

地电化学集成技术在湖北枣园矿区寻找隐伏金矿的应用研究

任选衡¹, 文美兰^{1*}, 刘攀峰¹, 丁乐乐², 蒋羽雄¹, 李建亭¹, 张晓涵¹, 林熙桐¹

1. 桂林理工大学, 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西 桂林 541006;

2. 湖北省地质局第八地质大队, 湖北 襄阳 441000



摘要:湖北省随县枣园金矿床地处新城—黄陂断裂带西南侧, 隶属桐柏—大别金—钼多金属成矿带东段, 属于典型的构造蚀变岩型金矿。为响应国家新一轮找矿突破战略行动计划, 针对研究区特有的地球化学景观, 在综合分析前人研究成果的基础上, 遵循“由已知到未知”的研究思路, 运用地电化学集成技术在枣园矿区开展隐伏金矿找矿预测研究。结果显示: 4#剖面矿体上方出现显著的Au、Ag、Mo和Bi等元素异常, 土壤离子电导率和热释汞异常亦有效指示隐伏矿体及构造, 验证了地电化学集成技术在该地区寻找隐伏金矿是可行的。在此基础上, 在矿区深部未知区开展隐伏金矿预测研究, 共圈定1个Ⅰ类靶区、1个Ⅱ类靶区和1个Ⅲ类靶区。

关键词:地电化学集成技术; 地电化学特征; 找矿预测; 枣园金矿床; 湖北

中图分类号: P632 文献标志码: A 文章编号: 1005-2518(2026)03-0597-13 DOI: 10.11872/j.issn.1005-2518.2026.03.016

引用格式: 任选衡, 文美兰, 刘攀峰, 等. 地电化学集成技术在湖北枣园矿区寻找隐伏金矿的应用研究[J]. 黄金科学技术, 2026, 34(3): 597-609. REN Xuanheng, WEN Meilan, LIU Panfeng, et al. Application of Geoelectrochemical Integrated Technology in Prospecting for Concealed Gold Deposits in the Zaoyuan Mining Area, Hubei Province[J]. Gold Science and Technology, 2026, 34(3): 597-609.

随着地表金矿资源日趋匮乏、勘查难度持续加大, 开展隐伏金矿勘查既是增加资源储量的关键途径, 也是实现资源可持续利用的必然选择(朱日祥等, 2015; 陈喜峰, 2024)。湖北省枣园金矿位于桐柏—大别金—钼多金属成矿带东段, 曾以黑龙潭和卸甲沟等典型构造蚀变岩型金矿成为重要黄金产地(陈国荣等, 2023)。随着浅部资源开采日趋枯竭, 当前亟需向深部及外围拓展找矿空间。

自20世纪80年代以来, 该矿区已陆续开展了重砂扫面、1:5万水系沉积物测量和矿产普查等一系列地质与矿产勘查工作, 显示本区具有良好的找

矿前景(余瑾等, 2023; 吴松等, 2024)。然而, 研究区植被茂密、第四系松散覆盖层厚度大, 加之水系发育、表生环境干扰强烈, 传统地球化学方法在浅覆盖区易受背景干扰, 对深部隐伏矿的异常识别能力弱、探测深度有限, 难以有效区分矿致异常与非矿致异常, 无法实现盲矿的精准定位(贺帅, 2022)。为解决覆盖区深部隐伏金矿探测难、定位不准及传统方法适用性差的问题, 亟需采用新方法和新技术开展勘查研究, 为矿区深部找矿提供可行的技术方案。

地电化学法作为一种穿透性地球化学勘查技

收稿日期: 2025-12-29; 修订日期: 2026-02-03

基金项目: 广西自然科学基金项目“铀矿床地电化学成晕机理研究”(编号: 2025GXNSFAA069927)和广西科技计划项目(编号: 桂科LT2600640017)联合资助

作者简介: 任选衡(2000—), 男, 山西孝义人, 硕士研究生, 从事地质和地电化学勘查研究工作。E-mail: 1289743393@qq.com

*通信作者: 文美兰(1974—), 女, 广西桂林人, 教授, 从事地质、地球化学和地电化学勘查研究工作。E-mail: mlwen@glut.edu.cn

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

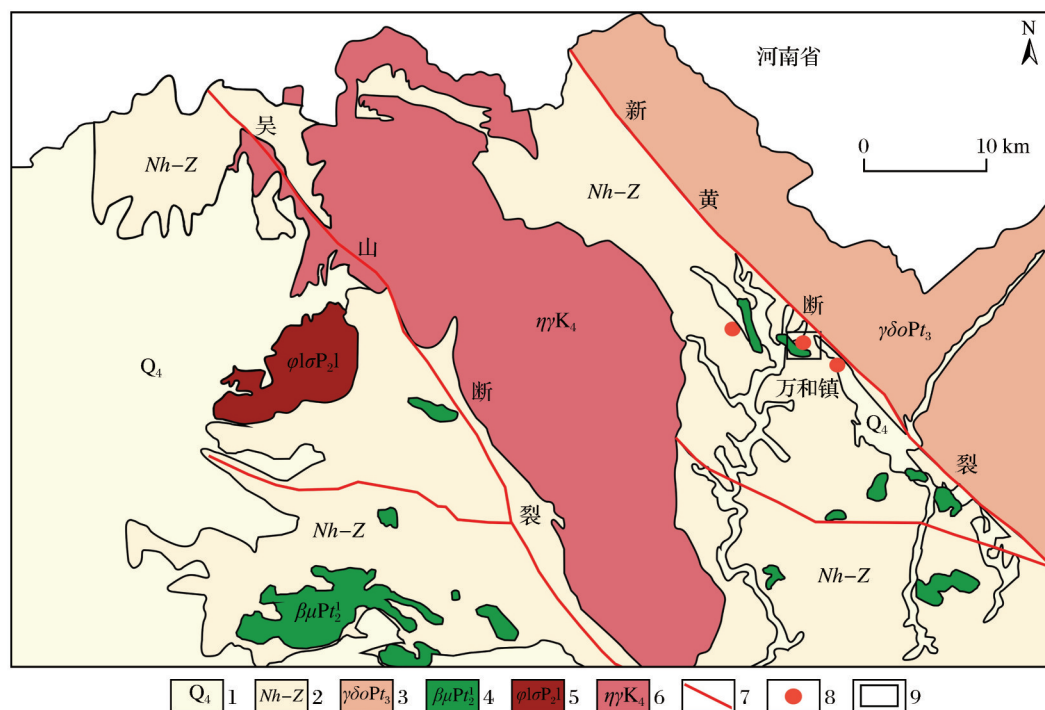
术,在多个隐伏金矿区已取得显著成效。该技术是集地电提取、土壤离子电导率及热释汞测量于一体的找矿方法(刘攀峰等,2016)。桂林理工大学罗先熔教授团队在广西金牙和四川烟依等多个矿区成功应用地电化学法,证实其对不同金矿类型的有效性(王振东等,2012;汤国栋,2021;张文博,2022)。因此,本文采用地电化学集成技术,在枣园金矿典型已知剖面开展找矿有效性试验,旨在建立地质—地电化学找矿标志与模型,指导深边部矿产找矿预测,为工程验证提供地球化学依据,也为同类金矿勘查提供技术范式。

1 成矿地质背景

枣园矿区隶属于湖北省随州市随县万和镇(图1),大地构造位置处于扬子板块与秦岭一大别造山带结合部的随枣走廊,地势总体北东高、南西低,东北部属桐柏山低山区,南西部为丘陵浅切割区(Niu et al, 2022)。

区内出露地层以中一晚元古界大狼山群变火

山碎屑岩、震旦系变基性火山熔岩和沉积岩,以及局部分布的寒武系炭硅质板岩为主;新黄断裂带南西侧断续出露白垩—第三系砂岩和砂砾岩;河流沟谷零星分布第四系黏土和亚黏土。区内断裂较发育,以NW向新黄断裂和吴山断裂为主。新黄断裂走向NW,倾向SW,倾角为 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$,构成一条重要的金、银、铅锌等多金属成矿带;吴山断裂同样走向NW,倾向SW,倾角为 $55^{\circ}\sim 70^{\circ}$,以发育宽达数十米的糜棱岩带为特征,沿断裂分布有金、银、铅锌、铜钼及萤石等多种矿床(点)(向祥辉等,2017)。矿区内岩浆活动强烈,发育晚元古代基性侵入岩一次火山岩和中生代重熔型花岗岩(如七尖峰岩体)。区内脉岩比较发育,种类较多,各种脉岩在不同地段发育程度不同,其中伟晶岩脉主要分布在七尖峰复合花岗岩体内;花斑岩脉主要分布在七尖峰复合岩体至新黄断裂之间的变质地层内;其他脉岩则分布在新黄断裂以南的变质地层中(胡起生等,2003)。此外,金矿化与碎裂岩带紧密共生,常见黄铁矿化、硅化、绿帘石化及绢云母化等蚀变(Cheng et al, 2012)。



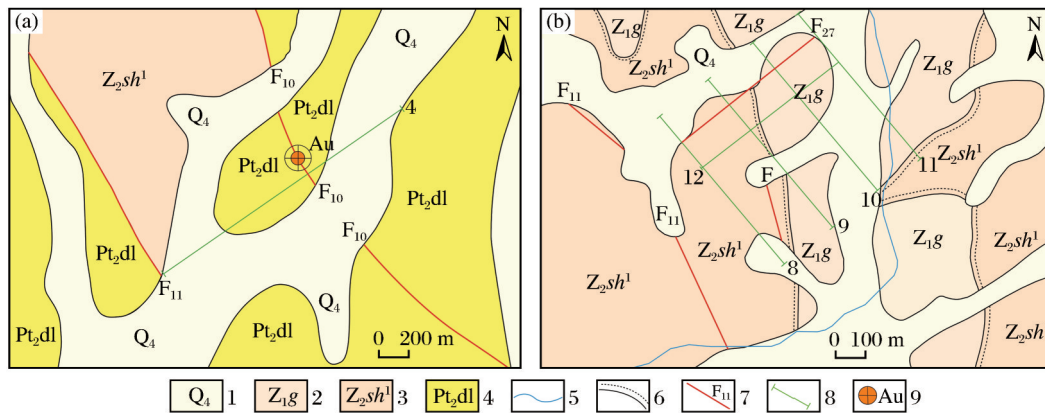
1. 第四系; 2. 变质地层区; 3. 新元古代花岗岩质片麻岩; 4. 南华纪变辉绿岩体; 5. 古生代大阜山基性—超基性岩体; 6. 中生代七尖峰复合花岗岩; 7. 断裂; 8. 金矿点; 9. 研究区

图1 矿区大地构造位置图(修改自 Niu et al, 2019)

Fig. 1 Tectonic location map of the ore district(modified after Niu et al, 2019)

研究区内主要出露上元古界震旦系下统过路湾组、上统尚家店组下段和第四系。过路湾组岩性以各类钠长片岩为主,常见绿色片岩与白云钠长片岩互层(图2)。尚家店组下段自上而下依次为含炭白云钠长片岩/石英片岩、变粗晶白云钠长片岩、石榴白云钠长片岩和白云石英片岩,其中夹有白云石大理岩透镜体。第四系为松散黏土和砂砾沉积。断裂以 F_{11} 和 F_{27} 为主。 F_{11} 断裂呈NW向,是导矿构

造,控制着金矿体,带内主要由蚀变碎裂岩和碎裂岩化糜棱岩组成。 F_{27} 断裂呈NE向,具多期活动特征,可见含黄铁矿和方铅矿的硫化物石英脉。区内岩浆岩出露较少。除第四系和白垩系之外,地层普遍经历区域变质作用和动力变质作用。围岩蚀变以硅化、绢云母化和黄铁矿化为主。其中,硅化和黄铁矿化与金、银矿化关系密切,矿化最富集部位见于强硅化的富硫化物石英脉中。



1. 第四系; 2. 上元古界下震旦统过路湾组钠长片岩; 3. 上元古界上震旦统尚家店组大理岩; 4. 中元古界大狼山群; 5. 河流; 6. 不整合接触线; 7. 断裂及编号; 8. 地电提取测线; 9. 金矿(化)点

图2 湖北枣园研究区地质简图

Fig. 2 Geological map of the Zaoyuan study area in Hubei

2 样品采集与分析

按照“已知到未知”的研究思路,在矿区内已有工程控制的4#剖面上开展地电化学集成技术找矿可行性及有效性试验研究,剖面全长390 m,按照20 m点距共布20个测点,点号为1~20[图2(a)]。在未知区内,按照100 m×20 m的勘查网度共布设地电提取测线4条,测线主体沿NW向构造走向布设,同时垂直构造走向布设控制测线,另平行 F_{27} 断裂布设地电提取测线1条,未知区与已知区同属同一构造—地层单元,地质背景、覆盖条件具有良好可比性,测线点距与已知区保持一致,共106个测点[图2(b)]。本研究采用桂林理工大学隐伏矿床研究所研发的低电压偶极地电提取装置进行采样,该装置具有低电压、小电流、便携及提取效果好等优点(刘攀峰等,2018)。

野外工作时严格遵循地电化学提取测量技术要求。首先利用手持GPS定位采样点,在每个测点

挖掘2个间距1 m、深度约为30 cm(见残积层土壤为准)的圆坑。采集土样后,分别于两坑内放置离子收集器的阳极和阴极,各注入500 mL提取液,充分搅拌后按取土顺序回填。持续供电48 h之后,取出阴阳极碳棒并拆下其上的聚氨酯泡塑,密封编号保存(赵欣怡等,2022)。

野外采集的聚氨酯泡塑样品晾晒后送至中国有色桂林矿产地质研究院测试中心。样品经湿法消解预处理后,采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)进行元素分析(唐瑞等,2021)。每批次50个样品中插入5件重复样以监控分析精密度,同步插入5件国家一级密码标准物质进行同步分析,以监控分析准确度和系统误差,测试结果显示各元素报出率为100%,密码标准物质合格率与重复样合格率均为100%,分析质量符合规范要求。土壤样品晾晒烘干,将样品过筛至100目,由桂林理工大学隐伏矿产研究所分别利用DDS-307型电导率仪和MilestoneDMA-80测汞仪进行分析测试。所有测试

仪器均经检定校准,仪器检出限、精密度和相对误差均符合国家地质试验测试规范要求,测试数据可靠、误差可控。其中,土壤离子电导率样品每批按10%比例抽检;土壤热释汞样品每批插入标样进行监控,并按10%比例抽检,分别统计对数偏差,结果均未出现超差。

3 方法找矿可行性试验研究

3.1 4#线剖面地质特征

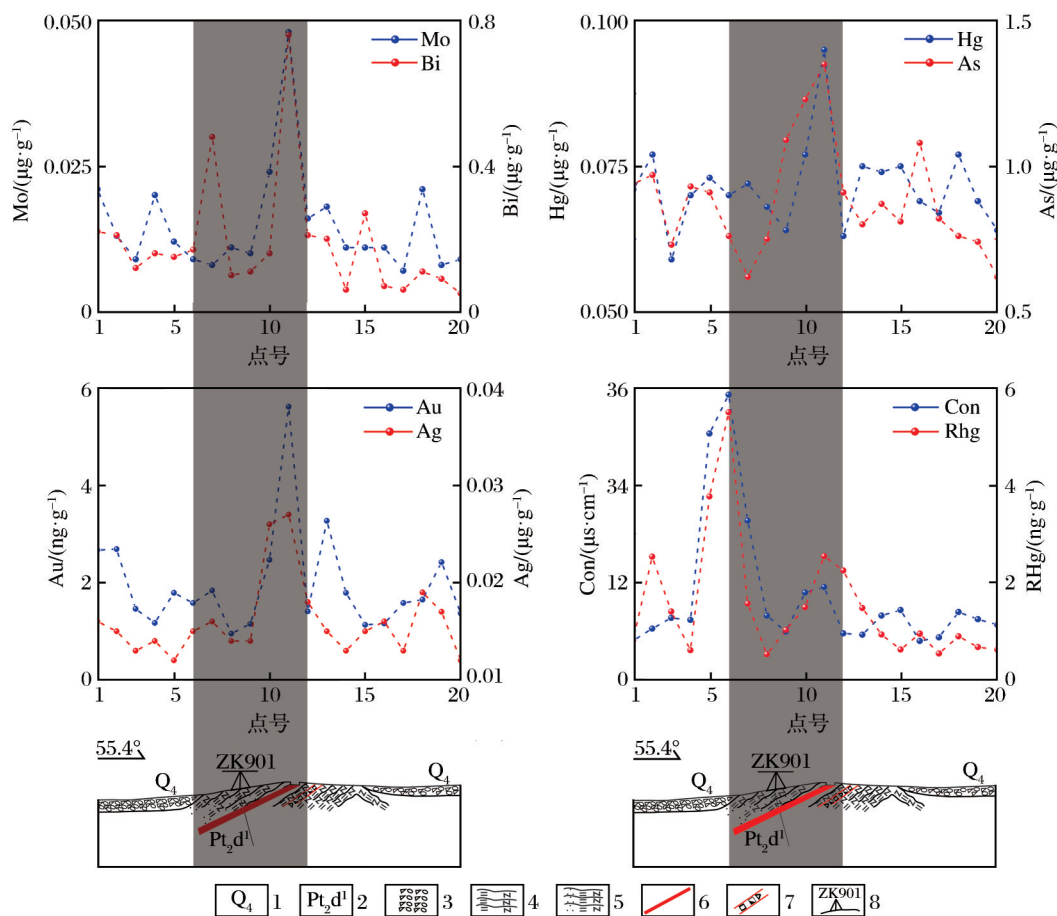
4#剖面位于未知区西北部的连家湾。该剖面包含一个见矿钻孔ZK901(图3)。该地质剖面出露地层为大狼山群,岩性以白云钠长片岩为主,局部夹绿泥钠长片岩、白云石英钠长片岩和绿泥白云钠长片岩等。该剖面地表第四系覆盖强烈,难见断裂露头,通过对民采坑进行调查,在剖面上发现一条

构造断裂带。岩性为具有弱褐铁矿化、绢云母化和硅化的破碎构造角砾,可见破碎石英岩和白云钠长片岩碎块角砾发育,推断其走向为 $165^{\circ}\sim 185^{\circ}$,倾角为 $50^{\circ}\sim 54^{\circ}$ 。

3.2 4#线剖面地电化学综合异常特征

通过绘制元素含量剖面图发现,地电化学提取和土壤离子电导率、土壤热释汞均呈现出不同程度的异常。由图3可知,在已知4#线剖面上,异常主要分布于6~12号点之间,异常宽度为120 m,与深部矿体位置吻合度较高,在此范围内,各元素均出现明显峰值。

地电提取Au元素异常形态呈“双峰状”,异常范围为0.95~5.62 ng/g,该范围内Au的峰值点为11号点,峰值为5.62 ng/g,为背景值的3.5倍,异常范围与已知矿体的赋存部位呈良好的对应关系;



1. 第四系; 2. 大狼山群; 3. 残坡积物; 4. 白云钠长片岩; 5. 白云石英钠长片岩; 6. 金矿体; 7. 褐铁矿化、硅化和断裂蚀变带; 8. 钻孔及编号

图3 4#勘探线地质—地电化学综合异常剖面图

Fig. 3 Geological-geochemical comprehensive anomaly cross-section of exploration line 4

13号点作为一个次级峰值,峰值为3.27 ng/g,对应于已知金矿体东侧的褐铁矿化蚀变带,是矿化蚀变作用的直接响应。Ag元素的异常形态呈“单峰状”,异常范围为0.014~0.027 $\mu\text{g/g}$,峰值点为12号点,峰值为0.027 $\mu\text{g/g}$,为背景值的2倍,异常形态完整,能够很好地反映矿体信息。

Mo元素异常形态呈“单峰状”,异常范围为0.10~0.76 $\mu\text{g/g}$,峰值点为11号点(0.76 $\mu\text{g/g}$),为异常值的5倍;Bi元素异常形态呈“兔耳状”,异常范围为0.008~0.048 $\mu\text{g/g}$,峰值点为11号点(0.048 $\mu\text{g/g}$),为背景值的4倍,Mo和Bi元素为典型的高温元素,在此范围内与已知矿体位置对应,在热液体系中常与Au元素共生,均具有较强的指示作用。由图3可知,二者异常峰值与Au元素异常峰值对应良好,且与已知矿体中该异常峰值的赋存部位呈显著对应关系。

As元素异常形态呈“单峰状”,异常范围为0.62~1.35 $\mu\text{g/g}$,异常形态较好,峰值点为11号点(1.35 $\mu\text{g/g}$),为该区域提取的最大值。Hg元素异常形态与As元素极为相似,呈“单峰状”,异常范围为0.63~0.95 $\mu\text{g/g}$,异常形态完整,在已知矿体上方响应显著。

土壤离子电导率(Con)异常形态呈“兔耳状”。异常峰值分别位于6号测点和11号测点,土壤离子电导率(Con)异常峰值分别位于6号和11号测点,其中11号测点对应矿体出露近地表端,6号测点为单元素、电导率和热释汞多指标综合异常圈定的异常尾端。该现象源于矿体自身发生电化学溶解形成原电池效应,溶解产生的矿化信息在电场力或其他力的驱动下,迁移并富集于矿体两端对应的地表土壤中(汤国栋,2021)。土壤热释汞(RHg)异常形态与土壤离子电导率异常极为相似,呈“兔耳状”,其中6号和11号测点为异常区内的峰值点,异常峰值为5.5 ng/g,是背景值的5.6倍。该异常对矿体及褐铁矿化、硅化、断裂蚀变带的指示显著。

通过在已知剖面开展地电化学集成技术可行性试验研究可知,该方法在矿体上方均有异常显示,异常位置与矿体位置吻合度高。因此,地电化学集成技术在该地区寻找隐伏金矿体是可行且有效的。

4 地质—地电化学找矿模型构建

4.1 找矿标志

地质找矿标志:研究区出露地层主要为中元古界大狼山群、上元古界下震旦统过路湾组及上震旦统尚家店组。钻孔验证结果表明,金矿体主要赋存在上元古界震旦系尚家店组的白云钠长片岩和白云石英钠长片岩中。区内以NW向新城—黄陂断裂带为主,以多条含次级羽状断裂的近E向断裂为辅助构造,两类断裂对成矿具有显著控制作用,区内绝大多数金银、多金属矿点均分布于上述断裂带交会处。研究区围岩蚀变受断裂破碎带控制,呈带状分布,与金矿有关的蚀变主要有硅化、绢云母化和黄铁矿化,其次为绿泥石化和碳酸盐化等。

地电化学找矿标志:在已知4#线剖面上开展的地电化学集成技术找矿可行性、有效性试验研究发现,地电化学提取的Ag、Au、Hg、RHg和Con等异常范围与已知矿体吻合度高,可见上述指标均可作为寻找深边部隐伏金矿的有效地电化学找矿标志。

4.2 地质—地电化学集成技术找矿模型构建

从研究区成矿地质背景可以看出,金矿主要赋存于上震旦统尚家店组白云钠长片岩层中,矿体围岩普遍发育硅化,局部可见绢云母化和黄铁矿化。矿区地质构造活跃,尤其是与区域构造走向相吻合的NE向构造,为岩浆和含矿热液的上升创造了空间。同时,这些构造产生的次级断裂也成为矿产富集的场所。因此,矿体的倾斜方向与地层倾斜方向大致相同,而断裂为地电化学集成技术检测到的离子提供了理想的传输路径。综上所述,结合已知4#线剖面的地质—地电化学特征及未知区地电化学综合异常特征,构建出枣园地区寻找隐伏金矿的地质—地电化学综合找矿模型(图4)。

5 找矿应用

5.1 单元素异常特征

利用GeoChemStudio软件对未知区6种元素含量数据进行处理,获得迭代后的参数(表1)。随后根据各地电化学参数的变异系数绘制离散图(图5),其中 Cv_i 代表元素地球化学场的相对变化幅度,

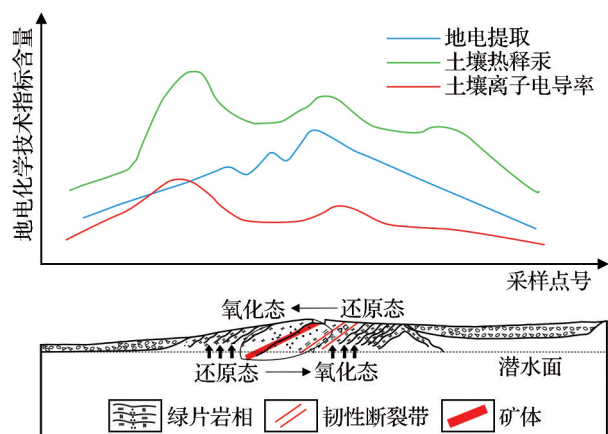


图4 地质—地电化学集成技术找矿模型

Fig. 4 Geological-geochemical integrated technology prospecting model

C_{V1}/C_{V2} 反映背景拟合中对极值的削平程度(黄文斌等, 2019)。

由图5可知, Au元素的离散程度最大, 表明其元素含量变化幅度较大且高值点突出, 是本区最具成矿优势的元素; Ag、Mo、As、Hg和Bi元素的变异

程度次之, 且 C_{V1}/C_{V2} 比值均大于1, 表明这些元素也具有一定的成矿潜力。

利用 GeoChemStudio 计算累计频率, 以 85%、92% 和 98% 频率值分别定义为异常外带、中带及内带下限(表2), 并据此绘制单元素异常图(图6)。

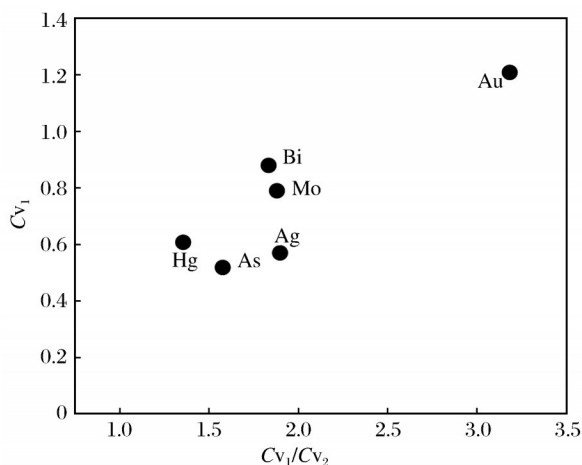


图5 研究区元素离散程度

Fig. 5 Element dispersion degree in the study area

表1 研究区地电方法提取各元素特征值统计

Table 1 Statistical of characteristic values of elements extracted by geoelectrical methods in the study area

元素	原始数据					迭代后		
	最大值	最小值	均值	标准偏差	变异系数 C_{V1}	均值	标准偏差	变异系数 C_{V2}
Au	31.12	0.8	2.93	3.55	1.21	1.91	0.73	0.38
Ag	0.115	0.009	0.0169	0.0096	0.57	0.0157	0.0046	0.30
Hg	0.167	0.01	0.032	0.02	0.61	0.031	0.014	0.45
As	3.52	0.32	0.86	0.45	0.52	0.77	0.26	0.33
Mo	1.10	0.04	0.14	0.11	0.79	0.12	0.05	0.42
Bi	0.109	0.002	0.016	0.014	0.88	0.013	0.006	0.48

注: Au元素含量单位为 ng/g, 其余元素为 $\mu\text{g/g}$

由图6可知, 研究区主要发育2处 Au元素异常。Au-1异常位于未知区西部, 异常峰值为 31.12 ng/g, 为异常下限的 7.5 倍, 异常面积约为 0.04 km², 异常强度高且分布集中。异常呈 NE 向展布, 与 F₂₇ 断层走向一致。该处出露上元古界上震旦统尚家店组大理岩, 发育含多金属硫化物石英脉, 脉体两侧见绢英岩化。8 号和 9 号测线分别从异常内、中、外带穿过, 异常呈现清晰的三级浓度分带特征, 并显示向外部延伸的趋势; Au-2 异常位于未知区东北部, 处于研究区边缘, 仅由外中带组成, 该处异常强度较小, 出露地层为过路湾组, 异常区域不整合接触

表2 研究区各元素异常分带值

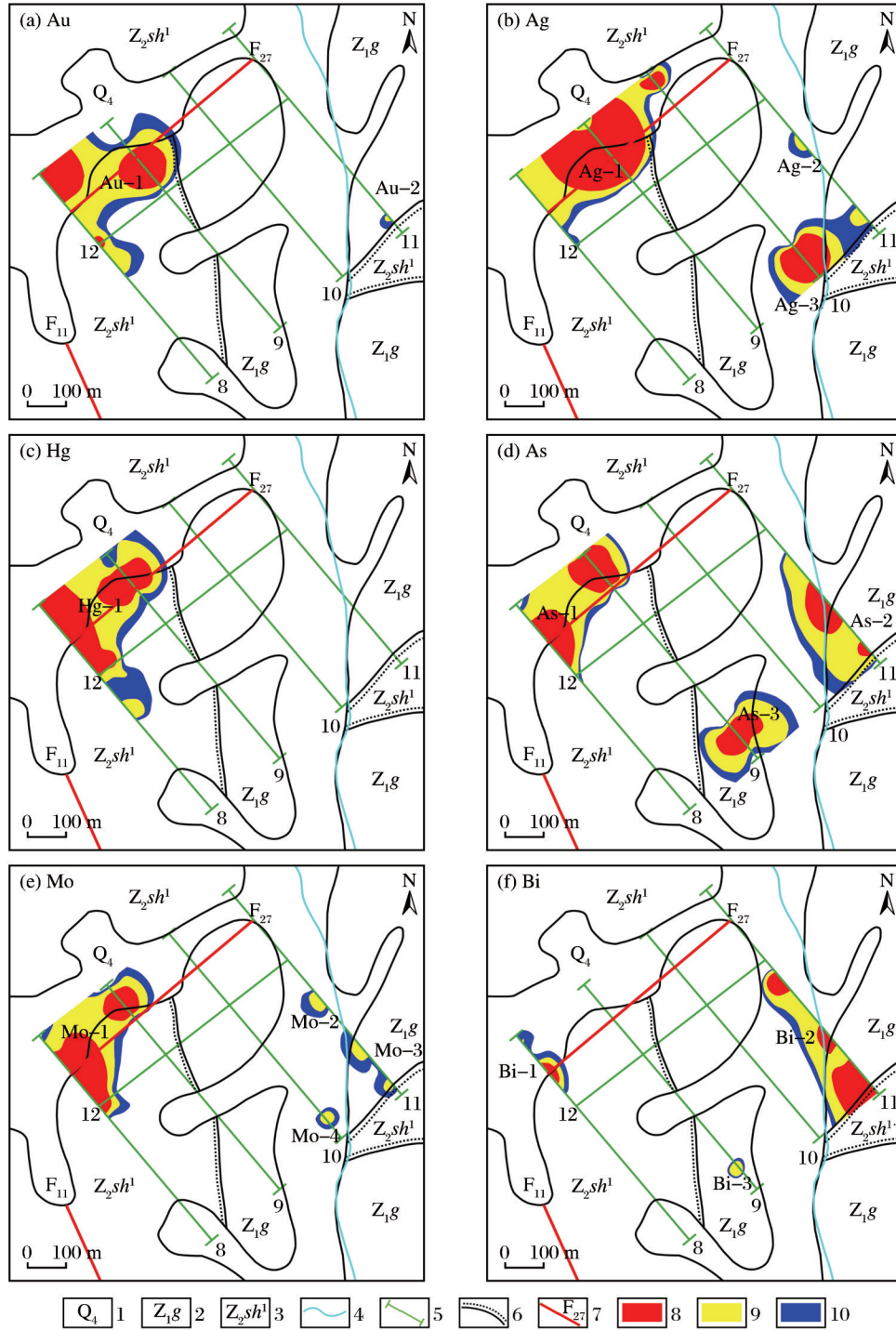
Table 2 Anomaly zoning values of various elements in the study area

元素	异常分级指标		
	外带下限	中带下限	内带下限
Au	4.19	6.43	9.55
Ag	0.021	0.025	0.032
Hg	0.048	0.055	0.069
As	1.14	1.39	2.16
Mo	0.20	0.25	0.45
Bi	0.023	0.027	0.051

注: Au元素含量单位为 ng/g, 其余元素为 $\mu\text{g/g}$

界线展布。该不整合面为构造薄弱带,后期构造—岩浆活动易使其破碎形成导矿、储矿空间;其古风

化壳发育的黏土矿物与有机质,可吸附还原含矿热液中的 Au 元素,促使成矿元素沉淀富集(顾雪祥



1.第四系;2.上元古界上震旦统过路湾组钠长片岩;3.上元古界上震旦统尚家店组大理岩;4.河流;5.地电提取测线;6.不整合接触线;
7.断裂及编号;8.异常内带;9.异常中带;10.异常外带

图6 研究区地电提取单元元素异常平面图

Fig. 6 Single-element anomaly plane maps of geoelectric extraction in the study area

等,2008;杨天赐等,2025)。与之套合极为相似的Hg元素异常也位于未知区西部,呈NE向展布,处于F₂₇断裂处,其含量最大值为0.167 μg/g,是异常下限的3.5倍,异常面积为0.033 km²,异常强度高且范围大。Hg元素具有易蒸发的特点,对于隐伏构造具有一定的指示效果,矿体和围岩空隙、裂隙越发育,连通性越好,越有利于Hg元素的富集(蓝天等,2018)。

在未知区,As、Mo和Bi元素异常与Au元素具有一定相似性,均呈现显著异常特征。As异常峰值为3.52 μg/g,是异常下限(1.14 μg/g)的3倍,共圈定3处异常,As-1异常位于西北部,强度高且范围大,富集于上震旦统尚家店组,并沿F₂₇断裂呈NE向展布,与Au异常的核心富集区重叠;As-2和As-3异常分别处于东部、南部的上震旦统过路湾组,均具完整三级浓度分带且对应区域发育不整合接触界线。Mo异常峰值为1.1 μg/g,是异常下限(0.20 μg/g)的5.5倍,共圈定4处异常,Mo-1异常位于西北部,与Au-1异常核心区共处于F₂₇断裂带,Mo-2、Mo-3和Mo-4异常分布于东部、南部的过路湾组,异常三级浓度分带完整且对应区域发育不整合接触界线。作为高温钨钼族元素,Mo常赋存于花岗岩类浅色矿物中,可随热液系统长距离迁移富集,其异常分布反映深部岩浆热液的成矿贡献(赵欣怡等,2022);Bi异常峰值为0.109 μg/g,是异常下限(0.023 μg/g)的4.7倍,共圈定3处异常,Bi-1异常位于西北部,沿F₂₇断裂富集于尚家店组,Bi作为高温亲硫元素,与Au常赋存于同一黄铁矿化载体中,其异常由构造控制隐伏矿体引发的特征,与Au异常的构造控矿规律一致。Bi-2和Bi-3异常处于东部、南部的过路湾组,均具完整三级浓度分带且对应区域发育不整合接触界线(刘延斌等,2018)。As为典型的低温前缘晕元素,Mo和Bi则为典型的高温尾晕元素,三者和研究区具有相似的地球化学空间分布模式,暗示着该区存在强烈的剥蚀活动,也可能反映了该地区存在多期次多阶段的成矿活动(李莲,1986)。

Ag异常峰值为0.115 μg/g,是异常下限(0.021 μg/g)的5.5倍,在未知区共圈定3处异常。其中Ag-1异常位于研究区西北部,异常强度高且范围大,主要富集于上震旦统尚家店组,沿F₂₇断裂呈NE向展

布,与Au-1异常核心区对应关系较为契合;Ag-2和Ag-3异常位于未知区东部,Ag-3异常主要富集于上震旦统过路湾组,异常三级浓度分带完整,区域内发育不整合接触界线。作为典型亲硫元素,Ag与Au同属热液成矿系统的核心伴生元素,成矿过程中二者以硫化物络合物形式同步迁移,在断裂部位因物理化学条件突变共同沉淀(史磊等,2024)。

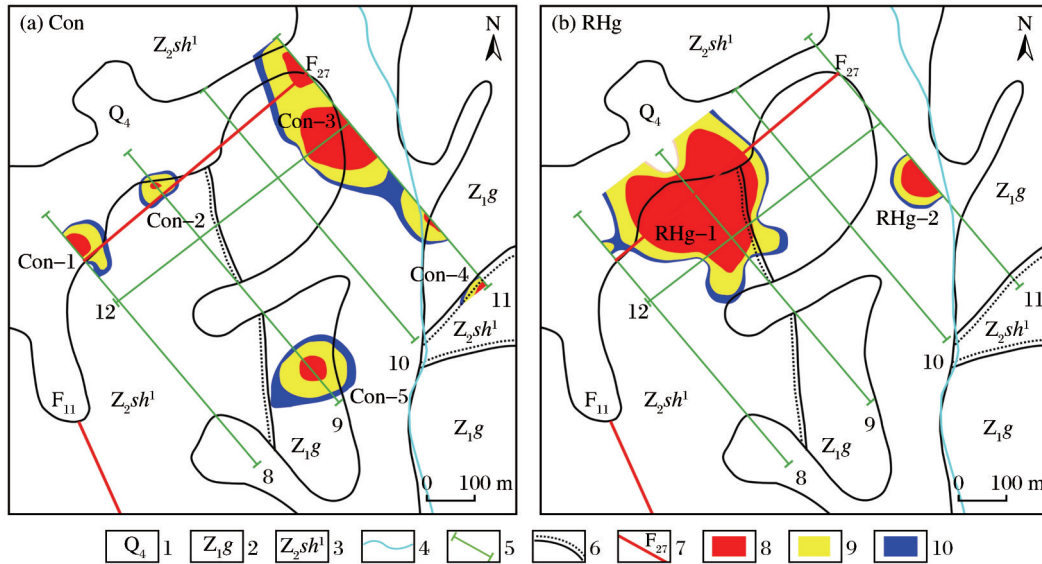
由单元素异常图(图6)可以看出,异常区域主要位于未知区西部和东部,个别元素在南部也具有不同程度的异常。其中西部异常强度高、范围大,各元素套合情况良好。说明成矿与断裂密切相关,断裂的空间展布在较大程度上决定着矿体的空间赋存,也说明地电提取测量法的效果显著。

5.2 土壤热释汞及离子电导率异常特征

土壤离子电导率和土壤热释汞异常展布总体呈现出沿NE向延伸,异常分带明显(图7)。土壤离子电导率异常面积为0.037 km²,异常峰值为39.8 μs/cm,在研究区可圈定出3处异常区。第一处异常位于研究区西北部,由Con-1和Con-2组成,呈不规则面状分布,异常规模不大,主要集中在8号和9号线4、5、6号点,该异常展布方向与F₂₇断裂带的走向高度一致,表明该断裂为深部矿化离子向上迁移提供了主要通道;第二处异常位于研究区东北部,由Con-3和Cin-4组成,异常主要集中在11号线,Con-3异常规模较大,呈条带状分布,在该区以黏土、亚黏土和砂砾为主。Con-4异常较小,处于上震旦统尚家店组和下震旦统过路湾组的不整合接触带附近。第三处异常位于研究区南部,异常规模较大,呈似圆状分布。热释汞异常规模较大,异常面积为0.039 km²,在F₂₇断裂带附近有大规模的异常,与地电化学提取各元素异常套合较好。这是由于汞具有较强的穿透力并以气态形式持续沿构造破碎带上升等特点(邹东风等,2020)。

6 成矿靶区预测

综合成矿地质条件、地电化学单元素异常特征、土壤热释汞和离子电导率异常的套合情况,将未知区异常划分为三级找矿靶区(图8):Ⅰ类靶区成矿条件最优,异常组合最完整;Ⅱ类靶区次之;Ⅲ类靶区显示一定找矿线索。该分级体系为后续



1.第四系;2.上元古界下震旦统过路湾组钠长片岩;3.上元古界上震旦统尚家店组大理岩;4.河流;5.地电提取测线;
6.不整合接触线;7.断裂及编号;8.异常内带;9.异常中带;10.异常外带

图7 研究区地电提取土壤离子电导率和土壤热释汞异常平面图

Fig. 7 Soil ionic conductivity and soil thermal release mercury anomaly plane map of geoelectric extraction in the study area

勘查工作提供了明确方向。

I类靶区:位于未知区西部,由Au、Ag、Hg和As等单元素以及土壤热释汞和电导率异常组成,其中Au元素异常规模较大(0.041 km²),强度高,元素异常与地层套合性良好,具有极大的找矿潜力。推测异常是由一条NE向断裂带(F₂₇)控制。区内发育高、中、低温元素,反映该区域成矿具有多期次和多阶段性(刘文韬等,2025),是寻找隐伏金矿(化)体的最有利区域。因此,该靶区具备较高的找矿潜力,是后续勘查工作的优先目标区域。

II类靶区:位于未知区东部,面积为0.028 km²,主成矿元素Au地电化学提取异常规模与地表强度相对较小,但区内已发现品位达10×10⁻⁶以上的金矿体,深部矿化信息明确。同时,该区与金成矿密切相关的Ag、Bi和Mo等指示元素异常清晰,规模及强度均较大,土壤热释汞和离子电导率异常亦呈现出清晰的三级分带特征,与矿化元素异常空间套合良好。此外,异常区内部发育不整合接触界线,具备优越的地层—构造控矿条件。综合前人工作成果与本区实际矿化线索、地电化学综合异常特征分析,认为该区域具有可靠的找矿潜力与验证价值。

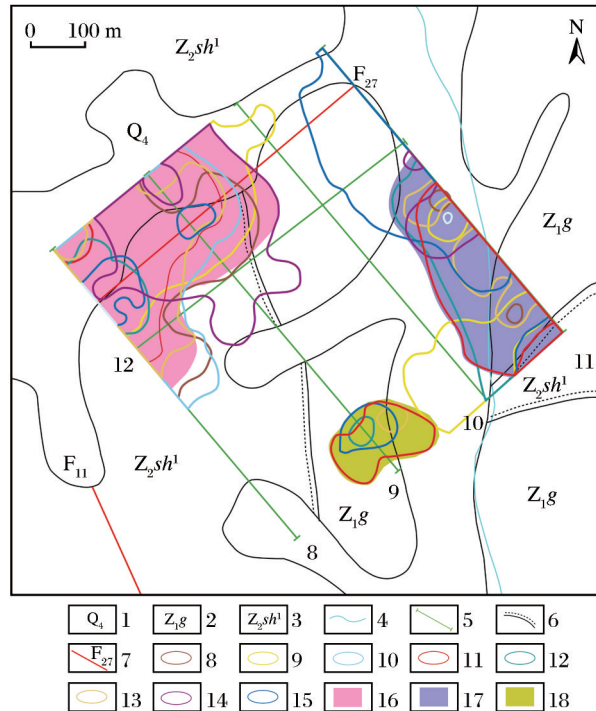
III类靶区:位于未知区南部,面积为0.016 km²,

由Mo、Bi和As元素组成,元素间套合度较高,异常分带明显,同时,异常区域内有不整合接触界线展布,表明仍具有一定的找矿潜力,但是主成矿元素及伴生元素异常规模小,延续性一般,与土壤离子电导率、热释汞异常套合度不高。暂将该区划分为III类靶区,值得开展进一步验证性研究。

7 结论

(1)在已有工程控制矿体的剖面开展找矿可行性试验研究,结果表明地电化学集成技术能够反映深部矿体赋存位置。该技术对于厚层第四系覆盖区具有显著的应用效果。充分说明利用地电化学集成技术在研究区寻找隐伏金矿(化)体是可行且有效的。

(2)以上震旦统尚家店组白云钠长片岩等赋矿层位、NW向及次级断裂控矿构造,以及硅化、黄铁矿化等围岩蚀变作为地质标志,以Au、Ag和Hg等元素异常,以及土壤离子电导率和热释汞“兔耳状”异常作为地电化学标志,构建了隐伏金矿地质—地电化学综合找矿模型。该模型融合了地质成矿特征与地电化学技术优势,既为未知区找矿提供了科



1. 第四系; 2. 上元古界下震旦统过路湾组钠长片岩; 3. 上元古界上震旦统尚家店组大理岩; 4. 河流; 5. 地电提取测线; 6. 不整合接触线; 7. 断裂及编号; 8. Au元素异常; 9. Ag元素异常; 10. Hg元素异常; 11. As元素异常; 12. Bi元素异常; 13. Mo元素异常; 14. 热释汞异常; 15. 电导率异常; 16. I类靶区; 17. II类靶区; 18. III类靶区

图8 湖北枣园地区地电化找矿预测图

Fig. 8 Geoelectrochemical prospecting prediction map of Zaoyuan area in Hubei

学指导,也为同类覆盖区隐伏金矿勘查提供了有效技术范式。

(3)根据研究区地电化综合异常特征以及土壤离子电导率、热释汞异常特征,结合研究区成矿地质特征,以构建的地质—地电化综合找矿模型为指导,在研究区开展找矿预测,共圈定出I类、II类和III类找矿靶区各1个,其中,I类靶区最具有成矿潜力。

参考文献 (References):

- Cheng W Q, Yang K G, Kusky T M, et al, 2012. Kinematic and thermochronological constraints on the Xincheng-Huangpi fault and Mesozoic two-phase extrusion of the Tongbai-Dabie Orogen Belt [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 60: 160-173.
- Niu P P, Jiang S Y, 2022. Fluid inclusion and stable isotope (C-

H-O-S) constraints on the genesis of the Heilongtan-Xiejia-gou Au deposit, northern Hubei, China [J]. Ore Geology Reviews, 144: 104841.

Niu P P, Jiang S Y, Xiong S F, et al, 2019. Geological characteristics, fluid inclusions and H-O-C-S isotopes of the Zaopa Ag-Mo prospect in the Suizao area, Hubei Province: implications for ore genesis [J]. Ore Geology Reviews, 111: 103012.

陈国荣, 许王静, 闫博, 2023. 随县戴家湾金(钼)矿地质特征及成矿地质条件[J]. 世界有色金属, (7): 97-99. Chen Guorong, Xu Wangjing, Yan Bo, 2023. Geological characteristics and metallogenic geological conditions of Daijiawan gold (molybdenum) deposit in Suixian County [J]. World Nonferrous Metals, (7): 97-99.

陈喜峰, 2024. 全球金矿资源分布特征、勘查开发格局及展望[J]. 中国矿业, 33(10): 64-73. Chen Xifeng, 2024. Distribution characteristics and exploration & development pattern of gold resources in global and its prospect [J]. China Mining Magazine, 33(10): 64-73.

顾雪祥, 董树义, 王银宏, 等, 2008. 不整合面控制内生金属成矿的新实例: 山东沂南金铜铁矿床[J]. 现代地质, 22(2): 151-161. Gu Xuexiang, Dong Shuyi, Wang Yinong, et al, 2008. A new example of unconformity-related endogenic metallization: the Yinan Au-Cu-Fe deposit in Shandong Province, China [J]. Geoscience, 22(2): 151-161.

贺帅, 2022. 南秦岭新元古代构造演化[D]. 西安: 西北大学. He Shuai, 2022. Neoproterozoic tectonic evolution of the south Qinling belt [D]. Xi'an: Northwest University.

胡起生, 许天良, 黄国平, 等, 2003. 湖北黑龙潭金矿床成因及成矿模式[J]. 湖北地矿, 17(1): 9-13. Hu Qisheng, Xu Tianliang, Huang Guoping, et al, 2003. The gold deposit metallogeny and ore-forming model of Heilongtan in Hubei Province [J]. Hubei Geology & Mineral Resources, 17(1): 9-13.

黄文斌, 罗先熔, 贾飞, 等, 2019. 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, 38(6): 1110-1117. Huang Wenbin, Luo Xianrong, Jia Fei, et al, 2019. 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, 38(6): 1110-1117.

蓝天, 罗先熔, 陈晓青, 2018. 湖南国庆矿区地电化方法寻找隐伏铜矿预测研究[J]. 地质与勘探, 54(3): 563-573. Lan Tian, Luo Xianrong, Chen Xiaoqing, 2018. Prediction

- of concealed copper deposits by the geoelectric-geochemical method in the Guoqing mine area, Hunan Province[J]. *Geology and Exploration*, 54(3):563-573.
- 李莲, 1986. 因子分析在化探异常评价中的应用[J]. *物化探计算技术*, 8(1):75-81. Li Lian, 1986. Application on the valuation of geochemical anomalies with factor analysis [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 8(1):75-81.
- 刘攀峰, 罗先熔, 文美兰, 等, 2018. 近三十年来我国地电化学技术研究回顾与展望[J]. *桂林理工大学学报*, 38(1):47-55. Liu Panfeng, Luo Xianrong, Wen Meilan, et al, 2018. Retrospect and prospect for geo-electrochemical technology research in the past three decades of China[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 38(1):47-55.
- 刘攀峰, 文美兰, 张佳莉, 2016. 地电化学集成技术在云南西邑铅锌矿区的找矿应用[J]. *物探与化探*, 40(4):655-660. Liu Panfeng, Wen Meilan, Zhang Jiali, 2016. The application of geo-electrochemical integrated technology to the prospecting in the Xiyi Pb-Zn deposit, Yunnan Province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 40(4):655-660.
- 刘文韬, 谢淑云, 梁馨之, 等, 2025. 普朗 Cu-Au 矿区覆盖层非常规地球化学勘查找矿试验[J]. *贵州地质*, 42(2):222-234. Liu Wentao, Xie Shuyun, Liang Xinzhi, et al, 2025. Unconventional geochemical prospecting trial for overburden in the Pulang Cu-Au mining district [J]. *Guizhou Geology*, 42(2):222-234.
- 刘延斌, 罗先熔, 刘攀峰, 等, 2018. 地电化学集成技术在内蒙古格鲁其堆山矿区及外围寻找隐伏铅锌矿的应用[J]. *地质与勘探*, 54(5):1001-1012. Liu Yanbin, Luo Xianrong, Liu Panfeng, et al, 2018. Application of geo-electrochemical integration technology to search for concealed Pb-Zn ore in the Geluqiduishan mining area and its periphery, Inner Mongolia [J]. *Geology and Exploration*, 54(5):1001-1012.
- 史磊, 王西荣, 宁霄峰, 等, 2024. 山东南吕一欣木金矿床金的赋存状态及富集机制[J]. *黄金科学技术*, 32(1):41-54. Shi Lei, Wang Xirong, Ning Xiaofeng, et al, 2024. Occurrence state and enrichment mechanism of gold in Nanlü-Xinmu gold deposit, Shandong Province [J]. *Gold Science and Technology*, 32(1):41-54.
- 汤国栋, 2021. 四川烟依矿区地电化学集成技术寻找隐伏金矿预测研究[D]. 桂林: 桂林理工大学. Tang Guodong, 2021. Study on prediction of concealed gold deposits by integrated geoelectrochemical technology in Yanyi mining area, Sichuan Province [D]. Guilin: Guilin University of Technology.
- 唐瑞, 欧阳菲, 罗先熔, 等, 2021. 相山矿田游坊地区地电提取找矿预测[J]. *物探与化探*, 45(6):1425-1438. Tang Rui, Ouyang Fei, Luo Xianrong, et al, 2021. The prediction of electrochemical prospecting in Youfang area of the Xiangshan orefield [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 45(6):1425-1438.
- 王振东, 罗先熔, 王坚, 等, 2012. 地电化学技术在青藏高原冻土覆盖区寻找隐伏金矿的研究: 以青海扎家同哪地区为例[J]. *现代矿业*, 27(2):50-52, 55. Wang Zhen-dong, Luo Xianrong, Wang Jian, et al, 2012. Study on geo-electrochemical technology in searching for concealed gold deposits in frozen soil covered area of Qinghai-Tibet Plateau: taking Zhajiatongna area in Qinghai as an example [J]. *Modern Mining*, 27(2):50-52, 55.
- 吴松, 许涛, 牛志勇, 等, 2024. 探析湖北随县黑龙潭金矿地质特征、矿床成因与成矿模式[J]. *世界有色金属*, (3):74-76. Wu Song, Xu Tao, Niu Zhiyong, et al, 2024. Exploring the geological characteristics, genesis, and mineralization model of the Heilongtan gold deposit in Suixian County, Hubei Province [J]. *World Nonferrous Metals*, (3):74-76.
- 向祥辉, 戴绍杰, 牛志勇, 等, 2017. 随县黄家沟钨矿岩石地球化学特征及其成因分析[J]. *资源环境与工程*, 31(6):675-682. Xiang Xianghui, Dai Shaojie, Niu Zhiyong, et al, 2017. Geochemical characteristics and genetic analysis of molybdenum deposits in Huangjiagou [J]. *Resources Environment & Engineering*, 31(6):675-682.
- 杨天赐, 管申进, 任涛, 等, 2025. 扬子地块西缘大红山铜铁矿床蚀变岩地球化学特征及找矿预测[J]. *矿床地质*, 44(3):581-596. Yang Tianci, Guan Shenjin, Ren Tao, et al, 2025. Geochemical characterization of alteration rocks and prospecting prediction of Dahongshan copper-iron deposit at western margin of Yangtze Block [J]. *Mineral Deposits*, 44(3):581-596.
- 余瑾, 杨波, 卞超, 等, 2023. 湖北省随县黑龙潭金矿床深部找矿潜力分析[J]. *世界有色金属*, (18):211-213. Yu Jin, Yang Bo, Bian Chao, et al, 2023. Analysis of the deep prospecting potential of the Heilongtan gold deposit in Suixian County, Hubei Province [J]. *World Nonferrous Metals*, (18):211-213.
- 张文博, 2022. 广西金牙矿区地电提取寻找隐伏金矿研究及找矿预测[D]. 桂林: 桂林理工大学. Zhang Wenbo, 2022. Research and prospecting prediction of geoelectric extrac-

- tion to find hidden gold deposits in Jinya mining, Guangxi [D]. Guilin: Guilin University of Technology.
- 赵欣怡, 欧阳菲, 罗先熔, 等, 2022. 地电化学法在寻找隐伏铀矿中的应用: 以诸广鹿井地区为例[J]. 金属矿山, 51(11): 167-178. Zhao Xinyi, Ouyang Fei, Luo Xianrong, et al, 2022. Application of geo-electrochemical methods to prospecting in the concealed uranium: a case study of Lujing area, Zhuguang[J]. Metal Mine, 51(11): 167-178.
- 朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 等, 2015. 克拉通破坏型金矿床[J]. 中国科学(地球科学), 45(8): 1153-1168, 1-4. Zhu Rixiang, Fan Hongrui, Li Jianwei, et al, 2015. Decratonic gold deposits[J]. Scientia Sinica (Terrae), 45(8): 1153-1168, 1-4.
- 邹东风, 姚涛, 2020. 土壤热释汞法在江西某金矿区的找矿试验研究[J]. 世界有色金属, (18): 65-67. Zou Dongfeng, Yao Tao, 2020. Experimental study on the application of soil thermorelease mercury method in a gold mine area of Jiangxi Province [J]. World Nonferrous Metals, (18): 65-67.

Application of Geoelectrochemical Integrated Technology in Prospecting for Concealed Gold Deposits in the Zaoyuan Mining Area, Hubei Province

REN Xuanheng¹, WEN Meilan¹, LIU Panfeng¹, DING Lele², JIANG Yuxiong¹, LI Jianting¹, ZHANG Xiaohan¹, LIN Xitong¹

1. Guangxi Key Laboratory of Concealed Metallic Ore Deposits Exploration, Guilin University of Technology, Guilin 541006, Guangxi, China;

2. No. 8 Geological Brigade of Hubei Provincial Bureau of Geology, Xiangyang 441000, Hubei, China

Abstract: The Zaoyuan gold deposit, situated in Suixian County, Hubei Province, within the eastern segment of the Tongbai-Dabie Metallogenic Belt, exemplifies a structurally altered rock-type gold deposit. As shallow resources become increasingly depleted, there is an urgent need for deep prospecting. However, the region is characterized by dense vegetation and a substantial overburden, which constrains the detection depth achievable by traditional geochemical methods. To address this challenge, this study adopts a “from the known to the unknown” research methodology and utilizes geoelectrochemical integrated technology to conduct prospecting prediction research for concealed gold deposits in the Zaoyuan mining area. Initially, a feasibility test was performed on the known Profile 4. The validation results reveal significant anomalies in geoelectrically extracted elements such as Au, Ag, Mo, and Bi directly above the ore body. Additionally, soil ionic conductivity and pyrolytic mercury display characteristic “rabbit-ear” shaped anomalies, which are highly consistent with the location of the deep ore body, thereby confirming the efficacy of this method in the area. Based on these findings, systematic measurements were conducted in the unexplored region along four survey lines arranged on a grid with 100 m×20 m spacing. Additionally, one geoelectric extraction survey line was positioned parallel to the F₂₇ fault, comprising a total of 106 sampling points. Analysis of single-element anomalies reveals that gold (Au) demonstrates the highest degree of dispersion, identifying it as the most promising element in the region. The anomalies predominantly exhibit a northeast (NE) trend, which aligns with the strike of the F₂₇ fault. Of particular interest is the Au-1 anomaly in the western section, which presents a peak concentration of 31.12 ng/g and displays a distinct three-zone concentration pattern. This anomaly shows a strong correlation with associated element anomalies, including silver (Ag), molybdenum (Mo), and bismuth (Bi). Furthermore, soil ionic conductivity and pyrolytic mercury anomalies also follow the NE trend, demonstrating high consistency with the elemental anomalies and structural zones. By integrating geological and geoelectrochemical characteristics, a comprehensive geological-geoelectrochemical prospecting model was developed for the area.

This study presents a model that identifies the Sinian Shangjiadian Formation albite schist as the host horizon, with NW-trending and secondary faults serving as ore-controlling structures, and silicification and pyritization acting as alteration indicators. The geoelectrochemical criteria encompass anomalies in Au, Ag, and Hg, as well as distinctive “rabbit-ear” anomalies in soil ionic conductivity and pyrolytic mercury. Utilizing this model, three prospecting targets were delineated within the unexplored area: a Class I target in the west, characterized by a comprehensive and high-intensity anomaly assemblage indicative of optimal metallogenic conditions; a Class II target in the east, exhibiting clear signs of mineralization; and a Class III target in the south, which presents preliminary indications of prospectivity. The geoelectrochemical integrated technology has demonstrated significant efficacy in detecting concealed gold deposits in regions with thick overburden. The prospecting model established through this research offers a technical framework for gold exploration in analogous areas. This investigation provides a scientific foundation for both deep and peripheral exploration in the Zaoyuan mining area, with a total of three prospecting targets identified, among which the Class I target is particularly promising.

Key words: geoelectrochemical integrated technology; geoelectrochemical characteristics; prospecting prediction; Zaoyuan gold deposit; Hubei