

# 地电化学法寻找隐伏金矿的应用研究<sup>①</sup>

文美兰<sup>1,2</sup>, 罗先熔<sup>1</sup>, 欧阳菲<sup>1</sup>, 熊健<sup>3</sup>

(1. 桂林工学院广西地质工程中心重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 桂林矿产地质研究院, 广西 桂林 54100)

**摘要:**通过对金的地电化学成晕机制的研究, 利用地电化学法在东北大兴安岭森林覆盖区虎拉林金矿和澳大利亚第四纪厚层覆盖区 Challenger 金矿进行可行性找矿试验研究。试验结果在上述已知矿区的剖面上均测出了清晰的地电化学异常, 表明利用地电化学法在上述地区寻找的隐伏金矿是有效的。在此基础上对两矿区外围及深部进行了找矿预测, 发现4个有利的成矿靶区, 经工程验证发现2个金矿体, 取得了良好的经济和社会经济效益。

**关键词:**隐伏金矿; 成晕机制; 地电化学; 找矿研究

**中图分类号:**P632; P599 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-5663(2008)04-0347-06

自20世纪80年代初, Yu. S. Ryss 对地电化学技术的原理、方法技术和实际找矿效果<sup>[1~2]</sup>作了较全面的介绍后, 国内外许多地质专家<sup>[3~8]</sup>对地电化学的成晕机制作了深入研究, 对该方法技术进行了不同程度的改进, 并先后利用这些新技术新方法在不同矿床上开展了地电化学试验研究, 均取得了明显的效果。地电化学集成技术是我国勘查地球化学专家通过二十多年的地质实践研究总结出来的一套技术方法。该技术方法是以电化学迁移为原理, 主要是利用地电提取装置直接提取在区域、局部天然电场或人工电场作用下自深部隐伏矿体向地表进行电化学迁移的成矿元素组分或采集这种隐伏矿体上方土壤等介质进行土壤离子电导率测定的集成技术方法。目前, 在我国地电化学集成技术在贵金属、有色金属及放射性金属矿床开展了广泛的应用研究, 取得了很好的效果。

## 1 金的地电化学成晕机制

研究表明, 地下深处的隐伏金矿体发生电化学溶解, 溶解出的氧化态  $\text{Au}^+$ 、 $\text{Au}^{3+}$  具有较强的极化力,

易与  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{HS}^-$ 、 $\text{S}^{2-}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{Br}^-$ 、 $\text{I}^-$ 、 $\text{CN}^-$  和  $\text{CNS}^-$  等形成易溶络合物, 如  $\text{H}_2[\text{AuCl}_3\text{O}]$ 、 $\text{H}[\text{AuCl}_4]$  等。在各种地质营力(电化学场、地气搬运、地下水等)作用下, 使呈阳离子和阴离子态的金属离子迁移至近地表松散层中, 被有机质、铁锰氧化物及高岭石、含水高岭土和其他粘土矿物等吸附而富集。在表生环境中, 金属元素发生复杂的变化, 例如, 在土壤里, 尤其是在硫化矿床氧化带和腐殖质发育的地区, 金离子可与多种配位体形成可溶络合物, 还可以形成胶体金和悬浮金迁移。其中络合金只能在矿化带上形成, 特别是  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$  的金络合物更具专属性。而背景区则只形成胶体金或悬浮金。因此, 这些金特别是络离子态金与矿体关系十分密切, 是寻找盲矿的重要标志。

土壤中的 pH 值以直接或间接方式影响着金的活动性。一般来说, 在酸性条件下, 如黄铁矿、磁黄铁矿和其它硫化物遭受氧化的地方, 金变得更为易溶。但是, 在碱性条件下, 有合适的络合剂存在的地方, 金的活动性更高。氯化物络合物  $[\text{AuCl}_4]^-$  和其它酸性络合物, 只是在酸性条件下才稳定。中和作用使这些络合物分解而沉淀出氧化物、氢氧化物或者金属。同

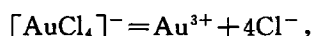
① 收稿日期: 2008-04-06 作者简介: 文美兰(1974-), 女, 2004年毕业于昆明理工大学, 获硕士学位, 在读博士研究生, 实验师, 现从事地球化学研究工作。

基金项目: 科技部国际科技合作与交流专项项目资助(编号: 2007DFA20910)和桂林工学院广西地质工程中心重点实验室基金项目(编号: 桂科能 07109011-k012)资助。

样,金的碱性络合物,如 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 和 $[\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^-$ ,在碱性条件下才稳定。因此,pH值的变化对土壤中可溶金的络合物的活动性是非常重要的。但是,土壤中金的化学性状很少单单取决于pH值的变化,铁、锰、铝等金属离子和有机质以各种方式改变着作用的过程。

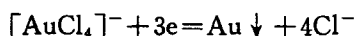
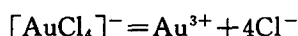
在地电提取离子过程中,阴极附近的氢离子会大量消耗( $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \uparrow$ ),由于 $\text{H}^+$ 电极反应速度远远大于 $\text{OH}^-$ 离子的迁移速度,所以阴极周围呈碱性。为了避免因大量碱化而阻碍阳离子的迁移和提取,在阴极上均匀浇泼一定量的稀硝酸,使阴极周围的碱性得到中和,有利于土壤中成矿物质的活化,有利于提高提取效果。

金的络阴离子在溶液中仍能或多或少地离解为络离子形成体和配位体,并存在着下列离解平衡(以 $[\text{AuCl}_4]^-$ 为例):

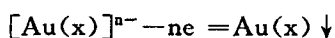


$K_{\text{不稳}} = [\text{Au}^{3+}][\text{Cl}^-]^4 / [\text{AuCl}_4]^-$  ( $K_{\text{不稳}}$ 为离解常数)

在络离子离解平衡中,如果改变平衡体系的条件,平衡就会移动。在电提取过程中,阴极上使 $\text{Au}^{3+}$ 得到电子而析出Au,于是土壤溶液中 $\text{Au}^{3+}$ 离子浓度减少,平衡就向配阴离子离解(即 $[\text{AuCl}_4]^-$ 被破坏了)的方向移动,即:



就常规的阴极提取而言,正极为无穷远极,离子的提取主要集中在阴极。在阴极附近,络阴离子一方面进行着离解平衡的破坏,在阴极上不断地析出Au;另一方面由于本身带负电而远离阴极迁移。所以络阴离子的电化学离解的范围是极其有限的,仅发生在阴极附近。如果是“偶极”提取,则络阴离子向阳极迁移,在阳极上失去电子而以Au盐形式沉积在电极上<sup>[9]</sup>,即:



$\text{Au}^+$ 形成的络阴离子在电极上可能发生歧化反应而析出 $\text{Au}^0$ 。如果正极是由惰性电极(碳棒)与泡塑组成的吸附电极,则大量络阴离子将被富集到吸附电极上。同时,负极所提取的是原先的 $\text{Au}^{3+}$ 和 $\text{Au}^+$ ,以及向正极方向迁移的络阴离子中的被离解而成的 $\text{Au}^{3+}$ 。

## 2 地电化学集成技术寻找隐伏金矿可行性试验研究

为了研究利用地电化学法寻找隐伏金矿的有效性,笔者选择在东北大兴安岭森林覆盖区的虎拉林金矿和澳大利亚第四纪厚层覆盖区的Challenger金矿进行可行性找矿试验。

### 2.1 大兴安岭虎拉林金矿

大兴安岭虎拉林金矿位于大兴安岭山脉的北段,属森林覆盖区。矿区大地构造位于额尔古纳隆起的北端,上黑龙江凹陷的边缘。矿区出露的地层为侏罗系中统二十二站组长石岩屑砂岩、粉砂泥质岩及煤线,含植物化石。侵入岩体主要为燕山期的花岗岩及花岗斑岩,花岗岩呈岩株状,花岗斑岩呈岩枝状,与二十二站组地层呈侵入接触。断裂构造按展布方向分为近EW向、NE向和近SN向三组,其中,近SN向断裂是区内主要控矿构造,它不仅控制花岗斑岩岩枝的走向,也控制着本区矿化蚀变带的走向,后期有硅化脉充填。

金矿(化)体主要产于花岗斑岩与其围岩的接触带部位,矿体与围岩界线不清。武警黄金部队曾利用各种方法在该区做了大量的研究工作,发现多处异常,共圈出19条矿(化)体。矿体的总体走向近SN向,E倾,倾角 $60^\circ \sim 70^\circ$ ,其中以1号、2号矿体为主要矿体。矿石中金属矿物主要有黄铁矿、毒砂、闪锌矿、黄铜矿、方铅矿、自然金、银金矿、碲银矿等;矿石结构为自形一半自形结构、它形结构、包含结构、固溶体分离结构、碎裂结构等。矿石构造为浸染或细脉浸染状构造、角砾状构造、脉状构造、团块状构造等。

矿床围岩蚀变主要为黄铁矿化、硅化、绢云母化、钾化为主,其次为高岭土化、碳酸盐化,其中黄铁矿化、硅化、绢云母化、钾化与金矿化关系密切。

为了检验地电化学对寻找隐伏金矿的有效性,笔者选择已知矿体出露的76号、68号两条剖面线进行试验,采用电提取法和土壤离子电导率法,点距为40m,矿体上方加密为20m。

从76号剖面线的地电化学异常特征剖面图(图1)可以看出,在已知金矿体上方(420~436点之间),恰好是地电提取Au异常的高值区和土壤离子电导率异常的较高值区域,地电提取Au异常峰值高达 $54.63 \times 10^{-9}$ (高出正常背景值10倍)。在矿(化)体上方离子电导率异常幅值高达 $11 \mu\text{S}/\text{cm}$ ,为正常背景值的1.6倍。表明地电提取异常与土壤离子电导率异常吻合较好。

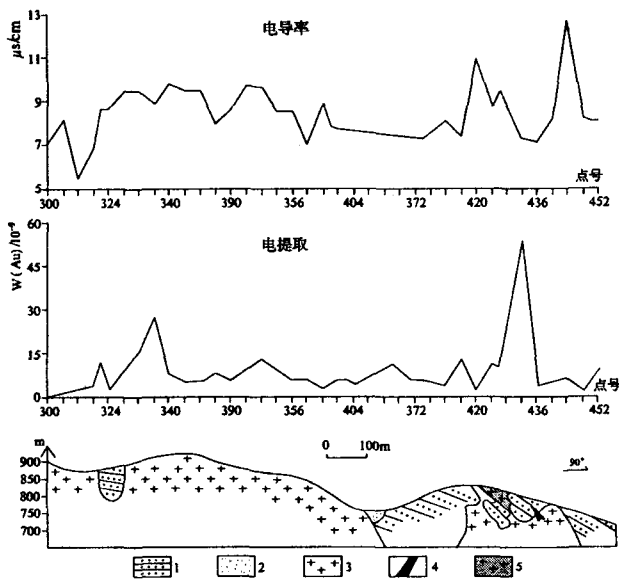


图1 大兴安岭虎拉林金矿76线地电化学异常剖面图

Fig. 1 Profile showing the geo-electrochemical anomalies on Line 76 of the Hulalin gold deposit in Daxing'anling

1—二十二站组:岩屑长石砂岩、石英长石砂岩夹砂岩、粉砂岩及煤线  
2—第四系表层土 3—花岗斑岩 4—金矿体 5—矿化蚀变带

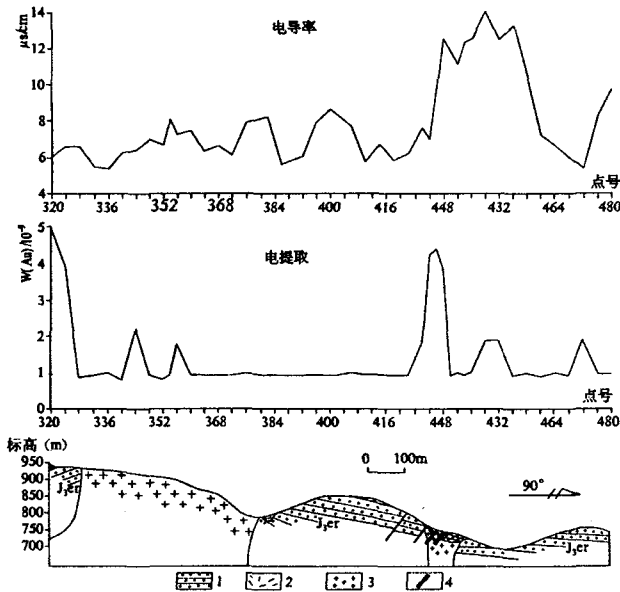


图2 大兴安岭虎拉林金矿68线地电化学异常剖面图

Fig. 2 Profile showing the geo-electrochemical anomalies on Line 68 of the Hulalin gold deposit in Daxing'anling

1—二十二站组:岩屑长石砂岩、石英长石砂岩夹细砂岩、粉砂岩及煤线 2—第四系表层土 3—花岗斑岩 4—金矿

图2为已知矿体上方的68线地电化学异常特征剖面图,该剖面地形起伏较大,地电提取法未受地形影响,在矿体上方(428~432点)出现很清晰的地电提取Au异常,峰值为 $4.4 \times 10^{-9}$ ,为正常背景值的4.4倍,且异常连续性好,较准确地指示了矿体的赋存位置。土壤离子电导率法受到地形的影响,异常范围较宽(428~460点),宽度达300m,异常强度较高(9~ $14 \mu\text{s}/\text{cm}$ ),峰值为 $14 \mu\text{s}/\text{cm}$ ,与地电提取异常基本是吻合的。

## 2.2 澳大利亚第四系厚层覆盖区Challenger金矿

Challenger金矿区地处澳大利亚内陆干燥的近沙漠化地带。区内地势平缓,地表覆盖物主要为二叠系的风化残余红土,其厚度可达数十米,在矿区约为20~30m,其上长有稀疏的耐旱灌木。该区干旱,年降雨量仅数十毫米,远低于蒸发量。

Challenger金矿是目前已报道的世界上最古老的金矿床之一。矿区的基岩由太古代片麻岩和绿岩及元古代花岗闪长岩组成,赋矿围岩为Christie片麻岩。该矿床为强变质作用改造的石英脉型金矿,由于混合岩化作用,早期形成的含金矿脉与围岩的界限已变得模糊不清。区内已探明的三条矿(化)带(M1、M2和M3,图3)NE30°展布,倾角近30°;矿化带宽一般为5~20m,最宽可达40~50m;南西端靠近地表,向NE倾伏,最大延伸约800m左右。金矿化或可见金主要与浅色物质共生,金属矿物主要为磁黄铁矿和毒砂,少量黄铜矿、闪锌矿、碲化物、辉钼矿、铋矿物和镍黄铁矿,部分金矿石中见有绿泥石。该矿床矿石平均品位 $5.6 \times 10^{-6}$ ,典型金矿石含5%~10%的硫化物,目前已探明金矿储量为15.5t。为了进一步检验地电化学法在厚层覆盖区寻找隐伏金矿的有效性,笔者在Challenger金矿区沿与已知矿(化)带M1、M2、M3延伸方向垂直的方向上布置了一条B剖面线,该剖面线长为500m(图3),点间距为20m,地表第四系覆盖物厚度达100m以上,由于受地表工作环境的限制,沿剖面B取样26个。

从地电化学异常特征剖面图(图4)可以看出,在三条矿(化)体上方均出现了明显的地电化学异常,且各类异常吻合程度较好。其中,M1金矿(化)体上方异常特征对应应在46至48号测点之间出现的异常,异常宽度为40m,地电提取Au、As异常呈单峰形态分布,最高峰值分别为 $67 \times 10^{-9}$ 、 $72 \times 10^{-9}$ ,离子电导率异常呈倒挂钟形态分布,最高峰值为 $83.3 \mu\text{s}/\text{cm}$ 。M2金矿(化)体上方异常特征对应应在49至51号测点之间,宽度为40m,地电提取Au、As异常呈单峰形态分布,最高峰值分别为 $63 \times 10^{-9}$ 、 $164 \times 10^{-9}$ ,离子电导率异常呈单峰形态分布,最高峰值为 $98.8 \mu\text{s}/\text{cm}$ 。M3

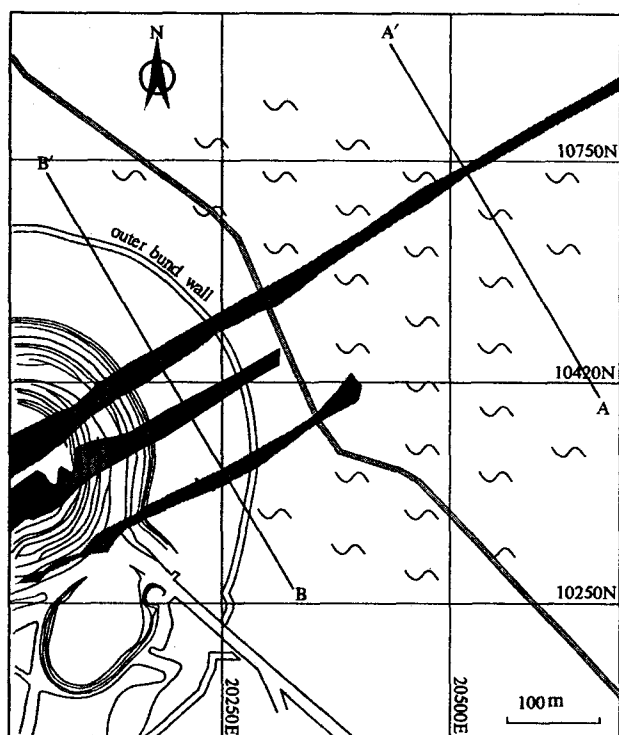


图3 Challenger 金矿地电化学法可行性  
试验A、B剖面线布置图

Fig. 3 A and B profile lines distributed for  
feasible experiments about using geo-electro-  
chemical methods in the Challenger gold deposit

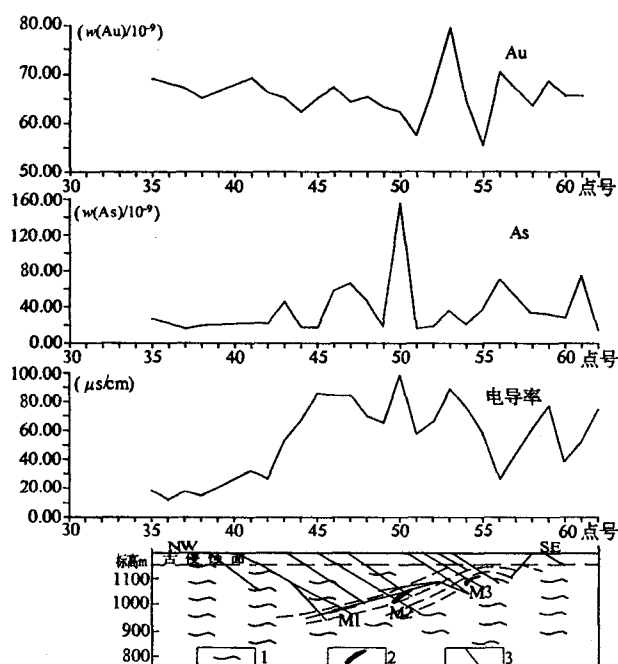


图4 Challenger 金矿B剖面地电化学异常特征图

Fig. 4 Map showing the geo-electrochemical  
anomalies of B profile in the Chanllenger deposit  
1—变质岩 2—矿体 3—钻孔

金矿(化)体上方异常特征对应应在53至56号测点之间,宽度为60m,地电提取Au、As异常呈单峰形态分布,最高峰值分别为 $79 \times 10^{-9}$ 、 $74 \times 10^{-9}$ ,离子电导率异常呈单峰形态分布,最高峰值为 $60.46 \mu\text{s}/\text{cm}$ 。

上述两金矿区已知矿体上方布置的地电化学异常特征,表明用该方法对寻找隐伏金矿是可行、有效的。

### 3 地电化学法找矿预测效果

为了验证地电化学法寻找隐伏金矿的有效性,笔者在两个金矿区外围及其深部开展了不同比例尺的地电化学法找矿预测研究,结果在两个矿区都发现了很好的综合Au地电化学异常,经工程验证,获得了一定的金储量,取得了良好的经济效益。

#### 3.1 大兴安岭虎拉林金矿深部找矿预测研究

2002年笔者应用地电化学法对虎拉林矿区圈出的Hy-2、Hy-3、Hy-4号化探Au异常进行深部找矿评价,工作方法按 $200 \times 40\text{m}$ 测网(异常中心地段加密到20m)布置6条线(84,76,68,60,52,44)。结果在测区内共圈出了三条带状分布的金异常(见图5),按照分布的平面位置,将异常从东到西分别编为D1、D2、D3号。

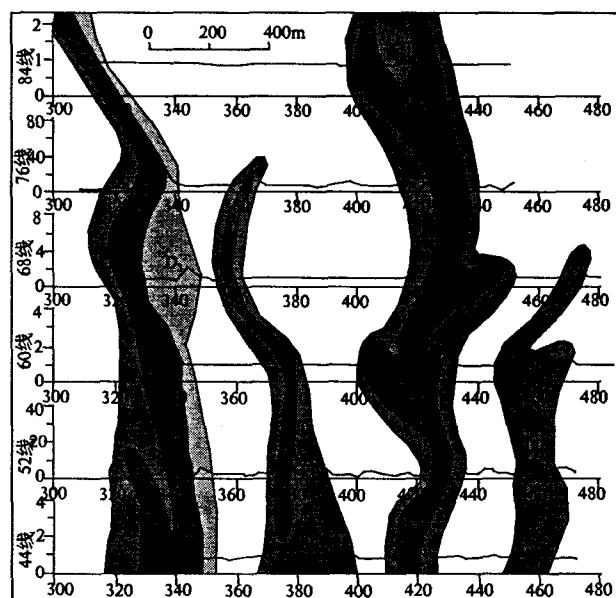


图5 大兴安岭虎拉林金矿地电提取  
异常平面剖面图及靶区划分

Fig. 5 Plane map showing the geo-electrochemical  
anomalies and the distribution of targets in the  
Hulalin gold deposit of Daxing'anling

320~340m 之间,异常基本上沿着侏罗系与岩体的接触带分布。建议对D3 号异常接触带进行山地工程揭露,可能会有新的突破。

2006 年我们在澳大利亚 Challenger 金矿进行地电化学法寻找隐伏金矿可行性试验的同时,也在与矿(化)体延伸方向(NE30°)、距离 B 剖面线 500m 处布置了一条与之平行的 A 剖面线(图 3),对该矿区外围进行找矿研究,工作方法采用 20m 点距测量,结果在该剖面上出现了明显的地电化学综合异常(图 7),从 A 剖面线的地电化学异常特征可以看出,在剖面线上共发现 3 段有利成矿地段,分别位于 A 剖面的 14 至 16 号点、18 至 20 号点、22 至 24 号点。其中:14~16 号点

图7 Challenger 金矿 A 剖面地电化学异常剖面及靶区地段图

1—变质岩 2—矿体 3—钻孔

351

图6 大兴安岭虎拉林60号线工程验证剖面图

D3 号异常位于测区西部,呈长条带状分布,异常长达 1200m,平均宽 150 余米,异常浓集中心分布在

(化)体延伸部分。

22~24号点间出现的综合异常宽度为20m,地电提取Au异常呈单峰形态分布,最高峰值为 $162 \times 10^{-9}$ ; As异常呈双峰形态分布,最高峰值为 $73 \times 10^{-9}$ 。结合矿床地质特征和已知B剖面线上的地电化学异常特征,认为该处为最有利的成矿地段,推测为M3矿(化)体向NE方向的延伸部位。2006年,经Dominio矿业公司钻探工程揭露,发现新矿体,获得了一定金储量。

## 4 结论

(1)经研究表明,金矿在微观原电池作用下会发生电化学溶解,形成金离子和金的络阴离子,同时也能产生金的离子晕。利用地电化学法不仅能提取金离子,而且也能提取金的络阴离子。

(2)通过在不同国度的不同厚层覆盖区、对不同成因、不同类型的隐伏金矿开展了地电化学方法找矿有效性的试验研究,结果在上述已知矿区的剖面上均测出了清晰的地电化学异常,表明利用地电化学法来寻找上述类型的隐伏金矿是有效的。

(3)在大兴安岭虎拉林金矿区,按 $200\text{m} \times 40\text{m}$ 测网(异常中心地段加密到20m)布置6条线(84,76,68,60,52,44),开展地电化学测量找矿评价工作。结果在测区内共圈出了三条带状分布的金异常,编号为D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>、D<sub>3</sub>,经深部工程验证D<sub>1</sub>号异常见到隐伏金矿体。

(4)在澳大利亚Challenger金矿区,开展了地电化学外围及深部找矿预测研究,结合矿床地质特征和

在已知矿体上方开展的地电化学方法试验,在矿区外围按20m点距布置1条线剖面线开展工作。获得了3个有利的成矿地段靶区,并经工程验证获得了一定的金储量。

综上所述,在不同厚层覆盖区,利用地电化学法寻找隐伏金矿的找矿方法是有效的。

## 参考文献:

- [1] Ryss Yu. S. and Goldberg I. S. The method of partial extraction of metals(CHIM) for exploration of ore deposits[J]. Methods Tech. Explor., 1973, 84: 5-19.
- [2] Alexeev S. G., Veikher A. A. and Goldberg I. S. Possibilities of the CHIM method for searching deep-seated gold-bearing objects[J]. Methods Techn. Explor., 1978, 84: 5-19.
- [3] Govett G. J. S. Soil conductivities assessment of an electro-chemical technique [J]. Geochemical exploration, 1974: 101-118.
- [4] 罗先熔. 地电化学成晕机制、方法技术及找矿研究[M]. 北京:地质出版社, 2007: 3.
- [5] 罗先熔. 地球电化学勘查及深部找矿[M]. 北京:冶金工业出版社, 1996: 235.
- [6] Xu B., Fei X. and Wang H. Electrogeochemical extraction technique in the prospecting of buried gold deposits. In: Xie Xuejing and S. E. Jenness (Editors), Geochemical Exploration in China[J]. J. Geochem. Explor., 1989, 33: 99-108.
- [7] 罗先熔. 地电提取法寻找贫硫化物金矿的研究[J]. 地质与勘探, 1999, 35(4): 42-44.
- [8] 罗先熔, 陈三明, 杜建波, 等. 地球电化学勘查法寻找不同埋深隐伏金矿的研究[J]. 矿物岩石, 2002, 22(4): 42-46.
- [9] 邓涛声. 隐伏金矿中金离子晕形成机理的探讨[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1991, 11(2): 171-175.

## Study the prospecting for concealed gold deposit by using geo-electrochemical method

WWN Mei-lan<sup>1,2</sup>, LUO Xian-rong<sup>1</sup>, OUYANG Fei<sup>1</sup>, XIONG Jian<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Geological Engineering Centre of Guangxi Province, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Guilin Research Institute of Geology for Mineral Resource, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract:** Based on the study of the forming mechanism about gold geo-electrochemical anomalies, the feasible prospecting experiments and prospecting prediction research about using geo-electrochemical methods were carried out in the Hulalin gold deposit covered by Daxing'anling forest in northeast China and in the Challenger gold deposit located in Australia Quaternary thickly overburdened area. The experiments' results showed that geo-electrochemical anomalies were detected obviously on the profiles of both known ore areas, which indicated that geo-electrochemical methods would be used effectively to prospect for concealed gold deposits in forementioned areas. Besides, prospecting prediction was made in the periphery and deep part of the two ore areas with 4 favourable ore-forming targets detected and 2 gold orebodies discovered by engineering verification. In addition, good economic and social benefits were obtained.

**Key Words:** concealed gold deposit, gold anomalies forming mechanism, geo-electrochemistry, prospecting study