

深穿透地球化学新进展

谢学锦, 王学求

(中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000)

摘 要:叙述了深穿透地球化学近年来在方法技术与理论上的新进展。列举了在国际合作项目“Deep-penetrating Geochemistry”中使用中国发展的新分析技术与国外一些方法在两个隐伏矿区比较的结果。在内华达 Mike 隐伏金矿上方使用中国的有机结合态提取方法(OBM)效果最好;Mike 隐伏铜矿上方使用中国的铁锰氧化物包裹及吸附态提取方法(FMM)效果最好。在智利 Gaby Sur 隐伏斑岩铜矿上方,应用国外 Actlabs 的水提取及酶提取方法仅在隐伏矿两侧断层上方地表圈出 Cu 和 Ag 异常峰值,而应用中国的水提取(WEM)及吸附态提取(AEM)方法则在整个隐伏矿床上方地表都圈出明显的 Cu 及 Ag 异常。两者明显差异的原因正在进一步研究中。在中国“973”及地质大调查项目中例举了在新疆东天山采集弱胶结层细粒物质进行战略性深穿透填图取得的成果,发现多处可找到 Au, U, Cu, W, Pt, Pd 隐伏矿床的远景区,特别是两个可能发现大型隐伏铀矿的靶区,为在该地区找寻可地浸砂岩型铀矿提供了重要线索。在理论研究方面报道了国际项目中提出的地震泵、大气压泵、冬季呼气、CO₂ 发生器等驱动活动态金属向上迁移的理论将之与中国近年提出的地球气搬运活动态金属的理论相结合,提出了一个新的以地球气为主的活动态元素向上迁移的多营力接力搬运模型。

关键词:深穿透地球化学; 地球气; 地震泵; 大气压泵

中图分类号:P632 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2321(2003)01-0225-14

0 引言

深穿透地球化学(deep-penetrating geochemistry)是 E. M. Cameron 与本文第一作者 1997 年在耶路撒冷第 16 届国际化探大会期间一次谈话时提出的,当时两人正讨论近年来出现的一些新的能够有效探索数百米以下隐伏矿床的方法。这些方法包括瑞典 Kristiansson 与 Malmqvist (1984)首先提出的地气(geogas)方法^[1],美国 Clarke 等人(1990)提出的酶提取方法^[2],在 20 世纪 90 年代初引起国际上广泛注意的前苏联的电地球化学方法

(CHIM)^[3]、元素有机态法(MRF)^[3],澳大利亚 Mann 等人提出的活动金属离子法(MMI)^[4],以及我们提出的金属活动态法(MOMEQ)^[5,6]。这些方法的共同特点是:(1)探测深度大,可达数百米;(2)所测量的主要是直接来自深部矿体的直接信息;(3)这种信息极为微弱,往往在亿分之几至百亿分之几;(4)但这种微弱信息反而更可靠,因为常规化探中起干扰作用的物质发不出这种信息。

这些方法研究的都是呈极活跃状态的金属,但测定这类金属的方法不尽相同。至于它们是被何种从深部上升的推动力携带于地表,研制这些方法的学者提出了不尽相同的而且并不能令人完全满意的解释。

我们都感到需要提出一个新的术语,来概括这些 20 世纪 90 年代的新方法、新技术,以便推动它们的发展。当时 Cameron 就提出了“深穿透地球化学”这一术语,而我们也首次将这一术语应用于 1997 年在耶路撒冷宣读的两篇报告中^[7,8],随后 Cameron 得到加拿大 CAMIRO 的经费资助,于 1998

收稿日期:2003-02-10;修订日期:2003-02-27

基金项目:国土资源地质大调查项目(DKD9904005);国家重点基础研究课题(G1999043212);国际合作项目“Deep-penetrating Geochemistry”

作者简介:谢学锦(1923—),男,研究员,中国科学院院士,现主要从事资源与环境地球化学工作。

隐伏矿床指被厚层运积物或成矿后的火山岩或沉积岩掩盖的矿床。用常规的地球化学方法找寻它们往往无能为力。

年初以“深穿透地球化学”为名开展了一个国际合作项目,有加拿大地质调查所、中国地球物理地球化学勘查研究所及全世界 26 家矿业公司及分析公司参加。至今这一术语已广泛为国际勘查界所接受。它可能成为 21 世纪极有发展前景的地学前沿。本文将重点讨论这一国际合作项目以及中国在深穿透地球化学上近几年取得的新进展。

1 国际合作项目的成果

参加加拿大 Cameron 所主持的 Deep-penetrating Geochemistry 对比项目的单位分两期进行,第一期参加者有:ACME Laboratories, Activation Laboratories, Aur Resources, Battle Mountain Gold, BHP Minerals, Bondar-Clegg, Cameco Corporation, Chemex Laboratories, Cominco, Cyprus Canada, Falconbridge Limited, Homestake Mining, Inco Limited, Inmet Mining, Kennecott Exploration, Noranda, Normandy Exploration, Outokumpu Mines, Phelps Dodge Cooperation, Placer Dome Canada, Ragnar Bruaset & Associates, Rio Tinto Exploration, Teck Corporation 和 Westmin Resources。

一些勘查公司,大都是提供他们感兴趣地区的样品,一些分析公司主要使用非专利的传统偏提取方法,只有 Actlabs 使用酶提取的新方法,X-RAL 使用 MMI 的新方法。这一阶段 Cameron 主要收集各矿业公司在许多隐伏矿区已进行过的工作,并用酶提取及 MMI 提取开展一些新工作。

1.1 第一阶段的总结报告

1998 年 6 月, Cameron 写成一篇初步总结报告《Deep-penetrating Geochemistry》^[9],主要论述了元素自埋藏矿床分散的原理,偏提取,质量监控,电地球化学,水地球化学,例案,结论。报告认为,元素从深部隐伏矿床向上迁移主要依靠气体,这种气体是硫化矿床氧化带产生的 CO_2 (图 1, 2)^[10]。这种 CO_2 气体直径只有几个 μm ,它们上升时带出地下水中的金属及卤族元素。这些微气泡一部分在地下水水面爆裂产生气溶胶,而在地下水水面以上的岩石孔隙中气体与气溶胶将由大气泵作用 (barometric pumping)^[11] 继续上升。在干旱地区隐伏矿床上方最明显的异常是酶提取的 Br、I 异常与 Fe、Mn 负异常 (图 3, 4)^[12]。Fe、Mn 负异常的形成可能是由于气体上升引起土壤中无定形 Fe、Mn 转化为结晶形式

所致。

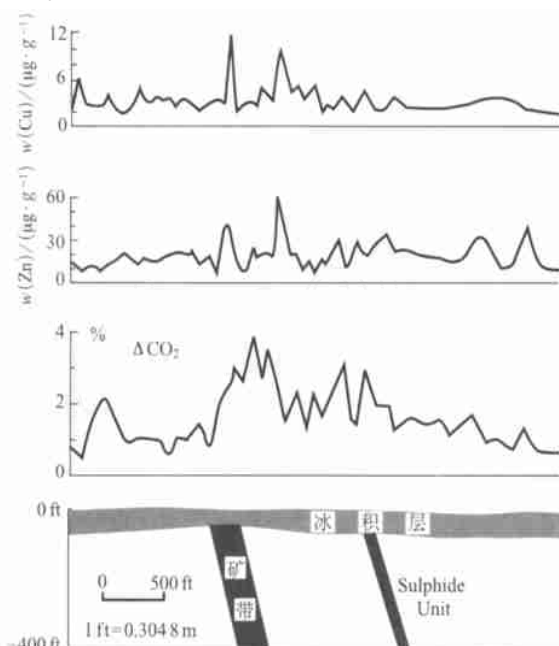


图 1 Crandon 块状硫化物矿床上方酶提取方法圈出的 CO_2 、Cu 及 Zn 异常

Fig. 1 Correlation between excess CO_2 in soil gas and Zn and Cu contents in soil by enzyme leach over Crandon deposit buried beneath 25 ~ 65 m glacial sediment
矿床被 25 ~ 65 m 厚的冰积物所覆盖

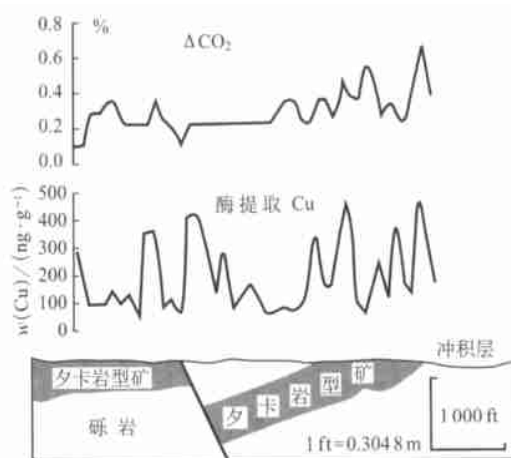


图 2 Ruby Star 夕卡岩型铜矿床 4600E 剖面上 CO_2 及酶提取圈定的 Cu 异常

Fig. 2 CO_2 and enzyme leach Cu anomaly over Ruby Star skarn Cu deposit along profile 4600E
矿床被 40 ~ 500 m 厚的砾石及古生代沉积岩所覆盖

报告还指出不同土壤类型对深穿透方法影响很大。因而强调在解释推断时必须研究每个样品的野外观察记录,以及土壤粒级与土壤组分的分析结果 (图 5)^[12]。

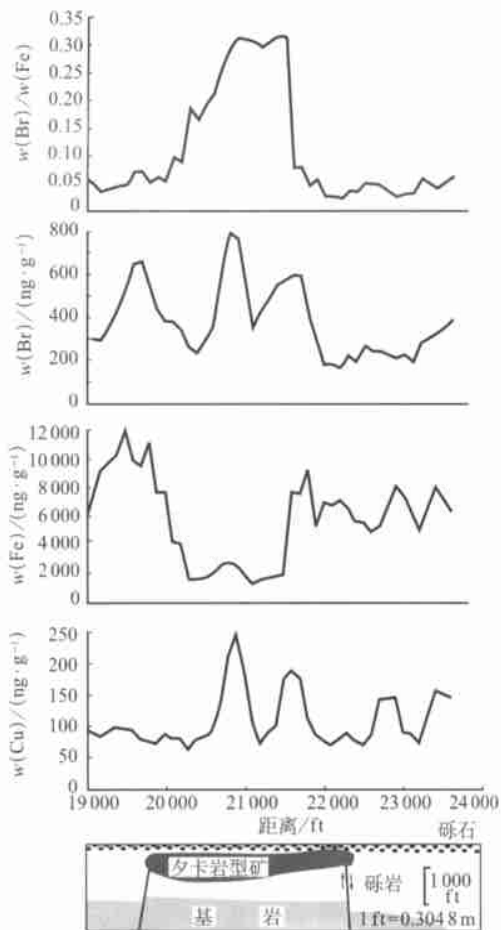


图3 Ruby Star 夕卡岩型矿床 32000N 剖面线上酶提取圈出的 Cu、Br/ Fe 异常及 Fe 的负异常^[12]

Fig. 3 Enzyme leach Cu, Br/ Fe anomalies and Fe negative anomaly over Ruby Star skarn Cu deposit along profile 32000N

报告还试图对酶提取与 MMI 方法进行比较,但由于 MMI 方法只有极少数在冰积物地区试用的资料,这种比较得不出什么明确的结论。

1999 年至 2001 年的第二阶段工作重点,是在加拿大、美国西南部及墨西哥、智利及澳大利亚选择一些隐伏矿床,用中国物化探所、加拿大地调所、Actlabs 及 X-RAL 的方法进行比较。由于本文第一作者尚未获得项目的总结报告,故只有用我们参加的两个地区实例来进行讨论。

1.2 内华达州 Mike 金铜矿床区各种方法比较结果

Mike 矿床金储量为 30 余 t,铜为 3 700 万 t,它位于北西向与北东向断层的交汇部位(图 6),矿床上方有 150~250 m 第三系卡林建造的沉积岩与火山岩覆盖,矿床氧化深度达 400 余 m。Newmont 公司在发现卡林金矿后沿构造进行大量普查勘探,终

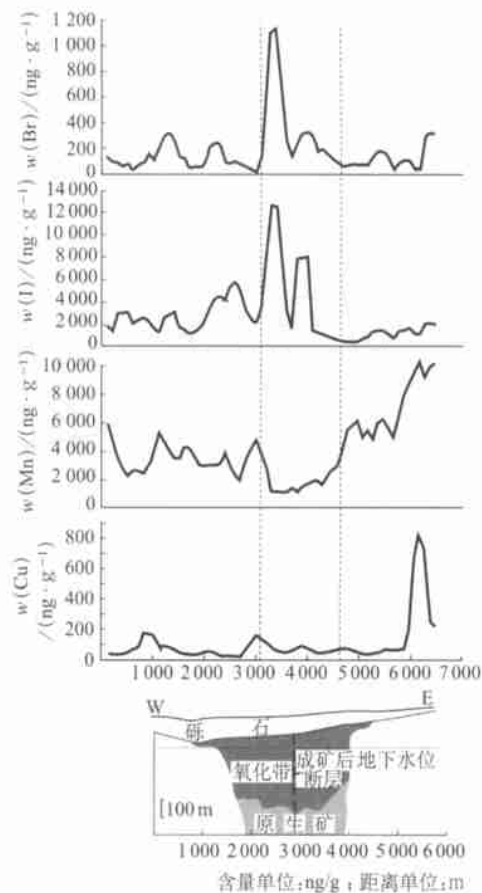


图4 智利 Radomiro Tomic 铜矿床上方酶提取圈出的 Br、I 异常及 Mn 负异常^[13]

Fig. 4 Enzyme leach Br, I anomalies and Mn negative anomaly over Radomiro Tomic Cu deposit
注意在此干旱地区酶提取对 Cu 无显示

于在 1989 年发现此隐伏矿床。

该区为半干旱气候,只有稀疏的蒿类植物生长,以 100 英尺(1 英尺 = 0.304 8 m,编者注)的间距沿北西向剖面线采集组合样(图 6),每个采样点上在方圆 5~10 英尺(1 英尺 = 0.304 8 m,编者注,下同)内采 5 个样组合,采样深度为 16~20 英寸(1 英寸 = 0.025 4 m)。样品在野外过 12 筛孔的钢丝筛,混匀干燥后,过 80 筛孔,密码随机编号后,送加拿大地调所,Actlabs 及 X-RAL 进行去离子水、盐酸氨胺、王水、酶及 MMI 提取,送中国廊坊物化探所进行 WEM(水提取)、AEM(柠檬酸铵提取)、OBM(焦

Cameron E M, XIE Xuejin. Selective leach analyses for copper and gold in soils over the Mike deposit, Nevada: Comparison of four sequential leaches from Chinese Laboratory and five selective leaches from Canadian laboratories. 2002.

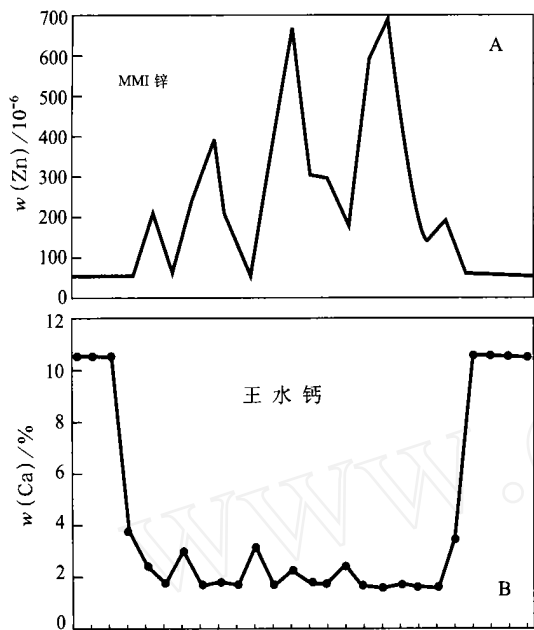


图5 西班牙 Guadalquivir 盆地内由于土壤中 Ca 含量低引致的 MMI Zn 异常
Fig. 5 MMI Zn anomaly caused by low Ca content in soil, Guadalquivir basin, Spain

磷酸钠提取) 及 FMM (柠檬酸铵-盐酸氢胺提取) [13~15]。

表 1 不同方法的检出限及样品数据的中值

方法	Au		Cu	
	检出限	中值	检出限	中值
	/(ng·g ⁻¹)	/(ng·g ⁻¹)	/(ng·g ⁻¹)	/(ng·g ⁻¹)
WEM	0.1	0.5	50	83
AEM	0.1	0.4	50	160
OBM	0.1	1.0	50	2 500
FMM	0.1	1.0	50	2 500
去离子水	0.1	<0.1	2	14
酶提取	0.1	<0.1	5	21
MMI	0.25	0.4	20	51
盐酸氢胺	50	<50	50	900
王水	0.2	1.5		14 000

表 1 示各种方法对 Au 及 Cu 的检出限及取得数据的中位数,从表上可以看到加拿大地调所的去离子水提取出的 Au 大部分都在检出限以下,而中国的 WEM 方法也是去离子水提取,但其含量都在检出限以上,其数据的中位数为 0.5 ng/g。在 Cameron 寄给本文第一作者的报告中特别指出这一点。其原因我们将在“中国取得的新进展”一节中加以讨论。

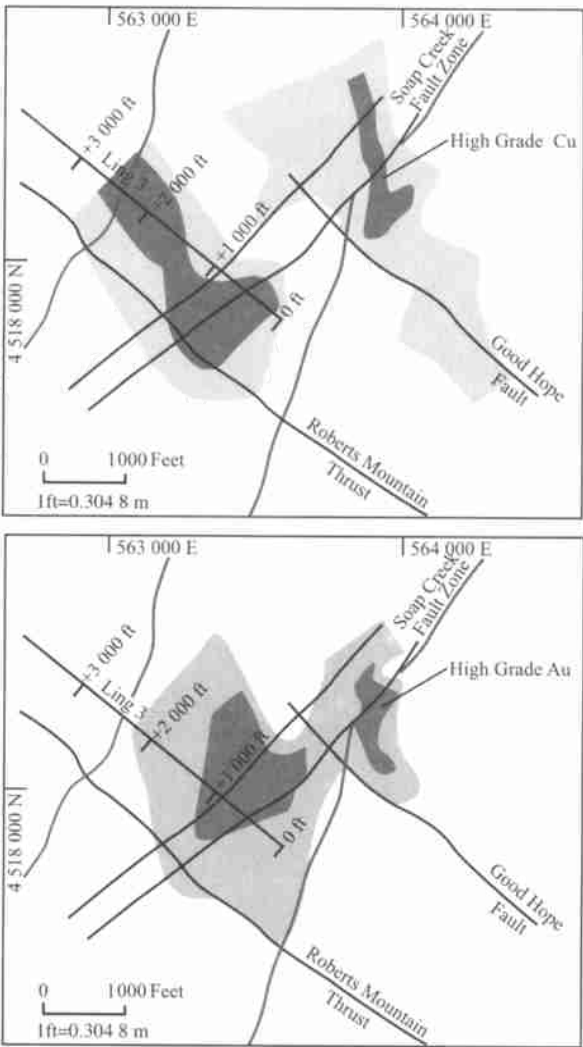


图 6 Mike 矿床的地质与矿化
Fig. 6 Geology and mineralization, Mike deposit

表 2 不同方法的 Cu 检出限、中值、90 %累积百分率的含量值以及后两者之间的衬值

方法	检出限	中值	90 %累积百分率含量值	衬值
	/10 ⁻⁹	/10 ⁻⁹	百分率含量值/10 ⁻⁹	
WEM	50	293	736	2.5
AEM	50	1 300	2 200	1.7
OBM	50	300	700	2.3
FMM	50	1 500	2 350	1.6
去离子水	2	15	30	2.0
酶提取	5	13	36	2.7
醋酸铵	20	200	340	1.7
盐酸氢胺	50	1 425	1 800	1.3
王水		41 400	62 000	1.5

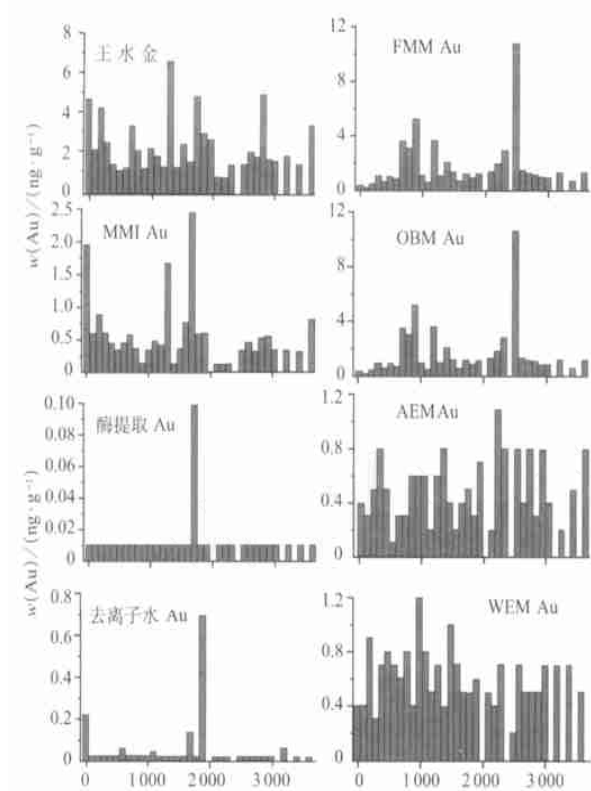


图 7 用各种方法分析 Mike 矿床上的活动态 Au 的结果
Fig. 7 Comparison of mobile Au variation over Mike deposit using different analytical

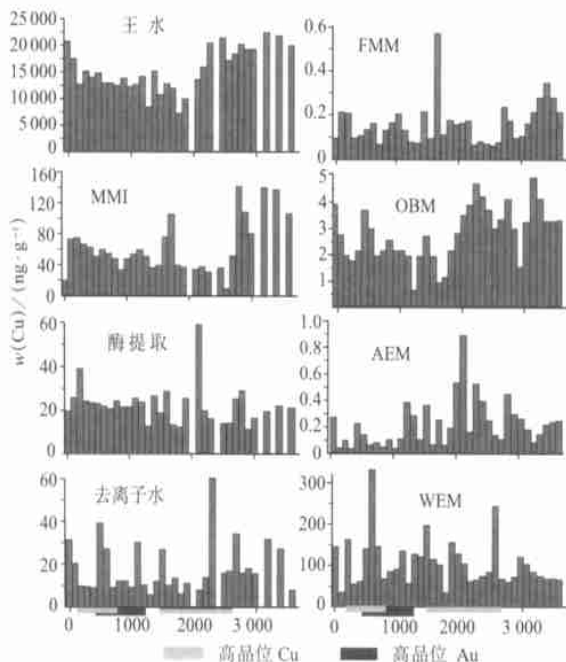


图 8 用各种分析方法分析活动态 Cu 的结果
Fig. 8 Comparison of mobile Cu variation over Mike deposit using different analytical methods

图 7 及图 8,以棒图形式将各种方法所得结果绘在剖面线上。研究对比这些图之后 Cameron 的结论是在隐伏 Au 矿上方反应最显著的是中国的 OBM 方法(隐伏金矿最富的部位在采样点 700 ~ 900 ft)。在隐伏 Cu 矿上方反应最好的是中国的 FMM 方法(Cu 矿最富的部位在 1 300 ft)。实际上,对我们的原始数据稍作处理后,许多元素的异常都能很好反映隐伏的 Mike 金矿及 Cu 矿(图 9)。

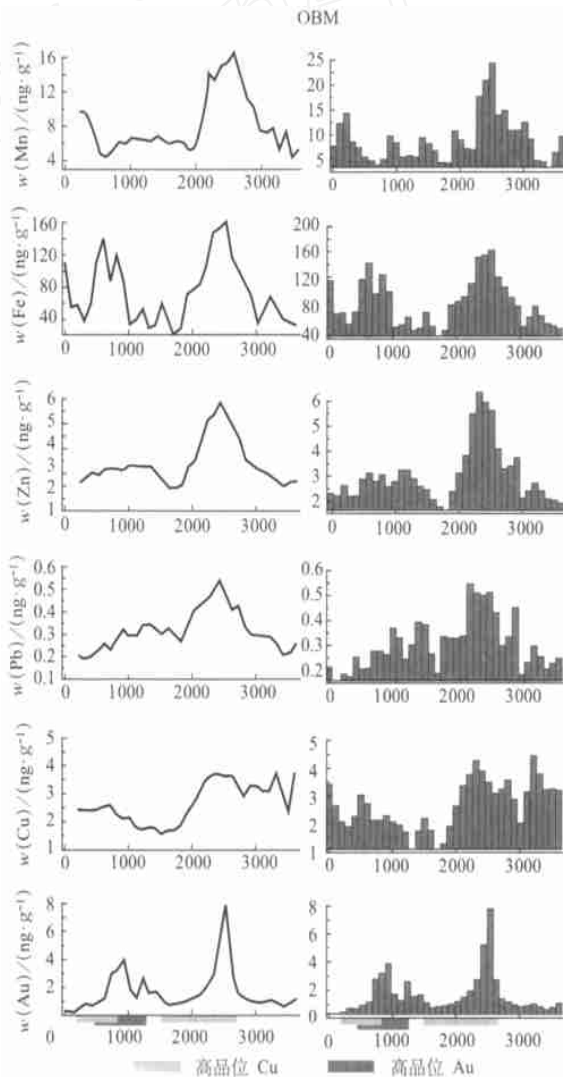


图 9 用距离倒数移动平均法处理数据后 Au, Cu, Zn, Pb, Fe, Mn 在 Mike 矿床上的异常
Fig. 9 OBM anomalies of Au, Cu, Pb, Zn, Fe and Mn over Mike deposit (plotted after data treatment by inverse distance moving average method)

1.3 智利 Gaby Sur 斑岩 Cu 矿床

Gaby Sur 铜矿床位于 Pampa Elvira 谷中,海拔 2 700 m,这是一个表生富集的斑岩 Cu 矿床,为 40 m 砾石层所覆盖。在 25 cm 深度有石膏胶结层,采

样工作由 Codelco 公司进行。他们用铲刮去 4 m^2 范围内土壤顶部的土壤, 铲取出露的红色含铁质的土壤, (一般为 5 cm , 有时深达 $20 \sim 35 \text{ cm}$), 由于采样深度不同, 样品中所含石膏数量亦不相同。

样品过 80 目筛后分送 Actlabs (去离子水及酶提取)、ACME (醋酸铵及王水提取)、Chemex (冷盐酸羟胺提取), 所有分析公司皆用 ICP-MS 进行多种元素扫描测定。中国物化探所则由卢荫麻进行 WEM、AEM、OBM 及 FMM 两步提取, 提取后用原子吸收方法进行 Cu 及 Ag 的测定^[13~15]。

图 10 示 Actlabs 去离子水提取及酶提取方法 Cu 分析结果制作的图, 从图上可见在隐伏 Cu 矿床上方并无异常而在 Cu 矿两侧断层上方有异常的峰值。但一些较强提取方法如 Chemex 的冷盐酸羟胺提取及 ACME 的王水提取都无法在隐伏矿上方及两侧断层上方发现任何异常。从图 10 看来, 水提取及酶提取的 Na 亦在矿体两侧断层上方形成高峰的异常。Cameron 的解释是此区由于所谓的地震泵作用(seismic pumping)^[16~18]使地下水沿断层的通道带上 Cu 及其它元素周期性上升, 故在矿床两侧断层上方形成高峰异常。而较强的提取方法由于还提取出了部分砾石层中原有的背景含量, 从而使随地下水上升的活动态异常受到掩蔽, 除 Cu 外, 在去离子水及酶提取的 Mo 及 Se 亦表现类似的异常模式。

中国实验室的分析结果则与国外几个实验室的结果很不相同(图 11), 图 11 上的 WEM Cu 不仅在矿体两侧断层上方, 而且在矿体上方都有不连续的峰值出现。另外中国实验室的 WEM Cu 的中值为 293 ng/g (表 2), 而 Actlabs 去离子水提取 Cu 的中值仅有 13 ng/g , 为此 Cameron 曾一度认为中国的试验受到了污染。我们不同意这种看法, 至于两种水提取方法所得结果差异如此之大, 将在以下文中加以讨论。

图 11 上水提取 Ag 异常在矿体上方及矿体两侧断层上方皆有很好的反映。这更支持了我们的看法, 认为由地震泵推动的源于隐伏矿床的活动态金属不仅可从断层而且也可从隐伏矿床上的微裂隙系统运移而达于地表, 至于 Ag 异常强于 Cu 异常是因为上升到碳酸盐环境中的活动态 Ag 易于保留 (Ag 可呈碳酸盐络合物), 而 Cu 很快形成不溶于去离子水的 CuCO_3 。这些研究结果给我们以新的启迪, 即在极干旱地区找隐伏矿时, 我们的循序提取系

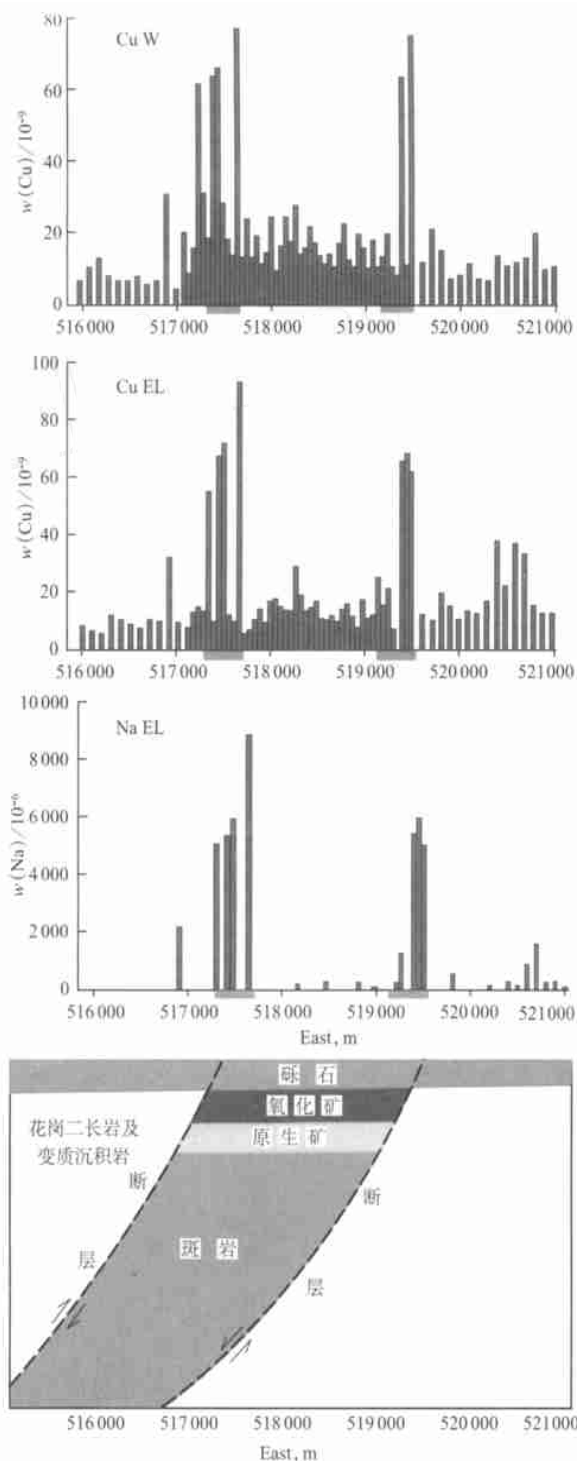


图 10 Actlabs 水提取及酶提取在 Gaby Sur 矿沿两侧断层在地表呈现的 Cu 及 Na 的异常峰

Fig. 10 Water extractable Cu and enzyme leach Cu and Na peak value over the two bounding faults of Gaby Sur porphyry Cu deposit

统中可能需加入提取新生碳酸盐中某些金属的方法。

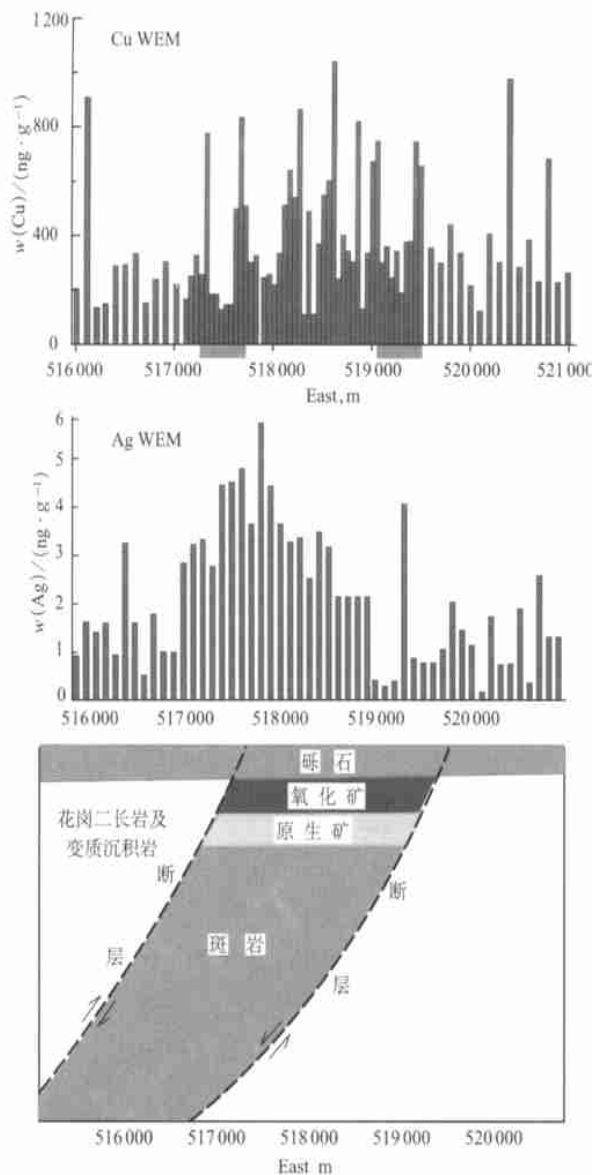


图 11 中国物化探所 WEM 提取在 Gaby Sur 矿床上方地表呈现的 Cu 及 Ag 异常

Fig. 11 WEM Cu and Ag anomalies direct across the Gaby Sur porphyry Cu deposit

2 中国深穿透地球化学研究的新进展

与国外不同,中国一开始就将深穿透地球化学方法用于超低密度区域性地球化学填图^[19~21]。从1994年开始已在国内冲积平原区(25万 km²)、黄土覆盖区(3万 km²)、草原覆盖区(3万 km²)及荒漠戈壁区(15万 km²)、以及澳大利亚奥林匹克坝外围(6000 km²)和乌兹别克斯坦穆龙套矿区外围(1万 km²)、完成了深穿透地球化学填图,发现了多处有可能找到新的 Au, U, Cu, W, Pt, Pd 隐伏矿床的远

景区^[8,9,19~25]。在川西北若尔盖草原红原地区圈出的巨大有机结合态(OBM)金异常^[13]已由钻探证实为一大型隐伏 Au 矿。近年来在东天山荒漠戈壁区进行的大规模研究与调查密切结合的工作,是由国家“973”项目与中国地质调查局“东天山地球化学大调查”项目配合进行的。此项工作尚未完成,已取得的重要成果列举如下。

(1) 东天山战略性深穿透地球化学调查:东天山荒漠戈壁区气候极干燥,大部分地区年降水量不足500 mm,在此区15万 km²内进行的超密度深穿透地球化学调查采样密度为400 km²格子中采集4个样。地表普遍为戈壁或风成砂所覆盖。经反复研究认定距地表20~40 cm的弱胶结层是最佳的采样介质^[24,25]。此层中含大量粉砂、粘土及胶结物,使深部活动态元素向上迁移时聚集于此层中。实验证明在此层中活动态 U 占总量40%~60%,活动态 Au 占总量30%~40%,为了迅速及低成本取得结果,采用王水溶解样品,并用 ICP-MS 方法分析 Au, Ag, As, Sb, Hg, Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, Co, W, Pt, Pd, U 等多种元素的全含量。在吐哈盆地圈出2个有可能发现大型隐伏铀矿的靶区,为我国寻找可地浸砂岩型铀矿提供了重要的找矿线索(图12)^[24,25]。

(2) 金窝子金矿区深穿透地球化学详查实验:为了今后检查超低密度地球化学调查中圈出的可能发现大型隐伏金矿的靶区,需要研究更有效的深穿透地球化学详查方法。选择了两种深穿透地球化学方法——FMM 提取和电地球化学提取。于横切金窝子金矿和210金矿的近南北向剖面上采样,间隔为1 km一个样,在16 km的剖面上共采集16个点位样品。样品采自20~40 cm深度的弱胶结层,过160目筛孔。同时为了与超低密度区域调查所用方法比较,对土壤样品也使用了王水溶矿的分析方法。电提取测量是将电提取器埋入40 cm深度的土壤中,供电24 h,取回提取器中的提取物送实验室。上述样品都使用石墨炉原子吸收(GF-AAS)分析了 Au。

图13是对比结果。图中横坐标代表采样点号,纵坐标代表金含量。9~10号点位于南部210金矿上方,12~13号点位于北部金窝子金矿上方。FMM 提取和电提取在矿体上方都有非常好的异常显示,异常值与背景值的比值可达5倍以上。全量分析+20目样品在两个矿体上方无任何异常显示,-160目样品在210矿上方有弱异常存在。

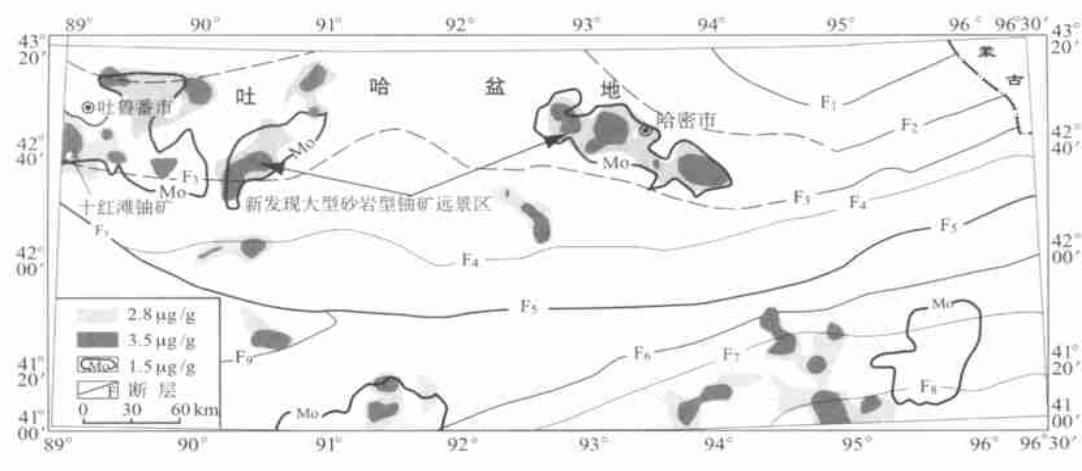


图 12 新疆东天山地区 U、Mo 的地球化学异常分布图

Fig. 12 Geochemical distribution of U and Mo in Eastern Tianshan region

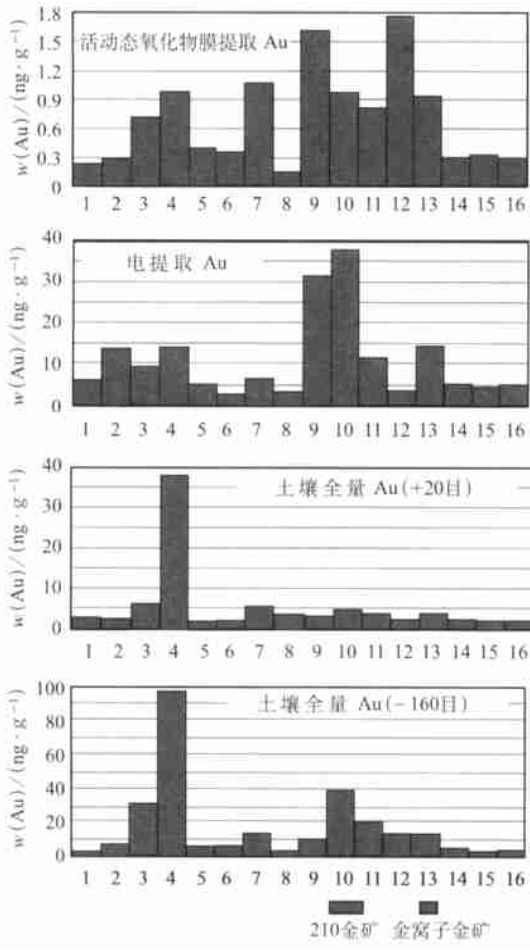


图 13 3 种方法在中国金窝子金矿上方对比结果

Fig. 13 Comparison of Au variations over Jinwozi Au deposit using different methods

单独的 FMM 提取实际上包含了能被水提取的离子态金和铁锰氧化物膜吸附或包裹金,而电提取由于只有离子形式的金才能沿电场向电极迁移,所

以提取的是离子形式的金,但由于电场作用范围可达几个 m^3 ,它可以将几个 m^3 内的离子金富集到电极上,所以它的含量反应的是富集后结果,而 FMM 提取是称取 10 g 样品进行提取分析,是相对于这 10 g 原始样品中的含量,所以它的含量要比电提取低一个数量级。

干旱荒漠区由于氧化作用和蒸发作用强烈,地表形成氧化地球化学障和大量盐类的蒸发地球化学障。FMM 提取的是赋存在氧化地球化学障的金属元素,电提取是由于蒸发障中大量盐类的良好导电性能使得金属离子可以向电极迁移。所以这两种方法在干旱荒漠区可以有效指示矿体。

(3) 分析方法的进展:与国外许多深穿透地球化学分析方法的研究思路不同,中国学者很早就注意到在各种偏提取分析中胶体物质及 nm、 μm 颗粒的影响,从而王学求制定了循序两步提取的分析方案^[13](图 14)。在循序进行水提取(WEM),吸附态提取(AEM),有机结合态提取(OBM)及铁锰氧化物态提取(FMM)时,每种提取都分两步进行,第一步用各种弱溶剂使活动态金属与载体分离。第二步用强溶剂($HNO_3 + HF + HClO_4$)破坏胶体使活动态金属摆脱胶体的吸附。而国外的酶提取及活动金属离子法只使用弱溶剂,使特定的活动态金属与载体分离,但在分离与稀释滤液过程中,很大一部分活动态金属又被硅胶体吸附。这是前文中述及的国外水提取方法测出的 Au 与 Cu 都比中国的 WEM 方法测出者低出很多的原因。至于 Gaby Sur Cu 矿区国外水提取与酶提取方法只在隐伏矿两侧发现 Cu 异常

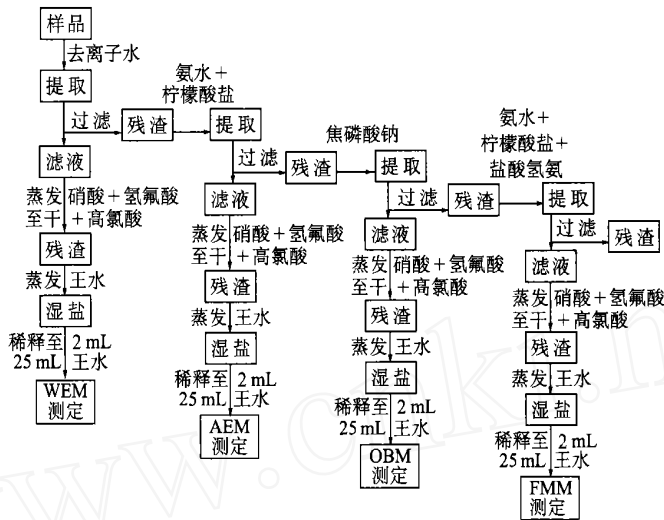


图 14 物化探所发展的活动态金属循序提取流程

Fig. 14 Sequential analytical scheme for the determination of different forms of mobile metals used by IGGE

峰,而中国的 WEM 方法与 AEM 方法都能在整个隐伏 Cu 矿上方都发现 Ag 与 Cu 的异常。其原因亦可能与提取方法的不同有关。由于原有样品已耗尽,正等待新样品,对此问题作进一步研究。

表 3 广西地区部分样品重复分析结果
(5 个样品重份分析)

Table 3 Results of duplicate analysis of five samples by WEM, AEM, and FMM methods

方法	指标	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe	Mn
水提取	σ	0.9	1.4	0.9	0.1	0.4	119	3.3
	$\bar{x}$	2.6	4.1	5.8	0.4	6.7	3 559	40.3
	RSD %	34.6	34.1	15.5	25.0	6.0	3.3	8.2
吸附态提取	σ	0.5	4.3	0.3	0.1	2.0	95.3	418
	$\bar{x}$	1.5	4.5	1.0	0.4	1.1	204	462
	RSD %	33.3	95.6	30.0	25.0	182	46.7	90.5
铁锰氧化物提取	σ	0.5	4.6	0.2	0.1	0.2	171	185
	$\bar{x}$	1.3	9.6	0.8	0.3	0.6	1 029	711
	RSD %	38.5	47.9	25.0	33.3	33.3	16.6	26.0

过去循序两步提取分析是用定量滤纸过滤,在某些地区应用时发现其重现性很差(表 3),这就引起对滤材的选择问题,在卢荫麻指导下,白金峰研究了各种滤膜对分析重现性的影响^[15](包括 0.2, 0.45, 1.2, 5 μm 的滤膜)结果发现使用 0.2 μm 的滤膜效果最佳,分析的重现性大大改善(表 4)。

表 4 活动态各元素精密度统计

Table 4 Precisions of mobile element analysis using new filters

元素	指标	水提取相	粘土吸附相	有机结合相	铁 锰氧化物相
Au	σ	1.1	0.6	4.8	1.0
	$\bar{x}$	0.10	0.07	0.34	0.10
	RSD %	9.1	11.7	7.1	10.0
Ag	σ	0.3	8.8	19.7	15.1
	$\bar{x}$	0.06	0.81	1.8	1.5
	RSD %	20.0	9.2	9.0	9.9
Cu	σ	157	1.6	3.2	0.7
	$\bar{x}$	12.5	0.13	0.22	0.08
	RSD %	8.0	8.1	6.9	11.4
Pb	σ	46.4	2.4	2.0	5.7
	$\bar{x}$	4.0	0.17	0.21	0.36
	RSD %	8.6	7.1	10.5	6.3
Zn	σ	0.5	1.8	2.5	4.9
	$\bar{x}$	0.06	0.18	0.18	0.30
	RSD %	12.0	10.0	7.2	6.1
Fe	σ	3.3	192	37.9	366
	$\bar{x}$	0.22	13.7	2.3	3.6
	RSD %	6.7	7.1	6.1	1.0
Mn	σ	2.4	68.3	8.8	23.4
	$\bar{x}$	0.23	4.0	0.91	1.8
	RSD %	9.6	5.9	10.3	7.7

白金峰. 活动态测量中某些关键性方法技术研究. 滤材选择及其应用研究. 2002.

3 元素自隐伏矿床向上运移的理论基础

过去许多文献都称隐伏矿床上方运积层内的异常为后生叠加异常,认为形成这种异常的营力为(1)毛细管作用;(2)蒸发作用;(3)地下水循环;(4)植物根系吸收;(5)自然电位场;(6)气体搬运;(7)离子扩散。20世纪80至90年代发展起来的一些探测深部隐伏矿的方法在涉及元素从深部向上迁移的机制时并未脱离上述的范畴。

例如前苏联 Yu S. Ryss 等发展的 CHIM 方法^[1],认为人工电场是驱使金属从深部达于地表的主要动力,为加大探测深度,他们使用装在汽车上的大功率电源,而中国和美国的学者^[26~29]都认为电提取的能力是有限的,用 500 mA 的电流所得结果与用 20 mA 电流并无大的差别,必须有另外的营力已经把深部金属带至浅部,然后人工电场才能驱使这些金属离子沉淀在电极上。

加拿大 I. R. Clark 等发展的酶提取方法^[2]的理论基础是地下水与自然电化学作用。

MMI 方法起源于澳大利亚^[4],他们认为在澳大利亚深风化过程中产生活态金属离子,最初他们对推动金属离子上升的营力含糊其辞,不外乎是毛细管作用,植物根系吸收,电地球化学场等,其后他们提出了气体的作用,并声称正在由 11 家矿业公司的经费支持下进行活动态金属离子向上迁运机制的研究。

Goldberg 提出的 INONEX 方法^[29]是迄今国外唯一的一种应用于战略性区域测量的深穿透地球化学方法,它的理论基础是地球上无处不存在自然电场,元素可以以离子形式在自然电场作用下从深处迁移至地表。

3.1 国际合作项目提出的新理论

开展“Deep-penetrating Geochemistry”研究项目以来,E. M. Cameron 提出了一些元素自深处向上迁移的新理论。

气态迁移,过去文献上气态迁移多指挥发性元素或化合物(如 Hg)本身呈气态迁移,而 Cameron 提出元素可以 CO₂ 为载体从深部迁移至地表。CO₂ 可在硫化矿床氧化带由硫化物氧化生成,或酸性地下水与碳酸盐岩作用而生成。

在干旱地区,这种气态迁移至关重要,因为在隐

伏矿床上方的岩石及覆盖物空隙中主要由蒸气及空气充满,矿床内的金属可由气压泵(barometric pump)推动达于地表,气压泵指高压与低气压的巡回过程。高压将空气压入,而低气压使空气将岩石或矿床中的气体带出。Cameron 认为,另一种推动营力是冬季呼气作用(winter exhalation)^[30]。在冬季,暖的空气在山顶上从岩石裂隙内释出,代以冷空气及蒸气从山脚下方深部上升。一种更强的推动营力是地震泵(seismic pumping)。这是在地震多发地区发生的现象(图 15),Cameron 认为在智利 Gaby Sur 及 Spence 巨型隐伏 Cu 矿床地表的深穿透异常主要都是由地震泵推动而形成的。

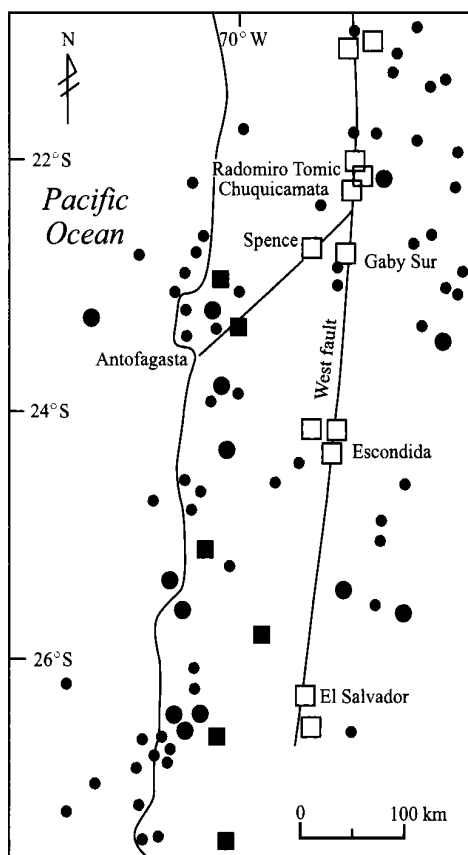


图 15 智利北部铜矿床及 1950—2001 年期间主要地震的震中分布

Fig. 15 Distribution of earthquake epicenters during 1950 - 2001 period
□斑岩铜矿; ■其他类型铜矿;
• 6~7 级地震的震中; ● 7~8 级地震的震中

Cameron 认为,在潮湿地区隐伏矿床上方岩石及覆盖沉积物的空隙中都被水充满。从隐伏矿床释出的元素随地下水侧移,而在河流、泉水、沼泽及渗出带形成侧移异常,只有当隐伏矿床产出深度不大时,可借毛细管作用,植物根的吸收作用及电化作用

用。在矿床上方地表形成异常,但 Cameron 推测,在地震多发地区可借地震喷射(seismic squirting)作用^[16]在隐伏矿床上方的断层或裂隙带中形成异常。

3.2 中国的理论——以地球气为主的元素迁移多营力接力模型

我们最早就支持 Kristiansson Malmqvist^[1]的观点,认为气体是将活动态金属从深部隐伏矿床中携出并搬运至地表的主要营力。与瑞典学者不同之处在于我们认为这种气体并非局限于在矿区发生,而是整个地球都在“漏气”^[19]。这种“地球气”不仅穿过隐伏矿床携带活动态金属达于地表,而且可从隐伏或半隐伏的地球化学块体中携带活动态金属达于地表。这种近乎狂想的思路却构成我们制定超低密度战略性深穿透地球化学填图的基础,而且已在山东全境、皖北、四川若尔盖草原,澳大利亚奥林匹克坝矿区外围及乌兹别克斯坦穆龙套矿区外围的超低密度深穿透地球化学填图工作中得到证实。

这种地球气的终极来源应是地幔。这可以从大量文献资料中找到证据。例如 Sokolov 估计气体在上地幔中的量 80 倍于大气层^[31]。杜乐天估计上地幔中的气体 120 倍于大气层^[32]。上地幔中的气体以超临界流体形式存在。但在 30~40 km 深处,大量气体可从超临界流体中分离。这种幔源气体可以达于地表也已有大量证据。地震及火山活动产生大量气体,大洋洋脊产生气体已被观测到,而 Gold 与 Soter 通过大量观测发现这类气体中 Rn、He 及³He/⁴He 比值与大气不一致,说明有幔源成分的加入^[33]。在隐伏金矿床上抽取土壤中气体发现,其中 Ar、He、CH₄ 含量及³He/⁴He 比值与大气不一致,亦表明有幔源成分的加入^[34]。

最近张荣华等进行了超临界流体试验,发现含矿的超临界流体在减压减温过程中,在 15 MPa、100 °C 下分离成液与气两相,在气相内含有 As、Bi、Mg、Na 等许多金属。这是初步用实验证明了气相可携带金属迁移^[35]。

程志中等近来的研究初步显示活动态金属在气体中向上迁移将在沿途形成串片状模式,这有别于活动态金属在液体中以扩散、渗滤或毛细管作用等形成的连续渐变模式。这是因为活动态金属在气体中向上迁移时有选择的聚集于沿途具有强吸附性岩层或土层中之故。

综合国内外近来在深穿透地球化学理论上的研究成果,笔者认为可以初步提出一个活动态金属向

上迁移的多营力接力模型。深部幔源地球气在进入地表数 km 范围内不断受到大气的稀释,在经过隐伏矿床与地球化学块体时又带入矿床及块体中离子、络合物及 nm、亚 μm 形式的物质,其继续向上迁移得到地震泵、电地球化学及 CO₂ 发生器(硫化矿床氧化带碳酸盐岩层)的加强推动与接力,在更浅的部位(数十 m 至数百 m)又得到植物根吸收作用、毛细管作用、大气压泵、蒸发作用等的加强推动与接力。在迁移过程中一部分活动态金属将聚集在沿途吸附力强的地层或土层中,形成串片状迁移的轨迹,最后在地表数十 cm 处与大气的界面上聚集形成深穿透地球化学方法易于发现的异常。

地表深穿透地球化学异常是这些在不同深度起作用的营力配合作用与接力的结果,但在不同的气候与地形条件下,这些营力如何配合与接力会有很大不同,两个极端情况是极端干旱地区与极端潮湿地区,在极端干旱地区金属是在充气的通道中向上迁移的。由于温差变化极大,加强地球气搬运与接力的最主要的营力是地震泵,继续上升时则大气压泵起重要作用,在地形起伏较大地区冬季呼气亦起重要作用。从这一极端过渡到干旱及半干旱地区,蒸发作用亦将成主要营力。而在极端潮湿地区,活动态金属是在充水的通道中向上迁移的。如果隐伏矿床埋藏较浅,毛细管作用、植物根吸收作用、电化学场都是加强地球气搬运与接力的重要营力。如果隐伏矿床埋藏很深,部分或全部在地下水以下,活动态金属主要将侧移至低洼处的渗湿带或河床底部。而在地震活动区如前文所述,活动态金属可呈粒子、胶体等可借所谓地震喷射作用垂直向上迁移。

4 结论

(1) 深穿透地球化学研究在国外通过国际合作项目在许多隐伏矿床上方进行剖面线测量取得不少进展,一些矿产勘查公司利用这类方法在圈定钻探靶区方面,取得一些成功。

(2) 中国与国外在研制深穿透地球化学分析方法思路上的最大区别在于中国使用了两步提取方法,不仅先用弱溶剂打开载体,使活动态金属释出而且进一步用强溶剂破坏硅胶体使释出的金属不被重新吸附。

(3) 在美国及智利半干旱及干旱地区用中国的方法与国外方法分析隐伏矿床上方地表采集的样品

比较所得结果初步表明中国方法的优越性。

(4) 与国外所有深穿透地球化学研究不同之处还在于中国一开始就将这种方法用于战略性普查, 并已在川西北及东天山取得巨大的找矿实效。

(5) 综合国内外在深穿透地球化学理论上的研究成果初步提出一个以地球气为主的金属从深部向上迁移的多营力接力搬运模型。

(6) 从本文可看到深穿透地球化学在技术方法与理论上近年已取得很大进展, 但同时提出许多有待解决的问题。可以预测今后在方法技术与找矿实效上将会不断有重大的新突破。但其理论依据仍是一种假说, 需要在方法技术上有重大突破及利用这些新方法新技术进行大量实际调查工作之后才可获得进展。

References[参考文献]:

- [1] KRISTIANSSON K, MALMQVIST L. Evidence for nondiffusive transport of Rn in the ground and a new physical model for the transport[J]. *Geophysics*, 1982, 47(10): 1444-1452.
- [2] CLARK J R, MEIER A L. Enzyme leaching of surficial geochemical samples for defining hydromorphic trace-element anomalies associated with precious/metal mineralized bedrock buried beneath glacial overburden in northern Minnesota[A]. *GOLD '90*[C], 1990. 189-207.
- [3] ANTROPOVA L V, GOLDBERG I S, VOROSHILOV N A, et al. New methods of regional exploration for blind mineralization: application in the USSR[J]. *J Geochem Explor*, 1992, 43: 157-166.
- [4] MANN A W, BIRRELL R D, GAY L M, et al. Partial extractions and mobile metal ions [A]. CAMUTI K S. *Extended Abstracts of the 17th IGES*[C]. 1995. 31-34.
- [5] XIE Xuejin. New ideas and new technology for searching giant ore deposit[J]. *Scientific Chinese*, 1995, 15: 14-16 (in Chinese). [谢学锦. 用新观念与新技术寻找巨型矿床[J]. 科学中国人, 1995, 15: 14-16.]
- [6] WANG Xueqiu, CHENG Zhizhong. Development of techniques for measuring mobile metals in soil and its significance in exploration[J]. *Geoexploration Abroad*, 1996 (2): 17-22 (in Chinese). [王学求, 程志中. 元素活动态测量技术的发展及其意义[J]. 国外地质勘探技术, 1996(2): 17-22.]
- [7] WANG Xueqiu, XIE Xuejin, CHENG Zhizhong, et al. Penetrating through thick covers and delineation of regional geochemical anomalies in concealed terrains—a case history from Olympic Dam[J]. *J Geochem Explor*, 1999, 66: 85-94.
- [8] XIE Xuejin, WANG Xueqiu, XU Li, et al. Orientation study of strategic deep penetration geochemical methods in the central Kyzylkum desert terrain, Uzbekistan[J]. *J Geochem Explor*, 1999, 66: 135-143.
- [9] CAMERON E M. *Deep-penetrating Geochemistry* [R]. CAMIRO-Exploration Division, 1998. 117.
- [10] McCARTHY J H, LAMBE R N, DIETRICH J A. A case study of soil gases as an exploration guide in glaciated terrain[J]. *Crandon Massive Deposit*, Wisconsin Explor. Geol., 1986, 81: 408-420.
- [11] NILSON R H, PETERSON E W, LIE K H, et al. Atmospheric pumping, a mechanism causing vertical transport of contaminated gas through fractured permeable media[J]. *J Geophys Res*, 1991, 96: 21933-21948.
- [12] KELLY D L. An investigation of piedmont geochemical exploration techniques for buried porphyry copper deposits: part 1. Soil geochemistry and biogeochemistry[A]. *BHP Minerals Report*[R]. 1995.
- [13] WANG Xueqiu. Leach of mobile forms of metals in overburden: development and application[J]. *J Geochem Explor*, 1998, 61: 39-55.
- [14] LU Yinxu, WANG Xiaoling, BAI Jinfeng. Analytical methods for the determination of metals in earthgas and metals in mobile forms in soil [A]. XIE Xuejin, SHAO Yue, WANG Xueqiu. *Exploration Geochemistry Toward 21st Century* [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1999. 143-159 (in Chinese). [卢荫麻, 王晓玲, 白金峰. 地球气中金属与活动态金属分析方法研究[A]. 谢学锦, 邵跃, 王学求. 走向 21 世纪的勘查地球化学[C]. 北京: 地质出版社, 1999. 143-159.]
- [15] BAI Jinfeng, LU Yinxu. Selection of filters used in the determination of mobile metals in soil [J]. *Geophy Geochem Explor*, 2001, 25(4): 272-278 (in Chinese). [白金峰, 卢荫麻. 活动态测量中滤材的选择及其应用[J]. 物探与化探, 2001, 25: 4, 272-278.]
- [16] NUR A. Matsushiro, Japan, earthquake swarm: confirmation of dilatancy-fluid diffusion model[J]. *Geology*, 1974, 2: 217-222.
- [17] SIBSON R H, MOORE J M, RANKIN A H. Seismic pumping: a hydrothermal fluid transport mechanism [J]. *J Geological Society*, London, Special Publication, 1975, 131: 653-659.
- [18] MUIR W R. Earthquake, strain cycling and the mobilization of fluids [A]. PARNELL J. *Geofluids: Origin, Migration and Evolution of Fluids in Sedimentary Basins* [C]. Geol Soc Spec Publ, 1994, 78: 85-98.
- [19] XIE Xuejin. Surficial and superimposed geochemical expressions for giant ore deposits[A], CLARK A H. *Giant Ore Deposits II* [C]. Kingston, Canada: Queen's University Press, 1995. 475-485.
- [20] WANG Xueqiu, CHENG Zhizhong, LIU Dawen, et al. Nanoscale metals in earthgas and mobile forms of metals in overburden in wide-spaced regional exploration for giant ore deposits in overburden terrains [J]. *J Geochem Explor*, 1997, 58(1): 63-72.
- [21] WANG Xueqiu, LIU Dawen, CHENG Zhizhong, et al. Wide-

- spaced geochemical mapping for mineral exploration in concealed terranes[A]. Xie Xuejin. *The Proc 30th Int Geol Congr* [C]. 1996, 19:127-140.
- [22] XIE Xuejin. Strategic and tactic deep-penetrating geochemical surveys[J]. *Earth Science Frontiers*, 1998, 5 (1-2): 171-183 (in Chinese). [谢学锦. 战略性与战术性的深穿透地球化学方法[J]. 地学前缘, 1998, 5 (1-2): 171-183.]
- [23] WANG Xueqiu. Principle and practice of exploration geochemistry in searching and discriminating concealed large and giant mineral deposits[J]. *Geophy Geochem Explor*, 1998, 22 (2): 81-89 (in Chinese). [王学求. 寻找和识别隐伏大型特大型矿床的勘查地球化学理论方法与应用[J]. 物探与化探, 1998, 22 (2): 81-89.]
- [24] WANG Xueqiu, CHI Qinghua, SUN Hongwei. Super lower density sampling geochemical survey—case history in Eastern Tianshan [J]. *Xinjiang Geology*, 2001, 19 (3): 200-206 (in Chinese). [王学求, 迟清华, 孙宏伟. 荒漠戈壁区超低密度地球化学调查与评价——以东天山为例[J]. 新疆地质, 2001, 19 (3): 200-206.]
- [25] WANG Xueqiu, CHENG Zhizhong, CHI Qinghua, et al. Strategy geochemical survey and evaluation of sandstone type uranium deposits in Tu-Ha basin[J]. *Geology and Exploration*, 2002, 3 (10): 148-157 (in Chinese). [王学求, 程志中, 迟清华, 等. 吐哈盆地砂岩性铀矿战略性地球化学调查与评价[J]. 地质与勘探, 2002, 3 (10): 148-157.]
- [26] SMITH D B, HOOVER D B, SANZALONE R F. Preliminary studies of the CHIM electrogeochemical method at the Kokomo Mine, Russell Gulch, Colorado [J]. *J Geochem Explor*, 1993, 46: 257-278.
- [27] LIU Jimin, LIU Zhanyuan, CHENG Zhizhong. Application of electrochemical method in exploring concealed mineral deposits (Abstract) [A]. *5th Symposium of Exploration Geochemistry in China* [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1993. 24-24 (in Chinese). [刘吉敏, 刘占元, 程志中. 地电化学法在隐伏矿产勘查中的应用效果(摘要) [A]. 第五届勘查地球化学学术讨论会论文摘要[C]. 北京:地质出版社, 1993. 24-24.]
- [28] LUO Xianrong. Exploring concealed mineral deposits with electrochemical methods (abstract) [A]. *5th Symposium of Exploration Geochemistry in China* [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1993. 25-25 (in Chinese). [罗先榕. 地电化学寻找隐伏金矿[A]. 第五届勘查地球化学学术讨论会论文摘要[C]. 北京:地质出版社, 1993. 25-25.]
- [29] GOLDBERG I S. Geoelectrochemical systems in the earth, their geological and exploration significance [A]. *The Proceedings of the 17th IGES* [C]. Townsville, 1995. 326-328.
- [30] WEEKS E P. Effect of topography on gas flow in unsaturated fractured rock: concepts and observations in Evans [A]. NICHOLSON T J. *Flow and Transport Through Unsaturated Fractured Rock* [C]. Amec Geophy Inst Geophy Mono 1978, 42:165-170.
- [31] SOKOLOV V A. *Geochemistry of Natural Gas* [M]. Moscow: Publishing House of Geology and Ore Protection, 1971 (in Russian).
- [32] DU Letian. Hydrogen and hydrocarbon resources and the five gasospheres of the earth [J]. *Geology of Uranium*, 1993, 9 (5): 260-262 (in Chinese). [杜乐天. 地球的五个气圈与氢烃资源[J]. 铀矿地质, 1993, 9 (5): 260-262.]
- [33] GOLD T, SOTER S. The deep earthgas hypothesis [J]. *Science America*, 1980, 242:130-138.
- [34] WANG Xueqiu, XIE Xuejin. *Exploration Geochemistry of Gold* [M]. Jinan: Shangdong Science and Technology Publishing House, 2000. 309 (in Chinese). [王学求, 谢学锦. 金的勘查地球化学[M]. 济南:山东科学技术出版社, 2000. 309.]
- [35] ZHANG R H, HU S M. A case study of the influx of the upper mantle fluids into the crust [J]. *J Volcanology and Geothermal Research*, 2002, 118: 319-338.

RECENT DEVELOPMENTS ON DEEP-PENETRATING GEOCHEMISTRY

XIE Xue-jin(g), WANG Xue-qiu

(Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geoscience,
Langfang 065000, China)

Abstract: Recent developments of deep-penetrating geochemistry are briefly reviewed, including achievements obtained by the international research project funded by CAMIRO in Canada and by the research projects funded by MST and CGS in China. In the international CAMIRO's project, comparison of results obtained by IGGE lab of China and Canadian labs on a concealed Au-Cu deposit in Nevada, USA, and a concealed Cu deposit in Chile is made. The Mike Au-Cu deposit in Nevada is concealed under 150 ~ 250 m post-ore sedi-

mentary and volcanic rocks. For Au , the most distinctive anomaly is by the IGGE OBM method directly over the concealed mineralization. For Cu , the most distinctive anomaly is by the IGGE FMM method over the Curich portion of the deposit. The Gaby Sur porphyry Cu deposit is concealed under 40 m piedmont gravel. Sharp anomalies for Na , Cu and Ag etc. only above the two bounding faults of the deposit , were obtained by Canadian deionized water and enzyme leach methods. But distinct anomalies of Cu and Ag were delineated directly across the whole concealed deposit. Further research is needed to explain the different anomalies patterns by Canadian & Chinese methods. The work in Tienshan is cited in this paper as an example from the progress of regional deep-penetrating geochemical mapping funded by MST and CGS of China. By wide spaced sampling of the fine fraction of weakly cemented layer under desert sand , many target areas of Au , U , Cu , Pt and Pd were delineated. Especially the two U targets will provide important information for searching concealed sandstone-type leachable uranium deposit. The recent progress on the principles for vertical migration of mobile elements through thick exotic covers is reviewed. A new hypothesis is advanced by the authors. It is based on the earthgas as the main driving force with seismic pumping , barometric pumping , winter exhalation , CO₂ generators , evaporation , capillary action , planet root action , etc. , and as the relay forces operating in different depths and different climate zones , to transport the mobile elements to the surface.

Key words : deep-penetrating geochemistry ; earthgas ; seismic pumping ; barometric pump

最新地球科学类期刊影响因子和总被引频次排序(前 20 名)

(据中国科学技术信息研究所,2002 年 12 月)

名次	期刊名称	影响因子	名次	期刊名称	总被引频次
1	测绘学报	1.057	1	地球物理学报	798
2	地学前缘	1.028	2	地球科学	591
3	地球物理学报	0.787	3	地球化学	564
4	地球化学	0.783	4	地学前缘	549
5	中国沙漠	0.727	5	地震学报	528
6	地震学报	0.720	6	第四纪研究	502
7	第四纪研究	0.693	7	中国沙漠	428
8	地球科学进展	0.640	8	地球科学进展	346
9	古脊椎动物学报	0.552	9	测绘学报	340
10	自然灾害学报	0.519	10	地震工程与工程振动	318
11	地球学报	0.515	11	古生物学报	317
12	地球科学	0.502	12	地震地质	310
13	地震工程与工程振动	0.466	13	自然灾害学报	258
14	地震	0.425	14	地球学报	222
15	地震地质	0.424	15	地震	211
16	中国地震	0.412	16	古脊椎动物学报	207
17	古生物学报	0.375	17	中国地震	187
18	微体古生物学报	0.361	18	测绘通报	166
19	大地构造与成矿学	0.346	19	地壳形变与地震	155
20	内陆地震	0.321	20	吉林大学学报地球科学版	151