

矿产资源量估计法在金矿中的应用

郭万超, 郭光裕

(天津地质研究院, 天津 300061)

摘 要: 大比例尺矿床统计预测中, 矿产资源量的估计是矿体定位预测的前提, 其中精度最高的方法是体积估计法。文章借助实例分析, 对体积估计法的计算程序进行了阐述。以区间概率解析法对矿脉和矿化体在垂向空间的金品位进行分解, 解析出其金品位统计分布模型; 利用波形分布模型对深部盲区进行预测, 对各中段的金品位、矿化体体积、矿石在矿化体中的体积分数进行解析和计算; 并利用有效探矿指数进行合理的校正, 最后得到近似于地质储量的金矿产资源量, 为下一步的矿体定位预测提供定量数据。经计算该矿重点预测区(-290 m ~ -810 m 标高) 预测的有效金矿产资源量为 70.28 t, 经部分工程控制, 已获 D+ E 级金储量 18 t。

关键词: 资源量; 区间概率解析法; 波形分布模型; 统计预测; 筛分

中图分类号: P628; P618.51 文献标识码: A 文章编号: 1001-1412(2002) 03-0203-09

资源是指地壳内部或表面天然形成的固、液、气态物质的富集体。它是在矿体的各种标志值未知的情况下, 依据资源量与控矿地质标志之间的关系推断得到的数值, 依其产出的概率大小来评价它的可靠性。任何一个矿床的资源预测, 都要解决两个问题。其一是预测区有没有矿产资源潜力? 若有, 有多少? 是否具有工业利用价值? 其二是预测区的潜力资源集中分布在哪些空间部位? 前者是定量问题, 后者是定位问题, 并且前一项工作是开展后一项工作的前提条件。

在大比例尺矿床统计预测的矿产资源量估计中, 精度最高且应用最广的方法是体积估计法。即设计求出预测区矿体体积、矿石平均体重、矿石有用组分平均品位, 用下列数学模型计算预测区的矿产资源总量:

$$A = VDCK$$

式中: A 为预测区有用组分有效矿产资源总量, V 为预测区矿体体积累加值, D 为矿石平均体重, C 为矿石有用组分区间概率加权平均值, K 为有效探矿指数。在储量计算中, 矿体体积、矿石体重、矿石品位等都是通过勘探工程揭露、测量、取样分析后计算出来的。但对地质情况不明的深部预测区而言, 只能在上部已知资料数据的基础上, 应用一定的数学方法进行估计。另外, 我们开展矿产资源量估计的目的是为了指导深部的探矿工作。最理想的结果是求出一个

近似于地质储量的量。因而, 我们在矿产资源量数学模型中加入一个被称作有效探矿指数的乘子 K 。该乘子参加计算后, 去掉了漏失的地质储量和常规资源量中那些没有现行开采价值、而将来有可能成为有经济价值的开采对象, 使估计出的资源量接近于地质储量。我们称其为有效矿产资源量。

本文以山东某金矿为实例, 介绍已知矿山深部探矿盲区矿产资源量的估计方法。研究对象为一资源危机的金矿山, 开采对象为产于花岗岩体中的中温热液充填型金矿床。成矿时代为中生代。由 4, 52, 47, 47 支, 48, 18, 10, 50 等 8 条矿脉及其支脉构成。矿脉由含金黄铁矿石英、含金黄铁矿绢英岩组成。矿脉产状严格受 NE 向, NNE 向, NEE 向断裂构造控制。矿脉地表出露高度为 270 m。-90 m 标高以上空间由系统的坑探工程和钻探工程控制。-90 m ~ -300 m 标高所在空间有少量的钻探工程。-300 m 标高以下空间为地质探矿盲区。经多年的开采, -90 m 标高以上的金矿石几近采空, 深部探矿工作迫在眉睫。因而有必要对矿床深部开展矿体定量定位预测工作。

1 矿石金平均品位

对地质情况不明的深部预测区而言, 矿石金品位只能通过一定的统计分布模型和空间分布模型进

行估计。对于热液型金矿床而言,可以把矿脉群看作一个独立的矿化空间。矿石金品位必然遵从某种分布律。若能模拟出金品位的统计分布模型,依照模型就能求出矿石金品位在分布模型中所占百分率,用概率加权平均的方法即能估计出矿石金平均品位。

地质作用的长期性、复杂性,往往使地质体经历多个形成阶段。对地质体取样观测所得数据大多数是多种成因及多次作用叠加的产物。它们往往表现为多个总体叠加的混合分布。单一总体分布律的研究和混合分布总体的筛分,可在概率纸上进行。单一正态分布总体累积概率在正态概率纸上表现为一条直线。直线上对应于累积概率 50% 的变量是总体平均数,对应于累积概率 15.87% 和 84.13% 的变量分别是总体平均数减、加均方差。混合分布总体累积概率在正态概率纸上表现为一条有明显拐点的曲线。A. J. 辛格莱(A. J. Sinclair)认为,混合分布总体累积概率与组成它的各单一分布总体累积概率间有下列关系:

$$P(A + B + C + \dots) = f^A P(A) + f^{B+C+\dots} P(B + C + \dots)$$

式中: $P(A + B + C + \dots)$ 为混合分布总体累积概率, $P(A)$ 为单一分布总体 A 累积概率, $P(B + C + \dots)$ 为剩余分布总体累积概率, f^A 为单一分布总体 A 在混合分布总体中所占百分数, $f^{B+C+\dots} = 1 - f^A$ 为剩余

分布总体在混合分布总体中所占百分数。

累积概率曲线上的拐点是分布总体 A 和剩余分布总体在混合分布总体中所占比例的分界点,不言而喻,找到了拐点就确定了分布总体 A 在混合分布总体中所占百分数。此外,当累积概率曲线从拐点处向左移动到一定信息水平时,混合分布总体累积概率将主要由分布总体 A 的累积概率构成。剩余分布总体累积概率在该处为可以忽略不计的一个微小数字。因此,可以用混合分布总体在该信息水平上的累积概率估计分布总体 A 的累积概率。从而十分精确地把分布总体 A 筛分出来。重复上述筛分过程,筛分出总体 B、总体 C,直到把全部总体筛分出来。为研究脉群金的统计分布特征,在研究区内 270 m ~ - 90 m 标高间的 9 个中段地质平面图(比例尺 1:200)上,收集刻槽取样(样长 1 m 左右)样品金品位数据 22 621 个。金品位变化范围 $w(Au) = 0.02 \times 10^{-6} \sim 402 \times 10^{-6}$,最高 $1 194 \times 10^{-6}$ 。对其进行自然对数变换,变换后的数据在 - 3.912 0 ~ 5.996 5 间变化。取对数值分组间隔 0.555 3,共分 15 组。计算各组的组中值、频数、频率、累积频率并作图。累积频率在正态概率纸上表现为一条曲线(图 1)。因此,判断它是一个混合分布总体。于是用辛格莱的方法进行筛分,得到 3 个对数正态分布总体(表 1,图 1)。

表 1 矿区金品位统计分布特征及筛分结果

Table 1 Screen results of Au ore grade statistical distribution characteristics

组中值 ($w(Au)/10^{-6}$)	频数	频率	混合分布总体累积概率		分布总体	累积概率	分布总体	累积概率	分布总体	累积概率
			实测值	理论值	理论值	在混合分布总体中的值	理论值	在混合分布总体中的值	理论值	在混合分布总体中的值
314.0812	78	0.0034	0.0034	0.0024	0.0075	0.0024	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
136.5460	139	0.0061	0.0096	0.0097	0.0302	0.0097	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
78.3617	272	0.0120	0.0216	0.0211	0.0656	0.0211	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
44.9706	449	0.0198	0.0415	0.0409	0.1269	0.0409	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
25.8079	681	0.0301	0.0716	0.0713	0.2200	0.0709	0.0012	0.0004	0.0000	0.0000
14.8108	02	0.0399	0.1114	0.1137	0.3433	0.1106	0.0085	0.0031	0.0000	0.0000
8.4997	1361	0.0602	0.1716	0.1717	0.4861	0.1566	0.0413	0.0151	0.0000	0.0000
4.8778	1846	0.0816	0.2532	0.2539	0.6308	0.2032	0.1386	0.0506	0.0001	0.0000
2.7993	2525	0.1116	0.3648	0.3666	0.7588	0.2445	0.3311	0.1210	0.0037	0.0012
1.6065	3188	0.1409	0.5058	0.5041	0.8580	0.2764	0.5843	0.2134	0.0458	0.0143
0.9219	3565	0.1576	0.6634	0.6681	0.9251	0.2981	0.8058	0.2944	0.2420	0.0756
0.5291	4255	0.1881	0.8515	0.8439	0.9647	0.3108	0.9348	0.3415	0.6131	0.1916
0.3036	2432	0.1075	0.9590	0.9581	0.9853	0.3175	0.9847	0.3597	0.8988	0.2809
0.1743	597	0.0264	0.9854	0.9936	0.9945	0.3204	0.9975	0.3644	0.9881	0.3088
0.1000	331	0.0146	1.0000	0.9991	0.9982	0.3216	0.9997	0.3652	0.9994	0.3123

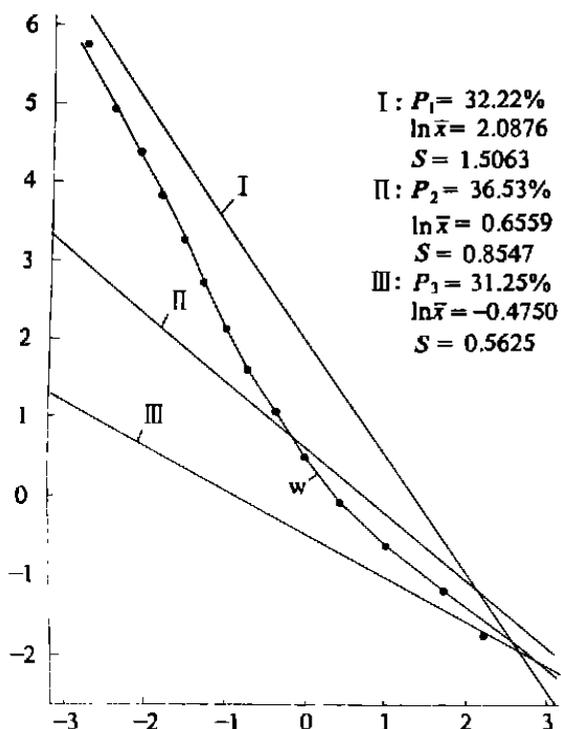


图1 矿区金品位混合分布总体筛分结果

Fig.1 Screen results of the mixed gold grade statistical distribution of mining area

筛分出的单一分布总体累积概率曲线 w 混合分布总体累积概率理论分布曲线 \cdots 混合分布总体累积概率实测值

把各单一分布总体复合成混合分布总体后,在概率纸上,混合分布总体累积概率实测值和混合分布总体累积概率分布曲线紧密伴随(图1)。表明筛分出的3个对数正态分布总体是客观的。其中,分布总体在混合分布总体中占32.22%,几何平均值 $w(Au) = 8.07 \times 10^{-6}$,密度分布函数为:

$$P_1(u) = \frac{1}{1.5063} \frac{1}{2\pi} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{u-2.0876}{1.5063}\right)^2\right] \quad (u = \ln x)$$

分布总体在混合分布总体中占36.53%,几何平均值 $w(Au) = 1.93 \times 10^{-6}$,密度分布函数为:

$$P_2(u) = \frac{1}{0.8547} \frac{1}{2\pi} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{u-0.6559}{0.8547}\right)^2\right] \quad (u = \ln x)$$

分布总体在混合分布总体中占31.25%,几何平均值 $w(Au) = 0.62 \times 10^{-6}$,密度分布函数为:

$$P_3(u) = \frac{1}{0.5625} \frac{1}{2\pi} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{u+0.4750}{0.5625}\right)^2\right] \quad (u = \ln x)$$

据矿石矿物组合特征、金及伴生元素地球化学特征研究发现,第I分布总体表征第一阶段金矿化。在该阶段中,金矿化富集程度低,金品位变化不大,一般 $w(Au) = 0.2 \times 10^{-6} \sim 1.92 \times 10^{-6}$,最高 $w(Au) = 3.36 \times 10^{-6}$ 。 $w(Au) = 3 \times 10^{-6}$ 以上者在该阶

段矿化中占0.26%,在矿床中占0.08%。提供的金矿产资源总量占矿床金资源总量的0.25%,意义不大。

第II分布总体表征第二阶段金矿化,在该阶段中,金富集程度很高,金品位变化较大,一般 $w(Au) = 0.4 \times 10^{-6} \sim 164 \times 10^{-6}$,最高 739.9×10^{-6} 。 $w(Au) = 3 \times 10^{-6}$ 以上者在该阶段矿化中占74.43%,在矿床中占23.98%。提供的金矿产资源总量占矿床金资源总量的70.87%。是最重要的金矿化阶段。

第III分布总体表征第三阶段金矿化,在该阶段中,金品位变化幅度不大,一般 $w(Au) = 0.35 \times 10^{-6} \sim 10.65 \times 10^{-6}$,最高 $w(Au) = 25.03 \times 10^{-6}$ 。 $w(Au) = 3 \times 10^{-6}$ 以上者在该阶段矿化中占30.33%,在矿床中占11.08%。提供的金矿产资源总量占矿床金资源总量的28.88%。是较重要的金矿化阶段。

在矿化体的不同空间上,金矿化强度不同,反映在组成矿化体的各个矿脉以及矿化体所在的各个中段上,金品位统计分布特征也是不一样的。为评价各个矿脉的矿化强度,以及金矿化在垂直空间上的变化,本文应用了区间概率解析法。该方法借助于矿化体金品位统计分布模型,对矿脉和矿化体垂向各中段金品位进行分解,解析出各矿脉以及矿化体金品位统计分布模型。具体做法如下:

(1) 以金品位分组区间为单位,把矿化体各单一分布总体在混合分布总体中的区间概率变换成相对百分率 $P_i (i = 1, 2, \dots)$ 。

(2) 将矿脉或某中段上矿化体金品位数据按矿化体的分组方式分组,统计各组的频数,计算频率 $Q_j (j = 1, 2, \dots)$ 。

(3) $P_{ij} Q_j$ 表征矿脉或某中段上矿化体第 i 个单一分布总体的第 j 个分组区间在混合分布总体中的概率。

(4) $\sum_j P_{ij} Q_j$ 表征分布总体 i 在混合分布总体中所占比例。

(5) $(P_{ij} Q_j) / (\sum_j P_{ij} Q_j)$ 表征分布总体 i 在第 j 个分组区间上的概率。

(6) 以单一分布总体在分组区间上的概率为权重,求出平均数、均方差。

(7) 进行正态分布的偏度、峰度检验。检验结果为正态分布时,确定该模型为某矿脉或某中段上矿化体的一个单一分布总体。

首先应用区间概率解析法对矿化体中的各矿脉金品位进行解析,表2列出了各矿脉金品位统计模

型参数。包括统计的样本大小(n)、单一分布总体在混合分布总体中所占比例(P_i)、单一分布总体平均数(\bar{x}_i)、单一分布总体均方差(S_i)、单一分布总体检验偏度与峰度值(q_{i1}, q_{i2})、分布总体中金品位 3×10^{-6} 的矿石在矿化体中所占体积分数(t_i)、金品位区间差加权值代数(Δ_i)。其中的金品位区间差加权

值代数和是以矿化体在混合分布总体和各单一分布总体的区间概率为参照值, 计算矿脉混合分布总体和各单一分布总体区间概率与矿化体相应的区间概率之差后, 乘以该区间的组中值即为区间概率差加权值。其代数和表征矿脉矿化强度的相对大小。

表2 各矿脉金品位统计分布模型参数区间概率解析结果表

Table 2 Probability analysis of model parameter intervals of Au grade statistical distribution for various ore veins

矿脉编号	4	52	47	47支	48	18	10	50
n	3187	2797	2720	3535	2736	3506	2214	2101
P_1	0.2876	0.3283	0.3173	0.3450	0.2973	0.3774	0.2738	0.2984
\bar{x}_1^*	1.6480	1.8883	1.7579	1.8821	1.6648	2.0520	1.5466	1.5199
S_1^*	1.4798	1.5916	0.6332	1.4691	1.4996	1.5002	1.5973	1.3802
q_{11}	0.0259	0.0386	0.0915	0.0174	0.0013	0.0137	0.0058	0.0162
q_{12}	2.4625	2.4092	2.4154	2.3601	2.3960	2.4192	2.4131	2.4108
t_1	0.6448	0.6901	0.6568	0.7031	0.6471	0.7375	0.6105	0.6197
Δ_1	-2.8775	3.6988	0.6704	1.3393	-1.7372	5.4431	-1.8019	-6.2990
P_2	0.3685	0.3521	0.3559	0.3759	0.3613	0.3710	0.3566	0.3804
\bar{x}_2	0.3216	0.3361	0.3322	0.4389	0.3395	0.4786	0.2543	0.4028
S_2	0.8582	0.8933	0.9048	0.8410	0.8918	0.8281	0.8987	0.8748
q_{21}	0.0204	0.0386	0.1038	0.0112	0.0239	0.0258	0.0230	0.0492
q_{22}	2.4254	2.4092	2.3232	2.3799	2.4110	2.3451	2.3790	2.4032
t_2	0.1826	0.1996	0.1995	0.2164	0.1974	0.2270	0.1738	0.2133
Δ_2	-0.1355	-0.0386	-0.0717	0.0850	-0.0607	0.1650	-0.2126	0.0305
P_3	0.3440	0.3196	0.3267	0.2791	0.3414	0.2516	0.3697	0.3215
\bar{x}_3	-0.7540	-0.7649	-0.8590	-0.6675	-0.8104	-0.6150	-0.8326	-0.7356
S_3	0.5556	0.6111	0.6725	0.5688	0.5862	0.5754	0.6148	0.5967
q_{31}	0.0549	0.1301	0.1194	0.0542	0.0318	0.1429	0.0905	0.0309
q_{32}	2.3838	2.3109	2.3728	2.2670	2.3544	2.2274	2.3369	2.3684
t_3	0.0004	0.0014	0.0018	0.0010	0.0006	0.0015	0.0008	0.0008
Δ_3	-0.0077	-0.0031	-0.0346	0.0434	-0.0292	0.0742	-0.0369	-0.0127
t_0	0.2529	0.2962	0.2800	0.3242	0.2639	0.3629	0.2294	0.2663
Δ_0	-1.4603	1.2857	0.0860	0.9197	-0.9766	3.0981	-1.4216	-2.2577

* 平均数、均方差为自然对数值, t_0 为矿脉在矿化体中所占体积分数, Δ_0 为矿脉金品位区间差加权值代数和。

不难看出, 各矿脉金品位虽然都遵从对数正态分布, 但分布模型参数各不相同。表明组成矿化体的各矿脉矿化强度各不相同。由大到小依次为 18, 47支, 52, 47, 48, 50, 4, 10。

表3是各中段矿化体金品位统计模型参数区间概率解析法解析结果。其内容与表2一样, 只是多了一项金矿石平均品位(C_0)。该标志是矿石金品位的区间概率加权平均值。

从表3可见, 在矿化体的垂向空间上, 金矿化强度不同。自上而下, 矿化强度时大时小, 呈现出一种波形分布特征。但总体向深部矿化强度是增大的。

2 矿体体积

众所周知, 断裂构造、裂隙是一定方向的应力作用于地质体形成的。而这种应力在地质体中是以波的形式传递的。特别当地质体成分和结构相对均匀时, 断裂构造在地质体中的形迹呈波形分布。波具有周期性, 在应力传播的方向上, 波形按周期重复出现。在一个周期内部, 波的不同位置上, 力对地质体作用的大小和方向各不相同, 形成的断裂裂隙性质

和规模也不一样。反映在受控于该断裂构造的矿脉上, 其走向、倾向、倾角等产状要素在不同空间上均会发生变异。矿脉厚度、矿石品位、矿体形态、规模等矿化要素也会在不同空间上发生变异。随着波形的周期性变化, 上述矿脉产状要素和矿化要素的变异

会在空间上周期性重复出现。

地质作用过程和实验过程不同, 它具有漫长的时间, 广阔的空间, 以及地质因素多种多样、错综复杂等特点。地质过程的每个阶段, 都伴随着新地质作用产物的出现和对旧地质作用产物的改造。我们在

表 3 各中段矿化体金品位统计分布模型参数区间概率解析结果

Table 3 Probability analysis of model parameters intervals of Au grade statistical distribution for mineralized bodies at all levels

中段	250m	210m	170m	130m	90m	50m	10m	- 30m	- 70m
n	1942	3521	5511	4107	3221	1818	1061	936	504
P_1	0.3917	0.2999	0.2902	0.3061	0.3182	0.3454	0.3879	0.4056	0.3415
$\overline{x_1}^*$	1.8949	1.6078	1.6395	1.7874	1.8610	1.8046	2.1633	2.2308	1.8644
S_1^*	1.4458	1.6971	1.5263	1.5013	1.4939	1.3267	1.4986	1.4774	1.3974
q_{11}	0.1195	0.0951	0.0136	0.0512	0.0635	0.0345	0.0510	0.0265	0.0540
q_{12}	2.2440	2.4090	2.4014	2.4695	2.4852	2.4427	2.4742	2.4693	2.4695
t_1	0.7091	0.6179	0.6385	0.6768	0.6951	0.7026	0.7613	0.7783	0.7081
Δ_1	0.0795	- 0.3684	- 1.3537	0.3315	1.6380	- 3.2204	8.3668	8.9913	- 0.5526
P_2	0.3596	0.3483	0.3612	0.3718	0.3763	0.3865	0.3679	0.3606	0.3914
$\overline{x_2}$	0.5599	0.2836	0.3212	0.3474	0.3543	0.4813	0.4742	0.4876	0.4157
S_2	0.9359	0.9525	0.8899	0.8335	0.8110	0.8305	0.8178	0.8224	0.7834
q_{21}	0.1982	0.1356	0.0430	0.0727	0.1432	0.0580	0.1196	0.1452	0.1750
q_{22}	2.2858	2.3282	2.4009	2.4273	2.4233	2.4576	2.4394	2.4436	2.3828
t_2	0.2825	0.1961	0.1912	0.1838	0.1794	0.2287	0.1196	0.2288	0.1916
Δ_2	0.4472	- 0.1151	- 0.1075	- 0.0997	- 0.0963	0.1719	0.1615	0.2127	- 0.0021
P_3	0.2488	0.3519	0.3488	0.3222	0.3056	0.2686	0.2451	0.2340	0.2672
$\overline{x_3}$	- 0.9277	- 0.9653	- 0.8433	- 0.6567	- 0.5747	- 0.5830	- 0.5175	- 0.4878	- 0.4846
S_3	0.7490	0.7087	0.6036	0.4915	0.4522	0.4780	0.4542	0.4328	0.4348
q_{31}	0.0061	0.0472	0.0591	0.0875	0.3056	0.1516	0.1325	0.1934	0.1612
q_{32}	2.5074	2.4449	2.4043	2.2325	2.2847	2.2757	2.2866	2.2908	2.2510
t_3	0.0034	0.0018	0.0006	0.0002	0.0001	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001
Δ_3	- 0.0382	- 0.0735	- 0.0402	0.0297	0.0688	0.0718	0.1055	0.1203	0.1226
t_0	0.3802	0.2911	0.2886	0.3258	0.3479	0.3702	0.4447	0.4659	0.3755
Δ_0	1.3686	- 0.5838	- 1.0029	- 0.1864	0.4817	- 0.5845	4.4743	5.1793	0.2178
C_0	7.24	6.49	5.99	6.17	6.30	6.30	7.32	9.12	6.30

* 平均数、均方差为自然对数值

野外观察到的仅仅是地质历史中某一瞬间各种因素综合的结果。大多数情况下, 不同时期、不同阶段地质作用产物在空间上叠加在一起。我们在野外观测的每一个地质点、采取的每一件矿石样品都包含着多个矿化阶段的信息。一个样品空间也可能包含不同深度上多个矿体的信息。具体到一个断裂构造、裂隙, 受多期或多组构造作用, 在空间形态上, 表现为多个波的叠加。即使在成分和结构相对均匀的地质体中, 呈现在人们面前的, 也是一条不规则的波形裂隙组合。如果能把这个波形分解为若干个单一的波, 并且能把每个单一的波合成为混合波, 就能利用波

的周期性变化在未知区预测断裂构造形迹, 以及相应的矿脉产状要素和矿化要素。从而推断出深部预测区的地质环境。

用一维规则观测数据的傅立叶趋势面分析方法可以进行复杂波的分解与合成。由于波是沿地质作用力传播方向分布的, 在分解复杂波之前, 应首先确定波轴。多数情况下, 波轴是一条直线。当构造和(或)地质体结构成分十分复杂时, 波轴有可能为曲线或折线。波轴确定以后, 对原始观测值进行变换, 使之成为沿波轴分布的波幅值。在此基础上, 通过一维观测数据的调和趋势面分析方法, 把复杂的波分

解成单一波, 并把单一波合成为复杂的波。应用的数学模型为:

$$\begin{cases} \hat{D}_i = \hat{Y}_i + \hat{Z}_i / \cos(\arctg b) \\ \hat{Y}_i = f(x_i) \\ \hat{Z}_i = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^s (A_n \cos \frac{n\pi x_i}{L} + B_n \sin \frac{n\pi x_i}{L}) \\ A_n = \frac{2}{N-1} (\frac{Z_0 + Z_{N-1}}{2} + \sum_{i=1}^{N-2} Z_i \cos \frac{n\pi x_i}{L}) \quad n=0, 1, 2, \dots, s \\ B_n = \frac{2}{N-1} \sum_{i=1}^{N-2} Z_i \sin \frac{n\pi x_i}{L} \quad n=1, 2, \dots, s \\ Z_i = \cos(\arctg b) * (D_i - \hat{Y}_i) \end{cases}$$

式中: x 为自变量(观测点对应坐标值);

D 为观测值;

N 为观测点数;

Z 为波幅;

A 为余弦波系数;

B 为正弦波系数;

L 为基本取样长度之半;

s 为最大调和数;

\hat{Y} 为波轴估计值;

b 为波轴线性方程式中的斜率。当波轴为曲线时, b 为经线性变换后直线方程中的斜率;

\hat{D} 为观测点的估计值;

\hat{Z} 为波幅估计值。

用波形分布模型对观测点进行估计时, 会产生一定的误差, 如果误差太大, 就不能用该模型进行预测。为此用拟合度:

$$C = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^m (D_i - \hat{D}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (D_i - D)^2} \right] \times 100\%$$

来评价估计值 \hat{D}_i 与观测值 D_i 的贴进度。当大多数观测点的拟合度在 70% 以上时, 就可以用波形分布模型进行预测。

具体操作时, 首先对 270 ~ -90 m 标高间已知 9 个中段的矿石金品位估计值进行波的分解与合成。表 4 列出了矿石金品位估计值与实测值。可以看出, 二者的最大绝对误差值为 0.446 1, 平均值为 0.049 6。最大相对误差值 -0.003 3, 平均值为 -0.000 4。拟合度为 77.9%, 表明模拟的矿石金品位估计值与真实值十分接近, 可用于金矿产资源量的计算。于是用该波形分布模型按 40 m 一个中段, 估计出 -90 ~ -810 m 标高空间内的 18 个中段的矿石金平均品位估计值参加预测空间的金矿产资源

量计算(表 5)。从图 2 可见, 金矿石平均品位在垂向空间上呈复杂的波形分布, 在 130 ~ 50 m, -190 ~ -270 m, -510 ~ -590 m 标高处形成波谷, 在 -30 m, -350 m, -670 m 标高处构成波峰。而总体自上而下呈上升的趋势。

表 4 矿石金品位波形分布模拟结果

Table 4 Stimulation results of wavy distribution of Au ore grade

中段(m)	实测值 C (10^{-6})	估计值 C' (10^{-6})	$C - C'$	$\frac{C - C'}{C}$
250	1.98	1.8731	0.1069	0.0540
210	1.87	1.8403	0.0297	0.0159
170	1.79	1.8137	0.0237	-0.0132
130	1.82	1.7893	0.0307	0.0169
90	1.84	1.8583	0.0183	-0.0099
50	1.84	1.8097	0.0303	0.0165
10	1.99	2.0154	0.0254	-0.0128
-30	2.21	2.1820	0.0280	0.0127
-70	1.84	1.9931	0.1531	-0.0033
Σ			0.4461	-0.0033
x			0.0496	-0.0004

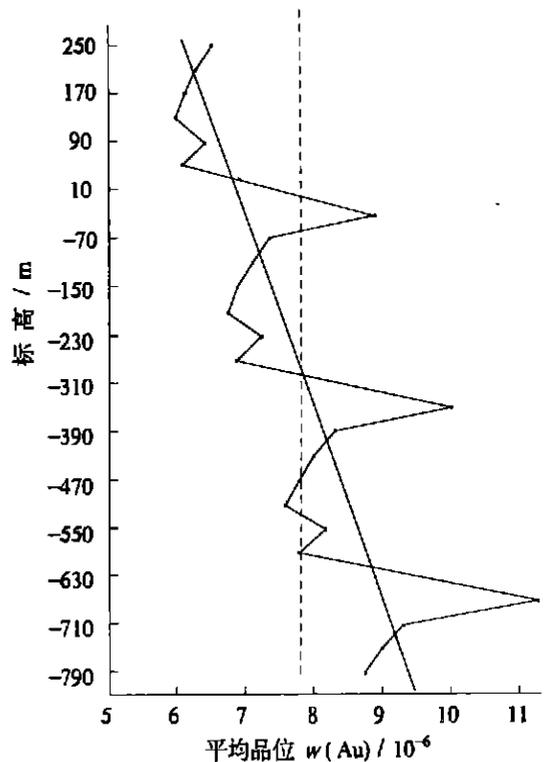


图 2 金矿石平均品位垂向变化特征

Fig.2 Vertical variation of Au ore grade

表 5 各中段金矿产有效资源量计算结果

Table 5 Calculation of effective Au mineral resource for all levels

标高 (m)	矿脉累加 厚度(m)	矿化体体积 (m ³)	矿体占矿化体 体积分数(%)	矿体体积 (m ³)	矿石量 (t)	平均品位 (w(Au)/10 ⁻⁶)	有效资源量 (t)
250	23.5369	1694656.8	31.56	534833.7	1481489.3	6.51	3.01
210	26.4369	1903456.8	25.61	487475.3	1350306.5	6.30	2.66
170	29.1983	2102277.6	25.36	533137.6	1476791.2	6.13	2.83
130	26.9041	1937095.2	27.69	536381.7	1485777.2	5.99	2.78
90	33.4658	2409537.6	28.77	693224.0	1920230.4	6.41	3.85
50	25.6186	1844539.2	33.24	613124.8	1698355.8	6.10	3.24
-10	16.9958	1223697.6	37.62	460355.0	1275183.5	7.50	2.99
-30	21.4186	1542139.2	39.95	616084.6	1706554.4	8.86	4.72
-70	16.2386	1169179.2	37.93	443469.7	1228411.0	7.34	2.82
-110	20.6327	1485554.4	31.97	474931.7	1315560.9	7.10	2.92
-150	24.0613	1732413.6	31.72	549521.6	1522174.8	6.91	3.29
-190	22.4113	1613613.6	34.05	549435.4	1521936.1	6.75	3.21
-230	30.3475	2185020.0	35.13	767597.5	2126245.1	7.23	4.80
-270	23.8075	1714140.0	39.60	678799.4	1880274.4	6.88	4.04
-310	16.6463	1198533.6	43.98	527115.1	1460108.7	8.46	3.86
-350	19.0727	1373234.4	46.31	635944.9	1761567.2	9.99	5.50
-390	17.4208	1254297.6	44.29	555528.4	1538813.7	8.27	3.98
-430	20.2322	1456718.4	38.34	558505.8	1547061.2	8.00	3.87
-470	23.4941	1691575.2	38.08	644151.8	1784300.6	7.79	4.34
-510	23.5202	1693454.4	40.42	684494.3	1896049.1	7.60	4.50
-550	30.1355	2169756.0	41.49	900231.8	2493642.0	8.14	6.34
-590	25.3600	1825920.0	45.97	839375.4	23530699	7.76	5.64
-630	20.0327	1442354.4	50.34	726081.2	2011244.9	9.53	5.99
-670	21.6258	1557057.6	52.68	820257.9	2272114.5	11.26	7.99
-710	0.8266	1499515.2	50.66	759654.4	2104242.7	9.32	6.13
-750	23.1877	1669514.4	44.70	746272.9	2067176.0	9.02	5.83
-790	25.9391	1867615.2	44.45	830155.0	2299529.2	8.78	6.31

如上所述,在资源量估计中,矿体体积是通过矿化体体积和矿体在矿化体中所占比例求得的。我们确定矿化体长度(沿矿脉群走向方向)为 1 800 m,矿化体高度 1 080 m,由 27 个中段(每中段高 40 m)控制。矿化体宽度由各矿脉在各个空间上的累加宽度来表征。矿脉宽度是受断裂裂隙控制的一种矿化要素。它在空间上的轨迹和厚薄变化也具有复杂的波形分布特征。于是深部预测区的矿脉发育特征可以应用波形分布模型进行预测。具体操作时,在预测区范围内,从 10 线到 100 线,以 50 m 间距垂直于基线作剖面,在 270 ~ - 90 m 标高间已知 9 个中段切割的剖面上,测取矿脉相对于基线 I 的距离和矿脉在剖面线上的水平宽度值。在此基础上进行波的分解与叠加,考虑到预测区各矿脉严格受控于 NE 向、NNE 向和 NEE 向 3 组断裂构造,在波的分解过程中,把调和数确定为 3。基本取样长度确定为 320 m。应用的具体数学模型如下:

$$\begin{cases} \hat{D}_i = \hat{Y}_i + \hat{Z}_i / \cos(\arctg b) \\ \hat{Y}_i = a + bx_i \\ \hat{Z}_i = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^3 (A_n \cos \frac{n\pi x_i}{160} + B_n \sin \frac{n\pi x_i}{160}) \\ A_n = \frac{1}{4} \left[\frac{Z_0 + Z_8}{2} + \sum_{i=1}^7 Z_i \cos \frac{n\pi x_i}{160} \right] \quad n = 0, 1, 2, 3 \\ B_n = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^7 Z_i \sin \frac{n\pi x_i}{160} \quad n = 1, 2, 3 \\ Z_i = (D_i - \hat{Y}_i) \cdot \cos(\arctg b) \end{cases}$$

经计算机处理,在 36 条剖面上得到矿脉与基线 I 之间距离的波形分布模型和矿脉水平宽度波形分布模型各 333 组。对 333 个矿脉与基线 I 之间距离的波形分布模型拟合度统计计算,拟合度数值大多数在 85% 以上,最大值 99.99%,最小值 48.43%,平均值 91.10%,均方差 9.95%,变异系数 0.109 2。对 333 个矿脉水平宽度波形分布模型拟合度统计计算,拟合度数值大多数在 80% 以上,最大值 100%,最小

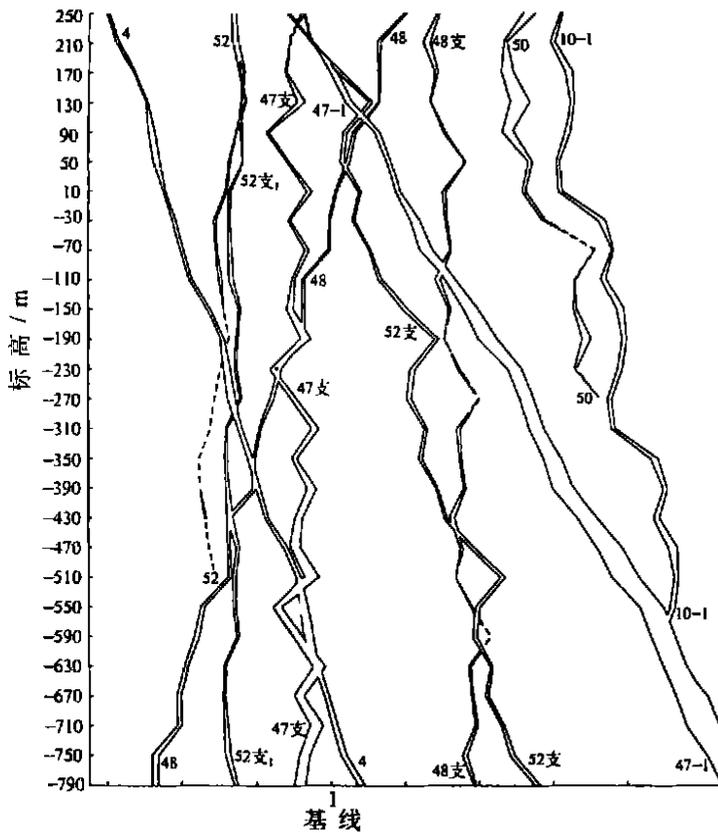


图3 95线矿脉空间分布预测剖面图

Fig. 3 The predicted spatial distribution in profile along line 95

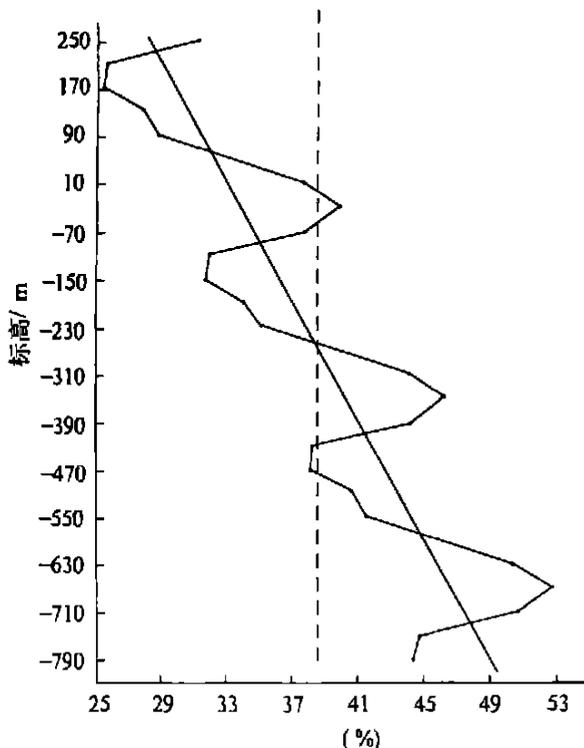


图4 矿体在矿化体中所占体积分数垂向变化特征

Fig. 4 Vertical volumetric percentage variation of ore bodies in mineralized body

值 36.21%，平均值 83.95%，均方差 12.83%，变异系数 0.1528。表明矿脉水平宽度和矿脉与基线 I 之间距离的波形分布模型可用。于是应用各类波形分布模型向深部每 40 m 一个点进行预测，得到 18 条矿脉在 36 条剖面上，上自 250 m 标高，下至 -790 m 标高各预测点的矿脉与基线 I 之间距离的估计值和矿脉水平宽度估计值各 8 910 个。前者标定控制断裂构造形迹在空间各点上的位置，表征断裂构造的产出特征；后者估计矿脉在空间各点上的水平宽度，表征矿脉在不同空间上的发育程度。图 3 表示 95 线上 10 条矿脉向深部呈波形分布特征。不难看出，各矿脉在垂向空间上产状不同，发育程度各异。将同一中段上矿脉厚度累加作为矿化体在该中段上的宽度。进而计算各中段矿化体体积(表 5)。

前已述及，矿体体积等于矿化体体积与矿体占矿化体体积分数之乘积。根据上部已知区各中段金品位统计分布模型可求出各中段金品位任何含量区间在矿化体中的体积分数。表 3 中已经列出了已知各中段金品位 $w(\text{Au}) > 3 \times 10^{-6}$ 的矿石在矿化体中的体积分数。它们在垂向空间上呈复杂的波形分布。于是用波形分布模型对其进行分解与合成。合成值与实测值间的拟合度高达 82.27%。于是用该模型对 -90 m ~ -810 m 空间上的 18 个中段分别计算出矿体在矿化体中的体积分数，计算结果列于表 5 中。从图 4 可见，矿体在矿化体中体积分数在垂向空间上呈波形分布。

在研究区范围内，收集金矿石小块体积质量实测数据 54 件，最小值为 2.5 t/m^3 ，最大值为 4.15 t/m^3 ，平均值为 2.7659 t/m^3 ，均方差为 0.3406，变异系数为 0.1231。进行计算时，取矿石体积质量为 2.77 t/m^3 。

综上所述，我们已经估计出各中段上矿脉累加宽度、矿化体体积、矿体占矿化体体积分数、矿体体积、矿石量、矿石平均品位、矿石平均体积质量等。而有效探矿指数是一个经验值，在该区为 0.3125。于是可以求出各中段上的有效金矿产资源量。从表 5 可见，各中段的有效金矿产资源量各不相同，最高值 7.99 t，最低值 2.66 t，平均 4.35 t。从图 5 可见，有效金矿产资源量在垂向空间上呈极不规则的波形分布，但总体看，向深部资源量增加。并且在 90 m，-30 m，-230 m，-350 m，-550 m，-670 m 标高处形成最大富集。

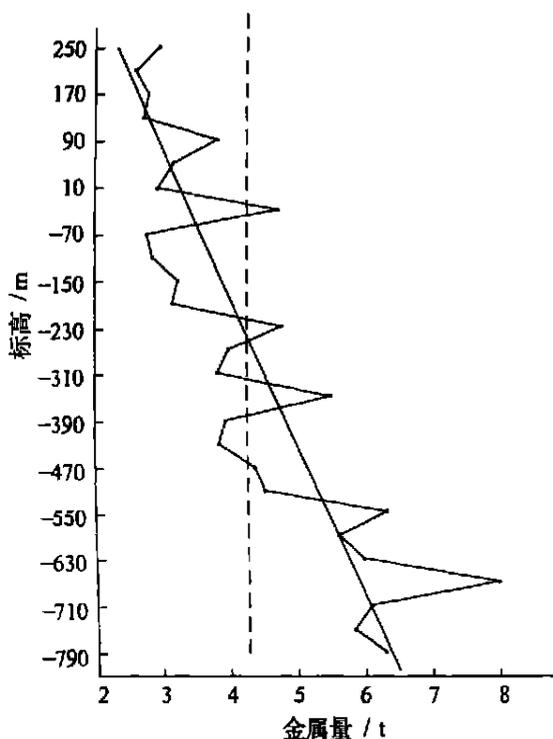


图 5 有效金矿产资源量垂向变化特征

Fig. 5 Vertical variation of effective mineral resource

经计算, 上部已知区(270 ~ - 90 m 标高) 有效金矿产资源量 28.9 t, 与地质储量接近。深部预测区(- 90 ~ - 810 m 标高) 有效金矿产资源量 88.54 t。其中, 重点预测区(- 290 ~ - 810 m 标高) 有效金矿产资源量为 70.28 t。经部分工程控制, 在重点预测区的上部空间已获 D+ E 级金储量 18 t。

参考文献:

- [1] 郭光裕, 林卓虹, 郭万超. 波形分布在深部预测区地质环境推测中的应用[J]. 冶金地质动态, 1999, (6): 3-7.
- [2] 辛格莱 A J (赵鹏大译). 概率图在矿床勘探中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 1976.
- [3] 郭光裕, 林卓虹, 朱学文, 等. 脉状金矿床深部大比例尺统计预测初探[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1988.
- [4] 赵鹏大. 地质勘探中的统计分析[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1990.
- [5] 郭光裕, 侯宗林, 林卓虹, 等. 热泉型金矿床成矿模式及成矿远景评价[M]. 天津: 天津科技出版社, 1993.
- [6] 王学仁. 地质数据的多变量统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [7] 侯景儒, 郭光裕. 矿床统计预测及地质统计学的理论与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.

THE APPLICATION OF MINERAL RESOURCE ESTIMATION METHODS TO GOLD MINES

GUO Wan-chao, GUO Guang-yu

(Tianjin Geological Academy, Tianjin 300061, China)

Abstract: In large scale statistical prediction of Au ore deposits mineral resource estimation is the prerequisite for location of the predicted ore bodies. Volumetric estimation method is the most accurate one. Here is the description of the calculation procedure. The interval probability analysis method is used to analyse spatial distribution of Au grade of ore bodies and mineralized bodies in the vertical direction and obtain the statistical distribution model. The wavy distribution model is used to make prediction at blind areas. Au grade, volume of the mineralized bodies, ore percentage of the mineralized bodies are calculated for all levels. The results are calibrated with the effective ore exploration index to give mineral resource volume approximate to geological reserves. The data is used to location of the predicted ore bodies. For example, 70.28 t of effective mineral resource for a gold mine is predicted and 18 t of reserves (D+ E) has been located by the uncompleted explorational engineering.

Key words: resource volume; interval probability analysis method; wavy distribution model; statistical prediction; screen