

· 矿产资源 ·

矿产资源评价系统(MRAS)在全国矿产资源潜力评价中的应用

娄德波, 肖克炎, 丁建华, 孙 艳

LOU De-bo, XIAO Ke-yan, DING Jian-hua, SUN Yan

中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

摘要: 矿产预测是矿床模型综合地质信息预测方法体系的重要组成部分, 矿产预测的成果也是矿产资源潜力评价的重要目标。MRAS 作为矿产预测最重要的辅助决策系统, 了解其在矿产预测工作中的基本方法和流程, 对于矿床模型综合地质信息预测方法体系在全国矿产资源潜力评价项目中的正确应用是很重要的。现对 MRAS 在矿产预测中的应用做详细的介绍。

关键词: MRAS; 矿产资源潜力评价; 定位预测; 定量预测

中图分类号: P612 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2010)11-1677-08

Lou D B, Xiao K Y, Ding J H, Sun Y. Application of MRAS in national mineral resource potential assessment. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(11):1677-1684

Abstract: Mineral prediction is important component of methodology of mineral resource potential assessment for deposit models using integrated geological information, and its achievements is also important goal of mineral resource potential assessment. As an important auxiliary decision-making system, it is essential for application of methodology of mineral resource potential assessment for deposit models using integrated geological information in national mineral resource potential assessment to know primary method and workflow of mineral prediction. Authors will particularly introduce the MRAS application in mineral prediction.

Key words: MRAS; mineral resource potential assessment; delineation of tract; estimation of resource amount

矿产资源评价系统(MRAS)是由中国地质科学院成矿远景区划室开发的一套矿产资源评价软件^[1]。该软件是在基于以矢量数据结构为主体的 MapGIS 平台上二次开发的^[2], 其处理的主要对象是点文件、线文件、面文件及其所对应的数据库, 这 3 类文件基本涵盖了地质、矿产、物探、化探、遥感等所要表达的信息。MRAS 的功能主要是满足 2 个方面的需求: 第一, 解决地学深层次成矿信息的提取和分析, 即提供深入研究各种多元找矿信息的方法; 第二, 解决多元信息的综合问题, 即研究各种成矿信

息在成矿作用过程中贡献大小的模型。成矿信息深层次分析功能主要包括地、物、化、遥单一学科的信息处理和各学科之间相互关系的研究, 如对区域化探异常强化、分解、综合等分析模型和异常或岩体对成矿的影响范围等; 信息综合实质上是要解决各专题信息的权重及其组合形式的问题, 矿产资源评价的数学方法是其基础^[3]。作为一套较为成熟的矿产资源评价软件, 在国内已经得到了广泛的应用, 如用于全国的金矿、铜矿、斑岩型铜矿和赤峰地区的金矿、东天山地区的铜镍矿等^[1,4-6]。目前, 在实施的全国

收稿日期: 2010-05-31; 修订日期: 2010-07-21

地调项目: 中国地质调查局《全国重要矿产总量预测》项目(编号: 1212010733806)和中央公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目《东天山铜镍硫化物矿产资源潜力评价方法研究》(编号: K0908)和《全球矿产勘查态势跟踪》(编号: K0803)联合资助

作者简介: 娄德波(1979-), 男, 博士, 从事矿产资源评价研究。E-mail: lldbb_e@126.com

矿产资源潜力评价项目中,MRAS 作为矿产预测的技术支撑软件,更是发挥了巨大的作用,并且在项目的推动下,该软件也在不断发展和完善^[7-8]。

1 全国矿产资源潜力评价

该项目的的主要任务是以叶天竺等^[7]提出的矿床模型综合地质信息预测技术体系为技术支撑,进行全国矿产资源潜力评价。该体系以地球动力学、成矿动力学和成矿系列理论为指导,深入开展区域地质构造研究,最大限度地分析地质构造的成矿信息,以各级成矿区带为单元,划分主要矿床的矿产预测类型,建立矿床模型,总结区域成矿系列,全面利用物探、化探、遥感等资料所显示的地质找矿信息和体现地质成矿规律内涵的预测技术,全面、全过程地应用空间数据库和 GIS 技术,在圈定预测区的基础上估计潜在的资源量^[7]。在实际研究和工作过程中,主要包括成矿地质背景、物化遥综合信息、成矿规律、矿产预测和数据模型研究 5 个部分。成矿地质背景研究是矿产预测的基础工作,主要目的是研究成矿作用和地质作用的关系,分析矿产形成和成矿的地质关系,深入分析和提取成矿地质构造信息,研究和总结成矿地质构造形成演化规律,为成矿规律研究和矿产预测提供地质背景资料 and 认识^[9]。物、化、遥综合信息研究工作主要由 2 个部分组成,一是应用物探、化探、遥感资料进行地质构造推断解释,进一步丰富和深化成矿地质构造背景的研究内容;二是在成矿规律研究过程中结合成矿特征的分析研究,充分应用物探、化探、遥感等综合异常资料建立找矿模式,在矿产预测过程中对通过物探、化探、遥感、自然重砂等局部异常的分析直接确定找矿信息,提供矿产预测依据。成矿规律研究工作主要由 2 个部分组成,一是典型矿床成矿规律研究,研究内容主要有 3 个方面:首先是成矿地质因素研究,其次研究矿床控岩控矿构造的特征,此外还要研究成矿作用的特征;二是区域成矿规律研究,主要研究内容为在典型矿床成矿规律研究的基础上,分析不同矿床类型在各类成矿地质构造环境下不同区块的分布规律,研究大地构造不同演化阶段与不同矿床类型之间的关系,研究不同矿床类型与地质建造之间的关系,分析各种矿床类型的区域地层、火山岩、侵入岩、构造等具体成矿地质因素,并在此基础上划分成矿区带,建立成矿系列和成矿模式。矿产预测研究的内容主要

有通过要素分析建立区域评价模型,分析研究特定矿产预测类型定位和定量预测的方法,从而在不确定性条件下制定最优决策^[10]。数据模型研究的内容是:以上 4 个方面的内容在研究和工作过程中均将产生一系列的图件(包括若干个图层)和相应的数据表,这些图表既包括用于预测评价的基础性图件,又包括一系列预测评价的成果图件,因此需要使用一个完备的数据模型对其进行规范,数据模型研究的主要内容就是分析如何建立一个结构合理、内容齐全、操作方便的数据管理软件。

2 MRAS 在矿产资源潜力评价中的应用

矿产预测是矿产资源潜力评价的最后阶段,也是矿产资源潜力评价的最终目标。而 MRAS 软件是矿产预测顺利完成的重要辅助决策系统,因此深入了解 MRAS 在矿产预测中的应用理念和应用过程,对于全国矿产资源潜力评价的成功实施具有重要意义。MRAS 在矿产预测中的应用如图 1 所示。本文结合在全国矿产资源潜力评价示范工作中的体会,详细介绍 MRAS 在矿产预测中的工作流程。大致包括以下 6 个步骤:矿产预测方法类型的选择、预测要素分析与建模、预测单元划分、预测要素变量的构置与选择、定位预测和定量预测。

2.1 矿产预测方法类型的选择

矿产资源潜力评价分矿种、按矿产预测类型开展工作。为了更好地完成此项工作,MRAS 软件中给出 6 种矿产预测方法类型,即沉积型、侵入岩体型、火山岩型、变质型、复合内生型和层控内生型。在预测工作中,不同的矿产预测类型应选择不同的矿产预测方法类型,以满足实际工作的需要。具体选择何种类型一般取决于矿产预测底图,如贵州务正道地区的铝土矿严格受地层层位控制,预测底图为岩相古地理图,则其矿产预测方法类型为沉积型;密西西比型(MVT)的铅锌矿虽然受层位的控制,但是后期的构造作用对成矿影响明显,则其矿产预测方法类型为层控内生型;另外某些金矿,如胶东金矿控矿因素复杂,预测底图为建造构造图,则预测方法类型为复合内生型。

2.2 预测要素分析与建模

主要是在区域预测要素图的基础上,通过分析已知矿床(点)与预测要素之间的关系,通过定性和半定量分析,确定对成矿有利的预测要素,并初步确

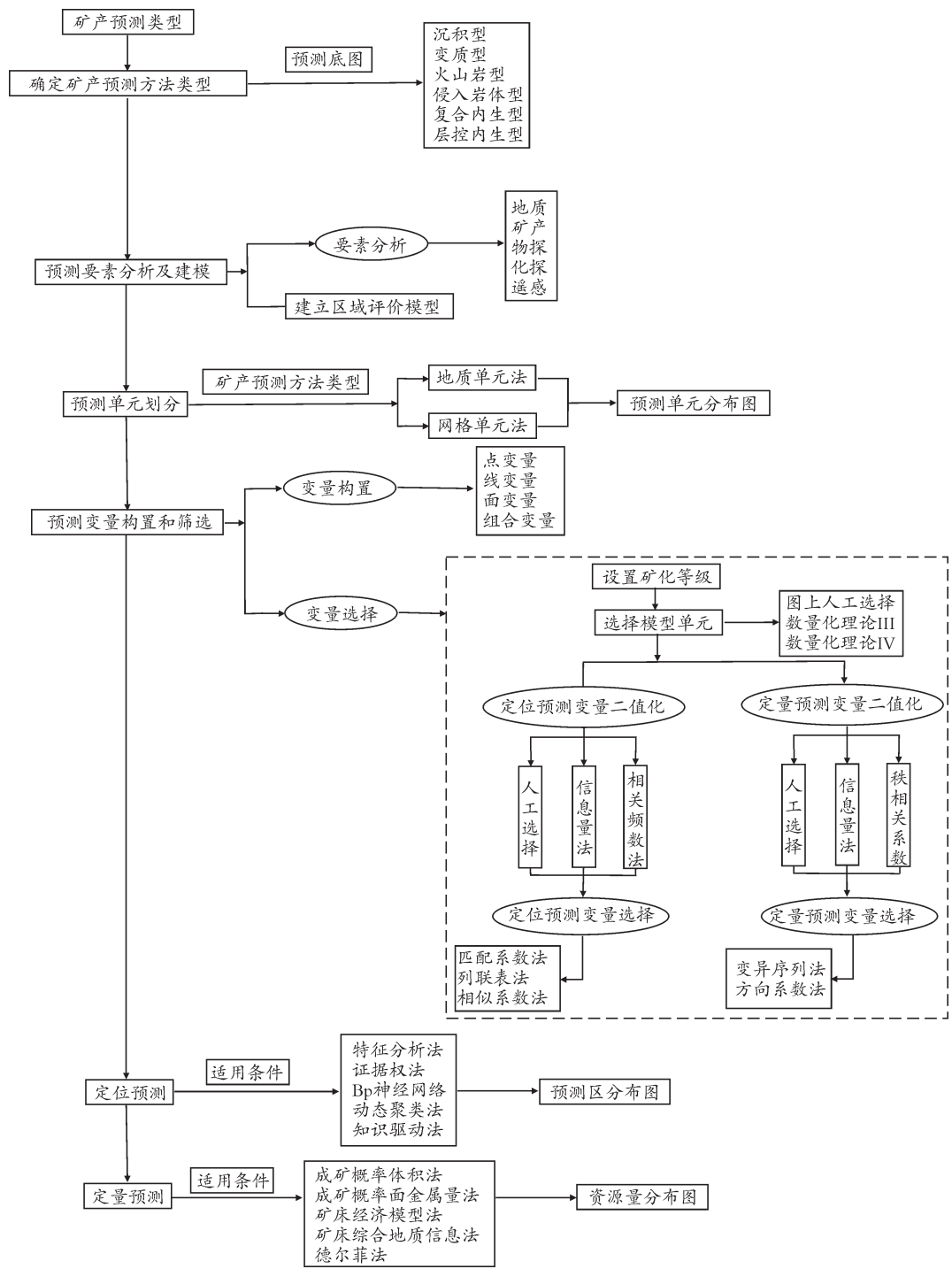


图 1 MRAS 在矿产预测中的应用流程

Fig. 1 Flow chart of MRAS application in mineral prediction

定预测要素的重要程度，从而建立起区域矿产预测模型。主要内容包括：地质构造或异常要素与已知矿床(点)之间的关系和不同预测要素之间的关系分析，如图 2 所示，分析东天山地区基性超基性岩建造、深

大断裂、铜镍矿、航磁异常、重力异常和化探异常之间关系；缓冲区分析，如在祁漫塔格地区统计侵入岩体对矽卡岩矿床成矿的影响域；属性查询（模糊查询），如在贵州务正道地区提取对铝土矿成矿有利的

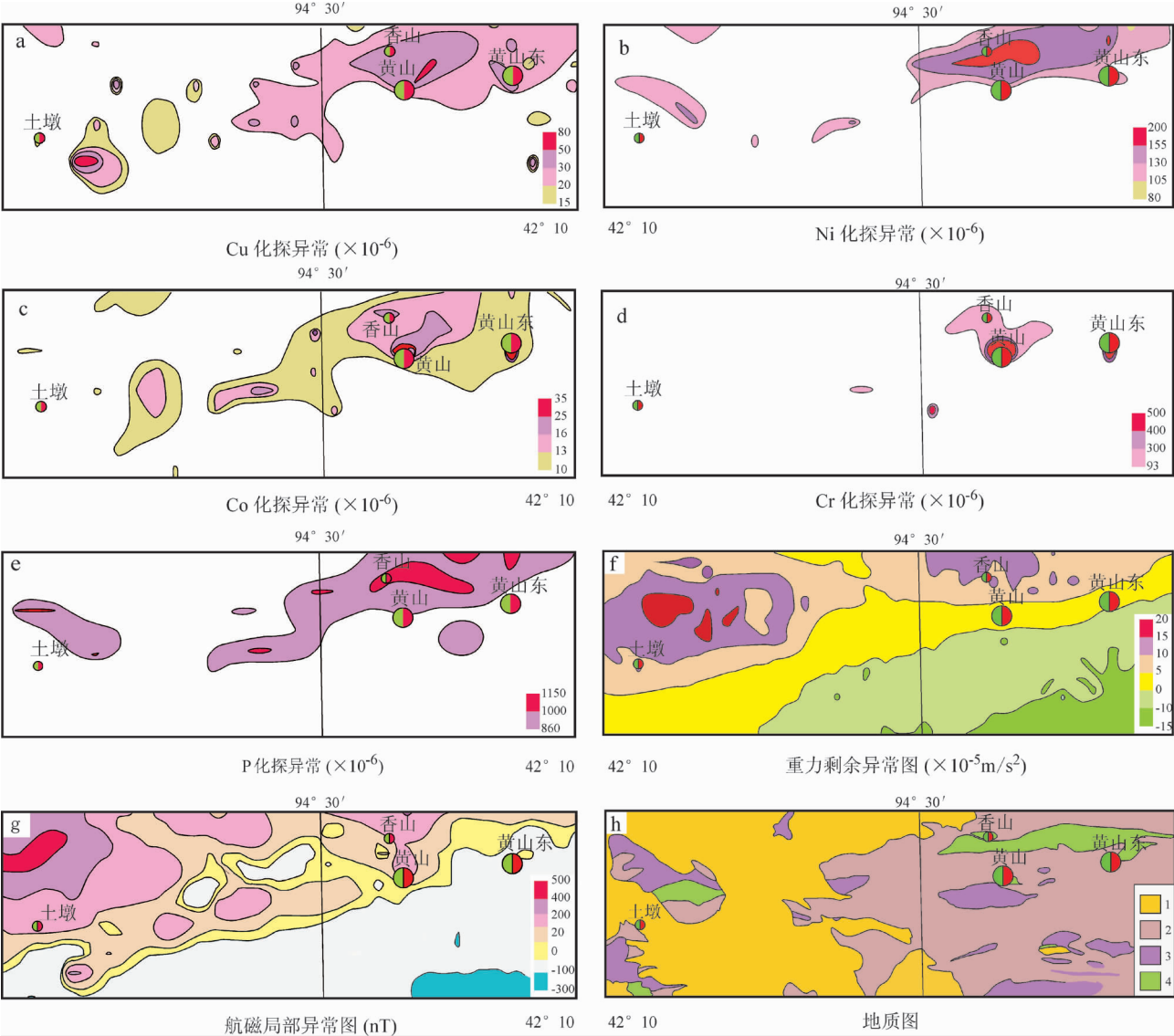


图2 黄山一带 1:20 万区域地质资料分析

Fig. 2 Aggregate analysis of 1:200000 regional geological data

1—第四系;2—石炭系;3—海西期花岗岩;4—海西期基性超基性岩(包括偏基性闪长岩)

岩相古地理图层中和浅湖有关的亚相;空间查询,如在祁漫塔格地区提取北西方向的构造线等。在通过上述方法对预测要素分析的基础上,建立本地区预测矿种矿产预测类型的区域预测模型,预测要素在性质上可分为必要的、重要的和次要的,要素种类和地、物、化、遥的成果图件及其属性表有关。

2.3 预测单元的划分

预测单元划分的方法主要有 2 种,即地质单元法和网格单元法。在划分预测单元的过程中,可以选择地质体单元法,即通过地质综合信息使用要素叠

加的方式将预测单元的位置和边界确定下来,该方法可以通过专家来实现,也可以通过 MRAS 中的建模器来实现;也可以使用网格单元法,该方法是以预测工作区内形成的大小相同的网格为预测单元,在使用网格单元时,网格单元大小的确定取决于 2 个因素,一个是预测工作区面积的大小,一个是取决于预测任务的具体要求。如在鞍本地区预测沉积变质型铁矿时,则使用地质体单元法,以变质建造与航磁局部异常叠加所形成的区域为预测单元,而在四川攀枝花地区,由于基性超基性岩体面积小,在区域地

质填图工作中很多难以发现,因此以网格单元为预测单元。

2.4 预测要素变量的构置和选择

2.4.1 变量的构置

预测要素变量是随时间、空间的变化而发生变化的地质现象或地质特征的量化标志,是构成资源特征与地质找矿标志之间统计关系的基本元素。很显然,单个变量的优劣将对资源预测结果产生直接的影响。变量的变化与矿体的特征密切相关,因此,可以通过预测变量的研究,并通过预测要素图层的数字化变量、变量取值与预测区关联在一起,以达到优化预测区的目的。预测要素变量的提取应首先考虑那些与所研究的地质问题有密切关系的地质因素,在矿产资源预测中,所选择的地质变量应该在一定程度上反映矿产资源体的资源特征。例如,资源的数量、质量、空间位置等特征。变量赋值的实质是将已作为地质变量提取出来的地质特征或地质标志在每个矿产资源体中的观测值取出或计算出来。在 MRAS 软件中,除了可以将属性表中任何一个属性作为变量并可对其做数学运算外,还给出了几个重要的深层次变量,如熵值、密度等,这些变量对于矿产预测有着重要的作用(图 3)。

2.4.2 变量的选择

矿产资源定位和定量预测以模型单元集合建立的统计模型,对未知单元定量类比达到矿产资源体定位和定量的目的。预测工作区内没有典型矿床或典型矿床很少的情况,则可充分利用其他类似地区的模型,达到变量筛选的目的。在 MRAS 2.0 中,变量的筛选一般经历以下 4 个步骤。

(1)设置矿化等级。设置矿化等级的主要目的是为了选择模型单元和进行变量筛选。设置矿化等级的指标可以是矿床规模也可以是资源量。

(2)选择模型单元。选择模型单元的目的主要是为了筛选定位和定量预测的变量,模型单元的选择,一般要求来自同一母体、有较完善的标志组合、有较可靠的矿产资源体成矿规模和不同模型单元之间在规模上要有差异。在 MRAS 2.0 中,提供了 3 种模型单元选择的方式,即图上人工选择、数量化理论Ⅲ和数量化理论Ⅳ。

(3)预测变量二值化。在 MRAS 2.0 中,许多资源靶区定位、定量预测数学模型要求输入二态数据,例如特征分析和逻辑信息法等均使用二态数据。所以,经赋值和整理后的定量地质变量一般还需要离散化为二态变量。定量变量离散化的准则是,离散化后的二值化变量能够最大限度地反映资源特征的变化。变量二值化包括两大类,一类是定位预测变量的二值化,包括人工输入二值化区间法、找矿信息量法和相关频数比值法;一类是定量预测变量的二值化,包括人工输入变化区间法、秩相关系数法和找矿信息量法。

(4)优选预测变量。优选变量的目的是为了去除那些次要的变量,使评价模型变得更加稳定、预测结果更为可靠。在 MARS 2.0 中,提供了 3 种筛选定位预测变量的方法:匹配系数法、列联表法和相似系数法;2 种筛选定量预测变量的方法:变异序列法和方向导数法。

2.5 定位预测

定位预测,是指在定位预测变量选定的基础上,



图 3 密度和熵值变量

Fig. 3 Density and entropy

根据合适的数学地质方法,确定每个预测变量的权重,最终计算出每个预测单元的成矿有利程度,再根据地质单元的成矿有利程度或成矿概率,确定预测单元所属的矿产资源靶区级别,达到预测区优选的目的。在 MRAS 2.0 中主要提供了特征分析法、证据权重法、BP 神经网络法、动态聚类分析法、知识驱动法等。

(1)特征分析法。是一种多元统计分析方法。它是传统类比法的一种定量化方法,通过研究模型单元的控矿变量特征,查明变量之间的内在联系,确定各个地质变量的成矿和找矿意义,建立起某种类型矿产资源体的成矿有利度类比模型。然后将模型应用到预测区,将预测单元与模型单元的各种特征进行类比,用它们的相似程度表示预测单元的成矿有利性,并据此圈定出有利成矿的预测区。该方法的使用条件有 2 个,一是只适用于二态变量,二是至少需要 5 个以上已知矿床作为模型,且这些模型在规模上存在差别。

(2)证据权重法。是数理统计、图像分析和人工智能的有机综合。利用证据权重法,可以在 GIS 系统中通过图层统计合成的方式,有效地圈定矿产资源靶区,其理论依据主要是贝叶斯公式、乘法公式和全概率公式。该方法的实施主要分 3 步:第一步,将每一种地质标志图层都用二态变量来表示,用 1 表示地质标志存在,0 表示地质标志不存在;第二步,每一个地质标志都计算一对权系数,一个表示该标志存在时的权,另一个表示该标志不存在时的权。当无法确定该标志存在与否时,令权系数为 0;第三步,计算后验概率,预测矿种矿床产出的后验概率比的对数值等于先验概率比的对数值与各种地质标志的权系数之和,在此基础上求出预测区的后验概率,并作为圈定有利预测区的依据。该方法的使用条件有 3 个,一是预测因素的条件独立性,二是预测要素是面文件,三是矿点为点文件,预测工作区内具备一定数量的矿床数,且从理论上讲,大部分矿床应该是已经发现的。

(3)BP 神经网络法。全称为基于误差反向传播算法的人工神经网络法,由信息的正向传播和误差的反向传播 2 个过程组成。输入层各神经元负责接收来自外界输入信息,并传递给中间层各神经元;中间层是内部信息处理层,负责信息变换,根据信息变化能力的需求,中间层可以设计为单隐层或者多

隐层结构;最后一个隐层传递到输出层各神经元的信息,经进一步处理后,完成一次学习的正向传播处理过程,由输出层向外界输出信息处理结果。当实际输出与期望输出不符时,进入误差的反向传播阶段。误差通过输出层,按误差梯度下降的方式修正各层权值,向隐层、输入层逐层反传。周而复始的信息正向传播和误差反向传播的过程是各层权值不断调整的过程,也是神经网络学习训练的过程,此过程一直进行到网络输出的误差减少到可以接受的程度,或者预先设定的学习次数为止。该方法的使用条件是:其一,训练集样本应包含已知有矿和无矿的各类样本,必须具有典型性、代表性和完整性;其二,输入节点数 $m \leq 10$ 个,需设置 1 个具有 $m+2$ 个节点的隐含层, $m > 10$ 个则需设置 2 个隐含层,每层具有 m 个或略少于 m 个的节点;其三,数据量过大时,运算可能会受影响。

(4)动态聚类分析法。是无模型或少模型定位预测评价中的一种比较传统的方法之一。聚类分析是数值分类方法的一种,它是根据多个指标进行数值分类的一种多元统计方法,近年来在地质学中有许多成功的应用。根据分类对象的不同,聚类分析可分成 2 类,一类是根据变量(指标或地质特征)对标本或样品进行分类,叫做 Q 型聚类分析;一类是根据变量在各个标本上的观测值对变量进行分类,叫做 R 型聚类分析。动态聚类分析就是 Q 型聚类分析的一种,又称为逐步聚类分析或快速聚类分析。由于该种聚类分析实现设定所分类别的数量,不必得到多个分类解,所以和一般聚类分析相比它具有分类速度快、占用内存小的特点,从而在大样本聚类分析中得到了广泛的应用。一般在已知矿床比较少的情況下往往使用这种方法。

(5)知识驱动法。该方法用于定位预测的基本原理是,根据专家的经验选择对成矿有利的预测变量,并对其归一化处理,使所有变量均取 0 到 1 之间的值,然后仍然根据专家的经验给每个变量赋一个权重,且使各预测变量的权重之和为 1,这样各变量与权重之积求和的值的大小便可以用于圈定有利的预测区。在预测工作区已知矿床比较少或者没有已知矿床而成矿条件比较有利的情况下使用该方法。虽然是专家主观判断的结果,但是由于这些专家在该类矿产方面有丰富的工作经验,对于对成矿有利的预测要素及其重要性均具有比较好的把握,往往也

会得出相对较为可靠的结果。

2.6 定量预测

资源量估算是全国矿产资源潜力评价的重要目标之一。在 MRAS 软件中给出了 5 种用于定量预测的估算方法,可基本满足定量预测的要求,具体方法的选择,则依据具体成矿地质条件而定。现将各方法具体介绍如下。

(1)成矿概率体积法。该方法的依据是在一定的地质建造中赋存某种矿产资源的潜力与该建造成正比。采用该方法估算资源量时,关键是确定 2 个参数,一个是含矿建造的空间三维分布范围,确定含矿建造的体积;一个是确定预测区的含矿率。在 MRAS 软件中给出了 2 种体积法,一种是基于预测区边界的体积法,体积的计算包括 3 种模型,即单斜模型、向斜模型和椭球模型(适用于向斜的转折端);一种是基于预测区面积的体积法,其体积大小取决于预测区内含矿岩系的面积及预测深度。这 2 种体积法的含矿率取决于模型区的含矿率和成矿概率。体积法主要适用于一些沉积型或受层位控制的复合内生型矿产,如东天山的火山岩型铁矿、贵州的铝土矿、川滇黔地区的 MVT 型铅锌矿等。

(2)矿床地质经济模型法。大多数金属矿床均可采用美国地质调查局“三步式”品位吨位模型。该方法的前提是:不同矿床类型有自己特有的地质经济品位-吨位分布模型。通过总结全国或者某个成矿区带现有类型矿床的品位-吨位模型,把它们应用到待评价的成矿区带中,估计成矿区带内的未发现矿床的个数,通过研究预测工作区已知矿点的分布、矿床的品位、矿石量的分布特征,来获得资源量的模拟,最后进行研究区资源的定量评价。该方法的使用条件是,不能对单个最小预测区进行估算,只能对预测工作区或某个成矿区带进行定量预测。

(3)成矿概率面金属量法。面金属量法是前苏联学者提出的一种地球化学异常评价的方法,其原理是利用次生晕和分散流资料对矿体进行定量评价:以晕的扩散模式为依据,在使用分析结果并结合地质资料圈定次生分散晕的条件下,研究某一水平截面(或平行于斜坡的截面)上所含的成矿元素的金属量与在同一水平上的矿体中所包含金属量之间的对应关系,并籍此进行资源量估算。成矿概率面金属量法是在此基础上以成矿概率为修正系数而形成的一种改进的面金属量法。该方法的使用条件有 3 个,一

是化探异常与矿床规模有着较好的对应关系,二是使用的资料必须是原始数据,三是针对于水系沉积物测量数据,预测单元必须是某一级别的汇水盆地,而不能使用异常限定的范围。

(4)矿床模型综合地质信息定量预测法。该方法的基本思路是,首先运用变异序列法或方向系数法等对变量进行分析,建立预测资源量有序预测变量组合,已知探明资源储量矿床的定量信息模型和综合地质信息定量模型,根据数量化理论和逻辑信息法建立矿床规模定量预测模型,并据此计算最小预测区的资源量或者规模。该类方法的使用条件是,需要一定数量的模型,且彼此之间在规模和变量上有一定的差别,其次是对于数量化理论 I 还必须进行检验,看自变量和因变量之间的关系是否显著。

(5)德尔菲法。它是一种客观综合多数地质专家经验和主观判断的方法。其基本做法是,分别地、不断地向一组地质专家提出预测工作区在一定概率下(90%、50%和 10%)和一定深度下(500m,1000m 和 2000m)的估算资源量,然后将它们的回答根据德尔菲法所规定的数学方法进行综合,直到取得一致的意见形成结论。由于本方法是用地质学家的经验和知识代替地质变量进行评价,所以它要求专家有丰富的理论知识和找矿经验,并且对研究区地质矿产情况比较了解。

3 讨论和结论

3.1 取得的成果

在全国矿产资源潜力评价示范工作中,MRAS 作为矿产预测的辅助决策系统,发挥了巨大的作用,并取得了令人满意的结果。如在攀枝花地区使用证据权重法定位预测所圈定的预测区中,经过钻孔验证,已经在深部发现厚大的钒钛磁铁矿体,同样在鞍本地区使用体积法计算的资源量,专家也一致认为符合客观实际。为了适应全国矿产资源潜力评价的需求,MRAS 软件自身也在不断完善,结合实际情况取得了一些进步。如建模器的引入,使得地质人员在使用地质体单元法圈定预测单元时,更加方便有效;各类体积法的丰富,使得 MRAS 在定量预测过程中的适用范围更加广泛。

3.2 存在的问题

由于全国矿产资源潜力评价涉及的矿种多、类型复杂,因此在矿产预测过程中 MRAS 软件还很难

完全满足实际需要,仍然需要在一些方面做出改进。笔者根据工作中的经验,任为有必要从以下几个方面进行改进。

(1)弱信息的识别。随着地质找矿工作的不断深入,地表矿越来越少,寻找隐伏矿床已经成为当前地质找矿工作的重中之重。由于隐伏矿的矿致异常地表显示较弱,如何识别矿致弱异常是矿产资源潜力评价的重要任务之一,因此需要在 MRAS 软件中引入更多的识别弱异常的方法,如当前地质领域比较认可的分形方法、小波分析等^[11-12]。

(2)变量的二值化。其优点是可以使复杂的问题简单化,但同时会忽略掉很多用于区别预测区级别的重要的细节,尤其是对一些诸如物化探信息等的连续变量。为了使预测结果更加精细,有必要对一些二值化的预测方法进行改进,如特征分析法、证据权法等。在这方面,国际上已经取得了一些成果,如模糊证据权法等^[13-14]。

(3)共伴生元素估算。在 MRAS 软件中,除了矿床经济模型法可用于计算共伴生元素的资源量外,其他方法只能计算单一元素。因此有必要进一步完善各种定量预测方法,使之可以同时预测多个矿种,且要区分不同的共伴生形式,如有的是多个矿种相互聚集在一起,而有的却呈分带分布。

(4)大比例尺预测。由于一些矿山经过几十年的开采已近枯竭,迫切需要进行深部及外围找矿^[15],因此大比例尺预测也便成为高级别预测资源量 334-1 的重要内容。该类预测一般需要已知矿床的详细勘探资料,如大比例尺的地形资料、地质填图资料、地面物化探测量资料、各种槽探、坑探和钻探资料等三维勘查资料。大比例尺预测目前在 MRAS 软件中还未实现。但是区划室开发的探矿者三维勘查软件(3D-Exploration)可以实现此目标,因此建议将这 2

个软件结合起来,用于全国矿产资源潜力评价。

致谢:本文在编写过程中得到了杨毅恒教授,李楠博士的支持和帮助,在此表示感谢。

参考文献

- [1]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,2000:87-107.
- [2]肖克炎,张晓华,宋国耀,等.应用 GIS 技术研制矿产资源评价系统[J].地球科学——中国地质大学学报,1999,24(5):525-528.
- [3]肖克炎,朱裕生,张晓华,等.矿产资源评价中的成矿信息提取与综合技术[J].矿床地质,1999,18(4):379-384.
- [4]丁建华,肖克炎,刘锐,等.区域资源定量评价中面金属量的应用[J].矿床地质,2007,26(2):230-236.
- [5]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.
- [6]姜德波,肖克炎,孙艳,等.区域矿产评价模型——以赤峰红花沟金矿为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2008,38(4):559-565.
- [7]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.
- [8]肖克炎,张晓华,李景朝,等.全国重要矿产总量预测方法[J].地学前缘,2007,14(5):20-26.
- [9]翟裕生,邓军,李晓波,等.区域成矿学[M].北京:地质出版社,1999:60-120.
- [10]赵鹏大.成矿定量预测与深部找矿[J].地学前缘,2007,14(5):1-10.
- [11]Cheng Qiuming, Agterberg F P, Ballantyne S B. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1994, 51: 109-130.
- [12]曹殿华,王建安,王高尚,等.勘查地球化学异常多尺度分析方法——以赣东北德兴矿集区为例[J].现代地质,2008,22(6):1028-1033.
- [13]Bonham-Cater G P. Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS[M]. Oxford: Pergamon Press,1994:398.
- [14]Cheng Qiuming, Agterberg F P. Fuzzy weights of evidence method and its application in mineral potential mapping[J]. Natural Resources Research,1999,8(1):27-35.
- [15]叶天竺,薛建玲.金属矿床深部找矿中的地质研究[J].中国地质,2007,34(5):855-869.