

区域地球化学定量预测方法技术在矿产资源潜力评价中的应用

龚鹏¹⁾, 李娟²⁾, 胡小梅³⁾, 刘修国¹⁾, 马振东²⁾

1) 中国地质大学信息工程学院, 武汉, 430074; 2) 中国地质大学地球科学学院, 武汉, 430074;

3) 中国地质大学资源学院, 武汉, 430074

内容提要:为科学评估我国重要矿产资源的潜力, 本文首先客观地分析了当前矿产资源预测领域的现状, 回顾并评述了三种地球化学定量预测方法(丰度法、面金属量法和地球化学块体法)。其次通过整理、吸纳前人研究成果, 在 GIS 技术平台上集成了以基础地质、成岩成矿机制、理论地球化学和勘查地球化学为一体的研究思路, 概要论述了在 III 级成矿带中开展地质、地球化学找矿模型建立、地球化学定量预测区优选和资源量估算的方法技术。最后总结了地球化学定量预测的几点认识和探索了进一步发展的方向。

关键词:找矿模型; 定量预测方法技术; 矿产资源潜力评价; 剥蚀系数; 相似系数

矿产资源一直是发展中国家工业化进程推进和发达国家经济持续发展的重要保障之一, 统计数据表明, 近年来我国各类大宗重要矿产品消耗量与日俱增且越来越依赖于国外进口, 为尽快扭转这样的不利局面, 必须在全球新一轮的矿产资源勘查热潮中做到立足国内, 面向全球。那么如何对我国已取得的丰富地质资料进行综合研究, 科学地评估其矿产资源的潜力呢? 2006 年中国地质调查局启动了全国矿产资源潜力评价项目, 其重要目标之一就是构建出一套行之有效的评价技术体系, 完成全国 25 个重要矿种的资源潜力的全面“体检”。

在此背景下, 作为全国矿产资源潜力评价的重要组成部分之一的地球化学定量预测, 我们在充分总结和吸纳前人矿产资源预测研究成果的基础上, 提出了以现代成矿理论和地球化学成晕理论为指导, 以区域地球化学调查数据为主, 以现代信息技术(GIS)为手段, 在 III 级成矿带尺度上探索矿产资源地球化学定量预测的方法技术, 其核心为地质、地球化学找矿模型的建立和定量预测方法的选取。下面分别从矿产资源预测的现状、地球化学定量预测方法和基于 GIS 的区域地球化学定量预测方法技术三个方面阐释。

1 矿产资源预测研究现状

矿产资源预测的核心是研究矿产资源在某一地区“有没有”、“在哪里”以及“有多少”的问题, 分别对应定性预测、定位预测和定量预测。我国矿产资源预测工作的快速发展始于上世纪 80 年代, 经过不断吸收国外理论和一定自主创新后, 近十年来涌现了一大批丰硕的成果。尤其是伴随着 GIS 技术的成熟, 逐渐朝数字化、自动化方向迈进。其中开发了一系列基于 GIS 平台或独立运行的应用软件评价系统, 如具有代表性的 MARK3 (Duval, 2000; Lisitsin, 2010)、Arc-WofE (Porwal et al., 2006; 陈建平等, 2005)、MRAS (肖克炎等, 2006; 薛顺荣等, 2008; 黄文斌等, 2011)、GeoDAS (成秋明, 2006)、MORPAS^①、MRQP (Wang Yan et al., 2008)、MRPM (Chen Yongliang, 2004)、KCYC (叶水盛, 2007)、DPIS (白万成等, 2004)、单元簇 (张振飞等, 2001) 等应用系统。

上述开发的矿产资源预测系统主要是以数理统计理论为基础, 在数据源上注重多元地学信息的融合(地质矿产、地球物理、地球化学、遥感、重砂等), 预测数学模型以各类证据权模型占主导地位, 大部分是基于 GIS 平台二次开发而成, 其目标主要应用

注: 本文为中国地质调查局资助项目(编号 1212010733805)的成果。

收稿日期: 2011-11-22; 改回日期: 2012-06-01; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 龚鹏, 男, 1985 年生。博士研究生, 地图制图学与地理信息工程专业, 研究方向为地球化学找矿与 GIS 成矿预测。Email: 360464454@qq.com。

于区域远景找矿区的优选和资源潜力的定量评价。其中 MRAS、GeoDAS 和 MORPAS 已经在国内外发表了诸多研究成果,特别是 MRAS 和 GeoDAS 在全国矿产资源评价项目中已被列为矿产预测的重要辅助决策系统(娄德波等,2010a;成秋明等,2009)。最近 Ore Geology Reviews 期刊出版了关于资源勘查和定量估算的论文专辑(Porwal et al.,2010),汇编了国外在矿产资源预测中的最新研究成果。

2 地球化学定量预测方法评述

地球化学定量预测属于矿产资源预测研究的一部分,是以不同尺度地球化学调查数据为主,对相应尺度的矿产资源潜力进行定性和定量评价。早在上个世纪美国学者就发现美国本土 26 个元素的地壳丰度与可采储量的吨位呈线性关系(McKelvey,1960),之后很多学者跟进相关的研究并做了大量卓有成效的工作,取得了众多成果(Garrett,1978;Mookherjee et al.,1994;Nishiyama et al.,1995)。前苏联学者索诺沃夫(1964)很早就研究了分散晕内金属量的计算、位移的估计以及含矿程度的评价,并创立了估算资源量的面金属量法;之后,欧美学者建立了应用于某一岩石类型单元、区域及地质省的丰度关系模型(Celenk et al.,1978);我国学者谢学锦等(2002)、刘大文(2002)提出了地球化学块体法,从巨型矿床有巨量成矿物质供应的角度,用地球化学块体代表巨量物源供应的地区,给出了块体内矿产资源定量估算的方法,地球化学块体法针对我国不同地区和不同矿种进行了较为广泛的应用(刘大文等,2005;刘长征等,2011)。

需要指出的是:无论那一种地球化学定量预测方法,均需要扎实的成矿地质基础和对成矿规律的深刻理解,只有建立在这样的基础上,才可能使挑选的各类预测变量符合或接近成矿的客观实际;近年来通过西藏冈底斯成矿带的找矿实践表明,在西部工作程度极低的地区可以优选出少量相互关联、目标一致、最能揭示某种类型成矿本质特征的关键信息组合,就可能导致该类型矿床被发现(郑有业等,2009)。而区域 1:20 万、1:50 万水系沉积物测量地球化学异常是关键信息组合之一,为此,预测时必须强调变量的关联性 & 关键信息的合理组合。

目前丰度法、面金属量法、地球化学块体法是勘查地球化学界中应用最广泛的三种定量预测方法。从表 1 中获知,三种方法涉及的预测矿种较多,研究尺度跨越较大,计算原理均为相似类比,资源量估算

公式也均得到不同程度的修正和完善。三种方法的差异之处在于丰度法要求矿床的勘探数据最为详细(储量、比重等),其次是面金属量法,最后是地球化学块体法;丰度法估算对象可从矿田→矿带→成矿省,乃至全球,而面金属量法和地球化学块体法主要应用于矿田和矿带尺度;面金属量法已被集成至 MRAS 系统中(娄德波等,2010a),近年来有学者在 GeoMDIS2000 系统中开发了地球化学块体谱系树图自动绘制方法(周晓东等,2007),通过谱系树图自动绘制的实现,大幅度提高了出图结果的工作效率和精确度,但仍未开发出集地球化学块体筛选、谱系树图绘制和资源量估算为一体化的应用程序。

尽管地球化学块体法已被作为全国重要矿产总量预测的五种方法之一(肖克炎等,2007),但是在实际应用中仍需进一步探索和完善,下面提出以下几个方面的问题供同行批评指正:

(1) 地球化学块体法的初衷是对大型或巨型矿床而提出的,这对块体的面积提出了一定的要求(大于 1000 km²),其决定因素不仅在于成矿物质的大量供应需要尺度的支撑,而且还取决于采样密度(一个组合样在 1:20 万水系沉积物测量中代表 4 km²);因此,地球化学谱系树的划分只有在一定尺度上进行才能与采样密度相匹配,这样,资源量的估算更具参考价值。

(2) 成矿率参数的计算主要受矿种、矿床类型、块体级别、景观条件、勘查程度等因素的制约,因此,必须科学合理的计算成矿率,这就需要利用已知矿床最新的储量资料和地球化学块体内的“原生态”的数据。

(3) 块体级别的划分需符合客观实际,块体级别的划分尚无细则,尤其是块体下限、空间数据的插值参数怎样设置最佳,需要反复试验后而定;地球化学块体划定不仅仅从几何形态上区分,更要注重结合成矿地质背景、成矿机制及多元素共存的实际情况,尝试进一步区分不同成因类型的块体和多元素叠合的块体是很有必要的,单纯考虑成矿物质质量的供应有一定的局限性。

(4) 由于地球化学块体法本质上也是基于相似类比的原理,因此,预测时需要注意预测深度和预测矿床类型的合理外延,尤其是对于预测深度而言,并非所有的矿种或者地区的预测深度均能高达 1 km,只有与实际研究区的矿床类型、预测矿种的勘探现状、自然景观等因素结合起来,选取一个合理的预测深度,这样预测结果可能更具说服力;另外,地球化

学块体法仅适用于成矿物质的源区处于所研究的地球化学块体内,然而不少矿床的物源是深源的(>1 km),成矿作用基本不受 1 km 之内表壳岩系元素丰度的制约,这样对该方法应用的矿床类型应有所限制,此外,还应当考虑矿床的剥蚀程度等影响因素。

综上所述,无论是丰度法,还是面金属量法和地球化学块体法,均需在实践过程中不断完善,特别是计算参数的补充和修正。为此,如何从区域地球化学数据入手,充分提取其中有利的成矿信息?如何通过这些有利的成矿信息进行预测区的优选和资源量的估算?如何对已有估算方法进行完善和修正?对于这些问题的深入探讨,将对促进地球化学定量预测工作的发展具有重要的现实意义和科学价值。下面通过全国铜矿资源地球化学定量预测方法技术四年多来的研究实践,详细阐述其研究思路、评价技术和估算方法,特别是对资源量的计算方法中的参数进行了适当的修正。

3 基于 GIS 的区域地球化学定量预测方法技术

3.1 研究思路

地球化学定量预测的研究思路是:以我国已有的 1: 20 万(1: 50 万)区域地球化学调查数据为主,综合利用 1: 5 万~1: 1 万中大比例尺化探资料,以现代信息技术(GIS)为手段,研究总结典型矿田(矿集区)、矿床的地质、地球化学特征,建立 III 级成矿带典型矿床的地质、地球化学找矿模型,通过找矿模型优选出与典型矿床相似的预测区,进一步运用地球化学资源量估算方法计算其资源量并评价可信度(图 1)。

由图 1 可知,地质、地球化学找矿模型的建立是

表 1 地球化学定量预测方法分类

Table 1 Classification for geochemical quantitative prediction methods					
预测方法	预测矿种	研究区	主要数据特征	公式是否修正	文献来源
丰度法	Cu	安徽罗吕河-月山	勘探数据、水系沉积物测量	否	赵鹏大等, 1994 (1980 年预测)
	Fe	攀西钒钛磁铁矿地区	勘探数据、岩体 Fe 平均含量等	是	杨本瑞等, 1985
	Mn	中国陆壳	储量、丰度等	是	黎彤, 1992
	Cu、Mo	玉龙斑岩铜矿带	勘探数据、2 条 1:20 万岩石测量剖面	综合	罗怀松, 1992
	Sn、W 等	湘南	勘探数据、1:20 万水系沉积物测量	是	罗长清, 1993
	Au	刺猬沟-苍林	勘探数据、1:5 万水系沉积物测量	是	裴尧 ^⑥
面金属量法	Ag	大兴安岭东南部	勘探数据及地球化学数据等	是 否	叶水盛等, 2008
	斑岩型 Cu	东天山地区	1:20 万水系沉积物测量	是	
	Cu、Pb、Zn 等	香格里拉地区		否	卢映祥等, 2010
	铜镍型 Cu	东天山地区		是	姜德波等, 2010b
地球化学块体法	Sn	中国		否	刘人文, 2002
	W	中国华南		否	谢学锦等, 2002
	B	辽东地区		是	周永恒等, 2011

注:叶水盛等(2008)用了丰度法和面金属量法两种方法。

核心之一,其模型建立的精细程度直接关系到预测区挑选的可信度。为此,从内容上而言,主要涵盖了地质特征和地球化学特征两大部分,属于以二元信息为主的矿产预测。对于成矿的地质特征分析,主要是从典型矿床成矿作用的“源”、“动”、“储”三个方面进行考察,其中“源”指的是金属元素成矿前是从哪一个(主要)地质体中活化—迁移—沉淀富集成矿的?“动”指的是哪一次(主要)地质作用具备有使金属元素富集的机制?“储”指的是金属元素在哪些空间位置最有利于沉淀富集?

而对于地球化学特征的揭示,其特点具有统一性、层次性和多元性。统一性是指成岩—成矿—成晕是同一个成矿系统下不同阶段演化的产物,是一个统一的整体,因此可以应用铅、硫等稳定同位素揭示其矿质来源,利用放射性同位素判明成岩、成矿的时空分布规律……;层次性是指不同尺度的勘查地球化学数据示踪了各异的成矿信息,不同层次之间的异常具有变异和继承的关系,所谓变异,即元素含量、赋存形式等从岩石——>土壤——>水系沉积物的过程中发生了变化,所谓继承,即在水系沉积物中仍然继承了相关的成矿元素组合特征和携带了大量的

异常信息;多元性是指利用多种地球化学统计参数定量刻画地球化学异常信息,如背景值、异常下限、元素衬值、面金属量、相似系数、剥蚀系数、衬度异常量(面金属量与背景值之比)等。简言之,建模的过程是一个充分综合基础地质、成岩成矿机制、理论地球化学和勘查地球化学等学科提取成矿信息的过程。

3.2 评价技术

地球化学定量预测的关键评价技术是圈定找矿预测区,其主要圈定依据包含地球化学异常特征和地质矿产特征两部分。具体为元素综合异常图、相似度图、预测元素衬值图、多元素平均衬值图、单元素衬值个数以及地质矿产图(表2),其中的各类地球化学图件是通过不同的数学处理方法,从多角度揭示地球化学数据反映的成矿信息;根据各类预测要素耦合程度的高低区分三个等级,根据有无预测元素对应的矿点或矿化点分为A级(有矿点或矿化点存在)和B级(无矿点或矿化点存在),进一步根据特征指示元素组合相似程度的高低,区分出C级(相似度图中的相似度异常无三级或二级异常分带),从可信度评价预测区为A级可信度高于B级,B级可信度高于C级。

下面以西藏冈底斯成矿带驱龙斑岩型铜矿床预测区的圈定为例,详细列举了其圈定预测区的依据,并对预测区的可信度区分为A、B、C三个等级(表3)。在表3中,以A级预测区圈定的依据为例,Cu + Mo + Au 综合异常图中异常达外带以上,Cu + Mo + Au + Ag 相似度图中异常分带清晰,至少具有两级分带,Cu + Mo + Pb + Zn + Au + Ag 平均衬值图中异常分带明显,异常强度较大,Cu、Mo、Pb、Zn、Au、

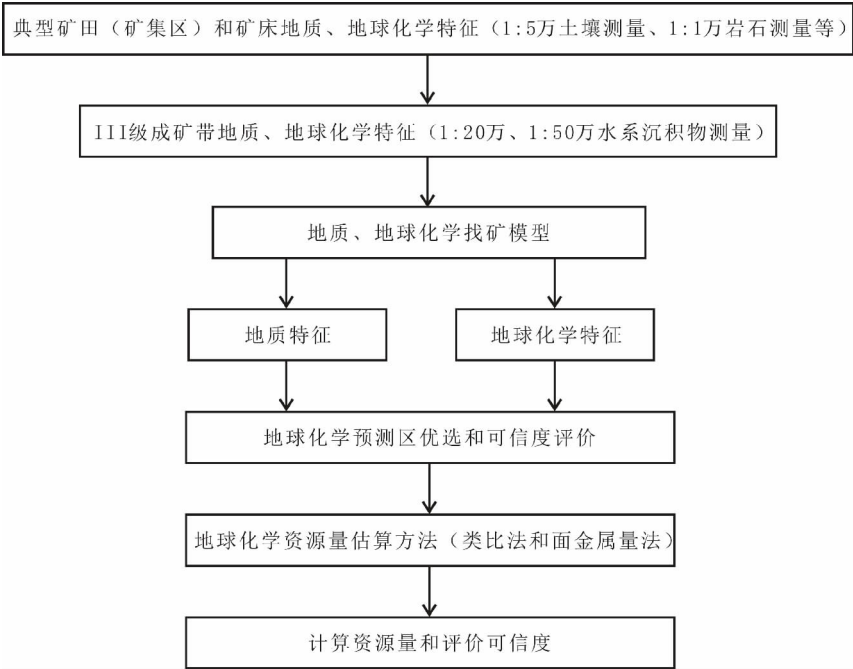


图1 地球化学定量预测流程图

Fig.1 Flowchart of geochemical quantitative prediction

Ag 六个单元素的组合衬值图(衬值为某样点所处小窗口与同心大窗口内某元素的平均值之比)中,有Cu 衬值异常(异常至少达外带),且有不低于3 个的元素的衬值异常套合程度高,即衬值异常的重叠面积较大;此外,有 Cu 的矿点或矿化点存在(包括以Cu 为主的多金属矿点或矿化点),又根据斑岩型矿

表2 地球化学定量预测区圈定依据和可信度分级

Table 2 Evidences of geochemical quantitative prediction for potential prospecting areas and grade of confidence level

地球化学预测区圈定的依据		可信度分级			备注
		A 级	B 级	C 级	
地球化学异常特征	综合异常图	+	+	+	预测元素综合异常至少具外带
	相似度图	+	+		异常分带清晰,至少两级分带
	预测元素衬值图	+	+	+	预测元素衬值有异常(至少外带)
	多元素平均衬值图	+	+	+	异常分带明显、异常强度较高
	单元素组合衬值图 (个数)	≥n	≥n	≥n+1	有预测元素衬值异常,且多元素衬值异常的套合程度高(重叠面积大)
地质矿产特征	矿产图	+			预测元素对应的矿点或矿化点
	地层				矿源层(“源”、“储”)
	构造				成岩、成矿通道(“动”)
	火成岩				矿质富集“热源”、“物源”)

注:地质矿产要素与一定的矿床类型紧密相关,即视具体的矿床类型而具体分析;+表示必须具备的要素,n 为个数,一般小于选取的特征指示元素的总数。

床形成的控制因素分析,要求预测区范围内必须存在中新世的深源中酸性斑岩体,而对围岩没有选择性,因为斑岩体若与碳酸盐岩接触可形成矽卡岩型矿体,而侵入在硅铝质岩石中则形成斑岩型矿体,最后要求预测区处在断裂构造的交汇部位或者有断裂穿过。只有在上述特征全部具备的条件下,才将该预测区精选为驱龙式的 A 级地球化学预测区。

地球化学预测区的圈定可采取两种形式进行,其基本流程相同,一种为图层分析,即以 GIS 技术为手段对预测要素图层之间进行相互叠加选区;另外一种为对地球化学预测要素图对应的地球化学找矿指标在统计分析软件中针对样本点检索出符合要求的点进行投点,投点区即为初选的预测区。后者选取的优点是避免了空间插值导致数据平滑的影响,直接对原始数据操作,再把投点区与地质矿产图等预测要素结合进行精选。

以利用图层分析的方法在西藏冈底斯 III 级成矿带内圈定斑岩铜矿预测区为例(图 2):首先粗选,在以驱龙典型铜矿床作为“标准样本”的 Cu + Mo + Au + Ag 相似度图、Cu + Mo + Pb + Zn + Au + Ag 组合元素平均衬值图以及对应单元素衬值套合程度、套合元素的个数等预测要素图上粗选出一批预测区(图 2a);然后精选,综合考虑地质图、矿产图、Cu + Mo + Au 组合元素地球化学图、(Cu + Mog + Au)/(Pb + Zn + Ag) 比值图、Cu 含量或衬值的点位图以及水系分布图等图层,进一步对预测区进行精选和可信度分级(图 2b)。

3.3 估算方法

地球化学资源量的估算方法可简述为:在已知区内,通过经验统计或计算机模拟的方式建立已知区典型矿床的未剥蚀储量(Pu)与地球化学异常统计参数(C 、 B)之间的数学关系(图 3),为简化计算的过程,下面以最简单的线性关系为例,推导资源量估算的计算公式。已知区的资源量计算公式为(1)式。根据成矿系列理论和“就矿找矿”的原则,把这个线性方程推广至成矿地质条

件类似的预测区,其计算公式为(2)式。

$$\frac{Pu_{已知}}{1 - F_{已知}} = C_{已知} \cdot S_{已知} \cdot H_{已知} \cdot \rho_{已知} \cdot Me_{已知}$$

(1)(已知区)

$Pu_{已知}$ 为已知区典型矿床目前资源量, $F_{已知}$ 为已知区典型矿床的剥蚀系数, $C_{已知}$ 为已知区典型矿床的地球化学异常内的平均值, $S_{已知}$ 为已知区典型矿床的地球化学异常面积, $H_{已知}$ 为已知区典型矿床的平均勘探深度, $\rho_{已知}$ 为已知区典型矿床的岩石密度, $Me_{已知}$ 为已知区典型矿床的成矿率。

$$\frac{Pu_{预测}}{1 - F_{预测}} = C_{预测} \cdot S_{预测} \cdot H_{预测} \cdot \rho_{预测} \cdot Me_{预测}$$

(2)(预测区)

$Pu_{预测}$ 为预测区预测矿床目前资源量, $F_{预测}$ 为预测区预测矿床的剥蚀系数, $C_{预测}$ 为预测区预测矿床的地球化学异常内的平均值, $S_{预测}$ 为预测区预测矿床的地球化学异常面积, $H_{预测}$ 为预测区预测矿床的预测深度, $\rho_{预测}$ 为预测区预测矿床的岩石密度, $Me_{预测}$ 为预测区预测矿床的成矿率。

由(1)式除以(2)式得:

$$\frac{\frac{Pu_{已知}}{1 - F_{已知}}}{\frac{Pu_{预测}}{1 - F_{预测}}} = \frac{C_{已知} \cdot S_{已知} \cdot H_{已知} \cdot \rho_{已知} \cdot Me_{已知}}{C_{预测} \cdot S_{预测} \cdot H_{预测} \cdot \rho_{预测} \cdot Me_{预测}}$$

(3)

表 3 西藏冈底斯 III 级成矿带的地球化学定量预测区圈定依据和可信度分级
Table 3 Evidences of geochemical quantitative prediction for potential prospecting areas and grade of confidence level in Gangdisse grade-III metallogenic belt, Xizang (Tibet)

地球化学预测区圈定的依据		可信度分级			备注
		A 级	B 级	C 级	
地球化学异常特征	Cu + Mo + Au 综合异常图	+	+	+	预测元素综合异常至少具外带
	Cu + Mo + Au + Ag 相似度图	+	+		浓度分带清晰,至少两级分带
	Cu 衬值图	+	+	+	Cu 衬值有异常(至少外带)
	Cu + Mo + Pb + Zn + Au + Ag 平均衬值图	+	+	+	浓度分带明显、异常强度较高
	单元素组合衬值图(个数)	≥3	≥3	≥4	有 Cu 元素衬值异常,且多元素衬值异常的套合程度高(重叠面积大)
地质矿产特征	矿产图	+			Cu 矿点或矿化点(包含 Cu 多金属矿点或矿化点)
	地层	矽卡岩型围岩为碳酸盐岩			接触带形成矽卡岩型矿床
	构造	断裂交汇部位或有断裂穿过			成岩、成矿通道(“动”)
	火成岩	中新世中酸性斑岩体			矿质富集“热源”、“物源”)

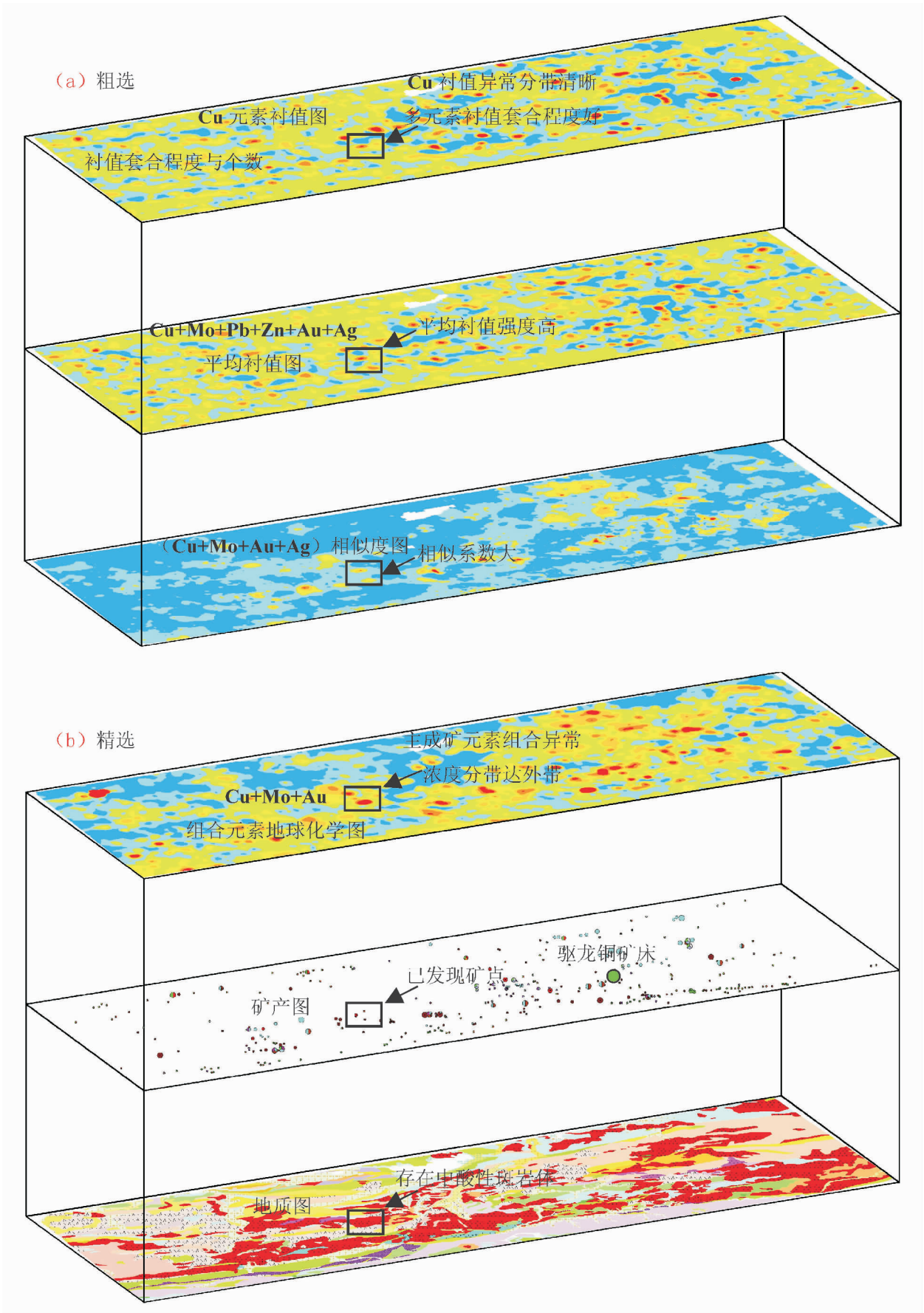


图 2 西藏冈底斯Ⅲ级成矿带的预测区圈定方法

Fig. 2 Targeting method of geochemical potential prospecting area in Gangdise grade-Ⅲ metallogenic belt, Xizang (Tibet)

通过相似系数(R),假定:

$$\rho_{\text{预测}} \cdot Me_{\text{预测}} = R \cdot \rho_{\text{已知}} \cdot Me_{\text{已知}}, \text{假定 } H_{\text{预测}} = H_{\text{已知}}$$

则(3)式简化为:

$$\frac{Pu_{\text{已知}}}{Pu_{\text{预测}}} = \frac{C_{\text{已知}} \cdot S_{\text{已知}}}{C_{\text{预测}} \cdot S_{\text{预测}}} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{1 - F_{\text{已知}}}{1 - F_{\text{预测}}} \quad (4)$$

由(4)式可计算出预测区的资源量称之为类比法资源量;若(4)式中的地球化学异常平均值(C)减去背景值(B)则为剩余异常平均值,此时计算公式为(5)式,其计算出预测区的资源量称之为面金属量法。

$$\frac{Pu_{\text{已知}}}{Pu_{\text{预测}}} = \frac{C_{\text{已知}} - B_{\text{已知}}}{C_{\text{预测}} - B_{\text{预测}}} \cdot \frac{S_{\text{已知}}}{S_{\text{预测}}} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{1 - F_{\text{已知}}}{1 - F_{\text{预测}}} \quad (5)$$

以上两种地球化学定量预测估算方法即为本次全国铜矿产资源地球化学模型建立与定量预测研究中推荐的两种资源量估算方法。与前人估算方法相比,其特色在于重视成矿作用“源”→“动”→“储”的研究和和深入挖掘不同尺度勘查地球化学数据隐藏的成矿信息,强调成矿作用与地球化学信息的关联性分析;此外,结合原生晕分带理论和次生异常对原生异常的继承性,研究了根据矿床剥蚀程度(前缘晕、矿体晕、矿尾晕)在区域地球化学异常中所呈现的相应元素组合特征,从而计算出判别矿床相对剥蚀程度的剥蚀系数,以及根据前人提出的相似性指标计算公式(任天祥等,1998),对其进行一定改进和完善后,选取关联性最强的一组成矿元素组合通过距离公式计算了相似系数,用来示踪预测区与已知区之间的相似程度。在实际应用过程

中,把这两个计算参数引入到估算资源量的计算公式中,使估算的资源量与客观实际更加吻合。

4 几点认识

基于以上分析和讨论,归纳为以下几点认识:

(1)通过当前矿产资源预测现状的分析获知,矿产资源预测以多源信息综合预测为主,通过二次开发实现了各具特色的预测评价系统,逐步朝数据处理复杂化、资源量定量计算方向发展。

(2)目前,地球化学定量预测方法以丰度法、面金属量法和地球化学块体法为主,本文比较了三者之间的异同点。尤其是针对我国应用最为广泛的地球化学块体法,通过分析众多发表的研究实例,从中概括了四个方面的问题,供同行参考、讨论。只有充分认识各种地球化学定量预测方法的应用条件的基础上,才可能使计算的资源量符合客观实际以及进行资源量结果的对比。

(3)在前人研究基础上,本文提出了区域地球化学定量预测方法技术在矿产资源潜力评价中应用的研究思路,阐述了地质、地球化学找矿模型的内涵,论证了预测区圈定的关键评价技术及两种资源量估算方法(类比法和面金属量法)等内容。在这个定量预测的过程中,找矿模型的建立是“根基”,预测区的圈定是“枝干”,资源量的估算则为“果实”。

(4)通过长江中下游铜多金属成矿带^①、西藏冈底斯铜多金属成矿带^②的试点研究以及通过苏州培训班培训后^③在全国省级推广铜矿资源地球化学定量预测的实践表明,该方法圈定的预测区和估算的资源量具有一定的可信度,获得了专家和同行的认可。经过四年多来的不断尝试和总结,初步形成了以基础地质、成岩成矿机制、理论地球化学和勘查地球化学为一体的综合性研究思路。

(5)需要指出的是:尽管在前人研究的基础上,基于 GIS 的地球化学定量预测方法技术取得了长足的进步,特别是首次把剥蚀系数和相似系数引入至地球化学资源量估算公式中,使地球化学预测方法从定性往定量方向发展迈出了可喜的一步。但在资源量预测理论和方法技术上仍然存在诸多需完善的方面,如①地球化学异常在岩石→土壤→水系沉积

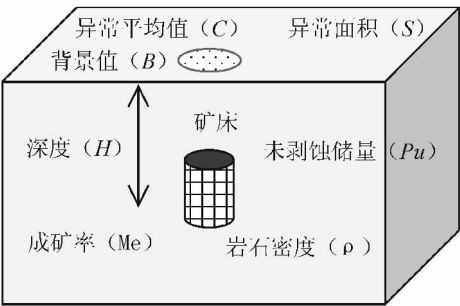


图 3 地球化学资源量的估算方法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of geochemical methods for estimating resources

物三类介质中是如何衔接和演化的? ②内生成矿作用与表生各种地球化学异常之间的内在联系,即地球化学异常参数和储量(资源量)之间的非线性联系如何建立? ③如何评价地质、地球化学找矿模型的可信度? ④现代信息技术(GIS、RS等)如何更科学、更简捷地应用于资源量预测中? ⑤圈定的预测区和估算的资源量如何同其他方法进行相互检验和深入的对比分析等等? 对于这些问题的解决尚需进一步的研究。

致谢:感谢中国地质调查局叶天竺总工的大力支持,感谢牟绪赞教授级高工、任天祥教授级高工、奚小环教授级高工、向运川教授级高工、王永华教授级高工、汪明启教授等专家和评审人提出的宝贵意见和建议。感谢龚敏博士、赵波硕士、熊燃硕士、金希硕士及十几位本科生参与铜矿资源地球化学模型建立与定量预测的研究!

注 释 / Notes

- ① 马振东,等. 2008. 矿产资源地球化学模型建立与定量预测研究——以长江中下游铜多金属成矿带为例. 内部研究成果报告. 武汉:中国地质大学, 1~68.
- ② 马振东,等. 2009. 矿产资源地球化学模型建立与定量预测研究——以西藏冈底斯铜多金属成矿带为例. 内部研究成果报告. 武汉:中国地质大学, 1~74.
- ③ 马振东,等. 2010. 矿产资源地球化学模型建立与定量预测研究方法指南. 中国地质调查局发展研究中心苏州培训班讲义. 北京:中国地质调查局发展研究中心, 1~34.
- ④ 秦东悦. 2010. “证据权”法在大兴安岭中南段矿产资源评价中的应用. 硕士学位论文. 导师:陈永清. 北京:中国地质大学, 1~41.
- ⑤ 裴尧. 2008. 组合异常丰度法在矿产资源潜力预测中的应用. 硕士学位论文. 导师:贾大成. 长春:吉林大学, 1~60.

参 考 文 献 / References

- 白万成,臧忠淑. 2004. 基于 Arc View GIS 的矿床定位预测系统简介. 地质与勘探,40(3):52~54.
- 陈建平,王功文,侯昌波,唐菊兴. 2005. 基于 GIS 技术的西南三江北段矿产资源定量预测与评价. 矿床地质,24(1):15~24.
- 成秋明. 2006. 非线性成矿预测理论:多重分形奇异性—广义自相似性—分形谱系模型与方法. 地球科学,31(3):337~348.
- 成秋明,刘江涛,张生元,夏庆霖. 2009. GIS 中的空间建模器技术及其在全国矿产资源潜力预测中的应用. 地球科学,34(2):338~346.
- 丁建华,肖克炎,刘锐,薛顺荣,程勘. 2007. 区域资源定量评价中金属量法的应用——以东天山为例. 矿床地质,26(2):230~236.
- 丁建华,肖克炎,娄德波,李楠. 2010. 一种地球化学定量评价方法的改进. 地质找矿论丛,25(4):366~371.
- 黄文斌,肖克炎,丁建华,李楠. 2011. 基于 GIS 的固体矿产资源潜力评价. 地质学报,85(11):1834~1843.
- 罗怀松. 1992. 一元丰度估计法在西藏玉龙斑岩铜矿资源预测中的应用. 物探化探计算技术,14(1):26~31.
- 刘大文. 2002. 地球化学块体理论与方法技术应用于矿产资源评价

- 的研究. 博士学位论文. 导师:杨经绥,谢学锦. 北京:中国地质科学院, 1~64.
- 刘大文,谢学锦. 2005. 基于地球化学块体概念的中国锡资源潜力评价. 中国地质,32(1):25~32.
- 刘长征,陈岳龙,许光,赵娟,李玥,李琳业,姬丙艳,汪元奎. 2011. 地球化学块体理论在青海沱沱河地区铅锌资源潜力预测中的应用. 地质学前沿,18(5):271~282.
- 黎彤. 1992. 锰的成矿地球化学特征及其资源预测. 矿床地质,11(4):301~306.
- 罗长清. 1993. 水系沉积物成矿元素的丰度在矿产资源量预测中的应用. 湖南地质,12(1):59~61.
- 卢映祥,薛顺荣,肖克炎,丁建华,蒋成兴,许东,余海军. 2010. 面金属量法在香格里拉地区铜多金属矿资源潜力定量评价应用. 地质与勘探,46(2):238~243.
- 娄德波,肖克炎,丁建华,孙艳. 2010a. 矿产资源评价系统(MRAS)在全国矿产资源潜力评价中的应用. 地质通报,29(11):1677~1684.
- 娄德波,肖克炎,孙艳,李楠. 2010b. 成矿概率面金属量法在东天山铜镍矿预测中的应用. 中国地质,37(1):183~190.
- 索洛沃夫 A П(苏). 1964. 金属量测量的理论和实践基础. 阮天健,林名章,吴荣祥. 译. 北京:中国工业出版社, 1~202.
- 任天祥,伍宗华,羌荣生. 1998. 区域化探异常筛选与查证的方法技术. 北京:地质出版社. 110~114.
- 薛顺荣,肖克炎,丁建华. 2008. 基于 MRAS 的证据权重法在香格里拉地区的综合信息成矿预测. 吉林大学学报(地球科学版),38(5):738~744.
- 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型. 北京:地质出版社. 215~260.
- 谢学锦,刘大文,向运川,严光生. 2002. 地球化学块体——概念和方法学的发展. 中国地质,29(3):225~233.
- 肖克炎,张晓华,李景朝,杨毅衡,陈建平,丁建华,娄德波,王保良,叶天竺,张立新. 2007. 全国重要矿产总量预测方法. 地质学前沿,14(5):20~26.
- 杨本瑞,郭履和,彭富钰,廖刚琴. 1985. 矿产资源评价决策模型——以攀西钒钛磁铁矿为例. 成都:四川科学技术出版社,29~38.
- 叶水盛. 2007. 综合信息矿产预测系统在内蒙古大兴安岭东南部多金属矿床密集区预测应用研究. 博士学位论文. 导师:王世称. 长春:吉林大学, 1~210.
- 叶水盛,杨凤超,于萍,蔡红军,武斌. 2008. 研究程度较低地区的矿产资源潜力评估方法应用研究. 世界地质,27(2):188~197.
- 赵鹏大,胡旺亮,李紫金. 1994. 矿床统计预测. 北京:地质出版社,96~99.
- 张振飞,高凤亮,马智民,姜常义. 2001. GIS 支持的 Eigenface 法——适于只有一个模型单元时的矿产定量预测方法. 地质与勘探,37(6):51~54.
- 周晓东,伍玲,曹全欣. 2007. 地球化学填图与地球化学块体的谱系分析——编号系统及谱系树图的自动绘制. 地质通报,26(7):892~898.
- 郑有业,陈仁义,庞迎春,施俊法,高顺宝,左仁广. 2009. “协优”成矿预测方法的理论探索与实践. 地球科学,34(3):511~524.
- 周永恒,张璟,徐山,李守义. 2011. 辽东地区硼找矿概率——地球化学块体资源评价. 地球科学,36(4):747~754.
- Celenk O, Clark A L, Vletter D R, Garrett R G, Staaldvinen C. 1978. Workshop on abundance estimation. Mathematical Geology, 10(5):473~480.
- Chen Y L. 2004. MRPM: three visual basic programs for mineral resource potential mapping. Computers & Geosciences, 30(9~10):

969 ~ 983.

Duval J S. 2000. A Microsoft windows version of the MARK3 Monte Carlo resource simulator. US Geological Survey Open File Report 00 – 415. <http://pubs.usgs.gov/of/2000/of00-415>.

Garrett R G. 1978. An abundance model resource appraisal for some Canadian commodities. *Mathematical Geology*,10(5):481 ~ 494.

Lisitsin V. 2010. Methods of Three-part quantitative assessments of undiscovered mineral resources: Examples from Victoria, Australia. *Mathematical Geosciences*,42:571 ~ 582.

McKelvey V E. 1960. Relation of reserves of the elements to their crustal abundance. *American Journal of Science*,258-A:234 ~ 241.

Mookherjee A, Panigrahi M K. 1994. Reserve base in relation to crustal abundance of metals: Another look. *Journal of Geochemical Exploration*,51(1):1 ~ 9.

Nishiyama T, Adachi T. 1995. Resource depletion calculated by the ratio of the reserve plus cumulative consumption to the crustal abundance for gold. *Natural Resources Research*,4(3):253 ~ 261.

Porwal A, Carranza E J M, Hale M. 2006. A hybrid fuzzy Weights-of-Evidence model for mineral potential mapping. *Natural Resources Research*,15(1):1 ~ 14.

Porwal A K, Kreuzer O P. 2010. Introduction to the special issue: Mineral prospectivity analysis and quantitative resource estimation. *Ore Geology Reviews*,38(3):121 ~ 127.

Wang Y, Shen W, Zhao P D. 2008. MRQP: A windows-based mixed-language program for mineral resource quantitative prediction. *Computers & Geosciences*,34(11):1631 ~ 1637.

Regional Geochemical Quantitative Prediction Method and Technology in the Mineral Resource Potential Assessment

GONG Peng¹⁾, LI Juan²⁾, HU Xiaomei³⁾, LIU Xiuguo¹⁾, MA Zhendong²⁾

1) Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, 430074;

2) Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, 430074;

3) Faculty of Earth Resource, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, 430074

Abstract: In order to scientific appraise the potential of important mineral resources in China, firstly, this paper objectively analyses the current situation of mineral resources prediction; moreover, three geochemical quantitative forecasting methods are reviewed and commented, whose names are abundance method, areal productivity method, and geochemical block method. Secondly, through summarizing and absorbing previous achievements, and integrating four disciplines composed by fundamental geology, mechanism of diagenesis and metallogenesis, theoretic geochemistry and exploration geochemistry, we generalized the establishment of geological—geochemical prospecting model, targeting method of geochemical potential prospecting area and mineral resources calculation on GIS platform. Finally, with reference to geochemical quantitative prediction, some conclusions are summarized and further development orientations are explored.

Key words: exploration model; method and technology of quantitative prediction; assessment of mineral resources potential; denudation coefficient; similarity coefficient

(上接第 1168 页) 的新矿体(床)(即所谓的“第二矿带”、“第三矿带”、“上矿带”、“下矿带”。如在胶东金矿矿集区、铜陵矿集区以及加拿大有百年开发史的肖得贝里(Sudbury)镍矿区。坚持矿山就矿找矿仍是当前实施找矿突破战略的一个重要阵地。

我国矿业及矿产品发展成绩显著,已成为世界矿业大国,产量名列前茅。2011 年产煤 35.5 亿吨、铁矿石 13.25 亿吨、十种有色金属 3424 万吨、水泥 20.85 亿吨(需耗石灰石 27.1 亿吨,其他生料 8.3 亿吨)、石膏 5500 万吨、大理石板材 6568 万吨、花岗石板材 28425 m²。但是,矿业废弃物(尾矿、废石、炉渣)和环保问题也日益严重。据矿联专家统计,全国

矿业用地 1.35 万 km²,采矿占用、破坏地面 300 万公顷(hm²),其中地面塌陷 43 万公顷,固体废料 353.3 亿吨,2006 ~ 2008 年引发矿山地质灾害 5000 多次。直接损失 70 亿元。矿山企业及其地质人员应按政策法规,如国务院批准的《全国矿产资规划(2008 ~ 2015 年)》、《循环经济促进法》等,做好减量化、无害化、再利资源化和环境地质及复垦生态化工作。积极落实矿业循环经济、绿色矿山建设各项任务,彻底转变粗放式矿山生产模式不断提高矿产资源保障能力和效率,推进矿业强国建设。

(彭毓,王静纯 供稿 章雨旭 编辑)