

油藏工程原理与方法

The Fundament and Practice of Reservoir Engineering

(讲义)

姜汉桥

绪 论

油藏工程(Reservoir Engineering)——油田开发

依据**详探成果**和必要的生产性**开发试验**，在综合研究的基础上对具有**商业价值**的油田，从油田的实际情况和生产规律出发，制定出合理的**开发方案**并对油田进行**建设和投产**，使油田按预定的生产能力和经济效益长期生产，直至开发结束。

绪 论

油藏工程——油田开发

从总体上来认识油藏工程是一门技术学科
“总体”包括两个完整的过程：

静态过程

一是认识和了解油藏的各个部分的物理化学性质，及其在油藏中的作用。

动态过程

二是在油气开采过程中，认识油藏内部发生的物理化学变化、机制，及其对油气开采的影响。

绪 论

特点 一 ● 是一门高度综合的技术学科

综合分析油藏地质、油藏物理、地球物理（测井，物探等）、渗流力学、采油工程等方面成果，以及提供的信息资料，对油藏中发生物理化学变化进行评价、预测、提出相应的调整措施。

● 具有整体性、连续性、长期性

绪 论

对象——含油气的地层（间接研究）

难度：不可见性、非均质性

目标——提高油气经济采收率

对油藏中发生的各种变化，从开采的角度进行评价、作出预测，并提出相应的技术措施

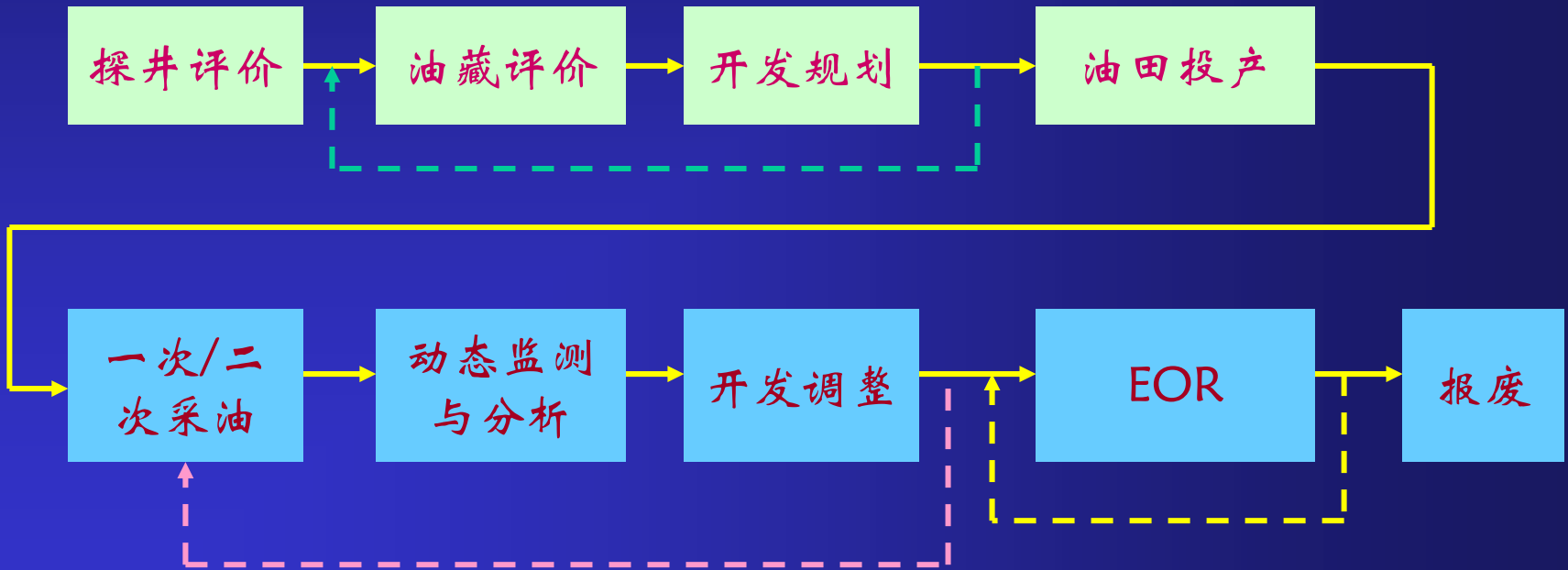
意义——对国民经济建设意义重大

石油安全战略—国家安全战略

地位——油田开发决策、经营、管理

绪论

业务领域——开发前期、投产期、开采期



绪 论

基本内容:

一、开发方案设计

开发前准备
开发设计
经济评价

二、开发动态分析

物质平衡方法
经验方法
试井分析
油藏数值模拟

三、动态监测与调整

绪 论

回顾历史，展望未来

近代石油工业的起点：

1859年美国宾夕法尼亚州Seneca Oil Co.

井名：DRAKE's Well

井深：69'1/2 ft (21米)

设备：钻井井架+6马力蒸气机

产能：1859年 年产2000bb

绪 论

第一阶段（—20世纪30's） 开始阶段

第二阶段（20世纪30—40's） 发展初期

第三阶段（20世纪40—50's） 发展阶段

第四阶段（60's—20世纪末） 现代化发展阶段

第五阶段（21世纪初——） 高新技术发展阶段

绪 论

进入80's后期，世界油气资源的新发现越来越少，油田开发的对象逐步向难开发的地下资源，油气资源开采的技术难度、投资额度和分险程度日益增高。因此，油藏工程已发展为整个油区制定及实施某种优化的油藏管理经营策略。

绪 论

科学技术进步推动着石油工业的发展

20世纪20~30's, 重力、地震折射波、沉积学、引入石油地质, 产生一个飞跃: 1925~30年, 世界年平均发现原油约27亿吨;

1935~40年, 世界年平均发现原油41亿吨。

20世纪40~50年代, 电测方法、蒸汽法开采稠油等技术, 年平均原油发现为33—55亿吨。注水技术使油田采收率普遍提高了15%—20%。

20世纪60~70年代, 地震勘探的叠加技术、定向钻井技术、大型水力压裂技术, 年平均增长量为37亿~56亿吨。

20世纪80年代以来, 石油科技的发展进入了高新技术发展阶段。特别是当前的信息技术, 正对世界石油工业进行着一场革命。80~90年代, 每发现和开发1桶原油的成本已下降了40%。

第一章 油藏工程设计基础

§ 1-1 油田勘探开发程序

The program of exploration and development for oilfield

预探—含油构造—工业价值—开发设计—投产

探井
发现工业油流

工业价值标准
详探

	<500	500~1000	1000~2000	2000~3000	>3000
m					
产量 t/d	0.3	0.5	1.0	3.0	5.0

第一章 油藏工程设计基础

§ 1-1 油田勘探开发程序

工业价值 (commercial value) — 商业价值：开采储量能补偿它的勘探开发及附加费用
— 与现有（当时）技术水平有关

§ 1-1 油田勘探开发程序

从 油藏评价—开发规划设计 阶段时间较短 1~3年
是油田开发过程中的关键阶段——开发前的准备工作

开发前的准备工作（详探阶段）

§ 1-1 油田勘探开发程序

开发的准备工作(详探阶段) detailed exploration

一、详探阶段要解决的问题

1、以含油层系为基础的地质研究

- 地层层序及其接触关系
- 各层中的油、气、水分布
- 隔层、盖层分布及性质
- 特殊层 高压气夹层、水夹层、易塌层

一、详探阶段要解决的问题

2、储层特征及储层流体物性

——建立地质模型，为建立油田开发过程模型作准备

4、天然能量评价——天然能量的利用、转注时机

5、生产能力（含吸水能力）——井数、井网

二、详探阶段要进行的工作

1. 地震细测工作 (seismic survey)

目的： 主要查明油藏构造情况，以便使用较少的探井资料井完成详探任务。

测线密度： > 2 公里/平方公里

结果： 目的层构造形态清楚；
断层情况清楚（走向、落差、倾角）；
含油圈闭面积清楚。

2. 钻详探资料井（取心资料井）

appraisal well , coring well, information well

目的： 直接认识油层，为布置生产井网提供地质依据。

布井： 在初步掌握的构造上布井。

一般井距：2~3公里

复杂断块：<1~2公里

任务： 认识油层本身性质和特征及变化规律；

探边、探断层

石油大学

2. 钻详探资料井（取心资料井）

成果：（对录井资料、测井资料、岩心资料综合研究）

♣ 地层对比，隔层对比；

♣ 稳定油层的性质及其分布（主力层）；

♣ 对断层、隔层性质及其分布作出评价；

♣ 进行岩心资料研究。

3. 油井试油和试采

testing for oil , production test

打详探井的成果——静态资料成果

问题：能否出油？含油面积？生产能力？

—— 动态情况？

试油：在油井完成后（固井、射孔），把某一层的油气水从地层中诱到地面上来，并经过专门测试取得各种资料的工作。

3. 油井试油和试采

试油资料

1. 产量资料：包括地下或地面的油、气、水 产量（不同压力下的稳定产量）；
2. 压力资料：地层静压、流动压力、压力恢复数据、油管压力、套管压力；
3. 油气水性质：组分、物理性质、高压物性；
4. 边底水能量：试水
5. 地层温度资料

3. 油井试油和试采

试采：开采试验。试油后，以较高的产量生产，通过试采，暴露出油田生产中的矛盾，以便在编制方案中加以考虑。

试采任务：（要认识的问题）

1. 油井生产能力（主力层能力、递减情况）；
2. 天然能量、驱动类型、驱动能量的转化；
3. 油层的连通性、层间干扰；
4. 适合该油层的增产措施。

进行生产测试：探边测试、井间干扰测试、常规测试

4. 开辟生产试验区

pilot test area

生产试验区：在详探程度高的地区，划出一块具有代表性的面积，用正规井网正式投入开发，并进行各项开发试验。

目的：进一步认识油田的静态和动态规律，指导油田全面投入开发。

任务：

- 1、详细解剖储油层情况；
- 2、研究井网；
- 3、研究生产动态；
- 4、研究采油工艺、集输工艺、油层改造措施。

4. 开辟生产试验区

开发试验内容:

- 1、各种天然能量开采试验;
- 2、井网试验——井网类型、形式、密度;
- 3、提高采收率方法试验;
- 4、各种增产措施及方法试验;
- 5、注水开发试验——早注、晚注对比, 合理转注时间、不同注采井网。

4. 开辟生产试验区

开辟生产试验区的原则：

- 1、位置与范围——具有代表性；
- 2、相对独立性；
- 3、试验项目——关键问题；
- 4、生产规模；
- 5、考虑整个油田建设。

5、基础井网布置

primary well pattern

基础井网：在油藏描述及试验区开发试验研究的基础上，选择最可靠、最稳定的油层（主力含油层）或层系，布置第一套正式开发井网。

任务：(1)合理开发主力层位，建成一定生产规模；

(2)兼探开发区的其它油层，解决探井、资料井所没有完成的任务。

5、基础井网布置

所选目的层的条件：

- 1、油层稳定、物性好；
- 2、油层上下有良好隔层；
- 3、有足够储量。

井网部署：

- 1、在开发区总体规划的基础上进行；
- 2、分布实施——钻完后，暂不射孔，及时进行油层对比，落实成果，必要时进行调整——射孔投产。

小 结

(普查)

打探井

地震
细测

资料井

试油
试采

试验区

初步
方案

基础井网

正式
方案

全面投产

(初探)

(详
探)

(生产)

认识油田

概念设计

开发油田

开发设计

油藏模型建立 reservoir model

不同开发
阶段

开发决策的内容目标
可用资料信息的质量、数量
油气藏控制的程度

建立模型的重点
精细有差别

油田开发阶段：

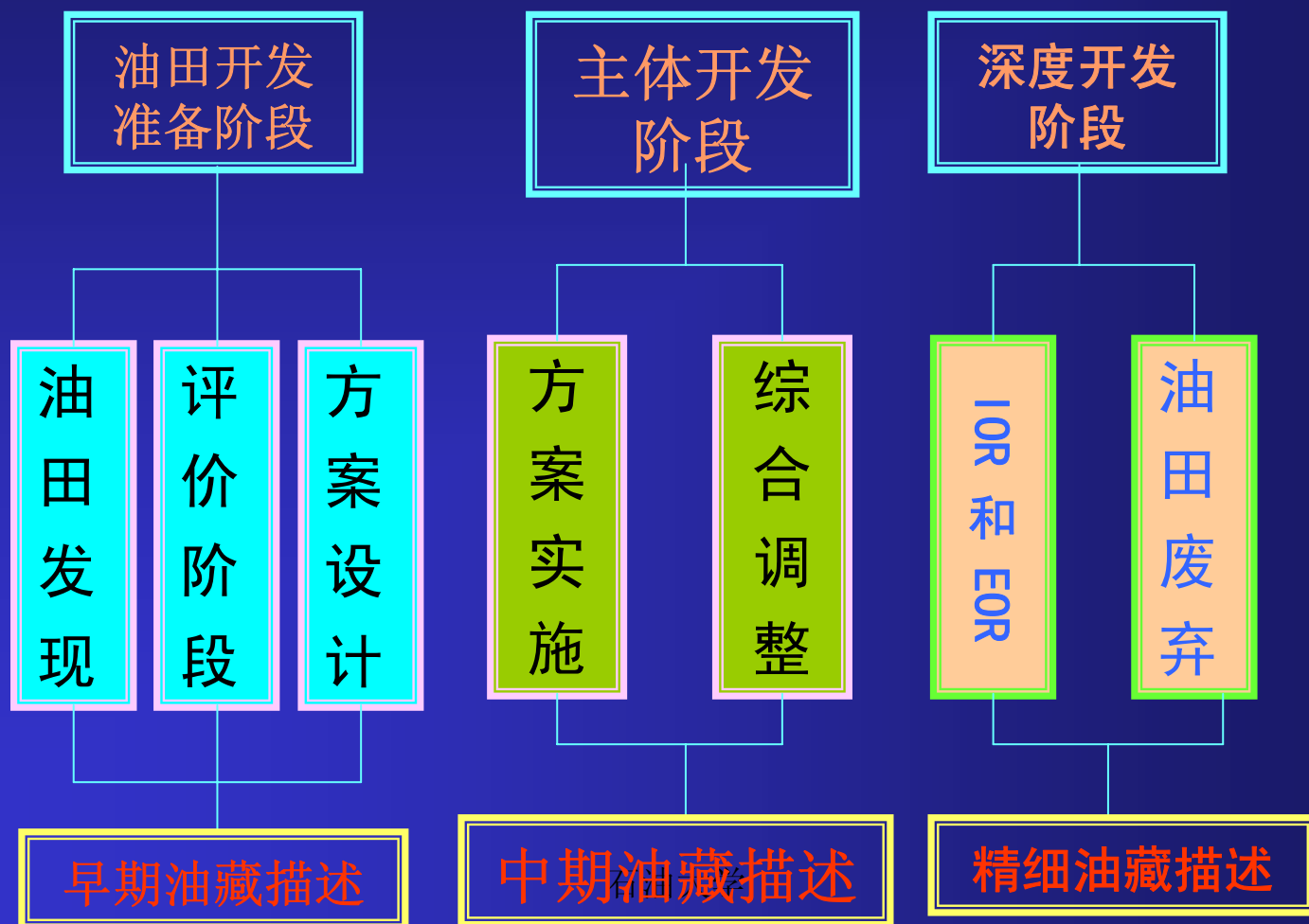
油田开发准备阶段；

主体开发阶段（低中含水期）；

深度开发阶段（高含水期以

后）

油藏模型建立



油藏模型建立

开发准备阶段：(1) 概念设计阶段 conceptual design

	开发研究的主要任务和内容	油藏描述的主要任务和内容	主要技术方法
评价阶段	<p>计算探明储量，预测可采储量；</p> <p>从技术和经济上对油藏是否有商业价值作出可行性评价；</p> <p>预测可能达到的生产规模，提出规划性的开发部署；</p> <p>提出钻、采、地面工程的初步设计。</p>	<p>油藏的主要圈闭条件及圈闭形态、产状；</p> <p>宏观的油气水系统划分及其控制条件；</p> <p>油气性质和油藏类型； 储层宏观展布及参数；</p> <p>建立初步的油藏概念模型。</p>	<p>以区域和地震资料为基础确定油藏骨架；</p> <p>以储层沉积学为基础，应用地质知识库和随机建模方法预测砂体空间分布；</p> <p>整体概念模型建立技术。</p>

油藏模型建立

开发准备阶段：(2) 开发设计阶段 development design

	开发研究的 主要任务和内容	油藏描述的 主要任务和内容	主要技术方法
方案设计阶段	对开发方式、层系、井网、注采压力系统、采油速度、稳产年限等重大问题进行决策； 进行油藏、钻井、采油、地面建设工程总体设计； 优选最佳开发方案。	落实可采储量； 核实构造及油气水分布； 预测储层尤其是主力储层的宏观分布规律； 完善和深化油藏地质概念模型。	精细地震构造解释； 储层沉积微相描述； 地质概念模型建立技术。

早期油藏评价模型建立 early reservoir description

一、重点研究内容和技术要求

1、确定油藏主要构造特征：

资料：地震资料、探井、评价井（层位标定）

成果：（1）油气层顶面及标准层构造图

（2）主断层断面图、

（3）分析主要断层对油气水分布的控制作用；

一、重点研究内容和技术要求

2、划分宏观的油气水系统

资料：录井、取心、钻杆测试、试油、试井、测井

成果：(1)划分油气水系统

(2)确定油气、油水、气水界面和压力系统

(3)含油面积、含气面积、水体体积

(4)分析其形成和控制条件

一、重点研究内容和技术要求

3、查明油气水物理化学性质

资料：取样分析资料（组分）、相态分析

成果：（1）油藏类型（以烃类性质为表征）

（2）油气水性质平面分布图

（3）油气水性质剖面变化图

一、重点研究内容和技术要求

4、搞清储层的主要展布特征及岩石物理参数

- (1) 地层划分和对比——储层形态特征、参数空间分布
——揭示多油层层间非均质性、分层开采
- (2) “四性”关系分析——确定测井解释方法和解释模型（岩性、物性、含油性与电性关系）
- (3) 划分储层和非储层界线——储层分类分级
- (4) 求取有效厚度、孔隙度、含油气饱和度——确定地质储量及储量分布
- (5) 储油物性、渗流特性、连续性、微观孔隙结构、储量丰度 ——储层评价

一、重点研究内容和技术要求

5、建立油藏概念模型

早期油藏评价描述最终成果——为储量计算和开发方案编制提供一个油藏整体地质模型和一些低级次的概念模型。

主力油层单砂体层内非均质模型；
各类油层典型的平面非均质模型；
全层系的砂体连续性及隔层分布模型；
全油藏整体地质模型。

二、概念设计阶段和开发设计阶段的主要差别

1、资料占有与研究的侧重点差别：

概念设计：资料很少，要求的研究精度低；

开发设计：补充了大量资料（开发资料井、油层岩心剖面、室内岩心实验、试采、试验井组）

二、概念设计阶段和开发设计阶段的主要差别

2、主要目的差别：

概念设计：提高勘探程度、

提交探明储量、

开发可行性研究

开发设计：研究开发方案中的重大战略问题（开发层系、开发方式、井网布置、注采系统、采油速度、稳产年限）

二、概念设计阶段和开发设计阶段的主要差别

3、研究精度差别：

（1）构造描述方面：

概念设计：初步搞清油层组顶面和主要断层的构造特征，编制构造图（1：25000）

开发设计：较准确地确定构造形态，提交油气层顶面构造图 and 主断层的断面图（1：10000）

二、概念设计阶段和开发设计阶段的主要差别

(2) 油气水研究方面:

概念设计：初步划分宏观的油气水系统，分析其控制条件，查明一般的油气水物化性质和油层类型；

开发设计：验证和落实油气水系统和各项具体内容，作出油气水系统的平面边界图和主要参数的平面、剖面变化图。

二、概念设计阶段和开发设计阶段的主要差别

（3）储层描述方面：

概念设计：初步地层划分和对比，确定储层大的沉积类型（亚相），掌握主力层物性参数的空间分布和宏观趋势；

开发设计：确定详细的对比原则和方法，储层微相和“四性关系分析”，储层及储量丰度作出全面、详细评价、储层物性参数空间分布。

二、概念设计阶段和开发设计阶段的主要差别

（4）建立油藏地质模型方面

概念设计：模型简单，以反映主力油层的均一化和随机模型为主；

开发设计：模型准确，随机成分减少，逐级建立主力层层内非均质、平面非均质、全油藏整体地质模型。

第一章 油藏工程设计基础

§ 1-2 油藏评价

(reservoir evaluation)

一、油藏类型及其模型

概念：

圈闭(trap)——一种地质场所。这种地质场所能阻止油气继续运移，并使油气聚集起来形成油气藏的地质场所。

油藏(reservoir)——油在单一圈闭中具有同一压力系统的基本聚集，为油藏。(气则气藏)

一、油藏类型及其模型

油气田——受同一局部构造面积内控制的油气藏的总和。

——地质上的概念

——地理上：行政区域

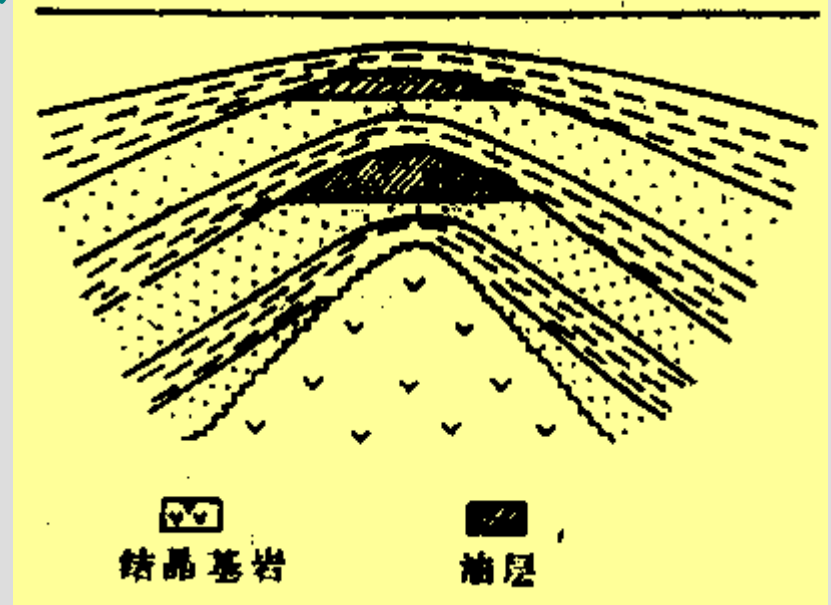
——经济上：基本建设的独立投资核算单位

§ 1-2 油藏评价

（一）分类：根据圈闭（油藏成因）

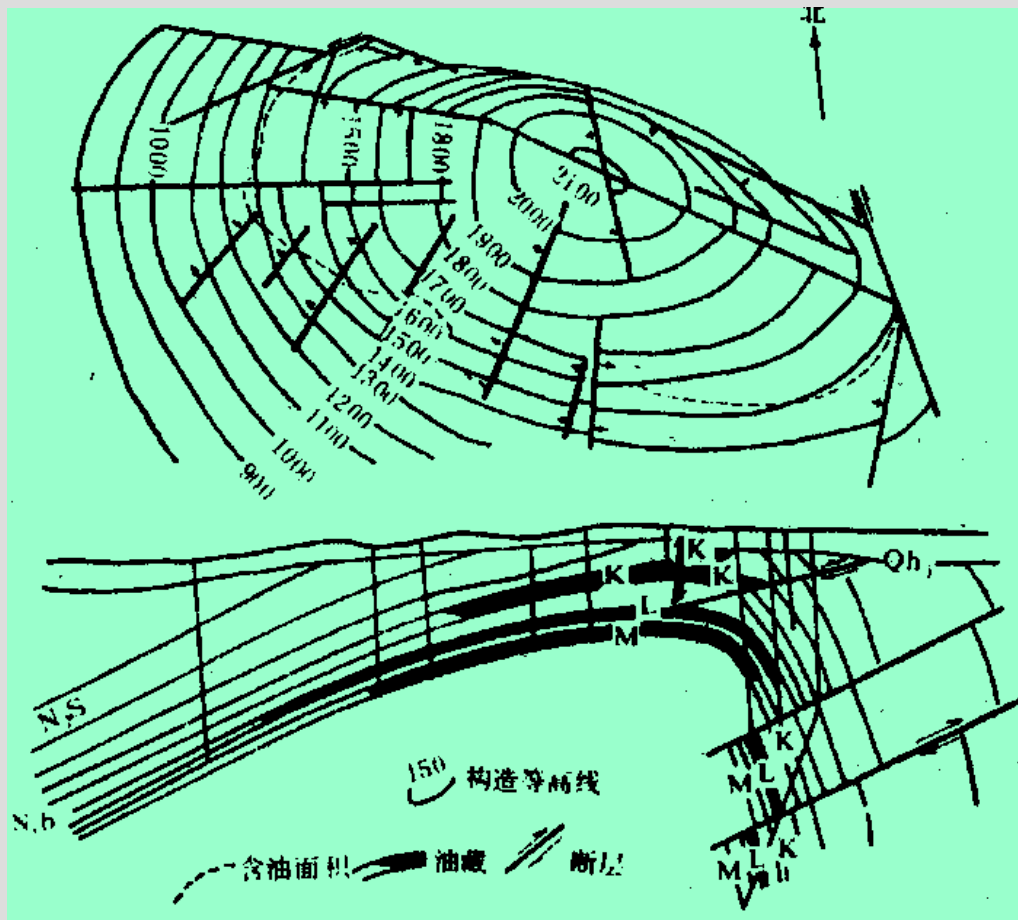
1、构造油藏：(structural oil pool)地层变形（褶皱）、变位（断层）所形成的圈闭。

—背斜油藏、断块油藏



§ 1-2 油藏评价

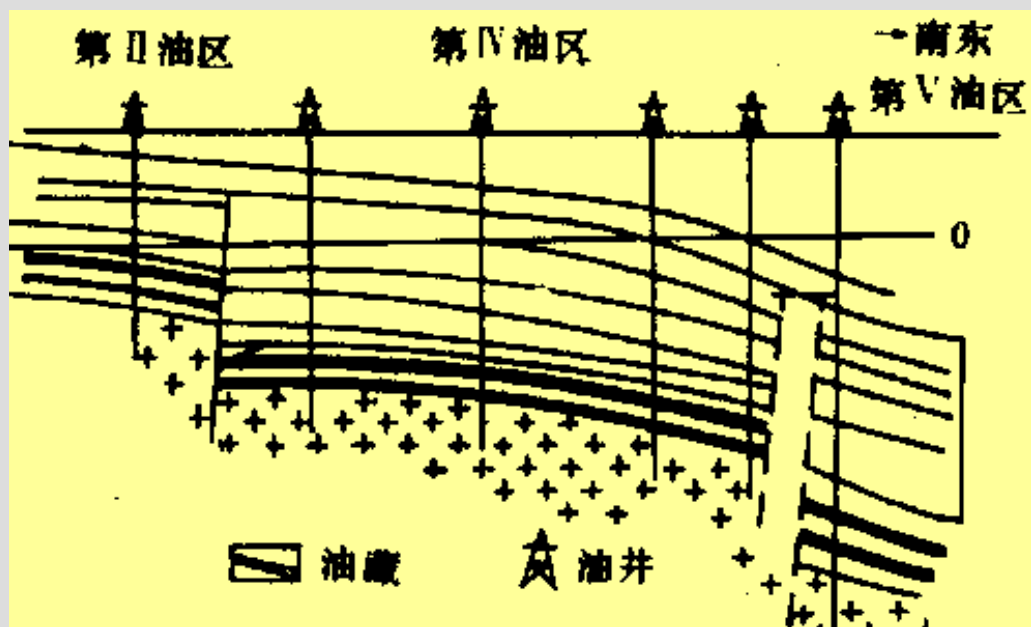
(一) 分类：根据圈闭（油藏成因）



玉门老君庙油田

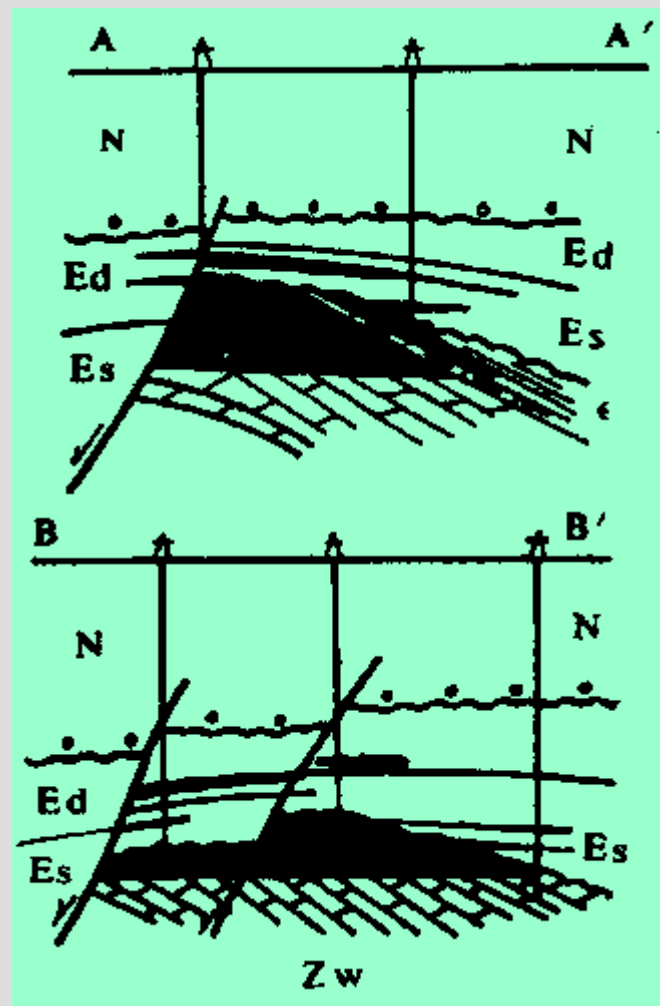
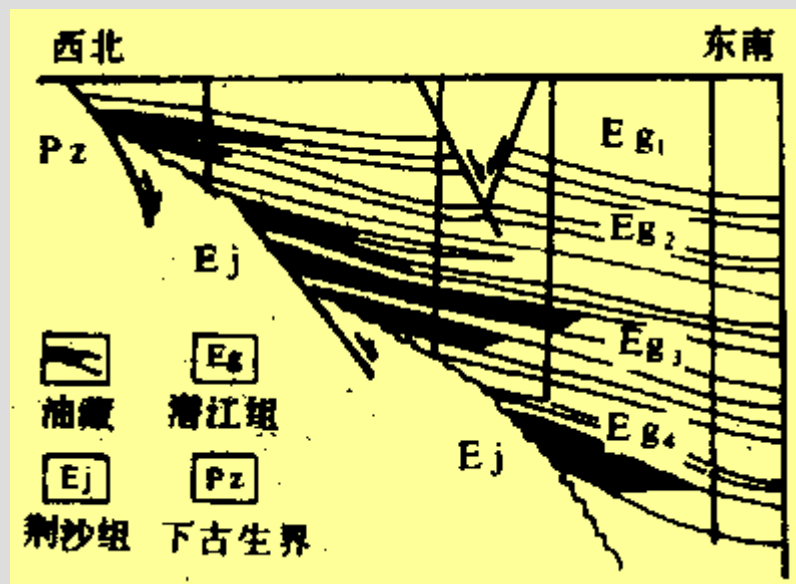
石油大学

§ 1-2 油藏评价



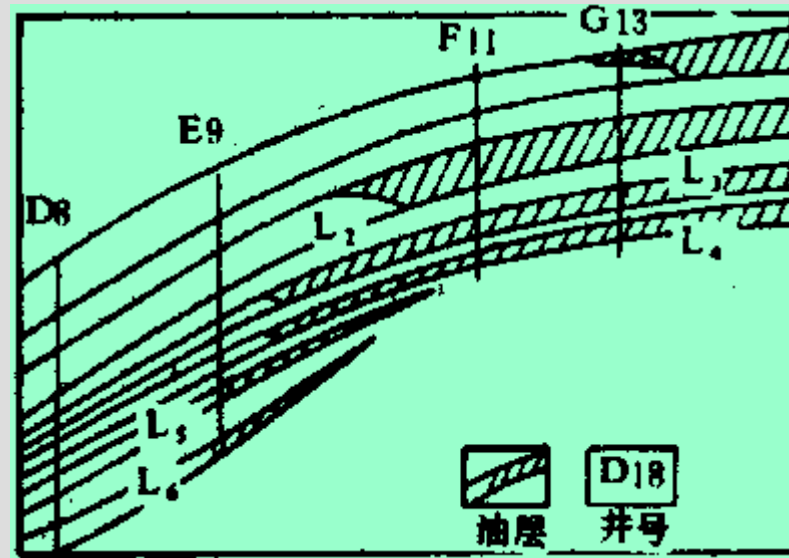
§ 1-2 油藏评价

2、地层油气藏：(stratigraphic reservoir)地层超覆或不整合覆盖所形成的圈闭 —— 古潜山油藏



§ 1-2 油藏评价

3、岩性油气藏：(lithologic reservoir)由岩性尖灭和砂岩透镜圈闭形成——岩性尖灭、透镜圈、生物礁油藏



老君庙油田西部围翼剖面

§ 1-2 油藏评价

4、特殊油气藏：(special reservoir)—隐蔽油气藏

油藏分类一般原则：

- a) 油藏的地质特征：包括油藏的圈闭、储集岩、储集空间、压力等特征；
- b) 油藏的流体及其分布特征
- c) 油藏的渗流物理特性：包括表面润湿性，相对渗透率，饱和度、流体性质；
- d) 油藏的天然驱动能量和驱动类型。

§ 1-2 油藏评价

- 渗透性：低渗透、特低渗透
- 天然能量：边底水、气顶
- 饱和程度：未饱和、饱和、过饱和
- 原油粘度：稠油、常规稠油、高凝油
- 流体性质：凝析油、黑油
- 储集空间：孔隙型、裂缝型、双重介质

§ 1-2 油藏评价

(二) 油田开发模型

地质模型 + 流体渗流模型 + (注入工作剂)

👉 定量描述储层
介质结构特征和油藏
流体在三维空间的变
化和分布规律

👉 油藏开采
过程中的流体
渗流规律

孔隙结构

裂缝结构

溶洞结构

孔隙型
裂缝型
溶洞型

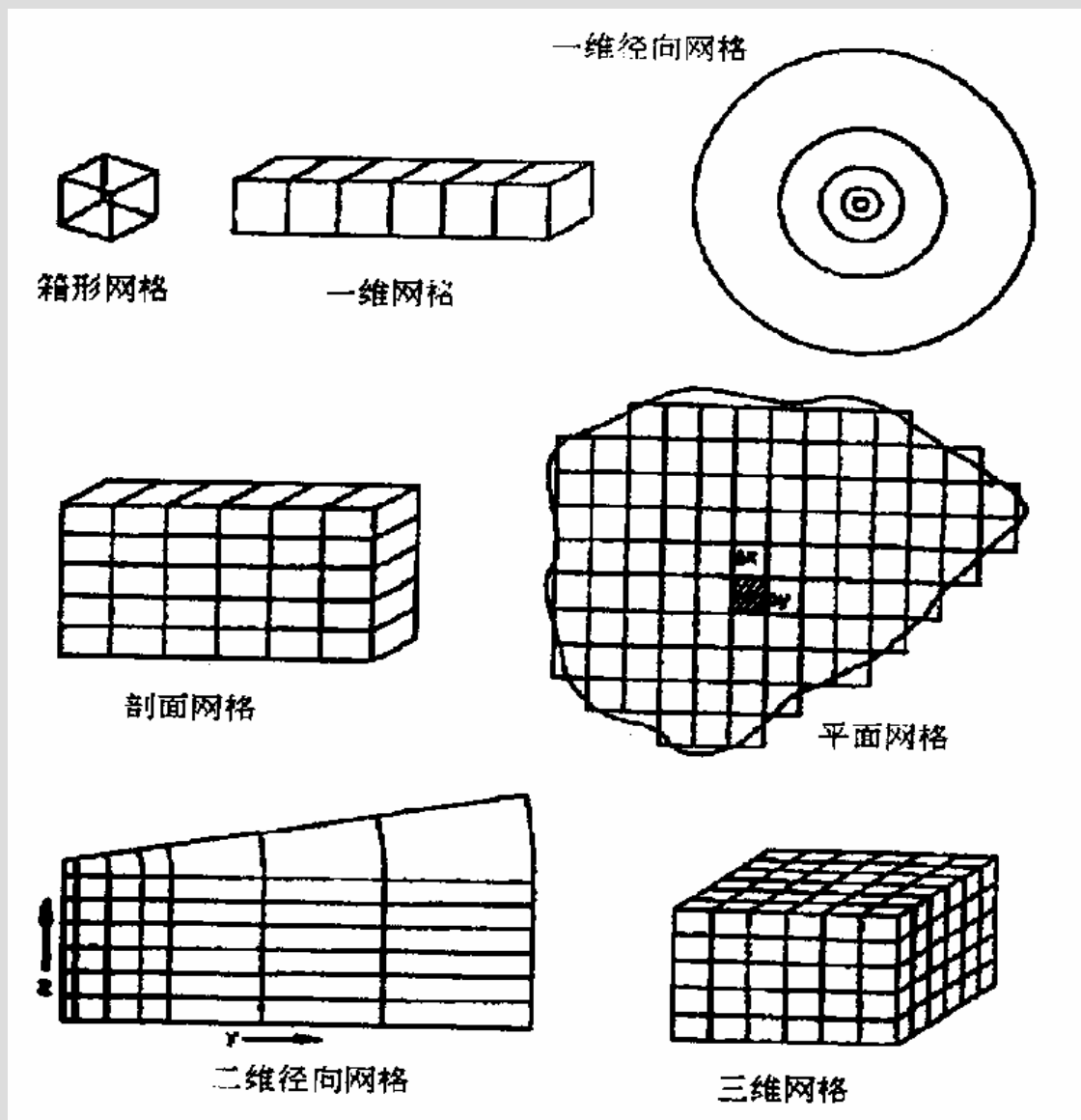
气藏
黑油
挥发油

复合结构

水、
气、
热、
化学剂

(二) 油田开发模型

几种典型的油藏模型网格



(二) 油田开发模型

黑油模型(black oil model)最常用于模拟因粘滞力、重力和毛管力作用而引起的油、气、水三相的等温流动。“黑油”这一术语用以表明油和气为单相。此外，尽管考虑了气体在油和水中的溶解，但仍认为烃类相组成恒定不变。

组分模型(compositional model)除了考虑了各相的流动方程外，还考虑了相组成随压力的变化。组分模拟软件适于挥发油和凝析气藏的动态研究。

(二) 油田开发模型

热采模型(thermal model)考虑了流体流动、热传递和化学反应，适用于模拟蒸汽驱、蒸气吞吐和原地火烧过程。

化学驱模型(chemical-flooding model)考虑了由于扩散、吸附、分离和复杂相特征引起的流体流动和质量传递，适合用于表面活性剂驱、聚合物驱和三元复合驱的模拟。

(二) 油田开发模型

按空间维数来分

零维

一维

二维

三维

按流体相数来分

单相

两相

三相

按流体组分来分

单组分

两组分

...

N组分

按岩石类型来分

单重介质 (砂岩)

双重介质 (碳酸

二、储量计算 (reserves evaluation)

对油、气储量关注的不仅是石油工作者，而且政策决策人、经济学家和油、气加工的下游产业的人员也都关注。

本讲讨论三个问题：

- 1、储量的分级
- 2、储量的测算模式
- 3、地质储量计算

二、储量计算

1、储量的分级分类

1977年储量分级标准：(三级)

三级储量：待探明储量（预测）：三口井以上发现工业油流，精度 $>50\%$

——进一步勘探的依据

二级储量：基本探明储量（控制）：探井、资料井、取心井参数落实，精度 $>70\%$

——制定开发方案依据

一级储量：探明储量（开发）：第一批生产井（基础井网）参数落实，有生产资料，精度 $>90\%$

——生产计划调整方案依据

1、储量的分级分类

我国油气储量资源量分级分类表

总 资 源 量							
工业油流以上	储 量					资源量	
	探明（一级）			控制 （二级）	预测 （三级）	潜在	推测
	已开发 （I类）	未开发 （II类）	基本探明 （III类）				
	A	B	C	C~D	D~E	F	G
非工业价值	资 源 量						
	← 随地质认识程度增加						

1、储量的分级分类

我国油气储量资源量分级分类表

已开发探明储量 (Developed Reserves)

指在现代经济技术条件下，通过开发方案的实施，已完成开发井钻井和开发设施建设，并已投入开采的储量。该储量是提供开发分析和管理的依据，也是各级储量误差对比的标准。

工业油流以上							
	已开发 (I类)						
	A	B	C	C~D	D~E	F	G
非工业价值	资 源 量						
	← 随地质认识程度增加						

1、储量的分级分类

未开发探明储量（Undeveloped）

指已完成评价钻探，并取得可靠的储量参数后所计算的储量。它是编制开发方案和进行开发建设投资决策的依据，其相对误差不得超过正负20%。

		<p>指已完成评价钻探，并取得可靠的储量参数后所计算的储量。它是编制开发方案和进行开发建设投资决策的依据，其相对误差不得超过正负20%。</p>					
工业油流以上	探明						
	已开发 (I类)	未开发 (II类)	未开发 (II类)	(二级)	(三级)	潜在	推测
	A	B	C	C~D	D~E	F	G
非工业价值	资 源 量						
	← 随地质认识程度增加						

1、储量的分级分类

我国油气储量资源量分级分类表

总 资 源 量						
工业油流以上	储 量				资源量	
	探明（一级）			控制 （二级）	预测 （三级）	潜在
	已开发 （I类）	未开发 （II类）	基本探明 （III类）			推测
非工业价值	<div>基本探明储量（Proved）</div> <div>多层系的复杂断块、复杂岩性和复杂裂缝性油气田，在完成地震详查或三维地震并钻了评价井后，在储量参数基本取全、面积基本控制的情况下所计算的储量。该储量是进行“滚动勘探开发”的依据。其相对误差应小于正负30%</div>					G

1、储量的分级分类

我国油气储量资源量分级分类表

总 资 源 量							
工业油流以上	储 量					资源量	
	探明（一级）			控制 （二级）	预测 （三级）	潜在	推测
	已开发 （I类）	未开发 （II类）	基本探明 （III类）				
非工业价值						F	G

控制储量（Probable）

在某一圈闭内预探井发现工业油气流后，以建立探明储量为目的，在评价钻探阶段的过程中钻了少数评价井后所计算的储量。其相对误差不超过正负50%。

1、储量的分级分类

我国油气储量资源量分级分类表

总 资 源 量							
工业油流以上	储 量				资源量		
	探明（一级）			控制 （二级）	预测 （三级）	潜在	推测
	已开发 （I类）	未开发 （II类）	基本探明 （III类）				
	A	B	C				
非工业价值	<div>预测储量（Possible） 是在地震详查提供的圈闭内，经过预探井钻探获得油气流、或油气显示后，根据区域地质条件分析和类比的有利地区按容积法估算的</div>						

预测储量（Possible）

是在地震详查提供的圈闭内，经过预探井钻探获得油气流、或油气显示后，根据区域地质条件分析和类比的有利地区按容积法估算的储量。是制定评价勘探方案的依据。

1、储量的分级分类

我国油气储量资源量分级分类表

总 资 源 量						
工业油流以上	储 量				资源量	
	探明（一级）			控制 （二级）	潜在	推测
	已开发 （I类）	未开发 （II类）	基本探明 （III类）			
						G
非工业价值						

远景资源量（Speculative、Undiscovered）

是根据地质、地球物理、地球化学资料统计或类比估算的尚未发现的资源量。它可推测今后油（气）田被发现的可能性和规模的大小，要求概率曲线上反映出的估算值具有一定合理范围。

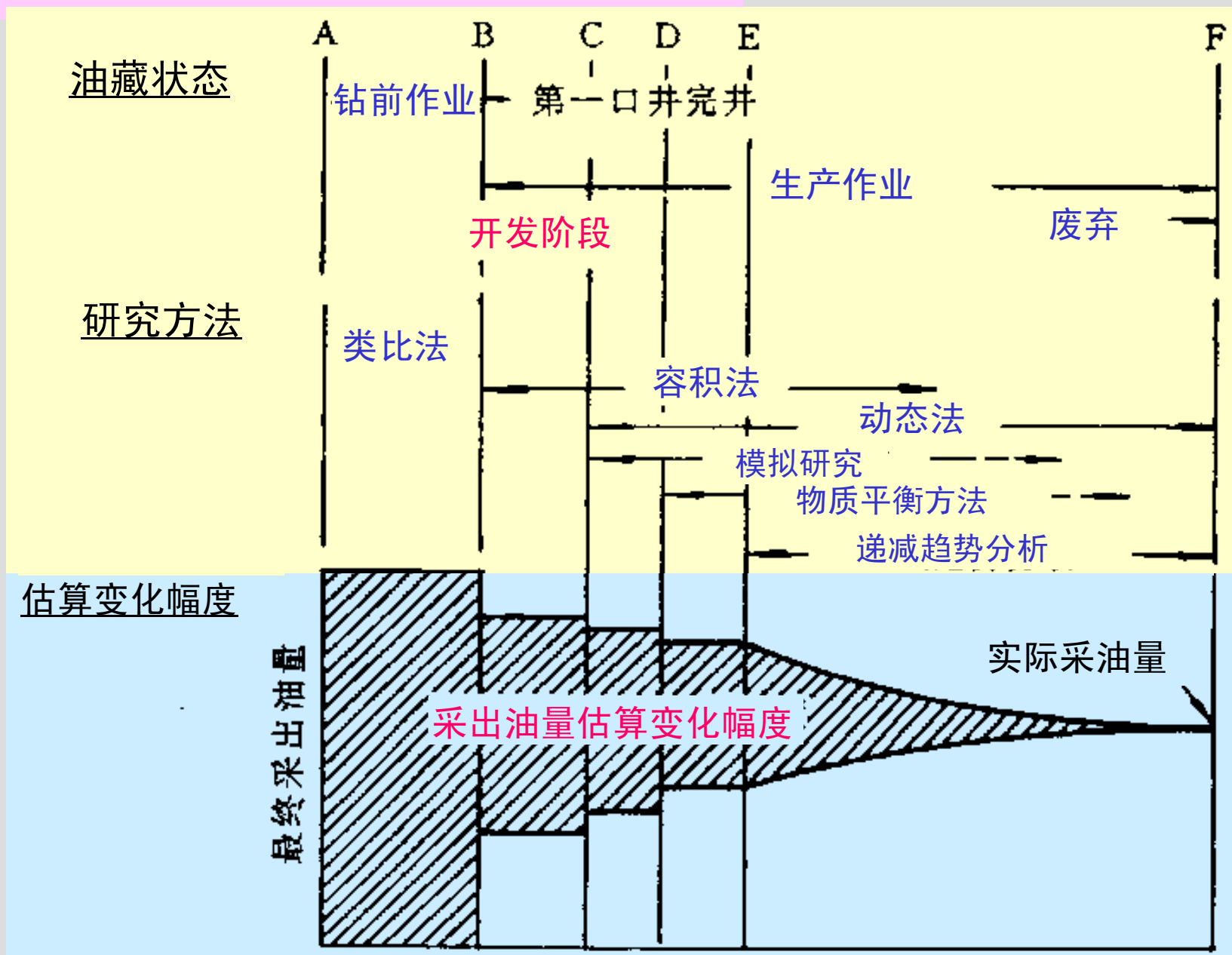
二、储量计算

2、储量的测算模式

储量计算方法：

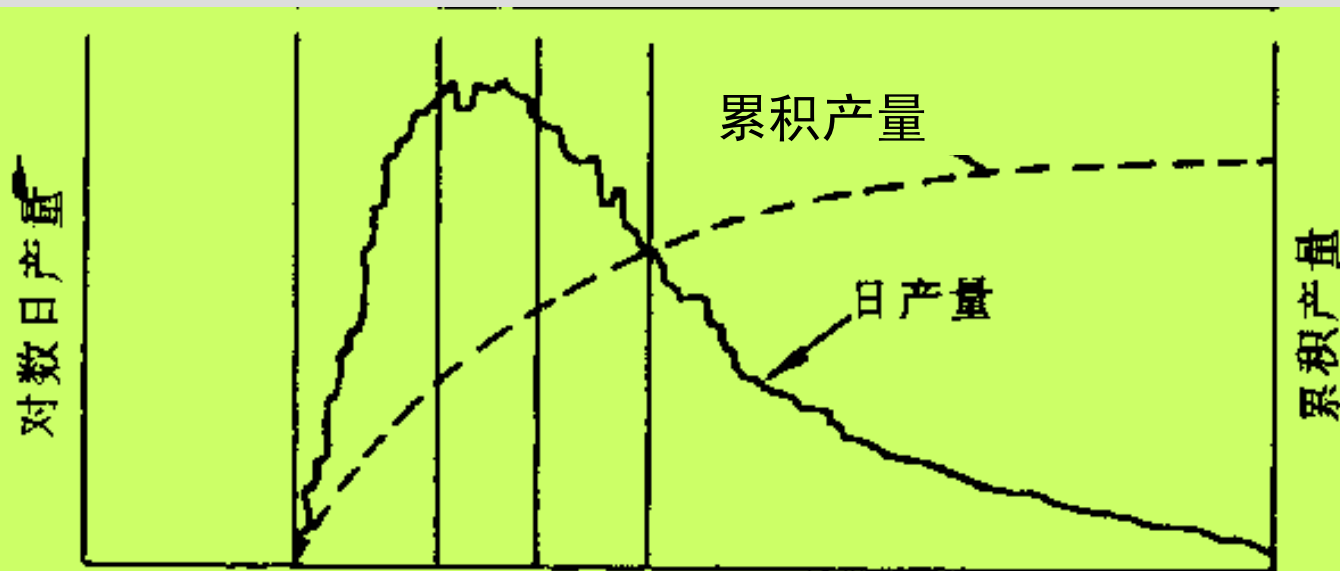
- (1) 类比法（即经验法）
- (2) 容积法
- (3) 物质平衡方法
- (4) 产量递减法
- (5) 矿场不稳定试井方法
- (6) 水驱特征曲线法
- (7) 统计方法

2、储量的测算模式

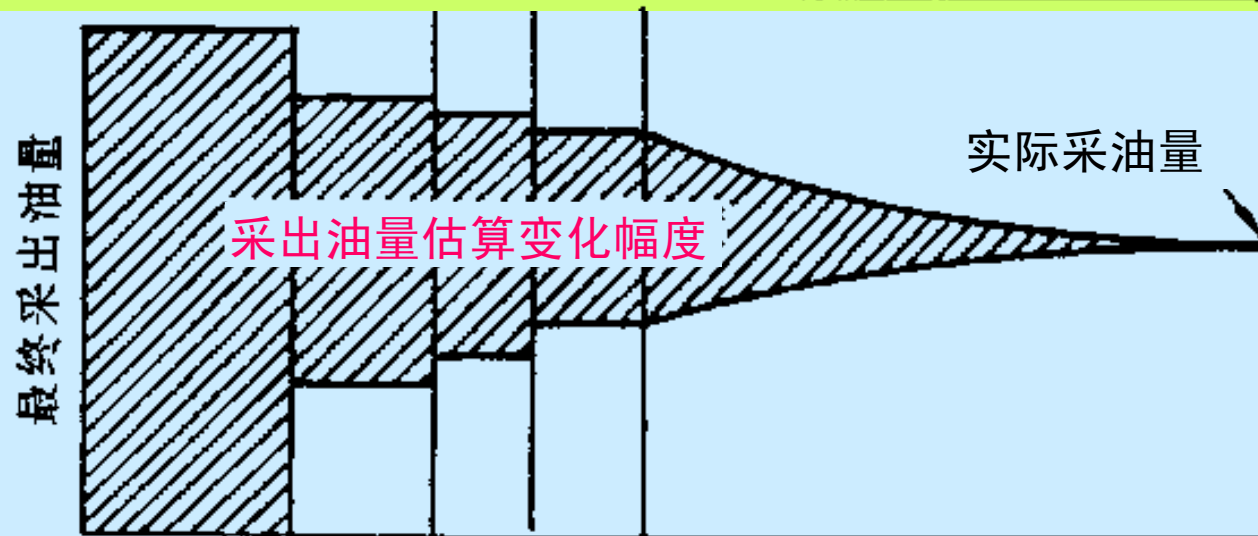


2、储量的测算模式

生产曲线

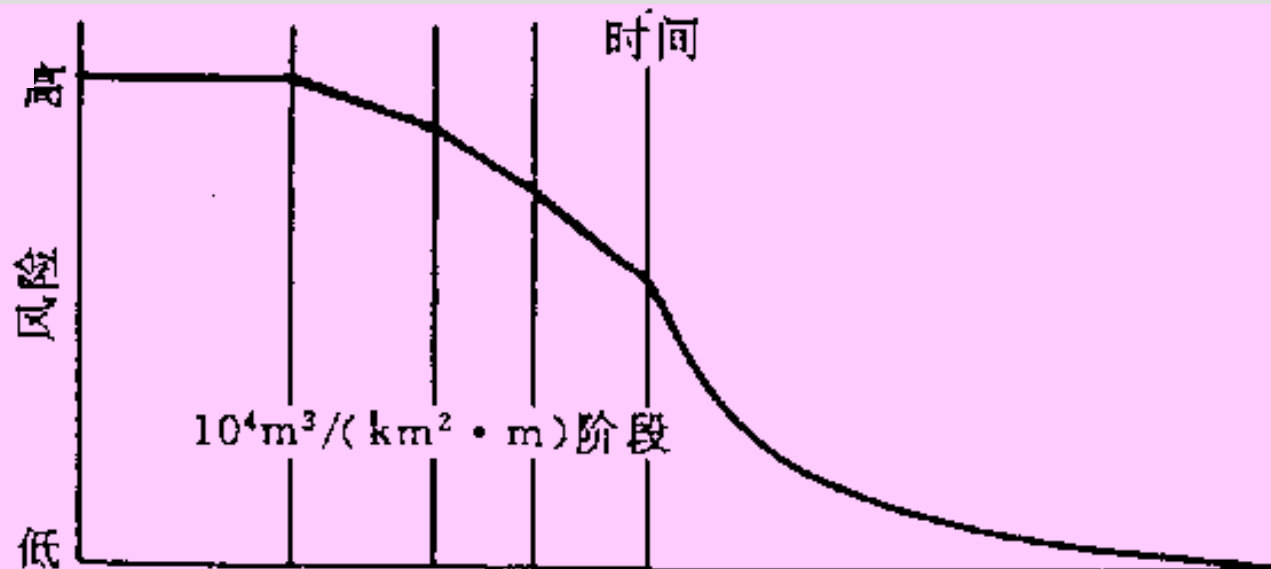


估算变化幅度

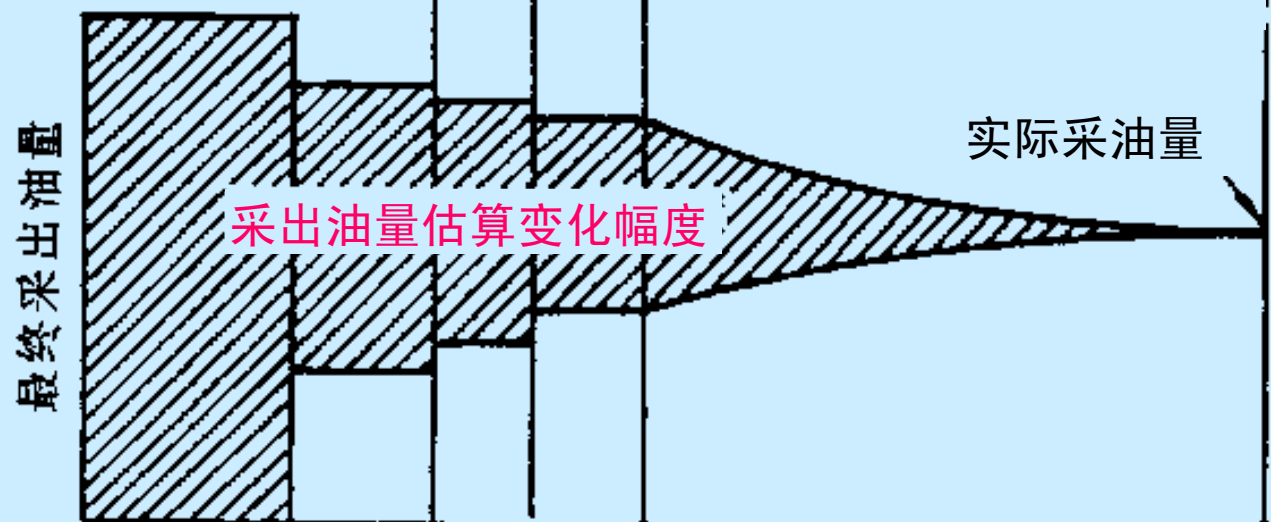


2、储量的测算模式

相对风险



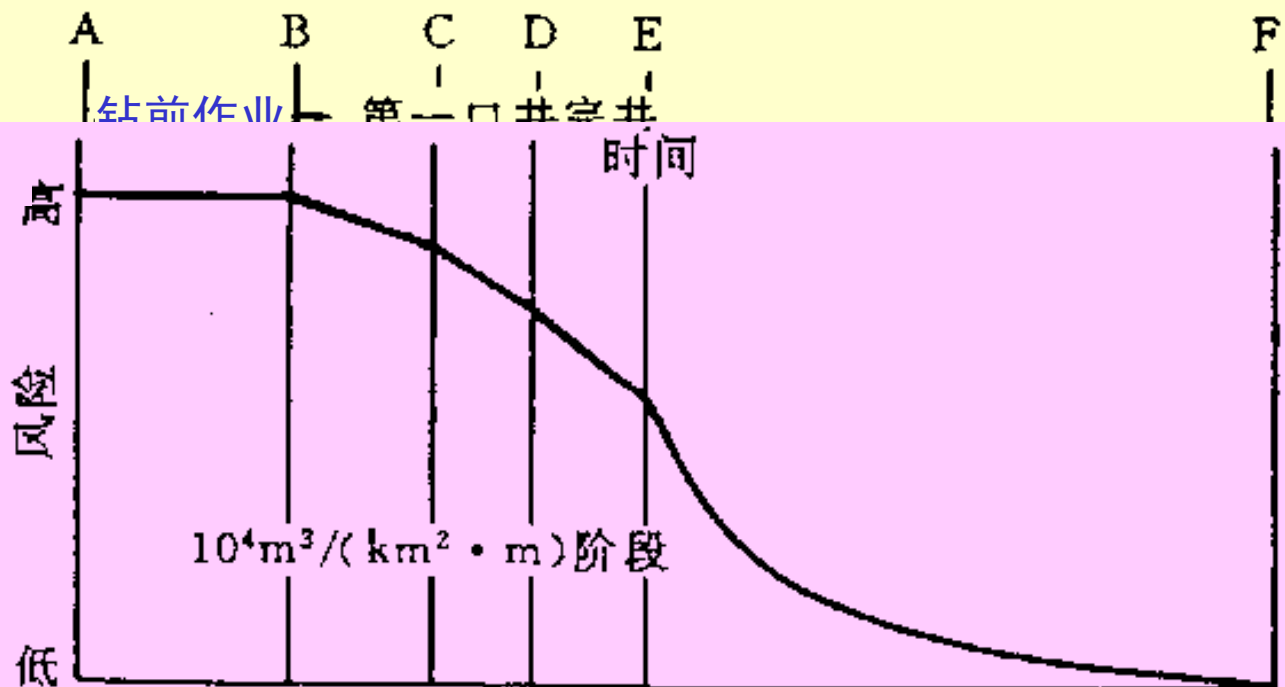
估算变化幅度



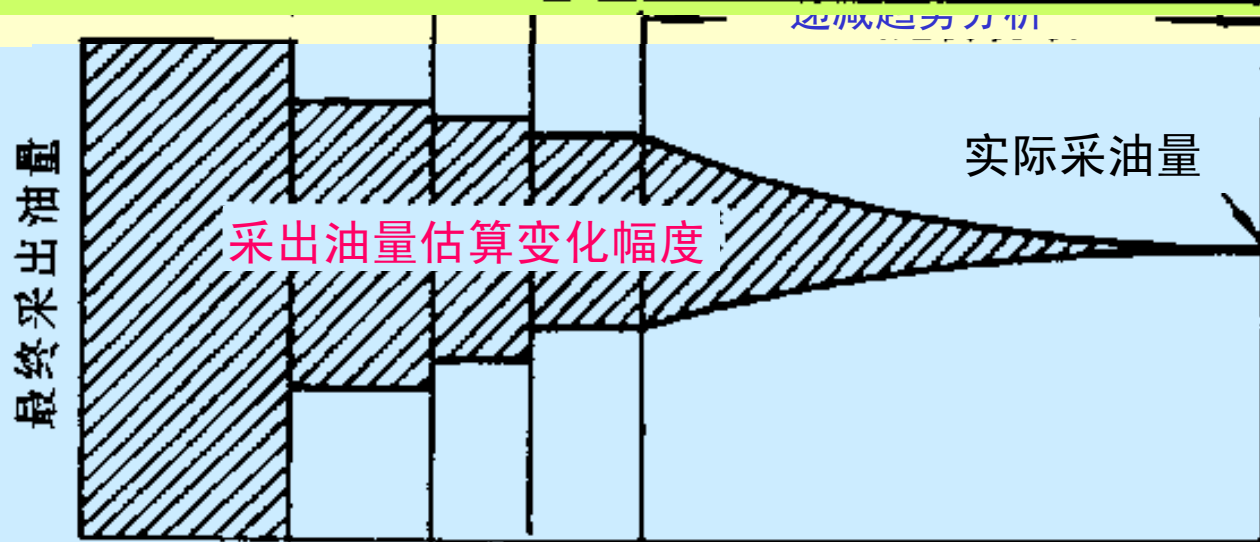
2、储量的测算模式

油藏状态

相对风险



估算变化幅度



2、储量的测算模式

储量综合评价标准

储量规模分类

油 藏		气 藏	
分类	标准	分类	标准 (10^8m^3)
特大油田	>10	特大气田	>1000
大油田	$>1-10$	大气田	$>300-1000$
中油田	$>0.1-1$	中气田	$>50-300$
小油田	$>0.01-0.1$	小气田	$>5-50$

2、储量的测算模式

储量丰度分类

油 藏		气 藏	
分类	标准 ($10^4\text{t}/\text{km}^2$)	分类	标准 ($10^8\text{m}^3/\text{km}^2$)
特高丰度	>500	特高丰度	>30
高丰度	$>300-500$	高丰度	$>10-30$
中丰度	$>100-300$	中丰度	$>4-10$
低丰度	$>50-100$	低丰度	$>2-4$
特低丰度	<50	特低丰度	<2

3、地质储量的计算

3.1 油田地质储量的计算

地质储量 $N = 100Ah\phi(1 - S_{wi})\rho_o / B_{oi}$

式中：N— 10^4 t； A— km^2 ； h—m； ρ — m^3/t

溶解气储量 $G_s = 10^{-4} NR_{si}$

式中：G_s— 10^8m^3 ； N— 10^4 t； R_{si}— m^3/t

储量丰度

$$\Omega_o = N / A = 100h\phi(1 - S_{wi})\rho_o / B_{oi}$$

度

单储系数

$$SNA = N / (Ah)$$

$$\Omega_o = 10^6 \text{ t} / \text{km}^2$$

数

3.2 气田地质储量的计算

气田地质储量: $G = 0.01Ah\phi S_{gi} / B_{gi}$

式中: G — 10^8 m^3 ; A — km^2 ; h — m ;

$$B_{gi} = \frac{V_{\text{地下}}}{V_{\text{地面}}} = \frac{p_{sc} Z_i T}{p_i T_{sc}}$$

下标: i —原始条件; sc —地面标准条件

取: p_i — 0.101 MPa ; T_{sc} — $293 \text{ }^\circ\text{K}$; Z —压缩因子

$$G = 0.01Ah\phi S_{gi} \frac{T_{sc}}{T} \frac{1}{p_{sc}} \frac{p_i}{Z_i}$$

式中: p_i/Z_i —原始视地层压力, MPa

3.2 气田地质储量的计算

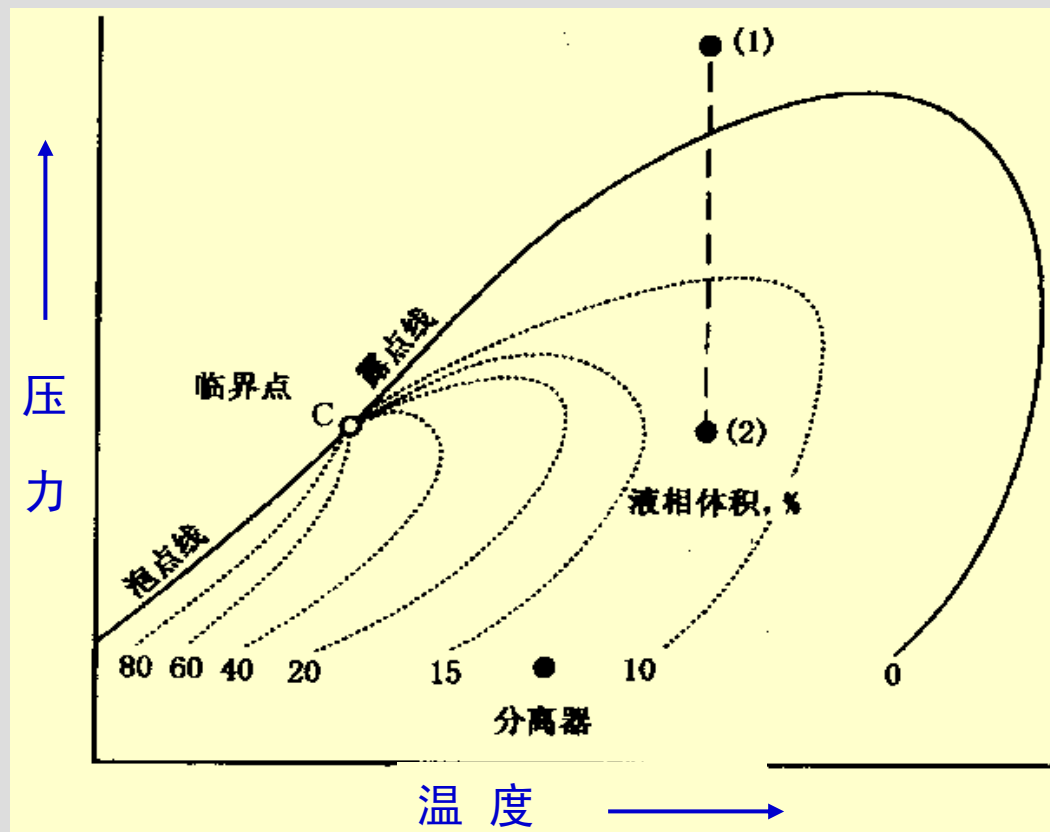
当气藏地层压力 p_i 下降到废弃压力 p_a 时，得可采储量：

$$G_R = 0.01Ah\phi S_{gi} \frac{T_{sc}}{T} \frac{1}{p_{sc}} \left(\frac{P_i}{Z_i} - \frac{p_a}{Z_a} \right)$$

式中： p_a/Z_a — 放弃视油层压力， Mpa ；

G_R — 气藏开采储量， 10^8 m^3 .

3.3 凝析气田地质储量的计算



计算原始天然气（单相气态）储量

天然气量 G_{ci}

凝析油量 N_{ci}

3.3 凝析气田地质储量的计算

(1) 容积法—天然气（单相气态）总储量

设原始条件下单相气体占体积 V_p ,

由状态方程 $pV=ZnRT$, 得总物质(V_p)的量:

$$n_t = \frac{p_i V_p}{Z_i RT}$$

n_t —kmol ; V_p — m^3 ; R — $0.0083159\text{MPa}\cdot m^3/(\text{kmol}\cdot K)$

$$G = 24.056 \times n_t = 24.056 \times \frac{0.01 Ah \phi S_{gi} p_i}{0.008315 Z_i T}$$

$$G = 28.927 \frac{Ah \phi S_{gi} p_i}{Z_i T}$$

$$G—10^8 m^3$$

3.3 凝析气田地质储量的计算

(2) 天然气储量 G_{ci}

设已知生产气油比 GOR ，即 1m^3 凝析油中有 GOR 方气，

其质量：

$$n_g = \frac{GOR}{24.056}$$

$$n_g - \text{kmol} ; GOR - \text{m}^3/\text{m}^3 ;$$

1 m^3 凝析油的质量： γ_o —凝析油密度； M_o —凝析油分子量

$$n_g = \frac{1000\gamma_o}{M_o}$$

3.3 凝析气田地质储量的计算

(2) 天然气储量 G_{ci}

平均分子量由经验关系式: $M_o = \frac{44.29\gamma_o}{1.03 - \gamma_o}$

天然气的 mol 分数:

$$f_g = \frac{n_g}{n_g + n_o}$$

天然气储量:

$$G_{ci} = Gf_g$$

$$10^8 \text{m}^3$$

(3) 凝析油储量:

$$N_{ci} = \frac{10^4 G_{ci} \gamma_o}{GOR}$$

$$10^4 \text{t}$$

三、驱动方式及其开采特征

了解油藏特性，预测未来动态，必须掌握有关油藏驱动机理的相关知识。有6种基本驱动机理：

(1) 岩石及流体弹性驱；

(2) 溶解气驱；

(3) 气顶驱动；

(4) 水驱动；

(5) 重力驱动；

(6) 复合驱动。

(1) 驱替效率最低；

(2) 采收率5%—30%；

(3) 采收率20%—40%；

(4) 采收率35%—75%；

(5) 采收率80%；

(6) 比溶解气高，比水驱低

三、驱动方式及其开采特征（弹性）

（1）封闭弹性驱（closed expansion drive）

形成条件：1、无边底水或边水不活跃；

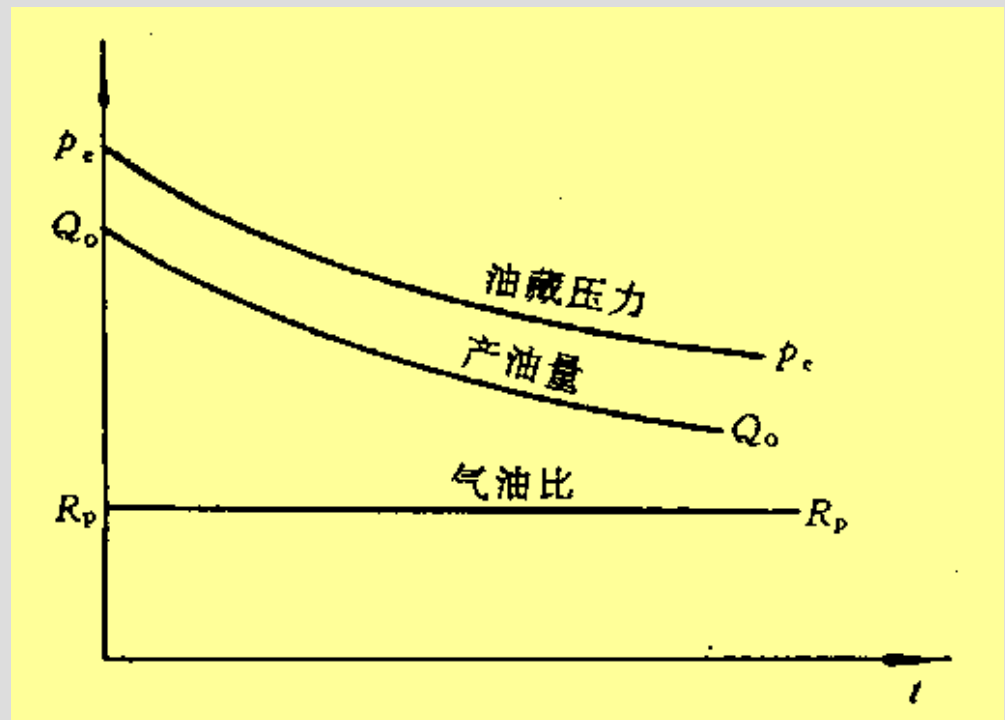
2、 $P_i > P_b$

驱油机理：流体和岩石颗粒膨胀；地层压实

生产特征：1、压力下降；2、产量下降；3、气油比稳定

采收率：1%—10%

平均3%

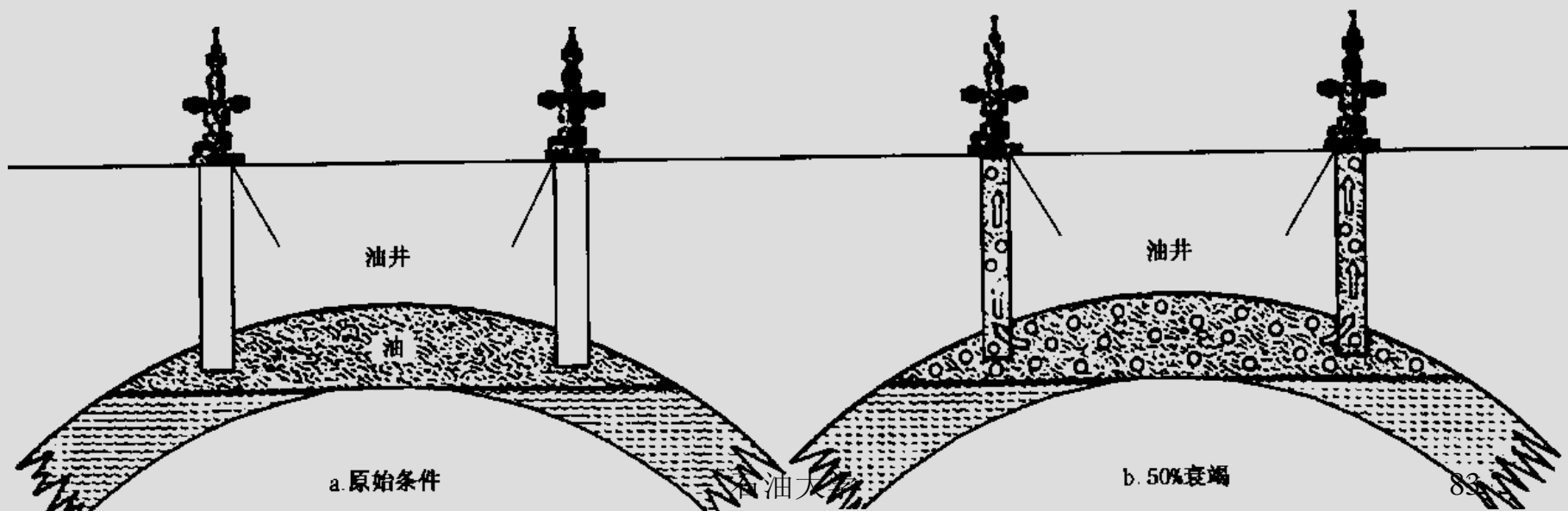


三、驱动方式及其开采特征（溶解气）

（2）溶解气驱动(solution gas drive)

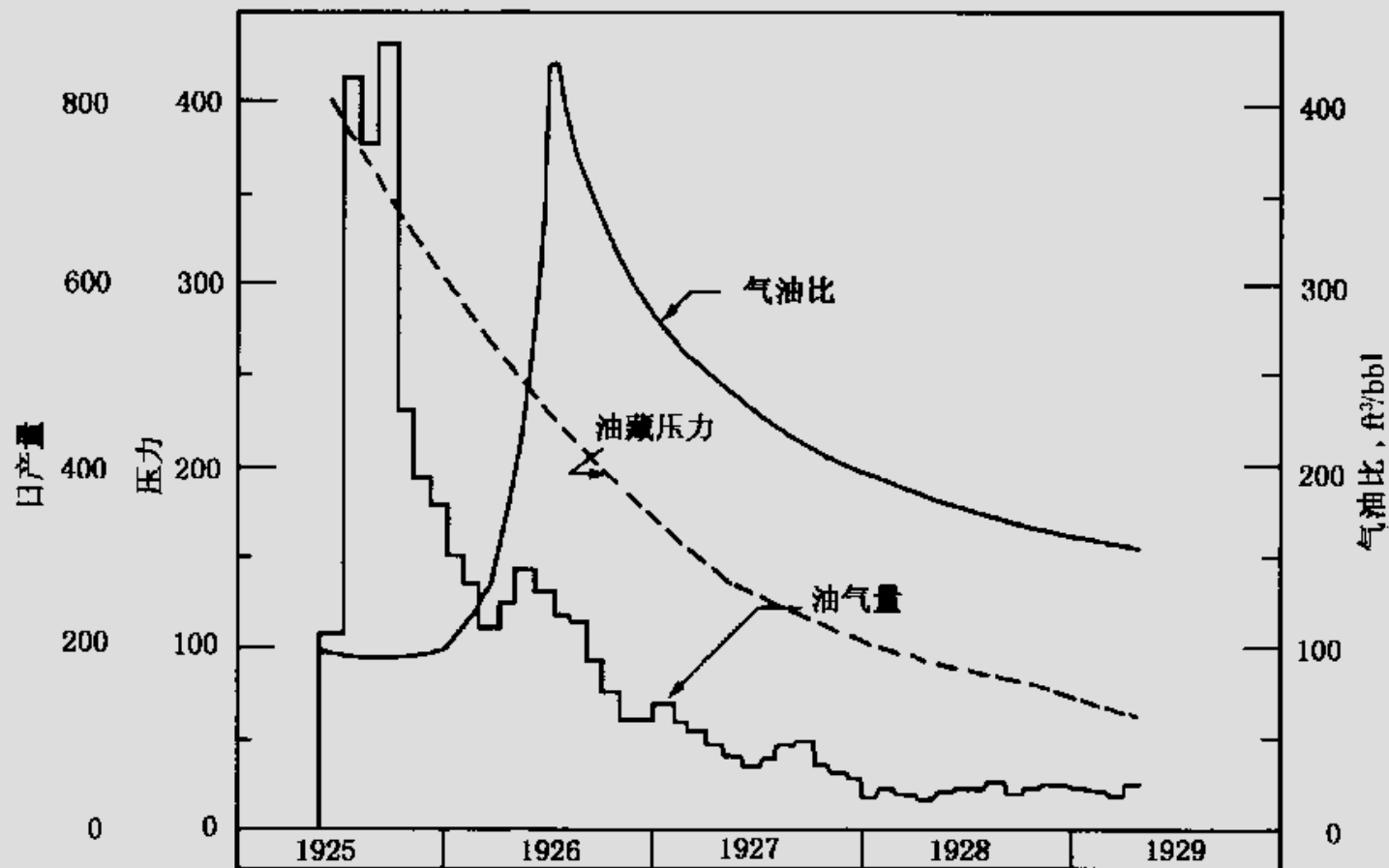
- 形成条件：
- 1、无气顶；
 - 2、无边底水或边水不活跃；
 - 3、 $P_i \leq P_b$

驱油机理：溶解气膨胀



三、驱动方式及其开采特征

(2) 溶解气驱动

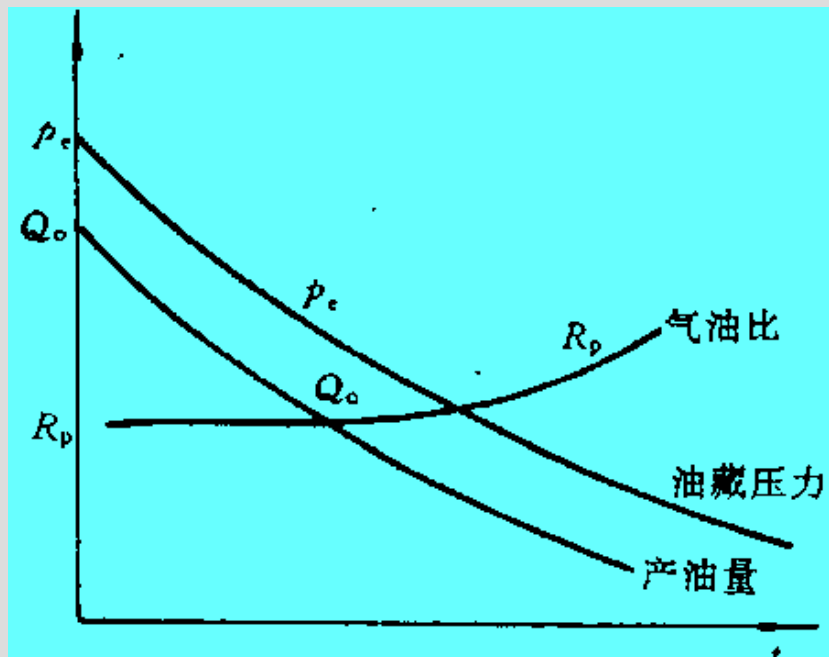


三、驱动方式及其开采特征（气顶）

（3）气顶驱动(gas cap drive)

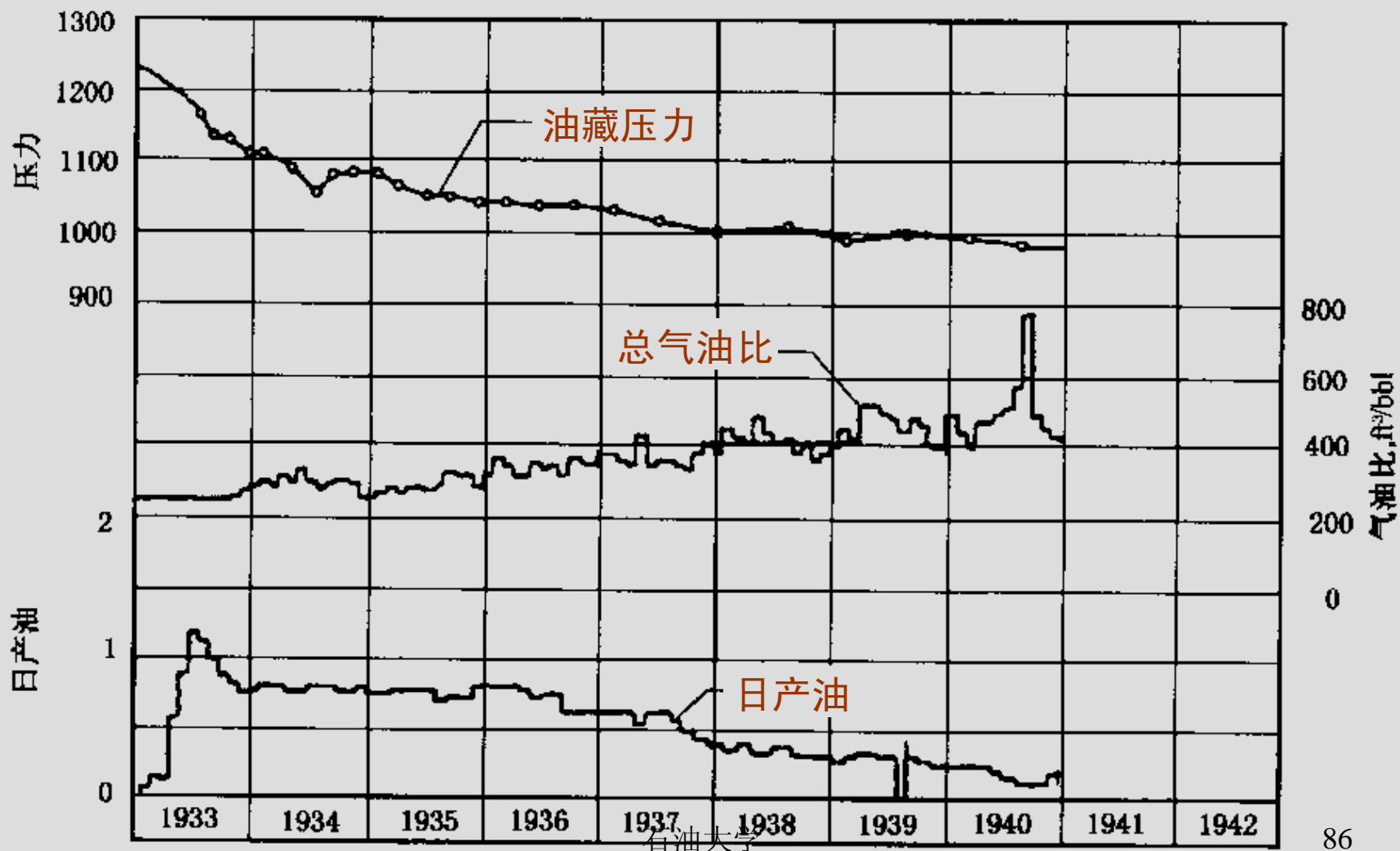
- 形成条件：
- 1、由气顶；
 - 2、无水驱或弱水驱；
 - 3、 $P_i = P_b$
 - 4、伴随溶解气膨胀

生产特征：



三、驱动方式及其开采特征

一个气顶驱油藏生产数据



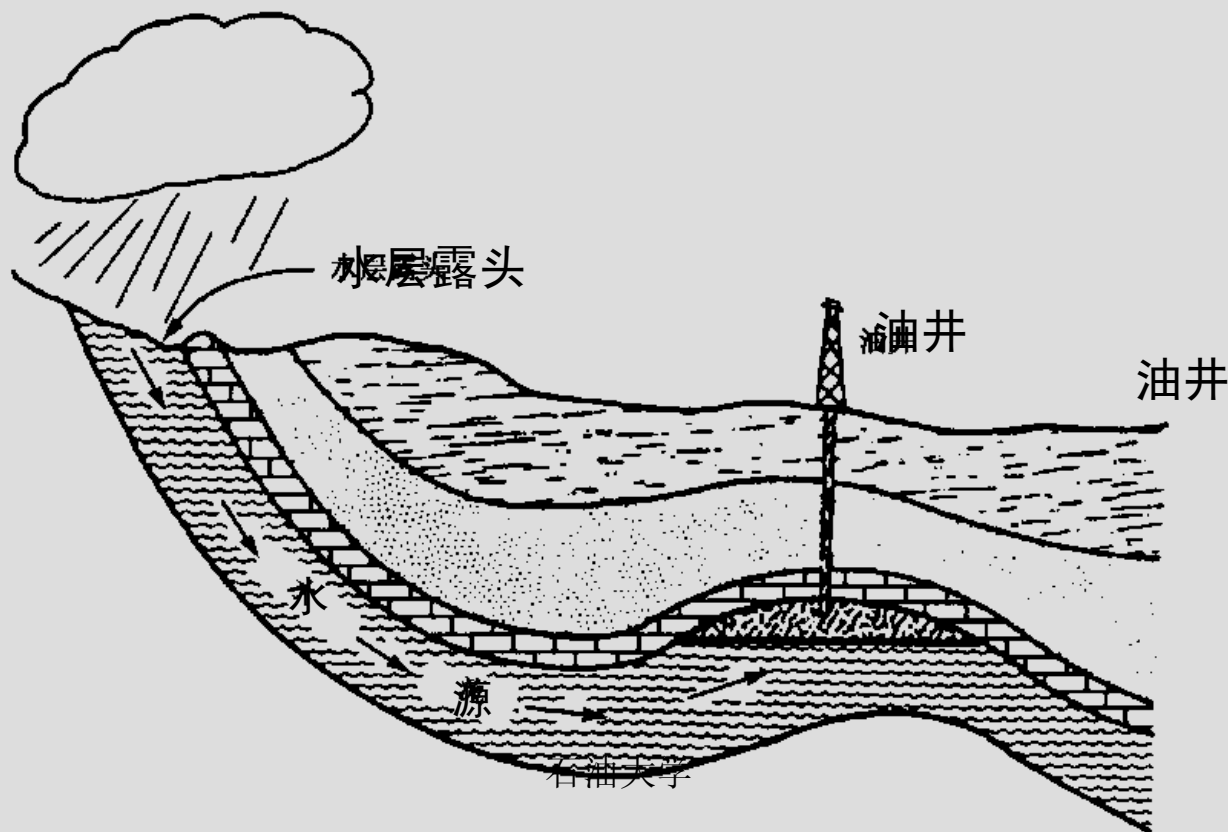
三、驱动方式及其开采特征（水驱）

（4）水压驱动(water drive)

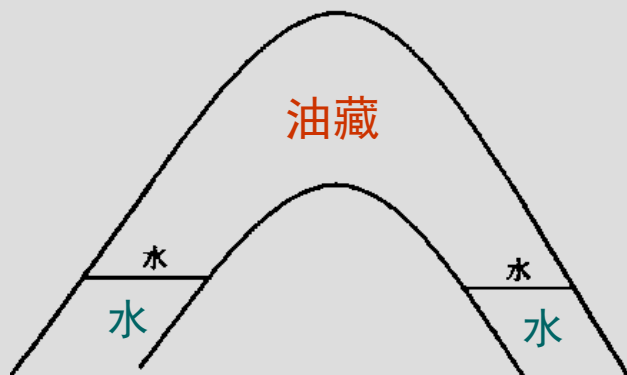
形成条件：1、有边底水；2、有露头；3、或人工注水

刚性水驱：供液速度=采液速度（边水充足）

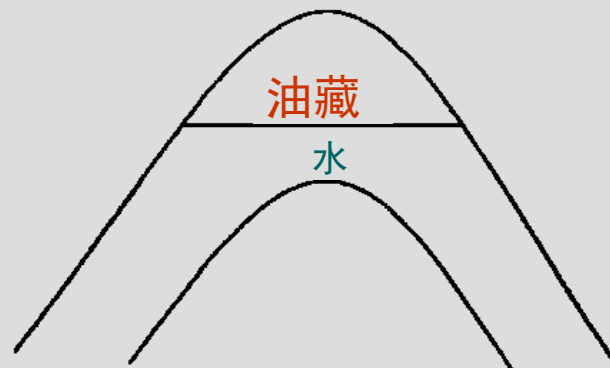
弹性水驱：供液速度< 采液速度（无露头，边水不活跃）



三、驱动方式及其开采特征

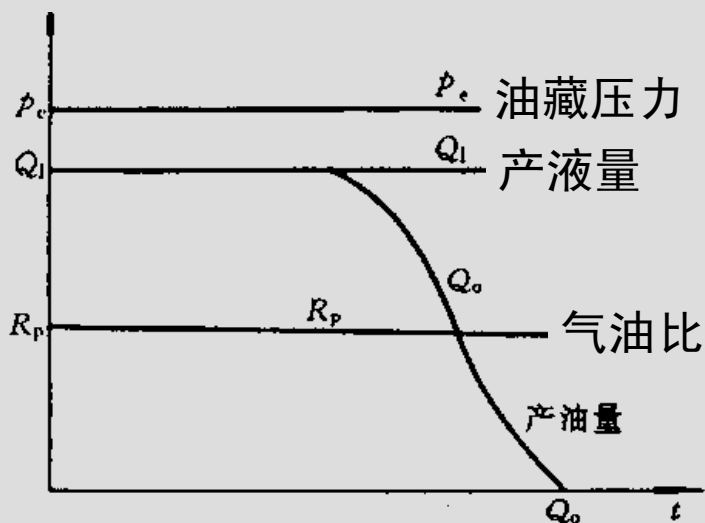


边水驱

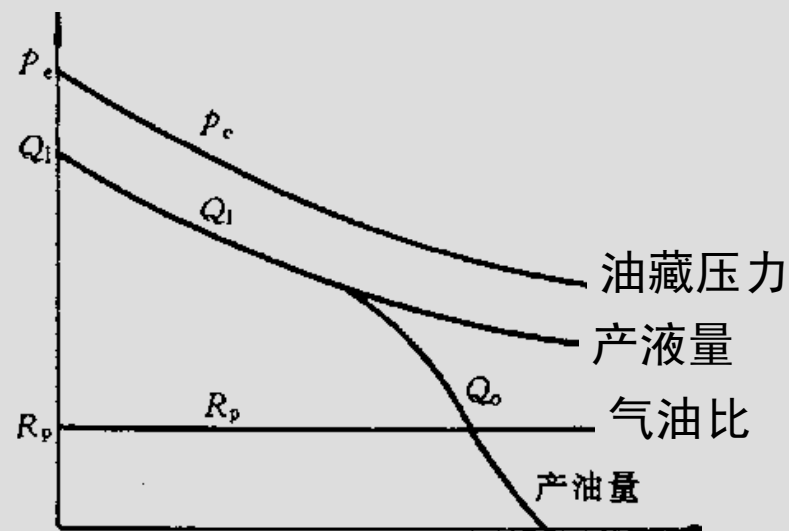


低水驱

生产特征:



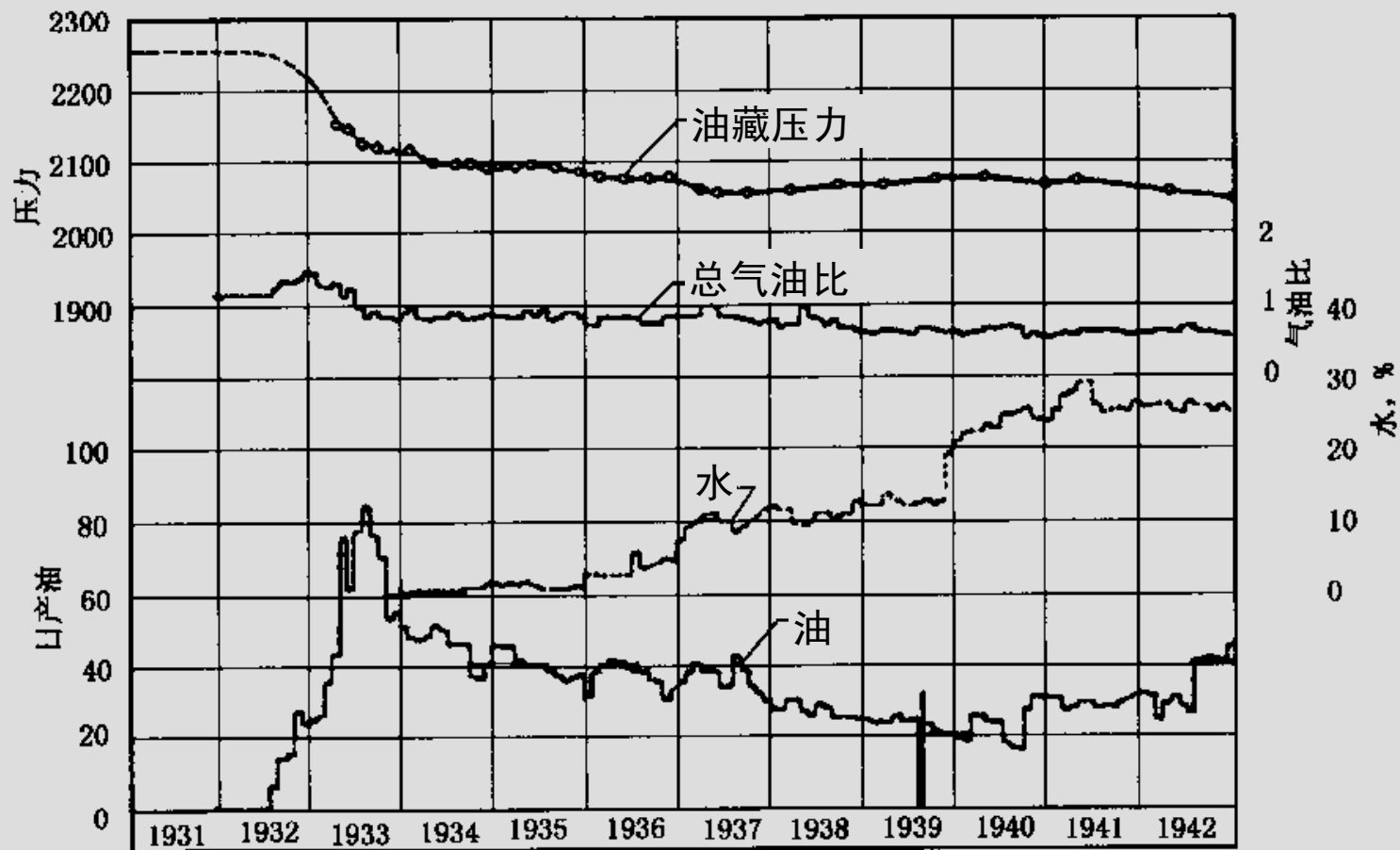
刚性水驱生产特征



弹性水驱生产特征

三、驱动方式及其开采特征

一个水驱油藏生产数据

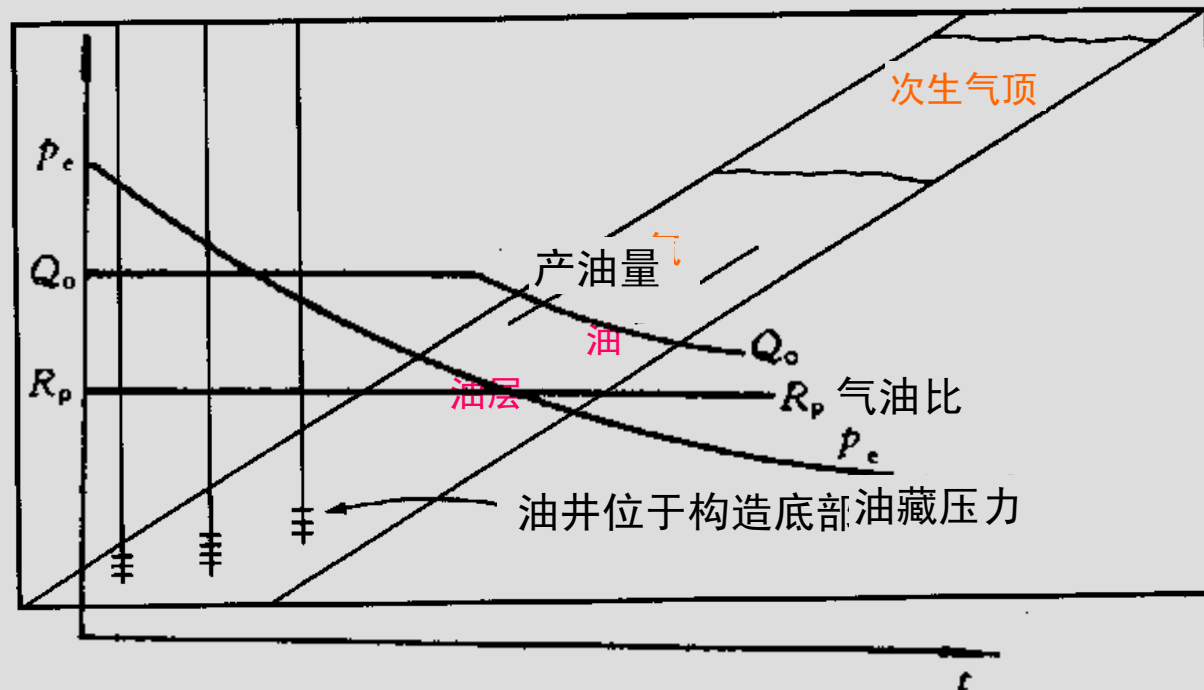


三、驱动方式及其开采特征（重力）

（5）重力驱动(gravity drive)

形成条件：1、油层比较厚，倾角大；
2、渗透性好；
3、开采后期。

生产特征：



三、驱动方式及其开采特征（复合）

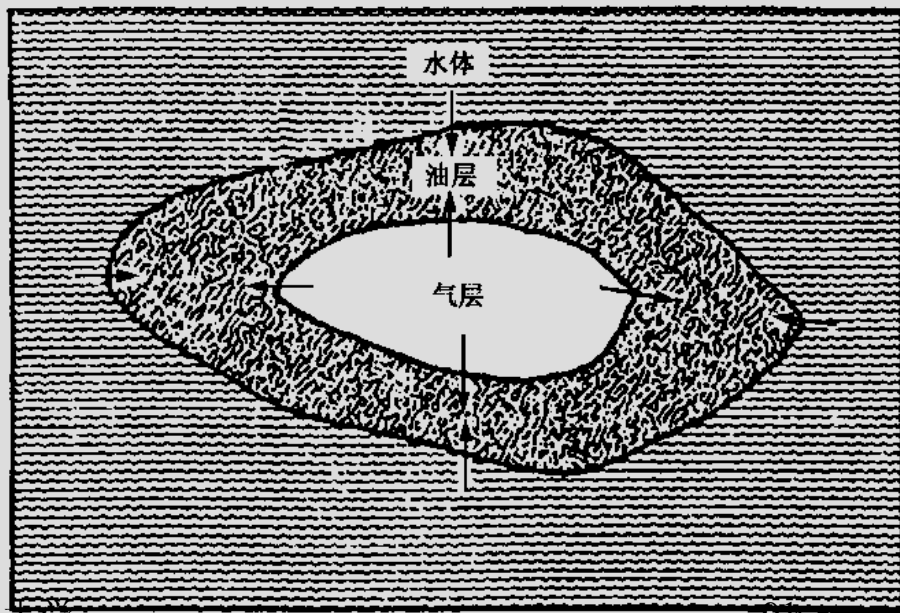
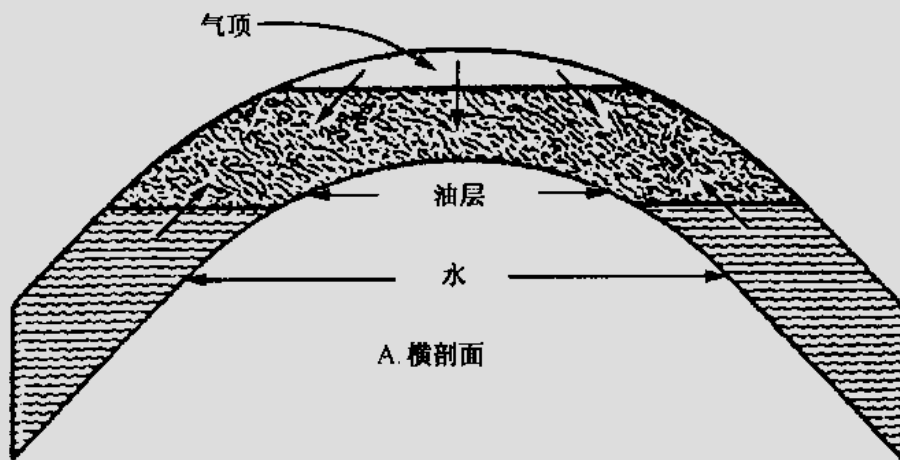
（6）复合驱动

(complex drive)

最常见的驱动机理是油藏中的水和自由气同时产生驱动作用。

在复合驱中有两种驱动力：

- （1）溶解气驱和弱水驱；
- （2）小气顶驱和弱水驱。



三、驱动方式及其开采特征

应注意：

- (1) 油藏中存在一种驱动方式是少见的，多数情况下，可能同时存在几种驱动能量，而某一种能量起主导作用；
- (2) 驱动方式会转化，要时刻注意 P_i 、 Q_o 、 R_p 生产动态变化，采用合理的驱动方式；
- (3) 要监测油藏压力变化，要保存合理的油藏压力水平。

第一章 油藏工程设计基础

§ 1—3 开发层系划分

油田—多油层—非均质 { 纵向上
平面上

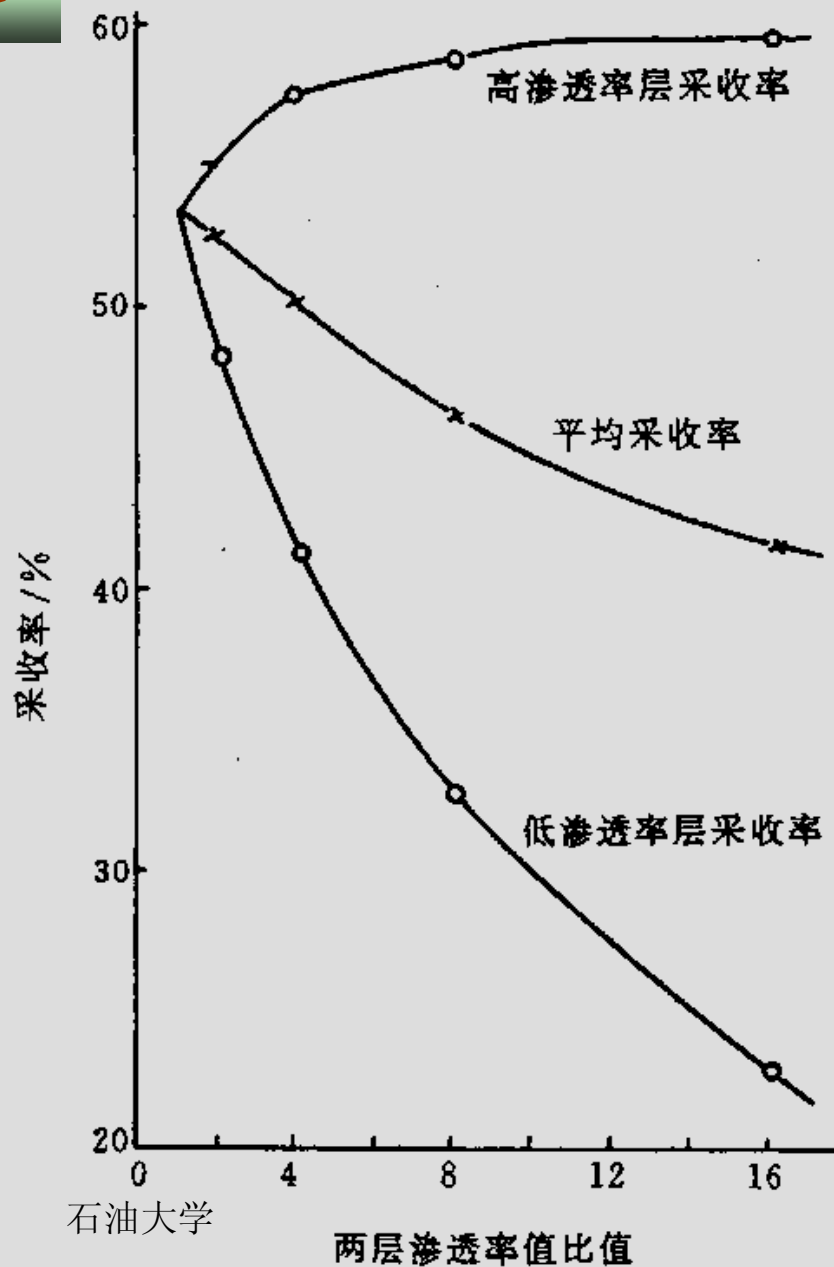
影响 { 油田开发部署 { 注入水的利用率
开发效果 { 各层储量的动用
水淹体积
最终采收率

本世纪四十年代开始重视对油层的划分和组合的研究

§ 1—3 开发层系划分

层间渗透率差别对
采收率的影响

室内实验结果



§ 1—3 开发层系划分

划分开发层系：就是把特征相近的油层组合在一起，用独立的一套开发井网进行开发，并以此为基础进行生产规划、动态研究和调整。

一、多油层油田的非均质性特

- 1、储油层性质之间的差别
- 2、各层油水关系的差别
- 3、各层间天然能量驱动方式的差别
- 4、各油层油气水的性质、压力系统差别

§ 1—3 开发层系划分

二、开发层系划分的意义

举例：辽河马701井

三个主力层如图所示

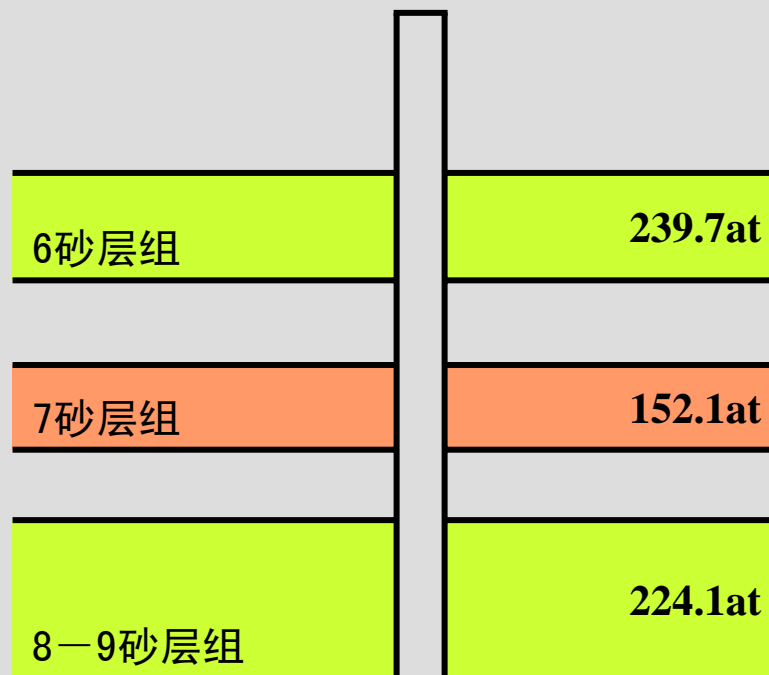
73年投产，用一套井网合采；

80年9月测试各层压力如图示

$Q_o: 2\text{t/d}$, $f_w: 95\%$, $P_f: 200\text{at}$

调整：隔开二层，生产7砂组

$Q_o: 97.8\text{t/d}$; $f_w: 2.2\%$



§ 1—3 开发层系划分

二、开发层系划分的意义

1、有利于发挥个油层的作用，为油层比较均衡开采打下基础，减少层间矛盾；

★水驱油田，高K层水淹后，会加剧层间矛盾

★编制方案是以平均参数来设计井距、排距、生产压差，而实际生产时， P_{fw} 反映高 k/μ 层

★干扰：高渗透层的生产受到低渗透层的干扰

2、提高采油速度，缩短开发时间；

3、提高注水波及体积，提高最终采收率；

4、适应采油采油工艺技术要求的要求。

§ 1—3 开发层系划分

三、划分开发层系的原则

1、同一层系内的油层物性应当接近，尤其渗透率要接近。

2、一个独立的开发层系应具有一定的厚度和储量。

$h_{\text{有}} > 10 \text{ m}$ 单井控制储量 > 10 万吨

3、各开发层系间必须具有良好的隔层。

（大庆）隔层厚度 > 3 米

4、要考虑到采油工艺技术水平，相邻油层尽可能组合在一起。

第一章 油藏工程设计基础

§ 1—4 井网与注水方式

第一个“五点井网注水”方案，在1924年宾夕法尼亚的Bradford油田实施。1931年，注水应用俄克拉何马，1936年又发展到得克萨斯Fry油田。尽管如此，直到20世纪50年代初，注水才真正得到广泛应用。

§ 1—4 井网与注水方式

本节讨论：

- 1、为什么选择注水？
- 2、注水时间的确定。
- 3、注采井网系统。

§ 1—4 井网与注水方式

一、为什么选择注水？

注水之所以被广泛地应用于商业性开采石油，主要出于下列原因：

- (1) 水易于获得；
- (2) 水对于低相对密度和中等相对密度的原油是一种有效的驱替介质；
- (3) 注水的投资和操作费用低，而利润大；
- (4) 水注入地层相对容易；
- (5) 水在油层中容易流动。

二、注水时间的确定

1、注水类型

从注水时间分三类：

早期注水，晚期注水，中期注水

(1) 早期注水

在油田投产的同时进行注水，或是在油层压力下降到饱和压力之前就及时进行注水，使油层压力始终保持保持在饱和压力以上或原始油层压力附近。

二、注水时间的确定

(1) 早期注水

- 特点：
- (1) 油层内不脱气，原油性质保持较好；
 - (2) 油层内只是油、水二相流动，渗流特征清楚；
 - (3) 油井产能高——自喷期长
 - (4) 采油速度高——较长的稳产期

缺点：投产初期注水工程投资较大，投资回收期长。

适用：地饱压差相对较小的油田。

二、注水时间的确定

(2) 晚期注水

开采初期依靠天然能量开采，在溶解气驱之后注水。

特点：(1) 驱动方式转为溶解气驱；

——导致 $\mu_o \nearrow$ 、 $J \searrow$ 、 $Q_o \searrow$ 、 $R_p \nearrow$

(2) 注水后，可能形成油气水三相渗流；

——流动过程复杂

(3) 产量不能保持稳定；

——对脱气后 μ_o 高、含蜡量高的油田渗流条件恶化

优点：开发初期投资少，原油成本低。

适用：原油性质好，天然能量足，中、小型油田。

二、注水时间的确定

(3) 中期注水

初期依靠天然能量开采，当地层压力下降到饱和压力以下，气油比上升到最大值之前开始注水。

特点：(1) 随注水压力恢复，地层压力略低于饱和压力，形成水驱混气油方式；

(2) 注水后，地层压力恢复到饱和压力以上，可获得较高产量。

优点：初期投资少，经济效益好；可保持较长稳产期，不影响最终采收率。

适用：地饱压差较大、天然能量相对较大的油田。

二、注水时间的确定

2、注水时机的选择

(1) 根据油田天然能量的大小

原则：满足开发要求的前提下，尽量利用天然能量
边水活跃，边水驱满足开发要求——不注水
地饱压差较大，有较大弹性能量——不早期注水

(2) 油田大小和对油田稳产的要求

小油田，储量小，不求稳产期长——不早期注水
大油田，保持较长时间稳产期——宜早期注水

(3) 油田的开采特点和开发方式

自喷采油——注水时间早些，压力保持水平较高
机械采油——不一定早期注水，压力保持低一些

三、油田注水方式

注水方式（也称注采系统）：

注水井在油层所处的地位和注水井与生产井之间的排列关系。

注水方式分类：

边缘注水、切割（行列）注水、面积注水

三、油田注水方式(边缘)

1、边缘注水

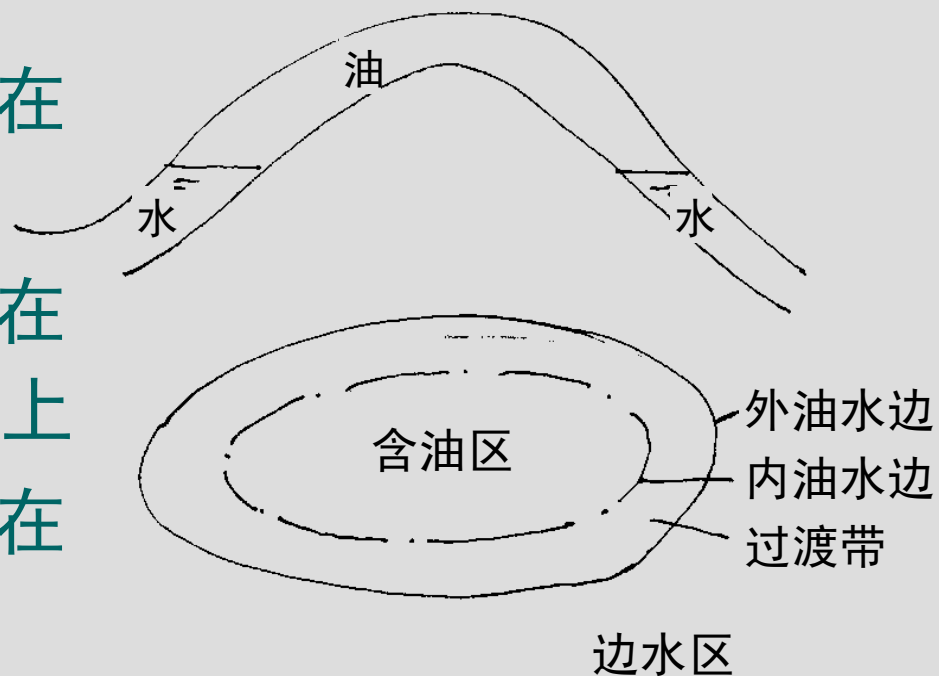
(1) 边缘注水:

把注水井布置在油水过渡带附近

缘外注水: 注水井布置在
外油水边界

缘上注水: 注水井布置在
油水过渡带上

缘内注水: 注水井布置在
内油水边界



三、油田注水方式

1、边缘注水

(2) 适用条件:

- ①适用于中小型油田，油层构造比较完整；
- ②油层分布比较稳定，含油边界位置清楚；
- ③外部和内部连通性好，流动系数高。

(3) 优点:

- ①油水边界比较完整，水线推进均匀；
- ②控制比较容易，无水采收率和低含水采收率高；
- ③注水井少，注入设备投资少。

三、油田注水方式

1、边缘注水

(4) 缺点:

①在较大油田的构造顶部效果差，易出现弹性驱或溶解气驱。

井排产量递减 5: 2: 1

改善: 边缘注水+顶部点状注水

②注入水利用率不高。

水向四周扩散

三、油田注水方式(行列)

2、切割注水（行列注水）

(1) 切割注水：

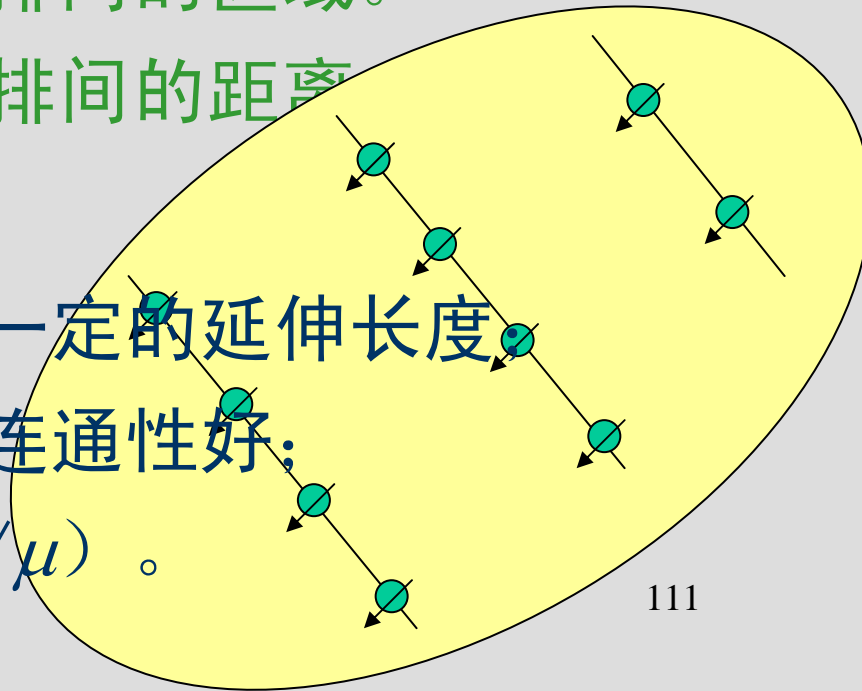
利用注水井排将油藏切割成较小的面积，成为独立的开发区域。

切割区：两相邻注水井排间的区域。

切割距：两相邻注水井排间的距离。

(2) 适用条件：

- ①油层大面积分布，有一定的延伸长度
- ②注水井排与生产井排连通性好；
- ③较好的流动系数（ kh/μ ）。



三、油田注水方式

2、切割注水（行列注水）

(3) 优点:

- ①根据地质情况，选择最佳切割方向及切割区的宽度；
- ②便于修改原来的注水方式；
切割注水——面积注水
- ③可以优先开采高产地带，使产量达到时间要求。

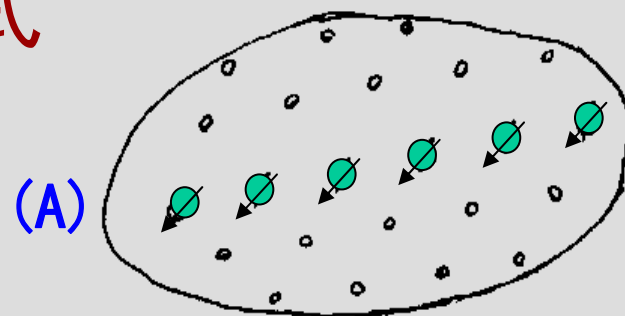
(4) 缺点:

- ①不适应非均质严重的油田——水线推进不均匀
- ②注水井间干扰大——吸水能力降低
- ③有时出现区间不平衡——造成平面矛盾

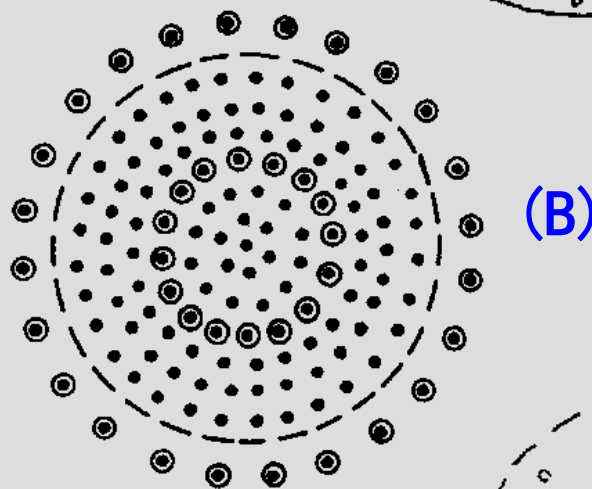
三、油田注水方式

内部注水的其它几种形式

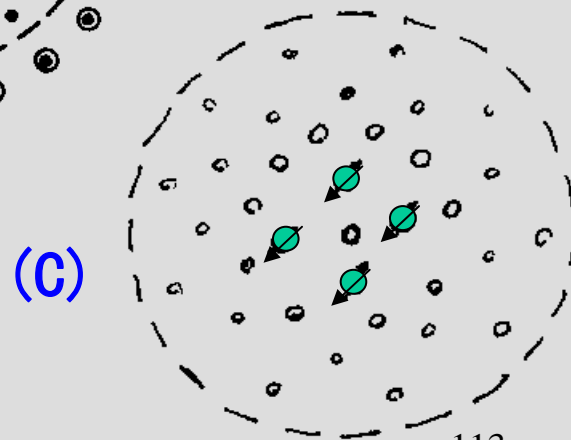
A. 轴线注水：注水井
沿构造轴线布置



B. 环状切割注水：注
水井按环状分布
水井布在 $0.4R$ 处



C. 中央注水：沿 $R:200-300m$ 圆周上布4—6口
水井，中央布1—2可
油井。



三、油田注水方式(面积)

3、面积注水

(1) 面积注水:

把注水井按一定的几何形状均匀地布置在整个开发区上。

——切割注水的极限形式

特点：适应范围广，见效快，采油速度高

(2) 适用条件:

- ①油层分布不规则，延伸性差；
- ②油层渗透性差，流动系数低；
- ③面积分布大，构造不完整，断层分布复杂；
- ④适用于强化采油。

三、油田注水方式

3、面积注水

(3) 优点:

- ①所有生产井置于注水井第一线，有利于油井受效；
- ②注水面积大，受效快；
- ③油井有多向供水条件，采油速度高；
- ④便于调整。

下面讨论常用的面积井网系统

三、油田注水方式

面积井网布置系统

特征参数:

m —生产井数与注水井数之比.

F —每口注水井控制的面积.

S —钻井密度 (每口井的控制面积) —井网密度

井网形状:

三角形井网

正方形井网

三、油田注水方式

面积井网布置系统

(一) 正方形井网系统

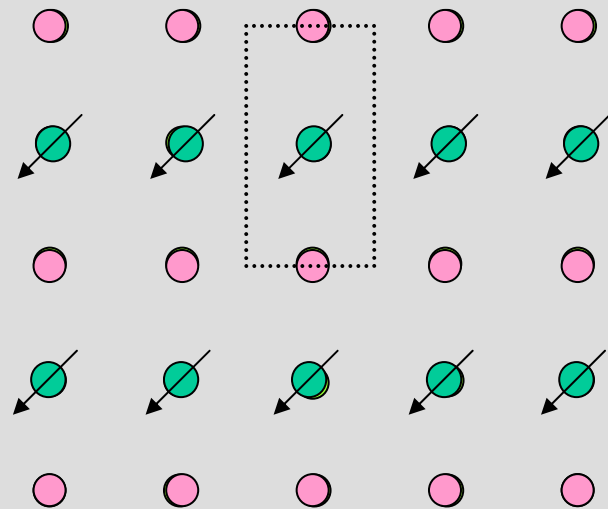
以正方形井网为基础，井距： a ；井距＝排距

(1) 直线系统

$$M=1:1$$

$$F=2a^2$$

$$S=a^2$$

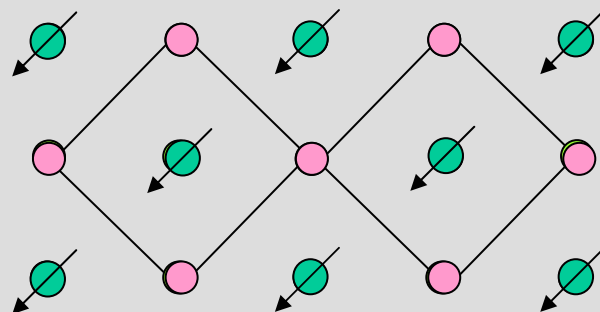


三、油田注水方式

(一) 正方形井网系统

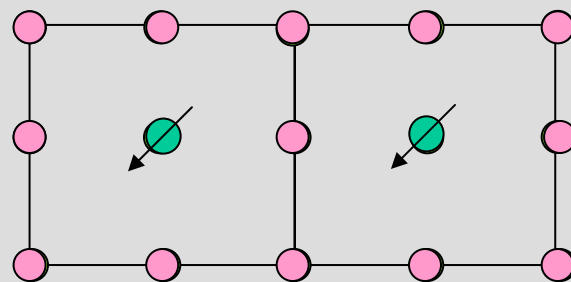
(2) 反五点系统

$$M=1:1 \quad ; \quad F=2a^2 \quad ; \quad S=a^2$$



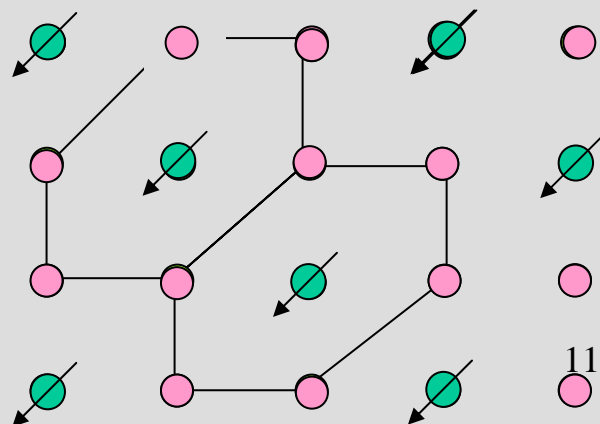
(3) 反九点系统

$$M=3:1 \quad ; \quad F=4a^2 \quad ; \quad S=a^2$$



(4) 反七点系统—斜七点

$$M=2:1 \quad ; \quad F=3a^2 \quad ; \quad S=a^2$$



三、油田注水方式

(二) 三角形井网系统

(1) 直线系统

$$M=1:1 ; F=1.732a^2 ;$$

$$S=0.866a^2$$

(2) 反七点系统

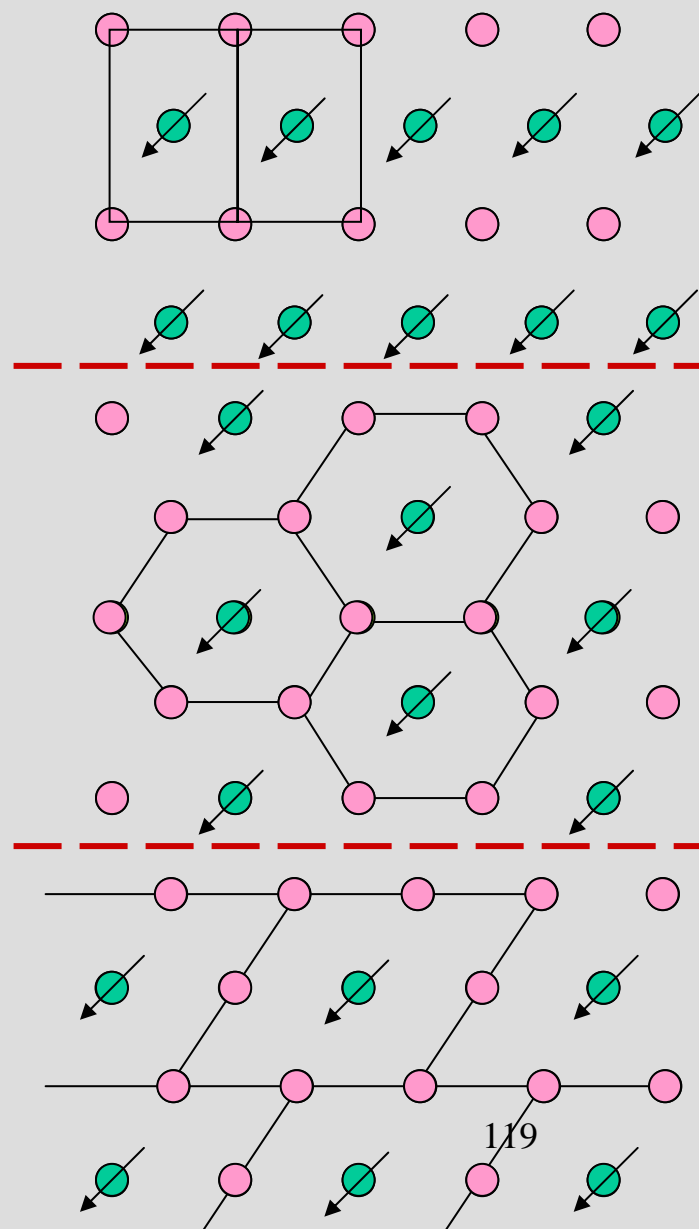
$$M=2:1 ; F=2.598a^2 ;$$

$$S=0.866a^2$$

(3) 反九点系统

$$M=3:1 ; F=3.464a^2 ;$$

$$S=0.866a^2$$



四、注采井网的面积波及系数

- 1、面积波及系数：水淹面积与井网控制面积之比
- 在水井与油井之间存在压力分布，相应的流线分布；
 - 在均匀井网内，连接注水井与生产井的一条直线形成主流线，其压力梯度最大；
 - 注入水首先沿主流线突破，井壁上各点不是同时见水；
 - 波及系数与流度比的影响很大。

2、研究方法

物理模拟：电解模型、X-射线造影、CT...

数学方法：解析法——研究油水接触界面移动规律

数值模拟法

四、注采井网的面积波及系数

B. П. 丹尼洛夫和P. M. 卡茨研究成果，得到面积注水波及系数—— E_A 主要受流度比控制。

直线井排（见水时 E_A ）：

$$E_A = \frac{\frac{2\pi d}{a} - \exp\left(-\frac{2\pi d}{a}\right) - 2.776}{\frac{2\pi d}{a} \left[1 + 8\exp\left(-\frac{2\pi d}{a}\right)\right]} \sqrt{\frac{1+M}{2M}}$$

式中： d ：排距，m； a ：井距，m； M ：流度比（ λ_w/λ_o ）

$$M = \frac{\mu_o}{\mu_w k_{ro}(s_{wc})} [k_{ro}(\bar{s}) + k_{rw}(\bar{s})]$$

四、注采井网的面积波及系数

当 $M \geq 1$ 时， $d/a \geq 1$ ，可将上式简化为：

直线井排：
$$E_A = \left(1 - 0.4413 \frac{a}{d}\right) \sqrt{\frac{1+M}{2M}}$$

交错井排：
$$E_A = \left(1 - 0.428 \frac{a}{d}\right) \sqrt{\frac{1+M}{2M}}$$

五点系统：
$$E_{A5} = 0.718 \sqrt{\frac{1+M}{2M}}$$

反九点法：
$$E_{A9} = 0.525 \sqrt{\frac{1+M}{2M}}$$

反七点法：
$$E_{A7} = 0.743 \sqrt[3]{\frac{1+M}{2M}}$$

根据不同的 M 值计算 E_A ，可作波及系数与流度比的关系！¹²²

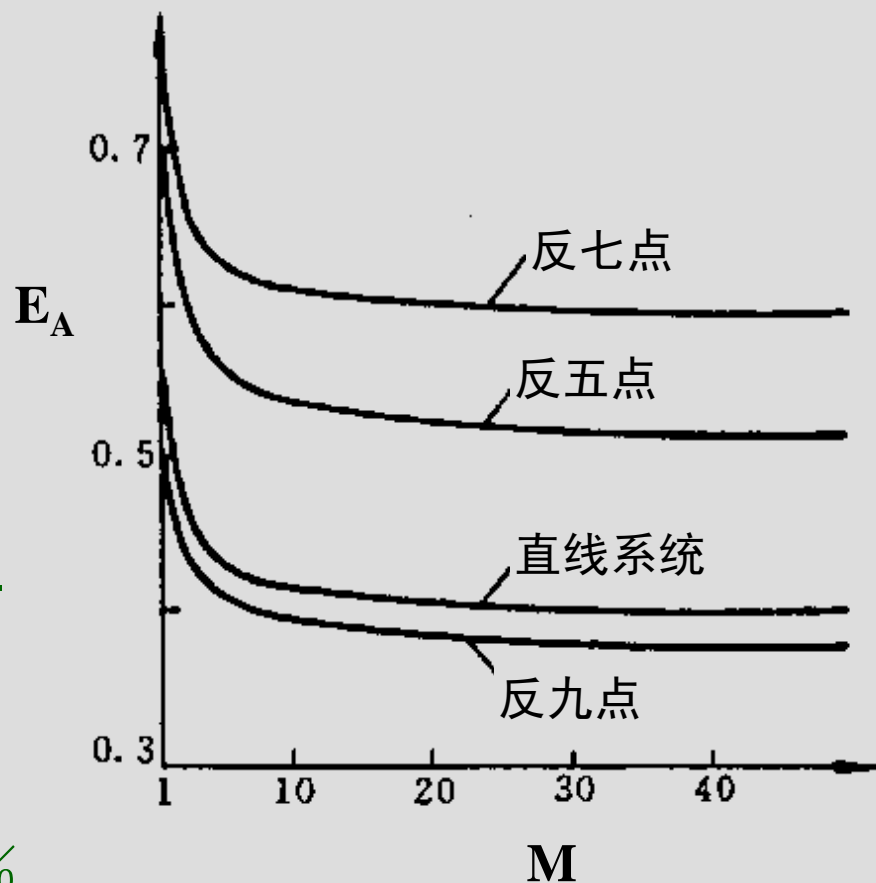
四、注采井网的面积波及系数

讨论:

(1) 当 M 增加时, 在稳定驱条件下, E_A 趋于极限值: 直线: 0.391, 五点: 0.508, 反九点: 0.371, 反七点: 0.590。

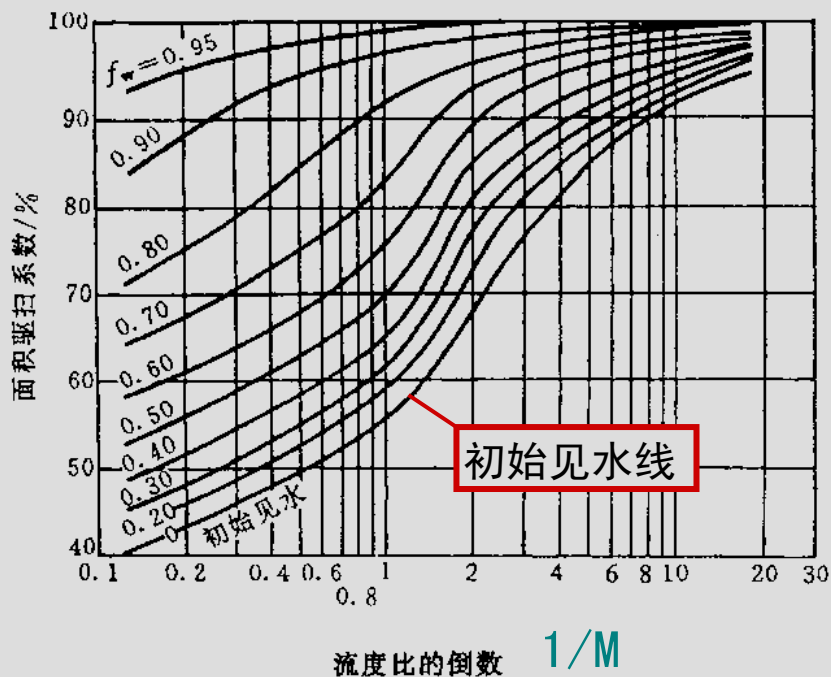
(2) 在 $M=1 \rightarrow 10$, E_A 迅速降低。
五点法: $M=1 \nearrow 10$, E_A 降低26%
 $M=5 \nearrow 10$, E_A 降低2.7%
反七点法: $M=5 \nearrow 10$, E_A 降低1.9%

(3) 正方形井网 $E_{A\Box}$ 小于三角形井网 $E_{A\Delta}$ 。

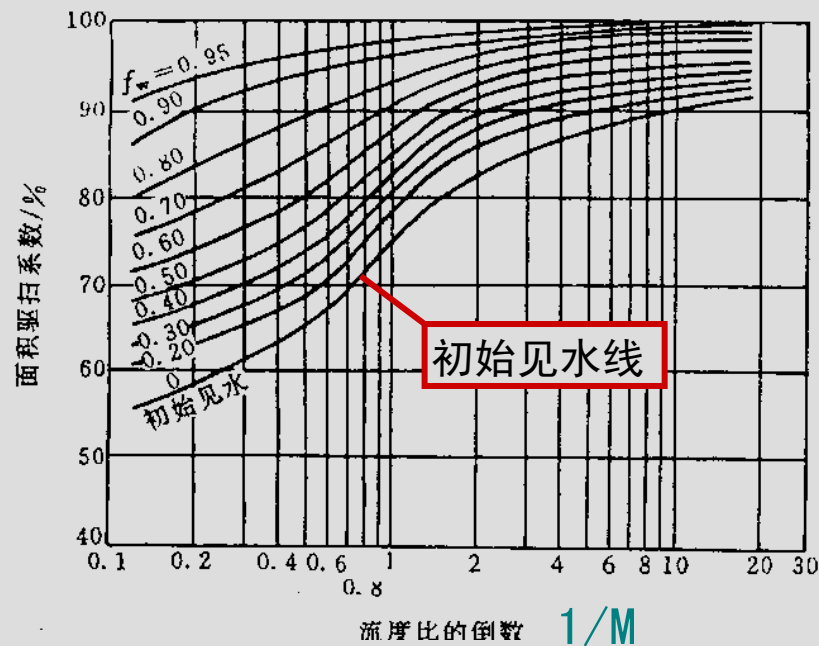


四、注采井网的面积波及系数

各种井网见水后的波及系数随含水上升， E_A 还会增加。其值可查标准图版。



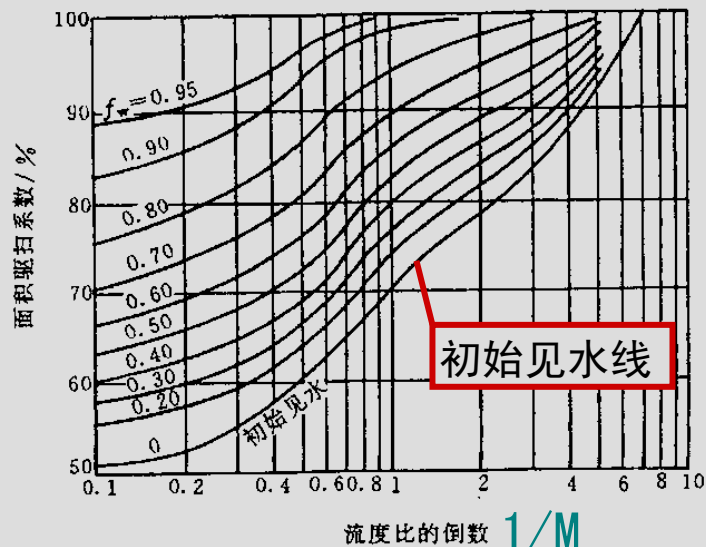
直线井网



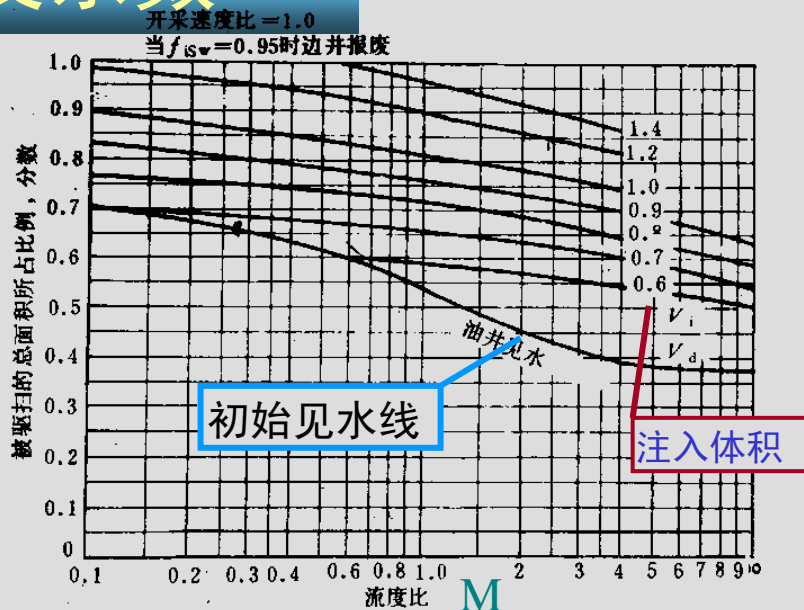
交错井网

四、注采井网的面积波及系数

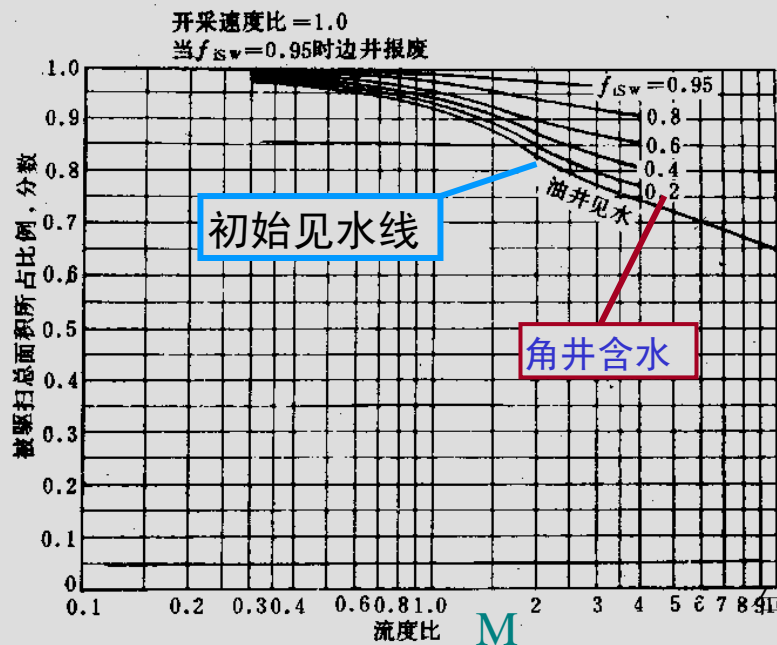
五点法



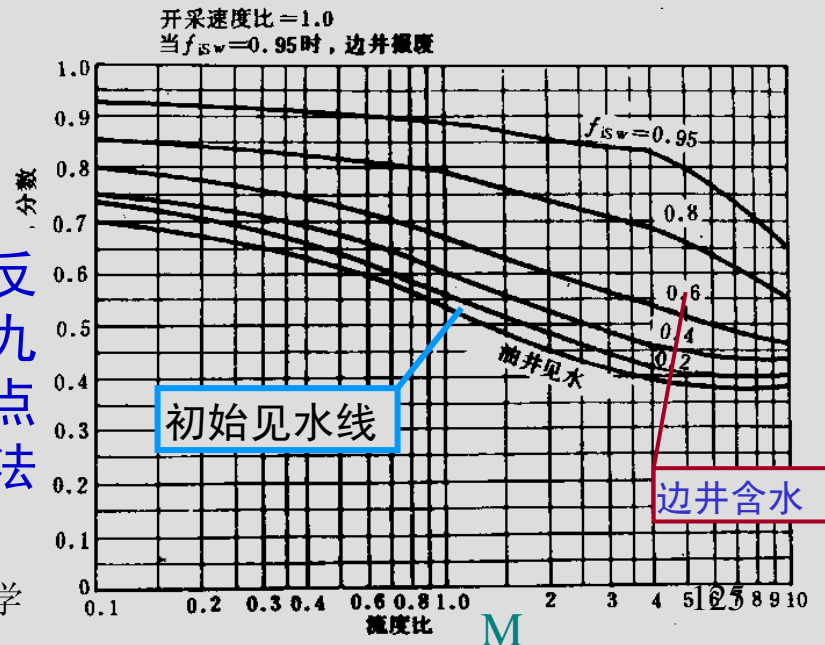
反九点法



反九点法



反九点法



§ 1—4 井网与注水方式

五、影响波及系数的因素

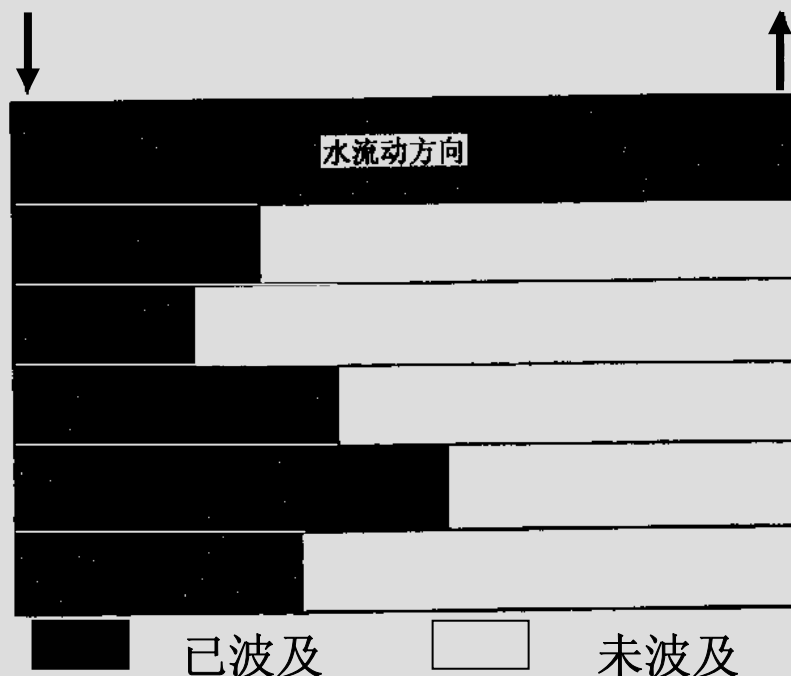
实际油藏——油水前缘在纵向上推进不均匀。

体积波及系数 E_V ：水所波及到的孔隙体积与所研究的注水单元的孔隙体积之比。

影响 E_V 因素：

- (1) 注水井网类型；
- (2) 油水流度比；
- (3) 油层非均质性；

渗透率变异系数；垂向渗透率



五、影响波及系数的因素

影响 E_V 因素:

- (1) 注水井网类型;
- (2) 油水流动度比;
- (3) 油层非均质性;
 渗透率变异系数; 垂向渗透率
- (4) 重力分异

五、影响波及系数的因素

影响 E_v 因素

- (1) 注水井网类型
- (2) 油水流度比
- (3) 油层非均质性
- (4) 重力分异
- (5) 毛细管力
- (6) 注水速度

六、布井部署

井网问题一直是油田开发中的一个重要问题。
——井网系统，井网密度，油水井数比

合理的注采井网和井网部署要满足以下条件：

- 一、有较高的水驱控制程度；
- 二、要适应差油层的渗流特点，达到一定的采油速度；
- 三、保证有一定的单井控制储量；
- 四、有较高的经济效益。

六、布井部署

1、划分开发层系——井网套数

2、确定油井数

已知：N—地质储量；v—采油速度；q—单井产能；
生产300天/年，则井数：

$$n = \frac{Nv}{300q}$$

3、确定注水井数——m值

①童氏法：

$$m \approx \frac{2}{J_L / I_w + 1}$$

②大庆油

$$m = \sqrt{I_w / J_L}$$

田：

③前苏联：

$$m = \sqrt{M_0}$$

$$M_0 = \lambda_{wo} / \lambda_o$$

六、布井部署

4、确定井距

①油藏工程计算

②经验方法

合理井距（数值模拟结果）

有效渗透率 $/10^{-3} \mu m$	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140	150
井距 /m	170	184	198	212	225	239	253	266	294	321	335
备注	生产压差5MPa，采油速度2%，稳产到含水70%										

六、布井部署

5、合理井网密度

①井网密度与采收率关系： $R = Ae^{B/s}$

R —采收率； s —井网密度，口/km²； A —驱油效率%；
 B —参数（储层与流体特征）

②合理井网密度——经济效益最大点

总产值： NCR

N ：地质储量； C ：油价

总费用： $M = nb$

n ：井数； b ：平均单井总费用

建立效益方程： $f(s) = NCR - M$ ，则：

$$\frac{d(NCR - M)}{ds} = 0$$

③极限井网密度——经济效益平衡点

$$f(s) = NCR - M = 0$$

二、油田开发方案设计

- 内容：
- 1、油田概况；
 - 2、油藏地质及描述
 - 3、油藏工程设计
 - 4、钻井工程设计
 - 5、采油工程设计
 - 6、地面工程设计
 - 7、经济评价
 - 8、方案实施要求

方案编制要满足技术要求和规范

二、油田开发方案设计

(一) 油田概况

(1) 油田地理位置、气候、水文、交通及经济状况。

(2) 阐述油田勘探历程和开发准备程度：（工作量）
发现井；

地震工作量及处理技术、测线密度及成果；

探井、评价井井数，取心及分析资料，测井及地层测试
试油、试气、试水工作，试采成果及开发试验。

(3) 油田规模、层系及类型。

二、油田开发方案设计

(二) 油藏地质及描述

1. 储层的构造特征

- (1) 构造：类型、形态、倾角、闭合高度、闭合面积。
- (2) 断层性质：条数、分布状态、密封程度、断层要素。
- (3) 划分油层组：描述其岩性及分布状况。
- (4) 划分沉积相带：描述沉积类型、砂体形态、砂体分布
- (5) 分层组描述：埋藏深度、储层厚度、有效厚度、单层层数、单层砂岩厚度及有效厚度。

2. 储层物性的空间分布

- (1) 孔渗饱：孔隙度、渗透率、含油饱和度、压缩系数
- (2) 非均质性描述：包括层间、平面、层内非均质性。

二、油田开发方案设计

- (3) 微观孔隙结构：包括孔隙类型、孔喉形态、粘土矿物
- (4) 隔层或夹层：岩性、厚度分布、渗透性、水敏性
- (5) 储集层五敏评价：水敏、酸敏、速敏、盐敏、压敏。
- (6) 储集层综合评价和分类。

3、流体的性质及其分布

(1) 流体分布

- ①油气水分布：分区块、分层系分布
- ②界面：油气、油水界面
- ③饱和度：油、气、水饱和度

(2) 流体性质

- ①原油性质：常规物性参数、PVT性质、流变性。
- ②天然气性质
- ③地层水性质

二、油田开发方案设计

(3) 渗流物理特性

- ①润湿性、界面张力、相对渗透率曲线、毛管压力曲线。
- ②计算水驱油效率。

4、油藏天然能量

- (1) 压力：原始地层压力、压力系统及梯度、温度及梯度。
- (2) 边底水：确定边底水、气顶的活跃程度。
- (3) 评价：对油藏天然能量进行评价和分类。

5、地质储量计算与评价

根据油藏描述结果，计算油田地质储量，综合分析各项地质资料，建立储层静态模型。

二、油田开发方案设计

(三) 钻井、采油、地面建设工程设计

(1) 钻井工程要求

- 设计：根据井性质、油层情况设计合理的井身结构；
- 钻井：应实现近平衡钻井和完井；——（欠平衡钻井）
- 油层保护：选用保护油气储层的钻井液、完井液；
- 固井：有效地封隔地下的各油、气、水层；
- 完井：一般应采用射孔完井方法；
特殊油层，可根据具体情况采用其他完井方法。

二、油田开发方案设计

(三) 钻井、采油、地面建设工程设计

(2) 采油工程要求

- 具有自喷能力的生产井应用自喷的生产方式，不具备自喷能力的生产井应采用机械采油方式生产。
- 提出井下采油工艺及配套工具、装置、仪器、仪表的技术要求。
- 提出测取抽油井与防砂井的产液剖面等资料技术要求。

(3) 地面建设工程设计要求

- 提出对油、气、水计量精度的要求；
- 提出对注入剂质量的具体要求。——水质

二、油田开发方案设计

(四) 油藏工程工程设计

油藏工程设计部分包括：

◆ 油田开发设计原则

◆ 层系划分与组合

◆ 开发方式（驱动方式）的选择

◆ 井网和井距及开采速度的确定

◆ 油田开发指标预测及经济评价

专题论证

(四) 油藏工程工程设计

1. 油田开发设计原则

坚持少投入、多产出，具有较好的经济效益

考虑：储量动用、投产次序、采油速度、稳产年限

技术政策界限：

(1) 采油速度和稳产时间

一般情况下： $v = 1.5 \sim 2\%$ ，稳产到采出地储20～30%

(四) 油藏工程工程设计

技术政策界限:

(1) 采油速度和稳产时间

(2) 规定开采方式、注水方式、含水上升速度

含水上升速度: 每采出1%地质储量含水上升值

(四) 油藏工程工程设计

2、设计细则：

(1) 中、高渗透率多层砂岩油藏：其中大、中型砂岩油藏如果不具备充分的天然水驱条件，必须适时注水，保持油藏能量开采。不允许油藏压力低于饱和压力。

(2) 低渗透砂岩油藏：要在技术经济论证的基础上采取低污染的钻井、完井措施，早期压裂改造油层，提高单井产量。具备注气、水条件的油藏，要保持油藏压力开采。

(3) 气顶油藏：要充分考虑天然气顶能量的利用。具备气驱条件的，要实施气驱开采；不具备气驱条件的，可考虑油气同采，或保护气顶的开采方式，但必须严格防止油气互窜，造成资源损失，要论证射孔顶界位置。

(四) 油藏工程工程设计

(4) 边底水油藏：边、底水能量充足地油藏要采用天然能量开采。要研究合理的采油速度和生产压差，极限压差和极限产量，要论证射孔底界位置。

(5) 裂缝性层状砂岩油藏：要搞清裂缝发育规律，实施人工注水的油藏，要研究最佳井排方向，沿裂缝走向部署注水井，设计合适的注水强度，防止水窜。

(6) 高凝油、高含蜡的油藏：保持油层温度和井筒温度。注水井应在投注前采取预处理措施，防止井筒附近油层析蜡。控制井底流压，防止井底附近大量脱气。

(四) 油藏工程工程设计

(7) 凝析气藏或带油环的凝析气藏：当凝析油质量浓度大于 $200\text{g} / \text{m}^3$ 时，须保持压力方式开采，油层压力高于露点压力。当应用循环注气开采时，凝析油含量低于经济极限时，可转为降压开采。

(8) 碳酸盐岩及变质岩、火成岩油藏：这些油藏具有双重孔隙介质性质，储集层多呈块状分布。要控制底水锥进，在最大水淹体积和驱油效率的前提下，确定合理采油速度。

(9) 重油油藏：进行开发可行性研究，筛选开采方法。在经济、技术条件许可下，采用热力开采。

(四) 油藏工程工程设计

3、编写内容:

(1) 开发原则

(2) 层系划分与组合

(3) 开发方式

- ◆ 尽可能利用天然能量开发。
- ◆ 采用人工补充能量的必要性和可能性。
- ◆ 分析确定最佳的能量补充方式和时机。

(4) 井网和井距

- ◆ 利用探井、评价井试油成果或试验区生产资料计算油井产能、每米有效厚度采油指数。
- ◆ 利用试注或实际注入资料，计算每米注入指数。没有实际注入资料的油田可采用类比法或经验法计算

(四) 油藏工程工程设计

(5) 确定布井范围

- ◆ 论证注入方式及生产井、注入井工作制度。
- ◆ 提出若干布井方案，并计算各方案的开发指标、储量损失等参数。

(6) 油田开发指标预测

- ◆ 根据布井方案，设计各种生产方式的对比方案。
- ◆ 用数值模拟计算和预测各方案10年以上开发指标。

(7) 经济评价

- ◆ 计算净现金流量、利润投资比、建成万吨产能投资、总投资和总费用。
- ◆ 分析影响经济效益的敏感性。
- ◆ 综合评价各方案的技术、经济指标，筛选出最佳方案。

二、油田开发方案设计

(五) 开发方案实施要求

(1) 提出钻井、投产、转注程序、运行计划及特殊技术要求。

(2) 提出开发试验安排及要求。

(3) 预测增产措施工作量。

(4) 提出油藏动态监测

- ◆ 根据油层特点和开发要求，确定动态监测内容、井数和取资料密度。

- ◆ 提出油藏动态监测的主要内容及监测要求。

- ◆ 指出油藏动态监测系统的监测重点。

第一章 油藏工程设计基础

§ 1-6 复杂油田开发

整装油田——复杂断块油田勘探开发程序的差别

整装油田勘探开发程序特点：

优点：工作有条不紊；处理好勘探开发矛盾；产能建设一步到位；效益大。

缺点：勘探周期长；探井、评价井多

复杂断块油田——不适应性

- 详探井网不适应（1000～5000m）
- 初期投资过大

一、复杂断块油田开发

一、复杂断块油田开发

断块——被断层分割开的独立或相对独立的、不同规模的地质体。

断块油藏——断层遮挡所形成的油藏称为断块油藏。

断块油田——在一定构造背景基础上，以断块油藏为主的油田，称为断块油田。

复杂断块油田——含油面积小于 1 km^2 的断块油藏，且地质储量占油田总储量50%以上的断块油田，称为复杂断块油田。

一、复杂断块油田开发

断块区——有相似的地质特征和相似的含油特点的若干个分布在一起并具有一定联系的断块总体，称为断块区。

油气富集区——油气相对富集的断块区，则称为油气富集区，简称“富集区”。

滚动开发——在复杂断块油田上、重点对油气富集区采取与详探紧密结合在一起进行的、在实践与认识上多次反复逐步发展的开发方法，称为滚动开发。

一、复杂断块油田开发

1、断块油田地质特征

(1) 含油层系多

在许多复杂断块油田上，最浅的油层埋深1000~1500m，而最深则超过3000m。含油的一般深度范围达到2000m左右。

(2) 单套层系在全油田不能连片含油

含油最广泛的油层，其连片含油面积也只占全油田含油面积的一部分。

一、复杂断块油田开发

2、断块油藏的分级

断块油藏的开发对策与断块油藏的大小有直接的关系，所以按含油面积大小划分等级。

界限划为五个级别：

- a. 大断块油藏： 含油面积 $> 1.0 \text{ km}^2$;
- b. 较大断块油藏： $0.4 \text{ km}^2 < \text{含油面积} \leq 1.0 \text{ km}^2$;
- c. 中断块油藏： $0.2 \text{ km}^2 < \text{含油面积} \leq 0.4 \text{ km}^2$;
- d. 小断块油藏： $0.1 \text{ km}^2 < \text{含油面积} \leq 0.2 \text{ km}^2$;
- e. 碎块油藏： 含油面积 $\leq 0.1 \text{ km}^2$

一、复杂断块油田开发

级 别	详探井网井距 500—1000m	500m三角形 井网	300m三角形 井网	300 m井网 局部加密
大断块油藏	不会漏掉，能 基本探明	可形成较好开 发井网	可形成良好开发 井网	可形成较好开发 井网
较大断块油藏	一般不会漏 掉，但很难探 明基本地质情 况	可基本探明地 质情况，不能 形成良好注采 关系	可形成较好开发 井网，需考虑开 发层系划分问题	可形成较好开发 井网；需考虑开 发层系划分问题
中断块油藏	易漏掉，不能 探明	一般不易漏 掉，不能探明	不会漏掉，能形 成不完善的注采 系统，开发层系 自然形成	可形成较好注采 井网
小断块油藏	易漏掉，不能 探明	易漏掉，不能 探明	不易漏掉，一般 形不成“—注— 采”关系	一般可形成“— 注—采”关系
碎块油藏	易漏掉，不能 探明	易漏掉，不能 探明	容易漏掉，不能 探明	少效能形成“— 注—采”关系

一、复杂断块油田开发

3、断块油藏滚动开发方式

工作程度：地震、钻井、取心、试油试采、综合地质研究；

认识程度：构造与复杂程度、油气富集区、油藏类型、油水关系、储量

- (1) 原则：应根据油田油气富集区分布情况及地质条件，按先富后贫、先高产后低产、先简单后复杂的原则，分批实施滚动开发，并严格遵循复杂断块油田详探开发工作程序。
- (2) 目标：以油气富集区为重点，以控制主力含油断块并形成初期开发系统，迅速建成生产能力为目标。

3、断块油藏滚动开发方式

3、断块油藏滚动开发方式

工作程度：地震、钻井、取心、试油试采、综合地质研究；

认识程度：构造、油气富集区、油藏类型、油水关系、储量

- 原则：应根据油田油气富集区分布情况及地质条件，按先富后贫、先高产后低产、先简单后复杂的原则，分批实施滚动开发，并严格遵循复杂断块油田详探开发工作程序。
- 目标：以油气富集区为重点，以控制主力含油断块并形成初期开发系统，迅速建成生产能力为目标。

3、断块油藏滚动开发方式

(2) 总体规划和工作要求

- 总体规划：在大体掌握油田规模基础上及时编制全油田总体开发规划，确定油田的近期目标和远景目标。
- 工作要求：

勘探与开发的衔接

详探和开发工作紧密地结合在一起

寻找富集区的工作同富集区的开发工作交叉进行

3、断块油藏滚动开发方式

●工作要求：

适度分配好勘探、开发准备、开发三者力量的配置，要在同一时期内开发一些富集区，而在另一些富集区内进行开发准备工作、同时用一定力量寻找新的富集区。

(3) 滚动开发基本工作程序

整体部署、分步实施、及时调整和逐步完善。
滚动开发应力争用少量的井既能探明含油断块，又能形成较好的开发井网。

3、断块油藏滚动开发方式

●整体部署：

根据断块区钻探资料并结合地震细测资料，从认识主力断块与开发主力断块的需要出发，以本块主力含油层系为主，设想一套开发井网，作为钻井实施基础。

●分步实施：

在设想井网基础上，根据断块区存在的地质问题，分批逐步加以解决，先打关键井，后打一般开发井。

3、断块油藏滚动开发方式

- 及时调整:

根据关键井的资料进行研究，按新的认识及时调整原来设想井网的部署，提出下一批井位，以适应本断块区的特点。

- 逐步完善:

一般经过几次调整，补打少量开发井，就能较好地控制主力含油断块，逐步形成开发井网。

3、断块油藏滚动开发方式

(4) 层系划分

- 含油面积大于 1km^2 的断块，划分层系。

层系划分原则与大的构造油藏划分原则一致，并按正规井网布置；

- 含油面积小于 1km^2 的断块，原则上不划分开发层系。

(5) 井网布置

以不规则四点法三角形井网为主；对宽度窄的条带形断块油藏，则应沿主断块构造高部位采用排状布井法。

3、断块油藏滚动开发方式

(4) 开发方式

●对高渗透率、低粘度、高产能、强边（底）水驱的断块油藏，应充分利用天然能量长期自喷开采。

●对以弹性驱动为主，天然能量不足的封闭或半开启断块油藏、稠油油藏、低渗透岩性油藏等，应采取人工补充地层能量注水开发方式。

3、断块油藏滚动开发方式

(4) 注水时机

◆以弹性驱动为主，天然能量不足的油藏，可采取早期注水开发。

◆压力系数在1.5左右的异常高压岩性油藏，利用弹性能量开采，当压力降至静水柱压力后再转入注水开发。

3、断块油藏滚动开发方式

(4) 注水时机

◆含油面积小而形不成注采系统的断块油藏（如碎块油藏），应在经过弹性开采与溶解气驱开采，直至油藏能量接近枯竭时，采取同井中周期性地间注间采等多种方式提高采收率。

(5) 注水方式

含油面积小于 1km^2 ，原则上均采取边缘注水方式。

3、断块油藏滚动开发方式

(6) 报告内容与格式

◆ 开发方案编制对象

复杂断块油田开发方案编制对象，应以划分出的断块区或主力含油断块为单元，分别进行编制。

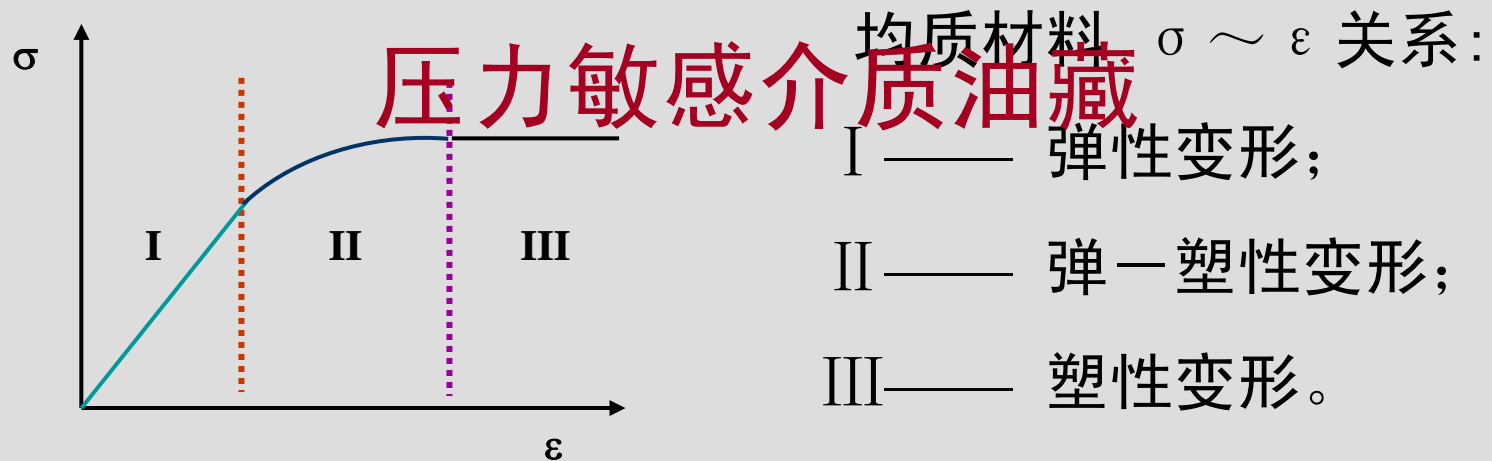
◆ 内容与格式

根据编制对象的具体情况，参照常规油田开发方案编制技术要求。

第一章 油藏工程设计基础

§ 1-6 复杂油田开发

二、弹塑性油藏开采



弹性介质——方解石胶结的砂岩。（硅质胶结）

弹塑性介质——白云岩、石灰岩，以粘土作胶结物

塑性介质——砂子、粘土、泥质胶结

二、弹塑性油藏开采

(一) k 参数随压力变化关系

k 、 ϕ 变化如图 A→B:

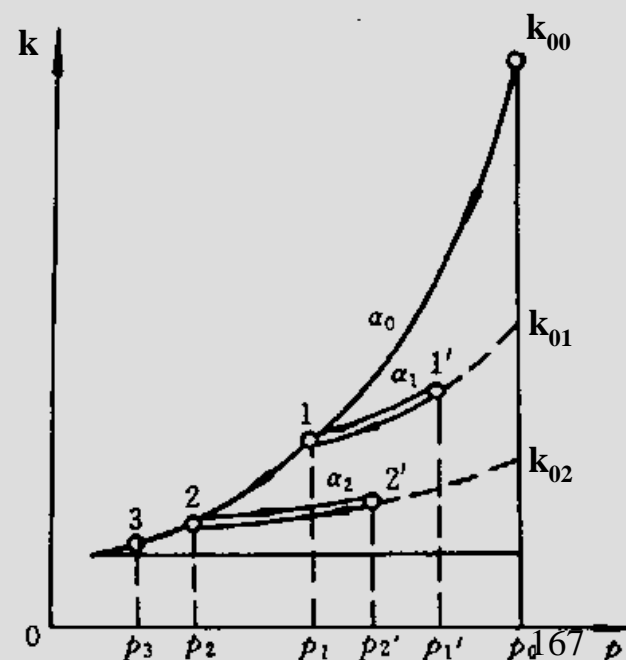
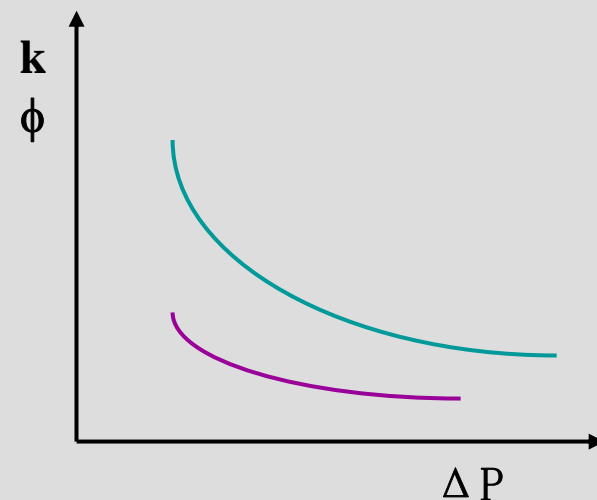
用指数函数描述:

$$k_0 = k_{00} \exp[-\alpha_{0k}(p_0 - p)]$$

流体性质随地层压力变化:

$$\rho = \rho_0 \exp[-\alpha_\rho(p_0 - p)]$$

$$\mu = \mu_0 \exp[-\alpha_\mu(p_0 - p)]$$



二、弹塑性油藏开采

(二) 压力下降时产量计算

由达西公式(质量流量):

$$G = \frac{2\pi k_0 \rho h}{\mu} r \frac{dp}{dr}$$

$$\frac{k_0 \rho}{\mu} = \frac{k_{00} \exp[-\alpha_{0k}(p_0 - p)] \bullet \rho_0 \exp[-\alpha_\rho(p_0 - p)]}{\mu_0 \exp[-\alpha_\mu(p_0 - p)]}$$

$$= \frac{k_{00} \rho_0}{\mu_0} \frac{\exp[-\alpha_{0k}(p_0 - p)] \exp[-\alpha_\rho(p_0 - p)]}{\exp[-\alpha_\mu(p_0 - p)]}$$

$$= \frac{k_{00} \rho_0}{\mu_0} \exp[-(\alpha_{0k} + \alpha_\rho + \alpha_\mu)(p_0 - p)]$$

$$= \frac{k_{00} \rho_0}{\mu_0} \exp[-\alpha_0(p_0 - p)]$$

$$\alpha_0 = \alpha_{0k} + \alpha_\rho + \alpha_\mu$$

二、弹塑性油藏开采

(二) 压力下降时产量计算

$$G = \frac{2\pi k_{00}\rho_0 h}{\mu_0} \exp[-\alpha_0(p_0 - p)] r \frac{dp}{dr}$$

分离变量，确定积分上下限：

$$\int_{r_c}^R G \frac{dr}{r} = \int_{p_c}^{p_0} \frac{2\pi k_{00}\rho_0 h}{\mu_0} \exp[-\alpha_0(p_0 - p)] dp$$

$$G = \frac{2\pi k_{00}\rho_0 h}{\mu_0} \frac{1 - \exp[-\alpha_0(p_0 - p_c)]}{\alpha_0 \ln(R/r_c)}$$

式中：G—质量流量；R—供给半径； r_c —井半径； p_c —流压

二、弹塑性油藏开采

(二) 压力下降时产量计算

$$G = \frac{2\pi k_{00} \rho_0 h}{\mu_0} \frac{1 - \exp[-\alpha_0 (p_0 - p_c)]}{\alpha_0 \ln(R/r_c)}$$

$$G = K_0 \frac{1 - \exp[-\alpha_0 (p_0 - p_c)]}{\alpha_0}$$

$$K_0 = \frac{2\pi k_{00} \rho_0 h}{\mu_0 \ln(R/r_c)}$$

常规达西径向流公式:

$$Q = \frac{2\pi k h}{\mu} \frac{p_0 - p_c}{\ln(R/r_c)}$$

$$Q = J_0 (p_0 - p_c)$$

石油大学

$$J_0 = \frac{2\pi k h}{\mu \ln(R/r_c)}$$

79

二、弹塑性油藏开采

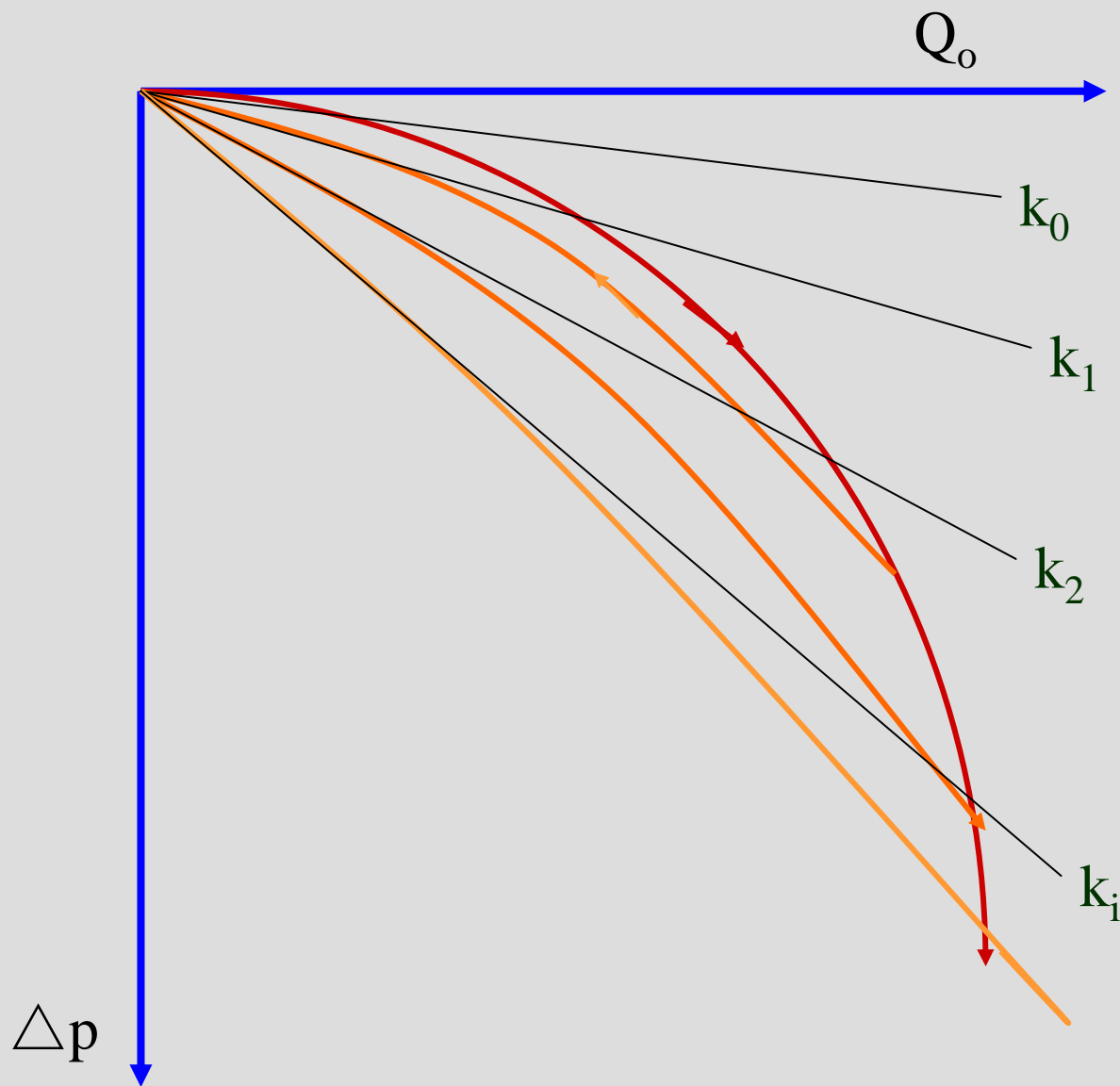
(三) 压力上升时产量计算

$$\downarrow G_1 = K_1 \frac{1 - \exp[-\alpha_1(p_0 - p_{c1})]}{\alpha_1}$$

$$K_1 = K_0 \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \frac{1 - \exp[-\alpha_0(p_0 - p_{c1})]}{1 - \exp[-\alpha_1(p_0 - p_{c1})]}$$

判断：根据油田开发初期阶段在井上所测的指示曲线变化来判断。

二、弹塑性油藏开采



二、弹塑性油藏开采

(三) 弹塑性油藏开发的原则：

- (1) 油层压力保持在原始地层压力水平上，或保持在不使渗透率明显下降水平上；
- (2) 制定合理的生产压差；
- (3) 试油应在较小压差下进行；
- (4) 合理的井底流压能保护。

第一章 油藏工程设计基础

§ 1-7 油田开发调整

原因？

- 1) 初期的井网比较稀；
- 2) 初期的方案主要以主力油层为对象；
- 3) 油藏的开发状况不断的随时间而变化，开发的条件也在发生变化。

调整类型：

- (1) 不改变开发系统，不改变开发层系和注水的方式，不钻新井；
- (2) 局部或者全部改变注采方式，并钻部分新井

§ 1-7 油田开发的实施、分析和调整

四、开发调整

层系调整

井网调整



第二类

开采工艺调整

驱动方式调整

工作制度调整



第一类

§ 1-7 油田开发的实施、分析和调整

(1) 采油工艺调整

自喷采油——机械采油。

当地层的能量不足时，需要从自喷转向抽油。
当井底含水比较高时，井底流压上升，从提高液量的角度也需要转抽。

自喷、抽油泵、电潜泵、水力喷射泵

水井：增加注入压力，提高注水量，满足提液需求。

约束条件：注水井的井底压力不超过破裂压

石油工程

§ 1-7 油田开发的实施、分析和调整

(2) 工作制度调整

主要目的：使地层中油水的渗流方向的改变，提高注入水的波及系数。

主要措施：

调剖堵水、重新射孔、油井转注、改向注水、周期注水、注聚合物、水气交替等措施。

(3) 驱动方式调整

主要采用的方式是从天然能量开发向依靠人工补充能量开发。

- (1) 封闭弹性开采——人工补充能量
- (2) 边水能量不足——补充能量
- (3) 枯竭式开采——二次采油
- (4) 局部出现溶解气驱——补充能量
- (5) 气顶收缩

(4) 层系调整

随着对油藏认识程度的加深，开发层系逐渐的变细，从一套井网增加到多套的井网，控制程度逐渐的增加。

(5) 井网调整

随开发程度的加深，对非均质认识更进一步，井距逐渐的变小，一般大的井网的调整都伴随着层系的调整。

由于在油田开发初期，往往采用较稀的井网来开发储量较集中、产能较好的一些层位，因此用加密井来进一步划分开发层系和更好地开发那些水驱较差的油层是必要的。

井网和层系的调整一般在含水上升较快和产量下降时进行，从经济角度和施工方便上着眼，早一点调整可能有利。