

隐伏矿体的预测理论、探测方法及发展现状

吴俊华^{1,2}, 袁承先², 赵 赣²

(1. 中国地质大学 资源学院, 武汉 430074; 2. 江西省地矿局资源公司, 南昌 330030)

摘 要: 隐伏矿体的预测理论与方法已成为当前成矿学和矿产勘查学研究的重点。隐伏矿体预测常用的理论有相似类比例理论、矿床模式和模型理论、地质异常导致矿理论、成矿系列和成矿系统理论等; 隐伏矿体预测研究的进展主要反映在矿床(产)定量预测理论日益完善, 研究方法层出不穷并不断改进, 多种找矿信息的综合运用, 三维空间成矿预测工作的开展, 基于 GIS 的成矿预测方法广泛应用, 创立了一批新的深部成矿理论等方面。在研究中将物探、化探和遥感等技术方法与地质、钻探综合运用和恰当配合, 形成现代找矿的基本手段。

关键词: 隐伏矿体; 预测; 进展; 研究现状; 评述

中图分类号: P612; P62 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2010)03-0188-08

0 引言

当前, 地质找矿的主体对象已经由地表矿、浅部矿逐步转变为隐伏矿、深部矿, 隐伏矿体的预测理论与方法也成为了成矿学和矿产勘查学研究的热点。前苏联及欧美国家从上世纪 50 年代起就开展了对隐伏矿体预测的地质研究, 找到了一大批大型、超大型矿床。中国在这方面的系统研究则始于上世纪 80 年代, 隐伏矿体预测理论与方法的研究被列为国家科技攻关项目, 找寻隐伏矿的理论与方法、揭示矿体就位机理和定位规律、找矿靶区快速定位预测评价技术被列为优先资助的研究领域和鼓励倡导的研究方向, 取得了一批矿产预测成果和较为理想的找矿效果。

国外对隐伏矿体预测的研究主要表现为两个方向: 一是以美、加等国为代表, 在深入研究成矿地质环境和成矿机制的基础上, 建立不同层次的矿床勘查模型来指导找矿靶区优选和隐伏矿体预测; 二是以俄罗斯为代表, 强调综合应用地质和物化探方法, 建立与“阶段目标方法”相匹配的“预测普查组合”来指导不同层次的隐伏矿体预测和评价^[1]。

1 隐伏矿体预测的定义及特点

目前, 对隐伏矿床(体)尚无统一的定义。池三川将隐伏矿床(体)定义为“埋藏于基岩中受到或未受到现代切割作用, 受到或未受到沉积物覆盖的所有矿床(体)”^[2]。隐伏矿体预测的工作面积一般为几平方公里到几十平方公里, 核心任务是在一定的成矿预测理论指导下, 运用有效的预测方法和技术, 预测工业矿化地段或矿体赋存的空间位置、矿体形态以及矿化强度等特征, 为勘查工程验证提供依据^[3]。其具有大比例、小尺度、高精度的特点, 属于大比例尺成矿预测^[4]。

隐伏矿体预测缺乏直接的找矿标志, 可利用的矿化信息少, 而预测的结果又具有小尺度、高精度的要求, 因此其具有探索性强、风险性大的特点^[5]。据国外统计, 发现一个隐伏的贱金属矿床的投资, 比发现一个出露、浅表的贵金属矿床高 10 倍以上。为避免高风险带来的巨大损失, 当前找矿投资的关注重点已经由原先的工作量、工程量转向对找矿思路的科学性、投入方法和工作量的合理性以及工程验证的目的性等重大技术环节的把握方面^[6]。

收稿日期: 2009-04-09

基金项目: 江西省地矿局 2009 年科技项目资助。

作者简介: 吴俊华(1969), 男, 江西南昌人, 博士, 主要从事成矿规律及成矿预测研究。通信地址: 江西省南昌市迎宾大道 938 号, 江西省地矿局资源公司; 邮政编码: 330030。

2 隐伏矿体预测理论及研究现状

2.1 隐伏矿体预测理论

隐伏矿体预测工作中常用的基本理论有相似类比理论、矿床模式和模型理论、地质异常致矿理论、成矿系列和成矿系统理论等。

(1) 相似类比理论。相似类比理论是成矿预测学的重要基础理论^[7,8], 它认为, 在一定的地质条件下产出一定类型的矿床, 相似地质条件下赋存有相似的矿床, 同类矿床之间可以进行类比, 与已知矿床地质背景相似的地区(段)可视为成矿远景区或圈定为找矿靶区。在类比方法上, 相似类比理论主要采用的是“将今论古”、“由已知到未知”的分析法, 是建立在大量的野外观察及实践基础之上的认识, 并根据所得认识以及归纳的理论去指导找矿预测。由于矿床产出的区域地质条件可能相似而具体的控矿条件不同, 利用这一理论进行成矿预测时, 应遵循求大同存小异的原则。相似类比理论可以预测和寻找类似的矿床, 但局限性很大, 对新类型矿床的预测和寻找没有指导意义。目前应用相似类比理论提交的预测成果, 特别是大比例尺预测成果多属于在一定风险前提下的定性预测。

(2) 矿床模式和模型理论。在研究、对比和概括众多矿床的地质、地球物理、地球化学特征的基础上, 提出矿床模型(模式)的概念, 在找矿工作中起到了很好的借鉴指导作用。1986年美国地质调查所考克斯和辛格编写了《矿床模式》一书^[9], 标志着对矿床模型的研究达到了高潮。矿床模型就是以相似类比理论为依据, 在对大量矿床进行综合研究的基础上, 对某一类矿床或矿体的成矿作用基本特征的概括。通常采用图解、文字或表格等形式将复杂的成矿要素、成矿过程和矿床、矿体地质特征进行归纳, 用以指导同类矿床的成矿预测^[10]。具体包括描述性矿床模型、矿床成因模型、品位吨位模型等。国内的陈毓川、张贻侠等都对矿床模型理论进行了系统论述^[11,12]。矿床模型理论在中国得到了广泛应用, 取得了很好的找矿效果。例如彭程电根据岩舌下凹兜成矿模型预测并发现了老厂矿田双竹矿床^[13]; 姚金炎根据长坡矿床的矿体类型与分带模型推断并发现了大福楼锡矿床^[14]; 赵玉琛根据凹山铁矿“三部八式”的成矿模式, 在南山铁矿深部发现8 000万t凹山式铁矿等^[15]。

(3) 地质异常理论。为了弥补相似类比理论和

矿床模型理论的不足, 上世纪90年代, 赵鹏大等提出地质异常理论。地质异常是在物质成分、结构构造和成因序次上与周围环境有明显差异的地质体或地质体的组合, 是不同地质历史时期演化发展的产物, 其形成的地质时代、构造背景、地质环境和岩石类型决定了异常的性质及其赋存的矿产资源种类和规模^[16,17]。地质异常矿体预测是在地质异常理论的指导下, 运用多学科信息, 以非线性科学和高新信息处理技术为手段, 以研究和圈定不同尺度和不同类型的地质异常为基本途径, 逐渐逼近工业矿体的一种新的成矿预测方法^[18-20]。对于隐伏矿体预测来说, 地质异常理论摒弃了已知矿床模式对勘查人员的思想束缚, 是一种很有应用前景的矿体预测理论。

(4) 成矿系列和成矿系统理论。程裕淇、陈毓川和翟裕生等从系统、整体的观点出发, 提出了成矿系列的概念: 将区域成矿作用过程中由地质构造发展阶段的特殊性所决定的不同成矿作用类型之间具有内在联系的一组矿床的组合称为成矿系列^[21-23]。成矿系列概念的提出使得人们由对单个矿床的研究发展到对矿种共生、矿床组合类型的研究, 将成矿作用研究与区域地质背景联系起来^[24]。成矿系列是矿床学理论与矿产勘查实践之间的桥梁, 构成了现代成矿预测的重要基础理论之一, 具有明显的指导找矿意义。成矿系统自上世纪70年代提出以来有了较大的发展, 国内的於崇文、李人澍和翟裕生等从不同角度论述过成矿系统研究的内容和方法^[25-27]。翟裕生认为, 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, 是一个具有成矿功能的自然系统。成矿系统的概念体现了与矿床形成有关的物质、运动、时间、空间、形成、演化的统一性、整体性和历史观。成矿系统研究的观点和方法以及成矿系统概念模型的建立有助于将矿床地质研究工作建立在较为完整的科学理论基础之上, 将会提高找矿勘探工作的成效。

2.2 隐伏矿体预测研究现状

隐伏矿体预测的基本目的是确定未被发现矿床的位置, 并大体推测未知矿床的类型、规模和品位。矿(床)产预测可分为定性预测和定量预测两个方面。矿产资源定量预测是将计算机和数学知识运用到地质问题上, 使得矿产资源预测更为高效、客观、准确, 是地质学和数学、信息技术、计算机技术集成的产物, 代表了资源预测的发展方向; 定量预测也是

定性预测的深化和具体化,在成果形式上要体现四定^[1,2]:即定量圈定成矿远景区、定量估算远景区内的找矿潜力、定量确定远景区内的成矿风险、定量确定远景区内的质量。其预测结果可作为找矿勘探工作部署的依据,可减少找矿勘探工作的盲目性和风险性,增加预见性,从而提高找矿工作的效率。因此,各国对矿床定量预测工作都非常重视。但定量预测必须以基本的地质认识和成矿规律为前提,正如翟裕生等^[3]指出的,对控矿地质因素和控矿类型的详细研究是评价异常和成矿预测的关键问题。

(1) 矿床(产)定量预测理论日益完善。结合我国地质找矿的实际情况,王世称创立了综合信息矿产资源预测方法,赵鹏大较系统地总结了矿床统计预测的基本理论、准则和方法^[1],提出矿床统计预测的基本理论是相似-类比理论、求异理论和定量组合控矿理论。求异理论是对物化探异常概念的引伸,它强调地质异常。但在已往的矿床地质异常研究中没有详细具体地按矿化阶段和不同空间来划分异常类型,而是把一些不同阶段、不同作用生成的异常作为一个“混合体”来笼统处理,以致难以缩小找矿靶区,影响预测效果。为解决此问题,翟裕生等^[28]提出在成矿系统的两类产物中(矿床系列和地质异常系列)地质异常系列包含地质、地球化学和地球物理各类异常,这些异常产生在成矿系统的各个阶段和各个部位,具有一定的时空结构。因此,用成矿系统的观点分析各种异常的来龙去脉、精细地区分不同异常类型及其成矿意义,就有可能提高异常评价的成效。

(2) 研究方法层出不穷并不断改进。法国学者 Allais(1957)开创了定量成矿预测的先河,他在对美国西部含矿盆地进行成矿预测时,把预测区划分成许多面积相等的单元,提出每个单元中的矿床数目服从泊松分布。60年代至80年代中期,随着计算机技术的逐步发展,采用概率论和数理统计方法进行成矿预测取得了突破性的进展。信息量法、证据权重法等一批新的预测方法开始应用于成矿预测。其中证据权重法是加拿大数学地质学家 Agterberg 提出的基于二值图像的地学统计方法,是在假设条件独立的前提下综合证据因子的定量预测方法。该模型并不要求对区域控矿因素的重要性有先验的知识,它用统计学方法研究各地质因素与矿产分布的关系。证据权重法作为一种重要的预测模型,在矿产资源预测中已有很多成功的应用。为了使证据权重法更方便、广泛的使用,中国地质科学院和中国地

质大学(武汉)数学地质研究所在 MAPGIS 软件平台上分别开发了 MRAS 和 MOR-PAS(mineral ore resources perspective and assessmentsystem)矿产资源勘查评价系统,其中预测方法中均包括证据权重预测模型。加拿大 Laura Kemp 也用 Avenue 语言编写了基于 ArcView 平台的证据权重法扩展模块(WofE Extension)。处理定性数据的方法也不断增多,定性变量的取值只有“1”和“0”,需要一套特殊的方法对它进行处理。处理这类变量的方法有秩相关分析、逻辑信息法、数量化理论、特征分析、信息量分析、条件概率法等。常规的多元统计方法在定量预测中得到改进和发展,由于不同的数学方法在解决某类具体问题上具有优势,通过不同方法的相会交叉而产生新方法,如模糊因子分析、对应分析(因子分析与聚类分析相结合),起到了取长补短的作用。近年来,由于人们对地质现象、过程的非线性认识,使人工神经网络、分形理论、混沌动力学等方法流行。如矿床的空间分布特征证实了分形理论的正确性(Mandelbrot, 1983; Li 等, 1994; Agterberg 等, 1993)。在地球化学勘探中发现元素的空间分布也适合于分形和 multidimensional 分形理论(Cheng 等, 1994)。

(3) 多种找矿信息的综合应用。应用多种信息(如地质、物探、化探、遥感等)进行找矿预测是一种发展趋势,但各类信息如何有机融合却是急待解决的问题。近年来有学者在矿床定量预测中已经对这个问题展开研究,并力图去解决它。姚书振等(2002)在秦岭一大别造山带、松潘-甘孜造山带成矿规律与成矿预测研究中,总结出以成矿系统、地质异常理论为指导,以成矿规律研究为基础,以“3S”技术为支撑,以多元信息处理为手段,以矿床系列为对象,开展区域矿产资源预测与潜力评价的思路。

(4) 三维空间成矿预测工作的开展。三维空间预测也称立体预测。随着找矿工作的深入,需要由中小比例尺的面上预测转为大比例尺的深部预测,已成为近年找矿工作的主要研究目标之一。如香花岭锡矿的预测,用统计分析和空间定位等方法建立矿床值与控矿因素间定量联系的三维数学模型^[29,30]。

(5) 基于 GIS 的成矿预测方法广泛应用。地理信息系统(GIS)克服了传统信息技术无法反映数据空间属性的缺点,通过一系列空间操作和分析方法使研究数据可视化、思维可视化。可使地质、物化探、遥感等地质多源信息进行计算机分层管理、空间信息快速查询和检索、按不同目的对多源信息进行

叠置构成所需的综合图件。中国地调局于 1995 年立项开展川西扬子地台西缘部分地区应用 GIS 技术的试验研究工作,总结了应用 GIS 技术开展中比例尺区域矿产资源评价的经验,1996 年即在全国 8 个省地勘局进行推广^[31]。目前 GIS 用于矿产预测主要有两类方法。一是利用 GIS 的基本空间分析功能研究地质矿产实体的空间关系,对未知地段找矿远景作直观评价,如通过控矿因素的叠置分析可以圈出找矿有利地段^[32-37];二是与数学模型相结合进行预测,即将各种预测方法移植到 GIS 中。同时,基于 GIS 平台进行成矿预测系统软件的二次开发也有了较大发展。在原地矿部科技司组织下,肖克炎等开发了“基于 GIS 平台上固体矿产资源评价辅助决策系统(MRAS)”;由姚书振等(2000)开发的“金属矿产资源评价分析系统(MORPAS)”现已在全国地矿行业得到广泛应用。

需要特别指出的是,用于矿产资源定量预测的数学模型是在地质概念模型的基础上建立起来的。进行矿床(产)定量预测时,应将多种方法结合起来运用或将几种方法同时运用,以展现每种方法的长处,并有利于预测结果的相互检验和比较。如由于黑矿类型(Kuroko-Type)的矿床中 Cu, Pb, Zn 的质量分数之间有很强的非线性关系,单独用地质统计学的方法很难分析矿石的品位分布情况, Katsuaki Koike 等将地质统计学的方法和神经网络方法结合起来,用于日本北部 Hokuroku 地区估计黑矿型矿床中的主要成矿元素(Cu, Pb, Zn)的质量分数,得到较好的预测效果^[38]。

(6) 创立了一批新的深部成矿理论。上世纪 80 年代以来,世界范围内的深部找矿工作取得了重大突破,同时创建和完善了一批新的深部成矿理论,为危机矿山接替资源勘查提供了新的思路^[1]。①绿岩带金矿新模式: 上世纪 80 年代,在太古宙麻粒岩相岩石中发现了高温热液($> 700^{\circ}\text{C}$)脉金矿床,格罗夫斯等据此提出了“太古宙脉状金矿床的地壳连续成矿模式”,认为从绿片岩相到麻粒岩相变质岩中的脉状金矿床是连续的同成因矿床组合。这一模式突破了金矿不能在麻粒岩相中形成的传统认识,丰富了变质岩区的金矿成矿理论;②浅成热液金矿和斑岩铜矿的套叠模式: 上世纪 80 年代初, R. H. 西利托指出,在火山岩区许多斑岩铜矿系统高部位多发育有浅成热液贵金属矿脉,贵金属矿脉与斑岩铜矿呈套叠状产出; 90 年代,西利托又论述了环太平洋火山岩区浅成热液金矿床与富金斑岩铜矿床之间在时

空和成因上的联系,为寻找与火山作用有关的浅成低温热液型-斑岩型金-铜矿拓宽了思路; 菲律宾曼卡延(Mankayan)的勒班陀(Lepanto)低温热液铜金矿脉和其南部下方的“远东南”斑岩铜金矿就是这种套叠模式的实例,我国福建紫金山金铜矿也属同一模式;③微细浸染型金矿深部找矿模式: 美国卡林金矿带是著名的微细浸染型金矿集中区,1987 年以前,在 100~300 m 的深度范围内发现 20 多个低品位($w(\text{Au}) < 10 \times 10^{-6}$)金矿床,1987 年初在卡林矿带 550 m 深度发现了高品位、大规模的深部波斯特-贝茨(Deep Post-Betze)硫化物金矿床(金储量 311 t, 平均品位 6.12×10^{-6} , 最高品位达 32×10^{-6})等一批深部金矿,在格彻尔金矿带深部发现有特阔伊斯里奇等深部金矿,说明微细浸染型金矿床的深部存在极大的找矿潜力;④铜镍硫化物矿床的深部找矿潜力: 加拿大肖德伯里矿区是世界上规模最大的铜镍产地,有大型矿床 10 余个,中小型矿床 30 余个,上世纪 90 年代又在矿床深部发现了几个大型铜镍矿床,包括维克多深部矿、镍环深部矿、新麦克里达矿床等,由此展示出铜、镍硫化物矿床深部诱人的找矿前景;⑤喷气沉积型(Sedex 型)铅锌矿与网脉状铜矿在空间上的共生现象: Sedex 型铅锌矿床是世界上最重要的铅锌矿床类型,这类铅锌矿床在空间上往往与脉状、网脉状铜矿相伴产出;古巴西部的侏罗纪喷气沉积型铅锌矿中既有层状的 Sedex 型铅锌矿体,又有网脉状铜矿;⑥金矿和铅锌矿的共(伴)生关系: 在矿床中金与铜的共生关系已成共识,然而金与铅锌矿化之间的关系尚缺乏统一认识;近几十年来,在铅锌矿床外围相继发现了一系列的金矿床,尽管对金矿与铅锌矿的成因关系存在着不同见解,但二者相伴出现的事实却不容置疑,从辽宁青城子、南京栖霞山、湖南水口山仙人岩等金矿与铅锌矿的地质特征分析,二者应属统一的成矿系统。

3 隐伏矿体预测和探测的技术方法

寻找隐伏矿体,矿产勘查人员必须依靠先进的科学技术手段发展和形成新的找矿能力。传统的找矿技术与方法在找寻隐伏矿体时遇到了不可逾越的障碍,一方面要寻求地质预测理论的创新与突破,另一方面要积极开发探测隐伏矿体的适用新技术、新方法,将物探、化探和遥感等技术方法与地质、钻探

综合运用和恰当配合已成为现代找矿的基本手段。新技术、新方法的应用将更多的成矿信息被挖掘出来,促进了隐伏矿体预测与探测的飞速发展。

(1) 经验类比法(地质类)。经验类比法是一种常规的预测方法,经常贯穿于成矿预测工作的始终^[28]。预测工作中应用相似类比原理,对预测对象与已知对象进行类比分析,并根据其矿床类型、成矿环境和控矿因素等的相似程度对矿床存在与否、矿化规模等做出预测。经验类比法虽然传统,但是目前仍是不可代替的基本方法,尤其是在大比例尺成矿预测中仍然要以此法为主。类比方式也随着成矿预测学和计算技术的发展,逐步增加了一些新技术、新方法、新形式,如人工思维类比、成矿模式类比、计算机模拟类比和专家系统类比等。

(2) 勘查地球化学方法。地球化学勘探是通过研究地球各圈层各化学元素的分布、分配及其含量变化,来了解地质情况、指导找矿的一种勘查方法。近20多年来相继开展了同位素地球化学探矿、航空地球化学探矿以及海洋地球化学探矿等方面的研究。在固体矿产隐伏矿、深部矿的地球化学勘查中,开始研制和开发具有较大探测深度的地球化学方法,即“深穿透(Deep penetrating)地球化学方法”,这些新方法有:活动态金属离子法(MMI, Mobile Metal Ion),所获得的地球化学异常重现性较好,能探测到地下700 m深的矿体;酶浸析法,在冰积物覆盖区尤为有效,可探测深度>300 m;地电化学法(CHIM),能探测到覆盖层(厚度>150 m)和基岩(厚度>500 m)之下的深部矿化;地球气法(NAMEG),我国的谢学锦等从1990年开始研究,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-铀-金矿进行试验;还有地气法(Geogas)、元素分子形式法(MFE)、离子晕法、独立供电的电化学测量法、水化学测量法等。其中,活动态金属法和酶浸析法已广泛用于隐伏区的矿产勘查中,而地电化学法正迅速地获得发展。在沉积物厚度较大时,特别是在异地沉积物覆盖区,上述寻找隐伏矿的方法是必须使用的并能取代常规化探方法的手段。

(3) 地球物理方法。对探测隐伏矿床来说,物探方法要解决的关键问题是加大探测深度和提高分辨率。国外曾提出到20世纪末找矿深度应超过1 000 m,加拿大J. Boldy把地下150~1 500 m作为探测深埋矿物的范围,前苏联在乌拉尔寻找含铜黄铁矿时将深度100~600 m的矿床作为找深埋矿的主

攻目标。

航空物探具有远距离、快速地获取地质信息的能力,航空物探资料对区域地球化学特征和控矿因素研究、隐伏矿床的靶区预测尤为有效。澳大利亚在上世纪90年代进行大区域(几十万平方千米)航空磁法测量和航空伽马能谱测量,获得编制高质量1:25万、1:10万比例尺图件的数字数据,同时还直接发现了一些矿化和与矿有关的异常;熊盛清等(2008)利用直升机快速获取了黄石、大冶地区的大比例尺高分辨率航空物探资料,经过对数据的精细反演处理,成功地实施了大冶铁矿的深部预测。

地震方法自上世纪50年代用于石油勘探,现已发展为三维、四维地震技术,成为石油物探的主要方法。近年来地震方法被引入到固体矿产的深部控矿构造研究、岩性划分、寻找深部隐伏矿体等方面,发展成一种寻找深部矿体的有效手段。应用试验表明,地震方法可在较大的深度范围内精确地查清不同层次地质构造之间的关系、圈定深部隐伏岩体、探讨测区断裂系统和构造-岩浆对矿床富集就位的作用、不同时代的岩层界面的空间形态与成矿制约作用;利用综合地震资料可分辨与矿体有关的局部不均匀体,有效控制隐伏矿体的空间位置;还可以提高钻孔命中率和地质找矿效果、节省勘查资金。在加拿大萨德伯里、诺兰达、马塔加米等金属矿的勘查中,通过改进反射地震数据收录和处理方法,取得了这些矿区深部构造和含矿岩层分布的信息,同时也证明了高分辨率地震测量对以结晶岩为主的金属矿勘查的价值;蔡新平将该方法应用于变质岩区和次火山岩区隐伏金矿体的预测,验证了建立的构造模型,成功预测了隐伏含矿角砾岩筒的形态和结构^[46]。但金属矿的地震勘查(尤其是3D法、VSP法)目前还面临成本较高、技术难度较大等问题。

近年来,一些探测深度较大的物探新方法、新技术不断问世,并受到人们的青睐。瞬变电磁法(TEM)可探测覆盖层下的良导体,探测深度可达300~400 m;可控源音频大地电磁法(CSAMT)的探测深度为几十米到近1 km。运用声波透视技术、无线电波工作站和数字综合井站构成井中物探和测井方法系统,目前已能发现井旁、井底和井间100~200 m范围内的隐伏矿体^[39];井中瞬变电磁法的找矿效果良,工作深度达2 500~3 000 m,可探测井周半径200~300 m范围内的良导体。上世纪80年代中期到90年代,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方法组合,相继发现了一

批深部铜镍硫化物矿床, 如林兹里(Linsley)、维克多(Victor)、新麦克里达(New McCeedy)等埋深 1 000~2 400 m 的铜镍矿; 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 700 m 的块状含铜黄铁矿矿体。

放射性测量是近 20 年迅速发展起来的新方法, 较成熟的有 α 法、 γ 能谱法和 X 射线荧光法等。 γ 能谱法是通过测量含金地质体中铀、钍、钾的含量及其比值的异常来确定含金蚀变带的存在, 进而指示金矿体的赋存部位^[40, 41]。吴国学、沈远超等应用该方法在黑龙江团结沟金矿外围和山东乳山金矿进行隐伏金矿体预测, 取得了良好的找矿效果^[42, 43]。

(4) 遥感技术。遥感技术作为高科技手段, 具有视域宽广、信息丰富、周期性和客观性等特点。由于遥感仪器和遥感信息处理方法的不断创新, 遥感找矿的技术方法越来越丰富多彩。遥感找矿就是在区域范围内寻找矿化集中区。将图像的色、线、环与成矿的基本要素(成矿岩体、控矿断裂、围岩蚀变等)相联系, 建立遥感矿田构造模式; 应用模式标志在航、卫片上判别矿田构造, 预测新的矿产地。遥感图像能反映各级断裂, 识别岩性地层, 显示不同的矿化蚀变光谱特征, 能为隐伏矿体预测提供有效的信息。在澳大利亚奥林匹克坝铜-铀-金巨型矿床的卫星图像中, 识别出 NW 向的大型线性构造, 对预测巨型构造的位置起到了重要作用; 智利科亚瓦西铜矿的卫星影像显示出矿区近圆形的热液系统和隐伏矿床的热液蚀变带, 为寻找新的隐伏矿床提供了靶区; 根据陆地卫星影像上的地质信息, 在巴基斯坦西部找到 2 个潜在的斑岩铜矿勘探区; 郭华东等利用遥感技术在新疆哈巴河县发现恰奔布拉克金矿, 科研预测 Au 储量 25.3 t^[44]。

(5) GIS 空间数据平台技术。隐伏矿体预测涉及大量多元地学信息, 如地质、地球物理、地球化学和遥感等资料。地理信息系统(GIS)无疑是处理这些信息最有力的工具。我国在“八五”期间将 GIS 技术列为地质矿产勘查的关键技术, 由此带来了 GIS 矿产资源预测技术的长足进步, 在一些矿区隐伏矿的预测研究中得以运用和推广。如池顺都等开展了基于 GIS 的地质异常分析、金属矿产经验预测、找矿有利度分析、找矿有利地段圈定和矿产资源潜力评价等方面的研究^[45]; 王世称等在 MAPGIS 软件平台上开发了综合信息矿产资源预测系统(KCYC)^[46]; 安徽省地质矿产局开展了基于 GIS 技术的安徽东部地区金矿资源评价研究^[52]。江西地

矿局 912 大队和东华理工大学在对冷水坑矿田进行多元地学信息 GIS 集成与融合分析的研究中, 将区调地质图件数据化, 并与地球化学、遥感等多元数据集成, 构建“冷水坑地学专题 GIS 系统”, 将系统用于地学信息图的分析研究, 在燕山-麻地、闽坑等地发现多处环形异常和银、金、多金属成矿远景区, 可为该区提供 1~2 处大型银铅锌矿找矿远景区。

(6) 地质岩心钻探技术的进展。目前的地质岩心钻探可以获得地下 10 km 乃至更深的岩石样品, 配合其他手段可以收集到各种深部信息。近 30 年来, 开发研制出多种新的矿产钻探工艺方法和配套设备(机具)。

①反循环中心取样(心)钻探技术: 包括空气和水的反循环中心取样技术, 该技术统一了钻进和取样过程, 提高了钻进效率, 解决了取样率和取样质量问题, 可获得 100% 的岩心采取率, 空气反循环还可避免冲洗介质对岩样的污染, 提高了样品质量。我国在 20 世纪 80 年代中后期引进了空气反循环钻探技术的成套设备, 并在金矿勘探中显示出极大成效, 解决了长期以来的“取心难”问题;

②泡沫钻进技术: 该技术采用低密度气液混合物作冲洗介质, 为空气钻进技术的重要分支; 上世纪 60 年代初开始用于石油钻进和水井施工中, 80 年代起开始用于固体矿产勘探, 在干旱缺水地区和复杂地层(漏失、膨胀、永冻地层等)的钻井中有极大优越性, 可使机械钻速提高 30% 以上, 钻进效率提高 25%~100%, 回次进尺提高 20%~100%, 钻时消耗和钻杆器转动率消耗明显降低;

③受控定向钻探技术: 是在定向钻探技术基础上发展起来的高新技术, 为海上平台钻进多分支钻孔, 为薄层油气田和煤层气田钻进水平侧向孔, 为盐矿床、硫矿床钻进液化开采孔等提供了有效的技术手段; 该技术大大提高了钻探施工的中靶精度, 并可明显减少钻探工作量, 到 80 年代末, 美国定向孔的最大水平移距已达 3 836 m, 前苏联为 2 500 m; 从一个井场(或平台)钻进多分支孔或集束孔已多达 25~30 个; 我国的受控定向钻探工艺现已位居国际先进行列, 如安徽冬瓜山矿区全方位多分支孔(6 个)工程、山西中条山铜矿勘探中的纤斜受控定向孔施工、湖南湘衡盐矿开采孔的地下对接工程等均获成功。

4 评述

(1) 隐伏矿体预测是一项具有挑战性的工作, 要

想取得新的找矿突破,就必须突破某些传统思维的禁锢,大胆探索和科学运用新的观念和理论,采用符合预测区实际情况的新技术、新方法,取得新的信息和认识,总结客观的规律并形成新思路指导下的科学理论。

(2)现代的地学学科,在学科理论和技术方法方面的渗透、融合程度越来越高,如对油田中伴生的金属矿床,过去认为石油和金属矿这两类矿产几乎是风马牛不相及,但现在有越来越多的证据显示石油与许多金属矿有着密不可分的关系,这是一些勘查地球化学家开始关注的;另一方面,以前从事石油勘探的地球物理学家也在尝试将石油成油理论和勘探方法技术嫁接到金属矿的深部找矿方面来,他们越来越重视工作区域的地质、地球化学信息;可以预期,一旦是“两军会师”,金属矿的隐伏矿体预测也许比现在要简单容易得多。

(3)新的方法技术可能会遭受挫折或失败,传统理论如果与新的科学技术有机结合,往往同样会取得令人意想不到的成功。马振东等(2008)遵循铜多金属矿床的时-空套叠成矿作用的准则,以地球化学成矿成晕机制为指导,以勘查地球化学新技术、新方法及高精度的分析测试为支撑,在江西九江城门山矿区深部及外围开展精细地球化学研究和成矿预测,建立了三维可视化系统,在城门外围发现了Ag、Au矿化点,经验证,其深部亦有良好的Ag矿化显示,获得了令人满意的效果。

(4)由于许多物、化探方法的异常解释中具有多解性,从而增大了找矿预测的风险。多元信息只有在不同学科的交流、互补和印证中,才能去粗取精、去伪存真,最大限度地接近客观,最终达到唯一性。所以建立多学科互补、合作的机制是一条通向成功的找矿之路^[6]。

(5)找矿技术方法组合很难有可比性,更重要的是实践的检验。所有的找矿技术方法都有其适用性,同时也都受到适用条件的限制:勘查地球化学和遥感技术明显受到露头 and 地形的影响,而勘查地球物理技术受到地形高差和地质体物性要素的影响。合理地剔除干扰因素,甄别出示矿信息,就必须结合地质成矿理论和地质、地形、物性等条件,在反复实践中梳理出针对某些矿床类型有效的技术方法组合。

参考文献:

- [1] 张均,陈守余,张玉香. 隐伏矿体定位预测中的几个关键问题[J]. 贵金属地质, 1998, 7(4): 293-301.
- [2] 池三川. 隐伏矿床(体)的寻找[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988: 6-9.
- [3] 侯德仪,李志德. 矿山地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 176-188.
- [4] 张均. 隐伏矿体定位预测的方法学基础及方法论[J]. 贵金属地质, 2000, 9(2): 100-104.
- [5] 杨言辰,李绪俊,马志红. 生产矿山隐伏矿体定位预测[J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27(1): 83-90.
- [6] 王庆乙,胡玉平. 金属资源的紧缺与隐伏找矿的思考[J]. 地质与勘探, 2004, 40(6): 75-79.
- [7] 赵鹏大. 矿产勘查理论与方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2001: 33-36.
- [8] 刘石年. 成矿预测学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1993: 86-91.
- [9] 考克斯 D P,辛格 D A(宋伯庆译). 矿床模式[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 1-3.
- [10] 翟裕生. 矿床学的百年回顾与发展趋势[J]. 地球科学进展, 2001, 16(5): 719-725.
- [11] 陈毓川,朱裕生. 中国矿床成矿模式[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1-33.
- [12] 张贻侠. 矿床模型导论[M]. 北京: 地震出版社, 1993: 1-4.
- [13] 彭程电. 略论个旧锡矿床地质找矿的新发现及其途径[J]. 矿床地质, 1986, 5(3): 37-48.
- [14] 姚金炎. 隐伏矿床及其找矿方法[J]. 地质与勘探, 1990, 26(3): 10-16.
- [15] 赵玉琛. 凹山矽卡岩铁流矿田的勘查历史和找矿预测[J]. 地质与勘探, 1990, 26(2): 10-16.
- [16] 赵鹏大,王京贵,饶明辉,等. 中国地质异常[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1995, 20(2): 117-127.
- [17] 翟裕生,邓军,崔彬,等. 成矿系统及综合地质异常[J]. 现代地质, 1999, 13(1): 99-104.
- [18] 赵鹏大,陈永清. 地质异常矿体定位的基本途径[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1998, 23(2): 111-114.
- [19] 赵鹏大,池顺都,陈永清. 查明地质异常: 成矿预测的基础[J]. 高校地质学报, 1996, 2(4): 361-373.
- [20] 王自杰,赵鹏大. 基于地质异常研究的矿产预测[J]. 华东地质学院学报, 1996, 19(2): 133-138.
- [21] 陈毓川. 矿床的成矿系列[J]. 地学前缘, 1994, 1(3/4): 90-94.
- [22] 陈毓川. 矿床的成矿系列研究现状与趋势[J]. 地质与勘探, 1997, 33(1): 21-25.
- [23] 翟裕生,姚书振,崔彬. 成矿系列研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996: 1-9.
- [24] 陈毓川,裴荣富,宋天锐,等. 中国矿床成矿系列初论[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 76-77.
- [25] 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.
- [26] 李人澍. 成矿系统分析的理论与实践[M]. 北京: 地质出版

- 社, 1996: 1-240.
- [27] 翟裕生. 论成矿系统[J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 13-26.
- [28] 翟裕生, 邓军, 崔彬, 等. 成矿系统及综合地质异常[J]. 现代地质, 1999, 13(1): 100-103.
- [29] Jonathan M Lees. Geotouch: software for three and four dimensional GIS in the earth sciences[J]. Computers & Geosciences, 2000, 26: 751-761.
- [30] 唐永成, 何义权, 王永敏, 等. GIS 应用于安徽东部地区金矿资源评价研究[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- [31] 池顺都, 赵鹏大. 应用 GIS 圈定找矿可行地段和有利地段[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1998, 23(2): 125-128.
- [32] 池顺都, 吴新林. 云南元江地区 GIS 预测时的找矿有利度和空间相关性分析[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1998, 23(1): 75-78.
- [33] 池顺都, 周顺平, 吴新林. GIS 支持下的地质异常分析及金属矿产经验预测[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1997, 22(1): 99-103.
- [34] 曾佐勋, 周继彬, 刘立林, 等. 陕甘川邻接区基于 MAPGIS 的金成矿远景区预测[J]. 地学前缘, 2001, 8(1): 416-419.
- [35] 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.
- [36] Chi Shundu, Zhao Pengda, Li Jianwei. Application of GIS to Geo-anomaly-Based Delineation of Mineral Resources [J]. Journal of China University of Geosciences, 2000, 11(2): 164-167.
- [37] 张振飞. GIS 支持下的矿产预测单元簇法[M]. 西安: 陕西科技出版社, 2001.
- [38] Katsuaki Koike, Setsuro Matsuda, Toru Suzuki, *et al.* Neural Network-Based Estimation of Principal Metal Contents in the Hokuroku District, Northern Japan, for Exploring Kuroko-Type Deposits[J]. Natural Resources Research, 2002, 11(2): 135-156.
- [39] 张正伟. 浅谈寻找隐伏矿床的理论和方法[J]. 河南地质, 1998, 16(3): 161-169.
- [40] 曾庆栋, 沈远超, 张启锐, 等. 伽玛能谱测量与隐伏金矿体预测[J]. 黄金, 1999, 20(1): 4-7.
- [41] Chiozzi P, Pasquale V, Verdoya M. Ground Radiometric survey of U, Th and K on the Lipari Island, Italy[J]. Journal of Applied Geophysics, 1998, 38: 209-217.
- [42] 吴国学, 李守义, 陈国华, 等. 金矿勘查中的伽玛能谱测量[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35(6): 823-826.
- [43] 曾庆栋, 沈远超, 张启锐, 等. 伽玛能谱测量与隐伏金矿体预测[J]. 黄金, 1999, 20(1): 4-7.
- [44] 郭华东. 新疆北部地质矿产遥感[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 1-244.
- [45] 池顺都, 赵鹏大. 应用 GIS 圈定找矿可行地段和有利地段[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1998, 23(2): 125-128.
- [46] 王世称, 陈永良, 夏立显. 综合信息矿产预测理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-343.

RESEARCH TECHNIQUE AND PROGRESS ON PROGNOSIS OF CONCEALED ORE BODY

WU Jun-hua^{1,2}, YUAN Cheng-xian², ZHAO Gan²

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Jiangxi Geology & Mineral Resources Exploration and Development Ltd., Nanchang 330030, China)

Abstract: Theory and methodology of blind ore body prediction are the focus for the present mineral prospecting and metallogeny. Analogue, metallogenic model, geo-anomaly, metallogenic series and system are the common theories. Progress made in the prediction is mainly reflected in 6 aspects: ①quantitative prediction theory is perfected; ②prediction techniques emerge endlessly and are improved with time; ③multi-informations are integrated and applied to the prediction; ④3D prediction is efficiently used in the prediction; ⑤the GIS-based prediction is widely used; ⑥a group of theories for deep ore prediction are established. Data obtained from geophysical and geochemical survey are combined with remote sensing techniques and data of geology and drilling to become the modern ore-searching means.

Key Words: concealed ore body; prognosis; progress; research status; prediction