$	95.2	10.7	1.73	0.37	23.3	1.1	26.3	0.62	2.06	75.2
	S	82.6	5.35	17.6	0.36	8.57	1.5	5.93	0.30	1.11	18.8
	C_V	0.85	0.50	10.2	0.97	0.37	1.36	0.23	0.49	0.54	0.25

注： $\bar{X}$ 为均值， S 为标准偏差， C_V 为变异系数，Au元素含量为 $\times 10^{-9}$ ，其他元素为 $\times 10^{-6}$ ；数据来源于黑龙江省地质调查研究总院（据曲晖等^[36]，修改）

（1）R 型聚类分析

R 型聚类分析是对元素（变量）进行分类处理，将因素轮廓相似度转化为归一化广义距离，建立样本之间两两对比的距离矩阵，再按照谱系聚类算法进行聚类分析，从而了解元素及元素之间的亲疏关系^[37-39]。

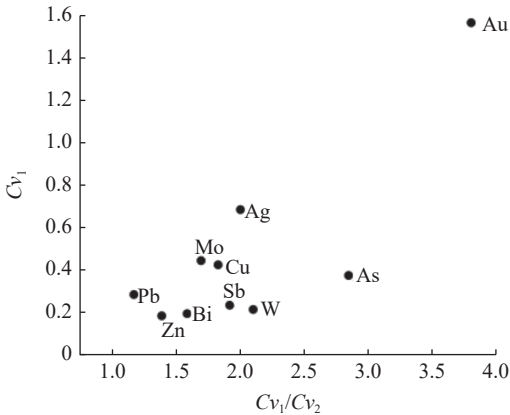


图 3 霍龙门沟地区变异系数
Fig.3 Variation coefficient in Huolongmengou area

通过 SPSS 软件计算出的 R 型系统聚类谱系图（图 4）可以看出，当元素的相关距离系数取 22 时，元素可以划分为四类：①As-Sb 组合，反映低温热液成矿作用；②Pb-Zn 组合，反映中低温热液成矿作用；③Au-Ag-Cu 组合，反映中高温热液成矿作用；④Mo-Bi-W 组合，反映高温热液成矿作用。

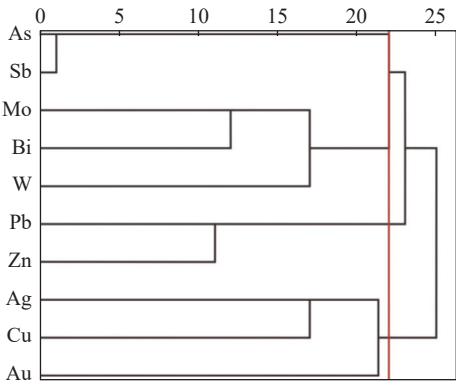


图 4 R 型系统聚类谱系
Fig.4 Clustering pedigree of R-type system

(2) R 型因子分析

为进一步了解元素间的组合特征，我们在聚类分析的基础上采用因子分析的方法来深入研究元素组合间的内在关系^[40-41]。首先要利用 KMO 和 Bartlett 检验对数据进行因子分析适用性判别，研究区内所提取出的 KMO 值为 0.622，大于统计学家 Kaiser 提出的 KMO 度量标准（即 KMO 值为 0.6），Bartlett 球形检验 Sig 值为 0.000，远小于显著性水平值 0.05。鉴于此，笔者认为该组数据内部存在关联性，适用于 R 型因子分析。

通过 R 型因子分析求出相关系数矩阵的特征值，以旋转后累计方差贡献率 76.79% 为基准，确定 6 个主因素，分别代表研究区内不同的元素组合类型（表 3）：F1 因子为 As-Sb 组合，As 和 Sb 均为亲铜成矿元素，且迁移能力较强，反映了低温成矿元素的聚集过程；F2 因子为 Pb-Zn 组合，Pb 和 Zn 伴生通常作为多金属矿的指示元素，Pb 作为亲酸性元素在表生条件下易迁移，Zn 作为亲基性元素在表生条件下易发生迁移，两者结合则证明其代表的地质背景较为复杂；F3 因子为 Ag-Cu 组合，Ag 和 Cu 元素伴生一般与中温矿化作用有关，是寻找热液金属矿化的标志；F4 因子为 Mo-Bi 组合，反映可能存在与中酸性岩体相关的高温热液矿化。而 F5 和 F6 为独立元素因子，表明了元素在热液成矿作用后发生有长距离迁移或叠加改造，W 和 Au 元素作为独立的因子，W 元素指示了区内大面积发育的中-酸性岩体，Au 元素指示了蚀变岩型金矿化特征。

表 3 正交旋转因子载荷矩阵
Table 3 Orthogonal rotating factor score matrix

元素	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Au	0.028	-0.027	0.08	0.007	0.011	0.994
Ag	0.027	0.326	0.804	0.122	-0.071	0.059
Pb	0.051	0.799	-0.062	0.108	-0.060	0.006
Mo	-0.021	0.102	-0.007	0.934	0.039	-0.019
W	0.001	0.112	-0.018	0.092	0.937	0.002
Cu	0.124	-0.444	0.704	-0.057	0.096	0.054
Zn	0.066	0.727	0.117	-0.023	0.225	-0.035
As	0.860	-0.038	0.058	0.106	0.001	-0.020
Sb	0.851	0.146	0.06	-0.049	0.034	0.053
Bi	0.303	-0.037	0.354	0.509	0.374	0.091
λ	1.580	1.518	1.298	1.185	1.090	1.007
Δ	15.804	30.985	43.970	55.820	66.715	76.788

注： λ -特征值； Δ -旋转后累计方差贡献率

3.3 元素含量分形特征

由于成矿作用的复杂性与多期次性，许多地

质现象通常表现出自相似性的特征。为此成秋明提出借助分形方法进行研究^[42-43]，利用参数分维数 D 反映矿区元素含量的分布特征。设分形模型为：

$$\text{Log}N(r) = -D\text{Log}r + \text{Log}C$$

式中， r 表示元素含量值， C 为比例常数， D 称为分形维数， $N(r)$ 表示尺度大于等于 r 的数目或和数。通过应用多重分形的方法对 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Bi、Mo、W 等十种元素的含量进行分形统计，得出元素含量与求和关系的双对数散点图，应用最小二乘法进行各分段直线拟合，求出各分段直线相应的分维数 D 。其中 D_1 与 D_2 分别表示元素未受到矿化影响的异常区内的背景值分布及已受到矿化影响的异常区内的背景值分布。当图上的点位分布于 D_1 、 D_2 两段直线上，为使分维 D 为较优值，需要通过分段拟合的方法来计算且对元素拟合进行检验。由于分界点不一定明显，因此可以用以下方法来提高分界点的准确性：寻找合适的分界点 r_{i0} ，使各区间的拟合直线与原始数据点之间的剩余平方和 $E_i(i=1, 2)$ 在两个区间的总和最小^[44]。检验公式如下：

$$E = E_1 + E_2 = \sum_{i=1}^{i_0} [\text{Log}N(r_i) + D_1\text{Log}r_i - \text{Log}C_1]^2 + \sum_{i=i_0+1}^n [\text{Log}N(r_i) + D_2\text{Log}r_i - \text{Log}C_2]^2$$

区内各元素在双对数坐标下的样品数和含量之间的关系大致可分为两段拟合线段且拟合的结果均呈线性^[45]。根据双对数散点拟合图（图 5）可以看出各元素第一段拟合线大多近似水平， D_1 的值普遍较小，反映了低背景区域元素含量的分布特征且元素含量间的差异较小。第二段拟合线反映研究区内元素含量的分布特征，该段拟合曲线 D_2 的值越小，说明元素含量间分布不均匀且差异较小，富集成矿的可能性也就越明显^[46-47]。因此可以将 $D_2=4$ 定为界限使元素划分为两类：I 类元素的分维数 D_2 值较小， $D_2<4$ 的元素包括 Au、Ag、Cu、As、Mo 等，其中 Au、Ag 元素的 D_2 值较低均 <2 ，具有较高成矿潜力，这与前文分析变异系数图解所得到的 Au 评价结果基本一致，且根据 R 型聚类分析和 R 型因子分析结果，综合认为本区 Au、Ag、Cu、As、Mo 等元素具有较高的找矿潜力，Au 元素可能是研究区主要的成矿矿种。 $D_2>4$ 元素有 Pb、W、Zn、Sb、Bi，虽 II 类元素的 D_2 值较大，有极高含量值点出现，但高含量点

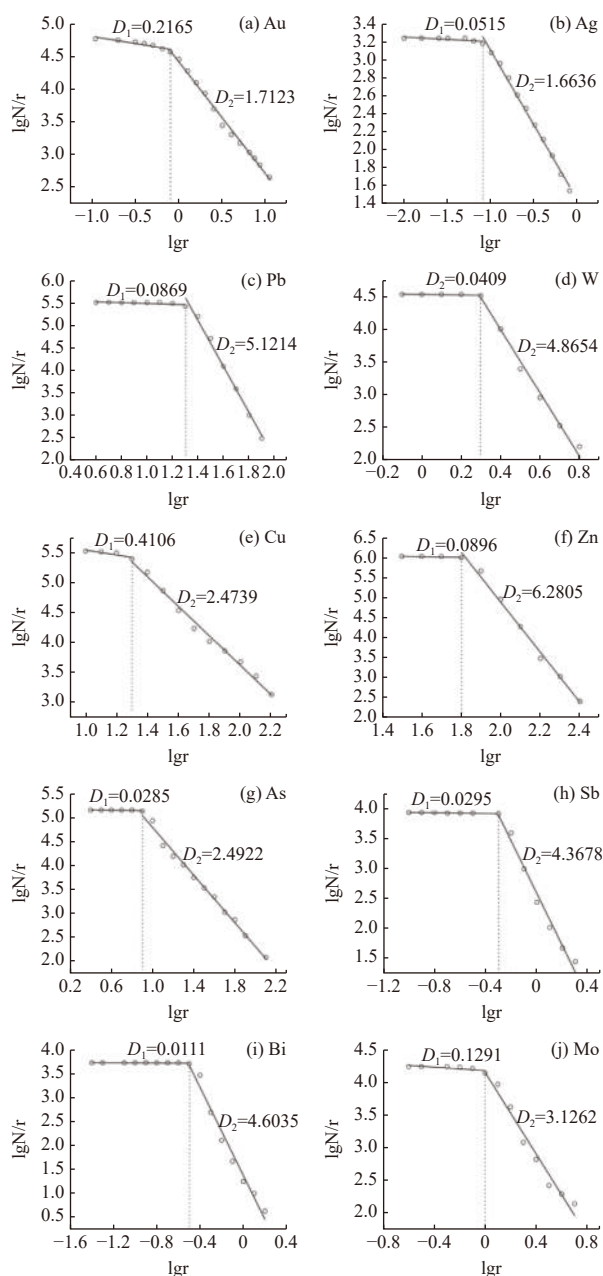


图5 分形含量和双对数散点拟合

Fig.5 Scatter fitting of double logarithmic fractal contents and contents

较少，主要含量点多集中于低含量区，因此该类元素富集成矿潜力较小。

4 土壤地球化学异常分析

根据确定的异常下限应用值，按各元素异常下限值的1倍，2倍，4倍进行计算（表4）。利用Mapgis 67软件圈定各元素的异常，并采用三角剖分法结合圈定效果将不合理的异常区域进行剔除，最终在研究区共圈定单元异常274处。

根据元素异常组合分布规律、所处地质背景，空间位置以及成因上的共生关系为基本原则，选择套合较好的元素异常进行综合圈定，勾绘出综合异常。勾绘时将成矿地质条件差、异常组合不明显的异常进行剔除，据此最终圈定出综合异常7处（图6）。经评价综合异常主要分布在如下两处：

大狼沟一带：位于研究区东北部，区内出露的地层主要为志留统泥鳅河组，下白垩纪光华组等，见大面积的花岗闪长岩体。发育有Ht-1、Ht-2等综合异常，异常未封闭，呈团簇状展布，异常元素包括：Au、Ag、W、Bi、Zn、Mo、Pb等（图6）。各元素组合内单元异常强度大，多种元素达到内带规模，其中Au-Ag元素间套合较好，具明显矿化富集现象，该异常区的发育应与火山作用热液活动密切相关有关，具有形成浅成热液型金矿床的潜力。

霍龙门沟村一带：位于研究区西南部，区内出露的地层主要为奥陶系裸河组，多宝山组等，区内见大面积的花岗闪长岩体。发育有Ht-6、Ht-7等综合异常，异常元素包括：Au、Ag、Cu、As、Sb、Bi等。多种元素达到内带规模，其中Cu-Au异常元素在该异常区内套合较好，异常强度高、范围大、规律性明显，成矿地质条件较有利，具有形成斑岩型铜矿床的潜力。

5 找矿远景区划分

研究区所属的东乌珠穆沁旗-嫩江多金属成矿带，矿产资源丰富，成矿带内已经发现的永新金矿和多宝山铜-钼-（金）矿分别为典型的浅成低温热液型矿床和斑岩型矿床。依据成矿远景区的圈定需要成矿地质条件与地球化学的有机结合这一重要原则，笔者根据研究区化探综合异常的元素组合特征及空间展布情况，将异常区成矿地质背景及地球化学特征与同一成矿带的典型矿床进行对比，由此圈定出两个成矿远景区：大狼沟Au-Ag成矿远景区和霍龙门沟Cu-Au成矿远景区。

5.1 典型矿床特征

5.1.1 永新金矿床

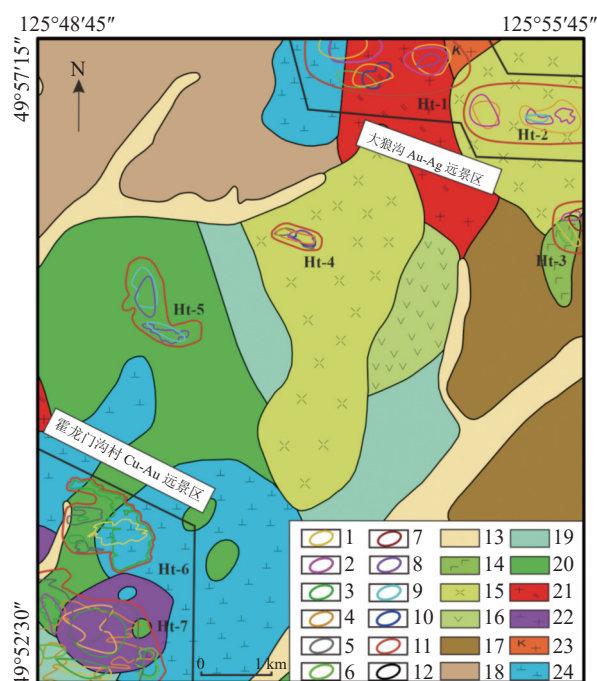
矿床概况：永新金矿位于东乌珠穆沁旗-嫩江多金属成矿带的北段，是近年来新发现的大型金矿，矿区出露的地层主要为早白垩世火山岩，从下至上依次为龙江组、光华组和甘河组。出露的侵入岩主要为正长花岗岩、花岗质糜棱岩及花岗

表 4 元素异常下限、浓度分带及单元素异常数统计

Table 4 10 elements anomaly threshold, concentration zoning and single element anomaly number

元素	异常下限使用值	外带	浓度分带 中带	内带	单元素异常数
Au	5.60	$\geq 5.6 \sim 11.2$	$\geq 11.2 \sim 22.4$	≥ 44.8	24
Ag	0.32	$\geq 0.32 \sim 0.64$	$\geq 0.64 \sim 1.28$	≥ 1.28	38
As	13.50	$\geq 13.5 \sim 27$	$\geq 27 \sim 54$	≥ 54	17
Sb	0.82	$\geq 0.82 \sim 1.64$	$\geq 1.64 \sim 3.28$	≥ 3.28	30
Bi	0.44	$\geq 0.44 \sim 0.88$	$\geq 0.88 \sim 1.76$	≥ 1.76	49
Cu	35.90	$\geq 35.9 \sim 71.8$	$\geq 71.8 \sim 143.6$	≥ 143.6	24
Pb	32.70	$\geq 32.7 \sim 65.4$	$\geq 65.4 \sim 130.8$	≥ 130.8	25
Zn	91.80	$\geq 91.8 \sim 183.6$	$\geq 183.6 \sim 367.2$	≥ 367.2	22
W	2.83	$\geq 2.83 \sim 5.66$	$\geq 5.66 \sim 11.32$	≥ 11.32	14
Mo	1.68	$\geq 1.68 \sim 3.36$	$\geq 3.36 \sim 6.72$	≥ 6.72	31

注：Au元素含量为 $\times 10^{-9}$ ，其他元素为 $\times 10^{-6}$ 。



1. Au 元素异常; 2. Ag 元素异常; 3. Cu 元素异常; 4. Sb 元素异常; 5. As 元素异常; 6. Bi 元素异常; 7. Zn 元素异常; 8. W 元素异常; 9. Mo 元素异常; 10. Pb 元素异常; 11. 综合异常区; 12. 远景区; 13. 第四系; 14. 甘河组; 15. 光华组; 16. 龙江组; 17. 腰桑南组; 18. 泥鳅河组; 19. 裸河组; 20. 多宝山组; 21. 晚石炭世二长花岗岩; 22. 晚石炭世花岗闪长岩; 23. 晚石炭世碱长花岗岩; 24. 中奥陶世闪长岩

图 6 霍龙门沟地区地球化学综合异常及成矿远景区分布

Fig.6 Distribution of the synthetic geochemical anomaly and the metallogenic prospect area

闪长岩等。矿区共圈定出两条主矿体，两条主矿体大体平行排列呈北东向展布，矿体均赋存在晚石炭世花岗质糜棱岩和正长花岗岩接触部位的热液角砾岩体中及其附近。矿区脉岩较为发育，主要包括闪长玢岩和花岗斑岩，总体呈北东-北北东向脉状展布，大致与矿体平行并伴生产出，显示

与成矿关系密切，矿石类型以热液角砾岩型为主，其次为石英脉型和蚀变岩型，偶见有少量糜棱岩型，矿石矿物主要包括黄铁矿、方铅矿、闪锌矿和少量的黄铜矿。热液蚀变主要包括硅化、青磐岩化和钾长石化等^[22]。

地球化学找矿标志：矿区原生晕轴向分带序列为 Sn-Zn-Pb-Mo→Au-Bi-Ag-Hg→Cd-W-Ni-As-Co-Sb-Cu，矿体的头部和尾部均有盲矿存在^[48-49]。矿区内 1:5 万土壤地球化学测量工作显示，Au、Ag、Cu、Pb、Mo 元素较富集、异常强度高、套合好。说明该套元素组合为区域内 Au 成矿作用的指示元素。

5.1.2 多宝山铜-钼-（金）矿床

矿床概况：多宝山铜-钼-（金）矿床位于东乌珠穆沁旗-嫩江多金属成矿带的南段，矿区内所出露地层主要为中奥陶统多宝山组和铜山组。出露的侵入岩主要为花岗闪长岩、花岗闪长斑岩、角闪伟晶岩等。多宝山铜-钼-（金）矿区斑岩型矿化较为发育，其矿体主要赋存于中奥陶世花岗闪长岩体和花岗闪长斑岩中，少量赋存于多宝山组安山岩中。矿化类型以脉状和细脉浸染状为主，矿石自然类型以原生矿石为主，氧化矿石较少。硫化物矿石中主要金属矿物有黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿与辉钼矿，次要矿物有赤铜矿，辉铜矿等；脉石矿物主要包括石英和方解石和绿帘石等。矿区内围岩蚀变作用广泛，多产于花岗闪长岩当中，且在空间分布上具有一定规律性，主要包括黄铜矿化、硅化、绿泥石化和碳酸盐化等^[50]。

地球化学找矿标志：矿区内 1:5 万水系沉积物测量^[51]显示 Au、Ag、Cu、Mo 等元素离散程度

大，背景值高，高含量数据较多，成矿的可能性大，为研究区的主成矿元素；从地质背景看，矿区异常与多宝山组、中奥陶世花岗闪长岩有关，尤其是铜元素异常。

5.2 找矿远景区

5.2.1 大狼沟 Au-Ag 成矿远景区

远景区分布于大狼沟一带，区域出露地层主要为光华组，侵入岩主要为二长花岗岩、碱长花岗岩和花岗闪长岩，该区域遭受多期次强烈构造运动，形成了众多的控矿构造。主要控矿构造是北东向、北西向、南北向断裂构造以及与火山作用有关的构造。区域处于南北向控矿断裂与北东向控矿断裂的交汇部位，对形成内生金属矿产十分有利。远景区发育有 Ht-1 和 Ht-2 综合异常，以 Ht-1 为例，该异常规模较大，整体呈北东向展布，其中 Au-Ag 异常强度最高，异常套和紧密，具有较好的成矿前景，经异常检查发现区内发育有硅化、绿泥石化、褐铁矿化和黄铁矿化等蚀变现象。据该矿床成矿地质条件及年代学等研究揭示，该远景区与永新金矿床成矿出露大面积的中酸性火山岩及其同期次火山岩脉（闪长玢岩和花岗斑岩）形成时代与成矿年龄基本一致，具有一

定的成因联系。显示该远景区具有寻找类似于永新地区浅成热液型金矿的找矿潜力。

5.2.2 霍龙门沟 Cu-Au 成矿远景区

霍龙门沟 Cu-Au 成矿远景区位于多宝山斑岩型铜-钼-（金）矿南侧，发育与之相似的铜矿化。矿化分布区的地质条件与多宝山铜-钼-（金）矿相似，均为奥陶纪火山岩系和同期侵入岩组合。出露地层为下-中奥陶统多宝山组安山岩类，与矿化有关的侵入岩为奥陶纪闪长岩-正长闪长岩-正长岩杂岩体。与矿化伴生的热液蚀变较强，分布广泛，主要有硅化、绢云母化、青磐岩化等蚀变。主要铜矿物有黄铜矿、赤铜矿、孔雀石及铜蓝，呈细脉浸染状分布于岩石及早期黄铁矿裂隙中。铜矿化多赋存在奥陶纪闪长岩、不规则外接触带的蚀变安山岩和闪长岩的硅化-绢云母化带内，矿化为细脉浸染状，矿化总体特征是分布范围广，矿化强度弱，而且成矿物质来源、成矿流体特征和成矿时代均具有相似性，表明它们均为中奥陶世岩浆活动的产物，具有典型斑岩型矿床特征。根据霍龙门沟地区地球化学综合异常及成矿远景区分布图可以看出 HtCu-11 号铜异常与 HtAu-20 号金异常套合紧密。在磁场特征上（图 7），

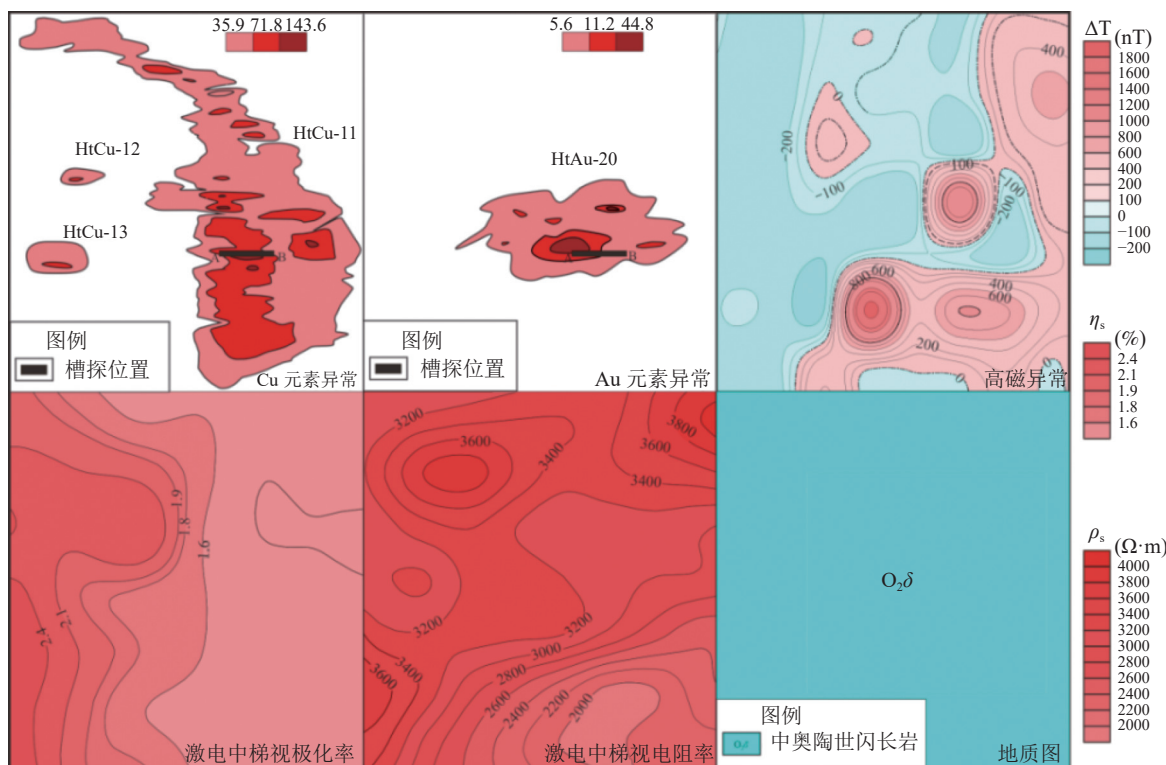


图7 霍龙门沟 Cu-Au 成矿远景区异常剖析

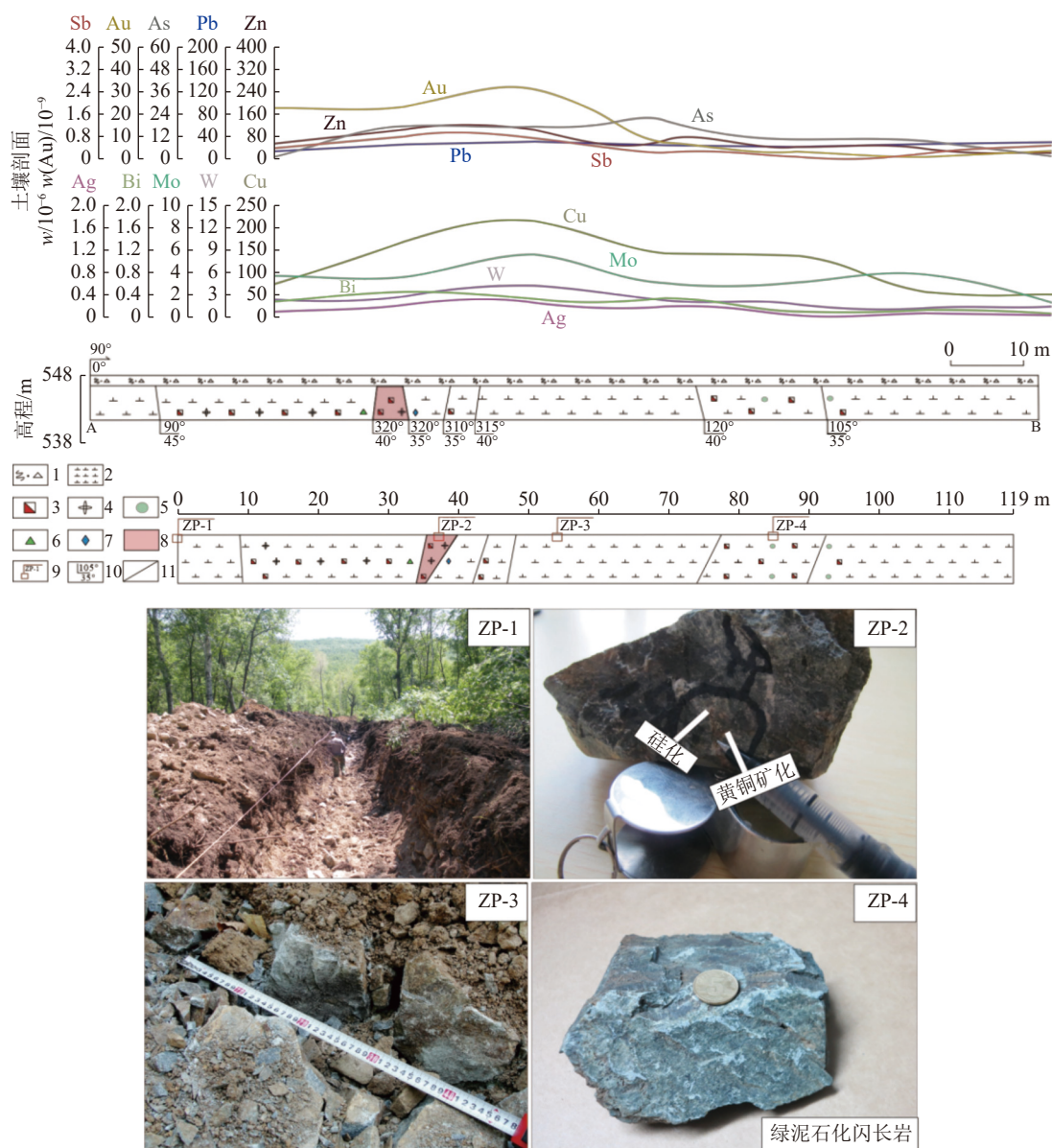
Fig.7 Anomalous analysis of Cu-Au metallogenetic prospect in the Huolongmengou area

HtCu-11 号铜异常位于高、低磁场的梯度带附近。在电性特征上, Au 异常位于视极化率高值区与低值区的梯度带上, 也位于视电阻率高值区与低值区的梯度带上。总体上, 该区 Cu-Au 异常强度较高, 物化探异常套和紧密, 地质条件有利于成矿, 显示出该区具备寻找斑岩型 Cu-Au 矿床的潜力。

5.3 工程验证

由于测区内已知矿(化)点出露较少, 且野外施工条件相对较差, 仅对霍龙门沟 Cu-Au 成矿远景区开展了工程验证, 主要对 Ht-6 异常区内圈

出的 HtCu-11 号铜异常进行地表槽探揭露和深部验证。通过 HGTC40-2 槽探工程揭露显示(图 8), 铜蓝在地表以及探槽广泛发育。化学分析和光谱分析结果均显示该区岩石铜含量很高, 其中化学分析铜含量最高可达 0.587%, 光谱分析铜含量最高可达 698.2×10^{-6} , 该区的蚀变主要以黄铜矿化、硅化、孔雀石化、绿泥石化为主, 反映该区岩石中发生了铜的富集作用或受到过成矿作用的影响。综上分析, 工程验证结果与化探分析结果较吻合, 该远景区具有较好的找矿潜力。



1. 第四系; 2. 细/中粒闪长岩; 3. 黄铜矿化; 4. 硅化; 5. 绿泥石化; 6. 孔雀石化; 7. 铜蓝; 8. 铜矿体; 9. 照片位置及编号; 10. 产状; 11. 地质界线

图 8 HGTC40-2 地球化学综合剖面及野外验证

Fig.8 Integrated soil geochemical section HGTC40-2 and field verification

6 结 论

通过 R 型聚类分析和因子分析对区内的主要成矿元素及其组合特征进行分析, 结果表明, As-Sb、Pb-Zn、Ag-Cu-Au、Mo-Bi-W 等元素组合彼此相关性较好, 且根据分形特征统计分析, 综合认为本区 Au、Ag、Cu、As、Mo 等元素具有较高的找矿潜力, Au 元素可能是研究区主要的成矿矿种。

依据土壤地球化学异常特征, 结合研究区成矿地质条件, 对比永新金矿床和多宝山铜-钼-(金)矿床地质地球化学特征, 初步划分了 2 个成矿远景区: 大狼沟 Au-Ag 成矿远景区和霍龙门沟 Cu-Au 成矿远景区。通过地球化学参数统计评价了主要元素成矿潜力及贫化规律, 发现大狼沟 Au-Ag 成矿远景区内 Au 的变异系数及离散程度最大, 高强度数据最多, 且区域内 Au-Ag 异常套合紧密, 因此认为该区域具有 Au-Ag 成矿的良好前景。霍龙门沟 Cu-Au 成矿远景区内 Cu-Au 异常强度较高, 物化探异常套和紧密, 通过槽探验证, 发现了一条品位较高的 Cu 矿体, 反映该区岩石中发生了铜的富集作用或受到过成矿作用的影响, 具有寻找斑岩型 Cu-Au 矿床的找矿前景, 为下一步该区域的找矿工作指明了方向和勘查部署依据。

参考文献:

- [1] GE W C, WU F Y, ZHOU C Y, et al. Mineralization ages and geodynamic implications of porphyry Cu-Mo deposits in the east of Xingmeng -orogenic belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(20):2407-2417.
- [2] LIU J, WU G, LI Y, et al. Re-Os sulfide (chalcopyrite, pyrite and molybdenite) systematics and fluid inclusion study of the Duobaoshan porphyry Cu (Mo) deposit, Heilongjiang Province, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 49(3):300-312.
- [3] ZENG Q D, LIU J M, CHU S X, et al. Re-Os and U-Pb geochronology of the Duobaoshan porphyry Cu-Mo-(Au) deposit, northeast China, and its geological significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 79(2):895-909.
- [4] 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.
- [5] 王乐, 秦克章, 庞绪勇, 等. 多宝山矿田铜山斑岩铜矿床地质特征与蚀变分带: 对热液—矿化中心及深部勘查的启示[J]. *矿床地质*, 2017, 36(5):1143-1168.
- WANG L, QIN K Z, PANG X Y, et al. Geological characteristics and alteration zonation of Tongshanporphyry copper deposit within Duobaoshanorefield, Heilongjiang: Implications for hydrothermal-mineralization center and further exploration[J]. *Mineral Deposits*, 2017, 36(5):1143-1168.
- [6] 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.
- [7] GAO R Z, XUE C J, LV X B, et al. Genesis of the Zhengguang gold deposit in the Duobaoshan ore field, Heilongjiang Province, NE China: Constraints from geology, geochronology and S-Pb isotopic compositions[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 84:202-217.
- [8] 张志华, 孙丰月, 舒旭. 黑龙江三道湾子金矿 Au-Ag-Te 系列矿物特征及其成矿阶段分析[J]. *地质与勘探*, 2018, 54(S1):1416-1424.
- ZHANG Z H, SUN F Y, SHU X. Characteristics of the Au-Ag-Te minerals from the Sandaowanzi gold deposit, Heilongjiang Province and the metallogenic stage[J]. *Geology and Exploration*, 2018, 54(S1):1416-1424.
- [9] YU R T, LI B L, SUN F Y, et al. Geochronology, geochemistry and Hf isotopes of andesites in the Sandaowanzi gold deposit (Great Xing'an Range, NE China): implications for petrogenesis, tectonic setting, and mineralization[J]. *Acta Geochimica*, 2021, 40(2):251-270.
- [10] 李成禄, 李胜荣, 袁茂, 等. 黑龙江省嫩江—黑河构造混杂岩带科洛金矿床成因: 来自黄铁矿化学成分及 He-Ar、S、Pb 同位素证据[J]. *地学前缘*, 2020, 27(5):099-115.
- LI C L, LI S S, YUAN M, et al. Genesis of the Keluo Au deposit in the Nenjiang-Heihe tectonic melange belt, Heilongjiang Province: evidence from chemical composition and pyrite He-Ar, S, Pb isotopes[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(5):099-115.
- [11] ZHAO Z H, SUN J G, LI G H, et al. Early Cretaceous gold mineralization in the Lesser Xing'an Range of NE China: the Yongxin example[J]. *International Geology Review*, 2019, 61(12):1522-1549.
- [12] ZHAO Z H, SUN J G, LI G H, et al. Age of the Yongxin Au deposit in the Lesser Xing'an Range: Implications for an Early Cretaceous geodynamic setting for gold mineralization in NE China[J]. *Geological Journal*, 2019, 54(4):2525-2544.
- [13] ZHAO Z H, SUN J G, LI G H, et al. Zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints on the timing and origin of the Early Cretaceous igneous rocks in the Yongxin gold deposit in the Lesser Xing'an Range, NE China[J]. *Geological Journal*, 2020, 55(4):2684-2703.
- [14] 杨笑笑, 罗先熔, 郑超杰, 等. 衡阳盆地北缘国庆矿区土壤地球化学特征及找矿方向[J]. *地质与勘探*, 2018, 54(4):762-771.
- YANG X X, LUO X R, ZHENG C J, et al. Geochemical characteristics of soil and prospecting direction in the Guoqing area, northern margin of the Hengyang Basin[J]. *Geology and Exploration*, 2018, 54(4):762-771.

- [15] 黄文斌, 罗先熔, 贾飞, 等. 陕西汉南碑坝地区土壤地球化学特征及找矿预测[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2019, 38(6):1110-1117.
- HUANG W B, LUO X R, JIA F, et al. Geochemical characteristics of soils in the Beiba area, Southern Hanzhong City, Shaanxi Province and their application for mineral prospecting prediction[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2019, 38(6):1110-1117.
- [16] 蒋艳明, 曹微, 燕振之. 2015. 印度尼西亚 Buti 铜矿的土壤地球化学特征与成矿预测[J]. 地质找矿论丛, 30(3): 422-428.
- JIANG Y M, CAO W, YAN Z Z. The soil geochemical characteristics of the Buti Cu deposit in Indonesia and the ore prediction[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2015, 30(3): 422-428.
- [17] 董一博, 焦建刚, 刘凯, 等. 土壤地球化学测量在南秦岭夏家店金矿刘家峡测区的应用[J]. 地质与勘探, 2019, 55(5):1202-1213.
- DONG Y B, JIAO J G, LIU K, et al. Application of soil geochemical measurement to the Liujiaxia area of the Xiajiadian gold mine in the South Qinling[J]. Geology and Exploration, 2019, 55(5):1202-1213.
- [18] 王仔章, 刘铭. 青海省都兰县丘吉东沟金矿地球化学特征及找矿潜力分析[J]. 地质找矿论丛, 2020, 35(3):332-338.
- WANG Z Z, LIU M. Geochemical characteristics and prospecting potential analysis of Qiujiadonggou gold deposit, Dulan county, Qinghai province[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2020, 35(3):332-338.
- [19] ZHENG C J, LUO X R, WEN M L, et al. Axial primary halo characterization and deep orebody prediction in the Ashele copper-zinc deposit, Xinjiang, NW China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2020, 213:1-16.
- [20] AN W T, CHEN J P, LI Y C, et al. The superposition characteristics of primary halo in the Daping gold deposit, Yunnan Province, China and its significance for exploration[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2021, 228:1-12.
- [21] WANG Q, WANG X Q, LIU H L, et al. Targeting deep-seated gold deposits: A study from the Qujia Gold Deposit, Shandong Province, China[J]. Applied Geochemistry, 2021, 130:1-13.
- [22] 赵忠海. 小兴安岭西北部永新大型金矿成因、成矿地质模式与深部三维成矿预测[D]. 长春: 吉林大学: 2019, 21-52.
- ZHAO Z H. Ore genesis, metallogenic geological mode and deep metallogenic prediction of the Yongxin large Au deposit based on 3D digital model in the northwestern Lesser Xing'an Range[D]. Changchun: Jilin University: 2019, 21-52.
- [23] 张璟, 邵军, 杨宏智, 等. 东北扎兰屯奥陶纪碱性辉长岩锆石 U-Pb 年代学证据[J]. 中国地质, 2017, 44(3):616-617.
- ZHANG J, SHAO J, YANG H Z, et al. U-Pb chronological evidence from zircons of Ordovician essexite in Zhalantun area, Northeast China[J]. Geology in China, 2017, 44(3):616-617.
- [24] 叶琴, 于洋, 高曦, 等. 内蒙古阿拉坦合力苏木汗贝布敦昭奥陶纪裸河组的重新厘定及其意义[J]. 地质通报, 2013, 32(10):1548-1557.
- YE Q, YU Y, GAO X, et al. Revision of the Ordovician Luohe Formation in Hanbeibudunzhao area of AltanHil, Inner Mongolia[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(10):1548-1557.
- [25] GAO S, XU H, ZANG Y Q, et al. Late Mesozoic magmatism and metallogeny in NE China: The Sandaowanzi -Beidagou example[J]. International Geology Review, 2016, 59(11):1413-1438.
- [26] 王苏珊, 刘佳宜, 季洪伟, 等. 黑龙江三道湾子金矿区龙江组安山岩的年代学与地球化学[J]. 岩石学报, 2017, 33(8):2604-2618.
- WANG S S, LIU J Y, JI H W, et al. Geochronology and geochemistry of the andesites of Longjiang Formation in the Sandaowanzi gold deposit, Heilongjiang Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(8):2604-2618.
- [27] 张超, 吴新伟, 张渝金, 等. 大兴安岭北段龙江盆地光华组碱流岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 2017, 36(9):1531-1541.
- ZHANG C, WU X W, ZHANG Y J, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of the pantellerite of Guanghua Formation from Longjiang basin in northern Da Hinggan Mountains and their geological implications[J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(9):1531-1541.
- [28] SUN J G, HAN S J, ZHANG Y, et al. Diagenesis and metallogenetic mechanisms of the Tuanjiogou gold deposit from the Lesser Xing'an Range, NE China: Zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopic constraints[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 62:373-388.
- [29] 胡二红, 张善明, 贺中银, 等. 内蒙古额济纳旗微波山地区土壤地球化学特征及找矿潜力[J]. 现代地质, 2020, 34(6):1303-1317.
- HU E H, ZHANG S M, HE Z Y, et al. Soil Geochemical Characteristics and Metallogenic Potential in Weibo Mountain Area of EjinaBanner, Inner Mongolia[J]. Geoscience, 2020, 34(6):1303-1317.
- [30] 张永三, 胡兆国, 刘静, 等. 水系沉积物测量在云南临沧地区离子吸附型稀土矿找矿中的应用[J]. 矿物学报, 2021, 41(2):171-180.
- ZHANG Y S, HU Z G, LIU J, et al. Application of stream sediment survey for prospecting the ion adsorption type REE deposit in the Lincang area, Yunnan Province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2021, 41(2):171-180.
- [31] 陈炳锦, 郑崔勇, 赵亮亮, 等. 土壤地球化学测量在陕西勉县瓦子坪铅锌多金属矿勘查中的应用[J]. 现代地质, 2021, 35(2):455-465.
- CHEN B J, ZHENG C Y, ZHAO L L, et al. Application of soil geochemical survey in the exploration of lead-zinc polymetallic ore in Waziping, Mianxian County, Shaanxi Province[J]. Geoscience, 2021, 35(2):455-465.
- [32] 黄永高, 冯佐海, 罗改, 等. 三江特提斯兰坪盆地通甸地区水系沉积物地球化学特征及找矿靶区优选[J]. 地质与勘探, 2020, 56(4):732-744.
- HUANG Y G, FENG Z H, LUO G, et al. Geochemical

- characteristics of stream sediments and prospecting target optimization in Tongdian area of Lanping Basin, Sanjiang Tethys[J]. *Geology and Exploration*, 2020, 56(4):732-744.
- [33] 张勤山, 马楠, 郝亚青, 等. 综合化探方法在青海夏日哈木超大型铜镍矿床中的找矿应用[J]. *物探与化探*, 2016, 40(3):429-437.
- ZHANG Q S, MA N, HAO Y Q, et al. A study of integrated geochemical exploration method and its application to Xiarihamu superlarge Cu-Ni deposit, Qinghai Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, 40(3):429-437.
- [34] 丁吉顺, 陈伟, 周恒, 等. 西藏雄梅地区 1: 5 万水系沉积物地球化学特征及找矿远景[J]. *地质与勘探*, 2019, 55(1):48-63.
- DING J S, CHEN W, ZHOU H, et al. Geochemical characteristics from 1: 50000 survey data of stream sediments and ore-search prospects in the Xiongmei Area, Tibet[J]. *Geology and Exploration*, 2019, 55(1):48-63.
- [35] 胡兆国, 张永三, 王战华, 等. 云南省者太地区金铋矿找矿预测——来自水系沉积物测量的证据[J]. *地质与勘探*, 2019, 55(3):753-764.
- HU Z G, ZHANG Y S, WANG Z H, et al. Prospecting of gold-antimony deposits in the Zhetai area of Yunnan Province: Evidence from stream sediment survey[J]. *Geology and Exploration*, 2019, 55(3):753-764.
- [36] 曲晖, 王佰义, 王建民, 等. 土壤地球化学测量在永新金矿勘查中的应用及找矿效果研究[J]. *黄金科学技术*, 2018, 26(2):143-152.
- QU H, WANG B Y, WANG J M, et al. Application of soil geochemical survey in the exploration of Yongxin gold deposit and its prospecting effect[J]. *Gold Science and Technology*, 2018, 26(2):143-152.
- [37] 孙雨, 神元, 鲁正清, 等. 河南卢氏三官庙铅多金属矿区土壤地球化学特征及成矿预测[J]. *金属矿山*, 2018(1):128-136.
- SUN Y, SHEN Y, LU Z Q, et al. Soil geochemical characteristics and metallogenic prediction of Sanguanmiao Mo-polymetallid mining area in Lushi County, Henan Province[J]. *Metal Mine*, 2018(1):128-136.
- [38] 王永开. 内蒙古额济纳旗沙河北幅土壤地球化学特征与异常评价[J]. *地质找矿论丛*, 2021, 36(2):195-201.
- WANG Y K. Characteristics and anomaly evaluation of soil geochemistry of Shahebei sheet of Ejinaqi in Inner Mongolia[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2021, 36(2):195-201.
- [39] 薛盈杉, 张军军, 曾小波. 基于 AHP-熵权法的金属矿山开发利用水平综合评价研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(4):66-72+58.
- XUE Y S, ZHANG J J, ZENG X B. Multipurpose evaluation of exploitation and utilization level of metal mines based on AHP and entropy weight method[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):66-72+58.
- [40] 姚玉玲. 聚焦耦合微波萃取沉积物中甲基汞前处理条件的研究[J]. *矿产综合利用*, 2013(4):48-51.
- YAO Y L. Study on pretreatment condition of extracting of methylmercury in sediments by focusing coupling microwave-assisted[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2013(4):48-51.
- [41] 辛存林, 王磊, 路阔, 等. 甘肃天水火鸡山地区土壤地球化学异常信息提取与评价[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(2):169-179.
- XIN C L, WANG L, LU K, et al. Extraction and evaluation of soil geochemical anomaly information in the Huojishan Area of Tianshui, Gansu Province[J]. *Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)*, 2020, 56(2):169-179.
- [42] 成秋明. 多维分形理论和地球化学元素分布规律[J]. *地球科学*, 2000(3):311-318.
- CHENG Q M. Multifractal theory and geochemical element distribution pattern[J]. *Earth Science*, 2000(3):311-318.
- [43] 成秋明, 张生元, 左仁广, 等. 2009. 多重分形滤波方法和地球化学信息提取技术与进展[J]. *地学前缘*, 16(2):185-198.
- CHENG Q M, ZHANG S Y, ZUO R G, et al. Progress of multifractal filtering techniques and their applications in geochemical information extraction[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 6(2):185-198.
- [44] 申维. 分形求和法及其在地球化学数据分组中的应用[J]. *物探化探计算技术*, 2007(2):134-137.
- SHEN W. Fractal summation method and its application in geochemical data grouping[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2007(2):134-137.
- [45] 蒙勇, 文件生, 吕宇明, 等. 广西贵港银山岭铅锌矿土壤地球化学找矿研究[J]. *现代地质*, 2011, 25(5):1013-1020.
- MENG Y, WEN J S, LV Y M, et al. Study on soil geochemical prospecting of lead-zinc deposit in Yinshanling, Guigang, Guangxi[J]. *Geoscience*, 2011, 25(5):1013-1020.
- [46] 鄢旭久, 薛林福, 刘正宏. 分形模型在黑龙江漠河地区金矿成矿预测中的应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(2):384-392.
- YAN X J, XUE L F, LIU Z H. Application of fractal model in gold prospecting in Mohe Area, Heilongjiang Province[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2012, 42(2):384-392.
- [47] 袁和, 许云鹏, 邵华, 等. 藏南邦卓玛地区金多金属矿土壤地球化学特征及找矿前景[J]. *金属矿山*, 2019(3):147-155.
- YUAN H, XU Y P, SHAO H, et al. Soil geochemical characteristics and prospecting potential of Au-polymetallic deposit in Bangzhuoma area, South Tibet[J]. *Metal Mine*, 2019(3):147-155.
- [48] 赵忠海, 孙景贵, 郭艳. 黑龙江永新金矿床原生晕轴向分带特征及深部矿体预测[J]. *地质论评*, 2017, 63(S1):157-158.
- ZHAO Z H, SUN J G, GUO Y. Axial zoning characteristics of primary halos and deep orebody prediction in Yongxin gold deposit, Heilongjiang Province[J]. *Geological Review*, 2017, 63(S1):157-158.
- [49] 梁科伟, 赵忠海, 郭艳. 原生晕在深部成矿预测中的应用——以黑河地区永新金矿为例[J]. *地质与资源*, 2019, 28(6):512-518.

LIANG K W, ZHAO Z H, GUO Y. Application of primary halo in deep metallogenic prediction: A case study of yongxin gold deposit in heihe area[J]. *Geology and Resources*, 2019, 28(6):512-518.

[50] 蔡文艳. 黑龙江省多宝山矿集区铜—钼—金多金属成矿作用研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2020, 39-83.

CAI W Y. Metallogenesis of copper –molybdenum –gold polymetallic in the Duobaoshan orefield, Heilongjiang

Province[D]. Changchun: Jilin University, 2020, 39-83.

[51] 徐东海, 万太平, 石国明. 黑龙江多宝山地区水系沉积物地球化学特征及成矿远景区划分 [J]. *黄金*, 2019, 40(6):18-22.

XU D H, WAN T P, SHI G M. Geochemical characteristics of stream sediments and division of metallogenic prospective regions in Duobaoshan area, Heilongjiang Province[J]. *Gold*, 2019, 40(6):18-22.

Analysis of Soil Geochemical Characteristics and Metallogenic Potential in Huolongmengou Area of Heilongjiang

Qiao Kai¹, Zhao Zhonghai¹, Chen Jundian², Liang Shanshan¹, Chen Jun¹, Li Chenglu³

(1.College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning, China; 2.Geophysical Measuring Exploration Institute of Liaoning Province, Shenyang, Liaoning, China; 3.Heilongjiang Institute of Natural Resources Survey, Harbin, Heilongjiang, China)

Abstract: Heilongjiang Huolongmengou area is located in the southern section of the DongwuzhuMuqi-Nenjiang polymetallic mineralization belt, and has a good prospect for exploration prospecting. Based on the results of 1:10000 soil geochemical measurements, this paper uses the methods of element variation coefficient, thick set coefficient and fractal characteristics to count the geochemical characteristics of 10 elements in Heilongjiang Huolongmengou area. Cluster analysis, factor analysis and fractal method were used to analyze the symbiotic association of elements. The results show that Au, Ag, Cu, As and Mo have high prospecting potential in the study area, and Au may be the main ore-forming minerals in the study area. According to the distribution law of elemental abnormal combination and the geological conditions of mineralization, a total of 7 comprehensive anomalies were circled, and compared with the mineralization geological background and geochemical characteristics of the typical Yongxin shallow into low temperature hydrothermal gold deposit and Duobaoshan spot rock Copper-Molybdenum-(Gold) deposit in the region, and the prospect area of Au-Ag mineralization and the Cu-Au mineralization prospect area of Huolongmengou were divided to provide scientific basis for the next step of prospecting and deployment of the research area.

Keywords: Soil geochemistry; Comprehensive anomaly; Minerogenic prospect; Huolongmengou area; Heilongjiang