

综合致矿地质异常信息提取与集成

陈永清¹, 赵鹏大²

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 中国地质大学, 北京 100083, 湖北武汉 430074

摘要: 矿床及其周围局部和区域的地质、地球物理和地球化学以及遥感地质等勘查信息构成认识成矿规律和资源潜力评价的基础。矿产资源综合定量评价首先涉及到以建立地质成矿概念模型为基础的地质、地球化学、地球物理以及遥感地质等单学科异常信息的提取与集成, 然后是对多学科异常信息的综合提取与集成, 最后应用综合致矿信息定量圈定找矿靶区, 评价资源潜力。阐述了综合地质异常数字找矿过程中综合致矿地质异常信息提取、信息关联、信息转换和信息集成的基本概念。强调实现“由地质异常体特征到空间地质异常信息模型, 再根据空间异常信息模型推断地质异常体特征”这一信息双向转换的重要意义。结果表明: (1) 综合致矿地质异常概念模型是选择资源评价变量和建立综合地质异常数字找矿模型的基础; (2) 非线性方法技术是提取隐蔽矿化信息的有效手段; (3) 综合致矿地质异常概念模型与数字找矿数学模型的有机结合是实现数字找矿突破的关键; (4) 应用综合致矿异常信息模拟矿产资源潜力的过程实质上是一个信息逐渐提取与集成的过程, 亦是一个空间数据→空间信息→知识决策的过程。

关键词: 综合致矿地质异常; 信息提取与集成; 信息关联与转换; 非线性数学方法; 矿产资源综合定量评价。

中图分类号: P628

文章编号: 1000-2383(2009)02-0325-11

收稿日期: 2008-12-28

Extraction and Integration of Geoanomalies Associated with Mineralization

CHEN Yong-qing¹, ZHAO Peng-da²

1. School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, Wuhan 430074, China

Abstract: The local and regional anomalies of mineral deposits from geology, geophysics, geochemistry as well as remote sensing image constitute a foundation for recognizing ore-forming regularities and estimating mineral potentials. Quantitatively integrated assessment of mineral resources usually includes three steps: (a) firstly, the extraction and integration of single discipline anomaly; (b) then, extraction and integration of multi-discipline anomalies; (c) finally, the integrated anomalies are used for indentifying ore-finding targets and assessing mineral potentials. In this paper, the basic concepts of extraction, connection, transform, and integration of the geoanomalies with mineralization from geology, geochemistry, and geophysics are elucidated. It emphasizes the significance of the bidirectional information transforms, that is, from characteristics of geoanomalous bodies to a spatial geoanomalous pattern, and from the pattern inferring the significance of a concrete geoanomalous body forming in the similar geological setting. It comes to the conclusions as follows: (a) the conceptual model of geoanomalies associated with mineralization is a foundation for selecting variables and establishing integrated mineral exploration pattern; (b) the nonlinear approach is a powerful tool to extract implicit mineralization information; (c) combination of the conceptual model of anomaly associated with mineralization with the mathematical model of the integrated mineral exploration is a key to discover new mineral deposits; (d) the process that integrated anomalies associated with mineralization are applied to modeling mineral potentials is one that gradually extracts and integrates mineralized information, and is also one that develops from spatial data, to spatial anomaly and to knowledge decision.

Key words: geoanomaly associated with mineralization; extraction and integration of geoanomalous information; connection and transformation of geoanomalous information; nonlinear approach; quantitatively integrated mineral exploration.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40772197); 国家高技术研究发展计划 863 项目(No. 2006AA06Z113); “十一·五”国家支撑计划课题(No. 2006BAB01A01-03); 地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费资助。

作者简介: 陈永清(1960-), 男, 博士, 教授, 地球探测与信息技术专业, E-mail: yqchen@cugb.edu.cn

20 世纪 80 年代初, Gorelov (1982) 对前苏联不同地区内生热液矿床就位地质条件的统计分析表明: 大多数工业矿床一个最普遍的特征是赋存这些矿床的矿田与其邻区相比具有异常的地质结构; 首次将地质异常定义为特定地质构造演化阶段, 某一地质体的特征在统计意义上偏离其总体背景。20 世纪 90 年代初, 赵鹏大和池顺都 (1991) 将地质异常定义为在物质组成、结构构造和成因序次上与周围环境具有显著差异的地质体或地质体组合。显然, 矿床是典型的地质异常体。自那以来, 伴随着计算机和空间数据分析技术的发展, 基于地质异常概念的矿产资源评价理论方法技术取得了长足的进展, 并已发展成为我国独具特色的定量综合成矿预测理论和数字找矿技术 (Zhao, 1992; 赵鹏大和孟宪国, 1993; 赵鹏大, 1995, 2002, 2007; 赵鹏大等, 1996, 2000, 2003; Chen and Zhao, 1997; Chen *et al.*, 2001; 赵鹏大和陈永清, 1998, 1999; 陈永清和刘红光, 2001; 陈永清等, 2008), 并在此基础上研制开发了金属矿产资源评价预测系统 (Hu *et al.*, 2000; 陈永清等, 2007b, 2007c, 2008)。该系统已被广泛应用于我国新一轮国土资源大调查矿产资源评价。矿产资源综合定量评价的核心是在地质异常成矿预测理论指导下, 实现综合致矿地质异常信息提取与集成, 开发提取与集成隐蔽致矿地质异常信息的非线性方法技术, 最终应用综合致矿异常信息定量圈定和评价找矿靶区。

1 综合致矿地质异常信息提取

在矿产勘查的初期阶段, 即“找矿人 (prospector)”阶段 (谢学锦, 1999), 仅凭矿化露头, 或其氧化露头, 如铁帽, 就可以发现和评价矿床, 这一阶段并不需要找矿信息提取与集成技术。在技术勘查 (technological exploration) 阶段, 比如, 应用物化探技术, 通过圈定和评价物化探异常寻找近地表和半隐伏矿床, 或难识别矿床。谢学锦 (1999) 将这种化探异常称作“微观矿化露头”。无论是宏观矿化露头还是微观矿化露头, 作为直接找矿信息都具有很好的找矿效果。截至 1972 年, 全世界生产出的矿石总量至少 90% 来自这一时期发现的矿床 (谢学锦, 1999)。但是当矿产勘查进入信息勘查 (information exploration) 阶段, 寻找的对象是难识别矿床、隐伏矿床和深部矿床, 地表二维物化遥勘查仅能不同程

度地获取微弱矿化信息, 而这些信息通常隐藏在复杂的地质背景信息中, 因此, 信息提取与集成技术才成为识别与评价矿异常的必要手段。

美国地质调查局资源评价专家 Singer (2001) 认为, 未来的资源定量评价应能够估算一个地区未发现矿产资源的数量、价值, 并能够预测矿产资源体产出的确切位置。由于大多数出露地表的矿床已经被发现, 人们将找矿的注意力逐渐转向盖层下面的隐伏矿床。因此, 深层次矿化信息的获取是成功发现隐伏矿床的关键。所谓深层次矿化信息是指传统的方法技术难以识别的矿化信息, 通常包括隐蔽矿化信息、深部矿化信息和复杂地质背景下提取的特定信息 (赵鹏大, 1995)。人们实施的区域地质、地球物理、地球化学以及遥感地质填图都是一种二维的观测, 且绝大多数观测数据只含有地质背景信息, 只有一小部分在矿化区域的观测数据既包含地质背景信息, 又包含矿化异常信息, 这一小部分能被识别的包含矿化异常信息的未知区域被定义为找矿靶区。因此, 隐伏矿床 (包括新类型矿床) 的识别不仅需要发展探测技术, 而且更需要开发信息处理技术 (信息提取与集成技术)。而目前影响矿产勘查评价效果的主要因素是资源评价线性模型的局限性而导致的找矿信息提取的不充分性、不完整性和不确定性 (赵鹏大, 1995)。因此, 发展能够充分完整地提取矿化异常信息的非线性模型对提高矿产勘查的效率, 缓解目前我国资源短缺的局面具有重要意义。

基于数据分析的信息提取能被定义为从数据集中提取有意义的地质事实, 空间数据地质异常分析是一个基于地质空间数据探索地质异常空间模式和空间异常组合的过程。通过空间数据地质异常分析描述空间地质体的地质异常特征, 深入认识并揭示隐含的各种控矿地质因素, 目的是预测隐伏矿床和难识别矿床。

无论纯科学研究还是实际应用研究, 数据分析都是必须的手段。前已述及, 矿产评价预测的不确定性往往与获取信息的不确定性和评价模型的局限性 (不适用性) 这两个关键性因素相联系。因此, 数据分析主要服务于两个目的: (1) 确定构建模型所需的参数; (2) 确认构建的模型代表了事物的现象和本质。遗憾的是, 无论是测量数据, 还是数值模拟数据都存在一种或多种问题: (1) 数据的不完整性, 例如: 样本数据数量缺乏或样本数据缺乏代表性, 不足以反映母体的特征; (2) 数据的非平稳性, 蚀变矿化地段, 组分结构复杂, 数据变化区间大; (3) 数据代表一种非

线性过程,成岩、成矿过程通常是一种非线性过程。

目前,地学领域积累了海量数据,欲从这些数据中获取所需的信息,除必须研究数据的完整程度和代表性外,更重要的是开发能够定量刻画复杂地质体各向异性特征,且反映非线性过程的数学模型。

异常信息提取的所谓“滤波技术(filtering)”可上溯到 20 世纪 30 年代,挪威统计学家兼经济学家 Wold(1938)在其博士论文中已经证明,任何平稳的时间序列都能分解为具有固定权系数的确定性成分和随机成分。20 世纪 40 年代, Wold(1949)提出了“一维滑动平均(one dimension moving average)”的概念, Griffin(1949)首次将“二维滑动平均”技术用于计算区域重力场。其后,“滑动平均技术”相继被应用于沉积岩石学、勘查地球化学研究,其中最有影响的是南非矿业工程师 Krige(1966)将此技术用于评价金矿资源。Krige 的贡献在于应用空间加权技术估计矿块的平均品位,从而克服“滑动平均”技术引起的金含量估计的系统偏差(高含量矿段的平均品位被低估,而低含量矿段的平均品位被高估)。与此同时, Matheron(1963)提出了“区域化变量”理论,为 Krige 的经验方法提供了理论基础,创立了“地质统计学”这一研究领域。目前,地质统计学(或称空间统计学)已被广泛地应用于地球科学的若干领域。

滤波技术是通过定义不同波段的滤波器获取目标信息。比如,“光滑”滤波滤掉高频信息保留低频信息,具有这种功能的滤波器称之为“低频”滤波器。若从原始数据中减去光滑处理后的数据,得到的剩余数据则为高频信息,产生高频信息的滤波器称之为高频滤波器。还有一类滤波器,专门提取特定波段的信息,称为带通滤波器。实际操作是在所谓的“频率域”中,通过变化滑动窗口的大小和滑动点的权系数达到增强或消除不同波段的信息。上述滤波器的缺陷是窗口的大小和形状确定缺乏客观准则,只能通过反复试验来建立,具有人为的经验性质(Sinclair, 1998a, 1998b)。地质异常体的物质组成和结构皆是高度变化的,既不满足多元统计分析中要求的正态分布(或对数正态分布),亦不满足地质统计学中的各种假设(平稳假设,内蕴假设等)。所以仅能用于刻画其变化不超过 1 个数量级(至多 2 个数量级)的地质现象的线性统计模型(包括地质统计学模型),不适于描述组分和结构具有大尺度变化的蚀变矿化现象,而谱分析(spectral analysis)和多重分维模型(multifractal model)开辟了描述非线性变化的新途径(Lovejoy, 2005)。

谱分析起源于对时间序列随机过程特征的研究。自 20 世纪 60 年代,伴随着计算机的发展,谱分析被广泛地应用于地球科学领域,主要通过数据(图像)滤波、增强提取地质、地球物理和地球化学异常。20 世纪 70 年代中期, Bath(1974)从应用的角度系统论述了谱分析原理(包括滤波原理)及其在地球结构分析、地震学、气象学、海洋学以及重力学与地磁学中的应用; Mugglestone(1998)应用二维谱分析从航空遥感图像上提取地质线性构造; Maus(1996)根据位场标度功率谱特征估计地质体的深度。历史上,傅氏谱分析(Fourier spectral analysis)已经为线性(或近似线性)和平稳(或弱平稳)分布的数据的整体能量—频率分布的查证提供了普适的方法,使得“谱”这个术语几乎变成了数据傅氏变换的同义词。尽管如此,傅氏谱分析和其他一些线性模型一样,亦存在诸多局限性,例如:描述的过程或系统必须是线性的,数据必须是严格周期的和平稳的;否则,其分析结果几乎不具有任何物理意义。傅氏谱分析在处理非线性过程和现象时存在下列缺陷:(1)傅氏谱分析定义了整体一致性谐和组分,因此,需要许多附加谐和分量去模拟时间(空间)域中非平稳数据的性质和特征,这些数据缺乏傅氏谱分析中定义的整体一致性谐和特征,这些数据的存在导致能量覆盖更宽的频率区间。受能量守恒条件的制约,这些伪谐和数据 and 宽阔的频率域不能忠实地表达频率空间真实的能量密度。(2)由于傅氏谱分析应用三角函数线性叠加,因此,需要附加谐和分量模拟变形波剖面,这种变形是非线性效应直接引起的后果。无论在什么条件下,只要数据形式偏离纯正弦和余弦函数,傅氏谱都将含有谐和分量。如前所述,无论是非平稳还是非线性过程都将触发导致能量扩散的伪谐和分量,其结果是歪曲非平稳或非线性数据的能量—频率分布模式(Huang, 1998)。

针对上述状况, Huang(1998)提出了一种处理非线性和非平稳数据的新方法,即“经验模分解方法(empirical mode decomposition, 简称 EMD)”。该方法的核心功能是能够将任何复杂的数据集分解到有限的,且常常是小数量的“本征模函数(intrinsic mode function, 简称 IMF)”,该函数允许 Hilbert 变换充分发挥其固有的优势。由于该分解方法是基于数据的局域特征时间标度,所以,能够应用于非线性和非平稳过程。借助 Hilbert 变换,本征模函数产生一种能够清晰地标度数据镶嵌结构,且能被视为时间函数的瞬时频率。该方法的创新之处是引进了基

于信号(信息)局域性质的本征模函数,该函数赋予瞬时频率丰富的涵义.对于复杂数据集来说,瞬时频率的引进能够消除对错误表达非线性和非平稳信号的伪谐和分量的需求,方法构建的原理是基于特征震动现象的时间标度,而通过 Hilbert 变换从本征模函数中获取的局域能量和瞬时频率能够给出数据的 Hilbert 谱,即完整能量—频率—时间分布.对非平稳和非线性数据分析来说, Hilbert 谱是一种理想的工具. Nunes(2003, 2005)在一维 EMD 的基础上,开发了二维 EMD 方法,并用于地震和医学图像分析,同样取得了预期的效果.陈建国和陈永清(另文讨论)将开发的二维 EMD 技术应用于云南个旧锡多金属矿田 Sn、Cu、Pb、Zn 和 Ag 等元素异常提取,其结果揭示了致矿异常空间分布的岩控、裂控特征.

一些学者(Cheng, 1995, 1999, 2004a, 2004b, 2008; 成秋明, 2003, 2006, 2007; 李庆谋和成秋明, 2004; 成秋明等, 2007)研究表明:地质、地球物理、地球化学、遥感等数据在特征空间域具有局部不均一性和各向异性,并显示奇异性特征,通常呈现多维分形分布.利用多维分形奇异性分析,可以挖掘复杂地质、矿化过程中的致矿信息,进而研究这些信息与矿床空间分布关系,为成矿预测评价提供科学依据. Cheng(1999)开发的多重分维谱分析(S-A)滤波技术,是将空间数据(重磁或区域地球化学数据)通过傅氏变换转换到频率域,然后通过多重分维谱分析确定具有特征谱能量密度之间的临界值,最终通过临界值确定的谱能量密度区构建低通滤波器、高通滤波器和带通滤波器.该技术对复杂地质背景下,致矿地球化学信息的提取具有独特的优势,并在加拿大和中国一些地区的致矿信息提取中取得预期应用效果(陈永清等, 2006; Chen *et al.*, 2007a, Huang *et al.*, 2008).

不同地质过程(成岩过程和成矿过程)引起的地质背景和地质异常(组分异常和结构异常),除空间特征外,其频率特征亦能够用于背景和异常的定量描述与识别(Mazzucchelli, 1989).从谱分析的观点看,地球科学研究中的各种分布模式(地质体成分分布、结构分布)能够在空间域和频率域中定量描述.空间域中的地质体分布模式在频率域中可视为不同频率的叠加信号(信息);在频率域中,这种叠加信号能够分解到具有特定频率分布区间的分量.傅氏变换(Fourier transformation)能被用于将空间域中的分布模式转换到频率域中的信号.通过傅氏逆变换(inverse Fourier transformation)能够将在频率域

中具有不同频率分布区间的分解信号,还原为空间中相对应的单一分布模式.区域成岩过程引起的背景模式通常具有低频特征,局部成矿过程引起的地质异常模式通常具有高频特征.通过设计不同的滤波器(低通滤波、高通滤波、带通滤波)能够增强所需的信号(信息),压抑噪音和不需要的信息,从而为提取致矿异常信息提供了有力工具.

多重分维谱分析(S-A)滤波方法的特点是将空间自相似性概念引入对场的滤波和数据分析,不仅考虑了频率的相对大小,而且还顾及频率的空间分布和能谱的空间自相似性特征;其另一特点是采用不规则或分形滤波器定量刻画能谱的空间自相似性,被分解的场反映了地质体的各向异性和奇异性特征,用奇异性指数作为找矿靶区定量圈定和评价的重要参数.地质过程的奇异性分析在定量刻画复杂地质体各向异性、致矿信息提取和资源定量评价领域具有广阔的应用前景.

2 致矿异常信息关联与转换

矿产资源体及其周围的地质勘查信息构成认识其形成和分布的地质因素和资源评价的基础(Sinclair, 1998a, 1998b).在地质(矿化)、地球化学、地球物理以及遥感找矿信息中,地质矿化信息是最直接的宏观找矿信息,致矿信息的关联与转换,就是以地质异常体为单元,试图建立地球化学、地球物理以及遥感找矿信息与地质矿化信息的对应关系,实质上是建立直接找矿信息与间接找矿信息的对应关系.

综合致矿地质异常信息关联与转换包括直接找矿信息之间和间接找矿信息之间的关联和转换,更重要的是直接找矿信息和间接找矿信息之间的关联与转换.这是因为模型区与预测区工作程度的不平衡性导致了二者之间找矿信息不平衡性,预测区往往缺乏直接找矿信息.直接找矿信息是联系矿产资源体与间接找矿信息的桥梁.

张本仁(1989)提出了应用地球化学信息解决地质和找矿问题的两个转换:(1)首先将成矿的地质环境与控矿地质因素和找矿标志,转化为地球化学环境与控矿地球化学因素和地球化学找矿标志;(2)然后将成矿有利的地球化学环境与控矿地球化学因素和地球化学找矿标志转化为地球化学异常解释评价的标志与准则,建立地球化学预测的指标与模型.

地球化学异常和重砂异常信息的关联不仅为成

矿预测提供直接的找矿信息,而且根据异常与构造和地质体的空间关系可以鉴定控矿地质异常(构造异常、岩体异常和地层异常)的空间分布规律(Chen *et al.*, 2000).地球化学异常与重砂异常信息的关联是划分成矿远景区和评价矿产资源潜力的重要依据(王世称等, 2000).

对于应用地球物理信息实施矿产勘查, Mc-Gaughey and Vallee(1998)认为:建立地质地球物理找矿模型,首先实现将矿床的地质概念模型转换为三维物理性质的模型,比如,矽卡岩型磁铁矿体可视为高磁性体,块状硫化物矿体可视为低电阻率体,但这种物理模型的建立必须以符合地质概念模型为先验前提.深入认识矿床(矿体)的物理性质(磁场强度、密度、电导率和地震波速等)和地质特征(矿体与容矿岩石的物质组成、组构特征、蚀变矿物及其分带特征等)之间的对应关系,尤其是容矿围岩物理性质与矿体物理性质之间的差异,实现地质异常体(矿产资源体)到地球物理异常体的转换;然后,实现地球物理异常到地球物理异常体,再到地质异常体(矿产资源体)的转换.

在区域成矿预测中,重磁信息与遥感信息主要解决控矿地质异常(因素)的空间分布规律及其对矿床空间分布的关系,最终应用于矿产资源评价,比如庐断裂(Chen *et al.*, 2001)和哀牢山—红河断裂等都具有典型的线性重磁异常特征,并控制一系列贵金属和有色金属矿产的分布(Hinze, 1990; Pan, 1996; Kay and Dimitrakopoulos, 2000; Chen *et al.*, 2001; 陈永清等, 2007b, 2007c).

3 致矿异常信息集成

由于地质成矿作用和控矿地质因素的复杂性,导致了元素成矿的多样性.而地物化遥信息仅能从不同的侧面反映地质体或地质异常体(包括矿体)的特征,任何单一信息都具有多解性(王世称等, 2000),因此,基于地质异常概念模型的多元矿化信息的集成,是减少单一信息多解性和找矿不确定性的根本途径.任何矿床都具有个性(特殊性)和共性,前者是识别不同类型矿床的基础,后者是建立统计性找矿模型的基础.

3.1 概念模型

地质学和地球科学属于广义上的自然科学,因此对自然现象和自然过程的模拟,包括其时空分布

规律的模拟,是描述、分析、解释和预测目标地质体(包括矿体)的一种重要途径(Hanmes, 2006).许多地质现象与过程遵循复杂的自然规律和法则,并经历多次随机事件的影响和时空的变迁.基于致矿地质异常概念由地质、地球化学、地球物理和遥感地质等多学科信息构成的综合致矿地质异常模型是减少矿床形成过程和分布规律认识的不确定性,并指导找矿的强有力工具.模型是对自然现象和规律的抽象概括.它虽然不可能像照片那样反映现实世界,但它为从现象(数据)中提取信息,通过信息认识地质异常(成矿)事件的发生发展和演化(时间和空间上)提供新的方法技术手段.基于地质概念的数学模型能够定量分析地质单元及其结构,以方程和参数的形式为深入认识地球科学现象和过程提供新的视野.

早期的矿床地质概念模型趋于简单和理想化,随着地质勘查工作的深入和新的地质信息的获取,为建立矿床的三维模型提供了可能.地质信息,尤其是勘探获取的深部地质矿化信息是构建三维矿床模型的基础,而地球物理和地球化学信息对三维模型的构建也具有重要作用,对矿床产出的区域和局部环境的认识,其中包括详细的构造作用、变质作用、岩浆作用和沉积作用的历史,为构建区域成矿模式和找矿模型提供基础.表达矿床如何形成的模型称为成因模型,描述矿化特征和找矿标志的模型称为找矿模型(Bonham-Carter, 1994),矿床的成因模型和找矿模型是致矿信息集成的地质基础.因为它们集中体现了成因相同(或相近)一类矿床形成和分布的控制因素和矿化标志.在资源评价中,这种模型可被视为特殊矿床类型地质特征空间分布的理想表达,并能够用于指导制定矿产勘查战略.

在区域成矿预测中,以地质蚀变矿化信息为基础的成因模型和找矿模型不能满足预测矿产资源的要求.这是因为上述模型仅含有直接找矿信息,缺乏地球化学、地球物理和遥感地质等间接找矿信息,而预测区,由于工作程度相对较低,尤其是隐伏区成矿预测,缺乏直接找矿信息,但具有不同尺度的间接找矿信息.矿产勘查的经济法则导致的模型区与预测区找矿信息客观上的不平衡性是成矿预测始终无法逾越的障碍,解决的惟一方法是建立基于综合致矿地质异常概念的集直接找矿信息和间接找矿信息于一体的综合找矿模型,并通过直接找矿信息与间接找矿信息之间的信息关联与转换,最终建立与预测区信息对等的预测模型,实现综合成矿预测.

地球物理信息和地球化学信息能够对矿床模型提供某些约束,以减少其不确定性,但这些信息作为对矿床物理和化学性质的补充描述,必须与已知典型矿床的成矿环境、成矿过程和矿床本身的组构组分尽可能具有一致性。这样建立的致矿地质异常综合找矿模型能够更精确地刻画矿床形成和分布的复杂性和变化规律,提高找矿的效率。

空间数据分析包括一系列有助于描述、理解和预测地质体空间分布模式和地质体空间组合规律以及相互间内在联系的活动。在 GIS 中模拟是发现、描述和预测空间现象等分析过程的重要组成部分。模式虽然不能告诉地质异常事件发生、发展、演化的全部过程,但它为刻画这种过程、以及地质异常事件与地质异常体之间的关系提供一个理想化的框架,且有助于进一步认识事件及其产物之间的内在联系,为预测资源体奠定了理论基础。

3.2 数学模型

地质概念模型是建立致矿信息集成定量模型的基础,它能被用于选择和组织控矿地质变量(信息)。综合致矿地质异常概念模型,像其他的矿床模型一样,虽然尽可能包含了控制矿床形成和分布的各种地质和物理化学因素,但该模型不能用纯数学的语言表达,这就需要在概念模型的基础上建立资源定量评价模型。在基于 GIS 的矿产资源潜力评价过程中,矿床概念模型在预测变量的选择和赋予变量权值两个方面扮演了重要角色。变量权值大小反映预测变量(成矿有利度)与自变量(诸多控矿变量)之间的相关关系,权系数越大,表明变量对预测变量的贡献越大。基于多元地学数据信息建立的资源评价模型称之为“数据驱动(data-driven)”模型(Bonham-Carter, 1994; Porwal *et al.*, 1999)。常用的信息集成数学模型有:特征分析(Botbol, 1971; McCammon, 1983; Pan and Harris, 2000; Chen *et al.*, 2001)、逻辑回归(Agterberg, 1989; Sahoo and Pandalai, 1999)、证据权法(Bonham-Carter *et al.*, 1989; Pan, 1996; Raines, 1999; Pan and Harris, 2000; Scott and Dimitrakopoulos, 2001; Paganelli *et al.*, 2002; Carranza, 2004; 陈永清等, 2007b, 2007c)、神经网络分析(Specht, 1990; Singer and Kouda, 1997; Pan and Harris, 2000; Koike *et al.*, 2002; Brown *et al.*, 2003; Porwal *et al.*, 2003)和成矿有利度函数分析(Pan and Harris, 1992, 2000; Pan, 1993a, 1993b, 1993c; Araujo and Macedo, 2002)等。此外,还有一类通过专家打分给变量赋值的模

型,通常称之为“知识驱动(knowledge-driven)”模型(Bonham-Carter, 1994; Porwal *et al.*, 1999)。

关于上述数学模型的应用条件和优缺点,一些学者曾展开过激烈而系统的讨论(Harris and Pan, 1999; Singer and Kouda, 1999; Harris *et al.*, 2003; Agterberg and Bonham-Carter, 2005)。Harris *et al.* (2003)应用证据权、逻辑回归、概率神经网络和判别分析对卡林型金矿、与侵入岩有关的 Alamos 铜矿床和与侵入岩有关的内华达铜矿床分别从矿床尺度(163.83 km²)、矿田尺度(1939 km² 含有 96 个铜矿床)和区域尺度(103 908 km² 含有 207 个铜矿床)实施矿产资源成矿有利度评价后认为:(1)逻辑回归、概率神经网络和判别分析优越于证据权法,其中概率神经网络是最理想的估算成矿有利度的工具;(2)证据权法的缺陷是变量离散化,导致找矿信息的损失。Agterberg and Bonham-Carter (2005)不同意上述认识,认为出现上述现象的主要原因是:(1)从研究区随机选取大量的小网格单元作为模型单元是不妥的,因为这些单元部分来自矿化区域,部分来自非矿化区域;加上矿床趋于成群分布的特征,因此,根据这些所谓模型单元建立的矿床模型很难区分预测区的成矿有利区域和不利区域。(2)证据图层之间缺乏条件独立性。(3)连续变量信息的离散化能够抑制资源潜力评价中由于预测变量区域上的高度变化性所带来的不利影响。

事实上,证据权法是通过测量已知矿床与其综合地质异常信息的组合关系估计控矿因素(即找矿证据或权)的相对重要性,并根据其重要性赋予各控矿因素适当的权值。这些计算是基于测量已知矿床与各控矿因素(证据图层)之间的空间组合关系而实现的,目的是在给定找矿证据存在和缺乏的条件下估计矿床产出的后验概率,这种后验概率能够反映单元的成矿有利度。该方法适用于在 GIS 环境下,实现致矿信息的横向(同类控矿信息或同一图层,例如地球物理信息中的重磁信息)和垂向(不同类控矿信息或不同图层,例如重磁异常信息和地球化学异常信息)的有机关联和集成,最终应用高度浓缩的综合致矿信息圈定和评价找矿靶区;其优点还在于权的解释相对直观,并能够独立确定,易于产生重现性。在这种方法中,矿床的成因和找矿模型是资源预测评价的地质基础,通常被用于指导提取致矿信息,选择优化矿产资源预测变量(陈永清等, 2007b, 2007c)。

为提高数学模型描述矿床概念模型的适应程度,减少成矿预测的不确定性,许多学者(Cheng and

Agterberg, 1999; Porwal *et al.*, 2003, 2006; Quadros *et al.*, 2006; 成秋明等, 2007)开发了以模糊证据权为代表的模糊数学方法集成致矿异常信息. 模糊证据权是基于含矿单元模糊证据, 通过模糊隶属度函数定义的模糊概率构建计算后验概率的数学模型, 预测变量根据反映矿化的可能程度可被赋予 0~1 之间的任何值, 而不是证据权中对预测变量简单的 0(证据不存在)和 1(证据存在)赋值. 该数学模型的优点更客观地描述矿床矿化特征和矿化规律, 并为能够应用校正的模糊隶属度函数代替丢失数据计算后验概率提供了新的途径, 从而在某种程度上缓解模型区与预测区由于勘查程度的差异导致的信息不平衡的矛盾(Cheng and Agterberg, 1999).

近年来, 成秋明(2003, 2007)探索了应用非线性理论方法集成致矿信息和矿产资源定量评价的新途径. 在矿集区内, 矿床谱系(包括具有时空内在联系的矿床、矿点和矿化点)以及它们产生的不同等级的地球化学异常谱系服从分形分布, 即矿集区成矿元素的金属量与其面积具有如下的幂律分布模型 $\langle \mu [A(\epsilon)] \rangle \propto \langle A^{\alpha/2} \rangle$, 这里 $\mu [A(\epsilon)]$ 为成矿元素金属量, A 为面积, α 被定义为奇异性指数(成秋明, 2003, 2007). 研究表明: $\alpha < 2$ 的区域是成矿元素富集的区域, $\alpha > 2$ 是贫化的区域, $\alpha = 2$ 是未发生热液蚀变矿化, 且成矿元素呈正态分布的背景区域(成秋明, 2003, 2007). 其后, Cheng(2008)建立 α (奇异性指数)与 W^+ (找矿信息存在权重)和 W^- (找矿信息不存在权重)的定量表达模型, 从而为应用非线性技术提取、集成多元致矿信息, 并定量评价资源潜力奠定了理论和方法基础.

集成各种空间分析技术的 GIS 专用软件能够将来自多元地学信息的致矿异常信息集成, 综合分析、表达已知矿化带与地质、地球物理与地球化学异常的关系, 并有效预测未发现矿床(Bonham-Carter, 1994). 目前国内、国际应用较广的是基于 MapGIS 平台开发的 MORPAS(Hu *et al.*, 2000, 陈永清等, 2007b, 2007c)和基于 ArcGIS 平台开发的 GeoDAS(Cheng *et al.*, 2004a, 2004b)信息提取集成与资源评价系统.

4 结论

综合地质异常概念模型既包含了控制矿床形成与分布的致矿异常信息, 又包含了反映矿床空间分

布与物质组成的矿致异常信息. 应用该模型首先从致矿异常信息提取与集成入手, 循序渐进, 逐步提取与集成矿致异常, 最终达到圈定和评价矿产资源体的目的.

致矿信息的提取与集成是通过空间分析实现的. 空间数据分析的目的是提取与集成蕴涵在海量数据中的空间地质体本质特征、内在联系和组合规律. 空间信息提取面向具体领域, 具有特定的前提约束条件和相对性. 提取与集成空间信息是根据空间数据的特点, 利用信息提取的数学地质方法, 按照一定的度量值和阈值从海量地学空间数据中提取与集成信息; 其中非线性技术在隐蔽致矿信息提取与集成上扮演极其重要的角色.

应用综合致矿异常信息模拟矿产资源潜力的过程实质上是一个信息逐渐提取与集成的过程. 这涉及来自不同数据源的空间信息与已知矿床有关的控矿地质异常和矿异常本身证据(因素)的分析与计算. 空间信息是客观反映空间实体本质特征和空间分布规律的空间数据, 可用来减少预测事物发生、发展和结果的不确定性. 空间数据是空间信息的载体, 空间信息是空间知识的载体, 空间知识是一个或多个信息关联在一起的有应用价值的信息结构. 从空间实体→空间数据→空间信息→空间知识的发展反映了人类认识自然和利用自然的巨大飞跃(李德仁等, 2006). 事实上, 资源评价的过程是一个从数据→信息→知识决策的过程.

References

- Agterberg, F. P., 1989. LOGDIA-FORT RAN 77 programs for logistic regression with diagnostics. *Computer & Geosciences*, 15(4): 599-614.
- Agterberg, F. P., Bonham-Carter, G. F., 2005. Measuring performance of mineral-potential maps. *Natural Resources Research*, 14(1): 1-18.
- Araujo, C. C., Macedo, A. B., 2002. Multicriteria geological data analysis for mineral favorability mapping: Application to a metal sulphide mineralized area, Ribeira valley metallogenic province, Brazil. *Natural Resources Research*, 11(1): 29-44.
- Bath, M., 1974. Special analysis in geophysics; Developments in solid earth geophysics 7. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford York.
- Bonham-Carter, G. F., 1994. Geographic information systems for geoscientists: Modelling with the GIS. Pergamon, Ontario.

- Bonham-Carter, G. F., Agterberg, F. P., Wright, D. F., 1989. Weights of evidence modeling: A new approach to mapping mineral potential. *Statistical Applications in Earth Sciences*, 89(9): 171–183.
- Botbol, J. M., 1971. An application of characteristic analysis to mineral exploration. In: Proceedings of 9th International Symposium on Techniques for Decision-Making in the Mineral Industry (Montreal, Canada). Special volume, 12: 92–99.
- Brown, W. M., Gedeon, T. D., Groves, D. L., 2003. Use of noise to augment training data: A neural network method of mineral-potential mapping in regions of limited known deposit examples. *Natural Resources Research*, 12(2): 141–152.
- Carranza E. J. M., 2004. Weights of evidence modeling of mineral potential: A case study using small number of prospects, Abra, Philippines. *Natural Resources Research*, 13(3): 173–188.
- Chen, Y. Q., Chen, J. G., Wang, X. Q., et al., 2008. Quantitative integrated assessment techniques for mineral resources based on GIS. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Chen, Y. Q., Huang, J. N., Zhang, S. Y., 2007a. Application of multi-fractal filtering in geochemistry data decomposing—A case study from the south region of “Sanjiang ore-forming belt”, south-western China. In: Bernd, M., ed., Proceedings of Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, Exploration 07, Volume two, Toronto, 985–988.
- Chen, Y. Q., Wang, X. Q., Chen, J. G., et al., 2007b. GIS based integrated quantitative assessments of mineral resources. *Geological Bulletin of China*, 26(2): 141–149 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. Q., Xia, Q. L., Wang, X. Q., et al., 2007c. Application of the weight-of-evidence method in mineral resources in the southern segment of the “Sanjiang metallogenic zone”, southwestern China. *Geology in China*, 34(1): 132–141 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. Q., Liu, H. G., 2001. A preliminary view on digital pattern for mineral exploration based ge anomaly. *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., Zhang, S. Y., Xia, Q. L., et al., 2006. Application of multi-fractal filtering to extraction of geochemical anomalies from multi-geochemical backgrounds: A case study of the southern section of “Sanjiang ore-forming zone”, southwestern China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(6): 861–866 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. Q., Zhao, P. D., 1997. The delineated methods of geological anomaly units and its application in the statistical predication of gold deposits of large scale. In: Zhao, P. D., et al., eds., Proc. 30th Int’l Geo. Congr. (Volume 25), Mathematical Geology and Geoinformatics VSP, 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., 1995. The perimeter-area fractal model and its application in geology. *Mathematical Geology*, 27(7): 64–77.
- Cheng, Q. M., 1999. Multifractality and spatial statistics. *Computer and Geosciences*, 25(10): 8–25.
- Cheng, Q. M., 2003. Non-linear mineralization model and information processing methods for prediction of unconventional mineral resources. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(4): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., 2004a. A new model for quantifying anisotropic scale invariance and for decomposition of mixing patterns. *Mathematical Geology*, 36(3): 345–360.
- Cheng, Q. M., 2004b. GeoDAS III user’ guide & exercise manual. York University, Canada.
- 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, Q. M., 2007. Singular mineralization process and mineral resources quantitative prediction: New theories and methods. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 42–53 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., 2008. Non-linear theory and power-law models for information integration and mineral resources quantitative assessments. *Mathematical Geosciences*, 40(5): 503–532.
- Cheng, Q. M., Agterberg, F. P., 1999. Fuzzy weights of evidence method and its application in mineral potential mapping. *Natural Resources Research*, 8(1): 27–35.
- Cheng, Q. M., Chen, Z. J., Khaled, A., 2007. Application of

- fuzzy weights of evidence method in mineral resource assessment for gold in Zhenyuan district, Yunnan Province, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(2): 175—184 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Q. M., Xu, Y. G., Grunsky, E., 2000. Integrated spatial and spectrum analysis for geochemical anomaly separation. *Nature Resources Research*, 9(1): 43—56.
- Chung, C. F., Agterberg, F. P., 1980. Regression models for estimating mineral resources from geological map data. *Mathematical Geology*, 12(5): 473—488.
- Gorelov, D. A., 1982. Quantitative characteristics of geologic anomalies in assessing ore capacity. *Internal. Geology Rew.*, 4: 457—465.
- Griffin, W. R., 1949. Residual gravity in theory and practice. *Geophysics* 14(1): 39—56.
- Hanmes, T., 2006. Theory and practice in mathematical geology—Introduction and discussion. *Mathematical Geology*, 38(6): 659—665.
- Harris D. P., Pan, G., 1999. Mineral favorability mapping: A comparison of artificial neural networks logistic regression, and discriminant analysis. *Natural Resources Research*, 8: 93—109.
- Harris D. P., Zurcher, L., Stanley, M., et al., 2003. A comparison analysis of favorability mapping by the weights of evidence and probabilistic neural networks discriminant analysis, and logistic regression. *Natural Resources Research*, 12(4): 241—255.
- Hinze, W. J., 1990. Applied effect of regional gravitational and magnetic data in geology. Translated by Chen, W. X., et al. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Hu, G. D., Chen, J. G., Chen, S. Y., 2000. Metallic mineral resources assessment and analysis system design. *Journal of China University of Geosciences*, 11(3): 308—311.
- Huang J. N., Liu H. G., Zhao P. D., 2008. Application of multi-fractal filtering to extract Cu, Ni, Au anomalies of the East Tianshan ore-forming belt, north-western China. The 33rd International Geological Congress Oslo (CD Abstract).
- Huang N. E., 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc. Royal Society Lond.*, A 454: 903—995.
- Kay, M., Dimitrakopoulos, R., 2000. Integrated interpolation methods for geophysical data: Application to mineral exploration. *Natural Resources Research*, 9(1): 53—64.
- Koike, K., Matsuda, S., Suzuki, T., et al., 2002. Neural network-based estimation of principal metal contents in the Hokuroku district, northern Japan, for exploration Kuroko-type deposits. *Natural Resources Research*, 11(2): 135—156.
- Krige, D. G., 1966. Two-dimensional weighted moving average trend surfaces for ore evaluation. *Jour. South African Inst. Mining and Metallurgy*, 66: 13—38.
- Li D. R., Wang S. L., Li, D. Y., 2006. Spatial data mining theories and applications. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Li Q. M., Cheng, Q. M., 2004. Fractal singular-value (eigenvalue) decomposition method for geophysical and geochemical anomaly reconstruction. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(1): 109—118 (in Chinese with English abstract).
- Lovejoy, S., 2005. Multifractal simulation of the Earth's surface and interior: Anisotropic singularities and morphology. In: Cheng, Q. M., et al., eds., Proceedings of IAMG 2005: GIS and Spatial Analysis. China University of Geosciences Press Wuhan, 37—54.
- Matheron, G., 1963. Principles of geostatistics. *Econ. Geology*, 58: 1246—1266.
- Maus, S., 1996. Depth estimation from the scaling power spectrum of potential fields? *Geophys. Jour. Intern.*, 124(1): 113—120.
- Mazzucchelli, C., 1989. Spatial filtering of exploration geochemical data using EDA and robust statistics. *Jour. Geochem. Exploration*, 34(3): 221—243.
- McCammon, R. B., Botbol, J. M., Larsen, R. S., et al., 1983. Characteristic analysis-1981: Final program and a possible discovery. *Math. Geology*, 15(1): 59—84.
- McGaughey, W. J., Vallee, M. A., 1998. Integrating geology and borehole geophysics in a common earth model for improved three-dimensional delineation of mineral deposits. *Explor. Mining Geol.*, 7(1—2): 51—62.
- Mugglestone, M. A., 1998. Detection of geological lineations on aerial photographs using two-dimensional spectral analysis. *Computer & Geosciences*, 24(8): 771—784.
- Nunes, J. C., 2003. Image analysis by bidimensional empirical mode decomposition. *Image and Vision Computing.*, 21: 1019—1026.
- Nunes, J. C., 2005. Texture analysis based on local analysis of the bidimensional empirical mode decomposition. *Machine Vision and Applications*, 16: 177—188.
- Paganelli, F., Richards, J. P., Grunsky, E. C., 2002. Integration of structural, gravity, and magnetic data using the weights of evidence method as a tool for kimberlite ex-

- ploration in the Buffalo Head Hills, northern Central Alberta, Canada. *Natural Resources Research*, 11(3): 219–236.
- Pan, G. C., 1993a. Regionalized favorability theory for information synthesis in mineral exploration. *Math. Geol.*, 25: 603–631.
- Pan, G. C., 1993b. Indicator favorability theory for mineral potential mapping. *Nonrenewable Resources*, 2(4): 292–311.
- Pan, G. C., 1993c. Canonical favorability model for data integration and mineral potential mapping. *Comp. Geosc.*, 19: 1077–1100.
- Pan, G. C., 1996. Extended weights of evidence modeling for the pseudo-estimation of metal grades. *Nonrenewable Resources*, 5(1): 53–76.
- Pan, G. C., Harris D. P., 1992. Estimating a favorability function for the integration of geodata and selection of mineral exploration targets. *Mathematical Geology*, 24: 177–202.
- Pan, G. C., Harris D. P., 2000. Information synthesis for mineral exploration. Oxford University Press.
- Porwal A., Carranza E. J. M., Hale M., 1999. Knowledge-driven and data-driven fuzzy models for predictive mineral potential mapping. *Natural Resources Research*, 12(1): 1–26.
- Porwal A., Carranza E. J. M., Hale M., 2003. Artificial neural networks for mineral-potential mapping: A case study from Aravalli Province, western India. *Natural Resources Research*, 12(3): 155–171.
- 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.
- Quadros T. F. P., Koppe J. C., Strieder, A. J., et al., 2006. Mineral-potential mapping: A comparison of weight-of-evidence and fuzzy methods. *Natural Resources Research*, 15(1): 49–65.
- Raines G. L., 1999. Evaluation of weights of evidence to predict epithermal-gold deposits in the Great Basin of the western United States. *Natural Resources Research*, 8(4): 257–276.
- Sahoo, N. R., Pandalai., 1999. Integration of sparse geological information in gold targeting using logistic regression analysis in the Hutti-Maski schist belt, Raichur, Karnataka, India—A case study. *Natural Resources Research*, 8(3): 233–250.
- Scott, M., Dimitrakopoulos, R., 2001. Quantitative analysis of mineral resources for strategic planning: Implication for Australian geological surveys. *Natural Resources Research*, 10(3): 159–178.
- Sinclair, A. J., 1998a. Geological controls in resource/ reserve estimation. *Explor. Mining Geol.*, 7(1–2): 29–44.
- Sinclair, A. J., 1998b. Exploratory data analysis: A precursor to resource/ reserve estimation. *Explor. Mining Geol.*, 7(1–2): 77–90.
- Singer, D. A., 2001. Some suggested future directions of quantitative resource assessments. *Journal of China University of Geosciences*, 12(1): 40–44.
- Singer, D. S., Kouda, R., 1997. Use of a neural network to integrate geoscience information in the classification of mineral deposits and occurrences. In: Gubins, A. G., ed., Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference Mineral Exploration, 127–134.
- Singer, D. S., Kouda, R. A., 1999. Comparison of the weights of evidence method and probabilistic neural networks. *Natural Resources Research*, 8(4): 287–298.
- Specht, D., 1990. Probabilistic neural networks. *Neural Networks*, 3: 109–118.
- Wang, S. C., Chen, Y. L., Xia, L. X., 2000. Theory and method of integrated prognosis of mineral resources. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Wold, H. A., 1949. A large sample test of moving average. *Jour. Royal Stat. Society*, 11(1): 297–305.
- Xie, X. J., 1999. On the history of mineral exploration-empirical exploration, scientific exploration, and information exploration. In: Xie, X. J., Shao, Y., Wang X. Q., eds., Geochemistry of mineral exploration toward 21th century. Geological Publishing House, Beijing, 12–22 (in Chinese).
- Zhang B. R., 1989. The theoretical schema and methods for the geochemical study of metallogenic province. In: Zhang, B. R., ed., Contributions to the exploration geophysics and geochemistry. Geological Publishing House, Beijing, 1–20 (in Chinese).
- Zhao, P. D., 1992. Theories, principle, and methods for statistical prediction of mineral deposits. *Mathematical Geology*, 24(6): 589–595.
- 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., 2002. “Three component” quantitative resource prediction and assessments: Theory and practice of digital mineral prospecting. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 139–148 (in Chinese).

Chinese with English abstract).

- Zhao, P. D., 2007. Quantitative mineral prediction and deep mineral exploration. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P. D., Chen, J. P., Zhang, S. T., 2003. The new development of “three components” quantitative mineral prediction. *Earth Science Frontiers*, 10(2): 455—463 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P. D., Chen, Y. Q., 1998. A basic way of anomaly based 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., 1999. Geological anomaly unit based delineation and assessment of preferable gold ore-finding area. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(5): 443—448 (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 geoanomaly 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).
- Zhao, P. D., Chi, S. D., Chen, Y. Q., 1996. A thorough investigation of geo-anomaly: A basis of metallogenic prognosis. *Geological Journal of China Universities*, 2(4): 360—373 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P. D., Meng, X. G., 1993. Geoanomaly and mineral prediction. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 18(1): 39—47 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈永清, 陈建国, 汪新庆, 等. 2008. 基于 GIS 矿产资源综合定量评价技术. 北京: 地质出版社.
- 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.
- 陈永清, 汪新庆, 陈建国, 等. 2007b. 基于 GIS 的矿产资源综合定量评价. 地质通报, 26(2): 141—149.
- 陈永清, 夏庆霖, 黄静宁, 等. 2007c. “证据权法”在西南“三江”南段矿产资源评价中的应用. 中国地质, 34(1): 132—141.
- 陈永清, 张生元, 夏庆霖, 等. 2006. 应用多重分形滤波技术提取致矿地球化学异常——以西南“三江”南段 Cu、Zn 致矿异常提取为例. 地球科学——中国地质大学学报, 31(6): 861—866.

- 成秋明. 2003. 矿床模型与非常规矿产资源评价. 地球科学——中国地质大学学报, 28(4): 1—10.
- 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.
- 成秋明. 2007. 成矿过程奇异性与矿产预测量化的新理论与新方法. 地质前缘, 14(5): 42—53.
- 成秋明, 陈志军, Khaled, A., 2007. 模糊证据权法在镇沅(老王寨)地区金矿资源评价中的应用. 地球科学——中国地质大学学报, 32(2): 175—184.
- Hinze, W. J., 1990. 区域重磁异常图的应用效果. 陈维雄等译. 北京: 地质出版社.
- 李德仁, 王树良, 李德毅. 2006. 空间数据挖掘理论与应用. 北京: 科学出版社.
- 李庆谋, 成秋明. 2004. 分形奇异(特征)值分解方法与地球物理和地球化学异常重建. 地球科学——中国地质大学学报, 29(1): 109—118.
- 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.
- 谢学锦. 1999. 论矿产勘查史——经验找矿、科学勘查与信息勘查. 见: 谢学锦, 邵跃, 王学求主编. 走向 21 世纪矿产勘查地球化学. 北京: 地质出版社, 12—22.
- 张本仁. 1989. 成矿带地球化学研究的理论构想和方法. 见: 张本仁主编. 勘查地球物理. 勘查地球化学文集. 北京: 地质出版社, 1—20.
- 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. 2002. “三联式”资源定量预测与评价——数字找矿理论与实践探讨. 地球科学——中国地质大学学报, 27(5): 139—148.
- 赵鹏大. 2007. 成矿定量预测与深部找矿. 地质前缘, 14(5): 1—10.
- 赵鹏大, 陈建平, 张寿庭. 2003. “三联式”成矿预测新进展. 地质前缘, 10(2): 455—463.
- 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. 1999. 基于地质异常单元金找矿有利地段圈定与评价. 地球科学——中国地质大学学报, 24(5): 443—448.
- 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.
- 赵鹏大, 池顺都, 陈永清. 1996. 查明地质异常: 成矿预测的基础. 高校地质学报, 2(4): 360—373.
- 赵鹏大, 孟宪国. 1993. 地质异常与矿产预测. 地球科学——中国地质大学学报, 18(1): 39—47.