

文章编号:1001-8166(2011)08-0822-15

隐伏矿床勘查地球化学新进展^{*}

孙 剑,陈岳龙,李大鹏

(中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083)

摘 要:近年来,隐伏矿床的勘查日益受到重视,随着成矿理论和分析技术的发展,形成了众多新的地球化学勘查方法,在隐伏矿床勘查中发挥着越来越重要的作用。当前,以金属活动态测量法、地球气纳微金属测量法、电地球化学方法、活动金属离子法等一系列偏提取技术为代表的深穿透地球化学方法,能够获取深部矿体的直接信息,是隐伏矿床勘查技术上的一项重大突破。综合应用地质、地球化学、地球物理、遥感等多元信息来进行勘查的综合信息找矿方法也在隐伏矿床勘查中取得了显著的效果,是未来矿产勘查的重要发展方向。以地球化学块体这一理论概念为基础发展出的地球化学块体方法技术,以国内外近百例矿床勘查发现史为基础总结经验得出的信息找矿战略,以及以 Cu、Fe、Zn 等非传统同位素示踪技术为代表的新的示踪技术,代表了当前矿产勘查在理论、经验和分析技术上的新突破,开始初步应用于隐伏矿床的勘查并产生良好的效果。同时,传统的地球化学勘查手段如地下水地球化学勘查、植物地球化学勘查方法取得了新的发展,仍在隐伏矿床勘查中发挥了重要作用。综述和讨论了各种勘查地球化学方法的概念、原理、使用方法以及实际应用效果,指出了目前存在的一些问题,为勘查工作者提供了参考。

关 键 词:隐伏矿床;勘查地球化学;深穿透地球化学;综合信息找矿

中图分类号:P62

文献标志码:A

随着中国国民经济持续快速发展,中国对矿产资源的需求呈现了快速增长的趋势,资源短缺已经成为制约中国经济又好又快发展的主要瓶颈之一。出露区经历了人类肉眼上千年的找矿历史和一个多世纪的系统地质勘查,找到新的矿产地的可能性越来越小,普遍认为寻找新的矿床,特别是大型或巨型矿床的最大机遇是在隐伏区^[1]。

从地球化学角度,矿床的特点是高度富集成矿元素。找矿的实质是寻找元素异常富集的地质体。因此,最直接的找矿方法是寻找出露在地表的矿石露头,如铁帽。对于埋藏在浅部地表下的矿床,矿体中的成矿物质或元素可以通过各种营力,如在风化搬运、离子扩散、地下水循环、生物搬运等作用下,迁移至地表,利用传统的勘查地球化学方法能够较有

效地找到矿。水系沉积物、土壤和岩石地球化学测量等传统化探方法,在 20 世纪的找矿实践中发挥了令矿产勘查界瞩目的重要作用^[2~5]。而对于深部隐伏矿床,特别是覆盖区找矿条件,传统化探方法已无法完全适应,需要有新的方法技术予以补充^[6~8]。

近年来,随着成矿理论和分析技术的发展,形成了一系列新的地球化学勘查方法,在隐伏矿床勘查实践中经受了考验,受到越来越多的关注。尤其令人瞩目的是以地气法、金属活动法、电地球化学法、活动金属离子法等一系列偏提取技术为代表的深穿透地球化学方法,综合应用地质、地球化学、地球物理、遥感等多元信息来进行勘查的综合信息找矿方法,在勘查实践中取得了显著的效果。除此之外,从地球化学块体这一概念理论出发发展的地球化学块

^{*} 收稿日期:2010-09-28;修回日期:2011-05-16.

^{*} 基金项目:中国地质调查局国土资源大调查项目“地质调查情报编译与科技成果集成”(编号:1212010561508);中国地质调查局“国外地质调查战略情报编译与专题研究”项目中的专题“国外化探技术文献编译与研究”(编号:1212011120175)资助。

作者简介:孙剑(1986-),男,浙江天台人,博士研究生,主要从事同位素地球化学研究。E-mail:sunjiantc@163.com

体方法技术,以国内外近百例矿床勘查发现史为基础总结经验得出的信息找矿战略,以及以 Cu、Fe、Zn 等非传统同位素示踪技术为代表的新的示踪技术,取得了快速的发展,将会对矿产勘查产生重要的影响。同时,传统的地球化学勘查方法如地下水地球化学勘查、植物地球化学勘查也得到了进一步的发展完善。这些新的进展对寻找隐伏矿床,解决资源短缺问题,具有重大的意义。本文对各种勘查地球化学方法的概念、理论基础、使用方法以及应用实例进行了介绍和讨论。

1 深穿透地球化学

国际找矿界都在致力于研究能探测更大深度的获取直接信息的地球化学找矿方法。20 世纪 90 年代以来,出现了一些新的能够有效探测数百米深度以下隐伏矿床的方法,这些方法包括瑞典 Kristiansson 等^[9]首先提出的地气(geogas)法,前苏联的电地球化学方法(CHIM)^[10],美国 Clark 等^[11]提出的酶提取方法,澳大利亚 Mann 等^[12]提出的活动金属离子法(MMI),以及我国提出的金属活动态法(MO-MEO)^[13]。在这一背景下,Cameron 与谢学锦于 1997 年第 16 届国际化探大会期间提出了“深穿透地球化学”(Deep-penetrating Geochemistry)的概念,来概括这些新方法、新技术,以推动它们的发展。

1.1 深穿透地球化学的概念和理论基础

深穿透地球化学被定义为,探测深部隐伏矿或地质体发出的直接信息的勘查地球化学理论与方法^[1]。它是通过研究隐伏矿成矿元素或伴生元素向地表的迁移机理和分散模式,含矿信息在地表的存在形式和富集规律,发展含矿信息采集、提取与分析、成果解释技术以达到寻找隐伏矿床的目的。与传统化探方法不同,该理论与方法具有下列特点:①探测深度大,可达数百米;②所测量的主要内容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^[14]。

深穿透地球化学方法研究的是呈极活跃状态的金属,它们可以在地表覆盖物中形成叠加异常。至于它们是被何种从深部上升的推动力携带于地表,可能的途径主要有:①风化过程中元素的物理和化学释放;②地下水循环将元素溶解带到地表;③离子扩散作用;④氧化还原作用;⑤蒸发作用;⑥植物的根系吸收;⑦气体扩散;⑧气体搬运^[15]。不同的学

者对此有不同的看法。如前苏联发展的 CHIM 方法^[10]认为人工电场是驱使金属从深部到达地表的主要动力;酶提取方法的理论基础是地下水与自然电化学作用;起源于澳大利亚的 MMI 方法认为在澳大利亚深风化过程中产生活态金属离子;我国的谢学锦等^[14]倾向于支持地幔脱气学说,认为整个地球都在“漏气”,这种来源于地幔的“地球气”不仅穿过隐伏矿床携带活动态金属到达地表,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到达地表。

尽管不同的深穿透地球化学方法都有各自的解释,但这些解释的共同点是:矿床本身及其围岩中的成矿元素或伴生元素活动态形式,包括各种离子、络合物、超微颗粒等,可以在某种或某几种营力的作用下,被迁移至地表,在地表介质中形成叠加含量,用适当的方法捕获或提取这些元素的叠加含量,可以达到寻找隐伏矿的目的。

1.2 深穿透地球化学勘查方法

由于不同学者对深穿透地球化学的元素迁移机理的理解不同,因此所使用的深部成矿信息提取方法也不同,主要包括金属活动态测量(MOMEQ)、地球气纳微金属测量(NAMEG)、电地球化学方法(CHIM)、活动金属离子法(MMI)、酶提取法(Enzyme leach)等。这里重点介绍我国学者所研发的金属活动态测量和地球气纳微金属测量。

1.2.1 金属活动态测量(MOMEQ)

(1) 基本概念和理论基础

地下深部成矿元素和伴生元素可以通过各种途径:地下水循环、离子扩散、毛细管作用、电化学梯度、植物作用和气体搬运等营力作用被运移至地表,被各种天然捕集物质,如可溶性盐类、胶体、粘土、氧化物和有机质所捕获^[16]。

金属元素可形成各种形式的活动态金属,主要包括:①作为离子状态存在;②作为可溶性化合物和络合物形式存在;③作为可溶性盐类;④作为胶体形式吸附在土壤颗粒表面;⑤以离子或超微细颗粒吸附在黏土表面,或以可交换的离子态存在于黏土矿物之中;⑥以不溶有机质结合形式存在;⑦作为离子或超微细颗粒吸附在矿物颗粒的氧化膜上或被氧化物包裹^[1]。不同的元素其活动态形式和赋存介质会有差别,如 Au 主要的活动态是以超微细颗粒存在,U 在干旱氧化条件下主要以活动态的铀酰络阳离子存在,Cu 主要以稳定形式存在。但无论何种形式,细粒物质的强烈吸附和可交换性能是活动态元

素的天然“捕获阱”(natural trap)^[17]。所以分离细粒物质进行全量分析或提取某种赋存介质进行偏量分析都可以获取含矿信息。

(2) 含矿信息分离与提取流程

对金属活动态的提取,不仅要破坏载体使金属释放出来,而且还要将释放出来的金属能够溶解于溶液中。因此,金属活动态提取是针对金属活动态本身的提取,而不只是对载体的提取^[13]。据此,Wang 等^[13, 18, 19]研制出了金属活动态 2 阶段提取方案:第一阶段是使用顺序提取的方法,将载体由弱到强依次溶解,并使金属释放出来;第二阶段是对提取液的处理过程,将第一阶段释放出来的金属溶解于溶液中。

活动态金属的提取包括:①水提取(WEM),提取包括金属离子、可溶性化合物、可溶性胶体和可溶性盐类中的金属元素;②吸附态提取(AEM),提取吸附和可交换金属;③有机结合态提取(OBM),提取有机质结合金属;④铁锰氧化物态提取(FMM),提取氧化物膜吸附或包裹金属。具体的步骤以及元素分析方法可参考文献[1]。

元素的分析仪器以等离子质谱(ICP-MS)为主,配合石墨炉原子光谱吸收(GF-AAS)、预富集化学光谱(CP-AES)和原子荧光光谱(AFS)。

(3) 试验与应用

由于金属活动态测量方法提取的是深部隐伏矿床发出的直接信息,该方法适用于不同地表条件下隐伏矿床的勘查,包括冲积平原、热带深风化壳覆盖区、草原覆盖区、荒漠戈壁覆盖区等。金属活动态测量方法能够提取并探测几乎所有金属的异常,包括 Au、Ag、Pb、Cu、Zn、Mo、U、钼族元素、稀土元素等。至于探测的深度,已有的试验表明,至少在超过 300 m 深的矿床上方可以有效地圈出异常。

王学求^[13, 16]利用金属活动态水提取(WEM)对冲积平原山东省进行了试验,发现了 4 处大规模的区域 Au 异常,其中 2 处异常是含已知大型金矿床的异常。利用金属活动态水提取(WEM)、吸附态提取(AEM)对位于乌兹别克斯坦西部克孜勒库姆沙漠腹地的穆龙套金矿进行了试验,在金矿体上方发现明显的 Au 异常。利用金属活动态提取方法在热带深风化壳覆盖区奥林匹克坝巨型 Cu-U-Au-Ag 矿床(深约 300 m)上方发现明显的 Cu、Au、Hg、Ir、Ta 异常。利用有机质结合态提取(OBM)方法在川西北若尔盖草原覆盖区东北寨金矿上方发现明显 Au 异常,已由钻探证实为一大型隐伏金矿^[14]。

王学求等^[21]利用各种金属活动态提取方法对东天山进行战略性深穿透地球化学调查,共圈出 1 000 km²以上的地球化学块体 18 处,包括铜、镍、铅、锌、银、金、钨、铀、铂—钯地球化学块体。有 6 处地球化学块体与已知矿集区相对应,新圈定的地球化学块体 12 处中有 3 处发现了新的矿床^[20]。对东天山荒漠戈壁覆盖区的研究还表明:弱胶结层是干旱荒漠区超低密度调查的有效采样介质,并且深部含矿信息主要赋存在细粒级部分和氧化地球化学障中,使用细粒级部分与提取氧化物膜中的金属元素相互补充可以有效地识别含矿信息。

1.2.2 地球气纳微金属测量

地球气纳微金属测量法,即地气法,最早由瑞典 Boliden Mineral 公司 Kristiansson 等^[9, 22]和 Malmqvist 等^[23]提出,但由于方法在基础理论上存在分歧,西方国家自 20 世纪 90 年代起少有新的突破性成果的报道,我国是世界上唯一始终坚持开展地气研究的国家。我国任天祥等^[24]提出地气异常物质可能呈纳米态存在和迁移,童莼萑等^[25, 26]研究证实地气物质以纳米颗粒存在和迁移并提出其迁移机制,王学求等^[27]设计了动态采样装置及方法(NAMEG),谢学锦等^[14]提出用该方法做地气地球化学填图,在理论研究发展的同时该方法在隐伏矿勘查中发挥了重要作用。

(1) 基本概念和理论基础

基于地球深部存在上升的气流,当上升气流经过矿体及其所形成的高含量地球化学块体时,将把成矿元素及伴生元素的活动态部分(纳米级颗粒、胶体、离子和各种络合物)带到地表。因而采取气体样品,分析气体中金属元素含量就会指示深部矿体的存在^[16]。地气测量方法和地表疏松沉积物中金属活动态测量方法的理论依据基本类似,只是采样的介质不同,地气法的采集对象是气体中的活动态金属。因而地气法同样能够勘查各种不同地表条件下的隐伏矿床,能够提取各种不同的金属异常。

(2) 采样技术及分析方法

地球气纳微金属测量法的采样方法有静态法和动态法 2 种。最初使用埋置集气法(静态法),具有受气候影响小但采样时间长采样器回收率低等特点,不易开展大规模的工作。王学求等^[27]设计的动态采样装置使用聚胺脂泡沫塑料加上特殊的负载作为吸附材料,用抽气泵快速抽气,只需几分钟就能完成一个样品的采集工作。该方法实现了高速采样、液态介质高效捕集。缺点是液体捕集剂无法在埋置

采样中应用,使动态采样中引入误差上升为技术问题。

地气中的金属含量非常低,通常 10 mL 气体中的绝对含量在 ng 级以下,相对含量在 10^{-2} ng/L 级别,因此对分析技术的要求极为严格和苛刻,只有使用高灵敏和超高灵敏的分析技术才能实现。地气样品测试方法主要有:质子激发荧光光谱分析(PIXE)、中子活化分析(INAA)和等离子质谱(ICP-MS)^[28]。更详细的采样及处理方法可参考文献[27, 29]。

(3) 试验与应用

王学求等^[27]利用地球气纳微金属测量法,结合地表疏松沉积物中金属活动态测量法,对山东招远市一大型隐伏金矿——大尹格庄金矿的 Au 元素进行了试验研究,结果表明:在矿体上方确实有“气态金”的存在,并且“气态金”的含量和地表土壤中 Au 的全量无关,而与活动态的 Au 有关,反映了部分活动态 Au 并不是土壤所固有的,可能是以某种途径从深部迁移至地表,带来了深部矿化的信息。

Wang^[13, 16]利用地球气纳微金属测量法对冲积平原山东全省(含胶东金矿)、沙漠覆盖区穆龙套金矿、热带深风化壳覆盖区奥林匹克坝、川西北若尔盖草原覆盖区地区的隐伏金矿进行了试验,发现金矿体上方具有明显的 Au 异常。

北祁连盆地区分布有我国最大的块状硫化物矿床,多被白垩纪以来各种运积物所覆盖,近年来利用地气测量法在北祁连黑河盆地的红层覆盖区先后发现了赖都滩和白柳沟多金属块状硫化物富矿体^[30]。汪明启等^[30]采用主动法采样方法对白柳沟地区的地气研究,圈出了 Cu、Pb、Zn、Au、Cd、Ba 等元素综合异常带 2 条,对其中的一条异常钴探验证表明,在 150~250 m 处存在铅锌矿化体及金矿化体。

刘应汉等^[31, 32]利用地气法在 Cu、Ni、Zn、Pb、Cr、Au 等隐伏矿床方面均取得良好的效果。1995 年在甘肃北黑山打到总厚 102 m 达到工业品位的铜镍矿体,1998 年在河北的和顺店打到数十米厚的铅锌银矿体,甘肃静宁县蛟龙掌地区验证见铜铅锌矿化体,2002 年在河北张全庄金矿区通过验证打到厚度超过 1 m,延伸超过 200 m,品位在 6 g/t 以上的金矿体。2005 年在青海祁连县三义地区通过地气测量发现新的镉矿化体和镉矿体^[32]。青海拉水峡隐伏铜镍矿深约 50 m,为第三系红层、第四系黄土覆盖。数十年来常规的地质、物化探工作均没有成效,利用地气测量表明具有明显的 Cu、Ni 异常,最

后验证见到矿体^[31]。

1.2.3 电地球化学方法

电地球化学方法是前苏联学者 Ryss 等^[33]提出的一种将地球物理、地球化学和电化学综合交叉为一体的找矿方法,主要应用于矿产勘查的详查及异常查证阶段。该方法用于寻找隐伏矿体的基本原理是:深部盲矿或隐伏矿经过电化学溶解,在矿体周围形成离子晕,与成矿有关的成矿元素及伴生元素在电化学电场、地气、地下水运动等各种自然营力作用下迁移到近地表,并以多种形式赋存下来。在人工电场作用下,矿化相关的金属离子平衡发生改变,金属阳离子在电场作用下向阴极移动,并形成电解物,收集并分析电极上吸附的电解物,即可发现相关的金属离子异常,从而达到找矿和评价的目的^[34, 35]。

20 世纪 70 年代以来,俄罗斯应用 CHIM 法在有色金属、贵金属、稀有金属矿床普查找矿方面取得了显著的成果。20 世纪 80 年代该方法传入我国,罗先熔等^[36, 37]率先在国内开展了地球电化学勘查技术寻找隐伏矿床的研究工作。CHIM 法的缺点是设备笨重、成本高、工作效率低,不适合大规模生产的需求。长安大学的康明^[38]对该方法进行了改进,在广西横县泰富金矿得到了较好的应用效果。

1.2.4 活动金属离子法

活动金属离子法(Mobile Metal Ions, MMI)是澳大利亚的 Mann 等^[12]发展起来的。MMI 法的理论基础是深部矿体的金属活动离子可以穿过上覆的沉积岩石及外来的沉积物到达地表,使用某种特殊试剂可以把这种金属活动离子提取出来,这种金属活动态离子异常经常较准确地位于矿体垂直上方,偶尔也在倾斜上方。MMI 法能够准确地圈定 Au 的盲矿体以及隐伏的镍和贱金属矿化,并已在澳大利亚、非洲、智利和美国等许多覆盖厚度几米至 700 m 的矿床上圈定出多个含金、贱金属和镍矿化的矿体。

1.3 深穿透地球化学方法综合应用与对比

国际勘查地球化学家协会于 1997 年开始组织实施了“深穿透地球化学对比计划项目”,将各国不同的方法进行了对比。结果表明,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;在内华达 Mike 隐伏金矿上方使用有机结合态提取方法(OBM)效果最好;Mike 隐伏铜矿上方使用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,应用水提取(WEM)及吸附态提取(AEM)方法能够在整个隐伏矿床上方地表都圈出明显的 Cu 及 Ag 异常^[14]。

我国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,先后在冲积平原区(25 万 km^2)、黄土覆盖区(3 万 km^2)、草原覆盖区(3 万 km^2)、荒漠戈壁区(15 万 km^2)以及澳大利亚奥林匹克坝外围(6 000 km^2)和乌兹别克斯坦穆龙套矿区外围(1 万 km^2),完成了深穿透地球化学填图^[14]。目前,正在进行全国 76 种元素地球化学图集的编制^[39]。在深穿透地球化学填图中,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。

1.4 总 结

深穿透地球化学勘查方法依靠灵敏的分析技术,能够探测到深部矿体的直接信息,开创了新的找矿方法。在近十几年里迅猛发展,已成为一种有效的隐伏矿床勘查手段,具有很大的应用潜力。但在应用的过程中需要注意的是:

(1) 深穿透地球化学方法主要适用于大型、超大型隐伏矿床的勘查。因为深穿透地球化学探测的深度大,还可能存在各种背景噪音的干扰,只有那些具有巨量成矿物质富集的大型、超大型矿床发出的信息才更有可能被识别出。

(2) 由于深穿透地球化学所测量的来自深部矿体的直接信息极其微弱,因此发展新的技术手段,提高元素的检测灵敏度,将会极大地推动深穿透地球化学的发展。

(3) 虽然深穿透地球化学勘查方法已在矿产勘查中成功应用,但是它的理论基础——成矿元素从深部向地表迁移的机理仍是勘查地球化学工作者需要努力解决的问题。

(4) 准确扣除背景干扰,有效提取成矿信息是深穿透地球化学应用成功的关键。不同的覆盖区和矿种,金属活动态的存在形式会不同,需要选用不同的提取方法。如 CHIM 和 MMI 提取的是离子态的形式,故对于那些易呈离子形式的金属元素(贱金属和多金属矿)比较有效;MOMEQ 提取的不仅是离子态的形式,还包括超微细的金属,故对于不易形成离子形式的金矿效果突出;Enzyme leach 只提取非晶质锰的氧化物,所以在氧化环境条件下效果比较好。

2 综合信息找矿

隐伏矿床勘查是一项极其复杂的工作,单一的勘查手段往往具有多解性或片面性,多种勘查手段的综合,或者多学科信息的结合,能够大大提高找矿效率。综合多种地质信息,包括地质、地球化学、地球物理、遥感等勘查信息,而进行隐伏矿床勘查的方

法,我们称之为综合信息找矿。近年来,越来越多的勘查者提出了综合不同信息进行找矿的思路和方法,包括综合信息矿产预测理论与方法^[40, 41]、矿床模型综合地质信息预测技术^[42]、多元信息综合找矿^[43]等。其中尤以王世称提出的综合信息矿产预测理论与方法效果显著,下面以此为例进行介绍。

综合信息矿产预测理论与方法最初是由吉林大学王世称等^[41, 44]于 20 世纪 80 年代提出的。该方法融合了地质、地球化学勘查、地球物理勘查、遥感勘查信息,对隐伏矿床进行勘查和预测。20 多年来该理论与方法广泛应用于中国矿产资源预测和评价领域,现已成为矿产资源预测和评价通行的理论与方法。

2.1 基本概念和理论基础

综合信息矿产预测理论与方法以研究地质、地球物理、地球化学和遥感信息为基础,同时研究信息之间的转换规律,建立综合信息找矿模型,开展成矿预测,应用间接信息找寻隐伏矿产资源体,达到找矿的目的^[45]。

综合信息矿产预测理论与方法的成矿学原理是成矿系列和矿化系列理论。成矿系列是由程裕淇等^[46]提出的,是指在一定的地质单元中,一定的地质发展时期,与一定地质作用有关的,在不同或相同的演化阶段不同部位形成的有内在成因联系的一组矿床。各种成因的矿床和不同矿种的矿床是有机关联的整体,形成成矿系列。成矿系列受控于不同的成矿地质条件,可以划分为变质成矿系列、沉积成矿系列、火山成矿系列和侵入成矿系列。

矿化系列是矿产资源体系列,指在统一地质成矿作用下,形成于一定地质构造单元上的所有有益元素的浓集地段(其中包括矿床、矿点、矿化点及原生晕)^[47]。矿产资源体集合是密集成群的,绝对不是独生子。矿产资源体由大、中、小型矿床组成,为一个有机的整体,具有“鹤立鸡群”的分布形式。大型、超大型矿床外围有姊妹矿,绝大多数的大型、超大型矿床外围有隐伏的大型、超大型矿床^[45]。

综合信息矿产预测理论与方法的地球化学原理是基于元素的成矿地质背景及成矿系列分别具有独特的元素组合和异常类型,并且二者之间具有某种内在联系。地球化学信息从异常结构和异常强度等方面直接揭示了矿床及其产出地质背景的地球化学特征。地球物理信息主要用于研究成矿区域地质背景的地球物理标志及深部地质特征,区域构造格架及其演化规律。遥感影像宏观地反映了研究区景观

地理特征,反映了山势、水系组合模式及岩性特点^[41]。

2.2 综合找矿模型的建立

综合信息找矿模型以矿产资源体为单元,应用它们的集合建立统计性模型。矿产资源体有不同的等级(矿床密集区、矿田、矿床、矿体),不同等级的找矿模型是统计性模型而不是确定性模型。综合信息找矿模型以地质信息为基础,研究地质、地球物理、地球化学和遥感信息,并研究它们之间信息的转换规律,应用间接信息找寻隐伏矿产资源体和盲矿资源体,达到找矿的目的。

模型的建立包括如下3个方面的研究工作:①成矿模式研究,重点进行成矿规律和控矿条件的研究,包括区域性和矿床地质特征的研究,查明矿床地质特征,空间展布格局和控矿条件,这是建立找矿模型的前提。②总结综合性的找矿标志。重点是根据地质体(包括矿化单元)的地质特征研究以及地质体之间地球物理和地球化学等性质差异的分析,确定能区分和识别不同地质体的各种标志。③在以上工作基础上,以一定矿产预测对象——矿化单元为目标,研究综合标志的关联和综合信息的模式化^[47]。

2.3 应用实例

乳山金矿区位于胶东半岛东部乳山县境内,属牟平—乳山近南北向金矿成矿带的南半部。区内主要有金青顶、唐家沟、英格庄、初家沟、胡八庄、铜锡山、三甲、东峒岭等金矿,金矿点星罗棋布。通过综合该区金牛山金矿中有关的地质信息:包括断裂控矿构造,脉岩信息(闪长玢岩脉、煌斑岩脉、石英脉及二长斑岩脉等),围岩蚀变信息(钾化、黄铁绢英岩化、绢英岩化、硅化等该区重要的找矿信),矿物学信息,地球化学信息(指示元素异常强弱和单个阶段形成原生晕的轴向分带特征等)以及地球物理信息(矿体与围岩具有不同的电阻率值)等综合研究,进行了矿体的定位预测。

根据现有地质资料及已经掌握的成矿规律,矿山部在金牛山成矿带优选了13个探矿靶区,其中10个靶区已被中国冶金地质勘查工程总局地球物理勘查院物探中心所进行的“山东牟平金牛山金矿床的构造叠加晕研究及深部预测”证实,此研究项目最终圈定Au金属量20 t,潜在价值约30亿元。优选的13个探矿靶区在2007年的探矿工作中都发挥了重要作用,总共探明新增332级以上地质储量580 831 t,获得Au金属量2.395 t^[48]。

3 其他的新方法与技术介绍

深穿透地球化学方法和综合信息找矿方法在隐伏矿床勘查中的应用已相对较为成熟。除此之外,成矿理论、分析技术上的突破,找矿经验的总结,还引发了众多新的勘查技术的出现。在成矿理论上,如地球化学块体这一概念的提出和完善^[49, 50],发展出了地球化学块体方法技术。在找矿经验总结上,施俊法等^[51]通过对国内外近百例矿床发现史的经验总结,提出了信息找矿战略。在分析技术上,随着多接收杯电感耦合等离子质谱(MC-ICP-MS)的出现,发展出了Cu、Fe、Zn等非传统同位素示踪技术。

3.1 地球化学块体方法技术

20世纪80年代,找寻巨型矿床成为国际矿业界勘查活动的焦点,许多地质学家一直试图从成矿过程、成矿环境和成矿条件来辨认巨型矿床与一般矿床的差异,然而没有成功。我国开展了20多年的区域地球化学全国扫面(RGMR)计划,获得全国逾600万km²国土面积的高质量元素分析的海量数据,在这一背景下,谢学锦等^[50]通过分析这些数据,发现自然界存在着一系列比传统意义的分散晕分散流更为宽广的套合的地球化学模式谱系,由此提出了地球化学块体的概念。经过最近几年的发展,完善了地球化学块体的概念:认为地球化学块体是地球上某种或者某些元素高含量的巨大块体,是地球从形成与演化至今不均匀的总显示,为大型至巨型矿床的形成提供了必要的物质供应条件。

由地球化学块体这一概念出发,发展了一套新战略和方法技术用于找矿研究。具体分3步:①对一个大的研究目标域(如一个省或一个国家)某个金属元素的资源潜力进行评价;②根据研究目标域的资源潜力指出最有远景的大型矿(矿集区)的靶区;③结合地质地球物理遥感资料对靶区(远景区)做进一步的优选缩小^[52]。

地球化学块体的理论与方法学研究虽然尚在初期阶段,但已为勘查地球化学、矿床学与成矿学开拓了眼界,并提供了新的研究思路。如王学求等^[20]通过在东天山15万km²的战略性地深穿透地球化学调查共圈出超过1 000 km²的地球化学块体18处,根据这些块体与矿集区的对比,发现所有的已知矿集区都位于地球化学块体的范围之内,地球化学块体的存在一定有地球化学块体的存在,但反过来有地球化学块体的存在不一定有矿集区的存在,地球化

学块体是客观存在的,而矿集区是已经发现的一系列矿床并勘探到一定程度才能称作矿集区;因此,地球化学块体内可能会存在潜在的矿集区,这为利用地球化学块体预测新的矿集区提供了依据。

地球化学块体的理论方法用于各种资源潜力评估,为隐伏矿床的寻找提供了依据,缩小了靶区。如刘大文等^[53]利用地球化学块体的概念和中国区域化探扫面的成果对中国锡资源潜力评价的方法技术,描述了中国锡地球化学块体的空间分布特征,分析了这些地球化学块体与地质体和已知锡矿床的空间对应关系,确定了中国锡在 8、10 $\mu\text{g/g}$ 含量级次的地球化学块体成矿率为 0.205% 和 0.208%,同时根据在中国大陆所圈定的锡地球化学块体的分布及其特征计算出中国锡的潜在资源量为 1 609 万和 1 406 万 t。

3.2 信息找矿战略

信息找矿战略是由中国地质调查局发展研究中心情报室施俊法等^[51]通过研究国内外近 100 个典型矿床(重点是国外 33 个大型超大型隐伏矿床)的发现过程,系统总结经验而提出的隐伏矿找矿的新思路和新方法。信息找矿战略可表达为:针对巨型矿床勘查,应瞄准隐伏矿和难识别矿,以直接找矿信息(化探资料)为先导,结合地质和地球物理信息,迅速掌握全局,逐步缩小靶区,直至找到大型、特大型矿床。该理论主要有以下几点认识:

(1) 直接信息是最可靠的找矿信息,在矿产勘查中必须起先导的作用。直接信息与间接信息在一定条件和环境下可以互相转化,只有在信息具有直接指示矿床存在和分布的特性时,它才会发挥实际的找矿效能。因此,多学科信息的收集和综合分析,是信息找矿战略实施的核心。

(2) 在覆盖区,地表地质观察无法进行,地质理论预测的不确定性大大增加,传统的化探方法也无能为力,物探几乎成了别无替代的战略手段。但从总体上说,地球物理信息是间接找矿信息,具有多解性。近年来发展起来的深穿透地球化学或取的是隐伏矿体的直接信息,为在掩伏区以化探为主导的勘查战略开辟了新的前景。

(3) 针对拟寻矿床的地质特征,抓住深部关键的地质因素,查明地球物理和地球化学特征与它们的对应关系,把地球物理和地球化学判据转化成找矿标志,是提高隐伏矿找矿效率的关键。

(4) 没有纯经验的勘查,也没有纯理论的勘查。在找矿工作中,经验与理论没有明确的界限。成功

的矿产勘查是经验与理论模式战略的交叉与融合。

隐伏矿床的勘查是一项极其复杂的工作,不仅需要理论上的指导,经验实践上的指导同样非常重要。信息找矿战略正是在学习大量国内外地质找矿经验的基础上所总结的理论,对于隐伏矿床勘查具有重要的指导价值。

3.3 非传统同位素在隐伏矿床勘查中的应用

地球化学分析测试技术的突破性发展开创了地球化学勘查新的思路。随着 MC-ICP-MS 技术的发展,非传统同位素如 Cu、Fe、Zn、Mg、Se、Mo 等同位素在地质上的应用迅猛发展。虽然这些元素的同位素在隐伏矿床勘查中的应用还非常少,但已初见端倪。与传统同位素相比,非传统同位素在矿床的应用上的优势是能够利用成矿元素本身对物质来源及成矿过程进行直接示踪。

如 Mathur 等^[54]对 9 个斑岩铜矿床(美国亚利桑那的 Bisbee、美国蒙大拿的 Butte、美国亚利桑那州的 Silver Bell、智利的 Rosario、智利的 Ujina、智利的 Chuquicamata、智利的 Escondida、智利的 El Salvador、土耳其的 Sirsir)的原生高温铜硫化物、次生低温铜硫化物(与铜氧化物)及淋滤帽中的铁氧化物的 Cu 同位素进行了研究,所有样品的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值在 $-16.96\text{‰} \sim 9.98\text{‰}$ 之间(分析的误差为 $\pm 0.14\text{‰}$)。结果表明斑岩铜矿中存于高温深成型、富集型和淋滤帽型等明显不同的 Cu 同位素储库。高温原生矿化的黄铜矿 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值局限在 $1\text{‰} \sim -1\text{‰}$ 之间,而低温下形成的次生矿物 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值则在 $-16.96\text{‰} \sim 9.98\text{‰}$ 之间。次生辉铜矿富集重的 Cu 同位素, $\delta^{65}\text{Cu}$ 值在 $-0.3\text{‰} \sim 6.5\text{‰}$ 之间。以铁氧化物(黄钾铁矾、赤铁矿和针铁矿)为主的淋滤帽型矿物富集轻的 Cu 同位素, $\delta^{65}\text{Cu}$ 值在 $-9.9\text{‰} \sim 0.14\text{‰}$ 之间。结合前人的研究成果^[55~59],表明淋滤帽和氧化带矿物具较轻的同位素,而表生样品中具较重同位素。这一发现在地质勘查中具有重要意义:①通过测定铜硫化物、铁氧化物样品中强烈分馏的 Cu 同位素比值,可以区分表生过程和 Cu 淋滤与富集过程;②Cu 同位素的测定能够用来识别发生强烈风化作用后铜硫化物明显富集的地表或地下水。

目前,我国以朱祥坤为首的研究团队开展了 Cu、Fe、Zn、Mg 等非传统同位素在矿床中的应用示范研究。最近,王跃等^[60,61]对 Cu、Zn 同位素在矿床学中的应用进行了详细的综述,这一新的同位素示踪技术将会为矿产勘查提供新的工具和手段。

4 传统地球化学勘查手段新进展

在非传统勘查技术得到迅速发展的同时,传统的地球化学勘查手段也在原有的基础上取得了新的进展,以适应隐伏矿床勘查的需要。以下重点介绍地下水地球化学和植物地球化学勘查方法的新进展。

4.1 地下水地球化学

地下水地球化学已应用于矿产勘查领域多年。在20世纪70年代尤其普及^[62],当时通常用于铀矿勘查^[63~66]。最近10年来,随着分析处理技术的发展以及覆盖层下隐伏矿床勘查因素的驱动,地下水地球化学勘查重新又受到重视^[67~70]。

地下水可以与矿化在地下某一深度相互作用,其主量元素、微量元素和同位素特征将发生改变,如果这种地球化学特征被保留下来并被运移足够长的距离达到地下水取样的孔中,就可以用于隐伏矿床的勘查。利用地下水地球化学方法,可以探测到200 m以下甚至到达5 km的深部^[71]。同其他勘查手段相比,地下水地球化学具有自身独特的优势:随着分析技术的进展,已能快速、灵敏地检测地下水中多种元素,而且所需的样品预处理量很小;地下水能够与矿化物质直接接触反应;地下水采样可以发掘三维勘查的潜在可能性;与岩石地球化学相比,地下水可以从与矿化发生反应的地方流出,从而提供一个更大的潜在的勘查靶区;许多有意义的物质背景浓度很低,因此可提高异常衬度^[8]。

4.1.1 新进展

目前影响地下水地球化学测量在矿产勘查中的应用及其优势、潜力充分发挥的最大问题在于:勘查者对地下水地球化学数据做不出全面的解释。近年来,围绕这个问题,地下水地球化学方法在采样技术、数据处理、研究对象以及研究方法上取得了新的发展。

在采样技术上,膨胀封圈系统的使用解决了在渗透率低的断裂岩石区采集深部地下水样品的问题,因为传统的打钻取水方法会造成污染,加之断裂裂隙的导水率很低,从中流出的带矿化信息的水进入钻孔后与地下水混合,既改变了信息出现的位置,又降低了异常的强度^[8]。采样技术上的改进保证了高质量、全面的物理化学数据的获取。

关于数据的处理解释,勘查者研发了一系列的数据处理软件。常用的软件如 PHREEQC、MINTEQA2 和 Geochemists Workbench,可以用来计算矿物

饱和指数和金属物质,模拟化学反应过程^[8, 72]。其他更多的关于地下水模型的软件可访问中国国际地下水模型中心网址 <http://igwmc.cigem.gov.cn/soft/index.htm>。地下水地球化学数据庞大而且复杂,好的数据处理软件有助于提取更多准确有用的信息。

在研究对象上,水地球化学方法用于各种类型的隐伏矿床勘查:斑岩型铜矿^[73~76]、火山成因块状硫化物矿床(VMS)^[77~79]、喷流沉积型矿床(SEDEX)^[80]、Ni-Cr-PGE 矿床^[81]、石英脉型金矿^[82]、金伯利岩钻石矿^[70]、铀矿^[83]等,也用于区域上的矿产勘查评估^[71]。

在研究方法上,现代的地下水勘查方法主要研究水的离子浓度、元素含量、同位素体系、物理化学条件(如 pH、Eh)等,并且利用商业软件处理数据进行化学模拟,大量研究所建立的水地球化学数据库为数据解释提供了依据。同位素体系一般包括 H、O、C、S、Sr、Pb 等同位素,主要用于物质来源的示踪,元素含量的异常能用于识别矿化。

4.1.2 应用实例

Dickson 等^[83]对南澳大利亚古河道隐伏铀矿床的地下水进行了研究。利用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)和电感耦合等离子质谱计(ICP-MS)分析地下水各元素含量及 Pb 同位素,利用商业软件及进一步的盐水中含 U 水组分的较好热力学数据集,结合精确溶液化学模拟,表明南澳大利亚古河道含 U 沉积物的地下水水体为中性、中等盐度,而其他的地下水水体可能以含盐、常常酸性为特征。这种水体易活化 Ra(U 的子体产物),依据地表 Rn 或伽玛测井这类铀—子体的勘查方法可能是无效的。对细菌还原 U^{4+} 及观察到盐池 U 含量增高的研究表明:细菌还原作用可能是古河道铀矿床形成的另一种机制。该模型可助于对将勘查集中到更有利区域。

de Caritat 等^[84]对 Broken Hill 超大型 Pb-Zn-Ag 矿床的地下水进行了研究。该矿体及大量其他小型矿床产于澳大利亚元古宙 Curnamona 省的有限露头中。该省中绝大部分被厚达 200 m 的风化层覆盖,使传统的勘查手段应用受到限制。在 Curnamona 省南部采集了约 300 件地下水样品,测定了 S、Sr 和 Pb 同位素组成,并计算了过剩 S(S_{XS})的量,即非蒸发、非混合的 S。研究表明,许多样品加入了 ^{34}S 亏损的 S,这可能与 Broken Hill 型 $\delta^{34}S$ 特征(平均约 0‰, V-CDT)的硫化物氧化作用有关。此外, Sr 同位素识

别了与地下水相互作用的各种基岩,西部多为较低放射成因的阿德来得期岩石(及矿物)(地下水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值低至 0.708),在东部多为高放射成因的 Willyama 超群岩石($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值高达 0.737)。地下水中 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值可与在该区已识别出的不同矿化类型(Broken Hill、Ruppee、Thackaringa 等类型)对比,或处于其间。少量采集于矿化附近的样品具有很好的指示意义(如正 S_{XS} 、低 $\delta^{34}\text{S}$ 、与基岩特征一致的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值及与矿化类型的 Pb 同位素特征)。对另外几个被沉积覆盖地区的研究表明这些地下水与矿化发生了相互作用。这一研究表明了地下水在隐伏矿床勘查中具有很大的潜力。

de Caritat 等^[80]对印度 Hinta 和 Kayar 2 个地区的喷流沉积型(SEDEX)多金属矿床做了研究。矿床的矿化主要以 Pb、Zn 硫化物为主,发育于变质的长英质和碳酸盐基底岩石。共取了 200 多口井的地下水样品,分析了主量元素浓度及它们对稳定元素离子(如 Cl^-)的比值、同位素体系、热动力学模型。结果表明水地球化学对研究隐伏矿床可能是一种非常有效的手段。

Caron 等^[71]分析了加拿大西北部地体 Mackenzie Mountain 的南 Nahanni 河盆地 37 000 km² 范围内的 151 个位置泉水的地球化学数据,作为这一广阔地区的矿产勘查评估指标之一。利用泉水的地球化学, pH 值及温度应用统计数据分析,图标方法及基本分组方法来快速有效地识别带有高度矿化潜力区域。由其他方法已经识别的盆地内部世界已知典型矿床与用该方法检测一致。由于不同的矿床类型有不同的地球化学特征,开发出全新的 3 端元方法来分析指示矿化性质的微量元素数据。循环深度估计以及最大潜在矿床深度进一步提高了经济潜力评价的准确性。泉水的循环深度全范围为 4.7 km ~ 200 m。总体上讲,62 个位置的泉水通过 1 种或多种方法被识别出微量金属元素含量异常(约占数据总量的 40%)。特别是 11 个位置的泉水通过 3 种方法均被划分为异常,17 个位置的泉水至少通过 2 种方法被划分为异常,其余 34 个位置仅 1 种方法显示异常。

4.2 植物地球化学

植物地球化学研究工作始于 20 世纪 30 年代, Tkalic 于 1938 年首先用植物中的铁含量圈出了西伯利亚一个毒砂矿床的轮廓^[85]。20 世纪 60 年代,植物已经开始作为生物地球化学勘查手段广泛用于

矿产勘查^[86],随后的一系列研究表明生物地球化学能在那些草木茂盛、被风化层覆盖的区域中,能够用来有效地检测当地的地球化学分布模式^[87~89]。随着矿产勘查的焦点转向运积层覆盖区,生物地球化学勘查又再次兴起^[90~92]。

由于植物的根系能渗透风化盖层吸收隐伏矿床元素,通过测定植物中的元素组成有助于隐伏矿床的勘查。植物化探的探测深度一般为几十米到几百米。植物化探的优点是:成本低,环境污染小,容易在大面积的区域上进行采样,而且植物根系能够穿透运积层,受表层物质迁移影响小。植物化探的缺点是容易受植物生长条件的控制。

4.2.1 新进展

近年来,植物地球化学的一个重要进展是生物地球化学的数据库的数据量不断积累,与生物地球化学找矿有关的基础数据和信息得到了系统的总结,如 Markert 于 1994 年查证了大量数据后,发表了《世界参考植物元素浓度表》,针对所有地区的所有植物提供了一个平均成分的参考指南,而后的学者对该表进行了不断的修正和验证^[8]。另一个重要进展是新仪器的出现,电子显微镜的使用,使研究者可以看到植物中的结晶相;而 ICP-MS 分析技术的完善,可以精确地测定植物体中微量元素分布,采用 0.5 g 植物干组织就能精确测定 60 多种元素。因此,植物地球化学测量方法的应用变得相对容易。

植物地球化学测量对于干旱荒漠地区、风成沙漠、黄土地区、多年冻土地区、沼泽地区、湿热地区等特殊的景观条件,特别是在外来运积物覆盖地区、强烈风化淋滤地区、粗块物质分布区以及潮湿的沼泽和泥炭区,对找隐伏矿有着显著的效果^[93]。虽然如此,由于不同种属的植物对金属元素的吸收能力不同,同一植物不同器官对金属元素的吸收能力也会有所区别,因此,采集有效的植物种属及其器官是当前植物地球化学测量的关键技术。另外,植物体内元素的异常,除了受矿化异常元素影响外,还会受植物本身生理因素、人为污染等各因素的影响,因此,研究植物地球化学作用元素的迁移转化,提取真正的异常信息,也是当前研究的热点。

4.2.2 应用实例

在澳大利亚,用于常规的地球化学勘查的植物还很少。三齿稈(*Triodia* 属)是其中一种有潜力的植物,在澳大利亚大具有勘查前景的干旱地区广泛分布,并且这种植物有很长的寿命(几十到几百年),很深的根系,能生长并穿透超过 10 m 厚的风

化盖层吸收养分。Reid 等^[94]对澳大利亚西部 Coyote Prospect 地区隐伏金矿体地表上的各种植物进行了采样研究,发现三齿稈体内积累了与成矿作用密切相关的重要元素(如 S、Zn、As、Au 等);根据三齿稈体内元素浓度与空间上的关系,绘制了各元素在隐伏金矿体地表上的空间分布图,反映了矿体在地下的分布特征。Reid 等^[94]对澳大利亚 Tanami 沙漠的 Titania Prospect 地区隐伏金矿床地表的一些植物进行了类似的研究,三齿稈植物仍然显示出勘查隐伏矿床的潜力。

Anand 等^[95]对澳大利亚 Yilgarn Craton 被运积层所覆盖的隐伏 VHMS 矿床地表的土壤和无脉相思树(Mulga)各器官上的微量元素进行了对比分析。结果表明,粒度<250 μm 的土壤无明显异常,而植物的不同器官上显示有多种元素(Cu、Zn、Pb、Cd 等)的不同异常,树干、树皮、叶柄具有微弱的异常,枯枝落叶中的异常最为明显。

Kozuskanich 等^[96]对加拿大安大略省 Cross 湖隐伏 VHMS 锌、铜、铅、银矿床上的黑云杉进行了研究,该矿床被冰碛物(厚达 50 m)所覆盖。研究表明隐伏矿床地表的黑云杉年轮的微量元素 Cu、Zn、S、As 和 Mg 异常高,并且不同年份的年轮中金属含量也发生变化。对无矿化背景的黑云杉年轮的元素分析表明 1960 年后金属含量显著增加,暗示该地区 1960 年后的采矿活动对周围土壤造成了金属污染。

5 结 语

最近几十年来,随着找矿的深入,隐伏矿、深部矿逐渐成为矿产勘查的重点,隐伏矿床勘查地球化学取得了长足的进步。总的来看,可以得出以下几点认识:

(1) 成矿理论的发展应用于勘查地球化学方法,指导矿产勘查,并促进了新的方法的诞生。如地球化学块体概念的提出和完善产生了地球化学块体方法技术;成矿系统应用于综合信息找矿,产生了明显的效果。

(2) 矿产勘查不仅需要理论的指导,还依赖经验上的指导。成功的矿产勘查是经验与理论模式战略的交叉与融合。在注重理论研究的同时,还要注重经验的总结。

(3) 分析技术的提高可以显著地推动各种地球化学勘查手段的发展。如 MC-ICP-MS 的出现使非传统元素同位素的测试成为可能,并应用于隐伏矿床勘查;ICP-MS 技术是深穿透地球化学、生物勘查

地球化学、水勘查地球化学等手段得以应用发展的前提。

(4) 总结不同的地球化学勘查手段的特点:深穿透地球化学方法能够获取深部矿体的直接信息,但是对于矿体的埋藏深度无法预测;地球化学块体方法虽然也无法准确定位预测隐伏矿体,但是利用它能够估计区域上的成矿概率,迅速缩小战略靶区;综合利用地质、地球物理、地球化学、遥感等信息有助于准确的定位预测隐伏矿体,然而这就必须投入大量的资金和人力。因此,最佳的隐伏矿床勘查战略可能是,先利用深穿透地球化学方法和地球化学块体方法缩小靶区,然后投入大量精力,利用综合信息找矿方法准确定位预测隐伏矿体。

(5) 虽然隐伏矿床勘查地球化学取得了长足的进步,但是仍然存在一些问题。如深穿透地球化学方法的元素垂向迁移机理问题,目前仍然没有解决。深穿透地球化学能够探测到几百米深的矿体信息,但对于更深部的矿体(500 m 以下的矿体),是否仍然适用。这些问题都值得进一步深入研究。

参考文献(References):

- [1] Wang Xueqiu, Liu Zhanyuan, Bai Jinfeng, *et al.* Deep-penetration geochemistry-comparison studies of two concealed deposits [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2005, 27(3): 250-255. [王学求, 刘占元, 白金峰, 等. 深穿透地球化学对比研究两例[J]. 物探化探计算技术, 2005, 27(3): 250-255.]
- [2] Xie Xuejin. New strategy for exploration of ore resources [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1997, 21(6): 402-410. [谢学锦. 矿产勘查的新战略[J]. 物探与化探, 1997, 21(6): 402-410.]
- [3] Xie Xuejin. Exploration geochemistry: Retrospect and prospect [J]. *Geology and Prospecting*, 2002, 38(6): 1-9. [谢学锦. 勘查地球化学: 发展史·现状·展望[J]. 地质与勘探, 2002, 38(6): 1-9.]
- [4] Wang Xueqiu. Exploration geochemistry: Past achievements and future challenges [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(1): 239-248. [王学求. 矿产勘查地球化学: 过去的成就与未来的挑战[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 239-248.]
- [5] Moon C J, Whateley M K G, Evans A M, *et al.* Introduction to Mineral Exploration [M]. Alabama: Blackwell Public, 2006.
- [6] Xie Xuejin. Exploration geochemistry into 21st century [J]. *Chinese Geology*, 2001, 28(4): 11-18. [谢学锦. 进入 21 世纪的勘查地球化学[J]. 中国地质, 2001, 28(4): 11-18.]
- [7] Tang Jinrong, Cui Xilin, Shi Junfa. New progress in research on non-traditional geochemical prospecting methods [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(2): 232-244. [唐金荣, 崔熙琳, 施俊法. 非传统化探方法研究的新进展[J]. 地质通报,

- 2009, 28(2): 232-244.]
- [8] Cameron E M, Hamilton S M, Leybourne M I, *et al.* Finding deeply buried deposits using geochemistry[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2004, 4(1): 7-32.
 - [9] 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: 1 444.
 - [10] Antropova L V, Goldberg I S, Voroshilov N A, *et al.* New methods of regional exploration for blind mineralization: Application in the USSR [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1992, 43 (2): 157-166.
 - [11] Clark J R, Meier A L, Riddle G. Enzyme leaching of surficial geochemical samples for detecting hydromorphic trace-element anomalies associated with precious-metal mineralized bedrock buried beneath glacial overburden in northern Minnesota [C] // Hause D M, *et al.*, eds. GOLD 90. Philippine: Society of Mining Engineers, 1990, 19: 189-207.
 - [12] Mann A W, Birrell R D, Mann A T, *et al.* Application of the mobile metal ion technique to routine geochemical exploration [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1998, 61(1/3): 87-102.
 - [13] Wang X Q. Leaching of mobile forms of metals in overburden: Development and application[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1998, 61(1/3): 39-55.
 - [14] Xie Xuejin, Wang Xueqiu. Recent developments on deep penetrating geochemistry[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(1): 225-238. [谢学锦, 王学求. 深穿透地球化学新进展[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 225-238.]
 - [15] Wang Xueqiu. Deep penetration exploration geochemistry[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1998, 22(3): 166-169. [王学求. 深穿透勘查地球化学[J]. 物探与化探, 1998, 22(3): 166-169.]
 - [16] Wang Xueqiu. Geochemical methods and application for giant ore deposits in concealed terrains [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1998, 22(2): 81-89. [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.]
 - [17] Wang Xueqiu, Liu Zhanyuan, Ye Rong, *et al.* Deep-penetrating geochemistry: A comparative study in the Jinwozi gold ore district, Xinjiang [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2003, 27(4): 247-250. [王学求, 刘占元, 叶荣, 等. 新疆金窝子矿区深穿透地球化学对比研究[J]. 物探与化探, 2003, 27(4): 247-250.]
 - [18] Wang X, Xie X, Ye S. Concepts for geochemical gold exploration based on the abundance and distribution of ultrafine gold [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1995, 55(1/3): 93-101.
 - [19] Wang X, Cheng Z, Lu Y, *et al.* Nanoscale metals in Earthgas and mobile forms of metals in overburden in wide-spaced regional exploration for giant deposits in overburden terrains[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1997, 58(1): 63-72.
 - [20] Wang Xueqiu, Shen Wujun, Zhang Bimin, *et al.* Relationship of geochemical blocks and ore districts: Examples from Eastern Tianshan metallogenic belt, Xinjiang, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(5): 116-123. [王学求, 申伍军, 张必敏, 等. 地球化学块体与大型矿集区的关系——以东天山为例[J]. 地学前缘, 2007, 14(5): 116-123.]
 - [21] Wang Xueqiu, Chi Qinghua. Wide-spaced geochemical survey in arid desert terrain, a case history from the Eastern Tianshan regions, northwestern China [J]. *Xinjiang Geology*, 2001, 19(3): 200-206. [王学求, 迟清华. 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.]
 - [22] Kristiansson K, Malmqvist L, Persson W. Geogas prospecting: A new tool in the search for concealed mineralizations[J]. *Endeavour*, 1990, 14(1): 28-33.
 - [23] Malmqvist L, Kristiansson K. Experimental evidence for an ascending microflow of geogas in the ground[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, 70: 407-416.
 - [24] Ren Tianxiang, Liu Yinghan, Wang Mingqi. Nanometre science and hidden mineral resources[J]. *Science & Technology Review*, 1995, 8(5): 18-19. [任天祥, 刘应汉, 汪明启. 纳米科学与隐伏矿藏——一种寻找隐伏矿的新方法、新技术[J]. 科技导报, 1995, 8(5): 18-19.]
 - [25] Chunhan O, Juchu I, Liangquan E, *et al.* Experimental observation of the nano-scale particles in geogas matters and its geological significance[J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 41(3): 325-329.
 - [26] Tong Chunhan. Imitative model experiment for elements transportation[J]. *Nuclear Techniques*, 2001, 24(6): 449-455. [童纯. 元素迁移的模拟模型实验[J]. 核技术, 2001, 24(6): 449-455.]
 - [27] Wang Xueqiu, Xie Xuejin, Lu Yinxu. Dynamic collection of geogas and its preliminary application in search for concealed deposits[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1995, 19(3): 161-171. [王学求, 谢学锦, 卢荫麻. 地气动态提取技术的研制及在寻找隐伏矿上的初步试验[J]. 物探与化探, 1995, 19(3): 161-171.]
 - [28] Mao Jingwen, Hu Ruizhong, Chen Yuchuan, *et al.* Large-scale Mineralization and Prediction for the Large Mineralized Clusters [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005. [毛景文, 胡瑞忠, 陈毓川, 等. 大规模成矿作用与大型矿集区[M]. 北京: 地质出版社, 2005.]
 - [29] Tang Jinrong, Yang Zhongfang, Wang Mingqi, *et al.* Method and application of geogas measurements[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2004, 28(3): 193-198. [唐金荣, 杨忠芳, 汪明启, 等. 地气测量方法研究及应用[J]. 物探与化探, 2004, 28(3): 193-198.]
 - [30] Wang Mingqi, Gao Yuyan, Zhang Deen, *et al.* Breakthrough in mineral exploration using geogas survey in the basin area of northern Qilian region and its significance[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2006, 30(1): 7-12. [汪明启, 高玉岩, 张得恩, 等. 地气测量在北祁连盆地区找矿突破及其意义[J]. 物探与化探, 2006, 30(1): 7-12.]

- [31] Liu Yinghan. The anomalous characteristic and the mode for prospecting ores of the nanoscale material geochemical measurement in Lashuixia copper-nickel deposit in Qinghai[J]. *Geology and Prospecting*, 2003, 39(2): 11-15. [刘应汉. 青海拉水峡铜镍矿纳米物质地球化学异常特征及找矿模型[J]. 地质与勘探, 2003, 39(2): 11-15.]
- [32] Liu Yinghan, Wang Mingqi, Zhao Hengchuan. The theory and application of geogas exploration method[J]. *Qinghai Guotu Jinglue*, 2006, 3: 41-42. [刘应汉, 汪明启, 赵恒川. 寻找隐伏矿的“地气”测量方法原理及应用前景[J]. 青海国土经略, 2006, 3: 41-42.]
- [33] Ryss Y S, Goldberg I S. The partial extraction of metals (CHIM) method in mineral exploration[J]. *Method and Technique*, 1973, 84: 5-19.
- [34] Kang Ming, Luo Xianrong. Improvement and applied results of geoelectrical chemistry methods[J]. *Geology and Prospecting*, 2003, 39(5): 63-66. [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, 39(5): 63-66.]
- [35] Kang Ming, Luo Xianrong. The present and future of electrogeochemical method for metallic ore deposit prospecting[J]. *Geological Review*, 2005, 51(4): 452-457. [康明, 罗先熔. 金属矿床地电化学勘查方法研究现状及前景展望[J]. 地质论评, 2005, 51(4): 452-457.]
- [36] Luo Xianrong. Geoelectrochemical Prospecting Methods and Searching for Deep Ore Deposits[M]. Beijing: Metallurgical Industry Publishing House, 1996. [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.]
- [37] Luo Xianrong, Yang Xiao. Research on geoelectrochemical prospecting methods and searching for deep ore deposits[J]. *Geology and Prospecting*, 1989, 25(12): 43-51. [罗先熔, 杨晓. 地电化学测量找寻隐伏矿床的研究及矿预测[J]. 地质与勘探, 1989, 25(12): 43-51.]
- [38] Kang Ming. Experiment and application of improved CHIM in mineral exploration[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(2): 250-256. [康明. 改进地电化学方法在矿区勘查中的试验与应用[J]. 地质通报, 2009, 28(2): 250-256.]
- [39] Xie Xuejin. Geochemical mapping and sustainable development of the national economic[J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22(11): 863-868. [谢学锦. 2020年的勘查地球化学——从勘查地球化学到应用地球化学[J]. 地质通报, 2003, 22(11): 863-868.]
- [40] Wang Shicheng, Xu Yaguang. Methods of synthetic information mineral resources prognosis[J]. *Chinese Geology*, 1992, (10): 12-14. [王世称, 许亚光. 综合信息成矿系列预测的基本思路与方法[J]. 中国地质, 1992, (10): 12-14.]
- [41] Wang Shicheng. Theory and Method of Synthetic Information Mineral Resources Prognosis[M]. Beijing: Science Press, 2000. [王世称. 综合信息矿产预测理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [42] Ye Tianzhu, Xiao Ke, Yan Guangsheng. Methodology of deposit modeling and mineral resource potential assessment using integrated geological information[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(5): 12-19. [叶天竺, 肖克, 严光生. 矿床模型综合地质信息预测技术研究[J]. 地学前缘, 2007, 14(5): 12-19.]
- [43] Zhou Jun. Synthetic Analyses of Geology, Geochemical Surveying and Remote Sensing in the Ore Exploration in Bumo Areas, Hainan[M]. Shaanxi: Shaanxi Science & Technology Press, 2005. [周军. 海南不磨金矿区地质, 化探, 遥感多元信息综合找矿研究[M]. 陕西: 陕西科学技术出版社, 2005.]
- [44] Wang Shicheng, Cheng Qiuming. Modelling of gold deposit prospecting[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 1989, 19(3): 311-316. [王世称, 成秋明. 金矿综合信息找矿模型[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 1989, 19(3): 311-316.]
- [45] Wang Shicheng. The new development of theory and method of synthetic information mineral resources prognosis[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(10): 1 399-1 403. [王世称. 综合信息矿产预测理论与方法体系新进展[J]. 地质通报, 2010, 29(10): 1 399-1 403.]
- [46] Cheng Yuqi, Chen Yuchuan, Zhao Yiming. Preliminary discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 1979, 1(1): 32-58. [程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣. 初论矿床的成矿系列问题[J]. 地球学报, 1979, 1(1): 32-58.]
- [47] Wang Shicheng, Chen Yongqing. The theoretical system of comprehensive prognosis for gold ore-forming series[J]. *Gold Geology*, 1995, 1(1): 1-7. [王世称, 陈永清. 金矿综合信息成矿系列预测理论体系[J]. 黄金地质, 1995, 1(1): 1-7.]
- [48] Wu Xiaolei, Chi Zhandong, Wang Ling, et al. Study on information prospecting about the Jinniushan Gold Deposit[J]. *Gold Science and Technology*, 2009, 17(2): 8-11. [吴小雷, 迟占东, 王玲, 等. 金牛山金矿综合信息找矿研究[J]. 黄金科学技术, 2009, 17(2): 8-11.]
- [49] Xie Xuejin. Using new concepts and new technique to look for giant mineral deposits[J]. *Scientific Chinese*, 1995, 5(15): 13-15. [谢学锦. 用新观念与新技术寻找巨型矿床[J]. 科学中国人, 1995, 5(15): 13-15.]
- [50] Xie Xuejin, Liu Dawen, Xiang Yunchuan, et al. Geochemical blocks—Development of concept and methodology[J]. *Chinese Geology*, 2002, 29(3): 225-233. [谢学锦, 刘大文, 向运川, 等. 地球化学块体——概念和方法学的发展[J]. 中国地质, 2002, 29(3): 225-233.]
- [51] Shi Junfa, Yao Huajun, Li Youzhi, et al. Information-based Mineral Exploration Strategy and One Hundred Mineral Exploration Case Histories[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005. [施俊法, 姚华军, 李友枝, 等. 信息找矿战略与勘查百例[M]. 北京: 地质出版社, 2005.]
- [52] Liu Dawen, Zhou Xiaodong, Xie Xuejin. The application of geochemical block methods to evaluation of mineral resources[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(1): 15. [刘大文, 周晓东, 谢学锦. 应用于矿产资源评价的地球化学块体方法技术[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 15.]
- [53] Liu Dawen, Xie Xuejin. Evaluation of China's tin resources potential based on the geochemical block concept[J]. *Chinese Ge-*

- ology, 2005, 32(1): 25-32. [刘大文, 谢学锦. 基于地球化学块体概念的中国锡资源潜力评价[J]. 中国地质, 2005, 32(1): 25-32.]
- [54] Mathur R, Titley S, Barra F, *et al.* Exploration potential of Cu isotope fractionation in porphyry copper deposits[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2009, 102(1): 1-6.
- [55] Zhu X K, O'Nions R K, Guo Y, *et al.* Determination of natural Cu-isotope variation by plasma-source mass spectrometry: Implications for use as geochemical tracers[J]. *Chemical Geology*, 2000, 163(1/4): 139-149.
- [56] Larson P B, Maher K, Ramos F C, *et al.* Copper isotope ratios in magmatic and hydrothermal ore-forming environments [J]. *Chemical Geology*, 2003, 201(3/4): 337-350.
- [57] Mathur R, Ruiz J, Titley S, *et al.* Cu isotopic fractionation in the supergene environment with and without bacteria [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(22): 5 233-5 246.
- [58] Markl G, Lahaye Y, Schwinn G. Copper isotopes as monitors of redox processes in hydrothermal mineralization[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(16): 4 215-4 228.
- [59] Maher K C, Larson P B. Variation in copper isotope ratios and controls on fractionation in Hypogene Skarn mineralization at Corrocohuayco and Tintaya, Peru [J]. *Economic Geology*, 2007, 102(2): 225-237.
- [60] Wang Yue, Zhu Xiangkun. Applications of Cu isotopes on studies of mineral deposits: A status report[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2010, 40(4): 739-750. [王跃, 朱祥坤. 铜同位素在矿床学中的应用: 认识与进展[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2010, 40(4): 739-750.]
- [61] Wang Yue, Zhu Xiangkun. Application of Zn isotopes to study of mineral deposits: A review[J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29(5): 843-852. [王跃, 朱祥坤. 锌同位素在矿床学中的应用: 认识与进展[J]. 矿床地质, 2010, 29(5): 843-852.]
- [62] Taufen P M. Ground waters and surface waters in exploration geochemical surveys[C]//Gubins A G ed. Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration. Toronto: Prospectors and Developers Association, 1997: 271-284.
- [63] Clarke W B, Kugler G. Dissolved helium in groundwater: A possible method for uranium and thorium prospecting[J]. *Economic Geology*, 1973, 68(2): 243-251.
- [64] Earle S Am, Drever G L. Hydrogeochemical exploration for uranium within the Athabasca Basin, northern Saskatchewan [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1984, 19: 57-73.
- [65] Dean J R, Bland C J, Levinson A A. The measurement of $^{226}\text{Ra}/^{223}\text{Ra}$ activity ratios in ground water as a uranium exploration technique[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1982, 19: 187-193.
- [66] Miller W R, Wanty R B, McHugh J B. Application of mineral-solution equilibria to geochemical exploration for sandstone-hosted uranium deposits in two basins in west central Utah [J]. *Economic Geology*, 1984, 79(2): 266.
- [67] Pauwels H, Baubron J C, Freyssinet P, *et al.* Sorption of metallic compounds on activated carbon: Application to exploration for concealed deposits in southern Spain [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1999, 66(1/2): 115-133.
- [68] Pauwels H, Tercier-Waeber M L, Arenas M, *et al.* Chemical characteristics of groundwater around two massive sulphide deposits in an area of previous mining contamination, Iberian Pyrite Belt, Spain [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2002, 75(1/3): 17-41.
- [69] Caritat P, Lavitt N, Kirste D. Groundwater geochemistry in the Broken Hill region, Australia [C]//Cidu R ed. Proceedings of the Tenth International Symposium on Water Rock Interaction WRI-10 Vol. 1. Netherlands: A. A. Balkema Publishers, 2001: 489-492.
- [70] Sader J A, Leybourne M I, McClenaghan M B, *et al.* Low-temperature serpentinization processes and kimberlite groundwater signatures in the Kirkland Lake and Lake Timiskaming kimberlite fields, Ontario, Canada: Implications for diamond exploration [J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2007, 7(1): 3-21.
- [71] Caron M E, Grasby S E, Cathryn Ryan M. Spring water trace element geochemistry: A tool for resource assessment and reconnaissance mineral exploration [J]. *Applied Geochemistry*, 2008, 23(12): 3 561-3 578.
- [72] Goodfellow W D. Mineral Deposits of Canada [M]. Canada: Geological Association of Canada Mineral Deposits Division, 2007, 5: 1 068.
- [73] Cameron E M, Leybourne M I, Kelley D L. Exploring for deeply covered mineral deposits: Formation of geochemical anomalies in northern Chile by earthquake-induced surface flooding of mineralized groundwaters [J]. *Geology*, 2002, 30(11): 1 007-1 010.
- [74] Cameron E M, Leybourne M I. Relationship between groundwater chemistry and soil geochemical anomalies at the Spence copper porphyry deposit, Chile [J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2005, 5(2): 135-145.
- [75] Leybourne M I, Cameron E M. Source, transport, and fate of rhenium, selenium, molybdenum, arsenic, and copper in groundwater associated with porphyry-Cu deposits, Atacama Desert, Chile [J]. *Chemical Geology*, 2008, 247(1/2): 208-228.
- [76] Leybourne M I, Cameron E M. Composition of groundwaters associated with porphyry-Cu deposits, Atacama Desert, Chile: Elemental and isotopic constraints on water sources and water-rock reactions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(7): 1 616-1 635.
- [77] Leybourne M I, Goodfellow W D, Boyle D R. Hydrogeochemical, isotopic, and rare Earth element evidence for contrasting water-rock interactions at two undisturbed Zn-Pb massive sulphide deposits, Bathurst Mining Camp, NB, Canada [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1998, 64(1/3): 237-261.
- [78] Leybourne M I, Cousens B L, Goodfellow W D. Lead isotopes in ground and surface waters: Fingerprinting heavy metal sources in mineral exploration [J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2009, 9(2): 115-123.

- [79] Leybourne M I, Clark I D, Goodfellow W D. Stable isotope geochemistry of ground and surface waters associated with undisturbed massive sulfide deposits; constraints on origin of waters and water-rock reactions [J]. *Chemical Geology*, 2006, 231 (4): 300-325.
- [80] de Caritat P, McPhail D C, Kyser K, *et al.* Using groundwater chemical and isotopic composition in the search for base metal deposits: Hydrogeochemical investigations in the Hinta and Kayar Pb-Zn districts, India [J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2009, 9(3): 215-226.
- [81] Hattori K H, Cameron E M. Using the high mobility of palladium in surface media in exploration for platinum group element deposits: Evidence from the Lac des Iles region, northwestern Ontario [J]. *Economic Geology*, 2004, 99(1): 157.
- [82] Carey M L, McPhail D C, Taufen P M. Groundwater flow in playa lake environments: Impact on gold and pathfinder element distributions in groundwaters surrounding mesothermal gold deposits, St. Ives area, Eastern Goldfields, Western Australia [J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2003, 3(1): 57.
- [83] Dickson B L, Giblin A M. Effective exploration for uranium in South Australian palaeochannels [J]. *Applied Earth Science; IMM Transactions Section B*, 2007, 116(2): 50-54.
- [84] de Caritat P, Kirste D, Carr G, *et al.* Groundwater in the Broken Hill region, Australia: Recognising interaction with bedrock and mineralisation using S, Sr and Pb isotopes [J]. *Applied Geochemistry*, 2005, 20(4): 767-787.
- [85] Song C, Lei L, Qiang. Research and orientation of exploration vegetation geochemistry in China [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2009, 29(1): 1-11. [宋慈安, 雷良奇. 我国勘查植物地球化学的研究现状及发展方向 [J]. 桂林工学院学报, 2009, 29(1): 1-11.]
- [86] Cole M M. The use of vegetation in mineral exploration in Australia [C] // Woodcock J T ed. 8th Commonwealth Mining and Metallurgical Congress: Australia and New Zealand, 1967, 6: 1 429-1 458.
- [87] Cole M M. The importance of environment in biogeographical/geobotanical and biogeochemical investigations [J]. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 1971, 11: 414-425.
- [88] Lintern M J, Butt C R M, Scott K M. Gold in vegetation and soil—Three case studies from the goldfields of southern Western Australia [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1997, 58 (1): 1-14.
- [89] Arne D C, Stott J E, Waldron H M. Biogeochemistry of the Ballarat east goldfield, Victoria, Australia [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1999, 67(1/3): 1-14.
- [90] Dann R. Hydrogeochemistry and Biogeochemistry in the Stephens Creek Catchment, Broken Hill, NSW [D]. Canberra: University of Canberra, 2001.
- [91] Hill S M, Hill L J. Some important plant characteristics and assay overviews for biogeochemical surveys in western New South Wales [C] // Roach I C ed. Advances in Regolith: Proceedings of the CRC LEME Regional Regolith Symposia, 2003: 187-192.
- [92] Hulme K A, Hill S M. River red gums as a biogeochemical sampling medium in mineral exploration and environmental chemistry programs in the Curnamona Craton and adjacent regions of NSW and SA [C] // Roach I C ed. Advances in Regolith: Proceedings of the CRC LEME Regional Regolith Symposia, 2003: 205-210.
- [93] Hu Xishun, Meng Guanglu. Method of plant geochemical measurement and its prospecting result [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2005, 19(6): 610-616. [胡西顺, 孟广路. 植物地球化学测量方法的试验效果 [J]. 矿产与地质, 2005, 19(6): 610-616.]
- [94] Reid N, Hill S M, Lewis D M. Biogeochemical expression of buried gold mineralization in semi-arid northern Australia: Penetration of transported cover at the Titania Gold Prospect, Tanami Desert, Australia [J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2009, 9(3): 267-288.
- [95] Anand R R, Cornelius M, Phang C. Use of vegetation and soil in mineral exploration in areas of transported overburden, Yilgarn Craton, Western Australia: A contribution towards understanding metal transportation processes [J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2007, 7(3): 267-288.
- [96] Kozuskanich J C, Kyser T K, MacFarlane W R, *et al.* Dendrochemical variation over the Cross Lake VMS mineralization—A tool for mineral exploration and decoupling anthropogenic input from background signals [J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2009, 9(2): 151-157.

New Advances in Geochemical Exploration of Concealed Deposits

Sun Jian, Chen Yuelong, Li Dapeng

(School of Earth Sciences and Resources, China University of Geoscience, Beijing 100083, China)

Abstract: Recently, the exploration in deeply concealed deposits becomes increasingly common. With the development in the state-of-the-art metallogenic theory and analysis technique, it has stimulated the formation of the non-traditional geochemical prospecting methods. One of great breakthroughs in buried mineral deposits exploration

is the advent of Deep-penetrating Exploration Geochemistry, which includes methods of the Selective Leaching of Mobile Metals (MOMEQ), Mobile Metal Ions (MMI), Enzyme Leach, Electro-geochemistry methods, etc. These methods are able to measure any direct geochemical information emanating from the deeply concealed deposits. Another important advance in concealed deposit exploration is using integrated geological information for prospecting, including geologic, geophysical, geochemical and remote sensing data. This method is proved a powerful tool for deeply buried mineral deposits exploration. Some other new methods including geochemical blocks method, information exploration, and non-traditional isotope tracer techniques are starting applied to concealed deposits exploration. Besides, the methods of traditional geochemical exploration including hydrogeochemical and biogeochemical methods are experience renewed interest and achieve new development. New advances in these geochemical exploration methods are reviewed in depth, including their concepts, basis theory, application method, and results of their application. Finally, the problems in geochemical exploration are pointed out.

Key words: Buried mineral; Geochemical exploration; Deep-penetrating geochemistry; Integrated geological information.

《地球科学进展》“973 项目研究进展”专栏公告

为了配合宣传国家重点基础研究发展规划对我国基础研究发展所取得的辉煌成就,进一步展示资源环境领域“973”项目的原创性研究成果,扩大交流,提升项目的科学价值,《地球科学进展》编辑部自 2005 年第 11 期开辟“973 项目研究进展”专栏,我们希望继续不断得到广大“973”项目首席科学家的大力支持和踊跃投稿,扩大刊登“973”项目中有关资源环境和全球变化方面的项目介绍、最新研究成果和进展。该专栏文章可包括以下几方面内容:

(1) 对已结题的项目,主要围绕该项目取得的研究成果及其应用价值、发展前景、与国际水平的差距等内容。

(2) 对正在进行的项目,主要就项目研究的现状、进展、新成果及发展前景等内容。

(3) 对刚申请批准的项目,围绕该项目研究的目的、意义、关键科学问题及其要达到的目标等内容。

凡是无项目首席科学家署名的来稿,最好经首席科学家的同意和认可,并签署意见。撰写的文章要求客观、公正、实事求是,内容完整,数据翔实,应有必要的文献、英文文摘等内容。具体格式要求参阅《地球科学进展》的投稿须知。

投稿时请注明“973 项目研究进展”栏目,栏目稿件经审核达到发表要求的将尽快刊出,免收审稿费,酌收一定的版面费并致稿酬,同时免费赠送全年期刊一套(1~12 期)。

欢迎从事“973”项目研究的科学家、学者赐稿。谢谢对我们工作的支持和帮助。

《地球科学进展》编辑部