

太平洋多金属结核富集区结核丰度和品位的地质统计学分析

张富元 沈华梯 韩喜球

(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

提 要 本文对太平洋 CC区 (Clarion-Chipperton Zone)多金属结核富集区的结核丰度、品位 (Mn Cu Co Ni)进行了详细的地质统计学分析, 获得了较好的实验变差图。分析结果表明光滑型结核富集区的丰度变程为 50~ 60 km, 结核水平分布连续性好, 丰度稳定而变化小, 结核中 Mn Cu Co Ni四种金属元素变程为 80~ 100 km, 各向异性和空穴效应现象不明显; 粗糙型结核富集区丰度变程为 40~ 50 km, 结核中 Ca Ni Mn变差图拟合较困难, 它们的变程约 100 km, 大多数变差图形表现出有漂移、空穴效应和各向异性现象, 结合其它实际调查资料分析, 影响变差函数稳健性的主要因素是粗糙型结核贫富分布不均且变化大。克立格法和算术平均法两种方法计算得出的结核资源量误差一般为 1%~ 2%。最大误差不超过 7%, 这与以往的分析结果基本一致。研究结果表明, 结核丰度采样间距为 28 km× 28 km, 结核资源估计误差: 光滑型结核区为 29.45%的资源估计误差下降到 14.59%, 粗糙型结核区为 36.07%; 采样间距缩小到 13 km× 13 km, 光滑型结核区的资源估计误差下降到 14.59%, 而粗糙型结核区资源估计误差仍有 23.01%。

关键词 太平洋 多金属结核 地质统计学 资源量计算 资源评价

分类号 P 721, P 618

第一作者简介 张富元 男 44岁 副研究员 海洋地质

1 前 言

在大洋多金属结核的普查阶段, 我们曾运用算术平均法、加权平均法和克立格法作了多金属结核的资源量计算和资源评价。随着大洋多金属结核调查研究工作的步步深入, 调查资料不断积累和丰富, 计算精度要求也随之提高, 本文根据太平洋 CC区^[1]两种主要的多金属结核富集区(光滑型^[2]结核和粗糙型^[3]结核)的丰度和品位资料, 运用地质统计学和传统统计学方法, 着重研究勘探阶段多金属结核资源量计算和资源评价。算术平均法采用矿块平均丰度和矿块平均品位计算矿块资源量, 这样做的主要缺点是没有对丰度和品位进行加权, 也没有考虑丰度和品位的空间变化特征, 因而影响了资源估计精度。另一个缺点是虽然运用传统统计学方法, 也能给出矿块资源量的估计精度, 但无法提供每个块段(即每个测站所控制的面积)资源估计误差。为了解决算术平均法和传统统计学所存在的问题, 必须

应用地质统计学方法。地质统计学^[4]的概念按法国著名学者马特隆 (G. Matheron)的定义是“地质统计学就是随机函数的形式体系在勘查与估计自然现象上的应用”。用通俗具体的描述, 即“地质统计学是以变差函数作为基本工具, 在研究区域化变量的空间分布结构特征规律性的基础上, 选择各种合适的克立格法, 以达到更精确地估计或对区域化变量进行条件模拟为主要目的的一门数学地质独立分支”。由于大洋多金属结核是一种二维分布的特殊矿床, 故本文采用二维普通克立格法进行地质统计学分析。

2 克立格法

克立格法^[5] (Kriging)是由南非矿山地质工程师 (G. G. Krige)于 40年代提出的一种储量计算方法。克立格法也是法国学者马特隆于 60年代创立的地质统计学的核心。从数学角度抽象概念讲, 它是一种对空间分布数据求线性、无偏、最优的内插估计方法。具体地说, 克立格法是根据一个待估块段域内的

若干个样品的已知变量数据,按照变量理论变差函数模型提供的结构信息,对每个样品值赋予一定的权重系数,最后进行加权得出该块段的估计值,从而弥

补了传统内插法的不足之处,从理论上讲能提高资源量的估算精度。克立格法的主要过程是建立变差函数和求解克立格方程组权重系数^[4,5]。

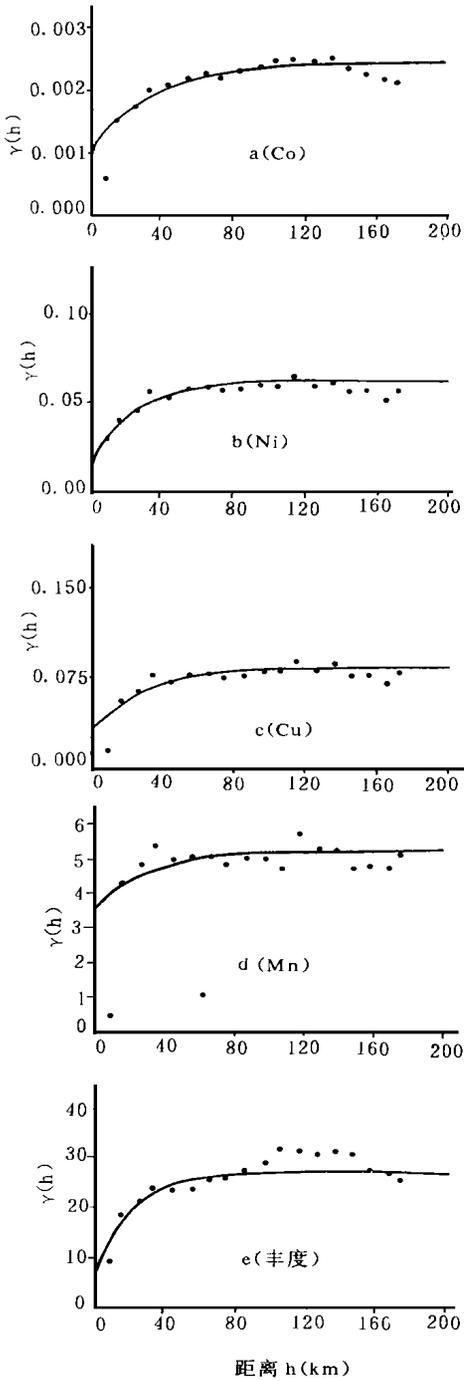


图 1 太平洋 CC区光滑型结核丰度和品位(Mn Cu Co Ni)变差图

Fig. 1 Variogram of the abundance and grade (Mn, Cu, Co, Ni) of smooth nodules from the Clarion-Clipperton zone in the Pacific

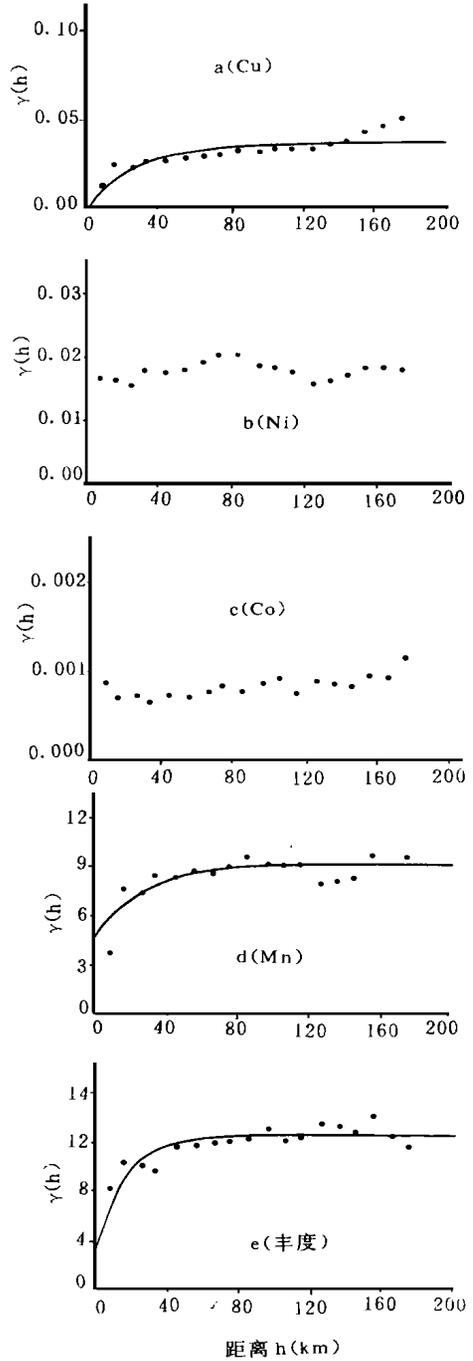


图 2 太平洋 CC区粗糙型结核丰度和品位(Mn Cu Co Ni)变差图

Fig. 2 Variogram of the abundance and grade (Mn, Cu, Co, Ni) of rough nodules from the Clarion-Clipperton zone in the Pacific

3 克立格法计算结果

3.1 变差函数和实验变差图

变差函数在地质统计学中占有极其重要的地位,它是许多地质统计学计算的基础,更有意义的是它能反映或刻划出区域化变量的许多重要性质,如变量的影响范围,变量的空间变化连续性和不同方向上变量的各向异性等特征。表1和图1图2是太平洋CC区两种成因不同的多金属结核富集区(以光滑型结核分布为主的称S区,粗糙型结核为主的称R区)的结核丰度和结核品位(Mn Cu Co Ni)理论变差函数参数表及部分变量的实验变差图(以下称变差图)。由图表可知S R两区似乎都有很小的块金效应。然而,块金效应的真实情况较为复杂,它既可能是由于取样和化学分析的误差所造成,也可能是地质体属性即结核分布不连续性所引起,更重要的原因可能是观测取样尺度的不同所致。在一般的矿化现象中,块金效应的含义都与观测网的尺度有密切关系。例如,用3~5 km取样间距的数据作克立格法变差函数分析,可以区分出变程 $a=10$ km的结构。但是,如果利用 >10 km的取样间距的数据,就无法区分出变程 $a\leq 10$ km的结构。本次选作克立格法的丰度、Mn Cu Co Ni五个变量的采样间距均为约 $13\text{ km}\times 13\text{ km}$ 。因此,无法区分 <20 km的结构,而只能把小于20 km的结构变化不太真实的归属到块金效应常数项中。这种块金效应的含义依赖于观测网尺度的现象叫做块金效应的尺度效应。由于本次变量的采样间距不足以区分 <20 km的结构,故采取暂且把它当作块金效应的尺度效应处理,对块金效应不作进一步探讨,要想较全面地反映变量在微观或小尺度变化特征,就必须进一步缩小采样间距。

变差函数的另一个重要功能是通过变程反映变量的影响范围。通常,变差函数随着两样品间距离 h 的增大而增大,随机变量 $Z(x)$ 与以变程为半径内的任一其他 $Z(x+h)$ 之间存在相关关系。随着两点间距离增大其相关程度随之减弱,当两点间距离 h 大于变程时,随机变量 $Z(x)$ 与 $Z(x+h)$ 之间不再相关。因此,变程能反映变量的最大影响范围。

3.1.1 光滑型结核集区(S区)的变差图

图1a是光滑型结核富集区的Co变差图。Co的变差函数 γ 自20 km随距离 h 增大而稳定增加,直到距离 h 约100 km为止,此处确定为变程 a 的位

置,100~140 km间 γ 值随距离增加而缓慢下降。整个变差图显得较有规律,拟合程度较高,大多数点落在或紧挨拟合线上。因此所确定的理论模型和理论变差函数参数可认为是比较合适的。反映了S区多金属结核中Co含量在水平方向变化较小的特点,这基本上与实际调查资料相吻合。Co变差图似乎有一个很小的块金效应。但是,距离 $h=10$ km占的对数仅有3对,而其它点的点对数约1000对,所以10 km的 γ 值其可信度较低,本次根据变差函数态势确定块金效应为0.001,仅供参考。

Ni Cu变差图(图1b,1c)除10 km点处,两变差图形起伏较相似,相关分析表明两者相关密切(表2)与Co相比,Cu Ni变差图上的个别 γ 点值距拟合线稍远些,但总体拟合较好。Ni的 γ 值自10 km开始随距离增加而增加,80~100 km后 γ 值基本保持不变,尾部130 km以后 γ 值表现出先降后升现象,变程确定为80~100 km之间。

表1 太平洋CC区光滑型(S区)和粗糙型(R区)结核的理论变差函数参数

Table 1 Theory variogram bparameters of smooth (S area) and rough (R area) nodules form the Clarion Clipperton zone in the Pacific

区域	参数	理论模型	块金效应 (Co)	基台值 (C)	变程 (a, km)
S区	丰度	指数	5.00	22.50	50~60
	Mn	指数	3.50	1.80	80~100
	Cu	指数	0.03	0.055	100
	Co	指数	0.001	0.0014	100
	Ni	指数	0.015	0.048	80~100
R区	丰度	指数	2.90	9.50	40~50
	Mn	指数	4.50	4.50	80~100
	Cu	指数	0.00	0.035	80~100
	Co	指数	0.0007	0.0001	80~100
	Ni	指数	0.016	0.0015	80~100

Mn的变差图(图1d)形不同于Co变差图,波动起伏大是Mn变差图的主要特点。从波动趋势分析,它的图形与Cu Ni变差图有一定联系,特别是40 km 120 km两处和尾部 γ 值变化,Mn Cu Ni三者都显示出升降的一致性,只是Mn的变化幅度远比Cu Ni的大,这可能与Mn的化学属性远比Cu

Ni活泼有关。变差图形的相似性反映出 Mn Cu Ni 的物质来源有一定的相关性和个性上的差异。表 2 相关分析表明 Mn 与 Cu Ni 为强正相关,而与 Co 为负相关。Mn 变差图较难拟合,考虑到与 Cu Ni 之间相似性,我们还是作大致拟合, Mn 变程为 80~100 km

表 2 太平洋 CC 区光滑型多金属结核丰度和品位相关分析

Table. 2 Relative analysis between the abundance and grade(Mn Cu Co Ni)of smooth nodules from the Clarion-Clipperton zone in the Pacific

参数	纬度	Mn	Cu	Co	Ni	Cu+ Co+ Ni	丰度
纬度	1.00						
Mn	-0.08	1.00					
Cu	-0.15	0.89	1.00				
Co	0.11	-0.60	-0.83	1.00			
Ni	-0.04	0.88	0.95	-0.77	1.00		
Cu+ Co+ Ni	-0.10	0.91	0.99	-0.78	1.00		
丰度	-0.01	-0.41	-0.61	0.60	-0.50	-0.58	1.00

丰度变差图(图 1e)特点是呈阶梯状盘上,尾部缓缓下降。丰度 γ 值自 10 km 开始随距离增大而增大, 40~60 km 之间的 γ 值基本不变, 60~110 km 之间 γ 值又随距离加大而上升, 110~150 km 之间的 γ 值又保持在一定水平,随后出现下降。整个图形显得有序而有规律,这种有规律的变化显然是由丰度信息所支配。光滑型结核丰度变差图反映出存在两个众数或群体,这在结核频率分布图上反映得较为明显,第一个众数所对应的丰度为 4~5 kg/m²,第二个众数所对应的丰度为 12~14 kg/m²。这两个众数显然是由两种不同类型的结构所构成。构成第一个众数的结核特点是高品位低丰度的粗糙型结核,对应于第二个众数的结核以高丰度低品位的光滑型结核。这种情境类似于东海沉积物粒度频率分布^[7]的第一个主峰由古代残留砂组成,而次峰由现代细粒物质组成。两种不同类型的相互混合还产生了高丰度中等品位的混合型结核。第一个众数变程为 50 km,第二个变程 110 km。实际调查资料表明,在长达 100 多公里的测线上曾观测到丰度连续保持一个相当高的水平,这就部分验证了变程 110 km 群体的存在。因此我们确定 S 区丰度变程为 50 km

是较保守的。当然,也有文献认为丰度在 1 公里之内的变化也是难以预测的。这就需要针对实际资料加以全面系统仔细分析,不同区域具体对待。

鉴于 Mn Cu Co Ni 变程为 80~100 km,表明利用已知样品的 Mn Cu Co Ni 含量推测未知样品的有效范围为 80~100 km,超过 100 km 的推测是无效的或精度不够,而 100 km 以内的推测精度随缩小而稳定提高,目前结核中 Mn Cu Co Ni 的采样间距与丰度一样均为 13 km \times 13 km,我们认为其精度能满足目前的勘探要求。今后如仍在相同区域内加密采样,那么可以考虑结核化学分析的采样间距比丰度采样间距大些,而把重点放在区别结核类型上。因为结核类型不同其品位也随之变化,而不同的结核类型基本上有一个比较固定的 Cu Co Ni 比例模式。当然,如不考虑经费和时间问题,品位分析的采样间距越小其资源量计算精度越高,变差函数的细微结构也越清楚。

3.1.2 粗糙型结核富集区(R区)的变差图

Cu 变差图(图 2a)是粗糙型结核富集区具有代表性的变差图。 γ 值在 10~80 km 范围内稳定增加, 90~120 km 的 γ 值变化很小,尾部 γ 值有上翘现象。从 Cu 变差图分析表明块金效应并不明显,即使有也非常小,随着采样间距进一步缩小,估计其它元素(Mn Cu Ni)的块金效应也会缩小。因此,在解释块金效应时一定要根据实际调查资料慎重行事。Cu 变差函数尾部上翘。变差点值变化剧烈的现象反映出结核中 Cu 含量在水平分布存在着方向性变化。相关分析表明在纬向上 Cu 含量存在由北向南减小的趋势,而在东西方向上的差异不明显,这种各向异性变化值得今后详细分析。然而,变差函数在变程范围内的结构特征受漂移的影响很小,点值变化平稳。

Co Ni Mn 的变差图(图 2b 2c 2d)呈波状起伏,拟合很困难。变差函数 γ 值并非单调递增,而是显示出有一定周期性变化,这种波动现象叫做空穴效应或孔穴效应。在陆地,有富矿层和非矿层交互出现的情况下,沿垂直方向上就会出现这种空穴效应^[8]。大洋多金属结核是一种二维分布的特殊矿床,只能说明在水平方向上存在结核贫富分布不均现象。根据结核中元素含量分析,表明 Co 含量有由南向北递增趋势,而 Cu Ni Mn 则相反为由南向北降低。

与 Co Ni 相比,相度变差函数(图 2e)波动平稳些,但与 S 区丰度变差图相比,其波动现象还是明显

的。尤其是 10~ 50 km 区间的变差函数, γ 值变化显得杂乱无章。由于地质和观测取样等因素的影响, 变差函数的稳健性受到干扰, 根据影响变差函数的因素综合分析, 有诸多因素能不同程度地影响变差函数。克拉克 (I. Clark) 认为随取样间距的加大, 样品变化的随机成分不断增加, 小型结构特征则逐渐被掩盖。戴维 (M. David) 指出, 取样率对变差函数的影响程度是与区域化变量的连续性有关。连续性好, 取样率对变差函数的影响就较小; 连续性差, 变化大的区域化变量, 取样率对变差函数的影响是很大的。此外, 个别异常点值对变差函数的稳健性有时也有明显的影响。但是, 根据目前对 R 区所掌握的有关地质资料分析, 造成丰度和品位变差图形剧烈变化的主要原因是结核水平分布不连续。当然, 结核分布的各向异性和结核中 Cu、Co、Ni、Mn 含量变化的不一致性以及比例效应等因素在一定程度上也会影响变差函数, 但这些影响是次一级的。

表 3 太平洋 CC 区粗糙型多金属结核丰度和品位相关分析
Table 2 Relative analysis between the abundance and grade
(Mn, Cu, Co, Ni) of smooth nodules from the
Clarion-Clipperton zone in the Pacific

参 数	纬度	Mn	Cu	Co	Ni	Cu+ Co+ Ni	丰度
纬度	1.00						
Mn	- 0.18	1.00					
Cu	- 0.51	0.75	1.00				
Co	0.40	- 0.44	- 0.58	1.00			
Ni	- 0.23	0.76	0.78	- 0.53	1.00		
Cu+ Co+ Ni	- 0.40	0.80	0.96	- 0.52	0.92	1.00	
丰 度	- 0.12	0.14	- 0.01	0.03	0.11	0.05	1.00

3.2 克立格法和算术平均法的资源量对比

表 4 是太平洋 CC 区光滑型结核 (S 区) 和粗糙型结核 (R 区) 富集区, 根据克立格法和算术平均法计算得出的资源量对比。由表可知两种方法求得的资源量相差很小, 但误差有正负之分。S 区以负误差居多, R 区则以正误差为主。两区误差范围为 - 0.21~ 6.60%。S 区干结核资源量误差最小 (- 0.21%), Mn、Ni、Co 金属量误差分别为 - 1.38%、2.66% 和 - 4.05%, Cu 的误差最大为 - 6.60%。相对而言, R 区误差较小, Co 金属量误差最小为 - 0.31%, 也是 R 区唯一的负误差, 其次是干结核资源量误差为

0.66%; Mn、Ni、Cu 三者误差很接近, 分别为 1.35%、1.34% 和 1.40%。从以上两种计算方法得出的资源量对比表明, R 区克立格法资源量略高于算术平均法, 而 S 区的算术平均法得出的资源量稍高于克立格法。这种差异除了变差函数参数的选择正确与否有一定影响外, 主要是两区结核成因和结核类型不同造成的。然而, 据本次计算, 绝大多数资源估计误差在 1~ 2% 之间, 最大误差也不超过 7%, 与以往的克立格法应用研究结果^[9]相似。因此我们认为这样的误差在现阶段多金属结核勘探阶段的资源量计算应该说是可以容忍的和接受的, 这就是说, 目前用算术平均法计算^[10]多金属结核资源量是可行的。随着调查研究不断深入和矿址储量计算, 开展算术平均法和克立格法的资源量计算也是必要的。

表 4 克立格法和算术平均法的多金属结核资源量比较
Table 4 Comparison of the resource amount of polymetallic
nodules between the Kriging and arithmetic average

区域	资源量 (* 100t)	计算方法		
		克立格法	算术平均法	误差 (%)
S 区	干结核量	25519.36	25572.70	- 0.21
	Mn 金属	6299.11	6386.96	- 1.38
	Cu 金属	191.35	204.87	- 6.60
	Co 金属	57.12	65.38	2.66
	Ni 金属	262.73	273.83	- 4.05
R 区	干结核量	9160.66	9100.55	0.66
	Mn 金属	2781.64	2744.36	1.35
	Cu 金属	117.03	115.48	1.34
	Co 金属	16.34	16.39	- 0.31
	Ni 金属	135.73	133.85	1.40

4 多金属结核勘探密度与资源估计误差

除了变差函数之外, 地质统计学中还有一个很有用的工具, 即克立格方差。克立格方差是地质统计学误差估计的基础。本文利用传统统计学中的标准差和地质统计学的克立格方差, 对 S 区和 R 区不同取样间距的数据按 95% 可信度进行了丰度、Cu、Co、Ni、Mn 估计误差分析。

表 5 多金属结核调查精度和资源量估计误差的关系

Table. 5 Relationship between the survey precision and resource estimation error of polymetallic nodules

区域	估计误差 (%)					网格 (km \times km)	计算方法
	丰度	Mn	Cu	Co	Ni		
S区	29.45	5.08	20.74	10.00	14.02	28 \times 28	传统统计学
	16.75	2.80	11.39	6.04	6.87	14 \times 14	传统统计学
	14.59	2.48	10.07	5.21	6.27	13 \times 13	传统统计学
	14.62	2.49	10.10	5.13	6.23	13 \times 13	地质统计学
R区	36.07	6.26	8.74	10.09	4.13	28 \times 28	传统统计学
	27.50	2.98	4.71	4.62	2.88	14 \times 14	传统统计学
	23.01	2.69	4.14	4.44	2.48	13 \times 13	传统统计学
	22.95	2.72	4.20	4.67	2.48	13 \times 13	地质统计学

由表 5 可知随着采样间距的缩小资源估计误差也逐渐变小。以丰度为例, 采样间距为 28 km \times 28 km, 传统统计学的估计误差 S 区为 29.45%, R 区为 36.07%。采样间距 14 km \times 14 km, 那么丰度估计误差 S 区为 16.75%, R 区为 27.50%, 当采样间距缩小到 13 km \times 13 km, S 区的估计误差为 14.59%, R 区为 23.01%。从这些数据变化可以看出, S 区采样间距缩小速度与其丰度估计误差缩小速度几乎同步, 即采样间距从 28 km 到 13 km, 缩小 2.15 倍 (28/13), 其丰度估计误差从 29.45% 到 14.59%, 下降了 2.02 倍。而 R 区的丰度估计误差只下降 1.57 倍, 其下降速度明显低于 S 区。两区 Cu、Co、Ni、Mn 估计误差下降速度大致相同, 但 S 区的 Cu、Ni 估计误差明显的要比 R 区的高。另外, 克立格法的 Cu、Co、Ni、Mn 估计误差水平大致与传统统计学的水平相当。

5 结 语

通过太平洋 CC 区两种不同成因的光滑型结核和粗糙型结核富集区的地质统计并结合有关资料分析, 归纳起来有以下几点结果和认识:

a. 用克立格法和算术平均法得出的多金属结核资源量 (结核量和金属量) 误差一般为 1~2%, 最大误差不超过 7%, 这与以往的克立格法应用结果大致相同。这样的误差在多金属结核调查和勘探阶段应该说是可以容忍的。因此, 可以根据具体工作项目要求选择不同的计算方法。

b. 虽然克立格法和算术平均法计算得出的资源总量相差不大, 或者说矿块的平均丰度、矿块 Cu、Co、Ni、Mn 平均值相差很小。但是, 各块段和局部块段的资源量有一定的差异, 这种差异在圈定矿址时值得注意, 毕竟克立格法是一种线性、无偏、最优的内插估计方法, 具有比传统内插法插值更合理, 精度更高优点。

c. 变差函数分析表明, 光滑型结核和粗糙型结核富集区的丰度变程为 40 km \sim 60 km, 两区结核品位 (Cu、Co、Ni、Mn) 变程为 80 km \sim 100 km。丰度变程均比品位变程小, 因此只要缩小丰度变程采样间距, 就能同时提高丰度和品位的估计精度。由于两区品位变程比丰度变程大, 今后可考虑丰度采样间距小些, 而品位采样间距大些。另一方面, 光滑型结核丰度变程比粗糙型结核丰度变程大, 所以今后对 S 区和 R 区的丰度采样加密, 也可采取 S 区疏, R 区密的做法。这样做的目的是减少调查分析费用和节省时间。如不考虑时间和运费, 无论是 S 区和 R 区, 丰度和品位的采样时间和经费, 无论是 S 区和 R 区, 丰度和品位的采样间距当然是越密越好。

d. 根据变差函数和估计误差, 结合有关实际调查资料分析, 光滑型结核丰度稳定, 分布连续性好, 水平漂移和空穴效应现象不明显; 粗糙型结核丰度不稳定而变化大, Co、Ni 变差图反映出该区存在空穴效应和各向异性现象。

e. 通过以上分析讨论我们看到, 无论运用传统统计学, 还是地质统计学, 都需要地质专业知识。统计结果仅是一些数字和图表, 只有详细了解和掌握有关地质知识才能把统计图表和数字所隐含的信息转换成有用的地质信息, 给出合理的地质解释。另外, 顺便指出, 传统统计学的研究对象强调必须是纯随机变量, 而地质、采矿中所遇到的许多变量并不是纯随机变量, 而是又有随机性又有结构性的变量, 因此地质统计学正是针对地质这个特殊的研究对象而发展起来的。然而在许多方面, 传统统计学与地质统计学是密切相关而不可分割的。

参 考 文 献

- [1] United Nations (Ocean Economics Technology Branch) Seabed Minerals, Volume 1, Assessment of Manganese Nodules Resources, Published by Graham & Trotman Limited, London, 1978, 14~ 15.
- [2] Goldberg E D, B L K Somayajulu and J Galloway. Geochim. Cosmochim. Acta, 1969, 33 287~ 289.

- [3] Calvert S E, N B Price, G R Heath et al. Relationship between ferromanganese nodules compositions and sedimentation in small surver area of the equatonical Pacific. *J Mar, Res*, 1978, 36 161- 183.
- [4] John C D avis. *Statistics and Data Analysis in Geology*, John Wiley & Sons, INC, New York, 1973, 36 381- 390.
- [5] Isobel Clark, *Practical Geostatistics*, Applied Science Publishers Ctd ,Lodon, 1979, 1- 99.
- [6] 王仁铎,胡光道. *线性地质统计学*.北京:地质出版社, 1988, 8- 168.
- [7] 张富元,李粹中,王秀昌.东海表层沉积物粒度因子分析结果及具地质意义探讨. *海洋实践*, 1982, (3).
- [8] 於崇文等 编著. *数学地质方法与应用*.北京:冶金工业出版社, 1980, 390- 398.
- [9] 张富元.克立格法在大洋多金属结核资源量计算和资源评价中应用. *海洋学报*, 1995, 17(4): 94- 100.
- [10] 张富元.大洋多金属结核资源量计算和资源评价方法探讨. *海洋学报*, 1995, 17(4): 85- 93.

Geostatistical Analysis of the Abundance and Grade of the Polymetallic Nodule Enriched Area of the Clarion-Clipperton Zone in the Pacific

Zhang Fuyuan Shen Huati and Han Xiqiu

(Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration Hangzhou 310012)

Abstract

Geostatistics was applied to the analysis of the abundance and grade (such as manganese, copper, cobalt and nickel) of the polymetallic nodules collected from the Clarion-Clipperton Zone in the Pacific and the excellent experimental variograms were obtained. The analytical results showed that the abundance range of the smooth nodule enriched area is about 50~ 60 km, the continuation of the surface nodule distribution is better than that of the rough nodule enriched area. The abundance variation is small in the area. The four metal ranges or Cu, Co, Ni and Mn in the nodules are approximately 80~ 100 km, and the phenomena of the anisotropy and the hole effects are not apparent; moreover, the abundance range of the area dominated by the rough nodules is about 40~ 50 km, and it is difficult to fit a smooth curve based on the points on the experimental variograms of Co, Ni and Mn in the nodules. These metal ranges are nearly 100 km, and the most of the experimental variograms showed the phenomena of the shifts, the hole effects and the anisotropy. Considering other practical survey data and information, the major factors of affecting the stability of the variogram could be attributed to the inhomogeneous distribution of the surface nodules and the abundance variation from place to place. The resource (including the nodule and the metal amount) estimation errors calculated in the Kriging and arithmetic average method are 1~ 2% in general. The biggest error is less than 7%. These results were similar to those of the previous practice. Research results also showed that the sampling distance of abundance is 28 km \times 28 km, the nodule resource estimation error is 29.45% for the smooth nodule deposit and 36.07% for the rough nodule one, when the distance is reduced to the level of 13 km \times 13 km, and the resource estimation error is 23.01% for the rough nodule enriched area.

Key Words Pacific polymetallic nodules geostatistics resources evaluation