

初论中国铜矿数字矿床模型

王勇毅^{1,2}, 肖克炎², 朱裕生², 张寿庭¹, 陈郑辉², 薛群威²

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

[摘要] 从传统描述性矿床模型入手, 通过对比论述数字矿床模型的概念、定义、特点及其与矿产资源评价方法的关系, 最后介绍了中国铜矿数字矿床模型的主要特点、设计思路及基本结构。

[关键词] 矿床模型 数字矿床模型 专家系统 矿产资源评价

[中图分类号] P618.41; P628 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2003)03-0020-05

1 矿床模型

现代矿床找矿模型的研究, 国内外起步时间相差不多。有关矿床成矿的带状分布模型, 最早是由 W H 艾孟斯提出的(1907), 而公认的现代矿床成矿模型, 则以 J D 洛厄尔-J M 吉伯特的斑岩铜矿模型^[2]为代表(1970)。我国最早系统研究建立的矿床模型是宁芜玢岩铁矿模型(1978), 此后, 我国地质工作者在矿床模型研究方面做了大量研究、探索工作, 并取得了一系列研究成果, 积累了丰富的研究资料。如陈毓川^[1]、裴荣富^[4]等人有关矿床模型的论著, 汇集了我国主要矿种的一些重要矿床的地质概念模型。另外, 欧阳宗圻(1990)、吴承烈(1998)等也先后出版过矿床地球化学模型专著。

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 等^[8], 1986)。传统矿床模型是自然语言形式表达的矿床描述性地质概念模型, 它通过分析、研究、对比大量类似矿床得出, 用来概括总结某一类矿床的综合地质特征, 包括这一类典型矿床的成矿地质环境、控矿因素、物化遥找矿标志、矿床学及岩石矿物学特征, 以及诸如成矿物质、成矿流体来源及特征、成矿物理化学环境等矿床成因方面的微观信息特征构成的组合标志特征。在现代矿产资源评价工作中, 矿床模型作为评价目标参照对比的对象, 一直受到中外地质学家高度重视, 并成为矿产资源评价工作的重要基础。

现代计算机高新技术的迅猛发展, 大量新型、实

用的计算机软件工具不断涌现, 极大地促进了现代地球信息科学理论和技术的发展, 并导致地球科学领域信息获取、资料管理、数据传输的方法、手段在现代高新技术支持下发生了根本性变化, 这方面最直接的证据是数字地质图的出现以及在 GIS 平台支持下的大型地学空间数据库的建立。区域矿产资源评价所需要的原始资料已不再是纸质地图和印刷文字报告及数据表格, 而是必须从各种专业性较强的地学空间数据库中查询得出^[6]; 资料、数据的使用方面, 成矿预测评价中对多源地学信息的分析、处理与综合, 也必须在现代高新技术平台支持下进行。

显然, 数据表达形式的统一性及数据处理软件平台的一致性是现代矿产资源定量评价研究的基础和前提, 以往以自然语言形式表达的矿床描述性模型已经不能满足现代成矿预测研究工作的需要。为适应现代矿产资源评价研究领域的新形势, 提高现代矿产资源评价研究工作的效率, 矿床模型在表达方式上的变革势在必行。要想更好发挥传统描述性矿床模型应有的作用, 并直接将其应用于现代矿产资源评价中, 就必须探索一种全新的矿床模型表达方式, 以便既无损原始描述性矿床模型中的有用地质信息, 又能实现与现代矿产资源评价高新技术平台的衔接。

2 数字矿床模型与矿产资源评价

数字矿床模型为世界前沿性研究课题, 该研究始于美国地质调查局。目前, 国内外文献检索尚未

[收稿日期] 2003-02-10; [修订日期] 2002-03-05; [责任编辑] 曲丽莉。

[基金项目] 国家重点基金项目(编号: 2001CB409809)资助。

[第一作者简介] 王勇毅(1956年-), 男, 1981年毕业于中南工业大学, 获学士学位, 在职博士生, 副研究员, 主要从事地理信息系统(GIS)及定量矿产资源评价科研工作。

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。美国地质调查局网页^[19]最近公开了正在进行的“高级资源评价方法”研究计划,其中包括了有关数字矿床模型的研究内容。

数字矿床模型包含地质学、矿物学、与空间相关的矿床类型、构造信息、地球化学和地球物理等信息,它能推断预测区可能出现的矿床类型,给出归类概率,并计算矿床产出概率,然后应用这些定量指标对成矿有利地段进行客观地识别、分类和无偏矿产资源定量评估,并可进行各种经济政策模拟分析。

数字矿床模型通过将描述性矿床模型数字化、知识化,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,在计算机中建立起与之对应的数字化矿床模型。描述性矿床模型中蕴涵的各种复杂关系在数字矿床模型中被转化成知识规则,通过数字矿床模型的规则推理网络完成与评价区地质条件的相似类比。描述性矿床模型组合标志特征的知识化、符号化建立起了与数字地质图及GIS地学空间数据库有机连接,使描述性传统矿床模型得以直接应用于成矿预测研究工作。

当代矿产资源评价方法中,有两种广泛使用的重要方法,即成因模型(概念模型)法^[11]和经验模型法。成因模型法也称矿床模型法,它以矿床模型为驱动,在实际资源评价工作中,首先通过与一个或多个矿床模型的对比,确定与模型的地质特征和成矿环境相类似的较大区域;之后,详细研究这些地区内的地质特征,以便圈出与模型特征更匹配的有利成矿区域,这些有利成矿区域可视为特定矿床类型产出的最佳地区;最后,利用统计方法和已发现矿床中金属含量等信息,预测未发现的矿床数目和总金属量。该方法代表性的研究工作有Cox、Singer、Hodgson、Wyborn等人的成果,最成功的应用实例是美国地质调查局(1996)对美国境内距地表1 km以上范围内未发现的金、银、铜、铅、锌矿产的估计^[15]。

“三部式”矿产资源评价方法^[12,16]是成因模型评价法的典型代表。该方法是在20世纪80年代开始的美国本土固体矿产资源评价计划中,由美国矿床学家D A Singer等人经十多年的研究与实践而提出,目前在美国本土及北美推行。“三部式”评价方法具体内容是:(1)根据实测地质条件确定评价区可能的矿床类型,以与之对应的矿床模型为基础,客观综合多源地学数据,圈定可能赋存该类型矿产资源的地质找矿可行地段;(2)用与区内推断矿床模型相一致的全球矿床品位—吨位模型^[16-18]评估有

利地段未发现矿产的资源规模;(3)根据相应品位—吨位模型估计每个有利地段各类型矿床可能出现的矿床数目。在三部式矿产资源评价研究工作中,客观地综合多源地学信息,是以某一类型矿床模型为前提,在评价所圈定区域内未发现矿产资源的规模时,也是对应于相应预测矿种某矿床成因类型的矿床模型。显然,“三部式”评价方法始终围绕矿床模型这一核心,通过构造的标准矿床模型,使成矿条件相似类比思想贯穿整个矿产资源评价过程;最后,利用统计方法及该类型矿床已发现的矿床个数、矿床金属量等信息建立的矿床品位—吨位模型,对研究区内未发现的矿床个数及总金属量做出定量预测。

经验模型法又称多源信息综合评价方法,该方法以勘查数据为驱动,主要研究区域矿床与多元地质找矿信息之间的关系,通过定量分析方法,特别是地理信息系统(GIS)的应用,建立起区域成矿有利度和资源潜力值与多元地质信息的统计规律,形成经验模型,实现资源潜力的定量估计。典型的评价过程包括:首先应用地质及其它相关信息,识别出有利于成矿的区域;然后估计每个有利区域内未发现矿床的数目;进而估计每个有利区域内可能的矿床品位、吨位等定量数值范围。如赵鹏大院士的矿产统计预测方法,王世称教授的综合信息矿产预测方法,加拿大F P Agterberg的证据加权法等^[7]。

事实上,多源信息综合评价方法离不开模型思想,因而目前的发展趋势是将上述两种方法有机结合起来,利用地质、地球物理、地球化学、遥感以及矿床(点)分布特征、矿床勘探历史等多源信息,以特定矿床模型为前提,建立区域成矿与多元地质信息的定量预测模型,进行资源潜力定量评价,并利用神经网络等算法,输出成矿有利区域分布的有益信息。数字矿床模型评价方法正是这种发展趋势的具体实践,它通过建立的数字矿床模型计算机智能推理网络确定预测区可能产出的矿床类型,然后利用多源统计定量分析方法和GIS技术的应用,完成区域矿产资源综合定量预测,达到成因模型法与经验模型法的统一。

3 中国铜矿数字矿床模型

中国铜矿数字矿床模型评价系统参考“三部式”成矿预测方法的基本思路,以经验模型法的多元信息综合评价为基础,综合经验模型法及成因模型法特点,以矿床模型及勘查数据共同驱动,完成矿产资源评价。具体做法是: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,在总结我

国铜矿典型矿床找矿模型基础上,构建数字矿床模型推理网络,形成数字化矿床模型知识库,通过建立起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 MRAS 软件^[7]相结合,以矿产地学综合信息 GIS 数据库为数据源,对预测区可能的矿床类

型、成矿位置、及多种远景指标作出综合定量评价。

系统总体框架按类型、位置及远景区优选顺序进行设计,评价分三步进行,由此构成系统的三级推理网络(图 1):第一级推理网络确定区域内可能存在的铜矿床类型;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。

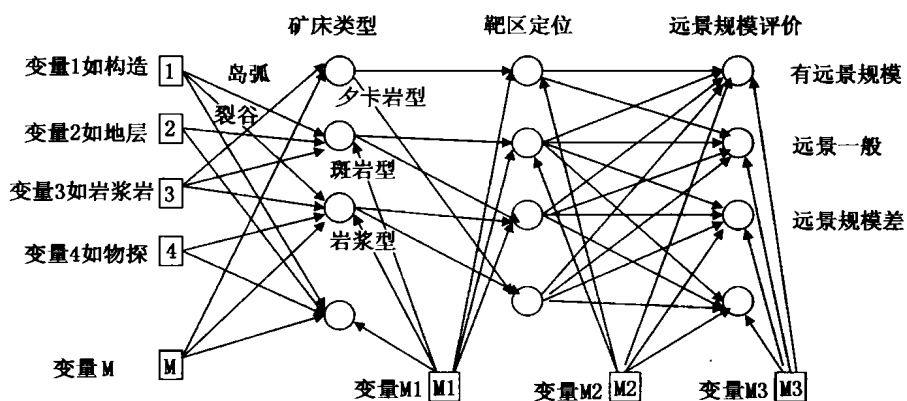


图 1 中国铜矿数字矿床模型三级推理网络

3.1 铜矿床描述性模型的建立

考虑到我国铜矿地质勘查工作程度较深,理论研究水平较高,成果资料齐全,本系统选择铜矿为例开展数字矿床模型研究工作。截至 1997 年,我国已勘察并获得储量的铜矿床共有 912 处^[3],按矿床成因类型归类划分为 10 种铜矿床类型,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。本研究以上述 10 种铜矿床类型作为矿床模型原始分类依据,建立铜矿描述性矿床模型。

目前,国内外已发表了诸多矿床模型研究成果,我们主要参考了陈毓川^[1]、裴荣富^[4]及美国地质调查局^[8]的矿床模型建模内容,本着以客观地质观测事实为主、尽量避免带有主观推测观点的原则,主要采用在地质找矿工作的前期阶段能够获取客观地质观测事实的地质特征标志组合作为铜矿描述性矿床模型建模内容。具体如下:(1)构造:大地构造背景,成矿构造环境(控矿构造、导岩构造);(2)岩浆岩:岩石类型,组合,分异,产状规模,侵入期次,时代;(3)地层围岩:含矿赋矿层位,岩石类型,时代,沉积建造,火山建造,变质建造;(4)矿化标志特征: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,共伴生矿产(矿床类型、矿产组

合);(5)间接标志: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),遥感影象,地表次生特征;(6)典型实例。

3.2 矿床模型的推理网络模型

在建立矿床模型专家推理系统的过程中,一个关键任务是建立矿床地质描述模型的计算机推理网络模型。从以上铜矿床模型的建模内容可以看出,10 个铜矿床模型的建模要素均将涉及构造、地层、岩浆岩、矿化指示标志、物化遥标志 5 大方面内容,也就是说,10 个铜矿床模型的建模地质特征标志组合相互之间会有许多重叠和相似部分。显然,我们不能直接把 10 个铜矿床地质模型转变成计算机推理模型,而应该抽取可用于推理判类、能够把 10 个铜矿模型相互区分开的地质要素和要素组合,用来建立计算机推理网络模型,作为系统进行推理判类的依据。本系统计算机推理网络模型建模要素的选取原则是:尽量抽取每个模型特有的可用于模型判类的标志性地质特征,包括从宏观的大地构造背景到微观的岩石矿物镜下结构构造特征,并尽可能剔除与其它模型重叠部分内容。如岩浆熔离铜镍硫化物型铜矿床的网络推理模型只涉及构造、岩浆岩、矿化指示标志、物化遥标志 4 方面,且内容项目大减,只保留了判类标志项。具体如下:(1)大地构造背景(裂谷或裂陷槽、深大断裂带、古板块缝合带)。

(2)成矿构造环境(穹状构造、断裂与隆起交汇部、多方向深大断裂交汇地段、蛇绿岩带)。(3)岩浆岩条件:①岩石类型(镁铁质基性—超基性岩建造或火山—侵入建造,岩类苏长岩、辉长岩、辉石岩、橄辉岩、辉橄岩、橄辉岩、辉绿—辉石岩);②产状规模(规模较小,呈岩株、岩墙、岩盆状产出);③岩体侵位(深成—中浅成侵入体,中细粒—粗粒结构);④岩浆分异(熔离分异好、岩相分带明显:自上而下岩浆、含矿岩浆、富矿岩浆和矿浆,岩体中心及下部基性程度高、边缘及上部基性程度低);⑤时代(主要元古宙);⑥岩体含矿性(Cu、Ni、S元素丰度较高,S含量大于0.1%、变异系数大)。(4)地球化学标志:①异常指示元素组合(Cu、Ni、Co、Cr、Au、Ag、Se、As、Pt族、Ti、V、Ba、B、F、I);②元素组合及分带(面型水平分带:中心带Cu、Ni、Co、Cr、Au、Ag、Se、Pt族、TFeO、MgO、Ti、V,边缘带B、Ba、F、I等)。(5)地球物理标志(区域重、磁异常梯度密集带、陡变带或区域异常边部的突出部位;局部高磁性、高重力、高极化异常体)。

3.3 数字矿床模型推理网络的实现

数字矿床模型系统研究的关键是建立数字矿床模型推理网络结构模型,并以此为理论框架,通过建立起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的计算机智能推理软件系统。此类软件系统的类似产品有美国地质调查局开发的专家系统Prospector II^[13-14],目前,国内尚未见相似研究成果的报道。Prospector II至上世纪末是世界上最早的专家系统之一“探矿者”专家系统Prospector的继承者,目前,它的知识数据库已包含了86个矿床模型和140多个矿床的信息。该系统能根据用户给出的研究区观测证据,与系统知识库中各种矿床模型作比较,并通过计算机图形界面与用户进行交互式对话,最后判定该地区可能产出哪种矿床类型,并给出匹配概率评估结论。

本系统主要借鉴Prospector II专家系统的经验,在构筑10个铜矿床找矿模型的计算机推理网络模型基础上,产生10个矿床模型的推理规则,形成矿床模型知识库,然后编制智能网络推理软件,实现原始矿床模型的计算机智能推理。具体推理控制策略分为两个阶段:第一阶段中,系统首先将用户提供的原始观测证据与知识库中10个矿床模型依次对比,从证据到结论正向推理,找出匹配概率最大的矿床模型,作为第二阶段考查目标。第二阶段再对目标模型中必备但尚未确定的前提证据依次考查,由结论到证据反向推理,通过人机交互方式询问用户,以

获得新证据,两阶段推理结果的综合最终给出评价区可能的矿床类型及匹配概率。

3.4 成矿有利地段定位及远景区优选

在数字定位预测中,为了对研究区的某类矿床类型进行定位以及靶区的优选,需要获得成矿有利地段的空間位置,而空間位置的确定则取决于采用哪些预测地质变量。在确定了研究区可能产出的矿床类型之后,预测地质变量的选取也就由相应矿床模型的具体建模内容确定下来。

在本系统中,成矿有利地段的定位是以对应矿床模型确定的地质找矿标志为基础,选取其中可用于定位的地质内容,在GIS空间数据库中,建立相应地质专题图层,然后利用GIS空间叠置分析功能,将对应矿床模型中所有标志都存在的位置定为成矿有利地段。具体实施中,先对评价区按照统一单元大小生成网格,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,当某个单元包含全部标志,便认为这个单元是一个有利的单元,由此确定出全部成矿有利地段。

获取有利空间定位单元以后,便可在在此基础上,进行进一步的靶区优选,以获得最佳成矿远景区。我们主要采用人工神经网络模型方法进行靶区的优选,其次是Q型聚类分析。

人工神经网络通过模拟大脑神经元处理、记忆信息的方式,对各种错综复杂的信息进行认知、识别、分类和目标预测。人脑的智慧是一种非线性现象,它使得人脑对自然界现象的认识有很大的自适应性。非线性系统不象线性处理系统那样,某一输入的变化会导致输出成比例的变化,故容错性高,对信息的容量很大。人工神经网络采用迭代过程模拟非线性处理过程,它对样本数及变量数无严格的要求,也不要求指标参数必须服从某种统计分布,这就克服了常规多源统计方法常常出现的已知矿床统计样本数量不足,及数据资料不满足统计分布的缺陷,从而使我们在大多数评价区都存在的完整勘探矿床数太少的情况下,仍可进行未发现矿床的精确统计评估。人工神经网络允许信息有各种变化,且系统本身也随之而变,即具有自学习、自组织、自适应的能力,这样,能对不同来源的多种信息通过学习建立最佳模式映射,从而有机地融合多元信息。另外,一个神经网络由多个神经元广泛连接而成,整体行为特性由单个神经元之间的相互作用、相互连接所决定,而不取决于某一个神经元。这使我们可用它来对地质单元的多个地质变量特征进行处理,从而获

取地质单元的整体特性。

根据人工神经网络模型的上述特征,把少数已知矿床样本单元与获取的有利单元放在一起,采用人工神经网络模型,对由评价区可能产出的矿床模型所确定的多个找矿标志进行迭代计算处理,求出每个单元的整体特性,将整体特性与已知矿床样本单元最相近的单元定为最优远景单元。另外,还可采用根据研究对象之间各种特征标志的相似程度对样品分类的 Q 型聚类分析方法,进行类似的远景单元分类优选。

4 结论

数字矿床模型评价系统通过建立数字矿床模型计算机智能推理网络系统,根据用户实测的多源地质数据进行客观综合智能推理,推断出预测区可能产出的矿床类型及其归类概率,之后的评价工作则完全按照常规多源信息综合评价方法进行(包括圈定找矿有利地段及其它成矿潜力指标综合定量评价),所不同的是,后面的整个评价过程始终围绕推断出的“矿床模型”这个核心进行,即在确定了研究区可能产出的矿床类型之后,该类型对应的矿床模型便确定了后面找矿预测评价工作的基本框架,预测地质变量的选取也就完全取决于相应矿床模型的具体建模内容。另外,建立专家系统导致的矿床模型数字化、智能化使推断评价区可能产出的矿床类型与评价区成矿潜力综合定量评价均统一到计算机软件平台上,通过一体化处理完成,且始终强调矿床成因的重要作用,真正达到了模型驱动和数据驱动的统一。

[参考文献]

- [1] 陈毓川,朱裕生,中国矿床成矿模式[M].北京:地质出版社,1993.
- [2] 地质矿产部情报研究所编著.矿床模型专辑[M].北京:地质出版社,1988,38~35.
- [3] 黄崇珂,白冶,朱裕生,等.中国铜矿床[M].北京:地质出版社,2001.
- [4] 裴荣富主编.中国矿床模式[M].北京:地质出版社,1995.

- [5] 王学平,魏民,杨丽沛等,中国斑岩铜矿床品位—吨位模式[J].地质与勘探,2000,36(1):57~59.
- [6] 王勇毅,GIS与地质图制作[J].地质与勘探,2000,36(1):44~47.
- [7] 肖克炎,张晓华,王四龙,等.矿产资源GIS评价系统[M].北京:地质出版社,2000.
- [8] Cox D P, Singer D A, Mineral Deposit Models[M]. U S Geological Survey Bulletin 1693,1986,379,143~161.
- [9] Cox D P, the Development and Use of Mineral Deposit Models in the United States Geological Survey[M]. Geological Association of Canada Special Paper,40,1993,(1995),15~19.
- [10] Drew L J, Revising U S Geological Survey Mineral - Resource Assessment Methods[J/oL]. <http://pubs.usgs.gov/info-hand-out/revision/>,1998.
- [11] Hodgson C J, Uses (and Abuses) of Ore Deposit Models in Mineral Exploration[J]. Geosciences Canada,1990,17.
- [12] Klaus J Schulz and Joseph A Briskey, 2002, A Cooperative International Project to Assess the World Undiscovered Non - fuel Mineral Resources; Status and Schedule of Activities[J]. Workshop on Assessment Undiscovered Mineral Resources, Beijing, China, 1~6.
- [13] McCammon, R B, PROSPECTOR II - an expert system for mineral deposit models[J]. Geological Association of Canada Special Paper, 40, 1993(1995):679~684.
- [14] McCammon, R B, PROSPECTOR II: towards a knowledge base for mineral deposits[J]. Mathematical Geology, 1994,26(8):917~936.
- [15] McCammon, R B, 1998, National Mineral - Resource Assessment: The 1996 Estimate of Undiscovered Gold, Silver, Copper, Lead, and Zinc Remaining in the United States[J/oL]. <http://minerals.er.usgs.gov/emrst/pubs/assessment/index.html>.
- [16] Singer, D A, Basic concepts in three quantitative assessments of undiscovered mineral resources [J]. Nonrenewable Resources, 1993a,2(2):69~81.
- [17] Singer, D A, Development of grade and tonnage models for different deposit types[J]. Geological Association of Canada Special Paper, 40, 1993b,(1995):21~30.
- [18] Singer, D A, Some Suggested Future Directions of Quantitative Resource Assessments[J]. Journal of China University of Geosciences,2001,12(1):40~44.
- [19] Western Minerals Team, U S Department of the Interior, USGS, Advanced Resource Assessment Methods[J/oL]. <http://minerals.usgs.gov/west/projects/aramdel.shtml>,2002.

A PRELIMINARY VIEW ON DIGITAL MINERAL DEPOSIT MODEL FOR COPPER IN CHINA

WANG Yong - yi^{1,2}, XIAO Ke - yan², ZHU Yu - sheng², ZHANG Shou - ting¹, CHEN Zheng - hui², XUE qun - wei²

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037)

Abstract: By comparing with traditional descriptive mineral deposit models, this paper discusses the basic concepts and characteristics of the digital mineral deposit models and the relationship between digital mineral deposit models and mineral resources assessment methods. The fundamental characteristics, design and composition of the digital mineral deposit model for copper in China are then introduced.

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