



## 第二节 碎屑物质的搬运和沉积作用

**Transportation and sedimentation  
of clastic**

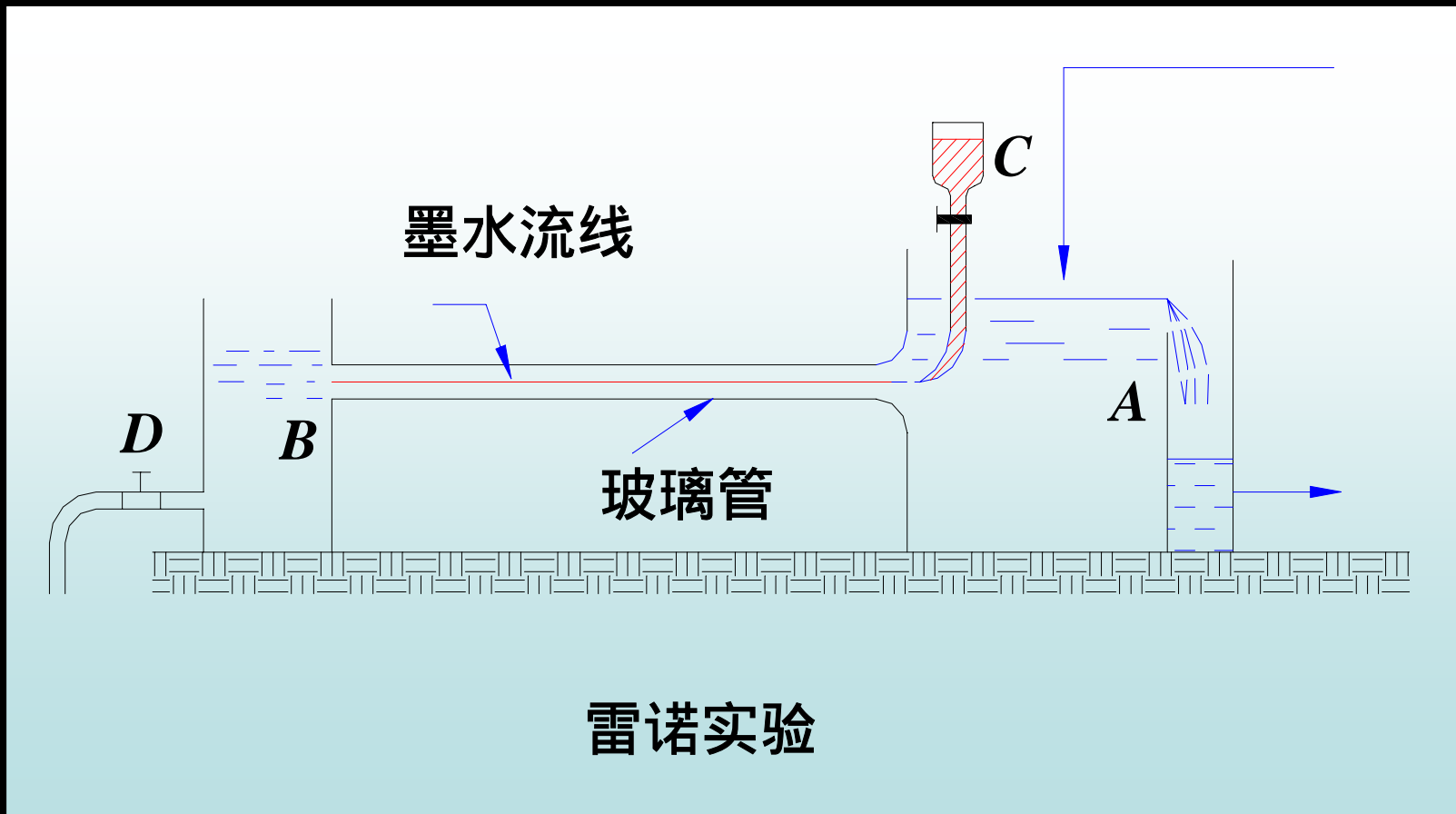


搬运和沉积碎屑物质的流体主要是**流水**和**大气**，在高寒地区的**冰川**和干旱地区的**风**也是搬运和沉积碎屑物质的营力。

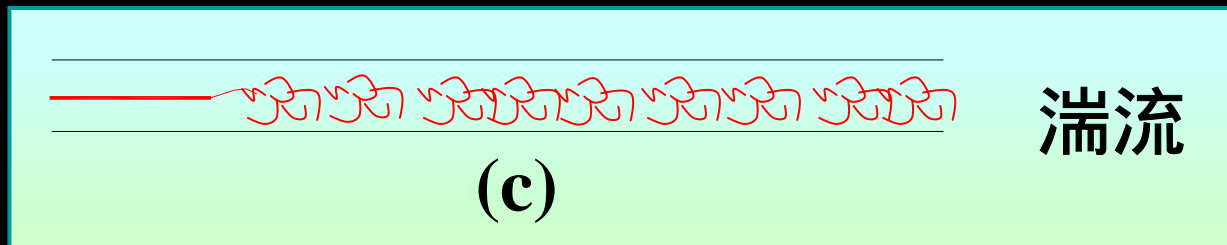
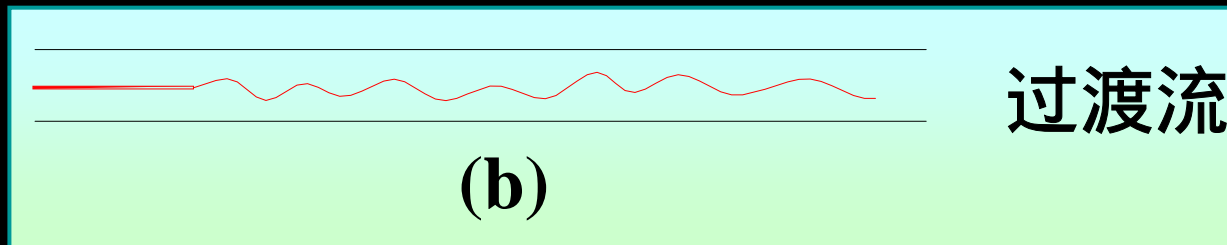
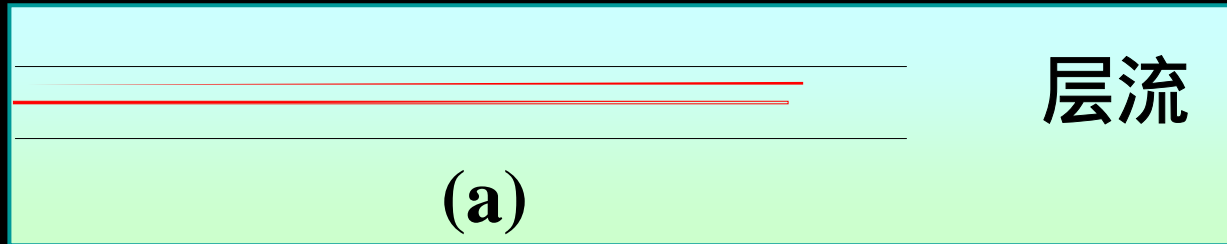
作为碎屑物质搬运和沉积的流体，自然界存在两种基本类型，即**牵引流**和**沉积物重力流**。

# 一、流体的一些基本知识和概念

## 1. 层流、紊流和雷诺数

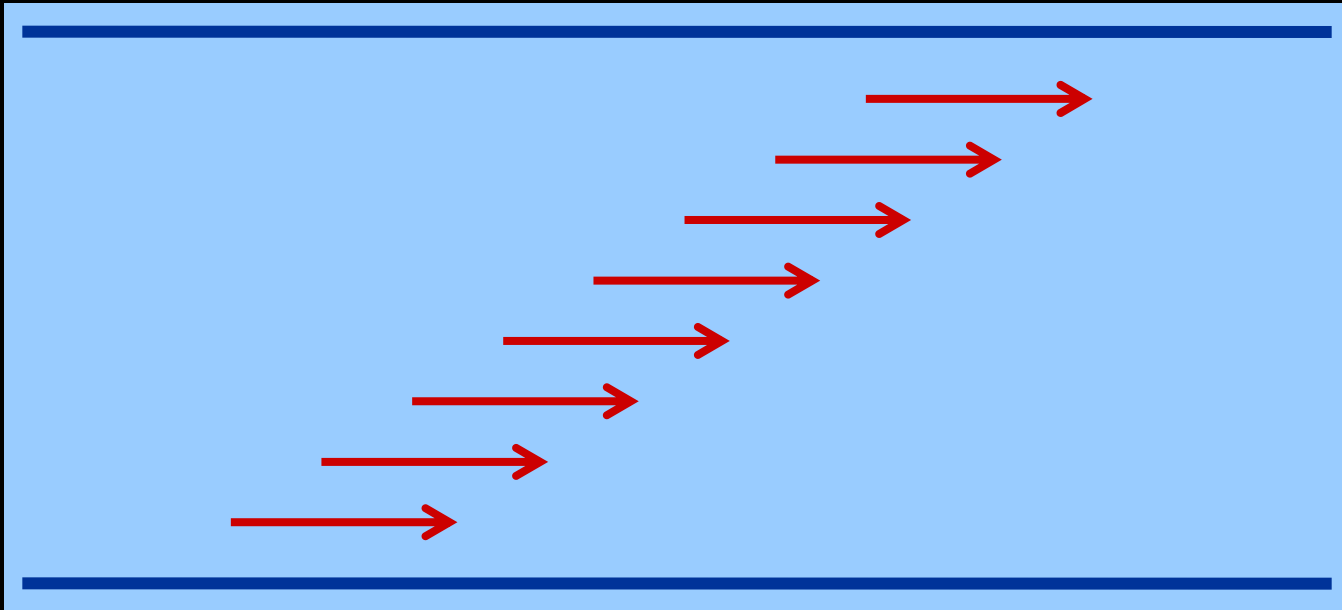


# 用红墨水观察管中水的流动状态

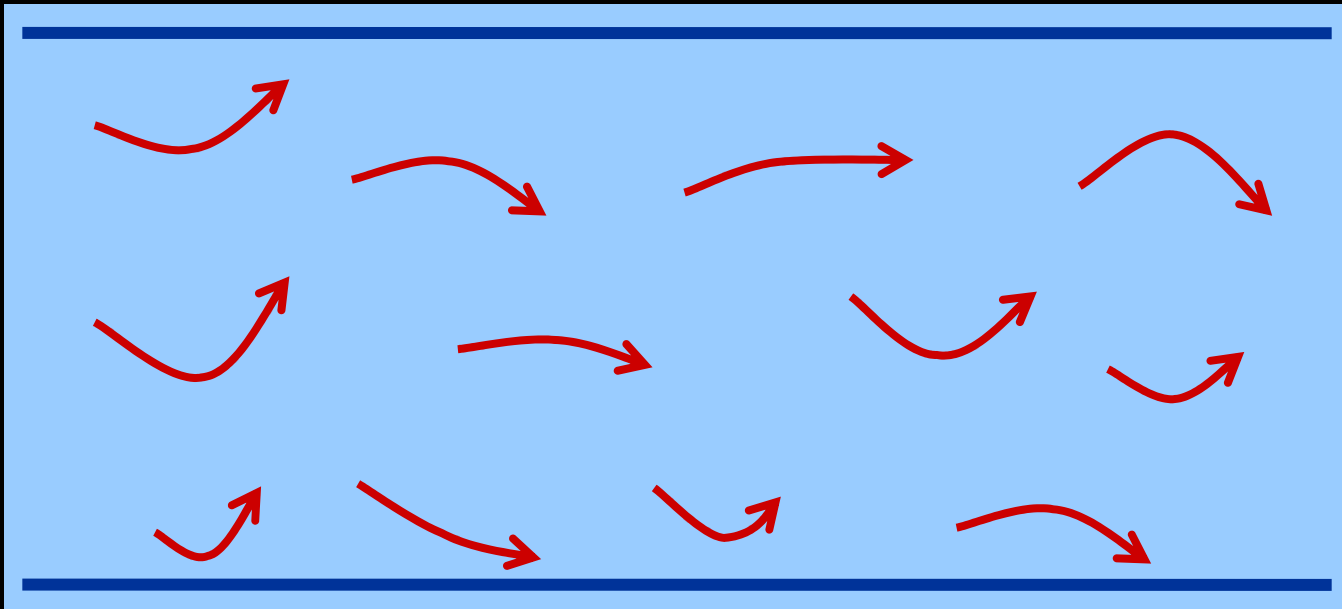


两种稳定的流动状态：**层流**、**湍流**

**层流** (laminar flow) : 一种缓慢流动的流体，流体质点作有条不紊的平行线状运动，彼此不相掺混。



**紊流** ( turbulent flow ) : 湍流 , 一种充满了漩涡的多湍流的流体 , 流体质点的运动轨迹极不规则 , 其流速大小和流动方向随时间而变化 , 彼此相互掺混。



英国学者雷诺 (O. Reynolds) 首先从实验室中观察到这一物理现象，用不同管径的管道和不同流体进行试验，获得了一个判别层流与紊流的准则，称为雷诺数 (Reynolds Numbers)

$$\begin{aligned} \text{雷诺数 (Re)} &= \text{惯性力} / \text{粘滞力} \\ &= \frac{V^2 d^2}{\nu d} = \frac{V d}{\nu} \end{aligned}$$

$V$ —水的流速

$\rho$ —水的密度

$d$ —颗粒直径

$\mu$ —动力粘滞系数

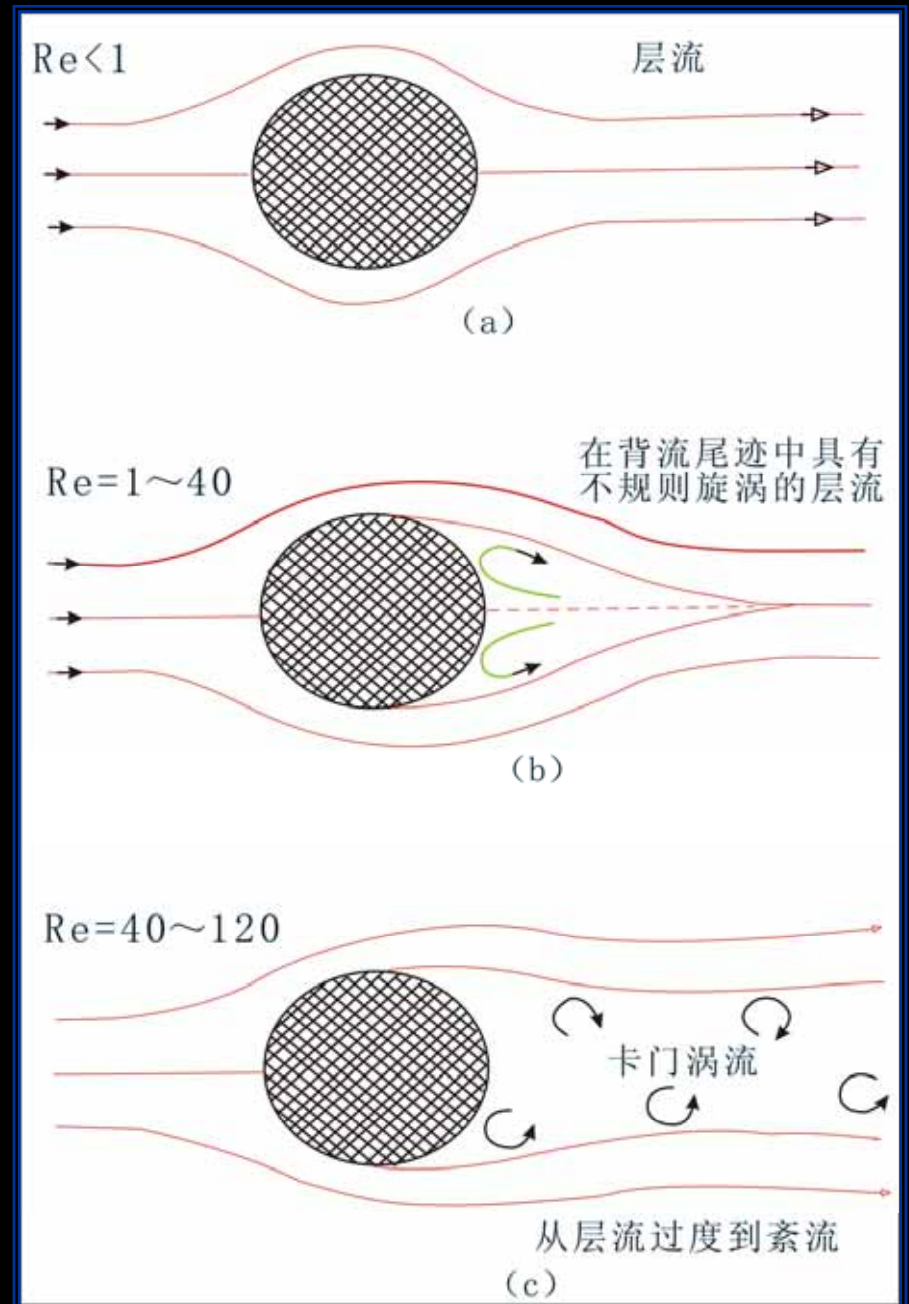
◆  $Re = 1$  时，流动呈层流

◆  $Re = 1 \sim 40$  时，在颗粒

背后会出现背流尾迹

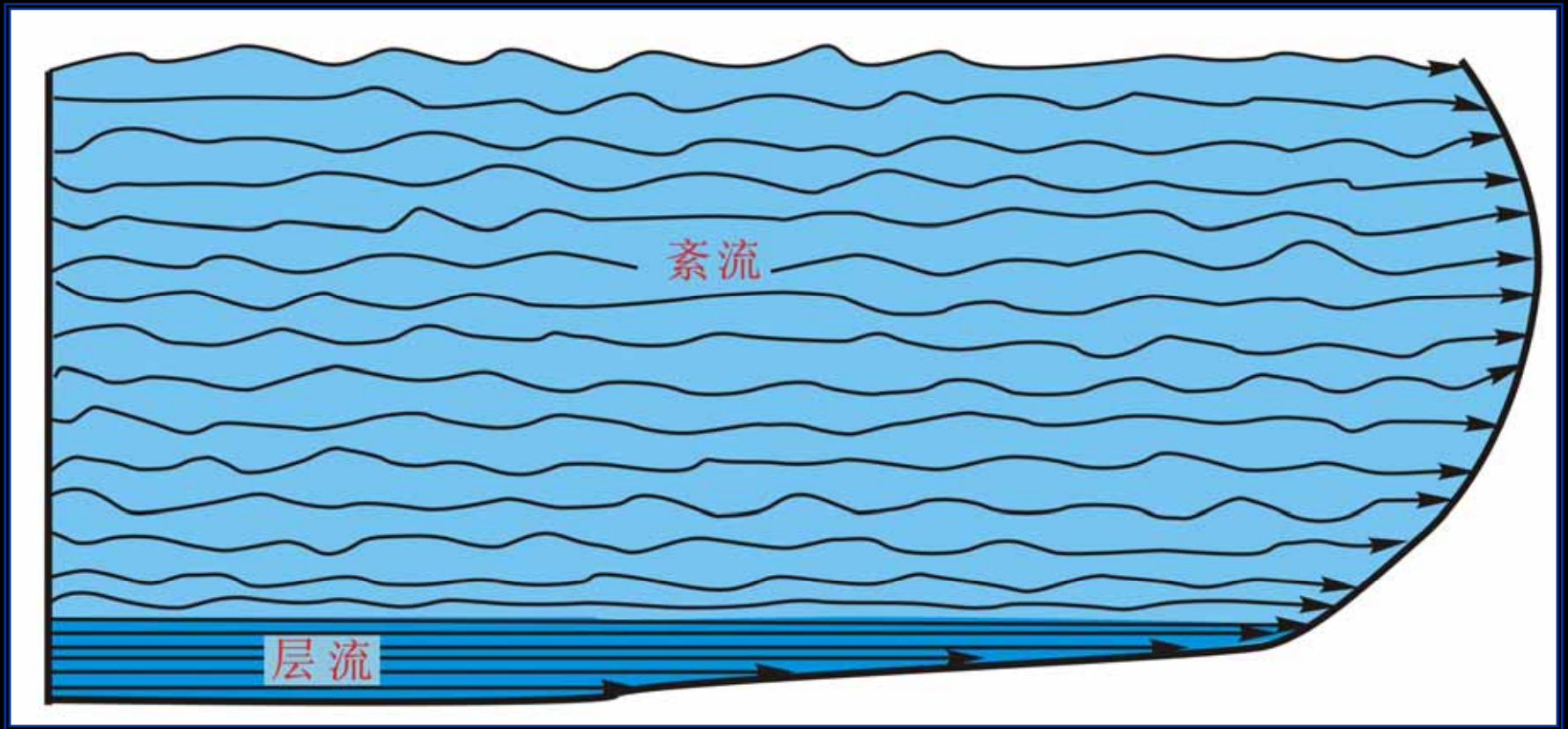
◆  $Re > 40$  时，出现“卡门

涡街”，紊流（涡流）





# 自然界中绝大多数水体是紊流运动



## 2. 急流、缓流和佛罗德数

根据佛罗德数（Froude Numbers）数，明渠水流可分为急流、缓流和临界流三种状态。

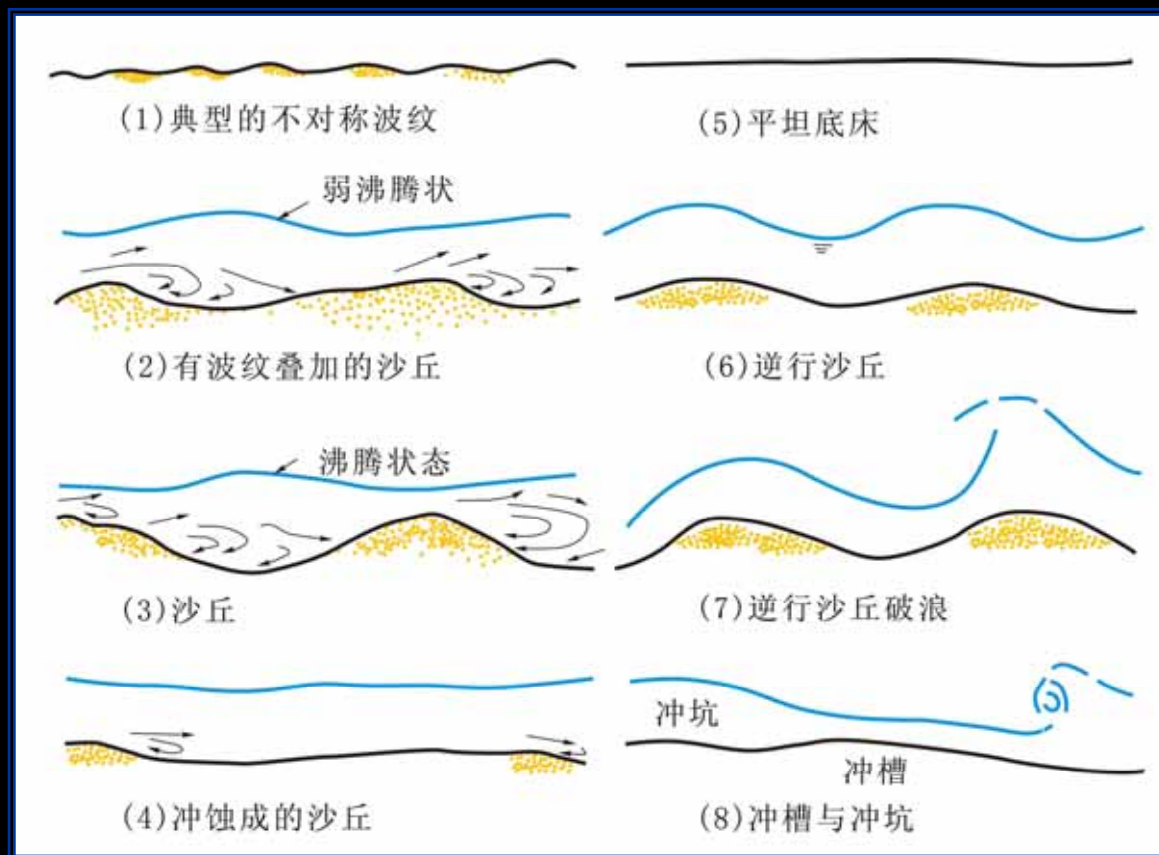
佛罗德数  $Fr = \text{惯性力} / \text{重力} = V^2 / Lg$

大多数工程技术人员把这一数值的平方根当作佛罗德数，即

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{Lg}}$$

- ◆  $Fr > 1$ ，急流，超临界流，水浅流急
- ◆  $Fr = 1$ ，临界流
- ◆  $Fr < 1$ ，静流，缓流或临界以下的流动，水深流缓

床沙表面可随水流强度变化而出现各种类型床沙形体，组成床沙的砂砾颗粒的滚动、滑动或跳跃移动使床沙形体发生顺流或逆流移动，这种现象在水力学中称为沙波运动。





### 3. 牛顿流体和非牛顿流体

◆ **牛顿流体** (Newtonian fluid) : 服从牛顿内摩擦定律的流体, 如**牵引流**。

◆ **非牛顿流体** (Non-Newtonian fluid) : 不服从牛顿内摩擦定律的流体, 如**沉积物重力流**。

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

其中：  $\tau$  —粘滞切应力（单位面积上的内摩擦力）

$u$  —流体速度，

$y$  —由底部起计算的距离（流体两滑动面之间的）

$du/dy$  —流体梯度（剪切变形率）

$\mu$  —动力粘滞系数

- ◆在温度不变的情况下，随着 $du/dy$ 的变化， $\mu$ 值始终保持一常数，则为服从内摩擦定律。
- ◆在温度不变的情况下， $\mu$ 值随着 $du/dy$ 的变化而变化，则为不服从内摩擦定律。



## 4. 两种流体及其搬运和沉积作用方式

◆ **牵引流** ( Traction current ) : 符合牛顿流体定律的流体。其搬运机制是流体动能**拖曳牵引**沉积物一起运动, 如河流、风流和波浪流等。

◆ **沉积物重力流** ( Gravity flow ) : 在**重力**作用下发生流动的弥散有大量沉积物的高密度流体。

● **牵引搬运（牵引作用）**：能使碎屑物质作底负载移动的各种作用。

● 牵引流的搬运力包括：

① **推力（牵引力）**与流速有关

② **载荷力（负荷力）**与流量有关

**推力大不一定负荷力大，反之亦然。**

● 牵引流搬运方式：

**溶解载荷、悬移载荷、推移载荷（床沙载荷）**

● 重力流搬运的驱动力主要起因于**重力**

## 二、搬运和沉积作用

### 1. 碎屑物质在流水中的搬运和沉积作用

Transportation and sedimentation of clastic materials in water flow

碎屑颗粒在流水中的搬运和沉积，主要与水的流动状态（是层流还紊流，是急流还缓流）关系密切；还与碎屑颗粒的本身特点（大小、相对密度和形状等）有关。



## (1) 搬运方式

推移搬运（滚动搬运，包括跳跃搬运）

悬浮搬运（悬移搬运）

## (2) 机械沉积作用

处于搬运状态的碎屑物质，在一定的条件下，主要是当流水的动力不足以克服碎屑的重力时，碎屑物质就会沉积下来。



碎屑物质在静水中下沉情况可用**斯托克实验公式**表示（G.G.Stokes，1850）：

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{d_1 - d_2}{\mu} \cdot g r^2$$

（适用于粒径 $<0.1\text{mm}$ 的球形颗粒）

其中： $v$ —颗粒下沉速度（ $\text{cm/s}$ ），  
 $d_1$ —颗粒密度  
 $d_2$ —水介质密度，  
 $g$ —重力加速度（ $980\text{cm/s}^2$ ），  
 $r$ —颗粒半径（ $\text{cm}$ ）  
 $\mu$ —水介质粘度

# ①碎屑颗粒在静水中下沉速度与颗粒半径平方成正比

细碎屑颗粒在清洁的净水中的下沉速度 ( mm/s )

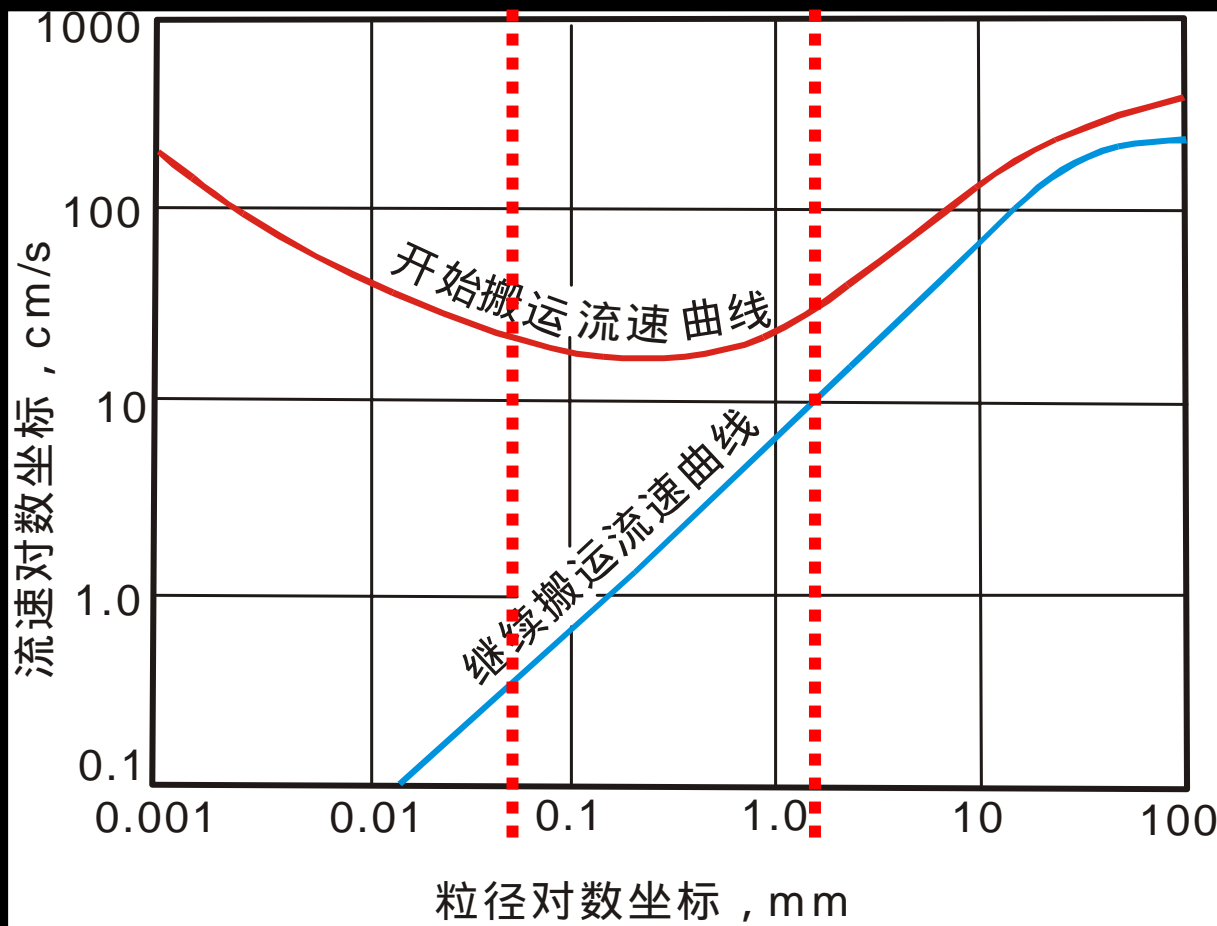
极细砂	>3.84	中粉砂	0.96~0.24	极细粉砂	0.06~0.015	中粘土	0.00375~0.0009375
粗粉砂	3.84~0.96	细粉砂	0.24~0.06	粗粘土	0.015~0.00375	细粘土	<0.0009375

极细砂下沉30m约需2小时，而细粘土则约需1年；如下沉3000~4000m，极细砂约需10天，细粘土则约需100年。

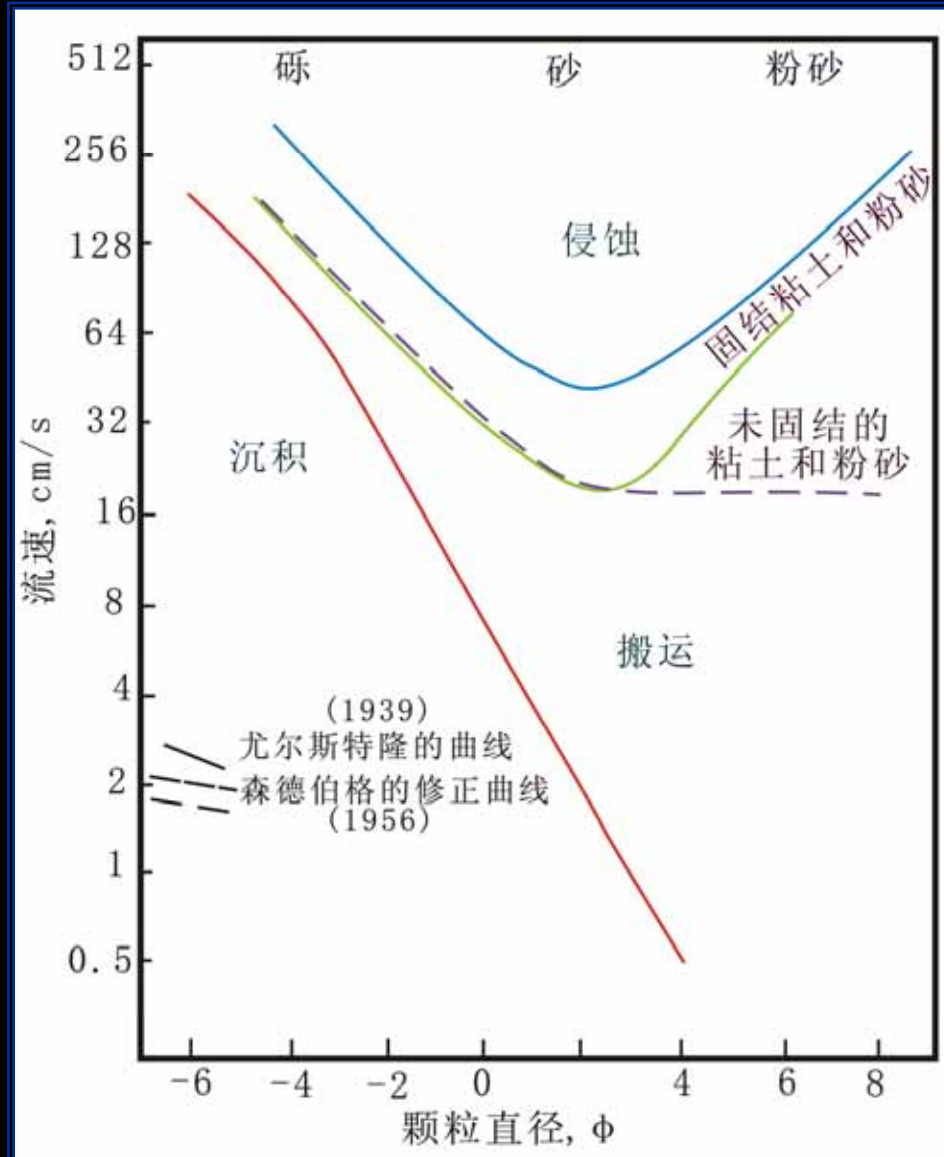


- ②碎屑颗粒在静水中下沉速度与其相对密度成正比；
- ③斯托克公式是在假定颗粒为球形的情况下求得的，假如颗粒不是球形，其沉速有所不同。实验证明，假设球形颗粒的沉速为100，则椭球形颗粒的沉速为84 ~ 61，立方体为74，长柱体为50，片状颗粒为80 ~ 38；
- ④斯托克公式只有在静水或层流条件下才适用。

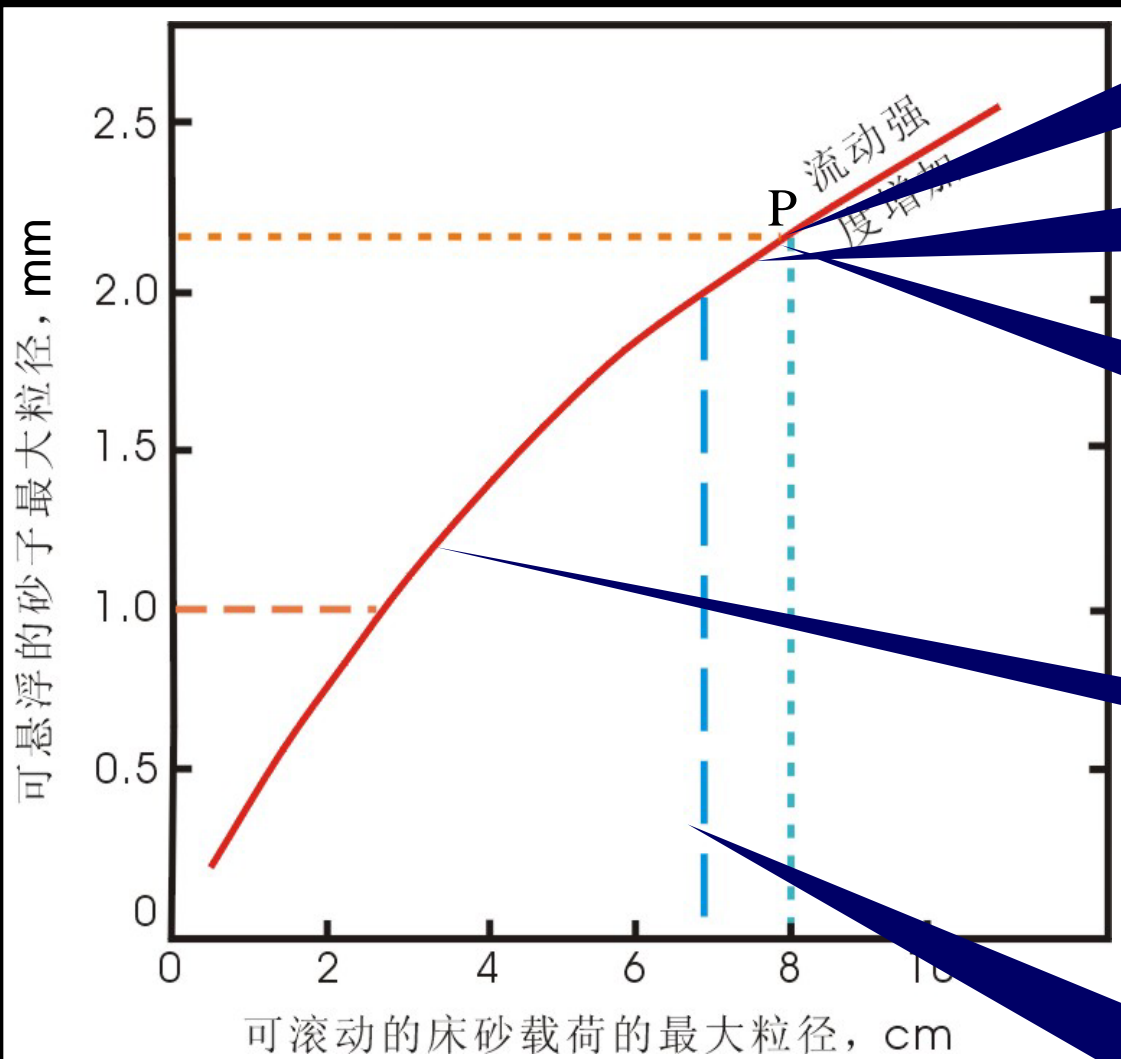
碎屑物质在流水中的搬运和沉积，流速和颗粒大小之间的关系最为关键。



尤尔斯特隆图解



经森德伯格 (Sundborg, 1956) 修改过的尤尔斯特隆图解



当流动强度为P时，它所能滚动的砾石最大粒径为8cm，同时所悬浮的颗粒最大粒径为2.2mm。

当流动强度略小于P时，可使粒径为8cm和2.2mm的砾石同时沉积，从而形成双众数的砾岩。

当流动强度在P附近反复变动时，则可能形成粗、细砾石沉积的互层，其平均粒度分别为8cm和2.2mm。

如果流动强度急剧减少，则可能造成分选极差的多众数的砾、砂、粉砂和泥的混合沉积物。

沉积1mm砂粒所需的流动强度比沉积7cm砾石所需强度小得多，故在平均粒度为7cm的砾石沉积的孔隙中所充填1mm的砂，不可能是同时沉积物。

沃克 (Walker, 1975) 的图解

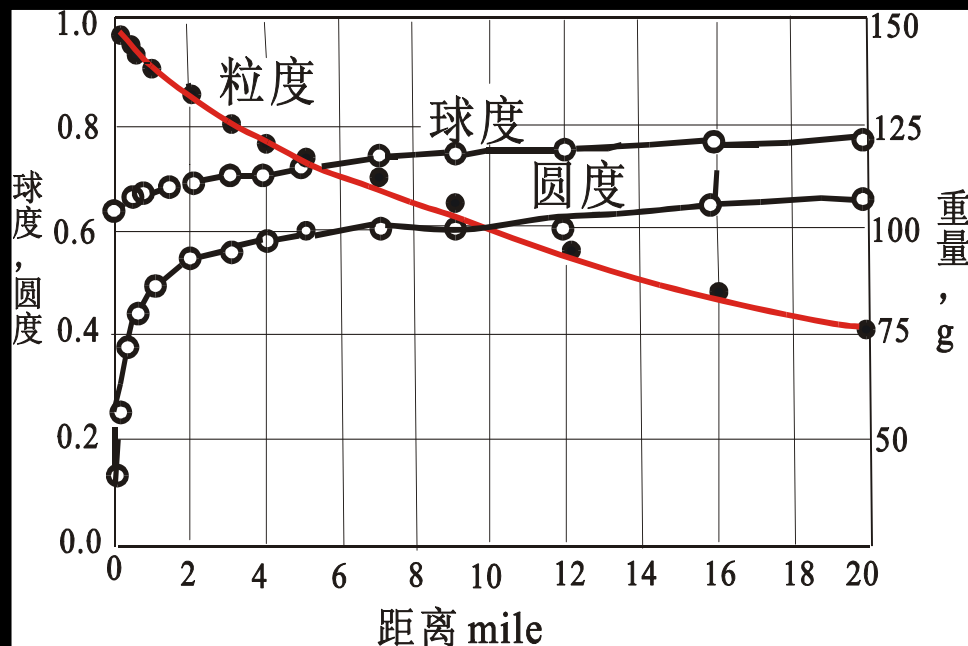
### (3) 碎屑物质在流水搬运过程中的变化

① **成分**：不稳定组分逐渐减少，稳定组分则相应增加，同其它组分也就变得更加简单了。

② 碎屑颗粒**粒度**逐渐变小

③ 碎屑颗粒的**圆度**逐渐变好

④ 碎屑颗粒的**球度**也有所增高

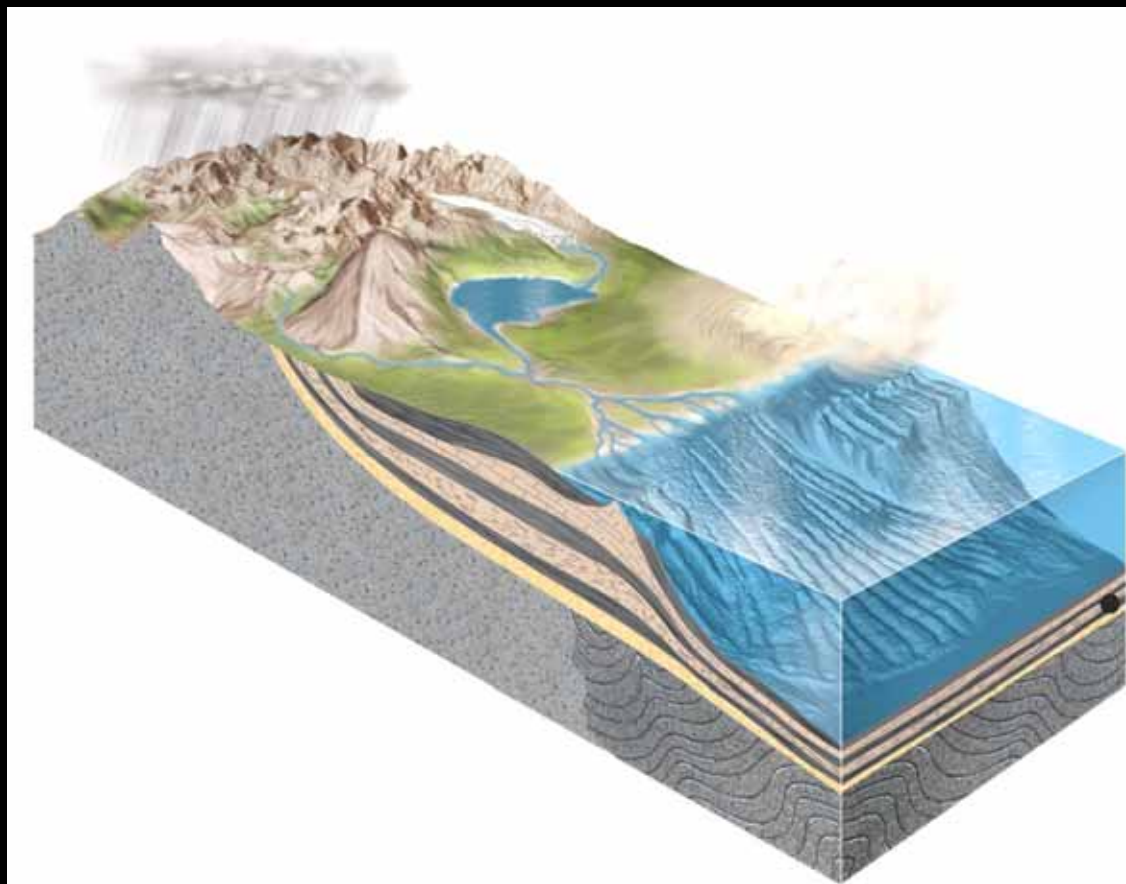




## 2.碎屑物质在海水、湖水中的搬运和沉积作用

Transportation and sedimentation of clastic materials in sea and lake water

陆地表面流水搬运的碎屑物质，大部分都注入海洋，其次是湖泊。海、湖是流水搬运碎屑物质的最终场所。



# (1) 碎屑物质在海水中的搬运和沉积作用

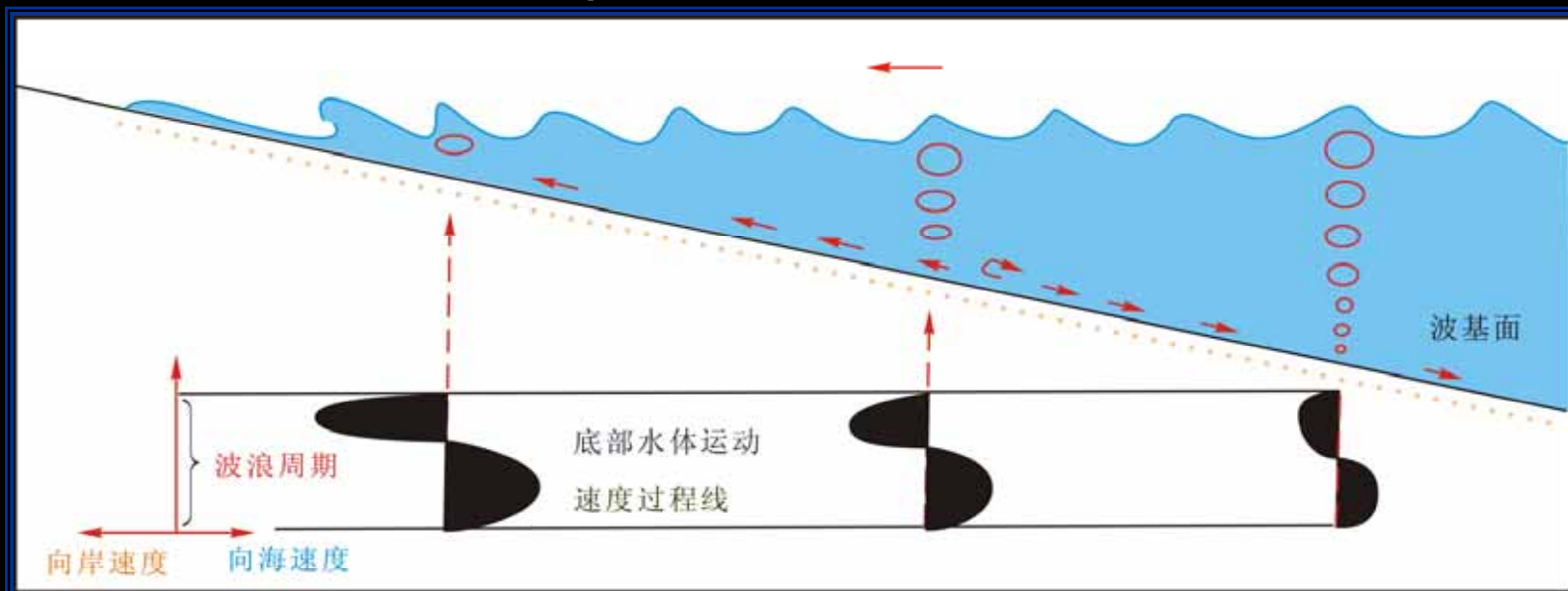
① **波浪**主要由风引起，波浪的大小主要取决于风的大小。



◆ **波基面**（浪底）（wave base）——波浪作用的下限，即波浪所影响的最大深度。

◆当波浪运动的方向与海岸垂直，而海底又位于浪底之上时：

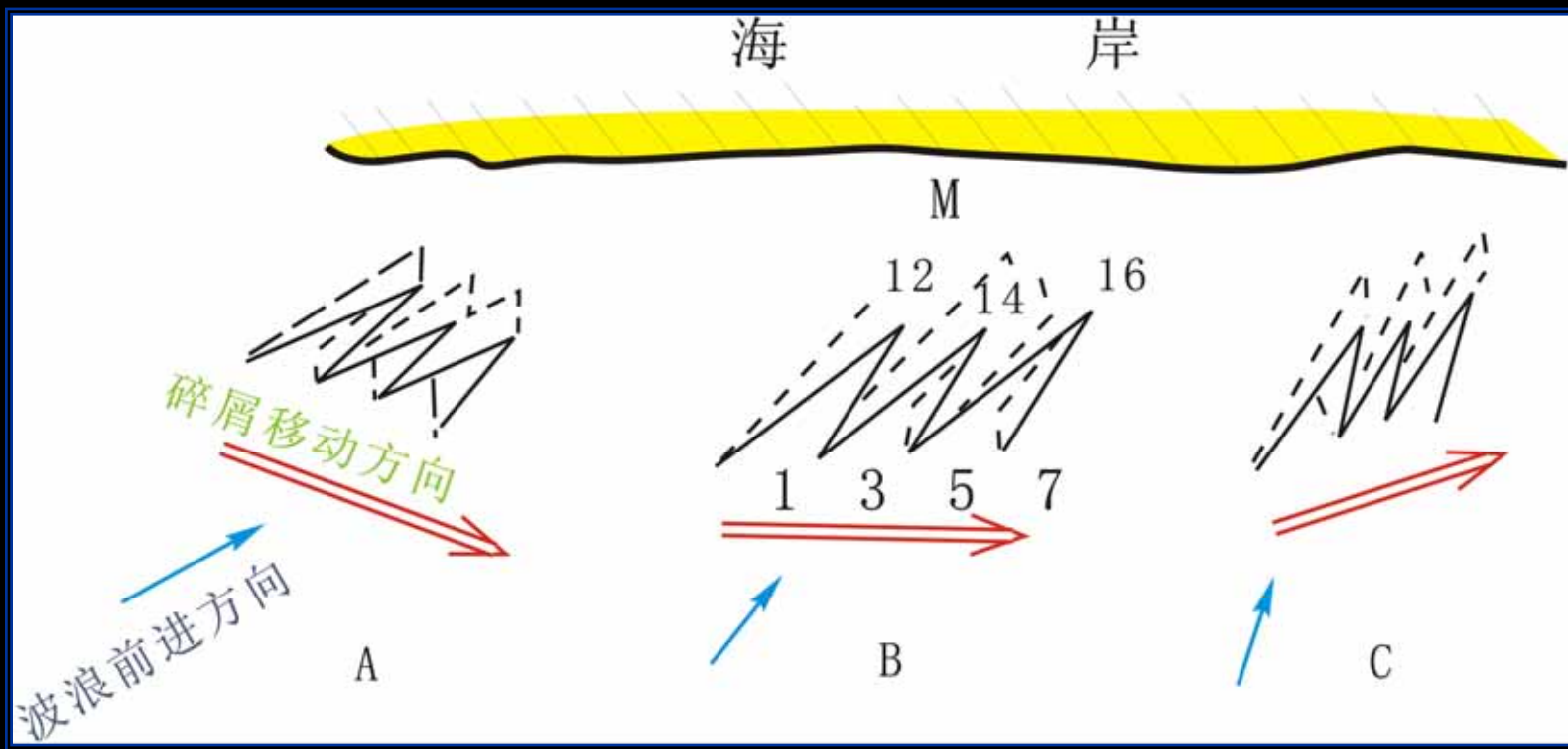
- 远离海岸深水区：碎屑往返运动、向海方向运动；
- 近岸浅水区：碎屑作往返运动、向岸方向运动；
- 在二者之间的区域，碎屑只作往返运动。



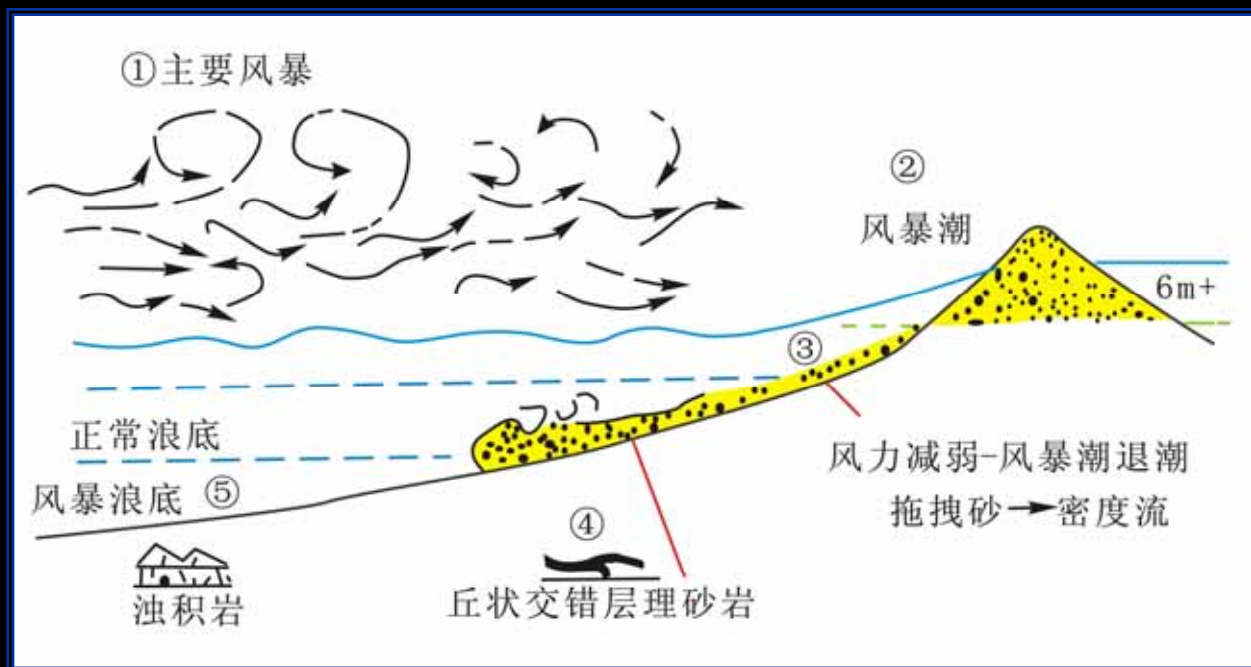
波浪底部水体运动、粗细物质分布及其与坡降的关系（据任明达，1985）

表面波向岸传递，总趋势是沉积物向海搬运。

◆如果波浪不垂直海岸，而与海岸斜交，则海底碎屑运动的路线呈更加复杂的“之”字形。其最大特点是波浪作用力方向与重力沿岸分力作用的方向不一致，而使物质沿着二者合力方向移动。



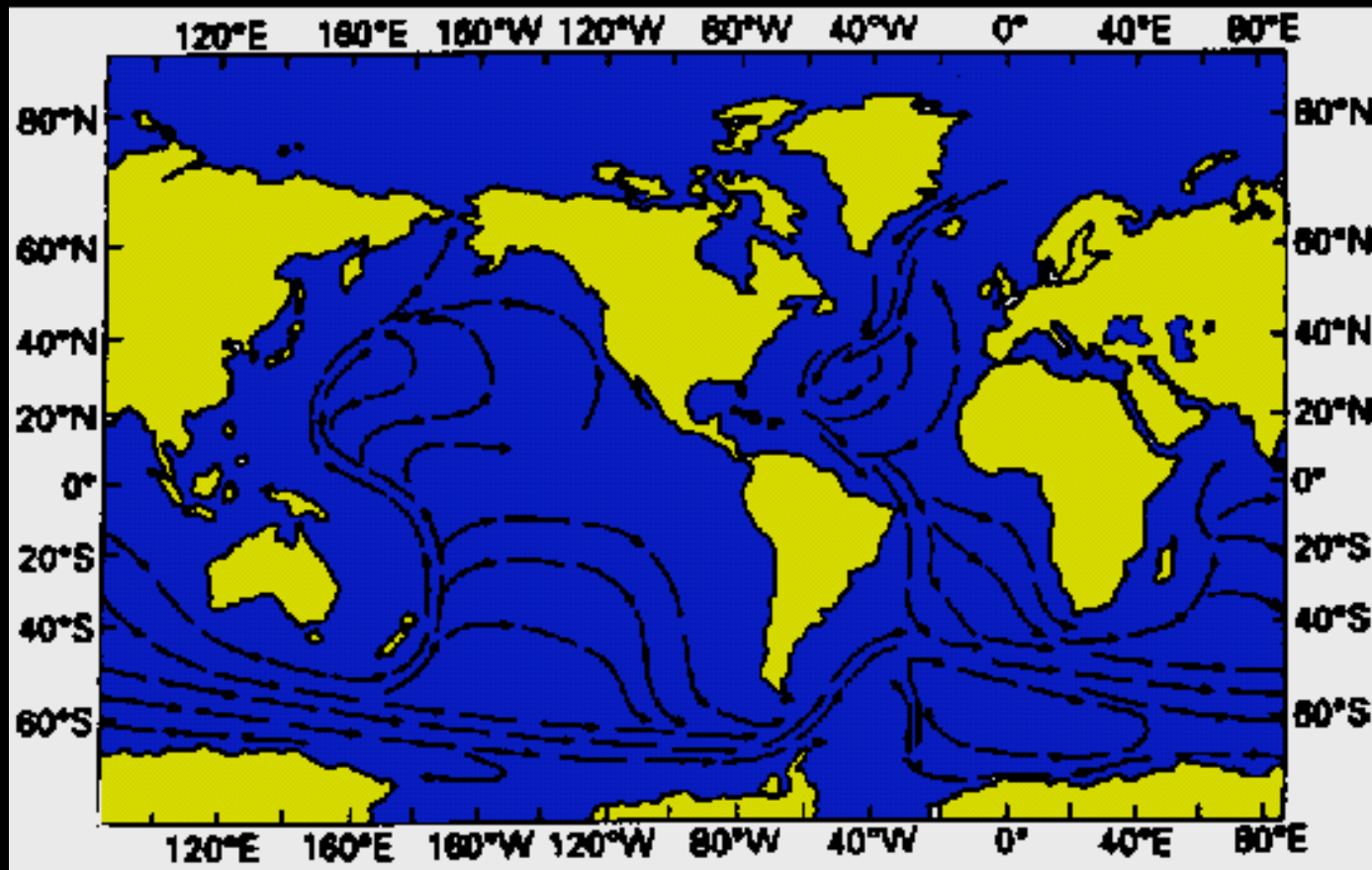
◆ 阵发性的风暴浪将浅海沉积物卷起而重新搬  
离或搬向海岸，形成**风暴沉积物**。



② **潮汐**作用对滨岸地区的碎屑物质影响很大，在潮汐作用带，水体作大规模地涨潮和落潮运动，因此也使水底的碎屑物质作相应的往返运动。



③近岸地带的海流或深海浊流、等深流、内潮流流、冷流、暖流、赤道洋流和上返洋流等对碎屑物质的搬运和沉积均有一定的作用。





## 海水中搬运和沉积的碎屑物质特点：

在波浪、潮汐的作用下，碎屑物质长时间往复运动（海水对颗粒间的溶蚀、颗粒与海底间的碰撞与磨蚀、颗粒间的碰撞和磨蚀），其成熟度（成分、粒度、圆度等）比陆相环境中的碎屑物质高得多，沉积分异也进行得较为彻底。



## (2) 碎屑物质在湖水中的搬运和沉积作用

与海洋相比，湖泊面积小，缺乏潮汐作用，因此，波浪和湖流是湖泊中搬运和沉积碎屑物质的主要营力。

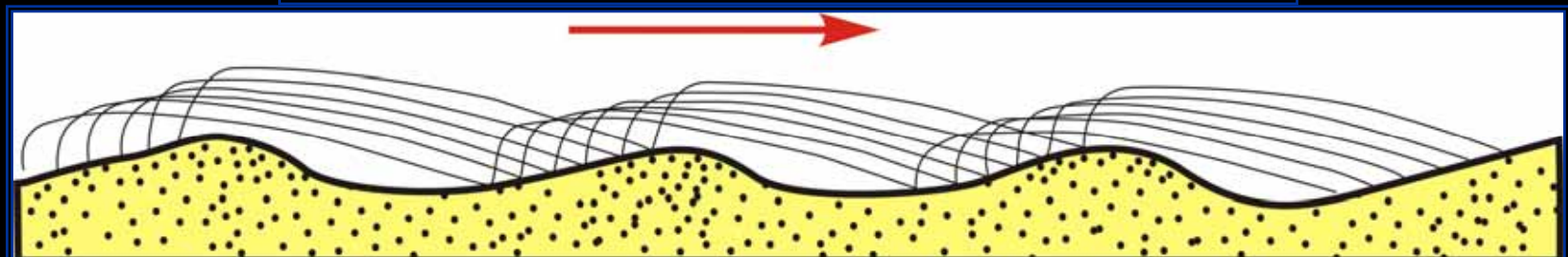
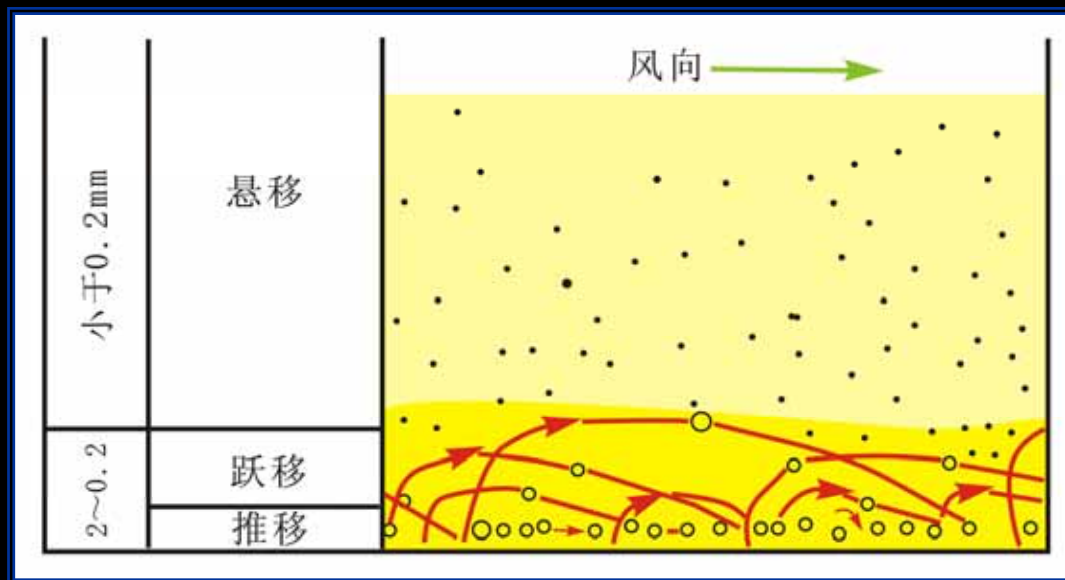


### 3.碎屑物质在空气中的搬运和沉积作用

Transportation and sedimentation of  
clastic materials in air

- 在干旱地区，风的搬运和沉积作用是主要的
- 风是碎屑物质在空气中搬运和沉积的主要营力
- 空气只能搬运碎屑物质，而不能搬运溶解物质

◆在正常地面条件下，搬运方式以**跳跃**为主（70~80%），其次是**蠕动**（<20%），而**悬浮**极少（<10%）。在一般情况下，搬运方式与粒度之间关系相当稳定。风力搬运的最大特点是碎屑呈**弓形弹道轨迹**前进。





## 风的搬运及沉积作用特点：

- ① 搬运能力远比水小，同样的速度下，风的搬运能力约为流水的 $1/300$ ，因此，风一般只能搬运较细粒的碎屑物质。
- ② 风的搬运能力有限，选择性较强，因此风成沉积的粒度分选性较好。
- ③ 空气密度小，颗粒碰撞磨蚀导致其圆度较好，常具霜状表面。



# 常见的风成沉积是各种沙丘和黄土



## 4.碎屑物质在冰川中的搬运和沉积作用

Transportation and sedimentation of clastic materials in glacier

◆ 在寒冷的两极地区和高寒山区，冰川的搬运及沉积作用是主要的。





昆仑山雪线（海拔4400m）及冰川（摄于花土沟尕斯湖畔）



## ◆冰川的搬运与堆积

**冰碛物**—冰川携带的碎屑物质

冰川具有巨大的搬运能力



南极大陆冰盖



# ◆冰碛物的基本特征：

结构疏松，大小混杂，分选极差；

冰碛物中砾石磨圆极差；

一般缺乏层理构造。





# 本节要点：

- 层流与紊流、急流与缓流划分的依据（难点）
- 流水搬运碎屑物质的方式
- 尤尔斯特隆图解的含义（重点）
- 沃克图解的含义
- 浪基面的概念
- 碎屑物质在流水中的搬运和沉积作用（重点）
- 碎屑物质在海水、空气和冰川中的搬运和沉积作用