

文章编号:0258-7106(2003)04-0425-05

中国铜矿数字矿床模型评价系统的开发*

肖克炎¹ 王勇毅¹ 薛群威¹ 张寿庭² 黄文斌¹

(1 中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037; 2 中国地质大学,北京 100083)

摘要 应用经典的标准矿床模型标志准则进行区域成矿远景区圈定是“三步式”固体矿产资源评价的重要基础,数字矿床模型将为广大资源评价人员提供计算机辅助决策工具。文章介绍了中国铜矿数字矿床评价系统开发的基本原理和方法,研究了数字矿床模型的核心创新技术问题。开发的系统初步实现了专家系统与 GIS 的结合,可以在区域成矿远景区划和评价中应用。

关键词 数学地质学 数字矿床 铜矿 GIS 专家系统 资源评价

中图分类号: P628⁺.3; P618.41

文献标识码: A

数字矿床模型是近年来矿产资源评价研究的热点(肖克炎等,2000),在此之前,赵鹏大提出了数字找矿模型(赵鹏大,1999),其基本点是通过定量数学模型建立资源潜力与多元地学信息的关系,它与数字矿床模型有一定的差异。

最早为建立矿床模型专家系统进行的开创性工作作为美国地质调查局的 Duda 在 20 世纪 80 年代初开发的斑岩铜矿专家系统,应用该系统成功地找到了斑岩铜矿。近年来, R. B. MacCm mon (1994; 2000), 在原 Prospector 的基础之上,以 D. P. Cox 等 (Cox et al., 1986) 的 86 个全球描述性矿床模型为知识库基础,总结了多于 146 个矿床的知识,开发了 Prospector-2 专家系统 (Hughes, 2000), 使用该系统,地质专家可在极短的时间内根据在研究区观察到的地质信息找到最佳的标准模型,并且可以确定哪些信息可以解释,哪些重要信息没有观测到。20 世纪 90 年代, D. J. Hughes (2000) 也研究了加拿大的 GEOMODEL 矿床专家系统。中国学者刘承祚 (1994) 等在中国矿床专家系统研究方面也做了大量工作。

近年来,随着 GIS 技术的成熟,大量的地学空间数据库以 GIS 数字化成果表达。如何将专家系统的知识库、知识推理与区域地质多元信息资料结合起来,实现 ES 与 GIS 的结合既是 GIS 空间分析的发展趋势(肖克炎等,2000),又是确保 ES 专家系统在地学中成功应用的重要问题。2000 年笔者承担了中

国地质调查局矿产资源评价新方法模型的研究,试图建立中国铜矿数字矿床评价模型,初步实现了 ES 与 GIS 技术的融合。

1 中国铜矿数字矿床模型总体结构

中国铜矿数字找矿模型评价系统综合参考了美国地质调查局的“三步式”成矿预测方法 (Singer et al., 2001) 的基本思路,通过建立数字矿床模型计算机智能推理网络系统,进行实测多元地学数据的客观综合,以实现预测区可能产出的矿床类型的推理判别,然后利用地学综合信息空间数据库中可用于定位的 GIS 地学图层数据,在 GIS 软件平台上进行多元信息综合处理,圈定可能赋存该类矿床的地质找矿可行地段。最后,选取适当的定量分析方法,完成预测区定位及远景区级别优选等区域成矿潜力的综合评价。以上工作是在统一的计算机软件平台上,通过一体化系统处理完成的。系统在运用数据分析方法进行综合、发掘和提取各种成矿潜力定量预测信息时,整个评价过程始终围绕“矿床模型”这个核心。

中国铜矿数字找矿模型评价系统以中国现有的典型铜矿床描述性模型研究成果为基础,抽取其中最能概括并区分各种矿床类型的内容,把这些用自然语言描述的项目转化成数据和符号,建立中国铜

* 本文得到国家重点基础研究规划项目 (G1999043216) 的资助

第一作者简介 肖克炎,男,1964 年生,研究员,博导,从事矿产资源定量评价研究工作。

收稿日期 2003-03-27; 改回日期 2003-07-18。李岩编辑。

矿主要典型矿床成因模型的数字矿床模型原始数据库。在此基础上,通过解决描述矿床模型的自然语言与计算机可以识别和处理的符号集合之间的对应关系,建成矿床类型计算机专家推理系统知识规则库,实现对矿床模型的智能推理。目前,中国已勘查并获得储量的铜矿床共有 912 处(截至 1999 年),按成因划分为 10 种铜矿床类型(黄崇轲,2000),它们是岩浆熔离铜镍硫化物型、斑岩型、接触交代(夕卡岩)型、海相火山气液型、陆相火山气液型、热液型、海相沉积型、陆相沉积型、受变质型和表生(风化壳)型。系统以这 10 种铜矿床模型为原始描述性矿床模型分类依据,通过分析和对比大量典型矿床实例,概括总结出了每一类矿床的综合地质特征及标志组合,建立了 10 个中国铜矿床地质找矿概念模型。然后,再从中抽取可用于推理判类,并能把 10 个铜矿模型区分开的地质特征,用来建立相应的计算机推理网络模型,作为系统进行推理判类的依据。

系统总体目标是:吸收国内外矿产资源专家系统的经验,将专家系统与 GIS 技术结合,在总结中国铜矿典型矿床找矿模型的基础上,构建数字矿床模型推理网络结构,形成数字化矿床模型知识库,通过建立原始矿床概念模型与计算机智能推理软件之间的信息交换机制,开发出数字矿床模型计算机智能推理软件系统,实现矿床模型的计算机推理,然后与矿产资源 GIS 评价系统的 MRAS 软件相结合,以矿产及地学综合信息 GIS 数据库为数据源,对预测区可能的矿床类型、成矿位置及远景区级别做出综合

定量评价。

本系统评价分 3 步进行,由此构成系统的 3 级推理网络(图 1):第一级确定区域内可能存在的矿种及类型;第二级确定可能存在相关类型矿床的区域位置及成矿概率;第三级进行成矿远景区的级别优选。该评价系统有如下特点:

(1) 系统总体框架按矿种、矿床类型、矿床位置及远景区优选顺序进行设计。矿床类型的确定通过数字矿床模型专家推理系统实现。推理过程采用传统的专家系统对话提问方式进行,用户可通过屏幕直接选择并辅以输入相关数据完成对提问的回答。

(2) 数字矿床模型知识库中每条规则的前提和结论部分均可附加贡献权重概率估值,对于端点前提(端点证据),则直接由用户根据这些地质证据的存在与否(如很可能存在、不大可能存在、不确定等)给出可信度值,这些概率估值在系统推理过程中全程参加计算,并最终确定推理得出的可能矿床类型的归类概率。另外,数字矿床模型知识库的知识可做到随时更新和添加。

(3) 推理机由规则推理网络构成,推理采用正反向混合不确定模糊推理法,其控制策略划分为两个阶段。在第一阶段中,用户首先向系统提供一批原始观测证据,系统将观测证据与系统中存储的各种矿床模型的规则集依次相匹配,找出匹配最好的矿床模型,作为第二阶段的考查目标。本阶段的推理方法为从证据到结果的正向推理。第二阶段为控制策略,其目的是为上述已确定的模型寻找户首尚未

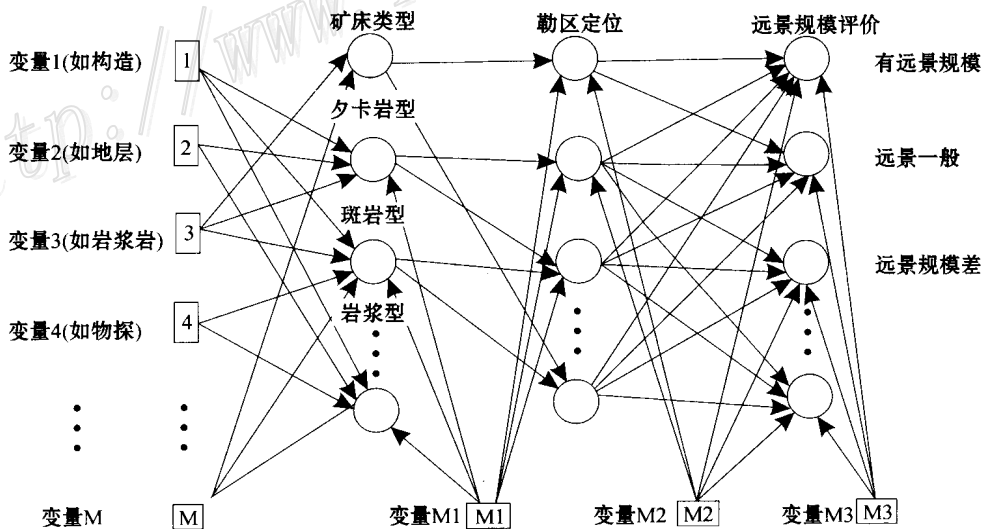


图 1 中国铜矿数字矿床模型三级推理网络

Fig.1 Three-level reasoning network of the copper deposit digital model

提供但却最有效的证据。其基本方法是,考查目标模型下那些尚未确定的前提断言,寻找对结论影响最大的前提断言,反向考查其次级前提断言,直至端点(叶子)前提断言,通过人机交互方式向用户询问,以便从用户处获得新证据;之后,系统再在该结论下面找下一个次大的前提断言,然后再重复调用这一过程。显然,新证据的获得将改变结论目标模型的可信度概率值。第二阶段采用的推理方法为从目标到证据的反向推理方法。

(4) 成矿位置的定位:在 GIS 平台上,通过对用户提供的 GIS 地学综合数据库中可用于成矿有利地段定位的地学图层数据的综合处理,来圈定成矿远景地段。具体做法为:先将与矿床成矿模式有关的找矿标志地学图层专题提取、圈定出来,并对该研究区生成统一大小的网格单元,然后通过 GIS 信息查询,获取每个单元中含有的找矿标志信息。只有当某个单元包含全部标志时,才认为其为有利单元,否则将作为不满足条件的单元删除,最后剩下的单元将是所需要的预测单元。

(5) 成矿远景区优选:以自主开发的矿产资源 GIS 评价系统软件 MRAS 为辅助工具,在获取空间定位单元的基础上,进行进一步的靶区优选,获得最佳的定位空间。系统主要是通过以下几种无模式的靶区优选方法进行靶区优选的:

- ④ 非线性的人工神经网络 ART 模型
- ④ 非线性的人工神经网络 Hopfield 模型
- ④ 非线性的人工神经网络 Kohonen 模型
- ④ 线性的 Q 型聚类分析

2 矿床模型知识和推理

2.1 铜矿知识库

以美国地调局 D. P. Singer(2001)给出的矿床描述性模型的指标体系为模板,总结出两类不同形式的知识库,一种是预测和识别研究区铜矿可能类型的知识库,另一类是进行空间定位的知识库。在总结知识库时选择不同类型中有代表性的铜矿床,如斑岩铜矿,选择了中国的德兴、玉龙等,来归纳其共性的矿床知识模型。在总结和确定矿床类型知识库时,不考虑空间数据库之间的联系;总结知识时可以考虑详细的矿床地质资料,但在进行区域定位靶区圈定时,必须考虑区域现有的资料,所以知识必须与区域资料匹配。

在铜矿类型推理中,应考虑如下的矿床知识:

- ④ 构造背景
- ④ 成矿地质条件与控矿因素
- ④ 区域构造
- ④ 岩浆岩,包括岩浆建造、岩体就位深度、岩体规模、岩浆分异、岩石类型、岩体时代、岩体地球化学
- ④ 地层围岩
- ④ 矿化部位
- ④ 矿物组合
- ④ 矿石结构构造
- ④ 围岩蚀变
- ④ 地球物理重力、磁法、电法异常
- ④ 地球化学异常指示元素组合
- ④ 水系地球化学元素数据(BP 模型)
- ④ 其他标志
- ④ 典型模型矿床图片

在进行区域靶区空间定位时,主要应考虑与区域多元地学空间数据库相对应的找矿关键标志,如区域岩浆岩分布、成矿构造带范围、重磁梯度带、区域化探异常分布区和遥感异常等信息。

2.2 知识推理机

推理机用于记忆所采用的规则和控制策略的程序,使整个专家系统能够以逻辑方式协调地工作。推理机能够根据知识进行推理和导出结论,而不是简单地搜索现成的答案。在进行推理机算法设计时应考虑用户对研究地区数据的不确定性和信息不对称缺失的情况。本次研究使用了美国地质调查局专家系统的算法,它是由 R. O. Duda 等人于 1976 年(见刘承祚,1994)提出的一种不确定性主观 Bayes 法推理模型,该推理模型曾被成功地应用在其本人开发的 Prospector 专家系统中。其原理如下:

(1) 知识不确定性的表示

主观 Bayes 方法中,知识用产生式表示,其形式为:if E then(LS, LN) H

其中 E 为规则前提, H 为规则结论, (LS, LN) 表示该知识的知识强度, LS 和 LN 分别定义为

$$LS = \frac{P(E|H)}{P(E|\bar{H})}$$

$$LN = \frac{P(\bar{E}|H)}{P(\bar{E}|\bar{H})} = \frac{1 - P(E|H)}{1 - P(E|\bar{H})}$$

在实际系统中, LS 和 LN 的值均由领域专家根据经验给出,而不是由 LS 和 LN 公式计算出来的,给值的基本原则是:当证据 E 越是支持 H 为真时,

则 LS 的值应该越大;当证据 E 对 H 越是重要时,则 LN 的值应该越小。

(2) 修改的 Bayes 公式

设几率函数为: $O(E) = \frac{P(E)}{P(\bar{E})} = \frac{P(E)}{1 - P(E)}$, 则:

$$O(H|E) = LS \times O(H)$$

$$O(H|\bar{E}) = LN \times O(H)$$

(3) 组合证据不确定性的表示

无论组合证据有多么复杂,其基本组合形式只有合取与析取两种。

设在观察 S 下有单一证据 E_1, E_2, \dots, E_n , 且分别有概率 $P(E_1|S), P(E_2|S), \dots, P(E_n|S)$, 若组合证据: $E = E_1 \text{ and } E_2 \text{ and } \dots \text{ and } E_n$, 则 $P(E|S) = \min\{P(E_1|S), P(E_2|S), \dots, P(E_n|S)\}$

若组合证据: $E = E_1 \text{ or } E_2 \text{ or } \dots \text{ or } E_n$,

则 $P(E|S) = \max\{P(E_1|S), P(E_2|S), \dots, P(E_n|S)\}$

由 Bayes 公式可知:

$$P(H|S) = P(E|S) \times P(H|E) + P(\bar{E}|S) \times P(H|\bar{E})$$

当 $P(E|S) = 1$ 时, $P(\bar{E}|S) = 0$, 可得:

$$\begin{aligned} P(H|S) &= P(H|E) = \frac{O(H|E)}{O(H|E) + 1} \\ &= \frac{LS \times O(H)}{LS \times O(H) + 1} = \frac{LS \times \frac{P(H)}{1 - P(H)}}{LS \times \frac{P(H)}{1 - P(H)} + 1} \\ &= \frac{LS \times P(H)}{(LS - 1) \times P(H) + 1} \end{aligned}$$

当 $P(E|S) = 0$ 时, $P(\bar{E}|S) = 1$, 可得:

$$\begin{aligned} P(H|S) &= P(H|\bar{E}) = \frac{O(H|\bar{E})}{O(H|\bar{E}) + 1} \\ &= \frac{LN \times O(H)}{LN \times O(H) + 1} = \frac{LN \times \frac{P(H)}{1 - P(H)}}{LN \times \frac{P(H)}{1 - P(H)} + 1} \\ &= \frac{LN \times P(H)}{(LN - 1) \times P(H) + 1} \end{aligned}$$

当 $P(E|S) = P(E)$ 时, 表示 E 与 S 无关, 可得:

$$\begin{aligned} P(H|S) &= P(E|S) \times P(H|E) + P(\bar{E}|S) \times P(H|\bar{E}) \\ &= P(E) \times P(H|E) + P(\bar{E}) \times P(H|\bar{E}) \\ &= P(H) \end{aligned}$$

由上述分析得到了 $P(E|S)$ 上的 3 个特殊值: 0、 $P(E)$ 和 1, 并分别取得了对应值 $P(H|\bar{E})$ 、 $P(H)$

和 $P(H|E)$, 这样就构成了 3 个特殊点; 当 $P(E|S)$ 为其他值时, 可通过上述 3 个特殊点的分段线性插值函数求得。

$P(H|S) = P(H|\bar{E}) + \frac{P(H) - P(H|\bar{E})}{P(E)} \times P(E|S)$, 若 $0 \leq P(E|S) < P(E)$, 则 $P(H|S) = P(H) + \frac{P(H|E) - P(H)}{1 - P(E)} \times [P(E|S) - P(E)]$, 若 $P(E) \leq P(E|S) \leq 1$, 该公式称为 EH 公式。

EH 公式处理用概率描述非精确性, 当证据的非精确性由可信度 $C(E|S)$ 给出时, 需要适当修改 EH 公式, 得到:

$$P(H|S) = P(H|\bar{E}) + [P(H) - P(H|\bar{E})] \times [\frac{1}{5} C(E|S) + 1], \text{ 若 } C(E|S) \leq 0,$$

则 $P(H|S) = P(H) + [P(H|E) - P(H)] \times \frac{1}{5} C(E|S)$, 若 $C(E|S) > 0$, 该公式称为 CP 公式。

有了 EH 和 CP 公式, 系统就可以根据这两个公式对可信度和概率进行不同的处理。当用初始证据进行推理时, 可根据用户给出的可信度 $C(E|S)$, 通过运用 CP 公式求出 $P(H|S)$; 当用前面推出的中间结论作为新的证据进行推理时, 可根据该中间结论的概率, 通过运用 CH 公式求出 $P(H|S)$ 。

在专家系统设计过程中往往还有实际测量数据, 如区域地球化学数据, 本次使用非线性神经网络 BP 分类期进行处理, 这样可对上述专家系统模型进行扩展。

3 数字矿床模型界面

系统采用有两类: 在进行铜矿类型的推理知识用户友好输入时, 采用 windows 对话框界面; 在区域靶区空间定位和优选时, 采用 MRAS 中有关 GIS 工程管理工作界面。

数字矿床模型系统主要用于将专家的经验与 GIS 空间分析功能相结合, 以获得研究区的矿床定位等, 根据系统总体结构, 可将系统分成 4 个主要子功能模块:

(1) 预测工程管理模块

提供预测工程的管理, 主要包括新建预测工程, 预测工程的打开、保存、另存为、关闭等相关操作, 以及提供与 MAPGIS 应用程序的接口, 即生成 MAPGIS 格式的工程文件, 并保存该文件, 同时提供预测工程的打印。

(2) 空间定位方式模块

主要是获取由数字矿床模型预测的矿床位置, 主要包括有: 综合图层定位, 找矿标志定位, 以及专家主观定位。目前已实现了综合图层定位。

(3) 靶区优选模块(综合标志数字定位)

应用线性、非线性的评价方法, 对已经存在的单元进行进一步的评价分类, 获得最优的靶区。主要包括生成预测结果专题、添加参与数字定位专题、选择参与数字定位专题和数字定位数据生成以及综合标志数字计算(包括神经网络 ART 模型、HOPFIELD 网模型、KOHONEN 网模型、聚类分析)等。

(4) 可视化模块

主要进行数据的可视化显示, 包括预测单元的数据显示, 主题图层的属性浏览编辑, 图形的放大、缩小、移动等交互操作及信息查询等。

4 结 论

(1) 数字矿床模型是将成矿基础研究成果应用到矿产资源评价的桥梁, 同时也使矿产资源评价有了可靠的地质理论基础, 可以形成矿产资源评价的标准。

(2) 本次研究初步解决了数字矿床模型研究的专家系统 ES 与地理信息系统的结合, 在确定矿床的可能类型时, 使用专家系统推理构架; 在靶区优选和潜力评价中, 采用专家知识库与 GIS 空间分析相结合的方法。

(3) 形成的原型可加入 MRAS 矿产资源评价系

统中, 供地质调查和矿产资源评价使用。

本次研究虽取得了以上成果, 但对于数字矿床研究的关键——总结矿床知识库和构造推理知识网络的工作还有待加强。建议国家在对矿产资源进行地质调查与评价的过程中, 加强对不同矿种的数字矿床模型的研究。

References

- Cox D P and Singer D A. 1986. Mineral deposits models[J]. USGS Bull. , 1693 .
- Huang C K. 2000. The copper deposits of China[M]. Beijing: Geol. Pub. House(in Chinese) .
- Hughes J D. 2000. GEOMODEL—an expert system for modeling layered geological sequences applied to assessment of coalfields[A]. Analysis techniques model and numerical methods[C]. Canada .
- Liu C Z. 1994. Geological expert system[M]. Beijing: Geol. Pub. House(in Chinese) .
- MacCmmon R B. 1994. PROSPECTOR-2, towards knowledge base for mineral deposits[J]. Mathematical Geology, 917 ~ 936 .
- MacCmmon R B. 2000. PROSPECTOR-2, an expert system for mineral deposit models[A]. Techniques model and numerical methods[C]. Canada .
- Singer D A, Menzie W D, Sutphin D M, et al. 2001. Mineral deposit density—An update[M]. USGS Professional Paper 1640-A. 13P .
- Xiao K Y, Zhang X H, Wang S L, et al. 2000. Mineral resource GIS assessment system[M]. Beijing: Geol. Pub. House(in Chinese) .

附中文参考文献

- 黄崇轲. 2000. 中国铜矿床[M]. 北京: 地质出版社 .
- 刘承祚. 1994. 地质专家系统[M]. 北京: 地质出版社 .
- 肖克炎, 张晓华, 王四龙, 等. 2000. 矿产资源 GIS 评价系统[M]. 北京: 地质出版社 .

Assessment System of Copper Deposit Digital Model of China

Xiao Keyan¹, Wang Yongyi¹, Xue Qunwei¹, Zhang Shouting² and Huang Wenbin¹

(1 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

The application of typical standard deposit model to delineating metallogenic provinces makes up an important foundation of the "three-step" mineral resource assessment method. The digital model is a supplementary computer policy-making tool for mineral deposit assessment. According to the copper deposit digital model to be developed in China, the authors describe in this paper the construction of the mineral deposit digital model as well as its basic principle and technique. Combining the expert system with GIS, the digital mineral resource assessment system can be applied to the prospective assessment of mineral deposits and regional planning.

Key words: mathematical geology, digital mineral deposit, copper deposit, GIS, expert system, resource assessment