

非线性矿床模型与非常规矿产资源评价

成秋明^{1,2}

(1. 中国地质大学地球系统和矿产资源工程实验室, 湖北武汉 430074; 2. York 大学地球大气系, 加拿大多伦多 M3J1P3)

摘要: 探讨了建立非线性矿床模型对难识别的非常规矿产资源评价的可能性。首先评述了非线性理论在成矿动力学和矿产勘查中的应用, 以及非常规矿床与非常规矿产资源评价的研究现状。然后引进了以岩浆结晶分异成矿作用为例的多维分形非线性成矿系统模型。在此基础上揭示了非线性成矿系统必然导致元素富集和聚集的奇异分布及矿床分布的广义自相似性规律。广义自相似性刻画了成矿的外在多样性和内在相似性。介绍了2种最新研究的“奇异分析”和“广义自相似性”异常分解方法。采用文中所建议的非线性矿床模型方法对加拿大北部 Gowganda 地区的热液型 Co, Ni, Ag, As, Pb 5 种元素矿产进行了预测和评价。结果表明, 以“广义自相似性”和“奇异分析”为基础的非线性矿床模型及 GIS 信息综合技术对非常规难识别矿产资源评价是有效的。

关键词: 非线性矿床模型; 广义自相似性理论; 奇异分析方法; 成矿系数; GIS 信息综合。

中图分类号: P628

文献标识码: A

文章编号: 1000—2383(2003)04—0445—10

作者简介: 成秋明(1960—), 男, 教授, 1994年毕业于加拿大渥太华大学, 获博士学位, 现为中国地质大学教育部长江学者特聘教授, 加拿大 York 大学教授, 主要从事矿产与勘探、数学地质、地理信息系统、矿产资源与环境评价的教学和研究。E-mail: qiuming@yorku.ca

非常规(非传统)矿产资源是指受目前经济、科学技术及环境等因素的限制尚未发现和尚未开发利用的矿产资源, 以及尚未被看作矿产和未发现其用途的潜在矿产资源^[1]。矿产资源的可利用程度除了受矿产本身的特征, 如赋存状态、粒度大小、组分等影响以外, 还与产出环境、开采利用的技术水平、生态环境的影响、成本与价格及国家战略与安全等多种因素有关。应该指出的是, 非常规矿产资源(unconventional mineral resource)与非常规矿床(unconventional mineral deposits or unconventional ore)的概念是既紧密联系又有区别的。非常规矿产资源是指目前不能被利用的资源, 而非传统矿床是指目前还没有完全被认识和提供主要矿产储量的矿床类型, 比如黑色沉积岩系中的铂族元素矿床是具有资源潜力的矿床类型, 但人们对它的研究和认知还相对有限, 在我国该类矿床还没有发现和提供主要的矿产储量。非传统矿产资源既可来源于尚未

发现或尚未完全认知的非传统矿床类型, 也包括传统的已知矿床类型中那些暂时不能被当前开采利用的潜在矿产资源。

对非常规矿产资源而言, 其研究对象是非常广泛的, 包括: 新类型、新领域、新深度、新工艺和新用途等方面的研究^[1,2]。新类型: 如黑色岩页中的铂族矿床; 新领域: 如海洋铁锰结核(壳); 新深度: 如许多危及矿山的深部矿体; 新用途: 如纳米非金属矿物; 新工艺: 如微细粒复杂共生的金属氧化物矿石等。而且, 涉及的矿种也是多样的, 如金、铀、铂族等等; 造成目前不可利用的原因也各异, 如: 由于有用组分含量的低贫、颗粒的微细、组分的复杂等造成难识别、难寻找、难选冶和难利用; 由于矿床产出环境的特殊(如海洋、极地和大深度矿产)造成难寻找和难开发利用; 还有的是由于人们对其用途的认知有限而未将其看作矿产资源等。

非常规矿产资源的认知、发现和利用难度大的原因是多方面的: 矿物颗粒微细、含量低贫、组分复杂以及人们的重视程度和研究力度不足等。对非常规矿产资源类型的认知、发现、评价, 必须采用非常规的研究思路和方法技术路线。微观和宏观理论的

收稿日期: 2003—04—21

基金项目: 科技部“863”项目“非线性信息提取基础研究”专题; 加拿大自然科学基金“研究和开发矿产资源和环境评价 GIS 空间分析和多重分形方法和系统”项目(No. NSERC—OGP0183993)。

创新和预测理论方法的进步是认知、发现、评价非常规矿产资源的成败所在。本文将探讨采用非线性理论、方法、技术进行非常规矿产资源评价的可能性和必要性。重点将研究以“广义自相似”和“奇异分析”为核心的非线性理论和方法。目的是为寻求适合于具有“低品位弱异常、隐伏难发现、无类比模型”等特点的“难识别、难发现、难评价”矿产资源综合评价的非线性模型。

1 非常规矿产资源评价研究现状

1.1 非常规矿产及矿产资源的定义和研究内容

非常规(非传统)矿产资源的研究越来越受到国内外科学家和政府部门的重视。早在 20 世纪 60 年代,石油和天然气领域就已开展了非常规能源和非常规勘查方法的研究^[3]。

1982 年国际经济地质学家协会(SEG)在美国 Dallas 召开了“非常规矿床”(unconventional mineral deposit)学术讨论会,研究对象是现今人类尚不能利用但在未来可能是矿产重要来源的矿床^[4]。大会探讨了“非常规矿床”和“非常规矿产资源”的基本特征和主要类型及其对全球经济的影响。涉及到的非常规矿产资源类型包括:低品位镍硫化物矿床、低品位锰矿床、低品位金矿床、磷酸岩中产出铀矿、密西西比型矿床中的微量元素、煤岩中的微量元素、海洋黑色页岩中金属含量、非铝矾石型铝矿、海洋锰结核(壳)沉积物、红海含金属盐水沉积物、浅海高品位沉积矿床、浅成贵金属斑岩型矿床中非常规金属资源等。在这次会议上,Barton^[5]指出,非常规矿床的概念似乎许多人都知道其意思,但很少有人给出过确切的定义。Tooker^[6]将“非常规未来矿产”(unconventional future ore)定义为“在当前技术和经济条件下不能但预期最终会被回收利用的天然的或人工堆积的金属和非金属物质”。Barton 指出 Tooker 的定义中忽视了尚未发现的新类型矿床。他强调“非常规矿床是指那些与当前开采的矿床在矿物、品位或者地质背景具有显著区别的矿床”。他指出“非常规矿床”的发现迄今为止都带有偶然性,但“地球化学循环”的概念将为未来勘查提供目的性基础。Van Rensburg^[7]将“非常规矿产资源”(unconventional mineral resource)定义为“还没有就某种特殊矿物而开采利用的、分布在一定地质和物理环境中的、可能具有经济意义的物质”。他讨论了促进或阻碍非常

规资源向常规资源转化的技术、经济、政治及社会等各种因素,而且认为只有在这些因素达到平衡时才能使新矿产资源成为可利用资源。该会议主席 Cameron 认为,海洋矿产资源是展现在我们面前的新世界,迄今为止我们所发现的深海矿产资源都属于非常规资源类。

1987 年美国地调局在 Oregon 州召开了“非常规矿床找矿”研讨会,会上专家们探讨了“层控矿床与块状硫化物矿床”、“火山和沉积岩中的浸染型贵金属矿床”、“与核杂岩、拆离断层及相关现象相关联的矿床”等。

目前对非常规矿床的研究无论其涉及的矿床类型还是研究规模都不断发展,如国际经济地质学家协会通讯 2003 年最新一期以头版刊登了题为“铂族(Pt 和 Pd)非常规矿床和勘查影响”的成果^[8]。文中研究了包括我国华南地区在内的全球主要非常规铂族矿床的分布和矿床特征。涉及到的矿床类型包括不整合型 U—Au—Pt—Pd 矿床、层控型铜矿床、层控型镍—钼—锌矿床、沉积岩中有机质 Au—Pt 矿床、超基性近地表改造型矿床等。

近年来,我国科学家对非常规矿产资源研究进行了创新探索,在非常规矿产资源的勘查理论与方法,对新类型固体矿产资源的发现和评价,开拓非常规矿产资源类型,增加非常规矿产资源的新用途,以及开辟非常规资源的开发利用新工艺等方面均做出了重要探索,受到国外同行的高度评价。赵鹏大院士给出了更全面的非常规矿产资源的定义“非传统矿产资源是指受目前经济、技术及环境等因素的限制尚未发现和尚未开发利用的矿产资源,以及尚未被看作矿产和未发现其用途的潜在矿产资源”^[1]。该定义不仅强调了非传统矿产资源受开发利用的影响,而且受人们对资源的认知的局限。该定义有利于开拓人们对新资源的发现和利用。

综合已有非常规矿产资源的研究,可以大致将非常规矿产资源的研究归纳为 3 个主要阶段:20 世纪 60—70 年代以非常规能源研究为主,80—90 年代以非常规矿床和矿产为主,90 年代以来开展了非常规矿产资源和资源评价研究。

1.2 非常规矿产资源综合评价的思路和理论

近年来,国内外学者均倡导非常规矿产资源勘查理论和方法研究是解决矿产资源短缺的重要途径之一。以“简单相似类比”或“就矿找矿”为主导的适用于对常规矿产资源勘查和评价的理论和方法已远

远不能适应对非常规矿产资源的勘查和评价。新的理论和方法的研究势在必行。经过多年的研究,赵鹏大院士首次科学系统地总结了非常规矿产资源研究的新思路和新理论方法,包括:“相似类比”与“求异理论”相结合,以求异引导新发现的非常规矿产资源的勘查和评价思路。他建议突破传统观念束缚,建立全新资源观;打破传统矿产资源分类的人为界限,提出地球物质资源是随时间、空间而变化,受技术、经济、环境、市场、人文等因素制约的。他论述了“成矿专属性”与“成矿多样性”理论相结合,拓宽找矿思路;“基础理论”与“高新技术”相结合,进行矿产评价和实现资源价值;“资源利用”与“环境保护”相结合,以宏观和微观的“资源环境联合评价”审视非常规矿产资源;以“近期目标”与“长期目标”相结合建立综合研究思路^[2]。该科学思路为非常规矿产资源的综合研究和评价奠定了理论和方法基础。

1.3 非常规矿产资源特征研究

无论常规和非常规矿产资源,对矿产特征包括形成机理和元素富集和聚集规律的研究是认知、发现和评价矿产资源的重要依据。对非常规矿产特征除需研究传统的矿产特征,包括形成和赋存地质环境、矿物岩石结构等特征外,还应研究其特殊的元素富集和赋存状态及时一空分布,包括品位—吨位分布等。比如,从矿床的品位—吨位模型分析,对那些主要受提取技术、开采经济环境和能源消耗价格影响的低品位高吨位矿产资源而言,降低可选品位会大大增加资源量。而对于有的矿产类型来说,由于元素赋存状态的原因,其品位—吨位模型中常出现多峰分布,降低品位要求并不一定意味着矿产资源量的显著增加。元素的赋存状态对于矿产资源的开采利用具有直接的影响。比如对于有些元素来说,只有元素的浓度超过临界点才会形成矿物,反之只会以微量元素的形式赋存于其他造岩矿物中。对这种有用组分的提取和利用,只有溶解整个造岩矿物。

从成矿过程中元素富集和聚集规律及造成品位—吨位分布的研究来看,正态分布和对数正态分布一直是占据统治地位的分布类型。然而,近年来非线性理论的发展提出了分形和 multidimensional 分布。比如岩浆结晶分异成矿作用通常产生元素富集和聚集对数正态分布的传统模型已被分形和 multidimensional 分布所取代^[9~11]。传统的动力学“中心式”成矿模式受到了非线性的混沌边缘成矿模式的挑战^[12]。对微观和宏观非线性成矿机理的研究仍然是非常规矿产研究的重

要内容之一^[13,14]。

1.4 非常规矿产资源勘查与评价理论和方法

分析对常规矿产资源的勘查和评价的理论方法,有助于提出适合对非常规矿产资源的勘查和评价的新理论和方法。常规矿产资源勘查和评价方法包括理论模式方法、异常评价方法和信息识别方法等。理论模式方法是以典型矿床理论模式为前提,在相似的地质环境中找寻和评价类似矿床。这种方法对宏观的矿产勘查具有重要的指导意义。对较具体的勘查靶区的识别和评价主要依靠异常的评价和综合信息的应用。“相似类比”矿床模型找矿方法往往只适用于寻找已知矿床类型,用于寻找新类型或非相似的矿产类型具有很大的局限性。传统的异常评价的思路只是对地、物、化、遥数据的异常识别,往往缺乏其地质控制依据而出现多解性和随意性。赵鹏大^[1]提出了“定量揭示地质异常与成矿的内在规律”,强调地质异常与周围地质环境在物质成分、结构构造、成因等方面存在显著区别,物化探和遥感异常是地质异常的不同表现形式。在2001年汉城召开的第52届《国际统计学大会》“奇异统计分布”分会会上,Zhao等^[15]被特邀介绍了“地质异常理论”。“地质异常理论”不仅为探索地球矿产资源形成和演化的复杂动力学机制等方面开拓了广阔的应用前景,而且为认识和识别复杂的物化探、遥感异常提供了理论依据。与矿产资源有关的地质异常的形成往往是非线性的动力学过程,而且所产生的元素在地体中的分布常常是奇异的,满足分形或多维分形分布^[16,17]。成矿过程中对元素的非线性富集、聚集及品位—吨位的奇异性分布的新认识是随着近年来分形数学—物理新理论的突破而产生的^[11,18,19]。从地质异常理论出发,不难理解对物化探、遥感异常的识别不仅仅依赖含量的频率分布,而且要结合元素组合、空间结构特征(包括合同异性)及时空变化规律(包括自相似性和尺度独立性、频率分布)^[10,17]。非线性“求异”理论和方法技术必将成为未来非常规矿产资源勘查和评价的重要手段。综合信息的挖掘和异常的识别无疑是提高矿产勘查和评价水平的有效方法。

1.5 常规和非常规矿产资源综合评价理论和方法

常规和非常规矿产资源是相对的,受当前社会和经济等因素制约,今天的非常规资源会变成未来的常规矿产资源。有些非常规矿产资源与已发现的常规矿产资源有着一定的联系。从成矿多样性的理

论出发,它们有可能成为矿床成矿谱系中的不同分子。只有从成矿谱系的角度才能找出它们的内在联系和分布规律。对这样的成矿谱系而言,隔离开常规和非常规矿产资源,只研究常规的可利用矿产资源或者只研究非常规矿产资源都是片面的、不完整的。因此,赵鹏大院士提出的“三联式”——“地质异常”、“成矿多样性”、“矿床谱系”理论对综合研究和识别常规和非常规矿产资源将起到划时代的作用^[20,21]。怎样建立和刻画常规和非常规矿产资源的谱系关系是研究非常规矿产资源的一大难题。解决这一问题不仅对非常规矿产资源的理论研究,而且对非常规矿产资源的勘查和评价将起到突破作用。比如,可以研究以成矿多样性为基础的“广义相似类比”取代以“成矿专属性”为基础的“相似类比”方法^[14]。“广义相似”强调矿床之间内在的一致性和外在的(形式的)多样性。“广义相似”和“广义自相似”是非线性理论领域过去十几年来的重要发展之一^[22],也是目前该领域中的国际研究热点之一。广义自相似理论尤其适合于对矿床分布的集散性及元素低贫和巨量聚集分布的描述。本文将着重介绍“广义自相似”和“奇异性分析”及其在矿产资源评价中的应用。

2 非线性矿床模型和矿产资源评价理论和方法

深入研究非线性成矿系统、元素赋存和富集奇异性规律、致矿异常的内在广义自相似性,是揭示非常规包括微细、低贫组分成矿机理的重要方面,也是研究成矿地质异常识别标志和识别方法的地质前提,是指导地、物、化、遥异常识别的依据。

2.1 非线性成矿系统

成矿系统研究通常会涉及复杂的物理化学和动力学过程。研究成矿系统的途径是多样的,比如可以研究成矿过程中有用元素组分的富集和聚集规律。成矿过程除了受成矿动力学系统的制约以外,同时与矿床的产出环境的复杂变化是分不开的。这些复杂因素的叠加往往会造成成矿系统的非线性特征。笔者将以岩浆结晶分异成矿作用为例来探讨非线性成矿系统的形成和对元素富集和聚集分布规律的影响。

2.1.1 分形模型(fractal model) Turcotte^[9]揭示了岩浆结晶分异成矿作用可能导致元素富集和聚

集,呈现分形分布。他假设在成矿过程中有用组分(Φ)的形成速率($\partial\Phi$)与矿石量(Ψ)的形成速率($\partial\Psi$)呈以下关系:

$$\frac{\partial\Phi}{\Phi} = k \frac{\partial\Psi}{\Psi}. \quad (1)$$

其中, k 是成矿系数。如果引入品位 $G = \Phi/\Psi$,那么品位和矿石量将具有以下关系:

$$\frac{\partial G}{G} = (k-1) \frac{\partial\Psi}{\Psi}. \quad (2)$$

方程(2)的解析解具有以下指数形式:

$$G = c\Psi^{(k-1)}. \quad (3)$$

其中, c 是常数。就此,Turcotte 教授认为分形模型比较适合品位和矿石量(即品位与吨位)模型。虽然该结论改变了传统的正态分布和对数正态分布的模型,但该结论只能反映非线性成矿系统的总体规律,还不能有效地描述真正复杂的实际成矿过程。本文将给出更为合理的多维分形模型。在此基础上将给出异常识别的奇异性分析方法(3.2)和广义自形似模型(3.3)。

2.1.2 多维分形模型(multi-fractal model) 假设在成矿系统中,由于赋矿介质等因素的差异,处在不同位置的成矿系数 k 会具有不同的数值,因而模型(3)将在不同位置上具有不同的 k 值。进一步假设在成矿系统中任一选定的位置上,当体积(V)很小时,矿石量与矿石体积具有如下的关系:

$$\frac{\partial\Psi}{\Psi} = \theta \frac{\partial V}{V}. \quad (4)$$

其中,系数 θ 随位置而变化。模型(4)的解析解为:

$$\Psi = cV^\theta. \quad (5)$$

其中, c 是常数。综合模型(5)和模型(3),可以得到金属量($\mu = G\Psi$)的模型为:

$$\mu = cV^{\theta k}. \quad (6)$$

如果将体积表示为半径(ϵ)的关系($V \propto \epsilon^3$),那么模型(6)可进一步改写为:

$$\mu \propto \epsilon^{3\theta k}. \quad (7)$$

由此可见,模型(7)反映了体积金属量与度量尺度(ϵ)具有分形关系。由于系数 θk 随位置的变化性,模型(7)反映了典型的多维分形规律。其中 $\alpha = 3\theta k$ 对应于多维分形的奇异指数。由多维分形原理可知,奇异系数的分布可由多维分形谱函数 $f(\alpha)$ 表示^[19]。在此基础上可进一步讨论矿化强度分布的奇异性 and 广义自相似性。

2.2 奇异性分析(singularity analysis)

为了讨论方便起见,以下将采用通常人们所熟

悉的金属体密度($\rho \propto \mu \epsilon^{-3}$) (同样可以采用面密度, 这时 $\rho \propto \mu \epsilon^{-2}$), 来讨论成矿系统的奇异性. 用体密度(ρ)取代模型(7)中的金属量(μ)将得到:

$$\rho \propto \epsilon^{\alpha-3}. \quad (8)$$

由多维分形原理可知, 奇异系数 α 的取值通常在 3 周围变化(对于面密度而言, α 的取值通常在 2 周围变化), 而且具有以下性质^[19]: (1) $\alpha=3$, 金属体密度为常数, $\rho=c$, 即不随体积的变化而变化, 反映了元素在该位置上的含量(μ)呈线性变化或非奇异变化. (2) $\alpha<3$, 随着体积的变小, 金属体密度趋于无穷大, $\rho \rightarrow \infty$, 即奇异状态. 在这样的位置上, 元素呈富集趋势. α 值越小, 富集程度越高. 由于 $\rho \rightarrow \infty$, 元素的富集呈奇异状态. 元素密度的分布会出现不连续和不光滑等奇异现象. (3) $\alpha>3$, 随着体积的变小, 金属体密度趋于零, $\rho \rightarrow 0$, 反映了元素在该位置上呈贫化趋势.

由此可以看出, 奇异系数 α 能够较好地刻画元素在成矿过程中的富集和贫化程度. 据此笔者提出了几种奇异分析及奇异地质统计学方法^[16, 17, 19, 22, 23]. 这些方法可采用勘查地球化学和地球物理数据对成矿富集的奇异指数的空间分布进行估计和度量, 并进行异常的加强和异常与背景场的分解, 从而达到有效圈定致矿地球化学和地球物理异常^[16, 17, 19, 21].

2.3 广义自相似性 (generalized self-similarity)

由以上讨论可以看出, 即便是同一成矿系统, 由于赋矿环境等因素的差异, 在不同环境中也可能形成不同的元素富集和贫化程度, 甚至在少数地段形成工业矿体或矿床. 这些差异不仅表现为矿化强调的不同, 也可能表现为元素组合的差异或者矿体空间形态的变异等. 因此, 成矿多样性是普遍的. 然而, 由于这些差异性属同一成矿系统的变异, 因此又具有内在的相似性或一致性. 本文所介绍的广义自相似性概念能够描述这种既具有外在多样性又具有内在相似性的自然现象. 这样的自然现象在我们的周围很常见, 比如人类遗传就具有表现形式上的多样性和内在的相似性. 同一家族不同祖代的成员在许多方面会具有一定程度的多样性, 包括智力水平、爱好习惯、身高体重等, 然而他们均受相同遗传基因的制约, 即具有内在的相似性或一致性. 同样, 矿床的形成也具有成矿和矿床分布的多样性及内在的相似性. 识别矿床形成的广义自相似性, 就构成了矿床的多样性和分布谱系的实质. 广义自相似性既可以表现在时间域, 也可在空间域, 还可以在时—空域. 本

文将介绍一种线性广义自相似性的度量模型, 以及利用该模型所发展的物化遥异常的识别和圈定方法和技术.

通常人们所熟悉的自相似性 (self-similarity) 是由各项同性的指数关系所确定的, 如 $M(\epsilon) \propto \epsilon^{-D}$, 这里 M 是某种度量 (比如体积金属量, μ), ϵ 是度量尺度 (如体积半径), D 是分形维数. 许多常见的分形模型, 如 box-counting 等均属于这种类型. 如果不同方向上具有不同的尺度变化系数, 那么所产生的相似性称为自仿射性 (self-affinity). 对于更复杂的具有各向异性的尺度独立性, 比如由于不同方向的差异性变换和旋转变换相互作用而成的相似性可称为“广义自相似性” (generalized self-similarity). 这样的相似性往往与复杂的尺度变换有关, 如 $M(\epsilon) \propto T_{\epsilon}^{-G}$, 这里 T_{ϵ}^{-G} 是某种尺度矩阵变换^[14, 24]. 如果该尺度矩阵变换是线性的, 那么所对应的相似性为线性广义自相似性. 为了度量地球物理和地球化学场的广义自相似性, 可以采用不同的方法和模型, 比如空间域和频率域模型等. 在频率域或其他特征空间内研究广义自相似性是行之有效的. 以下将介绍一种频率域的方法, S—A 方法^[23].

将地球物理和地球化学空间场转化到另外的特征空间 (比如傅立叶空间、特征向量空间等) 进行研究, 可大大简化许多复杂的卷积运算, 有利于刻画空间场的内在相似性质. 比如 Cheng 等^[23] 所提出的 S—A 模型能够在傅立叶能谱空间中度量物化异常所对应的各向异性的广义自相似性, 并能通过识别不同的广义自相似性将能谱的分布分解成不同的滤波器, 进而利用反傅立叶变换对物化异常和背景进行分解. 这样所圈定的物化异常不仅具有形式的多样性 (比如不同的异常强度、不同的大小范围、不同的背景等), 而且之所以有别于背景场就是因为它们在频率域中具有与背景场表现不同的自相似性. 这种自相似性可以由以下指数模型所刻画^[22]:

$$A(\geq S) \propto S^{-\beta}. \quad (9)$$

其中, S 是能谱密度, $A(\geq S)$ 是在能谱密度空间上超出 S 的面积, β 为分形模型的指数系数. 不论物化探异常的强度高、形态大小以及是否处于不同的背景, 如果它们具有内在的相似性, 在能谱密度空间中就可能呈现广义自相似性, 而且这种广义自相似性与背景场所表现的自相似性不同, 可由不同的 S—A 模型来刻画. 那么采用这种不同的分形模型可以形成不同的滤波器, 进而采用逆傅立叶变换可

将物化探异常与背景进行分解. 该方法的应用实例将在下一节中给出.

2.4 非线性矿床模型

从非线性成矿系统的高度能够真正认识元素在成矿过程中的富集和聚集的奇异性规律, 建立识别成矿与异常分布的关系, 模拟成矿系统中致矿异常的广义自相似性, 建立非线性矿床模型和进行矿产资源评价. 采用奇异分析方法识别元素富集系数(或成矿系数 α) 的空间分布, 能够有效地评价异常与成矿的关系. 采用 S—A 模型区分由异常和背景场所对应的不同广义自相似性的规律, 能够有效地圈定致矿异常尤其是“低弱异常、隐伏矿异常”等难识别异常. 在 GIS 环境中, 将多种致矿异常或信息综合将有利于对“难识别、难发现、难评价”矿产资源进行综合评价. 以下例举笔者在加拿大安省北部 Gowganda 地区 Co, Ni, Ag, As, Pb 矿床的资源评价的实例, 说明非线性矿床模型方法的应用效果.

研究区(约 2 700 km²) 内岩石主要由元古代 Lorrain 组变质石英砂岩、粉砂岩、角砾岩及 Gowganda 组泥质变质岩组成(图 1). 部分地区出现太古代酸性到基性超基性火山变质岩. 太古代和元古代变质岩被后期的 Nipissing 辉绿岩脉所切割侵入. Nipissing 辉绿岩的具体侵入时间和期次还不清楚. 由于古冰川的作用, 研究区大约 50% 的地段被数米厚的松散冰川沉积物所覆盖. 区内发现了大量热液型 Co, Ni, Ag 矿床. 主要成矿元素包括 Co, Ni, Ag, As, Pb 等, 故称之为 5 种元素矿床(图 1). 矿化蚀变包括较早期的硅化、钾化、黄铁矿化, 以及较后期的碳酸岩化等. 虽然矿床的成因仍然有争议, 但是矿床的分布通常与 Nipissing 辉绿岩脉紧密相关, 许多矿脉赋存在 Nipissing 辉绿岩脉的内部或附近, 明显的受构造控制. 然而, Nipissing 辉绿岩脉在研究区内分布是广泛的, 但矿床的分布却非常局限^[25].

笔者及其科研集体正在该区开展包括地质、地球物理、地球化学、遥感等综合矿产预测. 限于本文篇幅, 这里只介绍对湖泊沉积物和湖水取样中 Ag 等元素地球化学数据的应用. 更详细和全面的研究成果将陆续发表.

1997 年安省地质调查局在该区进行了地球化学取样, 取得了 1 172 个湖泊沉积物样品和 1 336 个水化学样品. 湖泊沉积物样品通过 INAA 分析方法分析了 Au, As, Na, Br, 通过 ICP—MS 方法分析了其他 51 种元素. 对分析结果进行了必要的质量控

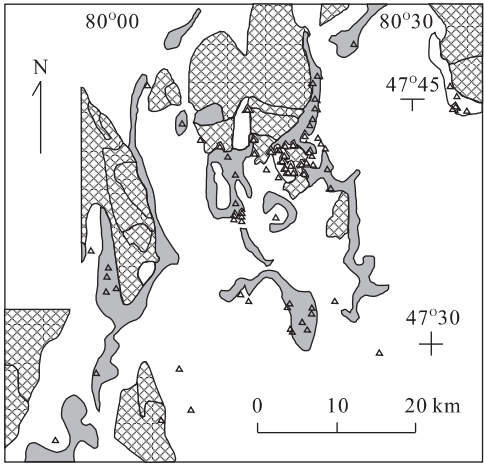


图 1 研究区地质简图

Fig. 1 Simplified geology map

较浅的点图案反映的是元古代 Lorrain 组石英砂岩、粉砂岩、角砾岩及 Gowganda 组泥质变质岩地层; 较大的点图案反映的是太古代酸性到基性超基性火山变质岩地层; 灰色带状的图案反映的是切割侵入太古代和元古代变质岩的后期 Nipissing 辉绿岩脉; 三角符号表示 Co, Ni, As, Ag, Pb 5 种元素矿床和矿点分布

制^[26]. 样品的分布位置见图 2.

为了研究与 Ag 矿化有关的地球化学元素在湖泊沉积物及湖水中的含量变化性和奇异性, 笔者采用多维分形插值方法^[19]对 Co, Ni, Ag, As, Pb 等多种元素的地球化学含量数据进行插值, 形成了微量元素地球化学图. 图 3a 给出了湖泊沉积物中 Ag 的插值结果. 采用同一方法可以计算 Ag 元素在沉积物中的奇异性分布. 图 3b 给出了对富集指数的计算结果. 可以看出, 图 3b 中 $\alpha < 2$ 的地段包含了大部分已知矿床和矿点的分布.

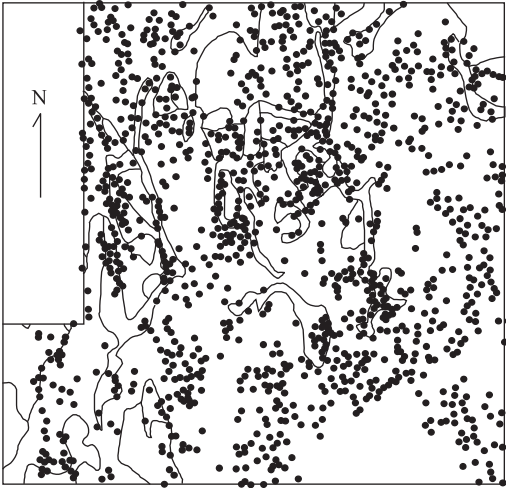


图 2 湖泊沉积物地球化学取样^[26]

Fig. 2 Location map of 1 172 lake sediment samples^[26]

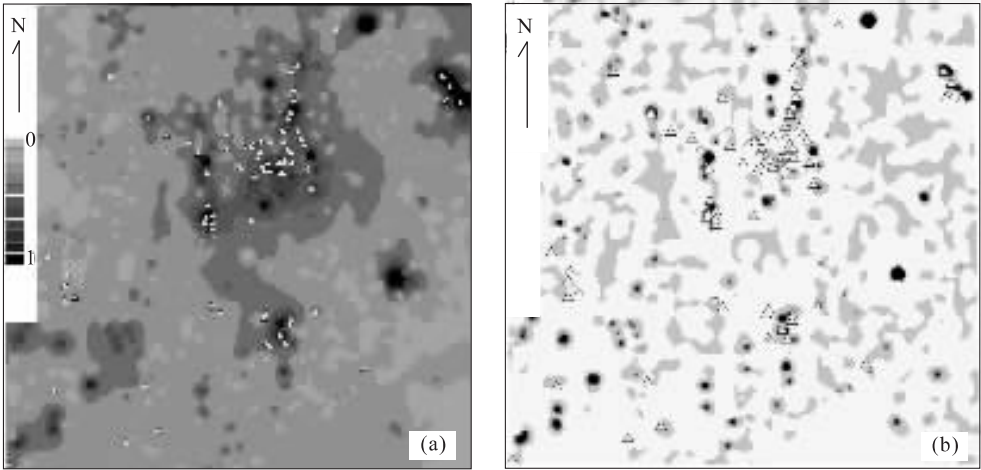


图 3 湖泊沉积物 Ag 地球化学(a)及奇异指数分布(b)

Fig. 3 Ag values (a) and singularity (b) in lake sediment samples

采用 GeoDAS GIS 软件多维分形插值方法^[28]. 网格大小为150 m,图像大小 387×404,窗口内最少 12 个样品,查寻半径为1 500 m;a. 正规化后的 Ag 数值. 三角符号表示 Co,Ni,As,Ag,Pb 5 种元素矿床和矿点分布;b. 图中灰度表示 $\alpha < 2$ 的程度. 三角符号表示 Co,Ni,As,Ag,Pb 5 种元素矿床和矿点分布

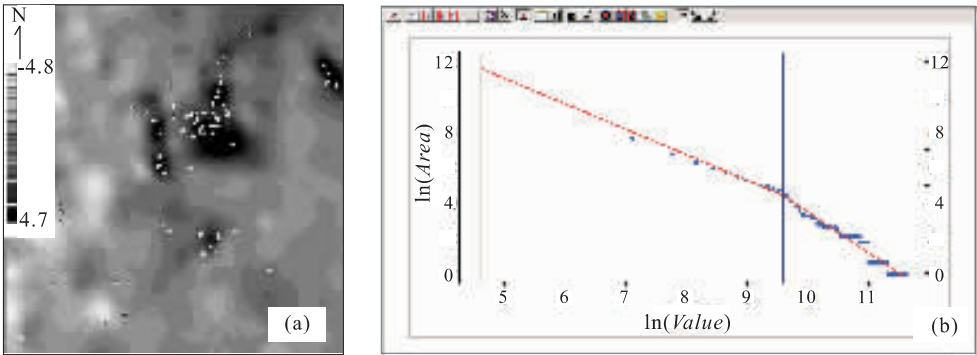


图 4 第三因子得分(a)及其对应的 S—A 关系(b)

Fig. 4 Scores on the third PCA contributed mainly (a) and power-law relationships between power spectrum energy density S and the area $A(\geq S)$ on frequency domain (b)

a. 采用 GeoDAS GIS 软件中网格化数据主成分分析方法^[25]. 组成该因子的主要元素包括 Cu,Pb,Co,Ag 等. 图中灰度表示因子得分. 三角符号表示 Co,Ni,As,Ag,Pb 5 种元素矿床和矿点分布;b. 采用 GeoDAS GIS 软件中 S—A 分形方法^[28]. 横坐标表示 \ln 能谱密度 S,纵坐标表示 \ln 面积 $A(\geq S)$. 阈值 $\ln S=9.6$ 将能谱密度分为 2 组具有不同广义自相似性的范围. 这 2 个不同的分布范围将形成不同的滤波器:小于 $\ln S=9.6$ 的范围为异常滤波器,大于 $\ln S=9.6$ 的范围为背景滤波器. 采用逆傅立叶变换并利用这两种滤波器可将第三因子得分图分解,结果见图 5

为了展示异常的多样性和广义自相似性,以下介绍应用 S—A 方法对地球化学数据的处理结果. 为了研究矿化有关元素组合,首先对多元素地球化学数据图进行主成分分析数据处理,产生了 3 个主因子. 其中第三主因子的主要元素组合为 Cu,Pb,Co,Ag. 其因子得分见图 4a. 由图 4a 可以看出,第三主因子所反映的是与成矿有关的元素组合. 因子得分与已知矿床的分布吻合较好. 应该看到的是,在研究区内不同的部位,由于地质环境和地表环境的差

异,该因子得分的分布具有较大的变化. 如在研究区西南部分,甚至在已知矿床分布的地段因子得分普遍较低. 应该说该区的 Cu,Pb,Co,Ag 异常具有多样性. 如果按常规的异常圈定方法采用同一异常下限来圈定异常,那么只有与已知矿床分布相关的分布在研究区中上部的异常会被圈出,而分布在西南部分的大量低缓弱异常会被遗漏. 为了识别该组合异常的广义自相似性,首先采用傅立叶变换将该因子得分图转变到能谱密度空间. 然后采用 S—A 双

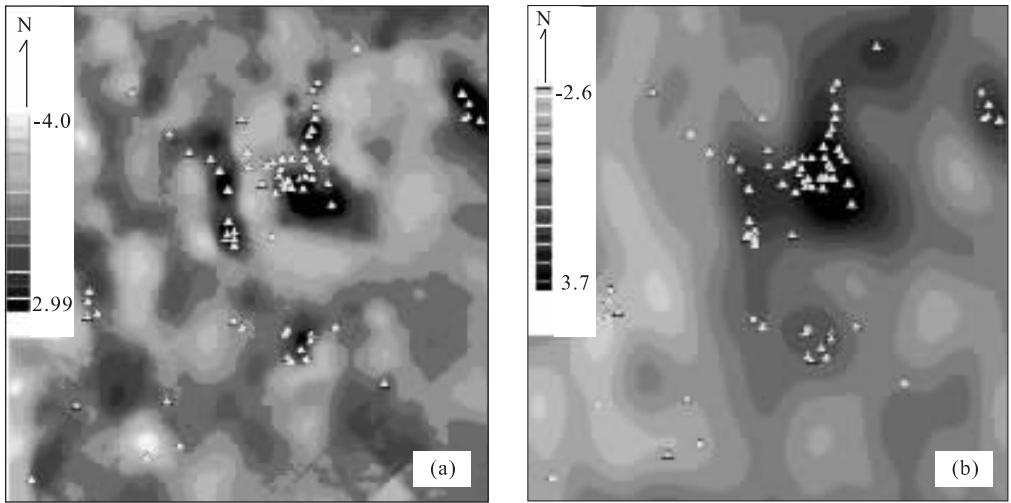


图 5 采用 S—A 方法和图 4b 中给出的异常滤波器得到的第三因子组合异常(a)及背景(b)

Fig. 5 Anomaly (a) and background (b) map calculated using S-A method with the anomaly filter defined in Fig. 4b
图中灰度表示异常相对强度. 三角符号表示 Co, Ni, As, Ag, Pb 5 种元素矿床和矿点分布

对数图检测能谱密度(S)与面积的分形规律, 结果见图 4b. 从图 4b 可以看出, 能谱密度与面积的结果以 $\ln S=9.6$ (无单位) 为界, 反映了 2 种不同的广义自相似性关系. 密度与面积的计算结果大致可以由 2 个不同的模型所拟合. 因此, 可以采用 $\ln S=9.6$ 作为阈值形成 2 个滤波器: 小于 $\ln S=9.6$ 的频率组合为异常滤波器, 大于 $\ln S=9.6$ 的频率组合为背景滤波器. 采用这 2 种滤波器并通过逆傅立叶变换将其变换回原地球化学空间域, 可以分别得到分解的异常和背景场, 结果见图 5. 比较被分解后的异常和背景场(图 5)可以看出, 研究区的背景场是变化的, 这与岩石中微量元素的背景含量不同及地表条件的差异相关. 所分解的异常是在去除不同背景场后的相对异常结果. 其中包括高背景上的高和低异常及低背景上的高和低异常. 可见, 异常本身具有多样性, 然而它们在频率域中具有广义自相似性(图 4b). 采用广义自相似性模型可以将异常与背景进行有效的分解. 将这样分解的组合异常和其他地质(距辉绿岩脉距离等)、地球物理(航磁、重力、放射性)、地球化学(第三主因子得分异常)综合形成了矿产资源预测图(图 6). 更详细的结果见文献[27].

3 结论

通过非线性成矿系统的研究及可能导致的奇异性元素富集和聚集规律的认识, 可以说明地质异常是导致成矿的普遍因素. 广义自相似性可能是成矿

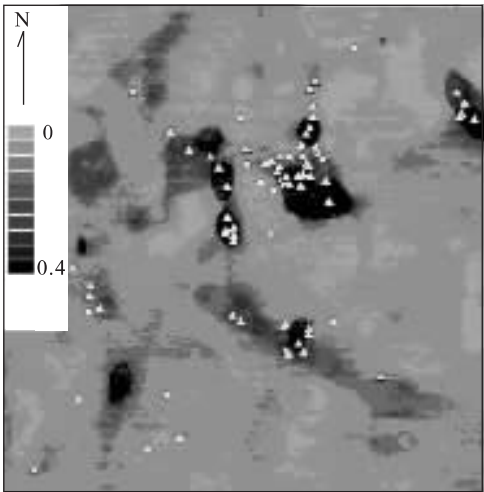


图 6 矿床分布潜力后验概率

Fig. 6 Posterior probability for potential occurrence of mineral deposits of five-element type

采用 GeoDAS GIS 模糊证据权方法, 综合了第三主因子异常、航磁异常、航空放射性异常及重力异常等信息层[27]. 图中灰度表示后验概率. 三角符号表示 Co, Ni, As, Ag, Pb 5 种元素已知矿床和矿点分布

多样性和矿床谱系的普遍规律. 通过奇异分析刻画异常的富集系数(成矿富集系数)有利于识别与矿化相关的物化探异常. 采用 S—A 方法可以识别异常与背景场所反映的不同的广义自相似性规律, 进而分解异常和背景场. 这样分解的异常与背景尤其对与“低缓弱异常或隐伏矿异常”等难识别异常的识别具有独到之处. 以“广义自相似性”和“奇异分析”的非线性矿床模型及以 GIS 为环境的信息综合技术将

会是对非常规难识别矿产资源评价的有效方法.

参考文献:

- [1] 赵鹏大. 地质异常与成矿预测: 当代矿产资源勘查评价的理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
ZHAO P D. Geological anomaly and mineral prediction: current mineral resources assessment theory and method [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998.
- [2] 赵鹏大. 地球科学的新使命——认知和发现非传统矿产资源[J]. 地球物理学进展, 2001, 16(4): 127—132.
ZHAO P D. Task of the earth sciences: identify and discover untraditional mineral resources [J]. Progress in Geophysics, 2001, 16(4): 127—132.
- [3] Heroy W B. Unconventional methods in exploration for petroleum and natural gas [D]. Dallas: Southern Methodist University, 1969. 218.
- [4] Shanks W C III. Cameron volume on unconventional mineral deposits [M]. New York: Am Inst Min Metall and Pet Eng Soc Min Eng, 1983. 246.
- [5] Barton P B. Unconventional mineral deposits: a challenge to geochemistry [A]. In: Shanks W C III, ed. Cameron volume on unconventional mineral deposits [C]. New York: Am Inst Min Metall and Pet Eng Soc Min Eng, 1983. 3—14.
- [6] Tooker E W. Unconventional future ores [A]. In: Brown M, ed. Encyclopaedia of materials sciences and engineering [C]. New York: Pergamon Press, 1982.
- [7] Van Rensburg W C J. Global economics relating to the exploration of unconventional mineral resources [A]. In: Shanks W C III, ed. Cameron volume on unconventional mineral deposits [C]. New York: Am Inst Min Metall and Pet Eng Soc Min Eng, 1983. 15—20.
- [8] Wilde A, Edwards A, Yakubchuk A. Unconventional deposits of Pt and Pd: a review with implications for exploration [J]. Newsletter SEG, 2003, 52: 10—18.
- [9] Turcotte D L. Fractals in petrology [J]. Lithos, 2002, 65: 261—271.
- [10] Cheng Q, Agterberg F P, Ballantyne S B. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods [J]. Journal of Exploration Geochemistry, 1994, 51(2): 109—130.
- [11] Agterberg F P. Power-law versus lognormal models in mineral exploration [A]. In: Mitri H S, ed. Proceedings of the third Canadian conference on computer applications in the mineral industry [C]. Montreal: McGill University, 1995. 17—26.
- [12] 於崇文. 地球系统的复杂性——地球科学的基本问题 (I) [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(5): 509—519.
YU C W. Complexity of earth systems—fundamental issues of earth sciences (I) [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(5): 509—519.
- [13] Zhang Z, Ma H, Cheng Q. Fractal geometry of element distribution on mineral surfaces [J]. Math Geol, 2001, 33: 217—228.
- [14] Cheng Q. GIS-based fractal anomaly analysis for prediction of mineralization and mineral deposits [A]. In: Harris J, ed. GIS applications in the earth sciences [C]. [s. l.]: Geological Association of Canada, 2003.
- [15] Zhao P D, Chen Y Q. Geo-anomaly: extreme value distribution in geology and its applications in quantitative assessment of mineral resources [J]. Bulletin of the Int Stat Inst, 2001, 53: 477—480.
- [16] Cheng Q. Decomposition of geochemical map patterns using scaling properties to separate anomalies from background [J]. Bulletin of the Int Stat Inst, 2001, 53: 481—484.
- [17] Cheng Q. A new model for quantification of anisotropic scale invariance and for anomaly decomposition [J]. Math Geol, 2003(in Press).
- [18] Turcotte D L. Fractals and chaos in geology and geophysics [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 398.
- [19] Cheng Q. Multifractality and spatial statistics [J]. Computers & Geosciences, 1999, 25(9): 949—961.
- [20] 赵鹏大. “三联式”资源定量预测与评价——数字找矿理论与实践探讨[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(5): 482—489.
ZHAO P D. "Three components" mineral resources quantitative assessment—digital prospecting theory and practice [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(5): 482—489.
- [21] 赵鹏大, 陈建平, 陈建国. 成矿多样性与成矿谱系[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2001, 26(2): 111—117.
ZHAO P D, CHEN J P, CHEN J G. Mineral diversity and mineralization spectrum [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2001, 26(2): 111—117.
- [22] Cheng Q. A new technique for quantification of anisotropic scale invariance and for decomposition of mixing patterns [A]. In: Bayer U, Burger H, Skala W, eds. Proceedings of the 8th annual conference of the interna-

- tional association for mathematical geology [C]. Berlin; Free University, 2002. 359—364.
- [23] Cheng Q, Xu Y, Grunsky E. Multifractal power spectrum-area method for geochemical anomaly separation [J]. *Natural Resources Research*, 2000, 9(1): 43—51.
- [24] Schertzer D, Lovejoy S. Nonlinear variability in geophysics [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publ, 1991. 318.
- [25] Panahi A, Cheng Q, Bonham-Carter G F. Modeling lake sediment geochemical distribution using spatial principal component, indicator kriging and multi-fractal power-spectrum analysis: a case study from Gowganda, Ontario [J]. *Journal of Geochemistry: Exploration, Environment and Analysis*, 2003(in Press).
- [26] Hamilton S M. A high density lake sediment and water geochemical survey of 32 geographic townships in the Montreal River headwaters area, entered on Gowganda area [R]. Ontario Geological Survey Open File Report 5962, 1997. 156.
- [27] Cheng Q, Agterberg F P, Zhang S. Handling uncertainty in evidence construction and fuzzy weights of evidence predictive model [M]. UK: IAMG, 2003.
- [28] Cheng Q. Geodata analysis system (GeoDAS) for mineral exploration: user's guide and exercise manual. Material for the training workshop on GeoDAS held at York University [EB/OL]. <http://www.gisworld.org/geodas>, 2000, Nov 1—3.

Non-Linear Mineralization Model and Information Processing Methods for Prediction of Unconventional Mineral Resources

CHENG Qiu-ming^{1,2}

(1. *Laboratory of Earth Systems and Mineral Resources Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*; 2. *Department of Earth and Atmospheric Science, York University, Toronto, Canada M3J1P3*)

Abstract: A non-linear mineralization model was proposed on the basis of a classical igneous differentiation mineralization model which can describe the generation of multi-fractal distribution of element concentration as well as grade-tonnage fractal/multi-fractal model. The work has also led to a model to explain the common properties of mineralization and mineralization-associated geochemical anomaly diversity and generalized self-similarity of the anomalies. Generalized self-similarity is related to the generalized scaling invariance which can characterize the external diversity and internal similarity of natural phenomena including mineralization and occurrence of mineral deposits. The models based on core principal of generalized self-similarity and singularity analysis have been applied to a case study of Co-Ni-Ag-As-Pb mineral resources assessment in the Gowganda area of Abitibi district, northern Ontario, Canada. The results have demonstrated that the non-linear models proposed in the current research are effective for delineating week lake sediment and water geochemical anomalies caused by deeply buried sources or week anomalies superimposed to low background values.

Key words: non-linear mineralization model; generalized self-similarity; singularity analysis method; mineralization index; GIS data integration.