

成矿过程奇异性与矿床多重分形分布

成秋明^{1,2}

1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074, 北京 1000871

2. 加拿大约克大学 地球与空间科学与工程系

摘要: 本文将成矿过程与地震、火山、滑坡、洪水、暴雨、森林火灾等一系列非线性地球系统过程称之为奇异性过程(Singular Processes)。奇异性过程的基本特征是在相对很小的时间间隔或者空间范围中产生巨大能量释放或者物质超常富集或堆积。探讨了奇异性过程的“资源”与“灾害”双重效应;从地幔对流、板块构造等自组织临界性系统探讨了成矿过程的奇异性以及成矿结果服从多重分形分布规律,如矿床规模与个数、矿床品位与个数等;介绍了可以刻画成矿域空间结构的不均匀性、尺度独立性和自组织临界性的多重分形模型,如度量元素富集强度的局部奇异性模型,度量成矿域结构各向异性的广义自相似性模型,以及度量分形结构序次的分形谱系模型。这些非线性模型为矿产资源定量预测提供了新的思路 and 工具。

关键词: 成矿理论; 复杂性理论; 奇异性; 广义自相似性; 自组织临界性; 成矿预测

中图分类号: P611. 5 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2008)03-0298-08

Singularity of Mineralization and Multifractal Distribution of Mineral Deposits

CHENG Qi-ming^{1,2}

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Beijing 100083, China; 2. Department of Earth and Space Science and Engineering, York University, Toronto M3J1P3, Canada

Abstract: According to the common non-linear property of several types of non-linear hazardous processes such as earthquakes, volcanos, landslides, cloud formation, rainfall, hurricanes, flooding, and mineralization that result in anomalous amounts of energy release or mass accumulation confined to narrow intervals in space or time, these types of processes can be termed as singular processes. The end products of these non-linear processes can be modeled as fractals or multifractals. Most types of hydrothermal mineral deposits are genetically associated with mantle events and plate tectonics which themselves shows self-organized criticality. Here we show that not only the relationships between mineral deposits size and the number of deposits (size and number model) and between ore grade and the number of deposits (grade and number model) may follow power-law models, but also the element concentrations in a mineral district and posterior probability of an unit area containing deposits calculated by weights of evidence method for prediction of mineral deposits may also follow power-law distribution with area. The singularity theory and non-linear models proposed have provided useful ideas and powerful tools for quantitative assessment of mineral resources.

Key words: ore-forming theory; complexity theory; singularity; generalized self-similarity; self-organized criticality; mineral resource assessment

收稿日期: 2008-6-15 收到

基金项目: 国家杰出青年科学研究基金项目(40525009); 自然科学基金重点项目(40638041)

作者简介: 成秋明(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 教育部长江学者特聘教授, 地质过程与矿产资源国家重点实验室主任, 加拿大 YORK 大学教授, 国家杰出青年科学研究基金获得者, 国际数学地球科学学会最高奖——克伦宾奖章获得者, 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。

成矿预测和矿产资源勘查与评价不仅需要了解矿床形成的机理,建立合理的找矿模型,确定准确的找矿标志,而且需要采取有效的评价技术获取充分的找矿信息。成矿理论与矿产勘查技术的有机结合是成矿预测和矿产资源勘查与评价的重要环节。过去几十年,矿床学研究更侧重于以典型矿床为核心的描述性研究,其重点是用矿物学、地球化学、同位素、流体包裹体等先进的分析测试技术研究矿床成因。这些研究成果无疑有助于认识成矿过程、矿质来源、矿液的传输和沉淀等过程,提供矿产资源预测的理论指导;然而,对矿床分布位置的预测,特别是对大型和超大型矿床的空间产出位置的预测起不到直接的作用^[1]。目前大家所熟悉的成矿模型和矿床模型在矿床空间分布模式或矿床场不均匀性方面的研究还相对较薄弱,还不能很好地解释矿床形成的空间分布和频率分布,比如矿床规模与矿床个数是否服从何种分布规律?矿床空间聚类分布规律?矿床分布密度、致矿异常分布随尺度变化的规律?

本文介绍的成矿奇异性理论从新的非线性理论视角来研究成矿过程,定量刻划成矿过程的结果,如矿床的空间分布和频率分布及元素富集规律等。在此基础上,探讨如何将非线性理论和模型应用于成矿预测和矿产资源定量评价,形成适用的矿产资源勘查和定量化预测的新思路和技术基础。

1 地球系统过程的自组织临界性

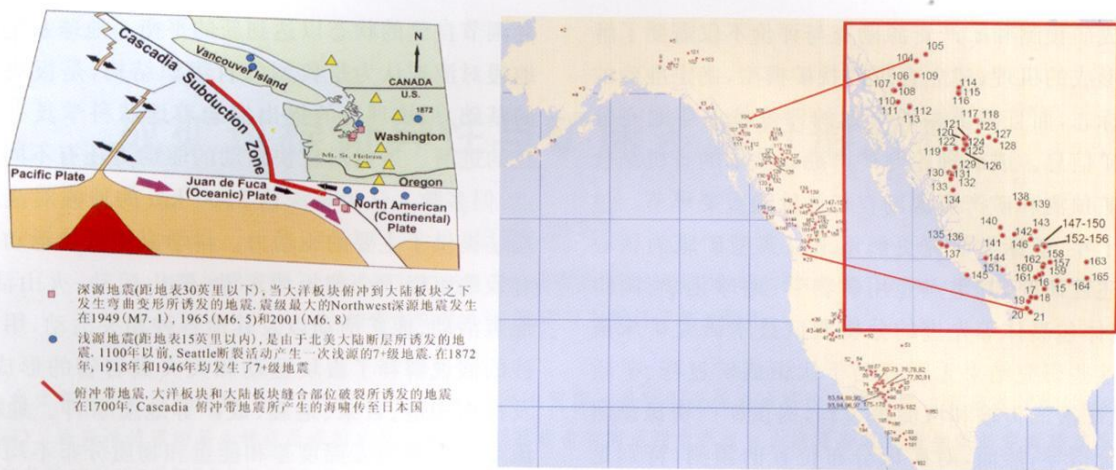
为了说明奇异性理论的概念和含义,首先分析一下众多发生在地球系统中的复杂过程,如地震、火山、滑坡、暴风雨、洪水、森林火灾和成矿等过程,其基本特征是在相对很小的时间间隔或者空间范围内产生巨大能量释放或者物质超常富集和堆积,我们将具有这样特征的地球系统过程(Geo-processes)称之为奇异性过程(singular Processes)^[2~4]。

从地球系统科学观点看,发生在地球系统中的各种物理、化学、生物过程相互联系、相互影响、相互制约,各子系统之间构成自组织结构^[5,6]。在长期的相互作用和演化过程中通过能量、物质交换不断调节系统之间的状态,实现由平衡—远离平衡—临界状态—新的平衡,不断的循环和系统演化。当系统达到自组织临界状态时,即使作用于系统的输入是相对连续的和均匀的,而系统的输出往往具有不连续性、跳跃性和“崩塌性”,系统以不连续的方式反

复调节自己的状态以达到新的平衡。地球系统内部地幔对流被认为是典型的自组织结构,是板块运动的基础,板块理论的提出标志着地球科学具有革命性的进展。虽然对板块运动的驱动力还有不同的观点,但多数人认为是深达 2900 km 的地幔对流和地幔柱提供了主要的驱动力。科学家用板块运动理论有效地解释了全球板块运动、造山运动、火山活动、地震活动、成矿活动以及其他各种相关活动,用地幔柱的假说解释了板块运动和大火成岩省的形成,以及板内构造、岩浆、地震、成矿等地质事件。地幔对流是地幔和地壳温度差和能量和物质分布不均匀的结果,通过地幔对流不断改变着地幔和地壳的边界条件,引发板块分离、聚合、漂移、俯冲、碰撞、造山、深部热物质(如岩浆)上侵和浅部物质下沉(如拆沉)等一系列自组织结构和系统的相互作用、重组和演化,也导致在地壳内部和表面一系列不均匀和不连续事件,如地震、火山、地热和成矿等。这些活动是地球系统之间物质和能量交换的结果,也是地球系统逐渐达到平衡的过程。由于地球系统的自组织临界性,这些能量和物质交换与调节的过程往往表现为不连续性、时间-空间奇异性和“崩塌性”,如在很小的时间间隔或空间范围中能量释放或物质富集和堆积的异常性,这样的过程或事件可称之为“奇异过程”或“奇异事件”。图 1 显示了在由太平洋洋壳向北美大陆俯冲所形成的造山带中发生的地震、火山(图 1A)和斑岩铜矿床分布图(图 1B)。

地震事件具有典型的自组织临界性和时空奇异性,即巨大能量释放发生在非常短暂的时间间隔和空间范围内。图 1 表示三种地震类型及其发生机制与分布规律。如由大洋板块和大陆板块缝合部位破裂所诱发的俯冲带地震,或由北美大陆断层所诱发的浅源地震,以及由大洋板块俯冲到大陆板块之下产生弯曲变形诱发的深源地震。此外,由于板块俯冲造成地幔物质上侵和地壳物质重溶形成火山分布并伴随地震活动。图 2 为圣海伦火山口的地形与地貌特征及其地震空间分布图。由于岩浆和火山作用,地震集中发生在直径约 1 km 大小的圆形火山口附近,仅在 2007 年 11 月份就发生了十余次小震(频率分布见图 A)。其发生时间(图 B)和地震所释放的应力能量分布(图 C)呈间歇性和不均匀性。

成矿流体的形成、运移、沉淀、保存等多个相关过程是由一系列子系统组成的复杂成矿系统^[9]。因

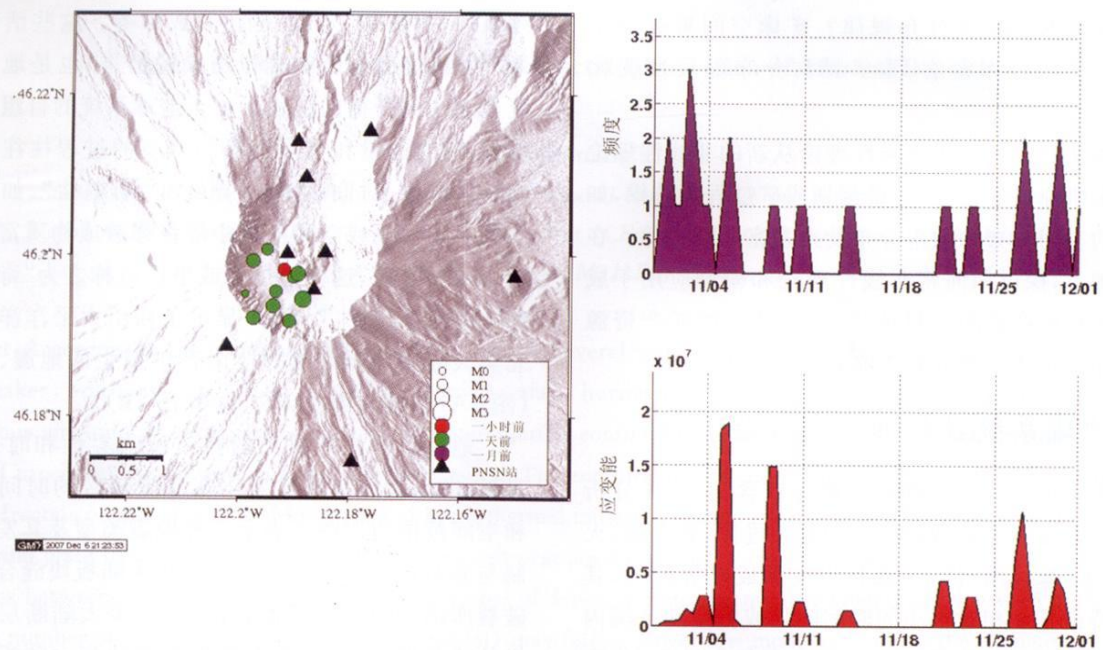


(A)重要的地震和火山分布^[7]; (B)斑岩铜矿分布。矩形框内为加拿大不列颠哥伦比亚省内斑岩铜矿分布^[8]

(A) Distribution of important earthquakes with volcanos^[7]; (B) Distribution of porphyry mineral deposits; The distribution of the porphyry mineral deposits in B C Province, Canada, is show in rectangle insert^[8]

图1 板块俯冲(太平洋与北美大陆)与奇异性地质事件(地震、火山、矿床)的空间分布关系

Fig. 1 Plate subduction zone and earthquakes, volcanos and mineral deposits distribution



(A) Mount St. Helens 火山口地貌图与地震发生的空间分布图; (B) 2007 年报 1 月内发生地震的个数(频率)分布图;

(C) 释放的应力能量分布图。图中图像和数据来源于网站^[7]

图2 圣海伦火山口地貌、地震频率和能量分布图

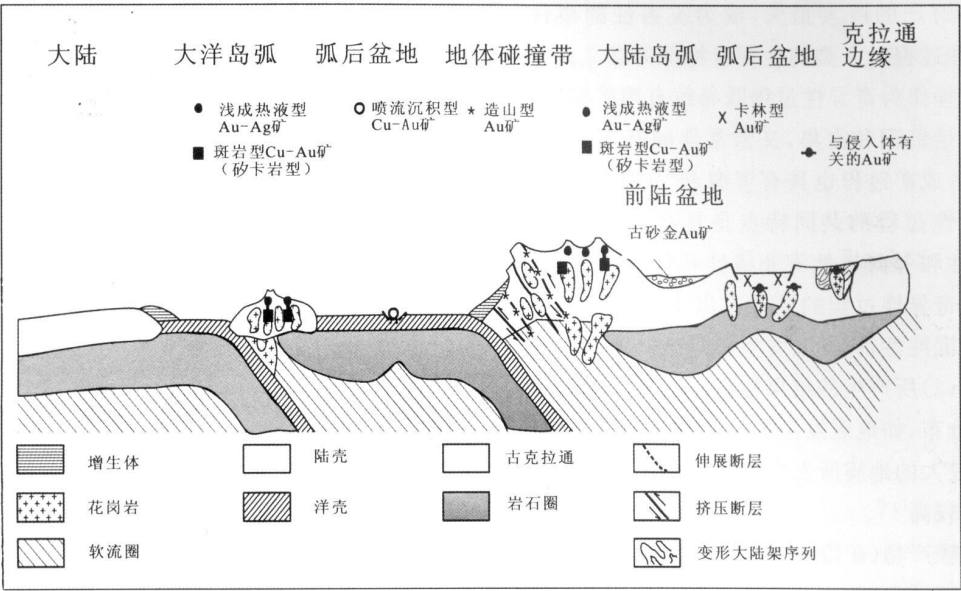
Fig. 2 (A) Geomorphological map of the Mount St. Helens crater and spatial distribution of earthquakes; (B) Distribution map of earthquakes frequency in January, 2007; (C) Distribution map of released stress-energy. Images and data from website^[7]

此,成矿流体的形成、运移、沉淀、保存受到诸多因素的制约。如成矿流体的起因包括幔源岩浆含矿系统、壳源岩浆成矿系统、热水流体与含矿岩石反应形成成矿系统(变质流体、沉积流体、地下热水或地表水系统),以及各种混合系统。携带矿物质的成矿流体的运移与传输系统往往受到不同构造系统的制约。由于构造活动常常具有不连续性和临界性,有

时具有继承性和多期次性,矿液的传输也会呈间歇性、脉动性和多期次性。矿质的沉淀受到系统的物理、化学和生物等因素的影响,成矿系统的化学组分、温度和压力等条件决定了矿物相变条件,而围岩成分和介质条件也会影响矿质沉淀系统,当含矿流体系统达到远离平衡的自组织临界状态时,诸如裂隙和构造活动对系统温度和压力条件的改变、围岩

或其他物质(如地表水的加入)也会改变系统的成分,这些变化哪怕是很微小也可能改变系统临界状态而产生系统的“崩塌”,导致矿质沉淀并形成矿体;当系统打破临界状态进入崩塌过程和处于混沌状态时,构造空间(断裂、褶皱、裂隙、溶洞等)将起到空间吸引子的作用,因此矿体和矿脉在空间分布上既有随机性又有一定统计规律,呈现时空继承性和聚类性。由此可见,探索成矿系统不仅要研究成矿系统本身,而且不应忽视其他相关子系统的作用。为了说明成矿系统的随机性、混沌性和奇异性,这里介绍由 Groves 等^[1]给出的关于主要金矿成矿类型和大地构造环境的空间关系(图3)。他们分析了各种成矿类型与板块构造和地幔柱的时空关系,如分布在大洋岛弧环境中的浅成热液型金矿和斑岩型或矽卡岩型铜金矿,其成矿系统与大洋岛弧的浅成岩浆活动有关,矿床的形成和就位环境较浅,往往受岩浆活

动和地表系统的混合影响。再如喷流沉积型(VHMS)成矿系统发生在弧后盆地大洋底部,火山和岩浆地热的驱动在洋底形成的地下热水与地表冷水的循环对流,径流过程中所携带的成矿物质在地表或近地表环境发生沉淀而形成沉积型矿床,矿床的形成和分布受地表沉积环境包括地形地貌条件的制约。沉积作用无论在空间上还是时间上均显示选择性、不均匀性和嵌套性(Multiplicative Cascade effect)。发生在洋脊的现代喷流沉积成矿过程为矿床的研究提供了现实环境。再如板块碰撞带和大陆岛弧环境中的造山型金矿、浅成热液型金银矿和斑岩型铜金矿床的形成和分布与造山作用和造山带的演化密切相关,成矿的深度范围大,既有发生在几公里到几十公里之下的深成热液矿床,又有几公里之上以至近地表的中深和浅成热液矿床。



据文献[1]

Modified after ref. [1]

图3 不同类型金矿成矿环境

Fig. 3 Schematic lithosphere-scale sections showing the formational environments of gold-bearing deposits

这些矿床的形成除了受岩浆活动的影响,还受碰撞、造山、后碰撞等过程产生的挤压、拉张、剪切等构造环境的制约,以及岩浆在上侵过程中与陆壳岩石发生混染作用的影响。浅成热液矿床还会受地表环境如地表流体混入的影响。以上说明,大多数内生热液型金矿成矿类型都与发生在地壳内部或近地表的成矿热液循环、矿液传输和矿质沉淀有关。当然,砂矿的形成是地表风化作用和地表流体介质中

搬运和矿质沉淀的结果。内生热液型成矿系统中矿质来源和成矿流体的形成往往受地球内部物质分布不均匀性和大地构造活动和演化的制约。在时间空间上与大地构造环境关系密切,具有时间隶属性、空间聚类性和结构性。图4显示多数矿床类型的发生与分布和地幔柱热事件时间序列分布有关。图B表示地幔柱热事件的频率分布,图A和C分别表示主要类型矿床的形成时间分布。可以看出,虽然大

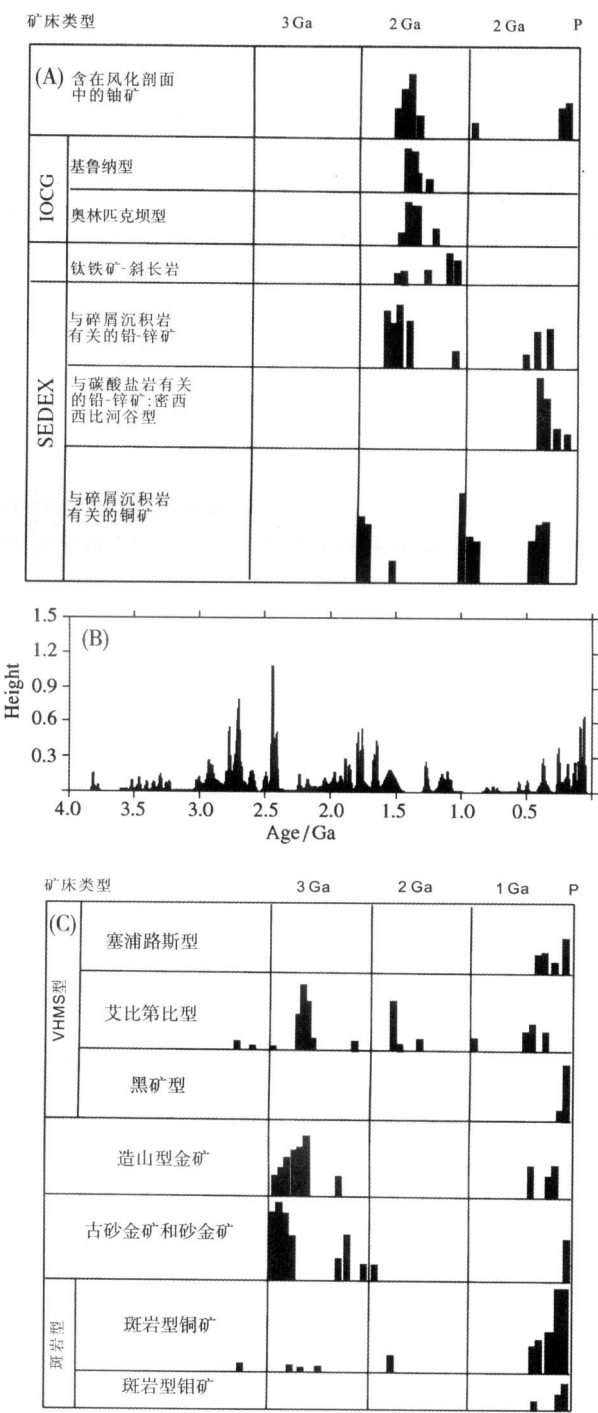
多数类型矿床的时-空分布与地幔柱热事件的分布关系密切,然而在发生时间和空间就位又有很大随机性和混沌性,在相同的成矿条件下也并不保证产生相类似的矿床,成矿系统和矿床分布位置的预测只能是概率性预测,即在相似的条件产生相类似的矿床的概率较大。这样的概率只有在一定范围内才有意义,一般不具有收敛性,即当范围过小将失去统计预测意义。

2 成矿过程奇异性与矿床多重分形分布

奇异性过程及其产生的事件常常被称为“极端过程”或“极端事件”(extreme event)。这种传统的概念强调了事件发生的极端性、特殊性和唯一性。由于这些事件发生的时间短暂和难预测性,人类还不仅不能完全利用它所产生的能量资源,而且如果这些事件发生在人类活动或设施较密集的地区还会造成生命和财产的巨大损失,成为灾害性的事件。因此,奇异性过程对人类的生存有特殊意义。

成矿过程作为奇异性过程既导致有用矿物质在矿体中的巨量堆积和富集,又常常伴随有害物质的富集。因此,成矿过程也具有资源和“灾害”的双重效应。奇异性过程的共同特点是具有自组织临界性、自相似性和各向异性等非线性特征。这些非线性特性导致奇异性过程的结果有以下特点:1) 发生的时间具有混沌性,因此其发生时间难以预测,只能是统计性的;2) 所产生的结果往往服从幂律(分形或多重分形)分布,如地震发生的震级与频率服从分形分布;震级较大的地震所发生的频率较小,震级较小的地震频率较高^[10]。

成矿过程产物(矿段、矿体、矿床、矿田以及相关的各种尺度的异常)的大小和个数也服从分形或多重分形分布^[11,12],如大型和超大型矿床的形成频率相对低,而中小型矿床形成频率相对高,超大型矿床则甚为罕见。大中小矿床的成因机制并无本质区别,所不同的是成矿系统各子系统之间的叠加与耦合。成矿是一种有经济价值的地质异常^[13]。超大型矿床被认为是爆炸性异常地质事件形成的^[14]。成矿系统的自组织临界性,大矿和超大型矿床的形成有很大的随机性和不确定性。除了矿床的规模(吨位与储量),矿床的品位是矿床富集程度的重要指标。成矿元素在矿石中的含量(品位)与在地壳同类岩石中的正常含量之比通常称为元素成矿富集系数,可用来衡量元素在成矿过程中的富集程度。



(A) 和 (C) 是主要矿床形成时间分布;
(B) 地幔柱时间序列分布结果; 据文献[1] 修改
(A) and (C) showing temporal distribution of major mineral deposits, and (B) showing the timing distribution of mantle plumes; modified after ref. [1]

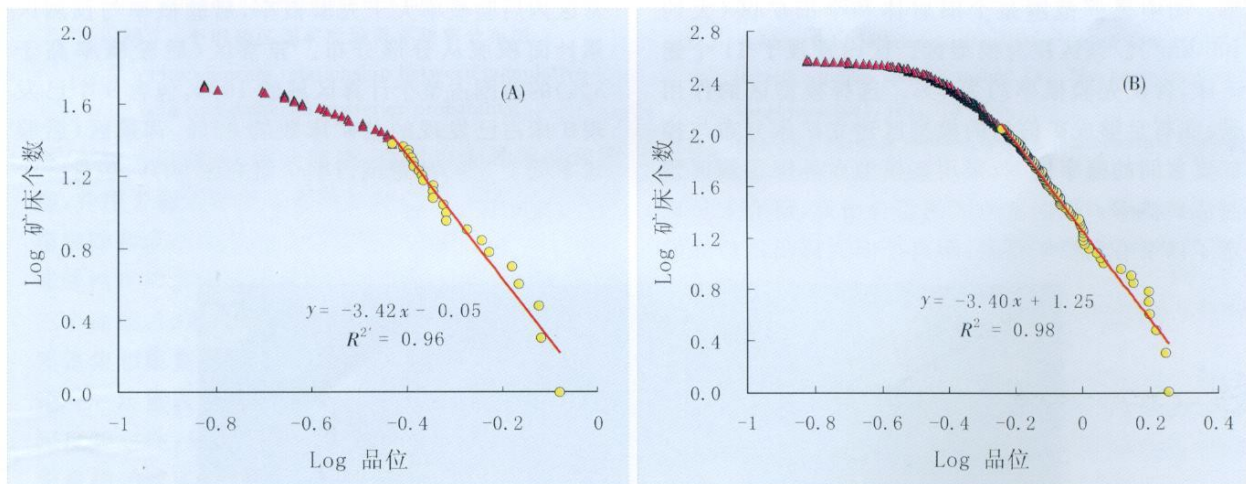
图4 不同类型矿床形成时间与地幔柱事件的关系
Fig. 4 Relationship between mantle plume events and formation times of mineral deposits types

按照成矿奇异性原理, 矿床品位分布应该服从分形/多重分形分布。图5中给出了对全球重要斑岩铜矿平均品位的统计分布。图5A 是对加拿大不列颠哥

伦比亚省内 51 个斑岩铜矿铜平均品位的统计结果; 图 5B 为全球 379 个斑岩铜矿床铜平均品位的统计结果。原始数据来源于 USGS open file^[8]。上述两项统计结果都显示, 较大的品位值均服从 power-law 分布。如不列颠哥伦比亚省内品位值高于 0.4% 的 23 斑岩铜矿铜平均品位值服从分形分布; 小于 0.4% 的品位值偏离拟合直线的一个原因可能是较小品位的统计不完全所致, 或者较小品位值服从其他分布规律。对全球 379 个斑岩铜矿的统计结果也显示类似结果, 其中品位高于 0.56% 的 110 矿床服从分形分布。

除了规模和品位等矿床特征服从全局性分形统计分布外, 还可探讨矿床场其他有关特征所具的不均匀性、奇异性、自相似性和聚散性^[15]。如元素密

度与分布范围服从统计分形或多重分形分布, 这种元素密度称之为分形密度分布, 分形密度有助于圈定矿致地质异常^[16]。前者与分形的最大差别是前者可以度量分形结构(场)的不均匀性、奇异性 and 时空变化性。成矿过程中矿石矿物和成矿元素的富集和亏损过程是复杂的非线性过程; 特别是由于多期次矿化过程的多重叠加与改造, 在成矿域中形成矿石矿物和成矿元素分布的不均匀性: 一些地段元素含量贫化或亏损, 而另一些地段富集。这种不均匀的贫化和富集程度和空间变异性可以用多重分形模型来度量^[16]。如在一定成矿区域范围内成矿物质密度(如金属量密度)随区域大小的变化呈幂律关系(分形)。该分形关系由分形密度和奇异性指数(密度维数)所确定。后者从空间维数意义上度量成矿



(A) 加拿大不列颠哥伦比亚省内 51 个矿床; (B) 全球 379 个矿床。对数以 10 为底。图 (A) 中 power-law 拟合品位分解值为 0.4%, 其中品位高于 0.4% 的矿床有 23 个, 参加计算的总矿床数为 51 个; (B) 中直线拟合品位分解值为 0.56%, 其中品位高于 0.56% 的矿床有 110 个, 参加计算的矿床总数为 379 个

(A) from 51 deposits located within BC and (B) 379 deposits from the world (data from [8]). Logarithm using 10 as the base. In Figure (A), grading decomposition value by power-law modeling is 0.4%, and the number of mineral deposits grading higher than 0.4% is 23 of 51; in Figure (B), grading decomposition value calculated by fitting of a straight line is 0.56%, and the number of mineral deposits grading higher than 0.56% is 110 of 379.

图 5 斑岩铜矿平均品位分布图

Fig.5 Distribution of average grades from porphyry copper deposits

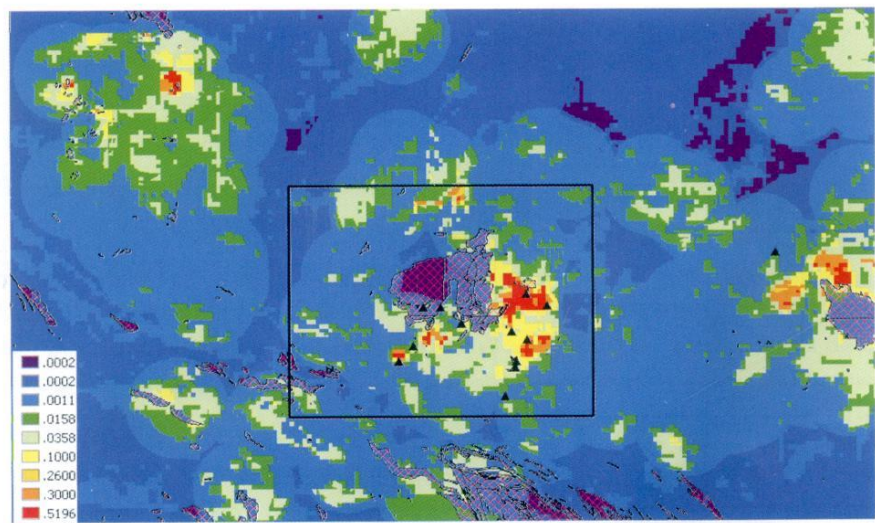
物质富集与贫化的程度, 如体状($\alpha = 3$)、面状($\alpha = 2$)、线状($\alpha = 1$)、点状($\alpha = 0$) 或介于它们之间(α 为非整数) 的富集或贫化。分形密度是成矿物质在分形维数空间度量的物质密度(单位为 g/cm^a)。成矿富集地段成矿物质密度为分形密度。分形密度空间维数——奇异性指数的高低刻画了成矿物质的富集与贫化强度, 因此, 奇异性分析方法可用于圈定有利成矿区 and 度量成矿富集强度。局部奇异性分析为异常识别尤其是提取与矿化有关的弱异常提供了一种有效的新手段^[4]。奇异性指数大小的空间-频率分

布可用多重分形谱系来描述。在一般的成矿域范围中, 无显著富集和贫化的地段(非奇异的背景范围如 $\alpha = 2$ 或具有正常面密度的地段) 总是占据区域的主体范围(维数为 2), 而显著富集和贫化的地段(具有分形密度地段) 总是占据区域较小的范围(维数为小于 2)。整个区域的成矿物质富集和贫化的空间变化将完全由多重分形维数谱系所确定。因此, 可以采用多重分形理论和模型刻画成矿域中元素的空间分布, 并划分富集地段, 圈定有利成矿靶区。由于不同的地质过程(如不同类型和期次的成矿过程以及

非成矿过程)往往产生各向异性,奇异性指数的另一性质——广义自相似性可以用于分解由具不同自相似性的地质过程模式,如区分背景场与异常场^[4]。

了解造成成矿物质富集(产生分形密度)的原因是为了确定成矿有利条件和控矿有利标志。为了预测和圈定矿床,通常需要叠合不同的有利控矿条件。控矿条件在GIS环境下常常表示为成矿有利信息图层。叠加有利控矿条件(信息图层)的过程是缩小预测区和提高找矿信息量的过程,这个过程可视为一般形式的非线性多重叠加过程(multiplicative cascade processes),其结果必然产生找矿信息累计(富集)的奇异性分布^[16]。图6是采用证据权信息综合方法所计算的云南个旧地区锡矿成矿后验概率分布图。该图给出了单位面积(1 km²)内的含矿概率。图中黑框范围是个旧岩体和个旧矿区(大约400 km²)。该区视为模型区。区内发现了11个锡矿床,含矿先验概率约为3%。选择模型区的作用是:在有足够成矿信息的模型区建立矿床分布与控矿要素间的概率模型,采用该模型在外围预测区预测成矿概率。根据该地区的综合研究,研究人员确定了以下有利控矿要素:距离个旧岩体出露边界的

最佳距离、碳酸盐岩石的有利岩性、常量元素地球化学异常和微量元素地球化学异常等。模型区采用证据权方法^[17]计算了每个控矿要素与矿床分布的空间关系,并转化为度量控矿条件控矿作用大小的权重。根据控矿要素和计算的权重,在预测区(图6的整个研究区)计算了成矿后验概率,绘制了后验概率图。图中不同颜色代表不同后验概率值。概率较高的地段说明出现较多有利控矿条件。可见出现有利控矿要素越多,可圈定的预测区范围越小;所对应后验概率越高,所在区域的成矿有力度越高。因此,无矿化的背景区域和矿化异常区域后验概率的分布应该有所不同。图7给出了后验概率与预测区范围的分形关系。由图可见,后验概率分解值3%将研究区分为两个不同的区域:背景区和异常区。在异常区内后验概率大于先验概率,后验概率与预测区累计面积服从分形分布。异常区(后验概率高于3%)的范围占整个计算区域的10%,包含9个已发现矿床占已发现的总矿床数的82%,背景区(后验概率低于3%)的范围占整个研究区90%,包含2个已发现矿床。



后验概率代表单位面积(1 km²)内含矿概率。计算单位面积1 km²,总矿床数11个,先验概率为3%。计算采用证据权方法和距离岩体距离、有利岩性、地球化学异常等控矿要素。三角形符号表示锡矿床分布,多边形黑线表示出露地表的岩体

Posterior probability representing ore-bearing frequency within an area unit(1 km²). The calculated area is 1 km², with totally 11 mineral deposits, and the posterior probability is 3%. The calculation uses means of weights of evidence and is based on ore-controlling factors of distance from pluton, favorable lithology and geochemical anomaly. Triangle representing the distribution of tin deposits, and polygonal black line representing exposed plutons

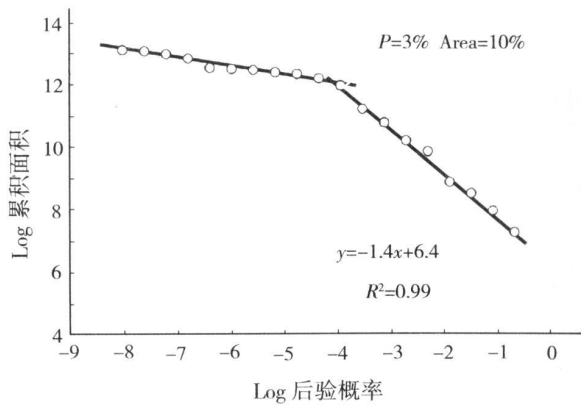
图6 个旧地区锡矿后验概率分布图

Fig. 6 Posterior probability map calculated by means of weights of evidence method

3 讨论与建议

将成矿过程与其他灾害性自然地质过程都视为

奇异性地质过程来研究,可丰富矿床学的研究思路和研究内容,也为矿床的预测和矿床规模的评价提供了新的非线性模型和技术方法。笔者研究了分



后验概率分解值为 3%, 后验概率高于 3% 的范围占整个计算区域的 10%, 包含 9 个矿床(占总矿床数的 82%)

Decomposition value of posterior probability is 3%, of which the range higher than 3% covering 10% of the whole calculating area (including 82 percentage of 9 mineral deposits)

图 7 个旧地区锡矿后验概率频率分布图

Fig. 7 Plot showing relationship between cumulative area and posterior probability

形/多重分形理论、混沌理论、自组织临界理论和模型,并用于揭示矿床形成的复杂过程、成矿物质的富集规律和成矿信息的非线性提取。据此提出了新的非线性矿产资源定量评价理论和方法。该理论包括三个命题:1)局部奇异性原理——定量表征成矿物质富集和聚集的时空分布规律;2)广义自相似性理论——定量表征成矿的外在多样性和内在相似性及尺度独立性;3)自组织临界性和多重分形谱系——定量描述成矿的“崩塌”效应和分形结果。该理论提供了研究以下问题的非线性原理、模型和定量化方法;这些问题是:如何度量成矿奇异性?如何度量矿床的时空频率分布规律?如何模拟成矿非线性过程?如何通过奇异性指数圈定矿床预测区?如何估计矿床发生后验概率?如何计算未发现的矿床?

参考文献 (References):

[1] Groves D, Condie K C, Goldfarb R J, Hronsky J M A, Viehreicher R M. Secular changes in global tectonic processes and their influence on the temporal distribution of gold-bearing mineral deposits[J]. *Economic Geology*, 2005, (100): 203–224.

[2] Cheng Q. Multifractality and spatial statistics[J]. *Computers & Geosciences*, 1999, (25): 949–961.

[3] Cheng Q. Multifractal imaging filtering and decomposition methods in space, fourier frequency, and eigen domains[J]. *Non-Linear Processes in Geophysics*, 2007, (14): 293–303.

[4] Cheng Q. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, (32): 314

– 324.

[5] Bak P, Chen K, Tang C. A forest-fire model and some thoughts on turbulence[J]. *Phys. Lett.*, 1992, (A14): 297–300.

[6] 於崇文. 矿床在混沌边缘分形生长(上卷)[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2007: 705.

Yu Chongwen. Fractal growth of mineral deposits at the edge of chaos[M]. Hefei: Anhui Education Press, 2007: 705. (in Chinese)

[7] http://www.pnsn.org/HELENS/helensep_mo.html

[8] Singer D, Berger V I, Moring B C. Porphyry copper deposits of the world: Database, map, and grade and tonnage models [R]. U. S. Geological Survey Open-File Report 02–268, 2005.

[9] 翟裕生. 地球系统、成矿系统到勘查系统[J]. *地学前缘*, 2007, (14): 173–181.

Zhai Yusheng. Earth, metallogenic to exploration system[J]. *Earth Science Frontier*, 2007, (14): 173–181. (in Chinese with English abstract)

[10] Turcotte D L. Self-organized criticality: Does it have anything to do with criticality and is it useful? [J]. *Non-linear Processes in Geophysics*, 2001, (8): 193–196.

[11] Cheng Q. Discrete multifractals[J]. *Mathematical Geology*, 1997, (29): 245–266.

[12] Cheng Q, Agterberg F P, Ballantyne S B. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1994, (51): 109–130.

[13] 赵鹏大. 地质异常理论与矿床预测: 现代矿产资源评价理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 1998.

Zhao Pengda. Geological anomaly theory and mineral deposits prediction: Advanced mineral resources assessment theory and methods [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. (in Chinese)

[14] 裴荣富, 邱小平, 尹冰川, 熊群尧. 成矿作用爆发异常及巨量金属堆积[J]. *矿床地质*, 1999, (18): 333–340.

Pei Rongfu, Qiu Xiaoping, Yin Bingchuan, Xiong Qunrao. The explosive anomaly of ore-forming processes and superaccumulation of metals[J]. *Mineral Deposits*, 1999, (18): 333–340. (in Chinese with English abstract)

[15] 成秋明. 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[J]. *地球科学*, 2006, (31): 337–348.

Cheng Qiuming. New multifractal mineralization prediction theory and singularity-generalized self-similarity – fractal spectrum (3S) models[J]. *Earth Science*, 2006, (31): 337–348. (in Chinese with English abstract)

[16] Cheng Q. Non-linear theory and power-law models for information integration and mineral resources quantitative assessments[J]. *Mathematical Geosciences*, 10.1007/s11004–008–9172–6.

[17] Bonham Carter G F. Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS [M]. Oxford: Pergamon, 1994: 398.