

---

# 薄互层油藏高效 开发技术与应用

---

余传谋 / 著

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

# 薄互层油藏高效开发 技术与应用

余传谋 著

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

---

图书在版编目(CIP)数据

薄互层油藏高效开发技术与应用 / 余传谋著. —北京:北京理工大学出版社,  
2020. 8

ISBN 978 - 7 - 5682 - 8877 - 4

I. ①薄… II. ①余… III. ①薄互层 - 低渗透油气藏 - 油田开发 - 研究  
IV. ①TE348

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 148773 号

---

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 唐山富达印务有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 16.75

字 数 / 388 千字

版 次 / 2020 年 8 月第 1 版 2020 年 8 月第 1 次印刷

定 价 / 98.00 元

责任编辑 / 王玲玲

文案编辑 / 王玲玲

责任校对 / 刘亚男

责任印制 / 李志强

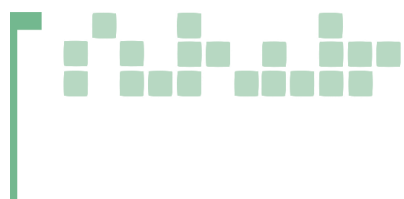
---

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换



# 前 言

中原油田东濮老区目前已进入高含水后期开发，主力厚油层采出程度已达41%，综合含水达96%以上。同时，受寒冬期油价大幅下跌影响，产量下滑明显，油田生存发展面临极大挑战。东濮老区复杂断块薄互层非均质油藏地质储量2.74亿吨，占总储量的49.6%，采出程度仅29%，具有埋藏深、油层多、层系多、多层薄互层发育、非均质性严重的特点，储层纵向上多层薄互层发育，仅沙二下就有50个小层，平均砂厚2.5 m，小于3 m的占75%，隔夹层厚度主要为2 m左右。平面上相变快，多条窄小河道发育，同期发育50条以上。以50~160 m窄条状河道为主，占80%。目前采出程度仅为29.1%，剩余可采储量1 021万吨。濮城油田文51油藏层段长，渗透率级差大，层间动用差异大，属于典型的薄互层非均质油藏。同时，该油藏构造复杂，被多期断层作用复杂化，切割出11个断块，并且每个断块内部低序级断层发育经过30余年的注水开发，长井段多油层合采合注，层间矛盾加剧，开发指标呈变差趋势。集团公司在2016年水驱技术交流会后，提出通过在地层薄互层剩余油描述技术、井筒深层精细分注技术、地面高效增注技术、精细注水管理机制等方面开展自主创新，确立创建濮城油田文51油藏中石化精细注水示范区，探索一套适应特高含水期薄互层油藏改善开发效果，提升开发效益的高效注水开发技术；指导同类油藏进一步改善开发效果，提升开发效益，实现油田健康可持续发展的目标。



# 目 录

<b>第一章 绪 论</b> .....	1
一、研究的目的及意义 .....	1
二、国内技术研究现状 .....	1
三、主要研究内容和难点 .....	2
<b>第二章 井间砂体构型研究</b> .....	5
一、单成因砂体的识别标志 .....	5
二、单成因砂体的连接模式 .....	6
三、厚油层构型划分及内部构型分析 .....	7
<b>第三章 薄砂体刻画研究</b> .....	17
一、相对保持提高分辨率处理与质量监控 .....	17
二、叠前同时反演 .....	26
三、震控岩相建模 .....	41
四、精细沉积微相建模 .....	44
五、J函数及时变数模一体化技术，提高相控剩余油定量描述精度 .....	51
六、剩余油分布模式 .....	67
<b>第四章 夹层识别结合数值模拟技术</b> .....	71
一、精细储层对比 .....	71
二、储层非均质研究 .....	74
三、隔夹层的识别技术 .....	81
四、夹层控制剩余油研究 .....	84
<b>第五章 河道微相细化研究</b> .....	88
一、层序地层学研究 .....	88
二、单井层序地层分析 .....	89
三、地震层序地层分析 .....	95
四、连井层序地层对比 .....	96
五、等时砂体与小层统层 .....	98
六、时间单元划分 .....	99
七、标准剖面的建立 .....	99
八、小层统层 .....	101



九、沉积微相基础研究及描述（以文 51 沙二下油藏为例） .....	102
<b>第六章 高耗水层带识别发育及控油研究 .....</b>	<b>108</b>
一、高耗水带影响因素分析 .....	108
二、高耗水带识别及发育特征 .....	109
三、高耗水带对剩余油分布影响分析 .....	113
<b>第七章 测井处理、解释与储层静态建模研究 .....</b>	<b>118</b>
一、测井研究概述 .....	118
二、测井数据处理 .....	121
三、井震联合测井资料综合研究 .....	127
四、测井二次储层物性、含油性解释与 QC .....	152
<b>第八章 深层高压薄互层高效细分 .....</b>	<b>175</b>
一、吸水剖面预测技术 .....	175
二、逐级解封多级分注工艺 .....	179
三、一体化智能高效测调技术 .....	185
<b>第九章 高效增注动态分压注水技术 .....</b>	<b>191</b>
一、低成本污水处理技术 .....	191
二、井况综合防治技术 .....	193
三、全流程节能注水 .....	201
<b>第十章 对置式大排量往复注水泵的研究 .....</b>	<b>205</b>
一、柱塞泵运动学分析 .....	205
二、对置式柱塞泵的力学分析 .....	212
三、对置式柱塞泵性能可视化界面 .....	220
四、新型注水泵的参数设计及核算 .....	222
五、对置泵总体设计 .....	229
六、新型对置连杆传动装置 .....	235
七、直连齿轮减速机传动方式 .....	237
八、机泵出口管路工艺系统减震设计 .....	242
九、机组智能监控系统 .....	250



## ■ 一、研究的目的及意义

中原油田东濮老区目前已进入高含水后期开发，主力厚油层采出程度已达41%，综合含水达96%以上。同时，受寒冬期油价大幅下跌影响，产量下滑明显，油田生存发展面临极大挑战。东濮老区复杂断块薄互层非均质油藏地质储量2.74亿吨，占总储量的49.6%，采出程度仅29%，具有埋藏深、油层多、层系多、多层薄互层发育、非均质性严重特点，储层纵向上多层薄互层发育，仅沙二下就有50个小层，平均砂厚2.5 m，小于3 m的占75%，隔夹层厚度主要为2 m左右。平面上相变快，多条窄小河道发育，同期发育50条以上。以50~160 m窄条状河道为主，占80%。目前采出程度仅为29.1%，剩余可采储量1 021万吨。濮城油田文51油藏层段长，渗透率级差大，层间动用差异大，属于典型的薄互层非均质油藏，同时，该油藏构造复杂，被多期断层作用复杂化，切割出11个断块，并且每个断块内部低序级断层发育经过30余年的注水开发，长井段多层合采合注，层间矛盾加剧，开发指标呈变差趋势。集团公司于2016年水驱技术交流会后，提出通过在地层薄互层剩余油描述技术、井筒深层精细分注技术、地面高效增注技术、精细注水管理机制等方面开展自主创新，确立创建濮城油田文51油藏中石化精细注水示范区，探索一套适应特高含水期薄互层油藏改善开发效果，提升开发效益的高效注水开发技术；指导同类油藏进一步改善开发效果，提升开发效益，实现油田健康可持续发展的目标。

## ■ 二、国内技术研究现状

基于薄互层油藏砂层单层薄、多层叠置、横向连续性差、层间非均质性严重的特点，目前国内各油田普遍认为薄互层油藏的开发，应把握好几个方面的问题：

①对薄互层储层而言，需要建立精细地层格架模型、微构造模型、沉积相微相模型、测井解释模型、非均质模型、储层流动单元模型，做好精细构造解释及储层非均质性及微观孔隙结构研究，分析了层内、层间、平面上的储层差异；

②通过相控剩余油分析，明确剩余油分布类型及区域，分层系实施相控注水挖潜剩余油；

③对于层间渗透率差异较大的油藏，应开展好层系细分技术研究来改善油藏开发效

果,目前多以细分注水、分段开发为主,调剖、堵水为辅,矿场实践证明经济效果较好。

经过多年的相控注水、单元重组及分层系开发,国内大部分老油田已进入高含水、特高含水期开发阶段,因层间差异大,水驱效率较低,部分油田含水高达95%以上,为了确保油田更长期的稳产,除进行主力油层的开发层系调整外,国内各油田越来越看重薄差油层、难采储层的井网加密调整、层段细分调整。与此同时,配套的采油工艺技术也逐步完善,目前细分注水技术已日趋进步,多段注水、四寸套井分注等技术普遍应用,但部分技术仍存在一定缺陷。

目前国内各大油田注水开发主要采用的是偏心分注技术,受工艺限制,无法适应进一步细分需要:一是受配水堵塞器投捞的影响,两级偏心配水器间距要求至少要在6 m以上才能保证投捞顺利、不投错层,限制了封隔器的卡距,使现有技术无法进一步细分;二是细分将导致封隔器级数的增加,管柱解封力加大,常规作业设备无法满足现场作业需求;三是目前管柱无法适应小夹层坐卡需要;四是细分后层段数大幅度增加,测调工作量将成倍增长,常规更换陶瓷水嘴的试配法无法满足测试需要。同时,由于井况、注水压差等原因,部分分注井采用4寸<sup>①</sup>套封隔器或油套分注管柱,这类管柱无法洗井,容易造成作业时卡管柱、井损等问题。为此,需要开展多级细分注水技术研究,形成一套适应特高含水期薄互层油藏剩余油挖潜的注水开发技术。

### ■ 三、主要研究内容和难点

#### (一) 研究的油藏概况

东濮老区复杂断块薄互层非均质油藏地质储量2.74亿吨,占总储量的49.6%,采出程度29.1%,综合含水94%,已进入特高含水开发阶段。油藏埋深-2 550~-2 900 m,油水界面为-2 810 m。孔隙度19.5%,渗透率101.8 mD<sup>②</sup>(毫达西),属中孔、中渗复杂断块油藏。

纵向上多层薄互层发育,仅沙二下就有50个小层。平均砂厚2.5 m(图1-1、图1-2)。

平面上多条窄小河道发育,同期发育50条以上。宽度以50~160 m窄条状河道为主(图1-3)。

#### (二) 研究油藏面临的难题

精细注水示范区的创建是一项集地下、井筒、地面、管理为一体的系统工程,经调查分析,进入高含水开发期后,制约濮城油田复杂断块薄互层非均质油藏开发水平提升主要有三大问题:

①难题一:多层薄互层非均质油藏特高含水期剩余油分布模式,特别是储量占比达72%的窄薄河道相剩余油分布模式还有待细化研究。

① 1寸=0.033 m。

② 1 D=0.987×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>。

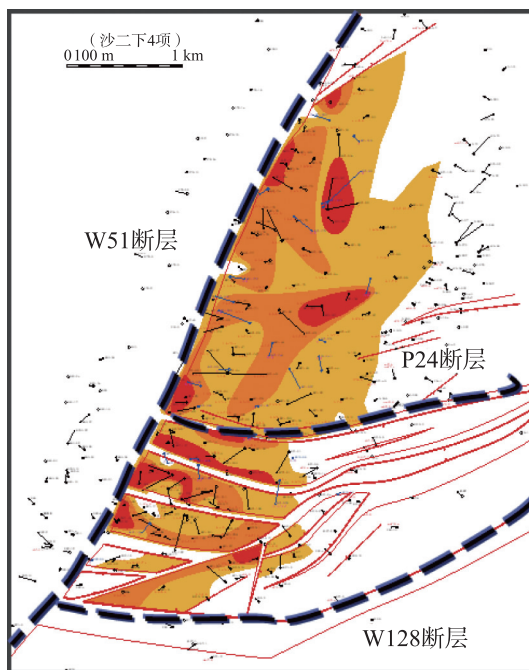


图 1-1 文 51 油藏构造图

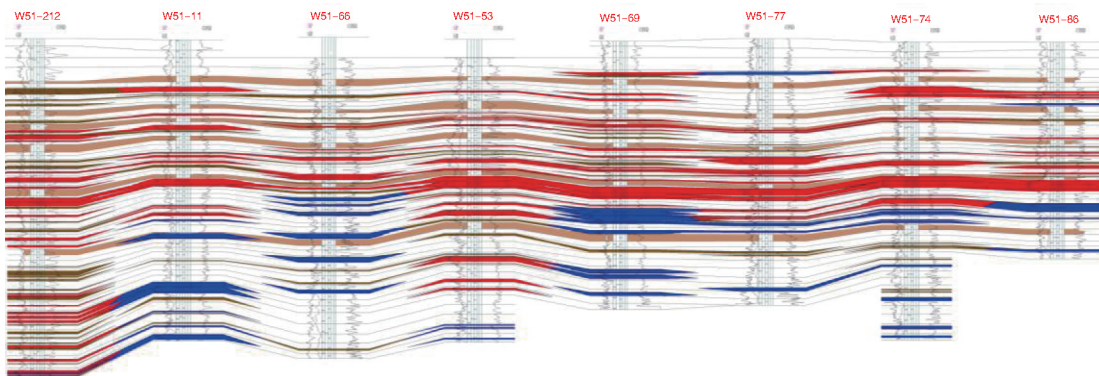


图 1-2 沉积微相连井剖面图

随着开发时间的增长,精细剩余油认识在地质开发工作中越发重要,以往刻画的宽泛河道及剩余油认识已不能适应高含水开发后期薄互层油藏精细开发需求。当前多层薄互层非均质油藏特高含水期剩余油分布模式,特别是储量占比达 72% 的窄薄河道相剩余油分布模式还有待细化研究(图 1-4)。

②难题二:受油藏埋藏深、高压、高温及井况影响,目前配套工艺技术不适应多层薄互层非均质油藏的精细开发需求。

薄互层油藏一方面层间非均质性强,随着开发对象向二、三层转移,必须研究优化多级多段注水管柱;另外,多层薄互层油藏隔夹层薄(0.6~2.8 m),目前的分注工艺较难实现薄夹层有效分注。同时,目前对于水井分注,缺乏一套层段优化、分注方案优选的解决方案,措施的有效率有待进一步提高。

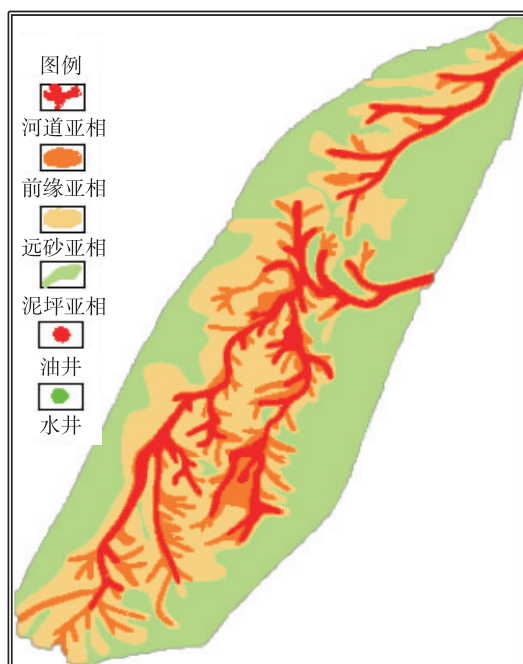


图 1-3 沉积微相图

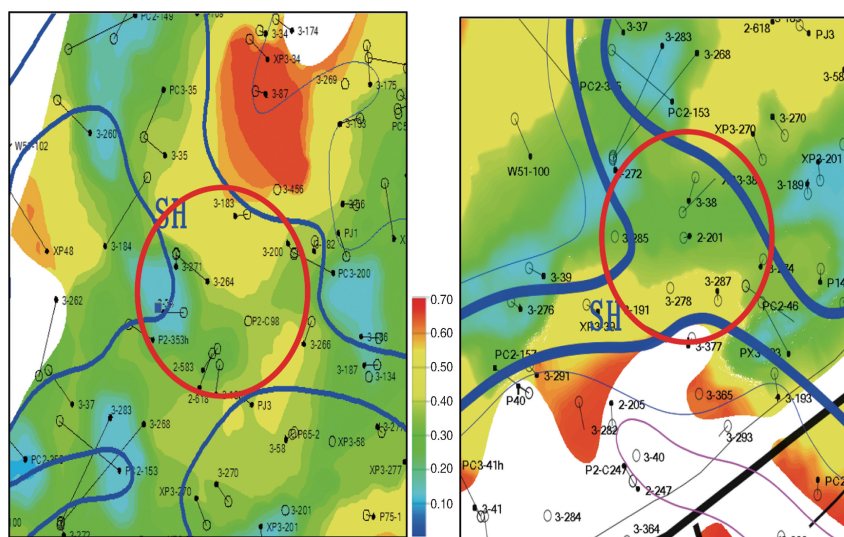


图 1-4 剩余油饱和度图

③难题三：老油田开发后期，开发目标向二、三类层转移，注水压力逐步上升，注水能耗增加，系统效率降低，原有地面注水系统不适应精细注水要求。

薄互层油藏层间非均质性严重，随着开发目标向二、三类层转移，注水压力逐步上升，早期建立的地面注水系统主要适应中高渗储层，增注站的注水能力与注水量的匹配程度下降，效率低，不适应精细注水、精细分注的要求。

# 井间砂体构型研究

## 第二章

### 一、单成因砂体的识别标志

前人对储层空间结构的研究和探讨主要集中于曲流河点坝砂体构型的分析，对三角洲前缘水下分流河道砂体的空间构型研究甚少，尤其是针对三角洲前缘窄薄砂体空间构型的研究基本还是一个空白。本次借鉴了前人在曲流河点坝空间构型分析方面的研究成果，在结合本区具体沉积环境和砂体特征的基础上，确定了水下分流主河道单成因砂体的识别的四类标志。

#### （一）不连续的水下分流河道间砂体

尽管大面积分布的水下分流河道砂体多为多条河道侧向拼合的结果。一般情况下，如果河道出现分岔，则在河道间会因为漫溢作用而形成不连续的水下分流河道间砂或者因为砂质沉积缺乏而只有河道间泥，沿河道横向上不连续分布的水下分流河道间砂体或者河道间泥便成为两条不同水下分流河道的分界标志（图 2-1）。

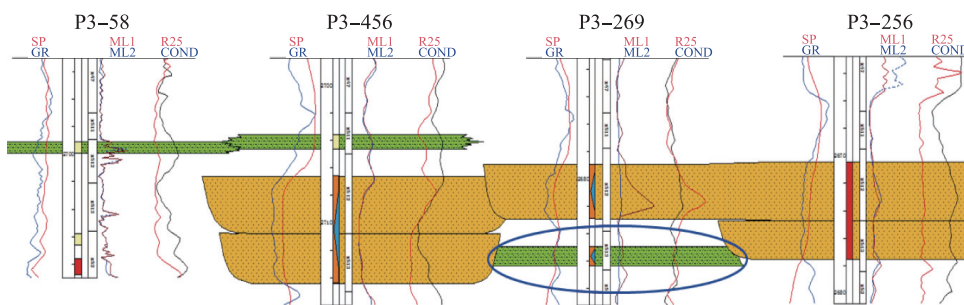


图 2-1 单一河道识别标志——河道间薄层砂沉积

#### （二）同时期水下分流河道砂体顶底面高程差异

不同水下分流河道砂体尽管属于同一地质时期沉积的产物，但是受其沉积古地形的影响、沉积能量的微弱差别及水下分流河道改道或发育时间差异的影响，在顶底相对高程上会有差异（图 2-2）。

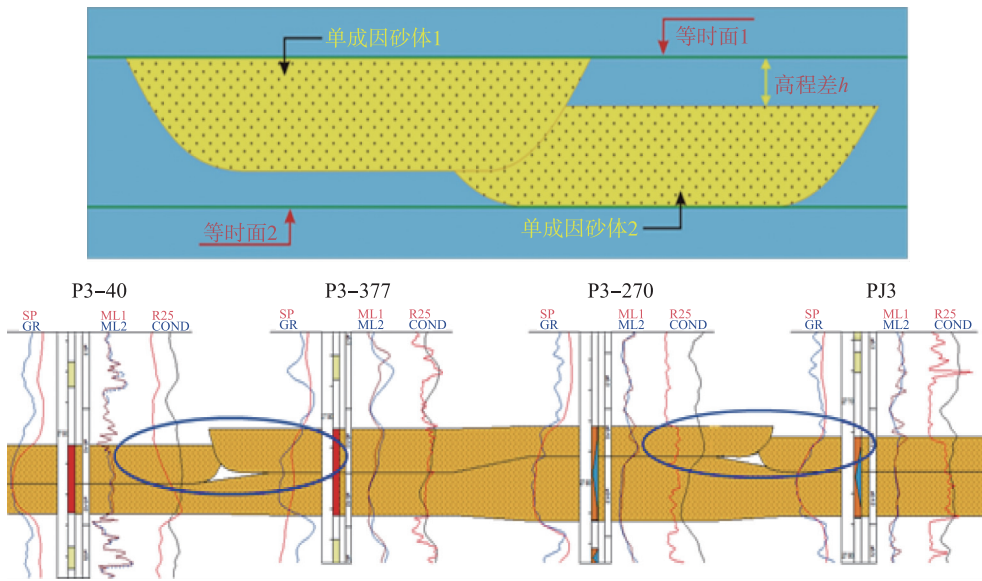


图 2-2 单一河道识别标志——同时期河道砂体顶面高程差异

如果这种差异出现在水下分流河道分界附近，就可以将其作为两条水下分流河道砂体的边界的标志，需要和其他资料配合使用才能更好地起到单河道划分的标志性作用。

### (三) 水下分流河道砂体厚度差异

不同水下分流河道砂体，由于分流能力受到多种因素的影响而必然会出现差异，会通过沉积砂体的厚度上的差异表现出来，如果这种差异性的边界可以在较大范围内追溯，就可以认为是不同水下分流河道单元的指示。

### (四) 废弃河道

废弃河道的形成多是由于河道改道或河道截留，沉积水动力发生改变，沉积砂体厚度出现差异变化。废弃河道一般底部物性与主河道底部物性一致，顶部沉积物性变差，可认为是不同水下分流河道单元的指示（图 2-3）。

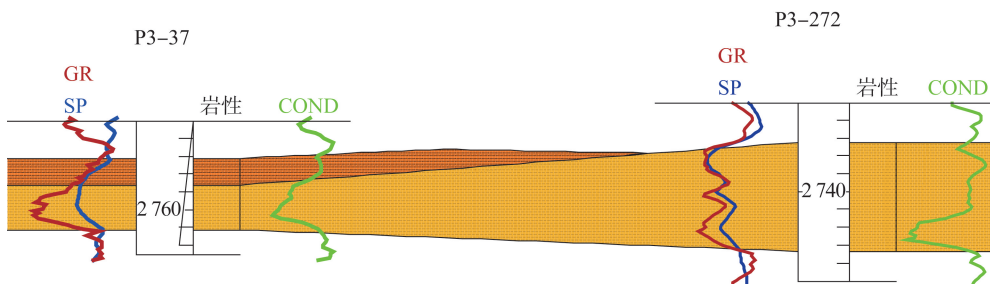


图 2-3 单一河道识别标志——废弃河道

## 二、单成因砂体的连接模式

以岩芯观察划分为基础，结合测井响应特征，将水下分流河道测井相划分为以下三

大类：

- ①多期叠合型：剩余油主要分布在未连通的砂体内部。
- ②横向孤立型：剩余油分布在水井难控制的孤立河道砂体中。
- ③切叠拼接型：剩余油分布在受隔夹层遮挡的井间渗流屏障区。

### 三、厚油层构型划分及内部构型分析

#### (一) 厚油层内部结构层次划分

在开展地下储层结构研究中，大多数学者基本都采用了 Miall 提出的储层结构界面及结构要素划分思路，虽然该方案严格遵循了沉积结构层次性原则，但明显存在与现场地层及小层划分方案和使用习惯不配套的问题，因而有必要针对具体的研究对象提出全新而具体的砂体内部结构划分方案。结构界面和要素的划分与种类应当是一个开放的体系，可以结合所研究地区的特点及研究对象的复杂程度自行排列界面序列、定义结构要素类型，不拘一格。

鉴于此，本次研究过程中，针对研究区厚油层的结构性和现场使用习惯提出了适合本油藏的砂体内部结构划分方案（表 2-1）。厚油层砂体结构解剖的重点研究对象为第六、七级结构体，即单成因砂体和加积体，分别对应于小层划分方案中的单砂体及加积单元。

表 2-1 砂体内部结构划分方案及其与小层划分方案对比表

构型方案	一级	二级	三级	四级	五级	六级	七级	八级	九级
地层方案	组	段	亚段	砂组	小层	单砂体	层理组	层系	纹层
厚油层 构型识 别结果	沙河 街组	沙 二 段	沙 二 下	X2 砂组	24	4-1 单成因砂体	层理组	层系	纹层
					24	4-2 单成因砂体	层理组	层系	纹层
				X3 砂组	34	4-1 单成因砂体	层理组	层系	纹层
					34	4-2 单成因砂体	层理组	层系	纹层
				X5 砂组	51	1-1 单成因砂体	层理组	层系	纹层
					51	1-2 单成因砂体	层理组	层系	纹层
					51	1-3 单成因砂体	层理组	层系	纹层
					52	2-1 单成因砂体	层理组	层系	纹层
				X6 砂组	52	2-2 单成因砂体	层理组	层系	纹层
					64	4-1 单成因砂体	层理组	层系	纹层
				64	4-2 单成因砂体	层理组	层系	纹层	

#### (二) 厚油层内部结构面类型及特征

厚油层内部结构面是指，在纵向沉积层序中，一期连续稳定沉积结束到下一期连续稳定沉积开始之间形成的，在岩性和测井响应特征上有别于上下邻层的特征岩性面。与结构

层次划分相应，结构面的规模有大小之别，级别有高低之分，本研究的重点是第六级和第七级结构面，即单成因砂体的边界结构面和单成因砂体内部的加积面（一般以夹层形式产出），这既是重点，也是难点，更是做好空间结构研究的关键所在。

根据岩芯特征和测井解释结果，厚油层砂体内部的第六级结构面主要有3种类型：泥质层、含砾砂岩层、钙质层。从岩芯特征来看，第七级结构面主要是单成因砂体内部的泥岩、粉砂质泥岩或泥质粉砂岩薄夹层，厚度一般为0.1~0.3 m，一般为洪后水道内的悬浮沉积或洪峰间河道内的细粒沉积，属水动力短暂变弱的沉积产物。

### 1. 泥质层

泥质层的成因往往是一期河道沉积在沉积晚期，随着水动力作用的减弱而在下部砂质沉积物之上形成的一套泥质，也可以是水下分流河道间的泥质沉积，但随着后期河道逐渐发育及下切作用不断增强的影响，此前的泥质沉积物一部分会被侵蚀，但这种侵蚀作用还不至于下切至前期沉积的河道砂体，于是在两期河道沉积砂体之间便形成了泥质结构面，微电极测井曲线回返明显，幅度差减小，比较容易识别。

### 2. 含砾砂岩层

含砾砂岩层主要由冲刷-充填作用形成，指位于河道底部的一套滞留沉积，此层分选和物性均相对较差（图2-4）。对研究区岩芯观察表明，虽然含砾砂岩层物性相对较差，但依然含油，只是原始油气充满度不如其上部砂岩段，电阻率回返程度较低。物性差的含砾砂岩层从岩芯上容易识别，但从测井曲线上识别尚有一定难度，故在做空间单成因砂体划分时，需要参考连井剖面上各结构体的空间位置及接触关系来开展综合识别。

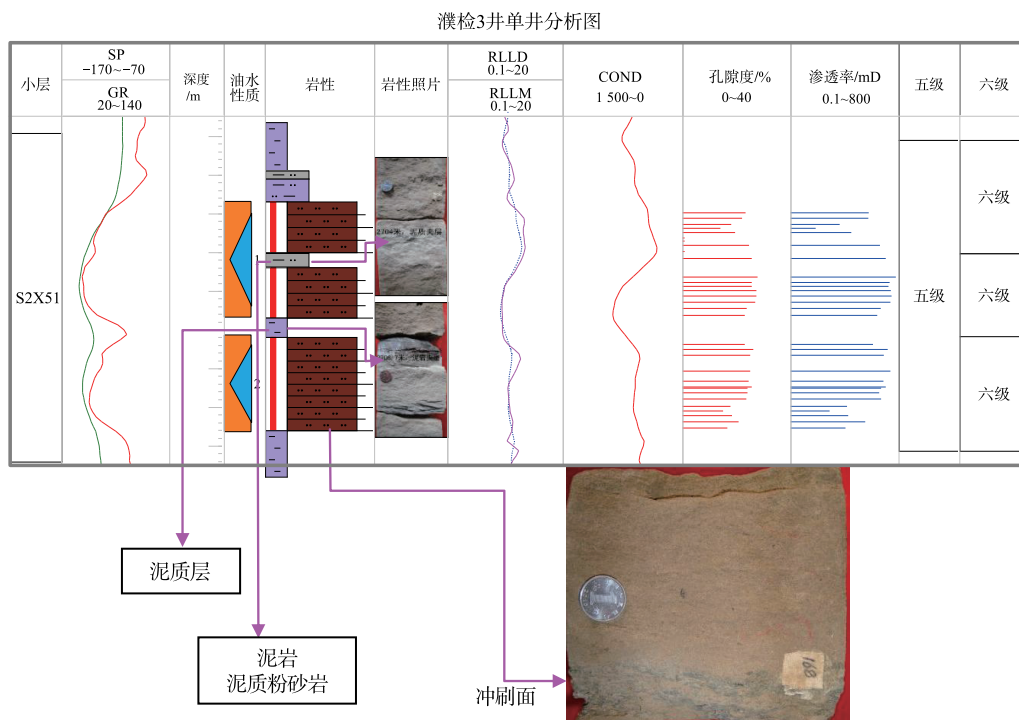


图2-4 厚油层当中的结构面（P3井）

### 3. 钙质层

正韵律水下分流河道储层的下部物性一般较好，是孔隙水的优势渗流部位，也是钙质优先沉积场所，易形成钙质砂岩，此为钙质层成因之一。另外，从厚油层岩芯特征来看，河道顶部与上覆泥岩接触位置的钙质层也较发育。所以，钙质层的成因之二也可能是早期黏土矿物转化过程中产生的钙离子，在沉积砂体顶部成岩而成的。不管钙质层属于哪一种成因，厚油层内部的钙质层指示了单成因砂体的顶、底面，属六级结构面之一，可作为多期单成因砂体叠加的佐证（图 2-5）。

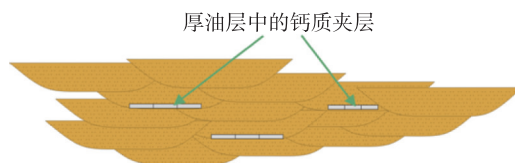


图 2-5 厚油层内部钙质层分布模式

至于研究区厚油层内第七级结构面，从岩芯特征来看，主要是单成因砂体内部的泥岩、粉砂质泥岩或泥质粉砂岩薄夹层，单层厚度一般为 0.1~0.3 m，一般为洪后水道内的悬浮沉积或洪峰间河道内的细粒沉积，属于水动力短暂变弱的沉积产物。

开展储集砂体划分和识别不同级次结构面必须遵循所研究对象的沉积规律，按照点-线-面-空间的思路开展全方位研究。一般地，如果是不同河道单元叠置，其间出现的泥质、钙质和冲刷面第六级结构面具有横向延续较稳定或略呈渐变的特点。如果在厚油层中的结构面不连续、井间不可追，则这种结构面有可能是单成因砂体内部的第七级结构面（图 2-6）。

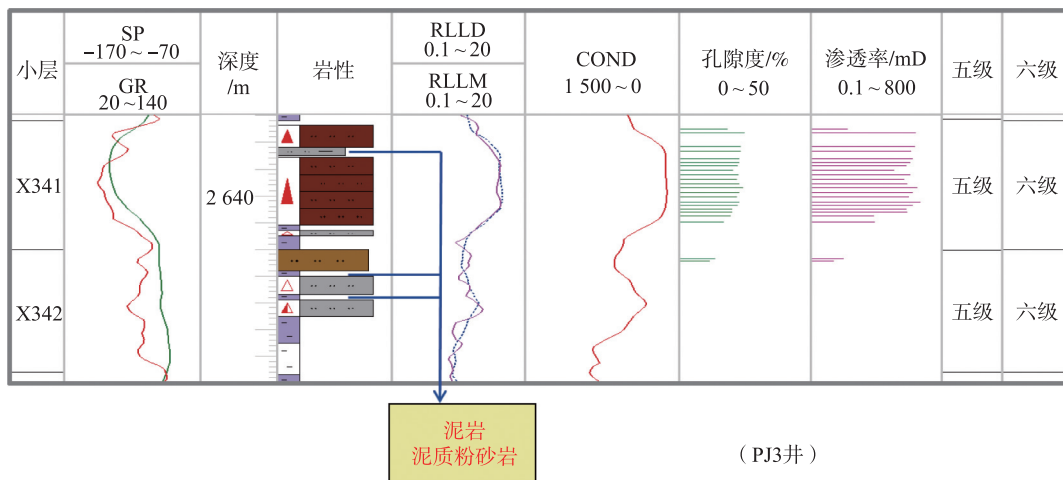


图 2-6 厚油层中的第七级结构面特征

### (三) 厚油层空间结构特征分析

通过对储层沉积单元的细分与对比，进行砂体骨架精细解剖，建立起东西向 2 条和南北向 2 条共计 4 条砂体精细划分与对比基于剖面 and 若干平行剖面。在此基础之上，充分认

识砂体可能成因类型、组合样式，并结合砂体的平面组合样式，在现代河流和古代露头沉积模式的指导下，按照地质思维来合理地建立砂体的剖面 and 平面结构模型。

### 1. 取芯井厚油层结构特征分析

详细观察和描述了研究区所有目的层取芯井的岩芯资料，对取芯井的岩芯观察和描述着眼于3方面的问题：取芯井厚油层内部各级结构面的识别；厚油层内部结构面的产状特征；取芯井厚油层单成因砂体的划分。以岩芯资料为基础，建立了濮检3井的单井结构剖面（图2-7）。

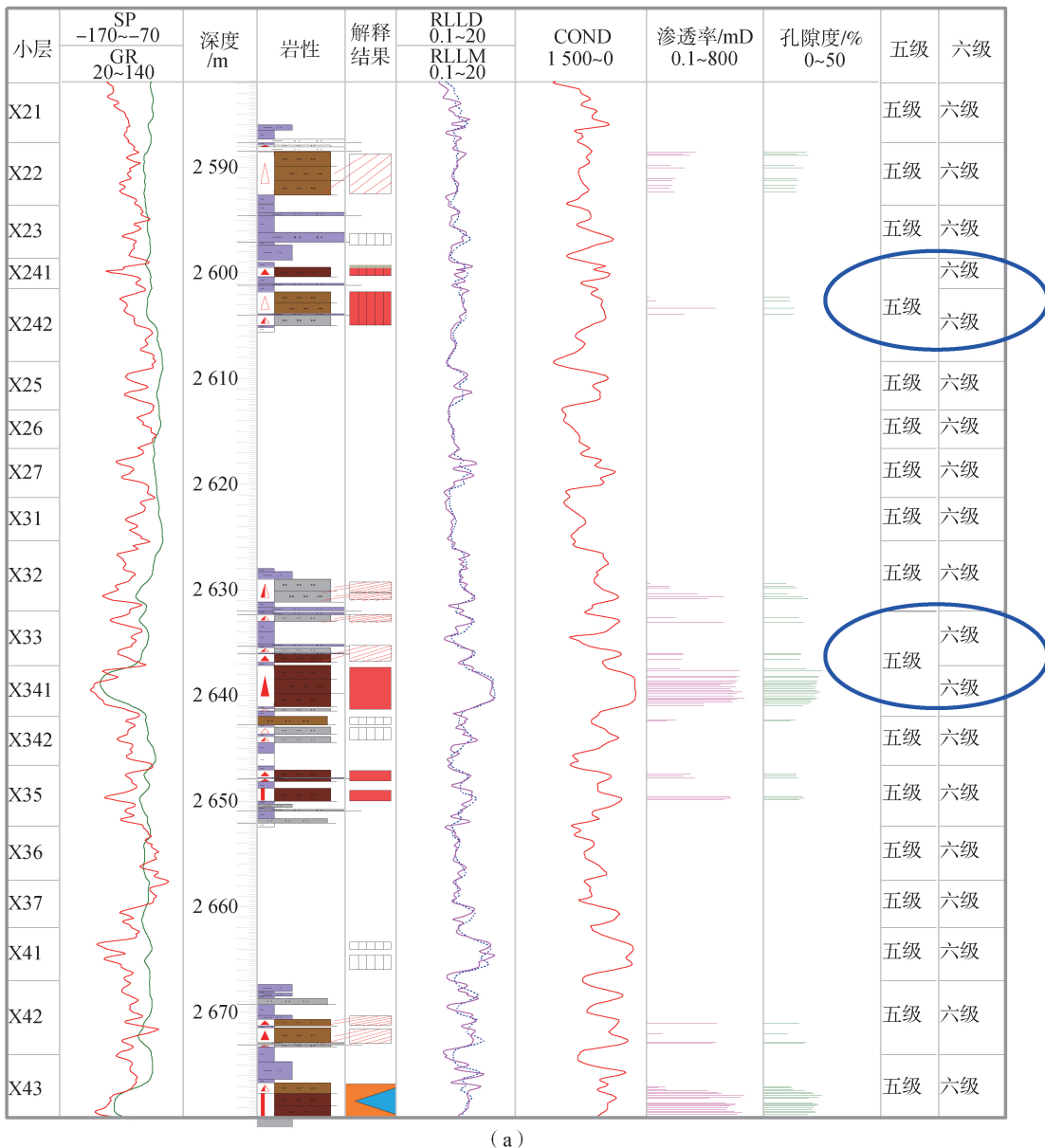
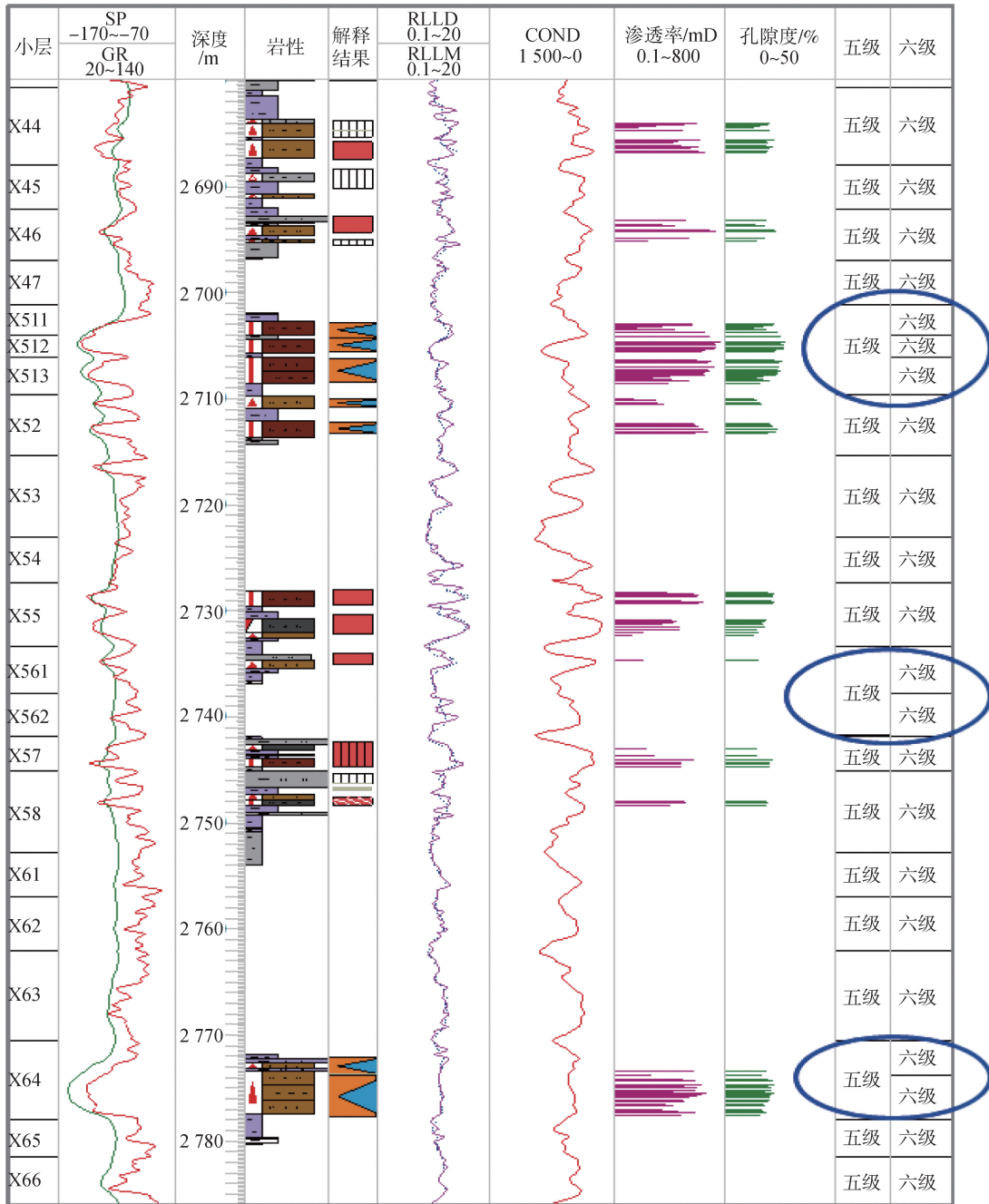


图2-7 濮检3井单井结构分析图



(b)

图 2-7 濮检 3 井单井结构分析图 (续)

濮检 3 井是 2002 年 10 月完钻的一口取芯井, 分析化验资料较全。取芯段主要厚油层砂体所处层位为沙二下, 属三角洲前缘水下分流河道砂。

#### (1) 结构面类型及产状

濮检 3 井厚油层内部的结构面共有两种类型: 一种是单河道底部冲刷面 (图 2-8),