

韦贤, 杨小江, 李建, 等. 流花D油田珠江组下段储层非均质性研究[J]. 华南地震, 2024, 44(2): 91-101. [WEI Xian, YANG Xiaojiang, LI Jian, et al. Reservoir Heterogeneity of the Lower Section of Zhujiang Formation in Liuhua D Oilfield [J]. South China journal of seismology, 2024, 44(2): 91-101]

流花D油田珠江组下段储层非均质性研究

韦 贤, 杨小江, 李 建, 何理鹏, 张永江, 黄国平

(中海石油(中国)有限公司深圳分公司开发部, 深圳 518054)

摘要: 油田储层非均质性分布规律的认识是深水油田产能指标设计的重要依据, 因此是深水油田开发的关键影响因素之一。针对南海深水流花D油田珠江组下段储层展开层内、层间和平面非均质性分析, 并结合沉积环境和成岩作用深入研究, 厘清了油田内部非均质性分布认识。研究认为南海深水流花D油田隔层和夹层的分布是非均质性的主要影响因素, 储层内发育隔层6套, 夹层9~10套; 此外, 油田位于古陆架坡折带附近, 沉积由三角洲前缘向浅海陆棚碳酸盐台地转变, 在海侵的大背景下, 水动力条件变换引起的沉积物变化是影响研究区储层非均质性的主控因素。

关键词: 深水油田; 珠江组; 储层非均质性; 隔夹层; 沉积相

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)02-0091-11

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.02.11

Reservoir Heterogeneity of the Lower Section of Zhujiang Formation in Liuhua D Oilfield

WEI Xian, YANG Xiaojiang, LI Jian, HE Lipeng,

ZHANG Yongjiang, HUANG Guoping

(Development Department of CNOOC China Ltd., Shenzhen, Shenzhen 518054, China)

Abstract: The heterogeneous distribution of oilfield reservoirs significantly impacts the production capacity in deep-water oilfields. This study focuses on the intra-layer, inter-layer, and planar heterogeneity of the lower section of the Zhujiang Formation in the Liuhua D deep-water oilfield in the South China Sea. Through in-depth research in combination with sedimentary environments and diagenetic processes, the internal heterogeneity distribution of the oilfield is clarified. The study suggests that the distribution of interlayer and interbeddings is an important factor influencing heterogeneity in the oilfield. There are six sets of interlayers and nine to ten sets of interbeddings in the reservoir. In addition, the oilfield is located near the ancient continental shelf break zone, where sedimentation changes from a delta front to a shallow-water carbonate platform. Under the background of marine transgression, sedimentary variations caused by the change in water dynamics are the main controlling factor affecting reservoir heterogeneity in the study area.

Keywords: Deep-water oilfield; Zhujiang Formation; Reservoir heterogeneity; Interlayer and interbedding; Sedimentary facies

收稿日期: 2023-12-17

作者简介: 韦贤(1981-), 男, 工程师, 主要从事油气田开发地质和油藏研究工作。

E-mail: weix2@cnooc.com.cn

0 引言

学者在流花油田珠江组储层非均质性研究方向多集中在礁灰岩^[1-2]，针对砂岩储层非均质性的研究很少。流花D油田是中国南海开发最深水油田之一，所在海域水深约400 m，由于所处环境条件恶劣、原油析蜡点高、伴生气量大、井温高，设计采用FPSO链接水下生产系统的总体开发工程方案^[3]，总体开发成本高，相对于有钻井平台的油田后期实施调整井成本高。为了适应深水油田高速高效开发的特点快速成功回收项目成本^[4-5]，必须在清晰准确的认知储层内部结构后，才能设计合理开发井网提高油田的采油速度和最终采收率。

流花D油田为厚层整体块状海相砂岩油藏，储层厚度达到125.6 m，油层厚度98 m，储层内隔层夹层分布不均，整体上非均质性较强。若按照以往在油藏顶部布置水平井开采的方案会存在纵向上动用储量不充分的问题，最终采收率不高。为了挖掘油藏的开发潜力，需对研究区内珠江组储层的非均质性特征进行研究。本文从分析研究区

内典型井的测井资料、岩心分析资料、薄片鉴定等入手，对流花D油田珠江组下段的储层非均质性特征和成因进行深入研究，研究结果为：本油田砂岩储层不均质，内部发育隔层和夹层；通过分析测井曲线特征和岩心观察，分类统计共发育隔层6条，夹层9~10条；采用储层非均质性定量评价技术研究层内和层间非均质性特征，认为储层的整体非均质性较强；通过宏观沉积相分析和微观岩石物理实验手段揭示了沉积相是流花D油田珠江组下段储层非均质性的主控因素；在此基础上提出了开发井网优化建议，对该类型油田开发有指导意义。

1 区域地质概况

流花D油田位于中国南海珠江口盆地番禺低隆起的东部(图1)，南侧紧邻白云东凹，是典型的深水厚层整体块状砂岩油田。基于珠江口盆地地质研究成果并结合流花D油田取心、测井资料综合分析认为本油田储层发育在一套三角洲前缘—滨岸—碳酸盐台地沉积体系组合中^[6-7]。

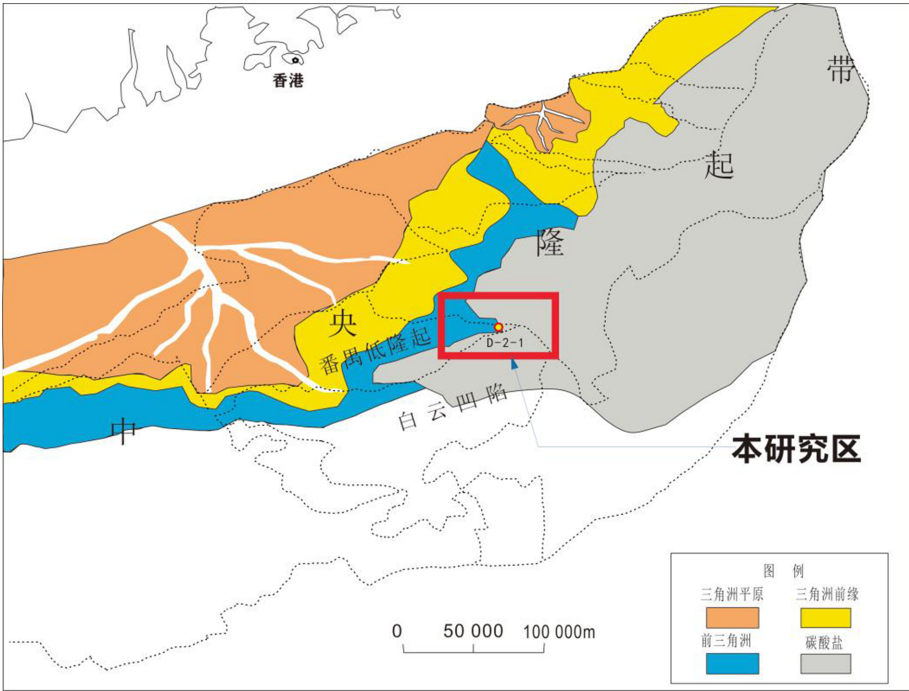


图1 珠江口盆地珠江组下段区域沉积研究成果图(根据李小平等)

Fig.1 Map of regional sedimentary research results in the lower section of Zhujiang Formation, Pearl River Mouth Basin (modified from Li Xiaoping, et al.)

在研究区自上而下钻遇地层依次为第四系；新近系上新统万山组，中新统粤海组、韩江组、珠江组；古近系渐新统珠海组，前古近系。流花D

油田在中新统珠江组发现砂岩油层约98 m，按照测井特征划分为ZJ10、ZJ20、ZJ30层(图2)。在ZJ10上部发育巨厚泥岩，伽马值约140 API；ZJ10

层具有低伽马高密度(伽马<50 API, 密度>2.50 g/cm³)的典型灰岩测井特征; ZJ10至ZJ20间发育的稳定泥岩, 测井特征为: 伽马值130~150 API、感应电阻为3~5 ohm·m、密度为2.45~2.60 g/cm³;

ZJ20至ZJ30间发育的稳定泥岩, 测井特征为: 伽马值为130~150 API、感应电阻为3~5 ohm·m、密度为2.45~2.5 g/cm³。

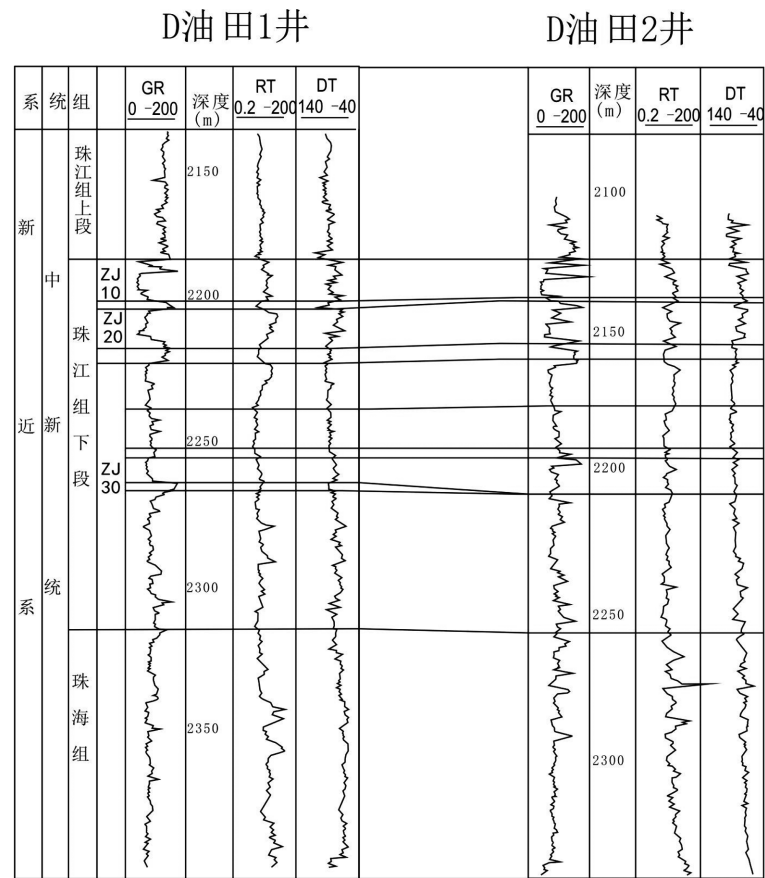


图2 珠江下段储层典型井测井特征对比图

Fig.2 Comparison of logging characteristics of typical wells in the lower section of Zhujiang Formation

2 储层非均质性研究

依据裘祚楠、Frazer、于兴河等观点, 储层非均质性是一种固有的、普遍存在于储层中的重要属性, 具有相对性, 且其表征依赖于观察的尺度 and 研究测量的方法^[8-15]。例如, ^[16]按照研究对象尺度大小将河流储层非均质性分为5类: 层系规模(100 m)、砂体规模(10 m)、层理系规模(1~10 m)、纹层规模(10~100 mm)、孔隙规模(10~100 um); ^[17]在研究非均质性影响剩余油分布时, 按照相似的沉积环境、成岩模式、构造类型将储层非均质性分为7种类型; 裘祚楠^[10]根据我国陆相储层特点, 按照储层非均质性的规模, 将碎屑岩储层非均质性分为4类: 层间非均质性、层内非均质性、平面非均质性、微观非均质性。

本次研究综合前人研究经验, 遵循储层空间构架为基础从储层的层内、层间、空间展布形式3个方向开展研究, 研究的内容包括珠江组储层的几何形态、空间分布及其与油田生产相关孔隙度、渗透率、含油性(含油饱和度)等的特征。

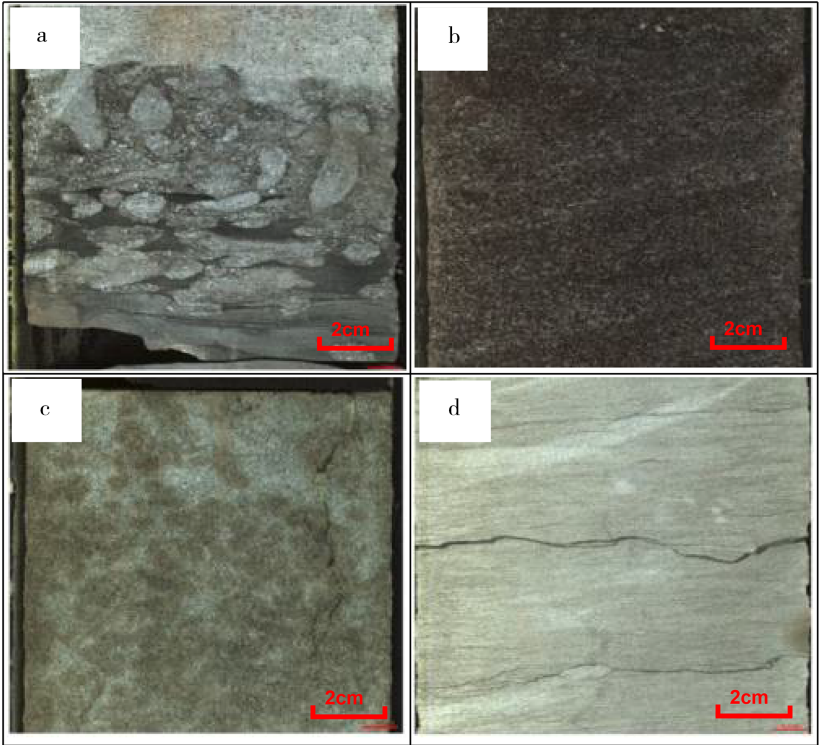
2.1 层内非均质性

研究层内非均质性是以单砂体为研究单位, 指一个单砂层内其岩性、物性和含油性的变化规律, 其控制和影响单砂体在空间上压力波及体积、可预测平面上来水的方向和层内剩余油分布范围^[18-19]。本研究以岩心观察及测井解释参数为基础, 从储集砂岩的粒度韵律性、沉积构造的垂向演变、层内不连续夹层、层内渗透率非均质程度方面进行分析研究。

层内韵律特征研究。南海东部珠江口盆地大量的砂岩油田开发经验研究表明，反韵律储层开发效果较好，正韵律效果最差^[20-21]。据该区岩心观察和测井资料分析，珠江下段储层沉积韵律性不太明显，整体将为均质呈箱型，仅ZJ30-Ⅳ单层呈现弱正韵律特征。因此认为珠江下段储层纵向波及厚度及开发效果均较好。

垂向层理沉积特征研究。研究区珠江组下段储层发育的层理类型主要有平行层理、板状交错层理、波状层理、脉状层理、小型槽状交错层理、沙纹交错层理。在ZJ30下部为深灰色粉砂质泥岩中，见透镜层理-波动层理、小型槽状交错层理，

沿层理面可见富集碳屑，生物扰动发育(图3a)；在ZJ30中上部为灰色粗砂岩向上变细为中砂岩，主要发育块状层理、水平层理、平行层理，局部见板状交错层理、透镜状层理、脉状层理(图3b)；在ZJ20为灰色含灰质粉砂岩、泥质粉砂岩、灰褐色细砂岩，主要发育块状层理和波状层理(图3c)；在ZJ10为浅灰色含细砂岩灰岩与灰岩互层，主要发育平行层理、波状层理、脉状层理(图3d)。块状层理有利于生产压差在纵向上的波及深度，同时有利于地层能量的快速补充，但是另一方面也增大了底水锥进的风险，并且对后期剩余油动用预测增加难度。



ZJ30 下部,见透镜层理—波动层理、小型槽状交错层理,沿层理面可见富集碳屑,生物扰动发育,LH-D-2井,2262.5 m,岩心照片;
ZJ30 上部,发育块状层理、水平层理、平行层理,LH-D-2井,2259 m,岩心照片;
ZJ20,灰色含灰质粉砂岩,主要发育块状层理和波状层理,LH-D-2井,2207.5 m,岩心照片。
ZJ10,浅灰色灰岩,主要发育平行层理、波状层理、脉状层理,LH-D-2井,2188.5 m,岩心照片。

图3 珠江下段典型井岩心观察照片

Fig.3 The core observation pictures from typical well in the lower section of Zhujiang Formaiton

层内局部夹层研究。研究区珠江组下段储层内发育隔层和夹层，统计分析研究区内已钻井认为隔层夹层主要分为钙质或者泥质两类，钙质隔层特征为伽马低、密度高、滴酸反应，泥质隔层特征为高伽马、低密度、滴酸不反应。研究分析表明(表1)统计珠江组下段在1井区发育夹层9条，厚度在0.2~2 m之间，平均厚度0.7 m；在2

井区发育夹层10条，厚度0.2~2 m之间，平均厚度1.3 m。按照南海东部海域海相砂岩油田开发经验，在开采过程中夹层对地下流体运移具有抑制作用，厚度大于1 m的夹层可有效延缓底水锥进。而隔层则对下部流体有遮挡作用，对下部储量动用起负向作用，往往是后期剩余油挖潜的有利区域。

表1 研究区珠江组下段隔层及夹层统计表

Table 1 Statistics of interlayers and interbeddings in the lower section of Zhujiang Formaiton in the study area

层位	1井区		2井区	
	夹层编号	厚度/m	夹层编号	厚度/m
珠江组下段	J1-1	1.5	J2-1	2
	J1-2	0.3	J2-2	0.5
	J1-3	0.4		
	J1-4	0.9		
			J2-3	0.8
			J2-4	0.7
	J1-5	0.3	J2-5	0.8
	J1-6	0.2		
	J1-7	0.4	J2-6	0.7
	J1-8	0.4	J2-7	0.9
	J1-9	2	J2-8	4
			J2-9	0.9
			J2-10	1.2
平均厚度		0.7		1.3

层内渗透率非均质特征研究。最常用的层内非均质性定量表征研究方法是渗透率变异系数、级差、突进系数。通过对D油田10口井岩石物性资料和测井解释资料的统计分析(图4),采用储层非均质性划分标准,1井区的变异系数为0.49~0.92,突进系数平均为2.13,级差平均为26.44;2井区的变异系数为0.28~3.15,突进系数平均为4.15,级差平均为377.28。综合评价珠江组下段储层的层内非均质性属于不均质型,D2井区下部层段非均质性更强。

2.2 层间非均质性

按照^[16]等依据沉积成因和界面以及对流体的影响,提出的储层非均质性研究的层次和分类的概念,主要以野外露头、室内实验、地质建模、数值模拟等研究方法,对中尺度的储层非均质性进行研究。本文根据海上油田域资料特点,使用地震资料、测井资料、地质建模等开展层间非均质性研究。

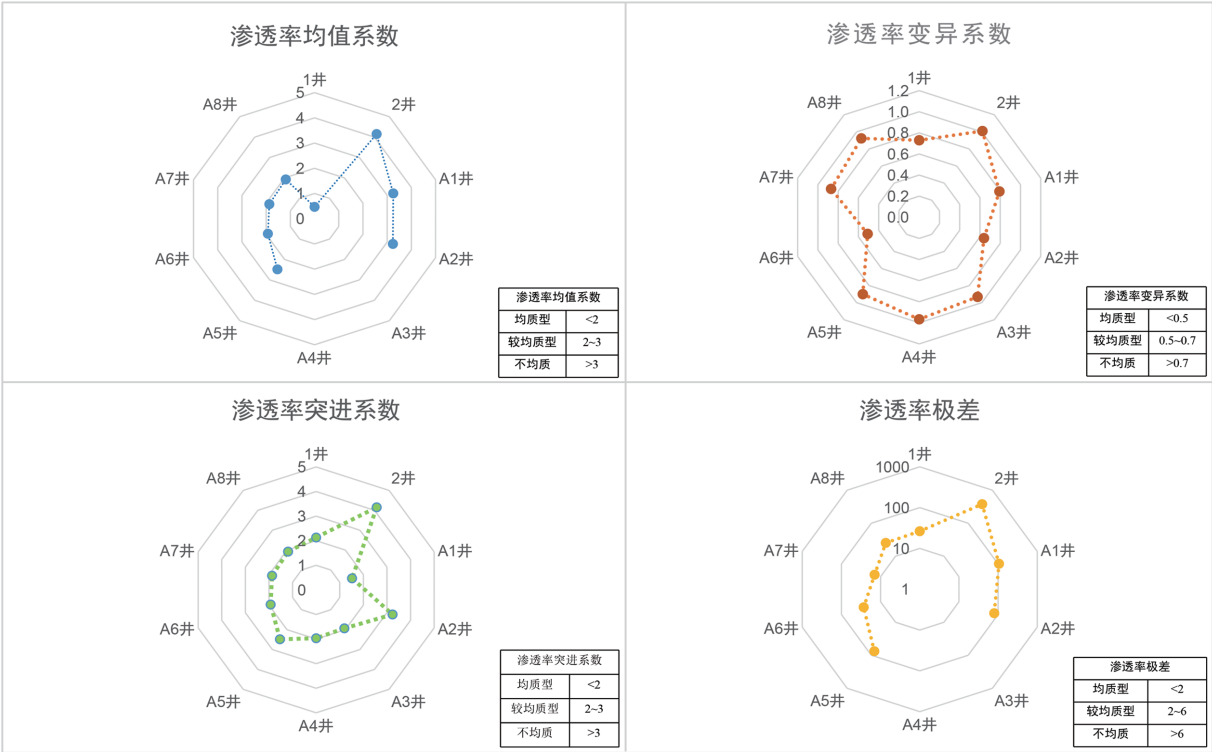


图4 储层非均质性统计分析图表

Fig.4 Statistical analysis of reservoir heterogeneity

层间隔层分布特征研究。储层非均质性研究的重要内容之一是隔层对流体的隔挡作用。本研究区域内珠江组隔层共6层(图5),隔层厚度在1.4~4.6

m之间(图6),以泥岩隔层为主,上部见灰岩隔层。其中G3隔层厚度在6.7~1.2 m之间,平均厚度4.6 m,在开发初期G3隔层对油水运移起隔挡作用,

在开发后期G3隔层下部将形成局部油富集区；G4隔层的厚度在0~4.5 m之间，平均厚度1.4 m，在部分井区发育不明显，G4隔层可延缓底水锥进有利于整体采收率的提高，开发后期会沿隔层发育薄弱区域形成垂向渗流带，控制剩余油分布范围。

隔层在平面呈现自西向东变薄的分布特征。隔层发育的厚度和展布特征与沉积相相关，研究区域位于古陆架坡折带附近，沉积过程是在海侵

的大背景下形成。早期为三角洲前缘，沉积微相为水下分流河道、河口坝等，在河道主体带上一 般厚度较薄，向两侧隔层厚度增大。随着海平面的上升，逐渐过渡到滨岸相，沉积微相为临滨水下沙坝，水动力条件变弱后，则开始沉积范围更大的泥岩隔层。再随着海平面的进一步上升过渡到浅海陆棚碳酸盐台地沉积，本研究区域目的层段中G1隔层为灰岩隔层。

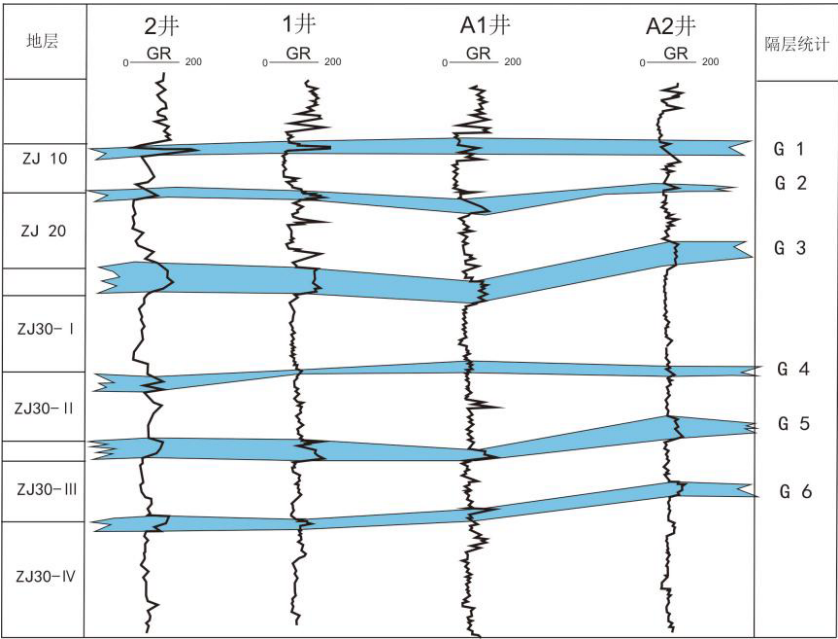


图5 流花D油田珠江组下段隔层划分

Fig.5 Classification of the interlayers in the lower section of Zhujiang Formation ,Liuhua D Oilfield

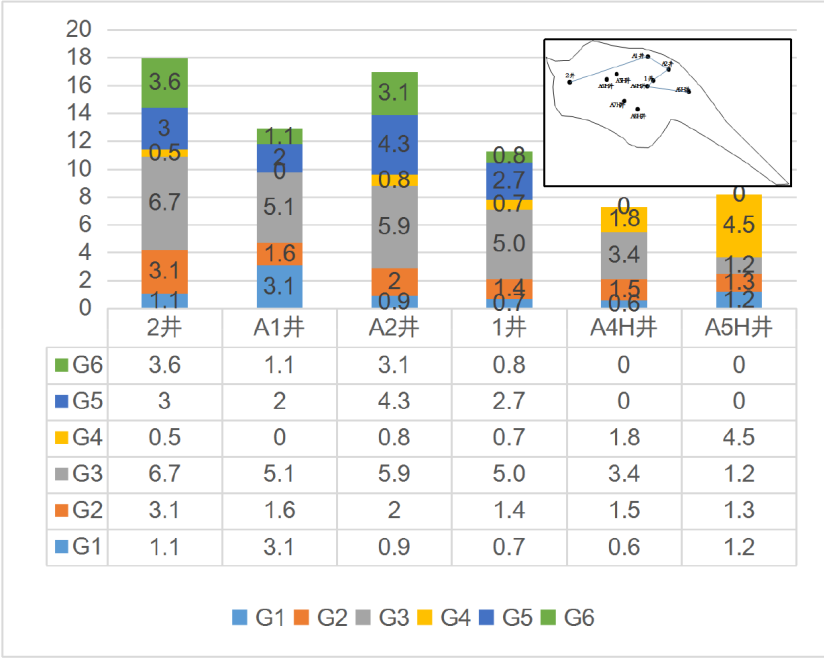


图6 本研究区域内珠江组隔层特征统计表图

Fig.6 Statistics of the interlayer in Zhujiang Formation in the study area

层间渗透率非均质性研究。由测井解释的非均质参数的统计结果显示(图7), ZJ10~ZJ30 储层的渗透率级差在 14.2~377.3 之间, 平均为 91.6; 渗透率突进系数在 1.5~3.2 之间, 平均为 2.3; 渗透率

变异系数在 0.51~1.0 之间, 平均为 0.8。按照杨少春等储层非均质性分类标准划分, ZJ10~ZJ30 层整体上属于层间非均质性较强储层。

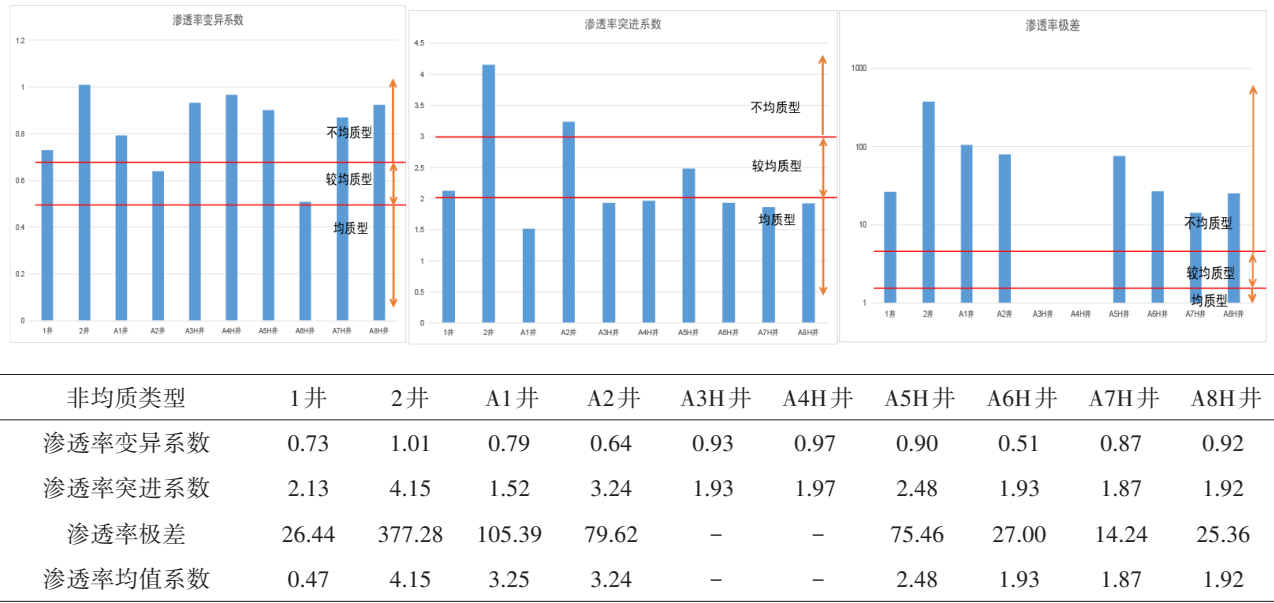


图7 D油田储层非均质分类统计图
Fig.7 Reservoir heterogeneity classification statistics in D oilfield

2.3 平面非均质性

平面非均质性特指砂体在平面上的各种属性特征共同作用下展示出来的横向上的差异, 特征一般包括砂体的厚度、平面上的连通性以及孔渗在平面上的展布情况等, 平面非均质性的程度直接将影响开采过程中流体的动态分布, 最终影响第一次布井采收率。

研究认为造成本研究区内厚层海相砂岩储层非均质性在平面上的差异主要原因是泥质的分布情况。通过相控地质统计学反演技术对储层进行精细描述, 进行泥岩隔夹层厚度解释, 泥岩厚度解释利用泥岩概率积分得到泥岩空间厚度分布, 对 ZJ10~ZJ30 泥岩进行预测和描述之后得到各层泥岩厚度分布图。分析认为油藏总体上属于中等平面非均质程度。其中 ZJ10 油组平面非均质性强, ZJ20 油组平面非均质性中等一强, ZJ30 油组平面均质性弱(以 ZJ30 油组为例, 图 8)。

砂体横向展布及各向连续性研究。砂体横向展布形态受到沉积相控制, 流花 D 油田位于古陆架坡折带附近, 沉积过程是在海侵的大背景下形成的。其中 ZJ10 层为浅海陆棚碳酸盐台地沉积: 厚度 13.1~12.7 m, 伽马曲线呈现出漏斗形转变为箱形, 上部含泥质条带。岩性主要为泥晶生屑灰

岩、亮晶生屑灰岩; ZJ20 层为浅海陆棚碎屑岩与碳酸盐混积和滨岸临滨相交替沉积: 厚度为 8.3~18.8 m, 伽马曲线呈多套指状不规则叠加特征, 或伽马曲线表现为从漏斗形转变为锯齿状箱形特征。岩性为细一中粒长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩、细一粗粒长石石英砂岩, 分选中等; ZJ30 层为三角洲前缘水下分流河道沉积: 厚度为 95.5~106.4 m, 伽马曲线下部呈多套钟形叠加, 上部呈箱形特征, 偶见泥质薄层。岩性以细一中粒长石岩屑砂岩、细一粗粒长石石英砂岩为主, 分选中等一好。

通过分析连井测井曲线, 各井测井曲线特征规律明显, 砂体界面清晰, 横向可追踪对比(图 9); 同时结合测井约束反演研究, 认为 ZJ10~ZJ30 砂体横向展布连续, 各小层横向上联通性较好。

储层物性的平面变化。储层物性在平面上的变化主要研究内容为储层孔隙度和渗透率在平面上的展布规律^[22]。研究区内 ZJ10 储层的孔隙度(12.8%~19.4%)、密度(2.41~2.48 g/cm³)、渗透率(1.3~9.8 mD)变化较大; ZJ20 储层的孔隙度(14.7%~21.4%), 密度(2.28~2.36 g/cm³)、渗透率 14.7~423.2 mD 变化中等; ZJ30 储层的孔隙度(15.2%~24.1%), 密度(2.25~2.4 g/cm³)、渗透率 17.1~897.8 mD 变化中等。平面上储层物性变化不大(图 8), 同层物性变化率小于 5%。

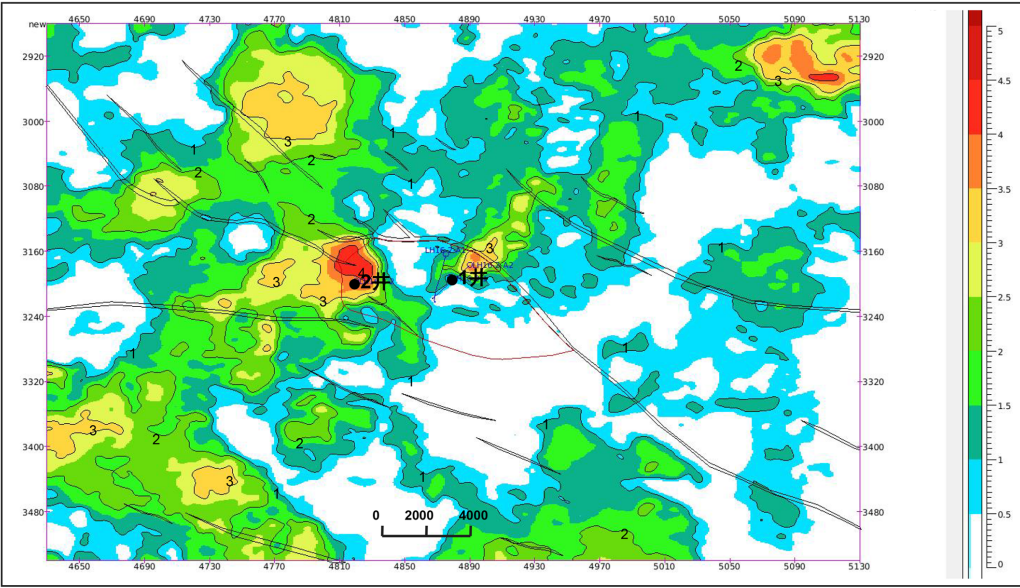


图8 ZJ30-II下部(G5)泥岩厚度图

Fig.8 Thickness distribution map for ZJ30-II(G5)mudstone

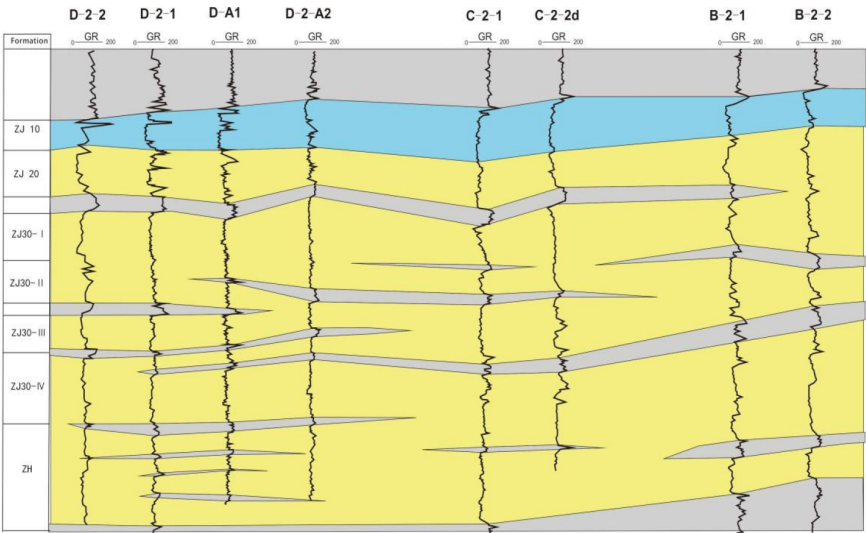


图9 研究区域相邻特征井砂体连片对比图

Fig.9 Sand bodies correlation of typical wells adjacent to the study area

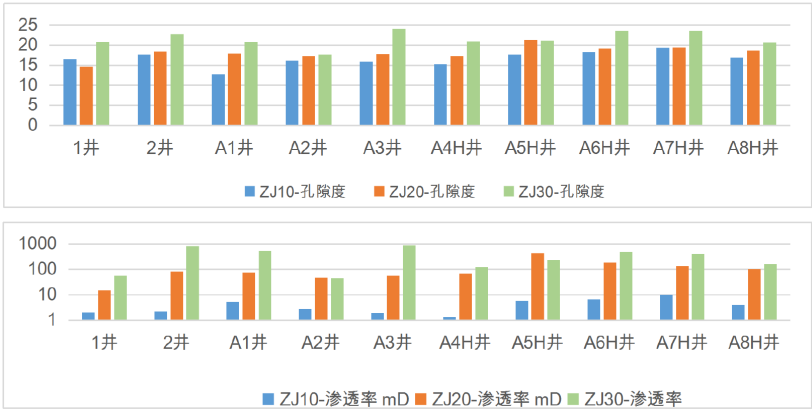


图10 研究区域主要井孔隙度、渗透率柱状图

Fig.10 Column chart of porosity and permeability values of main wells in the study area

3 储层非均质性的宏观微观控制因素

总结其他学者研究非均质性的影响因素有很多,大体归为三类:沉积作用、构造演化和成岩作用。例如在研究鄂尔多斯盆地苏里格气田西南部致密储层非均质性特征时,认为沉积作用控制了水动力条件、砂体展布,厚度和砂体构型是非均质的控制因素,同时成岩作用控制了岩矿组构、孔隙结构和孔隙演化,造成了微观上的非均质性^[23]。根据研究区珠江组储层特点,从宏观沉积相和微观成岩作用开展非均质性主控因素分析。

3.1 沉积相对非均质性的影响

前人研究表明,研究区域在珠江组沉积时期发育三角洲、深水重力流、深水扇、滨岸、浅海陆棚及碳酸盐岩台地体系,主要物源来自东沙隆起。沉积环境及水动力条件的不同可导致储层的岩石成分、结构和沉积构造等在纵、横向上存在差异,其对储层非均质性有明显的控制作用。

本文研究发现,由于流花D油田位于古陆架坡折带附近,沉积过程是在海侵的大背景下形成的,早期为三角洲前缘(图11),沉积微相为水下分流河道和河口坝,主要沉积大套分选磨圆较好的石英砂岩,水动力较相对较强,不利于沉积具有区域隔挡作用的隔层,储层非均质性不强;随着海平面的上升,过渡到前三角洲亚相,在此过程中研究区内局部区域沉积中一细砂岩泥岩向粉细砂质泥岩过渡,容易形成砂泥互层,并有可能形成具有较大范围隔挡作用的泥质隔层或具备局部隔挡作用的含粉砂质砂泥夹层,储层非均质性不强一较强;随着海平面的进一步上升过渡到浅海陆棚碳酸盐台地沉积,在此过程中沉积灰质砂岩和灰岩,致密灰岩容易形成较具有区域隔挡作用的隔层,储层非均质性较强。

在海侵背景下水动力强弱变化决定了珠江组泥岩沉积的范围,同时在古珠江和东沙隆起双物源砂体沉积的共同作用下,形成了研究区珠江组巨厚砂岩间发育多套泥质层的总体构架。

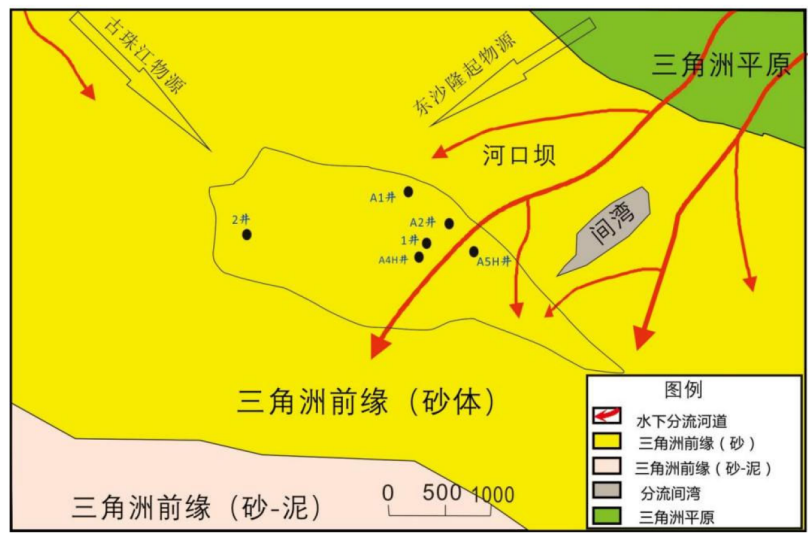


图11 流花D油田珠江组下段(ZJ30)沉积相(微相)图

Fig.11 Sedimentary facies (microfacies) of the lower section of Zhujiang Formation (ZJ30) in Liuhua D Oilfield

3.2 成岩作用对非均质的影响

研究区域内储层埋深较浅,储层在成岩作用过程中,受到机械压实作用、压溶作用、胶结作用和溶蚀作用。研究分析岩石薄片和扫描电镜实验认为,研究区珠江组储层上部接触方式为点一线接触,下部接触方式为线一点接触,整体受到机械压实作用对物性影响小(图12a);未见胶结作

用;可见石英自身加大Ⅱ~Ⅲ级,石英和部分长石具次生加大(图12b);未见缝合线等压溶作用;胶结类型以孔隙一压嵌型为主;少见长石发生溶蚀(图12c),形成长石溶孔,铸模孔等次生孔隙(图12d),自形晶面发育,颗粒表面被较完整的自形晶面包裹,占据部分原生孔隙。

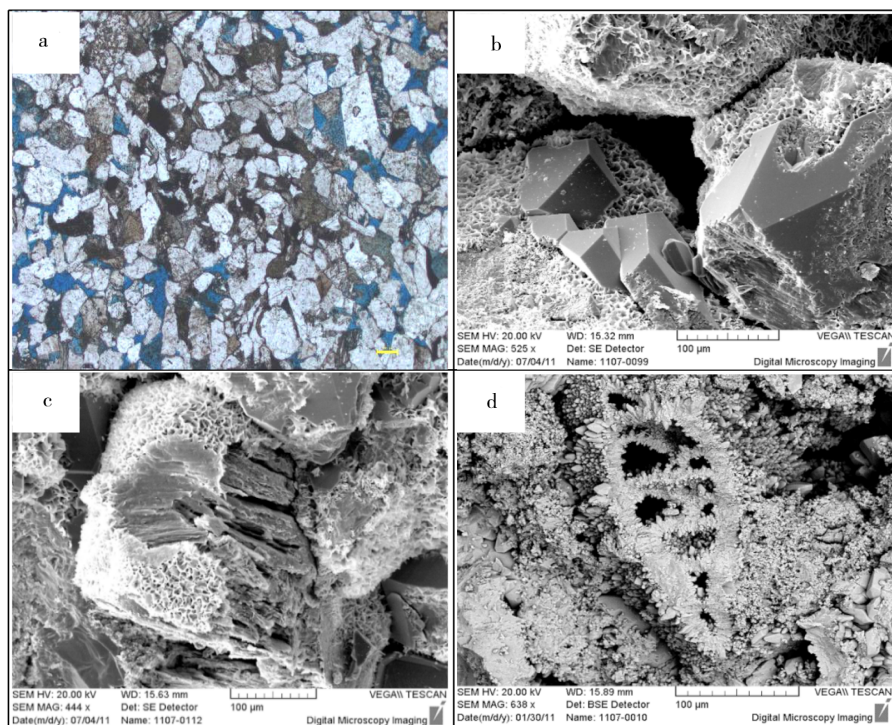
由此可见,早期成岩阶段的压实作用是研究区储层物性变差的主要成岩作用,其次是胶结作

用。压实作用减少原生孔隙约10%，胶结作用减少原生孔隙约4%，石英自身加大减少原生孔隙约2%。

珠江组储层的孔隙类型以原生粒间孔为主，由溶蚀作用形成的次生孔隙较少，次生孔隙主要是长石溶蚀粒内溶孔和生物溶蚀孔。因此，珠江

组储层建设性成岩作用为溶蚀作用，约增加原生孔隙约1%。

总体而言，研究区域内储层埋深较浅，未经历复杂的地质演变，成岩作用对研究区储层非均质性影响较小。



在压实作用下石英、长石颗粒呈半定向一定向排列，颗粒为点一线接触，未见溶蚀，未见石英加大，LH-D-2井，2269 m，X40，单偏光；

石英颗粒点接触，粒间孔隙100~200 μm，连通好，见石英加大Ⅲ级，片，LH-D-2井，2247.52 m，×525，扫描电镜；

长石淋滤，粒表蜂窝状C/S混层，LH-D-2井，2259.52 m，×444，扫描电镜；

粒间古生物碎屑，生物溶蚀孔，生物体腔孔，LH-D-2井，2191.75 m，×638，扫描电镜。

图12 珠江组砂岩储层主要成岩作用显微照片

Fig.12 Microscopic photos of main diagenesis of sandstone reservoirs in Zhujiang Formation

4 结论

(1)流花D油田珠江组砂岩储层内部发育6条隔层和9~10条夹层。储层整体非均质性较强，属于不均质型，其中在2井区下部非均质性最强。

(2)受沉积相带的控制，平面非均质性为中等；垂向上在储层内，受沉积韵律、层理特征、夹层等影响层内非均质性属于不均质型。

(3)油田位于古陆架坡折带附近，沉积由三角洲前缘向浅海陆棚碳酸盐台地转变，在海侵的大背景下，水动力条件变换引起的沉积物变化是影响研究区储层非均质性的主要因素。

(4)本油田由于储层埋深较浅，未经历复杂的

地质演变，成岩作用对研究区储层非均质性影响较小。

参考文献：

- [1] 宁玉萍,王峻峰,罗东红,等. 流花油田礁灰岩储层微观性质及驱替特征研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2017,39(06):34-44.
- [2] 张鹏,马东,续化蕾,等. 南海流花油田储层特征及敏感性评价[J]. 科学技术与工,2019,19(16):112-117.
- [3] 王春升,陈国龙,石云,等. 南海流花深水油田群开发工程方案研究[J]. 中国海上油气,2020,32(03):143-151.
- [4] 姜彬,尚凡杰,王亚青,等. 深水油田油藏评价及工程实施的应用与效果[J]. 中国石油勘探,2018,23(02):83-89.
- [5] 吕福亮,贺训云,武金云,等. 深水油田开发工程简析—以安哥拉吉拉索尔油田为例[J]. 石油天然气学报,2008

- (02):600-602.
- [6] 李小平,施和生,杜家元. 珠海组—珠江组时期东沙隆起物源提供能力探讨[J]. 沉积学报, 2014, 8(4):654-661.
- [7] 李小平,施和生,杜家元,等. 珠江口盆地番禺低隆起东部珠江组沉积环境的恢复[J]. 海相油气地质 2015, 20(1):25-32.
- [8] 张兴平,衣英杰,夏冰,等. 利用多种参数定量评价储层层间非均质性——以尚店油田为例[J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(1):56-57.
- [9] 杨少春. 储层非均质性定量研究的新方法[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2000, 24(1):56-56.
- [10] 裘怿楠. 底水油藏开发地质研究[J]. 中国海上油气, 1991(05):25-29+64.
- [11] 刘泽容,王伟峰,金强,等. 复杂油田的油藏描述技术[J]. 石油学报, 1993(04):42-48.
- [12] 谢俊,张金亮. 法 21 断块储层非均质性研究[J]. 山东科技大学学报:自然科学版, 2003, 22(3):10-13.
- [13] Yu J P, Yang J. Development of composite reservoir model for heterogeneous reservoir studies[C]//SPE Eastern Regional Meeting. Columbus, Ohio: SPE, 1990: SPE-21266-MS. .
- [14] Alpay, Allen O . A practical approach to defining reservoir heterogeneity[J]. Journal of Petroleum Technology, 1972, 24(07):841-848
- [15] Freeman M, Cheers M, Warrlich G, et al. Nested models—new workflows to simulate better representation of reservoir heterogeneity, within data-poor areas in a north kuwait heavy oil field[C]//SPE Kuwait Oil & Gas Show and Conference, Mishref, Kuwait: SPE, 2019: SPE-198153-MS.
- [16] Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. Sand and sandstone[M/OL]. New York: Springer New York, 1987[2023-11-17]. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1066-5>.
- [17] Weber, K J .Influence of common sedimentary structures on fluid flow in reservoir models[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1982, 34(03):665-672.
- [18] 杨鹏飞,张磊,李大伟. 埕岛油田馆上段储层非均质性研究[J]. 西南石油学院学报, 2003, 25(5):19-22.
- [19] 和琰,殷军,吴念胜. 储层非均质性描述的地质统计学方法[J]. 西南石油学院学报, 2001, 23(3):13-16.
- [20] 张健,李保振,周文胜,等. 中国海上气田开发与提高采收率技术[J]. 天然气工业, 2023, 43(01):132-140.
- [21] 罗东红,邹信波,梁卫,等. 珠江口盆地 LFX13-1 油田 Z37 油藏高采收率剖析[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(05):601-607.
- [22] 毕研斌,麻成斗,石红萍. 变差函数在描述储集层平面非均质性中的应用[J]. 新疆石油地质, 2003, 24(3):251-253.
- [23] 崔明明,李进步,李莹,等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田西南部致密储层非均质性特征及对成藏的制约[J]. 地质学报, 2023, 97(1):1-18.