

成矿预测理论与方法新进展

侯翠霞¹, 刘向冲¹, 张文斌², 申 维¹

HOU Cui-xia¹, LIU Xiang-chong¹, ZHANG Wen-bin², SHEN Wei¹

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室/中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国冶金地质总局西北局, 陕西 西安 710061

1. *State Key Laboratory of Geo-Processes and Mineral Resources/ School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

2. *Northwest Bureau of China Metallurgical Geology Bureau, Xi'an 710061, Shaanxi, China*

摘要:成矿预测研究的历史与人类进行矿产勘查的历史紧密联系,随着找矿难度的增大,成矿预测对勘查工作的指导作用越来越重要。现代地质科学的重要特征是冲破学科的界线,立足于整个地质学的高度进行跨学科联合攻关,方能在理论上和技术方法上有所创新。论述与总结了一些现有成矿预测新方法的特点,包括美国“三步式”固体矿产资源潜力评价方法、成矿系列缺位预测法、基于 GIS 的综合信息预测法及人工神经网络、多重分形等非线性数学预测方法。这为今后进行成矿预测时在方法选择上提供了一些有益的建议和参考。

关键词:成矿预测;综合信息;人工神经网络;地理信息系统;模糊逻辑

中图分类号:P612 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2010)06-0953-08

Hou C X, Shen W. New method and theory of metallogenic prediction. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(6):953-960

Abstract: Metallogenic prediction research history is closely related to human's mineral exploration. With the increasing difficulty of prospecting, it's indicated that metallogenic prediction can be an important guide to mineral exploration. An important characteristic of modern geosciences is breach of discipline the restriction. Thus focus on the whole geosciences, to conduct jointly inter-disciplinary research, we can obtain theoretical and technical innovations. This paper has summarized characteristics of several existing metallogenic prediction methods, such as "three-step" solid mineral resources evaluation method form USA, Vacancy of Metallogenic Series Prediction, Synthetic Metallogenic Prognosis Method Based on GIS, Artificial nerve network, and Multi-fractal non-linear methods for mineral resource prediction, which will provide useful reference to metallogenic prediction in future.

Key words: metallogenic prediction; comprehensive information; artificial nerve network(ANN); GIS; fuzzy logic

中国是世界上最大的发展中国家,目前国民经济发展仍处在对矿产资源需求的高峰期,矿产资源能否有效供给仍是制约国民经济发展的因素之一。在新的形势下,对有限的不可再生的矿产资源需求有增无减,但找矿难度却在日益增大,矿产勘查和矿业开发面临严峻的挑战。成矿预测研究成为应对这种挑战的重要举措,它是实现科学找矿的基础,是避

免和减少勘查风险、提高勘查效益的重要途径^[1]。成矿预测是在基本理论的指导下,根据一定的成矿地质理论、成矿地质环境、成矿条件、控矿因素和找矿标志对还没有而将来可能或应当发现的矿床作出推断、解释和评价,提出潜在的矿床发现的途径,从而发现矿床和对潜在的资源量进行评价^[2]。在预测过程中要进行系统的分析研究,做到实事求是、去粗取

收稿日期:2009-09-23;修订日期:2009-09-28

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(编号:2006CB701400)、国家自然科学基金项目(编号:40672196、40638041)和高等学校学科创新引智计划(编号:B07011)资助

作者简介:侯翠霞(1986-),女,在读硕士,矿产普查与勘探专业。E-mail:houcuxia@126.com

精、去伪存真,从感性认识提高到理性认识,正确做出进一步工作的决策。成矿预测是地质理论转化为勘查成果的桥梁。通过成矿预测的分析研究,建立潜在矿床与各类地质成果数据之间的关系,将地质各相关学科的成果运用于找矿勘查实践,转化为发现潜在矿床的信息和依据。

随着矿产资源找寻难度的不断增加与现代科学理论和方法技术的发展与渗透,成矿预测和矿产资源评价理论、方法、技术也得到了长足的发展。矿产资源评价已由传统的定性评价发展为定量评价;由简单相似类比发展为以复杂地学综合数据的挖掘和融合为主的地学综合信息的利用;由对单一矿种的评价转向多矿种的综合评价。

1 成矿预测发展概述

矿床具有经济上的紧缺性和地质上的稀有性、特异性,人们对地球表面地壳三维地质结构的认识具有有限性,因此找寻未发现的矿床就成了一项非常复杂和充满风险性的工作。由于找矿勘探的需要,成矿预测于 20 世纪 40—50 年代得到蓬勃发展,前苏联地质学家为该学科的发展做了许多开创性的工作。至 70 年代末,国际上实施了“矿产资源评价中计算机应用标准”,推出 6 种标准的矿产资源定量评价方法,即区域价值估计法、体积估计法、丰度估计法、矿床模型法、德尔菲法和综合方法(国际地质科学联合会,1975)。GIS 的发展彻底解决了地学信息技术应用的障碍,在地球科学各个研究和应用领域得到了前所未有的广泛应用。现代矿产勘查工作产生的地质、地球化学、地球物理、遥感等海量专题信息,得以通过计算机定量分析技术进行综合,达到对未知区定位、定量评价的目的。90 年代美国提出了第二代矿产资源评价的信息化内容,包括矿产资源的空间数据库、评价方法的计算机化、信息共享的网络化^[9]。矿产资源潜力评价在此期间有两大突破:一是将全球板块构造运动的理论与成矿学结合,总结了世界上重要的矿床成矿模式;二是广泛应用 GIS 等计算机信息处理技术进行矿产资源评价。美国学者提出的“三步式”矿产资源评价方法已成为较完善的矿产资源评价体系^[4]。中国学者在成矿预测方面取得有突破性进展的代表有:“地质异常致矿理论”^[5]和“三联式”5P 地质异常定量评价方法^[6-8];从地质、物探、化探、遥感、矿产资料信息综合出发,强调矿产

定量预测与其他预测相结合,独创的综合信息矿产资源评价方法^[9-10];从玢岩铁矿成矿模式建立到以成矿系列理论为指导,结合中国的实际,将成矿预测研究提高到一个新的理论高度^[11-14];矿床在混沌边缘分形生长^[15]、将分形理论应用于矿床预测^[16-17]、非线性矿产资源定量评价理论和方法^[18-20];近几年兴起的集计算机科学、数学、神经学等学科为一体的交叉学科——人工神经网络在成矿预测中的应用也取得了一定成果^[21-23]。

2 成矿预测理论与方法

评价科学理论的 3 条准则为:深刻、统一和预测^[24]。可见预测能力是评价科学理论的重要标准,具有预测能力的理论才是有用的理论。门捷列夫的元素周期律预测了许多未知元素,牛顿力学预测了天王星、海王星和冥王星的存在。正是这些新奇性预测的证实,才显示出这些理论的伟大和生命力^[25]。在一个地方开展找矿勘查不可避免地要在地质情况不完全明了时进行推理条件并不充分的预测分析,其预测结论的可靠性在很大程度上就取决于推理所依赖的成矿理论的预测能力,所以制定找矿勘查战略时所依据的预测理论对找矿的成败有着至关重要的影响。

2.1 美国“三步式”矿产资源潜力评价方法

“三步式”矿产资源定量评价方法集成了美国矿产资源评价专家的研究成果,包括 D. P. 哈里斯的矿产资源经济定量评价模型(Harris 等,1993),D. P. 考克斯等的矿床模型和标准品位-吨位模型(Cox 等,1986),麦卡门的定量评价和专家系统(McCammon 等,1992),Drew 的 MARK3 软件等^[3]。现在又引进了数字矿床专家系统、神经网络模型、分形等非线性科学等进行定位评价,开发了以矿床模型研究为基础的预测矿产地数量、经济评价产出率的模型,经济成本滤波器模型等。

“三步式”评价工作方法(图 1)可概括为以下 3 步:①根据所要预测的矿床类型圈定找矿地质可行地段;②运用与预测矿床类型相适应的标准品位-吨位模型估计可能发现矿床的金属量及其质量特征;③估计成矿远景区内可能发现的矿床个数^[3]。

美国使用“三步式”评价方法完成了美国北部、中部和南部 $5 \times 10^6 \text{ km}^2$ 范围内不同比例尺、不同地质环境和不同信息水平下的资源评价工作(1998),以

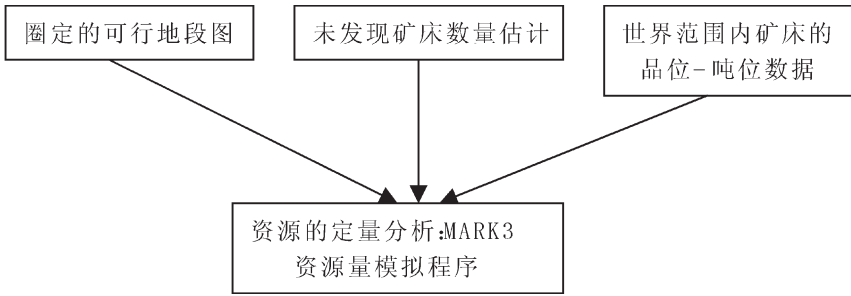


图 1 美国“三步式”资源评价方法^[4]

Fig. 1 "three-step" solid mineral resources evaluation method from USA

及中亚、东南亚地区的评价工作。中国地质学家应用美国“三步式”资源评价方法原理对中国大陆斑岩铜矿成矿地质背景、时空分布规律、矿床模型等方面进行研究,圈出 46 个远景区,建立铜矿数据库 984 个,开发出矿产资源定量评价模型程序,并计算了每个远景区的概率资源量^[26-27]。

“三步式”评价方法的基本优势是其内在一致性:圈定靶区与描述性模型一致;品位-吨位模型与描述性模型、评价区的已知矿床一致;研究区已知矿床和矿床数的估计与品位-吨位模型一致^[26]。“三步式”评价方法体系的特色是地质矿床模型应用,这在理论上保证了其合理性,但地质上常会出现同一地质环境多种成矿类型共生的现象,据此圈定的不同类型、不同矿种的可能地段就会出现重复,这使预测工作更加复杂,也是“三步式”评价方法尚需解决的技术问题^[9]。

2.2 成矿系列缺位预测法

成矿系列是指在一定的地质构造单元和一定的地质发展阶段内,与一定的地质成矿作用有关,在不同的成矿阶段和不同的地质构造部位形成的不同矿种、不同类型并具有内在成因联系的矿床的自然组合体系^[12]。成矿系列缺位即在一定的区域内,依据矿床的成矿系列概念,经对该区地质演化历史、矿床形成地质环境、成矿作用、成矿物质、矿床时空分布规律、成矿系列模式、成矿体系的系统研究后,确定的成矿体系中各个序次的成矿系列在空间、时代、矿床类型、成矿元素(矿种)等方面应当存在而尚未被发现的部分。成矿系列缺位预测是运用矿床的成矿系列和成矿系列缺位概念对矿床进行预测指导地质找矿的一项工作^[28]。

成矿系列缺位类别分为 4 种缺位:空间缺位、时

代缺位、类型缺位、成矿元素(矿种)缺位。4 种类型的成矿系列缺位既是成矿系列研究中一个问题从不同角度的反映,又是矿床成矿系列概念中强调的 4 个“一定”,即一定的历史时期、一定的地质构造单元、一定的地质成矿作用和具有一定成因联系的一组矿床内涵的全面反映。在应用成矿系列理论对燕山地区区域成矿体系和找矿方向的研究中,较好地运用成矿系列缺位概念开展了成矿预测,划分了成矿区带,找到大型矿床 2 处,中型矿床 2 处,具有较好找矿前景的矿床(化)点 10 余处^[28]。玢岩铁矿模式在中国也是一个较成功的模式,应用玢岩铁矿成矿模式使得宁芜、庐枞地区的储量几乎翻了一番,相关成果也得到了国内外专家和同行的认同^[29]。

成矿系列缺位预测方法以成矿系列理论为指导,其评价结果相对来说较容易被地质人员所接受。这种方法的优点是可以保证在区域潜力评价中不漏矿。但应用成矿系列缺位预测法圈定的可能地段的范围会很大。首先根据成矿系列圈定可能的成矿地段,再根据地质勘查的多元综合信息圈定成矿有利地段,甚至对成矿有利地段进行优选,从而确定找矿靶区。研究区域成矿规律、科学地进行综合信息矿产资源编图,不失为一种多元信息综合利用的可行方法。

2.3 基于 GIS 的综合信息预测法

成矿系列综合信息预测方法是系统总结出的一套适合于区域成矿预测的技术。该方法以找矿模型为基础,以地质体和矿产资源体为单元,研究地质体对矿产资源体的控制作用^[9]。综合信息成矿预测是指应用能够反映矿床形成、分布规律和控矿因素的地质、地球物理、地球化学、遥感地质等一系列方法所获得的有关信息,对矿产资源体所作的预

测工作^[30]。目前综合信息矿产预测利用符合成矿预测尺度要求的地质、矿床、地球物理、地球化学、遥感等资料,综合考虑其他成矿有利因素,结合 GIS 工具进行成矿预测。应用“三场”即物理场、能量场、空间场综合预测方法(流程如图 2 所示)对马超营断裂带中段金进行成矿预测,指出了寻找金、银矿床的有利地区^[31]。

近年来,GIS 在地学各领域得到了广泛的应用,特别是在多元信息的定量综合方面,给优化决策分析提供了强大的信息支持^[32-34]。它可以有效地采集和管理海量的地学信息数据;其空间分析功能把传统手工叠加方法与数学、图像处理方法结合起来,依靠经验和知识将各种图形模式结合,实现了多源信息的融合;能快速对大量数据进行对比、分析,极大地提高了工作效率^[35]。20 世纪 80 年代末,加拿大数学地质学家 Bonham-Carter 等^[36]将证据权法发展并开始应用于矿产资源预测领域,最终形成了较为完

善的基于 GIS 模拟的成矿预测方法^[37]。证据权法有利于实现控矿信息的横向(同类控矿信息或同一图层,譬如地球物理信息中的重磁信息)和纵向(不同类控矿信息或不同图层,如重磁异常信息和地球化学异常信息)的有机关联和集成,最终应用高度浓集的综合致矿信息圈定和评价找矿靶区。该方法在矿产资源预测中取得了丰硕的成果^[38-48]。而一种改进的证据权重法不仅能对区域矿产资源进行无偏概率预测,达到 $S=N$ (S : 预测可能存在的矿床数, N : 研究区的矿床数),还能自动处理某些缺少数据的层,把含缺少数据层的单元权重视为零(Frits Agterberg,2009)。应用综合信息进行成矿预测,往往对研究程度较高或已收集到相关的地质、物探、化探、遥感等各类信息的地区,对于已知矿床深部、边部的预测有很好的效果。对云南普朗斑岩铜矿床的三维定位预测就是基于 GIS 的综合信息成矿预测,确定了矿床的南西侧具有较好的找矿潜力,矿床的

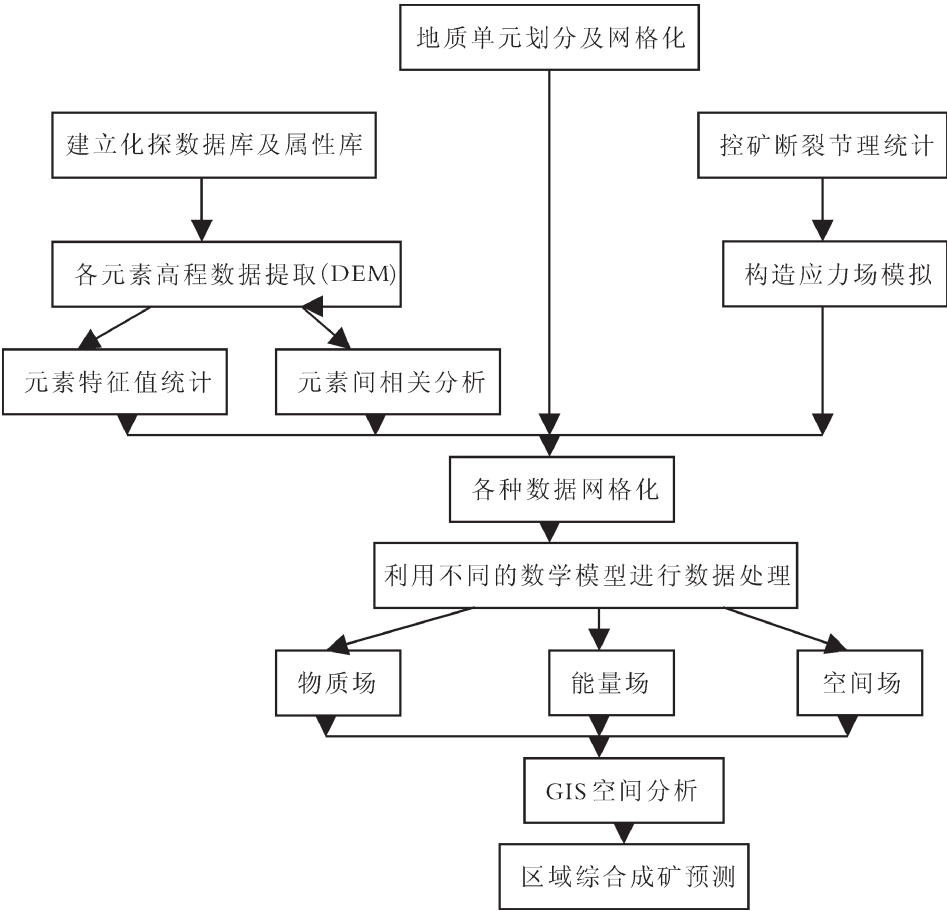


图 2 “三场”综合预测流程^[31]

Fig. 2 Process of "three fields" comprehensive prediction

东侧和北侧深部是有利的成矿远景区^[49]。

综合信息法可以利用众多信息进行预测,避免了单一找矿方法的片面性。综合信息预测侧重于定位预测,能提供优先勘探的靶区,以便于及时开展靶区查证工作,尤其是在开展隐伏矿床或难识别矿产资源预测中有很大的优势^[2]。在综合信息成矿预测时,多元统计在数据处理中也发挥着重要作用^[50]。聚类分析可以综合利用多个变量对样本进行分类,直观简明^[51];因子分析将存在复杂关系的较多变量依据某种内在联系生成几种新的变量,提取了原来众多变量的主要信息,便于地质研究^[52-53]。多元统计在成矿预测中实际应用效果较好,但它要求有足够的样品容量,要事先分析各种数据的统计分布特征,对地质变量要进行综合研究。还有不少学者从不同角度把流体成矿理论^[54-57]、构造成矿动力学^[58]、矿物标型特征^[59-61]等应用于成矿预测,也为矿区深部及外围远景评价提供了依据。

2.4 非线性矿产资源预测方法

非线性理论和复杂性理论被誉为 21 世纪科学研究的核心内容。地学研究在理论上遇到的非线性问题和在实践中遇到的复杂现象正是非线性科学研究的对象^[16]。将非线性理论应用于地球系统科学基础研究和自然资源应用研究相关领域已显示了良好的发展前景。应用于矿产资源预测的非线性理论主要有混沌理论、分形/多重分形理论、自组织理论、奇异性理论等,目前研究较为深入的是分形理论^[62-69]。成矿系统使有用物质由分散状态到高度富集成为矿床,它具有综合性、稀有性和自然经济复合性。成矿作用的发生是多种有利因素在一定时空域中的耦合,属于异常地质事件。成矿过程是特殊的奇异过程,成矿结果服从多重分形分布规律,多重分形矿产资源定量预测理论体系为矿产资源定量预测提供了新的思路 and 工具^[70-71]。奇异性指数可作为度量控矿要素与矿床分布相关性的统计指标,对数后验概率预测模型、成矿后验概率分形模型、未发现矿床数的估计和资源总量预测模型都可作为圈定预测区的模型^[18]。

全世界各种矿床 70%~85% 的储量都集中在只占 10%~20% 数量的大型、超大型矿床中,在空间分布上具有分形丛集性。将分形模型应用于新疆阿尔泰地区大型、超大型金矿床的定量预测指出了大型金矿床可能存在的单元^[72]。应用多元高斯克里格插

值法建立条件概率分布模型进行矿产资源评价预测,能削弱对已知均值的假设,为解释不确定的均值提供理论依据^[73-76]。该方法比普通克里格法更加准确。用新的分形模型对斑岩型矿床进行分带也取得了新的进展(Peyman Afzala 等,2009),该方法基于任何分形能以主元素 Cu、Mo、Au、W 的品位变化作为参数对斑岩型矿床进行分带,有更高的精度。

人工神经网络(ANN)是近几年兴起的一门综合交叉学科。它是模拟人脑的思维方式和组织形式而建立起来的高度非线性与线性运算复合而成的数学模型,具有很强的自适应、自学习、联想记忆、高度容错和并行处理能力,其应用已经渗透到各个领域。在成矿预测方面运用该项技术也已经取得了较好的成果。人工神经网络预测,是在输出和输入之间建立一个非线性的映射关系,ANN 可自动模拟各种成矿因素之间的自然关系,进行全局优化搜索,减少人为干预,提高资源预测的准确率。其中以反向传播网络——BP 网络应用最广泛^[77-78]。应用 BP 神经网络对湘西金矿成矿特征图形进行模糊识别并进行量化的相似类比研究,最后依据类比的结果对深部盲矿体的成矿富集规律进行了预测,明确了深部的找矿前景^[21]。应用模糊逻辑法在秦岭—松潘成矿区进行金矿潜力预测,也确定了几个区域规模的金成矿区带^[22]。

地质信息数字化的日益普及和计算机技术的迅猛发展,促使数学方法在成矿预测中的应用也越来越广泛。非线性矿产资源预测方法使用了尽可能多的数学方法模型对物探、化探、遥感等信息不断地进行挖掘,侧重于信息提取过程的研究,有其先进性与精确性,但在应用时首先要研究各种地质因素、地质现象是否具有自相似性。

3 探讨与建议

美国“三步式”评价方法有其内在一致性,在理论上保证了合理性。但地质上常会出现同一地质环境多种成矿类型共生的现象,据此圈定的不同类型、不同矿种的可能地段就会出现重复,这使预测工作更加复杂,也是“三步式”评价方法尚需解决的技术问题。

赵鹏大院士提出的相似类比理论对预测和寻找同一类型、同一尺度的矿床十分有效,但对同一矿种的其他类型有局限性,尤其对难识别矿和新类型矿

床的预测有局限。后来的地质异常区域成矿分析理论(赵鹏大,1991)突破了相似类比的束缚,发展了求异理论,通过地质异常分析,可以发现新的矿床类型,矿床本身就是地质异常的组成部分,是成分、结构、成因及演化上的特殊地质体。该理论以地质为基础,与高新技术紧密结合,使预测实现自动化、智能化和定量化。应用求异理论圈定“5P”地段时应认真分析异常,因为并非所有异常都是致矿异常。对于地球物理异常如何避免其多解性,对于地球化学异常在查证“高、大、全”异常的同时如何从“弱、小、无”异常中获取找矿信息,对于遥感异常如何正确识别,这些问题都是需要思考的问题。

成矿系列预测可以寻找属于同一成矿系列的其他类型的矿床,也可以对研究区潜在的资源作出全面、系统的评价,提高矿产预测的综合预见性。成矿系列缺位预测的评价结果相对来说较容易被地质人员所接受,它可以保证在区域潜力评价中不漏矿。应用该理论需要对研究区的区域地质情况有比较全面的认识,对区域地质演化历史、矿床形成地质环境、成矿作用、成矿物质、矿床时空分布规律、成矿系列模式、成矿系统有深入的研究方能进行。

综合信息法可以利用众多的信息进行预测,避免了单一找矿方法的片面性,在开展隐伏矿床或难识别矿产资源预测中有很大的优势。在进行危机矿山矿产预测时,由于研究程度高、各类资料较齐全,可综合应用多源信息进行预测,延长危机矿山的寿命。值得注意的是,进行综合信息预测时需分析各类因素对成矿起的不同作用,若能结合多元统计、证据权模型将会有更好的效果。

非线性理论用于成矿预测有良好的前景,分形/多重分形理论、混沌理论、自组织理论、奇异性理论、空间统计理论、空间信息技术的引入对揭示矿床形成的复杂过程、成矿物质的富集规律、成矿信息的非线性提取有很大作用。非线性矿产资源预测方法使用尽可能多的数学方法模型对物探、化探、遥感等信息不断地进行挖掘,侧重于信息提取过程的研究,有其先进性与精确性。但在应用时首先要研究各种地质因素、地质现象是否具有自相似性,而且该预测理论到目前发展得还不是很成熟,需要进一步探索完善。

虽然目前计算机技术在地学领域的应用越来越深入,但数学与地学之间还存在很大距离:一方

面数学理论和方法越来越深奥,商业化软件功能越来越强大;另一方面地学研究者依然习惯于传统的研究方法和思维方式,而不习惯抽象的数学思维和模型以及创造性地以数学方法解决地质难题。以矿床地质学家为代表的预测侧重于成矿规律总结;以数学地质学家为代表的预测方法则太侧重于信息提取过程的研究^[9]。

针对现有的不足,可从以下几方面努力:①扎实地做好基础地质工作,为创造有效地质理论、有效使用高新技术成果提供保证,加强危机矿山外围、深部预测,就矿找矿。地球化学方法(地气法、活动态偏提取技术),地球物理方法(放射性测量、地面电磁法、地震法和井中物探),遥感技术,GIS技术和综合信息矿产预测法可以发挥很好的作用^[7]。②进一步深入研究成矿理论,完善矿床模型。只有更深入地研究成矿理论,揭示成矿作用的复杂性规律,才能更准确地把握成矿预测的方向。③加强成矿过程的动力学研究 and 计算模拟。通过动力学计算模拟一定能大大促进成矿理论预测能力的提高。④构建地学信息空间分析中三维GIS模型及其可视化,利用地质找矿、勘查和开采过程中积累的大量数据,建立三维模型,在此基础上开展深部隐伏矿体的三维定位、定量和定概率预测。⑤矿床地质学家与数学地质学家、生产单位与科研机构要加强沟通合作,提高实际预测水平,在实践中发展预测方法技术。对前人的预测理论采取既继承又发展的态度,对于按常规理论很难解释的方法要勇敢地去试验、去假设,创新思维,创造性地开展工作。

致谢:中国地质调查局发展研究中心赵财胜先生和中国地质大学(北京)李永胜先生对本文初稿提出了宝贵的修改意见,在此表示感谢。

参考文献

- [1]范永香,阳正熙.成矿规律与成矿预测[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003:1-70.
- [2]王明志,李闰华,鄢云飞,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.
- [3]肖克炎,丁建华,刘锐.美国“三步式”固体矿产资源潜力评价方法评述[J].地质论评,2006,52(6):793-798.
- [4]Singer D A. Basic concepts in three-part quantitative assessments of undiscovered mineral resources[J].Nonrenewable Resources,1993,2(2):69-81.
- [5]赵鹏大.矿产勘查理论与方法[M].武汉:中国地质大学出版社,2005:1-116.

- [6]赵鹏大.“三联式”资源定量预测与评价——数字找矿理论与实践探讨[J].地球科学——中国地质大学学报,2002,27(5):482-489.
- [7]赵鹏大,陈建平,张寿庭.“三联式”成矿预测新进展[J].地学前缘,2003,10(2):455-462.
- [8]Zhao Pengda, Chen Jianping, Chen Jianguo, et al. The "Three-Component" digital prospecting method: A new approach for mineral resource quantitative prediction and assessment[J]. Natural Resources Research, 2005, 14(4): 295-303.
- [9]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.
- [10]陈永清, 王世称. 综合信息成矿系列预测的基本原理与方法[J]. 山东地质, 1995, 11(1): 55-62.
- [11]程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣, 等. 初论矿床的成矿系列问题[J]. 中国地质科学院院报, 1979, 1(1): 32-58.
- [12]陈毓川. 矿床的成矿系列[J]. 地学前缘, 1994, 1(3/4): 90-94.
- [13]Wang Denghong Ying Lijuan, Chen Yuchuan, et al. Basic patterns of metallogenesis of precious metal deposits in China and vectors for prospecting[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(5): 71-82.
- [14]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.
- [15]於崇文. 大型矿床和成矿区(带)在混沌边缘[J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 85-102.
- [16]申维. 分形混沌与矿产预测[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 1-59.
- [17]Shen Wei, Zhao Pengda. The theoretical study of statistical fractal model and its application in mineral resource prediction[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28: 369-376.
- [18]成秋明. 成矿过程奇异性与矿产预测定量化的新理论与新方法[J]. 地学前缘, 2007, 14(5): 42-53.
- [19]成秋明. 成矿过程奇异性与矿床多重分形分布[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(3): 298-305.
- [20]成秋明. 非线性成矿预测理论: 多重分形奇异性-广义自相似性-分形谱系模型与方法[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2006, 31(3): 337-346.
- [21]邵拥军, 贺辉, 张贻舟, 等. 基于 BP 神经网络的湘西金矿成矿预测[J]. 中南大学学报, 2007, 38(6): 1192-1198.
- [22]邢学文, 胡光道. 模糊逻辑法在秦岭-松潘成矿区金矿潜力预测中的应用[J]. 吉林大学学报, 2006, 36(2): 298-303.
- [23]Luo X, Dimitrakopoulos R. Data-driven fuzzy analysis in quantitative mineral resource assessment[J]. Computers & Geosciences, 2003, 29(3): 3-13.
- [24]Watkins J. Science and scepticism[M]. Princeton: Princeton University Press, 1984: 1-387.
- [25]刘亮明. 成矿理论的预测能力及其改善途径[J]. 地学前缘, 2007, 14(5): 82-91.
- [26]严光生, 邱瑞照, 连长云, 等. 中国大陆斑岩铜矿资源潜力定量评价[J]. 地学前缘, 2007, 14(5): 27-41.
- [27]王银宏, 严光生, 翟裕生. 三部式潜在矿产资源定量评价与蒙特卡罗模拟[J]. 中国矿业, 2006, 15(6): 14-17.
- [28]毕伏科, 肖文暹, 阎同生, 等. 成矿系列的缺口问题及其在成矿预测中的应用[J]. 矿床地质, 2006, 25(6): 735-742.
- [29]高道明, 赵云佳. 玢岩铁矿再认识[J]. 安徽地质, 2008, 18(3): 164-168.
- [30]王世称, 王於天. 综合信息解译原理与矿产预测图编制方法[M]. 长春: 吉林大学出版社, 1989.
- [31]和志军, 崔彬, 郑镐. 物理场-能量场-空间场综合成矿预测方法在豫西马超营断裂带中段的应用[J]. 地质与勘探, 2003, 39(3): 45-49.
- [32]Chen Jianping, Wang Gongwen, Hou Changbo. Quantitative Prediction and Evaluation of Mineral Resources Based on GIS: A Case Study in Sanjiang Region, Southwestern China [J]. Natural Resources Research, 2005, 14(4): 285-294.
- [33]薛顺荣, 肖克炎, 丁建华. 基于 GIS 技术下思茅—景洪地区铜多金属矿综合信息成矿预测[J]. 地质学报, 2008, 82(5): 648-654.
- [34]叶天竺, 肖克炎, 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): 11-19.
- [35]曾敏, 秦德先, 杨晓坤, 等. 基于 MapGis 的综合信息成矿预测[J]. 矿业工程, 2008, 6(5): 64-66.
- [36]Bonham-Carter G F, Agterberg F P, Weight D F. Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential [R]. Statistical applications in the Earth sciences Ottawa: Geological Survey of Canada, 1990: 171-183.
- [37]Bonham-Carter G F. Geographic Information Systems for Geoscientist: Modelling with GIS[M]. Oxford: Linacre House, 1994: 317-337.
- [38]陈永清, 夏庆霖, 黄静宁, 等. “证据权”法在西南“三江”南段矿产资源评价中的应用[J]. 中国地质, 2007, 34(1): 132-141.
- [39]杨茂森, 黎清华, 杨海巍. GIS 支持下的证据权法在胶东金矿集中区预测中的应用[J]. 地球学报, 2005, 26(5): 487-491.
- [40]黄海峰, 姚书振, 丁振举. 基于 GIS 的证据权重法在成矿预测中的应用——以甘肃省岷县—礼县地区的金矿预测为例[J]. 地质科技情报, 2003, 22(3): 77-82.
- [41]刘世翔, 薛林福, 郝瑞卿, 等. 基于 GIS 的证据权重法在黑龙江省西北部金矿成矿预测中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(5): 889-894.
- [42]揣媛媛, 肖克炎, 湛邵斌, 等. 基于 SIG 的证据权法矿产资源评价及应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(1): 54-58.
- [43]丁清峰, 孙丰月. 基于专家证据权重法的成矿远景区划与评价——以东昆仑地区金矿为例[J]. 地质科技情报, 2006, 25(1): 41-46.
- [44]成秋明, 陈志军, Ali Khaled. 模糊证据权方法在镇沅(老王寨)地区金矿资源评价中的应用[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2007, 32(2): 175-184.
- [45]左仁广, 夏庆霖, 谭宁, 等. 西藏冈底斯斑岩铜矿综合信息预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007, 38(2): 368-373.
- [46]徐善法, 陈建平, 叶继华. 证据权法在三江北段铜金矿床成矿预测中的应用研究[J]. 地质与勘探, 2006, 42(2): 54-59.
- [47]Donald A Singer, Ryoichi Kouda. A comparison of the weights-of-evidence method and probabilistic neural networks[J]. Natural Resources Research, 1999, 8(4): 287-298.
- [48]Alok Porwal, Emmanuel John M Carranza, Martin Hale. A hybrid fuzzy weights-of-evidence model for mineral potential mapping[J]. Natural Resources Research, 2006, 15(1): 1-14.
- [49]王功文, 郭远生, 杜杨松, 等. 基于 GIS 的云南普朗斑岩铜矿床三

- 维成矿预测[J].矿床地质,2007,26(6):651-658.
- [50]董庆吉,陈建平,唐宇.R 型因子分析在矿床成矿预测中的应用——以山东黄埠岭金矿为例[J].地质与勘探,2008,44(4):64-68.
- [51]叶水盛,杨凤超,于萍,等.研究程度较低地区的矿产资源潜力评估方法应用研究[J].世界地质,2008,27(2):188-197.
- [52]丛源,李雪梅,董庆吉.多元统计分析在矿床指示元素组合特征研究中的应用——以山东黄埠岭金矿为例[J].世界地质,2007,26(4):435-440.
- [53]Yan Wang, Wei Shen, Pengda Zhao. MRQP: A windows-based mixed-language program for mineral resource quantitative prediction[J]. Computers & Geosciences, 2008, 34(11): 1631-1637.
- [54]邓军,杨立强,翟裕生,等.构造-流体-成矿系统及其动力学的理论格架与方法体系[J].地球科学,2000,25(1):71-78.
- [55]张渊,孙景贵,王可勇,等.胶东西北部黄埠岭金矿床流体包裹体特征及其在成矿预测中的意义[J].世界地质,2008,27(3):245-251.
- [56]邓晋福,戴圣潜,赵海玲,等.铜陵 Cu-Au(Ag)成矿区岩浆-流体-成矿系统和亚系统的识别[J].矿床地质,2002,21(4):317-322.
- [57]陈华勇,陈衍景,倪培,等.新疆萨瓦亚尔顿金矿流体包裹体成分、矿床成因和成矿预测[J].岩石学报,2007,23(9):2189-2197.
- [58]韩润生.初论构造矿动力学及其隐伏矿定位预测研究内容和方法[J].地质与勘探,2003,39(1):5-9.
- [59]孟繁聪,孙岱生,李胜荣,等.山东烟台南张家金矿黄铁矿的标型特征[J].现代地质,2001,15(2):231-237.
- [60]周学武,李胜荣,鲁力,等.辽宁丹东五龙矿区石英脉型金矿床的黄铁矿标型特征研究[J].现代地质,2005,19(2):231-238.
- [61]孙忠实,车迎房,郑培玺,等.矿物磁性特征在金矿床形成及成矿预测中的作用[J].地质科学,2005,40(1):32-39.
- [62]马汉峰,李子颖,罗毅,等.矿产资源评价预测现状[J].世界核地质科学,2007,24(2):77-83.
- [63]申维.多维自仿射分布及其在地球化学中的应用[J].高校地质学报,1999,5(1):59-65.
- [64]申维.信息维原理分析及在钻孔数据中的应用[J].地质论评,2000,(增刊):343-346.
- [65]申维.利用“p100/q100”律对胶东地区金矿资源潜力估计[J].地学前缘,2001,8(4):463-466.
- [66]申维. n 维自仿射分形及其在地球化学中的应用[J].地质论评,2005,51(2):208-211.
- [67]Shen W, Cohen D R. Fractally invariant distributions and an application in geochemical exploration[J]. Mathematical Geology, 2005, 37(8): 895-913.
- [68]申维.分形求和法及其在地球化学数据分组中的应用[J].物探化探计算技术,2007,29(2):134-137.
- [69]申维.耗散结构、自组织、突变理论与地球科学[M].北京:地质出版社,2008:120.
- [70]Agterberg F P. Multifractal modeling of the sizes and grades of giant and surpergiant deposits[J]. International Geology Review,1995,37:1-8.
- [71]Agterberg F P, Cheng Qiuming. Introduction to Special Issue on "Fractals and Multifractals" [J].Computers and Geosciences,1999,25(9):947-948.
- [72]申维,骆社周.新疆阿尔泰地区大型、超大型金矿床的定量预测研究[J].科技导报,2006,24(2):53-56.
- [73]Xavier Emery.Uncertainty modeling and spatical prediction by multi-Gaussian kriging:Accounting for an unknown mean value [J]. Computers & Geosciences, 2008, 34:1432-1442.
- [74]Marcelo Monteiro da Rocha, Jorge Kazuo Yamamoto.Comparison between kriging variance and interpolation variance as uncertainty measurements in the Capanema iron mine, State of Minas Gerais-Brazil[J].Natural Resources Research,2000,9(3):223-235.
- [75]Pierre Goovaerts.Kriging and Semivariogram Deconvolution in the Presence of Irregular Geographical Units [J]. Mathematical Geosciences,2008,40(1):101-128.
- [76]Xavier Emery.Multi-Gaussian kriging and simulation in the presence of an uncertain mean value[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2009,11(5):1-9.
- [77]李随民,姚书振,周宗桂.基于 MATLAB 的 BP 网络在矿产资源预测中的应用[J].金属矿山,2007,8:55-67.
- [78]Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J.Learning representation by back-propagation errors[J].Nature,1986,329:533-536.
- [79]吕志刚,吴国学,王永祥,等.隐伏矿体预测研究[J].世界地质,2007,26(1):7-13.