

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

美国“三步式”固体矿产资源潜力评价方法评述

肖克炎, 丁建华, 刘锐

中国地质科学院 矿产资源研究所 北京 100037

内容提要:笔者等通过在中美合作项目中对美国地质调查局(USGS)在全美推荐使用的“三步式”矿产资源潜力评价方法的实际应用,对近年来美国地质调查局对此方法的完善和改进部分进行了系统介绍,同时对比中国常用矿产资源潜力评价方法,对“三步式”矿产资源评价方法使用过程中存在的一些问题进行了分析探讨。笔者等认为,“三步式”资源评价并非是一种全新的评价方法,它是一组评价方法的有效集成,这一方法中有几点是值得借鉴的,一是一致的区域构造编图,二是标准的矿床模型和品位吨位模型,三是关于经济成本滤波器的使用。

关键词: 矿产资源评价; 定量评价; “三步式”资源评价法

矿床是能够为人类所利用的具有经济价值的地质体,矿产勘查就是不断地找寻未发现的矿床。由于矿床具有经济上紧缺性、地质上稀有性和特异性以及人们对地球表面地壳三维地质结构认识的有限性等特点,找寻未发现的矿床就成了一项非常复杂和充满风险性的工作。如何去发现新的矿产资源、在哪里有所需要的质量和数量的矿产,即在哪里进行地质勘探工作,这就是矿产资源潜力评价(在中国称为成矿预测)的根本任务。

由于找矿勘探需要,成矿预测于20世纪四、五十年代得到蓬勃发展,前苏联地质学家毕利宾、斯米尔诺夫、费尔斯曼、科罗列夫及欧美吉尔德、纽豪斯、艾孟斯、鲁蒂埃等为该学科发展进行了许多有开创性的工作。毕利宾所创建的构造—建造成矿预测分析法在目前仍然为前苏联地质工作者奉为经典预测方法,也是当前现代金属成矿分析方法体系的基础。进入五、六十年代,各国的学者都在不断地研究和尝试新的方法,至70年代末,国际上实施了“矿产资源评价中计算机应用标准(IGP98项)”——国际地质科学联合会第98项计划,此计划推出了6种标准的矿产资源定量评价方法,即区域价值估计法、体积估计法、丰度估计法、矿床模型法、德尔菲法和综合方法等。这一阶段,多元统计方法和计算机技术被广泛应用于成矿预测中,进行地质经验类比的定性评价与数学统计的定量评价开始汇集为统一的系统,成矿规律、矿床模式、多元统计、专家系统、计算机系统

已融为一体,标志着定量评价进入实用阶段。此阶段的一些代表性的成果有:80年代加拿大学者F. P. Agterberg及美国学者Duda编制的矿产资源预测专家系统;美国哈里斯、麦卡门等发展的一套矿产资源经济评价方法体系等(刘承祚,1999)。

20世纪中后期,随着计算机信息技术的飞速发展,人类进入了信息化社会。地球科学这门古老的学科,同样在信息技术应用方面取得了突破性的进展。20世纪七、八十年代发展起来的处理空间数据的地理信息技术(GIS)彻底解决了地学信息技术应用的障碍,在地球科学各个研究和应用领域得到了前所未有的广泛应用。现代矿产勘查工作产生的地质、地球化学、地球物理、遥感等海量专题信息,得以通过计算机定量分析技术进行信息合成和综合。矿产资源定量评价得以以计算机信息处理技术为工具,研究各种勘查资料的成矿信息,特别是通过定量方法研究各种多元信息与矿床资源潜力的关系模型,达到对未知区的定位、定量评价的目的。

近几年来,矿产资源评价进入了一个信息更加综合、技术飞快更新的新时期。主要表现在当代成矿理论与现代高新综合勘查技术的有机结合,尤其是将传统的定量数值科学方法与计算机GIS图形图像可视化信息的有机结合。20世纪90年代美国提出了第二代矿产资源评价的信息化内容,主要包括:矿产资源的空间数据库、评价方法的计算机化、信息共享的网络化。这一时期,矿产资源潜力评价在理论

注:本文为国土资源大调查项目(121204561502)资助成果。

收稿日期:2006-04-26;改回日期:2006-07-11;责任编辑:章雨旭。

作者简介:肖克炎,男,1964年生。中国地质科学院研究员,博士生导师。矿产普查与勘探专业,主要从事矿产资源评价工作。通讯地址:100037,北京市百万庄大街26号中国地质科学院矿产资源研究所;电话:010-68998909;Email: kyanxiao@sohu.com。

和方法技术上的重大突破主要体现在两个方面：一是将全球板块构造运动的理论与成矿学结合，总结了世界上重要的矿床成矿模式；二是广泛应用了GIS等计算机信息处理技术进行矿产资源评价。

中国矿产资源定量评价方法在20世纪90年代也有突破性进展，较有代表性的有：赵鹏大作为中国矿产资源定量评价的先驱，根据“地质异常导致成矿预测”的理论(赵鹏大,1991)和评价工作阶段性特点提出和实践了“三联式”5P地质异常定量评价方法(赵鹏大等,2003)；王世称教授从地、物、化、遥、矿产资料信息综合出发，强调矿产定量预测与其他预测相结合，独创了综合信息矿产资源评价方法(王世称等^①；陈永清等,1995)；全国矿产资源二轮区划采用的以成矿系列理论为指导，将成矿构造地质背景分析、区域成矿规律研究与矿产资源定量评价结合的方法(是一种与USGS三步式资源评价方法较相近的方法)等。

1 “三步式”矿产资源潜力评价方法

1.1 “三步式”矿产资源潜力评价方法简介

“三步式”矿产资源评价方法是美国地质调查局目前广泛推荐使用的一种用于未发现矿产资源潜力评价方法，它在1975年就开始探索，到20世纪90年代形成较为完善的方法体系。该定量评价方法集成了美国众多的矿产资源评价专家的研究成果，包括了D. P. 哈里斯的矿产资源经济定量评价模型(Harris et al., 1993)、D. P. 考克斯和D. A. 辛格的矿床模型和标准品位吨位模型(Cox et al., 1986)、麦卡门的定量评价和专家系统(McCammon et al., 1992)以及Drew的MARK3软件等，成为美国地质调查局(USGS)在20世纪80年代末后的标准评价方法。

最近美国的资源评价专家麦卡门和D. P. 哈里斯在Internet网上公开了这些计划的部分成果，并提出了目前正在修正的矿产资源评价方法体系，这些修正包括发展引进了诸如数字矿床专家系统、神经网络模型、分形等非线性科学等进行定位评价、开发了以矿床模型研究为基础的预测矿产地数量和经济评价的产出率的模型(Rate of Deposits Occurrence)及经济成

本滤波器模型(Economical Cost Filters)(美国地质调查局网站)等。

中国学者赵鹏大最早对该方法进行了系统的介绍(赵鹏大,1994)，作者在此只作简单陈述。“三步式”(Three-part form)评价方法按英文翻译应该是赵鹏大院士翻译的“三部曲”，但它确实又是先后顺序的三个有机部分，因此“三步式”的译名也被中国地质工作者普遍接受。“三步式”资源评价方法框架如图1(Singer,1993)。

正如图1所述，“三步式”评价方法包括三大步骤：① 根据所要预测的矿床类型圈定找矿地质可行地段；② 运用与预测矿床类型相适应的标准品位—吨位模型估计可能发现矿床的金属量及质量特征；③ 估计成矿远景区内可能发现的矿床个数。

每种已勘探矿床的吨位和平均品位的频率分布都可以作为相似背景下同类型未发现矿床的品位和吨位模型，“三步式”评价方法将矿床的品位—吨位模型与矿床数估计相结合，也就把地质学家的资源评价用经济学的语言表示出来。美国的评价工作者在未发现矿产资源评价中还加入了一种预期可行费

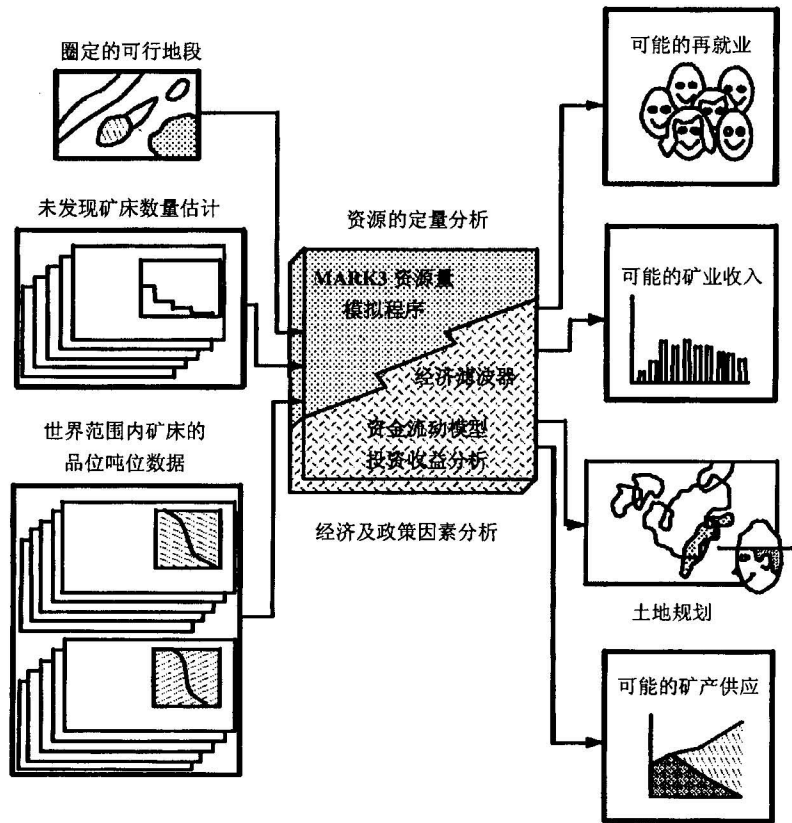


图1 USGS“三步式”定量资源评价方法图(据 Singer,1993)
Fig. 1 Showing of Three-part Form of Mineral Resource Assessment
(By Singer,1993)

用模型——经济滤波器,该模型可用来淘汰那些已被发现但可能产生不了效益的矿床,也可用于将来的可行性研究中。

第三步对未发现矿床数量的估计是矿产资源定量评价的一项重要内容,目的是为了表达在可行地段存在未发现矿床的概率(可信度)。可直接或间接用于这种估计的技术方法很多,这里主要运用矿床模型法,根据已勘探区内单位面积的矿床数来计算,结果为矿床的频率分布,可用直方图表示。矿床个数估计必须和矿床类型及品位—吨位模型相一致(Singer, 1994),同时还要求服从如下原则:①已知勘探区矿床分布密度,②局部矿床外推,③统计异常和矿产地概率,④过程限制,⑤相对频率,⑥空间面积。在大多数条件下,估计是主观的。

“三步式”定量评价的基本优势是其内在一致性。表现在:①圈定靶区与描述性模型一致;②品位—吨位模型与描述性模型和评价区的已知矿床一致;③研究区已知矿床和矿床数的估计与品位—吨位模型一致。在这一过程中,所有的可用的信息均要被利用,同时还要表达不确定性。

1.2 “三步式”资源评价方法使用中的几个问题

笔者等在参与中国地质调查局与美国地质调查局合作进行的《全球矿产资源评价(The Globe Mineral Resource Assessment Project)》项目过程中,对比了美国的“三步式”矿产资源评价系统与中国矿产资源评价常用方法,对前者的使用及其对我国矿产资源评价工作的借鉴意义作了一些思考。

1.2.1 关于矿床模型的使用

关于成矿预测要不要考虑成矿类型问题,一直是一个有争议的问题。从矿床学家的研究角度看,要开展潜力评价首先要考虑评价矿床类型,没有矿床类型,就没有评价模型,也就无从开始评价。但许多从事勘探技术、统计预测研究的专家则认为,不考虑矿床类型同样可以圈定靶区,如根据地球化学异常块体,使用一定的专业信息提取方法,也能找到需要的矿床。但事实上,如果我们不考虑矿床类型,使用定量方法(如证据权方法)圈定的远景区,其结果就类似一张物化探异常图,由于该图仅仅是数据合成出来的,其实用性甚至还不如物化探异常图。因此国际通行的潜力评价方法都是基于矿床模型的,而且是处在开放的评价系统中,矿床模型不是固定不变的,随地球科学新认识、矿业技术和经济需求等条件的变化,新的模型可能出现,旧的矿床模型可能被扬弃,从而保证评价结果的科学性和客观性。

“三步式”资源评价方法体系特色是地质矿床模型应用,由于矿产资源潜力评价工作是建立在地质模型基础上的,因此能在理论上保证其合理性,但我们也发现,地质上常会出现同一地质环境多种成矿类型共生的现象,许多矿种如金、银、铜、铅、锌等往往同时出现在同一地区,据此圈定的不同类型、不同矿种的可能地段就会出现重复的现象,这无疑将使矿产预测工作变得非常复杂,这也是“三步式”评价方法尚需解决的技术问题。

中国学者程裕淇、陈毓川等总结的成矿系列理论(程裕淇等, 1979; 陈毓川等, 1998, 2004^②), 为很好地解决矿床建模问题提供了理论支持:成矿系列理论通过“四个一定”(一定的地质历史时期、一定的构造部位、一定的地质作用、一定的矿床自然组合)将有成因联系的矿床有机的串联起来,并归纳出制约其产出的关键地质因素,据此建立起的成矿系列模型就有可能抓住区域评价的关键地质因素,因此在区域中小比例尺资源潜力评价过程中,使用成矿系列模型来圈定成矿远景区可能较使用矿床模型更有优势。

1.2.2 多元勘查信息综合应用问题

美国地质调查局在运用“三步式”资源评价系统时,进行评价工作的主要为矿床地质学专家,他们参照矿床模型,根据不同类型矿床的成矿地质环境,圈定出这些类型矿床可能产出的地段,并根据地球物理信息对地表以下 1km 以上的隐伏地质体进行推测,从而扩大可能的矿床产出地段的范围,然后根据对可能地段内的勘探历史和经验对未发现的矿床个数进行估计,该评价结果相对来说较容易被地质人员所接受。但是笔者等在使用过程中发现,该方法还存在一些问题,如,“三步式”资源评价方法中参与评价的信息主要是地质信息,物、化、遥等信息使用得较少,这样产生的结果就是圈定的可能地段范围会很大,如美国地质调查局(USGS)于 1998 年提交的《1998 年对美国未发现的金、银、铜、铅和锌的评价》报告中,在内华达州圈定的可能地段就占整个州面积的 47%。这种结果的优点是可以保证在区域潜力评价中不漏矿,然而对于以战略性矿产勘查部署为目的的评价工作意义却不大。在这一方面,中国的矿产资源潜力评价方法和美国的“三步式”有着较大的差别:中国地质工作几十年来积累了众多地、物、化、遥多元勘查信息,而且这些信息是基本覆盖全疆域的,据此,我们在进行资源潜力评价时所做出的成果会比他们更细致些,我们不仅可以根据成矿系列圈

定成矿可能地段,还可以根据地质勘查的多元综合信息圈定成矿有利地段,甚至还可以通过对成矿有利地段进行优选从而确定找矿靶区。如中国1992~1996年进行的全国第二轮矿产资源评价的结果,就为国家“九五”地质工作规划的制定及找矿工程的部署提供了重要依据。

然而地球化学、地球物理、遥感等信息的预测标志由于影响因素较多,常具有明显的多解性,如:据美国矿产局统计分析,10万个化探异常中,异常与矿点、矿床之比为100:4:0.7。因此,就需要将这些方法与地质预测理论有机地结合起来,从而减少因使用多解性的物、化、遥信息所带来的风险。中国的学者在这方面进行了有效的尝试,如王世称教授多年来总结出的综合信息矿产资源评价方法(王世称等,1994,2000):以地质直接信息为先验前提,全面对区域地质、地球物理、地球化学、遥感、矿产等多元信息进行综合解译,研究区域成矿规律,科学地进行综合信息矿产资源编图,该方法不失为一种多元信息综合利用的可行方法。

1.2.3 关于构造建造编图问题

成矿地质构造编图在“三步式”资源评价中占有极其重要的地位,是进行各种预测的最基本的出发点,因为,在标准的矿床模型中,构造环境是一个重要的圈定成矿远景区的标准准则。通过构造编图可以认识和研究构造环境分区、地质建造的演化以及产出相关矿床的可能性,从而提供圈定成矿可能地段的依据。

一定的地质环境和地质建造,决定了各种成矿学说的产生。前苏联学者毕利宾等认为:导致矿床产生的特别是内生矿床产生的成矿作用,是地壳历史发展的统一而复杂作用过程的一个方面,它在其历史发展过程中,与地质作用其他方面,即沉积作用、构造运动、岩浆活动和变质作用有着最密切的关系。矿化作用可以而且应该从其历史发展和与地壳地质发展作用过程所有其他方面相互联系的角度进行研究(别列捷里也夫,1957),该理论从地质建造出发,强调了矿床是地壳中不同的大地构造发展演化的结果,一定的矿床是特定的地质构造的产物,不同的构造建造单元的矿床产出类型有着根本的区别。如:在地槽发展早期主要是Cu、Ni、Fe等矿床,而在地槽晚期则主要是与岩浆活动有关的中、低温多金属矿床,产于地台区沉积盖层内的金属矿床主要是层控低温矿床和一些与碱性岩有关的矿产。以欧美地质学家为代表的板块成矿学说也十分强调一定大地构

造环境对矿床的控制作用,他们主要采用将今论古的思想,根据现代大洋洋脊、岛弧火山及大陆裂谷等不同成矿环境来认识地质历史发展过程中不同成矿地质构造环境。例如:著名的斑岩铜矿及与海底火山作用有关的黑矿被认为是大洋板块俯冲结果,非洲南德特大型金铀矿床则认为是古老克拉通成矿环境产物,而一些大型金刚石矿床被认为是大陆裂谷环境的产物(米契尔,1986)。成矿学研究显示,成矿作用在空间上常产于各类地质构造的边缘部位以及变异部位,时间上多数与地质构造事件相关,成矿区带的规模常与地质构造带相当(朱裕生等,1999),因此地质构造研究被认为是预测工作的基础。

在“三步式”资源评价中,构造环境底图目前已做得相当精细。通过地质构造编图不仅可以反映大的构造分区如地台、克拉通、岛弧等,还能够表达不同构造环境的物质组成。地质构造编图还是对地表以下矿化进行定位的有效方法,因为许多隐伏的构造都与矿化类型有着密切的关系,这将有利于矿床模型的完善。

1.2.4 关于运算公式中远景区矿床个数问题

在“三步式”评价方法中,未发现的矿产资源潜力数量=远景区可能的矿床个数×该类型的矿床品位×该类型矿床吨位。在操作过程中发现,公式中品位和吨位可以由标准矿床模型得到,但预测远景区矿床个数却是需要估计的,正如上文提到的,这种估计在大多数情况下是主观因素在起作用(Cox et al.^⑥,Cox et al.,1993)这和中国评价工作者常用的依回归方法或逻辑信息法预测资源量一样不太容易操作,这仍是一个有待解决的方法问题。对此USGS的Singer等学者解释说:虽然该计算方法中矿床个数的估计要基于矿床专家的经验,但它的计算结果对后来的经济评价来说具有一定的参考价值。

1.2.5 关于成矿远景区(TRACT)的问题

在矿产资源定量评价中,评价预测单元划分是一项重要工作。通常单元有网格单元(GRID)、地质单元(IGU)、靶区(TARGET)等概念。在“三步式”评价中使用了“TRACT”,究竟“TRACT”是什么级别的成矿远景区,使用过程中容易产生争议。在项目进行过程中,笔者等曾针对此问题与Warren J. Nokleberg探讨,根据Nokleberg的说明:TRACT是受某特定构造事件(如岩浆弧、碰撞带等)控制的可能产生一组有成因联系的矿床组合的区域,相当于MA分析的BELT。TRACT的边界可以是重要的构造边界或含矿岩系范围,在TRACT以外不太可能

有该类型矿床存在,边界是不规则的。和中国划分的成矿区带比较,BELT 相当于中国 3~4 级成矿区带,因此,这里的 TRACT 评价工作相当于一种小比例尺的战略评价工作。

1.2.6 关于品位吨位模型

笔者等使用中国地质调查局的 MRAS 软件(肖克炎,2000),依据 USGS 提供的世界标准斑岩铜矿品位吨位数据,对中国斑岩铜矿进行了对比研究,结果发现中国斑岩铜矿品位吨位模型的统计分布规律和世界斑岩铜矿一样,都服从正态分布,但在使用中出现了用世界铜矿模型估计的铜矿资源量比用中国的铜矿模型估计的资源量要高一倍的不合理现象,笔者等针对这个问题致信 Singer,得到的答复是,在应用世界铜矿模型时要注意以下条件:①小于 4.5 Mt 矿石量的斑岩铜矿不应该进入模型;②所有 2km² 的铜矿储量要加起来;③要进行 T 检验。

1.2.7 关于经济成本滤波器模型

在市场经济条件下,矿产品的市场价格对矿产资源的估计会有一些影响,市场价格上升可能降低矿床的工业品位,经济成本滤波器就是在目前的条件下,从经济学的角度综合考虑地质、经济、地理等影响矿床收益的各种因素,以保证一定经济收益为前提的一个确定矿与非矿的品位—吨位边界模型(如图 2)。也就是说,许多矿床能否作为矿床而列入估计范围之内,主要取决于其经济价值,经济滤波可以帮助剔除那些小型、低品位的矿床。当品位较低或吨位较少时,经济滤波效应尤为明显。

矿产资源评价中对经济成本的评价分析在北美

研究得较为深入,USGS 的资源评价专家 Singer 等从事这方面研究(Singer et al.,1998,1999;Camm et al.,1991)的同时还有专著论述,且 USGS 已在 MARK3 软件中加入了经济成本滤波器模块。目前在中国从事的相关研究主要局限于对已探明资源或已知矿床的经济评价(燕永锋,2001;秦德先,2004),是矿产资源已被发现或勘探到某种程度时进行的一种经济评估活动,如郭元岭等(2002)在综合分析油藏性质、价格、投资、税收等各种影响因素的基础上,利用盈亏平衡原理,导出了一种评价石油储量经济特性及勘探技术界限的模型。然而,在未发现矿床资源评价中引入经济概念的作法还不很普遍。

在地质市场快速发展的今天,应该把经济分析当作资源评价的一个必要考虑的条件,如图 2 所示,品位吨位模型中的品位应该是个动态的概念,即应随着市场需求和价格的变化作相应的改变。以铁矿为例,铁矿价格在 2003 年上半年以前走势一直较平稳,从 2003 年下半年开始价格猛涨,由于铁矿价格高位,利润空间加大,铁矿开发的边界品位已经从以前的 25%下降到 17%,甚至连 13%的矿山也被开发利用。在这种条件下对资源潜力评价的结果必将会随着发生变化。

2 综述

由上我们可以发现,“三步式”矿产资源评价并非一个全新的评价方法,它更像是一些有效方法的集成组装。与“三步式”矿产资源评价方法相比,中国成矿预测中广泛使用的综合信息矿产资源成矿规律编图、综合信息找矿模型建立和基于蒙特卡罗计算机定量模拟等,均与之相类似,而且,中国在使用综合信息进行区域三维立体成矿规律研究方面是走在他们前面的。但也有不足之处,如:中国资源评价方法大体可分为两个类型:一类是以矿床学家为代表的预测方法,侧重于成矿规律总结,较少根据区域成矿模型和实际勘探资料圈定成矿远景区;另一类是以数学地质学家为代表的预测方法,此类方法总体上侧重于信息提取过程的研究,使用了尽可能多的数学方法模型对物、化、遥等信息不断进行挖掘,许多预测工作较少考虑矿床类型模型问题。而两类预测方法之间又较少有沟通,因此造成了评价的理论基础与评价的手段方法研究相脱节的现象,这就不可避免地造成模型和预测相对脱节,从而降低预测结果的可信度。

美国的“三步式”矿产资源评价方法中有几点成

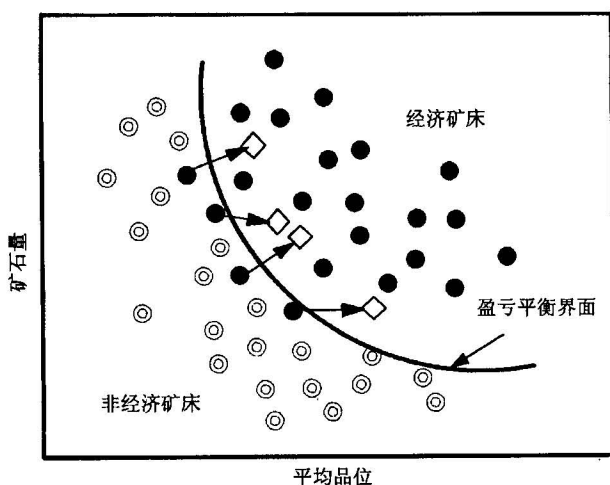


图 2 矿产资源评价经济成本滤波器概念模型

Fig. 2 The concept model of economic filter for mineral resource assessment

果对中国资源评价工作是非常有借鉴意义的:①一致的区域构造建造编图;②标准的矿床模型和品位吨位模型,以往我们在开展资源定量评价工作中,往往是使用地区的品位吨位模型,常导致一个地区一个结果,且有可能产生“领导资源量”;③经济评价因素的应用,这将会保证评价结果的时效性和合理性。

注 释

- ① 王世称,王於天,成秋明. 1987. 综合信息矿产资源定量评价. 地质矿产部地矿司,武汉地质科技管理干部学院,长春地质学院,1~212.
- ② 陈毓川,等. 2004. 中国成矿体系与区域成矿评价成果报告. 中国地质科学院矿产资源研究所,1~980.
- ③ Cox D P, Ludington S, Berger B R, et al. 2006. 在美国内华达州如何圈定矿产资源评价远景区和估算未发现矿床数. 肖克炎,译. 国外矿产资源潜力评价资料汇编. 中国地质科学院矿产资源研究所, 81~104.

参 考 文 献 / References

- 陈永清,王世称. 1995. 综合信息成矿系列预测的基本原理与方法. 山东地质,11(1):55~62.
- 陈毓川,裴荣富,宋天锐,邱小平. 1989. 中国矿床成矿系列初论. 北京:地质出版社,1~102.
- 程裕洪,陈毓川,赵一鸣. 1979. 初论矿床的成矿系列问题. 中国地质科学院院报,1(1):32~58.
- 郭元岭,王学军,高磊. 2002. 最小经济规模石油地质储量确定方法. 石油地质与开发,(1):27~29.
- 刘承祚. 1999. 地质专家系统与成矿预测. 见:陈毓川,主编. 当代矿产资源勘查评价的理论与方法. 北京:地震出版社,302~310.
- 米契尔 A H G, 加森 M S. 1986. 矿床与全球构造. 周裕藩,李锦轶,译. 北京:地质出版社,1~266.
- 秦德先,谈树成,燕永锋,刘光亮,范柱国. 2004. 矿床数学经济模型的软件包功能及应用. 地质与勘探,40(3):47~51.
- 王世称,陈永清. 1994. 综合信息成矿系列预测图编制的基本原则. 中国地质,(3):25~27.
- 王世称,陈永良,夏立显. 2000. 综合信息矿产预测理论与方法. 北京:科学出版社,1~343.
- 肖克炎,朱裕生,宋国耀. 2000. 矿产资源 GIS 定量评价. 中国地质,278(7):29~32.
- 燕永锋,秦德先. 2001. 矿床数学经济模型及其在元江金矿的应用. 矿物学报,24(4):619~624.
- 赵鹏大,池顺都. 1991. 初论地质异常. 地球科学,16(3):241~248.
- 赵鹏大,胡旺亮,李紫金. 1994. 矿床统计预测. 北京:地质出版社,1~272.
- 赵鹏大,陈建平,张寿庭. 2003. “三联式”成矿预测新进展. 地学前缘,10(2):455~463.
- 朱裕生,王全明,张晓华,方一平,肖克炎. 1999. 中国成矿区带划分及有关问题. 地质与勘探,35(4):1~4.
- Cox D P, Singer D A. 1986. 矿床模式. 宋伯庆,等,译. 北京:地质出版社,1~378.
- Camm T W. 1991. Simplified cost models for prefeasibility mineral evaluations. U. S. Bureau of Mines Information Circular 9298:35~51.
- Cox D P. 1993. Estimation of undiscovered deposits in quantitative mineral resource assessments—Examples from Venezuela and Puerto Rico. Nonrenewable Resources, 2(2):82~91.
- Harris D P, Rieber M. 1993. Evaluation of the United States Geological Survey's three-step assessment methodology. U. S. Geological Survey Open-File Report, (258-A):675~687.
- McCammon R B, Briskey J A. 1992. A proposed national mineral-resource assessment. Nonrenewable Resources,1(4):259~265.
- Singer D A. 1993. Basic concepts in three-part quantitative assessments of undiscovered mineral resources. Nonrenewable Resources, 2(2):69~81.
- Singer D A. 1994. The relationship of estimated number of undiscovered deposits to grade and tonnage models in three-part mineral resources assessments. International Association of Mathematical Geology, Geology Annual Conference, Papers and Extended Abstracts: 325~326.
- Singer D A, Menzie W D, Long K R. 1998. A simplified economic filter for underground mining of massive sulfide deposits. U. S. Geological Survey Open-File Report 00-349:1~18.
- Singer D A, Kouda R. 1999. Examining risk in mineral exploration. Natural Resources Research, 8(2):111~122.
- USGS Website: <http://pubs.usgs.gov/info-handout/revision>.

The Discussion of Three-part Form of Non-fuel Mineral Resource Assessment

XIAO Keyan, DING Jianhua, LIU Rui

Institute of Mineral Resource, Chinese Academy of Geology Science, Beijing, 100037

Abstract

During the co-operation with the United States Geological Survey (USGS), the writers used the three-part form of quantitative assessments, which was recommended by the USGS, in projects. In this paper, the modified parts of three-part form in recent years have been introduced. By comparing with the assessment methods used in China, the author discussed some questions which may be come into being when the three-part method was used. The writers also point out that three-part form of assessment is not a new method but an effective combination of several assessment methods. We should learn from them in three aspects: (1) accordant regional tectonic mapping, (2) the using of standard mineral deposit models and standard grade—tonnage models, (3) the using of economic cost filter in mineral quantitative assessment.

Key words: mineral resource assessment; quantitative assessment; three-part assessments method