

# Meta 分析在矿集区成矿信息权重值比较中的应用

王 颖<sup>1,2</sup> 彭省临<sup>2</sup> 王雄军<sup>2</sup>

(1. 中南大学 地学与环境工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中南林业科技大学, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 矿集区内隐伏矿综合定位预测方法已成为找矿预测领域的研究热点。矿床矿点的形成是由多种非线性成矿因素综合作用的结果, 多属性模糊优选决策模型(FOMMAD)是解决这类问题的有效工具。寻找一个科学合理的属性权重确定方法, 是 FOMMAD 能否成功实施的关键。首次应用 Meta 分析方法对地层、接触带、断裂、蚀变、构造交汇处 5 种找矿信息的权重进行了定量比较研究。在此基础上, 运用 FOMMAD 及模糊层次分析法(FAHP), 在研究区圈定了 12 个成矿有利度较高的靶区。验证结果表明, 基于 Meta 分析与 FOMMAD 模型的多元找矿信息综合预测模型得到的成矿有利度可作为研究区找矿预测的综合标志。

**关键词:** Meta 分析; 成矿信息权重; FOMMAD; 深部找矿预测; FAHP

**中图分类号:** P628<sup>+.1</sup>      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2011)01-0180-10

目前, 基于 GIS 的隐伏矿综合定位预测方法成为找矿预测领域的研究热点。该方法的基本思路是以 GIS 为平台, 通过对地、物、化、遥等成矿信息的提取和分析, 产生大量的、具有预测意义的找矿标志信息; 确定各标志因素在靶区定位预测中的权重大小; 根据成矿模式和找矿标志应用多元统计方法圈定找矿远景区和靶区。

模糊数学可将各种离散的地质因素综合起来。并且以模糊数学为基础的模糊综合评判可以将定量指标与定性指标同时考虑进行综合评价, 具有准确性高、实用性强等优点。矿床矿点的形成是由多种成矿因素综合作用的结果(是一种多属性现象), 因而, 不少学者开始将多属性模糊优选决策模型<sup>[1-3]</sup>(Fuzzy Optimize Model of Multi-attribute Decision-making, 即 FOMMAD)引入到隐伏矿定位预测研究中<sup>[3-9]</sup>。

对于 FOMMAD 而言, 权重的确定一直是研究

的难点。在隐伏矿定位预测研究中, 权重主要是指地、物、化、遥等各种信息对找矿的影响大小。确定权重的方法很多, 主要分为主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法受到的人为因素的影响太多, 使找矿预测难以达到定量定位的程度, 究其原因, 主要在于地质变量的复杂性、不确定性, 常规的定量分析方法难以适用<sup>[7]</sup>; 而对客观赋权法而言, 尚缺少准确确定找矿信息权重的定量方法, 因此, 目前在找矿预测中的使用很少。多种找矿信息的定量比较即定量比较不同找矿信息之间的重要性大小, 可为客观赋权法以及勘查技术方法的优选和集成提供可靠的科学依据。

Meta 分析是对同一课题的多项独立研究的结果进行系统的、定量的综合性分析。其精髓是“对具备特定条件的、同课题的诸多研究结果进行综合后统计”。基于上述认识, 本文将以天马山—金口岭—铜官山铜金矿区为例, 首次移植引用 Meta 分析来

收稿日期: 2010-04-01; 改回日期: 2010-09-25

基金项目: 科技部国家“十一五”科技支撑计划(2006BAB01B07)、国家“973”计划前期研究专项(2007CB416608)和中南大学博士研究生学位论文创新选项目(1343-77208)共同资助。

作者简介: 王颖, 男, 1975 年生, 博士, 主要从事 GIS、非线性智能算法等研究; E-mail: csu\_wangying@yahoo.com.cn。

通讯作者: 彭省临, 男, 1948 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事金属矿成矿学和矿床定位预测研究; E-mail: psl@csu.edu.cn。

对多种找矿预测信息进行再统计分析<sup>[8]</sup>,旨在探索一条将 Meta 分析方法引入到多元找矿信息综合集成研究中的新途径。

## 1 Meta 分析及其在多元找矿信息综合预测研究中的应用

### 1.1 Meta 分析概述

Meta 分析主要应用于医学领域。Meta 意思是 more comprehensive,即更加全面或超常规综合的意思;是以同一课题的多项独立研究的结果为研究对象,在严格设计的基础上,运用适当的统计学方法对多个研究结果进行系统、客观、定量的综合分析。其目的是通过增大样本量来增加结论的可信度,解决研究结果的不一致性<sup>[8-12]</sup>,目前还未见该方法在地质学领域的应用成果。

Meta 分析的基本步骤<sup>[13-18]</sup>:

1)根据研究主题,研究确定纳入 Meta 分析的资料入选标准;

2)获取与主题相关、符合入选标准的一切资料;

3)对纳入研究的资料进行质量评价;

4)提取纳入文献资料的数据信息;

5)资料的统计学分析,以选取合适的统计模型和分析方法,使结论更客观、可靠:

①异质性检验(齐性检验);

②统计合并效应量(加权合并,计算效应尺度及 95%的置信区间)并进行统计推断;

③图示单个试验的结果和合并后的结果;

④敏感性分析;

⑤通过“失安全数”的计算或采用“倒漏斗图”了解潜在的发表偏倚。

⑥形成结果报告。

### 1.2 在多元找矿信息综合预测研究中引入 Meta 分析的原因

之所以将它引入矿集区隐伏矿找矿预测中,主要基于以下原因:

①经过长期生产、研究,很多矿集区特别是其中的大中型矿山积累了大量生产、勘探及科研资料信息,如各种勘探工程数据、编录数据、化验数据等地质原始资料以及在此基础上融合各种地质经验和知识形成的地质图件资料等<sup>[19]</sup>。但缺乏充分利用这些资料开展隐伏矿找矿预测的系统统计方法。

②在找矿预测中,往往需要对多个研究区段的

研究结果进行分析对比。网格单元法为统计学进入找矿预测领域架起了桥梁<sup>[20]</sup>。然而,使用“网格单元法”时,对不同大小、不同成因的预测区,其网格的大小和形状亦可能不相同;同时,由于矿床形成的复杂性,所获数据的随机误差较大,使所得结论亦可能与实际情况有较大差别;即使对同一对象进行研究,所得结果也可能不一致。此时,传统的矿床统计分析方法很可能导致信息的失真。而 Meta 分析在解决结果不一致问题上有很强的统计对比功能;正好弥补了传统方法的不足。

③在开展隐伏矿定位预测研究中,需要科学的评价手段来对各种探测技术的有效性进行定量评价,准确确定它们在定位预测中的权重大小,为勘查技术方法的优选和集成,进而为隐伏矿定量定位预测提供可靠的科学依据。而 Meta 分析可为“客观赋权”提供有效途径<sup>[7]</sup>。

## 2 天马山—金口岭—铜官山地区地质概况

本文以天马山—金口岭—铜官山铜金矿区为研究区,应用 Meta 分析方法对地层、接触带、断裂、蚀变、构造交汇处 5 种找矿信息的权重进行了定量比较研究。

研究区位于铜陵地区,沿江拱断褶带中的铜陵复式褶皱。其北东为繁昌断陷盆地,南东为宣广断陷盆地,西为沿江断陷盆地。天马山—金口岭—铜官山地区即位于该复式褶皱的铜官山背斜的北东倾伏端及南东翼(图 1)。

区内地层自第四系到志留系均有出露。第四系松散堆积物分布于长江沿岸平原及山区的山麓、山坡、山间凹地中。新近系河流相砂砾岩地层分布于沿江一带的大通附近。白垩系—侏罗系为火山岩地层,分布于外围的繁昌盆地。三叠系以海相碳酸盐岩地层为主,分布在开阔的向斜部位。二叠系与上石炭统的海陆交互碎屑岩和海相碳酸盐岩地层分布于各背斜翼部。上泥盆统和志留系碎屑岩地层分布于各背斜轴部。上泥盆统及上石炭统、二叠系至下中三叠统是本区内生金属矿床的主要赋矿层位。

铜陵复式褶皱由一系列呈北东向的背斜与向斜组成。背斜多紧闭,一般延伸不远就倾伏,向斜开阔,并多呈复式向斜构造。由西向东依次分布有金口岭向斜、铜官山背斜、大通—顺安复向斜、永村桥背斜、

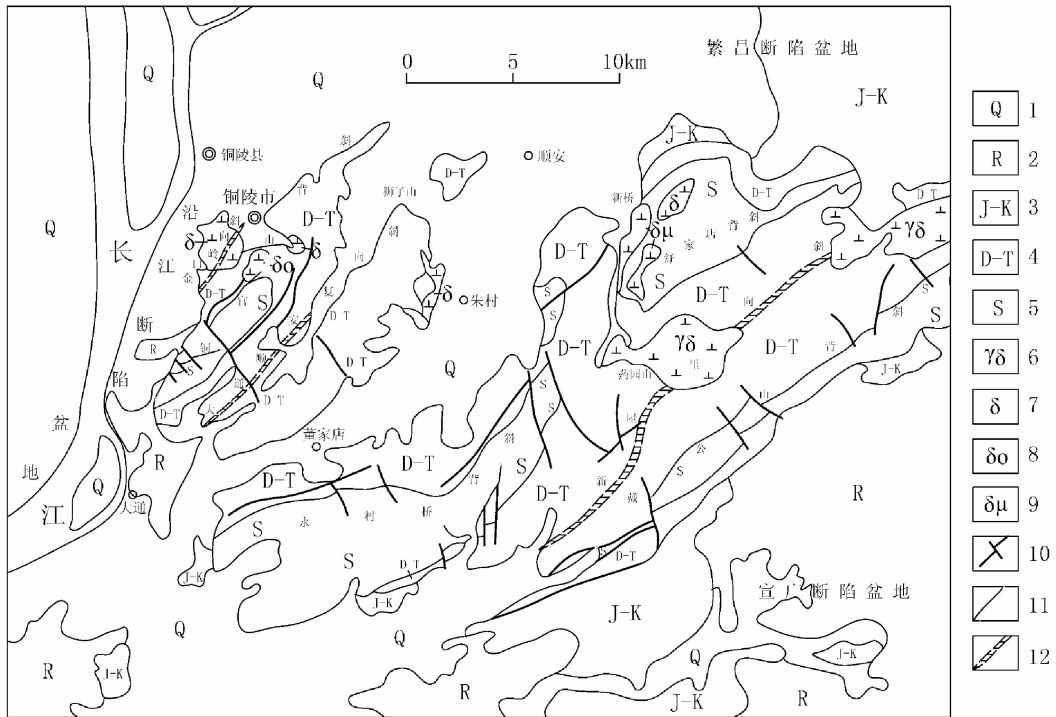


图1 铜陵地区地质简图

1—第四系;2—新近系;3—侏罗系-白垩系;4—泥盆系-三叠系;5—志留系;6—花岗岩闪长岩;  
7—闪长岩;8—石英闪长岩;9—闪长玢岩;10—断层;11—背斜轴;12—向斜轴

Fig.1 Geological sketch map of Tongling area

1-Quaternary;2-Neocene;3-Cretaceous/Jurassic;4-Devonian/ Triassic;5-Silurian;6-Granodiorite;  
7-Diorite;8-Quartz diorite;9-Diorite porphyrite;10-Fault;11-Anticline axis;12- syncline axis

舒家店背斜、新屋里背斜、戴公山背斜等。

区内燕山期岩浆岩分布广泛,侵入体有70多个,多沿复式褶皱的中间隆起部位出露,出露面积0.01~10 km<sup>2</sup>,形态有岩株、岩枝、岩床、岩脉等。岩浆岩类型主要包括:①辉石二长闪长岩,分布于白芒山、朝山、焦冲、舒家店等地,出露面积较小;②石英二长闪长岩,沿铜陵—南陵断裂广泛分布,是铜陵地区最主要的岩浆岩类型;③花岗闪长岩,分布于瑶山、凤凰山等地。另有少量石英闪长岩、花岗岩脉、辉绿岩脉、煌斑岩脉等零星分布(图1)。

天马山—金口岭—铜官山地区主要分布有天马山、黄狮涝硫金矿床和铜官山、金口岭铜矿床等矿床。矿床形成具有海西期海底喷流成矿和燕山期岩浆热液叠加改造成矿作用的多因复成矿床特征。

### 3 信息统计单元的划分及成矿地质信息变量的确定

#### 3.1 研究区信息统计单元的划分情况

目前,在国内外的成矿预测中应用最广的是规

则网格单元划分法,基本思想是运用统计学分析原理,在一定比例尺条件下选择一定大小的网格将整个研究区划分为面积相等形状相同的单元,用作统一观测和取值的基本单位,通过样本的观测来描述总体,并遵循抽样的随机性及样品的代表性原则。这里如何确定最佳的网格单元大小是关键问题,矿点空间分布统计模型与单元面积大小也有直接关系。

本次研究统计单元的划分主要考虑对矿化的显示和控制,同时又考虑了统计计算、地质信息变量的选取和空间分析等要素。根据矿区的实际情况和统计计算的处理能力,采用规则网格法在1:20000的铜陵天马山矿区地质图上分别按100 m×100 m,200 m×200 m,400 m×400 m的标准将研究区划分为不同标准的信息统计单元(如图2,即按200 m×200 m的标准划分)

#### 3.2 研究区成矿地质信息变量的确定

天马山—金口岭—铜官山地区矿床的形成是该地区燕山期岩浆岩、石炭系等地层、褶皱断裂构造及多期成矿事件等多种地质因素复合的结果,这些因

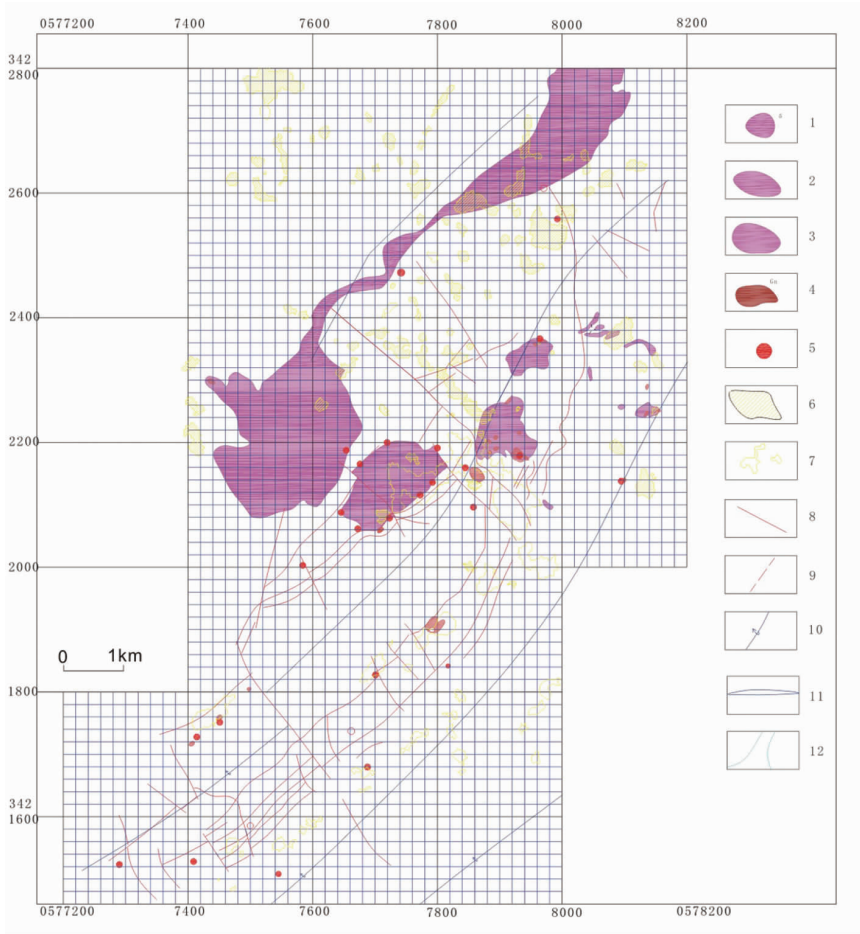


图 2 天马山—金口岭—铜官山地区部分地质与信息统计预测单元划分图(覆盖网格)

- 1—闪长岩; 2—石英闪长岩; 3—闪长斑岩; 4—铁帽; 5—矿点;
- 6—遥感混合蚀变异常塔山组(强); 7—遥感混合蚀变异常(弱)小凉亭组; 8—大隆组断裂;
- 9—推测大断裂; 10—褶皱轴; 11—东西向隆起叠加; 12—水体

Fig.2 Map showing part of geological information in Tianmashan-Jingkouling-Tongguanshan area (covered grid)

- 1-Diorite; 2-Quartz diorite; 3-Diorite porphyrite; 4-Gossan; 5-Ore spot; 6-Remote sensing synthetic strong alteration anomaly; 7-Remote sensing synthetic weak alteration anomaly; 8-Fracture; 9- Inferred fracture; 10-Fold axis; 11-EW-trending superimposed uplift; 12-Water bodies

素与成矿的关联性及其表现形式, 是厘定成矿地质信息变量的基础。

在统计变量选择的过程中, 既要考虑选择的变量便于计算机进行空间分析与计算, 又要注重选择有利于成矿预测的代表性变量。由于控制和影响天马山矿区成矿的地质信息变量十分复杂, 加之在提取与找矿有关的信息时, 有些信息是定性而不是定量的, 因而无法进行统计计算。因此, 为了建立空间定位预测模型, 为了使参与叠加分析的所有图层都包含在预测研究的范围内, 本次研究特选择以下变量进行空间分析: 地层信息(石炭系、二叠系、三叠系、泥盆系)、蚀变、接触带、断裂(北东向断裂、北西向断裂)、构造交汇处, 共 5 个变量。这些变量定量信

息, 除通过地质调查定量获得外, 其余均从遥感分析中获取。笔者在天马山矿区开展遥感蚀变信息的提取和定量统计分析研究, 结果表明由于天马山矿区岩石出露程度较高, 对遥感蚀变信息的提取十分有利, 加之蚀变岩石与广泛出露的碳酸盐岩地层及未蚀变花岗岩在光谱特征上反差明显, 因此所提取的综合蚀变区与现有矿床分布区具有高度的吻合性, 可做为隐伏矿体找矿预测的有效标志。

随着找矿主体对象由地表矿、浅部矿、易识别矿向隐伏矿、深部矿、难识别矿的逐渐转变, 找矿难度越来越大。因此, 物、化探找矿方法近年来得到了较以往更多的重视和应用。但在本文中, 由于整个天马山矿区的物、化探资料数据不是很全, 加上本文重点

是放在找矿信息的集成方法研究上,主要研究 Meta 分析及 FOMMAD 模型在多元找矿信息综合集成中的应用,因此,在多元找矿信息中,没有将物、化探等信息纳入统计研究。

## 4 Meta 分析在成矿信息权重值比较中的应用

依据第 1 节所确定的 Meta 分析步骤,将展开成矿信息权重值比较的研究。

### (1) 确定研究主题

成矿信息权重值比较。

### (2) 对相关文献资料进行收集和质量评价

该项工作已在第 2、3 节中完成。

### (3) 数据的提取

根据铜陵天马山—金口岭—铜官山地区的成矿模式,研究区每个单元格考虑五类成矿信息:断裂、构造交汇处、成矿有利地层、接触带、蚀变。每包含一个信息,单元格的值加 1,值大于等于 2 的暂且设为远景成矿单元格。

以比较断裂和蚀变两类信息权重值为例。经处理所得数据如表 1~3 所示。在表 1 中,5 类成矿信息全部予以考虑。得出研究区“预测成矿单元格数”和“位于预测区中的实际有矿单元格数( $y/x$ )”。在表 2~3 中,分别排除“断裂”信息和“蚀变”信息,只考虑其余 4 种成矿信息情况下,研究区中“预测成矿单元格数”和“位于预测区中的实际有矿单元格数”。

### (4) 进行 Meta 分析

表 1 5 类信息全部考虑情况下的远景成矿单元格与有矿单元格的个数

Table 1 Case in containing five types of information

网格规格	预测成矿 单元格数	实际有矿单 元格数(x)	位于预测区中的有 矿单元格数(y)
100 m×100 m	1953	258	221
200 m×200 m	766	93	75
400 m×400 m	398	46	40

表 2 缺“断裂”信息情况下的远景成矿单元格与有矿单元格的个数情形

Table 2 Case in lacking fracture information

网格规格	预测成矿 单元格数	实际有矿单 元格数(x)	位于预测区中的有 矿单元格数(y)
100 m×100 m	1325	258	188
200 m×200 m	504	93	45
400 m×400 m	282	46	36

利用 RevMan 软件对上述数据进行 Meta 分析。

### (5) 综合分析,得出结论

图 3~4 为 Meta 分析的结果。从图 3 可以看出,符合  $v = K-1$  的  $\chi^2$  分布。本研究的分析结果显示  $P=0.18 > 0.05$ , 因此认为各研究同质性较好,可用固定效应模型进行分析。OR=2.66 (95%CI, 1.88~3.76) > 0。菱形完全位于垂直线右侧,得出“断裂信息对成矿有影响”的结论。

从图 4 可以看出,符合  $v = K-1$  的  $\chi^2$  分布。本研究的分析结果显示  $P=0.53 > 0.05$ , 因此认为各研究同质性较好,可用固定效应模型进行分析。OR=1.81 (95%CI, 1.27~2.58) > 0。菱形完全位于垂直线右侧,得出“蚀变信息对成矿有影响”的结论。

对比图 3 与图 4 的 OR 值,笔者发现,2.66 > 1.81,说明有断裂信息情况下,比没有断裂信息的情况下,其优势比值更大。也就是说,相对于蚀变信息而言,由断裂所提供的信息对寻找隐伏矿床(体)的意义更大。因此,可以认为在本次研究中,断裂信息比蚀变信息更重要。

同理,笔者可以计算出缺“构造交汇处”信息、缺“接触带”信息、缺“地层”信息情况下远景成矿单元格与有矿单元格的关系。并最终计算出各自的 OR 值为:1.23, 3.52, 3.78。说明在本次研究中,上述信息的重要性依次为地层、接触带、断裂、蚀变、构造交汇处。

## 5 验证

判断一种综合预测模型的好坏,可以通过计算落在成矿预测区的含已知矿床(点)的单元数与总的含已知矿床(点)的单元数的比值  $k(k=y/x$ , 其中  $y \leq x$ ) 来衡量,  $k$  值越大,则该预测模型的效果越好。最理想的情况下,测区中所有  $x$  个含已知矿床(点)的单元都分布在预测区中。

依据 FOMMAD 中模糊评判的基本步骤<sup>[3,21]</sup>及模糊层次分析法 (FAHP fuzzy analytic hierarchy

表 3 缺“蚀变”信息情况下的远景成矿单元格与有矿单元格的个数情形

Table 3 Case in lacking alteration information

网格规格	预测成矿 单元格数	实际有矿单 元格数(x)	位于预测区中的有 矿单元格数(y)
100 m×100 m	1733	258	191
200 m×200 m	617	93	69
400 m×400 m	325	46	39

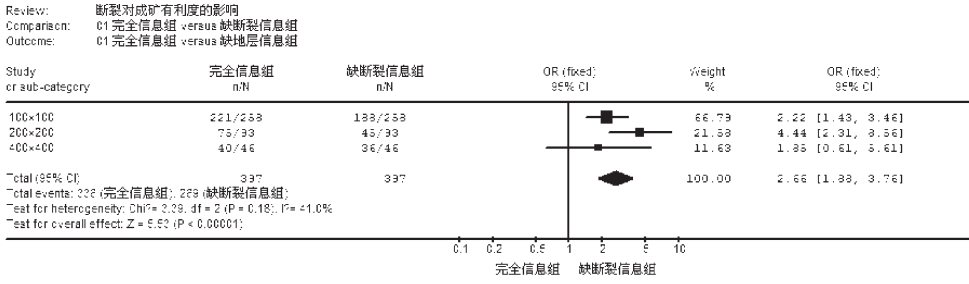


图 3 缺断裂信息情况下的 Meta 分析结果森林图

Fig.3 Forest graph of meta-analysis in lacking fracture information

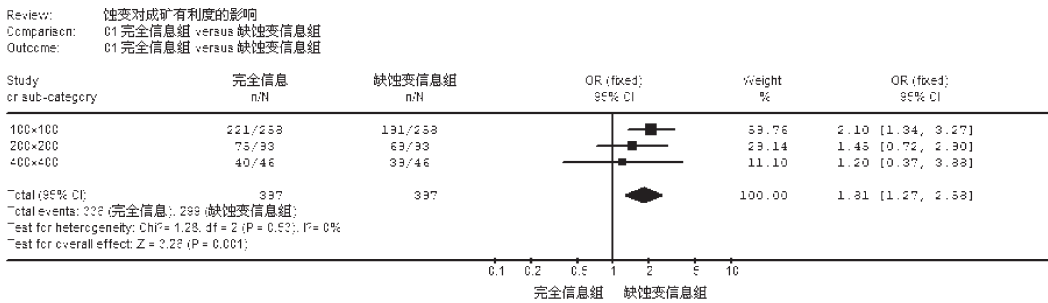


图 4 缺蚀变信息情况下的 Meta 分析森林图结果

Fig.4 Forest graph of meta-analysis in lacking alteration information

process)<sup>[22,23]</sup>的基本思想和步骤,依次设计如下验证步骤。

### 5.1 基于 Meta 分析确定目标因素权重

在第 4 节,通过 Meta 分析确定了地层、接触带、断裂、蚀变、构造交汇处 5 个成矿信息的 OR 值,因此,可直接通过 OR 值来定量判定其重要性大小(即权重值)。

我们规定:两者 OR 值之差在(0,1]的“标度”为 0.6;两者 OR 值之差在(1,2]的,“标度”为 0.7;两者 OR 值之差在(2,3]的,“标度”为 0.8;两者 OR 值之差在(3,4]的,“标度”为 0.9。

设 X<sub>1</sub>、X<sub>2</sub>、X<sub>3</sub>、X<sub>4</sub>、X<sub>5</sub> 分别代表“地层”、“接触带”、“断裂”、“蚀变”、“构造交汇处”。根据 FAHP 规则,得到如下权重模糊互补判断矩阵:

准则	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>
X <sub>1</sub>	0.5	0.6	0.7	0.8	0.8
X <sub>2</sub>	0.4	0.5	0.7	0.7	0.8
X <sub>3</sub>	0.3	0.3	0.5	0.6	0.7
X <sub>4</sub>	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
X <sub>5</sub>	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5

根据计算模糊互补判断矩阵的权重公式<sup>[24]</sup>: $w_i =$

$$\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)}, i=1, 2, \dots, n,$$

计算权重向量为

$$W=(0.245, 0.230, 0.195, 0.175, 0.155)$$

所以, A 的特征矩阵计算结果为:

$$W^* = \begin{bmatrix} 0.500 & 0.516 & 0.557 & 0.583 & 0.613 \\ 0.484 & 0.500 & 0.541 & 0.568 & 0.597 \\ 0.443 & 0.459 & 0.500 & 0.527 & 0.557 \\ 0.417 & 0.432 & 0.473 & 0.500 & 0.530 \\ 0.388 & 0.403 & 0.443 & 0.470 & 0.500 \end{bmatrix}$$

因此, A 与 W\* 的相容性指标 I(A, W\*)=0.1。故可以认为模糊判定矩阵 A 是满意一致的。因此其权重 W 的分配是合理的。

### 5.2 确定主要影响因素的隶属度

对天马山—金口岭—铜官山地区所进行的各种探查所取得的结果,分别进行归一化处理。定性指标按 9 级标准取值。表 4 给出了纵坐标为 2200、横坐

标在 7800 到 8200 之间的所有网格(图 5)的影响因素隶属度。隶属度模糊判断矩阵  $R=(r_{ij})_{5 \times 20}$  亦由此表获取。

### 5.3 综合评判优选结果

采用加权平均模型对方案集 B 进行隶属度复合运算,根据 FOMMAD 模型提供的公式  $B=W \cdot R$ ,

计算结果为 : $B=(0.759,0.759,0.786,0.771,0.728,0.726,0.742,0.763,0.800,0.777,0.759,0.694,0.659,0.654,0.635,0.602,0.578,0.564,0.522,0.480)$ 。

### 5.4 找矿靶区圈定及评价

根据上述方法,对全区 2580 个单元计算成矿有利度。按 0.65、0.7 和 0.75 为异常分界点,对预测单

表 4 评估结果主要影响指标  
Table 4 Major influential indicators

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18	D19	D20
$X_1$	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.75	0.75	0.65	0.65	0.55	0.45	0.45	0.35	0.35
$X_2$	0.75	0.75	0.85	0.85	0.75	0.75	0.75	0.85	0.85	0.75	0.75	0.65	0.65	0.65	0.65	0.75	0.75	0.75	0.75	0.65
$X_3$	0.75	0.75	0.85	0.85	0.75	0.75	0.75	0.75	0.95	0.95	0.85	0.75	0.65	0.65	0.55	0.65	0.65	0.75	0.75	0.65
$X_4$	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.65	0.65	0.55	0.45	0.45	0.55	0.65	0.65	0.85	0.85	0.65	0.65	0.55	0.45	0.45
$X_5$	0.65	0.65	0.55	0.45	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85	0.85	0.75	0.65	0.55	0.45	0.45	0.35	0.35	0.25	0.25	0.25

注: D1 表示坐标为(7800,2200)的网格单元, D2 表示坐标为(7820,2200)的网格单元……以此类推;  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$  分别表示地层、接触带、断裂、蚀变、构造交汇处 5 项影响成矿的因素。

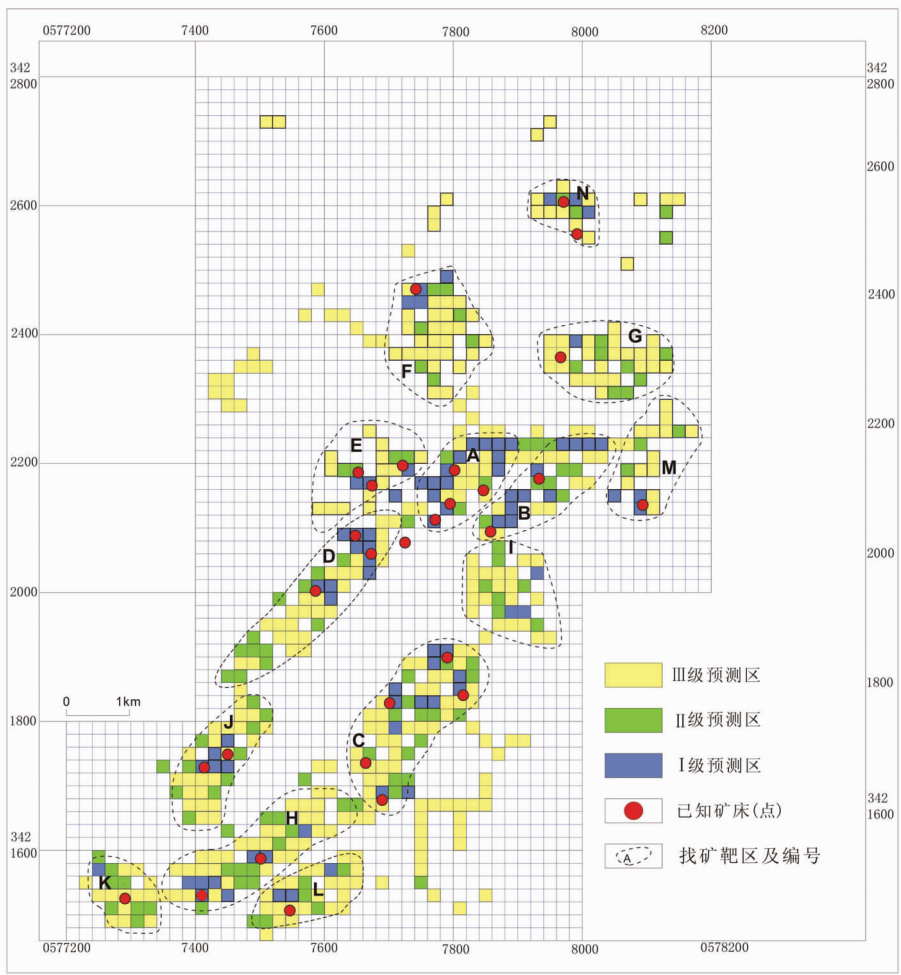


图 5 天马山—金口岭—铜官山地区找矿信息统计预测图

Fig.5 Concealed mineral prediction map of Tianmashan-Jingkouling-Tongguanshan area

元进行了分级,预测单元可分为 3 级,即 I 级、II 级和 III 级,其中 I 级预测单元(大于等于 0.75)为成矿条件最有利,找矿标志明显,找矿潜力大;II 级预测单元(大于等于 0.7 小于 0.75)为成矿条件比较有利,找矿标志较明显,找矿潜力较大;III 级预测单元(大于等于 0.65 小于 0.7)为成矿条件较一般,但仍有成矿可能。

根据预测单元计算结果,结合地质分析,圈定了 A~N 共 14 个找矿靶区,并按找矿潜力的大小分为

三级:A、B、C、D 为第一级;E、F、G、H、I 为第二级;其余为第 3 级(图 5)。表 5 为预测区特征一览表。

本文引入已知矿床(点)作为参照系。将“已知矿床(点)落在预测区域数量的多少”作为评价预测模型优劣的标准。从图 5 可以看出,全部 29 个已知矿床(点),其中 28 个位于圈定的 12 个靶区中,1 个位于靶区的边缘;另外,在 28 个被圈定的矿床(点)中,有 20 个位于成矿有利度最高的 I 级预测区中。表明基于 Meta 分析与 FOMMAD 模型的多元找矿信息

表 5 预测区域特征一览表

Fig.5 List of forecast regional characteristics

靶区编号	地质特征	预测区域特征
A	位于天马山岩体西南侧,铜官山背斜核部,出露地层有泥盆系、石炭系和二叠系,发育北东向和北西向断裂,有多处铁帽分布,在岩体内外接触带出现连续的遥感混合蚀变	连续性好,成矿有利度较高
B	位于天马山岩体南侧,从西向东一次出露泥盆系、石炭系、二叠系和三叠系,北东向断裂发育,在靶区东部出现小型褶曲,并有燕山期闪长岩小岩体出露。区内分布有连续的遥感混合蚀变	连续性好,靶区西部成矿有利度较高
C	位于黄狮涝矿床南侧,铜官山背斜南东翼,从西向东依次出露泥盆系、石炭系、二叠系和三叠系,北东向和北西向断裂发育并交汇,中部见有矿点和铁帽,西侧有小型褶曲,局部有遥感混合蚀变	呈 NE-SW 向带状展布,连续性好
D	位于铜官山背斜北西翼,铜官山岩体的南西侧,从南向北依次出露泥盆系、石炭系和二叠系,北东向、北西向断裂发育并交汇。	呈 NE-SW 向带状展布,连续性好
E	位于铜官山岩体和金口岭岩体夹持部位,主要出露二叠系和三叠系。以老矿区深边部找矿为主	较零散,不规则状
F	位于铜陵市西侧,铜官山背斜的北西翼,区内出露二叠系和三叠系,发育北东向和北西向断裂并有多处交汇,靶区北部有小型褶曲,东部有东西向隆起叠加。发育遥感混合异常	呈面状展布,连续性好,靶区南部成矿有利度较高
G	位于铜陵市北东虎山-龙山地区,处于铜官山背斜北东倾伏端,有一系列燕山期闪长岩小岩体出露,局部发育小型褶曲,并有东西向隆起叠加。主要出露二叠系和三叠系,有铁帽和遥感混合蚀变分布	面状展布,成矿有利度偏低
H	靠近铜官山背斜南西倾伏端并处于背斜南东翼,区内从西向东依次出露泥盆系、石炭系和二叠系,发育北东向和北西向断裂并交汇,见有矿点及零星的遥感混合蚀变	呈 NE-SW 向带状展布,规模大,连续性好
I	位于铜官山背斜南东翼,黄狮涝矿床东侧及南侧,区内从西向东依次出露泥盆系、石炭系、二叠系和三叠系,北东向断裂发育,发育小型褶曲,遥感混合蚀变清楚	面状展布,较连续
J	靠近铜官山背斜西南倾伏端并分布于背斜北西翼,主要出露泥盆系和二叠系,发育北东向、北西向、南-北向和近东西向断裂并多处交汇,沿断裂分布有矿点、铁帽和遥感混合蚀变	呈 NE-SW 向带状展布,连续性好
K	位于铜官山背斜西南倾伏端,分布有志留系、泥盆系、石炭系和二叠系,北西和北东向断裂发育	面状展布,规模较小
L	位于铜官山背斜东南翼,主要出露三叠系,褶皱和断裂构造发育	呈 NE-SW 向带状展布,较分散
M	位于铜陵市东侧大龙山一带,出露三叠系和燕山期闪长岩小岩体,褶皱发育,见多处铁帽并有遥感混合蚀变分布	分布在靶区南北两侧,较零散
N	位于铜官山背斜北东倾伏端附近并处于背斜北西翼,金口岭岩体的南东侧外接触带,出露地层为二叠系和三叠系,发育近南-北向断裂,靶区东部有近东西向隆起叠加,北部见有矿点,发育遥感混合蚀变	面状展布,规模较小



综合预测模型得到的成矿有利度可作为该区成矿预测的综合标志。可以预见,随着地、物、化、遥综合找矿研究的不断深入和定量研究信息的不断补充,本方法模型在该区的预测精度将会更高。

## 6 结论与展望

本文首次引入了模糊层次分析法 (FAHP) 和 Meta 分析来构建权重系数,建立了适用于找矿预测研究的 FOMMAD 模型。天马山—金口岭—铜官山地区的实践证明,该方法是科学可行的,对深边部找矿预测具有积极的指导意义。但由于受所用资料的数量和应用范围等的限制,本研究还存在很多需进一步深化的问题,主要体现在:

1) 进行多元信息找矿预测的建模过程中,没有充分考虑物、化探信息;

2) 同时,对地质体内部的研究不够深入,对研究区,更多的是从平面的角度来考虑的,如何将研究从二维的“网格单元”深入到三维的“立方体单元”,是我们后续研究的主要方向;

3) 本文把矿床(点)落入预测区的数量作为评价模型优劣的主要标准,但没有把矿床(点)的矿化强度和规模等作出定量划分,其后果可能会使评价结论出现一定的偏差,后续研究应加以重视;

4) 如何更加科学有效的确定“标度”,有待进一步论证。

本文研究的重点是放在将 Meta 分析及 FOMMAD 引入找矿预测研究中的思路和方法上,可以预见,随着 Meta 分析理论及其方法在找矿预测研究中的进一步完善与改进,相关问题将逐步得到有效的解决,其应用范围将更广、手段更多、结果更精确、效果更显著。

## 参考文献 (References):

[1] Hwang C L, Lin M J. Group decision making under multiple criteria: methods and applications. Berlin Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1987:23-41

[2] Chen Shujen, Frank P. wang H. Fuzzy Multiple Attribute Decision Making, Method and Application[M]. Berlin; New York; Springer-Verlag, 1992.

[3] 彭省临, 王颖, 杜瑞峰. 模糊综合评判模型在隐伏矿定位预测中的应用[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(2):245-259

Peng Shenglin, Wang Ying, Du Ruifeng. Application of fuzzy comprehensive appraisal model for location prediction of concealed deposits [J]. Geotectonica et Metallogenia 2009, 33 (2):

254-259 (in Chinese with English abstract).

[4] 李中兰. 多因子模糊综合评估法在找矿靶区优选中的应用 [J]. 江西地质科技, 1994, 21(4):47-50.

Li Zhonglan. Application of fuzzy comprehensive evaluation model of multi-factor for ore target area optimization [J]. Geological Science and Technology of Jiangxi, 1994, 21(4):47-50(in Chinese with English abstract).

[5] 刘名龙, 黄德镛, 李勃, 等. 基于 FCA 的隐伏矿找矿预测模型研究[J]. 矿业研究与开发, 2004, 24(4):22-24.

Liu Minglong, Huang Deyong, Li Bo, et al. The research of concealed mineral prediction model based on FCA [J]. Mining R & D, 2004, 24(4):22-24(in Chinese with English abstract).

[6] 邹海俊, 韩润生, 方维萱, 等. 专家辅助找矿系统中模糊综合评判 (FCA) 模型的软件实现及应用[J]. 地质通报, 2006, 25(4):521-527.

Zou Haijun, Han Runsheng, Fang Weixuan, et al. Software realization and application of the Fuzzy Comprehensive Adjudgment (FCA) model in the expert-assisted mineral exploration system [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(4):521-527(in Chinese with English abstract).

[7] 彭省临, 王颖, 邵拥军, 等. 基于 Meta 分析的多种探查技术有效性比较研究——以铜山铜矿为例[J]. 高校地质学报, 2009, 15(4):460-469.

Peng Shenglin, Wang Ying, Shao Yongjun, et al. Application of meta-analysis to deep prospecting predictions [J]. Geological Journal of China Universities, 2009, 3 (14):106-133 (in Chinese with English abstract).

[8] Glass G V. Primary, secondary and meta-analysis of research [J]. Education Research, 1976, 6(5):3-8.

[9] Hunter J E. Meta-analysis: Cumulation Research Findings across Studies, Beverly Hills[M]. CA: Sage Publication, 1982.

[10] Cooper H M. The Integrative Research Review: a Systematic Approach. Beverly Hills[M]. CA: Sage Publication, 1984.

[11] Chalmers T C. Problems included by meta-analysis [J]. Statistics in Medicine, 1999, 10:971-980.

[12] 钟文昭, 吴一龙, 谷力加. Review Manager (RevMan)——临床医生通向 Meta 分析的桥梁[J]. 循证医学, 2003, 3(4):234-246.

Zhong Wenzhao, Wu Yilong, Gu Lijia. Review Manager (RevMan)——a bridge leading the clinicians to Meta analysis [J]. Journal of Evidence-Based Medicine, 2003, 3 (4):234-246 (in Chinese with English abstract).

[13] Stangl D K, Berry D A. Meta-analysis in Medicine and Health Policy[M]. New York: Marcel Dekker Inc, 2000.

[14] Kalyani A. Approaches to meta-analysis: A guide for us researchers [J]. Library & Information Science Research, 2005, 27:164-176.

[15] 赵宁, 俞顺. Meta-analysis 方法及其应用 [J]. 中国公共卫生, 1993, 9(10):459-461.

Zhao Ning, Yu Shun. Method and application of meta-analysis [J]. China Public Health, 1993, 9 (10):459-461 (in Chinese with English abstract).

[16] Dickersim K, Berlin J A. Meta-analysis: State of the Science [J].

- Am. J. Epidemiol, 1992, 14:154.
- [17] Ballantyne A P, Lavine M, Crowley T J, et al. Meta-analysis of tropical surface temperatures during the Last Glacial Maximum[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 26, L05712.
- [18] Kalyani A. Approaches to meta-analysis: A guide for us researchers [J]. Library & Information Science Research, 2005, 27:164-176.
- [19] 彭省临, 邵拥军. 隐伏矿体定位预测研究现状及发展趋势[J]. 大地构造与成矿学, 2001, 25(3):329-334.  
Peng Shenlin, Shao Yongjun. Present research situation and trends of prognosis for concealed orebody[J]. Geotectonic et Metallogenia, 2001, 25(3):329-334(in Chinese with English Abstract).
- [20] 赵鹏大, 陈永清. 基于地质异常单元金矿找矿有利地段圈定与评价[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1999, 24(5):443-448.  
Zhao Pengda, Chen Yongqing. Geological anomaly unit-based delineation and assessment of preferable gold ore-finding area [J]. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 1999, 24(5):443-448(in Chinese with English abstract).
- [21] Liang G S. Fuzzy MCDM based on ideal and anti-ideal concepts [J]. European Journal of Operational Research, 1999, 112:682-691.
- [22] 陶余会. 如何构造模糊层次分析法中模糊一致判断矩阵[J]. 四川师范学院学报(自然科学版), 2002, 23(3):282-285.  
Tao Yuhui. How to make fuzzy consistent Judgement Matrix of the FAHP [J]. Journal of Sichuan Teachers College (Natural Science), 2002, 23(3):282-285(in Chinese with English abstract).
- [23] 张吉军. 模糊层次分析法 (FAHP)[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(2):80-88.  
Zhang Jijun. Fuzzy analytical hierarchy process[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2000, 14(2):80-88(in Chinese with English abstract).
- [24] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵排序的一种算法 [J]. 系统工程学报, 2001, 16(4):311-314.  
Xu Zeshui. Algorithm for priority of fuzzy complementary judgement matrix [J]. Journal of Systems Engineering, 2001, 16(4):311-314 (in Chinese with English abstract).

## Application of ore-searching information weight comparison to the ore concentration area based on meta-analysis

WANG Ying<sup>1,2</sup>, PENG Sheng-lin<sup>2</sup>, WANG Xiong-jun<sup>2</sup>

(1. School of Geosciences and Environmental Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;

2. Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

**Abstract:** The integrated prognosis of concealed ore deposit location has become a heated research field. The formation of the mineral deposit or ore spot is a non-linear process affected by many ore-controlling factors. The fuzzy optimization model of multi-attribute decision-making is an efficient method for dealing with such a problem. However, the creation of FOMMAD is not an easy thing. It is a key problem to find a scientific and reasonable method for attribute weight. Meta-analysis is a very comprehensive statistical method that systematically combines, analyzes and comprehensively evaluates several relevant trials. It has been applied generally to medical problems, and its statistical methods are developing day by day. Hence meta-analysis can provide reasonably scientific approach to attribute weight. In this paper, the principle and feasibility of the meta-analysis for metallogenic prediction were analyzed and demonstrated, and Tianmashan-Jingkouling-Tongguanshan area was chosen as the study area. Meta-analysis is applied in quantitative comparison of availability of five explorations for the first time. In the end, a comprehensive evaluation model for environmental quality at tourism sites was established based on analytic hierarchy process, Delphi Law, and the multi-level fuzzy synthetic evaluation method, and the environmental quality of the Zhangjiajie National Forest Park was evaluated. The authors made the multivariate metallogenic information synthetic prediction and evaluation to the study area, integrated the geological analysis results, and delineated 12 target areas which had high advantage degree in metallogenic conditions. Compared with the other relevant materials and outdoors verification, it is shown that the application of this kind of model to delineating target areas is highly effective in ore-prospecting work.

**Key words:** meta-analysis; ore-searching information; weight; FOMMAD; deep prospecting prediction; FAHP

**About the first author:** WANG Ying, male, born in 1975, doctor, mainly engages in the study of GIS and nonlinear Intelligent Algorithm; E-mail: csu\_wangying@yahoo.com.cn.