

矿床与断层空间关系研究

毕天平¹,胡志勇²,金成洙¹

(1. 东北大学资源与土木工程学院,辽宁 沈阳 110004; 2. 西佛罗里达大学,美国 佛罗里达州 32514)

摘 要:利用空间统计分析方法研究辽宁地区矿床与断层构造之间的空间位置关系。首先利用里普利(Ripley)K 函数和双变量 J 函数验证矿床在空间上存在聚集于断层附近的趋势;其次建立基于泊松过程的条件强度公式来模拟矿床与断层之间的空间关系,并且将该数学公式在统计软件 R 中进行模型拟合;最后利用被拟合的模型公式和可见的断层构造来分析预测各个区域矿床的条件强度值,通过圈定高强度的矿床预测区域来指导找矿工作。

关键词:双变量 J 函数;泊松过程;空间联系;模型拟合

在找矿过程中,总希望通过已知的地质条件来进行矿床预测,例如断层的位置。许多地质学家认为断层附近比其他地方更有可能发现某种类型的矿床,基于这些观念的相关地质模型认为地球的断层(至少在某种地质时间点上的断层)能够为矿床的产生提供有利条件,某种类型的矿床会产生在断层内部或者是断层附近。然而也有人怀疑,甚至反对断层能提供有效的指导,或者认为其能够提供矿床勘探或开采的价值不大^[1]。马歇尔(Marshall)列出此方面的许多争论^[2]。所以从空间统计学的角度来验证同一调查区域内矿床和断层之间的空间联系是一件既有趣,又很有价值的事情,如果能找到矿床在空间上依赖于断层的统计学证据,我们就可以利用二者之间的空间关系,根据容易发现的断层位置来推断和预测难得一见却很宝贵的矿床位置,从而指导找矿工作。

由地质争端的推动下,本文意在寻找中国辽宁地区的矿床和断层之间空间关系的证据。所有的统计测试结果都在统计软件 R 和 GIS 软件 ArcMap 下验证和执行。

1 理论基础

空间点格局数据集就是研究区域内的一系列点。同一个研究区域的空间点集中可能存在共变,共变可能是空间位置点 u 为自变量的空间函数 $Z(u)$,例如海拔高度、土壤 pH 等。共变也可以是另外的线格局,如地质断层等^[3-7]。

1.1 强度

强度(intensity)是单位面积上期望的点数,强度可能是一个常数(点格局为均质),也可能是从一个位置到另一位置不断变化,称为不均质或非齐次。

1.2 交互作用

内部交互作用是在同一点格局内部随机点之间的依赖性。通常在两个彼此紧贴的点之间,我们假设其依赖性最强。在研究交互作用之前,往往先考虑共变对强度的影响。对于存在共变的数据集中,习惯上调查某种类型的点格局强度是否依赖于共变。

1.3 模型公式

点格局 X 在空间位置 u 的条件强度函数为 $\lambda(u, x)$,对于齐次泊松过程(完全的空间随机),其条件强度公式为:

$$\lambda(u, x) = \beta \quad (1)$$

式中 β 表示强度(单位面积上期望的点数),该数值为一个常数。对于非齐次泊松过程,其条件强度依赖于具体点的位置 u ,公式为:

$$\lambda(u, x) = \beta(u) \quad (2)$$

对于施特劳斯(Strauss)过程,其包含点之间的依赖性,条件强度公式为:

$$\lambda(u, x) = \beta \gamma^{t(u, x)} \quad (3)$$

式中 $t(u, x)$ 表示在距离某一位置 u 为 $r(r > 0$ 为交互作用半径)的区域内出现的点的数量, γ 为交互作用参数, $0 \leq \gamma \leq 1$ 。

以上的条件强度函数是一个非常有用的模型公式,从它的函数形式上就能够提供直接的解释点格式的空间分布特征,最简单的形式是为常量的时候,对应

完全的空间随机(complete spatial randomness). 在大多数应用中, 这个情况说明不能建立模型. $\lambda(u, x)=\beta(u)$ 时, 对应非齐次泊松过程. 在此情况下 $\beta(u)$ 的函数形式将揭示依赖性. 条件强度取决于点格局 X , 也取决于空间位置 u . 例如, 在施特劳斯过程中, $\gamma \leq 1$ 对点依赖性的实际反映是: “如果有其他类型的点过程出现在 r 范围内, 那么再发现本类型点的条件概率将大大减少. 特别是当 $\gamma=0$ 时, 如果在 r 范围内发现其他类型的点, 发现本类型点的概率为 $0^{[8]}$ ”.

为了方便模型拟合, 通过总结上述的模型公式, 给出了适用于所有情况的通用条件强度函数公式. 其线性对数形式如下:

$$\lambda(u, x)=\exp(\omega\beta(u)+\psi t(u, x))$$

(4)

式中 ω, ψ 为需要估计的参数, $\beta(u)$ 代表空间共变的影响, $t(u, x)$ 代表交互作用. 如果该模式是一个泊松过程, $t(u, x)$ 部分将缺失.

2 研究区域

研究区域坐落在中国辽宁省, 坐标范围为东经 $119.07^{\circ} \sim 125.51^{\circ}$, 北纬 $38.769^{\circ} \sim 42.841^{\circ}$. 区域内的断层和和矿点分布如图 1 所示. 整个研究数据由 625 个矿床点和 1319 条线状断层组成, 某些地质工作者认为北西向的断层是重要的控矿构造, 特别是对金矿床的控制比较明显. 该数据是从辽宁省矿产资源规划管

理系统的空间数据库中提取获得. 坐标系统采用北京 1954.

3 探索性数据分析

作为探索性分析, 制作了矿床分布的核心平滑密度图(kernel smoothed density map)和距离图(distance map)(图 2). 密度图和等值线图显示, 矿床分布存在强烈的聚集趋势, 在图 2 上清晰可见 2 个强度中心区域. 距离图反映每个像素点与最近的矿床的距离, 其结果也显示在矿床的点格局分布中呈现非齐次的趋势. 在下节中, 将使用里普利 K 函数对矿床空间分布的趋势进行分析, 然后使用双变量 J 函数来统计分析矿床对断层的空间依赖关系. 所有的功能函数基于以下的定义和假设.

W 代表研究区域, W 是已知的、封闭的、并且边界已知的二维空间区域 R^d 的子集. 整个数据由 W 内的点集 X 和线集 Y 组成, X 由一系列的点组成, $X=\{x_1, \cdots, x_n \mid x_i \in W, n>0\}$, 数据集 Y 的几何形状可能是任意的. 在本文中, X 代表矿床点, Y 代表线性断层.

3.1 里普利 K 函数

里普利(Ripley)的 K 函数可以用来总结点格局本身的分布特性. 空间点格局的变化(即聚集和分散), 经常表示存在超越随机因素的一个必然事件的发生^[9-10]. 矿床的里普利 K 函数输出图见图 3. 结果表明矿床有

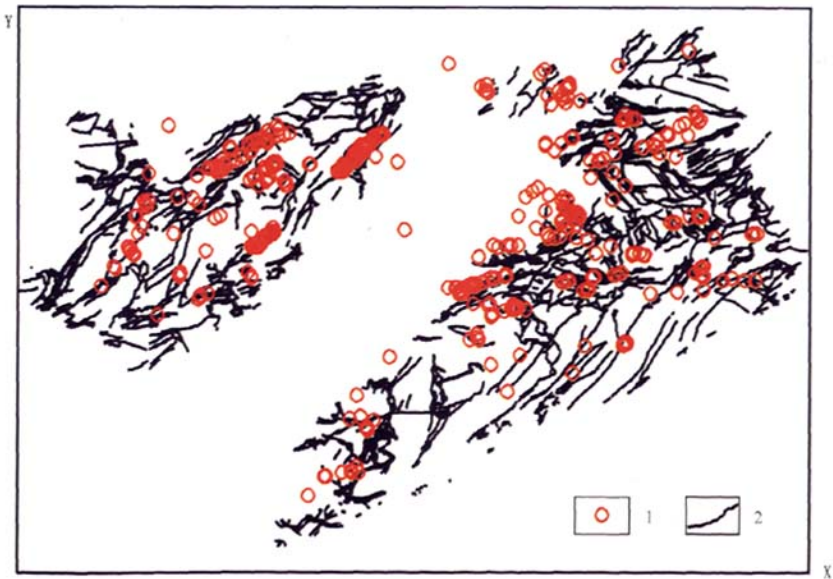


图 1 研究区域的矿床和断层
Fig. 1 Deposits and fractures in the studied area
1—矿床(deposit); 2—断层(fracture)

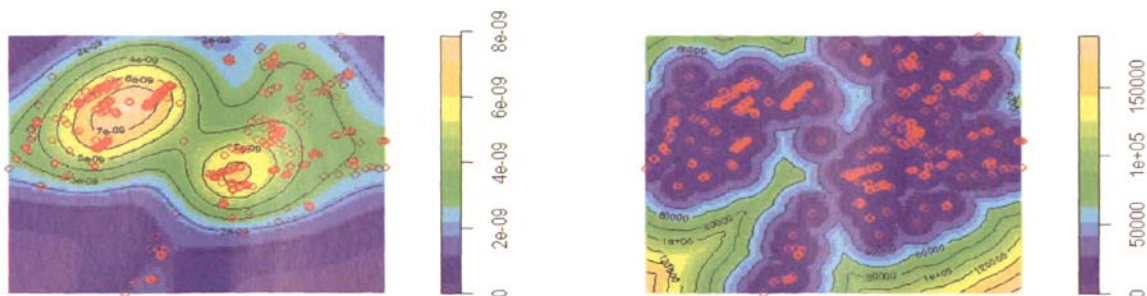


图 2 矿点的密度图(左)和距离图(右)

Fig. 2 Density map (left) and distance map (right) of ore deposits

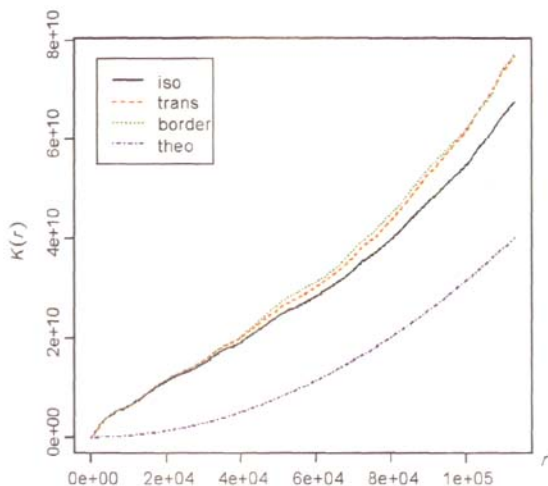


图 3 矿床的里普利 K 函数

Fig. 3 Ripley's K-function for ore deposits

高度聚集的空间特征. 里普利的 K 函数的公式如下:

$$K(r)=\frac{a}{\pi(n-1)}\sum I(d_{ij}\leq r)E_{ij} \quad (5)$$

a 表示研究区域 W 的面积,单位米(m), n 表示矿床点的个数, d_{ij} 表示两点之间的距离,单位米(m), $I(d_{ij}\leq r)$ 表示指示函数,如果距离小于 r ,函数返回值为 1,否则返回 0. E_{ij} 代表空间边界校正权重(取决于边界校正方法的选择).

蓝色的短线(theo)代表理论的泊松曲线,是期望的随机分布,也是罕见的概率事件,理论 K 函数计算公式为: $K(r)=\pi r^2$. 另外的 3 个曲线代表 K 函数在不同的边界校正下的估计值. 边界校正用来减少抽样区域之外不能看见的点造成的偏差. 黑色的实线(iso)代表对等性边界校正估计,红色的虚线(trans)代表转换校正估计,绿色虚线(border)代表边线校正估计. 如果 K 函数的估计曲线位于理论的曲线下方,点格局被认为

为是规范 的分布;如果估计曲线位于理论的泊松曲线之上,正如上图矿床的 K 曲线所示,表示矿床分布在空间上存在聚集特征^[3,5].

3.2 双变量 J 函数

双变量 J 函数适合测试一个点集和另外一种任意数据集之间的空间联系,空间点随机过程之间的交互作用能够由空闲的空间函数 F 和最近的邻居距离分布函数 G ,通过混合这两个函数获得函数 $J=(1-G)/(1-F)$. 对于泊松过程,函数 J 等于 1;函数值小于 1 表示聚集;大于 1 表示匀称性^[3,7].

我们能够通过计算 W 内任意测试点 z_j 到 Y 的最短距离 $d(z_j, Y)$,形成一个经验分布函数来计算 F_Y 的估计值. 边线校正的 F 估计值 $F_Y(r)$ 定义为在距离抽样区域边界线至少 r 个单位长度范围内的点中,满足 $d(z_i, Y)\leq r$ 的点所占的比例,其公式为:

$$\hat{F}_Y(r)=\frac{\sum_j 1\{d(z_j, W^c)\geq r\} 1\{d(z_j, Y)\leq r\}}{\sum_j 1\{d(z_j, W^c)\geq r\}} \quad (6)$$

W^c 表示 W 的补集,1(.)表示指标函数如果条件成立,结果为 1,否则为 0. 此估计值为 F_Y 的无偏估计值,但它并不是一个合理的分布函数^[5].

类似地,我们能够得到 $G_{X,Y}$ 的估计值,通过测量点格局 X 中的点 x_i 到 Y 的最短距离,形成一个经验分布函数,它的边线校正公式为:

$$\hat{G}_{X,Y}(r)=\frac{\sum_i 1\{d(x_i, W^c)\geq r\} 1\{d(x_i, Y)\leq r\}}{\sum_i 1\{d(x_i, W^c)\geq r\}} \quad (7)$$

此公式为 $G_{X,Y}$ 的近似无偏估计值^[5]. 然后可以根据 F_Y 和 $G_{X,Y}$,通过替代公式 $J=(1-G)/(1-F)$ 获得 $J_{X,Y}$ 估计值,当然要采用相同的边界校正方法.

$$\hat{J}_{X,Y}(r)=\frac{1-\hat{G}_{X,Y}(r)}{1-\hat{F}_Y(r)} \tag{8}$$

函数 G_{XY} 、 F_Y 、 J_{XY} 的估计值(X 表示矿点, Y 表示线性断层)见图 4. 该图也展示了相应的 Kaplan-Meier 估计值和 Hanisch-style 估计值^[5], 同时计算了在相同研究区域内 J 函数的包迹线图. 可以明显地看到 J_{XY} 的估计值在 1 以下, 而且当在 1000 m 的范围内, 函数位于包迹线以外, 此结果是矿点聚集在断层四周的空间统计学强有力证据.

4 基于泊松过程的数学模型

4.1 模型拟合

如上文提到的, 矿床点格局呈现非齐次的泊松过程的趋势, 并且聚集在断层的周围. 根据泊松过程(非齐次), 矿床点格局在 W 区域内, 点任意一点 $z, z \in W$ 的条件分布强度函数为:

$$\lambda(z)=\exp(\alpha+\beta d_w(z,Y)) \tag{9}$$

$d_w(z,Y)$ 为任意点 z 到 Y 的最短距离. 当 $\beta=0$, 该点过程为齐次的, 独立于 Y ; 当 $\beta<0$, 点过程趋向聚集^[16].

α, β 是待估计的参数. 使用 R 软件, 拟合该模型, 被拟合后的模型为一个如下强度函数公式的泊松过程.

$$\lambda(z)=\exp(-18.837-0.0001285d_w(z,Y)) \tag{10}$$

4.2 不同走向上的断层测试

正如上文提到的, 矿床更可能位于断层附近的假设是基于某些地质模型. 这些地质模型还暗示, 在一定地质时间点, 断层能创造形成某种特定类型的矿床的有利条件. 如果矿床的形成与特定的地质事件有关, 源于特定事件的空间联系应该存在于矿床与断层之间. 此外, 与独特地质事件相关联的断层趋向于相同的走向. 以正东方向为 0 度, 按照逆时针方向测定线性构造的方向角, 将研究区域内的断层以 90° 为界分成 2 个不同的部分(见图 5), 走向在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 的断层占 64%, $[90^\circ, 180^\circ]$ 的断层占 36%. 然后分别测试矿床与 2 类方向上的断层之间的空间关系. 重复应用以上的分析步骤和公式, 得到如下拟合后的模型公式:

$$\lambda_1(z)=\exp(-18.7-0.000127d_w(z,Y)) \tag{11}$$

$$\lambda_2(z)=\exp(-18.8-0.00009d_w(z,Y))$$

λ_1 为应用矿床与 $[0^\circ, 90^\circ]$ 的断层的拟合结果, λ_2

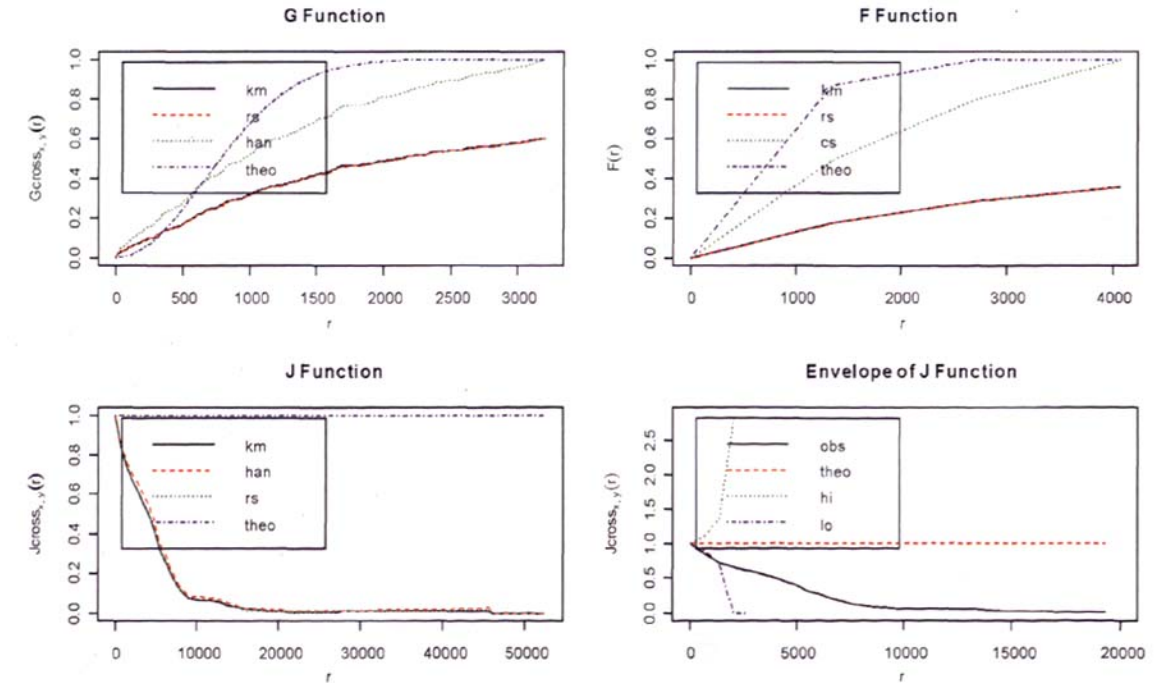


图 4 双变量 J 函数的结果

Fig. 4 Results of Bivariate J -function

km—Kaplan-Meier 估计值 (Kaplan-Meier estimate); han—Hanisch-style 估计值 (Hanisch-style estimate); rs—border corrected 估计值 (border corrected estimate); theo—理论泊松分布值 (theoretical Poisson); obs—观察值 (observed value); hi—上限 (upper point-wise envelope); lo—下限 (lower point-wise envelope)

为应用矿床与 $[90^{\circ},180^{\circ}]$ 的断层的拟合结果,因为在公式(11)中,2个公式只有微小的不同,该结果显示在2种不同走向上的断层没有明显的影响区别。

4.3 预测

利用拟合的矿床点格局分布强度公式(10),矿床的强度图可以被预测.图6展示了基于现有的断层构造的矿床条件强度图(左),将预测强度图上叠加现有观测的矿床点形成叠加显示图(右).在每像素上的矿床预测点强度在 $0\sim6\times10^{-9}$ (个/ m^2)之间,黄色区域应该是探矿的黄金区域,预测的区域与实际观测的矿点分布上基本吻合.叠加图形显示此拟合模型很好地模拟了辽宁省矿床的点格局.

5 结论与讨论

本次研究的矿点数据由多种类型的矿床组成,如金矿、铜矿、铁矿等等.如果断层创造有利条件形成某种类型的矿床,那么某一种类型的矿床应该仅仅与1~2个方向上的断层有关.因此进一步的研究应该集中在某种具体类型的矿床上.同时应该注意到本研究使

用的模型公式并没有揭示不同走向的断层与矿床有不同的空间联系.

不仅仅是地质学家相信矿床与断层有着重要的联系,我们也可以从空间统计学中找到二者之间空间位置关系的证据.同时此分析过程与方法不仅仅可以使用在研究矿床与断层构造的空间联系,而且适用于任意一种点过程和其他形式的随机过程之间.基于GIS的空间统计分析方法可能成为一种强有力的矿床预测方法.

参考文献:

[1]Berman M. Testing for spatial association between a point process and another stochastic process[J]. Applied Statistics, 1986, 35(1): 54—62.
[2]Marshall B. The lineament-ore association [J]. Econ Geol, 1979, 74: 942—946.
[3]Baddeley A, Turner R. Modeling spatial point patterns in R [M]. New York: Springer, 2006: 3—50.
[4]Baddeley A. Analyzing spatial point patterns in R[J]. Workshop Notes, 2008, 1—199.
[5]Baddeley A, Turner R. Spatstat: An R package for analyzing spatial point

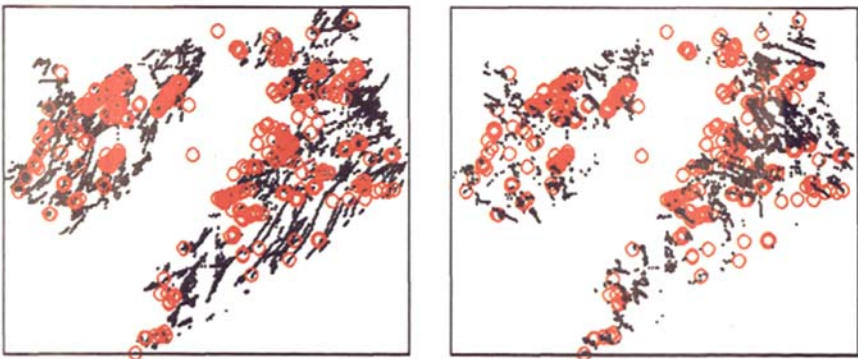


图5 两个不同方向上的断层构造图
Fig. 5 Deposits with fractures in two directions
左(left)— $[0^{\circ},90^{\circ}]$;右(right)— $[90^{\circ},180^{\circ}]$

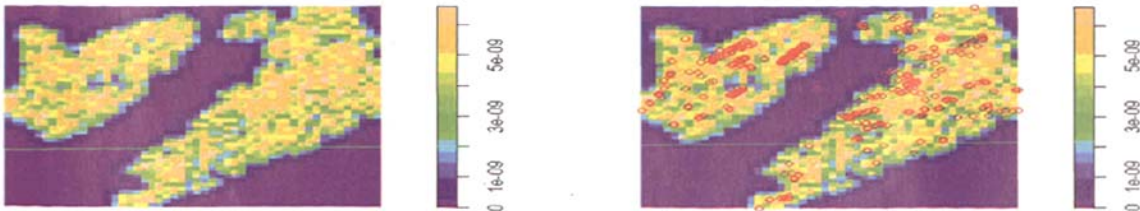


图6 模型预测
Fig. 6 Model prediction
左(left)—预测的矿床强度图(predicted intensity of deposit occurrence);右(right)—预测的强度图上叠加观察值(predicted intensity overlaid with observed values)

- patterns[J]. *Journal of Statistical Software*, 2005, 12(6): 1—42.
- [6] Baddeley A, Turner R. Practical maximum likelihood for spatial point patterns (with discussion) [J]. *Australian and New Zealand Journal of Statistics*, 2000, 42(3): 283—322.
- [7] Baddeley A. Estimating the J function without edge correction[J]. *Statistica Neerlandica*, 2000, 54(3): 315—328.
- [8] Foxall R, Baddeley A. Nonparametric measures of association between a spatial point process and a random set, with geological applications[J]. *Applied Statistics*, 2002, 51(2): 165—182.
- [9] Ripley B D. Modeling spatial patterns (with discussion)[J]. *Journal of the Royal Statistical Society, series B*, 1977, 39: 172—212.
- [10] Stoyan D, Stoyan H. Non-homogeneous Gibbs process models for forestry – A case study[J]. *Biometrical Journal*, 1998, 40: 521—531.

RESEARCH ON THE SPATIAL ASSOCIATION BETWEEN ORE DEPOSITS AND FRACTURES

BI Tian-ping¹, HU Zhi-yong², JIN Cheng-zhu

(1. Department of Geology Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. University of West Florida, FL 32514, USA)

Abstract: This study uses spatial statistical methods to investigate spatial relationship between ore deposits and fractures in Liaoning Province of China. Firstly, Ripley's K -function and bivariate J function find that the ore deposits have a clustering trend around the fractures. Secondly, a conditional intensity formula for ore deposits based on Poisson process is used to model the ore deposits' spatial dependence on the fractures, and the formula of model is fitted in statistics software called R. Finally, the fitted model is used to predict high intensity areas of invisible ore deposits based on locations of visible fractures, which could be used to guide ore deposit exploration.

Key words: bivariate J function; Poisson process; spatial relationship; model fitting

作者简介: 毕天平(1979—), 男, 东北大学博士研究生, 主要从事资源与环境信息系统研究, 通信地址 东北大学地质工程研究所, 邮政编码 110004, E-mail//btp23956710@hotmail.com

(上接第 172 页 /continued from Page 172)

APPLICATION OF REMOTE SENSING AND GEOCHEMICAL EXPLORING INFORMATION IN THE PROSPECTING IN NORTHWEST SICHUAN

LIU Gui-ge^{1,2}, WANG En-de¹, CHEN Yong-gan², CHANG Chun-jiao², CONG Run-xiang²,
ZHANG Hui-yu², CHAO Yin-yin²

(1. Institute of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. Institute of Gold Geology, CAPG, Langfang 065000, Hebei Province, China)

Abstract: Northwest Sichuan is one of the significant regions for primary gold deposits in China, especially for the fine disseminated type of gold deposits. The distribution of middle, large and super-large gold deposits, such as Shuajingsi Lianhecun, Gala and Jinmuda, indicates a great potential for gold mineralization in this area. Based on the regional metallogenic law and ore-forming conditions, using remote sensing technology, the regional structural framework in NW, E-W and near S-N directions is established. The abstraction of alteration information is optimized. A regional remote sensing exploration model is built. With integrated information of remote sensing, geology and geochemical exploration, the target areas are forecasted by GIS.

Key words: Northwest Sichuan; Rangtang metallogenic belt; fine disseminated type; remote sensing; exploration model

作者简介: 刘桂阁(1971—), 男, 山东省阳谷县人, 硕士, 高级工程师, 2003年毕业于吉林大学, 现为东北大学博士研究生, 主要从事贵金属地质方面的研究工作, 通信地址 河北廊坊武警黄金地质研究所, 邮政编码 065000.