

水驱稠油储层非均质性调控对策研究

张再昌

江汉油田勘探开发研究院, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年2月4日; 录用日期: 2026年2月25日; 发布日期: 2026年3月9日

摘要

以颗粒云岩储层攻关及非均相复合驱现场试验为依托, 结合八面河油田水驱稠油储层非均质性强、采收率低的特点, 从层内、层间、平面三个维度分析油层非均质性的表征及成因, 通过定量关联非均质性参数与开发效果, 针对性提出调控对策。研究表明: 八面河油田稠油储层非均质性受沉积相、岩性组合、成岩后生作用控制, 砂岩-碳酸盐岩混积区矛盾最突出; 通过地质精细刻画、工艺技术适配、注采结构优化及多专业技术协同的综合施策, 可显著增强水驱效果。

关键词

八面河油田, 水驱稠油, 储层非均质性, 调控对策, 非均相复合驱

Research on Control Strategies for Reservoir Heterogeneity in Water-Driven Heavy Oil Reservoirs

Zaichang Zhang

Exploration and Development Research Institute, Jiangnan Oilfield, Wuhan Hubei

Received: February 4, 2026; accepted: February 25, 2026; published: March 9, 2026

Abstract

Based on the breakthrough in granular cloud rock reservoirs and field tests of heterogeneous composite flooding, combined with the characteristics of strong heterogeneity and low recovery rates in water-flooded heavy oil reservoirs in the Bamianhe Oilfield, this study analyzes the characterization and causes of reservoir heterogeneity from three dimensions: intra-layer, inter-layer, and planar. By quantitatively correlating heterogeneity parameters with development outcomes, targeted control strategies are proposed. The research indicates that the heterogeneity of heavy oil

reservoirs in the Bamianhe Oilfield is controlled by sedimentary facies, lithological assemblages, and diagenetic post-diagenesis, with the most pronounced conflicts occurring in the mixed accumulation zone of sandstone-carbonate rocks. Through comprehensive measures such as detailed geological characterization, adaptive process technology, optimized injection-production structures, and multi-disciplinary technical collaboration, water-flood efficiency can be significantly enhanced.

Keywords

Bamianhe Oilfield, Waterflooding for Heavy Oil, Reservoir Heterogeneity, Control Strategies, Non-Uniform Composite Flooding

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

八面河油田地处东营凹陷湖盆边缘, 总面积约 1100 平方千米, 历经 37 年勘探开发已进入高含水、高采出程度的“双高”阶段, 目前综合含水率高达 94.2%, 采出程度仅 17.3%, 远低于国内同类水驱稠油油田 28% 的平均采收率。主力含油层系为新生界古近系沙河街组, 岩性以砂岩、泥岩、灰岩及颗粒云岩为主, 原油黏度高(50℃下可达 1200~3500 mPa·s)、储层非均质性强, 导致注水过程中优势渗流通道快速形成、水窜频发, 低渗透区剩余油难以有效驱替, 每年因非均质性造成的产量损失超 1 万吨。

近年来, 国内外学者围绕水驱稠油储层非均质性开展了大量研究, 主要聚焦于单一类型储层的非均质性表征或单一工艺技术的应用[1]-[5], 存在两大局限: 一是多数研究未兼顾八面河油田砂岩与颗粒云岩混积的特殊地质条件, 对不同岩性、不同区块非均质性的差异化特征刻画不足; 二是现有调控对策多为通用性方案, 缺乏与非均质性参数的定量匹配, 针对性和有效性有限。

该油田在颗粒云岩新储层发现及非均相复合驱技术应用中取得突破, 但传统调控手段仍难以兼顾通用性与针对性。基于此, 本文结合八面河油田 22 个开发单元的生产数据、210 口井的岩心分析结果及 16 组现场试验数据, 系统分析储层非均质性特征, 建立非均质性参数与开发效果的定量关联, 构建适配不同储层类型的调控对策体系, 弥补现有研究的不足, 为老油田稳产增效及新储层高效动用提供技术支撑。

2. 八面河油田水驱稠油储层非均质性特征

2.1. 层内非均质性

层内非均质性主要体现为单砂体内部渗透率、孔隙度的纵向差异及韵律性变化, 核心影响层内注水剖面均衡性。研究表明, 八面河油田沙三段储层层内非均质性分为箱型、钟型、漏斗型、中间突变型及复合型五类, 席状砂、远砂坝、水下分流河道微相为强非均质体(渗透率变异系数 > 0.7), 河口砂坝非均质性较弱(渗透率变异系数 < 0.5), 是品质最优的储集单元[1]。

沙四段 1 砂组(滨浅湖滩坝相沉积)为例, 单砂体有效厚度 1~5 m (平均 3 m), 纵向为灰质泥岩、粉砂岩薄互层, 孔隙度 25.96%~32.9%, 渗透率平均 $293 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 主力小层渗透率变异系数达 0.87, 1 号小层物性显著差于其他小层, 导致上层水淹、下层欠注。典型井面 22-15 井该层段, 1.2~1.8 m 深度渗透率 $452 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 2.5~3.0 m 深度仅 $89 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 投产 3 个月含水率从 65% 升至 82%, 日产油从 5.3 吨降至 1.9 吨。

水下分流河道砂体层内不同韵律段渗透率差异达 40%~60%, 上部粗粒砂岩段孔隙度平均 30.2%、渗

透率 $385 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 下部细粒砂岩段孔隙度 24.7%、渗透率 $112 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (差值 3.4 倍), 高渗段优先形成优势通道, 低渗段驱替液难以波及, 层内动用程度不均衡[2]。

2.2. 层间非均质性

层间非均质性源于不同砂组、小层的沉积环境差异, 体现为岩性组合、物性及含油性的层间差异, 是层间干扰、储量动用不均的主要诱因。八面河油田沙四段厚度 200~320 m (细分为 6 个砂组), 不同砂组物性差异显著。

海滩区块沙四段 5 砂组以河口砂坝细砂岩为主(石英与长石占比 71.5%), 岩性纯净; 西区、南区沙四段 4 砂组以水下分流河道砂岩为主, 岩性混杂, 与泥质砂岩互层频繁。传统测井图版因敏感参数阈值不合理, 无法准确识别有效油层, 放大了层间非均质性影响[3]。面 14 区最具代表性, 沙四段 4 砂组孔隙度 28.3%、渗透率 $312 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 相邻 5 砂组孔隙度 17.6%、渗透率 $68 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 前者吸水强度($52 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$)是后者($12.4 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$)的 4.2 倍, 5 砂组动用程度不足 30%。

老油田长期开发形成的层间压力差, 加剧了层间非均质性影响, 未动用储量达 2395 万吨, 主要集中在面 4、面 12、面 14 区, 其中面 12 区占比 41.2%, 以低渗颗粒云岩储层为主。

2.3. 平面非均质性

平面非均质性受沉积相带展布控制, 表现为储层厚度、物性、岩性的平面不规则变化, 直接影响注水波及范围。八面河油田 6 个主力产油区中, 沙四段 1 砂组平面渗透率变异系数达 1.12, 中部核心区砂体厚度 4~5 m、孔隙度 31.2%、渗透率 $420 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 边缘区砂体厚度 1~2 m、孔隙度 26.3%、渗透率 $95 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 导致平面水驱波及系数“中部 0.72、边缘 0.35”。

面 4-2 井组表现突出, 中部面 4-2 井日产油 12 t、含水率 78%, 边缘面 4-23 井日产油仅 1.5 t、含水率 91%, 且因欠驱导致油层结蜡严重。长期水驱形成的优势渗流通道, 进一步加剧平面非均质性, 面 4 区某井组优势通道渗透率是基质的 18 倍, 水窜速度 12 m/d, 剩余油富集区面积占比 28%、储量占比 45%, 分布零散[4]。

3. 非均质性特征与调控目标的定量关联的分析

为解决非均质性特征与调控对策之间的逻辑跳跃, 基于八面河油田 22 个开发单元数据, 选取渗透率变异系数(V_k)、孔隙度变异系数(V_p)、吸水强度差异系数(V_v)作为非均质性评价核心参数, 建立其与开发效果指标(水驱波及系数 E、采收率 R、日产油递减率 D)的定量关联, 明确调控优先级及目标阈值。

定量关联结果显示: ① 层内非均质性: V_k 与 E 呈显著负相关(相关系数 $R^2=0.83$), $V_k \leq 0.6$ 时, $E \geq 0.65$, 采收率提升显著; $V_k > 0.8$ 时, $E \leq 0.45$, 需优先实施分层调控。② 层间非均质性: V_v 与 D 呈正相关($R^2=0.79$), $V_v > 3.0$ 时, $D \geq 8.5\%$, 需通过分层配注抑制层间干扰。③ 平面非均质性: V_k 与 R 呈负相关($R^2=0.81$), $V_k \leq 0.9$ 时, $R \geq 18\%$; 同时, 优势通道渗透率与基质渗透率比值 > 10 时, 水窜现象频发, 需重点实施调剖堵水[5]。

结合定量关联结论, 确定调控核心目标: 将层内 V_k 降至 0.6 以下、层间 V_v 降至 3.0 以下、平面 V_k 降至 0.9 以下, 优势通道渗透率与基质比值控制在 10 以内, 使水驱波及系数提升至 0.6 以上, 采收率提升 3 个百分点以上, 为后续针对性制定调控对策提供量化依据。

4. 水驱稠油储层非均质性调控对策

4.1. 地质精细刻画, 夯实调控基础

针对砂岩与颗粒云岩混积、岩性识别难的问题, 通过 500 余口老井测井二次解释, 筛选声波时差、

自然伽马、电阻率 3 条敏感曲线, 构建交会图模型, 建立颗粒云岩识别标准(声波时差 285~310 $\mu\text{s}/\text{m}$ 、电阻率 8~15 $\Omega\cdot\text{m}$), 识别准确率从 62%提升至 89%, 完善颗粒云岩解释评价方法。

基于微相非均质性差异, 精准刻画有利微相平面展布; 融合动态数据与地质模型, 通过序贯高斯模拟开展三维地质建模, 储层参数纵向分辨率达 0.2 m、平面分辨率达 50 m, 建模精度提升 20%, 锁定剩余油富集区, 为分层调控提供地质支撑[6]。

4.2. 工艺技术适配, 针对性改善渗流能力

结合定量关联结果, 按“一层一策、一块一策”原则匹配工艺技术。颗粒云岩储层经 160 余次室内溶蚀试验, 优选酸液体系: 面 22 区块采用盐酸, 注酸排量 8~10 m^3/h , 形成酸溶蚀孔洞; 海滩区块采用盐酸-氟硼酸复合体系, 溶蚀率提升 23% [7]。

高含水期强非均质性储层($V_k > 0.8$), 采用非均相复合驱技术。面 4 区针对“三高”问题, 研发超短疏水碳链表面活性剂, 搭配抗钙镁聚合物与黏弹性颗粒, 井组注水井压力从 8.3 MPa 升至 10.5 MPa, 6 口采油井日产油从 2.2 吨升至 8.5 吨, 含水率从 92.1%降至 86.8%。

特稠油油藏采用自扩散式高分子降黏剂(50 $^{\circ}\text{C}$ 、3.5%浓度时降黏率 97%); 薄互层储层($V_k = 0.7\sim 0.8$)采用分层酸化与选择性堵水结合工艺, 可降解纤维暂堵剂封堵率 95%, 单井日增油 1.8 吨, 含水率下降 3.1 个百分点。

4.3. 注采结构优化, 提升水驱均衡性

平面上在剩余油富集区部署新井, 纵向上优化射孔方案, 避射高水淹层位。面 4 区完钻 13 口新井, 中部剩余油富集区新井初期日产油 11.3 吨, 生产一年后仍保持 9.8 吨, 稳定性良好。

推行注水闭环管理, 全面实施分层注采。普通砂岩高含水储层($V_v = 3.0\sim 4.0$)开展聚合物驱优化, 4 口试验井注采比从 0.45 提升至 0.88, 油组日产油从 6 吨增至 22 吨; 面 14 区低渗储层($V_v > 4.0$)采用光纤与示踪剂联合监测, 注水强度从 15 m^3/d 调整至 10 m^3/d , 化学剂注入比例提高 15%, 井组综合递减率降至 4.2%。

4.4. 多专业技术协同, 保障调控效果

构建地质 - 测井 - 油藏 - 工艺多专业技术协同体系, 突破单一专业技术局限, 实现非均质性调控全流程技术适配。整合岩心分析、测井解释、数值模拟、室内试验及现场应用等技术手段, 建立非均质性参数与工艺参数的匹配模型, 实现调控方案的精准设计与动态优化。

通过多专业技术融合, 解决不同类型非均质性交叉叠加带来的调控难题, 实现地质刻画、方案设计、现场实施、效果评价的一体化技术支撑, 提升调控对策的针对性和长效性, 降低调控成本, 确保调控目标落地[8]。

4.5. 调控效果综合验证

综合调控后, 各类储层开发效果显著改善: 颗粒云岩储层采收率提升 4.2 个百分点, 单井日产油从 3.1 吨增至 6.8 吨; 非均相复合驱区块采收率提升 5.8 个百分点, 面 4 区块含水率从 91.3%降至 86.0%; 薄互层区块采收率提升 3.5 个百分点, 单井年增油超 650 吨。

经济与动态指标均达预期: 单井改造成本下降 18%, 投资回收期减少 1.2 年; 颗粒云岩储层改造单井成本下降 23 万元; 储层纵向吸水均衡系数从 0.48 升至 0.73, 平面水驱波及系数从 0.45 升至 0.62, 剩余油动用程度显著提升, 实现油田稳产。

5. 结束语

八面河油田水驱稠油储层非均质性呈现层内、层间、平面差异化特征, 沉积相展布、岩性组合及成岩作用是主要控制因素, 砂岩与颗粒云岩混积区、薄互层储层问题最突出。本文通过补充非均质性与开发效果的定量关联, 弥补了现有研究缺乏定量匹配的不足, 提出的综合调控对策, 相比传统方案更具针对性。

长周期监测表明, 高含水期储层非均质性呈“强更强、弱更弱”演化特点, 高渗层渗透率提升 15%~20%, 低渗层下降 8%~12%。后期需加强非均质性动态演化研究, 引入人工智能、大数据技术构建动态模型, 完善低成本长效控水工艺, 扩大非均相复合驱应用范围, 支撑油田长稳生产。目前 14 区动态模型试验已取得初步成效, 后续将逐步推广。

参考文献

- [1] 左丝雨. 八面河油田排砂工艺适应性研究[J]. 江汉石油职工大学学报, 2025, 51(2): 368-376.
- [2] 曹绪龙, 束青林, 张世明, 等. 非均相复合驱提高采收率技术研究与应用[J]. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院, 2022, 42(1): 78-84.
- [3] 方丽. 八面河油田面 22 区沙四段 4-6 砂组滚动勘探潜力研究[J]. 江汉石油职工大学学报, 2023, 48(3): 291-297.
- [4] 胡心玲, 吴华, 高中臣, 等. 近源浅水三角洲沉积特征及沉积模式研究——以八面河油田沙三上亚段 5 砂组为例[J]. 海洋地质前沿, 2025, 45(5): 621-627.
- [5] 俞洋, 付琳, 张士豪. 热化学复合驱动在稠油开采中的应用分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 32(2): 145-151.
- [6] Liu, P.L., Wang, Z.X., Chen, X., Du, J., *et al.* (2026) Study on the Influence of Mineral Heterogeneity and Temperature on Acid-Rock Reaction Behavior in Mixed Sedimentary Reservoirs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **260**, Article 128485. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2026.128485>
- [7] Zheng, T.Y., Wen, J.J., Zhao, L., Zeng, X., *et al.* (2026) Reservoir Heterogeneity between Intra-Platform and Platform-Margin Settings in an Isolated Carbonate Platform: A Case Study from the Carboniferous, Pre-Caspian Basin. *Frontiers in Earth Science*, **13**, Article 1744762. <https://doi.org/10.3389/feart.2025.1744762>
- [8] Room, S.A.E., Zhang, L., Yan, Y., Ahmad, W., Nota, P.J. and Khan, A. (2025) Orbital-Scale Climate Control on Facies Architecture and Reservoir Heterogeneity: Evidence from the Eocene Fourth Member of the Shahejie Formation, Bonan Depression, China. *Minerals*, **16**, Article 48. <https://doi.org/10.3390/min16010048>