



第五章 油气田地下储层

第一节 储层沉积相研究

第二节 储层非均质性

第三节 储层裂缝

第四节 储层敏感性

第五节 储层评价

第六节 储层地质模型



第一节 储层沉积相研究

一

地质沉积相

二

测井沉积相

三

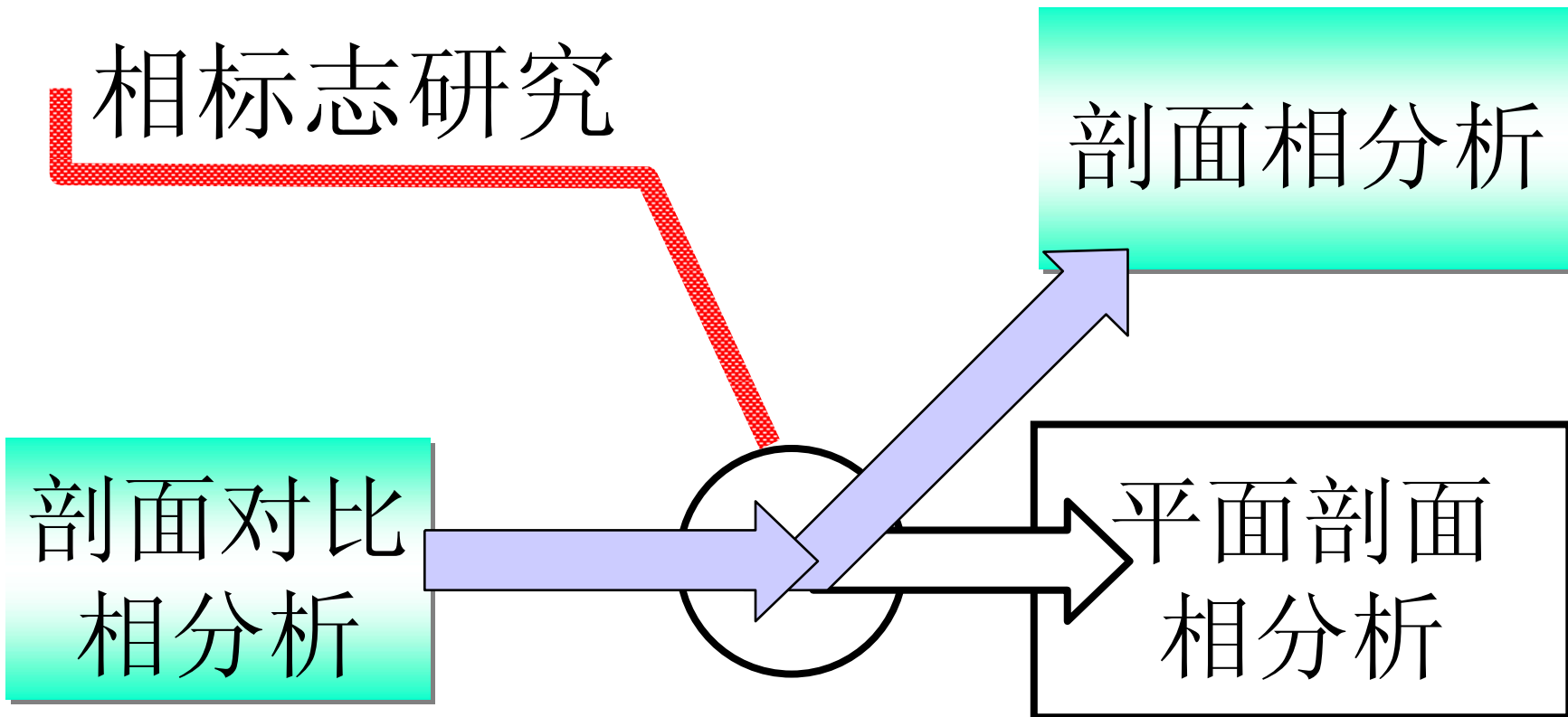
地震相分析

三

沉积相研究思路



一、地质沉积相



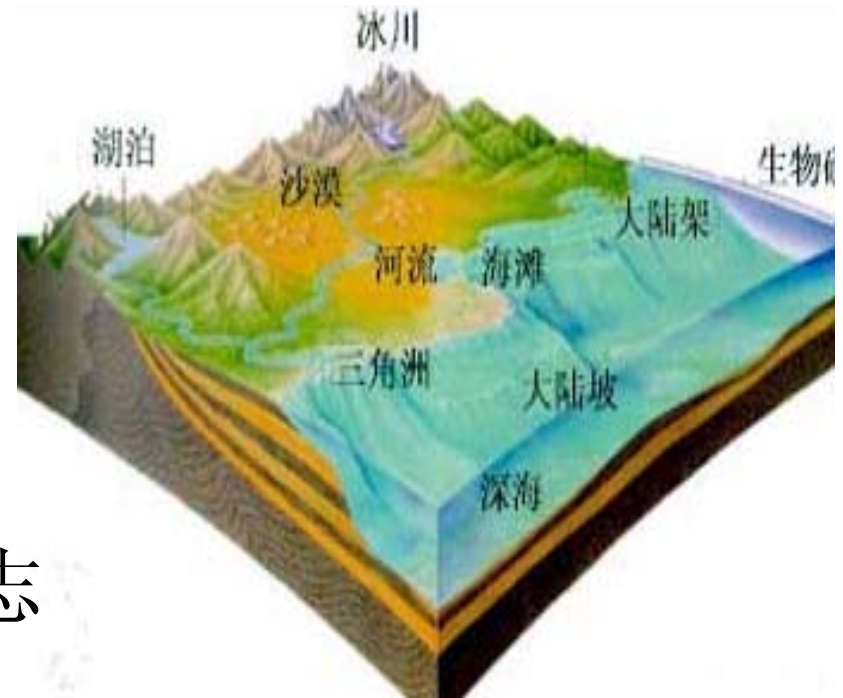


岩 心

岩性标志

古生物标志

地球化学标志





颜色

- 粘土岩（泥岩和页岩）颜色是恢复古沉积环境水介质氧化还原程度的地化指标。
- 红色—氧化环境、
- 绿色—弱氧化环境、
- 灰色—弱还原环境、
- 灰黑色—还原环境。
- 描述颜色时，应与行业标准色谱对照，用数字符号表示，如0—白色、1—棕红色、3—紫红色、4—紫色、5—黄色、8—灰绿色、9—褐色、10—棕色、12—黑色、13—深灰色、14—浅灰色、15—杂色等。

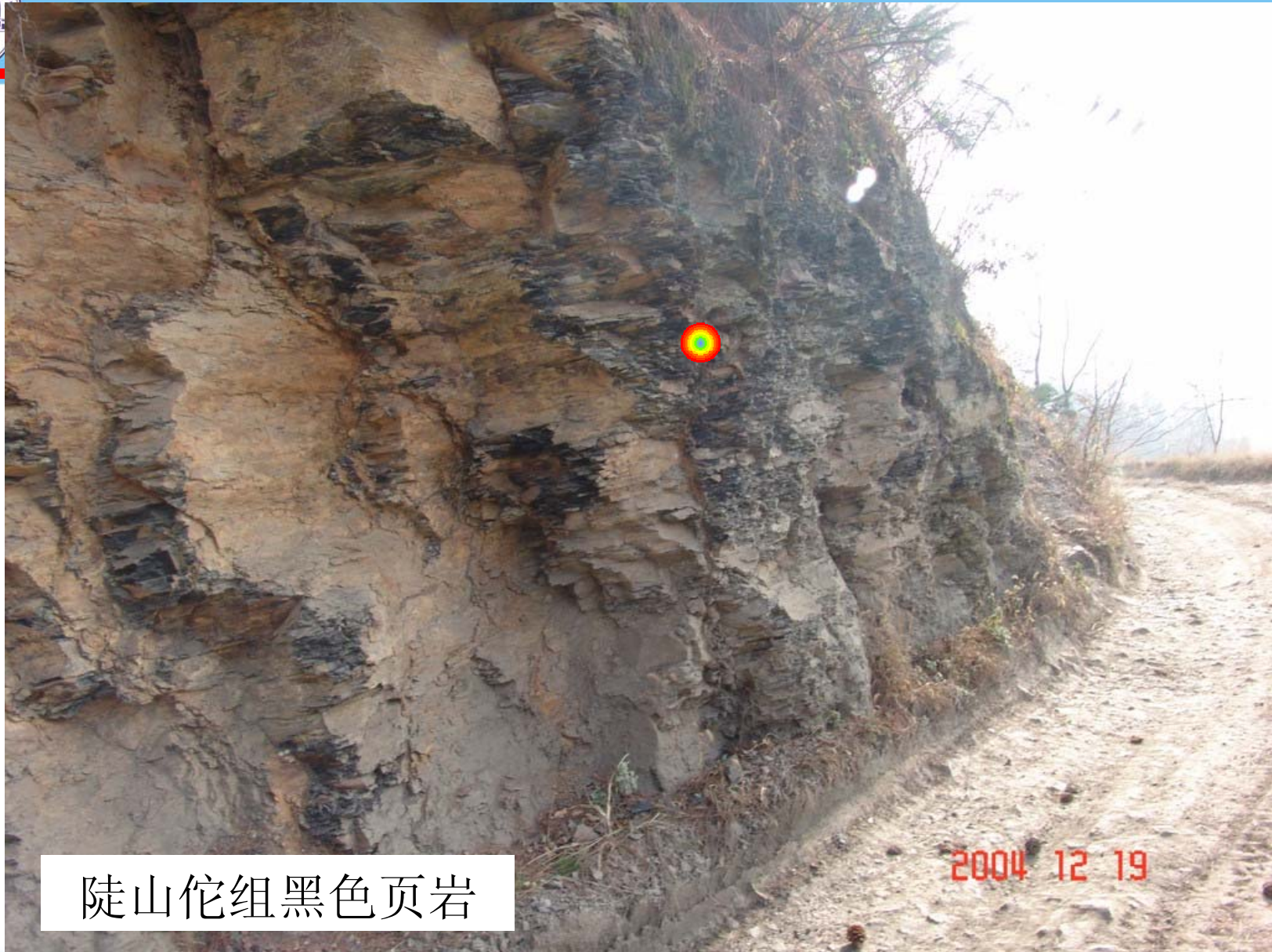


还原环境形成的岩石



寒武系牛蹄塘组烃源岩

2005 4 11



陡山沱组黑色页岩

2004 12 19



氧化环境形成的岩石



五彩地貌·新疆
<http://zouyongsheng.51dhl.com>

弱氧化环境



岩石类型

- 碎屑岩（如砂、砾岩）可出现在海陆各种沉积环境中，不是鉴别沉积相的良好标志。
- 与碎屑岩系共生的碳酸盐岩、硅岩、蒸发岩和红色岩层等具有一定指相性。如能定出是浊积岩、风积岩、风暴岩、冰渍岩、洪水岩等成因类型，对于判别沉积相类型很有意义。



前寒武冰积岩

2005 4 9



自生矿物

- 它们在碎屑岩中含量少，但具良好指相性。
 - ①锰结核--海洋底环境，
 - ②海绿石--浅海陆棚环境，
 - ③自生磷灰石--海相标志；
 - ④自生长石和自生沸石--湖相标志，
 - ⑤天青石、莹石和重晶石--咸化泻湖。



深海锰结核



萤石--咸化泻湖



海绿石

成因产状：海绿石是典型的表生矿物，产在浅海沉积物中（如砂岩、碳酸盐岩石等）。在近代的深度为300—500米的浅海沉积的绿色淤泥和砂中亦有发现；





碎屑颗粒结构

- 碎屑颗粒的粒度、园度、球度、表面特征及沉积优选组构均具有一定指相性。**物理成因构造**更具有良好的指相性，其次是**生物成因构造**。不同沉积环境下的特征可参阅沉积岩与沉积相的相关书籍和文献。



沉积构造

物理作用

流动构造

- 波痕、冲刷痕、压刻痕、其他表面痕迹、层理和叠瓦状构造

准同生变形

- 负载构造、球状和枕状构造、滑塌构造、喷出构造、碎屑脉、旋转层理、碟状构造、坑丘构造

暴露构造

- 雨痕、冰雹痕、干裂

化学作用

结晶

晶体印痕与假晶、鸟眼构造示顶底构造、

压溶

- 缝合线

增生与交代

- 结核与葡萄状构造

生物作用

生物遗迹

足迹、爬迹、停息迹、潜穴和钻孔

生物扰动

生物生长

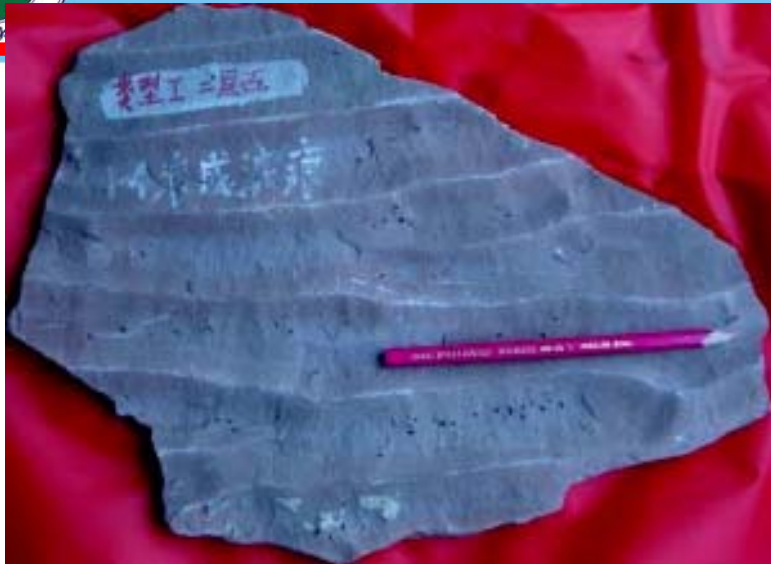
植物根痕



波痕 (ripple mark)

波痕是风、水流或波浪等介质的运动，在沉积物表面所形成的一种波状起伏的层面构造。





浪成波痕

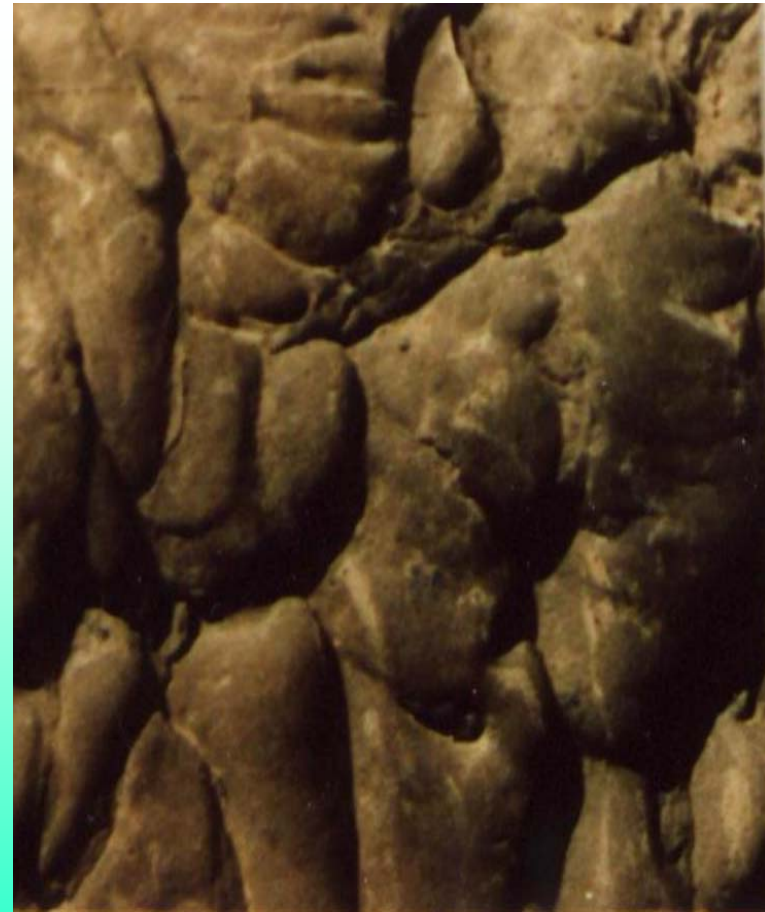
流水波痕





负载构造(Load structure)

- 也称负荷构造、重荷模（load casts）等。是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。



砂层底面上的瘤状突起





古生物标志

- 古生物标志是重要相标志，但主要用于区别一级、二级相，即用于划分海相、陆相或过渡相。如在一些早第三纪陆相沉积盆地中，发现了有孔虫，具有海相面貌的介形虫、软体动物、藻类，并伴生有海绿石。这类海绿石具有低铁、低钾、高铝的特点。这种有机和无机的组合相标志，反映我国东部中—新生代盆地中有些层段具海侵影响的近海湖泊相特点。



地球化学标志

- 由于海水和淡水环境中溶解的盐类物质差异较大，鉴定粘土矿物、碳酸盐、磷酸盐、硫酸盐中的各种化学元素、微量元素及同位素，其结果具有一定指相性。



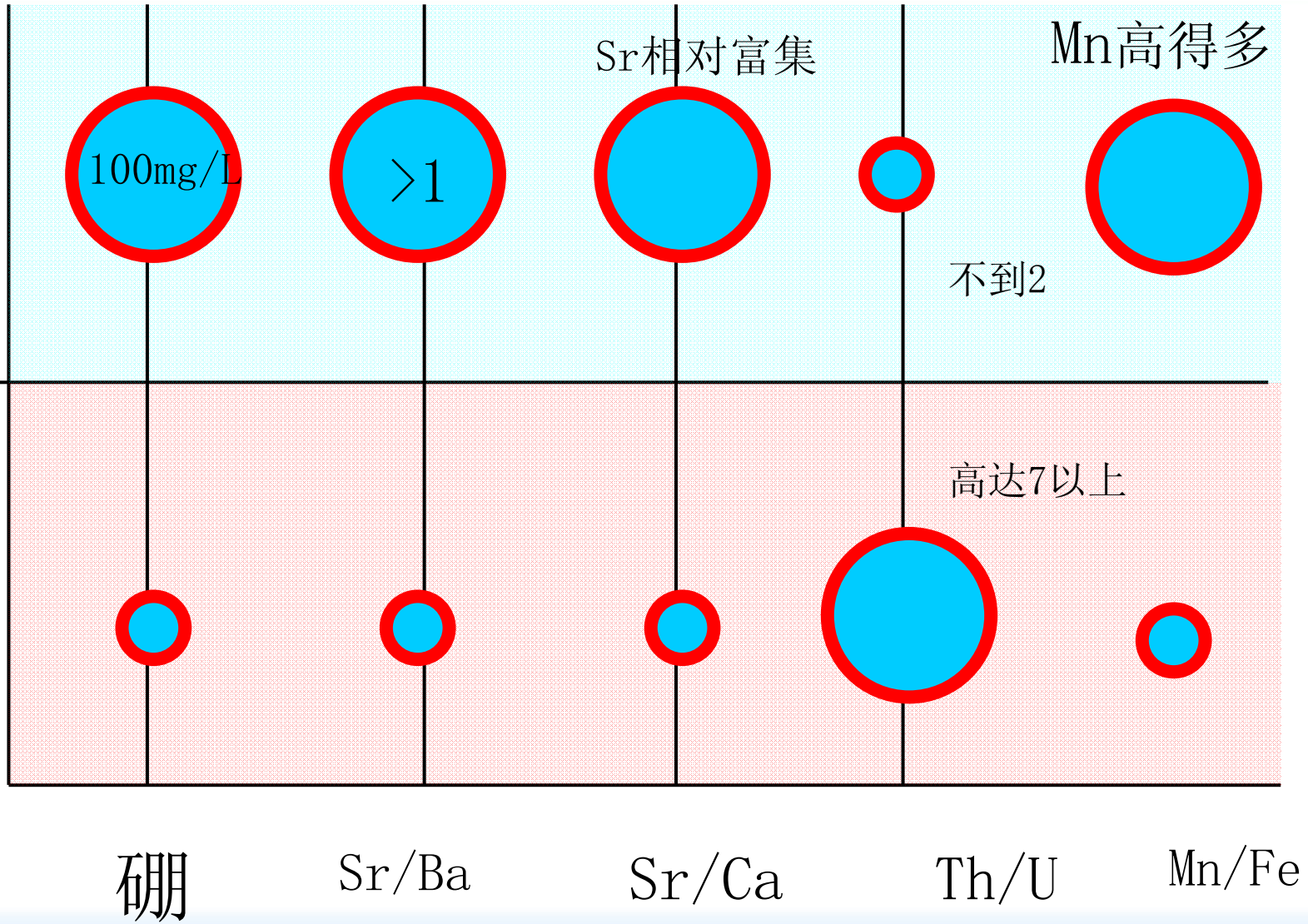
微量元素

- ① 硼是应用最广的一个指标，湖相沉积中硼含量最低，海相沉积物中为100mg/L或更高，
- ② Sr/Ba 有一定指相性、淡水沉积物中Sr/Ba通常 <1 ，海相沉积物中 >1 ；
- ③ Sr/Ca 湖相和河流相沉积物Sr/Ba比值低；海相沉积物较陆相大，因为海洋环境Sr相对富集。
- ④ Th/U 陆相页岩和三水铝矿中Th/U值高达7以上，海相黑色页岩、暗色层状燧石和灰岩中Th/U值不到2，借此可以指相。
- ⑤ Mn/Fe 海相页岩中Mn/Fe值比淡水页岩要高得多。现代海洋中Mn²⁺高于陆地水体，故海底有锰结核富集。



海相

陆相



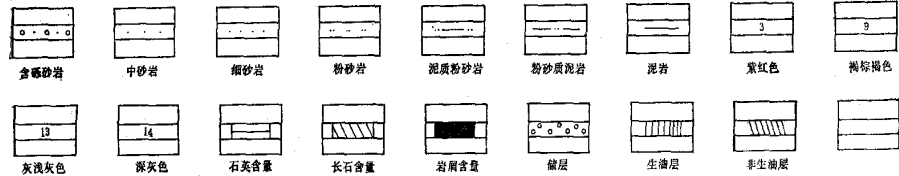
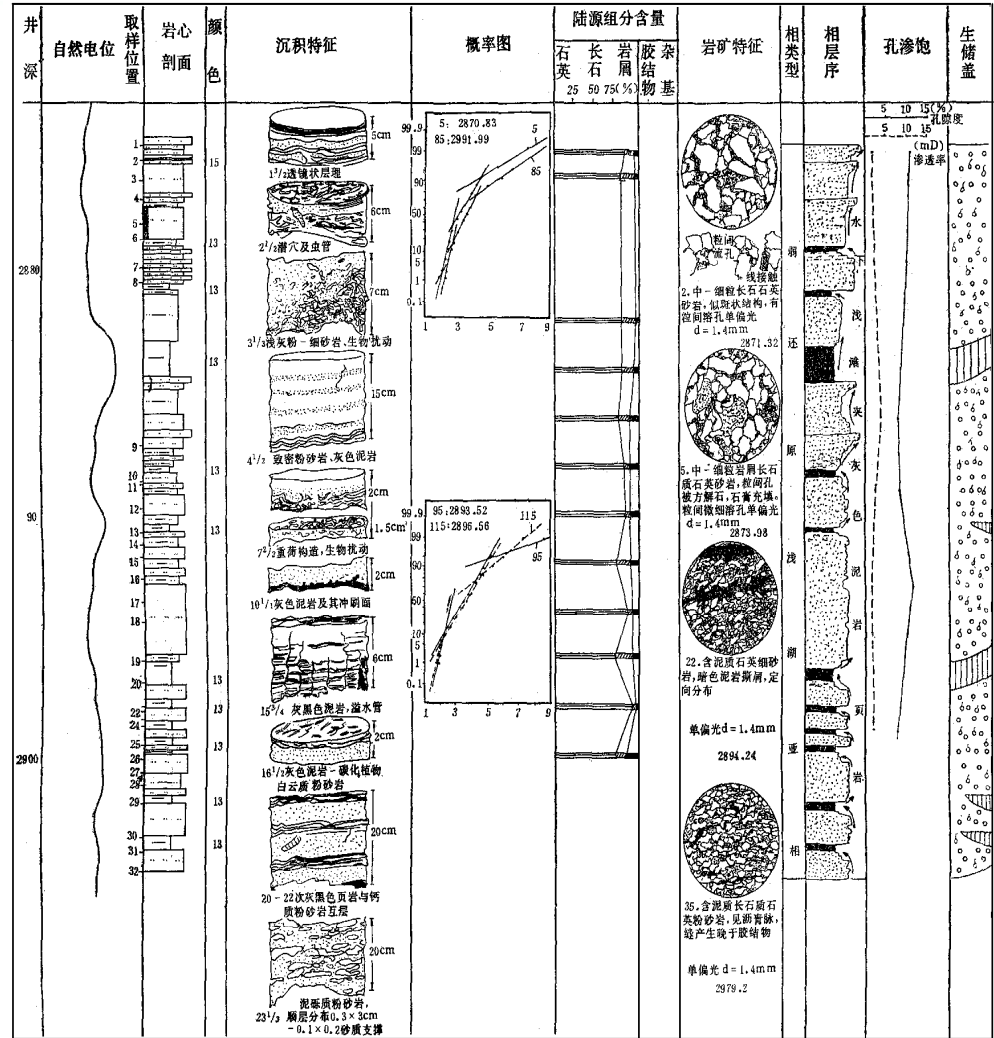


稳定同位素

- ① $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$: 海相沉积物中所含碳元素的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 值高于非海相沉积物中有机质的相应比值，特别是海相碳酸盐岩和钙质介壳富集 ^{13}C 。同样，利用页岩中菱铁矿结核的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 值也可作为区分海相、陆相、过渡相地层的标志。
- ② $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 海水中氧的同位素 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比值较为一致，淡水中较低。该指标受水体温度变化影响大，故不是一个可靠的指相标志，但用在恢复古海洋温度和古气候变化上效果良好。



2 单井相分析





剖面相分析—划分精度

相组	相	亚相	微相	五级相
陆相	辫状三角洲—湖相沉积体系	辫状三角洲平原亚相	辫状河道	砾质辫状河道微相 砂质辫状河道微相
			水道间微相 泛滥平原微相	
		辫状三角洲前缘亚相	水下分流河道微相 分流间微相 前缘席状砂微相	
			前三三角洲亚相	湖泥 远砂坝微相



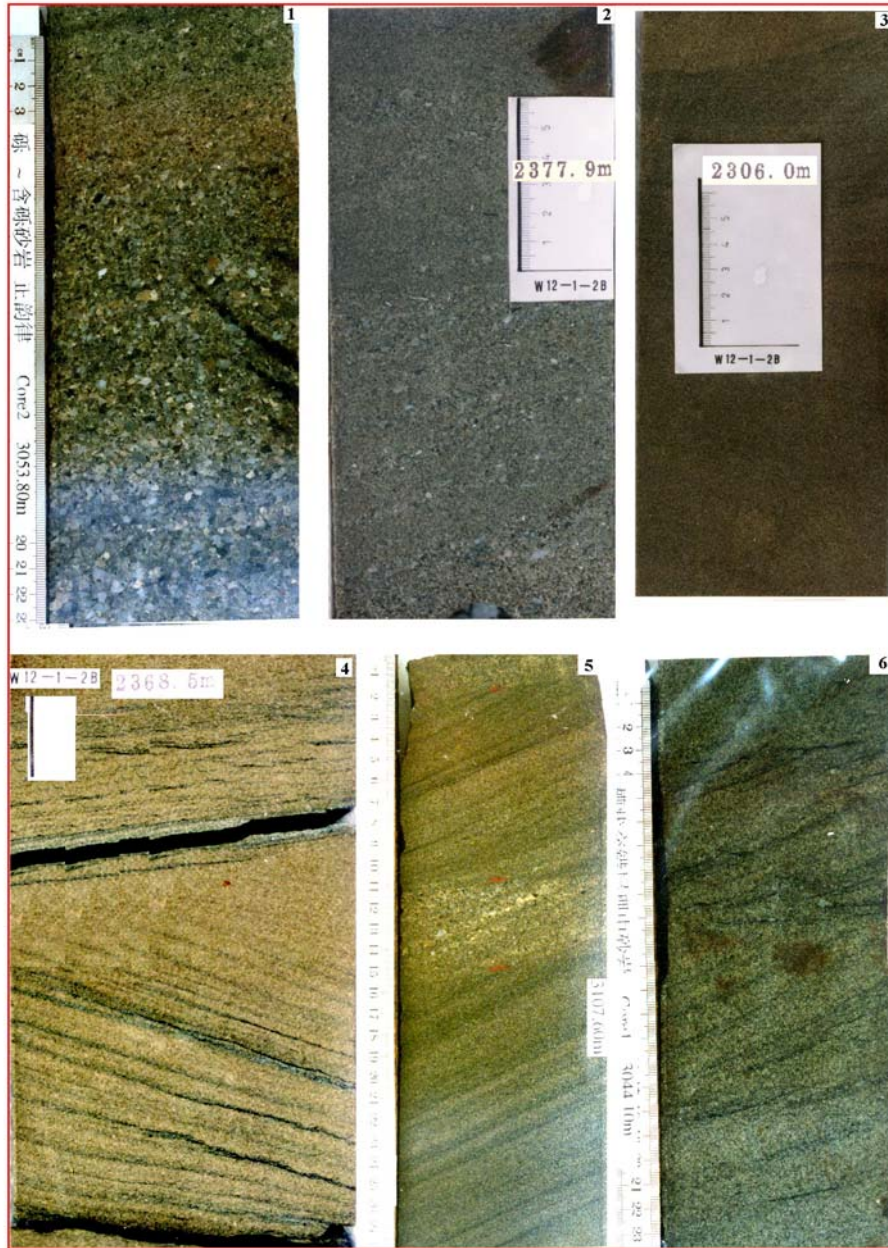
- 相模式是指对某一类或某一沉积相组合的全面概括。
- 目前较为典型的相模式有冲积扇、辫状河、曲流河、三角洲、扇三角洲、滨岸沉积、风暴沉积、近岸水下扇、湖底扇等。



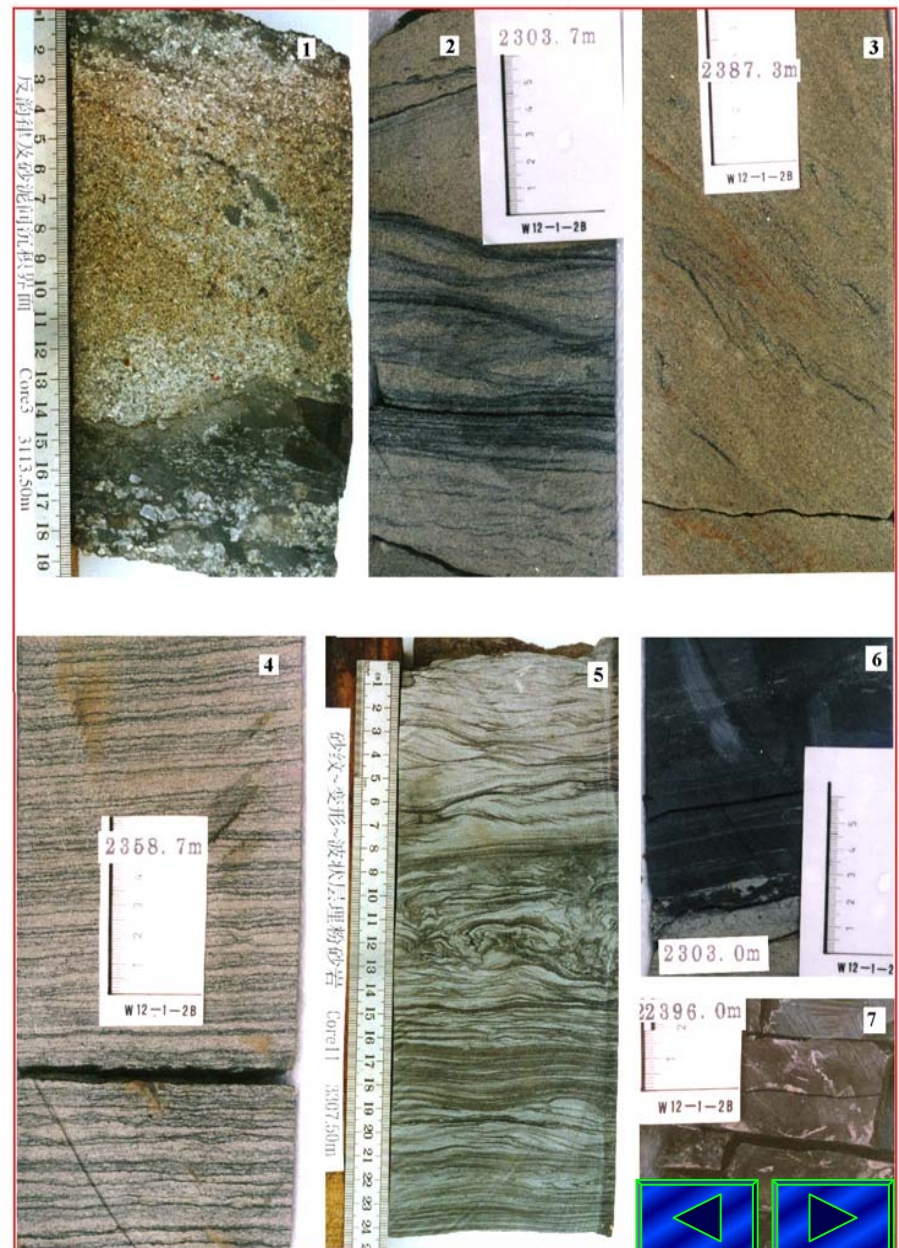
剖面相分析—基本步骤

- (1) 从最完整露头或岩心剖面入手
- ① 作详细的垂直剖面素描。描述所有沉积构造、判断水流机制、描述结构特征和各种变化、建立岩性组合及沉积韵律、重点描述层理类型及特征；② 确定沉积间断、冲刷面及各种接触关系。寻找少见的沉积构造、生物潜穴等；鉴别间断面上、下的矿物组合和化石组合；③ 确定动物群的存在和缺失。

图版 I



图版 II





准噶尔盆地侏罗系河流冲刷面



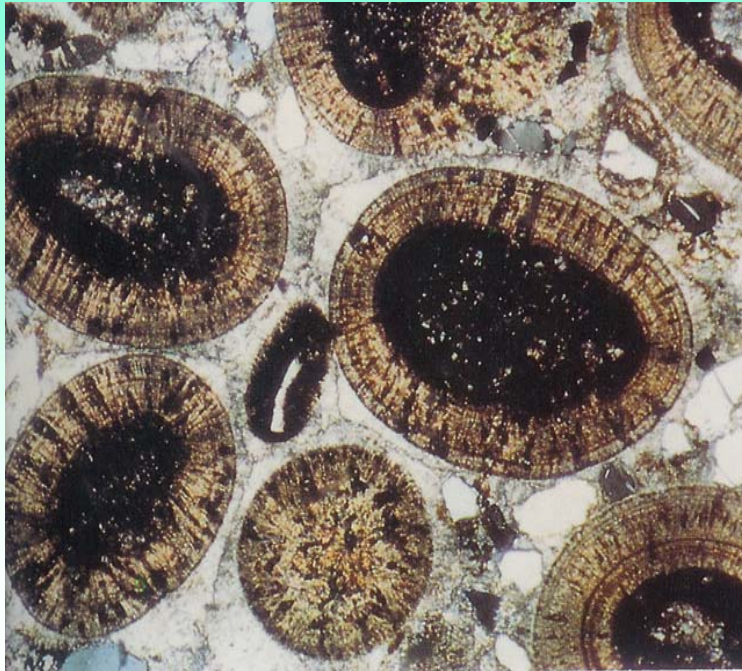
- (2) 确定和建立可能的沉积层序
- ① 将沉积层序与已知的沉积作用相对比；② 确定可能的形成条件—沉积环境、水体深度、沉积速率、介质能量大小和水介质物化条件，以及可能存在的地质事件；③ 确定剖面内相类型的重复情况。包括：一种相序简单重复类型、多种相序的复合体。



新疆郝家沟冲刷面和大型板状交错层理



鲕粒灰岩



陆表海

→ 蒸发潮坪台地

→ 浅滩沉积



(3) 作观察特征的对比

- ① 与**现代沉积**和**古代沉积**对比；② 作沉积作用和过程的预测；③ 选样、进行鉴定测试、补充宏观观察。包括：古生物和古生态分析；结构和粒度分析；测定粘土矿物及其演化分析；全而岩石学研究、分类命名；根据需要补充其它测试。



现代潮间



(4) 收集其它资料

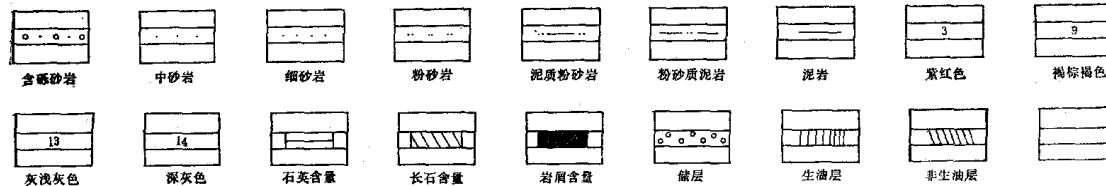
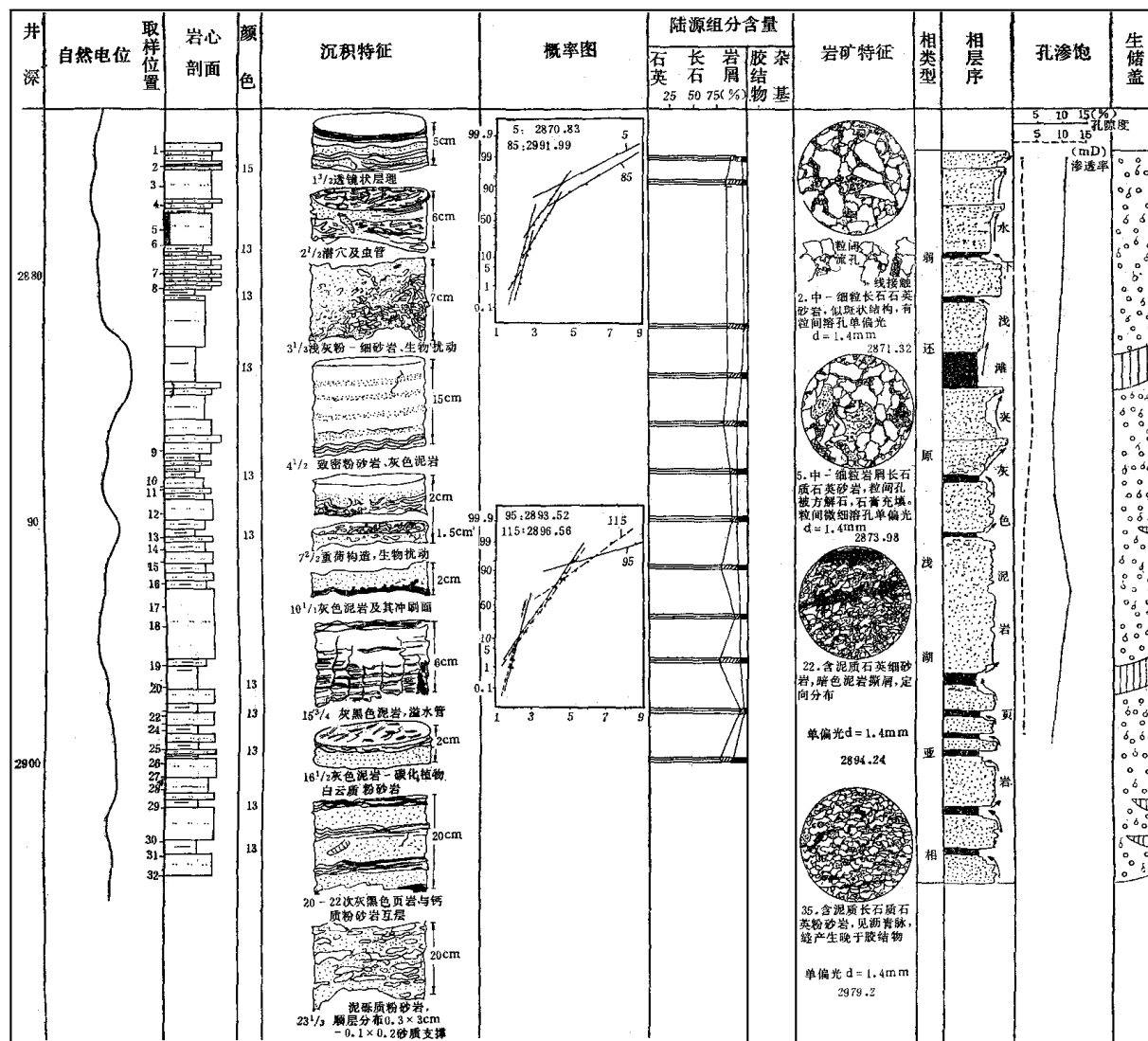
- ① 储油物性分析资料—孔隙度、渗透率、含油饱和度、压汞分析等；② 测井资料—岩性和电性对比，求取各项参数和进行测井相分析（图5-14）；③地震资料—应用井地震剖面，进行地震地层学研究。



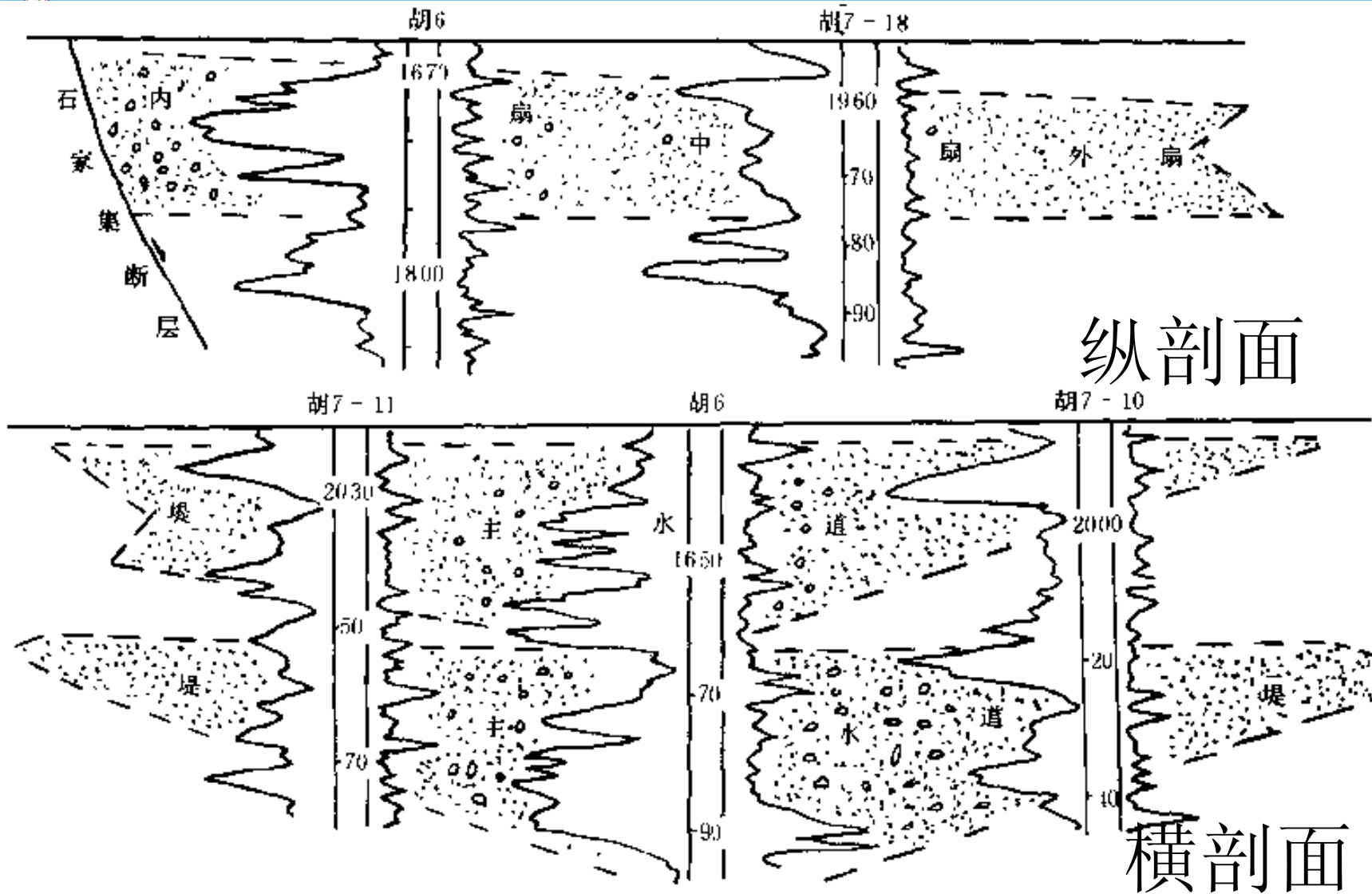
(5) 编制单剖面或单井相分析图

主要内容

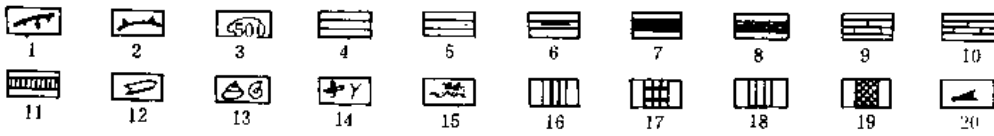
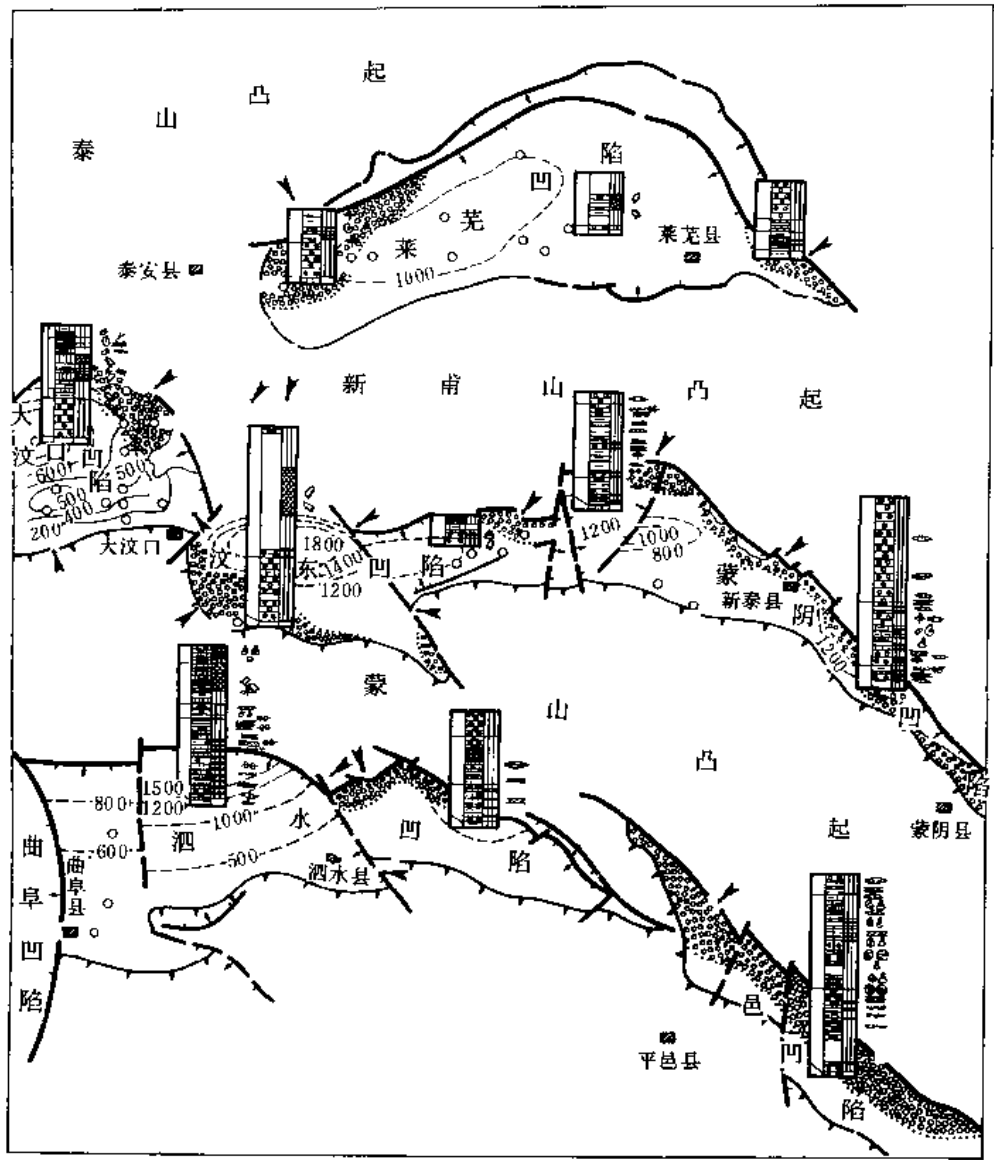
- ① 地层系统；
- ② 井深；
- ③ 电测曲线（至少应有自然电位曲线）；
- ④ 综合后的岩性剖面；
- ⑤ 泥岩颜色；
- ⑥ 沉积构造特征（采用精细的岩心素描图；
- ⑦ 粒度概率图和C—M图（采用标准坐标图）；
- ⑧ 陆源组分含量变化（长石、石英、岩屑）；
- ⑨ 填隙物含量变化（杂基、胶结物）；
- ⑩ 指相自生矿物：
 - (1) 显微薄片素描（反映组构及孔隙结构特征）；
 - (2) 相类型（至少划分到亚相）；
 - (3) 相层序（向上变细变薄或向上变粗变厚）；
 - (4) 油层物性（孔隙度、渗透率、含油饱和度）；
 - (5) 生储盖组合。



文留地区文106井沙四段单井相分析剖面图 3RG 尹太举 2009



东濮凹陷西部沙三4上~沙三3亚段时期水下扇砂体分布特征图



鲁西地区早第三纪岩相古地理图

1. 反映古构造特征
2. 反映岩相古地理特征
3. 反映生储条件



二、测井相

地质特征响应分析

1. 岩性标志
2. 沉积构造
3. 古水流与搬运方向

测井沉积相分析

1. 砂岩测井相分析
2. 梯形图或星形图
3. 碳酸盐岩相分析



测井响应反映储层性能的能力

测井方法	自然电位 SP	自然伽马 GR	电阻率 RT	声波时差 Δt	高分辨率地层倾角	体积密度 DEN	中子密度 Pe	自然伽马能谱
矿物成分	弱	中	中	中	弱	强	强	强
结构	中	中	强	强	中	中	弱	弱
构造	中	弱	中	弱	强	弱	弱	弱
流体	强	弱	强	中	弱	强	弱	弱

搜集岩屑资料 → 总结测井资料划分岩性规律 → 定性判断岩性。

常用的测井资料：自然电位；电阻率；地层倾角；体积密度；中子孔隙度；声波时差等。



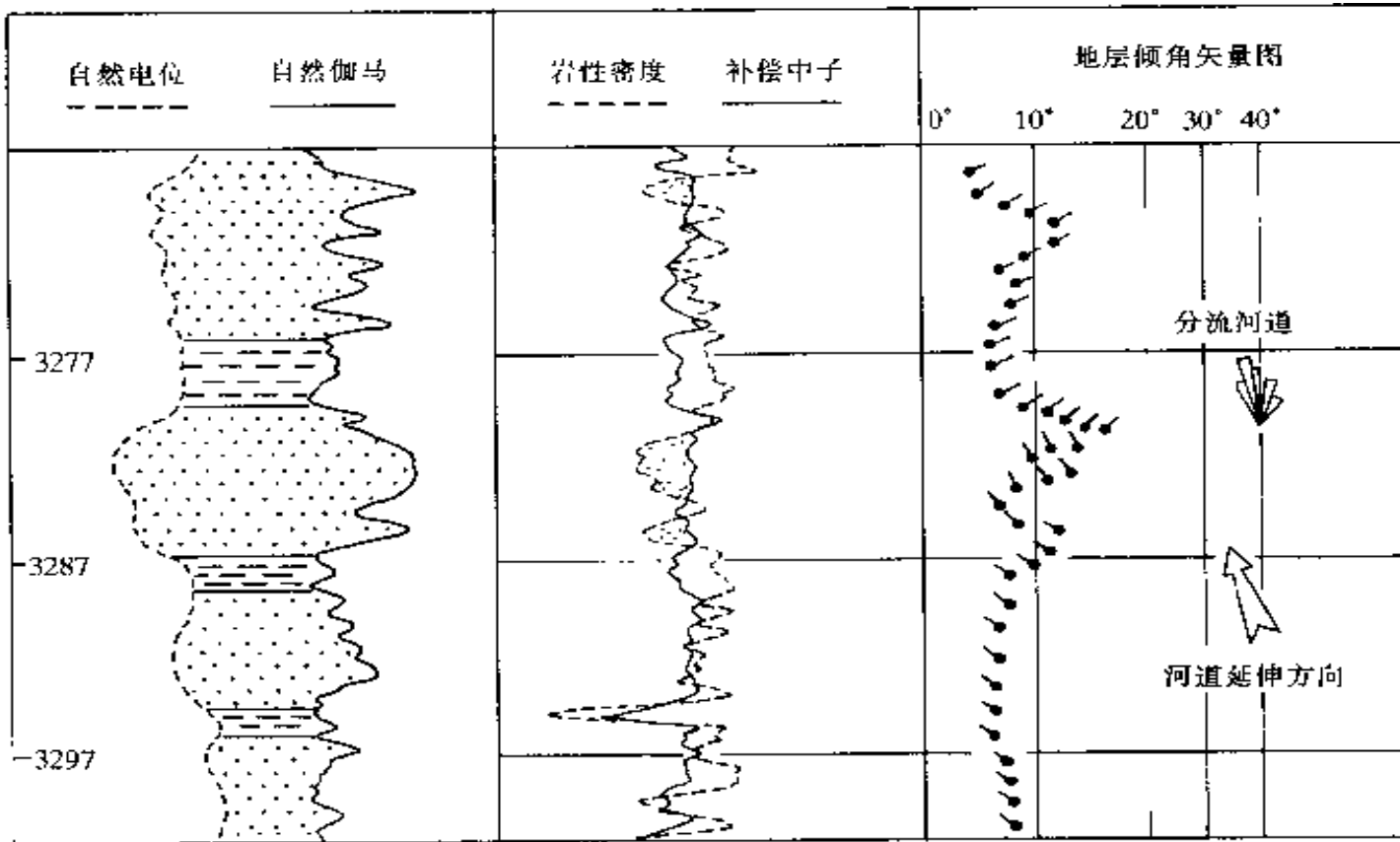
倾角矢量图 10° 20° 30° 40°					层理剖面	层理类型
						水平或平行层理
						波状层理
						单斜层理
						前积波状层理

倾角矢量图 10° 20° 30° 40°					层理剖面	层理类型
						波状交错层理
						交错层理
						槽状层理
						块状不显层理
						递变层理



在单层砂体内部的

小兰模式及小绿模式的倾角矢量方向都代表古水流方向

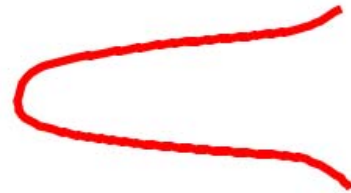


三角洲分流河道倾角对古水流方向分析图



自然电位

幅度



高幅-滩砂



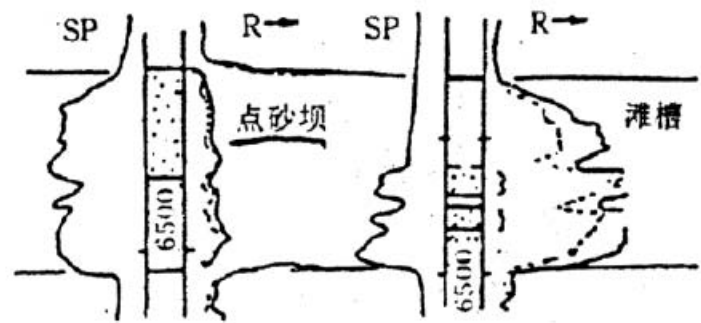
中幅-河道砂



低幅-漫滩沉积

形态

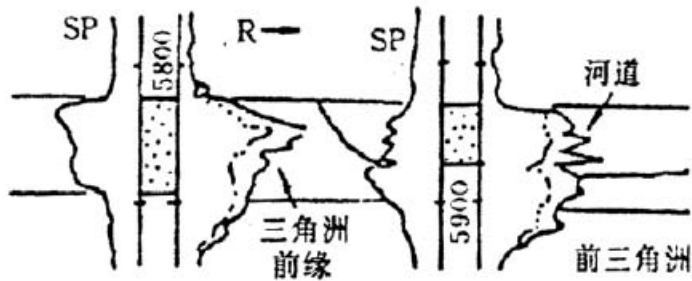
		水流能量	物源供应	代表相
钟形		逐渐减弱	不断减少	曲流河点砂坝 --正韵律、水进层序
漏斗形		由弱渐强	不断增多	三角洲前缘砂体或岸外砂坝 --反粒序、水退层序
箱形		稳定	稳定	风成砂丘 上、下幅度变化不大



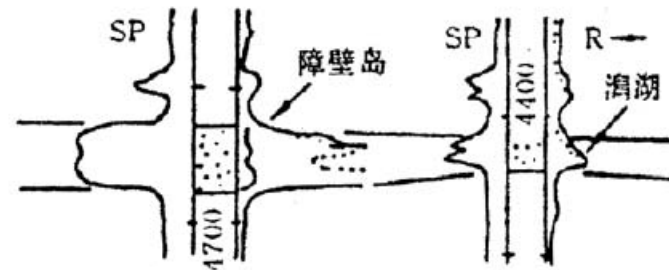
曲流河



辫状河



三角洲

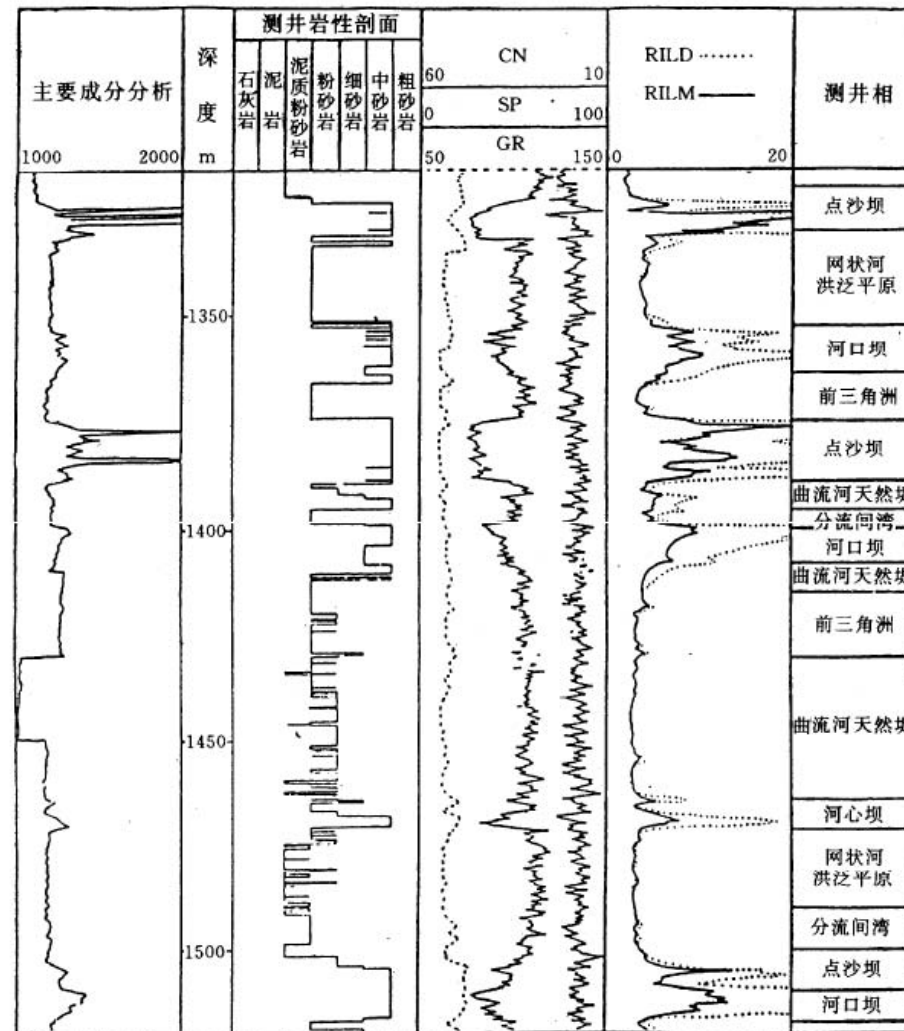


海岸

部分砂岩环境的自然电位和电阻率的典型响应 (据R. R. Berg, 1986)



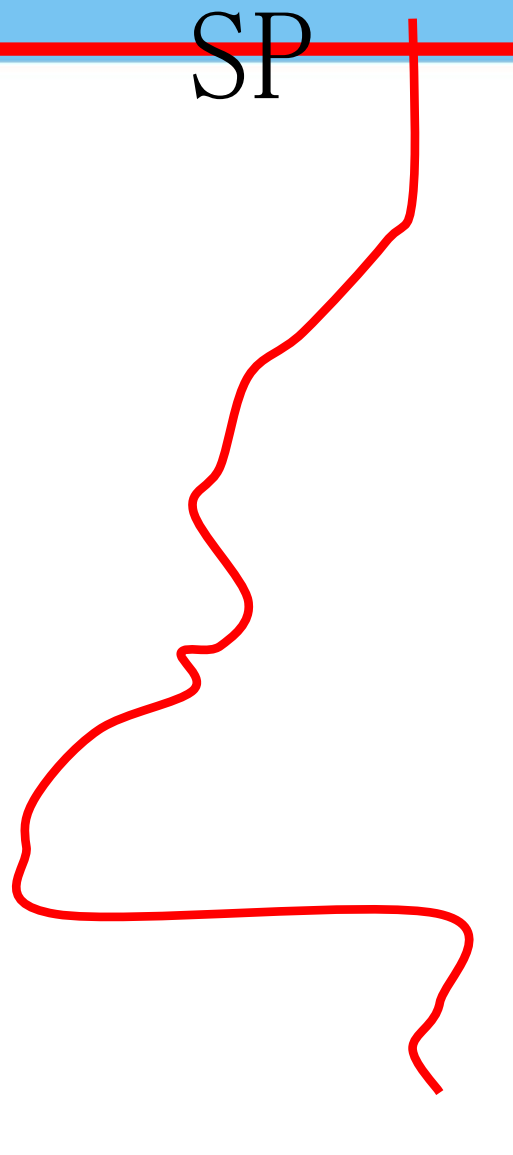
利用判别模型和测井相—岩相的对应关系，对目的层的测井资料进行处理，得出一条连续的地层岩相剖面。



某井测井相分析图



SP

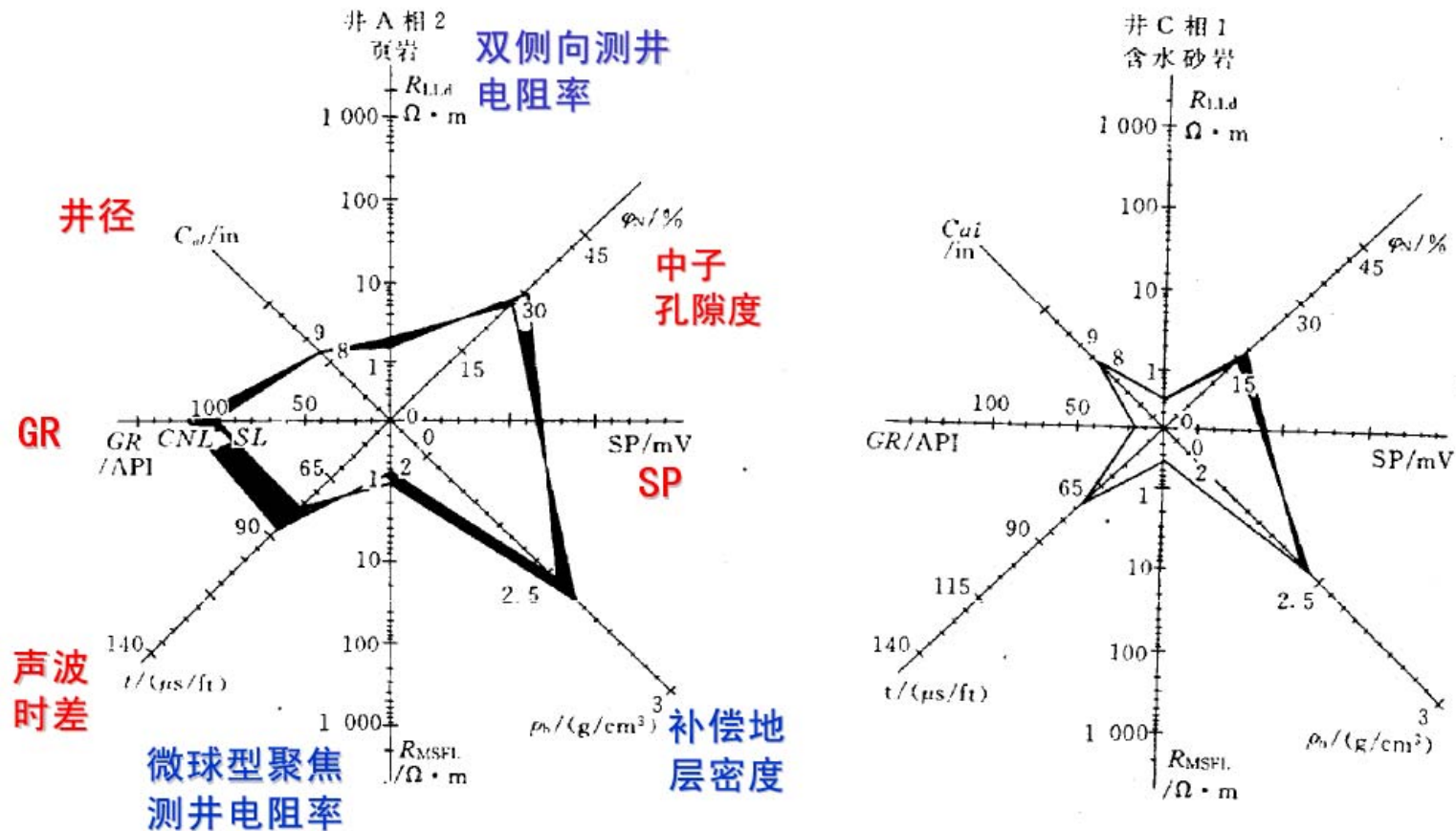




沉积环境	冲积扇	河流	三角洲	滩坝	水下冲积扇	重力流		
						重力流水道	浊积岩	
标志	扇根 扇中 扇端	辫状河 蛇曲河	分支河道 河口坝 前缘砂	滩砂 坝主体 坝内翼	扇根部 扇中 扇端	中心相 前缘相	根部相 中心相 边缘相	
曲线形态 (实例)								
单齿模式								
纵向幅度组合	幅度减小正韵律	席状砂 辫状河	沼泽相 分支河道 三角洲平原	堡坝外侧 开阔湖	席状砂 河道末端	前缘相	湖盆 深水重力流水道	
	幅度不变	扇端 扇中	河口坝 三角洲前缘	坝主体 滩砂	扇中前缘 扇中	中心相	边缘相 中心相 根部相	
	幅度加大反韵律	主河道 泥石流	河道砂坝 辫状河	堡坝内侧 半封闭湖 后积式(水进式)	非河道区 扇根(浅水)	水下漫滩 湖盆	深水相 深水浊积岩 深水相	
地质标志	背景	山麓陡坡	丘陵—平原	浅水区	陡坡—浅水	浅水—深水	陡坡、深水	
	砂	粗砾—细砂	砂砾—粉砂	含砾砂—细砂、粉砂	粗砾—粉砂	细砂—粉砂	砂砾—粉砂	
	泥	红色泥岩	红色—杂色	灰绿—浅灰	浅红、灰绿—灰	灰—深灰	深灰	
	环境标志	氧化环境	氧化环境	弱氧化到弱还原, 有炭质页岩、细粒灰岩伴生	弱还原 有鲕粒、生物灰岩层	弱还原扇根 粒、波状交错层	还原环境(弱—强)浅水 背景有鲕粒生物灰岩	还原环境 围岩为深水质纯泥岩



人工测井相分析 (2)



表示电相的星形图 (据O·塞拉, 1992)

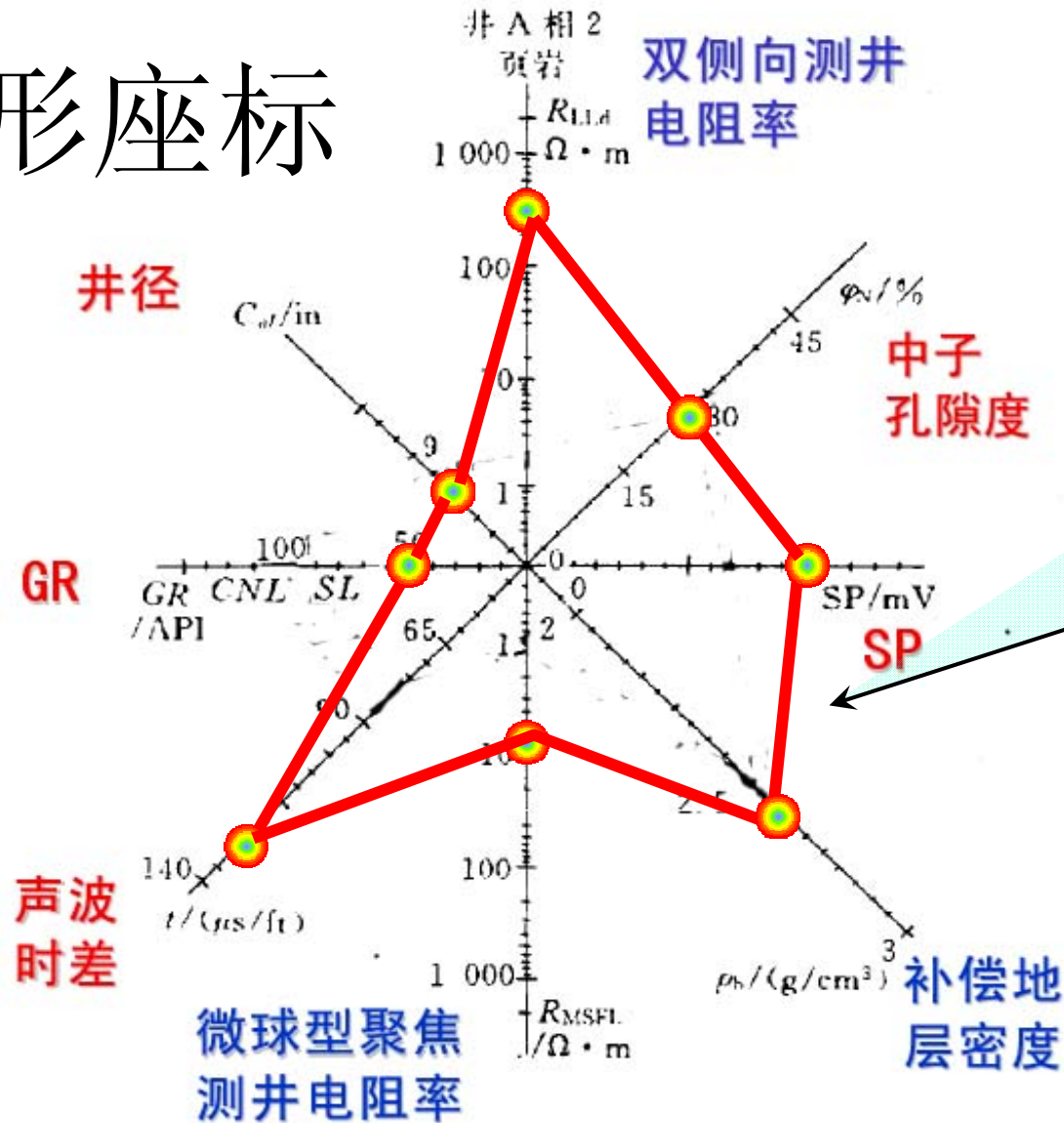


• 方法:

- ① 选择一组测井曲线（如自然电位、电阻率、自然伽马、声波、密度、中子等）
- ② 然后在放射状或平行状坐标上，标上任一层的各种测井参数数据；将这些值顶点连接起来，就构成了星形图或梯形图
- ③ 将具有相同或很相近的图形归为同一测井相，用岩心资料对这些测井相进行标定，确定相应的岩相。



星形座标



测井相

表示电相的星形图



碳酸盐岩相分析

- 由于碳酸盐岩没有明显的层理，而且往往呈块状连续沉积，因而其沉积相不能根据地层倾角测井研究古水流的砂岩沉积相模式来研究，它主要是根据岩性、岩相等岩石矿物组成及物理性质差别来判断，所以它的测井沉积相模式多采用数理统计方法来建立。



块状连续沉积





非均质性强





•对碳酸盐岩建立的相模式

•潮上蒸发盆地石膏:

$$•F1=a_1DT+b_1CNL+c_1DEN+d_1LLD+e_1CGR+f_1Th+g_1U+h_1K$$

•潮上云坪:

$$•F2=a_2DT+b_2CNL+c_2DEN+d_2LLD+e_2CGR+f_2Th+g_2U+h_2K$$

•潮间藻坪:

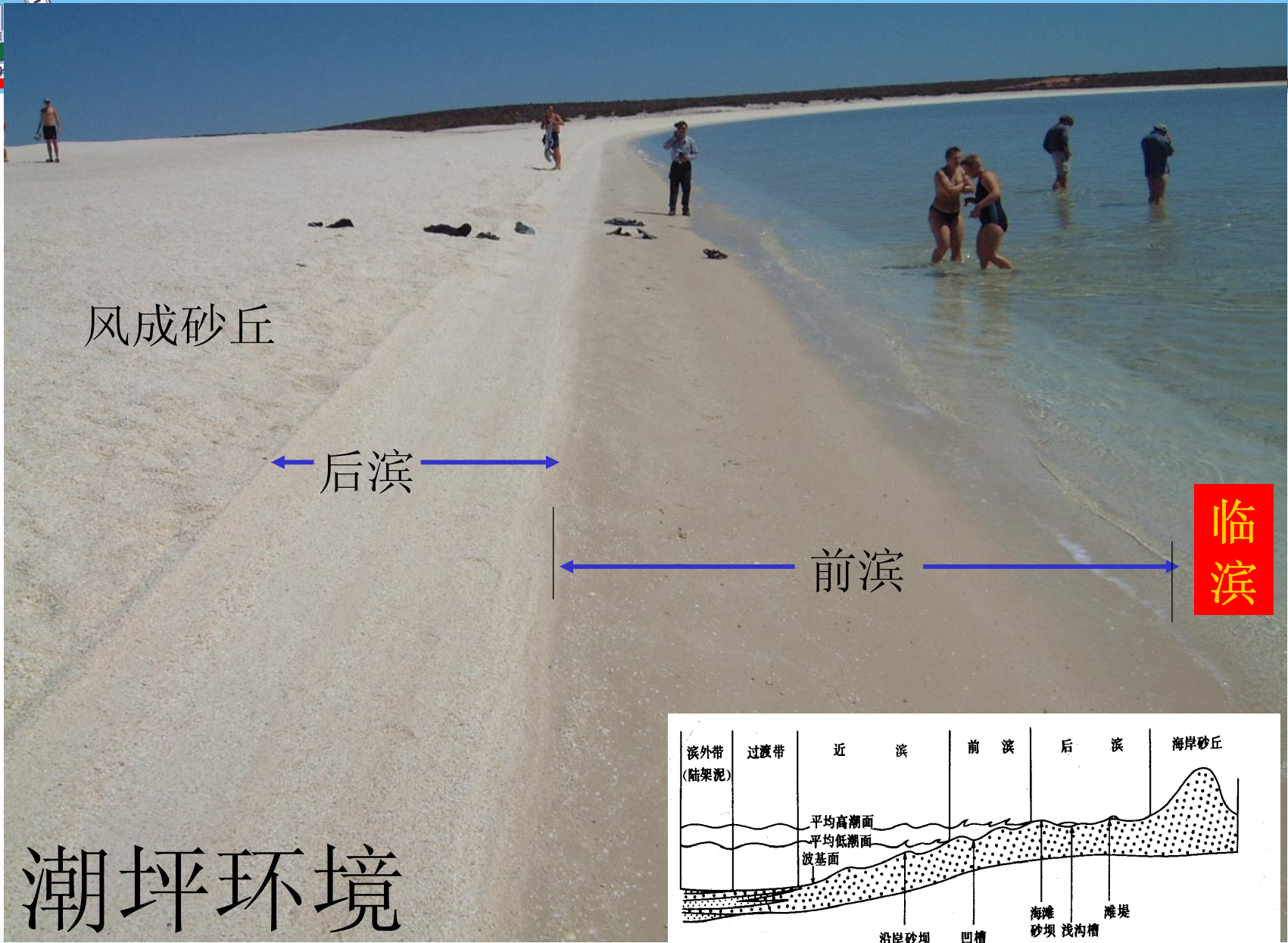
$$•F3=a_3DT+b_3CNL+c_3DEN+d_3LLD+e_3CGR+f_3Th+g_3U+h_3K$$

•潮下浅滩:

$$•F4=a_4DT+b_4CNL+c_4DEN+d_4LLD+e_4CGR+f_4Th+g_4U+h_4K$$

•潮下深水灰岩:

$$•F5=a_5DT+b_5CNL+c_5DEN+d_5LLD+e_5CGR+f_5Th+g_5U+h_5K$$



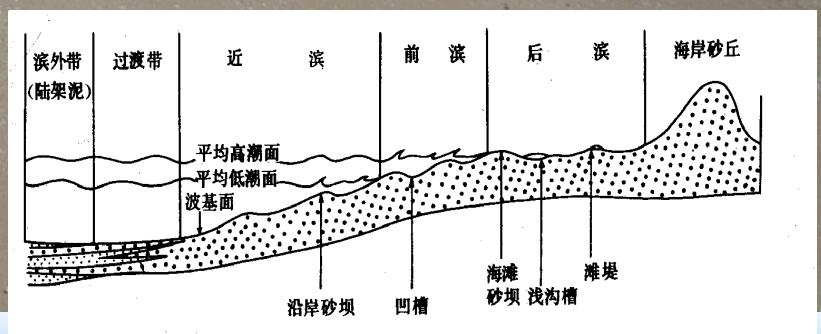
风成砂丘

← 后滨 →

← 前滨 →

临滨

潮坪环境





潮上蒸发盆地石膏:

$$F1 = a_1DT + b_1CNL + c_1DEN + d_1LLD + e_1CGR + f_1Th + g_1U + h_1K$$



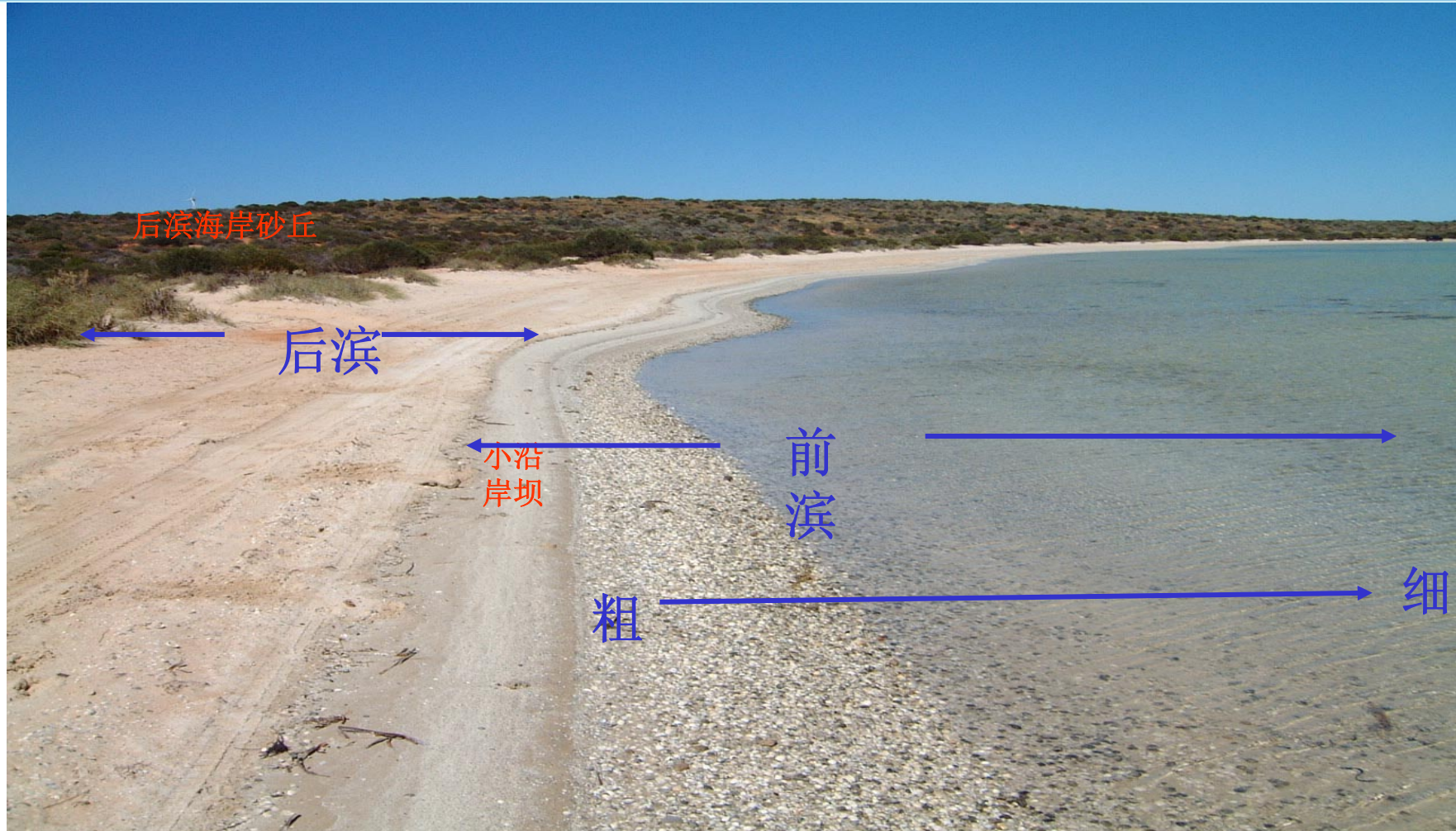
潮上



Enterolithic veins of Cretaceous secondary gypsum from Dorset , left, and modern sabkha anhydrite from Qatar, right . Ian West (c) 2005







后滨海岸砂丘

后滨

小沿岸坝

前滨

粗

细

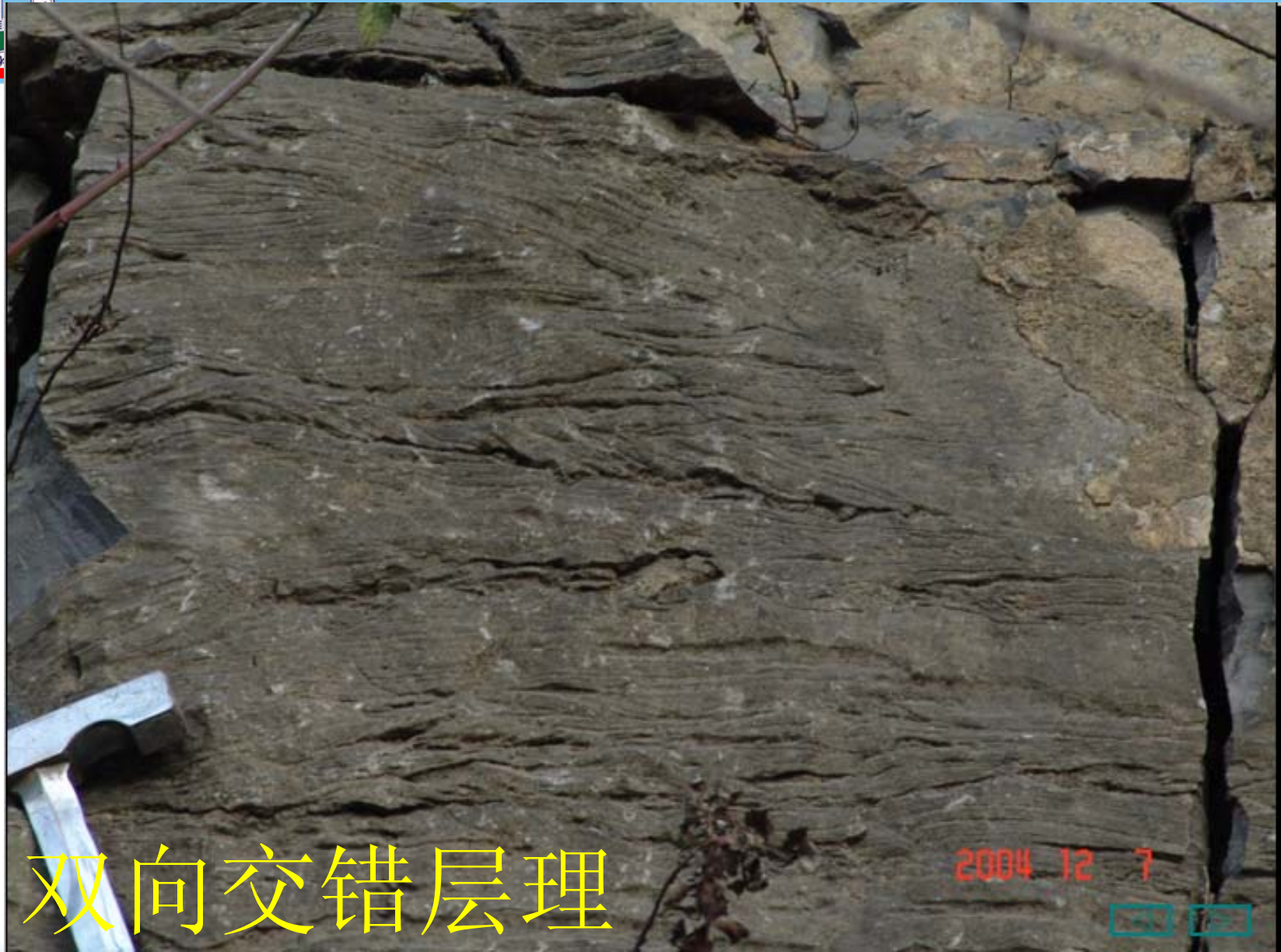
一个完整的海滩沉积



小潮湿道

沼泽

宽阔的潮间坪（前滨）沉积面上的波纹

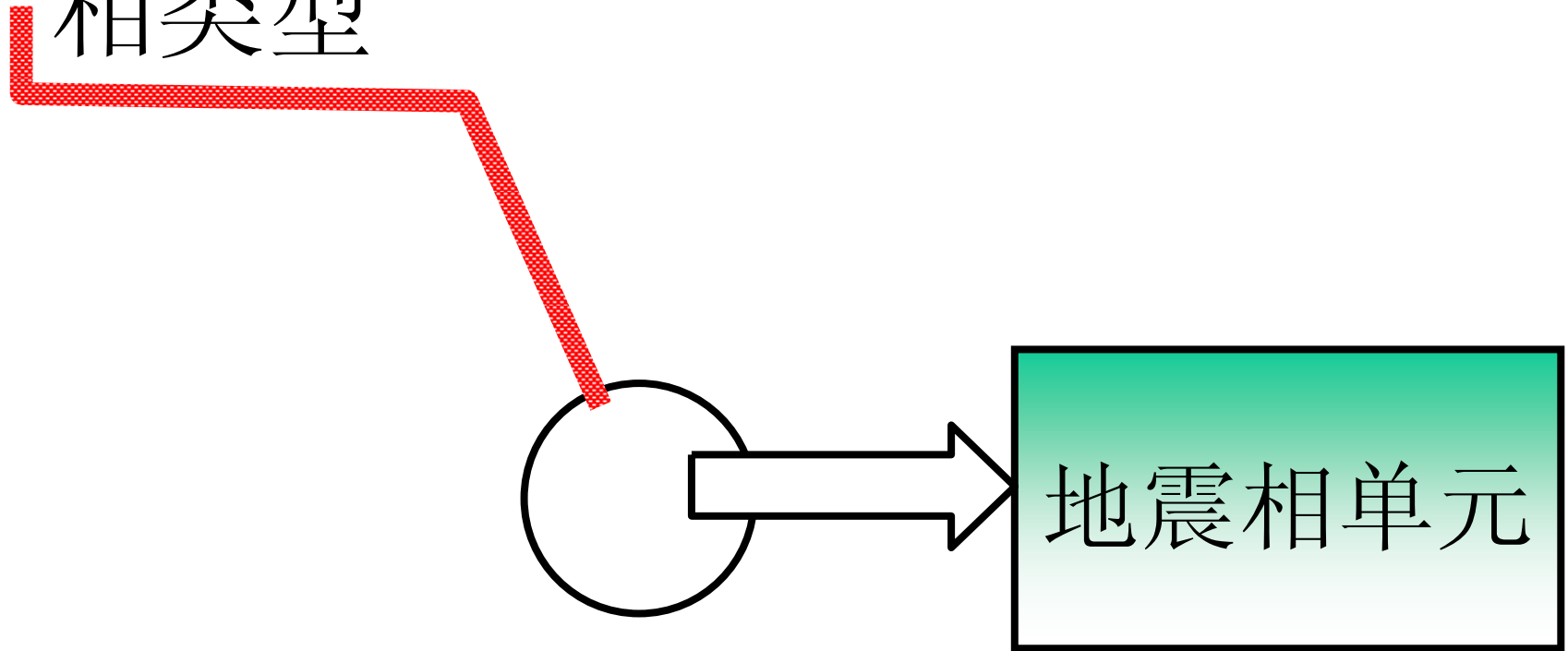


双向交错层理





相类型





三、地震相

平行地震相

前积相

丘状相

透镜状相

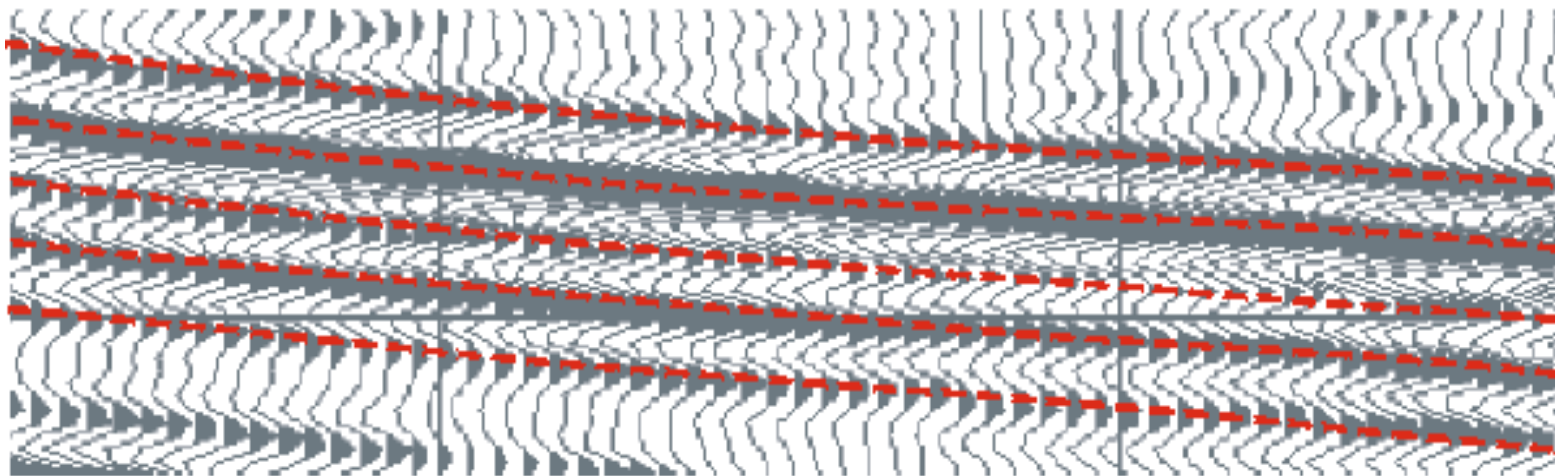
充填相

杂乱—空白相



平行与亚平行反射结构

- 反射层平行或微微起伏（波状），往往出现在席状、席状披盖及充填型中，**反映均速低能沉积环境。**



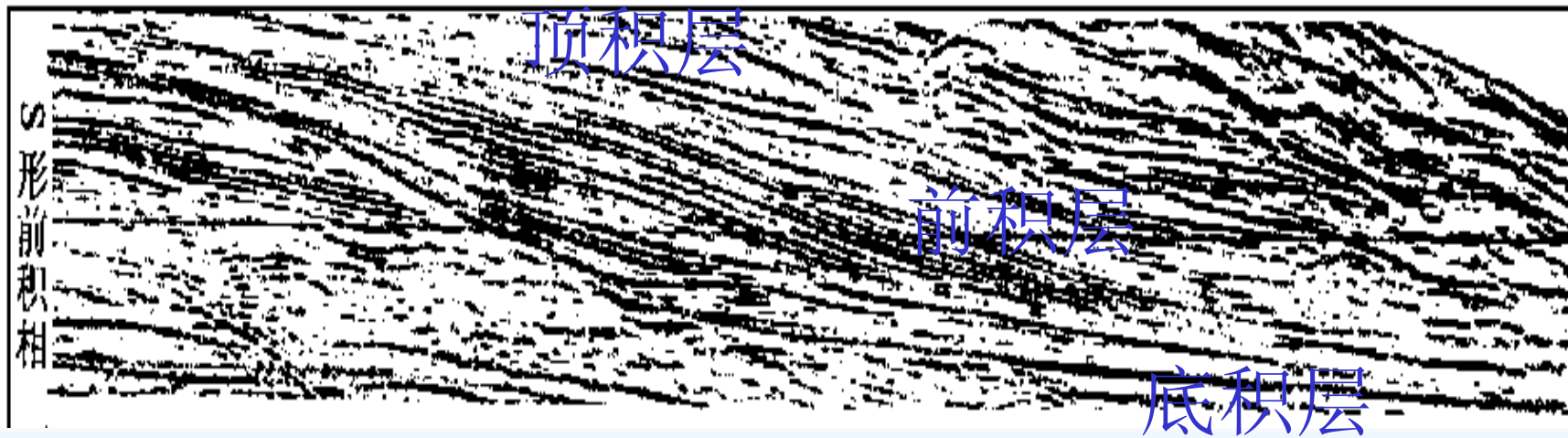
(A) 平行地震相



内部发育一组相互叠置的反S形反射同相轴：**上端**为近水平的顶积层，**中**部为倾斜的前积层，**顺**同相轴向下到了**底部**，同相轴逐渐变得平缓，形成底积层

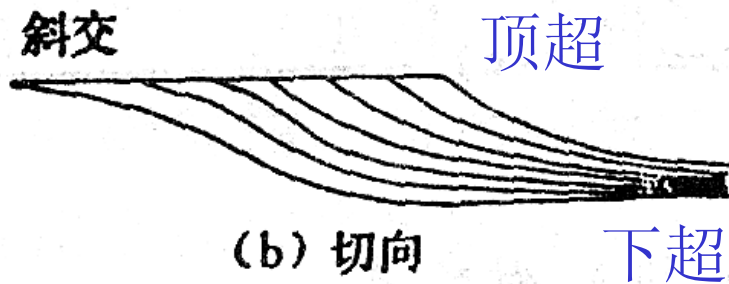


断陷盆地三角洲相。相对较低的沉积物供应（**保留顶积层**）和相对快的盆地沉降速度。

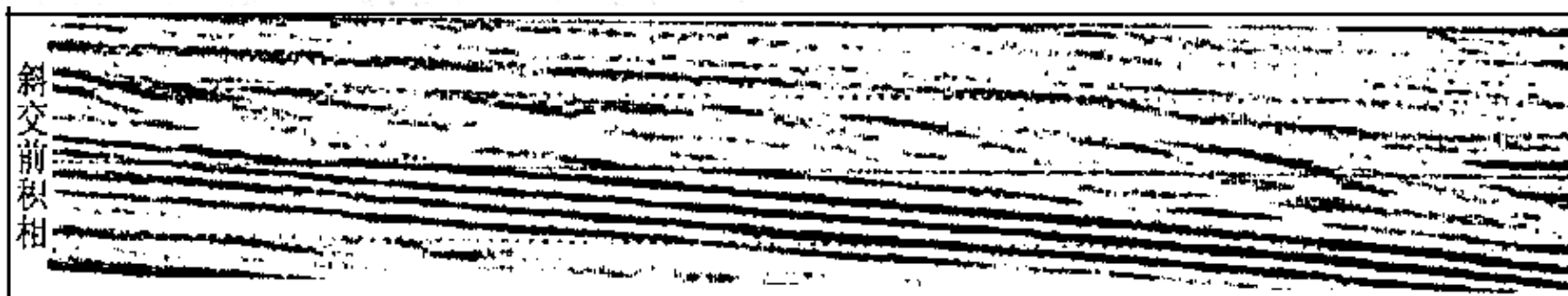




相对陡倾、顶超、下超。意味着相对高的沉积物供应速率和缓慢变动的相对海平面。从而造成盆地被迅速地充填，后来的沉积水流冲刷上部的沉积表面，**无顶积层**存在。代表一种**高能三角洲**环境，在它的前积段内发育大量前积砂体。



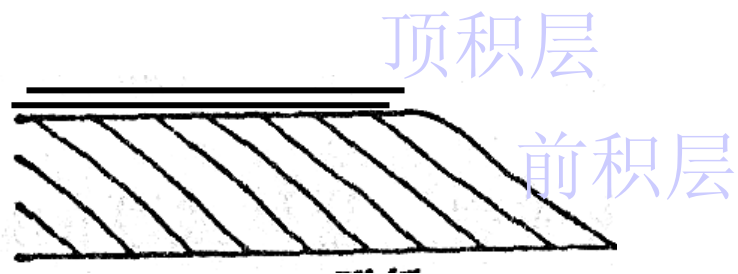
高能三角洲 斜交前积



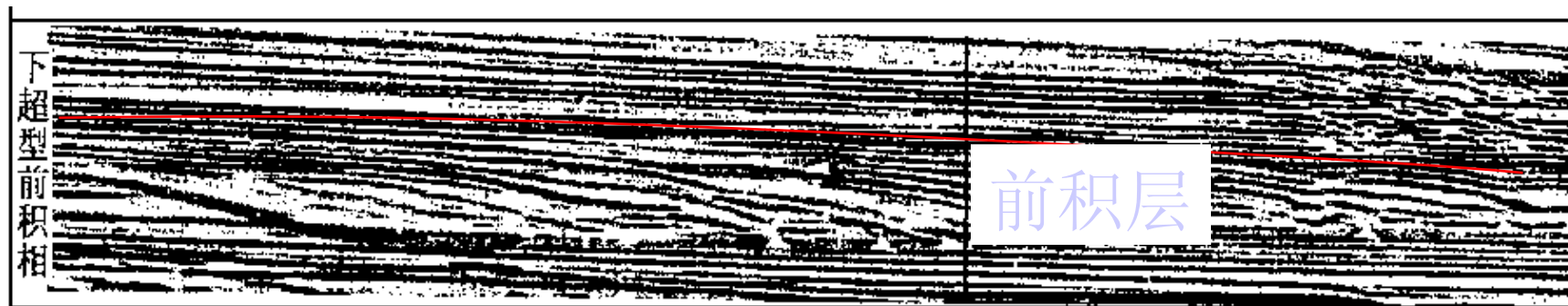


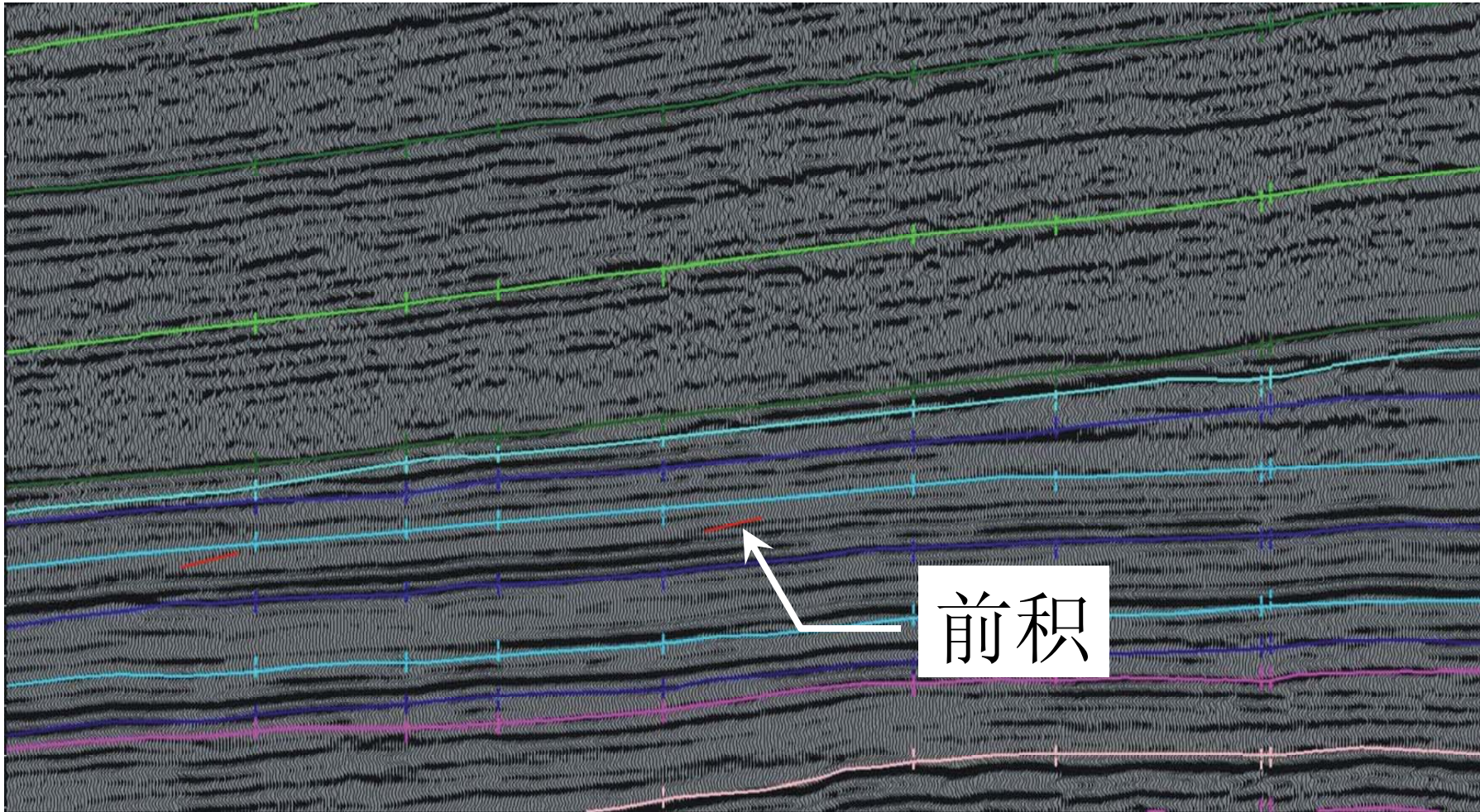
前积层和顶积层发育，缺失底积层。其顶积层发育表明是在水平面相对上升时期形成的。

一般在浊积扇或扇三角洲上容易发育



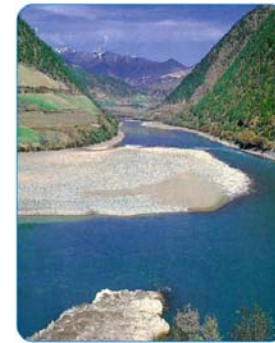
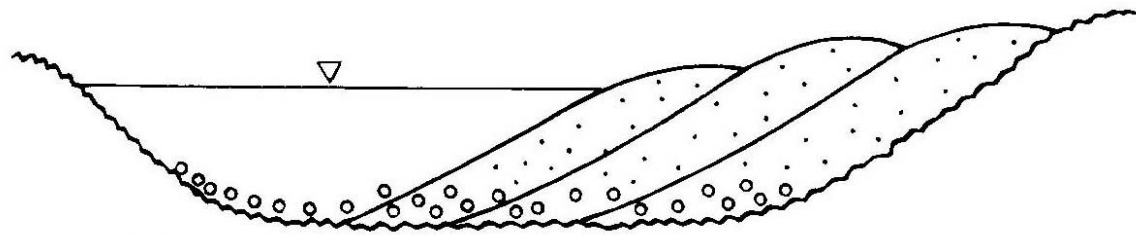
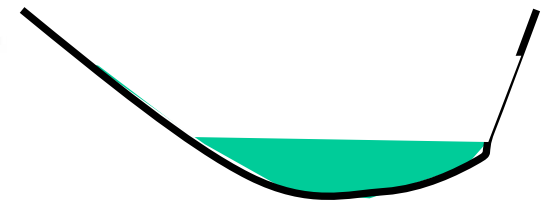
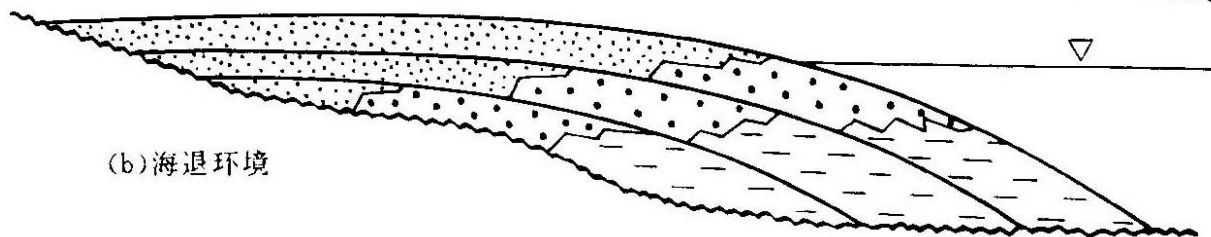
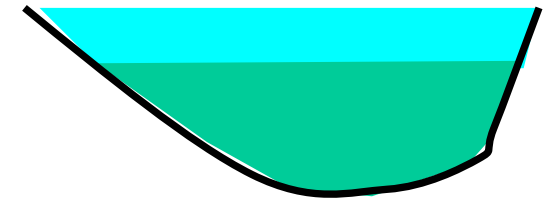
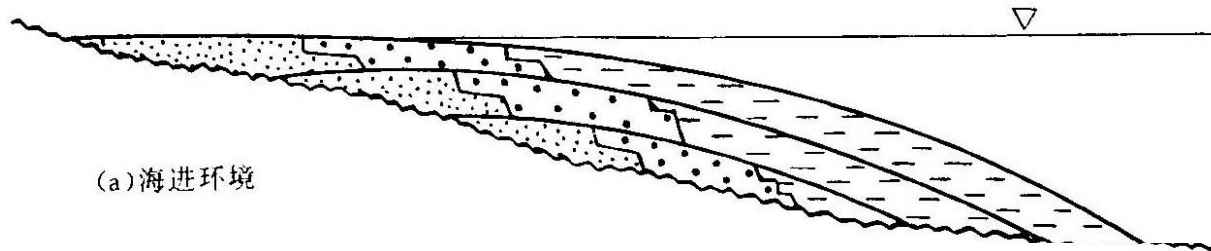
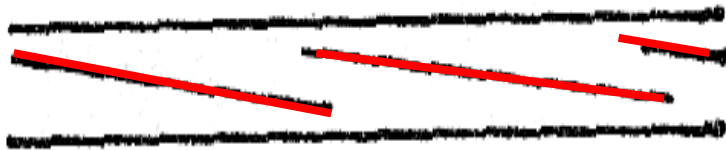
下超形前积







(e) 迭瓦



非海相海岸沉积



滨相沉积

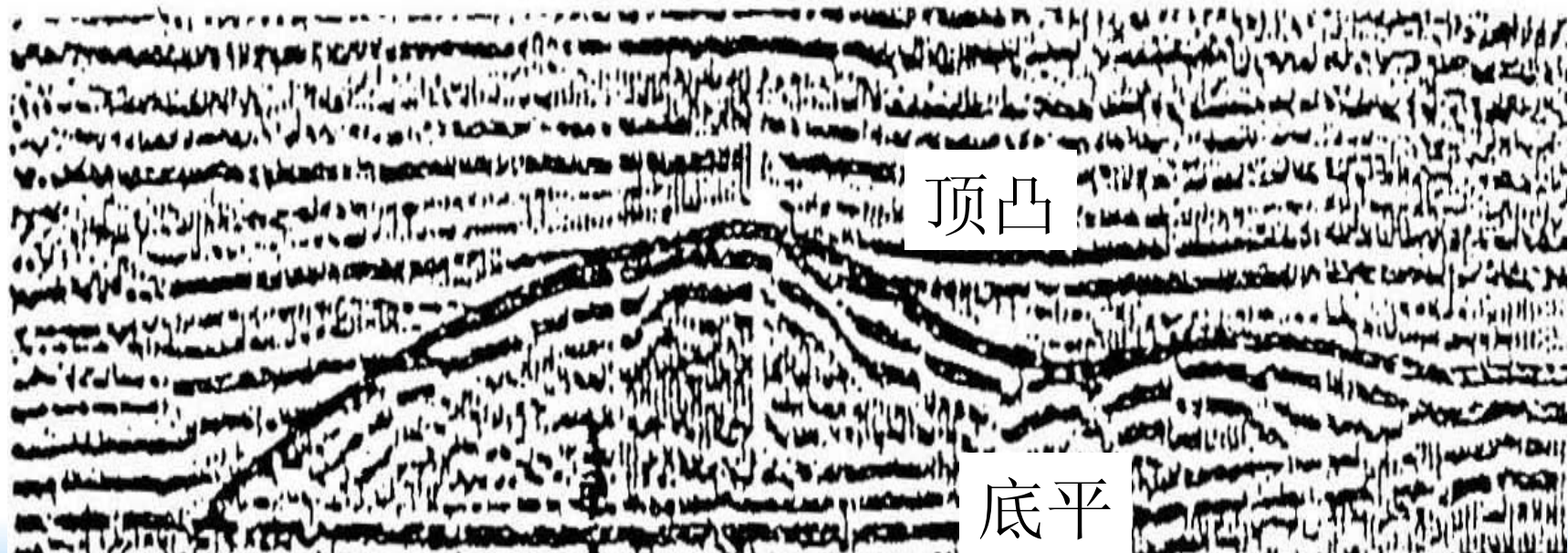


海相沉积



丘状相

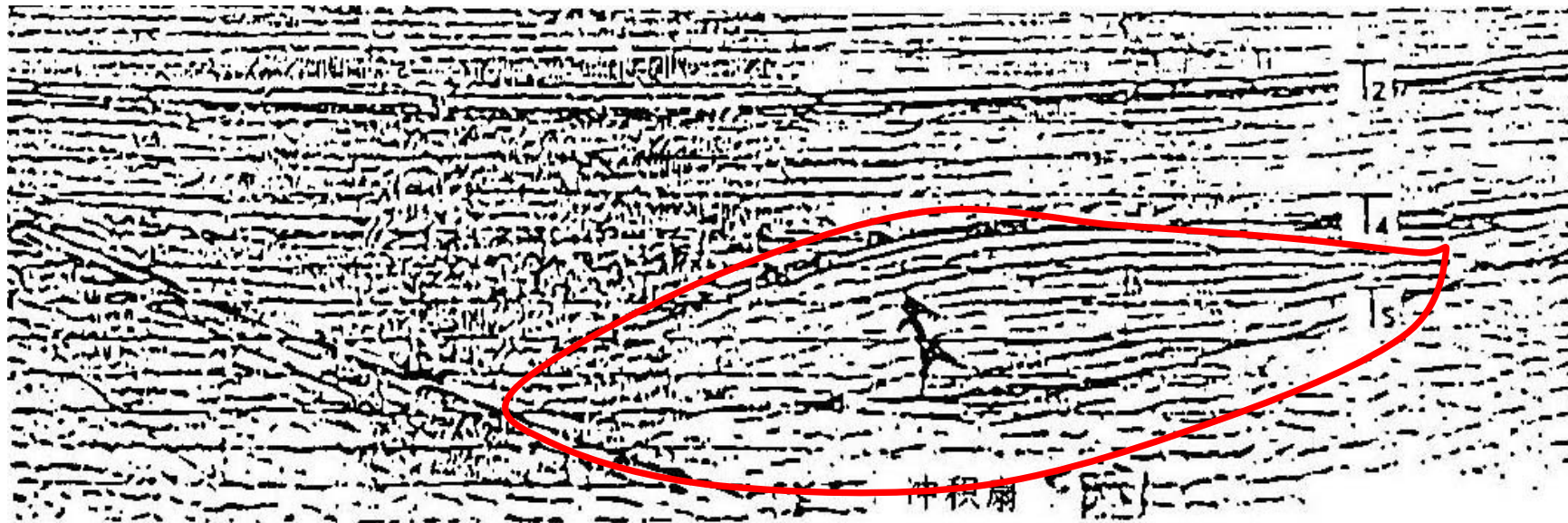
大多数丘状相与沉积作用和火山作用有关。丘状相作为一种高能沉积作用的产物，代表了一种沉积物搬运过程中快速卸载的过程，因此它主要发育在深海（或深湖）浊积扇环境。另外，滑塌块体、三角洲朵叶体和礁体以及火山堆也都可以表现为丘状相。





透镜状地震相

- 透镜状相可以产生于多种沉积环境中，它的双向外凸可以是原生的，也可以是成岩过程中差异压实造成的。大型透镜状相一般与河道下切和三角洲前积作用有关，一般，大型透镜体都是有利储集体勘探目标。



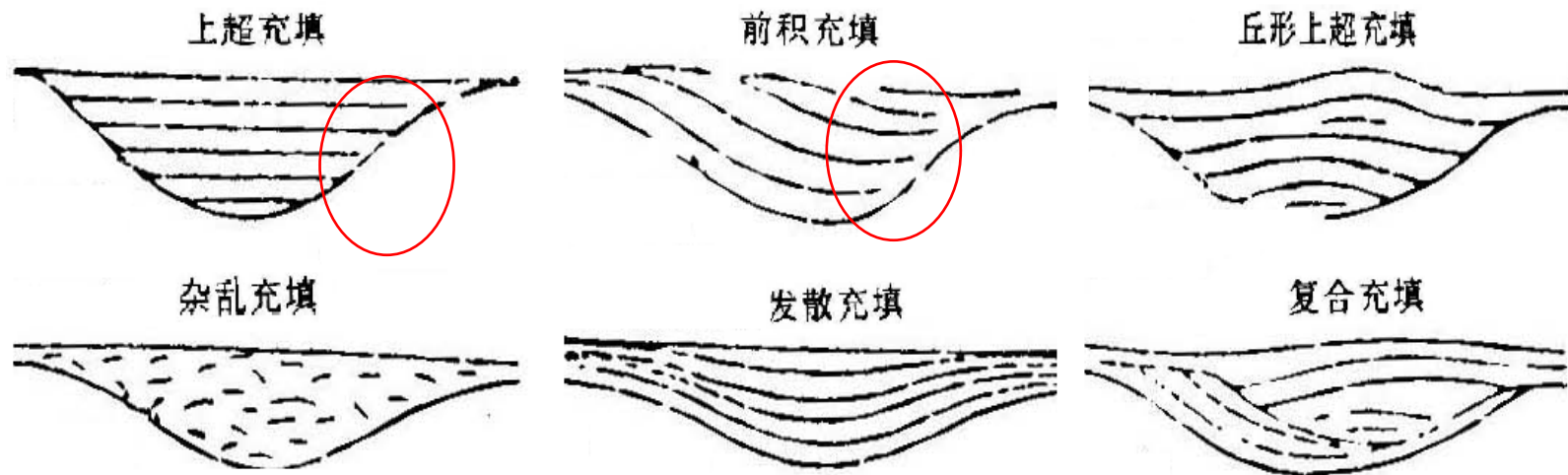
河道下切和三角洲前积

双向外凸



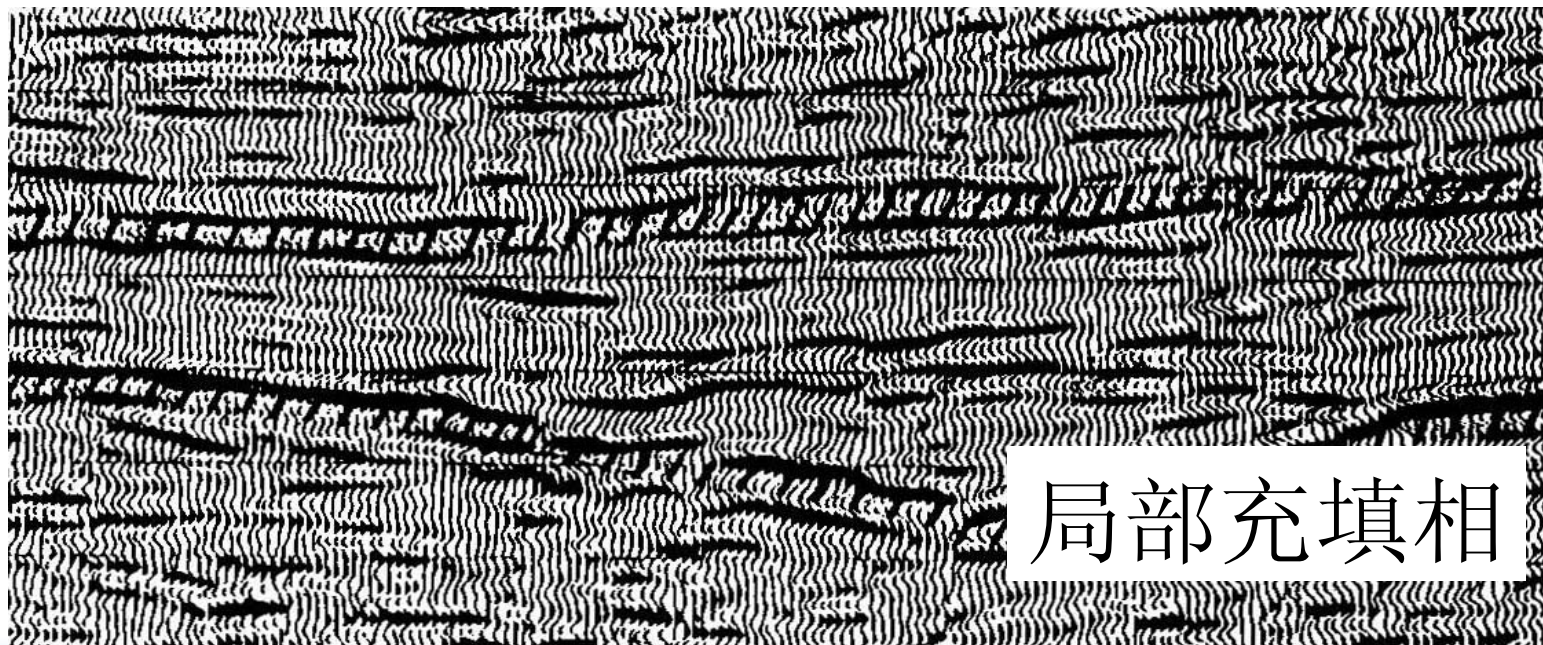
充填地震相

- 开阔充填指在一个盆地的某个负向单元如洼槽中充填的地层单元，一般为上超充填，为低能环境。

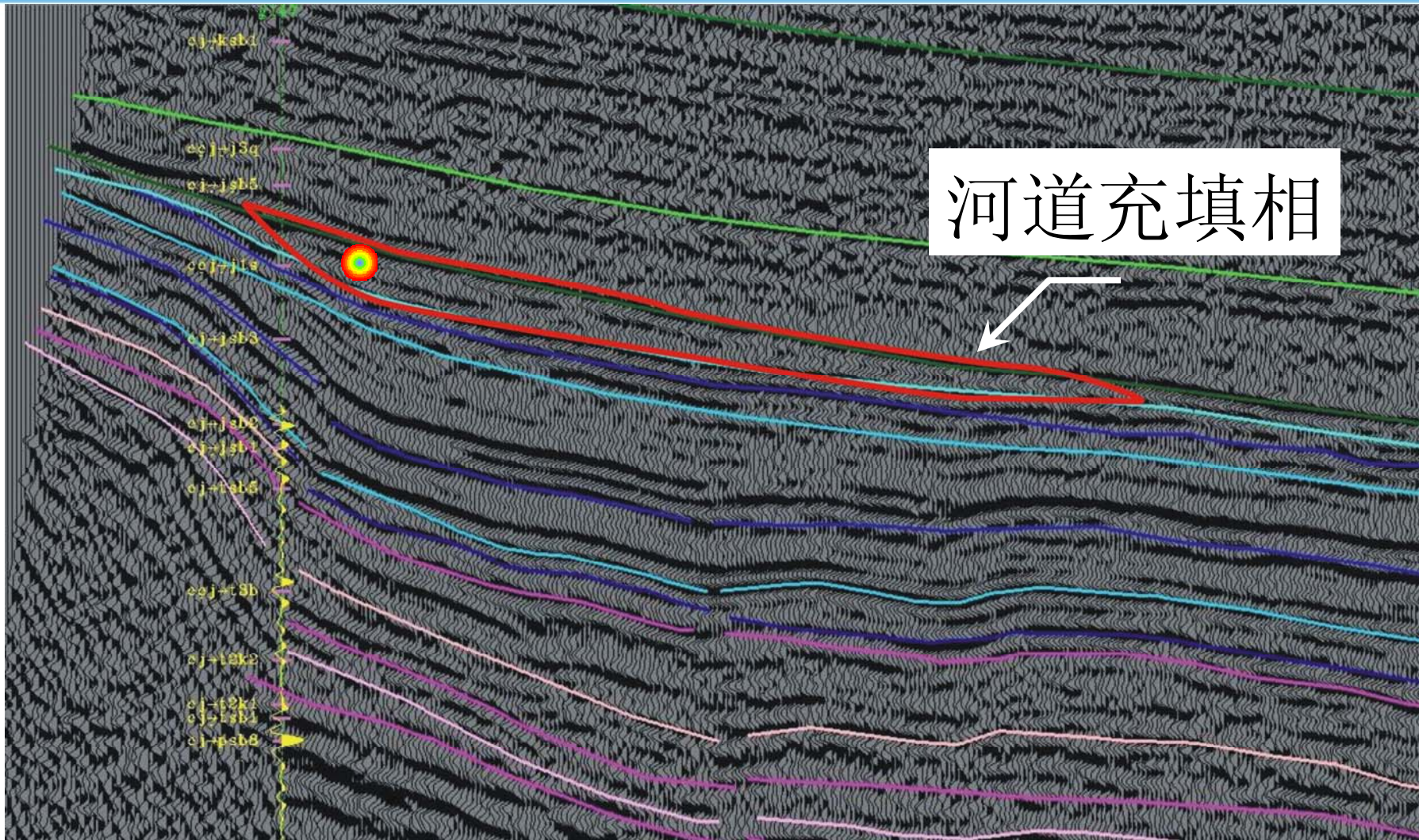




局部充填是指在河道下切后形成的较小的冲沟内形成的充填，代表较高能量的环境. 局部充填相与储层关系密切，诸如侵蚀河道、海底峡谷等都是储集体发育的有利部位。



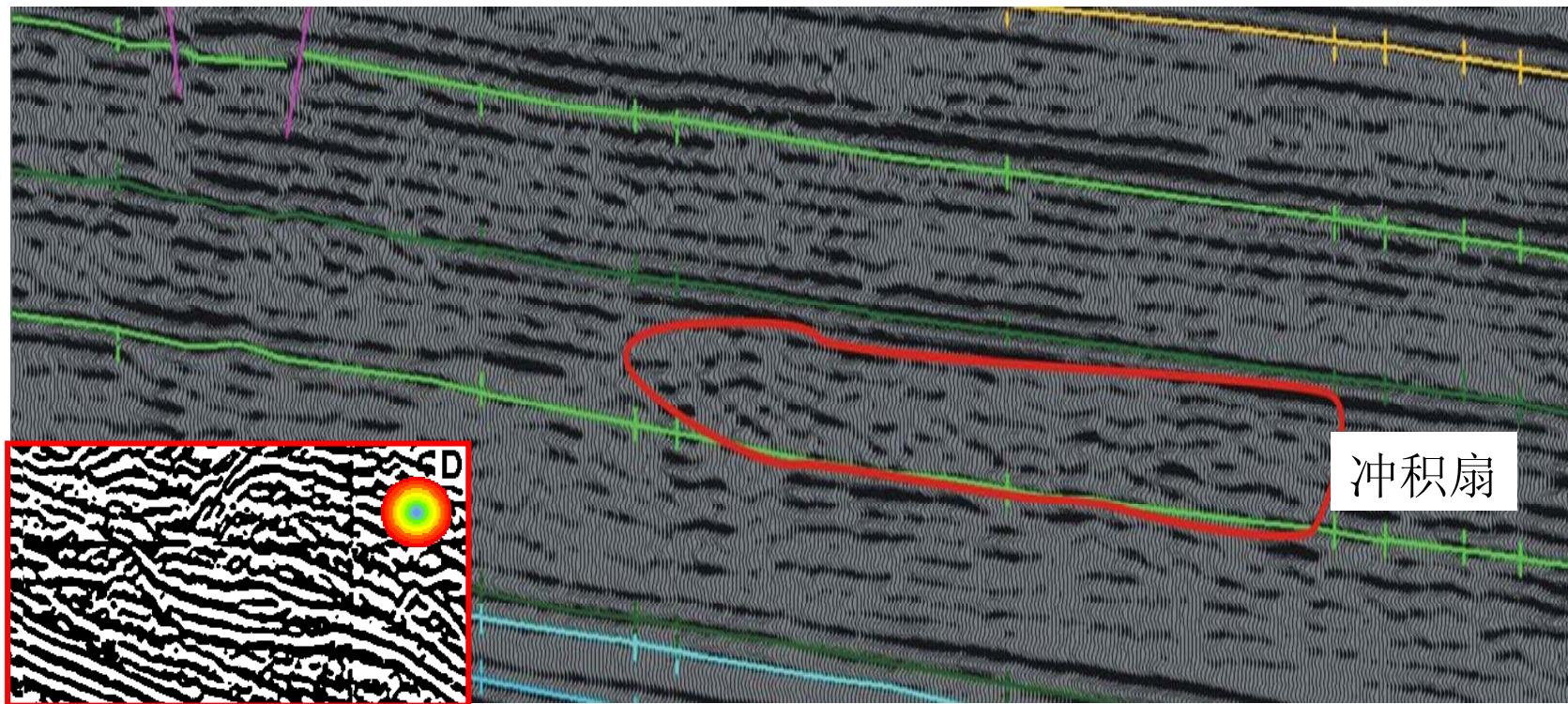
局部充填相





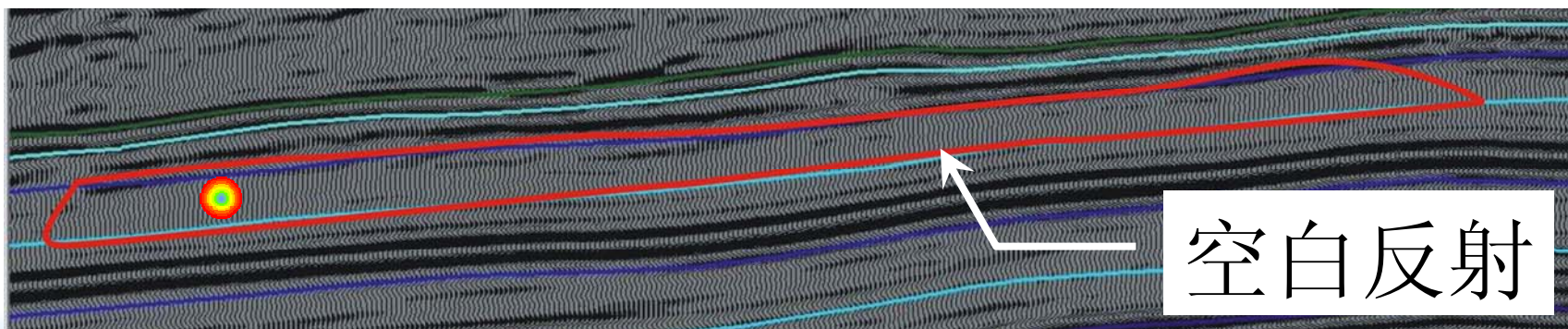
杂乱—空白地震相

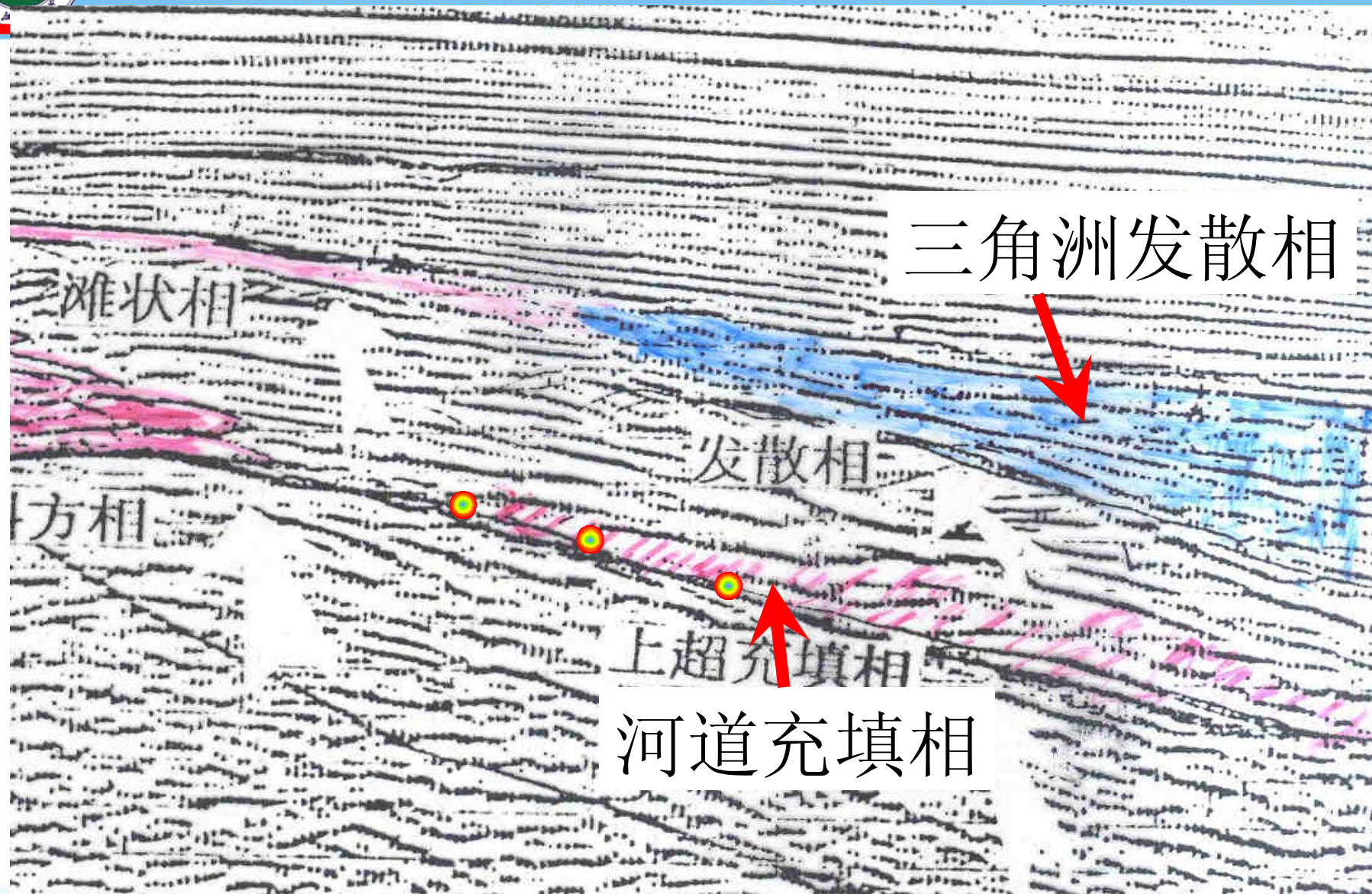
- 杂乱相代表能量相对较高但不稳定环境下的地层。杂乱相经常发育在冲积扇和近岸水下扇环境。





- 空白相实为杂乱相的反射能量变低后的产物，它代表能量稳定环境，可以是厚层细粒沉积，也可以是厚层粗粒沉积。
- 空白相成因与单元顶部的波阻抗差也有关系，当顶界面反射系数很大时，透射能量较低，变成空白相。





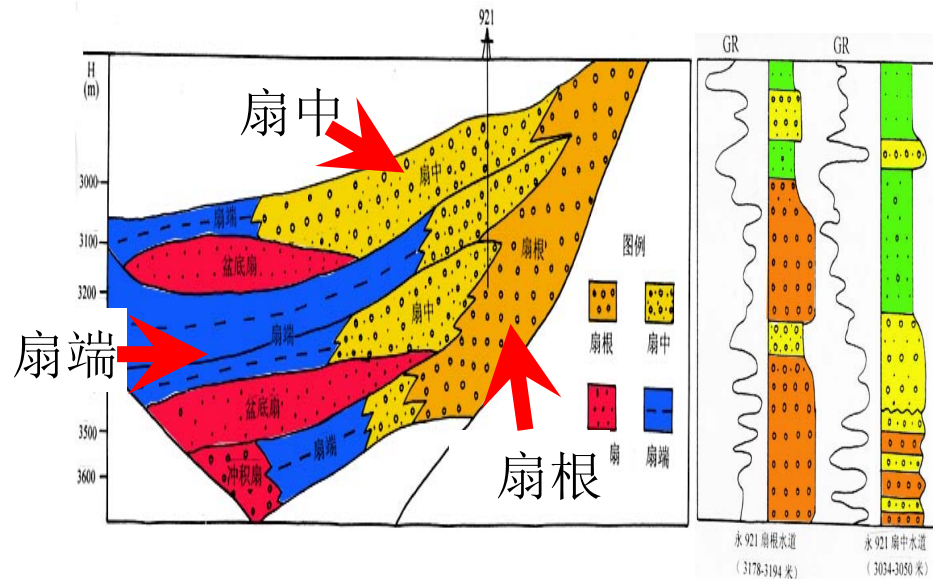
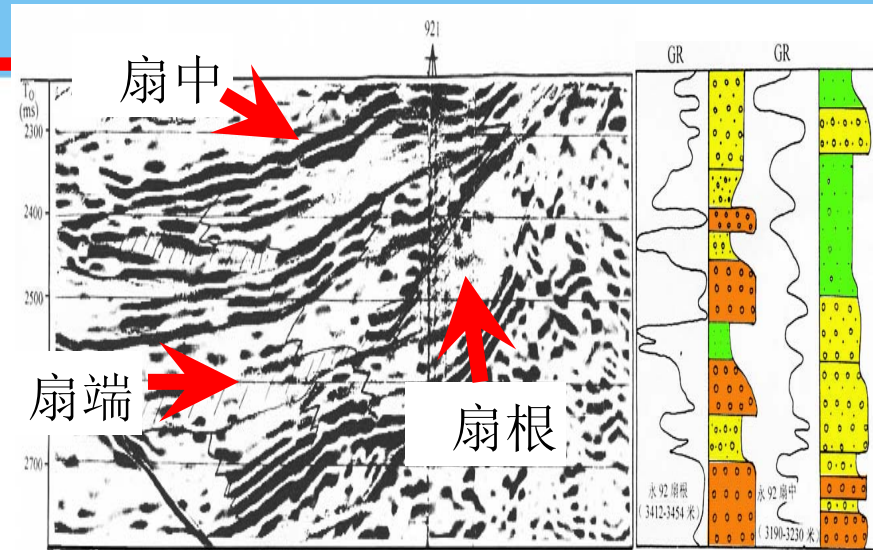


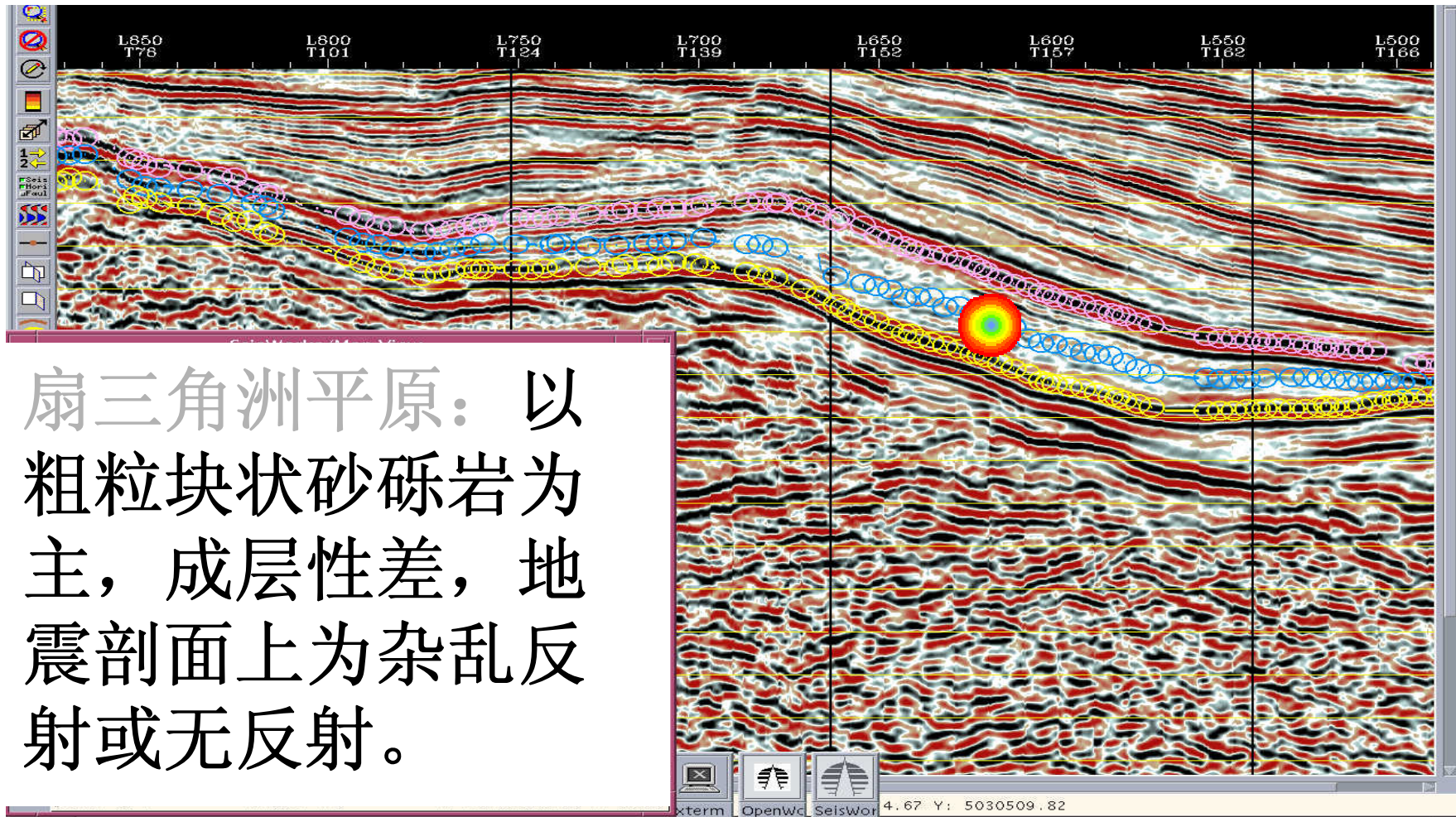
冲积扇体系

扇根：以泥石流沉积为主，砾、砂、泥混杂，分选差，成层性差，缺乏连续的波阻抗界面，无反射或杂乱丘状反射。

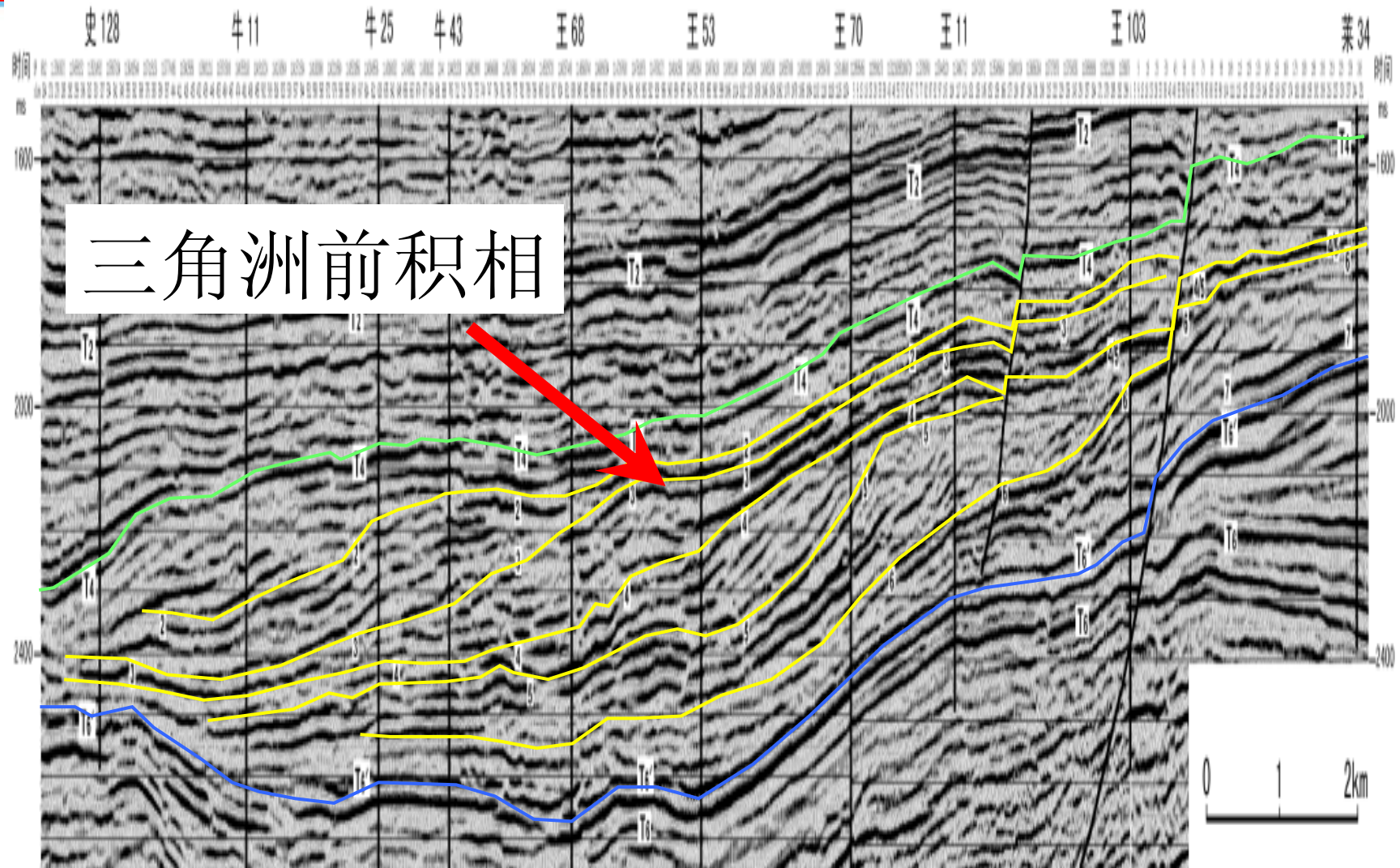
扇中：砂泥岩为主，河漫及河床充填沉积为主，可形成较连续的波阻抗界面，地震反射连续性中等到好，振幅中等—强，内部反射平行—亚平行。

扇端：以薄砂泥互层为主，高频、中—低振幅、中—低连续。





扇三角洲平原：以粗粒块状砂砾岩为主，成层性差，地震剖面上为杂乱反射或无反射。





四、沉积相研究流程

1. 区域沉积背景分析
2. 岩心观察与描述
3. 单井相分析
4. 沉积相模式
5. 岩电关系研究
6. 平面砂体分布
7. 测井相平面组合
8. 沉积相平面分布
9. 沉积演化及有利储层研究



第二节 储层非均质性

三

非均质性对储层
开发的影响

二

研究内容和方法

一

分 类



一、分类

Petition 分类

Weber 分类

Ealdormen 分类

裘亦楠分类（本教材）



1 Pettijohn 分类

油藏规模: $1 \rightarrow 10\text{km} \times 100\text{m}$

层规模: $100\text{m} \times 10\text{m}$

砂体规模: $(1 \rightarrow 10) \text{m}^2$

孔隙规模: $(10 \rightarrow 100) \text{mm}^2$

层理规模: $(10 \rightarrow 100) \mu\text{m}^2$

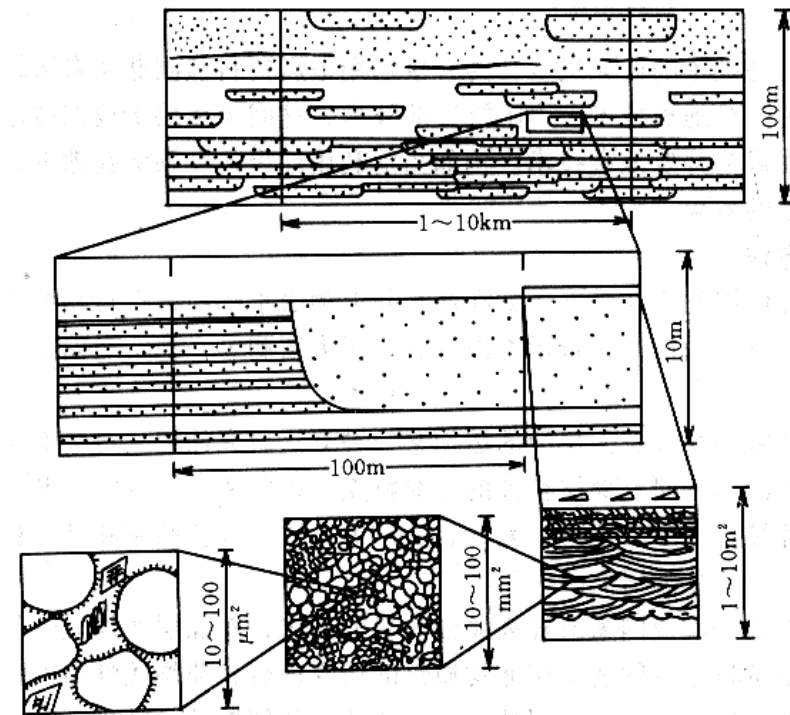


图 5-1 Pettijohn (1973 年) 的储层非均质分类
(以河流沉积储层为例)



2 Weber 分类

1	封闭、半封闭、未封闭断层	
2	成因单元边界	
3	成因单元内渗透层	
4	成因单元内隔夹层	
5	纹层和交错层理	
6	微观非均质性	
7	封闭、开启裂缝	



3 Haldorsen 分类

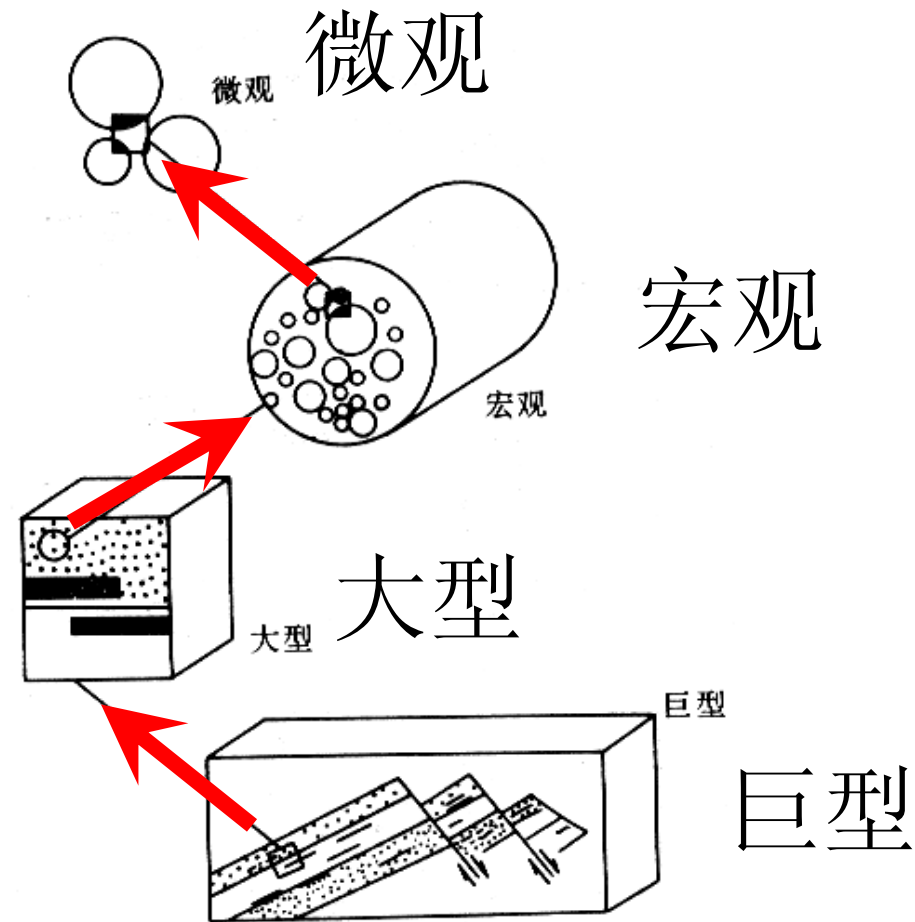


图 5-3 H.H.Haldorsen (1983) 的
储层非均质性分类



4 裘亦楠分类

层间非均质性：层系的旋回性、砂层间渗透率的非均质程度、隔层分布、特殊类型层的分布。

平面非均质性：砂体成因单元的连通程度、平面孔隙度、渗透率的变化和非均质程度、以及渗透率的方向性。

层内非均质性：包括粒度韵律性、层理构造序列、渗透率差异程度及高渗透段位置、层内不连续薄泥质夹层的分布频率和大小、以及其它的渗透隔层、全层规模的水平、垂直渗透率比值。

孔隙非均质性：砂体孔隙、喉道大小及其均匀程度；孔隙喉道的配置关系和连通程度



二、研究内容和方法

- 1、层内非均质性
- 2、层间非均质性
- 3、平面非均质性
- 4、微观非均质性
- 5、储层非均质性的影响因素
- 6、储层非均质性对开发的影响



1 层内非均质性

- 1) 粒度韵律（正韵律、反韵律、复合韵律、均质韵律）
- 2) 沉积构造（平行层理、斜层理、交错层理、波状层理、递变层理、块状层理、水平层理）
- 3) 渗透率韵律（正、反、复合韵律）（复合正韵律、复合反韵律、复合正反韵律、复合反正韵律、均匀韵律）
- 4) 垂直渗透率与水平渗透率的比值（ K_v/K_h ）
- 5) 渗透率非均质程度

变异系数

$$V_k = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2 / n}}{\bar{K}}$$

突进系数

$$T_k = \frac{K_{\max}}{\bar{K}}$$

极差

$$J_k = \frac{K_{\max}}{K_{\min}}$$

均质系数

$$K_p = \frac{\bar{K}}{K_{\max}}$$

- 6) 泥质夹层的分布频率和分布密度

分布频率

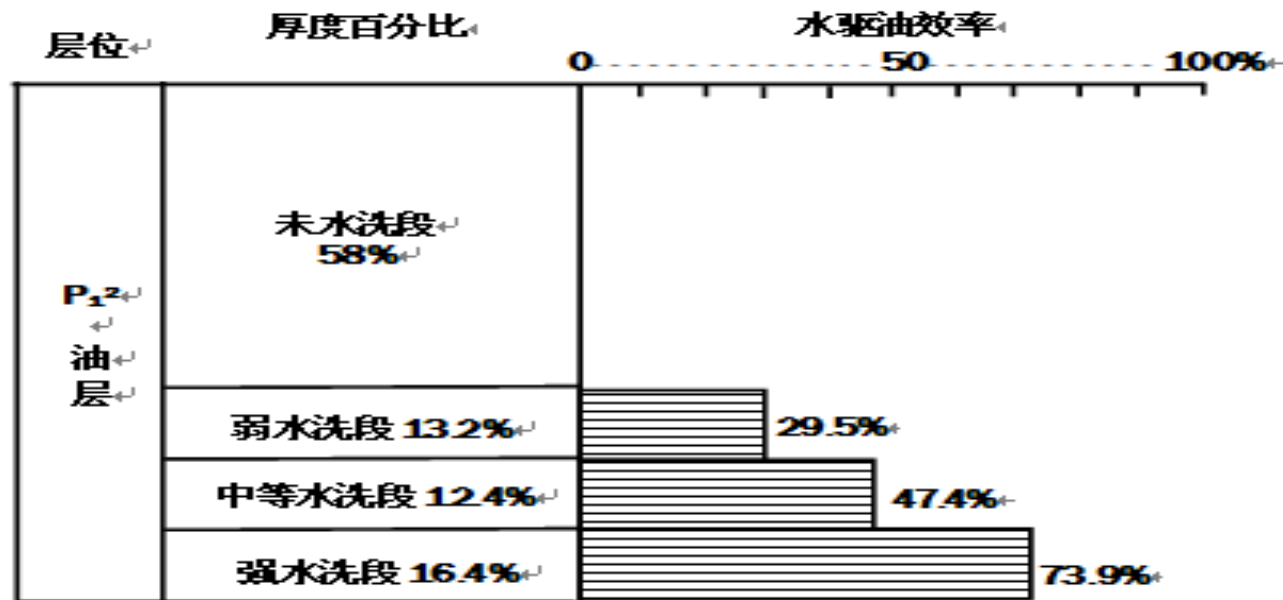
$$P_k = N / H$$

分布密度

$$D_k = H_{sh} / H$$



- 在注水开发过程中，正韵律剖面易出现底部水淹快、水淹厚度小和驱油效率低等现象。而反韵律剖面水淹侵且均匀，水淹厚度大，驱油效率高。复合韵律剖面其注水开发效果介于前两者之间。



大庆油田点坝微相油层水洗状况图

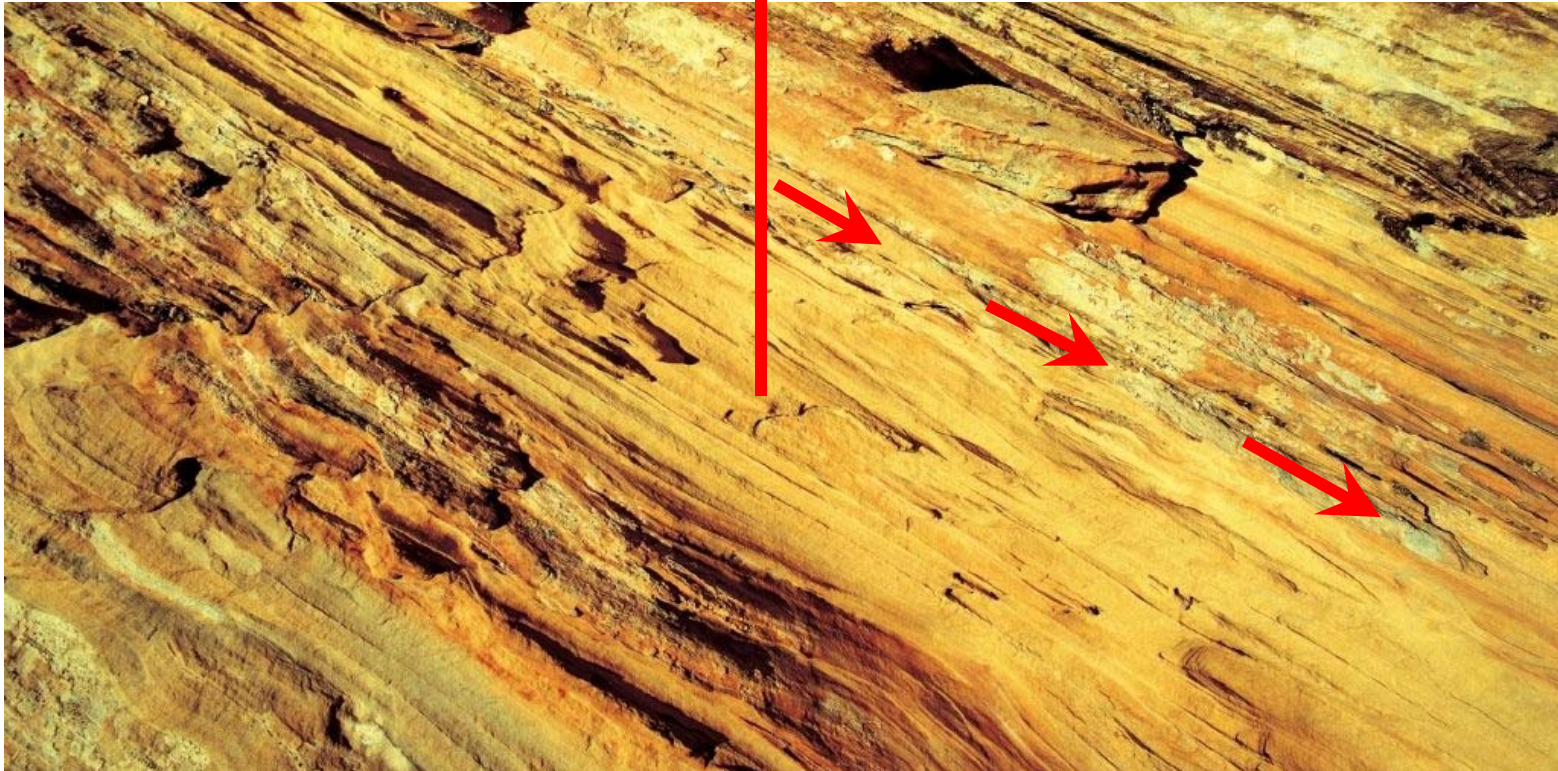




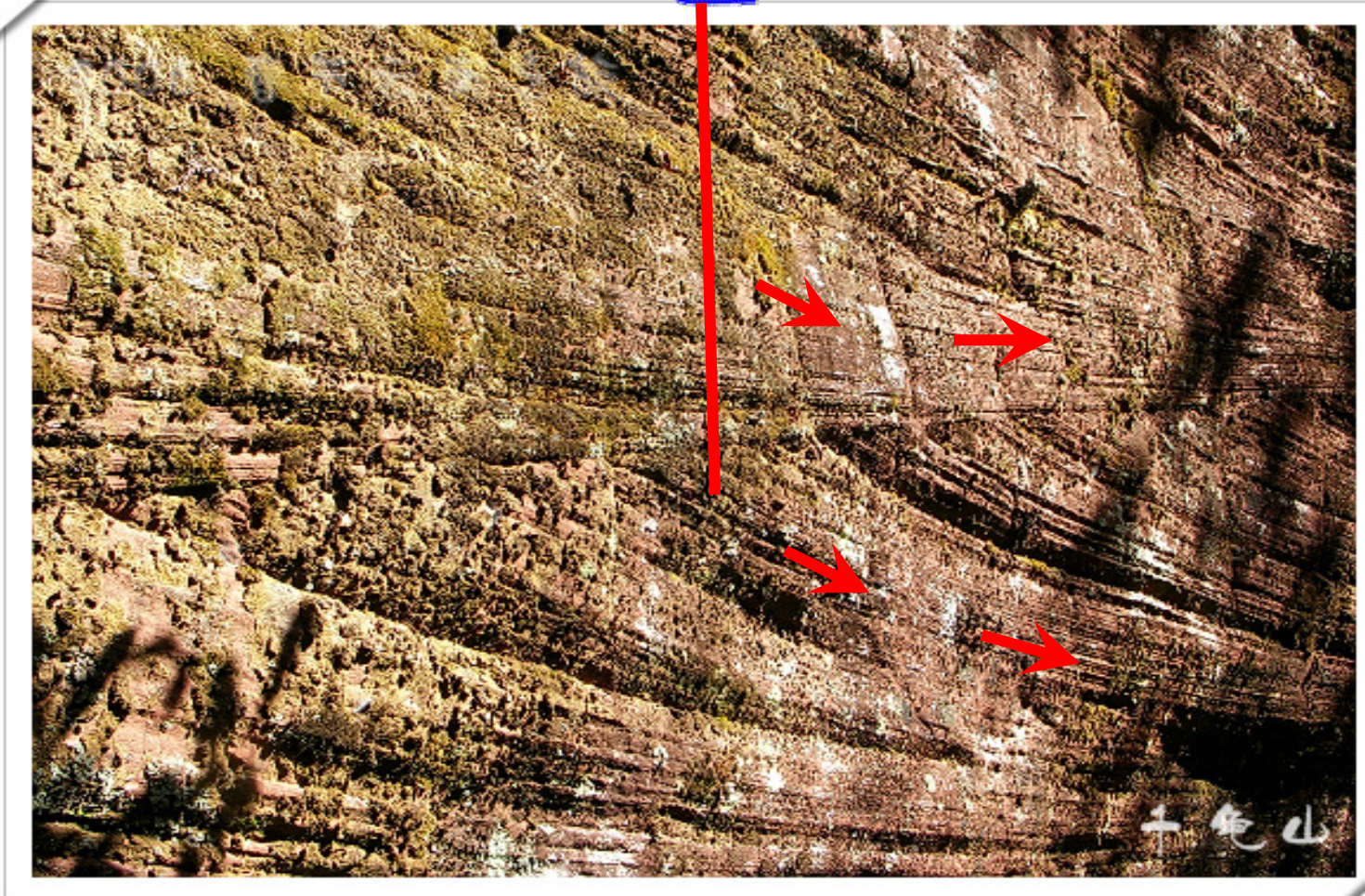
层理的影响

- 斜层理的渗透率高，水淹快，采收率低。交错层理砂岩的渗透率低，水淹均匀，因此采收率高。平行层理砂岩渗透率虽高，但水淹均匀，因此采收率较高。
- 对于斜层理砂岩，平行于纹层走向注水，其采收率最高。对于河道砂岩来讲，斜层理的倾向指向下游。一般采取河道中央注水，两侧采油，其效果最佳。

层理类型	渗透率 ($\times 10^{-3} \mu \text{m}^2$)	最终采收率 (%)
斜层理	723	21.3
交错层理	221.3	42.7
平行层理	816.2	31.8



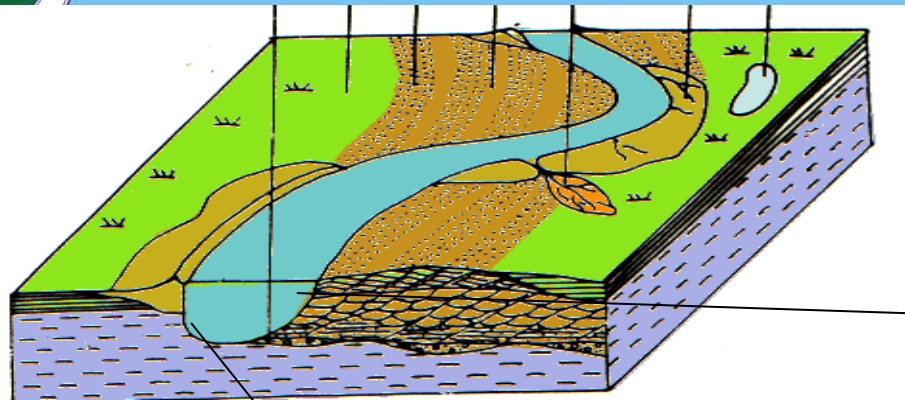
水驱不均匀，水淹快，采收率低



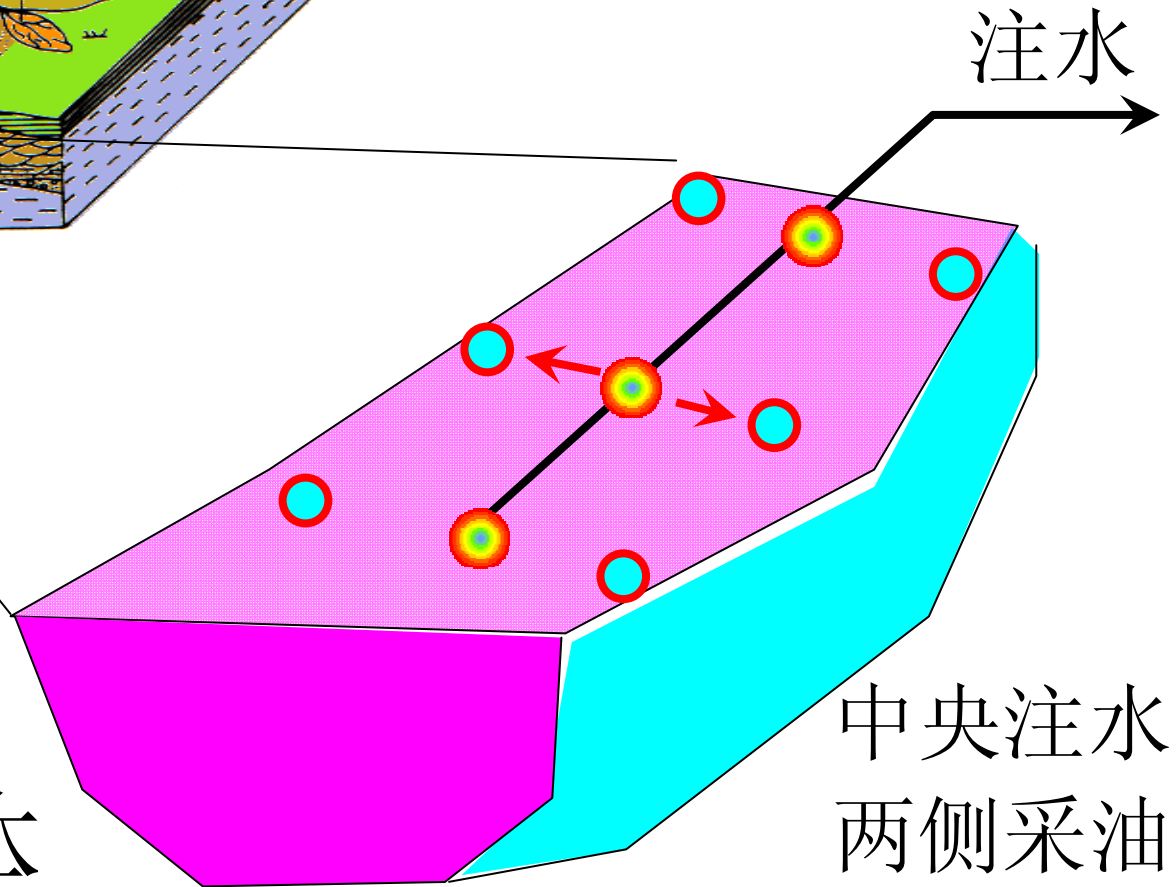
2006-02-07 13:09:40

水驱均匀采收率高

地球科学学院 3RG 尹太举 2009



河道砂体





隔夹层岩性-电性-物性

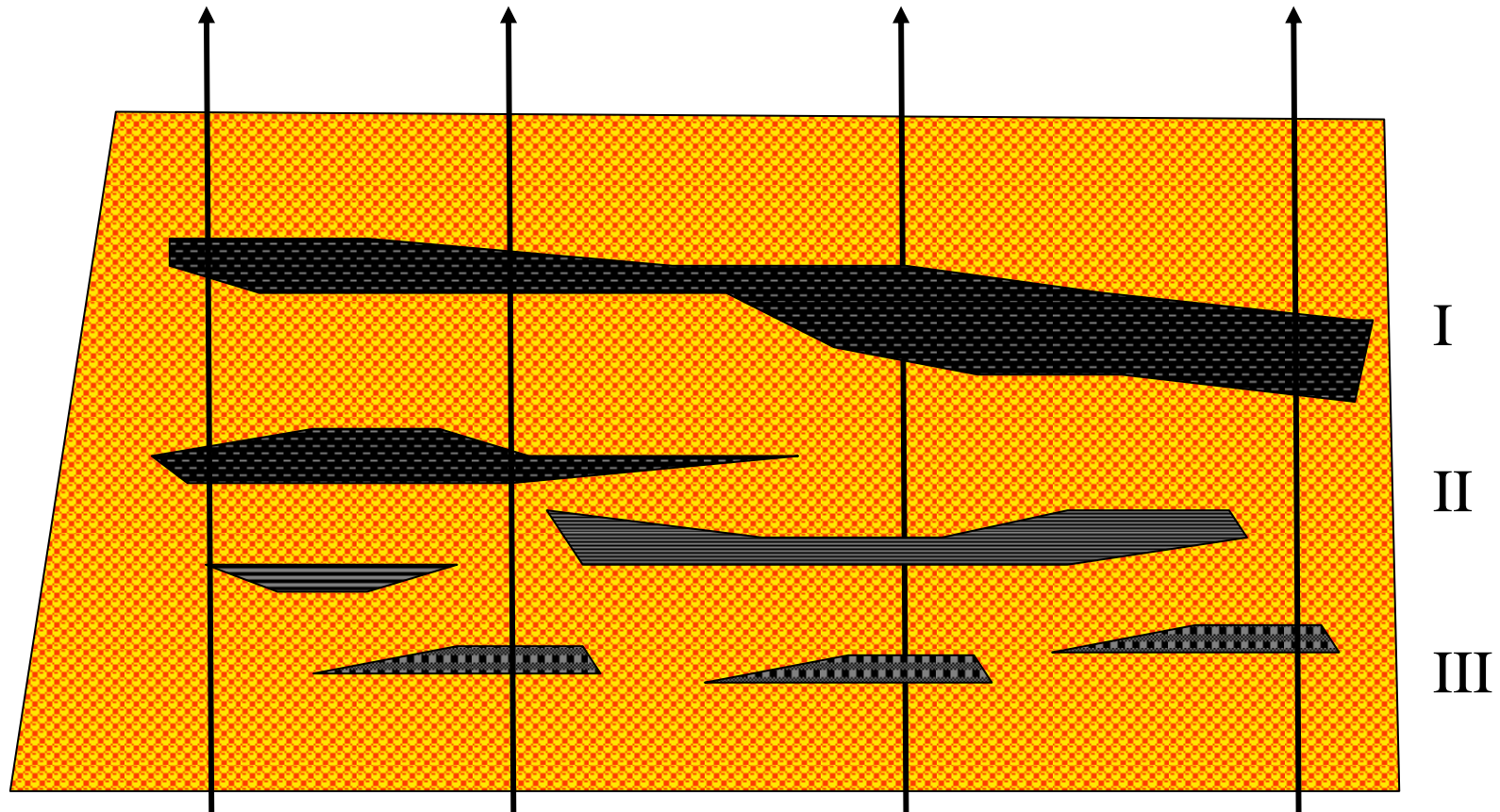
物性特征：夹层的识别是以油田夹层的物性标准为基础的，不同储层类型的油田，夹层物性标准有所不同；

岩性特征：碎屑岩储层中夹层的岩性类型有三种基本类型：泥岩类、泥质粉砂岩类和胶结致密砂岩类，前两种为沉积成因，后一种为成岩作用形成；

电性特征：具体通过交会图或相关分析可以建立定量识别标准



夹层分布特征



夹层等级类型示意



砂体连通性与夹层的作用

(1) 稳定夹层对流体的分隔作用

减弱了重力和毛细力的作用，对正韵律、块状厚油层来说，夹层有利于提高注水波及体积，而对于反韵律油层则不利于下部油层的动用

(2) 不稳定夹层对流动的遮挡作用

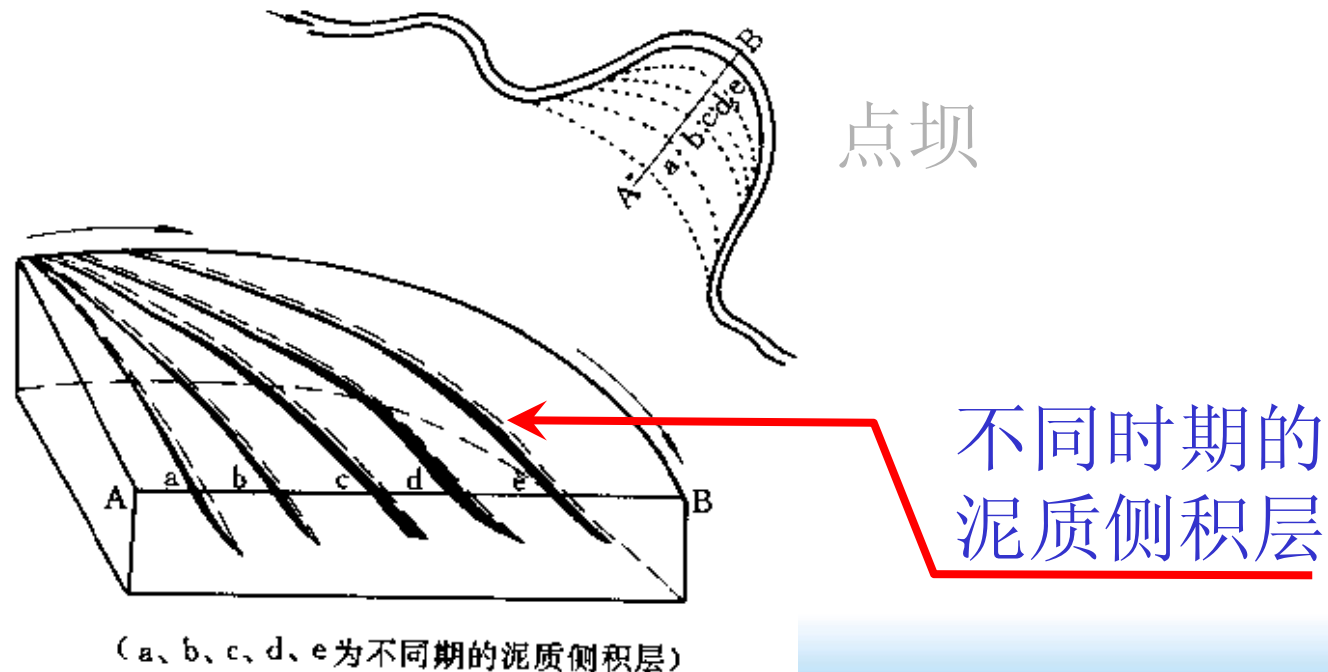
对流体局部起作用，减弱了注入水沿前进方向的下沉速度，同样对正韵律块状油层有利扩大波及体积和驱油效率，而反韵律油层不利

(3) 随机夹层对流体有一定影响

但对河道型条带状砂体来讲，砂层规模的夹层研究困难，连通性更主要是取决于河道砂体的垂向和横向的堆积方式，而不是夹层



- 砂岩中常存在泥岩和泥质粉砂岩夹层，其厚度较小，一般几厘米、几十厘米
- 海相储层夹层分布稳定、长度大。三角洲砂体夹层分布稳定性次之，点坝砂体的夹层的分布稳定性最差





微裂缝

- 在很致密的储层中常分布大量的微裂缝。微裂缝的存在，可以改变储层的渗透性，甚至可能形成串层。

裂缝

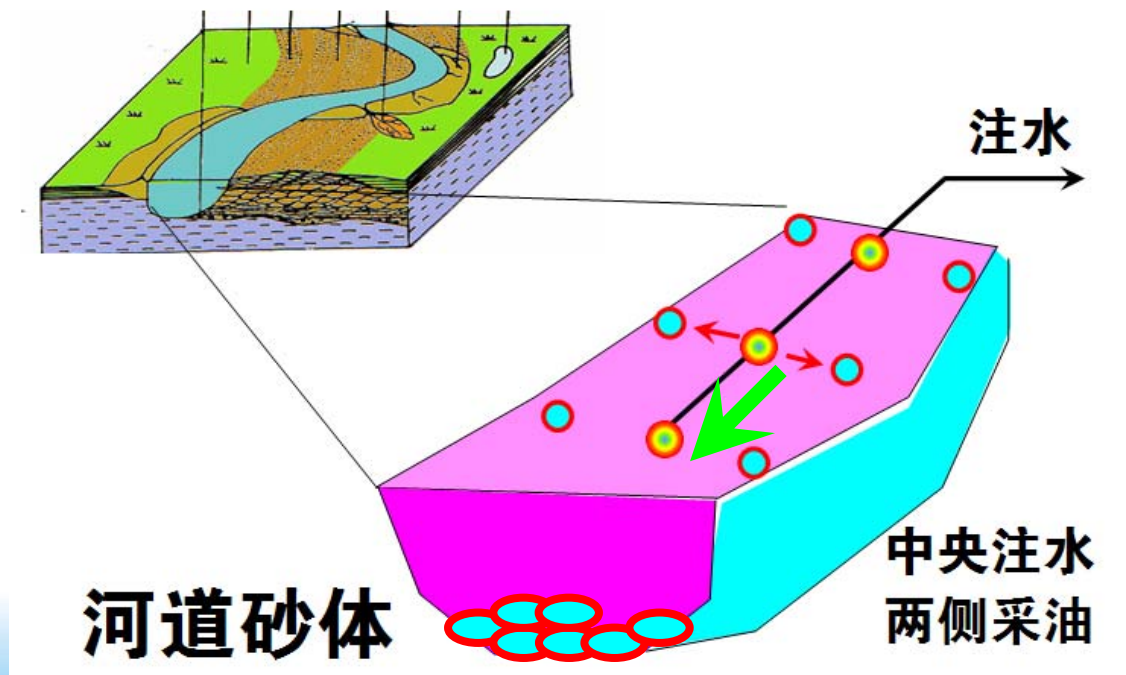






颗粒的排列方向

- 古水流的方向造成了颗粒的排列呈一定的方式。沿古水流方向注水对水流的阻力最小。对于河道砂体来讲，注入水沿古河道下游方向推进速度快，向上游方向推进速度慢且驱油效果也有差异。





2层间非均质性

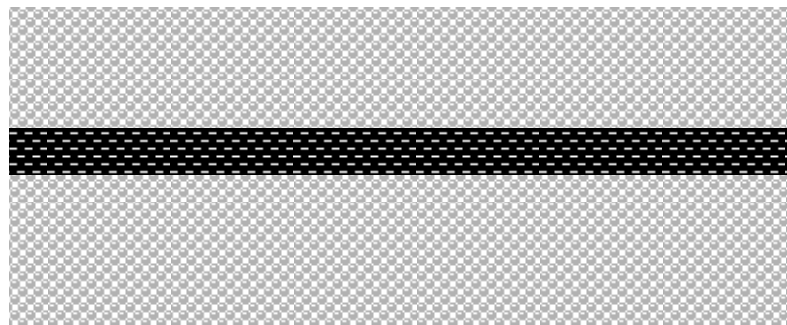
层间非均质性是指砂层组内或油层组内各砂层之间的差异。包括层系的韵律、砂层间渗透率的非均质程度、隔层分布、特殊类型层的分布、层组和小层的划分等。研究层间非均质性是为油田开发层系的划分和井网的选择提供地质依据。

层间非均质性的研究涉及两大方面：
隔层和层间差异。

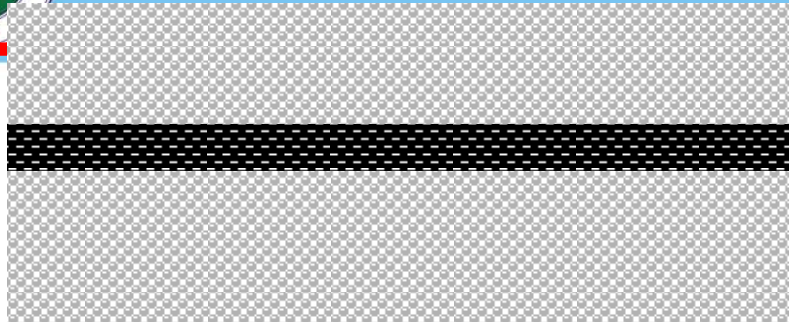


隔层

- 隔层是指在注水开发过程中，对流体具有隔绝能力的不渗透岩层。隔层的作用是将相邻两套层系的油层完全隔开，使层系之间不发生油、气、水窜流，形成两个独立的开发单元。



隔层



厚度 $>5\text{m}$

20~27MPa地层不透水

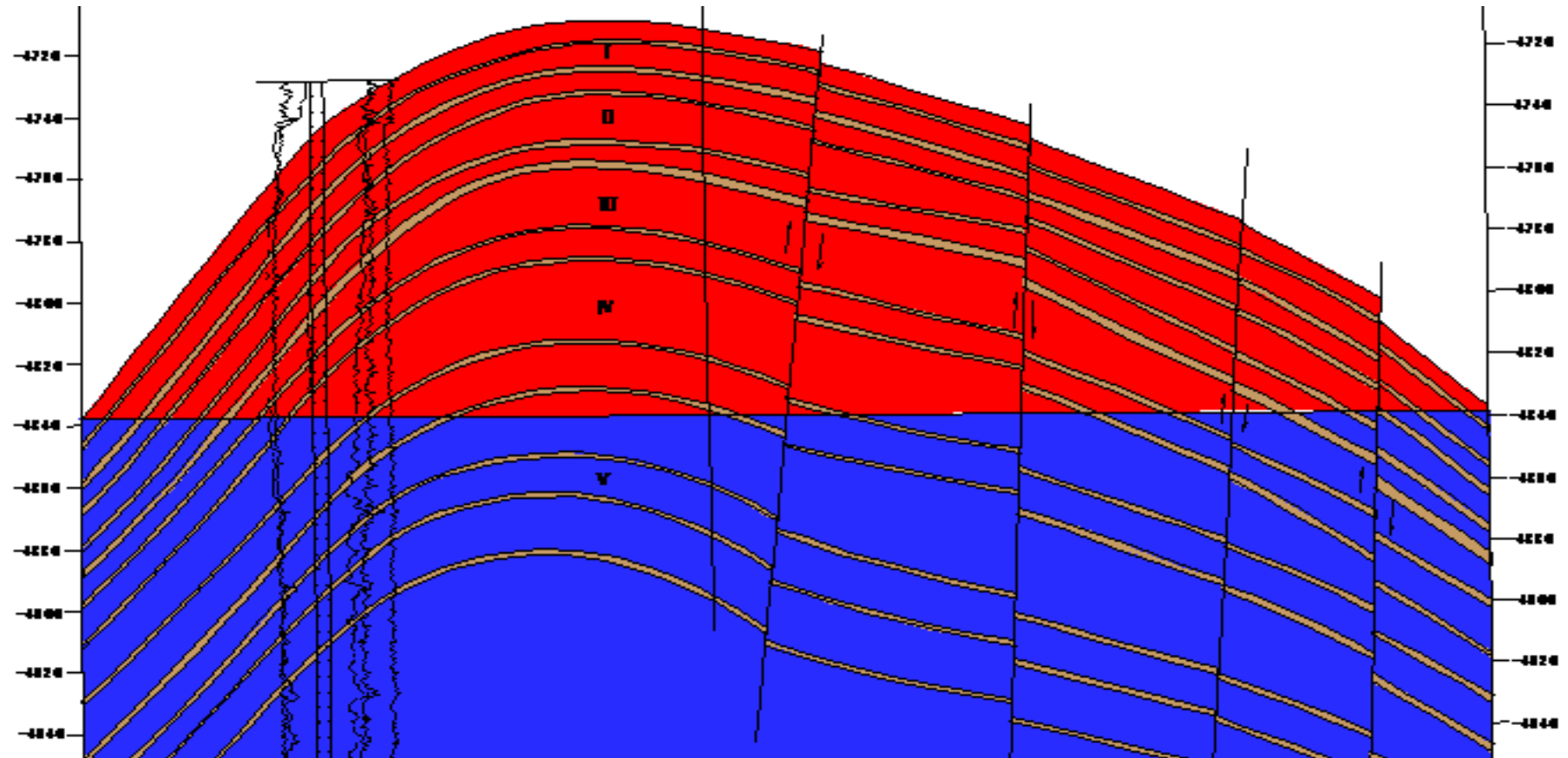
裂缝及小断层不发育

在平面上的分布要大于被分隔的砂层的分布范围

空气渗透率 $<10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$

泥岩、粉砂质泥岩、盐岩和膏盐

隔层的自然电位幅度要满足 $<0.15\text{mV}$





确定主力油层和非主力油层

注意特别高的孔渗性地层

多砂层间的渗透率非均质程度

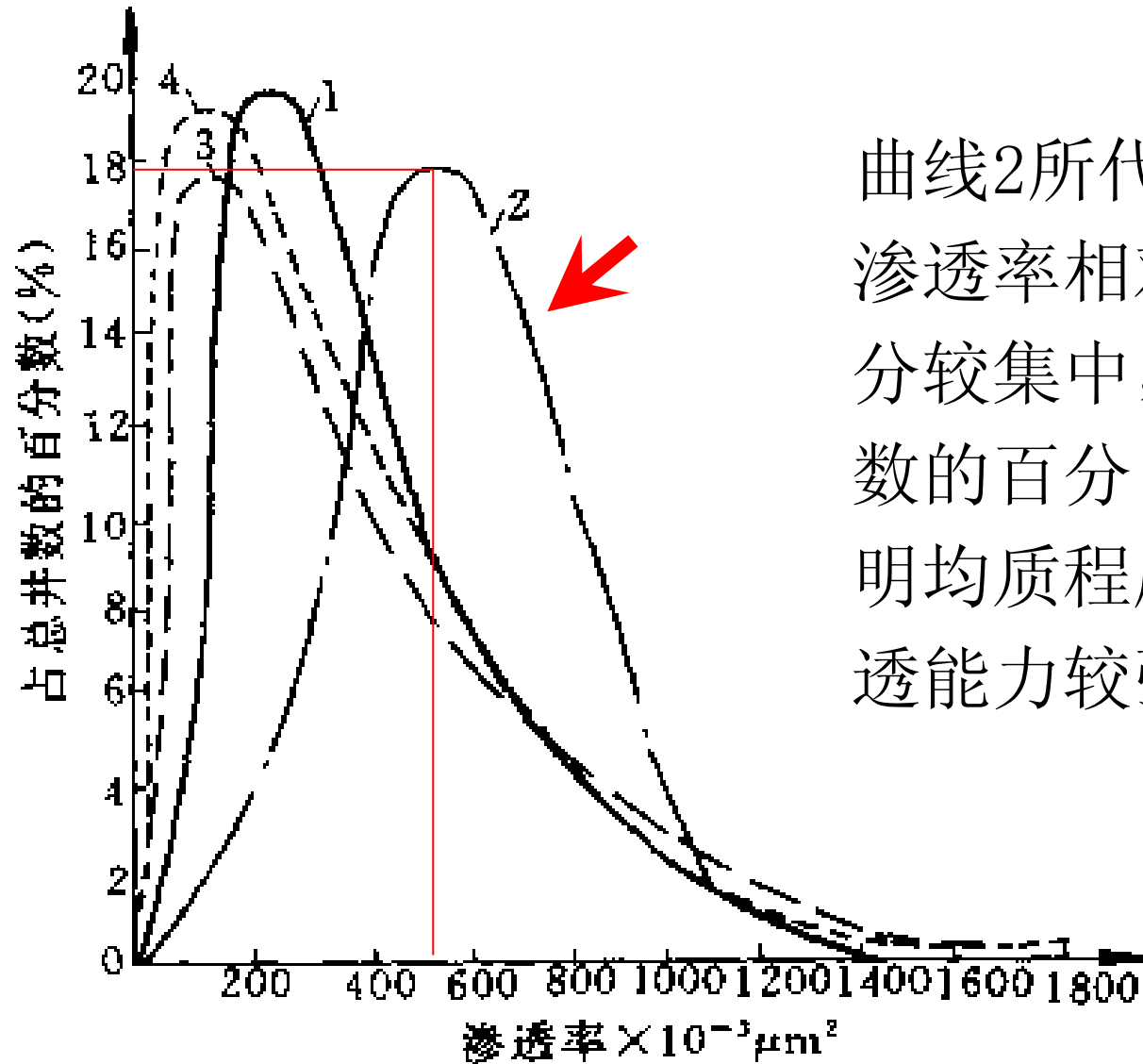
渗透率分布曲线

渗透率韵律模式

砂岩系数 K_n

分层系数 K_p

层间差异



曲线2所代表的油层渗透率相对较高的部分较集中，且占总井数的百分比较高，说明均质程度较好，渗透能力较强。

渗透率分布曲线

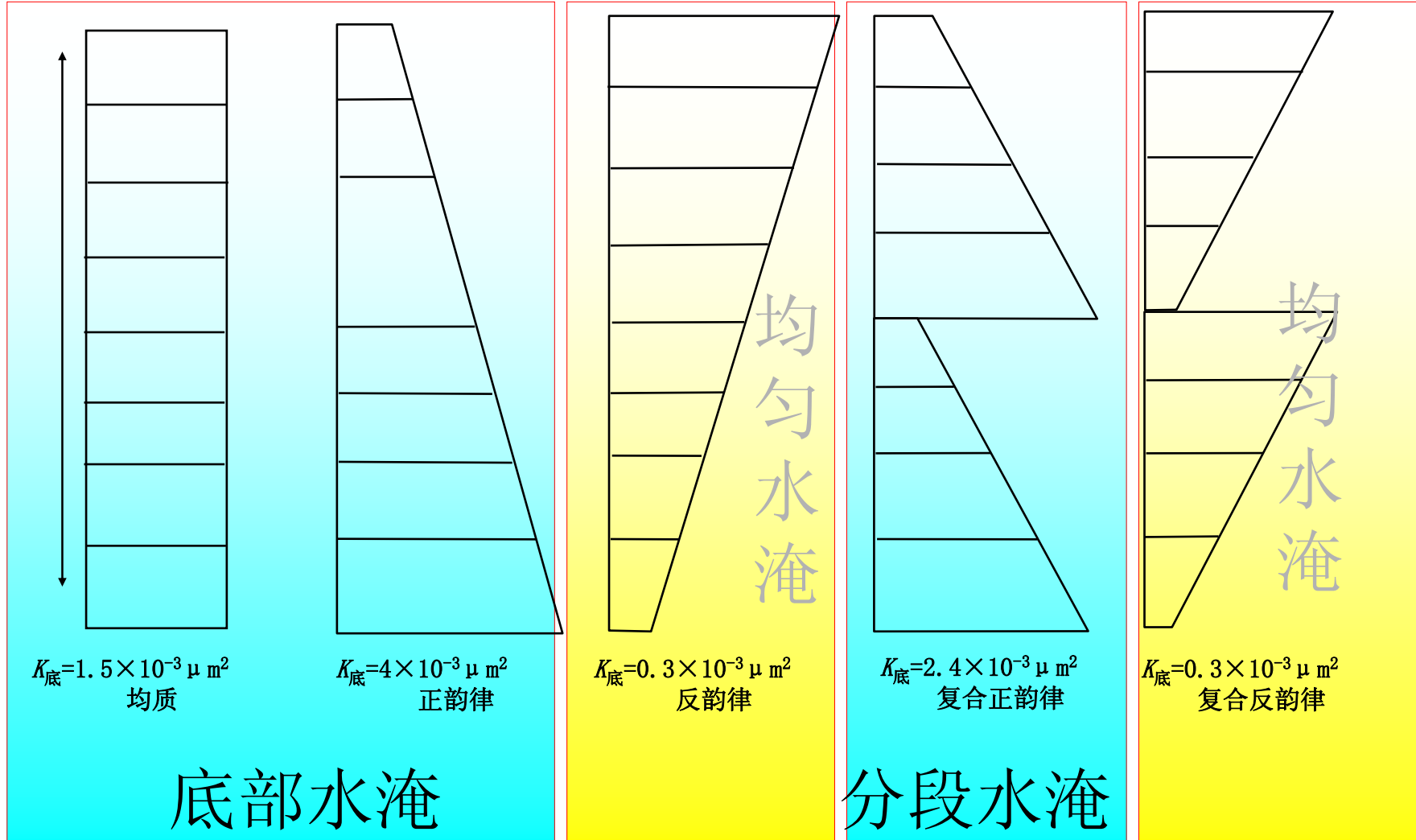


$$K_{\text{顶}}=0.3 \times 10^{-3} \mu \text{ m}^2$$

$$K_{\text{顶}}=2.4 \times 10^{-3} \mu \text{ m}^2$$

$$K_{\text{顶}}=0.3 \times 10^{-3} \mu \text{ m}^2$$

$$K_{\text{顶}}=2.4 \times 10^{-3} \mu \text{ m}^2$$



渗透率韵律模式

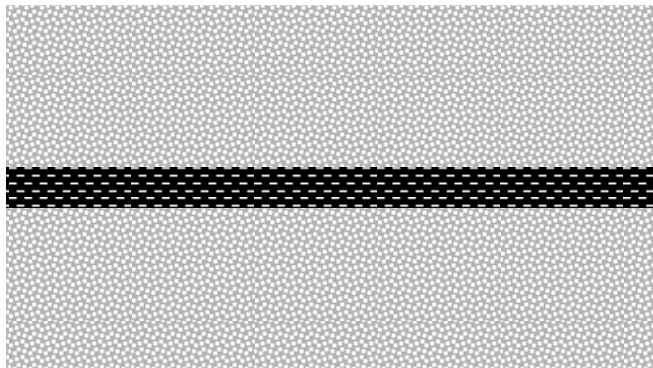


不同韵律模型开发指标对比

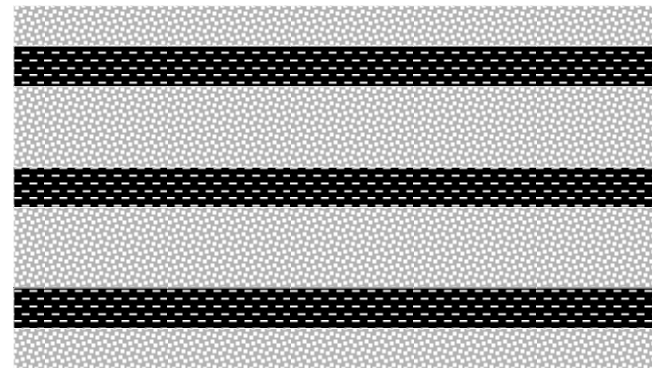
项目模型	无水采收率, %	见水时扫描厚度系数, %	最终采收率, %	最终注入倍数	注水效率系数, %
均质	18.00	4.00	57.78	2.32	24.9
正韵律	11.63	27.50	51.38	3.57	14.4
反韵律	33.38	71.88	57.34	1.87	30.6
复合正韵律	12.75	35.63	61.29	3.09	16.6
复合反韵律	24.00	56.88	54.54	2.14	25.5



- 它表示油层剖面中渗透性砂层的平均层数。计算的方法是将油田所有各井钻遇到的砂层数加起来，除以油井总数，即 $K_p = \text{油田各井钻遇的总砂层数} / \text{总井数}$ ， K_p 值越小表示油层剖面越均质， K_p 值越大表示非渗透夹层越多，油层越不均质。



分层系数 K_p 小

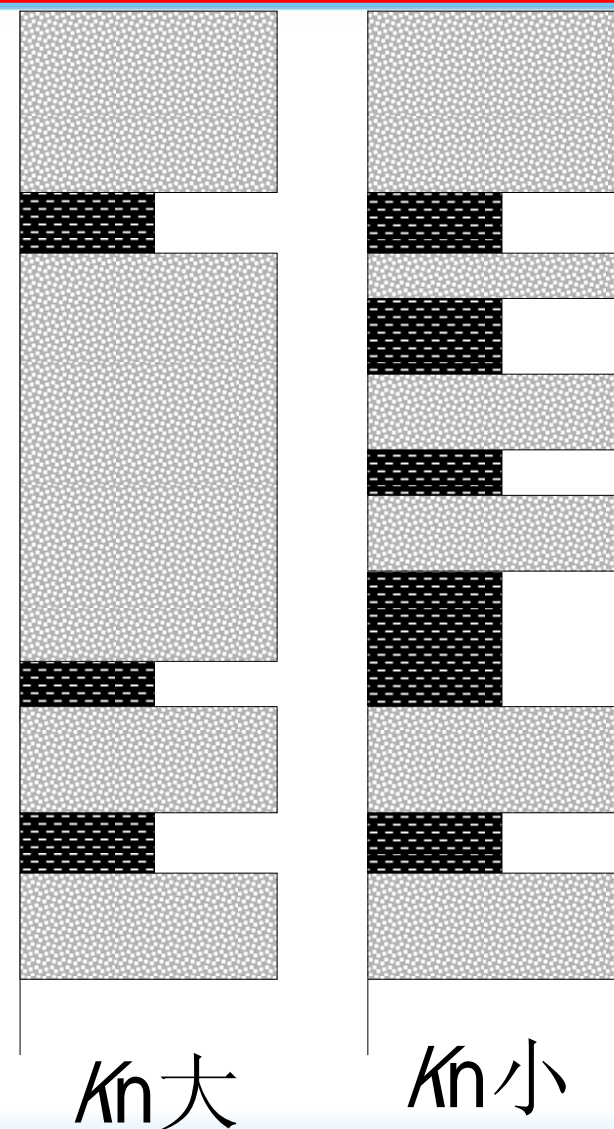


分层系数 K_p 大



砂岩系数 K_n

- 砂岩系数 K_n 是油层剖面中砂岩厚度与岩层总厚度比。也就是剖面中砂岩的含量。一般先计算出油田上每口井的 K_n 值，然后再把整个油田所有井剖面的 K_n 值进行算术平均，求出整个油田的 K_n 值。
- 油层的 K_n 值越接近于1，表示油层越均质， K_n 值越小，表示油层越不均质。





3平面非均质性

砂体的几何形态

- 4类，用小层平面图来表示

展布与连续性

- 长度、宽度、厚度。分4类

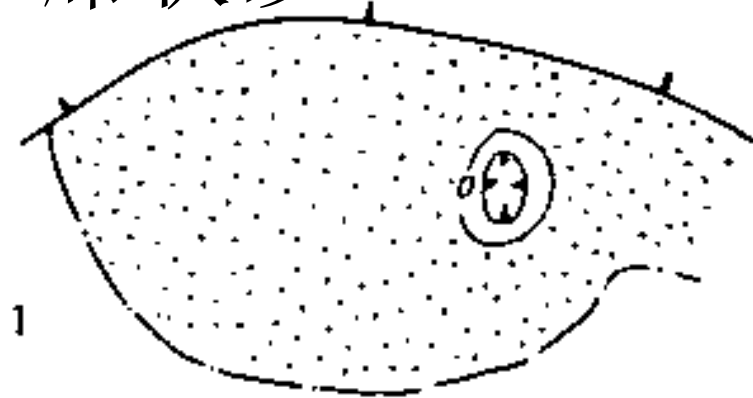
物性的平面变化

- 孔、渗平面等值线图表示



席状砂 长/宽比=1, 分布范围大

“土豆状”砂体

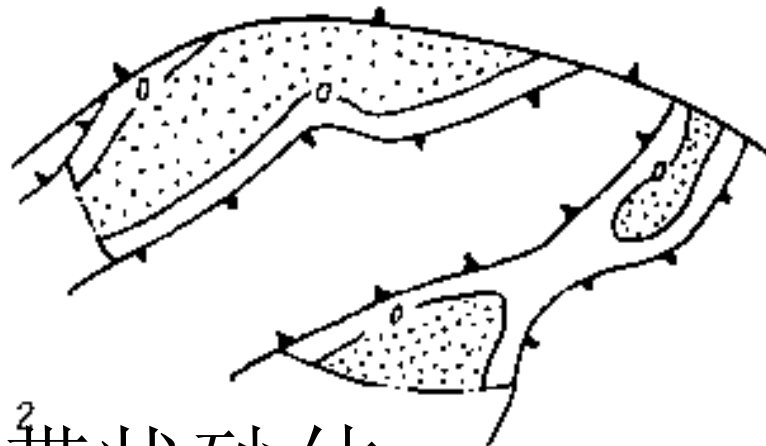


1



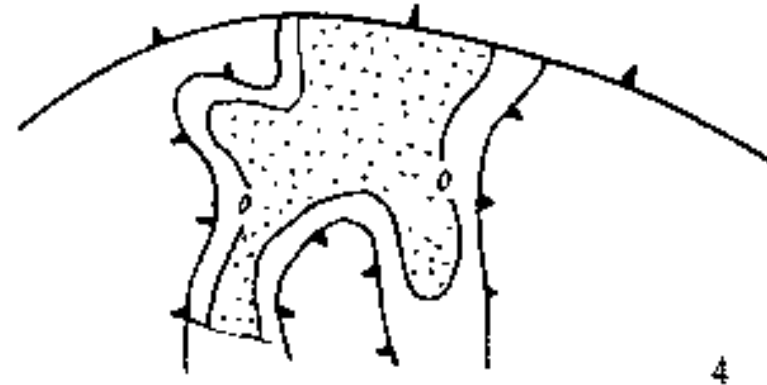
分布范围小

3



2

带状砂体 长/宽比>2



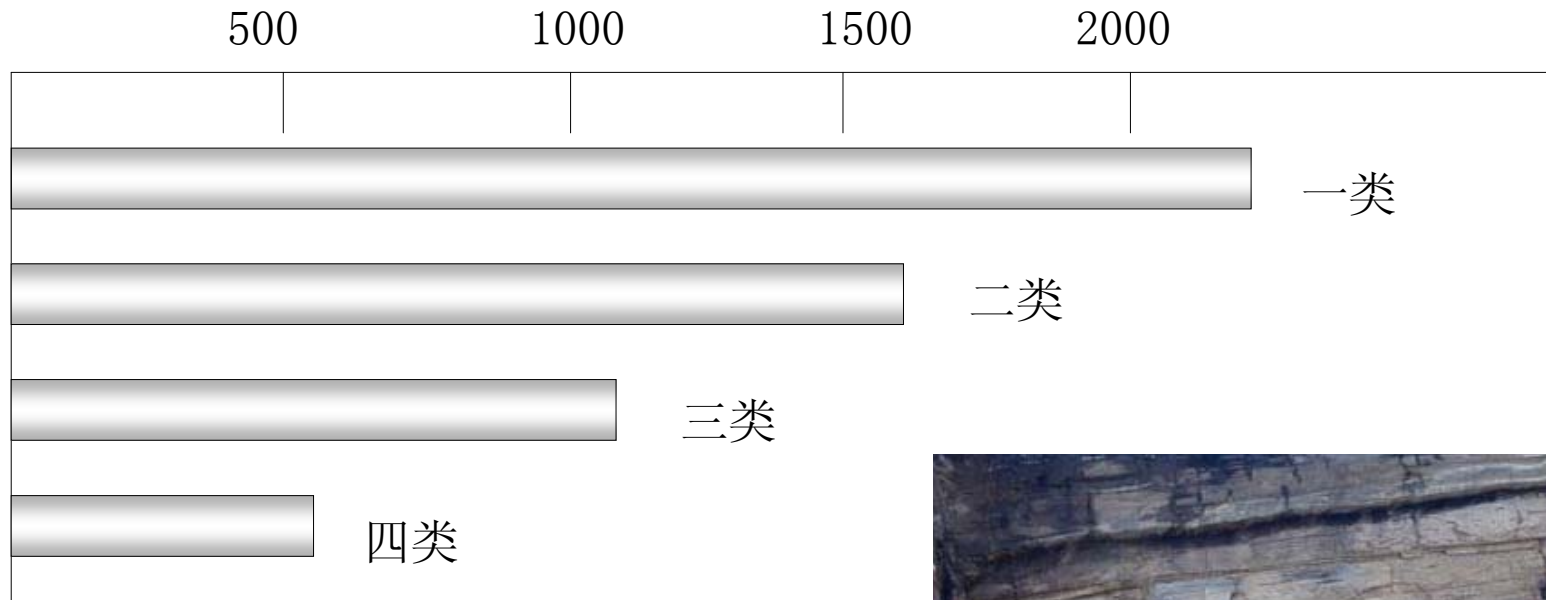
4

不规则状砂体

常见的砂体几何形态平面示意图



按砂体的宽度可将砂体的展布分为四类



- 一类：砂体宽度>1600m
- 二类：砂体宽度1600~1100m
- 三类：砂体宽度1100~600m
- 四类：砂体宽度<600m





4、微观非均质性



5、储层非均质性的影响因素

- 一是沉积因素。流水的强度和方向、沉积区的古地形、水盆的深浅，碎屑物质供应的差异，造成了碎屑沉积物的颗粒大小、排列方向、层理构造和砂体几何形态的差异；
- 二是成岩因素，压实、压溶、胶结作用和重结晶作用等改变了原始孔隙度和渗透率的分布状态，增加了储层的非均质程度；
- 三是构造因素。构造裂缝改变储层的渗透性的方向，造成储层的渗透性在纵、横向上有很大的差异。



6、储层非均质性对储层开发的影响

1. 泛滥河道砂岩体的开发特征
2. 三角洲平原分流河道砂岩体的开发特征
3. 河口砂坝的开发特征



泛滥河道砂岩体的开发特征







灰黑色油浸含细砾的粗粒砂岩，油浸不均匀，显示清晰的小型槽状交错层理。



深灰色粗粒砂岩，块状构造，有不的油斑。

(岩心磨损)



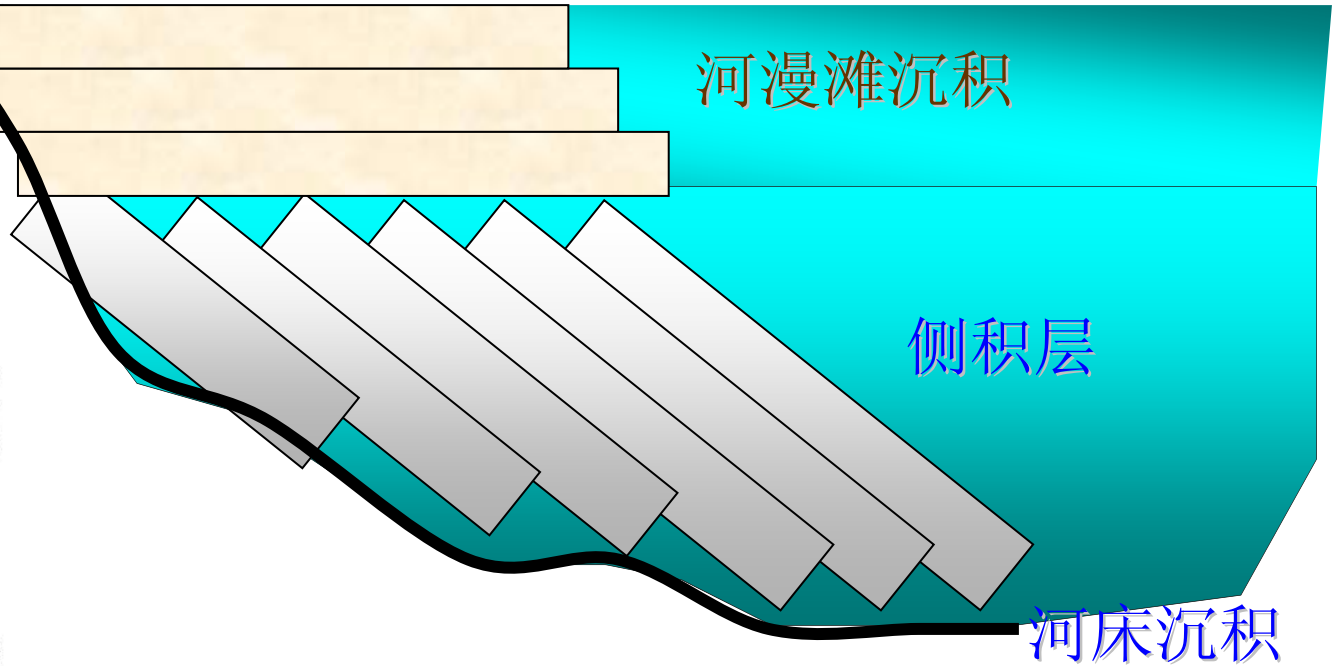
杂色砾岩，河道底部的砾石层，砾石磨圆度好，分选较差，结构杂乱。

(岩心磨损)



黑色煤层夹深灰色泥岩，为前一次河流沉积过程后期泛滥盆地沉积物。

冲刷面。



河漫滩沉积

侧积层

河床沉积

正韵律



- 点坝砂底部滞流层连通很好成为高渗透通道，上部泥质层形成层内遮挡，形成层内差异。
- 平面上顺曲流主流线形成明显的方向性渗透率，平面非均质性也比较严重。
- 纵向上多个时间单元的冲刷叠加形成大厚砂层、由于接触关系的不同，其层内非均质性更趋复杂。



河道底部滞留沉积





开发特点

- ① 平面上注入水优先沿河床凹槽主流线快速突进
- ② 同一注水井排的注入水向下游方向快于向上游方向
- ③ 注入水沿砂层底部高渗透段快速突进，层内水淹厚度小
- ④ 时间单元间可分性较差
- ⑤ 高产、含水上升快



冲刷
严重

注入水沿砂层底部高渗透段快速突进，层内水淹厚度小
时间单元间可分性较差

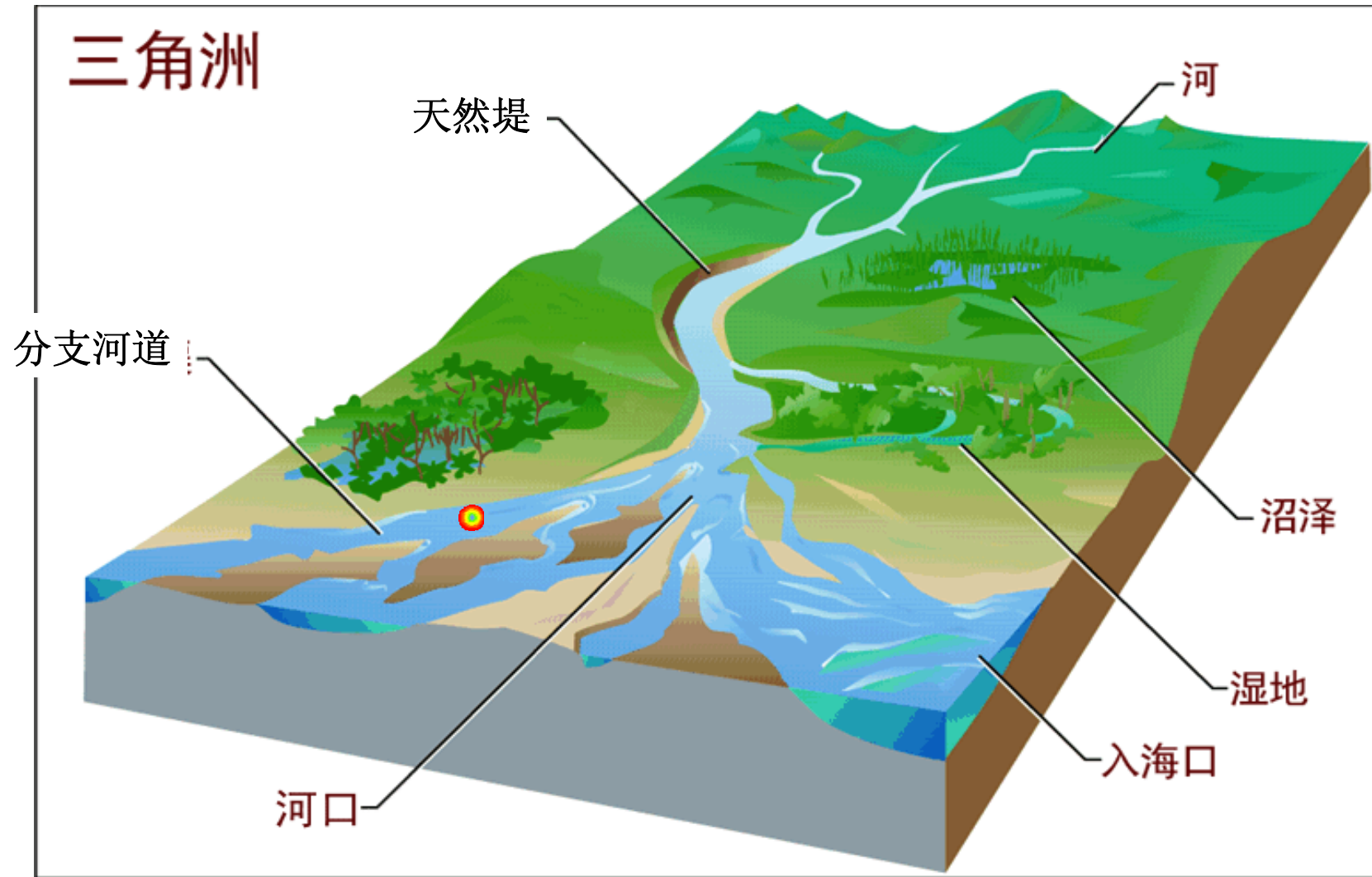


三角洲平原分流河道砂岩体的开发特征





三角洲平原亚相的沉积微相划分





密西西比河三角洲



分支河道微相:

构成三角洲平原的格架，砂质沉积。间断正韵律，发育板状和槽状交错层理以及冲刷构造，可发育心滩和边滩，与河流的河床沉积特点相同。

剖面	相	环境解释	
	夹炭质泥岩或煤层的砂泥岩互层	沼泽	三角洲平原
	槽状或板状交错层理砂岩	分支流河道	
	含半咸水生物化石和介壳碎屑泥岩	分支间湾	
	楔形交错层理和波状交错层理纯净砂岩	河口砂坝	三角洲前缘
	水平纹理和波状交错层理粉砂岩和泥岩互层	远砂坝	
	暗色块状均匀层理和水平纹理泥岩	前三角洲	
含海生生物化石块状泥岩	正常浅海		



三角洲平原分流河道砂岩体的开发特征

- ① 平面上，顺直型分流河道砂，注入水也是明显的沿主体带快速舌进，砂体渗透率方向性明显。
- ② 层内纵向上水淹厚度较河道砂大。水洗驱油效率相对也较均匀。
- ③ 时间单元之间可分性较好，分流河道的冲刷切割能力远较泛滥平原河道差，因而时间单元之间的薄泥质夹层相对稳定，砂体之间可分性较好。



三角洲发育过程

河口砂坝和河道的形成

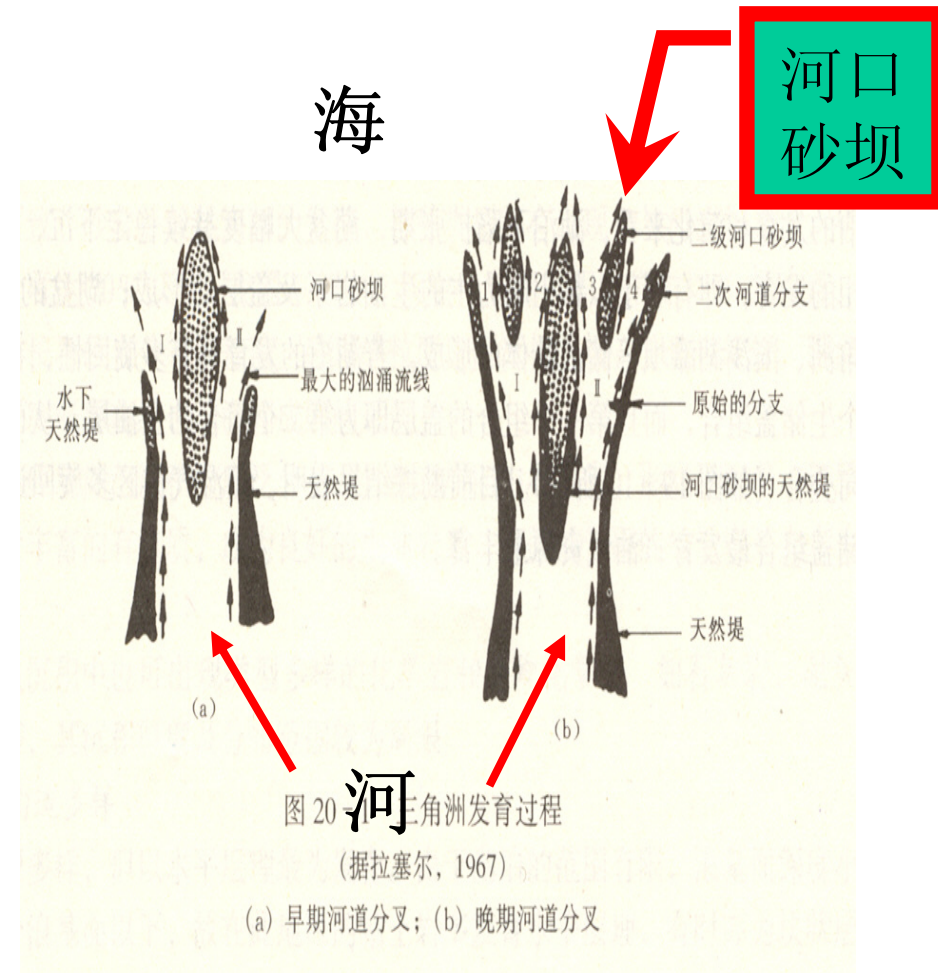
河流入海，水流展宽，

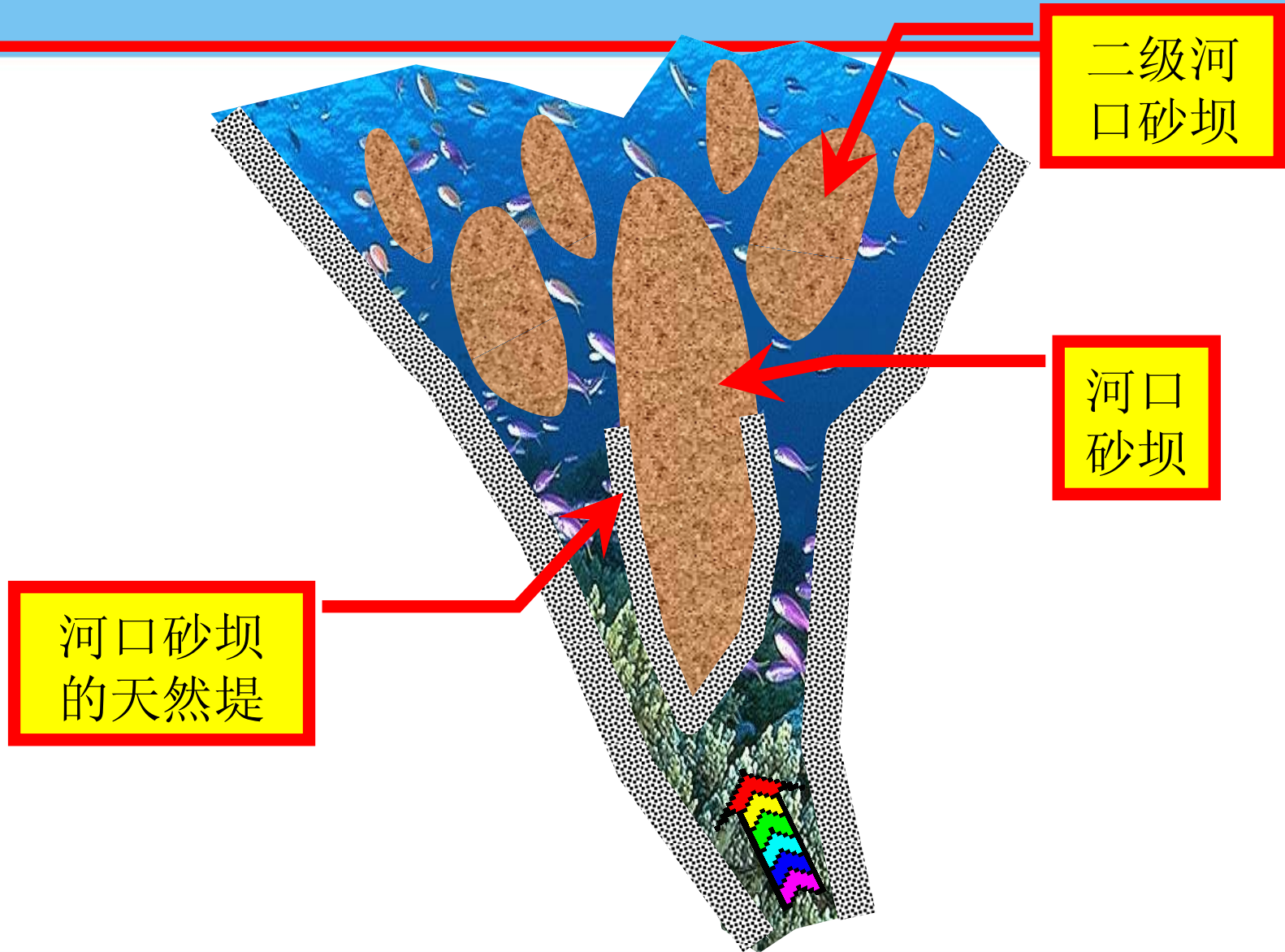
潮流顶托，流速减慢，

沉积物在河口处形成

河口砂坝，河流分叉，

形成分支河道。









河口砂坝

沉积速率最高，水动力作用强，沉积物主要为质纯的砂岩，发育槽状交错层理，沉积厚度较大，生物化石少。

剖面	相	环境解释	
	夹炭质泥岩或煤层的砂泥岩互层	沼泽	三角洲平原
	槽状或板状交错层理砂岩	分支流河道	
	含半咸水生物化石和介壳碎屑泥岩	分支间湾	
	楔形交错层理和波状交错层理纯净砂岩	河口砂坝	三角洲前缘
	水平纹理和波状交错层理粉砂岩和泥岩互层	远砂坝	
	暗色块状均匀层理和水平纹理泥岩	前三角洲	
含海生生物化石块状泥岩	正常浅海		



河口砂坝在注水开发特点

- (1) 注入水仍然有沿砂体轴部突进的现象，逐渐向两侧扩展，但总体来说，比前述二种砂体均匀得多。
- (2) 层内水淹厚区较大，驱油效率较均匀。
- (3) 位于河口砂坝主体部位油井仍然可以形成高产井，而且含水上升较慢，一般是高产稳产井。
- 大庆油田实践表明，河口砂坝是开发效果最好的油砂体，既能高产又有较长时间的稳产。



第三节 储层裂缝

一

裂缝性储层分类

二

裂缝类型及其评价

三

地下裂缝预测



垂直裂缝

X型裂缝



一、裂缝性储集层分类法

类型 I：纯裂缝型储层，即裂缝在储集和渗透方面都起主要作用的单一介质储集层。

类型 II：裂缝—孔隙型储层，即储集油气的空间主要是孔（洞），而裂缝主要起提高渗透率的作用（最常见）。

类型 III：孔隙—裂缝型储层，即裂缝可能只起辅助渗透作用，孔（洞）在储集和渗透方面都起主要作用。

其中最常见的是第 II 类型，即裂缝—孔隙型储层。



二、裂缝类型及其评价

裂缝类型

6种分类

评价内容

6大方面



1 裂缝类型

地质成因分类

构造 沉积—构造
非构造裂缝

力学性质分类

张性裂缝 剪切裂缝

产状分类

立缝、斜缝、平缝、不规则

大小分类

大、中、小、微

充填程度分类

张开、半充、全充填

渗流性质分类

闭合、开启、局部开启、高压开启

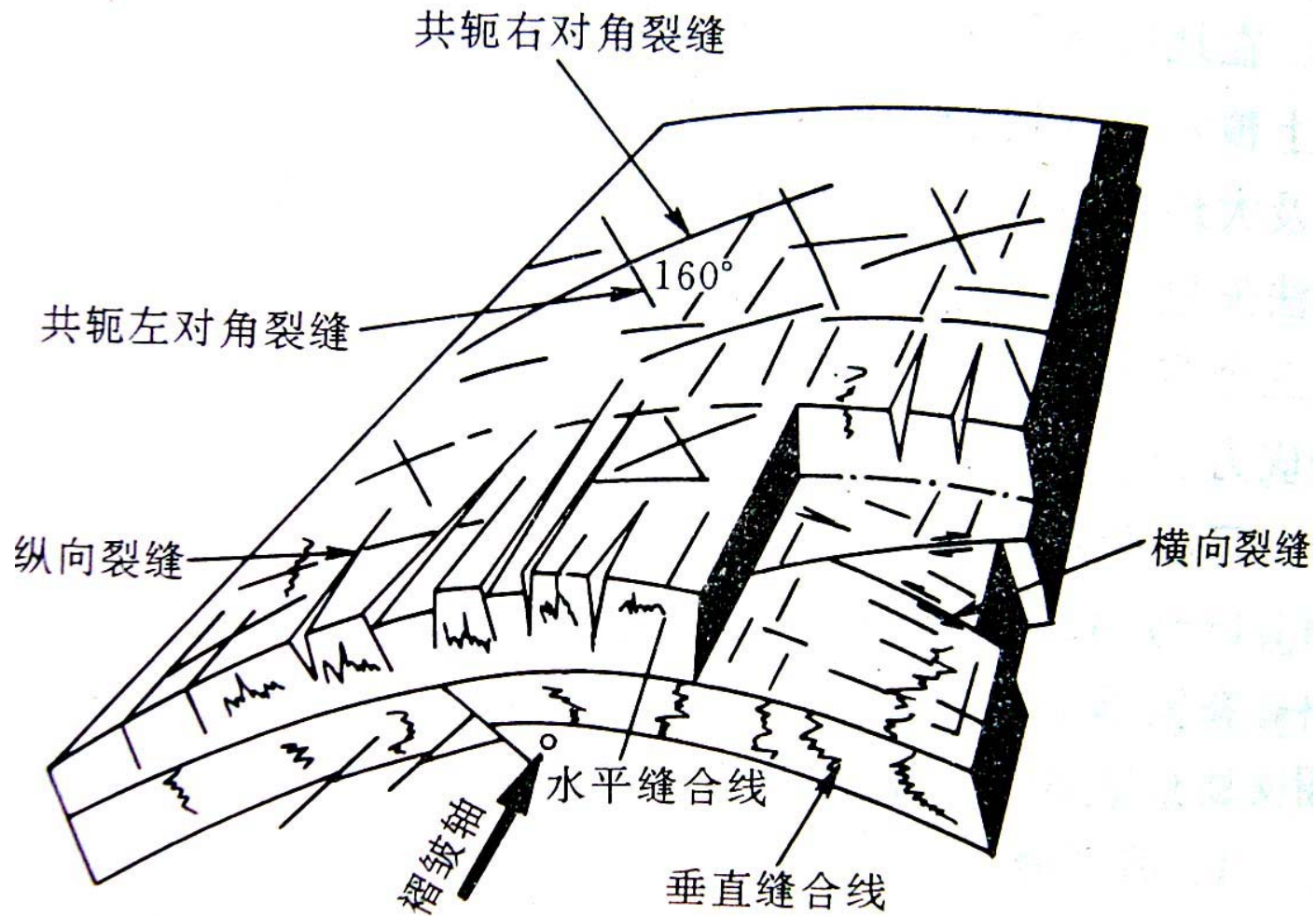


- 地质成因分类，按形成裂缝的地质因素来划分：
 - ① 构造裂缝：岩石受构造应力作用产生形变、破裂而形成的裂缝。裂缝多成组出现，延伸范围较大，多为穿层裂缝，对储层的储渗条件有重要影响。
 - ② 沉积—构造裂缝：主要指在构造力作用下形成的层理缝（层间缝）和因岩石结构不均形成的各种层内缝。
 - ③ 非构造裂缝：由于干缩、风化、崩塌（滑坡）、压实、压溶等作用形成的裂缝，又称岩性缝。其特点是局部发育，方向不定，规模较小，很少穿层。



力学性质分类，按使岩石发生破裂的应力性质划分

- 一类为张性裂缝，是张应力超过岩石的抗张强度时形成的裂缝。这种缝往往是张开的，缝面粗糙不平，其上没有擦痕。张性缝对储层的储渗条件有很大影响。
- 另一类为剪切裂缝，又称扭裂缝，是剪应力（扭应力）超过岩石的抗剪强度时形成的缝，一般呈共轭缝组出现。这种缝经改造可成为张扭性和压扭性缝，前者使储层有良好的渗透性。





X型裂缝



云2井34(24/60) x型
裂缝，泥质白云岩



云2井35(29/70)白
云岩裂缝含油，发
育一组x剪节理



35(21/70)云2井油
层段X型剪节理，伴
有3条微裂缝



产状分类，按裂缝与岩心横截面的夹角分：

- ① 立缝： $\alpha > 75^\circ$ ；
- ② 斜缝： $\alpha 15^\circ \sim 75^\circ$ ；
- ③ 平缝： $\alpha < 15^\circ$ ；
- ④ 不规则缝： α 变化不定，如树枝状缝等

大小分类，即按裂缝宽度来划分：

- ① 大裂缝： 宽度 $> 3\text{mm}$ ；
- ② 中裂缝： 宽度 $1 \sim 3\text{mm}$ ；
- ③ 小裂缝： 宽度 $0.1 \sim 1\text{mm}$ ；
- ④ 微裂缝： 宽度 $< 0.1\text{mm}$ 。





充填程度分类，按裂缝空间被方解石、白云石、沥青等充填情况分：

- ① 张开缝：基本无充填物；
- ② 半充填缝：被充填物部分地充填；
- ③ 全充填缝：完全被充填物充填，为无效缝。





- 渗流性质分类，从开发地质角度出发，按裂缝是否可以作为流体的储渗空间和运移通道来分类：
 - ① 闭合缝：在地应力作用下闭合的裂缝或被完全充填的裂缝，不能给流体的流动提供通道；
 - ② 开启缝：裂缝是开启的，未被充填，可以作为流体储存和流动的通道；
 - ③ 局部开启缝：裂缝只在局部开启，其它部位闭合。
 - ④ 高压开启缝：有些裂缝是闭合的，但在一定的注水压差下，裂缝由闭合变为开启，而成为流体运移的通道。



2 裂缝评价

裂缝发育程度

裂缝宽度与产状

裂缝孔隙度

裂缝渗透率

裂缝系统含流体饱和度

缝孔相通性与采收率



裂缝发育程度

一般用裂缝密度或裂缝间距来描述裂缝的发育程度。

- ① 线性裂缝密度 (L_{fD})：指在某一方向上（如垂直裂缝走向）单位距离中发育的裂缝条数，单位为条/m。线性裂缝密度也称为裂缝频率。
- ② 面积裂缝密度 (A_{fD})：指在某一横截面上所统计的裂缝累积长度与该横截面积之比，单位为1/m。
- ③ 体积裂缝密度 (V_{fD})：指单位岩石体积中所含裂缝的总表面积。
- ④ 裂缝间距：指在垂直于一组裂缝方向上所测量的各裂缝之间的平均距离，单位为m。



- ① 薄层比厚层的裂缝要发育。
- ② 裂缝密度顺序：白云岩—石灰岩—砂岩—膏盐类岩石
- ③ 直接位于刚性岩层之上或之下的塑性岩层裂缝不发育；位于塑性地层上、下的刚性岩层则裂缝较发育。
- ④ 在单一岩性剖面中，裂缝穿层较多见；
- ⑤ 岩性为互层状时，刚性地层中裂缝往往不穿入柔性地层。
- ⑥ 构造因素对裂缝分布的控制主要表现在裂缝总是发育在地层受力强、变形大，亦即地层具有最大曲率的地方，如构造轴部、端部、翼部挠曲处等，断层附近通常也发育裂缝。



- 裂缝宽度：又称张开度，是指裂缝壁之间的距离。
- 裂缝宽度是定量评价裂缝性质的一个很重要的参数，它对裂缝系统的孔隙度，特别是对渗透率有很大影响。裂缝的宽度与岩石的岩性、应力性质、形成的温压条件等有关。
- 裂缝的产状：指裂缝的走向、倾向和倾角。其中裂缝的走向方位尤为重要。裂缝的走向表示了裂缝的延伸方向，同时也反映了储层储渗条件的各向异性，并直接影响着油水运动轨迹。



- 裂缝孔隙度：裂缝孔隙度定义为裂缝容积与裂缝性岩石体积之比。裂缝孔隙度一般都很小（ $<3\%$ ），因此，当基块的孔隙度较大时，评价裂缝孔隙度就显得不很重要了。但据研究，裂缝孔隙空间中储藏可采石油的能力并不低，1%的裂缝孔隙所储藏的可采油量相当于5%~8%的岩块孔隙中所储藏的可采油量。
- 裂缝性岩石的总孔隙度为裂缝孔隙度与岩块孔隙度之和。



- 裂缝渗透率：裂缝性储层具有岩块基质渗透率和裂缝渗透率。
- 需要注意的是，裂缝性岩石的总渗透率与总孔隙度之间一般没有一定的正比关系。

因为虽然总孔隙度大，但对其贡献很大的基块系统的孔隙连通性相对较差，所以总渗透率不一定很高。



基块系统的孔隙连通性相对较差



- 裂缝系统、岩块基质系统含流体饱和度。
- 对裂缝系统而言，毛细管压力很小，其束缚水饱和度极低，一般不超过5%，所以，可以认为相应层位的流体（水层中的水、油层中的油等）在裂缝中的饱和度是100%。而对岩块系统来说，毛细管压力是不能忽略不计的，其束缚水饱和度较高，一般都超过30%。相应的，岩块中所含油（气）的饱和度就较低。在裂缝性油气层中，每一小岩块的尺寸大小不同，其中的孔隙结构不同，毛细管压力大小不同，所以总的岩块系统中含油（气）饱和度变化很大。



裂缝—孔隙系统之间的相通性和采收率

- ① 相通性评价：在具有裂缝和孔隙的储层中，两种系统是相互连通的，因而储于其中的流体就会发生交换性流动，称为交叉流动。在不少情况下，二者相通性很差，即使裂缝系统的渗透性很高，岩块系统中含有大量可动油气也难以开采出来。如果裂缝被成岩矿物或次生矿物所充填，不完全充填时，填充物就会在裂缝与岩块之间阻碍储存于岩块中的流体向裂缝流动。颗粒细小、分选性差的物质充填在裂缝中，将严重影响裂缝—岩块之间的相通性。



缝-孔相通性好
采收率高



- 采收率评价：裂缝系统含油饱和度很高，而且自身的驱油条件要比岩块系统好的多。它对引起流体流动的压力梯度的反映远超过岩块系统。从驱油效率和波及系数两方面来看，也都高于岩块系统。所以一般裂缝系统的采收率都很高，可达90%左右。相比之下，岩块系统的采收率要低的多，一般 $<30\%$ 。但裂缝—孔隙性油藏总的采收率比一般的常规孔隙性油藏要高些。



三、地下裂缝预测

岩心观察法

地应力分析法

现代试井分析法

测井解释法

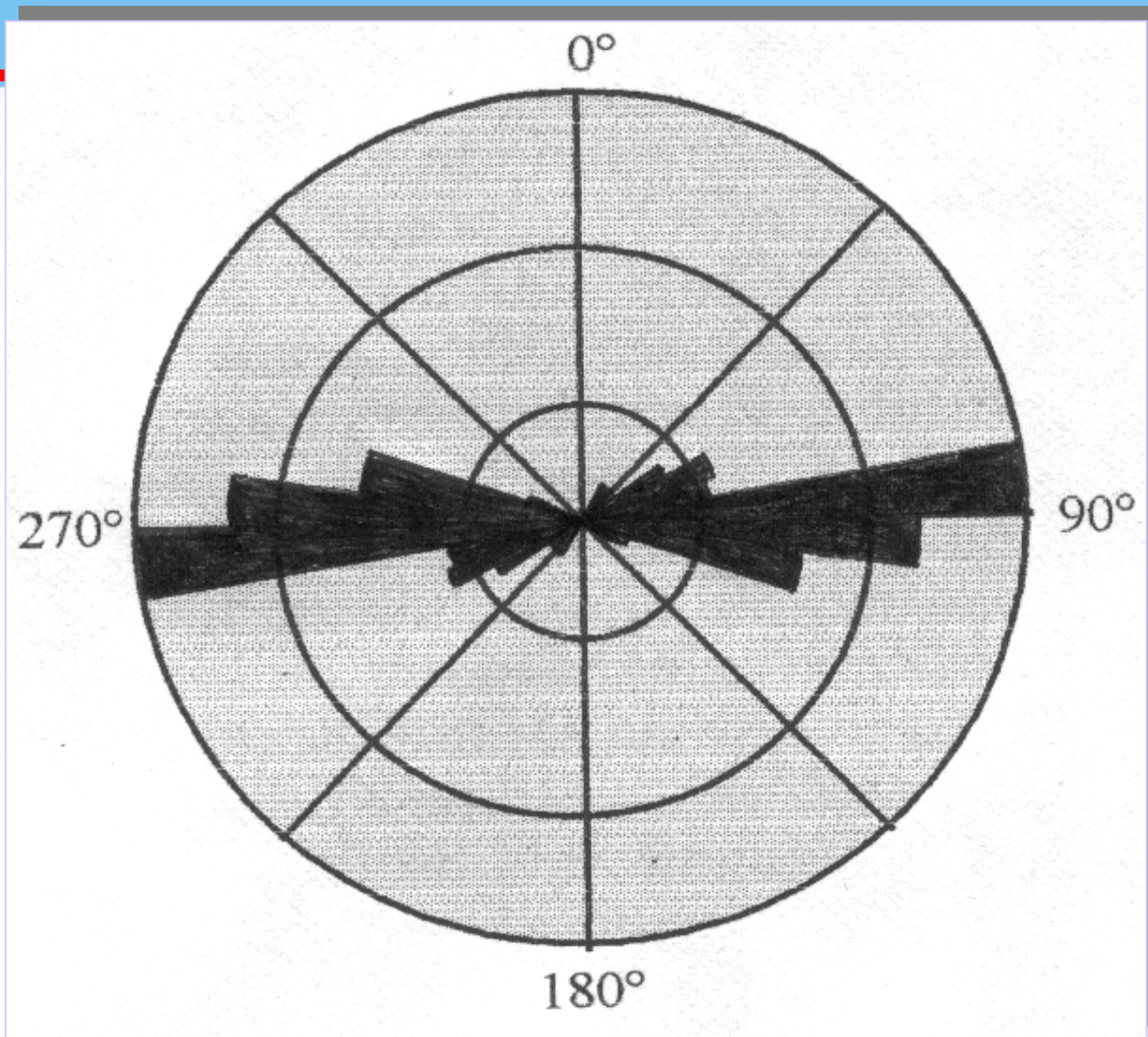
生产动态分析法



岩心观察法

- 直接观察和测量岩心，或通过岩心薄片观测，或用CT扫描技术，求出有关的裂缝参数，可对地下裂缝进行分析。
- 可观测的内容有裂缝组系、裂缝宽度、裂缝密度、裂缝产状、裂缝性质（如充填情况、溶蚀情况）、裂缝的连续性等。通过用全岩心实验测试或求取的裂缝参数可求取裂缝孔隙度、裂缝渗透率等。
- 可作出裂缝方位玫瑰图，得出该井点处的优势裂缝方向。





裂缝走向频率图



地应力分析法

- 根据地质力学原理，从构造与裂缝的生成关系、主应力的方向等，可以预测主要裂缝的分布方向。如国外某油田研究，呈伸长穹隆构造的储层所受的最大水平应力方向呈放射状，并发现裂缝分布及其导致的渗透率分布同样呈放射状。这一研究结果对选择注水方式和进行压裂设计有很大的指导意义。



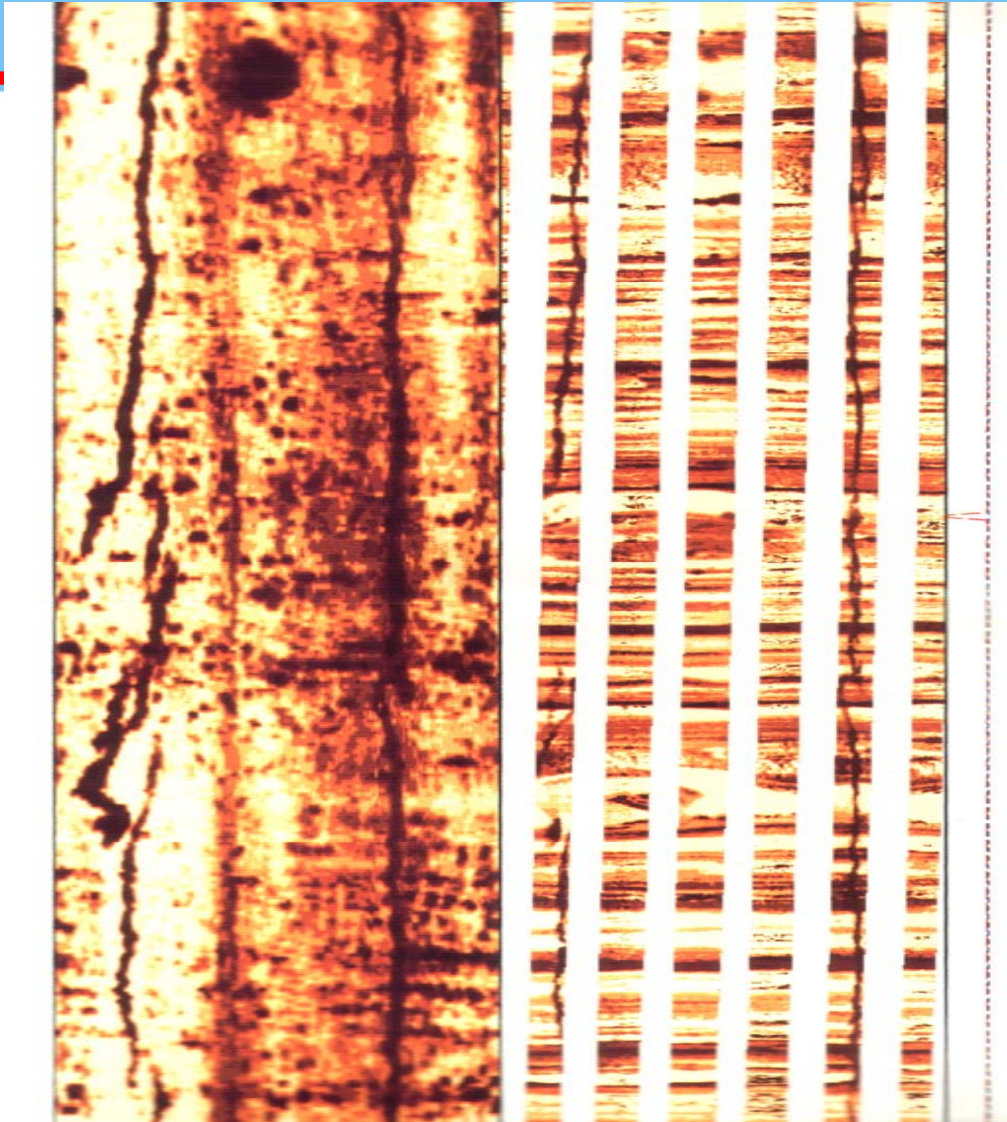
现代试井分析法

- 压力导数曲线在过渡阶段驼峰之后出现一个下凹，然后又表现为水平直线段的形态变化特征是这类储层的典型显示。可通过对压力恢复数据的进一步处理解释，求得裂缝部分参数。也可根据脉冲试井中产生脉冲（激动）的井与观察接收井的方位及反应信号，确定裂缝的方向性及其发育程度。



用测井资料研究储层裂缝

- 包括地层倾角测井、电阻率测井、声波测井、密度测井、中子测井等。
- 利用地层倾角测井，可以直接检测出裂缝的存在、裂缝产状（如水平缝、斜交缝、垂直缝），并用探测极板求知裂缝发育的具体方向。
- 裂缝的测井响应主要表现为密度减小、声波增大、电阻率低异常显示等。具体的测井解释裂缝方法请参阅有关测井地质学专著。

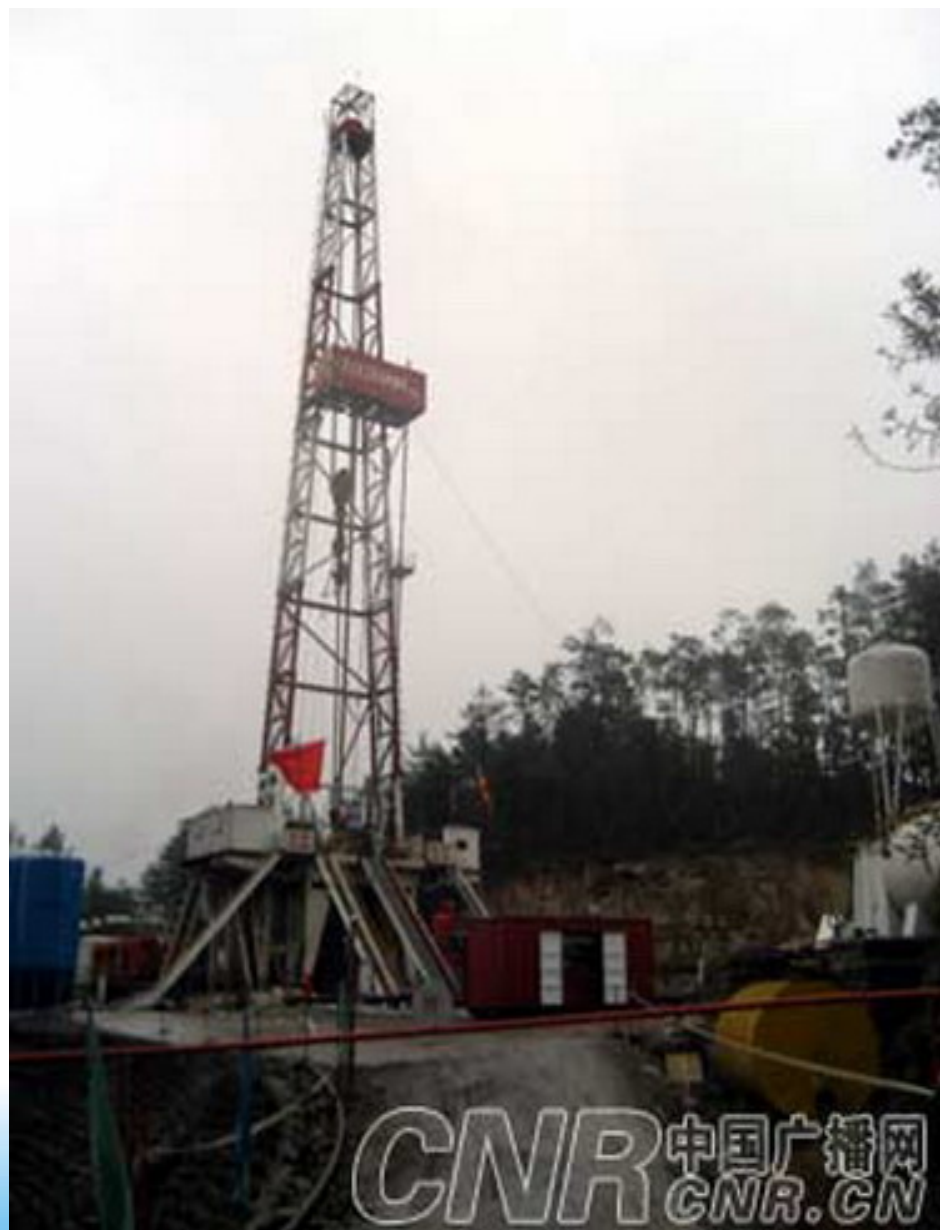


电阻率成像测井垂直裂缝特征



生产动态分析法

- 根据钻井过程中钻具放空长度、泥浆漏失量可定性判断缝洞大小和发育情况。
- 考察油井的来水方向和水淹特征可判断裂缝的方向性和发育程度。在注水井中加入示踪剂，而在水井周围的各井中检测示踪剂到达的时间，由不同方向上注入水的推进速度差异，可分析在不同方向上裂缝的发育与分布状况。





第四节 储层敏感性

岩石成分
及孔隙结构
对储层损害
的影响

外来流体与
储层相互作
用导致储层
损害

储集层敏感
性评价



敏感性矿物的影响

敏感性矿物是指储集层中与流体接触易发生物理、化学或物理化学反应并导致渗透率大幅度下降的一类矿物。

孔隙结构的影响

大孔粗喉型的砂岩储集层，喉道是孔隙的缩小部分、孔喉直径比接近于1，一般不易造成喉道堵塞，但易造成出砂，而对于喉道较细的砂岩储集层，孔隙喉道直径差别大，喉道多呈片状、弯片状或束状，易形成微粒堵塞喉道。



敏感性类型		敏感性矿物	损害形式
水敏性		绿泥石-蒙脱石 伊利石-蒙脱石 蒙脱石 降解伊利石 降解绿泥石 水化白云母	晶格膨胀 分散运移
酸敏性	HCL	蠕绿泥石 铁方解石 鲕绿泥石 铁白云石 绿泥石-蒙脱石 赤铁矿 海绿石 黄铁矿 水化黑云母 菱铁矿	化学沉淀 $\text{Fe}(\text{OH})_3 \downarrow$ 非晶质 $\text{SiO}_2 \downarrow$ 酸蚀释放出微粒运移
	HF	方解石 沸石类：浊沸石 白云石 钙沸石、斜 钙沸石 片沸石、辉沸石 钙长石 各类粘土矿物	化学沉淀 $\text{CaF}_2 \downarrow$ 非晶质 $\text{SiO}_2 \downarrow$
	PH>12	钾长石、钠长石、微晶石英、髓石（玉髓）、斜长石、各 类粘土矿物、蛋白石—CT、蛋白石—A（非晶质）	硅酸盐沉淀 硅凝胶体
流速敏感性		高岭石、毛发状伊利石、微晶石英、微晶白云母、降解伊 利石、微晶长石	分散运移 微粒运移
结 垢		石膏、重晶石、硫铁矿、方解石、赤铁矿、天青石、硬石 膏、岩盐、菱铁矿、磁铁矿	盐类沉淀



- 敏感性矿物主要分布在杂基和胶结物之中，特别是成岩作用期形成的并充填在孔隙中或附贴在孔隙壁表面的自生矿物对储层的敏感性影响最大。这类矿物一般颗粒很小，比面积很大。它们的种类，含量和分布状态在同一储层中具有严重的非均质性。
- 碳酸盐岩储集层的储集空间为孔隙、裂缝及溶洞、其孔隙结构具有严重的非均质性，因此在施工作业过程中，易发生井漏、井涌及井喷。在堵漏压井作业时，往往不同程度地降低了储层的渗透率、甚至完全堵死油气渗流的通道，严重损害了储集层。



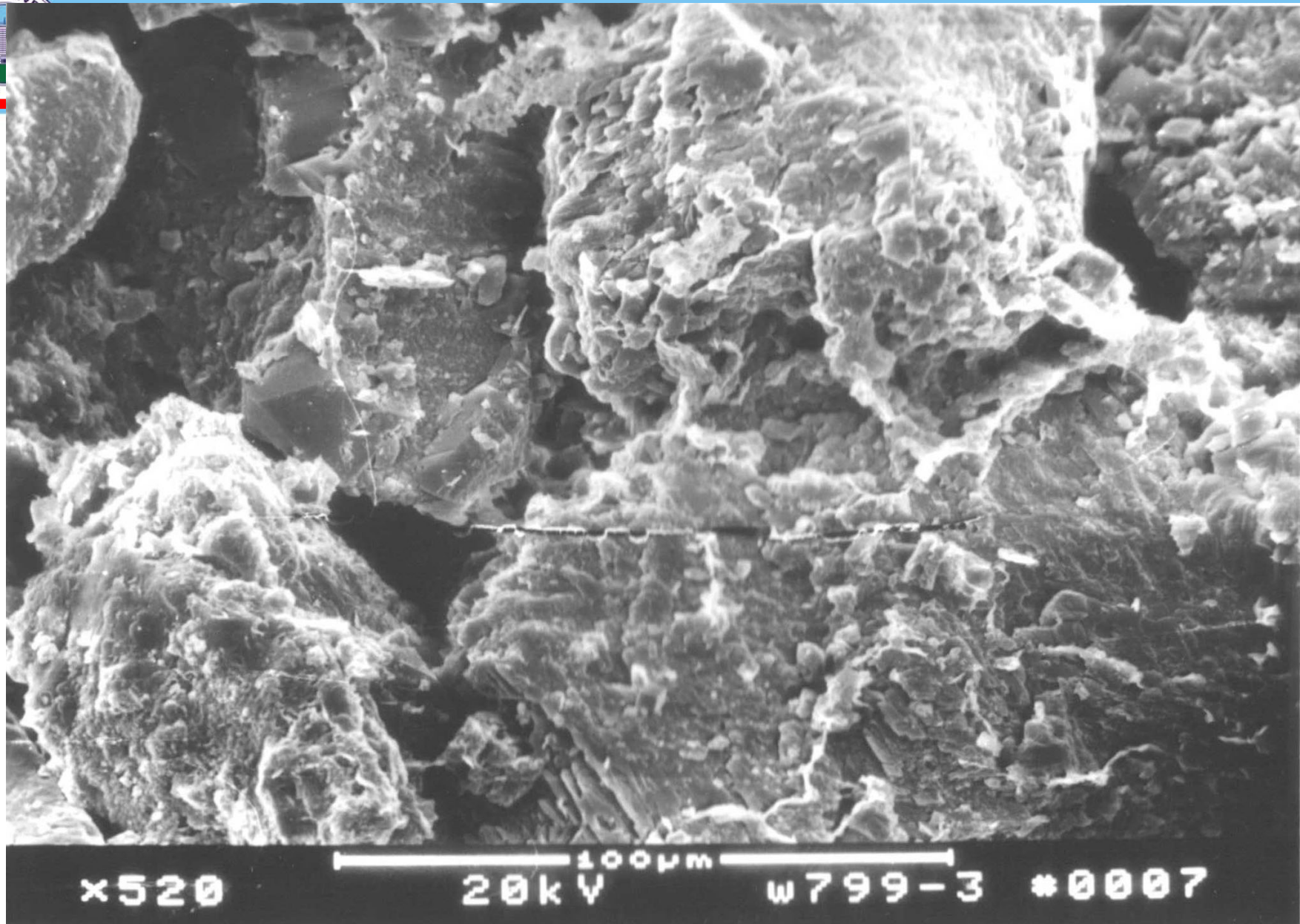
外部流体中固相颗粒的侵入

- 钻井液、完井液等各种施工作业流体及注入流体往往都含有固相颗粒，当井孔液柱压力大于地层压力时，外来流体中固相颗粒，可从裸露的井壁表面或射孔孔道侵入储集层，甚至堵塞孔隙或裂缝。对低孔低渗砂岩储集层，固相颗粒侵入浅而量小；对高孔高渗的砂岩储集层，固相颗粒的侵入深而量大。对裂缝及溶蚀孔洞发育且连通较好的碳酸盐岩储集层，外来流体中固相颗粒的侵入深度及侵入量更大。固相颗粒进入储层的量愈大、侵入愈深则对储层的伤害也愈大。



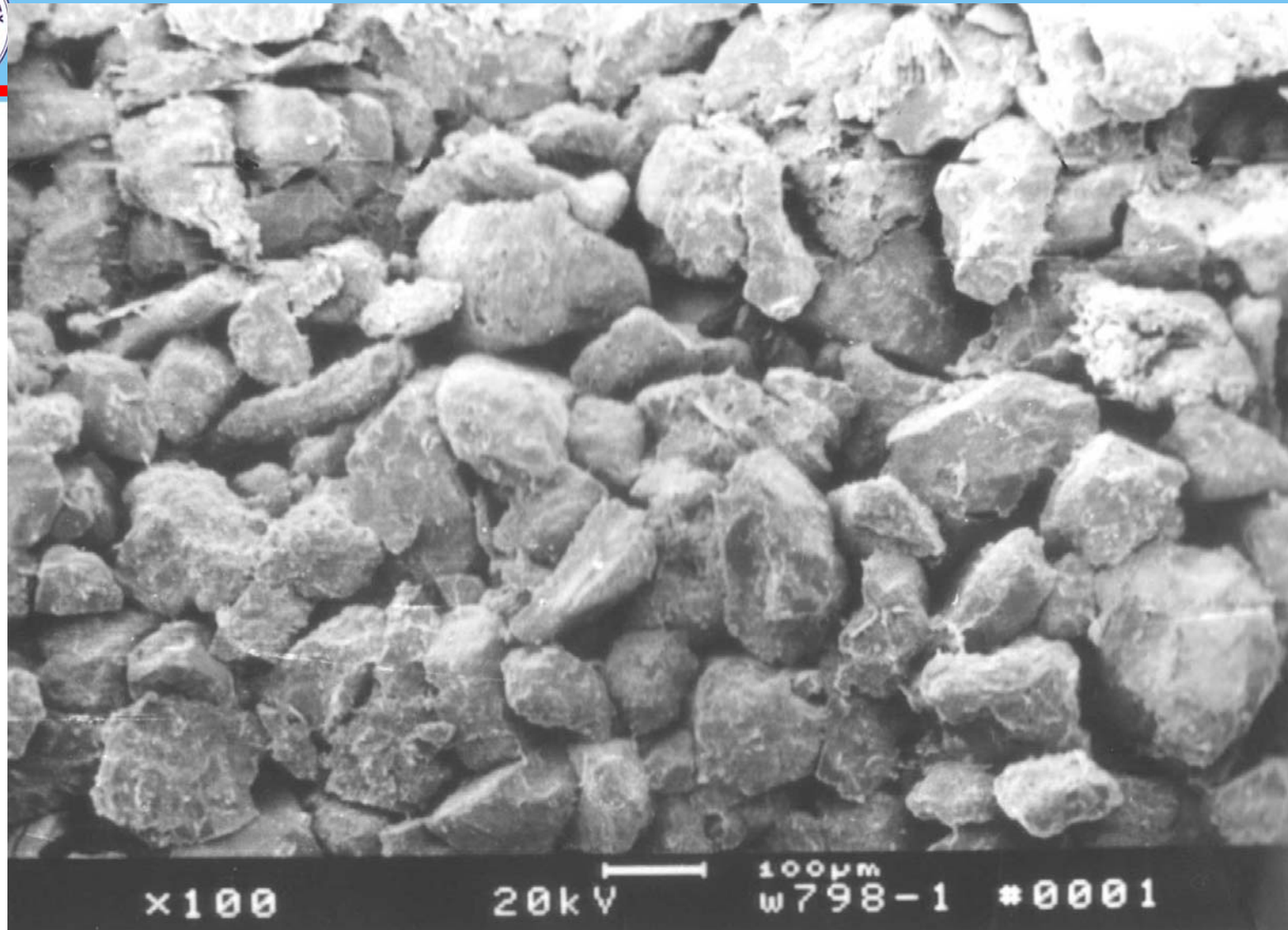
储层内部微粒运移

- 储集层都含有细小的矿物颗粒，如粘土颗粒、石英、长石、云母及碳酸盐矿物颗粒（微粒）等。当外来流体的流速过大时，未胶结的微粒，随流体在储集空间中运移。运移至狭窄的喉道处，即可形成单个微粒堵塞喉道，也可以几个微粒在喉道处形成桥堵，从而使储层的渗透性变差。
- 如果微粒较粗，相当于粉砂级或砂级，随流体一起流动并进入井筒时，则称之为油井出砂。

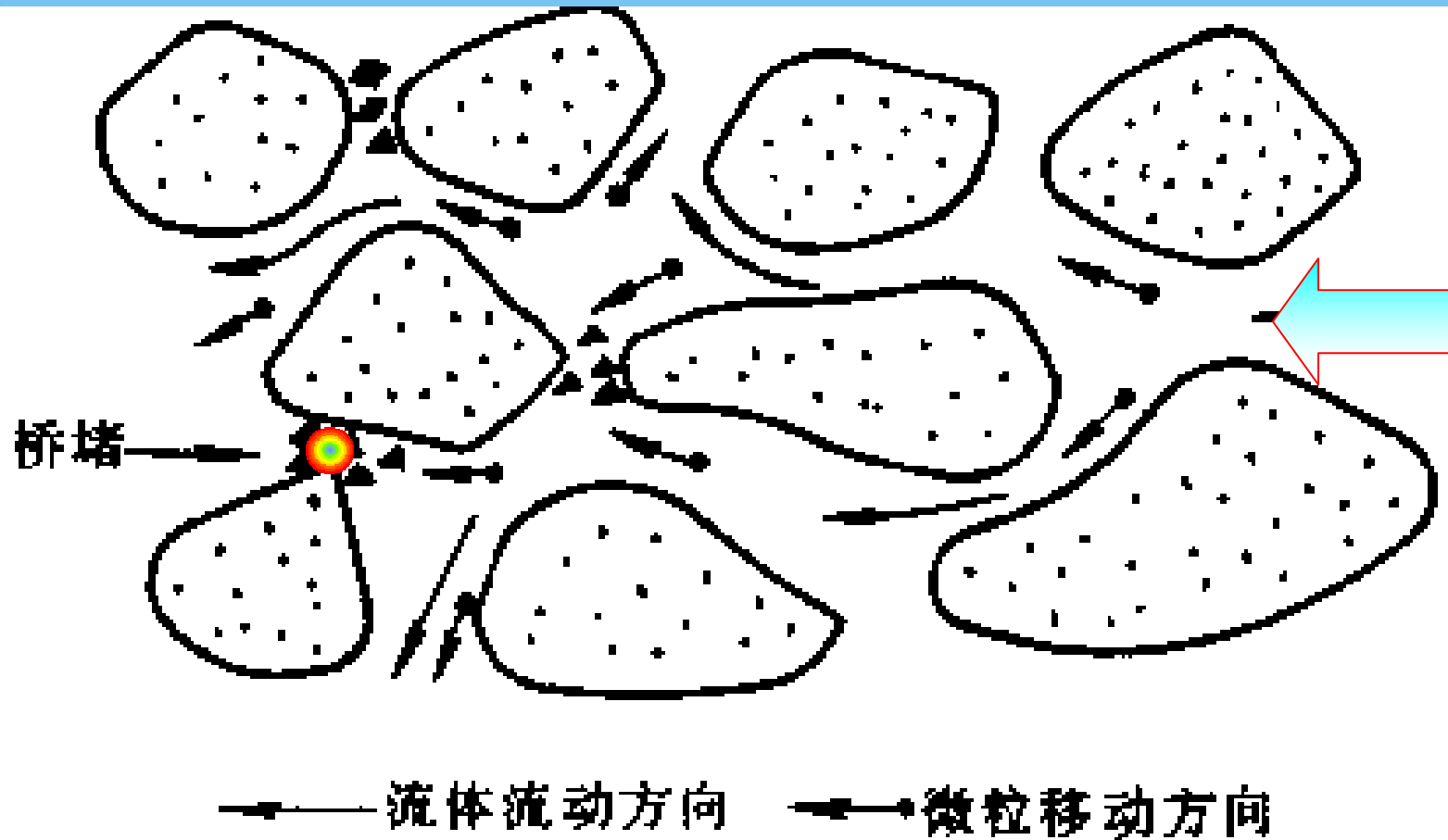


颗粒表面发育伊/蒙混层粘土膜

地球科学学院 3RG 尹太举 2009



高孔砂岩，孔径 $20\sim 40\mu\text{m}$ ，面孔隙率20%，颗粒
表面发育伊/蒙粘土膜



微粒运移堵塞喉道示意图

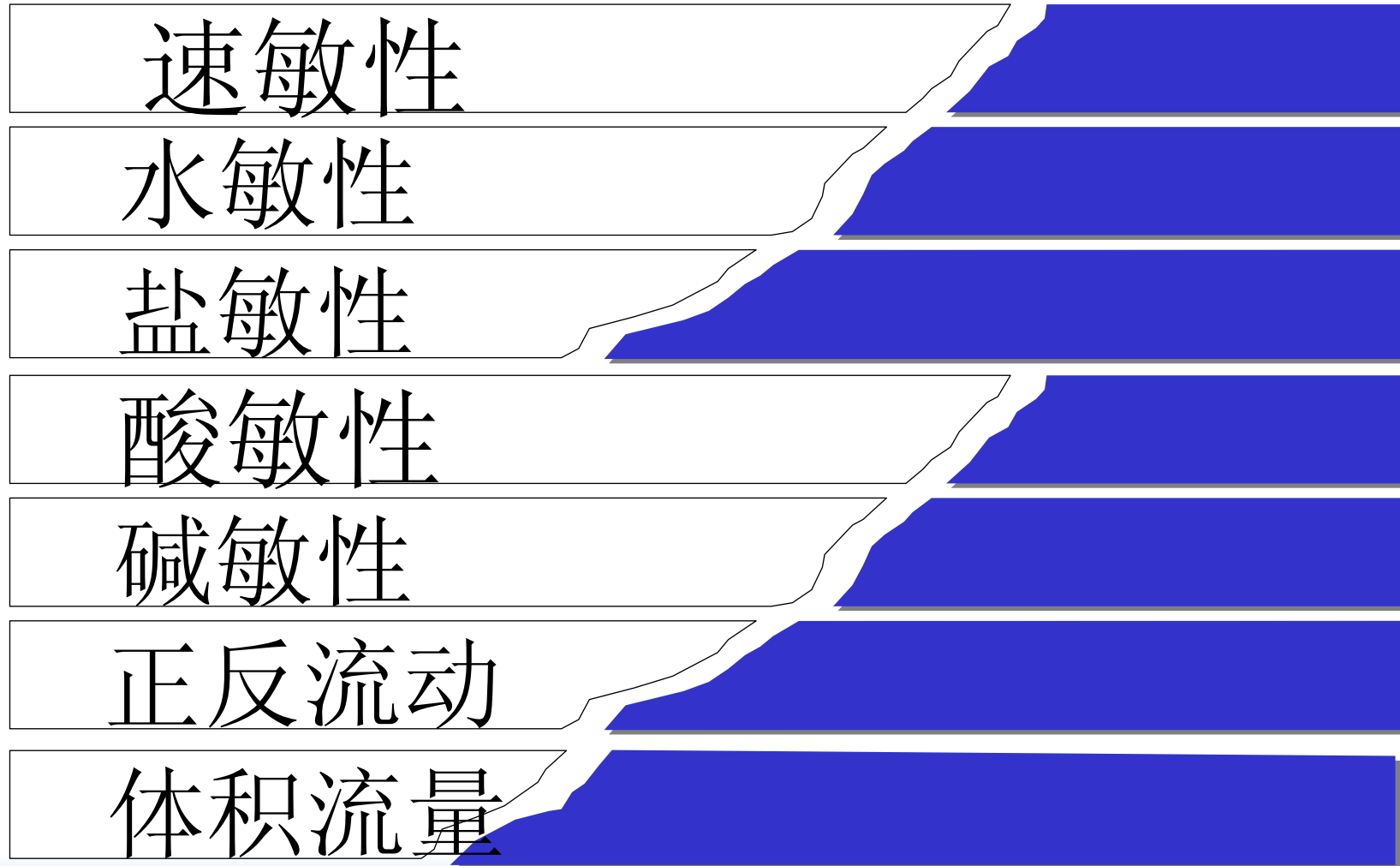


储层内部化学沉淀或结垢

- 当含有高硫酸盐的外来流体与含有大量钙离子的地层水相接触时，可能形成硫酸钙沉淀；
- 外来流体中常含有许多化学添加剂，可改变油水界面张力及润湿性，形成了油包水或水包油的乳化物，可降低储层油、气约有效渗透率，使储层受到损害。
- 硫酸钙、硫酸钡等无机结垢，既可以形成于储层的孔隙壁上，也可以形成在井内管柱壁上，从而堵塞油气运移的通道。
- 外来流体的注入可以改变油层温度、压力及pH值，导致原油中石蜡、沥青质析出，在井筒及井筒附近的储层中形成有机结垢、缩小和堵塞孔隙、喉道。



储层敏感性评价





- 速敏性是指液体在流速剪切力的作用下，使岩样孔隙中的微粒移动，堵塞孔隙、喉道，造成渗透率下降的可能性及其程度。

V_c 愈小速敏性愈强。

K_v/K_{oc} 称为速敏指数，它表示在不同流速下的储层速敏性。该参数愈小速敏性愈强。

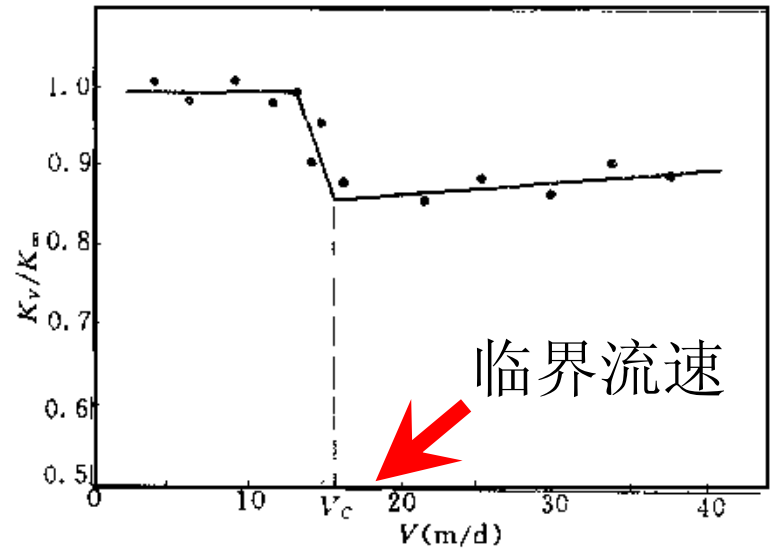


表 5-17· 岩样速敏程度评价指标

K_v/K_{oc}	<0.3	$0.3 \sim 0.7$	$>0.7 \sim <1$	≥ 1
速敏程度	强	中等	弱	无

K_v -不同流速条件下的渗透率

K_{oc} -液体渗透率

V_c -临界流速



- 水敏是指储集层被钻开时，外来流体引起粘土矿物的重新膨胀、分散和运移，导致储层的渗透率下降。

一般来说，粘土矿物的含量愈高水敏性愈强，粘土矿物中蒙皂石含量高水敏程度强。

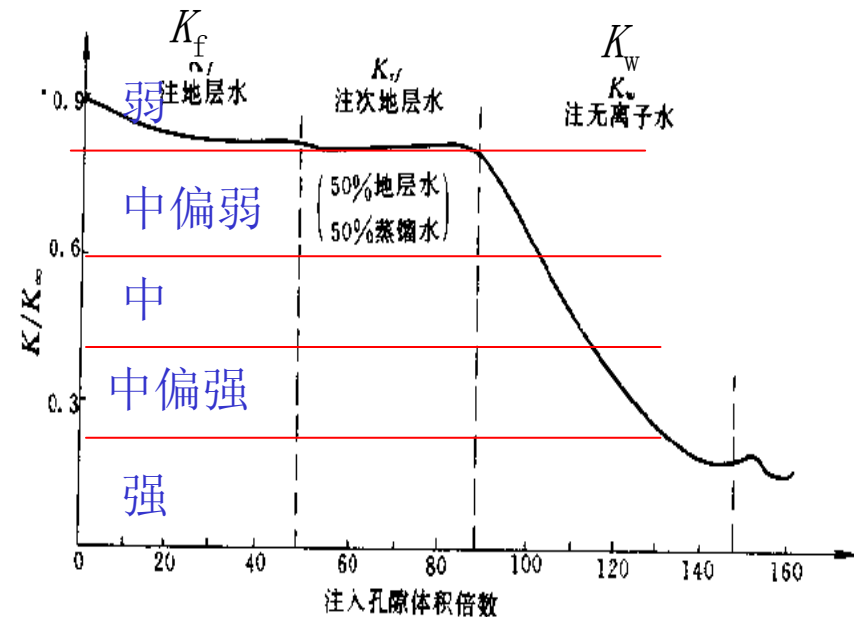


表 5-18 · 岩心水敏程度评价指标

K_w / K_{0c}	≤ 0.2	$>0.2 \sim 0.4$	$>0.4 \sim 0.6$	$>0.6 \sim 0.8$	$>0.8 \sim 1.0$
$(K_0 - K_w) / K_0$	>0.7	$0.7 \sim 0.55$	$0.55 \sim 0.45$	$0.45 \sim 0.3$	≤ 0.3
水敏程度	强	中偏强	中	中偏弱	弱



- 盐敏性实验实质上是水敏性实验的另一种方式。通过实验可以观察储层对所接触流体盐度变化的敏感性程度，找出引起粘上矿物水化膨胀而导致渗透率明显下降的临界矿化度。依据渗透率的变化及临界矿化度的大小，即可对岩心的盐酸性进行评价。

该实验通常在水敏实验的基础上进行。以矿化度 C 为横坐标，以 K_f/K_{oc} 为纵坐标作图，绘渗透率变化曲线，当溶液矿化度递减至某值时，岩石渗透率下降幅度增大。这一矿化度 C_c 即为临界矿化度

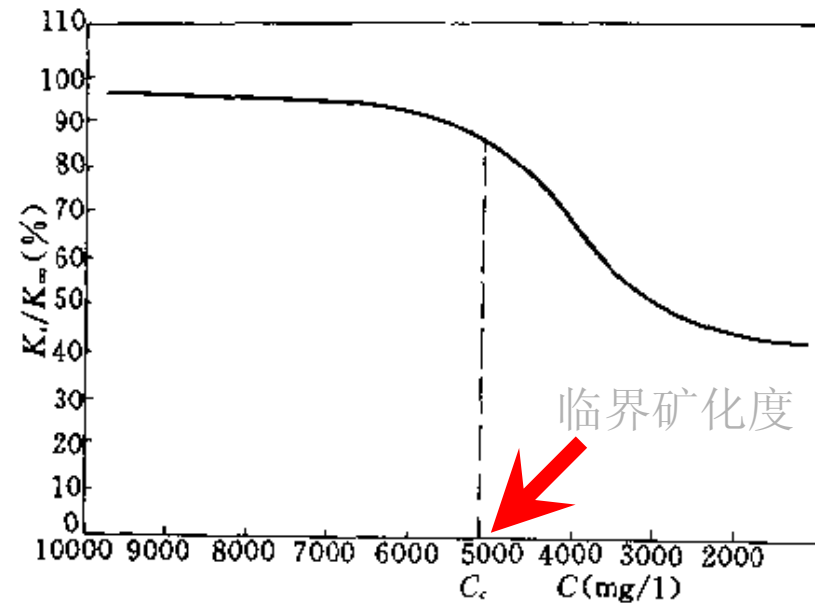


表 5-19 · 临界矿化度评价盐敏性指标 (标准水)

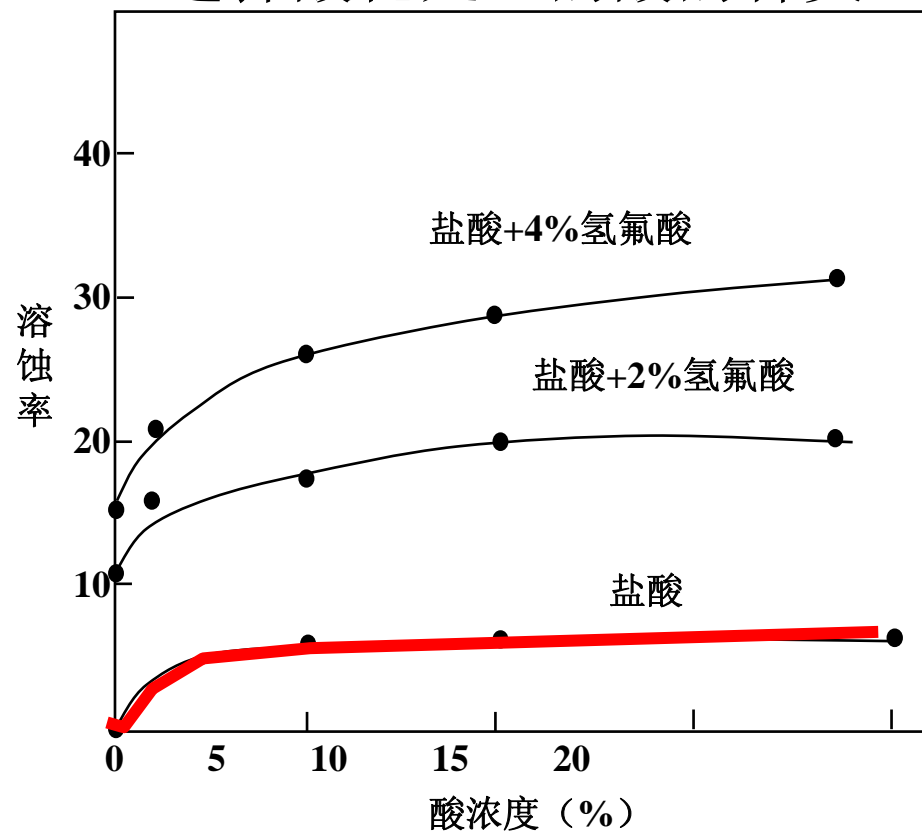
临界矿化度, mg/L	≤ 1000	$>1000 \sim 2500$	$>2500 \sim 4000$	$>4000 \sim 6000$	$>6000 \sim 9000$	>9000
盐敏程度	弱	中偏弱	中等	中偏强	强	极强

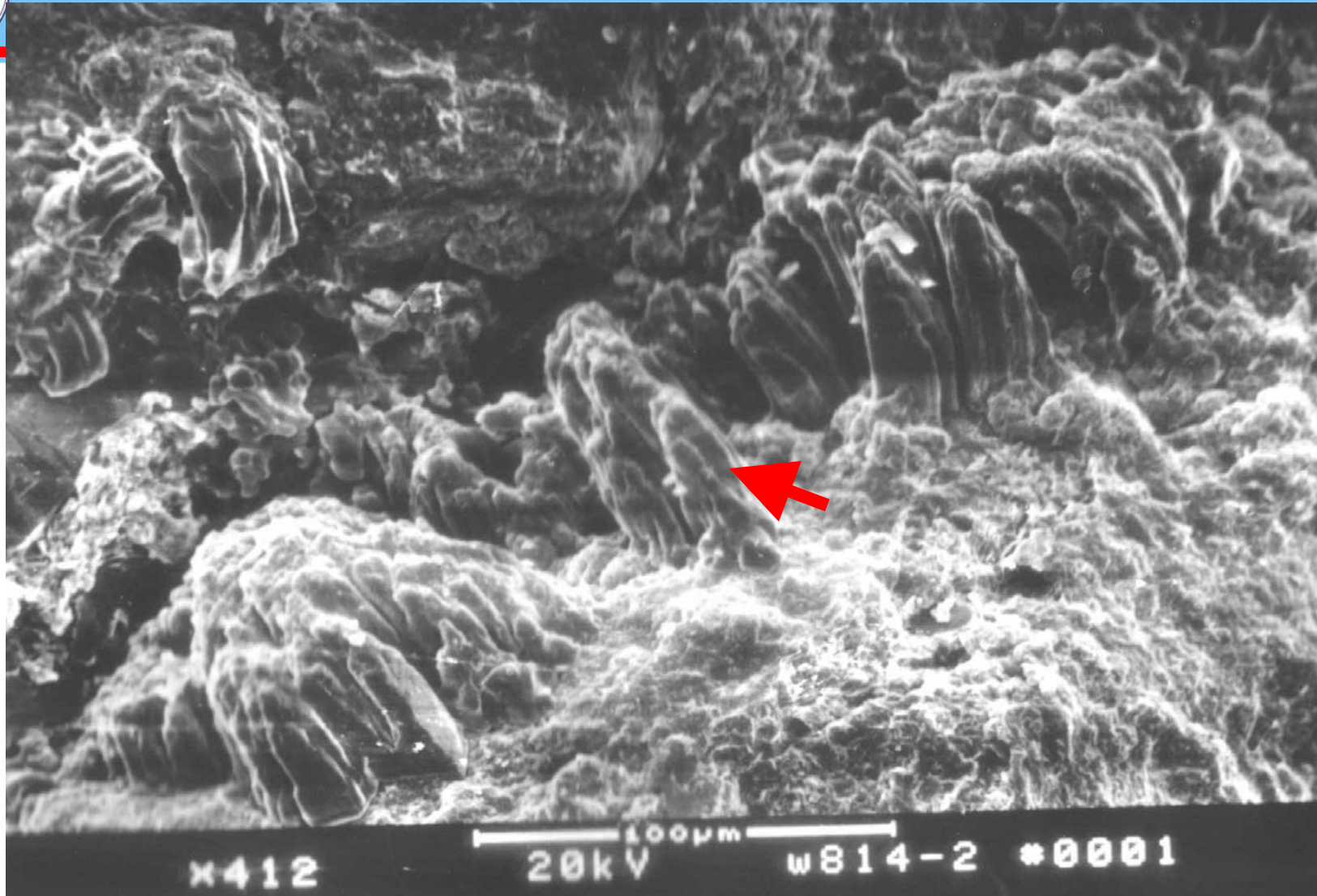


该实验通常包括酸溶实验、浸泡实验和流动酸敏实验。

酸溶实验是将一定量的岩样，分别置于一系列不同浓度的各种酸液之中，在不同温度下，经过一定时间的反应，测定岩样的溶失率、残酸浓度、残酸中酸敏性离子的种类及含量。

选择酸化处理的酸的种类





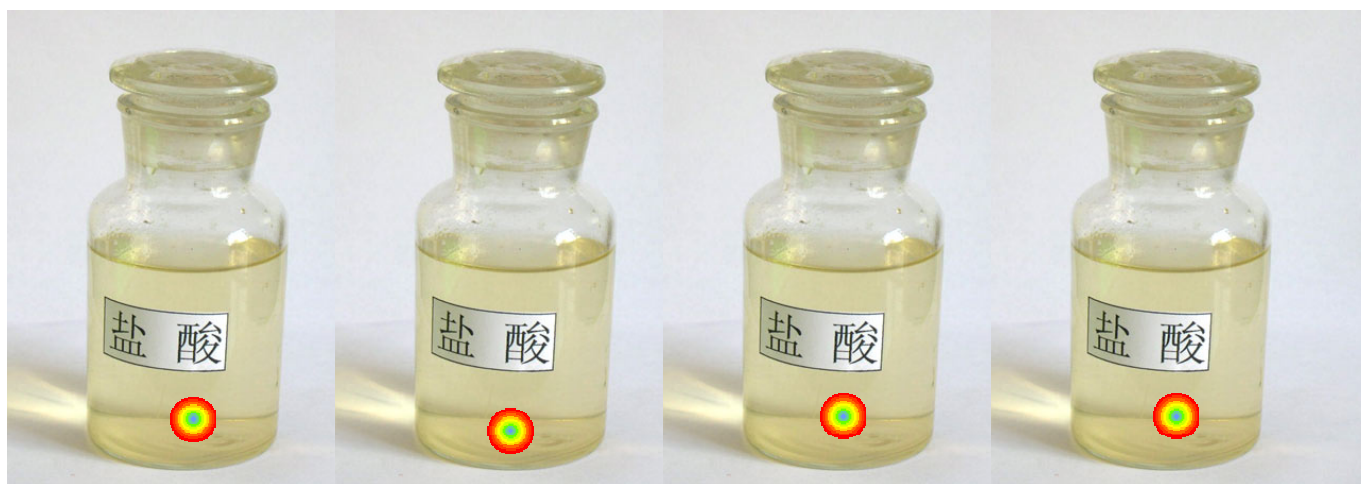
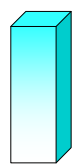
马牙状自生方解石



酸敏性实验及评价

浸泡实验

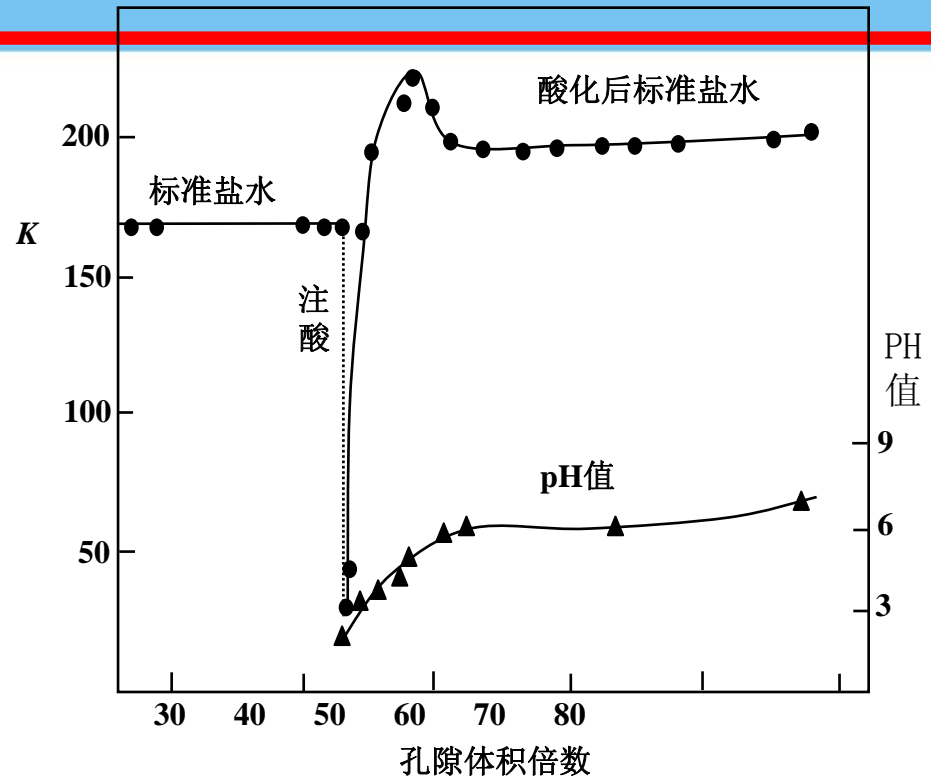
是将厚度约5mm的岩石样片，浸泡在不同浓度的各种酸液之中，观察浸泡前后岩片表面溶解、脱粒、分裂、解体等显微变化。





流动酸敏实验

是模拟储层酸化过程中，酸液可能对储层损害的实验。根据岩样与酸反应前后渗透率值的变化，即可判断岩样的酸敏程度。反应后渗透率值既可增大也可以减少



岩样在酸反应前后渗透率值的变化

表 5-20 酸敏性对储层损害评价表

K_i/K_F	≥ 1	$< 1 \sim 0.7$	$< 0.7 \sim 0.3$	> 0.3
酸敏损害程度	无	弱	中等	强

K_F 表示岩样与酸液反应之前，用标准盐水测的岩样渗透率。

K_i 表示岩样与酸反应之后，用相同流体测的岩样渗透率



碱敏性评价

- 是指钻井液、完井液等外来流体中的碳酸根离子与储集岩或地层水中的钙、镁等离子发生化学反应，形成沉淀堵塞孔隙喉道，使储层渗透率下降的现象。
- 碱敏性实验与流动酸敏实验方法基本相同，将配制好的碱液注入岩样，测定岩样与碱反应前后的渗透率值 K_f 、 K_i 用渗透率的变化率 $(K_f - K_i) / K_f$ 值，即可评价其碱敏性

表 5-21 · 岩心碱敏程度评价标准

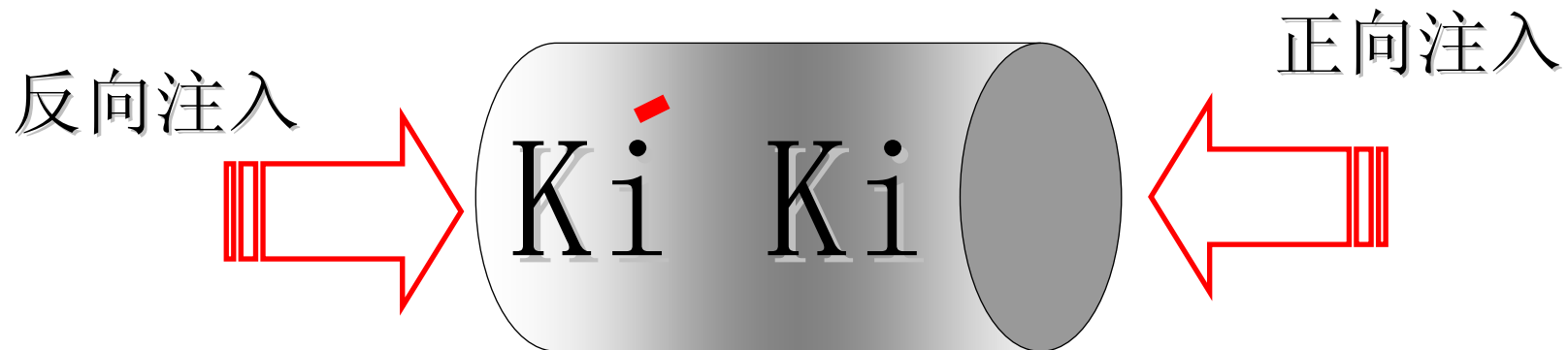
$(K_f - K_i) / K_f$	≤ 0	$>0 \sim 0.3$	$>0.3 \sim 0.7$	>0.7
碱敏程度	无	弱	中等	强

反应后的渗透率值下降



正向流动与反向流动实验

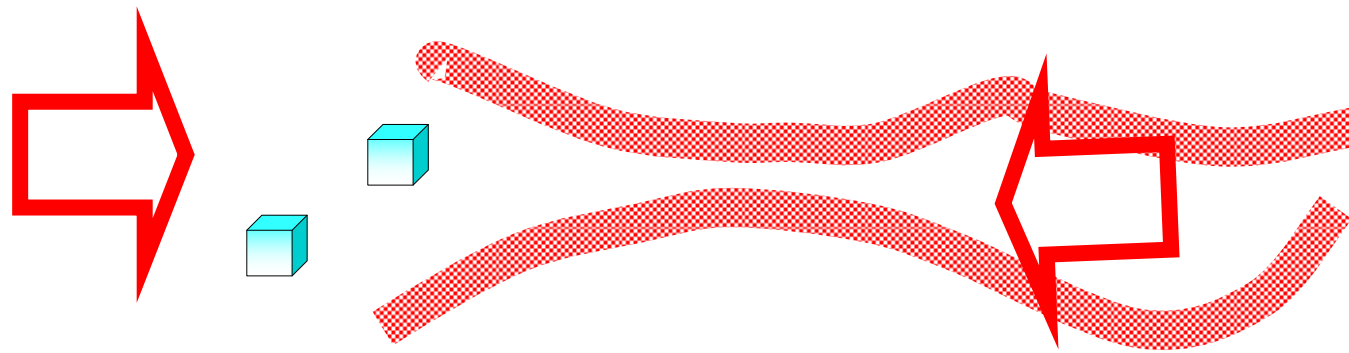
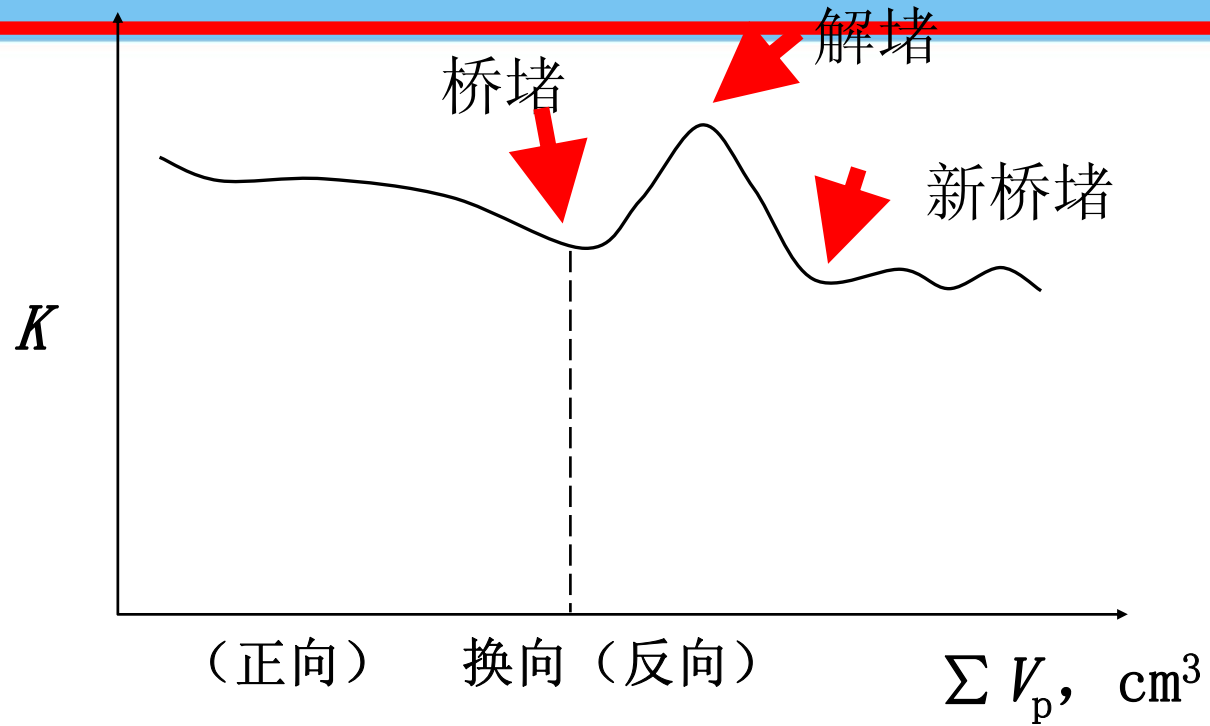
- 在大于临界流速的条件下，将流体正向注入岩心，测其渗透率 K_i 。在不中断流动的状态下将流体以相同的流速反向注入岩心，测定渗透率 K_i' 。这个实验称其为正反流动实验，其目的是研究微粒运移引起渗透率的波动情况。



大于临界流速注入流体



- 当正向流动速度超过了临界流速时，造成微粒在储集空间中运移，并在狭小的喉道处形成“桥堵”，导致渗透率下降。
- 流体以相同的流速反向流动时，聚集在喉道附近的微粒，将在相反的作用力下重新运移，可暂时解除“桥堵”，使渗透率突然增高。
- 反向流动时，由于流速大于临界流速，可移动的微粒又将在孔隙中运移，并在喉道处形成新的桥堵，渗透率又开始下降。再流动一段时间后，渗透率将趋于稳定。





体积流量敏感性实验及评价

- 了解储层渗透率的变化与流过液量之间的关系
- 在低于临界流速的条件下，将大量的流体注入岩样，同时测定各注入量下的渗透率值后。根据渗透率的变化，即可评价储层对体流量的敏感性，研究注入水的体积可能对储层的损害。

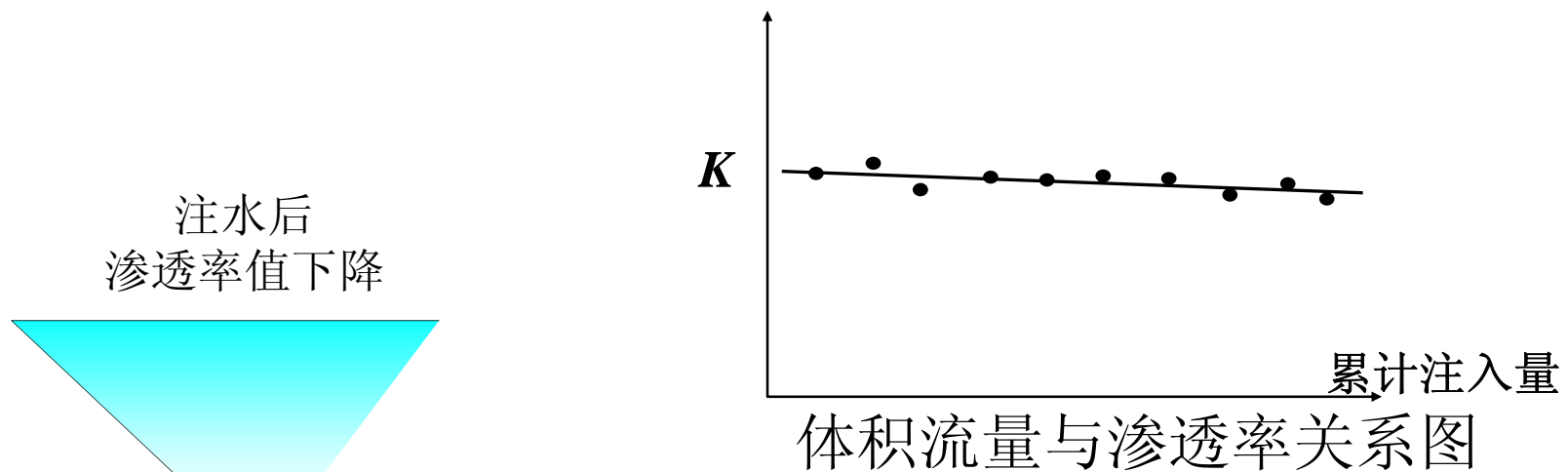


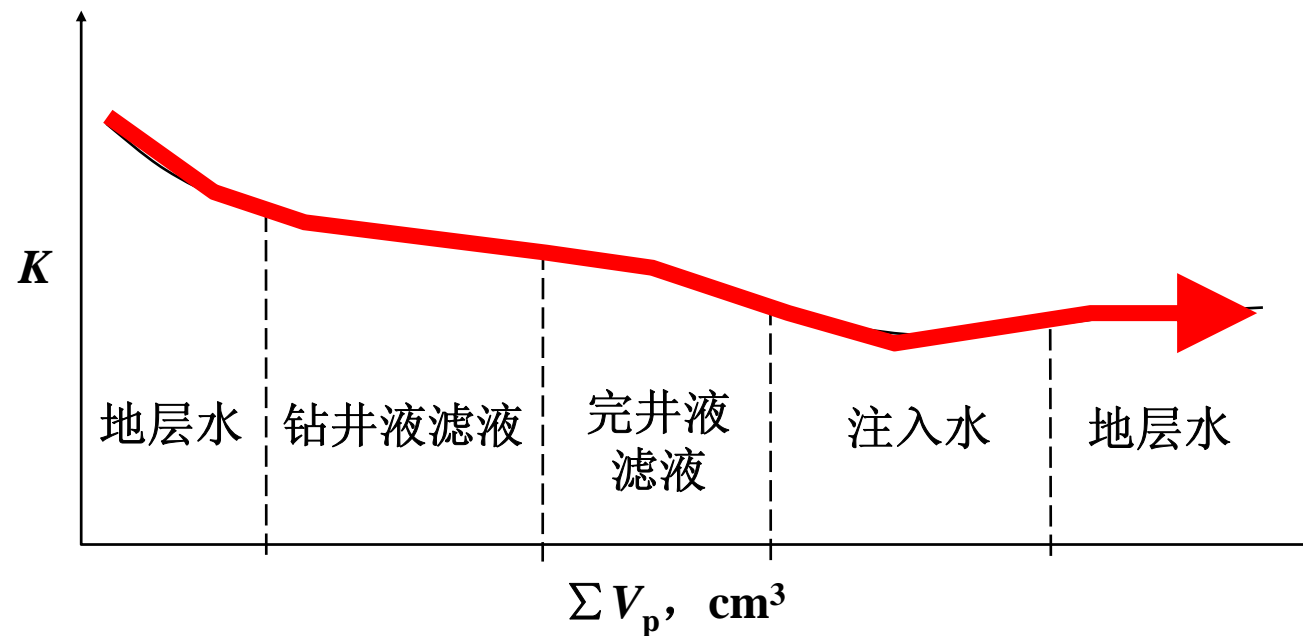
表 5-22 · 体积流量敏感性评价表

K_i/K_0	≤ 0.3	> 0.3~0.4	> 0.4~0.6	> 0.6~0.7	> 0.7
敏感程度	强	中偏强	中等	中偏弱	弱



系列流体敏感性实验及评价

- 将岩样按施工顺序与系列流体接触、并测定岩心与各种流体接触前后的渗透率值。根据渗透率值的变化率，既可以评价每一种流体对储层的损害、也可以评价系列流体对储层的综合损害。



系列流体渗透率变化曲线



第五节 储层评价

评价参数选择

单项参数评价分数的计算

各项参数的权系统确定

综合得分分类



一、评价参数选择

有效厚度

有效厚度
钻遇率

油砂体面积
或延伸长度

渗透率

有效
孔隙度

孔隙结
构参数

层内
非均质

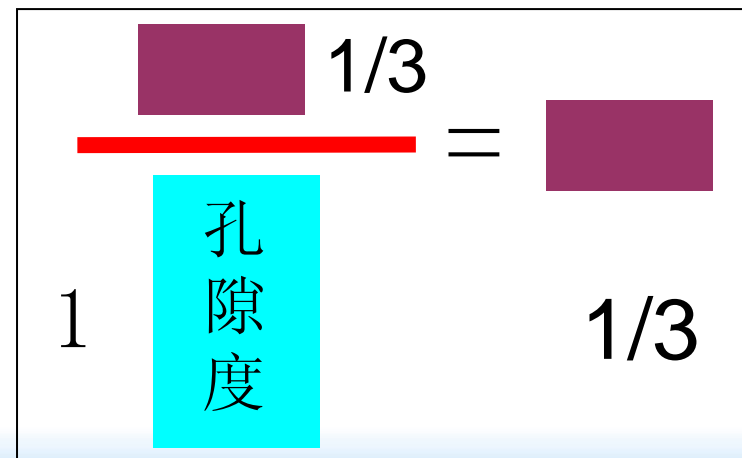
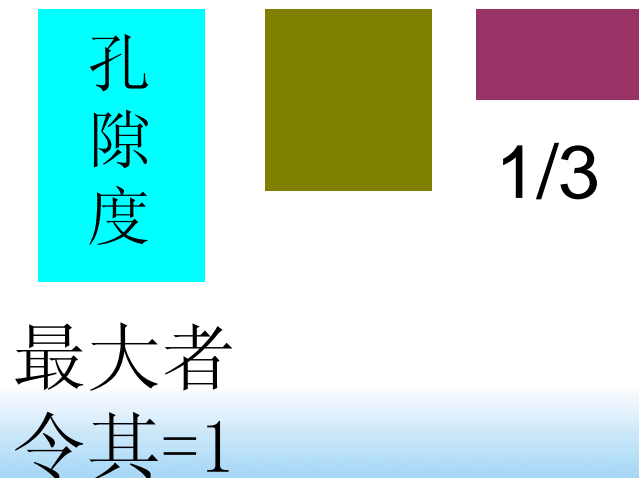
粘土矿物
碳酸盐



二、单项参数评价分数的计算

- 参数选定后，计算各单项参数的评价分数，可采用最大值标准化法。找出最大者，其他的表示为最大者的分数。
- 有效厚度、钻遇率、渗透率、孔隙度等值愈大，反映储层参数愈好，直接除以本项参数的最大值。

3个油层的孔隙度



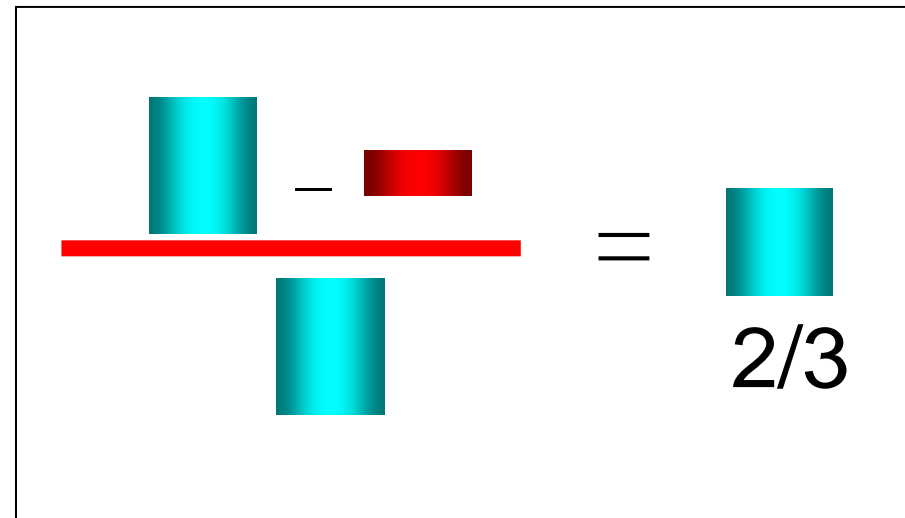


- 对于参数值愈小，反映储层性质愈好的参数，如泥质含量、层内非均质性等，有减法计算单项参数分数：

3个油层的泥质含量



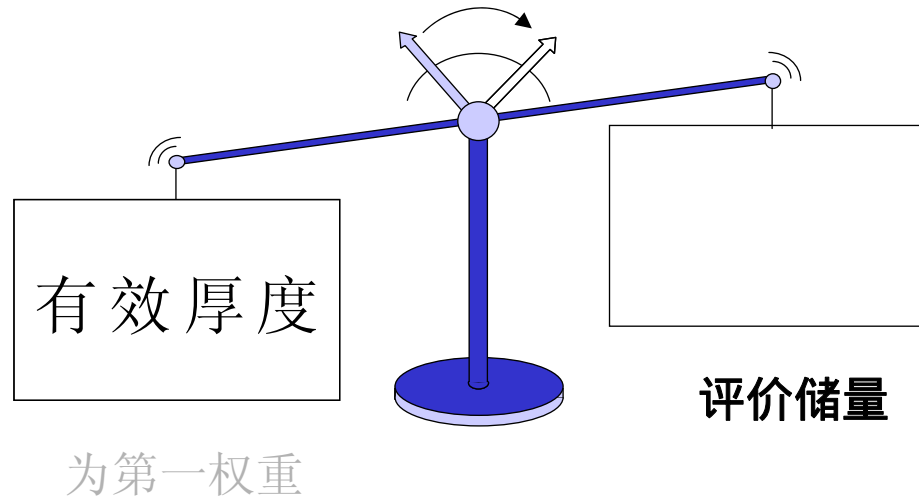
最大者
令其=1



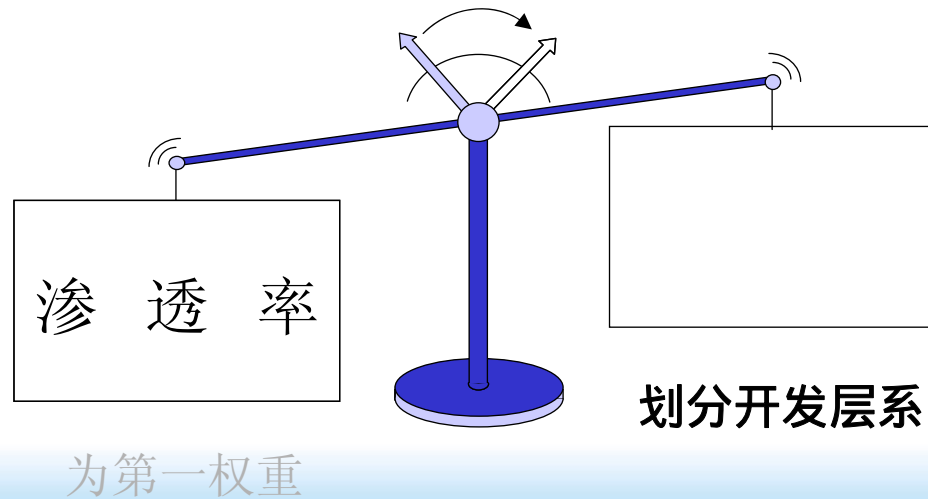


三、各项参数的权系统确定

在评价阶段

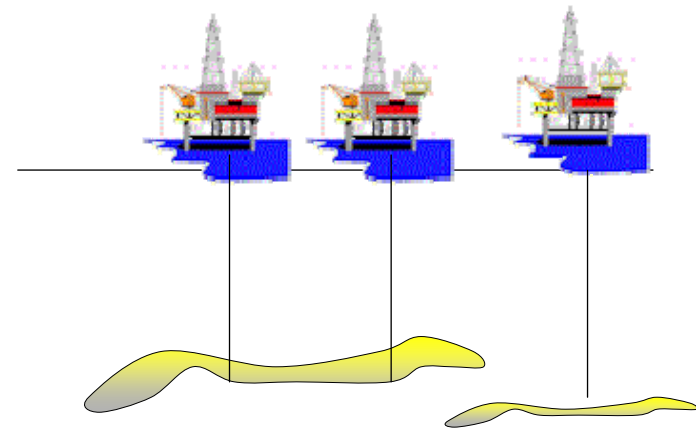
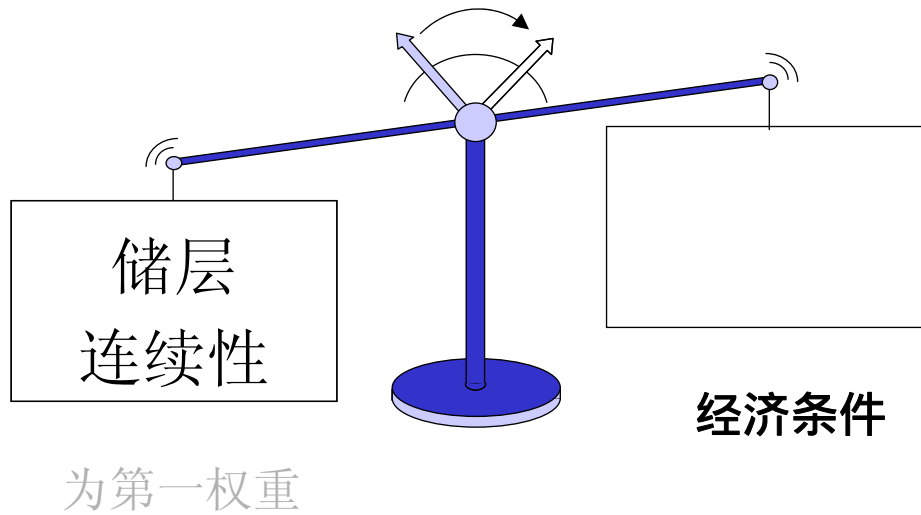


在方案设计阶段



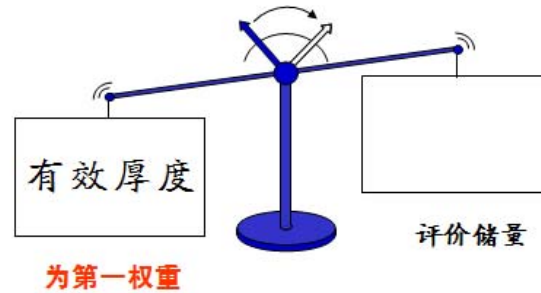


当所需井网密度处于经济边际条件时

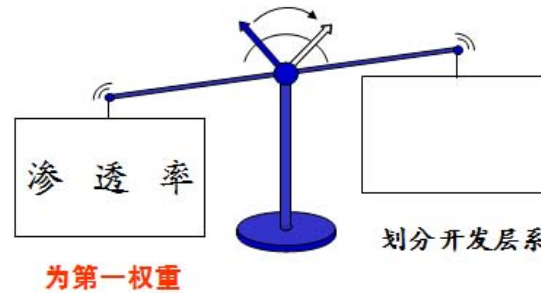




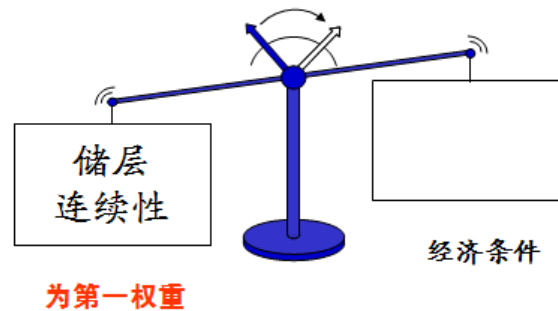
在评价阶段



在方案设计阶段



当所需井网密度处于经济边际条件时



在注水开发的油田，这三项参数一般都是储层综合评价的重要指标。



四、综合得分分类

表 5-23 · 曙光油田杜家台油层分区分油组综合权衡评价分类表

分区	油组	h_o 单项评价分数 $\times \lambda$	h_o 钻遇率单项评价分数 $\times \lambda$	K_a 单项评价分数 $\times \lambda$	ϕ 单项评价分数 $\times \lambda$	泥质含量单项评价分数 $\times \lambda$	碳酸盐含量单项评价分数 $\times \lambda$	综合权衡评价分数	分类
一	杜 I 组	0.186	0.166	0.200	0.068	0.066	0.025	0.711	I
	杜 II 组	0.30	0.130	0.080	0.073	0.068	0.062	0.713	I
	杜 III 组	0.057	0.036	0.030	0.060	0.066	0.058	0.307	III
二	杜 I 组	0.078	0.134	0.030	0.088	0.038	0.041	0.409	II
	杜 II 组	0.252	0.200	0.050	0.088	0.039	0.039	0.668	II
	杜 III 组	0.144	0.164	0.150	0.097	0.054	0.061	0.670	II
权系数 λ		0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1		

分类标准：1~0.7分为 I 类；0.7~0.35分为 II 类；<0.35分为 III 类



第六节 储层地质模型

一

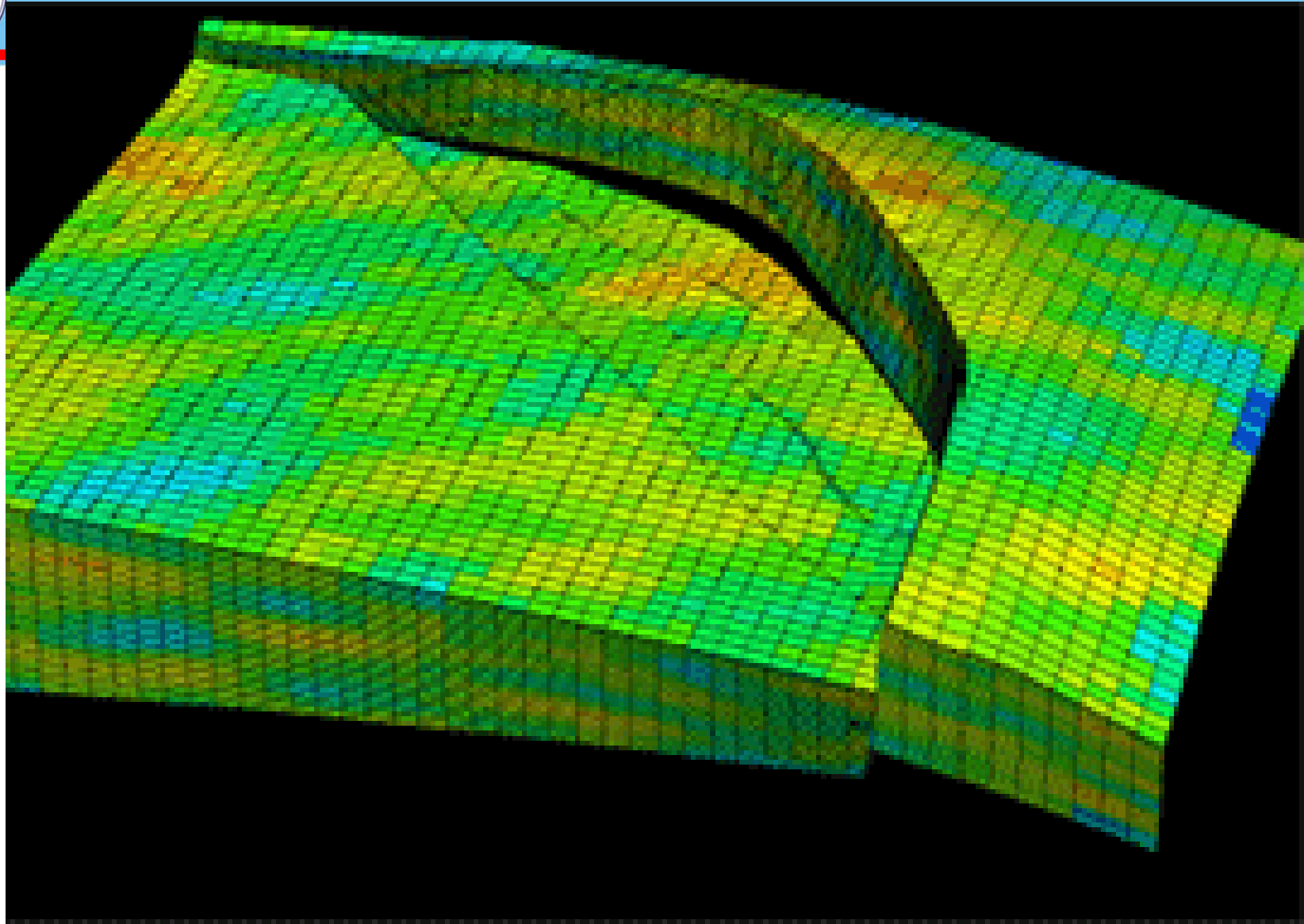
储层地质模型的类型

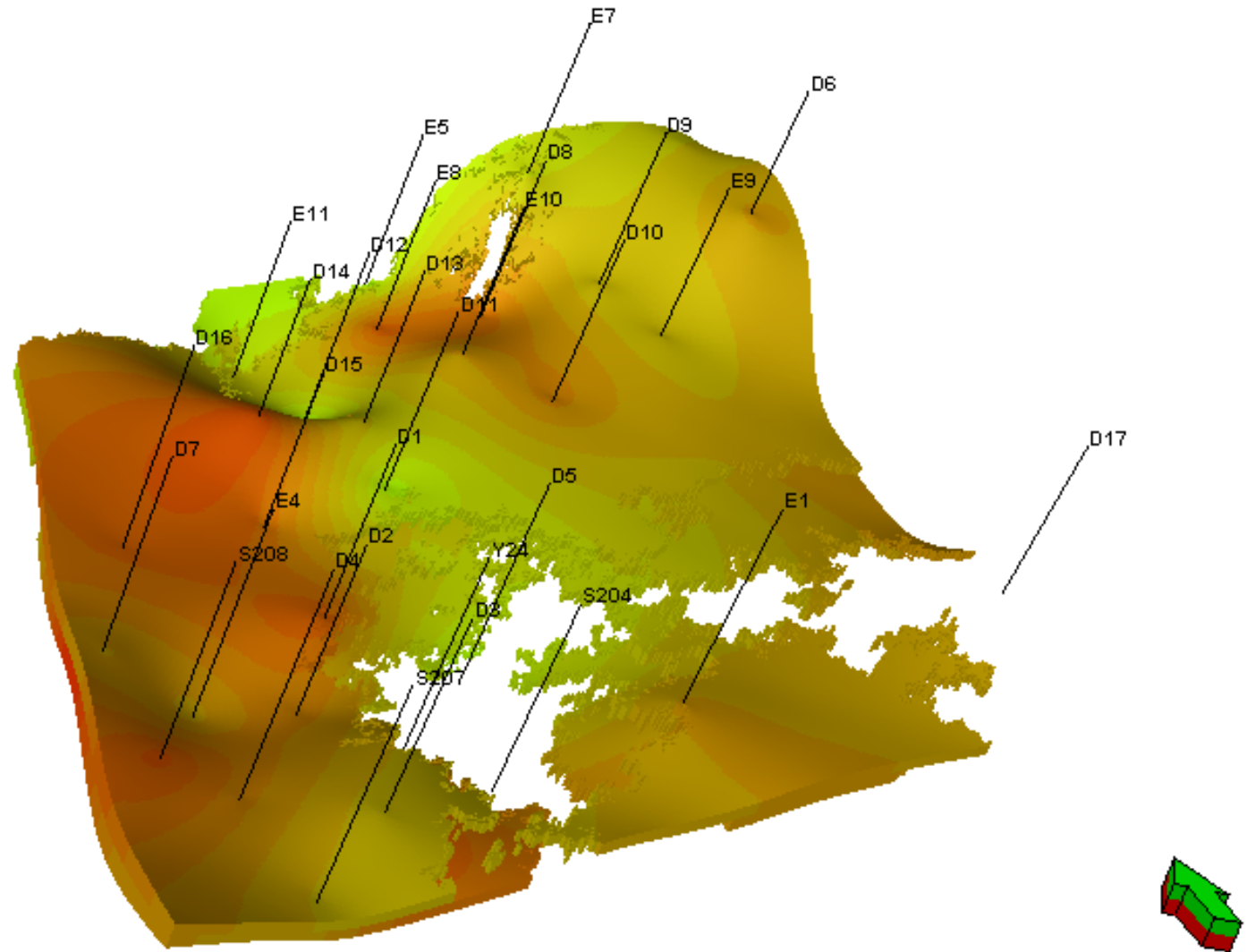
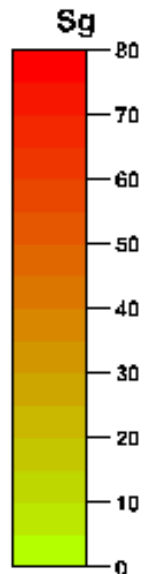
二

建模基本步骤

三

建模的策略





含油饱和度分布



- 现代油藏管理的两大支柱是油藏描述和油藏模拟。油藏描述的最终结果是油藏地质模型，而油藏地质模型的核心是储层地质模型，即储层属性的三维分布模型。
- 储层模型包括构造模型、储层属性分布模型及流体分布模型。



- 从本质上讲，三维储层建模是从三维的角度对储层进行定量的研究并建立其三维模型，其核心是对井间储层进行多学科综合一体化、三维定量化及可视化的预测。



一、储层地质模型的类型

储层离散属性模型

储层相模型（储层结构模型）

流动单元模型

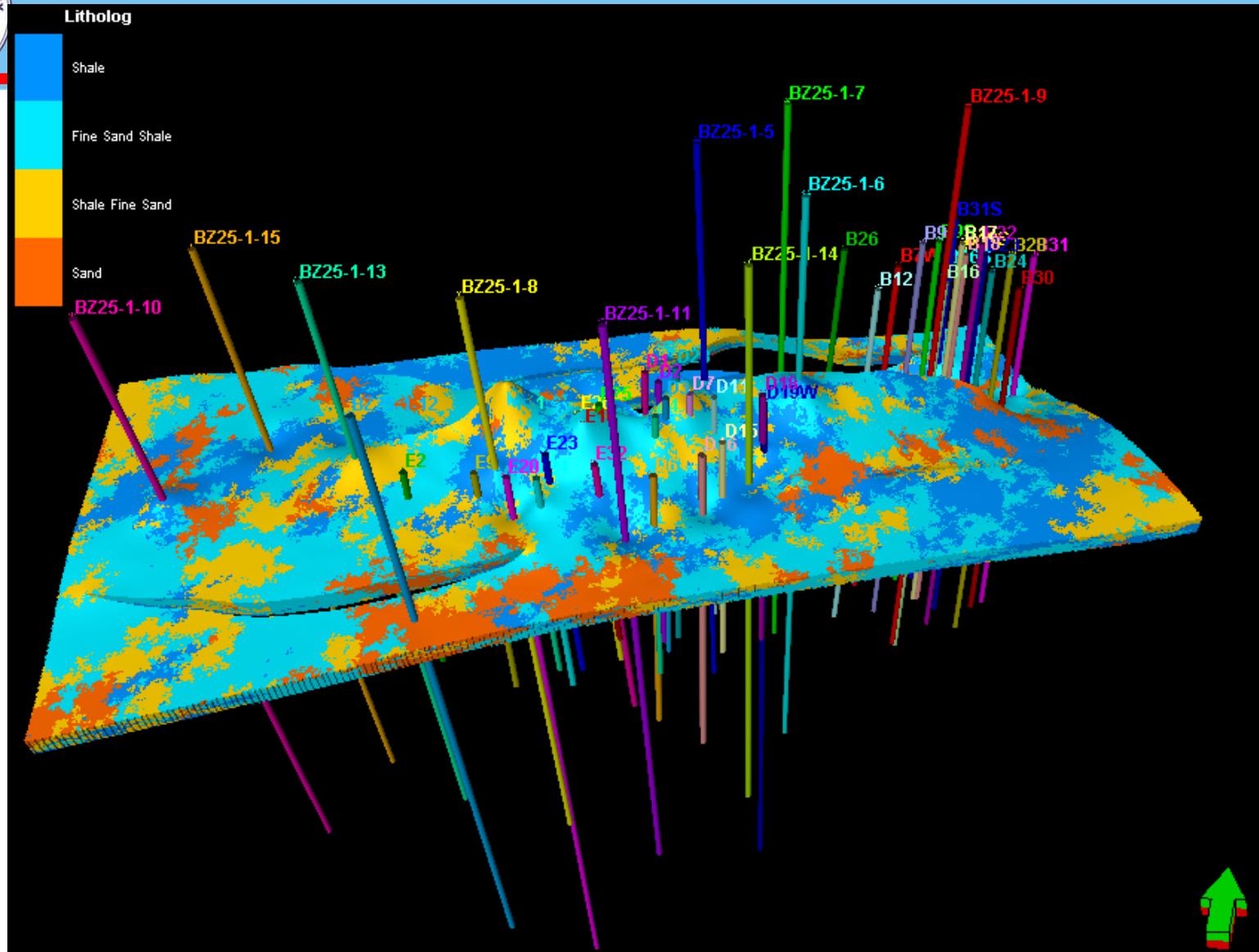
裂缝分布模型

储层参数模型

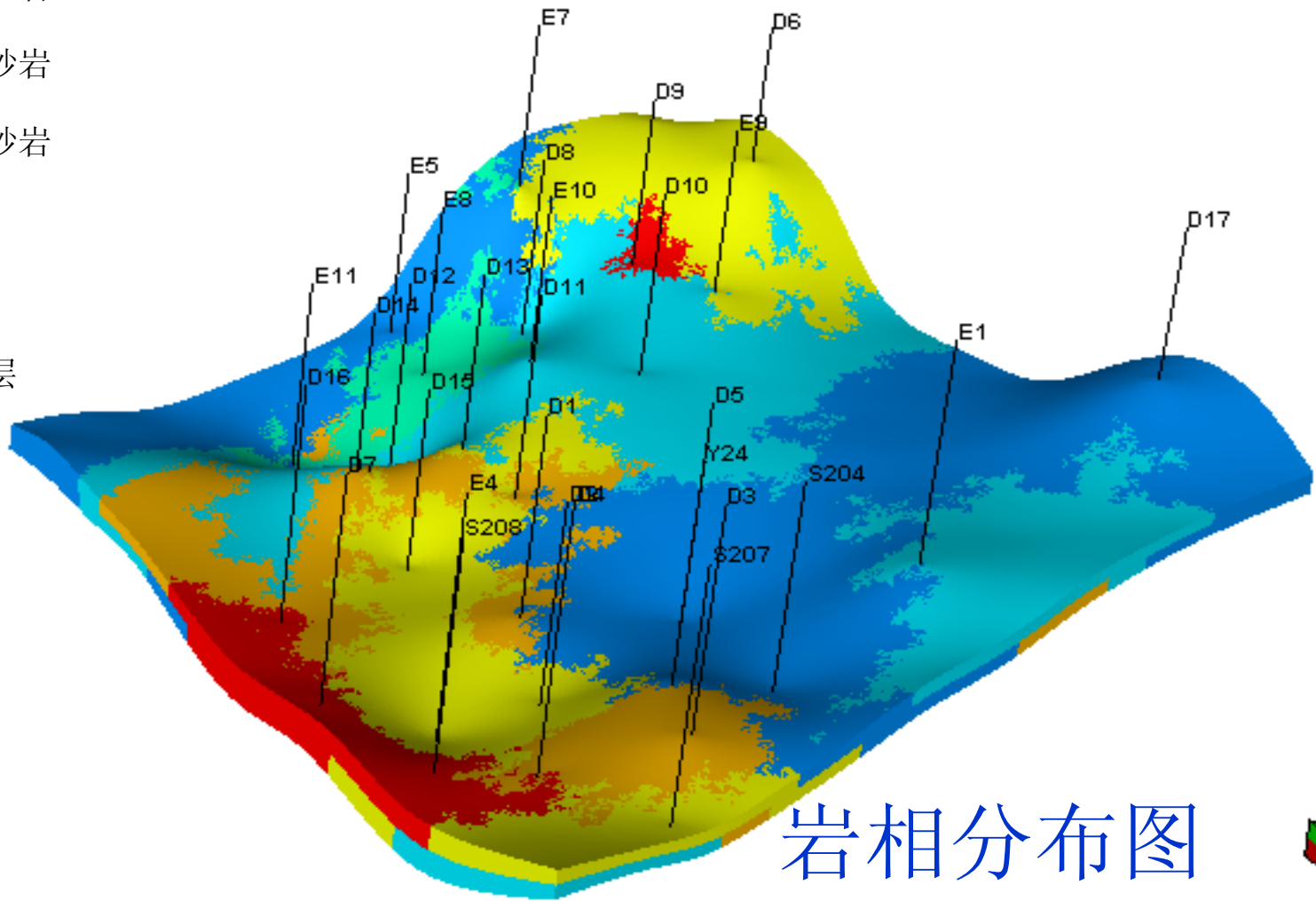
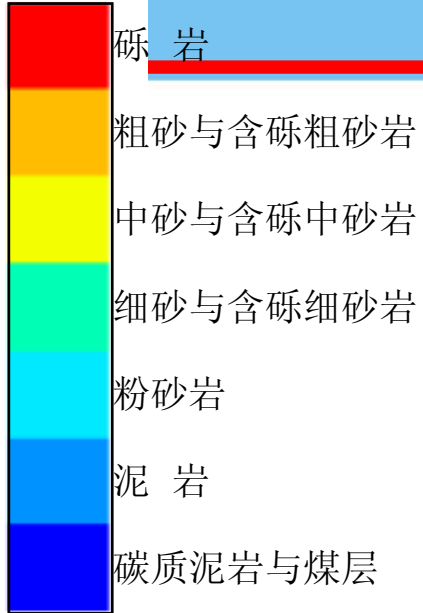


1 沉积相模型

- 沉积相模型为储层内部不同相类型的三维空间分布。该模型能定量表述储集砂体的大小、几何形态及其三维空间的分布，实际上为储层结构模型。



岩相分布模型



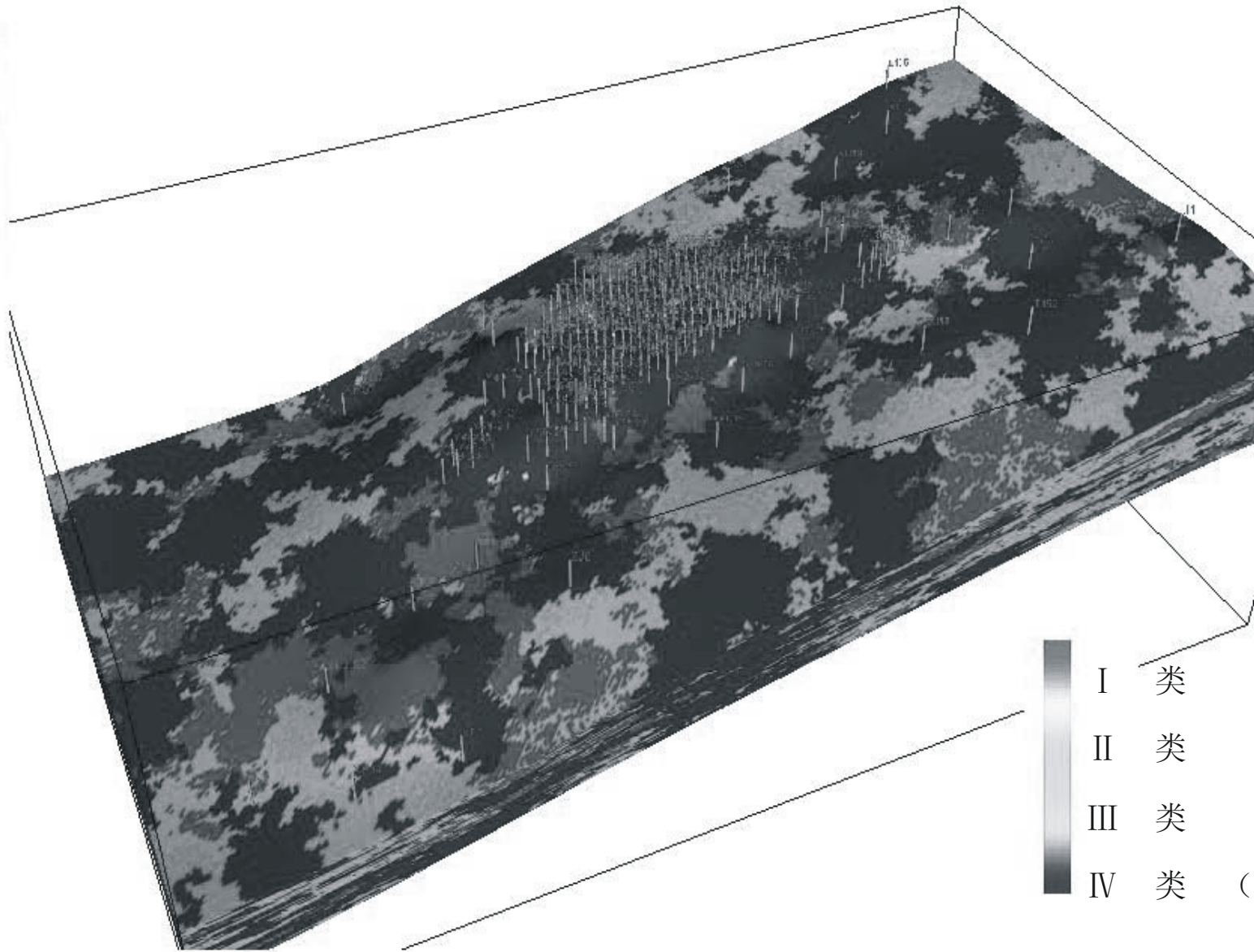


2 流动单元模型

- 所谓流动单元是指根据影响流体流动的地质参数（如渗透率、孔隙度、 K_v/K_h 比、非均质系数、毛细管压力等）在油藏储层中进一步划分的纵横向连续的储集带。在该带中，影响流体流动的地质参数在各地都相似，并且岩层特点在各地也相似。不同的流动单元具有不同的流体流动特征及生产性能。



- 流动单元模型是由许多流动单元块体镶嵌组合而成的模型，属于离散模型的范畴。该模型既反映了单元间岩石物性的差异和单元间边界，又突出地表现了同一流动单元内影响流体流动的物性参数的相似性，这对油藏模拟及动态分析有很大的意义，对预测二次采油和三次采油的生产性能十分有用。



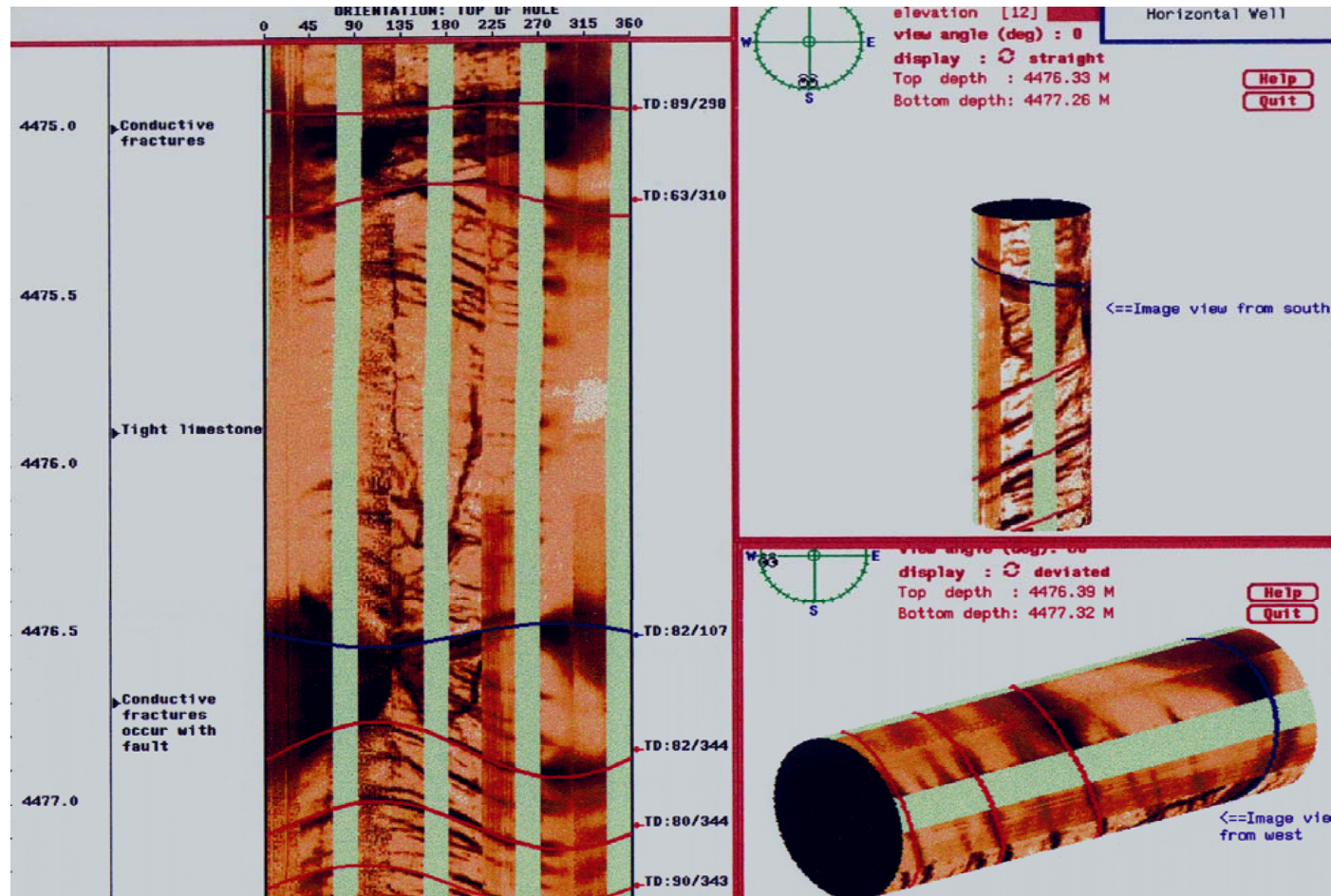


3 裂缝分布模型

- 裂缝和孔隙的渗透率差异很大。在注水开发过程中，当裂缝从注水井延伸到采油井时，注入水很易沿裂缝窜入油井，造成油井暴性水淹，从而使油田含水率上升很快而采出程度很低。裂缝分布模型可分为二类，
- 其一为三维裂缝网络模型，表征裂缝类型、大小、形状、产状、切割关系及基质岩块特征等；
- 其二为二维裂缝密度模型，表征裂缝的发育程度。



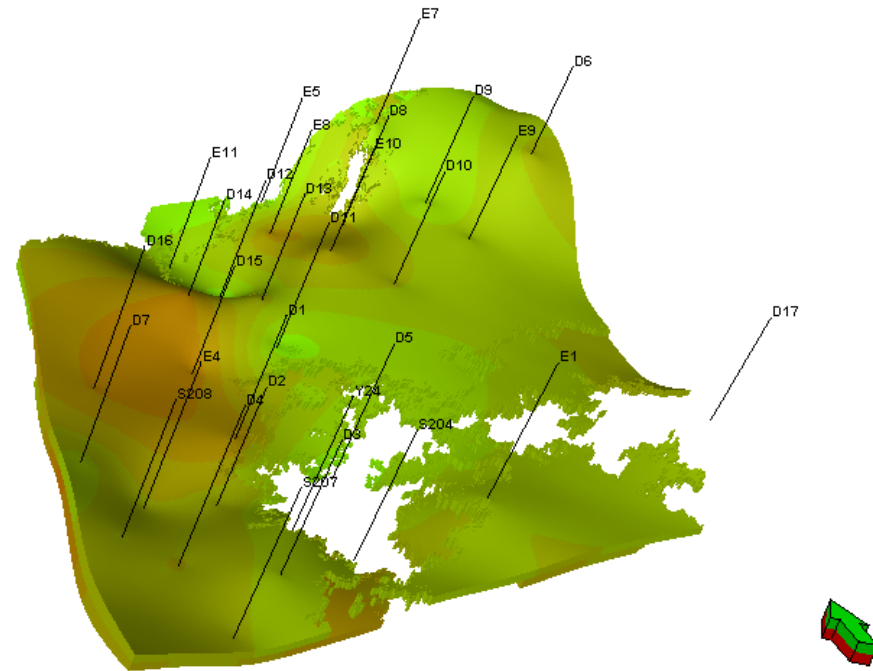
表征裂缝很难，必须借助测井、岩心录井等手段



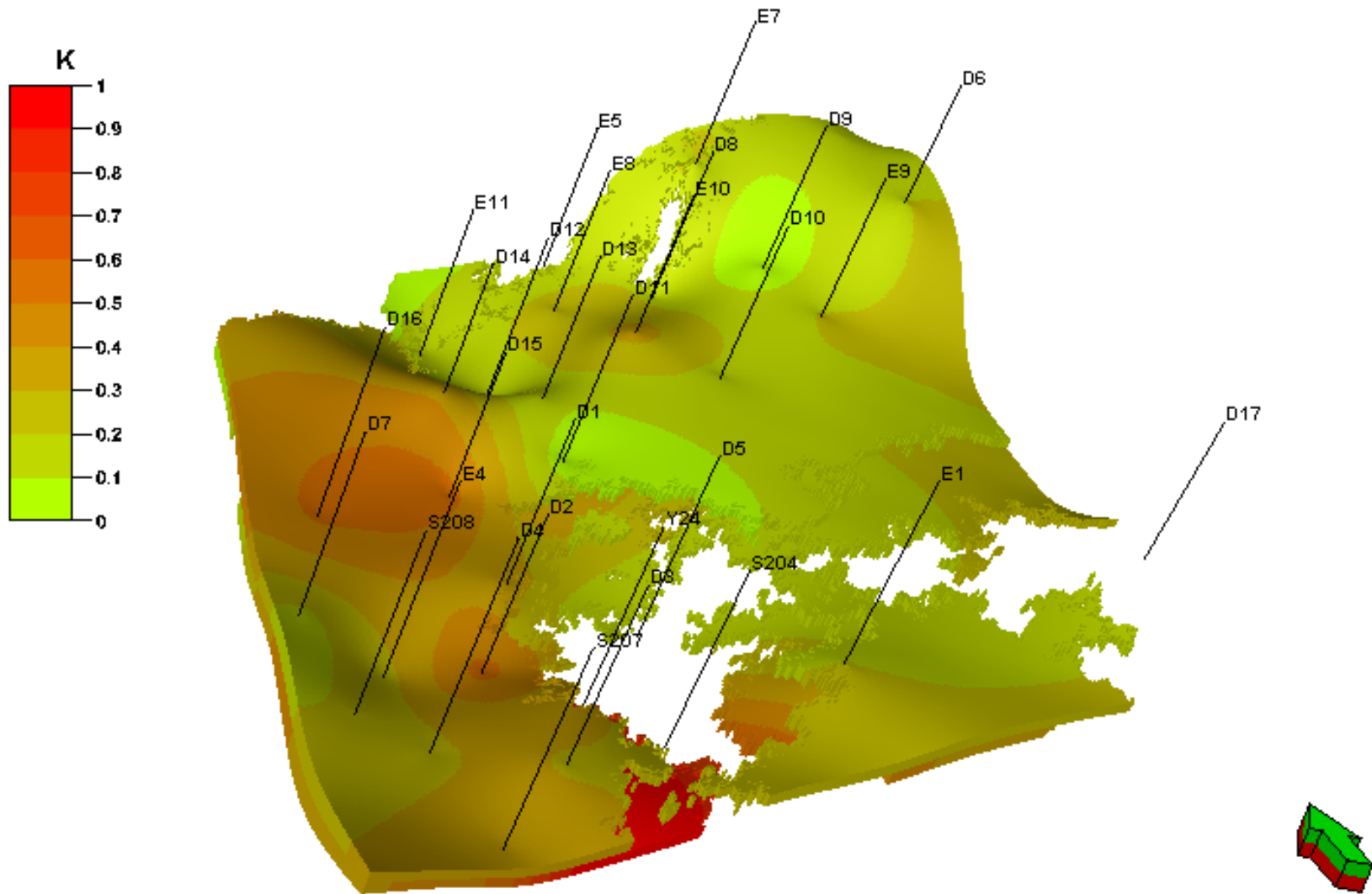


4 储层参数模型

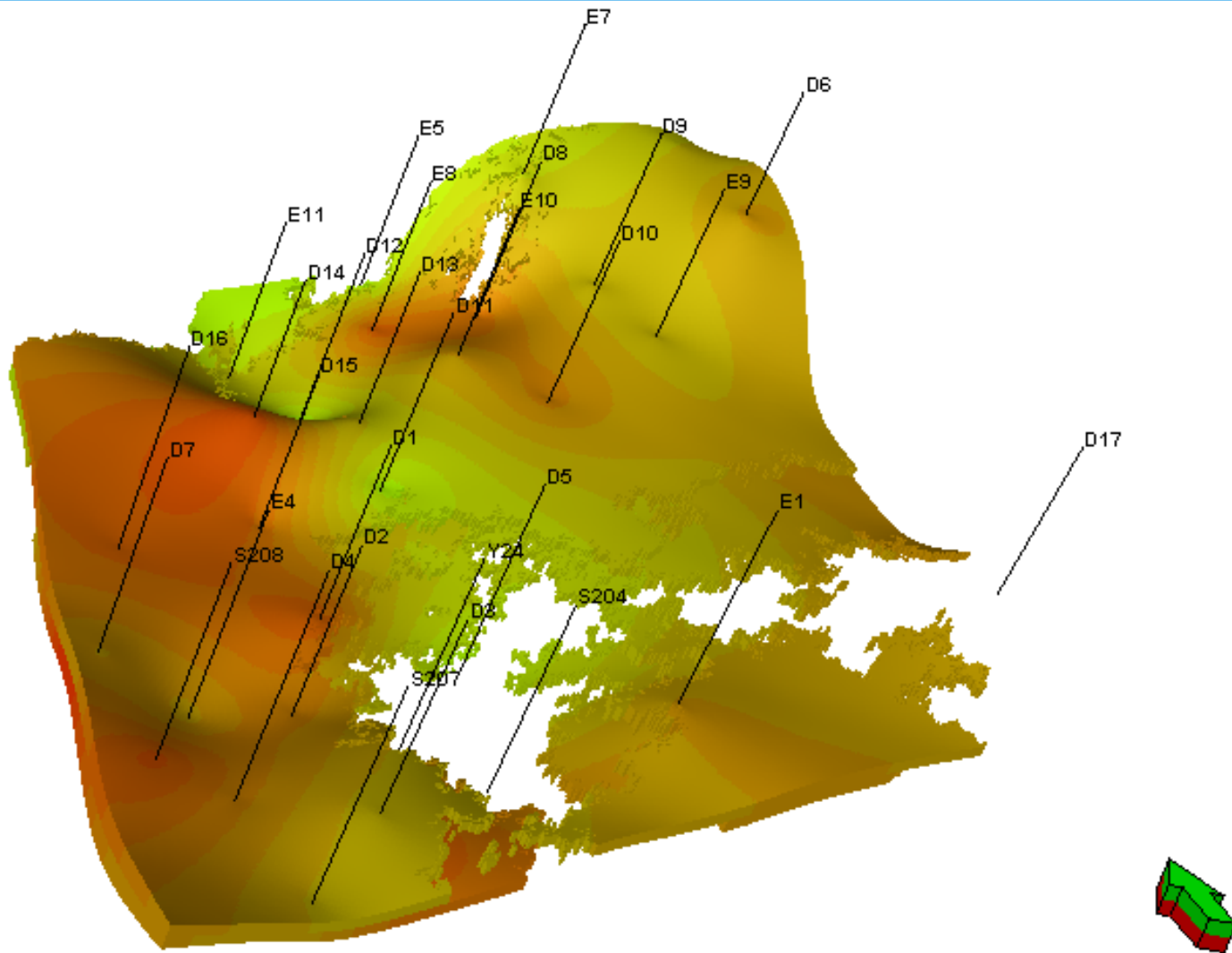
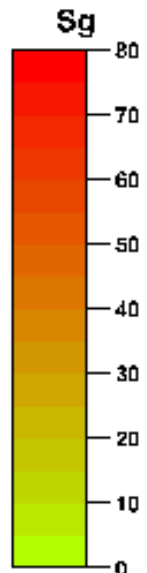
- 孔隙度、渗透率、含油饱和度等储层参数在三维空间上的变化和分布即为储层参数模型，属于连续性模型（continuous model）的范畴。
- 一般要建立三种参数的分布模型，即孔隙度模型、渗透率模型和含油（或含水）饱和度模型。



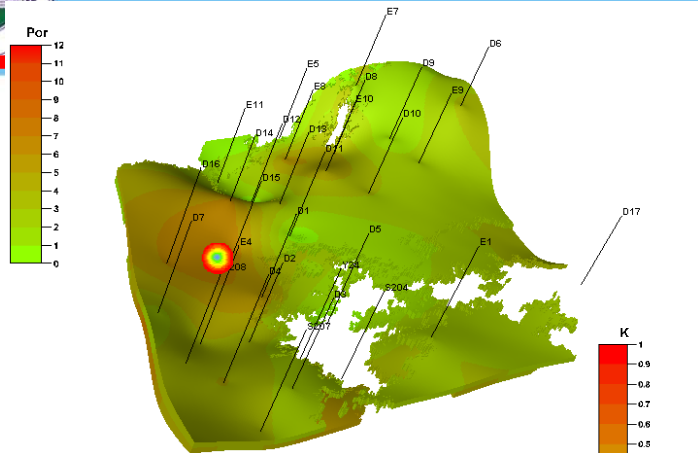
孔隙度模型



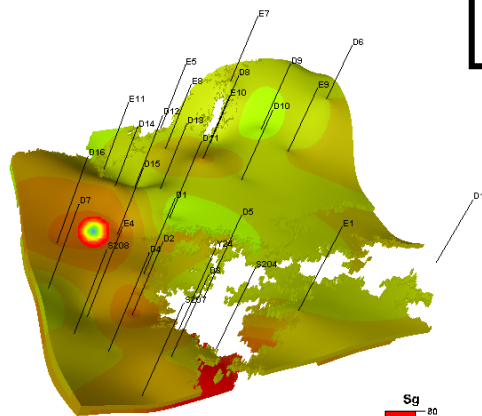
渗透率分布图



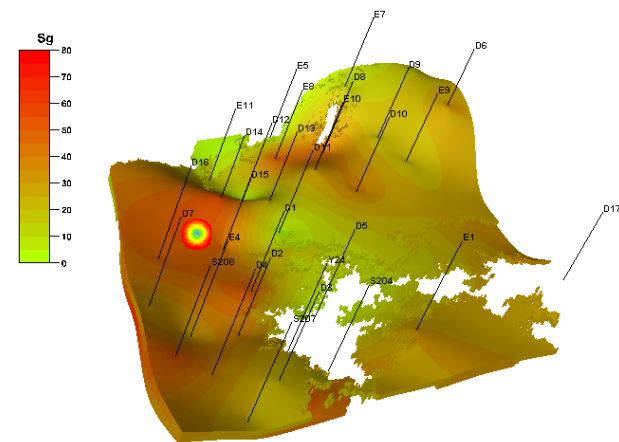
含气饱和度分布图



孔隙度模型



渗透率分布图

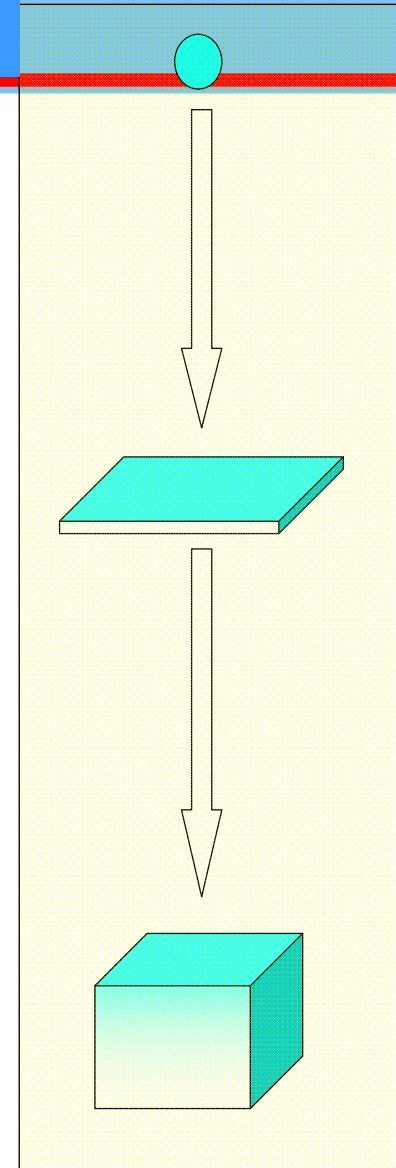
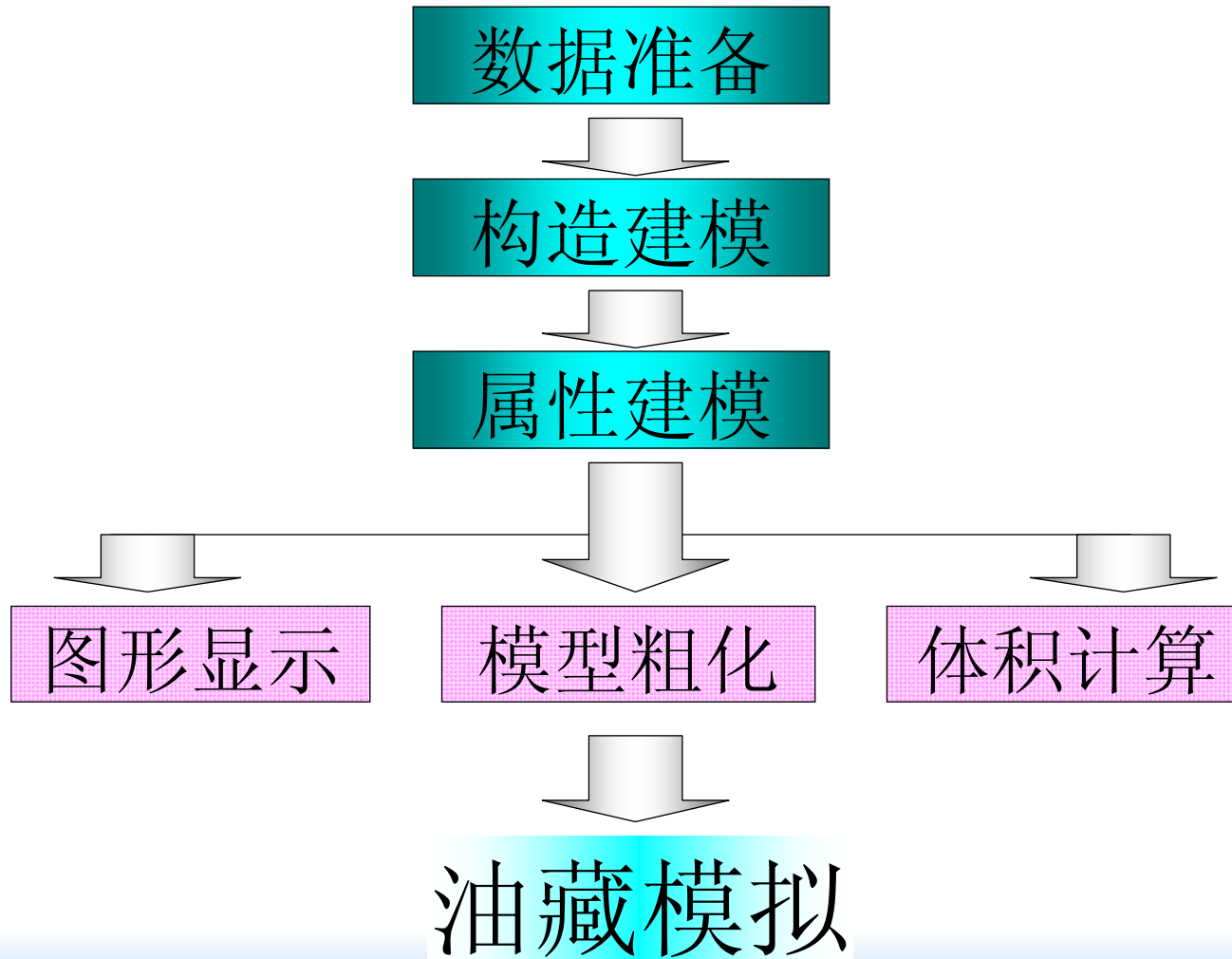


含气饱和度分布图

孔隙度、渗透率及含气饱和度高度的相关



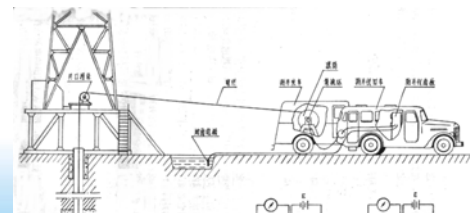
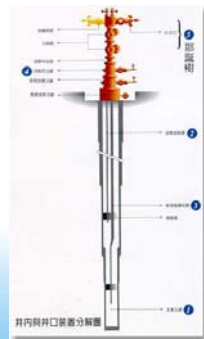
二、建模步骤





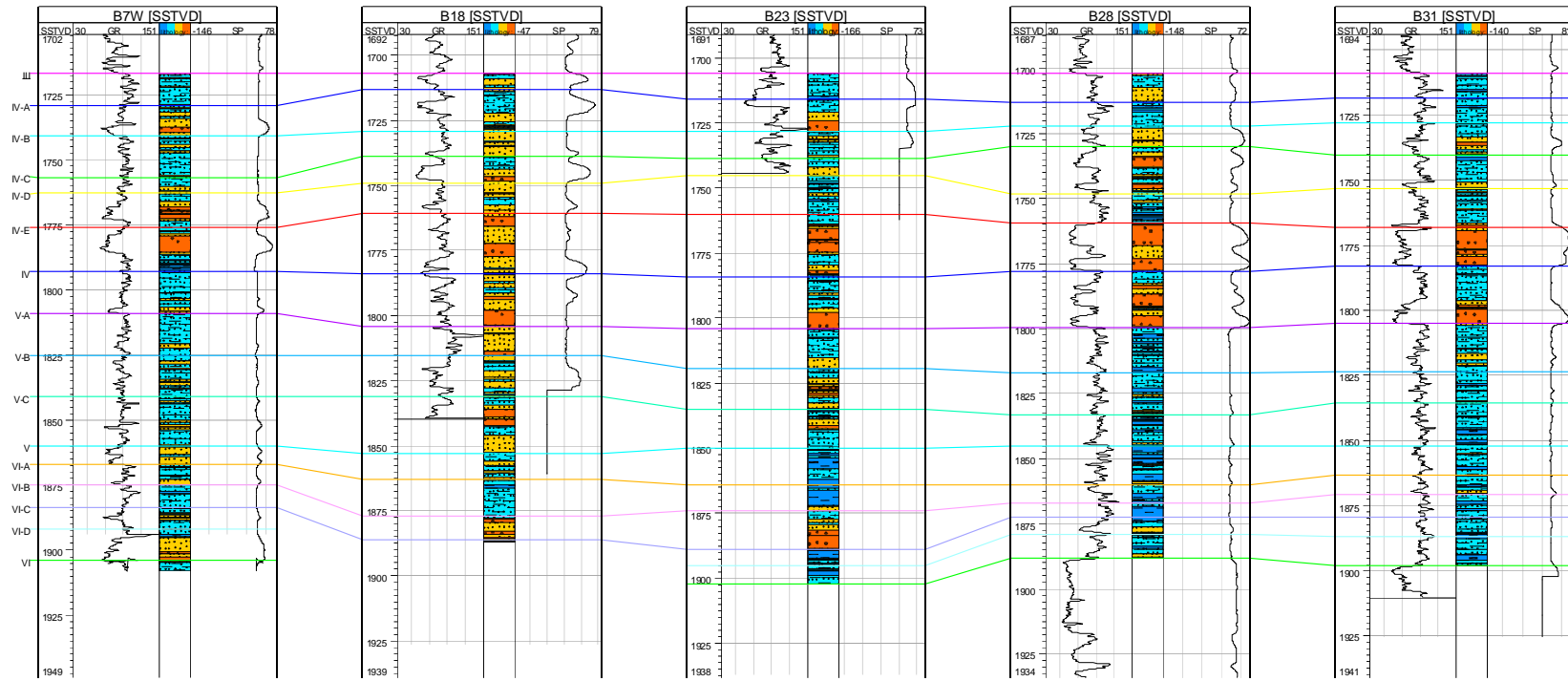
数据类型

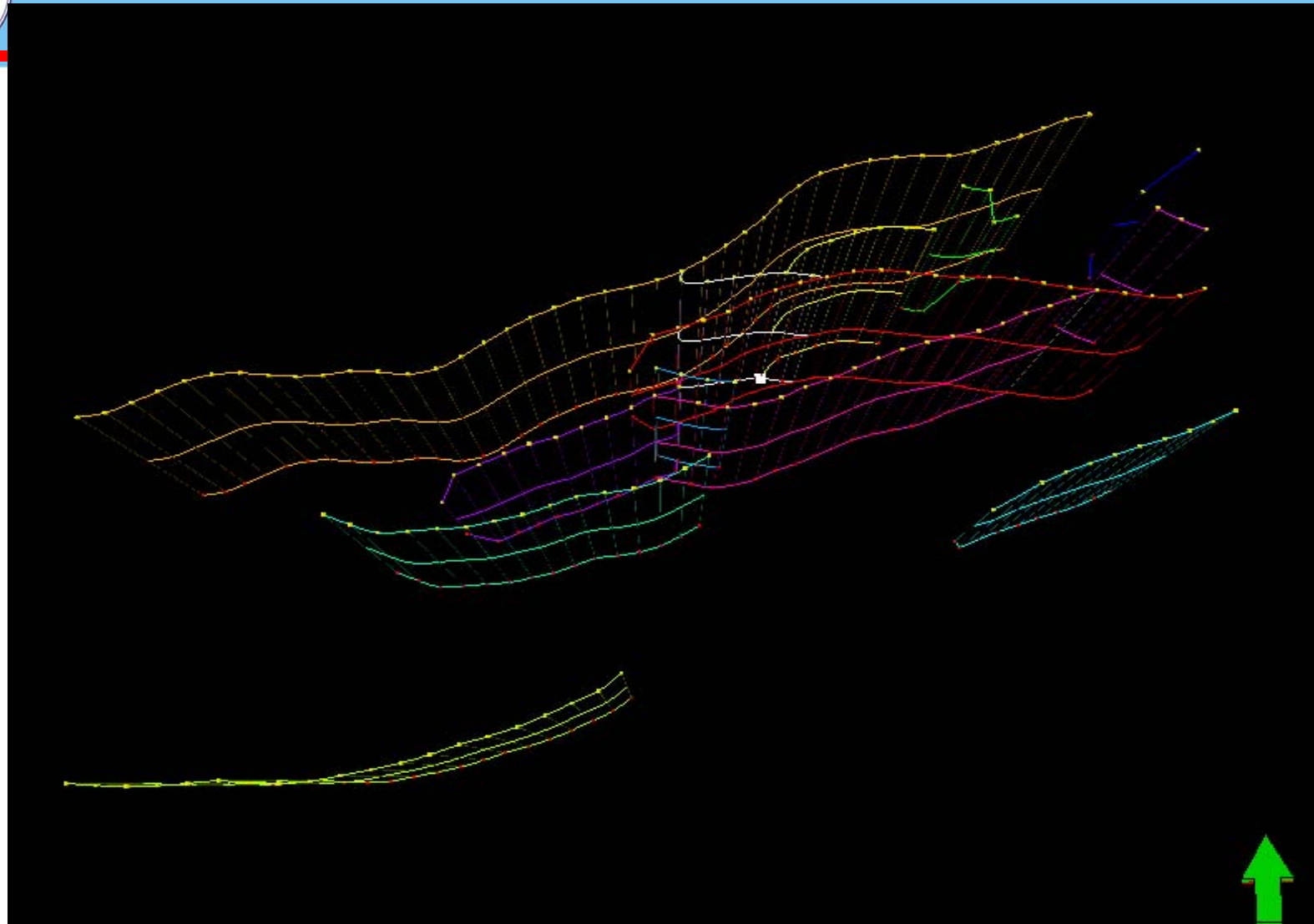
- 从建模内容来看，基本数据类型包括以下四类：
- （1）坐标数据：井位坐标、地震测网坐标等。
- （2）分层数据：各井的油组、砂组、小层、砂体的划分对比数据；地震资料解释的层面数据等。
- （3）断层数据：断层位置、断点、断距等。
- （4）**储层数据**：储层数据是储层建模中最重要的数据。包括**井眼**储层数据、**地震**储层数据和**试井**储层数据。



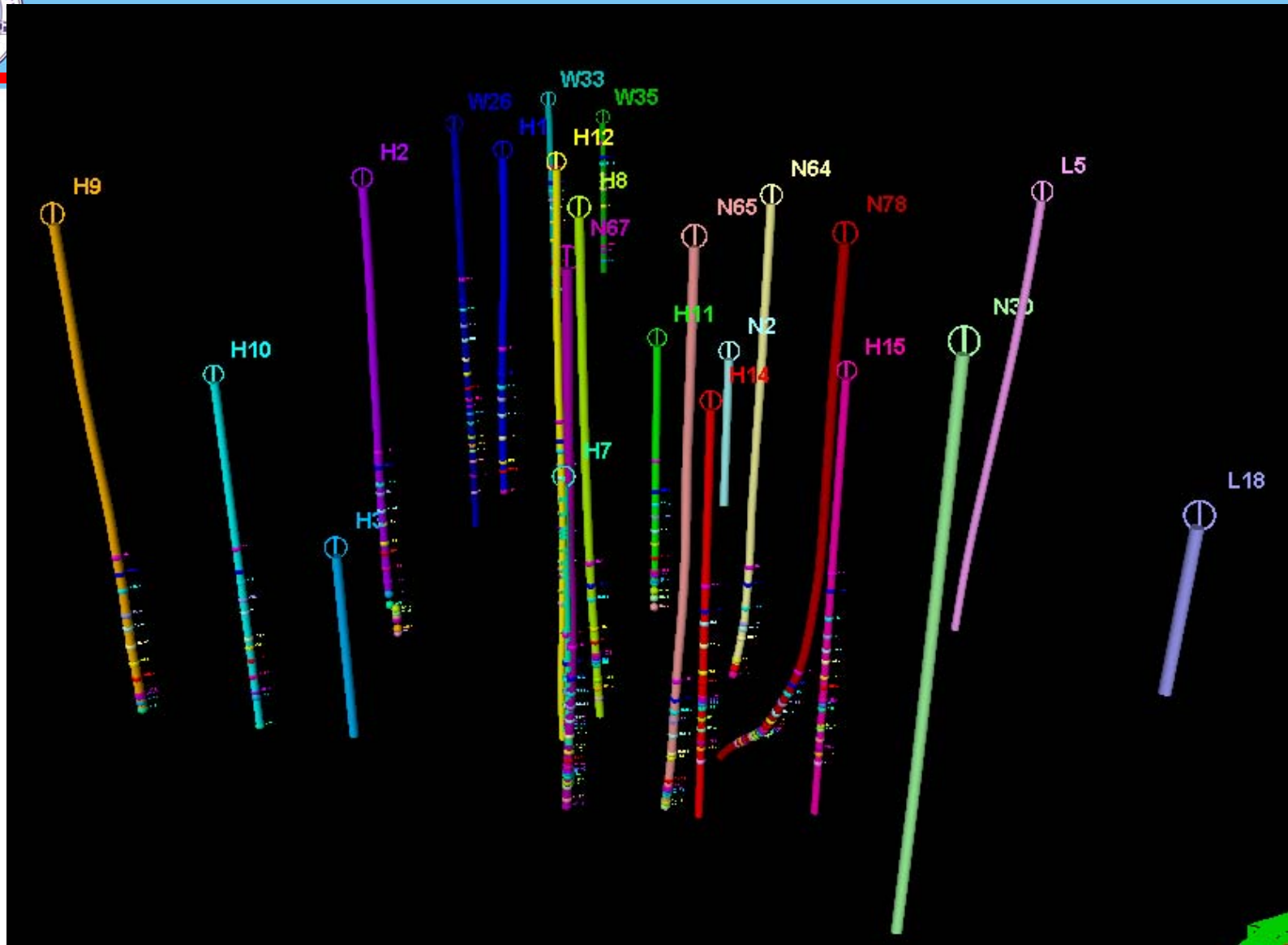


- 井眼储层数据为岩心和测井解释数据，包括井内相、砂体、隔夹层、孔隙度、渗透率、含油饱和度等数据，这是储层建模的硬数据,即最可靠的数据；
- 地震储层数据主要为速度、波阻抗、频率等数据，为储层建模的软数据,可靠程度相对较低。
- 试井储层数据，其一为储层连通性信息，可作为储层建模的硬数据，其二为储层参数数据，因其为井筒周围一定范围内的渗透率平均值，精度相对较低，一般作为储层建模的软数据。





断层建模中的断层组合

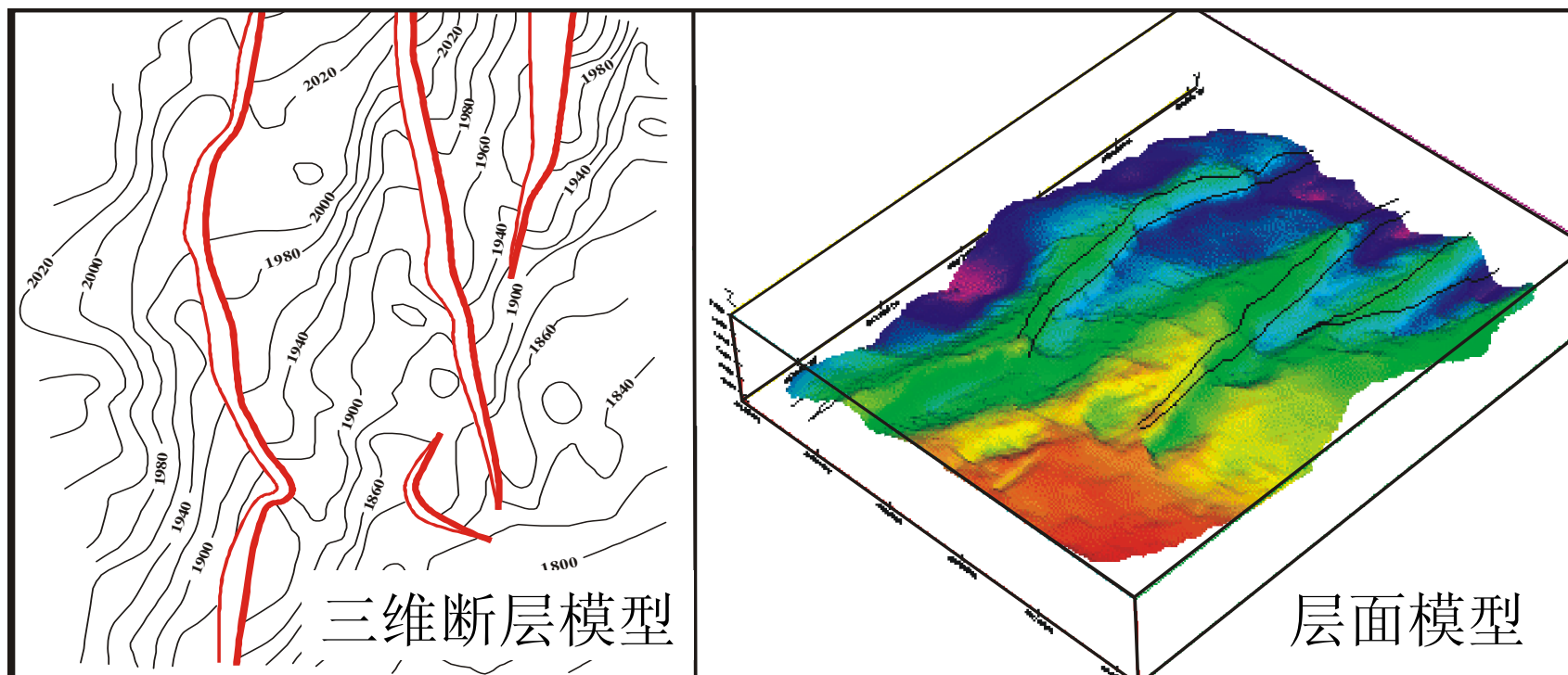


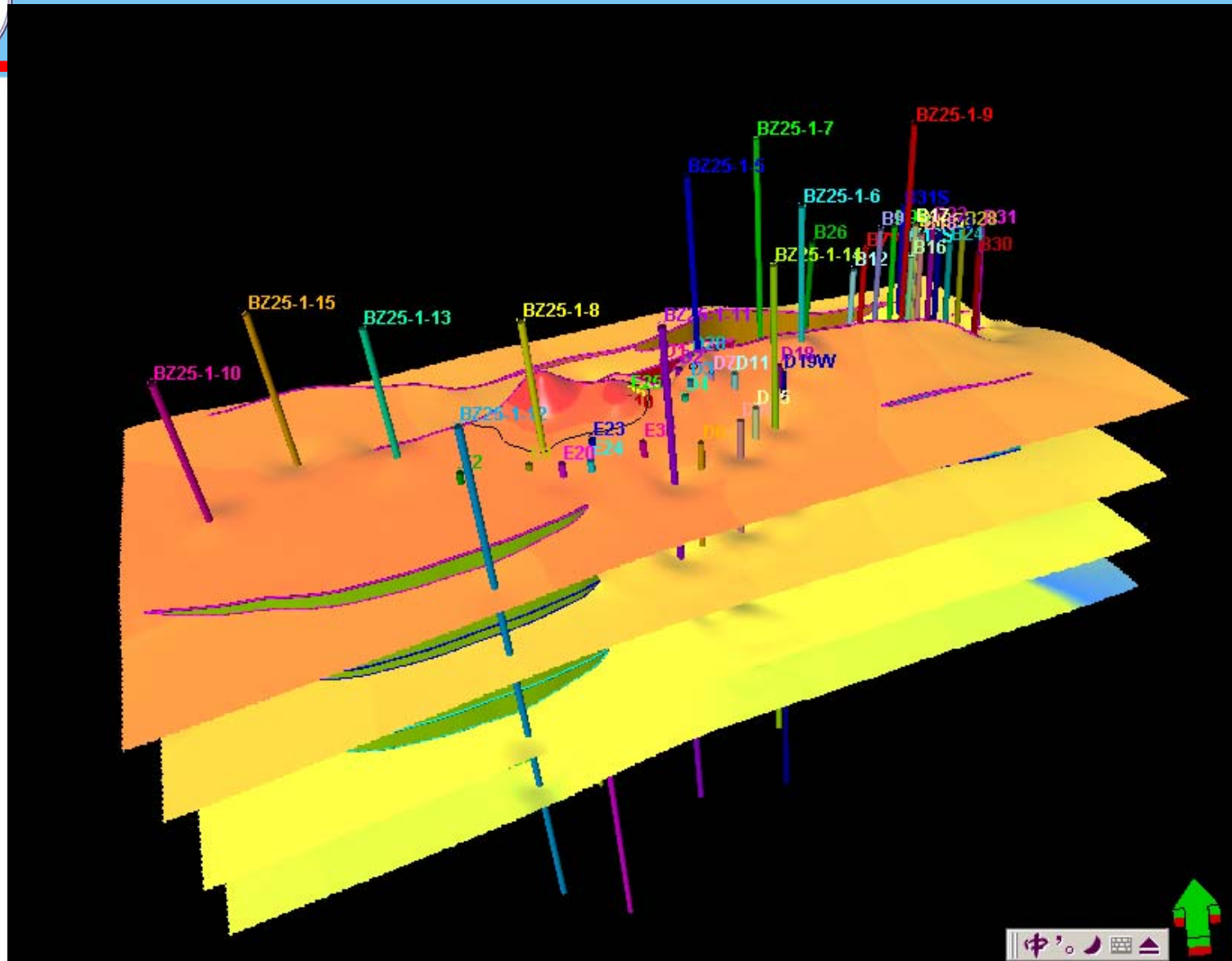
某油田井位轨迹及其分层显示图



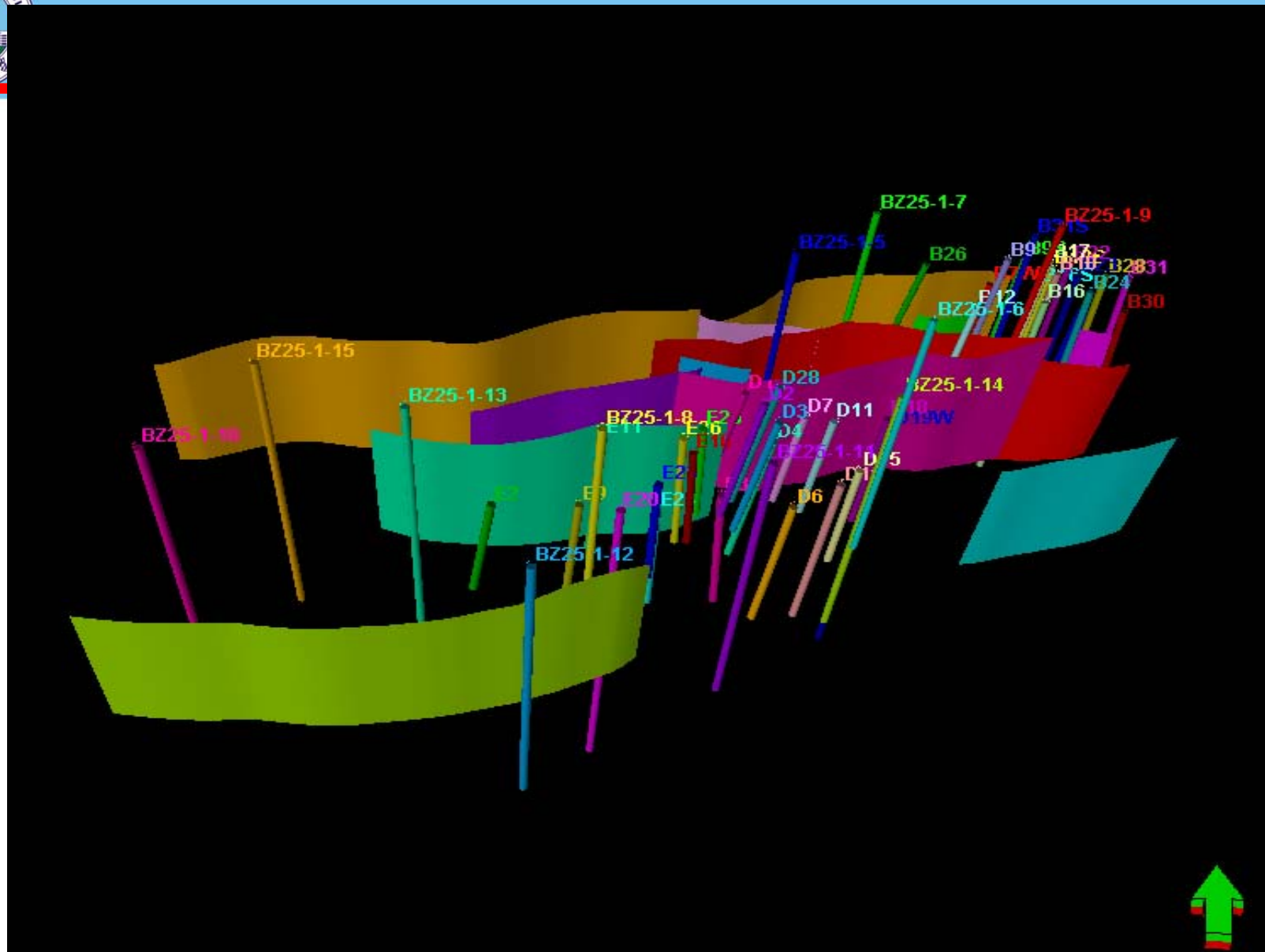
构造模型

- 由断层模型和层面模型组成。叠合的层面模型即为地层格架模型。



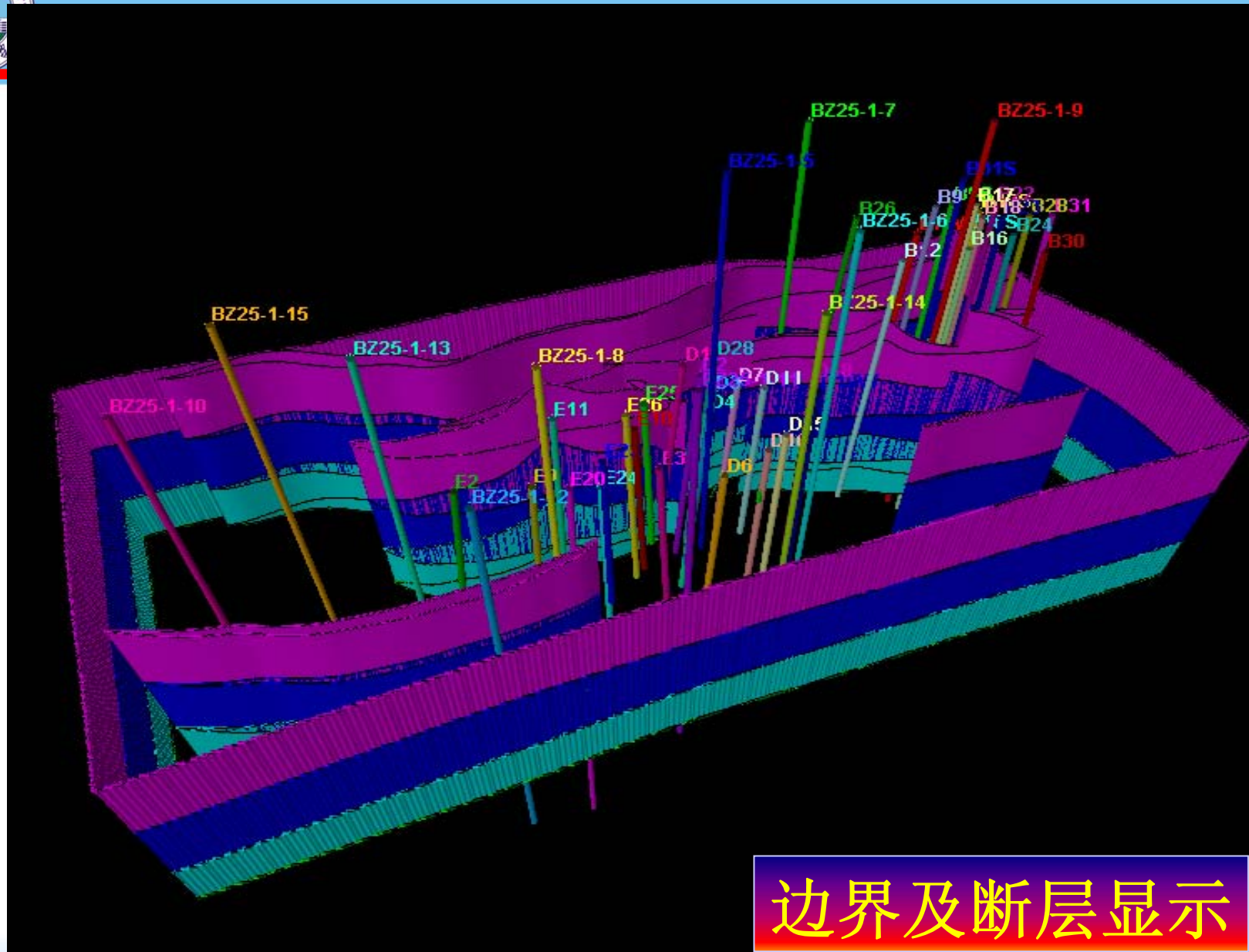


层面模型



断层建模结果显示

地球科学学院 3RG 尹太举 2009



边界及断层显示



储层属性建模

- 是在构造模型基础上，建立储层属性的三维分布。储层属性包括离散的储层性质（沉积相、储层结构、流动单元、裂缝等），以及连续的储层参数（孔隙度、渗透率及含油饱和度等）。
- 对构造模型进行三维网格化之后，利用井数据和地震数据，按照一定的插值（或模拟）方法对每个三维网格进行赋值，建立储层属性（离散和连续属性）的三维数据体，即储层数值模型。



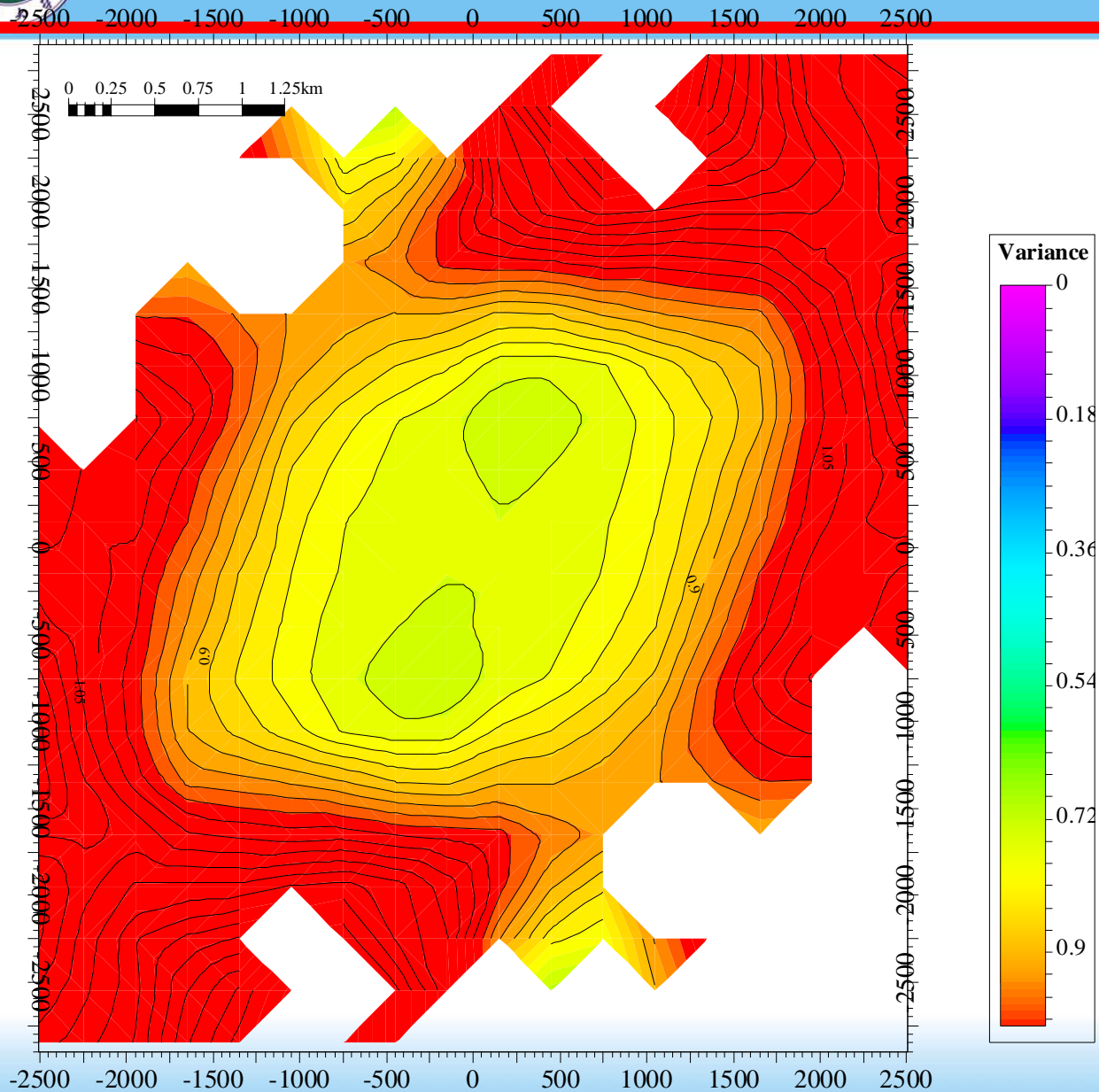
- **赋值方法**方法很多，就井间插值（或模拟）而言，有传统的插值方法（如中值法、距离平方反比加权法等）、各种克里金方法、各种随机模拟方法等。不同的赋值方法将产生不同精度的储层模型。因而，建模方法的选择是储层建模的关键。



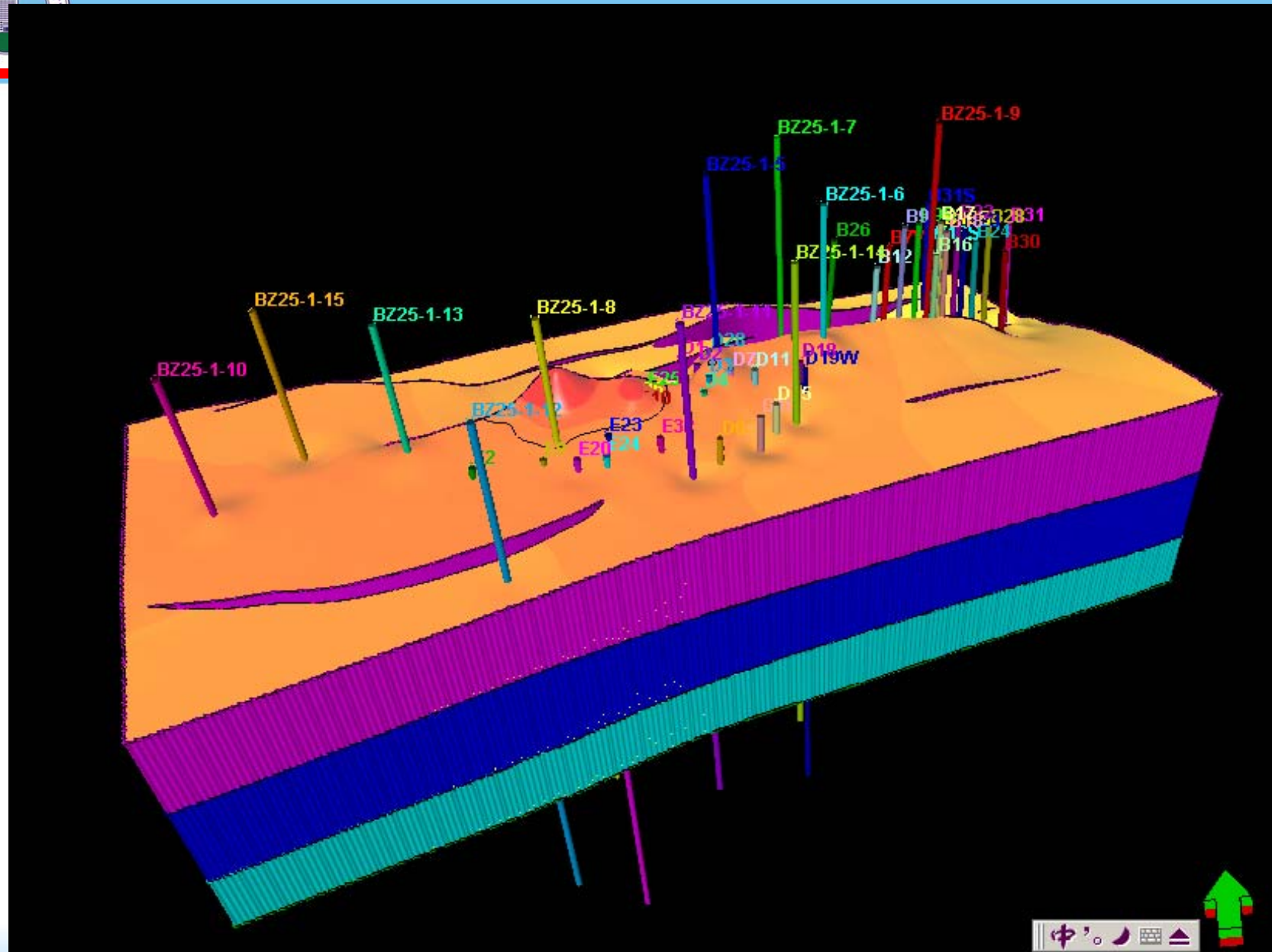
- 三维空间赋值所建立的是数值模型，即三维数据体。对此可进行图形变换，以图形的形式显示出来。现代计算机技术可提供十分完美的三维图形显示功能，通过任意旋转和不同方向切片以从不同角度显示储层的外部形态及其内部特点。地质人员和油藏管理人员可据此三维图件进行三维储层非均质分析和进行油藏开发管理。



Var.map from Lithologies



岩性变化方向统计图。
图中显示研究区岩相主要沿偏北45°方向分布





体积计算

- 储层建模的重要目的之一是进行油气储量计算。根据三维储层模型，可计算：
 - (1) 地层总体积；
 - (2) 储层总体积以及不同相（或流动单元）的体积；
 - (3) 储层孔隙体积及含烃孔隙体积；
 - (4) 油气体积及油气储量；
 - (5) 连通体积（连通的储层岩石体积、孔隙体积及油气储量）；
 - (6) 可采储量。



模型粗化

- 由于目前计算机内存和速度的限制，动态的数值模拟不可能处理太多的节点，因此，需要对地质模型进行粗化。
- 模型粗化（Upscaling），亦称均质化（Homogenisation），是使细网格的精细地质模型“转化”为粗网格模型的过程。
- 粗化方法很多，有各种平均方法（算术平均法、调和平均法、几何平均法、指数平均法、调和—算术平均法、算术—调和平均法等）、归一化方法、流动模拟法（包括对角张量和完全张量方法）等。
- 模型粗化后，即可直接进入模拟器进行油藏数值模拟。



三、建模策略

确定性建模与随机建模

等时储层建模

成因控制储层相建模

相控储层建模



- 储层建模有两种基本途径，即确定性建模（Deterministic modeling）和随机建模（Stochastic modeling）。
- **确定性建模**是对井间未知区给出确定性的预测结果，即试图从具有确定性资料的控制点（如井点）出发，推测出点间（如井间）确定的、唯一的、真实的储层参数。



确定性建模

储层地震学方法

储层沉积学方法

地质统计学克里金方法

- 储层地震学方法主要是利用地震层速度、波阻抗、振幅与岩性、孔隙度的关系进行储层横向预测，建立岩性和物性的三维分布模型
- 储层沉积学方法主要是在高分辨率等时地层对比及沉积模式基础上，通过井间砂体对比建立储层结构模型
- 地质统计学克里金方法则以变差函数为工具进行井间插值而建立储层参数分布模型



- **随机建模**是指以已知的信息为基础，以随机函数为理论，应用随机模拟方法，产生可选的、等概率的储层模型的方法，亦即对井间未知区应用随机模拟方法给出**多种**可能的预测**结果**。通过各模型的比较，可了解由于资料限制而导致的井间储层预测的不确定性，以满足油田开发决策的需要。随机模型分为两大类：离散（discrete）和连续（continuous model）。随机建模方法主要有：变差函数，克里金估计法，序贯指示。



- 沉积地质体是在不同的时间段形成的。为了提高建模精度，在建模过程中应进行等时地质约束，即应用高分辨率层序地层学原理确定等时界面，并利用等时界面将沉积体划分为若干等时层。在建模时，按层（zone）建模，然后再将其组合为统一的三维沉积模型。针对不同的等时层输入不同建模参数，使所建模型能更客观地反映地质实际。



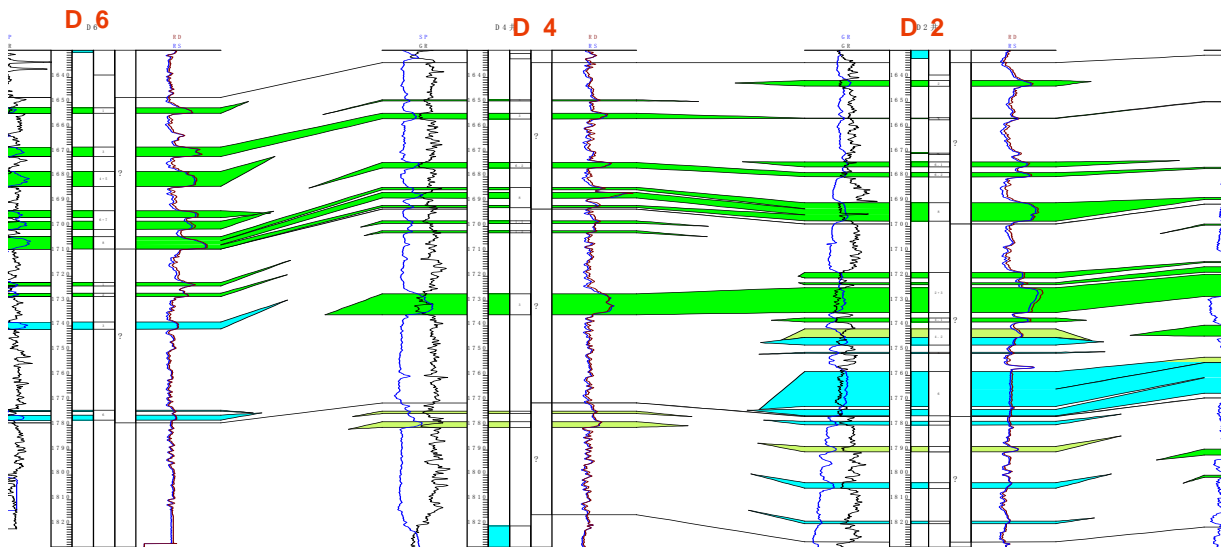
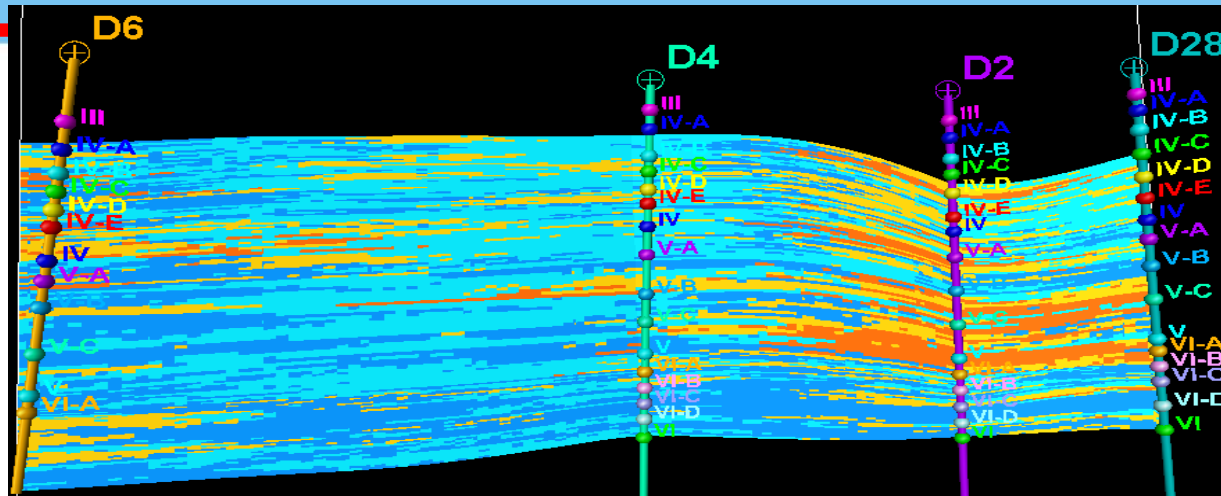
成因控制储层相建模

- 在相建模时，不论是确定性建模还是随机建模，均应充分应用层序地层学原理及沉积相模式来约束建模过程，即应用层序地层学原理确定等时界面及等时地层格架，并在由等时界面限制的模拟单元层（zone）内，依据一定的相模式（相序规律、砂体叠加规律、微相组合方式以及各相几何学特征）选取建模参数，进行沉积相的三维建模研究。



相控储层建模

- 对于具有多相分布或复杂储层结构（如拼合板状和迷宫状结构）的储层来说，应采用“相控建模”（facies-controlled modeling）或“二步建模”（two-stage modeling）方法，即首先建立沉积相、储层结构或流动单元模型，然后根据不同沉积相（砂体类型或流动单元）的储层参数定量分布规律，分相（砂体类型或流动单元）进行井间插值或随机模拟，建立储层参数分布模型。



建模剖面结果显示与实际钻井剖面吻合