

奇异性理论在个旧锡铜矿产资源预测中的应用： 综合信息集成与靶区圈定

成秋明^{1,2}, 赵鹏大¹, 张生元³, 夏庆霖¹,
陈志军¹, 陈建国¹, 徐德义^{1,4}, 王文磊²

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074, 北京 100083
2. 加拿大约克大学地球空间科学与工程系, 加拿大多伦多 M3J1P3
3. 石家庄经济学院资源与环境工程研究所, 河北石家庄 050031
4. 中国地质大学经济管理学院, 湖北武汉 430074

摘要: 在致矿弱异常提取和复合异常分解的基础上, 进行多元信息综合和集成, 绘制成矿后验概率图是矿床资源预测的基本过程. 以个旧锡矿为例, 介绍一种新的信息集成模型和后验概率图的应用方法. 结果表明, 个旧锡铜矿床分布受多个控矿要素控制, 包括地球化学异常、岩体、有利岩性以及构造条件等. 通过证据权所提供的空间相关性统计量可以定量确定控矿要素的最佳控矿距离, 并以此为依据形成二态信息图层. 对每个图层的叠加可看作一次找矿信息的累积和更新, 因此整个信息图层的集成过程可以看作多次信息叠加过程(multiplicative cascade process). 由此绘制的后验概率图具有自相似性、奇异性和分形谱系, 空间分布服从多重分形统计分布. 因此, 后验概率图的绘制可以作为致矿地质异常圈定的信息综合和集成方法.

关键词: 矿床预测; 矿产资源定量评价; GIS; 非线性理论; 多重分形模型.

中图分类号: P628

文章编号: 1000-2383(2009)02-0243-10

收稿日期: 2008-12-16

Application of Singularity Theory in Prediction of Tin and Copper Mineral Deposits in Gejiu District, Yunnan, China: Information Integration and Delineation of Mineral Exploration Targets

CHENG Qiu-ming^{1,2}, ZHAO Peng-da¹, ZHANG Sheng-yuan³, XIA Qing-lin¹,
CHEN Zhi-jun¹, CHEN Jian-guo¹, XU De-yi^{1,4}, WANG Wen-lei²

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
3. Institute of Natural Resource and Environment Engineering, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China
4. School of Economics and Management, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract This paper is based on several research projects conducted in Gejiu Sn and Cu mineral districts on regional mineral resource assessment, 3D mineral resource assessment and prediction of deeply buried mineral deposits. New non-linear theory and methods of multifractal singularity have been applied in these projects to map weak anomalies related to deeply buried ores and mineralization halos. The weights of evidence model with corrected posterior probability using a newly developed correction method is applied to integrate various geo-evidential layers to map mineral potentials in the Gejiu area. The binary evidential layers include two layers defined on the basis of geochemical data, with one on distance from intersection of faults and the other on Gejiu Formation. Each addition of a binary layer can be considered as a partition of the study area and redistribution of pos-

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(No. 40525009); 国家自然科学基金重点项目(No. 40638041); 国家 863 项目(No. 2006AA06Z115); 教育部创新团队基金(No. IRT0755); 地质调查项目(No. 121201063390110); 云南锡业集团省校合作项目; 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: 成秋明(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 教育部长江学者特聘教授, 国家杰出青年基金获得者, 国际数学地球科学协会最高奖——克伦宾奖章获得者, 主要从事矿产普查与勘探、数学地质、地理信息系统以及矿产资源评价的教学和研究. E-mail: qiuming@cug.edu.cn

terior probability which can be treated as a general multiplicative cascade process and the final product may show multifractal properties with multiple singularities. A power-law model was established between posterior probability and undiscovered mineral deposits for the area.

Key words: mineral deposit prediction; mineral resource quantitative assessment; GIS; non-linear theory; multifractal model.

本项研究是云锡公司与中国地质大学合作研究项目中的区域矿产预测课题,本课题的研究任务之一是从“地质异常—成矿多样性—矿床谱系”(“三联式”)成矿预测理论(赵鹏大,2002)出发,以致矿地质异常为研究对象,采用基于多重分形的“局部奇异性、广义自相似性、分形谱系”的非线性矿产资源定量评价原理和模型(成秋明,2004),在 GeoDAS (Cheng, 2000)专业 GIS 环境下对个旧岩体周边进行了成矿定量预测。在对区域地质、地球物理、地球化学、遥感数据成矿信息提取的基础上,突出了弱异常的识别、复合异常的分解和空间信息的综合等关键技术的研究与应用(成秋明,2007e, 2008b; 成秋明等,2009)。分别采用局部奇异性弱异常圈定方法和 $S-A$ 广义自相似性异常分解方法,结合空间主成分分析方法圈定了微量元素 Sn、Cu、Cd、Pb、Zn 等组合异常(成秋明,2008b)。在此基础上,采用人工智能方法——证据权模型对地球化学异常、有利岩性层、构造交汇、岩体影响范围等控矿要素进行了优化和最佳距离确定,以新的非线性空间信息叠加过程为出发点(multiplicative cascade process),对多种空间信息图层(证据层)进行信息综合,采用最新研究的证据权校正模型绘制了锡矿预测后验概率图,克服了证据图层不满足条件独立性的困难(Cheng, 2008a)。文中主要介绍成矿信息的综合和集成以及后验概率图计算的内容。这一研究成果不仅直接应用于个旧地区的锡铜多金属矿床预测和资源评价,而且所介绍的矿产预测原理、信息处理方法以及软件技术等创新性成果,对同行在其他地区开展矿产预测工作会有借鉴作用。

1 空间信息综合和集成模型

在诸多领域中,人们为了对某种事件进行预测和评价常常需要综合和集成相关多元信息,比如通过集成地质、地球物理、地球化学、遥感等信息预测未发现矿床的空间分布是找矿勘探和矿产资源定量预测的重要途径。采用基于多元地学信息提取和信息综合技术开展矿产资源定量评价与成矿预测是近年来矿产资源勘查快速发展方向之一,也是理论—

信息找矿的重要标志。这类预测工作的基本过程是选择与预测目标相关联的多种地学图层,如地质、地球物理、地球化学、遥感等图层绘制矿床预测后验概率图。采用的数学模型包括证据权模型、人工神经网络模型、逻辑回归模型、模糊逻辑模型等(Bonham-Carter, 1994)。其中最常用的模型之一是证据权模型。该模型作为一种人工智能模型,具有数学理论严谨、计算过程直观、计算结果易解释、适合地质找矿人员使用等优点,因此被国内外学者广泛用于多元信息综合和空间决策支持系统,在我国也同样有着广泛的应用领域。在矿产资源勘查和评价中,证据权方法发挥了重要作用。证据权方法最初应用在没有空间意义的医学诊断上。早在 20 世纪 80 年代,加拿大 Agterberg 和 Bonham-Carter 等数学地质学家对此方法进行了修改和发展,将其应用于矿产预测中,将不同地质现象和控矿要素作为“症状”,矿床预测作为“诊断结果”(Agterberg, 1989; Bonham-Carter, 1994)。近年来许多学者在矿产资源评价和环境评价中都应用了该方法,如 2005 年在多伦多召开的国际数学地质和地学信息大会的“GIS 环境下空间数据建模”分会场上,就有 20 余篇论文是关于证据权方法的理论、方法或应用成果(Cheng and Bonham-Carter, 2005)。近年来的研究成果不仅推动了证据权方法的应用,而且使其理论和技术得到了进一步发展,具有代表性的成果包括:Cheng and Agterberg (1999)发展了模糊证据权方法,克服了普通证据权方法在离散图层时易造成信息损失的不足;张生元等(2006)和 Zhang *et al.* (2008)将模糊证据权方法进一步扩展,使其能够处理模糊训练集的预测问题;Cheng *et al.* (1996)提出了可以预测具有空间聚类分布特征的未发现矿床的分形证据权方法,该成果使证据权方法能够预测具有空间聚类分布的矿床类型;Cheng (2007d)将矿床空间分布局部奇异性 and 聚类性引入了证据权方法中,使得证据权方法不仅能预测矿床的可能分布位置,而且能够给出预测矿床的空间聚类特征。应用证据权方法的重要条件和困难之一是如何保证证据层之间在预测对象作用上的条件独立性,为此人们研究了多种独立性检验方法,这方面的新进展包括 Agterberg and Cheng

(2002)提出的 *A-C* 模型. 该模型给出了简便而实用的检验方法 (Thiart *et al.*, 2007). 近几年来, 证据权方法还被应用于地质统计学领域, 代表性成果包括 Journel(2002)提出的 *Tau* 模型, 该模型可以避免条件独立性问题. 遗憾的是 Journel(2002)的工作完全忽视了与证据权方法的关系, 如何将 *Tau* 模型与传统证据权方法相结合还需进一步研究 (Cheng, 2008a). Cheng(2008a)探讨了证据权方法的条件独立性问题, 结果表明证据权方法只需证据图层之间满足弱条件独立性, 如果不满足条件独立性, 笔者进一步给出了校正模型, 这样可以保证该方法在图层不满足条件独立性的情况下仍然可以使用. 更多关于证据权方法的内容可参考 Cheng(2008a)和 Bonham-Carter(1994).

本文应用最新研制的校正证据权模型对个旧地区多元信息进行了综合和集成, 绘制了锡矿资源预测后验概率图, 圈定了预测靶区, 给出了该方法的工作流程和应用效果评价. 证据权方法的应用首先是从计算先验概率入手, 先验概率反映了研究区已发现矿床数与研究区面积大小的比值. 然后要计算在某种地质证据模式条件下的条件概率, 比如在某种岩石类型中产出矿床的概率. 这样就需要定义产出矿床的条件集合, 如“有”或“无”该种岩石类型的范围. 在处理连续型图层时如地球化学异常图, 为了计算在一定地球化学异常范围内产出矿床的条件概率, 往往需要将其离散化成为二态或三态图层, 如高于某一给定阈值的范围和低于同一阈值的范围, 这样可以计算属于不同地球化学值域范围内的成矿后验概率. 从地质空间数据(地质图件)中获取矿床预测信息图层是开展矿床定量预测的关键. 从复杂的地学数据和空间模式中提取有用信息并不是简单直观的, 而往往是较复杂的过程, 这个过程常常需要对原始地学数据进行适当处理(成秋明, 2008b)才能将数据转化为信息. 空间信息系统的优势也就在于其信息获取功能. 现代数据管理、处理和图像分析技术为地学信息的获取提供了有力的工具.

GIS 为证据权方法的实现提供了便捷友好的工具. 在 GIS 环境下采用校正证据权模型生成矿产资源潜力图的程序主要有以下 5 个步骤: (1)建立研究区的空间数据库; (2)基于地质和矿产数据, 针对某一特定矿床类型, 提取控矿或找矿地质要素或证据; (3)计算每张控矿或找矿地质要素或证据图层的权重(证据图件), 并将其转化为二态或三态图层, 以反映与成矿有关和无关的不同空间模式; (4)集成这些

二态或三态图层, 生成矿产潜力预测图; (5)模型的检验、校正, 预测区的解释和靶区的圈定.

在证据权方法中, 证据层通常为二态或三态图. 对于具连续属性的数据, 最常用的方法是将其离散成二态或三态图层. 离散化过程中的信息遗失问题在 Cheng and Agterberg(1999)论文中谈到过, 采取的改进工作办法之一是模糊证据权方法.

2 证据信息图层的选择与定义

应用信息综合和集成方法如证据权方法的关键步骤之一是根据控矿地质要素构建对矿床有预测意义的证据图层. 证据图层是指对矿床的发生和空间分布具有指示意义的图层, 这样的图层所提供的找矿信息可以帮助缩小预测目标, 减少找矿的不确定性. 对多层证据图层进行信息综合或集成可以提高找矿信息的累计程度, 从而更进一步缩小预测靶区, 提高靶区内成矿概率, 减少找矿风险. 采用证据权等方法可以综合多层证据图层并绘制成矿后验概率分布图. 该图给出找矿概率的空间分布状况, 同时与概率分布相伴的还可给出不确定性度量(如方差空间分布图). 通过 GIS 处理和分析, 可以从多种空间数据包括不同类型、不同格式、不同精度(如比例尺)、不同时间甚至用于不同目的的空间数据中提取有意义的证据层. 关于证据图层的提取方法可以参考其他相关文献(Bonham-Carter, 1994; 成秋明, 2007e, 2008b).

为了累积多个证据图层提供的找矿信息, 必须采取相应的方法. 由于各种证据图层反映了与矿床形成和空间分布的不同关系, 这些图层从多个角度提供了矿床信息, 因而这些信息图层之间往往是相关的, 不具有独立性或不具有与矿床空间分布关系的条件独立性, 对这样的信息层进行叠加和累积是复杂的. 简单的累积会导致信息的过高或过低估计. 这是信息综合和集成工作的难题. 这一问题长期没有得到很好的解决而影响到模型和方法的应用. 传统的证据权方法要求证据层之间满足条件独立性. 为了达到证据图层间的条件独立性, 人们常常采用各种方法对输入数据进行处理和变换, 目的是希望输入的证据图层尽量满足条件独立性, 以减小由于不满足条件独立性对预测结果带来的影响. 比如常用的方法包括主成分分析方法, 利用该方法将多元素地球化学图层进行综合, 形成相对独立的证据图

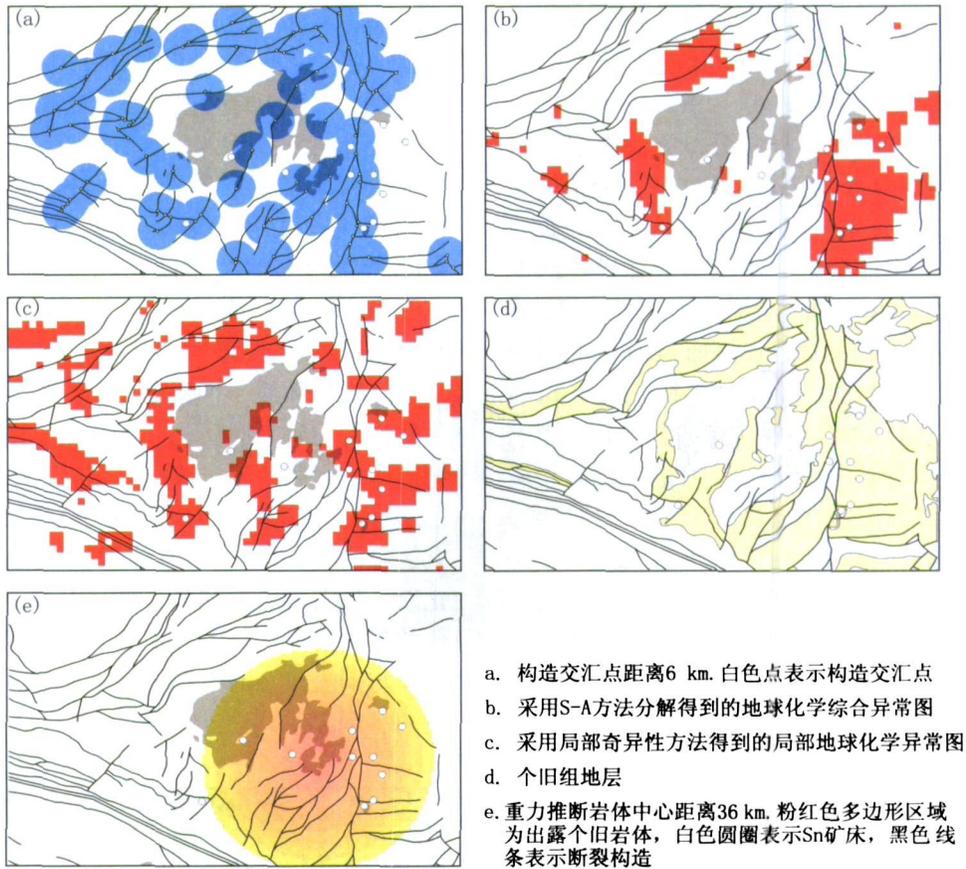
层.然而,这样做也只能保证地球化学元素图层本身的独立性,未必保证地球化学图层与其他类型图层之间的条件独立性.近年来人们对证据权方法的独立性等使用条件进行了深入研究.成秋明(2008b)发表了新的奇异性证据权模型,并探讨了传统证据权模型的条件独立性问题,证明了传统的证据权模型(更广的逻辑模型也成立)仅仅需要弱条件独立性,并不要求严格条件独立性.Cheng(2008a)的另一成果提出了证据权校正模型.该成果表明,即使证据层之间不满足条件独立性条件,也可以采用校正模型获得正确结果.校正模型在一定程度上解决了证据权方法的条件独立性难题.本文将介绍该校正模型在个旧地区的应用情况,这一模型将有望得到广泛应用,对证据权模型起到极大的推动作用.

选择的研究区范围为云南个旧锡铜多金属矿区,总面积约 1700 km^2 .云南个旧锡铜多金属矿区位于云南省东南部,是我国最重要的大规模锡多金属成矿密集区之一.其大地构造位置位于扬子陆块、华南褶皱系及三江造山带三大地质构造单元汇聚部位,属华南褶皱系右江裂谷盆地西南段.由于印支期金沙江—哀牢山洋盆和澜沧江洋的闭合和右江裂谷盆地向前陆盆地的转变与构造变形,以及燕山期三江碰撞造山带的碰撞后隆升,造成了该地区强烈的构造—岩浆活动和大规模的成矿作用.前人工作表明个旧锡铜多金属矿床除主要表现为燕山晚期“花岗岩岩浆期后气液矿床”特征外,多期次、多来源和多种成矿作用叠加成矿造就了现今的特大型矿床.关于个旧锡铜矿的成矿模型和区域矿化系列请参考秦德先等(2004)、谈树成等(2004)、於崇文等(1988)、夏庆霖等(2007)、Zhang *et al.*(2009)以及徐启东等(2009).

2.1 构造控矿要素

构造是热液型矿床形成和分布的重要条件,构造不仅可以提供导岩、导矿条件,也可为矿液沉淀和赋存提供容矿环境,甚至影响到矿体的保存和改造等环境.根据个旧地区原生锡、铜矿床的成矿模式,选择不同方向与矿床形成和分布有关的重要断裂构造及断裂构造交汇点作为可能与矿床分布有关的要素.判断断裂构造是否与矿床分布有关的方法之一是采用构造化探的研究方法,将构造与致矿地球化学异常相比较,与矿有关的断裂构造往往会对地球化学异常起到一定控制作用.根据构造与地球化学异常的关系可以判断断裂构造是否与成矿有关.当然对构造的研究还须包括构造的活动期次、性质等

特征以便判断构造的控矿作用.对构造的深入研究是了解热液矿床形成和分布规律的重要途径.这里通过对断裂构造交汇点与矿床空间分布的相关关系的研究确定有利的构造条件,并形成构造预测要素和证据图层.图 1a 给出了所确定的主要断裂构造和构造交汇点分布图.构造交汇点的获得借助了 GIS 空间分析功能.交汇点代表了构造系统的重要部分,是构造应力分布和岩石受损程度分布的特殊部位.对热液矿床来说,构造交汇点分布范围应力分布变化较强,是热液系统如温度、压力、介质的物理性质等易发生变化的部位,因此是热液型矿床形成和分布的重要条件.由于构造是岩石在应力作用下的结果,虽然地质图上所表达的构造往往只是断裂构造面或者主要构造面的分布,然而构造往往呈构造带而非简单的构造面存在,尤其是对热液型矿床的控制作用来说,构造的影响范围往往超出构造面的范围,因此,研究构造控矿作用往往要考虑构造带的影响范围.本文将通过 GIS 空间分析方法确定构造交汇点对矿床空间分布的最佳控制范围,并以此构建构造交汇点最佳控矿证据图层.为此,需要首先确定度量空间相关性模型.这里选择整个研究范围为模型区范围,按 1 km 为计算单位,整个区域总面积为 1688 个单位面积,区内有 11 个已知矿床和矿点,占整个研究区范围的 0.65% ,即先验概率为 0.0065 .为了计算矿床分布与构造交汇点的最佳距离,首先确定构造交汇点,然后进行构造交汇点缓冲区的绘制.以每 2 km 为宽度绘制 50 个等间距缓冲区,将缓冲区与矿床单元进行综合,可以计算每个累计缓冲区与 11 个矿床的空间相关性.可以把缓冲区边界作为分界形成一系列二态图形,采用证据权方法中提供的功能计算每个缓冲区与矿床的空间相关性,并以图形表示空间相关性随着缓冲区边界的变化情况.图 2 中给出了空间相关性与边界的分布结果.可以看出最佳空间相关系数所对应的距离为 6 km ,也就是说,构造交汇点对已知矿床空间分布的最佳控矿距离为 6 km .因此,距离构造交汇点 6 km 范围可以看作是有利控矿要素, 6 km 以外为不利控矿要素.距离构造交汇点 6 km 之内的范围占整个研究区的 515 个面积单元,占整个面积约 30% ,然而该面积范围内包含了 6.5 个矿床单元面积,占 11 个矿床单元的 59% .可见,构造交汇点 6 km 分布范围是否存在对矿床的分布是有影响的,或者说该图层与矿床的分布是空间相关的,证据权方法提供的相关性系数和学生统计量分别为 $C=1.18$ 和 $t=1.92$.该



a. 构造交汇点距离6 km. 白色点表示构造交汇点
 b. 采用S-A方法分解得到的地球化学综合异常图
 c. 采用局部奇异性方法得到的局部地球化学异常图
 d. 个旧组地层
 e. 重力推断岩体中心距离36 km. 粉红色多边形区域为出露个旧岩体, 白色圆圈表示Sn矿床, 黑色线条表示断裂构造

图 1 采用证据权方法确定的控矿要素二态图层

Fig. 1 Binary patterns obtained by using weights of evidence method

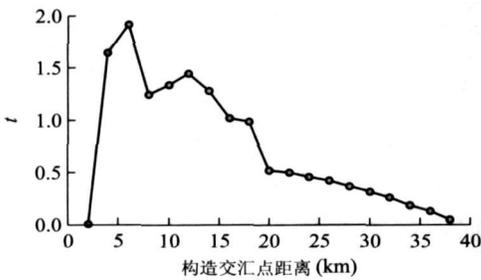


图 2 采用证据权方法计算矿床空间分布与构造交汇点距离的相关关系

Fig. 2 Plot showing the relationship between the distance from the intersections of faults and *t*-value calculated using weights of evidence method 图中给出了小于某一阈值的区域与矿床的分布关系; *t* 为学生统计量, 大小反映相关性的显著性. 最佳距离确定为 6 km

图层将作为证据图层参与预测. 计算结果也说明, 矿床在距离构造交汇点 6 km 之内的概率为 0.012 6, 这个概率是先验概率 0.006 5 的 2 倍, 而在 6 km 以外的范围内矿床出现的概率仅为先验概率的一半. 因此, 通过构造交汇点的最佳距离确定可以获得有

关矿床分布的信息 (信息量的差在数学上表示为确定性的增加量).

2.2 地球化学综合异常要素 I

在前面已发表的文章中, 介绍了采用 S-A 异常分界方法所获得的与锡铜矿分布有关的综合地球化学异常结果 (成秋明等, 2009). 为了确定该地球化学异常与锡铜矿床空间分布的最佳关系, 这里再次采用证据权方法确定最佳的分界点. 首先将该综合地球化学异常图的异常值按等间距的分级原则分为 20 类, 然后再采用证据权方法确定最优的分界点. 结果表明, 11 级以上确定了最佳范围, 结果见图 1b. 该有利范围占整个模型区面积的 188 个单元, 或占整个面积约 11%, 然而该面积范围内包含了 8 个矿床面积单元, 占整个矿床单元的 73%. 可见, 该范围是否存在对矿床的分布是有影响的, 或者说该图层与矿床的分布是空间相关的, 相关性 $C=3.1$, $t=4.54$. 该图层将作为证据图层参与预测. 计算结果也说明, 矿床在该异常之内的概率为 0.042 5, 是先验概率的 6 倍多, 而在异常以外的范围内矿床出现的

概率不到先验概率的 1/3. 可见, 通过圈定综合地球化学异常可以得到有关矿床分布的信息.

2.3 地球化学综合异常要素 II

局部奇异性原理和 $\Delta\alpha$ 异常分析方法圈定了与锡铜相关低缓局部异常(成秋明等, 2009). 为了进一步确定该地球化学局部异常与锡铜矿床空间分布的最佳关系, 笔者采用证据权方法确定最佳异常范围(图 1c). 该异常范围占整个模型区面积的 308 个面积单元, 约为整个面积的 18%, 然而该面积范围内包含了 6 个有矿单元, 占整个 11 个矿床单元的 55%. 可见, 该范围是否存在对矿床的分布是有影响的. 或者说该图层与矿床的分布是空间相关的, 相关性 $C=1.73$, $t=2.84$. 该图层将作为证据图层参与预测. 矿床在该局部异常之内的概率为 0.019 5, 是先验概率的 3 倍多, 而在局部异常以外的范围内矿床出现的概率约为先验概率的 1/2. 可见, 通过圈定局部地球化学异常可以得到有关矿床分布的信息.

2.4 有利地层要素

个旧锡铜矿原生矿的主要矿体的近矿围岩为中生界三叠系碳酸盐岩, 其中与矿化关系最密切的是法郎组 and 个旧组, 中三叠统个旧组地层为本区主要容矿层位, 由灰岩、白云质灰岩、灰质白云岩和白云岩互层局部夹薄层泥质灰岩组成, 总厚度超过 1000 km, 尤其是个旧组下段是整个个旧矿区容矿量最为丰富的层位(冶金工业部西南冶金地质勘探公司, 1984).

碳酸盐岩是影响热液型矿床形成和分布的重要围岩, 碳酸盐岩在酸性溶液参与下具有易溶解性和应力作用下易脆性变形, 易形成裂隙和溶洞等导岩、导矿、容矿空间. 由于碳酸盐岩受到侵入岩的影响易形成接触变质岩, 如矽卡岩化常伴随有矽卡岩矿床. 同时, 碳酸盐岩与成矿热液的相互作用、水岩反应可以形成各种矿化蚀变带. 从成矿系统角度看, 碳酸盐岩的加入还会改变成矿流体系统的化学平衡而促使系统产生矿物质沉淀形成矿体. 当流体系统处于自组织临界状态时, 围岩的局部影响会造成系统的变化而产生不连续的“崩塌”事件, 形成大小规模不等的矿化体和矿体等(成秋明等, 2009). 围岩不仅可为矿液沉淀和储存提供容矿环境, 甚至影响到矿体的保存和改造等环境. 因此, 研究成矿围岩是热液型矿床成矿规律和找矿勘探的重要内容, 自然也是矿产资源预测和评价的重要要素. 本研究项目对个旧地区地层与矿床的关系的详细研究结果将另外发表. 这里将采用个旧组地层分布与矿床空间分布的相关

关系来确定有利的地层条件并形成地层预测要素和证据图层. 根据个旧地区锡铜矿的成矿模式, 笔者选择个旧组岩性为有利成矿围岩(图 1d). 个旧组地层占整个研究区的 747 个面积单元, 占整个面积的约 44% 面积, 然而该面积范围内包含了 7 个矿床面积单元, 占整个 11 个矿床单元的 64%, 表明该图层与矿床的分布是空间相关的, 相关性 $C=0.75$, $t=1.20$. 该图层将作为证据图层参与预测.

2.5 岩体控矿要素

侵入岩体对个旧锡铜矿床的影响是明显的. 无论从提供物质来源还是热动力源, 个旧杂岩体对锡铜矿床的形成和分布的作用和影响都是被普遍接受的. 岩体要素的特征可以从多个方面来度量. 对本研究区来说, 揭示和了解岩体隐伏状态和深部形态变化以及与围岩的接触关系等对于预测和评价围绕岩体的矿化情况是至关重要的. 已知矿区的勘查说明, 岩体与围岩接触的不规则部位是矿体赋存和矿化富集有利部位, 对岩体边界的细致研究是矿床预测

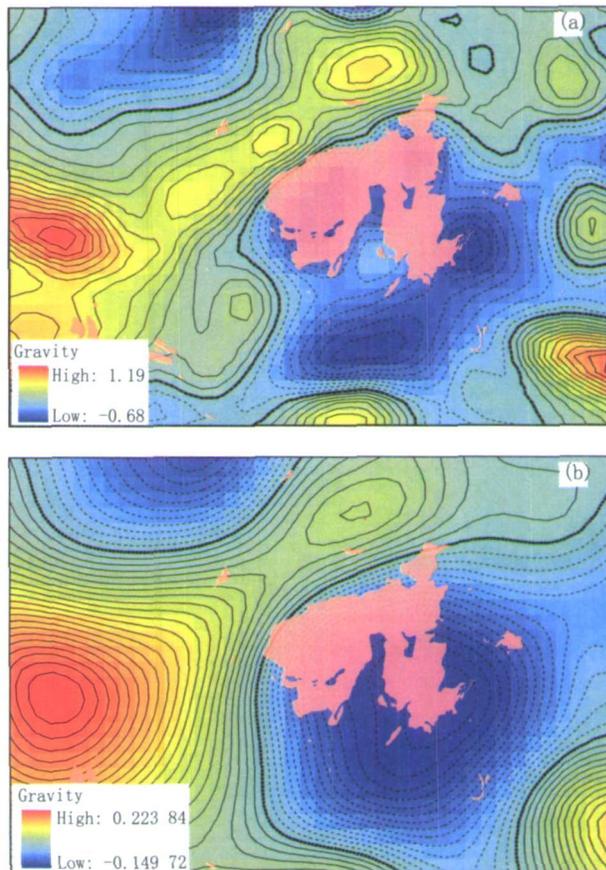


图 3 布格重力异常处理结果

Fig. 3 Results of processing and interpreting gravity anomaly
a. 重力上延 3 km 并同时做垂向二阶导数处理, b. 重力上延 7 km 并同时做垂向二阶导数处理. 图中暗色多边形表示岩体的出露范围

的有效途径. 本次研究采用综合地质、地球物理、地球化学、遥感等多种数据, 通过综合数据处理和解释, 推断了个旧杂岩体的深部形态变化和分布范围等特征. 有关详细的研究成果将另文发表. 这里给出了采用重力数据处理对岩体深部形态进行推断的结果(图 3). 图中显示, 个旧杂岩体深部总体向南东方向倾伏, 隐伏范围较实际出露面积至少大 3 倍, 说明岩体隐伏边界较长, 特别是南东方向包括个旧已知矿区岩体与围岩接触面较复杂, 有利于热液矿体的形成. 如果将重力向上延拓 10 km 圈定的重力最低点作为岩体的可能中心, 可以对距离该中心的距离与已知矿床的空间分布相关性进行计算. 采用证据权方法确定最佳的有利成矿距离为 37 km (图 1e). 该范围占整个研究区 441 个面积单元, 约 26%, 然而该面积范围内包含了 10 个矿床面积单元, 占整个 11 矿床单元的 91%, 可见, 该范围是否存在对矿床的分布是有重要影响的, 或者说该图层与矿床的分布是空间显著相关的, 相关性 $C=3.37$, $t=3.20$. 在以上 5 个证据图层中, 岩性图层与矿床分布相关性是相对较低的.

3 综合信息与成矿预测后验概率

以上提取的每一证据图层(图 1)都代表了一种控矿要素, 从一个侧面反映了与成矿的关系. 将多个证据层所提供的成矿信息进行叠加无疑可获得更多和更全面的成矿信息. 但是如何叠加和累积多来源信息并非简单的累加过程, 特别是当这些证据图层之间具有一定的相关性时, 尽管叠加这些图层应该提供更多的信息, 但也并非简单的信息叠加. 客观地说, 叠加证据图层后所得到的信息量应该大于每一种单个证据层所能提供的信息量, 但往往会小于所有单个图层所提供信息的累计. 叠加后的信息量大小还取决于图层之间的相关性. 比如将 2 个完全相同的图层进行叠加所提供的信息量和单个图层所能提供的信息量并没有区别. 在采用证据权方法时, 由于往往要求证据图层之间的条件独立性, 人们往往产生错误的印象, 认为证据图层必须是条件独立的. 然而, 由于不同证据图层均是反映成矿的要素, 这些不同要素之间往往是不独立的. 相反, 人们往往需要选择有一定相关性的要素做相互验证和补充, 这样所输入的证据图层就不能保证条件独立性, 从而在使用证据权方法时会出现过高或过低估计的问题.

这一问题是证据权方法使用的重要难题. Cheng (2008a) 的研究结果表明, 证据权方法并不要求严格条件独立性, 只要求弱条件独立性即可进行计算, 如果出现证据图层的不独立性, 可以采用校正模型. 这样对证据权方法的使用就不必太担心条件独立性问题. 这里笔者将采用证据权模型对图 1 中的前 4 个证据图层进行叠加. 没有选择岩体图层的原因是, 岩体图层与其他几个都具有较好的相关性, 为了突出其他图层的作用, 将岩体图层用于对后验概率的检验和比较. 所计算的结果反映在图 4 中. 由于所输入的证据图层具有相关性, 不满足条件独立性要求, 因此, 本研究采用由 Cheng (2008a) 提出的校正模型. 该模型的使用步骤是: 首先将所计算的后验概率进行分级, 然后将其看作一个新的图层重新计算后验概率, 这样所计算的后验概率与之前计算的后验概率之间具有相关性. 比如图 5a 给出了这两种后验概率的关系. 这个具体例子显示了这两种后验概率具有非线性相关关系. 通过这种相关关系, 可以计算校正后的后验概率. 这样所得到的后验概率既与未校正过的后验概率相关, 保持了后验概率图的基本形态, 又消除了图层相关性对后验概率的影响. 这样的计算结果与模型的实际结果会达到最佳近似. 校正结果表示在图 4 中, 图中的后验概率分级是采用对数变换后的等数值分级方案. 为了对比较校正前后的后验概率与所在区域大小的关系, 图 5b 给出了累积面积与后验概率的相关关系. 可以看出高后验概率与分布面积服从幂率(分形)分布. 这反映了所圈定的后验概率较高的区域与后验概率(可以看成为成

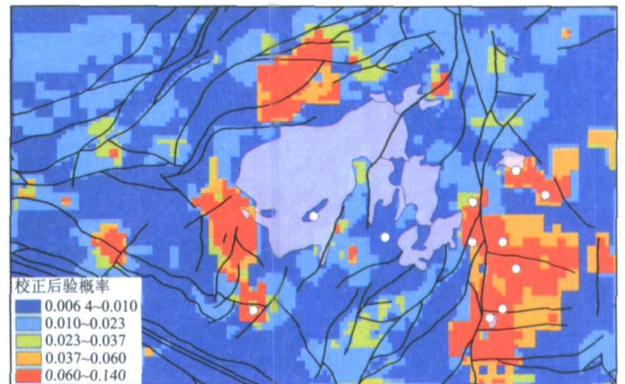


图 4 锡铜矿床预测后验概率图

Fig. 4 Posterior probability map calculated from integrating four evidential layers in Figs. 1a to 1d

采用证据权校正模型和 4 个证据图层(地球化学异常 I 和 II、个旧组地层、构造交汇点距离)为输入; 模型范围 1 688 个面积单元, 11 个矿床单元(由圆圈符号表示); 先验概率为 0.65%

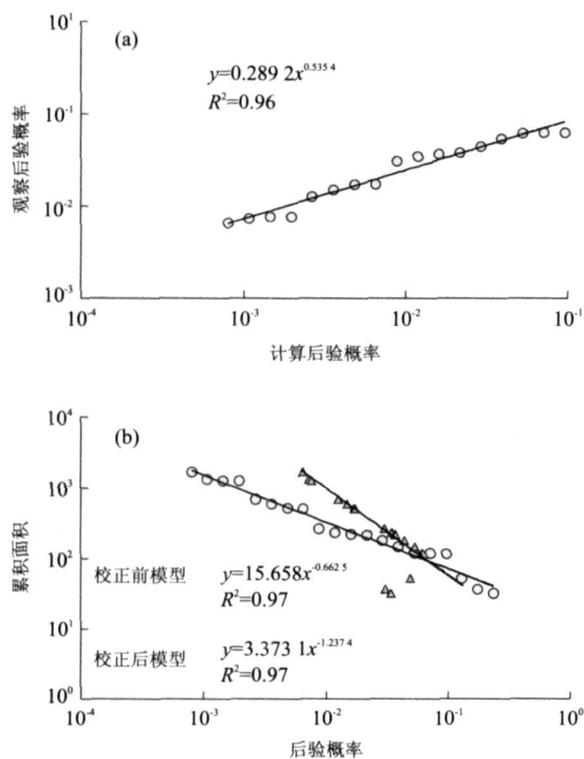


图 5 证据权校正模型

Fig. 5 Corrected weights of evidence model

a. 实际观察后验概率与计算后验概率的关系图; b. 校正前后模型. 累积面积与后验概率满足分形分布 (power-law); 三角形表示观察的后验概率

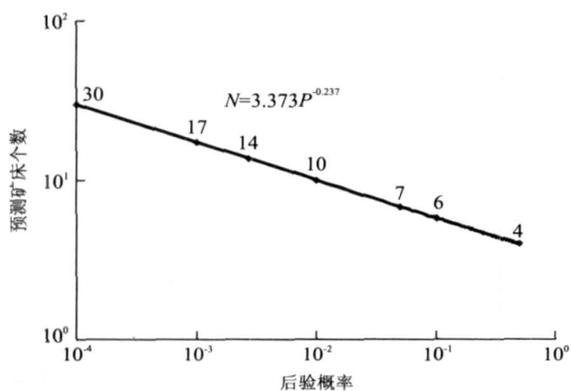


图 6 研究区矿床数预测模型

Fig. 6 Prediction model for undiscovered mineral deposits 预测矿床数是预测后验概率的函数. 采用图中模型可以计算在不同的概率意义下的预测矿床数, 如图中数据显示的在后验概率分别为 $1/10\ 000$ 、 $1/1\ 000$ 、 $1/100$ 、 $1/10$ 意义下的预测矿床数分别为 30、17、10、6

矿信息)之间满足分形分布, 具有奇异性和地质异常的基本特征, 因此可以作为成矿有利的找矿靶区. 更多关于奇异性原理和地质异常关系的探讨可参考

Cheng (2007a, 2007b, 2007c) 和 Cheng and Agterberg (2008).

基于校正后的后验概率与面积的关系, 笔者可以建立起未发现矿床个数与后验概率的关系式 $N(\triangleright P) = PA = 3.373P^{-0.237}$. 从这一关系可以计算不同概率意义下的矿床个数. 如果应用该模型对预测区进行预测即可计算未发现矿床数, 比如, 在后验概率分别为 $1/10\ 000$ 、 $1/1\ 000$ 、 $1/100$ 、 $1/10$ 意义下的预测矿床数分别为 30、17、10、6 (图 6).

4 预测结果解释

从预测后验概率图所显示的结果可以看出, 个旧东区已知矿区具有较高的后验概率, 说明后验概率预测结果与已知模型是一致的. 除此之外, 该区的后验概率范围大于已有矿的分布范围, 这表明在已知区内或外围还可能具有资源潜力, 同时, 个旧岩体的南部、西部、甚至北部圈出了高后验概率靶区, 这些地区均具有构造、地球化学异常和局部异常、有利地层等有利成矿因素, 而且在这些要素上表现了与东区模型区有较高的相似性和自相似性. 这也再次说明东区已知矿区与外围具有一定的可比性, 可以根据东区建立的模型对外围进行区域成矿预测, 所预测的靶区均具有进一步勘查意义. 从岩体的总体分布来看, 岩体不同倾伏方向应该给予特殊重视.

采用最新研究的校正模型克服了证据图层不满足条件独立性的困难, 所绘制的后验概率图反映了整个研究区内的综合地质异常分布. 高后验概率分布范围与后验概率服从分形分布并具有奇异性, 说明所圈定的高后验概率范围具有致矿地质异常的特点. 因此, 后验概率可以作为综合致矿地质异常圈定的有效方法. 后验概率的分布体现了综合地质异常、成矿空间分布多样性和空间分布谱系等多种特征.

References

- Agterberg, F. P., 1989. Computer programs for mineral exploration. *Science*, 245: 76–81.
- Agterberg, F. P., Cheng, Q. M., 2002. Conditional independence test for weights of evidence modeling. *Natural Resources Research*, 11(4): 249–255.
- Bonham-Carter, G. F., 1994. Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS. Pergamon, Oxford, 398.
- Cheng, Q. M., 2000. GeoData analysis system (GeoDAS) for

- mineral exploration: User's guide and exercise manual. Material for the training workshop on GeoDAS held at York University, Nov. 1 to 3 2000. 204. www.gis-world.org/geodas.
- Cheng, Q. M., 2004. Quantifying the generalized self-similarity of spatial patterns for mineral resources assessment. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(6): 733—744 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., 2007a. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China. *Ore Geology Reviews*, 32(1—2): 314—324.
- Cheng, Q. M., 2007b. Geological anomaly as fundamental characteristic of singular mineralization processes. In: Zhao, P. D., Agterberg, F., Cheng, Q. M., eds., Proceedings of IAMG'07: Geomathematics and GIS analysis of resources, environment and hazards held in Beijing, China, August 26—31, 2007. China University of Geosciences Press, Wuhan, 786—788.
- Cheng, Q. M., 2007c. Multifractal imaging filtering and decomposition methods in space, Fourier frequency and eigen domains. *Nonlin. Processes Geophys.*, 14: 293—303.
- Cheng, Q. M., 2007d. GIS based fractal/multifractal anomaly analysis for modeling and prediction of mineralization and mineral deposits. In: Harris, J., Wright, D., eds., GIS for geosciences. Geological Association of Canada, 285—296.
- Cheng, Q. M., 2007e. Singular mineralization processes and mineral resources quantitative prediction: New theories and methods. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 42—53 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., 2008a. Non-linear theory and power-law models for information integration and mineral resources quantitative assessments. *Mathematical Geosciences*, DOI 10.1007/s11004-008-9172-6.
- Cheng, Q. M., 2008b. Singularity of mineralization and multifractal distribution of mineral deposits. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(3): 298—305 (in Chinese with English abstract).
- 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., Agterberg, F. P., 2008. Singularity analysis of ore-mineral and toxic trace elements in stream sediments. *Computers & Geosciences*, DOI: 10.1016/j.cageo.2008.02.034.
- Cheng, Q. M., Agterberg, F. P., Bonham-Carter, G. F., 1996. A spatial analysis method for geochemical anomaly separation. *Journal of Exploration Geochemistry*, 56(3): 183—195.
- Cheng, Q. M., Bonham-Carter, G. P., 2005. GIS and spatial analysis. Proceedings of IAMG2005. International Association for Mathematical Geology, 1345.
- Cheng, Q. M., Zhao, P. D., Chen, J. G., et al., 2009. Application of singularity theory in prediction of tin and copper mineral deposits in Gejiu district, Yunnan, China: Weak information extraction and mixing information decomposition. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(2): 232—242 (in Chinese with English abstract).
- Journel, A. G., 2002. Combining knowledge from diverse sources: An alternative to traditional data independence hypotheses. *Mathematical Geology*, 34(5): 573—596.
- Qin, D. X., Tan, S. C., Fan, Z. G., et al., 2004. Geotectonic evolution and tin-polymetallic metallogenesis in Gejiu-Dachang area. *Acta Mineralogica Sinica*, 24(2): 118—123 (in Chinese with English abstract).
- Southwestern Metallurgy Exploration Company of the Ministry of Metallurgy Industry, 1984. Geology of Gejiu mineral district. Metallurgy Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Tan, S. C., Qin, D. X., Chen, A. B., et al., 2004. Regional crust evolution and metallogenesis of Gejiu tin deposit—A discussion. *Acta Mineralogica Sinica*, 24(2): 157—163 (in Chinese with English abstract).
- Thiart, C., Bonham-Carter, G. F., Agterberg, F. P., et al., 2007. An application of the new Omnibus test for conditional independence in weights-of-evidence modeling. In: Harris, J., Wright, D., eds., GIS for geosciences. Geological Association of Canada, 132—142.
- Xia, Q. L., Zhang, S. T., Chen, S. Y., et al., 2007. The key problems for deep mineral potential assessment in Gejiu tin deposit, Yunnan, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 27(Suppl.): 530—531 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q. D., Xia, Q. L., Cheng, Q. M., 2009. Tectono-magmatic evolution related to metallogenic system in Gejiu ore-concentration area, Southeast Yunnan of China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(2): 307—313 (in Chinese with English abstract).
- Yu, C. W., Tang, Y. J., Shi, P. F., et al., 1988. Dynamic system of Gejiu polymetallic mineralization processes. China University of Geosciences Press, Wuhan, 394 (in Chinese).

- Zhang, S. Y., Wu, Q., Cheng, Q. M., et al., 2006. Weights of evidence method based on fuzzy training layer and its application in desertification assessment. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(3): 389–393 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. T., Xia, Q. L., Zhao, P. D., et al., 2008. Diversity of mineralization and spectrum of the Gejiu superlarge tin-copper polymetallic deposit, Yunnan, China. *Journal of China University of Geosciences*, 19(4): 363–370.
- Zhao, P. D., 2002. “Three-component” quantitative resource prediction and assessment: Theory and practice of digital mineral prospecting. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 482–489 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P. D., Cheng, Q. M., Xia, Q. L., 2008. Quantitative prediction for deep mineral exploration. *Journal of China University of Geosciences*, 19(4): 309–318.
- 附中文参考文献**
- 成秋明, 2004. 空间模式的广义自相似性分析与矿产资源评价. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(6): 733–744.
- 成秋明, 2007e. 成矿过程奇异性与矿产预测量化的新理论与新方法. *地学前缘*, 14(5): 42–53.
- 成秋明, 2008b. 成矿过程奇异性与矿床多重分形分布. *矿物岩石地球化学通报*, 27(3): 298–305.
- 成秋明, 赵鹏大, 陈建国, 等, 2009. 奇异性理论在个旧锡铜矿产资源预测中的应用: 成矿弱信息提取和复合信息分解. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(2): 232–242.
- 秦德先, 谈树成, 范柱国, 等, 2004. 个旧—大厂地区地质构造演化及锡多金属成矿. *矿物学报*, 24(2): 118–123.
- 谈树成, 秦德先, 陈爱兵, 等, 2004. 个旧锡矿区域地壳演化与成矿探讨. *矿物学报*, 24(2): 157–163.
- 夏庆霖, 张寿庭, 陈守余, 等, 2007. 云南个旧锡矿深部资源潜力评价的几个关键问题. *矿物学报*, 27(增刊): 530–531.
- 徐启东, 夏庆霖, 成秋明, 2009. 云南个旧矿集区区域构造—岩浆演化与锡铜多金属成矿系统. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(2): 307–313.
- 冶金工业部西南冶金地质勘探公司, 1984. 个旧锡矿地质. 北京: 冶金工业出版社.
- 於崇文, 唐元骏, 石平方, 等, 1988. 云南个旧锡多金属成矿区内生成矿作用的动力学体系. 武汉: 中国地质大学出版社, 394.
- 张生元, 武强, 成秋明, 等, 2006. 基于模糊预测对象的证据权方法及其在土地沙漠化评价中的应用. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(3): 389–393.
- 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): 482–489.