

文章编号: 0258-7106 (2006) 02-0199-08

## 基于模糊逻辑的中甸岛弧斑岩型铜矿定位预测\*

曹殿华<sup>1,2</sup>, 王安建<sup>2</sup>, 管 焱<sup>3</sup>, 陈 江<sup>2</sup>

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心, 北京 100037; 3 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

**摘 要** 文章选择中甸岛弧地区中比例尺地表填图所圈定的侵入岩及火山岩、航磁解译构造格架及汇水盆地沉积物多元素异常作为斑岩型铜矿定位预测的主要方法, 总结提出了该区斑岩型铜矿的定位预测准则, 并根据该准则在 GIS 平台上基于模糊逻辑模型进行了模糊成员权重赋值和模糊推理网络构建。通过模糊推理计算得到该区不同高度、不同方向航磁解译构造的交汇部位以及不同元素的组合异常特征, 最终确定了该区可以发现斑岩型铜矿的模糊概率分布图。该区主要矿床如普朗、红山和雪鸡坪等均处于高模糊概率分布区, 经野外检查验证发现普上和地苏嘎两处斑岩铜矿矿化新区。

**关键词** 地质学; 模糊逻辑; 航磁解译构造格架; GIS; 斑岩铜矿; 定位预测; 中甸岛弧

中图分类号: P618.41

文献标识码: A

## Position prediction of porphyry copper deposits in Zhongdian island arc based on fuzzy logic

CAO DianHua<sup>1,2</sup>, WANG AnJian<sup>2</sup>, GUAN Ye<sup>3</sup> and CHEN Jiang<sup>2</sup>

(1 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 Research Center for Strategy of Global Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 3 Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China)

### Abstract

For the position prediction of porphyry copper deposits in Zhongdian island arc, the authors chose magma, aeromagnetic lines and catchment basin sediment geochemistry as the main data types and summarized the guideline of the position prediction of the porphyry copper deposits in Zhongdian island arc. According to the guideline, the fuzzy logic membership value was given and the fuzzy inference network was designed on GIS software. The intersecting positions of aeromagnetic lines of different directions and depths were calculated, and characteristics of the integrated anomaly of different elements were described. The fuzzy membership map for the porphyry copper deposit was compiled. The main porphyry copper deposits such as Pulang, Hongshan and Xuejiaping located in the high fuzzy membership place; Pushang and Disuga porphyry copper ore spots were discovered during the field work.

**Key words:** geology, fuzzy logic, aeromagnetic line, GIS, porphyry copper deposit, position prediction, Zhongdian island arc

\* 本文得到国家科技攻关项目(2003BA612A-05)和国家 973 项目(2002CB412607)的联合资助  
第一作者简介 曹殿华, 男, 1977 年生, 助理研究员, 在职博士, 主要从事成矿预测方面的研究。  
收稿日期 2005-12-14; 改回日期 2006-02-07。李 岩编辑。

基于 GIS 的综合方法可有效地促进矿产资源的勘查评价 (Moon et al., 1991; Bonham-Carter, 1994; Venkataraman et al., 1997)。对于勘查程度比较低的地区, 基于专家知识推理的模糊逻辑方法比较适用 (Brown et al., 2003)。20 世纪 90 年代初, 模糊逻辑方法开始被应用于矿产资源勘查 (An et al., 1991; Moon et al., 1991), 目前该模型已被成功地应用于对多种类型矿床的勘查评价, 例如: 黑色金属矿床 (An et al., 1991)、MVT 矿床 (D' Ercole et al., 2000)、造山带脉状金矿 (Knox-Robinson et al., 1997; Knox-Robinson, 2000) 和浅成低温热液金矿 (Carranza et al., 1999) 等。

中甸岛弧位于中国西南三江中段义敦岛弧的南端 (图 1), 是印支晚期甘孜—理塘洋壳向西大规模俯冲形成的火山-岩浆弧 (杨岳清等, 2002; 侯增谦等, 2003)。区内矿产资源丰富 (图 1), 是中国重要的铜多金属成矿带, 随着普朗大型斑岩型铜矿床的发现而备受关注, 在该区进行勘查新区的寻找和矿床定位预测具有十分重要的意义。中甸地区海拔较高 (3 000 ~ 4 800 m)、地形切割强烈、相对高差大、植被茂密、年积雪时间长、交通不便, 因此地质工作程度仍不高, 在其他地区适用的找矿技术方法在这里很难取得好的效果。本文进行了该区航磁构造格架的提取, 总结了该区斑岩型铜矿的评价准则, 基于模糊逻辑模型对航磁、化探和地质信息进行整合, 并对计算结果进行了野外检查验证。

## 1 中甸岛弧斑岩铜矿的定位预测准则

众所周知, 地形、植被、积雪等因素是制约遥感找矿的世界性难题, 强烈的地形起伏使普通的航磁位场处理方法受到了挑战, 而中甸岛弧特殊的自然景观对汇水盆地沉积物地球化学扫面的技术方法本身提出了特殊的要求。因此, 本文选择岩浆岩、航磁构造格架解译结果及汇水盆地沉积物多元素组合异常作为该区斑岩铜矿定位预测的主要依据。根据世界上斑岩型铜矿的一般性特点, 结合中甸岛弧中已发现的主要斑岩型矿床的异常特征, 确定出该区斑岩铜矿的定位预测准则。

### 1.1 岩浆岩

本区斑岩型铜矿的成矿作用主要与印支期甘孜—理塘洋向西俯冲消减所引起的岛弧火山岩浆作用

有关 (杨岳清等, 2002; 侯增谦等, 2003)。含矿岩浆岩的主要特征如下:

(1) 时代: 主要为印支期, 同位素年代学数据集于 250 ~ 215 Ma (云南省地质矿产局, 1990; 曾普胜等, 1999; 杨岳清等, 2002)。侵入岩与岛弧安山岩近于同期侵入 (杨岳清等, 2002)。

(2) 规模、形态、产状: 成矿岩体多为复式岩体, 多期侵入, 呈小岩株产出, 规模较小, 形态复杂, 侵位较浅。

(3) 围岩: 侵入的层位为上三叠统火山岩发育的曲嘎寺组 ( $T_3q$ ) 和图姆沟组 ( $T_3t$ ) 的火山-沉积岩系, 在以滨海-陆相建造沉积物为主体的喇嘛垭组 ( $T_3lm$ ) 中基本不出现 (图 1)。弧火山岩与斑 (玢) 岩时空关系密切 (侯增谦等, 2003), 在弧火山岩的下部有发现斑岩型铜矿的可能性。当围岩是碳酸盐岩时, 可形成矽卡岩型的矿化, 比如浪都铜矿、红山铜矿。

(4) 岩石组合: 成矿岩体具有从中性向酸性分异的演化特征, 岩石类型有闪长玢岩、二长斑岩等。斑岩型铜矿的矿化与二长斑岩的侵位有关, 蚀变模式与陆缘弧环境二长岩模式相似。

根据上述含矿岩浆岩的特征, 总结出该区斑岩型铜矿的预测准则为: 印支期多期侵入的复式岩体, 斑岩型铜矿的矿化主要与二长斑岩的侵位有关, 岛弧火山岩下有发现斑岩型铜矿的可能性。

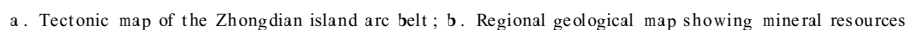
### 1.2 航磁解译构造格架

实践证明, 由于受该区自然条件的制约, 地表实测的线性构造精度还不能满足矿床定位的要求, 而对航磁构造格架的解译可弥补这方面的不足。航磁构造格架解译方法可以避免磁化强度方向的影响, 反映出磁性地质构造单元的边界和大致深度, 用其对隐伏断裂、含磁性岩脉、块体边界、接触带等具有一定线性特征的地质构造的磁异常进行定量解释, 效果较佳。并且, 通过不同上延高度解译结果的关联筛选可有效地避免噪音等假异常的影响, 本研究将其作为矿床预测的主要方法。

本文对该区 1:10 万直升机曲面飞行获取的高精度航磁数据进行了构造格架解译 (数据来自云南省地质三大队<sup>①</sup>), 根据对成岩成矿的贡献将区内航磁构造分成 3 类:

(1) 导岩、导矿构造: 众所周知, 与岩体展布一致的区域性深大断裂是导岩、导矿构造, 控制着深部岩浆的上升与侵位。航磁解译线性深构造能够很好

<sup>①</sup> 云南省地质三大队, 2002. 红山—普朗铜多金属矿评价区航磁异常 ( $\Delta T$ ) 图. 内部资料.



地反映大规模的断裂,可以代表区域导岩导矿构造,其影响的范围较大,具有相对重要的示矿作用。

(2) 控岩、控矿构造:不同深度、不同方向航磁解译构造的交汇部位,容易成为岩浆及热液系统活动的中心,控制着岩体的最终就位和矿床形成。所以不同深度、不同方向航磁解译构造的交汇部位及其周围是发现斑岩型铜矿的主要场所。

(3) 破矿构造:受新生代印度-欧亚板块碰撞的影响,沿金沙江-哀劳山断裂带发生大规模的走滑剪切作用(Tapponnier et al., 1982; 1990),该区遭受强烈的地壳变形(Wang et al., 2000; Burchfiel et al., 2003),对中生代矿床会有不同程度的改造。航磁解译构造格架记录了不同时期较大规模的构造,需结合其他示矿信息进行筛选。

综上所述,斑岩型铜矿的预测准则为:

(1) 航磁解译深构造及其附近,相对浅构造具有更大的影响范围和找矿意义;

(2) 不同深度、不同方向航磁解译构造的交汇部位及其周围是找矿的有利部位。

### 1.3 汇水盆地沉积物地球化学

受景观、埋深等条件的影响,不能简单地以汇水盆地沉积物铜异常的高值区作为找矿方向。本文收集了 1:10 万的汇水盆地沉积物地球化学 Cu、Au、Mo、Pb、Zn、Ag 等元素异常等值线图(云南省地质三大队,内部资料),通过与已知矿床分布的对比,认为汇水盆地沉积物地球化学异常基本上可以反映已知矿床的存在。各元素均有不同的指示意义,综合分析将提供更加丰富的示矿信息。斑岩型铜矿的预测准则如下:

(1) 规模与强度:大面积、高强度的成矿元素异常是重要的找矿场所。

(2) 元素组合:元素组合越复杂,找矿意义越大。Cu、Mo、Au 作为主要的成矿元素,具较大示矿意义;Pb、Zn、Ag 作为斑岩型铜矿的伴生元素,示矿作用相对略低。

## 2 模糊逻辑模型

### 2.1 基本原理

Zadeh(1965)被认为是模糊逻辑的创立者,他提出了布尔数学体系集合论的扩展,将二元扩展到多值。他的模糊逻辑集合论是一种广义的经典集合论,是对非精确性的极好表述。Kauffman 等(1985)

和 Zimmermann(1985)定义了模糊集合和模糊隶属关系。模糊逻辑是传统的布尔逻辑的超集,布尔逻辑集合既可以是真,也可以是假,而模糊集合可以具有部分的这种隶属关系。模糊集合的成员用 0~1 之间的连续数值表示,0 表示假,1 表示真,大于 0 小于 1 的实数表示假与真之间的真的程度(真度),值越大则真度越高。

Bonham-Carter(1994)与 An 等(1991)讨论了 5 种可被用于整合矿产资源预测的运算:“模糊与”、“模糊或”、“模糊乘”、“模糊和”和“模糊伽玛”。

(1) “模糊与”,它被定义为:

$$\mu_A = \min(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots)$$

$\mu_A, \mu_B, \mu_C \dots$ 是指图层 A、B、C...在某一点的模糊集合成员值。很明显图层上任意点输出的结果受该点所有输入图层的最小的模糊集合成员值控制,与布尔逻辑的逻辑“与”(逻辑交集)相似,其结果为集成员的保守估计,反映了信息图中最可能发生的位置。该操作适用于对于某假设为“真”时,支持该假设的两个或多个证据必须同时存在的情况。

(2) “模糊或”,它被定义为:

$$\mu_o = \max(\mu_A, \mu_B, \mu_C \dots)$$

与布尔逻辑的逻辑“或”(逻辑并集)相似,图层上任意点输出的结果受该点所有输出图层模糊集合成员值的最大值控制。适用于支持假设存在的证据较少,任何证据的存在都充分支持假设的情况。

(3) “模糊乘”,它被定义为:

$$\mu_p = \prod_{i=1}^n \mu_i$$

$\mu_i$ 是指第  $i$  个图层的模糊集合成员值, $i$  为正整数。由于每个模糊集合成员值都不大于 1,这会造成结果很小,其计算结果通常会小于或等于输入最小的模糊成员值。虽然如此,不同于“模糊与”和“模糊或”,每个证据图层的模糊成员值对计算结果都有影响。

(4) “模糊和”,它被定义为:

$$\mu_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)$$

$\mu_i$ 是指第  $i$  个图层的模糊集合成员值, $i$  为正整数。结果总是大于或等于最大的模糊成员值,所以效果是“增加”的,输出结果比任何输入证据更加支持假设。但其增加的效果自动受模糊成员的最大值 1.0 限制,永远不会超过 1.0。

尽管“模糊乘”是代数乘,但“模糊和”不是代数加。

(5) “模糊伽玛”,它被定义为:

$$\mu_g = (\mu_k)^y \times (\mu_b)^{1-y}$$

其中， $y$ 是取值 0~1 之间的参数。当  $y=1$  时，结果相当于“模糊和”，当  $y=0$  时，结果等于“模糊乘”。 $y$ 的大小控制了输出结果是增加还是减小，该值的范围受输入证据模糊成员值的影响。

2.2 数据组织与赋值

根据中甸岛弧斑岩型铜矿的定位预测准则，分别选择火山岩、侵入岩、航磁解译构造格架、汇水盆地地球化学异常等数据作为 GIS 的证据图层，进行相关的数字化、格式转换及 GIS 空间分析等方法的处理，完成该区矿产资源评价的数据集成。然后，根据该预测准则，对各图层数据进行数据分类和赋值，赋值的范围为[ 0 , 1 ]。考虑到不同证据图层数据质量和精度的差异，及图层信息本身的示矿概率的不同，给各图层不同的权重，表现为各图层中各分类数据最大值的差异( Porwal et al. , 2004) 。

火山岩图层参考 1: 20 万中甸幅<sup>①</sup>、1: 20 古学幅地质图<sup>②</sup>，由于比例尺相对较小，空间精度较低，所以给该图层相对较低的权重( 表 1) 。

侵入岩图层参考云南地质三大队中甸地区 1: 10 万地质矿产图<sup>③</sup>，将岩浆岩归类为印支期二长斑岩、闪长玢岩、燕山期花岗岩、喜马拉雅期正长岩、英安斑岩等几大类，印支期的侵入岩找到大型斑岩铜矿的可能性相对较大，赋值相对较高( 表 1) 。

表 1 不同类型岩浆岩模糊集权重

Table 1 Memberships for different types of magmatic rocks

| 分类     | 权重值  |
|--------|------|
| 火山岩图层  |      |
| 有岛弧火山岩 | 0.60 |
| 无岛弧火山岩 | 0.10 |
| 侵入岩图层  |      |
| 二长斑岩   | 0.85 |
| 闪长玢岩   | 0.80 |
| 花岗岩    | 0.75 |
| 英安斑岩   | 0.75 |
| 正长岩    | 0.75 |
| 无      | 0.10 |

航磁构造格架按不同的上延高度解译结果，重新分解为 1 kmNW、1 kmNE、3 kmNW、3 kmNE、5 kmNW、5 kmNE 等 6 个不同的图层，选择初始高度的解译线性构造分别进行间隔为 250 m 的多级缓冲区分析，根据距离线性构造的距离分类( 缓冲区分析结果) 给予不同的赋值。考虑到深构造具有更重要的示矿意义，其控制影响范围更大，赋值时相对浅构造赋予更高的值，并且扩大其有效权重( > 0.5) 的赋值范围。同一上延高度不同方向解译线性构造具有相同的赋值( 表 2) 。

汇水盆地沉积物元素地球化学异常分级是在元素异常等值线图上根据经验判断进行分级，然后进行模糊概率赋值( 表 3) ，铜元素图层相对于其他元

表 2 不同上延高度的航磁解译线性构造模糊集权重

Table 2 Memberships for aeromagnetic lines of different heights of upward continuation

| 上延高度 5 km   |      | 上延高度 3 km   |      | 上延高度 1 km   |      |
|-------------|------|-------------|------|-------------|------|
| 距离/ m       | 权重   | 距离/ m       | 权重   | 距离/ m       | 权重   |
| < 250       | 0.95 | < 250       | 0.90 | < 250       | 0.85 |
| 250 ~ 500   | 0.85 | 250 ~ 500   | 0.80 | 250 ~ 500   | 0.75 |
| 500 ~ 750   | 0.75 | 500 ~ 750   | 0.70 | 500 ~ 750   | 0.65 |
| 750 ~ 1000  | 0.65 | 750 ~ 1000  | 0.6  | 750 ~ 1000  | 0.55 |
| 1000 ~ 1250 | 0.55 | 1000 ~ 1250 | 0.5  | 1000 ~ 1250 | 0.45 |
| 1250 ~ 1500 | 0.50 | 1250 ~ 1500 | 0.5  | 1250 ~ 1500 | 0.35 |
| 1500 ~ 1750 | 0.50 | 1500 ~ 1750 | 0.4  | 1500 ~ 1750 | 0.3  |
| 1750 ~ 2000 | 0.50 | 1750 ~ 2000 | 0.3  | 1750 ~ 2000 | 0.3  |
| 2000 ~ 2250 | 0.40 | 2000 ~ 2250 | 0.3  | 2000 ~ 2250 | 0.3  |
| 2250 ~ 2500 | 0.30 | 2250 ~ 2500 | 0.3  | 2250 ~ 2500 | 0.3  |
| 无           | 0.10 | 无           | 0.1  | 无           | 0.1  |

注：每个上延高度包括 NW、NE 方向两个图层。

① 云南省矿产局区域地质调查队，1985.1：20 万中甸幅区域地质调查报告。  
② 云南省矿产局区域地质调查队，1982.1：20 万古学幅区域地质调查报告。  
③ 云南省地质三大队，2002，中甸地区 1：10 万地质矿产图。

表 3 汇水盆地沉积物地球化学元素各级异常模糊集权重

Table 3 Memberships for geochemical anomalies of various grades in sediments within the catchment basin

| 异常分级 | 权重值   |       |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | Cu 图层 | Au 图层 | Mo 图层 | Pb 图层 | Zn 图层 | Ag 图层 |
| 1    | 0.99  | 0.95  | 0.90  | 0.90  | 0.90  | 0.90  |
| 2    | 0.90  | 0.90  | -     | 0.80  | 0.80  | 0.80  |
| 3    | -     | -     | -     | 0.70  | 0.70  | 0.70  |
| 无    | 0.10  | 0.10  | 0.10  | 0.10  | 0.10  | 0.10  |

注：“-”表示没有该级异常；“无”表示没有异常分布区域。

素图层有较高的权重。

2.3 模糊推理网络

相对于一次即可联合所有证据图层的综合方法来说,有时整合一些证据图层去支持一个中间假设的方法效果会更好(Bonham-Carter, 1994),其结果可以与其他证据图层或其他的中间计算结果整合成最终的成矿有利度图层,从而构成模糊推理网络。尽管模糊端员值的确定可以借助于空间分析,但模糊推理网络的结构确定和模糊操作选择还要

凭主观判断(Brown et al., 2003)。

根据前述的定位预测准则,本文建立了中甸岛弧斑岩铜矿定位预测的综合模糊推理网络(图 2)。通过“模糊并”、“模糊或”和“模糊和”操作,将航磁同一上延高度内不同方向的线性构造与不同上延高度间不同方向的线性构造分别相交,然后将得到的各交汇部位叠加得到不同高度、不同方向航磁解译构造的交汇部位,其结果完整地反映了有利的找矿部位(图 3)。通过“模糊和”和“模糊伽玛”两种操作,整合了汇水盆地沉积物多元素地球化学异常数据(图 4)。

3 结果和讨论

通过计算得到中甸岛弧斑岩铜矿定位预测模糊概率分布图(图 5),与该区已知矿床分布(图 1)对比,雪鸡坪、红山、普朗等矿床均处于高模糊概率分布区,说明该方法的有效性。笔者对于具有高的找矿模糊概率的普上和地苏嘎靶区进行野外检查,在这 2 处均发现斑岩型铜矿化露头,普上靶区位于含

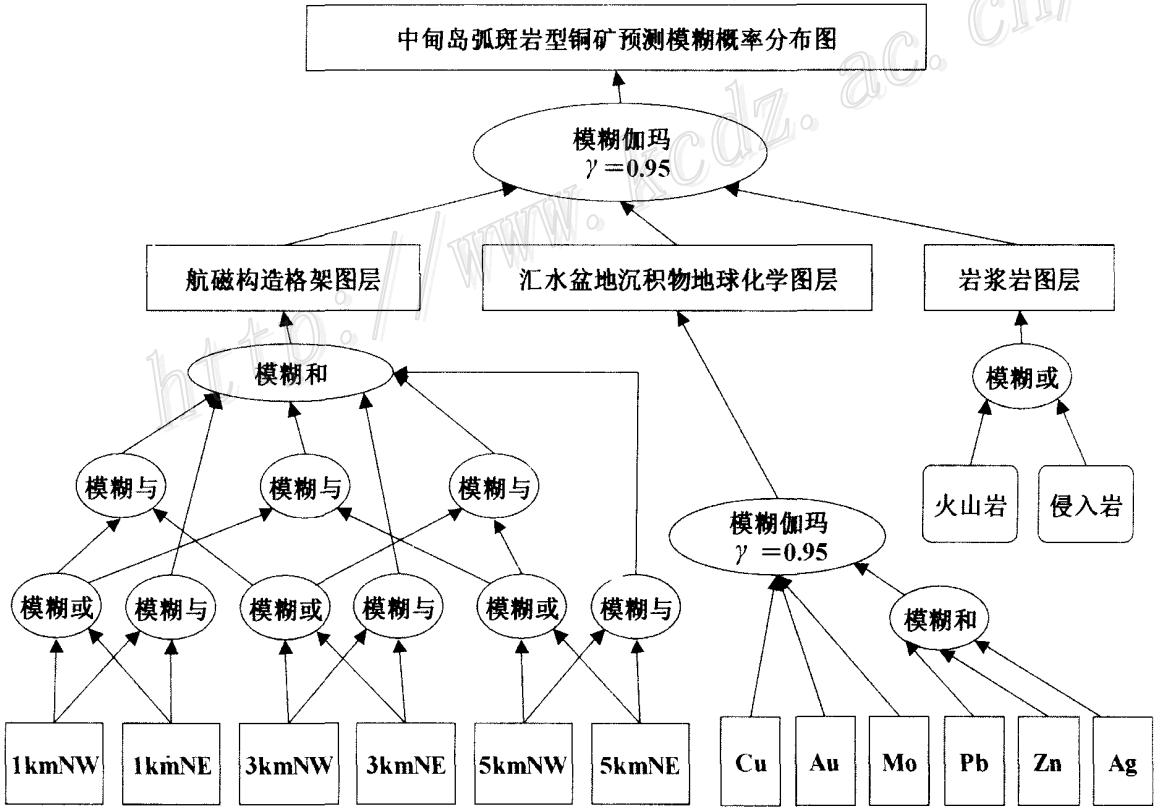


图 2 中甸岛弧斑岩铜矿定位预测的模糊推理网络

Fig. 2 Fuzzy logic inference network for position prediction of porphyry copper deposits in Zhongdian island arc

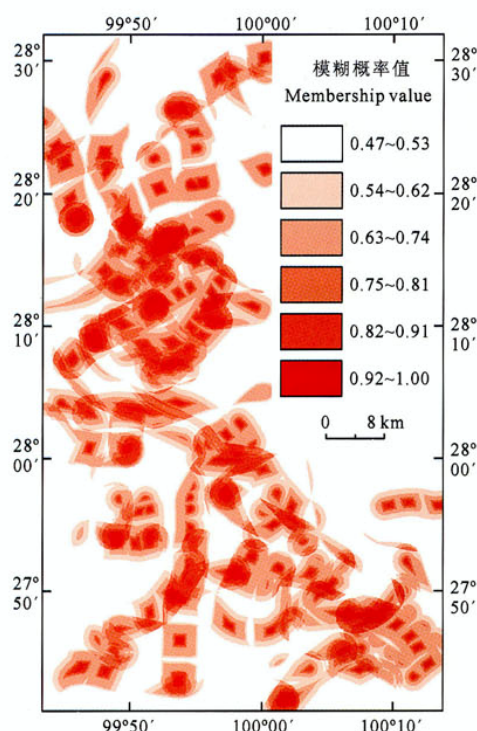


图 3 中甸岛弧航磁构造交汇部位示矿模糊概率分布图

Fig. 3 Fuzzy membership map for intersections of aeromagnetic lines

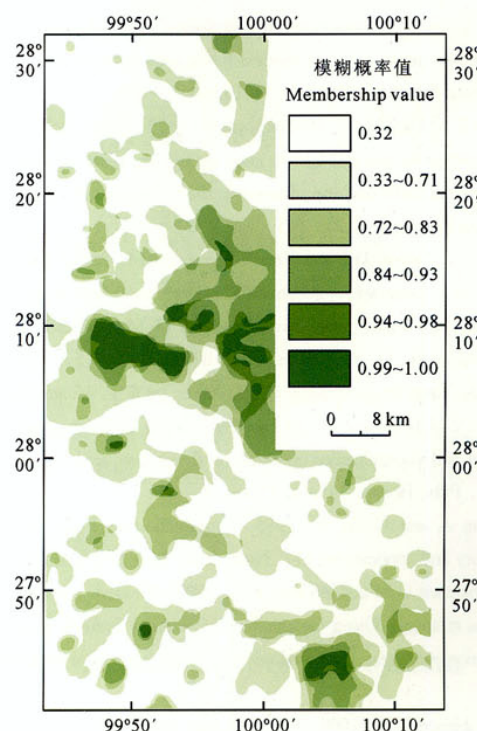


图 4 中甸岛弧汇水盆地沉积物地球化学异常示矿模糊概率分布图

Fig. 4 Fuzzy membership map for geochemical anomalies of sediments in the catchment basin

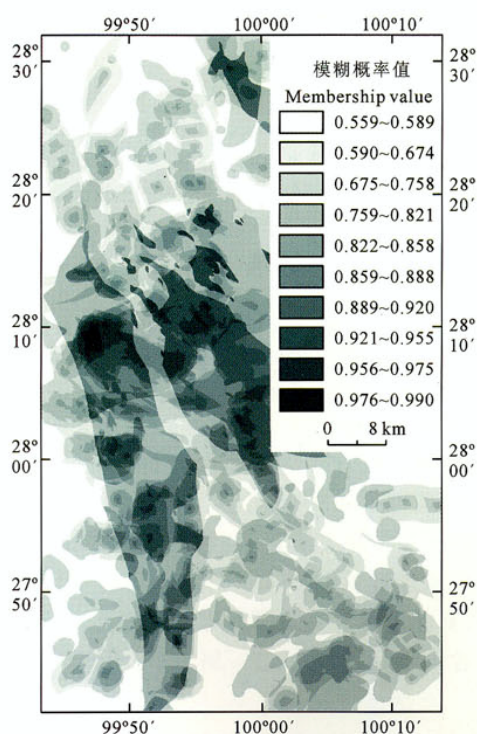


图 5 中甸岛弧斑岩铜矿定位预测模糊概率分布图

Fig. 5 Fuzzy membership map showing potential of porphyry copper deposits in Zhongdian island arc

矿斑岩的石英-绢英岩化蚀变带, 地苏嘎靶区位于含矿斑岩的青盘岩化蚀变带, 经电法工作验证, 在下部均存在大规模硫化物异常。可预见该 2 处靶区将是中甸岛弧潜在的斑岩型铜矿的勘查基地。其他高值区需进一步的野外地质工作验证。

找矿方法的选择和定位预测准则的确定是勘查成功的基础, 而多学科示矿信息的合理集成是找矿成功的关键。模糊逻辑模型能够较精确地表达预测人员的判断。按照预测人员的逻辑进行推理, 将多学科示矿信息进行有效综合, 可以提高矿产资源勘查评价工作的效果。

## References

- An P, Moon W M and Rencz A. 1991. Application of fuzzy set theory for integration of geological, geophysical and remote sensing data [J]. Canadian J. Explor. Geophy., 27: 1~11.
- Burchfiel B C and Wang E. 2003. Northwest-trending, middle Cenozoic, left-lateral faults in southern Yunnan, China, and their tectonic significance [J]. J. Structural Geol., 25: 781~792.
- Bonham-Carter G F. 1994. Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS [M]. New York: Pergamon Press. 398p.
- Brown W, Groves D and Gedeon T. 2003. Use of Fuzzy membership in

- put layers to combine subjective geological knowledge and empirical data in a neural network method for mineral-potential mapping[ J ]. *Natural Resources Research*, 12(3): 183 ~ 200.
- Carranza E J, Hale M and Mangaoang J C. 1999. Application of mineral exploration models and GIS to generate mineral potential maps as input for optimum land-use planning in the Philippines[ J ]. *Natural Resources Research*, 8(2): 165 ~ 173.
- D' Ercole C, Groves D I and Knox-Robinson C M. 2000. Using fuzzy logic in a Geographic Information System environment to enhance conceptually based prospectivity analysis of Mississippi Valley-type mineralization[ J ]. *Australian J. Earth Sciences*, 47(5): 913 ~ 927.
- Hou Z Q, Yang Y Q, Wang H P, Qu X M, Lv Q T, Huang D H, Wu X Z, Yu J J, Tang S H and Zhao J H. 2003. Collision-orogenic processes and mineralization systems of the Yidun arc[ M ]. Beijing: Geol. Pub. House. 345p(in Chinese).
- Kauffman A and Gupta A. 1985. Introduction to fuzzy arithmetic: Theory and applications[ M ]. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Knox-Robinson C M and Wyborn L A. 1997. Towards a holistic exploration strategy: Using Geographic Information Systems as a tool to enhance exploration[ J ]. *Australian J. Earth Sciences*, 44(4): 453 ~ 463.
- Knox-Robinson C M. 2000. Vectorial fuzzy logic: a novel technique for enhanced mineral prospectivity mapping, with reference to the orogenic gold mineralization potential of the Kalgoorlie Terrane, Western Australia[ J ]. *Australian J. Earth Sciences*, 47(5): 929 ~ 942.
- Moon W M, Chung C F and An P. 1991. Representation and integration of geological, geophysical and remote sensing data[ J ]. *Geoinformatics*, 2(2): 177 ~ 182.
- Porwal A, Carranza E J and Hale M. 2004. A hybrid neuro-fuzzy model for mineral potential mapping[ J ]. *Mathematical Geology*, 36(7): 803 ~ 826.
- Tapponnier P, Peltzer G, Le D, Armijo R and Cobbold P. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine[ J ]. *Geol.*, 10: 611 ~ 616.
- Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, Schärer U, Zhong D, Wu H, Liu X, Ji S, Zhang L and Zhong J. 1990. The Ailao Shan/ Red River metamorphic belt Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China[ J ]. *Nature*, 343: 431 ~ 437.
- Wang E and Burchfiel B C. 2000. Late Cenozoic to Holocene deformation in southwestern Sichuan and adjacent Yunnan, China, and its role in formation of the southeastern part of the Tibetan plateau[ J ]. *GSA Bulletin*, 112: 413 ~ 423.
- Venkataraman G, Madhavan B, Ratha B and Banglani S. 1997. Integration of geological and geophysical data for the identification of sulfide mineralized zones in Rajpura Dariba belt, Rajasthan[ J ]. *Intern. J. Remote Sensing*, 6(6): 1221 ~ 1232.
- Yang Y Q, Hou Z Q, Huang D H and Qu X M. 2002. Collision orogenic process and magmatic metallogenic system in Zhongdian island arc[ J ]. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(1): 17 ~ 24 (in Chinese with English abstract).
- Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources. 1990. Regional geology of Yunnan Province[ M ]. Beijing: Geol. Pub. House. 728p (in Chinese with English abstract).
- Zadeh L H. 1965. Fuzzy sets[ J ]. *Information and Control*, 8: 338 ~ 353.
- Zeng P S, Mo X X, Yu X H and Lu Z Q. 1999. Preliminary research on the intermediate-acidic porphyries and their ore-bearing in Zhongdian area, Northwestern Yunnan[ J ]. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(Supp.): 359 ~ 366 (in Chinese with English abstract).
- Zeng P S, Mo X X, Yu X H, Hou Z Q, Xu Q D, Wang H P, Li H and Yang C Z. 2003. Porphyries and porphyry copper deposits in Zhongdian area, northwestern Yunnan[ J ]. *Mineral Deposits*, 22(4): 394 ~ 400(in Chinese with English abstract).
- Zimmermann H J. 1985. Fuzzy set theory and its application[ M ]. Boston: Kluwer-Nijhoff. 363p.

#### 附中文参考文献

- 侯增谦, 杨岳清, 王海平, 曲晓明, 吕庆田, 黄典豪, 吴宣志, 余金杰, 唐绍华, 赵金花. 2003. 三江义敦岛弧碰撞造山过程与成矿系统[ M ]. 北京: 地质出版社. 345 页.
- 云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志[ M ]. 北京: 地质出版社. 728 页.
- 杨岳清, 侯增谦, 黄典豪, 曲晓明. 2002. 中甸弧碰撞造山作用和岩浆成矿系统[ J ]. *地球学报*, 23(1): 17 ~ 24.
- 曾普胜, 莫宣学, 喻学惠, 卢振权. 1999. 滇西北中甸地区中酸性斑岩及其含矿性初步研究[ J ]. *地球学报*, 20(增刊): 359 ~ 336.
- 曾普胜, 莫宣学, 喻学惠, 侯增谦, 徐启东, 王海平, 李红, 杨朝志. 2003. 滇西北中甸斑岩及斑岩铜矿[ J ]. *矿床地质*, 22(4): 394 ~ 400.