

曹令敏. 隐伏矿床定位预测理论和技术的研究现状及发展趋势. 地球物理学进展, 2010, 25(3): 1037~1045, DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-2903. 2010. 03. 044.

Cao L M. The status and trends of researching on the theory and technique of the location prediction for concealed orebody. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2010, 25(3): 1037~1045, DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-2903. 2010. 03. 044.

隐伏矿床定位预测理论和技术 的研究现状及发展趋势

曹令敏

(中国地质大学(北京)地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室, 北京 100083)

摘 要 隐伏矿床定位预测是当前成矿学和勘探学领域中研究的热点. 本文从成矿系统思想的拓展、模型找矿的进展、GIS 在成矿规律中的应用和新技术、新方法的引入四个方面, 应用地球物理方法“攻深探盲, 寻找大矿、富矿”, 对隐伏矿床定位预测的研究现状及进展进行了全面的综述, 并在此基础上, 探讨了隐伏矿床预测理论和技术的发展趋势, 认为未来隐伏矿床预测研究将会向着定量化、数字化、精细化和多方位化的方向发展.

关键词 隐伏矿体, 成矿系统, 地球物理

DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-2903. 2010. 03. 044

中图分类号 P631

文献标识码 A

The status and trends of researching on the theory and technique of the location prediction for concealed orebody

CAO Ling-min

(State Key laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract The location prediction for concealed orebody has been paid more attention in the area of metallogeny and prospecting. The paper summarizes the researching actuality and development of the location prediction for concealed orebody. This contains aspects of the expansion of thoughts of mineralizing, the development of metallogenic mode, the application of GIS to metallogenic regularities and the intervention of new technique and methods. Geophysics is used to detect the deep and blind zone and to find large and rich ore. On the basis of these, the paper discusses the developing trends of the location prediction for concealed orebody which will be quantitative, digital, highly-precise and multi-domains in the future.

Keywords concealed orebody, ore-forming system, geophysics

0 引 言

随着现代科学技术的飞速发展以及人类对矿产需求的日益增加, 支持国民经济可持续发展的所需矿产(主要是金属矿)一直需要进口, 各种露头、地表矿、浅部矿和易识别矿越来越少, 未来勘探将不再是以直接检测矿化的简单勘查为主的传统方式, 找矿工作正面临着—场新的革命, 寻找隐伏矿、盲矿和难识别矿必将成为 21 世纪首要勘查任务. 正因如此,

隐伏矿体定位预测已经成为成矿学研究领域中的前沿和重点, 在全球范围内对推动成矿学的发展和找矿工作都具有很大的理论和经济意义. 而应用新理论、新技术、新方法提高成矿预测水平和找矿效果, 最大限度地减少投入风险, 实现找矿工作重大突破, 必将成为今后找矿工作的指导思想^[1]. 其中, “应用地球物理方法攻深探盲, 寻找大矿、富矿”^[2]和“区域约束局部, 深层制约浅层”^[2]的指导思想已在隐伏矿床预测中得到广泛应用.

收稿日期 2009-11-21; 修回日期 2010-03-15.

作者简介 曹令敏, 1983 年生, 吉林人, 博士研究生, 目前主要从事计算地球物理研究工作. (E-mail: caolingmin@sohu.com)

1 隐伏矿床定位预测的研究现状

1.1 成矿系统思想

矿床学研究十分复杂,矿床的形成、分布和产出多种多样,其成因和分布涉及多种因素、多种地质条件,如何深入研究矿床形成和演化规律,首先必须解决思路和方法问题。

成矿系统一词最早于 20 世纪 70 年代初见于俄文地质辞典(卷二)^[4],被解释为“由成矿物质来源、运移通道和矿化堆积场所组成的一个自然系统”。之后, M. JI. 马祖洛夫(1985)^[4]、B. M. 契克夫(1987)^[4]、A. L. Jasques(1994)^[5]以及我国学者程裕淇^[3]、於崇文(1994,1998)^[6]、翟裕生(1999)^[8]、李人澍等也先后从不同的角度对成矿系统提出了不同的定义。李人澍(1996)以陕西秦巴地区为例进行了区域含矿性评价和成矿预测,探索了成矿研究的新途径^[4]。

通过研究某一类矿床的成矿规律进行成矿预测称为相似类比预测理论^[12]。为弥补“类比”原理找矿的不足,上世纪 90 年代,提出了以“求异”原理为基础的“地质异常理论”^[15]。对于隐伏矿体的预测来说,“求异”理论打破了已有观念,提供了一种全新的思维。之后,“偏在性”理论^[21]的提出也为特大型隐伏矿床的定位预测提供了新的思路。

成矿系统及其演化的研究要求全面研究和认识成矿规律,从矿床个体、局部、静态研究扩展到区域、整体、动态的研究,从而建立起综合找矿、综合评价的理论基础。它通过完善找矿思路和评价准则,来启发人们既要研究矿床的形成条件,又来研究矿床的保存条件。再者,从成矿系统的整体出发,可以由已知到未知发现新类型矿床。由单一矿种、单一类型研究到多矿种、多类型的整体研究,由浅入深寻找矿床。从成矿系统的空间结构出发,可引导人们向深处和外围找寻新类型的矿床。从成矿系统的时间结构分析,可以通过查找成矿序列中的缺失环节来找寻新类型矿床。由此可见,成矿系列研究本身是矿床学的一个进步,对研究成矿规律、指导找矿有重要的指导意义,然而它缺乏定位预测的能力,无法探明矿体的实际深度。

1.2 模型找矿技术

前苏联从 20 世纪 60 年代末期开始研究物理—地质模型。70 年代中期至今,前苏联的地球物理学家通过在乌拉尔和阿尔泰矿区进行了大量的试验与研究,提出了铁矿床、含铜黄铁矿床、斑岩铜矿床、硫

化铜镍矿床及铅锌矿床的地质模型、地球化学模型及地球物理模型。国际地科联(IUGS)于 1984 年设立了《矿床模式项目》(1985~1994),目的是为了交流矿床模式,促进发展矿床模式专门技能的系统化,为矿产资源的勘查、评价和开发服务,并取得了较好的效果^[10]。2007 年,陈建平等发明了一种基于三维建模的立方体预测模型找矿方法,并取得了专利,该方法实现了从二维找矿到三维找矿的突破,具有重大的理论价值和应用价值。

目前,已研究的模型有很多种,如地质成因模型、分类标志模型、形态模型、富集模型、多因素模型以及同等要素组合模型(地质—地球物理模型、物理—地质模型、几何化模型)等。模型找矿就是在成矿理论的基础上,结合找矿实践,综合分析各种成矿信息,抓住最主要的控矿要素,使预测效果得到明显提高^[18]。

近年来,由于成矿理论和成矿模式研究的不断发展,我国实现了许多大型矿床找矿的突破,如康家湾玉龙山铅—锌矿、西城铅—锌矿、冬瓜山铜矿、金川硫化铜—镍矿、高家堡银矿、德兴斑岩铜矿、土屋—延东斑岩型铜矿等的发现^[28]。在金属矿床预测中,发展成矿理论和成矿模式的研究,建立具有中国特色的成矿模式、成矿系列的成矿理论非常重要。上述实例说明,成矿模式在地质找矿工作中日益发挥着重要的指导作用,然而,要实现定位预测还必须结合地球物理方法,通过测井或地震勘探(时深转换)来确定目标体的隐伏位置。若能使成矿模式与地球物理方法很好的结合,必定在隐伏矿床定位预测中取得更大的突破与进展。

1.3 GIS 在成矿预测中的发展与应用

60 年代至 80 年代中期,随着计算机科学与技术的飞速发展,应用概率论和数理统计方法进行成矿预测取得了突破性进展(Harris; Agterberg)。自从加拿大地质调查局 Bonham Carter 于 1987 年发表了利用 GIS 对加拿大新斯科舍省的 Meguma 地区进行的金矿成矿预测研究之后^[29],GIS 在矿产资源勘查中的应用越来越广泛,目前已普遍利用 GIS 进行勘查数据的综合。

近年,数字地质图已进入实用阶段。在国外,G. F. Bonham Carter、F. D. Agterberg 和 D. F. Wright 提出了适用于 GIS 平台的资源预测模型—证据加权模型(Weights of Evidence Mode)和基于 GIS 的 Nova Scotia 地区的金矿勘探地质资料综合利用^[39];G. P. Watson、A. N. Rencz、G. F. Bonham

Carter 提出的基于 GIS 在新布瑞克省北部矿产资源评价中的应用^[40];澳大利亚地质调查局完成了矿产省的 GIS 数据集,广泛用于建立矿产资源评价^[36,41,42]等。

国内 GIS 在成矿预测方面也有较大的发展。苏红旗等于 1997 年开发出证据权重法矿产预测系统 (EWM)^[7]。1998 年,池顺都等应用 GIS 技术,在云南元江地区成功分析了找矿有利度和空间相关性^[9],同年与赵鹏大发表了应用 GIS 技术圈定找矿可行地段和有利地段的相关文章^[11]。曹瑜等建立了 GIS 成矿预测空间模型^[20]。宋国耀等在 GIS 平台基础上研制出了矿产资源评价系统^[13]。由此可见,GIS 在成矿预测的应用和研究中占据了越来越重要的位置,必将使隐伏矿体定位预测向着多元信息化、量化、自动化的方向发展。

1.4 新方法技术

过去对金属矿床的找矿勘探,多以地质为主,地球化学为辅,缺乏地球物理,尤其缺乏地震勘探,以致勘探深度不大^[14]。迈入 21 世纪以来,随着科学知识与技术的迅猛发展,隐伏矿体定位预测迎来了新的活力。各种新技术、新方法的出现,使得更多的与成矿有关的信息不断地被发掘,为矿体定位预测的飞速发展提供了更高的平台。

1.4.1 地球化学方法

地球化学勘查是以地球化学理论为基础,通过系统地测量天然物质的地球化学性质,发现各种类型的地球化学异常。但随着它的发展,逐渐建立起自己的理论与方法学体系,并发展成为地质科学的新分支,称为勘查地球化学。它利用地球化学勘查取得的大量资料,系统研究岩石圈、水圈、生物圈、气圈、土壤圈和技术圈(人类活动造成的特殊圈)中元素的地理分布,并探讨它们在宏观与微观尺度内的分配与迁移机制,指导找矿。利用地球化学法找矿具有很多优点,如分析元素多、信息丰富、灵敏度高、活性高的指示元素穿透性强,野外施工快速、经济,该方法在覆盖区找矿的潜力比较大。早在 50 年代至 60 年代初期,谢学锦院士便对矿床原生晕进行了开拓性研究,与前苏联学者同时发现了原生晕中元素的分布现象。在当时,这项研究远远超过西方。70 年代他开始地球化学填图理论与方法的研究,对区域化探全国扫面计划进行设计与全面指导。

目前,能够有效探索数百米以下隐伏矿床的方法包括由瑞典 Kristiansson 与 Malmqvist(1984)首先提出的地气(geogas)法,美国 Clarke 等人(1990)

提出的酶提取法,20 世纪 90 年代初引起国际上广泛注意的前苏联的地电化学方法(CHIM)、元素有机态法(MRF),澳大利亚 Mann 等人提出的活动金属离子法(MMI),以及我国地球化学家谢学锦提出的金属活动态法(MOMEQ)^[25]。1997 年,在耶路撒冷第 16 届国际化探大会上 E. M. Cameron 和谢学锦院士首次提出“深穿透地球化学”这一术语,对以上方法进行了高度的概括。

现应用地球化学方法已在全世界发现了一大批新的矿产地,包括前苏联、北美和南美发现的许多斑岩铜矿,以及 80 年代开始在中国发现的数百个金矿。尽管勘查地球化学取得了从理论到实践的巨大成功,但在大量金属的聚集机理、地球化学块体与大型矿集区或巨型矿床的定量评价及定位预测方面仍面临着巨大挑战。

1.4.2 地球物理方法^[17]

所谓地球物理勘查是利用物理的方法原理来研究和解决地质问题。它利用相适应的仪器测量、接收工作区域的各种物理现象的信息,应用有效的处理方法从中提取出需要的信息,并根据岩(矿)体或构造和围岩的物性(密度、磁性、电性、弹性、放射性等)差异,结合地质信息进行分析,推断并解释地下地质构造和矿产分布情况。

随着物探仪器和技术的飞速发展,特别是电子计算机以其技术的应用,地球物理勘查在找金属矿方面的应用越来越广泛,并已占据了重要地位。常用的物探方法有:重力、磁法、电法、地震、放射性等测量方法,根据岩石所引起的各种异常进行测量:

(1)矿石中含有磁性矿物(常见的是磁黄铁矿),能引起磁异常。

(2)矿石含有大量黄铁矿,因而其密度比围岩的大,能引起重力异常。

(3)整个矿体为一个低电阻的良导体,能引起各种电法异常。

(4)地震勘探是探测矿体与围岩之间存在的速度或波阻抗差异。

在我国,世界上常用的七大类物探方法(包含测井)以及 40 余个方法亚种均曾使用过,其中一些仪器和方法技术有创新且达到较高水平^[52,53]。

地面方法系统中,国内外用得最多的是电法,最初是激发极化法,现在是以过渡场法(或叫瞬变电磁法)为代表的电磁法。近年来,甚低频法(VLF)、连续电导率成像(EH4)、瞬变电磁法(矿体埋深几十米到 400 余米)、可控源音频大地电磁法(CSAMT)

(探测深度几十米到 1 km 左右)^[16,19]、时间域电磁法(TEM)(探测深度达到 300~400 m)和激发极化法(IP)(矿体埋深几十米到百余米)等高精度的地球物理探测技术有了飞跃性的进展. 近年国外报道的发现深部隐伏矿体的实例大多采用瞬变电磁法, 如加拿大雪湖硫化金属矿就是采用功率 500w 的电磁仪和 100×100 m 的发射回线发现的. 前苏联沃罗涅什结晶地地区也是采用瞬变电磁测深来追踪低阻石墨化含硫化镍矿的层位的^[46]. 国内, 刘建明等^[56]在好力宝铜矿床区采用甚低频电磁仪扫面、EH4 电磁测深和激发极化测深三种技术方法, 均发现了与成矿有关的地球物理异常, 并经检验钻孔验证, 证明这些方法在隐伏金属矿体预测中有着快速、高效和实用的特点. 可控音频大地电磁法(CSAMT)在日本南部世界级 Hishikari 金矿^[59]的发现和开发中曾起到了决定性的作用. 美国威斯康星洲北部 Grandon 硫化金属矿床^[60]在应用 CSAMT 方法探测中, 针对多金属硫化物型矿床电阻率偏低的特点, 探测出一个近于垂直的低电阻率带, 是 CSAMT 在金属矿勘探中成功实例之一.

1936 年, 李善邦等人在湖南常宁水口山铅锌矿首次在我国进行了金属矿区的磁法勘探工作^[48], 之后老一辈地球物理学家顾功叙、秦馨菱等也开展了大量磁法工作. 至今的 70 多年里, 磁法工作得到了很大的发展, 到 1985 年, 磁测工作几乎覆盖全国. 应用磁法寻找铁矿及其它金属、非金属矿都获得了很大的效益, 如利用航磁发现的铁矿床占我国磁铁矿总数的 80%, 如河北武安、云南大红山等^[47]. 其中高密度航空磁测在大冶矿区的应用成功的完成了深部及外围找矿的工作, 在新疆阿尔泰地区开展 1:10 万的航磁和放射性测量, 发现了大型铁矿床及可可塔勒大型铅-锌矿床^[18], 高精度磁法在可可塔勒铅锌矿床上也测到明显的异常.

由于近年重力仪观测精度的提高(mgal 级发展到 μmal 级), 重力勘探也开始成为寻找隐伏矿床的重要方法. 应用重力勘探金属矿床有两个途径, 一是在有利条件下直接寻找矿体; 另一个是研究金属矿床赋存的岩体或构造以推断矿体的位置. 20 世纪 70 年代在吉林省某地进行了利用重力法勘探金属矿的研究, 成功地发现了含铜硫铁矿. 世界上几个特大型铜矿, 如葡萄牙的内维斯^[21]和澳大内亚的奥林匹克坝^[22]都是利用矿体引起的重力异常进行探测的.

当矿体埋藏较浅(<500 m)时, 这些方法的勘探效果较好, 但由于方法原理中固有的缺陷, 其勘探

能力和精度随着勘探深度的增加急剧下降. 与之相比, 地震勘探对地下深部探测具有精度高、探测深度大、分辨率高和探测结果准确可靠等特点, 且地震和钻井是唯一能给出地下深度信息的探测方法. 最明显的例子就是南非的维特瓦特斯兰德金矿区用反射地震波法追踪含矿层位, 其深度打到 5000 m^[46]. 在奥林匹克坝矿床后期的深部找矿阶段, 在整个高勒克拉通地区进行了大探测深度的人工源深地震, 完成了深部地壳结构探测, 查明了该大型矿区的成因, 为深部找矿奠定了理论基础, 同时也为寻找深部金属矿产资源指出了范围^[50,51].

要解决金属矿勘查中的陡倾斜地层、复杂构造和不规则形态的隐伏岩体等地质问题, 单靠反射波地震方法是远远不够的, 这就需要三维成像技术^[55]. 地震成像技术有偏移成像和层析成像两种, 其中偏移成像是反射波地震数据处理中的关键步骤, 就是把受到速度变化影响而产生的反射波归位到产生它们的反射界面上并使绕射波收敛到产生它的绕射点上. 再把反射波回投到反射界面上和绕射波收敛到绕射点上时要去掉传播过程的效应, 如扩散与衰减等. 最后得到能够反映界面反射系数特点的并正确归位了的地震波形剖面, 即偏移剖面. 偏移成像作为构造成像的核心技术得到了飞速发展. 从绕射叠加偏移到波动方程偏移, 从叠后偏移到叠前偏移, 从二维偏移 to 三维偏移, 一步步趋于准确和完善^[54]. 偏移技术的发展使金属矿地区复杂的地震资料从质量和分辨率上得到了显著的提高. 加拿大的萨德伯里应用三维地震勘探寻找深部镍-铜已取得了显著的成效^[23,24].

但是由于常规地震勘探是针对层状沉积盆地上找构造圈闭发展起来的, 而金属矿构造复杂, 矿体常呈鸡窝状等复杂形态, 无论在理论上还是方法技术上都很难把常规地震勘探理论直接套用于金属矿区, 靠偏移成像不能很好的反映地下的三维信息, 地震层析成像^[33,35]却能很好的解决这些问题. 从原理上讲, 地震层析成像不依赖于层状地球模型, 适用于检测地下不均匀体, 对金属矿勘探是一个很好的尝试. 而且, 通常情况下金属矿体的纵波速度一边比围岩低 10% 到 30%, 成为开展地震层析成像的前提条件^[43]. 此外, 地震层析成像需要从地震记录中提取多种有效波(首波、反射 P 波、反射 S 波、折射波、转换 PS 波等), 大大丰富了有效波信息, 降低了多解性. 荣立新先后在内蒙古拜仁达坝、铜陵金属矿区地区进行了实验^[49], 证明地震层析成像能够利用反演

获得的隐伏岩体与周围地层之间的速度差异来确定隐伏岩体的分布。常旭、王辉等就采用高分辨率地震CT法对宽度不足1m的隐伏矿脉进行了有效的观测与追踪^[45],证实了层析成像是一种寻找和发现隐伏矿体、盲构造的有效方法,在金属矿隐伏矿床定位预测中具有良好的发展前景,并将得到广泛应用。

地球物理方法本身存在一个严重的基本问题,即其反演问题的解是不确定的。因为地球物理反演问题是非线性的,而非线性问题的求解方法至今还在探讨之中。即使是线性反演迄今也没有找出直接反演的方法,只能间接反演,给出初始条件,进行迭代,逐步逼近解答。实践证明,利用其他方法给出的条件,如测井资料,加以约束,进行约束反演,可以取得较好的效果。这表明,地球物理的解释工作必须走地质与各种地球物理资料做综合研究的道路^[17]。

此外,基于每一种物探方法都存在局限性,对一个具体的勘探目标的解释都存在“多解性”,而我们所面对的勘探目标要比以前更加复杂和困难(如复杂的地表条件和地下构造),使得单凭一种地球物理方法难以得到高质量的数据。各种物探方法有各自的特点,利用不同的物性,从各个角度描述同一目标体,就能使解释结果更接近于实际地质情况,减少多解性。在秦岭探测隐伏铅锌矿中应用综合物探方法就取得了显著的成效^[32],赵家围子银铅锌多金属矿床的发现也是这些方法联合应用取得成功的范例^[31,57]。刘红涛等在赤峰柴胡栏子金矿区利用VLF/EH4和CSAMT方法进行综合地球物理勘探,在寻找覆盖层之下的隐伏矿体方面也取得了良好的效果^[44]。

1.5 综合方法系统的应用

众所周知,地球物理勘探中的“干扰”和“多解性”是不可避免的。化探找矿中,除矿体之外,岩性变化、各类蚀变以及许多地球化学障等也都可以产生异常。遥感所提取的资料中也包含有矿体、蚀变、线性、环形构造之外的异常。现有的理论和方法技术都存在类似的问题,主要是由于找矿理论、成矿规律和成矿模式的推理带有很强的条件局限性,以及地下信息的未知性,才使得各种方法均存在多解性。因此,采用综合方法系统进行勘探是解决地质、地球化学和地球物理方法多解性的最佳方法之一。

在综合方法系统找金属矿产时,应遵循两条原则:一是区域约束局部。按唯物辩证法的解释,就是用普遍的规律来解决特殊问题。二是深部制约浅部。地质研究证实,浅部构造的形成与展布受到深部的

影响,所以必须先把深部构造和成藏规律摸清楚,然后用深部的规律性认识指导浅部的勘探研究。

综合方法系统包括地质调查、找矿理论、找矿模型、物探、化探及遥感、遥测等。综合方法系统不是简单地将这些方法集合在一起,而是按系统工程的原则将这些方法组合以获得最优的找矿效果。建立综合方法系统的基础是建立待找矿产的地质—地球物理—地球化学模型,或简称综合找矿模型。这种模型在不同的找矿阶段内容不一样。刘光鼎院士对综合地质地球物理工作提出了“一种指导,两个环节,三项结合,多次反馈”的综合解释思想^[2],其中“两个环节”指岩石物性和地质模型。岩石物性是地质与地球物理之间的纽带,地质模型是跨越地球物理场的定性解释和定量解释之间的桥梁。“三项结合”是指地质与地球物理的紧密结合、定性解释和定量解释的紧密结合及正演问题与反演问题的紧密结合。“多次反馈”,即通过信息的多次反馈逐步加深对地质、地球物理信息的认识,有效的克服反演问题的多解性,使解释结果渐趋合理、完善和精确。不但要综合利用地质、地球物理和地球化学方法技术,还要充分将地球物理各方法(如重、磁、电、震)相结合,以减少最终的多解性。

显然,“攻深探盲,寻找大矿、富矿”离不开地球物理方法,因为只有地球物理方法能达到高精度深部探测的要求,给出地下隐伏矿体的埋藏深度,实现隐伏矿床的定位预测。因此,利用综合方法系统,将地球物理新技术与矿田构造、矿床地质研究所获得的矿化地质模型相结合,在隐伏矿床预测中必将会取得很好的成绩。目前,国内外流行利用综合方法系统来找矿。郝天珧、江为等为在山东百里店地区利用综合地球物理方法(高精度磁力、微重力、激发激化及CSAMT方法),并与地质、地球化学资料相结合,以提高反演结果的可靠性,对百里店隐伏矿进行预测与分析。澳大利亚利用综合方法系统,主要是综合物探法在新南威尔士科巴地区找到了一个大型的隐伏铅锌、银多金属矿床。

2 隐伏矿床定位预测的发展趋势

当前,隐伏矿床定位预测正向着便携化、快速化、精确化、定量化、系统化、智能化的方向发展,其主要的发展趋势总结如下:

(1)模型找矿仍是当前隐伏矿床定位预测的重要手段之一,并朝向多元信息综合找矿模型发展,隐伏矿体定位预测成功与否的关键就是多元信息的有

效提取和筛分。

(2)运用“3S”(GIS、GPS、RS)技术预测正从一维向多维,从定性向“三定”(定位、定量、定级)方向发展,进而实现科学化、系统化、信息化、动态化和可视化多源信息综合预测,为勘查立项提供依据。

(3)发展各类深穿透化探技术,实施大面积地球化学填图技术,对成矿成晕模式、高效航空化探、新参量型地球化学晕等技术进行深入研究与应用,为找矿勘探开辟新的方法与思路。

(4)研究开发大探测深度的技术是一个重要且紧迫的课题,在该方面急需研制出新型、实用和轻便的金属矿勘察地震仪器和处理系统,以达到国际领先水平。野外数据采集要求高灵敏度、大容量、大功率、多功能、多分量、高精度。数据处理方面则要求计算机技术、信息数字化、成像(包括三维)和模拟等技术的发展与结合,使数据处理、资料解释以及图示方法实现自动化。

(5)开展了固体矿产中的非常规方法的应用研究(高频地震、地震层析等)。层析成像技术的发展给金属矿预测精度的提高带来了新的希望。它是借鉴医学中的“CT”扫描技术而创立的,该方法探测深度可达上千米,技术发展趋于成熟,在全球和区域构造反演中已取得显著成绩。早期以 Daily^[27]、Sommerstein^[30](1984)、Pratt 和 Worthington^[37]、Bishop^[38](1985)等人的研究为代表,尝试了利用人工地震发射与接收系统的地震层析成像理论、方法和技术,并以数值模拟的形式得到深入、广泛的研究。目前在隐伏矿体定位预测中还未引用,相信在不久的将来,随着其它配套设施的完善,必将给隐伏矿体定位预测注入新的活力。

总之,隐伏矿床定位预测正从一维向多维,从定性一半定量一定量,从静态到动态发展,从矿床模式—成因模式向勘查模式发展,模型从单一模型向综合找矿模型发展,由图表、文字模型向数字模型发展。方法技术向多方位发展,即根据地质新理论,综合地球物理勘测、综合地球化学勘测及地球物理地球化学综合勘测,多种方法、技术相互补充。测量仪器趋向多用化、系列化、轻便化和智能化。^[26]

参 考 文 献 (References):

- [1] 薛顺荣,胡光道,丁俊. 成矿预测研究现状及发展趋势[J]. 云南地质, 2001, 20(4): 411~416.
Xiu S R, Hu G D, Ding J. The current situation and development trend of metallogenetic prognosis[J]. Yunnan Geology. 2001, 20(4): 411~416.
- [2] 刘光鼎. 中国海区及邻域地质地球物理综合研究(系列图说明书)[M]. 北京:科学出版社, 1992.
Liu G D. Geology and geophysics integrated research on China sea area and neighbour [M]. Beijing: Science publishing Company, 1992.
- [3] 程裕淇,陈毓川. 再论矿床的成矿系列问题[J]. 地质论评, 1983, 29(2): 127~139.
Cheng Y Q, Chen Y C. Further discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits [J]. Geological Review, 1983, 29(2): 127~139.
- [4] 朱创业. 成矿系统研究现状及发展趋势[J]. 成都理工学院学报, 2000, 27(1): 50~53.
Zhu C Y. The present research situation and trend of ore forming system. journal of chengdu university of technology, 2000, 27(1): 50~53.
- [5] Jacques A L. The role of GIS, empirical modeling and expert system in metallogenetic research[J]. GSA Abstract, 1994, (3): 196~197.
- [6] 於崇文. 成矿作用动力学—理论体系和方法[J]. 地学前缘, 1997, 1(3): 54~82.
Yu C W. Dynamics of ore-forming processes—systematics and methodology. Earth science frontiers, 1997, 1(3): 54~82.
- [7] 苏红旗,葛艳,刘冬林,等. 基于 GIS 的证据权重法矿产预测系统(J). 地质与勘探. 1999, 35(1): 44~46.
Su H Q, Ge Y, Liu D L, et al. A GIS-based mineral deposits prediction system by using evidence weight modeling. Geology and prospecting, 1999, 35(1): 44~46.
- [8] 翟裕生. 论成矿系统[J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 13~26.
Zhai Y S. On the metallogenetic system. Earth science frontiers, 1999, 6(1): 13~26.
- [9] 池顺都,吴新林. 云南元江地区铜矿 GIS 预测时的找矿有利度和空间相关性分析[J]. 地球科学, 1998, 23(1): 75~78.
Chi S D, Wu X L. Beneficial degree and spatial correlation analysis of copper deposits prediction by gis in yuanjiang area, yunnan province. Earth Science, 1998, 23(1): 75~78.
- [10] 陈毓川,朱裕生,等. 中国矿床成矿模式[M]. 北京:地质出版社, 1993: 1~33.
Chen Y C, Zhu Y S, et al. Metallogenetic model of deposits in China [M]. Beijing: Geological publishing house, 1993: 1~33.
- [11] 池顺都,赵鹏大. 应用 GIS 圈定找矿可行地段和有利地段——以云南元江地区大红山群铜矿床预测为例 [J]. 地球科学, 1998, 23(2): 125~128.
Chi S D, Zhao P D. Delineating permissive ore-finding area and preferable ore-finding area by gis: an example from the prediction of copper deposits in Yuanjiang area, Yunnan province. Earth science, 1998, 23(2): 125~128.
- [12] 王明志,李国华,等. 若干成矿预测理论研究综述[J]. 资源环境与工程, 2007, 21(4): 363~369.
Wang M Z, Li Y H, et al. Overview of Research for Metallogenetic forecasting. Resources environment & engineering, 2007, 21(4): 363~369.

- [13] 宋国耀, 张晓华, 肖克炎, 等. 矿产资源潜力评价的理论和 GIS 技术[J]. 物探化探计算技术, 1999, 21(3): 199~205.
Song G Y, Zhang X H, Xiao K Y, *et al.* Theories on potentiality assessment of mineral resources and related new gis technique. Computing techniques for geophysical and geochemical exploration, 1999, 21(3): 199~205.
- [14] 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, 10: 855~869.
Ye T Z, Xue J L. Geological study in search of metallic ore deposits at depth. Geology in China, 2007, 10: 855~869.
- [15] 赵鹏大, 池顺都. 初论地质异常[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1991, 16(3): 241~238.
Zhao P D, Chi S D. A preliminary view on geological anomaly. Earth science, 1991, 16(3): 241~238.
- [16] 戴自希, 王家枢, 等. 矿产勘查百年[M]. 地震出版社, 2004.
Dai Z X, Wang J S. Mineral exploration century [M]. Earthquake press, 2004.
- [17] 刘光鼎, 郝天姚. 应用地球物理方法寻找隐伏矿床[J]. 地球物理学报, 1995, 38(6): 850~854.
Liu G D, Hao T Y. Searching of hidden mineral deposits by geophysical methods [J]. Chinese journal of geophysics, 1995, 38(6): 850~854.
- [18] 姜俊. 阿尔泰可可塔勒铅锌矿床围岩蚀变及成因[J]. 矿产与地质, 2003 (6): 679~682.
Jiang J. Genesis and wallrock alteration of the keketaile pb-zn deposit in Aertai, Xinjiang [J]. Mineral resources and geology, 2003 (6): 679~682.
- [19] 熊光楚. 寻找隐伏金属矿产的方法系统[J]. 有色金属矿产与勘查, 1996, 5(5): 289~302.
Xiong G C. Methodologic systems of searching for concealed ore deposits [J]. Geological exploration for non-ferrous metals, 1996, 5(5): 289~302.
- [20] 曹瑜, 胡光道. 圈定“5P”找矿地段的 GIS 成矿预测空间模型及其应用[J]. 地球科学, 24(1): 409~412.
Cao Y, Hu G D. GIS spatial model for minerogenetic prediction and its application to delineation of “5P” ore-finding area[J]. Earth science, 24(1): 409~412.
- [21] Leca X. Discovery of concealed massive sulphide bodies at Neves ~ Corvo, Southern Portugal—A case history [J]. Applied Earth Science, 1990(99).
- [22] Roberts D. E. and Hudson G. R. T. The Olympic Dam Copper ~ uranium ~ gold deposit Roxby Downs, South Australia[M]. Econ Geo, 1983.
- [23] Milkereit B, Berrer E K, Watts A, Roberts B. Development of 3D seismic exploration technology for Ni ~ Cu deposits, Sudbury basin, in Grubbins [M]. Proceedings of Exploration, 1997: 439~448.
- [24] Bernd, Milkereit, *et al.* Development of 3 ~ D seismic exploration technology for deep nickel ~ copper deposits—A case history from the Sudbury basin, Canada [J]. Geophysics, 2000, 11: 1890~1899.
- [25] 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 X J, Wang X Q. Recent developments on deep penetrating geochemistry[J]. Earth science frontiers, 2003, 10(1): 225~238.
- [26] 韩金良, 张宝林. 隐伏金矿床定位预测研究现状与展望[J]. 黄金科学技术, 2000, 8(5): 1~12.
Han J L, Zhang B L. The status and expectation of research on positioning prognosis of blind gold deposits [J]. Gold science & technology, 2000, 8(5): 1~12.
- [27] Daily W D. Underground oil ~ shale retort monitoring using geotomography[J]. Geophysics, 1984, 49: 1701~1711.
- [28] 韩颐. 有色金属矿产资源勘察技术方法综述[J]. 矿产与地质, 2006, 20(6): 590~593.
Han Y. Review on geo-exploration technologies for nonferrous metal resources [J]. Mineral resources and geology, 2006, 20(6): 590~593.
- [29] 阳正熙. 西方国家的“成矿规律和成矿预测”的发展和现状[J]. 成都理工学院学报, 2000, 27: 259~263.
Yang Z X. Development and current state of metallogenetic regularities and predictions in western countries[J]. Journal of chengdu university of technology, 2000, 27: 259~263.
- [30] Somerstein, Radio-frequency geotomography for remotely probing the interior of operating mini and commercial ~ sized oil ~ shale retorts. Geophysics, 1984, 49: 1288~300.
- [31] 陈伟军, 刘洪涛. 综合地球物理方法在隐伏矿床勘查中的应用——以内蒙赵家围子银铅锌多金属矿床为例[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(1): 293~302.
Chen W J, Liu H T. Integrated geophysical exploration for concealed ore beneath cover in the Zhaojiaweizi area, Inner Mongolia, northern China. Progress in geophysics, 2009, 24 (1): 293~302.
- [32] 王元君, 杨轮凯, 刘宏. 综合物探方法在秦岭探测隐伏铅锌矿中的应用[J]. 物探与化探, 2007, 31(4): 320~322.
Wang Y J, Yang L K, Liu H. The application of the integrated geophysical and geochemical method to the search for concealed lead-zinc deposits in qinling area [J]. Geophysical and geochemical exploration, 2007, 31(4): 320~322.
- [33] 高星. 地震层析成像研究的回顾与展望[J]. 地球物理学进展, 2000, 15(4): 41~45.
Gao X. Advance and review in seismic tomography [J]. Progress in geophysics, 2000, 15(4): 41~45.
- [34] Harris J R, Wilkinson L, Heather K, *et al.* Application of GIS processing techniques for producing mineral prospectivity maps—A case study: mesothermal Au in the Swayze Greenstone Belt, Ontario [J]. Canada Natural Resources Research, 2001, 10(2): 91~124.
- [35] 徐明才, 高景华, 等. 地面地震层析技术在金属矿勘查中的试验研究[J]. 物探与化探, 2005, 29(4): 299~303.
Xu M C, Gao J H, *et al.* The tentative application of surface seismic tomography to the exploration of metallic deposits [J]. Geophysical and geochemical exploration, 2005, 29(4):

- 299~303.
- [36] Knox Robinson C M, Wyborn L A I. Towards a holistic exploration strategy: Using geographic information systems as a tool to enhance exploration[J]. Australian journal of earth sciences, 1997, 44: 453~463.
- [37] Pratt R G, Worthington M H. The application of diffraction tomography to crosshole seismic data. Geophysics, 1988, 53: 1284~1294.
- [38] Bishop T N, *et al.* Tomographic determination of velocity and depth in laterally varying media. Geophysics, 1985, 50: 903~923.
- [39] BonhamCarter G F, Agterberg F P, Wright D F. Nova Scotia 地区金矿勘探地质资料的综合利用[M]. 地理信息系统及其在地质领域中的应用译文集, 地矿部科技司计算机办公室, 1993.
- Bonham Carter G F, Agterberg F P, Wright D F. Comprehensive utilization of geological data to prospect for gold on Nova Scotia area [M]. Translation collection on Geographical Information System and its application to the field of geoscience. Computer office in Technology Department of Department of Geology and Mineral, 1993.
- [40] Watson G P, Rencz A N, Bonham Carte G F. Geographic information system are being applied to mineral resource assessment in Northern New Brunswick[J]. GEOS, 1989, 18(1).
- [41] Lesley Wyborn, *et al.* Using GISfor mineral potential evaluation in Areas with few know mineral occurrences[J]. The second forum on GIS in the geosciences, AGSO, 1995: 199~211.
- [42] Lyle A B. Recent applications and research into mineral prospective mapping using GIS [J]. Proceeding of third national forum on GIS in the geosciences, AGSO, 1997: 121~129.
- [43] 杨文采, 李幼铭, 等. 应用地震层析成像[M]. 北京:地质出版社, 1993.
- Yang W C, Li Y M, *et al.* Applying seismic tomography [M]. Beijing: Geological publishing house, 1993.
- [44] 刘红涛, 杨秀瑛, 等. 用 VLF、EH4 和 CSAMT 方法寻找隐伏矿——以赤峰柴胡栏子金矿长为例[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(2): 276~285.
- Liu H T, Yang X Y, *et al.* A case study in finding concealed ores by using geophysical exploration methods in combination of VLF-EM, EH4 and CSAMT[J]. Progress in geophysics, 2004, 19(2): 276~285.
- [45] 常旭, 王辉. 地震 CT 法隐伏脉矿空间定位研究[J]. 地球物理学报, 1998, 41(3): 408~415.
- Chang X, Wang H. Locating subsurface aurifeours quartz vein by means of seismic tomography[J]. Chinese journal of geophysics, 1998, 41(3): 408~415.
- [46] 崔霖沛. 国外勘查地球物理工作现状和发展趋势[J]. 地球物理学进展, 1992, 7(4): 4~13.
- Cui L P. The state of the art and some trends of development of exploration geophysics abroad. Progress in geophysics, 1992, 7(4): 4~13.
- [47] 姜德波, 等. 磁法在我国矿产预测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(1): 249~256.
- Lou D B, *et al.* The application of magnetic method in national mineral prediction [J]. Progress in geophysics, 2008, 23(1): 249~256.
- [48] 熊光楚. 金属矿区磁法勘探的进展与展望[J]. 地球物理学报, 1994, 37(1): 437~443.
- Xiong G C. Development of magnetic exploration searching for metallic ore deposits in china [J]. Chinese journal of geophysics, 1994, 37(1): 437~443.
- [49] 荣立新. 应用于金属矿勘查中的地面地震层析成像技术[J]. 物探化探计算技术, 2007, 29: 125~128.
- Rong L X. The ground seismic tomography for mineral explorations[J]. Computing techniques for geophysical and geochemical exploration, 2007, 29: 125~128.
- [50] 严加水, 滕吉文, 等. 深部金属矿产资源地球物理勘查与应用 [J]. 地球物理学进展, 2008, 23(3): 871~890.
- Yan J Y, Teng J W, *et al.* Geophysical exploration and application of deep metallic ore resources [J]. Progress in geophysics, 2008, 23(3): 871~890.
- [51] 滕吉文, 杨立强, 等. 金属矿产资源的深部找矿、勘探与成矿的深层动力过程[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 317~334.
- Teng J W, Yang L Q, *et al.* Deep discover ore, exploration and exploitation for metal mineral resocrces and its deep dynamical process of formation. Progress in geophysics, 2007, 22(2): 317~334.
- [52] 孙文珂. 中国固体矿产物探的回顾与展望[J]. 物探与化探, 2001, 25(1): 1~7.
- Sun W K. The retrospect and prospect of geophysical exploration for solid [J]. Geophysical and geochemical exploration, 2001, 25(1): 1~7.
- [53] 刘士毅, 孙文珂, 等. 我国物探化探找矿思路与经验初析[J]. 物探与化探, 2004, 28(1): 1~9.
- Liu S Y, Sun W K, *et al.* A preliminary analysis of the train of thought for geophysical and geochemical exploration in china [J]. Geophysical and geochemical exploration, 2004, 28(1): 1~9.
- [54] 马在田. 当前反射地震学研究中的问题浅析[J]. 地球物理学进展, 1994, 9(1): 84~89.
- Ma Z T. Problems of reflection seismology [J]. Progress in geophysics, 1994, 9(1): 84~89.
- [55] 王妙月. 我国地震勘探研究进展[J]. 地球物理学报, 1997, 40(增刊): 257~265.
- Wang M Y. Progress in research on seismic prospecting [J]. Chinese journal of geophysics, 1997, 40: 257~265.
- [56] 孙兴国, 刘建明, 等. 综合物探方法在好力宝铜矿床的应用 [J]. 地球物理学进展, 2007, 22(6): 1910~1915.
- Sun X G, Liu J M, *et al.* The application of integrated geophysical prospecting method to the evaluation of haolibao

- copper deposits[J]. *Progress in geophysics*, 2007, 22(6): 1910~1915.
- [57] 陈伟军,刘洪涛,刘建明,等. 隐伏矿床定位预测常用的综合物化探方法[J]. *有色矿冶*, 2008, 24(2):2~7.
- Chen W J, Liu H T, Liu J M, *et al.* Comprehensive geophysical and geochemical prospecting method for concealed deposit localization prediction[J]. *Non-ferrous mining and metallurgy*, 2008, 24(2):2~7.
- [58] 陈青松,孙启斌,郭成有. 激发极化法在新疆地区找水的应用[J]. *西部探矿工程*, 2002, (6):55~58.
- Chen Q S, Sun Q B, Guo C Y. Application of induced polarization method in the exploration of underwater in Xinjiang area[J]. *West-china exploration engineering*, 2002, (6):55~58.
- [59] Kenneth L Z, Larry J H. 电法地球物理技术在贵金属勘探中的应用实例(上)[J]. *国外地质勘探技术*, 1996, (1):12~16.
- Kenneth L Z, Larry J H. Application of geophysical prospecting electrical method for exploration of precious metal [J]. *Foreign geoexploration gechnology*, 1996, (1):12~16.
- [60] 于昌明. CSAMT方法在寻找隐伏金矿中的应用[J]. *地球物理学报*, 1998, 41(1):133~138.
- Yu C M. The application of CSAMT method in looking for hidden gold mine[J]. *Chinese journal of geophysics*, 1998, 41(1):133~138.