

折衷型多属性模糊决策模型在青海祁连山玉石沟铜锌矿区成矿预测中的应用

杨琴,刘湘南,刘文灿,刘美玲,龙亚谦,刘烽

中国地质大学(北京),北京,100083

内容提要:本文建立基于模糊多属性决策方法的综合信息矿产预测模型,对青海省祁连山玉石沟成矿区铜锌矿进行预测。通过对玉石沟地质特征及成矿规律的研究,选取矿化蚀变、控矿地层岩性、控矿构造、铜锌元素异常等矿化信息,运用GIS技术进行关联和分析,建立研究区铜锌矿成矿预测指标,并利用折衷型模糊多属性决策方法对成矿预测指标进行综合和决策。通过确立每个预测指标的模糊正负理想值,采用加权欧氏距离测度工具来计算评价单元与模糊正负理想之间的距离,在此基础上再计算评价单元对正理想值的隶属度来表示成矿有利度。圈出了8个铜锌矿成矿远景区,1个Ⅰ级远景区,3个Ⅱ级远景区,4个Ⅲ级远景区。与经典的模糊综合评判预测模型的结果进行比较,成矿有利区更加收敛。成矿远景区多位于大断裂和次生断裂交汇处,说明研究区断裂发育强烈的交汇地带有良好的找矿前景。

关键词:模糊多属性决策;成矿预测;铜锌矿区;青海玉石沟

成矿系统是由相互作用和相互依存的若干部分(要素)结合成的有机整体,是众多控矿因素综合作用的结果,各控矿因素有些可以采用定量的方法来度量,有些则不能用定量的数值来表达,而只能用客观模糊或主观模糊的准则进行推断或识别(翟裕生,2003;杨毅恒等,2000)。因此,自从1965年美国控制论专家 Zadeh 提出模糊数学这一概念后,模糊数学在矿产资源评价领域中得到广泛的应用。目前,在矿产资源评价中最常用的模糊数学方法主要有三类:模糊模式识别,模糊逻辑和模糊综合评判。模糊模式识别主要是通过对成矿特征图形进行模糊识别并进行量化的相似类比研究,依据类比的结果对研究区成矿规律进行预测。模糊BP神经网络模型使用实现了对深部盲矿体成矿富集规律的预测,也有学者运用模糊模式识别理论,采取随机抽取测试岩体方式,对含矿性已知岩体进行识别从而达到对研究区铬铁矿远景区的预测(邵拥军等,2007; Leite et al., 2011; Fan Dongli et al., 2011)。模糊逻辑在矿产预测中的应用,主要分为两步,第一是输入变量模糊化,即把输入变量转化为由隶属度描述的模糊集;其次是应用模糊算子综合模糊集。国外学

者进行模糊逻辑建模,识别出了维多利亚西部的大规模热液镍矿;国内该方法在秦岭—松潘成矿区进行金矿潜力预测,确定了几个区域规模的金成矿区带(邢学文,2006; Lisitsin et al., 2013)。随着模糊数学方法在成矿预测研究中的深入和扩展,模糊决策理论也逐渐被应用到成矿预测中。模糊综合评判模型是用来解决含有非定量变量的多属性决策问题,在成矿预测中的应用大多数结合层次分析法,证据权证法来确定模糊因子的权重,从而建立成矿预测模型,更好地实现定量与定性分析的结合。许多学者已经作出了一些研究,彭省临等(2009)利用模糊数学方法,结合AHP(层次分析法),建立了模糊层次综合评判模型,并用于对个旧矿区阿西寨测区5个异常区的综合评价研究;成秋明等(2007)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,结果表明对比普通证据权证法,模糊证据权方法可减小图层离散化造成的有用信息损失,提高预测结果精度。大多数基于数据的成矿预测模型侧重于通过研究已知矿点挖掘控矿因素和成矿之间的内在关系,以便提取最佳的预测指标。但是,如何有机组合并最大限

注:本文为中国地质调查局青海柴达木周缘及邻区成矿带地质矿产调查评价项目的成果(项目编号:1212011121188)。

收稿日期:2013-07-11;改回日期:2014-02-28;责任编辑:章雨旭。

作者简介:杨琴,女,1987年生。硕士研究生。地理信息系统、测绘工程专业。Email:yangqinxif@126.com。通讯作者:刘湘南,男,1964年生。教授,博士生导师。主要从事资源环境遥感信息机理和应用模型等研究。Email:liuxncugh@163.com。

度利用预测指标的信息量对评价单元进行决策也是成矿预测要解决的关键问题。对此,前人在已有模型的基础上也提出了很多改进的方法来优化评价对象优选过程,例如 Fuzzy outranking, ELECTRE 等(郝佰伍, 2010; Geldermann, 2000; Abedi, 2012; 张宝一等, 2012)。但这些方法大多都从纯数学的角度进行优化,容易忽略矿产资源数据本身的特点,在对模糊性矿产指标定量化的问题上处理不够灵活,不能充分挖掘模糊性矿产指标的信息量为预测服务。本文采用折衷型模糊多属性决策方法是将经典的多准则决策法、模糊优选法、模糊层次分析法、模糊综合评价法结合在一起的一种多属性决策方法,不仅可以 将各种离散的地质因素有机综合起来,而且针对矿产资源数据的特性对不同的模糊性指标进行不同的处理,充分利用各预测指标信息,优化了评价单元优选过程,提高了成矿预测的易操作性和准确度,也为具有模糊性指标的多属性决策问题提供新的解决途径(Abedi, 2012)。

1 研究区地质背景与成矿规律

玉石沟位于青海省北部(东经 98°30′~99°00′, 北纬 38°35′~38°40′),地貌上属青藏高原北缘,行政区划隶属青海省祁连县。研究区地层归于西域板块秦祁昆地层大区,以托勒河隐伏深断裂为界,横跨了北祁连、中祁连两个地层分区,北部为北祁连地层分区肃南—祁连小区,南部为中祁连地层分区疏勒山小区(图 1)。

区内构造运动频繁,主要断裂为呈北西—北西西向延展的托来山断裂带,次要断裂也极为发育。南北两侧沉积建造差异明显,并控制区内岩浆岩的分布。褶皱为托来山复背斜,总体呈北西西走向,平面上呈横卧的“S”形,核部和两翼皆由古元古界变质岩系组成,两翼次级褶曲发育,多次遭受断层和侵入岩的破坏。区内早古生代火山活动强烈,加里东中期超基性岩极其发育,呈楔状侵入下奥陶统阴沟群中。主要为蛇绿岩套,由堆晶纯橄岩、辉长岩、橄长

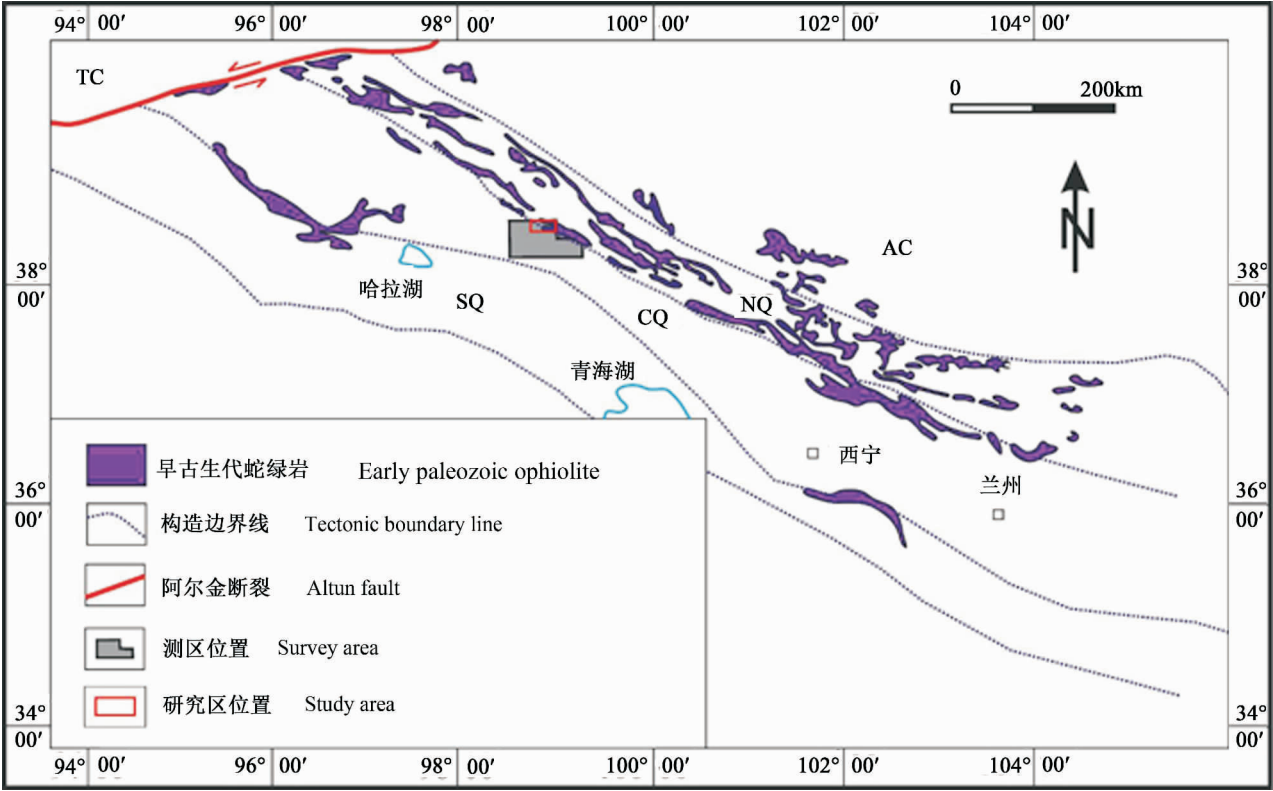


图 1 祁连山地区大地构造简图(据 Alan et al. ,2006 修改)

Fig. 1 Tectonic of Qilian Mountains

AC—阿拉善陆块;NQ—北祁连缝合带;CQ—中祁连陆块;SQ—南祁连陆块;TC—塔里木陆块
AC— Alxa continental block; NQ— North Qilian suture zone; CQ— Central Qilian continental block;
SQ— Southern Qilian continental block; TC— Tarim continental block

岩、辉绿岩和玄武岩等组成,岩体分异良好,相带明显,受构造破坏强烈,岩石普遍破碎,后期中低温热液蚀变普遍。研究表明基性火山岩和超基性岩对成矿作用控制明显(郑振华,2012)。

早期的矿产勘察工作中,已发现与玉石沟毗邻的阴凹槽铜锌矿床产于阴沟群浅变质中基性火山岩中,为一小型矿床,属火山热液型。区内成矿在时间和空间上受超基性岩和中基性火山岩控制,与断裂构造活动和热液作用有关。

2 成矿预测模型原理

成矿预测模型的建立,是在深入研究控矿条件、找矿信息与成矿规律的基础上,通过对刻画矿体存在矿床控制因素和找矿标志因素的系统分析,归纳出用于圈定矿体可能存在的空间区域的概念模型(赵鹏大,2011)。基于模糊多属性决策模型的预测模型,首先要确定目标集,建立预测准则及其权重:① 目标集,研究区所有评价单元的成矿预测综合有利程度;② 预测准则即指标层,包括参与预测的地质类要素,遥感类要素以及地球化学类要素;③ 预测指标权重,依据各个指标层对成矿的影响程度确定其在预测过程中所占比重。成矿预测模型基本框架确立之后,用折衷模糊多属性决策方法对各控矿因子进行集成和决策。

折衷型模糊多属性决策是在经典的多准则模糊多属性决策上发展而来的。折衷型模糊决策的基本原理是:从原始的样本数据出发,先虚拟模糊正理想和模糊负理想,其中模糊正理想是由每一个指标中模糊指标值的极大值构成;模糊负理想是由每一个指标中模糊指标值的极小值构成。然后采用加权欧氏距离的测度工具来计算各备选对象与模糊正理想和模糊负理想之间的距离。在此基础上,再计算各备选对象属于模糊正理想的隶属度,其方案优选的原则是,隶属度越大,该方案越理想。该方法的关键步骤为:

(1)指标和权重数据表达成模糊数的形式。由于三角模糊数的易操作性,将指标和权重数据按照定性和定量的不同分别转换成三角模糊数,得到的模糊指标矩阵为:

$$F = (f_{ij})_{m \times n}$$

(2)构造模糊决策矩阵。由于异源的各指标之间存在着不可公度性,因此需要用数学方法对其进行归一化处理,消除其的量纲,数量级,属性类别的影响。将归一化后的控矿模糊指标矩阵 R 进行加

权处理可得到控矿模糊决策矩阵:

$$D = (f_{ij})_{m \times n}$$

(3)确定模糊正理想 M^+ 与模糊负理想 M^- 。假设分量 $M_j^+ = \max r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{nj} (j = 1, 2, \dots, n)$ 是控矿模糊决策矩阵 D 中第 j 列的控矿指标所对应的模糊极大值; $M_j^- = \min r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{nj} (j = 1, 2, \dots, n)$ 控矿模糊决策矩阵 D 中第 j 列的控矿指标所对应的模糊极小值。则控矿指标的模糊正理想和模糊负理想可表示为 $M^+ = (M_1^+, M_2^+, \dots, M_j^+)$, $M^- = (M_1^-, M_2^-, \dots, M_j^-)$ 。

(4)确定各评价单元和模糊正理想 M^+ 与模糊负理想 M^- 之间的距离。选择加权欧氏距离的测度工具来计算各备选对象与模糊正理想和模糊负理想之间的距离。

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^6 (r_{ij} - M_j^+)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^6 (r_{ij} - M_j^-)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

(5)评价单元排序优选。评价单元的优选将选用评价单元从属于模糊正理想的隶属度 μ_i 作为度量值。 μ_i 代表了评价单元的成矿有利度。选取阈值将评价单元的的进行分级,圈出远景区。

$$\mu_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

3 铜锌矿预测指标提取

相似类比理论是矿床预测的基础,该理论的提出的假设前提是在相似的地质环境中,应该有相似的成矿系列和矿床产出(陈永清等,2009)。玉石沟与阴凹槽毗邻,地层岩性组合,构造分布都具有相似性,因此参考阴凹槽铜锌矿的控矿因素分析提取玉石沟铜锌矿成矿预测指标。本文收集到该区域的地质、地球化学、遥感等三方面的数据来提取成矿预测的指标,分别有 1: 5 万基础地质图、1: 20 万的地球化学数据、Landsat ETM + 遥感影像数据,在 ArcGIS9.3 软件平台上对其进行分析和提取,统一表达成栅格数据的形式,并对矿化蚀变、断层、岩性等定性的成矿指标进行等级划分,为后续的决策做准备。定性的控矿指标将依据其与成矿的关系疏密程度,分别划分为 ABCD 四个等级,其依次表示最可能成矿地段、中等可能成矿地段、可能成矿地段、不利于成矿地段(陈永清等,2009;陈建平,2008)。

3.1 矿化蚀变信息提取

矿化一般总伴随着一定面积的有指示性的矿化

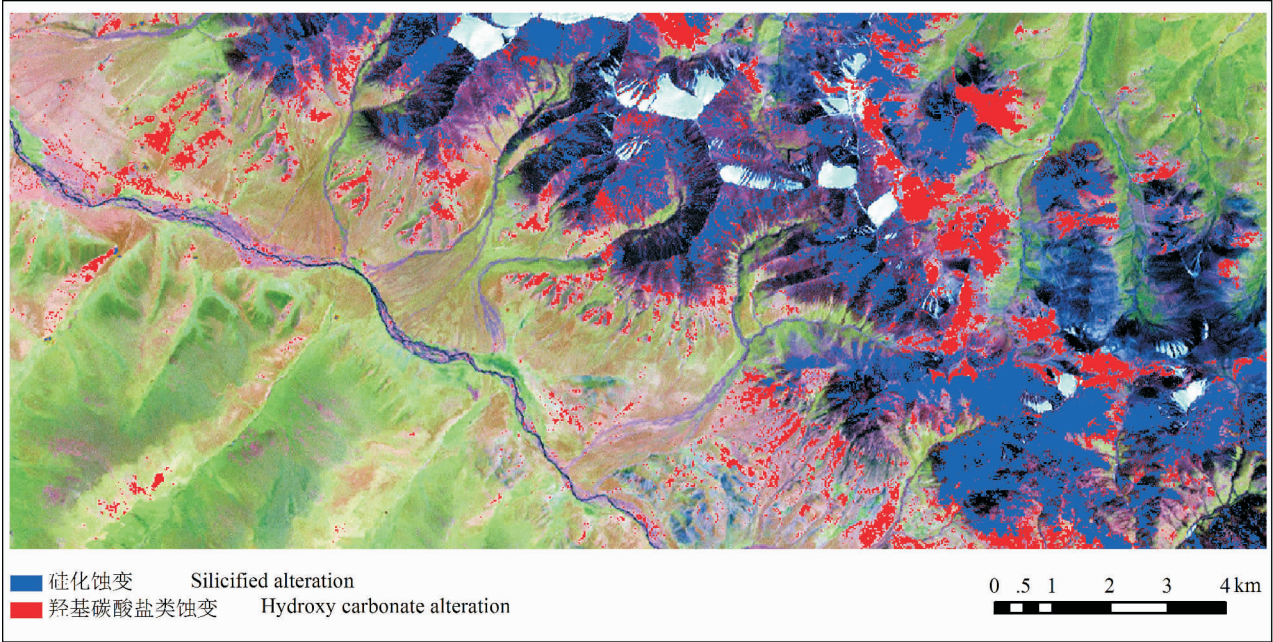


图 2 青海祁连山玉石沟地区遥感矿化蚀变信息图(波段比值 band5/4 和 band5/7)
Fig. 2 Alteration mapping based on ETM + band-ratio images of band5/4 and band5/7 of the Yushigou area, Qilian Mountains, Qinghai

蚀变出现,蚀变是不同的矿化作用所产生的重要的成矿标志。研究区基础地质调查表明,研究区蚀变类型为硅化、黄铁矿化、黄铜矿化、碳酸盐化、绢云母化、绿泥石化及滑石化,其中硅化和碳酸盐化与矿化关系较为密切。目前,利用多光谱遥感影像数据来提取矿化蚀变信息已经成为蚀变信息提取的一个重要手段。蚀变信息在遥感图像上属于弱信息,以矿物的特征光谱为基础,选用适当的波段比值,可增强微弱信息。本文使用 ETM + 影像数据,采用波段比值的方法提取矿化蚀变信息(郭娜等,2010; Shi Pulong et al.,2012;荆凤等,2005):

(1)提取硅化蚀变信息。硅化发育较强烈的地段往往黄铁矿富集(郑振华,2012),因此本文将提取黄铁矿的异常信息来指示硅化蚀变。由于含二价铁离子的矿物具有在 ETM band5 的高反射和在 ETM band4 强吸收的光谱特征,因此用 ETM band5/4 来提取二价铁染信息。

(2)提取羟基蚀变信息。由于含羟基矿物在 ETM band5 上高反射,band7 上强吸收,因此 ETM band5/7 是提取羟基蚀变信息的最佳波段组合。根据均值与 2 倍标准离差之和($C + 2\sigma$)的下限确定方法,提取蚀变信息如图 2 所示(底图采用 ETM band7,band4,band1 三个波段合成的真彩色图像来

表示研究区原地形地貌)。

蚀变程度在此基础上,继续采用密度分割的方法对蚀变进行分级,以 1 倍标准离差递增将蚀变信息范围分为 ABC 三级(向中林等,2009),即 A 等级为影像 DN 值大于($C + 4\sigma$),代表了蚀变程度最强的区域、B 等级为 DN 值介于($C + 3\sigma$)和($C + 2\sigma$)之间,表示蚀变程度较强的区域、C 等级 DN 值介于($C + 3\sigma$)至($C + 2\sigma$),表示蚀变程度较弱的区域,剩下区域统划分到 D 级(图 3a、b),表示蚀变程度最弱或者几乎没有蚀变的区域。

3.2 地质异常信息提取

内生矿床主要受到岩浆岩、构造和岩性的控制。通过对已知矿床成矿地质背景的分析,建立预测区的预测指标。通过对阴凹槽已知矿点与地层岩体信息进行叠加统计,已知矿点分布在下奥陶统阴沟群的以安山岩为主的下火山岩组,含硅质泥质粉砂岩段及灰绿色安山质凝灰岩段的碎屑岩组,超基性岩体,玄武岩等地层和岩体内,上述地质因素与铜锌矿成矿有着紧密的联系。因此,在岩性分布图中,与成矿有着紧密联系的地层和岩体将被定为 A 级,其它与成矿无关的地层和岩性被定为 D 级(图 3d)。

断裂构造与成矿关系极为密切,大的断裂构造往往是岩浆和矿液活动的通道,起着控矿又控岩的

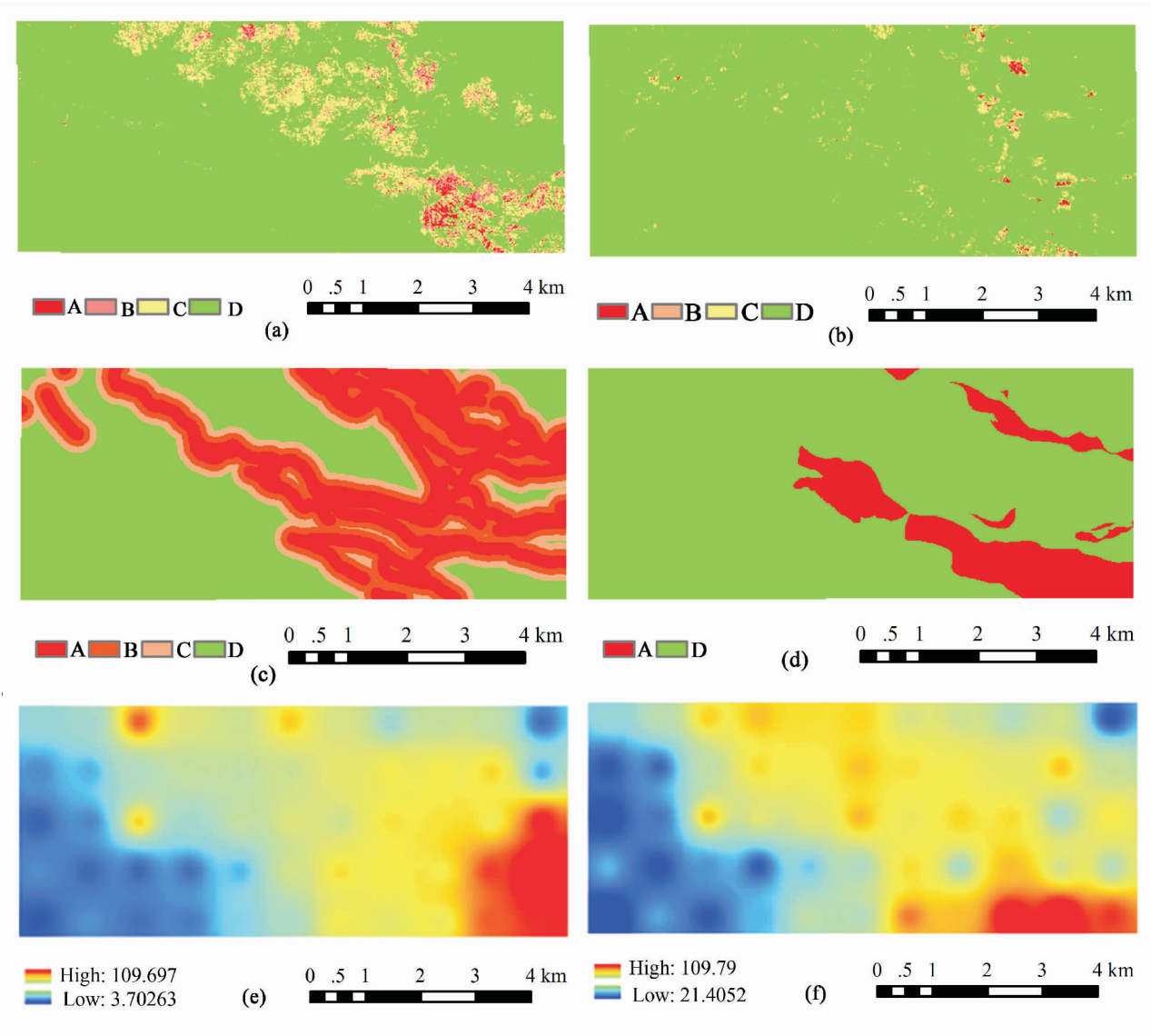


图 3 祁连山玉石沟地区：(a) 硅化蚀变信息分级图；(b) 羟基蚀变信息分级图；(c) 控矿断层分级图；
(d) 控矿地层岩体分级图；(e) 铜元素等值分布图；(f) 锌元素等值分布图

Fig. 3 The Yushigou area, Qilian Mountains, Qinghai: (a) silicification classification map information; (b) hydroxyl alteration classification map; (c) ore-controlling fault classification map; (d) ore-controlling strata and intrusions classification map; (e) anomaly distribution map of copper; (f) anomaly distribution map of zinc

作用,次一级的断裂构造则直接控制了矿床、矿体的产出和分布。该区断裂构造极为发育,利用 GIS 分析对北西以及北西西向线型构造异常进行缓冲区分析,并与已知的阴凹槽铜锌矿点水平投影进行相交检索(刘艳宾等,2012),分别得到线型构造的缓冲半径为 250m。于是将研究区控矿断裂分别以 250m,500m,750m 半径的三层缓冲区,从内到外分别表示为 ABC 等级,剩下的区域为断裂带影响较小的区域,划分为 D 级(图 3c)。

3.3 地球化学异常信息提取

化探异常反映地表或近地表区域内成矿元素富集程度,对于地质找矿、成矿预测均有重要的指示意义。本文收集了该区 1: 20 万的化探数据,分别针对铜元素和锌元素采用趋势面分析法(李宾等,2012)进行异常分析,在剔除异常值后,用克里金插值法对其进行插值,对插值精度进行交叉验证,经过反复试验,得到最优插值的模型。最优模型的交叉验证结果如表 1。插值后对其进行栅格化处理,重分类后得到预测所需要的化探指标层(图 3e 和 f)。

化探数据将作为定量的指标数据应用到研究区成矿预测中。

预测指标确定后,采用专家打分和层次分析法相结合得出各个指标的权重(表 2)。

表 1 祁连山玉石沟地区铜元素和
锌元素插值交叉验证结果

Table 1 Cross Validation Result of Cu and Zn in
the Yushigou area, Qilian Mountains, Qinghai

	铜元素	锌元素
平均误差	0.00881	-0.02887
均方根误差	12.41	12.46
平均标准误差	12.56	12.9
标准平均误差	-0.004888	-0.004382
标准均方根误差	0.9807	0.9554

表 2 祁连山玉石沟地区控矿指标权重

Table 2 weights of predicted layers for the
Yushigou area, Qilian Mountains, Qinghai

准则	权重	控矿指标	权重
地质因素	0.29364	控矿岩性	0.1996
		控矿断裂	0.09404
遥感因素	0.41588	硅化蚀变	0.22044
		羟基蚀变	0.19544
化探因素	0.29048	铜元素异常	0.14524
		锌元素异常	0.14524

4 玉石沟铜锌矿预测

矿产资源的预测,首先得划分地质评价单元。为了把众多的地质变量所包含的矿产资源信息量最大限度地反映出来,并且给矿产预测的计算机网格化和信息提取带来方便,本研究选择成矿预测中应用较广的是规则网格单元划分法。以玉石沟 1: 5 万地质图作为底图,分别把地质,化探,遥感的资料

投放在图上,依据预测单元的划分原则和方法,经过反复试验,最后选取 250m × 250m 的网格将整个预测区划分为 3219 个基本预测单元。并从空间数据库中检索,提取每个预测单元格内的相关控矿信息(表 3)。折衷型模糊多属性决策对玉石沟地区铜锌矿的预测过程中所涉及的计算过程均通过在 matlab 软件里编写程序完成(Adiat et al., 2012)。

4.1 三角模糊数表达

将控矿指标和权重表达为三角模糊数。定性控矿指标的转换将依据两级比例法将 ABCD 四个等级转化为三角模糊数精确的定量指标铜锌元素含量和权重直接表达成三角模糊数的形式即 $w = (w, w, w)$, 得到模糊指标矩阵(表 4)。

4.2 构造模糊决策矩阵

将上文得到的模糊指标矩阵进行归一化和加权处理,得到研究区的模糊决策矩阵。由于预测指标都是收益型指标,所以归一化的时候同一采用收益型归一化公式。为了方便计算,加权处理采用普通的加权处理方式。即

$$\begin{aligned}w &= (w^{(1)}, w^{(2)}, w^{(3)}), \\y_{ij} &= (y_{ij}^{(1)}, y_{ij}^{(2)}, y_{ij}^{(3)}) \\ \text{则 } r_{ij} &= w\theta y_{ij} = \\ & (w^{(1)}y_{ij}^{(1)}, w^{(2)}y_{ij}^{(2)}, w^{(3)}y_{ij}^{(3)})\end{aligned}$$

4.3 成矿预测靶区圈定

由于研究区的成矿元素的富集是由多种有利的地质因素优化配置所造成的,所以借助隶属度来定量综合评价各种控矿因素与成矿的关系。依据模糊多属性决策的计算过程,计算出各预测单元的综合隶属度(成矿有利度)。在成矿预测的优选准则的指导下,把所有结果输入 ArcGIS 软件进行插值并且

表 3 祁连山玉石沟地区预测单元格控矿指标提取

Table 3 Ore-controlling factors extraction of evaluation grid units in the Yushigou area, Qilian Mountains

Id	岩性	断层	硅化	铁染	铜元素	锌元素	网格中心点坐标 X	网格中心点坐标 Y
1	D	D	A	A	6.60474	27.0473	478359	4272450
2	B	C	C	D	5.93221	25.8726	478618	4272450
3	D	D	A	A	5.54322	25.1072	478858	4272450
4	C	D	B	C	5.65065	25.3239	479099	4272450
...	...	...	...	...	...	...	...	...
3219	D	B	D	A	6.39017	26.8113	479358	4272450

表 4 祁连山玉石沟地区定性控矿指标量化标准

Table 4 Quantified standards for quantifying ore controlling factors in the Yushigou area, Qilian Mountains

等级	A	B	C	D
量化值	(0.85 0.90 1)	(0.75 0.80 0.85)	(0.60 0.70 0.75)	(0.50 0.55 0.60)

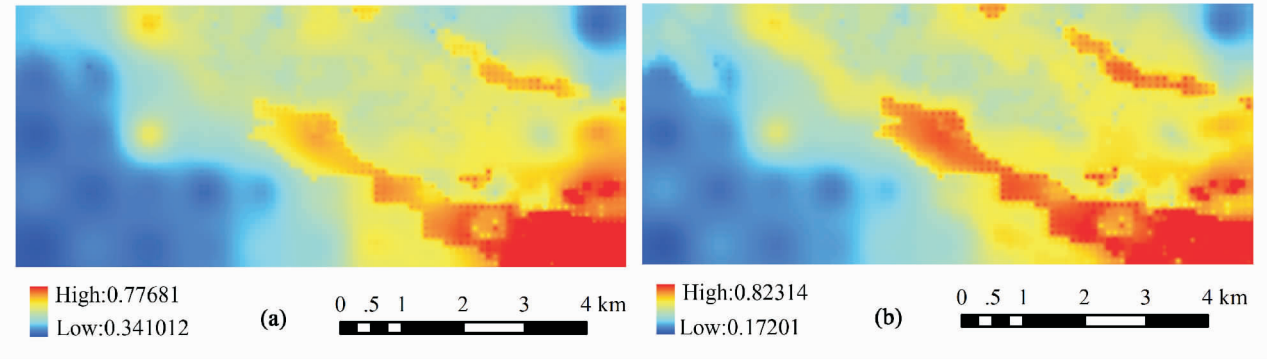


图 4 祁连山玉石沟地区成矿隶属性分布对比图
Fig. 4 Metallogenic membership distribution of contrast map of the Yushigou area, Qilian Mountains

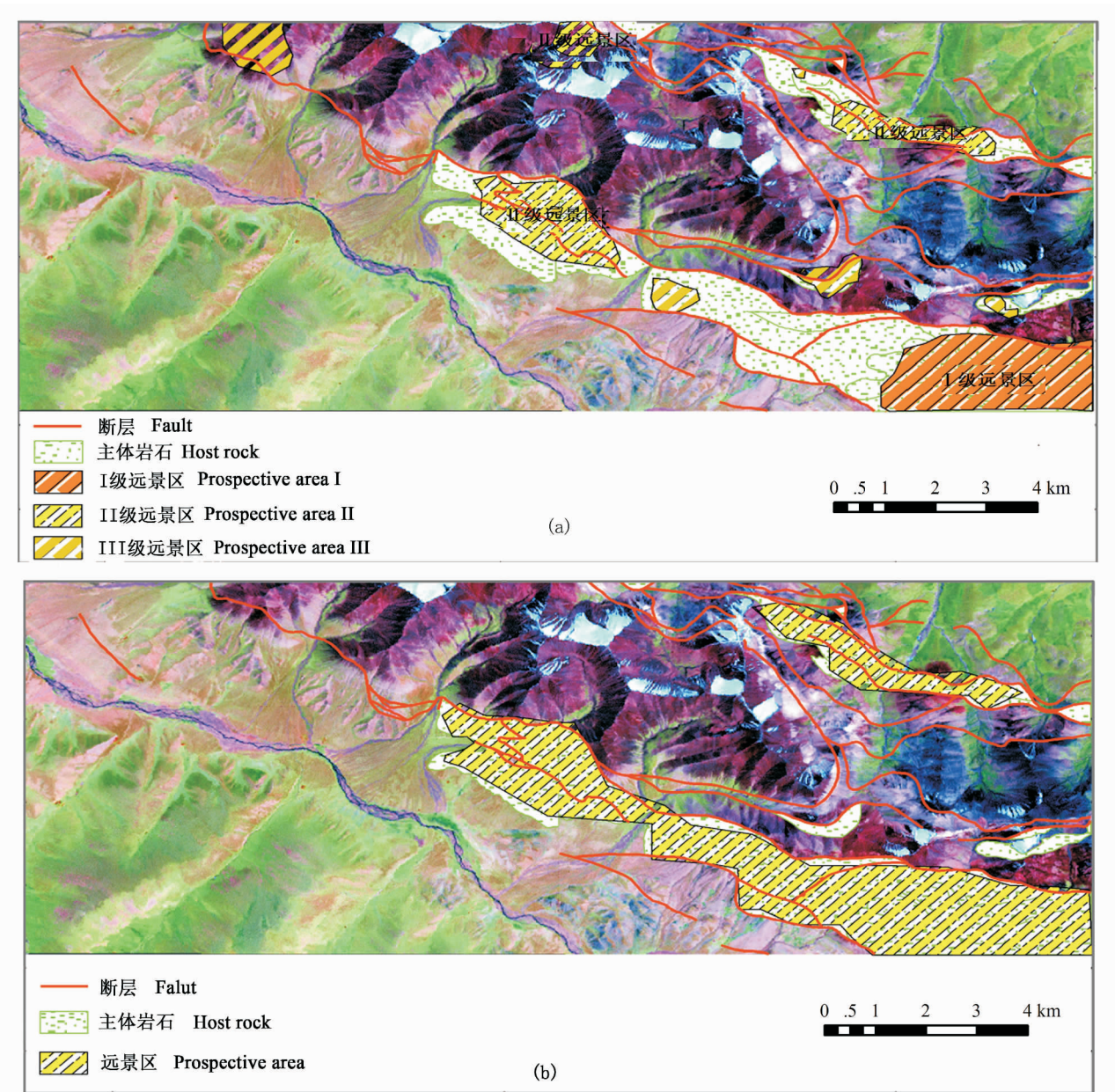


图 5 祁连山玉石沟地区基于折衷型模糊多属性决策模型的铜锌矿预测图(a)
和基于模糊综合评判模型的铜锌矿预测图(b)

Fig. 5 Prospectivity map estimated by Eclectic Fuzzy Multiple Attribute Decision Making (a) and prospectivity map estimated by Fuzzy Comprehensive Evaluation (b) of the Yushigou area, Qilian Mountains

渲染。综合隶属度主要分布在 0.34 和 0.78 之间,根据隶属度的分布特征以及综合考虑各类控矿因素和反复实验对比,选取阈值为 0.6,图中红色部分为综合隶属度大于 0.6 的为成矿有利区,红色的深浅表示了成矿有利的程度,把隶属度大于等于 0.72 的区域划分为Ⅰ级远景区,大于 0.6 小于 0.72 的区域划分为Ⅱ级远景区,0.5~0.6 之间的区域为小规模Ⅲ级远景区(图 4a)。模糊多属性决策模型是在经典的模糊综合评判预测模型发展而来的,将研究区的数据用模糊综合评判预测模型来计算得到隶属度结果如图 4b。

5 结果和讨论

根据隶属度分布图,结合各控矿要素,手动圈画出预测图,得到经典的模糊综合评判预测模型的预测图(图 5b)和折衷型模糊多属性决策模型所得预测远景图(如图 5a)。两者比较结果显示,成矿有利度高值区分布趋势大体一致,但是折衷型模糊多属性决策模型所得预测远景图范围相比较要更加集中,Ⅰ级和Ⅱ级远景区对比度更加强烈,界线分布更加清晰。折衷型模糊多属性决策模型优化了评判对象优选过程,使得预测结果更加精准,剔除掉了更多的伪有利区域。

所圈定的远景区的分布基本上体现了本研究区铜锌矿的主要成矿规律,即成矿主要发生在岩浆岩侵入地层的接触部位和主要断裂带内。Ⅰ级远景区的预测矿点位于拖莱山深大断裂和其北侧的一条次生断裂交汇处,地面出露大量的夹杂着基性凝灰岩的块状玄武岩,形成了找矿的有利区。Ⅱ级远景区的三个成矿区分布在Ⅰ级远景区的外围,位于拖莱山深大断裂次生断裂周围,并且处于超基性岩或者基性岩的接触带,为成矿次级有利区域。

模糊多属性决策模型对北祁连玉石沟的铜锌矿床进行预测,结果表明,玉石沟具有良好的铜锌矿成矿潜力,模糊多属性决策模型对北祁连玉石沟的铜锌矿床进行预测,结果表明,玉石沟具有良好的铜锌矿成矿潜力,圈出了 4 个成矿背景优越的Ⅰ级和Ⅱ级铜锌矿产勘查远景区和 4 个可考虑作为预查对象的Ⅲ级远景区,成矿远景具有分带性,呈北西向分

布。成矿有利区多位于大断裂和次生断裂交汇处,说明玉石沟铜锌矿在断裂发育强烈的交汇地带有良好的找矿前景。

模糊多属性决策模型解决了不确定性指标的在成矿预测中的分级和量化问题,并实现了模糊信息和精确信息在预测中的有效结合,实现了成矿预测中的多源异质信息的有机集成,有助于更加充分的挖掘各种控矿信息,并最大限度的利用其信息量为矿产预测服务。大大提高矿产资源勘测的效率和准确性,尤其是对于地理条件艰苦,地质工作程度较低,已知矿点较少的矿区的预测,贡献更为显著。该模型不仅适用于基于知识的成矿预测,也适用于基于数据的成矿预测,具有普适性,丰富了矿产资源预测理论。

参 考 文 献 / References

- 陈永清,赵鹏大. 2004. 综合致矿地质异常信息提取与集成. 地球科学, 3(34):325~335.
- 陈建平,陈勇,王全明. 2008. 基于 GIS 的多元信息成矿预测研究:以赤峰区为例. 地学前缘, 15(4):18~26.
- 成秋明,陈志军, Khaled A. 2007. 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. 地球科学(中国地质大学学报), 32(2):175~184.
- 郭娜,陈建平,唐菊兴,郭科. 2010. 基于 RS 技术的西藏甲玛铜多金属矿外围成矿预测研究. 地学前缘, 17(4):280~289.
- 郝佰伍. 2010. 层次分析-多级模糊评判法在贵州普晴锑(金)矿区综合信息成矿预测中的应用. 地质与勘探, 46(4):741~750.
- 荆风,陈建平. 2005. 矿化蚀变信息的遥感提取方法综述. 遥感信息, (2):62~66.
- 孔峰. 2008. 模糊多属性决策理论及应用. 北京:中国农业科学技术出版社.
- 李宾,李随民,韩腾飞,韩玉丑. 2012. 趋势面方法圈定龙关地区化探异常及应用效果评价. 物探与化探, 36(3):202~207.
- 刘艳宾,弓小平,陈斌,王哲,吴艳. 2012. ArcGIS 在东昆仑西段铁矿资源综合信息矿产预测中的应用——以沉积变质型铁矿为例. 地质学报, 86(6):1007~1019.
- 彭省临,王颖,杜瑞峰. 2009. 模糊综合评判模型在隐伏矿定位预测中的应用. 大地构造与成矿学, 2:253~258.
- 邵拥军,贺辉,张贻舟. 2007. 基于 BP 神经网络的湘西金矿成矿预测. 中南大学学报, 38(6):1192~1198.
- 童海奎,张顺桂,芦文泉. 2012. 北祁连托莱山超基性岩带玉石沟地区地球化学特征. 西北地质, 45(1):118~123.
- 邢学文,胡光道. 2006. 模糊逻辑法在秦岭—松潘成矿区金矿潜力预测中的应用. 吉林大学学报, 36(2):298~303.
- 杨毅恒,李景朝,严光. 2000. 地理信息系统在综合信息矿产预测中的应用. 地质论评, 46(10):40~42.

翟裕生. 2003. 成矿系统研究与找矿. 地质调查与研究, 26(2):66 ~ 71.

张宝一, 毛先成, 周尚国, 胡超, 闫芳. 2012. 限定作用域的矿产资源综合信息定量预测模型以桂西—滇东南锰矿为例. 地质论评, 58(5):978 ~ 986.

赵鹏大. 2001. 矿产勘查理论与方法. 北京: 中国地质大学出版社.

郑振华. 2012. 青海省祁连县阴凹槽锌铜矿床成因. 青海大学学报, 30:63 ~ 68.

Abedi M. 2012. ELECTRE III: A knowledge-driven method for integration of geophysical data with geological and geochemical data in mineral prospectivity mapping. Journal of Applied Geophysics, 87:9 ~ 18.

Abedi M. 2012. Fuzzy outranking approach: A knowledge-driven method for mineral prospectivity mapping. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 23:1 ~ 12.

Adiat K A N, Nawawi M N M, Abdullah K. 2012. Assessing the accuracy of GIS-based elementary multi criteria decision analysis as a spatial prediction tool - A case of predicting potential zones of sustainable groundwater resources. Journal of Hydrology, 440 ~ 441:75 ~ 89.

Fan Dongli, Cui Ximin, Yuan Debao, Wang Jiafeng, Yang Jinlin and Wang Shengyao. 2011. Weight of Evidence Method and Its Applications and Development. Procedia Environmental Sciences, 11:1412 ~

1418.

Geldermann J, Spengler T, Rentz O. 2000. Fuzzy outranking for environmental assessment. Case study: iron and steel making industry. Fuzzy Sets and Systems, 115:45 ~ 65.

Leite E P, Filho C R S. 2009. Probabilistic neural networks applied to mineral potential mapping for platinum group elements in the Serra Leste region, Carajás Mineral Province, Brazil. Computers & Geosciences, 35:675 ~ 687.

Lisitsin V A, González-Alvarez I, Porwal A. 2013. Regional prospectivity analysis for hydrothermal-remobilised nickel mineral systems in western Victoria, Australia. Ore Geology Reviews, 52:100 ~ 112.

Shi Pulong, Fu Bihong, Ninomiya Y, Sun Jinmin and Li Yang. 2012. Multispectral remote sensing mapping for hydrocarbon seepage-induced lithologic anomalies in the Kuqa foreland basin, south Tian Shan. Journal of Asian Earth Sciences, 46:70 ~ 77.

Smith A D. 2006. The geochemistry and age of ophiolitic strata of the Xinglongshan Group: Implications for the amalgamation of the Central Qilian belt. Journal of Asian Earth Sciences, 28:133 ~ 142.

Zuo Renguang, Cheng Qiuming, Agterberg F P. 2009. Application of a hybrid method combining multilevel fuzzy comprehensive evaluation with asymmetric fuzzy relation analysis to mapping prospectivity. Ore Geology Reviews, 35:101 ~ 108.

Eclectic Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Model for Metallogenic Prediction of Yushigou Copper—Zinc Deposit, Qilian Mountains, Qinghai

YANG Qin, LIU Xiangnan, LIU Wencan, LIU Meiling, LONG Yaqian, LIU Feng

China University of Geoscience, Beijing, 100083

Abstract: In this paper, a prediction model based on fuzzy multi-attribute decision-making has been posed and application in the Yushigou area, Qilian Mountain, Qinghai Province. Based on geological background and metallogeny of the Yushigou area, mineralizing information is extracted. Then use GIS to correlate and analyze multi-source information for establishing mineralization prediction index of copper—zinc ore. Finally, a eclectic fuzzy multi-attribute decision-making method is used in ore-controlling indicators for integration and decision-making. Compromised fuzzy multiple attribute decision making method is established by fuzzy positive and negative ideal value of each predictor, after which measure tools of weighted Euclidean distance are used to calculate the distance between the evaluation unit and the fuzzy positive or negative ideal, membership degree of each evaluation unit to fuzzy positive ideal is then calculated to measure the metallogenic favourability degree. The result is that 8 copper and zinc deposits has been prospected. Compared with the results obtained by fuzzy comprehensive evaluation model, the result is more convergence and centralized, more accurate positioning, and more consistent with the engineering verification with the actual situation. The model provides a new way for the realization of a low level of new mines forecast. Metallogenic prospect area is located at the junction of faults and secondary fracture and indicates that the strong fracture development convergence zone has good ore prospects.

Key words: Fuzzy multi-attribute; metallogenic prediction; Copper zinc deposit; Yushigou, Qilian Mountains, Qinghai