目　录

第一章　基本概念及粒度分析方法 …… 1
　第一节　基本概念 …… 1
　第二节　粒度分析方法 …… 3
　　一、粒度分析放大镜 …… 4
　　二、利用照片对粗碎屑岩进行粒度分析 …… 4
　　三、筛析 …… 5
　　四、沉降分析 …… 7
　　五、细粒悬浮物的粒度分析 …… 14
　　六、显微镜下的粒度分析 …… 18
　　七、半自动、自动粒度分析仪 …… 29
第二章　分析结果的整理及解释 …… 31
　第一节　资料的整理 …… 31
　　一、作图法 …… 32
　　二、计算法——矩值法 …… 32
　第二节　粒度分布 …… 37
　　一、正态分布（高斯分布） …… 37
　　二、罗辛分布 …… 39
　第三节　粒度参数 …… 44
　　一、平均值 …… 44
　　二、分选系数 …… 45
　　三、偏度 …… 51
　　四、峰态 …… 52
　　五、众数态 …… 53
　　六、各种环境沉积物的粒度参数特征 …… 54
第三章　粒度分析在区分沉积环境上的应用 …… 55
　第一节　根据概率累积频率图区分沉积环境 …… 55
　　一、海滩和浅海 …… 56
　　二、三角洲和河口 …… 58
　　三、河流 …… 61
　　四、湖泊 …… 63
　　五、古河流沉积 …… 63
　　六、古海滩沉积 …… 64
　　七、古浊流沉积 …… 65
　第二节　粒度象的研究 …… 66
　　一、C-M 图 …… 66
　　二、F-M、L-M和A-M 图 …… 70

三、粒度象的应用 ……71
四、粒度象的采样和分析要求 ……80
第三节　用粒度指数研究沉积环境 ……81
一、三指数分类表 ……82
二、五指数分类表 ……83
第四节　结构参数散点图 ……89
一、工作方法 ……89
二、海滩沙和河流沙的区分 ……90
三、海滩沙和沙丘沙的区分 ……97
四、河流沙和沙丘沙的区分 ……100
五、利用米制粒度统计值区分环境 ……101
六、冰积物的区分 ……103
第五节　判别分析在根据粒度资料区分环境上的应用 ……105
第六节　因素分析在粒度研究上的应用 ……117
第七节　粒度分析方法及粒度分布在陕甘宁盆地侏罗系岩
相古地理研究中应用的实例 ……127
一、基本地质情况 ……127
二、粒度分析方法 ……127
三、粒度在解释沉积环境方面的应用 ……133

第一章　基本概念及粒度分析方法

第一节　基　本　概　念

粒度有两种值，线性值和体积值。体积值一般以标准直径(d_n)表示，它代表与颗粒体积相等的球的直径。线性值常因颗粒形状不规则使测定测值很困难。通常测三个值：最长直径d_L、中间直径d_I及最短直径d_s。可按下述步骤确定这三个值：

1．确定颗粒的最大投影面；

2．做垂直最大投影面方向的最长截线，即最短直径d_s；

3．对最大投影面做切线矩形（图1—1），矩形的短边即中间直径d_L，长边则是最长直径d_L。

可以看出，d_L及d_s的方向同时还表明颗粒在空间的方位，因此，它们既可用于粒度，也可作颗粒的组构分析用。

线性值粒度较常用，在砾岩研究中有时也用体积值。

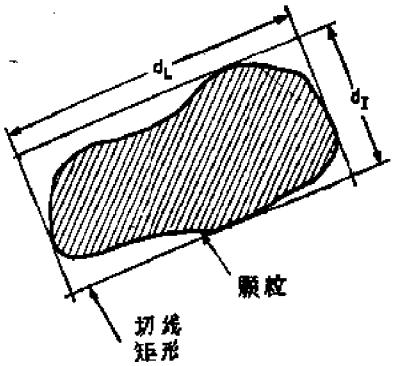


图 1—1　颗粒最大投影面的切线矩形

目前国际上应用最广的粒度分级是乌登-温特沃思粒级（Udden－Wentworth scale）。它是以1毫米作为基数乘以或除以2来分级的（表1—1）。后来，经克伦宾(Krumbein, 1934) 将其转化成ϕ值（表1—1）。转换公式为：

$$\phi = -\log_2 d$$

式中d为毫米直径值。这个ϕ分级标准受到广泛重视，因为它有以下优点：

1．分界为等间距，故可使用一般方格图纸作图，而不必一定要用对数图纸。求图解

表 1—1　乌登-温特沃思粒级及ϕ值

直径（毫米）		ϕ值	直径（毫米）		ϕ值
分数式	小数式		分数式	小数式	
256	256	－8	1/4	0.25	＋2
128	128	－7	1/8	0.125	＋3
64	64	－6	1/16	0.063	＋4
32	32	－5	1/32	0.032	＋5
16	16	－4	1/64	0.016	＋6
8	8	－3	1/128	0.008	＋7
4	4	－2	1/256	0.004	＋8
2	2	－1	1/512	0.002	＋9
1	1	0	1/1024	0.001	＋10
1/2	0.5	＋1	1/2048	0.0005	＋11

或统计参数值诸如平均值、方差、偏度以及峰态等均较简单方便。由于ϕ标准是几何基础，因此能同等地检查粒级频谱的所有部分。相反，在自然数的粒级标准情况下，细粒部分很难在图上表示，因距离太小了。

2．粒度范围广，可以自由地向较粗或较细的两端延伸到任一极限上。也可将粒级细分到任意间距的精度，数字并不显得冗长，如1/2ϕ、1/4ϕ。这对揭示粒度分布是否为双峰以及了解尾部的详细情况提供了很大的便利。

3．乌登-温特沃思ϕ粒级标准的分级界限都是整数，便于应用。它的粒级频谱是以零为中心，向两端近乎对称地延伸，习惯上以图纸的左边为负ϕ值，代表粗的粒级；而右边为正ϕ值，代表细的粒级，一目了然。

4．使用ϕ值粒级标准时，求出的ϕ值分选系数可以直接互相比较。例如，特拉斯克(Trask, 1932)分选系数S_0（即几何四分位标准差）不呈简单的线性关系，故不能说$S_0=3$是$S_0=1.5$分选性的两倍；而ϕ值四分位标准差QD_ϕ则为线性比例关系，$QD_\phi=4$即是$QD_\phi=2$的两倍，关系直观清楚。同时，还提供了研究ϕ值分选度区域分布的条件，如编制分选系数区域分布等值线图等，这给资料整理和地质解释带来极大方便。

5．便于引进数学统计方法来处理资料。如概率值粒度累积曲线图，其横座标即采用ϕ值。

关于粒级的分类命名，由于各部门的工作性质和要求不同而不完全一致。国内各生产单位使用的分类命名见表1—2。就沉积岩研究工作论，不管是碎屑岩或者碳酸盐，近年又开始采用乌登-温特沃思分类（表1—3）。

当砂、粉砂、粘土三组分含量相近，没有任何一种超过75%者，名为混积岩。可按混

表 1—2　国内各部门采用的碎屑粒度分类

燃化部门（毫米）	水文工程部门（毫米）	土壤部门（毫米）	海洋部门（毫米）	沉积岩石学（成都地质学院，1961）（毫米）
	漂　石		岩　块	石　块
	200		1000	1000
			圆　石	巨　砾
砾　石	卵　石	砾　石	100	100
	20		沙　砾	砾　石
	砾　石		10	10
		3	砾	卵　石
2	2			2
沙	沙　粒	沙　粒	1	沙
0.1			沙	
沙　粒	0.05		0.1	0.05
0.01	粉　粒	0.01	粉　沙	粉　沙
	0.005	物理性粘粒	0.01	0.005
粘　土	粘　粒	粘　土	泥　质	粘　土

表 1—3 乌登-温特沃思分类表（经适当修改）

粒级界限 （毫米）	名 称	粒级界限 （毫米）	名 称
>256	漂 石	0.5—0.25	中 沙
256—64	卵 石	0.25—0.125	细 沙
64—2	砾 石	0.125—0.063	极 细 沙
2—1	极 粗 沙	0.063—0.002	粉 沙
1—0.5	粗 沙	<0.002	粘 土

积岩分类方案细分之。较常用的是谢泼德的分类方案(Shepard, 1954)（图1—2)。

然而，由于目前工作的进展，这个分类已不够仔细，特别是图解的中间部分。比如有三个样品的含量比例为：（1）砂58%，粉砂21%，粘土21%；（2）粉砂58%，砂21%，粘土21%；（3）粘土58%，砂21%，粉砂21%，如用上法分类，则全部应命名为“砂-粉砂-粘土”，然而（1）和（3）却是很不同的两类物质。因此有必要提出更仔细而又不复杂的分类方案。林克(Link, 1966)提出一个这样的结构分类。在他的分类上尽量使用已经通用的名称，只是细分了中间部分（图1—3)。

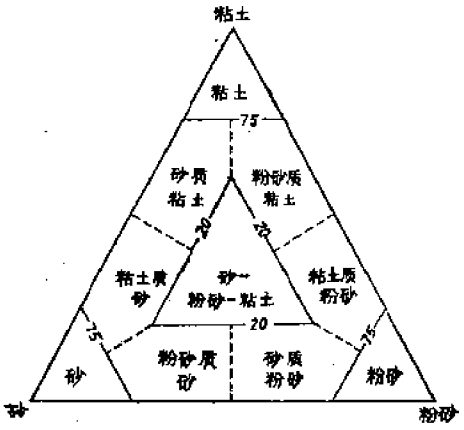


图 1—2 混积岩的分类命名方案

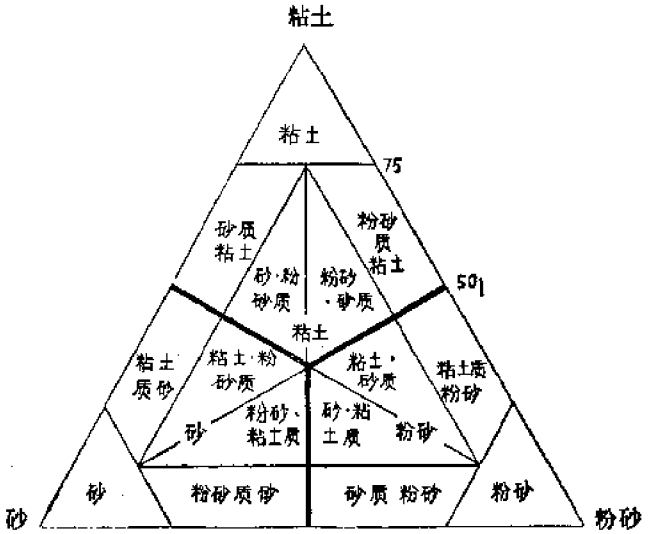


图 1—3 林克的混积岩分类（稍加修改）

举例来说，如一样品含23%的砂、48%的粉砂和29%的粘土，如按此分类则可称为粘土、砂质粉砂。可看出这个名称是将含量最多的组分做为主名，放在全名的最后面；其余两组分均做为副名放在主名的前面，并在与主名之间加一“质”字；两副名之间加“、”点，前面一个代表含量多的。

第二节 粒度分析方法

砾石可用直接法测量，如用测杆、测规量砾石的直径，用量筒测砾石的体积。可松解或疏松的细、中碎屑岩多采用筛析法。粉砂及粘土岩常用沉降法、流水法、液体比重计等方法测定。量少的小样或浓度太低的粉砂、粘土样，可采用光学法和电法。固结的无法松解的岩石只能采用薄片粒算法。近来已有自动、半自动粒度分析仪出现，大大的提高了工

效，并减轻了劳动强度。下面简介一些上述方法。

一、粒度分析放大镜

这是在野外作粒度测量的简易装置，是一长15厘米左右的长筒，内装三个透镜，放大倍数为10倍。利用筒内所装的一片标准片上的刻度（温特沃思粒级、微尺及倾角的度数）（图1—4）即可在野外直接进行观察读数。此装置除了作粒度测量外，还可观察孔隙的大小、纹层厚度及斜层理倾角等。

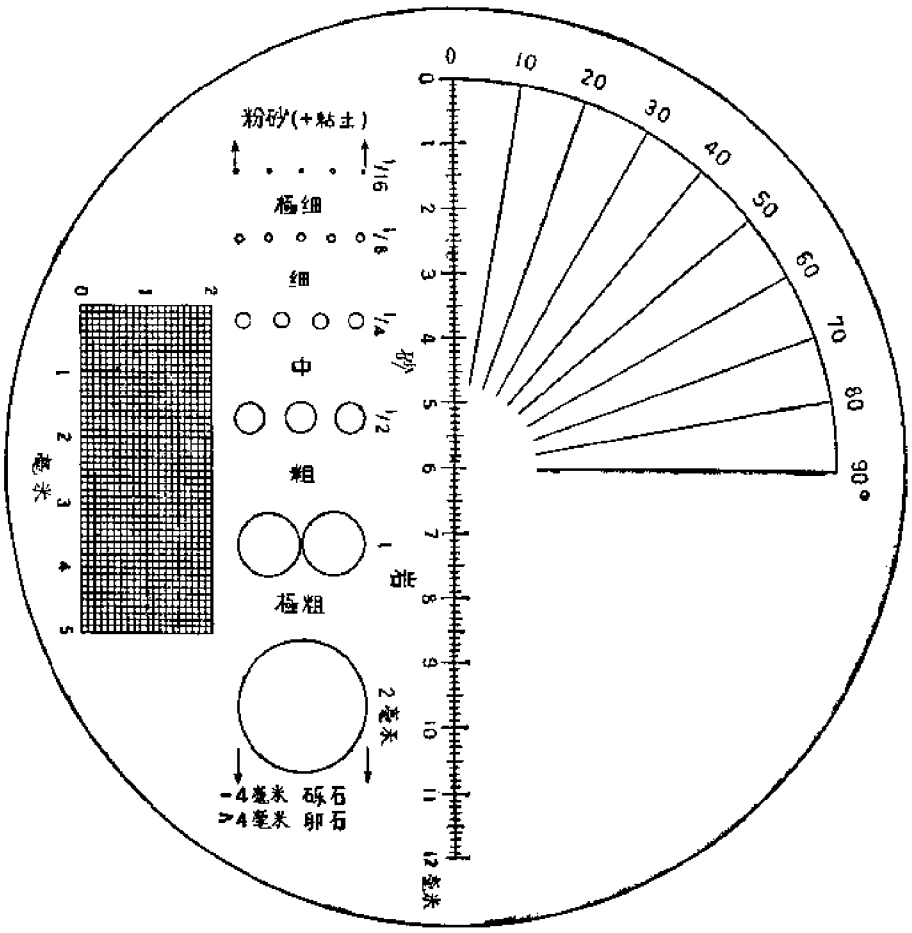


图 1—4　野外用粒度分析放大镜的标准片

应注意视域要大而清晰，这样才能保证测量准确。在长筒的下端设一进光孔以使视域明亮。

也有人在野外使用更简单的粒度比较器，如标准粒级的砂样管或有机玻璃的粒级载片等，也能起到相同的作用，但不能同时放大。

二、利用照片对粗碎屑岩进行粒度分析

固结的颗粒较大的粗碎屑岩如砾岩及角砾岩，不能使用筛析法求粒度分布，有时甚至用直接测量法测定也有困难，但可以在露头断面的照片上测出各个颗粒的粒度。纽曼-马尔考（Neumann-Mahlkau, 1967）曾对19个弱胶结的砾岩同时做照片测量和筛析，对比两

种方法的结果，存在着线性相关，说明它们之间存在清楚的转换关系，从而证明照片法可做粗碎屑岩的粒度测量。照片法的步骤如下：

1．照像。照像面积的大小取决于砾石直径。颗粒越大。照像面积就应越大。究竟多大才合适，可根据图1—5上的直线求得，该线求出的是应照断面的短边长，误差为1%。所使用照像暗盒的边长应是2:3，这样应照断面的长边长也就知道了。照像时应在拍照面积内放一清晰的比例尺。最后将照片放大成6×9厘米或9×12厘米。

2．将照片放在双目显微镜下测定其上每个颗粒的最长轴（代表视长径）。也可在双目镜上加一点计目镜及一网格微尺，放大倍数可在显微镜说明书内查出。微尺的长度可根据照片上的比例尺得知。应注意颗粒大小必须小于点计目镜中各点之间的距离。为了使测量颗粒时网格微尺的放大倍数合适，可先做一准备测定。当然也可以使用计数器记录各粒级的点数。

3．测量的点数视统计测定极限误差的要求而定。一般说1.5%的理论绝对误差就足够精确了。大多数情况下测定600个点的理论误差就小于1%，故3小时测定500—600个点完全可以达到此精度。如欲概略了解粒度的分布情况，300个测点就够了。

4．根据下列各公式或者利用图1—6即可将照片直径d_p换算成筛析直径d_t：

ϕ 分级：$d_t=0.9\ d_p-1.15$

毫米分级：$\log d_t=0.9\ \log d_p+0.32$

$$d_t=10^{0.9\log d_p+0.32}$$

$$d_t=10^{\log d_p{}^{0.9}}\times 10^{0.32}$$

$$d_t=d_p{}^{0.9}\times 2.09$$

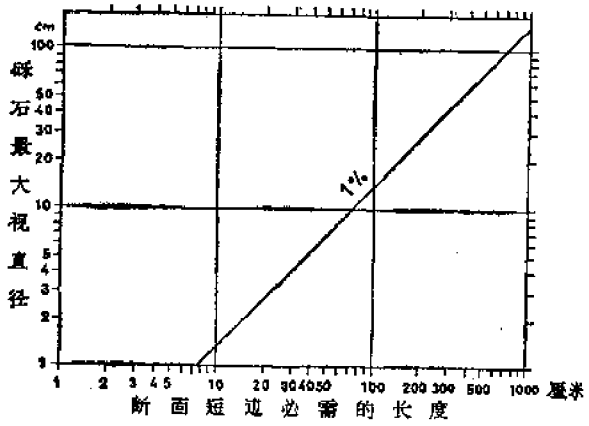


图 1—5 根据砾石最大视直径确定照像断面短边必须长度的图解

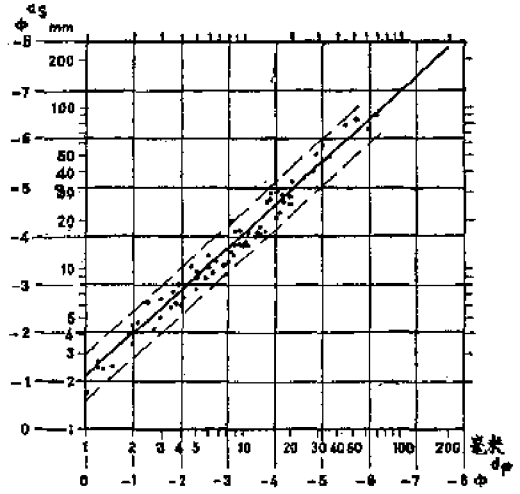


图 1—6 筛析直径d_t和照片直径d_p的转换关系

三、筛　析

对砂和细砾而言，筛析可能是较精确的办法。分析一个样所费时间属中等情况。筛孔间隔最好是1/2ϕ或1/4ϕ。1ϕ间隔的筛，其结果不精确，并不好使用。因为由其做出的频率曲线比较粗略，不易了解曲线的双峰性和尾部细节，如以概率值做图，则因得出的点

过稀，连成的直线不准确。筛析的缺点是仅对松散或弱胶结的岩石适用，同时软的或脆的颗粒如化石或变质岩碎屑在筛析过程中易破碎变细，而次生加大的石英颗粒又将使粒度变粗。再者，不规则形状的颗粒也不能得到真实的反映。筛析法最突出的优点是做了粒度分析之后，还为进一步的矿物学和颗粒形状研究准备了丰富的材料。

筛析法沿用已很久了，但其理论却较复杂。详细探讨超出本书的范围，故从略。这里只指出：理论上讲，能通过筛孔的圆球颗粒，其最大直径将等于筛孔的直径。但是由于通常使用的筛均为方形孔，同时沉积物颗粒也绝大多数并非理想的圆球，而是不规则的。情况就变得复杂了。如果方形筛孔的边长为 L，则只要中径小于或等于 L 的颗粒均可通过。然而由于方孔对角线方向的孔径达 $L\sqrt{2}$，因此，在某些极端情况下，d_i 大于 $L1.4$ 倍的颗粒也将通过筛孔。所以如果说颗粒中径 d_i 决定了它能否通过某一号筛的话，则这个中径乃是一个介于 L 和 $L\sqrt{2}$ 之间的数值。

筛析样品通常取15—20克，或者更多一些如30克，甚至 100 克。一般是在振筛机上筛 15—20 分钟，然后分级称重。称重应准确到 0.01克；如分级量不足1克时，则称重应准确到 0.001 克。随后，每个分级均需用双目镜检查，发现有未分离开的颗粒集合体，则应按估计百分数加以扣除，然后才计算重量及累积百分数。还要注意最后的总和应为 100%，如不足或多于100%时，要按比例分配到各级重量中去，使总量为100%。如果沉积物中同时含有砂及砾石，则应先通过1 ϕ 孔径的筛子，筛上的物质继续用1 ϕ 间隔的套筛做筛析。筛下的物质需分样，取所需的量，继续做砂样筛析。在最后总算累积含量时，这部分分样的重量需要除以分样系数，才能恢复到未分样时的情况。至于不能继续筛析的粘土物质，如不继续做分析，则可用外推法在一张算术图纸上，从最后的资料点 10 ϕ 上外推到 100% 的14 ϕ 上，以得到近似的情况。

在筛析工作中有各种误差（如裂分误差、制造误差、工作者和读数误差、再现性误差等）影响成果的精确性，其中以套筛制造误差最为显著。据研究，孔径误差对粗砂为 7.0%，对细砂甚至达 17.0%。如果只求粒度平均值和标准差，可以不进行孔径校正。如果要了解环境的细微区别，就必须仔细校正孔径，因为孔径的大小误差对偏度及峰态等参数产生的影响十分显著。检查和校正孔径的办法很多，现选择介绍于下：

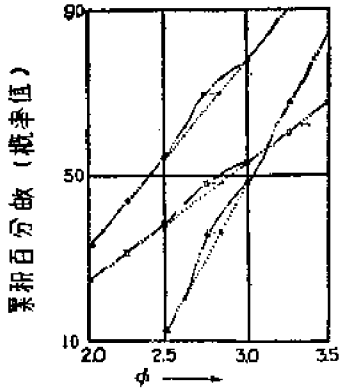


图 1—7　用样品检查校正筛孔

图中表示 2.75ϕ 的筛子孔径有问题，因所有样品的概率曲线均在同样粒度处出现拐曲。图还表示出连成直线来校正的办法，即将点平移至直线上有星号处。看来2.75ϕ 筛子的真实孔径应为 2.81ϕ

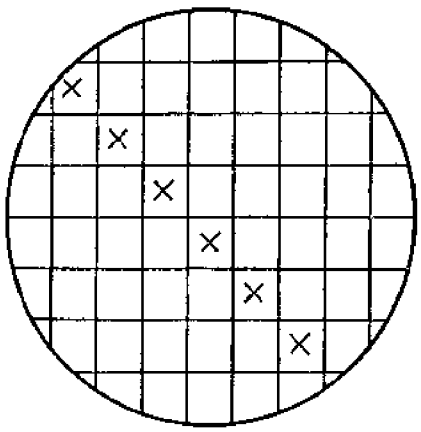


图 1—8　用显微镜测定筛孔径

测孔选在方孔的对角线方向上（带×者）

用不同地区的滨海砂样做检查，因为这种砂样的粒度分布大多数属正态分布。筛析结果都在同一ϕ值上出现拐曲，那么那个筛子的孔径就值得怀疑。校正方法是将成果在概率纸上做图，连成直线加以校正（图1—7）。或者在双目镜下测量筛孔，这时要选六个互不重叠的视域，前三个应与后三个垂直，每个视域至少测定50个孔径。测孔应选择在方孔的对角线方向上（图1—8）。也有人用标定了的玻璃球来检验筛孔是否标准，看套筛所得结果与玻璃球标定样的粒度是否一致。如不一致，则需得出校正系数。一个实验室要有自己的标准样，定期做检查。

四、沉 降 分 析

沉降分析法比其他任何测定粒度的方法都更符合自然情况，因为测定沉降速度较之沉积物颗粒几何大小，似乎是更能反映基本动力学的特性。沉降法的基本原理就是利用颗粒沉降速度来划分粒级分布。这个方法主要用于粘土-粉砂级和砂级沉积物。前者使用移液管法，后者使用沉积筒法。沉降分析法目前在所测特性的显著性和测量技术的精确性等方面还受到某些限制。

为了讨论这些方法以及沉降速度本身的含义，应当适当的涉及一点流体阻力的机制。

当固体颗粒在流体中运动时，将受到流体产生的力的反抗。这些力主要是两类：粘度和惯性。由于固体物质的通过而移动了一定质量的流体，必然使它从静止状态加速了一个大于零的速度。因此，这些力与流体的质量密度成正比。如果只有惯性力是重要的，则可能以量纲分析来确定阻力和密度以及速度之间的关系。我们可以用下面的最一般形式来描述它：

$$F_R = f(\rho, u, d) \qquad (1)$$

式中：F_R为在颗粒上作用的流体力，ρ为流体密度，u为相对于颗粒的流体速度，d为颗粒直径。

在动力学中，全部变量可用其基本单位表示：长度〔L〕、时间〔T〕、力〔F〕、质量〔M〕等。用方括号表明只考虑变量的基本量纲而非其绝对量。力的基本量纲通过质量、长度和时间就很容易从牛顿第二定律得到：

$$\text{力} = \text{质量} \times \text{加速度}$$

用量纲术语可以写成

$$[F] = [M][LT^{-2}]$$

在方程（1）的情况下，其量纲形式就是

$$[MLT^{-2}] = [ML^{-3}]^a[LT^{-1}]^b[L]^c$$

这里a、b及c为整数。考察方程可知$a=1$，$b=2$和$c=2$。否则就不符合量纲统一的基本定理。这就确立了方程（1）必须是这种类型

$$F_R = C(\rho u^2 d^2) \qquad (2)$$

式中 C为非量纲常数。方程（2）又可用颗粒横切面积A改写成下述方程

$$F_R = C_D \cdot \frac{\rho u^2}{2} \cdot A \qquad (3)$$

在这种形式中，方程可描述为阻力与流体动力能（$\rho u^2/2$）和颗粒横切面积成正比。C_D是颗粒的阻力系数。方程（2）或（3）叫做牛顿阻力定律。量纲分析不能揭示阻力系数的

值，它必须由实验确定出来。从实验得知的阻力系数并非总是一个常数。原因是在上述推导中忽视了一个重要的变量：流体粘度。

粘度并不是个别流体的一种绝对不变的性质。它有自己固有的分子之间的力，同时还因温度和可溶盐类存在而变化。另一方面，流体中悬浮物质增加，特别是粘土矿物增加，粘度也将增大。实验发现，一个颗粒通过液体时，其阻力是粘度的函数。通过运动着的流体之主要特性，诸如密度、速度以及粘度等的无量纲组合的办法可以表示粘度的相对重要性。这些变量只有一种无量纲组合，那就是雷诺数(Reynolds' number)R_e：

$$R_e=ud\rho/\mu \qquad (4)$$

式中 μ 为粘度，其余同前。如果颗粒形状不变，则阻力系数乃是雷诺数的唯一函数。

当很细的球状颗粒在水中沉降，并且浓度很低时，

$$C_D=\frac{24}{Re} \qquad (5)$$

如果联合（3）和（5）的方程，再结合R_e和A的定义，可得出：

$$F_R=3\pi d\mu u \qquad (6)$$

这就是熟知的斯托克斯(Stockes)阻力定律。当一个颗粒在水中以不变的速度W沉降（W称为沉降速度）时，流体阻力必然与作用于颗粒上的重力F_g相等而方向相反。重力可以根据球的体积$\pi d^3/6$、颗粒和流体的密度差$(\rho_s-\rho)$以及重力加速度g计算出来：

$$F_g=\pi d^3(\rho_s-\rho)g/6 \qquad (7)$$

联合方程（6）和（7），以$u=W$，并解W即得出斯托克斯沉降定律：

$$W=\left[\frac{(\rho_s-\rho)g}{18\mu}\right]d^2 \qquad (8)$$

这个公式曾广泛用来确定粘土至粉砂粒级颗粒的大小。这些颗粒在斯托克斯定律的有效范围内将沉落下来。然而，实际上有一些因素限制了该定律的应用。它们主要是：

1．在这个粒级范围内的颗粒并非球形的，而且其密度也无法准确的知道。因此，测定出的粒度值是所谓的“当量直径”，即相当于同样沉速的球的直径。同时，温度必须是规定的标准20℃。在这个温度上，方程（8）括号内的数值是0.892×10^4，W的单位是厘米/秒，d的单位是厘米。

2．斯托克斯定律只对在无限流体中的单个颗粒才严格有效。浓度即使低到1%时也能够阻碍沉降。

3．很小的颗粒总是趋向于凝聚。为避免凝聚现象发生，常在粘土中加少量的分散剂。

下面介绍两类沉降分析方法：

移液管法 这是过去应用较多的方法。此法内容为准备浓度低而均匀的悬浮液。将1升悬浮液装入刻度筒中，按算准的时间间隔于顶面向下10厘米或20厘米标度处取出悬浮样品。取样时间是根据斯托克斯定律计算出来的。在这些时间上，所有给定当量直径的颗粒都沉降到该标度之下。再次取出的悬浮样属于更细的粒级。根据全部所取已知体积样品中回收的沉积物重量（干重），可以计算出粒度分布。很清楚，从上面很简略的介绍就可看出，这个方法的精度是不高的。但是，它对确定泥质样品中粉砂的大致含量还是有用的。目前这个技术已经标准化了，而且在仪器方面也不断有所改进。因此，其精度也有所提高，目前一些生产单位仍在采用。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

沉积筒法 砂级颗粒的沉积筒法近年来得到了改进和推广，主要是因为它比筛析更为快速，并且人们认为沉速比筛析得到的粒度更具动力学意义。沉积筒工作原理是从筒的一端引入样品而在另一端沉积。对各种沉积物组分沉积所需用的时间，可用下述三种方法（图1—9）之一来测定：1.当沉积物堆积在筒（如埃默里筒、直观堆积筒等）下部的窄端时直接检查它的堆积高度。2.自动记录水-沉积物柱体与相当的纯水柱体之间的压力差。伍兹霍尔(Woods Hole)快速沉积物分析仪就是根据这个原理设计的。3.使用应变计或电天秤自动记录悬在筒底的盘上堆积的沉积物重量。后两种方法可以得到相当精确的结果。

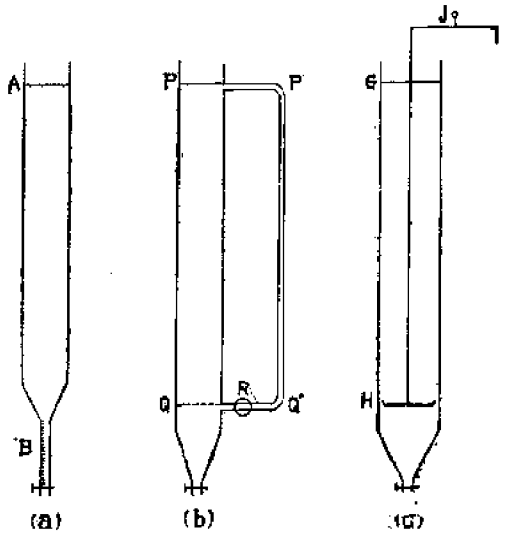


图 1—9 三种沉积筒的原理

a—样品在A处引进，在筒的窄部B处测量其堆积速度；b—样品在P处引入，只要颗粒未沉降过Q，悬浮物的重量将在pQ和$p'Q'$柱之间产生一个压力差，后者用在R处的一个传感器记录下来；C—从G处引进的颗粒沉降到盘H上，盘是从J处的一个电天秤上悬挂起来的

用沉积筒分析砂级沉积物时受到的一些限制是，首先砂级颗粒沉降时不服从斯托克斯定律，由于该定律的上限粒级是在25—60微米之间，雷诺数在0.02—0.2之间。这时可以使用劳斯(Rouse)球粒沉速实验曲线（图1—10），以弥补这一缺点。其次，沉积筒法不能很好地精确记录粒度分布的尾部，而很多地质工作者却认为尾部对解释沉积物的成因特别有用。

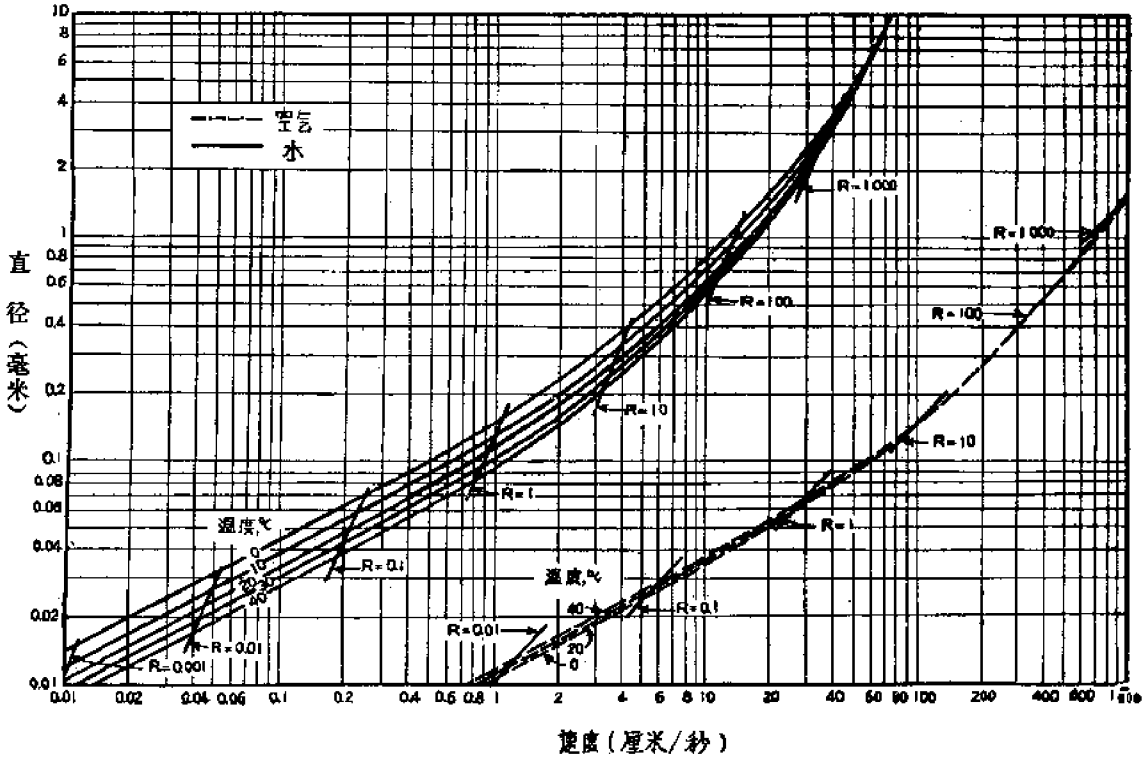


图 1—10 石英球粒在水及空气中的沉速实验曲线（劳斯，1937）

R为雷诺数

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

最后，沉积筒法还有一个缺点：在加入沉积物时，由于一时引入很大的浓度将使顶部的水发生搅动，颗粒成堆的下降，较小的颗粒甚至被较大的颗粒拖下去，可能形成一个小的垂直密流柱或“浊流”。避免这种现象的方法是在分析时使用标准的小量样，同时还可用已知密度和粒度的球样对筒进行标定，或者增加合适的放样装置。

尽管有上述缺点，沉积筒所得结果的精度是可以的，特别是对平均粒度和分选性的常规测定是可用的。施里(Schlee, 1966)同时用筛析和伍兹霍尔沉降筒对同一样品进行分析。根据50个样得出的图解统计值比较，发现两种方法得出的平均值只差0.09ϕ，标准差只差0.03ϕ，偏度的差别大一些，达0.37ϕ。沉积筒比筛析所得数值系统地偏大一些。当然，对筒进行校准可以减小这些差值。

由于沉积筒具有不少的优点，如测定快速；得出的粒度分布记录是连续的；粒度频谱广，可达63—2000微米；样品量少，只需1.5—5克，以及最重要的优点是因为这种分析过程与自然界的沉积作用很类似。下面我们介绍几种沉积筒，以便于生产中采用。

1．埃默里沉积筒。这是埃默里很早设计使用的。筒长164厘米，筒的下端直径变窄。在预定时间上读出堆积在窄部底上沉积物的高度。该仪器的再现误差为3%，它的特点是制造简易，任何实验室或野外队均可自制，用以进行分析。

2．伍兹霍尔快速沉积物分析仪。齐格勒等（Zeigler et, al., 1960）对此仪器曾有过详细的介绍。基本原理与图1—9（b）一样，是自动的记录纯水柱及水加沉积物柱的压力差。随着沉积物沉降，压力差也发生变化。此仪器适用于粗粉砂至砾石级颗粒，再现性好。经检验证明，所得粒度平均值的标准差是小数后第四位。

仪器基本组件为两个筒，一个测沉速较快的沉积物，另一个则测沉速较慢的沉积物。每个筒的靠顶部和底部各有一孔，接压力传导管。顶部孔将压力传到压力箱中，后者是在折箱的外面。底部孔将压力传到折箱内。当底部孔由于沉积物加水的柱比只是纯水柱的顶部孔传送的压力更大，因而折箱被伸开。在折箱底部装有一个灵敏的差异记录器，来测定折箱的运动量，然后经放大器将信号传到记录仪上。根据需要，筒上孔可降到不同的高度，以缩短沉降过程。所用之水可在热水箱中赶走水中的气体后，储于室温存水箱中，再借水管导入筒内。

最好用人造树脂或其他塑料做筒的材料，减少在打孔及其他方面的技术困难。

沉速较快那个筒可测粒径为0.04—3毫米的颗粒。样品量以5克为最好，但大到25或30克或小到2克的样均可以做实验。并且分析时不需要知道样品重量。可先通过引入小量样使记录笔起动，一般是0.05克的样即能开始记录。之后，由于惯性，只要有0.01克样记录器即可正常工作。因此，平均样重5克的话，只要0.2%的重量仪器就能检出其压力的变化。测量结果得出的是一条连续曲线。横座标为时间。根据时间（读出的）和沉降距（已知的）可算出沉速或从表中读出粒度。

近年来，该仪器又有所改进，更为快速和方便。施里在1966年改进了压力仪、放样闸门、沉积筒直径等。布雷津那(Brezina, 1969)又进一步改进了放样装置，还用一自动转换器将沉降时间转换为粒度，并以纵座标的电压代表频率。因此，可以直接记录下粒度频率曲线，而且更为快速，每天可测100—250个砂样。

3．沉积天平。以前多使用多格拉斯(Doeglas, 1946）提出的可以分析4克样的沉积天平，以后这种天平又有所改进。下面介绍两种较为适用的天平。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

荷兰壳牌实验室改进的多格拉斯沉积天平。它可以分析少到 2 克的样品，适用的粒度区间为63—2000微米。仪器的结构见图1—11，其工作原理是根据力的平衡，现简述于下：

以直径 0.1 毫米的细钢丝将平底盘悬在天平横梁上，盘位于透明沉积筒下部的直径变宽部分中，以保证能承接筒上部沉降下来的全部样品。盘上的载重与沉积物的沉速成函数关系，反映了样品内的粒度分布情况。天平梁下接一喷嘴，喷出空气。当盘上沉积物载重增加时，天平梁随之下降，因此限制了空气从喷嘴中喷出，于是在节气门后形成压力，使其旁的反馈折箱产生动量，直到与盘的载重平衡为止。折箱压力与盘上载重成正比。用气体放大器调节，使盘上载重为0—2克时所形成的压力输出信号为3—15磅/平方吋。用记录器将信号记录下来，即可了解粒度分布情况。

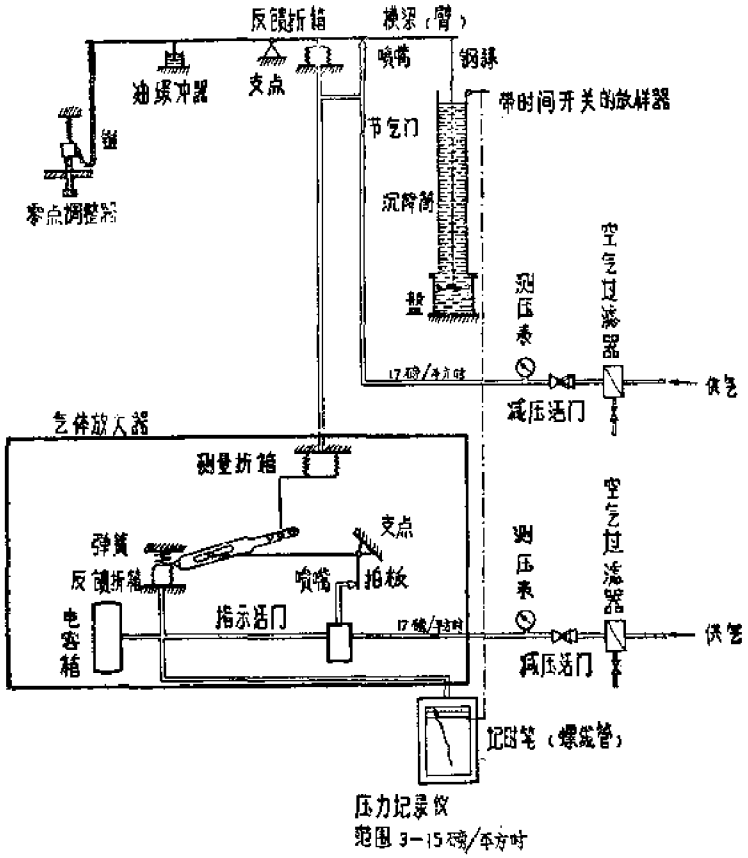


图 1—11　荷兰壳牌沉积天平图解

开始工作前，可以增加天平臂反方向的重量或移动支点的位置使之达到零点。在做10个样后，必须清洗盘，这时可以使盘降到筒的底部并使之翻转，进行冲洗。

分析准确与否的关键是，整个样品应同时进入筒的顶部，并同时开始降落，且不引起水的扰动。为此目的，曾设计了一个圆的多孔的浅陶质盘，装在筒的顶部。此盘只有两个稳定位置。一个是它的凸面向下并且刚好位于筒的水面下；另一个位置是翻过来凸面向上，并在平面上旋转了180度的筒外位置上。工作时开始是处于后一个位置。将样品弄湿，并均匀的展布在凸面上，然后再转成第一个位置，粘在盘上的样品到达水面同时开始降落。用这个装置释放样品不会形成意外的扰动。为了确定沉降开始的时间，在此装置上装

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

有开关，并与记录仪的时间记时笔相连，可将沉降作用开始的时间准确的记录下来。

格朗宁金沉积天平（Groningen Balance）。本仪器由三部分组成：204厘米高的双层透明塑料筒、自动称重的分析天平以及记录器（图1—12）。筒内可容70升蒸馏水。沉积盘用尼龙丝悬挂在天平盘上。为了减少尼龙丝的表面张力影响，可在水中加入7毫升去垢剂梯波儿（Teepol）。为了不使水中生长藻类生物，在不用时应用布幔遮住光线。为了避免滋生细菌，可在水中加70克尼帕晉*（$NaOC_6H_4COCOH_3$）(Nipagin)。使用双层壁可以保持水温较稳定。天平顶部装有光源及两个光电池，利用天平称重时两个光电池内产生的功率差，用电位计记录下来，并以1吋/分的速度画在记录图纸上（图1—13）。天平灵敏度小于1.0毫克。本沉积天平的适用粒度区间为50—1000微米。>1000微米的颗粒在悬浮物中会产生扰动效应，<50微米的颗粒沉降时间过长。如果用化学试剂除去样品中的有机质，则做一个样只需20分钟。样品重量最大可达1.6克，一般用1.5克样。沉积天平可连续作200个样品后再清洁沉积盘。方法是只需利用悬挂它的尼龙丝使之倾斜，让其上的沉积物滑下，然后松开筒底，除去沉积物即可。通常在使用一年后才重新换水。用此装置一天至少可做10个样。

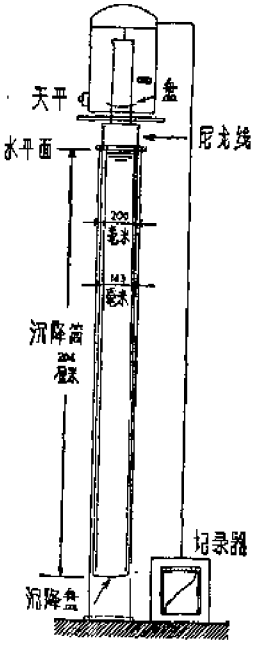


图 1—12 格朗宁金沉积天平示意图

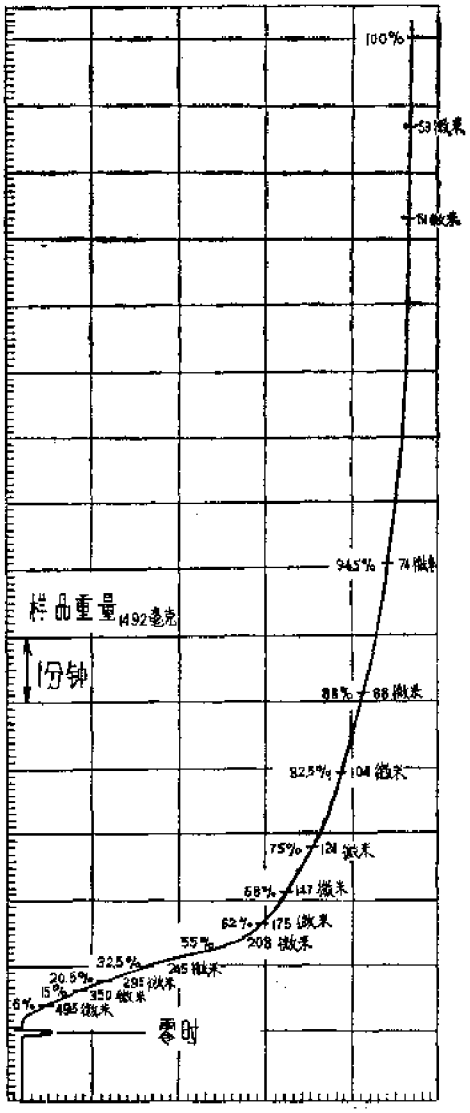


图 1—13 格朗宁金沉积天平得出的粒度分布曲线

上述的几种沉积天平记录的都是沉速，显然比筛析测定的中间直径更能可靠的说明颗粒在自然搬运和沉积中的情况。沉积天平的缺点是因记录系统的惰性，往往不能记录开始

* 是一种防腐剂，属对羟苯酸甲酯一类化合物。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

的5毫米，约相当样品的0.3%；同时沉积天平也和其他沉积筒一样，不能像筛析那样在分析结束时，为显微镜研究的各种粒级提供足够量的样品；而且，因沉积天平所需的样很少，分样工作麻烦和费时。

沉积天平和筛析二者所得的结果表明，在>250微米时，沉积天平资料的累积百分比比筛析资料要低些；<250微米时则相反（图1—14）。因此，一般从筛析得到的中位数比天平的记录要小7—10微米；对中粒沉积物，天平得到的84%累积重量相当的粒度比筛析资料大30微米；16%相当的粒度则小20微米。两种资料的这种差异的解释，认为是因粗粒部分存在有沉降慢的片状云母碎屑，细粒部分存在有沉降快的重矿物之故。

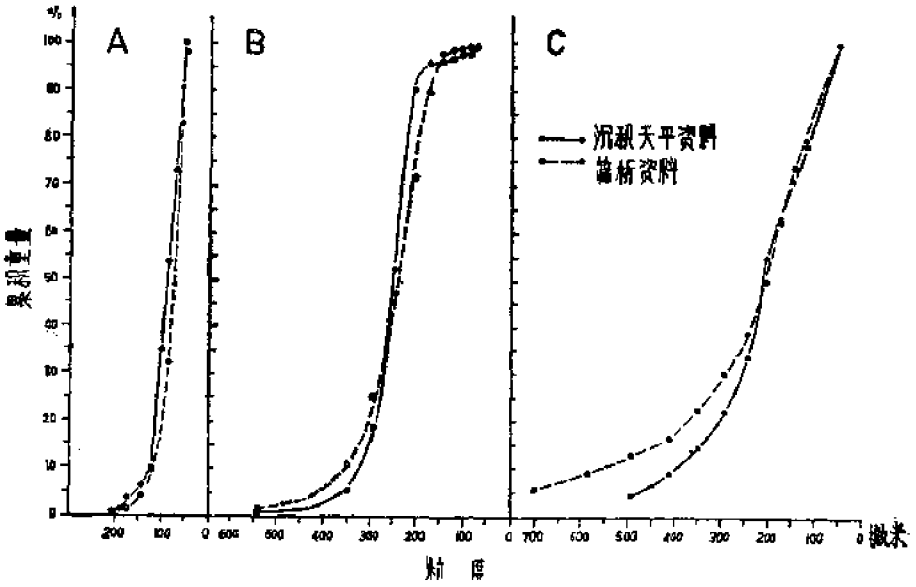


图 1—14 筛析和沉积天平得出的粒度资料的比较

A—细粒样；B—中粒样；C—粗粒样

至于筛析与沉积筒分析所得资料之间的换算问题，美国水源中间协调委员会（Interagency Committee on Water Resoures, 1964）曾提出一个换算图（图1—15），其纵座标D代表筛析直径，即颗粒通过的最后一个筛及留在其上的那个筛两者筛孔孔径的平均值，横座标Ds_1为颗粒的沉积直径，即和颗粒在相同温度相同流体成分下具相同密度的球的直径。图中第三个变量是球度$S.F.$。$S.F.=C\sqrt{ab}$，其中a、b、c分别代表颗粒的最长、中间和最短的三种粒径。大部分自然砂的$S.F.=0.7$。该图是根据在24℃情况下的实验资料做出来的。当温度差1°和2°时所形成的直径变化<2%。通过实验检验此图，发现从图上得出的粒度Ds_1与实际的沉积直径Ds很一致（Kennedy & Kon. 1961）。因此根据此图可以将筛析的平均值换算成沉积直径的平均值。可根据换算后的各Ds_1再来求沉积直径的标准差。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

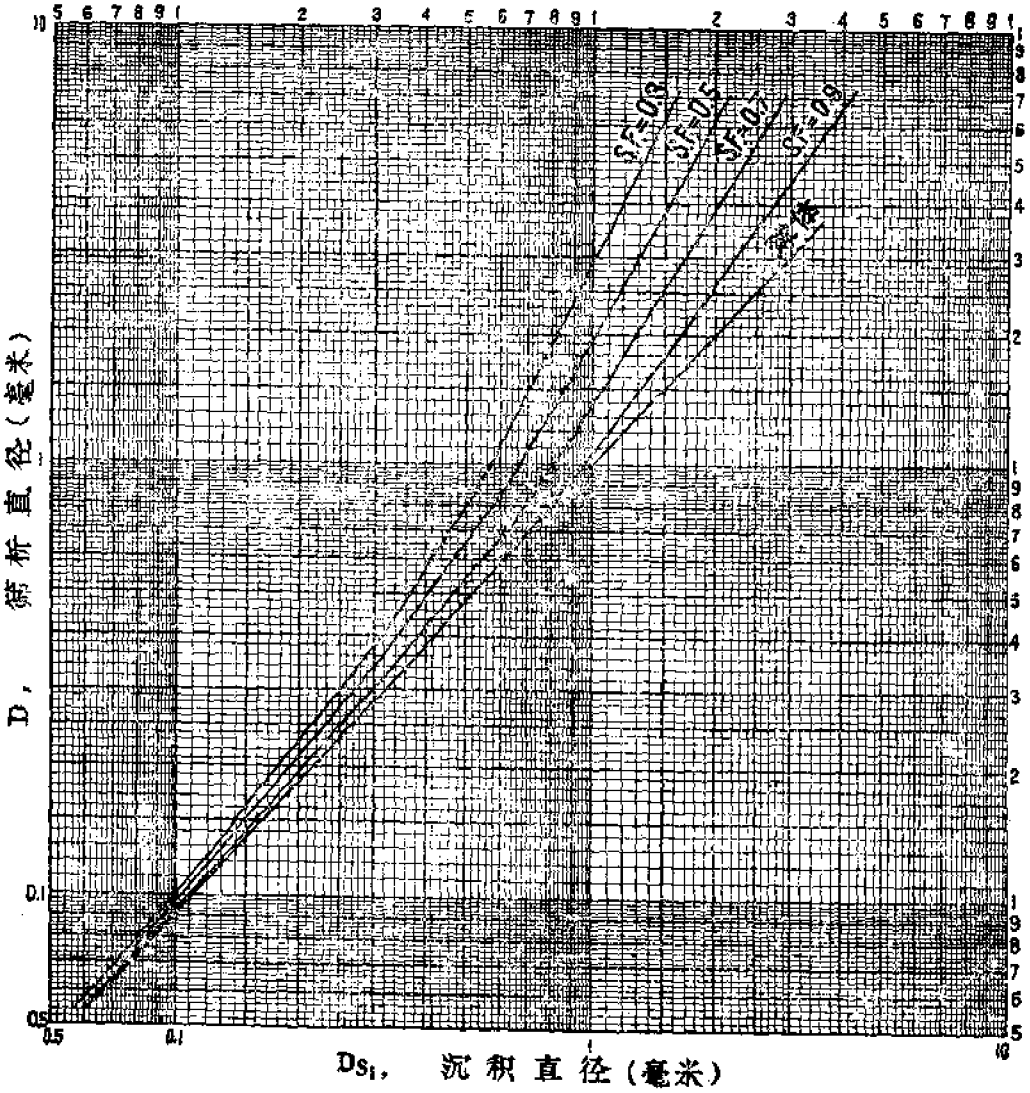


图 1—15　筛析直径和沉积直径关系图

五、细粒悬浮物的粒度分析

本节主要概述一下海水、河水以及其他流水中细粒悬浮物的粒度分析，制备后的土壤样也可能成细粒悬浮物。这种悬浮物的主要成分为石英碎屑、粘土颗粒、死的和活的有机物等。它们呈单颗粒、团状、集合体等形式存在。颗粒的投影面积、体积和直径因它们的光性和电性而变化很大。由于粘土的絮凝作用、有机物对沉积物的作用等，使细粒悬浮物的颗粒构造也多种多样。如静电荷可使粘土矿物构成板状；在无脊椎动物的腹腔内紧密排列可成椭圆形的颗粒；分解的有机物被藻丝或细菌粘液粘结成不规则的集合体状等。这种构造的不同，使它们的形状、密度、凝聚程度和电阻率都产生变化。如粉砂粒级石英碎屑的比重是 2.5 且为半球状，而具同样直径的粘土絮凝体可以含高达95%的水，因此，一个500微米直径的粘土絮凝体可以和20微米的石英颗粒具相同的沉速。有机物集合体也可含高达95%的水，因此沉速也慢得多，如活的或死的浮游生物，效果就更明显，因为它们的不

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

规则形状使得更易漂浮。

由于颗粒的投影面积、体积、直径等性质受不同因素的影响而变化很大，，各种不同的粒度分析法测量的是颗粒的不同性质，得出的是不同的粒度分布，因此不能直接对比。如显微镜法测定的是切面直径或当量圆直径，沉降分析是测量颗粒的当量球直径的沉速，库尔特计数器（Coulter Counter）是通过测定颗粒在电解质中不同体积产生的电阻而间接地测出颗粒的体积。

细粒悬浮物粒度分析的困难之一是抽样问题和分析时如何能保存自然的粒度分布状况问题。理想的情况是用分析仪就地测定或在船上进行分析，以便不改变水沉积物系统的浓度、盐度和其他参数。如果必须从水中抽样进行分析，则须非常小心。可以使用分散剂，但使用分散剂后的粒度分布，鉴定价值会减低。

下面简介几种常用的分析法：

1.颗粒载片的显微镜粒度分析法 从水体中取样，收集后立刻通过0.22微米的APD赛璐珞薄膜过滤器。用一种折光率等于赛璐珞（$n=1.51$）的液体冲洗一部分过滤器以制备载片。理想的情况是制成单个颗粒的薄层，且颗粒彼此最好不接触，虽然这样的样品量很小，但保证粒度分布统计的稳定性是足够了。

方法是直接在显微镜下测定，也可利用蔡斯TGZ-3照片分析仪、CBI分像目镜帮助计数。这两种仪器都是测定切面的当量圆直径——与颗粒切面具相同面积的圆的直径，或测切面直径。如颗粒是圆形，则直接测出当量切面圆直径；如颗粒为不规则形状，则可根据本节后面关于半自动、自动粒度分析仪部分中叙述的方法进行测定。这里从略。

显微镜分析得出的是一定粒级颗粒数的频率分布，而不是重量频率分布。

2.光学法 光通过混浊的水，强度会减弱，这主要是两种原因引起的：散射和吸收。散射是光线从直线方向上发生偏离；吸收是辐射能衰减。光学法就是根据光的这些性质来测定粒度。光学法分两种：（a）光学-沉降联合法；（b）纯光学法。

a．光学-沉降联合法。主要为消光-沉降法，是在沉积物水柱的一定深处，利用光感来确定时间加长时密度变化的情况。原理是根据入射光与透射光强度的关系：

$$\ln\frac{I_0}{I}=kcl\sum_{d=0}^{D}Knd^2$$

式中，I_0—入射光的强度；I—透射光强度，代表随着时间加长光强度的变化情况，可以从仪器上读出；k—体积吸收系数；c—浓度，单位为克/厘米^3；l—沉积池室的宽度；K—有效面积系数；n—颗粒数；d—颗粒直径。在任何一次实验情况下K、c、l都是常数，K值可以从罗斯曲线上读出（Rose. 1953），或从伯特（Burt, 1955）的表中查出。从仪器上读出的I与一定的颗粒粒度有关，$\ln\frac{I_0}{I}$的变化乘以平均直径就能够得出一级粒度的重量百分数，该结果再被有效面积系数除，可得出真正的颗粒重量百分数，进一步的计算讨论可参考西蒙斯（Simmons, 1959）及麦肯齐（Mckenzie, 1963）的文章。常用的简单设备包括光源、透镜、描准透镜（或称直准透镜）、沉积筒、微电流计等（图1—16）。麦肯齐（1963）曾提出使用一比色器来作消光沉降法。该法能在半小时内分析一个样，粒度达5微米，并且在10分钟内算出重量百分比。这种方法存在的第一个限制是，温度波动能影响检测器的输出功率，使测定的准确度受影响；第二个限制是浓度问题，在低浓度时，

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

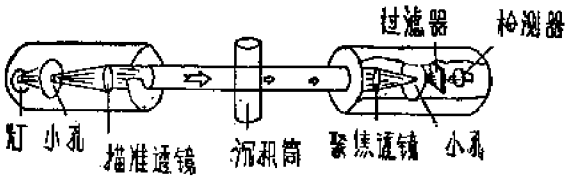


图 1—16　消光-沉降法粒度分析装置图解

测定散射度比测定透射度的灵敏度要高。测散射度的装置如图1—17。实验发现这种方法的灵敏度可达到小于0.01%(100毫克/升)的浓度，这时悬浮液的透明度对人眼来说几乎已是透明的了。当然，这种浓度实际上并不是最低的，对海水而言，还是相当高的浓度。因此，水源中间协调委员会（1963）又装置了一套利用散射光的仪器，可测定0—10/百万的浓度和0.020—0.120毫米的颗粒直径。

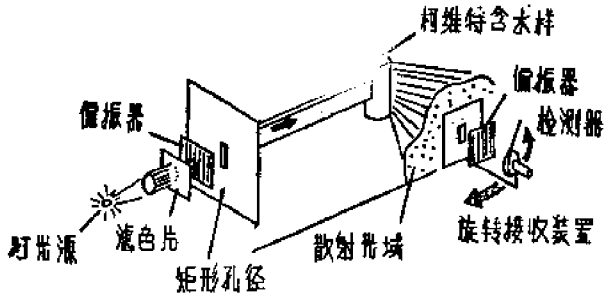


图 1—17　散射沉降法粒度分析装置图解

b．纯光学法。根据透射光百分比是随粒度而变化的原理，伯特（1955）用贝克曼分光光度计测定悬浮沉积物的浓度和粒度。分光光度计读出的光密度 $E\lambda$ 定义为：穿过沉积池室的光能的以10为底的负对数。对每立方厘米中含 N 个一定直径（以厘米计）的球状颗粒，其间关系为

$$0.23E\lambda=\pi R^2NK$$

为了研究单分散系的直径，伯特在不同波长上测定了样品的光密度，然后以 $E600$ 去除每一个值。当画成 $f(E\lambda)$ 对 λ 的曲线时，此结果与浓度无关，而可直接与伯特所计算的一组 $f(k)$ 曲线对比。将试验曲线重叠在计算的曲线上并根据内插法就可确定颗粒直径。用已知粒度频率分布的综合曲线对比试验 $f(E\lambda)$ 曲线就可能将这方法用于多分散系并估算颗粒值的分布。

比格斯（Biggs, 1968）利用Lumitron 402E型比色计测定水样透明度来确定粒度。方法是用双水样过滤以得到所需的浓度（以毫克/升计），根据透明度和重量资料，并把透明度转变成体积减少系数，以确定光学粒度中位数：

$$\alpha=\frac{1}{L}\ln\frac{N_r}{N_0}$$

式中：α 一每厘米的体积减少系数；L 一程长（厘米）；N_r 是距光源距离为 R 处的辐射；N_0 为光源辐射。再利用波斯特玛（Postma, 1961）实验确定的悬浮沉积样可见度 D、浓度 G 和颗粒直径 d 之间的关系：

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

$$\frac{1}{D}=0.15\frac{G}{d}$$

以及琼斯和威利斯（Jones & Willis, 1959）实验确定的可见度与中位直径的关系

$$\frac{\alpha}{4.38}=\frac{1}{D}$$

将上述公式化简，得

$$d=\frac{0.657G}{\alpha}$$

于是，根据仪器测定的α和G，就可以估定粒度。比较光学资料与显微镜资料，表明后者的值粗约30%。

3．电法测定粒度 库尔特计数器是经常使用的仪器，测定的粒度区间是0.5微米—1.0微米。特点是只能在悬浮物低浓度甚至低到1/百万的情况下进行工作，因此对一般方法准备的悬浮物还应进行稀释，如土壤要稀释到10—100/百万的浓度。本仪器适用于下述两种情况：（1）干的固结样量过小无法使用常规的分析法时；（2）河、海等水中的悬浮物，雨水中的尘埃，其浓度过低无法使用一般分析法时。

库尔特计数器十几年来发展很快，由最初只能测定血液中细胞的专用仪器到现在的新仪器，后者已能做0.5微米—1.0毫米大小的细胞和颗粒的快速、常规测定了。其原理和操作最近已由艾仑（Allen, 1966）以及谢尔登和珀森斯（Sheldon & Parsons, 1967）作过综合说明。方法的基本原理很简单。如果在电解质中维持一个电场，当颗粒所具电性与电解质不同，在其进入电场时就占据了电解质的与其体积相等的空间，从而引起电场的变化。变化程度与颗粒的体积成正比。

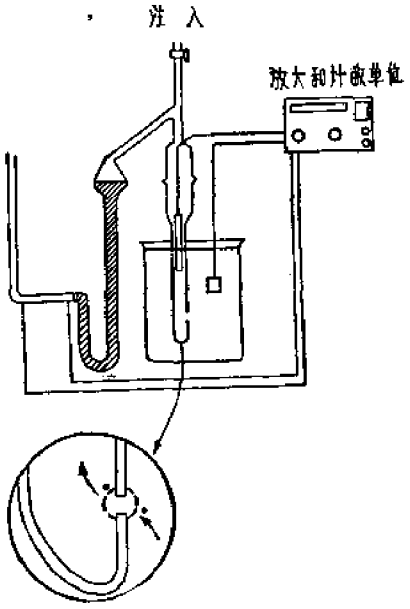


图 1—18 库尔特计数器图解
下方圆圈内为电敏感带的放大图

实际工作时，在非导体的壁上穿一小孔形成一个电敏感带（图1—18）。这个带的体积大约为孔的3倍，包括孔本身以及两个半球。测定的样是分散在适合的电解质中，并使之通过小孔。当每一个颗粒通过时，敏感带的电性即发生变化，这些变化被标度并以电压脉冲计算出来。用电滤波器排除大于和小于预定的两个界限的脉冲，仅对界限以内的脉冲计数。

仪器使用有两个条件。第一，颗粒与电解质的电阻必须不同。这点对地质上并不重要，因为大多数地质样具很高的电阻，而大多数电解质均是电阻很低的。第二，颗粒应当在一个时间内一个个地通过小孔。这就是说样品量应很少，如果取的样大，悬浮液必须稀释。例如，用移液管法备的样，在分析前必须稀释约1000倍。

工作的程序为：如系干样，5毫克就够了，最好是粉砂和粘土粒度区间的样品，但砂样也可以（McCave & Jaris, 1973）。第一步是分解样品，最好使用超声波发生器（KHZ, 125瓦），这比一般方法更不会损坏脆性矿物，通常处理15分钟就可以了。与此同时加

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

0.55%NaCl和碱性分散剂如氢氧化钠和六偏磷酸钠，以使悬浮的胶体稳定。如样品是粉砂和粘土质的，可用小孔径的库尔特仪直接测定；如样品含较多量的砂，则需先通过88微米的筛。>88微米的部分冲洗后并称重，然后以大孔径库尔特仪分析到粒度的最大限1毫米。其余的<88微米部分用小孔径库尔特仪来分析，分析的粒度区间是125微米至15.6微米。而<31微米的部分是从沉降作用得出的样品。用100微米和50微米孔径的库尔特仪，在引入物质时注意不要发生阻塞。各分析之间最好有一定的超覆，如样品中含有机质，可用过氧化氢等试剂加以处理。关于<2微米部分的重量是由总重量减去上述的重量求得，在这部分中主要是可溶盐类，要用大量样品抽提，才能得到一定的含量。

库尔特粒度分析仪与其他分析方法比较，本质上无特殊的优点，但极为快速。目前由于仪器的改进，一个1—500微米区间的样品，用15分钟即可将粒度情况求出。再一个优点是所需样品极少，一般说有火柴头那么大的样就行了，砂样的需要量稍多，但也不超过0.1—0.2克。因此，可以分析纹层的单层粒度情况。最后一个优点是它可以在整个粒度区间取得统一的粒度参数（体积参数）。缺点是抽样问题比较复杂，因其系小样的缘故。

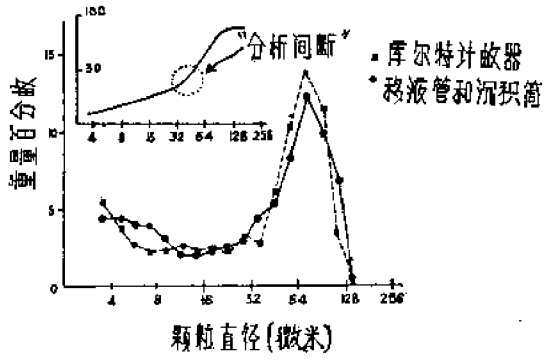


图 1—19　一个河口泥坪沉积物的粒度分布
圆点为移液管法（3—60微米）和埃默里沉积筒法（30—250微米）所得成果，方点代表库尔特计数器的分析结果。上左方小插图为重新绘成的累积曲线，上面的小圆圈表示"分析间断"

关于求得统一的粒度参数问题，目前随着仪器的改进，很多方法都能做到这点了，如沉积筒、移液管、筛析法等。过去认为粒度分布在30—50微米上存在的"分析间断"（图1—19）是由于方法变换引起的，后来用250—18微米的一套筛子求出统一的粒度参数，结果仍然存在这个"分析间断"，证明此间断并非因分析方法不同引起的，可能是沉积物在搬运过程中形成集合体引起的。

库尔特计数器求出的粒度分布与移液管和沉积筒法求得的结果大体一致（图1—19）。

六、显微镜下的粒度分析

载片粒度分析。松散颗粒的粒度分析只使用少量样品，因此可从野外样品中取20或25克，然后用四分法或微分样器分样得到所需的样品量。如果颗粒是干的状态，这时可将样品移到清洁的玻璃载片上，并且用铅笔轻敲载片的边缘，使颗粒处于稳定位置。这时颗粒的最大投影面（包含最长轴d_L和中间轴d_I）即会平行载片安放。如颗粒是湿的，则制备载片时需注意颗粒互相分离，不能重叠，最好是一薄层。测定时可测全部样品，也可用机械台沿一定间距的直线测定直线通过的颗粒。

薄片粒度分析。它是由于固结的硅质胶结或重结晶的泥质胶结的砂岩和粉砂岩松解困难，或者根本无法松解，不能采用筛析、沉降分析而发展起来的唯一的方法。在我国上述难于松解的沉积岩无论从地质时代上和区域上分布均十分广泛。另外，井壁取心或钻井岩屑样品，因系小样，做筛析往往有困难，但可磨成薄片做粒度测定。鉴于粒度分析资料对沉积岩研究，特别是对岩相古地理研究的重要性，因此，开展显微镜下薄片粒度分析工作将

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

具有现实的重要意义。下面将重点加以叙述。

薄片粒度分析是测定一定粒度的颗粒数的百分比，而不是重量百分比，所以它是属于粒算法。由于薄片切过的不一定是颗粒中心，求出的粒度必然小于实际情况，因而存在一个切面效应的处理问题。此外，由于颗粒形状常为不规则状，特别是板状和片状矿物，测定颗粒的不同轴，结果的差别很大。一般测定颗粒的视长轴，但也有人想使结果与筛析接近而测定视短轴。最后，测定时的抽样方法对结果也有明显的影响，不同的抽样方法，它们的结果是不能直接比较的。下面简略讨论一下这些问题。

1. **关于切面效应** 薄片上测得的粒度虽然普遍小于真实的粒度，但球状颗粒任意切面的大小与真正的大小之间有固定的关系。克伦宾和佩蒂约翰（Krumbein & Pettijohn, 1938）曾把等大的铅球铸在蜡中并磨片测定其视半径。以视半径对频数作图，得出一个向右平滑弯曲上升而不下降的曲线（图1—20），根据观察实测资料计算出的平均直径只是真正球半径的0.763。如果我们只根据薄片观察资料来考虑问题，就会将一些不同大小的圆误作是不同大小的球的最大切面，而得出的平均半径将比真正球半径小24%。就是说，如果不做校正，不仅得不出正确的粒度分布，也无法得出正确的平均值。沉积物情况就更为复杂，一方面它不是同等大小的颗粒，其任意切面圆的大小就更复杂，另一方面，同样的视直径代表的是大小不同的颗粒（图1—21）。再加上，颗粒不一定都是真正的球形。

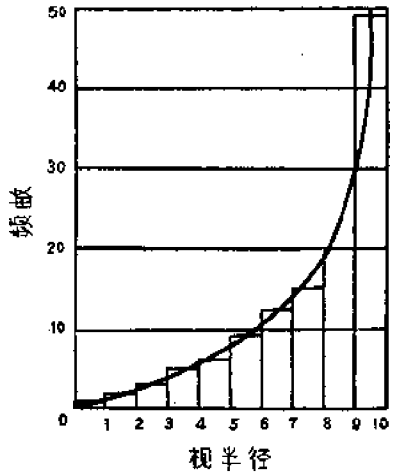


图 1—20 同等大小球的切面半径的频数分布

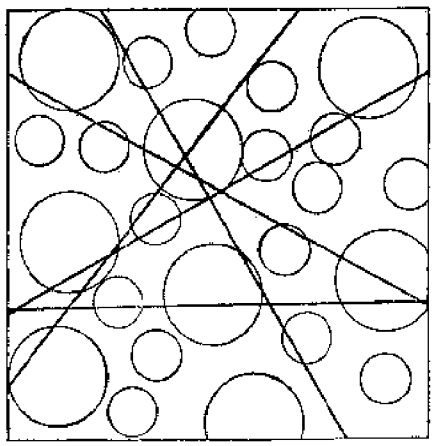


图 1—21 不同大小的球体的任意切面（黑线代表切面方向）

校正方法可以从颗粒分布的矩值与切面粒度分布矩值之间的数学关系中得到。其前4个矩关系公式为

$$\alpha x_1 = {}^{\pi}/_{4}\ \alpha r_1 \qquad 或 \alpha r_1 = 1.27\alpha x_1$$

$$\alpha x_2 = {}^{2}/_{3}\ \alpha r_2 \qquad \alpha r_2 = 1.50\alpha x_2$$

$$\alpha x_3 = {}^{3}/_{16}\ \alpha r_3 \qquad \alpha r_3 = 5.33\alpha x_3$$

$$\alpha x_4 = {}^{8}/_{15}\ \alpha r_4 \qquad \alpha r_4 = 1.87\alpha x_4$$

式中：x 为薄片下实测的颗粒视半径，从一系列的 x 可算出矩值 αx_1、αx_2、……。通过上式将 αx_1、αx_2……换成 αr_1、αr_2……即可得到校正。现举例说明如下：

设有一样品，其颗粒的半径（或直径）测定之后，经分组统计，得到各组的颗粒数，

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

即频数 f 及各组大小的中值，即组中值，将它们分别填入表1—4的前三栏中。然后分别计算出 fx、x^2 及 fx^2，如表所示列于后三栏中。最后就可得到第一矩，$\alpha x_1=\frac{\Sigma fx}{\Sigma f}=\frac{170.24}{518}=0.329$；第二矩，$\alpha x_2=\frac{\Sigma fx^2}{\Sigma f}=\frac{61.783}{518}=0.119$。更高的矩可以相同方法用 x 的更高次幂求得。再据前述公式校正。$\alpha r_1=1.27\alpha x_1=0.418$毫米，即该样校正后的算术平均值；$\alpha r_2=1.5\alpha x_2=0.179$，样品标准差公式为$\sigma=\sqrt{\alpha r_2-\alpha r_1^2}=\sqrt{0.179-(0.418)^2}=0.071$

表 1—4　某岩样薄片颗粒直径分布表

分组（毫米）	频　数 f	组 中 值 x	fx	x^2	fx^2
0.08—0.16	16	0.12	1.92	0.014	0.224
0.16—0.24	87	0.20	17.40	0.040	3.480
0.24—0.32	155	0.28	43.40	0.078	12.100
0.32—0.40	150	0.36	54.00	0.130	19.500
0.40—0.48	65	0.44	28.60	0.192	12.500
0.48—0.56	32	0.52	16.64	0.271	8.670
0.56—0.64	8	0.60	4.80	0.360	2.880
0.64—0.72	4	0.68	2.72	0.463	1.850
0.72—0.80	1	0.76	0.76	0.579	0.579
总　　计	518		170.24		61.783

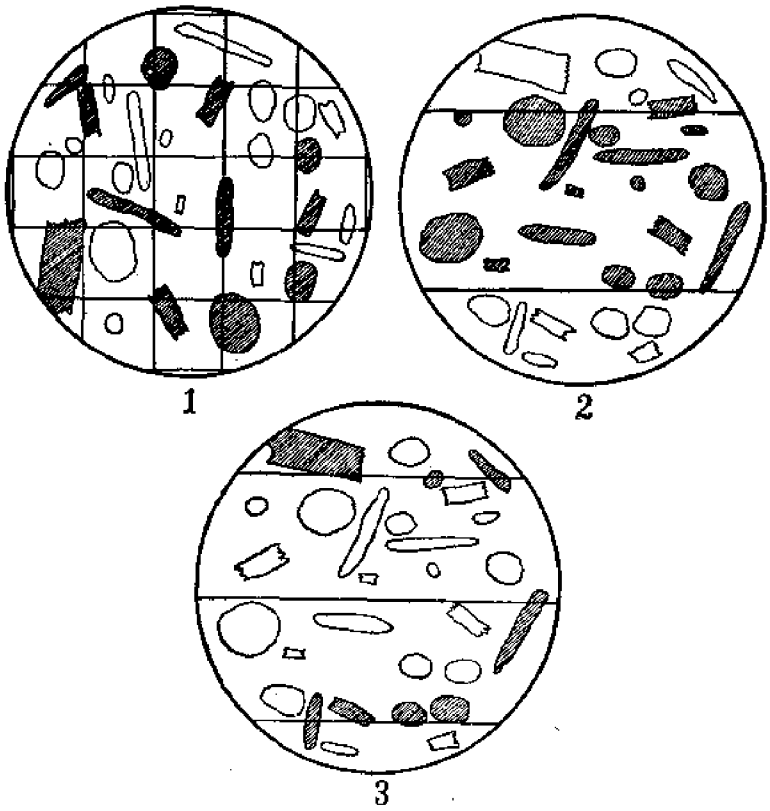


图 1—22　抽样方法示意图

1—点计法；2—带计法；3—线计法

毫米。关于矩计算的原理和方法详见第二章。

还有其他校正计算方法，如萨休曾将粒径转换成颗粒重量频率矩，也像上述方法求出其前四个矩关系式，再利用它算出粒度平均值、标准差等参数(Sahu, 1966)。这里就不详谈了。

2. **抽样问题**　常用的抽样方法有点计和线计、带计三种。点计法是最快速而又准确的方法。需要使用网格目镜，凡网格交点碰到的颗粒均要测定粒径，并予计数(图1—22之1)。也可以联合利用点积目镜和电动计数器或点计机械台和自动点计器。线计法使用机械台

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

等距离的移动薄片，测定纵丝或横丝通过的全部颗粒的粒径并计数（图1—22之3）。带计法是测定一个带内的全部颗粒（图1—22之2），带的宽度应等于或大于薄片内颗粒的最大视长径。方法是选择包含颗粒较多的薄片中间部分。然后用机械台在垂直目镜微尺的方向上慢慢移动薄片，凡位于微尺一定读数（如20和30）之间的颗粒，均需测定。利用此抽样法时，需系统的安排测带，使之包括全面。带计法最接近“全面测定”的抽样法，因此范德普拉斯(Van der Plas, 1962)认为是最准确的方法。他并通过石英砂做实验，对比了各种抽样法的结果（图1—23）。在图1—23中，A是与颗粒等体积球的直径的频率分布；B是筛析（为了便于比较，全部的n都代表颗粒数，而不代表重量，筛析的n也不例外），可看出筛析的结果较之体积频率分布的粒度偏细，这是因为筛析的分选不仅根据粒度，而且受颗粒形状的影响，同时最细一筛下的频率，因未继续分级故属于小于该级的全部颗粒，其频率偏高，但颗粒总数又是一定的，因此，较粗粒部分的百分比相对的变低一些。$C-G$是颗粒载片测定的结果，这种载片因系松散的颗粒，故平行载片的颗粒面往往是最大投影面，包含最长和中间直径，因此，其粒度分布总的偏粗，而其中的表面频率分布(E)最接近体积频率分布；其次线计法最小直径(F)也比较接近。$H-K$是薄片法。其中以带计法最理想；用最大视直径得出的粒度偏粗，但能看出粒度分布的细节情况；测定最小视直径时，方位和形状的影响较小，但只能得出一般情况，细节不很清楚。根据此图可看出，薄片粒度测定最好是测视表面的面积，带计法测视长径或视短径。然而此图一个很大的缺点是，只就粒算而言，根本未考虑重量频率情况。

各种抽样法为什么得出的结果不同呢？这是因为点计法、线计法抽样的结果，不仅是存在的颗粒情况的函数，而且是与颗粒能否被选上的概率有关。线计法能否被选上的概率是与该线垂直的颗粒切面视直径大小成正比，直径大时，遇到的概率就大；点计法则是点触到颗粒的概率，是与视平面的面积成正比。因此，它们的结果理所当然是有差别的。应该指出，目前沉积岩石学工作者之间，如弗里德曼（1965 a，b）、范德普拉斯（1965）及斯托弗(Stauffer, 1966)等人对点计、线计、带计成果的看法尚有分歧意见。我们认为，如果有条件的话，最好使用点计法，由于它测定的是面积百分比，故能较为方便的转换成重量百分比，以及进行各种统计处理。

3．测定的颗粒数问题 各家采用的标准不同，有500、400、300、250颗，甚至有人主张50颗就够了。测数过多，费时间；测数过少，则达不到精度要求。因此，在工作之前应先做试验以确定“稳定频率”。方法是选测几个有代表性的样品，在每个样品的两个薄片上分别对100、200、300、400、500颗粒的测值统计，并求出粒级参数Q_1、Md、Q_3等值，有时甚至做600、1000颗的计数。测定时要注意，测线要均匀的布满30×20毫米大小薄片的75%面积上，不能集中在薄片的一边。然后对各粒度参数值做图，看多少颗粒开始达到稳定频率（图1—24）。一般400或500颗即可达到稳定频率，以后的日常测定中，就采用此颗粒数为应测的颗粒数。这里需要强调一点，就是薄片的面积必须足够大或使用两个薄片。但较粗粒的砂岩为得到足够的测数往往很困难，这时可以采用硝酸纤维（有机玻璃）揭片来代替薄片，揭片的面积可以较大。揭片的方法详见本段后之附录。

4．薄片粒算结果换算成筛析结果的方法 有关此问题，很多人进行过研究。有些人虽认为需要换算，但认为实际上并不存在普遍适用的换算因数，只能在一定的信度界限内得到经验的换算公式，而且也只适用于一个工区范围；还有人企图用测量颗粒短轴的办

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

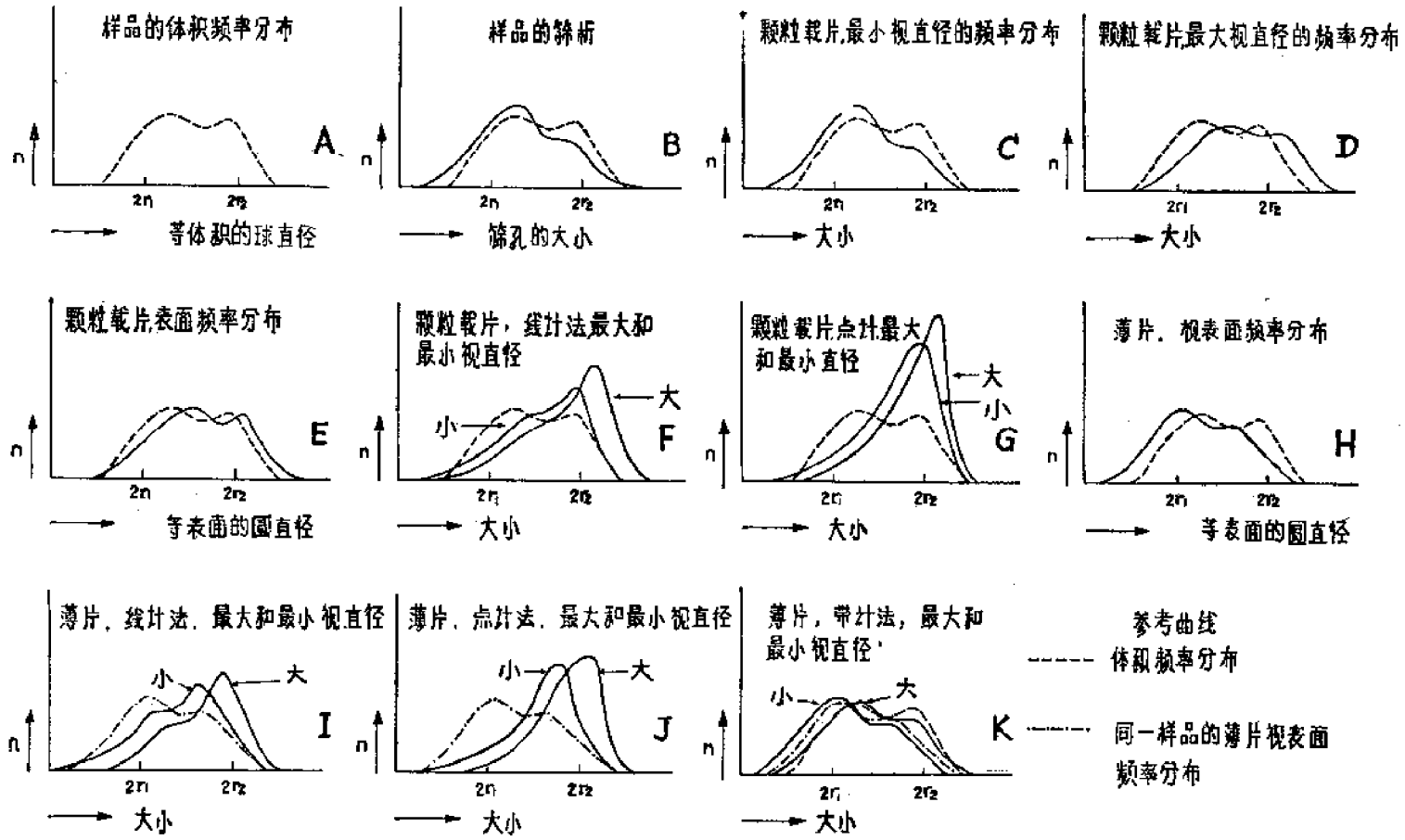


图 1—23 各种抽样方法的比较

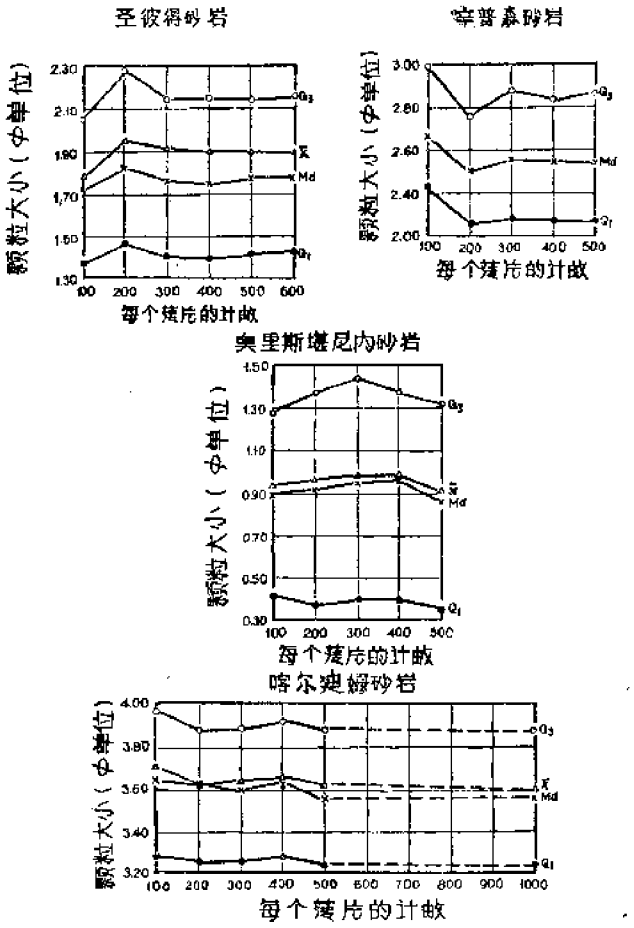


图 1—24　对砂岩求测定颗粒数“稳定频率”的图解

Q_1=25% 含量的颗粒大小；Q_3=75% 含量的颗粒大小；Md=50% 含量的颗粒大小；$\overline{X}$=平均直径

法，以便使结果接近筛析的结果，但可惜他们根据的样品太少，证据似嫌不足。弗里德曼（1958，1962）换算法虽不够完善，但近年来常为人引用，故介绍于下。

弗里德曼是根据38个以石英砂岩为主少量次硬砂岩及硬砂岩的样品制定出换算方程。

这些样品因均系钙质胶结，可用稀盐酸加以松解，因此有可能同时进行筛析和薄片粒算法分析。他用点计法测定的是颗粒的视长轴直径，同时每个样品测 500 个颗粒。他还测定了因工作者不同所造成的误差，并认为此误差不能忽视。因此，如工作时是几个人同时做薄片粒度分析，应该平均他们的结果，否则会造成误差。他所做薄片大部分是与层理成任意关系的。

弗里德曼所得结果，表现出薄片的粒度分布较筛析的偏粗，而且二者不完全平行，在较细粒部分两曲线不止一次的交叉（图1—25）。38个砂岩样品均属正态分布，而在概率纸上，薄片较筛析所成直线更好，只在细粒部分稍偏离直线，而筛析在这部分偏离更大。

筛析和薄片粒算累积曲线得出的 Q_1（第一四分位数）、Md（中位数）、Q_3（第三四分位数）的回归分析得到了线性相关，同时三个参数联合使用时也呈线性相关（图1—26）。他使用的Q_1代表25%含量的粒级，Q_3代表75%含量的粒级。其回归方程如下：

$$Q_1\text{（筛析）}=0.3377+0.9300Q_1\text{（薄片）}$$

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

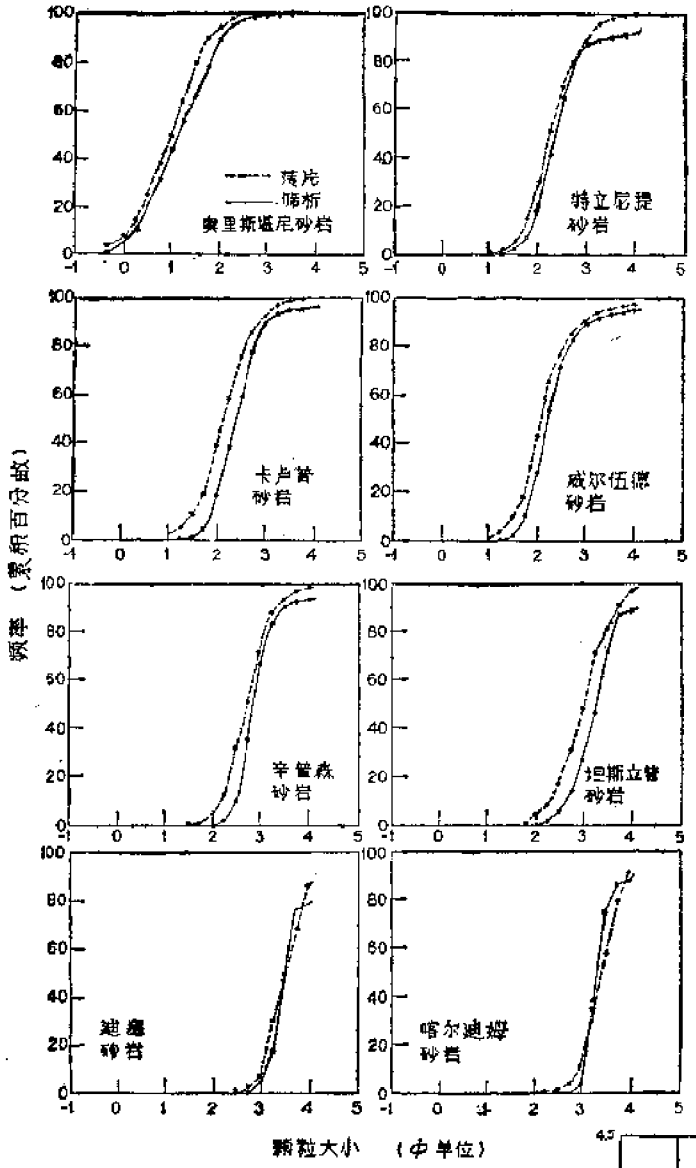


图 1—25 砂岩筛析和薄片粒算累积曲线的比较

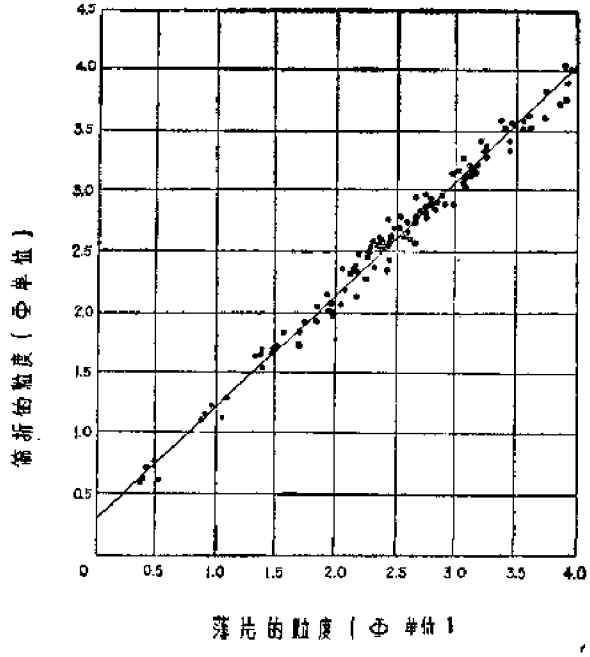


图 1—26 筛析和薄片粒算的粒度参数（Q_1、Md、Q_3联合的）回归线

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

$$Md\text{（筛析）}=0.3724+0.9063Md\text{（薄片）}$$

$$Q_3\text{（筛析）}=0.4293+0.8807Q_3\text{（薄片）}$$

$$Q\text{（联合的，筛析）}=0.3815+0.9027\text{（薄片）}$$

检查表明，联合方程并不比单个参数的回归方程做图差，因此，实际应用时使用联合方程就可以了。校正后的薄片资料几乎与筛析结果符合一致，同时比其他校正方法效果都好（图1—27）。

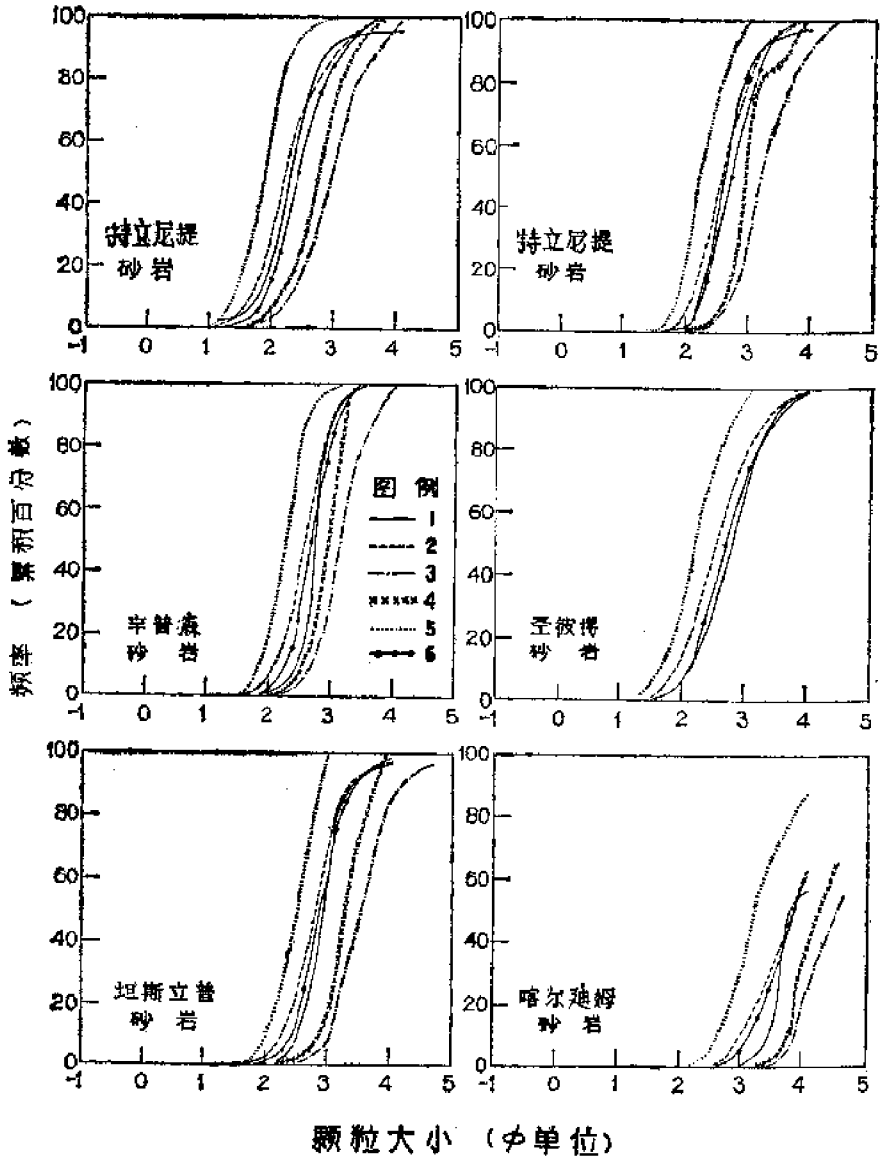


图 1—27 砂岩各种粒度资料（包括不同校正方法校正后的资料）的累积曲线图形的比较

图例：1—筛析；2—视长径薄片；3—视短径薄片；4—帕克哈姆(Packham,1965)颗粒短轴资料；5—用格林曼（Greenman,1951）法校正后的视长轴薄片资料；6—用弗里德曼法校正后的视长轴薄片资料

弗里德曼以他的回归方程为基础，做出一种换算图纸，以简化换算手续。图纸由*A*、*B*两尺构成（图1—28）。*A*尺代表薄片的粒度值，是以$^1/_4\phi$分格，用*A*尺做出薄片的累

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

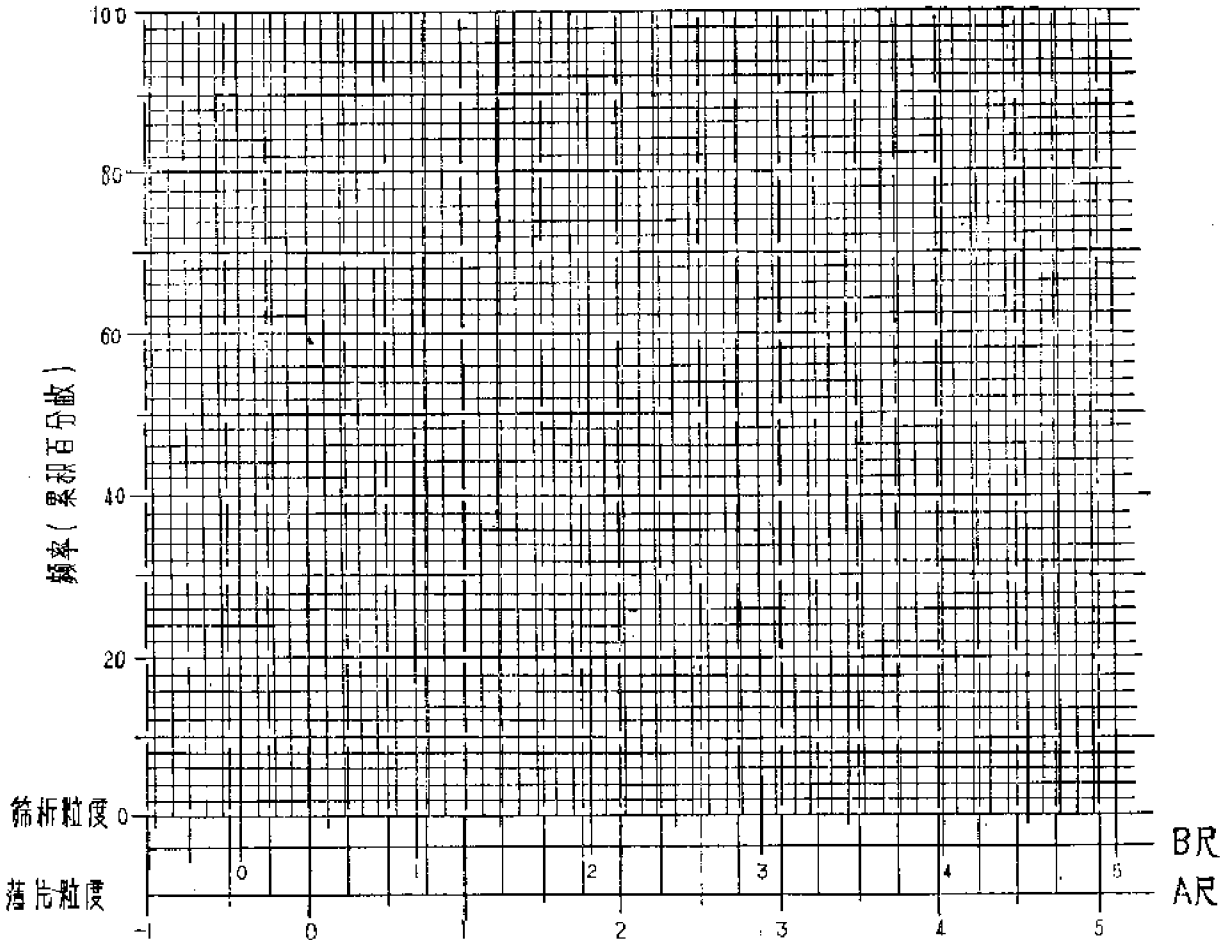


图 1—28　将薄片资料换算成筛析资料的简化尺

积曲线，在B尺上即可读出换算后的参数值。B尺上的分格是0.1ϕ。

此图不能用于将筛析资料换算成薄片资料。另外还需注意的是，本回归方程根据的砂岩是石英碎屑含量超过70%且分选为中偏好的情况，而且均属单众数正态分布者。自然界的情况要复杂得多，弗里德曼曾谈到，对分选差的砂岩，估计本校正方法也能适用，但他没谈这种看法的根据。然而石英含量低及双众数的砂岩，即使是弗里德曼也不认为本校正是适用的。

关于筛析资料的矩值与薄片资料的矩值换算问题，他还是根据上述的38个砂岩做了研究，得出下列的换算方程（表1—5）。

表 1—5　筛析与薄片资料矩值换算方程表

回　归　方　程	相关系数 γ	确定系数 γ^2
平均值（筛析）$=1.0550$平均值（薄片）$+0.3602$	0.9927	98.6%
M_p（筛析）$=0.7747M_d$（薄片）$+0.1044$	0.8628	74.4%
σ（筛析）$=0.7177\sigma$（薄片）$+0.1356$	0.7871	62.0%
α_3（筛析）$=0.3647\alpha_3$（薄析）$+0.2241$	0.5107	26.1%
α_4（薄片）$=0.2002\alpha_4$（筛析）$+3.4607$	0.4466	19.9%

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

从方程可看出，平均值的换算最有效。图 1—29 是它的回归线。换算后的薄片平均值与筛析平均值的关系近1:1（图1—30）。

方差（或均方差）和标准差的换算回归方程勉强可以利用，但点较分散。方差较标准差的情况稍好（（图1—31和1—32）。

偏度和峰态两种资料的相关性差，换算方程无效。

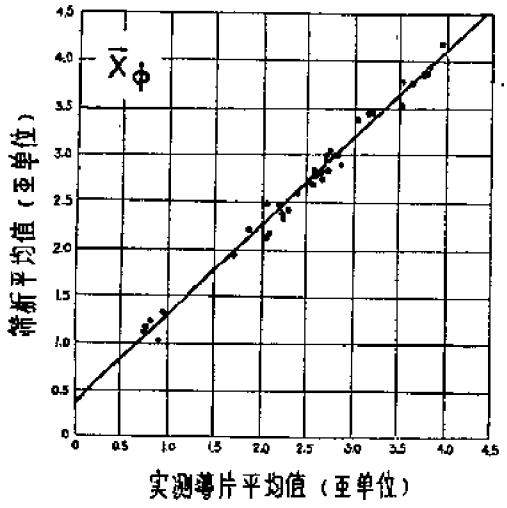


图 1—29　实测薄片平均值与筛析平均值的回归线

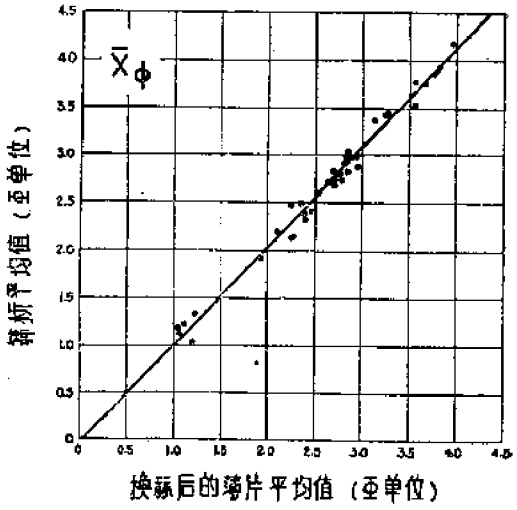


图 1—30　换算后的薄片平均值与筛析平均值的回归线

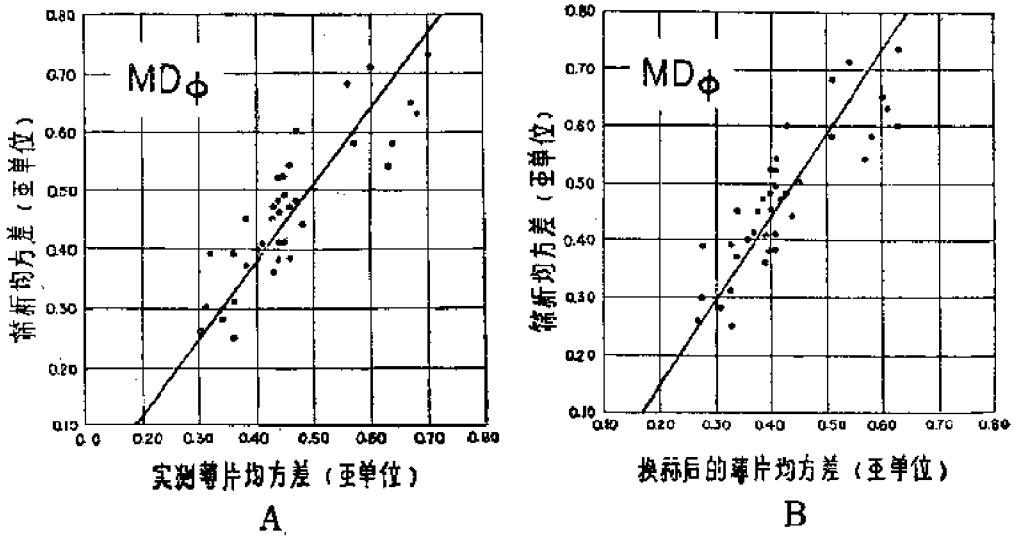


图 1—31　方差的回归线

A—实测薄片与筛析的，B—换算后薄片与筛析的

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

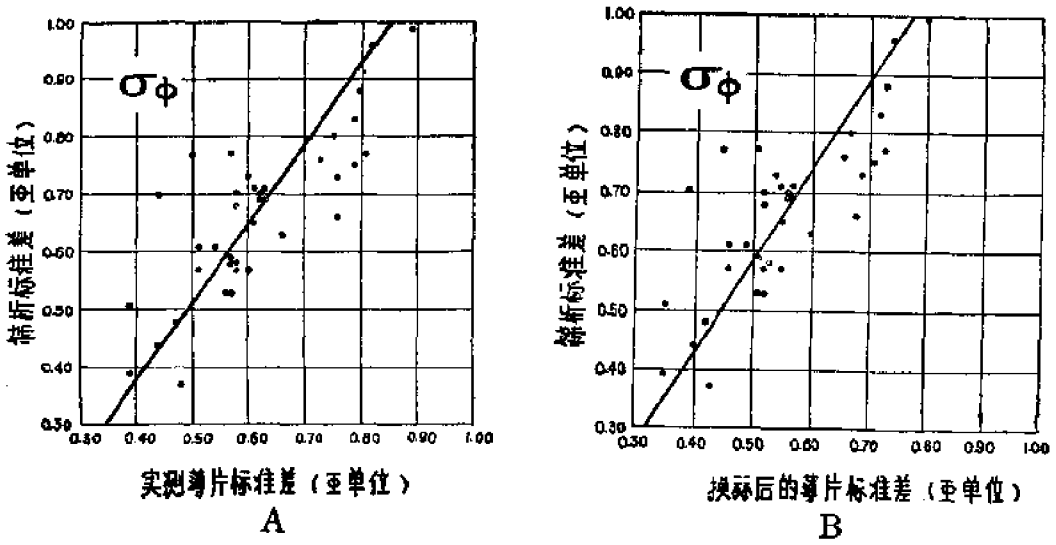


图 1—32　标准差的回归线

A—实测薄片对筛析；B—换算后的薄片与筛析

5．薄片粒算法中的其他问题　一般对轮廓不清楚的碎屑及重矿物不予计数。有人建议只测单矿物石英，但石英必须在各种粒级内都均匀的分布，而不是集中在某一粒级中。因为石英是近等轴形的颗粒，切片效应的校正比较准确。然而在硬砂岩或长石砂岩的情况，如只测石英则不具代表性。

对于细粒级部分，有人建议＜20微米时可不必测定，而是采取和筛析一样的估计办法。格莱斯特（Glaister，1974）则建议将＜30微米的部分全归入5—5.5Φ中。

关于切片应取什么方向？各家的看法也不一致。然而沉积物常是由一些纹层组成的，垂直纹层的切片代表复合的沉积环境，只有一个纹层才代表单一一致的沉积环境，复合环境的样品可以有几个粒度最大值，而不是一个简单的正态分布或对数正态分布。另一方面，颗粒的分布常具方向性。为了得到的资料比较客观、正确，并有代表性，切片最好垂直层理且垂直组构面。在薄片内最好见不到层理，同时抽样线或带也不要与层理痕迹平行，而是与之垂直。如果在薄片上可以见到层理，则应在不同层内分别抽样，并且分别处理结果。但也有人主张平行层理切片，这对纹层岩石比较适用。不管怎样，同一地区应采取相同的原则，才能互相比较。

在薄片粒度分析中，还需量出粘土基质的含量，它是＜20微米或30微米的含量。

除上述各问题外，最重要的还是在露头上取的切片样品应具代表性，否则不管用多大功夫，得出的结果都不能说明问题。

附录：用醋酸盐揭片来研究砂质岩的粒度

揭片的方法是，先将光片用40%*HF*浸蚀5—10秒钟，然后冲洗，晾干，再用丙酮浸湿，轻轻的压在醋酸纤维的载片上。待干后将光片很快的剥开，这时岩石光面的印迹即完全留在醋酸纤维片上。如使用的是厚的（1.6毫米）醋酸纤维片，可不必再粘在玻璃载片上，揭片直接放在显微镜下做为一个岩石负片进行研究。揭片的最大优点是面积较大，能提供足够的颗粒测值，这对粗粒的砂质岩特别适合。可直接在其上用点计法测颗粒的视长径，也可将其放大后投在屏幕上进行测定；也可在其照片上测定，这时

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

可加一方格网做点计。此外，在揭片上还可做圆度、颗粒方位、成分的研究。在揭片上的各种矿物易于辨认。石英在揭片的照片上是黑的，长石是灰的，粘土杂质也可从其形状上看出。长石双晶的叶片、石英包裹物及各种程度的风化作用都是清楚的。还可用硝酸钴染色，从而得出微斜长石/斜长石的比例。揭片是值得推广的一个方法。

七、半自动、自动粒度分析仪

显微镜粒度分析法是最直接的分析法，因为它是测量颗粒的外形而非物理性质，因此，常以显微镜分析法的结果做为检验其他方法的标准。然而一般的显微镜法工作既枯燥、单调、易疲劳而又费时间，同时因测数少而使结果不够精确。用自动、半自动测量粒度的装置可以解决这个问题。

1．蔡斯TGZ-3型粒度分析仪（图1—33） 这是最常用的半自动粒度分析仪，是在一个适当放大的照片上进行测定。当欲测那个颗粒时，将此颗粒移到光图板的中心，工作者可以调节左边的手轮，使板上中心照射的光点接近欲测颗粒的面积。如果颗粒轮廓是圆形的，光点范围调整到与颗粒轮廓一致即可。也可以像平日在显微镜下测粒度那样，调节光点的直径使与颗粒的最大视直径一致。膜瓣光圈的可调区间是1.2毫米至27.7毫米或0.4毫米至9.2毫米。在调整好光点的大小后，操作人员可控制一个脚踏开关，它能在测量过的颗粒上打孔做记号，同时激发一个具有48个连续等级的计数器的存储单元，不仅在单个计数组上记数，而且在总数上增加1。经过一定的操作后，可以在15分钟内测定（包括计算和分组）1000个颗粒。

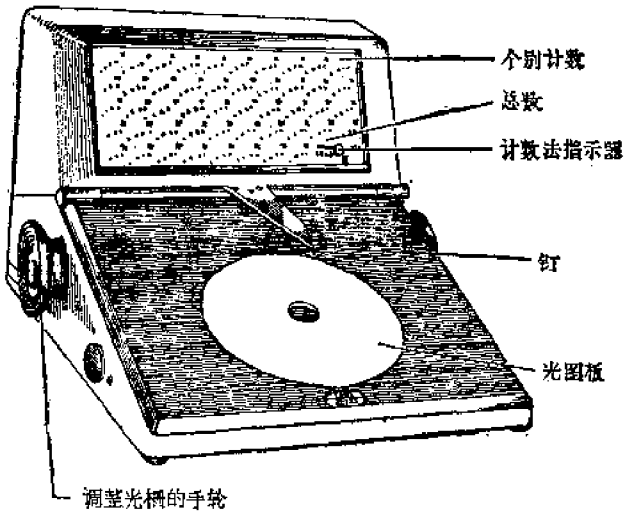


图 1—33 蔡斯TGZ-3型粒度分析仪

用TGZ-3型粒度分析仪工作时，不那么疲劳而且速度快得多。然而缺点是要准备照片；另外，因照片的曝光点是固定的，一张照片所包含的颗粒不够测定时要照几张照片，因此要注意各照片之间不要重叠。

2．维克分像目镜（Vickers AEI Image Splitting Eyepiece） 简称CBI分像目镜将分像目镜装在显微镜上直接观察。原理是在显微镜的目镜物镜之间，加上由修改过的Mach－Zehnder干涉仪组成的分像目镜。此干涉仪由两个能旋转的棱镜组成，每个棱镜是一个菱形和一个直角形的棱镜粘在一起构成的（图1—34）。当两个棱镜的位置平行时，颗粒呈一个像；当微尺螺旋转动时，棱镜同时向相反方向转动，形成分像效应，每个颗粒都分成两个同平面的像。两个像还可再次重叠或易位。球状颗粒（断面为圆）的直径可通过分开两个像至彼此相切时为止，读出微尺上移动的距离即球状颗粒的直径。然而还要用显微镜的常数将此距离换算成真正的长度单位。最大视直径的求法是，平行视长轴方向分开颗粒的像，使两个像相切为止。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

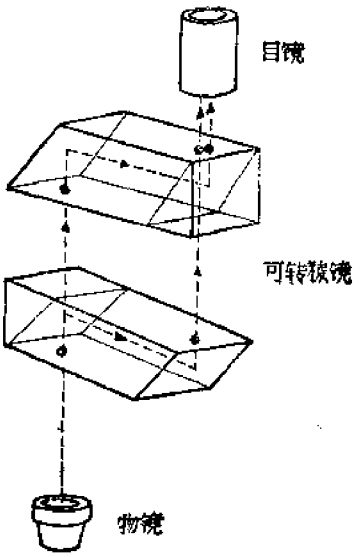


图 1—34　维克分像目镜的光学系统

虽然分像目镜是一个很准确并有用的粒度测定工具，但仍需读微尺，当测数很大时是很麻烦的，同时还要用显微镜装置常数换算并做分类计数。为了简化手续而设计了自动计数装置。是将微尺连接一个电桥通向16个电子脉冲计数器，每个计数器相当于微尺的一定位移区间即一定的颗粒大小。电桥的一半是一个高分辨电位计，它与微尺连接并产生与微尺位置相当的类比电压；电桥的另一半是一个对数电压分压器。当一个颗粒被分像时，操作人员踏一下脚踏开关，它就激发多级开关产生类比电压。在有一定实际经验时，每小时能测定1000个颗粒。

本仪器如上所述，可测定颗粒的长、宽、或直径，但以测当量圆直径的用处最大。如颗粒断面本来就是圆的，求当量圆直径很简单；如颗粒断面为其他非圆的形状，则可按图示（图 1—35）来进行。图内粗线与各细线轮廓位置之间的距离即代表当量圆直径，图内并给出各方向位置之间距离的情况。工作时只要按相当的方向来分像，并分到图内表示的合适位置为止。

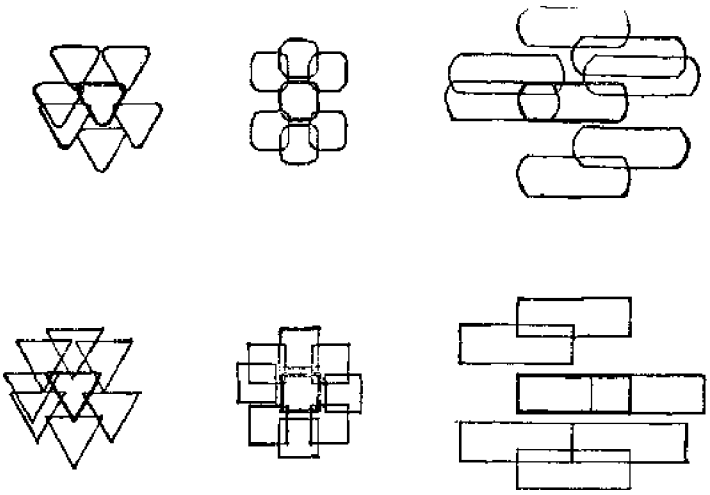


图 1—35　求非圆形断面颗粒的当量圆直径的图示

因为视域内所有的颗粒同时都分像，为了避免混淆，最好选择颗粒不拥挤的地方。或在维克目镜中加一网格微尺片，以保证颗粒的测定不会重复。显微镜的放大范围可以是10×至1000×，因此细粒物质也可以测定。

3. 自动粒度分析仪　是一种自动测粒度的装置。一张薄片置于显微镜载物台上，成象的光线就被分裂开，一部分光线进入目镜供目视检查，另一部分进入电视摄象机。电视接收机上显示出照射的视域并指明仪器正在测量的参数特征。

由于扫描光点扫过颗粒边界时，在同颗粒上亮度有差别，选定亮度差的级别后，电视摄象机会将不同颗粒亮度差变为电压差而输出，由一个电子检测器接收，供给一个计算机，得出所需的资料，并在表头上表示出来，例如，不同粒度的颗粒数及粒度分布情况等。然而此仪器不能将颗粒数换算成重量频率，也不能效正切片效应。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

第二章　分析结果的整理及解释

第一节　资料的整理

粒度分析的结果可取得大量的测值。这种大量的数字资料要用统计的方法加以处理，以便用来推断可能的总体性质。统计的第一步需要的是综合资料，综合的方法有二：1．根据资料做出一些图，从这些图上做定量的解释；2．直接从粒度资料手工或用计算机计算统计参数，而不经中间的做图阶段。两种方法各有其优缺点。比如计算法，尽管现在有了计算机，计算起来相当快速方便，但若不同时作出各种统计图，就不能对资料有总体和直观的认识，不易察觉是否为双众数曲线，也看不出因称重或筛孔不合格引起的误差。另外也无法得出成因的一般认识。对一个混合的粒度组合，实际上任何方法都不如统计图示法好。因为不可能有一个“复合参数”能完全揭示出复杂的分布性质。最后还有，在用做图法求参数时，能简单快速地得出达到一般要求的近似值。因此，目前一般是两种方法同时采用，既用图示，也求统计参数。

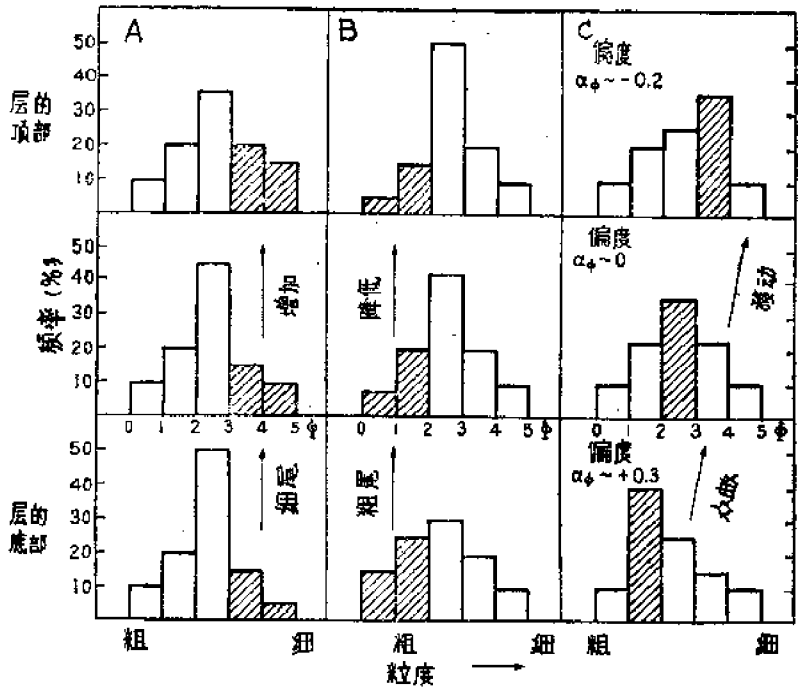


图 2—1　一些样品的直方图

A—显示粒度细“尾”从地层的底部向上增加；B—显示粗粒组分(粗“尾”)向上减少；C—阴影区间又称众数组，其组中值即众数。图示众数的移动和偏度的改变

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

一、作 图 法

常用的粒度图有直方图（或称柱状图）、频率曲线图以及累积曲线图等。

直方图 常以粒径区间（组距）为横座标，以频率（或频数）为纵座标作成的一种最简单的统计图（图2—1）。它是以矩形面积代表频率（或频数）的分布。优点是它比别种图更一目了然地表示出各种样品粒度的变化，众数的位置和移动、偏度的情况等。如果将直方图上各矩形上边中点连成一圆滑曲线则成为频率曲线图（图2—2的曲线1）。这种图的优点是能更准确地确定众数值，即出现最高频率时的粒度值。

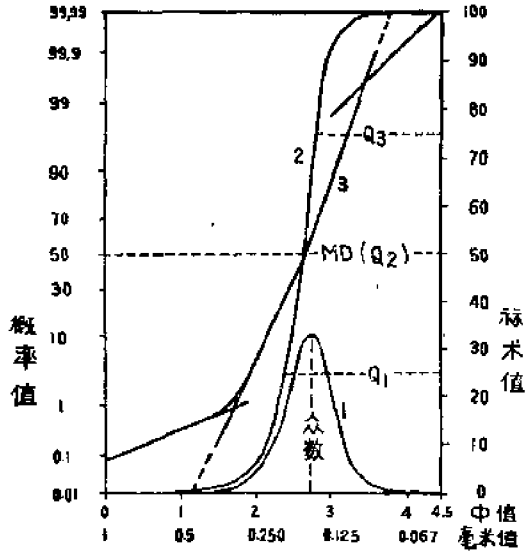


图 2—2 三种粒度图的比较

1—频率曲线；2—累积频率曲线；3—概率值累积曲线

累积曲线图又称累积百分含量图 是用来表现大于一定粒级的百分含量的统计图。它是以粒径（ϕ 值）为横座标，以累积频率或概率值为纵座标。如果纵座标是累积频率称为累积频率图（图2—2曲线2），如果以概率值为纵座标作出的图则叫做概率值累积曲线图（图2—2曲线3）。后者是使用正态概率纸、或对数正态概率纸作图。由于粒度分布一般属正态分布或对数正态分布，故它在前一类图中多呈S形，而在后一类图上则为直线形。累积曲线的优点是：1．可以用分组或不分组的资料做图，同时曲线形状不太受分组间隔大小的影响；2．可以从曲线上直接读出分布的四分位值或任意分位值，如Q_1、Md、Q_3等；3．在正态概率纸上做图，便于用肉眼与正态分布做比较。更重要的是还可进一步说明颗粒搬运状态（详后）。累积曲线的缺点是不如直方图那样一目了然，特别是不易确定曲线的众数值和众数组。

除此而外，还常用三角图表示粒度。三角形的三个端分别代表一定的粒度，如沙、粉沙、粘土。由点在图上的位置可看出粒度分布情况，还可看出不同地区或剖面上粒度的变化趋势。

二、计算法——矩值法

求频率分布较好的方法是矩值法。它是考虑整个频率分布，而不只是考虑少数百分位数。当然不能用矩值表示的数字特征如中位数和众数则不能求出。由于计算机的普及，使复杂计算变得简单容易，这必然将会扩大矩值法的使用范围。

矩计算的基本原理如下（林少宫，1963）：

设观测数x_1、x_2……x_n为取自某个总体的一个容量为n的随机样本，则可将r阶原点矩定义为

$$\alpha_r=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i^r \qquad r=1,2,\cdots\cdots$$

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

特别当$r=1$时，就得到样本平均值，通常记为

$$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i$$

r阶样本中心矩则定义为

$$m_r=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^r \qquad r=1,2,\cdots\cdots$$

显然，也有

$$m_1=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})=0$$

原点矩和中心矩具有以下关系：

$$m_2=\alpha_2-\alpha_1^2$$

$$m_3=\alpha_3-3\alpha_1\alpha_2+2\alpha_1^3$$

$$m_4=\alpha_4-4\alpha_3\alpha_1+6\alpha_2\alpha_1^2-3\alpha_1^4$$

给出了上述样本矩定义后，对于凡是能用矩来表示的总体数字特征，都容易写出其相应的样本数字特征。例如平均值、方差、标准差、偏度以及峰态等，其定义为：

方差$\sigma^2=m_2$

标准差$\sigma=\sqrt{m_2}$

偏度$C_s^{*}=\frac{m_3}{m_2^{3/2}}=\frac{m_3}{\sigma^3}$

有人认为偏度更好是定义为：

偏度$SK=\frac{C_s}{2}=\frac{m_3}{2\sigma^3}$

峰态 $C_E^{**}=\frac{m_4}{m_2^2}=\frac{m_4}{\sigma^4}$

有人认为峰态最好是定义为：

峰态 $K=C_E-3=\frac{m_4}{\sigma^4}-3$

当样本容量很大时，计算极繁。这时可将观测值适当分组，用组中值（即组的上限和下限的平均值）代替这组的所有观测值进行近似计算。则r阶原点矩的定义为：

$\alpha_r=\dfrac{\sum_{j=1}^{n}f_jx_j^r}{\sum_{j=1}^{n}f_j}$，式中$n$为分组数，第$j$组的组中值为$x_j$，组频数为$f_j$，则有

$$\alpha_1=\bar{X}=\frac{\sum_{j=1}^{n}f_jx_j}{\sum_{j=1}^{n}f_j} \qquad j=1,2,\cdots\cdots,n$$

* C_s又称为偏倚系数

** C_E又称为峰凸系数

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

也有

$$\alpha_2 \doteq \frac{\sum_{j=1}^{n} f_j x_j^2}{\sum_{j=1}^{n} f_j}$$

$$\alpha_3 \doteq \frac{\sum_{j=1}^{n} f_j x_j^3}{\sum_{j=1}^{n} f_j}$$

$$\alpha_4 \doteq \frac{\sum_{j=1}^{n} f_j x_j^4}{\sum_{j=1}^{n} f_j}$$

第一章中（第20页）表1—4的计算原理就是这样。如果设各组中值到某一个假想样本平均值的组中值（$\bar{x}_h$）之差为 $x_j - \bar{x}_h$，并采取等距分组且令组距为 k，再令 $d_j = \frac{x_j - \bar{x}_h}{k}$，则可得到

$$\alpha_1 = \frac{\sum_{j=1}^{n} f_j d_j}{\sum_{j=1}^{n} f_j}$$

$$\alpha_2 = \frac{\sum_{j=1}^{n} f_j d_j^2}{\sum_{j=1}^{n} f_j}$$

$$\alpha_3 \doteq \frac{\sum_{j=1}^{n} f_j d_j^3}{\sum_{j=1}^{n} f_j}$$

$$\alpha_4 \doteq \frac{\sum_{j=1}^{n} f_j d_j^4}{\sum_{j=1}^{n} f_j}$$

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

以及

$$m_1=\bar{x}\doteq\bar{x}_h+k\alpha_1$$
$$m_2=\sigma^2\doteq k^2(\alpha_2-\alpha_1^2)$$
$$m_3=k^3(\alpha_3-3\alpha_2\alpha_1+2\alpha_1^3)$$
$$m_4=k^4(\alpha_4-4\alpha_3\alpha_1+6\alpha_2\alpha_1^2-3\alpha_1^4)$$

这样就更进一步简化了公式以便做近似计算（详见格里菲思[Griffiths]，1967）。

现举一例说明详细计算程序：

1．首先将观测粒级分组，各组组中值及频数分别列入表 2—1 头三栏内；设$\bar{x}_h$为 5.5（表中以框围绕标出）。随后计算 d_i、f_id_i、$f_id_i^2$、$f_id_i^3$、$f_id_i^4$ 以及 $f_i(d_i-1)^4$ 等乘积，并填入相应的栏内。最后，算出 Σf_i、Σf_id_i、$\Sigma f_id_i^2$、$\Sigma f_id_i^3$、$\Sigma f_id_i^4$ 及 $\Sigma f_i(d_i-1)^4$，也填入表中。

表 2—1 矩值计算法实例（组距 $k=1\phi$）

粒级分组(ϕ单位)	x_i	f_i	d_i	f_id_i	$f_id_i^2$	$f_id_i^3$	$f_id_i^4$	$f_i(d_i-1)^4$
1—2	1.5	1	-4	-4	16	-64	256	625
2—3	2.5	2	-3	-6	18	-54	162	512
3—4	3.5	6	-2	-12	24	-48	96	486
4—5	4.5	21	-1	-21	21	-21	21	336
5—6	5.5	40	0	0	0	0	0	40
6—7	6.5	25	1	25	25	25	25	0
7—8	7.5	4	2	8	16	32	64	4
8—9	8.5	1	3	3	9	27	81	16
Σ		100		-7	129	-103	705	2019

2．总数检验，表的最后一栏 $\Sigma f_i(d_i-1)^4$ 是作检验用的，因为 $\Sigma f_i(d_i-1)^4$ 展开正好包含表中各总和项。

$$\Sigma f_i(d_i-1)^4=\Sigma f_id_i^4-4\Sigma f_id_i^3+6\Sigma f_id_i^2-4\Sigma f_id_i+\Sigma f_i$$
$$2019=\quad 705\quad +\quad 412\quad +\quad 774\quad +\quad 28\quad +100$$

等号两边相等，说明各项计算无误。

3．计算各种矩值

$$\alpha_1=\frac{\Sigma f_id_i}{\Sigma f_i}=\frac{-7}{100}=-0.07$$
$$\alpha_2=\frac{\Sigma f_id_i^2}{\Sigma f_i}=\frac{129}{100}=1.29$$
$$\alpha_3=\frac{\Sigma f_id_i^3}{\Sigma f_i}=\frac{-103}{100}=-1.03$$
$$\alpha_4=\frac{\Sigma f_id_i^4}{\Sigma f_i}=\frac{705}{100}=7.05$$
$$m_1=\bar{x}\doteq\bar{x}_h+k\alpha_1=5.5-0.07=5.43$$
$$m_2=\sigma^2=k^2(\alpha_2-\alpha_1^2)=1.29-0.0049=1.2851$$

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

$$\sigma=\sqrt{1.2851}=1.133$$

$$m_3=k^3(\alpha_3-3\alpha_2\alpha_1+2\alpha_1^3)=-1.03+3\times1.29\times0.07-2\times0.000343$$
$$=-0.7598$$

$$C_S=\frac{m_3}{\sigma^3}=\frac{-0.7598}{1.4544}=-0.5224$$

$$SK=\frac{C_S}{2}=-0.262$$

$$m_4=k_4(\alpha_4-4\alpha_3\alpha_1+6\alpha_2\alpha_1^2-3\alpha_1^4)$$
$$=7.05-4\times1.03\times0.07+6\times0.0049\times1.29-3\times0.00002401=6.7994$$

$$C_K=\frac{m_4}{\sigma_4}=\frac{6.7994}{1.6512}=4.117$$

$$K=C_K-3=4.117-3=1.117$$

4. 基本统计参数为，

平均值$\bar{x}_\phi=5.43$，

标准差$\sigma_\phi=1.133$

偏态$SK=-0.262$

峰态$K=1.117$

应该指出，这样的计算是根据ϕ粒级进行的。

除上述的矩值计算法外，还有一种计算方法，虽然计算较前复杂，但过去也常应用，故一并介绍于此，以备参考。此法使用的参数定义如下，

$$\text{平均值 } \bar{x}_\phi=\frac{\Sigma fx}{\Sigma f}$$

$$\text{标准差 } \sigma_\phi=\sqrt{\frac{\Sigma f(x-\bar{x}_\phi)^2}{\Sigma f}}$$

$$\text{偏度 } SK_\phi=\frac{\Sigma f(x-\bar{x}_\phi)^3}{\Sigma f\sigma_\phi^3}$$

表 2—2　矩值计算法实例（分组间隔是 1/2 ϕ）

粒级分组 (ϕ)	组中值 m (ϕ)	重量% f	fx	偏差 $x-\bar{x}$	偏差平方 $(x-\bar{x})^2$	$f(x-\bar{x})^2$	偏差立方 $(x-\bar{x})^3$	$f(x-\bar{x})^3$	偏差四方 $(x-\bar{x})^4$	$f(x-\bar{x})^4$
0—0.5	0.25	0.9	0.2	-2.13	4.54	4.09	-9.67	-8.70	20.60	18.54
0.5—1.0	0.75	2.9	2.2	-1.63	2.66	7.71	-4.34	-12.59	7.07	20.50
1.0—1.5	1.25	12.2	15.3	-1.13	1.28	15.62	-1.45	-17.69	1.63	19.89
1.5—2.0	1.75	13.7	24.0	-0.63	0.40	5.48	-0.25	-3.43	0.16	2.19
2.0—2.5	2.25	23.7	53.3	-0.13	0.02	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00
2.5—3.0	2.75	26.8	73.7	0.37	0.13	3.48	0.05	1.34	0.02	0.54
3.0—3.5	3.25	12.2	39.7	0.87	0.76	9.27	0.66	8.05	0.57	6.95
3.5—4.0	3.75	5.6	21.0	1.37	1.88	10.53	2.57	14.39	3.52	19.71
>4.0	4.25	2.0	8.6	1.87	3.50	7.00	6.55	13.10	12.25	24.50
Σ		100.0	237.9			63.65		-5.53		112.82

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

$$峰态 K_\phi = \frac{\Sigma f(x-\bar{x}_\phi)^4}{\Sigma f \sigma_\phi^4}$$

式中 f ＝每一粒级的重量百分数；$\Sigma f = 100$；x ＝每一 ϕ 粒级间隔的中点。下面举一例说明其计算程序（表2—2）。

先计算出 $\bar{x}_\phi = \frac{\Sigma fx}{\Sigma f} = \frac{237.9}{100} = 2.38\phi$，然后再求其他参数。

$$标准差\ \sigma_\phi = \sqrt{\frac{63.65}{100}} = 0.80\phi\ 单位$$

$$偏度\ SK_\phi = \frac{-5.53}{100 \times 0.8^3} = -0.11$$

$$峰态\ K_\phi = \frac{112.82}{100 \times 0.8^4} = 2.75$$

第二节　粒度分布

一、正态分布（高斯分布）

密度函数为：

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma} e^{-\frac{(x-\alpha)^2}{2\sigma^2}}$$

式中 α 为平均值，σ 为标准差。当 $\alpha = 0$，$\sigma = 1$ 时称为标准正态分布（图2—3）。通常以符号 $\phi(x; \alpha, \sigma)$ 代表平均值为 α、标准差为 σ 的正态分布。α 及 σ 称为正态分布的统计参数。在座标图上，α 为曲线最高点的横座标，σ 的大小表示分布的分选度（图2—4）。

正态分布具有以下特点：1．分布围绕着平均值 α 对称。一个正态分布的样本，最好的平均值估计方法是算术值的 $\bar{x} = \Sigma x/n$，n 为样本分组数，x 为组中值。正态分布的平均

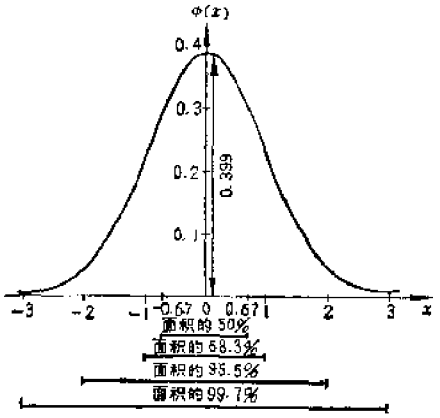


图 2—3　标准正态分布曲线 $\phi(x;\ 0,\ 1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$

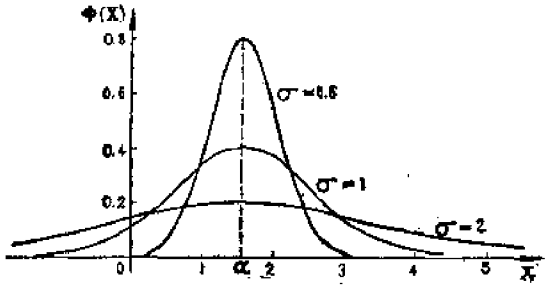


图 2—4　α 相同而 σ 不同的各种正态曲线形状

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

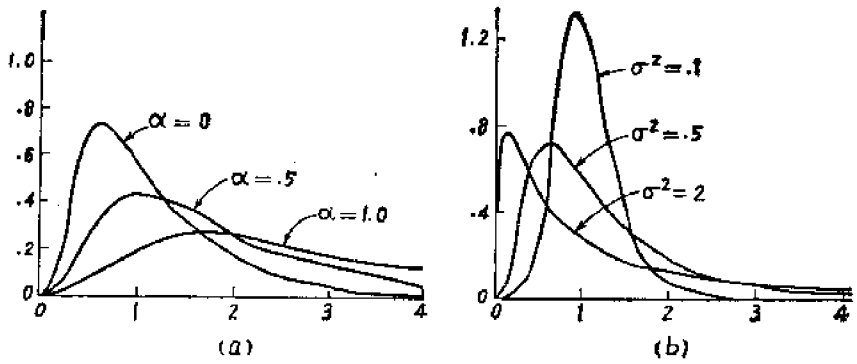


图 2—5 对数正态分布曲线

（a）表示α不同的曲线；（b）表示σ^2不同的曲线

值、中位数和众数是一致的，偏度为0，峰态等于3。2．理论上，在平均值的两边延展到无限大和无限小。但边部的面积很小，面积主要集中在横座标轴$x=\alpha\pm3\sigma$上面的部分中（图2—3）。在区间$\alpha\pm\sigma$中间，面积占68.3%，这接近于累积曲线的16%和84%中间的部分，后两个数值在地质上常使用。区间$\alpha\pm2\sigma$上面的面积占95.5%，区间$\alpha\pm3\sigma$占到99.7%的面积。区间$\alpha\pm1.96\sigma$及$\alpha\pm0.6745\sigma$分别占面积95%和50%。正态分布曲线与横座标围成的面积是1。3．正态曲线在$x=\alpha\pm\sigma$处有拐点，当$x\to\pm\infty$时，分布曲线以x轴为渐近线。4．正态分布样本的平均值仍然遵从正态分布，参数为α、$\sigma/\sqrt{n}$，n为抽样数。

表 2—3

容易形成正态分布的测值
1.粒度（ϕ单位）
2.圆度（ρ单位）
3.球度
4.砂岩颗粒的排列密度
5.砂岩的孔度
6.斜层理的倾角
7.一些古流向资料
8.岩石所含矿物成分的百分比，位于25—75%之间的部分
9.岩石中某些化学氧化物百分比
10.浊流速度的变化
11.测量的误差
容易形成对数正态分布的测值
1.粒度（毫米单位）
2.层的厚度
3.岩石中某些稀有成分的百分比，如痕量元素
4.河流的流量

有些分布虽然不是对称的，但它们的对数曲线仍属正态分布，遵从下列函数：

$$f(\log x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma}e^{-\frac{(\log x-\log\alpha)^2}{2\sigma^2}}$$

称为对数正态分布（图2—5）。

当粒度是ϕ值单位时得出的为正态分布，如粒度为毫米值时则得出对数正态曲线，这时曲线向着细粒偏斜。沉积岩石学中很多测值接近正态分布或对数正态分布（表2—3）

正态分布或对数正态分布在正态概率图纸（图2—6）上做图，画得的累积曲线为一直线。有些粒度分布是由几条直线段组成的，通常解释成是由几个正态分布线段合成的。每一线段可称为一个总体或次总体；线段相交的地方称为截点。如果两个总体有较明显的混合作用，则在相接处成曲线连接而非直线相交。两直线段延长线交点到曲线的垂直距离称混合度。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

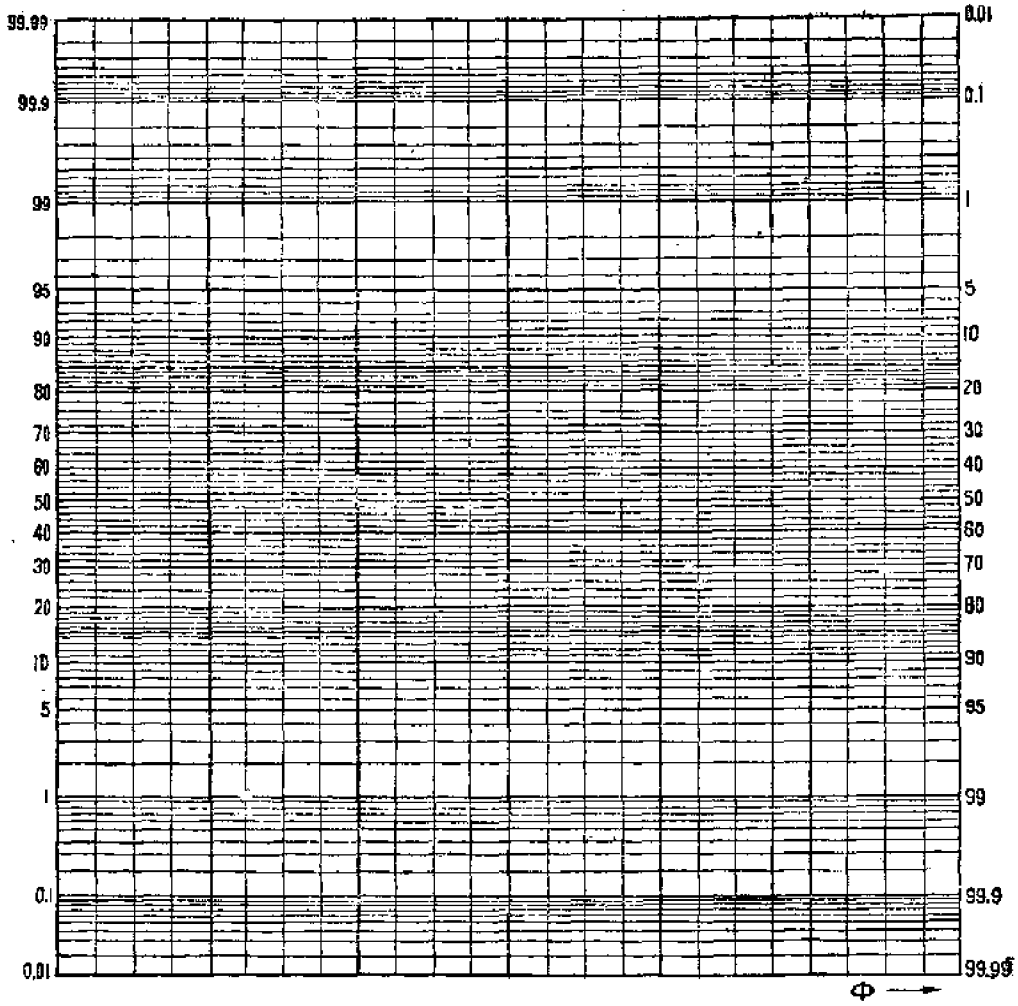


图 2—6　正态概率图纸

二、罗辛分布
(Rosin's distribution)

压碎或火山喷发的自然碎屑物质、冰碛物、表土（花岗岩的山麓碎石）等的粒度不属正态分布或对数正态分布，相反，它们遵从压碎物的罗辛律(Rosin & Rammlet, 1933)。罗辛分布与正态分布非常近似，在有些分选数值区间，用肉眼很难检查出二种分布曲线的区别（图2—7)。罗辛分布在正态概率纸上作图不成直线，然而在罗辛概率纸（制作方法见后述）上则成一直线。

罗辛律最早的形式是

$$R=100e^{-bx^n} \qquad (1)$$

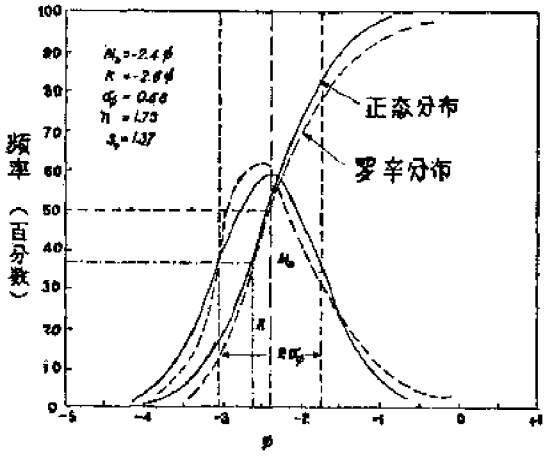


图 2—7　正态分布与罗辛分布曲线的形态比较

M_D—正态曲线的中位数；K—罗辛曲线相当36.78%含量的粒度；S_o—特拉斯克分选系数；σ_ϕ—正态分布的ϕ标准差；n—罗辛分布的分选系数

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

其导数为 $$y=100nbx^{n-1}e^{-bx^n} \quad (2)$$

式中R代表样本内大于x毫米粒级粒径的重量百分比，即累积重量百分数；b是粒度的反参数；n是分选系数，数值上等于罗辛概率纸上曲线斜率的正切；y是频率（罗辛分布曲线的纵座标）；e是自然对数的底。式中b与平均粒度成反相关，经修改后，$b=(1/k)^n$（Bennett, 1936）。将修改后的b代入（1）式，得

$$R=100e^{-(1/k)^n x^n}=100e^{-(x/k)^n} \quad (3)$$

如果$x=k$，则（3）式变为$R=100e^{-1}=36.78$。因此，粒度参数K为相当于累积百分数36.78时的粒度，其与正态曲线的M_D（相当50%累积百分数的粒度）的粒度意义相似。罗辛分布中的n与正态分布中的标准差σ相似，但σ与平均值互相独立，而n则是K的函数。另外，n如小于1，则分布曲线在$x>0$的实值区间没有最大值，同时，此累积曲线也没有实拐点。

关于罗辛分布的检验，以前是用肉眼检查数据在罗辛概率图纸上的线性趋势来说明罗辛分布拟合的良好程度，近来才开始使用严格的数学检验。

对拟合良好性的检验，特别是对以数目频率表示的资料，一般广泛应用的是x^2检验。但筛析是重量频率资料，因此，x^2检验不适用。对罗辛分布拟合良好性的检验是利用罗辛方程本身所具的线性性质。罗辛方程（3）可以直接导出方程（4），

$$\log\log\left(\frac{100}{R}\right)=C+n\log x \quad (4)$$

式中C为常数，等于当$\log x=0$时直线在纵座标上的截距。

方程（4）为一线性方程，也就是说以$\log\log\left(\frac{100}{R}\right)$为纵座标，以$\log x$为横座标时，方程（4）为一条直线。因此，相当于罗辛分布的筛析资料，在这种作图纸上应该呈线性趋势。这就可用一条回归线来拟合这些资料。

基特尔曼（Kittleman, 1964）用IBM—1620计算机做了回归线的计算。将样品筛析得到的大量的R（累积重量百分数）及x（颗粒毫米粒度）输入，计算机即能将它们转换为RLLOG$\left[\text{等于}\ln\ln\left(\frac{100}{R}\right)\right]$和$\phi$值，并算出回归系数$A$和$B$，分别相当于方程（4）的$C$和$n$输出。

因为任何资料，不管其是否具线性，都可以拟合回归线。所以，需要检验回归线的线性程度。这一步骤也是用计算机作F检验。将输出的F统计值与统计表上相应自由度的F分布作比较，如果计算值小于临界值，就认为资料呈线性分布的假设可被接受，因而是符合罗辛律的。这个计算程序在1620-FORTRAN-1程序化代码中有现成的，基特尔曼（1964）文章的附录2中也有详细说明，可供参考。

罗辛分布可用于判别火山碎屑物质从空气中降落后是否又经过改造的问题。河成火山碎屑岩属对数正态分布，未经改造的火成碎屑物质大致遵从罗辛分布。因此，在罗辛概率纸上作图即可判明。图2—8是采自火山口边的样在罗辛概率纸上画出的曲线，其粗粒部分显然是成直线的，但从-1ϕ起的较细粒部分呈正偏趋势。在另外有些样中也出现过这样的偏离，但为负偏。这可能是受到了风的改造所致，也可能是在松解或筛析时细粒部分磨

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

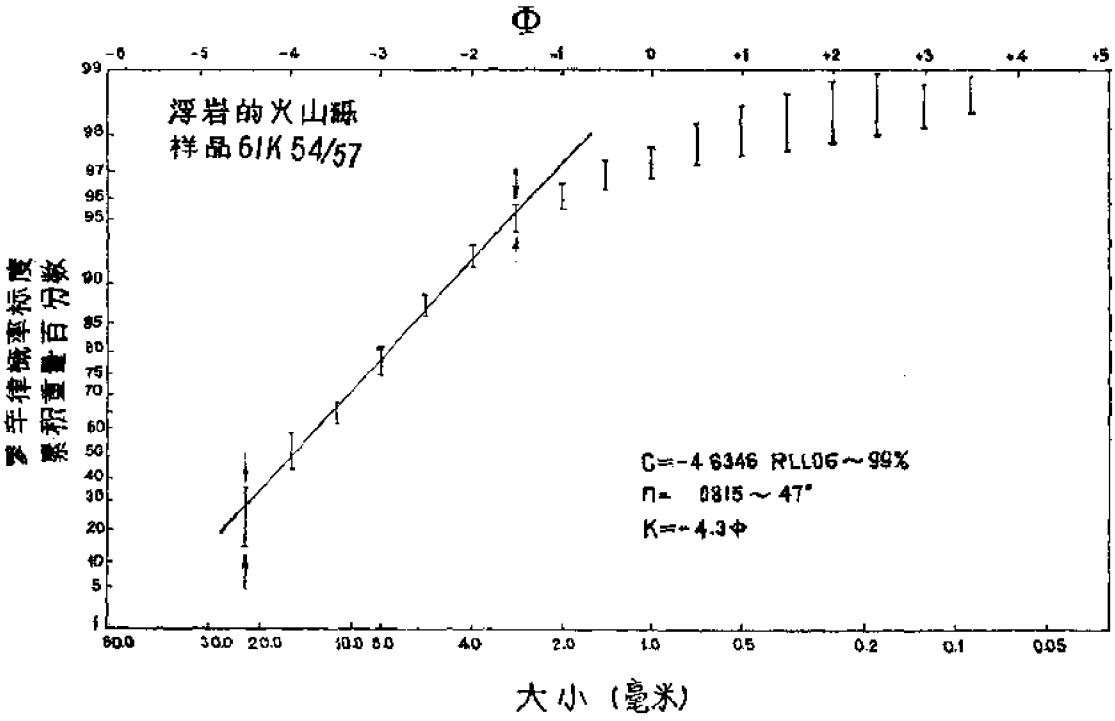


图 2—8　火成碎屑物质在罗辛概率纸上的分布情况和根据资料计算出来的回归线

垂直短线代表由 8 个分析测定的粒度累积百分数区间，垂直箭头指示对回归线线性所作检验可被接受的范围

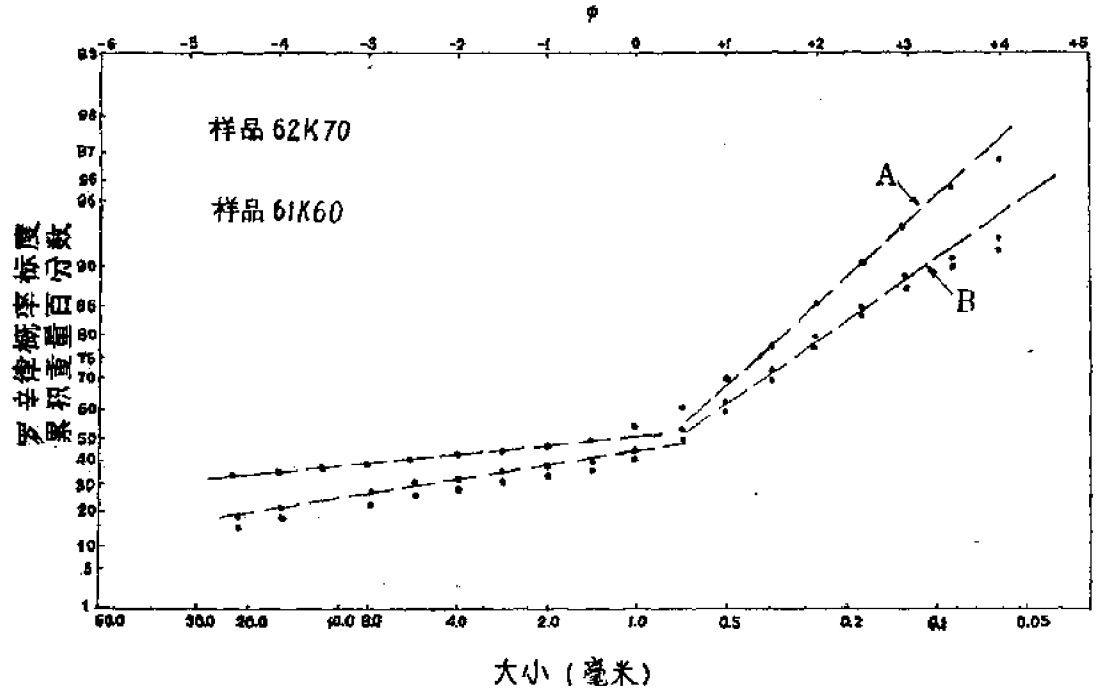


图 2—9　炽热崩落火山云沉积

A、B为两个样，B为两次重复分析

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

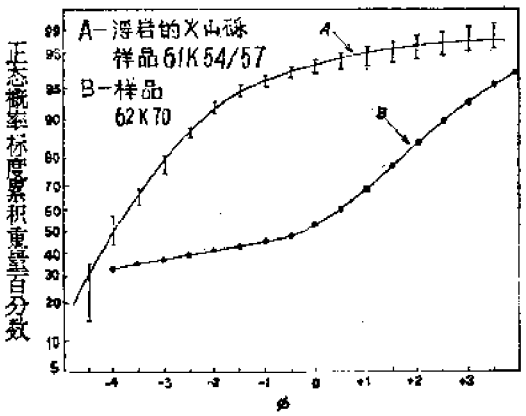


图 2—10　图2—8和图2—9 A两个样品在正态概率纸上的图形，显示不成一直线。图内符号见图2—8的说明

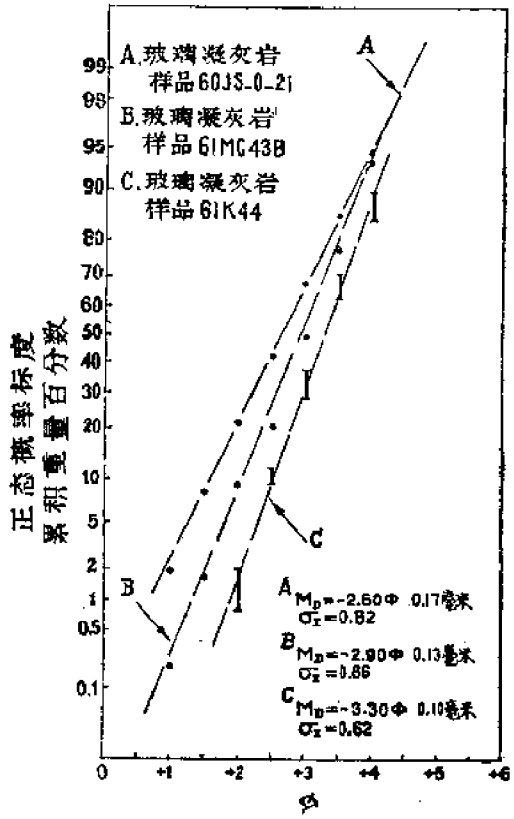


图 2—11　玻璃凝灰岩在正态概率纸上的图形

损较大，还可能是因粒度不同时矿物成分有变化等原因造成的。后者指的是在<−1.0 φ处岩屑、晶屑和结晶集合体增多。图2—9是两个炽热崩落的发光火山云沉积样品的分布，显示均由两个直线段组成，可能是反映所含物质成分不同因而造成双众数。这些样的分布曲线在正态概率纸上的形状都不成直线（图2—10），证明它们均属罗辛分布，而非正态（或对数正态）分布。然而一些玻璃凝灰岩试验结果却服从正态分布（图2—11）。很可能是受过改造之故。样品C最为明显，因为在这层中曾发现很好的摆动波痕。

冰碛物和表土物质也符合罗辛分布（图2—12）。前者可以根据在罗辛概率纸上做图是否成直线的办法来区分冰碛物和冰河沉积物；后者可根据与对数正态分布偏离的程度，做为离源区远近的

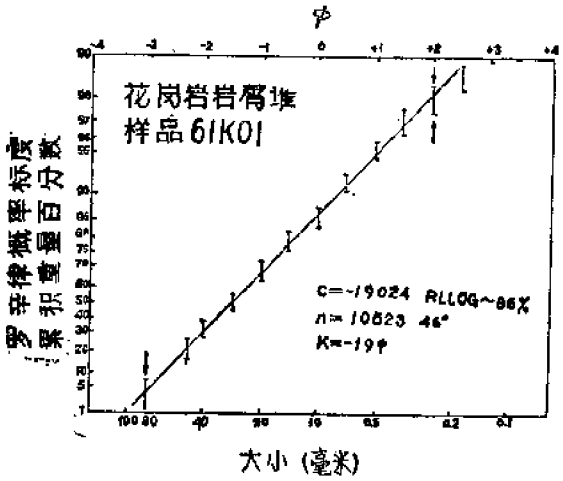


图 2—12　花岗岩岩屑堆在罗辛概率纸上的图形
图内符号见图2—8的说明

分选性指数，离源区越远的表上分选性越变好，与对数正态分布偏离的程度越小。

罗辛概率纸要自己制作。制图的根据是罗辛方程的线性形式[即方程（4）]，现将其推导简述如下：

$$R=100\,e^{-\left(\frac{x}{h}\right)^{n}}$$

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

两边均除以100，并取倒数，即得

$$\frac{100}{R}=\mathrm{e}^{\left(\frac{x}{k}\right)^{n}}$$

两边取两次对数，

$$\log\left(\frac{100}{R}\right)=\left(\frac{x}{k}\right)^{n}\log \mathrm{e}$$

$$\log\log\left(\frac{100}{R}\right)=n(\log x-\log k)+\log\log \mathrm{e}$$

$$=n\log x-n\log k+\log\log \mathrm{e} \qquad (5)$$

对于任何特定的分布，$\log k$、n、$\log\log \mathrm{e}$ 等都是常数，因此，上式可以简化为前述线性形式的方程（4）；$\log\log\left(\frac{100}{R}\right)=C+n\log x$。

利用这个关系制作罗辛概率纸的方法：

横座标根据 ϕ 值及其毫米对数值分格并标度，代表 $\log x$（如图2—8）。每个 ϕ 单位长1英寸，一般是从 -6ϕ 到 $+5\phi$ 就足够了。纵座标是与 $\log\log\left(\frac{100}{R}\right)$ 值成正比分格，并用累

表 2—4　罗辛概率做图纸纵座标分格单位R值的RLLOG值

R %	RLLOG	R %	RLLOG	R %	RLLOG	R %	RLLOG
1.0	1.5271	26.0	0.2979	51.0	−0.3054	76.0	−1.2930
2.0	1.3640	27.0	0.2695	52.0	−0.4247	77.0	−1.3418
3.0	1.2546	28.0	0.2413	53.0	−0.4543	78.0	−1.3924
4.0	1.1690	29.0	0.2133	54.0	−0.4842	79.0	−1.4451
5.0	1.0971	30.0	0.1856	55.0	−0.5144	80.0	−1.4999
6.0	1.0343	31.0	0.1580	56.0	−0.5450	81.0	−1.5572
7.0	0.9780	32.0	0.1305	57.0	−0.5760	82.0	−1.6172
8.0	0.9265	33.0	0.1031	58.0	−0.6074	83.0	−1.6802
9.0	0.8787	34.0	0.0758	59.0	−0.6393	84.0	−1.7466
10.0	0.8340	35.0	0.0406	60.0	−0.6717	85.0	−1.8169
11.0	0.7917	36.0	0.0214	61.0	−0.7046	86.0	−1.8916
12.0	0.7515	37.0	−0.0057	62.0	−0.7380	87.0	−1.9173
13.0	0.7130	38.0	−0.0329	63.0	−0.7721	88.0	−2.0570
14.0	0.6760	39.0	−0.0601	64.0	−0.8067	89.0	−2.1495
15.0	0.6401	40.0	−0.0874	65.0	−0.8421	90.0	−2.2503
16.0	0.6057	41.0	−0.1147	66.0	−0.8782	91.0	−2.3611
17.0	0.5720	42.0	−0.1421	67.0	−0.9150	92.0	−2.4843
18.0	0.5392	43.0	−0.1696	68.0	−0.9527	93.0	−2.6231
19.0	0.5072	44.0	−0.1972	69.0	−0.9913	94.0	−2.7826
20.0	0.4758	45.0	−0.2250	70.0	−1.0309	95.0	−2.9701
21.0	0.4451	46.0	−0.2520	71.0	−1.0715	96.0	−3.1985
22.0	0.4148	47.0	−0.2810	72.0	−1.1132	97.0	−3.4913
23.0	0.3850	48.0	−0.3092	73.0	−1.1561	98.0	−3.9019
24.0	0.3556	49.0	−0.3377	74.0	−1.2002	99.0	−4.6001
25.0	0.3268	50.0	−0.3665	75.0	−1.2458		

$R=36.78\%$，RLLOG = 0

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

积百分数R标度。根据方程（4），$0<R<100$的任何R都有一个$\log\log\left(\frac{100}{R}\right)$值。后者的长度是用IBM－1620计算机按下述公式算出的：

$$\mathrm{RLLOG}=\ln\ln\left(\frac{100}{R}\right)$$

使用e为底的对数，是因为FORTRAN自动编码器可以自动计算ln。计算出的每一百分之一的RLLOG值见表2—4。在$R=36.78\%$时RLLOG为零，$R<36.78\%$时，RLLOG值为正，$R>36.78\%$时，RLLOG为负。以$R=36.78\%$为起点，越远时，R变化所得到的RLLOG变化越大。纵座标上RLLOG的一个单位必须等于1吋。因为图的原点在1%，而1%等于RLLOG值1.53，所以，0 RLLOG应距原点为1.53吋。同样，99%是RLLOG零点上的4.60吋。

第三节　粒度参数

经常使用的粒度参数有粒度平均值、分选系数、偏度、峰态等。下面依次讨论它们的定义及应用。

一、平均值

代表粒度分布的集中趋势。如以有效能来表示，则代表沉积介质的平均动力能（速度）。但沉积物的平均粒度还在一定程度上取决于源区物质的粒度分布。

用矩值法求平均值的优点是能使整个粒度分布都投入计算；图解法则简单快速，通常读取的百分位数越多，得出的平均值越精确、越接近矩平均值。

已有的图解平均值定义不止一个。最简单的是特拉斯克（1930）的定义：平均值$=\phi50$。他的定义与中位数的定义分不开。奥托(Otto, 1939)的定义是$M_\phi=(\phi16+\phi84)/2$，这在地质界很流行，可能现在还有不少人在使用。然而此定义存在着忽略中间的第三值的缺点，因此不能满意的表示双峰或偏态曲线。为了补救这个缺点，福克和沃德（Folk & Ward, 1957）指出了平均值$M_z=(\phi16+\phi50+\phi84)/3$这个定义。麦克卡孟(Mc Cammon, 1962)后来又加补充和完善，他的公式为$(\phi10+\phi30+\phi50+\phi70+\phi90)/5$和$(\phi5+\phi15+\phi25+\cdots\cdots+\phi85+\phi95)/10$。而福克(1966)认为根本上最好的公式是$(\phi0.5+\phi1.5+\phi2.5+\cdots\cdots+\phi98.5+\phi99.5)/100$，这样求得的平均值和矩平均值一样好。各种平均值与正态分布矩平均值$\bar{x}_\phi$接近程度如下：

特拉斯克（1930），$\phi50$	64%
奥托（1939），M_ϕ	74%
福克和沃德（1957），M_z	88%
麦克卡孟（1962），	
$(\phi10+\phi30+\phi50+\phi70+\phi90)/6$	93%
$(\phi5+\phi15+\cdots\cdots+\phi85+\phi95)/10$	97%

也有考虑以众数来表明沉积物的粒度。众数是含量最多的颗粒粒径。正态分布的平均值、众数粒径及中位数（50%累积含量的粒径）是一致的、重合的，然而正偏或负偏的分

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

布，三者则不完全一致。有些沉积物，如砾质砂岩的分布，可以含两个或更多的众数，其频率曲线表现出不只一个峰。其中含量最多的称基本众数或第一众数，其次的为次要众数或第二众数，等等。求众数的近似方法是找累积曲线（算术坐标纸）的拐点或频率曲线上的峰值，有时也以含量最多的粒度组一众数组（或称模态组）来表示，如1/4ϕ－1/2ϕ。

平均值可以反映沉积物的平均粒度。在剖面或区域上系统的研究平均值的变化情况，可了解物质来源及沉积环境的变化。目前比较重视众数粒级，因为它对研究混合来源的物质特别有效，故它具有更大的成因意义。用概率纸做图时可以看出有时是由几个直线段组成，便于研究多众数的粒度情况。众数的各种变化，是引起陆源沉积物的分选性、偏度、峰态变化的基本原因。

二、分 选 系 数

特拉斯克（1930）提出的是毫米值量度

$$S_o=\sqrt{\frac{M_m25}{M_m75}}\text{或}=\sqrt{\frac{Q_1}{Q_3}}$$

也有时去掉根号，用以下的形式：

$$S_o=\frac{Q_1}{Q_3}$$

上式中M_m25、M_m75分别代表25%、75%累积含量的粒径（毫米）。这个公式目前还在广泛的应用。

克伦宾（1936）提出了类似的ϕ值分选系数：

$$QD_\phi=(\phi75-\phi25)/2$$

他并提出一个S_o和QD_ϕ的换算图（克伦宾，1938，p235）。

分选系数也和粒度平均值一样，参加定义的测值愈多，计算出来的分选系数越精确。上述的S_o和QD_ϕ都不能测定曲线中部的分选情况，只照顾了曲线的两端，而实际上分选性的变化大多数表现在尾部，即在25%和75%范围以外的部分上。因此这两种分选系数都不够灵敏。

在越来越多地使用标准差σ值的情况下，奥托（1939）提出$\sigma_\phi=(\phi84-\phi16)/2$，福克和沃德(1957)认为这个值不适合双峰或偏态分布，因而制定了概括图解标准差$\sigma_I=(\phi84-\phi16)/4+(\phi95-\phi5)/6.6$)*，这个$\sigma_I$值能更好地反映曲线尾部的分选性，因此经常被采用。

夏普和范（Sharp & Fan, 1963）提出了一个复杂的百分数分选量度，它代表了一种新的分选概念。这个量度对明显的双峰沉积物特别有效。如果利用他编制的表来计算，实际上并不困难。他的分选系数公式为：

$$S_i=100+k\sum_{i=1}^{n}f_i\log f_i$$

式中S_i代表以百分比表示的分选系数；k为根据粒级分组数求出的常数；f_i为第i组的含量。

当所有的f_i是1或0时，$S_i=100$；所有的f_i相等时，分选最差，故$S_i=0$。实际计算时应首先分组，然后求常数k，方法如下：

设N为总的组数，设各组的f_i都相等，则第i组的f_i含量为$1/N$。因各f_i都相等，故

* 这是根据筛析资料得出的。筛余部分的处理方法是，在一算术做图纸上将最后一筛10ϕ延到14ϕ成100%，在此延出的曲线上求各百分位值。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表 2—5　不同重量百分比相当的 U_i 值

%	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
0	0	0.215	0.386	0.541	0.686	0.823	0.954	1.079	1.200	1.317
1.00	1.431	1.541	1.649	1.754	1.857	1.957	2.055	2.152	2.247	2.339
2.00	2.431	2.520	2.609	2.695	2.781	2.865	2.948	3.030	3.110	3.190
3.00	3.268	3.345	3.422	3.497	3.572	3.645	3.718	3.790	3.861	3.931
4.00	4.000	4.069	4.136	4.203	4.270	4.335	4.400	4.465	4.528	4.591
5.00	4.653	4.715	4.776	4.837	4.897	4.956	5.015	5.073	5.130	5.188
6.00	5.244	5.300	5.356	5.411	5.466	5.520	5.573	5.626	5.679	5.731
7.00	5.783	5.834	5.885	5.936	5.986	6.035	6.085	6.133	6.182	6.230
8.00	6.277	6.324	6.371	6.418	6.464	6.510	6.555	6.600	6.644	6.689
9.00	6.733	6.776	6.819	6.862	6.905	6.947	6.989	7.031	7.072	7.113
10.00	7.153	7.194	7.234	7.273	7.313	7.352	7.391	7.429	7.467	7.505
11.00	7.543	7.580	7.617	7.654	7.691	7.727	7.763	7.799	7.834	7.869
12.00	7.904	7.939	7.973	8.008	8.042	8.075	8.109	8.142	8.175	8.207
13.00	8.240	8.272	8.304	8.336	8.367	8.398	8.429	8.460	8.491	8.521
14.00	8.551	8.581	8.611	8.640	8.670	8.699	8.727	8.756	8.784	8.813
15.00	8.841	8.869	8.896	8.923	8.950	8.977	9.004	9.031	9.057	9.083
16.00	9.109	9.135	9.161	9.186	9.211	9.236	9.261	9.286	9.310	9.334
17.00	9.358	9.382	9.406	9.429	9.453	9.476	9.499	9.522	9.544	9.567
18.00	9.588	9.611	9.633	9.655	9.677	9.698	9.719	9.740	9.761	9.782
19.00	9.803	9.823	9.843	9.864	9.884	9.903	9.923	9.942	9.962	9.981
20.00	10.000	10.019	10.038	10.056	10.074	10.093	10.111	10.129	10.147	10.164
21.00	10.182	10.199	10.216	10.233	10.250	10.267	10.284	10.300	10.316	10.333
22.00	10.349	10.364	10.380	10.396	10.411	10.427	10.442	10.457	10.472	10.487
23.00	10.501	10.516	10.530	10.545	10.559	10.573	10.586	10.600	10.614	10.627
24.00	10.641	10.654	10.667	10.680	10.693	10.705	10.718	10.730	10.743	10.755
25.00	10.767	10.779	10.791	10.802	10.814	10.825	10.837	10.848	10.859	10.870
26.00	10.881	10.892	10.902	10.913	10.923	10.933	10.943	10.953	10.963	10.973
27.00	10.983	10.992	11.002	11.011	11.020	11.029	11.038	11.047	11.056	11.065
28.00	11.073	11.082	11.090	11.098	11.106	11.114	11.122	11.130	11.137	11.145
29.00	11.152	11.160	11.167	11.174	11.181	11.188	11.195	11.202	11.208	11.215
30.00	11.221	11.227	11.234	11.240	11.246	11.251	11.257	11.263	11.268	11.274
31.00	11.279	11.285	11.290	11.295	11.300	11.305	11.309	11.314	11.319	11.323
32.00	11.328	11.332	11.336	11.340	11.344	11.348	11.352	11.355	11.359	11.363
33.00	11.366	11.369	11.373	11.376	11.379	11.382	11.385	11.387	11.390	11.393
34.00	11.395	11.398	11.400	11.402	11.404	11.406	11.408	11.410	11.412	11.414
35.00	11.415	11.417	11.418	11.419	11.421	11.422	11.423	11.424	11.425	11.425
36.00	11.426	11.427	11.427	11.428	11.428	11.428	11.429	11.429	11.429	11.429
37.00	11.429	11.428	11.428	11.428	11.427	11.427	11.426	11.425	11.425	11.424
38.00	11.423	11.422	11.421	11.419	11.418	11.417	11.415	11.414	11.412	11.410
39.00	11.409	11.407	11.405	11.403	11.401	11.398	11.396	11.394	11.392	11.389
40.00	11.386	11.384	11.381	11.378	11.375	11.372	11.369	11.366	11.363	11.360
41.00	11.357	11.353	11.350	11.346	11.343	11.339	11.335	11.331	11.327	11.323
42.00	11.319	11.315	11.311	11.306	11.302	11.298	11.293	11.289	11.284	11.279
43.00	11.274	11.269	11.265	11.259	11.254	11.249	11.244	11.239	11.233	11.228
44.00	11.222	11.217	11.211	11.205	11.199	11.194	11.188	11.182	11.176	11.169
45.00	11.163	11.157	11.151	11.144	11.138	11.131	11.124	11.118	11.111	11.104
46.00	11.097	11.090	11.083	11.076	11.069	11.062	11.054	11.047	11.039	11.032
47.00	11.024	11.017	11.009	11.001	10.993	10.985	10.978	10.969	10.961	10.953
48.00	10.945	10.937	10.928	10.920	10.911	10.903	10.894	10.886	10.877	10.868
49.00	10.859	10.850	10.841	10.832	10.823	10.814	10.805	10.795	10.786	10.776

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

续表

%	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
50.00	10.767	10.757	10.748	10.738	10.728	10.718	10.709	10.699	10.689	10.679
51.00	10.669	10.658	10.648	10.638	10.627	10.617	10.607	10.596	10.585	10.575
52.00	10.564	10.553	10.542	10.531	10.521	10.509	10.498	10.487	10.476	10.465
53.00	10.454	10.442	10.431	10.419	10.408	10.396	10.384	10.373	10.361	10.349
54.00	10.337	10.325	10.313	10.301	10.289	10.277	10.265	10.252	10.240	10.228
55.00	10.215	10.203	10.190	10.177	10.165	10.152	10.139	10.126	10.113	10.100
56.00	10.087	10.074	10.061	10.048	10.035	10.021	10.008	9.995	9.981	9.968
57.00	9.954	9.940	9.927	9.913	9.899	9.885	9.871	9.857	9.843	9.829
58.00	9.815	9.801	9.787	9.773	9.758	9.744	9.729	9.715	9.700	9.686
59.00	9.671	9.656	9.642	9.627	9.612	9.597	9.582	9.567	9.552	9.537
60.00	9.522	9.507	9.491	9.476	9.461	9.445	9.430	9.414	9.399	9.383
61.00	9.367	9.352	9.336	9.320	9.304	9.288	9.272	9.256	9.240	9.224
62.00	9.208	9.191	9.175	9.159	9.142	9.126	9.109	9.093	9.076	9.060
63.00	9.043	9.026	9.009	8.993	8.976	8.959	8.942	8.925	8.908	8.891
64.00	8.873	8.856	8.839	8.822	8.804	8.787	8.769	8.752	8.734	8.717
65.00	8.699	8.681	8.664	8.646	8.628	8.610	8.592	8.574	8.556	8.538
66.00	8.520	8.502	8.483	8.465	8.447	8.428	8.410	8.392	8.373	8.354
67.00	8.336	8.317	8.298	8.280	8.261	8.242	8.223	8.204	8.185	8.166
68.00	8.147	8.128	8.109	8.090	8.071	8.051	8.032	8.013	7.993	7.974
69.00	7.954	7.935	7.915	7.895	7.876	7.856	7.836	7.816	7.796	7.776
70.00	7.757	7.737	7.716	7.696	7.676	7.656	7.636	7.616	7.595	7.575
71.00	7.554	7.534	7.514	7.493	7.472	7.452	7.431	7.410	7.390	7.369
72.00	7.348	7.327	7.306	7.285	7.264	7.243	7.222	7.201	7.180	7.159
73.00	7.137	7.116	7.095	7.073	7.052	7.030	7.009	6.987	6.966	6.944
74.00	6.922	6.900	6.879	6.857	6.835	6.813	6.791	6.769	6.747	6.725
75.00	6.703	6.681	6.659	6.636	6.614	6.592	6.569	6.547	6.525	6.502
76.00	6.480	6.457	6.434	6.412	6.389	6.366	6.344	6.321	6.298	6.275
77.00	6.252	6.228	6.206	6.183	6.160	6.137	6.114	6.091	6.067	6.044
78.00	6.021	5.997	5.974	5.951	5.927	5.904	5.880	5.856	5.833	5.809
79.00	5.785	5.762	5.738	5.714	5.690	5.666	5.642	5.618	5.594	5.570
80.00	5.546	5.522	5.498	5.473	5.449	5.425	5.400	5.376	5.352	5.327
81.00	5.303	5.278	5.253	5.229	5.204	5.180	5.155	5.130	5.105	5.080
82.00	5.055	5.031	5.006	4.981	4.956	4.931	4.905	4.880	4.855	4.830
83.00	4.805	4.779	4.754	4.729	4.703	4.678	4.652	4.627	4.601	4.576
84.00	4.550	4.524	4.499	4.473	4.447	4.421	4.395	4.369	4.344	4.318
85.00	4.292	4.266	4.239	4.213	4.187	4.161	4.135	4.109	4.082	4.056
86.00	4.030	4.003	3.977	3.950	3.924	3.897	3.871	3.844	3.817	3.791
87.00	3.764	3.737	3.710	3.684	3.657	3.630	3.603	3.576	3.549	3.522
88.00	3.495	3.468	3.441	3.413	3.386	3.359	3.332	3.304	3.277	3.250
89.00	3.222	3.195	3.167	3.140	3.112	3.084	3.057	3.029	3.001	2.974
90.00	2.946	2.919	2.890	2.862	2.834	2.807	2.779	2.751	2.722	2.694
91.00	2.666	2.639	2.610	2.582	2.553	2.525	2.497	2.468	2.440	2.412
92.00	2.383	2.355	2.326	2.298	2.269	2.240	2.212	2.183	2.154	2.126
93.00	2.097	2.068	2.039	2.010	1.981	1.952	1.923	1.894	1.865	1.836
94.00	1.807	1.778	1.749	1.719	1.690	1.661	1.631	1.602	1.573	1.543
95.00	1.514	1.484	1.455	1.425	1.396	1.366	1.336	1.307	1.277	1.247
96.00	1.217	1.198	1.158	1.128	1.098	1.068	1.038	1.008	0.978	0.948
97.00	0.918	0.888	0.858	0.827	0.797	0.767	0.737	0.706	0.676	0.646
98.00	0.615	0.595	0.554	0.524	0.493	0.463	0.432	0.401	0.371	0.340
99.00	0.309	0.278	0.248	0.217	0.186	0.155	0.124	0.093	0.062	0.031

此 U_f 值仅适用于ϕ单位的分选系数 $S_f\phi$，范围是 -10至$+15\phi$，粒级间隔为 1ϕ，$U_f = -71.5338\, f_i \log f_i$，$f_i$=重量百分数/100；当% = 100.0 时，$U_f = 0.0$。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

$S_i=0$，即

$$0=100+k\sum_{i=1}^{n} f_i \log 1/N$$

移项

$$-100=k\log 1/N\sum_{i=1}^{n} f_i$$

因为是正态分布，故

$$\sum_{i=1}^{n} f_i=\frac{N}{N}=1$$

所以

$$-100=k\log 1/N$$

$$k=\frac{100}{\log N}$$

一般是根据乌登-温特沃思分级，以1ϕ为间隔，实际上有意义的区间是－10至＋15ϕ，共25级。因此$N=25$，此时的k值为

$$k=\frac{100}{\log 25}=\frac{100}{1.3979}=71.5338$$

此时的分选系数为

$$S_i=100+71.5338\sum_{i=1}^{n} f_i \log f_i$$

可以看出，用手算上式的S_i是很讨厌的。故进一步将它简化成

表 2—6 S_i 计 算 实 例

粒级分组 (ϕ)	S_i最大的情况		S_i最小的情况		含量集中在8ϕ以前的S_i		S_i的真实情况	
	重量%	U_i	重量%	U_i	重量%	U_i	重量%	U_i
－1—0	0.30	0.541	0.30	0.541	0.30	0.541	0.30	0.541
0—1	0.90	1.317	0.90	1.317	0.90	1.317	0.90	1.317
1—2	2.10	2.520	2.10	2.520	2.10	2.520	2.10	2.520
2—3	74.40	6.835	74.40	6.835	74.40	6.835	74.40	6.835
3—4	11.30	7.654	11.30	7.654	11.30	7.654	11.30	7.654
4—5	10.40	7.313	0.945	1.369	2.60	2.948	5.30	4.837
5—6			0.945	1.369	2.60	2.948	3.80	3.861
6—7			0.945	1.369	2.60	2.948	1.20	1.649
7—8			0.945	1.369	2.60	2.948	0.10	0.215
8—9			0.945	1.369				
9—10			0.945	1.369				
10—11			0.945	1.369				
11—12			0.945	1.369				
12—13			0.945	1.369				
13—14			0.945	1.369				
14—15			0.945	1.369				
总量	99.40		99.40		99.40		99.40	
$\sum_{i=1}^{n} U_i$		26.180		33.926		30.659		29.429
$S_i=100-\sum_{i=1}^{n} U_i$		73.820		66.074		69.341		70.571

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

$$S_i = 100 - \sum_{i=1}^{n} U_i$$

$$U_i = -71.5338 f_i \log f_i,$$

并且已编制好了f_i的U_i数值表（表2—5）。这样一来计算就变得方便了。下面举一个例子：

表 2—6是一条河流洪水沉积的一个样品，只分析到4ϕ部分，经分组（1ϕ 间距）和计算组重量百分数后，填入表2—6中。剩余的部分为土质（10.40%），其粒度分布可能有四种情况：1）全部集中于 4—5ϕ 组中（表2—6第一栏的情况）；2）均匀地分布在4—15ϕ 的各组中（表2—6第二栏情况）；3）只分布在 8ϕ 以前各组中（表 2—6第三栏情况）；4）土质继续细分的真实状况（表 2—6第四栏）。各栏都进行计算：按各组重量百分数（即 f_i）查表2—5得出相应的U_i值，分别填入表2—6中，各栏的 U_i 分别相加，得出各自的$\sum_{i=1}^{n} U_i$ 值，最后通过公式即求出S_i来。计算结果表明，四种情况计算出的分选系数各不相同，因而分析时对细粒部分应尽可能地细分。

用这种百分数分选系数，可以区分各种成因的沉积物，如冰碛石分选系数的众数值是30—35%，河道沙是50—60%，浅滩和沙丘沙是70—75%（图2—13）。

我们觉得这种分选系数照顾的粒级全面，比较准确，计算相当简便（利用 U_i 值表），适宜做平面分选系数等值线图以进行地质分析，因此，可在进一步使用中加以检验和推广。

单个纹层的分选系数叫做单元分选系数，它代表最佳分选。平均分选系数或整个样品平均分选系数决定于单个纹层中位直径 Md 的变化。以平均分选系数对单元分选系数之

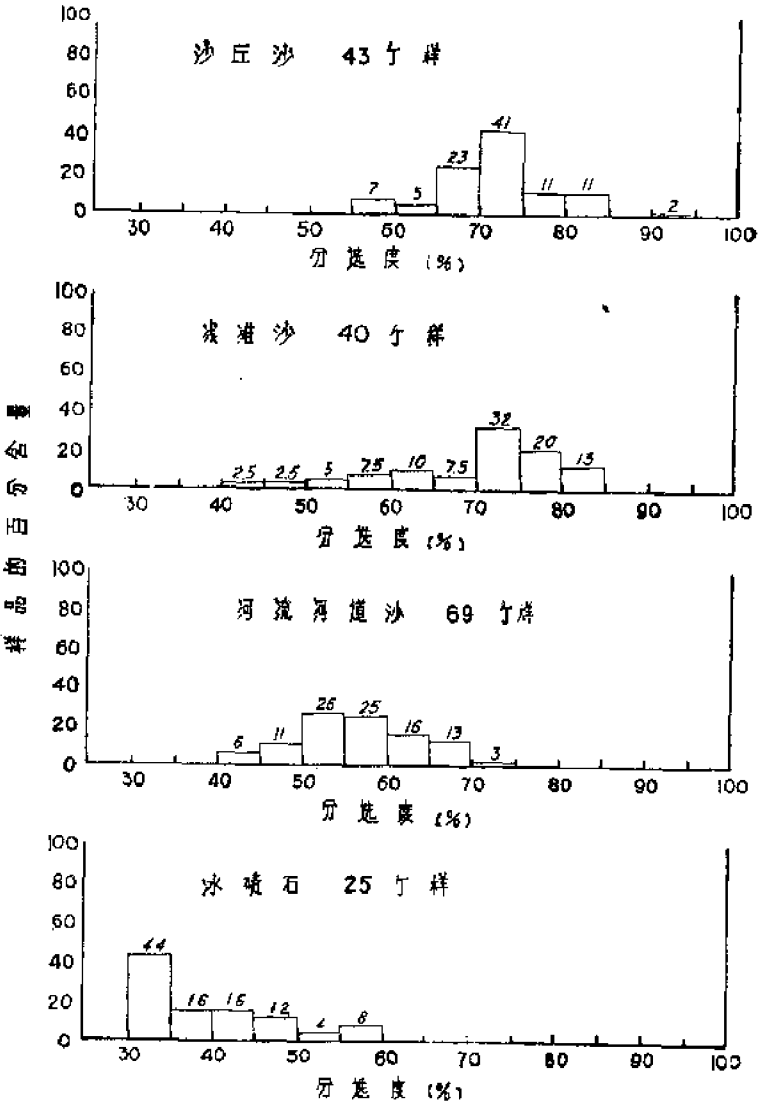


图 2—13 各种成因沉积物的百分数分选系数S_i

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

比称相对分选系数，其值为1时说明样品是均匀的。但通常样品都非均匀的，故相对分选系数一般都大于1。残余沉积物是在正常条件下沉积的沉积物，由于细粒部分被簸分出去改造而形成的。它的相对分选系数可小于1。塞博德（Seibold, 1963）据此而认出了滨岸沙的残余沉积物（图2—14）。相对分选系数与粒度无关。

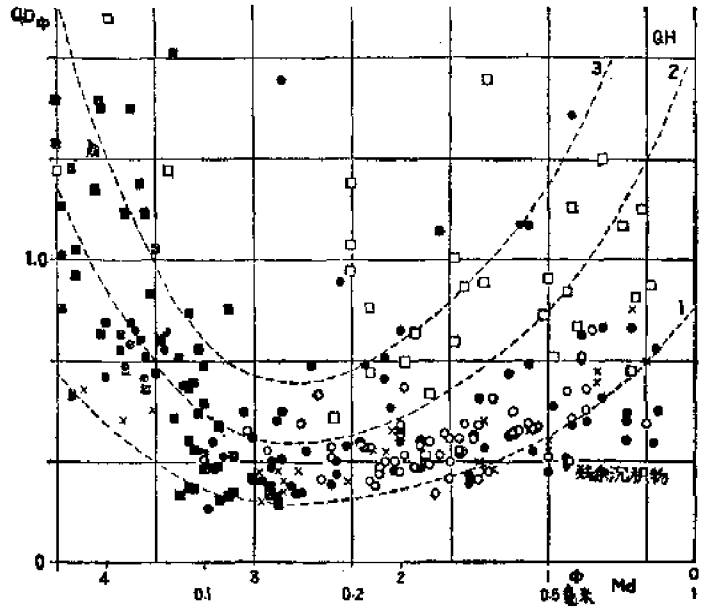


图 2—14　QD_ϕ与Md的函数关系图

样品取自不同沉积环境。×—各源区单纹层样粒度分析数据，整线为相对分选系数QH等值线，QH'<1 的沉积物为残余沉积物

很多人曾注意到分选系数与中位数的密切关系。英曼(Inman, 1952)发现中位粒径0.1—0.2毫米的区间内分选性最好。单个纹层的粒度分析也显示了这个特点(Walger, 1962)。前面图2—14也表示了分选系数和中位直径的关系。

关于分选性好坏的标准，各家所定界线不尽一致，菲赫特鲍尔（Füchtbauer, 1959）提出了S_o的分级（表2—7）；福克和沃德（1957）及弗里德曼(1962)分别指出了对σ的分级，前者主要级别间的比差值主要为2，分选度较好的等级分级比差值为$\sqrt{2}$。这基本上是一种几何分级标准。而弗里德曼（1962）的标准则是算术分级的，>0.80时的级间差值主要为0.60（表2—8）。

表 2—7　S_o的分级表

Q_1/Q_3	$\sqrt{\frac{Q_1}{Q_3}}$	分选度
1—1.5	1—1.23	很好
>1.5—2	>1.23—1.41	好
>2—3	>1.41—1.74	中
>3—4	>1.74—2.0	差
>5	>2.0	很差

表 2—8　分选性等级表

分选程度	σ（ϕ单位）	
	福克和沃德(1957)	弗里德曼(1962)
分选极好	<0.35	<0.35
分选好	0.35—0.50	0.35—0.50
分选较好	0.50—0.71	0.50—0.80
分选中等	0.71—1.00	0.80—1.40
分选较差	1.00—2.00	1.40—2.00
分选差	2.00—4.00	2.00—2.60
分选极差	>4.00	>2.60

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

分选系数也常被用作环境指标，但是大多数人只给出了相对值。通常，最坏的分选系数是代表冲积扇和冰碛物等粗粒沉积物；海滩卵石较河流卵石分选要好。对当代环境而言，滨岸沙比水下沙、潮间坪和河流沙分选更好，风成沙丘沙分选最好。

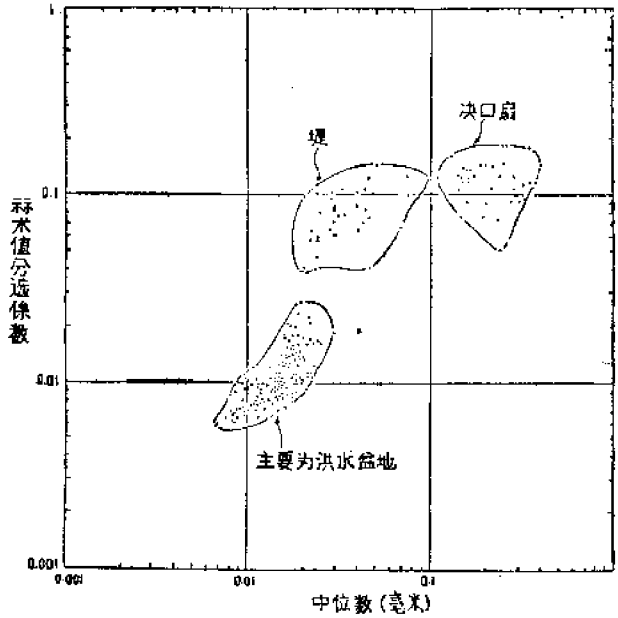


图 2—15 分选系数对中位数的散点图

近年来，很多人使用分选系数或标准差对其他粒度参数（如中位数，……）作散点图，发现它们能较好的区分各种沉积环境。例如，图2—15，它是分选系数对中位数的散点图，它能将河流沉积物的决口扇、天然堤及洪水盆地沉积物区分开。这方面的详情，后面有专门叙述，此处从略。

三、偏　　度

偏度可判别分布的对称性，并表明平均值与中位数的相对位置。如为负偏，则此沉积物是粗偏，平均值将向中位数的较粗方向移动；正偏则是细偏，平均值向中位数的较细方向移动（图2—16）。

特拉斯克（1930）和克伦宾（1936）制定的两个偏度公式是最早而应用较广的公式。它们是

$$SK=\frac{(M_m25)\ (M_m75)}{(M_m50)^2}\qquad\text{（特拉斯克）}$$

$$SK_\phi=(\phi25+\phi75-2\phi50)/2\qquad\text{（克伦宾）}$$

英曼（1952）提出了两个偏度量度，一个是针对分布的中部，另一个则针对尾部。福克（1966）对其略加修改，成以下形式：

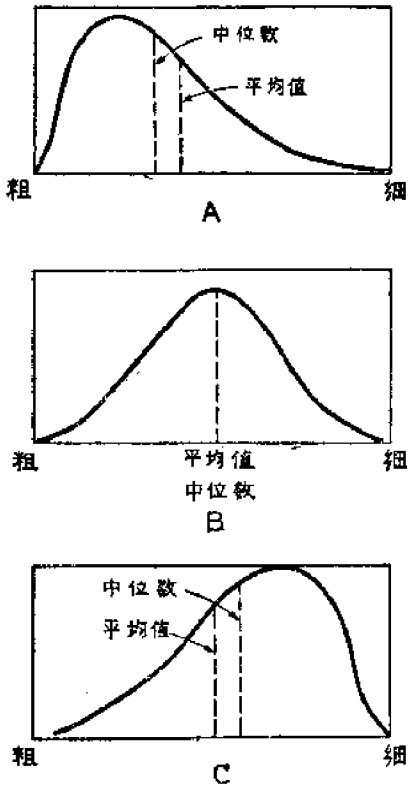


图 2—16 不同偏度的分布情况

A—正偏；B—对称；C—负偏

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

$$\alpha_\phi = \frac{\phi16 + \phi84 - 2\phi50}{\phi84 - \phi16}$$

$$\alpha_{2\phi} = \frac{\phi5 + \phi95 - 2\phi50}{\phi84 - \phi16}$$

一般对称曲线的$\alpha_\phi = 0.00$，正值表明尾部在细端，属正偏；负值表明尾部在粗端，属负偏。数字界限在+1.00至-1.00之间。实际上，天然沉积物的偏度很少超过+0.80或-0.80。1957年福克和沃德进一步研究英曼的公式，提出了一个判定偏度更加灵敏的量度，称为概括图解偏度SK_I：

$$SK_I = \frac{\phi84 + \phi16 - 2\phi50}{2(\phi84 - \phi16)} + \frac{\phi95 + \phi5 - 2\phi50}{2(\phi95 - \phi5)}$$

同时，他们将偏度分为以下等级：

极负偏：-1.00——0.30
负　偏：-0.30——0.10
近对称：-0.10——+0.10
正　偏：+0.10——+0.30
极正偏：+0.30——+1.00

矩值的偏度公式为$m_3/2\sigma^3$，也有人用m_3/σ^3。当曲线对称时，偏度为零，>0时为正偏，粒度集中在粗端部分；<0时为负偏，粒度集中于细端部分。

研究偏度对于了解沉积物的成因有一定的作用。一般说，海滩沙多为负偏，而沙丘及风坪沙则多为正偏。福克和沃德（1957）对一河流沉积物以平均粒度对分选系数和偏度做三维图解，发现平均粒度对分选系数以及对偏度都成正弦曲线关系，而分选系数对偏度则呈圆曲线关系，三者共同构成一螺旋线。经研究，这种独特的趋势是由于样品为两个明显不同总体组分的混合物所导致。这个结论已为其他人的工作所证实。

四、峰　　态

大多数峰态是度量粒度分布的中部和尾部展形之比，通俗说，就是衡量分布曲线的峰凸程度。如矩值的峰态公式为$\frac{m_4}{\sigma^4} - 3$，则正态曲线的峰态等于零。峰态为正值时，是窄峰态；负值时，是宽峰态（图2—17）。

关于图解峰态的公式，最早提出的是克伦宾和佩蒂约翰（1938）的

$$K_{q2} = \frac{\phi75 - \phi25}{2(\phi90 - \phi10)}$$

但这个公式，在实际工作中很少人用它。英曼（1952）提出的公式是

$$\beta_\phi = \frac{(\phi95 - \phi5) - (\phi84 - \phi16)}{\phi84 - \phi16}$$

正态曲线的$\beta_\phi = 0.65$。1957年福克和沃德提出了一个图解峰态量度：

$$KG = \frac{\phi95 - \phi5}{2.44(\phi75 - \phi25)}$$

正态曲线的$KG = 1.00$；双峰分布的KG值可能低达0.63；而含尾部的尖（窄）峰分布，其

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

KG 可能在 1.5—3之间，或者更大一些。福克和沃德在做散点图时建议不使用 KG，而使用标准化了的KG即KG'：

$$KG'=\frac{KG}{(KG+1)}$$

据100多个样的分析，他们订出了峰态等级的数据界限：

峰态：很宽：$KG<0.67$

宽：　0.67—0.90

中等：　0.90—1.11

窄：　1.11—1.50

很窄：　1.50—3.00

非常窄：>3.00

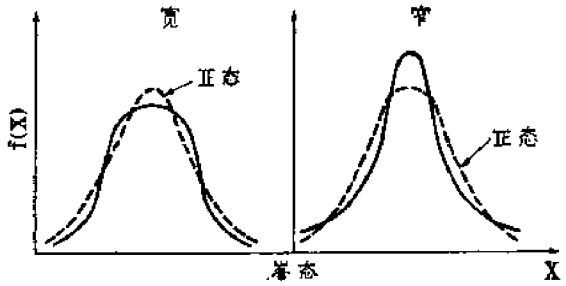


图 2—17　宽、窄峰态与正态曲线形状之比较

一般窄峰态的曲线，其中部较尾部分选性好。低于0.50的峰态很少见。峰态研究是发现双峰曲线的重要线索。如果 KG 值很低或非常低时，说明该沉积物是未经改造就进入新环境，而新环境对它的改造又不明显，因此，它仍然代表几个物质（或总体）直接混合而成，其分布曲线则可能是宽峰或鞍状分布，或者多峰曲线。

一组样品的偏度对峰态图可以反映粒度分布的正态性，是解释沉积物成因的有用方法。研究证明，样品如是两个正态分布总体以不同比例混合而成的话，则当细粒总体占优势时为负偏度，粗粒总体占优势时为正偏度，两个总体大致均等混合时可能成鞍状宽峰，如果一总体占绝对优势时则曲线呈尖峰分布。也可以将偏度和峰态作为两个对数正态分布混合度的指标(Spancer, 1963)。

后来戴尔(Dyer, 1970)考虑到沙质砾石中的沙，有的是后来填充在砾石孔隙中的。他发现，如沙、砾为同时的沉积物，沙的含量往往大于25%，如是后来填充的沙，则少于25%。因此建议以25%及75%代替参数中的5%及95%。另外，这两个百分数还有一个优点，除非是大样，往往最粗的5%是由曲线外推估计的，而25%则是根据曲线求得的，因此比较准确，他提出的公式如下：

$$\text{分选系数 } \sigma_D=\frac{\phi 84-\phi 16}{4}+\frac{\phi 75-\phi 25}{2.67}$$

$$\text{偏度 } SK_D=\frac{\phi 84+\phi 16-2\phi 50}{2(\phi 84-\phi 16)}+\frac{\phi 75+\phi 25-2\phi 50}{2(\phi 75-\phi 25)}$$

$$\text{峰态 } K_D=\frac{\phi 84-\phi 16}{1.5(\phi 75-\phi 25)}$$

对他所提出的公式可以进行试用。

五、众数态

众数态 m_o 是用来表明粒度分布曲线的双众数或多众数性质的，这是在沉积物中经常存在但往往被忽略了的性质。一般m_o定义如下：

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

$$m_\phi = 1 + \frac{\phi_e + \phi_1}{2\sigma_I}$$

式中ϕ_e是最后（最细）的众数的ϕ粒级；ϕ_1是第一个（最粗的）众数的ϕ粒级；σ_I是概括图解标准差。

双众数或多众数的分布可能是以下原因造成的：沉积介质的速度变化很厉害；源区物质缺乏固定的粒级区间；细粒物质透入砾石的孔隙中；不同沉积方式的结合；成岩作用和风化作用等等。有时双众数的出现是由于抽样不当造成的。因此，不是所有的双众数和多众数都有成因解释。

六、各种环境沉积物的粒度参数特征

由于近年来粒度参数的研究进入了一个新阶段，即对沉积物的成因作出解释和区分沉积环境的研究阶段。已累积的部分资料，有人（Füchtbauer & Müller, 1970）把它们综合成一个表，现稍加补充供参考（表2—9）。

表 2—9 各种环境沉积物的粒度参数

1. 冲积环境：

a. 河床和点沙坝

分选性（Q_3/Q_1）大部分>1.2；不稳定的河流大部分>1.3；偏度（SK）<1，故属正偏；少数>1*；通常为双众数，具典型的向上变细层序。沉积物是沙及砾石级，粘土含量低

b. 泛滥平原

分选性大部分>2；偏度总是<1，在粒度分布中含细粒尾；过岸沉积物是细沙至粉沙级，其中洪水盆地沉积物是粉沙至粘土级，且粘土含量大

2. 风成环境：

a. 沙丘

分选好（S_o≈1.25，σ_ϕ在0.21—0.26之间）；偏度大部分<1（α_ϕ为0.13—0.30）；通常缺粗尾；垂直层序只有小的变化；中位数大部分在0.15—0.35毫米之间。通常为单众数的粒度分布，但有时也成双众数含，两个分选好的总体，二者相差2—3ϕ

b. 黄土沉积物

分选差；偏度大部分<1，含细粒组分多；中位数通常<0.1毫米

3. 海成环境：

a. 海滩

分选性最好，大多数为1.1—1.23；偏度大部分>1，故属负偏；在对数概率纸上累积曲线有时呈两个跳跃次总体

b. 浅海（潮坪和陆棚）

分选坏，偏度<1，在海外陆棚部分常缺砂级组分

c. 深海（大陆斜坡和深渊平地）

在大陆斜坡为粘土质粉沙，深渊平地是粉沙质粘土，穿插有浊流的粗粒沉积物

4. 冰川环境：

a. 冰川沉积物

分选极差S_o可达5.48，粒度从几微米变化到几米，各种粒度的相对含量变化很大，中位数变化很大；ϕ偏度在零上下，从稍正偏至稍负偏

b. 冰水沉积物

经过水的改造，主要表现在移走一些粉沙和粘土，使较粗物质相对富集。其他和冰川沉积物相似

* 注意，此为特拉斯克偏度公式，非ϕ值的，SK<1属细偏。下面泛谈的偏度，均指SK

通号431

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

第三章　粒度分析在区分沉积环境上的应用

沉积岩的粒度主要受搬运介质、搬运方式、沉积环境等因素的控制。而这些正是沉积环境研究的重要方面。多年来，沉积岩工作者就曾试图用粒度资料确定沉积环境，现已取得一定的进展。然而其中大部分工作是根据当代已知环境的样品进行的；最近开始有人对固结岩石建立环境模式（Glaister等，1974）。我们对陕甘宁盆地侏罗系沉积、以及其他同志对某地中生代砂岩（成治，1976）、下辽河第三系等的研究均曾应用这些粒度区分环境的方法，虽系直接的或加一定修正的根据当代模式，但都能有一定的效果。下面简要地介绍近年来已发表的一些方法。

第一节　根据概率累积频率图区分沉积环境

在详细的研究了沉积物的搬运方式，并对1500多个样进行粒度分析和在正态概率纸上做图后，维谢尔（Visher，1965，1969）得出了沉积物搬运方式与粒度分布之间的关系，以及一些环境的概率图模式。

沉积物的搬运，也称为负载，共有三种方式：悬移或悬浮负载；跃移或跳跃负载；底面推移或牵引负载。

悬移质的颗粒一般很细，约在0.1毫米左右。颗粒粗细的变化取决于介质的扰动强度。悬移质成两种状态存在：1.均匀悬浮；2.递变悬浮。均匀悬浮的悬移质在垂直方向上粒度是均匀一致的，不存在粒度分异的情况。递变悬浮是悬移质和底负载（包括跃移和推移）之间的过渡情况，这部分的颗粒粒级垂直的向下方逐渐变粗，接近河床时与底负载成交叉存在。它们间变化点的粒度变化很大，这种变化反映沉积时的物理状况。

跃移质是指靠近河床的底部层。关于这方面的详情，目前了解得还不够充分。根据现有资料初步认为，其粒度是0.15至1.0毫米或更细些，是在底上2英尺内移动。发现有些纹层沉积物与跃移层的粒度分布情况类似。有些跃移质本身不只是一个粒度总体，而是由两部分组成，如海滩砂。

底部推移质是与前两种物质不同的粗粒组分。因颗粒粗故贴在底面上滑动或滚动。

由于沉积物搬运方式不同，故在正态概率纸上做图时，得出的就不只是一个直线，而为几个线段组成。以海滩冲刷带为例（图3—1），是由悬浮总体B、跳跃总体A及A'、牵引总体C几部分组成。这意味着沉积物的粒度分布并不是由一个简单的对数正态总体所组成。

从上图还可看出用正态概率纸做图的优越性。这种图纸的横坐标是以ϕ、1/2 ϕ、或1/4ϕ为单位；纵坐标为概率值。沉积岩的粒度曲线差不多都是由几个直线段所组成，在这种图上易于看出代表分选性的斜率、各线段间的截点、混合度等，而且频率曲线的尾部在

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

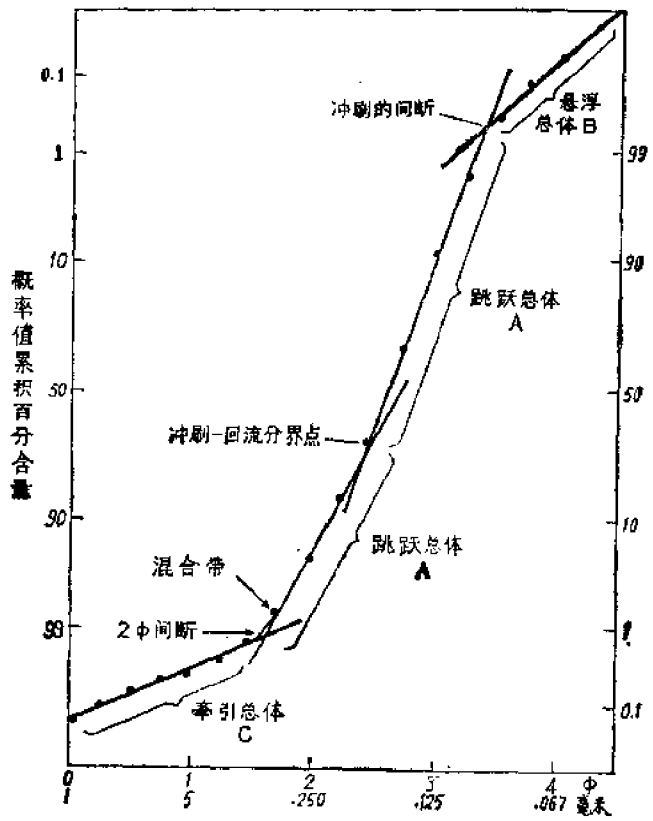


图 3—1 搬运方式与粒度分布总体和截点位置的关系

C与A′间有一混合带

这种图上也成直线，便于比较和测定。在分析这种图时，最重要的是认识各线段，每个线段在构成时，至少应有四个粒级点控制（指粒级间隔1/4φ者）。另外，各个线段的粒度分布特点，如次总体的存在、粒度区间，百分含量、分选度等在图上都能很清楚地看出来。

根据维谢尔（1969）研究的1500个已知环境的样品，得出以下典型环境的特点：

一、海滩和浅海

共分四个亚类：海滩、砂丘、波浪带及碎浪带。

1．海滩沙 是由三个或四个总体组成。共同的一个特点是，在跃移总体中间有一个截断。形成的原因可能是与波浪的冲刷和回流两种作用有关；但也可能是因来源不同或为不同的粒度分布混合的结果。看起来前者的可能性更大，因为所有的样品都是采自海滩的前滨带。

然而，各样品间还是有变化的。如截点的位置不一定都稳定在2φ位置上，有些在1φ处发生；有些则不存在此截点。另外跃移总体内的中断部位也是变化的，从15%至80%不等。最后，各线段的斜率或分选性的变化也很大（图3—2 A）。

2．沙丘沙 样品取自与海滩附近的沙丘背上。这些沙的特点是跃移区间的两个总体已合并成一个总体了，而且这个总体无例外地占98%的分布，从斜率可看出这个总体的分选是很好的，通常比海滩沙更好些。所有的推移总体与跃移总体的截点都在1.0和2.0φ之

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

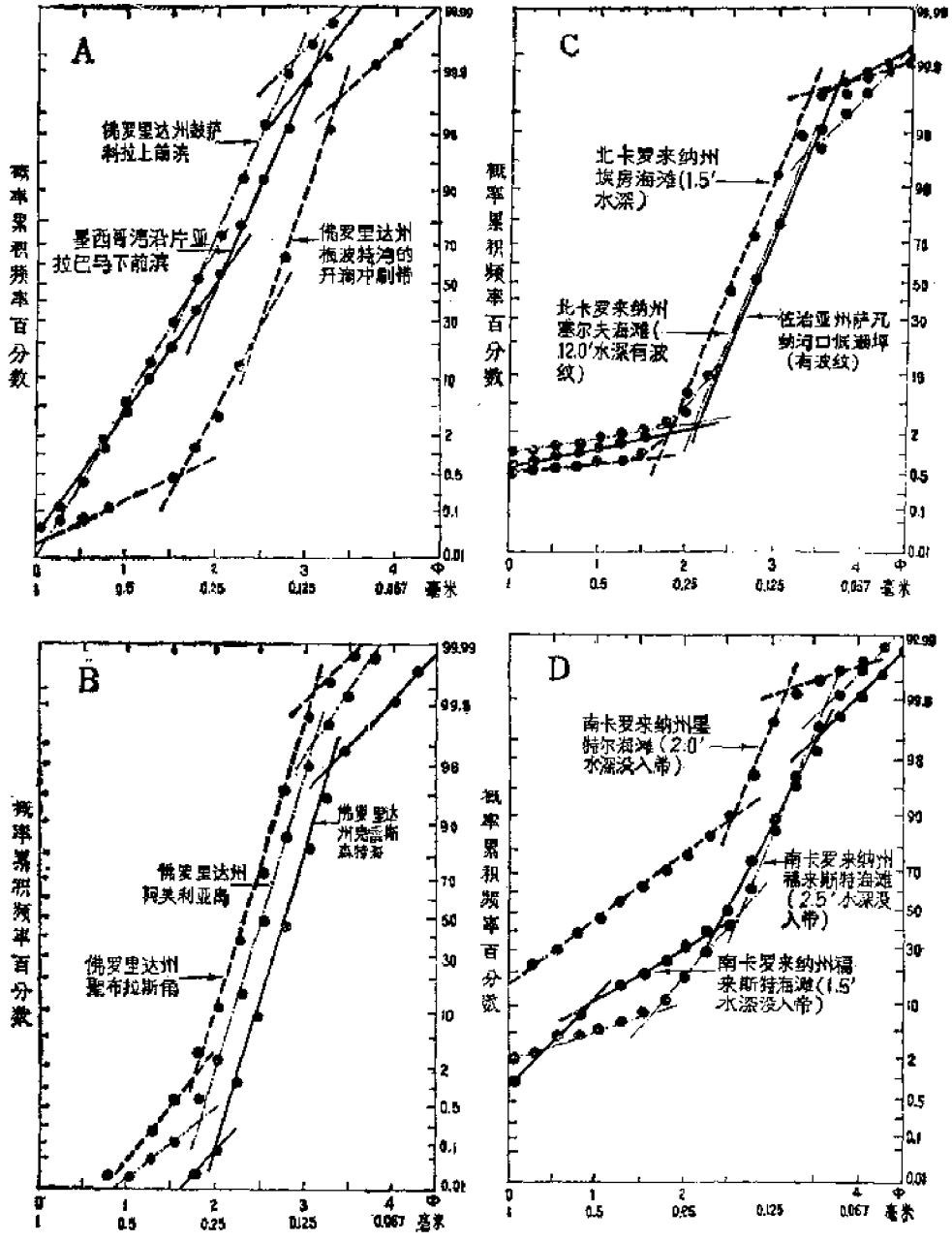


图 3—2　海滩和其他浅海环境的粒度分布图形

A—海滩的前滨及冲刷带；B—海滩邻近地区的风成沙丘背；C—波浪带浅海沙；D—碎浪带浅海沙

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

间，推移总体大部分在0至2ϕ间截断，推移质的数量很小，一般不大于2%。悬移质的存在和推移总体的截断都说明沙丘沉积属正偏的偏度（图3—2B）。

3．波浪带海沙 样品采自低潮坪至水深17英尺处，全部采样地区的沉积物表面都具波痕。所采之样与深度无关。全无例外地发育三个总体；都含不等量的粉沙和泥质；都含一个分选差的推移总体。跃移总体一般分选很好，粒度区间为2.0至3.5ϕ。

这种图形表明的沉积环境特点是，有强烈的波浪簸分作用，因此跃移总体的分选好，粒度区间窄；因为缺乏强流水，故保留了粗粒的推移总体且分选性差；悬浮总体的粉沙和泥质含量不等的原因可能是与物源有关，在入河口或沿岸含泥、粉沙很多时，这个总体的含量高，相反如来源于碎屑岩地区时，这个总体的含量就低（图3—2C）。

4．碎浪带的沙 这种沙的特点是与强烈的水流和波浪作用有关，波浪使沉积界面保持扰动，以致将悬移质筛分出去，因此这个总体的含量较少。跃移质是一种间歇性的，取决于波浪的位置及水流的方向和大小，使得跃移和推移总体之间存在着混合。另外这种海沙的特点是含较多量的推移总体，其含量取决于源区和波浪的状况，分布区间从百分之几至80%（图3—2D）。

二、三角洲和河口

样品主要取自密西西比河三角洲及奥尔塔马霍河河口。得出的粒度分布情况变化大。一方面，当所处三角洲或河口的具体位置不同时，得到的曲线形状不同；其次，入海河流的性质对曲线形状也有影响，如密西西比河三角洲含大量粉沙和粘土，因此悬移总体发育；最后，水流的强度也影响曲线的形状。在奥尔塔马霍河河口所设12小时采样站，每隔2小时取一次样，取满12小时，样是取自底上几厘米深处的沉积物，以便能代表采样前短时间内的物理状况。结果发现，在最大流速时只存在一个粒度分布总体，而低流速时是出三个总体组成。

密西西比河三角洲上各种环境表现出的粒度分布特点为：

1．滨线（图3—3A） 包括滨线上的天然堤或支流河口沙州样品。具有海滩前滨的双跃移总体的特点，并且含较多的粉沙和粘土沉积物，这可能是与密西西比河本身含悬移质高有关，也可能是因三角洲滨线上波浪能较小之故。

2.支流河口沙洲（图3—3B） 与以前描述的浅海波浪带沙的粒度分布类似，有时含相当量的悬移质，含悬移质多的原因同上述。

3．天然堤（图3—3C） 特点是，由基本上单一的悬移总体组成，粒度普遍较细。天然堤沉积是由悬浮物质沿支流两侧，因流速突然减低而急速沉积造成的。在海湾的急速沉降区也发现过这种单一总体。

4．支流河道（图3—3D） 主要由两个总体组成，一为悬移；一为跃移。跃移一般为2ϕ区间；跃移与悬移总体的截点在3.0—3.75ϕ；悬移质的含量在20%以内。

奥尔塔马霍河河口各种环境的曲线形状为：

1．潮三角洲（图3—4A） 样品采自潮三角洲区内深10至40英尺的滨外海沙。其曲线形状与浅海的形状类似。图内三个样品是取自潮三角洲上的不同深度和不同位置。共同表现了以下特点：a．跃移总体的粒度区间窄、分选很好；b．跃移和悬移总体的截点较细，通常近于3.5ϕ；c．推移和跃移总体之间的截点也很细，通常近于2.5ϕ。一般认为以上特

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

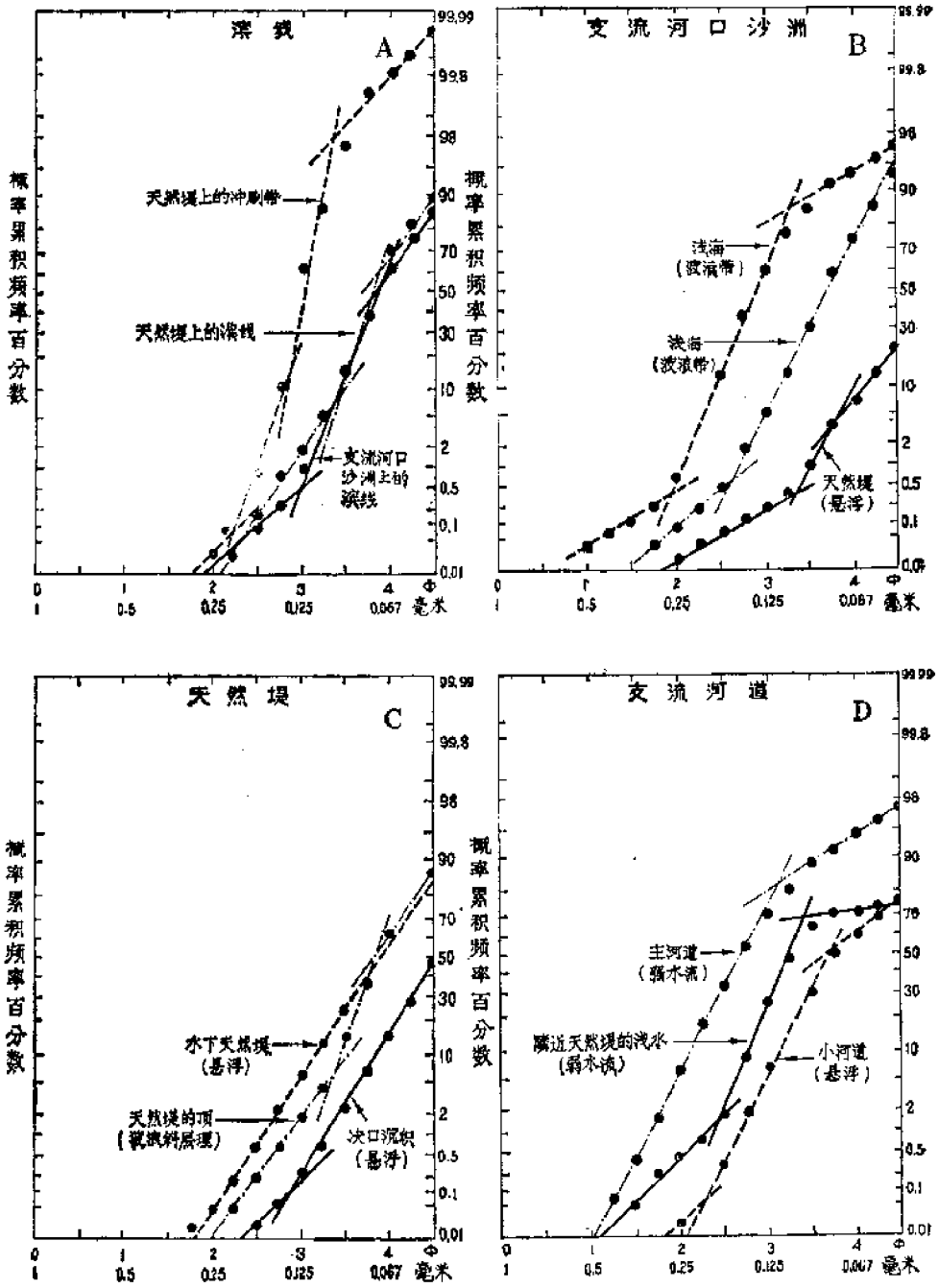


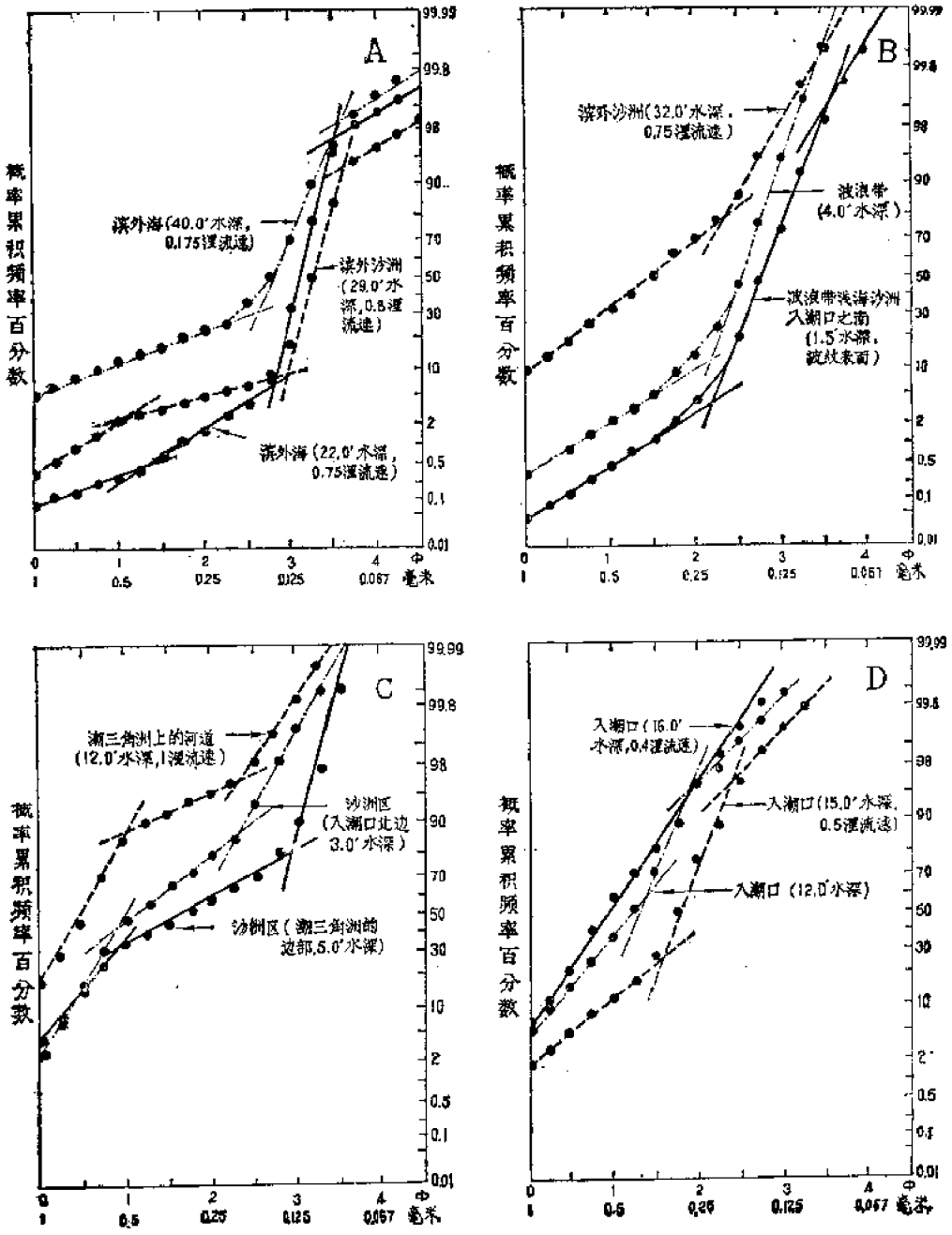
图 3—3　密西西比河三角洲上各种沉积环境的曲线形状

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

点是对称波纹沉积物的典型特征。曲线形状的变化是与所处三角洲上的位置及接近碎屑来源的情况有关，靠近河道时，推移总体含量更大而悬移总体含量较少，这是与水流及波浪活动较强有关。

2．潮三角洲外的沙洲沙（图3—4B） 其环境特点与海滩水下没入带（图3—2D）相似，可看出拍岸浪的活动。特点是：a．含一个发育很好的跃移总体；b．含大的推移总体，它与跃移总体在2.0及2.25 ϕ之间相接。和海滩没入带的推移总体含量相近或更高。以上特点说明其与邻近的海滩没入带的特点类似。

3．波浪与潮流相互作用带（图3—4C） 每个曲线都含三个总体。其特点为：a．悬



PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

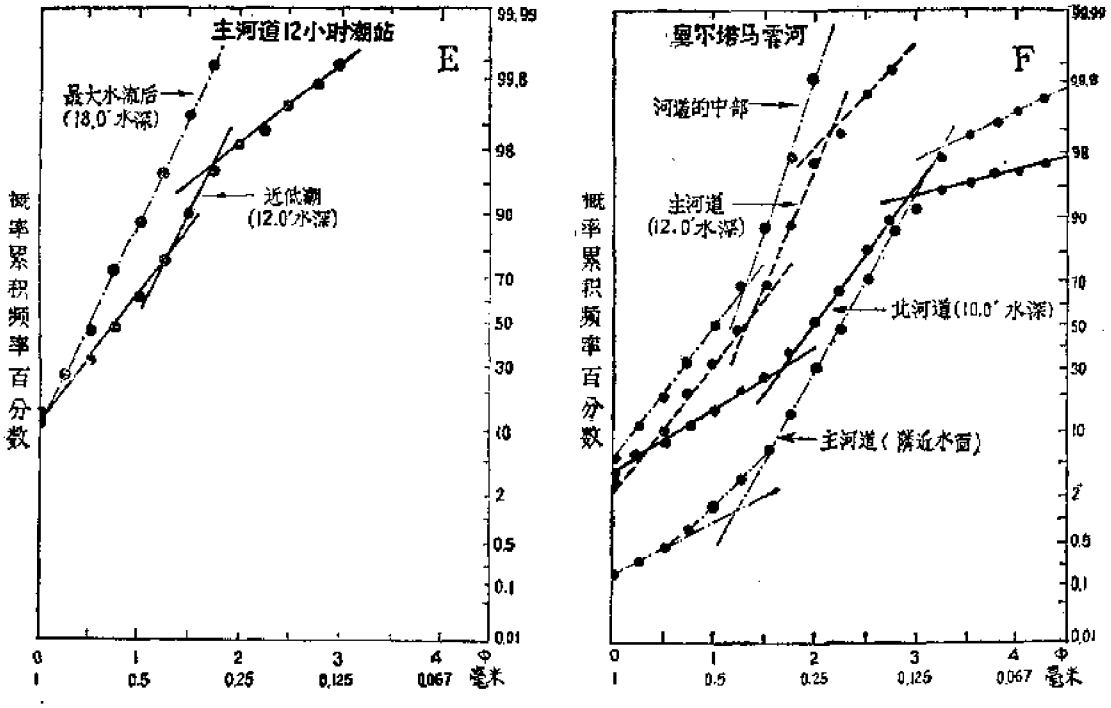


图 3—4 河口各种环境的粒度分布曲线

A—潮三角洲；B—潮三角洲外的沙州；C—波浪和潮流相互作用带；D—入潮口；E—主要河道12小时潮站；F—奥尔塔马霍河

移总体在细端上被截断，其粗端在2.5至3.5ϕ之间被截断。粒度区间较窄。比起其他成因的分布，粒度显然粗些；b.跃移总体分选差且粒度区间宽，其粗截点在1.0ϕ—2.0ϕ，说明是属扰动强的递变悬浮沉积物； c. 推移总体粒度区间宽且分选较好，说明水流较强。

4. 入潮口（图3—4D） 基本上形成三个分选中等的总体。特点为：a.悬移总体含量2—5%，粒度区间分布在近 2.0ϕ至 4.0ϕ之间；b. 跃移总体分选好，存在于一个很窄的区间内(1.5ϕ—2.0～2.5ϕ)；c. 推移总体分选也好，含量为20—70%，与跃移总体在1.5ϕ处接合，并且在近－1.0ϕ处截断。从此图上可看出推移总体的分选性与所处入潮河道内的位置及底流的速度有关。当流速进一步增大时，推移总体全部变成跃移总体。12小时潮站样品上也见到同样的情况（图3—4E）。

5. 流速较低的奥尔塔马霍河（图3—4F） 含两种曲线形状：1．与下面将描述的河道曲线形状类似，如右方的两条曲线；2．与图3—4E描述的曲线形状类似。前者是存在于低流速的浅水中；后者主要受水流及潮活动的作用。这两类曲线的区别，好像是与所处的河道位置有关。同时悬移总体的中断位置及跃移总体的斜率均受流速的控制。而推移总体的保证，似乎与潮的活动比与水流状况的关系更为密切，它是当潮活动时底流方向改变而集中于河口的，因此这个总体可代表潮的活动。

三、河流（图3—5A、B、C*、D*）

当代河流沉积的粒度分布曲线大致有以下特点：a．具发育好的、含量可达0—30%

* 据成冶，某地区白垩系中的冲积相，地质科学，1976，No. 3。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

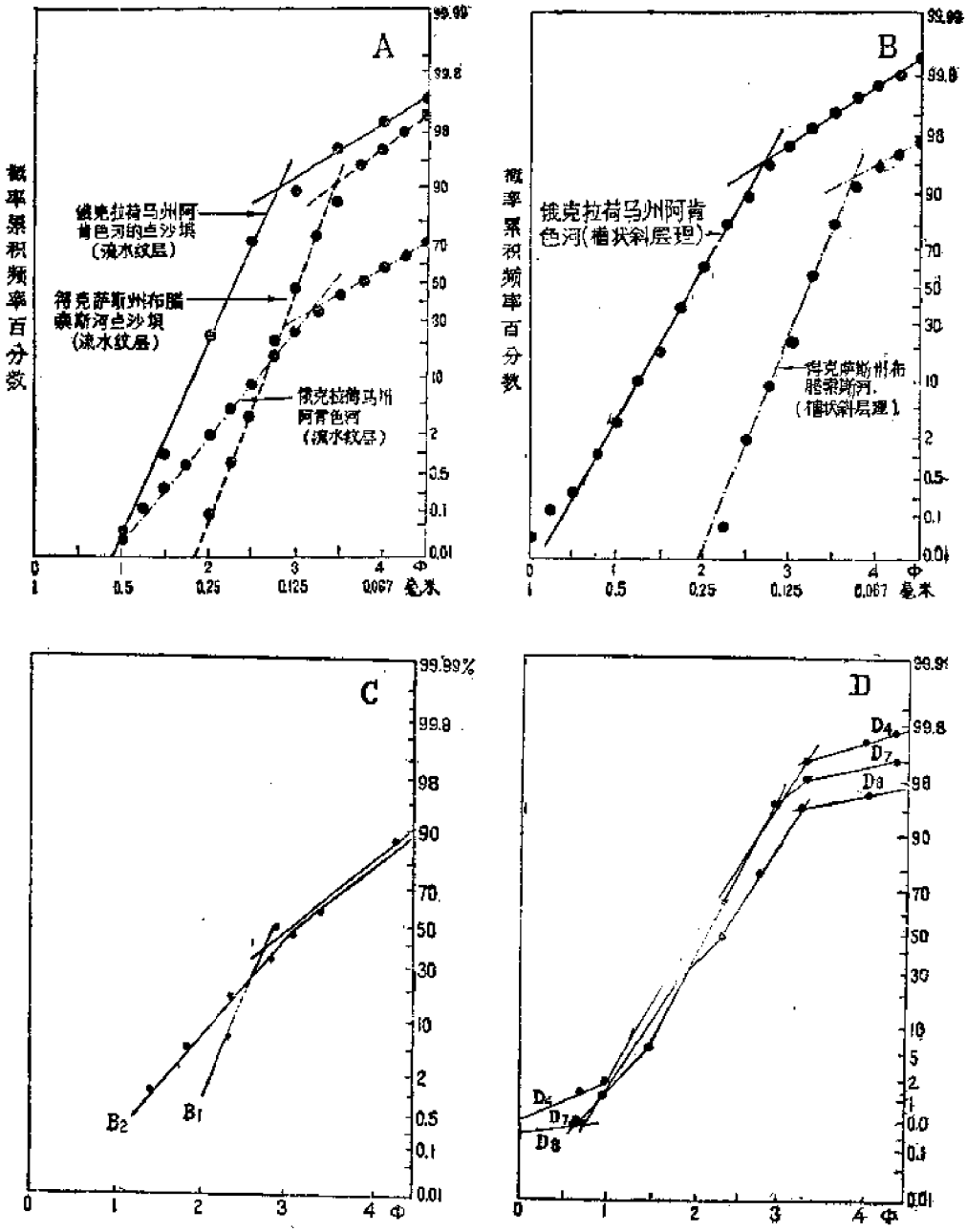


图 3—5　当代河流的粒度分布曲线

A—流水纹层；B—槽状斜层理；C—沱江洪家坝；D—沱江莫家坝

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

的悬移总体；b．悬移和跃移总体之间的截点在2.75—3.5φ区间内；c．跃移总体的分布范围是1.75—2.5φ；d．跃移总体的斜率或分选性为介于波浪及回流带的高达60°、70°和悬移总体的50°之间，多在60°至65°的范围内；e．普遍缺乏推移总体，如果有，也比1.0φ粗，这个总体主要受源区的控制，并且常是在河道的最深处发育。

四、湖　泊

当代湖泊的粒度分布资料虽然不少，但缺乏系统的归纳。原中国科学院兰州分院曾对青海湖作过研究，入湖河口的粒度分布与河流型的相同。而浅湖、滨湖的沙、粉沙粒度分布形状则完全不同。总之，湖相沙的分布特点还不是很清楚的。

以上各环境的模式均系根据当代沉积物得到的。目的在于利用它们来确定古代环境。根据维谢尔（1969）的工作及我们的工作，均证明这些模式对鉴定古沉积环境是有参考价值的。然而维谢尔认为古代和当代的粒度分布特点间，特别是和固结岩石是有区别的。主要是古代样中总是含有细于44微米的部分。这可能是从孔隙中下沉的细粒部分；也可能是成岩后生过程中细粒化的结果。总之，成岩后生变化强烈的岩石，在人工松解后，其粒度情况失真是不能不考虑的。做薄片粒度分析时，因系在显微镜下直接观察，可以不测量石英的次生加大环。对易碎的颗粒如长石，只要轮廓清楚，也可取得视直径值，细粒物质可用较大的放大倍数尽可能详细的观察，这些都是其比筛析准确的地方。

另外，古代岩石粒度分析有更重要的特点，即可以根据粒度情况来研究历史上环境的变迁。当代样品属短暂刹那的产物，是无法根据它们了解此点的。为此目的，可在剖面的垂直方向上按一定间距取样，同时记下其他成因特徵及流向，以便参考。还可在相邻地区的剖面上平行的取样，以作对比。分析并做图后，可以综合地研究剖面上各曲线的平均值、方差等参数以及曲线的斜率、截点位置、混合度等的系统演变情况，从而了解随着地壳构造运动加强或减弱，沉积环境的变化情况。

古代岩石做出的曲线形状，也有一些是当代没有或根据当代的模式不好解释的。形成这种情况的原因很多，主要有以下一些：1．当代采样的环境还不够全面，如湖泊、沼泽、山麓等大陆环境没很好的建立模式；2．当代的样品只代表短暂的地质时间，而古代包含了全部历史演变的情况，比当代要复杂得多；3．成岩后生作用的影响有时严重的歪曲了曲线的形状；4．古代岩石也可能属二轮迴沉积，是受过改造的产物，因此环境特征不明显；5．也可能是因分析方法不同之故。当代沉积一般用筛析法，古代固结岩石则常用粒算的薄片分析。遇到这种情况时，只能结合其他成因标志综合研究，并尽可能的解释。今后对当代环境应更广泛的建立模式。对古代岩石，特别是薄片粒算法的资料，也应建立更多的模式。古代岩石粒度曲线在解释环境上比较成功的是在河流、浅海及浊流几方面。下面介绍其概况。

五、古河流沉积

曲线的形状和当代河流的极为类似（图3—6），成明显的两段，截点在2.75至3.5φ之间，悬移总体含量由2%至30%，通常缺乏推移总体。这是维谢尔（1969）根据300个古代样得出的结论。与当代沉积比较，也有一些不同，如跃移和悬移的截点以及跃移体的斜率等，这可能是与样品所处河道的位置不同有关。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

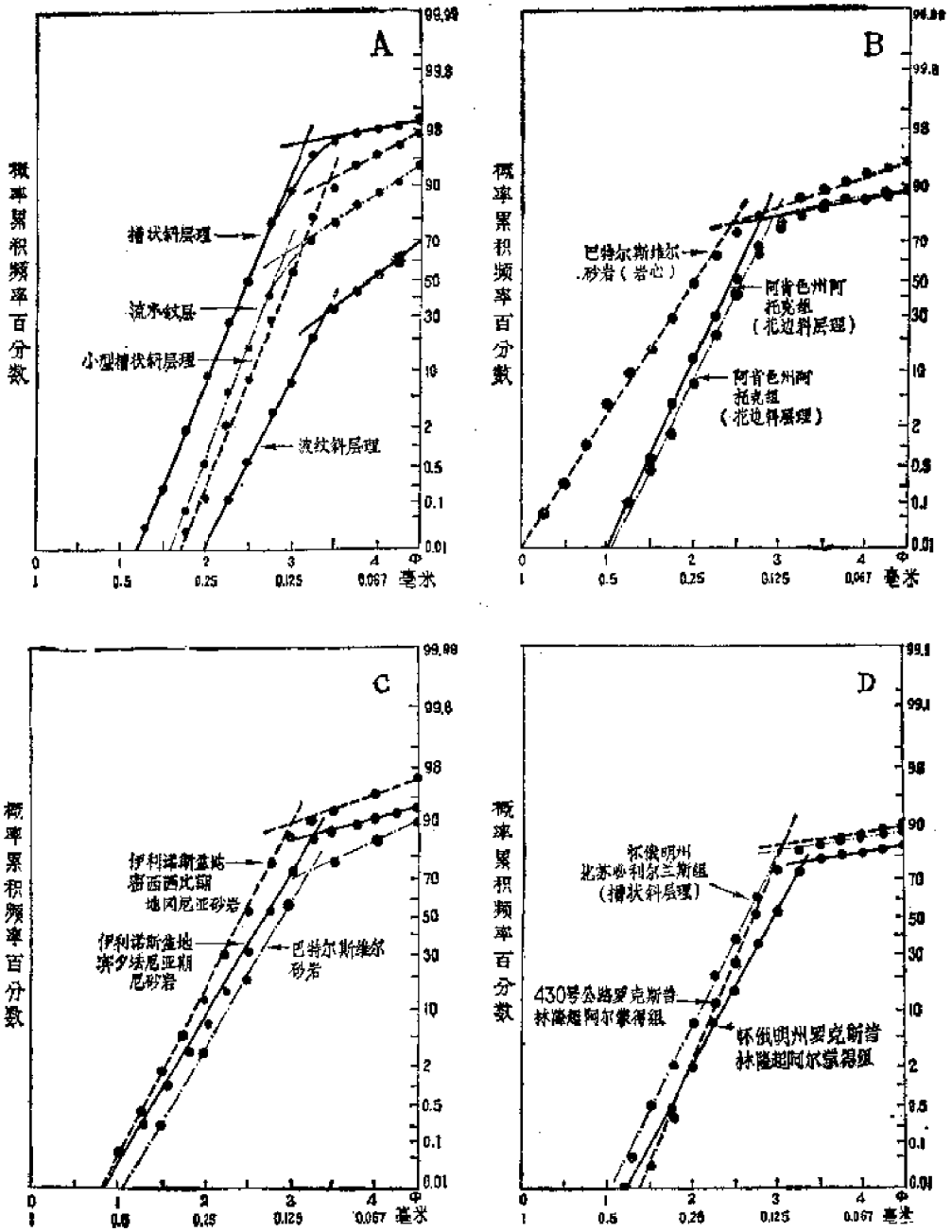


图 3—6　古河流沉积的粒度曲线形状

六、古 海 滩 沉 积

古海滩类型曲线不如河流类型发现得多，可能是因为没有保存下来或在成岩后生作用中改变了分布的特点。维谢尔所发现的一些海滩砂岩（图3—7）均具两个跃移次总体的特点，但有些样品含较多（达10%±）的悬移质，这可能是因成岩后生作用中细粒化造成的。我国贵州泥盆纪砂岩，很多具2个跃移次总体的特点，代表海滩成因，也有具沙丘砂及河口砂图形的。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

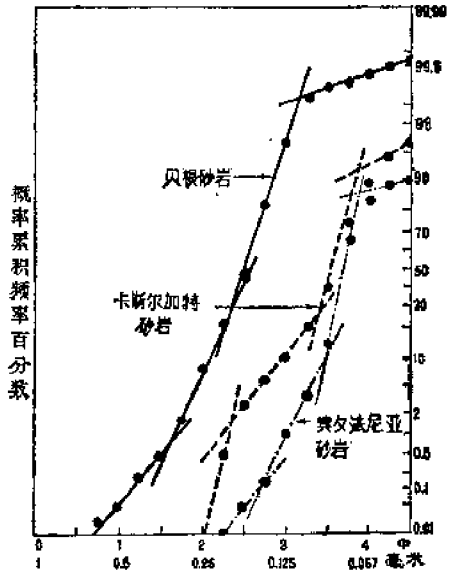


图 3—7　古海滩砂岩的粒度分布曲线

七、古 浊 流 沉 积

当代浊流沉积由于各种限制，未见粒度分析工作成果发表。然而，有关古浊流沉积的研究则很多。它的粒度分布特征不仅易于辨认，而且能清楚地反映沉积环境。其曲线特点为：

1．粒度区间宽。这是因水流的密度、速度及搬动物质的粒度变化大的原故。

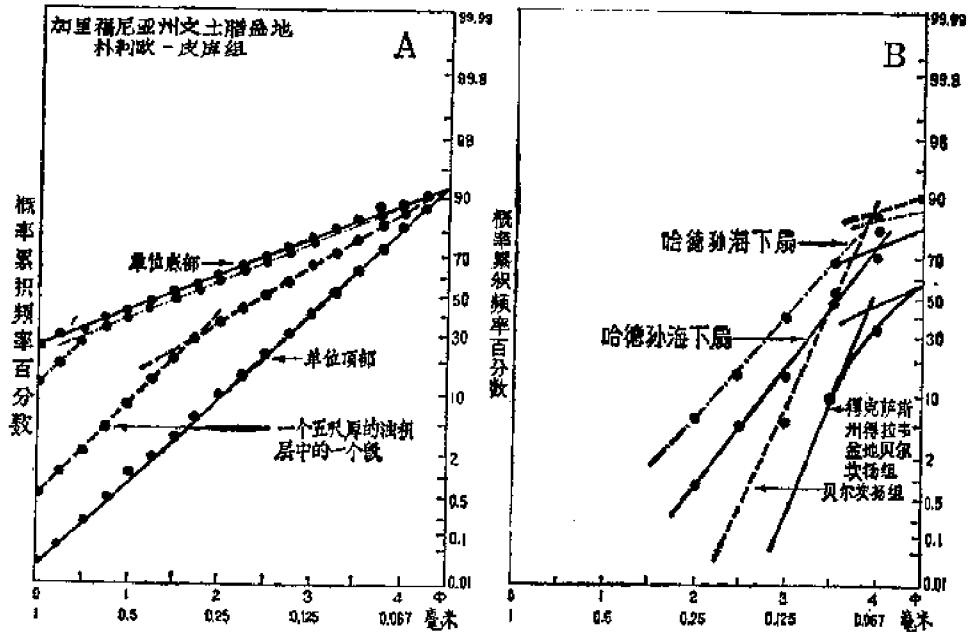


图 3—8　A．浊流沉积的粒度分布曲线，美国加利福尼亚州文土腊盆地朴利欧皮库组递变浊积岩；　B．海下扇沉积，表明当代(哈德孙海下扇)与古代（德拉韦盆地贝尔坎扬组）曲线的相似性

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

2．悬移总体大且分选差，同时包括粘土、粉砂至1毫米的粒度，截点可达1.5至0.01ϕ。

3．同时还存在一个更粗的总体，分选稍好，可能代表跃移总体。

浊流沉积是一种密流沉积，为密的混浊大群迅速的移下大陆斜坡沉积而成。关于它的搬运物理性质还不十分清楚，是否有跃移或推移搬运方式尚不很清楚。例如文土腊盆地的递变浊积层，粒度向上的方向变细（图3—8A）。

海下扇砂的分布曲线不同于上者（其特点是具分选好的跃移总体，同时与悬移总体之间有混合作用（图3—8B）。

大陆沉积的洪积物，特点有些像浊流沉积，粒度分布曲线的分选很差，斜率低。

第二节　粒度象的研究

帕塞加（Passega, 1957,1964）选择了一些与沉积搬运有密切关系的粒度参数，如

C：百分之一含量的粒度；

F：小于125微米组分的重量百分数；

L：小于31微米组分的重量百分数；

A：小于4微米组分的重量百分数；

M：中位数，即50%的粒度；

以C对M、F对M、L对M和A对M分别地作成所谓的C-M图、F-M图、L-M图以及A-M图。这些图均以M值为横座标，单位为微米；C、F、L及A分别为各图的纵座标，其中C的单位为微米，而F、L及A的单位均为含量百分数。C-M图是在双对数纸上作的图，其他图一般都是在单对数纸上成图（如图3—9）。前者表征样品的粗粒级组分，后者表征样品的不同的细粒组分。这些图的特点结合起来共同反映了整个沉积物全部样品的总面貌，这个由所有样品的粒度参数所构成的图象，帕塞加称之为沉积物的粒度象，并认为它可以说明沉积物的搬运介质状况、反映沉积环境以及沉积盆地的活动性等等。

一、C-M图

帕塞加在1957年讨论了C-M图之后，于1964年又分析了代表很多地区、各地质时代的上万个样品，发现C-M图与沉积搬运作用密切相关，可以提供关于沉积物的水动力状况资料。

一般搬运沉积物的水流有两种，牵引流和浊流。河流、海流及触底的波浪属牵引流，存在于海底大陆斜坡或海下扇的混浊密流属浊流。

牵引流和浊流所做的C-M图的形状不同（图3—9B及3—11）。牵引流的综合C-M图是根据密西西比河按深度间距取样并结合其他地区的C-M图做出的。此C-M图被N、O、P、Q、R及S各点截成几个区段（图3—9B）。

1．**NO段**　代表分选好的粗粒滚动沉积物，C值一般＞1毫米，构成河流的沙坝

2．**OP段**　代表滚动物质增加情况下，滚动和悬浮物质的混合，C值改变将严重影响M值的变化。

3．**PQ段**　代表悬浮沉积和小比例不影响中位数的滚动颗粒。这段中常缺乏500—1000

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

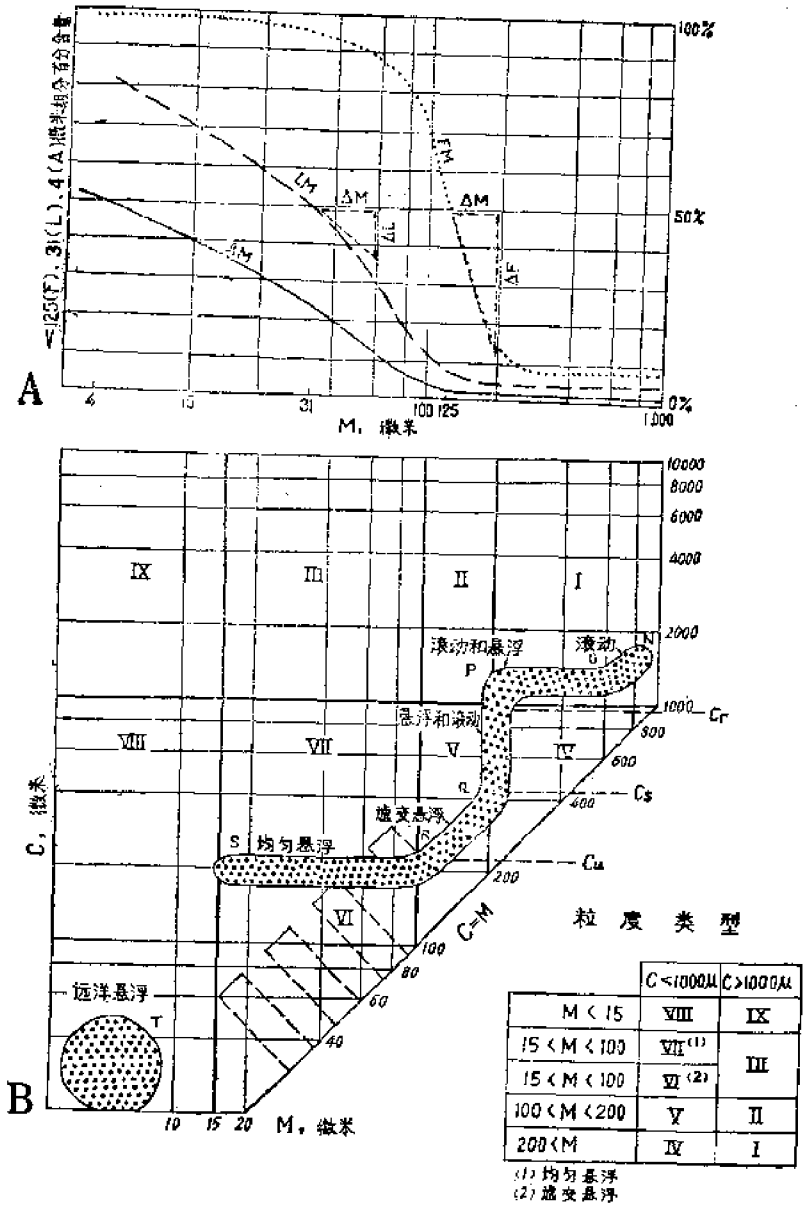


图 3—9 粒度象和粒度类型

A—F-M、L-M及A-M示意图；B—牵引流的C-M图及粒度类型

微米的粒级。这一粒级间隙代表那些成递变悬浮嫌粒度太大，而成滚动又嫌粒度过小的粒级，表明由紊流转变成推移搬运的转折点情况。同时，当紊流减弱时，这个间隙增大。

以上OP、PQ所代表的悬浮沉积物和各种比例的滚动物质混合的沉积物在自然界中是常见的。一般滚动颗粒是与递变悬浮物（QR段）一起搬运，但也可和均匀悬浮物（RS段）一起搬运。滚动颗粒比水流的速度低，悬浮物则绕之而过。当悬浮的沉积作用小时，滚动颗粒即可无阻地搬运长距离，如有些砾石沉积物距源区远达千公里。然而在悬浮沉积作用强烈的地区，滚动颗粒即被埋在悬浮沉积物的下面保护起来，因此，这些颗粒在靠近大量沉积作用的边缘，即与最粗的悬浮物共同存在。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

大于1毫米的颗粒在沉积物中的存在是有成因意义的，因为它们只能在最扰动的情况下才成悬浮搬运，故可以设想它们从源区至最后的沉积环境都是成滚动搬运的，而且沿途的悬浮沉积作用不大。对大于1毫米颗粒的分布界限作图，可以帮助了解古盆地的沉积环境，在分布界限的上游区，悬浮沉积作用不大，不能填埋持续滚动的颗粒。

4．**QR段** 为递变悬浮区。在河底的上面，沉积物一般成悬浮状，特点是粒度和浓度向上方规则地下降。根据密西西比河某地的资料，此段一般厚2米，浓度为1—8.5克/升，大致相当第一节中所谈的跃移质。帕塞加并且还认为用递变悬浮比常用的跃移质名词更好，因为颗粒在底上2米高度的水中能跳跃分选是难于理解的。因目前对这两个名词的意义的看法还不统一，故我们暂时保留这两个名词，未做统一。帕塞加认为递变悬浮是受底部摩擦所引起的紊流控制的，紊流愈强时，悬浮的颗粒愈粗；当紊流减弱时，开始了沉积作用。递变悬浮沉积物的一个最大特点是C和M成比例的增加。因此可以假定那些C是和M具有严格比值特征的沉积物是由递变悬浮形成的。由于其成比例地增加，此段内的各样品在累积曲线上成中部互相平行的直线，并且F-M、L-M曲线的中部也成直线且与累积曲线平行（图3—10A）。当代盆地中常见的河流及浊积岩常具这种特点。递变悬浮物受底部紊流控制，被紊流举起进行分选，这可由其中常含的凹槽、沟模、负载模、斜层理、波纹等底流构造所证实。

递变悬浮的最粗粒径C值很少＞1毫米；而中位数＜100微米时，往往在C和M之间就不成比例的增加了。虽然递变悬浮大多数是由最粗的悬浮物组成，然而它也可以捕获一部分细粒物质。

5．**RS段** 为均匀悬浮。一般位于递变悬浮之上，厚度也较其大，但浓度则较小，而且在垂直方向上浓度和粒度均匀一致。密西西比河某地的均匀悬浮最大浓度为3.5克/升，有10米厚。但密西西比河有时可以不存在递变悬浮段，均匀悬浮直接与河底接触。因均匀悬浮在C-M图上的RS段的C值是常数，而只M值变化，故累积曲线的形状成一系列的凸形，F-M、L-M曲线的形状也大致相同（图3—10B）；一般均匀悬浮的粗粒组分分选好，随着M值变小而分选性变差。

递变悬浮和上覆的均匀悬浮物之间界限是变化的。如果流速不变，但悬浮物的浓度增加时，均匀悬浮的最下部分即转变成递变悬浮物；反之亦然，如果浓度不变，速度降低时，可以得到同样的效果。因此当底流速度逐渐变低时，均匀悬浮可以转变成递变悬浮而发生沉积，但非直接沉积。然而有些地区如当代亚德里亚海深230米处，底流就十分微弱，沉积物为泥质粉沙岩与页岩的互层，页岩中含深水动物群，粉沙岩成块状未发现任何沉积构造。认为这种沙质沉积物是均匀悬浮沉积，未经底流的分选，是由表流和中间流搬运一定距离后，经过底部水直接沉积，而不是经过递变悬浮阶段而沉积的。它最初沉降的是粗颗粒粉沙的、随后粉沙的含量减少，细屑物质增加，这时C-M图的C值不变而M值改变；C值颗粒的含量与F（＜125微米的颗粒）的百分含量相比，反而下降。

均匀悬浮的最粗粒级通常细于250微米。

当代的均匀悬浮沉积有河床内的隐蔽区、泛滥平原，海的近岸泻湖及很细的波浪沉积物。某些海槽沉积亦属均匀悬浮沉积。

6．**T区** 远洋悬浮区是最细粒的物质或聚合体，可以由表流搬运至一定的距离。暂认它们的粒度C值＜31微米；M值＜3微米。与均匀悬浮物之间无明显的界限，在海洋陆

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

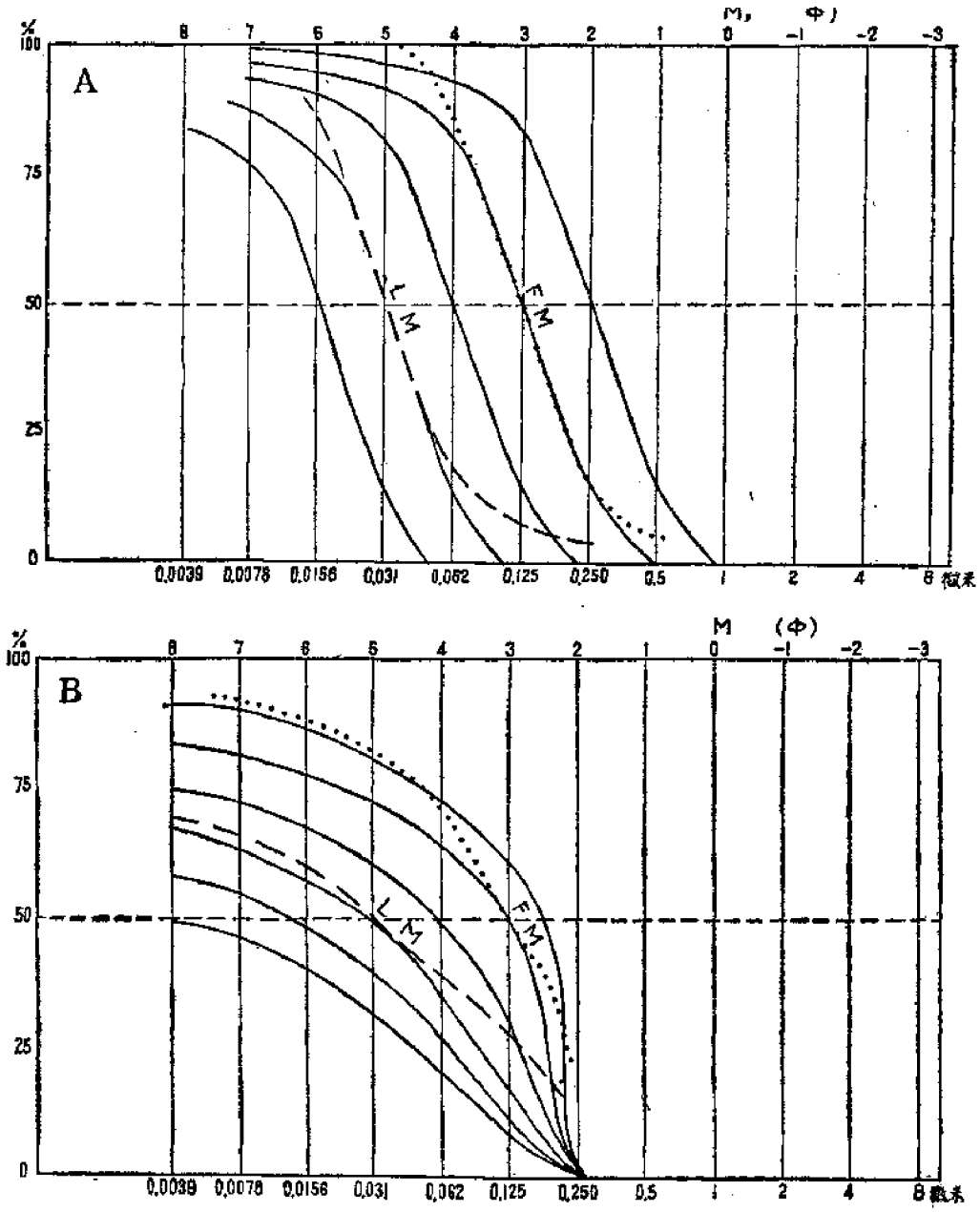


图 3—10　递变悬浮累积曲线及F-M、L-M曲线(A)；均匀悬浮累积曲线及F-M、L-M曲线(B)；实线为累积曲线，点线为F-M曲线，虚线为L-M曲线

棚外斜坡的均匀悬浮沉积中，最细最深（50米）的沉积物亦暂归此类；河流的后沼泽沉积可属此类。

牵引流的C-M图上有几个临界值：C_r代表最易滚动的粒度；C_t代表递变悬浮搬运的最大粒度，为底部最大紊流的指标；C_s代表均匀悬浮的最大粒度，是底部紊流上面水流最大扰度的指标。

不是所有的牵引流C-M图都发育全部区段，有些海湾和潮坪的牵引流C-M图只存在2—3个段。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

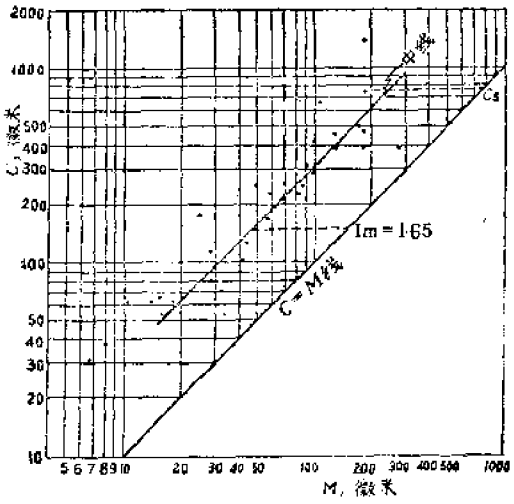


图 3—11　浊流的C-M图

浊流通常在一个限定的时间内非常急速地流动，它们的负载完全是悬移质，在源区附近可以使颗粒滚动一定的距离，如一段时间内较长的距离水流连续，并且流经的是沉积作用不强的地区，颗粒也可连续地滚动。浊流的C-M图和牵引流C-M图的QR段相似，C与M成比例地增加，说明浊流也成递变悬浮搬运（图3—11）。浊流C-M图上样品点的中线（线两边的样品点数相等）距$C=M$线的距离I_m称为最大分选度，代表沉积物，至少是粗粒部分的分选情况；I_m值越小，分选性越好。牵引流C-M图的RQ段同样可测I_m值。在浊流C-M图上一般只有临界值C_r，而无C_u及C_r。

当浊流速度逐渐变慢，沉积物发生沉积之前，悬浮物向水的底部运动，因而密度增加，形成密度层理，密度层理的形成反过来又促进沉积物扰度下降，于是开始了沉积作用。而沉积作用又反过来进一步促进密度层理增加。这种自身促进作用使之形成一悬浮沉积作用体，由于在底上存在的惰性，因而变成一种底上的沙流，直到为阻力所停止。因此浊流形成的递变层并不代表逐次下降的流速所控制的渐次沉积作用，而是反映沉积作用开始时悬浮物的粒度分布情况。浊流形成的沉积物构成所谓的浊积岩。

浊流C-M图上的C_r值代表最大的水流扰度。

二、F-M、L-M和A-M图

很多F-M、L-M、A-M图表明，样品点在图上很集中，因此可用一条线表示（图3—9A）。在图上有相当50%的固定点，分别为125微米、31微米及4微米的M值。三种曲线上F、L、$A=20\%$的M值可以近似地表明分选情况。某些海滨沙分选最好，M值很少低于100微米，它的$F=20\%$的M值接近150微米，这是天然沉积物中测得的最低值，其L、A值几乎为零。某些与浊积岩属同一盆地的浅海砂，由于盆地的活动性强，其$F=20\%$的M值大于400微米，L值大于10%。另外一些盆地活动性不明显的浊积岩，其$F=20\%$的M值为190微米，L是1%。河流的情况介于海滨及某些浊流之间，密西西比河的$F=20\%$的M值为180微米，L和A值几乎为零。

上述各种图均使用了M值，而M值在表征沉积物的最粗及细粒组分上是否有效呢？可以说大部分情况是有效的。首先，与C-M图QR段相当的沉积物，M是C的函数，并且可以看作是仅有的独立变量，因此M值可以表征沉积物的特点；线段RS可以看作很细沙或粉沙与更细的细屑混合物，C值往往保持不变，M值代表这两种组分的混合情况，因此M值也能表征沉积物的特点；如果悬浮物混有滚动颗粒，而且含量少，不足以影响M值时，上述情况仍然有效；如果含量多，影响M值时，这时M值不能表征沉积物的特点，然而可以根据所做的F-M、L-M、A-M图上的点比较分散来认出这种情况。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

三、粒度象的应用

1．判断沉积环境 帕塞加（1957）根据已知环境的当代沉积样品，制定了基本的C-M图形（图3—12）。详细情况见图内的说明。他对于河流的综合C-M图的理解是，PQ段（图3—12的Ⅴ区）样品点一般代表河道沉积；QR段（Ⅳ区）样品点代表水下堤或沙坝沉积；RS段（Ⅰ区）样品点代表河道内的隐蔽安静部分沉积（参看图3—9B）。

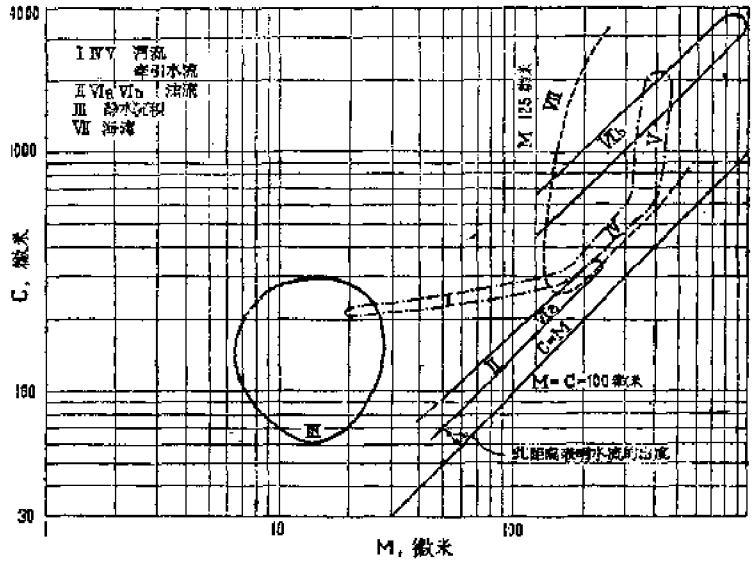


图 3—12 当代沉积物的C-M图基本图形

切斯特和罗伊思（Chester & Royse, 1968）认为递变、均匀和远洋悬浮三部分近似地代表河道底部、泛滥平原及河漫湖和后沼泽沉积。

由于C-M图是很多样品点综合而成的图形，而一般河流沉积多成牵引流C-M图的 S 形，因此可以利用此特点来决定未知环境沉积物的成因。例如我们对陕甘宁盆地侏罗系的一些砂体已根据各方面大量证据（包括岩层层序、斜层理及其他沉积构造，砂体几何形态和分布，岩体等厚线分布，粒度概率曲线、结构参数散点图……等等）确认其为河流相沉积。现据少量现有资料试作了一些C-M图，将其与综合C-M图对比，也同样显示了河流沉积特征的趋势，样品点几乎全部落在河道及沙坝区内（图3—13）。已知还有一些单位和同志作过系统的C-M图分析，由于一些原因，这里没有引用他们的图件，但是，他们的图都说明了对区分沉积环境和解释沉积物沉积特征是有价值的。

当代冲积扇的C-M图形与河流的类似。布尔（(Bull, 1962）通过冬季多雨季节后对几个冲积扇进行研究，发现属牵引流、泥流及二者之间的过渡类型（图 3—14）。其牵引流C-M图缺乏RS段，PQ 段的下限是1500微米，＞1500微米的沉积物代表牵引移动，为河道沉积。QR 段内的样品代表浅的网状河、面状水流以及大河河道内的沙坝沉积。这部分线段大致与 $C=M$ 线平行，因此 C 和 M 成比例地增加，C 与 M 值接近说明分选好，至少是粗粒部分分选好，这部分的有些沉积物和滨海沉积物分选一样好。

图 3—14 上方的长条状图，近于与 $C=M$ 线平行，但 I_m 值较一般浊流的要大，它代表分选差的泥流沉积；较小的 C 和 M 值代表更为流动性的泥流沉积物。泥流的分选很差，

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

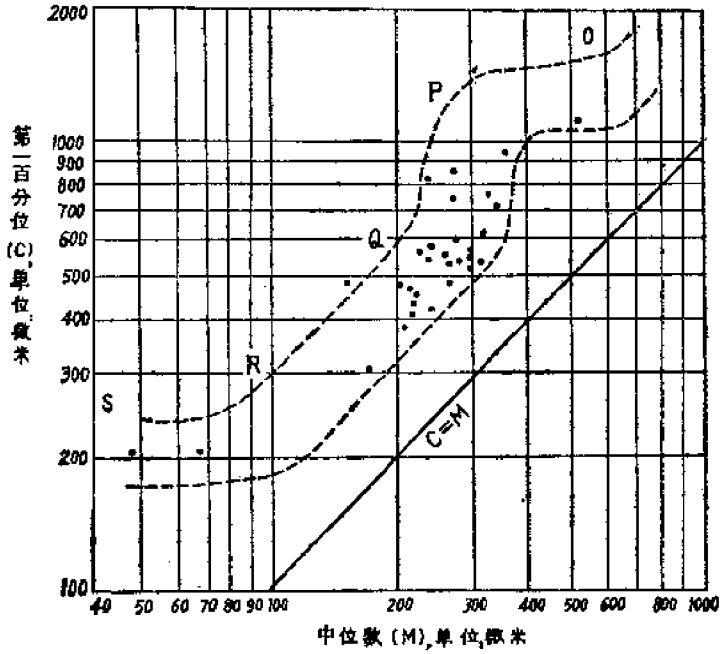


图 3—13　陕甘宁地区侏罗系延安砂岩的C-M 图

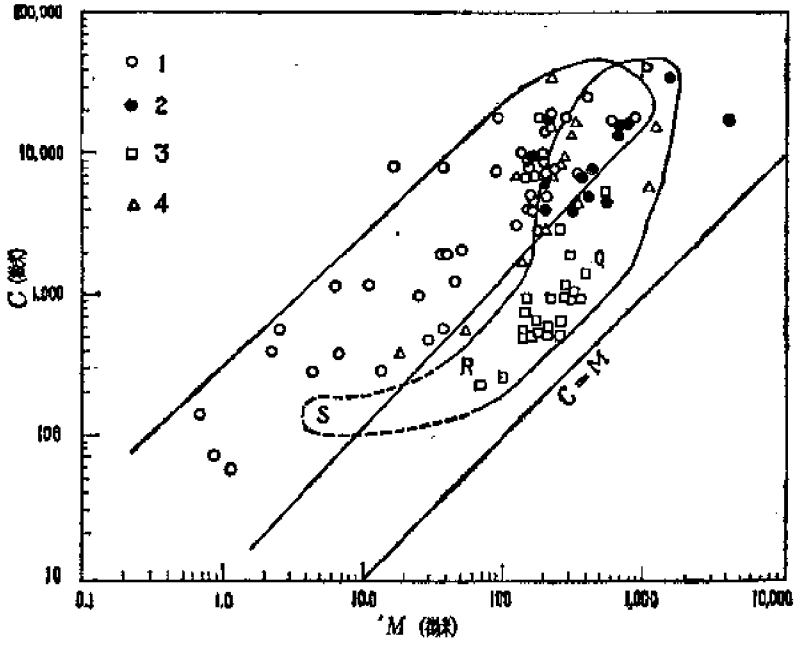


图 3—14　冲积扇和泥流沉积的C-M图

1—泥流沉积；2—河道沉积；3—网状河沉积；4—泥流和牵引流搬运的过渡沉积

S_o=2.5—5.0；ϕ 标准差 σ_ϕ 是4.1—6.2；ϕ 四分位标准差 QD_ϕ 是2.3—4.7。可以看出，泥流C-M图与浊流C-M图的基本图形相同，这是因泥流的沉积机制与密浊流类似。而且无论是泥流或浊流，其本身的区别是密度和分选性的区别。浊流图中线上的样品点，其 C 值是2.3至4.2倍 M 值。而沿泥流C-M图中线上的点，C 值是40至80倍的 M 值，这说明泥流较浊流基本C-M图有更大的密度或来源物质粒度变化更大。因此推测，更粘稠浊流的密度和

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

分选性可能与泥流类似。

上述之山麓冲积扇并未发现含砾石、卵石或块石等更能说明环境的粗粒物质。这可能是与来源区的物质本来就细，胶结又不紧有关。

艾农和沃克（Eynon & Walker, 1974）做了某地更新世冰水沉积砾岩网状河的C-M图，并划分了微相（图3—15）。与帕塞加的基本图形比较，发现它虽也呈S形，但与基本图形的S形位置不同。该作者认为帕塞加图形上滚动和悬浮的弯曲应取销，同时对这种双众数很发育的沉积物还应同时做其他的粒度分布图并研究沉积构造才能更好地了解它的沉积搬运方式。

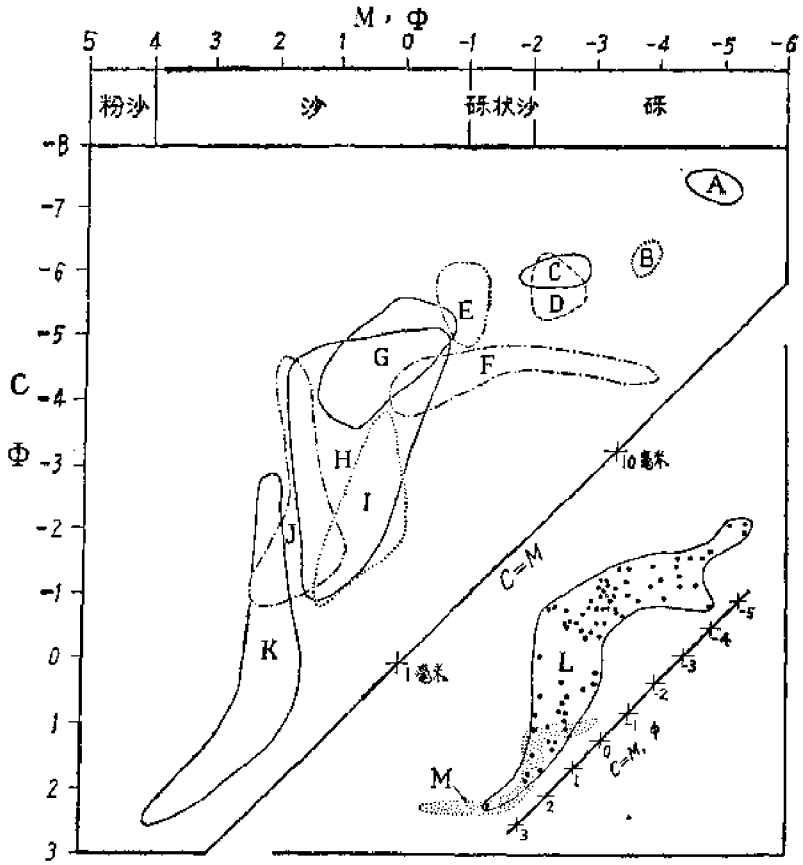


图 3—15 冰水砾石各微相在C-M图上的分布（上图）及总分布与帕塞加基本图形的比较（右下角）

A—坝核心砾石；B—坝前缘砾石；C—坝背砾石；D—坝顶砾石；E—浅网状河充填沉积物；F—浅网状河板状斜层理；G—坝背斜层理；H—边河槽状斜层理；I—坝前缘沙；J—浅网状河沙；K—边河的平行及斜纹层沙；L—总分布；M—帕塞加的基本牵引流C-M图

2．估计古海深 在深度<100米的浅海上波浪是主要的搬运营力，同时，波浪在海底往返运动乃是一种牵引流，其形成的沉积物也形成牵引流C-M图形。当海深加大时，波浪的活动减弱，最大扰度指数C_1应是海深的指数。盆地越深，C-M图的C_1值越小。这个设想已在意大利北部上、中新世沉积中由鲢科生态提供的海深所证实。在图3—16上鲢科所代表的深度截线间连一条线就得到C_1和海深的关系。此线只能提供近似的海深，因为暴风雨时的最大波浪大小在不同地区不同时代是不一样的。因此，对别的地区和时代只能提供海

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

深的相对值。

波浪沉积的C-M图上同时还存在有C_n和C_r之间的关系。在不知道C_r值时，也可以用C_n值来估计相对海深。但需要注意如果全部粒度都呈均匀悬浮搬运的话，则C_n只是代表均匀悬浮的最大扰度而已，并不一定能用来估计水深；然而可以设想，如果C-M图上表明沉积物中含一部分粗到能成递变悬浮时，则还是可以根据C_n来推断海深。

为了检验当代海洋沉积物是否符合C_r与海深的关系，曾在亚德里亚海不同深度（10—50米）取了250个样，按深度（10、15、20、25、30、40及50米）做了7个C-M图（帕塞加等，1962）。40和50米的图是典型的页岩图，最大C值分别为64及62微米。其它图全为均匀悬浮搬运的沉积物图形。没有递变悬浮沉积物。因此只能利用C_n值来估计水深。结果发现每个图的C_n值在深度从10米增加到30米时有规则的减少。但与海深关系和图3—16的表现不同，总的C_n值比图3—16的要低些，这与当地河流供给的物质普遍较细有关。如上所述，在这种情况下，C_n是不能直接用来做深度指标，只能了解相对的深度变化。

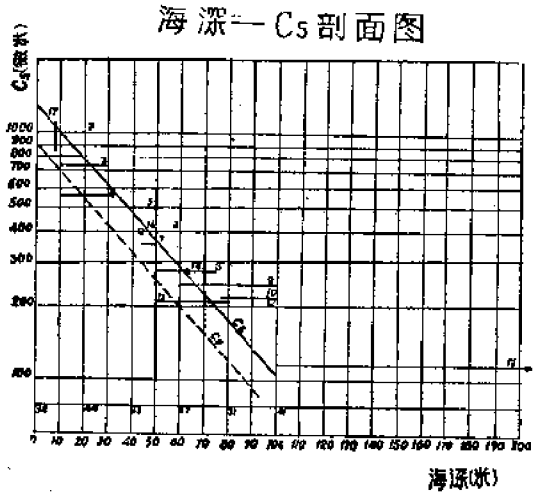


图 3—16 C_n—海深图

横截线代表采样组，并表示根据鞭科生态确定的深度间隔

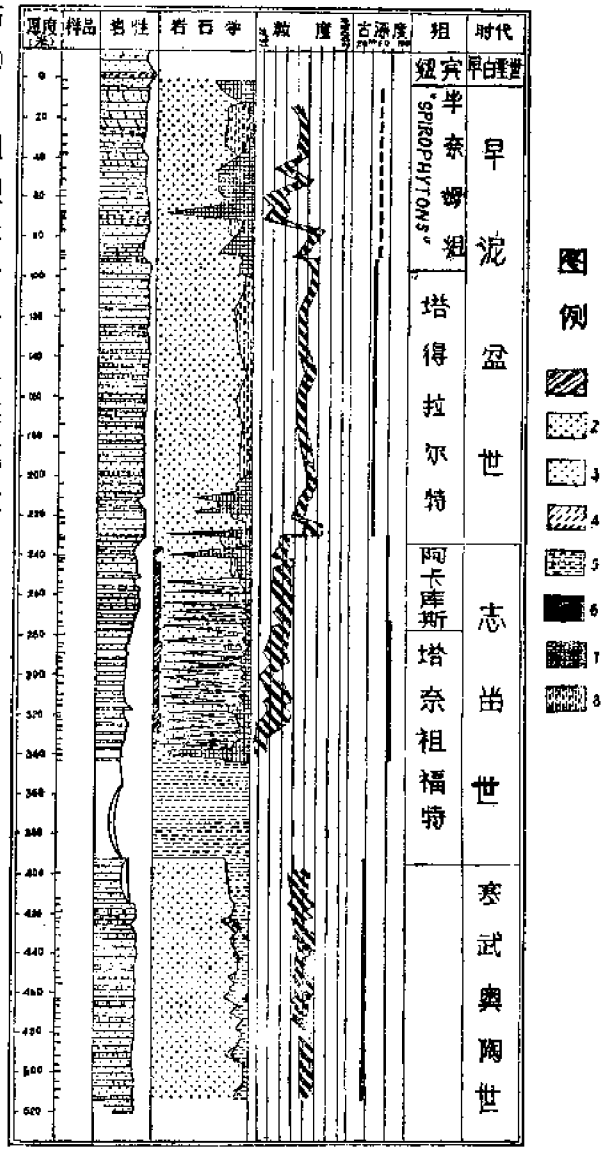


图 3—17 利比亚库夫纳盆地古生代岩性、粒度和古海深剖面

图例：1—长石；2—石英；3—硅酸盐；4—云母；5—粘土；6—碳酸盐；7—氧化铁；8—高岭土

帕塞加认为当代的海中似乎都是均匀悬浮搬运的，只是在近岸处有部分滚动搬运，递变悬浮是缺乏的；然而古代则不同，很多剖面证明递变悬浮沉积物是广泛发育的。当沉积物呈递变悬浮搬运时，就可以用C_r（或C_n）来测海深；可以在地层剖面上做海深变化记录

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

（图3—17）。当已知地区内很长时期海深是稳定的时候，可以认为沉积物供给和盆地沉降是平衡的；同时还可以做出当时的古海深平面图，以表现古海底地形（图3—18）。

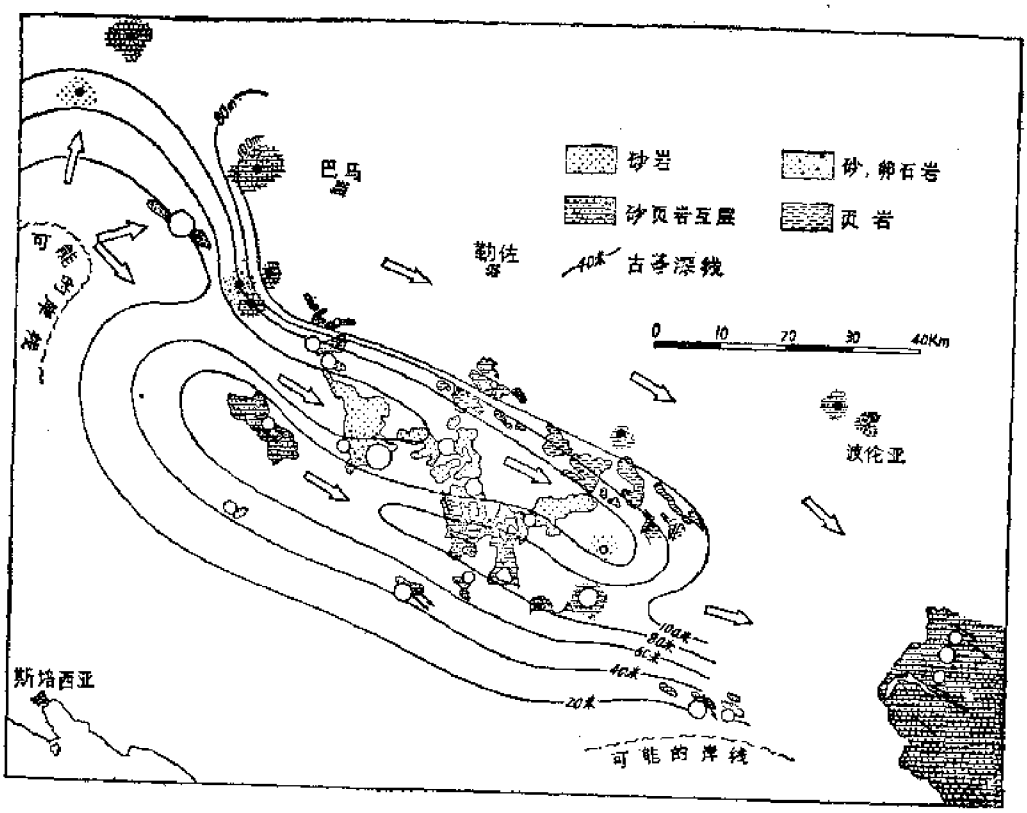


图 3—18 古海深平面图

等深线为20米（其他与海深无关的图例未注明）

除了上述方法研究古海深度外，也常做C、M、L、F、A等的等值线图。这些等值线的分布趋势往往与海的等深线分布趋势大体一致（图3—19）。因此，对上述等值线的研究也可了解古海深的情况。

研究古海深的意义在于，沉积物的特性主要由海深及供给物质的性质所决定。海深加大时，一般来讲粒度变细；而细粒物质在固结后，其渗透率会降低。当然，另一方面，沉积物变细时，分选性往往变好，渗透性相应又有所增高。因此粒度变细对渗透率的影响是有一定限度的。这可以说明为什么有的海深达50米却具高渗透层。而生油层的存在也与海深有关，一般C_t低于500微米时才会出现生油层，这是因为海的较浅处，底水是搅动的，供给过量的氧，以致不能保存有机物。另外，海底搬运显然也与海底地形有关，但这方面了解还不多。递变悬浮在重力作用下趋向于充填海底凹地，如果量较多的话，它们形成分布很广的毯状层，在高地区变薄或尖灭，这种尖灭可在任何深度的海底发生，不应误认为是发生在近岸。递变悬浮有时也可形成海底沙洲或海底河道，它们沉积得很快，并且构成一个具表面坡度的透镜体。碎屑物质因搬运方式不同而在侧向变化时，可以形成很好的地层圈闭。因此，对一个地区沉积搬运方式及分布的了解，有助于寻找地层圈闭油田。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

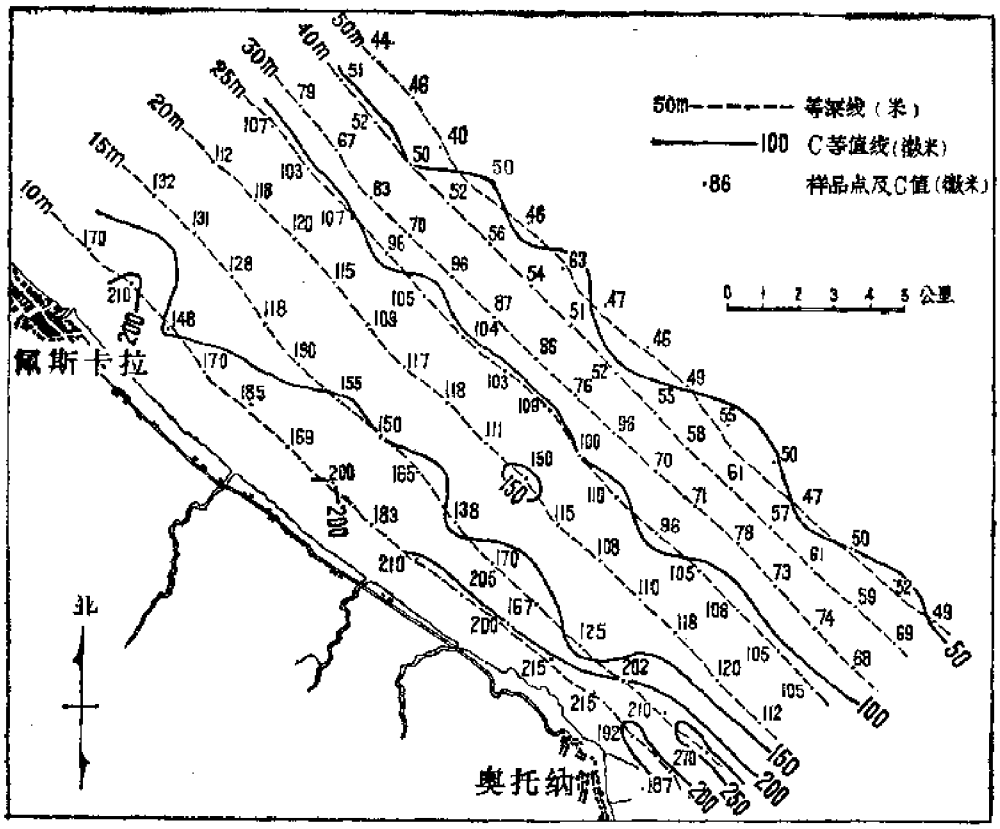


图 3—19 海等深线与C等值线关系图

3．粒度象的分选性参数 I_m（分选度）

关于 I_m 值的定义前面已谈过。I_m 值同时也表示沉积物的分选度，至少是粗粒沉积物的分选度。I_m值的一般范围，从牵引流及浊流的<1至泥流的>6。所有递变悬浮物及浊流，无论粗或细粒的样品点都位于距 $C=M$线同等距离位置上，因此它们的I_m值相同、具同样分选度。

$g(F50)$（细沙分选梯度）

当沉积物分选性越好时，F-M图的中值线（相当于50%含量的线）越靠近曲线的中部而且斜率越大。因此可以利用，F-M线中心斜率即M趋近125微米时的斜率，作为量度细沙的分选指标，称为细沙分选梯度，以 $g(F50)$表示之。求法是用125微米附近的增量ΔF、ΔM，求出1ϕ单位 ΔM所相当的 ΔF%数，梯度的单位为%/ϕ。数值越大表示分选性越好。如前所述，F-M曲线的中部是一直线，其斜率易于量度；如为曲线，在量度时只能利用趋近125微米的点的切线求增量（图3—9A）。

$g(L50)$（粉沙分选梯度）

它代表L-M线靠近31微米处的斜率，求法同 $g(F50)$（见图3—9A）。

$g(F50)$及 $g(L50)$值与中位数M为125微米的沙和31微米的粉沙的水动力特点有密切关系。如递变悬浮物是由底流速度减小而沉积的话，则$g(F50)$值的变化主要取决于沉积物的粒度分布和不同的浓度。在等粒度和相同水密度时，则在密度最小时的沉积物分选最好，而大密度形成分选差的成团沉积。如属同样的悬浮物和水密度，则粒度分选最好的

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

悬浮物形成分选最好的沉积物。这对递变悬浮沉积的粉沙也适用。至于 $g(L50)$ 则主要指示沉积作用的方式，它随环境不同而变化。

帕塞加（1972）收集了很多地区的细沙的 $g(F50)$ 和粉沙的 $g(L50)$ 值，以此两值为纵横坐标做图（图3—20）。确定了 $g(F50)$ 和 $g(L50)$ 的分级为：0—15，无分选；15—30，分选很差；30—45，分选差；45—65，分选较好；65—90，分选好；>90，分选很好；最大的分选梯度值达150以上。在这图上画出 $g(F50)=g(L50)$ 线，靠近此线的属于第一组沉积，它们属递变悬浮的粉沙沉积物。因此在分选性上与细沙很类似。在此组沉积中，分选最差的是古活动性盆地的浊流沉积物，现代大西洋浊流的分选稍好些，可能是它来源于陆棚，反映了陆棚沉积物的分选性。此组中分选最好的是席状水流沉积（如萨哈拉盆地古生代的平伏砂岩层）。好和很好分选度是与盆地的稳定性一致的。第二组点的特点是均匀悬浮的粉沙沉积物，其 $g(L50)$ 比 $g(F50)$ 的值低得多。本组中还包括图3—20上左和下方分开的两栏中那些只能测到一个参数的沉积物。此组中分选最好的是当代海滩沙、它比近岸的浅海沙分选好，后者的分选梯度区间很大；分选最差的是活动性盆地的浅海沙，其 $g(L50)$ 值与浊积岩类似。

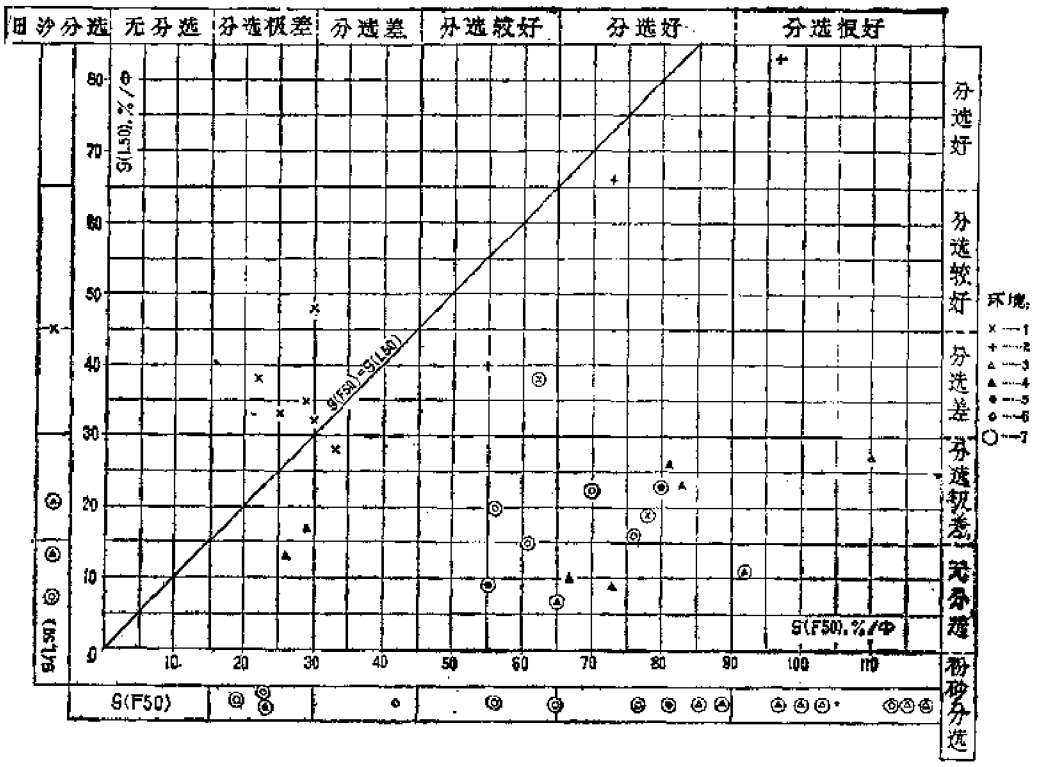


图 3—20　各种沉积物的 $g(F50)$—$g(L50)$ 图解

1—浊积岩；2—席状水流；3—海滩；4—浅海；5—潮；6—冲积；7—当代沉积。图左及下两个分开的栏内，表示的是只知道一个参数的沉积物分选度

总之，各种沉积物可以在分选度图上表示之。从图 3—20 上可以得到关于盆地活动性和环境的重要资料：$g(F50)$ 主要受盆地活动性因素控制，强烈活动性盆地的所有细沙，不管环境如何，其分选都很坏；但是，活动性并非控制 $g(L50)$ 的主要因素，如在强烈活动性盆地中，边部沉积与浊积岩之间在分选性上就有相当大的差别。在同一盆地中，分选

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

梯度的变化是指示环境的重要资料，如在一定条件下，浅海细沙沉积物比河流沉积物的分选性好，而含相当大比例细屑的河流悬浮物和经过强烈簸分的海沙，在分选性上的区别上就特别明显。如果河流（三角洲）悬浮物是由侵蚀海沙而来，然而这种海沙如沉速高又未受到过簸分的话，这种差别就将不存在。在活动性盆地中浊积岩分选性一般很差。

研究 $g(F50)$和 $g(L50)$值在剖面上的变化，可以指示盆地的活动性及有关沉积作用方式的变迁历史。如波河谷盆地在第四纪时的分选性变化，表明这个盆地在中新世至早第四纪为一强烈活动性盆地，主要充填了浊积岩，只在边部地区有点分选很坏的浅海沙。在晚第四纪时，盆地变得相当稳定，这时沉积了比早期沙体分选好的浅海沙和大陆沙。

分选梯度和环境的关系可以利用来对盆地不同地区做估价。分选梯度值的横向变化可以区分海和陆相环境。如某地三角洲的河流沉积物的 $g(F50)$ 为 18—23%/ϕ；海滩为115%/ϕ；浅海为86—89%/ϕ；岸外支流河口为23%/ϕ。虽然可以根据古生物来确定海和陆环境，但通常海沙不利于动物群生长，因此，对不含化石的沙体辨认其环境将发生困难，这时可用古生物与分选性数据结合、协同作出判别。

在海相环境中，沿岸线分选性的改变可以指明古河流的河口。垂向上的变化可以提供海进和海退的证据。

在一个盆地中，重建沉积物的搬运和分布，有利于圈定地层圈闭的面积和界限。分选性局部明显的变化有利于探明古岸线的情况。

4．根据粒度象的碎屑岩分类 用粒度象分析沉积作用的水力状况，可以表明一定粒级颗粒的主要搬运机制。根据常见的搬运和沉积类型即可对碎屑沉积物进行分类。在图3—9B上，利用 $C=1000$微米、$M=200$、100及15微米等界线将沉积物分成Ⅰ至Ⅸ类。

沉积物Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ及Ⅸ类的 C 值均大于1毫米，这些沉积物含滚动颗粒，或者在靠近源区处沉积，或者被搬运经过缺乏悬浮沉积作用的地区。

Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ及Ⅶ类是悬浮沉积物，其中可以含小于1毫米的滚动颗粒。它们在滚动之前，可以是成悬浮状态已搬运了一段长距离的路程，因此仍然包括在悬浮沉积物内。

$M=100$ 的线分开了递变悬浮和均匀悬浮沉积物。Ⅳ、Ⅴ两类均属递变悬浮沉积物，Ⅳ类是高扰动的而Ⅴ类则是中等扰动的沉积物。

Ⅵ类仍代表递变悬浮物，Ⅶ类代表均匀悬浮沉积物，通常根据在C-M图上的位置是不足以区分这两类的。如图3—9B所示，Ⅵ类基本上位于Ⅶ范围之内。故还须考虑C-M、F-M、L-M的具体图形。由于Ⅵ类是一种低扰度的递变悬浮沉积物，所含的粘土比均匀悬浮沉积物要少，其粉沙的分选性也较后者为好，因而二者的L-M、A-M图形有明显区别（图3—21）。Ⅶ类实际上代表一种更为复杂的沉积物。

Ⅷ类是最细的均匀悬浮和远洋悬浮沉积，沉积物为页岩。

Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅸ类沉积物是由悬浮沉积和滚动颗粒或卵石组成。从C-M图上可以看出这部分沉积物可以几乎全部由悬浮物组成。如是这样，这几类按从Ⅰ至Ⅸ的次序相应地扰度逐渐降低。滚动颗粒的含量也可以很多，这时，一般为双众数沉积物。

应当指出，分界线只是一个分开不同搬运类型沉积物的统计界线。而对水力状况更精确的了解，则应从粒度象分析获得。粒度变化情况，可以用C-M、F-M、L-M及A-M图来表示。

由于F-M图有 $F=50\%$ 时 $M=125$ 微米的固定点，一些分选极好的单一直径颗粒

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

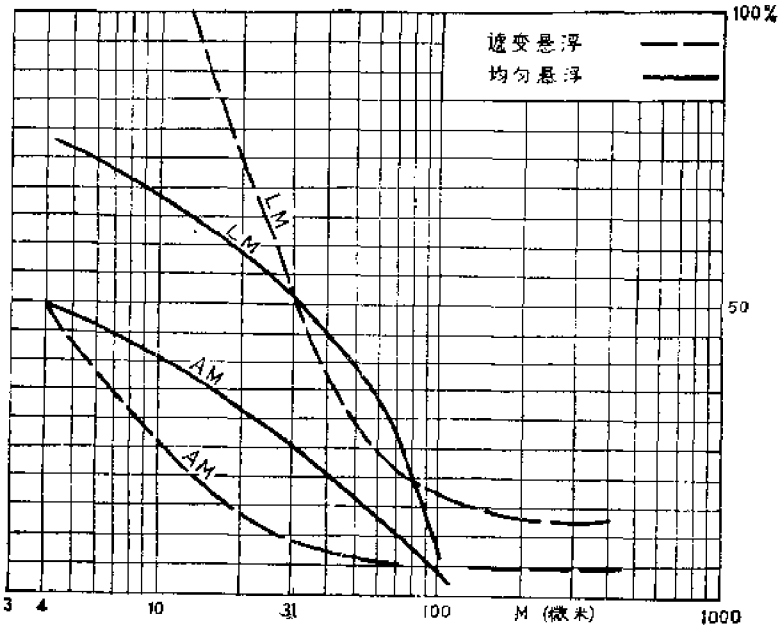


图 3—21　递变悬浮和均匀悬浮沉积的L-M及A-M图

表 3—1　亚类划分表

级	M（微米）	$F=20\%$时偏离程度(ϕ)
a	125—177	<0.5
b	177—250	0.5—1
c	250—350	1—1.5
d	>350	>1.5

组成的沉积物，其F-M图是由$M>125$微米时$F=0\%$，以及$M<125$微米和$M=125$微米时$F=100\%$的线段构成。任一图形与分选极好的图形比较，其偏离程度可用$F=20\%$时的M值来近似地表示。利用这种特点，可以将沉积物进一步划分出亚类。下面亚类的划分可以看出它们之间分选性的好坏，这对找油工作是有意义的。根据与分选最好的图形比较，在$F=20\%$时偏离的ϕ值分级如下表：

例如，很多当代海滩和某些现代河流的清洁砂属于a级，结合C-M图，则可分出I_a、V_b、……等各类型沉积物。

5．**粒度象图**　在剖面上或平面上均可以表示粒度象。特别是后一种图，不需要确定沉积相，就能表示沉积的一般趋势，并且，对未固结或疏松的岩石还可以了解渗透性趋势。这种平面粒度图常被称为粒度象平面图（图3—22）。做这种图时虽可不必定相，但可参考重要的相标志。

做图的方法是首先确定一个做图单位的垂直间隔，根据前述之粒度象分析，确定间隔内的样品类型百分比，用一定符号来表示该百分比。如图3—22上，1毫米颗粒的界线说明盆地内的扰度降低、悬浮沉积作用加强，以致阻止了很粗颗粒的滚动，最粗的悬浮颗粒开始沉降。中位数<100微米的沉积物是席状水流构成的递变悬浮沉积物。同等高线上沉积物的粒度向下游方向逐渐变细，说明可能属海下三角州的环境。如果沉积物未被完全胶结，渗透性一般与粒度类型有关。故通过这种图可以研究渗透性变化的趋势。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

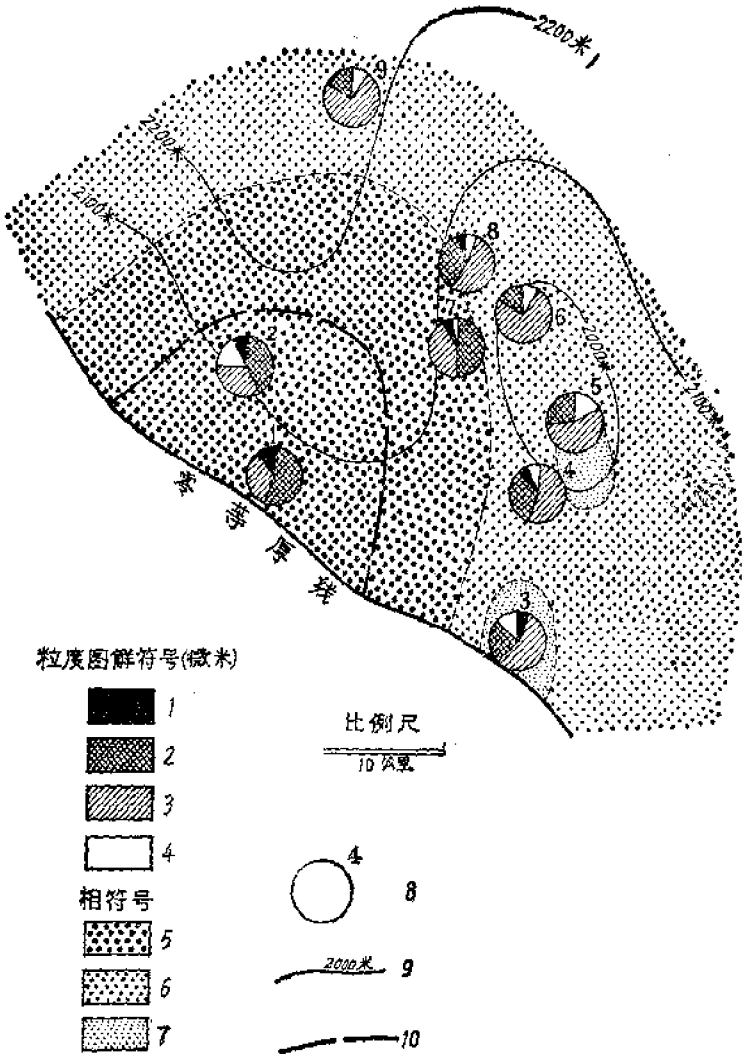


图 3—22 粒度象平面图举例

图例：1—Ⅰ，$C>1000$，$M>200$；2—Ⅳ，$C<1000$，$M>200$；3—Ⅴ，$C<1000$，$200>M>100$；4—Ⅵ，$C<1000$，$M<100$；5—(Ⅰ+Ⅳ)>50%；6—(Ⅰ+Ⅳ)<50%，Ⅵ<10%；7—(Ⅰ+Ⅳ)<50%，Ⅵ>10%；8—钻孔及孔号；9—顶组海下等高线；10—1毫米颗粒存在的近似界线（Ⅰ<10%）罗马字代表的意义参见图 3—9

四、粒度象的采样和分析要求

如果采样和分析工作不当，常常造成C-M图上的点分散。做粒度象的采样应尽可能地取自同种岩石。若系砂、页岩互层，则必须在砂岩和页岩中分别取样和分析。如系砂页岩混合取样，分析结果的C值代表砂岩，而M值则代表页岩；这样的样品点会落在C-M图图形的外边。总之，一个样品应该是代表一个沉积作用，而且是同一个沉积作用时期的产物。

一个C-M图通常由最细至最粗粒度的各种沉积物20至30个样做出的。地面剖面采样比较理想，因为可以直接看到沉积物的总貌，还可以加以选择。每个样品通常代表一个3—4

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

厘米厚的层，而一个C-M图代表几米厚的剖面，在一个厚几百米的地层剖面上，可根据岩性变化特点分配采样位置。钻井岩心也能做出好的图形，然而如是岩屑样品则须注意，只在单个岩屑够一个样品重量时才能使用。如果是一小块砂岩或灰岩，只要够切成薄片作分析用时也可应用。在作筛析前，样品应经过H_2O_2处理，筛子使用1ϕ间隔的就可以了。<31微米的组分，如果没有细分的套筛，可用移液管进行分析。如果是作薄片分析，最好沿层面切片，用点计法测300个颗粒的最小直径，<31微米的颗粒，不进行测定。薄片粒度分析的结果，可以不必换算成筛析数据也能得出相对的结果。

第三节　用粒度指数研究沉积环境

考虑到沉积物大部分是含纹层或层的，而逐层取样往往不可能，因此一个粒度分析的结果常代表一个复合的分布。这时，只用平均粒度来表征沉积物，往往不能说明问题。于是有人建议用四分位值（Q_1、Q_3），同时还考虑中位数或还考虑曲线尾部情况来制定沉积物的分类表。为避免名称过长而采用数字符号（ϕ值级）代表。如符号112代表的是Q_1和Md都是1，属粗沙级；Q_3是2，属中沙级。

多格拉斯（1968）将上述分类原则应用到分级更细的温特沃思粒级上（图3—23）。以图纸的对角线方向表明Md值；Md点上垂方向的点表明Q_1；下垂方向的点表明Q_3。从这种图上不仅能看出粒度参数，而且也可看出四分位标准差及偏度情况。如164号样，Q_1和Q_3至Md的距离不足1ϕ，这意味该样品分选好，因$1/2(Q_3-Q_1)<0.5$（四分位标准差值）；Q_1和Q_3对称的位于Md的两边，因此不是偏态分布。相反，187号样的分选很差，因其四分位标准差$1/2(Q_3-Q_1)>2.5$；同时属正偏；$(Q_3-Md)>(Md-Q_1)$。

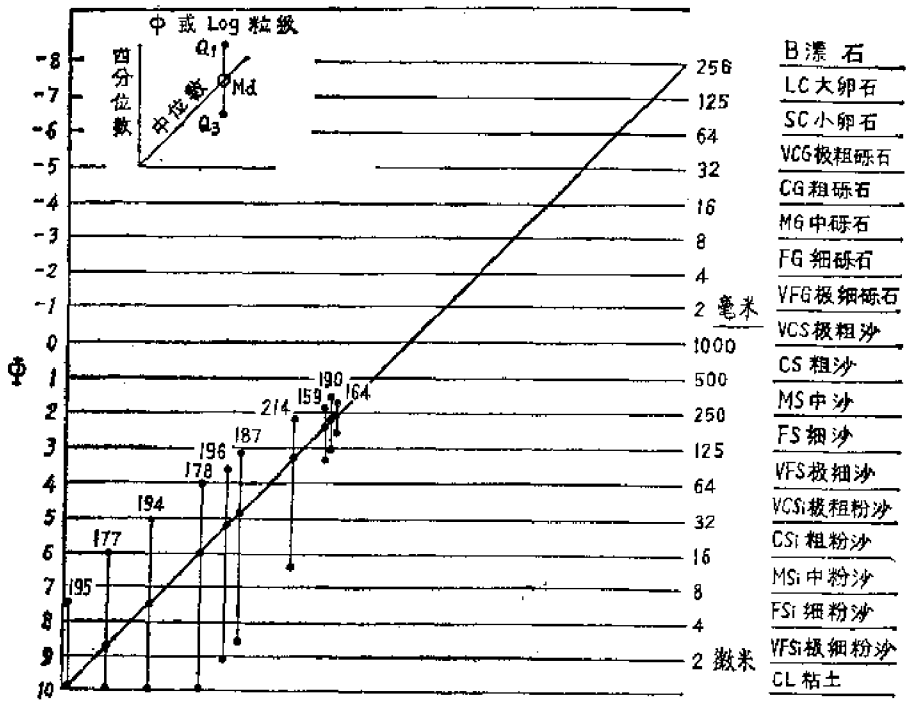


图 3—23　沉积物的粒级及Q_1-Md-Q_3样品表示法。数字为样品的编号

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

在这种图上，当四分位值大于9ϕ时，点的位置即画在基线上，如样品195、177、194、178等。因为9ϕ以上（＜2微米）的粒度只在特殊的科学研究时才确定，同时＜2微米的粒级含量在沉积物经受了成岩后生作用时可以发生变化。

实际画图时，只用点来表示。可以很明显的表明沉积物的粒度分布情况（图3—24）。从这些图上还可看出，它们能清楚的表现沉积环境的特性。

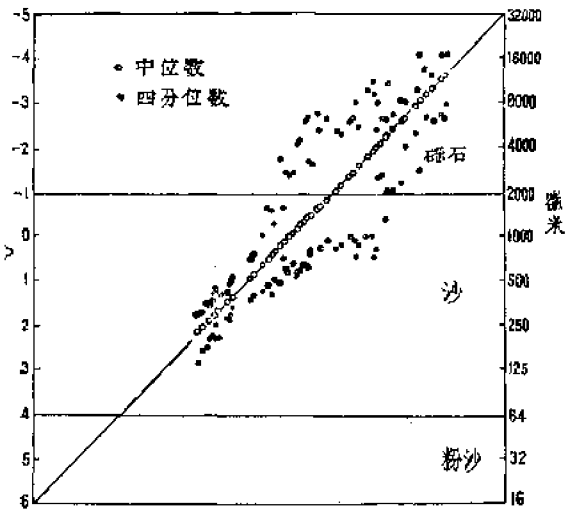


图. 3—24 Q_1MdQ_3指数图

样品采自莱茵河在德国及荷兰境内部分

方法是取Q_1、Md、Q_3的整数ϕ值。如原数值不是整数，正ϕ时可取紧接着的大些的整ϕ值；负ϕ时则取紧接着的小些的ϕ单位，如$Md=4.36$，则取为5；$Q_1=-2.64$，则取为$\overline{3}$。在表中0ϕ值并不用来代表1000微米，而是代表10ϕ（1微米），这差不多是颗粒最细的粒级了。在命名时，则是采取＞0ϕ（即-1ϕ、-2ϕ……）时，按界线之下的名称命名，如-2ϕ称为极细砾石；＜0ϕ时则按界线之上名称命名（如2ϕ称为中沙），以解决缺乏0ϕ名称的问题。

Q_1MdQ_3指数的优点除前述可以从指数直接看出沉积物的粒度参数、四分位标准差、偏度，例如222、666两样品为分选极好的对称分布，122、223为分选好的轻微负偏或正偏，$\overline{1}23$、457分选很差外，还可以一眼就看出变化的情况，如222、223、233、333、334是慢慢的变细。最后一个优点是便于用计算机处理资料，如使用趋势线及趋势面分析等。缺点是没考虑峰态的情况。

多格拉斯根据已知环境的30197个样品制定了三指数及五指数分类表。为了避免混乱，对分类表做了一些规定：

1．中位数和四分位数在同一级内时，以此级的名称命名。如222，即可称为中沙。

2．四分位数围绕中位数对称，命名时以四分位值的名称为名称，中间连以节号，不管中位数的命称。如234的名称为中沙一极细沙；$\overline{2}\overline{1}1$为极细砾石—粗沙；246为中沙一粗粉沙（见图3—23）。

3．一个四分位数距中位数比另一个更接近时，则以靠近中位数的四分位数为名词；另一为形容词。如122为粗沙质中沙；120为粘土质粗沙。这和过去常用的命名原则不同，过去命名时所加“质”字是代表含量的意义。因此使用此法时须注意不要和其混淆。

下面介绍三指数分类表和五指数分类表

一、三指数分类表（表3—2）

分类原则是纵坐标根据Md值分组；每个组内再根据Q_1值从表的上方至下方，Q_3值从表的左方至右方细分。在分类表内各位置上的字母代表不同的环境。字母后面的号码代表属这种环境的样品数。同一环境的符号位于方框内的相同位置上。每种Md值中从上至下分选变好、负偏度变小、粗尾消失。如T23、123到223。从左至右变得正偏、细尾更明

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

显，如233、234、235、236至239。

分类表共指示以下几种环境：

1．河流(*R*)

$Md=2\phi$：122

$=3\phi$：236、237、238、239、335、336、337

$=4\phi$：246、247、249、347、348

$=5\phi$：358、359、350

$=6\phi$：369、360、468、469

$=7\phi$：370

$=8\phi$：380、480

分类表中未列1ϕ及$\overline{3}\phi$、$\overline{2}\phi$、$\overline{1}\phi$的样品，因为所包含的样品过少，这几种 ϕ 值主要属河流沉积及少量冰川及海滩沉积。海滩沉积一般分选更好些，如$\overline{432}$、$\overline{322}$和$\overline{321}$；属河流沉积的有$\overline{531}$、$\overline{422}$、$\overline{521}$。

2．浅海(*C*)、潮坪(*F*)、泻湖和海湾(*L*)、较深海(*M*)等

只有含粉沙很多的泻湖沉积物落在黄土一起，如668、669、660，其他几种环境尚不能很好的区分。$Md=9\phi$和10ϕ中无泻湖及海湾沉积，但有三角洲、潮坪、河口和海岸沉积。

$Md=4\phi$：344、444、445、446、447、440）344有七个浊流沉积物，445有一个河流沉积物）。

$=5\phi$：455、557、558、559、550（455有一个浊流沉积物）

$=9\phi$：890

$=10\phi$：500、600

3．黄土(*E*)、366、466、566、666、667

4．浊流(*T*)、124、133、134、135

二、五指数分类表（表3—3）

除以上三指数外，再加上1%和99%的ϕ值共同构成五指数。可以用来区分那些三指数无法区分环境的指数，如222和333等。

分类表共有2至10的几种Md值，每个Md值内有几种常见的三指数，如$Md=2$内共分122、123、222、223四个方块；每个方块内又根据横坐标99%值及纵坐标1%值继续细分（见表3—3）。一般沿分类表的纵轴从上至下分选性变好、负偏减小，如13334、23334、33334。同时沿横轴向右方分选性变坏、正偏增大，如22333、22334、22335、22336等。

5ϕ或更高的ϕ值，99%的数值永远是零，故只能用1%的数值来区分。

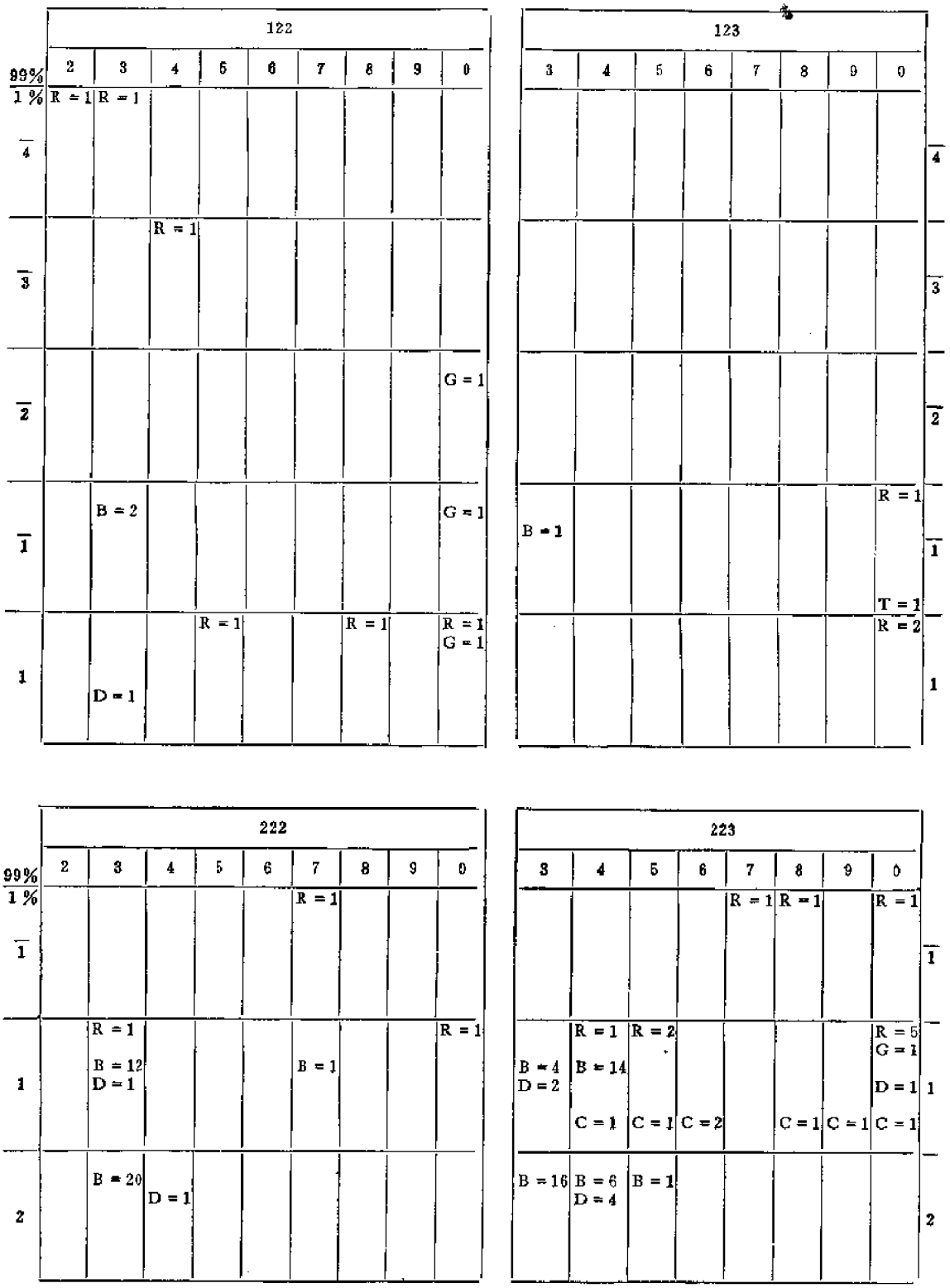
根据五指数可进一步区分某些环境。然而仍有一些环境区分不开，这时则需考虑“样品系列”。有时单个样品不能确定环境，而“样品系列”则可得到一定的解决。如122、223、233可同时代表河流、海滩、风成沙丘或海岸沉积，但如系列中含234、236、336、248等河流所仅有的指数、则可能整个系列均属河流沉积；如系列中含344、446、455、556等指数，则必属海岸沉积。

分析了多格拉斯的指数分类后，我们认为在表示沉积物的粒度细节上，这种表示法的确有不少的优点，然而在确定沉积环境上，则只能说具一定的价值，还需配合其他方法加以研究。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表 3—3 五指数分类表

Md = 2



122

99% / 1%	2	3	4	5	6	7	8	9	0	
4	R = 1	R = 1								4
3			R = 1							3
2									G = 1	2
1		B = 2							G = 1	1
1		D = 1		R = 1			R = 1		R = 1 G = 1	1

123

3	4	5	6	7	8	9	0	
								4
								3
								2
B = 1							R = 1 T = 1	1
							R = 2	1

222

99% / 1%	2	3	4	5	6	7	8	9	0	
1						R = 1				1
1		R = 1 B = 12 D = 1				B = 1			R = 1	1
2		B = 20	D = 1							2

223

3	4	5	6	7	8	9	0	
				R = 1	R = 1		R = 1	1
B = 4 D = 2	R = 1 B = 14 C = 1	R = 2 C = 1	C = 2		C = 1	C = 1	R = 5 G = 1 D = 1 C = 1	1
B = 16	B = 6 D = 4	B = 1						2

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

Md = 3

233

99%	3	4	5	6	7	8	9	0
1%							R = 1	R = 7
1								
1	G = 1 B = 8 D = 1	G = 1 B = 4 D = 5	R = 1 C = 1	R = 1 B = 1 C = 1		C = 1	R = 2	R = 5 D = 2 C = 3
2	B = 16	B = 4 D = 4 C = 1	B = 1 D = 1	D = 2 C = 1	D = 1 C = 1	A = 1 C = 2		R = 2 D = 4 DE = 1 C = 2 T = 1

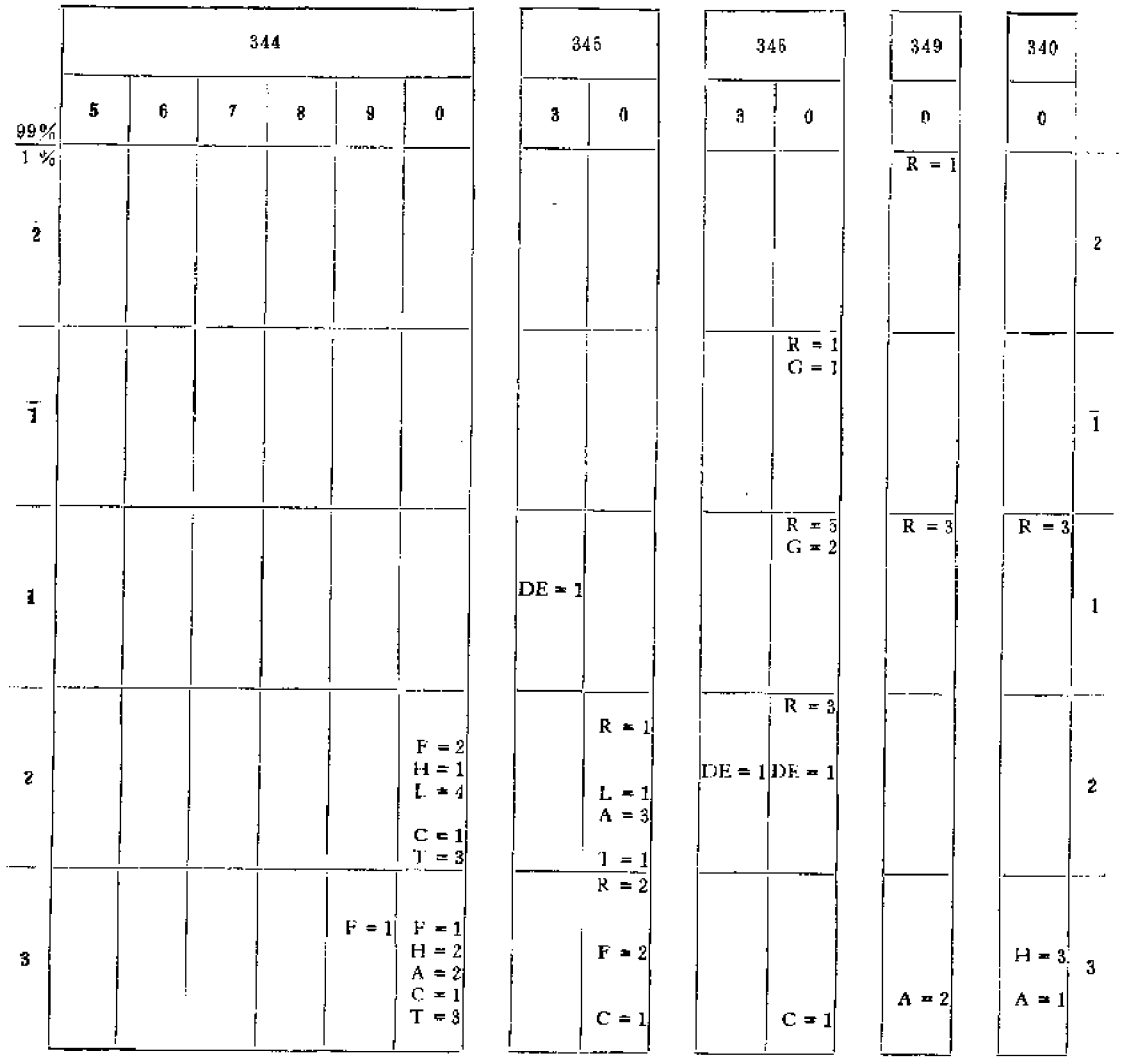
333

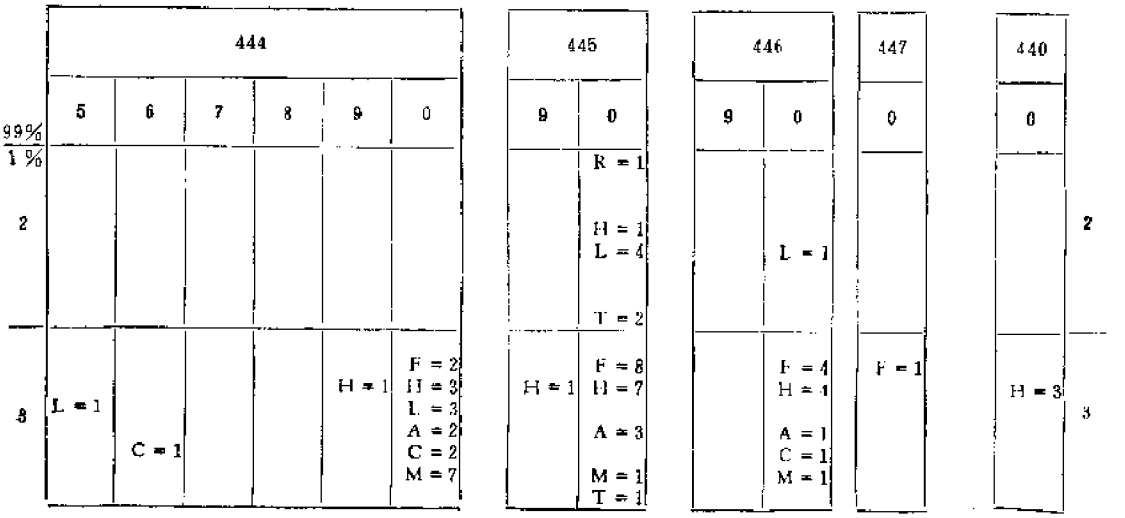
	4	5	6	7	8	9	0
1	B = 1 D = 1	R = 1 D = 2					R = 1 G = 1
2	B = 3 D = 5	R = 1 D = 9 L = 1	B = 1 D = 4 H = 1				R = 5 B = 1 D = 3 F = 1 H = 1 A = 2
3	B = 4						

334

	4	5	6	7	8	9	0
1							R = 2 T = 1
2	B = 3 L = 1	H = 1					R = 4 D = 1 F = 3 H = 1 L = 2 A = 2 C = 2
3		F = 1				DE = 1	F = 1

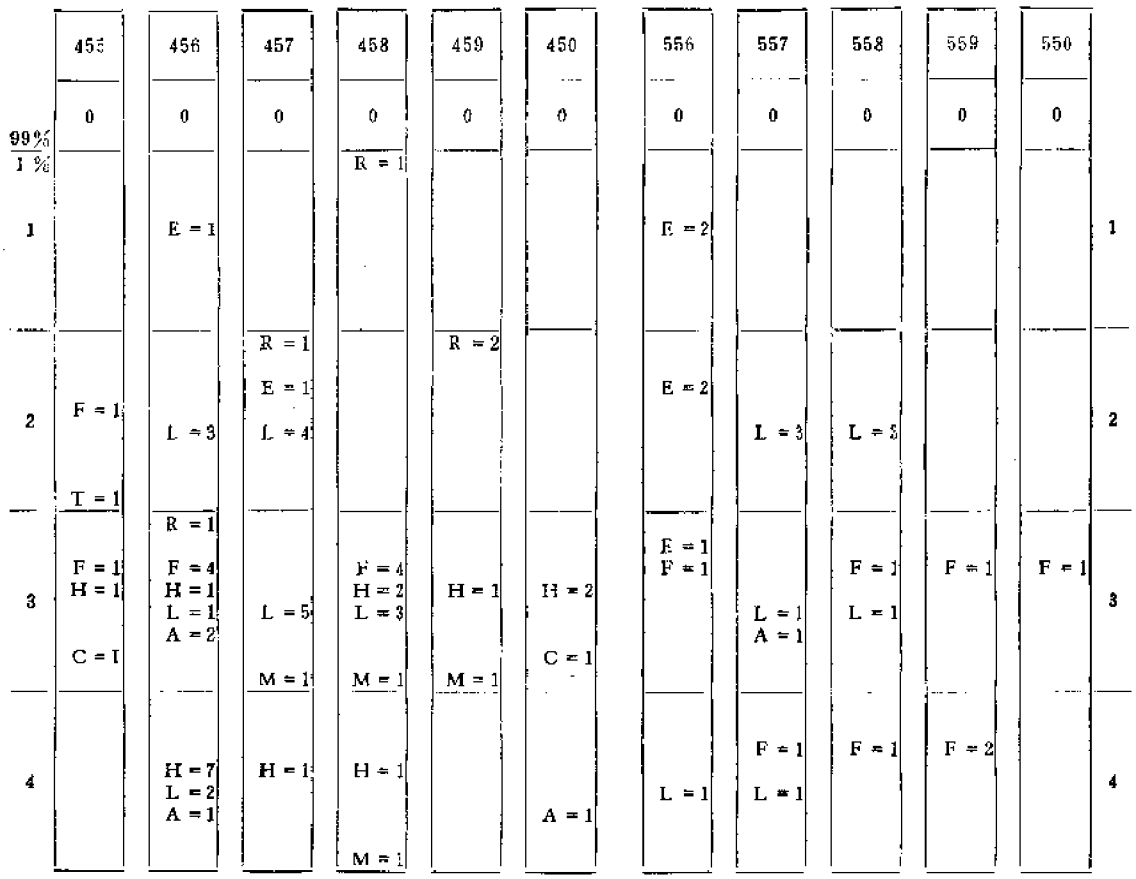
Md = 4



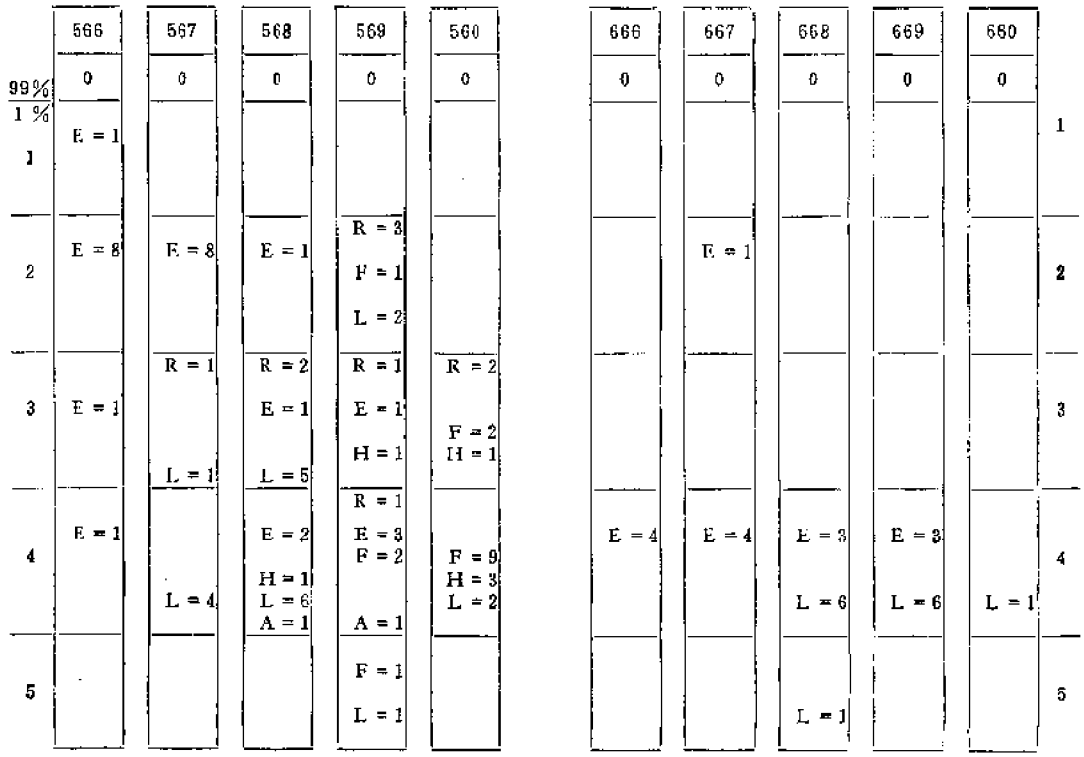


PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

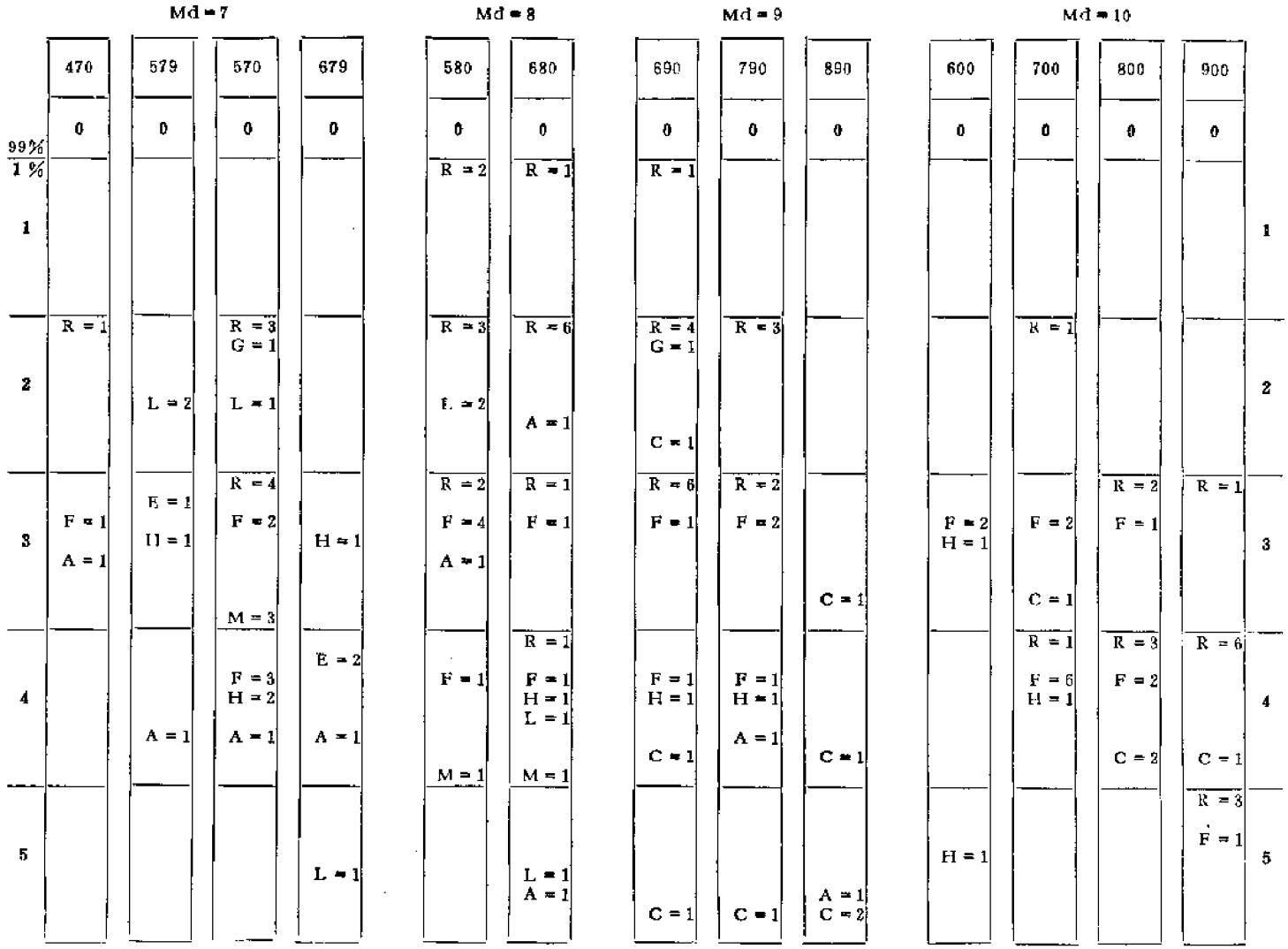
Md = 5



Md = 6



PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn



符号：见表 3 — 2 。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

第四节　结构参数散点图

近年来，不少人对已知环境的当代沉积物粒度参数做散点图，在图上得出不同环境的分界线，用来决定古代沉积物的沉积环境，并已取得一定的效果，尽管有人对这些散点图的价值及灵敏度存在疑问，但从下面即将介绍的一些图件来看，不同环境存在着差别是无疑的，虽然也可能有一些例外，然而例外的情况不多，故无损于它的价值。

到目前为止，工作大部分是限于区分海滩、河流、和沙丘，少量为区分冰川及冰水沉积。对大陆内及海内各种微相的区分工作，尚未见开展，而这方面却是实际工作中非常需要的，今后应该加强这方面的工作。

较早而且也有一定价值的是鲁欣（1952）的成因图解，我们（1960）在陕北侏罗系沉积的初期研究工作中曾使用过此图解，证明大体上是有效的。但此图的缺点是过于简单，同时由于根据的资料不多，图内的界限不十分确切。

早期比较著名的工作还有梅森和福克(Mason & Folk,1958）根据美国德克萨斯州木斯唐得出的结论。他们得出的各种环境区别如下：

概括图解标准差(σ_I)

0.21—0.26	可能是沙丘
0.26—0.28	沙丘或风坪
0.28—0.30	未定
0.30—0.35	可能是海滩

概括偏度(SK_I)

—.20—+.02	可能是海滩
+.02—+.05	海滩或沙丘
+.05—+.13	未定
+.13—+.30	沙丘或风坪

标准化峰态(KG')

.47—.53	海滩或沙丘
.53—.55	未定
.55—.61	可能是风坪

而且证明偏度对峰态的散点图在区分海滩、海岸沙丘和风坪上有效。

弗里德曼（1961、1967）进行了大量工作，得出的模式图经工作证明基本上有效，只有5—13%的例外，下面以他的工作为基础，介绍用散点图区分河流、海滩、沙丘的方法。

一、工　作　方　法

使用的是1/4ϕ粒级间隔的常规筛析法，为了避免成分混杂而平行层理取样；沙样的成分包括很广，有石英、碳酸盐、石膏、橄榄石、辉石、磁铁矿、岩屑等各种沙；样品采集的地区也很广。海滩包括部分湖滩及冲刷回流反复作用的冲刷带，河流则包括河底及点沙坝。得出的资料是根据下面的统计值公式用计算机处理的（表3—4）。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表 3—4　各种统计值公式

统　计　值	符　号	公　式
1 平均值	$(\overline{X})$	$1/100\Sigma f m_\phi$
2 标准差	(σ)	$[\Sigma f(m_\phi-\overline{X}_\phi)^2/100]^{1/2}$
3 偏度（第三矩）	(α_3)	$1/100\sigma^{-3}\Sigma f(m_\phi-\overline{X}_\phi)^3$
4 立方偏差平均值	$(\alpha_3\sigma^3)$	$1/100\Sigma f(m_\phi-\overline{X}_\phi)^3$
5 概括图解标准差	(σ_I)*	$\frac{\phi_{84}-\phi_{16}}{4}+\frac{\phi_{95}-\phi_5}{6.6}$
6 概括图解偏度	(SK_I)*	$\frac{\phi_{16}+\phi_{84}-2\phi_{50}}{2(\phi_{84}-\phi_{16})}+\frac{\phi_5+\phi_{95}-2\phi_{50}}{2(\phi_{95}-\phi_5)}$
7 图解峰态	(KG)*	$\frac{\phi_{95}-\phi_5}{2.44(\phi_{75}-\phi_{25})}$
8 简单分选系数	So_ϕ	$^1/_2(\phi_{95}-\phi_5)$
9 简单偏度	α_s	$(\phi_{95}-\phi_5)-2(\phi_{50})$
10 简单偏度（众数）	α_M	$(\phi_{95}+\phi_5)-2(\phi_{众数})$

关于＜62微米的筛余部分，在区分海滩和河流的工作中是以两种方式来处理：

1．＜62微米组份当做4.25ϕ来处理，即将＜62微米的细粒组份全部当做粒级是4.25ϕ。

2．＜62微米组份当做 6.00ϕ 来处理。

二、海滩沙和河流沙的区分

弗里德曼（1969）根据 335 个样（180个河沙、150个海滩沙），做出了 19 张参数散点图，包括将＜62微米做为4.25ϕ和6.00ϕ两种情况处理，其中只有偏度对峰态图完全无效，其他图不同程度的可分开两个环境区域。为了便于实际工作中参考，我们选择几张区别明显的图说明于下：

1．立方偏差平均值对标准差图（图 3 —25）

＜62微米做为4.25ϕ 和 6.00ϕ 处理两种情况的图形差不多一样的清楚，这里选用的是做为6.00ϕ 处理的图形。从图上可看出，滩沙的立方偏差平均值是负值或接近零，标准差为极好、好和较好的分选度范围；河沙的立方偏差平均值分布广，标准差落在较好、中等较差及差的分选度范围。

2．偏度（第三矩）对标准差图（图3—26）

可看出本图区分环境是有效的，而且可以看出标准差的作用比偏度大。

3．第一百分位对标准差图（图3—27）

第一百分位的定义为相当 1% 累积含量的粒度值，它能表明沉积物粗粒组份的情况。从图上可看出河沙比滩沙的最大粒径更粗。这个图用来区分环境是有效的。

4．平均值对标准差（图3—28）

本图也是有效的，但可以看出主要是标准差在起作用。

5．概括图解偏度(SK_I)对概括图解标准差(σ_I)（图3—29）

6．简单偏度对简单分选系数图（图3—30）

其他图件还有：如立方偏差平均值对立方标准差；偏度对＜62微米部分的百分含量；

* 根据福克和沃德(1957)的定义

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

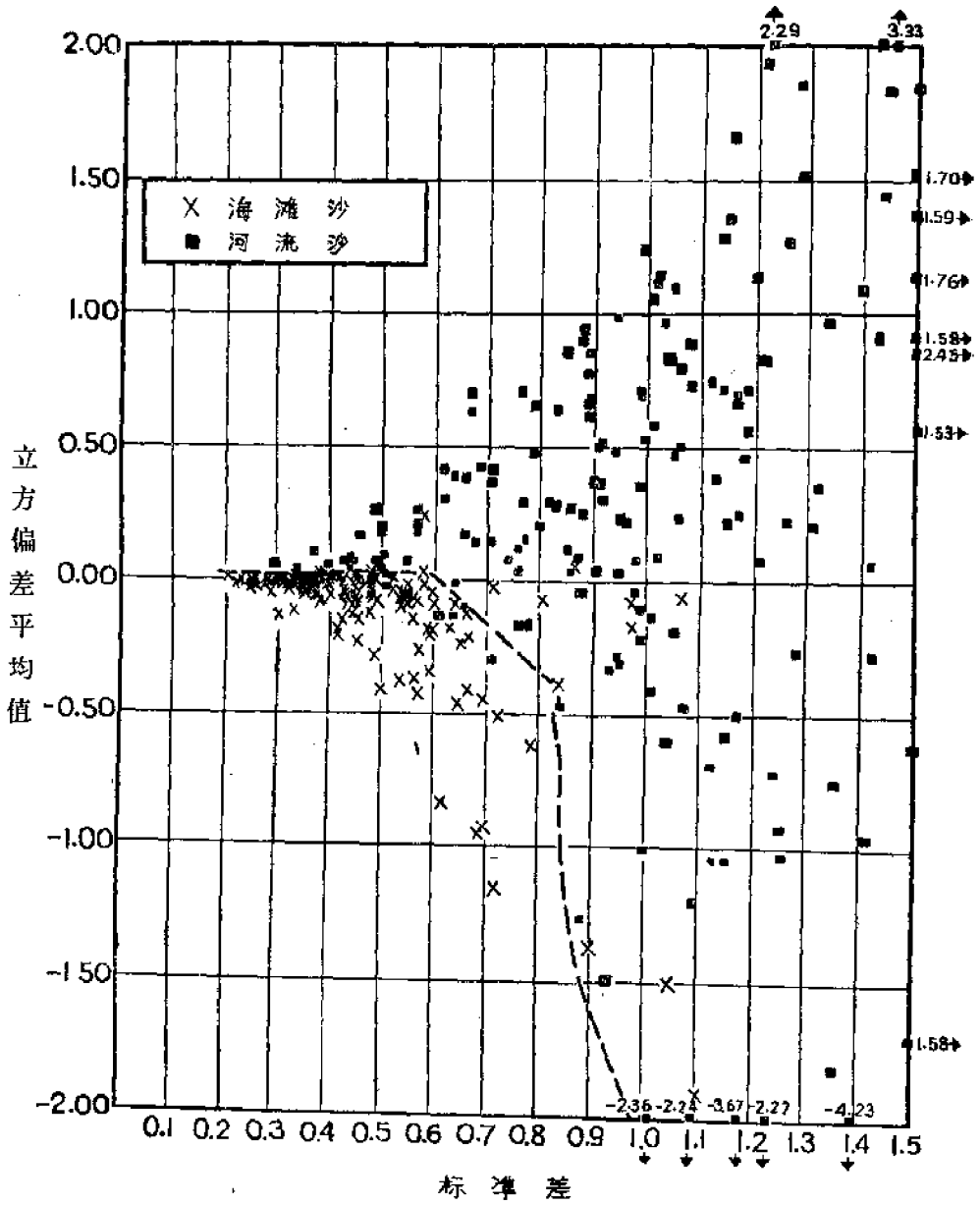


图 3—25 立方偏差平均值对标准差的散点图

<62微米部分做为6.00φ处理

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

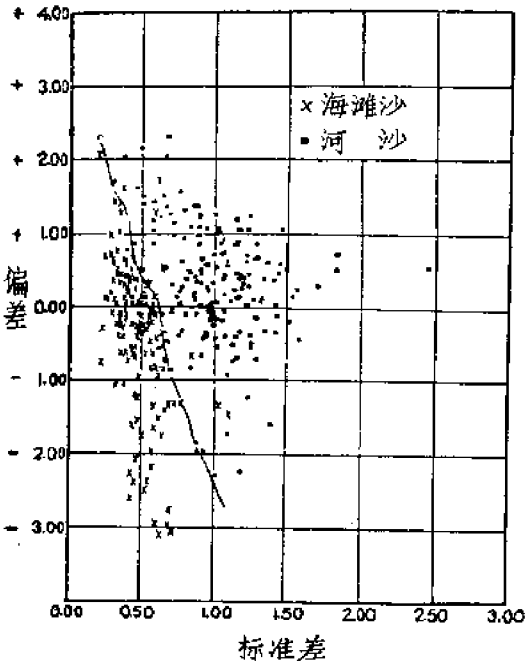


图 3—26　偏度对标准差的散点图

<62微米部分做为6.00φ处理

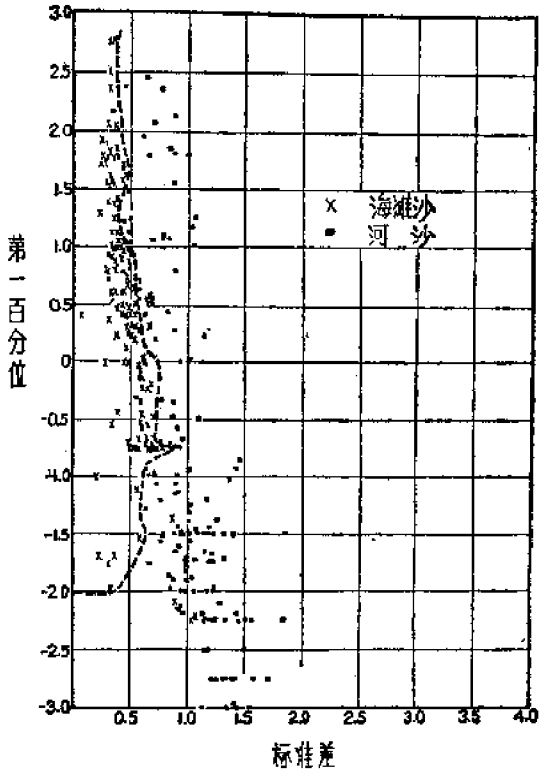


图 3—27　第一百分位对标准差的散点图

<62微米部分做为6.00φ处理

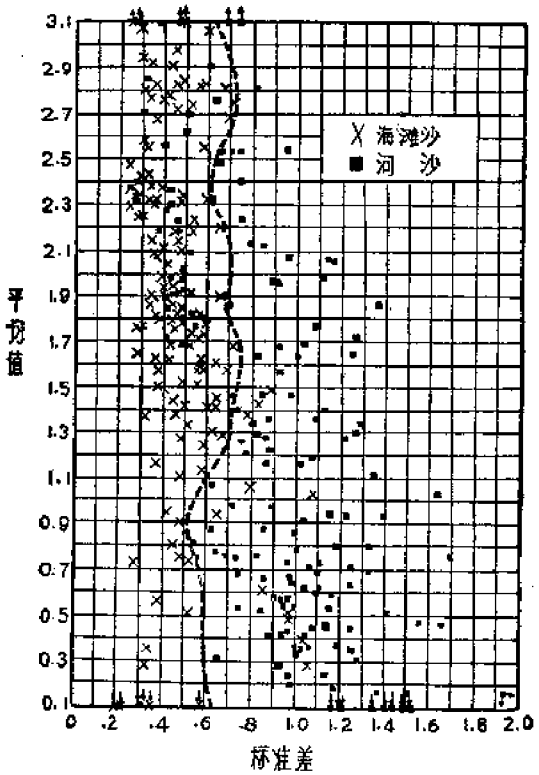


图 3—28　平均值对标准差的散点图

<62微米部分做为4.25φ处理

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

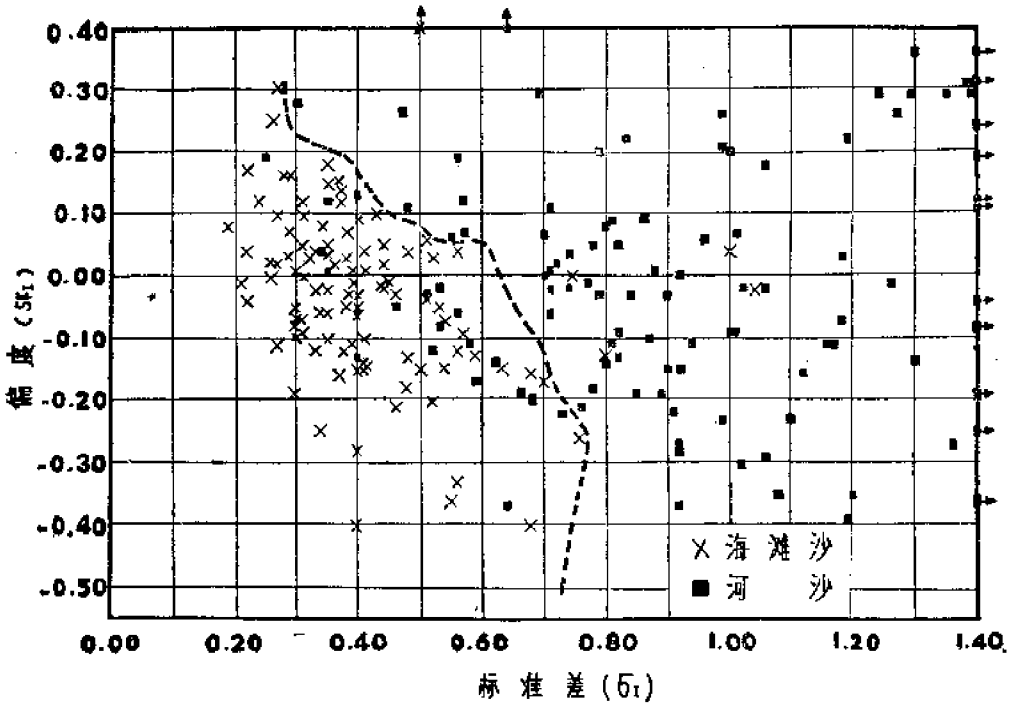


图 3—29 概括图解偏度对概括图解标准差的散点图

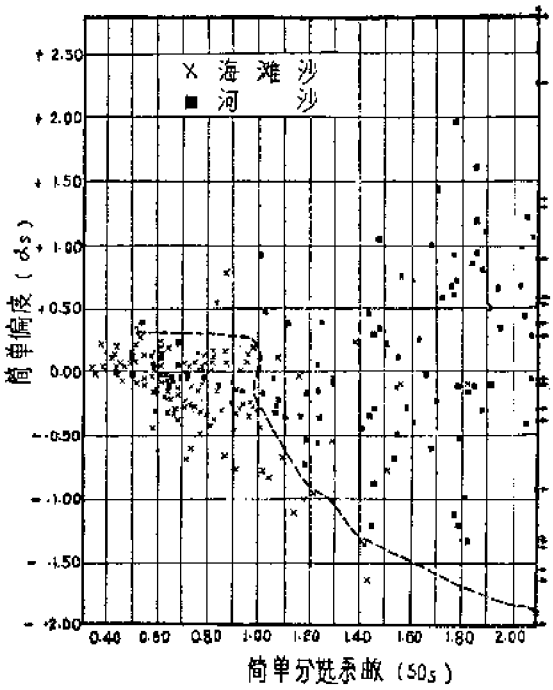


图 3—30 简单偏度对简单分选系数的散点图

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

第一百分位对<62微米部分的百分含量；第一百分位对立方偏差平均值；简单偏度对<62微米部分的百分含量；简单偏度（以众数值去求）对简单分选系数……等等。限于篇幅，不在这里列举。读者如需要可查参考文献。

造成上述各图上河流及海滩所在位置不同的原因是，因河流为单向水流，其沉积的粒度取决于搬运介质的速度，可是细粒物质的存在并不受速度的影响。当能量不够时，粗粒物质留在原地不被搬运，因此常缺乏正态曲线的粗粒部分，以致更易形成正偏态。

海滩的沙则因受冲刷和回流的反复作用，细粒物质受到改造和簸分，余下粗粒部分，故更易形成负偏。因此作为环境最精确的部分是分布的“尾”，特别是细尾，河流沙内这个细尾经常存在；而海滩沙这个细尾不存在或不重要。后者的偏度多在0附近或更偏负值。

然而在散点图上对此点表现得并不太明显，只在立方偏差平均值对标准差的散点图上(图3—25)稍清楚些。这个图的纵坐标并非是真正的偏度而是偏度乘以立方标准差($\alpha_3\sigma^3$)。因此总的看来，偏度对河沙及滩沙可以区分，但有5—13%的例外，且不十分明显，尚需配合其他粒度参数。

区分这两种环境的第二个重要参数是标准差。海滩沙一般比河流沙分选好，它们缺失细粒部分。并且，也如河流那样没有粗粒部分。看起来标准差在区分此两种环境上比偏度还明显些。

为什么用偏度区分二者不明显，且有5—13%的例外情况呢？可能主要是由于有些沙是多众数的，或某些沉积物的供应超出了介质的有效能量，而未达到平衡。如美国德克萨斯州帕德里岛滩沙的正偏是由于细沙区间内存在有双众数的原故，又如阿拉斯加州多山地带的内陆湖，由于快速的沉积因而湖滩沙具正偏的特点。有些滩沙则因含粘土及粉沙的微细互层，而使它们多半落在河区内。但这是暴风雨后的暂时现象，最终细粒物质将被簸分搬运到海(湖)的较深处而达到平衡。虽然河流沙一般有一个细粒的尾部而属正偏，然而正值也可被多众数的结合所抵销。当然可能还有其他原因。但看起来以不同的粒度参数配合时，在区分环境上的作用是清楚的，因此在图上可以划出明显的环境区。例外的情况毕竟是少数。

后来，莫伊欧拉和韦塞(Moiola & Weiser, 1968)根据120个海滩沙、海岸沙丘、内陆沙丘和河沙样品来检验结构参数散点图的灵敏度，并比较了用1/4ϕ、1/2ϕ和1ϕ粒度间隔资料所计算的参数的灵敏度。结果发现在区分环境上不像弗里德曼所说的，偏度对标准差最灵敏，而是平均直径对标准差最灵敏（图3—31）。当以平均直径对标准差作图时，甚至1ϕ间隔的资料都有效（图3—32）。

我们对陕甘宁盆地侏罗纪某些河流沉积可做散点图表明，弗里德曼的模式图基本上还是可用的。我们确定的沉积环境是根据沉积构造、岩相古地理图等特点综合确定的，得出的结果大部分与粒度参数确定的环境吻合，只有少数例外（详见后附录）。此外我国某地白垩系沉积的粒度资料在散点图上多数落在河流相区内（图3—33）（成冶，1976），与其他岩相标志鉴定的结果也一致（成冶，1976），这些均可说明弗里德曼所做模式图是可用的。

此外，汉德（Hand, 1967）通过对某地的海滩沙及沙丘沙的研究，发现还可以用两种或更多种共存的不同密度的矿物在水中的沉速来区分环境，所做散点图的横坐标是中位数粒径的石英碎屑的沉速；纵坐标是$\Delta_{任一种重矿物}$值。以角闪石为例，Δ值为中位数粒径的角闪

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

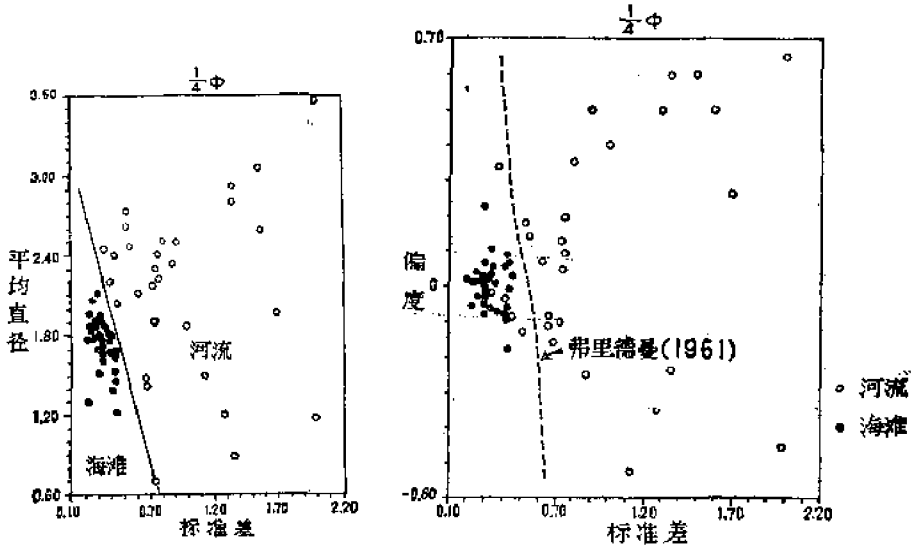


图 3—31　平均直径对标准差的散点图（左图），是根据莫伊欧拉和韦塞的资料；偏度对标准差散点图（右图），是根据弗里德曼（1961）的资料。二者均系1/4φ粒度间隔资料

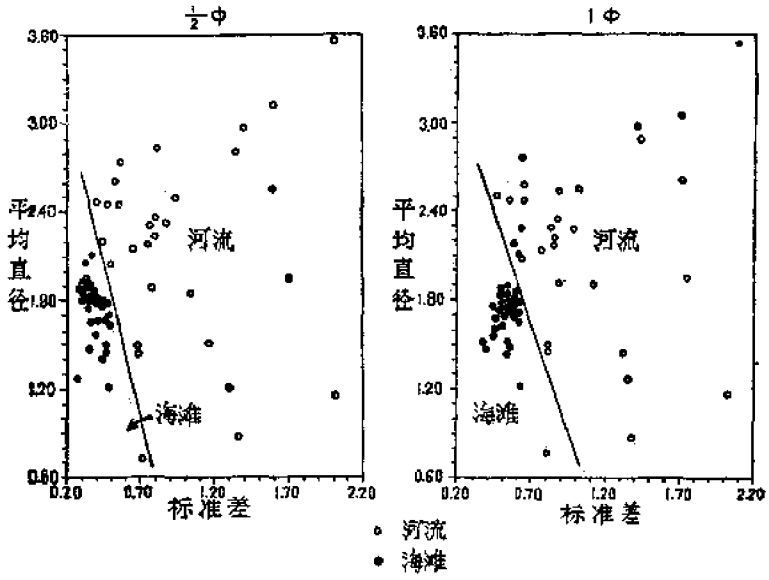


图 3—32　平均直径对标准差1φ、1/2φ资料所做散点图

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

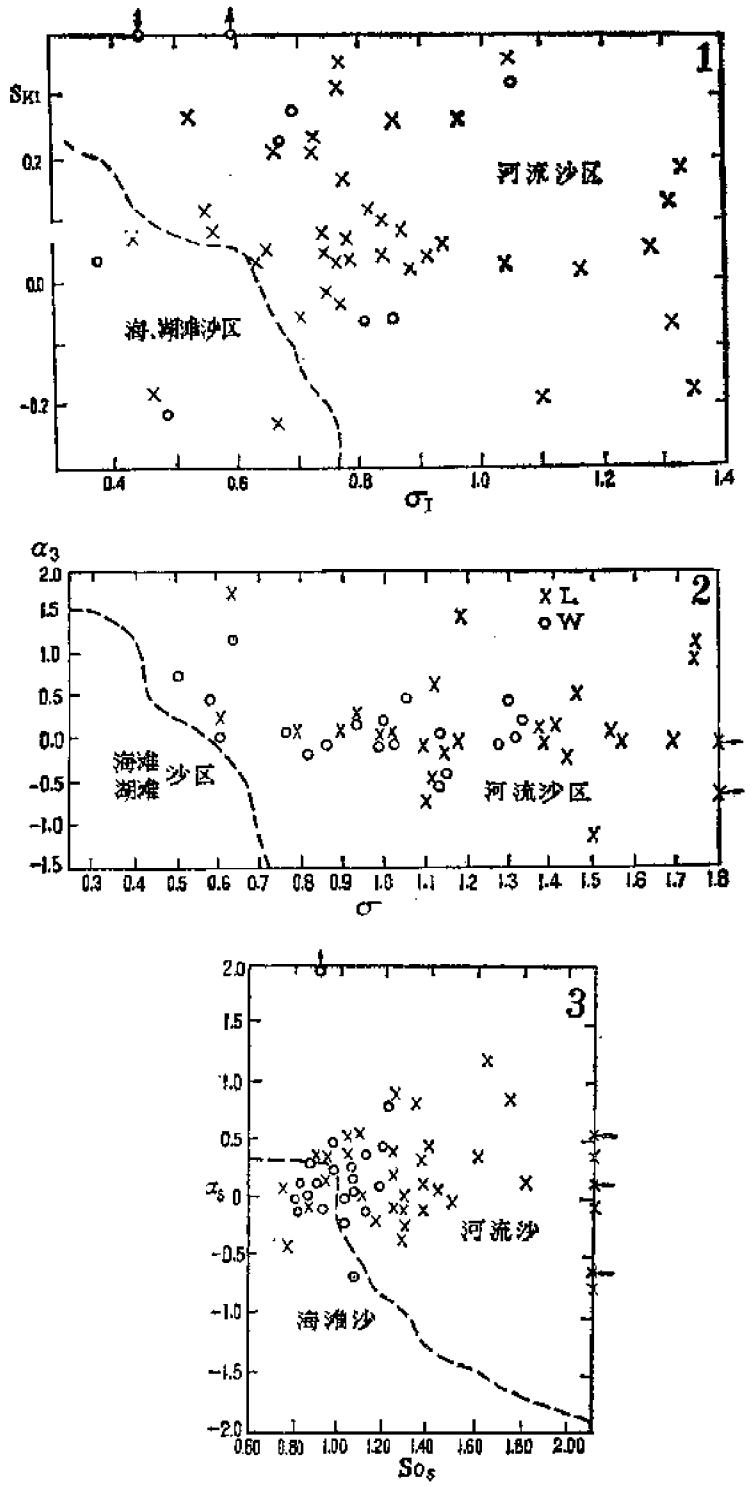


图 3—33　我国某地白垩系沉积粒度资料散点图

L, W 代表不同组段的沉积

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

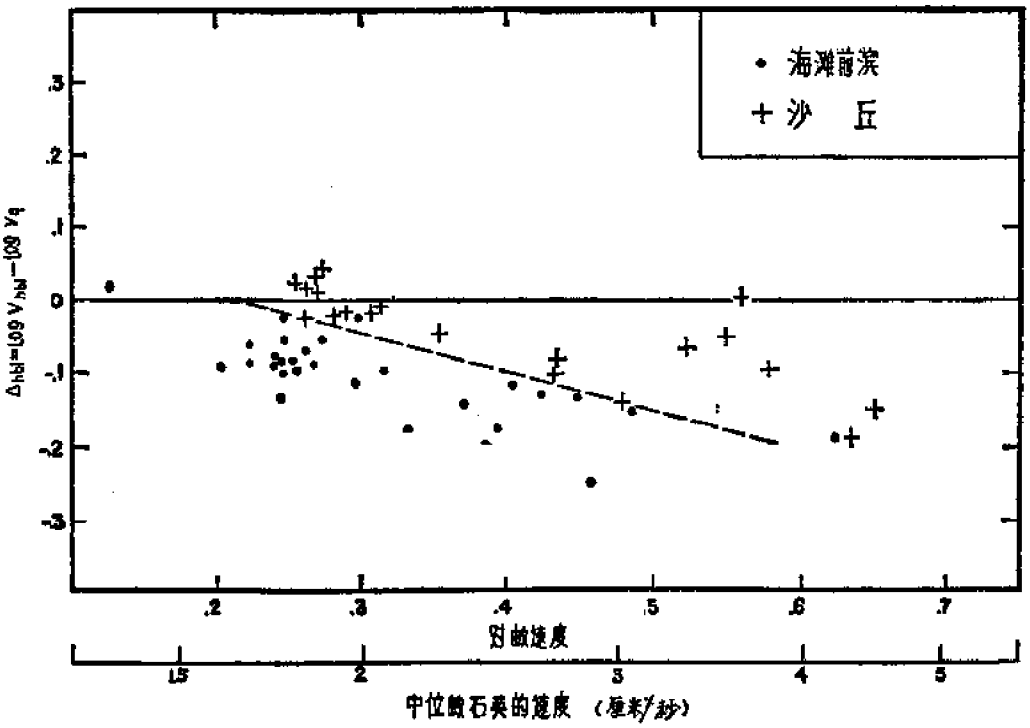


图 3—34 根据矿物的沉速区分环境

纵坐标 $\Delta_{hbl} = \log V_{hbl} - \log V_q$，代表 $\Delta_{角闪石} = \log 沉速_{角闪石} - \log 沉速_{石英}$

石碎屑沉速的对数值减去中位数粒径的石英沉速的对数值。48个样品中只有 4 个例外（图 3—34）。然而他的方法比较麻烦，需要用磁选及重液分离先分成单矿物，再分出 50 至200 颗矿物，在一玻璃筒内求沉速。

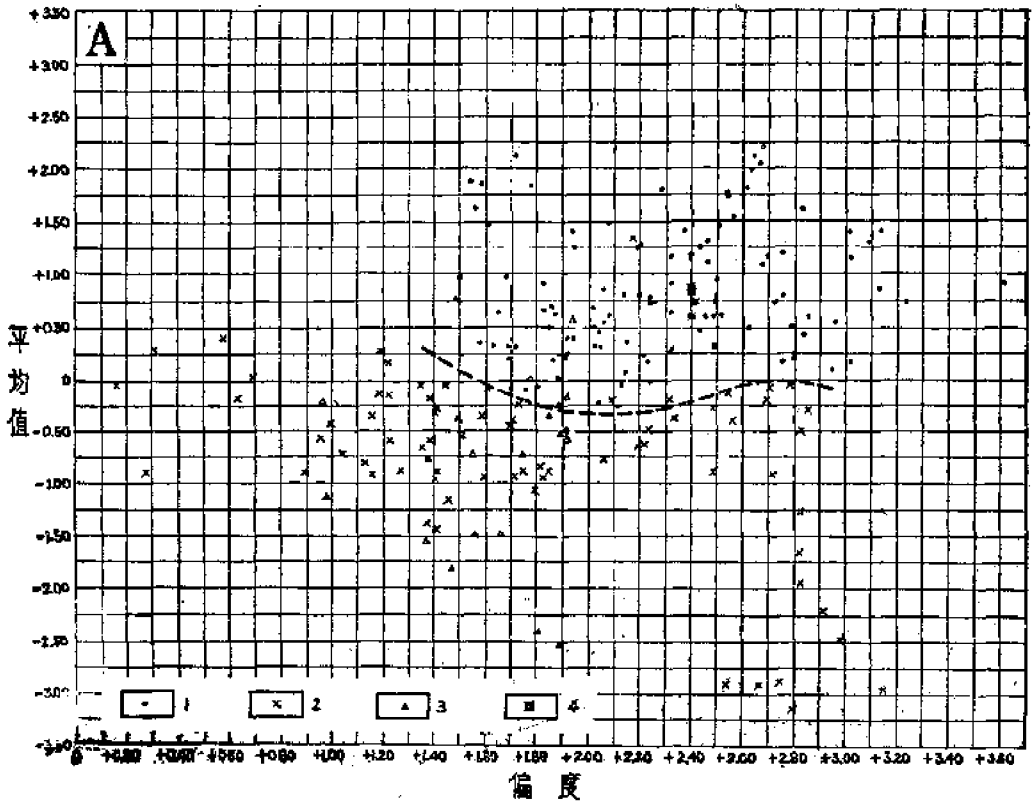
三、海滩沙和沙丘沙的区分

弗里德曼（1961）根据 212 个样品分析结果，证明沙丘沙（包括堰岛、海岸、湖、河流和沙漠的沙丘沙）多为正偏，少数为低负偏，−0.28 或更小，114 个样品中只有 8 个是这种例外；海滩沙为负偏，少数特殊情况为正偏，但在颗粒较细的沙如中至细粒和细粒沙中，这种正偏的例外情况少见，18个湖滩沙中只有 4 个是例外的情况。因此用粒度 ϕ 平均值对偏度的图可以区分这两种情况（图 3—35A）。样品的成分不影响偏度的符号。毫米图分区也是明显分开的（图3—35B）。

然而莫伊欧拉和韦塞（1968）根据他们的资料却认为，海滩和海岸沙丘沙是无法区分的。无论是平均直径对标准差、偏度对平均直径、偏度对标准差或偏度对峰态的 1/4ϕ资料图均无清楚的环境分界线。可是海滩和内陆沙丘却是可以区分的（图3—36）。其中以偏度对平均直径的图最有效，不管是1/4、1/2或1ϕ 资料都是如此，但 1ϕ 资料成功的程度要差些。这个结论和弗里德曼的看法一致。另外，用偏度对峰态的 1/4ϕ 资料可以区分海滩及内陆沙丘沙，但1/2ϕ 资料无效。

他们还注意到内陆沙丘和海岸沙丘沙也可以区分，用偏度对平均直径图不管是1/4ϕ、1/2ϕ还是 1ϕ 资料都很有效（图 3—37）。同时，偏度对峰态的图在 1/4ϕ 资料时有效，而

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn



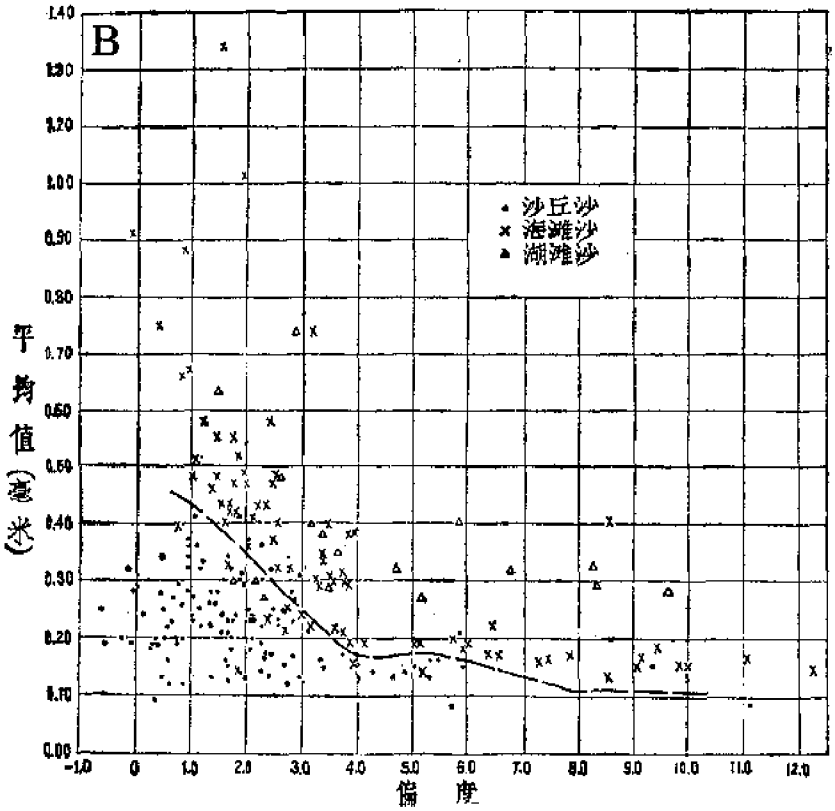


图 3—35 平均值对偏度的散点图，区分沙丘和海滩

A 图的单位是ϕ值，图例：1—沙丘沙；2—海滩沙；3—湖滩沙；4—不平衡的海滩沙。B 图的单位为毫米

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

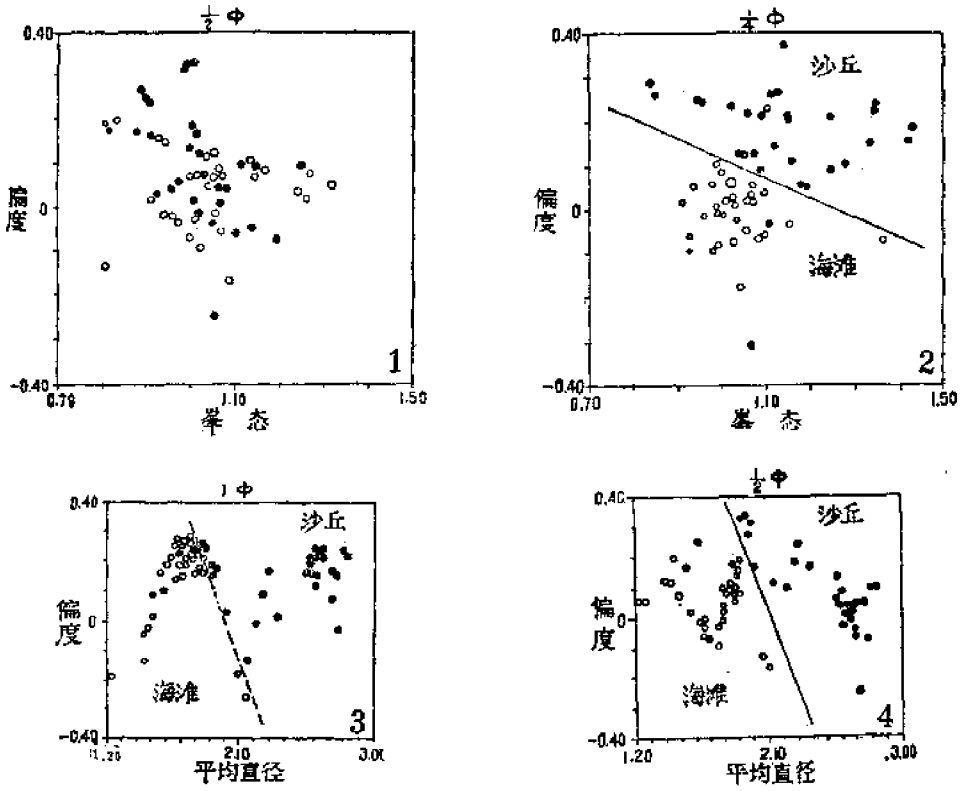


图 3—36　海滩和内陆沙丘区分的散点图

•—海滩；·—内陆沙丘

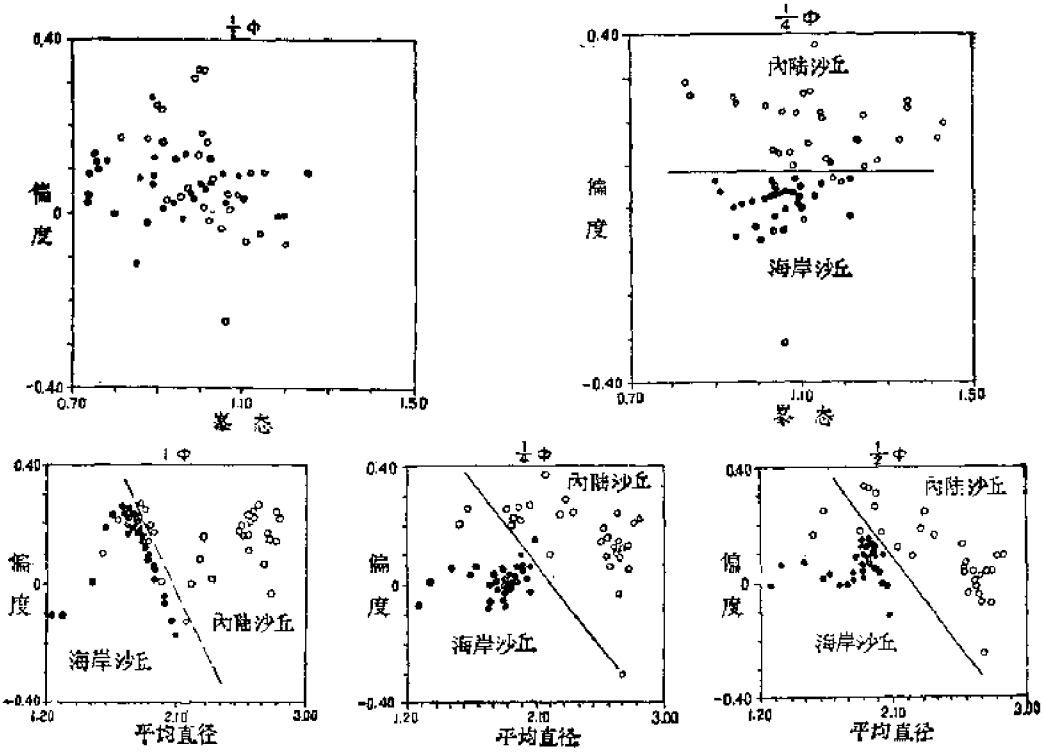


图 3—37　内陆沙丘和海岸沙丘沙区分的散点图

•—内陆砂丘；·—海岸砂丘

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

1/2ϕ资料时完全失败。但总的来讲即使是1/4ϕ资料，此种组合也不如偏度对平均值的组合成功。

四、河流沙和沙丘沙的区分

主要都是正偏，但可以根据分选性区分它们，沙丘沙的分选性好一些。然而在标准差对粒度平均值的图上有三个区域，中间的是重叠区，同时所反映的只是中-细粒和极细粒沙（图3—38）。这种图有人使用过，证明不够灵验，因此还需研究进一步的区分方法。目前是用石英和任一种重矿物平均粒度（ϕ值）之比来区分二者。河沙的比值大于沙丘沙的。从某地的这个比值对标准差比值作图，发现河流沙和沙丘沙位于不同区域内（图3—39）。形成这种比值差异的原理如下：

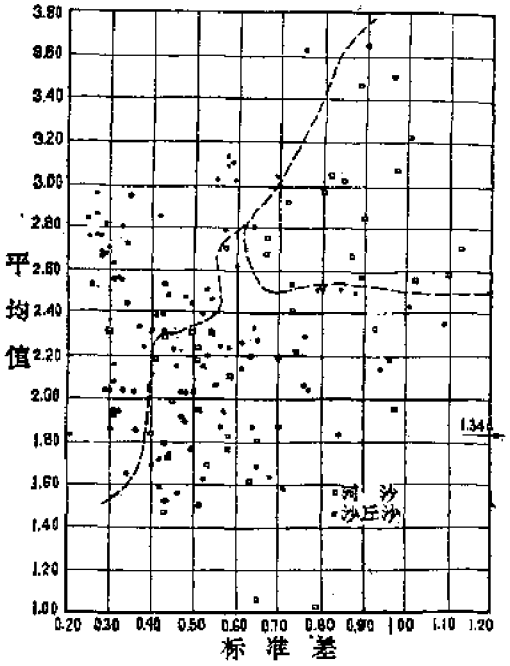


图 3—38 河流沙和沙丘沙的区分散点图

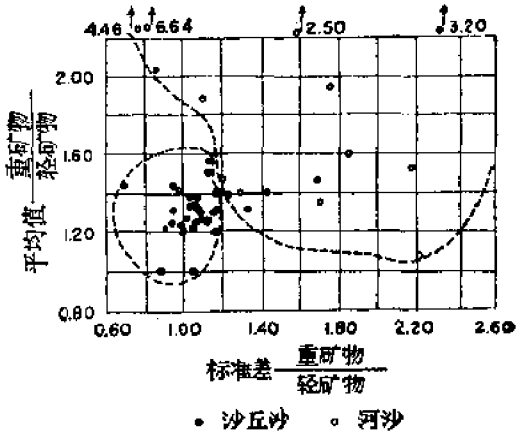


图 3—39 轻重矿物平均值比值对标准差比值的散点图

（注意：图上使用的比值与表3—5中使用比值的分子和分母是颠倒的，因为图上使用的是ϕ值体系）

水搬运情况下不同矿物粒度间的关系为：

$$\frac{r_1}{r_2}=\frac{D_2-K}{D_1-K}$$

式中r_1和r_2是矿物1和2（石英和任一种重矿物）球状颗粒的半径，D_1和D_2是两种矿物的比重，K是介质（水的）比重。因为空气的比重对矿物的比重而言是微不足道的，故可忽略不计，因此风介质搬运下的关系为：

$$\frac{r_1}{r_2}=\frac{D_2}{D_1}$$

以重矿物为磁铁矿举例：

水沉积：

$$\frac{r_1(\text{石英})}{r_2(\text{磁铁矿})}=\frac{5.18-1.00}{2.65-1.00}=2.56$$

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

风沉积：

$$\frac{r_1(\text{石英})}{r_2(\text{磁铁矿})}=\frac{5.18}{2.65}=1.96$$

因此水的

$$\frac{r_1(\text{石英})}{r_2(\text{磁铁矿})} > \text{风的} \frac{r_1(\text{石英})}{r_2(\text{磁铁矿})}$$

表3—5中给出常见的各种矿物比值：

表 3—5　石英和相同速度滚动的重矿物半径比值表

矿　　物	在水中的比值 r_1（石英）/r_2（重矿物）	在空气中的比值 r_1（石英）/r_2（重矿物）
磁铁矿	2.56	1.96
黄铁矿	2.39	1.87
石榴子石（铁铝榴石）	1.94	1.58
锆　石	2.24	1.78
电气石	1.26	1.16

工作时可用常规法做重矿物分离，重矿物的粒度可在显微镜下测定，石英的粒度则用筛析或用显微镜分析求出。

然而莫伊欧拉和韦塞（1968）的资料表明，可以简单地用沉积物的平均直径对标准差的散点图来区分河流及海岸沙丘，1/4ϕ、1/2ϕ及1ϕ均有效（图3—40）。但他在区分河流及内陆沙丘时也宣告失败。

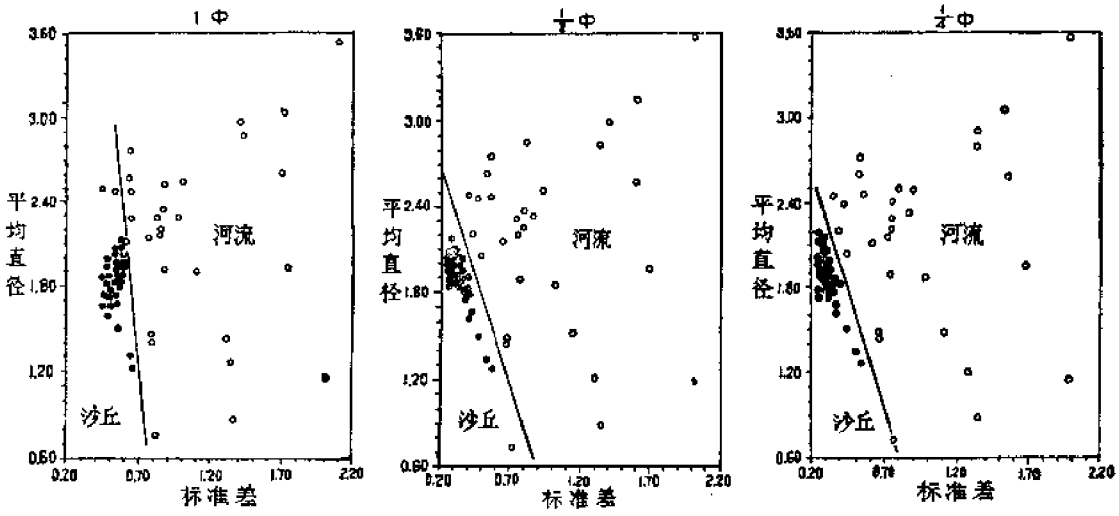


图 3—40　河流与海岸沙丘沙的区分散点图

五、利用米制粒度统计值区分环境

近年来，布勒和梅曼斯（Buller & Memans, 1972）考虑到上述各方法均是以ϕ粒级几何值为基础，而现有的粒度资料多属线性米制粒级的；同时等长的横坐标不代表等粒级变化的ϕ值，不那么容易理解。因此开始探索为人们忽略了的米制粒级参数在区分沉积环境上的应用。结果证明各种环境的趋势线位置及斜率均不同，可以用来区分环境。

粒度参数，无论ϕ粒级或米制粒级都有两种计算方法：算术的和几何的（表 3—6）。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表 3—6 粒度统计值
（米制粒级的，ϕ值粒级的从略）

一算术值
中位数Md
四分位数（分选系数）$QD_a=(Q_3-Q_1)/2$
偏度$SK_a=(Q_3+Q_1-2Md)/2$
二几何值
四分位差$So=(Q_3/Q_1)^{1/2}$
偏度$SKg=(Q_3Q_1/Md^2)^{1/2}$

几何方法得出的是无维值，算术法得出的是维值。例如一个沉积物含68%的颗粒属1.0毫米和0.25毫米的粒度区间。如以算术值表示这个粒度区间，应为1.0—0.25＝0.75毫米；而以几何值表示则为1.0/0.25＝4。前者是维值，后者为无维值。近年来沉积岩石学家似乎更倾向于用几何值。

他们以米制粒级算术值QD_a对SK_a在双对数纸上做图，根据800多个样品，表现出各种环境线性趋势的位置和斜率存在着区别。按下列顺序斜率逐次降低：静水；河成；海滩和浅滩；风成的（图3—41）。

而以QD_a对Md做图时，则按下列顺序斜率降低：风成；河流；海滩和浅滩；静水（图3—42）。静水可包括静海和湖成两部分，因为有的地区二者的线性趋势几乎一致。

考虑到这两种图上超覆的地区很多，因此最好将两种图结合起来使用，而且主要是了

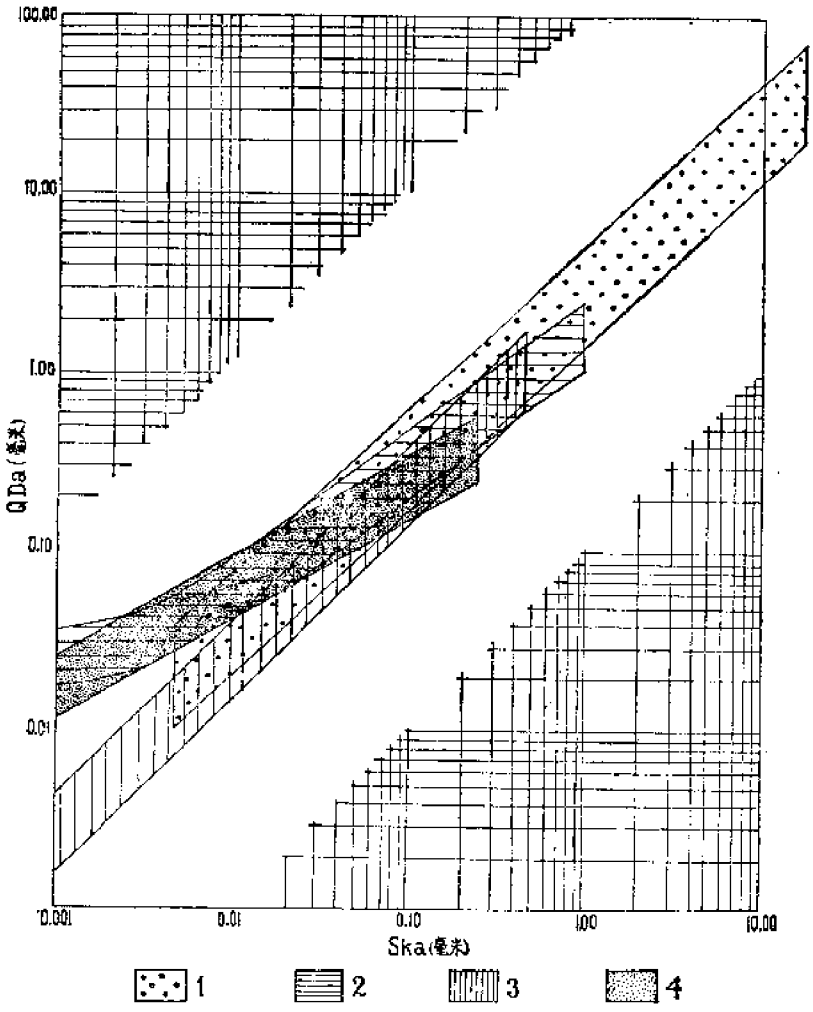


图 3—41 QD_a 对 SK_a 的散点图
1—河成；2—海滩和浅滩；3—静水；4—风成

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

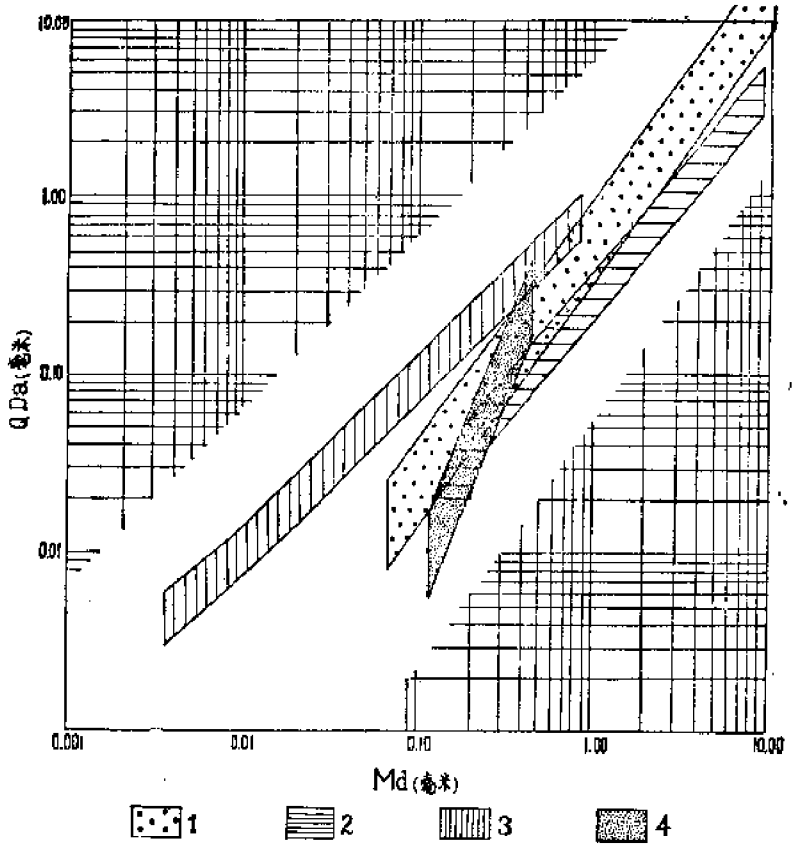


图 3—42 QD_a对Md的散点图

1—河成；2—海滩和浅滩；3—静水；4—风成的

解资料点分布趋势的位置和斜率，而不是根据个别资料点确定环境。因此需要大量的中位数粒度区间宽的资料。虽然这种图不如ϕ几何值图那样，资料点表现得很集中，然而用来处理我国积累起来的钻井粒度资料是有意义的。这种资料很多，而且大部分是米制的。我们就曾将陕北侏罗系的米制资料利用这种图来确定环境。结果发现，根据资料点趋势的位置和斜率定出的环境与其他分析的结果基本一致，进一步证明这种图解是可以利用的。

六、冰积物的区分

兰迪姆和弗雷克斯（Landim & Frakes, 1968）用散点图法研究冰碛物与冲积扇、冰碛物与冰水沉积的区分问题。发现概括图解标准差（σ_I）对平均值（M_z）在区分冰碛物与冲积扇上最有效。冰碛物的分选更差，同时平均值更细（图3—43）。在使用此图解时注意，冲积扇只根据了一个分析者在一个地区的资料，如资料增加时，可能图形会有所变化。但该作者在图上画了几个古泥流的资料，是落在冲积扇区内，说明此图还可以用于古代岩石的环境鉴定上。

区分冰碛物与冰水沉积，以概括图解标准差（σ_I）对图解平均值（M_z）的散点图最清楚（图3—44），图解平均值对图解峰态（KG）次之。在前种图上可看出，冰碛物比冰水沉积的分选差，同时它的平均值趋向于更细（ϕ值更大）。当然冰水沉积的资料更多时，

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

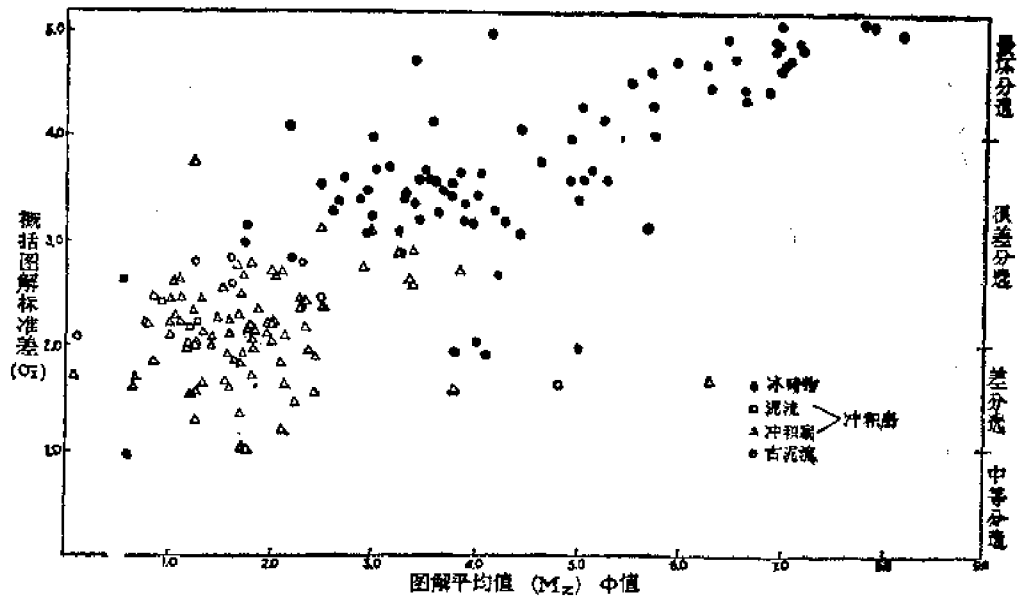


图 3—43 概括图解标准差（σ_I）对图解平均值（M_z）的散点图，可区分冰碛物与冲积扇沉积

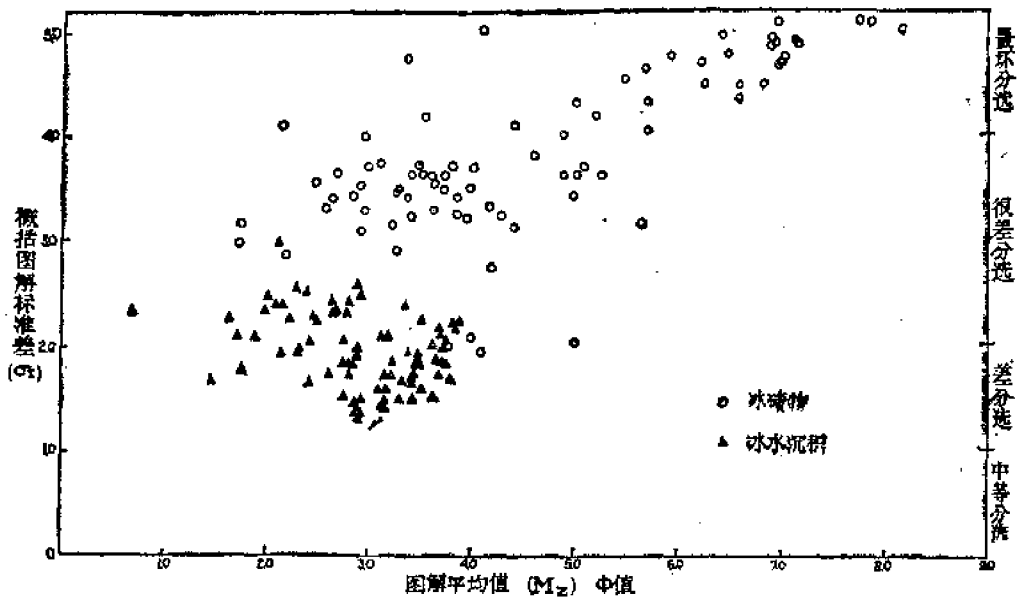


图 3—44 概括图解标准差（σ_I）对图解平均值（M_z）区分冰碛物和冰水沉积

可能图的形式会有所变化，但冰水沉积的分选性更好、平均值更粗，这是合理的。还可利用均值对峰态的图，在这种图上冰碛物呈宽峰态而冰水沉积则为窄峰态。实际上在野外情况下，二者还可根据层理情况分开，冰水沉积是有层理的。

区分冰水沉积和冲积扇沉积，可根据偏度对峰态的图，这种图不如前述各图清楚，冰水沉积是负偏并且为极窄的峰态；冲积扇则为正偏及微窄的峰态。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

第五节　判别分析在根据粒度资料区分环境上的应用

判别分析是一种多元统计分析，可用来寻找适当的统计值以判断不同的沉积作用和沉积环境。判别分析中最常用的是两组样品的多元线性判别函数。

假定有已知的两种环境的两组样品，每组样品都含同样的变量 x_k $(k=1,2\cdots,P)$，粒度分析中的变量一般为粒度参数M_z、σ_I^2、SK_I、KG 等（福克和沃德，1957）则可构成判别函数

$$y=\sum_{k=1}^{P}C_kx_k \qquad (1)$$

式中P代表变量x_k的个数，C_k为判别方程中的各系数。如果我们想了解一个未知样品(或组）属于两种环境中的那一种时，只需将粒度参数代入判别方程，求出$\bar{y}_x$，当$\bar{y}_x>y_c$（临界值）时属于第一种环境，$\bar{y}_x<y_c$属于第二种环境。

如何求出这两种环境的判别方程，并且使判别临界值y_c分辨最好呢？根据费希尔（Fisher 1936)准则，应该是两组（A, B）样品的判别函数平均值相差（$\bar{y}_A-\bar{y}_B$）越大越好；另外，每组内为各样品的判别函数越接近越好，亦即方差总和$\left[\sum_{i=1}^{n_A}(y_{Ai}-\bar{y}_A)^2+\sum_{i=1}^{n_B}(y_{Bi}-\bar{y}_B)^2\right]$越小越好（式中$i$为样品数，$n_A$为第一组样品总数，$n_B$为第二组样品总数)。二者联合起来，即要求下式最大

$$I=\frac{(\bar{y}_A-\bar{y}_B)^2}{\sum_{i=1}^{n_A}(y_{Ai}-\bar{y}_A)^2+\sum_{i=1}^{n_B}(y_{Bi}-\bar{y}_B)^2}=\frac{Q}{F}$$

为了求极值，需分别求I对各C_k的偏微商，即

$$\frac{\partial I}{\partial C_k}=\frac{F\frac{\partial Q}{\partial C_k}-Q\frac{\partial F}{\partial C_k}}{F^2}$$

$$\frac{1}{I}\frac{\partial Q}{\partial C_k}=\frac{\partial F}{\partial C_k}$$

将 $y=\sum_{k=1}^{P}C_kx_k$ 代入并化简，最后得出

$$(C_1S_{k1}+C_2S_{k2}+\cdots+C_kS_{kk}+\cdots+C_pS_{kp})=\frac{(C_1d_1+C_2d_2+\cdots+C_pd_p)d_k}{I}$$

式中 S_{kk}（自相关系数）$=\sum_{i=1}^{n_A}(x_{Aki}-\bar{x}_{Ak})^2+\sum_{i=1}^{n_B}(x_{Bki}-\bar{x}_{Bk})^2$

S_{kl}（互相关系数或交叉积）

$$=\sum_{i=1}^{n_A}(x_{Aki}-\bar{x}_{Ak})(x_{Ali}-\bar{x}_{Al})+\sum_{i=1}^{n_B}x_{Bki}-\bar{x}_{Bk})(x_{Bli}-\bar{x}_{Bl})$$

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

$$d_k=\bar{x}_{Ak}-\bar{x}_{Bk}$$

令
$$\frac{C_1d_1+C_2d_2+\cdots+C_Pd_P}{I}=\beta$$

则有 $C_1S_{k1}+C_2S_{k2}+\cdots+C_PS_{kP}=\beta d_k(k=1,2,\cdots,P)$

上式是一个P阶线性代数方程组，式中β独立于k，对k来说是常因子，对线性方程组的解起着共同扩大倍数的作用，不影响它的解C_k之间相对比例关系，因此对判别函数无影响，故可令$\beta=1$，因此上面线性方程组可以变成下列形式

$$\begin{cases}S_{11}C_1+S_{12}C_2+\cdots+S_{1P}C_P=\bar{x}_{A1}-\bar{x}_{B1}\\S_{21}C_1+S_{22}C_2+\cdots+S_{2P}C_P=\bar{x}_{A2}-\bar{x}_{B2}\\\vdots\\S_{P1}C_1+S_{P2}C_2+\cdots+S_{PP}C_P=\bar{x}_{AP}-\bar{x}_{BP}\end{cases}$$

根据这个方程组很容易求出C_1, C_2,…, C_P并得到

$$y=\sum_{k=1}^{P}C_kx_k$$

$$\bar{y}_A=\sum_{k=1}^{P}C_k\bar{x}_{Ak}\qquad\bar{y}_B=\sum_{k=1}^{P}C_k\bar{x}_{Bk}$$

同时还可计算判别函数的标准差

$$S_A=\frac{\sum_{i=1}^{n_A}(y_{Ai}-\bar{y}_A)^2}{n_A}\qquad S_B=\frac{\sum_{i=1}^{n_B}(y_{Bi}-\bar{y}_B)^2}{n_B}$$

从而得出判别函数临界值

$$y_{A:B}=\frac{S_B\bar{y}_A+S_A\bar{y}_B}{S_A+S_B}\qquad(2)$$

对未知样品（或组）进行判别时，需先根据判别函数（1）求出y_x值，然后看y_x在$y_{A:B}$之那一边，如在$\bar{y}_A$一边时则未知样品属第一种环境，反之属第二种环境。

判别函数是假设两样品得自不同的总体，如两组多元平均值在统计上差异不显著，判别就无效，因此需要检验这种假设是否成立。

显著性检验一般采用马哈拉诺比斯（Mahalanobis）统计值D_p^2

$$D_p^2=\sum_{k=1}^{P}C_kd_k$$

多元平均值之间的差异显著性用下式检验

$$F(p,\ n_A+n_B-p-1)=\frac{n_An_B(n_A+n_B-p-1)}{(n_A+n_B)(n_A+n_3-2)p}D_p^2$$

p、n_A+n_B-p-1为自由度。当$F>F_{0.05或0.1}$的表值时，表明两组样品在指定的信度下有显著的差异。

每个变量占多元平均值间总距离的百分比可由下列式子计算：

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

$$D_k = C_k d_k / D_i^2 \times 100$$

百分比小的变量在以后的计算中可以剔除，对判别函数无影响。

萨休（1964）将判别分析用于粗碎屑沉积物上，是基于假定碎屑沉积物的粒度能反映介质的流动性（粘度）和沉积位置（环境）的能量情况。因此采样只限于砾石、沙、粉沙等碎屑物质，采样的环境包括：浊流、三角洲、泛滥平原、河道、浅海（30英尺深）、沿岸（海滩）、风坪、风成沙丘等，大部分为沉积物样，只有浊流是岩石样。针对不同的沉积单位以等厚的间距取样，取样时尽量使取样的厚度单位小，以免采取了不同环境的复合样，海滩和风成沙丘是按25英尺的水平间距，风坪则按80英尺间距系统取样。

样品大部分是用沉积筒法，少数用筛析法进行分析。样品统计值是用图解法求得，各粒度统计值的定义是根据福克和沃德（1957），如下表（表3—7）：

表 3—7　样品统计值图解法的公式

φ平均直径 M_z	$\dfrac{\phi_{16}+\phi_{50}+\phi_{84}}{3}$
φ标准差 σ_I	$\dfrac{\phi_{84}-\phi_{16}}{4}+\dfrac{\phi_{95}-\phi_5}{6.6}$
φ偏度 SK_I	$\frac{1}{2}\left(\dfrac{\phi_{84}+\phi_{16}-2\phi_{50}}{\phi_{84}-\phi_{16}}+\dfrac{\phi_{95}+\phi_5-2\phi_{50}}{\phi_{95}-\phi_5}\right)$
φ峰态 K_G	$\dfrac{\phi_{95}-\phi_5}{2.44(\phi_{75}-\phi_{25})}$

得到以下各环境间的判别函数

Ⅰ，风和海滩

$$y_{风,海滩} = -3.5688M_z + 3.7016\sigma_I^2 - 2.0766SK_I + 3.1135K_G$$

未知样品组$\bar{y}_x < -2.7411$，属风成的；> -2.7411，属海滩的。$D_i^2 = 1.3148$，显著性水平0.1%。风成作用函数平均值$\bar{y}_{风} = -3.0973$，标准差$S_{(风)} = 0.519$；海滩的$\bar{y}_{海滩} = -1.7824$，$S_{(海滩)} = 1.397$。

Ⅱ，海滩和动荡的浅海

$$y_{海滩,浅海} = 15.6534M_z + 65.7091\sigma_I^2 + 18.1071SK_I + 18.5043K_G$$

未知样品组$\bar{y}_x < 65.3650$属海滩；> 65.3650属浅海。$D_i^2 = 52.8000$，显著性水平为0.1%。$\bar{y}_{海滩} = 51.9536$，$S_{(海滩)} = 4.869$；$\bar{y}_{浅海} = 104.7536$、$S_{(浅海)} = 14300$。

Ⅲ，浅海和冲积（样品主要取自三角洲，同时使用了部分河流相的文献资料）

$$y_{浅海,冲积} = 0.2852M_z - 8.7064\sigma_I^2 - 4.8932SK_I + 0.0482K_G$$

未知样品组$\bar{y}_x < -74190$时属于冲积（三角洲）；> -7.4190属浅海。$D_i^2 = 5.1251$，显著性水平0.1%。$\bar{y}_{浅海} = -5.3167$，$S_{(浅海)} = 2.190$；$\bar{y}_{冲积} = -10.4418$，$S_{(冲积)} = 3.149$。

Ⅳ，冲积和浊流

$$y_{冲积,浊流} = 0.7215M_z - 0.4030\sigma_I^2 + 6.7322SK_I + 5.2927K_G$$

未知样品组$\bar{y}_x < 9.8433$时属浊流；> 9.8433时则属冲积。$D_i^2 = 2.7325$，显著性水平1%。$\bar{y}_{冲积} = 10.7115$，$S_{(冲积)} = 1.197$ $\bar{y}_{浊} = 7.9791$，$S_{(浊)} = 2.570$。

以$\sqrt{\overline{\sigma_I^2}}$对$\left(\dfrac{S(KG)}{S(M_z)} \cdot S(\sigma_I^2)\right)$在对数坐标纸上做图表现得最清楚（图3—45）并可大致的分界。同时在图上也表示了能量及流动性下降的方向。

莫伊欧拉和韦塞（1969）也证明粒度的线性判别分析在用1φ间隔的资料区分当代海滩、沙丘和河流上比1/4φ资料的结构参数散点图还可靠和有效。最近我国地质工作者应用判别分析确定某地中生代砂岩体的环境也是有效的。

兰迪姆等（1968）曾求出了冰碛物及冰水沉积、冰碛物及冲积扇的判别方程，由于他们使用的冲积扇及冰水沉积的资料只是一个地区的，因此其普遍性还待继续证实，但他们

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

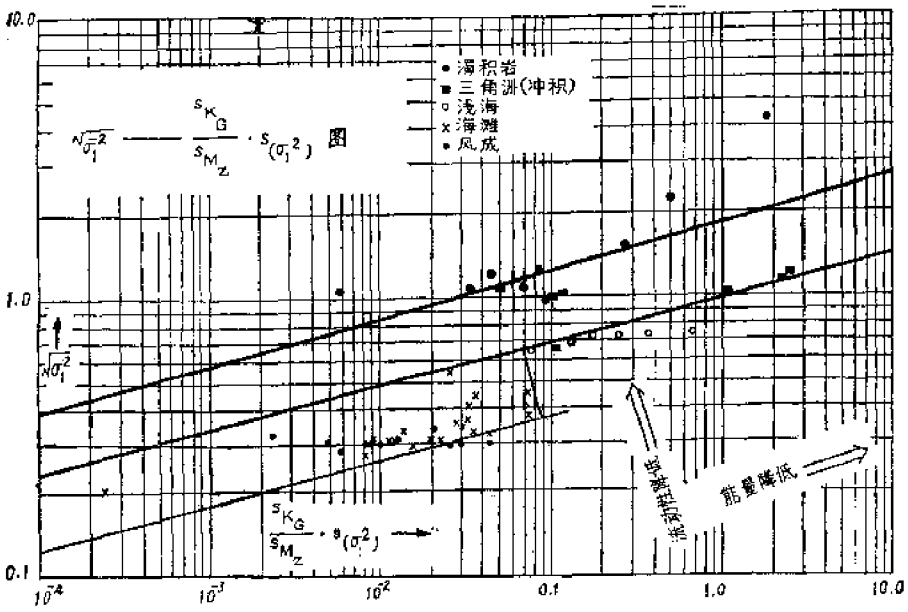


图 3—45 全部样品ϕ平均方差的平方根（纵坐标）对峰态标准差与平均粒度标准差之比乘全部样品方差的标准差（横坐标）

在几种参数联合图中，只有这种联合图得出最清楚的环境划分

得出的结果是合理的，因此介绍出来做为参考。

I 冰碛物和冲积扇

$$y_{\text{冰碛物：冲积扇}} = 0.00405M_z + 0.2381\sigma_I - 0.05616SK_I + 0.10365K_G$$

未知样品组$\overline{y}_x$<0.12809时属冲积扇；>0.12809 时属冰碛物。$D_4^2 = 10.08129$，显著性水平 0.1%；$\overline{y}_{\text{冰碛物}} = 0.16121$，$\overline{y}_{\text{冲积扇}} = 0.10225$；$S_{(\text{冰碛物})} = 0.02312$，$S_{(\text{冲积扇})} = 0.01317$；有12%的样品重叠互相过渡。

II 冰碛物与冰水沉积

$$y_{\text{冰碛物：冰水沉积}} = -0.00256M_z + 0.03501\sigma_I + 0.2578SK_I - 0.01549K_G'$$

未知样品组$\overline{y}_x$<0.8133时属于冰水沉积；$\overline{y}_x$>0.8133时属于冰碛物。$D_4^2 = 10.94437$，显著性水平 0.1%。$\overline{y}_{\text{冰碛物}} = 0.11429$，$\overline{y}_{\text{冰水沉积}} = 0.04836$；$S_{(\text{冰碛物})} = 0.2509$，$S_{(\text{冰水沉积})} = 0.01326$。有51%的点重叠过渡，但如剔除乌顿（1914）的四个样品资料，则只有11%的点重叠。

根据所计算的判别指数来看，是具有高的显著性判别，因此是可以利用的。

戴维斯和埃思里奇（Davies & Ethridge, 1975）鉴于砂岩碎屑受环境的影响很大，因而可以根据不同种类碎屑的相对含量和粒度来反映环境。盆地内任一环境的差异都可以引起沉积成分的变化，但是这种变化并非独立的，而是与结构的变化密切相关。因此，他们在全新世及古代沉积中选择了 600 个不同粒度的各种环境（包括堰岛综合体、河流冲积谷及三角洲等）做二元回归分析及多组判别分析，发现对中和高能环境（即较粗粒的沉积）判别有效，碎屑沉积物的成分和结构对区分环境是灵敏的。为了使所选样品的成分和粒度变化是真正的环境变化因素引起的，规定了严格的抽样限制：

（1）必须是短的地质时间间段内的沉积物，这样可以减小构造格局、气候等因素在时间上反映的变化影响。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

（2）整个抽样区内，沉积物必须来自单一源区。

（3）这些地层内必须有不同沉积环境的代表，而且都能采到样，并具有明确的环境资料，以便能在广泛的环境格局内估价成分和结构的变化。

（4）地区和岩石的构造变形必须了解清楚，并且是很小的，以免将区域构造影响误认是环境因素。

（5）成岩作用对碎屑矿物的原生成分或结构没有重要的影响。

按这样规定抽样才能正确地估价碎屑矿物的成分和结构变化在区分沉积环境上的作用。

采用的是薄片鉴定法，因为只有从薄片上才能得到碎屑成分的含量及粒度的资料，并能看出成岩作用的影响。沉积物分析方法步骤如下：

（1）根据野外工作建立或检查已建立的沉积环境；

（2）测定和记录剖面，采集样品；

（3）切片，如系疏松样可先煮胶；切片方位最好垂直层理；

（4）每个样品应测定（a）石英颗粒视长径的粒度；（b）点计法测定所有组份，包括石英、长石、云母、岩屑、基质、副矿物，有时还要测定其他以及胶结物；（c）确定每种矿物的统计分布；（d）计算所需成分和粒度的统计值（平均值、标准差）。

为了发现源区的变化，可对样品做常规的重矿物分析。重矿物抽样是限于一个粒度区间内，即100—50微米。这样做可以减小因粒度不同而造成的重矿物含量变化的影响。

基质（<0.03毫米部分）是做为一个考查环境变化的重要因素。测定后，一方面可以很容易看出它对总资料的影响，另一方面如果需要的话也可以剔除。

戴维斯和埃思里奇在数据分析中采用了金（King，1969，p210）提出的判别函数系数，并对线性判别函数作了经验的解释，即用系数的大小来表示在判别分类上每个变量的相对重要性。同时还用逐步判别函数法来检验判别分类上各变量的相对重要性。此外，他们还使用了回归分析来估价粒度—成分—沉积环境的相互关系，所有数据都做出了最佳拟合曲线。关于数学处理方法，因此处篇幅所限，读者可参考库利和洛内斯(Cooley & Lohnes，1962）和金（1969）等著作。下面简介一下他们的成果。

1．**全新世加尔沃斯顿堰岛综合体** 为很细粒（3.17ϕ，0.11毫米）、石英质（石英达63.3%）的沉积物。在石英粒级对石英含量图上（图3—46）可以大致的划分环境。泻湖的沙较下滨面沉积所含的石英少些，但石英粒度平均值则类似（0.08毫米）；中滨面比下滨面的沉积物含更多的石英，并且粒度粗些；海滩和沙丘的石英含量差不多一样（分别为百分之78和80），但石英粒度平均值稍有不同。

五个成分（石英、长石、岩屑、基质、副矿物）及两个粒度（石英粒度平均值和粒度标准差）变量的判别函数分析，可以分辨综合体内的五种环境：（1）下滨面；（2）中滨面；（3）上滨面-海滩；（4）沙丘；（5）泻湖。图3—47表示出前两个判别函数与每个样品的关系，在这个图中可以看出，五个环境中有四个可以可靠的分开，沙丘和海滩的样品点位于同一区，单根据岩石学资料是不能区分的。在图3—48中用判别函数1和3做了尽可能的区分。七个变量在判别上的相对重要性列于表3—8中，相关值越接近1.0或−1.0，判别也更有效。在图3—47中沿判别函数1，石英、岩屑含量高的样品投在零点的右方，而基质含量高时，趋向于投在左边。沿判别函数2，较高的基质含量则投在图的上

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

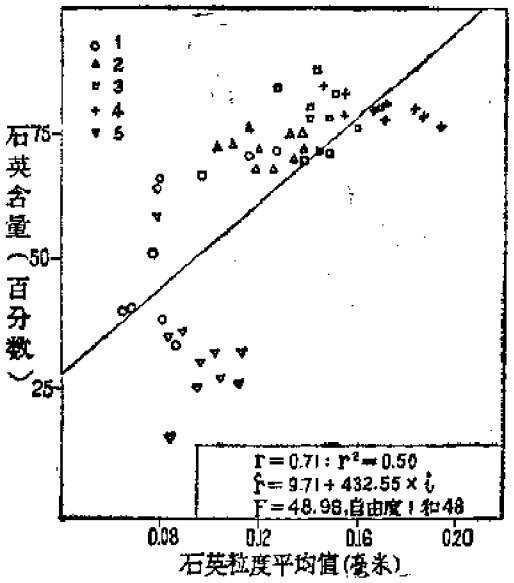


图 3—46 加尔沃斯顿堰岛综合体石英粒度平均值对石英含量图

r—相关系数；$\hat{Y}$—回归方程；F—F 检验值及自由度。1—下滨面；2—中滨面；3—上滨面-海滩；4—沙丘；5—泻湖

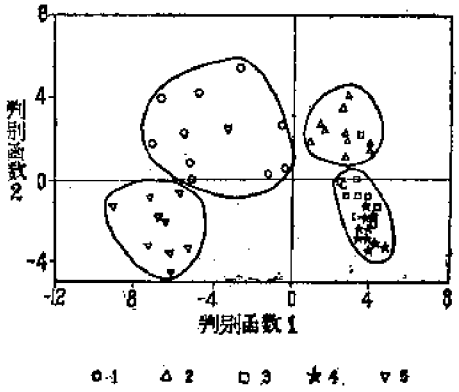


图 3—47 多组判别函数分析

堰岛综合体—轴1和2。1—下滨面；2—中滨面；3—海滩上滨面；4—沙丘；5—泻湖

表 3—8 变量与判别函数间的相关值，德克萨斯堰岛综合体

	石 英	长 石	岩 屑	基 质	副矿物和胶结物	石英粒度平均值	粒度标准差
判别函数 1	0.93	0.67	0.83	−0.95	0.07	−0.90	−0.90
判别函数 2	0.13	0.10	0.44	−0.22	0.17	0.41	0.03
判别函数 3	−0.24	−0.43	0.26	0.13	0.37	−0.06	−0.15

表 3—9 加尔沃斯顿堰岛综合体全新统沉积物的成分和结构

（资料是根据 5 个环境50个样品的岩石学分析）

	石 英	长 石	岩 屑	基 质	副矿物（混入介壳）	石英粒度平均值 ϕ（毫米）	石英粒度标准差
上滨面	54.6	3.5	7.5	32.8	1.5	3.7(0.08)	0.73
中滨面	72.2	5.5	17.6	1.8	2.9	3.08(0.12)	0.44
下滨面	78.0	4.1	15.6	0	2.3	2.86(0.14)	0.40
沙丘	80.1	6.8	11.8	0	1.3	2.63(0.16)	0.42
泻湖	31.7	0.7	1.9	63.8	1.9	3.57(0.08)	0.78
总平均值	63.3	4.1	10.9	19.7	2.0	3.17(0.11)	0.55
总标准差	20.3	2.9	6.5	27.6	2.0	0.46	0.19

方。这些判别分析得到的不同类别的范畴，是由各变量的含量平均值给出的（表3—9）。

对上述回归分析、判别分析结果所做的解释，主要认为是由于不同搬运作用——牵引、跳跃、悬浮造成的，各种作用的不同联合方式构成了不同的粒度分布，随之引起成分上的差异，如泻湖沉积物的特征是含大量悬浮作用的细粒（基质）物质及在偶然的暴风雨中引入的少量跳跃和牵引作用的较粗粒物质。下滨面则以悬浮和跳跃的粉沙质粘土和沙的互层

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

为特征，因为上述的两个环境中有悬浮和跳跃的混合作用，故其沉积物比堰岛的其他环境分选差些。此外，中滨面的特点是水深减小、能量增高的情况，因此是以跳跃和牵引为主、只有小量悬浮的粒度分布，沉积物特征是基质含量少些，但石英、长石、岩屑较以上两环境含量更大，并且石英粒度平均值较大。最后，上滨面-海滩环境中可以认出跳跃总体是由冲刷和回流的两段组成，沉积物完全不含基质，说明悬浮携带几乎不存在。当搬入的是较粗粒物质时，可以是牵引形成的。在这个带的能量状况下，可破坏某些矿物，只留下物理稳定性高的矿物，因此本带较中滨面所含稳定性差的岩屑要少些。风搬运的沙丘中跳跃作用是重要的，只含少量悬浮引入的物质。尽管沙丘和上滨面-海滩的搬运机质有明显的区别，但在图3—47中的判别无效。图3—48中也只是尽可能地划分，这个划分的根据是，由于上滨面-海滩的样品较之相当的沙丘样品含较少的长石，并且副矿物较高。其他人（Gribbons, 1967,等）在另外一些地区还观察到，从海滩至沙丘，钙质碳酸盐的含量降低，认为是由于粒度分选使海滩上留下较粗（主要是碳酸盐）物质，以及在沙丘中碳酸盐受到淋滤而流失之故。

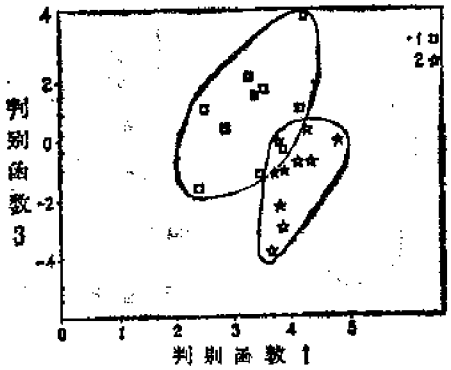


图 3—48　加尔沃斯顿综合体的多组判别分析轴1和3。1—上滨面海滩；2—沙丘

2．全新世密西西比河下冲积谷沉积物及三角洲沉积物　两种沉积物主要都属粉沙级，且含大量基质。对两种沉积物如前述一样都作了石英粒度对石英含量图（图3—49及3—50），冲积岩的最佳拟合曲线为二阶多项式，三角洲则为线性拟合曲线。在这两张图上可以看出，前者可以大致得出一些环境的区别，后者则不能很好的划分，各种环境都有一定的交叉。多组判别分析表明，冲积岩沉积物可以划分出点沙坝、天然堤-填塞河道-湖及后沼泽（图3—51）三类；三角洲沉积物则只能大概的划分出海浸海滩、天然堤-填塞河道-三角洲前缘、及前三角洲三类，而且三类都有相当的重叠（图3—52）。不同环境有重大变化的变量，即线性判别函数≥0.7的变量两种沉积物相同，都包括石英、长石、岩屑、基质和石英粒度。

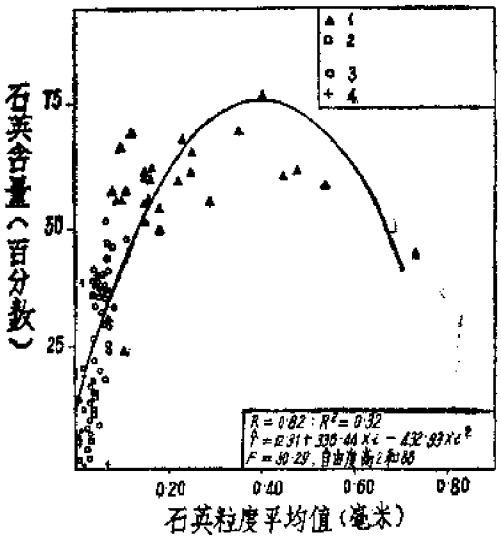


图 3—49　密西西比下冲积谷的石英粒度对石英含量图（曲线为二阶多项式）

1—点沙坝；2—天然堤-填塞河道；3—湖；4—后沼泽

从上述对三种全新世沉积物所做分析来看，加尔沃斯顿堰岛综合体最有效，冲积物次之，三角洲最不理想。戴维斯他们认为，这种区分环境有效性的不同，主要受沉积物的粒度控制。密西西比三角洲属低能量的（即粒度细的）体系，加上密西西比河带来的是大量细粒沉积物，故各种环境的选择分选机制很弱，以

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

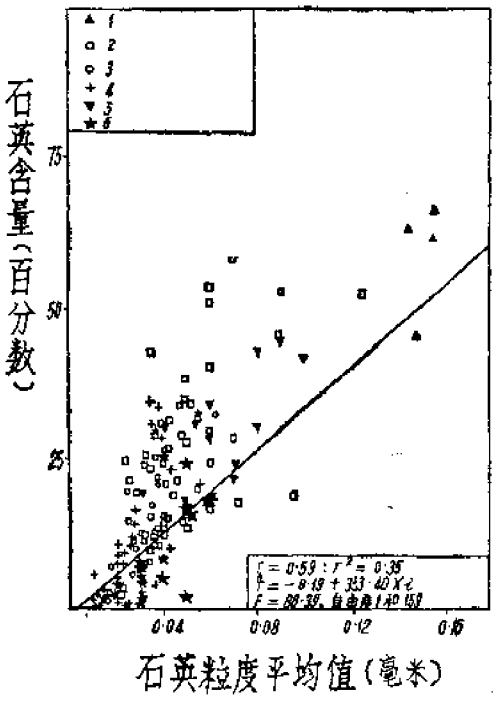


图 3—50 密西西比三角洲全新统沉积物的石英粒度和石英含量图

1—海浸海滩；2—天然堤-填塞河道；3—开放海湾；4—封闭海湾-沼泽；5—三角洲前缘；6—前三角洲

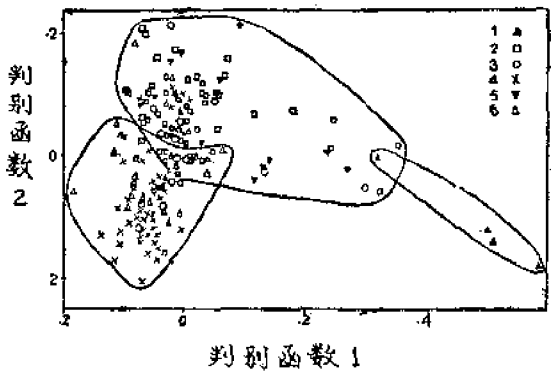


图 3—52 密西西比三角洲多组判别函数分析一轴1和2

1—海浸浅滩；2—天然堤-填塞河道；3—开放海湾；4—封闭海湾-沼泽；5—三角洲前缘；6—前三角洲

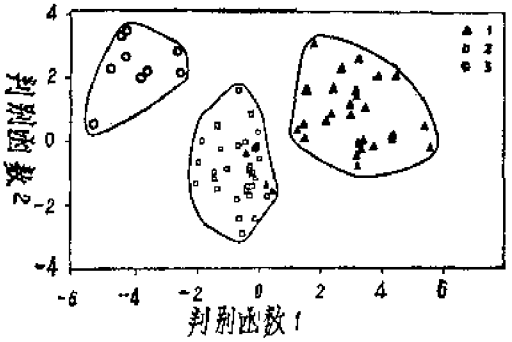


图 3—51 密西西比河冲积谷多组判别函数分析一轴1和2

在中间区内的湖相样品点省略了

1—点沙坝；2—天然堤-填塞河道；3—后沼泽

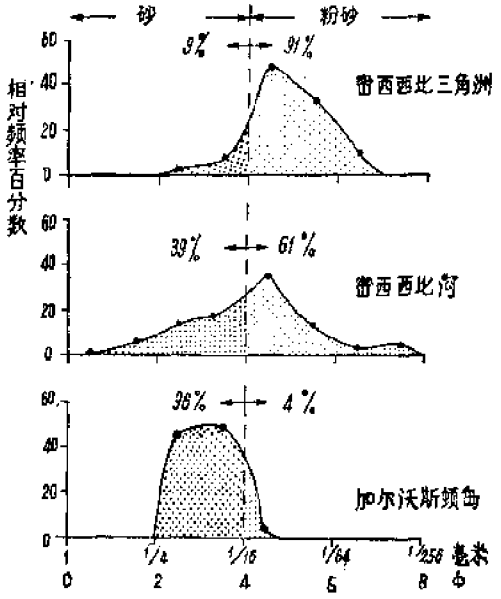


图 3—53 全新统的三角洲、冲积谷和堰岛综合体样品所含粒级百分数

致不能构成重要的环境差异。三角洲有>91% 的石英颗粒属沙—粉沙级界线以下（图 3—53），冲积谷则粗一些，只有61%的石英颗粒落在沙— 粉沙级界线以下，而堰岛 沉积物的沙含量高，约96%的石英颗粒在沙—粉沙级界线以上。这个资料表明，对以中或高能为特征的沉积体系区分环境最有效。因此，那些较密西西比三角洲能量高的三角洲体系，仍然可以用岩石学资料来有效的划分沉积环境。

3. 古代沉积物 戴维斯等作了四个古代沉积物的分析，即（1）威 尔科 克斯（始新

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

统）河流沉积；（2）威尔科克斯（始新统）三角洲沉积；（3）英格兰（下侏罗纪）托阿尔海相沉积岩；（4）泡德河（Powder river）盆地（下白垩系）海相和非海相的泥质砂岩层。用回归分析和判别分析划分环境的效果都是非常理想的。以前三个地区为例，威尔科克斯冲积沉积岩是细粒的及富含基质的，并含重要比例的副矿物和胶结物，石英粒度对含量图（图3—54之1）是一个二阶多项式曲线，可以大致区分点沙坝和天然堤沉积。判别分析只有判别函数1对环境起重要的判别作用（图3—54之2）。29个样品中只有两个不能正确的划分。变量和判别函数间的相关值表明，根据石英、基质和石英粒度平均值可以将点沙坝与天然堤-洪水平原沉积物分开。威尔科克斯三角洲沉积岩则含大量粉沙级颗粒（4.3ϕ—0.05毫米），石英含量少（19%）且富含基质（52.6%），副矿物和胶结物占总成分的比例也较大。它的石英粒度和成分二元图是一个线性相关，可以区分一些环境（图3—54之3）；它的判别函数分析（六个成分变量及两个结构变量）能成功地勾划出三个环境群（图3—54之4）。沿判别函数1，石英、长石和粒度可以将三角洲前缘从其他环境中区分开来。沿判别函数2，副矿物和胶结物能区分三角洲与封闭海湾-沼泽环境。下侏罗托阿尔海相沉积岩主要属粉沙粒级（0.06毫米），并且含两种主要成分，石英（54.2%）和基质（37.9），岩屑只含痕量。石英粒度和含量二元图容易区分单个的环境（图3—54之5），而五个成分和两个结构参数的判别函数分析表明对区分环境是灵敏的，所有的环境都可以分开（图3—54之6）。不同环境有重大变化的变量包括石英和基质二者。这三种环境中的粒度和成分也都是与不同的沉积物搬运作用（牵引、跳跃、悬浮）有关，这里不再详述。

最后谈一下戴维斯分析的泡德河盆地下白垩纪砂岩层的海相及非海相岩，对这样一个多环境的地层，处理结果是相当理想的。该泥质砂岩根据岩心及剖面的沉积结构构造分析，已经认出四种环境：（1）冲积的、（2）三角洲（建设型）、（3）海浸沙坝（三角洲破坏型）和（4）堰岛综合体，共取样224个。其岩石属细沙级（0.14毫米），石英（52.2%）和基质（35.2%）是主要的组份。全部样品的石英粒度对石英含量图（图3—55）不能划分环境，各环境的样品相当分散。然而可以用此二元图分出海相（海—堰岛综合体和三角洲破坏型）与非海相（冲积和三角洲建设型）的样品（图3—56）。同时，如按环境将资料分开并作石英粒度对含量图时（图3—57），得出和前面所举古代、当代沉积物例子一样的相关，并且所处的粒度区间也和前面的例子相似。六个成分和两个结构参数的判别函数分析表明，海对河对三角洲建设型环境分辨时，石英、基质、岩屑是灵敏的变量。在此分析中，100%的海相样品成功地从94%的冲积—三角洲样品中分辨出来（图3—58）。三角洲建设型对三角洲破坏型（海浸砂坝）的判别函数分析表明，判别函数1上的重要判别变量是石英和基质，做出的图见图3—59。海—堰岛综合体对三角洲破坏型（即海浸砂坝）的判别函数分析也是第一个判别函数有效，其判别灵敏的变量是岩屑（图3—60），注意图3—59和3—60都是判别函数1有效，划出纵坐标只是为了做图方便，如只划一个判别函数，则各点将会重叠在轴1上。

根据上述情况可以看出，对环境的划分是比较满意的。同时本方法还有一个很大的优点，特别适合石油的普查和勘探工作，这就是用井壁取心及岩屑样即可磨制薄片，不像沉积构造及某些结构分析那样，需要大块的样品，至少是连续的岩心或露头。取心的价值是昂贵的，有些深钻也不可能完全做到此点，而露头的出露情况更受极大的限制。鉴于我国

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

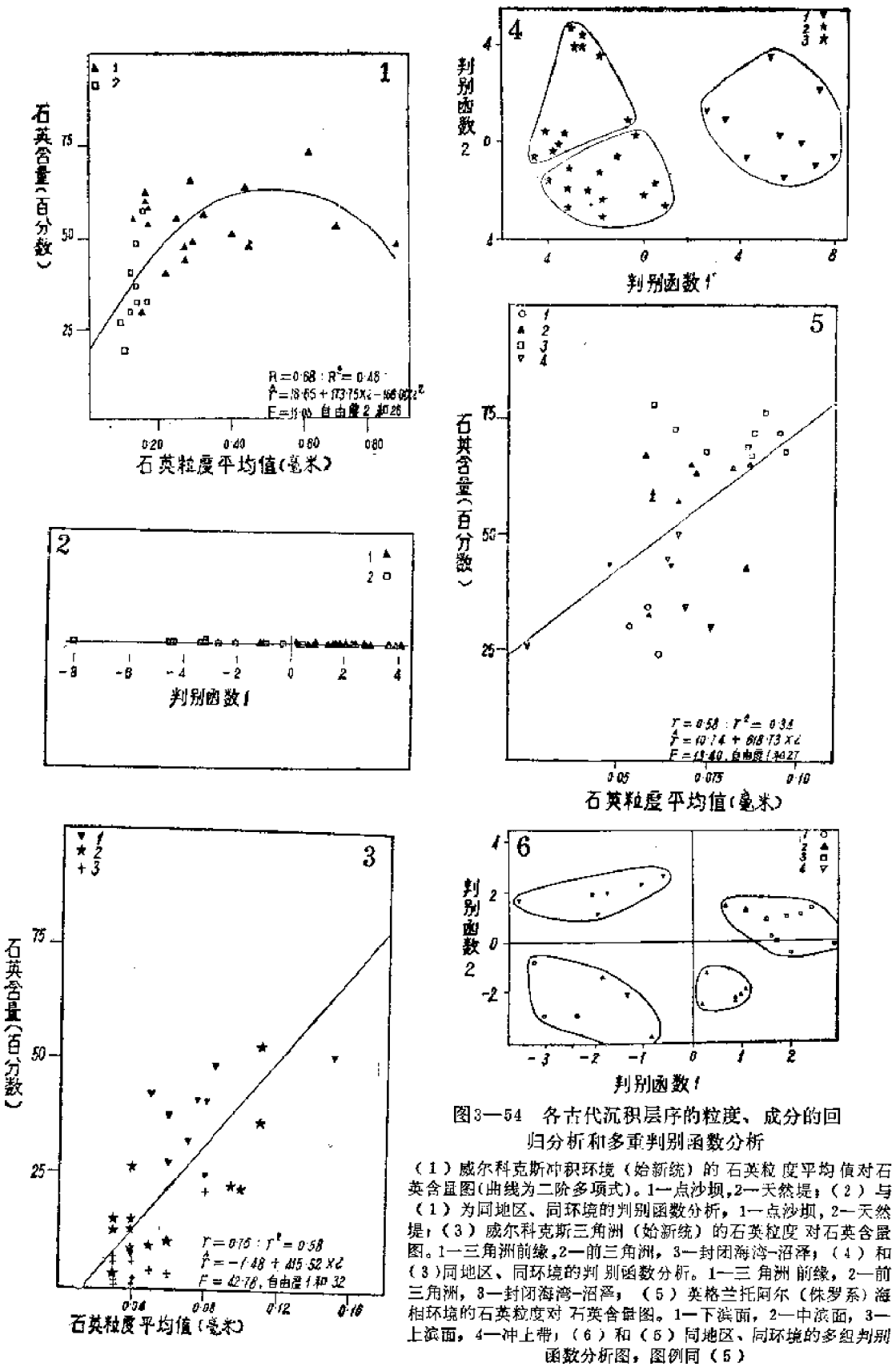


图3—54　各古代沉积层序的粒度、成分的回归分析和多重判别函数分析

（1）威尔科克斯冲积环境（始新统）的石英粒度平均值对石英含量图（曲线为二阶多项式）。1—点沙坝，2—天然堤；（2）与（1）为同地区、同环境的判别函数分析，1—点沙坝，2—天然堤；（3）威尔科克斯三角洲（始新统）的石英粒度对石英含量图。1—三角洲前缘，2—前三角洲，3—封闭海湾-沼泽；（4）和（3）同地区、同环境的判别函数分析。1—三角洲前缘，2—前三角洲，3—封闭海湾-沼泽；（5）英格兰托阿尔（侏罗系）海相环境的石英粒度对石英含量图。1—下滨面，2—中滨面，3—上滨面，4—冲上带；（6）和（5）同地区、同环境的多组判别函数分析图，图例同（5）

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

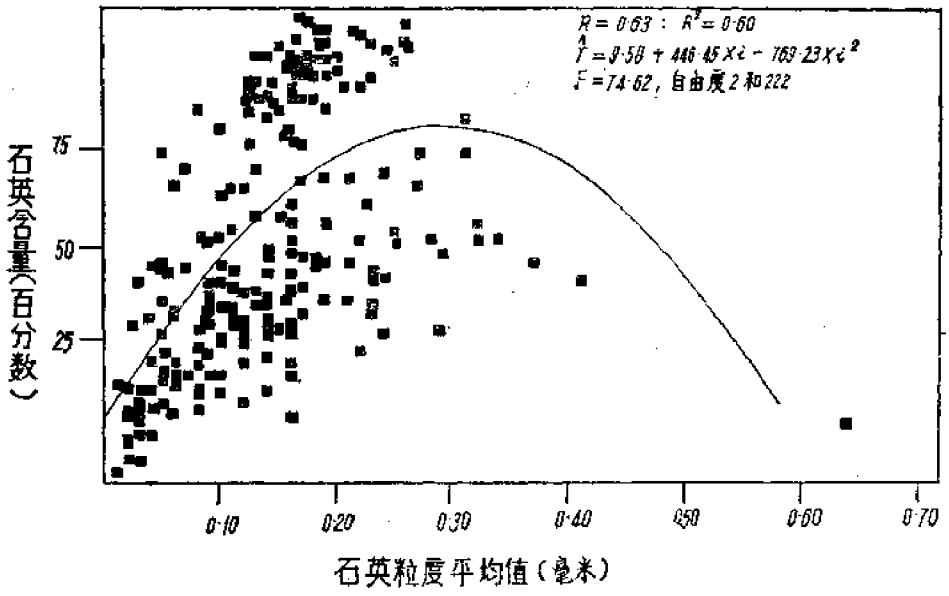


图 3—55　西北泡德河盆地下白垩纪泥质砂岩的石英粒度对石英含量图——二阶多项式（全部样品）

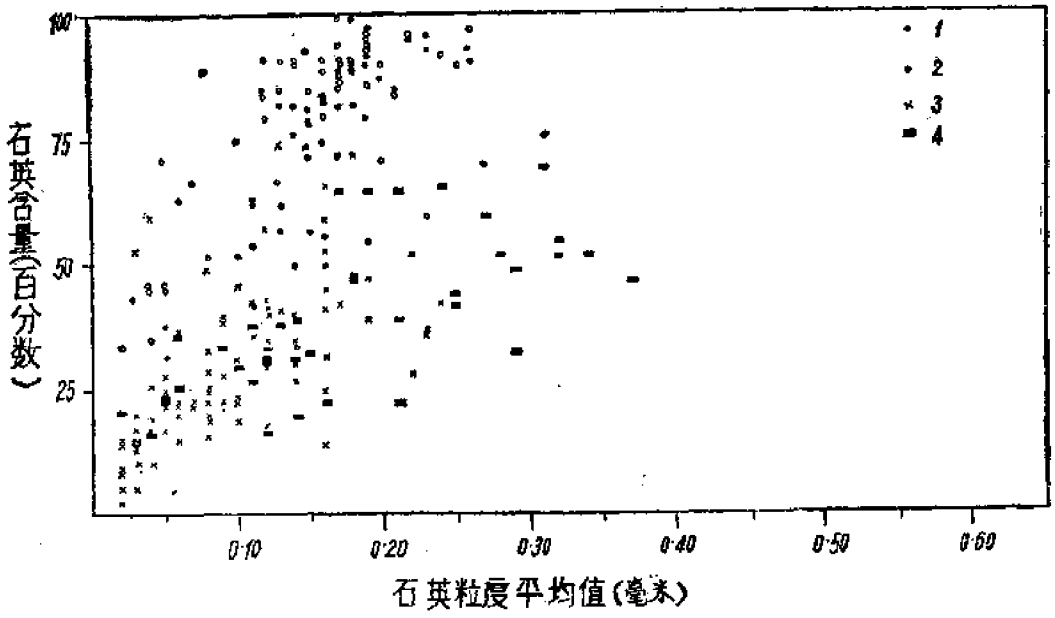


图 3—56　蒙大那和怀俄明白垩纪泥质砂岩的个别环境石英粒度对石英含量图

1—海-堰岛综合体；2—三角洲破坏型；3—三角洲建设型；4—冲积的

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

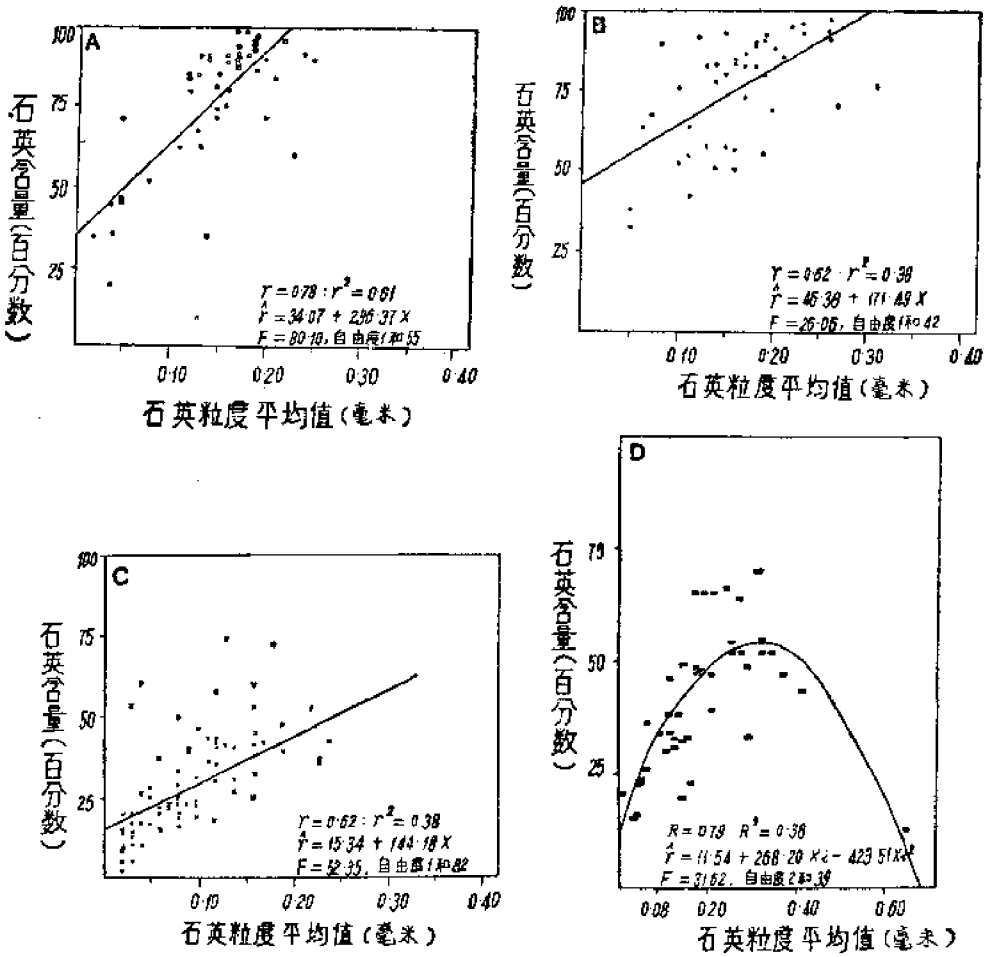


图 3—57　蒙大那和怀俄明下白垩纪砂岩不同环境的石英粒度对石英含量的回归分析

A—海-堰岛综合体；B—三角洲破坏型；C—三角洲建设型；D—冲积的

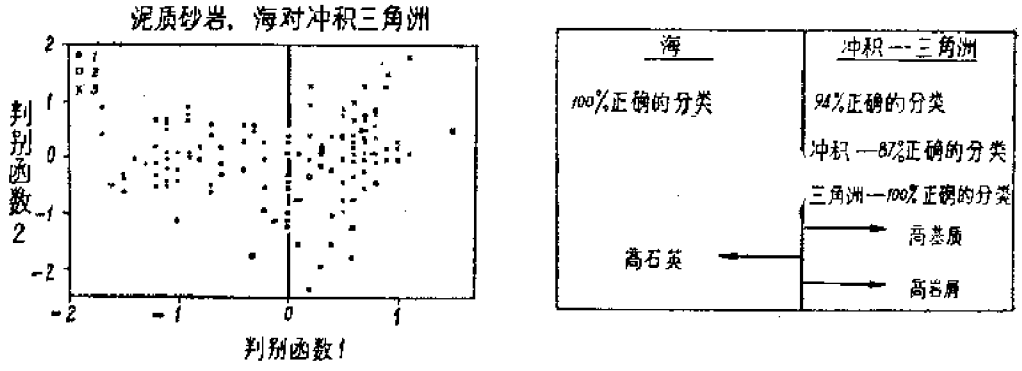


图 3—58　泥质砂岩的多组判别函数分析

海对冲积对三角洲环境，1—海；2—冲积；3—三角洲

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

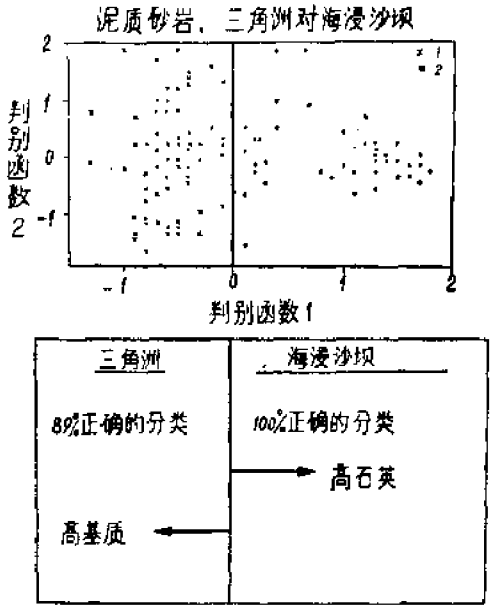


图 3—59 泥质砂岩的多组判别函数分析，三角洲(建设型)对三角洲（破坏型亦即海浸沙坝）

1—三角洲；2—海浸沙坝

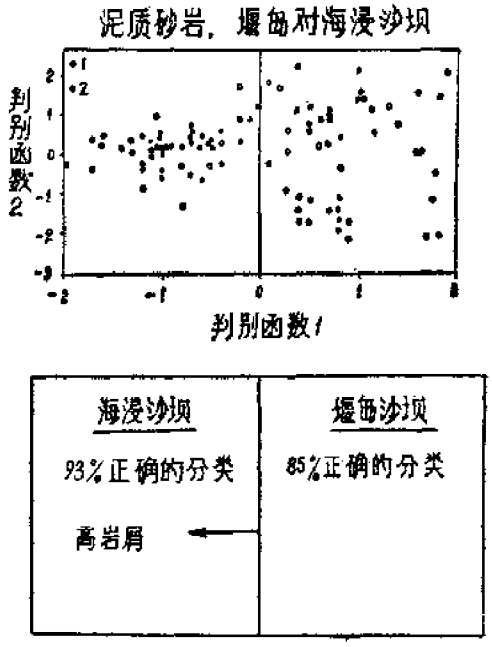


图 3—60 泥质砂岩的多组判别函数分析，海(堰岛综合体)对三角洲(破坏型亦即海浸沙坝)的多组判别函数分析

1—堰岛沙坝；2—海浸沙坝

不少的实验室已经积累了相当多的沉积岩成分和结构的资料，这对岩相分析工作是十分宝贵的和可以充分加以利用的。

第六节 因素分析在粒度研究上的应用

因素分析也是一种多元统计分析，它能从大量的观测数据中找出支配它们诸因素中的主要因素及因素之间的相互关系，并将它们变成简单而明显的类型。它的优点为：1)可以利用全部的粒度资料；2）不必用任何粒度参数，因此比较客观；3）用因素分析确定能的类型图时，不需要任何预先的环境和地理知识，即可以起到相图的作用。

因素分析是一种矢量分析。工作的第一步是将粒度分析资料排成一表，表的行代表样品；列代表变量，即各粒级的百分含量(表3—10)。任一行的所有数字，表示那一行所代表样品的粒度分布。这样，构成了一个N个样品n种粒级的$N\times n$矩阵，其中任一元素的符号是x_{ij}，代表第i个样品第j个变量（$i=1,2,\cdots,N$；$j=1,2,\cdots,n$)。有时不以粒度百分含量，而是以各种粒度参数为变量（维谢尔，1965)。

因素分析法又可分Q型及R型两种，粒度研究中多使用Q型法，也称为主因素分析法。它是以变量为坐标轴，样品作为n维空间中的矢量。如一个样品筛析成十个粒级时，则每一粒级的百分含量代表一个分量，每个样品都是由其粒级的10个分量组成的矢量所代表。矢量位置确定后即可计算各矢量之间的夹角余弦值，以了解各样品间的相似性。公式为：

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

$$\cos\theta_{kl}=\frac{\sum_{j=1}^{n}(x_{kj})(x_{lj})}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(x_{kj})^2\sum_{i=1}^{n}(x_{lj})^2}} \qquad (1)$$

若两个样品 (k, l) 的余弦值是 1.0，夹角为 0，则两个样品的矢量共线，这表明两个样品完全相似；相反，如余弦值是 0，则矢量相离90°，两个样品完全不相似。这样，做出一个所有样品之间的相似性表，称为 $\cos\theta$ 矩阵。

因素分析就是来确定可以说明相似性表内大部分数据所需的最少独立变量数，是在多维空间竖立互相正交的轴，而且要求第一轴能说明 $\cos\theta$ 矩阵内的大部分数据；第二轴能说明其余数据的大部分等等。在数学上，这就是按顺序的计算 $\cos\theta$ 相关矩阵的特征值λ和对应的特征矢量U。关于 λ 和U的求法，可参考一般线性代数教科书。理论上可求出N个 λ 值，但通常有意义的是最大的M个 λ 值，$M\ll N$。按大小依次排列 λ 值，使 $\lambda_1>\lambda_2>\cdots>\lambda_m$，这些最小独立变量数$M$所代表的正交轴即称为因素轴。$\lambda_1$、$\lambda_2\cdots\lambda_m$ 所代表的地质意义叫做第一主因素(F_1)、第二主因素$(F_2)\cdots$、第M个主因素 (F_M) (以下简称因素)。λ 值的大小代表各因素的方差在总方差中所占大小，亦即方差供献，而且要求 F_1 在总方差中占的比例最大。这样，样品就可用M个因素的线性数学模型来代表：

$$x_i=A_{i1}F_1+A_{i2}F_2+\cdots+A_{iP}F_P+\cdots+A_{im}F_m \qquad (2)$$

式中 i 为样品数，$i=1,2,\cdots,N$；P为因素数，$P=1,2,\cdots m$；A_{iP} 为各因素的系数，它表明第 i 个样品第P个因素(F_P)所占的比重，又称为权系数，即因素载荷。这时的问题可归结为求权系数。而权系数 A_{iP} 与特征值 λ_P 及特征矢量 U_P 具下列关系

$$A_{iP}=U_{iP}\sqrt{\lambda_P}\quad i=1,2,\cdots,N, \qquad (3)$$

根据公式即可求出各因素的系数 A_{iP}。至于M的大小，可根据实际情况决定，一般取 3 至 6。

根据各因素的系数值可找出端元样品，如第一因素 F_1 的系数为 A_{11}，$A_{21},\cdots A_{N1}$，其中最大的假定是 A_{t1}，则第 t 块样品就是 F_1 的端元样品，通过对端元样品研究，可认识 F_1 的地质作用并进行地质解释。依次再求出 $F_2,\cdots,F_m$各因素的端元样品。端元样品以外的其他样品被认为是这几个端元样品的不同比例混合样。

这样求出的最初因素，往往在数学上有意义，而在地质上难于解释，为了使样品的矢量位置安排得合理，常用方差极大法旋转因素轴（图3—61）(Kaiser, 1959)。理论的正交轴 A_1、A_2 旋转成 B_1、B_2，虽仍属正交轴，但其位置对资料的安排更合理。样品矢量与旋转后的因素轴的关系，以矢量向轴投影的方法来决定，这种投影为旋转后的因素载荷，数值的大小表明该因素轴控制每个样品矢量的程度。最后，列出各样品因素载荷的矩阵（表3—12)。一个样品各因素载荷的平方和叫做公共因素方差，该方差的大小反映因素轴能解释此样品的程度。但这种旋转法仍存在两个缺点。轴的选择是根据安排最合理的原则，当有别的样品插进资料矩阵时，就可能影响这种合理性，其次这种安排不一定有实际的地质意义。斜的参考矢量可以消除这两个缺点（图3—61c)。矢量 x_P 和 x_i 被斜的分解到末端真正样品矢量 C_q 和 C_r 上，这两个末端矢量取做参考矢量。这样，不仅这些端元成分是已知的，而且它们的地质背景资料都可以利用。更加上，插入的资料只在位置更属末端时才

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

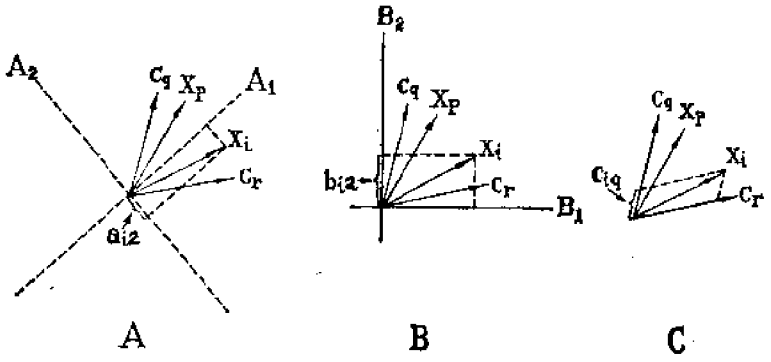


图 3—61 表示四个理想样品 C_q、x_p、x_i、C_r 的不同方法

A—最初的正交因素轴；B—正交的方差极大因素轴；C—斜的参考矢量

对其有影响。因此这种斜参考矢量分析法在相当程度上与地质解释一致。

为了说明因素分析在粒度研究上的应用，在下面介绍一个实例。例子为69个样品组成，均筛成10级，资料矩阵见表3—10。根据Q型分析，表3—11列出特征值、特征值平方和百分数及平方和累积百分数。从表内看出前三个 λ 值构成总数的97.5%。于是表3—12给出69个样品在前三个因素轴上的因素载荷矩阵，该矩阵已经根据方差极大法对因素轴做了旋转。除了第13号样品外，所有样品都具有很高的公共因素方差，说明这三个因素已能很好地说明它们。

表3—12内每个载荷值的平方代表因素分量，用同行的公共因素方差除因素分量得出标准化的分量。再在三角图上对这些标准化分量投点（图3—62）。因素载荷经平方转变成因素分量的作用是进一步强化了较高的载荷，实际上是加强了三角图的顶化，原理有些类似斜参考矢量表示法。

从图3—62上可看出，显然样品80、70、4属端元样品，其他样品可看作是这三个样品不同比例的混合物。根据了解，样品4的 ϕ 值中位数最低，标准差最小，是一个分布的粗粒部分被截断的沙；样品70的 ϕ 中位数高、标准差大，是一粉沙质粘土；样品80是含粘土且有些截断的接近沙的物质。样品80—70—4表现出中位数稳定的变粗，分选度轻微的变好，且截断也有变明显的趋势。这种系统变化表明潜伏一定的成因影响。为了了解因素的地质意义，必须设法推断三个端元样品能说明什么地质意义。按前述的样品特点可以看出，样品4可能代表高能环境中的沉积，细粒物质被改造和簸分，可以设想其为海滩破浪带形成的粒度分布，故因素Ⅲ暂定为波浪能。样品70是一个颗粒很细、分选很差的沉积物，可能是代表安静的隐蔽环境，其有效的能源是重力，故因素Ⅱ暂定为重力能；最后样品80和它的伴生物表现出双众数及沙和粘土总体相混合的特点，故因素Ⅰ很可能代表流水能。

为了了解这种推断是否有地质意义，在平面图上对每个样品的三种因素影响量做图（图3—63），结果发现样品4和其伴生物多存在于岛的靠海一边，于是样品4代表波浪能的看法得到证明；样品70及类似它的样品存在于隐蔽区，样品80及有关的样品存在于深水及沿河道处，也都有利于前面的设想。虽然也有例外存在。一般来说，可以根据因素所代表的能及能谱变化来分区，作用相当于岩相图。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表 3—10　资料矩阵，百分含量，ϕ 单位

样品号	1—2	2—3	3—4	4—5	5—6	6—7	7—8	8—9	9—10	<10
1	0.6	70.2	29.2	0	0	0	0	0	0	0
2	1.0	69.9	29.1	0	0	0	0	0	0	0
3	0.8	73.7	25.5	0	0	0	0	0	0	0
4	0.9	75.3	23.8	0	0	0	0	0	0	0
5	0.6	62.5	36.9	0	0	0	0	0	0	0
6	1.1	68.8	30.1	0	0	0	0	0	0	0
7	0.6	5.9	33.6	24.9	9.4	7.8	5.5	5.4	4.4	3.1
8	1.0	2.3	6.6	16.2	12.0	11.4	13.3	11.0	7.5	18.7
9	1.2	1.6	15.3	38.4	13.0	9.5	5.6	5.3	4.2	5.9
10	9.5	15.8	59.0	8.4	0.9	0.9	1.4	2.3	1.8	0
11	0.4	3.9	45.2	24.7	3.7	8.1	3.0	3.8	3.0	4.2
12	5.6	48.4	42.7	3.3	0	0	0	0	0	0
13	6.3	7.5	25.4	17.2	9.5	6.7	27.4	0	0	0
14	1.1	16.3	58.7	11.9	3.1	0.7	2.7	1.7	1.4	2.4
15	0	13.8	39.3	15.4	9.1	4.5	6.4	4.4	3.6	3.5
16	2.3	7.9	23.9	25.5	9.2	7.9	7.7	5.8	4.6	5.2
17	3.0	6.2	30.7	25.7	9.5	7.5	6.4	4.1	3.2	3.7
19	1.0	3.1	15.2	32.0	14.3	10.0	7.2	6.0	4.8	6.4
20	3.2	3.9	10.5	24.1	14.2	15.4	13.5	7.7	5.1	2.4
21	2.4	14.5	53.9	12.2	5.5	1.6	2.5	2.0	1.6	3.6
22	2.2	38.8	42.2	7.9	1.4	1.8	1.0	1.1	1.0	2.6
23	0	11.5	28.4	19.1	7.3	7.8	4.6	8.4	6.7	6.0
24	2.7	7.4	48.5	19.1	5.3	3.8	3.6	3.6	2.4	3.6
26	1.7	6.6	41.3	16.4	5.6	6.5	6.6	4.6	3.6	6.3
28	1.7	30.4	44.5	11.2	3.0	1.9	2.9	1.5	1.2	1.7
29	4.6	19.2	31.7	16.8	6.4	5.2	5.2	3.7	2.9	3.3
30	0	12.9	43.2	21.2	6.5	6.8	2.4	3.8	1.8	1.4
31	0	40.0	32.5	3.8	4.5	6.5	2.7	4.7	3.2	2.1
32	0.8	7.0	31.6	21.1	10.2	9.0	6.3	4.1	3.2	6.7
38	0	3.4	19.7	25.4	15.7	12.0	9.9	6.9	3.7	5.1
42	1.5	32.2	36.5	12.5	5.1	6.7	5.5	0	0	0
43	4.4	8.1	8.9	19.9	12.0	11.4	10.8	8.1	5.9	10.5
44	0.5	2.6	7.2	30.0	14.9	12.9	11.2	7.8	6.5	6.4
45	1.4	1.9	14.4	40.2	8.5	8.4	7.1	6.6	5.2	6.3
47	0.7	8.2	27.3	32.7	7.7	5.6	4.6	4.4	4.0	4.8
48	0.4	3.5	18.8	29.5	11.2	10.4	7.5	6.8	4.4	7.5
49	0.3	15.6	54.1	21.3	4.1	2.6	2.0	0	0	0
50	0.3	24.4	56.0	15.1	4.2	0	0	0	0	0
51	10.5	29.2	37.7	15.1	4.2	3.7	0	0	0	0
52	0.3	13.3	63.5	14.2	4.0	3.4	1.3	0	0	0
53	1.2	26.9	54.7	11.0	3.9	2.3	0	0	0	0
54	0.9	20.4	47.3	17.7	3.3	2.0	3.9	1.6	1.0	1.7
55	0.4	18.0	49.5	12.4	3.3	3.9	4.9	2.7	1.2	3.7
56	0.5	4.1	9.8	27.9	13.5	13.5	7.4	8.3	7.6	7.4
57	0.5	35.6	50.1	7.8	3.9	2.1	0	0	0	0
60	1.9	32.5	43.5	11.8	4.0	2.5	1.5	2.3	0	0

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

续表

样品号	1—2	2—3	3—4	4—5	5—6	6—7	7—8	8—9	9—10	<10
61	1.9	11.5	49.5	22.4	5.7	4.5	2.0	2.5	0	0
62	1.0	13.1	33.7	18.3	6.1	5.0	7.7	5.3	5.1	4.7
65	0.7	18.3	53.2	17.2	5.6	5.0	0	0	0	0
70	0.7	2.3	5.2	23.2	19.4	14.1	10.1	10.0	8.7	6.3
72	1.1	36.1	58.4	4.4	0	0	0	0	0	0
73	0.2	21.8	72.8	5.2	0	0	0	0	0	0
75	0	18.9	34.4	18.3	6.6	5.6	5.1	3.9	3.2	4.0
79	0.9	13.6	43.9	20.1	7.2	4.8	9.5	0	0	0
80	0.3	7.4	77.4	9.4	5.5	0	0	0	0	0
82	2.9	15.5	37.0	30.3	5.1	1.9	2.2	5.1	0	0
83	0.8	10.2	79.2	9.8	0	0	0	0	0	0
84	1.0	16.8	73.8	8.9	0	0	0	0	0	0
85	1.8	35.7	81.9	0.6	0	0	0	0	0	0
86	0.9	11.2	39.7	26.8	5.0	3.7	4.6	2.6	1.8	3.9
87	1.6	10.4	43.9	19.4	4.4	3.3	4.3	2.3	5.3	5.1
88	0	9.5	50.3	16.7	4.9	3.3	6.2	3.7	1.0	4.4
89	4.4	11.0	43.2	21.8	7.1	6.4	6.1	0	0	0
91	1.3	7.2	45.2	27.8	12.0	6.5	0	0	0	0
93	8.6	28.4	26.0	22.5	4.8	5.2	4.5	0	0	0
94	2.5	17.8	40.3	20.1	4.3	2.5	3.5	3.0	2.5	3.5
95	0.4	5.9	56.5	18.9	2.6	2.3	3.2	1.8	2.6	5.8
96	6.3	17.1	42.4	17.9	9.0	7.3	0	0	0	0
97	2.1	16.7	39.6	17.7	8.3	8.3	7.3	0	0	0

表 3—11 主因素及特征值

主因素	特征值	平方和百分数	平方和累积百分数
1	54.8230	77.22	77.22
2	10.1789	14.34	91.55
3	4.1959	5.91	97.46
4	0.9799	1.38	98.84
5	0.3692	0.52	99.36
6	0.2085	0.29	99.66
7	0.1111	0.16	99.81
8	0.0754	0.11	99.92
9	0.0403	0.06	99.97
10	0.0177	0.02	100.00

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表 3—12 因 素 载 荷 矩 阵

样品号	平方和% 累积百分数 公共因素方差	48.2 48.2 1	27.7 75.9 2	21.6 97.5 3	样品号	平方和% 累积百分数 公共因素方差	48.2 48.2 1	27.7 75.9 2	21.6 97.5 3
80	0.9846	0.9623	0.1288	0.2050	57	0.9968	0.7363	0.1587	0.6554
83	0.9915	0.9616	0.1046	0.2365	7	0.9957	0.7349	0.6503	0.1811
84	0.9932	0.9375	0.1046	0.3214	32	0.9932	0.7215	0.6509	0.2213
52	0.9958	0.9273	0.2179	0.2976	75	0.9973	0.7187	0.5006	0.4798
95	0.9926	0.9261	0.3164	0.1864	60	0.9985	0.7141	0.2451	0.6547
73	0.9888	0.9096	0.0732	0.3950	17	0.9944	0.7069	0.6782	0.1861
14	0.9937	0.9048	0.2134	0.3599	29	0.9948	0.6927	0.5026	0.5123
10	0.9732	0.9044	0.1564	0.3616	51	0.9624	0.6818	0.3049	0.6361
21	0.9907	0.8954	0.2598	0.3485	23	0.9764	0.6665	0.6464	0.3401
24	0.9977	0.8915	0.3918	0.2222	44	0.9930	0.1778	0.9799	0.0356
88	0.9910	0.8903	0.3603	0.2617	70	0.9673	0.0990	0.9776	0.0424
49	0.9952	0.8834	0.3202	0.3350	56	0.9844	0.2437	0.9578	0.0874
61	0.9946	0.8745	0.3895	0.2793	20	0.9710	0.2465	0.9485	0.1027
65	0.9941	0.8689	0.2937	0.3916	43	0.9711	0.2056	0.9339	0.2378
11	0.9894	0.8577	0.4883	0.1419					
					19	0.9725	0.3836	0.9064	0.0614
87	0.9912	0.8542	0.4259	0.2829	8	0.8265	0.1137	0.8995	0.0675
55	0.9906	0.8539	0.2912	0.4203	9	0.9282	0.3807	0.8850	0.0091
50	0.9974	0.8532	0.2203	0.4701	45	0.9045	0.3536	0.8787	0.0094
26	0.9828	0.8423	0.4701	0.2289	48	0.9851	0.4695	0.8699	0.0890
89	0.9866	0.8334	0.4580	0.2868					
					38	0.9878	0.4805	0.8640	0.1024
91	0.9677	0.8306	0.4926	0.1877	16	0.9940	0.5909	0.7707	0.2256
53	0.9979	0.8299	0.1915	0.5220	47	0.9479	0.6260	0.7201	0.1937
54	0.9974	0.8298	0.3290	0.4478	13	0.7882	0.5309	0.6362	0.2270
30	0.9940	0.8274	0.4534	0.3222					
79	0.9825	0.8228	0.4394	0.3353	4	0.9964	0.1936	0.0430	0.9783
					3	0.9969	0.2194	0.0430	0.9731
96	0.9729	0.8046	0.3951	0.4115	2	0.9982	0.2775	0.0432	0.9588
86	0.9814	0.7965	0.5211	0.2746	1	0.9979	0.2772	0.0429	0.9587
15	0.9875	0.7962	0.4615	0.3750	6	0.9985	0.2943	0.0432	0.9539
94	0.9929	0.7935	0.4255	0.4268					
85	0.9893	0.7918	0.0400	0.6006	5	0.9990	0.4047	0.0424	0.9129
					31	0.9831	0.5022	0.2244	0.8250
72	0.9962	0.7800	0.0787	0.6177	12	0.9973	0.5700	0.0787	0.8162
97	0.9823	0.7747	0.4569	0.4164	22	0.9983	0.6478	0.1762	0.7400
62	0.9903	0.7432	0.5490	0.3694	42	0.9915	0.6373	0.3262	0.6921
28	0.9993	0.7399	0.2425	0.6269					
82	0.9397	0.7389	0.5274	0.3399	93	0.9344	0.5299	0.4905	0.6426

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

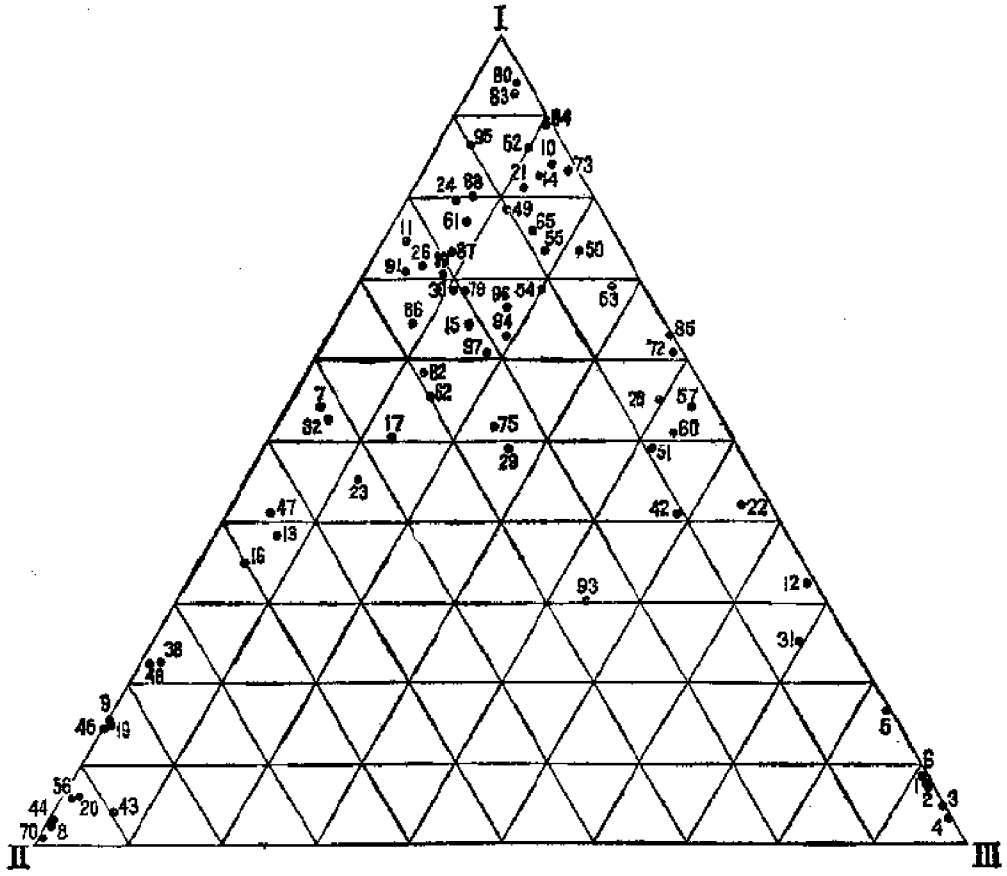


图 3—62　经方差极大法旋转因素轴后，样品标准化因素分量的投点图

索洛休伯和克洛文（Solohub & Kloven, 1970）为了检验各种区别沉积环境的粒度研究法的效果，选定了一个当代的湖区，同时进行各种方法的研究。这个湖区在小范围内有10种不同的沉积环境，便于系统的采样。他们认为虽然它的环境特点不同于常做为根据的海，但它也有因风和气压差别引起的波浪，同时规模、形状及生成特点都类似于海洋，虽无碱水效应，然而因所研究的物质粘土不多，因此关系不大。也如前例一样用Q型分析，样品数66，粒级数13，共得到三个因素，三个因素占全部数据的95%（因素1:64.5%；因素2:22.0%；因素3:8.8%）。根据前述原理，三个因素代表三个端元分布，每个端元分布说明一种作用，其中一个因素代表粗粒沉积为高能量，第二个因素代表中粒为中能量；第三个因素代表细粒为低能量。根据每个样品在如图 3—62 相似的三角图上的位置，来决定它代表的能量类型，最后在平面图上画出能类型分布图（图3—64）。发现结果与原环境的分布极为相当，完全起到沉积相图的作用。

他们在同时还做了CM 图、梅森和福克（1958）的结构参数散点图、弗里德曼（1961）的结构参数散点图、萨休（1964）的参数图等，发现结果都不很理想，不能很好地区分各种环境。他们得出结论认为，这些方法本身不如因素法灵敏，原因有下：1）双变量图表示不了形成粒度分布的复杂作用；2）作为图件基础的粒度参数，并未包括全部有价值的资料；3）不同的环境内，由于动力能的量和类型的结合可以形成类似的粒度分布，因此

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

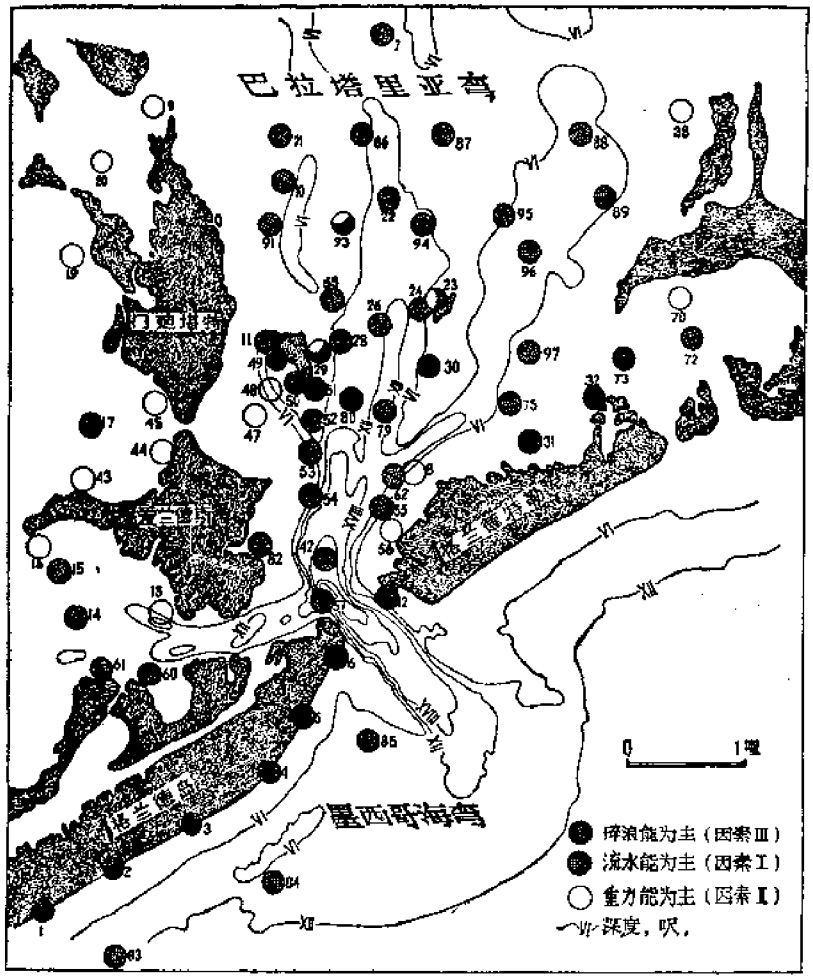


图 3—63　巴拉塔里亚海湾由Q型分析做出的能量类型图

粒度分布只能反映沉积作用并不能反映沉积环境。但我们认为，造成不灵验的原因可能是这些双变量图大部分是区分海、河、沙丘的，对区分内陆湖本身不十分有效。而当前这方面的资料极为缺乏，如果Q型因素法对研究内陆湖的各种环境真是这样的成功，今后在我国古代沉积中应大力的试用。

也有人进行了R型因素分析，如艾仑等（G. P. Allen等，1972）所做纪龙德河口（法国）沉积物R型分析。他们是将筛析结果的各种粒级重量做为粒度参数，因素分析是将这些参数根据对某一种环境（搬运过程）具同样反映而分成组合(因素)。关于R型因素分析的方法可参考有关的统计书，此处不详述。他们还将分析结果与粒度概率曲线（维谢尔，1965）及CM图（帕塞加，1964）作了比较。通过他们的分析发现，一般三个因素足能解释粒级的73%，其余27%作为随机变化处理。一定粒级受某一因素支配的程度，用因素载荷表示。例如，一种参数如只受一种因素影响，其载荷为1；相反，如该参数不受这个因素的影响，则载荷为0。实际的情况比这复杂得多，任一参数不只受一个因素的影响，是受一系列因素的影响，而其中有一个是主要的，这时可以对每个因素建立载荷剖面。如图3—65，因素Ⅰ载荷剖面（细黑线）表现出特别与>0.6ϕ的粒级有关，最大载荷是在0.0ϕ处，载荷量为−0.95；从0.6ϕ起，载荷急速的降低，并且由负值经零变为正值，因此0.6

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

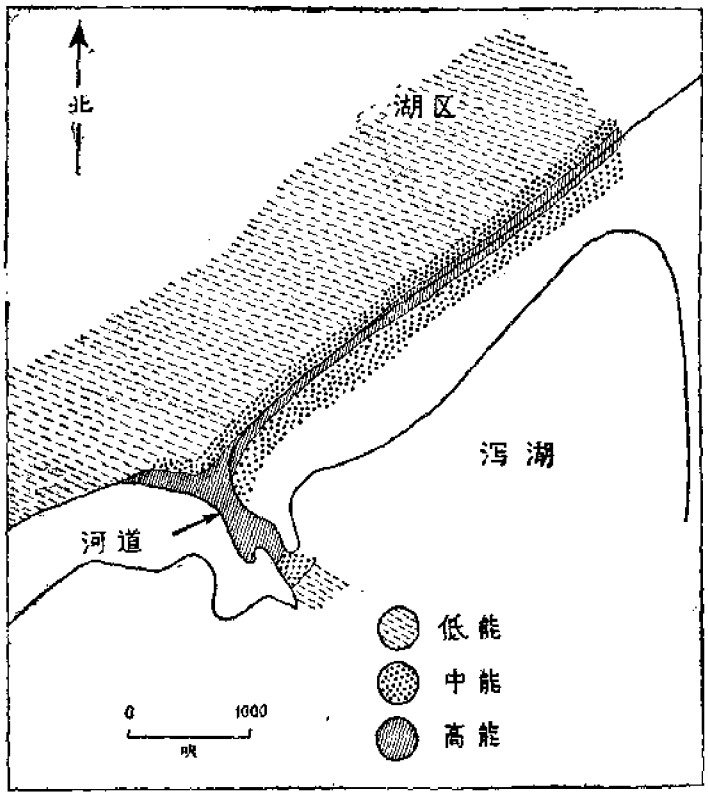


图 3—64 由Q型因素分析法做出的某湖区能量类型图

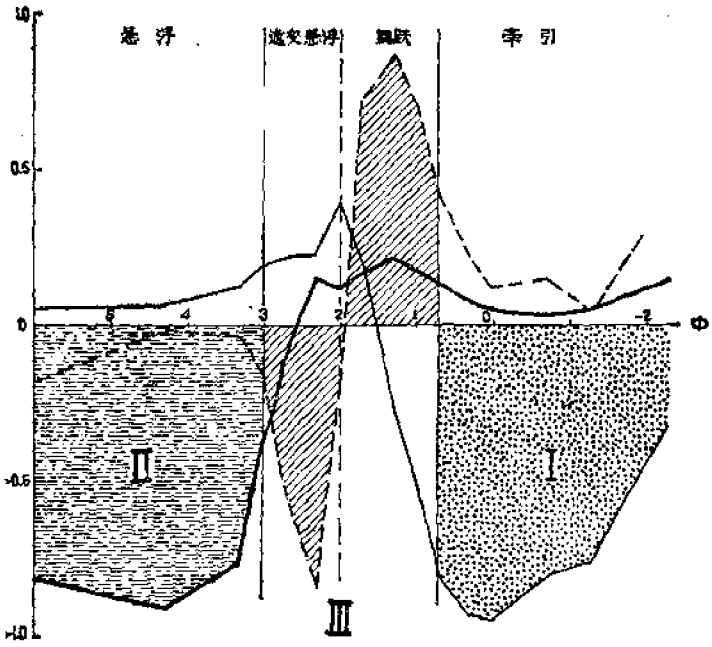


图 3—65 因素载荷剖面及其解释

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

—3.0φ 应属第二种粒级组，在<3.0φ 处载荷的量已很小了。因素Ⅱ（黑粗线）是与较细的粒级（>3.0φ）特别有关，最大载荷在4.3φ 处，载荷量为－0.8至－0.9，<3.0φ 处载荷急速降低。因素Ⅲ（虚线）介于二者之间，即0.6φ 和3.0φ 之间，同时还可看出中间分为两个亚组，一为3.0φ 至2.0φ，最大载荷在2.3φ 处；另一在2.0φ 至0.6φ 间，最大载荷在1.3φ 处。总之，可以分成以下的三个因素组或粒度总体：

总体Ⅰ　粗沙（<0.6φ）

总体Ⅱ　细沙、粉砂、粘土（>3.0φ）

总体Ⅲ　中沙（3.0—0.6φ）

根据计算，因素Ⅰ包含研究区总粒度的35%，因素Ⅱ26%，因素Ⅲ12%。

该区资料所做概率累积曲线（图3—66）与维谢尔的概率累积曲线比较的结果，认为总体Ⅱ相当于他的悬浮总体；3.0—1.3φ 间相当他的跳跃总体；<1.3—0.6φ 以上为牵引总体，因此牵引总体的下界是在1.3—0.6φ 间。此截点比维谢尔的入潮口环境截点（1.25φ—1.75φ）稍粗，艾仑等认为是由于本区物源混有较粗的古沉积物，不单是当代河口及冲积来源，因而粒度偏粗。另外，因素Ⅲ相当维谢尔的跳跃总体，是两端点的过渡带，颗粒越粗时，颗粒越易彼此接触并密集于底部，2φ 间断即相当因素Ⅲ的载荷由负至正的转变点（图3—65），该作者将因素Ⅲ以此点分为两亚类，3.0—2.0φ 代表递变悬浮（各词的含意与帕塞加的相同）；2.0—0.6φ 代表递变悬浮和牵引总体（帕塞加称之为滚动，也有人称为表面爬的）的过渡带，称为跳跃总体。而2.0φ 代表开始含牵引总体的转折点。在这里，我们进一步看到递变悬浮、跳跃总体这两个名词含意的分歧，但我们认为，此处的定义更为合理。因为根据我们对陕甘宁盆地侏罗系河流相砂岩研究及其他同志所做河沙和河流相砂岩，都发现在粒度概率累积曲线上的3.0φ±处可分出两个悬浮总体。粒度>3.0φ±者为均匀悬浮总体，分选好，直线的斜率大；<3.0φ±者属递变悬浮，分选差，

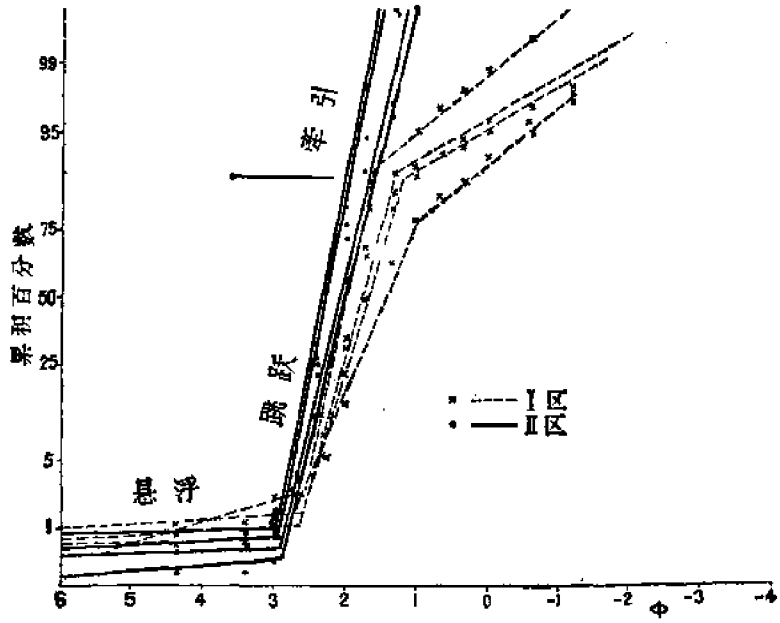


图 3—66　研究区内代表性样品所做概率累积曲线

搬运方式参考维谢尔（1969）

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

直线的斜率小；陕甘宁盆地侏罗系递变悬浮与其下之跳跃总体的截点是，从0.75ϕ至2.50ϕ，我们称这种含两个悬浮总体的河流型曲线为上三段型（图 3—71C），以兹与维谢尔（1969）之两段河流型曲线相区别，他的曲线上的悬浮总体实际上只相当递变悬浮。

该作者还对比了 CM 图。他是用 5 %的粒度而非 1 %粒度（在他的累积图上是95%）做为 C 值画图（图3—67）。结果在图上表明了几种搬运作用：递变悬浮（$D95>1.1\phi$）；递变悬浮加牵引及牵引($D95<1.0\phi$)，可看出界线与粒度概率曲线上的界线稍有不同。从图上可看出，主要是根据因素 I 的含量进行划分的。当因素 $I\geqslant 5$ % 时，是属于递变悬浮加牵引总体及纯牵引总体，其中 5—20%应属递变悬浮加牵引区，而>20%则属牵引总体区。

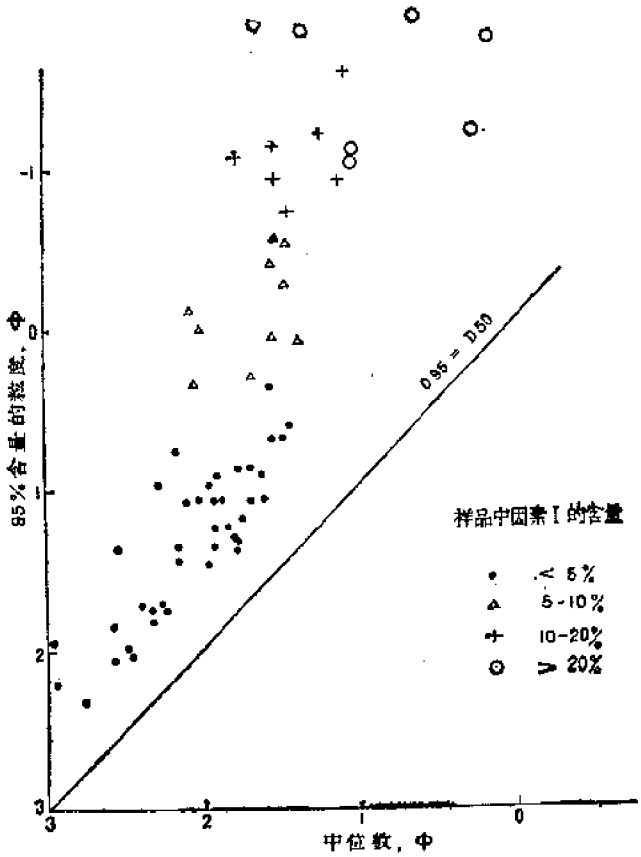


图 3—67 研究区内样品所作的CM图

总之，从上可看出R型因素分析对分析搬运作用是一个很好的方法。

第七节 粒度分析方法及粒度分布在陕甘宁盆地侏罗系岩相古地理研究中应用的实例

一、基本地质情况

陕甘宁盆地为一面积约 40 余万平方公里的巨大沉积盆地。盆地中侏罗系地层广泛发育。分为三部分：下部称延安群($J_{1-2}y$)、中部称直罗组(J_2z)、上部即安定组($J_{2-3}a$)。除后者为内陆湖相泥灰岩沉积外，其余均为陆相碎屑岩系(以河流相为主的河湖相)。作粒度分析的样品主要采自河流相，故以下的简介重点亦偏重河流相。

二、粒度分析方法

由于侏罗系岩石成岩后生变化明显，大部分泥质胶结物已重结晶为结晶的粘土矿物，无法松解，只有全部采用薄片粒算法。作薄片粒度分析时最好是用点计法抽样。我们这次工作，由于某些条件限制，选用了线计法。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

1．**米值与 ϕ 值的换算**　由于显微镜的微尺或机械台的读数均为米值，而下面我们多数的图件都使用 ϕ 值，故须将米值变为 ϕ 值，或了解某些 ϕ 值的毫米值。换算办法有二：一为查换算表(图3—68、表3—13)，一为用计算尺算出。后一方法有人（福克，1964）介绍使用计算尺的 L 及 D 尺。但不如使用重对数尺更为简易，现介绍于下：

米值换算为 ϕ 值，利用公式 $\phi=-\log_2 d$

例1　设米值粒径为 $d=4$mm，求 $\phi=$？

A．将发线对准 LL 尺的“2”，

B．将 c 尺指标移至发线下，

C．移滑标，使发线对 LL 尺的 d，即“4”

D．在 c 尺上读出发线下的数值“2”，即 $\phi=-2$

例2　设 $d=0.5$mm　求 $\phi=$？

A．将公式做适当的变化，以利计算：

$$\phi=-\log_2 d=-\log_2(0.5)=-\log_2(5\times10^{-1})$$
$$=-\log_2 5+\log_2 10$$

B．用例1的方法得

$$-\log_2 5=-2.32、\log_2 10=3.32$$

C．$\phi=3.32-2.32=1$

ϕ 值转换为米值，是利用公式 $d=2^{-\phi}$

例3　设粒径 $\phi=-2.5$，求 $d=$？mm

A．使发线对准 LL 尺的“2”，

B．将 C 尺指标移至发线下，

C．移滑标，使发线对准 C 尺上的“ϕ”，即“2.5”，

D．读出发线下 LL 尺上的数值“d”即“5.66”，故 $d=5.66$mm

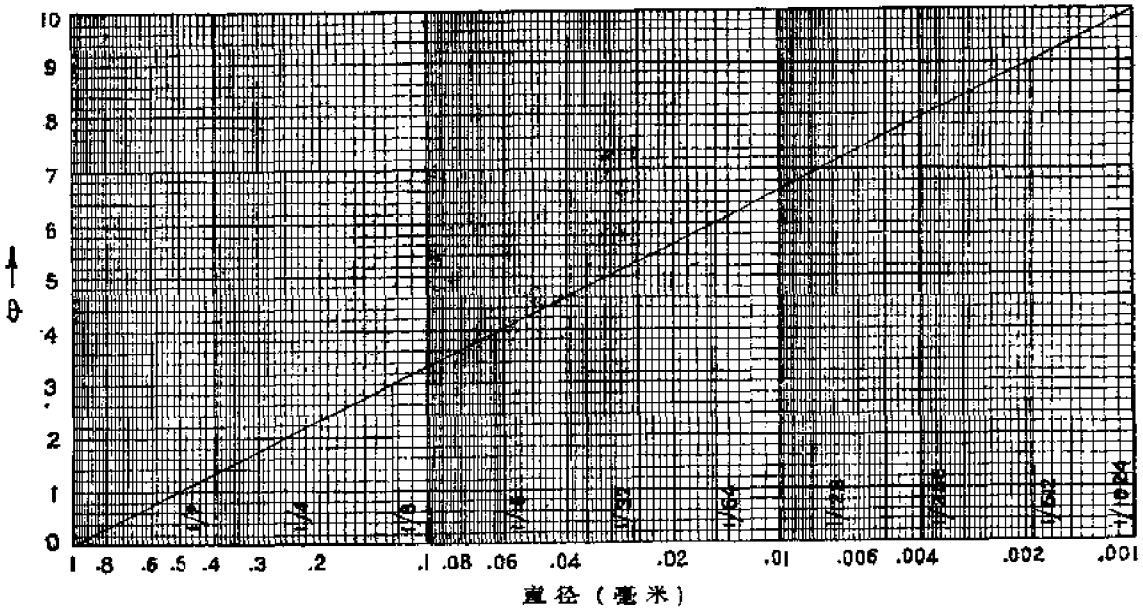


图 3—68　米值及 ϕ 值换算图

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表 3—13　ϕ单位变成毫米、微米值的换算表

ϕ	0.000	0.125	0.250	0.375	0.500	0.625	0.750	0.875		ϕ
−4	16.000	17.43	19.01	20.73	22.62	26.68	26.9	29.35	毫　米	
−3	8.000	8.73	9.51	10.73	11.31	12.34	13.46	14.68		
−2	4.000	4.36	4.75	5.18	5.66	6.17	6.73	7.34		
−1	2.000	2.181	2.375	2.594	2.828	3.084	3.363	3.668		
0	1.000	1.090	1.189	1.297	1.414	1.544	1.682	1.883		
微　米		545	595	648	707	772	841	917	1.000	+ 0
		273	297	324	354	386	421	458	500	1
		136	149	162	177	193	210	229	250	2
		68.1	74.3	81.2	88.4	96.5	105.1	114.6	125	3
		34.1	37.2	40.6	44.2	48.3	52.6	57.3	62.5	4
		17.0	18.6	20.3	22.1	24.1	26.3	28.6	31.25	5
		8.53	9.23	10.1	11.0	12.0	13.1	14.3	15.63	6
		4.26	4.64	5.97	5.53	6.03	6.57	7.16	7.84	7
		2.13	2.32	2.53	2.76	3.01	3.28	3.58	3.92	8
		1.07	1.16	1.27	1.38	1.51	1.64	1.79	1.960	9
		0.522	0.580	0.634	0.691	0.754	0.821	0.895	0.980	10
		0.266	0.290	0.317	0.345	0.377	0.410	0.447	0.090	11
		0.133	0.145	0.158	0.173	0.188	0.205	0.224	0.245	12
		0.066	0.073	0.079	0.086	0.094	0.103	0.112	0.122	13
		0.033	0.036	0.039	0.043	0.047	0.051	0.056	0.061	14
ϕ		0.875	0.750	0.625	0.500	0.375	0.250	0.125	0.000	ϕ

例 4　设 $\phi=2.12$，求 $d=$?mm

A、B、C、三步均同例 3，只是将“2.5”换成“2.12”。

D．在 LLO 尺上读出发线对准的数值“0.23”，亦即 $d=0.23$mm。

2．稳定频率试验　不管采用点计、线计或者带计，究竟一个样需要实测多少个颗粒才合适呢？各家的结论不一样。实际上各个地区、不同环境均有差别，最好用本区的样做稳定频率试验来确定。我们是选定了各种类型的 10 个样做试验，每个样分别测定 100、200、300、400、500及600（只两个样）个颗粒的粒径。以1/4ϕ分组统计，分别算出频率及累积频率。作累积曲线图（图 3—69），从图上读出四分位数 Q_1、Q_3 及 Md。将这些参数数据点在粒径对颗粒数的坐标图纸上，即得各样品的稳定频率试验曲线图（图3—70），从图上可看出，大致从300颗计数起，参数即趋于稳定。我们根据全部 10 个样的试验曲线确定了本区岩样颗粒计数以400—500颗为宜。

3．镜下粒度测量　由于需测定 400—500 颗，故样品切片面积要大一些，或者在同一样品的两块薄片上进行。在实测工作中，其实并不需要作上述的换算，因为一般都有设计好了的专用原始记录表可供选用。我们使用的记录表见表 3—14。在工作之前，应先确定显微镜目镜微尺相对于表上各区间的格数，并填入相应栏内。正式测定颗粒粒度时，应一颗颗地按其大小分开区间加以统计，即在表 3—14 中颗粒数栏内作“正”或“卌”符号予以记录，直到测完400到500颗为止。最后，计算频率及累积频率。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

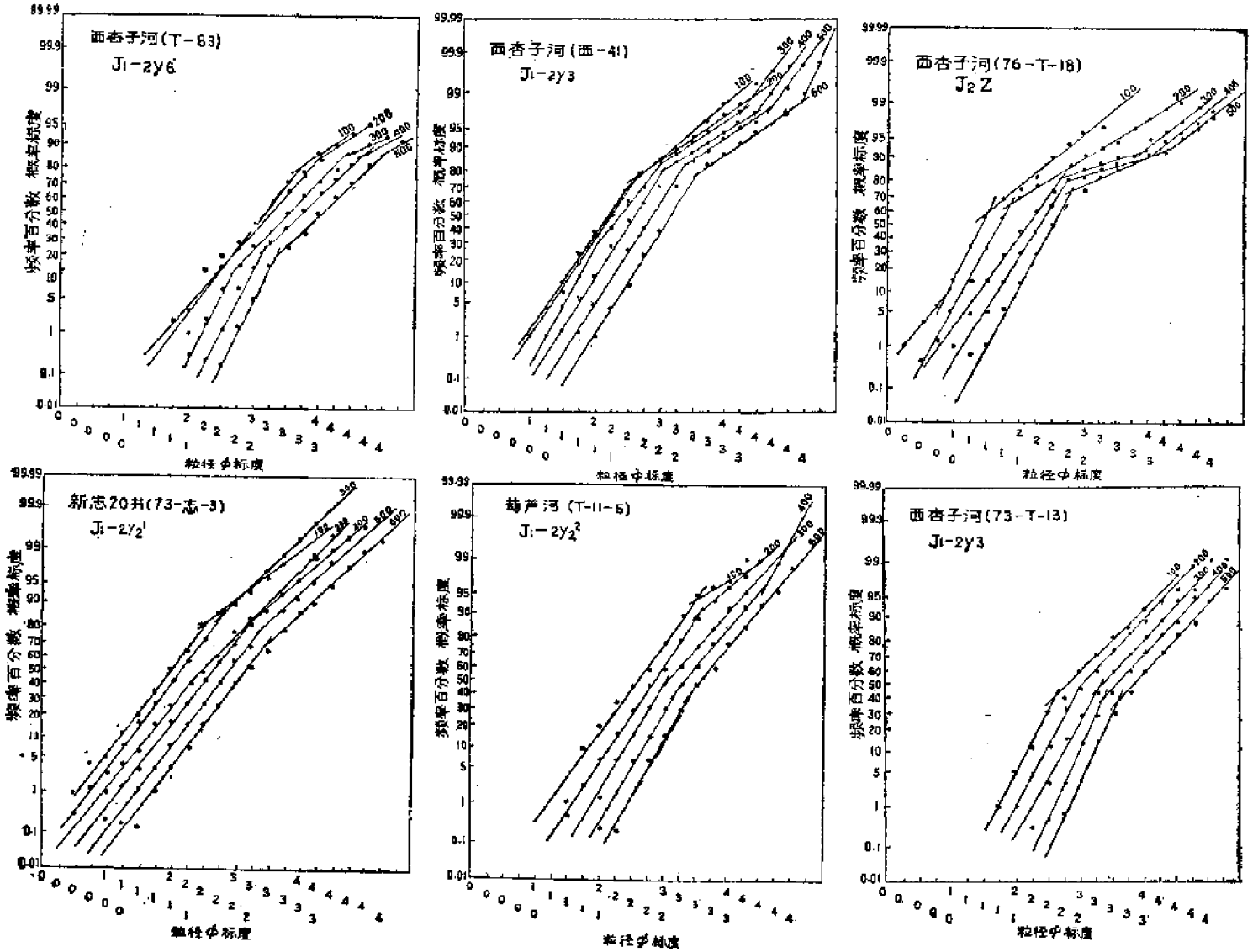


图 3—69 概率累积曲线图

表示曲线形状与颗粒计数间的关系。横坐标由上至下的标度依次代表100颗、200颗、……的曲线使用的标度

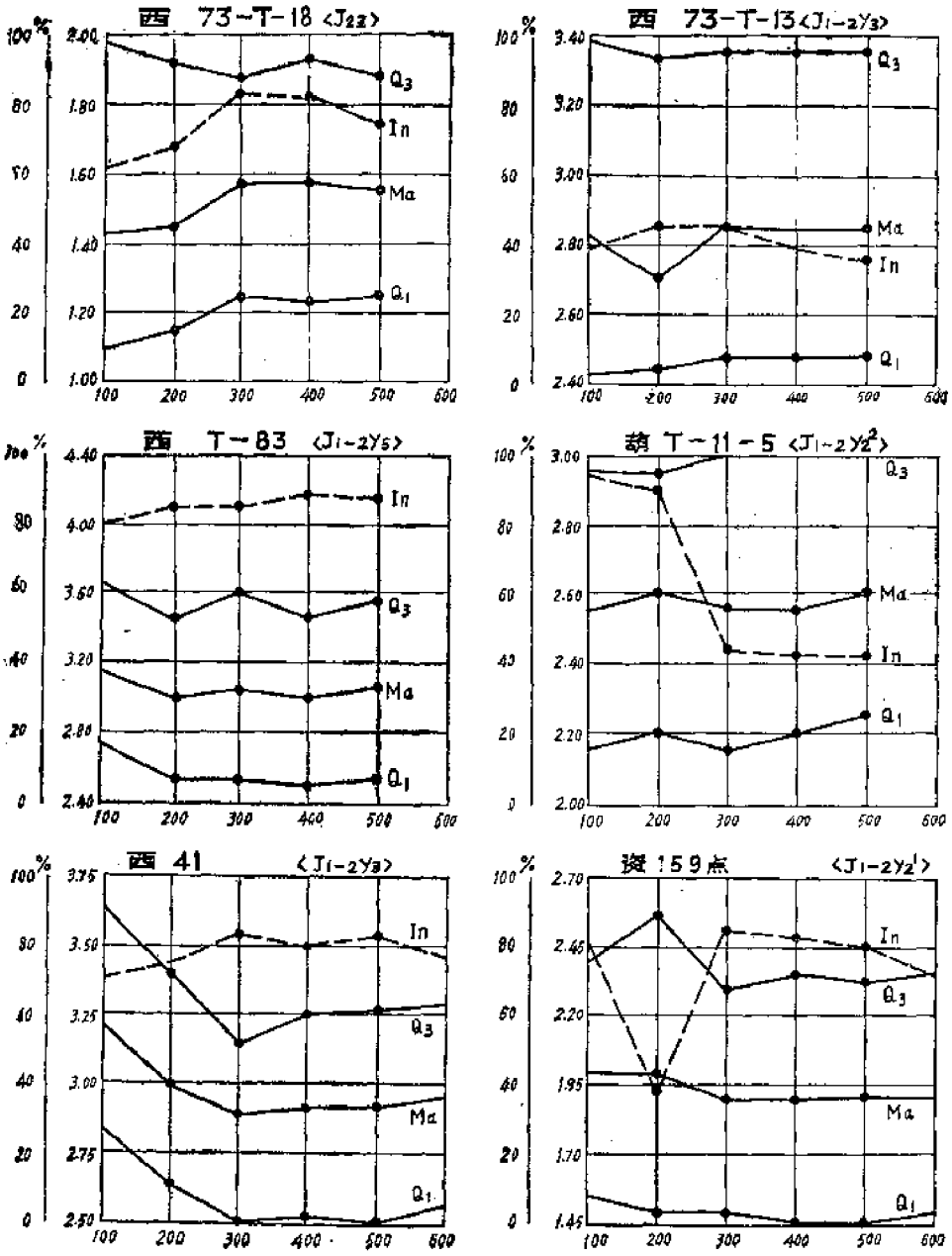


图 3—70 稳定频率试验曲线图

表示粒度分布统计参数与颗粒计数的关系。Q_1及Q_3：第一及第三四分位数；Md：中位数；In：概率累积曲线截点的百分数

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表 3—14　薄片粒度分析原始记录表

剖面（井）	薄片号	时代	定名	沉积构造	显微镜型号及放大倍数
四杏子河剖面	西73-T-14	$J_2y_2^2$	砂岩	水平层理	MNH-4 20×5

目镜微尺格数	区间 mm	区间 φ	颗粒数，视长径线计抽样 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	总计	频率 %	累积频率 %	注
	4.00～3.363	-2～1.75														
	3.363～2.828	-1.75～1.50														
58.5～49.2	0.500～0.421	1～1.25														
49.2～41.4	0.42～0.354	1.25～1.50	丅										2			
41.4～34.7	0.354～0.297	1.50～1.75	正	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	0.50	0.50	
34.7～29.2	0.297～0.250	1.75～2	正	正	一	—	—	—	—	—	—	—	11	2.75	4.25	
29.2～24.6	0.250～0.210	2～2.25	正	正	正	正	正	正	一	—	—	—	31	7.75	12.00	
24.6～20.7	0.210～0.177	2.25～2.5	正	正	正	正	正	正	正	正	正	正	57	14.75	26.25	
20.7～17.4	0.177～0.149	2.5～2.75	正	正	正	正	正	正	正	正	正	正	68	17.00	43.25	
17.4～14.6	0.149～0.125	2.75～3	正	正	正	正	正	正	正	正	正	正	94	23.50	66.75	
14.6～12.3	0.125～0.1051	3～3.25	正	正	正	正	正	正	正	正	正	正	59	14.75	81.50	
12.3～10.3	0.1051～0.0884	3.25～3.50	正	正	正	正	正	正	—	—	—	—	30	7.50	89.00	
10.3～8.7	0.0884～0.0744	3.50～3.75	正	正	正	正	正	一	—	—	—	—	26	6.50	95.50	
8.7～7.3	0.0774～0.0625	3.75～4	正	下	—	—	—	—	—	—	—	—	8	2.00	97.50	
7.3～6.2	0.0625～0.0526	4～4.25	正	下	—	—	—	—	—	—	—	—	8	2.00	99.50	
6.2～5.2	0.0526～0.0442	4.25～4.50	丅	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	0.50	100.0	
5.2～4.4	0.0442～0.0372	4.50～4.75														
1.8～1.3	0.0157～0.0110	6～6.50														
<1.3	<0.0110	>6.50														
总计			颗粒数：										400	1000.0		

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

有了这样的原始数据，即可进行各种粒度参数的计算（包括矩法计算）、编制各种粒度参数图件，如概率粒度累积曲线图、散点图、C-M图……等。

三、粒度在解释沉积环境方面的应用

现以概率粒度累积曲线及结构参数散点图在陕甘宁盆地侏罗系岩相古地理研究中所起作用作为在应用方面的一个例子。

1．**概率粒度累积曲线的类型**　本区粒度分析数据做出的概率粒度累积曲线大部分与维谢尔（1969）关于当代和古代河流的曲线类似，但不完全相同，然而根据野外观察和其他相分析方法，共同确定这些曲线均属河流相。从曲线形状看，大致可以分为三种类型。

A．两段型　是由跳跃和悬浮两个次总体组成（图3—71A及B），其截点的变化区间很宽（0.75—4.00ϕ），大多数的曲线截点与维谢尔（1969）的特征曲线（这些曲线的截点是2.75—3.50ϕ）相比要粗得多。根据弗里德曼（1958）的薄片粒度与筛析粒度换算法得知，一般粒径在<4.00ϕ的范围内，薄片测得的粒度累积曲线较之筛析法测得的曲线偏粗，最大相差0.4ϕ多，如将此数值扣除再取ϕ级整数，则标准河道砂（岩）的截点上限即由2.75ϕ大致变成2.25ϕ。本区两段型曲线截点大于或等于2.25ϕ的占61.1%。截点的大小可以反映搬运介质的扰动强度，强度高的在较粗粒度上发生截断，因而截点大于或等于2.25ϕ的那些两段型曲线可以反映较急河流的沉积环境。

另外，本区曲线的悬浮次总体的斜度多数分布在36—50°间（占80%）。与维谢尔（1969）的河流曲线比较，此总体偏陡（他的曲线在20—30°）。

本类型还包括一部分从其衍生的上三段型及下三段型曲线。

下三段型（图3—71D）是在跳跃次总体的粗端存在一个分选性差的牵引次总体，二者的截点在1.00ϕ附近。牵引次总体的存在，一般受源区物质的粒度控制，当河流负载中含有较粗的碎屑，流速不足以使其呈跳跃方式搬运时，它即呈滚动或滑动方式搬运，当流速减小时，即与其他方式搬运的碎屑一起沉积下来。这一次总体往往在河流的深水区中发育。

上三段曲线（图3—71C）的特征是由三个线段组成，中间线段的斜度最小，它与细粒次总体的截点在2.50—3.75ϕ间。底部的粗粒次总体含量一般小于65%，与中间次总体的截点在0.75—2.50间，其中截点大于2.25ϕ点多数（82.8%）。虽然本类曲线与维谢尔（1969）的潮三角洲曲线非常类似，但本地区结合其他岩相特点分析，我们认为仍应属河流沉积。因它除了在2.50—3.75ϕ间发育了一个截点外，其他特点与上述的两类型相似。

为了比较曲线的各种参数，按照维谢尔（1969）提出的河道砂（岩）的主要参数界限，将本区两段型曲线（包括上三段及下三段型）分出九种情况（表3—15）。首先是根据跳跃和悬浮两次总体的截点值分为≥2.25和<2.25ϕ两类；然后再从悬浮次总体的含量（以35%）为界；最后根据跳跃次总体的斜度（>60°、50°—60°、<50°）进一步划分。

初步分析，表3—15中Ⅰ—Ⅳ类曲线的截点粗，故属扰动大的急流河流沉积。而Ⅱ、Ⅳ两类同时含较高的悬浮次总体，更可说明水流急，后两类曲线共占Ⅰ—Ⅳ类曲线总数的74.3%。

Ⅴ—Ⅷ曲线属于流速相对较小、扰动较小的平原河流沉积。本区以含悬浮物较少的Ⅴ、Ⅶ两类曲线占多数。维谢尔（1969）提出的河道砂（岩）曲线大多数属此两类，少数沉积

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

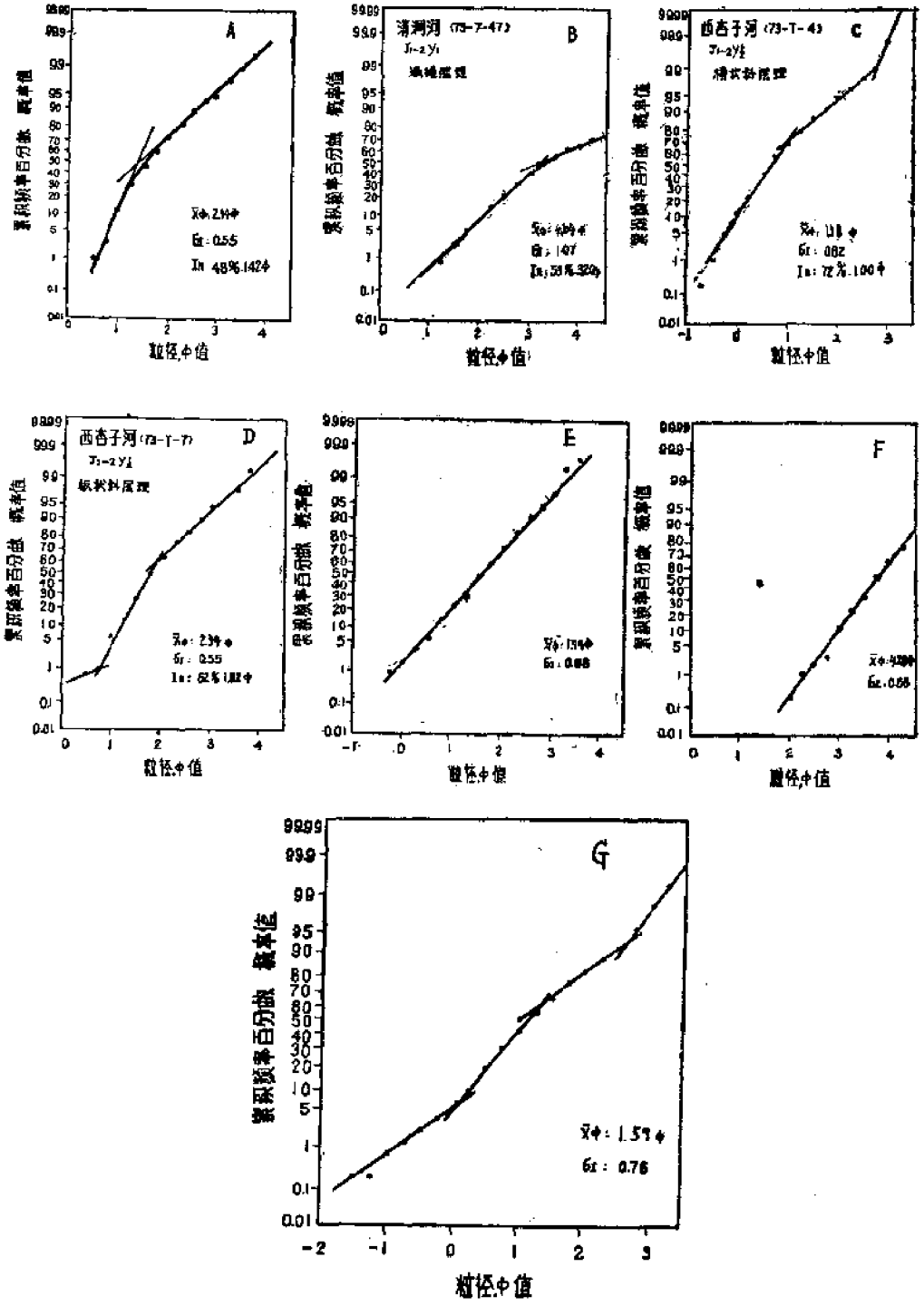


图 3—71 粒度概率分布曲线

$\bar{x}$：平均值；σ_I—概括分选系数；I_n—截点百分含量及粒度。$\bar{x}$及σ_I均用弗里德曼的方法换算过，故现为换算后的筛析粒度。$\bar{x} = 1/100\Sigma fx$；$\sigma_I = \frac{\phi 84 - \phi 16}{4} + \frac{\phi 95 - \phi 5}{6.6}$

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表 3—15 本区两段型粒度累积曲线的种类及占两段型曲线总数中的比例（68个样品）

跳跃和悬浮次总体的截点ϕ值		≥2.25ϕ		<2.25ϕ	
悬浮次总体的含量		<35%	>35%	<35%	>35%
跳跃次总体的斜度	>60°	Ⅰ 8.9%	Ⅱ 34.3%	Ⅴ 7.5%	Ⅵ 6.0%
	60—50°	Ⅲ 6.0%	Ⅳ 11.9%	Ⅶ 16.4%	Ⅷ 7.5%
	<50°				Ⅸ 1.5%

旋迴上部含波状层理及水平纹理的细粒砂（岩）曲线则属Ⅷ类。

Ⅸ类曲线所含悬浮物量高，同时分选性差，本区此种曲线大多代表支流的暂时性水流沉积，与浊流沉积有些类似。

本区两段型曲线之所以与维谢尔（1969）的特征曲线不同，我们认为主要还是由于河流性质不同之故。他所选用的样品均系采自平原河流，古代样品一般为中至细粒砂岩。而本区的砂岩样品多以中至粗粒为主，代表的是地壳上升后地形起伏较大的较急河流沉积。

B．单一直线型　本类曲线由单一的直线段组成(图3—71E)，说明粒度分布为一个正态分布，故属一种方式搬运。此种直线的斜度大部分小于 50°（42.6—48.5°），在宽的区间内延伸，最大粒径可在0.00ϕ附近。此类曲线与维谢尔（1969）所描绘的浊流沉积粒度曲线相似，只是后者的斜度稍小（小于42°）。本类曲线可能代表水速及密度均较大，全部沉积物均成悬浮负载。在本区此类曲线多与其他河流曲线伴生，但常位于河流沉积旋迴的底部或上游支流河道中，因此我们认为它应属水流更为湍急的沉积。

另一种直线型曲线（图3—71F）与上述直线型曲线不同，粒度较细（>2.00ϕ），斜度也较大（53°）。根据伴生的沉积特征分析，我们初步认为这种曲线可能属于河流的天然堤或其他河漫滩沉积。当洪水漫过河岸后，由于水速急剧下降，水体中的主要负载，大量沉积在河岸附近。

C．多段型　曲线至少由四段组成（图3—71G）。分选性一般差。虽然维谢尔(1969)谈到过，岩石的成岩后生作用能使粒度变成多段型，但本区具这种曲线的岩石并未发现特殊强的成岩后生作用。同时这种类型曲线较易在上游支流河道中存在，因此我们认为可能仍属于类似浊流沉积的山地河流沉积，由于水流湍急而分异不完全因而构成多段型。具此类型曲线的样品都属延安群第一段的砂岩，为地壳刚刚上升后、河流较急情况的产物，也可间接地证明上述论点。

2．侏罗系各段累积曲线的特征及岩相古地理意义　本区内侏罗系各时代从下至上，不仅曲线类型而且分选系数的分布都有一定的规律性。下面介绍各时代存在的曲线类型。

A．延安群第一段($J_{1-2}y_1$)根据20个样品表明，本段砂岩的概率粒度累积曲线类型是各段中最复杂的，四种类型均有。各类曲线所占比例见表3—16，特别是代表急流河流沉积的直线型和多段型所占比例在各组段中最高。

在两段型中，代表急流沉积的Ⅰ—Ⅳ类占全部两段型的80%。跳跃总体和悬浮总体的截点较之其他各段为粗，在 0.75—1.60ϕ间。从平面图上看（图3—72），主河道内（Ⅲ，

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表 3—16 各时代样品曲线类型所占比例（%含量）

百分含量 时代 \ 类型	两段型	直线型	多段型	其他	样品数
J_{2s}	100	0	0	0	10
$J_{1-2}y_2^2-y_2^3$	82.6	8.7*	0	8.7	23
$J_{1-2}y_2^1$	90.6	3.1	0	6.3	32
$J_{1-2}y_1$	50	25	15	10	20

* 属天然堤型的直线型曲线

区）主要属Ⅱ类曲线，甘泉东偏北金盆湾地区的曲线属Ⅰ类，粒度最粗，属砾岩沉积。安塞东北清涧河属Ⅳ类沉积，其中含直径为1厘米左右的砾石，并含涡卷层理，跳跃次总体的分选差，很可能代表从东北方流来的支流沉积，由于水流湍急，故有些象浊流沉积的特点。另外靠近边部支流处，多为直线型曲线。

本段中含较多的直线型曲线（占总数的25%）及多段型曲线（占15%）。这种曲线一般分选差。矩值分选系数$\sigma=0.55-1.00$，标准差中位数$m_\sigma=0.660$，标准差的标准差$\sigma_\sigma=0.118$（图3—73）。

本段砂岩的粒度平均值也最粗，粒度变化也大，$\overline{x}_\phi=1.25-4.00\phi$，平均值中位数$m_x=2.250\phi$平均值的标准差$\sigma_x=0.864$（表3—17，图3—74）

根据上述特点并结合其他地质特点来看，延安群第一段时期是在地壳上升运动刚刚发生后，地形分割较甚，除了一条东西向的主河流外，两岸地区沟壑纵横，支流繁多且水流湍急。同时因地形起伏大，故各种水流动态变化亦大，因而表现出曲线类型众多且以急流型为主，并且粒度粗、分选性差。

B．延安群第二段下部（$J_{1-2}y_2^1$）根据32个样品得出本段曲线是以两段型为主，共占总数的90.6%，仅个别为直线型。两段型曲线中，属于急流沉积的Ⅰ—Ⅳ类曲线比第一段有所减少，共占67.9%，与维谢尔（1969）提出的平原河相当的两段型Ⅶ类有所增加，占25%。同时代表缓流的Ⅷ类曲线开始出现，占7.10%。

一般在主河道上多出现Ⅰ—Ⅳ类的急流两段型曲线（图3—75）。同时这种曲线的跳跃次总体和悬浮次总体间的截点，一般比第一段砂岩的细，为$2.25-0.95\phi$间。另外，在某些剖面的上部还出现了Ⅴ、Ⅵ、Ⅷ类曲线，反映出在沉积旋迴的上部有流速逐渐减小的趋势。少数支流河道上仍然出现一直线型曲线（图3—75）。

本段的平均粒度（$\overline{x}_\phi$）分布在$1.00-4.50\phi$间，中位数$m_x=2.350$，较第一段稍细（图3—74；表3—17），不如第一段那么分散，$\sigma_x=0.535$。分选性一般也较第一段好（表3—17）。

根据上述特点可看出，第二段下部时期的地形已渐趋平坦，河流比前稳定，各处的水流动态情况渐趋一致，河流已由急流转成低弯度河，并逐渐向高弯度的平原河流转化，因此出现较一致的粒度曲线类型。

C．延安群第二段上部—第五段（$J_{1-2}y_2^2-J_{1-2}y_2^5$）所根据的23个岩样主要采自东部的地面剖面，得出的曲线形状主要是两段型，占全部的82.6%，直线型曲线占8.7%（表3—

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

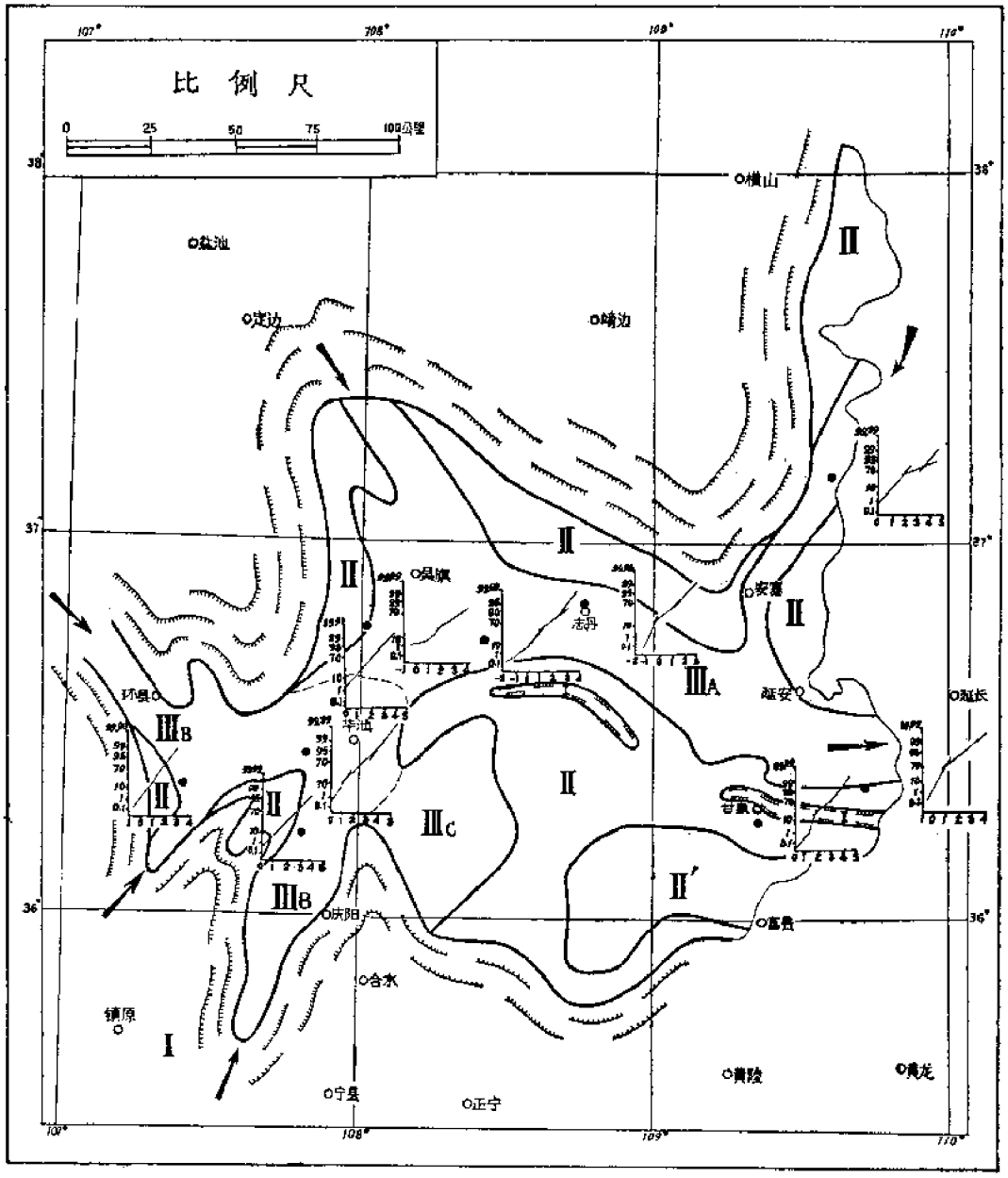


图 3—72 延安群第一段($J_{1-2}y_1$)概率累积粒度类型平面分布概况图

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

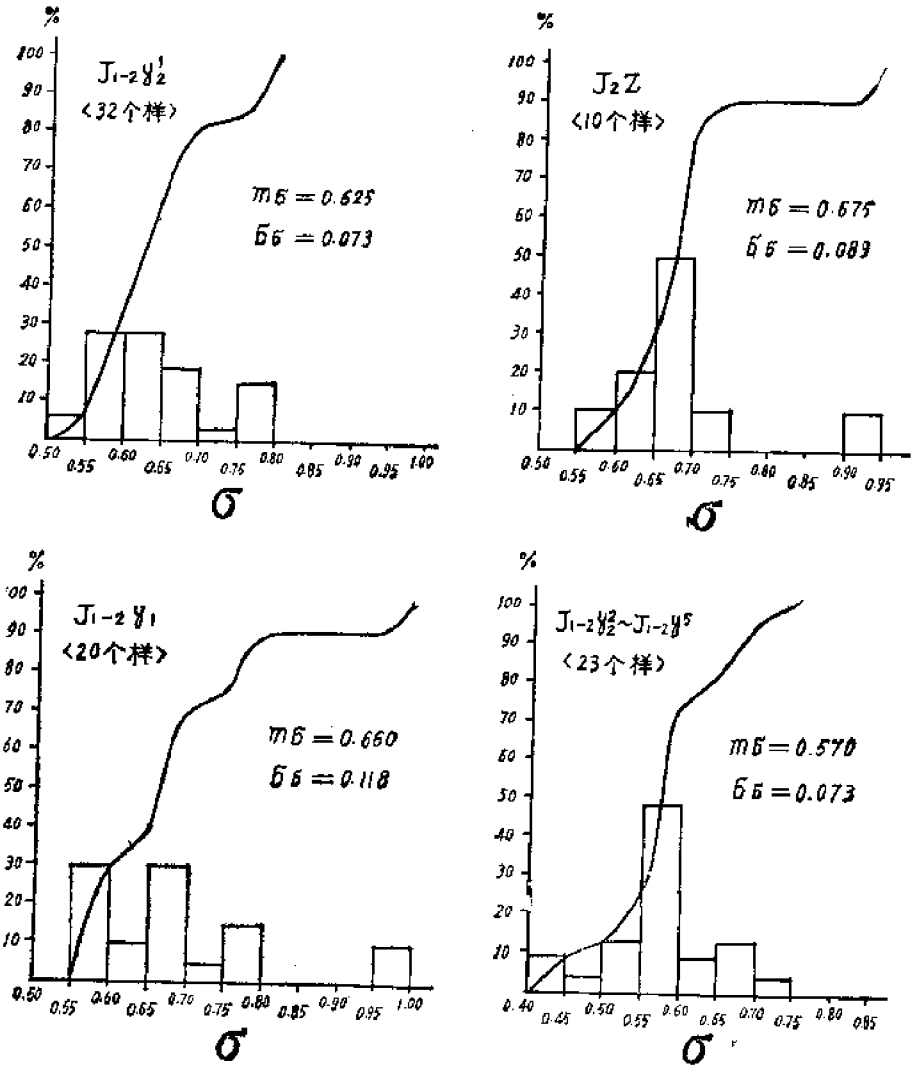


图 3—73　各时代砂样的标准差情况

m_σ = 标准差的中位数，σ_σ = 标准差的标准差

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

表 3—17　各时代样品曲线粒度平均值$\bar{X}_\phi$及分选系数的中位数及标准差变化情况

时代	结构参数			
	$\bar{X}_\phi$的中位数m_x	σ的中位数m_σ	$\bar{X}_\phi$的标准差σ_x	σ的标准差σ_σ
J_2z	2.650ϕ	0.675	0.445	0.089
$J_{1-2}y_2^2-J_{1-2}y_2^5$	3.130ϕ	0.570	0.373	0.073
$J_{1-2}y_2^1$	2.350ϕ	0.625	0.535	0.073
$J_{1-2}y_1$	2.250ϕ	0.660	0.864	0.118

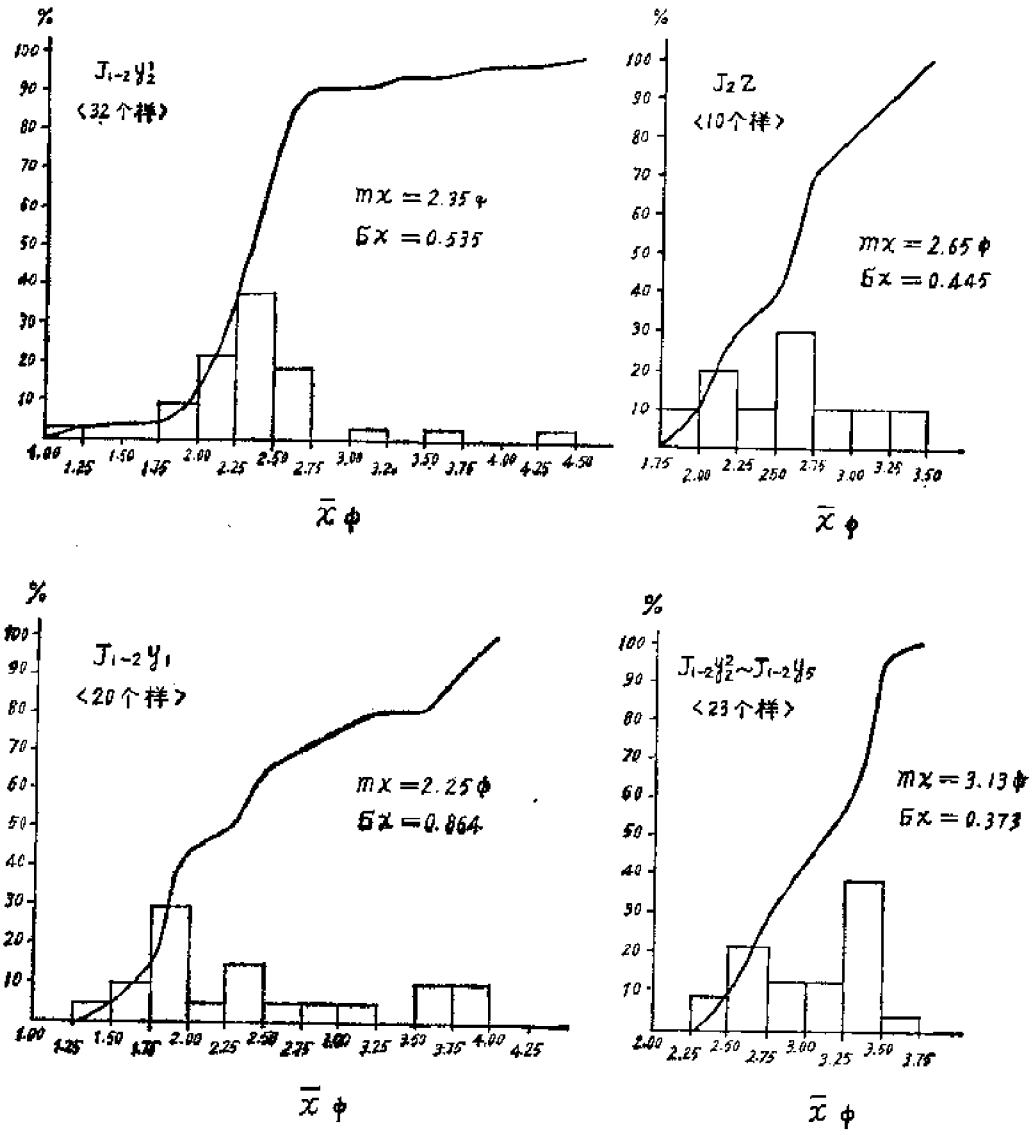
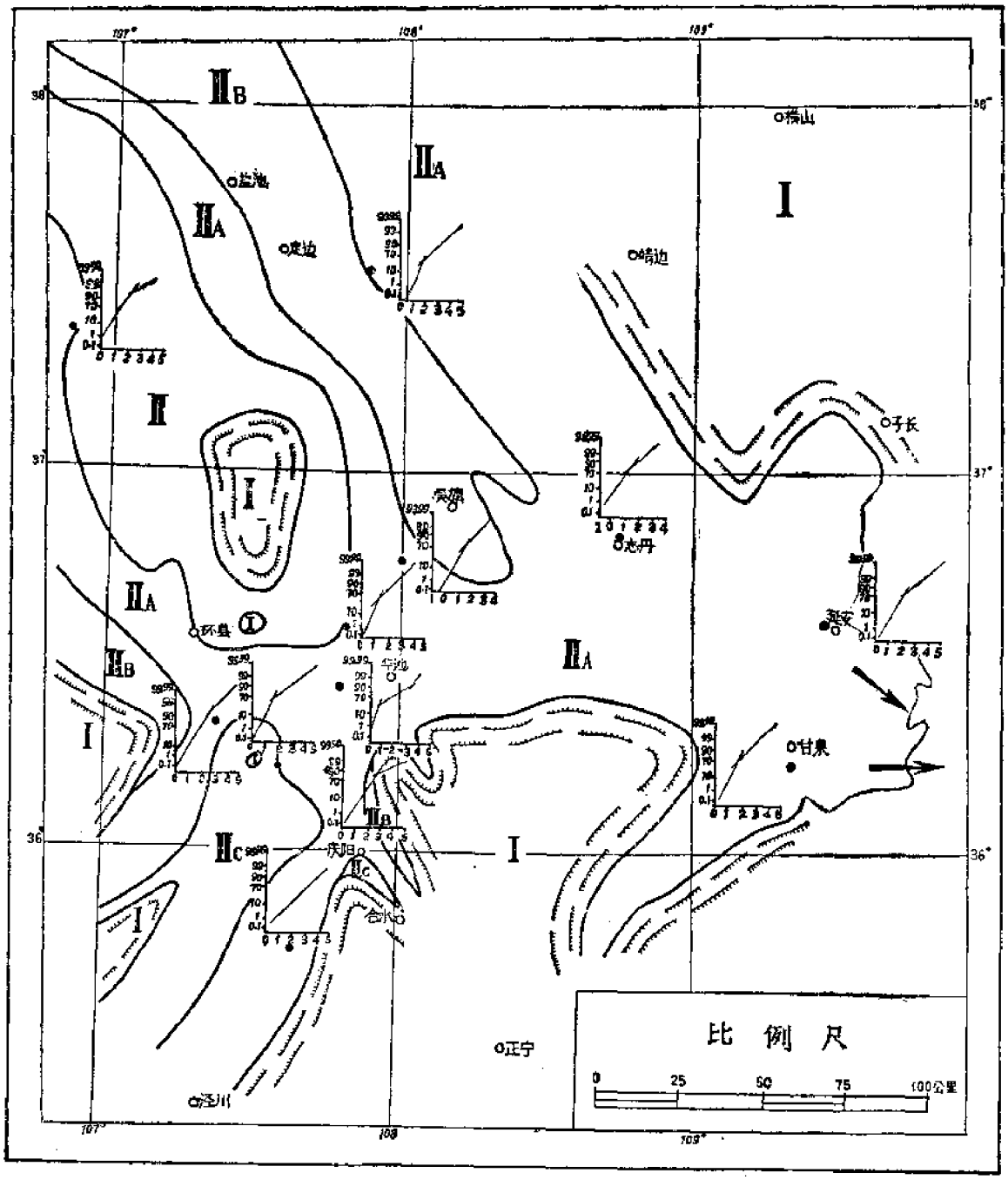


图 3—74　各时代砂样粒度平均值$\bar{x}_\phi$及标准差

mx：平均粒度($\bar{x}_\phi$)的中位数；σx：平均粒度的标准差

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn



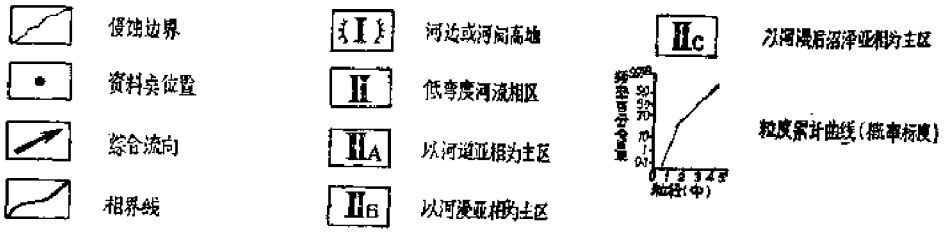
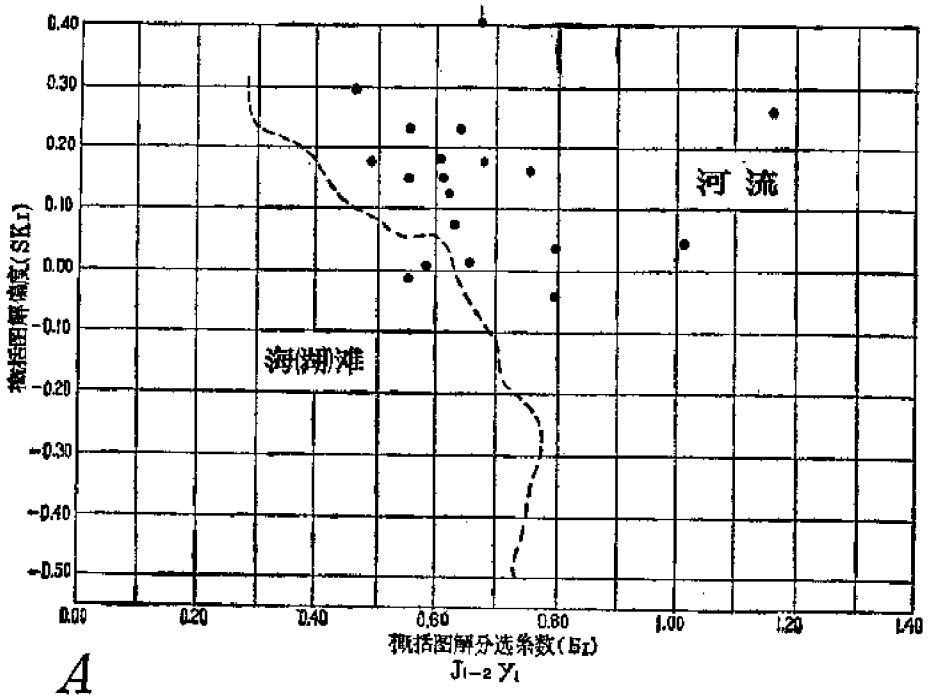
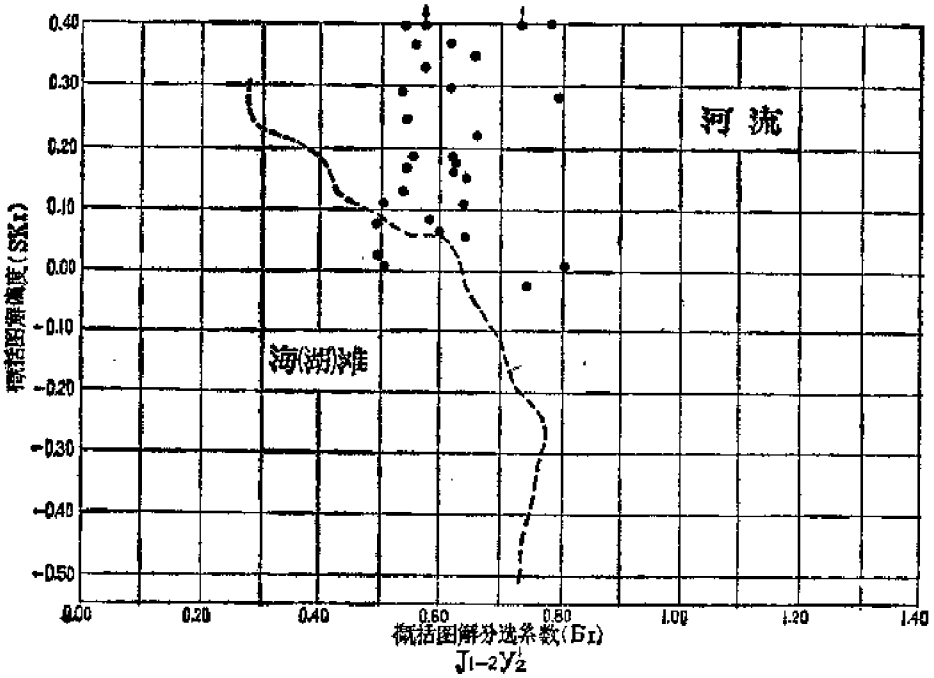


图 3—75 延安群第二段下部($J_{1-2}y^1_2$)的概率粒度累积曲线类型平面分布图

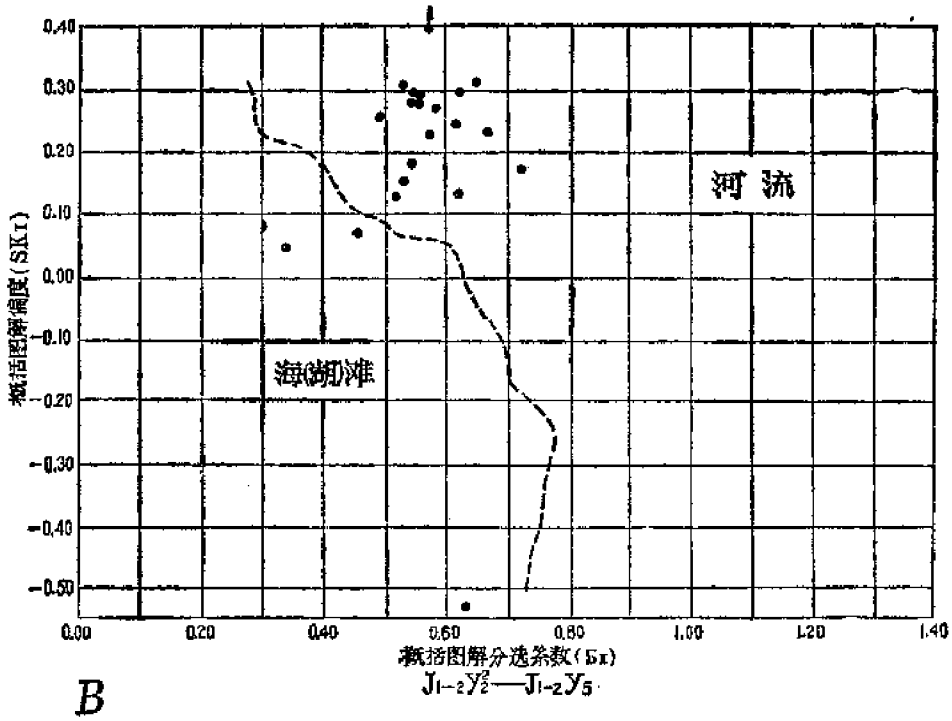
PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn



A



PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn



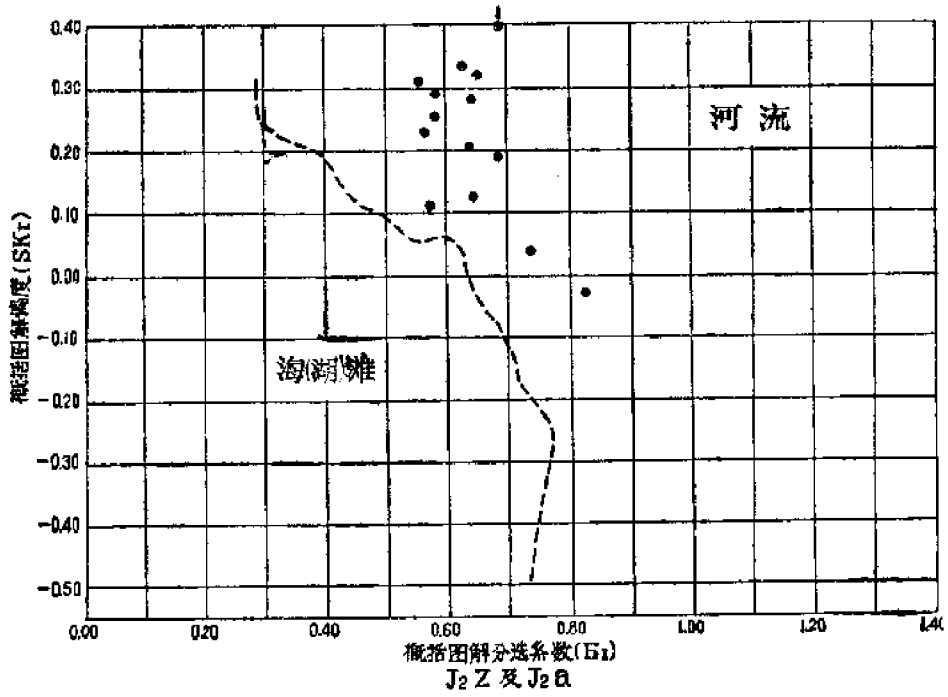


图 3—76 侏罗系沉积的结构参数散点图

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

16)。两段型曲线中，与维谢尔（1969）的平原河类型曲线（Ⅴ—Ⅶ）相当的曲线数量大为增加，占68.3%。这种曲线上的两次总体截点为2.45—3.30ϕ，较上述两段为细。属Ⅰ—Ⅳ类的两段型仅占31.7%，它们的截点稍粗，为1.70—2.20ϕ。本段中的直线型曲线的粒径较细，且斜度稍大，因此可能大部分属河漫滩沉积。

本段砂岩的平均粒度（$\overline{x}_\phi$）分布在2.25—3.75ϕ间，中位数m_x为3.13ϕ（图3—74），是延安群各段中最细的。分选系数在0.40—0.75范围内，$m_\sigma=0.570$，因此也是各段中分选最好的。此外，无论粒度及分选性从现有的样品来看都比较一致，这表现在σ_x和σ_σ的值均较小上（表3—17）。

根据上述特点并结合其他地质特征来看，在第二段下部以后，地形已基本被夷平，于其上发育的主要是流缓水深的高弯度平原河流。

D. 直罗组 J_2Z　本组砂岩主要采自东部的地面剖面，以底砂岩为主，共10个样品，测定结果全为两段型，其中Ⅰ—Ⅳ类的占80%，两个次总体的截点亦较粗，为1.20—2.25ϕ，与延安群第二段下部的砂岩类似。由于直罗时期前，地壳普遍的有过上升，因此其粒度曲线的各种性质与其下并不连续。根据各种特点分析，此底砂岩仍应属低弯度河流沉积。

中上侏罗纪安定组因样品过少，从略。

3. 结构参数散点图　本次工作中做了一些结构参数散点图。因为弗里德曼（1967）所做散点图模式都是根据筛析资料做出的，因此我们做出的薄片资料均按本文中所介绍的换算方法进行了换算，然后再做图。

几种结构参数散点图中，以概括图解偏度SK_I对概括图解分选系数σ_I的散点图最有效。在这种图上（图3—76）大部分点均落在河流环境区内，与上述概率粒度累积曲线所得结论一致。共有12个点落在海滩区内，占样品总数的14%弱。弗里德曼根据300多个样品作出的散点图模式均有5—13%的点也是落在它们应属的环境之外。我们的结果与之相比，大体近似。同时应指出，仔细研究后发现这些落在海滩环境内的点，相当一部分可能属河漫滩沉积，其生成环境更近乎海滩，而有别于河流的河道环境。

除此而外，我们还做了C-M图及米值算术值结构参数图，所得结果与上述两种方法得出的结果大体一致。

由于所做样品量不够多，同时还遇到一些特殊的、目前尚无法解释的曲线类型，这些均有待进一步的工作。然而，既使是这样，从上面的例子中已经能够说明粒度分析的资料，对岩相古地理的研究，有很大帮助*。

---

* 须加以说明的是，由于我们所做粒度概率图解是根据薄片粒算资料，又是根据维谢尔（1969）筛析资料当代模式进行解释的。他所采当代样品普遍缺乏44微米部分，并认为古代样品中这部分主要是成岩后生作用的产物，因此我们制图时未考虑<30微米的基质部分，结果粒度曲线上也表现出清楚和系统的与其他成因标志一样的变化。但普遍截点粗，悬浮总体陡，这可能是因这种处理方法存在部分误差造成的，但更主要还是成因的影响。至于在此基础上所做散点图，对于河流相来说，误差的关系不大，因此结果是可用的。我们建议今后的工作如系薄片粒算资料，最好建立并根据薄片粒算的模式，筛析资料时才用维谢尔的当代模式。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

主 要 参 考 文 献

1. 成冶，1975，我国某地区砂岩铜矿床的成因及控制因素的初步探讨，地质学报，1期。

2. 林少宫，1963，基础概率与数理统计，高等教育出版社。

3. 鲁欣，1952，沉积岩石学原理（译自俄文），地质出版社。

4. Allen, G. P., et. al., 1972, Distinction of elementary sand populations in the Gironde Estuary (France) by R-Mode factor analysis of grain-size data, *Sedimentologe*, 19, pp. 21—35.

5. Bennett, J. G., 1936, Broken coal, *J. Inst. Fuel*, 10, pp. 22—39.

6. Blatt, H. al., 1972, Origin of sedimentary rock, *New Jersey Englewood Cliff, Prentice-Hall, Inc.*, PP. 634.

7. Brizina, J., 1949, Granulometer—a sediment analyzer directly writing grain size distribution curves, *J. Sedim. Petro.*, 39, pp. 1627—1629.

8. Bull, W. B., 1962, Relation of textural (CM) patterns to depositional environment of alluvial-fan deposits, *J. Sedim. Petro.*, 32, pp. 211-216.

8. Buller, A. T. and Memans, J., 1972, Simple metric sedimentary statistics used to recognize different environment, *Sedimentology*, 18, pp. 1—21.

9. Carver, R. E., 1971, Procedures in sedimentary petrology, *John Wiley and Sons Inc., New York, London, Sydney Toronto* pp. 653.

10. Chester, F. and Royse, Jr., 1968, Recognition of fluvial environment by particle-size characteristics, *J. Sedim. Petro.* 38, pp. 1171—1178.

11. Davis, D. K. and Ethridge, F. G., 1975, Sandstone composition and depositional environment, *Bull. AAPG.*, 59, pp. 239—264.

12. Doeglas, D. T., 1968, Grain-size indices, classification and environment, *Sedimentology*, 10, pp. 83—100.

13. Dyer, K. R., 1970, Grain size parameters for sandy-gravels, *J. Sedim. petro.*, 40, pp. 616—620.

14. Eymon, G. and WalKer, R. G, 1974, Facies relationships in pleistocene outwash gravels South Ontario, A model for bar growth in braided rivers, *Sedimentology*, 21. pp. 43—70.

15. Folk, R. L., 1966, A review of grain-size parameters, *Sedimentology*, 6, pp. 73—93.

16. Folk, R. L. and Ward, W.C., 1957, Brazos river bar, Astudy in the signification of grain size parameters, *J. Sedim Petro.*, 27, pp. 3—27.

17. Friedman, G. M., 1958, Determination of sieve-size distridution from thin-section data for sedimentary petrological studies, *J, Geol.*, 66, pp. 384—416.

18. Friedman, G. M., 1961, Distinction between dune beach and river sands from their textural characteristics, *J. Sedim. petro.*, 31, pp. 514—529.

19. Friedman, G. M., 1962, Comparism of moment measures for sieving and thin-section data in sedimentary petrological studies, *J. Sedim. petro.* 32, pp. 15—25.

20. Friedman, G. M., 1965, In defense of point counting analysis, a discussion, *Sedimentology*, 4, pp. 247—249.

21. Friedman, G. M., 1965, In defense of point counting analysis, hypothetical experi-

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

ments versus real rocks, *Sedimentology*, 4, pp. 252—253.

22. Friedman, G. M., 1967, Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and river sands, *J. Sedim. Petro.*, 37, pp. 327—354.

23. Glaister, R. P. and H. W. Nelson, 1974, Grain-Size Distributions, An Aid in Facies Identification, *Bnll. Canadian petroleum Geo.*, vo. 22, pp. 203—240.

24. Greenman, N. N., 1951, The mechanical analysis of sediment from thin-section data, *J. Geol*, 59, pp. 447-462.

25. Griffiths, J. C., 1967, Scientific method in analysis of sediments, *New York, McGrow-Hill Book Co.*, pp.508.

26. Hand, B. M., 1967, Differentiation of beach and dune sands using settling velocities of light and heavy minerals, *J. sedim. Petro*, 37, pp. 514-520.

27. Harman, H. H., 1960, Modern factor analysis, *Univ. Chicago Press*, pp.469.

28. Imbrie, J. and van Andel, T. H., 1964, Vector analysis of heavy mineral data, *Geo. Soc. Am. Bull.*, 75, pp. 1131—1156.

29. Inman, D. L., 1952, Measures for describing the size distribution of sediments. *J. Sedim. Petro*, 22, pp. 125—145.

30. Kaiser, H. F., 1959, Commputer program for varimax rotation in factor analysis, *Educ. Psychological Measurement*, 19, pp. 413—420.

31. Kame, W. T. and Hubut, J. F., 1963, Fortron program for calculation of grain-size textural parameters on the IBM 1620 computer, *Sedimentology*, 2, pp. 87—90.

32. Kennedy, J. F. and Kon, R. C. Y., 1961, The relation between the frequency distributions of sieve diameters and fall velocities of sediment particles, *J. Geophys. Res.*, 66, pp. 4233—4246.

33. King, L. J., 1969, Statistical analysis in geography, *Englewood Cliffs, New Jersey prentice Hall*, pp. 288.

34. Kittleman, L. R. JF , 1964, Application of rosin's distribntion to size-frequency analysis of clastic rocks, *J. Sedim. Petro.*, 34, pp. 483—502.

35. Kloven, J. E., 1966, The use of factor analysis in determining depositional environment from grain size distributions, *J. Sedim, Petro.*, 36, pp. 111—125.

36. Krumbein, W. C. and pettijohn, F. J., 1938, Mannual of sedimentary petrology, *Appleton-Century-Crofts*, pp. 549.

37. Krumbein, W. C. and Graybill, F. A., 1965 An introduction to statistical modals in geology, *New york, McGraw-Hill Book Co.*, pp. 475.

38. Landim, P. M. B. and Frakes, L. A., 1968, Distinction between tills and other diamictons based on textural Characteristics, *J. Sedim. Petro.*, 38, pp. 1213—1223.

39. Link, A. G., 1966. Textural Classification of sediments, *Sedimewtology*, 7, pp. 241—254.

40. Mason. C. C. and Folk, R. L., 1958, Differentiation of beach, dune and Aeolian flat environment by size analysis, *J. Sedim. Petro.*, 28, pp. 211—216.

41. McCammon, R. B., 1962, Efficiencies of percentile measures for describing the mean size and sorting of sedimentary particles, *J. Geol.*, 70, pp. 453—463.

42. McCave, I. N. and Jarvis, J., 1973, Use of the modal Coulter counter in size analysis of fine to coarse sand, *Sedimentology*, 20, pp.305—315.

43. McKenzie, K. G., 1963, The adoption of a colorimeter for measuring silt-sized parti-

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

cles—a rapid photoextinction(PE) method, *J. Sedim. petro.*, 33, pp. 41—48.

44. Moiola, R. J. and Weiser, D., 1968, Texture parameters; An evaluation, *J. Sedim. Petro.*, 38, pp. 45—53.

45. Moiola, R. J. and Weiser, D., 1969, Environmental analysis of ancient sandstone bodies by discripminant(Abstract), *Bull. AAPG.*, 53, pp. 733.

46. Müller, G., 1967, A pocket microscope for grain-size measurement in the field, *J. Sedim. Petro.*, 37, pp. 703-704.

47. Neumann-Mahlkau, P., 1967, Korngrössenanalyse grobklastischer sedimente mit hilfe von aufshluss-photographien, *Sedimentology*, 9, pp. 245-261.

48. Packham, G. H., 1955, Volume, weight and number frequency analysis of sediments from thin-section, *J. Geol.*, 63, pp. 50-60.

49. Passaga, R., 1957, Texture as characteristic of clastic deposition, *Bull. AAPG.*, 41, pp. 1952-1984.

50. Passaga, R., 1964, Grain size representation by CM pattern as a geologic tool, *J. Sedim. Petro.*, 34, pp. 830—847.

51. Passaga, R., et al 1967, Transport of sediments by waves Adriatic Coastal shelf, Italy, *Bull. AA PG*, 51, pp. 1304—1319.

52. Passaga, R. and Ryramjee, R.,1969,Grain size image of clastic deposits, *Sedimentology*, 13, pp. 233—252.

53. Passaga, R., 1972, Sediment sorting related to basin mobility and environment, *Bnll. AAPG.*, 156, pp. 2440—2450.

54. Plankeel, 6. F. H., 1962, An improved sedimentation balance, *Sedimentology*, 1, pp. 158—163.

55. Rosin, P. and Rammler, E., 1933, Laws governing the fineness of powdered coal; *J. Inst Fuel*, 7, pp. 29—36.

56. Sahu, B. K., 1964, Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments, *J. Sedim. Petro.*, 34, pp. 73—83.

57. Schubel, J. R. and Schiemer, E. W., 1967, A Semiautomatic microscopic particle size analyzer utilizing the Vickers image splitting eyepiece, *Sedimentology*, 9, pp. 319—326.

58. Schlee, J. and Webster, J., 1967, A computer program for grain size data, *Sedimentology*, 8, pp. 45—53.

59. Seibold, E., 1963, Geological investigation of near-shore sand transport, *In*; *Sears, M.*, ed.,*Progress in oceanography*, v. 1. pp. 1-70, *Oxford, Pergamon.*

60. Sengupta, S. and Veenstra, H. S., 1968, On sieving and settling techniques for sand analysis, *Sedimentology*, 11, pp. 83—98.

61. Sharp, W. E. and Fan, P. F., 1963, A Sorting index, *J. Geol.*, 71, pp. 76—83.

62. Shepard, F. P., 1954, Nomenclature based on sand-silt-clay rations, *J. Sedim. Petro.*, 24, pp. 151—158.

63. Solohub, J. T. and Kloven, J. E.,1970. EValuaton of grain-size parameters in lacustrine environments, *J. Sedim. Petro.* 40, pp. 81—101.

64. Spancer, D. W., 1963, The interpretation of grain size distribution curves of clasitc sediments *J. Sedim. Petro.*, 33, pp. 180—190.

65. Stauffer, P. H., Thin-section size analysis; A Further note, *Sedimentology*, 7, pp.

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

261—263.

66. Swift, D. J. P. et al., 1972, Size analysis of fine-grained suspended sediments, A review, *J. Sedim. Petro.*, 42, pp. 122—134.

67. Van der Plas, L., 1962, Preliminary note on the granulometric analysis of sedimentary rocks, *Sedimentology*, 1, pp. 145—157.

68. Van der Plas, L., 1965, In defense of point counting analysis, a reply, *Sedimentology*, 4, pp. 249—251.

69. Visher, G. S., 1965, Fluvial processes as interpreted from ancient and recent fluvial deposits, *In*; *Middleton, C. V., ed., Primary sedimentary structures and their hydrodynamic interpretation, Soc. Econ. Paleontologists Mineralogists Spec. Publ.*, 12, pp. 116—132.

70. Visher, G. S., 1969, Grain size distributions and depositional processes, *J. Sedim. Petro.*, 39, pp. 1074—1106.

71. Walker, P. H. et al., 1974, Particle-size measuremnts by coulter counter of very small deposits and low suspended sediment concentrations in streams, *Sedimentology*, 13, pp. 305—315.

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn