

矿山深部隐伏矿定位预测关键技术新突破

彭省临^{1,2}, 樊俊昌^{1,2,3}, 邵拥军^{1,2}, 毛先成^{1,2}, 赖健清^{1,2}, 陈进^{1,2},
王颖⁴, 王雄军^{1,2}, 张建东^{1,2}

- (1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
3. 山金西部地质矿产勘查有限公司, 西宁 810016;
3. 中南林业科技大学, 长沙 410004)

摘要: 针对矿山深部隐伏矿大比例尺定位预测中的关键技术难题, 定量研究不同找矿技术方法的有效性和深部隐伏矿三维可视化定位定量预测, 重点介绍“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”等技术的新成果; 同时还介绍了在铜陵铜山铜矿和凤凰山铜矿对多种物探方法的有效性定量比较分析和深部隐伏矿体三维可视化定位定量预测的应用实例。

关键词: 大比例尺定位预测; 探测方法有效性; Meta 分析; 三维地质建模; 深部隐伏矿

中图分类号: P618.2

文献标志码: A

New breakthrough in key technologies of location prediction about deep concealed ore bodies of mine

PENG Sheng-lin^{1,2}, FAN Jun-chang^{1,2,3}, SHAO Yong-jun^{1,2}, MAO Xian-cheng^{1,2}, LAI Jian-qing^{1,2},
CHEN Jin^{1,2}, WANG Ying⁴, WANG Xiong-jun^{1,2}, ZHANG Jian-dong^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
3. Shanjin Western Geological Mineral Exploration Co., Ltd., Xining 810016, China;
4. Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: Aiming at the difficult problem of key techniques for large-scale location prediction about deep concealed ore bodies of mine, the quantitative methods for determination the effective level of different techniques and methods and the three-dimensional location quantitative prediction technique of deep concealed ore bodies were studied. A series of new technique fruits were introduced, including “Meta-analysis comparison method”, “Effectivity evaluation method”, “Three-dimensional morphological analysis of geological body”, “Simulation of ore-controlling geological factors”, “Three-dimensional quantitative analysis and extraction of ore-forming information” and “Geological three-dimensional visual modeling”. Meanwhile, the application examples of “effectiveness quantitative comparison of the several geophysical methods” in Tongshan Mine and “three-dimensional visual quantitative location prediction of deep concealed ore bodies” in Fenghuangshan Mine were also introduced.

Key words: large-scale location prediction; effectiveness of detection method; Meta analysis; three-dimensional geological modeling; deep concealed ore body

基金项目: 科技部国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAB01B07); 国家重点基础研究计划资助项目(2007CB416608)

收稿日期: 2011-12-01; 修订日期: 2012-02-20

通信作者: 彭省临, 教授, 博士; 电话: 0731-88830968; E-mail: psl@csu.edu.cn

在矿山深部找矿的进程中, 随着找矿空间逐渐向深部转移, 由于地质变量的复杂性和不确定性, 要准确掌握深部地质体和隐伏矿的空间分布状况是十分困难的^[1-2]。传统的预测方法多停留在经验和定性预测的范畴, 难以实现大比例尺定位预测的需求, 基于 GIS 的隐伏矿综合定位预测方法研究成为突破以上难点的有效途径。该方法的技术关键是如何定量提取具有预测意义的地、物、化、遥等探测方法获得的找矿信息; 准确确定它们在定位预测中的权重大小。其中, 权重的准确确定一直是研究的难点。确定权重的方法很多, 主要为主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法因其权重数据主要由专家根据经验主观赋值得到, 受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^[3]; 而客观赋权法, 由于尚缺少准确确定找矿信息权重的定量方法, 目前在找矿预测中使用依然很少。这也是传统找矿预测方法多停留在经验和定性评价范畴的原因。因此, 如何定量确定找矿信息权重成为深部隐伏矿大比例尺定位预测的关键技术之一。

在运用多种找矿技术方法开展隐伏矿定位预测中, 定量确定不同找矿技术方法的有效程度, 可为深部隐伏资源的三维定量定位预测提供最关键的参数, 为突破定量定位预测中的“客观赋权”和“技术优化集成”等瓶颈难题, 深层次挖掘地、物、化、遥等数据信息的潜力提供新途径。实现矿山深部隐伏矿大比例尺定位预测的技术关键是如何定量提取具有预测意义的地、物、化、遥等探测技术方法获得的找矿信息, 准确确定它们在定位预测中的权重大小, 定量刻画复杂地质体形态、控矿地质因素与矿化分布的制约关系, 以及三维可视化预测模型表达等^[3-5]。

近些年来, 本文作者结合国家支撑计划和 973 前期专项, 在铜陵地区深入开展了“危机矿山深部隐伏矿定位预测”研究, 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”等关键技术开发研究方面取得了突破性进展, 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”等新技术。这里, “有效性”(Effectiveness)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技术新突破

Meta 分析最早应用于心理、教育等社会领域, 20 世纪 70 年代开始出现在医学健康领域, 20 世纪 80 年

代后广泛应用于医学各个领域^[6-11], 现在 Meta 分析方法被移植应用于地学找矿预测领域^[3]。

Meta 分析的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分析方法, 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 分析的基本程序如下: 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^[8, 12]。

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质量评价

在选定资料时, 尽可能多地收集与研究主题有关的所有资料, 并尽量遵循以下标准: 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

找矿预测中, 像经典 Meta 分析法那样直接从文献中获取的数据, 可能因类型、产出环境等的不一致而无法利用, 但“微分单元法”为 Meta 分析移植到地学领域提供了可能途径, 所谓“微分单元法”即将一维或多维(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)。如此以来, 每个研究对象(如物化探探测剖面)便相当于经典 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共有的标准离差之比值来表示每个实验结果的效应大小^[13]。

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

种找矿预测方法的相对有效程度。

因此，通过以上技术处理和分析，我们可以将 Meta 分析方法移植应用于地学找矿预测研究中，特别是矿山深部隐伏矿大比例尺定位预测的研究中。

1.3 Meta 分析在深部隐伏矿定位预测研究中的应用

在运用多种找矿技术方法开展隐伏矿定位预测中，定量确定不同找矿技术方法的有效程度，可为深部隐伏资源的三维定量定位预测提供最关键的参数，为突破定位定量预测中的“客观赋权”和“技术优化集成”等瓶颈技术难题，深层次挖掘地、物、化、遥等数据信息的潜力提供新途径。

利用本课题组对安徽铜陵铜山铜矿前山南测区 13 线和 19 线开展的 CSAMT 法、EH4 法和 TEM 法联合物探试验剖面测量和验证结果，应用 Meta 分析比较法来定量比较研究几种物探方法的有效性。

1.3.1 资料获取

对 13 线和 19 线的 CSAMT、EH4 和 TEM 三种方法获得 6 个不同的二维测深反演剖面分别添加 10 m×10 m，20 m×20 m，40 m×40 m 的网格，共得 18 幅剖面图。图 1 所示为叠加了 40 m×40 m 网格和由钻探获得的相关地质界线的 13 线 EH4 二维反演剖面图。图 1 中虚线表示 EH4 法预测的地质界线；附近两条向南东倾斜的实线表示实际地质界线，其间有矿体

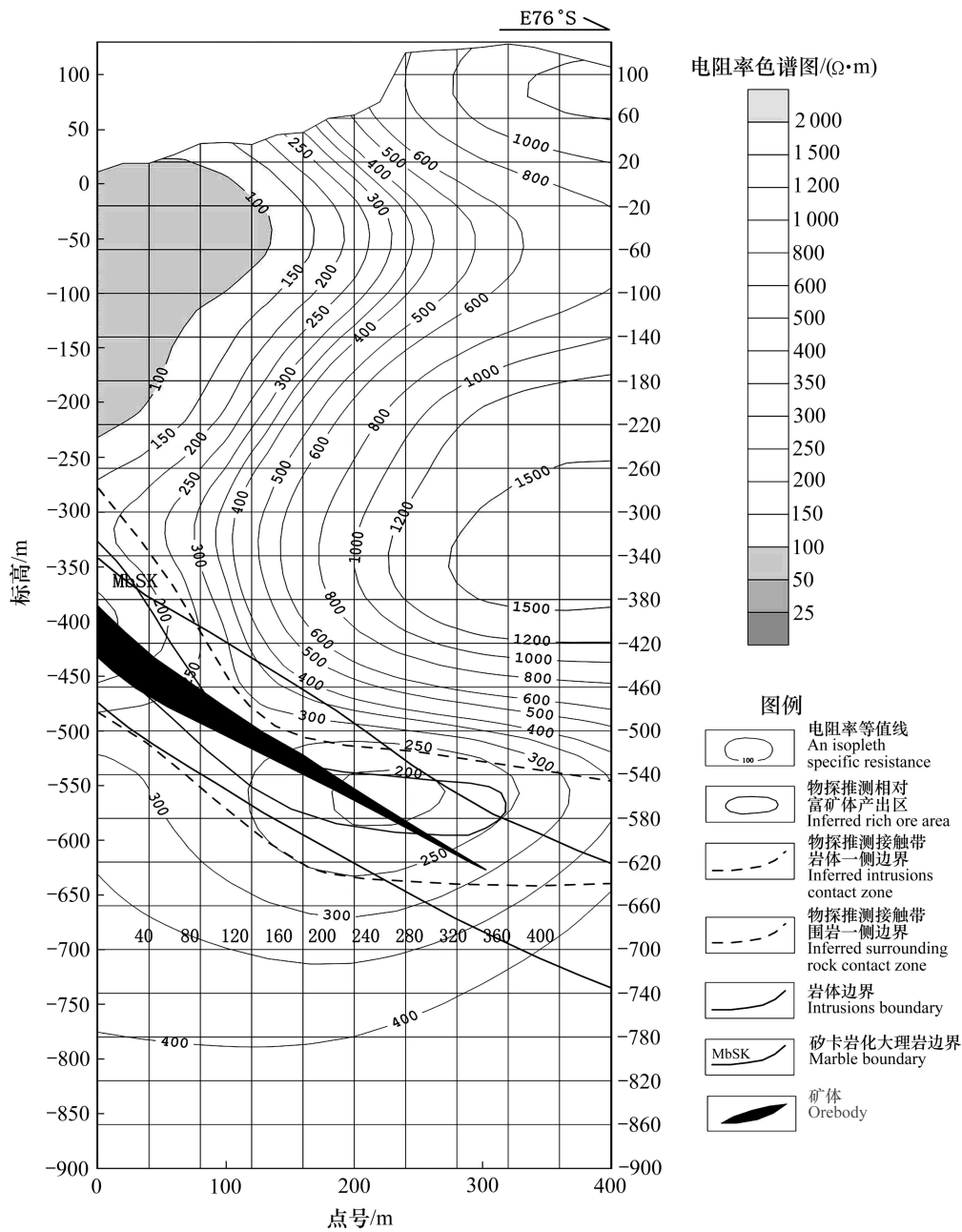


图 1 铜山铜矿前山南测区 13 线 EH4 二维反演和矿体实际分布剖面图(已叠加 40 m×40 m 网格)
Fig. 1 EH4 2-D inversion section and orebody distribution in line 13 of Qianshan area of Tongshan Copper Mine

产出。

1.3.2 数据提取

由于本区所用的 CSAMT 法、EH4 法和 TEM 法都是通过探测电阻率差异来圈定隐伏矿体的有利赋存空间, 因此, 可通过统计预测界线和实际界线间的吻合程度来间接评价探测方法的有效性。提取相对吻合和不吻合的方格数参与统计。这里, 图中每条虚线相当于 Meta 分析中一篇文献, 每个方格相当于研究文献中的一个实验对象。

对获取的 18 幅网格化二维测深反演剖面图统计提取相对吻合和不吻合的方格数。统计结果如表 1 所

列。

1.3.3 CSAMT 法与 TEM 法的有效性 Meta 分析

利用 Meta 分析软件 Review Manage 4.2 对表 1 中 CSAMT 法与 TEM 法所得数据进行统计分析, 其 Meta 分析森林图如图 2 所示。

由图 2 可以看出, 符合 $v=K-1$ 的 χ^2 分布。本研究的分析结果显示 $P=0.000\ 01<0.05$, 因此认为各研究异质性明显, 可选用随机效应模型进行分析。 $OR=4.43(95\%CI, 1.76\sim11.18)>0$, 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 法的要高。

表 1 不同网度不同探测方法预测吻合程度统计表

Table 1 Fit degree of prediction of various detection techniques under different prospecting networks

预测线	CSAMT		EH4		TEM	
	吻合段数	总段数	吻合段数	总段数	吻合段数	总段数
10 m×10 m-13-上	23	56	16	57	6	55
10 m×10 m-13-下	25	63	30	51	19	30
10 m×10 m-19-上	43	95	52	101	0	91
10 m×10 m-19-下	38	65	20	73	8	73
20 m×20 m-13-上	18	26	23	33	16	28
20 m×20 m-13-下	19	32	23	27	12	25
20 m×20 m-19-上	38	52	40	50	0	42
20 m×20 m-19-下	24	31	15	37	13	38
40 m×40 m-13-上	10	12	15	17	11	16
40 m×40 m-13-下	13	17	14	14	8	14
40 m×40 m-19-上	26	28	26	27	10	25
40 m×40 m-19-下	15	17	15	20	18	19

注: 表 1 中, 10 m×10 m-13-上表示在 13 线剖面上叠加了 10 m×10 m 的网格后位于上部的预测线; 总段数表示预测线被网格所分割成的线段数; 吻合段数表示预测线中与实际分界线相对吻合的线段数。

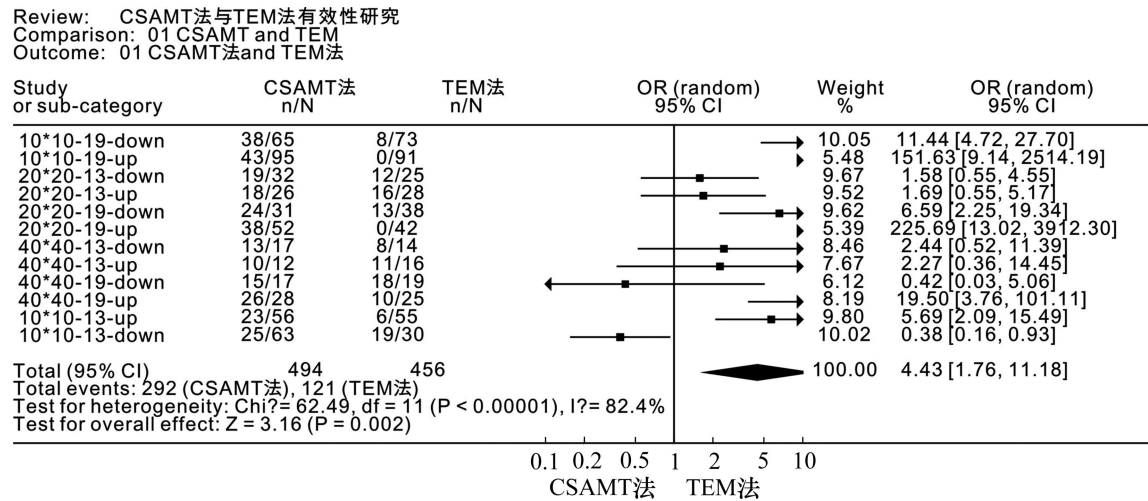


图 2 CSAMT 法与 TEM 法的 Meta 分析森林图

Fig. 2 Forest graph of meta-analysis for CSAMT and TEM

采用相同方式对 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 法的高; CSAMT 法的有效性与 EH4 法的没有明显的区别。

2 有效度评价法—单种方法的有效性定量评价技术新突破

2.1 基本思路 and 主要步骤

基本思路: 通过某种探测技术方法推断的目标地质体与实际地质体的分布状况进行定量统计对比后, 综合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

以铜陵凤凰山铜矿物探可控源音频大地电磁 (CSAMT) 法为例, 以经典的统计学理论为基础^[14-15], 提出了一种基于剖面对比的有效性定量评价方法^[16]。

2.2.1 定量评价步骤

1) 确定并网格化勘探剖面的样本区

凤凰山铜矿按 150 m×40 m 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, 将有效性评价的剖面样本区确定为从地表至 -400 m 标高范围。利用 ArcGIS 软件实现对所有剖面上的样本区按 5 m×5 m 的单元完成网格化; 统计获取各类地质体的栅格数量。

2) 计算匹配率

按下式计算匹配率, 即各种地质体判断正确的栅格数与总的栅格数之比:

$$C = \bigcup_{i=1}^n (G_i \cap P_i) \quad (1)$$

式中: C 为匹配率; G_i 为各类地质体所占栅格数; P_i 为各类推测地质体所占栅格数。匹配率 C 越大, 表明使用的探测方法揭示客观地质体越有效。

3) 确定地质体空间影响值

引入地质单元场 (F_{Ti}) 的概念, 即认为所有的地质体单元, 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:

$$F_{Ti} = \begin{cases} f_0, & u \in T_i \\ f_0(1 - d/d_0), & u \notin T_i \text{ 且 } u < d_0 \\ 0, & u \notin T_i \text{ 且 } u \geq d_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_i 可以表示地、物、化探剖面图中的某类地质体; f_0 表示场值初始最大值; d 表示该单元 u 距离该类地质体的最近距离; d_0 表示最大场影响距离。

利用上述地质体空间影响值计算公式, 选取最大影响值 f_0 为 1 000, 最大极限距离 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的计算。

4) 空间影响值的均值 t 检验

为定量探讨实际地质剖面 and 物化探测量推测地质剖面之间的误差程度, 构建统计量 F :

$$F = F_G(x, y) - F_P(x, y) \quad (3)$$

F 的分布基本符合均值 m 等于 0 的正态分布, 而其总方差大小与各种探测技术和探测对象相关, 可采用已知样本的方差 S 来近似表达。因此, 可以构建统计量 T 来判断在给定置信条件下, 样本的均值是否等于 0, 具体 T 的值:

$$T = \frac{(\bar{F} - \mu)}{S/\sqrt{n}} \sim t(n-1) \quad (4)$$

式中: \bar{F} 是所有样本的 F 均值; μ 是总体的均值, 计算中应该等于 0; S 是已知样本 F 值的方差; n 是样本数量。统计量 T 服从自由度 $n-1$ 的 t 分布。

统计值 T 可用来评价方法的有效性。如存在假设 $H_0: \bar{F} = 0$, 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 , 则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

在以上 t 检验的基础上, 构建以下的一元线性回归方程来拟合空间影响值。

$$F_G(x, y) = B \cdot F_P(x, y) + A + \varepsilon \quad (5)$$

式中: B 是系数 (理论值等于 1), A 是常数 (理论值等于 0), ε 是随机误差。

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

只有在通过以上 t 检验和拟合 F 检验的基础上, 才可按下式计算有效度:

$$D = \frac{U}{U + Q} \quad (6)$$

当回归平方和与总偏离平方和之比值 $U/(U+Q)$ 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)测量结果的有效性定量评价

基于匹配率计算公式、有效性定量评判的均值 t 检验方法, 拟合 F 值检验方法和有效度计算方法, 通过统计分析软件 SPSS 15.0 进行计算的结果如表 2 所列。

结果表明, CSAMT 法在以上 13 条剖面上均有效且有效度高; 其中 10 条剖面上的有效度在 90%上。

“Meta 分析比较法”可在开展隐伏矿定位预测中的试验剖面上用来优选最佳的找矿预测技术和最佳找矿预测技术组合; 同时也可为“客观赋权”提供更为客观科学的依据。该方法不但可在二维剖面上进行, 也能应用于一维、三维或多维空间; 不但可用于不同物探技术方法的有效性定量比较, 也能广泛应用于不同化探技术方法、遥感技术方法的有效性定量比较, 还能用于不同的地质找矿方法、找矿要素等的有效性定量比较。

“有效度评价法”是在具有大量探测数据和已知或验证资料的基础上进行的, 在勘查程度高的矿山更为适用。其定量评价结果——有效度可为隐伏矿三维定量定位预测提供更科学可靠的预测推断依据和“客

观赋权”参数。

如在凤凰山铜矿区通过“有效度评价法”得到了各个剖面上 CSAMT 有效度之后, 对于在某剖面上有效的方法, 就能对于-400 m 以下区域依照已有的反演图中各种地质体的形态来推断地质界线的下延产状。

3 隐伏矿体三维可视化定位定量预测技术新突破

3.1 基本思路

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^[17]。其核心流程与关键技术如图 3 所示。

3.2 控矿地质因素场建模技术

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。用预测空间中某单(体)元到地质体的最近距离来衡量控矿地质因素场对单元的影响程度。

表 2 有效性定量评价计算结果总表

Table 2 Computation result of quantitative evaluation on availability

勘探线号	匹配率	均值 t 检验		拟合 F 检验			有效性	有效度
		$t(1, n-1)$	$t_{0.025}(1, n-1)$	$F(1, n-2)$	$F_{0.05}(1, n-2)$	相关系数		
21	0.972	0.013 4	1.96	625 060.28	3.84	0.979	显著	0.958
23	0.808	0.003 7	1.96	18 744.619	3.84	0.644	显著	0.415
25	0.979	0.005 7	1.96	894 112.55	3.84	0.976	显著	0.952
28	0.971	0.001 6	1.96	635 850.65	3.84	0.960	显著	0.921
31	0.992	0.009 4	1.96	5 556 864.2	3.84	0.995	显著	0.989
34	0.993	0.000 7	1.96	8 522 275.4	3.84	0.997	显著	0.993
37	0.965	0.044 3	1.96	500 489.75	3.84	0.948	显著	0.907
40	0.996	0.014 0	1.96	28 221 582	3.84	0.999	显著	0.998
46	0.995	0.011 5	1.96	13 798 249	3.84	0.998	显著	0.996
48	0.959	0.011 3	1.96	518 629.44	3.84	0.940	显著	0.881
50	0.953	0.005 2	1.96	395 262.11	3.84	0.923	显著	0.853
52	0.981	0.009 8	1.96	1 239 019.5	3.84	0.975	显著	0.952
55	0.987	0.008 0	1.96	2 991 163.3	3.84	0.991	显著	0.981

注: $t_{0.025}(1, n-1)$ 是 95%的置信条件下, 查 t 分布表得到的 t 值; $F_{0.05}(1, n-2)$ 是 95%的置信条件下, 查 F 分布表得到的 F 值。

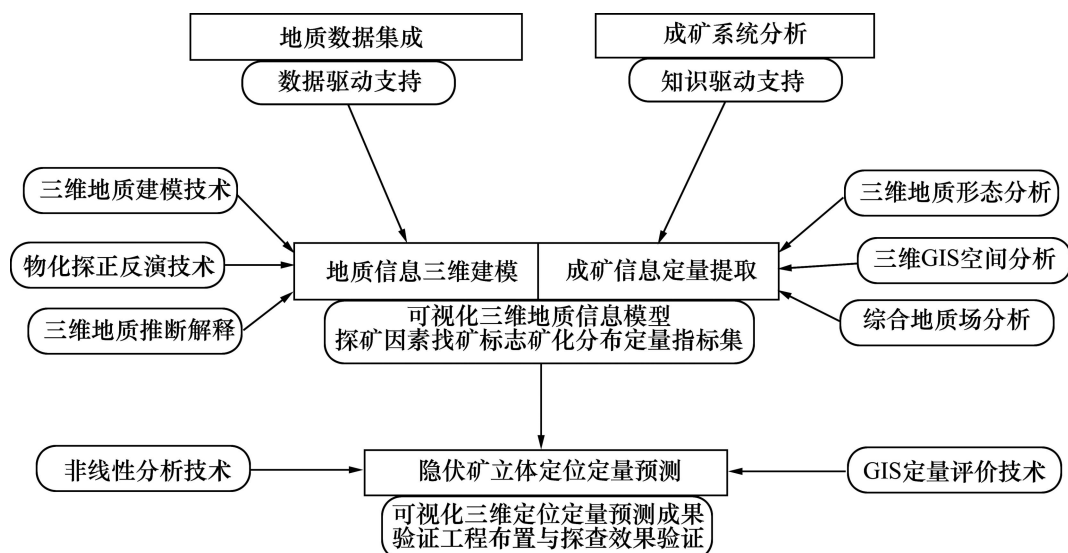


图3 隐伏矿体三维可视化预测核心流程与关键技术

Fig. 3 Core flow and key techniques for three-dimensional visual prediction of concealed ore bodies

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。这些模型为后续的成矿信息三维定量分析与提取奠定了基础。

3.3 地质体三维形态分析技术

为准确描述复杂地质体的形态,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-围岩接触带提取、岩体表面形态起伏如超覆、凹部以及其它不规则形态提取等。形态起伏分级提取流程如图4所示。

3.4 成矿信息三维定量分析与提取技术

成矿信息分为控矿因素信息(岩浆岩、地质构造、地层、岩性等地质条件)和找矿标志信息(物化探异常、遥感影像、重砂、蚀变等找矿标志)两类,相应地,成矿信息指标分为控矿因素指标(简称控矿指标)和找矿标志指标(简称标志指标)。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,因此,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:岩体热力场因素(dG),包含接触带因素(dI)的信息;岩体一级形态因素($wr1G$);岩体二级形态因素($wr2G$);接触面构造因素(aIT);横向张性断层因素(dF);区域挤压远应力场因素(aIP)的找矿信息指标;褶皱构造因素($dd3$)的找矿信息指标。

以铜陵凤凰山铜矿新屋里岩体的岩体热力场因素(dG)与单元矿化指标 Cu 、 $CuOre$ 的关系为例,通过构建和分析 $dG-Cu$ (单元铜平均品位)散点图和 $dG-CuOre$ (单元铜金属量)散点图可知,单元铜平均品位 Cu 、单元铜金属量 $CuOre$ 与因素 dG 之间存在着一定的关联关系: dG 取值为 $(-250, 150)$ 的单元时,其矿化指标 Cu 、 $CuOre$ 的值最高或明显偏高,即这些单元为主要矿化富集空间(品位高、金属量大); dG 取值为 $(260, 500)$ 的单元时,其矿化指标 Cu 、 $CuOre$ 的值相对较高,即这些单元为次要矿化富集空间(品位偏低、金属量偏小); dG 取值为其它值的单元时,其矿化指标 Cu 、 $CuOre$ 的值明显偏低,即这些单元为无矿或贫矿空间。由于矿化指标 Cu 、 $CuOre$ 与 dG 的关联关系是非线性的,可通过构建非线性模型来模拟这种关系:

$$Cu = \beta_{01} + \beta_{11} ddG1 + \epsilon \quad (7)$$

$$CuOre = \beta_{02} + \beta_{12} ddG2 + \epsilon \quad (8)$$

式中:

$$ddG1 = \begin{cases} |dG - d1a|, & \text{当 } dG < 250 \\ |dG - d1b|, & \text{当 } dG \geq 250 \end{cases}$$

(9)

$$ddG2 = \begin{cases} |dG - d2a|, & \text{当 } dG < 250 \\ |dG - d2b|, & \text{当 } dG \geq 250 \end{cases}$$

(10)

求解上述非线性回归方程, 得到上述方程各参数的值为: $d1a=-25$, $d1b=450$, $d2a=0$, $d2b=450$ 。由该模型可知, 矿化指标 Cu 、 $CuOre$ 应分别与新指标 $ddG1$ 、 $ddG2$ 呈线性相关, 故计算矿化指标 Cu 、 $CuOre$ 分别与新指标 $ddG1$ 、 $ddG2$ 的相关系数, 并对线性回归模型进行 F 检验, 结果如表 3 所列。

表 1 中统计结果表明, 矿化指标 Cu 、 $CuOre$ 分别与变量 $ddG1$ 、 $ddG2$ 具有显著的线性相关性, 即 $ddG1$ 、 $ddG2$ 对矿化空间分布具有显著的贡献或显著的控制作用, 可作为控矿指标来指示地质因素对成矿的有利程度。

3.5 隐伏矿体三维可视化定位定量预测

以铜陵凤凰山矿田为例, 将三维地质建模技术与矿产资源定量评价理论结合起来, 建立适应于矿山深部隐伏矿体三维可视化定位定量预测新技术。通过综合地质研究, 构建矿体定位预测概念模型; 在地物化探数据集成的基础上, 采用三维地质建模技术, 对

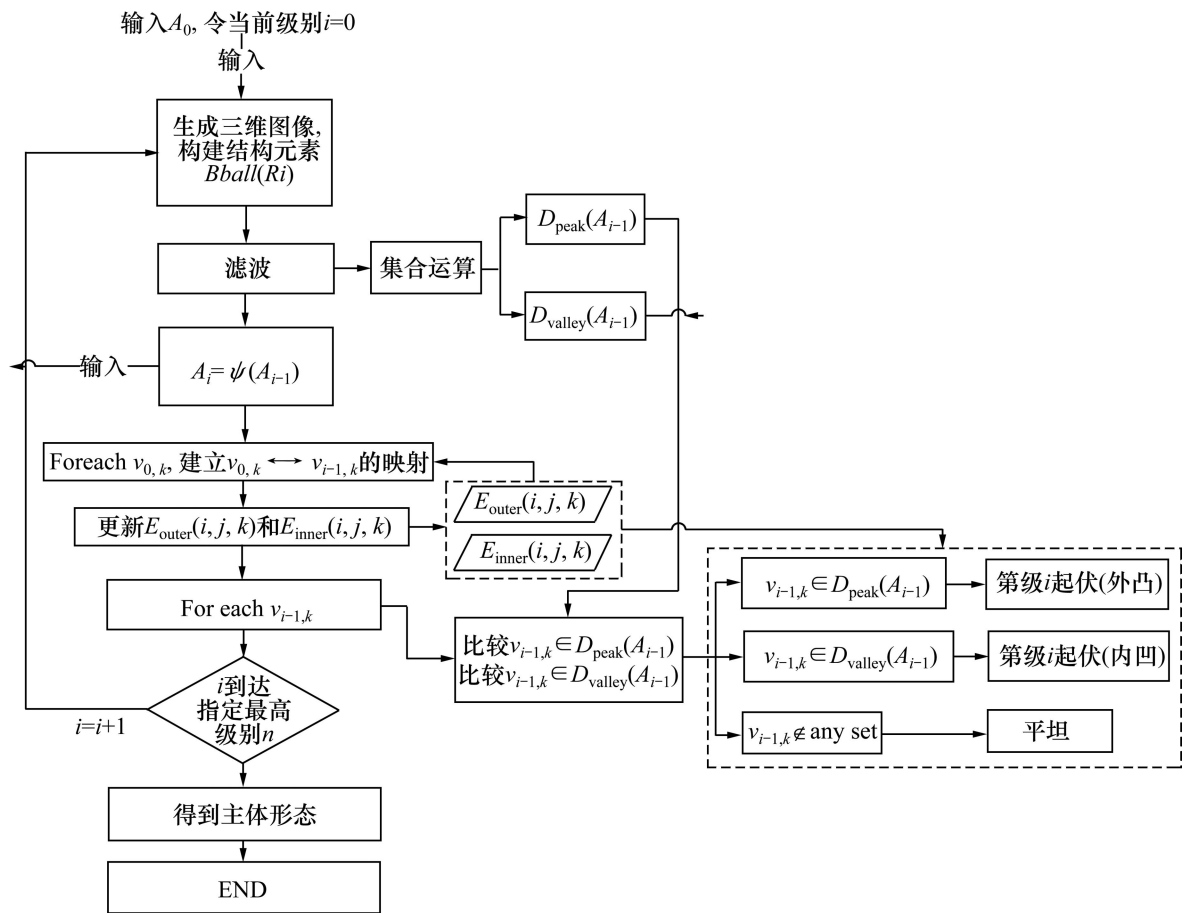


图 4 形态分析流程图
Fig. 4 Appearance-analysis flow

表 3 矿化指标 Cu 、 $CuOre$ 与岩体热力场因素 $ddG1$ 、 $ddG2$ 的相关系数及回归效果

Table 3 Correlation coefficient and regression effectiveness of mineralization indexes Cu and $CuOre$ with thermodynamic field factor $ddG1$ and $ddG2$

回归模型	相关系数 R	$F(1, 1\ 559)$	$F_{0.05}(1, 1\ 559)$	回归效果
$Cu=b_0+b_1ddG1+\varepsilon$	-0.130 610 934 229 9	27.022 176 683 22	3.847 430 500	显著
$CuOre=b_0+b_1ddG2+\varepsilon$	-0.164 094 602 932 5	43.085 565 976 89	3.847 430 500	显著

地层、构造、岩浆岩、矿体等地质体进行推断和圈定,构建地质体的线框模型与块体模型;再通过地质空间定义和立体单元划分,建立岩体及其表面形态起伏、接触带、地层及褶皱构造、断层等控矿地质因素的三维栅格场模型;在定量分析控矿地质因素与矿化分布的关联关系的基础上,建立反映这种关联关系的矿体立体定量预测模型。

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指标之间的定量关联关系,可用来对研究区内分布的隐伏矿体进行定位定量预测。

矿化分布实际上是矿化指标在三维地质空间上的分布,描述这些指标的变量称为矿化变量。矿化变量包括:1) Cu —单元铜平均品位;2) $CuOre$ —单元铜金属量。

矿化指标(Cu , $CuOre$)的预测模型为

$$MV_k = B_{k0} + \sum_{j=1}^p B_{kj} GV_j + \varepsilon, \quad k=1, \dots, m \quad (11)$$

式中: MV_k 为 MV 中的矿化变量(Cu , $CuOre$); GV_j 为 GV 中的控矿变量($ddG1$, $ddF1$, $daIP1$, $dwr1G1$, $aIT1$, $wr2G1$, $ddD31$)和($ddG2$, $ddF2$, $daIP2$, $dwr1G2$, $aIT2$, $wr2G2$, $ddD32$); B_{k0} , B_{k1} , \dots , B_{kp} 为线性函数的待求参数; ε 为期望值为零的随机变量。

参数 B_{k0} , B_{k1} , \dots , B_{kp} 可通过对 GV 和 MV 在地质空间控制区域中离散化单元的量化数据进行多元线性回归分析获得。

单元含矿性指标($IOre$)的估计模型为

$$\hat{IOrei} = \frac{\exp(B_{k0} + \sum_{j=1}^p B_{kj} GV_j)}{1 + \exp(B_{k0} + \sum_{j=1}^p B_{kj} GV_j)} \quad (12)$$

式中: i 为立体单元编号; \hat{IOrei} 为立体单元 i 的含矿性指标的估计量; GV_j 为 GV 中的控矿变量($ddG2$, $ddF2$, $daIP2$, $dwr1G2$, $aIT2$, $wr2G2$, $ddD32$); B_{k0} , B_{k1} , \dots , B_{kp} 为逻辑斯蒂模型的待求参数。参数 B_{k0} , B_{k1} , \dots , B_{kp} 可通过对 GV 和 MV 在地质空间控制区域中离散化单元的量化数据进行极大似然估计获得。

预测模型提供了矿田深部(−1 000 m 标高以上)所有 50 m×50 m×50 m 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预测的隐伏矿体的位置、品位和金属量等信息。

4 结论

1) 通过将 Meta 分析引入找矿预测,提出一种可对多种物化探方法的有效性进行定量比较评价的新方法,并应用于安徽铜陵铜山铜矿 CSAMT、EH4 和 TEM 3 种物化探方法的有效性的定量评价。

2) 利用目标地质体与实际地质体的分布状况的匹配率、有效度的计算和有效性的统计检验,得到可对单种物化探方法的有效性进行度量评价的方法,并对凤凰山铜矿 CSAMT 方法的有效性进行定量评价。

3) 基于物化探方法有效性评价、地质体三维形态分析、控矿地质因素场建模和成矿信息三维定量分析提取,以铜陵凤凰山矿田为例建立了隐伏矿体三维可视化定位定量预测模型,为危机矿山深边部隐伏资源的高效探测提供更可靠的技术支撑。

致谢:

在野外地质调查和原始资料收集工作中,得到铜陵有色金属集团股份有限公司的大力支持和协助;在成果研究过程中,得到郑洲顺教授、董军教授、林舸研究员、席振铎教授等的很多有益指点和资料提供,在此一并致谢!

REFERENCES

- [1] PARK N W, CHI K H, KWON B D. Accounting for spatial patterns of multiple geological data sets in geological thematic mapping using GIS-based spatial analysis[J]. Environmental Geology, 2007, 51: 1147–1155.
- [2] 黄力军, 徐刚峰. 成矿区带深部有色金属矿产资源勘查评价方法技术研究[J]. 地质学报, 2006, 80(10): 1549–1552.
HUANG Li-jun, XU Gang-feng. Method and technique study for deep resource exploration in mineral resources sections and strips[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(10): 1549–1552.
- [3] 彭省临, 王 颖, 邵拥军, 毛先成, 赖健清, 王雄军, 张建东. 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, 2009, 15(4): 460–469.
PENG Sheng-lin, WANG Ying, SHAO Yong-jun, MAO Xian-cheng, LAI Jian-qing, WANG Xiong-jun, ZHANG Jian-dong. Application of meta-analysis to deep prospecting predictions: An example from the Tongshan copper deposit, Tongling, Anhui Province[J]. Geological Journal of China Universities, 2009, 15(4): 460–469.

- [4] 彭省临, 刘亮明, 赖建清, 邵拥军, 柳建新, 席振铎, 王力, 杨群周. 大型矿山接替资源勘查技术与示范研究[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 73-154.
- PENG Sheng-lin, LIU Liang-ming, LAI Jian-qing, SHAO Yong-jun, LIU Jian-xin, XI Zhen-zhu, WANG Li, YANG Qun-zhou. Technologies for exploring successive resources for large scale mines and their application cases[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 73-154.
- [5] 王雄军. 云南老君山矿集区多成因复合成矿模式及空间信息成矿预测模型研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008: 110-136.
- WANG Xiong-jun. Research on the polygenetic compound metallogenic model and spatial information metallogenic prognosis of the deposit-accumulated area in Laojunshan, Yunnan[D]. Changsha: Central South University, 2008: 110-136.
- [6] GLASS G V. Primary, secondary and Meta-analysis of research[J]. Education Research, 1976, 6(5): 3-8.
- [7] STANGL D K AND BERRY D A. Meta-analysis in medicine and health policy[M]. New York: Marcel Dekker Inc, 2000.
- [8] KALYANI A. Approaches to meta-analysis: A guide for us researchers[J]. Library & Information Science Research, 2005, 27: 164-176.
- [9] 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.
- [10] DICKERSIM K, BERLIN J A. Meta-analysis: State of the science[J]. Am J Epidemiol, 1992, 14: 154.
- [11] 彭少麟, 唐小焱. Meta 分析及其在生态学上的应用[J]. 生态学杂志, 1998, 17(5): 74-79.
- PENG Shao-lin, TANG Xiao-yan. Meta-analysis and its application in ecology[J]. Chinese Journal of Ecology, 1998, 17(5): 74-79.
- [12] FREDERIK P A. Past and future of mathematical geology[J]. Journal of China University of Geosciences, 2003, 14(3): 191-198.
- [13] KORETZ R L. Methods of meta-analysis: An analysis[J]. Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care, 2002, 5: 467-474.
- [14] BALLANTYNE A P, LAVINE M, CROWLEY T J. Meta-analysis of tropical surface temperatures during the Last Glacial Maximum[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 26: L05712.
- [15] de VITRY C. Utilising statistics and geostatistics to validate, characterise and improve geological domaining—A case study From BHP Billiton's Yandi channel iron deposit[C]// Proceedings of Iron Ore Conference 2005. Fremantle: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2005: 193-202.
- [16] 陈进, 毛先成, 彭省临, 邹艳红. 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, 2010, 34(2): 263-269.
- CHEN Jin, MAO Xian-cheng, PENG Sheng-lin, ZOU Yan-hong. Quantitative evaluation on availability through geophysical and geochemical prospecting techniques—A case study on CSAMT approach in Fenghuangshan copper deposit[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2010, 34(2): 263-269.
- [17] 毛先成, 邹艳红, 陈进, 赖建清, 彭省临, 邵拥军, 疏志明, 吕俊武, 吕才玉. 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, 2010, 29(2/3): 401-413.
- MAO Xian-cheng, ZOU Yan-hong, CHEN Jin, LAI Jian-qing, PENG Sheng-lin, SHAO Yong-jun, SHU Zhi-ming, LÜ Jun-wu, LÜ Cai-yu. Three-dimensional visual prediction of concealed ore bodies in the deep and marginal parts of crisis mines: A case study of the Fenghuangshan ore field in Tongling, Anhui, China[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(2/3): 401-413.

(编辑 何学锋)