

# 采油地质工程

李 毓 主编



石油工业出版社

## 内 容 提 要

这是一部专门介绍油田投入开发以后,采油地质工程方法的书。它主要是结合大庆油田开发二十五年的实践和国内外油田开发的经验,着重介绍了在采油过程中油田动态监测和分析的方法;油藏地质及动态变化规律;提高油田开发水平的措施和手段;还用大量的实例说明油田开发现场试验研究在采油过程中的作用。

本书的主要阅读对象是从事采油工作的地质工程师和油藏工程师,也可供从事石油地质、油田开发的技术人员、研究人员及教学人员参考。

## 采 油 地 质 工 程

金毓荪主编

\*

石油工业出版社出版

(北京安定门内大街东后街甲36号)

地质印刷厂排版

北京顺义燕华营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

\*

787×1092毫米 16开本 40<sup>1</sup>/<sub>4</sub>印张 964千字 印1—5,530

1985年10月北京第1版 1985年10月北京第1次印刷

书号: 15037·2594 定价: 8.20 元

## 本书编委及参加者名单

主 编： 金 毓 荪  
编 委：

赵世远、程兆惠、袁庆峰、陈永生、刘春发、李其鑫、  
廖炎光、陈大方、李忠荣、孟庆惇、尹立柱、孙冠杰

参加人员：

区永迪、冀宝发、刘青年、梁慧文、万心懿、赵翰卿、  
叶中桂、贾修信、刘子晋、勾燕生、王友斌、陈家宝、  
徐正顺、罗祥忠、田宝成、张自坚、罗文钊、周继德、  
刘进义、张广志、杜庆康、林玉君、陈宏宾、杜智文、

封面设计：温崇辅

## 前 言

我国砂岩油田注水开发,已经有三十年的历史,特别是六十年代以来,随着大庆油田、胜利油田、大港油田、江汉油田、扶余油田、辽河油田和中原油田等相继投入开发,使我国石油工业得到了蓬勃的发展,已成为世界上原油产量比较高的国家。

油田开发是一门综合性很强的科学,油田开发过程中的采油地质工程方法,越来越显示出它的重要性,很需要把长期油田开发实践中积累的经验、研究的成果以及行之有效的方法加以总结和提高,用来指导油田开发,提高油田开发水平。《采油地质工程》一书的编写就是为了达到这个目的。

本书编委会就本书内容反复多次讨论,这是一本集体创作。

本书主编金毓荪。

编写人员有:金毓荪(绪论),李忠荣(第一篇第一、三、四、五章),赵翰卿、张广志(第一篇第二章),袁庆峰(第一篇第六章,第四篇第三、五章),万心燧(第一篇第七章),李其鑫、王友斌、陈家宝(第二篇第一、二、四章),贾修信(第二篇第三章),勾燕生(第二篇第五章),刘春发、杜庆康(第三篇第一章),孙冠杰、周继德、罗文钊、刘进义(第三篇第二、三章),程兆惠(第三篇第四章),刘青年(第四篇第一、二章),刘子晋(第四篇第四章),梁慧文(第四篇第六章、第五篇第二章),田宝成(第四篇第六章),冀宝发、徐正顺(第五篇第一、四章),赵世远、区永迪、叶中桂(第五篇第三、五章),廖炎光、陈永生(第六篇)。

全书由赵世远、程兆惠、孙冠杰编辑,由主编金毓荪审定。

本书在编写过程中,石油工业部谭文彬同志、石油勘探开发科学研究院李德生、童宪章、秦同洛同志,大庆石油管理局李虞庚等同志给了大力支持并提出了很好的意见。大庆各采油厂、公司和油田勘探开发研究院等单位都给予了大力的支持,在此一并表示谢意。

本书的参考文献只列出了公开出版的图书文献,大量油田内部资料均未列入,特此表示谢意。

《采油地质工程》一书的编写工作,由于时间仓促,水平有限,难免有许多不妥之处,恳请读者多加批评指正。

## Preface

Development of sandstone reservoirs by water-flooding has a long history of more than 30 years in China. Especially since 1960's when Daqing, Shengli, Dagang, Jianghan, Fuyu, Liaohe and Zhongyuan oilfields were put into production in succession, China's petroleum industry has been springing. China has now been in the rank of countries with higher oil output in the world.

Oilfield development is a very comprehensive science. Production Geological Engineering applied during oilfield development has been evidenced ever more significant importance. Hence, it is necessary to sum up and perfect the experiences, study results and applicable methods obtained during the long period of oilfield development, guiding and improving the development of fields of this kind. That is the main idea for editing the book "Production Geological Engineering".

The book is a crystallization of collection wisdom of the whole editorial board that has had several discussions on the book.

Jin Yusun is the Chief Editor of the book. Hereunder are the editorial staff and the pertaining chapters:

Jin Yusun (Introduction), Li Zhongrong (chapters 1, 3, 4 and 5 in Section 1), Zhao Hanqing & Zhang Guangzhi (chapter 2 in Section 1), Yuan Qinfeng (Chapter 6 in Section 1, Chapters 3 & 5 in Section 4), Wan Xinyi (Chapter 7 in Section 1), Li Qixin, Wang Youbin & Chen Jiabao (Chapters 1, 2 and 4 in Section 2), Jia Xiuxin (Chapter 3 in Section 2), Gou Yansheng (Chapter 5 in Section 2), Liu Chunfa & Du Qingkang (Chapter 1 in Section 3), Sun Guanjie, Zhou Jide, Luo Wenzhao & Liu Jinyi (Chapters 2 & 3 in Section 3), Cheng Zhaohui (Chapter 4, Section 3), Liu Qingnian (Chapters 1 & 2, Section 4), Liu Zijin (Chapter 4, Section 4), Liang Huiwen (Chapter 6, Section 4; chapter 2, Section 5), Tian Baocheng (Chapter 6, Section 4), Ji Baofa & Xu Zhengshun (Chapters 1, 4 in Section 5), Zhao Shiyuan, Ou Yongdi & Ye Zhonggui (Chapters 3, 5 in Section 5) & Liao Yanguang & Chen Yongsheng (Section 6).

The whole book is read and edited by Zhao Shiyuan, Cheng Zhaohui & Sun Guanjie, finally is examined and approved by the chief editor, Jin Yusun.

The editors would like to thank those who in the process of editing the book, gave us much help: Comrade Tan Wenbin from Ministry of Petroleum Industry, Comrades Li Desheng, Tong Xianzhang & Qin Tongluo from Beijing Petroleum Exploration & Development Institute and Li Yugeng from

Daqing Petroleum Administrative Bureau for their energetic support and valuable suggestions. The editors are thankful to all the units for the great support: each oil production company in Daqing, The Institute of Petroleum Exploration & Development of Daqing Oilfield.

The references listed in the book are only those published openly, a great number of references published within the oilfield are not listed here. We thank also the authors of the related papers.

The editors are limited both in time and in technical level for editing the book, there are possibly something improper, we are appreciate the readers who will make some corrections and suggestions to the book.

# 目 录

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 绪论 .....                    | 1   |
| 第一篇 采油地质基础 .....            | 15  |
| 第一章 油气藏和油气田 .....           | 17  |
| 第一节 油气藏的基本概念 .....          | 17  |
| 第二节 油气藏的类型 .....            | 18  |
| 第三节 油气田 .....               | 22  |
| 第四节 世界油气资源概况 .....          | 24  |
| 第二章 沉积相研究在开发地质中的应用 .....    | 26  |
| 第一节 油田沉积相研究的内容和方法 .....     | 26  |
| 第二节 油层划分与对比 .....           | 29  |
| 第三节 大型湖盆三角洲的沉积模式和砂体类型 ..... | 33  |
| 第四节 沉积相研究在油田开发中的应用 .....    | 48  |
| 第三章 油层的物理性质 .....           | 51  |
| 第一节 油层的岩石结构和构造 .....        | 51  |
| 第二节 储集层岩石的孔隙性及孔隙结构 .....    | 54  |
| 第三节 油层岩石的渗透性 .....          | 60  |
| 第四章 油层岩石和流体相互作用的基本性质 .....  | 64  |
| 第一节 岩石表面的润湿性 .....          | 64  |
| 第二节 毛细管压力曲线及其应用 .....       | 66  |
| 第三节 相对渗透率曲线 .....           | 72  |
| 第五章 油藏的压力系统和温度 .....        | 77  |
| 第一节 油藏的压力系统 .....           | 77  |
| 第二节 油藏的温度及油层岩石的热学性质 .....   | 80  |
| 第六章 油藏的天然能量 .....           | 83  |
| 第一节 天然水驱能量的分析和计算 .....      | 83  |
| 第二节 弹性能量的分析和计算 .....        | 86  |
| 第三节 溶解气的能量分析和计算 .....       | 87  |
| 第四节 气顶能量分析和计算 .....         | 88  |
| 第七章 石油及天然气地质储量计算 .....      | 92  |
| 第一节 地质储量概述 .....            | 92  |
| 第二节 地质储量计算方法 .....          | 93  |
| 第三节 地质储量参数研究 .....          | 99  |
| 第四节 地质储量的核实 .....           | 105 |
| 第五节 地质储量评价 .....            | 107 |
| 第二篇 油藏动态监测 .....            | 109 |
| 第一章 油藏动态监测概述 .....          | 111 |
| 第一节 动态监测的内容 .....           | 111 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 第二节 建立动态监测系统 .....              | 113 |
| 第二章 试井方法及应用 .....               | 115 |
| 第一节 稳定试井理论及应用 .....             | 115 |
| 第二节 压力恢复曲线分析及应用 .....           | 118 |
| 第三节 多井试井资料分析及应用 .....           | 137 |
| 第三章 开发测井方法及应用 .....             | 145 |
| 第一节 生产井产出剖面的测井方法及应用 .....       | 145 |
| 第二节 评价生产层测井方法及应用 .....          | 158 |
| 第三节 注水井吸水剖面测井方法及应用 .....        | 166 |
| 第四节 工程测井方法及应用 .....             | 176 |
| 第四章 油、气、水室内分析化验 .....           | 190 |
| 第一节 原油性质化验分析 .....              | 190 |
| 第二节 地层原油物理性质分析 .....            | 198 |
| 第三节 地层水和注入水性质化验方法和仪器 .....      | 200 |
| 第四节 天然气性质化验分析方法和仪器 .....        | 210 |
| 第五节 示踪剂的化验分析方法 .....            | 213 |
| 第五章 取心检查井的资料录取和整理 .....         | 216 |
| 第一节 取心检查井的种类和井位部署 .....         | 216 |
| 第二节 检查井取心方法和技术要求 .....          | 218 |
| 第三节 岩心观察分析项目及资料整理方法 .....       | 223 |
| 第四节 应用岩心资料判断水淹层和确定驱油效率的方法 ..... | 228 |
| 第三篇 油藏生产地质管理 .....              | 233 |
| 第一章 油田地质管理 .....                | 235 |
| 第一节 油田动态资料的录取和整理 .....          | 235 |
| 第二节 油田动态分析的内容和方法 .....          | 251 |
| 第三节 年度采油计划与配产配注方案的编制 .....      | 264 |
| 第四节 油田地质的分级管理制度 .....           | 270 |
| 第二章 油井地质管理 .....                | 273 |
| 第一节 自喷井地质管理 .....               | 273 |
| 第二节 机械采油井的地质管理 .....            | 288 |
| 第三章 注水井地质管理 .....               | 304 |
| 第一节 水质对油层的影响和水质标准 .....         | 304 |
| 第二节 注水井的排液、洗井和试注 .....          | 306 |
| 第三节 合理配注方案的编制 .....             | 307 |
| 第四节 注水井动态分析 .....               | 310 |
| 第四章 井下技术作业地质管理 .....            | 320 |
| 第一节 井下技术作业地质管理工作的任务 .....       | 320 |
| 第二节 井下技术作业地质设计方案 .....          | 321 |
| 第三节 井下技术作业工艺技术 .....            | 323 |
| 第四节 依据地质条件选择增产增注工艺技术措施 .....    | 330 |
| 第五节 资料验收 .....                  | 336 |
| 第六节 井下技术作业效果分析 .....            | 338 |
| 第七节 开发试油 .....                  | 351 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| <b>第四篇 油藏地质及动态变化</b> .....       | 355 |
| <b>第一章 采油过程中油层性质的变化</b> .....    | 357 |
| 第一节 油层岩石表面润湿性的变化 .....           | 357 |
| 第二节 油层孔隙结构的变化 .....              | 360 |
| 第三节 油层温度的变化 .....                | 366 |
| <b>第二章 采油过程中油、气、水性质的变化</b> ..... | 375 |
| 第一节 地层原油的流变性质及其变化 .....          | 375 |
| 第二节 地层原油常规高压物性参数的变化 .....        | 378 |
| 第三节 地面油、气、水性质的变化 .....           | 381 |
| <b>第三章 采油过程中压力的变化</b> .....      | 393 |
| 第一节 地层压力和流动压力的变化 .....           | 393 |
| 第二节 不同开采条件下各种压力的合理界限 .....       | 400 |
| <b>第四章 采油过程中裂缝和断层的变化</b> .....   | 409 |
| 第一节 采油过程中油藏断裂的变化 .....           | 409 |
| 第二节 采油过程中断层复活的条件及断裂活动的控制 .....   | 416 |
| <b>第五章 采油过程中油层内油水的分布规律</b> ..... | 420 |
| 第一节 影响油层内油水分布状况的主要因素 .....       | 420 |
| 第二节 地下油水分布的研究方法 .....            | 426 |
| 第三节 不同类型油层地下油水分布特征 .....         | 430 |
| <b>第六章 采油过程中生产动态的变化</b> .....    | 450 |
| 第一节 油田生产能力的变化 .....              | 450 |
| 第二节 油层吸水能力的变化 .....              | 452 |
| 第三节 油井和油田含水率的变化 .....            | 454 |
| 第四节 油井和油田产液量的变化 .....            | 459 |
| <b>第五篇 油藏开采过程中的预测和调整</b> .....   | 465 |
| <b>第一章 油田开发阶段划分</b> .....        | 467 |
| 第一节 开发阶段划分的依据和方法 .....           | 467 |
| 第二节 不同开发阶段的地质开发特征和开发效果预测 .....   | 473 |
| 第三节 几个主要影响因素的讨论 .....            | 475 |
| <b>第二章 油田动态指标预测方法</b> .....      | 480 |
| 第一节 油田稳产期内产量自然递减的预测方法 .....      | 480 |
| 第二节 油田稳产期的预测方法 .....             | 486 |
| 第三节 油田产量综合递减阶段的预测 .....          | 491 |
| 第四节 抽油机井的产量预测方法 .....            | 496 |
| 第五节 不同开发阶段经济指标预测方法 .....         | 503 |
| <b>第三章 油田综合调整方法</b> .....        | 510 |
| 第一节 油田综合调整的任务和原则 .....           | 510 |
| 第二节 油田综合调整的内容 .....              | 511 |
| 第三节 不同开发阶段适用的调整方法 .....          | 515 |
| <b>第四章 开发层系、井网适应性分析</b> .....    | 521 |
| 第一节 开发层系、井网适应性概述 .....           | 521 |
| 第二节 开发层系适应性分析 .....              | 527 |
| 第三节 注水方式适应性分析 .....              | 538 |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 第四节 开发井网适应性分析 .....                  | 547 |
| 第五章 开发层系、井网的调整 .....                 | 557 |
| 第一节 油田开发过程中开发层系、井网调整的必要性 .....       | 557 |
| 第二节 调整对象的选择 .....                    | 558 |
| 第三节 调整层系的组合与划分 .....                 | 564 |
| 第四节 注水方式和合理井距的确定 .....               | 570 |
| 第五节 调整方案开发指标预测方法 .....               | 574 |
| 第六节 调整井射孔方案的编制 .....                 | 586 |
| 第六篇 油田开发现场试验研究 .....                 | 595 |
| 第一章 为合理开发油田开展的试验 .....               | 599 |
| 第一节 试验的目的和特点 .....                   | 599 |
| 第二节 矿场试验实例——高台子油层开发试验区 .....         | 600 |
| 第二章 为认识油田开发问题开展的试验 .....             | 602 |
| 第一节 试验的目的与条件 .....                   | 602 |
| 第二节 矿场试验实例——杏一区东部降压开采试验 .....        | 603 |
| 第三章 改善油田开发效果的试验 .....                | 605 |
| 第一节 试验的目的与特点 .....                   | 605 |
| 第二节 矿场试验实例——中区西部开发试验区 .....          | 605 |
| 第四章 提早认识油田开发全过程试验 .....              | 609 |
| 第一节 试验的目的与特点 .....                   | 609 |
| 第二节 矿场试验实例——大庆油田“小井距”注水开发全过程试验 ..... | 610 |
| 第五章 提高油田采收率的试验 .....                 | 615 |
| 第一节 影响油田采收率的因素 .....                 | 615 |
| 第二节 矿场试验实例 .....                     | 616 |
| 第六章 工艺效果试验 .....                     | 624 |
| 第一节 试验的目的和特点 .....                   | 624 |
| 第二节 矿场试验实例 .....                     | 624 |
| 第七章 试验区的选择及应注意的问题 .....              | 626 |
| 第一节 试验区的选择 .....                     | 626 |
| 第二节 试验的观察与分析 .....                   | 627 |
| 第三节 矿场开发试验应注意的几个问题 .....             | 629 |
| 本书采用单位与法定单位对照表 .....                 | 631 |
| 参考文献 .....                           | 632 |

## 绪 论

《采油地质工程》主要是介绍油藏投入开发以后，采油过程中的油田地质管理方法、油田开采动态变化规律和改善油田开发效果的途径。

从近代石油工业兴起以来已经有一百二十年了。随着石油工业的发展，许多石油地质专家和学者，积累了许多经验，进行了大量的研究工作，创立和发展了一系列石油地质学科，例如石油地质学，油矿地质学，石油开发地质学等等，但总的来说，这些学科都是石油勘探过程中到油藏开发前的各种理论学科。对油藏投入开采后的地质及开采动态变化，涉及比较少。例如，通常讲的石油地质学，主要研究油气生成、运移、聚集及油气藏特点及油气藏分布规律，这门学科的意义在于指导石油勘探，以便做到最经济、最有效地找到油气田。通常讲的油矿地质学，则是油气藏投入开发之前，研究油气藏类型、储集层和地下流体的原始状态及物理性质、储量分布及估算的一门学科。这门学科的意义在于为合理开发油气藏提供地质基础。通常讲的油藏工程学，与我们讲的采油地质工程也不同。油藏工程学是以渗流力学为基础，以数学方法为主要手段来研究油水运动的过程，由于它把千变万化、非常复杂的地下情况加以理想化、模式化，在这个基础上研究油水运动规律，因而有时不可能比较具体地、细致地描述地下的变化规律，使这门学科在指导生产实践方面有一定的局限性。因而，需要有一门新学科，更全面、更具体地来研究油气藏开采过程中的地下变化，用来指导油田开发，改善油气藏的开发效果。通过长时期的油田开发现场实践和理论研究，这个领域里已经积累了相当丰富的资料，形成了一套比较完善和成熟的研究方法和手段，逐步具备了形成一门新学科的条件。《采油地质工程》就是专门研究油气藏投入开发以后地质管理方法及开采动态变化规律的一门学科，它要研究在开采过程中，油田动态的变化、油、气、水性质的变化、饱和度的变化、压力系统的变化、油层物理性质的变化、油藏构造、结构方面的变化等。通过掌握这些变化规律，来采取相应的调整措施，从而达到改善开发效果、提高采收率的目标。因而，也可以说，采油地质工程是在一系列石油地质学科的基础上发展起来的。石油地质学和油矿地质学的理论是采油地质工程的地质基础，油藏工程学的理论是它的工程理论基础，他们都与采油地质工程有着密切的联系，采油地质工程是上述这些学科的新发展。

本书主要是根据大庆油田开发二十五年的大量矿场资料和理论研究，并试图把石油地质学和油藏工程学的基础理论有机联系起来，来阐明《采油地质工程》的研究对象，研究内容，研究方法，研究手段，以及大庆油田开发过程中所取得的主要成果。

回顾大庆油田二十五年的开采历史，我们在油田开发上所采取的方针、政策是正确的，所采取的一系列具体措施，也基本上是正确的。大庆油田1976年原油产量上五千万吨已经稳产了九年，预计还可以继续稳产，对我们社会主义建设做出了很大贡献。国外一些石油专家认为，大庆油田的开发，是一种成功的“模式”，充分地给予了肯定和赞扬。但是，人的认识通过不断的实践，总是在不断提高的。总结我们整个油田开发过程中的经验，在成功的经验中，通常包含着许多不成功的教训。只有客观地总结这些经验和教训，才有助于

指导我们以后的工作。

在油田开发方面，在“早期内部切割注水、保持压力、自喷开采，要在一个比较长的时间内实现稳定高产，争取达到较高的最终采收率”这个总的开发方针指导下，油田开发取得很大成就，并在油田储油层的认识上，在油田开发系统部署上，在油田高产稳产的问题上，在油田动态变化规律上，在油田开发试验和油田资源潜力的认识上，也有一些新的发展和提高。

## 一、关于油藏储油层性质的认识

大庆油田详探阶段开始就十分重视对油层性质的研究工作，以每2~3平方公里一口井的密度钻了取心资料井，并进行了分层试油；大量资料的取得为油层研究和开发设计奠定了牢靠的基础。

油田开发初期用“旋回对比，分级控制”方法进行单油层对比，1962年提出“油砂体”是组成砂岩储油层的基本单元，并把大庆油田萨尔图油层和葡萄花油层在纵向上分为五个油层组，15个砂岩组和45个小层。平面上每个小层又分为若干个油砂体，每个大的开发区都有几千个油砂体，并绘制了油砂体平面图和剖面图。

上述对油层性质的研究是建立在大庆油田储油层是属于湖相沉积这一认识基础上的。

在采油过程中逐渐发现，注入水在地下的运动与油砂体图不完全一致，而且区与区、层与层之间油水运动的规律也有较大的差异。尤其是主要油层从北向南各开发区的开采特点、水淹特点、开发效果明显不同；从微观的孔隙结构、层理构造、粒度韵律性等也不相同。

1974年以来，在过去油田开发地质研究的基础上，抓住了大庆油田储油层主要是原生孔隙为主的碎屑沉积岩这一特征，因此其分布状况和内部性质主要决定于当时的沉积环境。从而深入、系统地开展了油层沉积相的研究。沉积相即岩相古地理的研究在国内外已有很长的历史，但大都是为勘探找油服务。而在油田投入注水开发以后，如何使这项研究工作进一步为认识油田和改造油田服务，还为时不长。大庆油田以开发井网条件下的大量岩心、测井和生产动态资料为依据，以沉积理论作指导，以现代沉积资料为借鉴，确定储集层的沉积机理，研究储集层沉积时的环境，从沉积成因上认识油层的分布规律和内部性质，并结合油层动态资料认识油水运动特点和油田潜力分布。目前已经完成了萨、葡油层中几个砂岩组的详细研究和高台子油层的整体认识工作，取得了各油层的沉积环境、沉积模式、砂体类型、宏观非均质、水淹特点、井网控制程度和储量比例等方面的系统资料。主要有以下几点认识：

1. 大庆油田萨尔图、葡萄花、高台子油层是松辽大型陆相湖盆中的一套河流-三角洲沉积。

白垩纪中期松辽盆地是一个大型内陆湖盆，主要河流沿盆地长轴方向自北而南流入湖泊，大庆油田的储油层是大型陆相湖盆的河流-三角洲沉积。由于湖岸线不断迁移，河湖频繁交替，湖水进退幅度大，河流又经常摆动，这一特定环境，使所形成的砂、泥质沉积物具有明显的多旋回性、平面分带性和严重的非均质性。油田北部以河道砂为主，向南逐渐演变成席状砂。

2. 三角洲沉积模式具有大型浅水湖盆的特点

单一三角洲叶状体薄而广布，具有众多的分支河道和广阔的前缘席状砂，形状象一片树叶。因为大型浅水湖泊的能量与海洋相比要弱得多，因此与入海三角洲相比，大型浅水湖盆三角洲有以下几点重要特征：

- (1) 三角洲均以建设性为主；
- (2) 不发育反韵律的大型河口砂坝或指状砂坝；
- (3) 砂质沉积物可以直达湖盆中心；
- (4) 三角洲连续沉积过程中垂向上相序可以不连续。

### 3. 大庆油田河流-三角洲沉积的油层主要由八种不同成因的砂体所组成

这八种砂体是曲流点坝砂体、高弯曲分流砂体、低弯曲分流砂体、分流间席状砂体、水下分流砂体、内前缘席状砂体、外前缘席状砂体和滨外坝砂体。它们的几何形态、油层性质、内部结构和开发特点各有区别。其中非均质较严重的厚层条带状河道砂体，具有沿主体带底部优先水淹，初期水淹厚度小，驱油效率不均匀，含水上升速度快的特点。而相对均质的低渗透薄层席状砂的特点刚好与河道砂相反。

### 4. 储油层沉积相研究在开发中的作用

储油层沉积相研究在开发中的作用主要体现在以下几个方面：

- (1) 加深了对油层连通状况的认识；
- (2) 有助于油水运动特点和潜力分布情况的分析；
- (3) 有效地判断纵向上油层发育特点的差异，指导油田分层开采和开发层系调整；
- (4) 准确地预测不同类型砂体的平面分布，指导井网加密调整。

总之，油层沉积相研究建立了大型浅水湖盆三角洲的沉积模式，揭示了湖盆三角洲与海三角洲的差异、以及湖盆三角洲的砂体类型，非均质特点和油水运动特点，逐步探索出一套在油田开发中进行油层研究的方法和途径。

## 二、关于早期注水，保持油层压力水平

大庆油田在投入开发初期，针对油田面积大、边水能量不活跃以及弹性能量小的特点，吸取了国内外油田开发的经验教训，提出早期注水，保持油层压力的开发方针。这样做是想通过早期注水、保持油层压力水平能够：

- (1) 保持地层原油性质不发生变化；
- (2) 保持自喷开采，使开采工艺简化；
- (3) 使生产能力旺盛，以便达到一定的采油速度下保持较长时间的稳产。

二十多年的油田开发实践表明，上述目的基本达到，油田保持了较长时间的高产稳产，开发效果是比较好的。

随着油田新开发区的投产和老区含水的升高。对早期注水、保持压力水平有了一些新的认识。

### 1. 油田注水时间

并不是所有注水开发的砂岩油田均需早期注水，而是要结合油田的地质特征，充分考虑弹性能量和边水能量的利用，这样在新油田开发时，可以考虑晚注水，如龙虎泡油田就准备晚些注水。

### 2. 油层压力保持水平

油田要实现“自喷开采，长期稳产高产”，就必须始终保持较高的压力水平，随着油田进入高含水期开采后，继续提高压力，给油田开发带来许多困难。

第一，高渗透率油层已普遍大面积高含水，再提高油层压力，必然加剧对较低渗透率油层的干扰，油井出油厚度减少；

第二，提高油层压力必然要提高注水压力，而注水压力超过油层破裂压力之后，容易发生套管变形、错断等情况，造成不良后果；

第三，油层压力过高，使油水过渡带原油外流，或使带气顶的油藏原油进入气层，造成储量损失；

第四，油层压力过高，使老开发区钻调整井和油、水井施工等工艺技术复杂化。

因此，不能把油层压力提得过高，在保证一定的生产压差和产能时，压力保持水平尽可能低一些，其下限可以降至不低于饱和压力即可。从大庆油田情况看，油田北部饱和压力高，地层压力一般不超过原始压力，而油田南部压力还可以适当降一些。其数值取决于采油工艺能把油井流压降到什么水平。

从国外资料看，苏联早期注水开发的油田一般油层压力保持在原始压力附近或超过原始压力，他们主张在注水开发油田中把地层压力保持在接近于原始地层压力的水平是合理开发油田的重要条件。而美国一些油田，由于一次采油时油层压力大幅度下降，有的还长期处在低于饱和压力下开采，当进行注水二次采油时，只要求在一定注水压力下实现注采平衡，油井大泵抽油，因此对油层压力的保持水平和界限没有严格的要求。

### 三、关于注水方式和井网问题

油田开发初期，考虑采用内部横切割行列注水的理由是：油田面积大，构造平缓，边水不活跃，弹性能量小，边外注水不可能使油田全部面积受效；构造长宽比为3:1，横切割注水线较短，便于管理和控制；油层变化砂体沿伸方向和渗透率变化方向均沿长轴方向，横切割使注水线与大多数尖灭线垂直，且断层对横切割影响小。因此中区采用2.4公里切割距，二排注水井间夹三排生产井的注水方式。

1963年在编制南、北一区方案时，根据中区试验的实践，提出了对分布不稳定、砂体面积小、渗透率较低的油层组，采用四点法面积井网。它对差油层适应性较好，控制水驱储量大，注水井吸水能力能满足要求。因此在北一区萨Ⅰ、萨Ⅲ、葡Ⅱ和南一区萨加葡Ⅱ组油层布500米井距的四点法面积注水井网，一直到1972年萨中地区调整时，对差油层加密井网，均采用了（反九点法）面积井网。

1972年编制喇嘛甸油田方案，提出对全部萨、葡、高油层采用一套井网，反九点面积注水的开发方案。其理由是行列井中间井排与第一排井矛盾较大；断层多，对行列注水不适应；后期调整比较灵活；井数少，油水井数比为3:1。

近几年反九点法井网注水量不足的问题突出出来，通过数学模型比较，认为五点法面积注水更优于反九点法：水驱控制程度高，采油速度高；井距也比较均匀。因此，在葡南方案中要求反九点法开采到一定阶段后，转为五点法注水；1983年编制的龙虎泡油田开发方案和杏北地区加密调整方案，均采用了五点法面积注水的方式。

从国外油田看，内部行列注水在苏联目前仍占主导地位，但切割宽度不断缩少。这种方法可以选择油田任一地区首先投入开发，取得资料后，指导其它地区开发；同时可以利

用井排多的特点进行排间调整,争取获得较高的无水采油量。为弥补其不足之处,有时辅以点状注水。而西方国家如美国、加拿大,一般在二次采油中普遍应用面积注水,并多用五点法和反九点法。在美国以五点法面积注水最为普遍,其原因是五点法和反九点法与原来一次采油时的方形井网易调整;并认为一次采油后油井产能下降的地方,生产井周围应有几口注水井,否则油井增产幅度小。

从我们现在的实践看,大面积分布的高渗透率油层适于较大切割距行列井网注水开发,该方式调整主动,并留有余地(中间井排),有利于相互接替。而渗透率低、分布不稳定的油层,则适合于面积注水,吸水能力低的油层,更适于五点法面积注水。

#### 四、关于层系细分和开发调整问题

大庆油田的储油层是陆相沉积的非均质多油层油田,初期井网是对主力油层和非主力油层中偏好的部分部署的,原井网对中低渗透率油层控制程度低,注水受效差,储量动用不好。因此,1972年在萨中地区部分区块进行加密调整时,其调整对象是将原井网中动用不好的油层全部抽出来,萨、葡合采,以反九点法面积井网均匀加密。对调整层射孔的原则是,除见水层及隔层调整不射外,其它属调整对象的层全部射孔,使调整井投产初期含水较低,但由于对这些层的沉积特征研究不够,现在看来调整层仍然划得较粗。

1978年以来,开始考虑到调整层系的进一步划分的问题,在萨北地区加密调整时,把在大合采时未动用油层中的葡Ⅱ组和高台子油层单独抽出作为一套调整层系,进行调整。

1981年开始注意到调整层系的沉积特征,即调整层中,沉积条件不同的油层分开调整,并在井网部署中考虑砂体的形态特征,对那些砂体宽度窄的条带状分布砂体,可在砂体延伸方向适当放大井距,而在垂直砂体延伸方向,井距适当缩小,以提高水驱控制程度。

1983年在以往调整的基础上,总结了加密调整的做法,对选择调整单元和组合开发层系进行分析,认为调整层系的细分,必须考虑以下几点:

##### 1. 调整对象油层的沉积环境和砂体形态

对泛滥平原薄层砂、分流间薄层砂、内前缘相分流河道形成的较窄的薄层砂,因其厚度薄,物性差,分布窄,应采用较密的井网组成一套层系开发;而其它分布较广的砂体如内前缘相分布较广的薄层砂和外前缘相席状砂等,可另组合为一套层系开发,如一套层系厚度太大,还可细分。

##### 2. 同一层系油层渗透率级差

对同一层系组合中,层间渗透率级差不得超过一定范围,减少层间干扰。如萨南地区油层渗透率级差超过5时,有62.2%的厚度不出油,而杏南地区油层渗透率级差超过3时,有86%的厚度不出油。因此,同一层系油层渗透率级差不能超过3-5为组合调整层系的原则。

##### 3. 原油粘度和油层润湿性

同一套调整层系的原油粘度要接近,如果靠近水底的稠油段具有一定厚度,应单独细分为一套层系。大庆油田油层润湿性自上而下,从北向南,均由亲油向亲水方面变化,另外油层润湿性与渗透率高低有明显关系,低渗透率油层偏亲水,高渗透率油层偏亲油,在组合调整层系时要考虑这些因素。

国外也在开始重视细分开发层系问题，苏联1983年油田开发会议指出，细分开发层系在完善油田开发系统中占有重要地位。五十年代和六十年代那种把岩性和物性差别很大的油层组合为一个开发层系的设计方法，造成储量动用很不均匀。许多油田后来不得不在细分开发层系上做大量工作。

## 五、关于开采方式的转变和大生产压差采油

大庆油田成功的采用了早期注水，保持油层压力的开发方针，油层能量充足，自喷能力旺盛，在中低含水期，自喷开采表现出了很大的优越性。这是由于大庆油田饱和压力较高，溶解油气比也较高，粘度中等，油井具有较强的自喷能力，自喷开采可以充分利用这部分能量；同时地面设备简单，管理方便，电耗和作业工作量也较少，在开采初期，经济效益高。当油井见水以后，可以进行各种措施，使油田继续保持稳产。

但油田进入高含水期开采之后，油井产能下降速度加快，停喷压力上升，流压上升而生产压差缩小，如继续采用自喷开采，实际已难以实现稳产。因此提出开采方式的改变。

起初是把单井增产作为转抽的主要目标，其效果一是可以大幅度提高排量，其次可以减轻层间干扰，改善出油剖面，并提高地面流程的输油能力。从增产出发，多选低含水井转抽，1981年开始试验转抽时就是这样考虑的。通过试验发现，只抽低含水井太分散，必然是出现注采关系不好调整；同时出现不少井因气体影响而欠载，特别是油田北部饱和压力较高的地区，欠载更为严重。

实践使我们认识到，转抽的意义远不止是增产，开采方式的转变使油田压力保持水平降低，保护了套管，简化了钻调整井和油井措施施工工艺，对油田长期稳产产生很大影响。因此，认识到了必须成片转抽，在油田南部饱和压力低的地区、套管损坏严重地区和需要钻调整井地区优先转抽；在过渡带高压区转抽，还可以阻止原油外流现象的发生。

对于成片转抽的开发区块，要求编制全面转抽的整体设计和方案。近几年通过萨中西区和杏一区东部全面转抽后的实践，均获得了良好的效果。西区转抽前由于含水高(80%)，流压上升导致生产压差缩小(由20.8大气压降到17.2大气压)，因产液量上不去，产油量大大幅度下降，采油速度由1980年2.6%、1981年2.09%降至1982年1.85%。1983年全面转抽后，生产压差由17.2大气压放大到40大气压左右，采油速度又回升到2.07%。杏一区东部全面转抽后一年时间，总压差由+9.3大气压降至-2.7大气压，但由于流动压力降的幅度更大，使生产压差由22.2大气压放大到47.5大气压，虽然全区综合含水由57.4%上升到73.2%，但由于产液量增加74.7%，日产油量增加10%。同时为1984年在该地区钻调整井创造了条件，使固井合格率由85%提高到98%。

国外油田开发比较重视通过机械采油降低生产井的井底压力，采用大生产压差采油。苏联在采用高压注水的同时，强调降低油井的井底压力进行大压差采油，在油井含水不断增加的情况下，由自喷转抽油，把小泵抽油换成大泵抽油，把有杆泵改为电泵抽油是有效的强化开采方法，可使油井产油量与采液量成比例地增长。罗马什金油田1971~1975年的油田开发分析表明，由于采用大生产压差采油，每年增产的油量占油田总增产油量的20%。美国绝大部分油田都要经过一次采油，二次采油时地层压力也不高，因此采油井绝大部分是非自喷井，1982年自喷井仅占6.2%。他们对降低油井的井底压力在技术上是比较重视的，通过加深泵挂和大泵抽油，可以将油井的井底压力降到10个大气压以下。

大庆油田根据各开发区饱和压力不同,油井的井底压力降到一定程度,井底附近油层脱气严重,形成油、气、水三相流动,这将使得油相的相对渗透率降低,采油指数大幅度下降;另外气液比过高也会影响泵效。根据理论计算,大庆油田自北向南,在含水80%时泵口至油层中部深度100米的情况下,流压可降至56.1~46.1大气压。如果泵口下至油层中部深度,流压可降至47.3~37.2大气压。随着含水升高,气液比影响因素减小,井底流压还可以进一步降低。因此,提高机械采油的技术水平对油田后期开采,意义是很大的。

## 六、关于油田接替稳产问题

油田投产初期,在油田开发方针中就明确规定:要实现油田长期、稳定、高产。这个方针是正确的。但通过这些年来的不断实践,对油田稳产的含义,如稳产的方式、稳产的水平及稳产的措施等,在理解上都更加深刻了。

由于在油田开发初期所采用的一系列技术措施,包括井网、层系组合、注水方式、开采方式及保持压力水平、含水上升速度等开采政策和技术界限均仅适应于高渗透率主力油层,而对占储量一半以上的低渗透率非主力油层则考虑得不够。

油田全面投入注水开发以后,发现高渗透率油层单层、局部突进比较严重,开始采用分层开采工艺,强调要井井稳产,层层稳产。其作法是,注水井对高渗透率主力油层严格控制注水,在油井进行分层配产,各类油层都按可采储量3%左右的速度分配产量,对主力油层用井下油嘴调节出油。当时提出要“保护”主力油层,实质上由于对井与井之间,单井的层与层之间生产能力的差异认识不足,削高就低,限制了主力油层与高产油井产能的发挥,油田采油速度只1.0~1.2%(地质储量),稳产保持在较低的采油速度。这种作法使一些高产井和高产油层不能充分发挥作用,错过了高产的时机。

七十年代以后,由于对油层沉积特征的深入研究,认识到油层的沉积成因和砂体分布形态是控制油水运动的基本因素。研究表明,大庆油田主要含油区的主要砂体属大陆型湖盆河流-三角洲沉积体系,砂体的高渗透率部位,多为泛滥平原或分流平原的河道砂,注水开发之后,这些部位见效快、产量高、见水也快,对这些井层不应该采取限制政策,而是不失时机地夺取高产,让其充分发挥作用。事实表明,主力油层先见效、先见水、先高产的客观规律并不以人的意志而转移,只有因势利导,放大生产压差采油,才能取得较好的开采效果。当这些井层因含水高而产量开始下降的时候,通过采取同井分层开采工艺技术(包括分层注水、分层堵水、分层测试和分层压裂改造等)和钻调整井等措施来实现产量的转移接替。这就打破了要求单井、单层均匀开采,各自实现稳产的概念,建立起了井与井之间、层与层之间产量接替实现稳产的新看法,这使得实现在较高采油速度下的稳产成为可能。

1975年油田提出“高产五千万吨,稳产再十年”的规划设想时,把十年稳产期明确分为两个阶段,分两步走。前五年以立足于现有井网、层系,现有采油工艺技术,主力油层自喷开采来实现稳产。后五年则靠非主力油层调整、挖潜实现接替稳产。在靠主力油层稳产期间,由于主力油层采出程度和含水均较低,通过调整、挖潜较易实现分区产量稳定。但1980年进入高含水开采阶段后,主力油层产量迅速下降,需要靠非主力油层加密调整,提高动用程度和采油速度来接替稳产。由于钻井不可能在全油田各区同时进行,需要按计划