

Research on Macroscopic Heterogeneities and Their Effects on Thermal Recovery of Heavy Oil in L16 Oilfield

Jing Tang, Ting'en Fan, Hongjun Fan, Haifeng Wang, Lei Wang

CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing
Email: tangjing3@cnooc.com.cn

Received: Sep. 7th, 2018; accepted: Sep. 21st, 2018; published: Sep. 28th, 2018

Abstract

Reservoir macroscopic heterogeneity is one of the main geological factors that affect remaining oil distribution and recovery effectiveness. The reservoir type of L16 oilfield is unconventional high porosity, high permeability, massive thick bottom water and extra heavy hydrocarbon reservoir. In view of this phenomenon, according to the practical geological situation, geological data of lithologies, physical properties, electric properties and oiliness were adopted to conduct qualitative evaluation of L16 reservoir heterogeneity and its cause, and to analyze the influences of heterogeneity on thermal recovery of heavy oil of the reservoir. This paper divided macroscopic heterogeneity into the intra-layer, inter-layer and plane heterogeneities for respective discussion. The result shows that the intra-layer heterogeneity is strong in the study area, which is mainly controlled by sedimentary structure, rhythm, permeability directivity, permeability heterogeneous and interlayers; the plane heterogeneity is mainly affected by the geometric shape and distribution of sand body; there is only one oil layer in the study area. There is not interlayer development in the oil layer, only intraformational bed in the development layer, so the problem of interlayer heterogeneity is nonexistent. The research of the reservoir heterogeneity provides important theory basis for grasping the distribution of remaining oil and later exploitation in the study area.

Keywords

Reservoir Macroscopic Heterogeneity, L16 Oilfield, Heavy Oil Thermal Recovery, Influence Factor

L16油田储层宏观非均质性及对稠油热采的影响研究

汤 婧, 范廷恩, 范洪军, 王海峰, 王 磊

中海油研究总院有限责任公司, 北京
Email: tangjing3@cnooc.com.cn

收稿日期: 2018年9月7日; 录用日期: 2018年9月21日; 发布日期: 2018年9月28日

摘要

储层宏观非均质性是影响油田剩余油赋存和开采效果的主要地质因素之一。L16油田的油气藏类型为非常规高孔高渗块状厚层底水特稠油油气藏。针对这一现象, 结合该区实际地质情况, 利用区内岩性、物性、电性及含油性等资料, 定性评价该油田储层非均质性及其成因, 并分析非均质性对稠油热采的影响。将区域宏观非均质性分为层内、层间、平面3类进行探讨。结果表明: 研究区层内非均质性较强, 主要受沉积构造、粒度韵律、渗透率方向性、渗透率非均质性及夹层分布等因素的控制; 平面非均质性受砂体几何形态及展布影响较大; 研究区只有一套油层, 油层内不存在层间隔层发育, 仅仅是发育层内夹层, 故层间非均质性问题可以说不存在。通过对储层非均质性的研究, 可以掌握研究区对稠油热采的影响因素并对后期勘探开发提供重要依据。

关键词

储层宏观非均质性, L16油田, 稠油热采, 影响因素

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

储层宏观非均质性是指表征储层特征的参数在空间上的不均质性, 具体是指储层的基本性质(岩性、物性、电性及含油气性等)在三维空间分布的不均一性[1]。通过调研总结辽河曙光油田、辽河欢喜岭油田和渤中油田等7个油田稠油热采的成功经验和失败教训, 稠油热采主要面临边底水入侵、层间干扰、汽窜、出砂等问题, 主要受储层厚度、构造及倾角、储层渗透率、储层韵律性、层内非均质性、层间非均质性、平面非均质性、连通性及隔夹层等地质因素影响。储层宏观非均质性是影响油田剩余油赋存和开采效果的主要地质因素, 一般分为层内、层间、平面3类[2]。层间非均质性直接影响分层的吸气及储量动用, 高渗层动用半径大于其他层, 当井间某一层动用半径沟通, 可形成汽窜。平面非均质性使渗透率变化较大, 蒸汽往高渗区方向锥近, 为汽窜的主要方向。平面不动用不平衡, 使汽窜由低采出强度区向高采出强度区突进。通过对储层宏观非均质性的研究, 可以为掌握研究区稠油热采的影响因素提供重要依据。

2. 区域地质概况

L16油田位于辽东湾地区辽西低凸起南端东斜坡带, 断层复杂化的低幅背斜, 断层呈雁列式排列、北北东走向。油气藏类型为非常规高孔高渗块状厚层底水特稠油油气藏。钻井揭示的地层, 自上而下为第四系平原组、新近系明化镇组和馆陶组及古近系东营组。油田的主要含油气层系发育于新近系馆陶组, 其次是古近系东营组上段。新近系馆陶组岩性为厚层砂岩和含砾砂岩夹薄层绿灰色泥岩。古近系东营组

岩性为深灰、褐灰泥岩与灰、浅灰、绿灰泥质粉砂岩、粉砂岩、砂岩不等厚互层。馆陶组储层为辫状河沉积，主要发育河道心滩和泛滥平原亚相。L16 油田馆陶组储层物性具有高孔、高渗的特征，孔隙度平均值为 32.0%，渗透率平均值为 1400 mD，并且储层孔隙度和渗透率有较好的正相关性。馆陶组油气藏的油柱高度为 44.4 m，而且是一套具有独立油水系统的底水油气藏。地面原油密度 0.9941~1.005 g/cm³，粘度 11,875~12,715.4 mPa.s，即流体性质为特稠油。根据上述构造特征、储层物性，分析认为 L16 油田的油气藏类型为非常规高孔高渗块状厚层底水特稠油气藏。

已钻探井、评价井共 4 口，钻井进尺 5965 m，取心总进尺 34.5 m，总心长 30.1 m，含油岩心总长 24.2 m。针对 L16 油田底水能量大、原油粘度高的特点，推荐采用水平井蒸汽吞吐的开发方式，一套层系进行开发；优先动用高部位储量，油井分批投产，充分分析油田风险和潜力，不断优化，提高油井产能和油田综合效益。

3. 影响稠油热采的地质因素

稠油热采主要面临边底水入侵、层间干扰、汽窜、出砂等问题，主要受储层平面非均质性、层间非均质性、层内非均质性、油层的厚度、连通性及隔夹层等地质因素影响，根据本区地质特点认为：影响 L16 油田稠油热采的地质因素为构造、夹层及储层宏观非均质性。

1、构造

蒸汽超覆使得蒸汽总是向油层顶部聚集，这种现象在稠油层尤其是厚油层极为普遍。由于泥岩顶板隔夹层的比热容远大于砂岩，所以源源不断向顶部运移聚集的蒸汽主要加热泥岩隔夹层。在构造较低部位，蒸汽基本上不能到达，原油不能动用，开发效果不好。

L16 油田的油层下伏地层发育一些小断层(图 1)，注采关系因小断层的存在，小断层的遮挡作用，会导致注气井注气状况差。同时，小断层易沟通边底水，易导致水侵。

2、夹层

夹层条件对稠油油气藏的开发具有两面性。夹层总体积越大，平面延伸范围越广，注入蒸汽热损失率越高，层间动用程度差异越大，开采效果越差；另一方面，纵向蒸汽的超覆效应明显，厚储层内适量夹层的出现，可以有效的遏制蒸汽向上超覆，使油层井段得到较为均匀的动用，称之为夹层对于纵向上油层动用的截断增效效应(图 2)。

L16 油田发育泥岩夹层和砾岩夹层两种模式，油藏上段存在 2.8 米的砂砾岩，油藏下段泥岩夹层厚度为 1.2 米(图 3)。夹层可起到抑制底水锥进作用，夹层厚度越大、越靠近油水界面，对底水阻隔作用能力

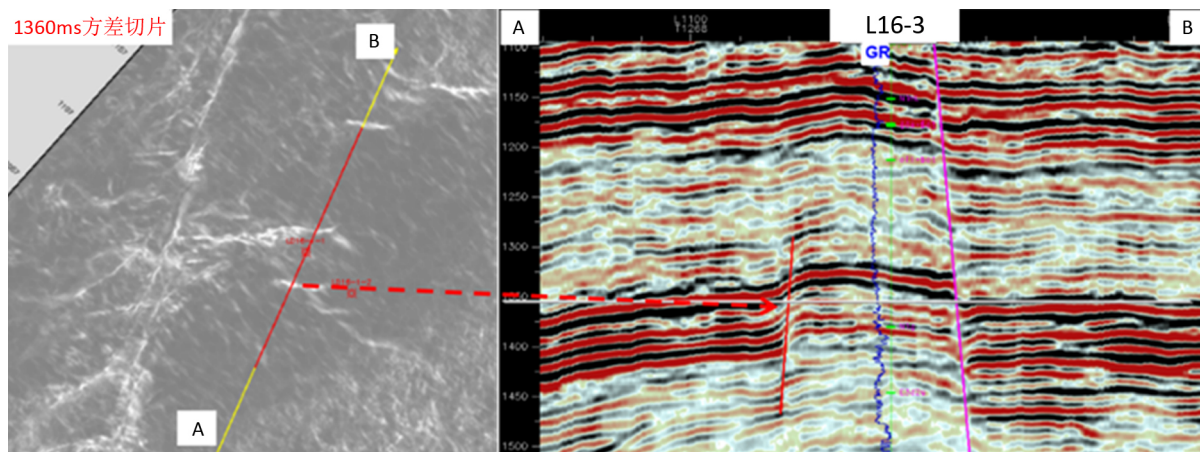


Figure 1. Variance plane plan and seismic section map of L16 Oilfield

图 1. L16 油田方差平面图和地震剖面图

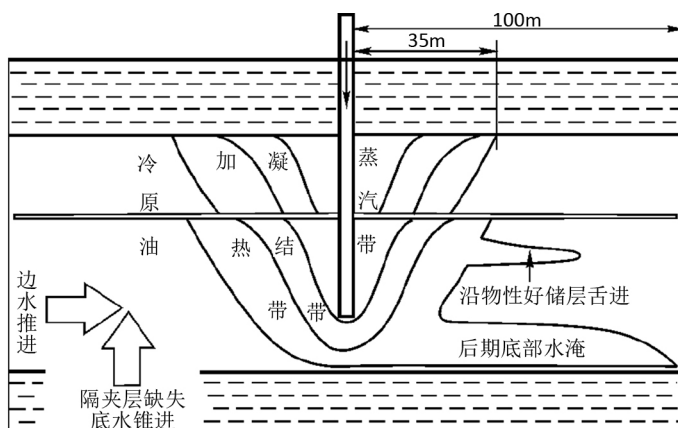


Figure 2. Sketch map of Interlayers are blocking steam drive
图 2. 夹层阻挡蒸汽驱示意图

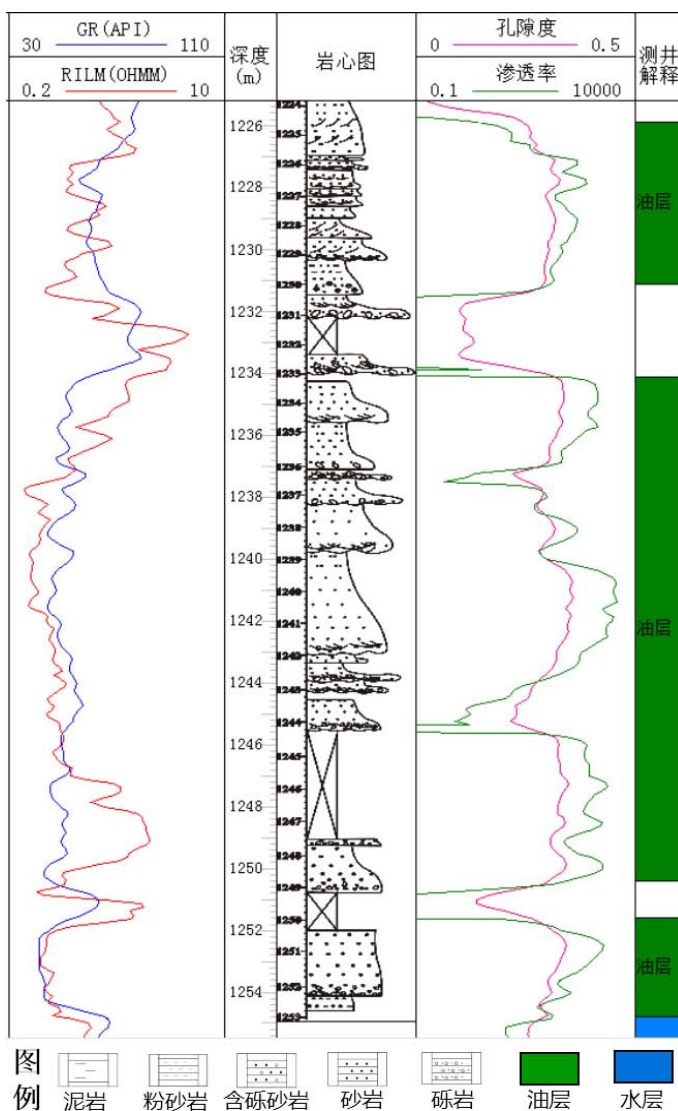


Figure 3. Core description composite columnar section of the L16-3 well
图 3. L16-3 井岩心描述综合柱状图

越强；夹层厚度越小、越远离油水界面，夹层对底水的阻隔能力越差。

3、储层宏观非均质性

从宏观非均质性角度上分析：层内非均质性影响蒸汽不能充分用来加热油层，导致注汽效果不佳。层间非均质性直接影响分层的吸气及储量动用，高渗层动用半径大于其他层，当井间某一层动用半径沟通，可形成汽窜。平面渗透率变化较大，蒸汽往高渗区方向锥近，为汽窜的主要方向。平面不动用不平衡，使汽窜由低采出强度区向高采出强度区突进[3]。

1) 对开发层系的影响：各油层性质不同，储层非均质性强，合采时会出现严重的层间干扰，导致开发效果不好。

2) 对吸汽能力的影响：储层的吸汽能力除了受注汽工艺(如注汽速度、注汽压力、注汽干度，注汽温度等因素)影响外，还受储层非均质性的影响，即非均质性弱，吸汽能力强，反之亦然。

3) 对产液能力的影响：平面非均质相对较弱，产液能力较强；一般情况下，渗透率越高，油层产液能力越强。对正韵律油层，油层下部流体较易被采出；对反韵律油层，反之亦然。

4. 宏观非均质性对热采的影响

结合国内外油气储层非均质性的分类方案，从储层沉积学的角度而言，可将储层的非均质性分为宏观与微观两大类。其中宏观非均质性又包括层内、层间和平面非均质性。非均质性直接影响驱油效率的高低；层内、层间非均质性直接影响厚度波及系数的大小；平面非均质性直接影响面积波及系数的大小。

4.1. 层内非均质性

层内非均质性是指单砂体内部垂向上储集性质的变化，不同沉积微相的层内非均质性是不同的，而层内非均质性的形式主要表现为砂体的沉积韵律性、沉积构造、砂泥组合类型及层内夹层分布等[4]。

4.1.1. 垂向韵律特征

沉积韵律性是单砂层内碎屑颗粒的粒度大小在垂向上的变化，它受沉积环境和沉积作用的控制，水流强度周期性变化而造成粒度粗细的周期性变化，是构成渗透率韵律的内在原因，它对层内水洗厚度的大小影响很大。主要分为四类：正韵律、反韵律、复合韵律和均质韵律。韵律性影响吸汽效果，正韵律油藏吸汽能力最好，反韵律最差，复合韵律介于两者之间，主要原因在于重力分异产生不同程度的蒸汽超覆，超覆作用将降低蒸汽纵向波及效率。

通过岩心观察，L16 油田的馆陶组油层的韵律性主要有 2 种类型：

1、正韵律：底部粒度粗、渗透率大，向上粒度逐渐变细、渗透率变小。辫状河河道多期叠置，厚层砂体底部常具有冲刷面或砂泥混杂堆积，这是典型河道沉积特征(图 4、图 5)。正韵律油藏具有较高的驱油效率，主要原因是由于蒸汽的超覆作用使上部的低渗段也具有较高的驱油情况。

2、均质韵律：渗透率上下变化不大，多位于厚层砂体的中部，沉积微相为辫状河心滩(图 5)。均质韵律在蒸汽吞吐开发条件下，由于蒸汽的超覆作用，往往上部驱油效率较高，而中下部驱油效率较低，在底部往往易形成剩余油。

4.1.2. 沉积构造特征

影响储层层内非均质性的沉积构造主要为各种层理的发育，层理的发育对渗透率的各向异性有很大影响，一般平行层理和斜层理的渗透率导向性好，而交错层理较差。不同沉积环境所发育的层理各不相同，岩心观察可见块状层理、交错层理、平行层理和水平层理。

1、块状层理

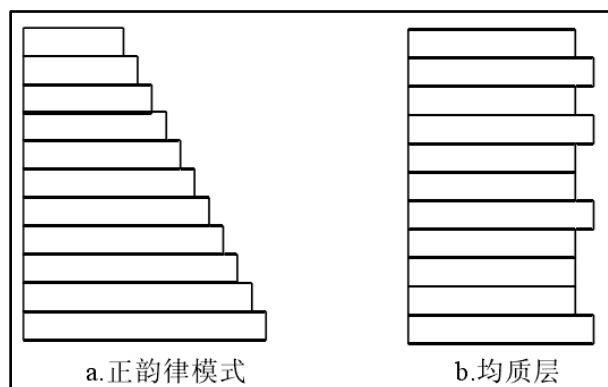


Figure 4. Inhomogeneous model of permeability in layer
图 4. 层内渗透率非均质模式

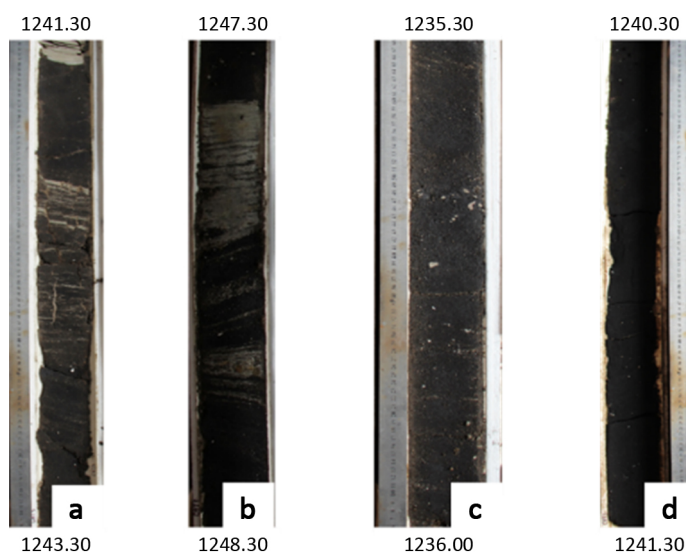


Figure 5. Observation of positive rhythm and homogeneous rhythm in the core of L16-3 well

图 5. L16-3 井岩心观察正韵律和均质韵律

块状层理又称均质层理，是一种呈现大致均质外貌，不具任何纹层构造的层理。大多发育在厚层砂岩中部，岩性主要为均匀的或略呈下粗上细正韵律的中粗砂岩。岩心可见多处块状层理，中间夹有其他沉积构造，即垂向上属于多期叠加辫状河沉积(图 5)。

2、交错层理

若相邻层系互相平行，各层系中的细层均向一个方向倾斜，称为单向斜层理。它是当水流向一方向运动时形成的，其细层的倾斜方向指示水流的下游方向，常见于河流沉积及其他流动水的沉积物中。若相邻层系相互交错，各层系中细层的倾斜方向也多变，称为交错层理。本次岩心观察可见两种层理，以斜交层理为主(图 6a、图 6b)。

3、平行层理和水平层理

平行层理主要产于砂岩中，是在较强的水动力条件下，高流态中由平坦的床沙迁移、在床面上连续滚动的沙粒产生粗细分离而显出的水平细层，沿层理面易剥开，在剥开面上可见到剥离线理构造，平行层理一般出现在急流及能量高的环境，如河流环境中，常与大型交错层理、底冲刷相伴生(图 6c)。

水平层理又称水平纹层，其特点是纹层呈直线状互相平行，并且平行于层面。与平行层理相似，二

者的纹层均呈直线状互相平行，并且平行于岩层面。野外识别看岩层沉积物粒径大小，水平层理主要产于泥质岩、粉砂岩以及泥晶灰岩中，粒度细碎；平行层理主要产于砂岩中，粒度粗(图 6d)。

4、河道滞留沉积

滞留砾石沉积在河流上游，由于坡降大，河流具有较大的动能。细粒物质被冲走，粗粒物质留下来成为滞留沉积。其沉积物以河床砾石为主，成分复杂，砾石呈叠瓦状排列，一般厚度不大，常呈透镜体分布于河道之中(图 4)。河床底部常具明显的侵蚀、切割及冲刷构造，并常含泥砾及下伏层的砾石(图 6e、图 6f)。

4.1.3. 渗透率方向性

层理造成的渗透率横向与垂向之间的差异与渗透率三维方向上的各向异性特征相关，即：平行古水流的水平渗透率(K_{h1})最大，垂直层面(K_v)的垂向渗透率最低，垂直于古水流的水平渗透率(K_{h2})中等(图 7)。在层理发育的砂岩中，由于泥质纹层或炭屑纹层的发育，可以阻碍流体的垂向流动，极大降低垂直渗透率，更加剧了这种渗透率各向异性。

垂直于层理方向渗透率较低，采收率最高；而顺层理方向的渗透率高，水淹快，无水采收率低，易形成较多的残余油，故驱油效率低，最终采收率也低。

平行层理往往使砂体内部垂向与横向渗透率的比值在层理面出现突变，使进入砂体的油气优先沿着层理面进行侧向运移，此时层理面成为油气运移的“优势通道”。在油气充足且具有侧向遮挡条件下，油气尚可沿层理面纵向扩散直至充满整段砂体，而油气不充足或不具备侧向遮挡条件下则形成块状砂体

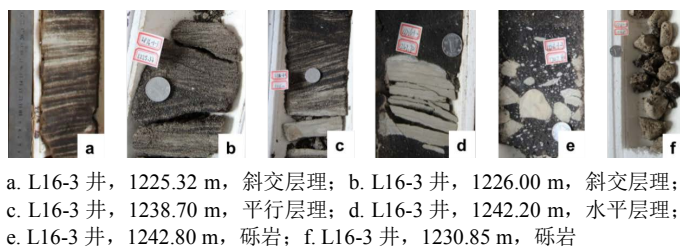


Figure 6. Core map of sedimentary structure in L16-3 well
图 6. L16-3 井沉积构造岩心图

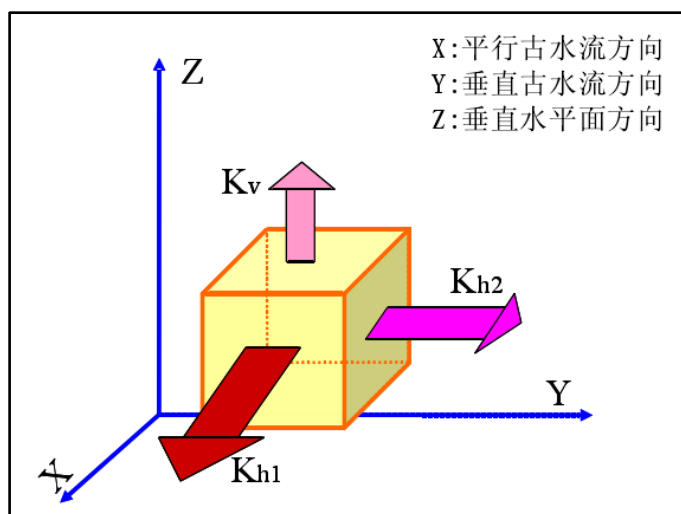


Figure 7. The permeability anisotropy pattern of reservoir sand in the river
图 7. 河道储层砂体中的渗透率各向异性模式图

中狭窄条带状含油的现象(图 6c)。

交错层理的渗透率各向异性最强,且交错纹层组合愈复杂,各向异性程度愈高。Weber (1983)通过研究指出,对于交错层来说,垂直于前积纹层(平行于古河道轴)方向的驱替特性比主流动平行于前积纹层更有利。事实上,渗透率的方向性控制着驱替特征各向异性。

L16 油田垂向渗透率与水平渗透率大部分小于 1,垂向渗透率与水平渗透率之比越小,阻隔蒸汽超覆能力越强,即蒸汽注入的水平波及面积越大,采收率越大,对蒸汽的注入比较有利。

4.1.4. 渗透率非均质性特征

渗透性非均质性一般是从岩心测试实验获取数据和结论,岩心观察显示,粒度大小与渗透率成正比,有粉砂质泥岩、粉砂岩和砾岩夹层发育层段,渗透率变小。L16-3 井的岩心综合柱状图表明,该区为辫状河沉积,典型的正旋回,但因为河道底部发育砾岩和泥砾,故渗透率有所变小(图 3)。渗透率变化与砂岩颗粒和夹层发育极为相关,故可以根据测井解释结果的渗透率曲线,应用统计学方法计算渗透率突进系数、渗透率变异系数、渗透率级差[4] [5]。渗透率突进系数越大,说明渗透率变化越大,注入剂就越易沿高渗透率路径突进,造成驱油效果差;渗透率变异系数和渗透率级差越大,储层的非均质性越强[2]。各小层变异系数均大于 0.7,极差均都很高,表明各小层层内非均质性很强(表 1)。在蒸汽吞吐过程中必须采用相应的措施,如低渗段不射孔、分层开采等方式。

4.1.5. 夹层分布特征

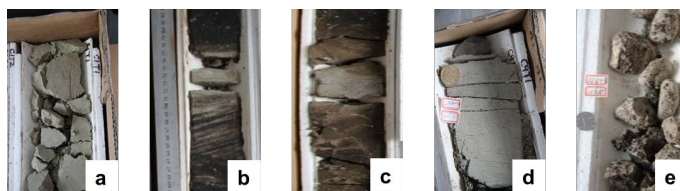
层内夹层主要指单砂层内部的非渗透层和低渗透层[6] [7],这些层多为泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、钙质砂岩。由短暂而局部的水流状态变化形成的,反映沉积微相及相变特征,夹层的形态、厚度、分布是极为不稳定的。

夹层位于砂体内部,且厚度小,难以有效识别。测井响应认为,自然电位与电阻率曲线上高值背景下的局部异常值则为砂体内部的薄层泥岩和砾岩夹层。岩心观察显示 L16 油田的夹层的粒度大,主要的岩性为砾岩、粉砂岩、粉砂质泥岩(图 8)。油层内部夹层过多,容易造成蒸汽沿某些狭窄层段向油层深部

Table 1. Heterogeneity parameters statistics in each well layer of L16 oilfield

表 1. L16 油田各井层内部非均质参数统计

井名	序号	顶深	底深	最小渗透率	最大渗透率	平均渗透率	变异系数	突进系数	级差	解释结论	非均质性程度
L16-1	1	1209	1211.4	0.3016	353.1491	91.097	1.422377	3.876618	1170.919	气层	强
L16-1	2	1212.6	1257	8.4637	10000	3539.077	0.94561	2.825596	1181.516	油层	强
L16-1	3	1257	1308.4	0.4607	10000	759.831	1.793473	13.16083	21706.1	水层	强
L16-3	1	1183.6	1198.7	1.7542	4460.6494	1117.155	0.915692	3.992864	2542.84	水层	强
L16-3	2	1203	1217.6	0.2735	4023.4075	761.389	1.197715	5.284301	14710.81	水层	强
L16-3	3	1225.9	1231.1	5.3263	841.5316	251.603	0.767792	3.34468	157.9955	油层	强
L16-3	4	1234.1	1250.4	0.7913	3978.9116	899.632	1.056124	4.422822	5028.323	油层	强
L16-3	5	1251.4	1254.8	0.2688	1805.8237	525.218	1.047565	3.438239	6718.094	油层	强
L16-3	6	1254.8	1262.3	0.463	1674.5485	200.804	1.674153	8.339205	3616.735	水层	强
L16-3	7	1263.1	1312.2	0.1913	11345.9482	844.876	1.688616	13.42912	59309.71	水层	强
L16-4	1	1180	1183.4	2.2717	2209.5071	707.621	0.908348	3.122446	972.6227	水层	强
L16-4	2	1187.6	1223.5	0.1463	2281.415	162.993	2.13355	13.99698	15594.09	水层	强
L16-4	3	1225.5	1297.2	0.1999	14574.3955	1086.285	1.535651	13.41673	72908.43	水层	强



a. L16-3 井, 1225.32 m, 斜交层理; b. L16-3 井, 1226.00 m, 斜交层理;
c. L16-3 井, 1238.70 m, 平行层理; d. L16-3 井, 1242.20 m, 水平层理;
e. L16-3 井, 1242.80 m, 砾岩; f. L16-3 井, 1230.85 m, 砾岩

Figure 8. Interlayer lithology map of the L16-3 well
图 8. L16-3 井夹层岩性图

延伸, 致使蒸汽不能充分用来加热油层, 严重影响注汽效果, 一般净总厚度比小于 0.4 的油藏不适宜应用蒸汽吞吐开采方式。夹层也有有利的一面。在注蒸汽采油时, 油层越厚, 越易产生蒸汽超覆现象, 尤其是反韵律油层更为严重。因此, 厚度较大的油层中, 如果存在一些较薄的泥岩夹层, 当其总厚度不超过油层厚度的 20% 时, 可以起到克服热蒸汽发生上窜的作用。

岩心观察到油层内部共有 9 层夹层, 厚度大约 5~15 cm, 其中大套砾岩中间夹有 15 cm 左右的中砂岩。

夹层发育模式分为两类: 泥岩夹层和砾岩夹层模式。以 L16-3 井为例, 油藏上段的夹层从岩心描述可知, 岩心描述为 2.8 米的砂砾岩, 砂砾岩颜色为灰绿色块状, 砾石松散, 粒径 2~5 cm, 次圆-次棱角, 分选中等, 未见明显沉积构造, 属快速沉积成因, 含油性较差。油藏下段的夹层为泥岩, 厚度为 1.2 米。依据辫状河沉积特点和沉积规律, 垂向厚度与平面展布范围成正相关, 厚度越大, 平面展布越广, 反之亦然。砾岩夹层模式是厚度大, 分布面积广。泥岩夹层模式是相对于砾岩夹层, 厚度小, 分布面积小。

4.2. 平面非均质性

平面非均质性是指一个储层砂体的几何形态、规模、连续性, 以及砂体内孔隙度、渗透率的平面变化所引起的非均质性。主要研究砂体在平面展布特征、砂体形态、砂体的连通性、平面上油层分布的非均质性特征[7]。

平面非均质性是造成注水前缘不均匀推进的主要原因, 它对于井网布置、注入剂的平面波及效率和剩余油的平面分布有很大影响。

4.2.1. 砂体几何形态

不同沉积环境形成的砂体的几何形态有着自己的特性与规律。为了更好地反映砂体三维空间的形态变化及展布特征, 采用长/宽/厚度 L、W、T 的比值来加以描述[8] [9]。

结合区域沉积背景, 从地震沉积学分析可知, 该油田为辫状河沉积, 物源方向为北北东向, 大量发育砂岩, 局部发育泥岩和砾岩[10], 平面提取的 90°相移体显示席状砂体形态。席状砂体定义为长宽比近于 1, 平面上呈等轴状; 宽厚比 > 1000; 大片分布, 面积从几 km² 至几十 km² (图 9、图 10、图 11)。

4.2.2. 砂体的连通性

连通性一般是指各成因单元砂体在垂向上和侧向上相互接触连通的方式和程度。

连通体的形态: 各种成因单元的砂体在垂向上和平面上相互接触连通形成不同形式的“连通体”(图 12), 目前主流研究, 将其分为:

- 1、多边形砂: 体间在侧面上连通为主;
- 2、多层式砂: 体间在垂向上相互连通为主;

3、孤立式：砂体彼此之间相互连通；

从岩心观察和地层对比，以及辫状河发育特点分析，认为该油田的河道迁移摆动激烈，河道的前积作用和侧积作用比较强，并且局部发育少量夹层，故 L16 油田的砂体连通性为多层式的形态。

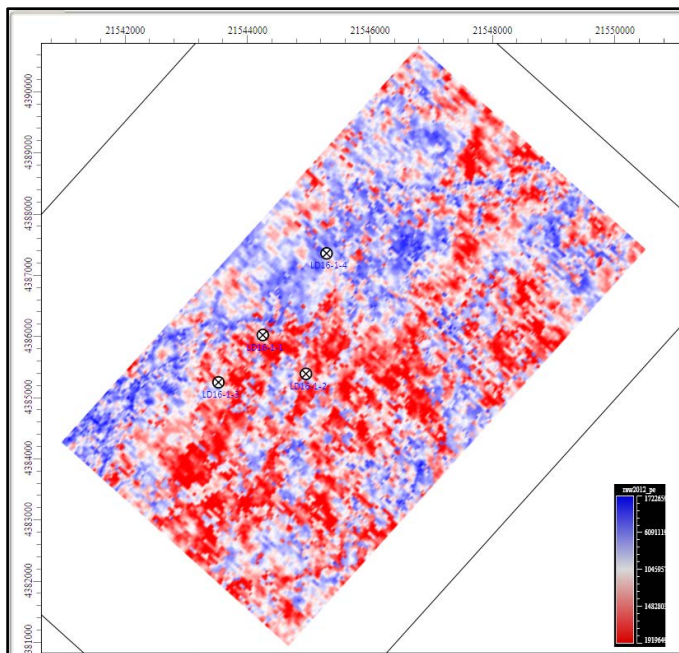


Figure 9. Horizon slice plane graph of the top of oil layer drifted down 20 ms by 90° phase shift

图 9. 90°相移油层顶下漂 20 ms 沿层切片平面图

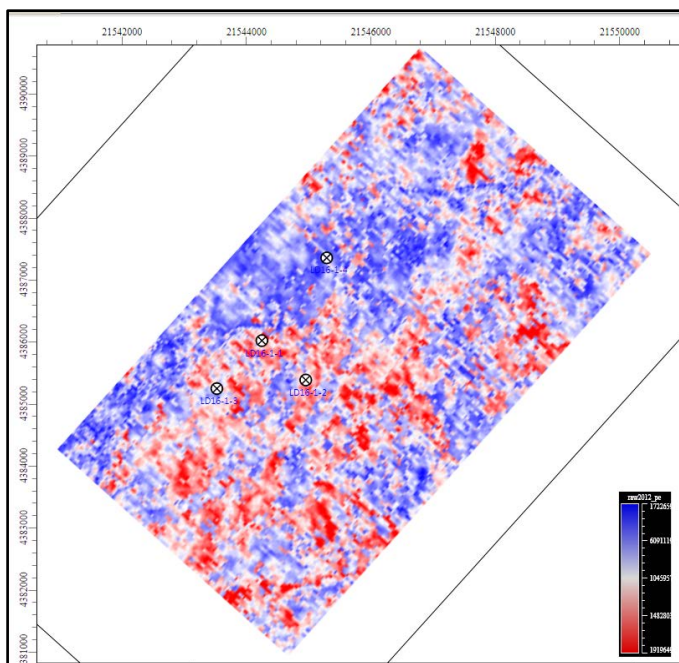


Figure 10. Horizon slice plane graph of the top of oil layer drifted down 22 ms by 90° phase shift

图 10. 90°相移油层顶下漂 22 ms 沿层切片平面图

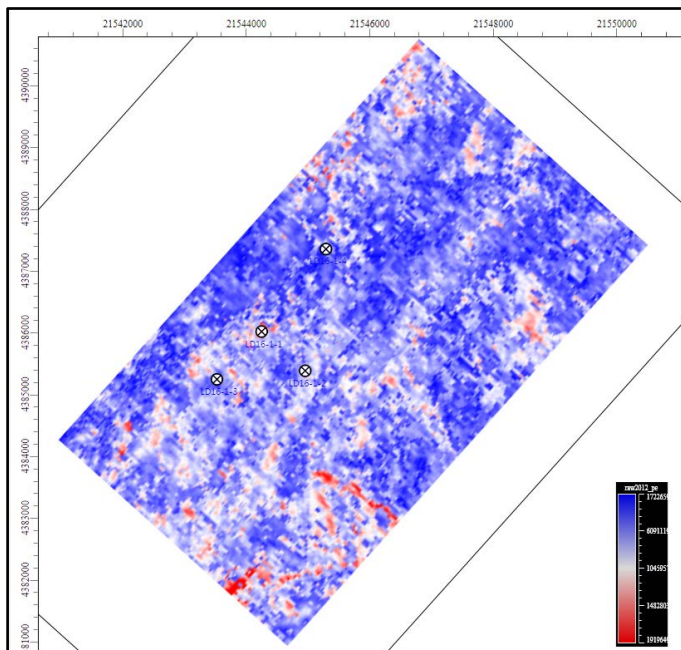


Figure 11. Horizon slice plane graph of the top of oil layer drifted down 24 ms by 90° phase shift

图 11. 90°相移油层顶下漂 24 ms 沿层切片平面图

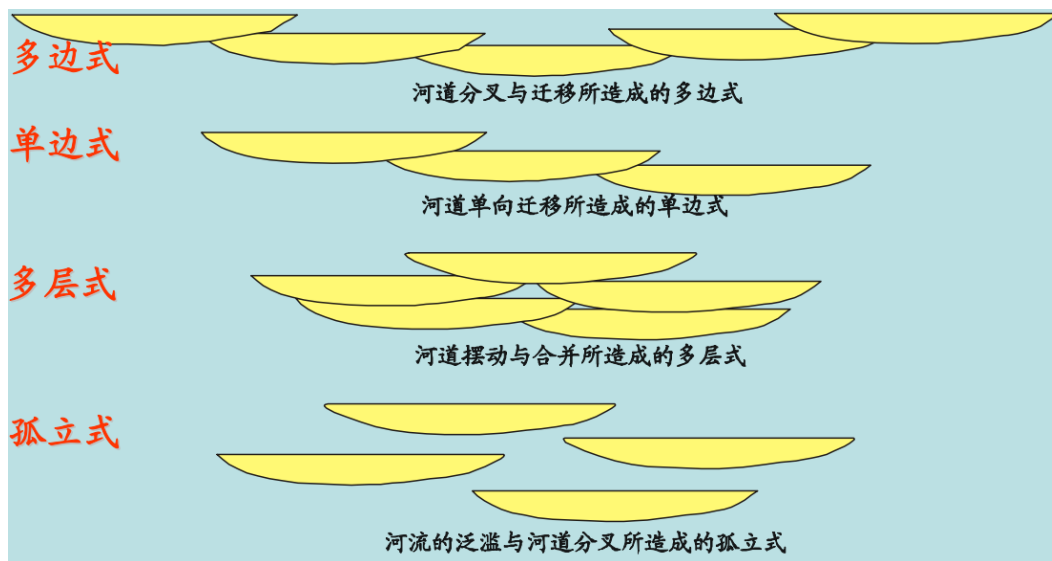


Figure 12. Relationship between spatial connectivity of sand bodies and sedimentation

图 12. 砂体空间连通形式与沉积作用的关系

4.2.3. 砂体内孔渗的平面变化及方向

砂体内岩性变化引起的方向性，砂体不同部位(内部、边缘)渗透率的差异、沉积高能带与低能带的差异，以方位角表示。

除裂缝外，砂体沉积时形成的渗透率方向性，是导致注入气平面舌进的主要原因。注入蒸汽总是优先沿渗流阻力最小，渗透率最大的方向快速推进，而在低渗方向和部位推进较慢，造成汽线前缘的严重非均匀分布，影响平面波及效率。预先认识到砂体在平面上的非均质性，可有效地指导采用合理注采方

案, 达到最佳开发效果[10] [11]。

建立 L16 油田三维地质模型, 对比原始孔隙度测井曲线、粗化孔隙度与孔隙度模型的分布, 三者吻合度高, 原始孔隙度测井曲线与从孔隙度模型中提取的孔隙度曲线对比, 两者吻合度高; 渗透率模型检验: 对比原始渗透率测井曲线、粗化渗透率与渗透率模型的分布, 三者吻合度高, 原始渗透率测井曲线与从渗透率模型中提取的渗透率曲线对比, 两者吻合度高(图 13、图 14)。

L16 油田的储层物性特征为高孔高渗, 孔渗平面相对均一, 但仍存在一定的变化: 孔渗方向为北北东方向, 与物源方向一致, 顺物源方向孔渗变化较小, 而垂直物源方向变化较大(图 15、图 16)。从注采关系而言, 顺物源方向注入汽快速推进, 而垂直物源方向推进较慢, 造成汽线前缘的严重非均匀分布, 影响平面波及效率[12]。

4.3. 层间非均质性

储层的层间非均质性是指储层或砂体之间的差异, 是对一个油气藏或一套砂泥岩间含油层系的总体研究, 属于层系规模的储层描述。层间非均质性以单砂层的平均值代表单砂层的特征, 研究小层内砂层

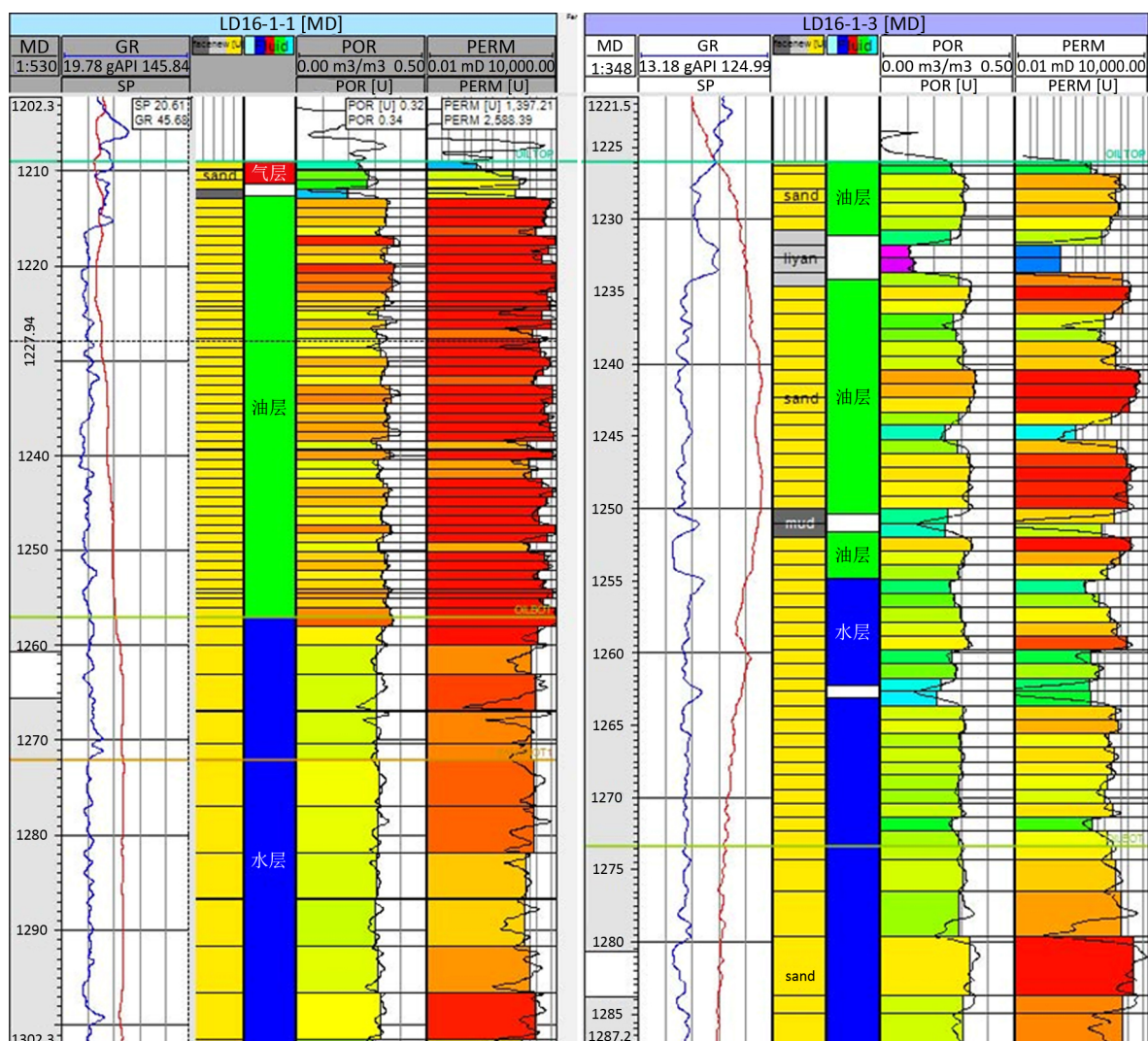


Figure 13. Comparison of geological model results with original curves

图 13. 地质模型结果和原始曲线对比图

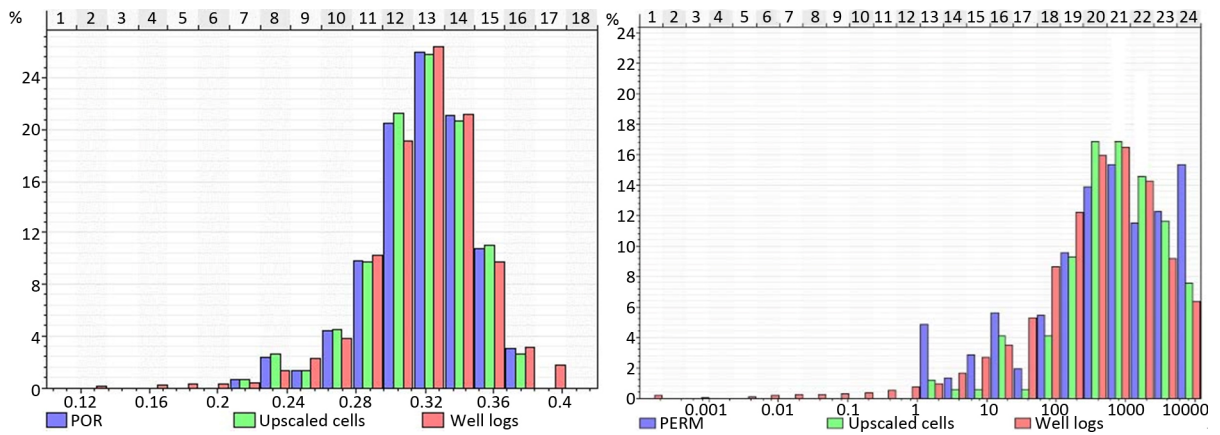


Figure 14. Statistical results of physical properties of geological model
 图 14. 地质模型物性统计结果图

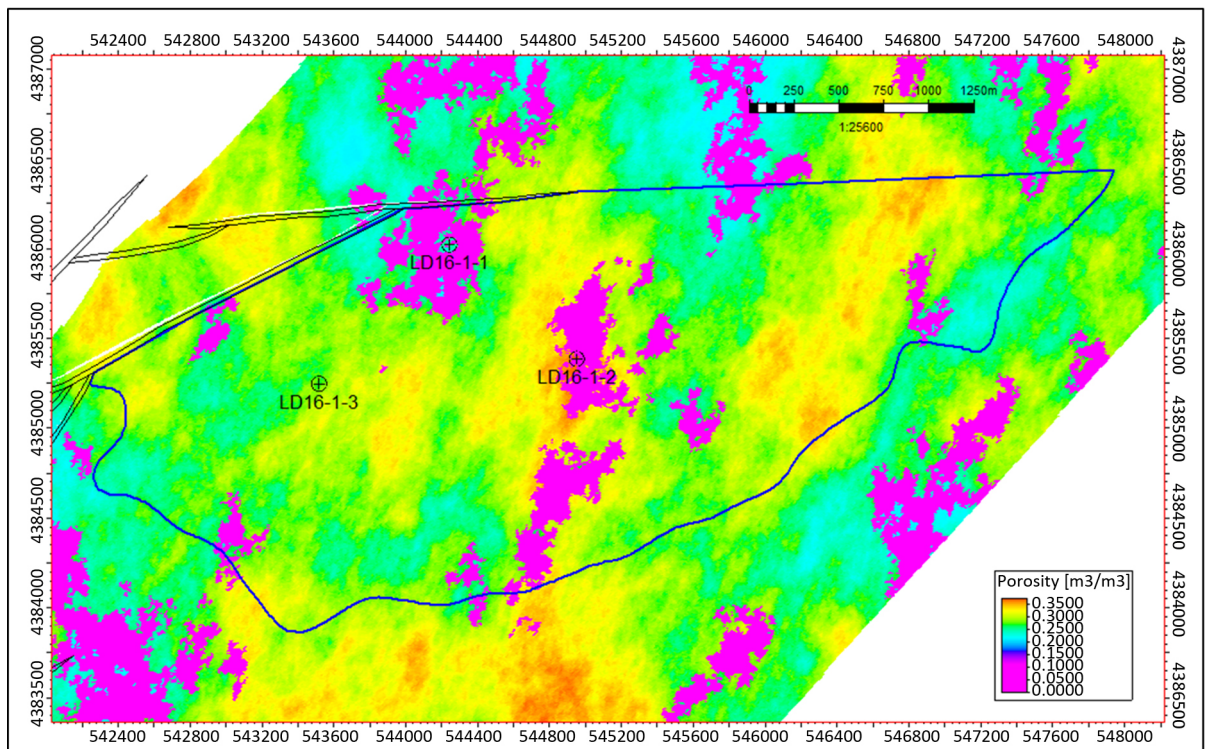


Figure 15. Average porosity plane map of reservoir geological model
 图 15. 油层地质模型平均孔隙度平面图

间的渗透率变化；在研究砂岩组内部小层时，则用小层的参数平均值代表小层的参数值来研究其渗透率的变化特征。它是层间干扰和单层突进(统称为层间矛盾)形成的内因。

L16 油田只有一套油层，油层内不存在层间隔层发育，仅仅是发育层内夹层，故层间非均质性问题不存在，但油层内的夹层仍可造成注气和采油干扰，后期开发需注意其风险性。

5. 结论

- 1) 影响 L16 油田稠油热采的地质因素为构造、夹层及储层宏观非均质性。
- 2) L16 油田层内非均质性主要受粒度韵律、沉积构造、夹层分布及渗透率非均质性等因素的控制。

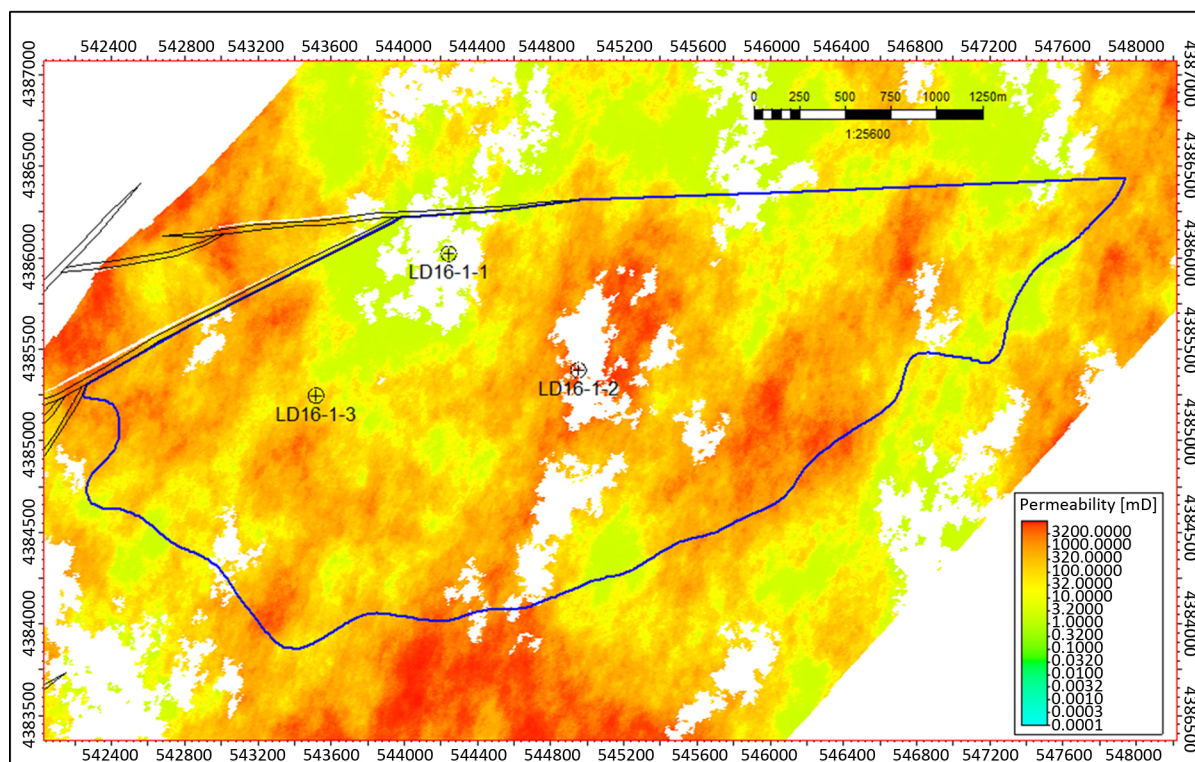


Figure 16. Average permeability plane map of reservoir geological model

图 16. 油层地质模型平均渗透率平面图

区内共有两种渗透率类型，即正韵律、均值韵律。夹层受控于短期基准面旋回的影响，对地下油气具有遮挡或隔绝能力。渗透率各参数特征标明 L16 油田储层具有较强的层内非均质性。

3) 平面非均质性主要受沉积相展布的控制，研究区砂体物源方向为北北东，孔、渗的平面分布与沉积砂体的展布基本吻合。

4) 研究区只有一套油层，油层内不存在层间隔层发育，仅仅是发育层内夹层，故层间非均质性不存在，但油层内的夹层仍可造成注气和采油干扰，后期开发需注意其风险性。

参考文献

- [1] 吴胜和, 熊琦华. 油气储层地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 155-172.
- [2] 裘亦楠, 薛叔浩. 油气储层评价技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 290-324.
- [3] 张云鹏, 汤艳. 油藏储层非均质性研究综述[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(3): 17-22.
- [4] 杨丽. 西峰油田白马北区长 8 油藏开发储层特征评价[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2012.
- [5] 张庆, 朱玉双, 郭兵, 等. 杏北区长 6 储层非均质性对含油性分布的影响[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2009, 39(2): 277-282.
- [6] 彭国红, 胡望水, 戴寅. 濮城油田沙一段储层宏观非均质性及其对剩余油分布的影响[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2010, 32(5): 191-194.
- [7] 杨明明, 王建民, 王新, 等. 志丹地区长 2 储层非均质性研究[J]. 石油地质与工程, 2014, 28(3): 34-37.
- [8] Hampson, D.P. and Russel, B.H. (2005) Simultaneous Inversion of Pre-Stack Seismic Data. *SEG/Houston 2005 Annual Meeting*, 1633-1637.
- [9] Dahl, T. and Ursin, B. (1991) Parameter Estimation in a One-Dimensional Anelastic Medium. *Journal of Geophysical Research*, 96, 20217-20233. <https://doi.org/10.1029/91JB00419>

-
- [10] Barbe, J.A. and Schnoebelen, D.J. (1987) Quantitative Analysis of Infill Performance: Robertson Clearfork Unit. *Journal of Petroleum Technology*, Dec.1987, SPE 15568.
- [11] Ahmed, T. and McKinney, P.D. (2005) *Advanced Reservoir Engineering*. Gulf Professional Publishing, Oxford, 322-381.
- [12] Schoenberg, M. and Zoeppritz, P.J. (1992) Rationalized and Generalize to Anisotropy. *Journal of Seismic Exploration*, **1**, 125-144.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org