

成矿环境空间结构的模糊建模

张振飞^{1,2}, 夏庆霖^{1,2}

1. 国土资源部信息工程与资源定量评价重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学数学地质遥感地质研究所, 湖北武汉 430074

摘要: 为了提高矿产预测的精度和可靠性, 必须分析和利用与矿床有关的空间结构信息. 提出了一种用模糊集建立成矿环境空间结构模型的方法. 成矿环境空间结构是地质变量在矿床周围的分布, 可用变量与空间点之间的模糊关系来描述. 同一地区的同类矿床, 其空间结构具有一定相似性, 通过这种相似性的极大化可对结构模型进行优化. 优化的结构模型是一种包含了方向和距离关系的特殊的空间关联规则集, 也是模糊推理矿产预测的推理规则库. 通过模糊推理进行结构相似性的比较, 可对任意点上的找矿有利性进行预测. 以云南东川地区铜矿预测的实例说明了该方法具有良好的应用效果.

关键词: 模糊推理; 空间数据挖掘; 矿产预测; 空间结构.

中图分类号: P628

文章编号: 1000-2383(2005)01-0109-05

收稿日期: 2004-06-23

Modeling the Spatial Patterns of Mineralization Environments Using Fuzzy Sets

ZHANG Zhen-fei^{1,2}, XIA Qing-lin^{1,2}

1. Key Laboratory of Information Engineering and Resources Appraisal, Chinese Ministry of Land and Resources, Wuhan 430074, China

2. Institute of Mathematical Geology and Remote Sensing Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The utilization of spatial structural information is essential for mineral prediction. This paper proposes a method for the fuzzy modeling of spatial patterns of mineralization environments (SPME). SPME is the spatial distribution of geological factors and geophysical, geochemical responses (geo-variables) on/around a deposit, described by fuzzy relations of the geo-variables to spatial points. SPME related to deposits of the same genetic type in a given region are to some extent structurally similar. Based on a set of known deposits in the region, a model of SPME of the region can be built, and by maximizing the structural similarity between those known deposits, the model can be optimized. The model serves as a fuzzy deduction rule base. To evaluate the prospecting potential of any point in the region, a pattern is built on the point and the structural similarity of the pattern to the model is calculated by fuzzy deduction. A case study of copper mineral deposit prediction in the Dongchuan region of Yunnan, China, shows that the method is highly effective.

Key words: fuzzy deduction; spatial data mining; mineral resources prediction; spatial pattern.

矿床产于特定的地质结构之中, 这种结构表现为各种控矿、示矿因素或标志(地质变量)在矿床周围的分布或配置, 我们称其为“成矿环境空间结构”. 在一定区域内, 同类型矿床的成矿环境空间结构具有一定的共性, 查明这种共性正是成矿规律研究的核心内容, 也是提高成矿预测可靠性的基础. 过去数十年中, 对这种结构性的研究在矿床学和矿产勘查领域取得了极大进展, 各类矿床成因模型(Cox and

Singer, 1986)换一个角度看, 都可认为是对这种结构性的描述或解释; 近年来出现的成矿多样性和矿床谱系概念十分强调矿床及其产出环境的空间结构规律性(赵鹏大等, 2001). 以找矿为目的物探和化探强调研究异常与矿化体之间的空间关系(De Geoffroy and Wignall, 1985; Henley and Berger, 1993), 其实也是要查明物化探异常在矿床附近的空间结构性. 在矿产定量预测中, 近年来随着 GIS 和

空间数据挖掘技术应用的逐步深入,提取利用空间结构信息以提高预测可靠性具备了高效的方法手段,而且由于结构信息包含点信息,所以对结构信息的研究将越来越重视。我们曾提出矿产预测中以基本单元的空间组合作为统计分析对象,从而捕捉空间结构信息的思路和一些方法(张振飞等,1999;张振飞,2001)。这些思路和方法提供了一个起点,近年来的发展之一是以动态搜索最优化结构模型取代静态的统计分析建模。这将导致突破矿产定量预测中先划分网格单元的传统套路,将建模预测与空间数据挖掘直接结合,提高其客观性和智能化程度。本文提出一种以模糊推理空间数据挖掘为基础的成矿环境空间结构建模方法,并以云南东川地区铜矿预测为实例说明其应用效果。

1 原理和方法

1.1 成矿环境空间结构

成矿环境空间结构是以矿床为中心的一定范围内多个地质变量的空间分布。若一地质变量趋向于在矿床的特定方向特定距离上取特定值,则认为该变量与矿床的空间关系是稳定的;若一空间点上至少有一个变量稳定,则认为该点对该空间结构是重要的。变量稳定性及空间点的重要性可看作模糊概念。设 $V = \{v\}$ 为地质变量集; $S = \{s\}$ 为一定区域(如一个成矿带)内以矿床为原点、以 $d > 0$ 为半径的子区域内许多点 s 的集合。由于实际上既不可能也没必要研究子区域中所有无穷多个点,而总是选择有限个离散点去逼近子区域,所以令 S 为有限点集,各点 s 在子区域中均匀分布,具代表性,且每个 s 与中心点(矿床位置)之间具有确定的空间关系(距离和方向); R 是 $S \times V$ 上的模糊关系,其隶属函数 $\mu_R(s, v)$ 表示变量 v 在点 s 上的稳定程度。于是 3 个集合 (S, V, R) 可以完整描述一个空间结构。 $\mu_R(s, v)$ 在所有数据为规格化数据情况下定义为:

$$\mu_R(s, v) \begin{cases} 0, & \text{当 } ss(v) \geq 0.2887, \\ 1 - ss(v)/0.2887, & \text{其他。} \end{cases}$$

式中: $ss(v)$ 表示 v 在 s 上的标准差;常数 0.2887 是 $(0, 1)$ 区间均匀分布的变量的标准差。

1.2 空间结构模型优化

一定区域内多个同类型矿床,其成矿环境空间结构必有某些相似性,具有相似性的那些特征是这些结构的本质特征。空间结构建模就是在多个具体

结构基础上找到一个具有代表性的抽象结构。可以用一个“平均结构”作为结构的模型,并通过具体结构样本之间相似性的极大化来优化模型。又因不同地质变量与矿床有不同的成因联系和空间联系,故优化模型应最大限度地体现这些不同的联系。所以,模型优化还应考虑到使不同变量与矿床之间空间关系的差异尽量大。总之,模型优化可表达为:选择 s , 使目标函数 y 极大, y 定义为:

$$y = \max(\mu_R(s, v)) / e(\mu_R(s, v)),$$

$$e(\mu_R(s, v)) = -(1/\ln N) \sum_N \mu_R(s, v) \ln \mu_R(s, v).$$

式中: N 是 R 的元素总数; $e(\mu_R(s, v))$ 是 R 的模糊熵(谭扬波和陈光福,2000),它可反映 R 中元素的变异程度。

1.3 结构相似性的模糊推理

模型建立后,通过结构相似性的比较对研究区内任一点的找矿有利性进行评价。以待评价点为中心划出与模型子区域相同的子区域,在其中选取与模型的“构型”相同的点集,记为 $S_u = \{s_u\}$ 。构型相同是指任一 s_u 对应一个 s , s_u 与待评价子区域中心的空间关系,与 s 和模型中心的空间关系是一样的。在每个 s_u 上,对每个变量 v 在其值域上定义一模糊集合 A ,其隶属函数 $\mu_A(v)$ 表示 v 在 s_u 上与 v 在模型点 s 上取值的相似程度:

$$\mu_A(v) \begin{cases} 1, & \text{当 } ms(v) - ss(v) \leq v \leq ms(v) + ss(v), \\ 1 / \{1 + [v - ms(v)]^2 / [ss(v)]^2\}, & \text{其他。} \end{cases}$$

式中: $ms(v)$ 和 $ss(v)$ 分别表示模型中变量 v 在点 s 上的平均值和标准差。将 s_u 相似于 s 的程度(模糊概念)记为 B 。然后在 A 和 B 之间建立模糊推理(杨纶标和高英仪,2003):

$$\text{IF } v \text{ IS } A \text{ THEN } s_u \text{ IS } B \text{ (规则),}$$

$$v \text{ IS } A' \text{ (事实),}$$

$$s_u \text{ IS } B' \text{ (结论).}$$

其中,推理规则是模糊关系 R ;事实 A' 是 s_u 上 v 属于 A 的程度;结论 B' 是 s_u 相似于 s 的程度。通过关系合成获得结论:

$$B' = A' \cdot R.$$

合成算法采用如下乘法:

$$\mu_B(s_u) = \mu_A(v) \mu_R(s, v).$$

对待评价子区域中每个点用每个变量进行评价,得到 N 个 $\mu_B(s_u)$ 。最后,可以用加权平均方法获得该待评价子区域与模型之间总的结构相似程度 f :

$$f = \sum_N (\mu_B^2(s_u)) / \sum_N (\mu_B(s_u)).$$

2 应用实例

研究区位于云南北部东川、会泽一带,属中元古代昆阳海槽.区内产出东川、汤丹等大中型铜矿床和许多铜矿点,主要受中元古界因民组、鹅头沟组和落雪组细碎屑岩—白云岩地层及近北东向断裂构造控制,统称东川铜矿,属沉积改造型(孙克祥等,1991)(图 1).本文利用区内 1/250 000 地质矿产、物探和化探空间数据库中有关数据,用上述方法进行了铜矿预测.

2.1 数据准备

(1)模型矿床和地质变量.选因民、汤丹等 6 个铜矿床为模型矿床(图 1).选取 19 个地质变量,见表 1.(2)中间数据表.在研究区范围内生成一个高密度(250 m×250 m)网格状分布的点文件.在每个数据点(共 8 320 个)上获取各变量的值,并分别对各变量规格化,得到中间数据表(因数据太多未列出).生成网格数据点和中间数据表是为了避免在空间数据库中实时进行空间查询、计算任意点上多变量的值,以提高速度.数据规格化目的是使不同变量的标准差有可比性.

2.2 建模及预测应用

以每个模型矿床点为中心划出圆形子区域,在子区域中取 9 个点构成 S .点的位置这样确定:将子区域划分为等面积均匀分布的 9 部分,在每部分中心处各取一点,分别记为 s_0, s_1, \dots, s_8 .每个 s_i 点是落入相应部分的网格化数据点的代表.这样所有 9 个点与矿床的相对位置可以由子区域直径 d 和一个旋转角 θ 完全确定,如图 2(图中 $\theta=40^\circ$).通过改

表 1 地质变量

Table 1 Geo-variables

名称	说明
v_1	到任意断层的最近距离
v_2	到最近东西向断层的距离
v_3	到最近南北—北东向断层的距离
v_4	到最近断层交点的距离
v_5	到鹅头沟组地层(Pt_2e)的最近距离
v_6	到因民组地层(Pt_2y)的最近距离
v_7	到落雪组地层(Pt_2l)的最近距离
v_8	0.562 5 km ² 范围内 As 元素平均丰度
v_9	0.562 5 km ² 范围内 As 元素最大梯度
v_{10}	0.562 5 km ² 范围内 Cu 元素平均丰度
v_{11}	0.562 5 km ² 范围内 Cu 元素最大梯度
v_{12}	0.562 5 km ² 范围内布格重力平均值
v_{13}	0.562 5 km ² 范围内布格重力最大梯度
v_{14}	0.562 5 km ² 范围内 Mo 元素平均丰度
v_{15}	0.562 5 km ² 范围内 Mo 元素最大梯度
v_{16}	0.562 5 km ² 范围内平均航磁异常 ΔT
v_{17}	0.562 5 km ² 范围内 ΔT 最大梯度
v_{18}	0.562 5 km ² 范围内 B 元素平均丰度
v_{19}	0.562 5 km ² 范围内 B 元素最大梯度

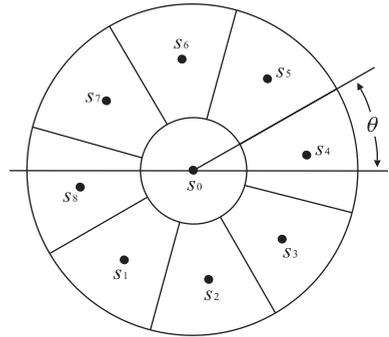


图 2 子区域内点的分布

Fig. 2 Distribution of points in a subregion

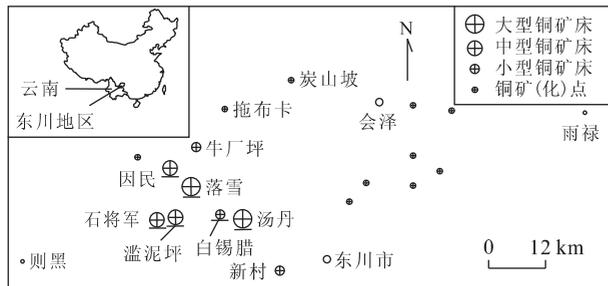


图 1 研究区(东川地区)及其铜矿床(点)分布(据云南地调院 2002 年资料编)

Fig. 1 Location of study area and locations of copper mineral occurrences

研究区范围:东经 $102^\circ 38' 00'' \sim 103^\circ 37' 00''$,北纬 $26^\circ 01' 00'' \sim 26^\circ 37' 00''$.带下划线者为所选的模型矿床

变 d 和 θ 而改变 s_i 的位置,搜索优化模型.经搜索发现当 $d=2.25$ km, $\theta=40^\circ$ 时优化指标达到最大,如图 3.此时各变量在各点上的稳定程度如图 4.然后对每个数据点进行评价,获得找矿有利度图(图 5).

3 结论及讨论

(1)成矿环境空间结构模糊建模可以获得较好的矿床预测效果.比较图 1 和图 5 可见,预测找矿有利度相对较高地段与已知矿化的空间分布十分吻合,同时也反映了区内铜矿化受北东向构造及中元古界因民组、鹅头沟组和落雪组控制的主要成矿规律.

(2)由图 3 可见,模型优化指标随着相对于矿床

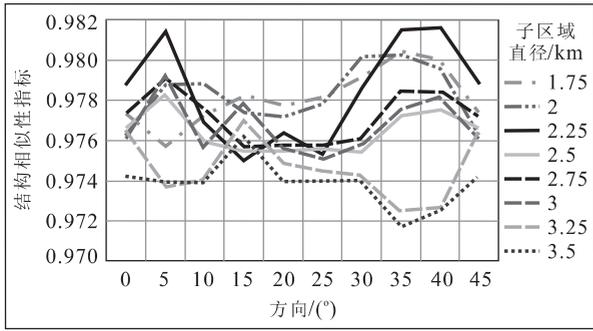


图 3 不同子区域半径和方向上模型优化指标的分布

Fig. 3 Variation of the optimum index with radius and orientation of the subregion

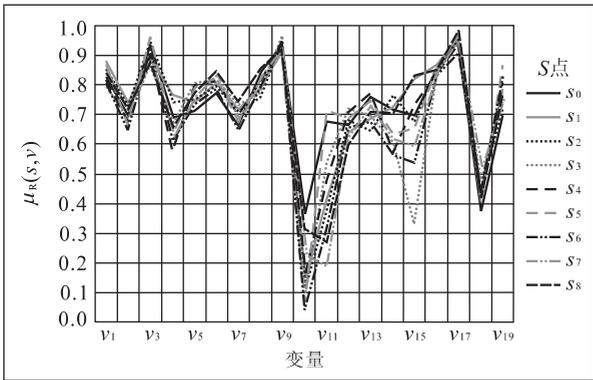


图 4 各变量在空间结构的不同点上的稳定程度

Fig. 4 Stability of variables on points of the spatial pattern

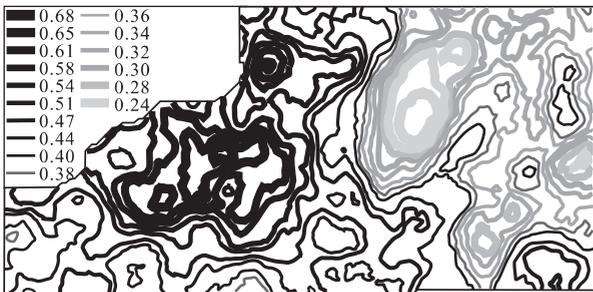


图 5 东川铜矿找矿有利度等值线

Fig. 5 Contour map of prospecting favorability of copper mineral deposits of Dongchuan region

图框位置及比例尺与图 1 一致

的方向和距离而有一定变化趋势. 这说明由多变量空间分布所体现的成矿环境空间结构性是存在且可捕捉的. 这种空间结构性可认为是矿床与勘查标志之间一种考虑到了方向和距离关系的独特的空间关联规则(Koperski and Han, 1995). 这种空间结构的研究可能成为空间数据挖掘矿产预测应用的一个重要方向.

(3)成矿环境空间结构模型能识别出其他定量预测方法难以识别的信息. 最重要的是“结构信息”, 即不同变量在相对于矿床的不同位置上具有不同的权, 这符合地质常识. 有些情况下, 可明显看出变量与矿床之间的空间关系. 如图 4(并参照图 2)显示, 变量 v_{14} (Mo 平均丰度) 在矿床点上及南西侧较稳定; v_{15} (Mo 最大梯度) 在矿床的南西及北东侧较稳定, 而它们在其他部位较不稳定. 这说明矿床倾向于产在高 Mo 异常地段的北东边缘. 这一现象的形成机理尚待研究, 但对地球化学找矿有参考意义. 这种方向性规律在不同地区、不同变量表现不同, 但有一定普遍性. 成矿环境空间结构建模为定量探索这类规律性提供了一种思路和方法.

(4)通过成矿环境空间结构建模, 可能对各种找矿标志的意义作出较客观的评价. 从图 4 可看出 19 种标志在矿床不同部位稳定性的一种排序, 其中 Cu 异常稳定性最差. 虽然一般认为 Cu 异常是寻找铜矿的重要标志, 但本文在东川地区得到相反的结论. 这个问题应从两方面看. 一是本区 Cu 背景值较高, 其标准差较大, 故以本文方法易将它判为不稳定; 另一方面, 实践证明个别元素化探异常指示有矿床的几率很低, 如我国“九五”以前 15 年各类化探异常验证有矿比例约 1.32%(牟绪赞和奚小环, 1996), 因此在东川这样的高 Cu 背景地区进行铜矿床定位, Cu 异常可能确实不重要(但从圈定区域找矿远景区角度, 则当别论).

研究得到云南地调院大力支持, 特致谢!

References

Cox, D. P., Singer, D. A., 1986. Mineral deposit models. *US Geological Survey Bulletin*, 1693:379.

De Geoffroy, J. G., Wignall, T. K., 1985. Designing optimal strategies for mineral exploration. Plenum Press, New York, 1-363.

Henley, R. W., Berger, B. R., 1993. What is an exploration model anyway—An analysis of the cognitive development and use of models in mineral exploration. In: Kirkham, R. V., Sinclair, W. D., Thorpe, R. I., et al., eds., *Mineral deposits modeling*. Special Paper 40, Geological Association of Canada, Ottawa, 41-50.

Koperski, K., Han, J., 1995. Discovery of spatial association rules in geographic information databases. In: Egenhofer, M. J., Herring, J. R., eds., *Advances in spatial databases*, LNCS 951. Springer-Verlag, Heidelberg, 47.

Mu, X. Z., Xi, X. H., 1996. The advances in geochemical exploration of solid ore resources and the achievements gained. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 20 (4): 241-249 (in Chinese with English abstract).

Sun, K. X., Shen, Y. R., Liu, G. Q., et al., 1991. Proterozoic iron and copper deposits in Middle Yunnan, China University of Geosciences Press, Wuhan, 169 (in Chinese).

Tan, Y. B., Chen, G. F., 2000. A Gaussian clustering method based on maximum fuzzy entropy. *Journal of UEST of China*, 29(3): 269-272 (in Chinese with English abstract).

Yang, L. B., Gao, Y. Y., 2003. Fuzzy mathematics, Principle and applications. South China University of Technology Press, Guangzhou, 1-422 (in Chinese).

Zhang, Z. F., 2001. GIS-supported cell cluster methods of mineral resources prediction. Shaanxi Science and Technology Press, Xi'an, 1-140 (in Chinese).

Zhang, Z. F., Hu, G. D., Zeng, Z. R., 1999. Quantitative analogy between spatial geological structures in mineral resources prediction—Cell cluster concept and application. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(6): 661-664 (in Chinese with English abstract).

Zhao, P. D., Chen, J. P., Chen, J. G., 2001. Mineral diversity and mineralization spectrum. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 26(2): 111-117 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

牟绪赞, 奚小环, 1996, 固体矿产地球化学勘查进展与成果. 物探与化探, 20(4): 241-249.

孙克祥, 沈远仁, 刘国庆, 等, 1991. 滇中元古宙铁铜矿床. 武汉: 中国地质大学出版社, 1-169.

谭扬波, 陈光福, 2000. 一种基于最大模糊熵的高斯聚类算法. 电子科技大学学报, 29(3): 269-272.

杨纶标, 高英仪, 2003. 模糊数学原理及应用(第三版). 广州: 华南理工大学出版社, 1-422.

张振飞, 2001. GIS支持的矿产预测单元簇法. 西安: 陕西科学技术出版社, 1-140.

张振飞, 胡光道, 曾章仁, 1999. 矿产预测中空间地质结构的定量类比——单元簇的概念及其应用. 地球科学——中国地质大学学报, 24(6): 661-664.

赵鹏大, 陈建平, 陈建国, 2001. 成矿多样性与成矿谱系. 地球科学——中国地质大学学报, 26(2): 111-117.

《地球科学——中国地质大学学报》
2005 年 第 30 卷 第 2 期 要目预告

喜马拉雅造山带晚新生代构造隆升的裂变径迹证据	刘德民等
川西南震旦系储集层有机包裹体在油气运移研究中的应用	唐俊红等
鹰峰斑斑花岗岩地球化学特征及其构造意义	邢作云等
阳霞凹陷超压成因及与油气成藏关系	石万忠等
云南芦子园铅锌矿床地球化学、流体包裹体及稳定同位素特征	夏庆霖等
前陆盆地二级层序内可容纳空间发育演化及三级层序对比	王家豪等
莺歌海盆地高温超压环境下储层物性影响因素分析	姜涛等
安徽宣城更新世红土正构烷烃分布特征及其古植被意义	梁斌等
敦煌盆地中、下侏罗统含油气系统分析	江平等