我国深部找矿研究进展综述*

曹新志[a], 张旺生[b], 孙华山[a]

(中国地质大学 a. 资源学院; b. 地球科学学院, 武汉 430074)

摘 要: 进入 21 世纪以来, 深部矿已成为我国矿产勘查的重要对象, 从而标志着矿产勘查进入了一个新的阶段。由于深部矿相对浅部矿具有埋深大、矿化信息弱、综合地质研究程度低的特点, 使传统成矿理论的指导作用和勘查技术方法应用的有效性受到较大的影响, 造成深部矿勘查的难度加大。为了减少深部矿勘查的盲目性和风险性, 人们重视和加强了深部找矿地质成矿理论和技术方法的研究, 并取得了一定的进展。研究资料表明, 成矿系统、第二矿化富集带、矿床成矿深度厘定、矿床深部成矿特征、矿田深部构造以及深部找矿前景的定量评价等研究内容已成为当前我国深部找矿工作中地质成矿理论研究的热点, 大深度物探技术和深穿透的化探新方法、高分辨率航卫遥感技术以及大深度的钻探技术等方法的研制和应用已成为深部找矿技术的发展方向。

关键词: 深部找矿; 成矿理论; 技术方法; 研究进展

中图分类号: P62 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-7849(2009)02-0104-06

进入 21 世纪以来, 随着我国矿产勘查工作的持续进行和国民经济建设对矿产资源需求的不断增长, 围绕深部找矿的有关研究和实践工作已引起有关管理部门和业内人士的高度关注和重视。在当前开展的危机矿山进一步的矿产勘查以及我国经济相对比较发达的中东部地区的矿产勘查工作中, 深部矿基本上是最主要的工作对象。开展深部矿的研究和勘查工作, 对于缓解目前矿产资源日益匮乏、供需关系严重失衡都有着非常直接的现实意义。深部矿勘查已成为矿产勘查领域内继隐伏矿勘查之后的又一主要勘查对象。

但是, 目前人们普遍关注的深部矿勘查与 20 世纪 70 年代初期兴起的隐伏矿勘查并无本质上的差别。严格地讲, 目前提及的/深部矿0属于/隐伏矿0中埋藏深度较大的部分。对于深部矿和浅部矿的具体深度的界定目前在学术界尚无定论, 但一般是将距现今地表 500 m 以下的称之为深部矿, 反之则称之为浅部矿。这种划分基本上是参照我国计划经济年代由于受当时的开采技术条件所限, 固体矿产的勘查一般对地表 500 m 以下的资源只做远景控制、不做详细调查的勘查要求。

由于深部矿相对于浅部矿的埋藏深度大, 造成人们对其矿床地质特征了解较少, 矿化信息多为间接信息, 已有的勘查技术方法的有效性进一步降低, 因而勘查难度、勘查投资以及勘查风险也相应增大。

针对深部矿勘查难度较大的现状, 为了减少深部矿勘查的盲目性和风险性, 提高深部矿勘查工作的有效性, 目前深部找矿的地质成矿理论研究和深部找矿技术与方法的研究已成为深部矿勘查研究的热点。前者如成矿系统[1]、第二矿化富集带、矿床成矿深度厘定[2]、矿床成矿特征、矿田深部构造的研究[3]以及深部找矿前景的定量评价[4]等; 后者如物探的高精度磁法、瞬变电磁法(TEM)、可控源音频大地电磁法(CSAMT)、金属矿地震方法试验等大深度探测技术的研制和应用[5-7], 化探的活动态金属离子法、酶浸析法、地电化学法、地球气法等深穿透方法的探索等[8-9]。但总的来看, 目前我国针对深部矿勘查的地质成矿理论和深部找矿技术、方法的研究水平与勘查实践的要求还有着较大的差距, 因而导致深部矿的勘查工作仍存在着较大的盲目性。国外由于对深部找矿开展较早且十分重视, 深部找矿理论和技术方法已日趋成熟, 已有的经验[10]表明, 政府的强力支持、矿业企业的高强度投入、基于成矿理论建立的矿床模型的指导、新技术新方法的联合探测、综合信息的提取、大密度的工程施工是深部找矿取得成功的关键。

1 我国深部找矿的地质成矿理论研究进展

受传统技术水平所限现有的勘查技术手段对深部矿勘查的有效性非常有限, 因此利用地质成矿理论指导深部矿勘查受到了业内人士的高度重视[11-14]。

* 收稿日期: 2008-11-10 编辑: 禹华珍

基金项目: 中国地质调查局项目/西藏念青唐古拉山地区铜铅锌银矿产资源调查评价0(1212010630103)

作者简介: 曹新志(1956-), 男, 教授, 主要从事成矿规律、成矿预测、矿产勘查与评价方面的科研和教学工作。

1.1 关于对矿床形成深度和产出深度厘定的探讨

翟裕生等[1] 认为, 矿床的形成深度和产出深度是两个概念, 不能混淆。深部矿是指目前埋藏于深部的矿床, 但其原始形成时并非一定形成于深部, 因为后期的地壳升降或大的构造活动都可以使原先形成于地表附近的矿床下降到深部; 反之也可以使原先形成于地下深部的矿床上升到浅部或地表。

矿床的原始成矿深度, 即垂向上的成矿范围大小是一个影响到深部找矿前景大小的先天条件。这是由于不同类型的成矿作用的原始成矿深度是不同的(表 1), 因而与其直接相关的矿产资源量大小也是有差别的。从表 1 中可以看出, 在不考虑后期改造的前提下, 几乎所有内生成矿作用的成矿深度都比较大, 都可以形成所谓的深部矿床。矿床原始成矿深度的确定是成矿学研究的主要内容之一。一般可以根据矿床类型来判定矿床(或矿化)的原始成矿深度, 例如与基性、超基性有关的岩浆矿床以及与花岗伟晶岩有关的稀有金属矿化的原始成矿深度一般都比较大。与热液成矿作用有关的稀有金属及多金属等矿化由于有所谓的高、中、低温热液成矿之分, 因而成矿深度范围变化较大, 需要作进一步的判定研究, 张德会等[2] 认为目前一般多采用流体地球化学方法来确定热液矿床的形成深度, 吕古贤[15] 通过构造校正的途径来测算具体热液矿床的成矿深度。

表 1　不同成矿作用的形成深度(据文献[223]改编)

Table 1　The depth of different mineralizations

成矿作用或矿床类型	形成深度/km
与超基性岩有关的铬铁矿床	20~ 30
与基性、超基性岩有关的硫化铜镍矿床	10 左右
与热液成矿作用有关的稀有金属及多金属等矿化	从近地表~ 8
与花岗伟晶岩有关的稀有金属矿化	2~ 20
夕卡岩化和斑岩型矿化	4~ 5
火山岩型(包括次火山岩型)	小于 2
热卤水成矿作用	一般小于 2
沉积成矿作用	和沉积盆地深度有关
与韧性剪切带有关的成矿作用	一般为 3~ 5

不同类型矿床目前的产出深度因受后期地质构造改造作用的不同而不同。矿床目前产出深度的确定对深部矿勘查工作有着直接的指导作用, 它是当前深部矿勘查和研究中的热点和难点所在, 深部矿勘查和研究的核心任务之一就是界定深部矿可能的赋存位置。但是, 到目前为止, 深部矿产出深度的界定并没有得到较好的解决, 有关认识多是通过具体的勘查工程实施后的后验判定所得到。有必要指出, 深部矿床目前产出深度的界定将是今后相当长时期内深部矿勘查和研究的重点难题之一。

1.2 成矿系统研究现状及其在深部矿勘查中的意义

成矿系统是指在一定的时空域中, 控制矿床形成和保存的全部地质要素和成矿作用动力过程, 以及所形成的矿床系列、异常系列构成的整体, 是具有成矿功能的一个自然系统[16-17] 。成矿系统是一种自然历史过程, 绝大多数成矿系统不能直接观察到, 但各种信息被保存在现存矿床及有关的异常中, 成矿系统研究是通过从现在的矿床特征和现存的地质环境入手, 反推其原来的成矿环境和成矿过程, 并强调把矿床形成过程和产物以及形成后的改造过程作为一个必然的有机整体进行分析, 从而为深部找矿的前景评价以及深部找矿中非常重要的矿床当前可能产出状态的厘定提供参考依据。

成矿系统一词自提出以来, 众多学者就成矿系统开展了系统的研究并取得了大量的研究成果[1-2,18] 。近几年, 翟裕生等[1, 16-17] 一直致力于成矿系统在深部预测找矿工作中指导作用的研究, 明确提出通过研究成矿系统的发育完整程度、发育深度(图 1)以及建立成矿系统网络的三维结构与矿床分带(图 2), 可以在深部找矿中起到由已知到未知、由此及彼、由浅入深的指导作用。正是由于成矿系统理论对于深部预测找矿工作可以起到较直接的指导作用, 因而在当前的深部找矿工作中日益受到人们的重视。

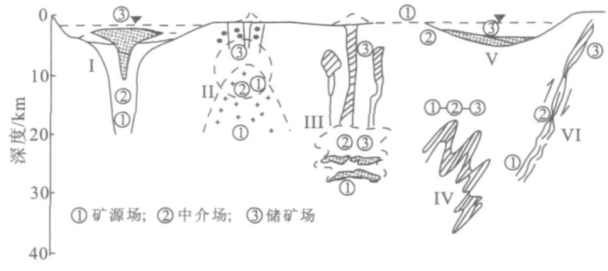


图 1　主要成矿系统的发育深度概图[1]

Fig. 1　Depths of the occurrence of the major metallogenic system

Ⅰ. VMS、SEDEX 成矿系统; Ⅱ. 花岗岩类岩浆热液成矿系统; Ⅲ. 镁铁-超镁铁质岩浆成矿系统; Ⅳ. 变质-受变质成矿系统; Ⅴ. 沉积成矿系统; Ⅵ. 韧性剪切带有关成矿系统

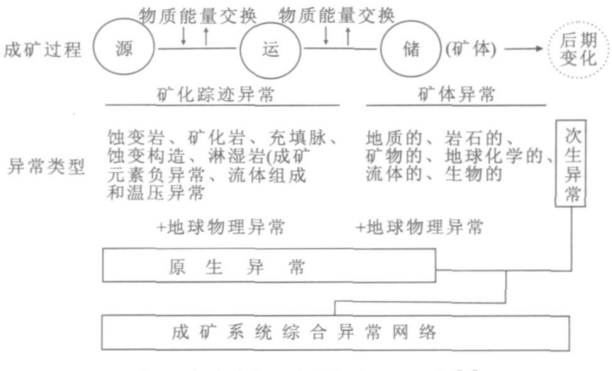


图 2　成矿系统及综合异常网络图解[1]

Fig. 2　Diagram showing the network of the metallogenic system and the composite anomaly

1.3 第二矿化富集带研究现状及其在深部矿勘查中的意义

迄今为止, 学术界对所谓的第二矿化富集带尚无明确的定义。按笔者的理解, 所谓的/ 第二矿化富集带0应是指在已知矿集区的深部或已知矿区深部的新的矿化富集空间, 其与上部矿化富集带, 即第一矿化富集带之间由所谓的无矿(或贫矿) 带所分隔。腾吉文[6] 称之为/ 第二成矿空间0或/ 第二找矿空间0。常印佛等[19] 认为长江中、下游矿集区的深部可能存在第二矿化富集带; 翟裕生[20] 认为小秦岭金矿带深部可能存在第二矿化富集带; 吕古贤等[15, 21] 认为胶东金矿区的深部可能存在第二矿化富集带等。

进入 21 世纪以来, 随着深部找矿工作的普及和理论研究工作的深入, 第二矿化富集带对深部找矿工作的指导作用重新受到人们的高度重视, 在论及深部找矿的有关文献中几乎不可回避地都要论及第二矿化富集带的有关问题[4, 21, 22] 。

第二矿化富集带的研究始于隐伏矿床找矿的研究, 发展于深部找矿研究热潮之中。/ 第二矿化富集带0的提出对区域及矿区深部找矿前景的评价以及具体勘查工程的实施都可以起到较好的指导作用, 它为开拓第二找矿空间或 / 矿下找矿0或/ 矿外找矿0提供了重要的理论依据。在针对第二矿化富集带的理论研究中, 翟裕生[20] 认为对深部第二矿化富集带的研究应结合第一矿化富集带的已知成矿特征进行, 在具体的地质研究中应从深部的围岩、构造情况是否与浅部一致? 矿床(矿体)类型是否与浅部一致? 是否出现新的矿种和矿床类型? 成矿时代是否与浅部一致? 浅部带与深部带的划分标志等方面入手。常印佛等[19] 认为, 可用构造物理化学方法在长江中、下游矿集区寻找金属矿床深部的第二矿化富集带。但迄今为止, 第二矿化富集带的理论研究程度仍非常有限。例如, 目前第二矿化富集带的含义在学术界尚无明确的界定, 第二矿化富集带的形成机制、划分标志、与第一矿化富集带成矿特征的差异性对比以及由于第二矿化富集带自身的产出特征(埋藏深、矿化信息少、矿化信息弱等)对矿产勘查技术方法的影响等方面尚缺少深入全面的研究和总结。这些都有待研究工作的进一步开展和深入。

1.4 深部矿勘查中的综合地质研究现状

大量的勘查工作实践证明, 综合地质研究程度的高低是影响矿产勘查工作成败的先决条件, 这在深部矿勘查中尤为突出。由于深部找矿工作具有高度的探索性, 需要从多学科进行综合研究, 其中包括地质、矿产、勘查技术等相关学科的全部内容。但单就地质、矿产来说, 它涉及到成矿地质背景、矿床地质、成矿规律等方面的研究内容。针对深部矿勘查中的综合地质研究内容, 一些国家重视开展深部地壳演化、壳幔相互作用、地壳结构与成分类型、岩浆与成矿作用的响应、地壳深部动力学特征与成矿等理论问题的研究[23224] 。2003 年由俄罗斯沃龙涅日国立大学出版的5新世纪之交矿床预测、普查及研究问题6一书就发表了一系列有关深部地质成矿问题的论文[25226] 。

国内有关的专家学者[1, 324, 27] 分别从成矿地质作用、矿床成矿规律、地壳深部结构研究等不同的侧面提出了自己的认识和见解。例如, 叶天竺等[3] 最近提出深部矿勘查中的综合地质研究应从成矿地质作用特征研究入手, 研究内容包括成矿作用的深度、与成矿作用有关的控矿因素、矿田构造、成矿作用标志等, 并对上述有关内容的研究意义、研究要点、注意事项和应用实例进行了阐述; 翟裕生等[1] 认为/ 进行深部找矿的关键是要深入研究区域和矿区的成矿规律, 重点是成矿环境、成矿系统和成矿演化, 以便全面认识矿床之所以产在某一深度空间的原因及其制约因素, 运用适当手段发现深部矿床0; 赵鹏大[4] 认为深部找矿中要加强地壳深部结构的研究, 要重视深部找矿的经济/ 回报率0和勘查项目的/ 转化率0, 并强调以/ 求异0准则为指导的成矿定量预测的重要性。

笔者认为深部矿勘查中的综合地质研究要点应根据区域性深部找矿和矿区深部找矿的不同而不同。对于区域性深部找矿工作, 综合地质研究首先要判定与深部成矿有关的地质背景, 进而确定主要的控矿因素组合种类及其控矿作用的相互关系, 在此基础上结合区域内已知矿床的成矿作用和成矿特征, 总结区域成矿规律, 最终建立矿床成因模型, 从而指导区域内具体的深部矿勘查工作, 在整个勘查系统中起到地质研究的先行、指导作用。对于矿区深部找矿工作, 综合地质研究则应首先侧重于查明主要控矿地质条件的局部化变化特征, 特别是查明直接的赋矿地质部位, 进而总结矿体(床) 空间定位的规律, 最终建立矿体(床) 产状定位模型, 以指导矿区深部矿勘查工程的具体实施[28] 。

总体来看, 由于受现有地质成矿理论研究本身的探索性和不完善性、地质成矿事件的复杂性和变化性以及研究手段的技术水平所限, 目前在深部矿勘查中综合地质研究的程度非常有限。与深部矿勘查有关的深部成矿地质环境、深部成矿特征、深部成矿规律的研究急待加强和提高。

2 深部找矿的技术与方法研究进展

由于深部矿勘查相对于浅部矿勘查具有难度

大、投资大、风险性大的特点, 迫使矿产勘查人员必须依靠科学技术的进步来发展和形成新的找矿能力。深部找矿一方面如前所述更加依赖于地质成矿理论对预测找矿的指导作用, 另一方面也必须向新技术、新方法寻求帮助, 特别是针对深部矿埋深较大、信息弱和干扰大的特点要求传统的找矿技术方法与手段在探测深度、探测灵敏度以及抗干扰方面能有较大的改进和提高, 因而出现了所谓的大深度物探技术和深穿透的化探新方法、高分辨率航卫遥感技术以及大深度的钻探技术等方法。限于篇幅, 以下仅对大深度物探技术和深穿透的化探新方法作简单的介绍。

2.1 深部找矿中的大深度物探技术研究进展

传统的物探方法从电、磁、重等多方面已经形成了众多的具体方法, 这些方法对不同物性的矿化体有着较好的针对性。但传统物探方法的一大缺陷是探测深度有限, 其有效探测深度一般小于 300 m。为了有效地探测深部隐伏矿床(体), 物探方法面临的重要问题之一就是加大探测深度和提高分辨率, 通过研制深度大、分辨率高、效率高、轻便化、抗干扰的物探新仪器, 形成新的物探技术方法。经过多年的发展, 目前瞬变电磁法(TEM)、可控源音频大地电磁法(CSAMT)、高精度磁法、井中物探、金属矿地震勘探以及大比例尺航空物探等方法已逐步应用于金属矿勘查中[5, 7, 29230], 并在深部矿勘查中取得了较好的效果。

(1)瞬变电磁法(TEM)　TEM 与传统的直流电法、激电方法相比, 其探测深度明显要大, 垂向分辨率也高, 易于探测到覆盖层下的良导电体, 探测深度可达 300~ 400 m。20 世纪 80 年代以来, 利用该方法相继发现了一批隐伏的、埋藏较深的金属矿床。1991 年澳大利亚发现的欧内斯特亨利(Emest Her2 ry)黄铁矿型铜矿, 埋深近百米[5]。目前, 瞬变电磁法(TEM)在我国已处于普及阶段。

(2)可控源音频大地电磁法(CSAMT)　CSAMT 是一种主动源大地电磁测量方法, 通过在一定范围内逐步改变发射机与接收机的频率, 对不同深度进行取样, 其探测深度从几十米到 1 km 左右[5]。1981 年日本九州岛的菱刈金矿床就是在用 CSAMT 系统识别出低阻异常带和高阻异常带后经钻探验证发现的[5]。招金集团在 7 处矿山应用该方法预测靶区, 经验证有 6 处找到了深达 800~ 1 000 m的深部矿体[31]。可控源音频大地电磁法目前在我国已进入推广应用阶段。

(3)金属矿地震勘探法　金属矿地震勘探法是利用人工激发的地震波在弹性不同的地层内的传播规律来勘测地下的地质情况, 过去这种方法在油气、煤田、盐岩和一些层状沉积矿床中经常使用。随着地震数据在采集、处理和解释方面的改进和完善, 该方法愈来愈多地用于金属矿的勘查[32233], 尤其是在研究程度较高的具层状构造的沉积型矿产的矿区用于查明深部控矿构造, 划分岩性、岩相, 甚至直接进行深部隐伏矿的寻找。在加拿大萨德伯里、诺兰达、马塔加米等许多著名的金属矿区, 通过改进反射地震数据的收录和处理方法, 获得了这些矿区深部构造和含矿岩层分布的信息, 对深部找矿起到了较好的指导作用。金属矿地震勘探法已逐渐发展成为一种在研究程度较高的矿区寻找深部隐伏矿的有效手段, 但该方法目前在我国尚待进一步推广。

(4)井中物探方法　井中物探方法可获取井壁四周和钻孔底部的信息, 这对发现井旁或井底的盲矿是十分重要的。井中物探采用的方法是多样的, 如井中磁测、井中瞬变电磁法、井中激发极化法和井中充电法等。井中瞬变电磁法是西方国家使用较多且找矿效果较好的一种方法, 工作深度可达 2 500~ 3 000 m, 可探测井周半径为 200~ 300 m 范围内的良导体。在加拿大萨德伯里铜镍矿区用深部钻孔加井中瞬变电磁测量组合方法, 从 20 世纪 80 年代中期到 90 年代相继发现了一批深部铜镍硫化物矿床, 包括埋深为 1 280 m 的林兹里(Linsley)铜镍矿床、埋深为 2 400 m 的维克多(Victor)铜镍矿床和埋深为 1 000~ 1 500 m 的新麦克里达(New McCeedy)铜镍矿床等。哈萨克斯坦应用井中充电法在库斯穆龙(Kusmurun)矿田成功地探测到埋深为 700 m 的块状含铜黄铁矿矿体[5]。目前, 井中物探方法在我国的深部矿勘查中已得到普及和推广。

(5)大比例尺航空物探方法　航空物探方法具有远距离快速获取地质信息的能力, 也是区域地质填图的一个重要组成部分。利用航空物探资料, 结合区域地球化学和地质理论可用来研究区域控矿因素, 确定隐伏矿可能存在的靶区。航空物探系统本身的精度和综合配套能力也在不断提高, 形成由航测(包括磁梯度)、电磁、放射性等方法构成的综合系统, 再配合全球卫星定位系统(GPS), 可在区域普查以及矿区深部找矿中发挥作用。2006 年在湖北大冶的深部找矿中试验用航空磁测圈定深部找矿靶区并取得了一定的实际效果[34]。

2.2 深部找矿中的深穿透化探新方法研究进展

针对深部矿勘查中的深穿透地球化学探矿方法研究也取得了一定的进展, 这些新方法主要有: 活动态金属离子法、酶浸析法、地电化学法、地球气法、地气法(Geogas)、元素分子形式法(MFE)、离子晕法等[5, 829]。

(1)活动态金属离子法(moile metal ion, 缩写

为 MMI) 这种方法是用一种或几种弱的金属试剂提取活动态的金属离子, 主要分析 Cu、Pb、Zn、Cd、Ni、Au、Ag 和 Pd 等[5] 。这种方法所获得的地球化学异常重现性较好, 并能探测到地下 700 m 深的矿体[5] 。

(2)酶浸析法 酶浸析法主要根据运积物土壤中非晶质所吸收的微量元素能反映深部基岩的地球化学特征这一原理进行探测的。这种方法在冰积物覆盖区尤为有效, 能探测的深度在 300 m 以上。

(3)地电化学法(CHIM) 地电化学法包括元素赋存形式法、热磁地球化学法、扩散提取法和部分金属提取法等方法。其中, 部分金属提取法是其核心, 亦称电提取技术。元素赋存形式法、热磁地球化学法和扩散提取法又称偏提取技术。这些方法都能反映深部矿化信息, 能够探测到覆盖层(厚度超过 150 m) 和基岩(厚度超过 500 m) 之下的深部矿化。

(4)地球气法(NAMEG) 地球气(Earth gas) 是一种以微气泡形式携带超微细颗粒金属达到地表的深部气体。地球气可能不是局部的, 而是全球性的[5, 35] 。在各种尺度上分析这种带至地表的地球气的方法称为地球气法。谢学锦等[36] 已在中国山东金矿、乌兹别克斯坦穆龙套金矿和澳大利亚奥林匹克坝铜2铀2金矿的战略性找矿中运用该方法进行了试验。

类似的方法还有地气法、元素分子形式法和离子晕法等。

以上这些地球化学新方法中的活动态金属离子法和酶浸析法已开始应用于隐伏区的矿产勘查, 其他方法远不如这两种方法受到重视, 而地电化学法正迅速地获得发展。

3 几点认识

(1)深部矿已成为现阶段我国中、东部地区以及今后我国大部分地区金属矿的主要找矿对象, 表明我国的找矿工作已进入一个新的阶段, 即找矿对象由 20 世纪 50~ 60 年代的露头矿、易识别矿 y 70 年代的易识别矿、浅部隐伏矿 y 80 年代的浅部隐伏矿、难识别矿、新类型矿 y 90 年代以来的难识别矿、新类型矿和深部隐伏矿。

(2)找矿阶段的变化, 特别是找矿对象由浅部隐伏矿 y 深部隐伏矿的变化, 导致了找矿思维和找矿策略以及找矿技术方法的变化, 具体体现在深部矿找矿地质成矿理论和找矿技术方法的变化上。如在深部矿找矿地质成矿理论研究中提出和加强了对矿床形成和产出深度的研究, 重视对成矿系统的研究和恢复, 提出了第二矿化富集带的找矿思路; 针对深部成矿特点, 在找矿技术方法研究方面出现了一些大深度的物探技术和深穿透的化探新方法等。

(3)深部矿勘查地质成矿理论和找矿技术方法的研究程度目前还比较低, 深部矿的有关研究尚任重而道远。具体如对第二矿化富集带的成因机制缺少深入的探讨, 深部矿的成矿条件、成矿特征以及空间定位规律有待开展系统的研究, 有关的针对深部矿勘查而提出的专门性的技术方法本身尚处于探索试验阶段; 另外, 随着深部矿勘查的持续进行, 必将有新问题的发现和提出。这些问题都有待研究工作的逐步深入。

参考文献:

[1] 翟裕生, 邓军, 王建平, 等. 深部找矿研究问题[J]. 矿床地质, 2004, 23(2): 142- 149.

[2] 张德会, 周圣华, 万天丰. 矿床形成深度与深部成矿预测[J]. 地质通报, 2007, 26(12): 1 509- 1 518.

[3] 叶天竺, 薛建玲. 金属矿床深部找矿中的地质研究[J]. 中国地质, 2007, 34(5): 855- 869.

[4] 赵鹏大. 成矿定量预测与深部找矿[J]. 地学前缘, 2007, 14(5): 142- 149.

[5] 戴自希, 王家枢. 矿产勘查百年[M]. 北京: 地震出版社, 2004.

[6] 腾吉文. 第二度空间金属矿产勘查与东北战略后备基地的建立和可持续发展[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(4): 633- 651.

[7] 藤吉文. 强化开展地壳内部第二深度空间金属矿产资源地球物理找矿、勘探和开发[J]. 地质通报, 2006, 25(2): 767- 771.

[8] 谢学锦. 战术性与战略性的深穿透地球化学方法[J]. 地学前缘, 1998, 5(1- 2): 171- 183.

[9] 李惠, 岑况, 沈镛立, 等. 危机矿山深部及其外围盲矿预测的化探新方法及其最佳组合[J]. 地质与勘探, 2006, 42(4): 62- 66.

[10] 王瑞江. 国外矿产资源深部找矿勘探的现状与趋势[C]M佚名. 全国深部找矿工作研讨会论文(内部交流). 2007.

[11] 王登红, 许建祥, 张家菁, 等. 华南深部找矿有关问题探讨[J]. 地质学报, 2008, 82(7): 866- 872.

[12] 侯满堂, 齐文. 陕西深部找矿进展及找矿建议[J]. 陕西地质, 2007, 25(2): 1- 10.

[13] 王登红. 地幔柱及其成矿作用[M]. 北京: 地震出版社, 1998.

[14] 余龙起. 关于深部找矿最佳部位的地质预测问题[J]. 吉林地质, 1985, (4): 53- 58.

[15] 吕古贤. 山东省玲珑金矿田成矿深度的研究与测算[J]. 科学通报, 1995, 40(15): 1 399- 1 402.

[16] 翟裕生. 论成矿系统[J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 13- 27.

[17] 翟裕生, 邓军, 崔彬, 等. 成矿系统与综合地质异常[J]. 现代地质, 1999, 13(1): 99- 104.

[18] 李人澍. 成矿系统分析的理论与实践[M]. 北京: 地质出版社, 1996.

[19] 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 长江中下游铜铁乘矿带[M]. 北京: 地质出版社, 1991.

[20] 翟裕生. 深部找矿研究(内部讲课)[Z]. 昆明, 2006205.

[21] 吕古贤, 武际春, 郑小武, 等. 山东省玲珑金矿田深部资源第二富集带的研究和预测[J]. 矿床地质, 2006, 25(增刊): 435- 438.

[22] 伊丕厚, 宋明春. 加强深部找矿开辟胶东金矿第二找矿空间[J]. 山东国土资源, 2008, 24(1): 36- 39.

[23] Shahabpour J. The role of deep structures in the distribution of some major ore deposits in Iran, NE of the Zagros thrust zone[J]. Geodynamics, 1999, 28: 237- 250.

[24] Groves D I, Goldfarb R J, Gebre2Mariam M, et al. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types [J]. Ore Geology Reviews, 1998, 13: 7- 27.

[25] º Ê¿º¿ , ÃÄÀ¾º¿ , Âº¿¶¿½À . ¶ÂÃÁ¶¼Ãº³ Í´½Å²º¿À´À º¹ÁÉ¶¿ºÑ ÁÀÄ¶¿Èº ±½Î¿À´À ÂÅµÀ¿ÀÃ¿À´À ÃÅÁ¶Â¼À¾Á½¶½Ã±/ ±±±¿À ¡¼ÅÃÃ¼º» Âº Æ0 [M] M ÂÀ²½¶¾Í ÁÂÀ´¿À¹º ÂÀ³ ±ºÑ, ÅÀºÃ½À³ º º¹ÁÉ¶¿ºÑ ¾¶ÃÄÀÀÂÀ, µ¶¿º» ÅÀ½¶¶¿Í Ç ºÃ¼ÅÁ-¶¾Í Ç ¿±ÁÂÂÀ´¶ XXI ³¶¼± ÀÂÀ¿¶, : ¹µ ÀÂÀ¿¶, Ã¼Á´À´ÀÃÄµ±ÃÃ³¶¿¿À´À Å¿º³¶ÂÃºÄ¶Ã±, 2003.

[26] ÀÃÁ¶¶³ ± . ½Å²º¿¿À¶ ÃÃÂÀ¶¿º¶ ´±³ÀÄÄÀÉ¿À» º²ºÂº ÁÀ Â¶¹Å½Î ±±±¼ ¾±¿ºÄÀÄ¶½½ÅÂº É¶Ã¼Ç ÏÀ¿µº ÂÀ³ ±¿º» [M] M ÂÀ² ½¶¾Í ÁÂÂÀ´¿À¹ºÂÀ³ ±¿ºÑ, ÁÀºÃ¼À³ º º¹ÅÉ¶¿ºÑ ¾¶ÃÄÀÀÂÀ, µ¶¿º» ÁÀ½¶¹ ¿Í Ç ºÃ¼ÀÁ-¶¾Í Ç ¿± ÁÀÂÀ´¶ XXI ³¶¼± ÀÂÀ¿¶, : ¹µ ÀÂÀ¿¶, Ã¼Á´À ´ÀÃÅµ±ÃÃ³¶¿¿À´À Å¿º³¶ÂÃºÄ¶Ã±, 2003.

[27] Pei R F, Peag C, Xiong Q Y. Deep tectonic processes and superaccumulation of metals related to granitoids in the Nanling metallogenic province, China[J]. Acta Geological Sinica, 1999, 73(2): 181- 192.

[28] 曹新志, 高秋斌, 徐伯骏, 等. 矿区深部矿体定位预测的有效途径和方法研究))) 以山东招远界河金矿为例[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2005.

[29] 周平, 施俊法. 瞬变电磁法(TEM)新进展及其在寻找深部隐伏矿中的应用[J]. 地质与勘探, 2007, 43(6): 63- 69.

[30] 王志豪, 张小路, 王钟. 大功率瞬变电磁在广西大厂外围深部找矿中的应用[J]. 物探与化探, 2006, 30(3): 194- 198.

[31] 何明勤. 深部找矿(内部讲课)[Z]. 昆明, 2008208.

[32] 梁光河, 蔡新平, 张宝林, 等. 浅层地震勘探方法在金矿深部预测中的应用[J]. 地质与勘探, 2001, 37(6): 29- 331.

[33] 梁光河, 蔡新平, 华伟. 隐伏金矿勘探中的地震勘探方法[J]. 矿床地质, 2002, 21(增刊): 1 164- 1 167.

[34] 熊盛青, 于长春, 王卫平. 直升机大比例尺航空物探在深部找矿中的应用前景[J]. 地球科学进展, 2008, 23(3): 270- 275.

[35] 王学求, 谢学锦. 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.

[36] 谢学锦. 巨型矿床的地表地球化学显示[C] M张炳熹. 面向 21 世纪的应用地球化学))) 谢学锦院士从事地球化学研究 50 周年. 北京: 地质出版社, 2002: 425- 432.

Progress in the Study of Deep Exploration in China

CAO Xin2zhi[a], ZHANG Wang2sheng[b], SUN Hua2shan[a]

(a. Faculty of Earth Resources; b. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: In this century, deep mineralization has become an important object of mineral exploration in China, thus starting a new stage of development. Compared with shallow mineralization, deep mineralization is characterized by deep burial depth, weak mineralization and a low level of synthetical geological study. This, to some extent, influences the application of traditional metallogenic theory as well as the exploration technology and casues more difficulties in the exploration of deep minerals. In order to reduce the risk in the deep mineral exploration great importance has been attached to the study of metallogenic theory and technical methods about deep exploration, such as the metallogenic systems, the second enrichment belt, the modification of metallogenic depth, the characteristics of deep mineralization, the deep2seated structure of ore field and the quantitative evaluation of the prospect of deep exploration. The development and application of deep geophysical exploration techniques, deeply penetrated geochemical exploration methods, remote sensing technology with high resolution and deep drilling technology have become the new evolutive orientation of technology about deep exploration.

Key words: deep exploration; metallogenic theory; technology and method; research progress