

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

郝百武^{1,2}

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093;
2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

[摘要] 因综合信息成矿预测涉及的控矿因子较多, 各度量指标间具有一定的层次性, 有些定性指标还具有模糊性特征, 高精度和定量化一直是制约其发展的难题。为了实现对研究程度较低的新矿区的成矿预测, 并解决上述难题, 本文试图将专家的主观判断与精确的数学运算巧妙地融合, 将复杂问题及定性指标定量化, 使评价过程和评判结果更具客观性, 建立一种层次分析-多级模糊评价的成矿预测模型。以贵州大厂锑(金)矿田普晴矿区为例, 选取地质、化探和遥感多元致矿信息, 基于GIS平台, 建立了层次分析-多级模糊评判的综合信息成矿预测模型, 最终圈定出锑(金)矿远景区18个, 其中I、II和III级远景区分别有4个、5个和9个。根据勘查验证, 预测结果较为客观有效。

[关键词] 层次分析-模糊综合评判法 综合信息成矿预测 普晴锑(金)矿区 贵州

[中图分类号] P612

[文献标识码] A

[文章编号] 0495-5331(2010)04-0741-10

Hao Bai-wu. An AHP and multiple-grade fuzzy evaluation (MGFE) coupling model based on comprehensive information for metallogenic prediction: Application to the Puqing antimony-gold orefield in Guizhou province [J]. *Geology and Exploration*, 2010, 46(4): 0741-0750.

0 引言

计算机技术和3S技术的进步使多元信息成矿预测方法技术得到迅速发展, 已进入一个新的数字定量化时期 (Zhao *et al.*, 2005)。目前, 综合信息成矿预测的理论方法 (CIM) (Wang *et al.*, 1992; 王世称等, 2000) 已经发展成为理论较为成熟、方法较全面和实用性较强的矿产预测方法体系, 其主要思想是以计算机为工具, 以各种数学模型为手段, 充分开发地质、物探、化探和遥感等各类矿产地质资料蕴含的成矿信息, 进行成矿预测。在其各指标选取和多元信息融合过程中, 既要突出各主要致矿信息的贡献, 又要全面分析各次要因素的作用。但由于控矿因素较多, 不同类型矿床各指标的重要性差别较大, 指标之间具有一定的层次性, 有些定性指标还具有模糊性和不确定性特征, 为使各致矿因素和找矿标志具有可比性, 必

须使其指标定量化, 才能保证预测结果的准确性和客观有效性。因此, 综合信息成矿预测中, 数学模型的选取及建立极为重要。

层次分析法 (Analytical Hierarchy Process, 简称AHP) 是美国匹兹堡大学 L. Saaty 教授于20世纪70年代提出的一种系统分析方法, 是系统工程中对非定量的事件作定量分析的一种简便方法, 也是对人们主观判断做客观描述的一种有效方法 (许树柏等, 1998)。其核心是将决策者的经验判断给予量化, 从而为决策者提供定量形式的决策依据 (王敏等, 2002), 实现定性分析与定量分析相结合。而最早由我国学者汪培庄提出的模糊综合评判法 (Fuzzy Comprehensive Evaluation) (徐建华等, 1994; 李洪兴等, 1994; 赵朋大等, 2004) 适宜于对影响因素较多且定性指标具有模糊性及不确定性的复杂系统进行评价, 其实质就是应用模糊变换原理和最大隶属度原则, 考虑被评价目标的主要因素或多个影响因素, 对

[收稿日期] 2009-10-29; [修订日期] 2010-07-20; [责任编辑] 郑杰。

[基金项目] 国家财政部项目 (编号: 295050028-6) 和国家自然科学基金项目 (编号: 40772067) 资助。

[第一作者简介] 郝百武 (1973年-), 男, 2008年毕业于昆明理工大学, 获硕士学位, 现主要从事区域成矿研究, E-mail: haob1698@yahoo.com.cn。

其综合评价。根据被评价事物的复杂程度,又可分为单级和多级模糊综合评判(汪培庄等,1983)。相对于神经网络法(赵鹏大等,2004)、证据加权法(Bonham-Carter *et al.*, 1990;徐善法等,2006),本次建立一种具有独特优点的层次分析-多级模糊评判相结合的模式,并应用于贵州晴隆大厂矿田西部普晴锑(金)矿区的综合信息成矿预测,结果较为客观有效。

1 矿区成矿信息特征

1.1 地质信息

贵州晴隆大厂矿田普晴锑(金)矿区位于贵州省晴隆县大厂镇西北部的碧痕营乡。大地构造位置上,矿区处于扬子准地台上扬子台褶带内的黔西南叠陷褶断束的中部,处在右江被动边缘盆地的北西边缘。

地层与岩性:区内主要出露二叠系和三叠系(苏书灿等,1992;彭建堂等,2002),从老到新依次为:下二叠统茅口组(P_1m)灰色中-厚层状灰岩,顶部为一层不稳定的角砾状灰岩,偶见燧石结核;“大厂层”($P_{1-2}d$)火山凝灰岩;上二叠统峨眉山玄武岩组($P_2\beta$)为紫色、灰绿色、暗绿色、深灰色高岭石化、赤铁矿化、绿泥石化、硅化变余玄武岩和细-隐晶致密块状玄武岩,以及上二叠统龙潭组(P_2l)碎屑岩。区内锑(金)矿床受一定的岩性控制,茅口组(P_1m)

顶部不整合面上的“大厂层”($P_{1-2}d$)及龙潭组一段(P_2l)是区内锑(金)矿的主要含矿层。

上二叠统峨眉山玄武岩既提供成矿物质,又因其结构致密而阻挡成矿热液和矿质的逸散,而起到一定的屏蔽作用;“大厂层”内角砾状粘土岩裂隙发育、空隙度大,利于矿液的运移,在岩性封闭条件下有利于成矿。据研究,大厂锑(金)矿田内地层与矿化程度的对应关系为: P_2l -弱矿化、 $P_2\beta$ -弱矿化、 $P_{1-2}d$ -强矿化、 P_1m -顶部张裂隙局部有矿化。区内大多数已知矿床(体)主要分布于玄武岩覆盖区。

构造:矿区构造极为发育,总体为一个 NE 向的断褶带。NE 向的花鱼井、青山镇和雷钵碛等主干断裂,控制了带内 NNE 向和 NW 向次级断裂的发育,共同构成重要的容矿空间;碧痕营背斜两翼之次级褶皱的轴部隆起部位及其转折端,也是良好的储矿场所。其中,“大厂层”内的层间断裂和切穿“大厂层”的断裂是脉状富锑矿体的有利产出部位。

围岩蚀变:围岩蚀变特别是硅化,与成矿作用关系密切,大厂矿田已知锑矿床无一不与硅化相伴生。其中,硅化与角砾化共存时,最有利于矿化。乳白色石英和绿色石英的出现,是直接的锑矿化指示剂;与绿石英伴生的锑空花,是辉锑矿溶蚀后遗留的外膜,也是重要的找矿标志。

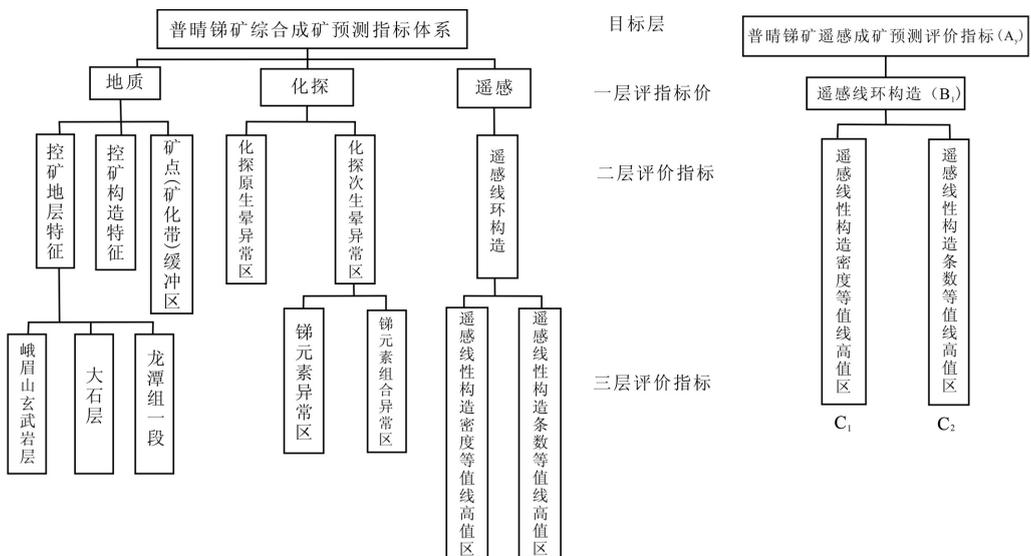


图1 普晴锑矿成矿预测指标递阶和遥感结构层次图

Fig. 1 Multiple-layer structure of prediction indexes for Puqing antimony-ore mineralization and remote sensing data

古喀斯特地貌:古喀斯特地貌的低凹地段,“大厂层”厚度一般较大,常形成规模厚大的矿体;而其上凸地段,“大厂层”厚度较小甚至缺失,矿体规模相对较小。

1.2 化探信息

据研究^{①,②},根据原生晕、次生晕异常,或矿化组合因子高得分等值线图所反映出的异常区及其组合特征,可以推测隐伏矿体的大致位置。因子得分的高低,反映了成矿物质的富集程度,也反映构造应力驱动矿液沿断裂运移和渗流的方向,以及构造应力作用下的岩石形变、成矿物质在后生成矿作用下的迁移富集规律等信息。

1.3 遥感信息

区内锑矿的形成与构造关系极为密切。根据分辨率较高的 ETM+遥感影像的综合解译,能够识别出线、环构造和隐伏构造。解译结果(郝百武,2007)显示,遥感线环构造密度等值线图和线性构造条数等值线图的高值区,总体沿 NNE 向分布,与大厂锑矿带的走向一致;而不同方向断裂的交汇处以及线环构造发育处,往往是锑矿良好的富集场所。

2 层次分析-多级模糊综合评判法

2.1 层次分析

(1) 综合评价指标的选取及层次结构模型的建立

地质、化探和遥感三大因素是区内主要的控矿因素和找矿标志,本次将该三大指标作为成矿预测的准则层参与评价。根据指标选取原则,经过对大

厂矿田已有资料的二次开发和与已知矿区的对比,结合详细的野外地质调查,选取峨眉山玄武岩组、“大厂层”、龙潭组一段、NE 向断裂缓冲区影响带、NNE 向断裂缓冲区影响带、近 EW 向断裂缓冲区影响带、不同方向断裂交汇处缓冲区影响带、已知矿点(矿化带)缓冲区影响带、化探次生晕及原生晕异常区、遥感线性构造密度等值线和线性构造条数等值线的高值区,作为指标层参与成矿预测。考虑到不同指标在成矿预测中所起作用的差异,在共性与特性的基础上,通过野外调查及专家咨询,分别确定区内控矿因素和找矿标志的细化评价指标(图1~图2)。

(2) 构造判断矩阵

判断矩阵的构造是层次分析法的关键。仅以地质成矿评价指标为例,说明评价指标权重的求取方法。首先,根据图1中的指标递阶结构层次,构造一级评价因子间的判断矩阵(表1),再构造出地质成矿二、三级评价指标的判断矩阵(表2~表4)。

表1 一级总判断矩阵

Table 1 The first grade general estimation matrix

A	D	H	Y
D	1	4	6
H	1/4	1	4
Y	1/6	1/4	1

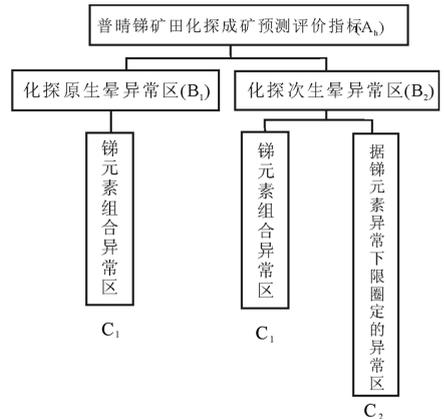
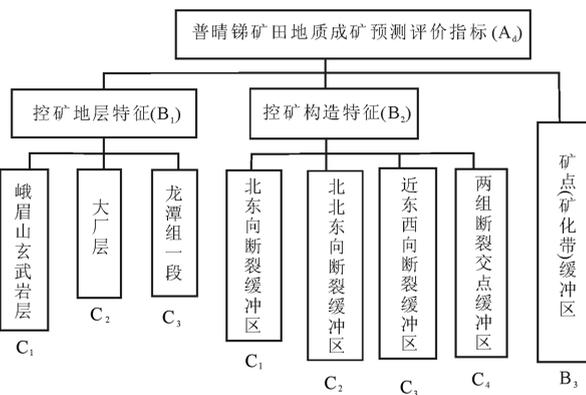


图2 地质和化探成矿预测指标结构层次图

Fig. 2 Multiple-layer structure of metallogenic prediction indexes based on geology and geochemical exploration

表 2 地质二级 A-B 判断矩阵

Table 2 The geological second grade A versus B estimation matrix

A_n	B_1	B_2	B_3
B_1	1	1	1/3
B_2	1	1	1/3
B_3	3	3	1

表 3 地质三级 B_1 -C 判断矩阵

Table 3 The geological third grade B_1 versus C estimation matrix

B_1	C_1	C_2	C_3
C_1	1	1/6	2
C_2	6	1	8
C_3	1/2	1/8	1

表 4 地质三级 B_2 -C 判断矩阵

Table 4 The geological third grade B_2 versus C estimation matrix

B_2	C_1	C_2	C_3	C_4
C_1	1	1/2	4	1/3
C_2	2	1	7	1/2
C_3	1/4	1/7	1	1/9
C_4	3	2	9	1

(3) 计算权向量与一致性检验

权向量和一致性检验的计算均是通过编写程序计算(郝百武,2007)来实现的。在一致性指标 $CR < 0.1$,判断矩阵具有满意的一致性(郝百武,2007)前提下,得各级成矿评价指标权重(表 5)。

2.2 模糊综合计算与评价

(1) 确定评价因子集

假设,地质=D、化探=H、遥感=Y。利用评价指标层次结构图,确立评价指标集,即可确定评价指标及其易发程度分级指标。其中,一级模糊评价指标集(母集) $A = \{D, H, Y\}$;二级模糊评价指标(子集) $A_d = \{B_{d1}, B_{d2}, B_{d3}\}$, $A_h = \{B_{h1}, B_{h3}\}$, $A_y = \{B_y\}$;三级模糊评价指标(子集) $B_{d1} = [C_{d11}, C_{d12}, C_{d13}]$, $B_{h1} = [C_{h11}]$, $B_y = [C_{y1}, C_{y1}]$, $B_{d2} = [C_{d21}, C_{d22}, C_{d23}, C_{d234}]$, $B_{h2} = [C_{h21}, C_{h22}]$ 。

(2) 确定评价集

根据研究区 Sb(Au) 矿控矿因素和找矿标志综合分析,将成矿有利度分为 4 个等级,即:

$V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\} = \{\text{最可能成矿、中等可能成矿、可能成矿、不可能成矿}\}$ 。

(3) 确定评价指标分级标准

根据区内不同控矿因素和找矿标志的特征,结合对已知矿区的认识和专家咨询意见,就地质、化探、遥感三大成矿因素,总结出其成矿有利度评价指标分级标准(表 6)。其中,区内未做锑(金)化探原生晕的区域,按缺少 F6(Sb-Au) 因子指标处理。

表 5 各级评价指标权重值

Table 5 The weight values of grades evaluation factors

一级评价指标	权重	二级评价指标	权重	三级评价指标	权重
地质评价指标(A_d)	0.682	控矿地层特征(B_1)	0.200	峨眉山玄武岩层(C_1)	0.147
				大厂层(C_2)	0.769
				龙潭一段(C_3)	0.084
		控矿构造特征(B_2)	0.200	北东向断裂缓冲区影响带(C_1)	0.165
				北北东向断裂缓冲区影响带(C_2)	0.296
				近东西向断裂缓冲区影响带(C_3)	0.046
				两组断裂交点缓冲区影响带(C_4)	0.493
		矿点(矿化带)缓冲区(B_3)	0.600		
		化探评价指标(A_h)	0.236	化探次生晕异常(B_1)	0.580
锑元素异常下限圈定异常(C_2)	0.450				
化探原生晕异常(B_2)	0.420			F_6 因子,锑(金)元素组合异常(C_3)	0.420
遥感评价指标(A_y)	0.082	遥感线性构造(B_1)	1.000	遥感线性构造密度等值线异常区(C_1)	0.500
				遥感线性构造条数等值线异常区(C_2)	0.500

表 6 大厂矿田成矿有利度因子分级标准

Table 6 The factor grading standard of advantage degree in Dachang ore field

指标	等级				
	最可能成矿(A)	中等可能成矿(B)	可能成矿(C)	不可能成矿(D)	
控矿地层特征	峨眉山玄武岩层	玄武岩内断裂、解理、裂隙等构造不发育	玄武岩内断裂、解理、裂隙构造发育	玄武岩内断裂、解理、裂隙较发育	岩层内断裂、解理、裂隙极发育
	大厂层	厚度大于 20m,岩层内硅化、角砾粘土岩化极发育	厚度:20m~10m,岩层内部硅化,角砾粘土岩化较发育	厚度小于 10m,岩层内部硅化,角砾粘土岩化发育	厚度小于 5m 岩层内部硅化,角砾粘土岩化极不发育
	龙潭组一段	岩层内部断裂、解理、裂隙构造极发育,硅化强	岩层内部断裂、解理、裂隙构造较发育,硅化较强	岩层内部断裂、解理、裂隙发育,硅化弱	岩层内部断裂、解理、裂隙不发育,硅化较弱或无硅化
控矿构造特征	断裂交点缓冲区	距离:0~0.08km	距离:0.08km~0.15km	距离:0.15km~0.21km	距离:>0.21km
	NNE 向断裂缓冲区	距离 0~0.07km	距离:0.07km~0.13km	距离:0.13km~0.18km	距离:>0.18km
	NE 向断裂缓冲区	距离:0~0.10km	距离:0.10km~0.18km	距离:0.18km~0.25km	距离:>0.25km
	近 EW 向断裂缓冲区	距离:0~0.08km	距离:0.08km~0.15km	距离:0.15km~0.20km	距离:>0.20km
矿点(矿化带)缓冲区	距离:0~0.2km	距离:0.2km~0.4km	距离:0.4km~0.6km	距离:>0.6km	
化探原生晕异常	F ₆ 因子锑金元素组合异常	F ₆ 值>0.5	F ₆ 值 0.3~0.5	F ₆ 值 0~0.3	F ₆ 值<0
化探次生晕异常	F ₁ 因子锑元素组合异常	F ₁ 值>1.8	F ₁ 值 0.6~1.8	F ₁ 值 0~0.6	F ₁ 值<0
	据锑元素异常下限值($\times 10^{-6}$)	>40	20~40	10~20	<10
遥感线环构造异常	线性构造密度等值线	>160	140~160	120~140	<120
	线性构造条数等值线	>6.25	4.38~6.25	1.25~4.38	<1.25

(4) 确定评价指标隶属度模糊矩阵

根据隶属度确定方法,本次采用专家评定法及公式法对定性及定量指标分别赋值;定量指标按照以下隶属函数求得:

不可能成矿区:

$$r_{n1} = \begin{cases} 1 & (x \leq a_1) \\ \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1} & (a_1 < x < a_2) \\ 0 & (x \geq a_2) \end{cases}$$

可能成矿区:

$$r_{n2} = \begin{cases} \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & (a_1 < x < a_2) \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2} & (a_2 < x < a_3) \\ 0 & (x \leq a_1 \text{ 或 } x \geq a_3) \end{cases}$$

中等可能成矿区:

$$r_{n3} = \begin{cases} \frac{x - a_2}{a_3 - a_2} & (a_2 < x < a_3) \\ \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3} & (a_3 < x < a_4) \\ 0 & (x \geq a_4 \text{ 或 } x \leq a_2) \end{cases}$$

最可能成矿区:

$$r_{n4} = \begin{cases} 0(x < a_3) \\ \frac{x - a_3}{a_4 - a_3} (a_3 \leq x < a_4) \\ 1(x \geq a_4) \end{cases}$$

式中, $a_1 = D; a_2 = C; a_3 = B; a_4 = A, x$ 为评价指标的实测值。

定性指标隶属度的确定, 则根据专家评定法来实现表 7。

表 7 定性指标隶属度取值

Table 7 The value of the nature index membership of factor

级别, 隶属变	指标	峨眉山玄武岩层	大厂层	龙潭组一段
最有可能成矿区	A	0.10	0.40	0.10
中等可能成矿区	B	0.30	0.50	0.30
可能成矿区	C	0.40	0.20	0.35
不可能成矿区	D	0.20	0.10	0.25

通过以上两种方式即可确定评价指标隶属度的模糊矩阵 R:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}_{n \times m}$$

(5) 模糊综合评价

1) 预测区单元格的划分

为了提取研究区地质变量, 首先对其进行网格单元划分。根据单元格划分原则和方法(侯景儒

等, 1993; 赵鹏大, 1994, 1999; 陈毓川, 1999; 王世称等, 2001) 本次工作以 GIS 为平台, 选取易于计算机操作的平均单元格法, 以大厂矿田普晴梯(金)矿区为具体评价区域, 将 1/1 万地形地质图作为底图, 分别把地质、化探、遥感资料投放在图上。为保证区内地质体与矿产的关系在成矿预测的过程中不被人割裂, 又要保证单元矿点分布接近普阿松分布, 而确保成矿预测的精度, 经反复试验, 最后选取 2cm × 2cm 的网格将整个预测区划分为 1224 个基本评价单元。现以一个评价单元格(郝百武, 2007)(顶上单元格)为例, 来说明层次—模糊综合评价模型的计算评价过程, 所涉及的计算均通过编写程序完成。

2) 单元格致矿信息的空间检索与提取

从空间数据库中对评价单元格内的相关信息进行提取(表 8)。

3) 构造隶属度模糊矩阵

根据表 8 所获取的单元格信息, 构造三级因子模糊矩阵。其中, dv_1 为地质地层特征模糊矩阵, dv_2 为地质构造特征模糊矩阵, dv_3 为矿化点缓冲区模糊矩阵(此单元格未涉及), hv_1 为化探次生晕特征模糊矩阵, hv_2 为化探原生晕特征模糊矩阵, yv_1 为遥感线性构造特征模糊矩阵。各矩阵值如下:

$$dv_1 = \begin{bmatrix} 0.100 & 0.300 & 0.400 & 0.200 \\ 0.100 & 0.300 & 0.350 & 0.250 \end{bmatrix}$$

$$dv_2 = \begin{bmatrix} 0.500 & 0.500 & 0 & 0 \\ 0.857 & 0.143 & 0 & 0 \\ 0.500 & 0.500 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

表 8 评价单元格信息提取表

Table 8 Information from evaluation unit grids

评价指标		致矿信息
地质特征	控矿地层特征	单元格内有玄武岩($P_2\beta$)出露, 玄武岩层内断裂、解理等构造不发育; 有龙潭一段(P_2l^1)产出, 岩层内断裂、解理等裂隙发育, 硅化弱。
	控矿构造特征	近 EW 向构造; 预测单元格所处其断裂缓冲区影响带平均半径约为 0.078km; NNE 向构造; 预测单元格所处其断裂带缓冲区平均半径约为 0.0678km; 断裂交点缓冲区; 预测单元格所处其断裂影响带平均半径约为 0.0775km。
化探特征	化探次生晕异常特征	F_1 (Sb-As-Hg) 因子值; 预测单元格平均值约 0.075; Sb 元素值; 预测单元格值 $< 10 \times 10^{-6}$ 。
	化探原生晕异常特征	F_6 (Sb-Au) 因子值; 预测单元格平均值约 0.35。
遥感特征	遥感线性构造特征	预测单元格, 在遥感线性构造密度等值线图中值 > 160 ; 在遥感线性构造条数等值线图中其值 > 6.25 。

$$hv_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1.00 \\ 0 & 0 & 0.250 & 0.750 \end{bmatrix}$$

$$hv_2 = [0 \quad 0.336 \quad 0.164 \quad 0.500]$$

$$yv_1 = \begin{bmatrix} 1.000 & 0 & 0 & 0 \\ 1.000 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4) 模糊综合评价

根据建立的三级模糊矩阵和已确定的各级评价因子权重,最终计算出一级评价因子(地质、化探、遥感)模糊矩阵R和模糊—层次最终评价结果U:

$$R = \begin{bmatrix} 0.310 & 0.379 & 0.196 & 0.104 \\ 0 & 0.336 & 0.164 & 0.500 \\ 1.000 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U = [0.293 \quad 0.338 \quad 0.172 \quad 0.189]$$

根据最大隶属度原则,该单元格最终评价结果为中等可能成矿区。当计算的两级结果相同时,应选择成矿较高的级别。

5) 预测成果输出及评价

对区内所有网格单元逐一做出评价后,将所有评价值输入计算机,并生成模糊综合评价图^[17]。将各等级预测靶区分区界线进行圆滑处理后,即得到勘查区综合信息成矿预测图5。

3 结果分析

共圈定出锑(金)矿远景区18个(图3),具体见表9:

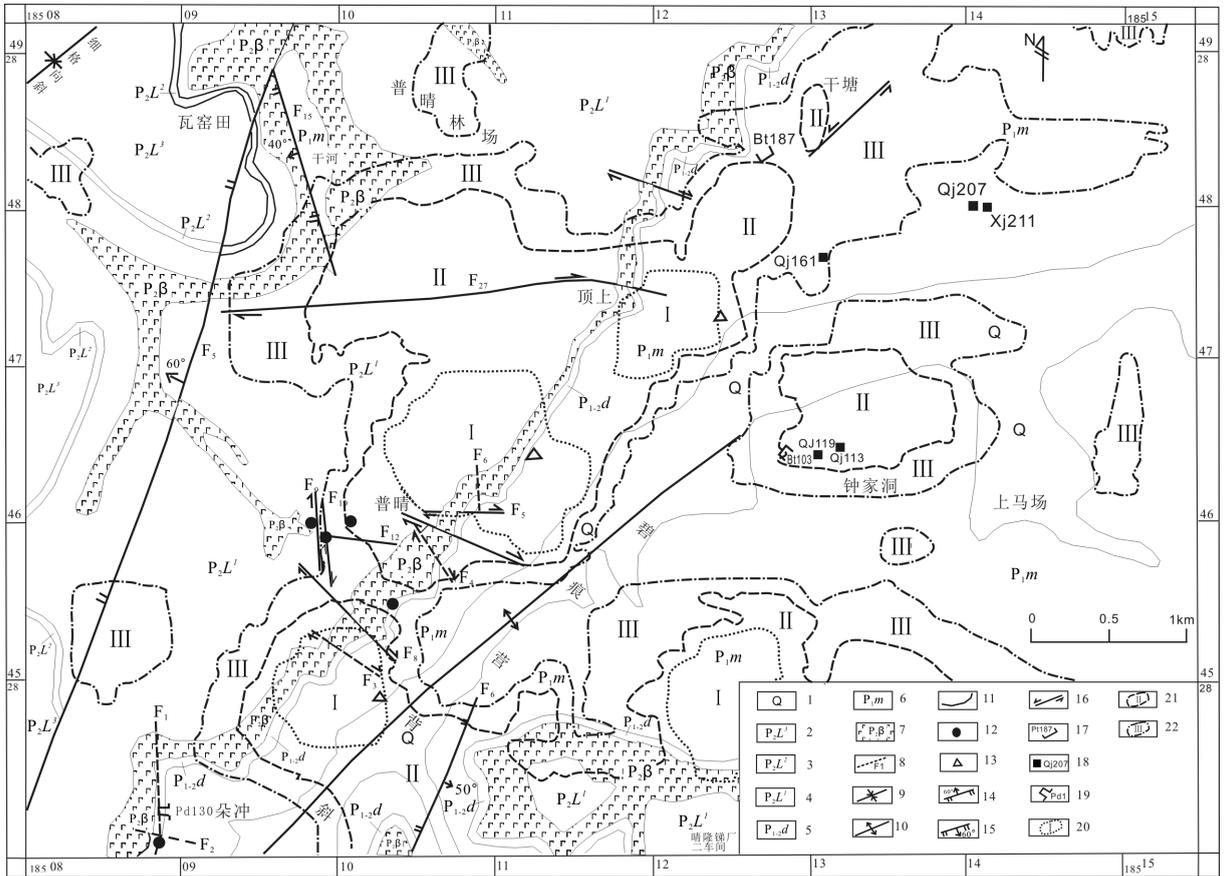


图3 普晴勘查区综合信息成矿预测成果图

Fig.3 Map showing mineralization production based on comprehensive information in the Puqing prospecting area

1-第四系;2-二叠系龙潭组三段;3-二叠系龙潭组二段;4-二叠系龙潭组一段;5-二叠系大厂层组;6-二叠系茅口组;7-二叠系峨眉山玄武岩组;8-推测断层;9-向斜;10-背斜;11-地质界线;12-锑矿化点;13-锑矿点;14-逆断层;15-正断层;16-平移断层;17-剥土及编号;18-浅井及编号;19-平洞及编号;20-I级异常区及编号;21-II级异常区及编号;22-III级异常区及编号

1-Quaternary;2-Longtan Groups the third member of Permian;3-Longtan Groups the second part of Permian;4-Longtan Groups the first part of Permian;5-Dachang layer Groups of Permian;6-Maokou Groups of Permian;7-Ermei mountain basalt Groups of Permian;8-speculate fault;9-Syncline;10-anticline;11-the geological borderline;12-antimony mineralization points;13-antimony mine points;14-reverse fault;15-normal fault;16-translational fault;17-erosion soils and number;18-shallow well and number;19-andit and number;20-the first grade abnormal areas and number;21-the second grade abnormal areas and number;22-the third grade abnormal areas and number

表9 部分成预测靶区概况

Table 9 The general situation of portion metallogenic prediction areas

预测靶区	位置	地质情况	化探情况	遥感	规模(km ²)	预测成矿潜力	
I级	A ₁	晴隆梯厂二车间及旧寨。	有三个已知矿点,有"大厂层"、玄武岩、龙潭组一段出露。	缺少土壤次生化探资料。	线性条数、线性密度高异常。	1.013	有已知矿点,同等级成矿潜力大。
	A ₂	朵冲,112~160号勘探线间。	有一个矿化点;有近EW向和近SN向断裂交汇;有"大厂层"、玄武岩、龙潭组一段出露。	缺少土壤化探资料;原生晕高异常。	线性条数、线性密度高异常。	0.566	各指标因子值均高,同等级成矿潜力大。
	A ₃	普晴白坟,16~64号勘探线间。	有二个已知矿化点;有四条断裂及其交点出露,有"大厂层"、玄武岩、龙潭组一段出露。	F因子、Sb元素中低异常;原生晕高异常。	线性条数、线性密度高、中异常。	1.324	有工程ZK2001、ZK2401 TC24、TC24-2、KD24-1检验,成矿潜力大
	A ₄	竹马冲NW,15~79号勘探线间。	有一个矿化点,有二条断裂和一个断裂交点;有"大厂层"、玄武岩、龙潭组一段出露。	F因子高、中异常,Sb元素中低异常;原生晕高异常。	线性条数、线性密度低异常。	0.599	有设计钻孔4701、已知TC19、TC67、TC43工程控制,同等级成矿潜力较大。
II级	B ₁	大坪地,80~128号勘探线间。	有一条F6断裂;有"大厂层"、玄武岩出露。	缺少次生晕化探资料;原生晕中低异常。	线性条数中、低异常;线性密度低异常。	0.760	同等级成矿潜力较大。
	B ₂	钟家洞,63~127号勘探线间。	有一Au矿点;碧痕营背斜南东翼近核部。	F因子、Sb元素高、中异常;缺少原生晕资料。	线性条数中、低异常;线性密度低异常。	1.308	有已知BT103、QJ113、QJ109工程检验,同等级成矿潜力大。
	B ₃	畜牧场,47~48号勘探线间。	有三条断裂和两个断裂交点;有玄武岩和龙潭一段出露。	F因子Sb元素无异常;原生晕低异常。	线性条数、线性密度高异常	2.275	同等级下成矿潜力大。
	B ₄	顶上,95~143号勘探线间	有二条断裂和一个断裂交点;有"大厂层"、玄武岩、龙潭组一段出露。	F因子Sb元素中、低异常;原生晕高、中异常。	线性条数、线性密度低异常;	0.404	层次-模糊评判法示例单元格位于其中,同等级成矿潜力大。
	B ₅	干塘,175~207号勘探线间。	有"大厂层"、玄武岩、龙潭组一段出露。	F因子高异常,Sb元素中低异常;原生晕高、中异常。	线性条数低异常;线性密度中异常。	0.073	有BT173、BT173-1已知工程检验,同等级成矿潜力大。
III级	C ₁	晴隆梯厂二车间及旧寨。	有"大厂层"、玄武岩出露。	缺少化探资料,	线性条数中异常;线性密度高中异常。	0.371	在已知矿点附近,同等级成矿潜力大。
	C ₂	上马场东,143~191号勘探线间。	碧痕营背斜SE翼。	F因子、Sb元素中低异常;缺少原生晕资料。	线性条数中异常;线性密度高异常。	0.285	同等级下成矿潜力较大。
	C ₃	碉堡,207~239号勘探线间。	有一Au矿化点;碧痕营背斜NW翼。	F因子中低异常,Sb高异常;缺少原生晕资料。	线性条数中、低异常;线性密度低异常。	0.422	有已知KD207、QJ207、XJ211工程检验,同等级下成矿潜力较大。
	C ₄	干塘,95~207线间。	有一Au矿化点;有1条f16断裂;有"大厂层"、玄武岩、龙潭组一段出露。	F因子高中异常,Sb元素中低异常;原生晕中、低异常,缺少原生晕资料。	线性条数低异常;线性密度中、低异常。	1.869	位于B4、B5的外围,BT187,位于其中;同等级下成矿潜力大。
	C ₅	瓦窑田NE,111~143号勘探线间。	有F5、f152条断裂及其交点;有玄武岩出露。	F因子、Sb元素低异常;缺少原生晕资料。	线性条数、线性密度中、低异常	0.284	同等级成矿潜力较大。
	C ₆	下寨,160号勘探线SW。	无地质异常。	缺少化探资料;缺少原生晕资料。	线性条数高异常;线性密度中异常。	0.433	同等级成矿潜力较大。

(1) I级远景区:共4个最有可能成矿区,分别位于碧痕营背斜的NW翼顶上东、普晴北东、朵冲北东1km处,以及碧痕营北斜SE翼,普晴矿区与大厂矿区交界附近。区内已知矿(化)点,有80%落入该类预测区内。

(2) II级远景区:共5个中等可能成矿预测区,对称展布于碧痕营背斜的两翼,主要分布于I级远景区的外围。其中,在普晴和干河附近、碧痕营背斜NW翼的成矿预测区规模最大,其余则分别位于干河SE、新庄平SW,以及朵冲与普晴矿区以及大厂矿区交界处。

(3) III级远景区:共9个可能成矿预测区,主要位于II级远景区的外围,其总体呈NE~SW向沿碧痕营背斜轴向延伸。其中,规模最大的一个位于碧痕营背斜NW翼干塘附近。

根据各级预测区的实际地质情况和已有工程验证,本次预测结果较为准确有效。

4 结论

本文以普晴矿区为例,选取地质、化探和遥感多种致矿信息,在GIS平台上建立层次分析-多级模糊评价的成矿预测模型。对于成矿预测指标较多、各指标间具有一定层次性和模糊性程度较低的矿区或勘查区,基于层次分析-多级模糊评价法的成矿预测模型具有极大的优越性,可将专家的主观判断与精确的数学运算巧妙地融合,将复杂问题及定性指标定量化,并使评价过程及评判结果更具客观性,可直接指导本区的找矿勘探。应用结果证实,本次所建立的成矿预测模型具有较为广泛的适用性,可大大提高预测工作的可靠性和效率,不仅对研究程度较低的新矿区预测有效,更适用于研究程度较高的老矿区。

致谢 本文是中央财政资源补偿项目“贵州省晴隆县大厂锑矿田西部普晴锑金矿勘查”的部分研究成果。室内外工作过程中,始终得到韩润生研究员的悉心指导,野外工作中得到晴隆锑矿刘宏科长、西北有色地质局物化探队以及刁理品硕士和朱林生等本科生的大力协助,遥感图像由贵州省地勘局况顺达博士无偿提供,在此一并表示衷心感谢!同时,衷心感谢评委专家和编辑们提宝贵意见!

[注释]

① 韩润生,方维宣,刁理品. 2005. 贵州省晴隆县大厂锑矿田西部普晴锑金矿勘查项目设计书

② 韩润生,刁理品,郝百武. 2006. 贵州省晴隆县大厂锑矿田西部普

晴锑金矿普查 2005~2006 年度项目执行总结报告

[References]

- Bonham-Carter GF, Agterberg FP, Weight DF. 1990. Weights of evidence modeling; a new approach to mapping mineral potential[A]. Statistical applications in the earth sciences[C]. Ottawa: Geological Survey of Canada; 173-183
- Chen Yu-chuan. 1999. The theory and method of the ore produces exploration an evaluation in current[M]. Beijing: earthquake Press; 297-381 (in Chinese)
- Hao Bai-wu. 2007. The Comprehensive information metallogenic prediction in Puqing antimony-gold survey field from Dachang mine field in Guizhou province[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology; 73-144 (in Chinese with English abstract)
- Hou Jing-ru, Guo Guang-yu. 1993. The theory and applying of Geology statistics and deposits statistics prediction[M]. Beijing: metallurgy industry Press; 226-302 (in Chinese)
- Li Hong-xing, Wang Pei-zhuang. 1994. Fuzzy Math[M]. Beijing: Defend industry Press; 1-289 (in Chinese)
- Peng Jian-tang, Hu Rui-zhong, Qi Liang. 2002. The features of REE and its means of indication in fluorite from Puqing antimony deposits [J]. The geological science, 37(3): 277-287 (in Chinese with English abstract)
- Su Shu-can. 1992. The features and the metallogenic rule of antimony deposits in Guizhou province[J]. The Ore Productions and Geology of Southwest, 4: 8-17 (in Chinese with English abstract)
- Xu Jian-hua. 1994. The applying of mathematic method in geography [M]. Beijing: high education Press; 281-308 (in Chinese)
- Xu Shan-fa, Chen Jian-ping, Ye Ji-hua. 2006. The study of applying about the method of Weight evidence in copper and gold metallogenic prediction from northern in Three River [J]. Geology and exploration, 42(2): 54-59 (in Chinese with English abstract)
- Xu Shu-bo. 1998. The theory of the Fuzzy-AHP[M]. Tianjin: Tianjin university Press; 1-80 (in Chinese)
- Wang Min. 2002. The basic process and the contents of applying GIS technology in metallogenic prediction [J]. Shandong province geology, 18(1): 50-57 (in Chinese with English abstract)
- Wang Pei-zhuang. 1983. The fuzzy set theory and its applying [M]. Shanghai: The Science and technology Press in Shanghai; 1-296 (in Chinese)
- Wang Shi-cheng, Wang Yu-tian, Liu Shao-hua, Wang Kai. 1992. Overview of a theory and method for prediction of mineral resources in China [J]. Mathematical Geology, 24(6): 597-608 (in Chinese with English abstract)
- Wang Shi-cheng, Chen Yong-liang, Xia Li-xian. 2000. The theory and method of Comprehensive information metallogenic prediction [M]. Beijing: Science Press; 1-343 (in Chinese)
- Wang Shi-cheng, 2001. Comprehensive information metallogenic prediction in large and superlarge Gold Deposits dense area [M]. Beijing: Geological Publishing House; 126-129 (in Chinese)
- Zhao Peng-da, Hu Wang-liang, Li Zi-jin. 1994. The statistic and prediction of Deposits (second edition) [M]. Beijing: Geological Publishing House; 11-42 (in Chinese)

Zhao Peng-da, Chen Yong-qing, Liu Yong-ping. 1999. The metallogenic prediction theory and practice of Geological abnormal [M]. Wuhan: Chinese Geology university Press; 101-103 (in Chinese)

Zhao Peng-da. 2004. The method and practice of fix quantity Geology [M]. Beijing: high education Press; 158-167 (in Chinese)

Zhao Peng-da, Chen Jian-ping, Chen Jian-guo, Zhang Shou-ting, Chen Yong-qing. 2005. The three-component digital prospecting method: a new approach for mineral resource quantitative prediction and assessment [J]. Natural Resources Research, 14(4): 295-303

[附中文参考文献]

陈毓川. 1999. 当代矿产资源勘查评价的理论与方法 [M]. 北京: 地震出版社; 297-381

郝百武. 2007. 贵州大厂矿田普晴锑金矿区综合信息成矿预测 [D]. 昆明: 昆明理工大学; 73-144

侯景儒, 郭光裕. 1993. 矿床统计预测及地质统计学的理论与应用 [M]. 北京: 冶金工业出版社; 226-302

李洪兴, 汪培庄. 1994. 模糊数学 [M]. 北京: 国防工业出版社; 1-289

彭建堂, 胡瑞忠, 漆亮. 2002. 晴隆锑矿床中萤石的稀土元素特征及其指示意义 [J]. 地质科学, 37(3): 277-287

苏书灿. 1992. 贵州锑矿地质特征及成矿规律 [J]. 西南矿产地质, 4: 8-17

徐建华. 1994. 数学方法在地理学中的应用 [M]. 北京: 高等教育出版社; 281-308

徐善法, 陈建平, 叶继华. 2006. 证据权法在三江北段铜金矿床成矿预测中的应用研究 [J]. 地质与勘探, 42(2): 54-59

许树柏. 1988. 层次分析法原理 [M]. 天津: 天津大学出版社; 1-80

王敏. 2002. 应用 GIS 技术进行成矿预测的基本步骤及主要内容 [J]. 山东地质, 18(1): 50-57

汪培庄. 1983. 模糊集合论及其应用 [M]. 上海: 上海科学技术出版社; 1-189

王世称, 陈永良, 夏立显. 2000. 综合信息矿产预测理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社; 1-343

王世称. 2001. 大型、超大型金矿床密集区综合信息成矿预测 [M]. 北京: 地质出版社; 126-129

赵鹏大, 胡旺亮, 李紫金. 1994. 矿床统计预测 (第二版) [M]. 北京: 地质出版社; 11-42

赵鹏大, 陈永清, 刘永平. 1999. 地质异常成矿预测理论与实践 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社; 101-103

赵鹏大. 2004. 定量地质学方法及应用 [M]. 北京: 高等教育出版社; 158-167

An AHP and Multiple-Grade Fuzzy Evaluation (MGFE) Coupling Model Based on Comprehensive Information for Metallogenic Prediction: Application to the Puqing Antimony-Gold Orefield in Guizhou Province

HAO Bai-wu^{1,2}

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093;

2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037)

Abstract: The metallogenic prediction based on comprehensive information involves many factors which have the features of hierarchy, and some qualitative factors have fuzzy features. So the high precision and quantification are always difficult problems restricting its development. In order to realize the metallogenic prediction in new mine fields which have been studied to a low degree, and resolve the above mentioned difficulties, this work tries to build the AHP model and multiple-grade fuzzy evaluation model for metallogenic prediction. These models are the synthetic model which combines the expert's subjective ideas with exact math calculation, making complicated problems and qualitative factors quantified, and the evaluation process and results more exact. Taking the Puqing Antimony-gold mine area of Dachang ore field in GuiZhou province for example, and geology, this work uses data of geology, geochemical exploration and remote sensing to make prediction on the platform of GIS, the AHP model and multiple-grade fuzzy evaluation model. Finally, 18 prospecting areas of antimony-gold are determined, including four I grade, five II grade antimony and and nine III grade areas. The exploration examination shows that this prediction method is fairly effective and can achieve rather accurate forecasting results.

Key words: AHP model, more grade fuzzy evaluation (MGFE) model, comprehensive information metallogenic prediction, Puqing antimony-gold ore field, Guizhou province