

# 应用复杂性-非线性理论开展成矿预测

——奇异性理论-广义自相似性-分形谱系多重分形理论与应用\*

## The application of complexity-nonlinear theory to ore prognosis: the singularity theory-generalized self-similarity-fractal lineage multiple fractal theory and its application

成秋明<sup>1,2</sup>

(1 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学, 北京 100083; 2 York大学地球空间系和地理系, 加拿大 多伦多, M3J1P3)

CHENG QiuMing<sup>1,2</sup>

(1 State Key Lab of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Department of Earth Space and Department of Geophysics, York University, Toronto M3J1P3, Canada)

**摘要** 本文应用“奇异性-广义自相似性-分形谱系”为核心的多重分形现代成矿预测理论与模型开展了云南兰坪、个旧等地区的成矿过程模拟与矿产资源定量评价。文中介绍了作为非线性、复杂性理论的重要领域之一的多重分形理论如何应用与矿产资源定量评价中, 所涉及的“奇异性-广义自相似性-分形谱系”等概念和相关的模型能够合理地描述成矿系统、成矿过程、成矿富集规律、矿产资源时空分布, 还提供了定量模拟和识别成矿异常(地质、地球物理、地球化学、遥感异常)的有效模型和实用方法。将多重分形原理与成矿过程、矿产资源分布规律、矿产资源信息获取研究相结合, 可形成具有良好应用前景的现代成矿预测理论与模型。采用该多重分形矿产资源预测理论和在此基础上所开发的专用地学非线性空间信息GeoDAS GIS技术, 对国内外多个金属成矿区带进行了矿产资源勘查与评价, 均取得了较理想的预测效果。文中将以该理论方法在云南省多个地区开展矿产品定量预测的实例来说明该理论体系和方法技术的有效性和可行性。

**关键词** 非线性矿床模型; 多重分形成矿预测; 广义自相似性理论; 奇异分析; 分形谱系; 金属矿产; GeoDAS GIS技术; 矿产资源评价

成矿预测与矿产资源评价学与矿床学、区域成矿学、矿产勘查学等是密切联系而又有其相对独立的研究内容。成矿预测和矿产资源评价研究的最终目的是为识别和发现矿产资源和对矿产资源潜力作出综合评价。因此, 研究内容既包括研究矿产资源的形成背景、形成环境、形成过程、分布规律, 也包括在此基础上研究矿产资源的勘查与评价理论、方法及技术。可见, 成矿预测和矿产资源评价学是综合性和交叉性较强的学科。它不仅涉及矿床学、成矿系统等理论, 而且更强调对矿产资源时-空分布规律的认识和资源潜力的识别, 对矿产资源信息的获取以及对矿产资源分布位置、产出机率、资源潜力评价等。先进的成矿模式、成矿系统和成矿环境的建立是开展成矿预测的前提, 正确认识和刻划矿产资源的时-空分布规律, 有效地获取矿产资源信息, 合理地进行信息综合和建模是成功进行矿产预测的关键。因此, 对成矿预测理论、方法、技术优劣性的评价应以实用性、可操作性和有效性为标准。

随着矿产资源的找寻难度的不断增加与现代科学理论和方法技术的发展与渗透, 成矿预测和矿产资源评价理论、方法和技术也得到了仓促的发展。由于非线性物理学、统计学、空间统计学、计算机技术、空

\*本文得到国家杰出青年科学研究基金项目“成矿复杂系统和矿产资源评价非线性理论与模拟”(40525009)的资助

作者简介 成秋明, 男, 1960年生, 加拿大YORK大学教授, 主要从事矿产普查与勘探, 数学地质、地理信息系统、矿产资源评价的教学和研究。

间信息学以及其它相关学科的渗透, 矿产资源评价已由传统的定性评价发展为以模型进行定量评价; 由传统的简单相似类比发展为以复杂地学综合数据的挖掘和融合为主的地学综合信息的利用; 由对单一矿种的评价向多矿种的综合评价; 由对矿床的产出的定性评价发展为对不同规模矿产资源体(矿床、矿田、矿带等)的综合评价和统计性预测。矿产资源定量评价已经发展成为矿产勘查学的重要研究领域,也是目前国际矿床地质、数学地质、勘查地质、勘查地球化学、勘查地球物理、地学信息等地质领域中十分受关注的研究领域。近年来已有一系列新的矿产资源勘查评价新思路、理论、方法和技术相继问世并付诸实践,极大地丰富了矿产资源评价的学科和提高了矿产资源勘查评价的效率与效果。这里仅举几个典型的例子: 美国地调局推行了“三部曲”(Three Parts)矿产资源评价思路、俄罗斯开展的“预测普查组合”(ППК)法及系统勘查、加拿大基于GIS环境下的资源潜力评价方法、中国学者开展了“三联式”成矿预测等等(赵鹏大, 2004)。

非线性理论和复杂性理论被称为21世纪科学研究的核心领域。将非线性理论和复杂性理论和技术应用于成矿学和成矿动力学的研究已显示了良好的发展前景。国内外大量的研究成果表明, 将现代非线性理论和复杂性理论应用于矿床学和矿产资源勘查和评价是地学领域中的前沿研究方向(於崇文, 2004)。作者近年来的研究也表明, 将非线性理论特别是混沌理论、分形/多重分形理论、自组织理论、奇异性理论等引入矿床学和矿产资源勘查和评价学对揭示矿床形成的复杂过程、成矿物质的富集规律、成矿信息的获取等均具有非常广阔的发展空间。开发非线性空间信息获取方法技术, 将空间结构信息、尺度变化信息、各向异性信息、多元信息有机的结合, 并应用于低缓、微弱、难识别矿产资源信息的获取, 分解复合、叠加异常以及对成矿异常的时-空分布的综合评价是有效的。

本文将要介绍的是笔者在开展非线性理论、复杂性理论以及矿产资源综合研究基础上, 形成的“奇异性-广义自相似-分形谱系”为主要内容的多重分形成矿预测新理论、方法和技术体系, 内容包括①采用非线性理论模拟矿床的形成与分布规律(如成矿富集规律、成矿系统结构、成矿结构次序); ②矿产资源信息提取(尤其是弱信息、隐蔽信息、复合叠加信息); ③多元信息综合与矿产资源潜力分布图的编制等。以上工作都可在GIS环境下(GeoDAS)完成。原理和流程见图1(Cheng, 2006)。

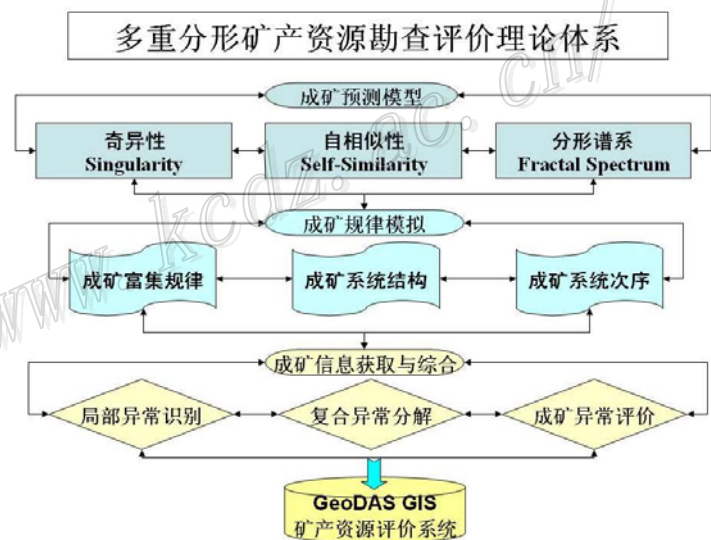


图1 “3S”非线性矿产资源定量预测理论体系框架

## 1 奇异性与成矿(Singularity and Mineralization)

为了采用奇异性原理研究一般的奇异性地质过程, 笔者给出如下的奇异过程和奇异性定义: 将在很小的时间-空间范围内具有巨大能量释放或巨量物质形成的现象称之为具有奇异性(Cheng, 2004)。成矿作用可以认为是一种特殊的奇异事件, 它通常引起成矿物质的巨量堆积和元素高度富集, 因而造成有用元素在地质体中的奇异性分布。采用本文给出的定义, 成矿、地震、滑坡、洪水等地质过程都可看成奇异性地质过程, 可见奇异性现象在自然界是非常普遍的。

对成矿过程中元素的非线性富集、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。由于奇异性的存在往往使许多数理方法不能有效被地应用于奇异性数据的处

理。奇异性数据往往不满足平稳性，通常的时间序列分析和统计方法不能有效地用于奇异数据处理。此外，由于奇异性事件往往发生在相对较短时-空间隔中，也是造成奇异性研究较困难的原因之一。然而，非线性理论和复杂性理论的最新研究结果表明，奇异性通常具有尺度不变性特征，而且所产生的现象往往满足分形或多重分形分布，比如自组织临界过程往往产生“崩塌”分形结果（Bak, 1996）。在漫长的地质岁月中成矿作用也可看作为自组织临界过程产生的奇异事件，其结果所产生的“崩塌”-矿床或矿化异常的规模和频率也会服从分形或多重分形分布规律。成矿作用发生在特定的地质环境、地质时期、与特定的地质事件相伴，它与沉积过程、构造与岩浆活动等正常的地质过程相比，成矿富集所涉及的地质时间往往是相对较短暂的，空间分布往往是局限的。利用局部奇异性分析能对人们所感兴趣的局部时-空范围进行聚焦分析，采用局部奇异性指数（ $\alpha$ ）来定量表征异常区与其周边的异常状态以及与成矿系数的直接关系。研究表明，局部奇异性原理比较适合对矿床空间分布的集散性、异向性、尺度独立性、自相似性、分布谱系等特征的刻划。局部奇异性分析方法可作为有效的非线性“求异”理论和方法技术。已经成为深层次信息提取、重要矿产资源勘查和评价的非传统手段和有效方法（成秋明，2003）。

## 2 广义自相似性理论 (Generalized Self-Similarity Theory)

“广义自相似性”是指内在的一致性和外在的（形式）的多样性（成秋明，2003）。广义自相似性的概念能够描述那些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是很常见的（成秋明，2003）。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。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-空域等。广义自相似性是成矿多样性和矿床谱系的有机结合，构成了多样性和谱系研究的重要内容。

如何度量和刻画广义自相似是目前多重分形领域中的重要研究方向之一，在不同“基因映射”空间中研究矿产资源信息和成矿奇异性模式，对于揭示成矿模式和矿产资源的本质规律是有益的。从广义自相似原理出发，不同地质过程所导致的时-空模式往往具有不同广义自相似性。复合和叠加系统是金属成矿作用的普遍特征，尤其是在多个构造单元复合、交叉的成矿地段，成矿的叠加作用、复合作用、混合作用等是普遍存在的。中国地处特殊的大地构造环境，成矿地质条件复杂，已发现的大部分内生金属矿床属复合、叠加型，以伴生矿石类型为主，这无疑给成矿信息的识别和找矿带来一定难度。研究复合系统的结构、混合效应是解释成矿规律的重要途径。非线性理论在混合系统研究中发挥着不可取代的作用。如何采用有效方法区分叠加异常是找矿勘探中的重大难题。本文作者在研究非线性系统理论和多重分形理论的基础上。先后提出了利用广义自相似原理分解混合系统的理论和系列方法。这些方法（C-A、S-A）已被广泛用于地球化学和地球物理异常的分解和识别。实践表明，矿化过程所产生的成矿异常场与背景场往往在“基因映射”空间中具有不同的自相似性规律，异常场往往呈分形和多重分形分布。

## 3 分形谱系与矿床预测 (Fractal Spectrum and Mineral Deposit Prediction)

矿床谱系 (spectrum of mineral deposits) 理论（赵鹏大，2003）把矿床纳入时、空及成因演化系统中考察，研究成矿及其多样性特征所表现出的某些规律性序列。成矿的规律性序列可以表现在成因、规模、成分、数量、质量以及它们的组合上，但最基本的是表现在成矿时间和空间上的“有序性”和“成套性”（赵鹏大，2003）。矿床谱系的研究不仅是矿床学研究的重要内容，也是矿产资源勘查必不可少的研究内容。

从成矿作用过程中元素富集的时-空奇异性分布以及尺度独立性、广义自相似性、异向性等方面可以定量描述矿床的时-空谱系。通过识别矿床的时-空谱系不仅有助于对已发现矿床的模拟，而且有利于对未发现矿床的识别。本文作者曾给出了一系列度量成矿谱系的非线性谱分析模型和方法（成秋明，2003）：

①矿化强度-范围、矿床的规模-个数分形谱系；②矿化强度及矿床的空间聚散性分布谱系；③矿床在“基因映射”空间中分布谱系；④矿床品位-吨位分形与多重分形模型；⑤矿床空间分布后验概率与矿床预测。

从随机多重叠加模型可以看出，异常的空间分布是随机多重叠加过程的结果。同样，矿床可以看作是自组织临界过程的“崩塌”结果，其空间就位可看作是热液混沌过程中的空间吸引子。因此，对矿床的空间分布可以采用概率理论进行描述，这是矿床统计预测的理论基础。对成矿域中单位面积区域中所能产出矿床的先验概率可表示为 $P[D]$ ， $0 \leq P[D] \leq 1$ ，当然先验概率与度量的单位面积大小是有关的。如果人们能够确定控制矿床分布的地质因素，那么就可以建立控矿因素与矿床空间分布的后验概率模型， $P[D|A, B, C, \dots]$ ，这里 $P$ 是与矿床空间分布有关的 $A, B, C$ 等证据层（或信息层）的条件下单位面积中包含矿床的后验概率。这种后验概率反映了矿床空间分布的有序性，可以看作是矿床的一种空间谱系。对这种谱系的标度和制图将起到对矿床的定位预测，这就是通常人们所熟悉的矿床统计预测的基本模型。比如，可以采用证据权模型、模糊证据权模型、逻辑回归模型、人工神经网络等数学方法计算矿床空间分布的后验概率分布。

### 3 小 结

多重分形理论不是简单的数学概念，而是能够深刻刻画奇异性地质过程以及所产生的奇异结果的数理概念。多重分形概念和模型较全面地刻划了成矿系统的结构性、奇异性、尺度独立性、有序性、自相似性、聚散性，异向性、自组织性、随机性、临界性等特征。这些性质可概括为3个主要原理：局部奇异性原理——可用于定量表征成矿物质时-空奇异性富集和聚集规律；广义自相似性理论——可定量表征成矿的外在多样性和内在相似性；多重分形谱——可定量描述成矿的发生、演变和结果的时-空有序性和矿床预测。该理论体系将矿床特征研究与矿床预测、矿产资源信息获取有机的联系在一起，具有可操作性、和实用性。在多个重要成矿区带开展的矿产资源预测和定量评价中取得了很好的实际效果。

#### 主 要 参 考 文 献

- 成秋明. 2003. 非线性矿床模型与非常规矿产资源评价. 地球科学, 28(4): 445-454.
- 成秋明. 2004. 空间模式的广义自相似性分析和矿产资源评价. 地球科学, 29(6): 733-744.
- 於崇文. 2004. 地质系统的复杂性. 北京: 地质出版社.
- 赵鹏大. 2003. 非传统矿产资源概论. 北京: 地质出版社.
- 赵鹏大. 2004. 定量地学方法及应用. 北京: 高等教育出版社.
- Bak P. 1996. How Nature Works. New York: Springer-Verlag.
- Cheng Q. 2006. GIS based fractal/multifractal anomaly analysis for modeling and prediction of mineralization and mineral deposits. In: Jeff Harris, ed. GIS applications in earth sciences. Geological Association of Canada Special Book. 289-300.