

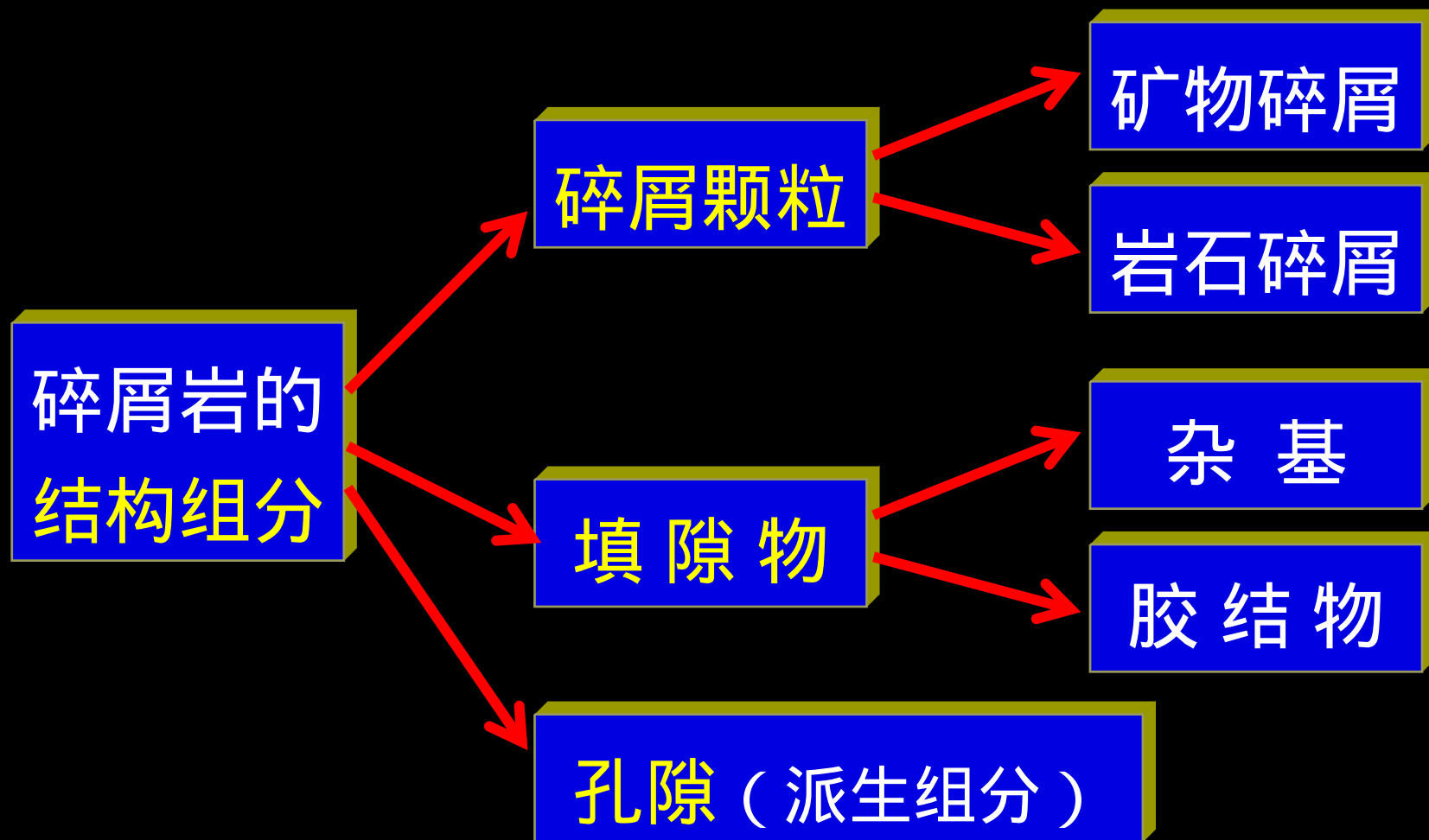


第二节 碎屑岩的结构

Textures of clastic rocks



碎屑岩的结构是指碎屑岩内各结构组分的大小、形状以及空间组合方式。





一、碎屑颗粒的结构 (Textures of clastic grains)

碎屑颗粒的结构特征一般包括：粒度、球度、形状、圆度、颗粒的表面特征。

(一) 粒度 (Grain size)

1. 粒度的概念

粒度—是指碎屑颗粒的大小。

粒度是碎屑颗粒的最主要的结构特征，直接决定着岩石的类型和性质，是碎屑岩分类命名的重要依据。

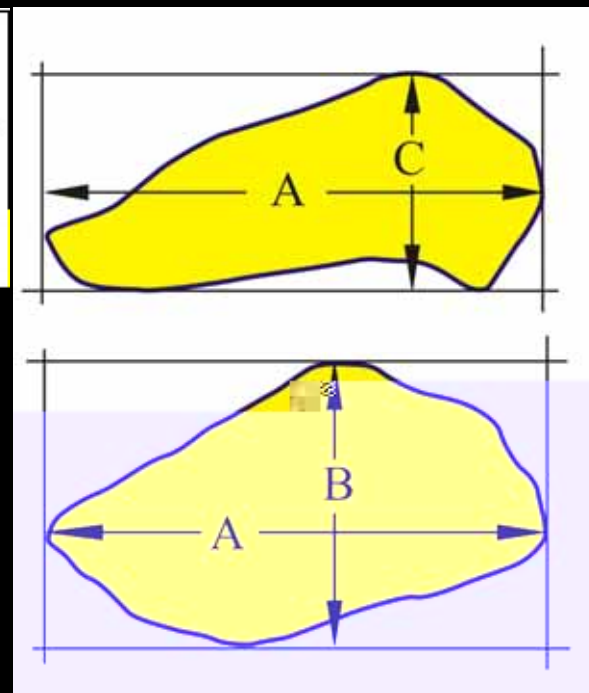
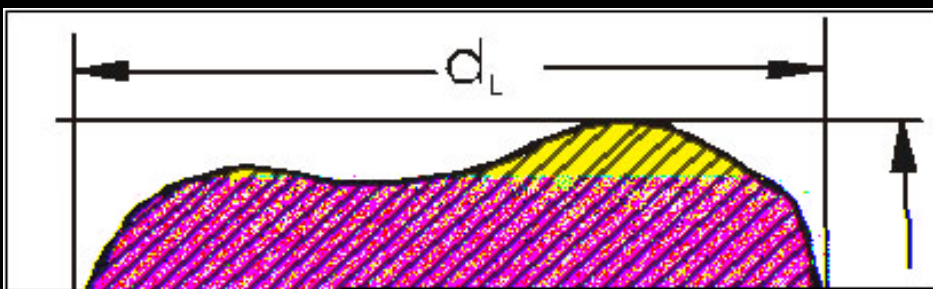


表示粒度，可用**线性值**和**体积值**

体积值：可用标准直径（ d_n ）表示，代表着与颗粒同体积的球体直径。

线性值：直观度量出来的颗粒的长、中、短直径 d_L （A）、 d_I （B）、 d_s （C）线性值。

最大投影面





2. 粒级的划分

(1) 伍登 — 温 特 华 斯 (Udden-Wentworth) 的划分方案 , 2的几何级数制。它是以1mm为中心 , 乘以2或除以2来进行分级的。

0.0625 0.125 0.25 0.5 1 mm



(2) 十进制划分方案，在我国应用较广泛。



0.0001 0.001 0.01 0.1 1 10 100 1000 mm



常用的碎屑颗粒粒度分级表

0.5~0.25	中 砂	砂	粗 砂 中 砂	1~0.5 0.5~0.25
----------	-----	---	------------	-------------------



(3) 中国石油天然气集团公司标准—— 石油行业碎屑颗粒粒度分级标准。

粒 级	粒 径 , mm
砾 石	>2
粗 砂	$0.5\sim2$
中 砂	$0.25\sim0.5$
细 砂	$0.1\sim0.25$
粉 砂	$0.03\sim0.1$
杂 基	<0.03



(4) 克鲁宾 (Krumbein, 1934) 将伍德—温特华斯的粒级划分转化为 ϕ 值：

$$\phi = -\log_2 D$$

“D”与“ ϕ ”的换算关系

D, mm		$D = 2^{-\phi}$		ϕ
值	分数式	分数式	值	
-3	8	8	$8 = 2^3$	
4	4	$4 = 2^2$	2	
$2 = 2^1$	-1	2	1	
$1 = 2^0$	0	1	0.5	
$1/2 = 2^{-1}$	1	0.5	0.25	
$1/4 = 2^{-2}$	2	0.25	0.125	
8	$1/8 = 2^{-3}$	3	1	

值优点：整数、正数（粗砂以下）、作图方便



3. 碎屑岩的粒度分类及命名

(1) 三级命名法：

50%的粒级定为岩石的主名，即**基本名**；

介于50-25%之间的粒级以形容词“**× × 质**”的形式写在基本名之前；

25-10%的粒级作次要形容词，以“**含 × ×**”的形式写在最前面；

含量<10%的粒级一般不反映在岩石名称中。



(2) **复合命名**：若碎屑岩的粒度分选较差，所含粒级较多，没有含量 $>50\%$ 的粒级，而含量介于 $50 \sim 25\%$ 的粒级又不止一个，进行复合命名，以“ $\times \times - \times \times$ 岩”的形式表示，含量较多的写在后面。

(3) 若碎屑岩的粒度分选更差，粒度含量均 $<25\%$ ，则应将此岩石的全部粒度组分分别合并为砾、砂和粉砂三大级别，然后按前两条原则命名。



中砂占55%，粗砂占30%，砾石占10%，其它占5%

命名：

中砂36%，细砂48%，粉砂16%

命名：

细砾16%，中砾12%，粗砂20%，中砂18%，粗粉砂12%，粘土22%

命名：





(二) 球度 (Sphericity)

球度是一个定量参数，用它来度量一个颗粒近于球体的程度。

1958年斯尼德和福克 (Sneed and Folk) 提出了最大球度投影法，用以确定球度参数数值。它是用与颗粒体积相同的球体的横切面积与该颗粒的最大投影面积的比值求得的。



$$\text{球度} = \sqrt[3]{\frac{C^2}{AB}}$$

颗粒的三个轴愈接近相等，其球度愈高；
相反，片状和柱状颗粒都具有很低的球度。

在悬浮搬运组分中，球度小的片状颗粒最容易被漂走。

在滚动搬运组分中，只有球度大的颗粒才最易沿床底滚动。

(三) 形状 (shape)

颗粒的形状是由颗粒中A、B、C三个轴的相对大小决定的。

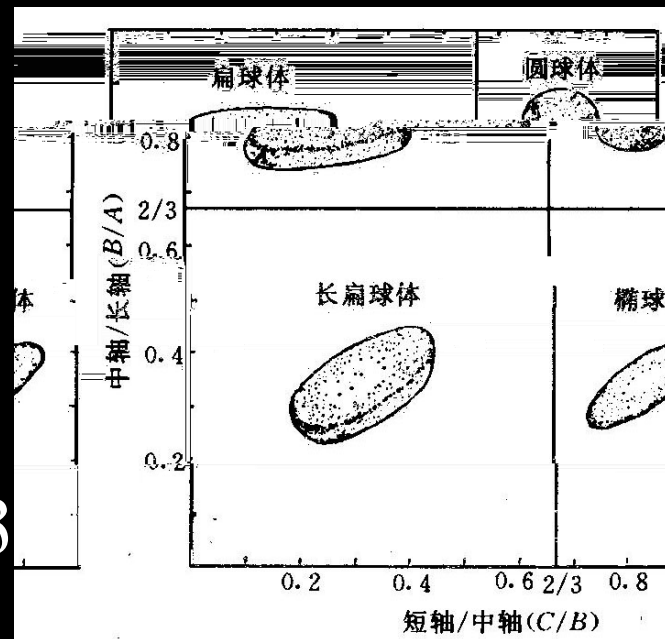
辛格 (Zingg, 1935) 根据颗粒A、B、C三个轴的长度比例，将颗粒划分为四种形状：

圆球体： $B/A > 2/3$ ， $C/B > 2/3$

椭球体： $B/A < 2/3$ ， $C/B > 2/3$

扁球体： $B/A > 2/3$ ， $C/B < 2/3$

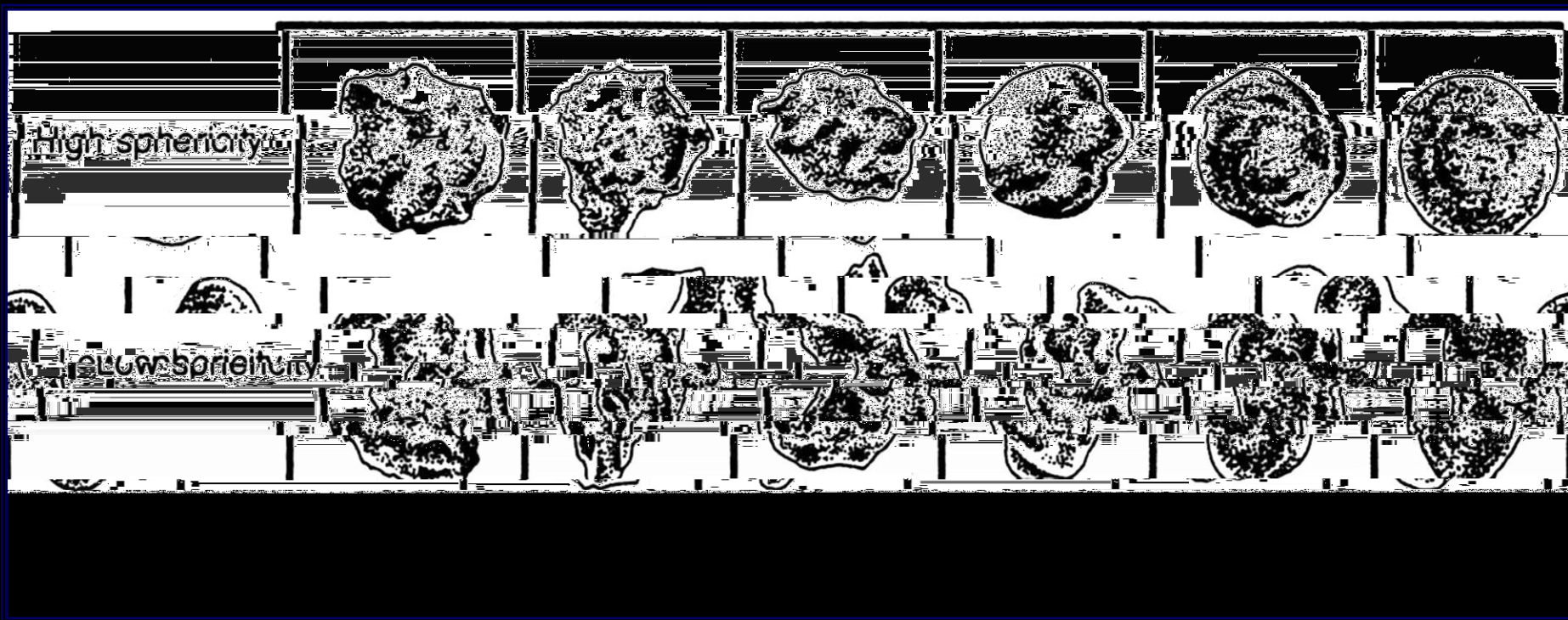
长扁球体： $B/A < 2/3$ ， $C/B < 2/3$





(四) 圆度 (Roundness)

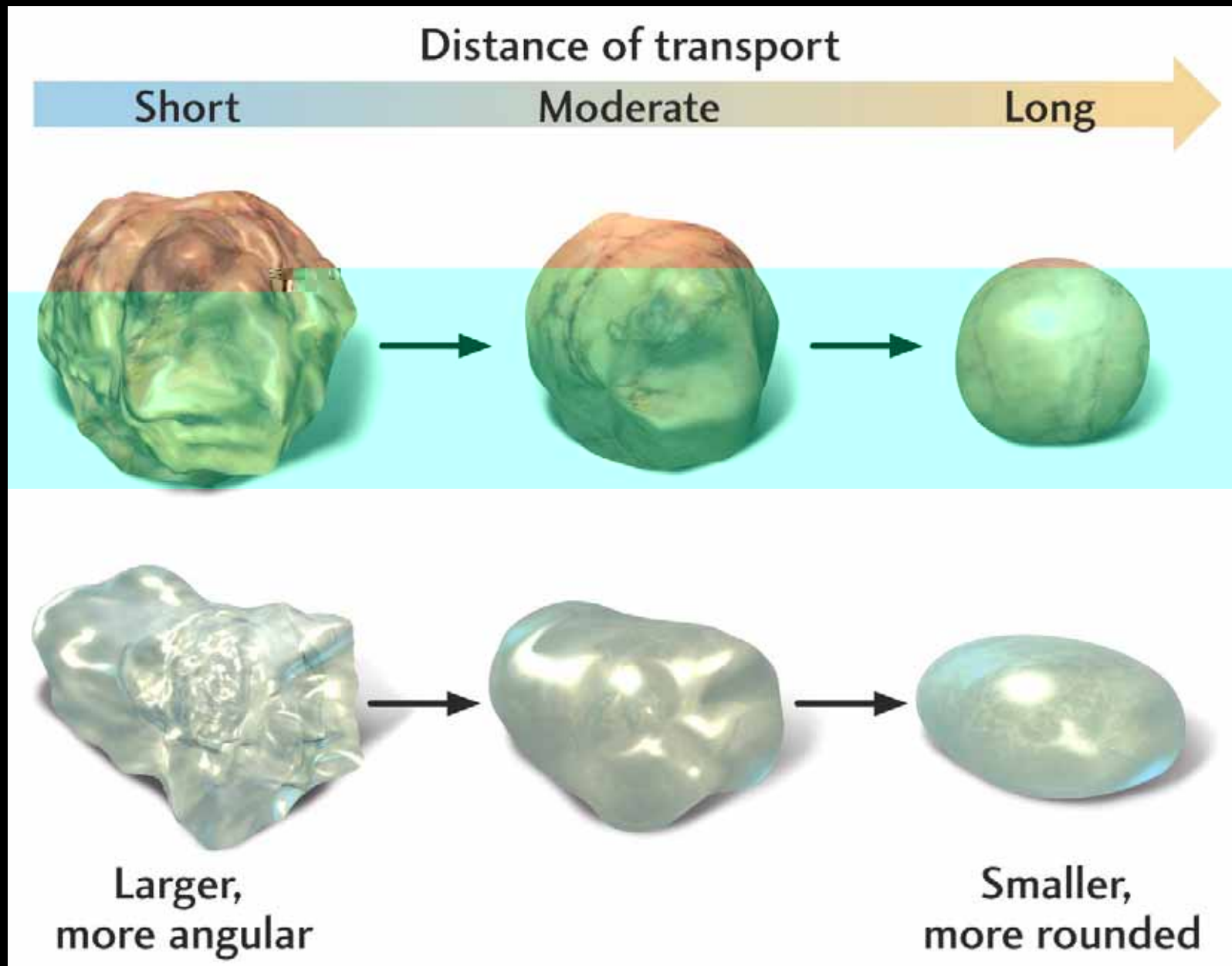
圆度——指碎屑颗粒的**原始棱角被磨圆的程度**



在手标本的观察描述中，通常把碎屑的圆度划分为4个级别：**棱角状、次棱角状、次圆状、圆状**

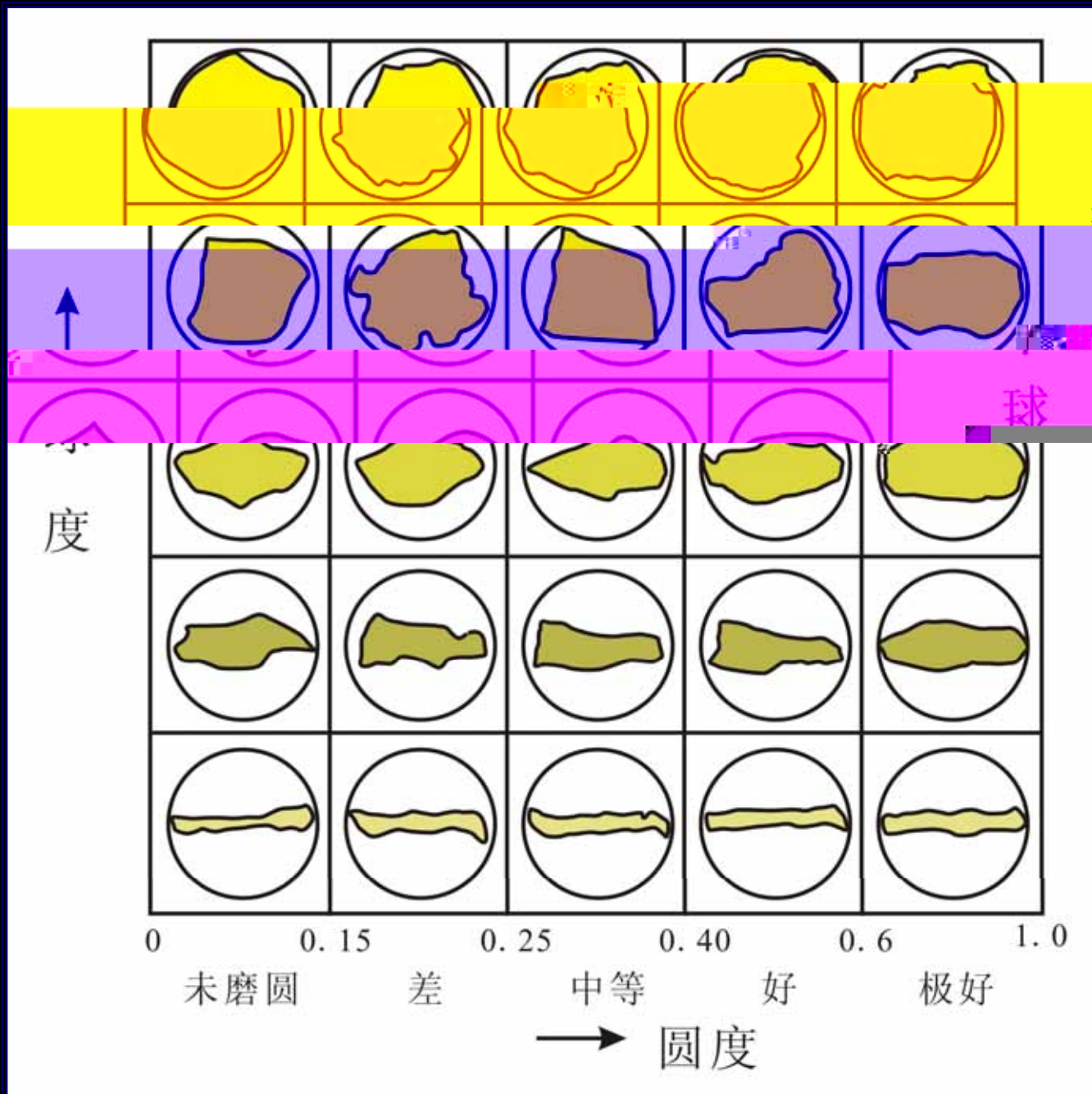


Rounding ...





球度与圆度的关系





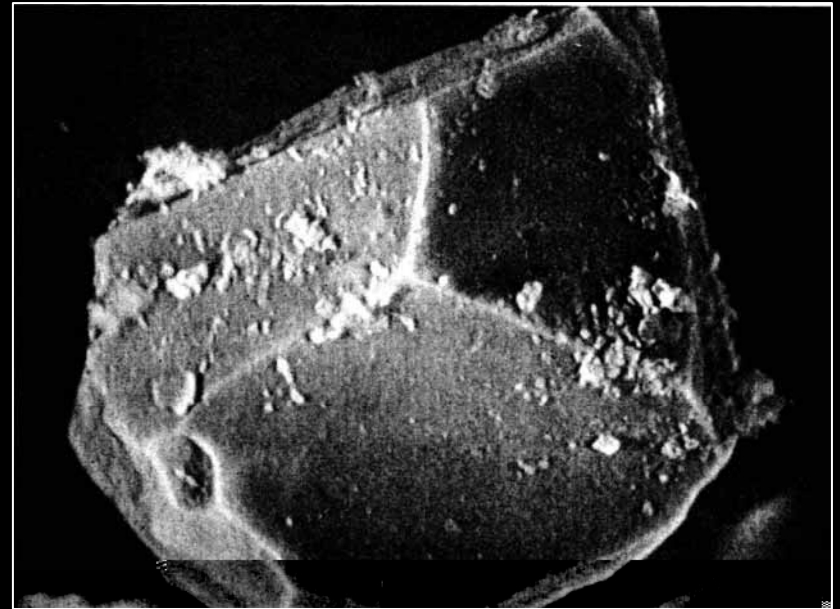
(五) 颗粒的表面结构 (Surface texture of grains)

表面结构是碎屑颗粒表面的形态特征，一般主要观察表面的磨光程度及表面刻蚀痕迹两个方面。

研究方法：电子显微镜能够识别的环境有滨海、风成、冰川等环境。

(1) 霜面似毛玻璃，在反向光下看，表面模糊不清，一般认为是沙丘石英颗粒的特征。

SEM photomicrograph of sand grain from a stream deposit (Quaternary) , Grandfather Mountain , North Carolina.

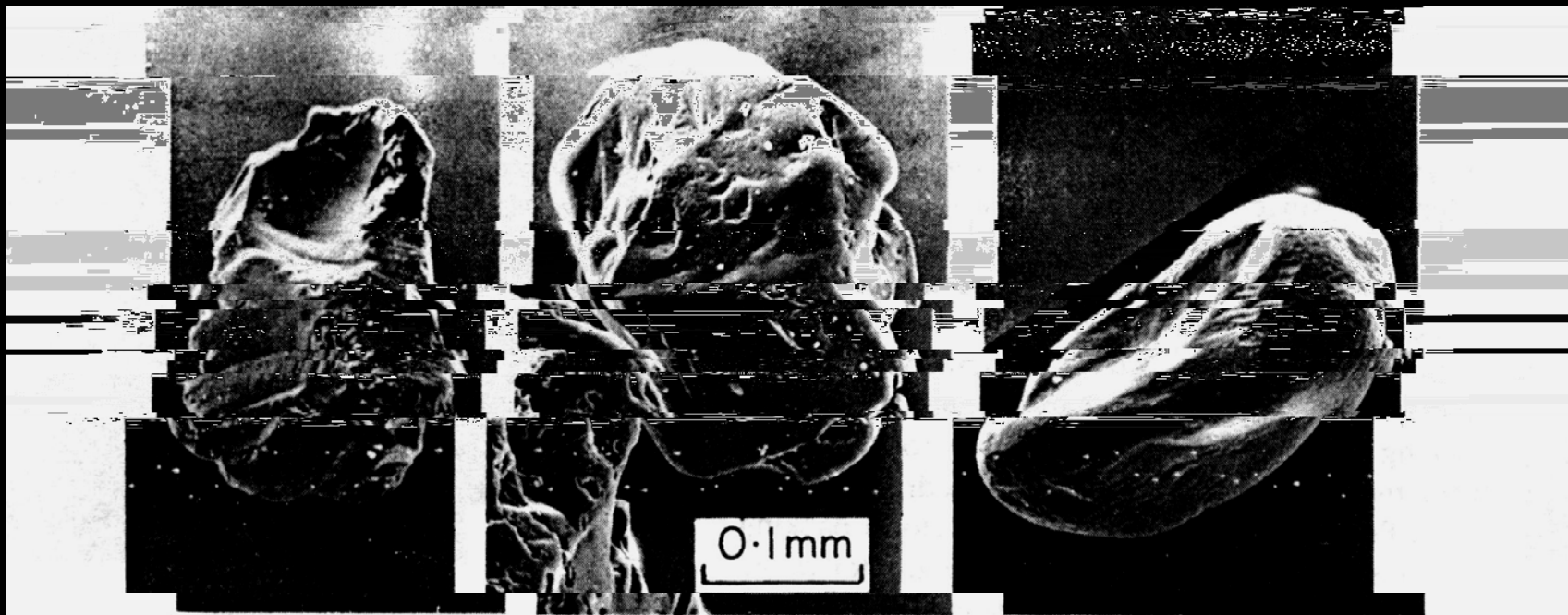


(2) 磨光面是光滑的磨亮的表面，如河流的石英砂，海滩石英砂。



(3) 刻蚀痕迹由碰撞作用造成，如冰川作用。

(4) 在海滩带及海的近岸地带，石英砂粒表面具有机械成因的“V”形坑。



(A)

(B)

(C)

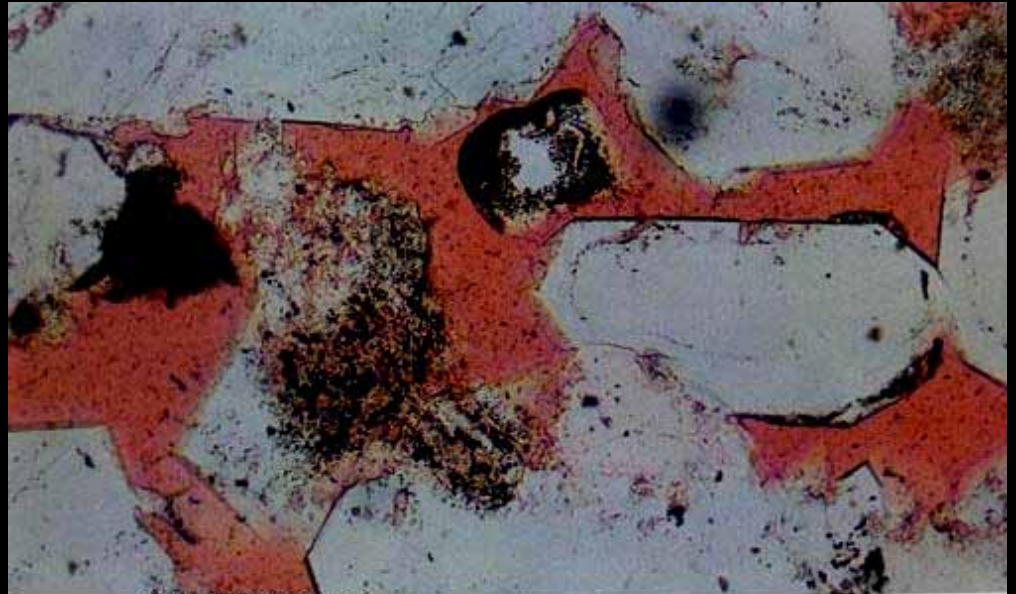
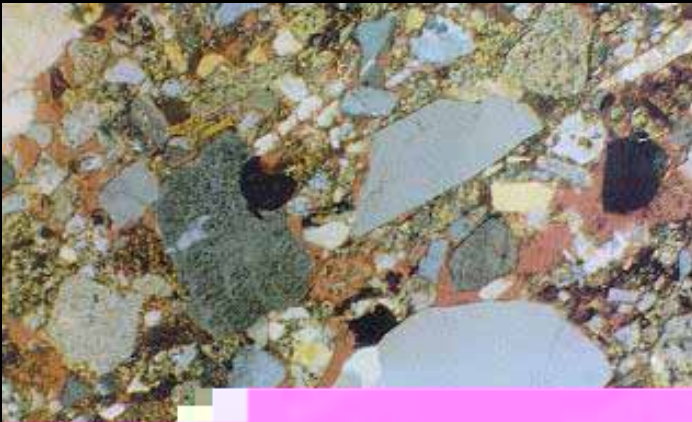
Scanning electron micrographs of quartz sand grains from three modern environments. A, Grain from glacial outwash deposit, Ottawa, Canada, showing conchoidal fractures and angular shape; B, Grain from high-energy beach, Sierra Leone, West Africa, showing rounded shape and smooth surface with small v-shaped percussion marks; C, Grain from sand sea, Saudi Arabia, showing frosted, pock-marked surface (due to upturned plates which are visible at higher magnifications) and conchoidal fractures due to mechanical chipping.



二、填隙物的结构

(Textures of interstitial materials)

碎屑岩的填隙物包括**杂基**和**胶结物**。

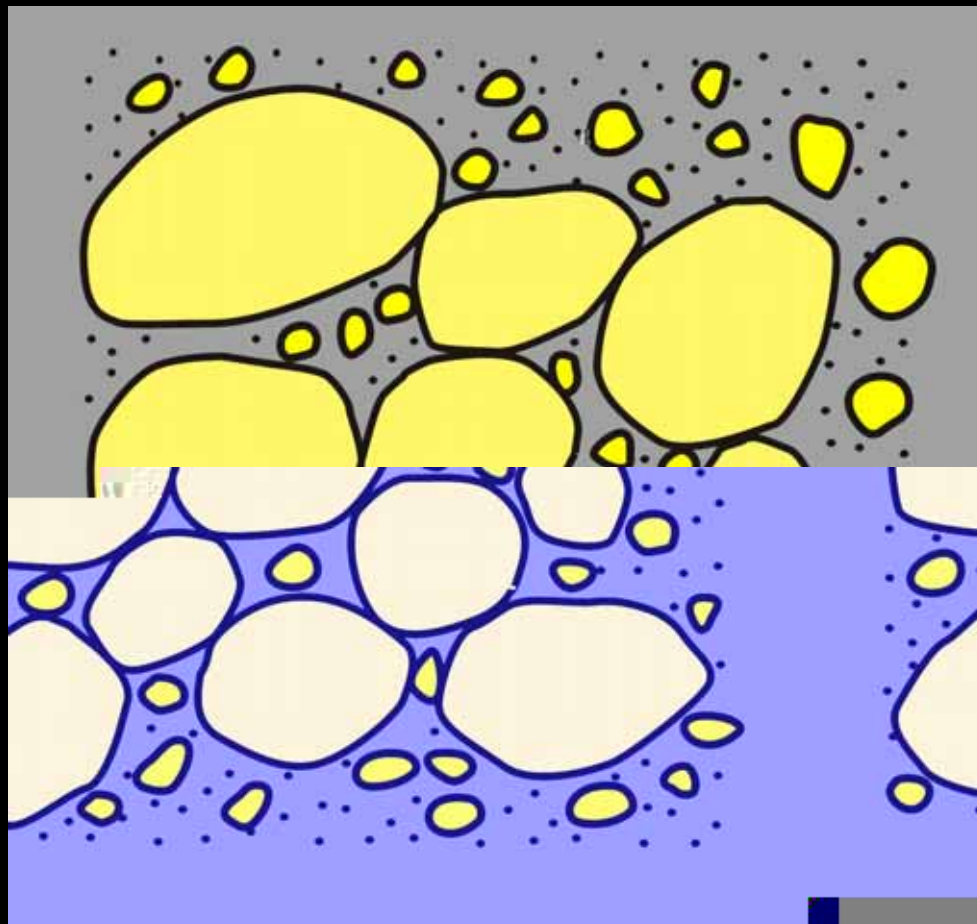


石英具次生加大
细-中粒石英砂岩 硅质胶结，呈自形晶粒状加大，加大后残余粒间孔。红色铸体，单偏光， $\times 95$ 。
侏罗系延安组，长庆油田元16井1361.6m。



(一) 杂基 (Matrix)

(1) 定义：碎屑岩中与粗碎屑一起沉积下来的细粒填隙组分，粒度一般小于 0.03mm (>5)。



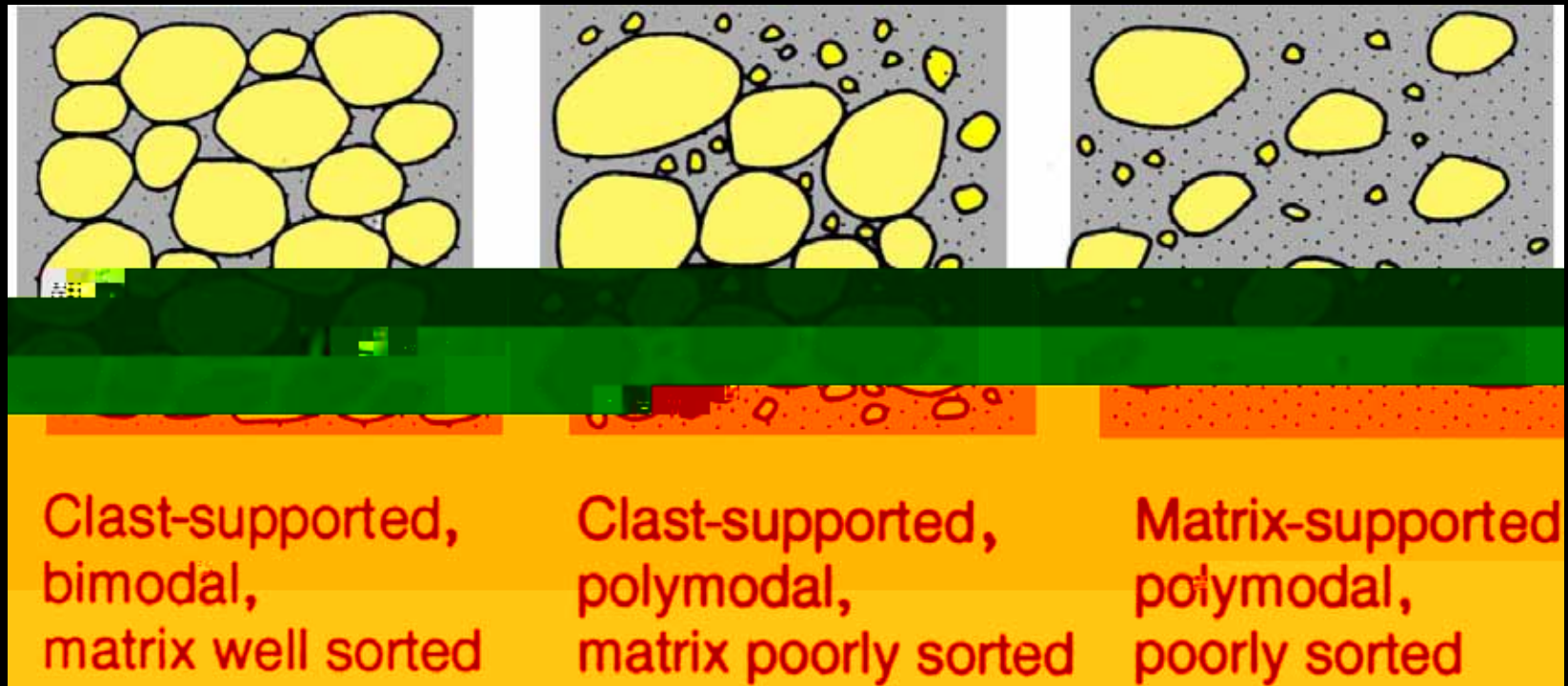


对于更粗的碎屑岩，如砾岩，杂基也相对变粗，除泥以外，还包括粉砂甚至砂级颗粒。



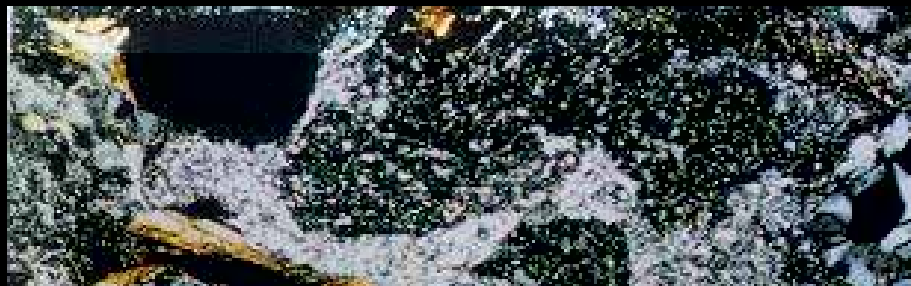
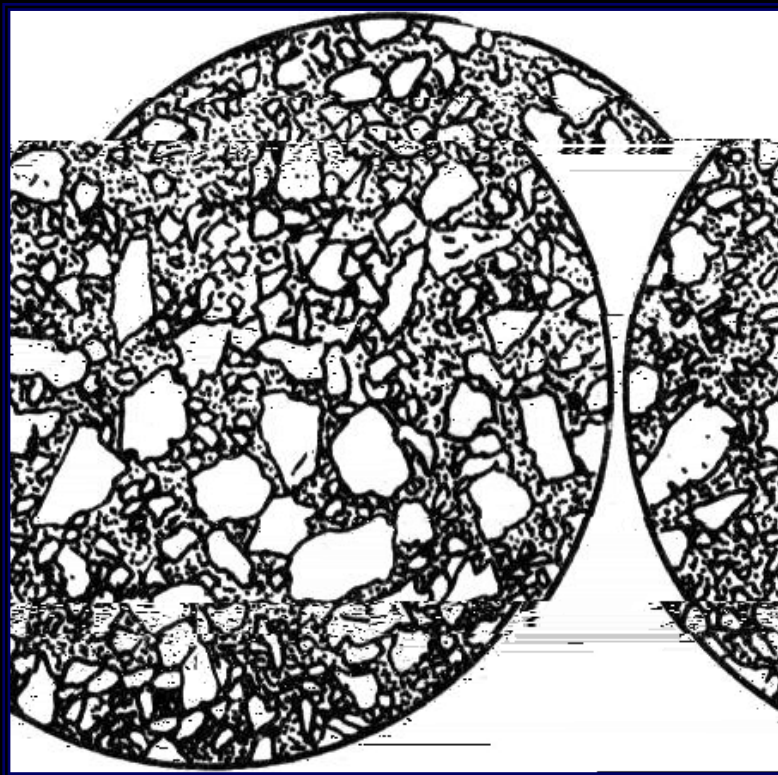
冲积扇
扇根部位砾石呈扁平状排列。
云南五里桥冲积扇。

(2) **地质意义**：杂基的含量和性质可以反映**搬运介质的流动特性**，反映碎屑组分的**分选性**，也是**水动力强度**的重要标志，是碎屑岩结构成熟度的重要标志。





(3) **杂基成分**：多为粘土矿物，有时见有灰泥、云泥及一些细粉砂碎屑颗粒。

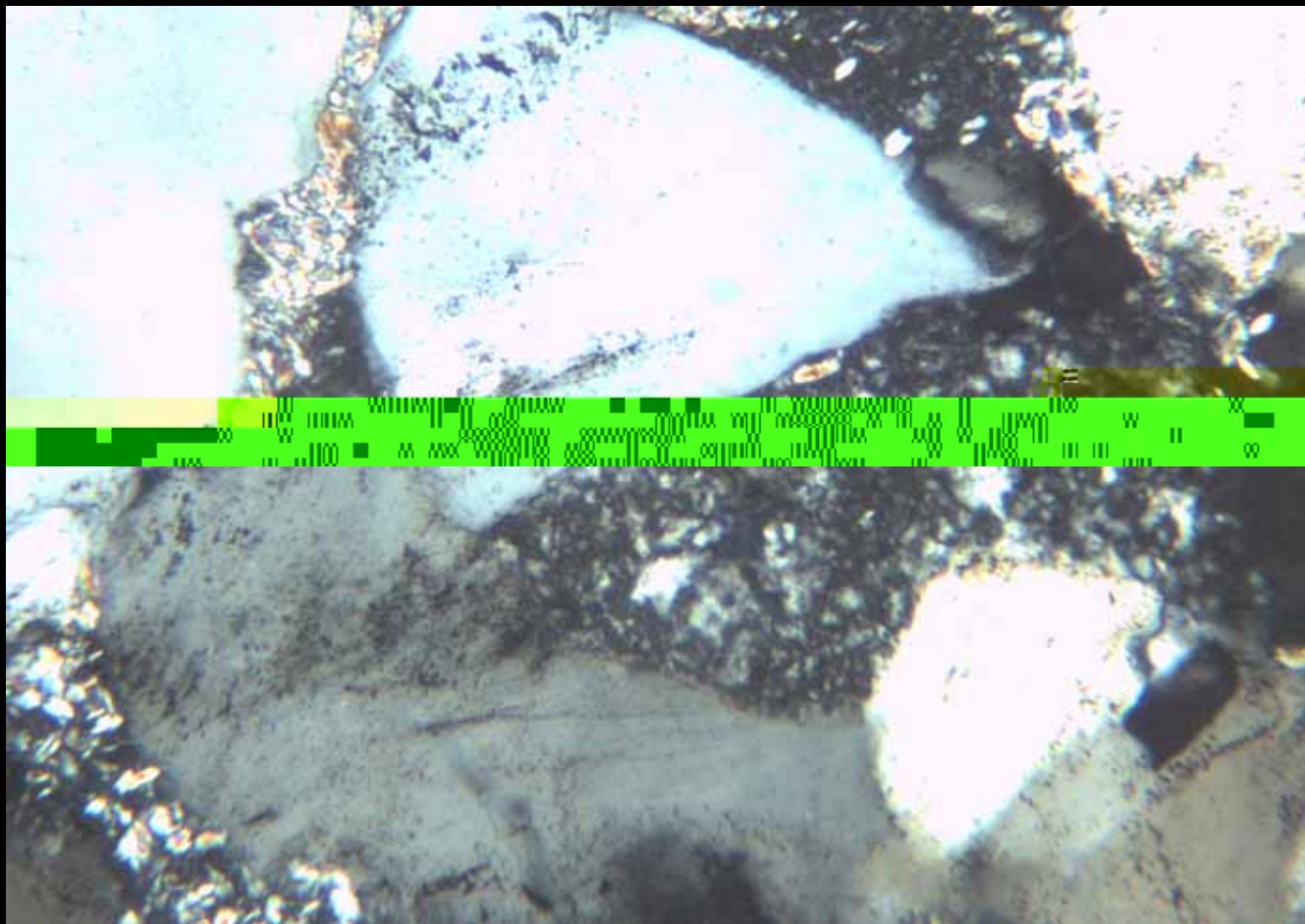


杂基成分为粘土和灰泥



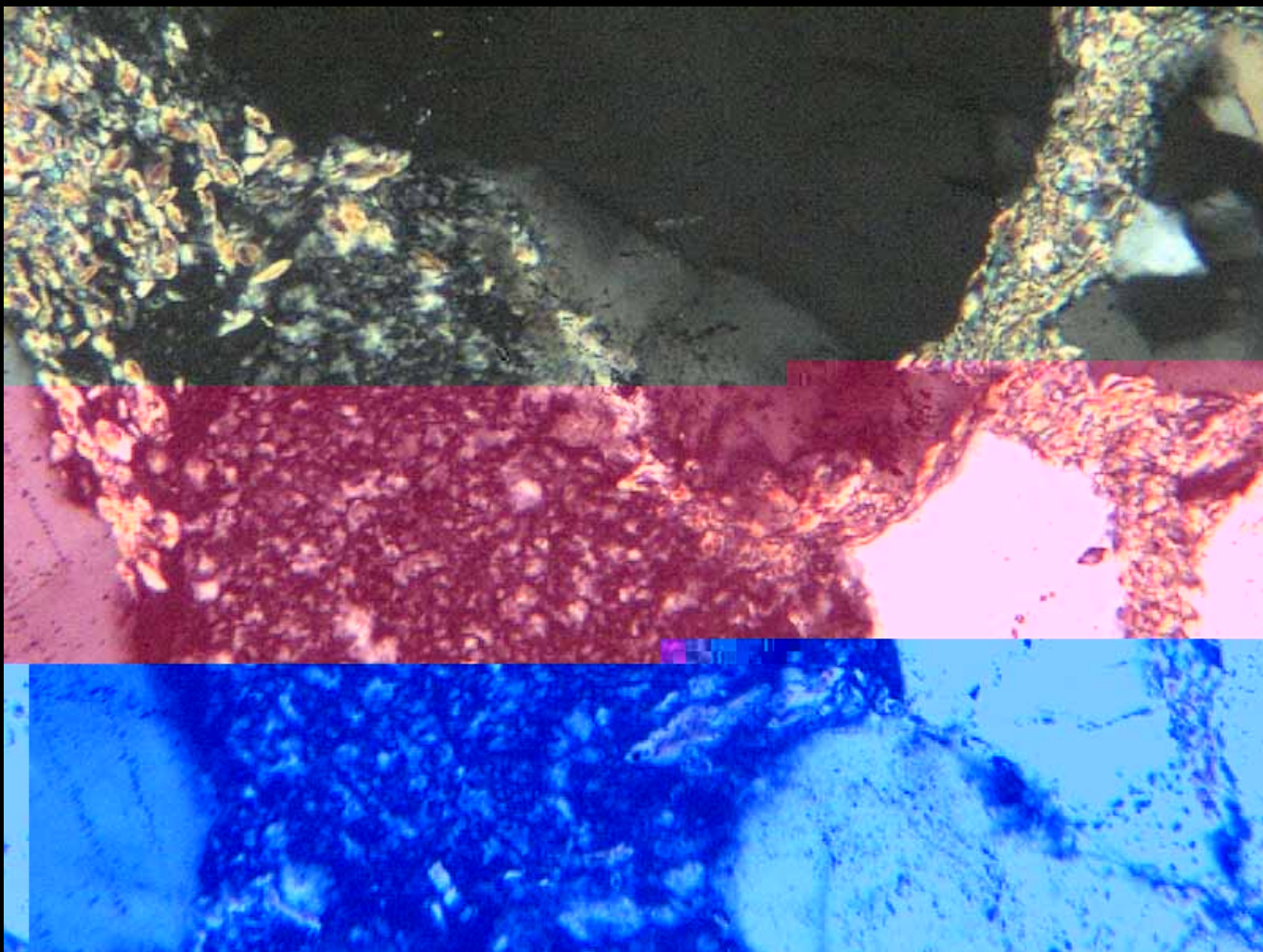
(4) 杂基的类型

原杂基—代表原始沉积状态的杂基，泥质结构。





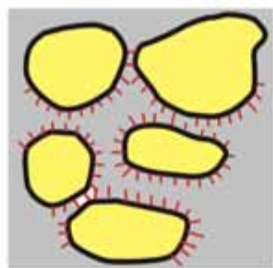
正杂基—原杂基经成岩作用明显重结晶的产物，粘土矿物 显微鳞片结构。



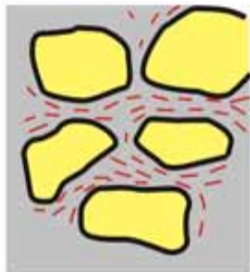


似杂基—碎屑岩中一些与杂基结构极为相似的细粒组分，在成因上与杂基完全不同。包括下面三种：

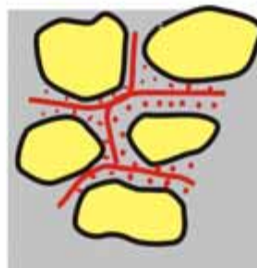
(a) **淀杂基**—在成岩作用过程中，由孔隙水中析出的粘土矿物胶结物。



a

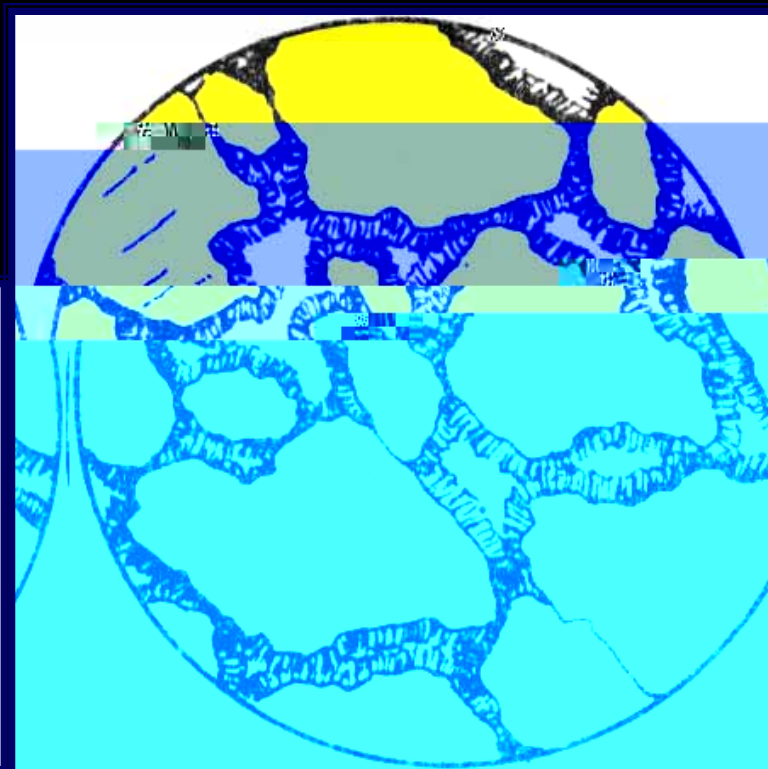


b



c

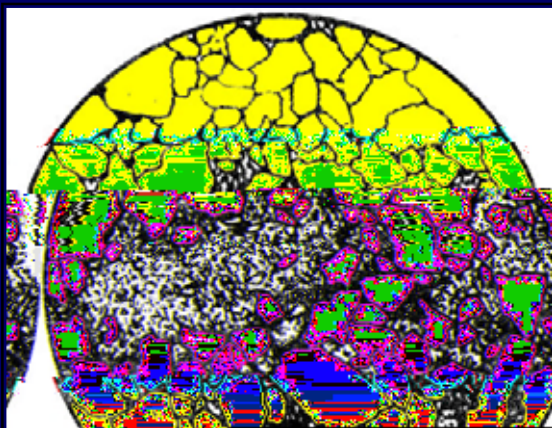
淀杂基的类型



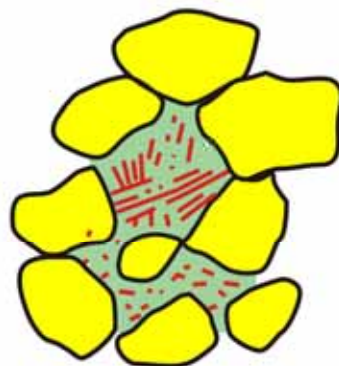


(b) **外杂基**—碎屑沉积物堆积后，在成岩后期充填于其粒间孔隙中的外来杂基物质，常具示顶底构造。

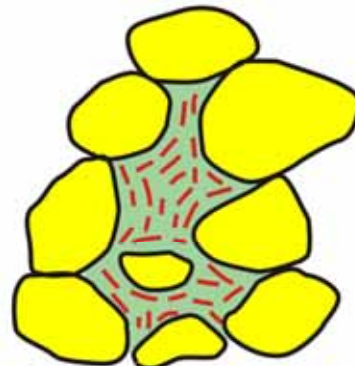
(c) **假杂基**—软碎屑经压实破碎形成的类似杂基的填隙物



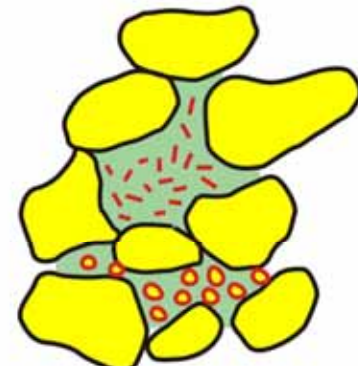
压扁和压碎的假杂基



呈束状体的假杂基



假塑性流体构造



假杂基分布不均



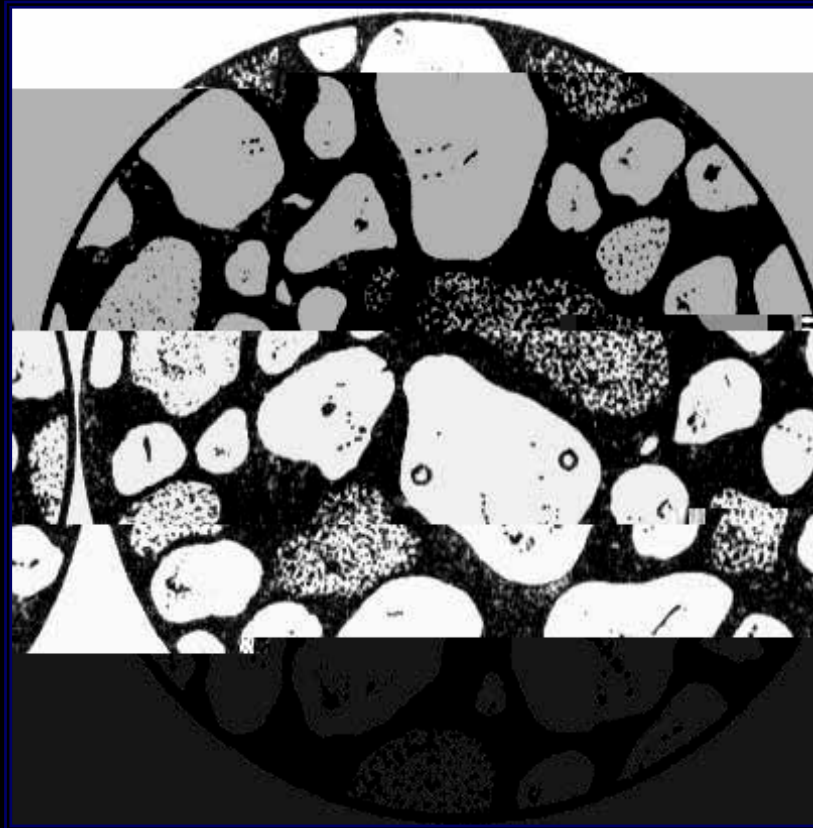
(二) 胶结物 (Cement)

胶结物是碎屑岩中以化学沉淀方式形成于粒间孔隙中的自生矿物。

在碎屑岩中，其含量 $<50\%$ ，表现为孔隙充填结构。

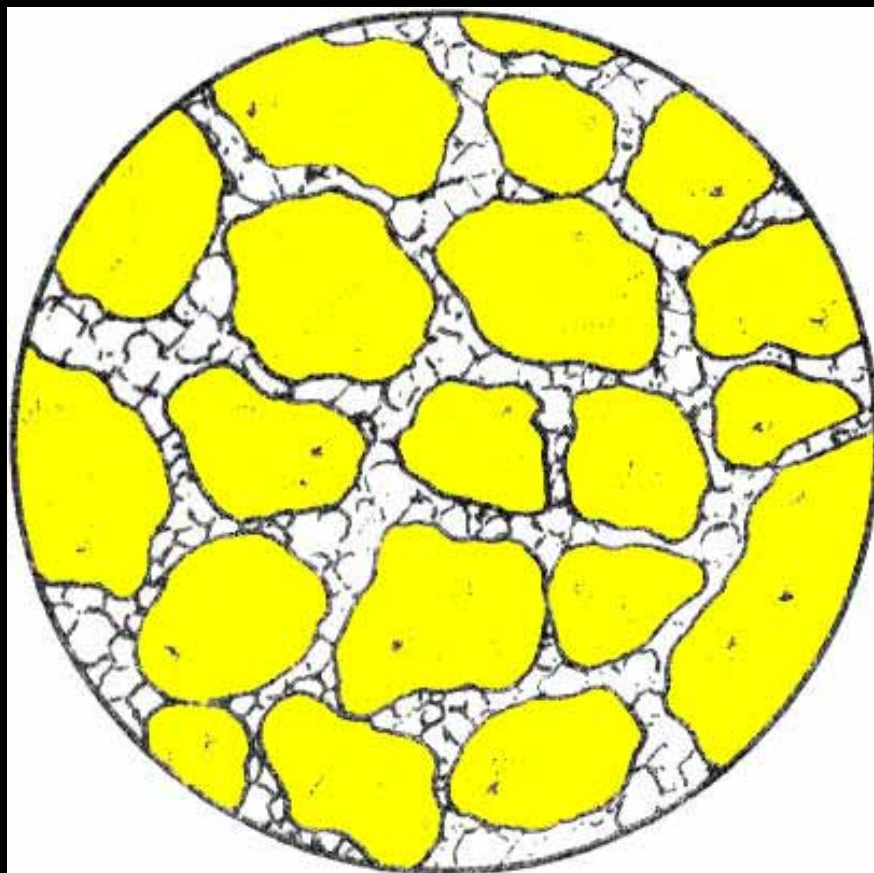
(1) 非晶质及隐晶质结构

蛋白石、磷酸盐矿物，在偏光显微镜下表现为均质体性质。



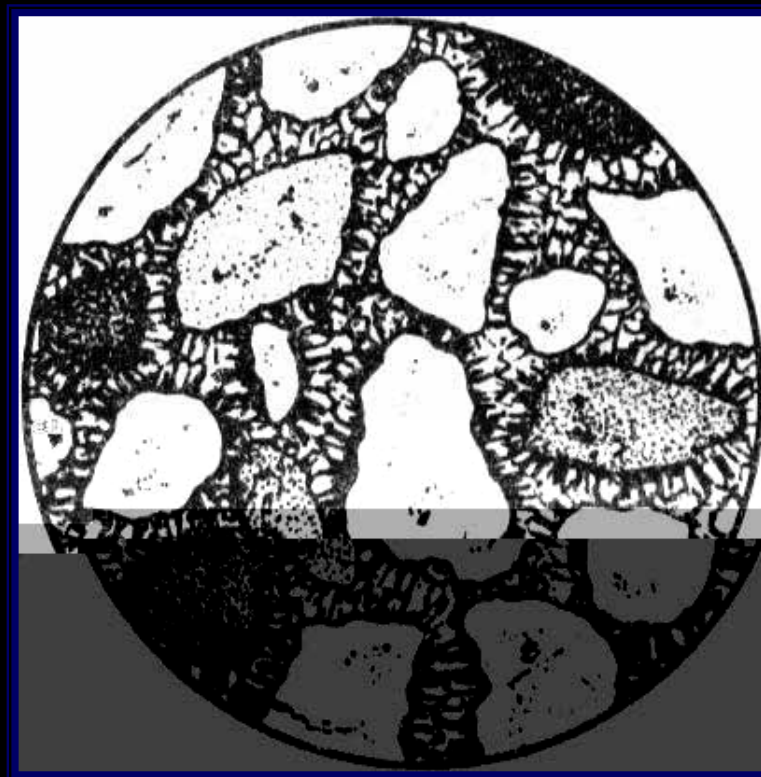
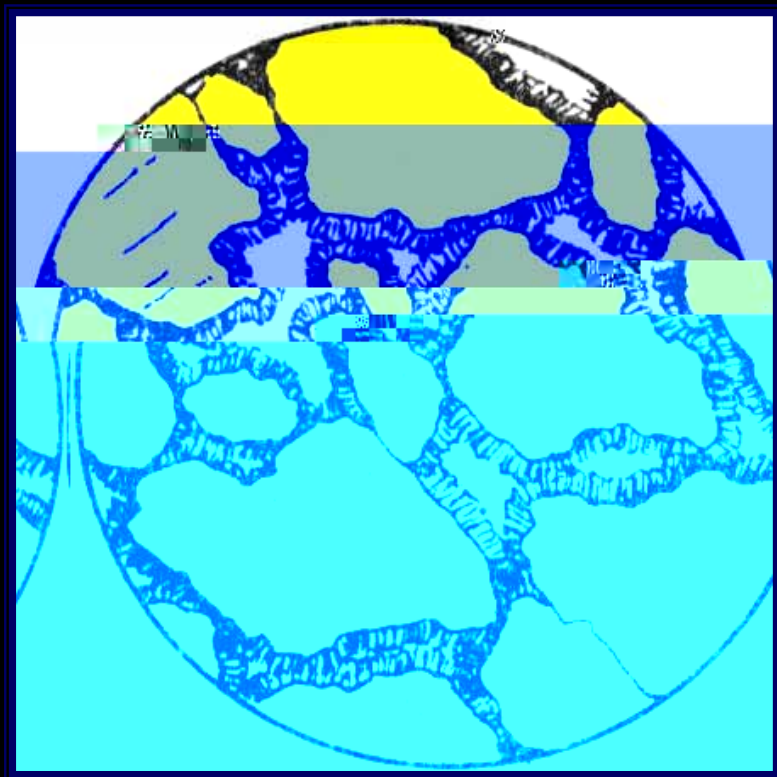
(2) 显晶粒状结构

胶结物呈结晶粒状分布碎屑颗粒之间。因晶粒较大，在手标上可以辨认。



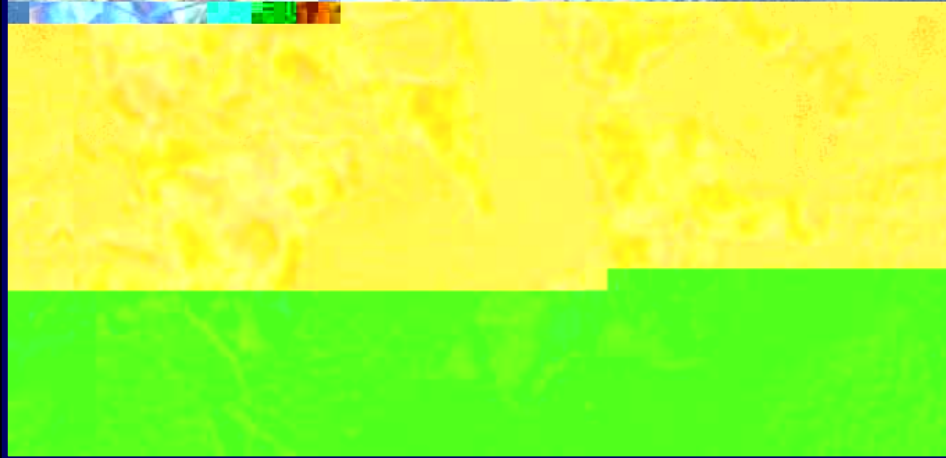
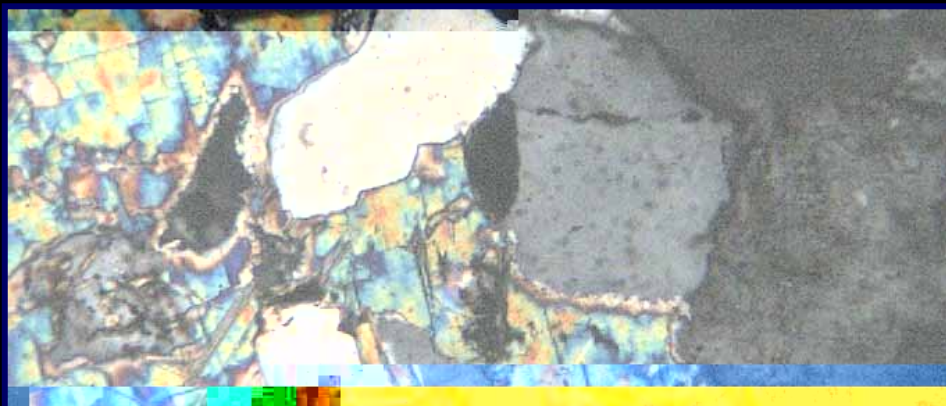
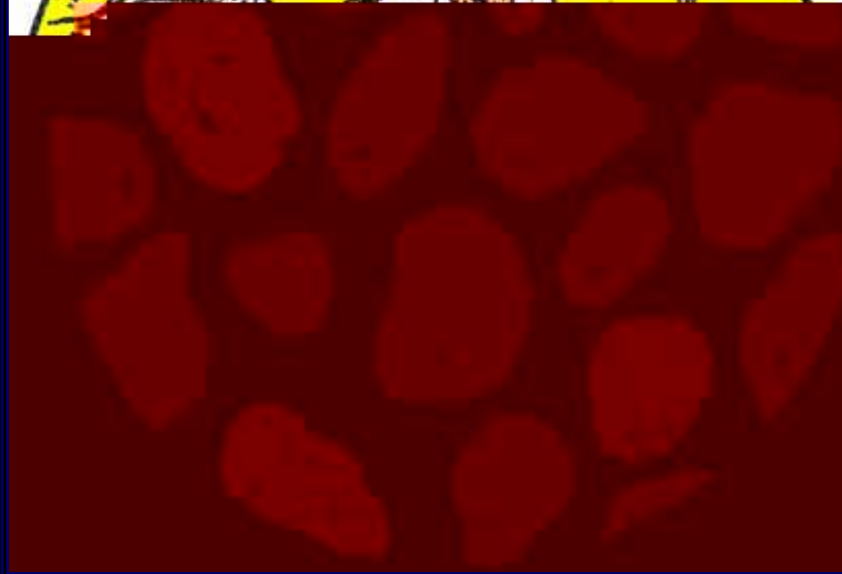
(3) 带状和栉壳状结构

胶结物环绕颗粒呈带状分布为**带状结构**，常为粘土胶结物。如果胶结物呈纤维状或针状垂直颗粒表面生长，称为**栉壳状结构**。



(4) 嵌晶结构

胶结物结晶颗粒较粗大，晶粒间呈镶嵌结构，每一个晶粒中可以包含有多个碎屑颗粒。

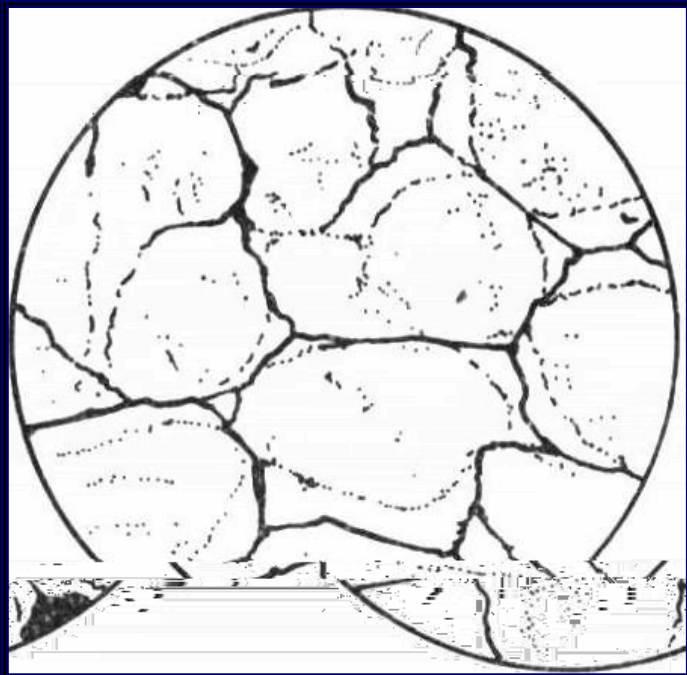




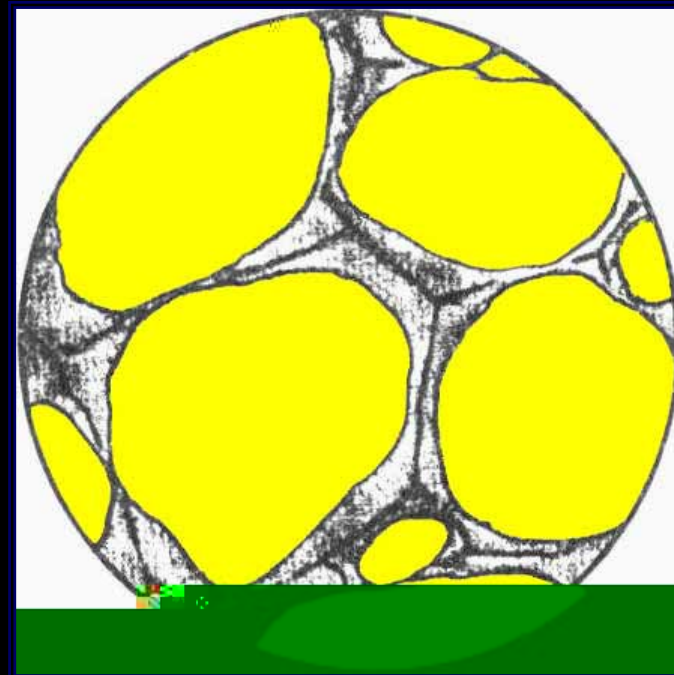
(4) 自生加大结构

多见于硅质胶结的石英砂岩中，硅质胶结物围绕碎屑石英颗粒生长，二者成分相同，而且表现为**完全一致的光性方位**。

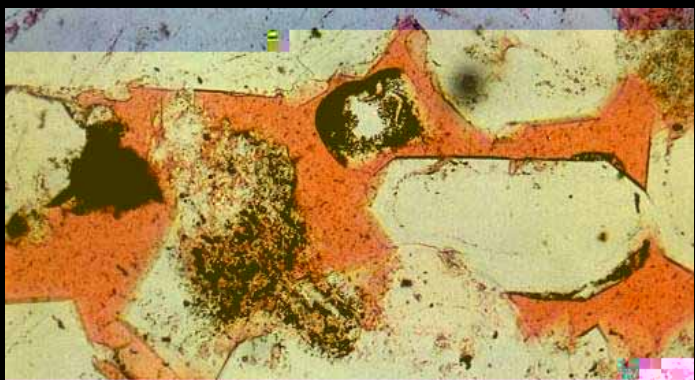
良好的自生加大胶结物形成于成岩阶段或后生阶段。



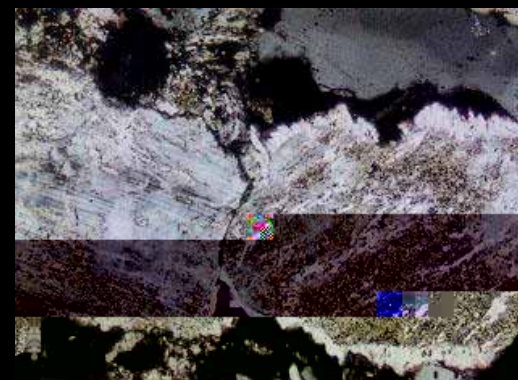
海绿石石英砂岩



沉积石英岩



石英具次生加大
细-中粒石英砂岩 硅质胶结，呈自形晶粒状加大，加大后残余粒间孔。红色铸体，单偏光， $\times 95$ 。
侏罗系延安组，长庆油田元16井1361.6m。



长石加大
中-粗粒石英砂岩 长石呈锯齿状加大。正交偏光， $\times 63$ 。
侏罗系延安组，长庆油田岭130井1445.3m。



三、胶结类型及颗粒支撑类型

(Types of cementation and grain-supported characteristics)

(一) 概述

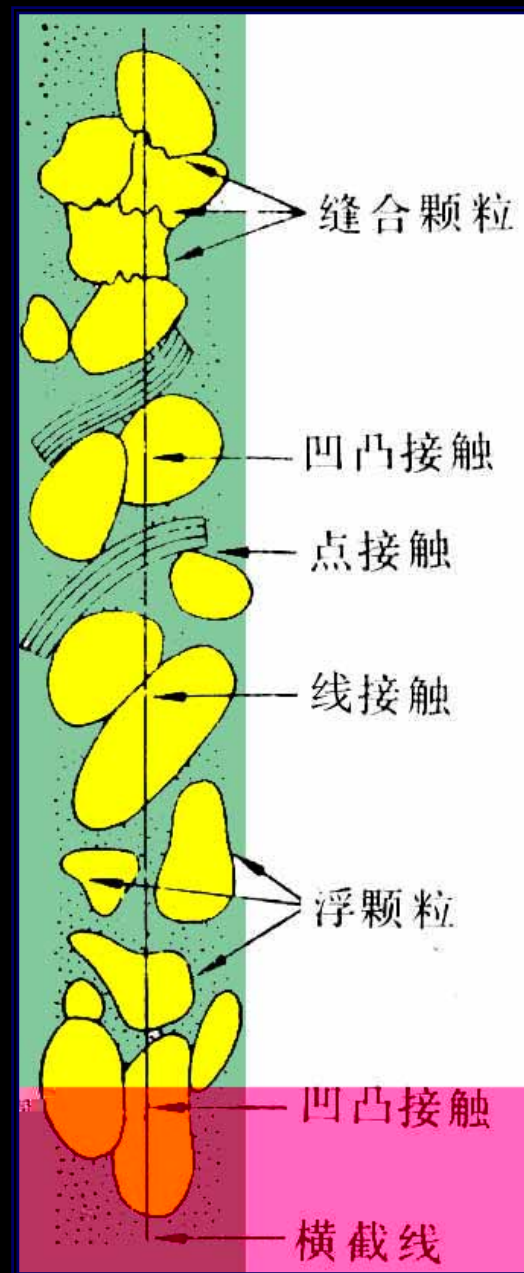
1. 胶结类型——在碎屑岩中，填隙物的分布状况及其与碎屑颗粒的接触关系

胶结类型 胶结物的类型

2. 决定碎屑岩胶结类型的因素：

(1) 碎屑颗粒与填隙物的**相对数量**

(2) 碎屑颗粒之间的**接触关系**



碎屑颗粒接触性质示意图



（二）胶结类型的分类

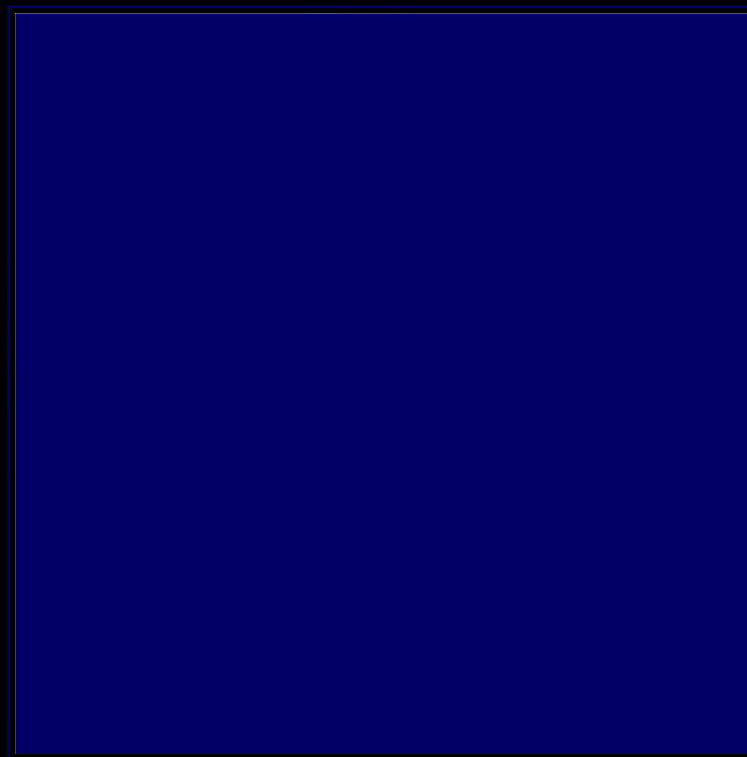
1. **基底胶结**——填隙物（**杂基**）含量较多，碎屑颗粒在杂基中互不接触呈**漂浮状**，填隙物主要为原杂基（或正杂基）。

不同于胶结物呈**嵌晶结构**的胶结方式。

代表**高密度流快速堆积**的特征。

又称**杂基支撑结构**。

形成于沉积同生期。



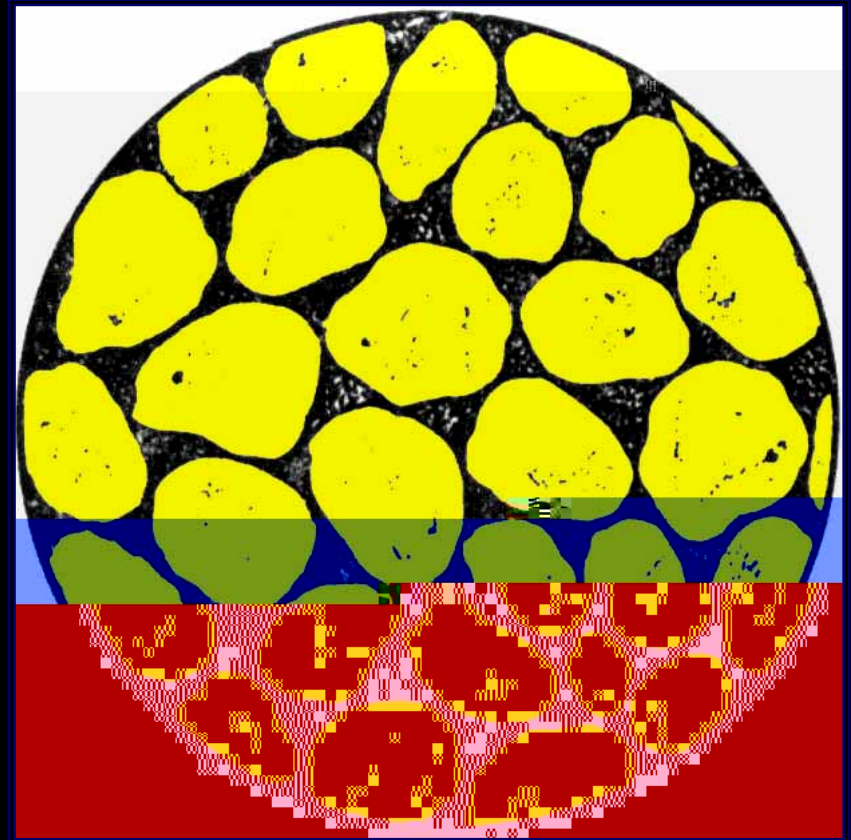




2. **孔隙胶结**——最常见的颗粒支撑结构，碎屑颗粒构成支架状，颗粒之间多呈**点状接触**，胶结物充填在碎屑颗粒之间的孔隙中。

胶结物形成于成岩期或后生期化学沉淀的产物。

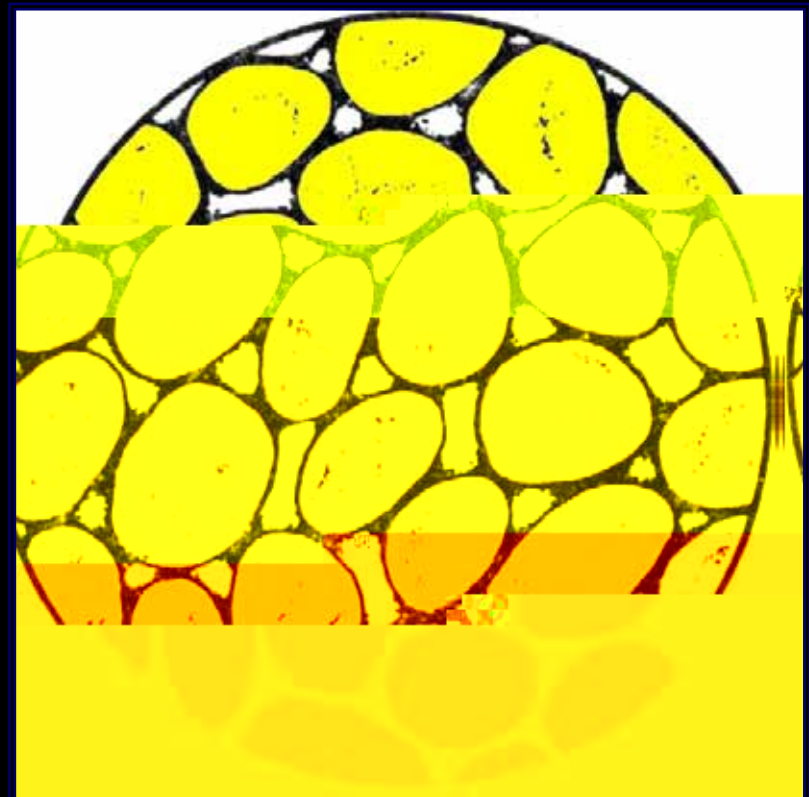
反映**稳定强水流**的沉积特征。





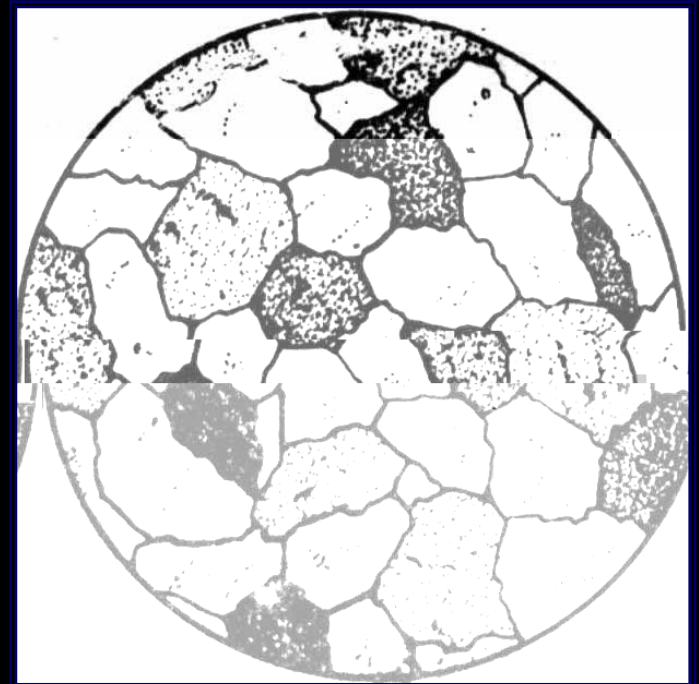
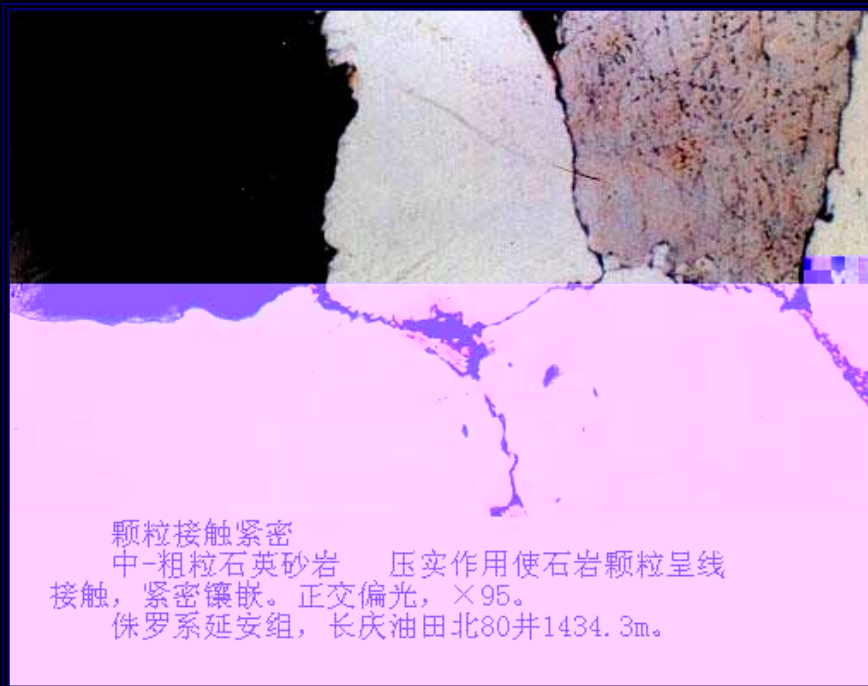
3. **接触胶结**——亦为一种颗粒支撑结构，颗粒之间呈**点接触**或**线接触**，胶结物含量少，分布于碎屑颗粒相互接触的地方，孔隙中无胶结物。

可能是干旱气候条件下的砂层，因**毛细管作用**，溶液沿颗粒间细缝流动并沉淀而成；或者由原来的孔隙式胶结物经地下水**淋滤溶蚀**改造而成。






4. **镶嵌胶结**——在成岩期的压固作用下，特别是当压溶作用明显时，砂质沉积物中的碎屑颗粒会更紧密地接触，颗粒之间由点接触发展为**线接触**、**凹凸接触**，甚至形成**缝合线接触**。





(三) 碎屑颗粒支撑类型

碎屑结构的支撑类型可划分为两类：**杂基支撑结构**和**颗粒支撑结构**。

碎屑结构支撑类型	杂基支撑结构：杂基含量高，颗粒在杂基中呈漂浮状		 压固 压溶 作用 加强
	颗粒支撑结构：颗粒之间有不同程度的接触	点接触	
		线接触	
		凹凸接触	
		缝合线接触	

(四) 支撑类型、胶结类型和颗粒接触关系

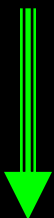
	支撑类型	连接方式	胶结类型	颗粒接触性质	
杂基支撑		胶结	基底式	漂浮状 (颗粒不接触)	压实作用
孔式接触		连接	孔式接触	点接触	作用强度增大
颗粒支撑		接触	线接触	线接触	压溶

支撑类型、胶结类型和颗粒接触关系(据曾允孚等, 1986)

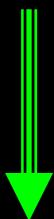


胶结类型、接触方式与支撑类型

基底式

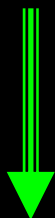


漂浮

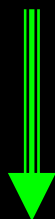


杂基支撑

孔隙式

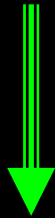


点接触为主
少量线接触

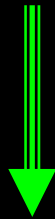


颗粒支撑

接触式

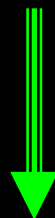


点接触
线接触

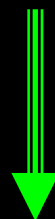


颗粒支撑

镶嵌式



线接触
凹凸接触
缝合接触



颗粒支撑



四种胶结类型在颗粒接触关系、颗粒间连接方式、颗粒支撑性质、填隙物数量及压实压溶强度等方面的差异：

胶结类型	基底式胶结	孔隙式胶结	接触式胶结	镶嵌式胶结
颗粒接触关系	颗粒彼此分开, 呈漂浮状	点接触	点接触	线接触、凹凸接触、缝合线状接触
颗粒间连接方式	杂基连接	杂基或胶结物连接, 或二者兼有	胶结物连接	颗粒连接
颗粒支撑性质	杂基支撑	颗粒支撑		
填隙物数量	多	—————>	少	—————> 无
压实压溶强度	弱	—————>		强



颗粒支撑和杂基支撑在流体性质、搬运方式、沉积特点、水动力条件、沉积环境、颗粒接触关系、粒间填隙物特征、油气储集性能等方面的差异：

	颗粒支撑	杂基支撑
流体性质	牵引流、牛顿流体	沉积物重力流(密度流)、非牛顿流体
搬运方式	碎屑物质呈滚动、跳跃、悬浮等方式搬运	块体搬运 ~ 自悬浮的流体搬运
沉积特点	碎屑颗粒可以沉积,而悬浮物质难以沉积,二者沉积分异明显	碎屑颗粒与杂基可同时沉积,二者基本上无分异
水动力条件	具有一定强度而稳定的水流	流速骤然降低
沉积环境	多形成于浪基面之上的浅水沉积区、河流	多形成于浪基面之下的斜坡带及盆地边缘沉积区、泥石流
颗粒接触关系	颗粒间呈点、线、凹凸及缝合线状接触	颗粒被杂基彼此分开而呈漂浮状
粒间填隙物	胶结物或杂基,少	杂基,多
储集性能	多数较好 ~ 好	多数差 ~ 较差



四、碎屑岩的孔隙结构

Pore textures of clastic rocks

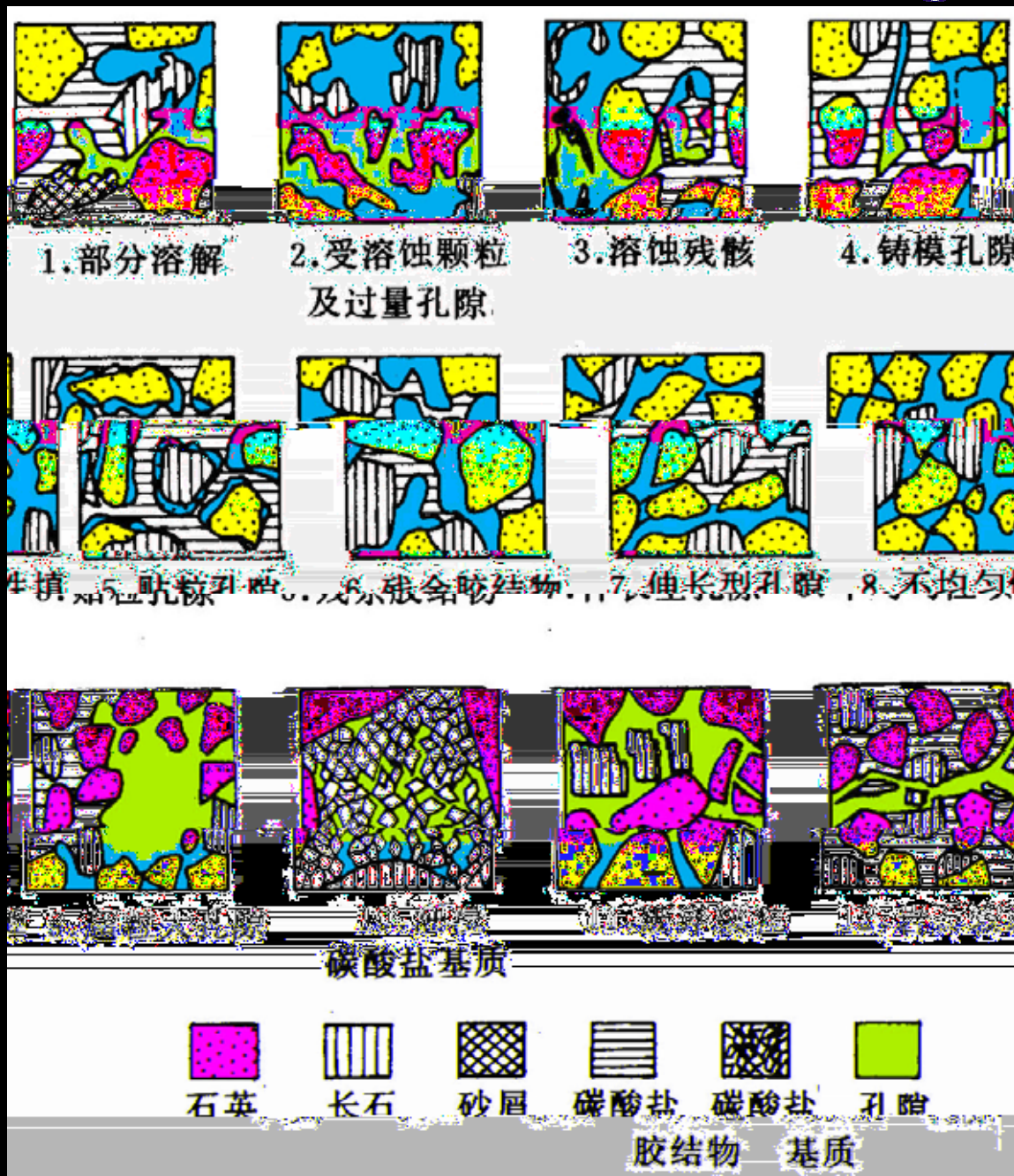
孔隙是碎屑岩（特别是砂岩）的重要结构组成部分之一，其间可以充填大量的气体或液体。



孔隙可以分为原生孔隙和次生孔隙两类：

原生孔隙主要是**粒间孔隙**，即碎屑颗粒原始格架间的孔隙。原生的孔隙度和渗透率与碎屑颗粒的粒度、分选性、球度、圆度和填集性有关。

次生孔隙绝大多数都是形成于成岩中期之后及后生期，一般都是岩石组分发生**溶解**作用的结果，也可以是由于岩石的破碎和收缩产生的次生孔隙。

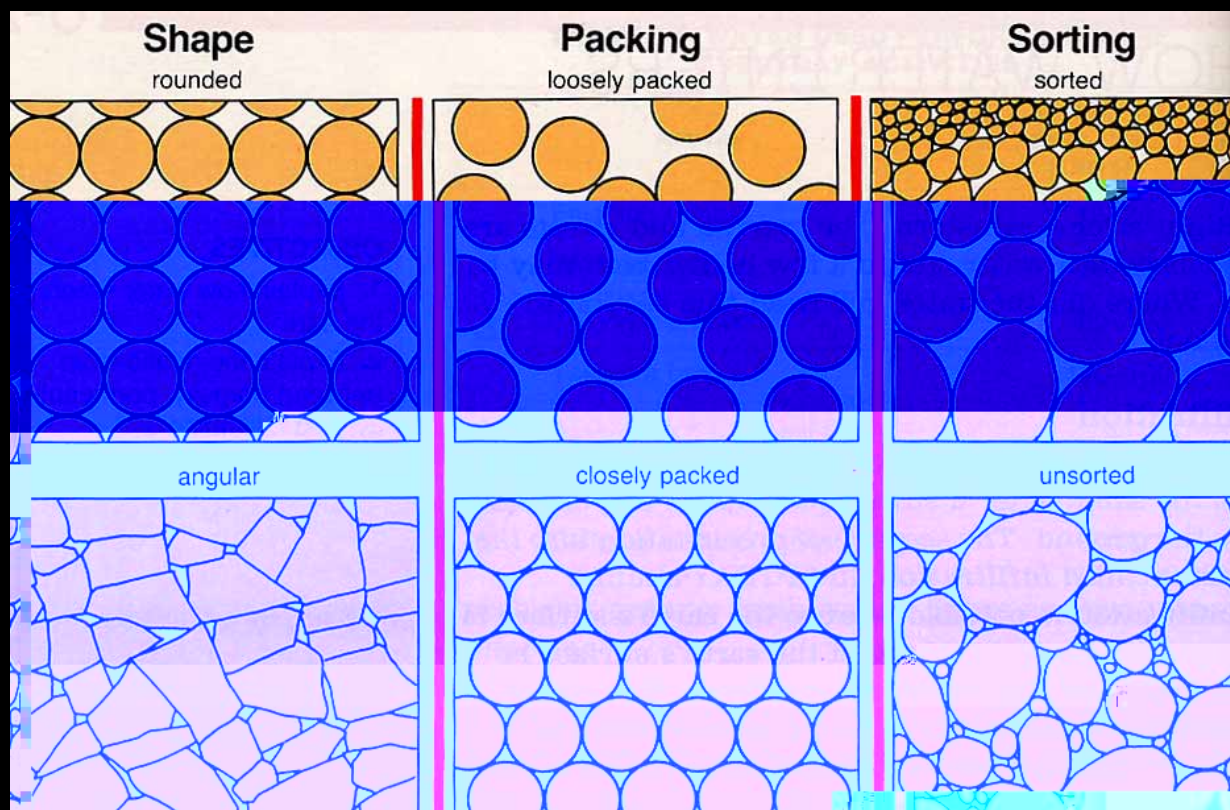


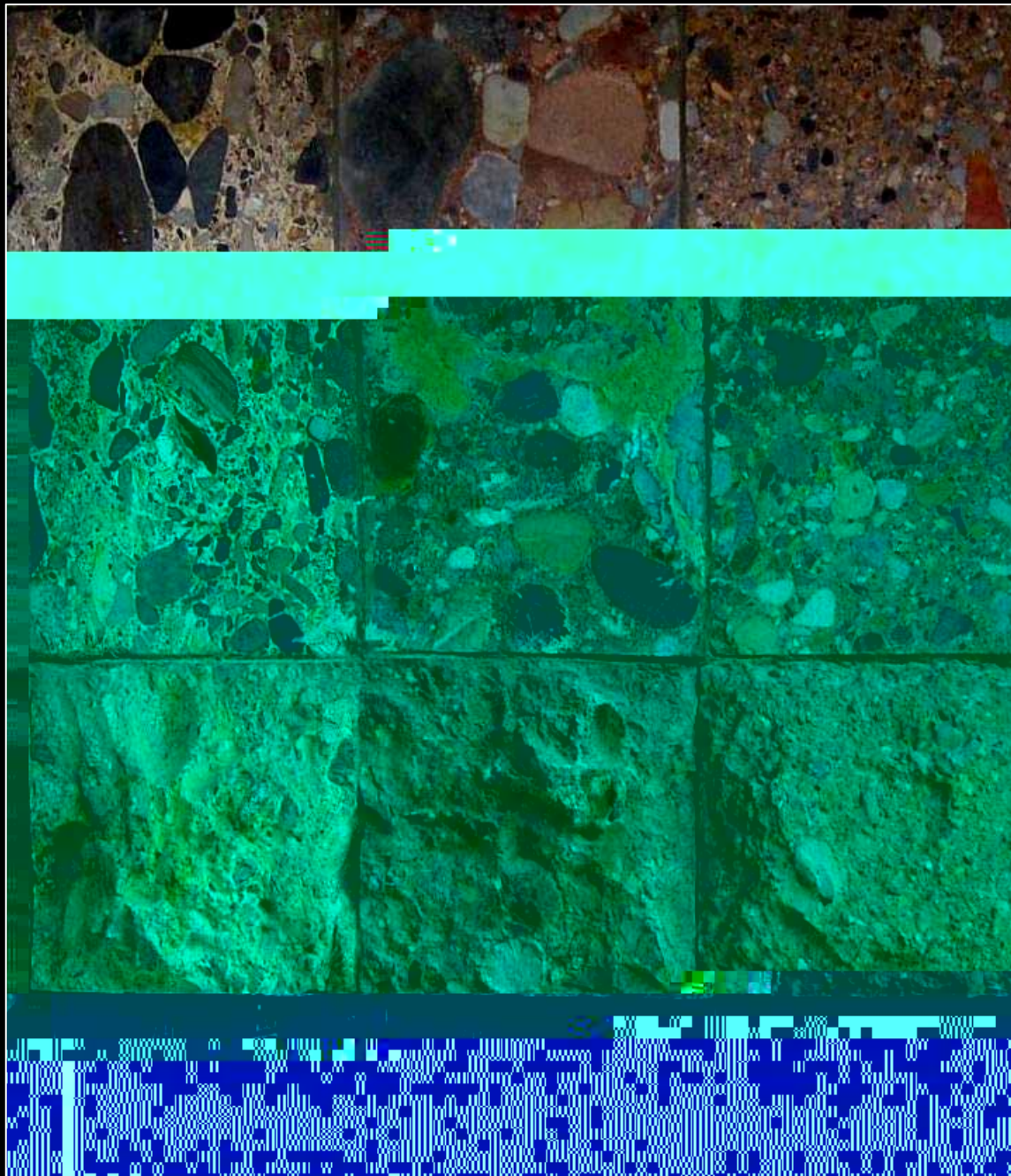


五、结构成熟度 (textural maturity)

结构成熟度——指碎屑物质**结构**上被改造趋向于最终产物的程度。

等大 分选好 圆状 球形 无杂基







六、粒度分析 (Grain size analysis)

(一) 粒度分析方法的选择

Selection of grain size analysis methods

粒度分析方法的选择因碎屑颗粒大小而定



对于碎屑粒度进行系统分析时，一般以**筛析法**为主，辅之以沉速法和直接测量法，从而求得碎屑岩的全部粒度组分。

数量很少或在悬浮液中浓度太低的粉砂、粘土样品，可以采用光学法和电法。

固结紧密无法松解的岩石，则只能采用薄片粒算法。



1. 筛析

筛析时是将已处理好的碎屑颗粒通过孔径大小不同而且按顺序排列的一套套筛，使直径大小不同的颗粒分别集中，从而得到被分析样品各粒级组分的含量数据。

为保证筛析的精度，要求套筛有较好的质量，筛孔要均匀而且大小标准。筛孔间距最好是 $1/4$ 或 $1/2$ 。

青岛某海滩样品粒度分析记录

筛析记录表

0.40~0.30	1.3~1.75	83.02	20.75	43.25	69.85
0.30~0.25	1.75~2.0	13.75	3.44		73.29
0.25~0.20	2.0~2.32	79.18	19.79		93.08
0.20~0.15	2.32~2.72	23.73	5.22	26.24	99.01
0.15~0.12	2.72~3.0	2.10	0.52		99.53
0.12~0.10	3.0~3.3	0.58	0.15		99.68
0.10~0.09	3.3~3.5	0.24	0.06	0.36	99.74
0.09~0.075	3.5~3.75	0.30	0.08		99.82
0.075~0.06	3.75~4.0	0.00	0.07		99.89
0.06~0.05	4.0~4.75	0.00	0.00	0.21	99.89
0.05~0.04	4.75~5.0	0.00	0.00		100



筛析法的**优点**是：

设备简单，易于操作，适于做大量分析；

②筛析结果为进一步的矿物学和颗粒粒度、形状研究准备了丰富的材料。

筛析法的**缺点**是：

只对松散的或弱胶结的岩石适用

②软的或过脆的颗粒可能在筛析过程中因破碎而变细

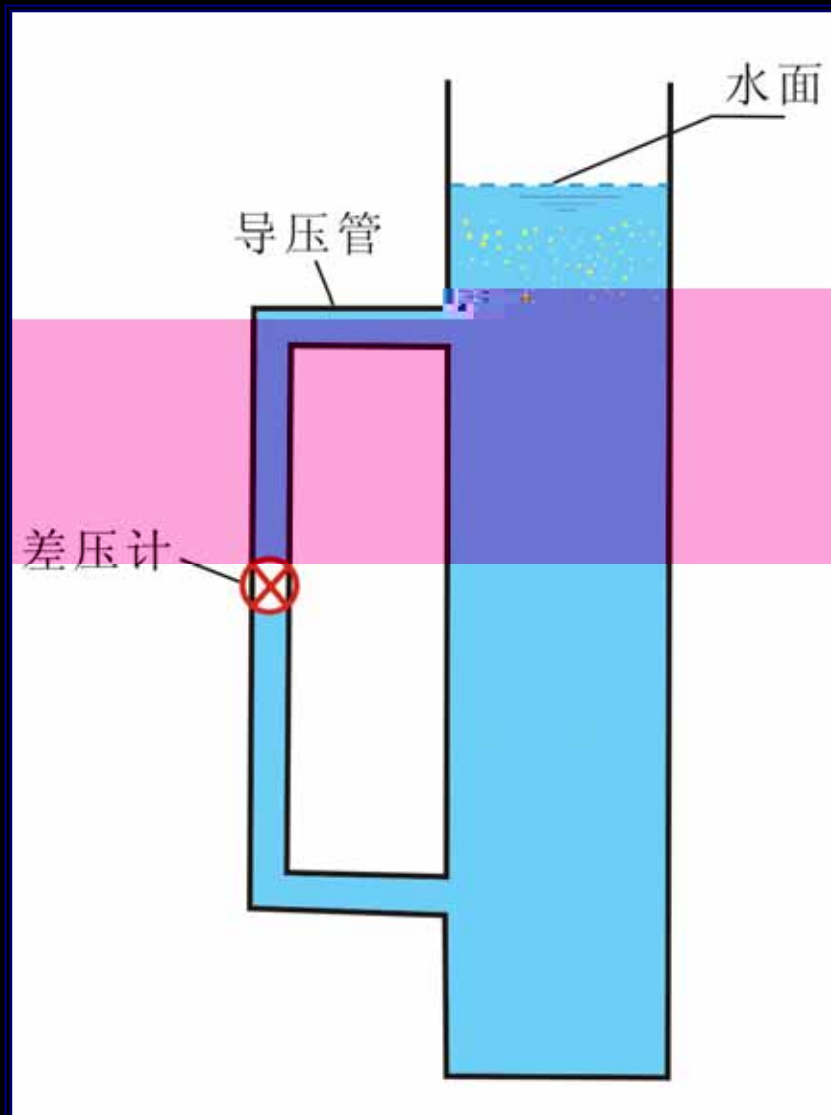


2.



(2) 沉降管法

在沉降管内放好纯水，然后将分析样品从管的上端导入，使之向下端沉降。这时可直接观察颗粒堆积速度，或借用差压计或压力计对沉积物中不同粒度的沉降速度和过程进行测量和记录，从而得到样品的粒度分布资料。



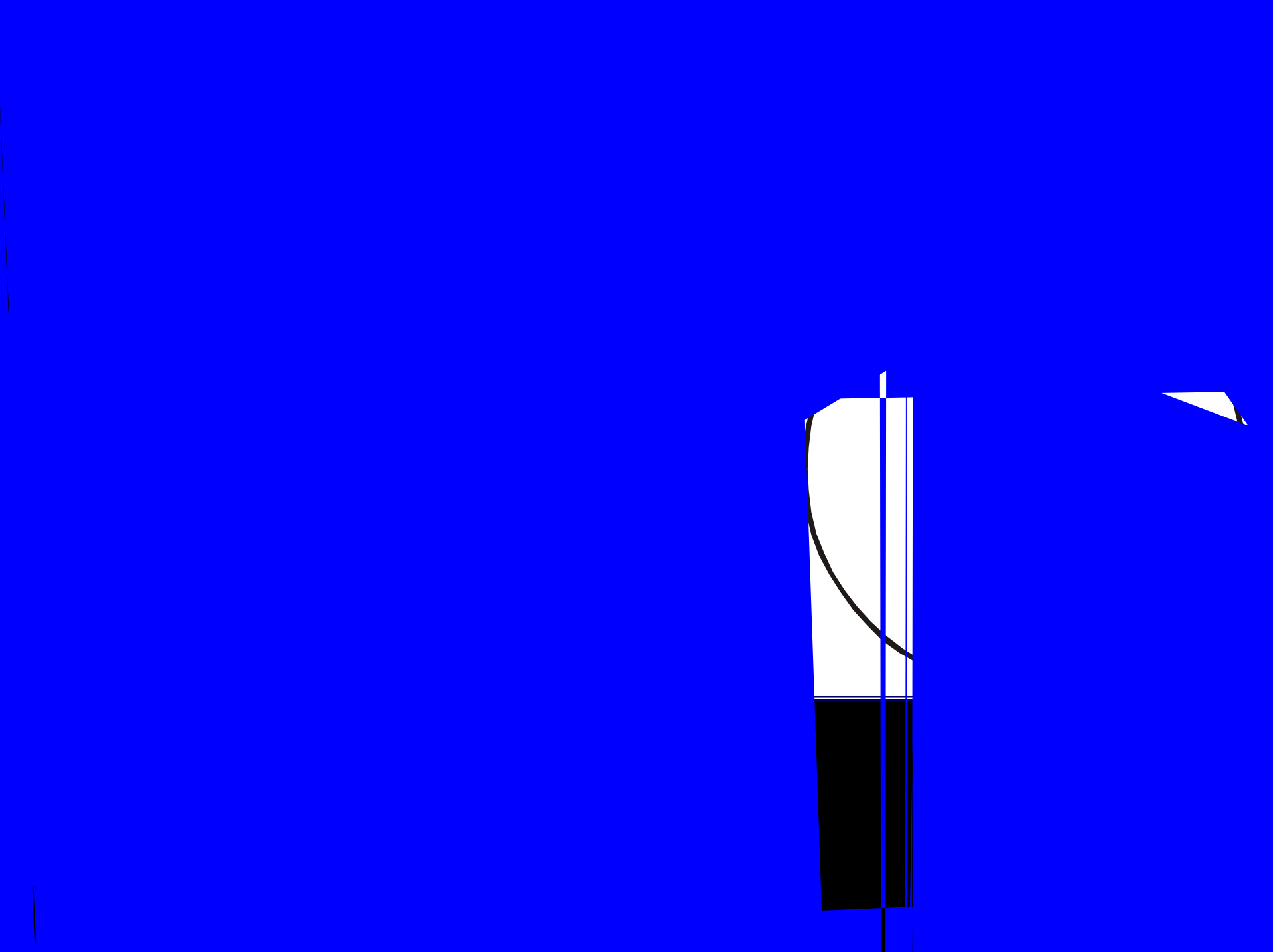


3. 薄片粒度分析

对于固结紧密难于松懈、甚至无法松懈的砂岩或粉砂岩都不能采用筛析和沉降分析，只能利用薄片进行粒度分析。

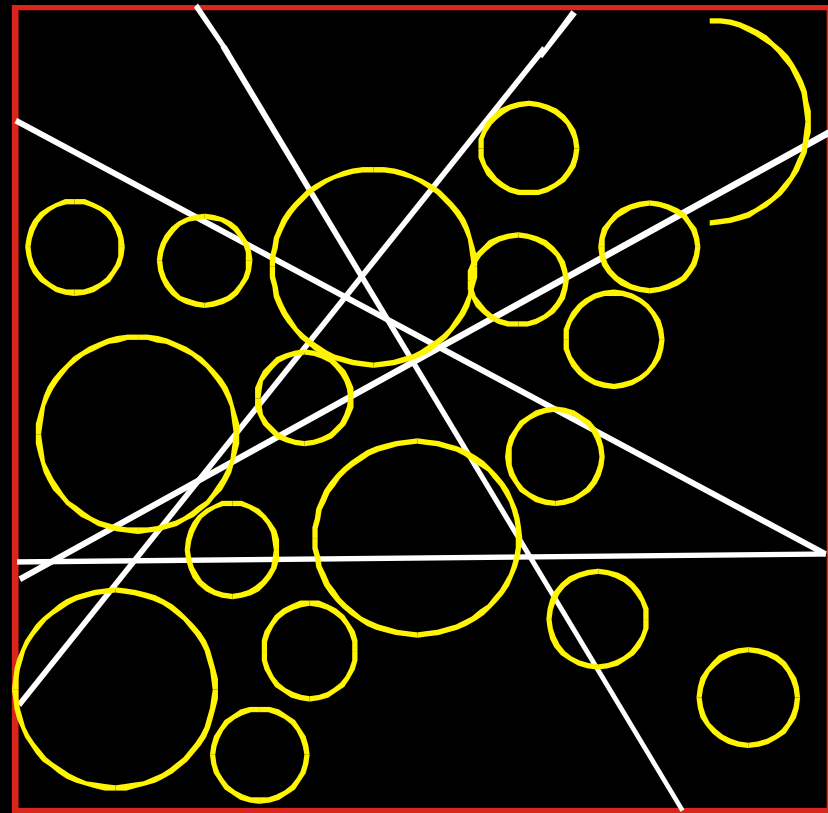
有时由于样品数量过少，难于作筛析，也只好用薄片观察粒度。

薄片粒度分析测得的是一定粒度的颗粒数百分比，而不是各粒级组分的重量百分比，因此它是属于**粒算法**。



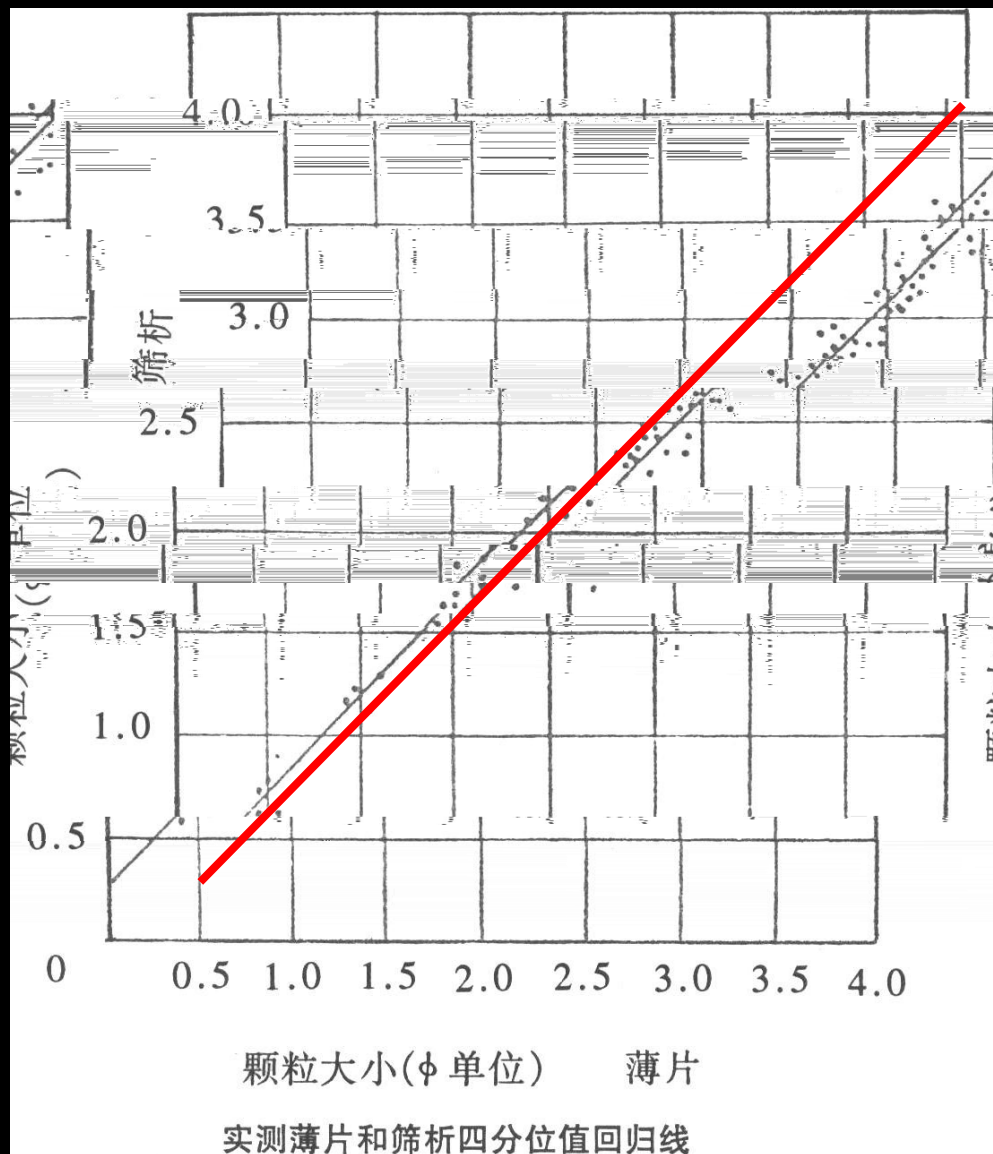


从不等大颗粒堆积体的任意切面上看，切面穿过颗粒的概率与颗粒的大小成正比，大颗粒显然比小颗粒有更多的被切穿的机会。

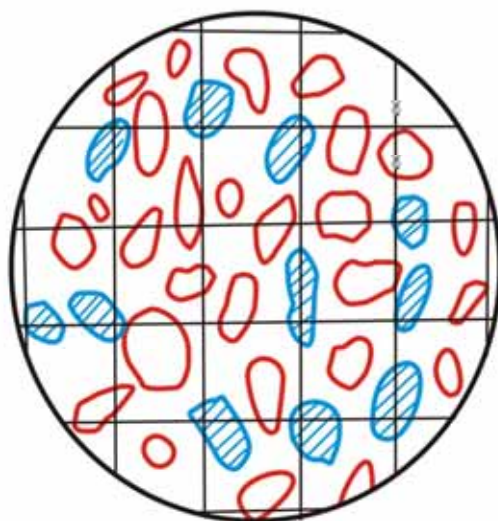




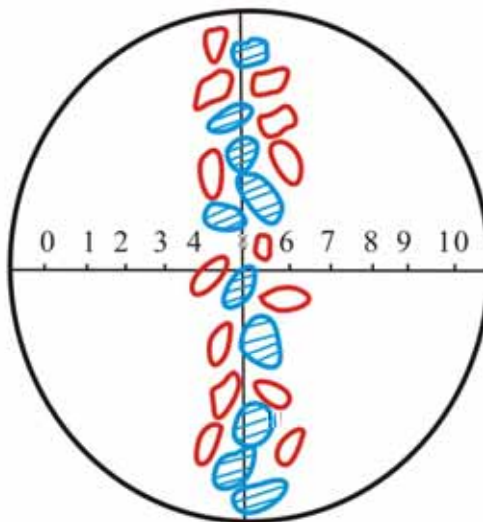
因此，对薄片
得到的粒度数据要进
行校正，校正方法可
以从颗粒分布的矩值
与切面粒度分布矩值
之间的数学关系中得
到。



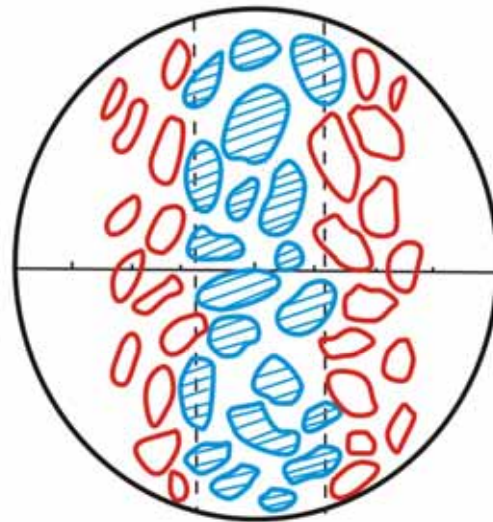
在薄片粒度分析中，常用的抽样方法有三种，即点计法、线计法和带计法。



A. 点计法



B. 线计法



C. 带计法

薄片粒度分析(只统计画斜线的颗粒)

所得结果，经过校正和换算，便可求出各粒级颗粒的重量百分比。



除了以上的粒度分析方法以外，当前生产中还使用有显微镜上用的自动或半自动粒度分析仪、光电微粒分析仪等。



(二) 粒度资料图解 (Diagram of grain size data)

粒度分析的结果，是得到碎屑样品的粒度组分数数据。

筛析记录表					
0.40~0.30	1.3~1.75	83.02	20.75	43.25	69.85
0.30~0.25	1.75~2.0	13.75	3.44		73.29
0.25~0.20	2.0~2.32	79.18	19.79		93.08
0.20~0.15	2.32~2.72	23.73	5.35	26.24	99.01
0.15~0.12	2.72~3.0	2.10	0.52		99.53
0.12~0.10	3.0~3.3	0.58	0.15		99.68
0.10~0.09	3.3~3.5	0.24	0.06		99.74
0.09~0.075	3.5~3.75	0.30	0.08	0.36	99.82
0.075~0.06	3.75~4.0	0.82	0.82	0.07	99.89
0.06~0.05	4.0~4.75				
0.05~0.04	4.75~5.0				
0.04~0.03	5.0~6.0				
0.03~0.02	6.0~8.0				
0.02~0.015	8.0~10				
0.015~0.01	10~20				
0.01~0.0075	20~40				
0.0075~0.005	40~60				
0.005~0.0025	60~80				
0.0025~0.00125	80~100				
0.00125~0.0006	100~200				
0.0006~0.0003	200~400				
0.0003~0.00015	400~600				
0.00015~0.000075	600~800				
0.000075~0.0000375	800~1000				
0.0000375~0.00001875	1000~2000				
0.00001875~0.000009375	2000~4000				
0.000009375~0.0000046875	4000~8000				
0.0000046875~0.00000234375	8000~16000				
0.00000234375~0.000001171875	16000~32000				
0.000001171875~0.0000005859375	32000~64000				
0.0000005859375~0.00000029296875	64000~128000				
0.00000029296875~0.000000146484375	128000~256000				
0.000000146484375~0.0000000732421875	256000~512000				
0.0000000732421875~0.00000003662109375	512000~1024000				
0.00000003662109375~0.000000018310546875	1024000~2048000				
0.000000018310546875~0.0000000091552734375	2048000~4096000				
0.0000000091552734375~0.00000000457763671875	4096000~8192000				
0.00000000457763671875~0.000000002288818359375	8192000~16384000				
0.000000002288818359375~0.0000000011444091796875	16384000~32768000				
0.0000000011444091796875~0.00000000057220458984375	32768000~65536000				
0.00000000057220458984375~0.000000000286102294921875	65536000~131072000				
0.000000000286102294921875~0.0000000001430511474609375	131072000~262144000				
0.0000000001430511474609375~0.00000000007152557373046875	262144000~524288000				
0.00000000007152557373046875~0.000000000035762786865234375	524288000~1048576000				
0.000000000035762786865234375~0.0000000000178813934326171875	1048576000~2097152000				
0.0000000000178813934326171875~0.00000000000894069671630859375	2097152000~4194304000				
0.00000000000894069671630859375~0.000000000004470348358154296875	4194304000~8388608000				
0.000000000004470348358154296875~0.0000000000022351741790771484375	8388608000~16777216000				
0.0000000000022351741790771484375~0.00000000000111758708953857421875	16777216000~33554432000				
0.00000000000111758708953857421875~0.000000000000558793544769287109375	33554432000~67108864000				
0.000000000000558793544769287109375~0.0000000000002793967723846435546875	67108864000~134217728000				
0.0000000000002793967723846435546875~0.00000000000013969838619232177734375	134217728000~268435456000				
0.00000000000013969838619232177734375~0.000000000000069849193096160888671875	268435456000~536870912000				
0.000000000000069849193096160888671875~0.0000000000000349245965480804443359375	536870912000~1073741824000				
0.0000000000000349245965480804443359375~0.00000000000001746229827404022216796875	1073741824000~2147483648000				
0.00000000000001746229827404022216796875~0.000000000000008731149137020111083984375	2147483648000~4294967296000				
0.000000000000008731149137020111083984375~0.0000000000000043655745685100555419921875	4294967296000~8589934592000				
0.0000000000000043655745685100555419921875~0.00000000000000218278728425502777099609375	8589934592000~17179869184000				
0.00000000000000218278728425502777099609375~0.000000000000001091393642127513885498046875	17179869184000~34359738368000				
0.000000000000001091393642127513885498046875~0.0000000000000005456968210637569427490234375	34359738368000~68719476736000				
0.0000000000000005456968210637569427490234375~0.00000000000000027284841053187847137451171875	68719476736000~137438953472000				
0.00000000000000027284841053187847137451171875~0.000000000000000136424205265939235687255859375	137438953472000~274877906944000				
0.000000000000000136424205265939235687255859375~0.0000000000000000682121026329696178436279296875	274877906944000~549755813888000				
0.0000000000000000682121026329696178436279296875~0.00000000000000003410605131648480892181396484375	549755813888000~1099511627776000				
0.00000000000000003410605131648480892181396484375~0.000000000000000017053025658242404460906982421875	1099511627776000~2199023255552000				
0.000000000000000017053025658242404460906982421875~0.00000000000000000852651282912220223045349122109375	2199023255552000~4398046511104000				
0.00000000000000000852651282912220223045349122109375~0.00000000000000000426325641456110111522674561046875	4398046511104000~8796093022208000				
0.00000000000000000426325641456110111522674561046875~0.000000000000000002131628207280550557613372805234375	8796093022208000~17592186044416000				
0.000000000000000002131628207280550557613372805234375~0.0000000000000000010658141036402752788066864026171875	17592186044416000~35184372088832000				
0.0000000000000000010658141036402752788066864026171875~0.00000000000000000053290705182013763940334320130859375	35184372088832000~70368744177664000				
0.00000000000000000053290705182013763940334320130859375~0.000000000000000000266453525910068819701671600654296875	70368744177664000~140737488355328000				
0.000000000000000000266453525910068819701671600654296875~0.0000000000000000001332267629550344098508358003271484375	140737488355328000~281474976710656000				
0.0000000000000000001332267629550344098508358003271484375~0.00000000000000000006661338147751720492541790016357421875	281474976710656000~562949953421312000				
0.00000000000000000006661338147751720492541790016357421875~0.000000000000000000033306690738758602462708950081787109375	562949953421312000~1125899906842624000				
0.000000000000000000033306690738758602462708950081787109375~0.000000000000000000016653345369379301231354475040893546875	1125899906842624000~2251799813685248000				
0.000000000000000000016653345369379301231354475040893546875~0.0000000000000000000083266726846896506156772375204467734375	2251799813685248000~4503599627370496000				
0.0000000000000000000083266726846896506156772375204467734375~0.00000000000000000000416333634234482530783861876222338671875	4503599627370496000~9007199254740992000				
0.00000000000000000000416333634234482530783861876222338671875~0.000000000000000000002081668171172412653919309381111693359375	9007199254740992000~18014398509481984000				
0.000000000000000000002081668171172412653919309381111693359375~0.0000000000000000000010408340855862063269596546905558466796875	18014398509481984000~36028797018963968000				
0.0000000000000000000010408340855862063269596546905558466796875~0.00000000000000000000052041704279310316347782734527792333984375	36028797018963968000~72057594037927936000				
0.00000000000000000000052041704279310316347782734527792333984375~0.000000000000000000000260208521396551581738913672639611669921875	72057594037927936000~144115188075855872000				
0.000000000000000000000260208521396551581738913672639611669921875~0.0000000000000000000001301042606982757908694568363198058349609375	144115188075855872000~288230376151711744000				
0.0000000000000000000001301042606982757908694568363198058349609375~0.00000000000000000000006505213034913789543472841815990291748046875	288230376151711744000~576460752303423488000				
0.00000000000000000000006505213034913789543472841815990291748046875~0.000000000000000000000032526065174568947717364209079951458740234375	576460752303423488000~1152921504606846976000				
0.000000000000000000000032526065174568947717364209079951458740234375~0.00000000000000000000001626303258728447385868210453997572937201171875	1152921504606846976000~2305843009213693952000				
0.00000000000000000000001626303258728447385868210453997572937201171875~0.000000000000000000000008131516293642236929341052269987864686005859375	2305843009213693952000~4611686018427387904000				
0.000000000000000000000008131516293642236929341052269987864686005859375~0.0000000000000000000000040657581468211184646705261349939323430029296875	4611686018427387904000~9223372036854775808000				
0.0000000000000000000000040657581468211184646705261349939323430029296875~0.00000000000000000000000203287907341055923233526306749696617150146484375	9223372036854775808000~18446744073709551616000				
0.00000000000000000000000203287907341055923233526306749696617150146484375~0.000000000000000000000001016439536705279616167631533748483085750732421875	18446744073709551616000~36893488147419103232000				
0.000000000000000000000001016439536705279616167631533748483085750732421875~0.0000000000000000000000005082197683526398080833815668742415428763671875	36893488147419103232000~73786976294838206464000				
0.0000000000000000000000005082197683526398080833815668742415428763671875~0.0000000000000000000000002541098841763199040416907834371207714381818359375	73786976294838206464000~147573952589676412928000				
0.0000000					



这些数据是非常重要的第一性资料，但是直接用数据不便于应用和对比。

因此，常需要将数据形象化，绘制成图。

常用的粒度图——直方图、频率曲线、累积曲线和概率值累积曲线。

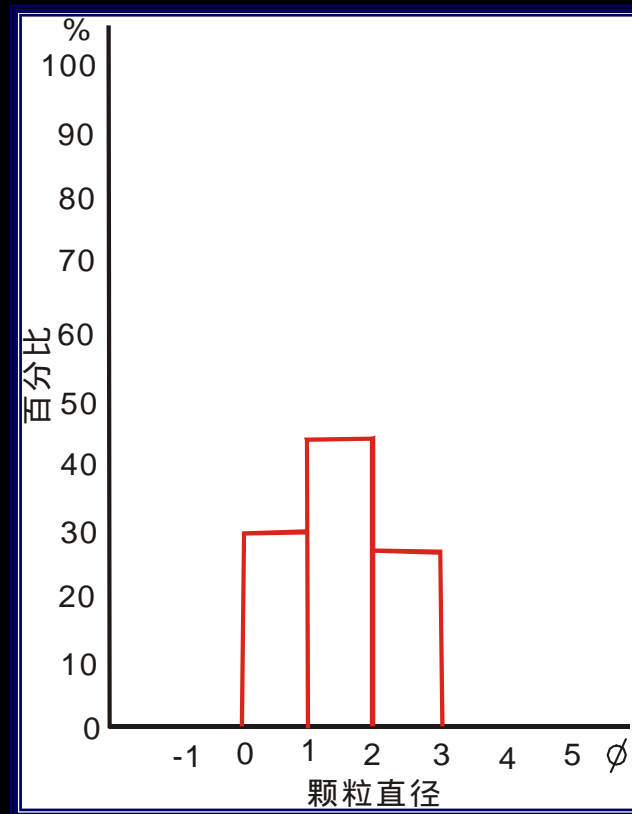


1. 直方图和频率曲线

Histogram and frequency distribution curve

直方图是最常用的粒度组分图件，它是由一系列相邻的长方块构成的。

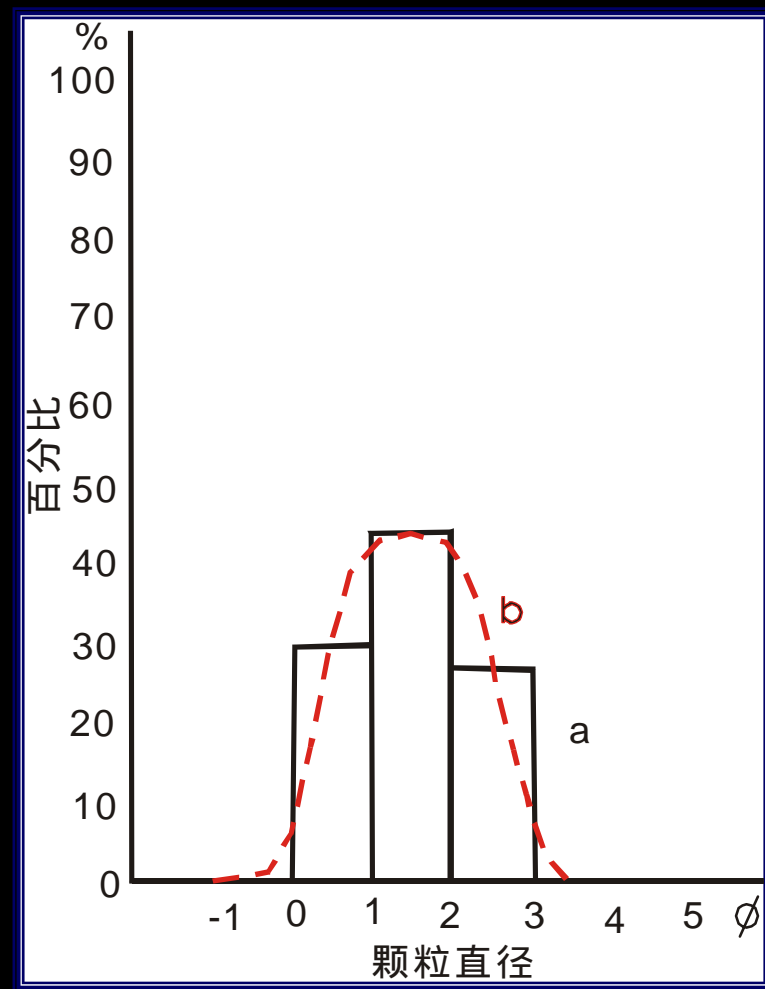
各长方形的底边等长，其长度代表粒度区间，长方形的高代表每种粒度的频数，即表示各粒度区间的重量百分比。





将直方图上各方块的顶边中点连接起来，绘制成一条圆滑曲线，这就是**频率曲线图**。

与直方图类似，频率曲线也表示了样品的粒度分布。



频率曲线图形简单、直观，应用更广。



通常把直方图中突出于周围方块之上的高方块或频率曲线中的高点称作**峰**（亦称**众数**）。

如果样品中只有一个峰，叫作**单峰**；若有两个或两个以上的峰则称为**双峰**或**多峰**。



海岸卵石层的粒度范围最窄，具有很突出的单峰，这是沉积物粒度分选极好的特征；

河流冲积沉积物的粒度分布较宽，具双峰，峰所在粒级的重量百分比并不高，这是分选性不好的表现；

冰川沉积和雨水冲刷斜坡上的堆积物则粒度分布范围更广，其中砾石与泥、砂混杂，说明分选性更差。



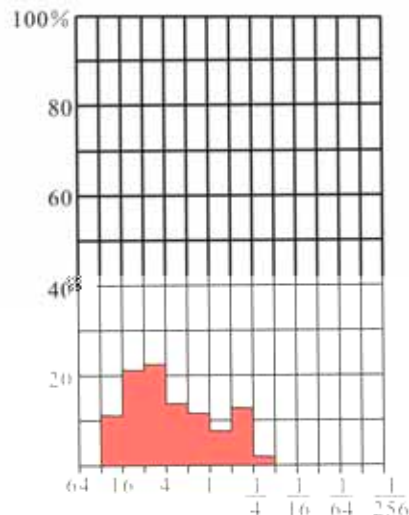
不同成因碎屑沉积物的粒度组分直方图

(a) 河流冲积砂质卵石砾石

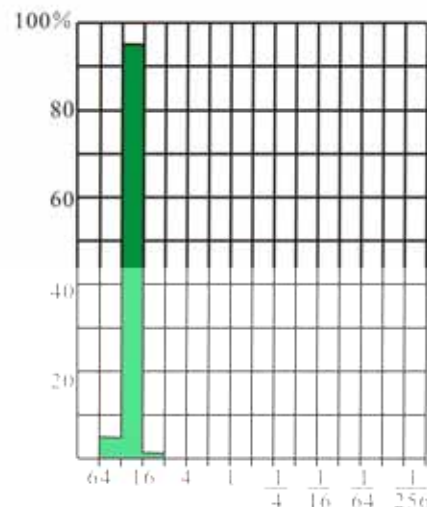
(b) 海岸细卵石层

(c) 含碎屑的冰川砂

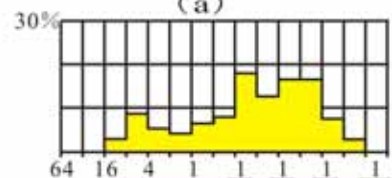
(d) 雨水冲刷斜坡上堆积物



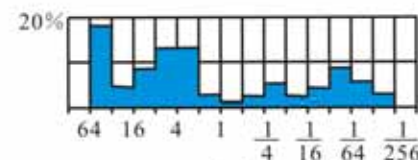
(a)



(b)

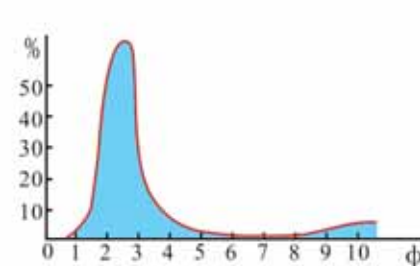


(c)

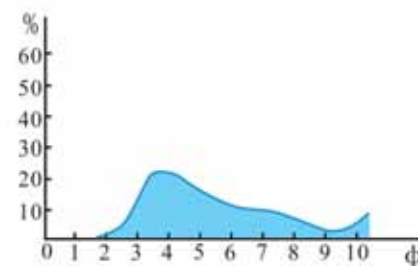


(d)

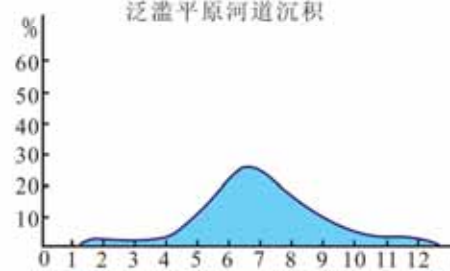
松辽盆地白垩系中部 含油层组频率曲线



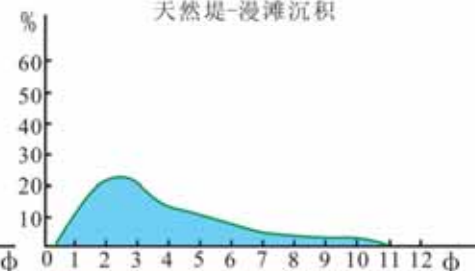
泛滥平原河道沉积



天然堤-漫滩沉积



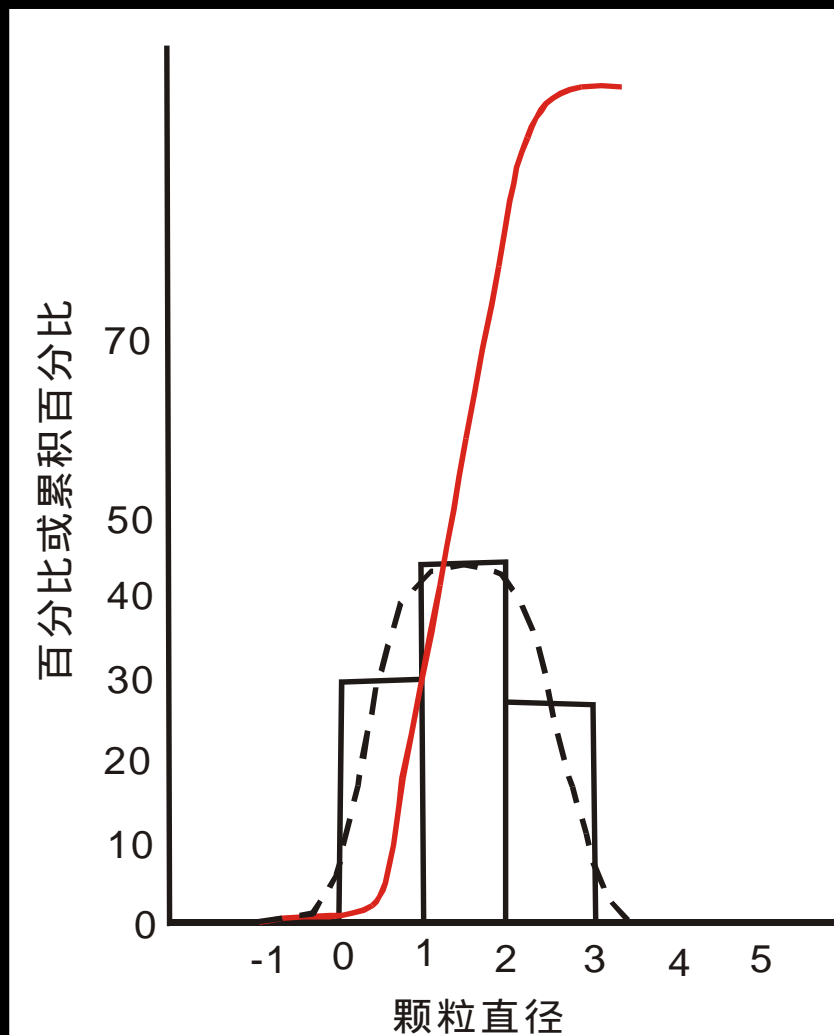
沼泽沉积



浅湖沉积



2. 累积曲线 (Cumulative frequency curve)





累积曲线总是构成“S”形。但不同沉积环境形成的碎屑沉积物，其累积曲线形态是有差别的。

滨海沉积和风成沉积的碎屑物质分选好，粒度范围窄，因而累积曲线很陡；

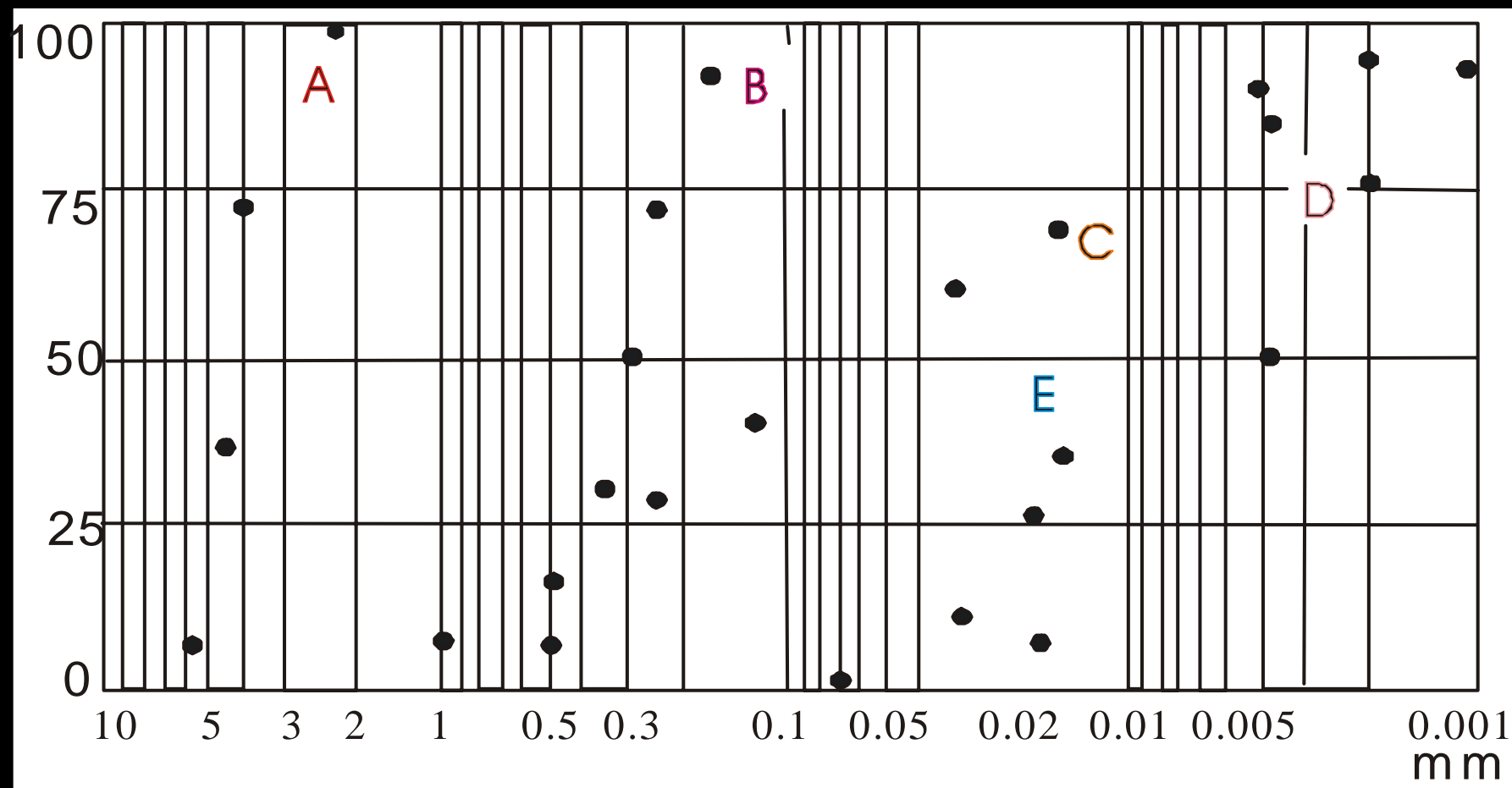
洪流及冰川沉积分选差，粒度分布范围宽，累积曲线表现得平缓。

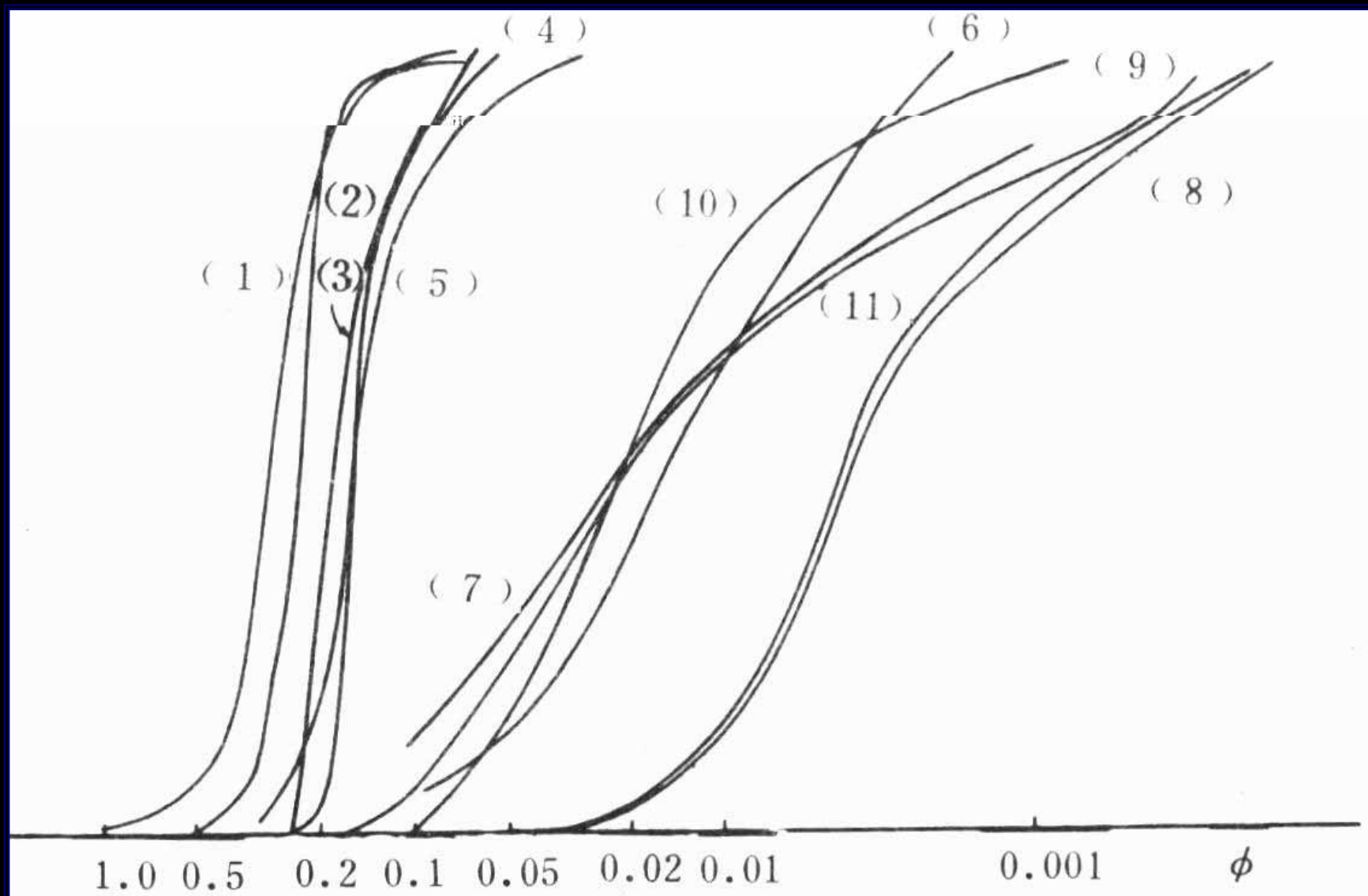


海滨砾石

海滨砂

黄土





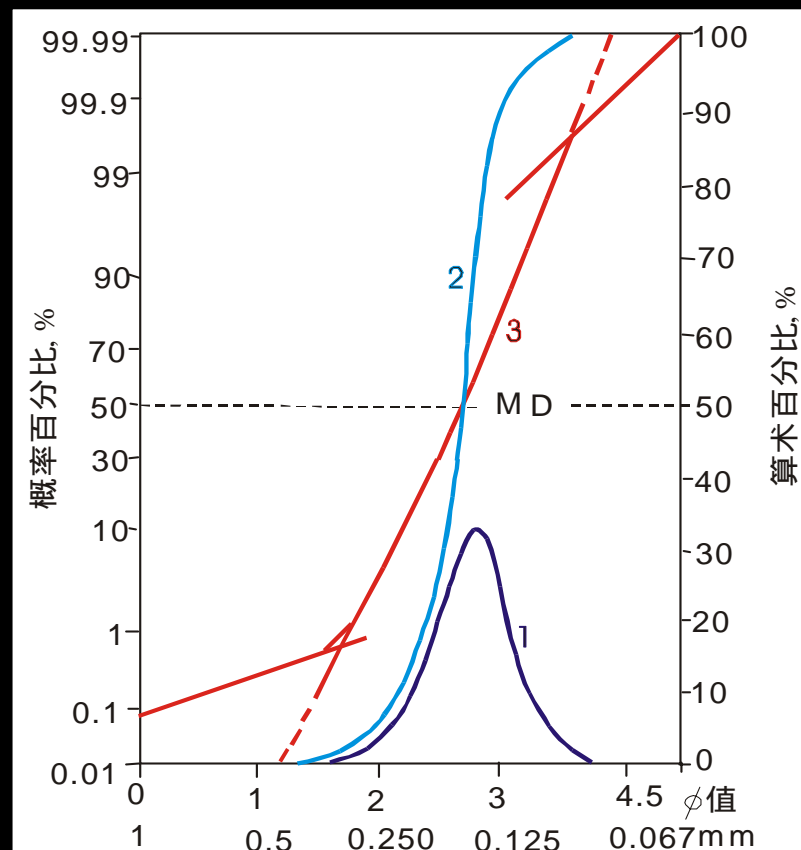
长江中下游现代沉积的粒度累积曲线图



3. 概率值累积曲线

Cumulative frequency curve plotted with a log probability scale

仍然用累积重量百分比作图。横坐标仍为粒径（ ）值，纵坐标改用概率百分数标度，这样做成的便是概率值累积曲线图





如果粒度分布符合通常所说的对数正态分布，那么用概率坐标在图上会得到一条直线。

但一般碎屑沉积物的概率累积曲线总是表现为相交的几个直线段，这反映了在沉积物中包含着几个正态次总体。

与“S”形累积曲线相比，概率值累积曲线是将碎屑组分中含量较少的粗、细尾部的特点**放大了**，这对于沉积成因分析及在图解法中应用都显得更加方便。



(三) 粒度参数 (Grain size statistical parameters)

计算粒度参数常与图解相结合

首先由累积曲线上读得某些累积百分比处

的颗粒直径

然后用数学公式进行计算



粒度参数的种类很多，过去主要用**粒度中值**（ M_d ）和**分选系数**（ S_o ）。

当前广泛应用的有**平均粒径**（ M_z ）、**标准偏差**（ σ_1 ）、**偏度**（ SK_1 ）和**峰度**（ K_G ）等。

过去用特拉斯克（Trask）公式计算，当前应用更广的是**福克和沃德**（Folk and Ward）的公式。



1. 平均粒径和中值





2. 标准偏差和分选系数

Standard deviation and sorting coefficient

表示分选程度的参数。

它表示颗粒大小的均匀程度，或者说是表现围绕集中趋势的离差。



分选系数说明分选性，分选系数为：

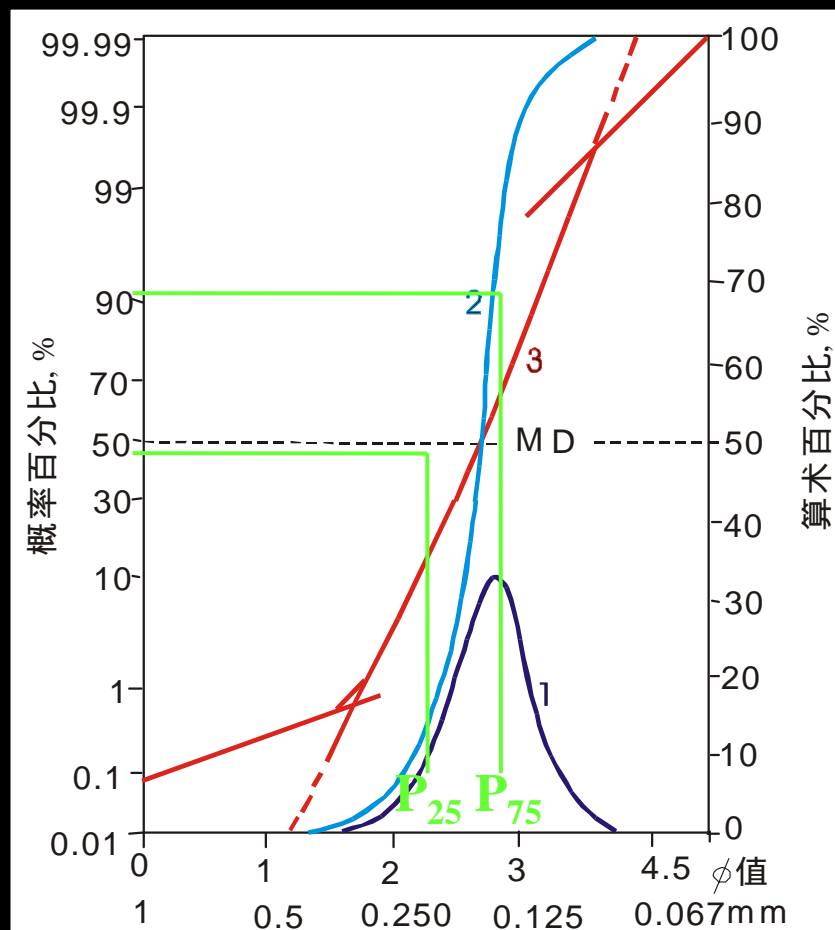
$$S_o = \frac{P_{25}}{P_{75}}$$

P_{25} 和 P_{75} 分别代表累积曲线上25%和75%处所对应的颗粒直径（mm）。

分选好： $S_o=1\sim2.5$

分选中等： $S_o=2.5\sim4.0$

分选差： $S_o>4.0$





分选系数应用很广，但上述公式存在着缺欠，因它没能包括粗、细尾端的分选特点。

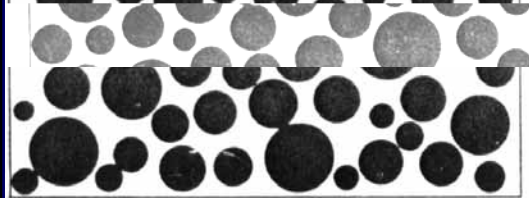
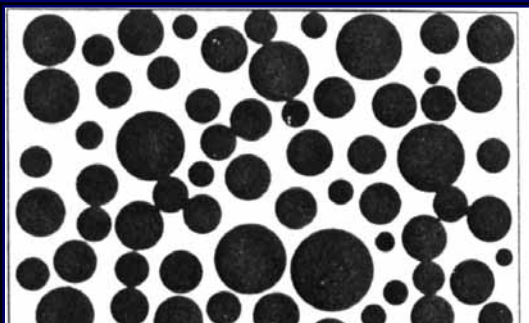
由福克和沃德提出的**标准偏差**公式为：

$$\sigma_1 = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}$$

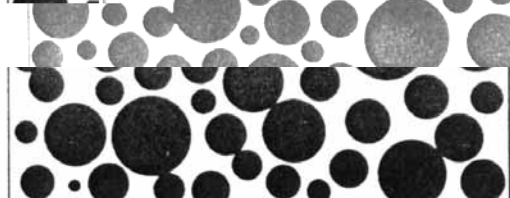
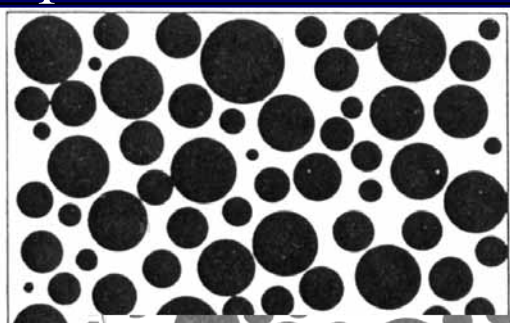
式中除包含了粒级分布的中央部分（16%至84%）外，也包括了对水动力条件反映最灵敏的粗细尾部（95%和5%）的分选情况。因此，该式被认为是更全面和更富有成因意义。



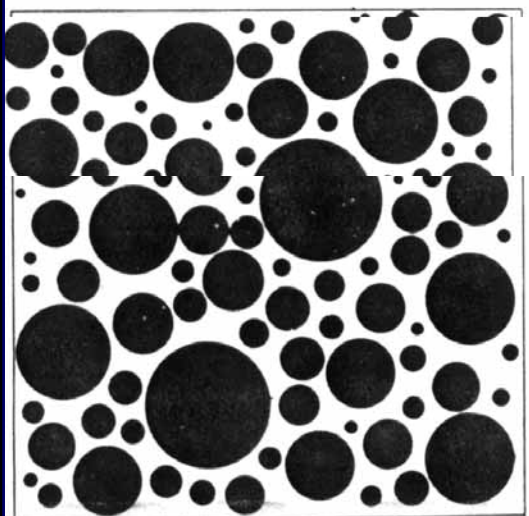
前人曾分析了大量样品，从而确定了用
标准偏差（ σ ）确定分选级别的标准。



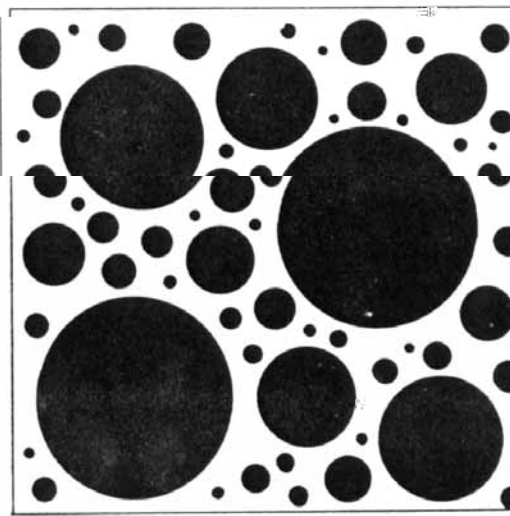
(a) standard deviation = 0.35



(b) standard deviation = 0.5



(c) standard deviation = 1.0



(d) standard deviation = 2.0

分选极好： <0.35

分选好： $0.35\sim0.50$

分选较好： $0.50\sim0.71$

分选中等： $0.71\sim1.00$

分选较差： $1.00\sim2.00$

分选差： $2.00\sim4.00$

分选极差： >4.00



分选性的好坏也可以作环境标志。碎屑物质的分选程度与沉积环境的**水动力条件**和**自然地理条件**有着密切的关系。

总的看来，**风成沙丘砂的分选最好，海（湖）滩砂次之，河砂更差，分选最坏的是冲积扇和冰川沉积。**

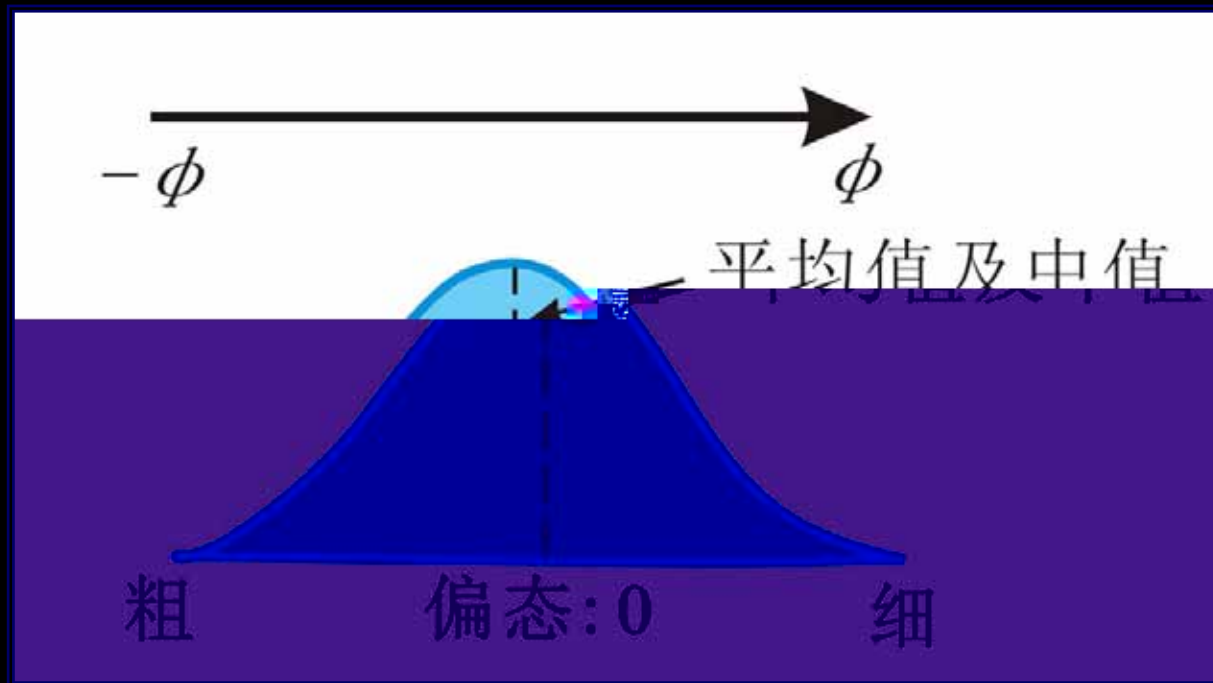


3. 偏度 (Skewness)

偏度 SK_1 被用来判别粒度分布的不对称程度。福克和沃德的偏度公式为：

$$SK_1 = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})}$$

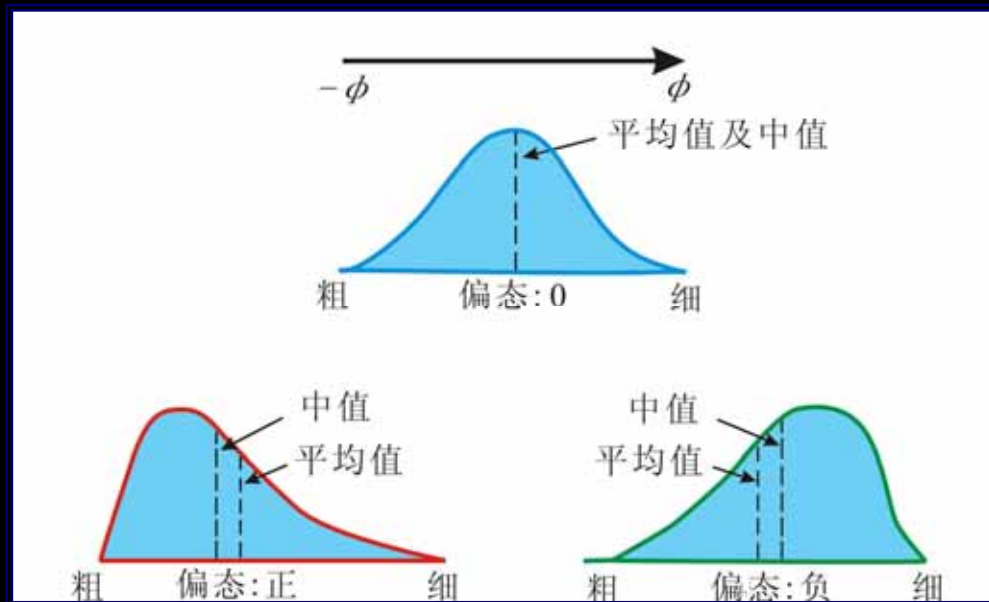
从频率曲线上看，对数正态分布是左右对称的。同时中值、平均粒径和众数一致，即表现为一个数值。用偏度公式计算，正态粒度分布的 SK_1 应等于零。



根据峰的偏斜方向可分出：

(1) **正偏态**：峰偏向粗粒度一侧，说明沉积物以粗组分为主，细粒一侧表现为低的尾部。用偏度公式计算， SK_1 应为正值。

(2) **负偏态**：峰偏向细粒度一侧，沉积物以细粒主，粗粒一侧有低的尾部。这时 SK_1 应为负值。





不对称的频率曲线可以是单峰曲线，但也不



福克（1966）按偏度值 SK_1 将偏度分为五级：

很负偏态：-1 ~ -0.3

负偏态：-0.3 ~ -0.1

近于对称：-0.1 ~ +0.1

正偏态：+0.1 ~ +0.3

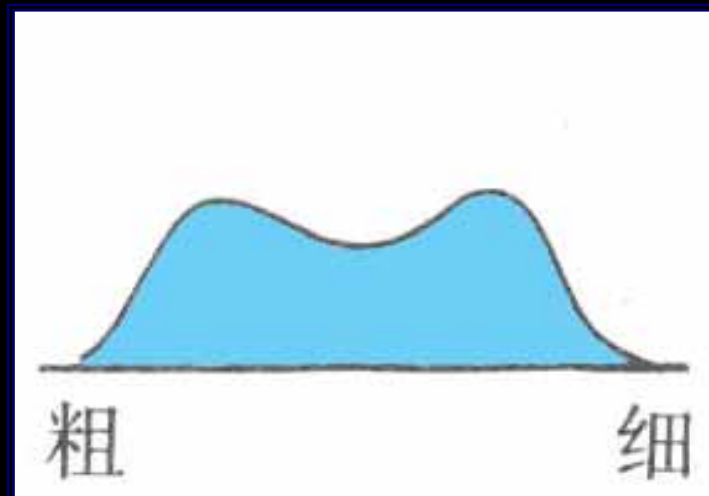
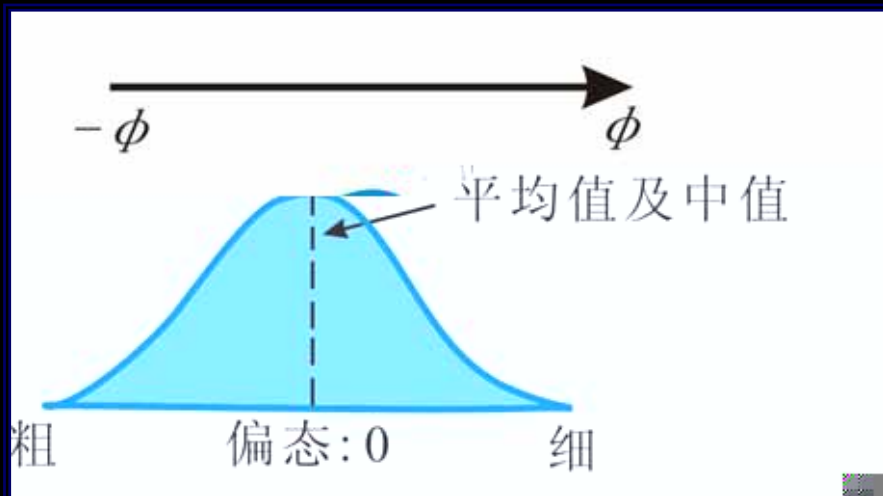
很正偏态：+0.3 ~ +1

一般说来，河砂表现为正偏度，海滩砂表现为负偏度，风成沙丘砂为正偏度。

偏度值趋于零有两种完全不同的含义：

一种是指单峰正态曲线，分选最好。一般见于海滩沉积。

另一种是表示马鞍形双峰曲线，两种粒度总体等量混合，分选最差。多属河流沉积





4. 峰度（尖度）（Kurtosis）

峰度是用来衡量粒度频率曲线尖锐程度的。也就是度量粒度分布的中部与两尾端的展形之比。

福克和沃德提出的峰度公式为：

$$K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44 (\phi_{75} - \phi_{25})}$$



在对称正态曲线中， $_{95}$ 与 $_5$ 之间粒度间距是 $_{75}$ 与 $_{25}$ 之间粒度间距的2.44倍，因此**正态粒度分布的 $K_G=1$** 。

根据一百多个样品的分析，福克等用 K_G 值确定了峰值的等级界限。

很平坦： <0.67

平坦： $0.67\sim0.9$ ；

中等（正态）： $0.90\sim1.11$

尖锐： $1.11\sim1.56$

很尖锐： $1.56\sim3.00$

非常尖锐： >3.00



K_G 值的分布不规则，作图时使用不方便。

福克和沃德又建议在作图时将 K_G 值转换为 K'_G ，其转换公式为：

$$K'_G = \frac{K_G}{K_G + 1}$$

K'_G 值的变化范围在0.33~0.90，正态曲线的 K'_G 值等于0.5。



几种沉积类型的粒度特点

沉积类型		特 点				
		频率曲线形态	偏 度	峰 度	分 选	
中	粗	河 砂	常见双峰或多峰不对称曲线	变化大，正偏为主， 也有负偏态	数值多低	差
		海滩砂	单峰对称正态曲线为主	多对称，偶有负偏态	中等至微尖	好
中 等	极 好	细	沙丘砂	单峰曲线，微不对称	正 偏 态	
尖 锐	好		风成坪地砂	双峰曲线、不对称	正 偏 态	



（四）粒度分析在区分沉积环境中的应用

Applications of grain size analysis in distinguishing sedimentary environments

沉积岩的粒度是受搬运介质、搬运方式及沉积环境等因素控制的，反过来这些成因特点必然会在沉积岩的粒度性质中得到反映，这正是应用粒度资料确定沉积环境的依据。



1. 粒度判别函数及成因图解

萨胡 (Sahu, 1964) 判别分析

鉴别沉积环境的判别函数

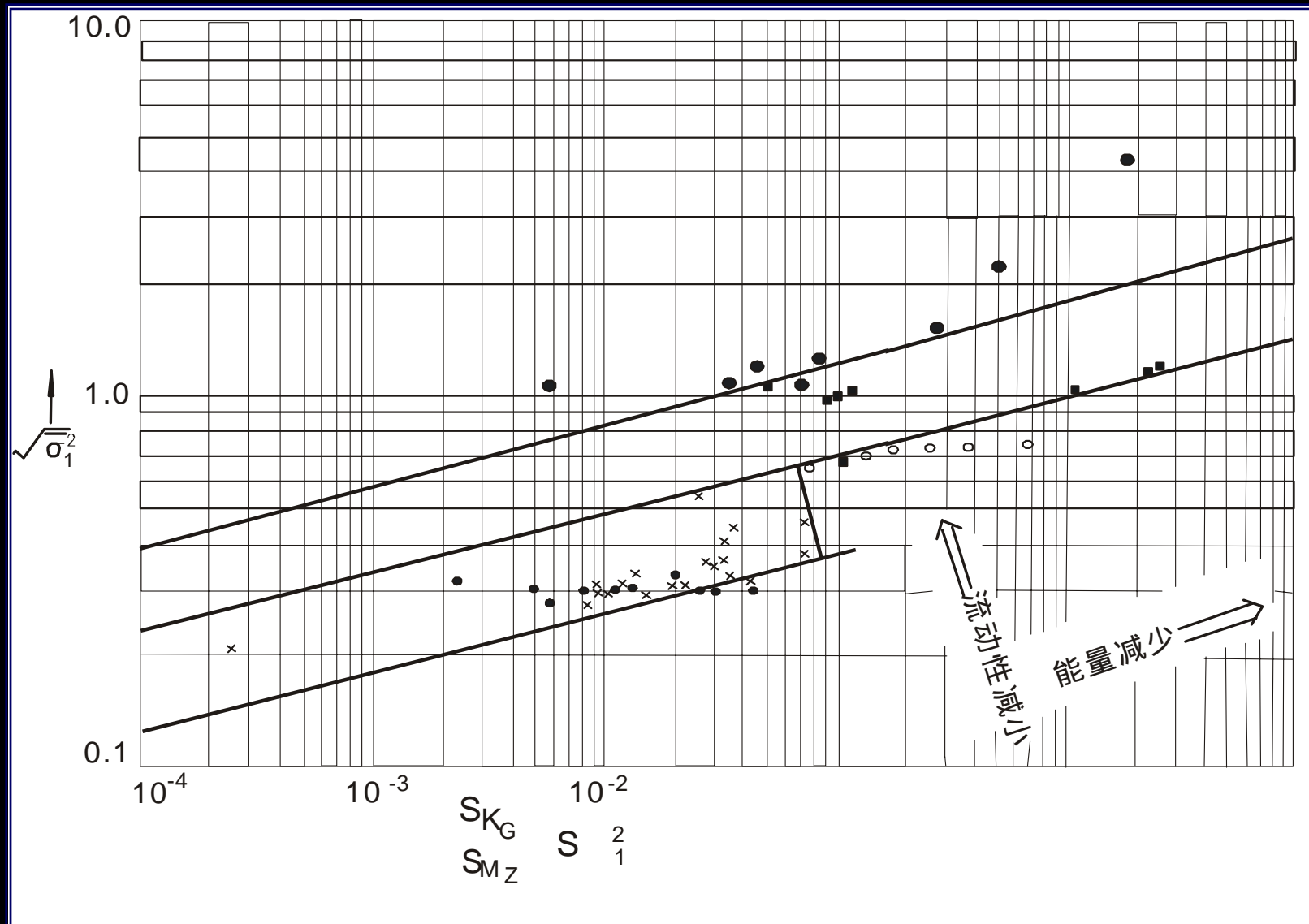
鉴别沉积环境	判 别 公 式	鉴 别 值	函数平均值
沙丘与海滩	$Y_{\text{风成, 海滩}} = -3.568Mz + 3.7016\sigma_1^2$	风成 $Y < -2.7411$ 海滩 $Y > -2.7411$	$\bar{Y}_{\text{风成}} = -3.0973$ $\bar{Y}_{\text{海滩}} = -2.3824$
海滩与浅海	$Y_{\text{海滩, 浅海}} = 15.6543Mz + 65.7091\sigma_1^2$	海滩 $Y < 65.3650$ 浅海 $Y > 65.3650$	$\bar{Y}_{\text{海滩}} = 51.9536$ $\bar{Y}_{\text{浅海}} = 104.7536$



兰迪姆 (Landim, 1968) 等求出的冰碛物 与冰水沉积、冰碛物与冲积扇沉积的判别方 程：

鉴别沉积环境的判别函数

鉴别沉积环境	判 别 公 式	鉴 别 值	函数平均值
冰碛物与冲积扇	$Y_{\text{冰碛物, 冲积扇}} = 0.00405Mz + 0.02381\sigma_1$ $= 0.05616SK_1 + 0.10365K_G$	冰碛物 $Y \geq 0.12809$ 冲积扇 $Y \leq 0.12809$	$\bar{Y}_{\text{冰碛物}} = 0.16121$ $\bar{Y}_{\text{冲积扇}} = 0.10225$
冰碛物与冰水沉积	$Y_{\text{冰碛物: 冰水沉积}} = -0.00256Mz + 0.03501\sigma_1$ $= 0.02578SK_1 - 0.01549K_G$	冰碛物 $Y > 0.08133$ 冰水沉积 $Y \leq 0.08133$	$\bar{Y}_{\text{冰碛物}} = 0.11429$ $\bar{Y}_{\text{冰水沉积}} = 0.04836$

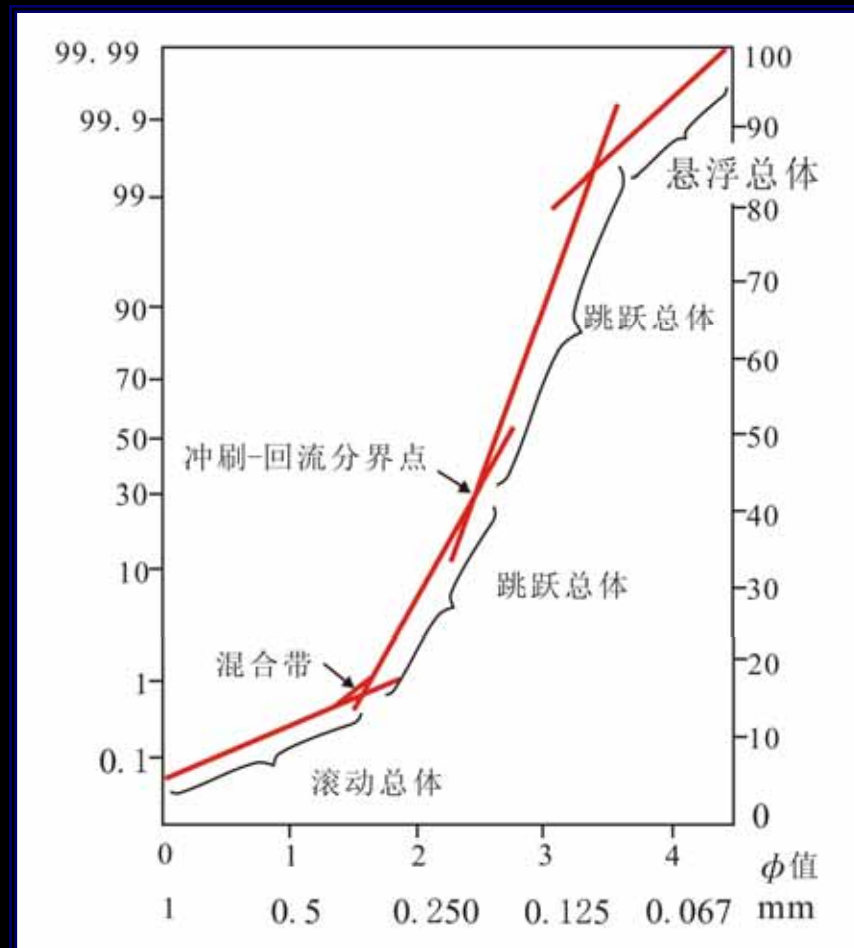




2. 用概率累积曲线区分沉积环境

维谢尔 (Visher, 1965, 1969) 首先提出。

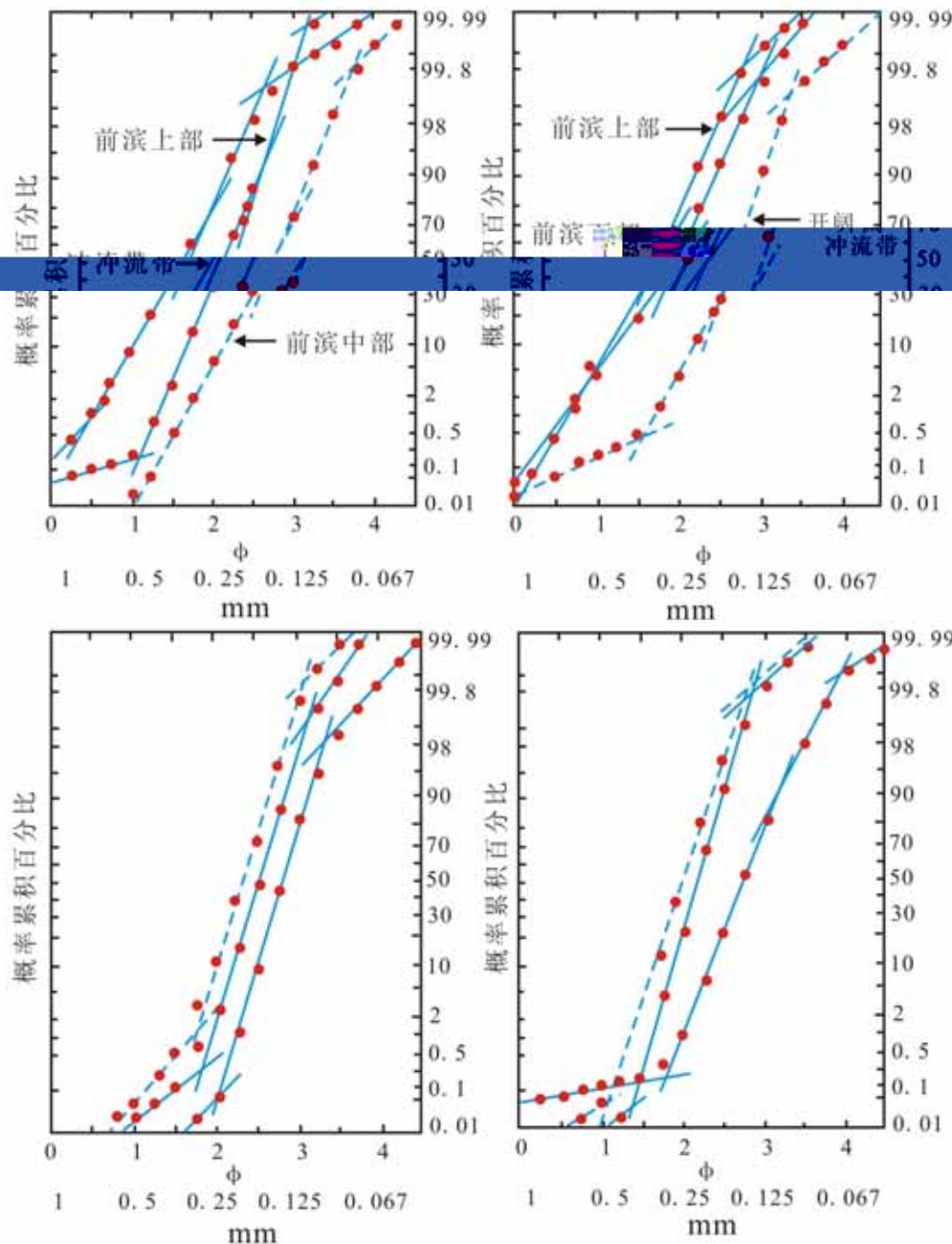
沉积物的粒度一般不是表现为单一的对数正态分布，因此其概率图总是由几个相交的直线段构成。

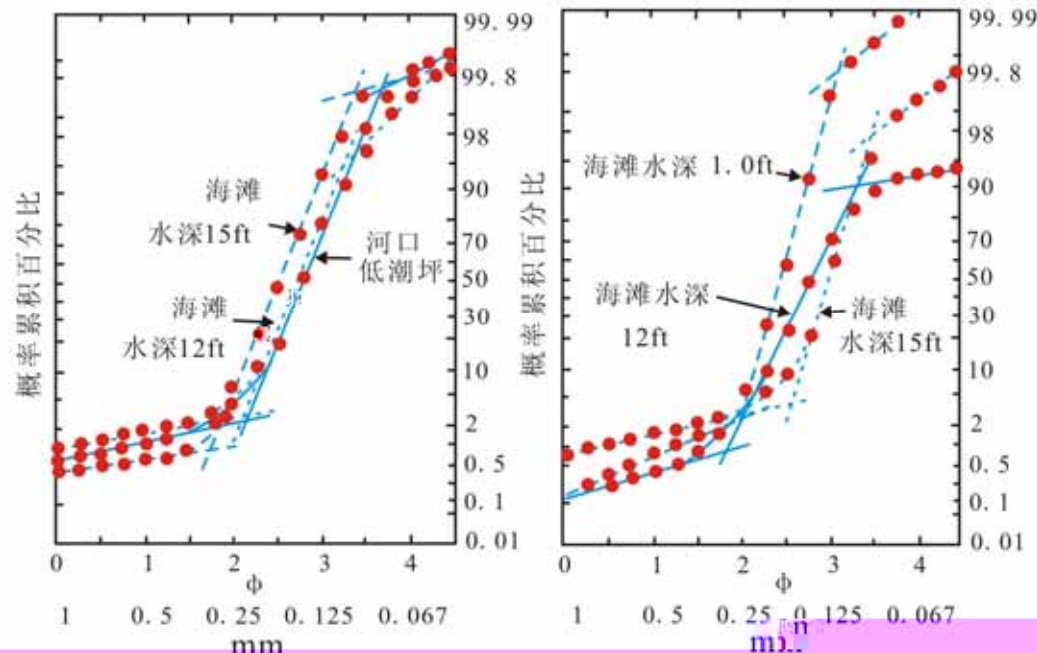




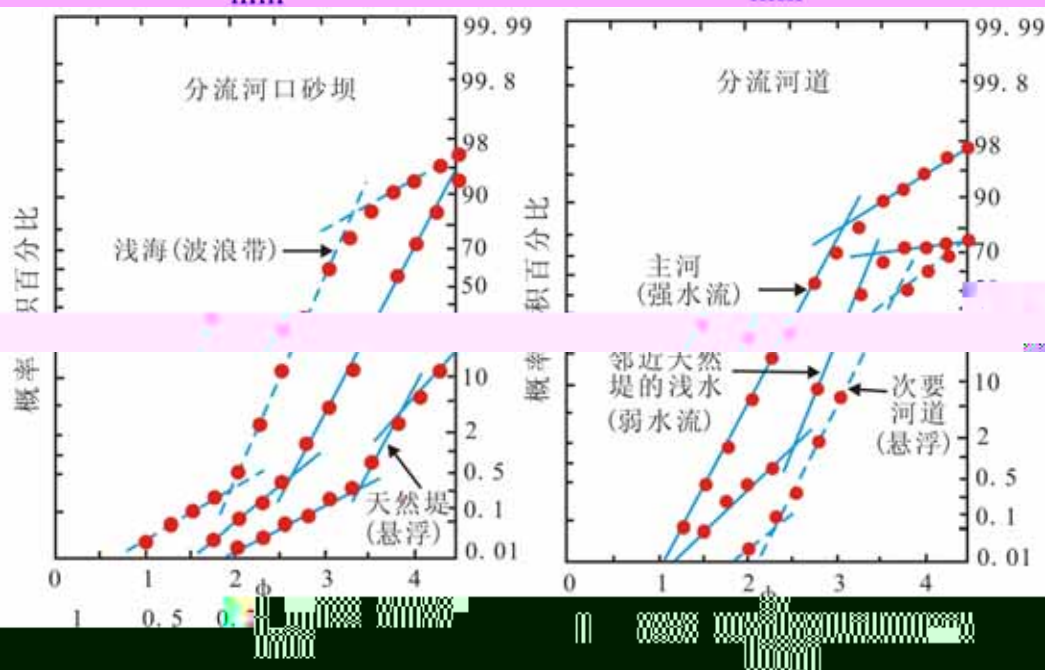
海滩砂的 粒度概率图

海滩沙丘砂的 粒度概率图





波浪带浅海砂 的粒度概率图

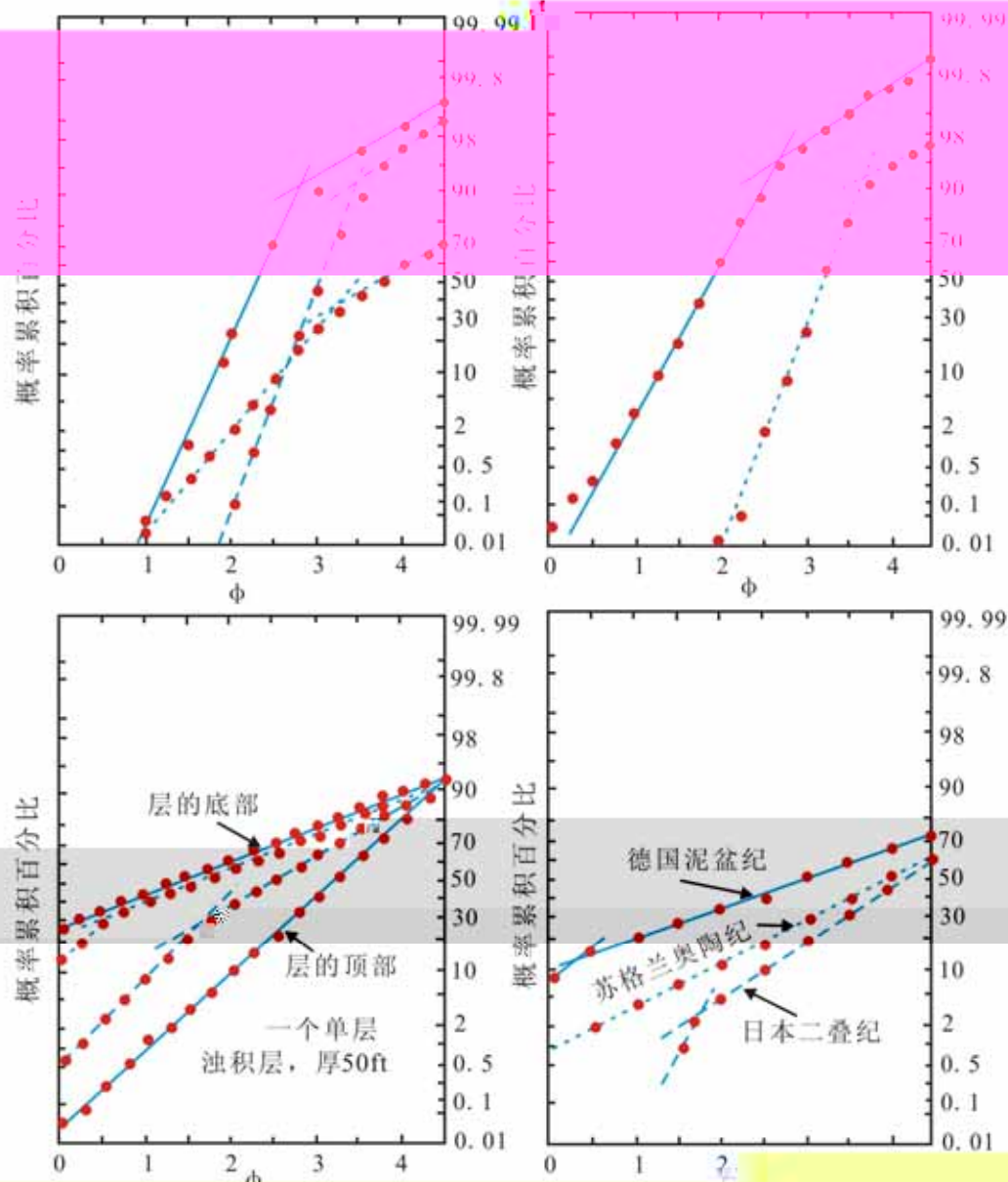


密西西比河三角洲 河口砂坝及河道砂 的粒度概率图



现代河道砂 的粒度概率图

浊流沉积的 粒度概率图





不同沉积环境砂质沉积物的粒度概率图特征

特征	跳 跃 组 分 (A)				悬 浮 组 分 (B)				滚 动 组 分 (C)				主要特征
	百分		C.T. F.T.		百分		A.B. F.T.		百分		C.T. A.C.		
	混合	(ϕ)	混合	(ϕ)	混合	(ϕ)	混合	(ϕ)	混合	(ϕ)	混合	(ϕ)	
(ϕ)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1~3 中等 中等	4.0~	0~2	差	1.0	少	跳跃组分含量较	风成沙丘	97	很好	1.2	3.0		
海 滩	很好	0~10	少	0~50	中	中等	跳跃组分含量最高						
35 好	2.0	3.0~	5~	中等	3.75~	0~	三种组分都有						
(河床)	2~	-1.0	~3.5	3.5	变化大, 以跳跃组	河流	65						
流	中	0~	30~	差	多	>4.5	0~40	中	无极限	多	赏吕志景遥解分	油	

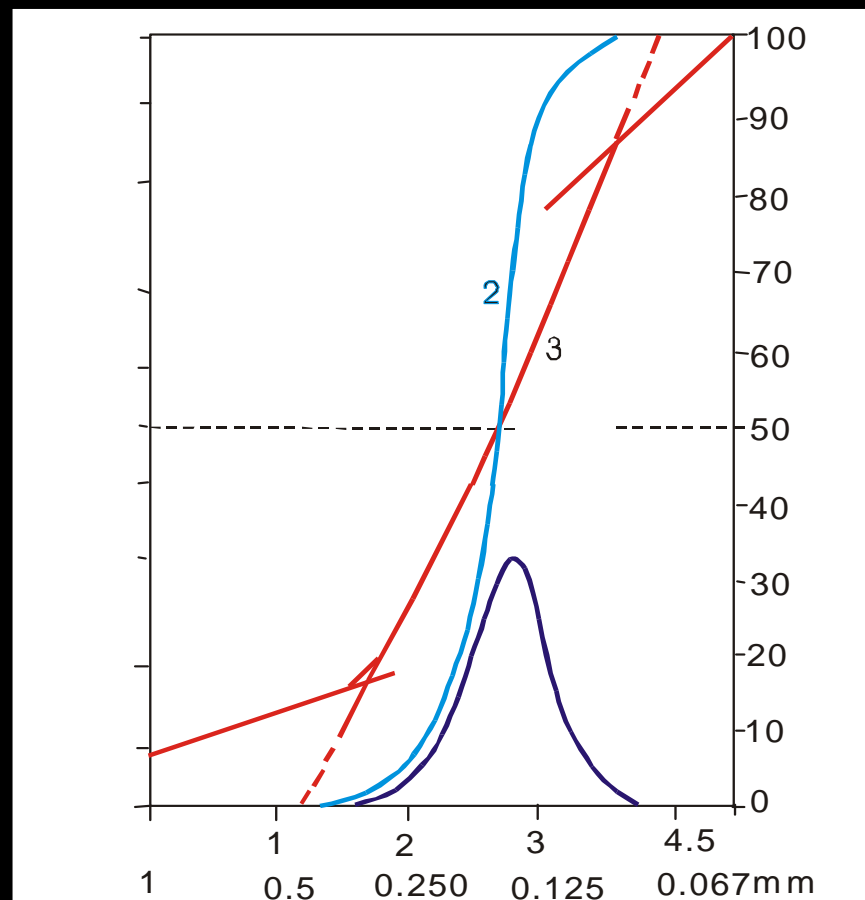
注: C.T.代表粗粒一端的切点; F.T.代表细粒一端的切点。

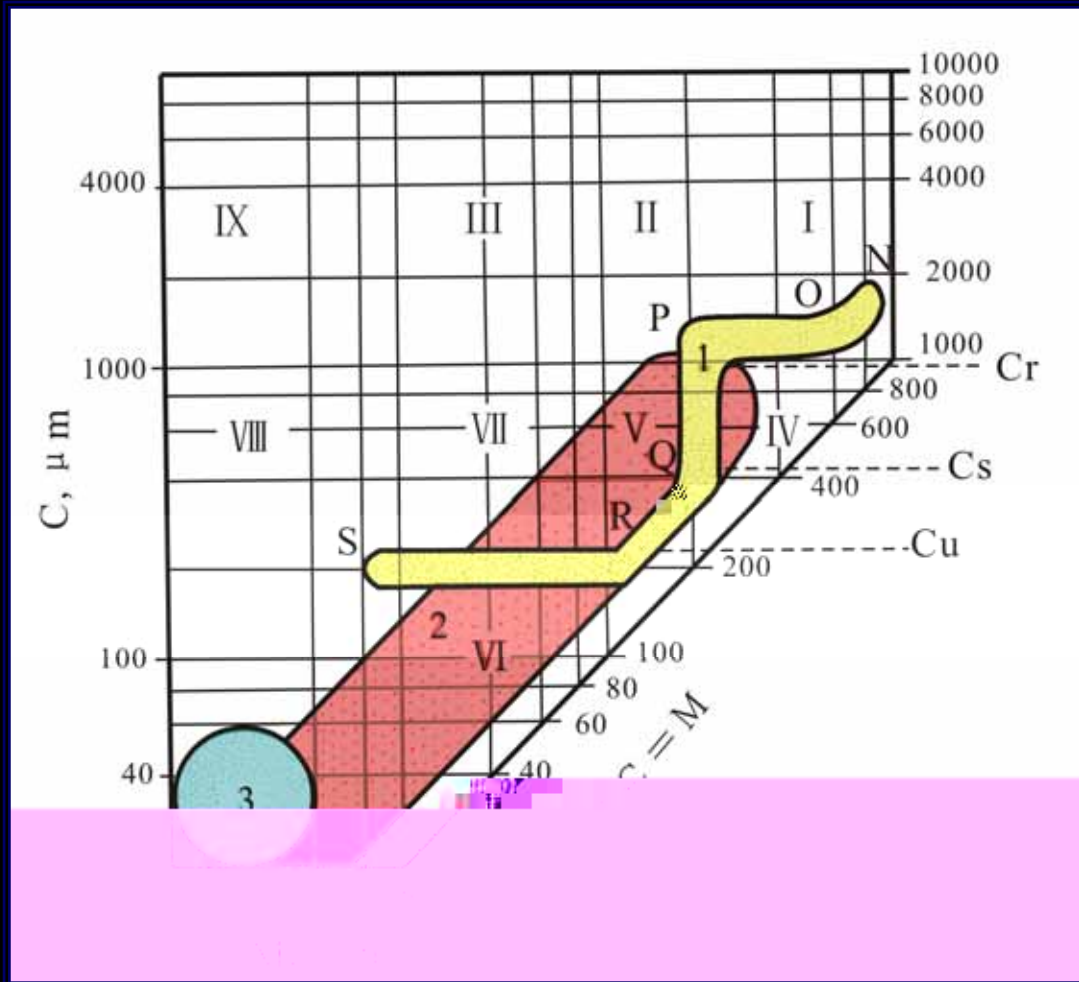


3. C-M图解

C-M图是应用每个样品的C值和M值绘成的图形。

C值是累积曲线上1%处对应的粒径，**C值**与样品中最粗颗粒的粒径相当，代表了水动力搅动开始搬运的最大能量。





1——牵引流沉积

2——浊流沉积

3——静水沉积

NO——滚动组分

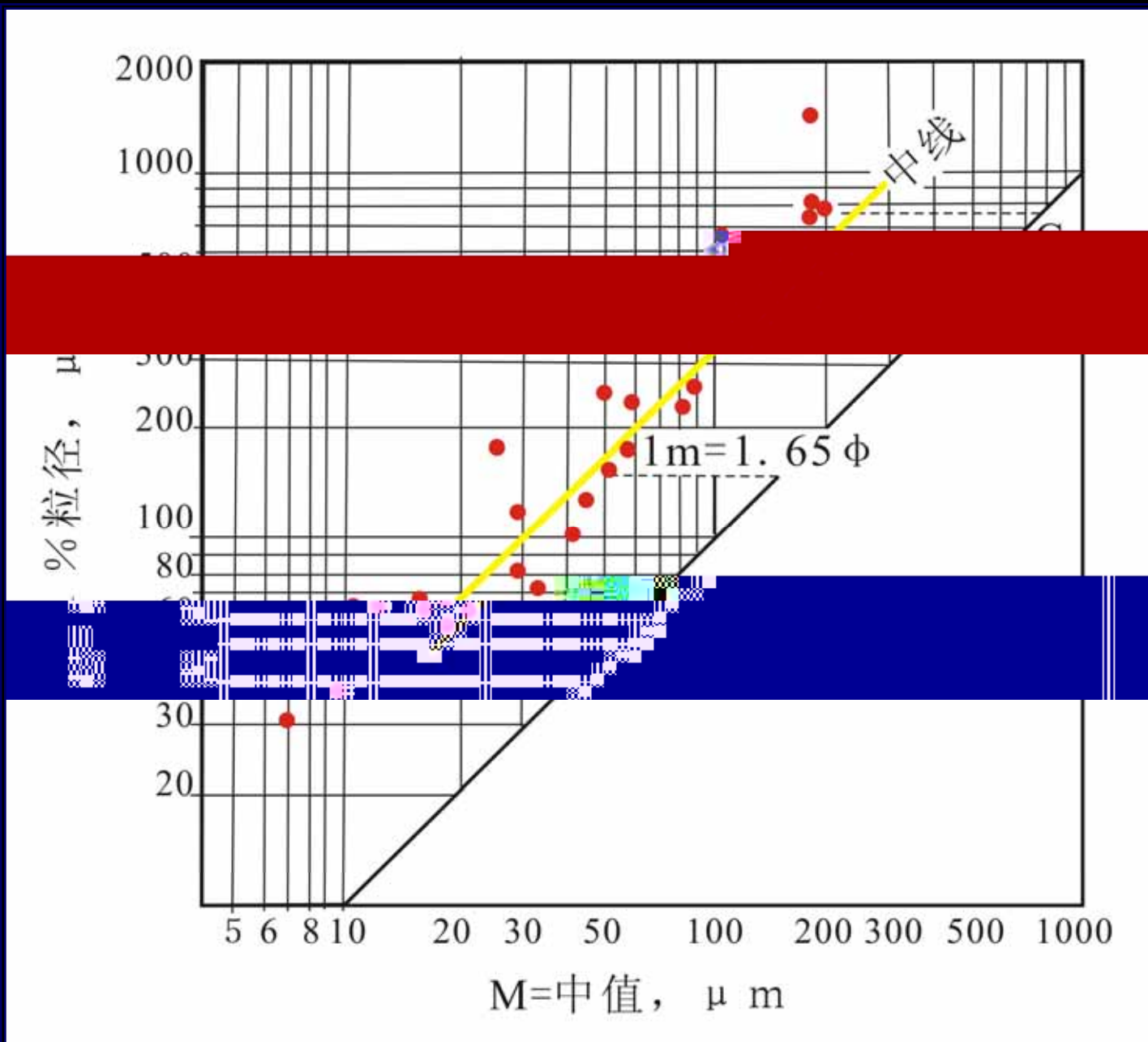
OP——滚动搬运为主

PQ——悬浮沉积为主

QR——递变悬浮沉积

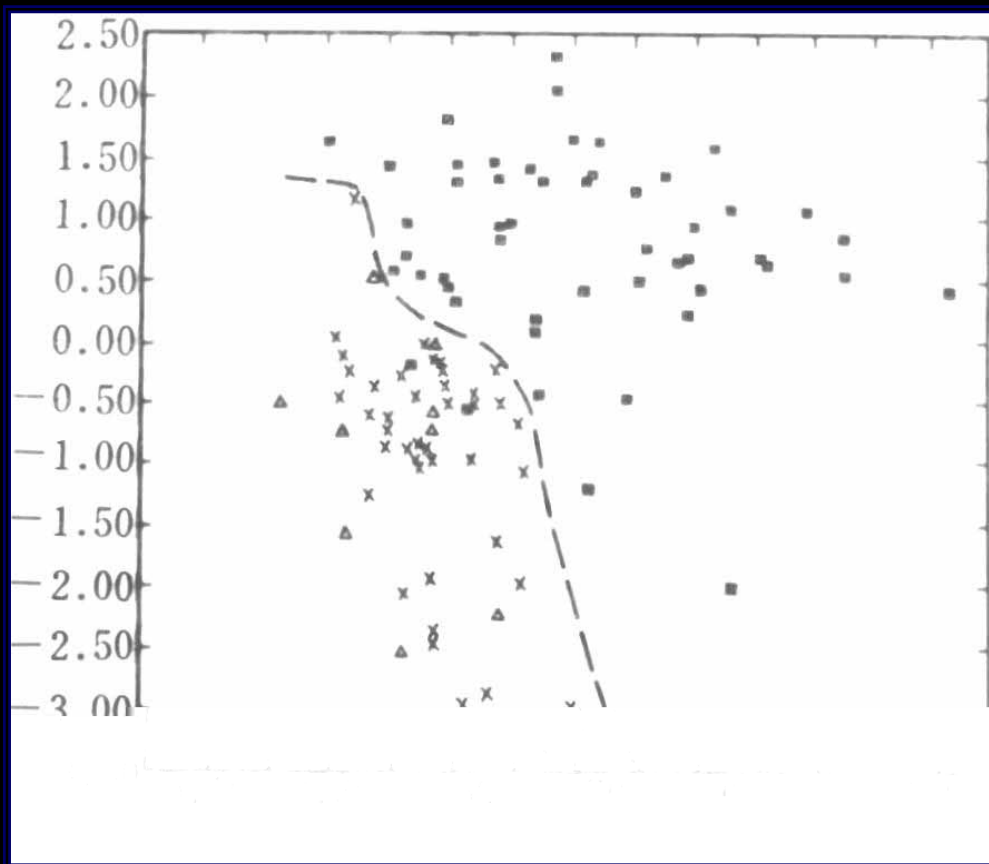
RS——均匀悬浮沉积

帕塞加 (Passeea, 1957, 1964) 的C-M图



油流沉积的C-M图

4. 结构参数散点图解



近年来有不少人应用已知环境的现代沉积物粒度参数作散点图，在图上划分出不同的环境范围，并以此来推断古代沉积物的沉积环境，取得了不少成果。



本节要点：

粒度的表示方法

碎屑岩的粒度分类和命名（重点）

球度与圆度的分级

杂基与胶结物的区别（重点）

杂基的分类、胶结物的结构分类



胶结类型与支撑结构的分类和二者间的关系

(重点)

结构成熟度的概念 (重点)

粒度分析资料的应用 (重点)