

doi: 10.12029/gc20160518

张必敏, 王学求, 徐善法, 等. 盆地金属矿穿透性地球化学勘查模型与案例[J]. 中国地质, 2016, 43(5): 1697-1709.

Zhang Bimin, Wang Xueqiu, Xu Shanfa, et al. Models and case history studies of deep-penetrating geochemical exploration for concealed deposits in basins[J]. Geology in China, 2016, 43(5): 1697-1709(in Chinese with English abstract).

盆地金属矿穿透性地球化学勘查模型与案例

张必敏^{1,2,3} 王学求^{1,2,3} 徐善法^{1,2,3} 姚文生^{1,2,3} 叶 荣⁴

(1. 国土资源部地球化学探测技术重点实验室, 河北 廊坊 065000; 2. 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; 3. 联合国教科文组织全球尺度地球化学国际研究中心, 河北 廊坊 065000; 4. 中国地质大学(北京), 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 近 20 年来, 越来越多的大型金属矿床在盆地内部及其边缘被发现。传统的勘查地球化学方法对盆地及盆地边缘覆盖区无能为力, 深穿透地球化学探测技术为解决盆地及其边缘覆盖区找矿难题提供了一种行之有效的手段。文章通过对沉积砂岩盆地铀矿、火山岩盆地银多金属矿、变质岩盖层铜镍矿和沉积盖层金矿开展探测试验, 得出: (1) 砂岩型铀矿中活动性铀主要以铀酰络阳离子的形式存在, 铀酰络阳离子很容易受地下水运动及蒸发蒸腾作用而发生迁移, 迁移通道包括砂岩的孔隙、构造裂隙等, 到达地表后, 铀酰络阳离子易与土壤中带负电的黏土矿物结合而赋存其中, 使用微细粒分离和动态提取两种方法均能圈定矿致异常; (2) 火山岩盆地中, 与火山岩近乎同期形成的矿床, 矿床形成过程中含矿流体携带成矿元素银、金、铜等沿构造裂隙运移, 迁移到地表后被土壤中的黏土矿物所吸附, 使用土壤动态测量和微细粒分离测量均能有效圈定已知矿体, 异常直接位于矿体上方; (3) 变质岩盆地超基性岩体在侵位过程中, 岩体与变质岩接触带将产生大量的构造裂隙, 因此当流体通过岩体与围岩接触带时, 将携带矿体中铜、镍向上迁移至地表, 形成环状异常; (4) 洛宁盆地金矿成矿过程中, 成矿元素金、银等以络合物、纳米级单质或合金等形式通过流体携带顺着构造破碎带向上迁移, 地表岩石风化发生成矿元素解离, 后期被黄土覆盖, 矿体或岩石解离的化合物或纳米颗粒可以穿过黄土孔隙向上迁移至地表, 并赋存于表层黄土的细粒级黏土中, 因此采用土壤微细粒分离测量可圈出矿致异常。本文根据深穿透地球化学方法应用效果, 异常的形态, 并结合盖层的特点, 成矿元素的存在形式、迁移方式以及在地表的赋存状态, 初步建立了盆地金属矿深穿透地球化学勘查模型, 为盆地盖层区地球化学勘查提供了理论与技术支撑。

关键词: 盆地; 盖层; 隐伏矿; 深穿透地球化学; 纳米晶体; 迁移模型

中图分类号: P632⁺.1; P623.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)05-1697-13

Models and case history studies of deep-penetrating geochemical exploration for concealed deposits in basins

ZHANG Bi-min^{1,2,3}, WANG Xue-qiu^{1,2,3}, XU Shan-fa^{1,2,3}, YAO Wen-sheng^{1,2,3}, YE Rong⁴

收稿日期: 2016-06-16; 改回日期: 2016-09-13

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(深部探测专项 SinoProbe-04, 201511034)、国家自然科学基金项目(41573044)、中国地质调查局地质调查项目(12120113100900)及国家重点研发计划项目(2016YFC0600600)联合资助。

作者简介: 张必敏, 男, 1981 年生, 高级工程师, 从事勘查地球化学研究; E-mail: zhangbimin@igge.cn。

通讯作者: 王学求, 男, 1963 年生, 研究员, 从事勘查地球化学研究; E-mail: wangxueqiu@igge.cn。

(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, Hebei, China; 2. Key Laboratory of Geochemical Exploration, Ministry of Land and Resources, Langfang 065000, Hebei, China; 3. UNESCO International Center on Global-scale Geochemistry, Langfang 065000, Hebei, China; 4. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In the past twenty years, more and more mineral deposits were discovered in basins. The traditional geochemical exploration methods are not effective in mineral exploration of concealed deposits in basins. Deep-penetrating geochemistry provides a new approach for exploration in basins. The case history studies from the concealed sandstone-type uranium deposit hosted in a sedimentary basin, the concealed Ag-polymetallic deposit in a volcanic basin, the concealed Cu-Ni deposit in a basin covered by metamorphic rocks and the concealed Au deposit covered by loess have led the authors to reach the following conclusions: (1) Uranium is converted to uranyl ions $[UO_2]^{2+}$ under the oxidizing condition and is easy to migrate under the influence of groundwater movement along sandstone pore structure and tectonic fissures; the uranyl ions are absorbed on clay minerals after migration to earth's surface, because clay layers have a net negative charge, which needs to be balanced by interlayer cations; leaching of mobile forms of elements in soils and separation of fine-grained soils can be used to determine the orebodies; (2) The Yueyang Ag-polymetallic deposit was nearly formed in the same period as the volcanic rock; Ore-bearing fluid migrated to earth's surface along tectonic fissures in the formation process of the deposit; mobile forms of metals in ore-bearing fluid were absorbed on clay minerals; leaching of mobile forms of elements in soils and separation of fine-grained soils can be used to determine the orebodies in volcanic basins; anomalies of elements are directly displayed over the blind orebodies; (3) the contact zone between intrusive mass and metamorphic rock generated a lot of tectonic fissures in the process of emplacement of the ultrabasic intrusion; and the fluid would take ore-forming elements Cu and Ni and migrate to earth's surface and form cyclic anomaly; (4) ore-forming elements Au and Ag in the form of complexes, nano-scale elemental or alloy particles taken by fluid migrated upward in the ore-forming process of Au deposits in Luoning basin; compound or nanoparticles which dissociated from orebodies or rocks could penetrate loess pores and migrated upward to earth's surface and were absorbed on clay minerals; separation of fine-grained soils can be used to determine the orebodies. In this paper, the authors built deep-penetrating geochemical models for mineral deposits in basins based on application effects, anomaly shapes, characteristics of the covers, occurrences of the ore-forming elements, and migration patterns. The above results will provide theoretical and technical support for geochemical exploration in basins.

Key words: basins; cover; concealed deposit; deep-penetrating geochemistry; nanocrystal; migration models

About the first author: ZHANG Bi-min, male, born in 1981, senior engineer, mainly engages in the study of exploration geochemistry; E-mail: zhangbimin@igge.cn.

About the corresponding author: WANG Xue-qiu, male, born in 1963, professor, supervisor of doctor candidates, mainly engages in the study of exploration geochemistry; E-mail: wangxueqiu@igge.cn.

Fund support: Supported by Non-profit Industry Financial Program of Ministry of Land and Resources (No. SinoProbe-04, No. 201511034), National Natural Science Foundation of China (No. 41573044), China Geological Survey Program (No. 12120113100900) and National Key Research and Development Program (No. 2016YFC0600600).

由于借助了现代分析技术,地球化学方法在有效识别直接矿化信息方面的能力大大增强,在过去的金属矿产勘查过程中一直起着重要作用。但随着矿产资源勘查向覆盖区和深部转移,传统的地表地球化学勘查技术受到了重大限制。

近20年来,随着勘查程度的提高和方向的转移,越来越多的大型金属矿产和能源矿产在盆地内部及其边缘区域被发现^[1-4],事实证明盆地内部以及边缘区域蕴含了大量的矿产资源,可视为中国新一轮矿产资源勘查最有可能获得重大发现和重大突破的地区。盆地占中国陆地面积近1/5,由于该地

形基本都是被沉积岩和火山岩所覆盖,地表又发育了厚层土壤,且覆盖厚度往往较大,少则数十米,多则数百米甚至上千米,掩盖了绝大部分找矿信息。因此这类地区一直被认为是地球化学调查的技术难点地区,甚至被视为技术禁区。传统的地球化学方法由于无法获得深部矿体发出的有效找矿信息,几乎放弃了对巨厚沉积物所覆盖的盆地地球化学勘查,即使少部分地区进行了区域化探工作,但由于覆盖层的影响再加技术条件本身不具备,收效甚微,投入难以获得回报,更难以对其资源潜力有全面了解。盆地及其边缘区域的外来覆盖物主要包

括了第四纪冲洪积物、风成沙、沉积岩和火山盖层等,要解决被这些覆盖物掩盖的大中型矿床的地球化学找矿难题,首先要查明覆盖层下方深部矿床成矿或伴生元素如何穿透外来盖层迁移到地表,并且在地表如何探测并识别到这种含矿信息。

深穿透地球化学探测技术^[5-28]由于能直接获取来自于覆盖层深部的异常信息,因此利用该技术解决盆地及其边缘区域找矿难题显然是一种行之有效的手段。近几年,中国在深穿透地球化学探测技术领域取得了较大进展,特别是在元素迁移机理研究取得了实证性证据^[29-40],在活动态提取和土壤微细粒分离方法研究上取得了技术性突破。由于自然界元素迁移过程极其复杂,特别是穿透覆盖层的远距离垂向迁移机制,到目前为止各国地球化学家还没有形成统一的认识,本文主要根据在盆地盖层区开展的地球化学探测试验和微观观测结果,并结合覆盖特点、地形地貌、地质、元素化学性质等情况,介绍针对盆地盖层区初步建立的元素迁移模型并剖析一些成功案例,由于所获得支持模型的证据还比较少,这些模型主要是一些推测性模型,即便如此,仍将为我们更好地认识成矿元素从矿体向上迁移至地表的机理和过程,以及进一步发展穿透性地球化学勘查技术提供帮助。

1 沉积盆地砂岩型铀矿穿透性地球化学研究—以吐哈盆地十红滩为例

吐哈盆地十红滩铀矿床位于盆地西南部,属层间氧化带砂岩型铀矿床。中、下侏罗的水西沟群(J_{1-2})的西山窑组(J_{2x})为含矿岩系(图1)。主要岩性为砂砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩及炭质泥岩、煤层等。矿石以灰色、深灰色、灰黑色的砂砾岩和砂岩为主,含有大量的炭质碎屑,矿石胶结疏松。试验区景观类型为干旱荒漠戈壁景观,受地形的影响,地表大部分地区被冲积物覆盖,表层有一层黑色砾幕。矿体的埋藏深度为200~300 m。

深穿透地球化学勘查试验研究的采样密度为1点/ km^2 。采样点布设尽可能控制采样单元的面积,并选择主要沟渠出口或低洼处进行样品采集。由于该区域地形较为平坦,由南往北呈缓坡状,因此实际采样点分布较为均匀(图2)。采样介质主要选择0~30 cm深度的细粒级土壤,这部分土壤包含了地表的戈壁结皮和下部相对固结的弱胶结层,采样粒级选择-200目。本次研究主要采用活动态提取方法对样品进行处理,再做测试分析,提取剂采用研制的铀专属提取试剂(MML-U)。

勘查地球化学样品分析工作的一项重要任务

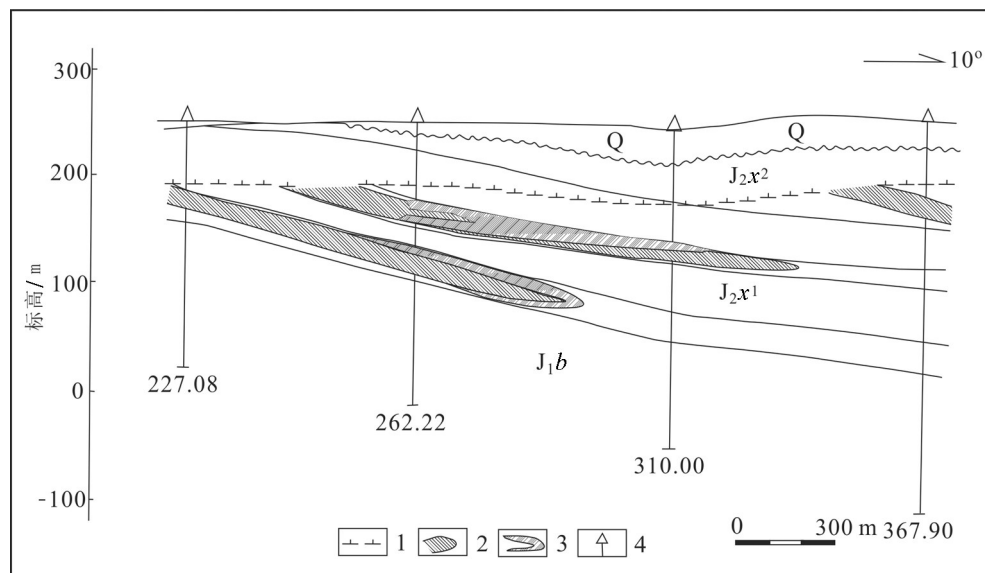


图1 十红滩地区15线勘探剖面图^[42]

1—氧化还原带;2—矿体;3—铀异常带;4—钻孔

Fig. 1 Geological section along No.15 exploration line in Shihongtan^[42]

1—Oxidation-reduction zone;2—Orebody;3—Uranium anomaly belt;4—Drill hole

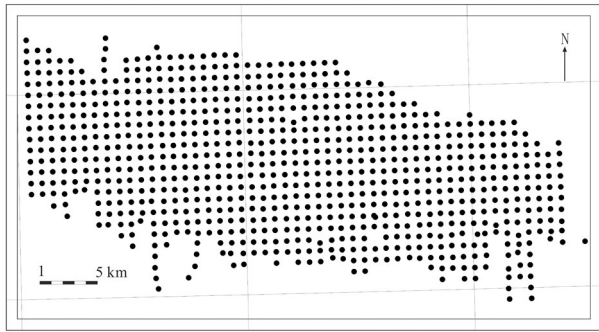


图2 新疆吐鲁番十红滩地区地球化学采样点位图
Fig.2 Distribution of geochemical sampling sites in Shihongtan, Xinjiang

是测量样品中与矿化有关的元素含量异常信息。常规地球化学方法,对样品进行全部溶解,或通过物理方法对样品进行处理,以测定样品中元素的总含量^[4],并研究与矿床有关元素的次生分散晕、次生分散流及原生晕,这种方法在浅表矿勘查中发挥了重要作用。而在覆盖区隐伏矿的勘查过程中,为获取从深部矿(化)体迁移至地表疏松介质中的元素信息,可利用特定试剂提取这部分来自于深部的活动性物质,通过测定其含量来获知深部矿化情况。活动态信息微弱,易受地表疏松介质中内生组分元素的干扰,活动态提取方法的有效性取决于外生组分(活动态)与内生组分元素含量相对比值,这又取决于提取方法对次生矿物的选择性、以及次生矿物中

待测元素的本底含量。由于提取过程中用到的不同试剂对元素的提取本身具有一定的选择性,因此在勘查不同矿种时,为了取得最好的提取效果,就需要研制专用的提取试剂。铀专用提取试剂(MML-U)就是在该背景下研制而成并投入使用的。同时,为了技术发展需要,建立了元素活动态提取及测定实验流水线(图3),以提高提取的规范化和效率,该流水线主要包括野外采样-物理筛分-专用提取剂提取-恒温振荡-过滤-仪器测定等几个操作流程。

从所制作的动态铀地球化学图(图4)可以看出,铀异常带主要位于侏罗系上方,由于侏罗系本身为铀矿含矿层,因此本身具有高背景的一个特征;同时在 J_{1-2} 地层已知隐伏铀矿带所在区域,活动态铀异常最为强烈,且异常面积较大,反映出异常与矿体较好的空间对应关系。由于提取的是活动态铀,推测出现的强异常与深部隐伏的砂岩型铀矿体有直接的关系,铀异常的出现来源于活动态铀的垂向迁移。在试验区东边Q地层上方出现的铀异常则主要与活动态铀的水平迁移具有一定的关系,因为该区域靠近艾丁湖,地形最低,因此铀容易通过水平迁移在该区域富集。试验区西边异常目前暂时还无法判断其形成原因,由于被第四系土壤覆盖,有待进一步钻探验证。以上结果可以看出,利用活动态提取技术可有效圈定隐伏砂岩型铀矿,可

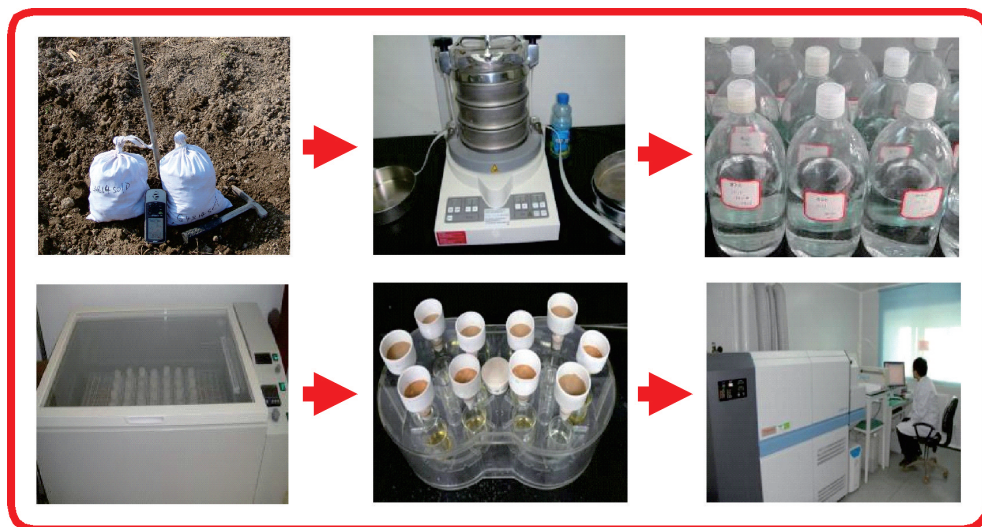


图3 元素活动态提取及元素高精度测定实验流水线
Fig.3 The laboratory pipelining systems for the extraction of mobile forms of metals

用于盆地中寻找隐伏砂岩型铀矿。

砂岩型铀矿中活动性铀主要以铀酰络阳离子的形式存在,其很容易受地下水运动及蒸发蒸腾作用而发生迁移,迁移通道包括砂岩的孔隙、构造裂隙等,方向上既可以垂向迁移至地表,也可以顺着地层水平方向一直迁移到渗出带。到达地表后,铀酰络阳离子很容易与土壤中带负电的黏土矿物结合而赋存其中^[29],同时活动性铀也会受地表水流作用发生水平运移,因此土壤异常位置既可以是矿体正上方,也可以是远离矿体的地下水渗出带,亦或是地形低洼部位。根据以上认识,并结合新疆十红滩和内蒙古鄂尔多斯盆地^[34]开展的试验研究结果,初步建立了盆地砂岩型铀矿元素迁移模型(图5)。

2 火山岩盆地银金铜矿穿透性地球化学研究——以紫金山悦洋盆地为例

福建紫金山是中国著名的大型铜金矿田,其位于东南沿海中生代火山活动带的西部,闽西南凹陷西南部上杭—云霄深大断裂与宣和复式背斜交汇部位。矿田内矿床类型多样,是目前中国唯一的多种类型并存的斑岩—浅成热液成矿系统,也是世界

范围内典型的多种矿化类型发育齐全的岩浆—流体成矿体统。紫金山矿田由西南至东北陆续分布着悦洋火山岩盆地浅成低温热液型银金矿床、紫金山浅层低温热液型铜金矿床、五子骑龙高温热液型铜矿床、萝卜岭斑岩型铜钼矿床等。其中悦洋火山岩盆地银金矿位于燕山晚期火山岩盖层下部,属于隐伏矿,隐伏深度为80~700 m,矿体位于火山岩盖层与深部花岗岩体的不整合面上,是本次深穿透地球化学探测试验重点开展区域。

在悦洋火山岩盆地布置了一条横穿悦洋银金铜多金属矿区的采样剖面线。采样点距为50 m,采样深度10~20 cm,主要采集腐植层下部的B层土壤(淋积层),土壤样品室内过200目筛子。同时在火山岩盆地选择了逾20 km²开展面积性试验工作,每平方千米采集4件样品,采样部位和采样介质主要为小山沟中的冲积土壤,布点时点位尽量分散均匀,样品的采样深度5~20 cm,粒度小于200目。对横穿悦洋银金铜多金属矿区的采样剖面线微细粒土壤样品分析了全量、水溶态和铁锰氧化物态。土壤全量分析Ag的平均含量为384 ng/g,水溶态Ag的平均含量为0.18 ng/g,铁锰氧化物态Ag的平均含量为197 ng/g,结果说明Ag在铁锰氧化物态中占了比较

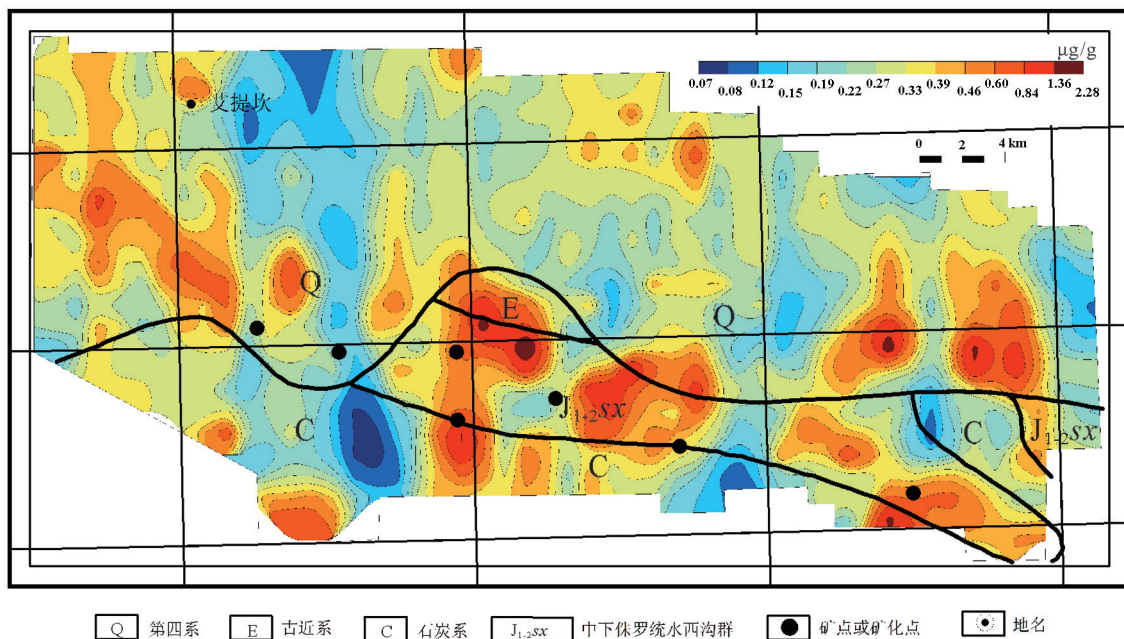


图4 十红滩铀矿试验区活动态提取U地球化学图

Fig.4 Geochemical map of U based on deep-penetrating geochemical results in the Shihongtan U deposit

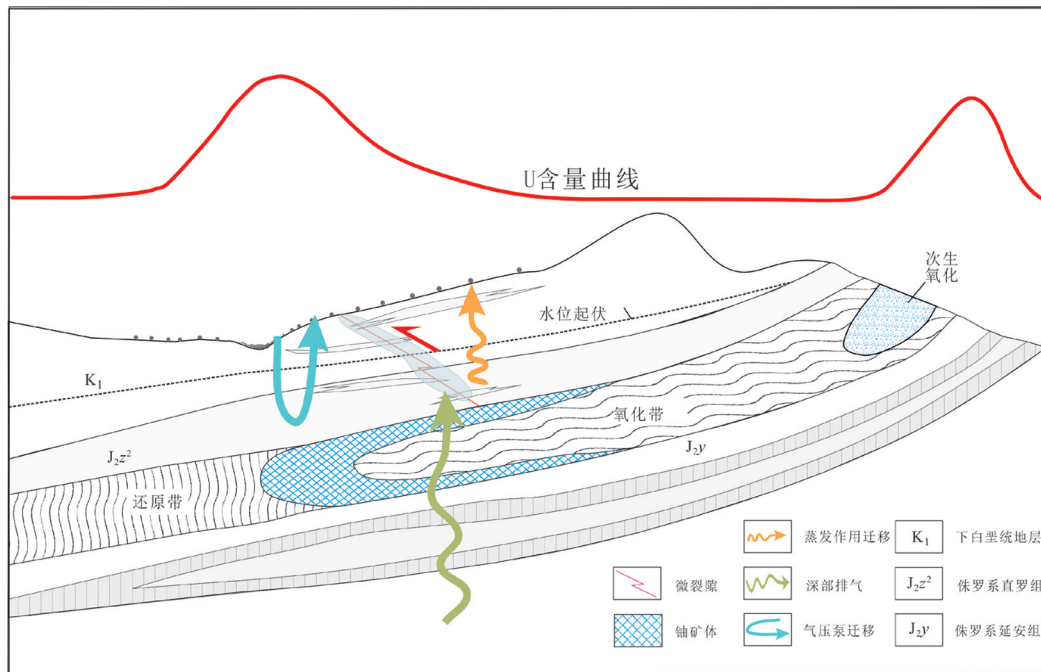


图5 盆地砂岩型铀矿元素迁移模型

Fig.5 Migration model of elements for concealed sandstone-type uranium deposits

大的比例。图6为剖面线Ag和Au的元素分布,可以看出土壤微细粒分离和动态提取技术可以有效地指示深部隐伏矿体。此外,在整个悦洋火山岩盆地开展的扫面工作,运用土壤微细粒分离技术,在已知几个矿区均显示了明显的元素异常(图7)。

土壤微细粒分离方法之所以能用于寻找隐伏矿主要基于以下几点考虑:(1)呈高度分散形式存在的超微细金属不仅在化学上是活动的,能被溶解与迁移,并且在物理上这种极小颗粒金属能被长距离搬运与迁移;(2)微细粒土壤中包含了大量的黏土矿物,黏土矿物是土壤中最主要的次生矿物,由于其具有的负电性和巨大的表面积,使其很容易吸附具活动性的带正电荷的金属阳离子、超微细金属微粒和金属络阳离子等;(3)土壤微细粒分离方法通过分离富含黏土矿物的土壤颗粒来分离来自于深部的活动性物质,其是一种纯物理分离手段。野外开展大面积深穿透地球化学填图工作时可直接利用普通样品筛筛分-120目或-200目样品进行分析试验,然而对于-200目样品反映效果不好或需要筛分更细粒级土壤样品进行研究工作,常规样品筛则无法取得较好的筛分效果。目前,主要采用高精度电磁震荡筛分仪,以实现更细土壤微粒的物理分离。

该筛分仪利用电磁震荡的方式实现样品的垂直筛分,相对于普通样品筛的水平筛分方式,显然其筛分效果更佳。干筛装置可实现粒径 $38\ \mu\text{m}$ 微粒物质的快速分离,水筛装置可实现粒径 $5\ \mu\text{m}$ 微粒物质的快速分离。

此外,在悦洋银金铜多金属矿上方还设计了横穿矿体的地气测线,测线点距为 $12.5\sim 20\ \text{m}$,总长度为 $0.8\ \text{km}$ 。捕集介质采用王水和泡塑。结果显示,两种方法所测得的Ag、Au、Cu等元素均较好地在矿体和矿化带位置显示了异常(图8)。

福建紫金山外围悦洋银金铜多金属矿位于植被红土覆盖区,矿床类型属于浅成低温热液型矿床,矿体直接被火山岩所覆盖。利用细粒级全量、动态提取、地气测量的方法,均在隐伏矿体上方显示了明显的异常。悦洋矿区火山岩与矿体近乎同时形成,断裂构造十分发育,此外部分含矿热液本身沿构造裂隙分布。利用微粒观测的方法在该矿区矿体上方地气和土壤中同时观测到了纳米颗粒,而且颗粒大小、形貌特点、成分基本相似^[9]。根据以上结论初步建立了该研究区元素迁移的模型(图9)。即矿床形成过程中含矿流体携带成矿元素银、金、铜等沿构造裂隙运移,可迁移到地表,此

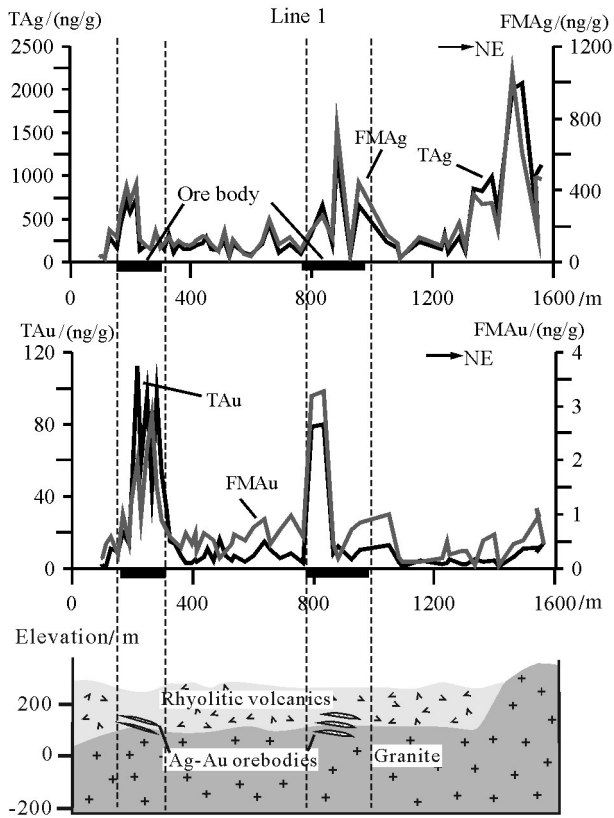


图6 横穿悦洋银金铜多金属矿矿体北东向试验剖面线元素分布(据 [39])

Fig.6 Distribution of Ag and Au along Line 1 above the Yueyang Ag-Au deposit at the periphery of the Zijinshan Au-Cu deposit (after reference [39])

外,矿床形成后地壳深部地气流垂直向上经过隐伏矿体,由于气体巨大的比表面积,其可携带矿体所含的活动性金属微粒向上迁移,这些活动性金属微粒主要为一些含银、金、铜等成矿元素的纳米级单质或合金晶体,穿过矿体后由于矿体上方火山岩盖层存在的大量断裂构造,气体可通过这些裂隙构造轻松穿越致密火山岩而到达地表。到地表后含矿物质被土壤中的细小的黏土矿物所吸附,从而能利用深穿透地球化学方法探测到地表矿致异常。此外,该地区丰富的地下水也对成矿元素由矿体向地表的迁移起到了重要作用。

3 变质岩盖层盆地铜镍矿穿透性地球化学研究——以南阳盆地周庵为例

周庵矿床是秦岭—大别造山带发现的最大铂

族元素矿床和最大铜镍矿床,是中国唯一的完全隐伏的难识别的大型铂族铜镍矿床。该矿床位于盆地边缘区域,矿体被太古宙变质岩和新生代冲洪积层所覆盖,覆盖层厚度大,矿体的埋深在400~800 m,没有开采,地表未被污染,是进行深穿透地球化学测量试验研究的理想选区。

布置了6条横穿矿体的剖面线,5条剖面长8 km,1条剖面长6 km,采样线距为50~150 m,点距为40 m。采样深度为去除浮土后0~20 cm。土壤分析了元素全量和活动态。活动态分析采用了贱金属元素专用提取剂。全量异常均位于实验区东部的出露少量的中—新元古界朱家山群大雀山组地层的基岩出露区,也就是说土壤全量分析显示的异常与隐伏矿体无明显的对应关系。而活动态异常分布于矿体地面垂直投影的外侧(图10),位于矿体与围岩的接触带上,形成了环状异常。

河南周庵铜镍矿属于湿润农田覆盖区。开展的一系列深穿透地球化学探测试验表明,使用活动态测量、地气测量以及水化学测量,所圈定的异常均很好地对应了隐伏矿体,指示了矿体所在部位,其中活动态测量和地气测量所显示的异常沿矿体水平投影的外围呈环形分布,而水化学测量在矿体上方出现明显异常点。由于地表农田土壤有机质含量高,因此需采用研制的贱金属专用提取剂提取土壤活动态确定异常。无论如何,运用这几种方法所测得的元素异常与矿体必然存在一定的联系,可认为这些成矿元素肯定是以其特殊的方式从矿体穿越覆盖层迁移到达地表。在周庵隐伏铜镍矿矿体上方地气、土壤和矿石中同时观测到纳米金属颗粒,并被室内迁移柱观测到纳米颗粒所证实,而且颗粒大小、形貌特点、成分基本相似,认为它们之间具有成因联系,同时纳米金属微粒具有有序晶体结构,表明它们是内生条件下的产物^[30]。以上事实表明地气和土壤中的纳米颗粒均来自于矿体,地气起到了携带纳米颗粒向上迁移的角色。这就是为什么地气测量和土壤活动态测量具有相同异常分布的原因。考虑到上述试验结果,并参考隐伏的铜镍矿体独特的形态特征,初步建立了该研究区元素迁移的模型(图11)。变质岩盆地超基性岩体在侵位过程中,岩体与变质岩接触带将产生大量的构造裂隙,由于矿体环绕岩体与地层的接触带分布,当流

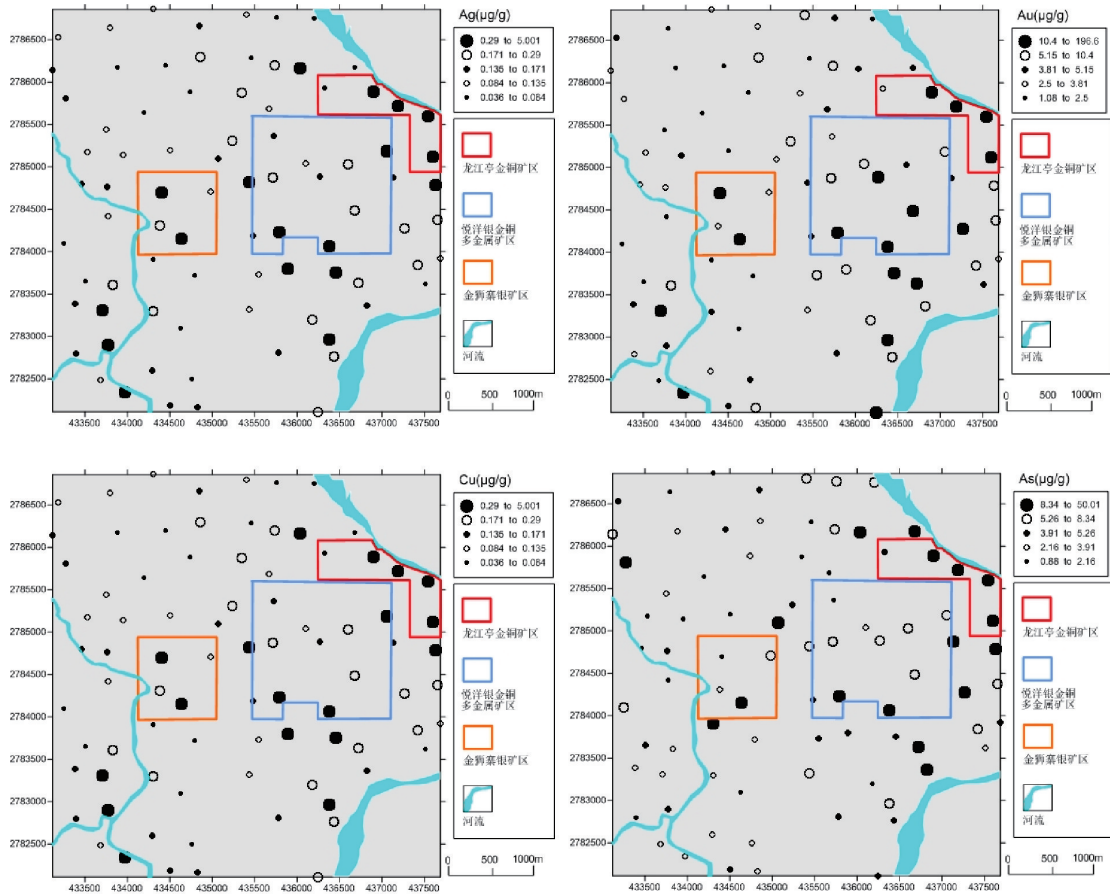


图7 悦洋火山岩盆地Ag、Au、Cu、As含量投点图

Fig.7 The content distribution of Ag, Au, Cu, As in Yueyang volcanic basin

体通过岩体与围岩接触带时,将携带矿体中铜、镍等成矿物质沿构造裂隙向上迁移至地表,到达地表后一部分纳米颗粒仍然滞留在气体里,另一部分被土壤地球化学障所捕获形成环状异常。

4 沉积盖层区金矿穿透性地球化学研究——以洛宁盆地为例

洛宁盆地位于河南崤山和熊耳山中间,为断陷盆地。崤山和熊耳山均是中国著名的金矿田,由于之间的洛宁盆地下陷,地表被巨厚的黄土所覆盖,由此使其被推断为寻找金矿的有利地区,这点已引起地质工作者的高度重视。所选的试验区总体上以黄土覆盖为主,在东北部有零星的基岩出露,覆盖厚度上西边覆盖浅,东边覆盖深。此外,沟壑较多,沟壑主要呈北西向分布。试验区内已知的金矿包括金洞沟金矿、鸡金山金矿以及石寨沟金矿等,这些金矿点主要分布在试验区的西部,位于盆山边

缘区域,黄土覆盖较浅。根据现场踏勘的情况看,目前这些金矿点全处于停采状态,采矿以洞采为主,现场基本未见矿石堆积。

考虑到黄土本身就细颗粒矿物为主,黏土所占比例高,易吸附活动性金属元素,因此选择分离微细粒土壤(<200目)的方法来开展面积性工作。采样密度是4件样/km²,由于黄土覆盖区具有沟壑纵横的景观特点,所选择的采样密度能更好地控制异常位置,跟踪异常。采样部位主要选择在长度在500~1000 m范围内的沟隙中,此外在稍大的沟中也进行一定密度的采样,以对异常进行控制。图12为洛宁盆地土壤全量Au、Ag、Cu、Hg元素地球化学图,从图中可以看出,这些元素异常主要位于试验区的西部,异常与该区的金矿化和覆盖深度浅具有较大的关系。对比看出,异常与已知金矿点有较好的对应关系。此外,在试验区东边也存在一些有价值的异常,这些异常与沟壑的方向较为一致,呈北

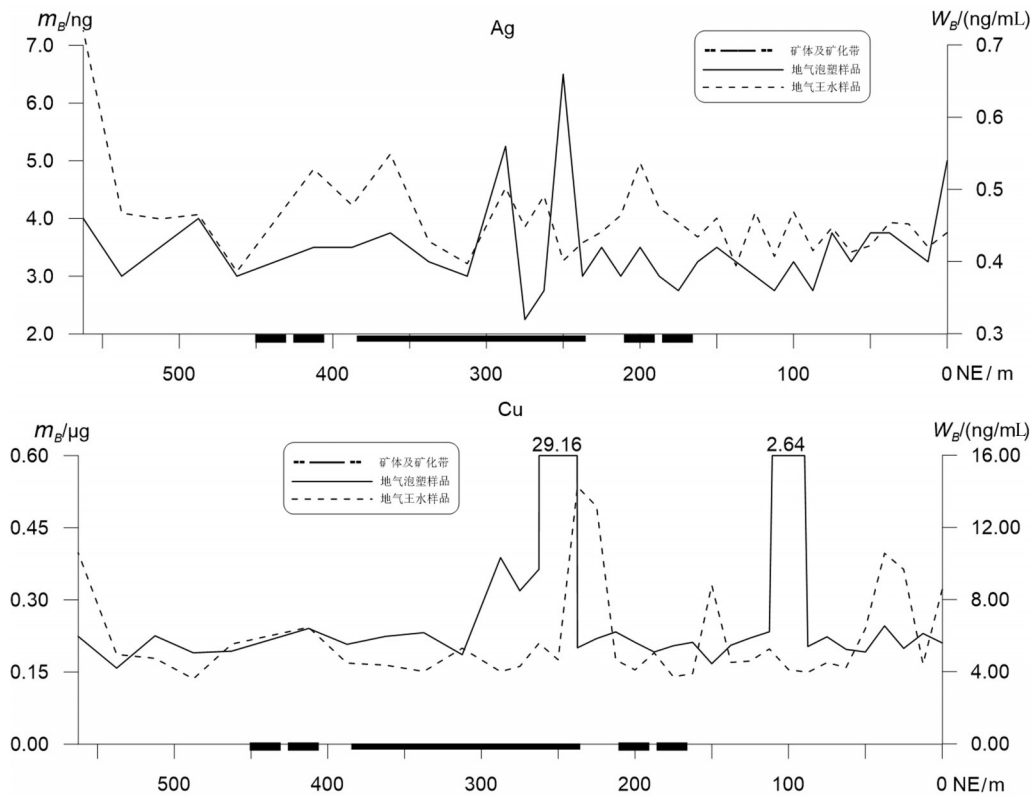


图8 悦洋矿区地气测量Ag、Cu元素含量折线图

Fig.8 The line chart of Ag and Cu content obtained by geogas prospecting in Yueyang volcanic basin

西向,说明这些异常存在一定的连续性。

洛宁盆地的金矿主要为蚀变破碎带型金矿,矿体沿着构造破碎带发育。在盆地边缘开展的土壤微细粒分离测量、地气测量和地电化学测量均很好地指示了已知金矿体。此外,在金矿体上方地气和土壤中同样捕集并观测到了纳米金属微粒。根据以上情况初步建立了河南洛宁盆地金矿元素迁移模型(图13)。金矿成矿过程中,成矿元素金、银等以络合物、纳米级单质或合金等形式通过流体携带顺着构造破碎带向上迁移,地表岩石风化产生成矿元素解离。后期被黄土覆盖,矿体或岩石解离的化合物或纳米颗粒可以穿过黄土孔隙向上迁移至地表,并赋存于表层黄土的细粒级黏土中,因此采用土壤微细粒分离测量可圈出矿致异常。

5 讨论

本文对盆地穿透性地球化学探测理论和技术进行了研究,总结如下:

(1)化学元素可以穿透盆地盖层到达地表。穿

透性地球化学是未来盆地覆盖区寻找隐伏矿的有效探测手段。盆地盖层复杂,在实际应用时,需根据不同盖层性质、地理景观特点和矿床类型选择性使用不同的深穿透地球化学技术,以达到有效寻找隐伏矿的目的。本文根据深穿透地球化学方法应用效果,异常的形态,并结合盖层的特点,成矿元素的存在形式、迁移方式以及在地表的赋存状态,初步建立了沉积砂岩盆地铀矿、火山岩盆地隐伏银金铜矿、变质岩盆地铜镍矿及沉积盖层金矿穿透性地球化学勘查模型。

(2)沉积砂岩盆地中砂岩型铀矿中活动性铀主要以铀酰络阳离子的形式存在,铀酰络阳离子很容易受地下水运动及蒸发蒸腾作用而发生迁移,迁移通道包括砂岩的孔隙、构造裂隙等,到达地表后,铀酰络阳离子很容易与土壤中带负电的黏土矿物结合而赋存其中;在地势较平坦及土壤中黏土比例较高地区使用微细粒分离和动态提取两种方法均能圈定矿致异常。

(3)火山岩与矿体同时期形成,部分含矿热液本

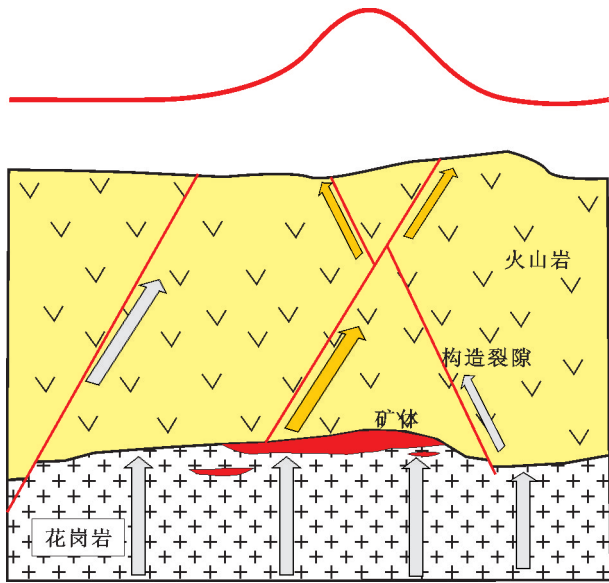


图9 福建悦洋银金铜矿元素迁移模型
Fig.9 Migration model of elements for concealed Yueyang Ag-Au-Cu deposit in Shanghang, Fujian

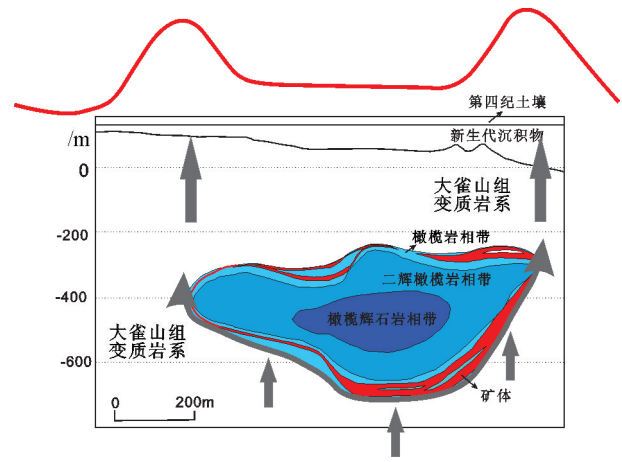


图11 河南周庵隐伏铜镍矿环状异常元素迁移模型(据[31])
Fig.11 Deep-penetrating geochemical migration model for concealed Zhou'an Cu-Ni deposit in Nanyang, Henan (after reference [31])

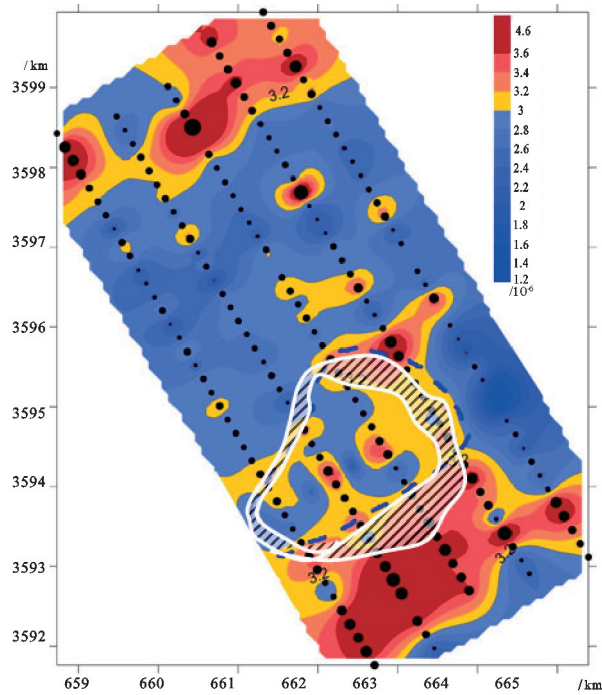


图10 周庵铜镍矿矿体上方环状铜异常(据[31])
Fig.10 Circular-shaped anomaly over concealed Zhou'an Cu-Ni deposit in Nanyang, Henan (after reference [31])

身沿构造裂隙分布; 主成矿元素银、金、铜等以纳米级单质或合金等形式通过地气携带并顺着火山岩

盖层内部众多的构造裂隙向上迁移, 迁移到地表后被土壤中的黏土矿物所吸附, 从而能利用深穿透地球化学方法探测到地表矿致异常。

(4)铜镍矿赋存的超基性岩体侵位于变质岩层位中, 超基性岩体在侵入过程中, 岩体与变质岩接触带将产生大量的构造裂隙。流体通过接触带, 将携带矿体中的活动性金属元素沿构造裂隙向上运动, 异常位于致密超基性岩体地面垂直投影的外侧, 呈环状。发现铜、镍或其合金纳米矿物, 纳米矿物可以直接沿裂隙垂直向上迁移。

(5)洛宁盆地变质岩型金矿地表被黄土覆盖。金矿成矿过程中, 成矿元素金、银等以络合物、纳米级单质或合金等形式通过流体携带顺着构造破碎带向上迁移, 地表岩石风化产生成矿元素解离。后期被黄土覆盖, 矿体或岩石解离的化合物或纳米颗粒可以穿过黄土孔隙向上迁移至地表, 并赋存于表层黄土的细粒级黏土中, 因此采用土壤微细粒分离测量可圈出矿致异常。

(6)从上述案例中可以看出, 土壤微粒分离是具有普遍适用性的盆地金属矿地球化学探测技术, 对于快速有效地开展大面积的地球化学扫面工作, 具有重要的现实意义。一方面是由于土壤微细粒级组分中大部分是黏土矿物, 而黏土矿物被认为是元素活动态的天然“捕获井”, 深部迁移上来的化学元素及其化合物易被黏土矿物所吸附, 二是纳米微粒

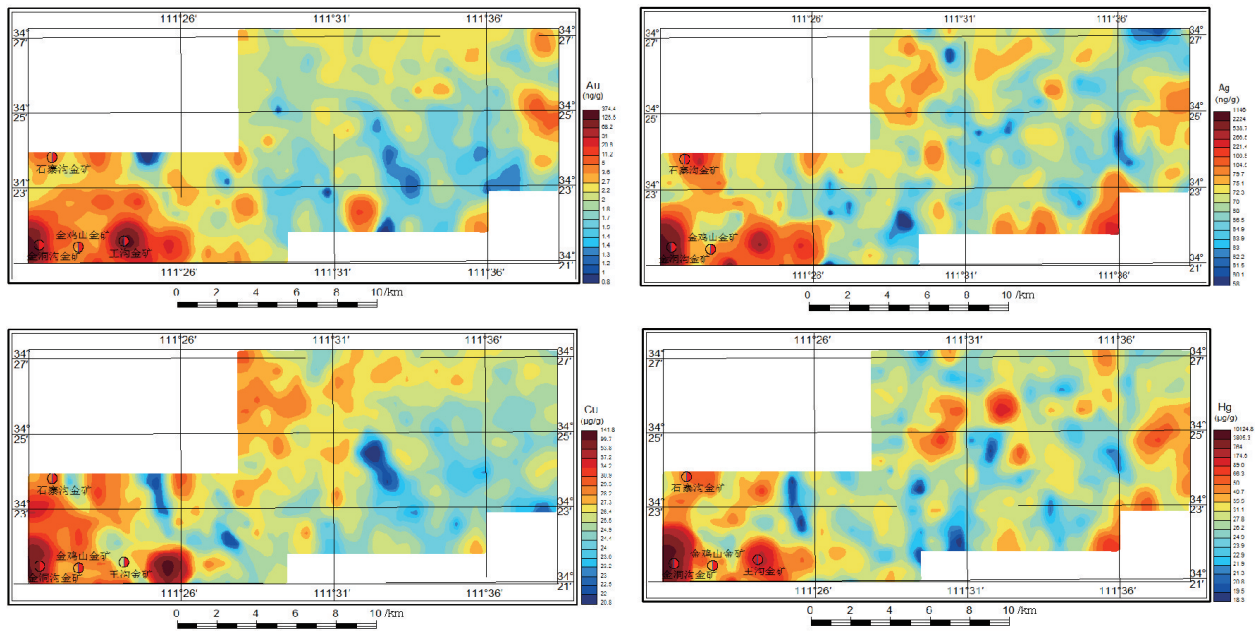


图 12 洛宁盆地 Au、Ag、Cu、Hg 元素地球化学图

Fig.12 Geochemical map of Au, Ag, Cu and Hg based on deep-penetrating geochemical results in Luoning Basin

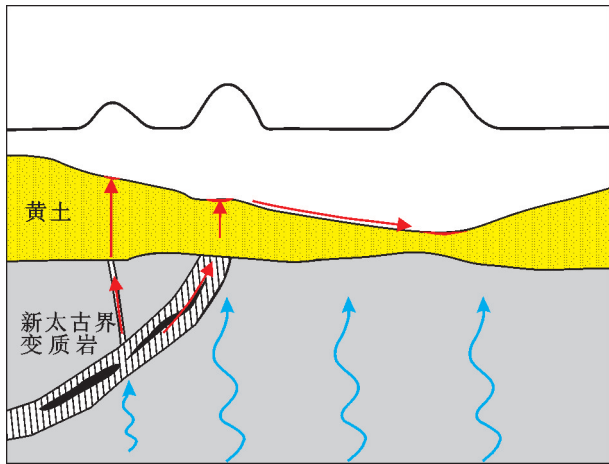


图 13 河南洛宁盆地金矿元素迁移模型

Fig.13 Deep-penetrating geochemical migration model for concealed Au deposits in Luoning, Henan

本身就是微粒的一种特殊组分,迁移到地表后作为其中的一部分存在于土壤微粒中。在隐伏矿的地表次生采样介质气体、土壤和原生矿石中同时观测到纳米金属微粒,微粒在形貌、大小、成分和晶体结构等方面具有一致性或相似性,表明它们之间具有继承关系,均来源于内生矿体。特别是纳米金属晶体的发现证实了其内生成因,而非外生成因。

尽管中国在深穿透地球化学机理和技术方法方面取得了突破性进展,但也发现了一些亟待解决的问题。目前开展探测试验的矿床深度主要集中在几百米以内,效果较好,但如何将有效探测深度提高到千米深度,这不仅需要从技术上加以解决,更要通过大量的试验达到实效。隐伏矿盖层复杂,有岩石盖层、有不同成因类型土壤盖层,需要建立针对不同盖层性质的有效采样技术和含矿信息提取技术。这些问题,是未来一段时间亟需解决的。

参考文献(References):

[1] Poluarshinov G P, Pigul'ski V M. 地质勘探经验导致在哈萨克斯坦成矿省发现不同成因类型的可采铀矿床[J]. 国外铀金地质, 1994, 11(1): 88-94.
 Poluarshinov G P, Pigul'ski V M. Different genetic types of uranium deposits were discovered in Kazakhstan metallogenic province due to geology exploration experiences[J]. Overseas Uranium and Gold Geology, 1994, 11(1): 88-94 (in Chinese with English abstract).
 [2] 刘益康, 徐叶兵. 蒙古 Oyu Tolgoi 斑岩铜金矿的勘查[J]. 地质与勘探, 2003, 39(1): 1-4.
 Liu Yikang, Xu Yebing. The prospecting and main features of OYU Tolgoi porphyry Cu-Au deposit in Mongolia[J]. Geology and Prospecting, 1994, 11(1): 88-94 (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- [3] 聂凤军, 江思宏, 张义, 等. 中蒙边境及邻区斑岩型铜矿床地质特征及成因[J]. 矿床地质, 2004, 23(2): 176-189.
Nie Fengjun, Jiang Sihong, Zhang Yi, et al. Geological features and origin of porphyry copper deposits in China-Mongolia border region and its neighboring areas[J]. Mineral Deposits, 2004, 23(2): 176-189 (in Chinese with English abstract).
- [4] 宋志, 齐高鹏, 祁世军, 等. 哈萨克斯坦斑岩铜矿地质-成因模式[J]. 新疆地质, 2009, 27(增刊): 70-75.
Song Zhi, Qi Gaopeng, Qi Shijun, et al. The geology-genetic model of Kazakhstan porphyry copper deposit[J]. Xinjiang Geology, 2009, 27(supp.): 70-75 (in Chinese with English abstract).
- [5] Ryss Y S, Goldberg I S. The partial extraction of metals (CHIM) method in mineral exploration[J]. Method and Technique, ONTI, VITR, Leningrad, 1973, 84: 5-19.
- [6] Kristiansson K, Malmqvist L. Evidence for non-diffusive transport of Rn in the ground and a new physical model for the transport [J]. Geophysics, 1982, 47(10): 1444-1452.
- [7] Clark J R. Enzyme-induced leaching of B-horizon soils for mineral exploration in areas of glacial overburden[J]. Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. B: Appl. Earth Sci.), 1993, 102: B19-B29.
- [8] Mann A W, Birrell R D, Gay L M, et al. Partial extractions and mobile metal ions[M]// Camuti K S (ed.). Extended Abstracts of the 17th IGES, 1995: 31-34.
- [9] Wang X Q, Cheng Z Z, Liu D W, et al. Nanoscale metals in earth gas and mobile forms of metals in overburden in wide-spaced regional exploration for giant ore deposits in overburden terrains[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1997, 58(1): 63-72.
- [10] Wang X Q. Leaching of mobile forms of metals in overburden: development and applications[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1998, 61: 39-55.
- [11] 王学求. 深穿透勘查地球化学[J]. 物探与化探, 1998, 22(3): 166-169.
Wang Xueqiu. Deep penetration exploration geochemistry[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1998, 61: 39-55 (in Chinese with English abstract).
- [12] 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: 157-166.
- [13] 董纯菡, 梁兴中, 李巨初. 地气测量研究及在东季金矿的试验[J]. 物探与化探, 1992, 16(6): 445-451.
Tong Chunhan, Liang Xingzhong, Li Juchu. The tentative geogas in the Dongji gold deposit[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1992, 16(6): 445-451 (in Chinese with English abstract).
- [14] Cohen D R, Shen X C, Dunlop A C, et al. A comparison of selective extraction soil geochemistry and biogeochemistry in the Cobar area, New South Wales[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1998, 61: 173-189.
- [15] Bajc A F. A comparative analysis of enzyme leach and mobile metal ion selective extractions: Case studies from glaciated terrain, northern Ontario[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1998, 61: 113-148.
- [16] 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: 87-102.
- [17] Yeager J R, Clark J R, Mitchell W, et al. Enzyme Leach anomalies associated with deep Mississippi Valley-type zinc ore bodies at the Elmwood Mine, Tennessee[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1998, 61: 103-112.
- [18] Williams T M, Gunn A G. Application of enzyme leach soil analysis for epithermal gold exploration in the Andes of Ecuador[J]. Applied Geochemistry, 2002, 17: 367-385.
- [19] 罗先熔, 陈三明, 杜建波, 等. 地球电化学勘查法寻找不同埋深隐伏金矿的研究[J]. 矿物岩石, 2002, 22(4): 42-46.
Luo Xianrong, Chen Sanming, Du Jianbo, et al. Study of geoelectro-chemical method in search for different hidden deposits[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2002, 22(4): 42-46 (in Chinese with English abstract).
- [20] Kelley D L, Hall G E M, Cross L G, et al. The use of partial extraction geochemistry for copper exploration in northern Chile[J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2003, 3: 85-104.
- [21] 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.
Xie Xuejin, Wang Xueqiu. Recent developments on deep-penetrating geochemistry[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(1): 225-238 (in Chinese with English abstract).
- [22] Cameron E M, Hamilton S M H, Leybourne M I L, et al. Finding deeply-buried deposits using geochemistry[J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2004, 4(1): 7-32.
- [23] Hamilton S M, Cameron E M, McClenaghan M B, et al. Redox, pH and SP variation over mineralization in thick glacial overburden. Part I: methodologies and field investigation at the Marsh Zone gold property[J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2004, 4: 33-34.
- [24] Hamilton S M, Cameron E M, McClenaghan M B, et al. Redox, pH and SP variation over mineralization in thick glacial overburden. Part II: field investigation at Cross Lake VMS property[J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2004, 4: 45-58.
- [25] 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.
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 (in Chinese with English abstract).
- [26] Wang X Q, Chi Q H, Liu H Y, et al. Wide-spaced sampling for delineation of geochemical provinces in desert terrains, northwestern China[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2007, 7: 153–161.
- [27] Noble R R P, Stanley C R. Traditional and novel geochemical extractions applied to a Cu–Zn soil anomaly: A quantitative comparison of exploration accuracy and precision[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2009, 9: 159–172.
- [28] Xie X J, Lu Y X, Yao W S, et al. Further study on deep penetrating geochemistry over the Spence porphyry copper deposit, Chile[J]. *Geoscience Frontiers*, 2011, 2(3): 303–311.
- [29] Wang X Q, Xu S F, Zhang B M, et al. Deep-penetrating geochemistry for sandstone-type uranium deposits in the Turpan-Hami Basin, north-western China[J]. 2011, 26: 2238–2246.
- [30] 王学求, 叶荣. 纳米金属微粒发现——深穿透地球化学的微观证据[J]. *地球学报*, 2011, 32(1): 7–12.
Wang Xueqiu, Ye Rong. Findings of nanoscale metal particles: Evidence for deep-penetrating geochemistry[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2011, 32(1): 7–12 (in Chinese with English abstract).
- [31] 王学求, 张必敏, 刘雪敏. 纳米地球化学: 穿透覆盖层的地球化学勘查[J]. *地学前缘*, 2012, 19(3): 101–112.
Wang Xueqiu, Zhang Bimin, Liu Xuemin. Deep-penetrating geochemical exploration through cover[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(3): 101–112 (in Chinese with English abstract).
- [32] 王学求, 张必敏, 姚文生, 等. 覆盖区勘查地球化学理论研究进展与案例[J]. *地球科学*, 2012, 37(6): 1126–1132.
Wang Xueqiu, Zhang Bimin, Yao Wensheng, et al. New evidences for transport mechanism and case histories of geochemical exploration through covers[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(6): 1126–1132 (in Chinese with English abstract).
- [33] 叶荣, 张必敏, 姚文生, 等. 隐伏矿床上方纳米铜颗粒存在形式与成因[J]. *地学前缘*, 2012, 19(3): 120–129.
Ye Rong, Zhang Bimin, Yao Wensheng, et al. Occurrences and formation of copper nanoparticles over the concealed ore deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(3): 120–129 (in Chinese with English abstract).
- [34] 姚文生, 王学求, 张必敏, 等. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿深穿透地球化学勘查方法实验[J]. *地学前缘*, 2012, 19(3): 167–176.
Yao Wensheng, Wang Xueqiu, Zhang Bimin, et al. Pilot study of deep-penetrating geochemical exploration for sandstone-type uranium deposit, Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(3): 167–176 (in Chinese with English abstract).
- [35] 张必敏, 王学求, 贺灵, 等. 内蒙古半干旱草原区隐伏矿地球化学勘查方法试验[J]. *物探与化探*, 2013, 37(5): 804–810.
Zhang Bimin, Wang Xueqiu, He Ling, et al. Geochemical exploration for concealed deposits on semi-arid grasslands of Inner Mongolia[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2013, 37(5): 804–810 (in Chinese with English abstract).
- [36] 王学求, 张必敏, 姚文生, 等. 地球化学探测: 从纳米到全球[J]. *地学前缘*, 2014, 21(1): 65–74.
Wang Xueqiu, Zhang Bimin, Yao Wensheng, et al. Geochemical exploration: From nanoscale to global-scale patterns[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(1): 65–74 (in Chinese with English abstract).
- [37] Zhang B M, Wang X Q. Findings of gold nanoparticles by TEM in geogases and soils over a concealed gold deposit[C]. *Goldschmidt Conference*, 2014, 2014: 2828.
- [38] 张必敏, 王学求, 叶荣, 等. 纳米金属微粒的采集观测及其对地球化学勘查的意义[J]. *物探化探计算技术*, 2014, 36(6): 708–714.
Zhang Bimin, Wang Xueqiu, Ye Rong, et al. Collection and observation of nanoparticles and the significance for geochemical exploration[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, 36(6): 708–714 (in Chinese with English abstract).
- [39] Zhang B M, Wang X Q, Ye R, et al. Geochemical exploration for concealed deposits at the periphery of the Zijinshan copper–gold mine, southeastern China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, 157: 184–193.
- [40] Wang X Q, Zhang B M, Lin X, et al. Geochemical challenges of diverse regolith-covered terrains for mineral exploration in China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 73: 417–431.
- [41] Chao T T, Sanzalone R F. Decomposition Techniques[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1992, 44: 65–106.
- [42] 权志高, 李占双. 新疆十红滩砂岩型铀矿床基本特征及成因分析[J]. *地质论评*, 2002, 48(4): 430–436.
Quan Zhigao, Li Zhanshuang. Geological characteristics and genesis of the Shihongtan sandstone-type Uranium deposit, Xinjiang[J]. *Geological Review*, 2002, 48(4): 430–436 (in Chinese with English abstract).