



第二节 物理成因的沉积构造

Physical genetic structures



一、流动构造（current structures）

（一）波痕（重点）

（二）冲刷痕

（三）压刻痕

（四）其它表面痕迹

（五）层理（重点）

（六）叠瓦状构造



流动构造系指沉积物在搬运和沉积时，在**流体（主要是水和空气）的流动**作用下形成的构造。

有的是以**沉积作用**为主在沉积物表面或内部形成的构造，例如波痕、层理等。

有的则是在**侵蚀作用**下形成的表面构造，如冲刷痕和压刻痕。



(一) 波痕 (ripple mark)

常见的波痕是风、水流或波浪等在非粘性的砂质沉积物表面运动所形成的一种波状起伏的层面构造。





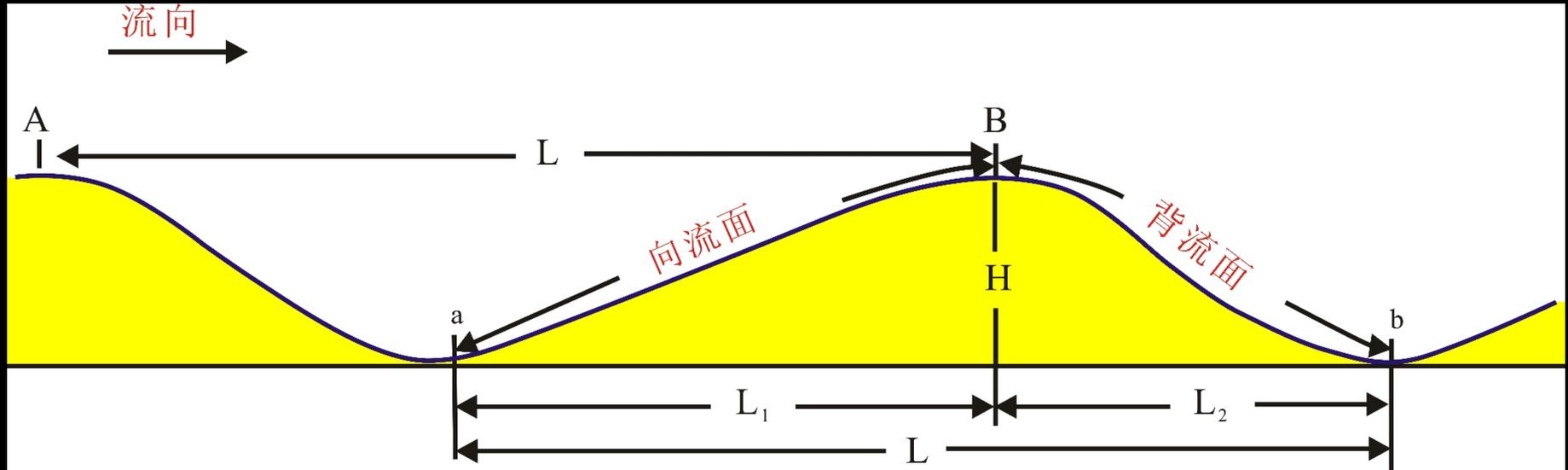
波痕要素

波长 (L) —两个相邻波峰或波谷之间的水平距离

波高 (H) —波峰与波谷之间的高差

波痕指数 (RI) = L/H , 表示波痕相对高度及起伏情况

不对称指数 (RSI) = L_1/L_2 , 表示波痕的不对称程度





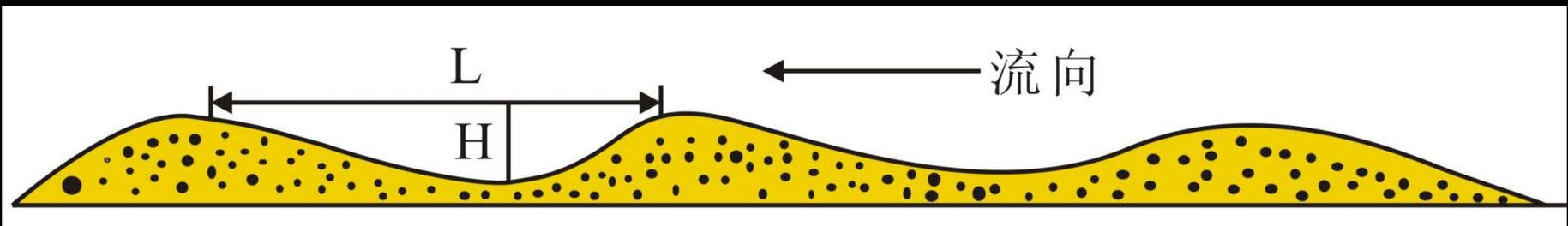
波痕的成因分类及主要特征

名称	波脊形态	波长	波高	波痕指数	对称性	
水流波痕	小波痕	直线形, 波曲形, 链形, 舌形, 菱形	4—60 厘米	0.3—6 厘米	大于5, 多数在8—15	不对称
	大波痕	直线形, 波曲形, 新月形, 舌形, 菱形	0.6—30米	0.06—1.5 米	多数大于15	不对称
	巨波痕	直线形, 波曲形	30—1000 米	1.5—15米	多数大于30	不对称或对称
	逆行沙丘	直线形	0.01—6米	0.1—45 厘米		近于对称
浪成波痕	对称浪成波痕	直线形, 部分分叉	0.9—200 厘米	0.3—23 厘米	4—13, 多数为6—7	对称
	不对称浪成波痕	直线形, 部分分叉	1.5—105 厘米	0.3—20 厘米	5—16, 多数为6—8	不对称 RSI=1.1—3.8
孤立波痕	孤立小水流波痕	直线形, 波曲形, 舌形	类似小波痕	比小波痕低	比小波痕大	不对称
	孤立大水流波痕	直线形, 波曲形, 新月形	类似大波痕	比大波痕低	比大波痕大	不对称
	孤立浪成波痕	直线形	类似浪成波痕	比浪成波痕低	比浪成波痕大	对称或不对称
干涉波痕	波浪-波浪干涉波痕	变化多端				
	波浪-水流干涉波痕	变化多端				
	纵向波痕	直线形, 平行于水流方向延伸				对称或略为不对称
	横向波痕	圆形, 垂直于水流方向延伸				不对称或对称
改造波痕	双脊, 圆顶, 平顶等					
风成波痕	直线形, 部分分叉	2.5—25 厘米	0.5—1 厘米	10—50 以上	不对称	

1. 流水波痕 (current ripple)

●成因：由定向流动的水流形成，见于河流和存在有底流的海湖近岸地带。

●特点：波峰波谷均圆滑；不对称状，不对称指数 $RSI > 2$ (2.5)，陡坡倾向指示水流方向；波痕指数 $RI > 5$ (8~15)；波谷比波峰粗。



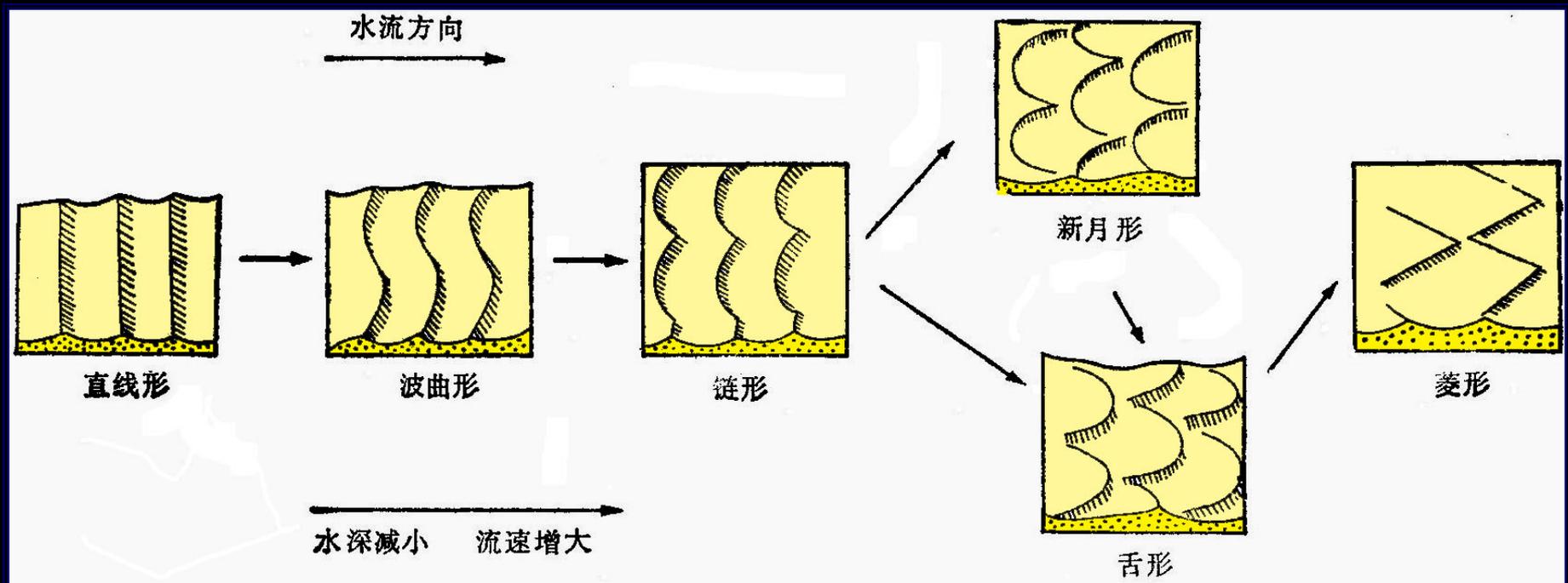


流水波痕



波脊形态的变化主要与水深和流速有关。

一般来说，随着水深减小和流速增大，波脊形态由简单变复杂，由连续变断续。

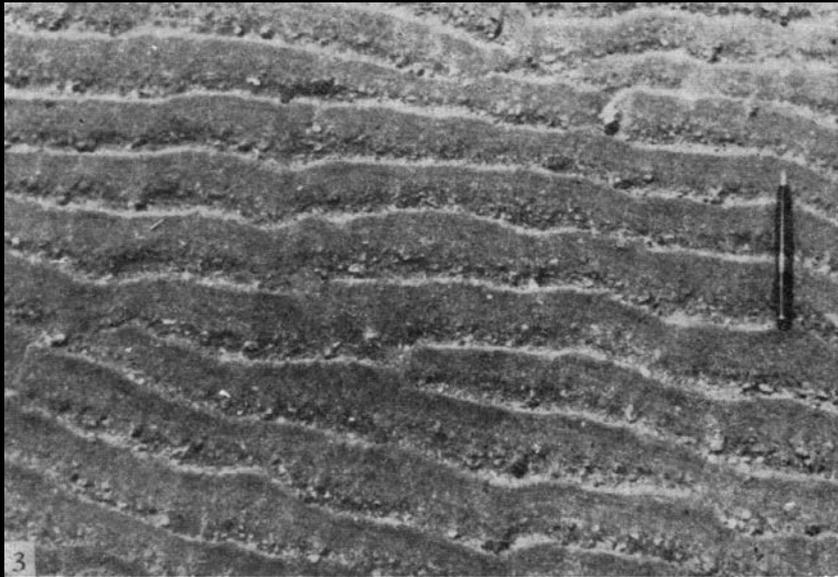
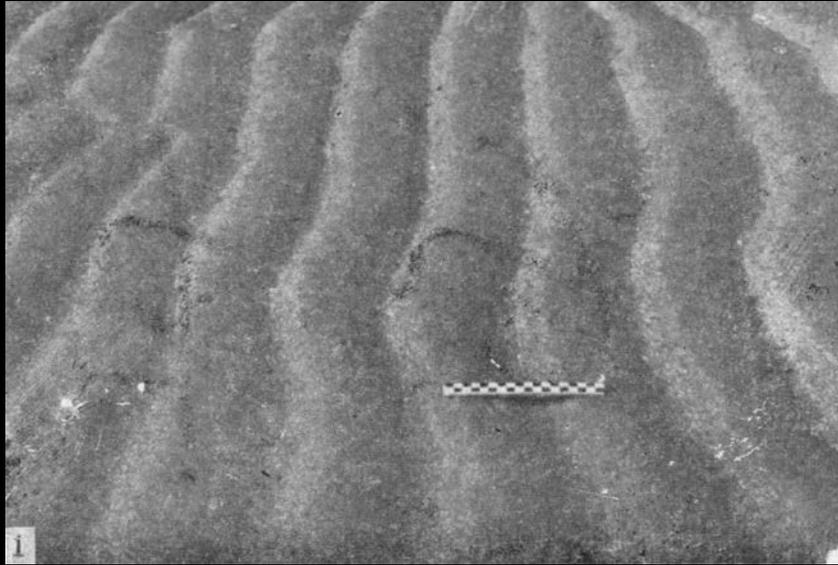




下列流水波痕的波脊形态中，代表水动力最强的是（ ）。

- A. 直线形 B. 波曲形
C. 链形 D. 新月形







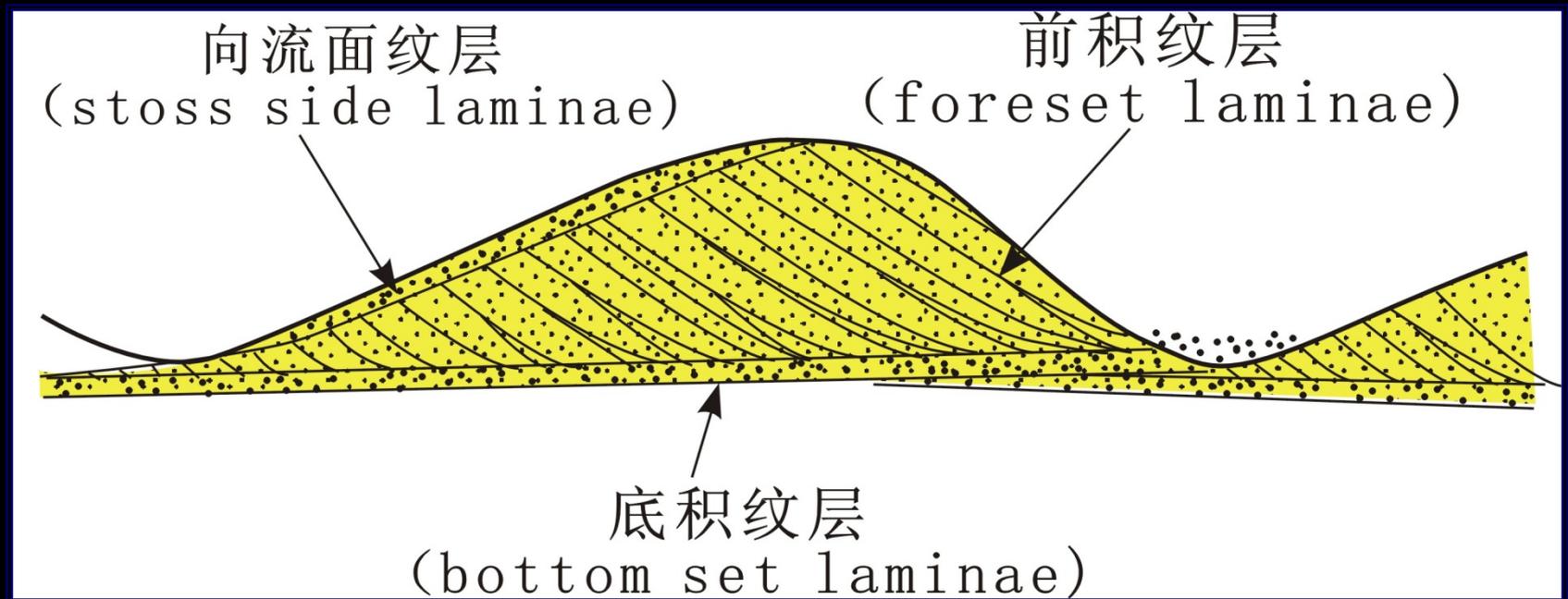
Asymmetrical current ripples formed on a river bar, Rogue River, southern Oregon. The current flowed from left to right.



Current ripple (G. Hu, 2013, Snow Canyon State Park)

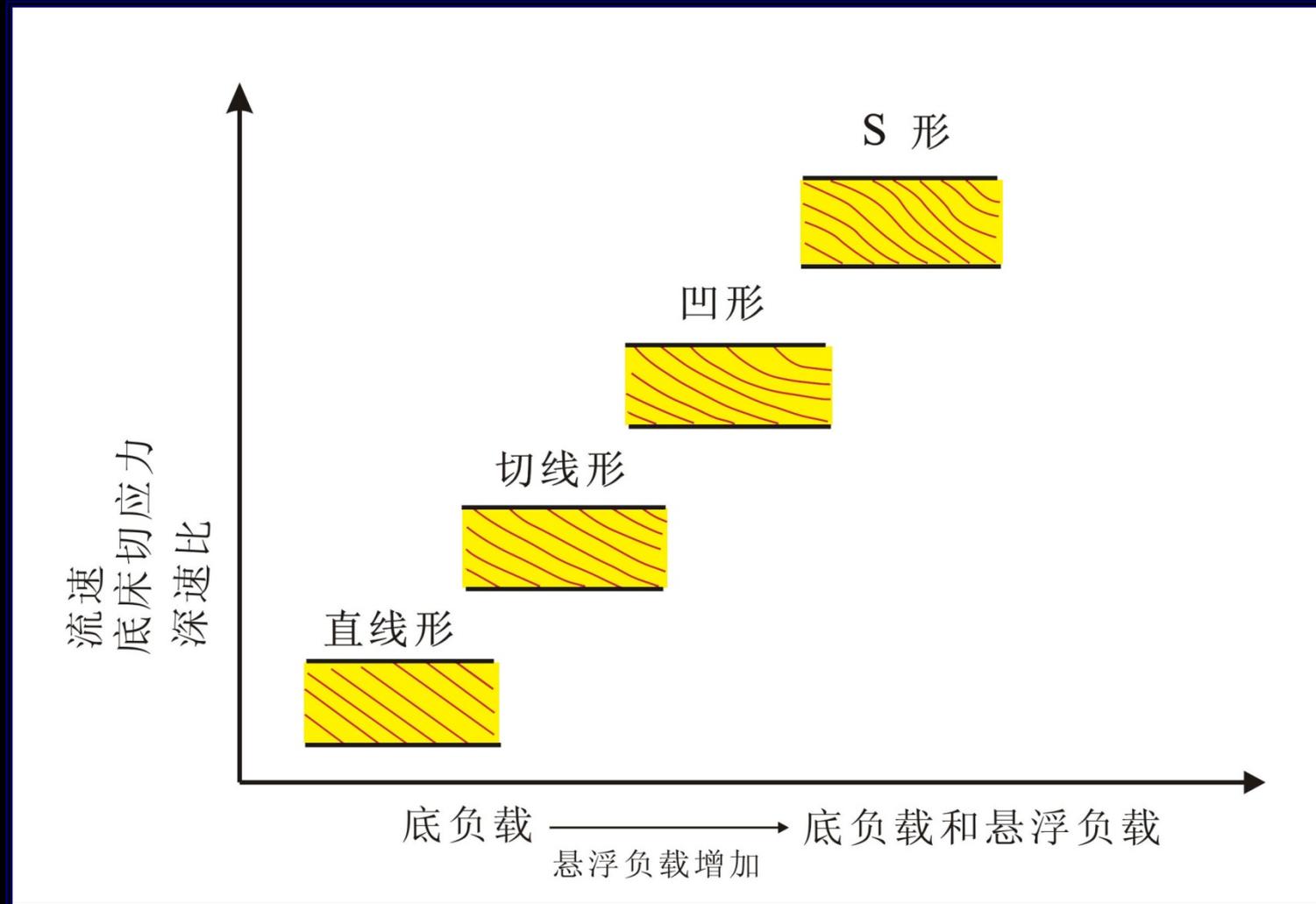


发育完善的流水波痕，由一个或几个**向流面纹层**、许多**前积纹层**以及一个或几个水平的**底积纹层**组成。





随着流速的增大和悬浮载荷比例增加，前积纹层的形态从直线形→切线形→凹形→S形。

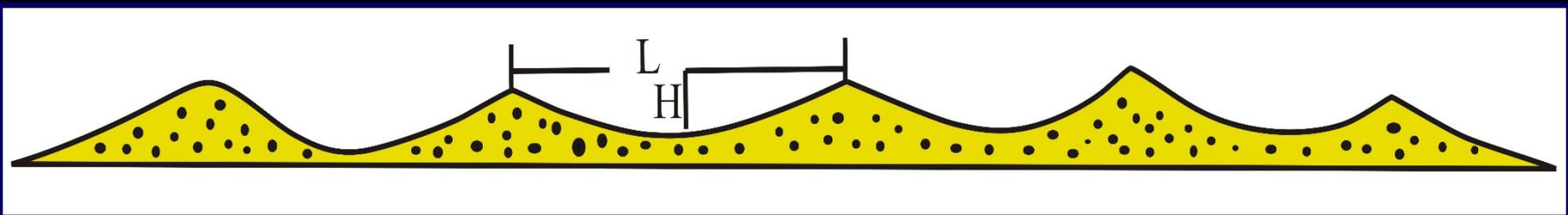


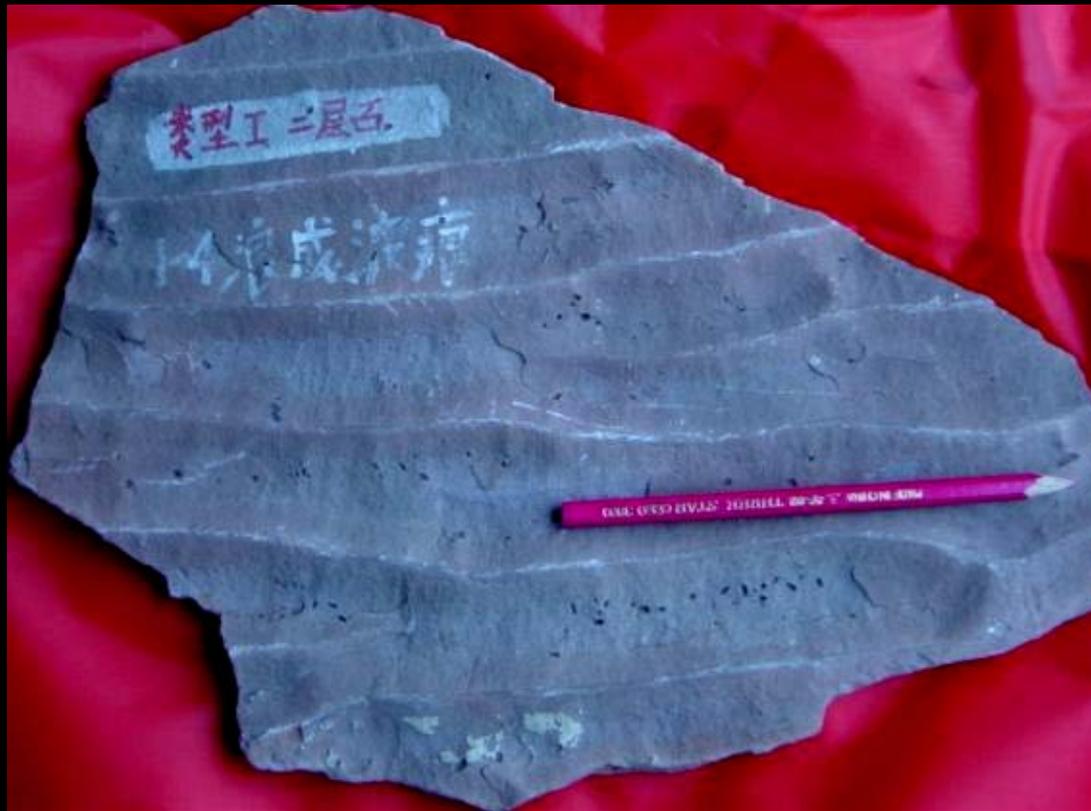


2. 浪成波痕 (wave ripple)

● **成因**：由波浪产生的**动荡水流**形成，常见于**海、湖浅水地带**。

● **特点**：① 对称波痕波峰尖锐，波谷圆滑，波脊多平直，部分分叉，波痕指数 $RI=4\sim 13$ （多为 $6\sim 7$ ）；② 不对称波痕与流水波痕类似，峰谷均圆滑，不对称指数 $RSI=1.1\sim 3.8$ ，波痕指数 $RI=5\sim 16$ （多为 $6\sim 8$ ）。

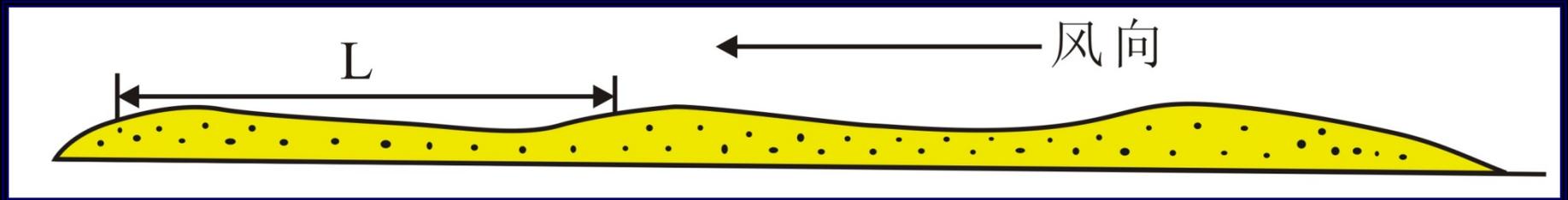




浪成波痕

3. 风成波痕 (aeolian ripple)

● **成因**：由**定向风**形成，常见于沙漠、海、湖滨岸的沙丘沉积中。



● **特点**：波峰波谷圆滑(?) 开阔，峰窄谷宽；呈不对称状，不对称度比流水波痕更大，陡坡倾向与风向一致；波痕指数 $RI=10\sim70$ ；波峰粒度比波谷粗。



风成沙丘之上的波痕



Modern Dunes





风成沙丘所显示的风向为何相反？



4. 修饰波痕和叠置波痕

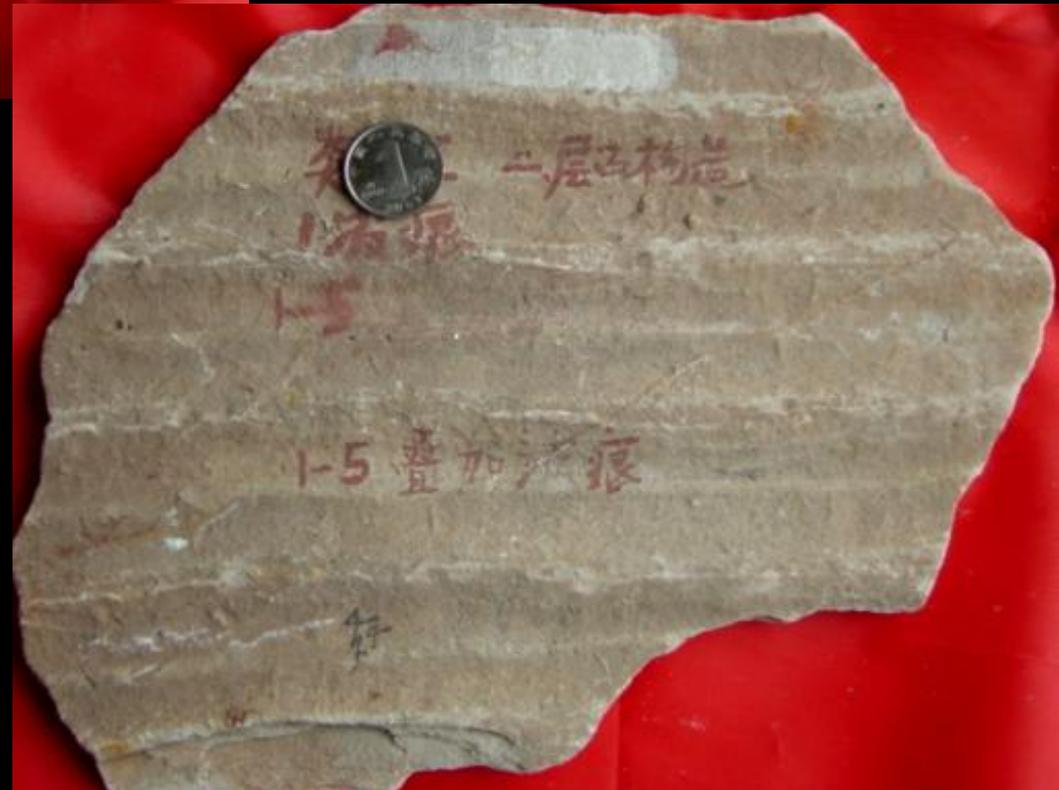
由于水位、水流方向、波浪方向、浪基面等的变化，而导致早先形成的波痕被修饰改造而形成**修饰波痕**（modified ripple），或在早先形成的大波痕的基础上重叠小波痕，形成**叠置波痕**。



规模相差悬殊的波痕相互叠加



干涉波痕



叠加波痕



5. 波痕研究意义

- (1) 根据波痕类型可以了解岩石形成条件。
- (2) 不对称波痕指示介质的流动方向。
- (3) 浪成波痕可指示地层的顶底。
- (4) 海、湖波痕在平面上的分布有平行滨线的趋势。
- (5) 波痕的形态和分布，是识别沉积环境的重要依据。



6. 波痕的研究方法

- (1) 测量波长、波高，计算波痕指数，测量陡坡缓坡倾角，计算不对称度；
- (2) 测量大量波痕走向，确定其在平面上的分布；
- (3) 编制波峰走向、陡坡倾角的玫瑰图。



(二) 冲刷痕 (scour mark)

水流在泥质沉积物表面流动时冲刷出来的痕迹称为冲刷痕。

形成于泥质沉积物表面上的冲刷痕，通常以上覆砂质层底面上的铸型形式保在下来。



刘家场关木山南侧山沟波痕的铸模（不属于冲刷痕）

痕



模

阴文



阳文



1. 槽痕与槽模 (flute mark and flute cast)

水流在泥质沉积物表面冲刷而形成的不连续的长形小凹坑为**槽痕**。

凹坑最深可达几厘米，长从几厘米到几十厘米不等。其**上游端陡而深**，**向下游变宽变浅**，逐渐与沉积物表面齐平。

槽痕被砂充填，成为砂岩层底面上的槽铸型，即为**槽模**。

见于**浊流**环境，为浊积岩的重要标志。



槽模 (flute cast)





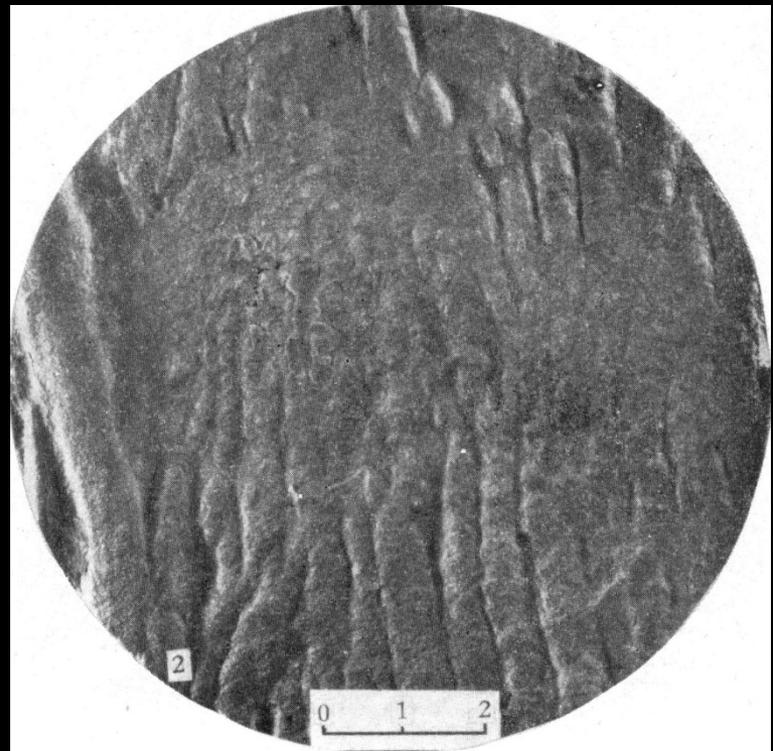
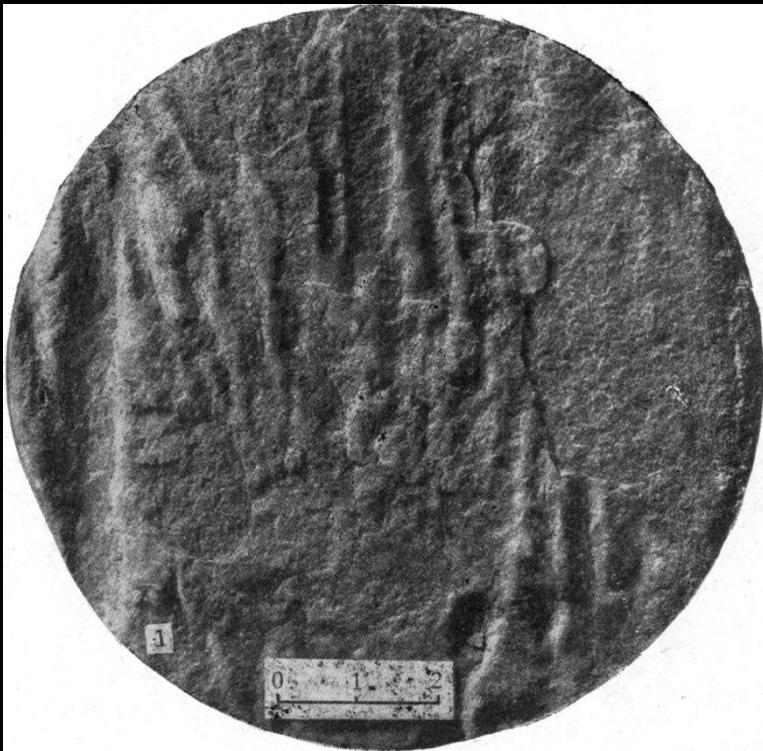
槽模 (flute cast)





2. 纵向脊与沟 (longitudinal ridge and furrow)

由一系列平行于水流方向延伸的脊与沟紧密互排列所组成的构造，也叫剥离线构造，常与平行层理共生。





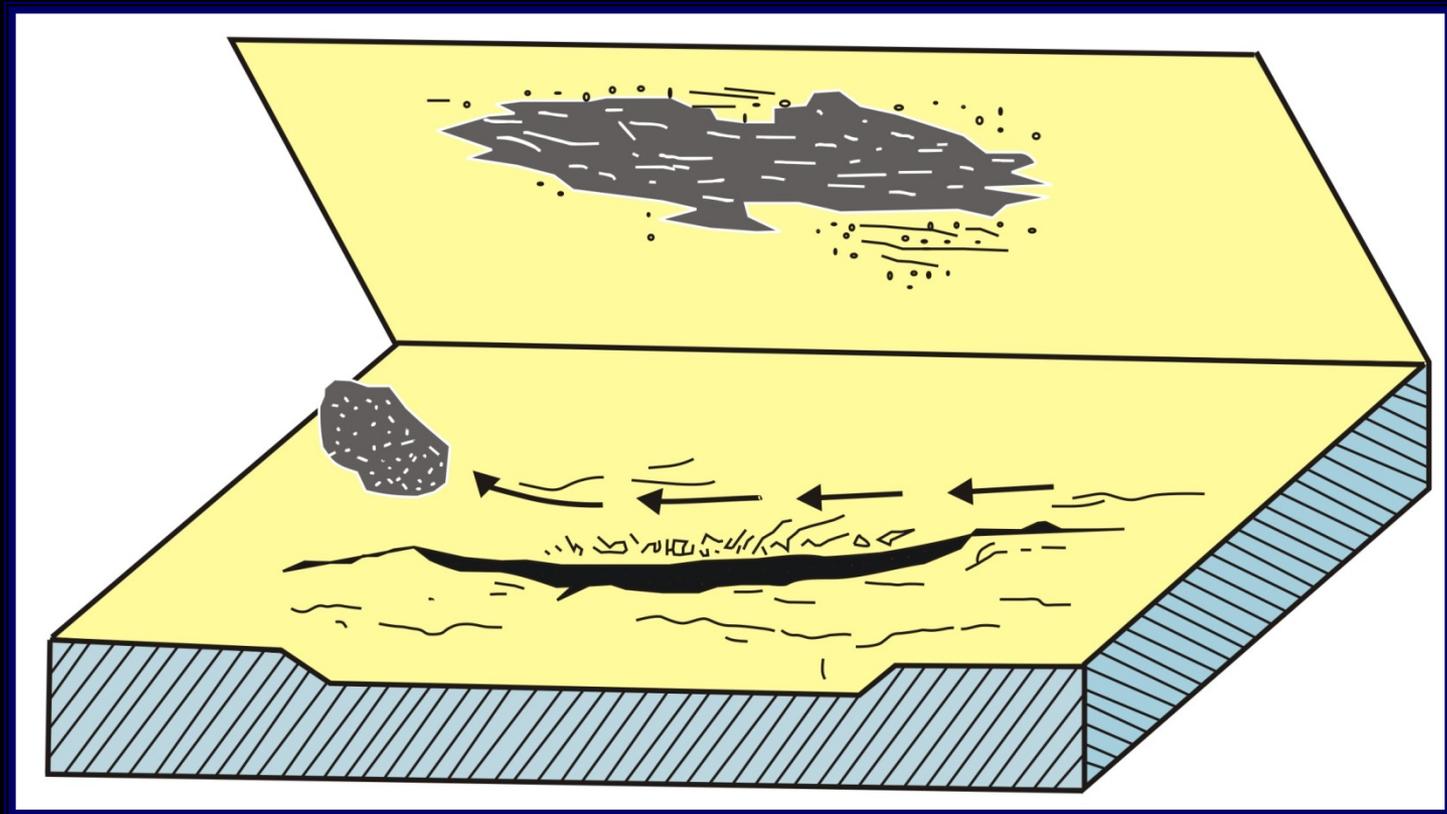
（三）压刻痕

水流所携带的物体在松软的沉积物表面上运动时所刻蚀或刻划出来的痕迹称为**压刻痕**或**工具痕**（tool mark）。



1. 沟痕 (groove mark)

水流所携带的物体沿松软的沉积物表面连续运动时所刻划出来的、直而长的小沟。



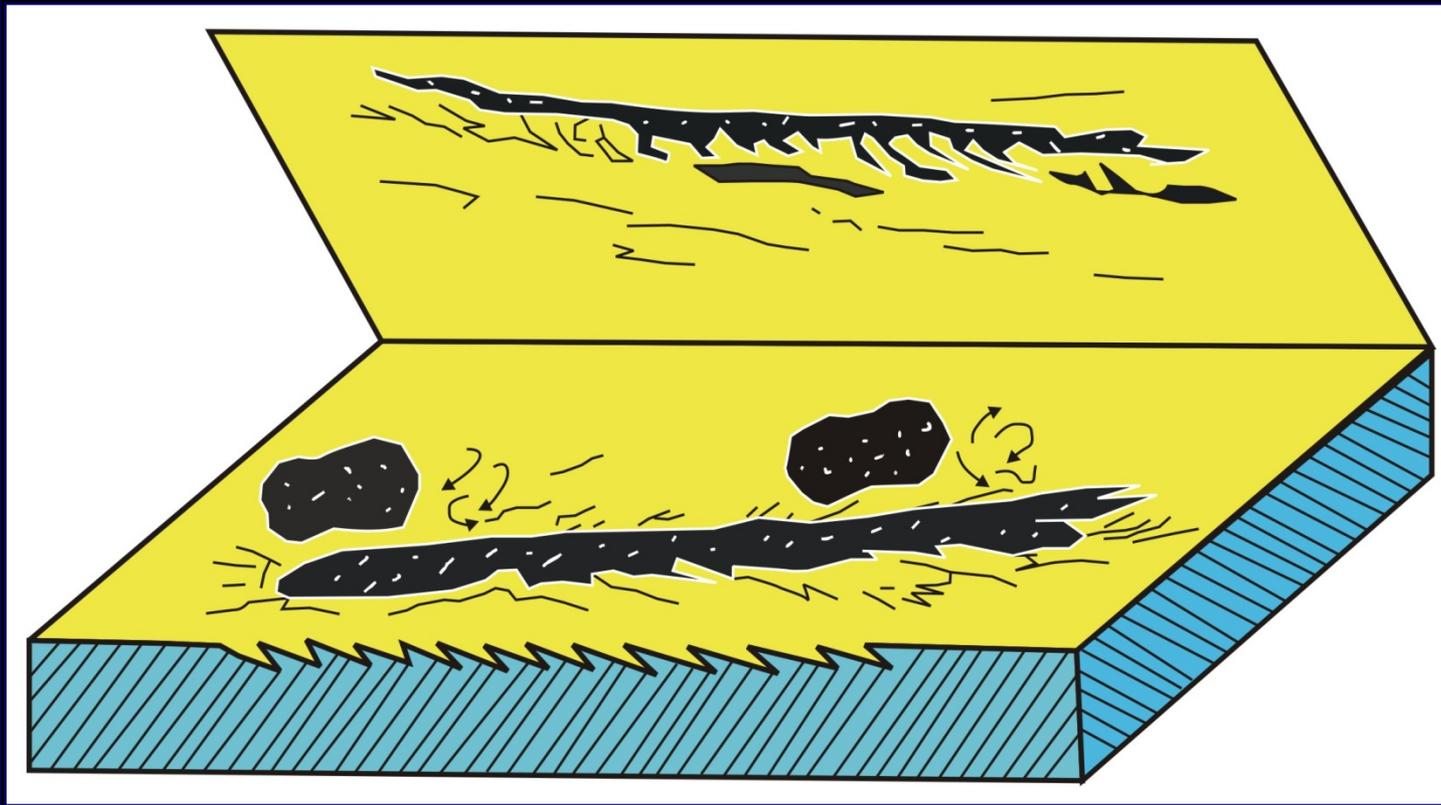


沟痕常成组出现，沟痕的铸型为沟模，据沟模走向和突起高度的变化可判断水流方向。



2. V形痕 (chevron mark)

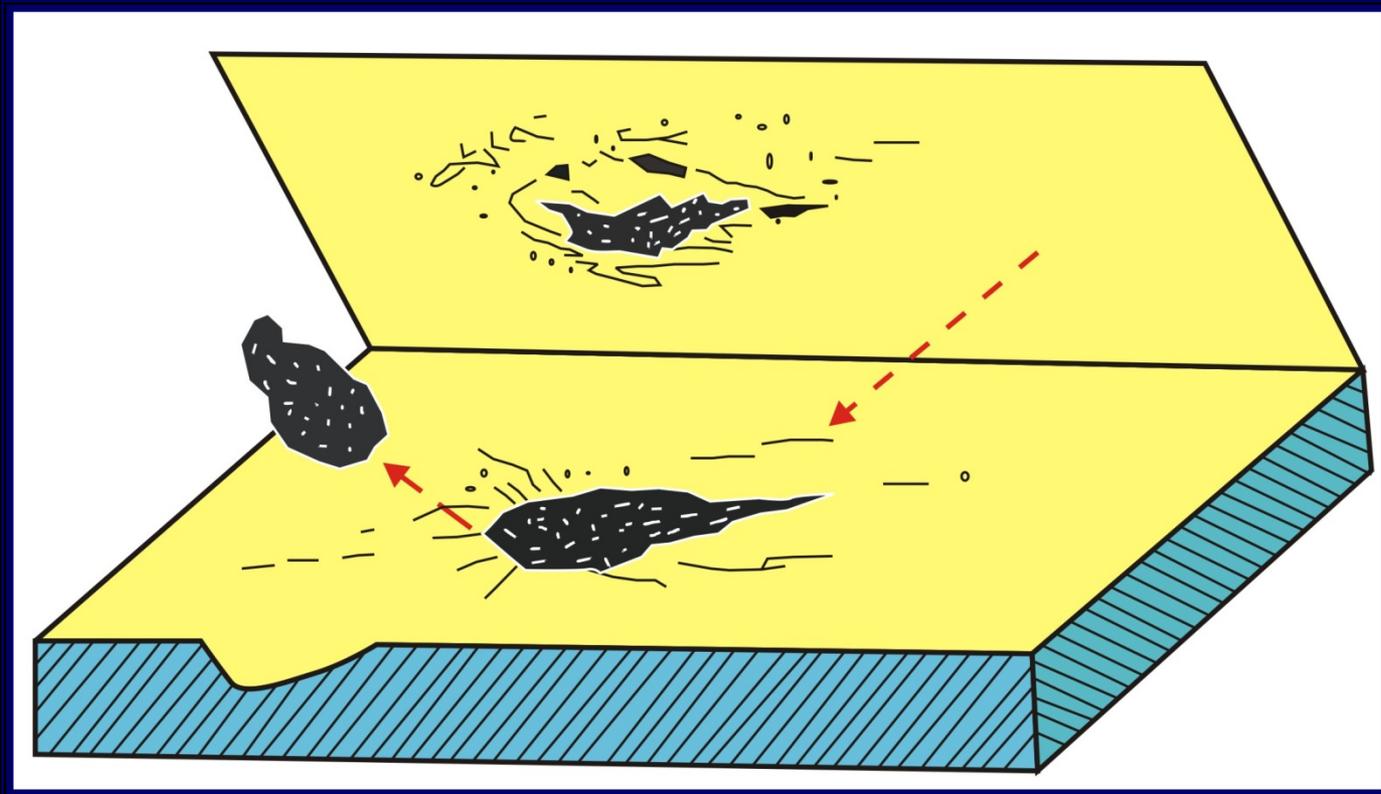
一条尖端指向下游的一系列V形凹坑连续排列而成的直沟。





3. 戳痕 (prod mark)

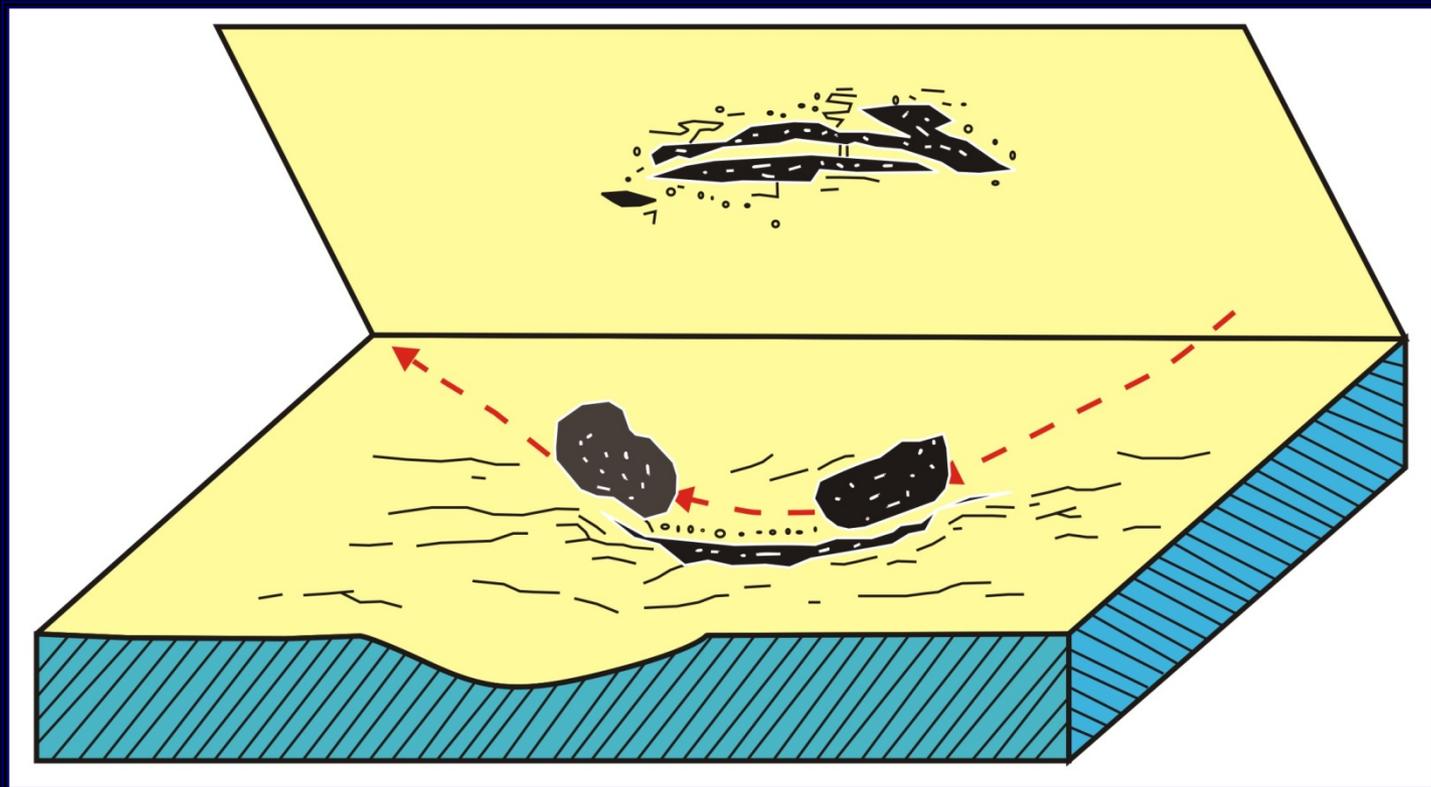
当运动物体以较大的角度戳向沉积物表面，随后离去而留下的不对称的、锥形到三角形凹坑。





4. 弹跳痕 (bounce mark)

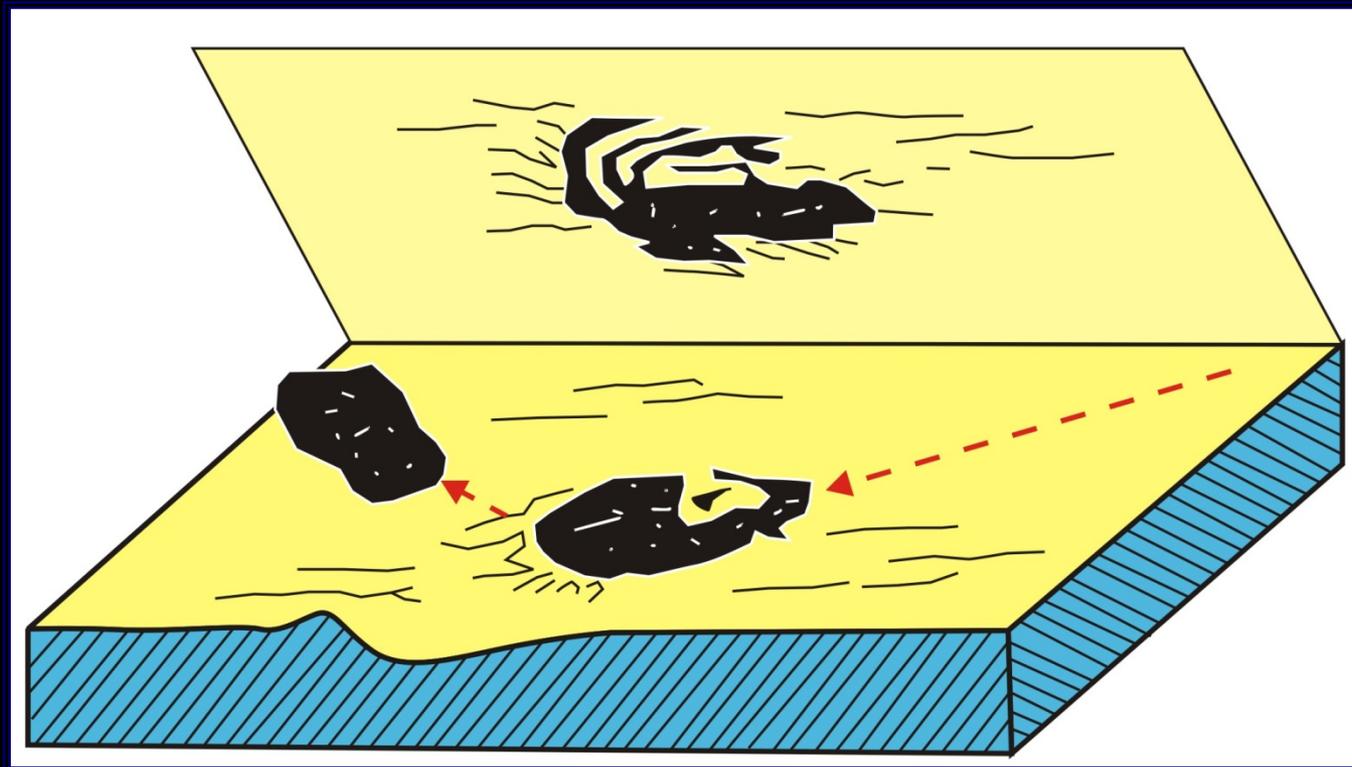
是一个两端变尖变平的、大致对称的浅凹坑，其长轴平行于水流方向。





5. 刷痕 (brush mark)

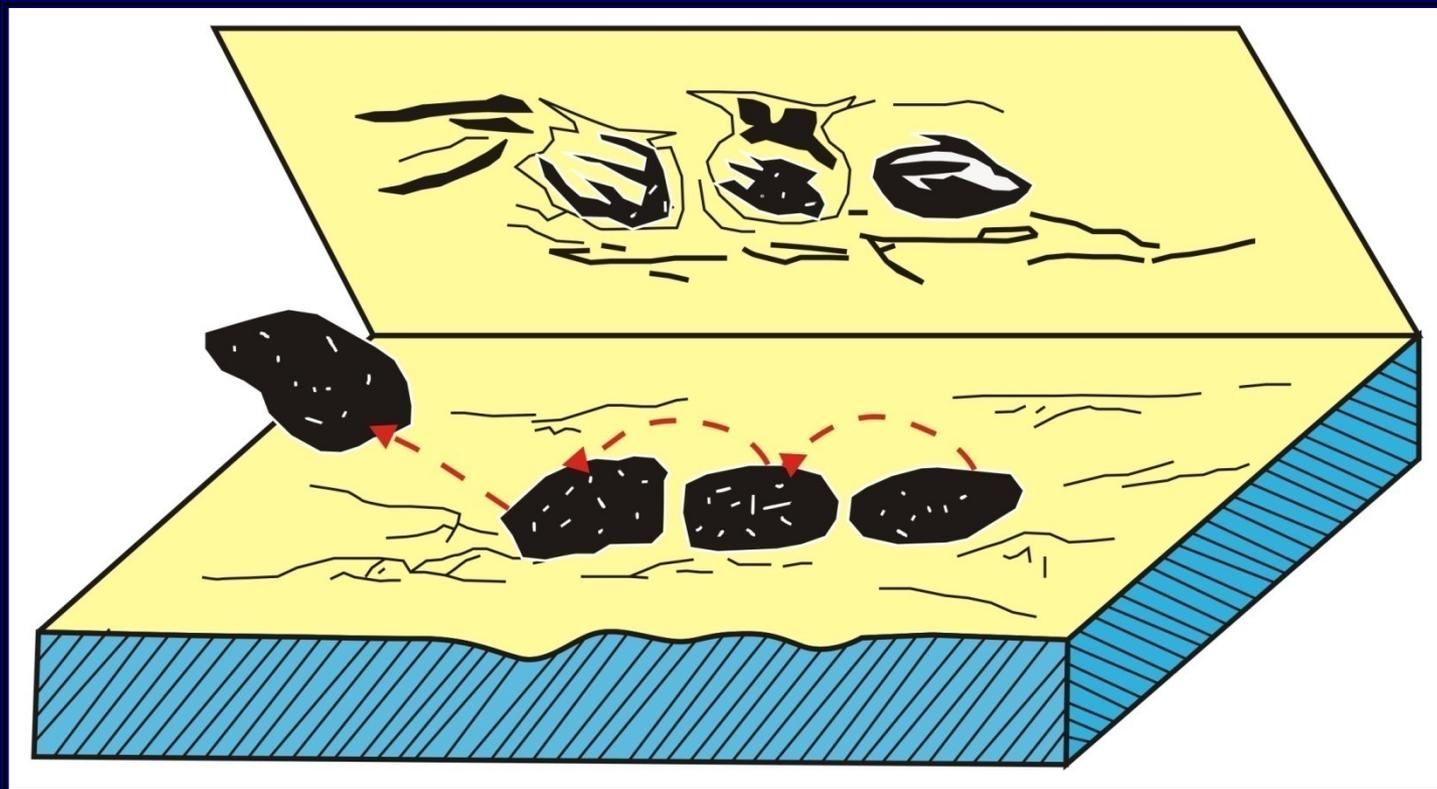
当运动物体以很低的角度擦过沉积物表面时，可产生一个长而浅的凹坑，而且其下游端发育有圆滑的弯曲形泥脊。





6. 跳跃痕 (skip mark)

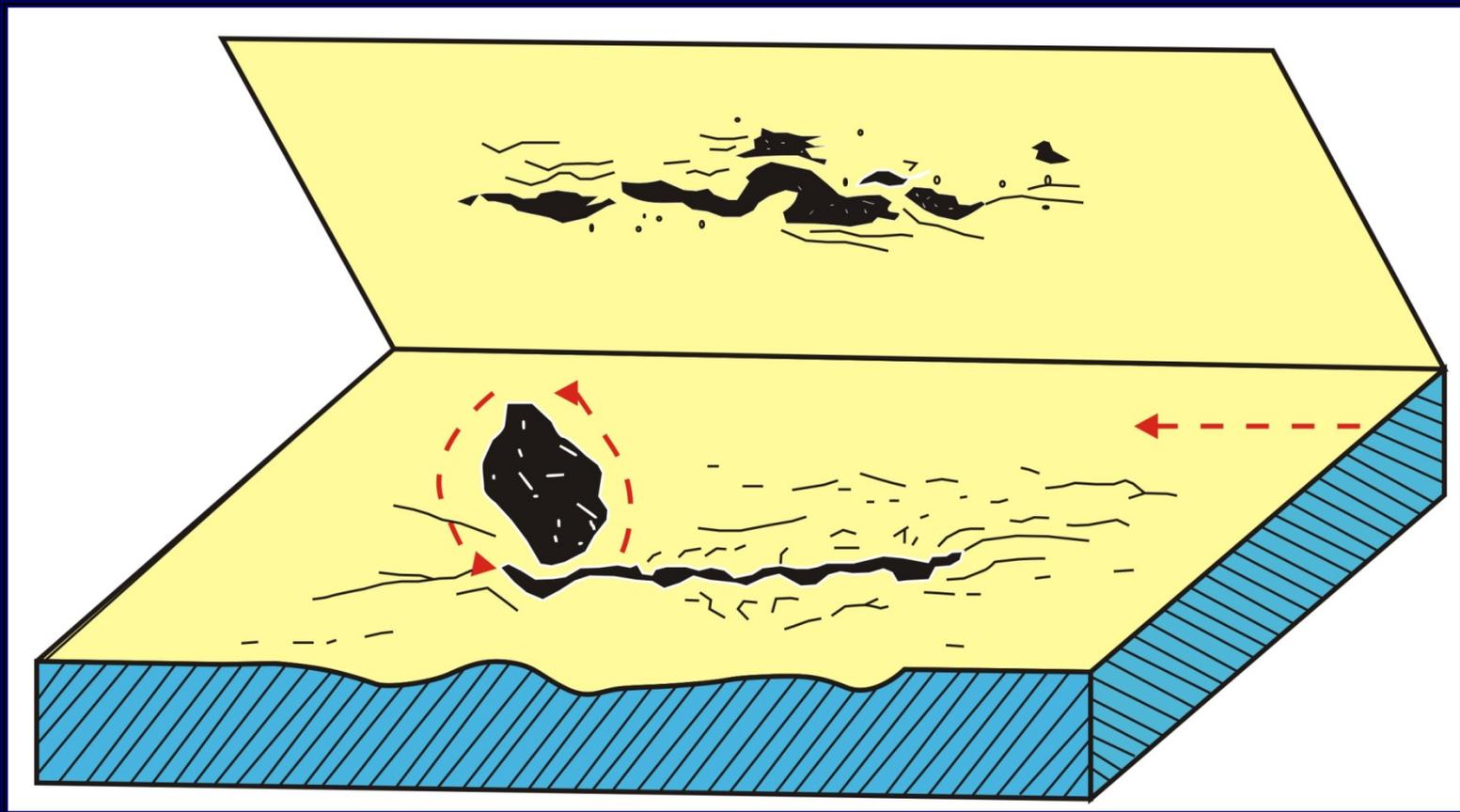
水流所携带的物体在沉积物表面上作跳跃运动时，每隔一定距离撞击一下表面，就产生排成一行的几个小凹坑。





7. 滚动痕 (roll mark)

水流携带物体在沉积物表面上作滚动运动时所刻划出来的痕迹。





8. 大型滚动痕 (large-scale mark)

较大的物体（如泥块）在水流推动下沿沉积物表面滑动时所产生的长形凹槽。它的宽度和深度均比沟痕大得多。





(四) 其它表面痕迹

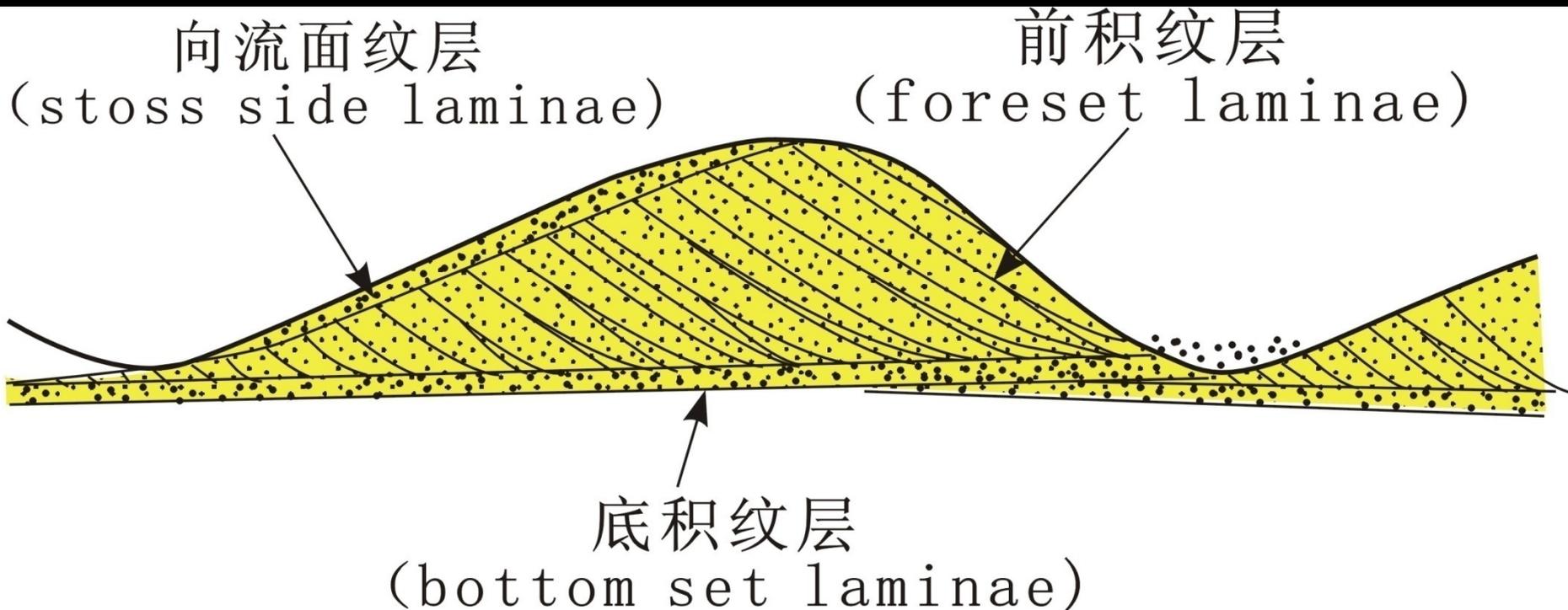
1. 细流痕
2. 冲淤构造
3. 冲蚀构造
4. 冲流痕
5. 水位痕
6. 皱痕
7. 粘附波痕和粘附瘤



水位痕（青岛）

(五) 层理 (bedding)

波痕是保留在层面上的底沙形体痕迹，在层内的痕迹就是**层理**。





1. 基本术语

层理 (bedding) — 岩石性质沿垂向变化的一种层状构造，它可以通过矿物成分、结构、颜色的突变和渐变而显现出来。

岩石因层理的存在而显出岩石的**非均质性**。



层理类型	序号	层理形态	层系	层组
水平层理	1			
波状层理	2			
板状	3			
交错层理	楔状	4		
	槽状	5		
递变层理	6			
透镜状层理	7			
韵律层理	8			

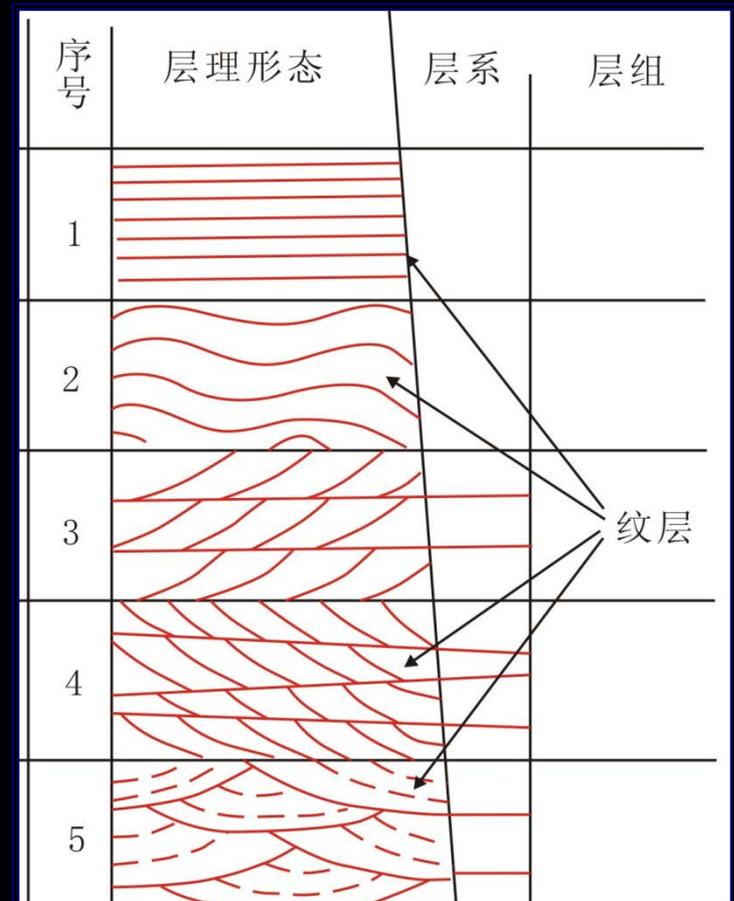
纹层

层理的基本类型及有关术语

纹层（Lamina）：组成层理的最基本的最小的单位，纹层之内没有任何肉眼可见的层。
亦称**细层**。

成因：在一定条件下同时沉积的。

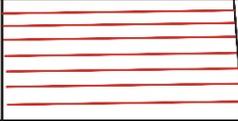
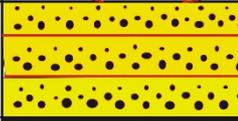
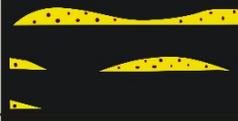
特征：厚度小，一般数毫米～数厘米。

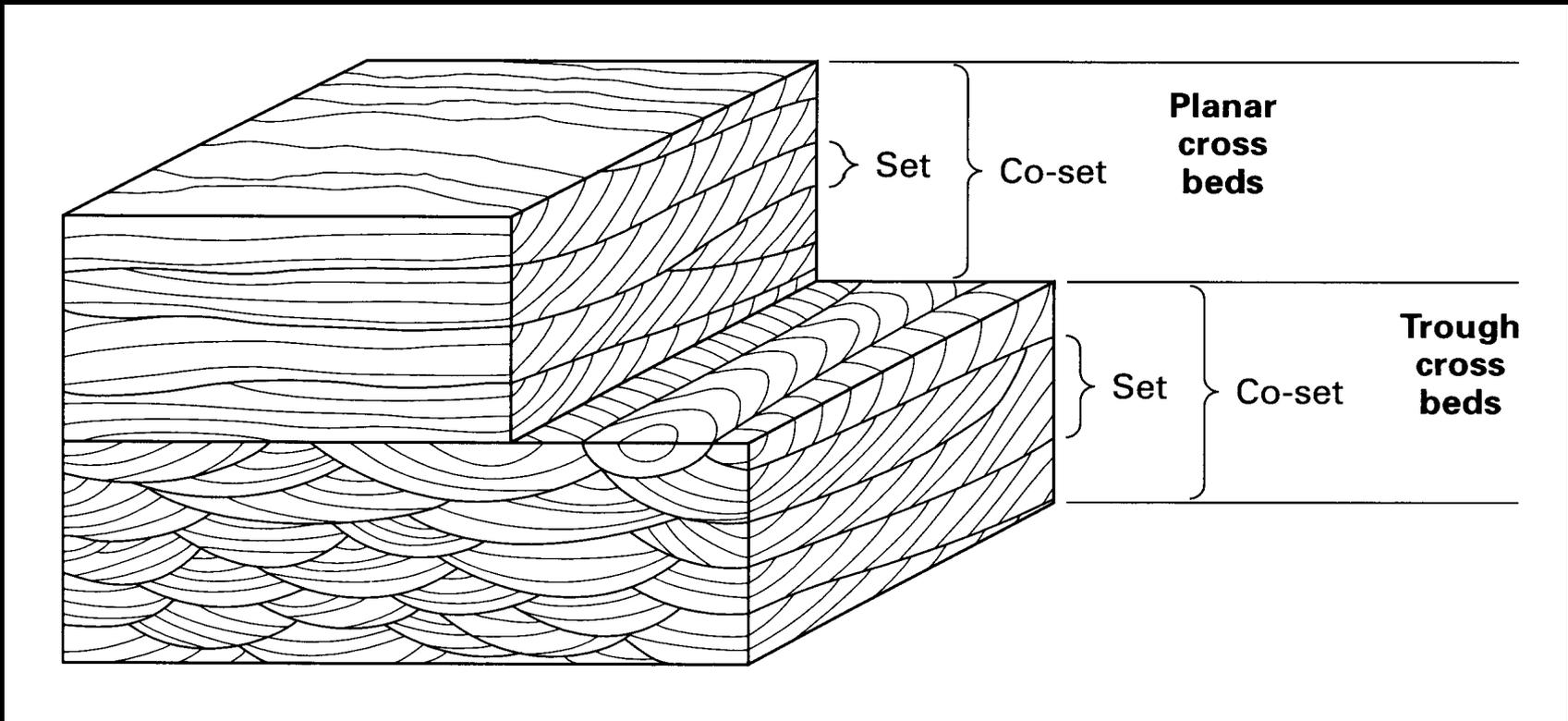




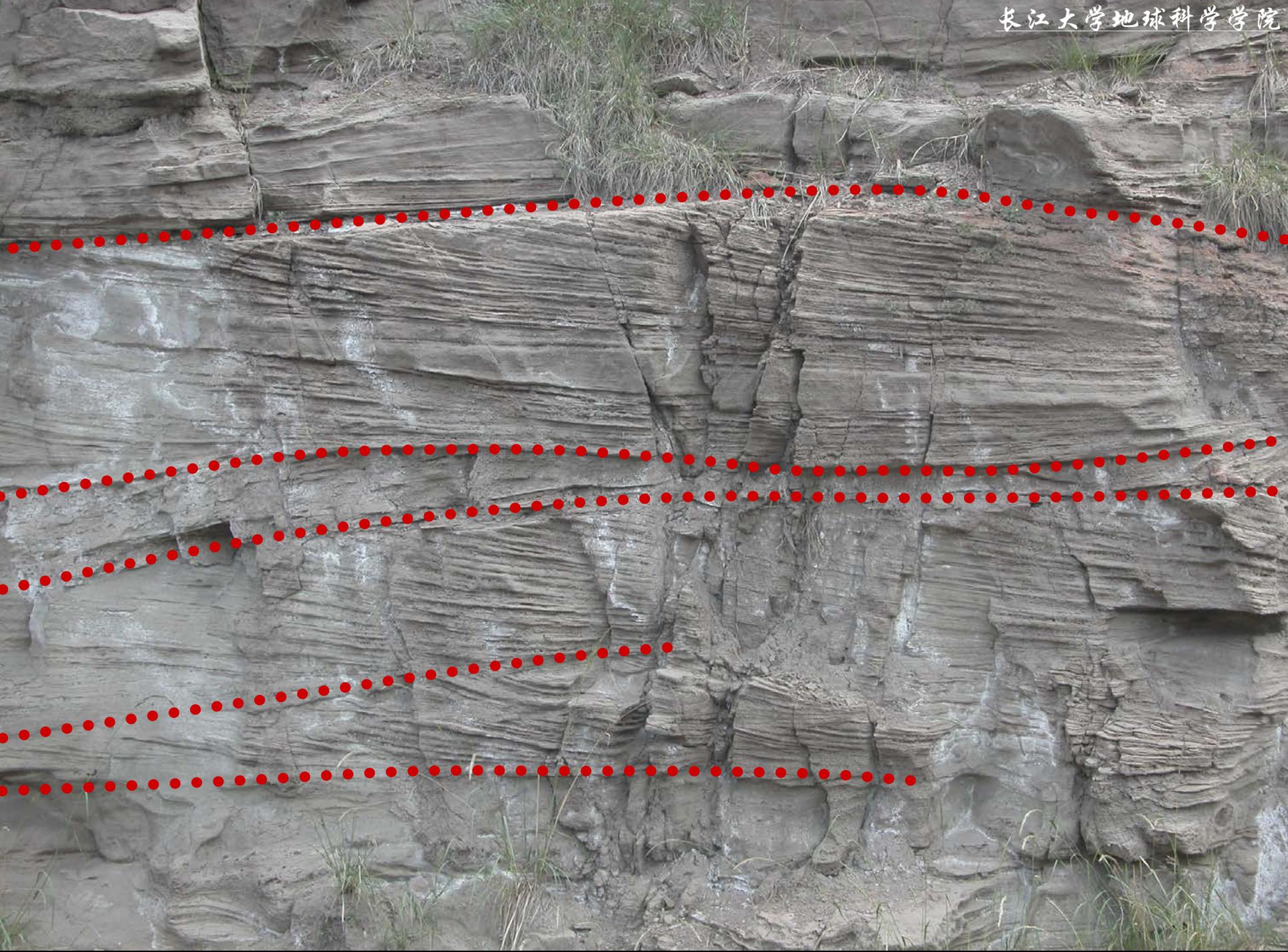
层系 (set)：由许多在成分、结构、厚度和产状上近似的同类型纹层组合而成。

成因：形成于相同的沉积条件下，是一段时间内水动力条件相对稳定的产物。

层理类型	序号	层理形态	层系	层组
水平层理	1			
波状层理	2			
交错层理	板状	3		纹层
	楔状	4		
	槽状	5		
递变层理	6			
透镜状层理	7			
韵律层理	8			



层系组（co-set）：由两个或两个以上岩性（成分、结构）基本一致的相似层或性质不同组成因上有联系的层系叠覆组成，其间没有明显间断。也称**层组**。





层 (bed) : 组成沉积地层的基本单位。由**成分基本一致**的岩石组成，它是在较大区域内，在基本稳定的自然条件下沉积而成的。





一个层可以包括一个或若干个纹层、层系或层系组。层没有限定的厚度，其厚度变化范围很大，可自数厘米~数十米，通常是几厘米~几十厘米。

层的分类：

- 块状层 ($>1\text{m}$)
- 厚层 ($0.5\sim 1\text{m}$)
- 中层 ($0.1\sim 0.5\text{m}$)
- 薄层 ($0.1\sim 0.01\text{m}$)
- 微细层或页状层 ($<0.01\text{m}$)







2. 层理的分类及主要类型

首先，按照层内组分和结构性质把层理划分为四种类型（？）：（1）非均质层理、（2）均质层理、（3）递变层理、（4）韵律层理。

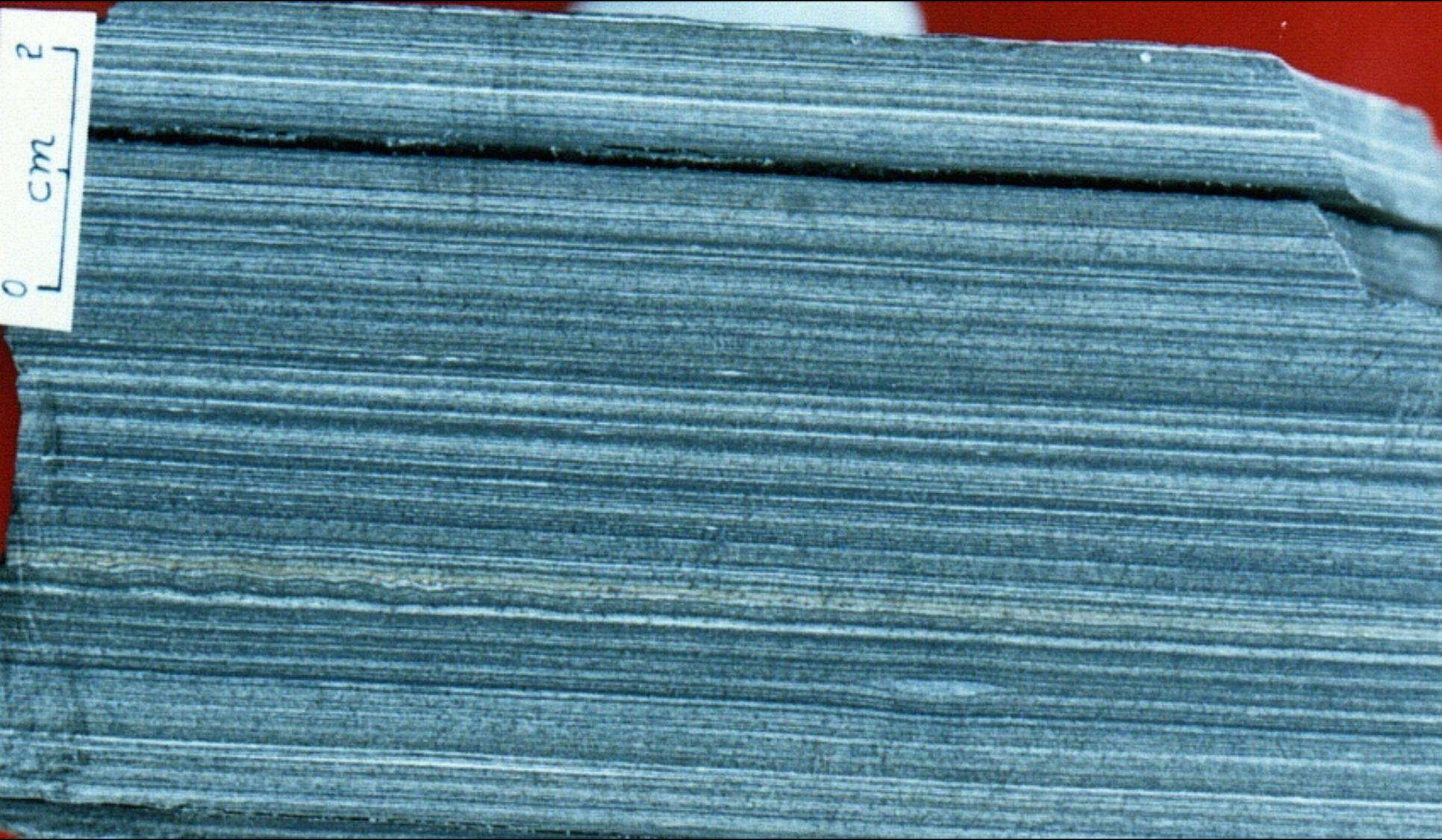
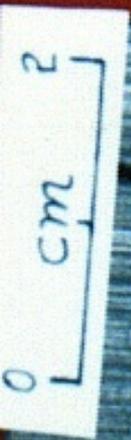
其次，在非均质层理中，再按照几何形态进一步分为水平、平行、交错、波状、压扁、透镜状层理。



2.1 水平层理和平行层理

(1) 水平层理 (horizontal bedding)

- **特点：**纹层呈直线状互相平行，且平行于层面。主要产于泥质岩、粉砂岩以及泥晶灰岩中
- **成因与环境：**在比较弱的水动力条件（静水）下，由悬浮物质或溶解物质先后沉淀而成。出现在低能环境中，如深湖、泻湖、深海等环境。



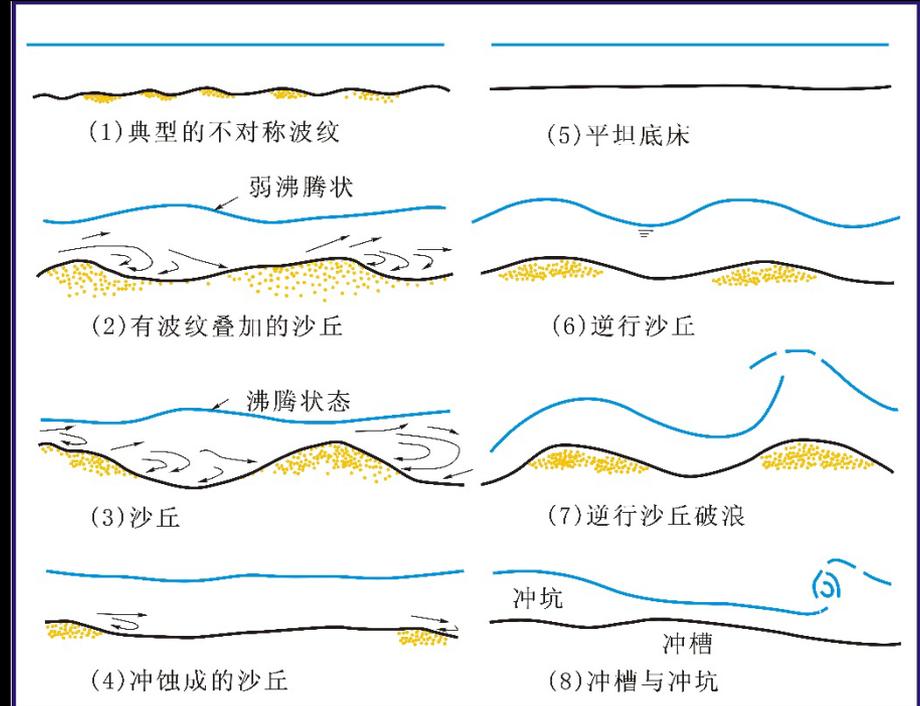
水平层理



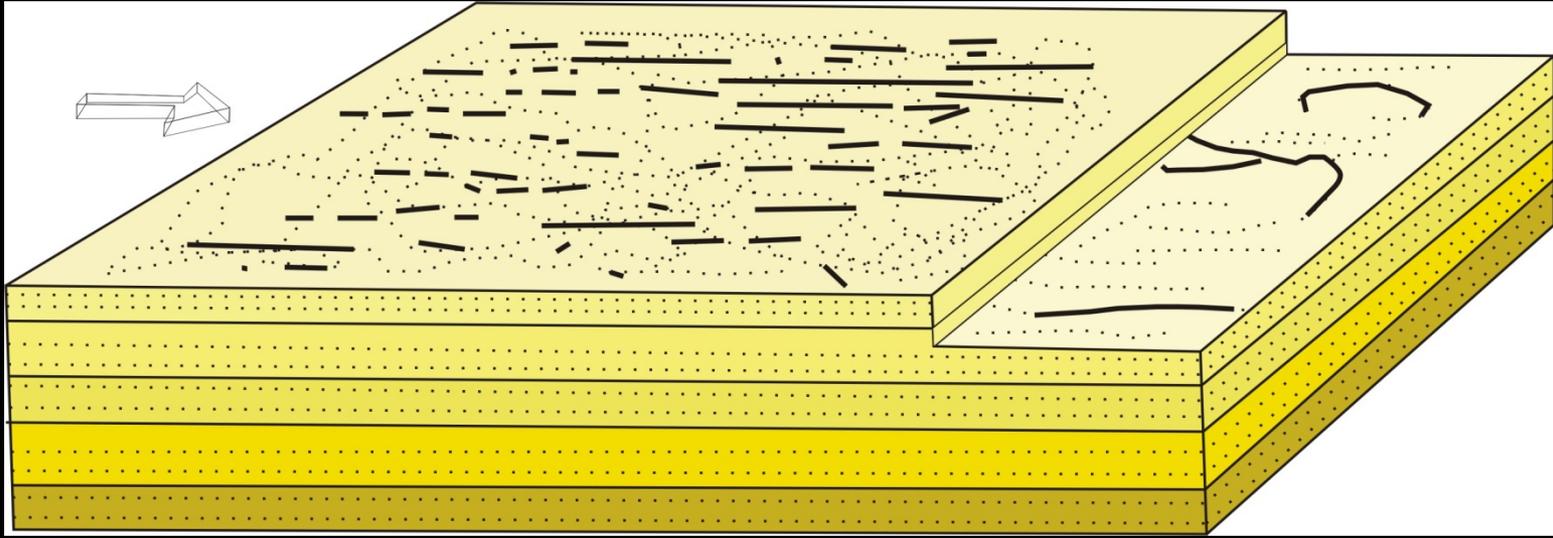
水平层理

(2) 平行层理 (parallel bedding)

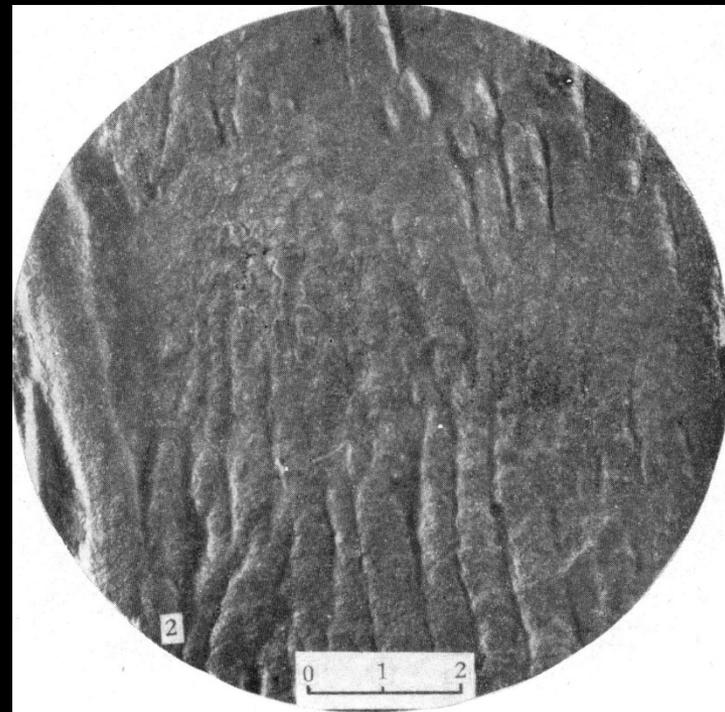
● **特点**：纹层平行而又几乎水平，主要产于**砂岩**中。

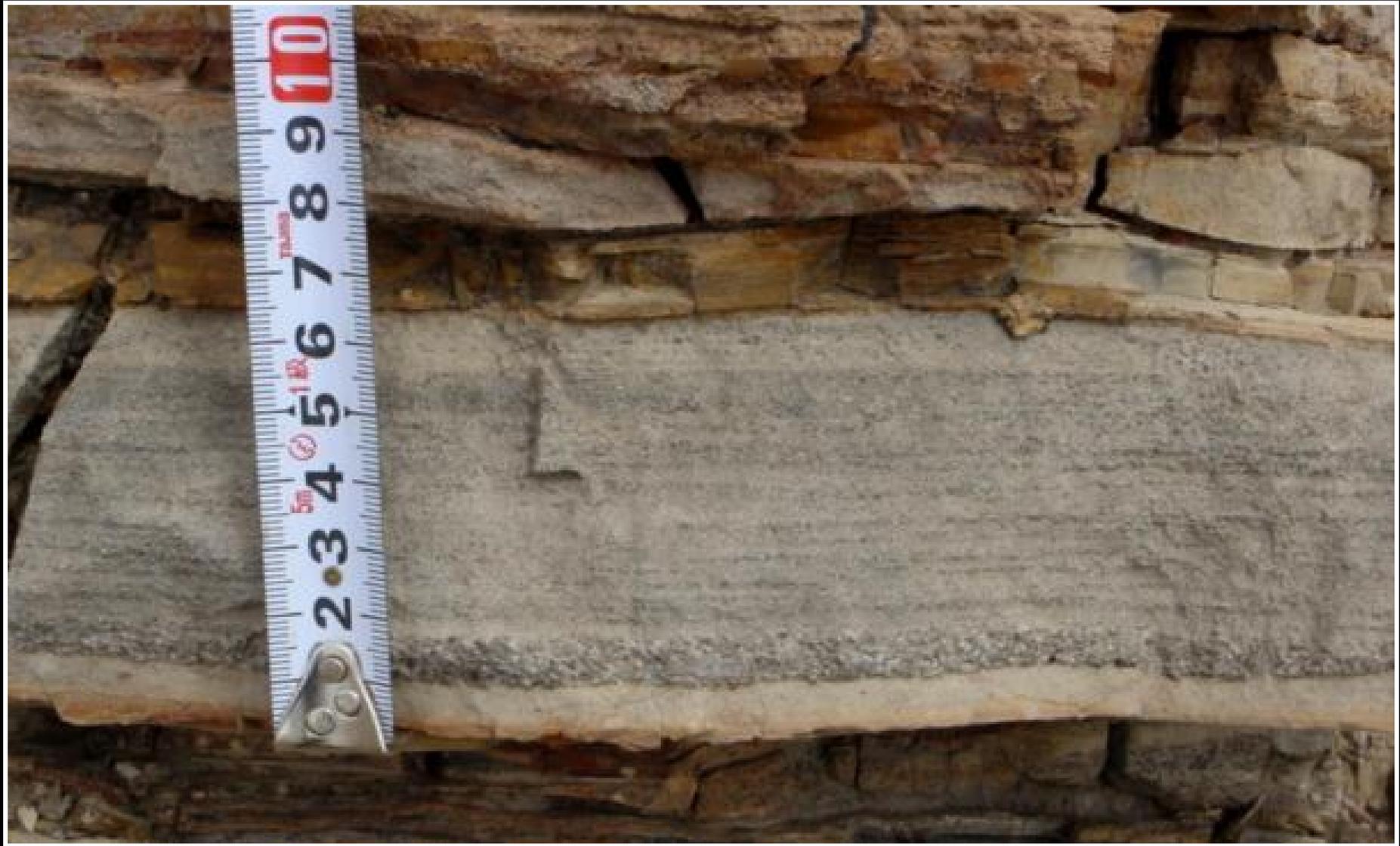


● **成因与环境**：在**较强的水动力条件**下，连续滚动的砂粒产生粗细分离而形成水平纹层。一般出现在**急流或高能环境**中，如河道、湖岸、海滩等环境。



平行层理纹层面上见剥离线构造，侧向延伸较差

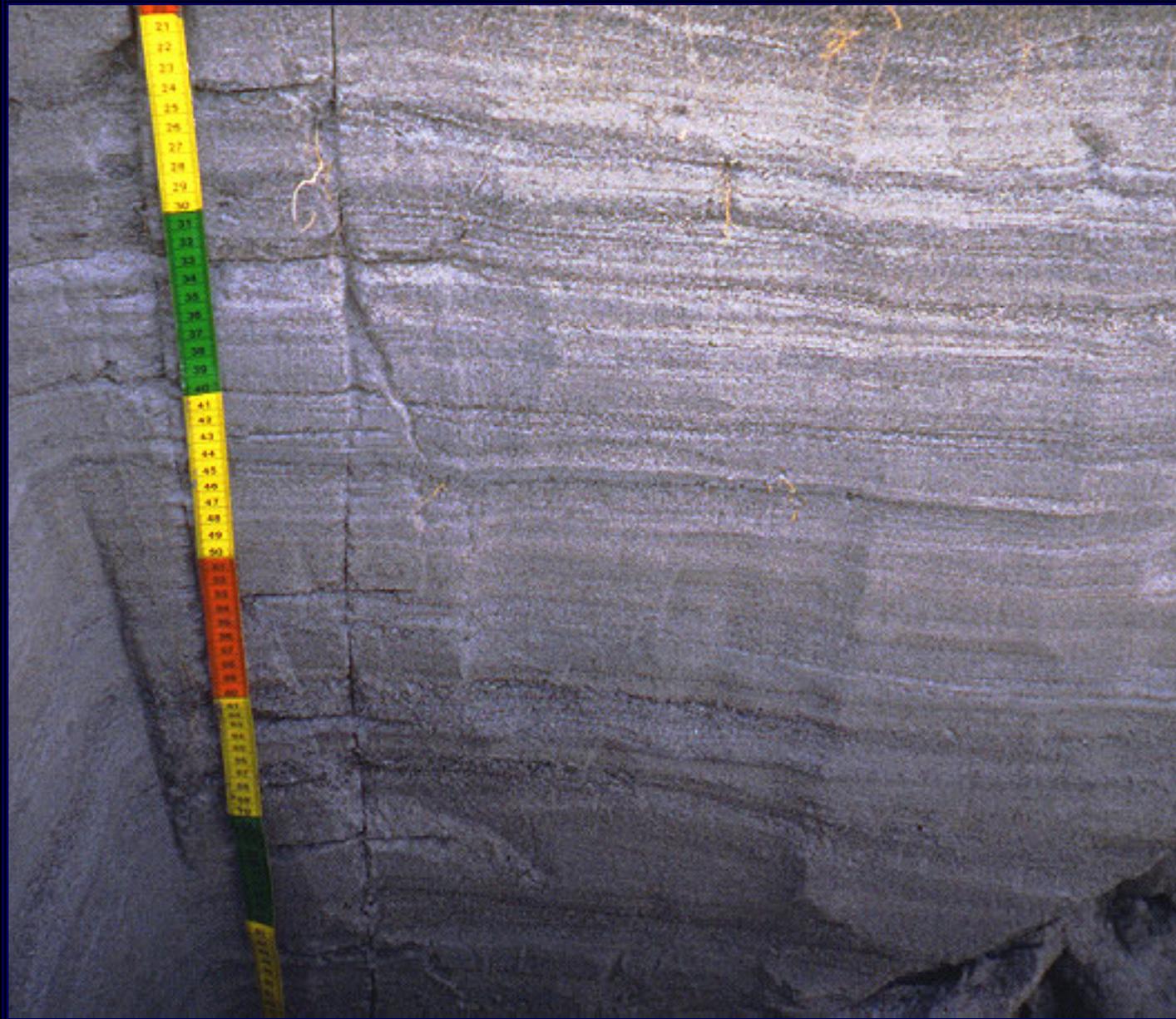








Parallel bedding (G. Hu, 2013, Red Rock Canyon)



平行层理



2.2 交错层理 (cross bedding)

最常见的一种层理。在层的内部边一组倾斜的细层（前积层）与层面或层系界面相交。
又称斜层理。





松滋刘家场河田坪山顶交错层理



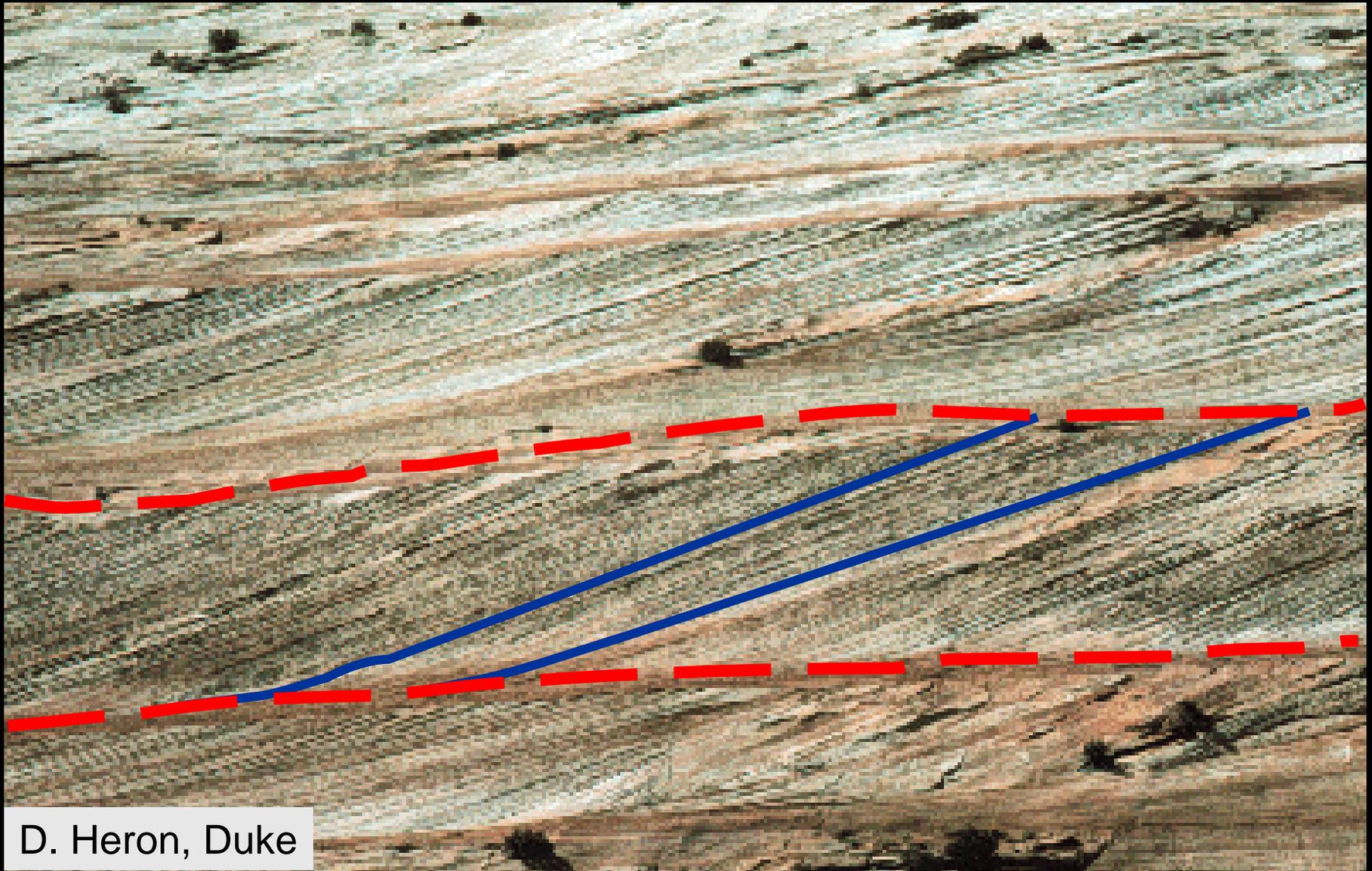
柳江盆地王铁庄采石场交错层理





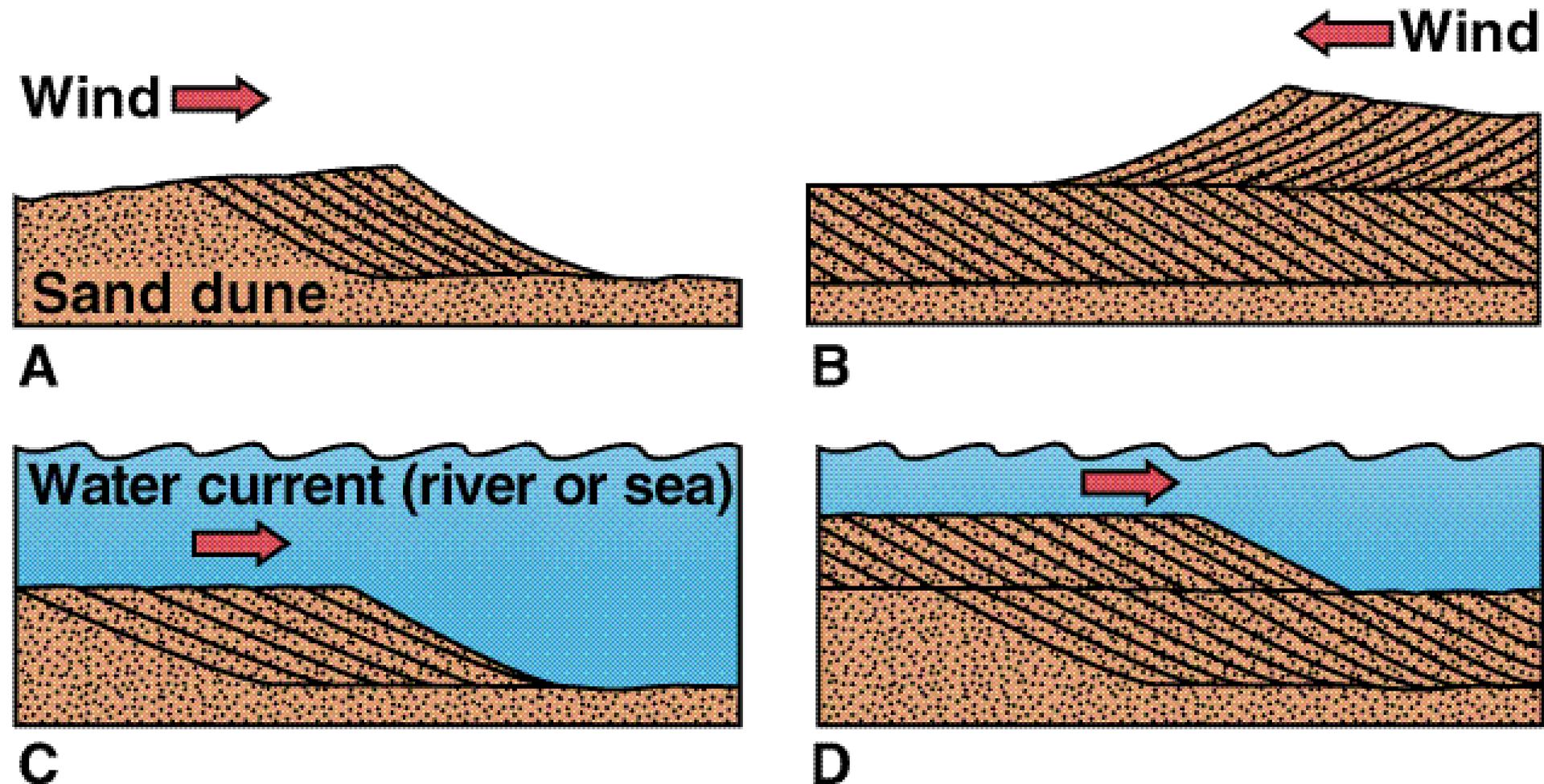


Cross Beds



D. Heron, Duke

Development of Cross-bedding





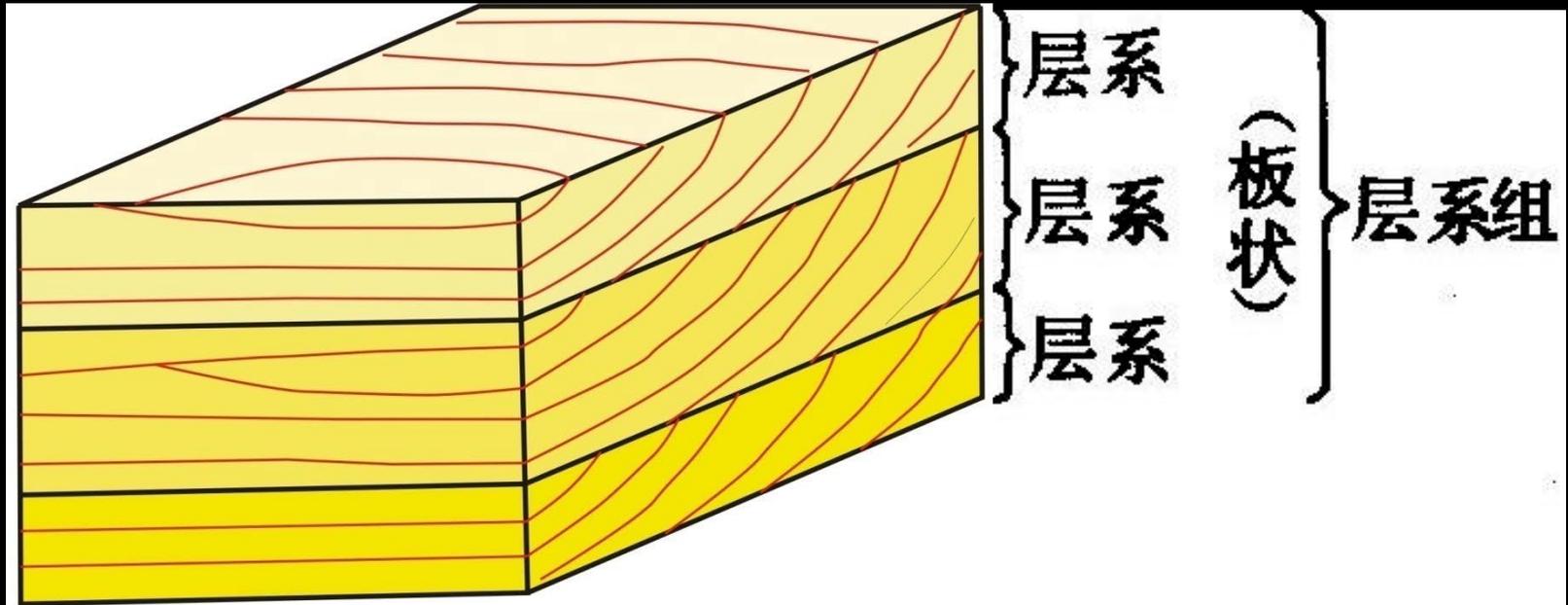
按层系厚度，交错层理可分为：

- 小型交错层理 ($<3\text{cm}$)
- 中型交错层理 ($3\sim 10\text{cm}$)
- 大型交错层理 ($10\sim 200\text{cm}$)
- 特大型交错层理 ($>200\text{cm}$)

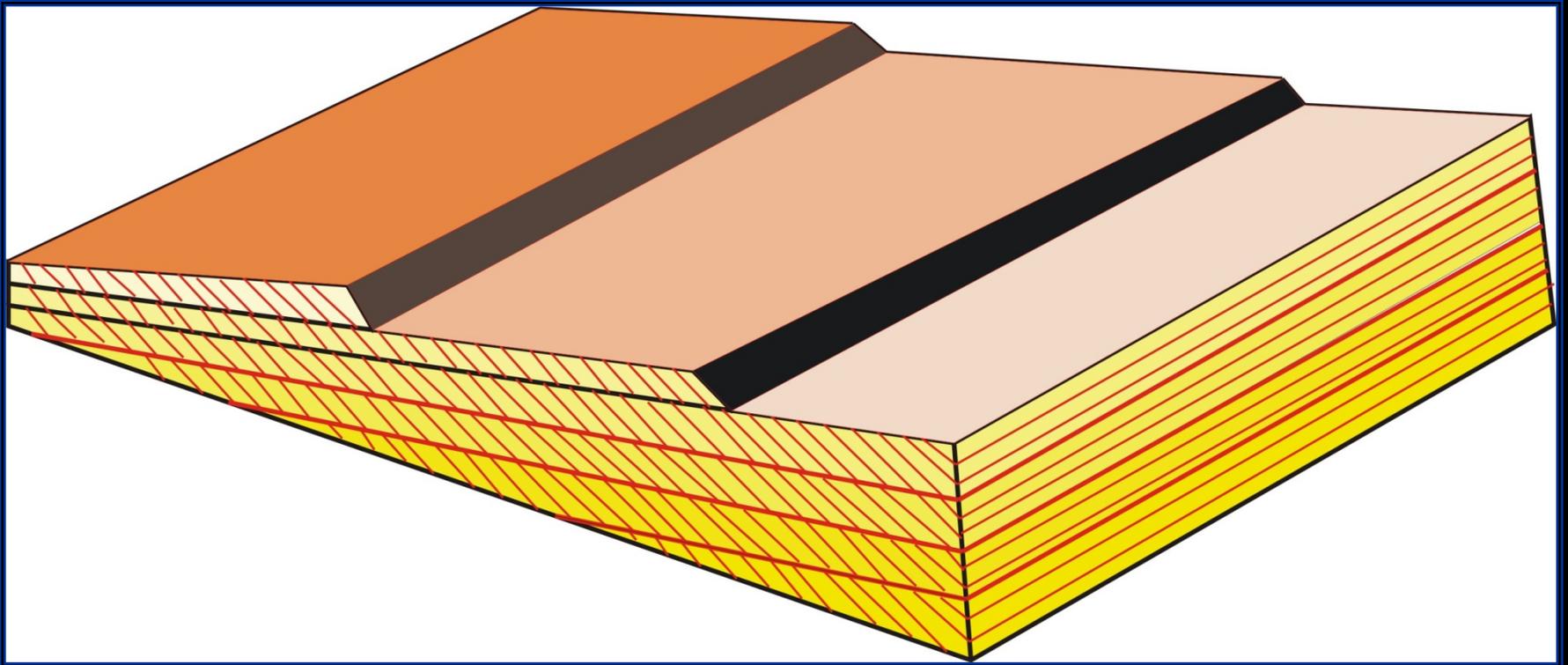
根据层系与上下界面的形状和性质，通常可以将交错层理分为三种基本类型：板状、楔状、槽状交错层理。



(1) 板状交错层理 (tabular cross bedding)



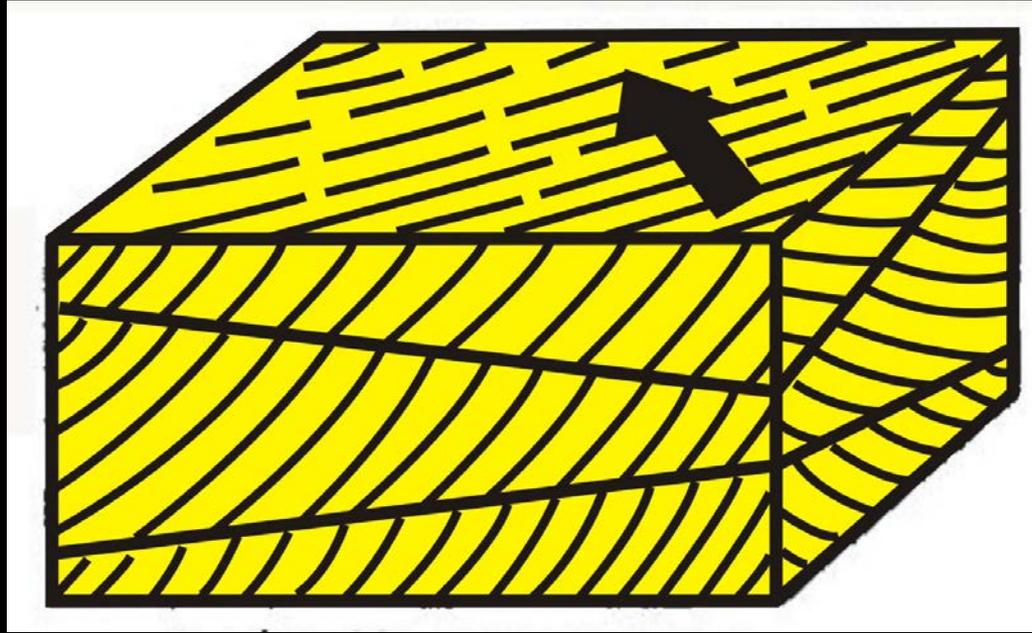
层系之间的界面为平面而且彼此平行，纹层与层系界面斜交。大型板状交错层理在河流沉积中最为典型。



特点：层系顶界为直脊水流波痕，底界有冲刷面；垂直水流方向为平行砂纹，倾向与水流方向一致；纹层内常呈下粗上细变化，有的纹层在顺水流方向上向下收敛。

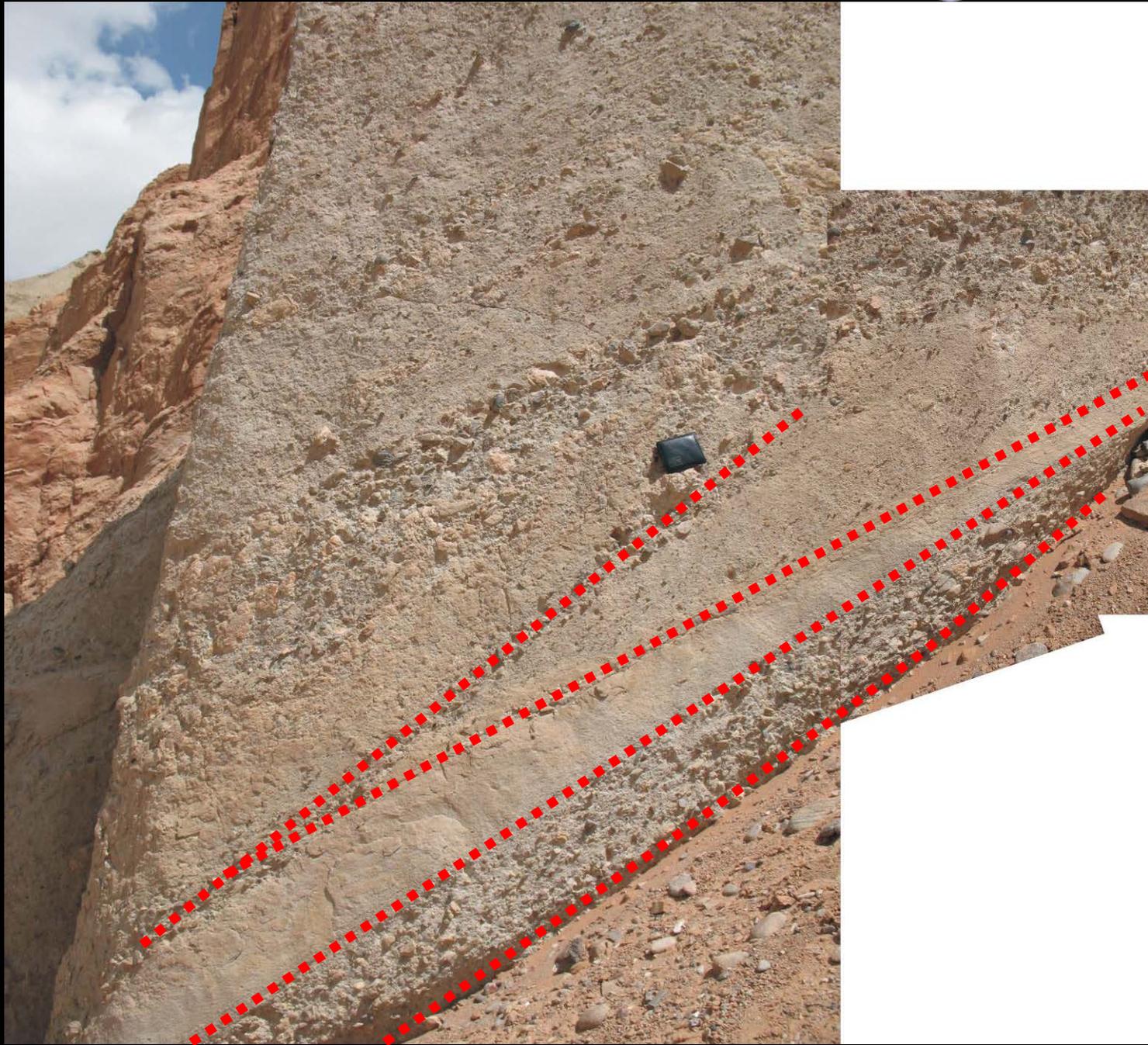


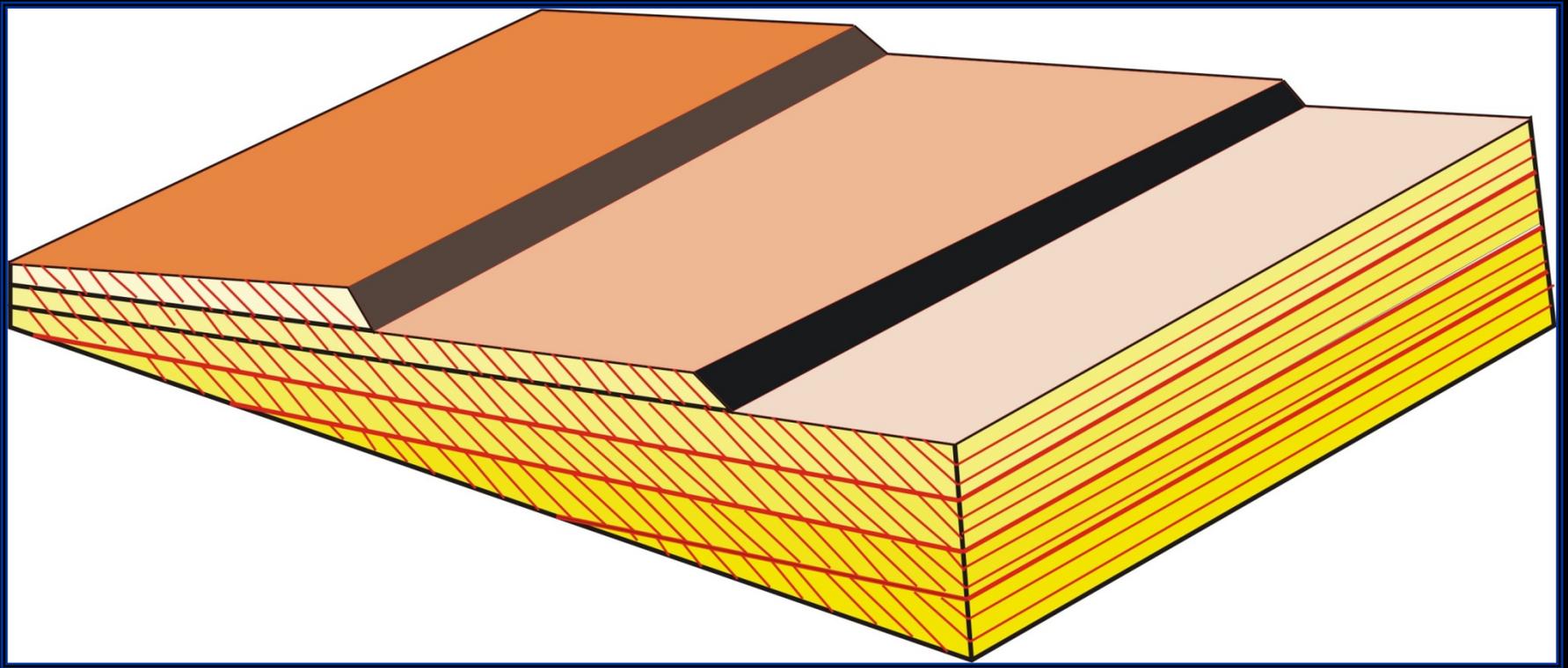
(2) 楔状交错层理 (wedge-shaped cross bedding)



层系界面为平面，且互相不平行，层系厚度变化明显呈楔形；平行于流动方向上纹层与层系界面斜交，垂直于流动方向上纹层与层系界面大致平行或斜交，纹层倾向和倾角变化不定。常见于海、湖浅水地带及三角洲地区。



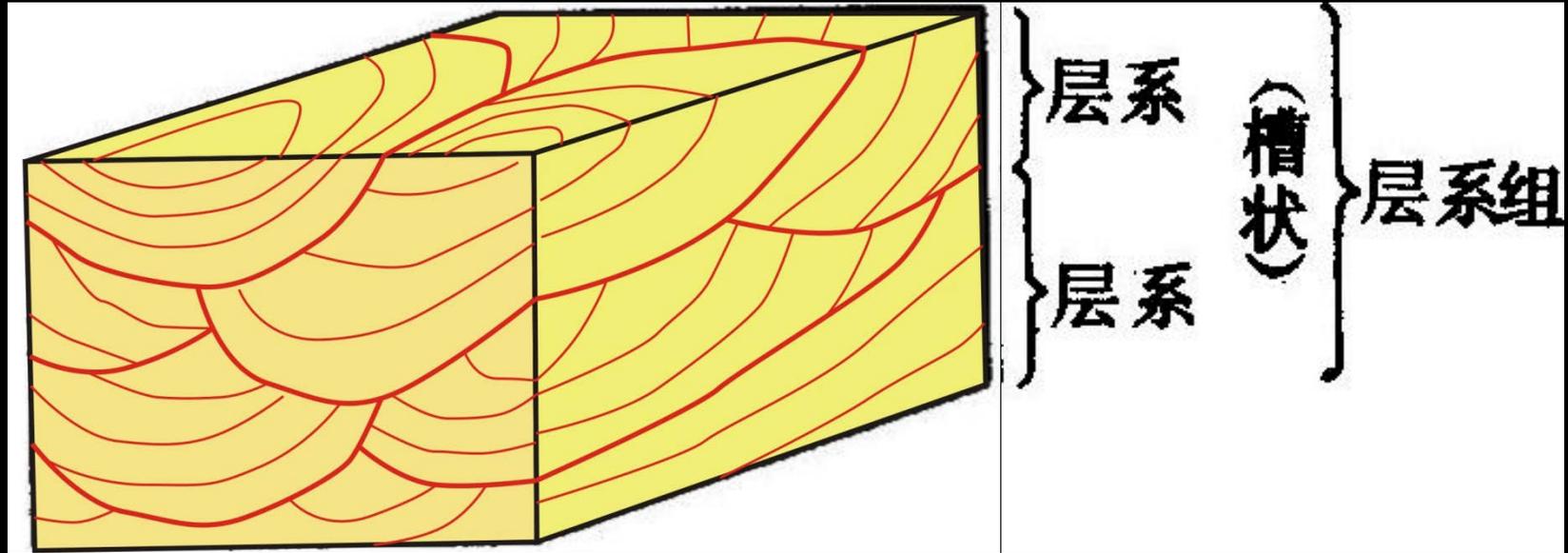




在一定条件下，直脊波痕的纵剖面上可以看到楔状交错层理。



(3) 槽状交错层理 (trough cross bedding)



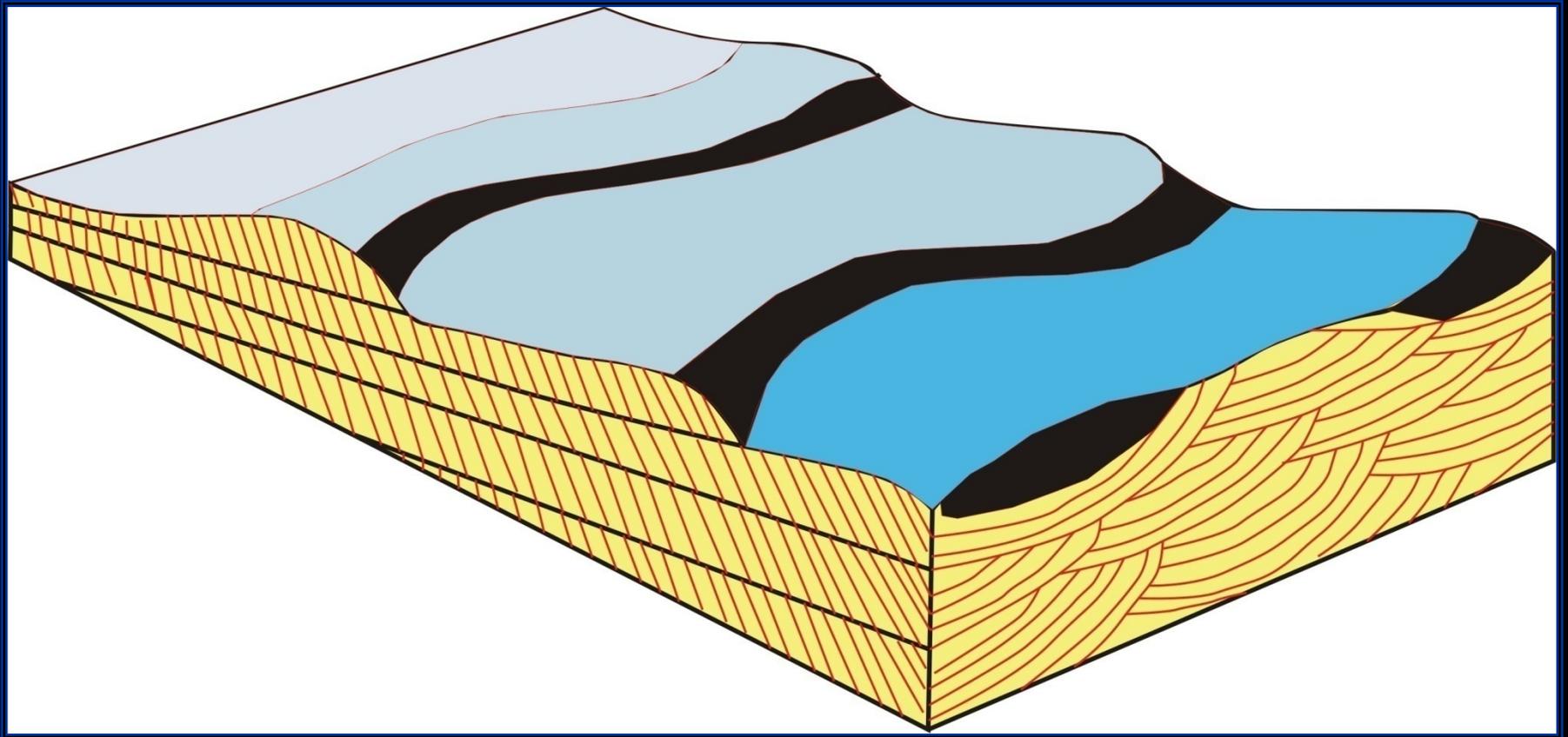
层系底界为槽形冲刷面，纹层顶部被切割。在横切面上，层系界面是槽状，纹层与之一致也是槽状；在纵切面上，层系底界面呈弧状，纹层向下倾方向收敛并与之斜交；顶视为重叠的瓣状。

大型槽状交错层理系底界冲刷面明显，底部常有泥砾，多见于河流环境中。

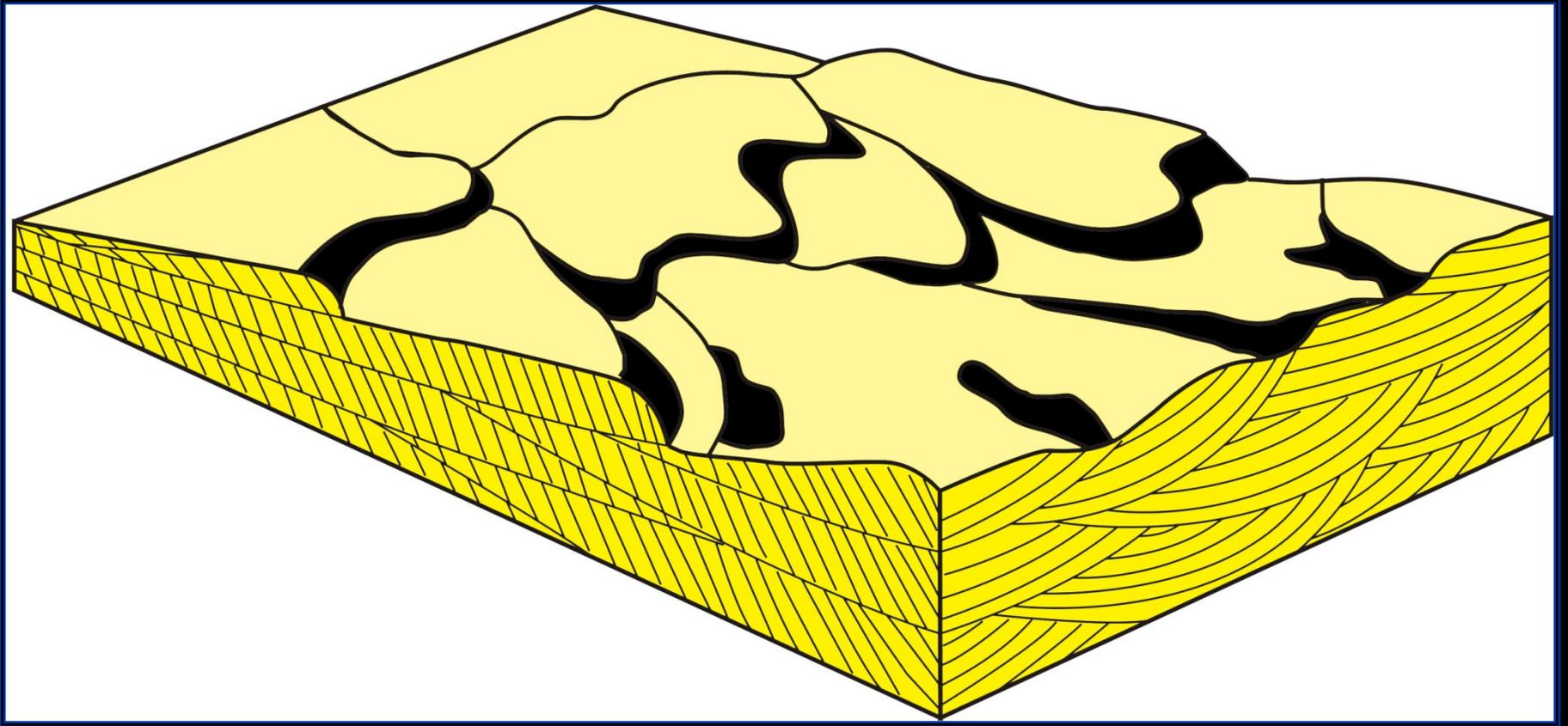


湖北钟祥大口林场鹰子洞瀑布泥盆系云台观组石英砂岩中的糙状交错层理

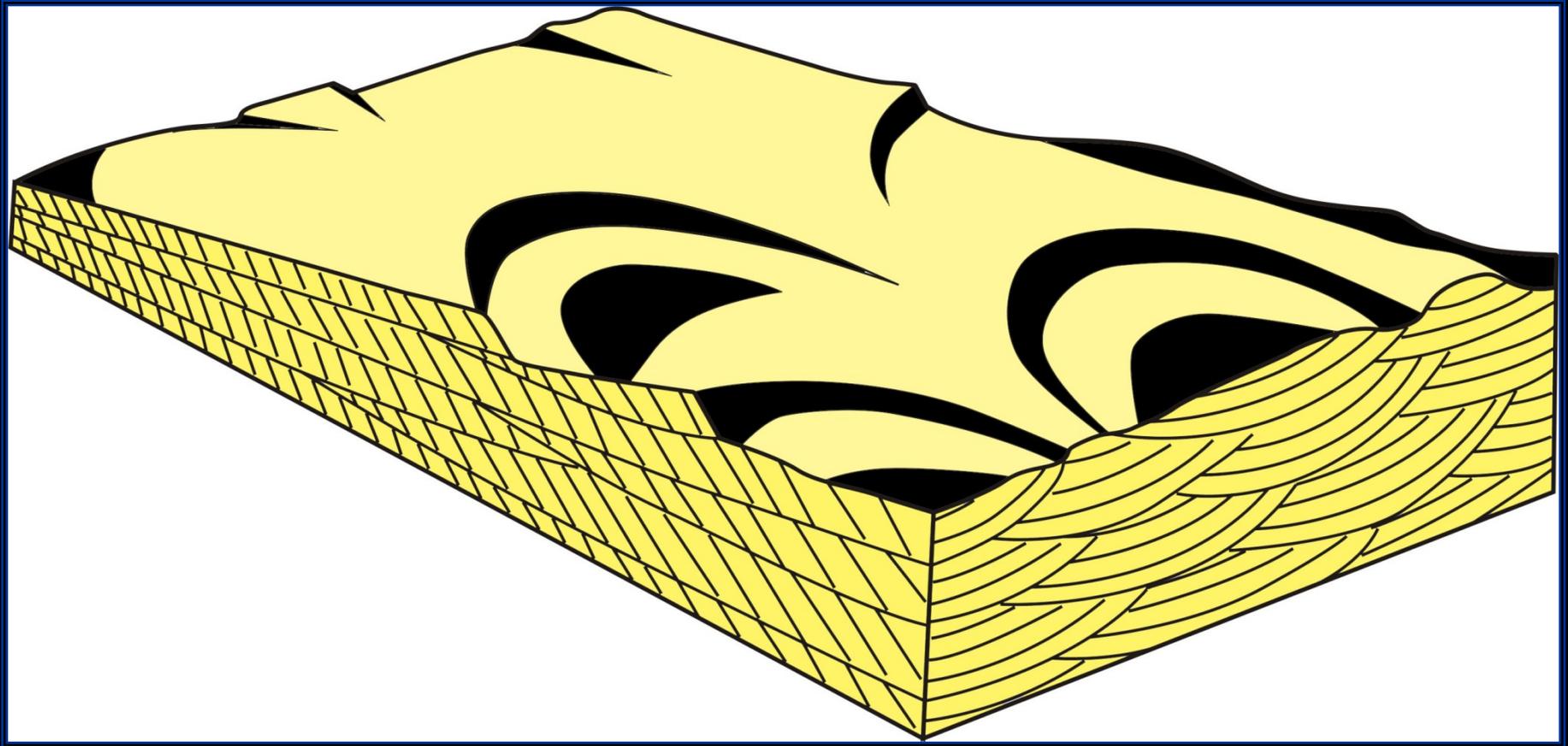




波曲形水流波痕的迁移形成槽状交错层理



舌形水流波痕的迁移形成槽状交错层理

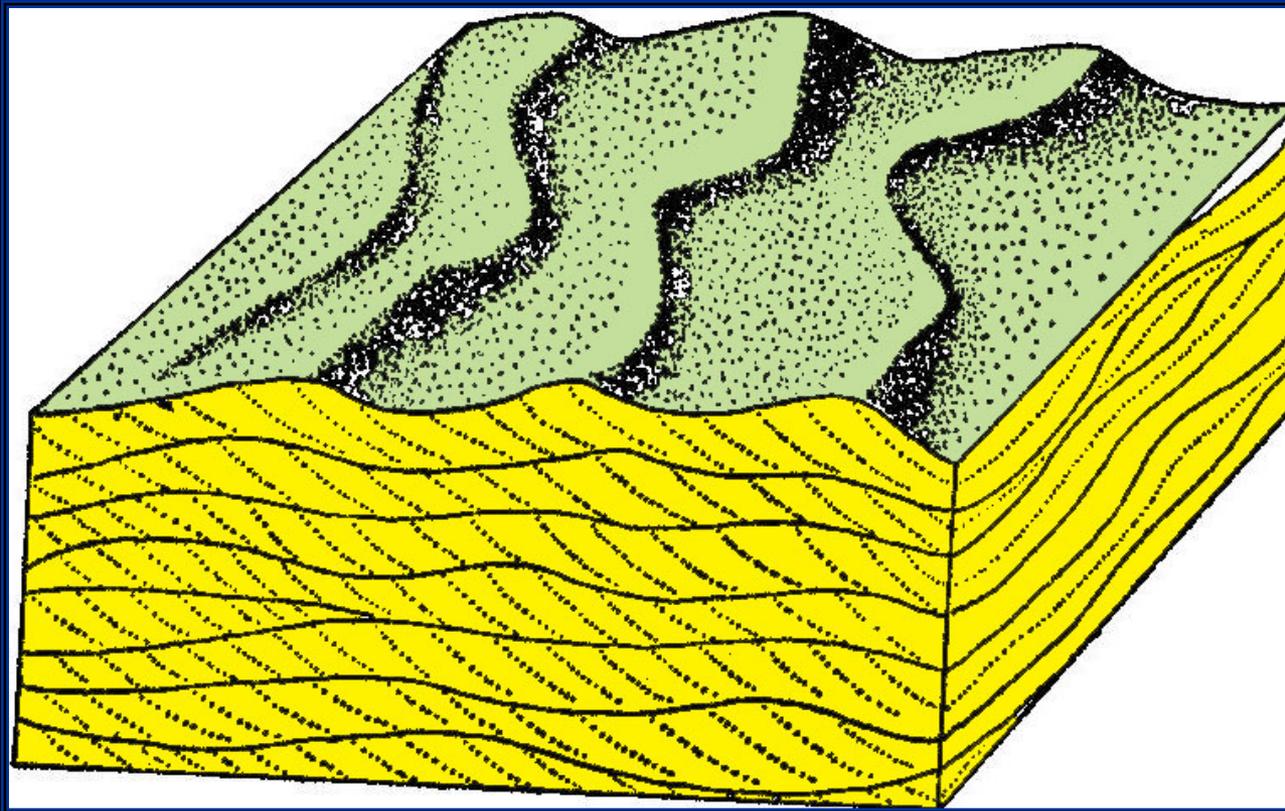


新月形水流波痕的迁移形成槽状交错层理



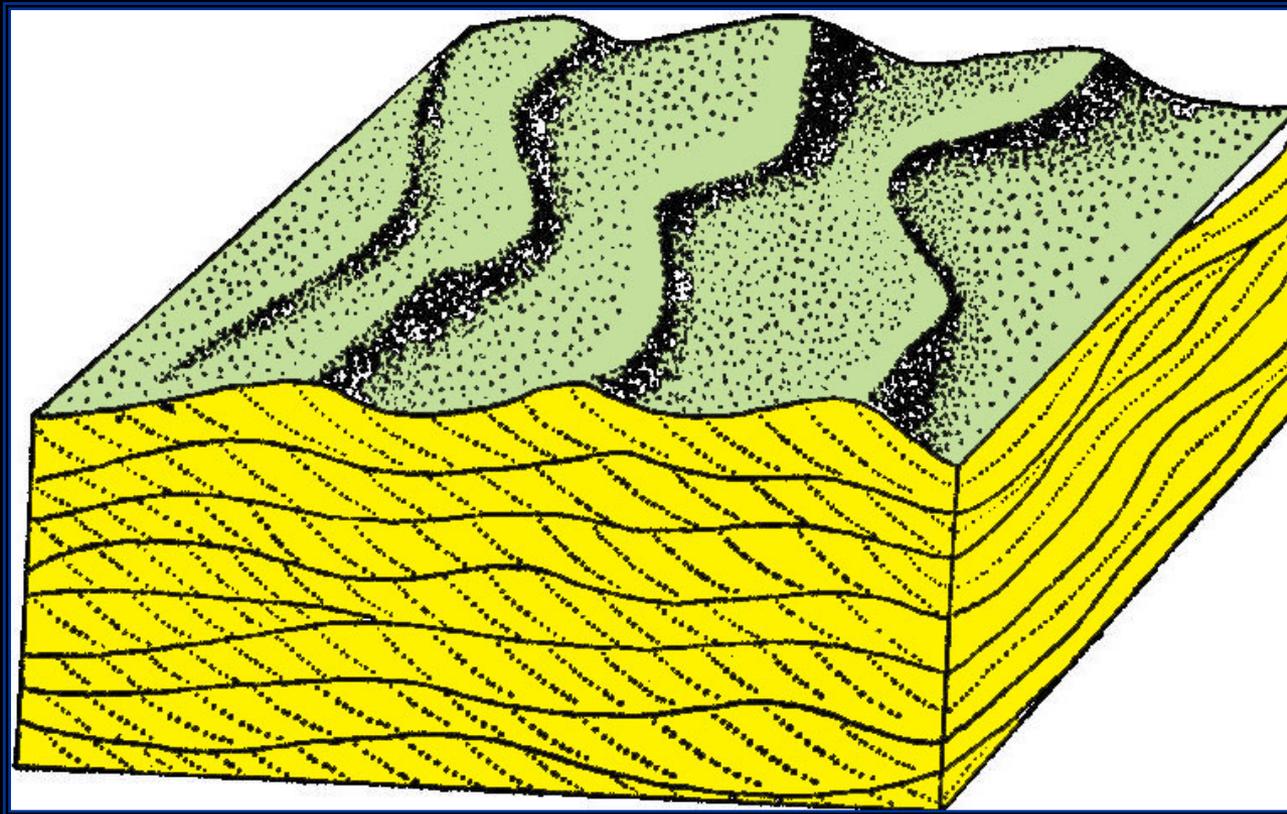
(4) 波状交错层理 (wave cross bedding)

层系界面为波状起伏的**曲面**，上下界面可平行，也可不平行或相交，但总的延伸方向与层面平行。





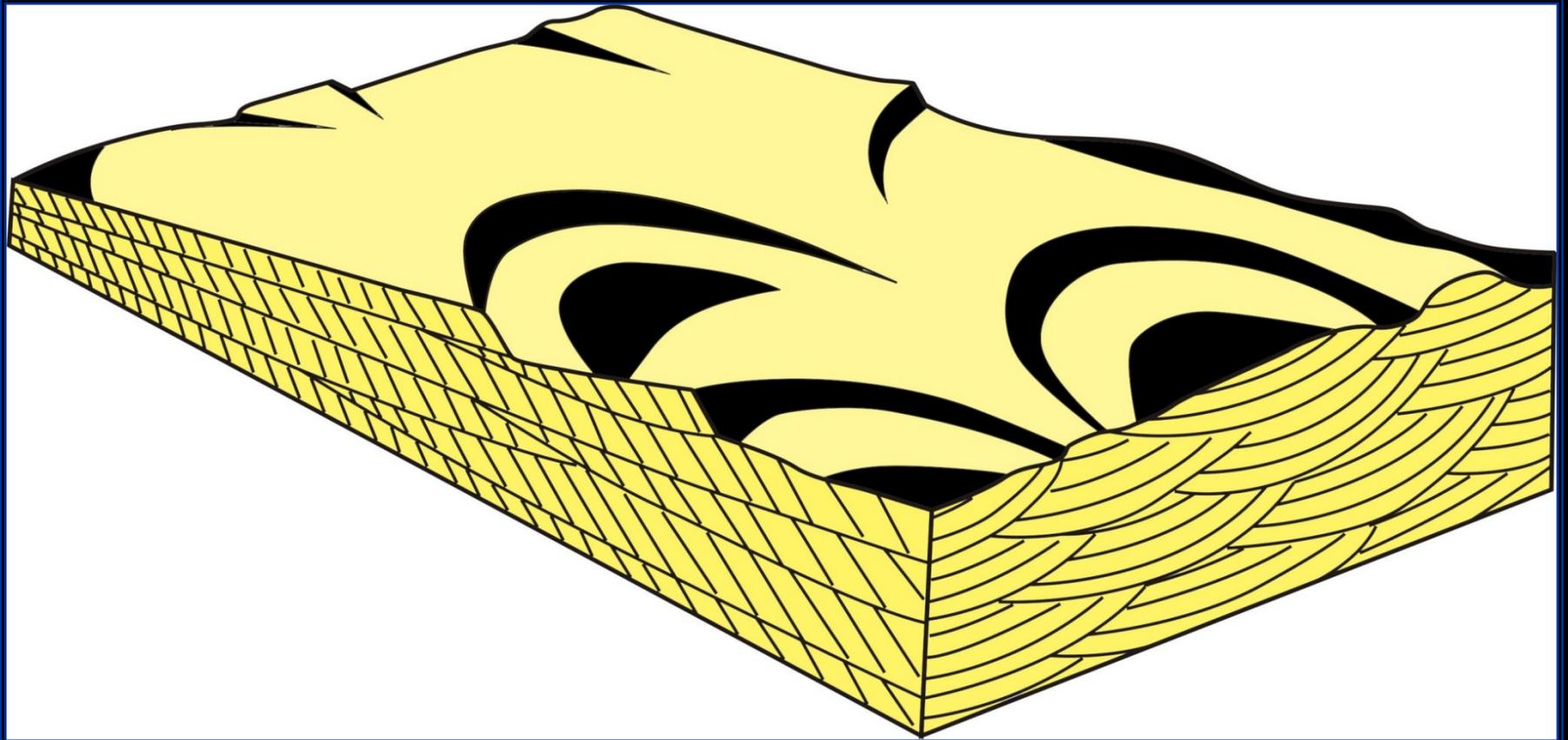
平行水流方向上纹层与层系界面**斜交**，
垂直水流方向上纹层与层系界面**大致平行或斜交**。



在波浪影响下水流波痕的迁移形成**波状交错层理**



在确定交错层理类型时，最好有**三度空间**或至少有两个断面的露头。因为在不同的断面上，层系或纹层可以有不同的形态。





(5) 其它类型的交错层理

- ① 爬升波纹交错层理 (climbing ripple bedding)
- ② 羽状交错层理 (herringbone cross bedding)
- ③ 浪成波纹交错层理 (wave-ripple bedding)
- ④ 冲洗交错层理 (swash cross bedding)
- ⑤ 侧积交错层理 (epsilon cross bedding)
- ⑥ 丘状交错层理 (hummocky cross bedding)
- ⑦ 洼状交错层理 (swaley cross bedding)
- ⑧ 风成交错层理 (aeolian cross bedding)



① 爬升波纹交错层理 (climbing ripple bedding)

亦称上叠波纹交错层理，也是沙波迁移的产物。



Climbing ripple bedding





悬浮载荷速率与底载荷速率的关系

$V_{\text{悬浮载荷}} > V_{\text{底载荷}}$: 同相位或近同相位的波状层理

$V_{\text{悬浮载荷}} = V_{\text{底载荷}}$: 爬升波纹交错层理

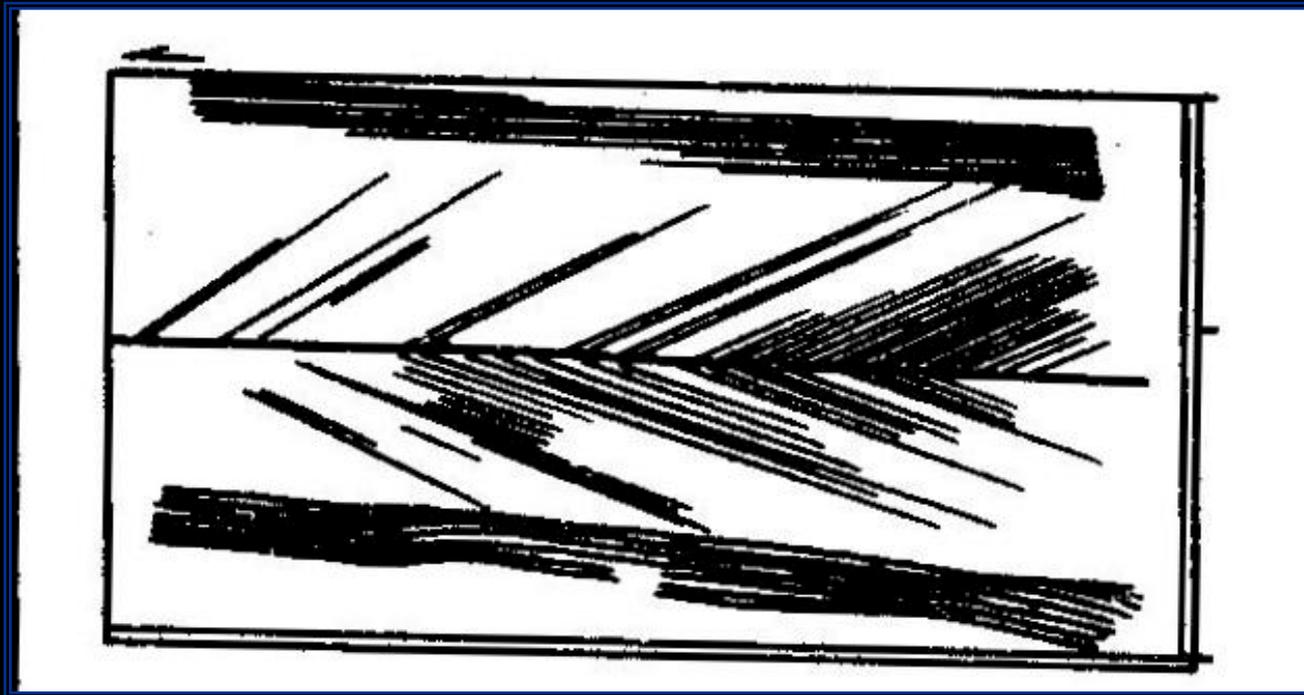
$V_{\text{悬浮载荷}} < V_{\text{底载荷}}$: 沙波向前迁移而不向上生长

类型	剖面	保存程度	悬移质/推移质比	波痕爬升角
II型迁移爬升波痕层理过渡		只有背流面	 增大	 增大
I型迁移爬升波痕层理过渡		背流面和向流面		
同相位爬升波痕层理				



②羽状交错层理 (herringbone cross bedding)

一种特殊类型的交错层理。其特点是纹层平直或微向上弯曲，相邻斜层系的纹层倾向相反，延伸至层系界面进彼此呈锐角相交，呈羽毛状。





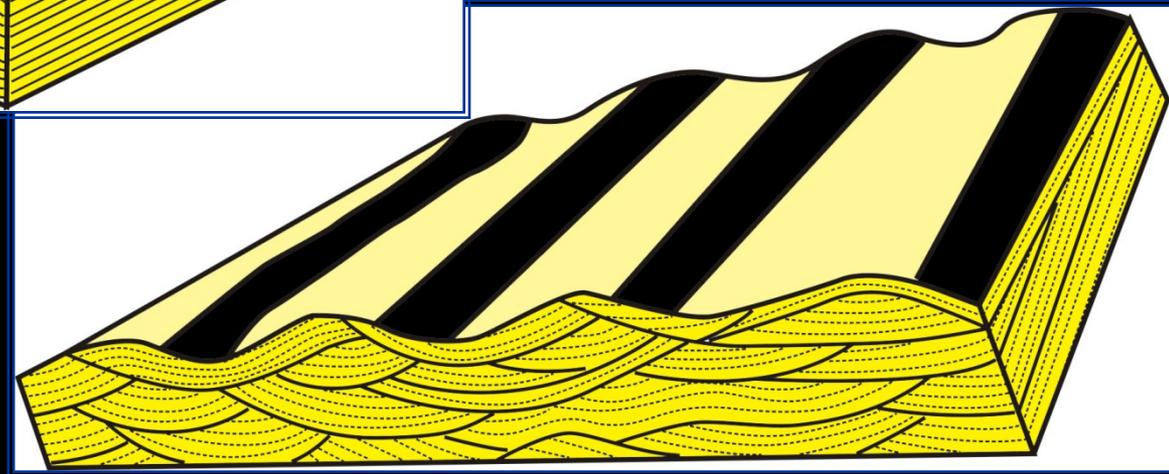
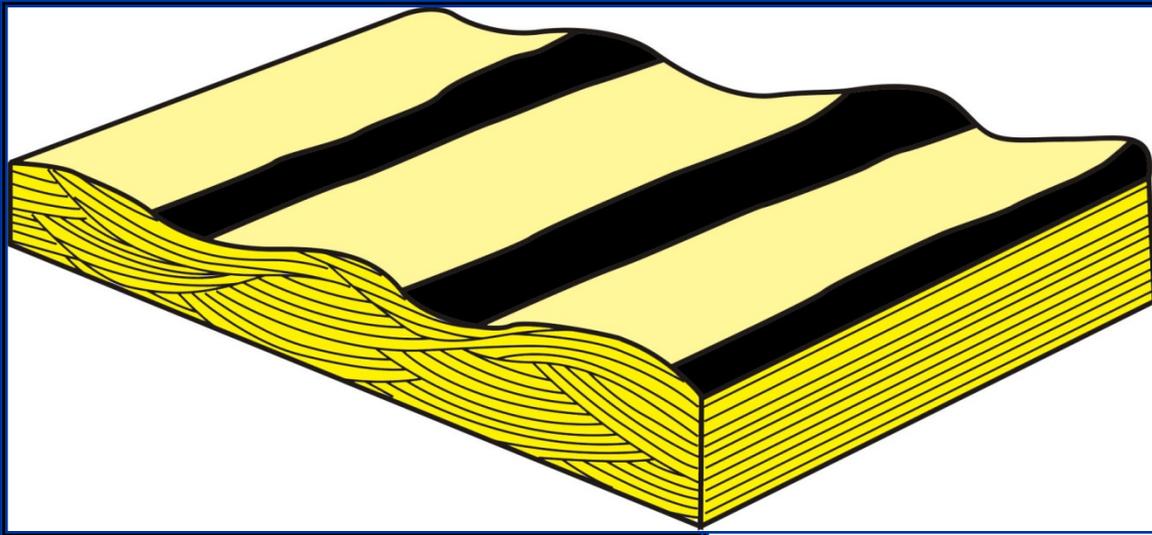
湖南石门杨家坪寒武系灰岩中的羽状交错层理

这种层理是在具有反向水流存在的情况下形成的，一般见于潮坪环境中。

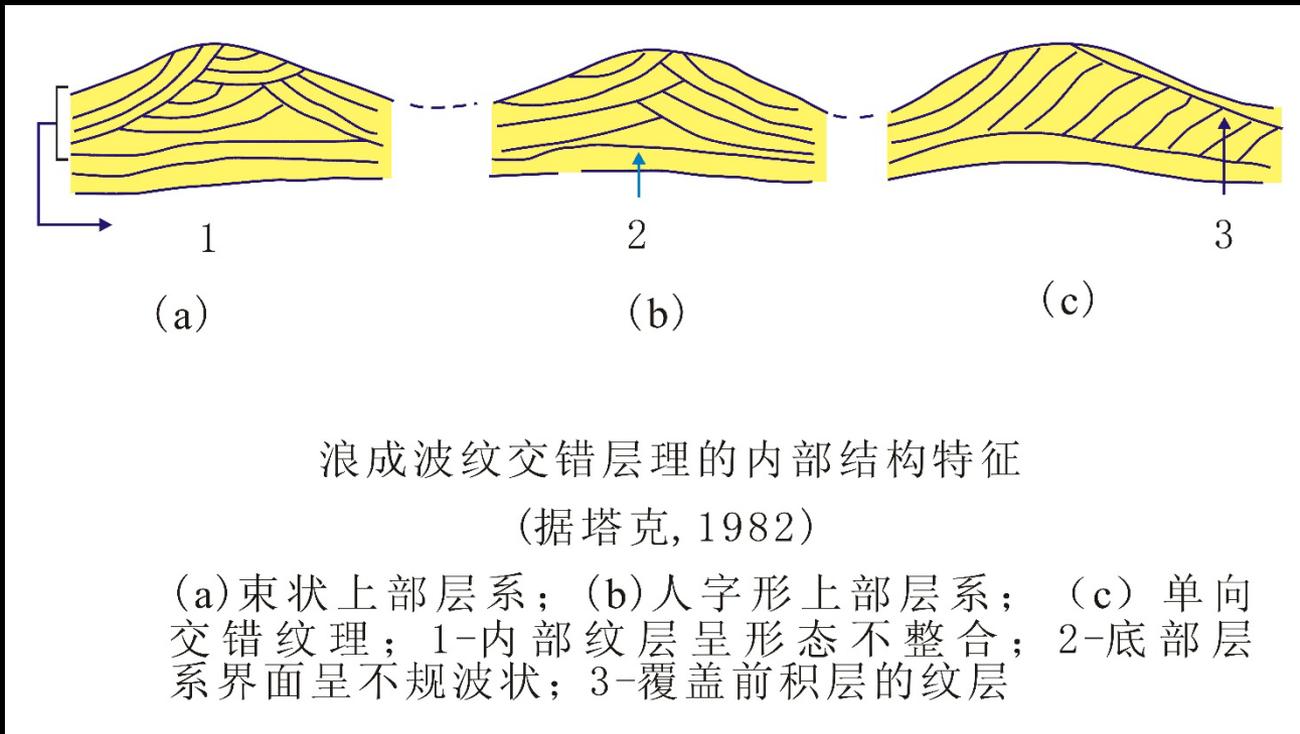


③浪成波纹交错层理 (wave-ripple cross bedding)

由浪成沙波迁移形成的，不同于水流沙波迁移所形成的层理。



浪成波痕的迁移形成浪成交错层理的示意图



- 对称波浪形成的：由**倾向相反、相互超覆的前积层**组成，内部有**人字形构造**。
- 不对称波浪形成的：具不规则波状起伏的层系界面，前积纹层成组排列成束状层系，前积层通过波谷到达相邻沙纹的翼上，为人字形构造。



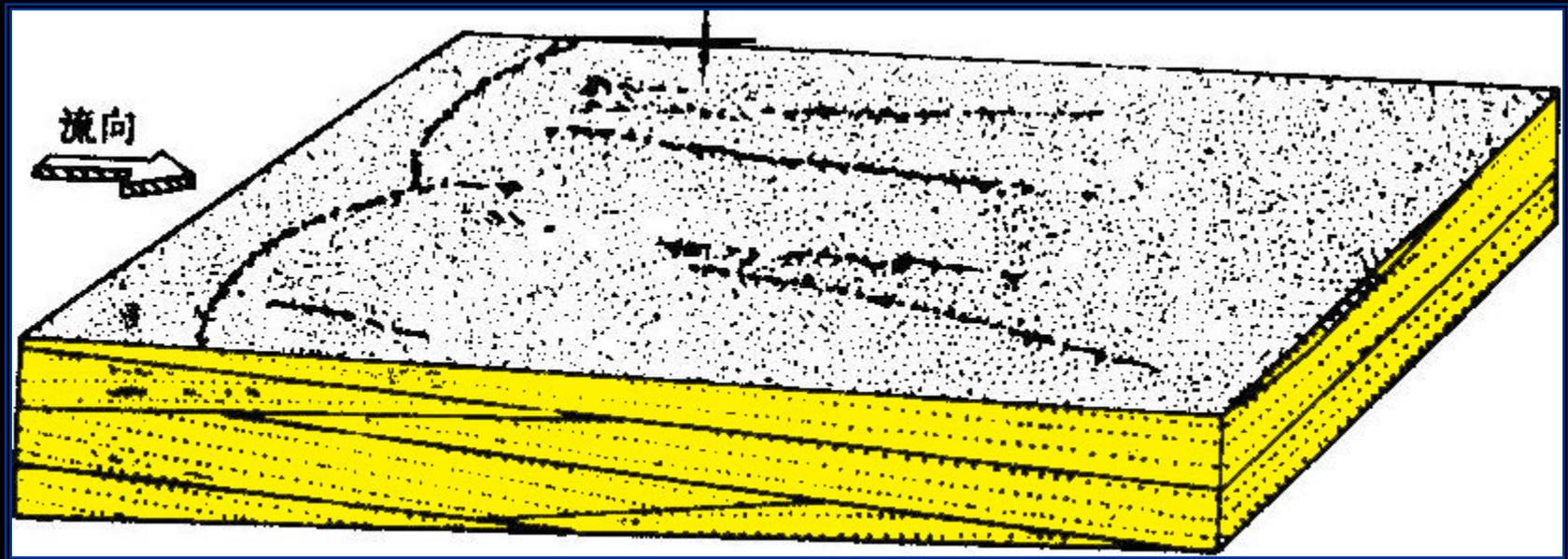
浅湖砂坝中的浪
成沙纹交错层理



2009/09/26 09:20

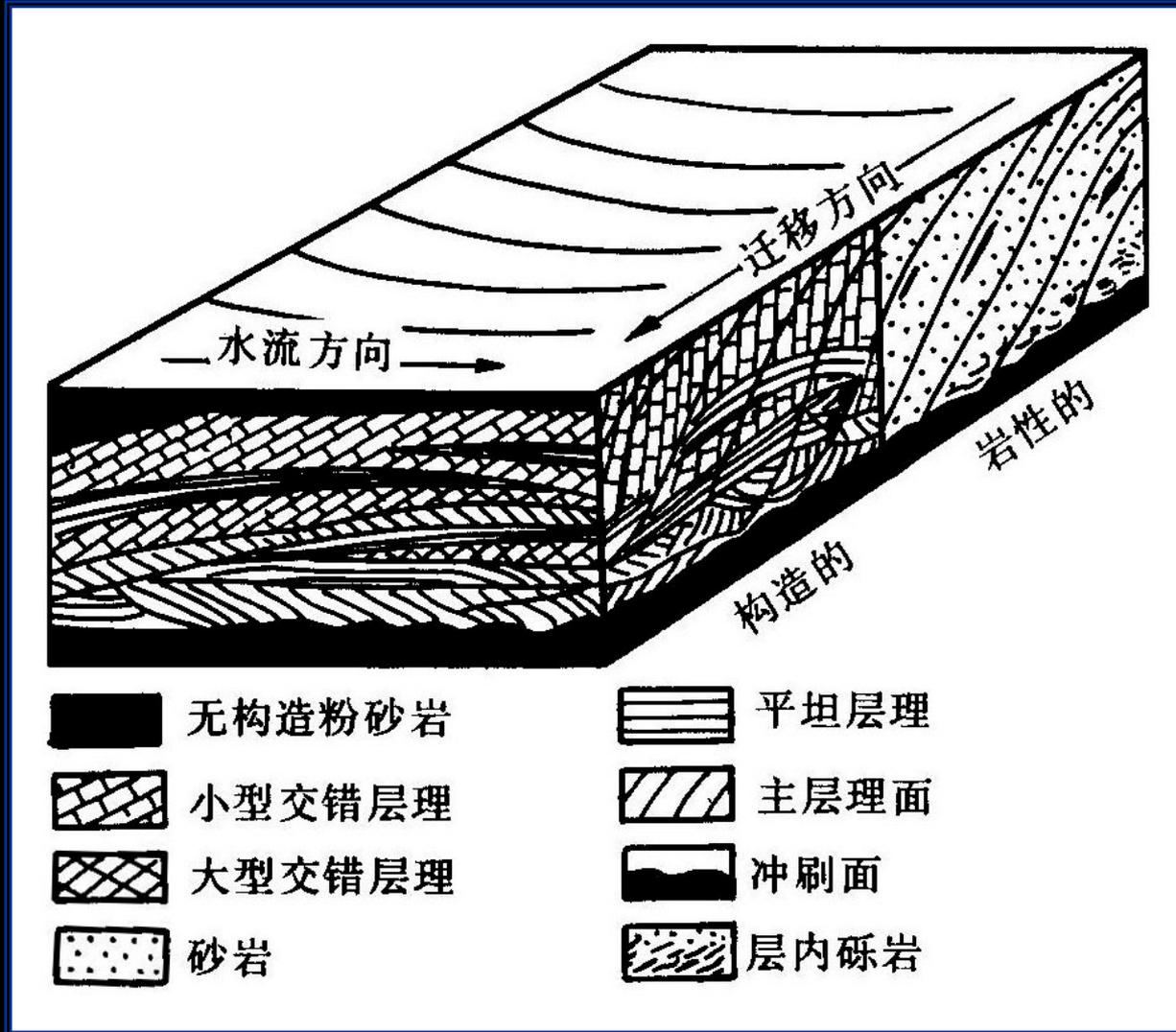
④ 冲洗交错层理 (swash cross bedding)

也称低角度交错层理。其特点是层系界面和纹层平直，层系呈楔状以低角度相交，一般 $2\sim 10^\circ$ ，多向海倾斜。主要出现于前滨环境中。





⑤ 侧积交错层理 (epsilon cross bedding)



侧积交错层理是水道侧向迁移加积作用的产物。



侧积交错层层系厚度较大，多在0.5m以上，有时可达数米。

层系多呈板状，亦见楔状和透镜状，底部均发育冲刷构造，冲刷面上往往分布砾石或粗砂。

单一层系从底到顶沉积物粒度明显变细，多从砾石级（以细砾为主）到中砂，局部达细砂级。



侧积交错层的细层厚度亦较大，一般为2~10cm，局部达10cm以上，且同一层系中细层厚度亦有较大差别，细层多呈“S”形，向上向下明显收敛，但多数侧积交错层因受到侵蚀而只保留其下部，从而形成向下收敛明显的细层。

同一层系中细层的粒度可有较大的差别。

侧积交错层的“细层”中可发育次一级的前积作用形成的交错层，常见有板状交错层及沙纹层理等，其分布受“细层”界面的限制。



这种侧积交错层是一种良好指示沉积环境的标志，它指示河道或水下分流河道的快速侧向迁移，在富砂少泥环境中易于发育，主要出现在**辫状河道**和**水下分流河道**沉积中。

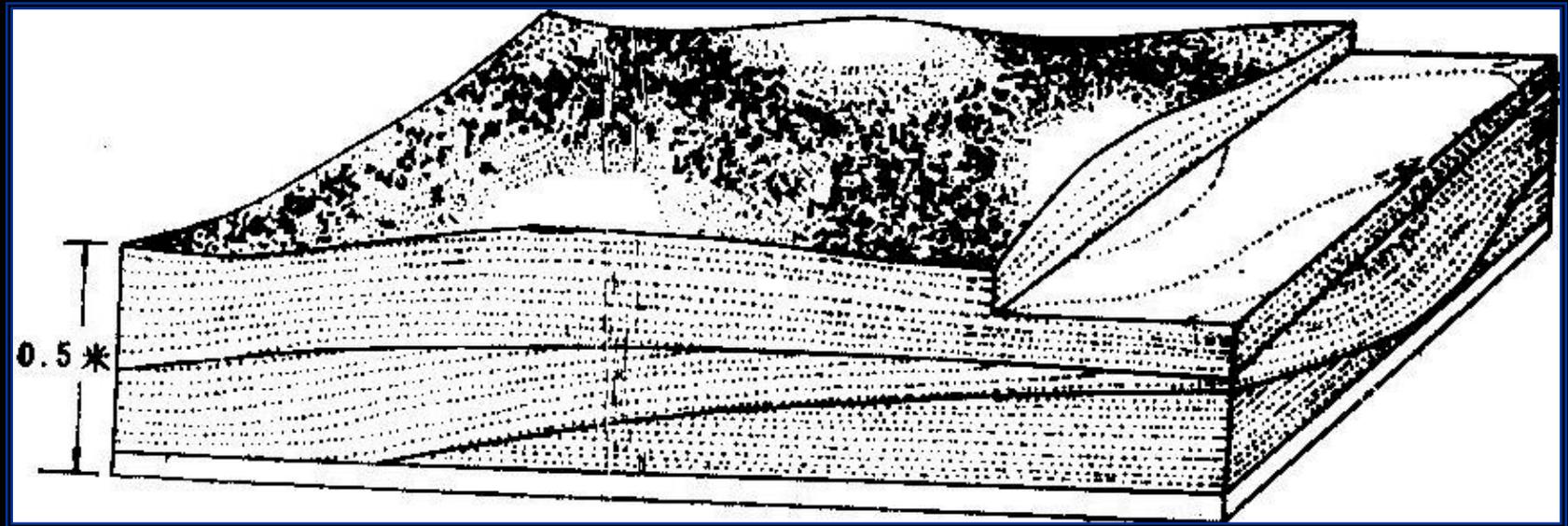


据焦养泉等



⑥ 丘状交错层理 (hummocky cross bedding)

由一些大型的宽缓波状层系组成，外形上象隆起的圆丘状，向四周缓倾斜。



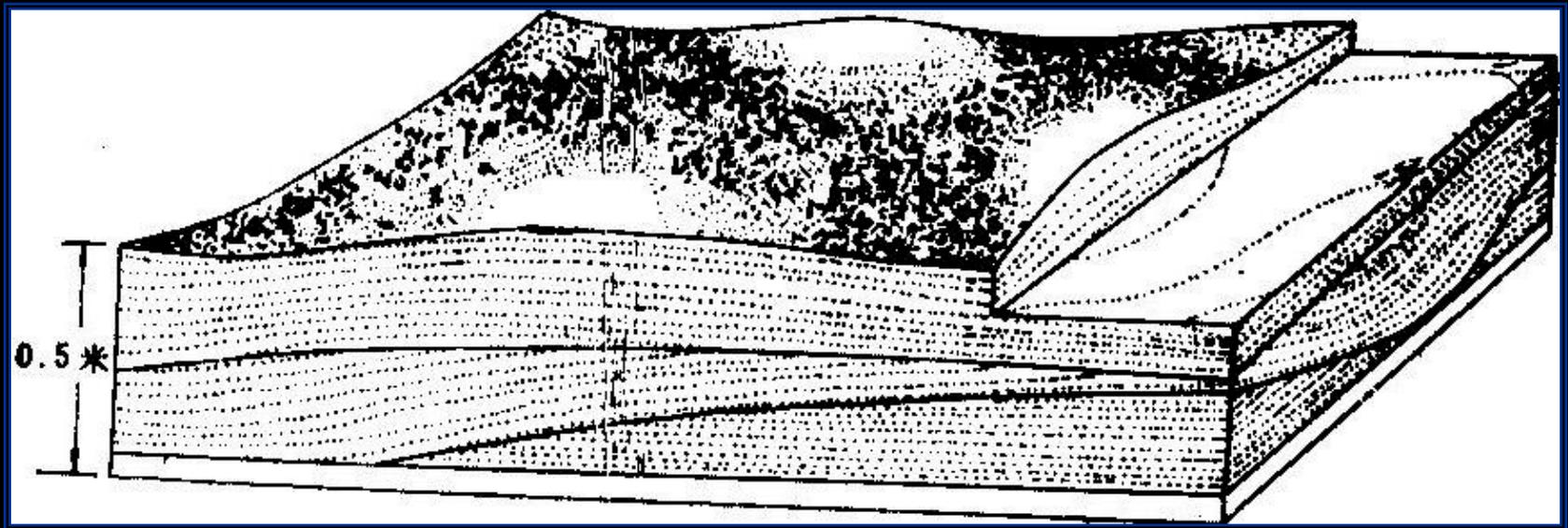


Hummocky cross bedding



⑦ 洼状交错层理 (swaley cross bedding)

是彼此以低角度交切的浅洼坑，其中充填的细层与浅洼坑底界面平行，而向上变成很缓的波状并近于平行的层理。





Swaley cross bedding (G. Hu, 2013, Book Cliff)



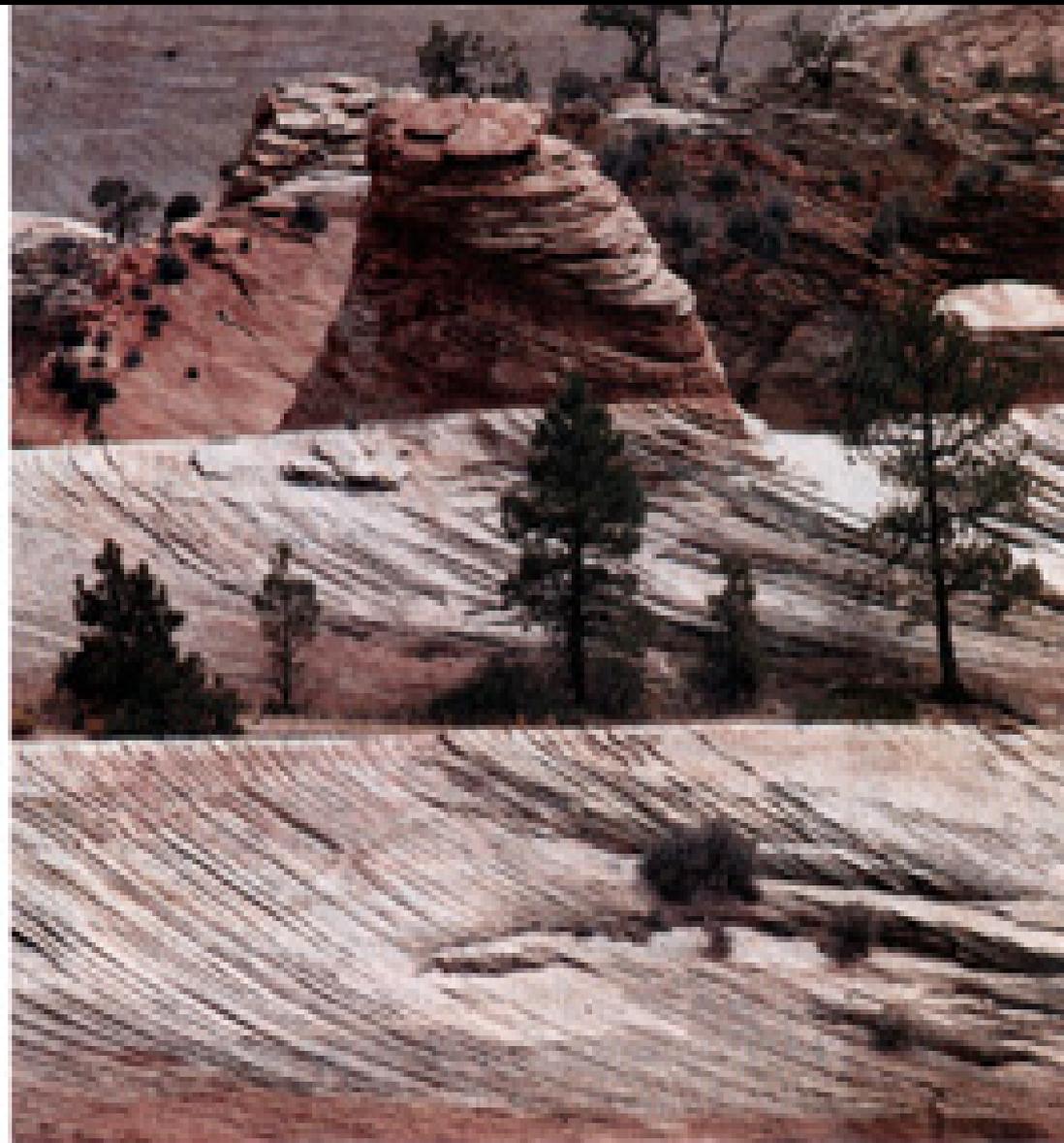
⑧ 风成交错层理 (eolian cross bedding)

风的吹扬作用可以形成风砂流，风砂流的流动造成床沙形体迁移，从而形成风成交错层理。层系厚度较大（巨大），几十厘米～几米。前积纹层多高角度倾斜， $25^{\circ} \sim 34^{\circ}$ 。



A.

Figure 6.20 A. The cut-away section of this sand dune shows cross-bedding. (Photo by John S. Shelton)
B. The cross-bedding of this sandstone indicates it was once a sand dune. (Photo by David Muench)



B.





P. Gore 1996



Eolian cross bedding (G. Hu, 2013, Snow Canyon State Park)



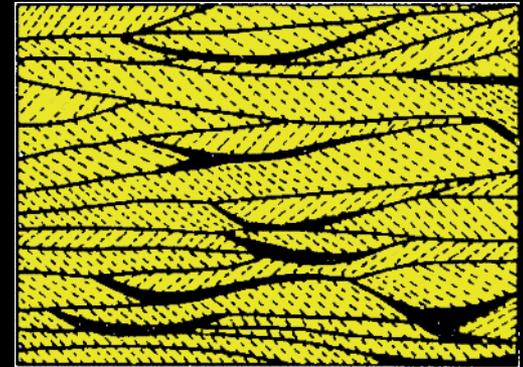


Eolian cross bedding (G. Hu, 2013, Snow Canyon State Park)

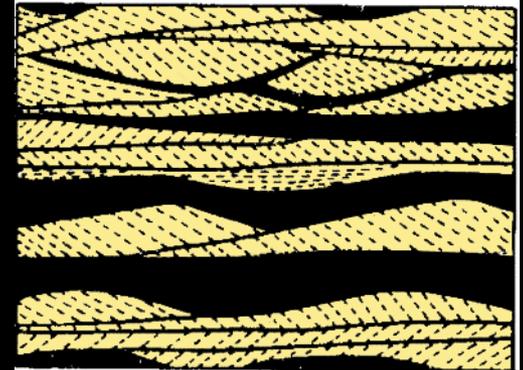
2.3 压扁层理、波状层理和透镜状层理

这是在砂、泥沉积中的一种复合层理。

它是由压扁层理（又称脉状层理flaser bedding）、波状层理（Wavy bedding）和透镜状层理（lenticular bedding）组合而成。



(a)



(b)



(c)



透镜状层理



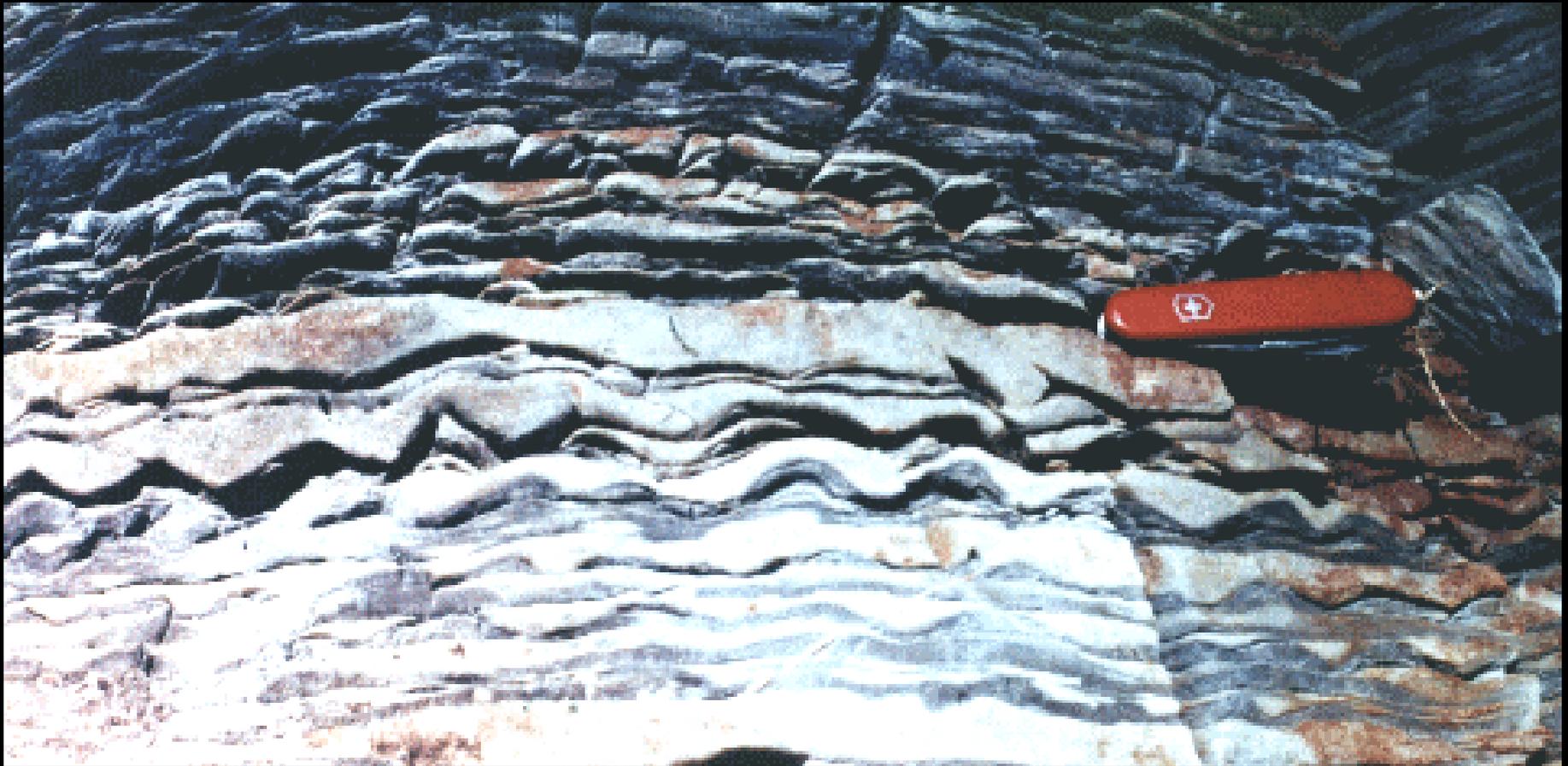
脉状层理
波状层理



透镜状层理
脉状层理



波状层理特点：纹层呈**对称或不对称的波状**，但总的方向平行于层面。





波状层理的成因：

■水流活动期与水流停滞期交替；

■波浪振荡造就**对称**的波状起伏界面为主，**单向水流**的前进运动造就**不对称**的波状起伏面为次；

■一般要有**大量悬浮物质**沉积，当**沉积速率**>**流水的侵蚀速率**时，可保存连续的波状层理。

在水介质稍浅的地区，如**海、湖浅水地带**和**河漫滩、潮坪**等地区较常见。



这种复合层理的形成，说明环境有砂、泥供应，而且水流活动期与水流停滞期交替出现。

主要发育在粉砂岩、泥质粉砂岩与泥岩、粉砂质泥岩互层的地层中。

主要形成于潮下带、潮间带及深水砂泥沉积环境中。



以下各种水动力条件形成什么类型的层理？

◆双向水流：

◆波浪振荡：

◆波浪振荡+单向水流：

◆间歇性波浪振荡+大量悬浮物沉积（悬浮载荷>>底载荷）：

◆间歇性单向水流+大量悬浮物沉积（悬浮载荷>>底载荷）：

◆间歇性单向水流+大量悬浮物沉积（悬浮载荷=底载荷）：





如何区分以下层理？

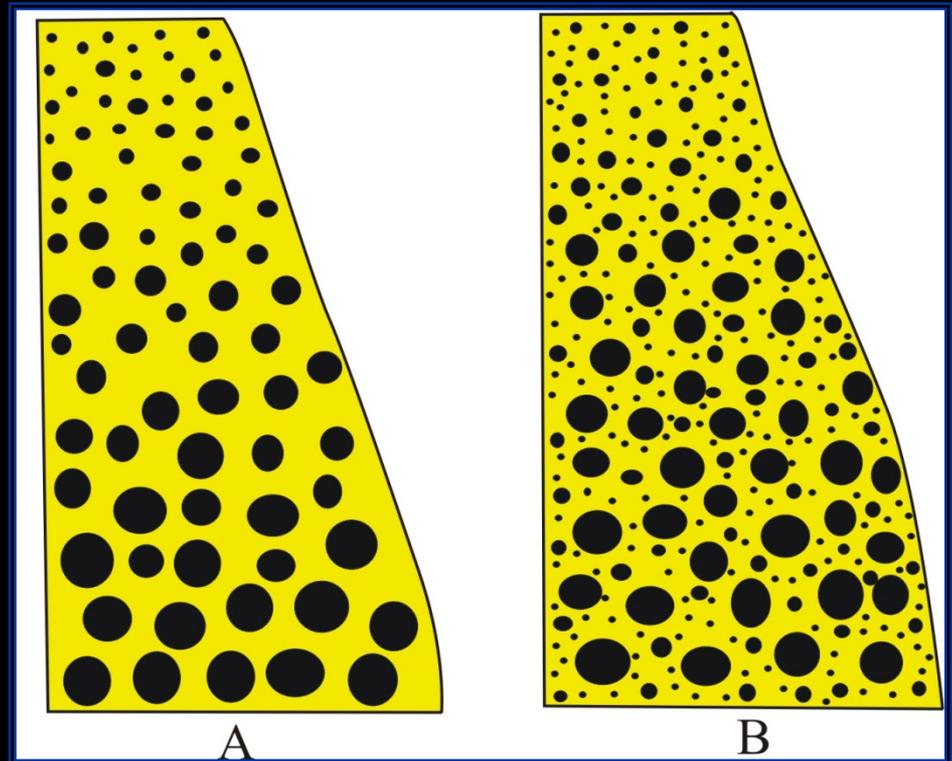
- ◆羽状交错层理、楔状交错层理和冲洗交错层理
- ◆浪成交错层理和槽状交错层理
- ◆平行层理和水平层理

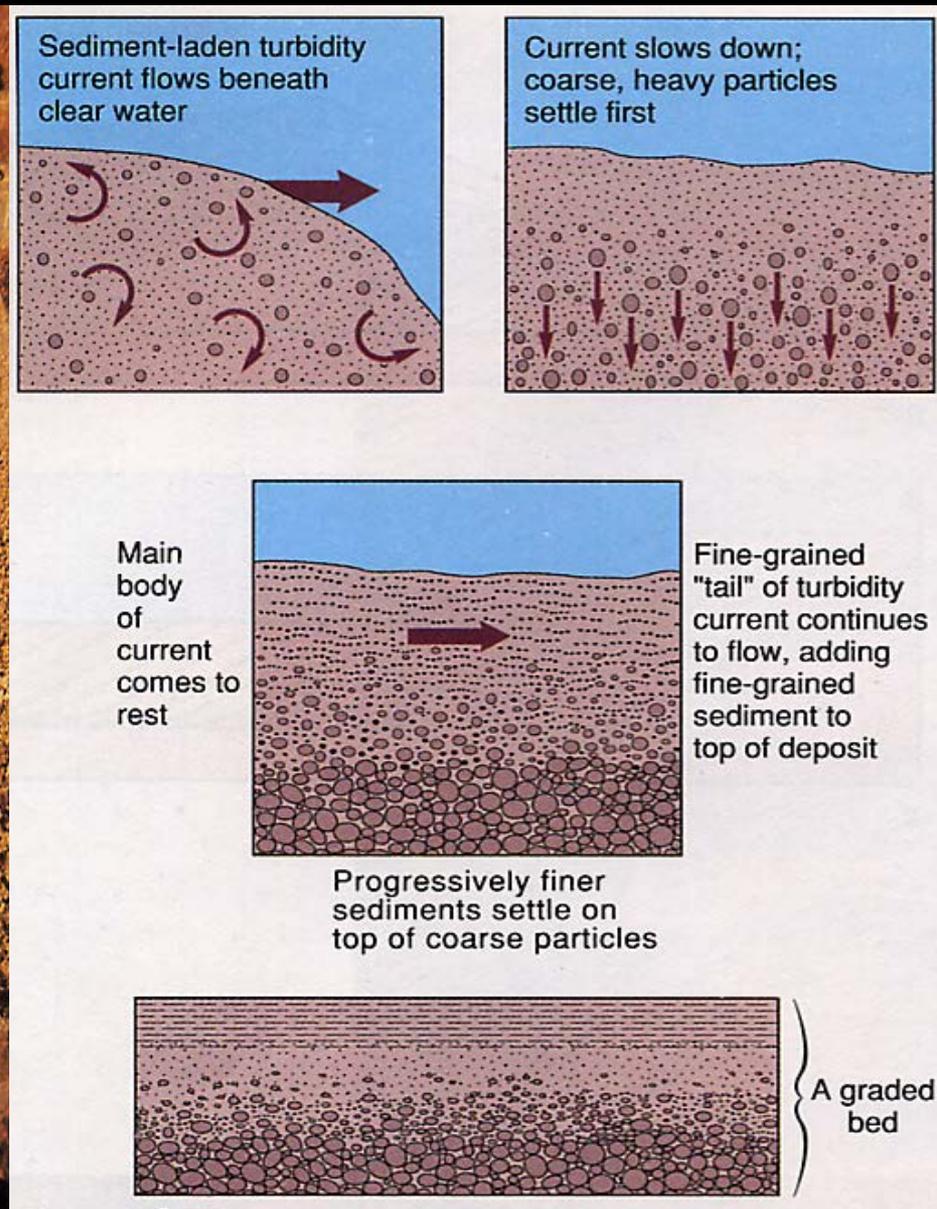


2.4 递变层理

又称**粒序层理**（graded bedding），是具有粒变递变的一种特殊层理，分**正粒序**、**逆粒序**和**双向粒序**（正逆粒序呈渐变性衔接）。

其特点由底部向顶部颗粒逐渐**由粗变细**或**由细变粗**，除了粒度变化外，没有任何内部纹层。主要由**浊流**形成。





浊流形成的递变层理

递变层理的形成过程





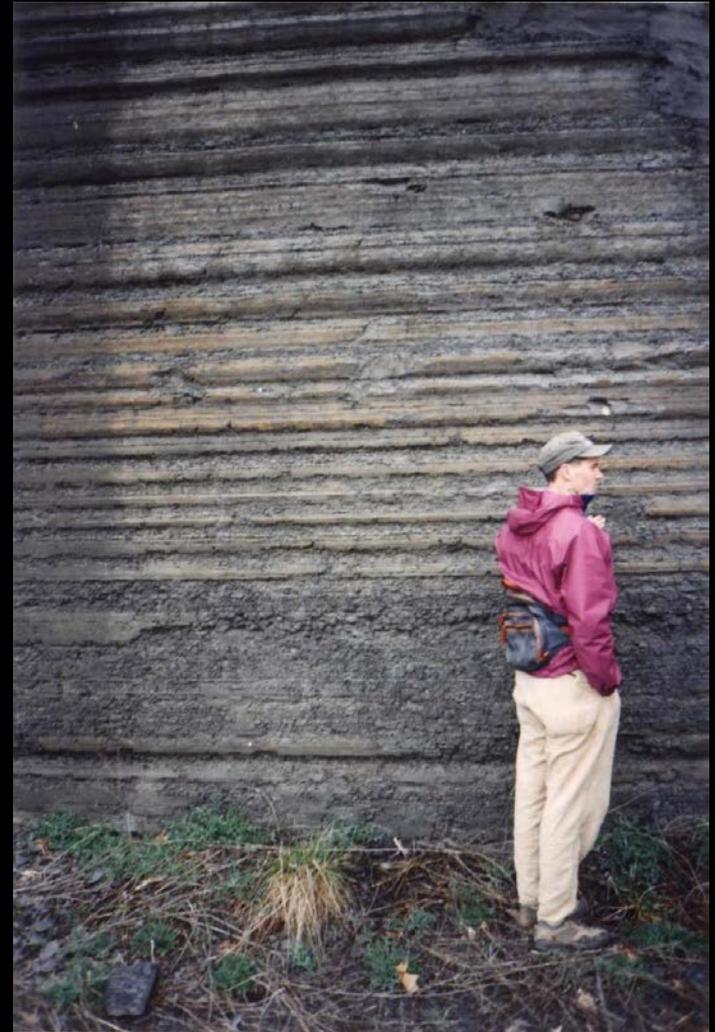
How does graded bedding form?





2.5 韵律层理 (rhythmic bedding)

由成分、结构和颜色不同的薄层作有规律地重复出现而组成的。为潮汐周期变化、季节周期变化所致，或由浊流沉积形成的复理石韵律。







Deep-sea turbidites
exposed along the
coast of Washington



中扬子下寒武统天河板组灰岩与泥岩稳定互层



2.6 均质层理

通常称**块状层理**（massive bedding），是一种呈现大致均质外貌，不具任何纹层构造的层理。

其特点内部物质均匀，组分和结构都无分异现象。

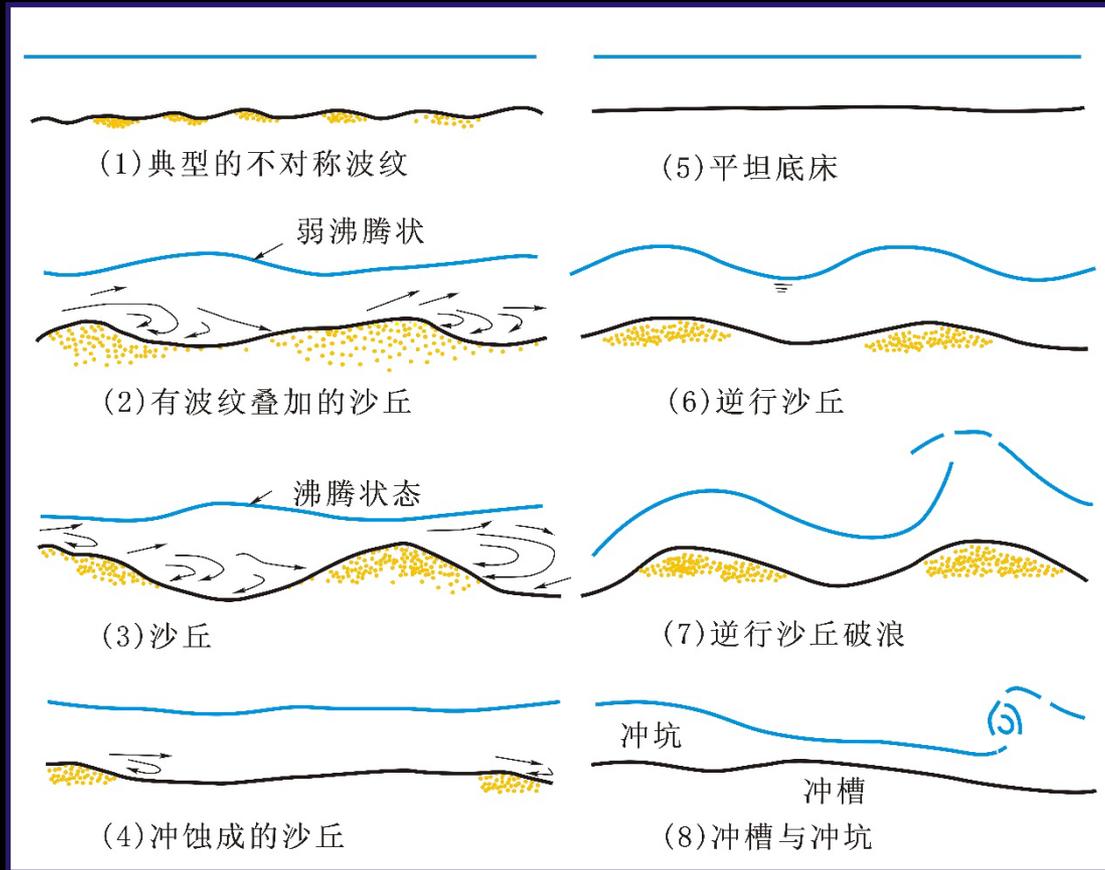
成因：（1）悬浮物质快速沉积，（2）浊流，（3）生物扰动。



3. 流动体制、底床形态及其与层理形成的关系

底床形态：河道底床上松散的沉积物在流水的作用下形成的各种形态，也叫**床沙形体**。

冲积河道中的砂体可以划分为**下部流动体制**和**上部流动体制**两个强度范围。下部流动体制指底床形态主要受底部水流控制，上部流动体制指底床形态主要受水体自由表面控制。

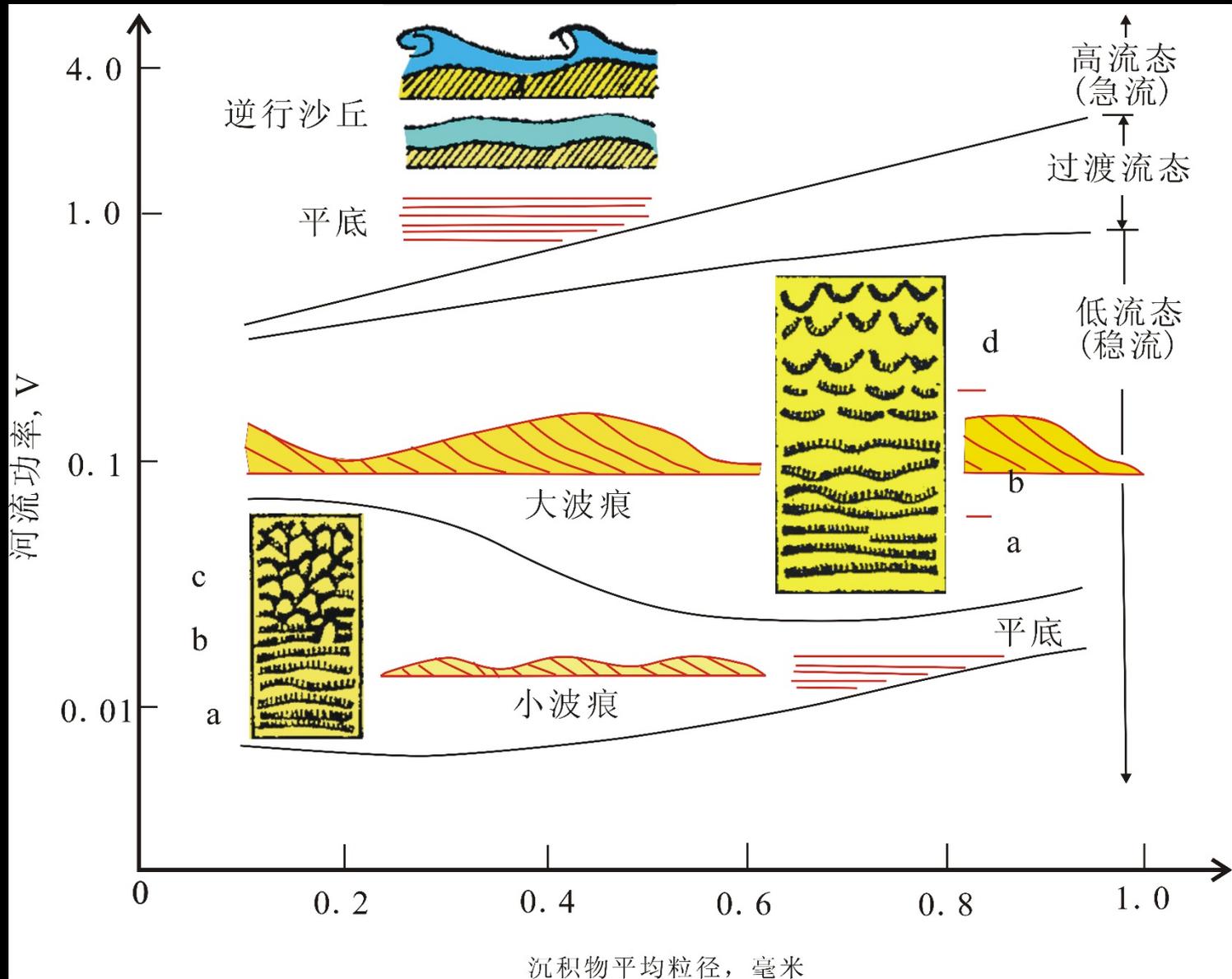


随着水流强度的增加，底床形态依次发生变化：
典型不对称波纹 → 沙丘，具叠置的小波纹 → 沙丘 → 冲蚀沙丘 → 平坦底床 → 逆行沙丘 → 逆行沙丘破浪 → 冲槽及冲坑



Antidunes

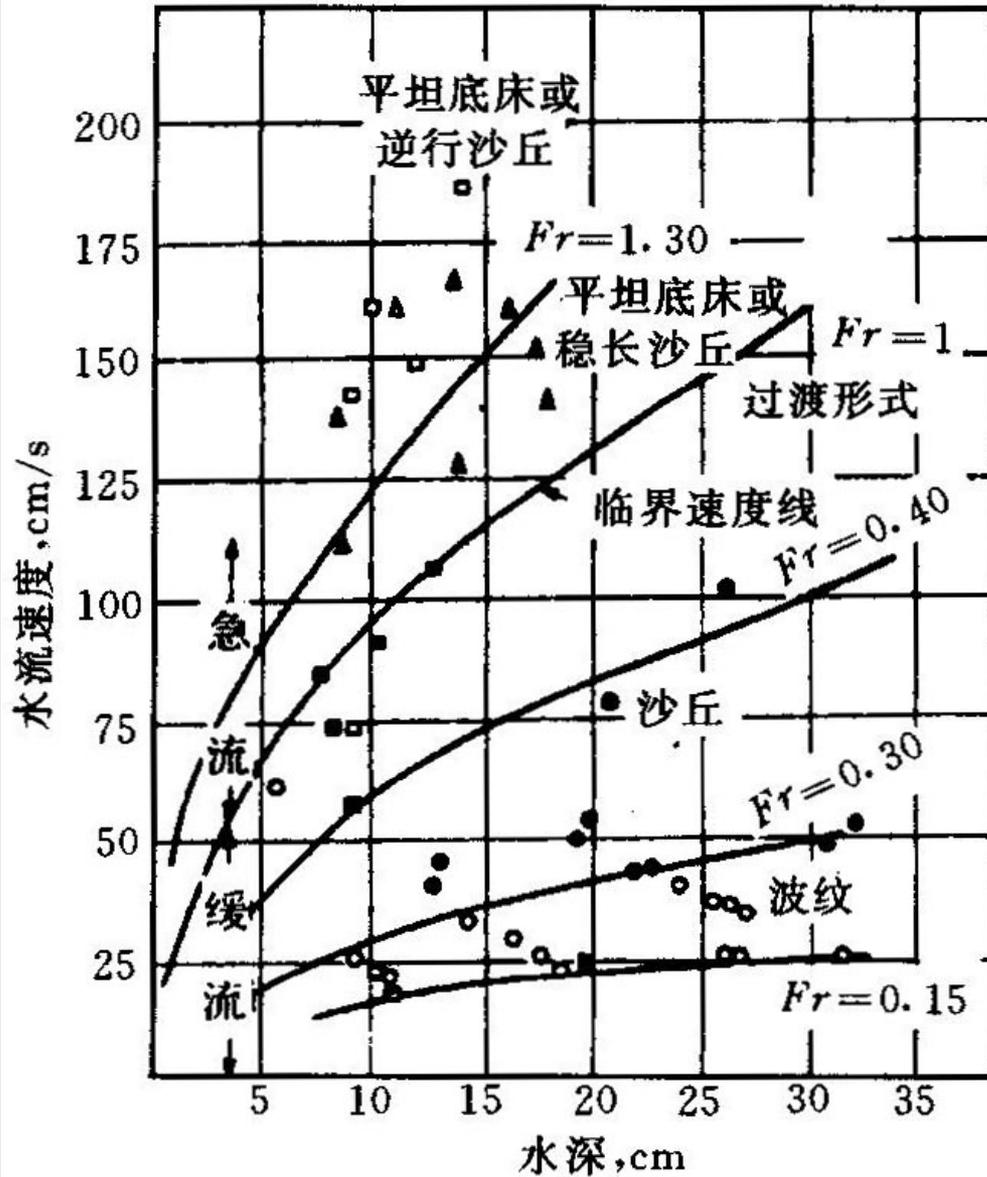




河流功率 = 平均流速 × 底床上的剪应力

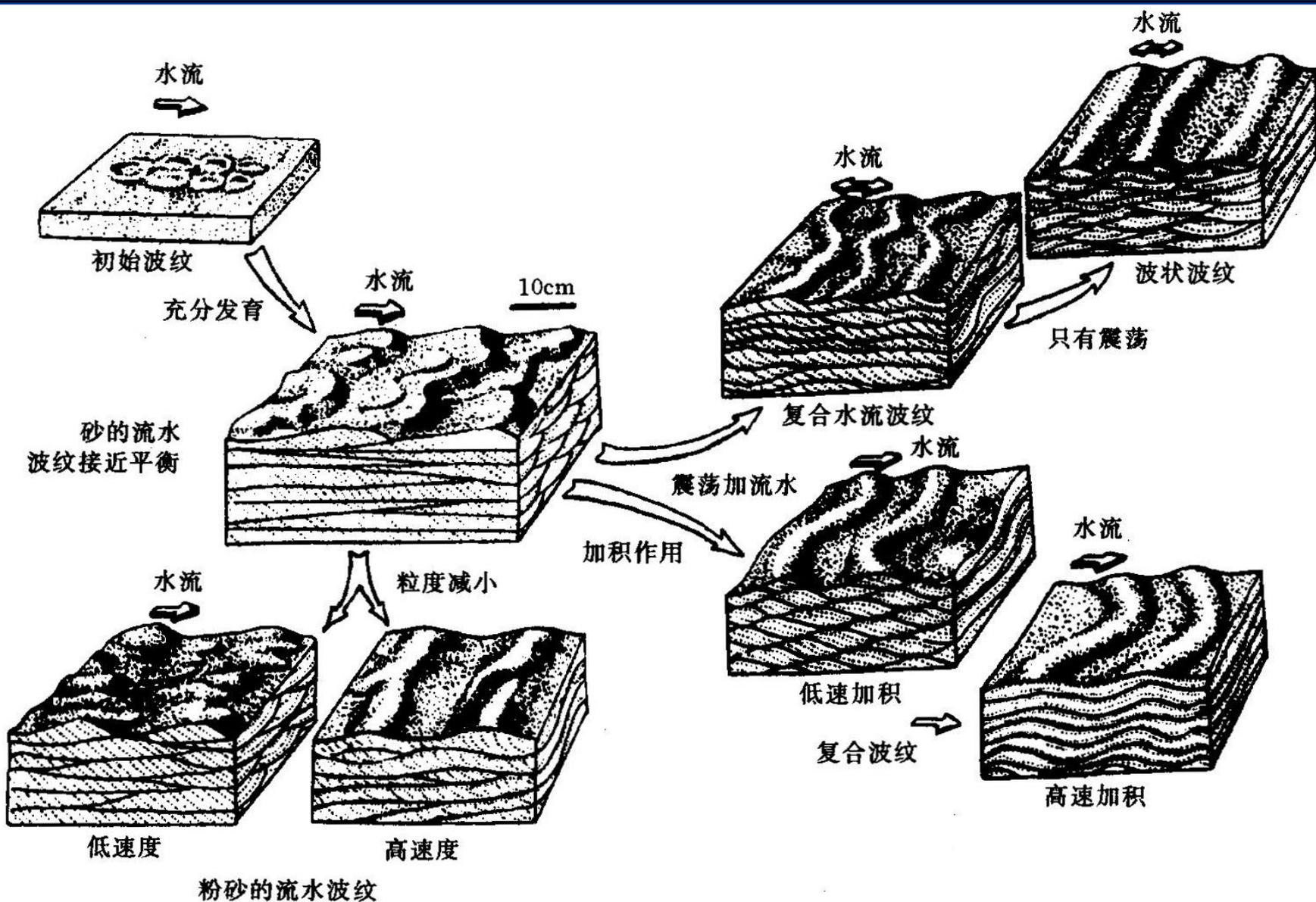
河流功率在很大程度上取决于水深和流速。

缓流区底床形态在水深超过临界值以后，大致与水深无关；急流区底床形态强烈受水深影响。



底床形态与流速和水深的关系

(据赖内克等, 1973)



小型交错层理与水流条件、粒度大小和加积速率的关系(据哈姆斯, 1975)



4. 层理的意义和研究方法

研究意义：

- (1) 有助于正确划分和对比地层、恢复地层产状。
- (2) 交错层理是最有价值的指向构造，可以确定古水流系统。
- (3) 根据层理类型，可以推断沉积环境。



研究方法：

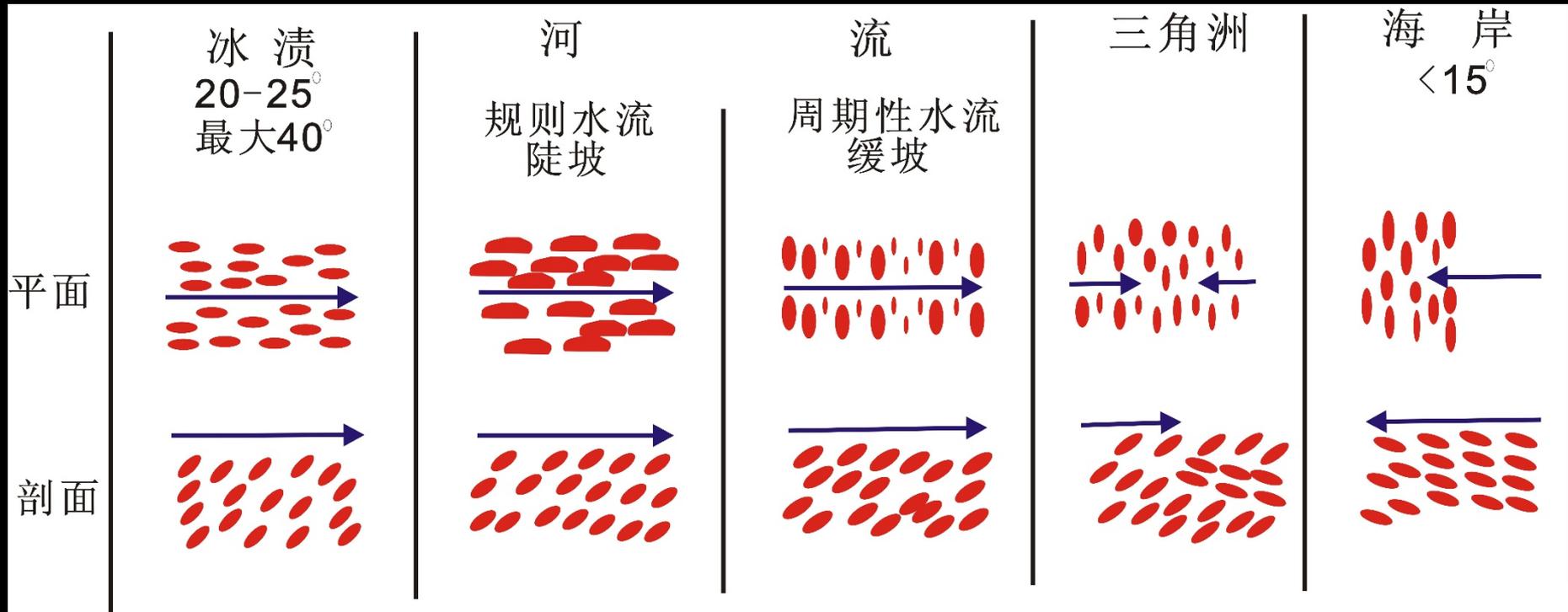
- (1) 确定层理类型及其在剖面中的组合关系。
- (2) 查明层理显现的原因。
- (3) 详细描述层理的内部特征。
- (4) 必须进行交错层理的定向测量。



（六）叠瓦状构造（imbricated structures）

主要是指扁平砾石在流水的作用下均向同一方向排列的现象。

砾石的叠瓦形式与流水方向的关系，最常见的是迎流叠瓦，即砾石的**最大扁平面的倾向与水流方向相反**。



砾石叠瓦状构造在不同环境中的发育情况



二、准同生变形构造

(penecontemporaneous deformation structures)

(一) 负载构造

(二) 球枕构造

(三) 滑塌构造

(四) 包卷层理 (构造)

(五) 碟状构造和柱状构造



准同生变形构造（penecontemporaneous deformation structures）是指沉积物沉积后，在**固结成岩之前**处于塑性状态时发生变形所形成的各种构造。

这类构造通常是局部分布的，**基本上局限于上、下未变形层之间的一个层内。**



（一）负载构造（load structure）

也称**负荷构造**、**重荷模**（load casts）等，指覆盖在泥质岩之上的砂层底面上的瘤状突起。

它是由于下伏的含水塑性软泥承受了不均匀的负载，使上覆砂质物陷入下伏泥质物中而产生的。



形状很不规则，一般不对称，排列杂乱，大小不一，几毫米~几分米。

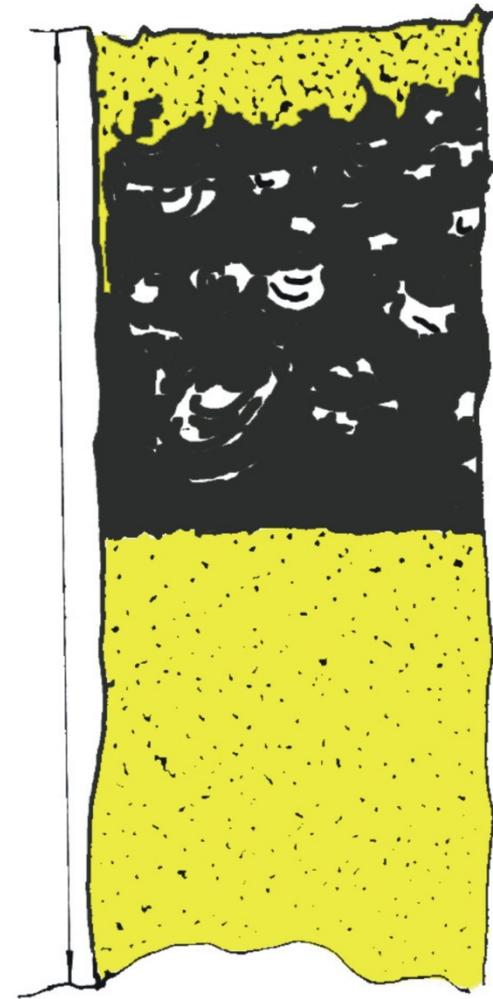
负载构造多在**浊积岩**中保存良好。

(二) 球枕构造

砂球和砂枕构造：

(ball and pillow structure)
是指砂岩层断开并陷入泥岩中形成的许多紧密或稀疏排列的椭球状或枕状块体。

在浅水与深水环境中均有，代表沉积环境具有快速沉积甚至震积作用。



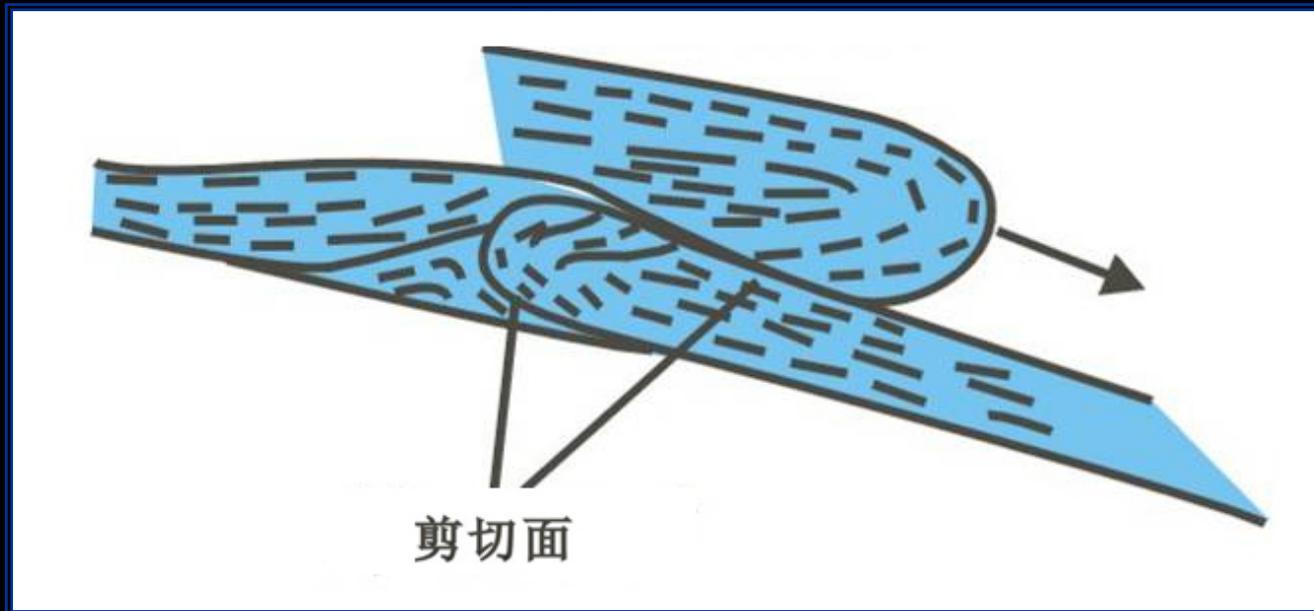
砂球、砂枕构造

(东濮凹陷, 桥17井, 砂三段)

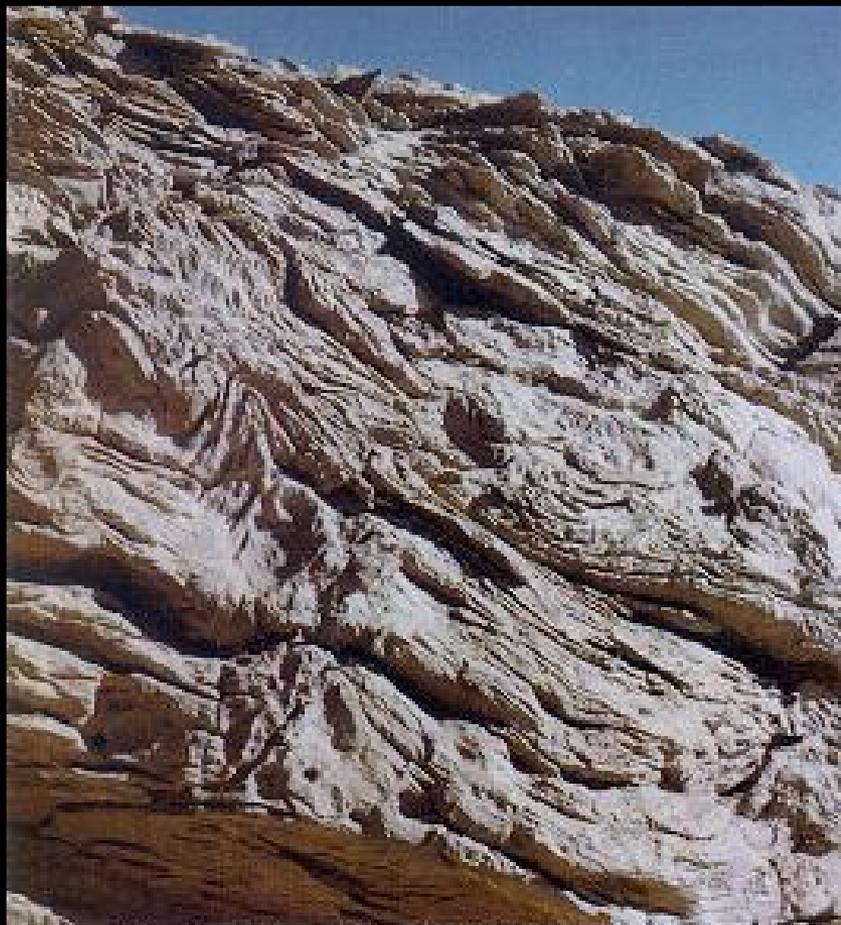


(三) 滑塌构造 (slump structure)

是指斜坡上未固结的沉积物在重力作用下发生滑动而形成的变形构造。



一般伴随快速沉积而产生，它是水下滑坡的良好标志。多出现在三角洲前缘、礁前、大陆斜坡及海底峡谷前缘。



浅灰白色砂岩中的滑动构造。三角洲前缘斜坡。
第三系渐新统中部，青海东紫山。



滑动变形和砂枕构造，砂泥岩薄互层的原始层理仍可保存，砂枕发育不良，个体较小。



滑动变形构造。
坝侧缘斜坡
下第三系阜宁组，苏北盆地
杨1井1617~1618.8m。

滑动变形常引起沉积物的形变、揉皱、断裂、角砾化、岩性混杂。



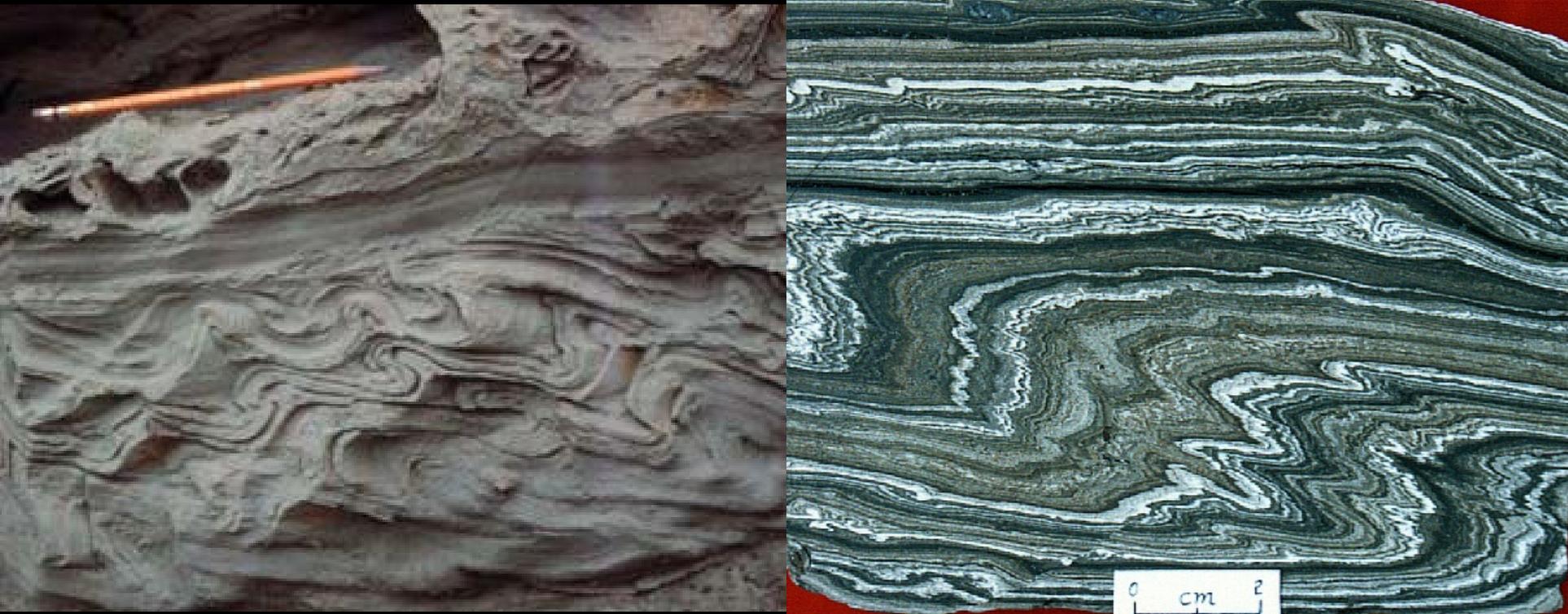
江西萍乡T₁d



滑动造成沉积物形变、揉皱



滑动造成沉积物形变、揉皱



这类构造常局限于一定层位中，与上下岩层呈突变接触。



（四）包卷层理（构造）（convolute bedding）

或称包卷构造、旋卷层理、扭曲层理、揉皱层理、卷曲层理等，是指在一个岩层内所发生的纹层盘回和扭曲现象。

它常被限于一个层内连续分布，并显示出小型开阔向斜和紧密背斜的复杂现象。

主要见于较薄层粗粉砂层或细粉砂层中，可以是硅质的或碳酸盐质的。





棕黄色细粒砂岩中的包卷构造。三角洲前缘。上三叠统延长组，陕西省延安市郊。

不同于滑塌构造变形，尽管包卷层理的纹层扭曲很复杂，但却是连续的，没有错断和角砾化。



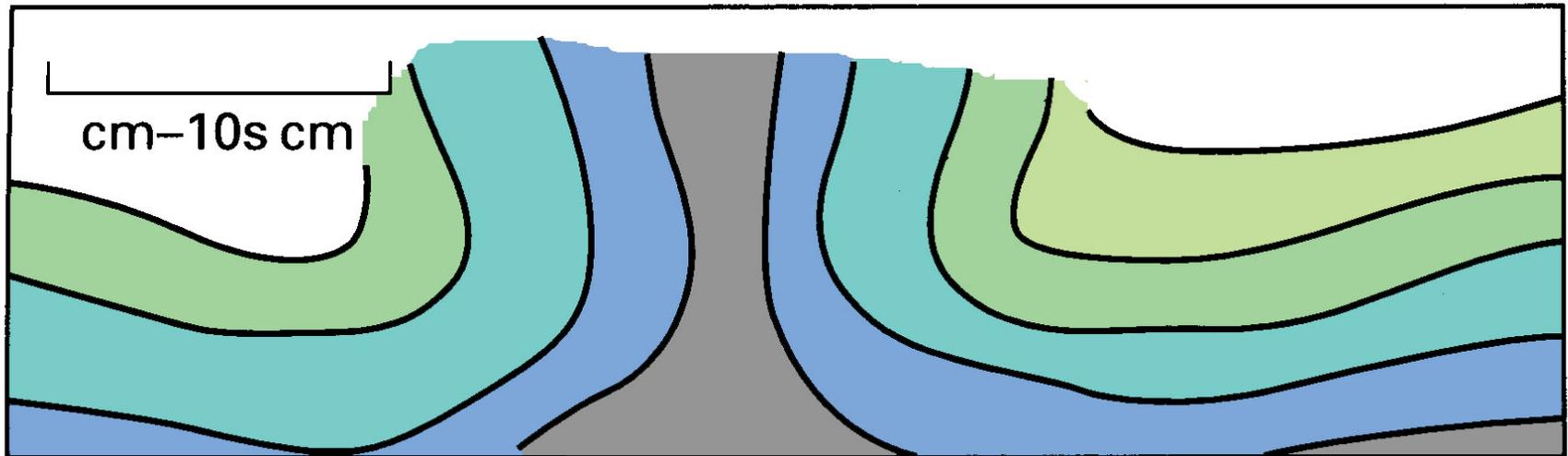
灰黄色砂岩，包卷构造发育。滨湖。第三系中新统上部，青海狮子沟深10井1267.85~1277.47m。

有多种**成因解释**：

- (1) 沉积物的液化作用；
- (2) 孔隙水的泄水作用。

在**浊流沉积**中较为常见。

Dewatering structures



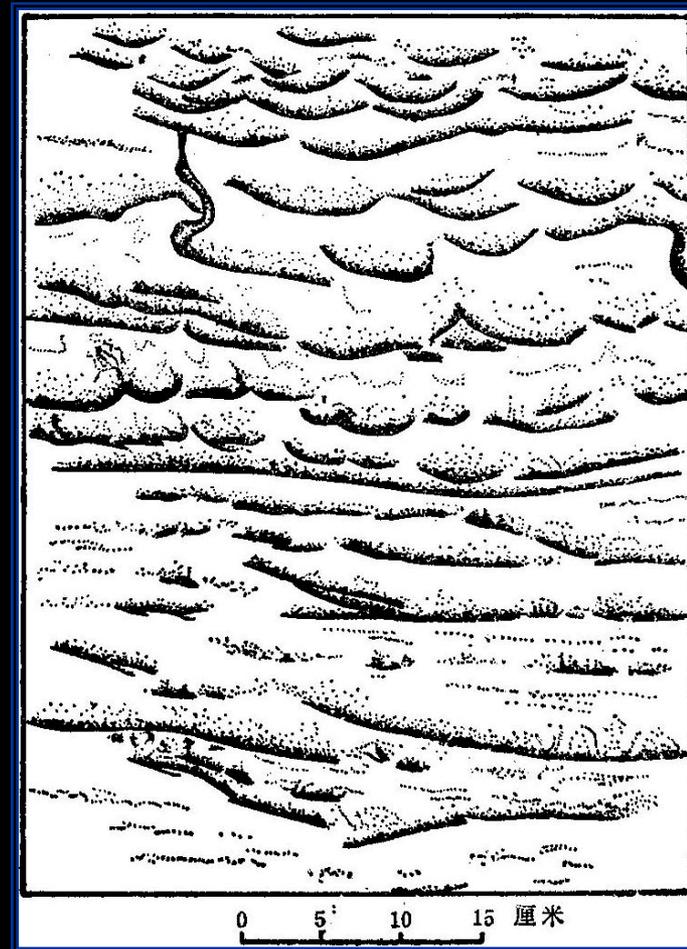
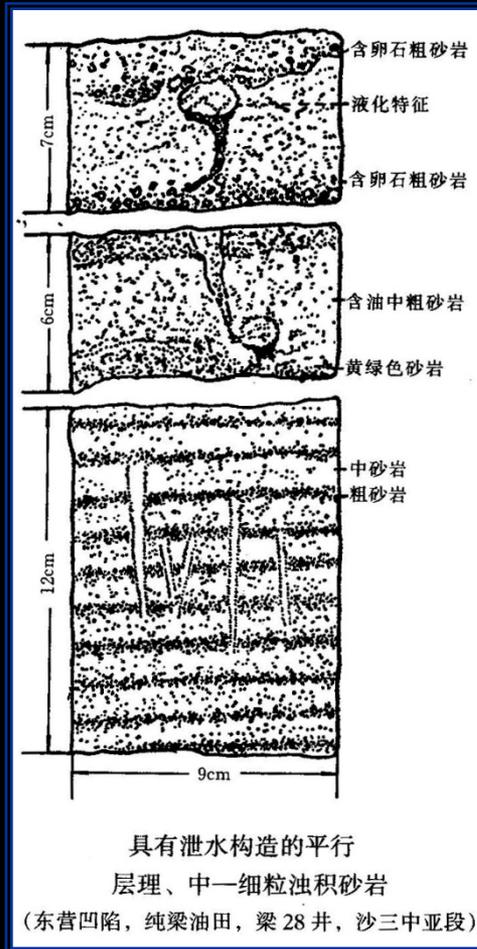


（五）碟状构造和柱状构造

（dish structures and chimney-like structure）

快速堆积的松散沉积物中，孔隙水向上泄出，引起颗粒的位移和重新排列，形成**泄水构造**（water-escape structure），如**碟状构造**（dish structures）、**柱状构造**（chimney-like structure）。

主要见于**浊流沉积**、**三角洲前缘沉积**及**河流边滩沉积**。

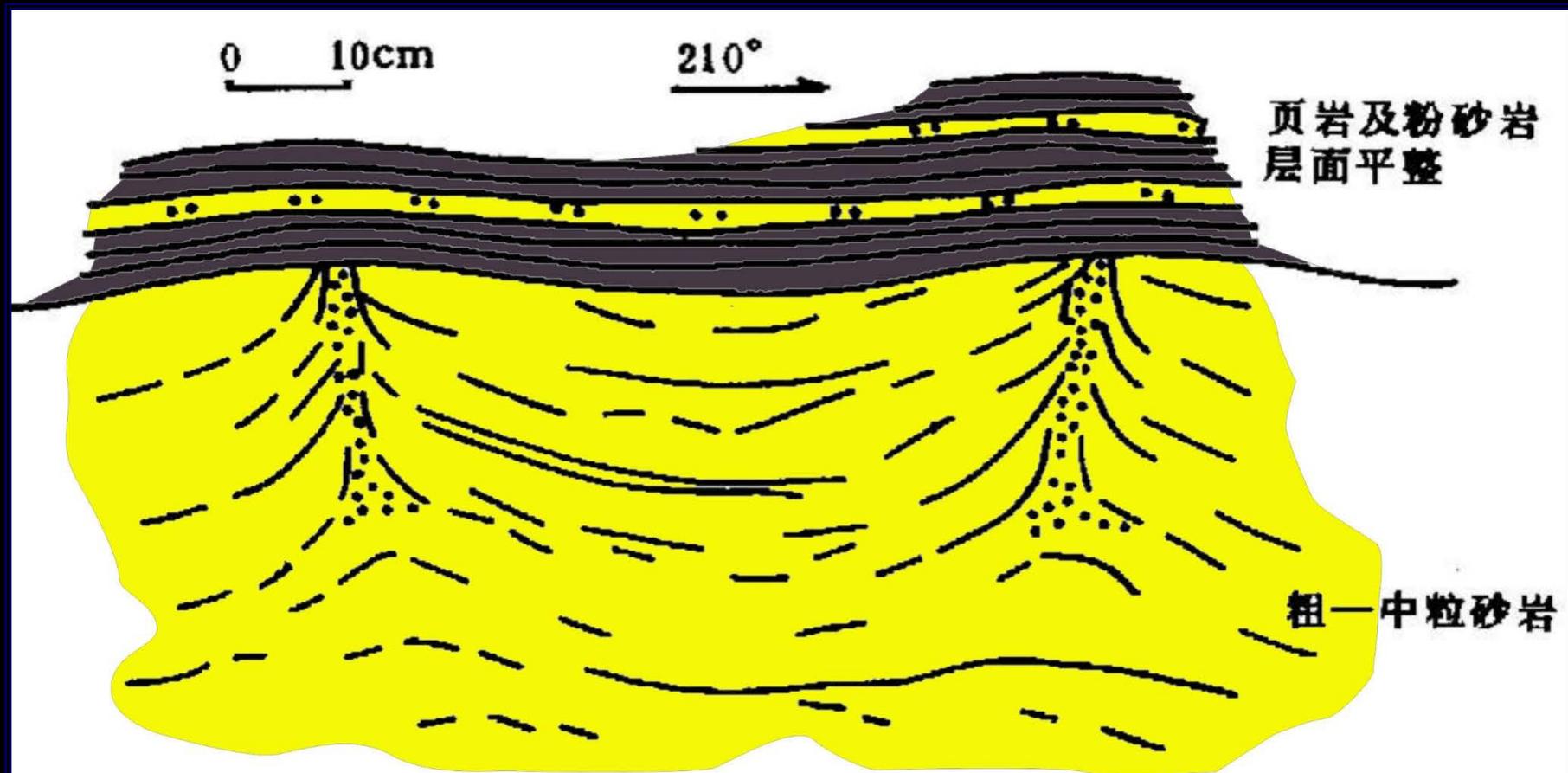


碟状构造直径一般为1~50cm，垂向上互相重叠，横向上断续分布，其间被泄水通道的砂柱（**柱状构造**）分开。

有的碟状构造向上强烈卷曲为包卷层理。



柱状构造



液化流沉积中的泄水管构造素描图

(云南宁蒗牛克夕, 下泥盆统班满到地组中部)



三、暴露成因的构造

(一) 雨痕及冰雹痕

(二) 泥裂 (干裂)

(三) 流痕

(四) 泡沫痕



沉积物露出水面（或在水面附近），处于大气中，表面逐渐干涸收缩，或者受到撞击而形成的层面构造，如干裂、雨痕、泡沫痕等。

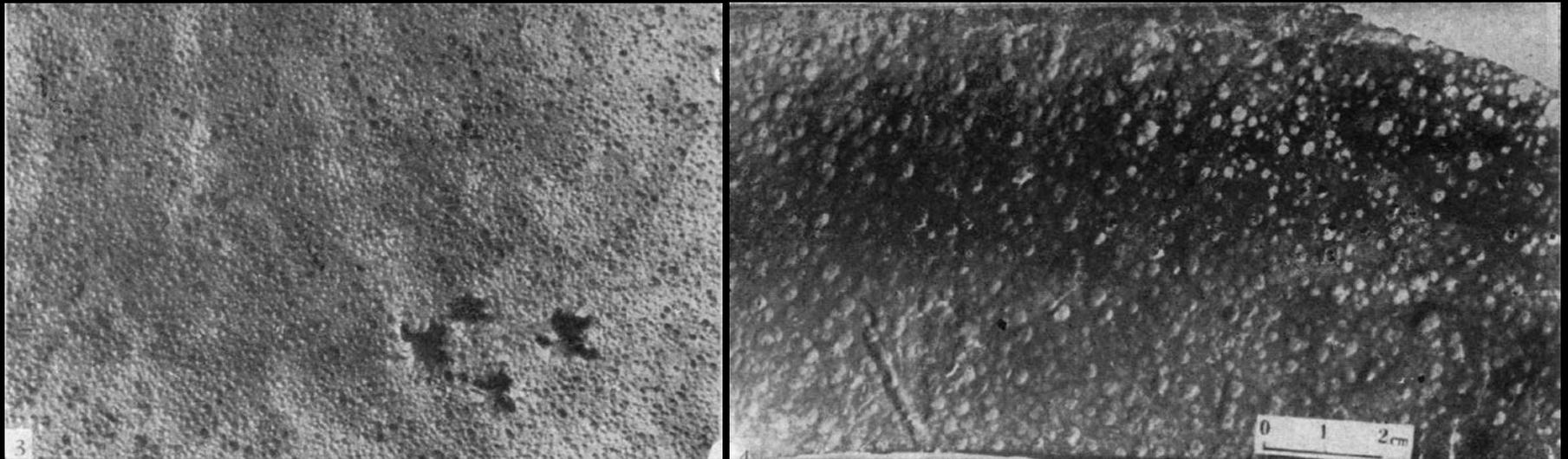
这些沉积构造具有指示沉积环境及古气候的意义。



(一) 雨痕及冰雹痕

(raindrop impression & hail print)

雨痕、冰雹痕是雨滴或冰雹降落在泥质沉积物的表面，撞击成的小坑，坑的边缘略微凸起。



偶尔的阵雨形成的雨痕才比较容易保存，反映了干燥与半干燥气候条件下的大陆沉积。

冰雹痕比雨痕大、深，且不规则。



(二) 泡沫痕 (foam impressions)

是沉积物近于出露水面时，水泡沫在沉积物表面暂停留所留下的半球形小坑，坑壁光滑，边缘无凸起，很象小的痘疤，常成群出现，大小悬殊。



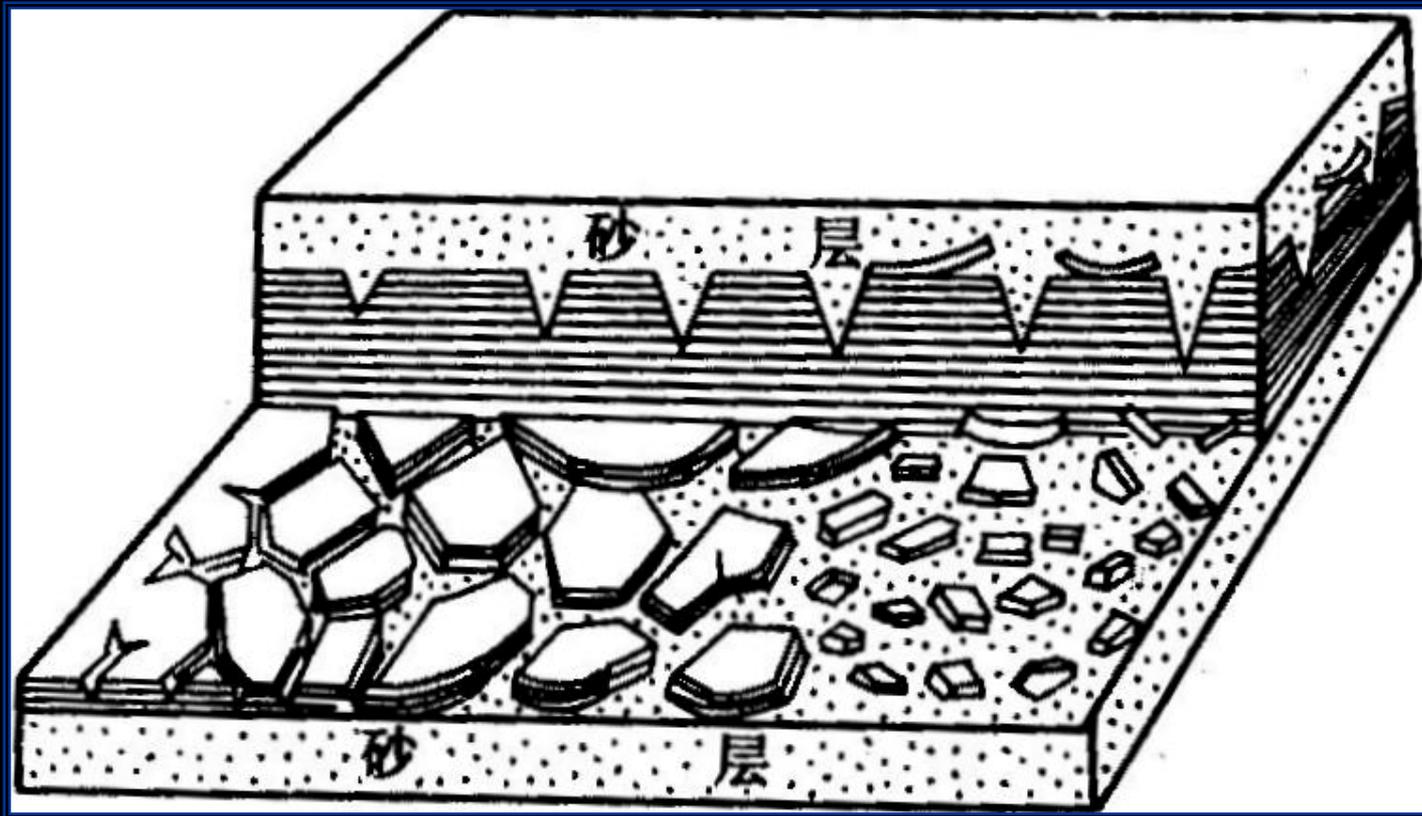
2009/09/26 09:14



(三) 泥裂 (干裂) (mud crack)

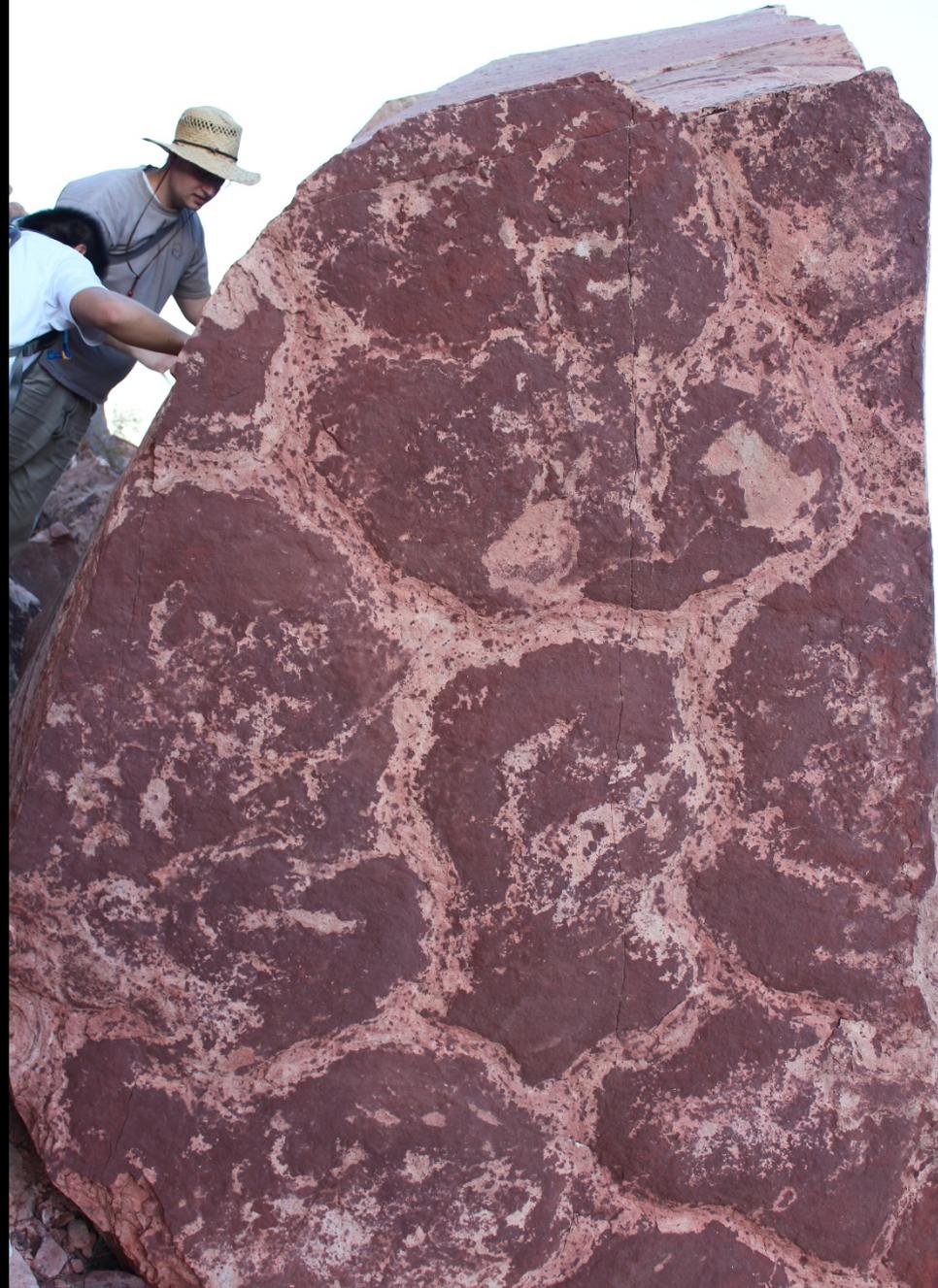
它是沉积物露出水面时因曝晒干涸所产生的收缩裂缝。





在平面上呈多角形或网格状龟裂纹，断裂面形状呈“V”字形，也可呈“U”字型。

常见于粘土岩和碳酸盐岩中。



Mud crack cast
(G. Hu, 2013,
Red Rock Canyon)



(四) 流痕 (current mark)

流痕是在水位降低，沉积物即将露出水面时，薄水层汇集在沉积物表面上流动时形成的侵蚀痕。

一般呈齿状、梳状、穗状、树枝状、蛇曲状等。





本节要点:

- **波痕要素**
- **流水波痕、浪成波痕和风成波痕的基本特征
(重点)**
- **槽痕与槽模的形成与特征 (重点)**
- **层理的组成要素**
- **水平层理、平行层理、波状层理的基本特征
(重点)**



●板状交错层理、楔状交错层理、槽状交错层理、波状交错层理、爬升波纹层理的基本特征与指相意义（重点）

●羽状交错层理、浪成波纹交错层理、冲洗交错层理、丘状和洼状交错层理、脉状和透镜状交错层理的指相意义（重点）

●递变层理、韵律层理、块状层理和叠瓦状构造的地质意义



- **重荷模构造、滑塌变形构造、球枕构造、包卷层理及泄水构造的形成与指相意义（重点）**
- **雨痕、冰雹痕、泡沫痕、泥裂、流痕的形成与指相意义**