

CC 西区多金属资源评价的协同区域化理论和方法

杜德文^{1,2}, 孟宪伟^{1,2}, 石学法^{1,2}, 刘焱光^{1,2}

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061)

摘要: 详细介绍矿产资源评价的协同区域化理论和协同克里格方法, 同时结合大洋 CC 西区锰结核资源评价工作, 探讨其在大洋矿产资源评价中的应用. 在 CC 西区的锰结核矿石中铜、钴、镍是三种相关而经济价值又不同的金属, 同时矿石的分布水深也是制约开采成本的重要因素. 利用协同克里格方法建立资源评价模型, 估计上述区域化变量在空间中的有利组合分布样式来圈定更加有潜力的矿区位置以及估计资源量, 达到资源定位预测和定量评价的目的. 这种方法对锰结核资源评价同样有效.

关键词: 协同克里格方法; 锰结核; 资源评价

中图分类号: P763.1 文献标识码: A 文章编号: 0253-4193(2005)02-0098-08

1 引言

20 世纪 60 年代 Matheron G 在 Krige D G 的估计矿山资源量的经验公式基础上提出区域化理论并创立地质统计学^[1]. 该理论和方法为空间数据统计分析奠定了全新的基础, 一经提出便获得广泛应用, 在陆地矿产资源评价方面尤其成功^[2]. 国内张富元^[3]将地质统计学方法应用于海洋锰结核资源量估计方面取得了不错的效果.

目前对矿产资源评价多应用单参量的地质统计学方法, 即每次计算只涉及一种空间参量, 例如在估计矿产丰度分布时不考虑与之相关的品位特征, 同样估计品位时也不考虑丰度的影响. 实际上区域化变量不但表现出空间自相关性, 也表现出空间互相关性. 如果将许多相关的参量弃之不用, 则将带来信息的损失. 协同区域化理论和协同克里格方法为我们利用多种相关信息来估计序参量提供了方法.

协同克里格方法由 Matheron G 于 1970 年提出, 尔后由 Myers 用矩阵形式使其公式化^[4,5]. 该方

法的特点是利用密切相关的几种参量来联合估计序参量. 这种做法的优点是当序参量的信息不够多时可用相关参量来弥补. 该方法特别适合海底矿产资源量的估计, 因为海底信息得之不易, 而信息量又不足. 下面结合 CC 西区锰结核资源评价工作, 着重介绍矿产资源评价的协同区域化理论和协同克里格方法, 讨论利用铜、钴、镍等相关参量协同估计资源量的方法. 相信这种方法会在今后海底资源评价中获得广泛应用.

2 矿产资源评价的协同区域化理论

2.1 地质系统中多变量间的协同与竞争

成矿的实质是某种元素的浓集程度达到了工业可利用的水平. 在多变量成矿系统中一种元素的迁移和富集必然同时伴随着其他元素的迁移和富集, 它们彼此之间相互竞争, 最终导致一种元素——序参量占优势, 支配着其他元素的迁移和富集, 这种元素称为主元素, 而与其具有相同地球化学性质(相同衰减常数)的其他元素与其伴生, 成为伴生元素; 其

收稿日期: 2003-05-26; 修订日期: 2003-08-22.

基金项目: “十五”大洋课题资助项目(DY105-05-01-02).

作者简介: 杜德文(1966—), 男, 安徽省寿县人, 研究员, 博士, 博士生导师, 从事地球探测及信息技术和海洋地质研究. E-mail: dwdu@Public.qi.sd.cn

他具有不同衰减常数的元素在空间上按地球科学性质的差异依次排列, 形成空间分带. 当成矿条件发生改变时, 成矿系统的序参量也发生改变, 使矿种或矿床类型发生改变, 造成不同矿种和不同类型的矿床在空间上有规律的分布, 这就是矿化系列. 在多金属结核成矿系统中, 如果就单个结核而言把水深、地形等因素视为不变的, 那么每个结核个体都是成矿子系统, 各种成矿元素锰、铁、铜、钴和镍的化学振荡是多金属结核个体生长、发育的主要机制, 但是个体之间并非彼此孤立存在. 在统一的成矿系统中化学扩散把诸多个体联系起来, 某一结核的生长和发育必然制约着其他结核的生长和发育, 造成了成矿元素在不同的结核个体之间空间相关, 形成多金属结核丰度和品位在空间上有规律的分布.

协同论解释了成矿系统有序结构的微观成因机制, 但是对于成矿预测来说, 更多的是关心多变量之间的宏观有序结构, 即变量之间关系的定量表征及分布规律, 那么又如何表征变量之间的空间关系呢?

有幸的是, 我们发现协同论中多变量协同、竞争的自组织过程与宏观上的变量空间自相关和互相关之间存在内在联系, 表现在自组织过程中的涨落扰动范围即协同长度表征了不稳定性附近所展现的长程空间(或时间)相关, 而变差函数(或交叉变差函数)的变程也反映了地球化学变量在该范围内的空间相关; 协同长度相同的变量在变差函数上具有相同的变程. 因此, 自组织理论中的“协同长度”和随机场理论中的“变程”就空间相关的共性而言彼此相对应, 这样我们就可以用区域化和协同区域化理论和方法来刻画地球化学变量间的相互关系和矿产的空间分布规律.

2.2 地质系统中的协同区域化

在平稳的地质系统中由于各变量之间存在的协同竞争导致它们在空间上或时间上存在自相关, 因此它们都是区域化变量. 区域化变量是一种随机函数, 它们同时反映了地质变量的空间结构性和随机性, 区域化变量的这些性质都可以从变差函数中判读出来, 例如变差函数的变程反映区域化变量的影响范围; 变差函数可以反映区域化变量在小尺度范围内的空间连续性; 不同方向上的变差函数可以反映区域化变量的各向异性; 变差函数的多重套合性又可以反映区域化变量的叠加性等. 由此可见, 变差函数是研究区域化变量的性质和随机场结构的基本工具.

在多变量地质系统中多变量协同、竞争的结果会导致协同区域化, 也就是说, 一种区域化现象常常可以用几个相关的变量来表示, 如金的富集成矿可能与砷、锑等元素的富集密切相关, 而这些变量都是同一空间域中定义的区域化变量, 它们之间既有统计相关, 又有空间相关关系, 即在金的富集成矿作用中金元素是个序参量, 它与其他元素之间相互协同、竞争的结果使其富集成矿, 而其他元素与其伴生. 我们称这些变量为协同区域化变量.

2.3 多金属结核资源分布的协同区域化

尽管多金属结核个体在海底的空间分布并不连续, 但是由于多金属结核个体的形成是成矿元素铜、钴、镍等浓度扩散和温度涨落机制控制下的化学振荡的结果, 而铜、钴、镍等成矿元素源于水-沉积物界面处的饱和介质. 正是饱和介质把铜、钴、镍等成矿元素在空间上联系起来, 因此从多金属结核的品位来看, 不仅在多金属结核个体中它们是时间协同区域化变量, 而且在整个多金属结核分布区它们也可能是空间协同区域化变量. 由这些元素组成的多金属结核个体在空间上的分布又受制于水深和地形等因素, 因此其分布并非完全随机, 在某一空间尺度内多金属结核丰度与水深、地形等又共同组成了协同区域化变量^[6]. 成矿预测的协同区域化理论要求矿产资源预测和资源评价的方法应发生根本的转变, 即多元统计学方法应该被多元地质统计学方法取代.

3 协同克立格方法

协同克立格方法是多元地质统计学方法之一. 无论是点协同克立格还是块段协同克立格都是普通克立格的自然扩展. 以下公式中大写字母代表矩阵.

3.1 点协同克立格

假定协同克立格方程由源于 m 个平稳随机函数的一组 n 个样品组成:

$$\{Z_j(X_i), j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n\}, \quad (1)$$

式中, X_i 代表第 i 个空间样品位置. 在空间 X_0 位置处 m 个随机函数值的协同克立格估计量是 $n \times m$ 个数值的线性组合:

$$Z^*(X_0) = \sum_{i=1}^n \Lambda_i Z(X_i), \quad (2)$$

式中, $Z = (Z_1, \dots, Z_m)^T$; $Z^* = (Z_1^*, \dots, Z_m^*)$; $\Lambda_i = [\Lambda_{ik}^{(j)}]_{m \times m}$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 代表将要确定的权系数矩阵. 协同克立格方程可以在无偏条件下使克立格方差最小来获得, 即在 $E[Z^*(X_0) - Z(X_0)] = 0$ 条件

下使

$$\sigma^2 = E \left\{ [Z^*(X_0) - Z(X_0)]^T \times [Z^*(X_0) - Z(X_0)] \right\} \quad (3)$$

最小或者说在 $\sum_i \Lambda_i = I$ 条件下使

$$\sigma^2 = \text{Tr} \left[\sum_i \sum_j \Lambda_i^T \bar{C}_{ij} - 2 \sum_i \Lambda_i^T \bar{C}_{i0} + \bar{C}_{00} \right] \quad (4)$$

最小, 其中 Tr 表示矩阵的迹; $\bar{C}_{ij} = E[Z(X_i), Z'(X_j)]$, 是样品-样品协方差矩阵; $\bar{C}_{i0} = E[Z(X_i), Z'(X_0)]$, 代表样品-估计点协方差矩阵; $\bar{C}_{00} = E[Z(X_0), Z'(X_0)]$, 是估计点-估计点协方差矩阵. 在无偏条件下使式(4)最小, 形成了下列方程组:

$$\begin{cases} \bar{C}\Lambda + \bar{U}\Delta = \bar{C}_0 \\ \bar{U}^T \Lambda = I \end{cases}, \quad (5)$$

式中, Δ 是拉格朗日乘数矩阵; $\bar{C} = \bar{C}_{ij}$, 是由 $n \times n$ 个子块组成的 $nm \times nm$ 矩阵, 并且

$$\Lambda = \begin{Bmatrix} \Lambda_1 \\ \vdots \\ \Lambda_n \end{Bmatrix}, \quad \bar{U} = \begin{Bmatrix} I \\ \vdots \\ I \end{Bmatrix}, \quad \bar{C}_0 = \begin{Bmatrix} \bar{C}_{10} \\ \vdots \\ \bar{C}_{n0} \end{Bmatrix},$$

$$C = \begin{Bmatrix} \bar{C} & \bar{U} \\ \bar{U}^T & \theta \end{Bmatrix}, \quad \theta = \begin{Bmatrix} \Lambda \\ \Delta \end{Bmatrix}, \quad C_0 = \begin{Bmatrix} \bar{C}_{10} \\ \vdots \\ I \end{Bmatrix},$$

这样克立格方程组可以写成

$$C\theta = C_0. \quad (6)$$

利用条件 $\sum_i \Lambda_i = I$, 式(4)变成

$$\sigma^2 = \text{Tr}[\bar{C}_{00} - \text{Tr}(\Delta) - \text{Tr}(\sum_i \Lambda_i^T \bar{C}_{i0})]. \quad (7)$$

假定区域化变量满足本征假设, 式(6)可以用变差函数和交叉变差函数形式表示:

$$\Gamma\theta = \Gamma_0 \quad (8)$$

式中, Γ 和 Γ_0 代表变差函数和交叉变差函数矩阵; $\bar{\Gamma}_a = [\gamma_{jk}(h_{ij})]_{m \times m}$, 称为样品-样品变差函数矩阵, $\gamma_{jk}(h_{ij})$ 代表变量对 (j, k) 在 $h_{ij} = X_i - X_j$ 处的交叉变差函数. 这样估计方差便可以写成变差函数形式:

$$\sigma^2 = \text{Tr}(\Delta) + \text{Tr}(\sum_i \Lambda_i^T \bar{\Gamma}_{i0}). \quad (9)$$

方程(6)和(8)可以用高斯消去法来求解^[7,8].

3.2 块段协同克立格方法

在矿山实际工作中人们更关心的是具有某一几何形状的块段品位或丰度平均值:

$$\bar{Z}^* = \frac{1}{V} \int_v Z^*(X) dX, \quad (10)$$

式中, v 代表中心位于 X_0 处的块段的面积或体积.

块段协同克立格方程组在形式上与点协同克立格完全一致, 所不同的是式(8)中的点-样品变差函数矩阵用样品-块段变差函数代替:

$$\bar{\Gamma}_{i0} = \frac{1}{v} \int_v \bar{\Gamma}_{i0}(h) dh \quad (11)$$

式中, $h = X_i - X_0$, X_0 是块段 v 的中心点, i 是块段 v 中的一个点. 实际上样品-块段变差函数矩阵可以近似地表示成几个点-样品变差函数矩阵的平均值:

$$\bar{\Gamma}_{i0} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \bar{\Gamma}_{i0}^{(m)}, \quad (12)$$

式中, n 代表块段 v 中均匀分布的离散点的数目. 同理, 式(9)表示的估计方差相应地变成了块段估计方差^[4].

3.3 交叉变差函数估计^[7-9]

在实际应用协同克立格方法进行估计时, 主要的是使变量对交叉变差函数拟合. 在满足二阶平稳假设条件下, 两个区域化随机变量 Z_j 和 Z_k 交叉变差函数的经典定义是

$$\gamma_{jk}(h) = 0.5 E \{ [Z_i(X_i) - Z_j(X_i)] \times [Z_k(X_i) - Z_k(X_i)] \}, \quad (13)$$

式中, $h = X_i - X_l$. 为了拟合交叉变差函数, 人们经常使用 Myers 于 1991 年建议的方法: 对每一对变量求和形成一个新变量, 计算这个新变量的变差函数并进行拟合, 然后计算

$$\gamma_{jk}^*(h) = \gamma_{jj}(h) + \gamma_{kk}(h) + 2\gamma_{jk}(h), \quad (14)$$

式中, $h = X_i - X_j$; $\gamma_{jk}^*(h)$ 表示新变量的理论变差函数. 这样通过式(14)便可拟合交叉变差函数:

$$\gamma_{jk}^*(h) = 0.5 [\gamma_{jk}^*(h) - \gamma_{jj}(h) - \gamma_{kk}(h)], \quad (15)$$

但是对交叉变差函数来说, 必需满足柯西不等式才能使协同克立格方程组有惟一解, 即

$$|\gamma_{jk}(h)| \leq [\gamma_{jj}(h) - \gamma_{kk}(h)]^{1/2}. \quad (16)$$

4 协同克立格方法在太平洋 CC 西区多金属结核资源评价中的应用

4.1 应用协同克立格方法进行资源评价的步骤

与普通克立格方法相比, 协同克立格方法显然相对复杂些, 因此在应用协同克立格方法解决实际问题时, 需要进行一系列附属性的工作. 根据国外应用协同克立格方法进行资源评价的实例研究, 进行协同克立格方法成功估计的关键步骤有地质估计域的描述与界定、非平稳性识别、数据的筛选和截尾处理、变量的分类、变量的重新标度、变差函数拟合和

结果的验证(图 1)

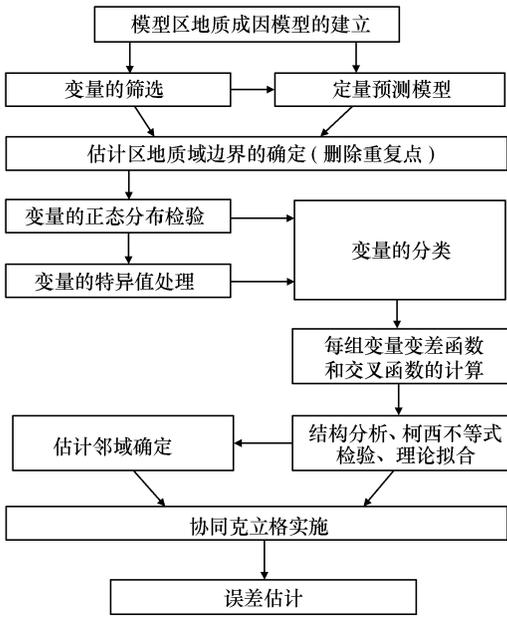


图 1 应用协同克里格方法进行资源评价的步骤

4.1.1 地质域的定义

应用协同克里格方法进行资源评价的最大缺点是它容易使估计值过于平滑。对于品位而言,这种平滑效应往往使所估计的矿石品位在高品位地段低于实际品位,而在低品位地段又高于实际品位,从而使得在边界品位较低时对吨位估计过高,并歪曲了吨位-品位之间的关系。为了抑制这种负效应,一般要确定空间地质域。地质域是代表矿体的空间实体。一个理想的地质域中是不含或少含无矿化物质。地质域的边界通常在数据信息和地质条件信息的基础上确定。数据信息对确定边界的临界值十分有用,而地质条件信息(如断裂)则有助于验证和进一步厘定边界,特别是对于数据信息较少的区块,确定地质域边界主要应用地质条件信息。

尽管在确定地质域边界时总是以地质条件信息为基础,但是数据集因其包含最直接和最具体的信息,在确定边界时更为重要。在地质域中每一子域内应有足够的样品,以便能合理地计算或拟合实验变差函数,但是绝不能把这里用于资源评价的地质域与由边界品位确定的矿体相混淆。地质域不仅应包括具有经济价值的资源,而且含有潜在资源和低程度矿化的物质。这一点是非常重要的,因为我们所计算的变差函数代表了矿体、矿化物质的连续空间结构。

4.1.2 非平稳性和随机性

我们通常在应用协同克里格方法进行资源估计时都没有考虑非平稳性对变差函数有效性的影响。由于我们计算的实验变差函数是一阶差平方的平均值,并不是平方差,因此如果非平稳存在,则实验变差函数是有偏的。理论上合理的计算实验变差函数的方法是直接应用泛协同克里格算法,该算法注意了非平稳漂移,但它并没有解决变差函数的理论拟合问题。许多研究者指出,确定漂移项实际上具有主观人为性,因而利用泛协同克里格算法并不现实。另一种消除非平稳影响的途径是用最小二乘法拟合漂移趋势,然后计算剩余的实验变差函数。尽管理论上提供了上述合理的方法,但在实际中发现,只要距离较近,非平稳性对实验变差函数有效性的影响并不大;只要内插的邻域较小,有无漂移对协同克里格估值的差别非常小。因此,多数进行克里格估值时都没有考虑漂移,但是对于某些变量只有通过计算出实验变差函数后才发现它不是区域化变量,而完全是随机变量。对于这类变量任何协同克里格估值都是不合理的。

4.1.3 数据截尾处理

在进行多元素统计时常常发现有些元素表现为正态或对数正态分布,而另一些元素的分布却不符合正态(或对数)分布,其变异系数往往大于2,它们的共同特征是在众多的数据中只有少数的和个别高品位样品在金属含量中占有较大的比例,在这种情况下需要采用合适的截尾方法来限制高品位数据的影响。

在矿山工业中最简单的截尾方法是以均值和方差为基础:如果某一品位值大于均值加以3倍的方差,那么这个品位值被截断,用均值加3倍方差代替。另一种较直观的方法是从累积概率率曲线图中识别那些脱离母体众数分布的离群点。值得注意的是在原始数据中往往含有重复或距离接近的样品点。根据前人的经验,对这类样品点必须从数据集中删除,否则将会给协同克里格方程组求解带来困难。

4.1.4 变量的分类

在多变量中至少有一个次变量与所要估计的主变量相关才能使用协同克里格方法。因此,对各变量进行初始空间相关性检验对于简化工作量而不致于无谓的浪费时间是非常必要的,但是确定变量之间的空间相关性并不是相当容易的事。一个简单的检验方法就是计算某确定步长内变量之间的简单相关

系数,特别是当步长 $h=0$ 时就相当于计算统计相关系数.这种方法似乎显得粗糙,但便于应用,并常常收到满意的结果.在简单相关分析的基础上,多变量被分成几个元素组合,在每个组合内变量相关程度较高.可以用聚类分析方法把变量分组.

4 1 5 变量的重新标度

与普通的变差函数不同,交叉变差函数的计算需要对两个变量求和.如果两个变量代表的地质现象属于不同类型,或者两个变量的数值单位差别较大,那么由这两个变量之和组成的变量的变差函数就会继承这两个变量中数值较大的那个变量的变差函数特征.因此,必需在一相关变量组合中通过对每一变量乘以合适的因子,以确保每一变量组中的各变量具有大致相同的平均值.例如,设 Z_1 和 Z_2 分别代表主变量和次变量, \bar{Z}_1 和 \bar{Z}_2 是它们的平均值,如果把第二个变量乘以因子 $f = \bar{Z}_1/\bar{Z}_2$,便确保了 Z_1 和 Z_2 两变量的均值相等.

4 1 6 变叉变差函数的检验

前以述及,交叉变差函数必需满足式(16)的要求,因此所计算的交叉变差函数必需经过检验. Kirsch 和 Pawlowsky 于 1985 年提出一种数值方法来检查交叉变差函数:

$$(\sqrt{Y_{ij}} - \sqrt{Y_{lk}})^2 \leq Y_{jk} \leq (\sqrt{Y_{ij}} + \sqrt{Y_{lk}}), \quad (17)$$

亦即如果变量的变差函数满足上面的关系式,便能确保交叉变差函数满足柯西不等式,否则就违背了柯西准则,这时就要及时调整对应的简单变差函数的拟合值.

4 1 7 检验估算结果

为了证实协同克立格方法估算值的可信性,对结果应根据估计误差和协同克立格方差来检验,但是目前还没有某种应用估计误差和协同克立格方差检验协同克立格方法估值有效性的方法,惟一可行的方法是用交叉验证思路:通过把协同克立格方法的估值结果与用普通克立格方法的估值结果进行比较来评估协同克立格方法的估值结果.这种比较主要指两种克立格方法的估值精度比较,即比较估值与真值之差的大小.这种比较有两种方式:一种是总体统计特征比较,主要指均值、标准偏差、绝对平均误差等;另一种是单个样品的误差比较.

4 2 协同克立格方法在开辟区西区的实施

根据上述的协同克立格方法的实施步骤,在太平洋 CC 区的西区对多金属结核的丰度、铜和钴及镍品位实施块段协同克立格估计.

4 2 1 太平洋开辟区(CC区)西区多金属结核分布域

用协同克立格方法估计矿产资源要求研究区内样品分布相对均匀,但由于多次在西区进行取样,使得多金属结核取样站位重复点或距离相当近的点较多,为了有效地利用协同克立格方法,必要删除这类重复点和近距离点.为此我们以 0.04° 为半径进行搜寻,将圆心出现两个点以上的样品点当作或近似当作重复点,将重复点的平均值做为该圆心点的值.删除重复点后,西区采样站位剩 440 个.

4 2 2 丰度、品位的正态分布检验

与经典的多元统计分析一样,地质统计学中任何形式的协同克立格估值方法都要求初始数据符合正态或对数正态分布,但是实际上对于任何矿化地质体或地质域来说,因某种参数的特异值存在,其统计分布形式都难以符合正态或对数分布.因此,在利用多金属结核丰度、铜、钴和镍品位进行协同克立格方法估值之前,必须对原始数据进行正态分布检验.图 2 是西区多金属结核丰度、品位分布直方图.从它可以看出,西区的多金属结核丰度、铜、钴和镍品位都近似服从于正态分布,因此无需进行正态变换.

4 2 3 变量的分类

利用聚类分析对西区多金属结核丰度、铜、钴和镍品位进行了分类(见图 3).从图 3 中可以看出,西区多金属结核丰度、铜、钴和镍品位 4 个参数明显被分为 2 组:第一组为铜和镍,第二组为丰度和钴.因此,在假定这 4 个参数都是区域化多变量的前提下,在 2 个组内都适于用协同克立格方法进行估值:第一组为铜和镍相互估计,第二组为丰度和钴相互估计.

4 2 4 变量的重新标度

从变量分组情况看,在西区结核丰度和钴品位、铜和镍品位可以相互利用协同克立格方法进行块估计,但每对变量之间的单位或数值存在较大差异,因此需要对各变量对进行重新标度,即乘以某一因子,使标度后的每对变量的平均值近于相等.对于铜-镍品位变量对,镍品位乘以 0.75,对于丰度-钴品位变量对,钴品位乘以 36.15.

4 2 5 变差函数和交叉变差函数的计算和理论拟合

按照实验变差函数的计算公式和实验交叉变差函数的计算公式分别计算出铜-铜、丰度-丰度、镍-镍、钴-钴、铜-镍、丰度-钴变量对的 4 个方向(0° , 45° , 90° 和 135°) 的实验变差函数分别如图 4 和 5,从中可以看出各变量对 4 个方向的变差函数具有各向同性的特点,因此可以用平均实验变差函数来表示(见图 4).

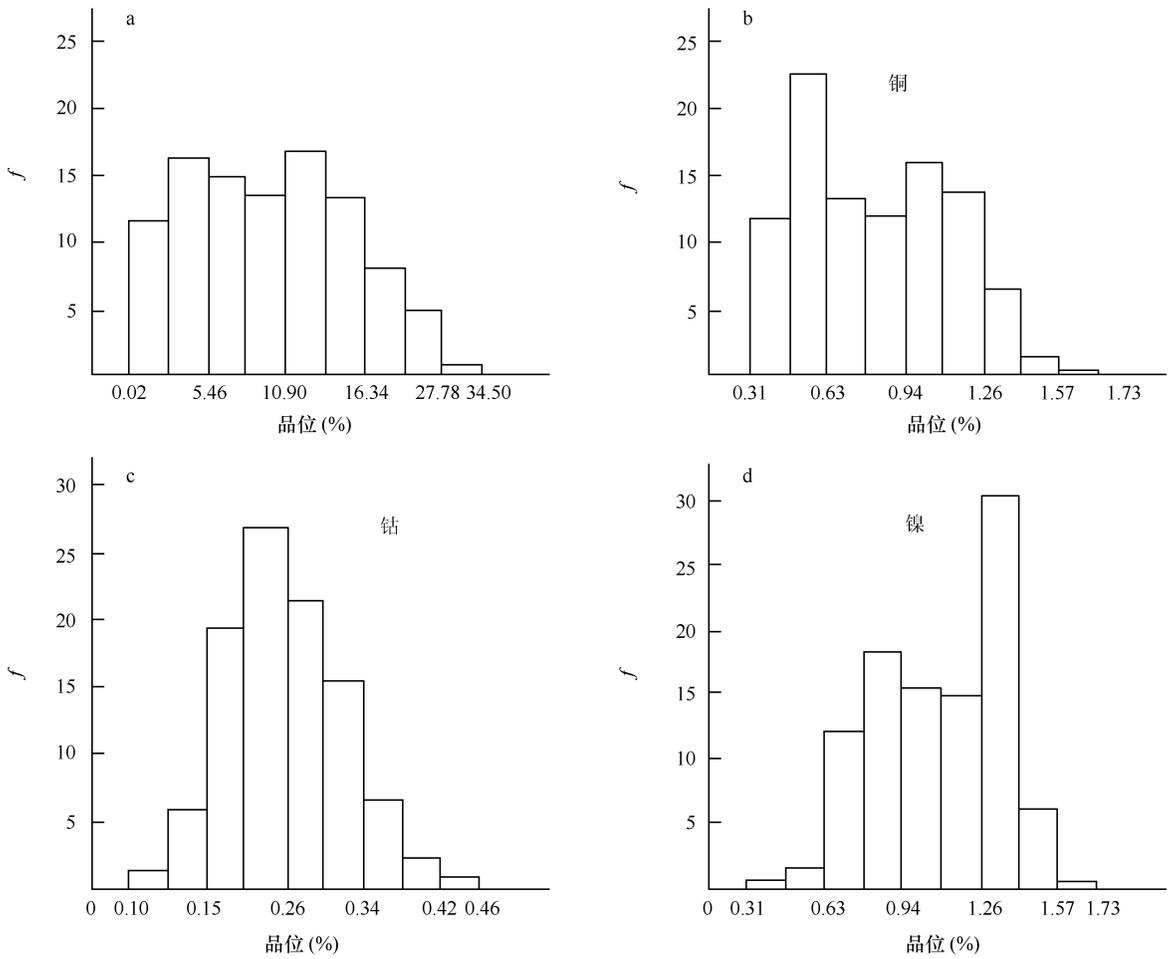


图2 西区多金属原始结核丰度、品位统计直方图(图中 f 为频数)

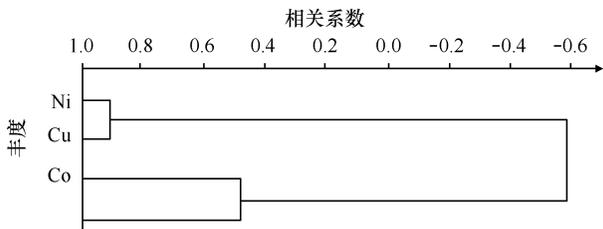


图3 西区多金属结核丰度、品位聚类谱系图

作出了稳定的平均实验变差函数后,就要考虑对它们拟合一个最后的理论变差函数,称为变差函数的最优拟合.拟合实验变差函数的理论模型较多,根据本研究区多金属结核丰度、铜、钴和镍品位平均实验变差函数的实际情况,这里只讨论用球状模型拟合实验变差函数.

传统的球状模型拟合用的是加权多项式回归方法,该方法尽管比较成熟,但对数据点的选择常常具有人为性,特别是对具有多级套合结构的变差函数的

拟合不仅方法本身复杂,而且对数据点分区更具有人为性.本次研究中用一种简单、直观的拟合方法——多标度分形谱方法来实现变差函数的理论拟合.根据实验变差函数的理论拟合,研究区多金属结核各参数的平均实验变差函数和平均交叉实验变差函数都属于具有单一结构的球状模型,因此只需从图中读出变程 a ,块金常数 C_0 和基台值 C (表1).

表1 西区多金属结核各参数变差函数理论拟合结果

变量对	$A/(\circ)$	C_0	C	球状模型
abs-abs	0 17	4 79	28.8	$\gamma(r) = 4 79 - 28.8 sph(0 17, r)$
铜-铜	0 29	0 048	0.089	$\gamma(r) = 0 048 + 0.089 sph(0 29, r)$
铜-铜	0 16	0 0013	0 0032	$\gamma(r) = 0 0013 + 0 0032 sph(0 16, r)$
镍-镍	0 29	0 030	0.065	$\gamma(r) = 0 030 + 0.065 sph(0 29, r)$
abs-铜	0 16	3 16	17.4	$\gamma(r) = 3 16 + 17.4 sph(0 16, r)$

注: abs 为结核丰度; sph 为球状模型函数

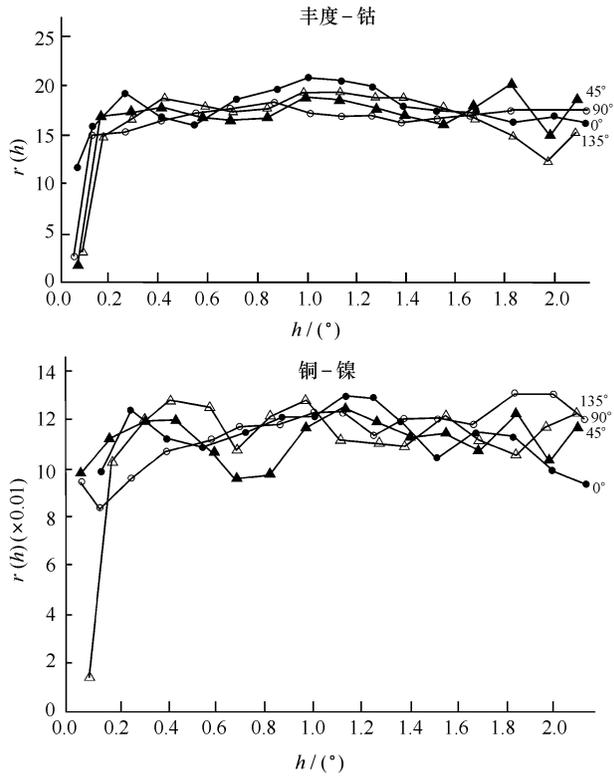


图4 西区多金属结核丰度与钴、铜与镍的交叉实验变差函数

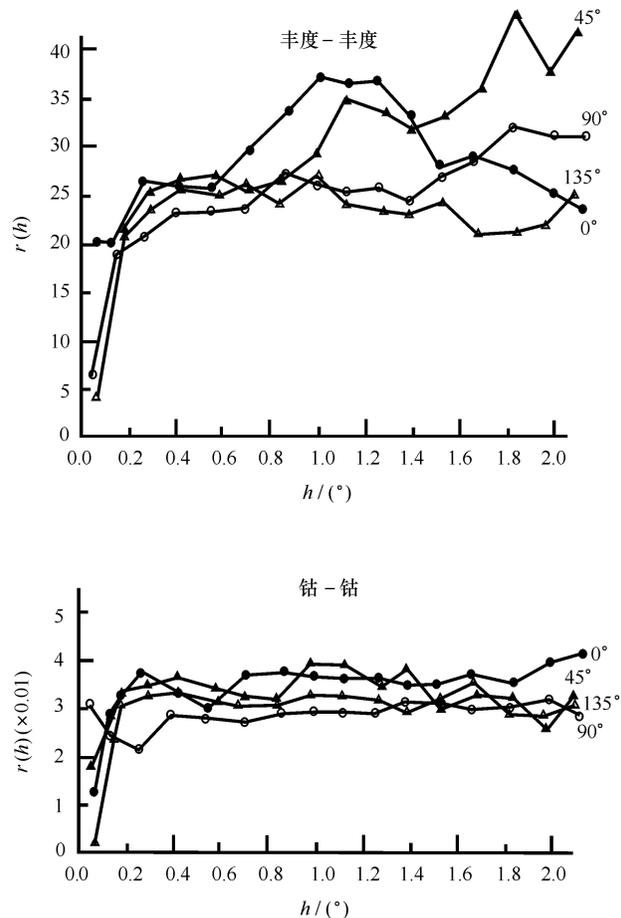


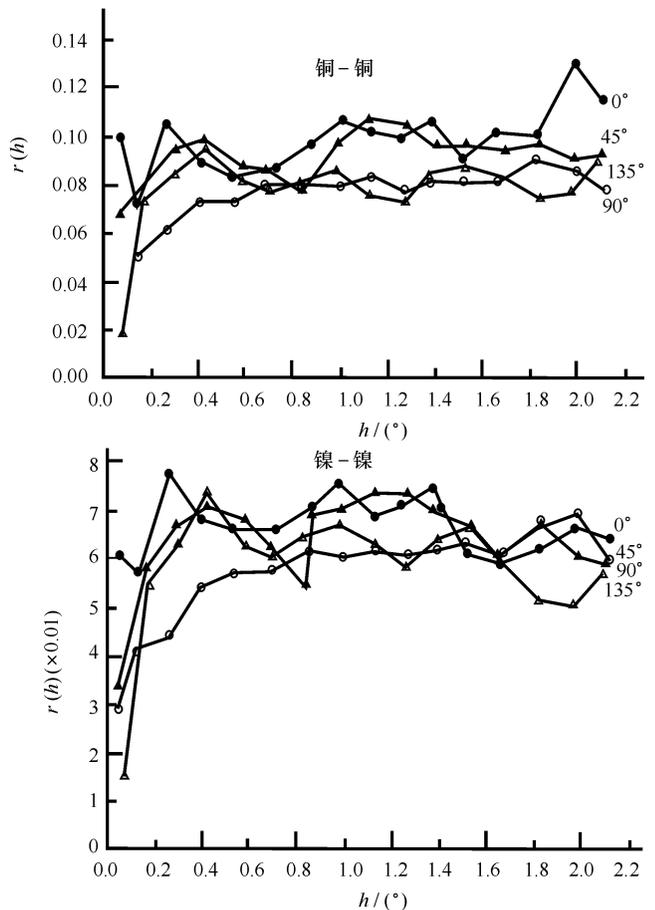
图5 西区多金属结核丰度、品位4个方向的实验变差函数

4.2.6 西区多金属结核丰度、品位的块段协同克立格估计

根据西区多金属结核丰度、品位变差函数的结构特征(各向同性, 变程范围为 0.16~0.30), 在 x , y 方向, 这里按接近 A 值的 0.25° 间隔把研究区分割, 共得到 192 个块段, 其中有 64 个块段为空白块段, 因此对 129 个块段进行了协同克立格估计, 估计结果见图 6. 从多金属结核丰度、品位块段分布来看, 结核丰度的较大值相对集中, 主要分布于西区的西部, 介于 $9^\circ \sim 10.25^\circ \text{N}$ 和 $153.25^\circ \sim 155^\circ \text{E}$, 而铜、钴和镍的品位分布相当分散. 因此, 如果利用铜、钴和镍品位圈定勘探靶区, 很难确定较理想的连续区域, 而利用块段协同克立格估计锰结核丰度来确定勘探靶区比较容易.

5 结论

(1) 利用协同区域化理论进行海底资源评价的前提是: 被评价的序参量与其他变量具有显著相关性(例如深海的富钴结壳丰度与水深、坡度的密切相关); 其他变量的获取成本比序参量获取低得多, 而



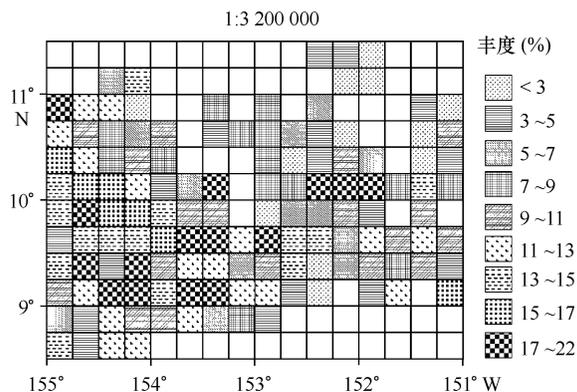


图6 太平洋CC西区多金属结合丰度的协同克里格估计分布

序参量数量不足以进行资源评价(例如多波束全覆盖式地形测量获取的水深、坡度信息多而便宜,而锰结核只能在某些站位上获取,费用昂贵);把丰富的其他变量信息和足够数量的序参量信息相结合,才能进行资源量的有效估计。

(2) 协同区域化理论的有效方法是协同克里格方法,它是国际海底管理局认可的资源评价方法,而且易于实施。

参考文献:

- [1] DAVIS J. Statistics and Data Analysis in Geology[M]. New York: John Wiley & Sons INC, 1973. 381—390.
- [2] JOURNAL A G. 矿冶地质统计学[M]. 侯景儒, 黄竞先译. 北京: 地质出版社, 1982. 10—50.
- [3] 张富元. 克里格法在大洋多金属结核资源量计算和资源评价中应用[J]. 海洋学报, 1995, 17(4): 94—100.
- [4] JOURNAL A G. Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons [M]. Washington D C: America Union Press, 1989. 80.
- [5] ANDRE G, JOURNAL G. Geostatistical Software Library [M]. New York: Oxford University Press, 1992. 200.
- [6] 张德玉, 陈穗田. 东太平洋海盆中/西部多金属结核主要锰矿物区域变化规律的研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1998. 121.
- [7] MARCOTTE. D. Co-Kriging with MATLAB[J]. Computers and Geosciences, 1991, 17(9): 1 265—1 280.
- [8] JEFFREY D. H. Universal co-Kriging under intrinsic co-regionalization [J]. Mathematical Geology, 1994, 26(2): 205—225.
- [9] WACKERNAGEL H. Description of a computer program for analyzing multivariate spatially distributed data [J]. Computers and Geosciences, 1989, 15(4): 593—598.

Co-Kriging model of manganese nucleus mineral resource evolution in the CC region of the Pacific Ocean

DU De-wen^{1,2}, MENG Xian-wei^{1,2}, SHI Xue-fa^{1,2}, LIU Yan-guang^{1,2}

(1. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 2. Key Laboratory of Marine Sedimentology & Environmental Geology of State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Abstract: The co-Kriging method and its application to mineral resource evaluation of manganese nucleus in the CC region of the Pacific Ocean are introduced in detail. Cu, Co and Ni are three metal elements which depend on each other and are introduced in detail have different economical values. Depth of seabed is another importance characteristics related to exploitation cost. Using co-Kriging model evaluates manganese nucleus mineral resource amount, estimates space distribution pattern of those characteristics and their combination, and delimits potential and amount of manganese nucleus mineral resource, predicts and evaluates mineral resource with Co, Cu and Ni abundance. This method has the same availability with manganese crust

Key words: co-Kriging; manganese nucleus; mineral resource evaluation