doi: 10.11720/wtyht.2026.1231
付立春, 宋庆元, 李博, 等. 小兴安岭东南部格勒比勒河地区 Au 致矿地球化学异常信息识别与提取[J]. 物探与化探, 2026, 50(1): 12-20. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1231
Fu L C, Song Q Y, Li B, et al. Identification and extraction of gold mineralization-related geochemical anomalies in the Gelebile River area, southeastern Lesser Xing'an Range, China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(1): 12-20. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1231

小兴安岭东南部格勒比勒河地区 Au 致矿地球化学异常信息识别与提取

付立春[1,2], 宋庆元[1,2], 李博[1,2], 袁和[1,2], 谢天坤[1,2], 王桃源[1,2], 李增涛[1,2], 周龙[1,2], 李雪峰[3], 朱显男[1,2], 王佳辉[1,2], 李一成[1,2]

(1. 中国地质调查局 哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086; 2. 自然资源部 哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086; 3. 黑龙江省自然资源调查院, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘 要: 自然界中 Au 元素常以金属态单质形式存在, 其粒度极为细小, 且空间分布极不均匀, 导致部分金矿床(点)没有与之对应的 Au 元素化探异常出现, 极大地增加了通过化探异常开展地质找矿的难度。本文以地学大数据"数据驱动"思想为指导, 查明数据间的相关关系, 以此解决地质找矿问题。选取黑龙江省东北部格勒比勒河地区土壤地球化学数据为研究对象, 运用 C_{V1} 和 C_{V1}/C_{V2} 变化系数解释图对格勒比勒河地区 10 种元素进行统计分析, 得出 Au、Mo 的成矿潜力较大; 通过构建 Au 元素回归模型, 在格勒比勒河地区圈定 2 处找矿靶区, 利用槽探、钻探工程对 1 号靶区进行验证, 揭露出 1 条金矿体和 1 条钼矿体。本次研究证明, 运用多元回归分析方法构建的找矿预测模型在极大程度上提高了找矿效率, 有效解决了在小范围区域内矿床(点)产出位置不明的情况下无法开展找矿靶区定量预测的难题。

关键词: 土壤地球化学; 数据挖掘; 地学大数据; 金矿; 找矿预测
中图分类号: P632; P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)01-0012-09

0 引言

金(Au)作为重要的战略矿产资源, 其勘查开发历来是地质工作的重点。勘查地球化学技术作为矿产勘查领域的一项重要基础工作, 在地质找矿方面一直发挥着重要作用[1-2]。20 世纪 70~80 年代, 该技术的广泛应用显著提升了矿产勘查效率, 成功发现了包括铜、金、钼在内的大量金属矿产。然而, Au 元素在地壳中的丰度极低(中国东部和西部分别仅为 1.73×10^{-9} 和 1.95×10^{-9})[3], 且在自然界中多以粒度细微的单质形式存在, 导致其在找矿过程中难以通过直接观察识别, 这极大地制约了金矿的发现[4]。随着易识别矿床大多已被探明, 以及金元素本身因分布极不均匀、在采样与分析过程中易受区域地质背景、景观条件、分析方法检出限等多种因素干扰[5], 传统的化探方法已难以有效捕捉真实的致矿异常信息, 找矿成效明显减弱。

当前, 化探找矿面临的核心挑战在于如何从海量数据中精准提取微弱的致矿异常信息。一方面, Au 的测试值受"粒金效应"等影响, 往往不能完全反映其真实丰度[5]; 另一方面, 元素的地球化学背景具有区域性差异, 采用统一的异常下限会掩盖低背景区的有效异常, 致使找矿概率降低[6-7]。为突破这一瓶颈, 国内外学者不断探索新的数据处理方法, 如多变量统计分析[8-10]、地质统计学[11-12]、非线性模型[13-14]及谱分析技术[15] 等, 虽取得了一定进展, 但受限于传统数据处理模式, 未能从根本上解决弱异常信息的

收稿日期: 2025-06-27; **修回日期:** 2025-09-24
基金项目: 中国地质调查局项目"内蒙古得尔布尔—莫尔道嘎一带金矿调查评价"(DD20242939)
第一作者: 付立春(1981-), 男, 正高级工程师, 从事成矿规律与成矿作用研究工作。Email: 1197603651@qq.com
通讯作者: 宋庆元(1990-), 男, 工程师, 从事矿产勘查工作。Email: 3859729889@qq.com

识别与提取难题[16-17]。

近年来,“地质大数据”思维为勘查地球化学注入了新的活力,其核心在于通过“数据驱动”深入挖掘元素间的内在关联,从而提取传统方法难以识别的隐蔽信息[18-19]。本研究以黑龙江省东北部格勒比勒河这一工作程度较低的地区为范例,对区内采集的 3 850 件土壤地球化学样品数据进行深度挖掘。首先,利用“元素变化系数”对 Au、Mo 等 10 种元素的成矿潜力进行评价[20];进而,创新性地运用多元回归分析方法,分别构建全样本与异常样本的找矿预测模型(AuQ 与 AuY),以分布相对均匀的伴生元素来推算金的理论含量,从而有效“还原”被噪声掩盖的致矿异常信息。通过此模型,在研究区内精准圈定了 2 处找矿靶区,并对其中 1 处(AuYHt-1)进行了工程验证,成功发现了金、钼矿体。实践证明,该方法显著提高了找矿效率,为解决小范围区域内矿床(点)产出位置不明情况下的靶区定量预测难题提供了新思路[5],为勘查地球化学方法寻找金矿的应用提供了有效的新途径。

1　区域地质背景

中国东北地区处于西伯利亚克拉通和华北克拉通之间,位于中亚造山带东段[21–23],是由多个微陆块拼合而成,由北向南依次为额尔古纳地块、兴安地块、松辽地块、佳木斯地块、那丹哈达地体、辽源地块(图 1a)[24-26]。中生代以来,由于受太平洋板块的俯冲作用和蒙古—鄂霍茨克构造域演化的影响,小兴安岭地区发生了多期岩浆作用和大规模的成矿作用[26-28],区域上广泛发育花岗岩和陆相中—酸性火山—次火山岩,并形成众多的金属矿床,矿床类型有浅成低温热液型金矿床、斑岩型铜钼矿床以及矽卡岩型铁铜(钼)多金属矿床等。其中,浅成低温热液型金矿床形成于早白垩世,矿床的形成均与早白垩世活动大陆边缘的岩浆作用有关[29–32],代表性矿床有东安、团结沟、高松山等金矿床;斑岩型铜钼矿床以高岗山矿床为代表,形成时代为晚二叠世—早三叠世[33],矿床的形成与太平洋板块俯冲引起的高钾钙碱性花岗质岩浆作用有关[34-37];矽卡岩型铁铜(钼)多金属矿床主要形成于早侏罗世,代表性矿床有翠宏山、二股西山和徐老九沟矿床等(图 1b)。

格勒比勒河地区位于小兴安岭东南部,区内出露的地层有下白垩统宁远村组(K_1n)、下白垩统建兴组(K_1j)、渐新统—上新统孙吴组(E_3N_2s)及第四系下更新统大熊山玄武岩(Qp^{1vl})。区内岩浆岩较发育,主要有中奥陶世片麻状黑云母花岗闪长岩、中奥陶

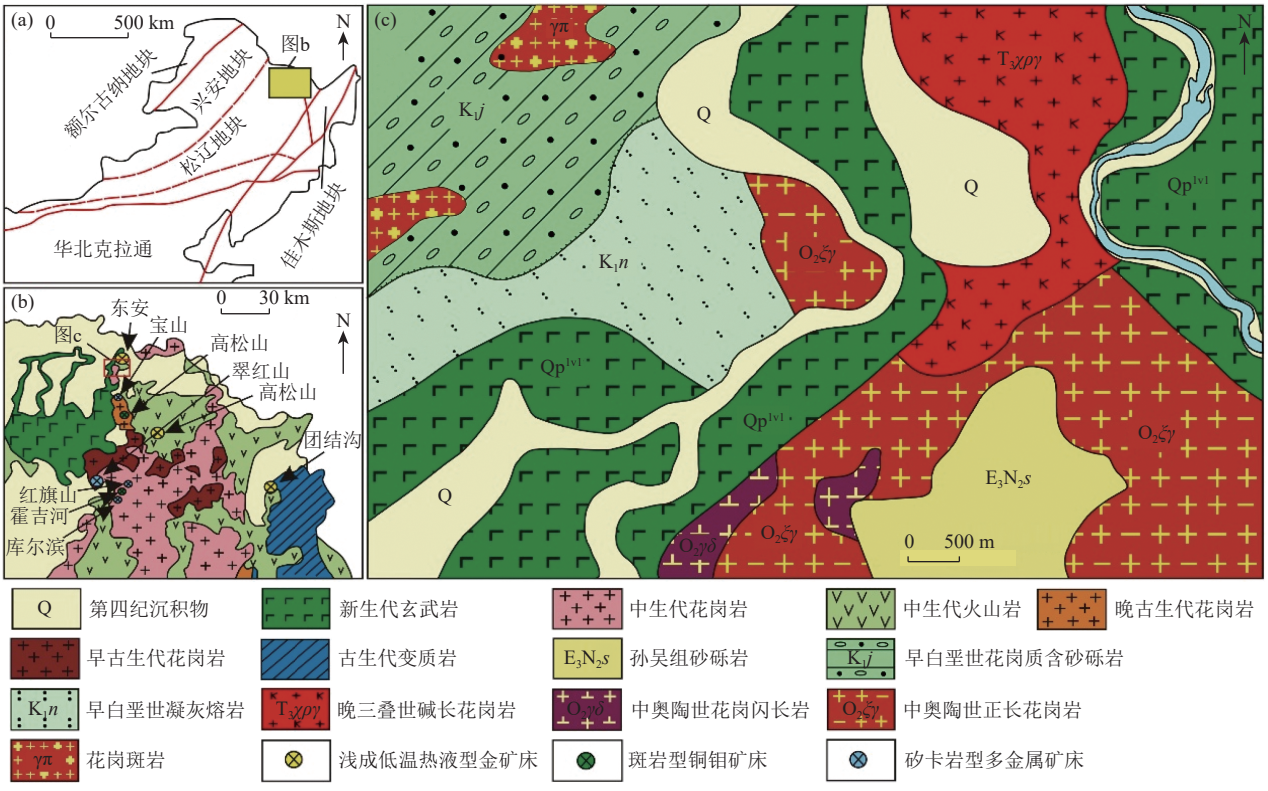


图 1　中国东北地区大地构造分区(a)、小兴安岭地区区域地质简图 (b)[27] 及研究区区域地质简图 (c)

Fig. 1　Tectonic zoning map of Northeast China(a), simplified regional geological map of the Lesser Xing'an Range(b) and simplified regional geological of the study area(c)

世似斑状正长花岗岩和晚三叠世碱长花岗岩。区内构造不发育(图 1c)。

2　土壤地球化学样品采集和测试方法

本次工作在黑龙江省格勒比勒河地区开展 1∶20 000 土壤地球化学测量工作,面积 16 km^2,采样网度为 200 m×20 m,测线方向为 EW 向。运用便携式 GPS 定位仪定点,对采样点及周围的地形地质特征进行详细记录。样品均采于无污染的 B 层或 B+C 层。样品在处理过程中均按照干燥—碎样—过筛(−4 ~ +20 目)—拌匀—称重(大于 300 g)—装袋—装箱的程序,并保证样品无相互污染,最终送交化验室进行测试分析。

本次共采集土壤样品 3 850 件,化验分析由原黑龙江省有色金属地质勘查研究总院测试中心承担,该化验室持有黑龙江省颁发的计量认证合格证书,符合中国地质调查局关于调查项目样品测试单位资质等级要求。分析元素有 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Bi、W、Mo 共 10 种元素。样品使用无污染的球磨机加工至 200 目,采用《区域地球化学样品分析方法 第 19 部分:金量测定 泡沫塑料富集−石墨炉原子吸收光谱法》(DZ/T 0279.19—2016)标准测定金元素(Au);采用《区域地球化学样品分析方法 第 11 部分:银硼锡量测定 交流电弧−发射光谱法》(DZ/T 0279.11—2016)标准测定银元素(Ag);采用《区域地球化学样品分析方法 第 13 部分:砷、锑和铋量测定氢化物发生−原子荧光光谱法》(DZ/T 0279.13—2016)标准测定 As、Sb;采用《硅酸盐岩石化学分析方法 第 30 部分:44 个元素的测定》(GB/T 14506.30—2010)标准测定 Cu、Pb、Zn、Bi、W、Mo 6 种元素。

3　化探数据的挖掘

3.1　地球化学数据特征及异常圈定

对格勒比勒河地区土壤地球化学数据进行统计(表 1),原始数据的各元素标准差(S_1)和变化系数(C_{V1})均大于 1,平均值($\overline{X}_1$)高于中国东部地区丰度值[38] 的元素有 Au、As、Cu、Pb、Zn,说明上述元素具有富集成矿的可能。

表 1　格勒比勒河地区土壤地球化学数据统计

Table 1　Statistics of soil geochemical data in the Gelebile River area

数据源	参数	Au	Cu	Ag	W	As	Mo	Pb	Zn	Sb	Bi
原始数据	算术平均值($\overline{X}_1$)	2.30	18.55	0.20	2.24	12.13	0.42	25.86	122.79	0.67	0.44
	标准差(S_1)	25.89	5.73	0.13	0.51	14.98	3.50	5.90	49.57	0.27	0.17
	变化系数(C_{V1})	11.26	0.31	0.64	0.23	1.24	8.33	0.23	0.40	0.40	0.39
	中国东部地区丰度[38]	0.8	17.0	0.056	0.8	2.8	0.6	18.0	63.0	0.22	0.16
原始数据迭代后	算术平均值($\overline{X}_2$)	0.87	17.65	0.17	2.18	9.68	1.57	25.58	114.71	0.62	0.41
	标准差(S_2)	0.56	3.78	0.07	0.29	2.54	0.51	4.95	28.67	0.12	0.08
	变化系数(C_{V2})	0.64	0.21	0.42	0.13	0.26	0.50	0. 19	0.25	0.19	0.19

注:Au含量单位为10^{-9},其余元素为10^{-6}。

为进一步明确 10 种元素中有哪些元素能够富集成矿,笔者对原始数据进行二次处理,运用“平均值±2 倍标准差”来循环剔除原始数据中各元素的特高值和特低值,使各元素的含量值服从正态分布;经迭代后,求得各元素的算术平均值、标准差和变化系数(表 1)。由于原始数据变化系数(C_{V1})和原始数据迭代后的变化系数(C_{V2})能反映两组数据集的离散程度,而 C_{V1}/C_{V2} 的比值则反映了拟合处理时对特高值、特低值的削平程度[6,20],因此,本文运用 C_{V1} 和 C_{V1}/C_{V2} 制作变化系数解释图(图 2),对各元素的成矿潜力进行评价。从图 2 中可以看出,Au 和 Mo 的高强数据多,分异程度大,成矿潜力大;而其他元素的高强数据少,分异程度较弱,成矿潜力较小。

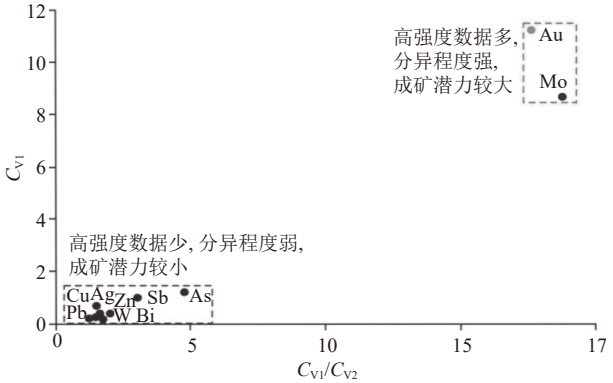


图 2　C_{V1} 和 C_{V1}/C_{V2} 变化系数解释

Fig. 2　Interpretation diagram of C_{V1} and C_{V1}/C_{V2} variation coefficients

综上所述, Au 和 Mo 在土壤中的次生富集能力和富集强度远高于其他元素, 研究区具备寻找 Au 和 Mo 的找矿前景。

在传统的矿产勘查过程中, 化探数据异常信息的提取主要是确定元素的异常下限值, 并根据异常下限值来圈定异常区。异常下限的确定常采用衬度系数法[7,39-40]、小波分析原理[41]、“平均值+2 倍标准差”[42] 等方法。本文采用原始数据经迭代后的“平均值+2 倍标准差”来确定 Au 的异常下限值, 求得 Au 异常下限值为 1.99×10^{-9}, 以该值为标准圈定 Au 异常。结果(图 3)显示 Au 异常分布范围广泛且较为散乱, 致矿异常与非致矿异常识别困难, 这将显著降低找矿靶区圈定的准确性, 进而影响后续勘查工作的部署与成效。

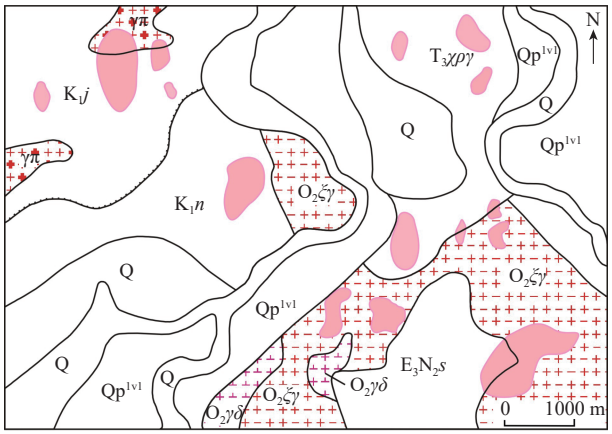


图 3　常规方法圈定 Au 异常

Fig. 3　Au element anomaly map delineated by conventional methods

3.2　构建异常信息识别与提取的思想

自然界中, 金(Au)元素主要以自然金(单质态)形式赋存, 其粒度通常处于亚微米至纳米级, 这种高度稳定的物理化学性质导致其在自然表生环境下难以发生显著的化学离解形成离子态, 进而在土壤介质中呈现出强烈的空间分布不均一性[4-5]。金矿床的形成依赖于分散金经历活化、迁移及最终富集的地质过程。固态条件下的热扩散作用受限于温度变化范围, 无法独立驱动金的有效富集成矿; 气态迁移虽可局部富集金, 但不足以形成具经济意义的矿床, 因此, 热液活动是驱动金元素完成活化、迁移并富集形成工业矿床的关键机制。值得注意的是, 在热液成矿过程中, 其他金属元素(如 Cu, Pb, Zn, As, Sb 等)也普遍经历类似的活化—迁移—富集序列, 这导致金在成矿过程中常与特定元素组合, 表现出显著的地球化学相关性。然而, 相较于金元素极强的局部富集与贫化特征(即高度不均匀性), 这些伴生元素的分布往往表现出相对更好的均一性。

回归分析作为一种核心统计方法, 能够揭示测试数据中变量间潜在的统计关联性, 即便这些关系存在不确定性。该方法的核心应用在于: 基于一个或多个自变量(预测变量)的取值, 建立模型以预测因变量(响应变量)的取值; 在共同影响因变量的多个自变量中量化其相对重要性(例如, 通过显著性检验、标准化系数或解释方差贡献), 并辨识它们与因变量之间存在的函数关系形式(如线性或非线性)及的交互效应[19]。为此, 本文运用回归分析方法挖掘格勒比勒河地区 Au 与其他元素的相关关系, 并构建 Au 与其他相关元素的回归模拟模型, 利用该模型计算出 Au 的回归预测值, 实现对 Au 潜在信息的提取, 并潜在进一步圈定找矿靶区, 提高找矿概率。

3.3　致矿异常信息的识别与提取

格勒比勒河地区土壤地球化学测量数据中, Au 与其他相关元素的回归模拟模型数据建模方法为: 对原始数据进行奇异值处理, 将处理后的数据运用多元回归方法分别构建全样本预测模型和异常样本预测模型。

3.3.1　模型 1: 全样本预测模型 (AuQ)

以格勒比勒河地区采集的 3 850 件土壤地球化学样品为样本, 将每个样本分析的 10 种元素含量作为数据集, 建立如式(1)所示的 Au 与其他 9 种元素的多元回归预测模型, 式中元素符号代表元素含量。各参数详见表 2。

$$\begin{aligned}AuQ = &-4.365-0.25Cu+0.11Ag-0.23W+\\&0.12As+0.61Mo+0.86Pb+0.79Zn-\\&0.37Sb+0.32Bi。\end{aligned}\quad(1)$$

表 2　模型 AuQ 回归建模参数统计

Table 2　Statistical of regression modeling parameters for the AuQ model

项目	常数	Cu	Ag	W	As	Mo	Pb	Zn	Sb	Bi
系数	−4.365	−0.25	0.11	−0.23	0.12	0.61	0.86	0.79	−0.37	0.32
显著性	0.412	0.83	0.71	0.92	0.76	0.84	0.46	0.87	0.37	0.79

根据回归建模求得 Au 的理论值(AuQ)数据集，采用模型 AuQ 数据集的“平均值+2 倍标准差”计算全样本预测模型 Au 异常下限值为 4.27×10^{-9}，最终以 4.0×10^{-9} 为异常下限确定值圈定全样本 Au 预测模型异常，共圈定异常 6 处(图 4)。

3.3.2　模型 2：异常样本预测模型（AuY）

为进一步有效提取 Au 致矿异常信息，更精准地圈定找矿靶区，对化探数据进行二次建模。为消除由 Au 分布状态引起的误差或低缓的异常，选取 3 850 件样品中 Au 含量大于异常下限值 1.99×10^{-9} 的 527 件样品数据为研究对象，构建 Au 与其他 9 种元素的回归模型(式(2))，式中元素符号代表元素含量。模型及各参数见表 3。

$$\begin{aligned}\mathrm{AuY} = &-1.247-0.08\mathrm{Cu}+0.29\mathrm{Ag}-0.47\mathrm{W}+\\&0.64\mathrm{As}+0.85\mathrm{Mo}-0.56\mathrm{Pb}-0.13\mathrm{Zn}-\\&0.12\mathrm{Sb}+0.18\mathrm{Bi}。\end{aligned}\qquad(2)$$

根据回归建模求得 Au 的理论值(AuY)数据集，采用模型 AuY 数据集的“平均值+2 倍标准差”计算异常样本预测模型 Au 异常下限值为 32.68×10^{-9}，最终以 32.0×10^{-9} 为异常下限确定值圈定异常样本 Au 预测模型异常，共圈定异常靶区 2 处(图 5)。

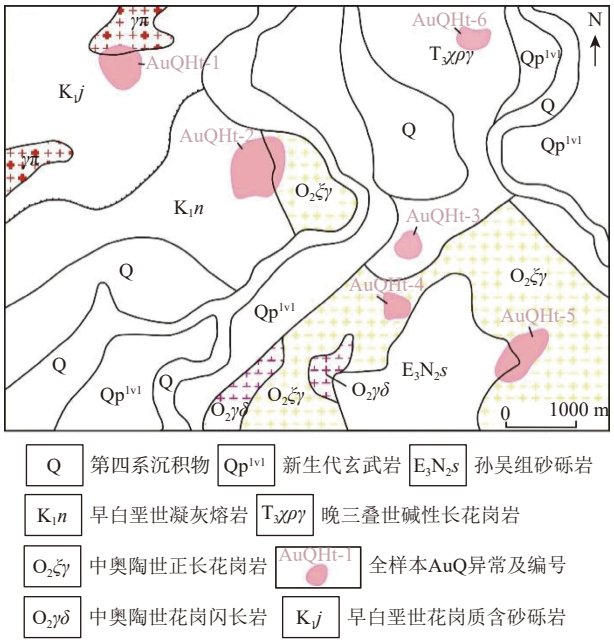


图 4　全样本 AuQ 异常

Fig. 4　AuQ anomaly map of the full sample

表 3　模型 AuY 回归建模参数统计

Table 3　Statistical table of regression modeling parameters for the AuY model

项目	常数	Cu	Ag	W	As	Mo	Pb	Zn	Sb	Bi
系数	−1.247	−0.08	0.29	−0.47	0.64	0.85	−0.56	−0.13	−0.12	0.18
显著性	0.728	0.58	0.34	0.84	0.67	0.91	0.35	0.72	0.43	0.93

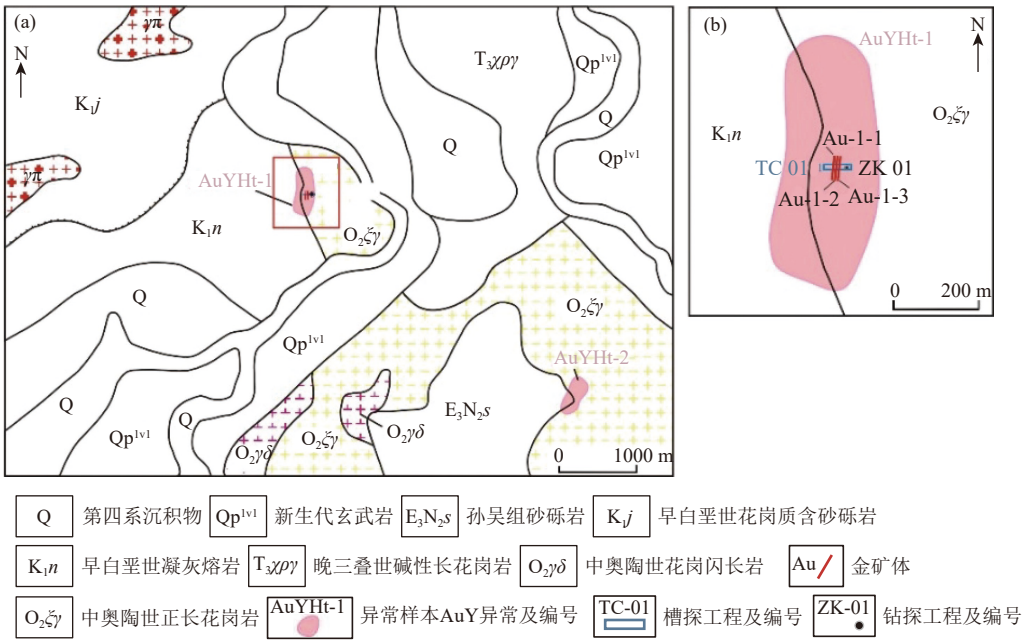


图 5　异常样本 AuY 异常

Fig. 5　AuY anomaly map of abnormal samples

4　效果评价及找矿应用

4.1　效果评价

对比传统常规方法与多元回归分析方法在圈定化探异常方面的有效性, 发现运用常规“平均值+2 倍标准差”方法进行化探数据处理, 按照 Au 异常下限值 1.99×10^{-9} 圈定的异常数量多且分布散乱, 而采用多元回归分析方法在工作区内共圈定出 2 处异常, 消除了常规方法圈定的一些非致矿异常的干扰。由图 5 可见, AuYHt-1 异常位于工作区中部, 面积约 0.20 km^2, 呈椭圆状, 走向近 SN, 异常位于白垩系下统宁远村组(K_1n)凝灰熔岩和中奥陶世正长花岗岩($O_2\xi\gamma$)中, 特别是在酸性凝灰岩与正长花岗岩的接触部位, 火山活动强烈, 成矿地质条件极为有利, 推断该异常为矿致异常。

通过对 AuYHt-1 异常进行槽探、钻探工程验证, 发现 1 条金矿带。地表浅部由 TC01 号槽探工程控制, 共揭露出 3 条金矿体, 矿体总体产状为 90°∠45°~62°。矿体深部由 ZK01 号钻孔控制, 经钻探工程验证, 发现地表 3 条矿体向深部汇聚成一条矿体(图 6)。金矿体最高品位 1.23 g/t, 平均品位 0.7 g/t, 矿脉走向长度 75 m, 控制倾斜延伸 30 m。矿石类型为石英细脉型, 矿石金属矿物为黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿, 非金属矿物为石英、方解石等。矿石结构以交代结构为主, 其次为粒状结构, 矿石构造主要为细脉−网脉状, 矿化蚀变主要为硅化、绿泥石化、碳酸盐化及黄铁矿化、辉钼矿化、黄铜矿化等金属硫化物矿化(图 7)。

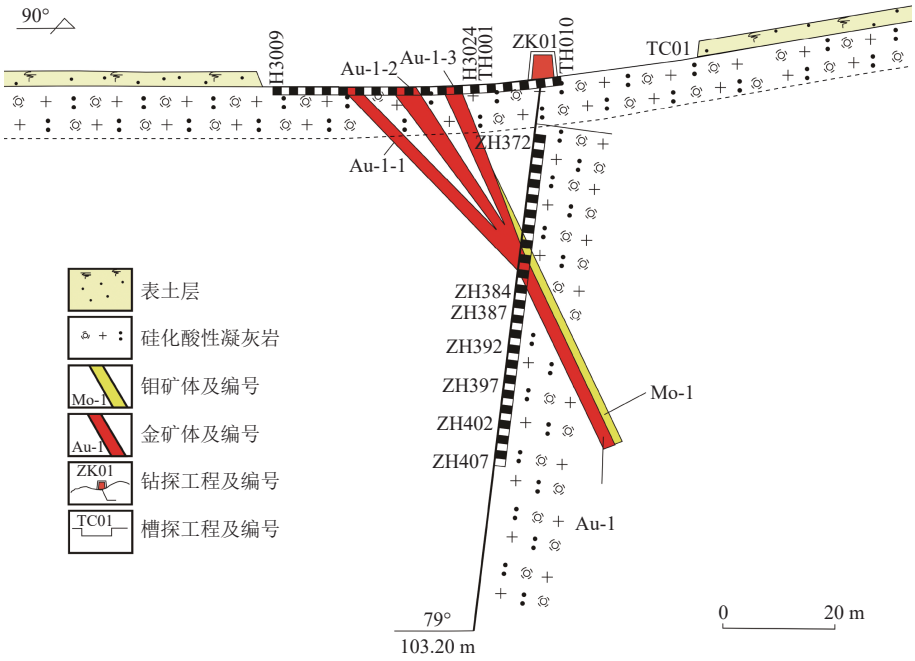


图 6　格勒比勒河地区 124 线地质剖面

Fig. 6　Geological profile of No.124 exploration line in the Gelebile River area

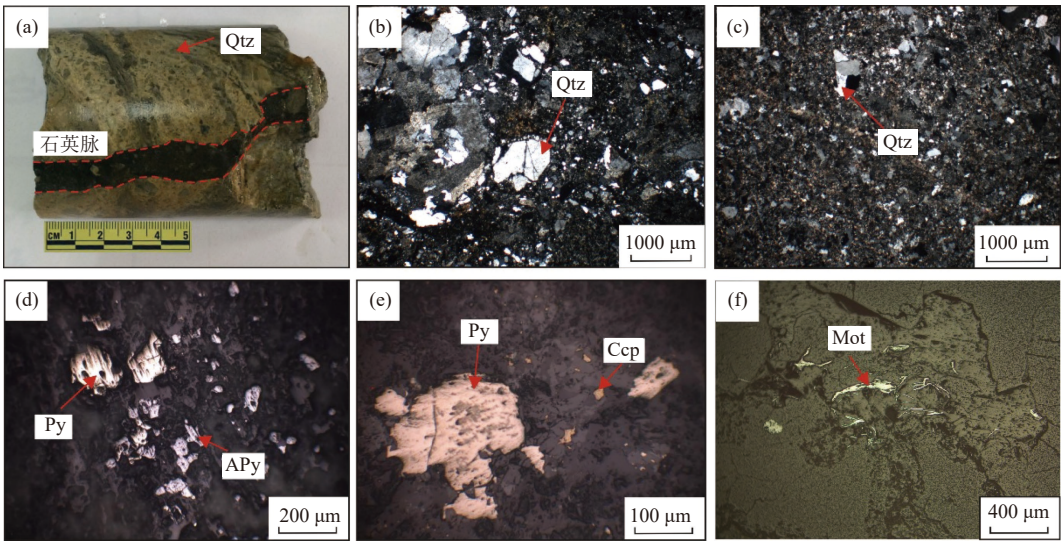
此外, 在 ZK01 钻孔 22.6~24.3 m 深处发现了 1 条钼矿体(编号 Mo-1), 厚 1.7 m, Mo 品位 0.033%~0.078%, 这也验证了运用 C_{V1} 和 C_{V1}/C_{V2} 制作变化系数解释图对各元素成矿潜力评价是有效的。

上述研究表明, 以“地质大数据驱动”的思维对 Au 化探数据进行深度挖掘, 可以有效地避免在采样和分析等过程中造成异常信息的丢失, 极大地提高了找矿概率。

4.2　找矿靶区预测

精确圈定找矿靶区是矿产勘查成功的关键环节, 因此, 成矿预测与靶区优选构成勘查工作的核心任务。无论是基于典型矿床模型的传统理论预测, 还是依托地质大数据挖掘的现代预测方法, 其本质均遵循“从已知地质体(模型)外推预测未知目标”的基本原理。

以格勒比勒河地区为例, 目前仅对 AuYHt-1 号异常实施了工程查证, 发现了一条金矿带。与其毗邻、位于工作区东南部的 AuYHt-2 号异常(面积约 0.15 km^2, 呈 NNE 走向椭圆状)尚未进行验证, 该异常同样赋存于奥陶纪正长花岗岩($O_2\xi\gamma$)内, 其地质背景与已证矿的 AuYHt-1 号异常高度相似。鉴于 AuYHt-1 号异常的查证成果, 类比分析表明 AuYHt-2



Qtz—石英; Py—黄铁矿; Apy—毒砂; Ccp—黄铜矿; Mot—辉钼矿

图 7　矿化蚀变标本及显微镜下特征

Fig. 7　Characteristics of mineralized alteration hand specimens and under the microscope

号异常同样具有显著的找矿潜力。基于 AuYHt-2 异常与已证矿的 AuYHt-1 异常地质背景高度相似，下一步将对该异常开展大比例尺物探工作，精准刻画 NNE 向控矿构造与低阻异常体空间展布；在物化探异常吻合部位布置槽探、钻探工作，控制地表矿化和验证深部矿体连续性及资源潜力，优化勘查模型，实现快速靶区评价。

5　结论

本研究以小兴安岭东南部格勒比勒河地区为例，通过系统分析土壤地球化学数据，成功识别和提取了 Au 致矿地球化学异常信息，得出以下结论：

1）基于地球化学数据的统计分析，利用 C_{V1} 和 C_{V1}/C_{V2} 变化系数解释图，对区内 10 种元素进行评价。结果表明，Au 和 Mo 元素具有显著的成矿潜力，其高强数据多、分异程度大，而其他元素成矿潜力较弱。这一结论经工程验证得到证实，在区内发现了金矿体和钼矿体，体现了元素地球化学特征与成矿能力的直接关联。

2）通过构建 Au 元素的多元回归模型（包括全样本预测模型 AuQ 和异常样本预测模型 AuY），建立了基于地学大数据“数据驱动”的找矿预测方法，成功圈定了 2 处找矿靶区（AuYHt-1 和 AuYHt-2）。对 AuYHt-1 靶区进行了槽探和钻探验证，揭露出金矿体和钼矿体，证明该方法极大提高了找矿效率，解决了小范围区域内矿床（点）产出位置不明情况下无法开展定量预测的难题。

3）目前仅对 1 处靶区（AuYHt-1）进行了验证，下一步建议对 AuYHt-2 异常开展大比例尺地球物理探测和工程验证，以全面评价区域找矿潜力。同时，可进一步优化模型参数，拓展方法在其他矿种和地区的应用。

参考文献（References）：

[1] Carranza E J M. Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS [J]. Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry, 2009, 11: VII–VIII.

[2] Grunsky E C. The interpretation of geochemical survey data[J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2010, 10(1): 27–74.

[3] 黎彤, 袁怀雨, 吴胜昔, 等. 中国大陆壳体的区域元素丰度 [J]. 大地构造与成矿学, 1999, 23(2): 101–107.
Li T, Yuan H Y, Wu S X, et al. Regional element abundances of continental crustobodies in China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1999, 23(2): 101–107.

[4] 李景春. 金在热液流体中存在形式的讨论: “纳米效应”在成矿理论中的应用 [J]. 贵金属地质, 1995, 4(4): 307–311.
Li J C. A discussion on the being formal of gold in hydrothermal fluid[J]. Journal of Precious Metallic Geology, 1995, 4(4): 307–311.

[5] 任文秀, 罗建民, 孙柏年, 等. 化探数据挖掘在金矿找矿及靶区优选中的应用—以甘肃玉石山地区为例 [J]. 岩石学报, 2018, 34(11): 3225–3234.
Ren W X, Luo J M, Sun B N, et al. Application of geochemical data in gold prospecting and target selecting: Taking the Yushishan area in Gansu Province as a case[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(11): 3225–3234.

[6] 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 the Xiarihamu super-

large Cu-Ni deposit, Qinghai Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(3): 429−437.

[7] 袁兆宪, 侯振广, 任志栋, 等. 金属元素形成原生晕能力定量评价——以青海省扎家同哪金矿为例 [J]. 物探与化探, 2021, 45(2): 292−300.
Yuan Z X, Hou Z G, Ren Z D, et al. Quantitative evaluation of the ability of elements in forming primary halos: A case study of the Zhajiatongna gold deposit, Qinghai Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(2): 292−300.

[8] Jimenez-Espinosa R, Sousa A J, Chica-Olmo M. Identification of geochemical anomalies using principal component analysis and factorial Kriging analysis[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1993, 46(3): 245−256.

[9] Reimann C, Filzmoser P, Garrett R G. Factor analysis applied to regional geochemical data: Problems and possibilities[J]. Applied Geochemistry, 2002, 17(3): 185−206.

[10] Xiao F, Chen J G. Fractal projection pursuit classification model applied to geochemical survey data[J]. Computers & Geosciences, 2012, 45: 75−81.

[11] Goovaerts P. Factorial Kriging analysis: A useful tool for exploring the structure of multivariate spatial soil information[J]. Journal of Soil Science, 1992, 43(4): 597−619.

[12] Li C J, Lu Z M, Ma T H, et al. A simple Kriging method incorporating multiscale measurements in geochemical survey[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2009, 101(2): 147−154.

[13] Cheng Q M, Xu Y G, Grunsky E. Integrated spatial and spectrum method for geochemical anomaly separation[J]. Natural Resources Research, 2000, 9(1): 43−52.

[14] Xiao F, Chen J G, Zhang Z Y, et al. Singularity mapping and spatially weighted principal component analysis to identify geochemical anomalies associated with Ag and Pb-Zn polymetallic mineralization in Northwest Zhejiang, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, 122: 90−100.

[15] Shahi H, Ghavami R, Kamkar Rouhani A, et al. Application of Fourier and wavelet approaches for identification of geochemical anomalies[J]. Journal of African Earth Sciences, 2015, 106: 118−128.

[16] 李晓晖, 袁峰, 周涛发, 等. 新疆塔尔巴哈台—萨吾尔地区多重分形地球化学异常提取及成矿预测 [J]. 岩石学报, 2015, 31(2): 426-434.
Li X H, Yuan F, Zhou T F , et al. Mineral prospectivity mapping and geochemical anomalies identification based on multifractal modeling in the Taerbahatai-Sawuer area, Xinjiang. [J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(2): 426-434.

[17] 辛存林, 董凯, 孟健, 等. 新疆和静熬如勒更地区矿化元素组合异常提取及评价 [J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2014, 50(4): 447−454.
Xin C L, Dong K, Meng J, et al. Extraction and assessment of geochemical element composite anomalies of Aorulegeng Area, in Hejing County, Xinjiang[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2014, 50(4): 447−454.

[18] Pawlowsky-Glahn V, Buccianti A. Compositional Date Analysis: Theory and Applications[M]. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.

[19] 成秋明, 赵鹏大, 陈建国, 等. 奇异性理论在个旧锡铜矿产资源预测中的应用: 成矿弱信息提取和复合信息分解 [J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2009, 34(2): 232−242.
Cheng Q M, Zhao P D, Chen J G, et al. Application of singularity theory in prediction of tin and copper mineral deposits in Gejiu district, Yunnan, China: Weak information extraction and mixing information decomposition[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2009, 34(2): 232−242.

[20] 刘珏玉, 孙成才. 区域化探中评价元素离散程度及找矿意义的方法讨论 [J]. 物探化探计算技术, 1990, 12(4): 285−294.
Liu J Y, Sun C C. Method discussing on evaluating element discrete extend and the significance for finding mineral in region geochemical exploration[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1990, 12(4): 285−294.

[21] Hong D W, Zhang J S, Wang T, et al. Continental crustal growth and the supercontinental cycle: Evidence from the Central Asian Orogenic Belt[J]. Journal of Asian earth sciences, 2004, 23(5): 799−813.

[22] Jahn B M. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2004, 226(1): 73−100.

[23] Kovalenko V I, Yarmolyuk V V, Kovach V P, et al. Isotope provinces, mechanisms of generation and sources of the continental crust in the Central Asian Mobile Belt: Geological and isotopic evidence[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 23(5): 605−627.

[24] Jahn B M, Wu F, Chen B, et al. Massive granitoid generation in Central Asia: Ndisotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic[J]. Episodes, 2000, 23(2): 82−92.

[25] Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, et al. Highly fractionated I-type granites in NE China (II): Isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic[J]. Lithos, 2003, 67(3/4): 191−204.

[26] Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Journal of the Geological Society, 2007, 164(1): 31−47.

[27] 赵忠海, 程斌彬, 尹业长, 等. 小兴安岭东南部伊东林场金矿床成因探讨: 来自流体包裹体和 H-O-S-Pb 同位素的证据 [J]. 大地构造与成矿学, 2024, 48(5): 1000−1016.
Zhao Z H, Cheng B B, Yin Y C, et al. Ore genesis of the Yidonglinchang gold deposit in southeastern Lesser Hinggan Range: Constraints from fluid inclusions and H-O-S-Pb isotopes[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2024, 48(5): 1000−1016.

[28] 许文良, 王枫, 孟恩, 等. 黑龙江省东部古生代—早中生代的构造演化: 火成岩组合与碎屑锆石 U-Pb 年代学证据 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(5): 1378-1389.
Xu W L , Wang F, Meng E, et al. Paleozoic-Early Mesozoic tectonic evolution in the eastern Heilongjiang Province, NE China: Evidence from igneous rock association and U-Pb geochronology of detrital zircons[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(5): 1378-1389.

[29] Hao B W, Deng J , Bagas L, et al. The Gaosongshan epithermal gold deposit in the Lesser Hinggan Range of the Heilongjiang Province,

NE China: Implications for Early Cretaceous mineralization[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 73: 179-197.

[30] Zhai D G, Liu J J, Ripley E M, et al. Geochronological and He-Ar-S isotopic constraints on the origin of the Sandaowanzi gold-telluride deposit, Northeastern China[J]. Lithos, 2015, 212: 338−352.

[31] Sun J G, Han S J, Zhang Y, et al. Diagenesis and metallogenetic mechanisms of the Tuanjiegou 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.

[32] Zhang Z C, Mao J W, Wang Y B, et al. Geochemistry and geochronology of the volcanic rocks associated with the Dong'an adularia-sericite epithermal gold deposit, Lesser Hinggan Range, Heilongjiang province, NE China: Constraints on the metallogenesis[J]. Ore Geology Reviews, 2010, 37(3/4): 158-174.

[33] Zhang Y M, Gu X X, Liu R P , et al. Geology, geochronology and geochemistry of the Gaogangshan Mo deposit: A newly discovered Permo-Triassic collision-type Mo mineralization in the Lesser Xing'an Range, NE China[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 81: 672–688.

[34] 谭红艳, 汪道东, 吕骏超, 等. 小兴安岭霍吉河钼矿床成岩成矿年代学及其地质意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 2013, 32(5): 733-750.
Tan H Y, Wang D D , Lyu J C, et al. Petrogenesis and mineralization chronology study on the Huojihe molybdenum deposit Xiao Hinggan Mountains and its geological implication [J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2013, 32(5): 733-750.

[35] Hu X L, Ding Z J, He M C, et al. A porphyry-skarn metallogenic system in the Lesser Xing'an Range, NE China: Implications from U–Pb and Re–Os geochronology and Sr–Nd–Hf isotopes of the Luming Mo and Xulaojiugou Pb–Zn deposits[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 90: 88−100.

[36] 刘翠, 邓晋福, 罗照华, 等. 岩基后成矿作用: 来自小兴安岭鹿鸣超大型钼矿的证据 [J]. 岩石学报, 2014, 30(11): 3400−3418.
Liu C, Deng J F, Luo Z H, et al. Post-batholith metallogenesis: Evidence from Luming super large molybdenite deposit in Lesser Xing'an Range[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(11): 3400−3418.

[37] 张琳琳, 刘翠, 周肃, 等. 小兴安岭霍吉河钼矿区含矿花岗岩类特征及成矿年龄 [J]. 岩石学报, 2014, 30(11): 3419−3431.
Zhang L L, Liu C, Zhou S, et al. Characteristics of ore-bearing granites and ore-forming age of the Huojihe molybdenum deposit in Lesser Xing'an Range[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(11): 3419−3431.

[38] 鄢明才, 迟清华, 顾铁新, 等. 中国东部地壳元素丰度与岩石平均化学组成研究 [J]. 物探与化探, 1997,21(6): 451−459.
Yan M C, Chi Q H, Gu T X, et al. Chemical compositions of continental crust and rocks in eastern china[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1997, 21(6): 451−459.

[39] KÜRZL H. Exploratory data analysis: Recent advances for the interpretation of geochemical data[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1988, 30(s1/3): 309−322.

[40] KÜRZL H. Data analysis and geochemical mapping for the regional stream sediment survey of Austria[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1989, 32(1/2/3): 349−351.

[41] Schumaker L L, Webb G. Recent advance in wavelet analysis[M]. Boston: Academic Press,1994.

[42] Grunsky E C. Recognition of alteration in volcanic rocks using statistical analysis of lithogeochemical data[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1986, 25(1/2): 157−183.

Identification and extraction of gold mineralization-related geochemical anomalies in the Gelebile River area, southeastern Lesser Xing'an Range, China

FU Li-Chun [1,2], SONG Qing-Yuan [1,2], LI Bo [1,2], YUAN He [1,2], XIE Tian-Kun [1,2], WANG Tao-Yuan [1,2], LI Zeng-Tao [1,2], ZHOU Long [1,2], LI Xue-Feng [3], ZHU Xian-Nan [1,2], WANG Jia-Hui [1,2], LI Yi-Cheng [1,2]

(1. *Harbin Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological Survey, Harbin* 150086, *China*; 2. *Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Ministry of Natural Resources, Harbin* 150086, *China*; 3. *Natural Resources Survey Institute of Heilongjiang Province, Harbin* 150036, *China*)

Abstract: In nature, gold typically occurs as extremely fine-grained native gold in an extremely uneven distribution. As a result, some gold deposits (ore occurrences) lack corresponding gold geochemical anomalies, posing significant challenges to geological prospecting based on geochemical anomalies. Hence, under the guidance of the geoscience big data-driven approach, this study identified the correlations among data to address geological prospecting challenges. Based on the soil geochemical data of the Gelebile River area in northeastern Heilongjiang Province, 10 elements in the area were statistically analyzed using the C_{V1} and C_{V1}/C_{V2} interpretation diagrams (C_V: coefficient of variation), revealing high gold and molybdenum mineralization potential. By constructing a regression model for gold, this study delineated two prospecting targets in the Gelebile River area. The No. 1 prospecting target was verified through trenching and drilling engineering, exposing one gold and one molybdenum ore body. This study demonstrates that the prospecting and prediction model established based on multivariate regression analysis can significantly improve prospecting efficiency. Moreover, it offers an effective solution to quantitative prediction of prospecting targets in small-scale areas where the precise locations of mineral deposits (or occurrences) remain unknown.

Key words: soil geochemistry; data mining; geoscience big data; gold deposit; prospecting and prediction

（本文编辑: 蒋实, 沈效群）