

金属矿产勘查技术发展现状与思考

陈永清^{1,2} 夏庆霖²

(1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100083; 2. 中国地质大学, 武汉 430074)

[摘要] 近年来, 以寻找金属矿产为目的发展起来的勘查新技术可概括为: (1) 以寻找隐伏矿为目标的覆盖区地球物理勘查技术, 其中包括“三维地震”和“高光谱遥感”技术; (2) 地球化学勘查新技术, 其中包括“深穿透地球化学技术”、“地球化学信息的综合解释和地球化学填图技术”; (3) “找矿信息提取和综合”技术等。限于篇幅, 本文仅对地球化学勘查新技术的研究现状进行了分析, 同时对下列问题进行了思考: (1) 在一个地区开展地球化学找矿工作首先要确立合适的取样介质, 取样介质的确立应以查明成矿成晕元素的形成机制和赋存状态为基础; (2) 加强不同景观条件下不同矿种和不同矿床类型的异常特征和异常模式研究, 建立区分矿异常和非矿异常的模式识别模型; (3) 加强不同景观地质条件下, 不同勘查尺度的地球化学填图技术研究, 以实现迅速掌握全局, 逐步缩小靶区的找矿战略; (4) 加强地球化学信息与地质、地球物理和遥感信息相结合的信息综合技术的研究, 应用综合信息定量圈定和评价找矿靶区, 减少矿产勘查的不确定性。

[关键词] 金属矿产勘查; 隐伏矿预测; 综合找矿信息

[中图分类号] P624

[文献标识码] A

[文章编号] 1004-2903(2002)03-0540-11

近年来, 金属矿产勘查技术伴随着探测技术、测试技术和计算机技术的进步而得到了迅速发展, 譬如“三维地震技术^[1]”、“高光谱遥感技术^[2]”、“深穿透地球化学技术^[3]”、“找矿信息提取和综合技术^[4]”以及“地球化学填图技术^[5]”等。限于篇幅, 文章根据近年来国际矿产勘查学术讨论会信息, 结合有关杂志, 重点分析以寻找金属矿产为目的地球化学勘查技术现状。主要内容包括: (1) 以寻找隐伏矿为目标的覆盖区地球化学勘查; (2) 元素的赋存状态和地球化学性质研究; (3) 地球化学信息的综合解释; (4) 区域地球化学填图。

1 以寻找隐伏矿为目标的覆盖区地球化学勘查

这一领域主要包括: (1) 取样介质研究和应用; (2) 找矿信息的偏提取技术; (3) 酶提取技术; (4) 深穿透地球化学技术。

1.1 取样介质研究和应用

澳大利亚学者 A. Pwa 等 (1999)^[6] 在澳大利亚新南威尔士 Cobar 地区应用风化层 (Regolith) 中的酸不溶物作为取样介质寻找金和贱金属矿床。他们在 Cobar 地区的 Mckinnons 和 Wagga Tank 矿床及其勘探区, 将风化层样品中酸不溶物先后用王水和硫酸处理后作为取样介质以确定围绕金和贱金属矿化的地球化学标志 (geochemical signatures)。研究表明: ①由石英、燧石和少量云母组成这些不溶残留物保留了与矿化和蚀变事件有关的初始地球化学特征。②Cobar 地区的金和贱金属矿床产在早泥盆纪碎屑沉积岩和火山碎屑沉积岩中, 常见的蚀变类型是硅化和带有碳酸盐化和绢云母化的绿泥石化。在风化层内, 粘土矿物蚀变是最有意

[收稿日期] 2001-0819; **[修回日期]** 2002-02-20.

[基金来源] 国家“十五”攻关课题 (2001BA609A02) 和国土资源部重点基础研究项目 (199905) 联合资助。

[作者简介] 陈永清, 男, 1960 年生, 教授, 1994 年毕业于长春地质学院数学地质专业, 获博士学位。现主要从事矿产资源勘查评价工作。

义的.③在勘查区,风化剖面厚度大约 80~100 米,风化层主要组成矿物是石英、粘土矿物(主要是伊利石)、白云母、黄铁矿和赤铁矿,其他物质有残存含铁层、富高岭土带、含铝土矿-黄钾铁矾和针铁矿腐殖土等.④在岩石和风化层元素的分布上,McKinnons 和 Wagga Tank 矿床具有类似的地球化学特征,并存在两组有意义的元素组合.第一组(Cu、Zn、Pb、Ni、As、Mo、Ag、Sb、Ba、Bi 和 W)是与矿有关的并环绕矿化带和矿化带内富集分布;第二组(K、Fe、Ca、Ti、Mn、Cl、Ga、Rb、Sr、Zr、Y、V、Al、Na、Mg、Tl 和 F)在矿化带附近和周围的岩石和风化层中的酸不溶物中通常是贫化的.某些元素像 K、Al、Ca、Na、Rb 和 Sr 等的贫化被认为由于后期硅化交代了长石和云母使其从热液系统中流失.尽管经历了风化作用,但这些特征被认为是原生地球化学分散的结果.研究结论表明:经王水(3HCl:1HNO₃)和 H₂SO₄ 相继处理后的样品中的酸不溶物主要由石英、燧石和微量的云母组成,这些残留物能被用于在高度风化的区域识别与金和贱金属矿化有关的地球化学晕.

巴西学者 M. L. Costa 等(1999)^[7]对巴西 Carajas 地区砖红土,崩积层,红土型铁壳和铁帽中的 Au-As-B-(Cu)-Sn-W 地球化学组合对原生矿识别的重要性进行了研究.研究区发育红土建造,并被发育于热湿赤道气候条件下稠密雨林所覆盖,基岩由太古代高级变质地质体、绿岩带和构造后花岗岩组成.富金铁帽赋存于红土层.金被发现于红色砖红土,铁壳,铁帽和崩积层中.为了查明这些物质作为地球化学取样介质指示原生矿存在的能力,在研究区实施了多元素地球化学测量(用不同方法分别测试了 27 种元素).根据表层物质的性质,R 型因子分析鉴别出几种元素组合:As-Cu-Mn-Pb-B-Au-W-F 组合对应于赋存在砖红土、铁壳和崩积层中的元素的原生组合特征;Cr-V-Ga-Mo-Ni-Zn-Se-Sc-Hg-Sn-Cl-Y-Zr 组合反应了一般的红土演化特征.结论表明:砖红土与崩积物保留了隐伏原生矿的地球化学特征和信息,它们能被用作理想的找矿取样介质.

澳大利亚学者 K. M. Scott 等(1999)^[8]在“澳大利亚中维多利亚 Goornong South 金矿床及其对隐伏矿勘查的启示”一文中,对至少在 5m 厚的运积物覆盖层之下的 Goornong South 金矿化的研究为中维多利亚运积物覆盖区矿产勘查提供了良好的案例. Au 矿化与 As、Sb 和 W 有关,且 Au 和 As 在腐岩中的丰度(分别 > 10 ppb 和 100 > ppm)足以圈定出矿化体.这些元素的分散晕产在上覆的冲积层中,但其产出模式是多样的.金富集于表层土富粘土的细粒(-63 μm)部分,而 As 富集于粗粒(+2mm)的含铁部分.这些元素在土壤中的异常是风化基岩中异常的 2 倍.由于土壤的细粒部分可能遭受风成物质污染,因此对该区浅覆盖层区,粗粒部分可能是最经济实用的取样介质.在中维多利亚的一些区域,机械分散可能比热液分散更重要.在深覆盖区域热液分散可能是主要的分散作用,这还有待于进一步检验.

总之,(1)在 Goornong South 金矿化区,As、Sb 和 W 与 Au 矿化有关.(2)在风化层样品中 Au 和 As 的丰度是风化岩石和运积物中有用的指示元素.(3)Au 优先浓集在土壤富粘土的细粒部分,而 As 则优先浓集在土壤富含铁质的粗粒部分.土壤中粗粒部分上述元素产生的异常在规模上是其基岩异常的二部,因此,粗粒部分是覆盖区区域勘查的良好介质.

澳大利亚学者 K. G. McQueen 等(1999)^[9]对南澳大利亚风化碳酸盐堆积的性质和分布以及它们在地球化学勘查中作为取样介质的潜力进行了研究.风化碳酸盐岩堆积广布于澳洲大陆的南部,并作为取样介质成功地应用于 Yilgarn 和 Ganwler 克拉通的金矿勘查.碳酸盐岩中 Au 的组合既可指示区域异常亦可指示局部异常.风化碳酸盐岩堆积物在研究区对 Au

和含 Au 多金属矿化都是一种重要的勘查技术.当制订取样战略和区域以及局部异常下限时,需要考虑碳酸盐岩地貌学、矿物学、以及景观环境的变化性;考虑碳酸盐岩成因和分散途径.在应用该技术之前,应进行定向调查研究.研究结论表明:(1)风化碳酸盐岩堆积物在西新威尔士半干旱地区能被用于寻找 Au 的取样介质.(2)在 Cobar 地区风化碳酸盐岩中,Au 的区域异常显然反映了 Au 在碎屑物和地下水中有意义的侧向分散.这种宽阔的异常能被用于圈定矿化区的勘查靶区.

加拿大学者 G. Melo, Jr 等(1999)^[10]对巴西北东部半干旱条件下水系沉积物中金及其组合元素的分散晕进行了研究.在巴西半干旱的北东地区开展了找寻金矿化的水系沉积物定向测量.在源头的金矿化以厘米至米厚的含金硫化物石英脉产出.含金硫化物石英脉位于 NNE-SSW 向的剪切带中容矿岩为矽线石-石榴子石-黑云母片岩.采样在夏季河流干枯的时候进行,在每个采集站,采集 3~5 处高能量组合样品,粒度-2mm.在实验室中,样品被干筛至-2+0.500 mm, -0.500+0.180 mm, -0.180 mm+0.106 mm, -0.106±0.063 mm 和 -0.063 mm 部分.所有小于 500 mm 部分被分析 Au, As, Hg, Sb, Cd, Co, Cu, Fe, Pb 和 Zn.金异常表现为顺流衰减模式,在 1.3 km, 金从 40-55 ppb 降低至 <5ppb.异常顺流分散模式被观测对 As, Cu, Pb, Zn, Co 和 Cd 在所分析的所有粒度部分对金来说顺流延伸 3km 存在很少的不规则性,限制了研究沉积物粒度部分的数据表明,金的分布与沉积物密切相关,当-0.063 mm 部分物质增加时金的浓度降低,而其它贱金属元素则不存在这种尖系.基于上述报道的结果,在干旱地区深部风化层的有限发展和水系盆地内细粒物质的滞流隐藏了金的长分散流的发展,在这种情况下淘洗浓集重砂和探途元素的重要性可能会增加.结论表明,在巴西北东部半干旱季节性河流中-0.063 mm 沉积物部分比更粗部分给出了更强的 Au 和探途元素的异常分散(2.5 km).分散异常的差异性可能源于作为重砂物的金和样品细粒部分的反相关关系.探途元素随样品中细粒部分丰度的增加而增加,但在水系盆的下游部分,金异常逐渐被稀释.加拿大学者 K. A. Laurus 等(1999)^[11]对加拿大 Nunavut 地区冰积物和土壤中的金分布进行了研究.金矿化在表生沉积物中表现为两种截然不同的金异常(1)区域冰积物中的弱金异常(<5~65 ppb),异常带自矿床向冰川移动方向可延伸 2 km;(2)最强烈的异常发生在矿化带附近,由冰缘作用形成(冻胀,融冻泥流作用,土流作用),冰缘作用仍在不断的修改和重新分布富金的风化岩层.在区域冰积物局部矿床中,大部分金寄居在 <53 μm 部分,一小部分在 <106, >53 μm 部分在重矿物中浓集;轻矿物部分和更粗粒的重矿物部分很少,含有可测量到的金,海相粘土中的金小于 5 ppb,并且有效掩盖了来自下伏冰积物或矿化中的地球化学信息.

1.2 偏提取技术

偏提取技术(partial extraction),亦称选择性提取技术(selective extraction),是指使用某些相对专属性弱的提取剂,提取特定的相态,以达到强化异常的目的.

澳大利亚学者 D. J. Gray 等(1999)^[12]对分布于 Yilgarn 地盾 7 个金矿床上的运积物进行了金矿勘查的选择性和偏提取研究.沿矿体趋向采集土壤样品,空气中自然凉干,然后筛分到小于 2 mm,并用各种反应物进行选择提取,其内容包括:(1)相继选择性提取[①PH 为 5 的醋酸盐,②0.1M 羟胺,③0.25M 羟胺酶];(2)4M HCl (15°/4h)和 10M HCl(25°/4h)使用一种氧化剂提取金;(3)碘化物(0.1MKI, PH7.4);(4)活动金属离子(MMI);(5)酶提取.相

继选择提取和 HCl 提取,其结果对一系列元素具有可比性。

活动态金属离子(MMI)法分析包括:(1)对 Cd, Cu, Pb, Zn, 除富碳酸盐土壤给出更低的 MMI 结果外,酸提取与选择性和 HCl 提取具有类似的可比性结果。(2)对 As, Au, Co, Ni, 和 Pd 的碱提取,与用碘化物和 HCl 提取 Au 具有非常特征的结果。尤其是 HCl, 碘化物和 MMI 提取从富碳酸盐土壤中溶解金总量的 70~80%。MMI 亦溶解了大部分的 Ag, 因此对 Au 和 Ag 来说,与总量王水或 BLEG 分析相比,并没有给出更多的勘查信息。酶提取结果是更低的,相对其它方法表明了不同的分布模式。对薄覆盖地区,一直存在机械和生物混合作用足以将一些金带到地表。虽然总量金测量是同等有效的,但 MMI, HCl 和碘化物提取给出了更有意义的结果。相反,在 >25 m 运积物覆盖区,在矿化上方亦有强土壤 Au 异常(155 ppb),但 Au 的溶解度低于所有其他的富碳酸盐土壤。这些异常可能源于含 Au 碎屑的机械搬运。河流水系聚集了 Mn 氧化物和非晶质 Fe 氧化物,它们通常富集多种微量元素。这就导致主要土壤异常,使用选择性或偏提取可以提高异常的强度,但显然这些异常与埋藏 Au 矿化有关。运积覆盖物的厚度显示出特别的意义,厚度大于 10m 的运积物覆盖区在地表并不显示与矿化有关的 Au 异常。结论表明:通常偏提取显示了假正异常,没有能力显示埋藏矿化。在 Yilgarn 地盾运积物覆盖区,偏提取对 Au 勘查没有能提供任何优势。在研究区,偏提取在埋藏矿床定位方面,仅在常规方法有效的地方取得了成功。尽管偏提取方法提高了异常衬度和异常的敏感性,但对在运积物覆盖区 Au 勘查没能提供实质性的优势。

1.3 酶提取技术

酶提取技术(Enzyme leach)是由 J.R.Clark 等于 20 世纪 80 年代末和 90 年代初研制出的一种利用葡萄糖氧化酶提取矿物颗粒表面的非晶质锰的氧化膜寻找隐伏矿的方法,最初被用于探测 B 层土壤中的及敏感地球化学异常。Clark (1999)^[13]在“用于矿产和石油勘查酶提取数据解释的概念和模式”一文中对近年来的研究成果进行了系统总结。由于其异常模式完全不同于传统的地球化学数据,因此,作者强调模式识别是合理解释酶提取数据的关键。

许多矿床被深埋于诸如湖积层或更年轻的火山岩等厚层覆盖物之下,另一种情况是矿体或油储处于地表无任何迹象显示的岩层深处。但在一定的地质时间内,与下伏矿体有关的极少量痕量元素能通过各种机制运移到地表,并趋向于被沉淀于土壤中的矿物颗粒上的各种氧化物所捕获。在这些捕获痕量元素陷阱中,最有效的一种就是非晶质 MnO_2 , 它仅占土壤中锰的氧化物总量的一小部分。 MnO_2 的非晶质沉淀物对能够迁移到地表的各种阴离子、阳离子和极性分子应该是一种非常有效的捕捉陷阱。由于这种捕捉物质的效力,酶提取异常的定位通常独立于土壤中可被提取的量。酶提取是利用酶催化反应选择性溶解土壤中 MnO_2 最活泼的形式,即化合物的非晶质形式。因此,样品中非常少量的 MnO_2 被溶解,且在提取液中出现痕量的 H_2O_2 有助于降低 Fe 的溶解度。由于这种选择性,被确定的许多痕量元素的背景提取浓度低至 10^{-9} 数量级。这样,异常对背景具有显著的衬度。形态上,存在三种可辨认的异常形式:(1)晕异常(halo anomalies);(2)顶置异常(apical anomalies);(3)组合异常(combination)。成因上,亦存在三种类型:(a)氧化异常(有时涉及到氧化晕,在那里形成形态晕)(oxidation anomalies);(b)扩散异常(diffusion anomalies),起源于高度浓集源的逐步动力分散;(c)机械/水成分散异常(mechanical/hydromorphic dispersion anomalies)。

氧化异常可能是由发育于地下还原体顶部的非常敏感的电化学元所引起。这种异常的

特征是对一套元素,即“氧化套”,其中包括 Cl、Br、I、As、Sb、Mo、W、Re、Se、Te、V、U、和 Th 等具有很高的衬度值.稀土元素亦经常伴生于氧化套元素中.在同样的土壤样品中,贱金属亦能形成异常,但通常具有很低的衬度.异常衬度常常是非常明显的,在某些情况下超过背景的 50 倍.氧化异常通常围绕埋藏的还原体形成非对称晕或偏置晕,晕内中心低的位置对应于下伏的还原体.业已发现,相关的还原体位于地下 2Km.通常晕中元素异常衬度和异常元素的数量随还原体深度的增加而降低.这一结论适合任何还原体:斑岩 Cu 矿床,贱金属块状硫化物矿床,热液金矿床,脉状金矿床,油储,地热系统,贫块状硫化物,贫浸染状黄铁矿蚀变,断层内部作为孤立的马鞍状存在的或作为地堑存在于两条正断层的贫瘠的黄铁矿页岩块体或黑色页岩块体.任何比围岩含有更多的可氧化物质的岩体都具有产生上述其中一种异常的潜力.晕中的一套痕量指示元素通常源成分不具备指示意义.但是,存在于某些痕量元素中的相对差异,和某些真正的稀土元素,譬如 Re,在异常中的出现能提供关于异常源地球化学的线索.证据假定在电化学电流元正极形成的挥发分卤化物和卤素气体沿岩石中的节理和断层能迁移到地表,并穿透可渗透的覆盖物,在其表面形成这些氧化物异常.作为沿电化学梯度被推进的阳离子这种电化学机制的产物与氧化套元素晕有关的贱金属“兔耳”异常能够形成.电化学梯度基于不同的电极势也似乎产生不同的变异,这些电极势需将氯化物、溴化物和碘化物氧化成 Cl_2 、 Br_2 、和 I_2 .这些异常模式通常环绕某些大型矿床和油储分布.产生于电化学元分布区的 CO_2 流作为携带者有助于氧化套挥发分迁移到地表.

顶置异常是酶提取异常中最常见的形态异常,其中大多数异常和断层有关.作为代表异常源的痕量元素异常被发现于异常源的正上方.如果异常源是矿床,表明矿床特征的矿产品、探途元素和和蚀变痕量元素都能够在地表形成异常.当一个顶置异常被发现与一个富硫化物矿床有关,这是因为某些东西正在阻止一个强氧化物晕的形成.这矿床对强氧化物电流元来说太深以至于难以发展.在这矿床和地表之间可能存在一个诸如永久冻土的屏障,或者矿床的顶部已经被深风化作用所破坏.富集于下伏矿床中的金属和探途元素作为这些元素在细菌作用下生物甲基作用的结果可能被转移到地表.许多元素的二甲基和三甲基化合物作为气体是高度活动的.因此,深埋富硫化物矿床上方的许多顶置酶提取异常起源于痕量元素的气相运移.在油储中以卞啉为特征的痕量元素通常在油储上方形成顶置异常.碳氢化合物的微渗透将携带这些化合物到地表.矿化断层、切割矿化的断层或切割地球化学异常岩石的断层将伴随地下断层亚露头在地表产生线形异常.如果断层通过氧化物电流元或在其附近通过,那么,氧化套元素在断层经过的上方一起形成高衬度的异常.假定不活动的诸如 Zr、Nb、Hf、和 Ta 等高场强元素在亚地表氧化作用正持续发生区域中的断层正上方亦常常形成极高衬度的异常.

组合异常具有顶置异常和氧化异常的双重特征.它们通常被发现亚地表弱至中等强度的氧化电流元发育区.随着氧化电流元强度的增加,表明异常元特征的痕量元素越来越多的迁移到晕异常中,直到顶置晕消失.

各种地质环境和地质作用能使酶提取异常复杂化,从而增加了解释的不确定性.氧化晕通常在形状上是不规则的,或者是非对称的,因此,易于导致对异常模式的错误解释.相邻的矿化体之间产生的氧化晕互相影响.石墨容矿岩对氧化电流元具有强烈的淬火效应,从而导致异常衬度的消失,并使异常元似乎显得比实际深度更深.由于矿床顶部的强烈风化作用,

潜水面的变化以及其他因素,异常模式能随时间发生实质性转变.在同一地区活动的和残留的异常将使异常解释复杂化.亚地表象强氧化的沉积单元能削弱甚至完全阻止酶提取异常的形成.

1.4 深穿透地球化学技术

关于深穿透地球化学技术概念和方法技术,谢学锦和王学球等(1999,2000)^[3,5]在有关著作和文章中有过专门系统地论述,故这里不再赘述.

2 元素的赋存状态和地球化学性质

美国学者 R. J. Howell 等(1999)^[14]对美国内华达 Getchell 矿山金的赋存状态进行了研究.结论表明:该项研究至少揭露了 Getchell 矿山金的三种赋存状态:(1)呈亚微粒至微粒金赋存于石英硫化物和其它矿物中;(2)化学上金赋存于黄铁矿富 As 的边缘;(3)游离的自然金颗粒(80 μm).

第一种方式从露天矿至脉状矿是最常见的.第二种方式与页岩中富黄铁矿交代矿床具有密切关系.第三种方式比较少见,主要被限制在重新活化的角砾状氧化矿石重新活化的高角度断层带的硫化物矿石中.金出现在砷黄铁矿中,很可能富集于黄铁矿颗粒的外部边缘.砷黄铁矿内部的自然金颗粒最可能来自沉淀后的出溶和(或)由于电化学作用沉淀于富 Au 黄铁矿的表面.矿石中 Au 赋存状态的详细矿物学评价有益于勘查资料的解释,有利于评价金的回收.

澳大利亚学者 N. W. Brand(1999)^[15]对澳大利亚 Norseman-Wiluna 绿岩带中的镍硫化物矿床勘查中的元素比值进行了研究以指示成矿环境.研究表明:(1)Ni:Cr 和 Cu:Zn 比值能够有效地鉴别和指示 Ni 硫化物矿化潜力及其容矿岩石类型.(2)Ni:Cr 比率与 Cu:Zn 比率结合(Kambalda ratio = $([\text{Ni}/\text{Cr}] \times [\text{Cu}/\text{Zn}])$)提供了强有力的确定科马提岩通道的环境和 Ni 硫化物矿化的指示参数.(3)Kambalda 比率能被有效的应用于深风化地区和剥蚀残留地表环境指示远景矿化区.(4)风化层内的比率能有助于区分矿化与非矿化层序.(5)Cu:Zn 比率的内涵表明突起的 Cu 来自于 Ni 硫化物,而平缓的 Cu 来自于硫化的沉积岩和硅酸盐.(6)域上的 Ni:Cr 比值具有判别远景绿岩带的能力.(7)使用弱浸提取方法和风化物中的细粒部分能够增强比值衬度.

美国学者 V. T. Mclemore 等(1999)^[16]对美国新墨西哥,Sierra 县 Hillsboro 矿区 Copper Flat 斑岩地球化学及其有关矿床进行了研究.地球化学和地质年代学数据表明,Hillsboro 矿区的火成岩是同源岩浆的,并与形成于大约 75Ma 的 Laramide 火山/侵入杂岩有关,而安粗岩脉的同位素年龄是 75 ~ 70 Ma.地球化学资料假定火成岩是岛弧岩浆作用高度演化的产物,成分上类似于美国西部的斑岩铜矿,铅同位素数据表明 Copper Flat 石英二长岩与新墨西哥其它斑岩铜矿床具有类似的来源,其来源显著不同于更年青的中第三纪矿床.铅是非放射性成因的,因此假定它们来源于下地壳或上地幔,与火成岩的地球化学成分相一致.

收集的地质、地球化学和流体包裹体资料表明,发现于 Hillsboro 矿区的矿床形成与 Copper Flat 火山/侵入杂岩和相继侵入的石英二长岩,安粗岩和石英安粗岩脉有关的热液对流系统.这些对流热液系统是浅成的,形成深度是 1 ~ 2 km.来自 Wick 脉和 Copper Flat 石英二长岩角砾岩筒的流体包裹体具有高盐度,表明是岩浆来源的.来自 Wick 脉和来自 Copper Flat

石英二长岩角砾筒的流体包裹体在化学成分上仅存在微小的差异,这表明矿化流体是同源的,只是控制成矿的沉淀过程不同.在 Copper Flat Laramide 脉和以碳酸盐岩作为容矿岩的交代矿床贵金属和贱金属之间存在着良好的相关关系,亦表明它们是同源的.斑岩铜矿和脉状矿床中 Cu 和 Mo 之间的非相关关系表明成矿流体是多旋回的,可能是多个热液系统的结果.在 Copper Flat 石英二长岩和脉状矿床中低温流体包裹体的出现亦表明热液流体是多旋回的.碧玉岩局部角砾岩化并被更年轻的以碳酸岩为容矿岩的交代矿床胶结,表明它们比胶结物更老.某些碧玉岩样品含有异常的 Au 和 As 浓度,表明它可能形成于 Copper Flat 石英二长岩和 Laramide 脉状矿床有关的远程热液流体中.如果假设是正确的,以碳酸盐岩作为容矿岩的交代矿床能代表 Hillsboro 矿区热液岩浆矿化的最后阶段.在中新世和全新世来自 Copper Flat 石英二长岩和脉状矿床物质的剥蚀和再聚集形成了砂金矿床.

3 地球化学信息的综合解释

加拿大学者 E. C. Grunsky 和 B. W. Smee(1999)^[17]应用多元分析方法和数字拓扑技术区分土壤类型和来自多元素地球化学的矿化.多元素地球化学数据能被有效地解释通过应用多元统计技术,图像方法和与数字拓扑信息的综合.这些技术已经被应用于一套 1665 土壤样品,这些样品采自印度尼西亚的 Sumatra 中部地区.使用王水溶解样品,然后应用 ICP-IES 分析 Au、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Ca、Cd、Co、Cr、Fe、Ga、K、La、Li、Mg、Mn、Nb、Sc、Sr、Ti、V、Y、Zr、Hg.用几个元素显示的双模式总体难以解释单元素平面图,单元素空间模式似乎是不连续的,并产生了一种怀疑,即双成分总体反映了样品介质差异而不是与岩性和矿化有关的特征.统计方法被用于检验样品介质中存在的差异性假设.主成分分析鉴定了几种不同的元素组合和总体.每个主成分的样品得分被内推并绘制成图象和平面图.第一主成分在平面图上很难解释,似乎并没有反映任何岩性和已知的矿化趋势.因此,可以得出结论:与第一主成分有关的模式可能反应样品介质类型的差异(腐殖土和火山灰),第二主成分揭示了与腐殖土有关的模式;它反映了 Cu 的高含量,并与平行 Sumatra 大断层带的区域性 NW 向断层构造相吻合;第三主成分归结于与腐殖土有关的 Au 含量,可能反映了与扩容和区域断层作用有关的热液过程.具有 10m 分辨率的数字抬升模型与主成分分析结果综合研究表明,产在第一主成分内的两个样品总体表明了不同的空间分布特征,解释为火山灰的样品总体沿山顶斜坡和水系渠道分布,并置于腐殖土剖面之上.总之,给定的一套多元素数据,多元分析技术和数字拓扑方法的综合研究比单元素标准平面图提供了更多且更有意义的信息,这些技术的应用亦提供了可视化和解释多元素地球化学数据更有效的方法.

加拿大学者 J. R. Harris 等(1999)^[18]将岩石地球化学数据的分析和可视化技术应用于安大略 Swayze 绿岩带的研究.1993 年 1 月,加拿大地质调查局会同安大略地质调查局开始一项应用 GIS 技术分析覆盖 Swayze 绿岩带的数字化资料并进行编图的工程.作为地球化学编图过程的一部分,一个庞大的岩石化学数据库被建立,文章给出了探测蚀变与未蚀变岩石化学样品方法学的改进和对比结果和从背景中签别异常岩石地球化学总体的结果.3395 件样品中,其中 1606 件被认为是蚀变样品,大约代表了总体的 47%.蚀变样品的特征是高 SiO₂、K₂O 和 MgO 值,低 CaO、FeO 和 TiO₂ 值.SiO₂、K₂O 和 MgO 的富集反映了硅化,钾化和绿泥石化蚀变.反映矿化潜在地段的强蚀变带已经被单变量和多变量技术所鉴定,根据这些分

析,几种关键的蚀变带被鉴定是值得进一步跟踪勘查的找矿靶区。

4 区域地球化学填图

澳大利亚学者 Rohan Halfpenny 等(1999)^[19]在“巴基斯坦北部喜马拉雅山区域多元素水系地球化学”一文中详细介绍了他们在这—地区的地球化学填图和研究工作。在北巴基斯坦的水系勘查取样作为澳大利亚援助计划的一部分始于 1992 年,后来巴基斯坦机构延伸了这一计划,至 1997 年覆盖了 10 万 km²。 < 200 μ m (- 80 目) 的重砂样按不同的采样密度被采集,在西北边缘省和北部区域总共分布有 4260 个样点,用原子吸收光谱分析了 Au, Bi, Co, Ni, Pb 和 Zn 等元素。论文根据分析结果对区域地质和矿化提出了认识。调查包括欧亚板块与印度板块的碰撞带,及其过渡的白恶系 - 第三系岛弧系 (kohistan 和 ladakh 弧)。主要的三个构造地壳单元被二条逆冲断层 (北缝合线带 (NSZ) 和主幔逆冲断层 (MMT)) 所分割。它们是宽达 4 km 的剪切带。其中分布有大洋蛇绿岩质的火山岩和阿尔脾斯蛇纹质侵入体。该区域地形景观,山峰超过海拔 8000 m。虽然是半干旱气候,大部分高地被永久性积雪和活动冰川覆盖,雪冰溶水是宽广的印度河水系的源泉。与新始世印度板块 (55 百万年) 以来向北运动有关的压缩已经导致地壳隆升 20 至 40km,且剥蚀水平更深。

前剥蚀期的残余物滞留在河谷内部形成的沉积物中。多元素地球化学很好揭示了区域地质特征。欧亚和印度两板块都具有 Ba, Pb, Sn, Tl 和高 K/Na, 高背景值特征, kohistan-ladakh 弧具有 Co, Cu, Fe, Mn 和 V 的高背景值特征。一系列 Cr, Ni 和 Mg/Ca 比值富集单向延长的模式圈定出了 NSI 和 MMI 的分布。主成份分析很好的揭示了这些关系,前二个因子明显与三个区域地质单元和分隔它们的构造有关;其它因子能被解释为代表了不同类型的矿化,虽然至今没有确定有意义的矿化点。某些元素的结果受汇水盆地面积变化的影响,中等浓集的 Ba, Co, Cu, Mo, Ni 和 Zn 随盆地面积的增加而降低,这是一种下游稀湿的正常模式。As, Au, Cr, Nb, Pd, Pt, Sb, Sn, V 和 W 表明了相返的趋势,如,在更大的汇水盆地中富集。这种行为对被分散在重矿物相中的元素是典型的并被沙阱点取样介质所放大,这些沙阱点是重砂矿物水动力浓集的位置。淘洗重砂中的 Au 可高达 480 ppm,被认为代表了 Au 浓集而不是分散的模式。其中一部分来自完全被剥蚀的基岩源。概略地定向研究假定更有意义的分散模式能被低能沉积物部分 (而不是沙阱中) 的取样介质和 < 75 μ m 部分所圈定。

总之,调查区结果表明地球化学分散模式与区域地质特征之间存在密切关系。在某些情况下,这种联系超越了简单的岩性界限,涵盖了更大的构造单元。像喜马拉雅这样的山链,正像在其它环境,地球化学分散模式能够期望提供与地质和矿产相关的信息。

来自重矿物沙阱点的淘洗浓集样品的收集能增强作为重矿物分散的远距离矿的信号,但对像 Au 这样的贵金属冲积物浓集具有不希望的增加模式效应,这种增强效应与活动侵蚀的原生金矿化没有任何关系。超细 (< 75 μ m) 低能沉积物取样在地球化学水系测量中是一种有效的对淘洗浓集重矿物的代用品,并且对贵金属以及作为所有其它有意义元素测量的合适介质提供了更有效的异常。

美国学者 M. D. Cocker(1999)^[20]在“地球化学填图在美国中乔治亚州:一种用于环境研究,地质填图和矿产勘查的工具”一文中介绍了他们的研究成果。由于强烈的风化作用,贫的露头 and 厚的植被,地表地球化学填图是美国东南部一种有价值的工具。70 年代后期作为美

国能源部国家铀矿资源评价(NURE)项目的组成部分收集的水系沉积物和水地球化学数据近来由乔治亚州地质调查所借助于 GIS 技术进行编图和分析.结果表明基岩地质和矿化是影响水系沉积物和水系地球化学的最重要的变量.人类活动对地球化学的影响很小亦很局限.乔治亚州的地球化学填图已经被习惯于定义为:(1)用于河流盆地管理规划的主要河流盆地的背景地球化学;(2)在 Piedmont 和 Blue Ridge 地区具有最高 Ra 资源潜力的岩石单位;(3)与区域和局部地质单元和构造有关的地球化学模式(4)与已知和以前未发现矿化有关的地球化学异常.被 NURE 鉴定和定义的地球化学异常表明了 5 个重矿物异常带, Mississippian Valley 型矿化, 和与镁质变火山岩有关的贱金属矿化.结论表明, NURE 水系沉积物和水系地球化学数据定义了与原生下伏地质和次生人类活动有关的区域和局部地球化学模式.地球化学填图已经成功地用于乔治亚州环境研究, 定义了潜在的经济矿化带和有利的地质填图区域.大尺度多元素贱金属异常, REE-Th-Ti-U, 和 Zn-Fe-Mg-Ti-V 和下伏地质特征假定 MV 矿化, 古砂矿和以镁质层状火山岩和深成岩贱金属和 Pt 组矿化的存在. NURE 数据为河流盆地管理规划, 和河流盆地成盆的监测变化提供了一个地球化学基线.地球化学填图能被用于针对关键地区的填图并能够帮助地质填图.

5 思考和建议

5.1 取样介质的正确选择和相应的分析技术的进步是发现隐伏矿的关键.取样介质应含有最丰富的找矿信息, 这些信息可能是通过同生成矿作用或后生成矿作用, 亦可能是通过原生地质作用或次生地质作用形成于取样介质中.在一个地区开展地球化学找矿工作首先要确立合适的取样介质.取样介质的确立是以查明成晕元素的形成机制和赋存状态为基础的.

5.2 了找寻隐伏矿, 自 20 世纪 70 年代以来, 勘查地球化学家研制了一系列针对不同矿种(贱金属和贵金属)和不同景观条件(热带雨林、高寒山区、荒漠戈壁以及冰川冻土等)的地球化学勘查新方法和新技术.如目前应用较为广泛的电地球化学方法(CHIM)、酶提取方法(enzyme leach)、金属活动态提取方法(MOMEO, Wang Xueqiu, 1998)^[21]和活动态金属离子法(MMI, A. W. Mann 等, 1995)^[22]等.上述方法一个共同特点都是以直接探测来自深部矿体的, 以各种形式(相态)存在的成矿成晕物质为手段的.由于上述方法缺乏统一的测试标样, 因此, 元素(或元素组合)异常模式比异常强度显得更为重要, 那么, 模式识别技术就构成了异常解释和异常评价的关键.应加强不同景观条件下不同矿种和不同矿床类型的异常特征和异常模式研究, 加强能够鉴别矿异常和非矿异常以及矿床类型的模式识别技术研究.

5.3 加强不同景观地质条件下、不同勘查尺度的地球化学填图技术研究, 以实现迅速掌握全局, 逐步缩小靶区直到矿床定位的找矿战略.

5.4 加强应用勘查地球化学信息解决关键基础地质问题的研究; 加强地球化学信息与地质、地球物理和遥感信息结合的信息综合研究, 应用综合信息定量圈定和评价找矿靶区.

参 考 文 献

- [1] Cas S, Greenhalgh S. High-resolution seismic tomographic delineation of ore deposits[J]. Exploration Geophysics, 1995, 26:315 ~ 318.
- [2] Yang K, Huntington J F, Boardman J W, Mason P. Map-

- ping hydrothermal alteration in the Comstock mining district, Nevada, using simulated satellite-borne hyperspectral data [J]. Australian J. of Earth Sciences, 2000, 46: 915 ~ 922.
- [3] X Xie, X Wang, L Xu, Kremenetsky A A, Kheffets V K. Orientation study of strategic deep penetration geochemical methods in the central Kyzylkum desert terrain, Uzbekistan [J]. J. Geochem. Explor. 1999, 66: 135 ~ 144.
- [4] Yingqing Chen, Pengda Zhao, Jianguo Chen, Jiping Liu. Application of The Geo-anomaly Unit Concept in Quantitative Delineation and Assessment of Gold Ore Targets In Western Shandong Uplift Terrain, Eastern China [J]. Natural Resources Research, 2001, 10(1): 35 ~ 49.
- [5] Lombard M, de Bruin D, Elsenbroek J H. High - density regional geochemical mapping of soils and stream sediments in South Africa [J]. J. Geochem. Explor. 1999, 66: 145 ~ 150.
- [6] Pwa A, McQueen K G, Scott K M, van Moort J C. Regolith geochemical exploration using acid insoluble residues as a sample medium for gold and base metal deposits in the Cobar region, N.S.W., Australia [J]. J. Geochem. Explor. 1999, 67: 15 ~ 31.
- [7] Costa M L, Angelica R S, Costa N C. Regochemical association Au-As-B-(Cu)-Sn-W in latosol, colluvium, lateritic iron crust and gossan in Carajas, Brazil: importance for primary ore identification [J]. J. Geochem. Explor. 1999, 67: 33 ~ 49.
- [8] Scott K M van Riel B. The Goornong South gild deposit and its implications for exploration beneath cover in Central Victoria, Australia [J]. J. Geochem. Explor. 1999, 67: 83 ~ 96.
- [9] McQueen K G, Hill S M, Foster K A. The nature and distribution of regolith carbonate accumulations in southeastern Australia and their potential as a sampling medium in geochemical exploration [J]. J. Geochem. Explor. 1999, 67: 67 ~ 82.
- [10] Melo Jr G, Fletcher W K. Dispersion of gold and associated elements in stream sediments under semi-arid conditions, northeast Brazil [J]. J. Geochem. Explor. 1999, 67: 235 ~ 244.
- [11] Laurus K A, Fletcher W K. Gold distribution in glacial sediments and soils at Boston Property, Nunavut, Canada [J]. J. Geochem. Explor. 1999, 67: 271 ~ 286.
- [12] Gray J D, Wildman J E, Longman G D. Selective and partial extraction analyses of transported overburden for gold exploration in the Yilgarn Craton, Western Australia [J]. J. Geochem. Explor. 1999, 67: 51 ~ 66.
- [13] Clark J R. Concepts and models for interpretation of enzyme leach data for mineral and petroleum exploration [A]. In: Enzyme leach model, sampling protocol & case histories, [C]. Activation Laboratories Ltd & Actlabs-Skyline, 1999.
- [14] Bowell R J, Baumann M, Gingrich M, et al. The occurrence of gold at the Getchell mine, Nevada [J]. J. Geochem. Explor. 1999, 67: 127 ~ 144.
- [15] Brand N W. Element ratios in nickel sulphide exploration: vectoring towards ore environments [J]. J. Geochem. Explor. 1999, 67: 145 ~ 166.
- [16] Mclemore V T, Munroe E A, Heizler M T, Mckee C. Geochemistry of the Copper Flat porphyry and associated deposits in the Hillsboro mining district, Sierra County, New Mexico, USA [J]. J. Geochem. Explor. 1999, 67: 167 ~ 190.
- [17] Grunsky E C, Smee B W. The differentiation of soil types and mineralization from multi-element geochemistry using multi-element methods and digital topography [J]. J. Geochem. Explor. 1999, 67: 167 ~ 300.
- [18] Harris J R, Wilkinson L, Grunsky E, Heather K, Ayer J. Techniques for analysis and visualization of lithogeochemical data with applications to the Swayze greenstone belt, Ontario [J]. J. Geochem. Explor. 1999, 67: 301 ~ 334.
- [19] Halfpenny R, Mazzucchelli R H. Regional multi - element drainage geochemistry in the Himalayan Mountains, northern Pakistan [J]. J. Geochem. Explor. 1999, 67: 223 ~ 233.
- [20] Cocker M D. Geochemical mapping in Georgia, USA: a tool for environment studies, geologic mapping and mineral exploration [J]. J. Geochem. Explor. 1999, 67: 345 ~ 360.
- [21] Wang Xueqiu. Leaching of mobile forms of metals in overburden: development and applications [J]. J. Geochem. Explor. 1998, 61: 345 ~ 360.
- [22] Mann A W, Birrell Gay L M. Application of the mobile metal ion technique to routine geochemical exploration [A]. In: Hall G.E.M., Bonham-Carter G.F. (editors). Selective extractions [J]. J. Geochem. Explor. 1995, 51: 87 ~ 102.

Developing Current Situation of Metal Resources Exploration Techniques and Some Thought

CHEN Yong-qing^{1,2} XIA Qing-lin²

(1. *Development & Research Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China;*

2. *China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*)

[**Abstract**] Developing current situation of geochemical exploration methodology and techniques used for searching for ore deposits can be outlined as the following contents: (1) study on geochemical exploration for concealed mineral deposits in overburden areas; (2) study on both existing status of elements and geochemical properties of elements; (3) comprehensive interpretation of geochemical information; (4) regional geochemical mapping. The following suggestions are given in this paper: (1) the first task of geochemical exploration for mineral resources is to determine suitable sampling medium; (2) the study on elemental anomalous features and elemental anomalous pattern should be strengthen; (3) the study on geochemical mapping techniques under different landscapes should be strengthen to realize the mineral exploration strategy of quickly mastering all situation and delineating ore targets step by step; (4) strength the study on information processing techniques for geochemical, geological, geophysical and remote sensing data to delineate and assess ore targets utilizing integrated information and to reduce the uncertainty of mineral exploration.

[**Keywords**] Mineral exploration; Concealed ore body; Integrated ore-finding information