

# 矿产资源定量预测的研究现状

李随民<sup>1</sup>, 姚书振<sup>2</sup>, 周宗桂<sup>2</sup>

(1. 石家庄经济学院 资源学院, 石家庄 050031; 2. 中国地质大学 资源学院, 武汉 430074)

**摘 要:** 随着地质数据收集技术和数据处理技术的迅速发展及成矿理论的进展, 矿产资源定量预测已由初期的主要应用数学方法进行统计预测发展演变为以计算机技术为手段, 多种信息的综合预测, 成矿预测的方法更加科学和完善, 文章总结了近年来在矿产资源预测方面取得的一些进展及发展趋势。

**关键词:** 成矿预测; 预测方法; 定量预测

**中图分类号:** P612; P628.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2007)01-0009-04

## 0 引言

成矿预测的基本目的是能够预测未来发现矿床的位置, 并大体知道这些矿床的类型、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、计算机技术相结合的产物, 代表了资源预测的发展方向; 是定性预测的深化和具体化, 在成果形式上要体现四定<sup>[1,2]</sup>, 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, 各国都对矿床定量预测工作极为重视。但定量预测必须以基本的地质认识和成矿规律为前提。正如翟裕生等人指出的<sup>[3]</sup>, 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 定量预测的发展

定量预测的发展过程就是数学模型或预测方法

不断丰富过程。这个过程与数学和计算机的发展相一致, 同时与地质工作者的认识发展一致。20 世纪 70 年代及以前, 盛行基于概率统计和多元统计的方法, 引入地质的主要是较传统的数理统计, 主要用于物化探数据处理; 80 年代初期, 人们认识到地质数据中包含大量的定性数据, 使得数量化理论得到发展; 80 年代中后期, 模糊集方法流行, 反映了人们对地质现象、过程模糊性的认识; 90 年代以来, 灰色理论<sup>[4-5]</sup>、人工神经网络<sup>[6-16]</sup>、分形理论<sup>[6,7,17,18]</sup>等方法流行, 反映了人们对地质现象、过程的非线性认识。

其次, 以上各阶段出现的数学模型和预测方法本身也都在发展, 以适应不同的应用条件。如地质数据进行主成分分析时, 如果其中某一变量的个别值异常偏高, 那么该列变量数据的方差及与之有关的协方差都会增加, 从而对分析结果产生很大的负面影响。这种情况在非特异性分析时是不希望见到的。因此一些学者对公式中特征值的求解方法进行了改进, 用相关矩阵代替协方差矩阵, 即认为各变量的权重相同, 与其方差无关, 从而有效地纠正了原方法的缺陷<sup>[19,20]</sup>。习惯上将这种利用相关矩阵进行主成分分析的方法称为标准主成分分析(SPCA)。

## 2 定量预测的研究现状

目前, 国内外矿床定量预测工作取得以下主要进

展:

(1) 矿床(产)定量预测理论的日益完善。为适应我国科学找矿的需要,王世称教授创立了综合信息矿产资源预测方法;赵鹏大院士较系统地总结了矿床统计预测的基本理论、准则和方法<sup>[1]</sup>。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,而是把这些不同阶段、不同作用生成的异常作为一个“混合体”来笼统处理,这就难以缩小找矿靶区,影响预测效果。为解决此问题,翟裕生等人<sup>[3]</sup>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中。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。其出发点是统计学,即统计出研究区里既有某地质标志,又有矿产地的面积;某标志与矿产同时出现的概率越大,其找矿意义无疑越重要,其权重值也就越大;将统计单元各独立找矿信息因子进行加权综合,便可得到不同级别的远景区。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。为了使证据权重法被更多的地质工作者使用,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 MORPAS(mineral ore resources perspective and assessment system)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,如 Haiyu Gao 等<sup>[21]</sup>论证了当有偏离样品存在时,运用传统的贝叶斯程序推断,判别的分类结果可能出错。如果将样品的均值向量限制在一个变化范围内,当有偏斜的样品出现时就可以用来校正母体参数,用这种校正母体参数的贝叶斯估计方程进行判别的结果将优于传统的贝叶斯法。

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。近几年来,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, Xu, and Jiang, 1994; Agterberg, Cheng and Wright, 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, Agterberg and Ballantyne, 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)进行找矿预测是目前找矿工作发展的一个重要趋势。但各种资料如何达到有机的综合却是目前急需解决的问题。姚书振等(2002)在秦岭—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。近几年来在矿床定量预测的实践中已注意到这个问题,并逐步去解决它。

(4) 三维空间成矿预测工作的展开。三维空间的预测也称立体预测。随着找矿工作的发展,需要从中小比例尺的面上预测进入大比例尺的深部预测。这方面的工作我国开展较晚。但它是近几年来找矿工作的主要研究方向之一。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<sup>[22-23]</sup>。

(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、遥感等地学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。GIS作为研究地学信息的工具,为进行矿产资源预测工作提供了方便性和实用性。自从 Bonham Carter (1987) 利用 GIS 对加拿大新斯科舍省的 Meguma 地区进行金矿成矿预测研究后, GIS 在矿产勘查中的应用不断扩大,目前已普遍利用 GIS 技术进行综合勘查数据<sup>[24-36]</sup>。我国 GIS 矿产资源评价工作是最近几年才开始兴起,中国地调局于 1995 年立项,由李裕伟主持了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;继而 1996 年在全国 8 个省地勘局进行了推广<sup>[24]</sup>。GIS 技术及其应用作为通用技术被列为 20 世纪 90 年代发展地质勘查工作的关键技术,在《矿产勘查跨世纪工程》和《第二轮填图计划》中都明确规定要利用 GIS 作为重要技术手段支持新一轮矿产资源评价和填图。

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<sup>[25-28, 34, 35]</sup>;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。结合后的预测方式可概括为:利用 GIS 空间数据库提取输入信息 $\rightarrow$ 利用预测方法分析信息 $\rightarrow$ 利用 GIS 图形功能显示结果<sup>[24, 36]</sup>。显然在矿产预测中只使用 GIS 的基本空间分析功能是不够的,因为这些功能一般较少涉及各种地质变量之间及它们与矿产之间的数量或统计关系,而这些关系是成矿规律的体现,是预测的主要依据。预测模型(方法)正是这些关系的载体,因此, GIS 与统计预测方法相结合是非常必要的。

近年来,基于 GIS 平台进行成矿预测系统软件的二次开发件也有了较大发展。原地矿部科技司组织 GIS 应用系统的二次开发工作,肖克炎等人开发了“基于 GIS 平台上固体矿产资源评价辅助决策系统(MRAS)”。需特别说明的是,2000 年由中国地质大学(武汉)姚书振教授、胡光道教授等组织开发的“金属矿产资源评价分析系统(MORPAS)”(Mineral Ore Resources Perspective And Assessment System)已在全国地矿行业得到广泛地应用。该系统是以 MAP-GIS 为基础平台开发出的适用于资源评价分析应用软件,它将 GIS 的应用分为两个层次,一是事务处理

层,为基础数据库管理子系统,包括空间数据库、属性数据库和图符库等 GIS 的基本数据库以及地学基础数据库。二是应用分析层,是在 GIS 空间分析的基础上,增加了适用于矿产资源预测评价的专用型空间分析模型和处理方法,并采用了数据仓库、联机分析和数据挖掘的最新数据集成技术构件的子系统。系统的基础数据库结构按已颁发的国家、行业及原地矿部有关的规范标准设计,具有很好的通用性,对地勘单位的信息管理十分实用,目前各省地勘局按部颁标准建设的地质基础数据库可以直接挂到此系统上使用。该系统适用于不同层次和不同空间范围的矿产资源预测评价工作,从区域资源远景评价到找矿靶区优选评价等都可以使用。MORPAS 软件的设计思路是从地学基础数据库出发,通过数据转换、综合、集成,生成用户级局部数据仓库和多级数据模型,然后运用联机分析方法和数据挖掘技术,提取与矿化有关的隐蔽信息,寻找数据潜在的关联,发现被忽略的矿化要素,最终达到识别、圈定和评价矿化异常的目的。该系统的优点是可将各种空间分析模型及方法集成,提高系统分析、预测和评价的能力,避免系统设计中数据库、方法库和模型库相互脱节的问题。其运行特点是人机交互、数据管理便捷、综合分析能力强,从数据集成到成果解释成图可实现一体化。

总之,矿产资源预测已经进入了信息更加综合、技术飞快更新的新时期,主要表现在将当代成矿理论与现代综合勘探技术有机结合起来,体现在将传统的定量数值计算与计算机 GIS 图形图像信息可视化技术结合起来。

需要特别指出的是,用于矿产资源定量预测的数学模型是由地质概念模型发展而成的定量模型,是在定性研究和定性预测基础上的定量预测。因此,数学模型的建立必须以坚实的地质研究所建立的正确地质概念模型为基础。此外,进行矿床(产)预测定量预测时,应将几种方法结合起来运用或将几种方法同时运用,将各种方法综合起来运用可以综合利用每种方法的长处,起到扬长避短作用;而将几种方法同时运用,可以互相进行预测结果的检验和比较。如由于黑矿类型(Kuroko Type)的矿床中 Cu, Pb, Zn 含量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 等人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)的含量。得到较好的预测效果<sup>[10]</sup>。

## 参考文献:

- [1] 赵鹏大, 胡旺亮, 李紫金. 矿床统计预测(第二版)[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [2] Singer Donald A. Some Suggested Future Directions of Quantitative Resource Assessments[J]. Journal of China University of Geosciences, 2001, 12(1): 40-44.
- [3] 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.
- [4] 徐忠祥, 吴国平. 灰色系统理论与矿床灰色预测[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993.
- [5] 赵云胜, 龙昱, 赵钦球. 灰色系统理论在地质中的应用研究[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1997.
- [6] 中国地质学会数学地质专业委员会. 中国数学地质(第8集)[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [7] 李长江, 麻士华, 朱兴盛. 矿产勘查中的分形、混沌与 ANN[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [8] 陈守余, 周梅春. 人工神经网络模拟实现与应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2000.
- [9] 赵鹏大, 吕新彪. 长江中下游地区地质异常及成矿预测 BP 模型[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999.
- [10] Katsuki 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.
- [11] Gavin J Bowden, Holger R Maier, Graeme C Dandy. Optimal division of data for neural network models in water resources applications[J]. Water Resources Research, 2002, 38(2): 2(1-11).
- [12] 谢贤平, 柴建设, 童光煦. 地质数据的 BP 网络分析方法[J]. 地质与勘探, 1995, 31(2): 38-42.
- [13] 邓建, 古德生, 李夕兵. 可视化自适应神经网络及在矿业中的应用[J]. 中南工业大学学报, 2000, 23(3): 205-207.
- [14] Hsu K, Gupta H V, Ssoroooshian. Artificial neural network modeling of the rainfall-runoff process[J]. Water Resources Research, 31(10): 2517-2530.
- [15] 朱宝龙, 夏玉成. 基于 Matlab 下 BP 网络在砂土液化评价中的应用[J]. 华东地质学院学报, 2001, 24(1): 30-33.
- [16] 刘国东, 丁晶. 运用 BP 网络预测地下水位[J]. 西安地质学院学报, 1997, 19(2): 53-57.
- [17] 胡尊国, 孟宪国. 第一届全国分形理论与地质科学学术讨论会论文集[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993.
- [18] Zhang Zheru, Mao Huahai, Qiuming Cheng. Fractal Geometry of Element Distribution on Mineral Surfaces[J]. Mathematical Geology, 2001, 33(2): 217-228.
- [19] Eastman R J, Fulk M. Long sequence time series evaluation using standardized principal components[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1993, 59(8): 1307-1312.
- [20] Fung T, LeDrew E. Application of principal components analysis to change detection[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1987, 53(12): 1649-1658.
- [21] Haiyu Gao, Pengda Zhao, Jiahua Wang, *et al.* Updating of population parameters and credibility of discriminant analysis[J]. Mathematical Geology, 1999, 31(3): 249-275.
- [22] 毛先成. 香花岭锡矿床三维数学模型及深部盲矿预测[A]. 中国地质大学. 矿产资源统计预测国际学术讨论会论文集[C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990.
- [23] Jonathan M Lees. Geotouch: software for three and four dimensional GIS in the earth sciences[J]. Computers & Geosciences, 2000, 26: 751-761.
- [24] 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.
- [25] 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, 1998, 23(2): 125-128.
- [26] 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, 1998, 23(1): 75-78.
- [27] 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, 1997, 22(1).
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Rokos D, Argialas D, Mavrantza R, *et al.* Structural Analysis for Gold Mineralization Using Remote Sensing and Geochemical Techniques in a GIS Environment: Island of Lesbos[J]. Hellas Natural Resources Research, 2000, 9(4): 277-294.
- [31] Gao Yu, Hu Guangdao, Ma Hongchao. Application of GIS to Geological Information Extraction[J]. Journal of China University of Geosciences, 2000, 11(2): 183-185.
- [32] Xiao Keyan, Zhang Xiaohua, Chen Zhenghui, *et al.* GIS: A Tool to Change Traditional Way of Mineral Resources Appraisal[J]. Journal of China University of Geosciences, 2000, 11(2): 138-140.
- [33] 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.
- [34] 陈石羨. 地理信息系统在金属矿产预测中的应用[J]. 地质找矿论丛, 1998, 13(1): 74-82.
- [35] 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.
- [36] 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.

- structures[J]. *Geophys. J. Int.*, 1998, 135: 627-649.
- [53] 曹正林, 赵锡奎, 王英民, 等. 鄂尔多斯盆地北部古风化壳岩石—流体反应动力学模拟研究[J]. *沉积学报*, 1997, 15(4): 91-96.
- [54] 段振豪, 吕万军, 李思田, 等. 地质流体热力学性质的计算机模拟与分子动力学模拟[J]. *中国科学基金*, 2000, 2: 112-117.
- [55] Anthony J Park, Peter J Ortoleva. WRIS.TEQ: multi-mineralic water-rock interaction, mass-transfer and textural dynamics simulator[J]. *Computers & Geosciences*, 2003, 29: 277-290.
- [56] Brien G O, Bean C J, McDermott F. Numerical and experimental modelling of fluid-rock interactions with heterogeneous porosity [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, 69-70: 119-125.

## TREND OF STUDY ON WATER ROCK REACTION IN ORE-FORMING PROCESS

GAO Bang-fei<sup>1,2</sup>, DENG Jun<sup>1,2</sup>, WANG Qing-fei<sup>1,2</sup>, YANG Li-qiang<sup>1,2</sup>, WAN Li<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Geological process and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083, China; 2. Key Laboratory of Lithosphere Tectonics and Lithoprobeing Techology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing, 100083, China;

3. School of Mathematics and Information Science, Guangzhou University, Guangzhou, 510405, China)

**Abstract:** Water-rock reaction (WRR) is not only the significant research content of metallogeny, but also the frontier geoscience problem. Introduction of complexity theory, hydrodynamics and some other theories and the improvement of testing technology led to the WRR research developing in a systematical and quantitative direction and the relevant achievements. This paper focuses on the process and mechanism of element migration and isotope fractionation based on which geological data of elements and isotopes are used to tracing fluid activity and estimating the process of WRR. Quantitative calculation, numerical simulation and physical experiment are the main means of WRR study, and each method has its own characters. For the complexity of water-rock system, all the methods should be used to remodeling the geological process of WRR.

**Key Words:** water-rock reaction; dynamics; quantitative calculation; numerical simulation; physical experiment

(上接第 12 页)

## RESEARCH ON QUANTITATIVE PREDICTION OF MINERAL RESOURCES

LI Sui-min<sup>1</sup>, YAO Shu-zhen<sup>2</sup>, ZHOU Zong-gui<sup>2</sup>

(1. The Resources Collage of Shijiazhuang University of economy, Shijiazhuang 050031, China;

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** with the data procession and data collection techniques, quantitative prediction of mineral resources has developed from statistic prediction at initial stages to multi-information synthesis quantitative prediction based on computer in recent year. This paper summarizes the development and the direction of quantitative prediction of mineral resources in recent years.

**Key Words:** prediction; prediction method; quantitative prediction