地球电化学法在中国–澳大利亚两国寻找隐伏铀矿中的对比研究

侯冬梅[1,2],罗先熔[1,3],王建历[2],文美兰[1],欧阳菲[1],李兆谊[1]
HOU Dong-mei[1,2], LUO Xian-rong[1,3], WANG Jian-li[2],
WEN Mei-lan[1], OUYANG Fei[1], LI Zhao-yi[1]

1. 桂林理工大学地球科学学院,广西 桂林 541004;
2. 浙江省地球物理地球化学勘查院,浙江 杭州 310005;
3. 桂林理工大学有色及贵金属隐伏矿床勘查教育部工程研究中心, 广西 桂林 541004
1. *College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;*
2. *Zhejiang Geophysical and Geochemical Exploration Academy, Hangzhou 310005, Zhejiang, China;*
3. *Engineering Research Center of Exploration for Hidden Non-ferrous and Precious Mental Ore Deposits at Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China*

摘要:地球电化学法是一种借外加电场使活动态的金属离子定向迁移到特制的接收装置、分析装置中的电解物,从而发现与隐伏矿床有关的金属离子异常,达到找矿目的的新方法。通过在中国江西省乐安县湖溪某矿区、澳大利亚 Four Mile East 某矿区开展以地球电化学提取测量为主、土壤离子电导率测量为辅寻找隐伏铀矿的工作,结合相应矿区地质、地球化学特征对该集成技术的应用效果进行了对比研究,提出了地球电化学法寻找隐伏铀矿的理想异常模式。结果表明,地球电化学法不仅适用于厚层覆盖区寻找火山岩型铀矿,对砂岩型铀矿同样可以取得良好的找矿效果。

关键词:地球电化学法;隐伏铀矿;找矿模式;中国–澳大利亚
中图分类号:P632+.2; P631.3+22 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-2552(2012)01-0126-10

Hou D M,Luo X R,Wang J L,Wen M L, Ouyang F, Li Z Y. A comparative study of the prospecting for hidden uranium deposits by applying geo-electrochemical method in China and Australia. ***Geological Bulletin of China,*** **2012,31(1):126-135**

Abstract: The geo-electrochemical method is a new technology in search for deep concealed deposits. With an electrical field, active metal ions move into special receivers. Electrolyte in the receiver is analyzed. Metal ion anomalies which may be related to concealed ore deposits can guide prospecting. Geo-electrochemical extraction method, soil ionic conductivity method and soil heat-released mercury method were applied to the prospecting for uranium deposits, which are located in the Huxi ore district in Jiangxi Province of China and the Four Mile East mine in Australia. Combined with different geological backgrounds and geo-chemical features, the authors studied practical application effect of the integrated technology, and put forward an ideal geo-electrochemical anomaly pattern of the hydrothermal uranium ore vein. The result shows that the application range of the method is suitable not only for volcanic type uranium deposits but also for sandstone-type uranium deposits. The prospecting result is satisfactory.

Key words: geo-electrochemistry method; hidden uranium deposit; prospecting model; China and Australia

收稿日期:2011-05-18;**修订日期**:2011-11-25
资助项目:国际科技合作项目(编号:2007DFA20910)和广西地质工程中心重点实验室基金项目(编号:11-031-20-2)
作者简介:侯冬梅(1984-),女,硕士,从事深穿透勘查地球化学研究工作。E-mail:saraih520@163.com
通讯作者:罗先熔(1953-),男,教授,博士生导师,从事地质、地球化学勘查教学与研究工作。E-mail:luoxianrong@glite.edu.cn

近年来,迫于全球温室气体减排的压力,有关部门甚至考虑上调未来核电发展的目标。尽管前不久日本 9.0 级地震、海啸引起的核泄露事故引发了全球对核电安全的担忧,各国都在考虑是否“弃核”,但是从发展清洁能源和低碳经济考虑,依靠煤炭、水力发电面临着非常大的环保压力, 风力和太阳能发电的成本又居高不下,所以“弃核”并不现实。若能合理设计、良好管理和有效监管, 核能仍是一种比较安全、高效的能源。世界上已探明的铀资源主要分布于澳大利亚、巴西、加拿大等 9 个国家,占全球已探明铀资源总量的 70%。中国已探明的铀矿床有 200 多个,以中、小型矿床为主,且品位较低,主要分布在江西、新疆、广东、辽宁等地[1]。

当前中国已确定了“积极推进核电建设”的基本方针, 核电规模快速发展对铀矿资源提出了新的需求。随着找矿难度的加大,开展新一轮找矿工作必须寻求更为有效的方法技术。由于隐伏矿床找矿缺乏直接的矿产标志,可利用的矿化信息少,地球电化学法(地电化学法)是寻找隐伏矿床的直接找矿方法之一。本文试图通过分析地电化学法在江西乐安县湖溪某铀矿区、澳大利亚 Four Mile East 某铀矿区的地质-地球化学特征, 对该方法的应用条件和异常特征进行对比研究, 提出相应的找矿模式以便指导类似隐伏铀矿的找矿工作。

1　方法原理及特点

1.1　地电化学提取测量法

地电化学提取测量法是以地下岩石中的离子动态平衡状态为基础的地球化学方法[2],利用人工电场打破地下的离子动态平衡, 促使离子向离子收集器方向迁移, 之后地下岩石中的离子重新达到动态平衡。通过测量收集器外层样品(泡塑)中的成矿离子含量来推测深部是否存在隐伏矿, 从而达到寻找隐伏矿的目的。野外工作方法是在测点位置处挖 2 个间距为 1m、深约 30cm 的坑,各倒入 500mL 浓度为 15%的硝酸溶液, 充分搅拌后把经过特殊处理的泡塑包裹碳棒(电极)放入坑中并浸泡完全,回填土壤。然后,将 2 个电极接于 9V 电池,供电 48h 后回收离子收集器,对泡塑样品进行分析。

该方法具有较单一确定探测目标性质的能力,可作为评价常规物化探异常的有效手段。该方法可用于厚层外来运积物覆盖区, 在常规化探无效或效果较差的情况下可以强化或发现弱异常。

1.2　土壤离子电导率测量法

土壤离子电导率测量法是地电化学测量法的一种, 方法的实质是通过测定样品中多种成晕离子的代参数——电导率来达到寻找隐伏矿的目的[3]。野外采集 B 层土壤样,晾干过 100 目筛,称取 1g 样品,加入 100mL 去离子水,用磁力搅拌仪搅拌 1min,静置 30s,用电导率仪测定电导率。

土壤离子电导率测量法示矿信息远比常规物化探方法要强,野外工作方法简单、易于操作、工作效率高、成本低,数据采集重现性好,采样测试分析误差较小。

2　地球电化学法在国内外铀矿区应用实例

2.1　江西省湖溪某火山岩型铀矿

2.1.1　地质概况

本区位于赣杭构造火山岩成矿带(钦杭成矿带东段)西南段,相山火山塌陷盆地的西部。区内出露地层自老到新有震旦系变质岩(Z)和上侏罗统打鼓顶组(J_3d)、鹅湖岭组(J_3e)火山岩,测区西北部少量出露上白垩统南雄组(K_2n)含砾砂岩、粗砂岩。测区北部有一条近东西向的次花岗斑岩带,呈岩墙、岩枝状侵入碎斑熔岩中。区内已知铀矿床主要受 NW 向河元背-小陂断裂($F_{河-小}$)和 NE 向东堆断裂($F_{东堆}$)的控制。$F_{河-小}$断裂是本区最主要的断裂构造,断裂带的上、下盘均发育有一系列近南北走向的裂隙构造,裂隙构造多与主断裂成锐角相交,局部与之平行。$F_{河-小}$断裂不仅是一条导矿构造, 也是一条含矿构造。断裂东、西两侧分布有 2 个矿床,断裂带上盘(西侧)为牛头山矿床、下盘(东侧)为河元背矿床。两矿床中钍矿体与铀矿体共生,矿化范围大体一致,亦有钼共生。牛头山矿床深部铀矿化层下部有铅、锌、银多金属矿化层存在。

2.1.2　可行性试验研究与地电化学理想异常模式

选取相邻地区已知同类型铀矿床居隆庵矿床 64 线为试验剖面。矿体富集部位埋深 250~470m,在此开展了地电提取和土壤离子电导率测量,2 种方法在已知矿体上均获得了清晰的异常, 吻合情况较好,如图 1 所示。

在铀矿(带)赋存的地表垂直投影范围内,有带状的土壤离子电导率异常, 存在明显可辨的成矿元素 U、Th、Mo 及其它伴生元素异常; 矿带在地表的

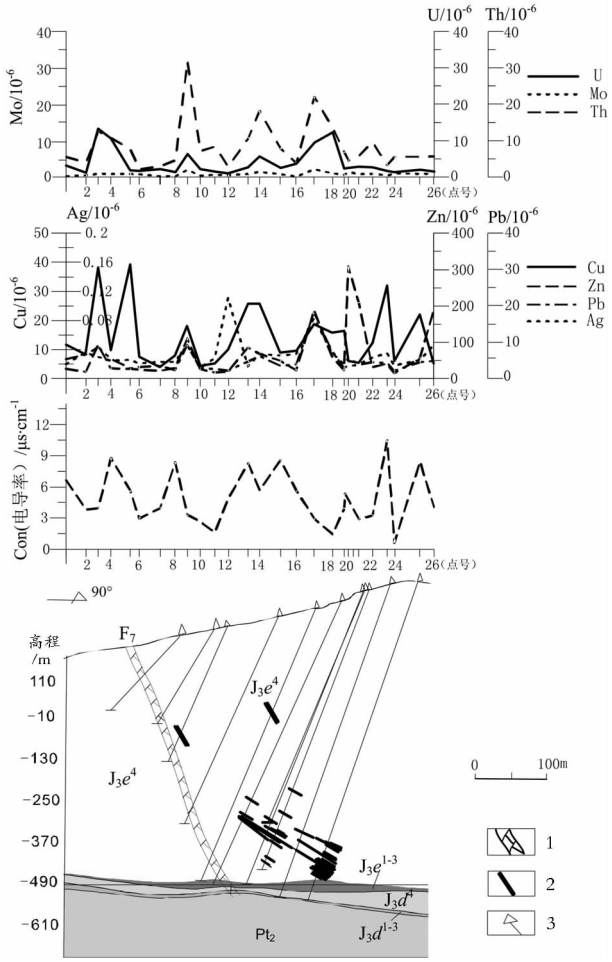


图 1 居隆庵矿床 64 线地质-地球化学综合异常剖面

Fig. 1 Profile showing geological and geochemical integrated anomalies along No.64 exploration line of the Julong′an ore deposit

J_3e^4—上侏罗统鹅湖岭组碎斑熔岩; J_3e^{1-3}—砂岩; J_3d^4—上侏罗统打鼓顶组流纹英安岩; J_3d^{1-3}—含砾砂岩; Pt_2—中元古代石英片岩;1—断层;2—矿体;3—钻孔

垂直投影范围内以土壤离子电导率的明显高异常值为边界,分别为 8 号点和 23 号点。根据该铀矿床的地球化学异常特征, 即在电导率高峰值夹持的异常带中存在成矿元素 U、Th、Mo 及多金属元素地电提取异常, 可归纳本矿区铀矿带地电化学理想异常模式,如图 2 所示。

2.1.3 地质-地球化学找矿标志

地质找矿标志:①赋矿地层及岩性,上侏罗统鹅湖岭组(J_3e)碎斑熔岩;②构造,“三面交汇”(断裂破碎带、基底断陷与不整合接触带)部位存在多金属矿

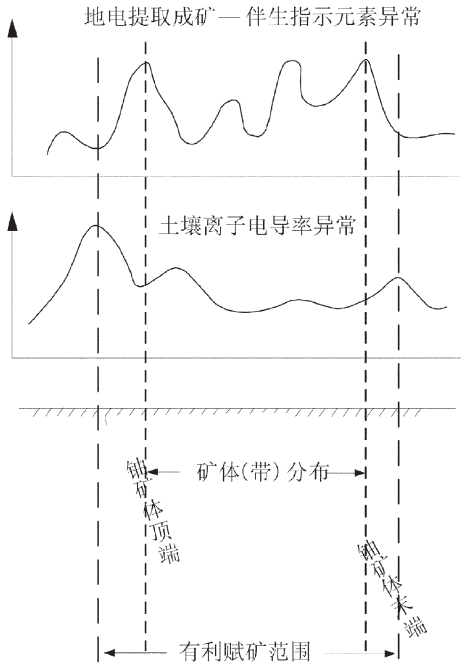


图 2 湖溪某铀矿区地电化学理想异常模式

Fig. 2 Ideal model of geo-electrochemical anomalies in the Huxi uranium ore district

化或赋存铀(钍)矿,裂隙越密集发育的地方成矿概率越大,断裂与地层组间界面复合部位的上、下岩层(碎斑熔岩和流纹英安岩)中往往赋存矿体;③矿化次火山岩侵入到主赋矿岩层碎斑熔岩中。

地球化学找矿标志: ①元素组合 U、Th、Mo、Pb、Zn、Ag 可作为找矿指示元素; ②土壤离子电导率明显异常往往出现在裂隙发育等具有良好离子通道的矿化体上方。

2.1.4 湖溪某矿区地球化学异常特征

在本区布设 3 条剖面,采集样品 227 个,共发现 12 处地电提取铀异常和 11 处土壤离子电导率异常,圈定了 5 个成矿远景区。

(1)地电提取 U 异常平面特征

该区共获得 12 个规模大小不等的 U 异常,如图 3 所示。U-2 和 U-3 号异常具有 3 级浓度分带,且异常规模较大。U-3 号位于铀矿化带附近,异常西部位于东堆断裂东侧,推测为含铀矿(带)引起的。U-2 号异常呈条带状,位于 NE 向东堆断裂破碎带西侧以碎斑熔岩为主的地层内, 推测是由未知铀(钍)矿带引起的。其它异常零星分布,规模相对较小。

(2)土壤离子电导率(Con)异常平面特征

图 4 展示了 11 个规模不等的电导率(Con)异常,具有内带浓度中心的有 Con-7 和 Con-10 号 2 个异常,位于河元背-小陂断裂东西两侧。如 Con-10 号异常, 呈 NW 向位于河元背-小陂断裂东侧,受火山断陷构造的控制,位于赋矿地层内,异常北东侧裂隙密集,地表附近可见铀矿(化)脉。规模较大的 Con-3 号异常位于 NE 向东堆断裂西侧赋矿地层中,推测为未知铀矿带赋矿边界引起的。类似的还有 Con-4、Con-5 号异常。

2.1.5　靶区划分和找矿预测评价

将地电提取 U、Th、Mo、Pb、Zn、Cu、Ag 各元素异常中带进行叠加, 可圈出 5 个地电提取综合异常区,如图 5 所示。在此基础上,结合同类型矿床、本矿区的地质特征、土壤离子电导率异常,将综合异常区划分为 3 类靶区,按找矿前景依次为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类,建议首先在Ⅰ类靶区进行工程施工验证。各靶区的特征和找矿预测评价见表 1。

2.2　澳大利亚 Four Mile East 某砂岩型铀矿

2.2.1　地质概况

Four Mile East 某铀矿床位于一崩塌剥蚀的平原上,距前缘约 1.5km。铀矿化主要出现在古近系—新近系砂岩中,矿化在 Eyre 地层中横向扩展。铀矿化上层覆盖包括约 90m 厚的岩性为粉质粘土的 Namba 地层和 40m 厚的 Willawortina 地层坡积-冲积物,矿化发生在潜水面以下 150~210m 的深处。

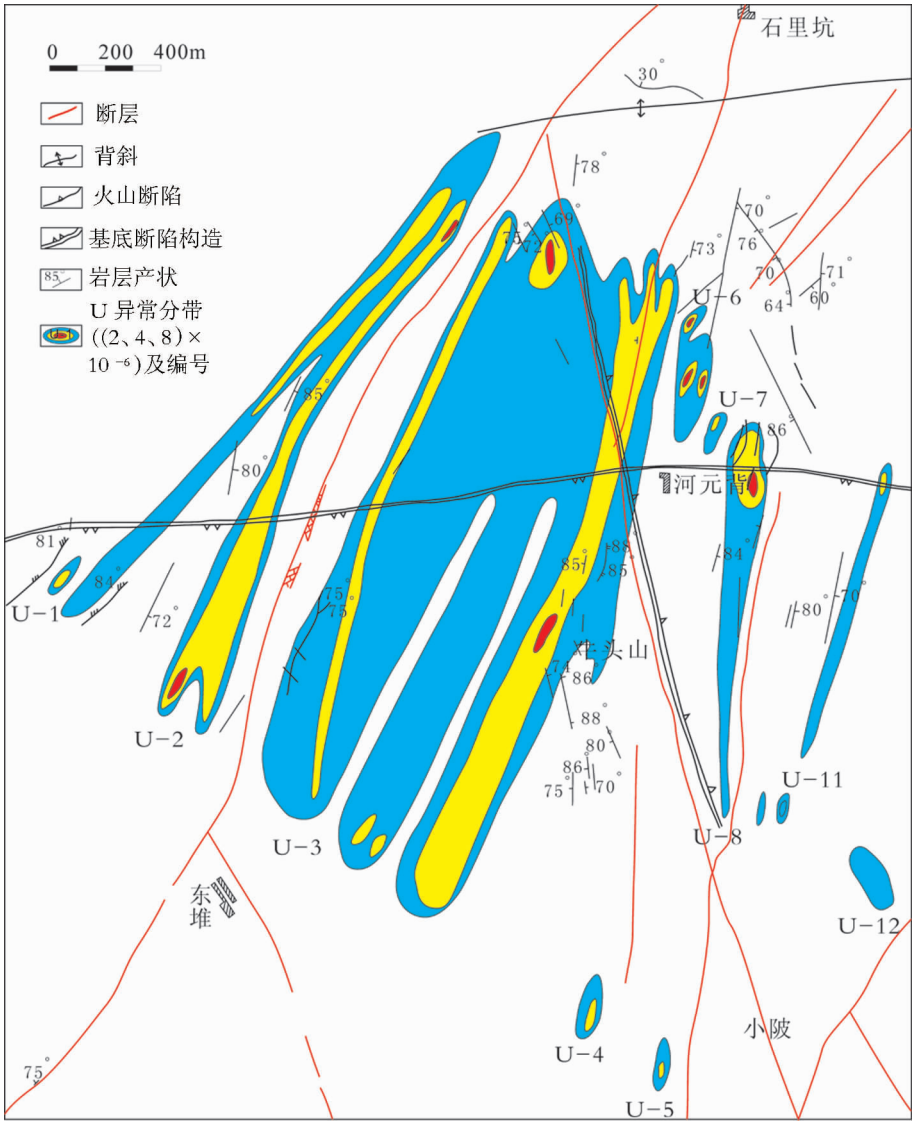


图 3　湖溪某矿区地电提取铀异常平面图

Fig. 3　Plan view of the geo-electrochemical extracted uranium anomalies in the Huxi ore district

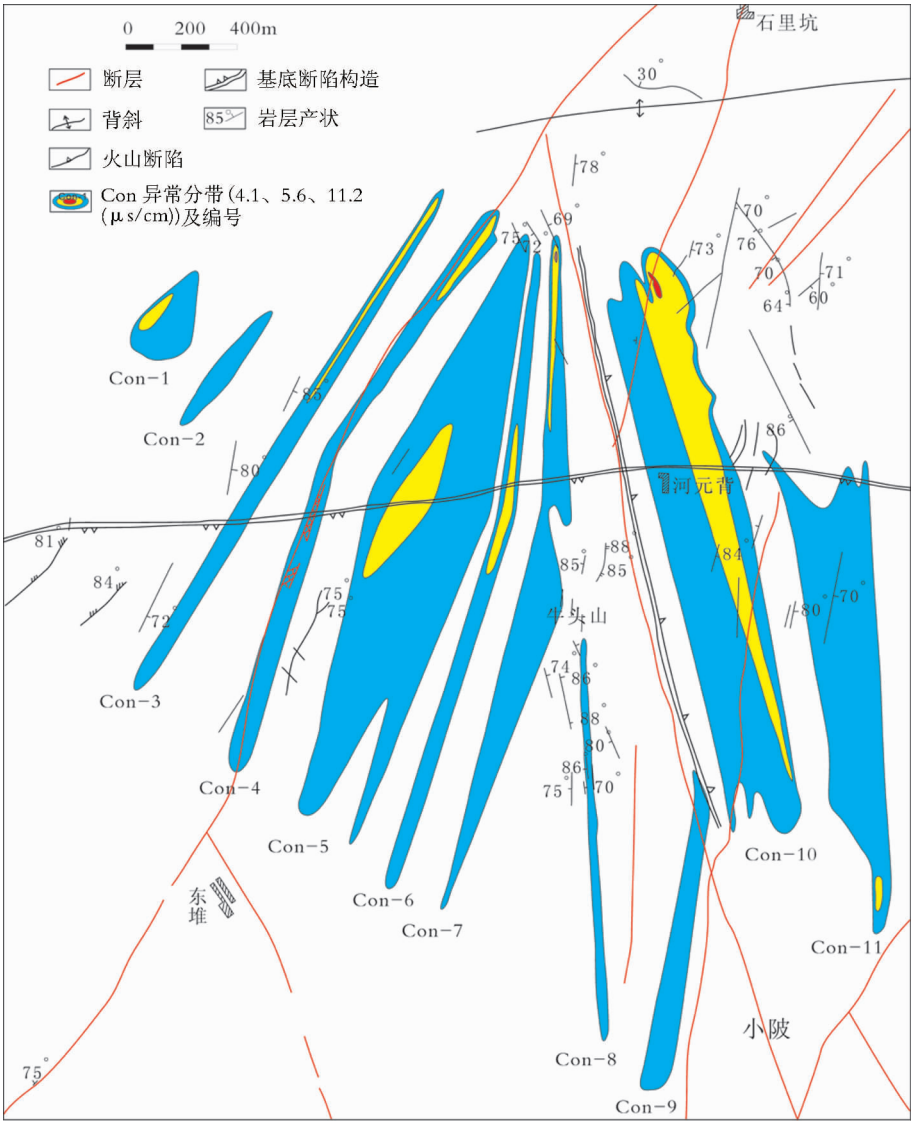


图 4 湖溪某矿区土壤离子电导率异常平面图

Fig. 4 Plan view of anomalies of soil ionic conductivity in the Huxi ore district

2.2.2 地质-地球化学异常特征

在 Four Mile East 某铀矿区开展了土壤离子电导率测量、地电提取测量和土壤测量。测线长为 1000m,点距为 20m。

如图 6 所示,剖面上出现 2 处综合异常段,第一处位于 4~21 号点之间,出现 U、Mo、Ag、Cu、Co 异常组合,异常宽约 340m,位于古近系砂岩为主的地层中,该地段铀矿化较富积。土壤离子电导率(Con)仅在该段 17~21 号点出现高异常,对应胶结石英砂岩带尖灭端的位置,找矿前景较好。29~40 号点之间综合异常宽约 200m,尽管已知铀矿化较弱,但 U、Mo、Ag、Cu、V、Co 异常明显,并且多数在此段取得最大异常值,此外还出现多峰状电导率异常。

2.2.3 地电提取与土壤地球化学测量异常效果对比

土壤测量法是采集放置电极前的坑底土样,用 75 目的筛子过滤,然后用偏提取液(氰化物与焦磷酸钠的混合溶液)处理再进行 ICP-MS 分析。由于 2 种方法的测量结果存在级数差,故对数据进行极差变换统一量纲,以方便对比研究。

如图 7 所示,地电提取 U 异常曲线表现出阶梯变化,3~15 号点(平均含量为 1464μg/L)和 29~40 号点之间(平均含量为 1998μg/L)高异常较明显,

表 1　湖溪某矿区靶区综合异常特征

Table 1　Comprehensive anomaly features of the target area in the Huxi ore district

靶区编号	地电异常编号	异常组合	地　质　特　征	推　断　解　释
Ⅰ类	CHIM-1	U、Th、Pb Cu、Zn、Ag Mo、Con	异常位于 NE 向 $F_{东堆}$西北侧，中部出现基底断陷构造，主要地层为上侏罗统鹅湖岭组碎斑熔岩，北部出现上白垩统南雄组砂砾岩、含砾砂岩、粗砂岩与鹅湖岭组不整合接触带，多处次斑状花岗岩侵入碎斑熔岩	推测是由未知铀(钍)矿脉带及多金属矿化引起的
	CHIM-2	U、Th、Pb Cu、Zn、Ag Mo、Con	异常位于 NE 向 $F_{东堆}$和 NW 向 $F_{河-小}$夹持的北部地段。EW 向次花岗斑岩呈岩枝或岩墙状侵入到碎斑熔岩中，异常北部位于震旦系变质岩和上侏罗统打鼓顶组、鹅湖岭组火山岩不整合接触带上方，裂隙发育。基底断陷北部河元背−小陂断裂破碎带东西两侧分别为已知的河元背矿床与湖港二号矿带	据已知的同类型邹家山和居隆庵矿床的资料，推测“三面交汇”部位存在多金属矿化或赋存铀(钍)矿；断裂与组间界面复合部位的上下岩层(碎斑熔岩和流纹英安岩)中赋存矿体。局部异常由已知矿体引起。找矿前景较好
Ⅱ类	CHIM-4	U、Th、Pb Cu、Zn、Ag	异常位于 NE 向 F 东堆和 NW 向 $F_{河-小}$组成的菱形块断中部的碎斑熔岩地层中。北部靠近牛头山矿床，裂隙发育	推测由未知的铀(钍)矿脉带及多金属矿化引起
Ⅲ类	CHIM-3	U、Th、Mo Cu、Zn、Ag	位于一条 NS 向小断裂尾端的碎斑熔岩中	推测由未知的铀(钍)矿脉带及多金属矿化引起
	CHIM-5	U、Th、Pb Cu、Zn	异常位于火山断陷构造南部的碎斑熔岩地层中，裂隙发育	

表 2　地电化学法在国内外铀矿区应用条件和异常特征

Table 2　Application conditions and anomaly features of geo−electrochemistry in the uranium ore districts in China and abroad

矿区	矿床类型	覆盖程度	土壤性质	矿体埋深和产出形态	饱水条件	构造条件	元素组合和地电异常特点	地电异常范围(背景值)/10^{-6}
江西乐安湖溪某矿区	火山岩型	几到几十米	残积物坡积物粘土、细砂	>250m，呈陡倾斜脉状、群脉状	湿润气候	相山火山塌陷盆地，EW 向基底断陷构造与 NS 向的火山断陷构造交叉，NW 向和 NE 向断裂交错，裂隙发育	U、Th、Mo、Pb 相关性较大 Th>U>Mo 同步变化	U 2~22.5(0.9) Mo 1.8~21.9(0.8) Th 9~100(4.5)
Four Mile East 某矿区	沉积砂岩型	40m	坡积物冲积物	130m，呈缓倾斜层状、似层状、透镜状	潜水面以下 150~210m	位于崩塌剥蚀平原上	U、Mo、Ag、V 组合异常，U>Mo 基本同步	U 1.86~4.37(1.07) Mo 0.72~1.27(0.42)

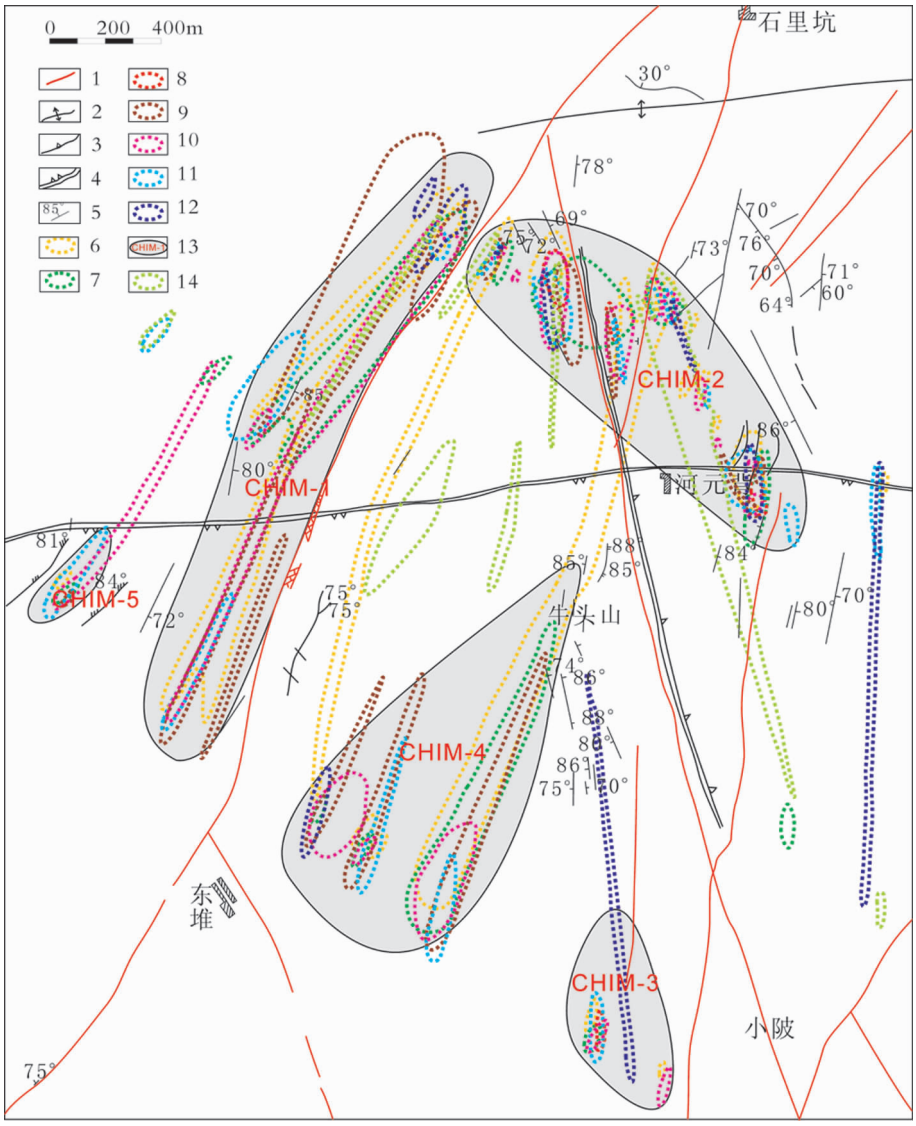


图 5 湖溪某矿区地质地化综合异常叠加图

Fig. 5 Superimposition map of geo-electrochemical comprehensive anomalies in the Huxi ore district

1—断层;2—背斜;3—火山断陷;4—基底断陷构造;5—岩层产状;6—U 异常;7—Th 异常;8—Mo 异常;9—Pb 异常;10—Zn 异常;11—Cu 异常;12—Ag 异常;13—地电提取综合异常;14—离子电导率异常

16~28 号点之间相对较低的 U 异常段(U 含量低于 1000μg/L)将 2 个高异常带分隔开了,推测是由于强矿化地段上方存在胶结石英碎屑岩,作为屏蔽层不仅保护强铀矿化体不受地下水和小溪的氧化淋滤,同时也拦阻了离子在垂向上的迁移。这也刚好可以解释为什么在距离小溪两边约 100m 的地段(即 16~28 号点之间)会出现低"背景"的突变。3~15 号点之间高异常与强铀矿化地段相对应,29~40 号点之间的高异常位于弱矿化地段的上方。土壤测量 U 异常跟地电提取异常曲线的形态相同。

地电提取 Ag 异常出现明显的阶梯变化,与土壤测量结果不同。在 22~25 号点之间地电提取 Ag 异常较弱,刚好位于小溪东边到排水沟西边这一地段,推测是由地形的影响所致,并非受矿化带的影响。地电提取 V、Cu、Mo 等元素异常,与土壤测量异常对应不太明显。地电提取 Cu 异常曲线出现了 2 个窄小的高异常段,但在连续矿化带上方没有出现类似的高异常。

综上所述,在 Four Mile East 某矿区,U 元素与地质特征的相关性最明显,而且地电提取的 U 异常

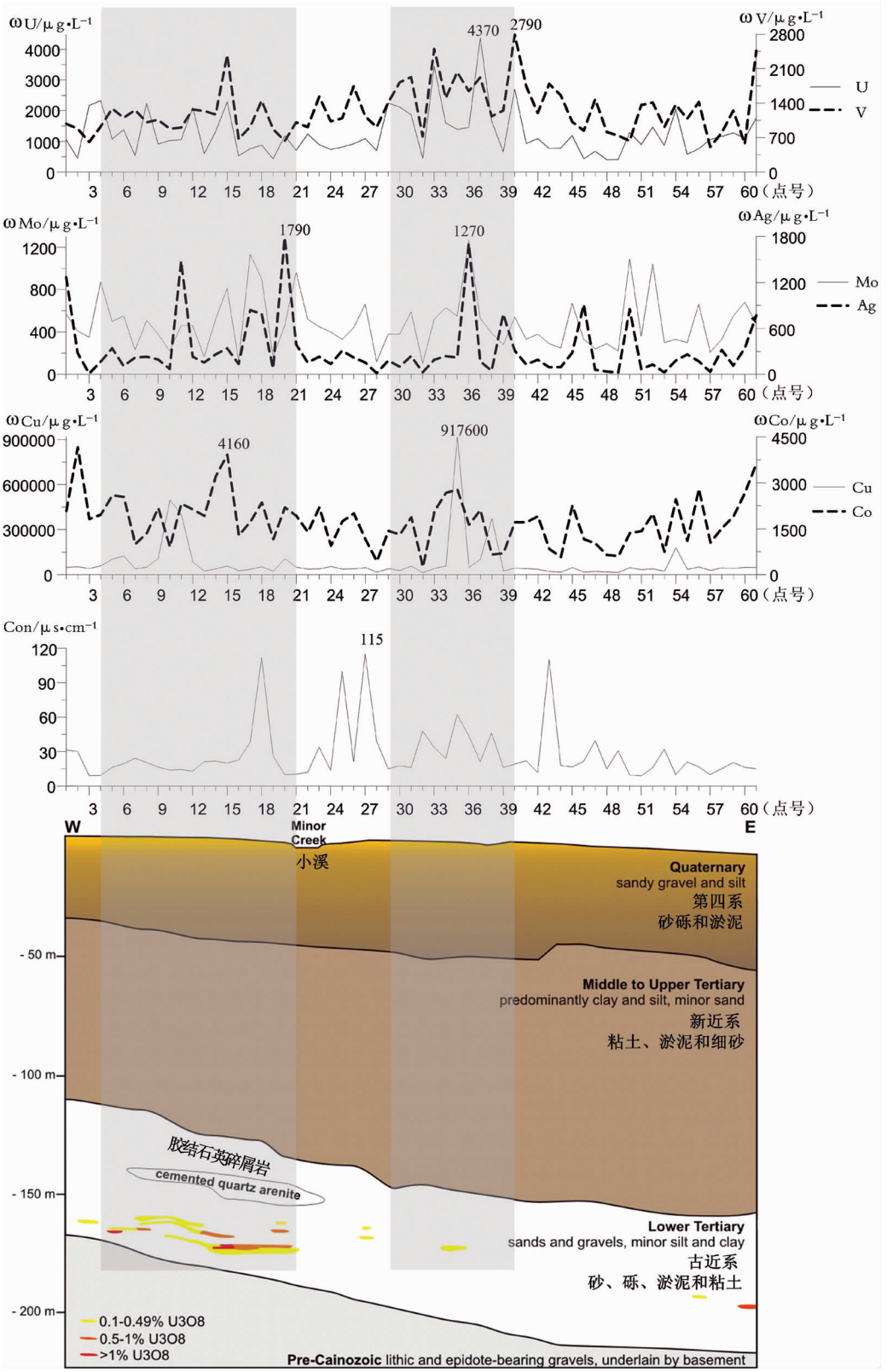


图 6　Four Mile East 某铀矿区地质-地化异常剖面

Fig. 6　Cross section of geological and geo-electrochemical anomalies in the Four Mile East uranium ore district

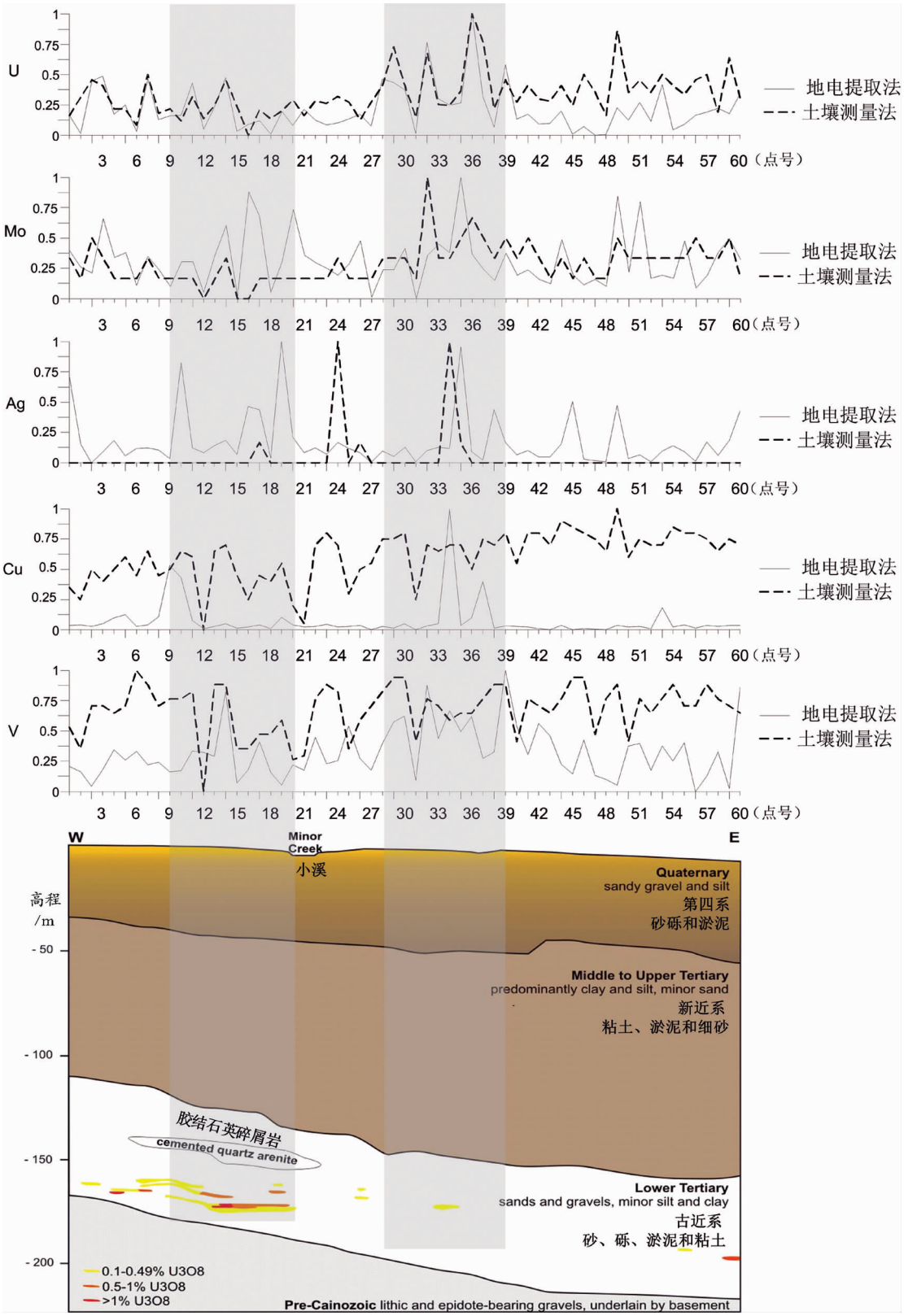


图 7 Four Mile East 某铀矿区地电提取与土壤测量法异常对比

Fig. 7 Comparative studies of anomalies of geo-electrochemical extraction and soil survey method in the Four Mile East uranium ore district

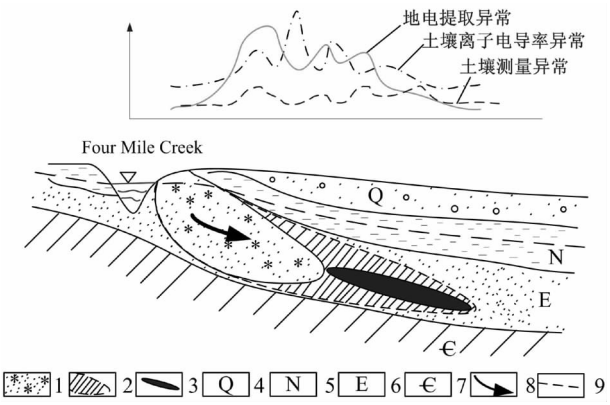


图 8　Four Mile East 某铀矿区地质-地球化学找矿模式

Fig. 8　Geological and geochemical prospecting model of the Four Mile East uranium ore district

1—后生氧化透水砂岩层;2—氧化还原过渡带;3—铀矿体;4—第四系砂砾;5—第三系中-上新世统粘土、淤泥层;6—古近系原生透水砂岩层;7—含铀基岩;8—地下水流方向;9—潜水面

和土壤测量异常的结果很相似。此外,在土壤测量异常极弱的地方地电提取异常相对明显，这也体现了地电提取法可以强化或发现弱异常这一优点。

2.2.4　找矿标志和找矿模式

根据 Four Mile East 某矿区的地质及地形特征,并结合 4 种测量方法所获的异常结果，提出能够指示类似铀矿床的地质、地化找矿标志及找矿模型,如图 8 所示。

地质找矿标志：①矿化位于潜水面以下 150~210m,由基岩剥蚀区补给的含铀、含氧地下水以潜水-层间水的运动方式向冲洪积扇前缘的泥砂交错部位渗入,在氧化带前锋富积成矿;②含矿岩层为古近系 Eyre 地层,岩性以砂、砾、淤泥、粘土为主;③有利的岩相、岩层厚度和岩层产状——含矿砂岩为河流或三角洲相砂岩。砂岩层间有胶结石英碎屑岩存在,作为保护层可防止已形成的铀矿被淋滤,缓倾斜的砂岩地层减缓含铀、含氧地下水的流速便于形成铀矿;④铀矿化。

地球化学找矿标志：①U 及其伴生的 Mo、Cu、V、Ag、Co、As 等元素可作为找矿指标元素，尤其是地电提取和土壤测量 U、Mo、V 异常明显,且吻合较好;②地表覆盖层较厚,有利于保存各种经电化学等作用迁移到表层的阴阳离子，并且粘土地层对离子吸附能力强,土壤中离子含量相对较高,电导率值较大,异常明显。

2.3　地电化学法应用条件和异常特征对比

任何一种找矿方法都有其最佳的适用条件,地电化学法也是如此。通过在江西湖溪某矿区、澳大利亚 Four Mile East 某铀矿区开展地电化学法测量均取得了明显的找矿效果，在此针对地电化学法在国内外铀矿区应用条件进行对比研究，总结归纳于表2。

3　结　论

(1)对江西省湖溪某矿区和澳大利亚 Four Mile East 某铀矿区开展以地电化学提取法为主的找矿试验研究。结果表明,利用地电化学集成技术在国内外厚层覆盖区寻找隐伏铀矿的方法是可行的，找矿效果明显。

(2)在厚层覆盖区应用地电化学方法找矿需满足的条件：①深部矿体所处环境有利于发生电化学溶解,如湿润气候、潜水面切割或土壤饱水、矿物成分复杂;②具有良好的构造条件或裂隙系统。

(3)本文提出的地电化学找矿模式不仅可以指导寻找火山岩型铀矿,对于砂岩型铀矿同样适用。

(4)地电化学提取法与土壤测量法异常相比,前者异常更明显,可强化弱异常。

参考文献

[1]吴运声.浅析我国核电业发展面临的问题[J].商业经济,2010,(2): 53-54.

[2]曹中煌,罗先熔,王培培,等.不同覆盖区地电化学提取法寻找铜镍矿对比研究[J].2010,46(3): 476-482.

[3]罗先熔.地球化学勘查及深部找矿[M].北京:冶金工业出版社,2000: 44-47.