

模糊证据权方法在镇沅(老王寨)地区 金矿资源评价中的应用

成秋明^{1,2}, 陈志军¹, Ali Khaled²

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

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

摘要: 采用模糊证据权方法和 GeoDAS GIS 技术开展了镇沅(老王寨)及其邻区的金矿资源潜力评价。分别采用 GeoDAS GIS 软件提供的局部奇异性分析技术、S A 异常分解技术、主成分分析技术、证据权、模糊证据权等技术对相关地球化学元素进行了系统的处理和分析。应用主成分分析方法确定了可能的 2 种不同成矿类型, 并采用主成分得分确定了组合异常点, 在此基础上分别采用普通证据权和模糊证据权方法编制了成矿后验概率图, 圈定了有利成矿地段。对比普通证据权方法与模糊证据权方法所得结果表明, 模糊证据权方法可减小小图层离散化造成的有用信息损失, 提高预测结果精度。

关键词: 模糊概率; 证据权方法; 异常分解; 奇异性; GeoDAS GIS 技术; 矿产资源评价; 热液金矿。

中图分类号: P628

文章编号: 1000-2383(2007)02-0175-10

收稿日期: 2006-11-05

Application of Fuzzy Weights of Evidence Method in Mineral Resource Assessment for Gold in Zhenyuan District, Yunnan Province, China

CHENG Qiu ming^{1,2}, CHEN Zhi jun¹, Ali Khaled²

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Department of Earth and Space Science and Engineering, York University, Toronto M3J1P3, Canada

Abstract: The fuzzy weights of evidence method implemented in GeoDAS GIS was applied to delineate targets for exploration of gold mineral deposits in Zhenyuan mineral district, Yunnan Province, southwestern China. According to the mineral deposit model compiled by USGS, the mineral deposit type discovered in the area is determined as mesothermal gold deposit. Together with field observations the mineralization associated elements are determined, which include Au, As, Hg, Ag, Sb, Pb, and Cd. The singularity method and S A methods provided in GeoDAS GIS were applied to delineate the weak anomalies and mixing anomalies related to gold mineral deposits. Principal component analysis method was utilized to analyze these elements to form two components (PC2 and PC3) which may reflect two different types of mineralization; PC2 dominated by Au As Hg Co Ni Cu may be related to mesothermal deposits formed close to the contact of the ultramafic intrusions; whereas the PC3 dominated by Au As Hg Ag Pb may represent epithermal mineral deposits located in the sedimentary basin away from the ultramafic intrusions. The peaks of scores on these types of composite anomaly maps were delineated and used as training points for utilization of weights of evidence method and fuzzy weights of evidence method, respectively. 16 targeting areas were delineated using fuzzy weights of evidence method and were suggested for further exploration. The detailed comparison of fuzzy weights of evidence method with the ordinary weights of evidence method shows that the former

基金项目: 国家杰出青年科学研究基金资助项目“成矿复杂系统和矿产资源评价非线性理论与模拟”(No. 40525009); 自然科学基金重点项目“基于多重分形理论的成矿过程模拟与矿产资源定量评价”(No. 40638041); “863”计划区域成矿多元信息处理新方法和新技术(No. 2006AA06Z115)。

作者简介: 成秋明(1960-), 男, 教授, 中国地质大学教育部长江学者特聘教授, 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。E-mail: qiuming@yorku.ca

can produce better results with less loss of useful information during construction of discrete evidential layers.

Key words: fuzzy probability; weights of evidence method; anomaly decomposition; singularity; GeoDAS GIS; mineral resource assessment; hydrothermal gold deposit.

0 引言

基于多元信息和信息综合技术的矿产资源定量评价与成矿预测是近年来矿产资源勘查领域的快速发展方向之一,也是理论-信息找矿的重要途径之一。作为矿产资源定量评价和成矿预测的最常用模型之一,证据权模型(weight of evidence, 简称 WofE)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。证据权方法是一种人工智能方法,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——不同地质现象作为“症状”,矿床预测作为“诊断结果”(Agterberg, 1989; Agterberg *et al.*, 1993; Bonham Carter, 1994)。近年来许多学者在各种矿产资源评价和环境评价中应用了该方法,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”分会场上就有近 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)。GeoRef 检索结果表明,应用证据权方法的论文不下几百篇。这些成果不仅对证据权方法的应用,而且对该方法的理论和技术也取得了进一步发展,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)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空间分布不规则的矿床类型;Cheng (2006)将矿床空间分布局部奇异性及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,这方面的最新进展包括 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.*, 2006);近 2 年来,证据权方法还被应用于地质统计学领域,代表的成果包括 Krishnan and Journel(2004)提出的 Tau 模型,该模型可以避免条件独立性问题。更多关于证据权方法的内容可参考(Bonham Carter *et al.*, 1989; Cheng *et al.*, 1996; Bonham Carter and Cheng, 2001)。

本文要着重介绍的是应用模糊证据权方法的工作流程和应用效果。用于矿产资源预测的证据往往是某些空间地质特征及其分布模式。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的矿床数与研究区大小的比值。然后要计算在某种地学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。在处理连续性图层时,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,这样可以计算处于该地球化学值域范围内的成矿后验概率。然而,这样做的结果往往会造成图层信息的损失。为了克服以上不足,本文介绍的模糊证据权方法引进了模糊概率和模糊证据层的概念和模型,在此基础上形成了模糊证据权方法。文中介绍了该方法在云南三江成矿带镇沅地区金矿预测中的应用结果。该地区已经发现 2 处与超基性岩有关的热液型金矿床。该区域研究程度相对较低,但具有很好的找矿前景。本文主要采用 1:20 万水系沉积物地球化学资料和地质资料开展了矿产资源定位预测。确定了 2 种可能的矿床类型:中温热液和浅成低温热液矿床类型。为了克服只有 2 个矿床做训练集的困难,文中采用了由主成分分析方法得到的局部组合异常为训练点集,定义了地球化学局部奇异性组合、地球化学局部异常组合、距离超基性岩体边界的缓冲区、距离断裂构造的缓冲区等 4 个控矿因子,计算了每一因子的模糊权重,最后应用贝叶斯概率原理对多层模糊证据进行叠加,给出了整个研究区的矿床产出模糊后验概率图。该后验概率图反映了已知矿床和预测矿床的空间分布概率图。

1 研究区地质概况

研究区为镇沅(老王寨)及其邻区,沿哀牢山断裂呈NW-SE向展布,该区域位于金沙江-哀牢山缝合线的西部。地理坐标为东经 $100^{\circ}39' \sim 102^{\circ}15'$,北纬 $24^{\circ}51' \sim 22^{\circ}57'$ 。研究区面积约 $12\,610\text{ km}^2$,跨景东、镇沅、墨江、元江、新平、双柏、楚雄、红河及南华诸县。

滇西三江褶皱带是印度板块与欧亚板块相互拼合的转换地带。由于多期大地构造运动,沿深大断裂带的岩浆活动和变质活动非常强烈,古生代、中生代和新生代褶皱带都经受了不同程度的变形和变质作用,因而形成了一些多期构造-岩浆-变质杂岩带。多期次构造演化,尤其燕山中晚期以来的历次构造运动,为该区金-多金属成矿提供了极为有利的成矿地质构造环境和条件。红河深大断裂和墨江断裂带之间夹持的构造-岩浆-(沉积)变质带即是金-多金属矿床的有利产出地段。据云南省地矿局资料(1992)统计,在哀牢山成矿带已圈出面积超过 8 km^2 的金异常40多个,大多分布在九甲-墨江断裂与哀牢山断裂之间的浅变质岩系或古生界地层中,显示出具有良好的成矿远景,其中,探明具有一定储量规模的金矿床(点)20余处,铜厂、大坪、金厂、老王寨等金矿床均已达大型规模(薛传东等,2002)。

云南哀牢山金矿带是我国重要的产金基地,其特殊的成矿环境和成矿条件正引起国内外学者的研究兴趣(宋新宇等,1994;任胜利等,1995;黄智龙等,1999;薛传东等,2002;Ali,2005;Ali and Cheng,2005;Ali *et al.*,2006a,2006b)。带内著名的镇沅(老王寨)金矿田产于哀牢山金成矿带北段的浅变质岩系中,面积约 40 km^2 ,由总体呈北西-南东向延伸的烂泥塘、冬瓜林、老王寨、搭桥箐-比幅山和库独木等5个矿段组成,这几个矿段分布在老王寨周围 10 km^2 的范围之内。已探明金储量接近 100 t ,矿床的规模接近于超大型金矿床,并有望进一步扩大(薛传东等,2002)。老王寨和冬瓜林矿段的地质勘探和研究程度较高。

矿区出露哀牢山浅变质岩带的晚泥盆系、石炭系、二叠系浅变质岩和上三叠统砂砾岩(应汉龙和刘秉光,2000)。矿区内断裂构造发育,其展布大体可分为3组:(1)北西向断裂组(矿区一级构造),为矿区导矿构造;(2)北西西向断裂组(矿区二级构造),空间分布上属一级断裂组“入”字型分支断裂构造,为

矿区容矿构造,不仅决定了金矿化带的分布和规模,而且控制了金矿体的大小和品级变化;(3)北东向组及性质不明断裂组。矿区断裂构造具有长期活动性和演化历史,其活动期大致分为早(燕山期以前)、中(燕山期-喜马拉雅期)、晚(喜马拉雅期)3期(黄智龙等,1999)。矿区岩浆岩有超基性岩、基性火山岩、偏碱性斑岩、中基性和酸性脉岩等。超基性岩沿断裂分布,属于哀牢山超基性岩带的西亚带,超基性岩已经蛇纹石化,部分超基性岩经碳酸盐化、硅化、黄铁矿化、铬水云母化等热液蚀变形成金矿体。基性火山岩为玄武岩类和玄武质角砾岩,岩石常受到蚀变矿化形成矿石,部分煌斑岩经蚀变形成金矿体。偏碱性斑岩为石英斑岩-花岗斑岩-花岗闪长斑岩类。中基性岩脉主要为煌斑岩类,如橄辉云煌岩、云斜煌岩、闪煌岩等,呈脉状产出,部分煌斑岩经蚀变形成金矿体(何文举,1993;应汉龙和刘秉光,2000)。

区内围岩蚀变强烈,以硅化、粘土化、碳酸盐化(铁白云母化为主)、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化和铬水云母化最为普遍,其中金矿化与硅化、粘土化、碳酸盐化及黄铁矿化关系密切。辉锑矿化等发育相对较晚,且分布局限(任胜利等,1995)。根据蚀变特征及矿物共生组合的先后关系,老王寨金矿田的成矿作用分为4个成矿阶段:(1)第1阶段为白钨矿-石英脉形成阶段,温度较高,热液活动范围小,金矿化弱;(2)第2阶段分布广泛,主要为碳酸盐化、黄铁矿化、绢云母化和少量硅化,该阶段形成自然金-黄铁矿-毒砂组合,构成As Au矿化;(3)第3阶段发育碳酸盐化和黄铁矿化,形成自然金-黄铁矿-辉锑矿矿物组合,构成Sb Au矿化;(4)第4阶段热液活动较弱,形成石英和方解石,基本无金矿化(应汉龙和刘秉光,2000)。

2 GIS数据及工作流程

本次矿产预测中涉及的主要数据有:(1)地质数据。地质图是从国家1:20万地质图数据库中提取,全区共有607个地层单元。(2)矿产数据。研究区内已知金矿矿床仅有2处,其一为镇沅金矿,另一位于墨江县与元江县交界。相对研究区的总体范围来说,矿产信息严重缺乏,给采用数据驱动的预测方法带来困难。本文在应用证据权法等进行信息综合时采用了特别的预处理技术,从而保证预测方法的可靠应用。(3)化探数据。研究区内采用的1:20万水系沉

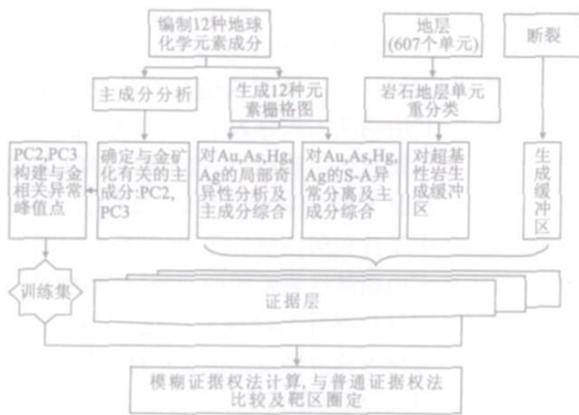


图 1 信息提取与信息综合处理流程

Fig. 1 Flow chart showing procedures of spatial information extraction and integration

积物地球化学数据来自 3 169 个采样点, 采样间距为 2 km, 本次研究所用分析元素包括 Ag, As, Au, Cd, Co, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Zn, Sn 等 12 种元素。

信息提取与信息综合处理流程: 在对区域地质、矿区地质进行调查研究基础上, 以 1 : 20 万地质图、矿产分布图、水系沉积物地球化学元素含量分布图为基础数据资料, 采用 GeoDAS 有效的信息处理方法和进行数据处理与信息提取, 开展镇沅(老王寨)地区的区域性矿产资源潜力评价与找矿靶区预测。在对数据特征进行深入研究的基础上, 主要开展如下工作(图 1): (1) 采用主成分分析方法提取与金成矿相关元素的有效组合信息(最终确定重点分析元素为 Au, As, Hg 和 Ag)。(2) 采用 S-A 方法对水系沉积物 Au, As, Hg, Ag 元素进行地球化学异常分解, 识别低缓化探异常。(3) 采用多重分形局部奇异分析方法对 Au, As, Hg, Ag 元素进行局部奇异性分析, 确定局部异常。(4) 选择合理的缓冲区距离, 对超基性侵入岩、断层等面状或线状控矿因素进行缓冲区分析, 确定其最佳控矿范围。(5) 采用模糊证据权法对该区成矿或控矿因素进行信息综合, 形成金矿矿产资源潜力分布图, 确定矿床预测靶区。

3 数据预处理与空间信息提取

GeoDAS 系统提供了众多较高级的数据处理、分析手段。本文中用到对化探数据的单变量分析、多变量分析(主成分分析)、对断层和岩体的缓冲区分析、多证据层综合模型等方法。

3.1 地质图的简化与信息提取

在研究区内的岩性单元共计 607 个, 根据与金矿的相关关系, 我们对地质图中的地质单元进行了必要归并和概括, 并创建了必要的属性表来反映主要岩石类型。合并后的岩性地质单元分为以下简单的几类: 火成侵入岩、变质岩、沉积岩。火成侵入岩进一步分为超基性岩、花岗岩和辉绿岩亚类。在这个重新分类的基础上, 形成简要地质图(图 2)。哀牢山断裂把变质地带分为西侧的浅变质带和东侧的深变质带。

3.2 地球化学数据的基本统计分析

直方图和 Q-Q 图分析可以提供简单的数据分布评价。研究发现, 所有 12 种地球化学元素的含量分布都是非正态的, 并且呈正偏分布。因此, 过去常用对数变换来改善数据正态状态。GeoDAS GIS 软件可方便地绘制各种统计图来了解数据的统计特征, 包括确定离散点群在地质图上的分布范围以及在表格数据库中的分布位置。Q-Q 图检验显示, 除了 2 个端尾外, 微量元素含量的主体服从对数正态分布, 2 个端尾的数据服从分形分布(Cheng *et al.*, 1994)。

在本研究中, 由于水系沉积物地球化学采样点在空间上是均匀分布的, 即每 4 km² 一个点, 为了不

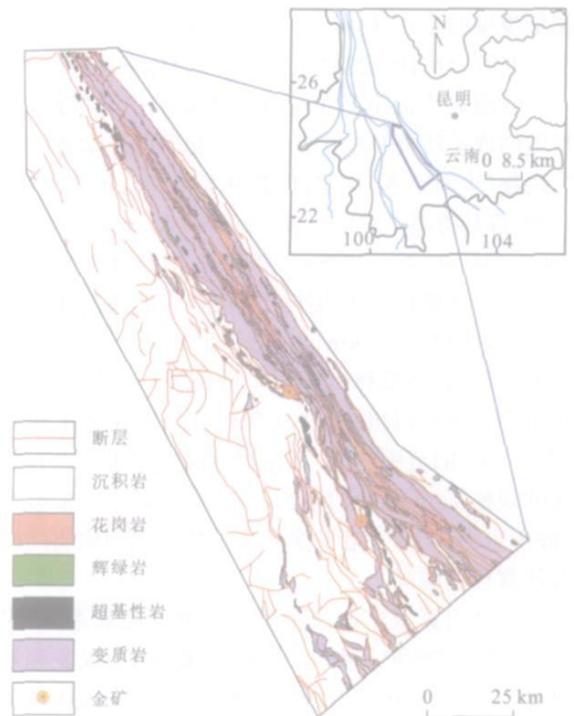


图 2 研究区地理简图及简要地质图

Fig. 2 Location and simplified geological units of the study area

再引入不确定性,构建的栅格数据仍然采用 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 的单元格,栅格中的数据值就是最邻近的采样点取值。

3.3 缓冲区的建立与距离有关成矿信息的提取

本区构造-岩浆活动强烈,与成矿关系密切。为了分析它们与矿床分布之间的最佳空间关系和使用这些关系作为证据层来预测金矿可能的所在位置,可在断层线和超基性侵入岩接触带周围生成缓冲区图。断层的缓冲区间距为 500 m ,缓冲带个数为 20 ,最大距离为 10 km ;对简要地质图中的超基性侵入岩的缓冲区距离以 1000 m 等间距增加,最大缓冲区距离为 20 km 。与金矿分布的最佳缓冲区距离可由证据权方法来确定。

3.4 主成分分析方法用于多元素组合成矿信息的提取

主成分分析法(principal component analysis, 简称 PCA)是一种对多元变量降维的统计方法。其原理是将众多具有一定相关性的原始变量重新组合成一组个数较少的互相独立的新因子,这些新的综合指标按照方差依次递减的顺序排列。综合指标保留了原始变量的主要信息,同时彼此之间又不相关,比原始变量具有更优越的性质,从而更能反映问题的实质,有利于结果的地质解释。

对研究区的 12 种元素作对数变换后进行了主成分分析,前 3 个主成分的结果是:

第 1 主成分 PC1 占总体方差的 44% , 12 个元素变量均具有正载荷,其高值主要出现在哀牢山变质带中的浅变质区域,PC1 总体上反映了元素浓集的区域背景。

第 2 主成分 PC2 占总体方差的 14% ,其正载荷反映了与金成矿相关的元素组合: Au As Ag Hg Ni Co Cu。以哀牢山断裂为界,PC2 在深变质带表现为明显的低值,而浅变质带相对要高,这暗示了 2 种不同的地质环境。在浅变质带内,PC2 的高值区域与已知矿产的位置相当吻合,同时在兰坪-思茅盆地内也有零星的高值出现。

第 3 主成分 PC3 占总体方差的 10% ,其负载荷反映了与金成矿相关的一套元素组合: Au As Ag Hg Pb Cd。组合中 Pb Ag Hg 的出现说明 PC3 反映了浅成低温的元素组合。已知矿点同样出现在其高值区域,并且兰坪-思茅盆地内以及深变质带内都出现了明显的 PC3 的高值。

PC2 与 PC3 不同分布特点也许指示不同的矿

床类型,PC2 与浅变质带内与超基性岩相关的金矿有关,PC3 则可能与沉积岩(或深变质带)的浅成低温成矿有关,尽管后者尚未有矿床发现的直接证据。具体结果可参见 Ali *et al.* (2006b)。

3.5 地球化学局部异常与复合异常分析

地球化学异常的空间结构从另一个侧面描述了异常的特性。化探异常除了可以体现含量数值的与众不同之外,还经常在局部尺度上显示特殊的空间模式或频率特性。对局部结构性质的量化有助于理解异常的结构并提供异常识别的新的线索。在多重分形中定义的奇异性指数 α 可以用来度量这种局部标度性质。正奇异的地区($\alpha < 2$)对应于由于矿化作用或其他局部地质过程而引起的元素富集的地段;负奇异的地区($\alpha > 2$)对应于元素亏损的地段;无奇异的地区对应于背景场,一般在地球化学图中占多数(Cheng, 1999)。从空间统计观点来看,在地球化学图上的大多数数据($\alpha \approx 2$)符合正态分布或对数正态分布,而在图上小部分数据($\alpha \neq 2$, 2 端截尾极高值和极低值)可能符合分形分布(Cheng *et al.*, 1994)。在本研究区,由于已知矿产出露地表造成强烈的地球化学异常,因而掩盖了其他地区可能隐伏矿体引起的化探异常的显示。为了增强和突出局部异常,采用 GeoDAS 提供的局部奇异性分析方法计算了 Au、As、Hg、Ag 四种元素的局部奇异性指数(最大的滑动窗口大小为 $20\text{ km} \times 20\text{ km}$),具体结果可参见(Ali *et al.*, 2006a)。已知的 2 个金矿床都位于局部异常($\alpha < 2$)中,其他异常区域可以指示矿致异常。Au、As 局部异常主要出现在浅变质带并且沿着哀牢山断裂 NNW-SSE 方向附近展布。对 Ag、Hg 异常,尤其是后者,在沉积岩内有明显的显示。

矿化作用引起的异常模式和一般地质过程造成的空间性质、几何性质、频率性质以及尺度变化性质通常是不同的。正确地量化这些性质对于弱异常和复杂异常的识别来说显得非常必要。“能谱-面积”方法或称“S-A”方法(Cheng *et al.*, 2001; Cheng, 2004)提供了一种新的异常分解方法。S-A 方法可以对地球化学数据展现的广义自相似性及空间模式的各向异性标度特征进行量化。它不仅能对不同深度地质体引起的各向同性异常进行分离,而且也能对更加一般的地质过程引起的各向异性异常进行分离。例如由矿化作用引起的局部地球化学异常能从区域背景中分离出来。这个方法可将地球化学图从空间域变换到频率域,基于不同广义自相似性可以

构建分形滤波器,最后经反变换得到分解后的背景图和异常图.由于强烈的构造-岩浆活动,背景和异常出现叠加和混合是常见的,在变化强烈的背景中弱异常是难识别的,因此应用传统的统计分析方法对异常和背景分离很难获得满意的效果.本文采用了SA方法对Au, As, Hg, Ag等元素进行了异常和背景的分解,具体结果可参见Ali *et al.* (2006a).

4 模糊证据权法及金矿矿产资源综合评价

以矿产资源评价为应用目的且使用最普遍的信息综合方法之一应属证据权法.证据权法的应用原理和流程与找矿勘探者确定找矿靶区而进行不同地质图件的人工组合过程非常相似.因此,证据权法是很受地质人员欢迎的信息综合方法. GIS 为证据权法的实现提供了便捷友好的工具.在GIS环境下采用证据权法生成矿产资源潜力图的程序可以分为以下5个主要步骤:(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、预测区的解释和靶区的圈定.

在证据权法中,证据层通常为二态或三态图.对于具连续属性的数据,最常用的方法是离散化成二态或三态图层.然而,在实际中,将连续型转化为离散型图层,往往会丢失一些信息.除此之外,在预测过程中由于存在勘探程度的不同,以及数据质量的差异也会造成数据具有不确定性,这样会给证据层的定义带来不便.为了克服以上困难,将不确定性减到最小,Cheng and Agterberg (1999)提出了模糊证据权法(fuzzy weights of evidence).模糊证据权法是对传统证据权方法的推广.模糊证据权法用多值模糊隶属度函数($0 \leq \mu(A) \leq 1$)把证据层定义为模糊集,普通证据权法中的二值或三值模式是模糊集的特殊情形,例如 $\mu(A) = 1$ 或 0 对应二值模式; $\mu(A) = 0, 0.5, 1$ 对应三值模式.模糊证据权方法的实施包括以下6个步骤(Cheng and Zhang, 2002):(1)确定研究目标,如确定预测尚未发现的矿床类型;(2)确定与目标相关的空间图层;(3)提取与目标

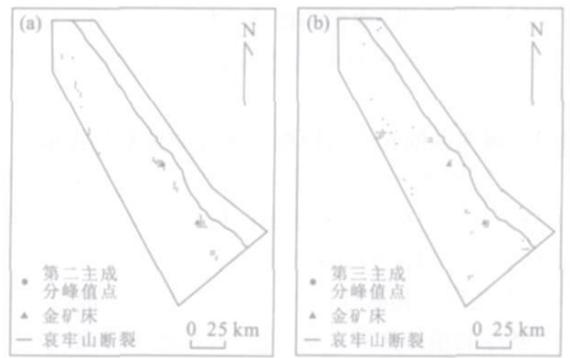


图 3 由主成分 PC2 和 PC3 构建的与金相关峰值点
Fig. 3 Peak points created from absolute high values of PC2 and PC3

a. PC2 构建峰值点, b. PC3 构建峰值点

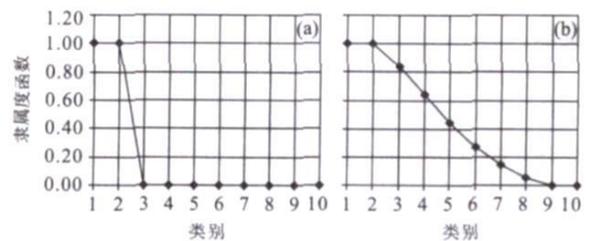


图 4 JS_PC1 与隶属度函数的关系

Fig. 4 Fuzzy membership functions calculated using JS_PC1 and the second training point set

a. 普通证据权法隶属度函数示意图; b. 模糊证据权法隶属度函数示意图; 计算采用了第 2 类金相关峰值点集(来源于 PC3)

相关证据层,用模糊隶属度函数表示证据层的可信度;(4)计算模糊证据层的权重(确定证据层的重要性);(5)综合多个模糊证据层,计算后验概率形成矿产资源潜力分布图;(6)模型检验和预测区解释.

4.1 与金相关地球化学组合异常峰值点集的构建

研究区GIS数据库的矿产数据中只有2个已知的金矿床,直接应用这2个矿床作为训练点集进行证据层的研究和综合是不充分的.鉴于在实际成矿过程中,金元素往往不会单独产出,因而往往造成组合元素异常(主要成矿元素和伴生元素).为了定义训练点集,我们采取了一种替代的方式,即构建“与金相关的组合异常峰值点(gold association peak)”,并将其看作最有可能成为“已知金矿点”,由此构成训练点集.

由于研究区的12种元素产生的第2主成分PC2和第3主成分PC3分别可能反映2种不同的成矿类型(可能是由于多期矿化或不同的矿化类型

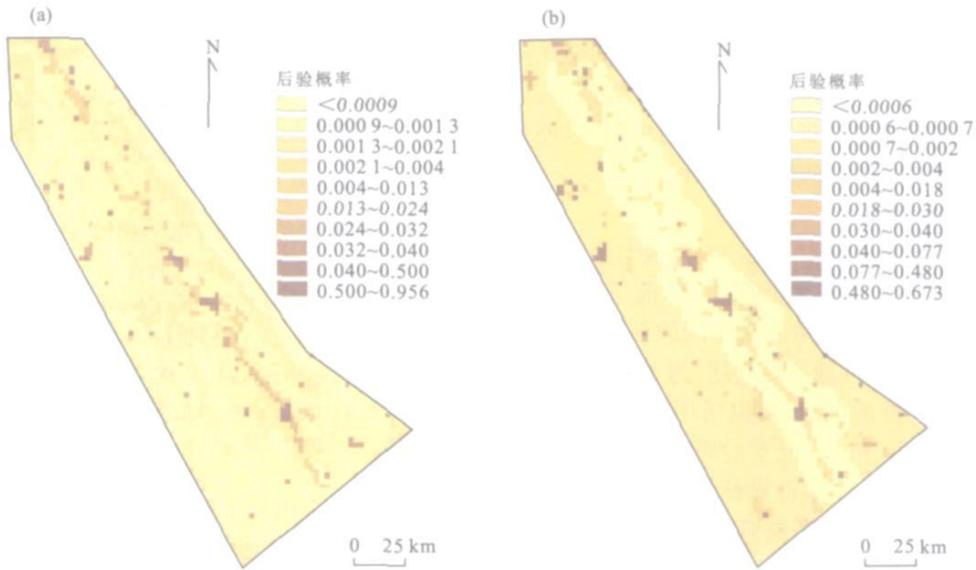


图 5 采用普通证据权法计算的金的后验概率

Fig. 5 Posterior probability map of Au created by using ordinary weights of evidence method

a. PC2 峰值点为训练集, 最小值: 0.000 71, 最大值: 0.955 71, 均值: 0.008 50, 极差: 0.064 88, 标准差: 0.004 21; b. PC3 峰值点为训练集, 最小值: 0.000 62, 最大值: 0.672 96, 均值: 0.010 79, 极差: 0.672 33, 标准差: 0.067 43

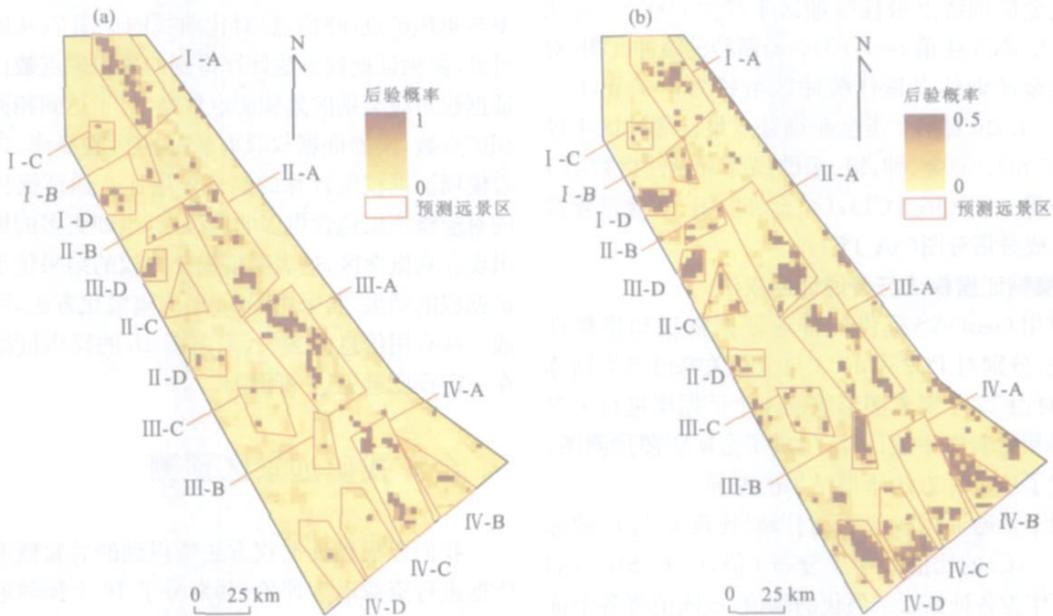


图 6 采用模糊证据权计算的金的后验概率图及资源潜力远景区预测

Fig. 6 Posterior probability map of Au and target areas favorable for Au mineral deposits delineated by fuzzy weights of evidence method

a. PC2 峰值点为训练集, 最小值: 0.000 78, 最大值: 0.955 71, 均值: 0.072 24, 极差: 0.954 93, 标准差: 0.129 13; b. PC3 峰值点为训练集, 最小值: 0.000 000 2, 最大值: 0.495 40, 均值: 0.056 51, 极差: 0.495 40, 标准差: 0.107 04

作用的结果), 分别取其绝对高值作为与金相关的峰值区或金矿床靶区(对 PC2 取正的极高值, 对 PC3 取负的极低值), 于是可以在 GIS 环境下生成峰值

点图. 在本项研究中将具有极值的前 50 个栅格提取出来(约占 1.5%的总图栅格数), 转换成 GIS 点图(图 3). 在 2 个已知的金矿区相对减少一些点以减

少已知金矿床的影响程度,并相对增加尚未发现矿床区域的点.为了比较可能存在的 2 种不同金矿类型,分别用主成分 PC2 和 PC3 生成矿点数据图,这些点将作为训练点进行证据权方法的应用,以便预测潜在的 2 种不同类型的金矿远景区.

4.2 证据层的选择

应用 WofE 的关键步骤之一是生成与金矿化有关的控矿或找矿地质要素证据层.如前所述,通过 GIS 处理和分析,可以提取多种不同的证据层.作为证据层,需要考虑条件独立性问题,为了避免证据图层间的条件独立性的破坏,可以采用主成分分析方法将 Au, As, Hg 和 Ag 元素的局部奇异性指数图进行综合,形成组合局部奇异性指数分布图,记为 JS_PC1.同样地,将 SA 分解后产生的 Au, As, Hg 和 Ag 元素局部异常图进行综合,形成组合局部异常图,记为 SA_PC1.

最终选取如下证据层来进行金矿综合预测:(1)超基性岩的缓冲区图(对第 1 类金矿训练点最佳缓冲区半径为 3 000 m,对比度 $C=2.54$,学生值 $t=8.2$;对第 2 类金矿训练点最佳缓冲区半径为 4 000 m,对比度 $C=0.52$,学生值 $t=1.63$);(2)断裂的缓冲区图(对第 1 类金矿训练点最佳缓冲区半径为 1 000 m, $C=0.43$, $t=1.29$;对第 2 类金矿训练点最佳缓冲区半径为 1 500 m);(3)金、砷、银、汞的局部奇异性指数第 1 主成分得分图(JS_PC1);(4)金、砷、银、汞含量异常第 1 主成分得分图(SA_PC1).

4.3 模糊证据权法与普通证据权法

应用 GeoDAS 提供的普通证据权法和模糊证据权法,分别对 PC2 和 PC3 与金相关峰值点为训练点集,对由 12 个要素图形成的 4 个证据层进行了先验概率和后验概率的计算,生成了金矿资源预测图,并比较了这 2 种方法所得结果的差异.

对于普通证据权法,我们以对比度 C 与 C 的标准偏差 $S(C)$ 的比值 t (学生分布 t 值, $t=C/S(C)$) 的极大值作为各证据层二值化的阈值,该阈值将各个证据层分为边界截然的二值图.而对于模糊证据权法,它的证据层将由所谓的隶属度函数(MSF)进行重分类,MSF 可在闭区间 $[0, 1]$ 上任意取值,其图形表现为一条渐变曲线.一般地,根据 t 值大小来确定各类的 MSF 取值,GeoDAS 提供的曲线拟合功能可实现自动赋值.图 4a、4b 分别给出了普通证据权法隶属度函数图和模糊证据权法隶属度函数图,由局部奇异性指数图形成的第 1 主成分图(JS_PC1)与来源于

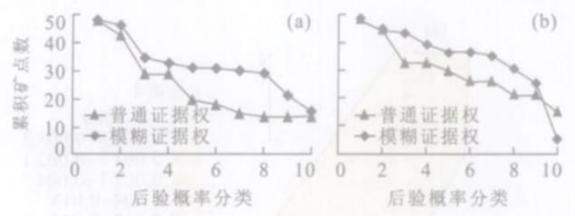


图 7 普通证据权法和模糊证据权法计算后验概率结果分类与累积矿点(峰值点)对比曲线

Fig. 7 Plotting cumulative training points versus classifications of the posterior probabilities to contrast the optimum results from ordinary WofE and fuzzy WofE
a. PC2 峰值点为训练集; b. PC3 峰值点为训练集,共分 10 类,以 0.1 为概率间距,类别 10 具有最高概率,按概率由高到低累积

PC3 的第 2 类金相关峰值点计算得到.从隶属度函数的角度,普通证据权法可以看作是模糊证据权法的特例,其隶属度函数为 2 种取值的分段函数.隶属度函数确定之后,便可计算模糊权重以及相关的统计量.普通证据权法和模糊证据权法所计算的后验概率结果及最终预测图分别见图 5 和图 6.我们将后验概率图分成 10 类,普通证据权法和模糊证据权法后验概率与累积矿点(峰值点)对比曲线图见图 7,从图 7 中可见,模糊证据权方法计算得到的累积矿点数比普通证据权对应类别的累积矿点数高,对于达到相同的累积矿点数,模糊证据权具有较高的后验概率.这意味着模糊证据权所计算的高概率层比普通证据权计算的对应概率层包含更多的训练点,也即更多的训练点出现在高概率区,这表明模糊证据权的结果优于普通证据权的结果.若采用图 4a 中的离散化方法,可能造成一些有用信息的丢失,采用图 4b 的模糊证据可以在一定程度避免这一问题.

5 金矿找矿远景区预测

我们以模糊证据权方法所得到的后验概率图为依据进行资源潜力评价,共划分了 16 个预测远景区(图 6).按等距性从北至南划分为四大远景地段: I、II、III、IV.每一远景地段按与基性-超基性岩群距离远近,各自分出 A、B、C、D 四种不同类型.(1)对 A 类型远景区:以基性-超基性岩群延展方向为中心线呈近南北向展布,PC2 与 PC3 均具有较高的后验概率,基性-超基性岩群发育,断裂构造极为发育,高温-中温矿产类型丰富,如铬矿、镍钴矿、石棉矿等,远景区 IIIA 中出露有著名的镇沅金矿;(2)对

B 类型远景区: 处于与 A 类远景区空间毗邻部位, PC3 具有较高的后验概率, 而 PC2 较高后验概率反映不甚明显, 仅出现在若干有限位置, 主要出露地层为二叠系、三叠系和侏罗系, 断裂构造较发育, 该区目前已发现矿产类型较少; (3) 对 C 类远景区: 它距离超基性岩群稍远之, 约距 20 km, PC3 具有较高的后验概率, 而 PC2 较高后验概率反映不甚明显, 主要出露地层为侏罗系、白垩系, 区内断裂简单, 已发现金属矿产主要为铜矿和铅锌矿, 远景区 IV C 中还分布有辉绿岩体群; (4) 对 D 类远景区: 出现在研究区左侧边缘, 距离超基性岩群最远, 约距 30 km, 主要出露地层为三叠系、侏罗系、白垩系、区内断裂不发育, 已发现金属矿产主要为铜矿和铅锌矿和汞矿。对 I-D 和 II-D, PC2 与 PC3 均具有较高的后验概率, 对 III-D 和 IV-D, PC3 具有较高的后验概率, 而 PC2 较高后验概率反映不甚明显。

6 结论

本论文首次将 GeoDAS GIS 中提供的模糊证据权新技术应用于云南省矿产资源评价中。论文较详细地介绍了工作流程, 以便在其他地区应用该技术时做参考, 该方法有望成为矿产资源评价和预测的标准方法。在镇沅(老王寨)及其邻区金矿资源潜力评价中的应用表明: 模糊证据权方法较普通证据权方法具有信息损失少、预测精度高等优点。在研究区不具备大量已知矿床分布的情况下, 可以采用地球化学异常作为训练集使用。文中通过应用主成分分析方法确定了该地区可能存在的 2 种不同成矿类型。并在此基础上, 分别采用普通证据权和模糊证据权方法编制了成矿后验概率图, 圈定了有利成矿地段, 其预测结果对进一步开展找矿工作部署具有重要的参考意义。

References

- Agterberg, F. P., 1989. Computer programs for mineral exploration. *Science*, 245, 76–81.
- Agterberg, F. P., Bonham Carter, G. F., Cheng, Q. M., et al., 1993. Weights of evidence modeling and weighted logistic regression for mineral potential mapping. In: Davis, J. C., Herzfeld U. C., eds., *Computers in geology*. Oxford University Press, New York, 13–32.
- Agterberg, F. P., Cheng, Q. M., 2002. Conditional independence test for weights of evidence modeling. *Natural Resources Research*, 11(4): 249–255.
- Ali, K., 2005. Application of GeoDAS and other advanced GIS technologies for modeling stream sediment geochemical distribution patterns to assess gold resources potential in Yunnan Province, South China. Unpublished M. Sc. theses. York University, Toronto, Canada, 166.
- Ali, K., Cheng, Q. M., 2005. Separation of geochemical anomalies from backgrounds using multifractal power spectrum analysis: A case study from Yunnan Province, South China. *Proceedings of IAMG 05: GIS and Spatial Analysis*. Edited by Qiuming Cheng & Graeme Bonham Carter, 1, 464–469.
- Ali, K., Cheng, Q. M., Chen, Z. J., 2006a. Multifractal power spectrum and singularity analysis for modelling stream sediment geochemical distribution patterns to identify anomalies related to gold mineralization in Yunnan Province, South China (accepted by GEEA).
- Ali, K., Cheng, Q. M., Li, W., et al., 2006b. Multi element association analysis of stream sediment geochemistry data for predicting gold deposits in Yunnan Province, South China. *GEEA*, 6: 341–348.
- Bonham Carter, G. F., 1994. *Geographic information system for geosciences: Modelling with GIS*. Pergamon Press, Oxford, 398.
- Bonham Carter, G. F., Cheng, Q. M., 2001. Spatially weighted principal component analysis. Presented at IAMG2001 Meeting, Cancun, Mexico, September, 6–12.
- Bonham Carter, G. F., Agterberg, F. P., Wright, D. F., 1989. Weights of evidence modeling: A new approach to mapping mineral potential. In: Agterberg, F. P., Bonham Carter, G. F., eds., *Statistical applications in the earth sciences*. Geological Survey of Canada, 89–9, 171–183.
- Cheng, Q. M., 1999. Multifractal interpolation. In: Lippard, S. J., Naess, A., Sinding Larsen, R., eds., *Proceedings of the fifth annual conference of the international association for mathematical geology*, Trondheim, Norway, Vol. 1, 245–250.
- Cheng, Q. M., 2004. A new model for quantifying anisotropic scale invariance and decomposing of complex patterns. *Mathematical Geology*, 36(3): 345–360.
- Cheng, Q. M., 2006. GIS Based fractal anomaly analysis for prediction of mineralization and mineral deposits. In: Jeff, H., ed., *GIS applications in earth sciences*. Special Paper of Geological Association of Canada, 285–296.
- Cheng, Q. M., Agterberg, F. P., 1999. Fuzzy weights of evi-

- dence method and its applications in mineral potential mapping. *Natural Resources Research*, 8(1): 27–35.
- Cheng Q. M., Bonham Carter G. P., 2005. Proceedings of IAMG 05: GIS and spatial analysis. Annual Conference of International Association for Mathematical Geology Toronto, Canada.
- Cheng Q. M., Zhang S., 2002. Fuzzy weights of evidence method implemented in GeoDAS GIS for information extraction and integration for prediction of point events. In: Proceedings of IEEE international conference of geosciences and remote sensing (IGARSS02), Toronto, Canada, June 3, 24–28.
- Cheng Q. M., Agterberg F. P., Ballantyne S. B., 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Exploration Geochemistry*, 51(2): 109–130.
- Cheng Q. M., Agterberg F. P., Bonham Carter G. F., 1996. Spatial analysis method for geochemical anomaly separation. *Journal of Exploration Geochemistry*, 56(3): 183–195.
- Cheng Q. M., Agterberg F. P., Bonham Carter G. F., 1996. Fractal pattern integration method for mineral potential mapping. *Journal of Nonrenewable Resources*, 5(2): 117–130.
- Cheng Q. M., Xu Y., Grunsky E., 2001. Multifractal power spectrum area method for geochemical anomaly separation. *Natural Resources Research*, 9(1): 43–51.
- He W. J., 1993. Characteristic of the lamprophyer and the relation with gold mineralization in Zhenyuan gold mine field. *Yunnan Geology*, 12(2): 149–158 (in Chinese with English abstract).
- Huang Z. L., Liu C. Q., Zhu C. M., et al., 1999. The origin of lamprophyres in the Laowangzhai gold field, Yunnan Province and their relations with gold mineralization. Geological Publishing House, Beijing, 250 (in Chinese).
- Krishnan, S., Journel A., 2004. Evaluating information redundancy through the Tau model. In: *Geostatistics Banff 2004, Quantitative Geology and Geostatistics Vol. 14*, Leuangthong O., Deutsch C., V. eds., XXV III ISBN: 1–4020–3515–2, Springer, Volume 2.
- Ren S. L., Qin G. J., Chi S. C., et al., 1995. Au origin of Laowangzhai Donggualin gold deposit, Zhenyuan County, Yunnan Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 20(1): 47–52 (in Chinese with English abstract).
- Song X. Y., Ren S. L., Qin G. J., 1994. Characteristics of metallogenic tectonics of Laowangzhai gold deposit and occurrence regularity of its orebody. *Gold*, 15(9): 7–11 (in Chinese with English abstract).
- Thiart, C., Bonham Carter G. F., Agterberg, F. P., et al., 2006. An application of the new omnibus test for conditional independence in weights of evidence modeling. In: Jeff H. eds., *GIS applications in earth sciences*, Special paper of Geological Association of Canada, 131–142.
- Xue C. D., Liu X., Tan S. C., et al., 2002. Typomorphic characteristics of main minerals from Laowangzhai gold deposit, western Yunnan. *J. Mineral Petrol.*, 22(3): 10–16 (in Chinese with English abstract).
- Ying, H. L., Liu, B. G., 2000. The trace element and isotope composition and their restriction on the origin mineralization matter of Laowangzhai gold ore deposit, Yunnan. *Gold Science and Technology*, 8(2): 15–20 (in Chinese with English abstract).
- 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).

附中文参考文献

- 何文举, 1993. 镇源金矿田煌斑岩特征及其与金矿成矿的关系. *云南地质*, 12(2): 148–158.
- 黄智龙, 刘丛强, 朱成明, 等, 1999. 云南老王寨金矿区煌斑岩成因及其与金矿化的关系. 北京: 地质出版社, 250.
- 任胜利, 秦功炯, 池三川, 等, 1995. 云南镇源老王寨—冬瓜林金矿床的成矿物质来源. *地球科学——中国地质大学学报*, 20(1): 47–52.
- 宋新宇, 任胜利, 覃功炯, 1994. 老王寨金矿成矿构造特征及矿体赋存规律. *黄金*, 15(9): 7–11.
- 薛传东, 刘星, 谈树成, 等, 2002. 云南老王寨金矿床主要矿物的标型特征. *矿物岩石*, 22(3): 10–16.
- 应汉龙, 刘秉光, 2000. 云南老王寨金矿床微量元素和同位素组成及对成矿物质来源的限定. *黄金科学技术*, 8(2): 15–20.
- 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.