

# 第五章 矿体地质研究

## 一、矿体地质的概念

**矿体地质** 是以**矿体**为研究对象，其基本任务是研究矿体各种标志的**变化性**，目的在于阐明矿体各种标志的变化特征或变化规律，为选择**合理的勘查方法及矿床的工业评价提供依据**。

矿体地质研究的**中心问题**是矿体的变化性，它具体包括**变化性质、变化程度及变化因素**三个方面。

# 矿体和矿床地质研究的联系和区别

从矿床学角度研究矿体更侧重于物质成分、结构构造及矿体形成的地质条件，其主要目的在于阐明矿化过程、矿化条件等**成因规律**。而从勘查角度研究矿体则侧重于矿石品位、矿体厚度、形态、规模、产状、矿体内部的结构构造等，其主要目的在于阐明矿体各种标志的**变化规律**。

**矿体的变化主要受矿床成因所控制**，因此为了查明矿体的变化就必须了解矿床成因特点；不同成因的矿体其变化性往往是不相同的，通过矿体变化性的研究又有助于查明矿床成因问题，因而二者必须密切配合。

## 二、矿体地质研究的意义

矿体变化性与勘查精度之间，有着紧密的相关关系，它是勘查方法的理论基础，是划分矿床勘查类型的基本依据，是决定每个具体矿床勘查难易程度、勘查精确程度和勘查经济效果的基本客观条件。所以，对矿体地质的研究，不仅具有重要的理论意义，而且对于指导勘查实践更有非常重要的实际意义。

## 第二节 矿体地质研究的基本内容

从勘查角度研究矿体，是在研究成矿地质条件与规律的基础上，侧重于影响勘查的最主要的矿体变化标志的研究，即**矿体的外部形态标志**（矿体厚度、形态、产状及规模）和**矿体的内部结构标志**（矿石品位、品级、类型及夹石）。这些标志是矿体地质研究的主要对象。这些矿体标志值的**变化性**是矿体地质研究的核心问题，而矿体变化性所包括的**变化性质、变化程度和变化因素**这三个方面也就是从勘查角度研究矿体地质的基本内容。

# 一、矿体变化性质的研究

**矿体的变化性质**：一般可理解为**某标志**在矿体不同空间位置上相互之间的联系特点与**变化的特征和规律**。

通过勘查工作，可以在矿体三度空间的不同部位，取得大量品位、厚度等标志的数值，如果把这些标志的数值按照**不同方向的实际顺序与位置排列**起来，它们的**升高或降低**所形成的各种各样的自然变化特征和规律，就是矿体某标志的变化性质。

# 一、矿体变化性质的研究

卡里斯托夫将矿体的变化性按其性质分为两类：

1. 规则的或坐标性的变化
2. 偶然的或不规则的变化

# 1. 规则的或坐标性的变化

属于这类性质变化的典型标志是**矿体的厚度变化**。厚度变化的基本特征之一就是具有一定的**方向性和平稳性**。这种特征表现在矿体剖面中沿一定的方向可分为若干区段，厚度的变化以同一增长符号（即逐渐变厚或逐渐变薄）而改变，有时还有可能划分出其中厚度变化不仅保持同一增长符号，而且还保持着**大致稳定的增长值**。

## 2. 偶然的或不规则的变化

是指在矿体内某一区段或某一方向上，相邻观测点所获得的标志值相互之间**既无局部联系**，在整个区段也**缺乏总体联系**，即标志值的大小呈现**无规律的急剧的跳跃或不连续的杂乱变化**。

属于这类变化性质的主要是**有色、稀有、贵金属矿床**中**有用组分品位**沿走向、倾向及其他方向较常见的变化特征（图5-1）。卡里斯托夫还指出矿体的品位变化往往具有**坐标性变化与偶然性变化量叠加**，这两种变化性质的结合便构成品位变化的复杂形式。

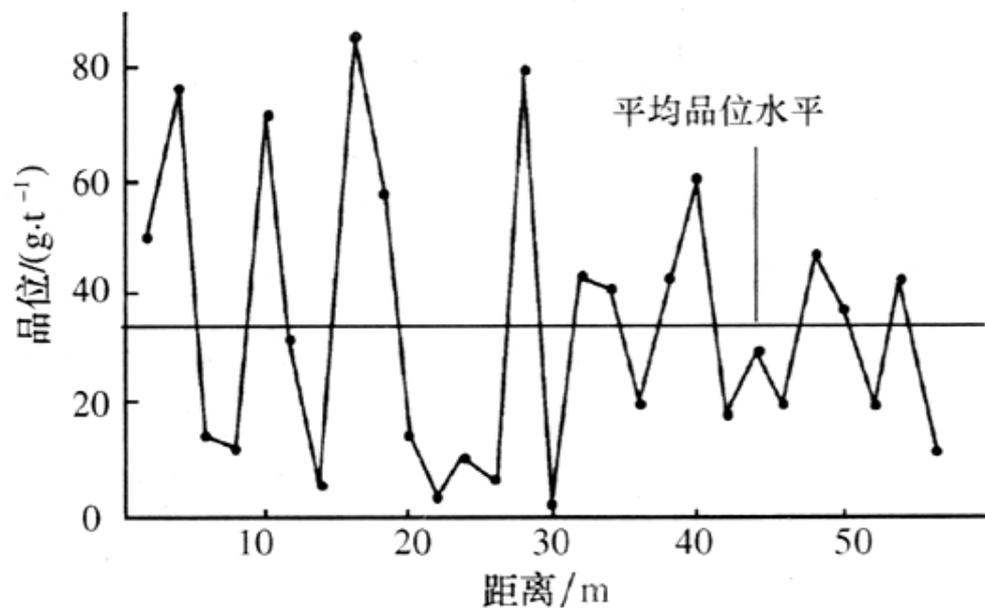


图 5-1 金矿体品位的不规则变化  
(据 П. Л. 卡里斯托夫, 1956, 1959)

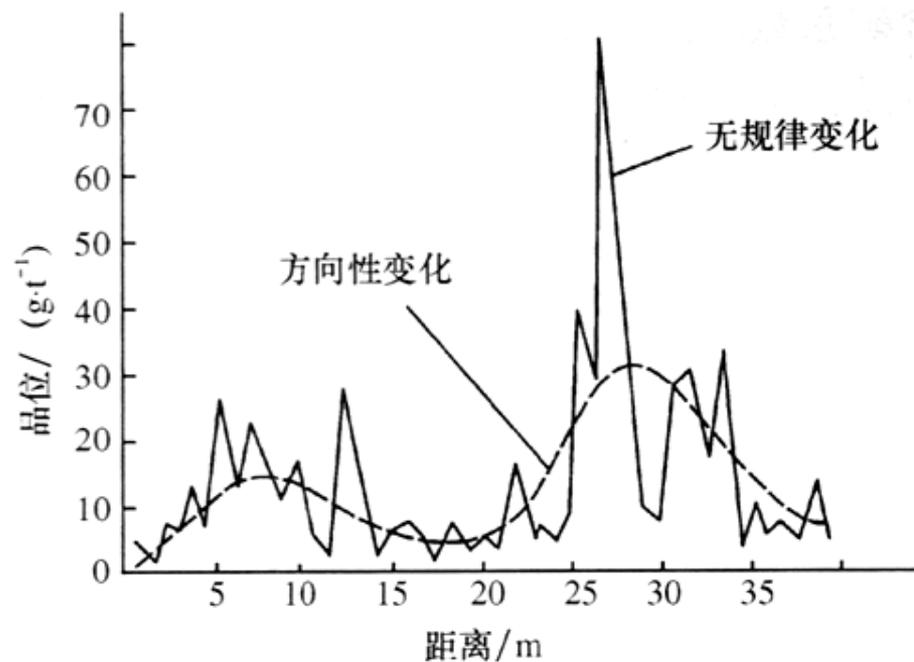


图 5-2 金矿体品位的不规则变化与  
方向性变化的结合

## 二、矿体变化程度的研究

**矿体变化程度** 一般是指矿体标志值的**相对变化幅度**、**变化速度**。它是一个量的概念，是研究变化性质的基础。

**矿体各主要标志的变化程度**对矿床的勘查有很大的影响。在同样的勘查工程间距和工程数量的条件下，变化程度越大的矿体其勘查精确程度越低、地质经济效果越低；反之，为了获得相同的勘查精度，对于变化程度大的矿体比变化小的矿体需要更密的工程间距和更多的工程数量。

## 二、矿体变化程度的研究

对矿体变化程度的研究 有重要的理论意义与实际意义。它直接影响到矿床类型的划分、勘查技术方法的选择、勘查工程间距的确定，以及矿体的圈定方法和圈定结果的可靠性。

## 二、矿体变化程度的研究

**矿石组分品位** 是大部分内生矿床，特别是**有色、稀有及贵金属矿床的矿体最大变化标志**。因此，定量的研究矿化均匀程度、矿化连续程度、矿化强度及各组间的相关程度，就成为研究这类矿床的重点内容。

**矿体的最主要形态特征标志** 如厚度、形态、产状及规模等是许多矿床，特别是大多数外生沉积矿体的矿体变化最大标志，从而成为影响勘查难易程度和勘查精度的主要因素。

### 三、控制矿体变化因素的研究

矿体的变化性质与变化程度 主要取决于矿床成因、成矿方式和成矿地质条件，决定于矿化元素分散与集中的各种因素的发育程度及其变化情况，同时也决定于成矿后的改造与破坏。因此，在研究矿体变化性时，必须进行控制矿体变化因素的研究。

### 三、控制矿体变化因素的研究

对大多数矿体来说，矿体的大小、形态及产状变化主要受构造因素控制。

控制矿体的内部结构标志（矿石类型、品级和品位等）变化的主要因素有原生和次生两类因素。原生因素中主要是成矿时矿化强度的不同造成了矿化的不均匀性和矿化的不连续性。

次生因素中最主要的是矿石的氧化淋滤和次生富集作用，许多硫化物矿床的矿体次生带状结构，使有用组分在垂直方向（或沿矿体倾斜方向）具有明显的方向性变化。

### 第三节 矿体变化性的数字表征方法

矿体变化性的研究有**定性**和**定量**两种表示方法。在**定性的方法**中主要是利用各种地质图件（如剖面图、平面图和方体图等）和各种几何图件（如统计分布曲线、自然分布曲线和各种等值线图）表示矿体各标志的变化特征，并辅以必要有说明。

## （一）统计分布曲线法

统计分布曲线又称频数（频率）分布图。它的实质是反映矿体某个标志不同数值的数量分布或频率分布。当观察、度量数量足够多时，根据抽样结果所制作的统计分布曲线基本上可以代表整个矿体这一标志不同数值的客观比例。研究矿体标志值的统计分布特征具有重要的理论和实际意义。

## （一）统计分布曲线法

根据分布曲线的状态特征可以初步判断矿体标志值的**总体变化性质和变化程度**。一般认为，某个由许多影响因素综合作用下产生的地质变量，当这些因素对变量的影响并非都是均匀微小而**个别因素的影响显著突出时**，变量将由于不满足**中心极限定理**的要求，而使统计分布曲线趋于偏斜。如果出现很大正偏斜的话（极大值 $<$ 平均数），则**变量的对数值一般都呈正态分布或对数正态分布**。即变量服从或近似于对数正态分布。

## (一) 统计分布曲线法

经验表明，大多数内生有色—稀有金属矿床中的有用组分以及矿石中的微量元素都具有对数正态分布的特点（图5-3）。

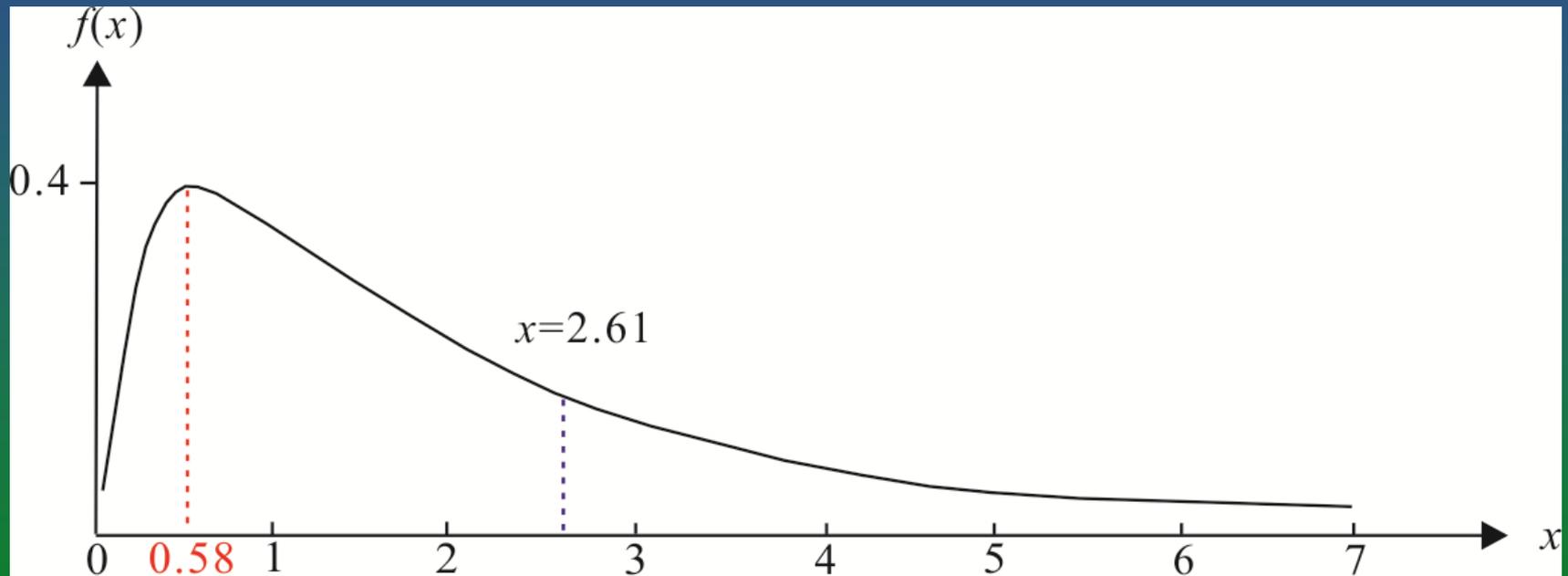


图5-3 品位值对数正态分布曲线

## （一）统计分布曲线法

由许多独立的微小部分组成或由许多微小随机因素综合作用下产生的地质变量，当这些因素对变量的影响是均匀微小，且无一个因素是突出显著的时候，变量的统计分布将呈正态分布或接近正态分布。也就是说当有利矿化或不利矿化的条件对整个矿体比较均一，往往较多的矿石具有与平均品位相近似的数值，这时品位易于趋向正态分布。

## (一) 统计分布曲线法

例如：矿化比较均匀的**沉积型或沉积变质型铁矿**、次火山岩体中的早期浸染状贫铁矿，其铁的品位值通常呈**正态分布或接近正态分布**（图5-4）。

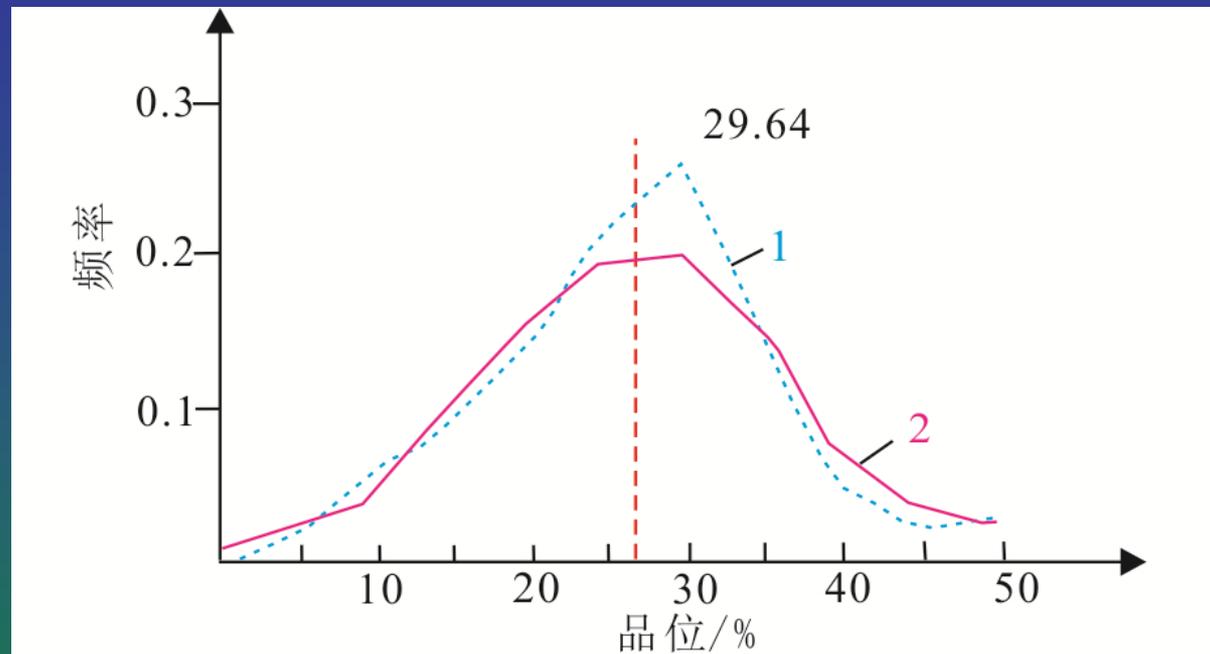


图5-4 某沉积变质铁矿床品位值统计分布曲线  
1—根据分析资料所作曲线；2—一次平差后所作曲线

## (一) 统计分布曲线法

正态分布中**参数平均值**和**均方差**可以反映变量的**集中水平**与**离散程度**。均方差的大小表示分布的离散程度。均方差越大，数据对于平均值的离散程度越大，反映在统计分布曲线上是越平缓；平均值则表示分布的集中水平，即数据在平均值附近出现最多。

## （一）统计分布曲线法

根据统计分布曲线的特征可以鉴别与解释矿床成因。一般认为不同成因或不同成矿条件下形成的矿体应构成不同的统计总体，它们应各自具有其特殊类型的统计分布模型和相应的统计特征值。

## (一) 统计分布曲线法

矿化均匀、控制矿化局部富集的因素不明显或不重要时，品位数值一般接近正态分布，而矿化不均匀，控制矿化局部富集的因素突出或重要时，则其统计分布明显偏离正态。成矿作用单一时，统计分布表现为简单分布，即呈单峰的正态或偏斜曲线，而多种矿化作用或多期矿化的叠加，则表现为混合分布，即大多数情况下是呈双峰或多峰曲线。

# (一) 统计分布曲线法

表5-1 某矿田铁矿床品位 (TFe) 的统计分布特征表

矿床名称	观测值个数	分布类型	分布曲线特征	基本统计特征值			
				平均数/%	方差	标准差	变化系数/%
A	417	简单分布	近正态分布	23.5	34	5.83	24.8
B	72	简单混合分布	双峰强负不对称	46.9	133.4	15.3	33
C	1018	简单混合分布	双峰弱负不对称	43.3	137.9	11.74	27.1
D	171	复杂混合分布	三峰正不对称	37.1	153.8	12.4	33.4

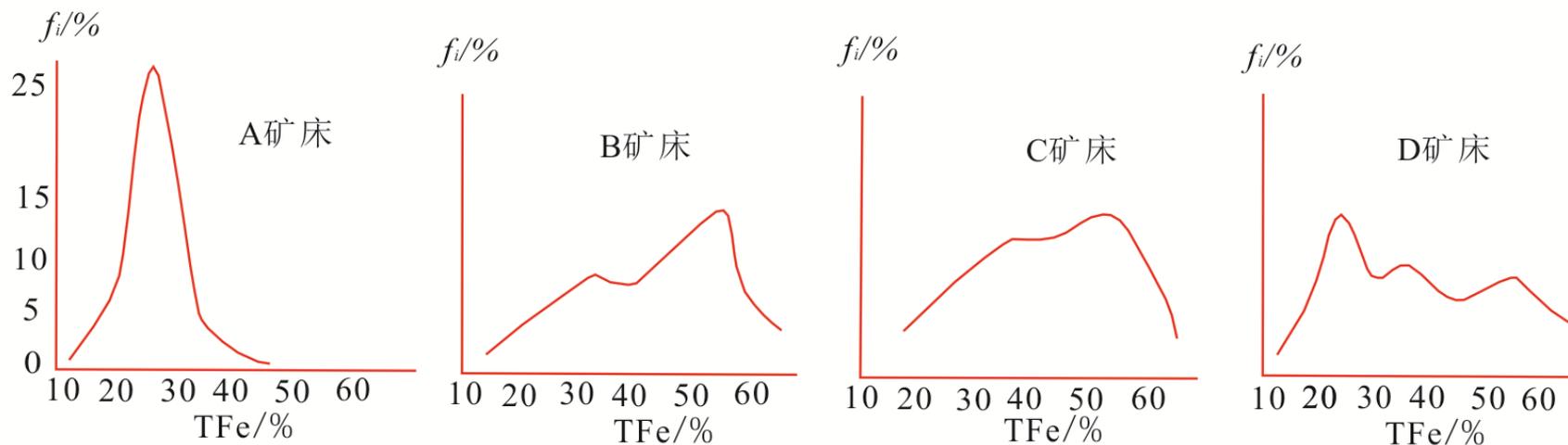


图5-5 某矿田4个铁矿床的铁品位统计分布曲线

## 作业二

查阅资料，分别阐述“卡林型”金矿床（1-8）、“焦家式”蚀变岩型金矿床（9-16）和“高硫型”浅成低温热液金矿床（17-24）的描述性成矿模型（矿床存在模式）。

## （二）自然分布曲线及变化性指数法

自然分布曲线法是反映矿体不同空间位置上，矿体标志值具体变化性质的一种方法。它是对矿体变化性质进行研究的基本方法，也是最常用的方法。通过对自然分布曲线形态特征的分析，可以初步定性地判断矿体标志值在某特定方向的变化性质和变化规律。

## （二）自然分布曲线及变化性指数法

**变化性指数** 是由赵鹏大院士提出的，是在某一方向标志值自然分布曲线的基础上，根据**相邻观测点**上矿体标志值之间的**符号变化关系**，用“变化性指数”定量地判断矿体标志值（如品位）变化性质的一种方法。

## (二) 自然分布曲线及变化性指数法

变化性指数 ( $t$ ) 的计算式为:

$$t = \frac{M}{n-2}$$

式中:  $M$  为矿石品位在自然分布曲线中其数值上升下降的“符号”变化次数;  $n$  为样品个数;  $t$  为变化性指数, 其值与变化性质的关系见表5-2.

## (二) 自然分布曲线及变化性指数法

表5-2 矿体标志变化性质的变化性指数(t)分类表

类别	变化性质	t值
1	规则变化	0.0~0.2
2	明显方向性变化	0.3~0.5
3	不明显方向性变化	0.5~0.7
4	不规则变化	0.8~1.0

### （三）平差曲线及相依系数法

**1.平差曲线法** 是指用各观察点相邻若干点的标志值的平均值作为该点的数值（即趋势值）。按该数值（趋势值）编制的坐标曲线称为平差曲线。经过一次平差所得的曲线称为一次平差曲线，经过二次平差或三次平差所得的曲线称为二次或三次平差曲线。一般认为**二次平差曲线**即可反映矿体标志值的总体变化趋势。

### (三) 平差曲线及相依系数法

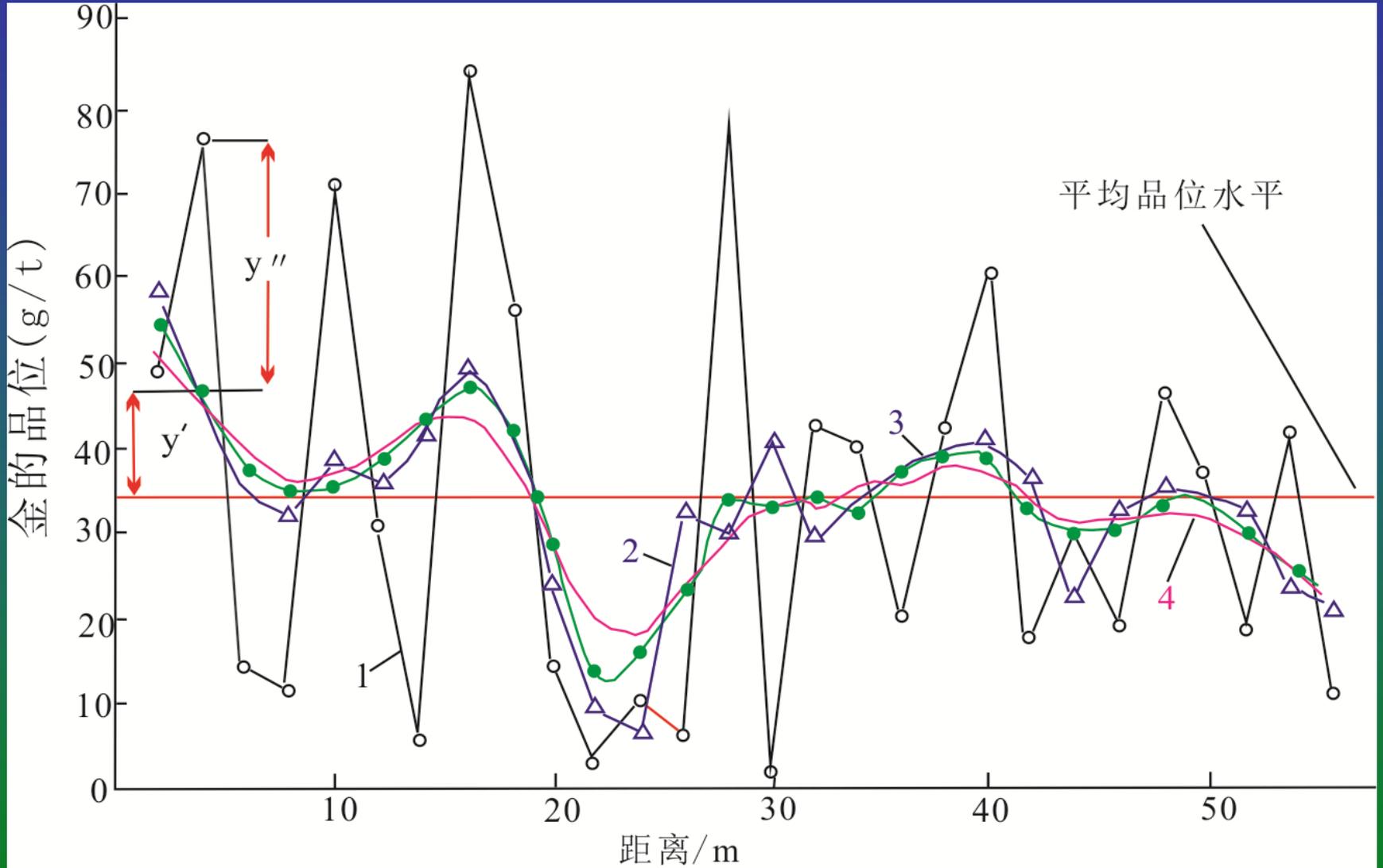


图5-6 金矿品位平差曲线图

### （三）平差曲线及相依系数法

**1.平差曲线法** 是指用各观察点相邻若干点的标志值的平均值作为该点的数值（即趋势值）。按该数值（趋势值）编制的坐标曲线称为平差曲线。经过一次平差所得的曲线称为一次平差曲线，经过二次平差或三次平差所得的曲线称为二次或三次平差曲线。一般认为二次平差曲线即可反映矿体标志值的总体变化趋势。

### (三) 平差曲线及相依系数法

平差曲线法实质上是一种滑动平均法。常用的滑动平均公式是等权滑动平均：

$$\hat{y}_0 = \frac{1}{2m+1} (y_{-m} + y_{-(m-1)} + \dots + y_0 + \dots + y_{m-1} + y_m) = \frac{1}{2m+1} \sum_{i=1}^m y_i$$

$\hat{y}_0$  为中心项趋势值， $y_0$  为中心项观测值， $m$  为距中心的最大项数。等权滑动平均分离趋势能力太强， $m$  越大修匀效果超强， $m$  一般选择1或2为宜。

### （三）平差曲线及相依系数法

不等权滑动平均是按围点与所计算中心顶点的距离远近给予不同的权重，距离越近，权数越大；距离愈远要数愈小。

**平差曲线的优点：**在复杂的自然分布曲线中排除局部随机性成分的干扰，显出整体趋势性的变化规律。

**平差曲线的缺点：**只能**定性**地表示矿体标值的变化性质，不能定量地表征矿体变化性质。

### （三）平差曲线及相依系数法

自然界中绝大多数矿体标志的变化性质具有二重性——**趋势性和随机性**。也就是说，在一般情况下，矿体标志的变化性质是在总体趋势性变化的背景下叠加了一些局部随机性或偶然性的变化。在矿体空间上任一点的标志值都可分解为趋势和随机两部分。

矿体标志的趋势值一般呈平缓起伏的曲线形状，在观测点比较均匀的情况下，可采用**二次平差**的方法求得其估计量。矿体标志的随机值反映了矿体局部的随机干扰，通常是通过在确定标志值后得到的剩余值求得的。

### (三) 平差曲线及相依系数法

为了恰当地刻画与定量地表征矿体标志的变化性质，一般采用“空间序列相依系数”

$$c_1 = \frac{m}{n-2} \quad c_2 = \frac{M}{n-2}$$

$c_1$ 为局部相依系数， $c_2$ 为整体相依系数。 $m$ 为局部相依个数（依自然分布曲线）， $M$ 为整体相依个数（依二次平差曲线）， $n$ 为样品数或观察点数。

### (三) 平差曲线及相依系数法

相依系数 ( $C_1$ 或 $C_2$ ) 在0~1之间变化, 即 $0 \leq C_1$ 或 $C_2 \leq 1$ 。相依系数越大, 相依程度越高, 矿体变化的规律性越强; 反之, 相依系数愈小, 相依程度愈低, 矿体变化的规律性愈弱, 而随机性变化愈显著。

### (三) 平差曲线及相依系数法

**局部相依**：是指某观测点与其相邻两观测点的信息具线性关系或单调函数关系，即某点数值升高，其下一相邻的取样点的数值也长升高，反之亦然。

**总体相依**：是指空间序列的观测值，经过二次滑动平均处理后，第*n*个观测值的相应趋势值，在空间上与其相邻两个点趋势值之间具有线性或单调函数关系。

### (三) 平差曲线及相依系数法

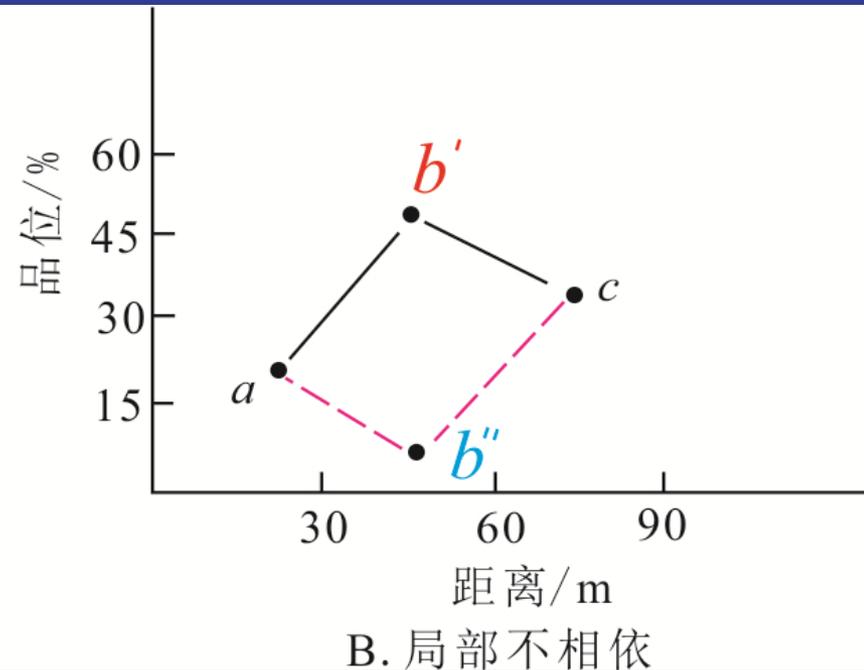
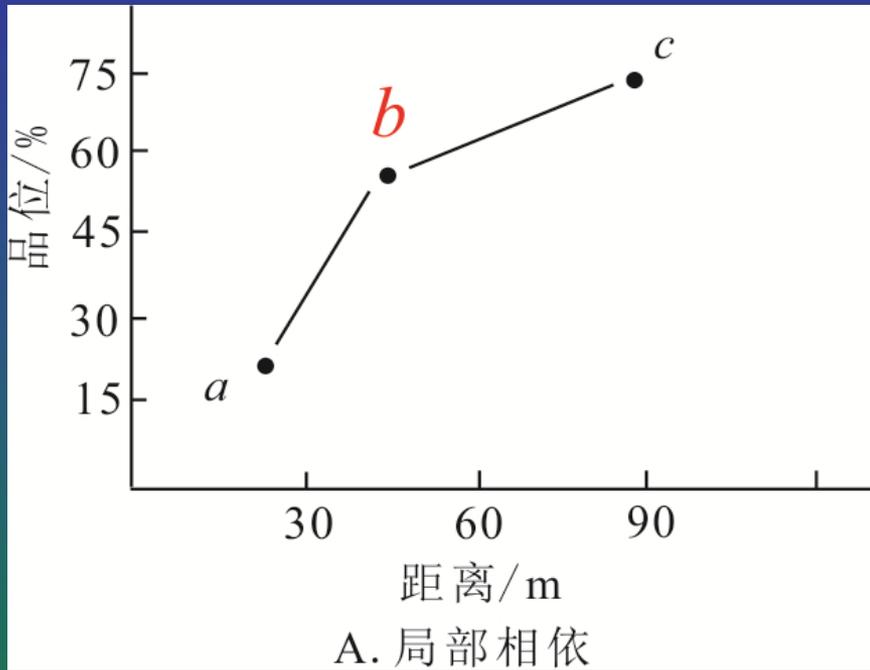


图5-7 品位标志值相依关系图

依据局部及总体相依系数的大小，可将矿体标志的相依特征作如下分类（表5-3）

类别	相依特征	局部或总体相依系数 (C1或C2)
1	完全相依的	0.9~1.0
2	基本相依的	0.7~0.9
3	大致相依的	0.5~0.7
4	不相依的	0.3~0.5
5	完全不相依的	<0.3

表5-3 矿体标志的相依特征分类表

### （三）平差曲线及相依系数法

依据局部和总体相依系数的大小和可能组合，将矿体标志值的变化性质类型初步划分为五种类型，如表5-4（教材P149）即规则变化、较规则变化、明显方向性变化、不明显方向性变化和不规则变化。

## （四）变异函数曲线分析法

**变异函数曲线**亦称**变程方差**曲线，简称**变差图**或**变异图**。它是法国统计学家**马特龙**在20世纪60年代初期提出的一种表征矿体变化性的新方法。它的基本特点是，以**区域化变量的理论**为基础，通过对**变异函数的计算**和**变异函数的分析**，从而**定性**地判断矿体的变异特征或变异类型。

# 1. 区域化变量的概念与性质

区域化变量是一种具有数值的空间位置的函数，即由一点移往下一点时，函数值是变化的，并具有明显的不同程度的连续性。然而，这种变化性不能用一般的函数来描述，它是一种复杂的随机函数。如矿石的品位、矿体的厚度、矿石内有害组分的含量等都是区域化变量。

# 1. 区域化变量的概念与性质

1) **局限性 (Localization)** 区域化变量的变化限于一定的空间内，如品位的变化只局限于矿化空间之内，这种矿化空间称为区域化的**几何域**。且每个变量数值的大小，一般是按一定的承载或称支架 (**Support**) 定义的，**承载即取值的样本几何形态、规格和体积大小**。研究样品变化规律，一定要取样方法相同，样品的承载相同。各种取样方法样品品位与真实品位偏差不同，主要是由于样品的承载不同造成的。

# 1. 区域化变量的概念与性质

- 2) 区域化变量的空间变化具有**规律性和随机性**的双重性质。
- 3) 区域化变量的空间变化具有**非均质性**。某些区域化变量是各向异性的。
- 4) 区域化变量的空间变化具有**跃迁性**。它是指一系列点变量中相邻两点变量的**增量的均值**随点的距离 $h$ 的增大而**迅速增大**，当点的距离 $h$ 达到一定的范围（数值）时增量的均值趋于稳定。

# 1. 区域化变量的概念与性质

由于区域化变量具有上述复杂的性质，因此不能用通常的概率统计方法对这种区域化变量的空间函数进行直接研究，而只能用**特殊的结构函数**来刻画其**规律性和随机性**的双重性质。

## 2. 变异函数和变异曲线

在一般统计学中，变量的离散程度是用方差来表示的，它不能反映任何空间的、规律性的或结构性的变化。在地质统计学中，则常用变异函数和变异曲线来表征区域化变量的空间变化特征与变化程度。

变异函数或变异曲线是研究区域化变量自然离差的基本手段与工具，它是用曲线来表示的数学函数，变异函数是区域化变量增量平方的数学期望，由于它恰为区域化变量增量方差的一半，故又叫半变程方差。

## 2. 变异函数和变异曲线

理论半变异函数，在内蕴假设条件下定义为：

$$\gamma(h) = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} = \frac{1}{2V} \int_v [Z(x+h) - Z(x)]^2 dx$$

式中积分式，是在一个无限大的几何域，无限多对点样品增量的平方和。实际上除非矿床全部开采完毕，否则是不可能得到的。

## 2. 变异函数和变异曲线

局部半变异函数，为一个有限的几何域L中，无限多对样品点增量平方的均值

$$\gamma'(h) = \frac{1}{2(L-h)} \int_0^{L-h} [Z(x+h) - Z(x)]^2 dx$$

式中：**h**为距离或滞后；**L**为几何域，这里指样品点分布地段的总长度。实际上这样的变异函数也是不易得到的。

## 2. 变异函数和变异曲线

实验半变异函数，是指在有限的几何域中，有限多对样品的变量的增量平方的均值，可写成：

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2$$

在实际工作中，只有实验半变异函数可以得到。实验半变异函数是局部半变变异函数的估计值。

## 2. 变异函数和变异曲线

由于实验半变异函数是由有限数据计算出来的，所以与局部变异函数之间存在偏差，这个偏差用变量 $E\{[\gamma'(h) - \gamma^*(h)]\}$ 来描述，叫**局部半变异函数估计方差**。其大小取决于参加计算的**数据对的数目 (N)**。而局部半变异函数与理论半变异函数之间的偏差，用 $E\{[\gamma(h) - \gamma'(h)]\}$ 表示，叫**波动方差**，其大小与**几何域 (L或V)**的尺寸大小有关。

## 2. 变异函数和变异曲线

根据理论研究与实践检验，当 $N$ 大于 $30\sim 50$ 时， $h$ 小于 $L/2$ 时，估计方差是很小的，波动方差也不大，故可用实验半变异函数来估计局部半变异函数，因此，计算实验半变异函数，必须在 $N$ 大于 $30\sim 50$ 时， $h$ 小于 $L/2$ 的条件下进行。

## 2. 变异函数和变异曲线

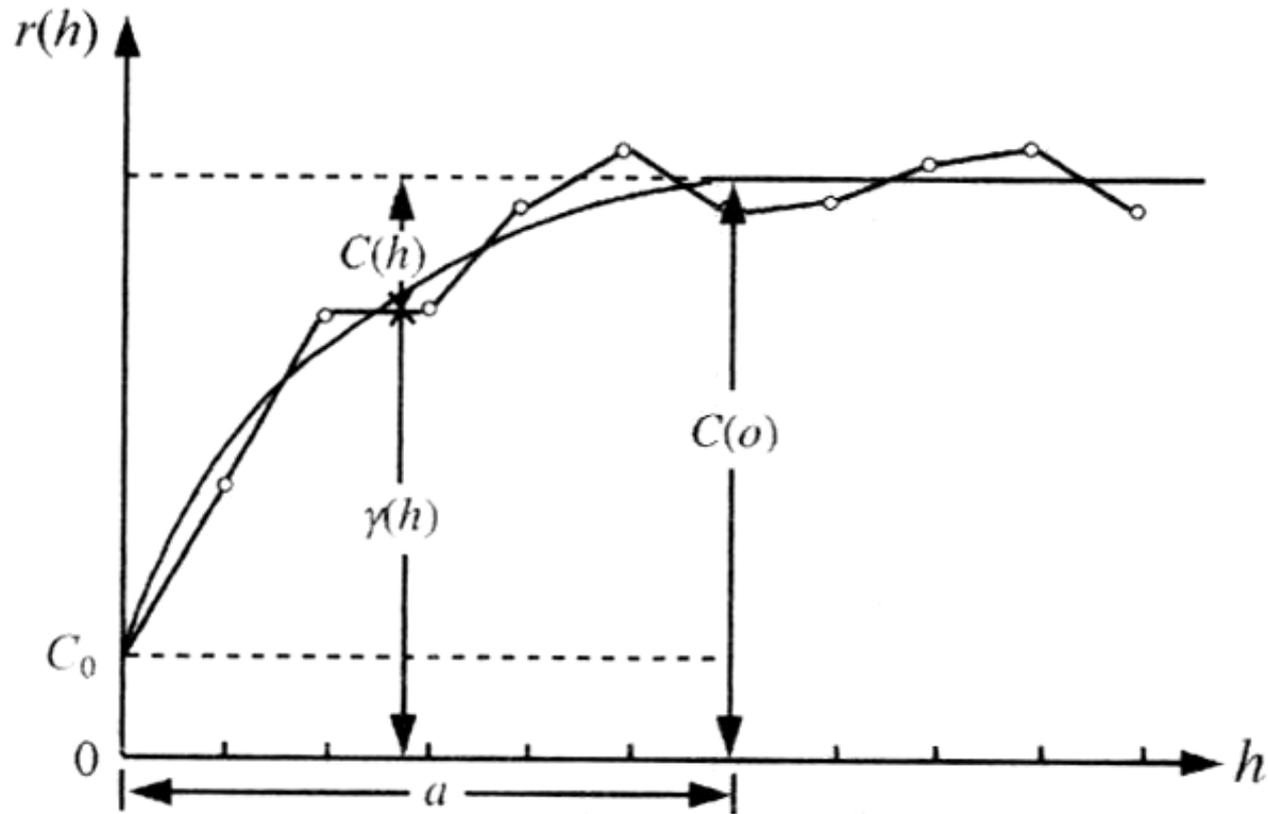
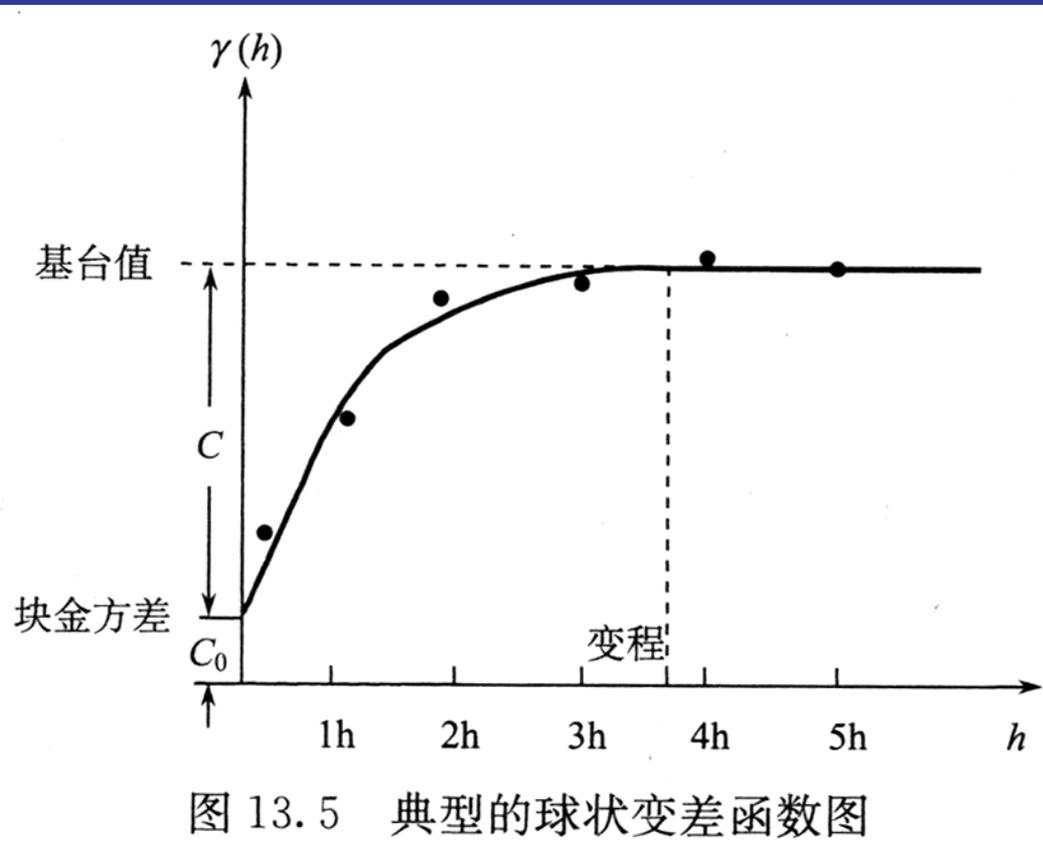


图 5-8 变异函数曲线图

## 2. 变异函数和变异曲线



**块金方差** (nugget variance)

$C_0$ : 是用于描述在同一位置重复取样结果吻合程度的术语。矿化越均匀, 块金方差值越低。

**基台值** (Sill) ( $C_0+C$ ): 是

指变差函数所达到的最大值。块金方差与基台值的比值定义为**块金效应**, 它是区域化变量随机性重要性的度量。

**变程** (range): 变程 (a)

表示变差函数曲线到达基台的点。它可以看作区域化变量的影响范围, 在滞后小于变程的区间内, 变量值之间是空间相依的。

### 3. 方差、协方差和变异函数的关系及其性质

如图5-8可知，方差、协方差和变异函数之间的关系如下： $\gamma(h) = C(o) - C(h)$

式中： $\gamma(h)$ 为半变异函数； $C(o)$ 为有限（或）先验方差； $C(h)$ 协方差（图5-9）

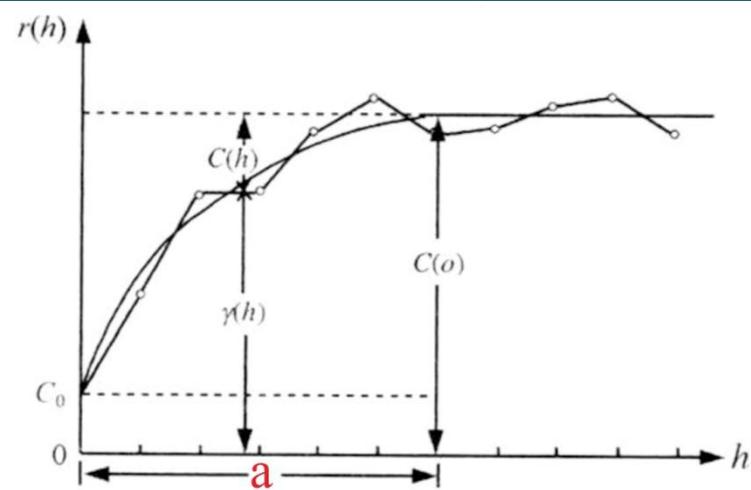


图 5-8 变异函数曲线图

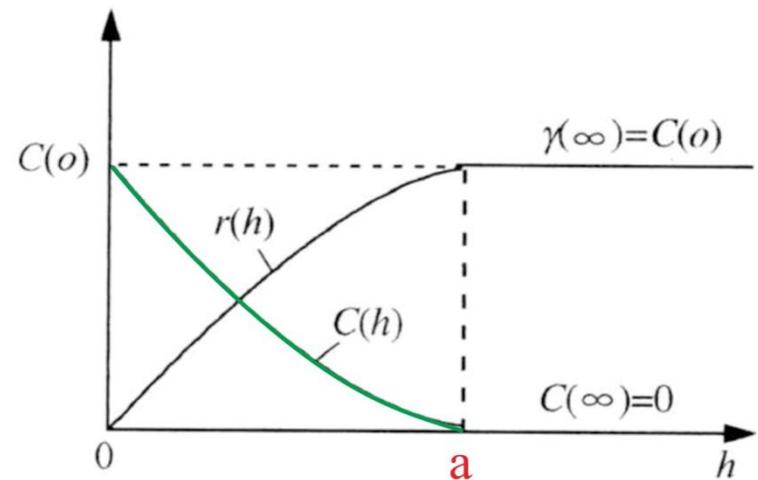


图 5-9 方差、协方差及变异函数关系图

协方差 $C(h)$ 为向量 $h$ 滞后的函数。当 $h$ 等于零时， $C(h)$ 值最大。随着 $h$ 的增大， $C(h)$ 逐渐减小。当 $h$ 趋向于无穷大时，协方差等于零，实际上当 $h \geq a$ 时， $C(h)$ 极限值为零。

半变异函数 $\gamma(h)$ 也是向量 $h$ （滞后）的函数，随 $h$ 的增大而增大。当 $h$ 等于零时， $\gamma(h)$ 一般等于零，有时不然，而是等于 $C(o)$ （非结构的随机变化，称作块金效应，简称块金）。

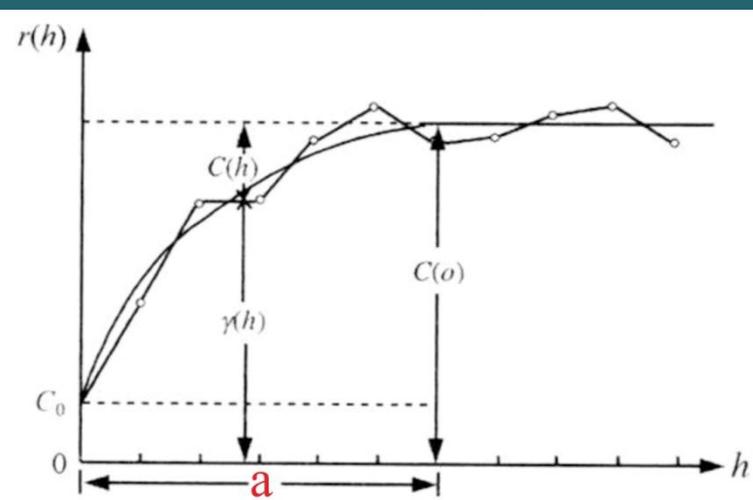


图 5-8 变异函数曲线图

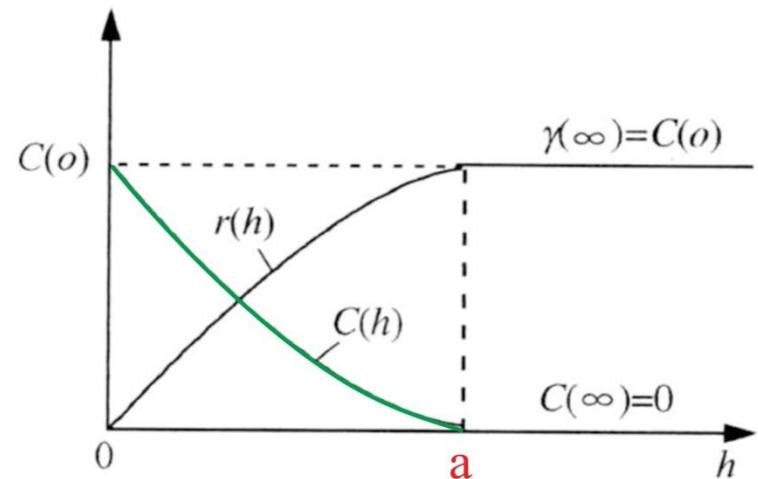


图 5-9 方差、协方差及变异函数关系图

协方差 $C(h)$ 为向量 $h$ 滞后的函数。当 $h$ 等于零时， $C(h)$ 值最大。随着 $h$ 的增大， $C(h)$ 逐渐减小。当 $h$ 趋向于无穷大时，协方差等于零，实际上当 $h \geq a$ 时， $C(h)$ 极限值为零。

半变异函数 $\gamma(h)$ 也是向量 $h$ （滞后）的函数，随 $h$ 的增大而增大。当 $h$ 等于零时， $\gamma(h)$ 一般等于零，有时不然，而是等于 $C(o)$ （非结构的随机变化，称作块金效应，简称块金）。

## 4. 计算实验半变异函数的方法

计算实验半变异函数的方法取决于区域化变量资料的空间结构，即样品的空间分布。

(1) **直线上等间距（或等长）样品**半变异函数的计算

包括沿脉坑道或天井按等距离采样，钻孔或穿脉坑道按固定长度连续取样，沿一定的剖面线上布置等距离**垂直钻孔**等计算矿石品位或厚度实验半变异函数。

## 4. 计算实验半变异函数的方法

**计算方法：**以**样品间距离或样品长度**作为基本距离（或称滞后） $h$ ，计算直线上每两个相邻样品或厚度之间的增量平方

$$(\Delta Z)^2 = [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2$$

然后再计算均值

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2$$

即该长度 $h=d$ 的实验半变异函数。然后再计算2倍基本距离，即 $2h=2d$ 样品间

## 4. 计算实验半变异函数的方法

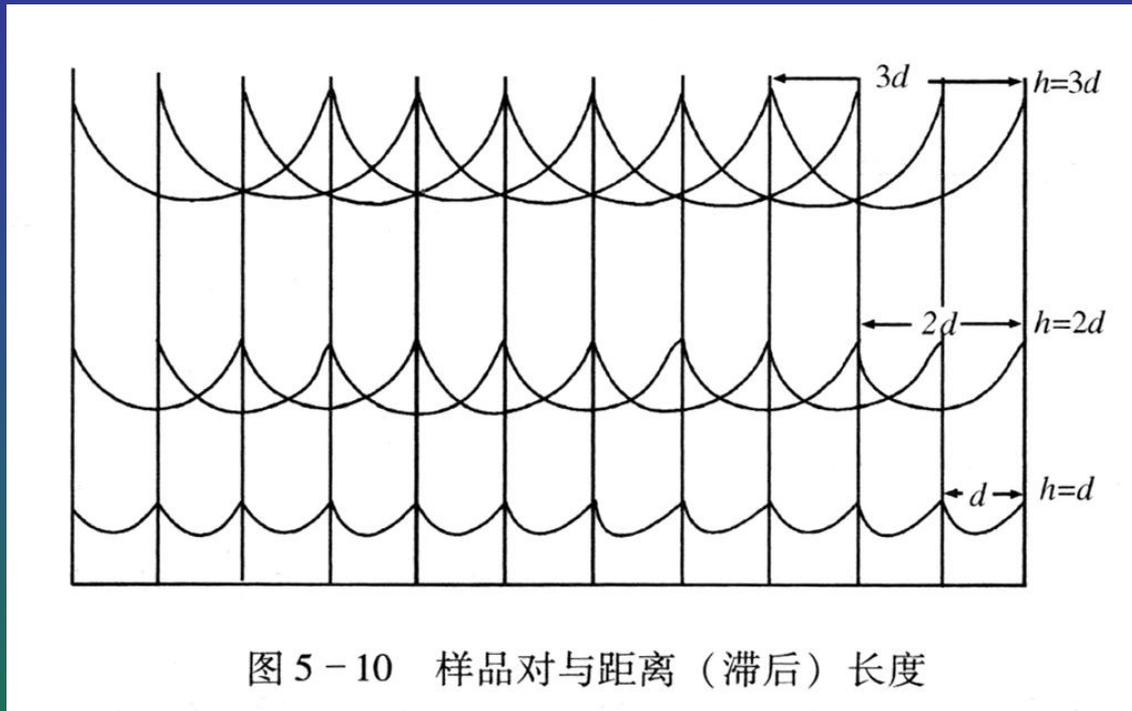
然后再计算**2倍基本距离**，即 $2h=2d$ 样品间距，每两个相邻**样品间**实验半变异函数。

$$\gamma^*(2h) = \frac{1}{2(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} [Z(x_i + 2h) - Z(x_i)]^2$$

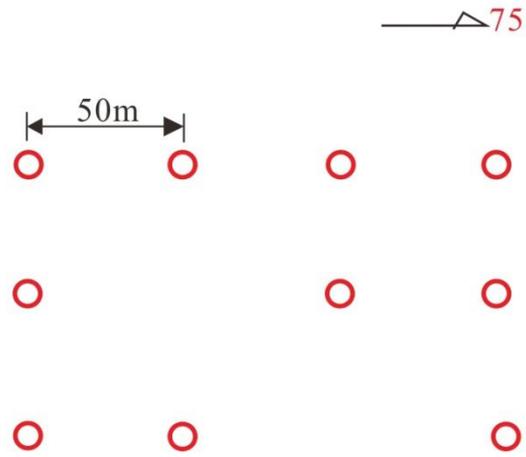
如此计算 $3h=3d$ ， $4h=4d$ ， $\dots$ ， $nh=nd$ ，间距的实验半变异函数 $\gamma^*(ih)$ ，其中， $i=3, 4, \dots, n$ ；一直计算到距离 $nh$ 等于**样品分布统计地段长度的二分之一**为止（图5-10）。

于是就可以根据不同的点距 $h, 2h, 3h, \dots, nh$ 与不同点距时，样品位差的平方的平均值 $\gamma^*(h), \gamma^*(2h), \gamma^*(3h), \dots, \gamma^*(nh)$ ，画出半变异函数曲线。

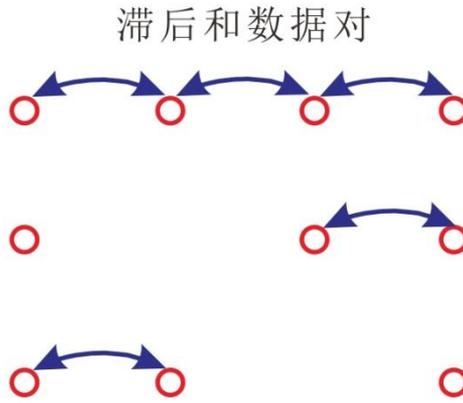
## 4. 计算实验半变异函数的方法



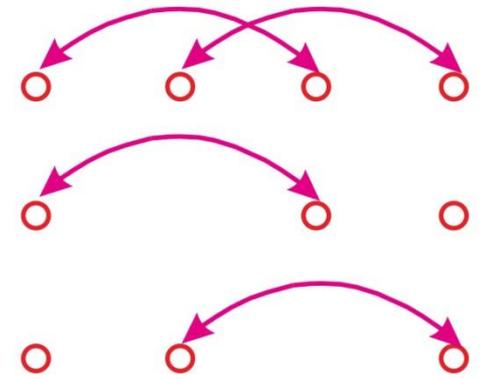
于是就可以根据不同的点距 $h$ ,  $2h$ ,  $3h$ ,  $\dots$ ,  $nh$ 与不同点距时, 样品品位差的平方的平均值 $\gamma^*(h)$ ,  $\gamma^*(2h)$ ,  $\gamma^*(3h)$ ,  $\dots$   $\gamma^*(nh)$ , 画出半变异函数曲线。



钻孔分布型式



第一步



第二步

## 实验变差函数计算原理

# 建立变差函数的步骤

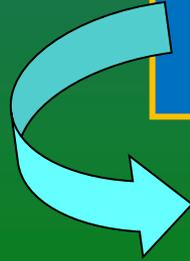
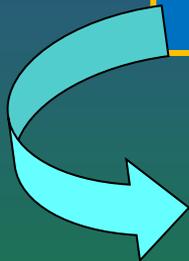
设置搜索椭球

选择方向，搜索样品对

建立经验变差函数

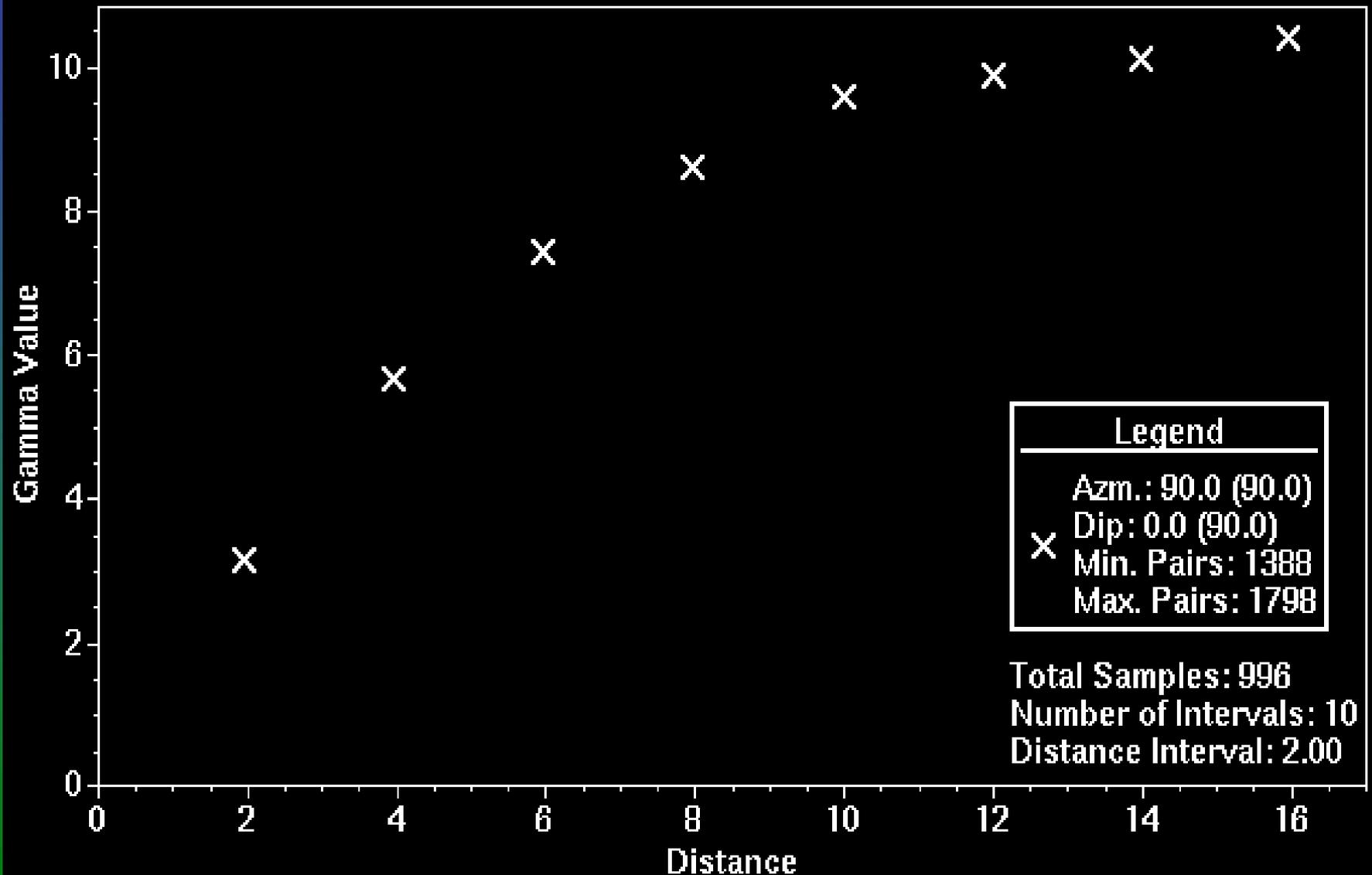
拟合理论变差函数

不同方向变差函数套合



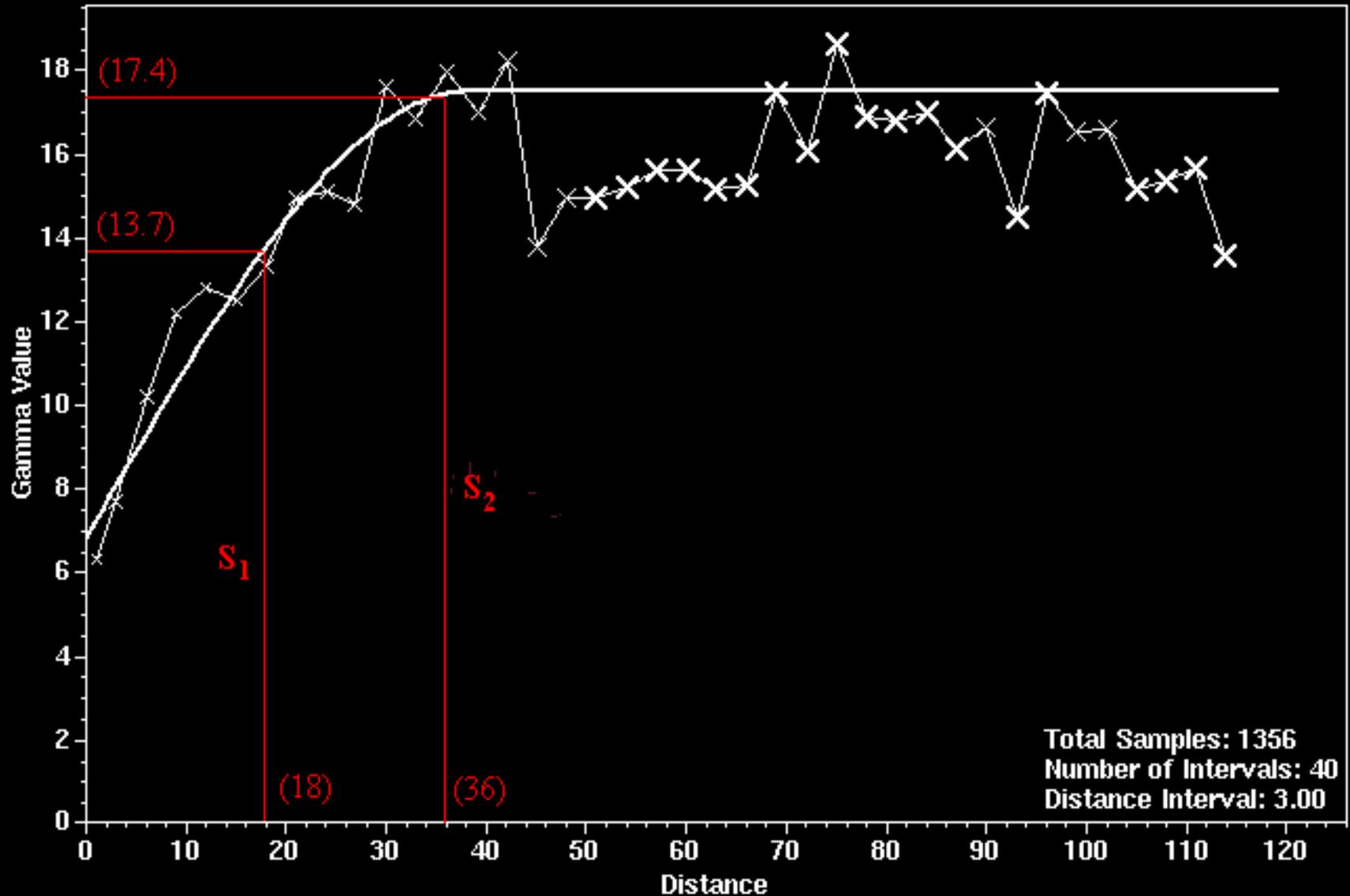
# 实验变异函数

Mineralized Zone Samples (MineralZone.slh)  
Normal Semi-Variogram of Zn



# 理论变差函数拟合

Mineralized Zone Samples (MineralZone.slh) - Non-Oxidized Ore  
Normal Semi-Variogram of Zn



## 5. 变异函数的曲线类型

**变异函数曲线**（实际上是半变异函数曲线）清晰地反映了区域化变量的空间分布特征。变异函数曲线按其在原点附近的性状和曲线的总体形态，分为五类（图5-11）：

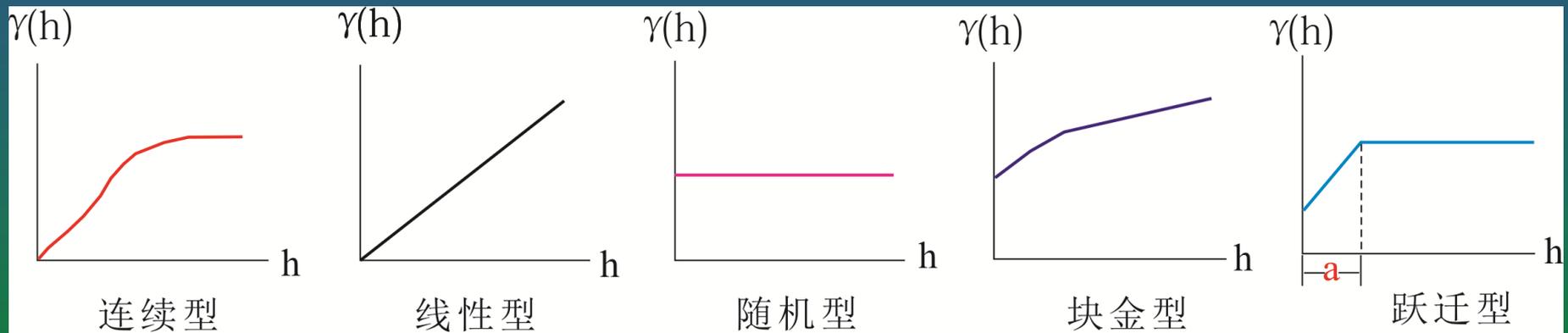


图5-11 变异函数曲线类型

## 5. 变异函数的曲线类型

**连续型（或称抛物线型）** 变异函数在原点附近趋向于**抛物线**，反映区域化变量的空间分布具有**高度的连续性**。

**线性型（或叫弧线型）** 变异函数曲线在原点附近呈**斜向切线**。反映区域化变量分布具有**平均意义的连续矿化**。

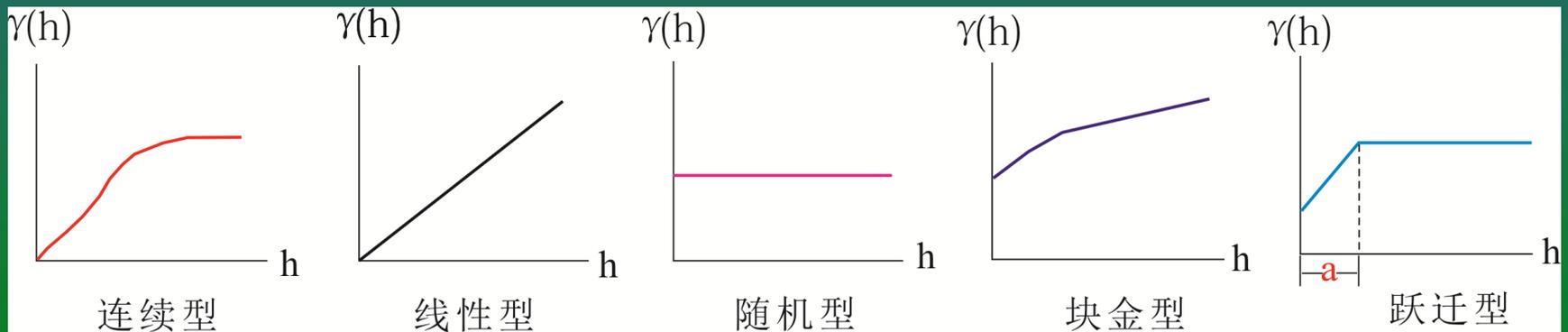


图5-11 变异函数曲线类型

## 5. 变异函数的曲线类型

随机型（或称纯块金型）变异函数在一水平线上下波动，从平均意义来说，呈一水平直线，其数值为一块金常数值，反映区域化变量空间变化具有纯粹的随机性，变量之间为非相关关系。

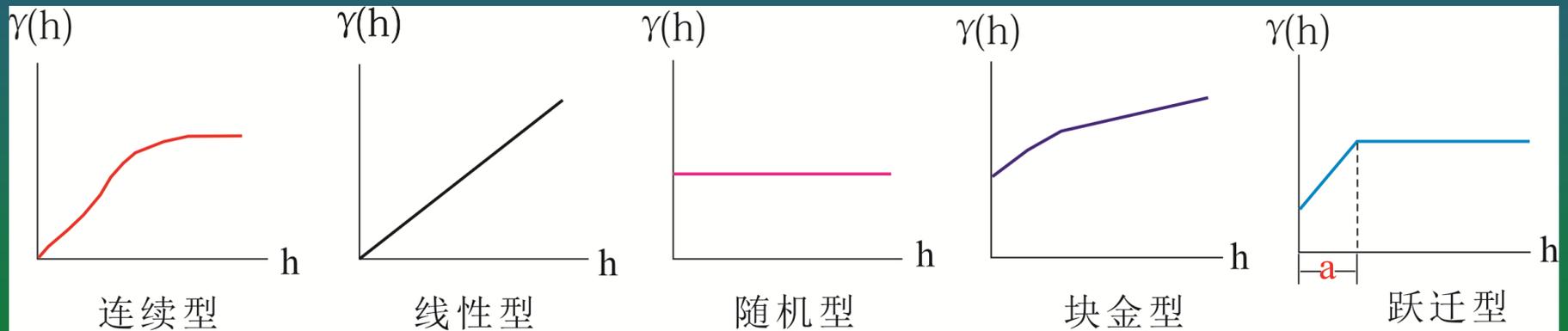


图5-11 变异函数曲线类型

## 5. 变异函数的曲线类型

**块金型（或叫块金效应型）**变异函数在  
原点附近不连续，反映了区域化变量具有很低的连续性，  
当 $h$ 趋近于0时（实际是很小距离时）， $\gamma(h)$ 并不趋于零，  
是一种微型的随机型结构。这种类型曲线，**常见于有特高品位出现的有色金属、稀有金属及贵金属矿床的矿体微型结构函数曲线。**

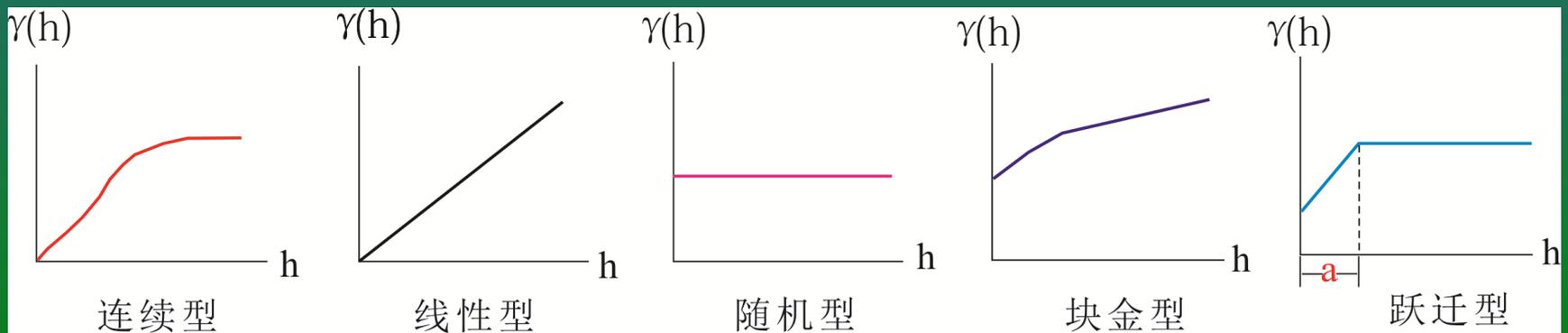


图5-11 变异函数曲线类型

## 5. 变异函数的曲线类型

**跃迁型（或叫瞬变型）** 变异函数在 origin 附近呈斜切线与 origin 相交，或在 origin 附近很短距离内出现**块金效应**。变程在一定范围内，变异函数随  $h$  增大而增大，即实验半变异函数曲线呈跳跃上升，反映出区域化变量的局部连续性，具**相关关系**；变程达到一定的数值，即  $h \geq a$  以后，半变异函数趋于稳定，停留在有限方差的水平线上，这时区域化变量的连续性消失，变为**随机性**，变量之间为非相关关系。

## 5. 变异函数的曲线类型

在这种类型曲线中的区域化变量连续变化段与随机变化段的分界距离 $h=a$ 的值，叫连续变化的极限变程，简称变程。

故跃迁型曲线反映区域化变量的总体不连续、局部连续，属于此类型的有有色、稀有、贵金属矿床。

## 6 矿体的数学模型

根据区域化变量特点所绘制的变异函数曲线是根据样本实测数据作出的一种实验半变异函数曲线，由于样品数据较少，实际上**只是一种锯齿状的非光滑曲线**。因此这种变异函数曲线作出后，还必须用一个适当的圆滑曲线或直线对它进行模拟（拟合），并用**一个特定的函数去描述**它，这就是**变异函数理论模型**（即矿体数学模型），用以反映区域化变量的空间变化特征。

## 6 矿体的数学模型

常用的几种点变量可分为**两大类**，一类是**有基台**，即有有限方差的模型，如球状模型、指数模型和高斯模型；另一类是**没有基台**，即没有有限方差的模型，如线性模型、对数模型等。此外还有一种特殊的模型——孔穴效应模型。

# 6 矿体的变异函数理论模型

表 13.2 常见的几类理论变差函数模型

模型名称	数学表达式	模型参数
球状模型	$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left( \frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3} \right) & 0 < h \leq a \\ C_0 & h = 0 \\ C_0 + C & h > a \end{cases}$	块金常数: $C_0$ 区域化变量的空间组分, 称为剩余方差或拱高: $C$ 基台: $C_0 + C$ 变程: $a$
高斯模型	$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left( 1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}} \right) & h > 0 \\ C_0 & h = 0 \end{cases}$	基台: $C_0 + C$ 变程: $\sqrt{3}a$
指数模型	$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left( 1 - e^{-\frac{h}{a}} \right) & h > 0 \\ C_0 & h = 0 \end{cases}$	基台: $C_0 + C$ 变程: $3a$
线性模型	$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 & h = 0 \\ wh & 0 < h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases}$	直线斜率: $w$

## 7 变异函数反映的地质意义

1) **变程a反映地质变量的影响范围**。对于一个矿体来说，在变程a范围之内，矿体的变量（如品位或厚度）具有相依性，超出变程a的范围，则不具有相依性。因此**变程a作为确定勘探工程间距或取样间距的参考**。

## 7 变异函数反映的地质意义

2) 变异函数在 origin 处的极限形态可以反映变量不同程度的空间连续性。抛物线型反映变量高度的连续性；线性型反映变量具有平均的连续性；跃迁型反映变量具有局部的连续性和总体上的不连续性；纯随机型反映变量在任何范围内都是不连续的。

## 二 矿体变化程度的数学表征方法

### (一) 均方差和变化系数

**均方差** 是数理统计中反映随机变量**离散程度**的参数，表求各个数据**对其数学期望（平均值）**的偏离程度。

均方差的通式为：

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

## (一) 均方差和变化系数

如果将数据分为**m组**，设**组中值**为 $x_1, x_2, \dots, x_m$ ，相应的频率为 $f_1^*, f_1^*, \dots, f_m^*$ ，则其均方差为：

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 f_i^*}$$

均方差是有单位的特征数，其单位与变量的单位相同。均方差能衡量一批数据的**绝对离散程度**，**均方差越小，数据越集中在平均值附近**，均方差越大，数据越分散。

## (一) 均方差和变化系数

实际应用时，如果n较小（ $n < 25 \sim 50$ ），通常分母的n换为n-1来计算，即：

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

或

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{(m-1)} \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 f_i^*}$$

## (一) 均方差和变化系数

实际应用时，如果n较小（ $n < 25 \sim 50$ ），通常分母的n换为n-1来计算，即：

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

或

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{(m-1)} \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 f_i^*}$$

由上可知，均方差的大小只各个变量值与其平均数的离差大小有关，而与各个变量值本身的大小无关。

## (一) 均方差和变化系数

**变异系数 (V)**：也称变化系数，它是根据变量的观测值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 计算得到的**均方差 ( $\sigma_x$ )**与此观测序列的**算术平均值  $\bar{x}$** 的比值，通常以百分数表示：

$$V = \frac{\sigma_x}{\bar{x}} \times 100\%$$

变化系数是一个随机变量离散程度的统计特征值，对于偶然性或随机性变化，变化程度主要取决于数据的离散程度，但对于**坐标性或方向性变化**，其变化程度受各个数据空间排列排序的影响，**变化系数不能反映坐标性变化的复杂程度。**

# (一) 均方差和变化系数

表5-5 两组厚度观测值的均方差与变化系数示例

观测点序列号	第一组观测值/m	第二组观测值/m	观测点序列号	第一组观测值/m	第二组观测值/m
1	1	9	6	11	1
2	3	3	7	13	13
3	5	15	8	15	7
4	7	5	均方差( $\sigma$ )		
5	9	11	变化系数( $V$ )		
				4.99	4.99
				62%	62%



图5-12 变化系数相同而变化程度不同的两组厚度变化示意图

## (二) 二级差平均数与变化指标

为了克服均方差和变异系数不能反映标志值空间排列关系上的不足，查卡柯夫斯基(1948)用**相对平均二级差数平均值**来表示矿体标志的变化程度。

设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 是**按取样地点排列**的某标志的测定值，由每一个值减去前一个值得一级差序列 $\Delta'_1 x, \Delta'_2 x, \dots, \Delta'_{n-2} x, \Delta'_{n-1} x$ ，再由每一个一级差减去前一个一级差，得二级差序列，并求绝对值，这些绝对值的平均数对各测定值的平均数  $\bar{x}$  之比称为**相对平均二级差或变化指标** ( $J$ )。

表 5-6 一级差、二级差计算示例

观测值	一级差	二级差
$x_1$		
$x_2$	$x_2 - x_1 = \Delta'_1 x$	
$x_3$	$x_3 - x_2 = \Delta'_2 x$	$\Delta'_2 x - \Delta'_1 x = \Delta''_1 x$
$x_4$	$x_4 - x_3 = \Delta'_3 x$	$\Delta'_3 x - \Delta'_2 x = \Delta''_2 x$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$x_{n-2}$	$x_{n-1} - x_{n-2} = \Delta'_{n-2} x$	
$x_{n-1}$	$x_n - x_{n-1} = \Delta'_{n-1} x$	$\Delta'_{n-1} x - \Delta'_{n-2} x = \Delta''_{n-2} x$
$x_n$		

## (二) 二级差平均数与变化指标

$$\Delta_{cp}'' = \frac{|\Delta_1''x| + |\Delta_2''x| + \dots + |\Delta_{n-2}''x|}{n-2}$$

式中： $\Delta_{cp}''$  为二级差数值平均值； $\bar{x}$  为标志值平均值； $J$  为变化指标（相对平均二级差）。用  $\Delta_{cp}''$  可以评定矿体某标志值的绝对变化程度，用  $J$  可以评定其相对变化程度。

$$J = \frac{\Delta_{cp}''}{\bar{x}}$$

表 5-7 两组厚度观测值序列变化指标计算结果对比

第一组			第二组		
观测值	一级差	二级差	观测值	一级差	二级差
1			9		
3	$3 - 1 = 2$		3	$3 - 9 = 6$	
5	$5 - 3 = 2$	$2 - 2 = 0$	15	$15 - 3 = 12$	$12 + 6 = 18$
7	$7 - 5 = 2$	$2 - 2 = 0$	5	$5 - 15 = -10$	$-10 - 12 = -22$
9	$9 - 7 = 2$	$2 - 2 = 0$	11	$11 - 5 = 6$	$6 + 10 = 16$
11	$11 - 9 = 2$	$2 - 2 = 0$	1	$1 - 11 = -10$	$-10 - 6 = -16$
13	$13 - 11 = 2$	$2 - 2 = 0$	13	$13 - 1 = 12$	$12 + 10 = 22$
15	$15 - 13 = 2$	$2 - 2 = 0$	7	$7 - 13 = -6$	$-6 - 12 = -18$
$\Delta''_{cp} = 0$			$\Delta''_{cp} = 18.66$		
$J = 0$			$J = 2.33$		

### (三) 含矿系数或含矿率

**含矿系数**：也称含矿率，它是指**工业矿化地段**（工业矿体）的**长度、面积或体积**与**整个矿化地段**（含矿体）的**长度、面积或体积**的比值。它是表示矿化连续程度的重要指标，能说明矿体内**工业矿化的连续程度**。含矿系数的变化在0~1范围内。

含矿系数的计算公式为：

$$K_p = \frac{L_p}{L_0} \quad \text{或} \quad K_p = \frac{S_p}{S_0} \quad \text{或} \quad K_p = \frac{V_p}{V_0}$$

式中： $L_p$ 、 $S_p$ 、 $V_p$ 为工业矿化地段（工业矿体）的长度、面积、体积； $L_0$ 、 $S_0$ 、 $V_0$ 为矿化地段（包括矿体在内）的长度、面积和体积。

### (三) 含矿系数或含矿率

根据含矿系数的大小将矿体中工业矿化的连续性分为4类（表5-8）：

表5-8 矿化连续性的含矿系数分类

Kp值	矿化连续程度	主要特征
1	矿化连续的	整个矿体均达到了工业要求
0.7~1	矿化微间断的	矿体内局部地段未达到工业要求
0.4~0.7	矿化间断的	矿体内达到工业要求的地段稍大于未达到工业要求的地段
<0.4	矿化极间断的	矿体内大部分地段未达到工业要求

### (三) 含矿系数或含矿率

工业矿化的连续性取决于边界品位的高低，同一矿床或同一矿体，边界品位定得低一些，矿化连续性就好一些；相反边界品位定得高一些，矿化的连续性也就差一些。故分析工业矿化连续性时，首先要确定边界品位指标，然后按边界品位圈定工业矿体边界，才能计算含矿系数，判断矿化的连续性。

## （四）矿化强度指数

矿化强度：是反映品位变化程度的另一个重要指标。矿化强度是通过某地段（某工程、某块段、某中段等）的平均品位与整个矿体平均品位之比来确定的。这个比值一般称为矿化强度指数（ $I_c$ ），其公式为：

$$I_c = \frac{\bar{C}_i}{\bar{C}}$$

式中： $\bar{C}_i$  为矿体某地段的平均品位； $\bar{C}$  为矿体总平均品位。

## （四）矿化强度指数

通过不同地段或不同中段矿化强度指数的比较，可以初步查明矿化强度在矿体三维空间的变化规律。矿化强度的变化与品位分布均匀程度有一定的联系：矿化强度变化越大，品位分布也越不均匀，而矿化强度越大，品位变化相对地越小。对不同矿化阶段矿化强度变化的研究，有助于指导矿床勘查和评价。

## （五）矿化边界模数

为了描述矿体边界外形的复杂程度，晋可夫（1957）提出**边界模数的数值指标**，用于评定矿体边界外形的复杂程度。边界模数据的计算方法用该**矿体等面积的一定标准图形的边界长度与矿体实际边界长度的比值**。边界模数的具体计算，可根据**矿体断面图形**的不同选用不同的计算方法。

## （五）矿化边界模数

矿体边界模数在一定程度上反映了矿体形态的复杂程度，模数越小，形态越复杂；反之，模数越大，矿体形态越简单，模数边界值的变化介于1~0之间。

边界模数的缺点与含矿系数类似，它不能反映边界凹凸的频率及其有无规律性，此外，即使对于同一矿体的不同断面来说，其边界模数值的变化也是相当大的。

### (三) 含矿系数或含矿率

**含矿系数**：也称含矿率，它是指**工业矿化地段**（工业矿体）的**长度、面积或体积**与**整个矿化地段**（含矿体）的**长度、面积或体积**的比值。它是表示矿化连续程度的重要指标，能说明矿体内**工业矿化的连续程度**。含矿系数的变化在0~1范围内。

含矿系数的计算公式为：

$$K_p = \frac{L_p}{L_0} \quad \text{或} \quad K_p = \frac{S_p}{S_0} \quad \text{或} \quad K_p = \frac{V_p}{V_0}$$

式中： $L_p$ 、 $S_p$ 、 $V_p$ 为工业矿化地段（工业矿体）的长度、面积、体积； $L_0$ 、 $S_0$ 、 $V_0$ 为矿化地段（包括矿体在内）的长度、面积和体积。

### (三) 含矿系数或含矿率

根据含矿系数的大小将矿体中工业矿化的连续性分为4类（表5-8）：

表5-8 矿化连续性的含矿系数分类

Kp值	矿化连续程度	主要特征
1	矿化连续的	整个矿体均达到了工业要求
0.7~1	矿化微间断的	矿体内局部地段未达到工业要求
0.4~0.7	矿化间断的	矿体内达到工业要求的地段稍大于未达到工业要求的地段
<0.4	矿化极间断的	矿体内大部分地段未达到工业要求

### (三) 含矿系数或含矿率

工业矿化的连续性取决于边界品位的高低，同一矿床或同一矿体，边界品位定得低一些，矿化连续性就好一些；相反边界品位定得高一些，矿化的连续性也就差一些。故分析工业矿化连续性时，首先要确定边界品位指标，然后按边界品位圈定工业矿体边界，才能计算含矿系数，判断矿化的连续性。

## （四）矿化强度指数

矿化强度：是反映品位变化程度的另一个重要指标。矿化强度是通过某地段（某工程、某块段、某中段等）的平均品位与整个矿体平均品位之比来确定的。这个比值一般称为矿化强度指数（ $I_c$ ），其公式为：

$$I_c = \frac{\bar{C}_i}{\bar{C}}$$

式中： $\bar{C}_i$  为矿体某地段的平均品位； $\bar{C}$  为矿体总平均品位。

## （四）矿化强度指数

通过不同地段或不同中段矿化强度指数的比较，可以初步查明矿化强度在矿体三维空间的变化规律。矿化强度的变化与品位分布均匀程度有一定的联系：矿化强度变化越大，品位分布也越不均匀，而矿化强度越大，品位变化相对地越小。对不同矿化阶段矿化强度变化的研究，有助于指导矿床勘查和评价。

## （五）矿化边界模数

为了描述矿体边界外形的复杂程度，晋可夫（1957）提出**边界模数的数值指标**，用于评定矿体边界外形的复杂程度。边界模数据的计算方法用该**矿体等面积的一定标准图形的边界长度与矿体实际边界长度的比值**。边界模数的具体计算，可根据**矿体断面图形**的不同选用不同的计算方法。

## (五) 矿化边界模数

1) 当矿体的断面近于**等轴状态**时，可用其**等面积**的圆作为标准图形，即用标准圆的的周长 ( $L_0$ ) 与矿体在**断面上的**周长 ( $L_k$ ) 之比。

$$\mu_K = \frac{L_0}{L_K} = \frac{2\pi \sqrt{\frac{S_P}{\pi}}}{L_K}$$

式中： $\mu_K$ 为矿体边界模数； $L_k$ 为断面上矿体边界总长度 (m)， $L_0$ 为等面积标准图形圆的周长 (m)， $S_P$ 为矿体的断面面积 ( $m^2$ )。

## (五) 矿化边界模数

2) 当矿体的断面近于**矩形**时，可用其**等面积**的矩形周长与矿体在断面上的周长的之比计算：

$$\mu_K = \frac{L_0}{L_K} = \frac{2(l + \frac{S}{l})}{L_K}$$

式中： $\mu_K$ 为矿体边界模数； $L_K$ 为断面上矿体边界总长度（m）， $l$ 为矿体在剖面上的延深长度（m）， $S$ 为矿体的断面面积（ $m^2$ ）。

## (五) 矿化边界模数

3) 当矿体的断面形态具有**透镜状**外形时，可用椭圆作为确定边界模数的标准图形，椭圆的两个轴分别等于矿体的长度和厚度，其计算公式：

$$\mu_K = \frac{L_0}{L_K} = \frac{l(4 + 1.1M + 1.2M^2)}{2L_K}$$

式中： $L_0=1/2(4+1.1M+1.2M^2)$  为椭圆的周长（m）； $l$  为矿体在**剖面**上的长度（椭圆的**长轴**）（m）， $M$  为断面中矿体最大厚度（椭圆的**短轴**）（m）； $L_K$  为断面上矿体边界总长度（m）。

## （五）矿化边界模数

矿体边界模数在一定程度上反映了矿体形态的复杂程度，模数越小，形态越复杂；反之，模数越大，矿体形态越简单，模数边界值的变化介于1~0之间。

边界模数的缺点与含矿系数类似，它不能反映边界凹凸的频率及其有无规律性，此外，即使对于同一矿体的不同断面来说，其边界模数值的变化也是相当大的。