

危机矿山深部隐伏矿三维可视化定位预测关键技术新突破*

彭省临, 毛先成, 陈进, 王颖, 邵拥军, 赖健清, 王雄军, 张建东

(中南大学地质与环境工程学院, 湖南长沙 410083)

近些年来, 我们在开展危机矿山深部隐伏矿定位预测的研究中, 在“找矿方法有效性定量评价”和“隐伏矿体三维可视化定位定量预测”等关键技术研究方面取得了突破性进展, 研究开发了“Meta 分析比较法”、“有效度评价法”、“地质体三维形态分析法”、“控矿地质因素场模拟”、“成矿信息三维定量分析提取”和“地质三维可视化建模”等技术。这里, “有效性”是专指某种探测技术方法预测找矿目标体的效果或有效程度。

1 Meta 分析比较法——多种方法的有效性定量比较评价

经典 Meta 分析起源于医学领域, 其精髓是对具备特定条件的、同类研究主题的大量研究结果进行综合后统计的统计方法; 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。研究数据主要来源于已有文献资料。Meta 意思是 more comprehensive, 即更加全面或超常规综合的意思。

1.1 Meta 分析的基本程序

Meta 分析的基本程序为: (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; (6) 形成结果报告。

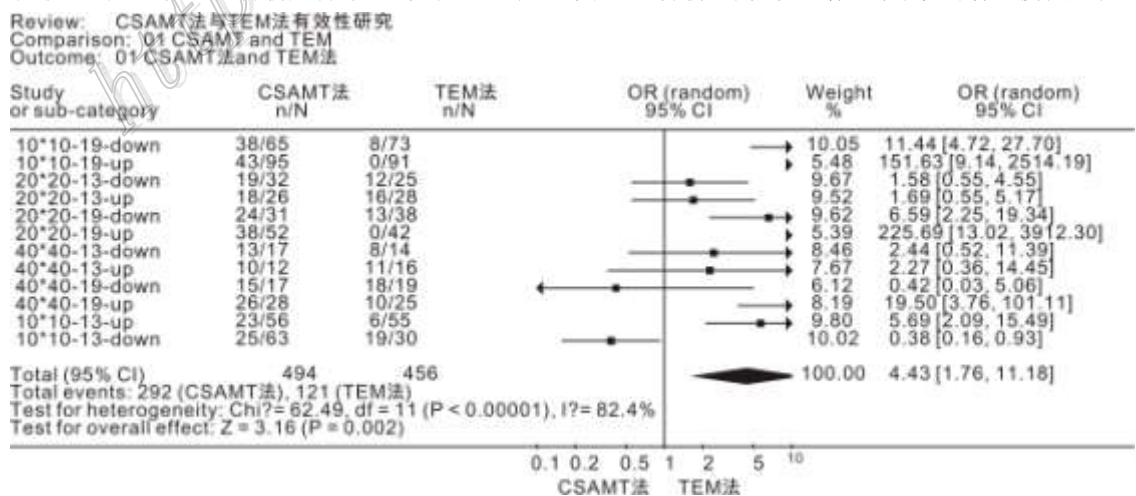
1.2 将 Meta 分析引入到找矿预测中的基本思路

(1) 确定研究主题。以找矿为目标, 探讨各种找矿信息与找矿目标之间的联系为研究主题;

(2) 对相关文献资料进行收集和评价。在选定资料时, 尽量遵循以下标准: ① 地质资料翔实准确; ② 所选资料来自同类型区、段; ③ 所选资料具有代表性; ④ 所选资料中的找矿标志性信息应是定量的或可转化为定量的数据。

(3) 数据的提取。这是整个 Meta 分析成功与否的关键。相对于经典 Meta 分析, 我们无法像医学研究那样直接从文献

中获取所需数据。在找矿预测中, 可通过“微分单元法”, 即对一维或多维(比如线、面、体等)研究对象“微分”分成若干信息统计单元(如线段、方格、方体等),



*本文得到科技部国家“十一五”科技支撑计划课题“铜陵地区危机铜矿山大比例尺定位预测技术开发”(编号:2006BAB01B07)和国家“973”计划前期研究专项课题“危机矿山接替资源大比例尺定位预测基础研究”(编号:2007CB416608)联合资助
第一作者简介 彭省临, 男, 1948年生, 博士, 教授。主要从事金属矿成矿学和矿床定位预测研究。Email:psl@csu.edu.cn

此时,每个研究对象(如物化探探测剖面)相当于经典 Meta 分析中的检索文献,而统计单元则可看作文献中的研究样本。

(4) 进行 Meta 分析。对具有一致性的统计量进行加权合并后,将所研究的探测方法用 Meta 分析软件进行两两比较分析,其中一种方法的数据作为“对照组”,另一种方法的数据作为“实验组”。以这两组数据均值的差异与两组数据共有的标准离差之比值来表示每个实验结果的效应大小。

(5) 综合分析得出结论。使用优势比 OR (odds ratio) 值来衡量所研究的两种探测方法的相对有效程度。

1.3 Meta 分析在深部隐伏矿定位预测研究中的应用

利用铜山铜矿前山南测区 13 线和 19 线的 CSAMT 法、EH4 法和 TEM 法联合物探试验剖面的测量和验证结果,首次移植应用 Meta 分析法来定量比较几种物探方法的有效性(彭省临等, 2009)。

(1) 资料获取及数据提取

对 13 线和 19 线的 CSAMT 法, EH4 法和 TEM 法三种方法获得 6 个不同的二维测深反演剖面分别添加 $10 \times 10 \text{ m}^2$, $20 \times 20 \text{ m}^2$, $40 \times 40 \text{ m}^2$ 的网格, 共得 18 幅剖面图。这些网格化图将预测界线和实际界线分成若干小段, 对于每一小段预测线, 如果能在同格或相邻方格中找到相应的实际界线, 则认为该小段预测线跟实际界线是相对吻合的。提取相对吻合方格数 (n) 和总方格数 (N) 参与统计。

(2) CSAMT 法与 TEM 法有效性比较的 Meta 分析

利用 Meta 分析软件 Review Manage 4.2 对 CSAMT 法与 TEM 法所得数据进行统计后分析, 其 Meta 分析森林图如上图所示。

分析结果表明, 各研究数据异质性明显, 选用随机效应模型进行分析; $OR=4.43$ (95%CI, 1.76~11.18) >0 , 且菱形完全位于垂直线右侧; 说明在铜山铜矿前山南测区, CSAMT 法的有效性比 TEM 高。

同样对 EH4 法与 TEM 法和 CSAMT 法与 EH4 法的有效性进行 Meta 比较分析, 结果表明, 在该区, EH4 法的有效性比 TEM 法高; CSAMT 法与 EH4 法的有效性没有明显的区别。

2 有效度评价法——单种方法的有效性定量评价

2.1 基本思路和主要步骤

该方法的基本思路是: 通过某种探测方法推测的地质体与实际目标地质体的分布状况进行定量统计对比后, 定量评价该技术探测该类地质体的有效程度。

主要步骤: ① 确定并网格化勘探剖面的样本区; ② 计算匹配率; ③ 求目标地质体空间影响值; ④ 完成空间影响值的均值检验——t 检验; ⑤ 进行空间影响值的拟合检验——F 检验; ⑥ 计算有效度; ⑦ 定量评价方法的有效性。

2.2 凤凰山铜矿 CSAMT 法有效性定量评价

(1) 确定并网格化勘探剖面的样本区。在凤凰山铜矿按 150×40 米布置测网共布置了 13 条测线, 考虑到已有地质剖面图与 CSAMT 解译图的共有区段, 本研究将有效性评价的剖面样本区确定为从地表至 -400 米标高范围。利用 ArcGIS 软件实现对所有剖面上的样本区按 $5 \times 5 \text{ m}^2$ 的单元完成网格化。

(2) 计算匹配率。计算各种地质体判断正确的栅格数与总的栅格数之比。匹配率 C 越大, 表明使用的探测方法一定程度上揭示实际地质体越有效。

(3) 确定地质体空间影响值。由于单靠匹配率还不能完全准确评判该探测方法所推测地质体空间分布与对应的“真实”地质体空间分布的拟合状况, 特引入地质单元场 (F_{Ti}) 的概念, 即认为所有的地质体单元 (T_i) 不仅对其单元本身而且对于其单元周围一定范围的空间域存在着某种形式的影响: “地质单元场”所产生的地质空间影响值 F_{Ti} 由下式确定:

$$F_{Ti} = \begin{cases} f_0 & u \in T_i \\ f_0(1-d/d_0) & u \notin T_i \text{ 且 } u < d_0 \\ 0 & u \notin T_i \text{ 且 } u \geq d_0 \end{cases}$$

利用上述地质体空间影响值计算公式, 选取场值初始最大影响值 f_0 为 1 000, 最大场影响距离 d_0 为 50 m 作为参数对

CSAMT 反演剖面图和地质剖面图的各类地质体进行空间影响值计算。计算结果可应用 Surfer 软件来绘制三维立体图。

(4) 空间影响值的均值 t 检验。为定量探讨实际地质剖面和物化探测量推测地质剖面之间的误差程度, 构建统计量 F : $F = F_G(x, y) - F_p(x, y)$ 。 F 的分布基本符合均值 m 等于 0 的正态分布, 而其总体方差大小可采用已知样本的方差 S 来近似表达。有效性评价就可以通过构建统计值 T 来进行 (陈进等, 2010), 即存在假设 $H_0: \bar{F} = 0$, 对于给定的显著性水平 α , 当 $|T| > t_{\alpha/2}(n-1)$, 拒绝 H_0 , 即认定该方法在该剖面的探测有效性不显著; 否则接受 H_0 , 认定该方法在该剖面的有效性是显著的。

(5) 有效性拟合 F 检验。在有效性 t 检验的基础上, 进一步构建以下的一元线性回归方程来拟合空间影响值, $F_G(x, y) = B \cdot F_p(x, y) + A + \varepsilon$, 通过有效性评判的探测方法, 必须满足该方程的 F 检验通过, 即系数 B 大于 0。

(6) 有效度的计算。在通过以上 t 检验和拟合 F 检验的基础上, 才可按下式计算有效度: $D = \frac{U}{U+Q}$ 。

当回归平方和与总的偏离平方和之比值 $U/(U+Q)$ 越接近于 1, 则认为该线形回归方程回归效果越好; 也即该探技术对目标地质体 (包括矿化体) 解译推断越准确。

(7) 凤凰山铜矿 CSAMT 剖面 (13 条) 测量结果的有效性评价。通过统计分析软件 SPSS 15.0 进行计算的结果表明, CSAMT 法在以上 13 条剖面上剖面均有效且有效度高; 其中 12 条剖面上的有效度在 90% 上。

3 隐伏矿体三维可视化定位定量预测技术

3.1 基本思路

我们开展隐伏矿体三维可视化预测的基本思路是: 在地质数据集成和成矿系统分析的基础上, 通过连续地质体 (含矿化体) 的三维建模与离散化, 研究开发地质形态分析、地质场模拟、成矿信息三维定量分析提取等技术; 建立控矿地质因素场模型, 定量分析控矿地质因素和矿化分布之间的关联关系 → 建立反映控矿变量到矿化变量映射关系的立体定位定量预测模型, 对预测区三维空间中的矿化分布进行定位定量预测 → 采用三维可视化模型表达预测成果 (毛先成等, 2010)。

3.2 控矿地质因素场建模技术

地质综合场实际上地质作用或成矿作用物理化学过程中各种物理、化学场的综合表征与体现。本研究直接从控矿地质条件出发, 寻找可以宏观地描述或反映成矿物理化学作用在地质空间中的综合分布与控矿作用效果的地质综合场。

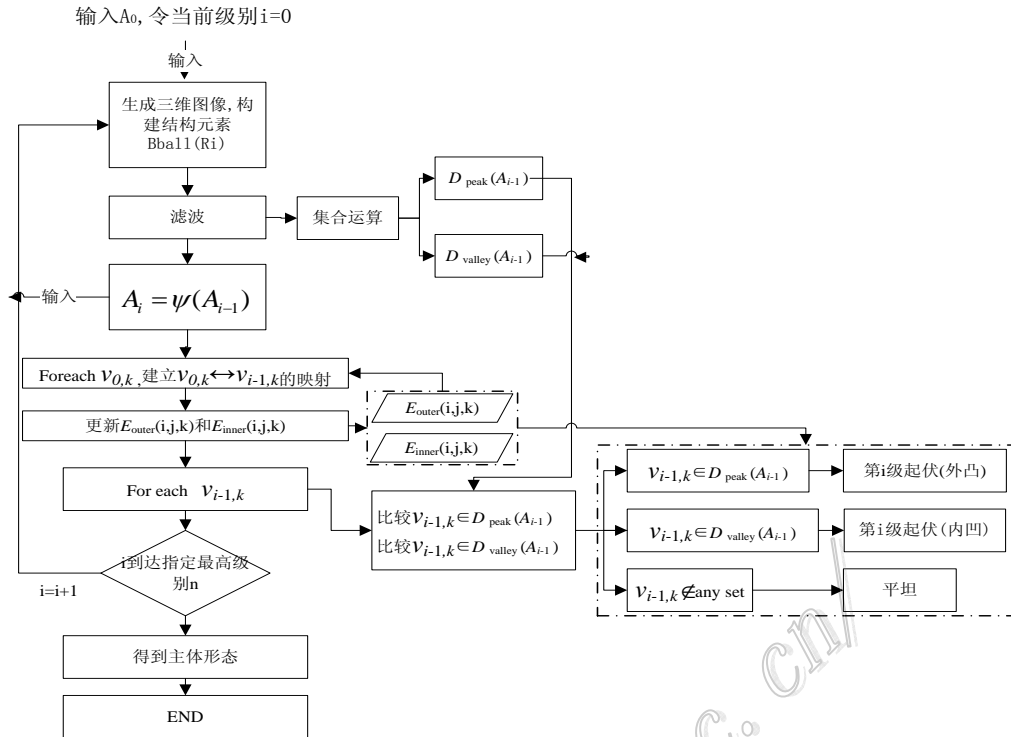
控矿地质因素场与空间中某点到相关联的地质体的距离有关, 即控矿地质因素场是到地质体距离的空间分布函数。我们将预测空间中某单元 (u) 到地质体的最近距离 (d) 作为控矿地质因素场对单元的影响程度。

通过欧式距离变换算法编程计算出地质空间中每一个单元到地质体的最近距离, 利用该距离在地质空间中的分布实现了控矿地质因素场的离散化建模。如本次研究中建立的凤凰山铜矿区新屋里岩体的岩体形态因素 (一级起伏 wr1G、二级起伏 wr2G) 分布三维栅格图、岩体热力场因素 (dG) 栅格模型、接触带因素 (dI) 栅格模型、接触面构造因素 (aIT) 栅格模型、区域挤压远应力场因素 (aIP) 栅格模型、横向张性断层因素 (dF) 栅格模型、褶皱构造因素 (dD3) 栅格模型等为后续分析研究奠定了基础。

3.3 地质体三维形态分析技术

地质体形态可以通过地质界面的波状起伏来描述。我们引入数学形态学方法, 研究开发了三维形态学处理算法与程序, 可对任意复杂的地质体进行三维形态分析, 如岩体一围岩接触带提取、岩体表面形态起伏如超覆、凹部以及其他不规则形态提取等。

形态起伏分级提取流程可用下图表示。经过处理后可得任意复杂的地质体的一级、二级等多级形态趋势栅格模型。



3.4 成矿信息三维定量分析与提取技术

本研究将物化遥手段获取的信息主要用于对深部地质现象的推断而间接地转化为深部地质信息,因此,隐伏矿体预测成矿信息提取的关键是控矿地质因素的分析与提取。

成矿信息三维定量分析与提取的步骤:① 研究矿体定位规律与定位模型;② 导入地质体块体模型数据作为成矿信息提取的原始数据;③ 定义地质空间和划分立体单元;④ 建立控矿地质因素场模型,实现控矿地质因素的三维栅格模型表达;⑤ 定量分析矿化分布与控矿地质因素的关联关系,构建控矿因素指标集。由于控矿因素指标是控矿地质因素场变量经过非线性变换后得到的新变量,与矿化指标呈线性关联关系,从而,可直接用传统的统计分析方法建立控矿指标到矿化指标的关联模型。

主要的控矿因素包括:

- (1) 岩体热力场因素 (dG) — 包含接触带因素 (dI) 的信息;
- (2) 岩体形态因素 (wr1G);
- (3) 岩体形态因素 (wr2G);
- (4) 接触面构造因素 (aIT);
- (5) 横向张性断层因素 (dF);
- (6) 区域挤压远应力场因素 (aIP);
- (7) 褶皱构造因素 (dD3)。

3.5 隐伏矿体三维可视化定位定量预测技术

以安徽铜陵凤凰山矿田为例,研究建立的预测模型,表达的是三维空间地质空间中的矿化指标与控矿因素指标之间的定量关联关系,可用于对研究区内分布的隐伏矿体进行定位定量预测。

本预测模型提供了凤凰山矿田深部(—1000 m 标高以上)所有 $50 \times 50 \times 50 \text{ m}^3$ 立体单元的铜品位、铜金属量和含矿概率的预测结果,并实现了预测结果的三维可视化。基于预测结果在凤凰山铜矿区圈定了 4 个深部找矿立体靶区,为深部找矿工程设计提供了所预测隐伏矿体的位置、品位和金属量等定量信息。

参考文献

- 彭省临,王颖,邵拥军,等.2009.Meta分析在深部找矿预测中的应用——以铜陵铜山铜矿为例[J].高校地质学报,15(4):460-469.
- 陈进,毛先成,彭省临,等.2010.物化探技术有效性定量评价方法研究——以凤凰山铜矿 CSAMT 法为例[J].大地构造与成矿学,34(2):263-269.
- 毛先成,周艳红,陈进,等.2010.危机矿山深、边部隐伏矿体的三维可视化预测——以安徽铜陵凤凰山矿田为例[J].地质通报,29(2-3):401-413.