





www.izy.cn



一次采油是依靠油藏的能量驱动采油（能量衰竭法），当能量衰竭后，绝大部分原油仍残留在油层中，这时如果运用注水或注气补充能量，可以大幅度提高开发效果。注水或注气采油称为二次采油法。三次采油是指向油层注入化学或气体溶剂，对油田进行第三次开采。提高采收率方法泛指注水开发以外的方法（不含一次采油），如热力采油、聚合物采油等。



提高采收率技术分类

- 化学驱：以聚合物驱和微乳液低界面张力驱为代表。
- 气驱：以二氧化碳驱为代表。
- 微生物采油：通过微生物降粘或微生物作用携油
- 热力驱：包括热蒸汽、蒸汽吞吐和火烧油层等技术
- 水平井技术：通过加长生产井段取油井高产



第十一章 提高采收率

第一节 热力采油的油藏地质分析

（一、稠油开发地质特点；二、蒸汽吞吐和蒸汽驱油概述；三、蒸汽吞吐和蒸汽驱油的油藏条件、）

第二节 聚合物驱油藏地质研究

（一、油藏物理性质对聚合物的影响；二、聚合物驱油藏筛选、三、实例）

第三节 水平井采油的地质分析

（一、概述、二、水平井的产能与直井的比较、三、水平井适用油藏条件分析）



第一节 热力采油的油藏地质分析

随着纵向渗透率非均质性的增强，采收率降低，开采效果变差，主要原因是由于油藏纵向存在非均质性。蒸汽驱时，高渗透层的吸汽能力强，注入蒸汽沿高渗透层过早突破，这种层间的差异越大，使得蒸汽驱的纵向波及效率越低，最终导致采收率降低。



一、稠油开发地质研究

- 稠油油藏具有埋藏浅、粘度大、胶结疏松、样品易散等特点。
- 热力采油法是指利用热能促使油层温度升高，降低原油粘度，从而达到提高采收率的目的。其机理包括加热使原油粘度降低，改善驱油效率，同时促进原油膨胀，此外通过蒸汽的蒸馏和溶剂的抽提作用，均可改善排驱效率。



不同韵律下的蒸汽驱开采效果表

油藏类型	生产指标	正韵律	复合韵律a	复合韵律b	反韵律
块状	生产时间(d)	2070	1933	1383	960
	采收率(%)	24.37	21.08	17.38	12.25
互层状	生产时间(d)	640	540	420	316
	采收率(%)	8.14	6.53	6.02	5.76
单层状	生产时间(d)	1368	1165	1190	650
	采收率(%)	21.98	18.66	19.85	10.72



反韵律油藏的驱油效果最差，正韵律油藏的蒸汽驱油效果最好，而复合油藏的蒸汽驱油效果介于两者之间。其主要原因在于，反韵律油层的高渗透层在油藏的上部，蒸汽超覆严重，使蒸汽纵向波及系数减小，导致蒸汽驱采收率降低；正韵律油藏的高渗透层在油藏的下部，削弱了蒸汽驱的超覆作用，提高蒸汽驱的纵向波及系数，从而提高了蒸汽驱采收率；复合韵律油藏将不同程度地削弱超覆作用，其波及效率将高于反韵律油藏。



稠油油藏地质研究内容

1. 构造：构造形态、断裂性质、分布，对油气水分布的影响等。
2. 储层：储层含油性、胶结物含量及成分、胶结程度、油层厚度、物性及含油性在平面上和纵向上的分布、隔层厚度与分布、粘土矿物成分及水敏性等
3. 流体：油气水分布、性质，特别是原油粘度随温度、压力的变化关系和在蒸汽开发过程中可能发生的各种变化。
4. 渗流特性：储层的水敏性、液体的相对渗透率、汽驱油效率等。
5. 压力和温度系统：地层压力分布及大小、地层破裂压力、地层温度等。



二、蒸汽吞吐和蒸汽驱油

热力采油法是开采稠油的重要方法。



蒸汽驱

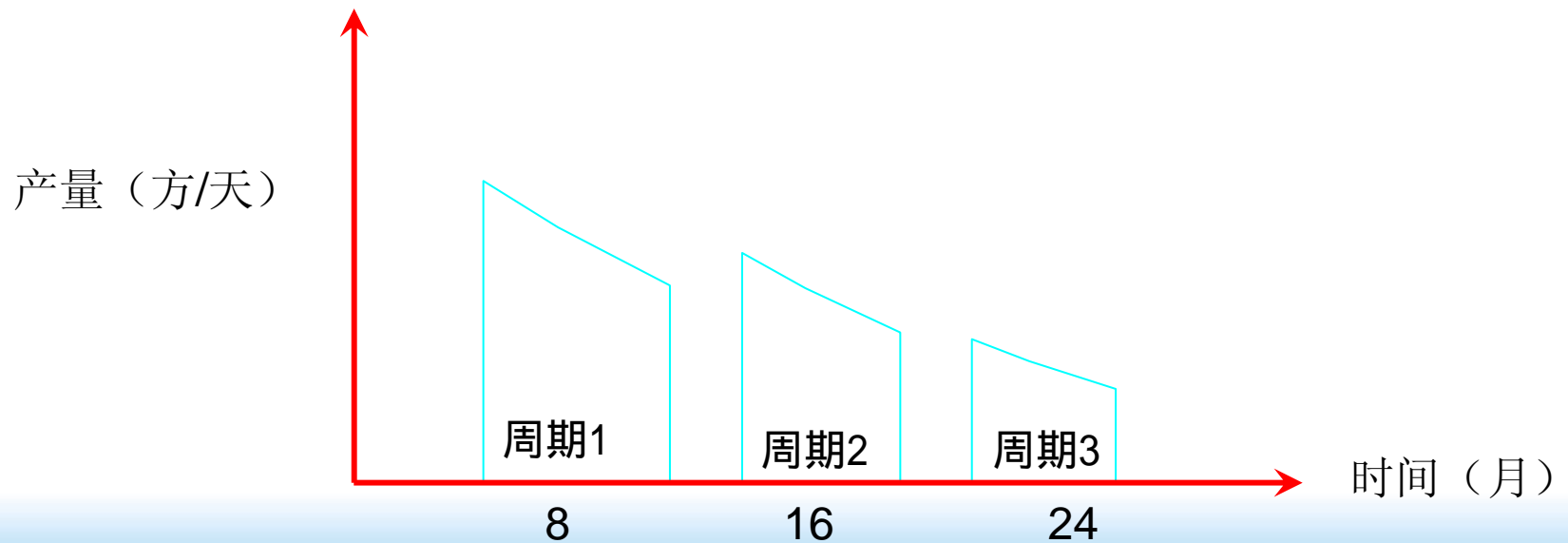
蒸汽吞吐

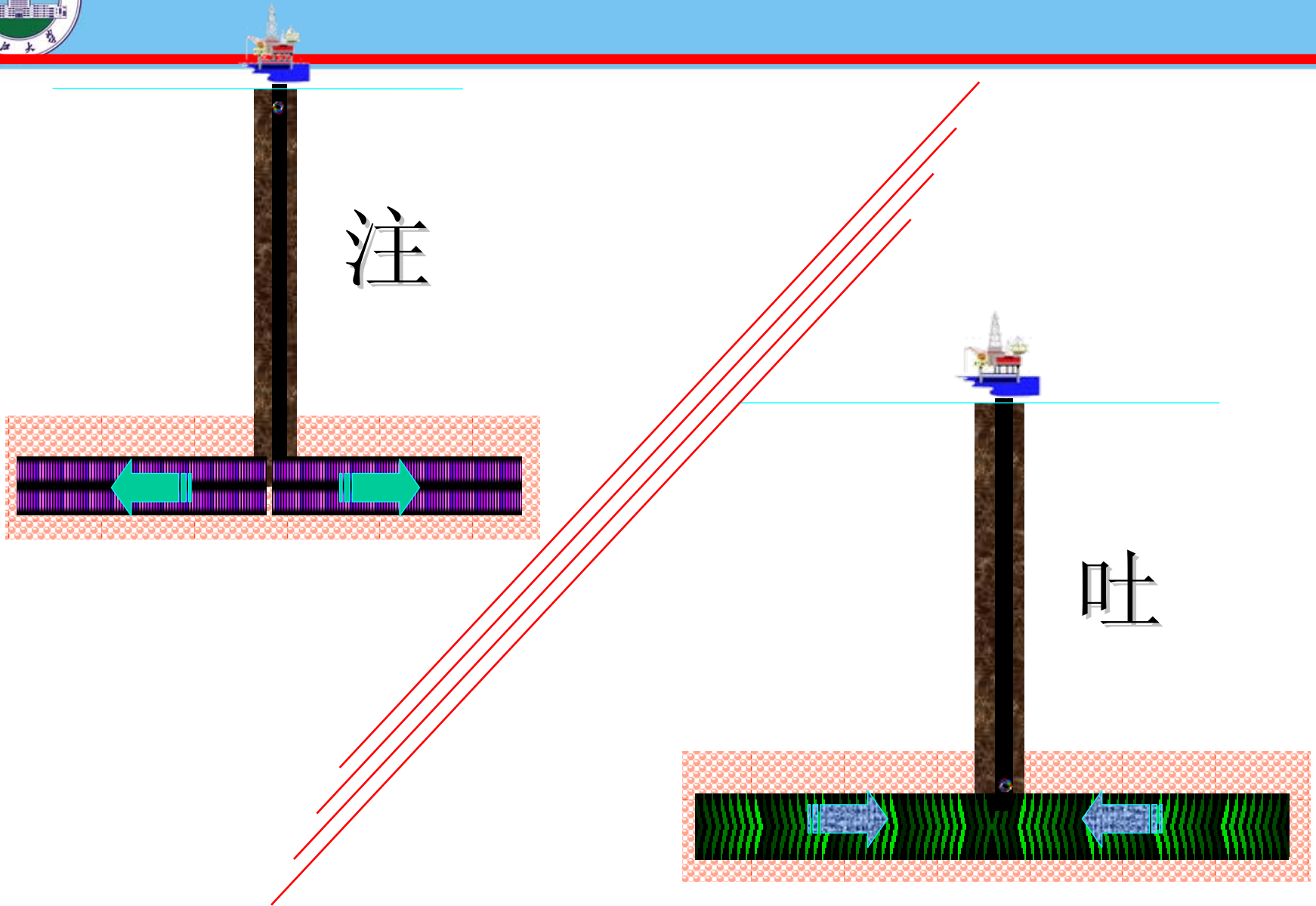
火烧油层

相对密度大于**0.934**;
粘度大于**100mPa.s**



蒸汽吞吐：又称循环注蒸汽或蒸汽浸泡，是向油层注几周的蒸汽（2—6周），在注蒸汽期间保持高的注入速度，然后关井几天，进行所谓的焖井，最后开井生产。这些井一般以较高的产量生产几个月或一年，这个过程构成一个循环。



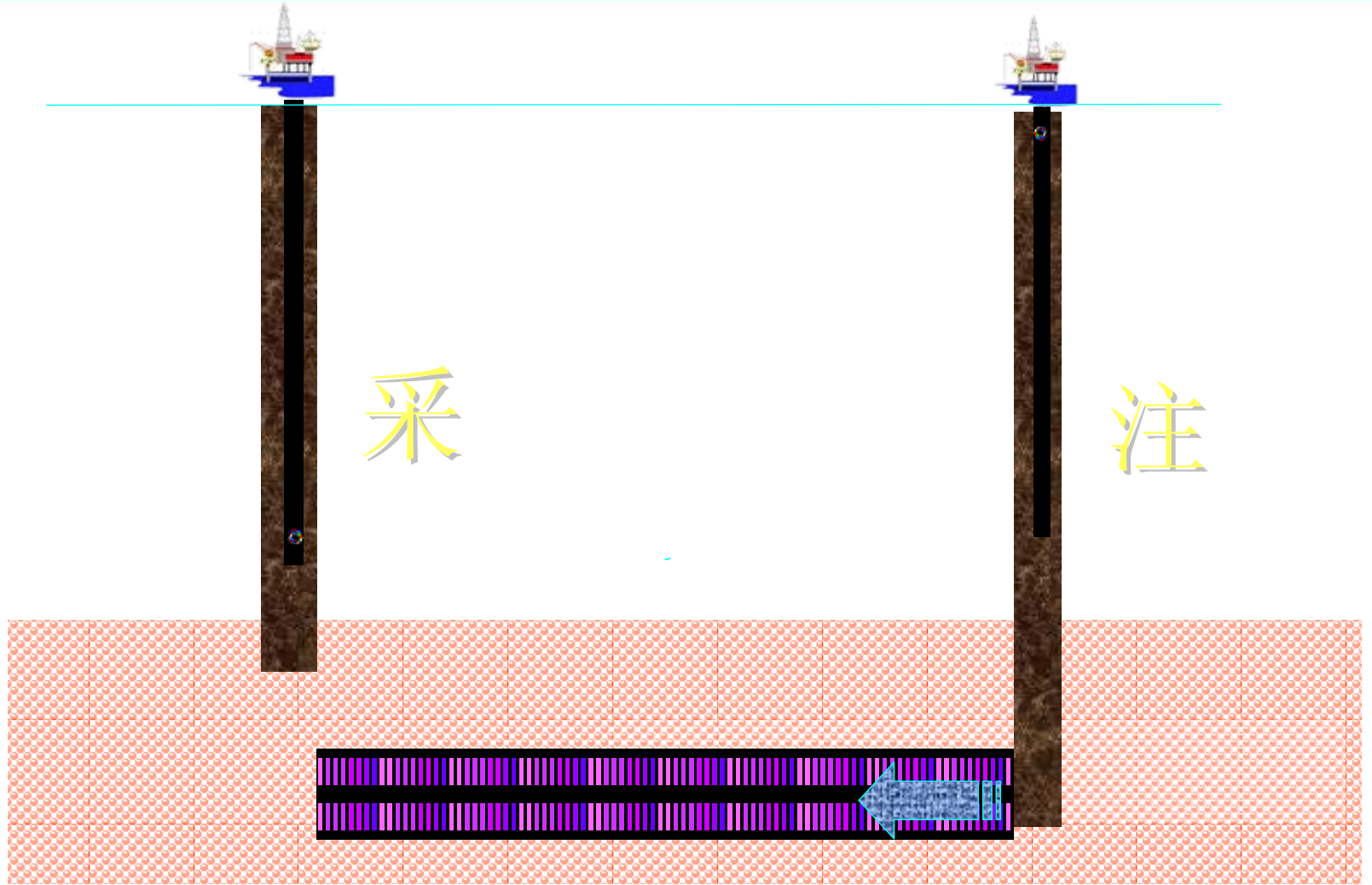




随着循环注蒸汽连续地进行，热量从井筒附近的加热带传导到离井筒较远的低温带，导致原油粘度大幅度降低，大大提高低温带的原油流动能力。开井生产后，井底附近的水蒸发成蒸汽会降低水的相对渗透率，此外，清除井筒及地层损害也是蒸汽吞吐增产的原因。



蒸汽驱油：是一种驱替式采油方法。以井组为基础，向注入井连续地注入蒸汽，蒸汽将油推向井底。注入油层的蒸汽在油层内扩散蔓延，将岩石及所含流体加热到蒸汽温度。原油的粘度可以降低到原来的千分之一，驱替效率相当好。一方水可以产生**100方蒸汽（压力1，4mPa）**。





蒸汽驱油机理可归纳为：

原油降粘改善流动性

原油热膨胀降低残余油饱和度

蒸汽蒸馏产生轻质烃

气驱效应（蒸汽和冷凝水驱替）

溶剂萃取效应

现场一般先进行蒸汽吞吐，然后进行蒸汽驱替。



三、蒸汽吞吐和蒸汽驱油的油藏条件

蒸汽吞吐适应的油藏： 蒸汽吞吐一般应考虑油藏下列参数：原油粘度、油层效厚度、油层系数(油层有效厚度与总厚度之比)、孔隙度、含油饱和度、单位体积含油量(孔隙度与含油饱和度的乘积)。新疆石油管理局勘探开发研究院根据近千口井的蒸汽吞吐实际生产资料、提出了筛选蒸汽吞吐油藏的标准。



表 10-1 准噶尔盆地西北缘蒸汽吞吐筛选标准 (据常毓文等, 1990)

工艺技术		粘度 (地层温度下) (mPa·s)	密度 (g/cm ³)	有效厚度 (m)	油层 系数	含油饱和度 (%)	有效孔隙度 (%)	单位体积 含油量	井深 (m)
现行 技术	中价油	100 ~ 10000	<0.937	>5.0	>0.5	>0.6	>0.28	>0.18	<350
	高价油	100 ~ 20000	<0.937	>5.0	>0.5	>0.5	>0.25	>0.15	<600
技术 改进	中价油	10000 ~ 20000	<0.937	>5.0	>0.5	>0.55	>0.25	>0.15	<600
	高价油	10000 ~ 50000	<0.95	>5.0	>0.5	>0.45	>0.23	>0.13	<600
技术 发展	中价油	20000 ~ 50000	<0.95	≥5.0	0.4	>0.45	>0.2	>0.13	<1600
	高价油	>50000	<0.96	≥5.0	>0.4	>0.4	>0.2	≥0.13	<1600



根据上述标准，在现行技术下，对于地层温度下脱气原油粘度小于**20000Pas**，有效厚度大于**5m**，油层系数大于**0.5**，孔隙度大于**25%**，含油饱和度大于**50%**的稠油油层，无论在技术上，还是在经济上，均可获得成功。采收率大于**25%**。



蒸汽驱适用的油藏

稠油油藏用蒸汽驱的特征参数，包括油藏深度、厚度、孔隙度、渗透率、含油饱和度、原油粘度、相对密度等；根据这些参数的取值范围，可以分析蒸汽驱适用的油藏条件。我国既考虑油藏特征又考虑开采技术可行性。



表 10-3 蒸汽驱筛选标准及稠油储量分类标准 (据韩显卿, 1993)

参 数 组	一 等 靠现有技术	二 等 近期技术改进	三 等 待技术发展	四 等 不适于注蒸汽开采
1. 原油粘度 (油层条件) ($\text{mPa} \cdot \text{s}$) 相对密度	> 50 ~ 10000 > 0.92	< 50000 > 0.95	> 50000 > 0.98	
2. 油层深度 (m)	150 ~ 1400	150 ~ 1600	≤ 1800	
3. 油层纯厚度 (m) 纯厚度/总厚度	≥ 10 > 0.70	≥ 10 > 0.50	≥ 5 ≥ 0.50	< 5.0 < 5.0
4. 孔隙度 (%) 原始含油饱和度 (%) 单位体积含油量 储量系数 [$10^4 \text{t} / (\text{km}^2 \cdot \text{m})$]	> 0.20 > 0.50 ≥ 0.10 > 10.0	> 0.20 > 0.50 ≥ 0.10 > 7.0	≥ 0.20 ≥ 0.40 ≥ 0.80 > 7.0	< 0.20 < 0.40 < 0.08 < 7.0
5. 渗透率 (μm^2)	≥ 250	≥ 250	≥ 200	< 200



岩性： 最适合蒸汽驱开采的油藏是砂岩油藏，而灰岩油藏因加热效率低不适合蒸汽驱。

油层压力： 油层压力过高，会导致蒸汽带的体积较小，不能充分发挥蒸汽相的驱油作用。所以埋藏深的油藏一般先蒸汽吞吐以降低油层压力，然后再转蒸汽驱。

地层倾角： 地层倾角过大，蒸汽波及范围小。

注水间的连通性： 正韵律油藏更适合蒸汽驱（超覆现象）；

底水和气顶： 降低开采效果



一般认为，由于蒸汽驱是在蒸汽吞吐之后进行的，采用正方形井网正好适应蒸汽驱阶段开发调整的需要。

对于扇三角洲稠油储层，由于河道和河口坝砂体是扇三角洲骨架砂体，也是稠油的主力油层，砂体是沿水流方向延伸的条带，且顺条带方向渗透率高，横切条带方向渗透率低，亦即渗透性具有明显的方向性，应在砂体延伸方向注意注采井距要大些，横切砂体方向注采井距小，从而在蒸汽驱过程中可实现较均匀的面积驱替，有利于提高采收率。



第二节 聚合物驱油藏地质研究

一、油藏物理性质对聚合物驱的影响

1. 纵向非均质性

- 聚合物驱的一个重要特征是适应于油藏的非均质性，特别是纵向的非均质性。
- 注水时，正韵律油层中，水沿底部高渗透部位突进情况严重，中上部中低渗透部位波及体积及采出程度较低。对于聚合物驱油而言，这种情况有不同程度的改善，但仍受油层非均质性的影响。



在底部高渗透部位，由于水驱已有较高的采出程度，聚合物驱对该部位作用效果并不十分明显。但是，由于聚合物高粘度溶液抑制了高渗透部位注入液的突进，使得油层中上部中低渗透部位驱油效果得以改善，中上层部位能达到较高的波及效率和采出程度，上层部位聚合物驱的波及效率及采出程度都较水驱有相对较大幅度的提高。



对于反韵律油层，聚合物驱采出程度及聚合物驱提高的采收率随非均质系数的增大而降低。

由于注入的聚合物溶液大部分进入高渗透层，正韵律油层底部得到的聚合物溶液多，且注入中上层的聚合物溶液有一部分因重力分异作用渗透到下层，使正韵律油层比反韵律油层得到了更大改善，聚合物驱对正韵律油层比对反韵律油层更有效。



2. 润湿性

在相同的油水粘度比下，水湿油层的采收率均高于油湿油层。

聚合物驱适用的原油粘度，除与地层温度、地层水及注水液中盐浓度、非均质程度和类型、润湿性、密度差与油层厚度、聚合物性能有关外，还与地层平均渗透率有关。在一定条件下，聚合物驱甚至可以适用于原油粘度较高的油田。



3. 油水粘度比

水驱和聚合物驱的采收率均随油水粘度比的增加而减少。

粘度增大，总采收率下降

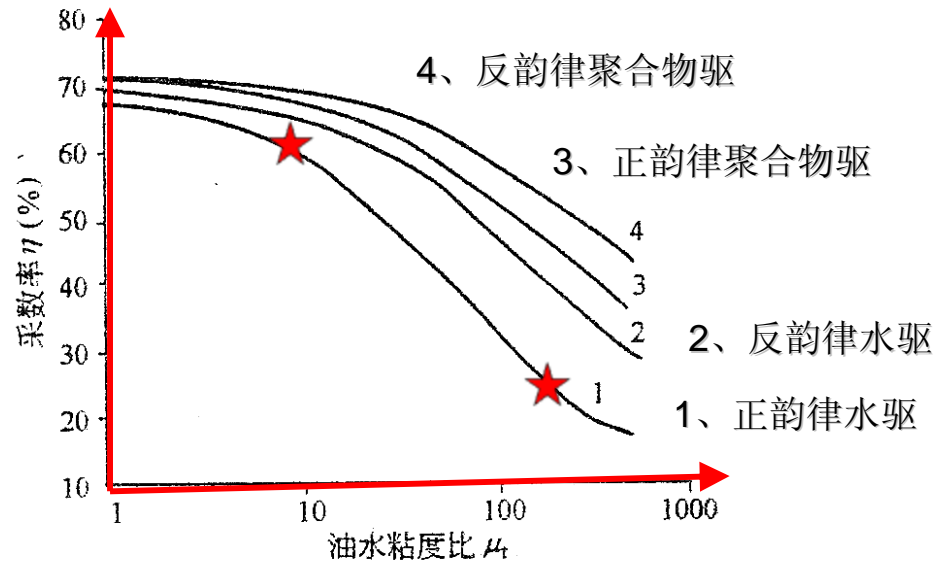
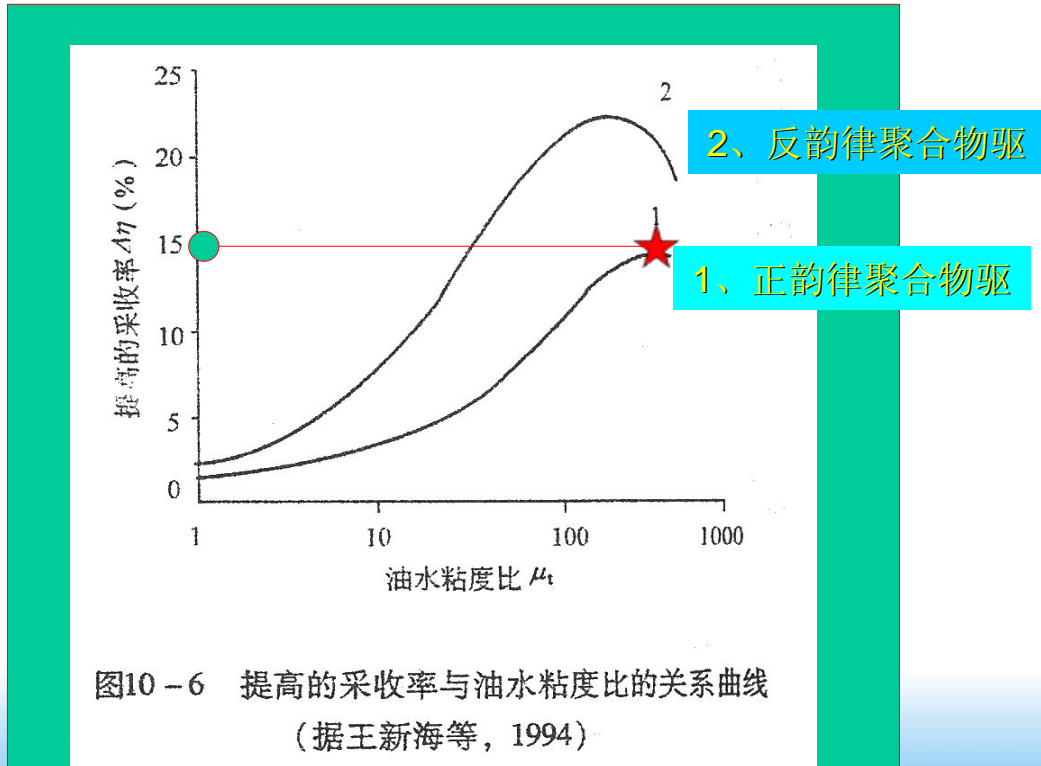


图 10-5 采收率与油水粘度比的关系曲线
(据王新海等, 1994)



聚合物驱提高的采收率达到峰值时，油水粘度比就已经很大了（再高就不行了）；存在一定的粘度比时，对正韵律油层进行聚合物驱通常也能成功。





4. 原油密度

当水油密度差为零或不考虑重力的作用时，正、反韵律油层的开发指标相同；当存在密度差时，正、反韵律油层的开发指标相差显著。聚合驱原油的采收率随着原油密度的降低而增加。

但反韵律油层中，如果原油的密度较大，对聚合物驱有利（考虑重力作用）。



5. 吸附和渗透率降低

在一定范围内，聚合物被吸附愈多，对聚合物驱愈有利。

无论是正韵律、反韵律油层，还是其他类型的非均质油层，渗透率降低幅度愈大，聚合物驱采收率则愈高，渗透率降低起到了有益的作用。



6. 不可进入的孔隙体积

不可进入孔隙体积定义为水能进入而聚合物不能进入的那部分孔隙体积。

不可进入孔隙体积的概念与机械滞留相关，即所有直径小于聚合物分子等效直径的那些孔隙都是不可进入孔隙。当聚合物的吸附能力较小时，不可进入孔隙体积愈大，对聚合物驱愈有利；当聚合物吸附能力较大时（有利于发生化学反应），不可进入孔隙体积愈小对聚合物驱愈有利。



二、聚合物驱油藏筛选

世界各国对聚合物驱油藏适用条件进行了深入研究，提出了许多筛选标准

参数		(美) 刘文	(美)加州大学	(美)石油 审议会	加拿大	中石油 研究院
储油层	有效厚度(m)		>5			
	渗透率 (μm^2)	>0.0197	<1.48	0.0294—4.935	>0.018	>0.04
	渗透率变异系数					0.6
	岩性	砂岩	砂岩			砂岩
原油性质	粘度(mPa·s)	<200		<200	20—100	<100
	相对密度	<0.9465	<0.934			<0.95
地层水	饱和度(%)	<50		<75		<50
	矿化度(mg / L)					<1000



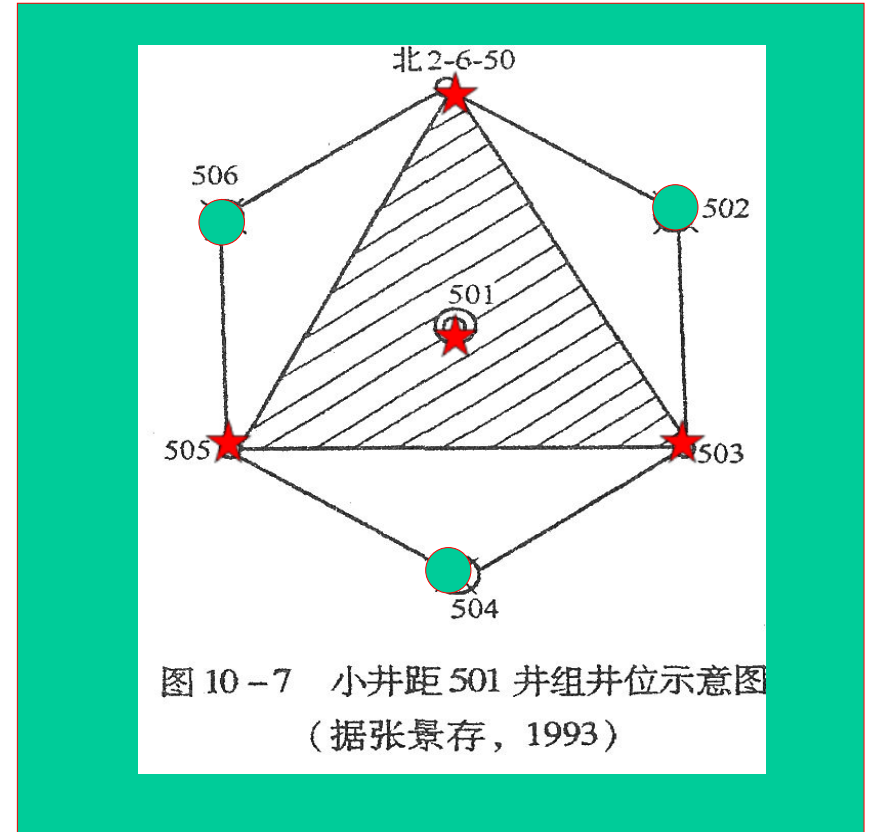
三、聚合物驱油实例及动态分析

大庆油田萨II₇₊₈油层是典型的正韵律厚油层。油层厚度大，井组平均有效厚度为5.2m，渗透率高，平均有效渗透率为0.63 μm_2 。油层内部非均质严重，上部为低渗透和砂泥岩薄互层，中、下部为中、高渗透率砂岩，平面上连通性好。



萨II₇₊₈油层注聚合物前大体可分为3个开采阶段：

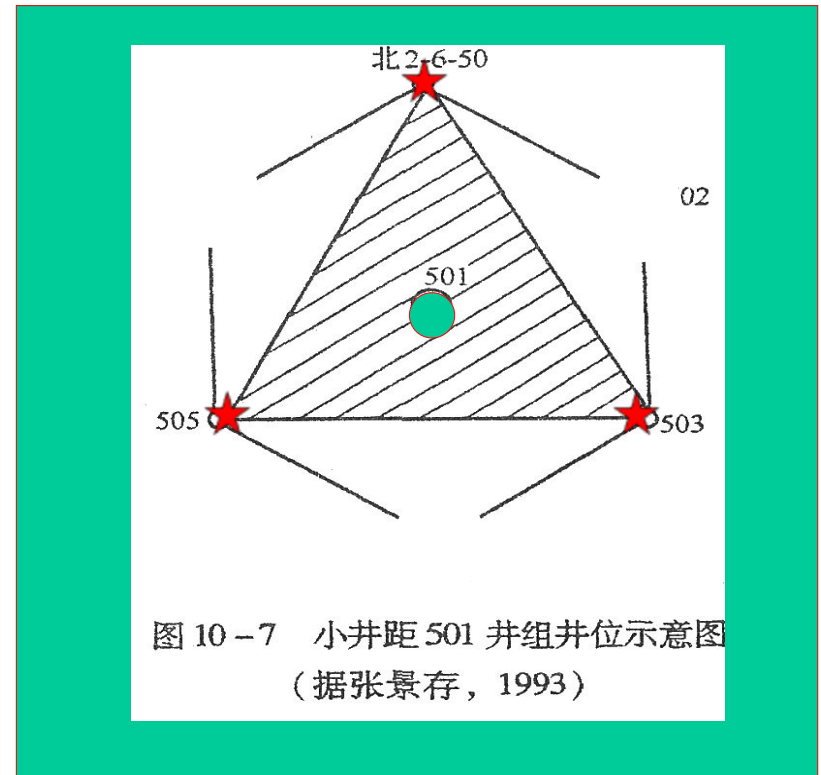
强注强采提高采油速度试验阶段，此阶段采用四点法加平衡井面积井网，采油井为501、503、505、北2-6-50井。注水井502、504、506井。历时178d，试验结束时，采油井已处于特高含水期，综合含水达97%以上，其中501井已高达99%。





水淹关井阶段(1961年5月19日----1972年4月21日);

注聚合物前的试采阶段(1972年4月22日----8月30日)。注聚合物前，对原井网进行了调整，关闭了原来502、504、506共3口注水井，改501采油井为注水井，503、505、北2-6.50井仍为采油井，形成一注三采的反四点法井网。





1. 聚合物注入简况:

注入期间，试验区压力略高于周围地区压力，以排除试验区外的干扰。从1972年8月30日到9月24日，历时26d，共用含量为聚合物49.63t，注入量为3637.8方，占油层孔隙体积的16.3%。

2. 效果:

同位素测试资料证实，注水井吸水厚度由注聚合物前的2.4m增加到注后的3.8m.

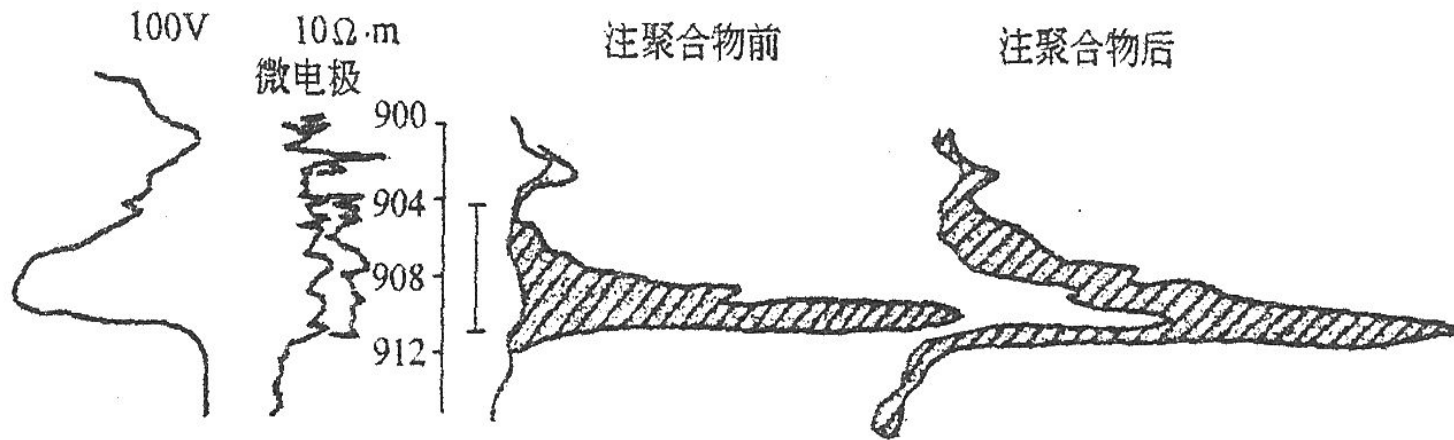
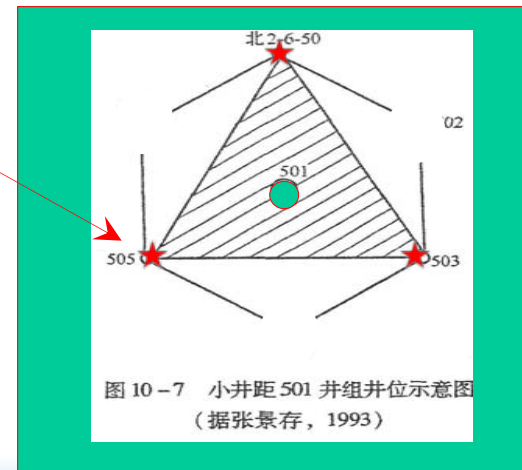


图 10 - 8 501 井吸水剖面变化图 (据张景存, 1993)



油井含水大幅度下降，产油量明显增加。从注聚合物的第12天开始，3口油井相继见效，含水开始下降，产油量上升。503井含水由99%下降到88%；北2—6—50井含水由97%下降到77%；效果最明显的是505井，含水由99%最低降到60%，日产油量由0.3t上升到5.2t；有效期最长的是北2—6—50井，有效期长达222d。

效果最好



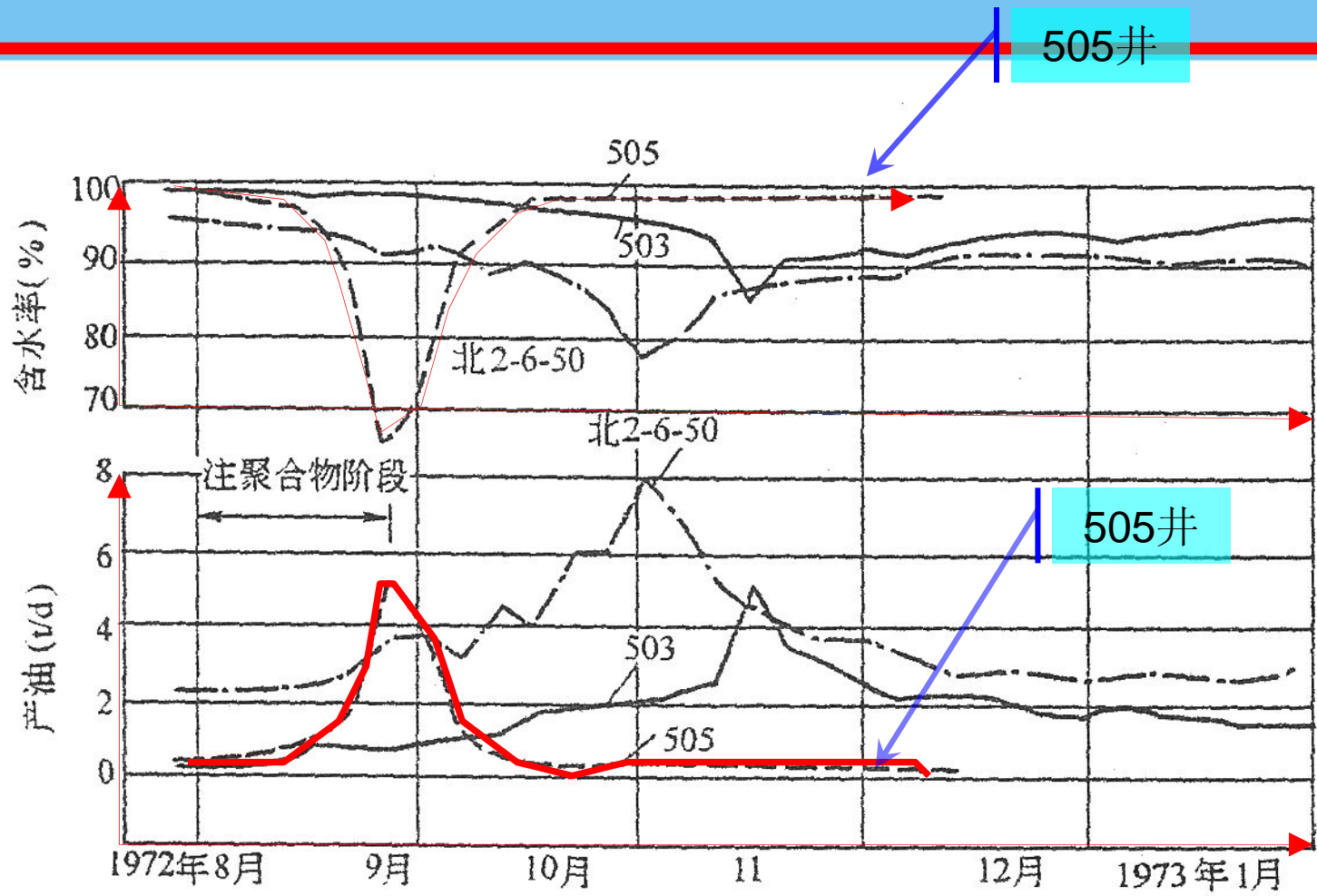


图 10 - 9 501 井组萨 II₇₊₈层注聚合物试验效果 (据张景存, 1993)



原油性质较好。水驱过程中，油层水淹部位随水淹程度的增加，原油中轻质组分逐渐减少，使原油性质变差。注入聚合物后，由于增加了新的出油部位，使产出原油的中轻质组分增大，原油性质变好。

水井注入压力升高。注聚合物后，注水井地层压力升高了3.3MPa。

油井产液能力大幅度下降。注聚合物后，由于聚合物堵塞了油层高渗透率部位，降低了渗透率，导致3口油井产能都下降了，但可通过压裂来恢复。

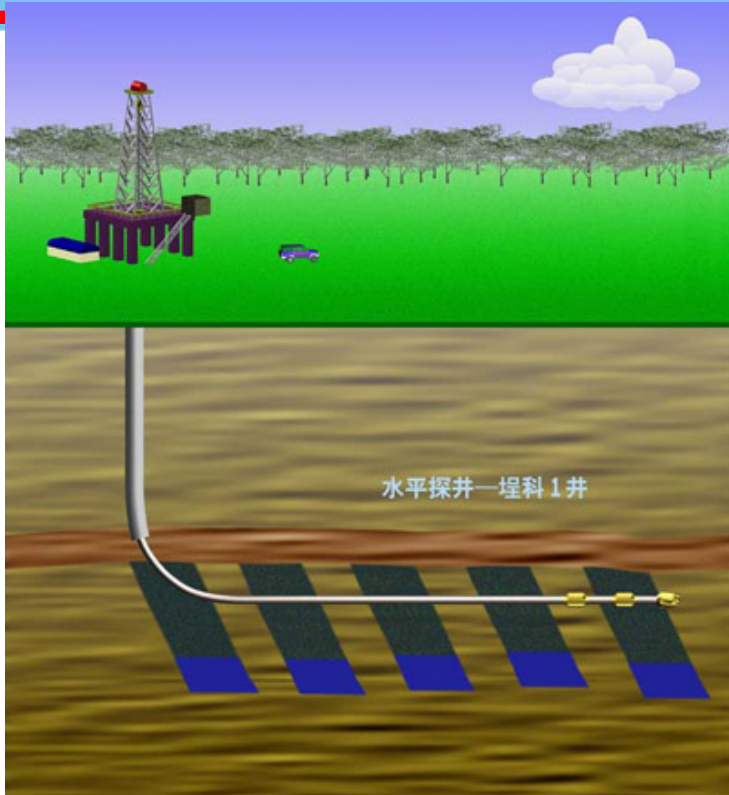


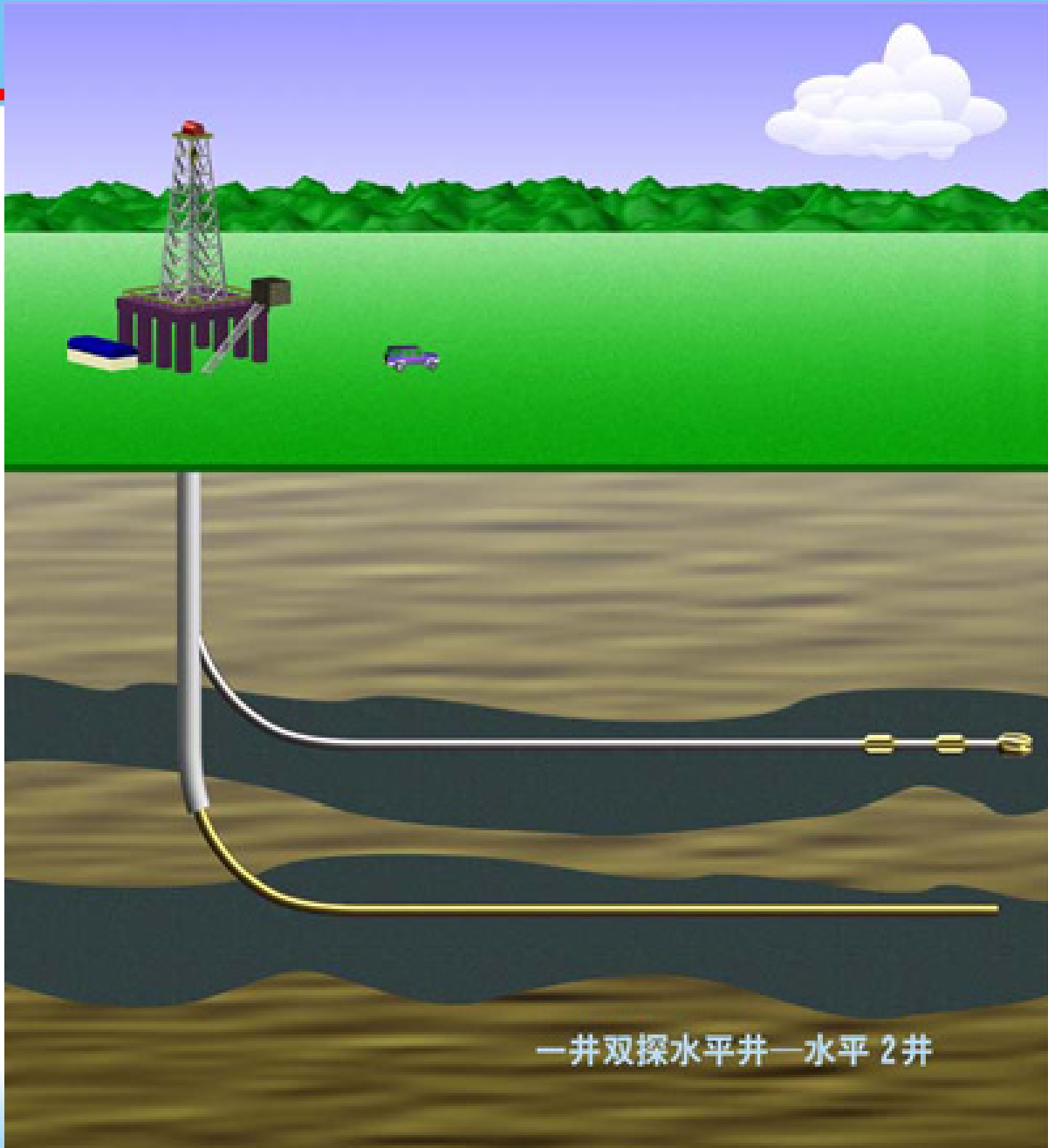
第三节 水平井采油的地质分析

一、概述

根据由垂直方向转为水平方向所要求的曲率半径和水平段长度，可把现有水平井划分为4类，4种类型的水平井曲率半径(R)及水平段长度(L)分别为：

- 超短曲率半径， $R=0.305\text{--}6.07\text{m}$ ， $L=30.48\text{--}60.96\text{m}$ 。
- 短曲率半径， $R=6.10\text{--}12.19\text{m}$ ， $L=30.48\text{--}213.36\text{m}$ 。
- 中等曲率半径， $R=91.44\text{--}152.40\text{m}$ ， $L=304.80\sim 457.20\text{m}$ 。
- 长曲率半径， $R=182.88\sim 609.60\text{m}$ ， $L=304.80\sim 914.40\text{m}$ 。





—井双探水平井—水平 2 井

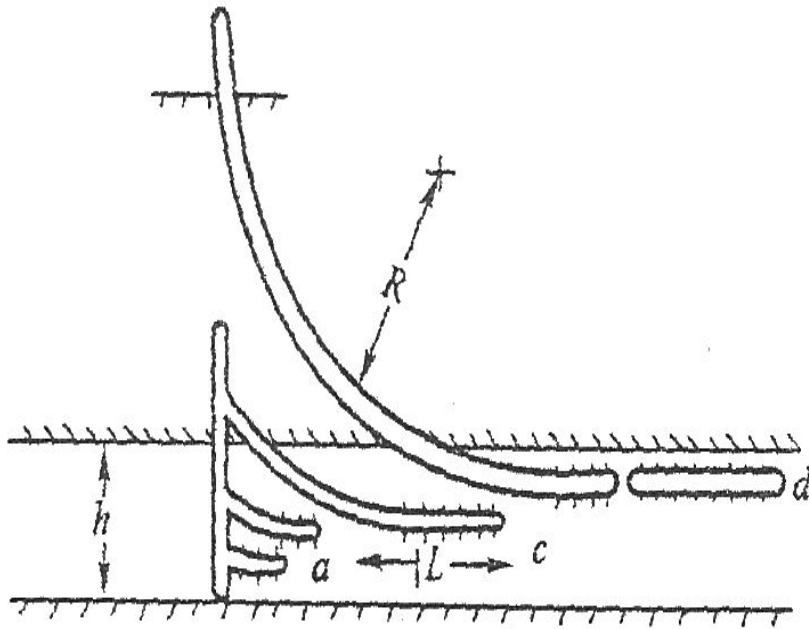


图 10-10 水平井类型图 (据 Joshi, 1986)

a: 超短曲率半径

b: 短曲率半径

c: 中等曲率半径

d: 长曲率半径



表 1 大庆油田阶梯水平井主要技术指标

序号	井号	完钻井深 (m)	水平段长 (m)	水平位移 (m)	钻进周期 (d)	油层厚度 (m)	阶梯段与 位移之比
1	州 66-平 61	2236	695.9	934	21.46	0.5~0.9	4.33 : 100
2	肇 60-平 33	2231	718.5	961	19.29	0.6~1.1	5.62 : 100
3	肇 57-平 33	2241	737	957	19.5	0.4~0.9	8.98 : 100
4	肇 57-平 35	2241	744	948	15.58	0.4~0.8	4.88 : 100
5	州 64-平 72	2243	741	961	12.29	0.7~1.0	6.16 : 100
6	肇 53-平 37	2263.65	739.40	980	25.92	0.5~0.9	7.52 : 100
7	肇 60-平 54	2279.54	716.50	937	24.75	0.6~1.1	7.38 : 100
8	肇 59-平 55	2286.20	744.40	980	20.66	0.4~1.0	6.12 : 100
9	台 70-平 88	2241	698	949	22.92	0.6~0.7	4.8 : 100
平均		2251.38	726.08	956.3	20.24	0.8	5.58 : 100

长曲率半径水平井 (L=304.80~914.40m)



二、水平井的产能及与直井的比较

1. 非均质性和油层厚度

- 垂直渗透率越高，水平井采油越有利；
- 薄油层更适用于水平井采油。

2. 水平井和压裂直井的比较

- 水平井相当于一口完全穿透油层的垂直裂缝的直井。水平井段长200—300m的水平井产能是未处理直井产能的2.5~3.8倍，水平井也明显优于常规压裂的直井。



3. 气锥和水锥

●水锥和气锥是油田开发面临的难题之一。现场经验表明，水平井不仅增大了产油量，而且减少了水锥和气锥趋势。这是因为：第一，在相同的产量下，水平井比直井所需压降小得多；第二，从井筒至泄油半径，水平井压力梯度几乎呈线性。这使得在整个水平井生产长度上有一个稳定的气体下倾或水面上升；相反，在直井中，从井筒到泄油半径是沿锥形流线至一点，呈对数——线性压力梯度，加速了锥进。

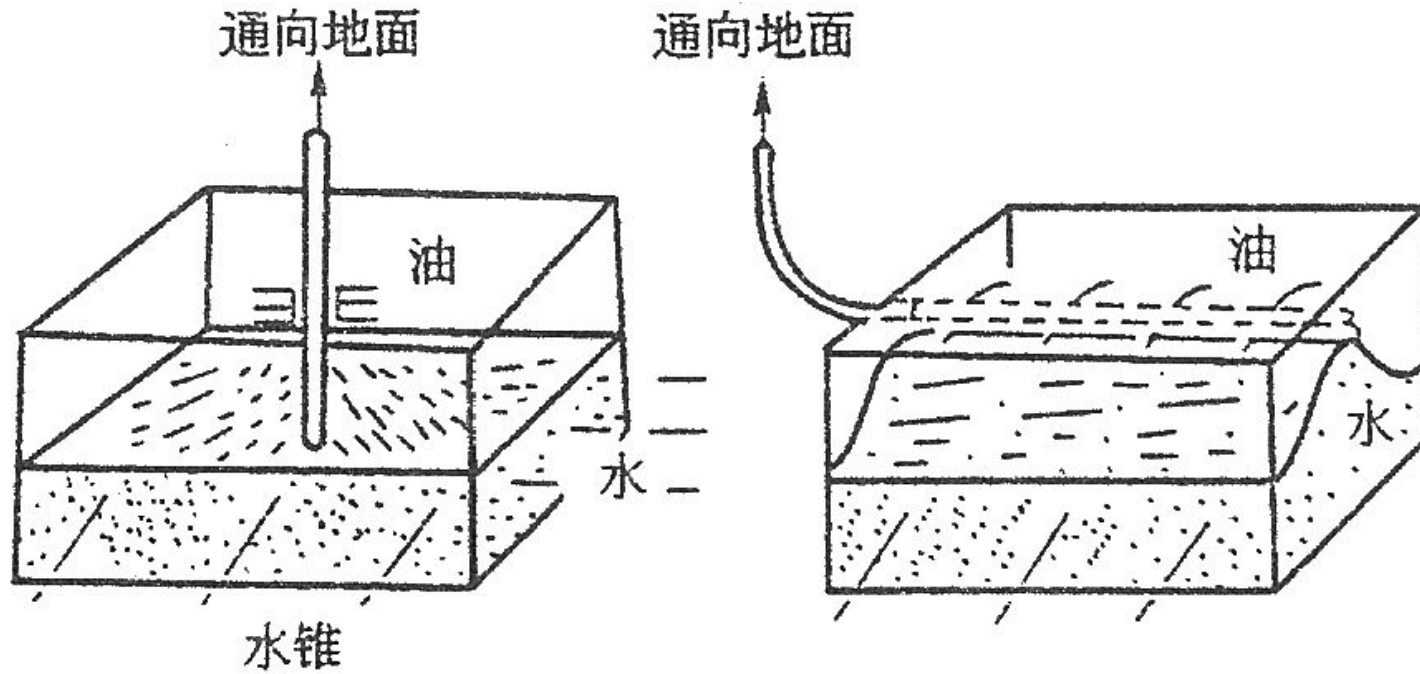


图 10 - 17 直井和水平井水锥示意图 (据 Joshi, 1986)



三、水平井适用油藏条件分析

非热采砂岩油藏水平井适用性筛选方法：

这种筛选方法分4步：

- ①确定首选候选油藏**类型**；
- ②确定适用于水平井开采的候选油藏**参数范围**；
- ③确定适用于水平井开采的**油藏**；
- ④进行水平井适用性**经济**评价。



适用于水平井开采的油藏类型大致有12种：

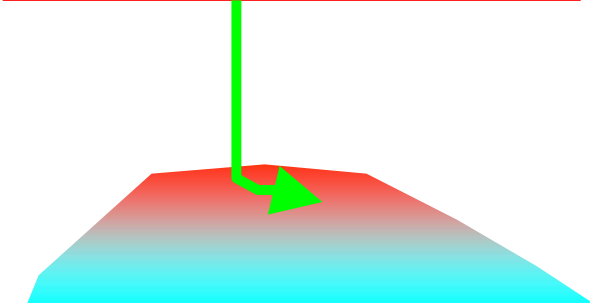
(1)底水油藏。水平井可控制水锥，与直井相比有较高的临界产量和采收率。

(2)气顶油藏。水平井可控制气锥，与直井相比有较高的产量和采收率。

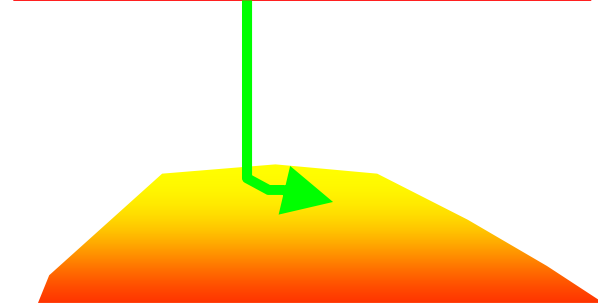
(3)底水气顶油藏。水平井开采兼具上述优点。

(4)断层遮挡油藏。被断层切割的高角度多层油藏，可利用水平井横穿多个油层。

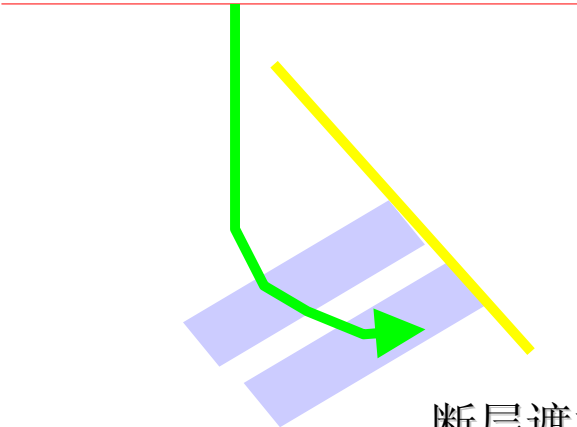
(5)地层遮挡油藏。不整合面遮挡的直交多层油藏，可利用水平井横穿多个油层。



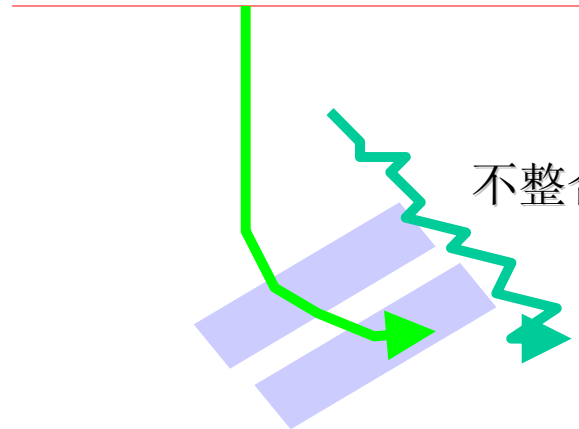
底水油藏



气顶油藏



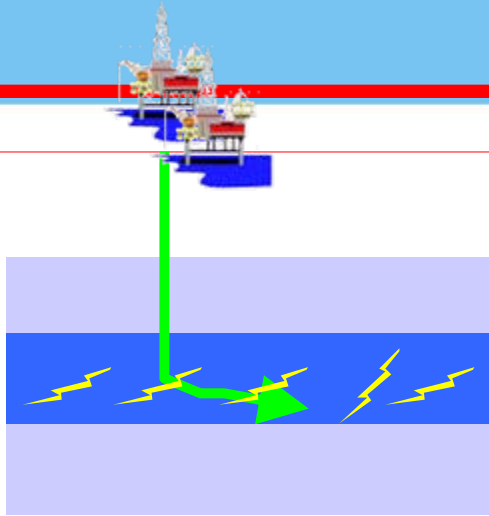
断层遮挡油藏



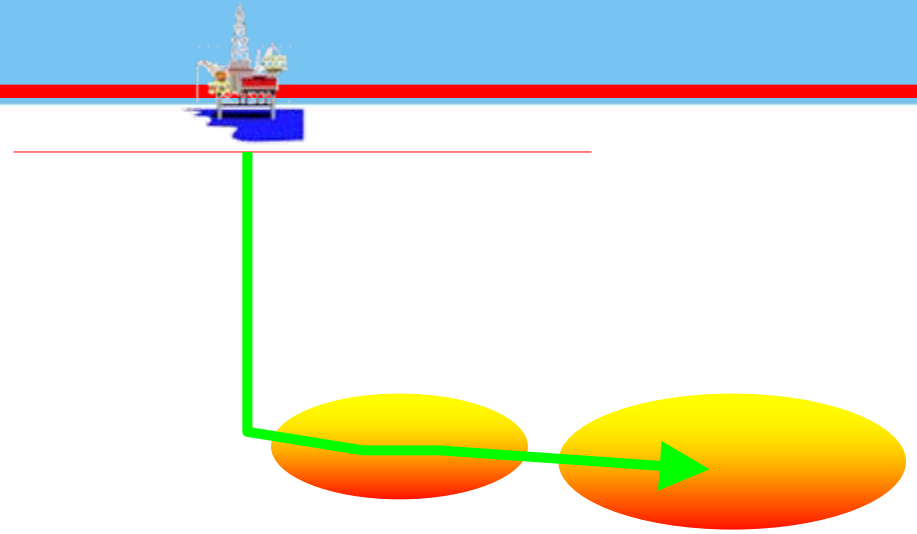
不整合遮挡油藏



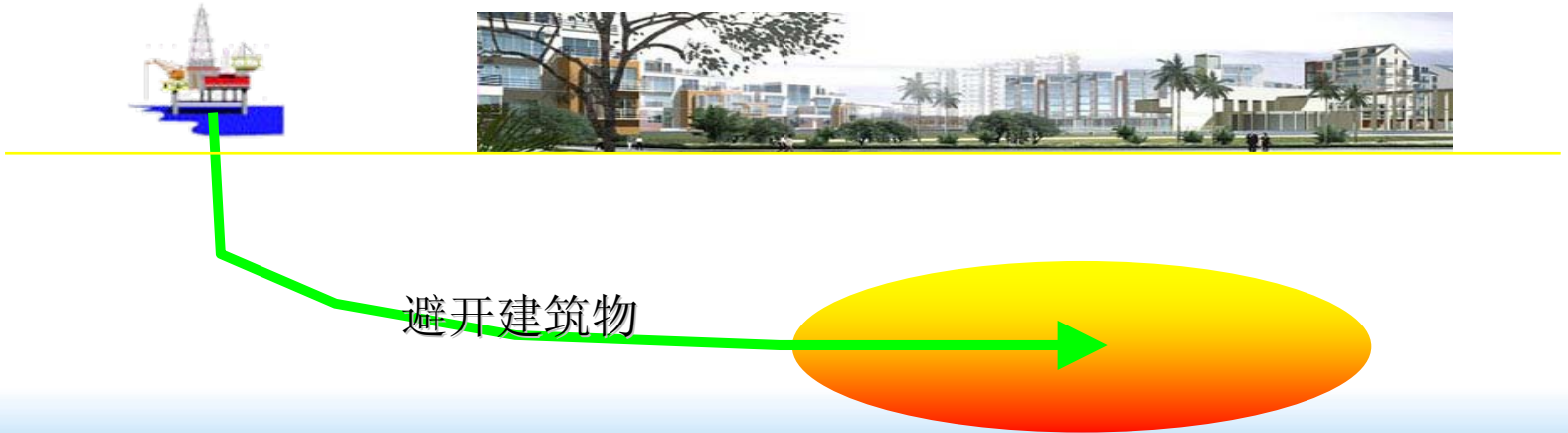
- (7)夹层裂缝油藏。砂岩油藏中的泥岩夹层若有裂缝可形成夹层裂缝油藏，利用水平井可横穿这些裂缝，提高产量和采收率。
- (8)不连续不规则岩性油藏。利用水平井有利于搜索这些油藏，或横穿多个含油单元，提高储量动用程度。
- (9)地台型油田油水过渡带。相当于水平井开发底水油藏的作用。
- (10)注水油藏未波及区。对于富含油的注水未波及区，采用水平井开发可扩大波及系数。
- (11)需要提高采收率的油藏。采用点状垂直井与水平井相结合的方法，可提高注化学剂等的波及程度。
- (12)水下或城市无法接近的油藏及因地面条件无法接近的油藏。可用水平井开采。



夹层裂缝油藏

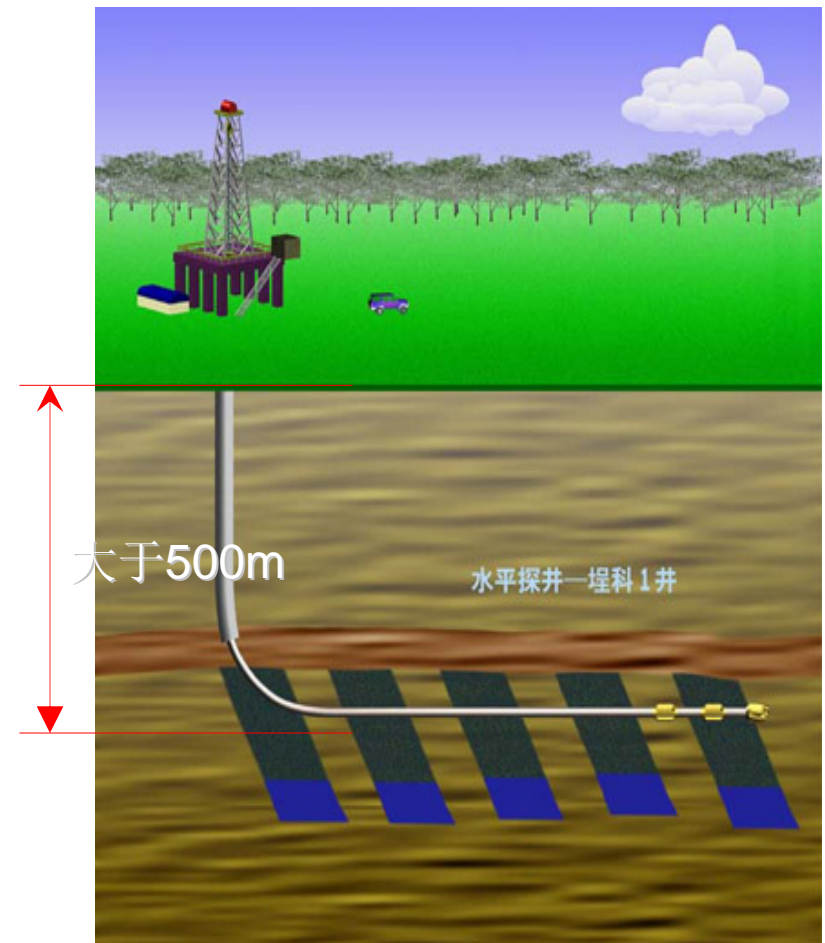


不连续岩性油气藏



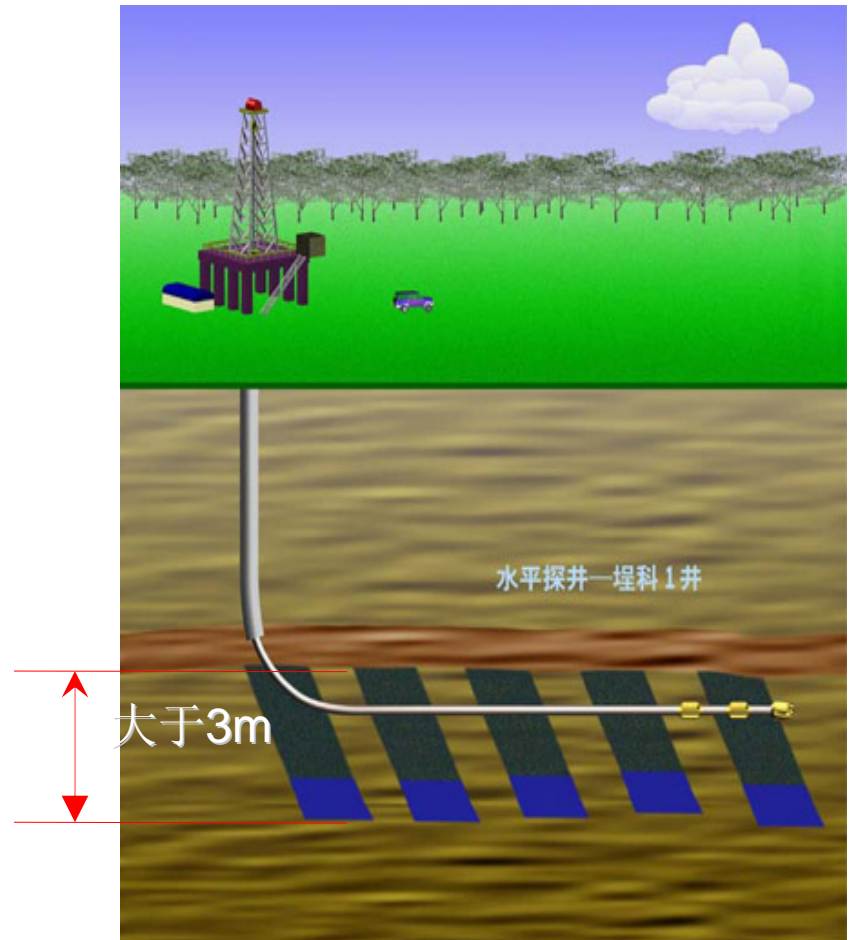


(1)油藏深度500—5000m。国外一般认为浅油层(深度小于1000m)打水平井不合算。因为对这类油层采用浅垂直井花费很低。根据我国实际情况,深度下限定义为500m。井深上限主要受钻机能力限制,美国最深的水平井垂深为4553m,一般小于4200m。





(2)油层厚度大于3m。根据国外的经验，油层厚度小于3m，不宜钻水平井，原因是钻水平井准确定向困难和花费太大。特别是存在底水和气顶的薄油层情况。





(3)水平渗透率与垂直渗透率比值 k_h/k_v :

$$h\sqrt{\frac{k_h}{k_v}} \text{ 大于 } 100\text{m}$$

(4)地层系数 kh 大于 $20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2\text{m}$ 。致密厚层砂岩油藏不是水平井理想的对象。

(5) 地下原油粘度大于 $50\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的油藏，列入需热采的稠油油藏。