

第四部分 用几何方法和地质统计学方法计算矿石储量

(以沉积锰矿床为例)

历史回顾

1. 前言

“锰丘”矿床位于西澳大利亚的太古界皮尔巴拉地块上。该矿床是在四十年代末、五十年代早期发现的，在本世纪初即已开始小规模开采。目前开采的所有矿床，在地表和浅部都是中品位和高品位矿石。矿石由隐钾锰矿、黑锰矿、褐锰矿及常见锰矿物——软锰矿等组成，铁的混入物为赤铁矿，有时是褐铁矿。

这个地区大部分矿床都是含锰约5000到50000吨的中、小型矿床，只有少数矿床超过50000吨。

采出的矿石用火车运400多公里到附近港口装船运到日本、美国和欧洲，只有30%的矿石供给澳大利亚。

2. 自然条件

“锰丘”矿床位于一个准平原上，平均海拔550米，仅有一些小的丘陵最高可达580到620米。11月和12月的季节性降雨形成了平缓的河谷，在矿区内及其附近有两条永久性河流，另一条小溪仅在11月份、12月份和1月份有水，矿区西北部在约5米深处可以找到很好的泉水。

植被由草、荆棘和极少量桉树组成。气候干燥，夏天温度约35到40℃，冬天约25到30℃。在开设采矿公司以前，仅有很少的公路和小道，没有铁路，从1951年到1954年建设了通到海岸的1521公里公路和铁路，但至今没有电话和政府邮局，同其他地区联系的唯一方式是无线电，同航空医疗服务联系也用无线电。

3. 地质环境

含锰岩系由覆盖在太古界岩石、熔岩和元古界沉积岩系之上的下Balfour 页岩和上Noreena 页岩组成，锰矿层被第三系和第四系的沉积物所覆盖(图1、2和3A)。

(1) 矿源岩石：因为大部分沉积岩和火成岩都含锰，所有的太古界岩石及老于元古界燧石角砾岩的Nullagine含锰岩系都是锰的可能来源，但仅仅Balfour 页岩和Noreena 页岩含锰高。

建造名称	Mn (%)
Noreena 页岩	0.43 ~ 15.0
Balfour 页岩	0.03 ~ 16.2
燧石角砾岩	0.00 ~ 2.5
Little de Gray 熔岩	0.6 ~ 0.12
Rumbole 砾岩	0.7 ~ 2.9
Tambiola 砾岩	0.15

Noreena 页岩和Balfour 页岩主要靠颜色来区别。前者为黑色到巧克力色、紫色、红色，后者为灰色到绿色。由于建造是整合的，而且紫色页岩覆在绿色页岩之上，Noreena 页岩看上去象是在氧化环境中沉积的，而Balfour 页岩是在还原环境下沉积的。在巧克力色页岩的层面上还出现锰铁矿球粒，这在氧化环境中是一种不常见的现象。

绿色页岩之上的紫色页岩底部可以看到氧化矿层，这是同生矿床的沉积作用带。该区的同生沉积矿层常常由氧化硅酸盐褐锰矿组成。

(2) 表生富集：这个地区可以见到锰矿交代燧石角砾岩、砾岩和页岩，在砾岩中有锰的氧化物交代石英质卵石的现象。褐锰矿表面的氧化锰薄皮壳以及锰氧化物细脉，是表生富集的主要证据。矿

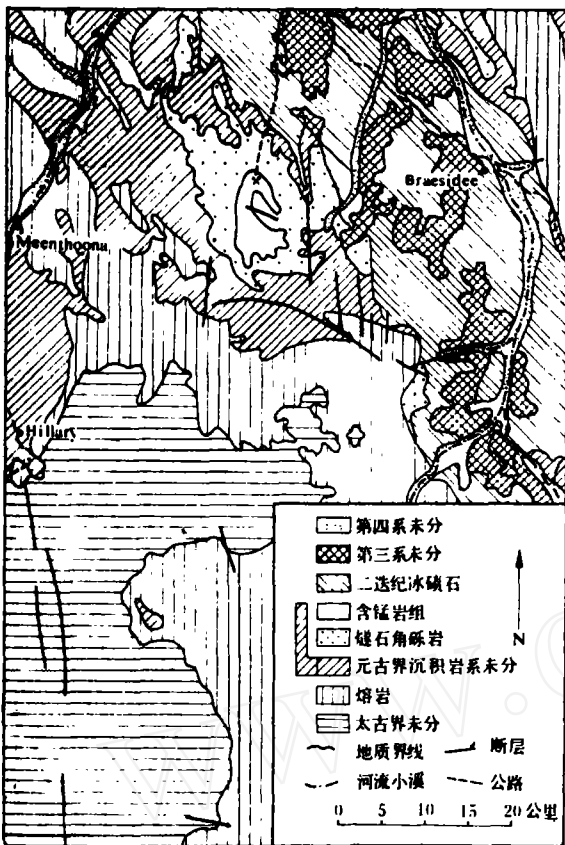


图1 “锰丘”地区地质图

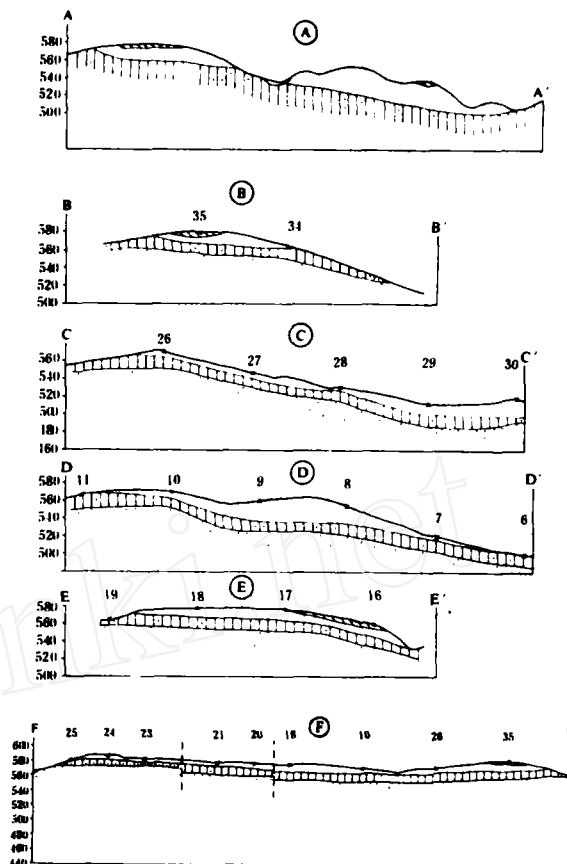


图3 穿过“锰丘”矿床的剖面图

A—E, 东西向剖面; F, 南北向剖面

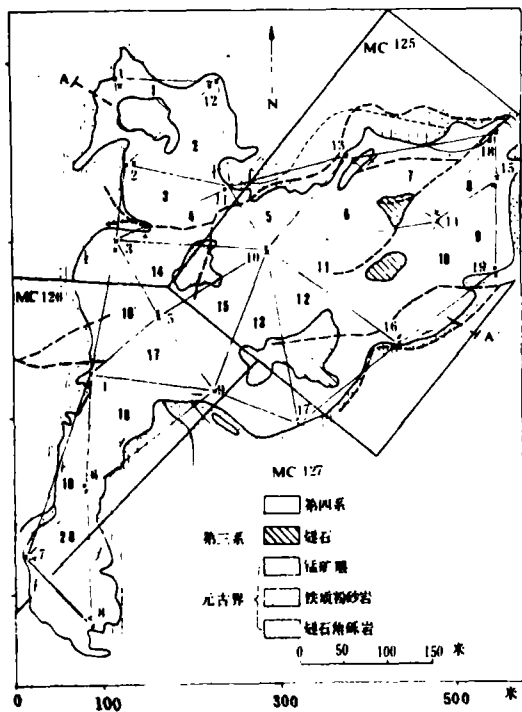


图2 “锰丘”矿床地质图

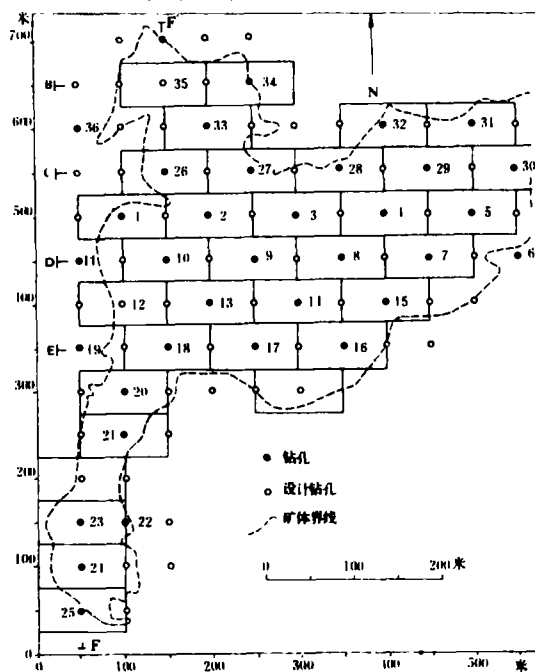


图4 钻孔位置图

物鉴定已经发现褐锰矿被隐钾锰矿和软锰矿交代的交代作用。

4. 采矿及选矿

所有锰矿都是露天开采,一般深度不超过50米,用打钻孔放炮采矿,推土机和卡车运矿,然后把矿石送到车间用破碎机和手镐破碎来选矿。用破碎机选矿的基本原理是含铁的物质和泥土比锰矿石要松软,容易成为粉末而被去掉。较小的矿块也能很好地在矿石和脉石之间分出来,其中的脉石呈小碎块,因此混在废石中被丢掉的矿石很少。大的脉石岩块用选择采矿法甩掉。这个地区的矿床都没有用化学方法选矿。

“锰丘”矿床的矿石作过两个大样的选矿试验,试样是由许多经过了四分缩分和混合后的样品组成的代表性样,其中包含有高品位矿石、中品位和低品位矿石以及铁豆石、泥土等。如果矿床比较松散,以上的样品就用手工采。

选矿试验得到的结果是:

(1) 低品位锰矿石还适于作磁选、电选和浮选。

(2) 虽然在锰的回收率、锰精矿的品位方面还存在很多问题没有解决,但三种类型的锰矿石都可以在经过还原焙烧后用磁选法提高品位。

(3) 必须进行工业试验以确定这种选矿过程的经济价值。

5. 地质工作

经过用地质填图、采样进行找矿和初步选矿试验之后,公司决定开始采矿。为了取得与矿床有关的更详细的信息,地质人员在矿区范围布置了一个钻探网,网距为50×50米,但首批36个钻孔是50×100米(参看图3B—F及图4),而且这批钻孔全部打到了燧石角砾岩。

矿石储量计算

储量计算是对是否真正找到了一个矿床的首次检验。在一个地区进行找矿之后,必须进行储量计算,以便了解应当如何继续工作进行,还是应当放弃这个地区。在一个矿床开发的过程中,特别是当钻探、采矿等工程获得一些新的信息时,必须一次

又一次地反复进行储量计算。

决定开采规模、选厂大小、职员数目以及矿床维持开采多长时间等,都是以储量为基础的。所谓矿床的维持开采时间,含义是在这段时间内你能收回投资,获得利润。

1. 用三角形法计算储量

可以用某些几何学方法计算储量。“锰丘”矿床在经过用填图和采样进行找矿之后作了首次储量计算。储量计算者仅有的材料是地质图、地形图和采得样品所分析出来的锰含量,以及不同类型矿石样品的百分率(表1)。

“锰丘”矿床所采样品的锰含量				表 1
编号	x	y	厚度(米)	品位(%)
1	120.00	684.00	4.00	44.80
2	132.00	596.00	3.00	39.50
3	119.00	500.00	6.00	48.20
4	89.00	352.00	4.00	36.10
5	166.00	414.00	10.00	47.00
6	83.00	208.00	5.00	48.70
7	14.00	142.00	4.00	37.80
8	88.00	66.00	6.00	43.60
9	228.00	330.00	5.00	48.90
10	290.00	487.00	25.00	44.50
11	247.00	558.00	2.00	32.50
12	234.00	677.00	6.00	40.90
13	379.00	591.00	5.00	47.10
14	480.00	516.00	20.00	42.60
15	550.00	560.00	5.00	37.00
16	438.00	382.00	7.00	35.80
17	323.00	293.00	2.00	42.70
18	550.00	610.00	5.00	53.70
19	548.00	464.00	1.00	27.60

因为矿床是接近水平的层状矿床,储量计算是用三角形法作的。在图2上可以找到各个样品的采样点,在相邻采样点相互之间联成最小或最佳三角形之后,用下式作储量计算:

$$C_{Mn} = S_t \times T \times P \times W, \quad (a)$$

C_{Mn} —锰储量; S_t —三角形面积; T —厚度;

P —样品中锰的品位; W —锰矿石的比重。

矿床中金属锰的总储量是全部 C_{Mn} 相加之和。

如果用锰矿石密度作为比重,则可得到矿床的矿石储量。

用三角形法或其他几何方法计算储量,可以得到很好的结果,但不知道这种结果好到什么程度。

不过,它可以充分说明这是一个小矿或是一个中型矿还是一个矿。

2. 用地质统计学方法计算储量

由于在一个矿床里能观测到的几乎所有参数都是区域化变量,所以,用地质统计学方法研究了一个矿床中两点之间的关系。这种方法不仅可能用几个已知点的参数计算未知点的参数,而且可以估算必须处理的误差。

地质统计学的基本思想包括定量地确定一个区域内的数据在空间上的关系,估算矿产储量和计算估计误差。以上是通过所谓“变异函数”或“半变异函数”来实现的。这两个函数可以表明是否存在一定的影响范围,该矿床是各向同性的还是各向异性的,样品的方差为多少,以及是否有测量误差或者是否存在比采样网格还小的微结构(块金效应)。

“影响范围”的含义:当对某点作计算时,位于离该计算点一定距离之内的任何其他采样点对计算有影响,而位于这一距离之外的采样点对计算没有任何影响。

“各向异性”的含义是指在矿床内矿石沿某方向的分布与沿别的方向分布不同。如果沿任何方向矿石的分布都相同,则该矿床是各向同性的。

“块金效应”给出了测量误差,这个误差可以是采样、分析和计算带来的,也可能是因为存在比采样网格还小的微结构。这意味着,你看不见微结构,但它对于矿的分布和计算又是重要的。如选择较小的采样网格,有可能准确地弄清微结构,若半变异函数曲线不通过坐标原点,这就是有“块金效应”存在。

(1) 变异函数与半变异函数:用下列公式作为变异函数的定义:

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [f(x_i) - f(x_i - h)]^2 \quad (b)$$

(b) 式除以 2 后就是半变异函数。

$f(x_i)$ 和 $f(x_i - h)$ 是两个采样点的样品值,这两点的位置相距向量 h 。一般,要沿不同的方向 h 计算变异函数 $\gamma(h)$, h 的长度取为采样点之间的平均距离,将 h 和算得的 $\gamma(h)$ 点在坐标纸上,就得到了用点表示的变异函数图,然后用最合适的数学函数拟合这些点。

实际上这就是说,对所有的采样点上的值都要

用分布在四个主要方向上的各个距离不同的采样点的值作校正,举一个简单例子,设有如图 5、图 6 所示的采样网格。

得到以下结果:

		$f(x_i)$	$f(x_i - h)$	$[f(x_i) - f(x_i - h)]^2$
方向 1	LAG 1	3	7	16
		7	5	4
		2	9	49
	LAG 2	9	6	9
		4	5	1
		5	7	4
方向 2	LAG 1	3	5	4
		2	6	16
		4	7	9
	LAG 2	3	2	1
		2	4	4
		7	9	4
方向 3	LAG 1	9	5	16
		5	6	1
		6	7	1
	LAG 2	3	4	1
		7	5	4
		5	7	4
方向 4	LAG 1	2	7	25
		4	9	25
		9	5	16
	LAG 2	5	6	1
		4	5	1
		2	5	9
方向 5	LAG 1	3	9	36
		9	7	4
		7	6	1
	LAG 2	3	7	16
		7	3	16
		9	5	16

$\gamma(h)$ 的最后结果是:

方向	LAG 1		LAG 2	
	$n(h)$	$\gamma(h)$	$n(h)$	$\gamma(h)$
1	6	6.92	3	1.83
2	6	2.25	3	1.50
3	4	8.38	1	0.50
4	4	7.50	1	8.00

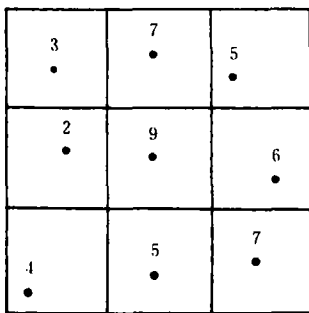


图 5

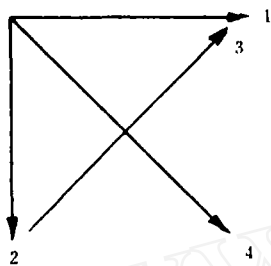


图 6

现在可以计算平均的半变异函数,但在第 3、第 4 方向上,距离 h (LAG) 应乘上 $\sqrt{2}$ 。

按 50 米 $\times$ 100 米的钻探网对“锰丘”矿床打钻,表 3 列出了钻孔的化学分析结果,表 4 是算出的半变异函数。

“锰丘”矿床 36 个钻孔的锰累积量 表 3			
编号	x	y	锰的累积量 ($\mu\text{g} \times \text{米}$)
1	100.00	500.00	144.60
2	200.00	500.00	173.50
3	300.00	500.00	978.40
4	400.00	500.00	1036.14
5	500.00	500.00	1220.00
6	550.00	450.00	0.00
7	450.00	450.00	249.20
8	350.00	450.00	1101.32
9	250.00	450.00	1073.16
10	150.00	450.00	297.72
11	50.00	450.00	0.00
12	100.00	400.00	281.22
13	200.00	400.00	933.66
14	300.00	400.00	860.94
15	400.00	400.00	198.12
16	350.00	350.00	434.52
17	250.00	350.00	112.11
18	150.00	350.00	150.80
19	50.00	350.00	0.00
20	100.00	300.00	264.78

续表

21	100.00	250.00	202.40
22	100.00	150.00	77.50
23	50.00	150.00	155.32
24	50.00	100.00	199.90
25	50.00	50.00	0.00
26	150.00	550.00	252.50
27	250.00	550.00	217.60
28	350.00	550.00	196.80
29	450.00	550.00	571.20
30	550.00	550.00	895.14
31	500.00	600.00	164.92
32	400.00	600.00	224.90
33	200.00	600.00	521.15
34	250.00	650.00	80.90
35	150.00	650.00	468.00
36	50.00	600.00	0.00

平均半变异函数的计算结果
(根据“锰丘”矿床 33 个见矿孔资料) 表 4

LAG	变 异 函 数
50.0000	6486.9713
70.7107	111911.9920
100.0000	112936.2060
141.4214	166110.7690
150.0000	39496.4425
212.1320	171600.7980
200.0000	162814.2770
282.8427	95636.4462
250.0000	10599.3175
353.5534	119595.0180
300.0000	—
424.2641	180914.5780
350.0000	15840.4050
494.9747	203763.0630
400.0000	172018.7860
565.6854	58768.3625
450.0000	12827.5250
636.3961	372062.0430
500.0000	9990.0025
707.1068	400781.0450
550.0000	00.0000
777.8175	—
600.0000	—
848.5281	—
650.0000	—
919.2388	—
700.0000	—
989.9495	—
750.0000	—
7060.6602	—
方 差	133226.036

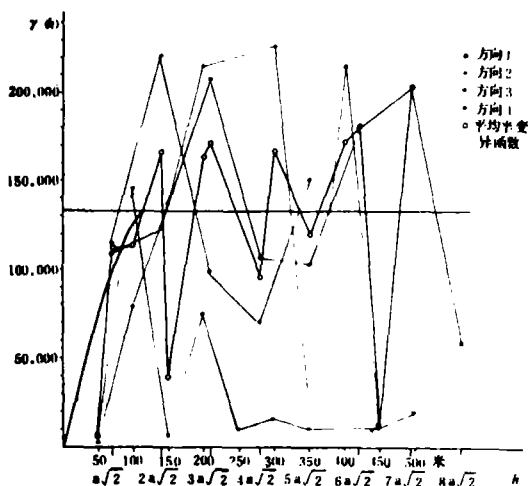


图7 四个方向的半变异函数
和平均半变异函数图

(据“锰丘”矿床33个见矿钻孔资料)

半变异函数图表明,在四个主要方向上情况大不相同,这意味矿床不是各向同性的,沿东西方向锰的累积量比沿南北方向的好(图7)。

这个平均半变异函数有较好的趋势,可以用球状模型拟合它,得到公式如下:

$$\gamma(h) = N + C_1 \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1h^3}{2a^3} \right] \text{ 当 } h \leq a \quad (c)$$

其中各项的含义可以从图8看出:

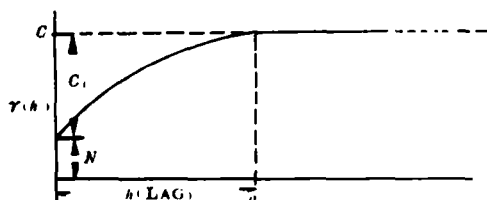


图8

N —块金效应; a —影响范围;

C_1 —一台基—块金效应

(2) 储量计算: 计算总储量(中等金属品位的矿石量和金属量)是地质统计学中的一个整体估算问题,如果采用规则的采样网格,并且数据服从正态分布,这时,算术平均值就是该矿床的中等金属含量的最好估计量。

如果只考虑钻孔中含锰品位高于30%的样品及最小厚度为2米,这就意味着只有含锰的累积量高

于60%的那些钻孔资料参加计算。有31个见矿的钻孔,其平均的含锰品位是46.36‰ ($S = 3.65\%$; $S^2 = 13.33\%$),平均厚度为9.94米 ($S = 6.98\%$; $S^2 = 48.72\%$),平均的锰—累积量是408.01‰·米 ($S = 365.00\%$; $S^2 = 133226.04 (\%)^2 \times \text{米}^2$)。

采用33个矩形(50×100米)组成的网格估算矿床面积,其中有二个矩形中没有钻孔,有一个矩形中有二个钻孔(图4),得到对矿床的估算面积为:

$$S = 33 \times 50 \times 100 = 165000 \text{ 米}^2$$

取矿石的平均密度为4.6克/厘米³,可以计算出矿床的矿石储量和金属量:

品位	46.36‰
厚度	9.94米
面积	165000.0米 ²
矿石密度	4.6克/厘米 ³
矿石量	7544460吨
金属量	3497611吨

3. 误差估算

误差估算常常是通过计算标准差来实现的,但是,如果数据有空间上的相互影响存在,那么,同时考虑到变异函数模型和样品的几何位置比只计算单一的数据会更正确。

(1) 估算锰—累积量的误差: 在“锰丘”矿床的例子中,钻探网的大部分是规则的,只有二个矩形中没有钻孔,有一个矩形中有二个钻孔。但是,如果采样网不规则,钻孔位置可以是一个矩形中的任何一点,钻探网是随机分层的。在一个“块段” v 内采样点(o)的方差(σ^2)用下述公式计算:

$$\sigma^2(o, v) = \frac{1}{v} \int_v dx \int_v \gamma(x - y) dx \quad (d)$$

这个积分称为“ F —函数”,它是块段—体积 v 内所有可能点(x, y)的“平均值”,对于比较简单的情况,也就是指二维问题,马特隆(1971)已经计算了一些诺谟图。从这些诺谟图(见图9)上,可以查到所需要的也是符合下列公式的数:

$$\frac{1}{C} F \left\{ \frac{l}{a}; \frac{h}{a} \right\} = \frac{1}{C} F \left\{ \frac{100}{100}; \frac{50}{100} \right\} = 0.52 \quad (e)$$

其中: C = 总体方差— N

a —影响范围; l —一块段长度; h —一块段宽度

从(d)式和(e)式,我们得到:

$$\sigma^2(o, v) = 0.52 C$$

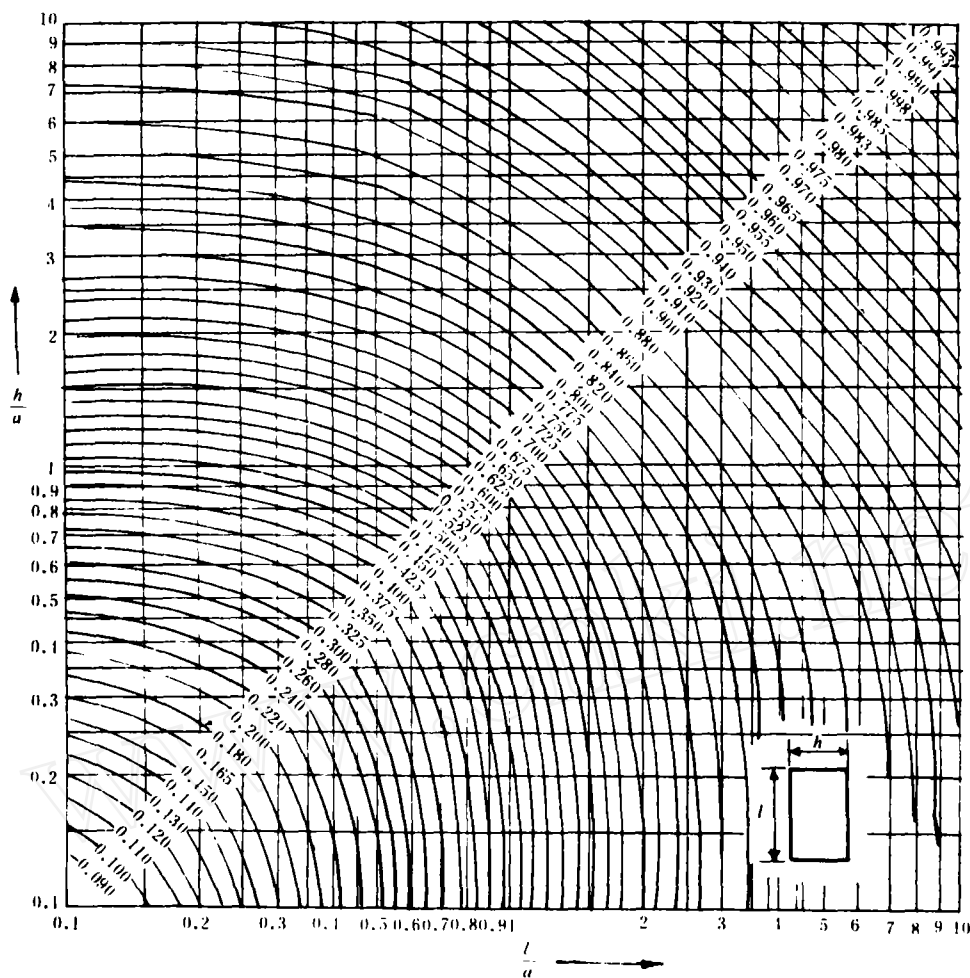


图9 在矩形 (h, l) 内一点的方差 σ^2 (或 S^2)，采用球状模型函数 $(1-C)F(h/a, l/a)$
(据 David, 1977)

其中: $N = 0$; $C = 133226.04$

$$\sigma^2(o, v) = 0 + 0.52 \times 133226.04$$

$$\sigma^2(o, v) = 69277.54 \text{ (} \mu\text{g} \times \text{米)}^2$$

这是对每个块段的估算误差，但是每个块段间彼此没有关系，对整个矿床，估算方差为：

$$\sigma^2 = \sigma^2(o, v) \cdot n \quad n \text{—块段数} \quad (f)$$

$$\sigma^2 = 69277.54 \cdot 33 = 2099.31 \text{ (} \mu\text{g} \times \text{米)}^2$$

$$\sigma = 45.82 \text{ (} \mu\text{g} \times \text{米)}$$

用平均的锰—累积量除 σ ，就得到锰—累积量的估算误差：

$$45.82 / 408.01 \times 100 = 11.22 \text{ (}\%)$$

(2) 面积估算的误差：估算面积之前，要画出矿体的轮廓线并将矿体划分为块段，估算面积的误差由这两个因素决定，可用下列公式（根据

David, 1977）计算这一误差。

$$\frac{\sigma^2}{S^2} = \frac{1}{n} \left\{ \frac{N_2}{6} + 0.061 \frac{N_1}{N_2} \right\} \quad N_2, N_1 \text{ (g)}$$

其中: n —块段数; N_1 —与南北方向平行的矩形边数;

N_2 —与东西方向平行的矩形边数

在“锰丘”矿床内，有13条矩形边平行于南北方向，有6条边平行东西方向；块段数是33，根据（g）式，很容易计算出面积的误差：

$$\frac{\sigma^2}{S^2} = \frac{1}{1089} \left\{ \frac{13}{6} + 0.061 \frac{6}{13} \right\} = 0.002$$

$$\frac{\sigma}{S} = 0.046$$

这里的面积估算误差是4.6%。

(3) 边缘效应：在估算的面积内又估算均值
(下转第34页)

作,以提高综合利用的研究程度;同时要研究综合利用中的分析技术、提取方法、经济政策、管理体制、产品销售渠道等问题。我国铁矿资源利用的程度能否提高,在很大程度上还取决于综合利用的程度。

3. 开发矿产资源的经济政策研究 世界上采掘工业发达的国家,都非常重视矿产资源开发的经济政策研究,制订鼓励和保护矿产资源开发的经济政策或条例。我国目前铁矿资源开发中,也

存在一些经济政策问题有待进一步研究,如矿石价格、矿山建设投资返本年限、基准收益率、折旧期和折旧率……,这些与资源开发密切相关的经济政策,都要根据我国资源特点,一一加以研究,制订出有利于资源开发的适宜的经济政策。

综上所述,我国铁矿资源利用程度的研究确是关系我国钢铁工业发展的现实问题。有许多问题急待解决,要有计划、有步骤逐一加以研究,使铁矿资源利用程度大大提高一步。

(上接第29页)

会引起另一个误差,根据Formery (1954), 这个误差是:

$$\sigma_{\text{SUP}}^2 = \frac{S^2}{\bar{x}^2} \times \frac{\sigma^2}{S^2} \quad (\text{h})$$

其中: S^2 = 锰—累积量的方差; $\bar{x}$ = 平均的锰—累

$$\text{积量}; \sigma_{\text{SUP}}^2 = \frac{365.00^2}{408.01^2} \times 0.002 = 0.0016;$$

$$\sigma_{\text{SUP}} = 4.12\%。$$

(4) 锰—累积量的总估算误差: 锰—累积量的总估算误差的计算公式为

$$\frac{\sigma_i^2}{\bar{x}^2} = \frac{\sigma^2}{\bar{x}^2} + \sigma_{\text{SUP}}^2 \quad (\text{i})$$

$$\frac{\sigma_i^2}{\bar{x}^2} = \frac{2099.31}{408.01^2} + 0.0016 = 0.014$$

$$\frac{\sigma_i}{\bar{x}} = 0.119$$

(5) 对金属含量的估算误差: 如果已知金属含量的估算误差, 该矿床总金属量的估算精度也就已知了。用下列公式计算金属含量的估算误差:

$$\frac{\sigma^2}{Q^2} = \frac{\sigma_i^2}{\bar{x}^2} + \frac{\sigma^2}{S^2} \quad (\text{j})$$

勘

误

$$\frac{\sigma^2}{Q^2} = 0.014 + 0.002 = 0.016$$

$$\frac{\sigma}{Q} = 0.1265$$

金属含量的估算误差是12.65%。

结 语

一个矿床的特征常常是用一些参数表示的, 研究地质统计学方法就是为了研究这些参数间的相关关系。这种方法不仅可说明相关关系, 还可有助于判断各估算阶段和整体估算的估算误差

这个简单例子只能对地质统计学作些介绍, 不能说明这个方法的全部优点。这里所列举的计算还只是在投资分析, 选择开采和采区分配 (对多于一种矿物的情况) 等方面的初步工作。

需要对此作更多更详细的了解可以参考许多有关地质统计学方法、克立格法以及它们的用途等方面的书籍和刊物。

(吴 明译)

本刊1982年第11期41页倒数第1行, 下转第24页, 应为第26页; 第26页第1行, 上接第35页, 应为第41页。