

doi:10.3799/dqkx.2011.019

科学选靶的理论途径

赵鹏大¹, 陈永清²

1. 中国地质大学, 湖北武汉 430074; 北京 100083

2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要: 针对隐伏矿床和新类型矿床, 科学选靶是矿产勘查成功的关键。根据地质异常致矿理论, 将地壳结构复杂的地质异常区域定义为找矿有利地段; 在找矿有利地段内, 根据成矿系统理论, 将成矿关键要素(源、运、储、盖)发育的地段定义为找矿潜在地段; 在找矿潜在地段内, 根据成矿系列理论, 将可能出现矿床共生组合的地段定义为找矿远景地段。研究表明: (1) 矿产资源体等级性和不均一分布, 矿集区内, 矿床规模—频率幂律分布和大型矿床通常在找矿初期发现的规律奠定了多尺度聚焦找矿战略的理论基础; (2) 地质矿化单一信息的多解性和不确定性奠定了应用综合致矿信息找矿战略的理论基础; (3) 基于成矿系统模式的概率模拟和基于综合找矿模型的概率模拟是从成矿的本质和现象两个方面评价可能矿化地段的最有效途径。

关键词: 科学选靶; 矿产勘查; 幂律(分维)分布; 综合信息找矿。

中图分类号: P628

文章编号: 1000-2383(2011)02-0181-08

收稿日期: 2010-10-28

Theories and Approaches on Scientific Targeting at Mineral Deposits

ZHAO Peng-da¹, CHEN Yong-qing²1. *China University of Geosciences, Wuhan 430074; Beijing 100083, China*2. *School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

Abstract: Scientific targeting is a successful key for exploration of both the concealed and new type of mineral deposits. Geological anomaly areas with complex structures in the crust can be defined as preferable ore-finding areas based on the theory of ore-forming geonomaly. Areas where critical ore-forming factors such as thermal energy and ore-fluid source, plumbing fluid systems, trap (depositional) site, and fluid seal (cap) are well developed within the preferable ore-finding areas can be defined as potential mineral resource areas based on the theory of ore-forming system. Areas where association of ore deposits may exist can be defined as perspective ore-finding areas based on the theory of ore-forming series. This study demonstrates that both hierarchy and heterogeneity of the spatial and temporal distribution of ore deposits and their power-law size frequency distribution in individual province as well as the largest deposits discovered generally in the early phases of mineral exploration of a terrain lay a theoretical foundation of the telescoping ore deposits at multiple exploration scales. Ambiguity and uncertainty of ore-finding information from single discipline make it necessary to explore ore deposits using integrated ore-finding information from multi-disciplines such as geology, geochemistry, geophysics and remote sensing image. Probabilistic modeling techniques based on both ore-forming system model and integrated ore-finding pattern are the best approaches to assess mineral potentials of ore-finding target areas from two aspects of both ore-forming essence and phenomenon.

Key words: scientific targeting; mineral exploration; power-law (fractal) distribution; integrated strategy to find mineral deposits.

矿产勘查通常包括3个步骤: 找矿战略规划、在矿床概念模式基础上建立找矿模型和应用找矿模型探测找矿靶区。在过去的半个世纪, 地质、地球化学、地球物理和遥感等方法技术的进步都不同程度地促

进了矿床的发现。其中矿床概念模型对诸如斑岩矿床的发现, 地球化学方法对金、铂钯等难识别矿床的发现以及地球物理方法对铁矿和块状硫化物矿床的发现都具有不可替代的作用(Sillitoe, 2006)。历史

上,矿床的发现是波浪式发展的,其波峰往往出现在新技术引进或矿床成因取得新的认识之后. 1950—1975 年间,伴随着矿床模型概念、勘查地球物理和勘查地球化学新方法和新仪器的出现,矿床发现的速率急剧增加. 但进入 20 世纪 80 年代以来,虽然在这一阶段早期,增加了勘查投资,但找矿效率越来越低. 金矿勘查表明 (Schodde, 2004): 在过去的 20 多年里,新发现一个金矿床的平均成本增加近 4 倍,发现矿床的储量规模下降了 30%. 计算机和计算技术的发展大大增强了数据挖掘的能力,但仍没能改变找矿难度逐渐增大的总趋势 (Paterson, 2003). 这很可能表明常规的勘查技术未能穿透更深或更复杂的盖层以发现其下的隐伏矿床 (Hronsky and Groves, 2008). 笔者认为致矿信息提取的不充分性和找矿模型的局限性. 这包括诸如构造、岩性等定性地质异常控矿信息定量提取缺乏成熟的理论和方法,线性数学模型,包括以数据正态分布为基础的多元统计分析和以平稳假设为前提的地质统计学模型,在处理具有多重母体数据分布或数据极差大于 2 个数量级的数据集时变得无能为力 (Lovejoy *et al.*, 2005),而矿化地段的数据恰恰具有极差大和多重母体数据分布的复杂性特征.

很显然,矿产勘查一方面需要改进关键的直接探查技术(例如,3D 合成图像技术、廉价有效钻探技术、活动离子提取地球化学技术等),另一方面需要持续探索致矿异常信息提取集成技术以及找矿靶区综合定量评价技术,同时需要发展科学选靶理论和方法学体系,以探寻具有最大成矿潜力的矿化区域 (Hronsky and Groves, 2008).

1 科学选靶

科学选靶是降低找矿地质风险、确保高效直接探查成功的有效途径. 科学选靶并不是概念模型的简单应用. 概念模型不仅包括矿床成因模型、多元致矿信息的综合找矿模型,还包括矿床勘查的经济评价模型,用以获取勘查的最佳商业结果. 概念模型的质量直接影响矿产勘查的效率和效益. 科学选靶必须以精通应用成矿学和经济学为前提,把成矿学和矿业经济学原理贯穿于选靶的全过程. 上述认识提供了一项经济法则,所有的勘查活动和勘查过程必须转化为矿业和勘查实体的经济利益 (Hronsky and Groves, 2008).

成矿系统是复杂地球巨系统的有机组成部分,

其形成与分布受地球系统演化的制约. 地球历史演化的不同时期发育不同成矿系统,这些成矿系统既是地球系统演化的产物,亦以某种方式记录地球系统的演化进程 (翟裕生等, 2008). 从全球至成矿省尺度来看,绝大多数重要矿床,尤其是世界级矿床通常分布于地壳结构复杂的地质异常区域,其形成与深大断裂构造活动有关. 这些异常区域有些可能是过渡型岩石圈、过渡型地壳以及板块的结合部. 很显然,一个特殊过渡性岩石圈构造可能控制多个矿化期形成的多个矿床的分布. 典型例子是产于美国内华达大盆地的 Au、Ag、Cu 矿化,从始新世到全新世分布有卡林型 Au、斑岩 Cu-Au 和热液 Au-Ag 等最具经济潜力的矿床类型,这些矿床沿活化的过渡岩石圈边界分布 (John, 2001; Arehart *et al.*, 2003; Grauch *et al.*, 2003). 上述成矿规律奠定了应用地质异常概念预测找矿可行地段的理论基础.

有意义的矿床很显然与构造热系统密切相关,这些热系统在规模上远大于矿床形成环境,并对应于主要的地壳生长期. 例如,特定地质时代的特定俯冲环境下与广泛发育的岛弧岩浆作用有关的斑岩型矿床、特定构造环境与特殊类型充填封闭盆地有关的 SEDEX 型矿床,以及与造山作用有关的造山带型金矿床 (Kerrich *et al.*, 2005). 在一些成矿系统中,通常形成矿床共生组合(成矿系列). 例如,位于老挝沙瓦那吉省 Sepon 斑岩成矿系统和川圹省的 Phu Kham 斑岩成矿系统,在斑岩体内部形成斑岩型 Cu-Au 矿床;在斑岩体与灰岩接触带形成矽卡岩型 Fe-Cu-Au 矿床;在灰岩中形成卡林型金矿床.

因此,在科学选靶上,我们能够根据地质异常致矿理论 (Gorelov, 1982; 赵鹏大和池顺都, 1991; Zhao, 1992; 赵鹏大, 1995; Chen *et al.*, 1997, 2000, 2001; 赵鹏大和陈永清, 1998; 赵鹏大等, 2000; 陈永清和刘红光, 2001), 将地壳结构复杂的地质异常区域定义为找矿有利地段;在找矿有利地段内,根据成矿系统理论 (翟裕生等, 1999, 2000, 2008, 2009; 翟裕生, 2007), 将成矿关键要素(源、运、储、盖)发育的地段定义为找矿潜在地段;在找矿潜在地段内,根据成矿系列理论 (程裕淇等, 1979, 1983; 陈毓川等, 2006), 将可能出现矿床共生组合的地段定义为找矿远景地段.

2 勘查尺度与勘查目标

区域成矿研究表明,成矿元素通常富集在不

同尺度的地质成矿单元中,譬如矿体、矿床、矿田、矿带以及成矿省等.在同一等级的矿产资源体中,矿化在概念上是连续的;矿化的不连续性仅存在于不同等级的矿产资源体之间.这种概念上的矿化只具有理论意义而不具商业意义.譬如,一个矿床可能包含几个矿体,就矿体尺度而言,矿床本身是不连续的;但在矿田尺度上,单个矿床本身是连续的矿产资源体,矿床与矿床之间则是离散的.这一事实告诉我们,在矿产勘查中,寻找不同等级的勘查目标,需要设计不同的勘查尺度.在一个已知矿床内开采的新矿体通常被视为矿床的资源潜力;而在矿田内发现一个矿床则被视为矿田的资源潜力;同样,在矿带内发现一个新矿田被视为矿带的资源潜力.科学选靶的一个基本前提是矿产资源体是更广泛地质成矿系统的一部分,且具有上述等级性特征.因此,理论上,选靶必须实施全球尺度至省际尺度到区域矿田尺度的多尺度聚焦勘查(谢学锦,1997; Xie *et al.*, 2004).矿产勘查是一个多阶段的活动,从小比例尺矿产普查到大比例尺的矿床勘探,直至寻找隐伏矿床勘探靶区的确定.在小比例尺普查阶段,通常是基于广义的地质上的考虑,决策者必须圈定广义的可能产出某一矿床类型的资源潜力区——找矿可行地段.在中比例尺勘查阶段,伴随着更详细的跟踪勘查,从上述广义的资源潜力区中优选出更具资源潜力的地段——找矿有利地段;圈定的依据是地质填图、区域地球化学、地球物理勘查和已知矿床(点)的位置.在大比例尺勘查阶段,通过对找矿远景地段更详细的勘查,圈出可供直接探查的矿化信息浓集地段,并对这些地段依据成矿有利度进行排序,确立最具矿化潜力的信息浓集地段,即确立最具矿化潜力的找矿远景地段;上述过程应充分利用各种来源的空间综合致矿信息数据(赵鹏大和陈永清,1998).

矿床通常视为更广泛复杂的成矿系统中混沌作用的产物(Turcotte,1993; 於崇文,2003),识别这种系统需要更大的勘查视野.在全球尺度上,特定时间段地球动力学和岩石圈结构构造环境是矿产资源潜力评价所需的宏观致矿因素.例如,产于太古代绿岩带造山带型金矿床选择性地集中分布于2.7 Ga,具有短暂的历史和薄的岩石圈.然而在成矿省尺度上,需要更专门的构造参数和表明一级构造和岩石地层的数据库.例如,含有世界级造山带金矿床的成矿省具有折线形地壳尺度的剪切带,占主导地位的绿片岩相域和复杂的岩石地层序列.覆盖于火山岩层序之上的沉积岩是成矿的更有利地段(Hronsky and

Groves,2008).从矿田到矿床尺度上,随着勘查精度的增加,这种大比例尺成矿预测,就需要专门具有定位功能的地质、地球化学和地球物理数据.因此,随着勘查尺度的减小(比例尺增大),概念选靶(预测)作用在逐渐减小,最后取而代之的是矿床尺度的地质、地球化学和地球物理手段的综合直接探查.随着勘查尺度的减小,伴随靶区面积的减小,找矿不确定性因素降低,而勘查成本和找矿信息量增加(赵鹏大和陈永清,1998).

3 科学选靶的影响因素

靶区选择最初涉及到许多与商业有关的制约因素,包括:(1)根据成矿地质环境确立巨型、超大型和大型矿床产出的可能地段;(2)根据商业利益确立适于作为勘探靶区的矿床类型.以下重点讨论影响靶区选择的地质因素.

矿床的许多成因特征对靶区选择战略具有重要的影响.(1)矿床的时空分布是极其不均匀的,这样导致仅有一些成矿省具有相对丰富的矿产资源,其中绝大多数成矿省仅含有一些零星的矿床.(2)像油气资源一样(Barton and Scholz,1995),成矿省内矿床规模一频率分布具有幂律关系,即服从分形分布(Mandelbrot,1995; 连长云和苏小四,2000; 成秋明,2006; Hronsky and Groves,2008).(3)巨型矿床与其他矿床在空间分布上具有“鹤立鸡群”的空间分布模式.以金矿床为例,这里的“鹤”是指矿集中为数不多的超大型、大型金矿床;“鸡群”是指与超大型、大型金矿床在空间分布和成因等方面有密切关系的中小型金矿床群.超大型、大型金矿床常常出现在中小型金矿床的密集区,超大型、大型、中型和小型金矿床是密集成群出现的,矿床的储量规模也是有序变化的.在金矿床集中区或金属省中,超大型、大型金矿床与中小型金矿床常常具有相同的成矿地质背景和控矿条件,成矿物质来源亦很相似,只是由于某些与矿床规模相关的影响因素,导致个别金矿床的规模明显变大,形成了矿床总体中的极少数“地质异常分子”.因此,超大型、大型金矿床属于“地质异常之中的异常”,即金矿床集中区是处于特定地质背景中的一种特殊地质异常,而存在超大型、大型金矿床的矿集区从某种意义上讲又构成了众多金矿床集中区之中的“地质异常区”(王世称等,2000).(4)地质晕,或矿床印迹的面积大小代表成矿系统的规模,且通常与产于其中的矿床的规模成正比(谢学锦

等,2002)。若在其他因素同等的条件下,在任何成矿省或成矿区大矿通常在矿产勘查的初期首先被发现(Hronsky and Groves,2008)。

上述研究可得出两点结论:(1)巨型、超大型和大型矿床发现最佳机遇是勘查具有超常金属含量的规模巨大的地球化学块体(谢学锦等,2002);(2)最大矿床通常发现于矿产勘查的早期阶段。

4 科学选靶的基本途径及方法

科学选靶的基本途径是“快速聚焦找矿”(谢学锦等,2002),基本方法是综合信息找矿(王世称等,2000)。

“快速聚焦找矿”将寻求探索最大矿床应产在地壳结构最复杂的地质异常区域(Gorelov,1982),以及最大矿床应在勘查初期发现的找矿战略理念。为确保勘查成功,必须要求:(1)勘查者必须具有识别新的具有高资源禀赋潜力的致矿地质异常环境能力,比如能够识别传统的地球化学和地球物理技术未能穿透的深覆盖层下具有巨大成矿远景(奥林匹克坝Cu-Au矿床),而且能够在地表通过地质、地球化学和地球物理手段快速获取这些信息;(2)对低勘查程度地区,能够根据成矿学概念识别矿产资源远景地段的能力;(3)具有运用新矿床(勘查)模型和新的勘查技术,在传统的勘查区域发现新矿床类型资源潜力的能力。

综合信息找矿是基于综合信息能够对单一找矿信息的多解性提供相互约束,以减少找矿的不确定性这一理念。区域地球物理场特征能够反映地壳深部地质体及地质构造特征,可以探明超大型、大型矿床及矿集区形成的深部构造控制因素。因此,研究区域地球物理特征可以为超大型、大型金矿床的预测提供有利的地球物理信息。通过遥感信息研究古火山机构、火山口的位置及火山口周围的裂隙系统的分布特征,对寻找和预测与火山作用有关的超大型、大型矿床及矿集区具有重要的参考价值。因此,遥感信息特征是定位与火山作用有关的矿集区的重要标志。地球化学异常是成矿元素区域性富集的直接标志。中国一些超大型、大型矿床(除Cu外)周围均有大规模地球化学异常存在(谢学锦等,2002)。地球化学省、地球化学域和地球化学区的存在是矿源物质补给强度的一种显示。研究地球化学省、地球化学域和地球化学区与区域地质体、地质构造及矿集区的空间分布关系,有利于查明地球化学异常的成因机

制,可以为超大型、大型矿床的预测提供地球化学标志。重砂是找矿的直接标志之一,金矿床研究表明:区域重砂异常的主要物质来源是富含成矿物质的地质体,只有少部分成矿物质来自原生金矿床,因此,金重砂异常可以作为原生金矿资源潜力评价的一种标志来圈定原生金矿成矿有利的远景区。中国黑龙江省萝北一漠河地区和新疆阿勒泰地区金的重砂异常研究结果皆表明,金的砂矿和重砂异常的空间分布受前寒武纪地质建造的控制,砂金矿及金重砂异常通常分布于前寒武纪建造区的边部及周围。通过砂金空间分布规律推测古老基底的隐伏情况,为预测超大型、大型金矿的存在提供有利标志(王世称和陈永良,1999)。

5 靶区圈定

选靶的关键是根据矿床成因模型和找矿模型提取不同的选靶参数,将这些不同尺度的选靶参数应用于相应尺度的选靶模型是至关重要的。如果选靶模型使用来自成矿过程模型(成因模型)的数据,必须定义代表成矿过程的关键要素,模型区和预测区数据集尽可能具有一致的数据质量是非常重要的,以确保模型区高质量的数据不至于过分地影响选靶模型,尤其是对成矿省尺度到矿田尺度的成矿预测。选靶模型应该聚焦反映矿化出现必须的参数,尽可能地将它们与一般的参数(可识别,但不是必须的)区别开。很显然,经验矿点数据对确认或否认是否存在勘查过程中所要寻找矿床类型的参数是至关重要的。

一旦建立选靶模型,就将其应用于成矿省或矿田识别特定的靶区。为完成这一目标,必须将关键选靶主题或参数作为信息图层编制成图,这些信息图层必须代表选靶模型的关键要素,并能够描述其空间变化特征。对大多数被寻找的矿床类型,这些信息图层包括一层或多层来自地球动力学、构造(结构)学、岩性地层学、变质和火成岩石学数据库的信息,并结合所要寻找矿床类型已知矿床产出特征。

靶区鉴定过程存在两种基本端元途径:等级套合和综合致矿信息图系(图1)。在实践中,许多选靶过程采用上述两种端元途径相结合。等级套合方法通常被用于从全球尺度到成矿省尺度的选靶,而综合致矿信息图通常被用于矿田尺度选靶。

等级套合是基于这样一种概念,大多数选靶模型包括一系列出现在不同勘查尺度成矿单元中的一

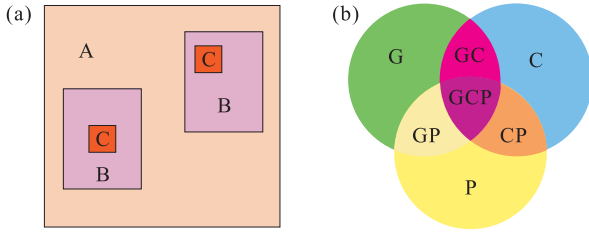


图1 圈定靶区的两种基本途径

Fig. 1 The two basic approaches showing delineation of ore-finding targets

a. 等级套合聚焦找矿; b. 综合信息找矿; 详细说明见正文

些关键参数. 在图 1a 图中, A 区代表根据地质异常致矿原理确定的找矿有利地段; B 区代表根据成矿系统原理在找矿有利地段内确定的找矿潜在地段; C 区代表根据成矿系列原理在找矿潜在地段内确定的找矿远景地段. 等级套合途径更适用于“快速聚焦找矿战略”, 选靶者必须从贫乏的数据集中提取成矿要素, 编制其主题图件, 以确立最初找矿可行地段.

综合致矿信息方法通常被广泛地应用于勘查程度较高且具有高质量相对一致的数据集地区, 因此, “综合找矿”战略必须将靶区鉴定视为靶区定位的过程, 圈定靶区必须浓缩选拔模型中一系列关键参数(信息). 在图 1b 中, G 区代表地质信息显示的成矿远景区, C 区代表地球化学信息显示的成矿远景区, P 区代表地球物理信息显示的成矿远景区; GC 代表地质地球化学信息显示的成矿远景区, GP 代表地质地球物理信息显示的成矿远景区, CP 代表地球化学地球物理信息显示的成矿远景区; GCP 区代表地质地球化学地球物理信息显示的成矿远景区; 显然 GCP 区是最有成矿远景的找矿靶区. 这些哲学上的方法奠定了 GIS 方法学编制资源潜力图的基础.

笔者曾将上述两种找矿战略分别应用于鲁西金矿勘查和滇东寻找 Pt 矿床, 取得了预期的勘查效果(赵鹏大等, 2000; Chen *et al.*, 2009).

6 靶区评价

矿产勘查归根结底是一项经济活动, 矿产勘查的经济法则决定人们不可能对地球的任意块段投入均等的勘查工程, 从而导致在矿产勘查理论指导下从普查、预查、详查到勘探这种循序渐进的勘查活动. 矿产勘查成功的概率主要取决于勘探前圈定找矿靶区的质量和数量, 高质量的找矿靶区数量越多, 找矿成功的机遇亦越大. 那么, 如何评价所圈定靶区

的质量呢? 靶区排序实质上是靶区鉴定过程的延伸, 这里将其单独列出讨论是为了强调其潜在的重要性. 传统上, 靶区排序涉及到靶区预测参数的得分, 得分通常被转换成权系数以显示每个选靶参数的重要程度, 或得分赋值的可信程度. 将每个预测参数分别乘以各自的权系数后相加就得到成矿有利度, 根据每个靶区成矿有利度的大小, 就能够对靶区进行排序(Chen *et al.*, 2001).

近年来一些学者(Penney *et al.*, 2004; Barnett, 2006; Kreuzer *et al.*, 2008; Potma *et al.*, 2008)基于找矿靶区定量评价, 探索降低找矿风险、提高找矿效率的方法技术. 其中最具有代表性的是基于找矿模型的靶区综合致矿异常信息概率模拟(Barnett, 2006)和基于成矿模式的靶区成矿要素(矿源—导矿构造—储矿构造—矿物堆积的物理化学过程)概率模拟技术(Kreuzer *et al.*, 2008).

基于找矿模型的靶区综合致矿异常信息概率模拟是在致矿信息提取与集成的基础上, 基于综合致矿信息定量给出某一成矿远景区域的矿床可能产出的有利程度. 其通常的数学表达式为: $P(D/x)$, 其中, D 代表矿床可能产出的空间位置, x 为一组向量数据, 代表矿床可能产出的空间位置的地质、地球物理和地球化学综合致矿异常信息特征, 那么, $P(D/x)$ 就代表在 x 一组向量数据表达的综合致矿异常信息特征出现的条件下, 空间位置 D 可能产出矿床的概率. 假定根据成矿有利度函数 F 值圈定找矿靶区, 其临界值为 F_a , 大于 F_a 值的靶区有 N 个, 那么其中任意一个靶区含有一个有经济价值的矿床的概率是多少? 其结果可能取决于 F_a 的大小, 更重要的是 F_a 是否代表未发现矿床的数字特征和概率分布特征. 理想地, F_a 应能够清晰地区分矿化地段和非矿化地段, 但事实上, 由于地质成矿作用的复杂性和多样性, 矿化与非矿化之间往往存在一个叠加区域. 假定基于综合致矿异常信息已完成了对研究区找矿靶区的圈定, 并根据成矿有利度(F)完成了对靶区成矿有利程度的初步排序, 那么, 求取每个找矿靶区含有工业矿床的概率正是该方法所要探索的内容.

基于成矿模式的靶区成矿要素概率模拟涉及到与成矿过程有关的下列步骤: (1) 具有内在联系的地质过程模型的构建; (2) 基于综合致矿信息特征, 确定成矿独立关键要素存在概率: P_1 (矿源存在概率)、 P_2 (成矿流体通道存在概率)、 P_3 (矿质沉淀堆积场所存在概率)、 P_4 (圈闭场所有利于矿质沉淀的

物理化学条件存在概率);(3)根据累乘计算成矿的总概率(P_m),潜在的经济矿化发生在综合致矿信息高度浓集的场所; $P_m = P_1 \times P_2 \times P_3 \times P_4$. 一个特殊的矿化系统只存在于其必要成矿要素与关键成矿过程时空耦合的区域. 这种时空耦合事件的识别和关键成矿过程的确立是勘查选靶的关键,在选择靶区内应当显示这种耦合关系. 因此,应从数据库中聚焦提取发生于找矿靶区的成矿关键过程以及分过程. 概率矿化系统模型有助于追踪和度量找矿模型要素适应于靶区的程度.

基于成矿模式的靶区成矿要素概率模拟是基于对找矿靶区成矿过程的四大要素(矿源—导矿构造—储矿构造—矿物堆积的物理化学过程)的概率模拟实现的,而每个成矿要素的模拟概率则取更具体的控矿因素. 这种基于概率的靶区排序方法是基于提炼选靶模型,其模型依赖于能够代表靶区矿床类型关键成矿过程的参数. 例如,后生热液矿床在成矿系统中关键成矿要素能被定义为(矿)源、运(流体隧道)、储和盖等. 在这种基于成矿要素概率的靶区排序方法中,要求上述四大要素是相互独立的,且发生耦合作用.

7 结论

矿产勘查是一项多阶段的探测活动. 针对隐伏矿床和新类型矿床,科学选靶是矿产勘查成功的关键. 这种探索综合来自地学各相关领域致矿信息,然后将从这些信息中获取的关键成矿过程和参数转换为空间数据信息,根据选靶模型确认这些空间数据信息存在,最后在全球、成矿省和矿化集中区尺度上圈定能够定量排序的找矿靶区. 科学选靶应为未来的矿产勘查奠定理论和方法学基础,为应用直接探测技术和方法探测矿床提供合理的工程勘查靶区.

References

Arehart, G. B., Chakurian, A. M., Tretbar, D. R., et al., 2003. Evaluation of radioisotope dating of Carlin-type deposits in the Great basin, western North America, and implications for deposit genesis. *Economic Geology*, 98 (2): 235—248. doi: 10. 2113/gsecongeo. 98. 2. 235

Barnett, C. T., 2006. Mineral exploration using modern data mining techniques. In: Doggett, M. D., et al., eds., Wealth creation in the minerals industry: integrating

science, business, and education. SEG, INC., 12: 295—310.

Barton, C. C., Scholz, C. H., 1995. The fractal size and spatial distribution of hydrocarbon accumulations; implication for resource assessment and exploration strategy. In: Barton, C. C., Scholz, C. H., eds., Fractal in petroleum geology and earth science. Plenum Press, New York, 13—34.

Chen, Y. C., Pei, R. F., Wang, D. H., 2006. On minerogenetic (metallo-genetic) series: third discussion. *Acta Geologica Sinica*, 80 (10): 1501—1508 (in Chinese with English abstract).

Chen, Y. Q., Huang, J. N., Zhai, X. M., et al., 2009. Telescoping ore targets by geochemical exploration at multiple scales in eastern Yunnan Pt geochemical province. *Sciences in China (Series D)*, 52 (5): 627—637. doi: 10. 1007/s11430-009-0051-x

Chen, Y. Q., Liu, H. G., 2001. A preliminary view on digital pattern for mineral exploration based geoanomaly. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 26 (2): 129—134 (in Chinese with English abstract).

Chen, Y. Q., Xia, Q. L., Liu, H. G., 2000. Delineation of potential mineral resources region based on geo-anomaly unit. *Journal of China University of Geosciences*, 11 (2): 158—163.

Chen, Y. Q., Zhao, P. D., Chen, J. G., 1997. The delineated method of geological anomaly units and its application in the statistical predication of gold deposits of large scale. Proc. 30th Int'l. Geo. Congr., 25: 23—32.

Chen, Y. Q., Zhao, P. D., Chen, J. G., et al., 2001. Application of the geo-anomaly unit concept in quantitative delineation and assessment of gold ore targets in western Shangdong uplift terrain, eastern China. *Natural Resources Research*, 10 (1): 35—49.

Cheng, Q. M., 2006. Singularity-generalized self-similarity-fractal spectrum (3S) models. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31 (3): 337—348 (in Chinese with English abstract).

Cheng, Y. Q., Chen, Y. C., Zhao, Y. M., 1979. Preliminary discussion on the problems of minerogenetic of mineral deposits. *Bulletin of Chinese Academy of Geological Sciences*, 1 (1): 32—58 (in Chinese with English abstract).

Cheng, Y. Q., Chen, Y. C., Zhao, Y. M., et al., 1983. Further discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits. *Bulletin of Chinese Academy of Geological Sciences*, 5 (6): 1—64 (in Chinese with English

abstract).

- Gorelov, D. A., 1982. Quantitative characteristics of geological anomalies in assessing ore capacity. *Internal Geology Rew.*, 4: 457—465.
- Grauch, V. J. S., Rodriguez, B. D., Wooden, J. L., 2003. Geophysical and isotopic constraints on crustal structure related to mineral trends in North-Central Nevada and implications for tectonic history. *Economic Geology*, 98(2): 269—286. doi: 10.2113/gsecongeo.98.2.269
- Hronsky, J. M. A., Groves, D. I., 2008. Science of targeting: definition, strategies, targeting and performance measurement. *Australian Journal of Earth Sciences*, 55: 101—122.
- John, D. A., 2001. Moicene and Early Pliocene epithermal gold-silver deposits in the northern Great basin, western United States: characteristics, distribution, and relationship to magmatism. *Economic Geology*, 96(8): 1827—1853.
- Kerrich, R., Goldfarb, R. J., Richards, J. P., 2005. Metallogenic provinces in an evolving geodynamic framework. In: Hedenquist, J. W., et al., eds., *Economic geology—one hundredth anniversary (1905—2005)*. Society of Economic Geologists, Inc., Littleton, Colorado, 1097—1136.
- Kreuzer, O. P., Etheridge, M. A., Guj, P., et al., 2008. Linking mineral deposit models to quantitative risk analysis and decision-making in exploration. *Economic Geology*, 103(4): 829—850. doi: 10.2113/gsecongeo.103.4.829
- Lian, C. Y., Su, X. S., 2000. Fractal estimation for resource extent of gold in Jiaodong exploration field. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 30(1): 24—27 (in Chinese with English abstract).
- Lovejoy, S., Schertzer, D., Gagnon, J. S., 2005. Multifractal simulation of the Earth's surface and interior: anisotropic singularities and morphology. *Proceeding of IAMG'2005; GIS and Spatial Analysis*, 1: 37—54.
- Mandelbrot, B. B., 1995. The statistics of natural resources and the law of pareto. In: Barton, C. C., Scholz, C. H., eds., *Fractal in petroleum geology and earth processes*. Plenum Press, New York, 13—34.
- Paterson, N. R., 2003. Geophysical developments and mine discoveries in the 20th century. *The Leading Edge*, 22(6): 558—561. doi: 10.1190/1.1587678
- Penney, S. R., Allen, R. M., Harrison, S., et al., 2004. A global-scale exploration risk analysis technique to determine the best mineral belts for exploration. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, 133(3): 183—196. doi: 10.1179/037174504225005681
- Potma, W., Roberts, P. A., Schaubs, P. M., et al., 2008. Predictive targeting in Australian orogenic-gold systems at the deposit to district scale using numerical modeling. *Australian Journal of Earth Sciences*, 55(1): 101—122. doi: 10.1080/08120090701673328
- Schodde, R. C., 2004. Discovery performance of the western world gold industry over the period 1985—2003. *Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Pacrim 2004 Congress, Adelaide, Proceedings, 2004*: 367—380.
- Sillitoe, R. H., 2006. Change in mineral exploration practice: consequences for discovery. In: Doggett, M. D., et al., eds., *Wealth creation in the minerals industry: integrating science, business, and education*. Seg., Inc., 295—310.
- Turcotte, D. L., 1993. *Fractals and chaos in geology and geophysics* (second edition). Cambridge University Press.
- Wang, S. C., Chen, Y. L., 1999. Predictive indexes of large and superlarge gold deposits on comprehensive information. *Gold Geology*, 5(1): 1—5 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. C., Chen, Y. L., Xia, L. X., 2000. Theory and method of integrated prognosis of mineral resources. Science Press, Beijing, 343 (in Chinese).
- Xie, X. J., 1997. New strategy for exploration of ore resources. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 21(6): 402—410 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. J., Liu, D. W., Xiang, Y. C., 2004. Geochemical blocks for predicting large ore deposits—concept and methodology. *Journal of Geochemical Exploration*, 84: 77—91.
- Xie, X. J., Liu, D. W., Xiang, Y. C., et al., 2002. Geochemical blocks—development of concept and methodology. *Geology in China*, 29(3): 225—233 (in Chinese with English abstract).
- Yu, C. W., 2003. *The complexity of geosystems (Book 1 & 2)*. Geological Publishing House, Beijing, 1135 (in Chinese).
- Zhai, Y. S., 2007. Earth system, metallogenic system to exploration system. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 172—181 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Y. S., Deng, J., Cui, B., et al., 1999. Ore-forming system and comprehensive geo-anomaly. *Geoscience*, 13(1): 99—104 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Y. S., Peng, R. M., Den, J., et al., 2000. Metallogenic system analysis and new type ore deposits forecast. *Earth Science Frontiers*, 7(1): 123—132 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Y. S., Wang, J. P., Deng, J., et al., 2008. Temporal-

spatial evolution of metallogenic systems and its significance to mineral exploration. *Geoscience*, 22(2): 143—150 (in Chinese with English abstract).

Zhai, Y. S., Wang, J. P., Peng, R. M., et al., 2009. Research on superimposed metallogenic systems and polygenetic mineral deposits. *Earth Science Frontiers*, 16(6): 282—290 (in Chinese with English abstract).

Zhao, P. D., 1992. Theories, principle, and methods for statistical prediction of mineral deposits. *Mathematical Geology*, 24(6): 589—595. doi: 10.1007/BF00894226

Zhao, P. D., 1995. Mathematical geology: retrospect and prospect for the future. In: Wang, H. Z., ed., Retrospect of the development of geoscience disciplines in China, China University of Geosciences Press, Wuhan, 174—178 (in Chinese).

Zhao, P. D., Chen, Y. Q., 1998. The main way of geophysical anomaly location of ore body. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 23(2): 111—114 (in Chinese with English abstract).

Zhao, P. D., Chen, Y. Q., Jin, Y. Y., 2000. Quantitative delineation and assessment of “5P” ore-finding area on the basis of geophysical principles. *Geological Review*, 46 (Suppl.): 6—16 (in Chinese with English abstract).

Zhao, P. D., Chi, S. D., 1991. A preliminary view on geological anomaly. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 16(3): 241—248 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈永清, 刘红光, 2001. 初论地质异常数字找矿模型. *地球科学——中国地质大学学报*, 26(2): 129—134.

陈毓川, 裴荣富, 王登红, 2006. 三论矿床的成矿系列问题. *地质学报*, 80(10): 1501—1508.

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——中国地质大学学报*, 31(3): 337—348.

程裕淇, 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.

程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣, 等, 1983. 再论矿床的成矿系列问题. *中国地质科学院院报*, 5(6): 1—64.

连长云, 苏小四, 2000. 胶东地区未发现金矿床资源总量的分形估计. *长春科技大学学报*, 30(1): 24—27.

王世称, 陈永良, 1999. 大型、超大型金矿床综合信息成矿预测标志. *黄金地质*, 5(1): 1—5.

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, 343.

谢学锦, 1997. 矿产勘查的新战略. *物探与化探*, 21(6): 402—410.

谢学锦, 刘大文, 向运川, 等, 2002. 地球化学块体——概念和方法学的发展. *中国地质*, 29(3): 225—233.

於崇文, 2003. 地质系统的复杂性(上、下册). 北京: 地质出版社, 1135.

翟裕生, 2007. 地球系统、成矿系统到勘查系统. *地学前缘*, 14(1): 172—181.

翟裕生, 邓军, 崔彬, 等, 1999. 成矿系统及综合地质异常. *现代地质*, 13(1): 99—104.

翟裕生, 彭润民, 邓军, 等, 2000. 成矿系统分析与新类型矿床预测. *地学前缘*, 7(1): 123—132.

翟裕生, 王建平, 邓军, 等, 2008. 成矿系统时空演化及其找矿意义. *现代地质*, 22(2): 143—150.

翟裕生, 王建平, 彭润民, 等, 2009. 叠加成矿系统与多成因矿床研究. *地学前缘*, 16(6): 282—290.

赵鹏大, 1995. 数学地质: 回顾与展望. 见: 王鸿祯主编, 中国地质学科发展的回顾——孙云铸教授百年诞辰纪念文集. 武汉: 中国地质大学出版社, 174—178.

赵鹏大, 陈永清, 1998. 地质异常矿体定位的基本途径. *地球科学——中国地质大学学报*, 23(2): 111—114.

赵鹏大, 陈永清, 金友渔, 2000. 基于地质异常的“5P”找矿地段的定量圈定与评价. *地质论评*, 46(增刊): 6—16.

赵鹏大, 池顺都, 1991. 初论地质异常. *地球科学——中国地质大学学报*, 16(3): 241—248.