

·矿产资源·

地学信息三维定量化提取与集成 ——以河南栾川钼矿区为例

李瑞喜¹, 王功文¹, 张寿庭¹, 曲家楠¹, 朱彦彦¹, 黄陆雄¹, 燕长海²,
宋要武², 韩江伟², 马振波², 云 辉²

LI Rui-xi¹, WANG Gong-wen¹, ZHANG Shou-ting¹, QU Jia-nan¹, ZHU Yan-yan¹,
HUANG Lu-xiong¹, YAN Chang-hai², SONG Yao-wu², HAN Jiang-wei²,
MA Zhen-bo², YUN Hui²

1. 中国地质大学(北京), 北京 100083;

2. 河南省地质调查院, 河南 郑州 450001

1. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;

2. He'nan Institute of Geological Survey, Zhengzhou, 450001, He'nan, China

摘要: 三维地质建模与找矿靶区优选是当前国际地学研究的热点和难点。利用三维可视化技术和数学建模方法,通过自主研发GeoCube三维矿产资源预测与评价软件,实现了栾川钼矿区三维地学信息定量化提取与集成。在此基础上,开展多种数学建模方法集成对比及其网格单元划分的不确定性分析,认为证据权法具有稳健的三维空间集成分析特征,其三维环境中的预测远景靶区为该区深部找矿定位、定量研究提供了科学依据。研究成果为中国老矿山深部成矿定量预测技术方法研究提供借鉴。

关键词: 三维地质建模;数学建模;地学信息;提取与集成;矿产资源预测评价

中图分类号: P5; P618.65 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2014)06-0883-11

Li R X, Wang G W, Zhang S T, Qu J N, Zhu Y Y, Huang L X, Yan C H, Song Y W, Han J W, Ma Z B, Yun H. Three dimensional quantitative extraction and integration for geosciences information: A case study of the Luanchuan Mo ore district. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(6):883-893

Abstract: Three dimensional (3D) geological modeling and optimization of prospecting targeting constitute the hotspot and difficulty in the current international geosciences research. In this paper, 3D visualization technology and mathematical modeling method were utilized through independent research and development of GeoCube software for mineral resources prediction and evaluation, and the molybdenum targeting based on 3D geological information quantitative extraction and integration was realized. On such a basis, the integrated comparison was carried out by a variety of mathematical modeling methods and the uncertainty analysis of grid cell division. The weight of evidence has the characteristics of steady 3D integrated analysis, and the prediction of the targets in the 3D environment can realize deep prospecting positioning and provide a scientific basis for quantitative research. The research results presented in this paper can be used for deep ore-forming quantitative prediction technological research in old mines of China.

Key words: 3D geological modeling; mathematical modeling; geosciences information; extraction and integration; mineral resources prediction and assessment

收稿日期:2014-02-18;修订日期:2014-04-17

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(编号:2011BAB04B06)和国土资源部公益性行业基金项目(编号:201111007)

作者简介: 李瑞喜(1990-),男,在读博士生,从事三维矿产资源预测与评价工作。E-mail: lrxgis@163.com

通讯作者: 王功文(1972-),男,副教授,博士生导师,从事三维地质建模与资源定量评价工作。E-mail: gwwang@cugb.edu.cn

近 20 年以来,地理信息系统(Geographic Information System, GIS)技术一直是国内外定量地质与地质信息者研究的重要手段,基于 GIS 的多元成矿地质信息(地质、地球物理、地球化学和遥感)提取—集成—制图,成为矿产资源评价的技术方法体系,至今仍是国内外矿产勘查与评价研究的重要内容^[1]。该方法体系对中小比例尺的 2D 或 2.5D 世界、区域性资源评价具有普适性,但是在 1:10000 以上大比例尺三维空间矿产资源的评价中还存在诸多不足,尤其是在深部隐伏矿的定位预测和金属资源量估算方面明显欠缺,主要是因为受地质体三维可视化的制约,缺乏必要的三维空间分析技术和致矿异常信息提取与集成方法。因此,大比例尺三维空间的矿产资源评价成为现今国内外矿产勘查学的前沿课题与发展趋势^[2]。以三维地质建模系统和三维地理信息系统为主体的地质信息系统,注重三维建模、三维空间分析和三维建模技术发展与应用,目前已成为地质与信息科学的交叉技术前沿和攻关热点^[3-4],为大比例尺三维矿产资源的定量化研究提供了重要的技术支撑。在三维环境系统开展多元地质致矿异常信息的非线性方法综合解译(提取)、集成,是减少单一信息多解性和找矿不确定性的根本途径^[5-7]。

本文利用三维可视化技术和数学建模方法(信息量法、证据权法和分形方法),以河南栾川钼矿区为例,基于自主研发的 GeoCube 矿产资源预测与评价三维软件,实现了研究区的三维地质信息(地质、地球物理、地球化学)的定量化提取与集成,为该区域深部找矿定位和定量研究提供科学依据。

1 研究区地质特征

河南栾川钼矿集区位于东秦岭成矿带,大地构造位置处于华北陆块南缘与北秦岭造山带的交接部位,华北陆块自 NE 向 SW 左行走滑推覆在北秦岭褶皱带之上。

1.1 地层

研究区位于华北陆块南缘金堆城—南泥湖钼钨铅锌银成矿带的东部。区内出露的地层主要为中元古界官道口群、新元古界栾川群和震旦系陶湾群。中元古界官道口群分布于矿区北部,为一套浅海相含燧石条带碳酸盐岩建造,岩性主要为含燧石条带白云质大理岩。新元古界栾川群分布于矿区中部,为一套碎屑岩—碳酸盐岩—粗面火山岩夹基

性火山岩建造,自下而上由白术沟组、三川组、南泥湖组、煤窑沟组、大红口组等组成。白术沟组由炭质绢云千枚岩、绢云石英片岩、长石石英岩夹大理岩组成。三川组下部以含石英细砾变石英砂岩为主,上部以大理岩为主。南泥湖组下段主要为细粒石英岩,中段以变斑二云片岩、炭质绢云片岩及钙质二云片岩为主,上段以黑云大理岩为主。煤窑沟组下段为变细砂岩、片岩大理岩互层,中段以白云石大理岩为主,富含叠层石,上段以白云石大理岩为主,夹绢云千枚岩、石煤层及变石英砂岩。大红口组以变粗面岩为主,夹变火山碎屑岩、火山沉积岩及白云质大理岩。新元古界陶湾群分布于矿区的南部,为一套陆源碎屑—碳酸盐岩沉积建造,岩性以含砾灰岩、大理岩、千枚岩、变砂岩和石英岩为主。

1.2 构造

研究区总体以近 EW 向构造为主,NNE 向构造叠加其上。自北向南分布的褶皱构造有杨树凹—白沙洞向斜、银河沟背斜、增河口向斜、黄背岭—石宝沟背斜、核桃岔向斜等近 EW 向紧密褶皱;断裂构造有区域性的栾川断裂、庙子断裂及一系列自北向南推覆的逆冲断裂。黄背岭—南泥湖—马圈断裂带、石宝沟—庄科断裂带等 NNE 向构造发育。近 EW 向断裂带或背斜核部与 NNE 向断裂带的交会部位既是高热流渗透的构造薄弱带,也是含矿斑岩及其驱动的热液成矿系统的定位空间,控制了南泥湖、上房沟、黄背岭、石宝沟等侏罗纪斑岩体及斑岩—热液成矿系统形成的钼钨及铅锌银矿床分布^[8]。

1.3 岩浆岩

研究区内发育新元古代碱性火山岩和辉长岩体、侏罗纪花岗斑岩体。与钼钨矿床在时间、空间和成因上密切相关的花岗斑岩体主要有南泥湖岩体、上房沟岩体、马圈岩体、石宝沟岩体、黄背岭岩体等。岩体大多分布于近 EW 向与 NNE 向构造交会处,出露面积小于 1 km²,为复式岩体,如南泥湖岩体由早期斑状黑云母花岗闪长岩、中期花岗斑岩(主体)、晚期花岗斑岩脉和细晶岩脉组成,上房沟岩体由早期斑状黑云母二长花岗岩、中期花岗斑岩(主体)和晚期花岗斑岩脉组成,岩体与围岩界线清楚,热接触交代变质带发育,广泛形成各类夕卡岩和角岩。南泥湖岩体上房沟岩体和石宝沟斑岩体的锆石 SHRIMP 年龄分别为 157.1±2.9 Ma、157.6±2.7 Ma^[8]和 150.3±0.3 Ma^[9]。

1.4 围岩蚀变

矿区内各种围岩因受热液接触交代作用影响形成范围广泛的围岩蚀变,种类繁多,主要有钾化、绢云母化、夕卡岩化、云英岩化、硅化、碳酸盐—沸石化和阳起—绿帘—绿泥石化,其次有萤石化、黑云母化等;钼矿化主要与硅化、云英岩化和沸石—碳酸盐化最为密切。岩体内外热液蚀变均具水平分带特征。自岩体接触带向外,热液蚀变晕呈扇形分布,可划分为钾化带、硅化带、沸石—碳酸盐化带和夕卡岩化带。岩体内的蚀变,自岩体内部向接触带亦可分为钾化带、硅化带和绢云母化带。

2 三维地质建模

三维地质模型构建需要通过一种结构化、量化的方法来实现,因此需要大量相对均匀地分布在整个研究区域内的高质量、多元化的数据^[5-7]。本次三维地质建模过程中所使用的数据包括:河南省栾川县三道庄钼钨矿区1:2000地形地质图、栾川县南泥湖钼(钨)矿区1:2000地形地质图、栾川县上房沟钼(铁)矿1:2000地形地质图,以及南泥湖钼铅锌多金属矿集区1:10000地质矿产、实际材料图等基础地质资料,12条南泥湖、13条三道庄地质剖面图资料,256个钻孔、26000个地球化学采样数据、4095个地球物理探测点(重、磁及地形等)等。

图1为研究区地质三维块体模型,通过三维地质建模软件Micromine和上述多元地学数据建立而成。具体包括研究区的三维地表模型、三维矿体模型、三维地层模型、三维岩体模型、三维断裂模型、三维重磁模型等^[6-11]。在三维环境下,实体模型可以直观地显示不同地质体的几何形态及其属性特征。

3 异常信息提取

根据研究区钼多金属矿床的矿体与蚀变分带特征,结合研究区岩浆—夕卡岩钼多金属矿的成矿模式,将已建立的三维矿体模型、三维夕卡岩矿化模型与三维岩体缓冲模型叠加分析。通过数理统计分析,确定成矿有利期燕山期侵入岩体与接触带找矿有利地段的三维缓冲区,在三维可视化的条件下对岩体模型进行三维缓冲分析。通过建立岩体的三维缓冲模型,获得岩体缓冲区实体模型,表达了三维环境中夕卡岩型矿床矿致有利地段,也是三维定量预测中重要的地质矿致异常信息(变量)。

地球物理异常信息包括研究区重力和磁测数据的异常信息。地球物理(重力和磁测)矿致异常区可作为有效的找矿有利地段^[6-12]。密度和磁性的差异使得研究区内不同地层间、岩体与地层间的重力场和磁场发生变化而产生特征差异。研究区内对找矿有利的花岗岩体呈高磁或极强磁性、低重力或极低重力性的特点。根据栾川地区1:25000剩余重力异常和1:50000磁测数据,通过三维概率反演方法进行量化分析,以便提取矿致重磁异常地段作为找矿信息(变量)。

研究区内的Mo元素异常分布是金属矿化的主要标志,因此研究其异常分布情况对于Mo元素深部找矿有着重要的指导意义。对于Mo元素异常值采用密度—面积(C-A)分形方法进行插值处理,该方法已广泛应用于地球化学、地球物理、遥感异常的分解和识别,以及找矿有利靶区的优选等^[10]。

4 异常信息集成

4.1 信息量法

找矿信息量法属于统计分析方法,Vysokoostrovskaya等^[13]将其引入矿产资源预测与评价领域。该方法以地质异常理论为指导,以地质、物探、化探、遥感等找矿信息为基础,通过统计计算各地质因素、找矿标志所提供的找矿信息量,定量地评价控矿地质因素和找矿标志对指示找矿作用的大小,确定有利成矿部位。

找矿标志对研究对象的作用是根据信息量的大小来评价地质因素及标志与研究对象的关系密切程度。某种标志的找矿信息量用条件概率计算,即:

$$I_{A(B)} = \frac{P(A|B)}{P(A)} \quad (1)$$

公式(1)中 $I_{A(B)}$ 为A标志有B矿的信息量, $P(A|B)$ 为已知B矿存在的条件下出现标志A的概率, $P(A)$ 为在研究区出现标志A的概率。

由于总体概率估计上的困难,具体运算时,用样本频率值来估计总体概率值,此时:

$$I_{A(B)} = (N_j/N)/(S_j/S) \quad (2)$$

公式(2)中, N_j 为研究区内具有标志A的含矿单元数, N 为研究区内含矿单元总数, S_j 为研究区内具有标志A的单元数, S 为研究区内单元总数。

若 $I_{A(B)} = 0$, 表示 A 不提供任何找矿信息, 即标志 A 存在与否对找矿无影响; 若 $I_{A(B)}$ 为负值, 表示标志 A 的存在对找矿不利; 若 $I_{A(B)}$ 为正值, 表示标志 A 可以提供找矿信息, 且越大, 提供的找矿信息越多^[14]。

4.2 逻辑斯蒂回归法

逻辑斯蒂回归模型^[15]是一种对自变量组合产生相应概率的统计方法, 属于非线性回归模型。多元逻辑斯蒂回归表达式如下所示:

$$P_{y|x} = \frac{e^{(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n)}}{1 + e^{(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n)}} \quad (3)$$

对公式(3)对数变换可得:

$$\mu_p = \ln\left(\frac{P_{y|x}}{1 - P_{y|x}}\right) \quad (4)$$

则公式(4)可化为多元线性模型:

$$\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n = \ln\left(\frac{P_{y|x}}{1 - P_{y|x}}\right) \quad (5)$$

通过最大似然方法可获得逻辑斯蒂回归的回归系数。带入公式(3)即可得到各个网格单元所对应的后验概率值。

4.3 普通证据权法

证据权模型是一种基于贝叶斯法则和概率不确定性的多元统计模型, 最初应用于医学领域专家系统 GLADYS^[16]。20 世纪 80 年代末, 加拿大数学地质学家 Agterberg 等^[17-21]将该方法引入到矿产资源定量预测与评价领域。

使用证据权法需要首先计算出与成矿相关的各证据因子存在及不存在的权重, 其表达式如下所示:

$$W_i^+ = \ln \frac{P(B_i|D)}{P(B_i|\bar{D})} \quad (6)$$

$$W_i^- = \ln \frac{P(\bar{B}_i|D)}{P(\bar{B}_i|\bar{D})} \quad (7)$$

其中, B_i 表示第 i 个证据因子存在, D 表示矿床(点)存在。若 N 个证据因子满足条件独立, 根据贝叶斯公式, 研究区任一块体单元的后验有利度可表示为:

$$O_{\text{后验}} = O_{\text{先验}} * e^{\sum_{i=1}^N W_i^+} \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

对公式(8)两边取对数可得:

$$\ln O_{\text{后验}}(D|B_1^k B_2^k \dots B_N^k) = \ln O_{\text{先验}} + \sum_{i=1}^N W_i^k \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (9)$$

通过公式(9), 则可得到任一块体单元的后验概率:

$$P_{\text{后验}} = \frac{O_{\text{先验}}}{1 - O_{\text{后验}}} \quad (10)$$

普通证据权算法的本质决定了其所能使用的证据图层间必须具有条件独立性或者弱的条件独立性, 而矿产资源预测与评价使用的地质要素间往往因为存在内在联系而难以满足这一条件。使用具有高度相关性的数据进行信息集成势必会导致某一地质要素的权重会被过分放大, 而其他地质要素的权重则会相对降低, 从而影响了预测结果的准确性。针对这一问题, 近些年来, 众多国内外学者^[22-28]已经展开了广泛的探索和研究, 致力于克服及削弱证据图层不独立对预测结果产生的影响, 并且已经提出了诸多行之有效的解决方案。本文中主要应用了基于逻辑斯蒂回归的加权证据权法及增强证据权法。

4.4 基于逻辑斯蒂回归的加权证据权法

Agterberg^[15]将逻辑斯蒂回归与证据权方法结合起来, 提出了基于逻辑斯蒂回归的加权证据权模型。在该模型中, 需要将逻辑斯蒂回归系数作为加权证据权的权重因子, 得到加权后的权重并以此计算后验概率。而使用逻辑斯蒂回归系数作为权重因子将使得该方法同逻辑斯蒂回归一样可以得到后验概率的无偏估计, 从而克服证据图层独立性问题对预测结果的影响。

基于逻辑斯蒂回归的加权证据权模型第一步与普通证据权一致, 根据公式(6)和公式(7)计算出各证据图层的权重值; 对于每一个证据图层, 用 W_i^+ 和 W_i^- 分别代替原来的 1 和 0 值, 根据公式(5)进行逻辑斯蒂回归计算, 再通过极大似然法可得到回归方程的偏回归系数 β_i^+ ; 然后用 β_i^+ 作为各证据图层初始证据权重的修正系数, 对 W_i^+ 和 W_i^- 进行加权, 加权后的权重为:

$$W_i^{+*} = \beta_i^+ W_i^+ \quad (11)$$

$$W_i^{-*} = \beta_i^- W_i^- \quad (12)$$

最后使用加权的证据权重计算所有块体单元的后验概率^[22-23]。

4.5 增强证据权法

成秋明^[24]提出了增强证据权模型, 该模型不再要求条件独立性的假设, 需要将证据图层依次加入, 同时更新后验概率值。增强证据权模型根据贝

叶斯原理做出如下改进

$$\begin{aligned}\log(D|ABC) &\approx W_0 + W_A^+ + W_{B^*}^+ + W_{C^*}^+ \\ \log(D|AB\tilde{C}) &\approx W_0 + W_A^+ + W_{B^*}^- + W_{C^*}^- \\ &\dots \\ \log(D|\tilde{A}\tilde{B}\tilde{C}) &\approx W_0 + W_A^- + W_{B^*}^- + W_{C^*}^- \quad (13)\end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned}W_{B^*}^+ &= \ln \frac{P[B|AD] + P[B|\tilde{A}D]}{P[B|\tilde{A}D] + P[B|\tilde{A}\tilde{D}]} \\ W_{B^*}^- &= \ln \frac{P[\tilde{B}|AD] + P[\tilde{B}|\tilde{A}D]}{P[\tilde{B}|\tilde{A}D] + P[\tilde{B}|\tilde{A}\tilde{D}]} \\ W_{B^*}^+ &= \ln \frac{P[C|ABD] + P[C|\tilde{A}\tilde{B}D] + P[C|\tilde{A}\tilde{B}\tilde{D}] + P[C|\tilde{A}\tilde{B}\tilde{D}]}{P[C|\tilde{A}\tilde{B}\tilde{D}] + P[C|\tilde{A}\tilde{B}\tilde{D}] + P[C|\tilde{A}\tilde{B}\tilde{D}] + P[C|\tilde{A}\tilde{B}\tilde{D}]} \\ W_{B^*}^- &= \ln \frac{P[\tilde{C}|ABD] + P[\tilde{C}|\tilde{A}\tilde{B}D] + P[\tilde{C}|\tilde{A}\tilde{B}\tilde{D}] + P[\tilde{C}|\tilde{A}\tilde{B}\tilde{D}]}{P[\tilde{C}|\tilde{A}\tilde{B}\tilde{D}] + P[\tilde{C}|\tilde{A}\tilde{B}\tilde{D}] + P[\tilde{C}|\tilde{A}\tilde{B}\tilde{D}] + P[\tilde{C}|\tilde{A}\tilde{B}\tilde{D}]} \quad (14)\end{aligned}$$

除第一个证据图层所对应的权重为独立权重外,其他证据图层所对应的权重均为条件权重。条件权重的实际意义是对正确预测条件概率和错误预测条件概率的比值所取的自然对数变换,而且是在前一个证据图层应用前提下的条件概率比值。

5 三维矿产资源预测与评价

本文采用 GeoCube 软件对研究区进行三维定量预测与评价,GeoCube 提供了多种基于三维块体模型的信息集成方法,包括信息量模型、逻辑斯蒂回归模型、证据权模型及其改进模型等,支持 Micromine、Surpac 等三维建模软件所导出的部分数据格式,且具有三维显示功能,可以直观地表现分析和计算结果。

本文对源自地质(构造、岩体、地层)、地球物理(重力、磁)、地球化学(Mo 异常)等的多元信息进行信息集成。对于信息集成所得结果,采用分形方法对远景区进行等级划分,圈定出了 3 级成矿远景区。

表 1 为应用普通证据权法所得到的的证据图层($C>0$)的权重列表。其中 $N(E)$ 表示证据图层所含块体单元数; $N(D)$ 表示证据图层内所含矿体单元数; W^+ 与 W^- 分别表示该证据因子存在及不存在的权重; $s(W^+)$ 与

$s(W^-)$ 分别为 W^+ 与 W^- 的标准差; C 值为相关系数。

表 1 按相关系数(C)由大到小排列; C 值大于 0,表示证据因子的存在有利于成矿, C 值越大,表示对成矿越有利;反之, C 值小于 0,表示证据因子的存在不利于成矿, C 值越小,表示对成矿越不利; C 值为 0 则表示证据因子与成矿与否无关。模型中进行运算的证据图层共 24 个,仅前 9 个证据图层的 C 值为正。其中,证据图层“断裂缓冲”与“断裂”共存,“重力延拓”与“重力反演”共存,为削弱条件相关对预测结果的影响,舍弃 C 值相对较小的证据图层“断裂”与“重力反演”,采用剩余的 7 个证据图层进行后验概率的计算。

信息集成的结果在空间范围上是最终参与信息集成的 7 个证据图层的并集,而取值则为 0 到 1 之间的离散值,表示块体单元的后验概率。统计后验概率与块体单元数的关系所得到的后验概率对数值—累计块体单元数对数值图,如图 2 所示。由图 2 双对数图可见,双对数散点图可以大致分为水平方向和竖直方向 2 段,水平方向依然可以细分。本次研究使用分形方法进行成矿远景区的划分。

分形是局部和整体以某种方式相似,这种相似性并不是在任何尺度上都成立的,通常只是在某些特定的尺度范围内才成立分形。地质现象中产生的分形大多数属于无规则分形,其特点是不具有严格的自相似性,只是在统计意义上是自相似的,体现在双对数统计图中,即具有相同或相似特征的一

表 1 研究区普通证据权法变量及其权重

Table 1 The weight values of variables in the study area using Ordinary Weight of Evidence

证据因子	$N(E)$	$N(D)$	W^+	$s(W^+)$	W^-	$s(W^-)$	C
重力(延拓)	6608	2525	3.5889	0.0253	-0.1994	0.0095	3.7883
三川组上段	17457	2980	2.4889	0.0201	-0.2279	0.0097	2.7168
南泥湖组下段	48339	2932	1.3295	0.0191	-0.1832	0.0097	1.5128
南泥湖组中段	137703	5377	0.8664	0.0139	-0.3195	0.0111	1.1859
钼异常	84175	2818	0.7067	0.0192	-0.1238	0.0097	0.8305
断裂缓冲	453640	9938	0.2707	0.0101	-0.4912	0.0165	0.7620
重力(反演)	130730	3260	0.4034	0.0177	-0.0990	0.0099	0.5024
断裂	12089	251	0.2159	0.0639	-0.0036	0.0087	0.2195
南泥湖岩体缓冲	368568	6405	0.0345	0.0126	-0.0295	0.0118	0.0641

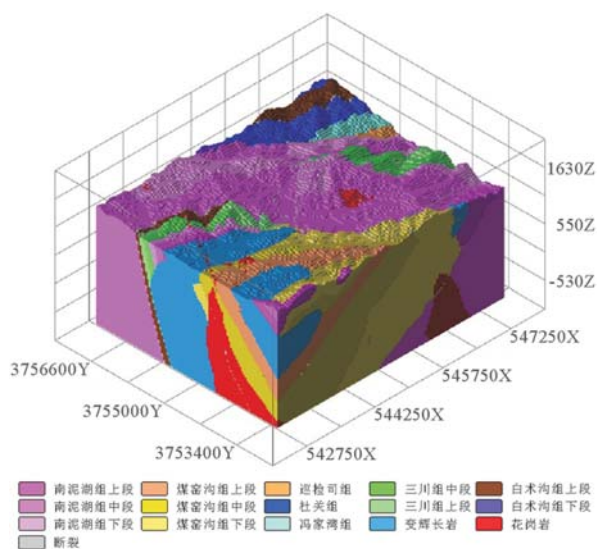


图1 研究区三维实体块体单元模型

Fig. 1 Three-dimensional entity block unit model in the study area

类事物通常近似分布于同一条直线段上。分形模型如下所示:

$$N(r) = Cr^{-D} \quad (16)$$

其中, r 为特征尺度, 在此表示后验概率, $C > 0$, 称为比例系数, $D > 0$, 称为分维数, $N(r)$ 表示后验概率小于特征尺度 r 的累计块体单元数。对上式取对数可得:

$$\log N(r) = \log C - D \log r \quad (17)$$

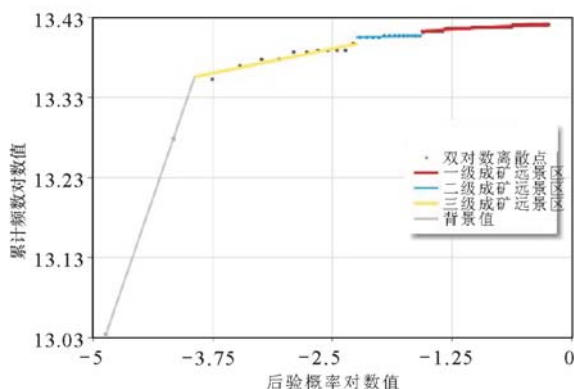


图2 普通证据权法后验概率分形分类结果

Fig. 2 Fractal classification result of posteriori probability using ordinary weight of evidence

由公式(16)可见, $\log N(r)$ 和 $\log r$ 呈线性关系, 而分维数即为双对数拟合直线的斜率绝对值。用最小二乘法分段拟合直线, 背景值和远景区可以对应于不同的斜率值, 不同线段所对应的分界值往往可作为区分背景和远景区或者是不同级别远景区的临界值^[29]。

鉴于所有参与计算的证据图层均为二值化的数据, 如果有 N 个相互独立的证据图层, 则后验概率最多可能会有 2^N 种不同的取值。在本文中, 共有 7 个证据图层参与最后的信息集成, 而后验概率总共出现了 45 种不同的取值, 后验概率的取值范围为 0.0038~0.7881, 其中, 约 68% 的块体单元 (457612 个) 分布在后验概率取值最小 1% 的范围内, 约 97% 的块体单元 (646786 个) 分布在后验概率取值最小 10% 的范围内, 而不足 1% 的块体单元 (6280 个) 却分布在后验概率取值最大 73% 的范围内。本文中使用 GeoCube 提供的基于分形的后验概率等级划分功能, 将研究区划分为 3 级成矿远景区与背景值。使用分形方法的研究区成矿有利度划分后的结果如图 3 所示。图 4 则主要展现了钼矿体的形态特征及其与各主要证据图层之间的关系, 其中红色部分为该证据图层与矿体的交集。结合图 3 及图 4 可以发现, C 值较大的几个证据图层对最终集成的高后验概率值的区域形态和分布影响十分显著, 结果与公式(9)及公式(10)的预期结果十分符合。

此外, 本文还应用了信息量法、逻辑斯蒂回归法、基于逻辑斯蒂回归的加权证据权法及增强证据

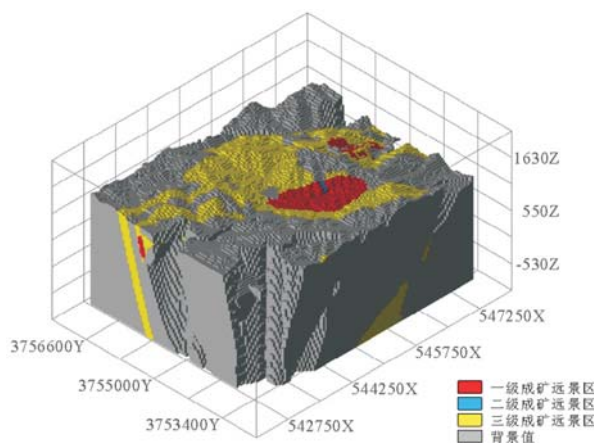


图3 普通证据权法远景区划分结果

Fig. 3 The prospecting targets classification using ordinary weight of evidence

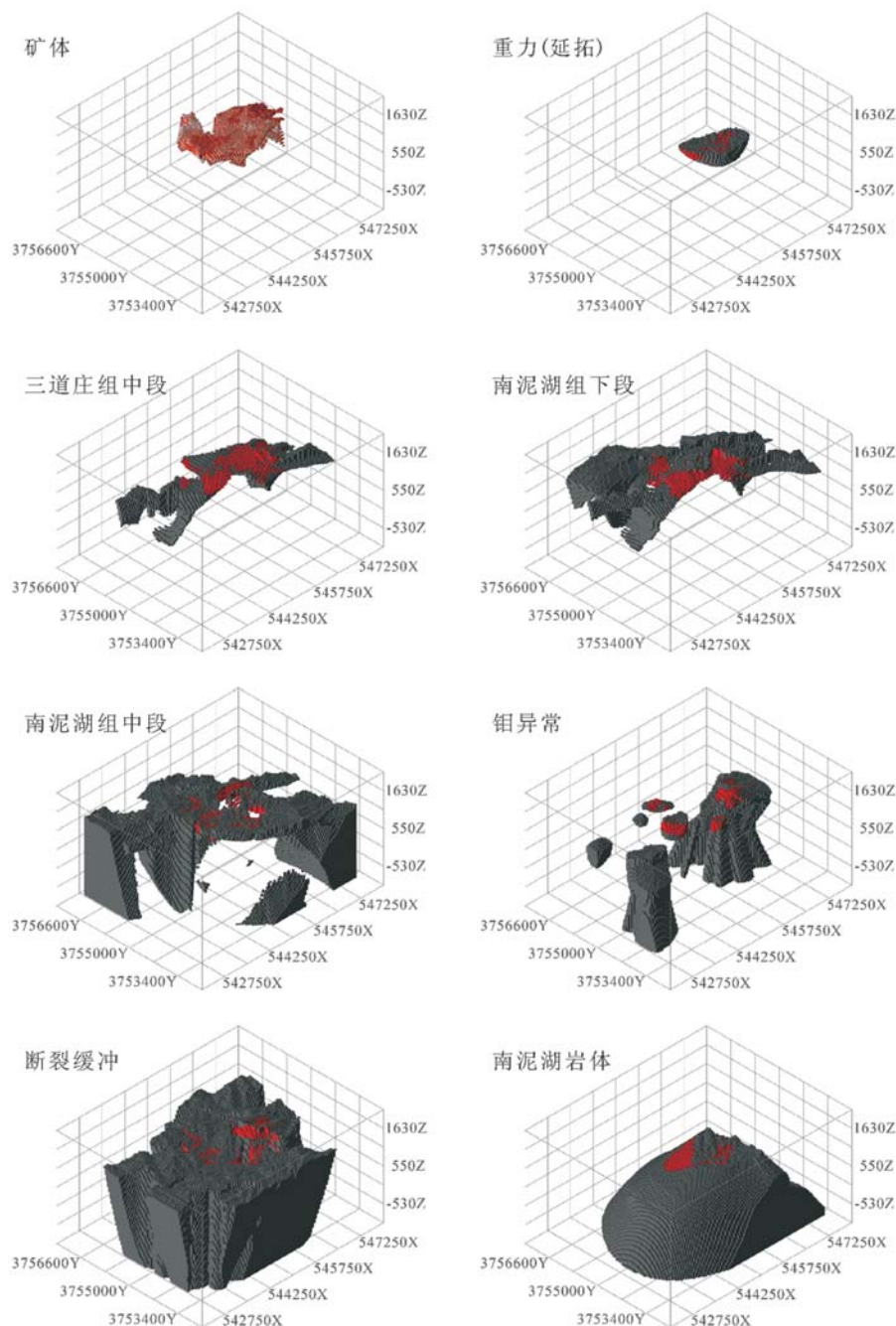


图 4 三维建模找矿因子与矿体模型

Fig. 4 3D anomaly factors models and orebody model in 3D model

权法,分别结合分形方法划分了成矿远景区。所得结果见图5。

由图5可见,由于不同信息集成模型的具体算法不同,导致其所得后验概率的分布也存在差异。基于分形的后验概率划分也得到了不同的结

果。从整体效果来看,效果最好的应该是普通证据权法,逻辑斯蒂回归方法次之。虽然各种方法集成的效果各不相同,但在各模型中,起主要作用的证据图层却完全一致,而且其重要性排布特点也基本一致。



图 5 不同数学建模方法集成的三维模型图

Fig. 5 3D models of different mathematical modeling methods integration

a—信息量模型; b—基于逻辑斯蒂回归的加权证据权模型; c—逻辑斯蒂

回归模型; d—增强证据权模型; e—普通证据权模型

表2中列举了各集成方法中主要证据图层重要性的评价指标。由于加权方式采用基于逻辑斯蒂回归的加权,加权后的正负权重之差与逻辑斯蒂回归系数基本一致,其他模型之间虽然在数值上有所差异,但整体趋势却是相同的,在各个模型中起主要作用的证据图层为表中所列的7个图层。

图6为5种集成方法的分布曲线,由图6可知,一般证据权、增强证据权及逻辑斯蒂回归在后验概率分布上较为相似。同时,普通证据权法也是所有方法中数据变化最为平滑的模型,而信息量法和加权证据权则呈现出较为明显的阶梯性。但各集成方法间也存在共性,即背景值与远景区之间的临界点基本位于一条直线上。

为了准确划分找矿有利靶区,本文通过3种尺度单元网格的划分探讨其对预测结果的影响。研究区的范围是5000m×4000m×2700m。图7分别使用了3种不同的尺度,数据量分别为12.5万、100万和800万个块体单元。预测所使用的块体

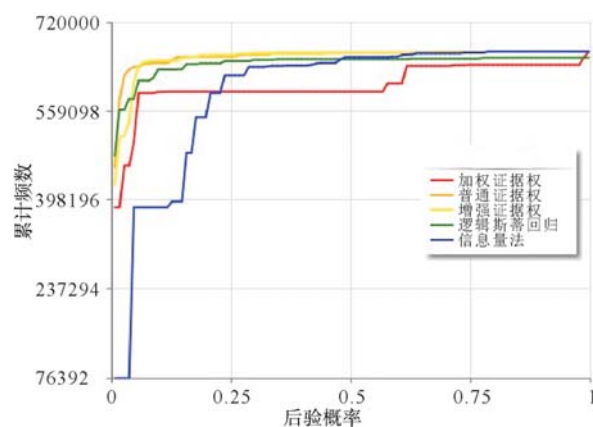


图6 五种集成结果分析与对比

Fig. 6 Integrated results of analysis and contrast of 5 methods

模型由三维地质建模中所建立的实体模型离散化而来,离散化的过程中进行了重采样,这一过程不可避免地造成了信息损失。因此,网格划分越细,

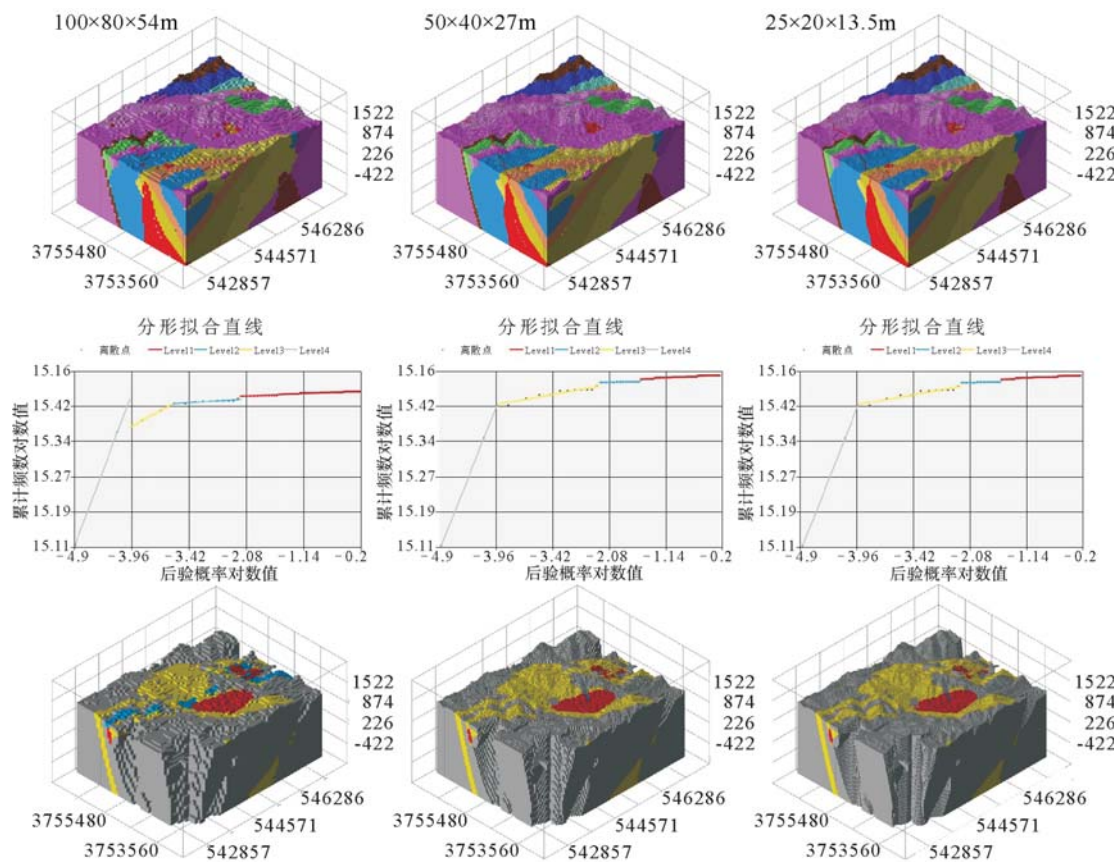


图7 不同尺度分类结果

Fig. 7 Different scales classification results

表 2 数学集成方法评价系数对比
Table 2 The assessment coefficient contrast table of
mathematical modeling methods integration

变量	信息量法 信息量	逻辑斯蒂 回归系数	一般证据权 相关系数	加权证据权 相关系数	增强证据权 相关系数
重力(延拓)	3.124431	4.309109	3.788295	4.309108	3.778847
三川组					
上段	2.318654	3.495257	2.716832	3.495257	2.511988
南泥湖组					
下段	1.283917	3.481217	1.512787	3.481217	1.741093
南泥湖组					
中段	0.843502	1.899268	1.185924	1.899267	1.398437
Mo 异常	0.689600	1.010195	0.830503	1.010195	0.457861
断裂缓冲	0.265533	0.641151	0.761915	0.641151	0.138382
岩体缓冲	0.033925	0.491478	0.064050	0.491478	-0.882692

块体模型就越贴近实体模型,但同时也会带来一定的数据冗余,增加计算的负担。在一定范围内,随着块体的不断细化,预算结果越来越精确,随后超过某一尺度后,块体尺度的增加则不会再提升预测精度。本文研究表明,虽然各种尺度下后验概率的分布情况基本相似,但也存在微弱差异。第一种尺度下的后验概率分布情况与后面 2 种尺度的后验概率分布区别较大,在该尺度下,二级成矿远景区范围有所扩大,而三级成矿远景区范围则被压缩。后 2 种尺度下,后验概率的分布则近乎一致。这种尺度的变化与建模过程中所用的数据尺度和采用的建模方法(如插值半径)密切相关。经对比分析,本文中所用最小块体单元为 50m×40m×27m,该尺度能够较好地反映实体模型的形态特征,保证模型计算的精度,同时数据冗余较小,计算效率较高。

6 结 论

(1)采用自主研发的三维空间分析软件 Geo-Cube 与商业软件 Micromine、surpac 结合的方式,实现了栾川矿区尺度的多元地学信息分析,包括地质(断层、地层、岩体)、地球物理(重磁反演)、地球化学等异常信息的三维提取与集成,拓展了商业软件在三维空间分析功能。

(2)普通证据权、增强证据权及逻辑斯蒂回归在

后验概率分布上较为相似,二者的定量预测结果趋于一致,即背景值与远景区之间的临界点基本位于一条直线上。在本次研究的计算过程中,普通证据权法是所有方法中数据变化最为平滑的模型,信息量法和加权证据权则呈现出较为明显的阶梯性。因此,普通证据权法是一种稳健的三维空间分析方法,适用于三维多元信息的集成分析。

(3)根据研究区地层、构造与岩体三维模型和矿体三维模型之间的几何关联结合三维证据权值的计算,认为研究区以燕山期侵入岩体和栾川群地层接触带为主体的夕卡岩(热液)成矿是南泥湖钼矿区的主要特征,夕卡岩是该区有利的赋矿地质体,虽然 NW 向构造与燕山期岩体组合控矿特征显著,但岩体具有多期性,赋矿特征多样,小岩株成矿,岩墙、岩基矿化或不成矿。

(4)虽然通过分形方法划分远景区的范围有所不同,但本文计算获取的 5 种三维定量预测靶区结果总体上趋于一致,即南泥湖已知矿区的西北、东南和北部地段是找矿的有利的地段,矿区矿体主要走向为北西向,北东向地段为富矿区。

致谢:感谢 James Cook University 的 John Caranza 博士在三维定量化解释方面提供的帮助。

参考文献

[1]Bonham-Carter G. Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS[M]. Oxford: Pergamon Press, 1994: 12-24.
[2]Houlding S W. 3D geoscience modeling computer techniques for geological characterization[J]. Berlin: Springer-Verlag, 1994: 1-6.
[3]吴立新, 史文中, Gold C. 3D GIS 与 3D GMS 中的空间构模技术[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(1): 5-11.
[4]王功文, 郭远生, 杜杨松, 等. 基于 GIS 的云南普朗斑岩铜矿床三维成矿预测[J]. 矿床地质, 2008, 26(6): 651-658.
[5]Fallara F, Legault M, Rabeau O. 3-D integrated geological modeling in the Abitibi Subprovince (Québec, Canada): Techniques and applications[J]. Exploration and Mining Geology, 2006, 15(1/2): 27-43.
[6]Wang G, Zhang S, Yan C, et al. Mineral potential targeting and resource assessment based on 3D geological modeling in Luanchuan region, China[J]. Computers & Geosciences, 2011, 37(12): 1976-1988.
[7]Sprague K, de Kemp E, Wong W, et al. Spatial targeting using que-

- ries in a 3-D GIS environment with application to mineral exploration[J]. *Computers & Geosciences*, 2006, 32(3): 396–418.
- [8]叶会寿, 毛景文, 李永峰, 等. 豫西南泥湖矿田钨钼及铅锌银矿床地质特征及其成矿机理探讨[J]. *现代地质*, 2006, 20(1): 165–174.
- [9]燕长海, 刘国印. 豫西南铅锌多金属矿控矿条件及找矿方向[J]. *地质通报*, 2004, 23(11): 1143–1148.
- [10]曲家楠, 王功文, 郝应龙, 等. 基于三维建模的指示克里格估算与分形方法的对比研究[J]. *西北地质*, 2013, 45(B12): 198–201.
- [11]肖巧艳, 王功文, 张寿庭, 等. 豫西南杜关—云阳钨多金属成矿预测研究[J]. *现代地质*, 2011, 25(1): 94–100.
- [12]王功文, 张寿庭, 燕长海, 等. 基于地质与重磁数据集成的栾川钨多金属矿区三维地质建模[J]. *地球科学*, 2011, 36(2): 360–366.
- [13]Vysokostrovskaya E B, Zelenetsky D S. On quantitative evaluation of the prospects of a territory when searching for ore mineral deposits[J]. *Sov. Geol.*, 1968, (8): 58–71.
- [14]赵鹏大. 定量地学方法及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 23.
- [15]Agterberg F P, Bonham-Carter G F, Cheng Q, et al. Weights of evidence modeling and weighted logistic regression for mineral potential mapping[J]. *Computers in geology*, 1993, 25: 13–32.
- [16]Spiegelhalter D J, Knill-Jones R P. Statistical and knowledge-based approaches to clinical decision-support systems, with an application in gastroenterology[J]. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, 1984: 35–77.
- [17]Agterberg F P. Computer programs for mineral exploration[J]. 1989, 245(4913): 76–81.
- [18]Agterberg F P, Bonham-Carter G F, Cheng Q, et al. Weights of evidence modeling and weighted logistic regression for mineral potential mapping[J]. *Computers in geology*, 1993, 25: 13–32.
- [19]Journel A G. Combining knowledge from diverse sources: An alternative to traditional data independence hypotheses[J]. *Mathematical geology*, 2002, 34(5): 573–596.
- [20]Bonham-Carter G F, Agterberg F P, Wright D F. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia[J]. *Short Courses in Geology*, 1989, 10: 15–23.
- [21]Bonham-Carter G F, Agterberg F P. Weights of evidence: a new approach to mapping mineral potential, statistical applications in the earth sciences[J]. *Canada: Geological Survey of Canada*, 1990: 231–245.
- [22]张道军, 成秋明, 左仁广, 等. 加权证据权模型的应用与对比[J]. *地球科学*, 2012, 37(6): 1160–1168.
- [23]张生元, 成秋明, 张素萍, 等. 加权证据权模型和逐步证据权模型及其在个旧锡铜矿产资源预测中的应用[J]. *地球科学*, 2009, 34(2): 281–286.
- [24]成秋明. 增强证据权 (BoostWofE) 新方法在矿产资源定量评价中的应用[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2012, 42(6): 1976–1984.
- [25]Journel A G. Combining knowledge from diverse sources: An alternative to traditional data independence hypotheses[J]. *Mathematical geology*, 2002, 34(5): 573–596.
- [26]Krishnan S, Boucher A, Journel A G. Evaluating information redundancy through the tau model[C]//*Geostatistics Banff 2004*. Springer Netherlands, 2005: 1037–1046.
- [27]Agterberg F. A modified weights-of-evidence method for regional mineral resource estimation[J]. *Natural Resources Research*, 2011, 20(2): 95–101.
- [28]Deng M. A conditional dependence adjusted weights of evidence model[J]. *Natural resources research*, 2009, 18(4): 249–258.
- [29]梁钰琦, 王功文, 朱彦彦, 等. 分形方法在遥感蚀变信息提取中的应用研究[J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(4): 508–511.