

文章编号: 1673-1506(2025)05-0083-11

DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2025.05.008

引用: 王海峰,任梦怡,李伟,等.复合砂体构型约束的井间连通性定量评价[J].中国海上油气,2025,37(5):83-93.

WANG Haifeng, REN Mengyi, LI Wei, et al. Quantitative evaluation of inter-well connectivity constrained by compound sandbody configuration[J]. China Offshore Oil and Gas, 2025, 37(5):83-93.

## 复合砂体构型约束的井间连通性定量评价<sup>\*</sup>

王海峰<sup>1,2</sup> 任梦怡<sup>2</sup> 李 伟<sup>1,3</sup> 岳大力<sup>1,3</sup> 林 津<sup>1,3</sup> 刘警阳<sup>1,3</sup> 吴胜和<sup>1,3</sup>

(1. 中国石油大学(北京)地球科学院 北京 102249; 2. 中海油研究总院有限责任公司 北京 100028;

3. 油气资源与工程全国重点实验室 中国石油大学(北京) 北京 102249)

**摘要** 井间连通性评价可为注水效率分析与剩余油分布预测提供重要支持,对陆相碎屑岩油藏(特别是对陆相高含水老油藏)的高效开发至关重要。以渤海PL油田馆陶组辫状河三角洲储层为例,在多层合注合采条件下,提出了一种砂体构型约束的井间连通性评价新方法,实现了单层级次井间连通性差异定量评价。该方法综合考虑砂体厚度、渗透率大小、井距、静态连通样式等地质特征,结合注采数据,构建了井间连通性评价数学模型,并通过灰色关联度定量评估了多层井间连通性;构建多元回归模型对各小层连通性迭代求解,完成小层连通性定量评价。该方法应用于渤海PL油田3区各小层的井间连通性定量评价,评价结果与典型井组各小层产吸剖面特征吻合,方法可靠。本文方法为动态监测数据相对稀缺的中国海上油气田,提供了一种可靠的井间连通性定量评价手段,具有良好应用价值。

**关键词** 砂体构型;井间连通性;碎屑岩储层;灰色关联;渤海PL油田

中图分类号: TE341 文献标识码: A

## Quantitative evaluation of inter-well connectivity constrained by compound sandbody configuration

WANG Haifeng<sup>1,2</sup> REN Mengyi<sup>2</sup> LI Wei<sup>1,3</sup> YUE Dali<sup>1,3</sup> LIN Jin<sup>1,3</sup> LIU Jingyang<sup>1,3</sup> WU Shenghe<sup>1,3</sup>

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing, Beijing 102249, China;

2. CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100028, China;

3. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum, Beijing, Beijing 102249, China)

**Abstract:** The evaluation of inter-well connectivity directly affects the water injection efficiency and prediction of remaining oil distribution, which is crucial for the efficient development of terrestrial clastic reservoirs (especially high-water-cut mature reservoirs in terrestrial settings). By taking the braided river delta reservoir of the Guantao Formation in the Bohai PL Oilfield as an example, an innovative method for evaluating the inter-well connectivity under the constraint of sandbody configuration was proposed under multi-layer commingled injection/production conditions, which enabled the quantitative evaluation of the inter-well connectivity differences between wells at a single-layer level. The method integrated geological features such as sandbody thickness, permeability, well spacing, and static connectivity patterns with injection-production data to establish a mathematical model for inter-well connectivity evaluation. Grey correlation analysis was applied to quantitatively evaluate inter-well connectivity in multiple layers. Subsequently, a multiple regression model was constructed to iteratively solve connectivity for each

\* 中海石油(中国)有限公司综合科研课题“海上中浅层薄储层描述及挖潜关键技术研究(编号:KJZH-2024-2203)”、国家自然科学基金青年项目“坡度与水深主控的河流辫-曲转换机理及其沉积响应(编号:42202109)”、国家自然科学基金面上项目“少井条件下地质知识与数据双驱动的地震智能反演方法(编号:42472179)”部分研究成果。

第一作者简介:王海峰,男,高级工程师,硕士,主要从事油气田开发地质等研究工作。地址:北京市朝阳区太阳宫南街6号中国海油大厦(邮编:100028)。E-mail: wanghf39@cnooc.com.cn。

通信作者简介:李伟,男,博士,副教授,入选北京市科协青年人才托举工程、博士后创新人支持计划、博士后资助选介百人名单,主要从事油气田开发地质、油气智能表征等科研工作。地址:北京市昌平区府学路18号中国石油大学(北京)(邮编:102249)。E-mail: wei\_li@cup.edu.cn。

sublayer, enabling quantitative connectivity characterization. This approach was implemented in the quantitative inter-well connectivity evaluation of sublayers in Block 3 of the Bohai PL Oilfield, with results consistent with production/injection profile characteristics observed in the typical Well Group, demonstrating the method's reliability. This method provides a robust quantitative evaluation tool for inter-well connectivity in offshore oilfields with limited dynamic monitoring data, demonstrating significant practical applicability.

**Key words:** sandbody configuration; inter-well connectivity; clastic reservoir; grey correlation; Bohai PL Oilfield

中国海上油气田逐渐进入高含水开发阶段,含水率逐年上升,开发难度日益增加<sup>[1-2]</sup>。复合砂体构型约束的井间连通性评价已成为精准挖潜剩余油、提高采收率的关键<sup>[3-4]</sup>。井间连通性评价方法通常分为静态评价和动态评价两类<sup>[5-6]</sup>。储层连通性静态评价是在储层结构和物性差异描述的基础上,进行储层连通性定性或半定量评价<sup>[7-9]</sup>。由于静态评估方法缺少对生产动态数据的利用,评价结果多解性强、可靠性低,在强非均质储层中的局限性尤为明显<sup>[10]</sup>。动态储层连通性评价主要依据生产过程中的流体运移数据,通过分析井间的流体流动情况,更为直接地评价储层的连通性差异;常用的动态方法包括多元线性回归、灰色关联分析和阻容模型等<sup>[11-16]</sup>。尽管动态评价方法能够较为可靠地反映储层连通性差异,但该方法需要齐全的动态监测数据,否则方法难以应用或可靠性大幅度降低。然而,中国海上油气田开发早中期,经常采用定向井合注合采的开发方式,井间示踪剂、产吸剖面等动态数据严重不足,为井间连通性动态评价带来巨大挑战。

为了克服静态和动态方法的局限性,动静结合的储层连通性评价方法逐渐成为研究热点,即通过将静

态地质模型与动态生产数据结合,更全面地评估储层的连通性<sup>[17]</sup>。但现有方法仍然需要比较丰富的动态数据,难以适用于多层合注合采、动态监测数据稀缺的地区。针对海上油田多层合采且生产监测数据少的特点,本文提出了一种砂体构型约束的井间连通性定量评价新方法,即综合考虑砂体厚度、静态连通样式、渗透率大小等地质特征,初步进行连通性定性分级;然后结合注采数据,构建井间连通性评价数学模型,并通过灰色关联度定量评估射孔段的井间连通性;最后在连通性静态分级的约束下,构建多元回归模型对各小层连通性迭代求解,完成小层连通性定量评价。

## 1 油田地质概况

渤海PL油田位于渤海海域中南部渤海低凸起带中段的东北端<sup>[18]</sup>(图1),为受两组走滑断层控制的断裂背斜构造,断层较为发育。平面可划分为22区块,本次研究以西侧3区为重点剖析对象,研究区面积约12 km<sup>2</sup>,平均井距200~300 m。含油层段众多,其中主要含油层段为馆陶组至明化镇组下段,主力生产层位为馆陶组L50、L62、L72、L82等小层<sup>[19]</sup>。研究表明馆陶组为典型的辫状河三角洲沉积,储层以中细砂岩

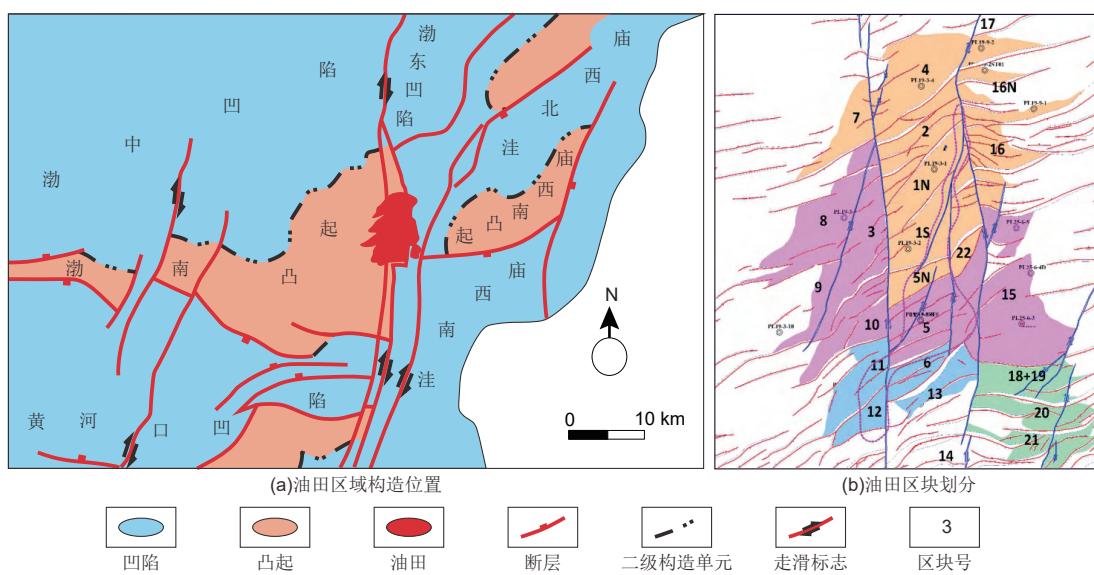


图1 渤海湾盆地渤海PL油田区域构造位置与油田区块划分

Fig. 1 Regional structural setting and oilfield block division of Bohai PL Oilfield in Bohai Bay Basin

为主,含少量含砾砂岩,常见块状层理、平行层理及板状交错层理等,孔隙度分布在23.3%~25.8%,渗透率分布在737~1 001 mD,属于中—高孔渗储层

(图2)。研究区河道频繁改道,多个不同成因的砂体在垂向上和侧向相互拼接,在平面上砂体呈泛连通体分布,沿北东—南西方向展布<sup>[20~21]</sup>。

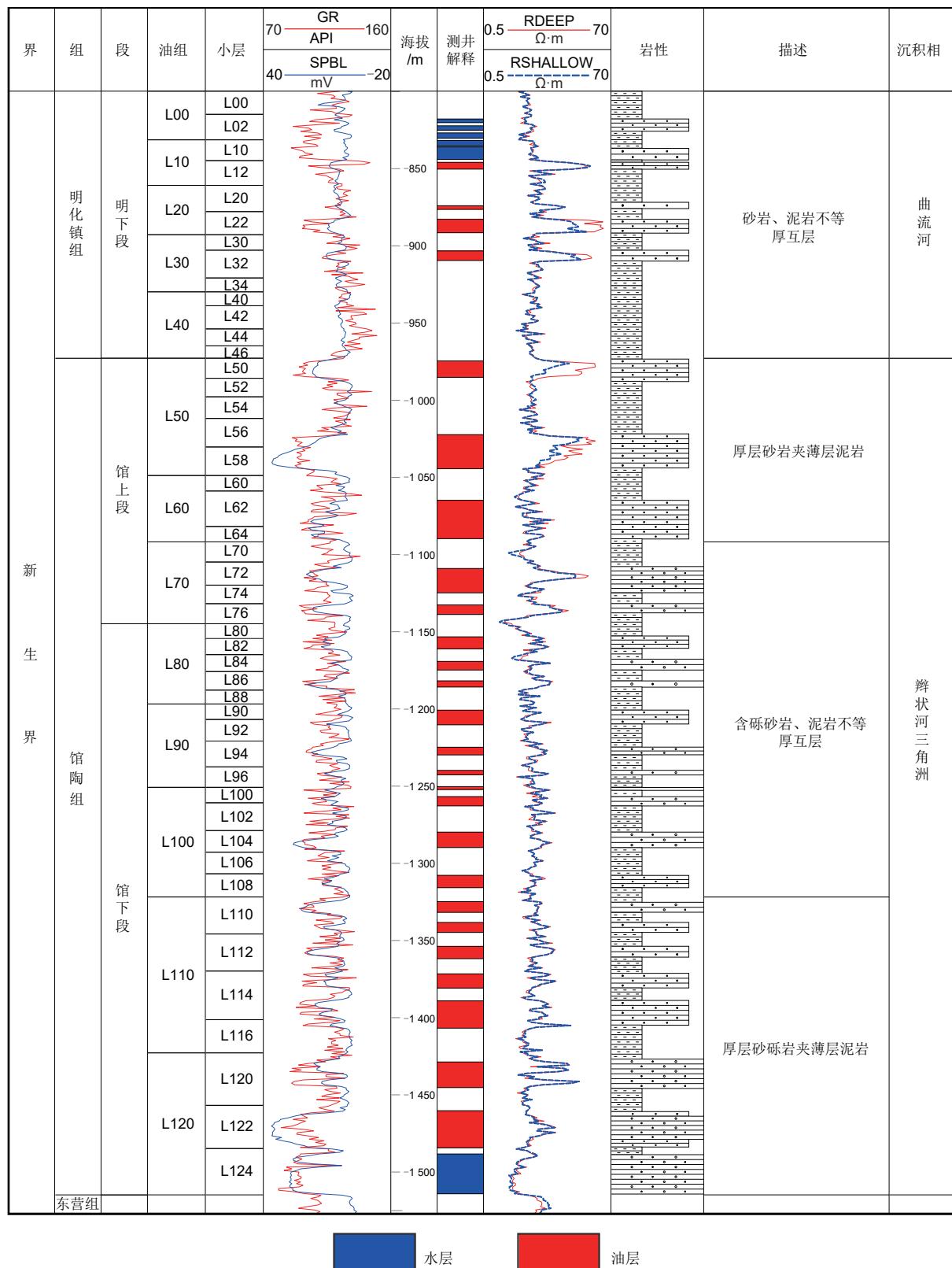


图2 渤海PL油田某取心井岩性地层综合柱状图

Fig. 2 Composite lithostratigraphic column of a cored well in Bohai PL Oilfield

渤海PL油田于2002年正式投产,历经20余年生产开发,油田已进入开发后期,面临产能递减速度快、注采关系不平衡、开发井网不完善等一系列问题<sup>[22]</sup>。因此,开展井间连通性评价,对油田后续开发策略调整意义重大。

## 2 砂体构型及静态连通样式

渤海PL油田馆陶组上段储层埋深浅、成岩作用弱,砂体构型是控制储层井间连通性差异的主要因素<sup>[23-24]</sup>。总体而言,砂体大范围紧密切叠能够促进复合砂体内部的连通能力,连通性好;砂体小范围局部切叠或接触位置发育夹层,砂体之间的连通性大幅度降低。综合生产需求、井网密度与地震资料分辨率,

本次主要聚焦于Miall提出的4~5级构型界面及其限制的构型单元<sup>[25-28]</sup>,其中5级对应小层内部的复合砂体,4级对应辫状河三角洲前缘的单一河口坝、平原辫流带内部的单一心滩。

综合岩心、测井与地震解释等成果,井震结合、平剖互动、模式指导,开展了多级次储层精细构型解剖,精细刻画了复合砂体内部结构(图3),阐明了各单砂体的空间叠置关系,为储层连通性的精细化评价提供地质依据。其中L50、L62小层平均单砂体厚度大于5 m,垂向叠置关系简单,平面上为2~3条大型辫流带叠置,单一辫流带宽约1 500 m(图4a,b);其他小层平均单砂体厚度小于5 m,垂向上叠置关系复杂,平面上为多期小型河道带叠置,单一辫流带宽约700 m(图4c,d)。

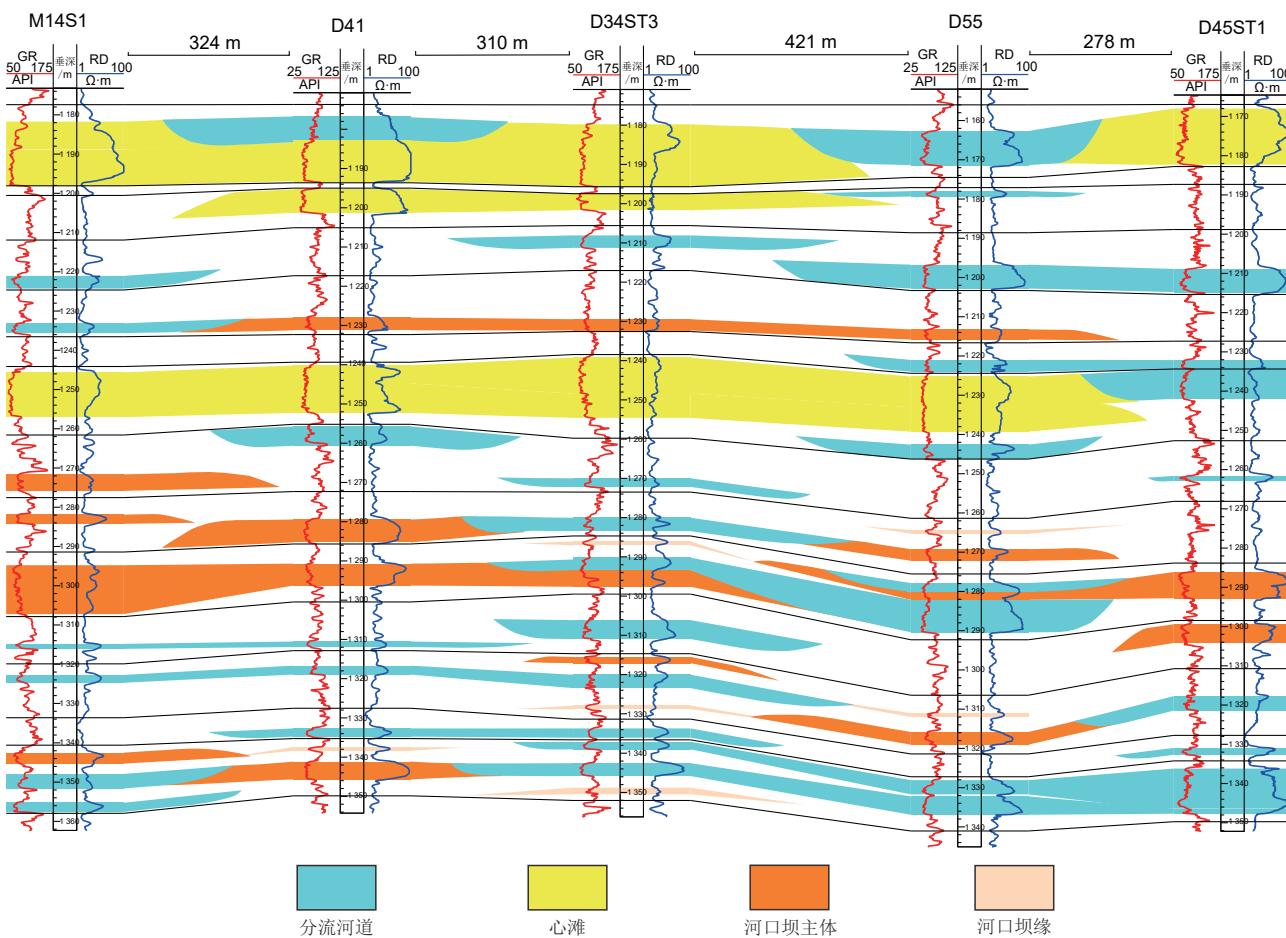


图3 渤海PL油田单一河道构型解剖剖面图(垂向源方向剖面)

Fig. 3 Configuration characterization profile of single channel in Bohai PL Oilfield (cross-paleocurrent section)

储层构型解剖成果表明,渤海PL油田井间砂体连通关系可大致归为4类:单砂体型、切叠型、接触型、相对孤立型(表1)。单砂体型指注采井组位于同一单砂体,即注采井位于同一分流河道、同一心滩或同一河口坝,井间无明显渗流屏障,井间连通性最好,易形成水淹或强水淹;切叠型指注采井组位于单砂体相互

切叠的复合砂体内部,切叠部位通常不发育明显的渗流屏障,连通性与切叠面积及部位密切相关,切叠范围越大、切叠部位的物性越好,连通性越好,不同程度的水淹均可发育;接触型指注采井分别位于不同单砂体,单砂体之间局部切叠、或叠置位置发育夹层等渗流屏障,以弱水淹或未水淹为主;相对孤立型,指注采

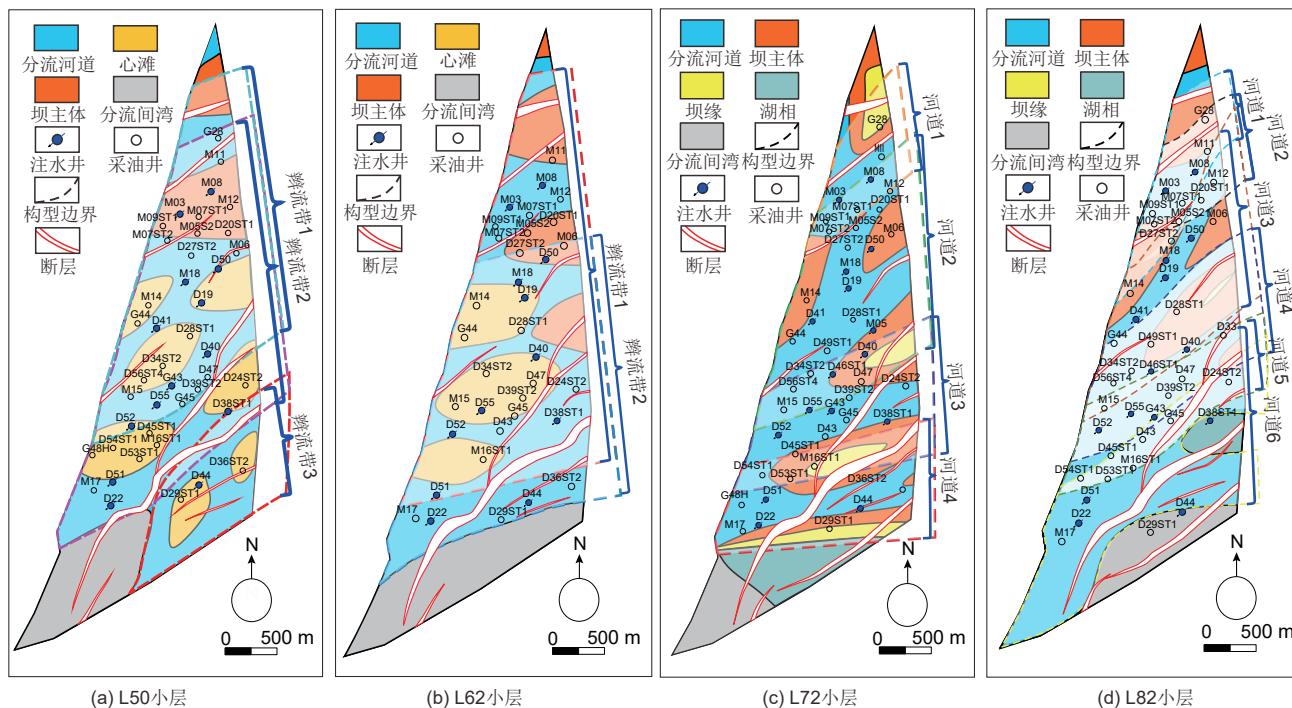


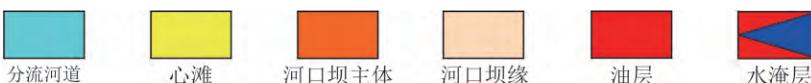
图4 渤海PL油田单一河道构型解剖平面图

Fig. 4 Planar configuration of single channel in Bohai PL Oilfield

表1 井间砂体静态连通样式

Table 1 Static connectivity patterns of inter-well sandbodies

静态连通样式	概念模型	研究区实例	水淹特征	连通特征
单砂体型				中水淹 强水淹 同一单砂体井间无渗流屏障,连通性最好
切叠型				弱水淹 中水淹 强水淹 连通程度取决于砂体叠置范围,连通程度变化范围最大
接触型				弱水淹 未水淹 连通程度取决于砂体叠置范围,连通程度变化范围最大
相对孤立型				未水淹 井间不连通



井分别位于不同单砂体,单砂体之间相对孤立、不连通,注采不受效。最终,综合水淹程度、砂体叠置关系及物性分布,建立了4种静态连通样式并分析了其相对连通能力:单砂体型>切叠型>接触型>相对孤立型(表1)。

综合典型井组的产液与吸水剖面的灰色关联度,结合概念模型数值模拟结果,明确上述4种静态连通样式的连通性大致分布范围。其中,“单砂体型”连通样式的井间连通性最好,其连通系数通常为0.6~1.0;“切叠型”井间连通性中等,其连通系数通常为0.2~0.8;“接触型”井间连通性较弱,其连通系数通常为0~0.6;“相对孤立型”连通样式的连通性最低,其连通系数通常小于0.2。总体而言,砂体叠置范围越大、叠置部位的物性越好,单砂体之间的连通性也随之越好。

### 3 构型约束的井间连通性评价方法

井间连通性评价对剩余油精细挖潜至关重要。然而,海上油田动态监测数据稀缺、井网稀疏,井间连通性评价困难重重。因此,本文创新提出了基于砂体构型约束的井间连通性定量评价方法,在多层次合注合采情况下实现了单层级次的井间连通性定量表征,并在渤海PL油田取得了良好应用效果。

#### 3.1 多层连通性评价方法

相较于示踪剂、监测剖面等动态监测数据,生产数据具有易获取、成本低的优势。在注水压力与注水量发生变化时,相邻生产井的产液量会随之产生相应变化,两者之间的相似性主要受控于井间的连通差异。基于

$$r_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \cdot \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \cdot \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (3)$$

式(1)~(3)中: $n$ 为注水的月份数量; $m$ 为周围采油井的数量; $x_0(k)$ 为水井月平均注入量系列; $x_i(k)$ 为油井月平均产液量系列; $r_i(k)$ 为第*i*个比较序列在第*k*个指标处的灰色关联系数; $R(X_0, X_i)$ 为第*i*个比较序列与参考序列的灰色关联度; $\rho$ 为分辨系数,且 $\rho \in [0, 1]$ ,一般取值为0.5。

#### 3.2 单层连通性评价方法

然而,在油田注水开发中后期,剩余油分布高度离散化,基于多层次估算的连通性差异已经无法支撑剩余油精细挖潜。因此,如何实现单层(小层)级别的连通性定量评价是海上油田连通性分析的难点与热点。提出了一种复合砂体构型(静态连通模式)约束的多元线性回归模型单层连通性定量预测方法,该方法分为两个关键步骤。一是构建多元线性回归方程,二是

此原理,根据不同时间段的动态生产数据,运用灰色关联分析法,可求取油井与水井之间的动态连通关系。

灰色关联分析法已广泛应用于井间连通性评价工作,其基本原理是以序列曲线几何形状的相似程度为依据,判断注采井之间的紧密程度,曲线越接近相应序列之间的关联度越大,反之则越小。关联度取值为0~1,其值越大,表示油水井间连通性越好。但海上复杂断块油田,缺少监测数据,产量无法准确划分,因此只能通过灰色关联分析法准确分析油水井间射孔段的整体连通关系。考虑动态数据的完整性,选取渤海PL油田首次调整开发到二次调整开发期间内稳定开发1年以上的油井进行评价,并以1个月为计算单元,以确保评价结果的客观性。

灰色关联分析方法用数学语言表述:设参考序列为 $X_0 = \{x_0(k), k = 1, 2, \dots, n\}$ ,被比较序列为 $X_i = \{x_i(k), k = 1, 2, \dots, n\}$ (其中*i*=1,2,⋯,n),则 $X_0$ 和 $X_i$ 的灰色关联度矩阵为

$$(x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)) =$$

$$\begin{bmatrix} x_1(1) & x_2(1) & \cdots & x_n(1) \\ x_1(2) & x_2(2) & \cdots & x_n(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1(m) & x_2(m) & \cdots & x_n(m) \end{bmatrix} \quad (1)$$

则 $X_0$ 和 $X_i$ 的灰色关联度为

$$R(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i(k) \quad (2)$$

其中 $r$ 为

$$r_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \cdot \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \cdot \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (3)$$

静态连通模式约束的连通性求解。

多元回归模型是一种经典的统计方法,广泛应用于分析多个自变量(输入变量)对因变量(输出变量)的影响。其核心思想是通过建立自变量与因变量之间的线性关系,进而预测因变量的变化。由于注采井间多层次连通特征是由各主力开发层位共同作用的结果,因而在对单层级次的连通性定量评价过程中,将各主力开发层位的结构特征(地层系数、井距及叠置关系)作为自变量,灰色关联度所反映的井间连通性作为因变量,单层连通系数作为回归系数(各层对多层次连通性的贡献度),构建多元回归模型。通过对模型训练实现单层连通特征的预测,预测结果结合实际地质情况进行迭代修正,以确保其合理性和准确性。回归模型可表示为

$$Y_c = \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2 + \cdots + \beta_w Z_w \quad (4)$$

$$Z_c = \{K_c, d_c, r_c\} \quad (5)$$

$$K_c = \frac{k_c h_c}{\sum_{c=1}^w k_c h_c} \quad (6)$$

式(4)~(6)中:  $Y_c$  为注采井间灰色关联度;  $w$  为采油井开发层系数量;  $Z_c$  为第  $c$  层的地层特征变量矩阵;  $\beta_c$  为第  $c$  层连通系数;  $K_c$  为注采井组在第  $c$  层地层系数比例;  $k_c$  为注采井组第  $c$  层的平均渗透率;  $h_c$  为注采井组第  $i$  层的砂体厚度;  $d_c$  为注采井组第  $c$  层的井距;  $r_c$  为注采井组在第  $c$  层的静态连通关系。

然而,通常由于变量较多,上述多元线性回归方法难以求解或存在明显的多解性,因此本文进一步提出了复合砂体构型约束的多元线性回归模型迭代求解方法。具体而言,首先根据实际灰色关联度数据对连通性进行初步赋值,并引入噪声以增强数据的随机性和鲁棒性,并将静态连通关系( $r_c$ )设为优化参数,继而采用差分优化算法在该区间限制内进行多元线性方程迭代求解,确保求解的连通性符合地质模式。更新回归系数及迭代收敛函数表示为

$$\beta^{(j+1)} = \beta^{(j)} - \eta \nabla J(\beta^{(j)}) \quad (7)$$

$$|J(\beta^{(j+1)}) - J(\beta^{(j)})| < \delta \quad (8)$$

式(7)、(8)中:  $\beta^{(j+1)}$  为第  $j+1$  次迭代回归系数;  $\beta^{(j)}$  为第  $j$  次迭代回归系数;  $\nabla J(\beta^{(j)})$  为损失梯度,表示系数更新方向;  $\eta$  为步长;  $|J(\beta^{(j+1)}) - J(\beta^{(j)})|$  为目标函数的变化值;  $\delta$  为目标函数变化阈值。

## 4 应用实例

为检验该方法的可行性与可靠性,选取区块内动态监测资料较完整的D40井组进行灰色关联模型与多元线性回归模型的应用和计算,并结合产吸监测剖面结果,检验连通性数学模型的准确性。

### 4.1 多层连通性评价

综合渤海PL油田开发调整历程及现有资料,选取首次调整实施至二次调整期间的注采井组评价其连通情况。以D40井组为例,将D40水井月平均注水量设为参考序列,周围采油(D47、D34ST2、D28ST1、D39ST2)月平均产液量设为被比较序列,详见表2。

在对数据进行标准化处理后,使用式(3)计算出注、采井生产数据的灰色关联度系数,定量评价多层连通性差异。由表3所示计算结果可知,D40水井与周围采油井相关性如下:D28ST1>D47>D34ST2>D39ST2,因此可以判断D40水井与D47井连通性最

表2 D40井组生产数据

Table 2 Production data of Well Group D40

D40井 注水量/m <sup>3</sup>	产液量/m <sup>3</sup>			
	D47井	D34ST2井	D28ST1井	D39ST2井
1 131	1 407	253	286	511
754	1 453	492	287	507
888	1 400	446	280	308
901	1 434	635	289	209
1 065	1 377	648	283	232
1 028	1 368	411	269	346
800	1 331	232	273	406
1 453	1 329	826	280	376
1 520	1 340	481	286	389
1 188	1 409	139	296	381
1 149	1 373	108	301	366
923	1 185	101	338	361
36	1 477	115	344	219
1 051	1 439	113	302	299
1 025	1 348	85	277	242
948	1 302	81	280	365

表3 D40井组多层连通性评价结果

Table 3 Multi-layer connectivity evaluation results of Well Group D40

井号	连通系数
D28ST1	0.85
D47	0.82
D34ST2	0.72
D39ST2	0.68

好;与D34ST2井和D28ST1井的连通性依次变弱;与D39ST2两井间连通性最弱。

### 4.2 单层连通性评价

以D40与D28ST1井为例,该井主力生产层位L50、L62、L72、L74、L80、L82、L84、L86、L88及L90,其地层系数比例、井距及叠置关系详见表4与图5。应用多元回归模型,以注采井对的结构特征矩阵作为自变量,井间多层连通性作为因变量,在砂体静态连

表4 D40-D28ST1注采井对地层系数比例、井距及砂体静态连通关系

Table 4 Formation coefficients, well spacing, and sandbody static connectivity relationships for D40-D28ST1 injection/production well pair

小层	地层系数比例	井距/m	砂体静态连通性
L50	0.50	240	切叠型
L62	0.11	291	单砂体型
L72	0.12	339	切叠型
L74	0.01	354	接触型
L80	0.00	394	接触型
L82	0.11	408	接触型
L84	0.04	413	接触型
L86	0.04	440	接触型
L88	0.05	467	切叠型
L90	0.01	477	相对孤立性

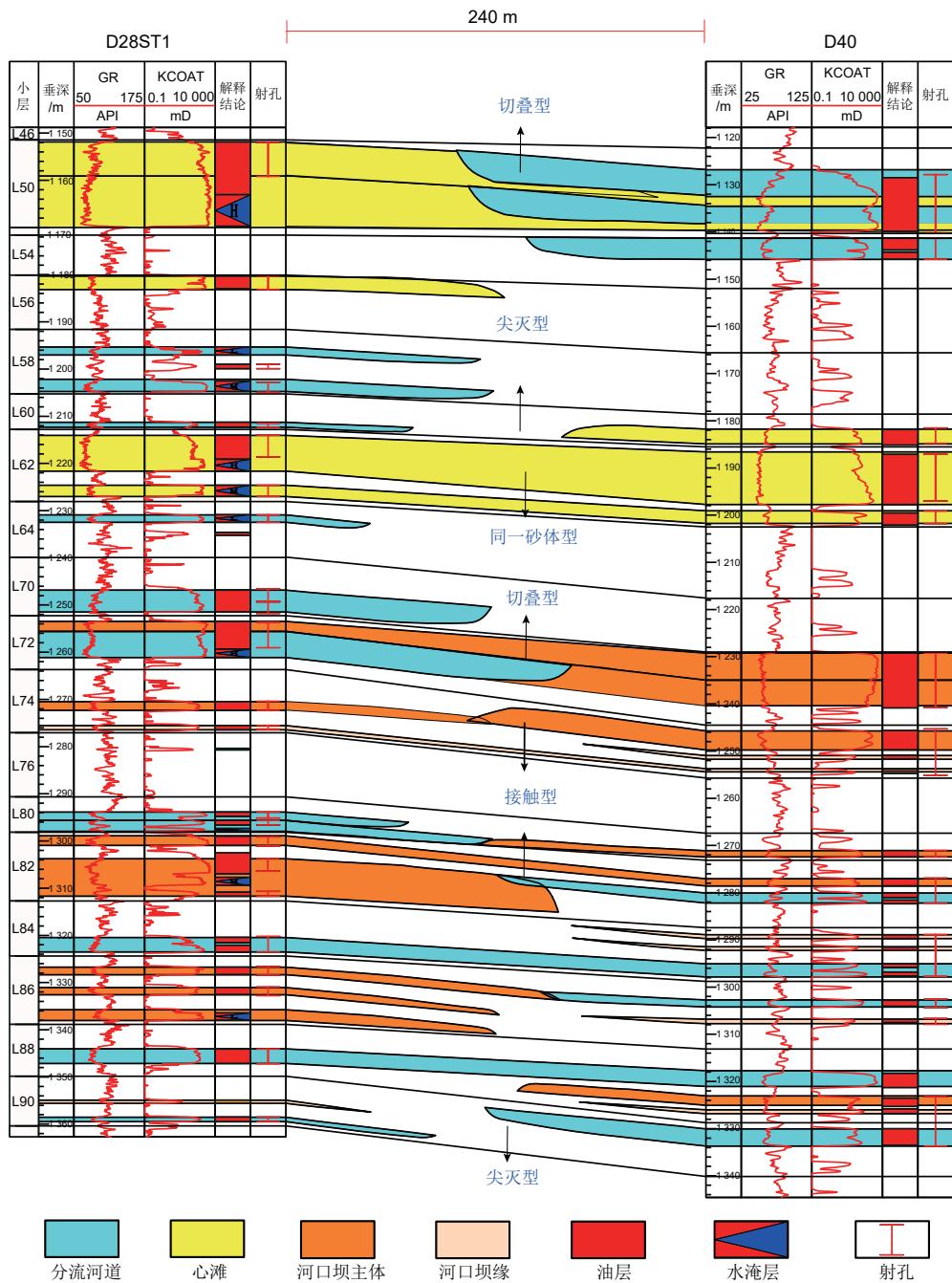


图5 渤海PL油田D40-D28ST1井间砂体叠置关系

Fig. 5 Sandbody stacking pattern of Well D40-D28ST1 in Bohai PL Oilfield

通关系的约束下,迭代求解定量评价单层连通性。

将D40-D28ST1井的地层系数比例作为回归模型的回归系数,井距与砂体静态连通关系作为回归模型的迭代约束条件,迭代求解D40-D28ST1井间单层连通系数(表5)。由D40-D28ST1单层连通系数计算结果可知,D40与D28ST1井间L50、L62、L72小层连通性较好(连通系数 $>0.65$ ),即这些小层对注采相关性的贡献度高;L74、L82和L88层的连通性较一般(连通系数为0.35~0.65);L80、L84、L86和L90的小层

表5 D40-D28ST1井单层井间连通性

Table 5 Single-layer inter-well connectivity of Well D40-D28ST1

小层	连通系数	小层	连通系数
L50	0.80	L88	0.58
L62	0.77	L84	0.28
L72	0.68	L86	0.26
L82	0.59	L80	0.21
L74	0.54	L90	0.20

连通性较差(连通系数 $<0.35$ ),即这些小层对注采相关性的贡献度低。

以上述方法,对D40井组各小层井间连通性进行评价。由图6单层连通性计算结果可知,D40井组不同小层的连通性存在显著差异,其中L50、L62和L72

小层连通性较好;L88层的连通性中等;L74、L80、L82和L86层的连通性较差;L84和L90层连通性差,多数井间连通性低。

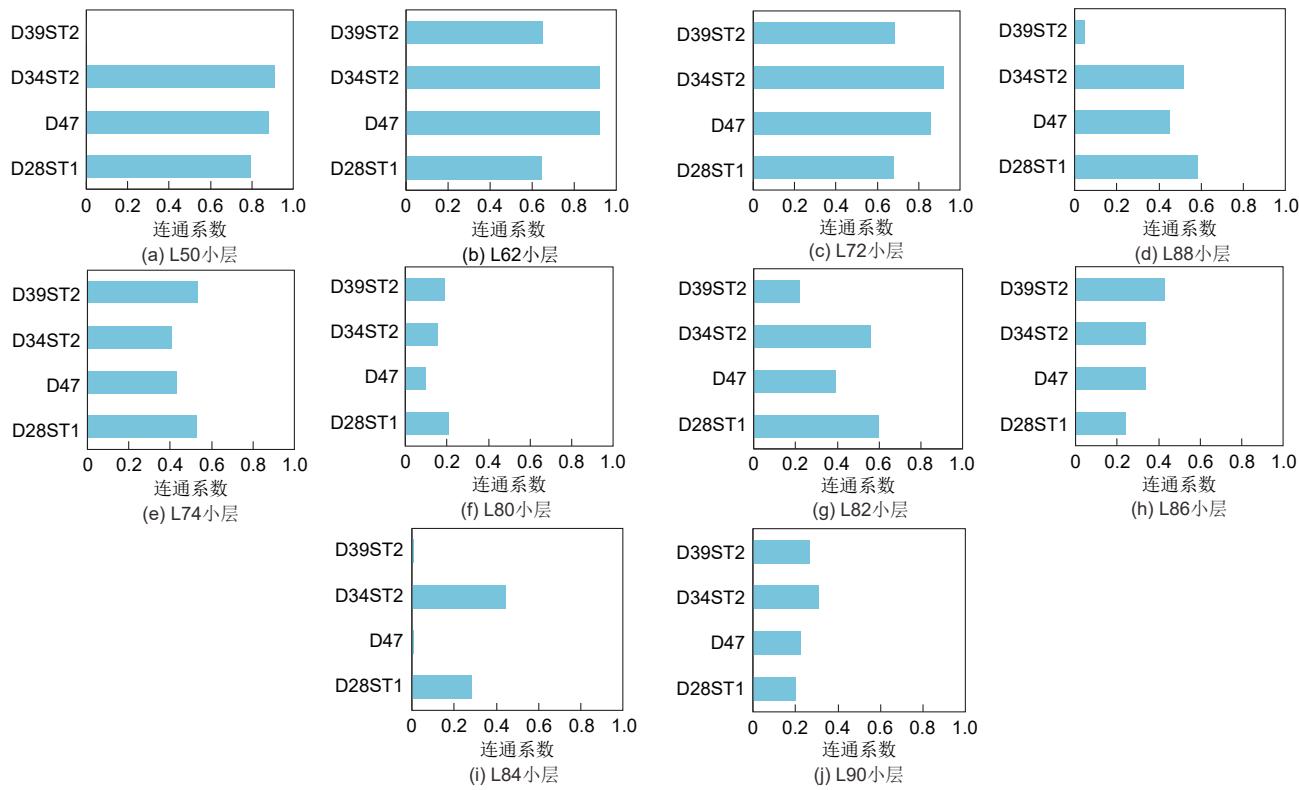


图6 D40井组主力开发小层井间连通性评价结果

Fig. 6 Inter-well connectivity evaluation results of key producing layers in Well Group D40

#### 4.3 可靠性分析

实际生产中,观察各层段的产液、吸水数据变化趋势及差异,可判断注采井组不同层段连通程度,即产液或吸水比例越高表明该层段连通性较好。D40井于

2019年12月及2020年10月开展了吸水监测剖面测试(图7),测试结果表明:D40水井在L50—L54小层、L58—L64小层及L72—L76小层吸水比例高,且高于或与地层系数比例相当,表明这些层位井间连通性

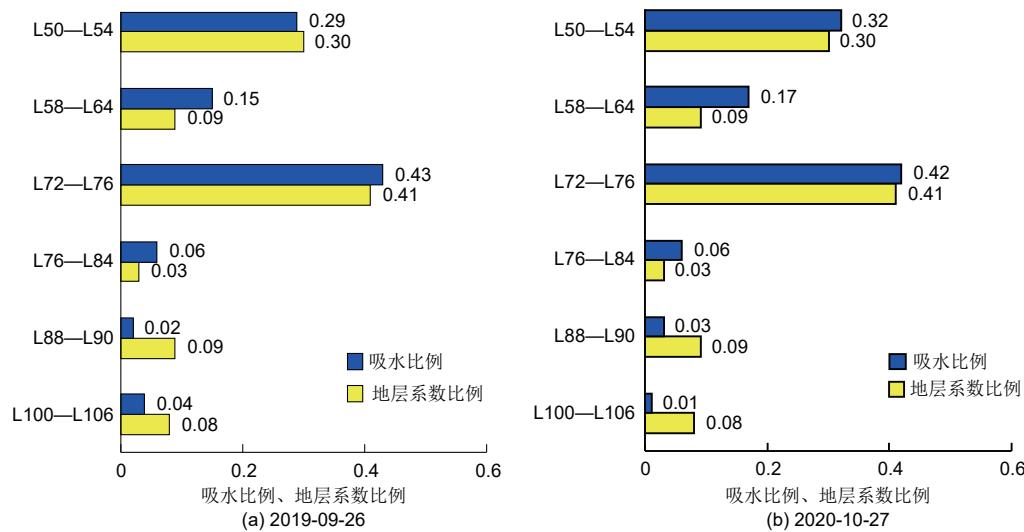


图7 D40井吸水监测剖面

Fig. 7 Water absorption monitoring profile of Well D40

好,这与连通性的定量预测结果一致。同样,在相同地层系数条件下,又如L62小层与L90小层,L62小层吸水比例明显高于地层系数,而L90小层地层吸水比例明显低于地层系数,表明L62小层的连通性好于L90小层,同样与连通性定量预测结果一致。总之,各层吸水剖面与连通性定量预测结果一致,表明砂体构型约束的井间连通性评价结果可靠。

## 5 结论与认识

1)本文针对辫状河三角洲储层,总结了单砂体型、切叠型、接触型和相对孤立型四种典型静态连通样式及其相对连通能力,并在此基础上提出了一种砂体构型约束的井间连通性定量评价方法。该方法有效结合复合砂体构型与动态生产数据,实现了多层合注合采条件下单层级次的连通性差异定量评价,并在渤海PL油田馆陶组辫状河三角洲储层得到应用,预测结果与监测资料高度一致,表明了该方法具有较强的适用性和可靠性。

2)本文方法在砂体构型约束下实现了单层连通性的定量评价,但仍存在一定局限性。首先,相较于依托干扰试井、示踪剂、单层产吸剖面等高品质测试资料连通性评价方法,多元迭代求解过程存在一定多解性。其次,该方法依赖精细的构型解剖结果作为回归约束,适用于井网密集或地震数据质量较高的区域。尽管如此,该方法及应用实例为测试数据稀缺的区块提供了一种连通性定量评价新方法。

## 参 考 文 献

- [1] 王海峰,范廷恩,胡光义,等.海上油田开发中后期砂岩储层构型剖析与表征[J].海洋地质与第四纪地质,2020,40(1):114-125.  
WANG Haifeng, FAN Ting'en, HU Guangyi, et al. Analysis and characterization of sandstone reservoir architecture in middle and late stages of offshore oilfield development [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2020, 40 (1) : 114-125.
- [2] 贾永康,鞠野,刘丰钢,等.海上油田新型水基复合调驱体系研究与应用[J].中国海上油气,2023,35(5):178-184. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2023.05.019.  
JIA Yongkang, JU Ye, LIU Fenggang, et al. Research and application of new type of water-based composite profile control and displacement system in offshore oilfield[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35 (5) : 178-184. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2023.05.019.
- [3] 孙焕泉,杨勇,王海涛,等.特高含水油藏剩余油分布特征与提高采收率新技术[J].中国石油大学学报(自然科学版),2023,47(5):90-102.  
SUN Huanquan, YANG Yong, WANG Haitao, et al. Distribution characteristics of remaining oil in extra-high water cut reservoirs and new technologies for enhancing oil recovery [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(5) : 90-102.
- [4] 张瑞,刘宗宾,田博,等.渤海SZ油田井间单砂体连通性判别及定量评价[J].地质科技情报,2018,37(5):78-83.  
ZHANG Rui, LIU Zongbin, TIAN Bo, et al. Identification and quantitative evaluation of interwell single sandbody connectivity of SZ oilfield in Bohai sea[J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(5) : 78-83.
- [5] 王海峰,范廷恩,胡光义,等.基于地震识别复合砂体构型地质模型的剩余油开发井网井距规律:以渤海Q油田明化镇组R13油层为例[J].东北石油大学学报,2021,45(5):41-50.  
WANG Haifeng, FAN Ting'en, HU Guangyi, et al. Well network and well spacing pattern in remaining oil recovery based on geological pattern with seismic-identified complex sand architecture interfaces: taking Minghuazhen Formation R13 oil layer in Bohai Q oilfield for example [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2021, 45(5) : 41-50.
- [6] 周成,董驰,司勇,等.海上油田井间连通性识别方法研究[J].当代化工,2024,53(11):2628-2632,2638.  
ZHOU Cheng, DONG Chi, SI Yong, et al. Research on identification method of interwell connectivity in offshore oilfields[J]. Contemporary Chemical Industry, 2024, 53(11) : 2628-2632, 2638.
- [7] 廖明光,廖成基,陈小凡.动静态方法在油藏井间连通性分析中的应用研究[J].特种油气藏,2020,27(3):131-136.  
LIAO Mingguang, LIAO Chengji, CHEN Xiaofan. Application of dynamic and static analyses in Inter-Well connectivity characterization [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(3) : 131-136.
- [8] 于海波,许鹏,李龙,等.渤海海域明化镇组下段砂体构型与连通性分析[J].中国海上油气,2024,36(4):72-83. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2024.04.007.  
YU Haibo, XU Peng, LI Long, et al. Analysis of sand architecture and connectivity in lower member of Minghuazhen Formation in Bohai Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2024, 36 (4) : 72-83. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2024.04.007.
- [9] 林伟强,曲丽丽,朱露,等.井震藏结合判定井间砂体连通性研究及应用:以南堡油田M区中深层为例[J].油气藏评价与开发,2022,12(2):373-381.  
LIN Weiqiang, QU Lili, ZHU Lu, et al. Evaluation of inter-well sand body connectivity by combination of well, seismic, and reservoir and its application: taking the middle and deep layers of M area of Nanpu Oilfield as an example [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(2) : 373-381.
- [10] 陈凯,李勇峰,姚为英,等.海上油田井间连通性综合评价技术研究[J].石油化工应用,2021,40(7):84-89.  
CHEN Kai, LI Yongfeng, YAO Weiyi, et al. Research on comprehensive evaluation technology of inter-well connectivity in offshore oilfield [J]. Petrochemical Industry

- Application, 2021, 40(7): 84-89.
- [11] ALBERTONI A, LAKE L W. Inferring interwell connectivity only from well-rate fluctuations in waterfloods [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2003, 6(1): 6-16.
- [12] 王建国, 沈焕文, 邱一新, 等. 基于多元线性回归的井间动态连通性反演模型可行性分析: 以靖安油田五里湾一区长6油藏为例 [J]. 非常规油气, 2019, 6(2): 57-62, 34.
- WANG Jianguo, SHEN Huanwen, QIU Yixin, et al. Feasibility analysis of interwell dynamic connectivity inversion model based on multivariate linear regression: taking chang-6 reservoir in Wuliwan area 1 of Jing'an oilfield as an example [J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(2): 57-62, 34.
- [13] 张明安. 油藏井间动态连通性反演方法研究 [J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(3): 70-73.
- ZHANG Mingan. Study on inversion for reservoir inter-well dynamic connectivity [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(3): 70-73.
- [14] 富宇, 郭晓萍. 基于灰色关联分析的优势渗流通道识别研究 [J]. 计算机与数字工程, 2023, 51(3): 748-752.
- FU Yu, GUO Xiaoping. Identification of dominant seepage channels based on grey correlation analysis [J]. Computer & Digital Engineering, 2023, 51(3): 748-752.
- [15] 刘世界, 赵俊, 段宝江, 等. 基于灰相关法的井间连通性评价研究 [J]. 油气井测试, 2017, 26(3): 36-38.
- LIU Shijie, ZHAO Jun, DUAN Baojiang, et al. Research and interpretation of Inter-Well connectivity dynamic using grey correlation degree [J]. Well Testing, 2017, 26(3): 36-38.
- [16] 李雷, 程时清, 何佑伟. 井间动态连通性反演模型研究进展 [J]. 内蒙古石油化工, 2015, 41(17): 8-9, 151.
- LI Lei, CHENG Shiqing, HE Youwei. Research progress on inversion models of inter-well dynamic connectivity [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2015, 41(17): 8-9, 151.
- [17] LI Yupeng, MOHAMMAD R S. Integrate inter-well connectivity data with static reservoir models based on Bayesian formalism [J]. Petroleum Research, 2023, 8(3): 433-438.
- [18] 刘彦成, 罗宪波, 康凯, 等. 陆相多层砂岩油藏渗透率表征与定向井初期产能预测: 以蓬莱19-3油田为例 [J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 97-103.
- LIU Yancheng, LUO Xianbo, KANG Kai, et al. Permeability characterization and directional wells initial productivity prediction in the continental multilayer sandstone reservoirs: a case from Penglai 19-3 oil field, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 97-103.
- [19] 徐中波, 汪利兵, 申春生, 等. 渤海蓬莱19-3油田新近系下段曲流河储层构型表征 [J]. 岩性油气藏, 2023, 35(5): 100-107.
- XU Zhongbo, WANG Libing, SHEN Chunsheng, et al. Architecture characterization of meandering river reservoirs of lower Minghuazhen Formation of Neogene in Penglai 19-3 oilfield, Bohai Sea [J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(5): 100-107.
- [20] 刘百川, 石飞, 邓猛, 等. 渤海C油田馆陶组辫状河沉积模式及控制因素 [J]. 地质找矿论丛, 2024, 39(2): 209-218.
- LIU Baichuan, SHI Fei, DENG Meng, et al. Sedimentary model and control factors of braided river in Guantao formation of oilfield C in Bohai sea [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2024, 39(2): 209-218.
- [21] 徐中波, 康凯, 申春生, 等. 渤海海域L油田新近系明化镇组下段与馆陶组储层沉积微相研究 [J]. 岩性油气藏, 2015, 27(5): 161-166.
- XU Zhongbo, KANG Kai, SHEN Chunsheng, et al. Sedimentary microfacies of Neogene Guantao Formation and lower Minghuazhen Formation in L oilfield, Bohai Bay [J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(5): 161-166.
- [22] 薛永安, 邓运华, 王德英, 等. 蓬莱19-3特大型油田成藏条件及勘探开发关键技术 [J]. 石油学报, 2019, 40(9): 1125-1146.
- XUE Yongan, DENG Yunhua, WANG Deying, et al. Reservoir formation conditions and key exploration & development technologies in PL 19-3 giant oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(9): 1125-1146.
- [23] 聂新强, 周玉辉, 钱致颖, 等. 砂体井间连通动态特征的精细刻画及分类表征方法 [J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2021, 40(1): 14-21.
- NIE Xinqiang, ZHOU Yuhui, QIAN Zhiying, et al. Fine description and classification characterization method for dynamic feature of interwell connectivity in sandstone reservoirs [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2021, 40(1): 14-21.
- [24] 郭丽娜, 王龙, 陈培元, 等. 渤海P油田河流相多层砂岩油藏储层连通性分析 [J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(5): 57-63.
- GUO Lina, WANG Long, CHEN Peiyuan, et al. Reservoir connection of a fluvial multi-layered sandstone reservoir of the Bohai P oilfield [J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(5): 57-63.
- [25] MIALL A D. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits [J]. Earth-Science Reviews, 1985, 22(4): 261-308.
- [26] 吴胜和, 翟瑞, 李宇鹏. 地下储层构型表征: 现状与展望 [J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 15-23.
- WU Shenghe, ZHAI Rui, LI Yupeng. Subsurface reservoir architecture characterization: current status and prospects [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 15-23.
- [27] 王海峰, 范廷恩, 宋来明, 等. 高弯曲度曲流河砂体规模定量表征研究 [J]. 沉积学报, 2017, 35(2): 279-289.
- WANG Haifeng, FAN Ting'en, SONG Laiming, et al. Quantitative characterization study on sand body scale in high sinuosity meandering river [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(2): 279-289.
- [28] 胡光义, 王海峰, 范廷恩, 等. 海上油田河流相复合砂体构型级次解析 [J]. 古地理学报, 2021, 23(4): 810-823.
- HU Guangyi, WANG Haifeng, FAN Ting'en, et al. Analysis of fluvial compound sand-body architecture hierarchy in offshore oil field [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2021, 23(4): 810-823.

收稿日期:2024-11-13 录用日期:2025-04-01

(编辑:杨滨)