

doi: 10.11720/wtyht.2015.1.24

智超, 向武, 曾键年, 等. 地电提取法在深部找矿中的试验——以安徽胡村铜钼矿为例[J]. 物探与化探, 2015, 39(1): 149-155. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.1.24>

Zhi C, Xiang W, Zeng J N, et al. The tentative application of the geoelectro-chemical extraction method to the deep prospecting: A case study of the Hucun copper-molybdenum deposit in Anhui Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(1): 149-155. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.1.24>

## 地电提取法在深部找矿中的试验 ——以安徽胡村铜钼矿为例

智超<sup>1,2</sup>, 向武<sup>2</sup>, 曾键年<sup>3</sup>, 谢淑云<sup>2</sup>, 于桑<sup>2</sup>, 郑钦元<sup>4</sup>, 陆顺富<sup>3</sup>, 万翔<sup>2</sup>

(1. 甘肃有色张掖矿产勘查院, 甘肃 张掖 734012; 2. 中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 3. 中国地质大学 资源学院, 湖北 武汉 430074; 4. 湖北省地质矿业开发有限责任公司, 湖北 武汉 430022)

**摘要:** 在狮子山矿田胡村深部铜钼矿开展了地电化学方法技术找矿可行性研究。试验结果表明, 地电化学测量可以提高异常衬度, 特别适合对弱异常区进行地球化学详查工作; As、Sb、Se、Ag、Pb 衬度高, 异常范围宽, 具有一定的深部找矿意义; Ba、Zn 也具有一定的指示意义。此外, 利用常规电化学测量获得的 pH 值和电导率异常, 能有效区分出浅部矿化导致的地电提取异常。根据野外试验, 该方法不适合土层较薄的基岩出露区。同时, 考虑到工作量较大, 认为地电化学测量可以用于精细地球化学深部找矿工作。

**关键词:** 地电提取法; 深部找矿; 铜钼矿; 安徽胡村

**中图分类号:** P632      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2015)01-0149-07

地电化学法是物探与化探相结合的一种新方法<sup>[1]</sup>。它的找矿机理是由于各种电化学溶解、机械运移等作用, 在隐伏矿体及其周围形成一个范围较大的、活动态的原始金属离子晕, 在成矿后期的漫长地质年代里, 这些原始金属离子晕通过岩石孔隙、构造裂隙、断层、破碎带等通道运移至地表, 形成活动态的地表金属离子晕。在局部天然或人工电场作用下, 这些地表金属离子晕会发生定向迁移并在电极表面富集, 提取电极表面上的淀积物进行处理和分析, 便形成了地电化学异常。这种局部的地电化学异常可用于寻找隐伏矿体, 因而该方法在一定条件下可以解决常规物化探方法不能解决的找矿难题, 特别是在各种厚层覆盖条件下, 利用地电化学异常更能发挥寻找隐伏矿的作用<sup>[1-2]</sup>。

地电化学法适用于寻找以 Cu、Au、Ag 等为主的多金属硫化物矿床<sup>[3-6]</sup>, 该方法在北方草原区、荒漠区、覆盖区和冻土区多有找金和多金属矿的研究, 并已取得较好的理论成果和找矿效果<sup>[7-17]</sup>, 但在长江中下游铜铁成矿带地区湿润多雨的景观条件下的应

用鲜有报道。此外, 不同景观条件下, 地电化学法能否有效指示隐伏矿的临界深度, 一直是化探界尚未解决的重要问题。笔者期望通过对铜陵矿集区胡村铜矿两种成因类型的铜矿体进行地电提取找矿方法的试验研究, 进一步评价该方法在本区找隐伏矿体的实际效果。

### 1 地质背景

研究区大地构造位于下扬子拗陷带中部的铜陵断隆, 在地层区划上属下扬子分区, 出露地层为志留系一下三叠统的沉积盖层, 主要为海相碳酸盐岩和碎屑岩, 除缺失下、中泥盆统外, 从志留系至第四系层序完全, 发育较为完整(图 1)。南北两端分别以近 EW 向隐伏基底断裂带为界, 与池州 NE 向“S”形褶皱带相隔; 东西两侧分别以 NE 向大断裂带为界, 与宣(城)南(陵)拗陷、下扬子拗陷等中生代沉积盆地相邻<sup>[18]</sup>。构造格局由多期不同方向、不同性质的构造变形相互叠加而成, 除存在前印支期和印支期构造外, 还发育有燕山—喜马拉雅期构造, 主要构

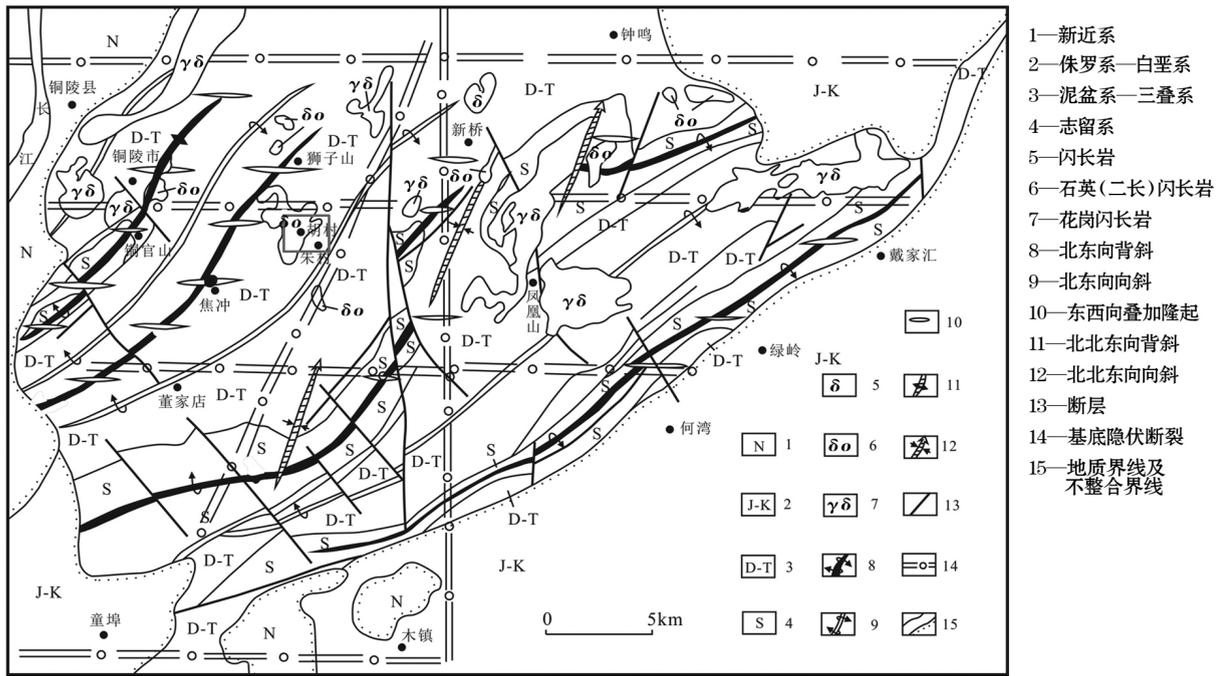


图1 铜陵地区地质概况(据参考文献[19-20]改绘)

造有 NE、EW、NNE、SN 和 NW 向五组<sup>[11-12]</sup>, 构成了区内复杂的构造变形格局。

铜陵地区燕山期岩浆活动是铁、铜、金、硫矿床成矿的主要控矿因素, 该地区有 70 多个岩体, 出露面积均为 0.5~3 km<sup>2</sup>, 地表出露岩体大多数分布于宽约 25 km、长约 40 km 的 EW 向展布的铜陵—南陵深断裂控制的构造—岩浆—成矿带之上<sup>[21]</sup>, 控制着区内凤凰山、狮子山、新桥、铜官山矿田等主要铜金(铁)矿产的分布<sup>[18]</sup>(图 1)。狮子山矿田位于铜陵矿集区的西部, 行政区划属大部分属安徽省铜陵市狮子山区, 南部属铜陵县管辖。矿田在市区正东偏南约 7 km。矿田内主要出露三叠系地层, 青山背斜是矿田内规模最大的主体构造。矿田出露的岩浆岩主要有花岗闪长岩、石英(二长)闪长岩和辉石(二长)闪长岩, 围绕 3 类岩体发育多个不同类型的铜金钼矿床。

胡村矿床位于狮子山矿田的南部, 青山次级背斜南东翼。矿区出露地层为下三叠统薄—中厚层灰岩和条带状灰岩, 区内发育的近 SN 向、NNW 向和 NNE 向断裂在平面呈“Y”形, 控制了区内胡村花岗闪长岩体的分布。岩体周边与围岩发育了不同程度的接触蚀变, 以硅化、绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化为主。

矿床分为浅部矿体和深部矿体两部分。浅部矿体位于地表以下 300~600 m 深度, 产于花岗闪长岩与碳酸盐岩围岩接触带附近, 矿体空间位置受接触

构造带控制, 矿种以铜为主, 为典型的矽卡岩型铜矿床。主矿体长 400 m, 延伸约 400 m。矿体为凹凸不平的薄板状或不规则透镜状, 矿石类型主要有矽卡岩型和块状硫化物型, 另有少量大理岩型和花岗闪长岩型。主要矿石矿物有黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿、磁铁矿等, 此外还有少量闪锌矿。浅部矿体成矿作用受岩浆热液影响, 可划分为矽卡岩阶段、石英—硫化物阶段和碳酸盐阶段, 其中石英—硫化物阶段为主要的成矿阶段<sup>[22-23]</sup>。

深部矿体在-1 000 m 标高以下, 主要发育于二叠系栖霞组地层、花岗闪长岩体及其接触带中, 矿体呈层状或似层状, 产状与地层基本一致, 在岩体与围岩的接触带主要发育铜矿化, 往岩体深部主要发育钼矿化, 构成“上铜下钼”的成矿格局。

## 2 方法技术

采用中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所研制的固体载体型元素提取器, 进行地电提取法测量。利用人工电场的作用, 驱动离子向离子接收器中迁移并富集。本次采用偶极提取技术, 选用净化处理的具有较强吸附能力的高密度聚氨脂材料和碳质底盘组装成的提取器, 采用 9 V 直流供电 24 h, 在受有机物影响小的 B 层位土壤中开展提取工作。考虑到南方风化型土壤多偏酸性, 元素淋失作用较强, 在每个样点采用 1 L 纯净水作为提取剂, 以减少提取剂本底干扰。提取样品送合肥矿产资源

检测中心分析测试,测试仪器为电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)。测试元素主要选择与成矿密切相关的 Cu、Pb、Zn、Ag、As、Sb、Bi、Tl、Se、Ba 等 10 个指标。

在胡村矿区布置了两条勘探线剖面(74 线、90 线)(图 2),按 40 m 的等间距(矿区加密至 20 m)布设采样点 46 个,共采样 52 个。74 线上采样点 28 个,其中 2 个重复样;90 线上采样点 18 个,其中 4 个重复样。重复样占 13%。原样与重复样元素相对误差基本在 40% 以内,样品合格。实际测量中,90 勘探线的南东段洋山冲穿越条件很差,故这一部分多元地球化学剖面未能实现测制,但两端均有样品控制。

### 3 找矿试验效果

#### 3.1 元素地球化学特征

元素的地球化学统计特征在一定程度上可以反映成矿的可能性。两条勘探线数据的统计结果表明(表 1、表 2),Cu、Pb、Zn、As、Sb、Bi、Tl 等表现为强分异,Ag、Ba 为分异,说明这些元素具有局部富集趋势,尤其 Pb 变异系数较大,为 3.33。Cu、Pb、Zn、As、Sb 最大浓集系数较高,都在 15 以上,进一步反映这些元素的分异性强。As、Sb、Ba、Pb 等均值和中值相差较大,说明这几个元素的测试值存在离群值。异常下限是通过箱图法剔除离群样后,用剩余数据均值加两倍标准离差所得。

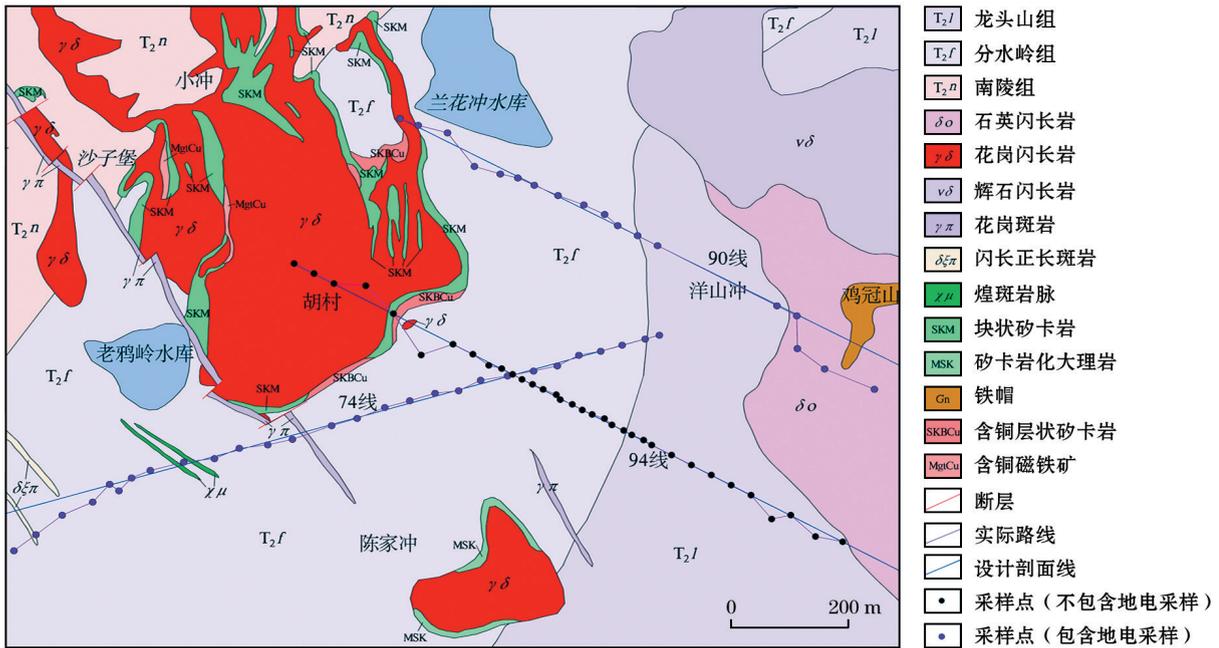


图 2 胡村矿区地质概况及采样布置

表 1 狮子山矿田胡村地电提取测量剖面数据统计

参数	Cu	Zn	As	Se	Ag	Sb	Ba	Tl	Pb	Bi
样品数	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
极小值	0.06	0.24	0.18	0.31	0.82	0	0	0.09	0.02	0.04
极大值	2.2	7.82	162.84	21.71	20.53	10.37	0.49	1.48	4.87	1.86
均值	0.16	0.68	12.63	8.89	4.58	0.95	0.12	0.2	0.22	0.25
中值	0.11	0.5	5.98	8.42	3.61	0.58	0.09	0.13	0.08	0.2
标准差	0.31	1.12	25.05	5.14	3.86	1.65	0.1	0.21	0.72	0.28
背景值	0.09	0.44	4.82	7.74	4.33	0.43	0.06	0.18	0.07	0.17
异常下限	0.14	0.74	12.01	17.65	9.62	1.12	0.13	0.32	0.14	0.29
$S_t$	0.02	0.15	3.59	4.96	2.64	0.34	0.03	0.07	0.04	0.06
$C_v$	1.96	1.63	1.98	0.58	0.84	1.75	0.83	1.01	3.33	1.12
$f$	19.43	16.27	28.69	2.44	5.2	18.71	4.3	8.69	67.55	9.46

注:As、Se、Ag、Sb、Tl、Bi 含量单位为  $10^{-9}$ ,其余元素为  $10^{-6}$ ;  $S_t$  表示剔除离群样后的离差;  $C_v$  为变异系数;  $f$  为最大浓集系数,  $f = \text{极大值} / \text{背景值}$ 。样品由合肥矿产资源监督检测中心测试完成。

表 2 狮子山矿田胡村地电提取剖面元素分异情况统计

变异系数	分布情况	元素
$C_v < 30\%$	均匀	无
$30\% \leq C_v < 70\%$	弱分异	Se
$70\% \leq C_v \leq 100\%$	分异	Ag, Ba
$C_v > 100\%$	强分异	Cu, Pb, Zn, As, Sb, Bi, Tl

为了深入分析研究区内不同元素的地球化学行为,划分元素共生组合,对分析数据标准化后进行 R 型聚类分析,得出元素分类谱系(图 3)。截取距离系数(欧式距离的平方)10 为指标,可将测试元素分为 6 大类: I 大类由 Cu、Zn 主成矿元素组成,表征铜矿中伴有闪锌矿; II 大类由 As、Sb、Pb、Tl 等铜矿伴生元素组成;其余 Ag、Ba、Bi、Se 等自成一类。

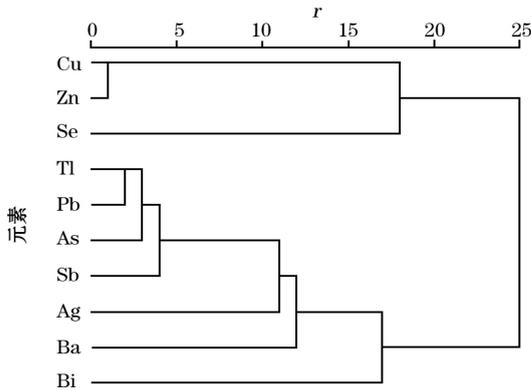


图 3 胡村剖面地电提取元素 R 型聚类分析图谱

### 3.2 狮子山矿田胡村铜矿地电异常特征

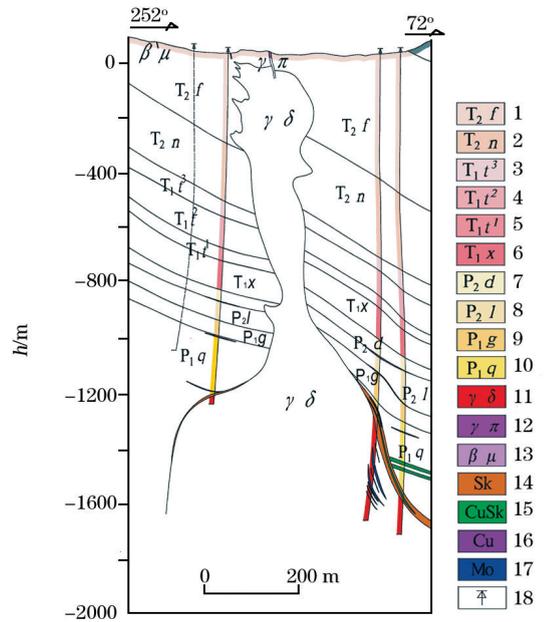
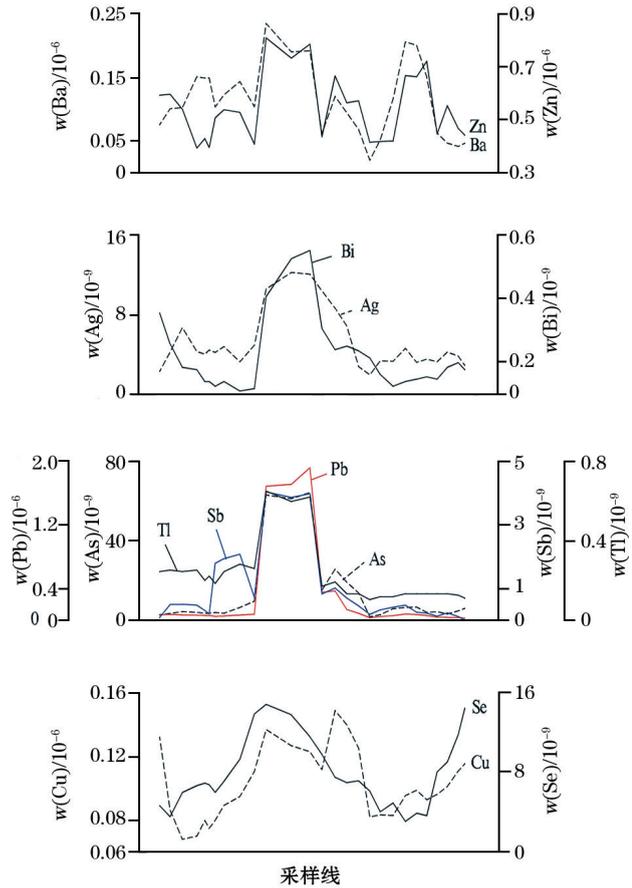
为了更清楚地观察剖面异常趋势,对测试值进行三点移动平均后(90 线 Ag、Pb 除外),作地球化学异常剖面图(图 4、图 5)。

#### 3.2.1 74 线实验效果

从图 4 中可以看出,Zn、Ba 在东侧矿体上方出现异常,与矿体位置相对应;几乎所有元素都在岩体上方出现异常,且异常位置一致,异常宽度大。As 的异常衬度在 1~5.33, Pb 的异常衬度在 2~13.67, Sb 异常衬度在 1~3.6, 其他元素异常衬度均小于 2。由于岩体两端深部均存在矿体,元素沿着接触带易迁移地表,初步认为该异常是矿体和岩体的综合反映。

#### 3.2.2 90 线实验效果

90 勘探线地电提取 Cu、Ba、Zn、Se、Tl 在剖面西端出现显著异常,Cu 异常衬度达 15.72, Zn 异常衬度达 10.56, 且套合很好,恰好位于深部铜矿体和浅部石英闪长岩上方,可能是对矿体和石英闪长岩体的综合反映。Ag、Pb、As、Se、Sb 在矿体集中部位上方出现清晰带状异常, Ag 异常衬度在 1.28~3.58,



1—分水岭组;2—南岭湖组;3—塔山组上段;4—塔山组中段;5—塔山组下段;6—小凉亭组;7—大隆组;8—龙潭组;9—孤峰组;10—栖霞组;11—花岗闪长岩;12—花岗斑岩;13—未知;14—砂卡岩;15—含铜砂卡岩;16—铜矿体;17—钼矿体;18—钻孔。图 5 同。

图 4 胡村铜钼矿 74 线地电提取元素异常剖面

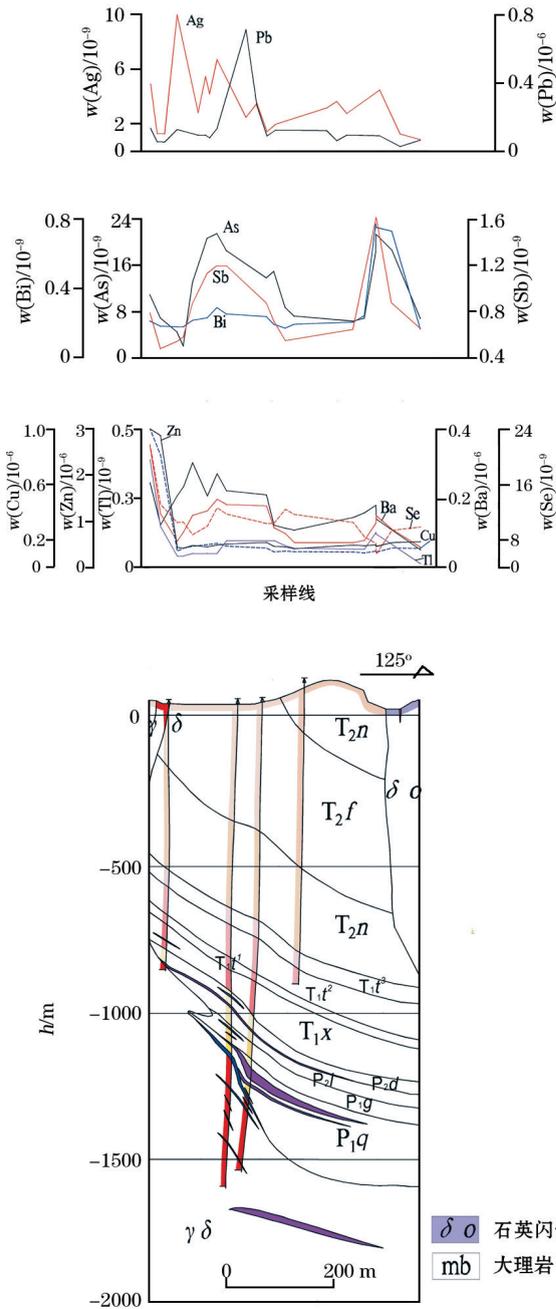


图 5 胡村铜钼矿 90 线地电提取元素异常剖面

Pb 异常衬度在 1.89~5.06, As、Se、Sb 异常衬度小于 2, 这些元素异常是对矿体的指示。As、Bi、Sb 等在东侧岩体(鸡冠山硫铁矿外围)上方出现清晰异常, Ag、Ba、Tl 出现弱异常。勘探线东西两端岩体元素组合明显不同, 在西端花岗闪长岩体上方 Se、Zn、Ba、Cu、Tl 异常非常显著, 但在东端石英闪长岩体上方基本无异常, 初步认为成矿与花岗闪长岩密切相关; 而 As、Sb 在东西两端岩体上方均显示异常, 且东端异常显著, As、Sb、Bi 套合非常好, 认为西端异常是对矿体和蚀变带的综合反映, 而东端异常位

于鸡冠山硫铁矿外围, 认为是对鸡冠山硫铁矿的指示。

### 3.2.3 异常的解释与成因分析

如何区分地电化学提取的异常是来自地表矿化还是深部矿化, 一直是影响地电提取法有效性的关键, 也是尚未解决的难题。长江中下游景观条件下, 浅表含硫化物矿化因氧化作用可以导致土壤 pH 偏低, 因此尝试利用简便的电化学测量 (pH 测量结合电导率测量) 来辅助解释地电化学异常的成因。

前人根据电导率( $\kappa_s$ )和 pH 值异常形成机理和我国地理条件, 建立了适合于我国找矿应用的电导率( $\kappa_s$ )和 pH 值异常模式(图 6)。图 6a 中, 浅埋藏矿体上方的土壤水溶液中, 将出现高强度的电导率异常和极低 pH 异常, 两者呈反相关关系; 图 6b 中, 深埋藏矿体上方的土壤水溶液中, 将出现弱电导率异常和高 pH 异常, 两者呈正相关关系。

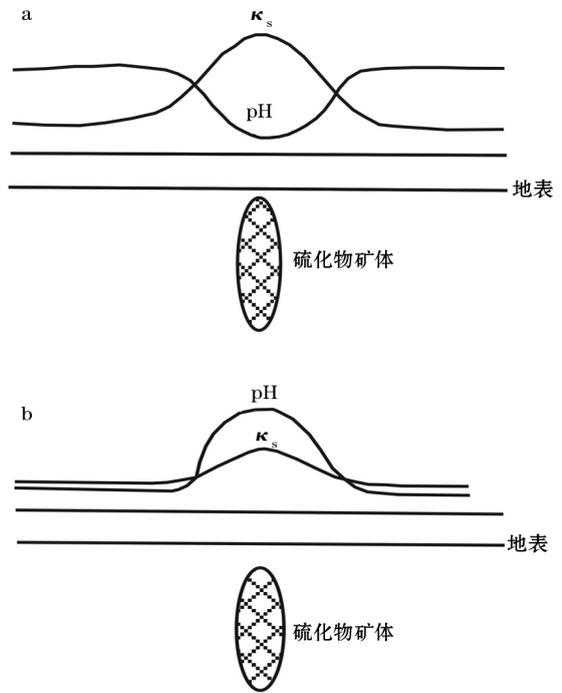


图 6 硫化物矿体上方土壤中  $\kappa_s$ 、pH 值异常模式(据参考文献[24]修改)

74 线电化学测量结果表明(图 7), 低 pH 异常刚好对应地电提取异常, 这说明 74 线提取的地电异常很可能是由于浅部矿化或者岩浆热液造成的。两侧岩体上方显示清晰电导率、pH 异常与矿体相对应, 且符合深部硫化物矿体异常模式, 但由于 pH 受地表干扰因素较多, 电导率和 pH 异常是否是深部矿体的反映还有待进一步验证。深部岩体与二叠系栖霞组厚层灰岩的接触带, 以及二叠系孤峰组硅质岩

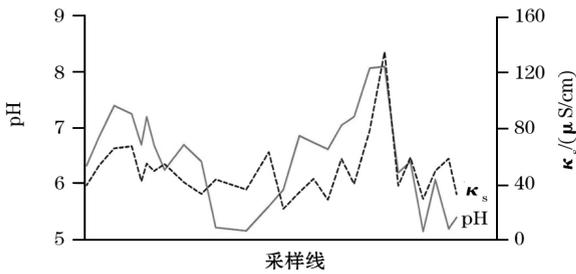


图7 胡村铜钼矿74线pH- $\kappa_s$ 异常剖面

与龙潭组砂页岩岩性突变界面,为深部矿化及相关伴生元素迁移提供了通道,尤其是岩体接触带砂卡岩及含铜砂卡岩产状近直立,为元素远距离输运奠定了构造条件。

同样,90线两侧的低pH、高电导率异常可能也反映了局部浅表矿化或岩体本身风化的影响(图8)。但中部西北侧地电提取异常处,其土壤pH值并不低,且同时存在电导率弱异常,与深部矿异常模式相吻合,因此90线西北侧的地电提取异常有可能是深部矿化的反映。剖面上地层倾向南东,矿体顺层产出,产状相对较陡,岩体与地层接触面,以及二叠系孤峰组硅质岩与龙潭组砂页岩岩性突变界面,为深部矿化及相关伴生元素迁移提供了通道,故在剖面西北侧地电提取异常很可能是对深部矿体的反映。

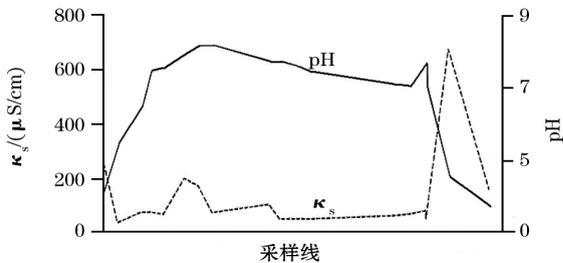


图8 胡村铜钼矿90线pH- $\kappa_s$ 异常剖面

综上分析可以看出,长江中下游景观条件下,地电提取法测量结合常规电化学测量可以有效指示和区分浅部及深部矿化。在构造有利地段,地电提取法测量可以有效指示深部矿化。

#### 4 认识及结论

试验表明,地电提取法在狮子山矿田胡村铜矿厚覆盖区寻找隐伏铜矿的效果较好,异常清晰。异常出现的位置与矿体位置比较吻合。地电化学测量可以提高异常衬度,针对深部矿体指示信息作用强,特别适合对弱异常区进行地球化学详查工作。其

中,前缘晕元素如As、Sb、Se、Ag和Pb,具有一定的深部找矿意义,衬度高,异常范围宽;Ba、Zn也具有一定的指示意义。同时,长江中下游景观条件下,可以利用高效、低成本的电化学测量(pH测量结合电导率测量)来辅助解释地电化学异常的成因。但该方法不适合土层较薄的基岩出露区。考虑到工作量较大,认为地电化学测量可以用于精细地球化学深部找矿工作。

#### 参考文献:

- [1] 罗先熔.再论地球电化学测量法寻找隐伏矿床[J].桂林冶金地质学院学报,1994,14(3):295-302.
- [2] 林才顺.地电化学新方法寻找隐伏铜金矿床的研究——以凤凰山铜矿为例[D].长沙:中南大学,2004.
- [3] 李晓勇.地电提取测量法寻找隐伏矿方法研究及应用[J].大地构造与成矿学,2002,26(1):92-96.
- [4] 赵景,邱炜,罗先熔.两种深穿透地球化学勘查方法的研究现状及存在的主要问题[J].青海大学学报:自然科学版,2012(1):49-52.
- [5] 康明,罗先熔.地电化学方法的改进及应用效果[J].地质与勘探,2003(5):63-66.
- [6] 黄学强,罗先熔,刘巍,等.凹陷盆地铜镍多金属矿床地电化学异常特征及找矿预测[J].物探与化探,2013(2):199-205.
- [7] 邱炜,潘彤,李永虎.地电化学测量法寻找隐伏金矿的机理及其应用效果[J].物探与化探,2011(2):203-205.
- [8] 邱炜,王富春,罗先熔.地电化学集成技术在青藏高原特殊景观区的找矿效果及其异常与矿体产状的关系[J].物探与化探,2013(3):377-381.
- [9] 刘秀娟,罗先熔,郑小明,等.利用地电化学法寻找隐伏铅、锌、银多金属矿——以内蒙古阿巴嘎旗陶勒盖矿区为例[J].地质通报,2012,31(1):143-150.
- [10] 舒立霞,罗先熔,吴满生,等.干旱荒漠区地电化学法寻找隐伏多金属矿——以甘肃白银银洞沟勘查区为例[J].桂林工学院学报,2009,29(4):439-444.
- [11] 王光洪,罗先熔,单江涛,等.第四纪沉积物覆盖区地电化学法寻找隐伏金矿——以安徽凤阳地区为例[J].桂林理工大学学报,2010,30(1):52-55.
- [12] 王振东,罗先熔,王坚,等.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,2012(2):50-52.
- [13] 黄标,罗先熔,覃斌贤,等.地电化学新方法寻找隐伏多金属矿——以青海三岔矿区为例[J].现代矿业,2012(9):57-59,61.
- [14] 文美兰,欧阳菲.广西平桂地区锡矿土壤离子电导率异常特征和离子成分及找矿预测[J].地质通报,2013(5):784-789.
- [15] 刘秀娟,罗先熔,郑小明,等.利用地电化学法寻找隐伏铅、锌、银多金属矿——以内蒙古阿巴嘎旗陶勒盖矿区为例[J].地质通报,2012(1):143-150.
- [16] 王慧平,朱粉利.CHIM法在双沟金矿深部找矿中应用及效果[J].云南地质,2012(3):351-353.
- [17] 金永明,邱炜,王生林,等.地电提取法在青藏高原冻土区寻找

隐伏多金属矿的初探——以沱沱河茶曲怕查铅锌矿为例[J].

青海大学学报:自然科学版,2013, 31(2): 40-44.

[18] 周涛发,袁峰,范裕,等.铜陵矿集区矿床学实践教程[M].北京:地质出版社,2009: 1-13.

[19] 常印佛,刘湘培.长江中下游铜铁成矿带[M].北京:地质出版社,1991: 1-190.

[20] 唐永成,常印佛,吴言昌,等.安徽沿江地区铜金多金属矿床地质[M].北京:地质出版社,1998: 32-44.

[21] 吴才来,陈松永,史仁灯,等.铜陵中生代中酸性侵入岩特征及

成因[J].地球学报,2003, 24(1): 41-48.

[22] 肖秋香.安徽铜陵冬瓜山铜金矿床和胡村铜钼矿床蚀变特征及成矿作用[D].合肥:合肥工业大学,2012.

[23] 徐晓春,楼金伟,陈林杰,等.安徽铜陵狮子山矿田胡村铜钼矿床的地质特征[C]//中国矿物岩石地球化学学会.中国矿物岩石地球化学学会第13届学术年会论文集,2011.

[24] 贾国相,黄书俊,栾继琛,等.无机与有机地球化学勘查技术方法研究与应用[M].北京:冶金工业出版社,2005:75-82.

## The tentative application of the geoelectro-chemical extraction method to the deep prospecting: A case study of the Hucun copper-molybdenum deposit in Anhui Province

ZHI Chao<sup>1,2</sup>, XIANG Wu<sup>2</sup>, ZENG Jian-Nian<sup>3</sup>, Xie Shu-Yun<sup>2</sup>,  
YU Sang<sup>2</sup>, ZHENG Qin-Yuan<sup>4</sup>, LU Shun-Fu<sup>3</sup>, WAN Xiang<sup>2</sup>

(1. Zhangye Institute of Non-ferrous Metal Exploration of Gansu Province, Zhangye 734012, China; 2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 4. Hubei Geological & Mining Exploration Co., Ltd., Wuhan 430022, China)

**Abstract:** The feasibility study of the geoelectric extraction method was conducted in the Hucun copper deposit, Anhui Province. The result shows that the geoelectro-chemical extraction method can improve anomaly contrast and hence is very suitable for detailed exploration work of weak regional geochemical anomalies. In particular, As, Sb, Se, Ag and Pb with a high anomaly contrast and a wide abnormal range are somewhat valuable for deep mineral exploration. Ba and Zn also have some indication significance. In addition, the authors measured the pH and  $\kappa_s$  anomalies which could effectively distinguish geoelectric extraction anomalies caused by shallow mineralization. According to the field test, the method is not suitable for thin soil bedrock outcrop area. At the same time, taking into account the considerable workload, the authors hold that the electrochemical measurements can be used to fine deep geochemical prospecting work.

**Key words:** geoelectro-chemical method; deep mineral exploration; copper-molybdenum deposit; Hucun deposit in Anhui Province

**作者简介:** 智超(1986-),男,甘肃民乐人,助理工程师,硕士研究生,主要从事矿产勘查与资源评价方面的工作。E-mail: zhcug@163.com

**通讯作者:** 向武(1968-),男,教授,主要从事非常规化探研究工作。E-mail: bgegxw@aliyun.com