

文章编号 10258-7106 (2008) 01-0113-07

数字矿床模型研究与系统实现*

何凯涛^{1,3}, 王勇毅², 丁建华², 赵汀²

(1 中国地质调查局, 北京 100011; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
3 国防科学技术大学, 湖南 长沙 410073)

摘 要 数字矿床模型(DDM)是传统矿床模型的数字化。本文论述了数字矿床模型的概念,提出了其主要组成结构和建模关键技术。在吸收国内外地质领域专家系统建立的经验基础上,将人工智能技术与地理信息技术(WebGIS)相结合,通过构建矿床模型知识库,建立数字矿床模型推理网络结构,并以斑岩型铜矿为例论述了建立数字矿床模型的系统过程。本文是“十一五”期间国家高技术研究发展(863)计划的阶段成果。

关键词 地质学; 数字矿床模型; 专家系统; 矿产资源评价; GIS

中图分类号 P628

文献标识码 A

Digital deposit model and its implementation in GIS system

HE KaiTao^{1,3}, WANG YongYi², DING JianHua² and ZHAO Ting²

(1 China Geological Survey, Beijing 100011, China; 2 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China)

Abstract

Traditional mineral deposit models usually provide a qualitative description of geological properties, tonnage, scale and genesis of a group of similar types of mineral deposits. These types of qualitative models provide guidelines for establishment of the digital mineral deposit model which has been considered to be a new research area. This paper deals with the concept of the digital mineral deposit model as well as the construction of the Digital Mineral Deposit Model including reasoning network and knowledgebase. The model and system were verified through a case study of porphyry copper deposits in China. The results presented in this paper reflect the preliminary achievements of a project supported by Chinese High-Technology Research and Development (863) Program.

Key words: geology, digital deposit model, expert system, mineral resources assessment, GIS

数字矿床模型(Digital Deposit Model, 简称 DDM)是近年来矿产资源评价的热点研究课题,是专家系统在成矿预测应用中的重要领域(刘承样等, 1994)。该研究始于 2002 年美国地质调查局进行的“先进的资源评价方法”研究计划。该计划包括了有关数字矿床模型的研究内容,但目前尚未见到最终

成果。截止到目前,国内外文献检索尚未见到有关数字矿床模型方面的研究成果以及相关软件产品问世的报道。肖克炎等(2006)在中国矿产资源评价新方法模型中,系统介绍了数字矿床模型研究的进展,形成了数字矿床模型软件原型。加拿大学者克林顿开发了基于全球 86 种矿床类型的基于 WEB 知识推

* 本文得到国家 863 计划项目《矿产资源评价数字矿床模型及可视化技术研究》(2006AA06Z114)和《基于 SIG 的资源环境空间信息共享与应用服务》(2002AA134010)的联合资助

第一作者简介 何凯涛,男,1970 年生,高工,主要从事地质调查、资源评价和地质信息技术研究。Email: hekt@vip.163.com

收稿日期 2007-08-27; 改回日期 2007-09-26。李德先编辑。

理软件。使用模型知识推理在方法上已成熟,但在模型知识总结、结合 GIS 进行空间靶区圈定等方面还需进一步研究。本文在吸收国内外地质领域专家系统建立的经验基础上,将人工智能技术与地理信息技术(WebGIS)相结合,以斑岩型铜矿为例论述了建立数字矿床模型的系统过程,是国家“十一五”期间国家高技术研究发展(863)计划课题的阶段成果。

1 数字矿床模型(DDM)

数字矿床模型是通过将描述性矿床模型知识化、数字化,以计算机可以直接识别和处理的数据、知识规则和符号形式,采用先进的网络地理信息技术(WebGIS)和智能推理网络技术,在计算机中建立起来进行计算的矿床模型。数字矿床模型中包含地质信息、地球物理、地球化学、遥感地质、构造、矿产等多学科地学内容。数字矿床模型的组成结构主要包括三个部分:矿床知识库、智能推理网络和解释评价方法(图1)。

数字矿床模型的计算机实现,即形成数字矿床模型专家系统(Deposit Model Expert System,简称DMES),其功能包括:推断预测区可能出现的矿床类型、给出归类概率、计算矿床产出概率,并能够基于空间数据库和GIS平台利用定量指标,对成矿有利地段进行矿产资源定量评估、进行各种经济政策模

拟分析(McCommon,2000)等。

数字矿床模型把矿床专家或专家系统和矿产资源GIS评价系统紧密地融合为一体,通过GIS评价系统中定量资源评价工具,利用被判定矿床类型的矿床模型必备成矿关键要素中可用于定位的地质要素专题图层,完成远景区定位及远景区成矿级别优选等资源评价工作。

2 数字矿床模型建模关键技术

数字矿床模型建立的过程,是矿床地质描述模型的计算机化过程,关键技术包括建立矿床知识描述模型(Knowledge Description Model,简称KDM)、建立矿床知识推理网络模型(Knowledge Reasoning Network Model,简称KRNM)、矿床模型知识规则库(Knowledge Reasoning Rules Database,简称KRRD)等。

根据基本建模要素建立的各种类型的矿床地质描述模型中,存在着可用于判别不同类型的特别建模要素,称为特征地质标志。通过分析矿床地质描述模型,从中归纳、抽取可用于推理判类、能够把不同类矿床模型区分开的特征地质标志(包括从宏观大地构造背景到微观岩矿镜下特征),由此建立起来不同类型矿床的矿床地质知识模型。对矿床地质知识模型进一步抽取、归纳,采用树状结构表示矿床地质知识模型,通过专家系统中推理机的技术和方法,

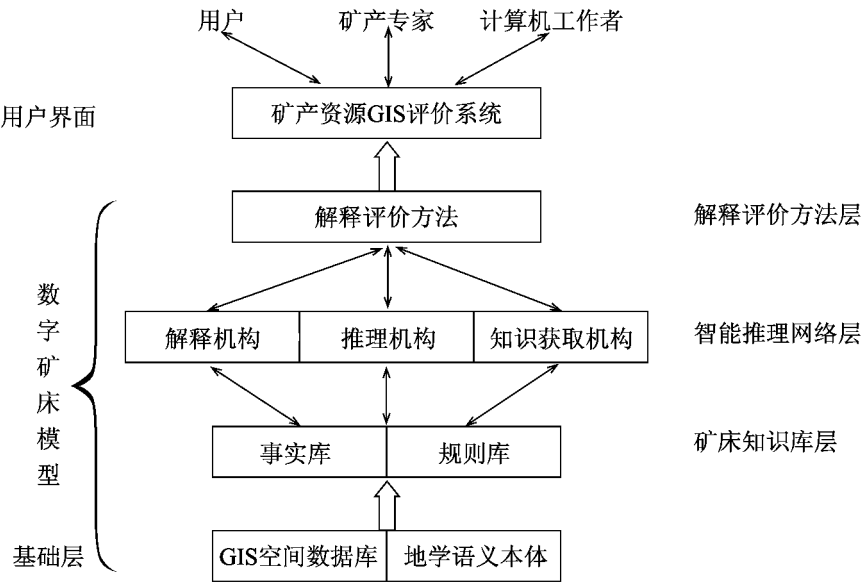


图 1 数字矿床模型结构及工作原理

Fig. 1 Structure and working principle of Digital Deposit Model

得出不同矿床类型的推理网络结构图,建立矿床模型的计算机推理网络模型。从计算机推理网络模型中抽取、产生矿床模型的计算机推理规则,并由此形成矿床模型推理知识规则库(Singer 2001a)。

2.1 矿床知识描述模型(KDM)

矿床模型是对同一类相似矿床的有关地质特征、品位、吨位、规模及成因的系统概述(Cox et al., 1986),这些描述是由实际资料组成的地质知识综合而成,反映了矿床三维地质环境和成矿地质作用过程。由于地质作用的长期性和地质过程的复杂性,在同一空间存在不同时间地质过程的叠加,或同一时间不同空间的叠加,使矿床模型的结构大为复杂化,对其成因的判断更加困难。为了便于计算机的存储和推理判断,必须采用最基本的矿床模型,即以同一矿种的同一成因类型矿床构成一个矿床模型。KDM是数字矿床推理网络模型的基础,KDM的正确性直接关系到推理结果的正确性和可靠性。

例如,建立中国铜矿床地质知识模型。

首先,参考国内外大量有关矿床建模理论和实践的文献和论著,同时查阅大量目前中国已发现铜矿床的最新报告、论文和实例资料,作为铜矿床KDM基础资料来源。其中宋叔和院士、陈毓川院士(1993)、裴荣富院士(1995)及美国地质调查局的Cox(1986)和Singer(2001b)等人的文章和论著,以及《中国铜矿床》(黄崇柯等,2001)都是最重要的参考资料。

第二步,在中国现有典型铜矿床描述模型研究成果的基础上,研究模型所依据的成矿地质内容(称为基本建模要素),经过专家咨询、审核,最终确定基本建模要素。在具体建模过程中,各种铜矿床类型的典型矿床实例是获取矿床地质描述模型的直接依据。至此,建立中国铜矿床岩浆熔离铜镍硫化物型、斑岩型、接触交代(矽卡岩)型等主要类型矿床地质描述模型。

第三步,对中国铜矿典型矿床描述性模型进行概括和总结,分析研究矿床描述性模型中所涉及的有关地质、构造、地球化学、地球物理和矿物学等诸学科有关概念的内涵和外延及其自然语言描述方式,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,建立中国主要类型铜矿床地质知识模型。其中,抽取建模要素中构造(包括大地构造背景)、地层、岩浆岩、矿化指示标志、物化遥标志等6大方面内容中可用于推理判类的地质要素和要素组合,作为建模

的特征地质标志,具体如下:

①构造:包括大地构造背景、成矿地质构造环境、有利的局部构造等;

②岩浆岩:包括岩石类型、结构、组合、分异、产状规模、时代等;

③地层围岩:包括含矿赋矿层位、岩石类型、沉积建造、火山建造、变质建造、时代等;

④矿化标志特征:包括成矿时代、矿化部位、矿物组合(矿石矿物、脉石矿物、指示矿物)、矿石结构构造、围岩蚀变、地表次生特征等;

⑤间接标志:包括地球化学(异常指示元素、代表性元素组合及分带)、地球物理(重、磁、电异常特征)、遥感影像、共伴生矿产(矿床类型、矿产组合)等;

⑥典型实例:在建立中国铜矿床地质描述模型过程中,各种铜矿床类型的典型矿床实例是获取矿床地质描述模型的直接依据。

目前,中国已勘查并获得储量的铜矿床共有912处(黄崇柯等,2001),按矿床成因类型可划分为10种铜矿床类型。

2.2 矿床知识推理网络模型(KRNM)

建立KDM的目的是为了建立矿床模型计算机推理网络模型。矿产资源评价工作是在一定的成矿规律认识(成矿模式)的指导下,对可在野外采集或在实验室测试获取的原始信息构成的基本事实进行由此及彼的推理,估算研究区内与成矿有关的各种地质因素的存在及对找矿的有利程度,最终作出有矿或无矿的评价。有利的地质因素通常包括有利的成矿环境、找矿标志等。成矿环境包括区域地质构造背景、火山、岩浆活动等;找矿标志包括矿化、蚀变、地表次生特征、物化探异常、遥感影像特征等。每个项目又可进一步分为若干子项目,如区域地质构造背景可分别考查大地构造位置、容矿及控矿构造、地层、岩性等。子项目又可进一步细分,如此反复分解,直到基本事实为止。矿产资源评价的知识模型就是表达地质找矿专家如何从研究区的基本事实出发,逐步得出中间结论,直至最终作出有矿、无矿评价的整个过程。这样的知识可以用一个“基本事实-中间结论-最终结论”的树状结构网络来表达,最终结论称为顶层结点或根结点,基本事实称为叶子结点。图2为以斑岩型铜矿构造条件为例的推理网络结构模型。

大地构造背景:

agz103 陆内构造-岩浆活动带

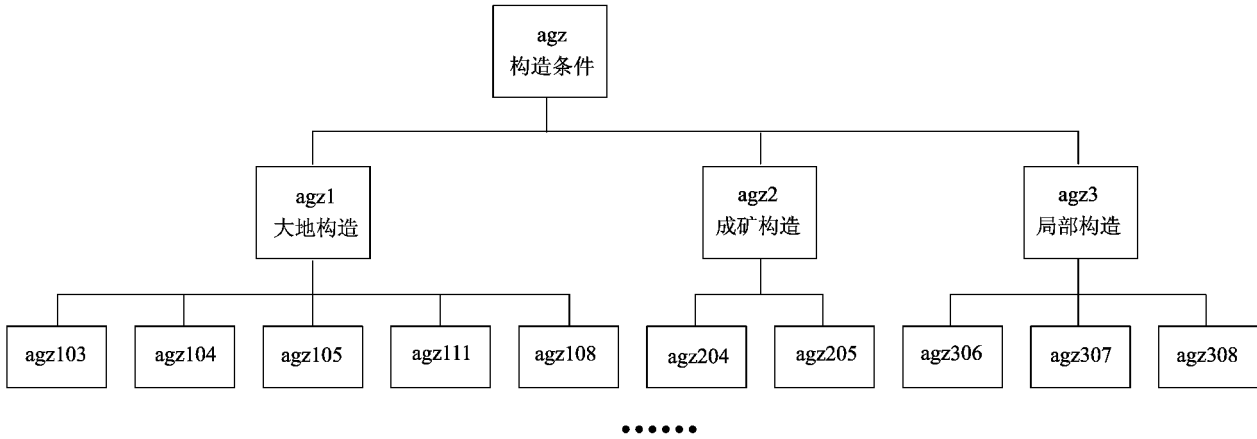


图 2 斑岩型铜矿知识推理网络结构模型

Fig. 2 Reasoning network model for porphyritic copper deposit

- agz104 大陆边缘活动带
- agz105 大陆增生褶皱带
- agz108 大陆造山带或大陆边缘造山带
- agz111 岛弧带

成矿地质构造环境：

- agz204 深大断裂带及其旁侧次级断裂带发育的中酸性岩体分布区
 - agz205 陆相火山喷发盆地或火山断陷盆地、次火山活动区
- 有利的局部构造：

- agz306 次级断裂裂隙发育
- agz307 多组断裂交汇
- agz308 断裂褶皱相交、交切部位

.....

2.3 矿床模型知识规则库(KRRD)

在矿床 KDM 和 KRNm 的基础上 ,要实现矿床模型的智能推理 ,需要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 ,这就是要建立矿床模型知识规则库(KBS)。KBS 是数字矿床模型专家系统 DMES 最重要的部分。

在 DMES 中(图 1) ,解释、推理、知识获取机构组成了智能推理网络层 ,事实库、规则库形成了知识库。事实库是指存放地质事实的数据库 ;规则库指存放矿床知识推理规则的数据库 ;知识库是用于存取和管理从地学专家获取的有关矿床模型的专门知识、事实和规则 ,供推理使用 ,作为推断矿床类型的依据 ,是专家积累经验的信息数据库 ;解释机构具有解答用户的询问并做出解释的功能 ,是“ 专家 ”与用户之间的“ 人 - 机 ”接口 ;推理机构具有完成各种推

理或搜索等的功能 ,能够利用有关矿床模型的专门知识 ,推断出可能的矿床类型 ;知识获取机构具备自学习的功能 ,通过人工移植的方法获取专家知识 ,将专业文献、专家经验等进行分析整理 ,经知识编码输入知识库。其中 ,知识库和推理机构是两个关键技术。

知识的表达与组织是系统推理的基础 ,它关系到系统的推理是否能够模拟出专家的思维过程。本系统中 ,矿床模型的知识被总结成各种规则表示出来 ,因此 ,要求规则不仅能表达出矿床模型的大量事实和规律 ,而且各种表达要能准确、全面地体现出专家的实践经验。

知识表示方法采用的是产生式规则表示法 ,其基本表示方式为：

if< 前提 > then< 结论 > [LS ,LN]
/注释/

“ 注释 ”为规则中编码所代表的地质意义说明 ,它由两个斜杠“ / ”括起来 ,并置于每条规则之后。

在每条规则的尾部 ,分别给出充分性量度值 LS 和必要性量度值 LN ,用以反映专家总结该条规则的可信度 ,并用方括号括起来。LS 值及 LN 值由专家打分获得 ,方括号中字母代码与 LS、LN 实际取值的对应关系如表 1 所示。

规则库的组织方式。在规则库中 ,采用如下格式表示规则：

< 规则编号 > :< 规则 > [LS ,LN]
/注释/

库中规则采用编码法表示。规则的所有断言 (前提或结论) 均用变量表示 ,其对应关系见规则编码表。从数学角度看 ,库中规则由若干变量经过相

表 1 规则库专家评估打分

Table 1 Rule database expert evaluation

可能性	肯定	非常可能	很可能	一般可能	有点可能	很小可能	无影响
估值	A	B	C	D	E	F	G
LS 值	1E+6	10000	100	10	100.7	100.3	1
LN 值	10~0.3	10~0.7	0.1	0.001	1 E-4	1 E-6	1

表 2 运算符含义

Table 2 Meanings of operators

运算符	含义	解释
or	逻辑“或”	满足一个条件结果为真
and	逻辑“与”	满足所有条件结果为真

关运算得出结论,相关运算符的含义如表 2 所示。

例如,斑岩型铜矿推理规则

构造:

<by-a102> :if agz103 or agz104 or agz105 or
agz108 or agz111 then agz1[A F]

/agz103 陆内构造-岩浆活动带

agz104 大陆边缘活动带

agz105 大陆增生褶皱带

agz108 大陆造山带或大陆边缘造山带

agz111 岛弧带

agz1 大地构造背景有利/

<by-a202> :if agz204 or agz205 then agz2[B ,
E]

/ agz204 深大断裂带及其旁侧次级断裂带发育
的中酸性岩体分布区

agz205 陆相火山喷发盆地或火山断陷盆地、次
火山活动区

agz2 成矿地质构造环境有利/

.....

2.4 推理

推理是指依据一定的原则从已有的事实推出结
论的过程,这个原则就是推理的核心。专家系统中的
自动推理是知识推理。而知识推理是指在计算机
或智能机器中,在知识表达的基础上,进行机器思
维,求解问题,实现知识推理的智能操作过程。

按照问题求解推理过程的推理方向,可以分为
正向推理、反向推理、正反向混合推理三种自动推理
方法。正向推理是由原始数据出发,按照一定策略,
运用知识库中专家的知识,推断出结论的方法。这种
推理方式由于是由数据到结论,所以也叫数据驱

动策略。反向推理是先提出假设(结论),然后去找
支持这个结论证据的方法,这种由结论到数据的策
略称为目标驱动策略。正反向混合推理一般是先根
据原始数据,通过正向推理,提出假设,再运用反向
推理,进一步寻找支持假设的证据。如此反复,这个
过程就是正反向混合推理。

推理机构的运行依靠推理规则,即 KBS、KRNM
的支撑。

在地质学中,地质成矿规律实际上是各种假说,
假说的结论由地质观测证据支持,而地质证据有可
能又是另一地质假说的结论,即证据和假说是相对
的。在推理网络中,必须反映出这种证据和假说的
相对关系,而这种证据-假说-证据的复杂关系是依靠
一定的推理关系来联接的。

在证据和假说之间存在着下列 3 种基本推理关
系:

① 似然推理关系:在似然推理关系中,不同的证
据可对一个假说有不同的支持程度,称为规则强度,
它可用可能性比率值来表达。每个规则强度值测定
了一个断言概率的变化是如何影响其他断言的。

规则中一个给定的事实证据可以存在或不存
在,这可分别用可信度概率值来说明。一般说来,证
据事实的存在与否是非确定性的,系统通过在这两
个极端值之间进行插值,来计算可能性概率。显然,
证据不确定必然会随之改变结论的可信度。推理中
概率的变化及其结合,可采用贝叶斯公式。

规则可信度由矿床地质专家在设计模型时提出
来,通过把表达程度的自然语言转换成数字来表示,
例如本系统表示存在与否的描述及其可信度概率值
如表 3 所示。

② 逻辑推理关系:推理网络中有些规则的证据
与假说之间是一种逻辑关系,即一种假说的真假值
由证据的布尔函数式确定。基本的三种逻辑关系是
“与(and)”或(or)”非(not)。例如斑岩体中钠
长石交代斜长石(E1)白云母交代斜长石(E2)和绿
帘石交代斜长石(E3)三种交代作用地质证据对斑岩
体内核心带形成有利(H)关系如图 3 所示,这就是一种
逻辑推理关系。H 的值为: $H = (E1 \text{ or } E2) \text{ and } (\text{not } E3)$

③ 顺序推理关系:在断言之间有时会有一定次
序,必须按照一定的顺序考虑断言。例如,在考虑大
陆边缘地带的年代之前,首先要确定该地带是否存在,
所以系统向用户进行提问及获取事实证据是有

表 3 可信度描述及取值

Table 3 Reliability description and volume

	描述	可信度(概率值)
存在	肯定存在	1
	非常可能存在	0.999
	很可能存在	0.99
	可能存在	0.9
	有点可能存在	0.75
不存在	不确定	0.5
	不太可能存在	0.25
	可能不存在	0.1
	很可能不存在	0.01
	非常可能不存在	0.001
	肯定不存在	0

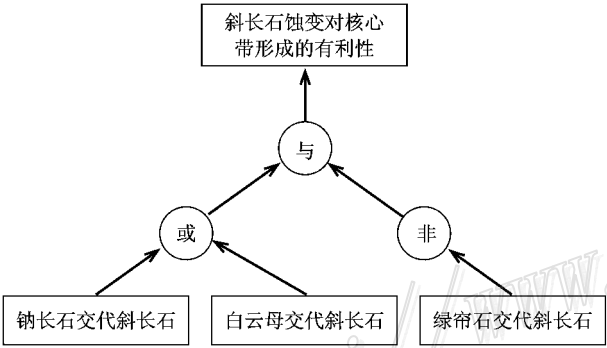


图 3 逻辑推理关系示意图

Fig. 3 Logical reasoning relationship map

选择性的,不能去询问一个实际上不存在的地质年代问题。在一般情况下,可以用先后次序关系表达一种条件,只有在该条件满足以后才能将一个断言用在推理之中。例如上例中的边缘地带存在与否和询问某年代是具有先后次序关系的。系统首先要用一切办法建立地带的存在证据,而不能够在某地带存在的概率值小于某个阈值时就询问其年代。所以,一个断言只有在另一个先后次序有关的断言已成立的条件下才有意义。

推理过程如下:首先,地质勘查人员根据要求输入某个地区的地质观测证据(包括大地构造背景、矿床地质特征如控矿地层、构造、岩浆岩特征、岩石、矿物、蚀变指示标志及物、化、遥信息标志等),确认后,计算机程序将观测证据与各种类型的矿床模型进行对比,并根据矿床模型知识库中的推理规则进行推理计算,然后将推理结果中与输入地质数据最匹配的前3个矿床类型的名称及相应归类概率列出,作为该地区可能存在的矿床类型评价结论,供用户选

择。在此,系统每次只允许用户选择一个矿床类型进行考查。当用户做出选择后,系统进入反向推理,程序以所选矿床类型为结论,反向逐级考查该矿床模型,找出那些用户尚未提供但却最有效的证据,通过人机交互方式向用户询问,以便从用户处获得新证据,进而改变目标矿床类型的判类可信度概率值。

3 数字矿床模型三级推理网络

建立数字矿床模型的基本步骤为:研究矿床模型,建立数字矿床模型及专家系统,用以推断评价区的矿床类型,把矿床模型专家系统与矿产资源评价GIS系统有机融合,完成成矿远景区定位及级别优选评价。

数字矿床模型工作的三步评价步骤(陈毓川等,1993)形成了三级推理网络(图4)。第一级推理网络确定区域内可能存在的矿种及类型;第二级推理网络确定可能存在相关类型矿床的区域位置及成矿概率;第三级推理网络进行成矿远景区级别优选。综合起来有如下具体特点:

(1)总体框架按矿种、类型、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。

(2)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进行数据综合处理(Lesky et al.,1995),圈定成矿远景地段。具体做法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,只有当这个单元包含全部标志时,才认为这个单元是一个有利的单元,否则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。

(3)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(肖克炎等,2006),在获取空间定位单元的基础上,进行进一步的靶区优选,确定成矿远景区级别。

4 结 语

数字矿床模型中包含有地质信息、地球物理、地球化学、遥感地质、构造、矿产等多学科地学内容,数字矿床模型的组成结构主要包括三个部分:矿床知

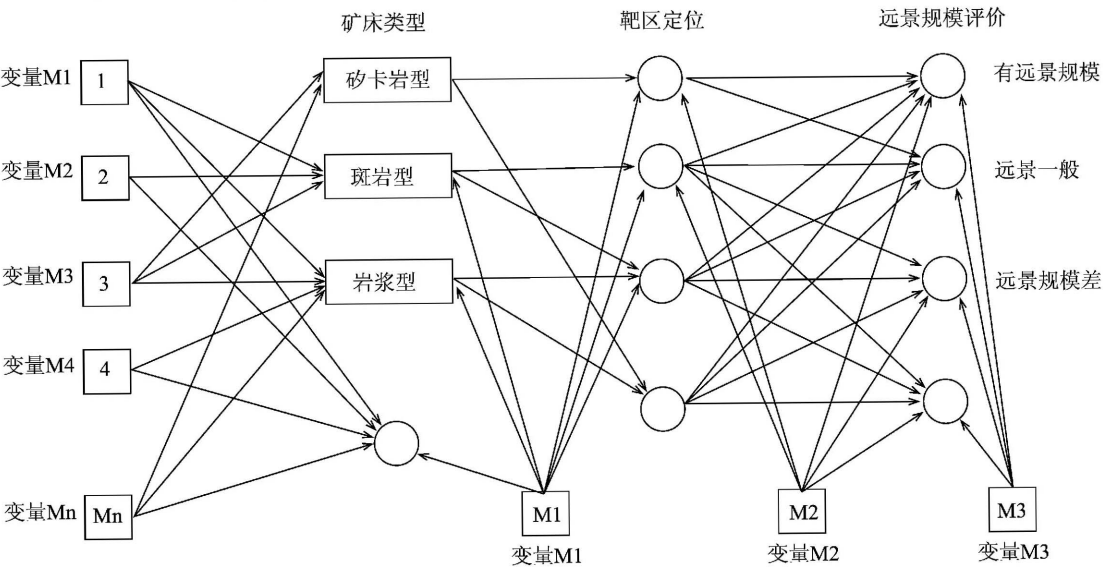


图 4 数字矿床模型三级推理网络

Fig. 4 Three levels of reasoning network for Digital Deposit Model

识库,智能推理网络 and 解释评价方法。数字矿床模型克服了传统描述型矿床模型在矿产资源评价工作中的不利因素,并且基于数字矿床模型三级推理网络可以实现人工智能化判别矿床类型、完成远景区定位及远景区成矿级别优选等资源评价工作,为今后网络环境下未发现矿产资源的评价和矿产资源信息共享服务奠定了基础,有着非常重要的价值。

References

posit models[A]. Techniques model and numerical methods. Canada[C].

Pei R F. 1995. China mineral deposit model[M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese with English abstract).

Singer D A and Berger V. 2001a. Deposit models and their application in mineral resource assessments. In: Schulz K, ed. Methods for global mineral resource assessment, chapter x. US geological survey professional paper[J]. 72~73.

Singer D A, et al. 2001b. Mineral deposit density-An update [M]. USGS professional paper.

Xiao K Y, Wang Y Y, Chen Z H, Xue Q W, Huang W B, Zhu Y S, Yang Y H, Zhang S T, Yang Y H, Zhang X H and Liu R. 2006. New techniques and models of mineral resources assessment in China[M]. Beijing: Geol. Pub. House(in Chinese).

Chen Y C and Zhu Y S. 1993. China mineral deposit metallogenic mode [M]. Beijing: Geol. Pub. House(in Chinese with English abstract).

Cox D P and Singer D A. 1986. Mineral deposits models[J]. USGS bull, 1~2.

Huang C K, Bai Y, Zhu Y S et al. 2001. China copper deposit [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 5~6 (in Chinese with English abstrct).

Lesley Wyborn et al. 1995. Using GIS for mineral potential evaluation in areas with few known mineral resources. Second national forum on GIS in the geosciences[C]. 29~31.

Liu C Y and Chen Y G. 1994. Geological expert system[M]. Beijing: Geol. Pub. House(in Chinese with English abstract).

McCammon R B. 2000. Prospector II, an expert system for mineral de-

posit models[A]. Techniques model and numerical methods. Canada[C].

Pei R F. 1995. China mineral deposit model[M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese with English abstract).

Singer D A and Berger V. 2001a. Deposit models and their application in mineral resource assessments. In: Schulz K, ed. Methods for global mineral resource assessment, chapter x. US geological survey professional paper[J]. 72~73.

Singer D A, et al. 2001b. Mineral deposit density-An update [M]. USGS professional paper.

Xiao K Y, Wang Y Y, Chen Z H, Xue Q W, Huang W B, Zhu Y S, Yang Y H, Zhang S T, Yang Y H, Zhang X H and Liu R. 2006. New techniques and models of mineral resources assessment in China[M]. Beijing: Geol. Pub. House(in Chinese).

陈毓川,朱裕生. 1993. 中国矿床成矿模式[M]. 北京:地质出版社.

黄崇珂,白冶,朱裕生等. 2001. 中国铜矿床[M]. 北京:地质出版社. 5~6.

刘承祥,陈亚光. 1994. 地质专家系统[M]. 北京:地质出版社.

裴荣富主编. 1995. 中国矿床模式[M]. 北京:地质出版社.

肖克炎,王勇毅,陈郑辉,薛群威,黄文斌,朱裕生,杨永华,张寿庭,杨毅恒,张晓华,刘锐. 2006. 中国矿产资源评价新技术与评价新模式[M]. 北京:地质出版社.