

致密砂岩气藏孔隙分形特征与动态水锁损害关系研究

黎涛^{1*}, 沈晓燕², 张昶³, 史恺翌¹, 杨林川¹

¹重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

²中国石油西南油气田分公司川西北气矿, 四川 绵阳

³大庆油田勘探开发研究院采收率研究一室, 黑龙江 大庆

收稿日期: 2025年7月2日; 录用日期: 2025年8月27日; 发布日期: 2025年9月11日

摘要

鄂尔多斯盆地南部某区块的致密砂岩气藏, 其上古生界石盒子组地层孔渗低、泥质含量高、孔喉半径小导致水锁伤害严重, 严重制约其气藏开发效率。因此, 本文以鄂南某区块盒一段致密砂岩为对象, 结合低场核磁共振(NMR)及分形理论, 系统表征孔隙结构非均质性, 揭示孔隙结构特征与水锁伤害的关系。结果表明, 研究区块岩心的整体平均分形维数为2.354, 小孔段不具备分形特征, 中孔与大孔的平均分形维数分别为2.546、2.799, 且与水锁损害率呈显著正相关, 其孔隙结构复杂性通过增强毛细管力与液相滞留主导水锁效应。本研究提出以中孔分形维数为主要的致密砂岩气藏的水锁风险主要评价指标, 为致密砂岩气藏高效开发提供理论支撑。

关键词

致密砂岩, 水锁伤害, 低场核磁, 液相滞留, 分形维数

Research on the Relationship between Pore Fractal Characteristics and Dynamic Water Lock Damage in Tight Sandstone Gas Reservoirs

Tao Li^{1*}, Xiaoyan Shen², Chang Zhang³, Kaiyi Shi¹, Linchuan Yang¹

¹School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

²Northwest Sichuan Gas Mine, Southwest Oil & Gas Field Branch of Petroc China, Mianyang Sichuan

³Research Room 1 of Recovery Rate, Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield, Daqing Heilongjiang

*通讯作者。

文章引用: 黎涛, 沈晓燕, 张昶, 史恺翌, 杨林川. 致密砂岩气藏孔隙分形特征与动态水锁损害关系研究[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(3): 375-382. DOI: 10.12677/jogt.2025.473042

Abstract

In the tight sandstone gas reservoir of a certain block in the southern part of the Ordos Basin, the Upper Paleozoic Shihezi Formation has low porosity and permeability, high clay content and small pore throat radius, which leads to severe water lock damage and seriously restricts the development efficiency of the gas reservoir. Therefore, this paper takes the tight sandstone of the Boxi 1st Member in a certain block in the southern Ordos Basin as the object, optimizes the efficient water lock release agent, and combines low-field nuclear magnetic resonance (NMR) and fractal theory to systematically characterize the heterogeneity of pore structure and reveal the relationship between pore structure characteristics and water lock damage. The results show that the overall average fractal dimension of the core in the study block is 2.354. The small pore segment does not have fractal characteristics, and the average fractal dimensions of the medium and large pores are 2.546 and 2.799, respectively, and are significantly positively correlated with the water lock damage rate. The complexity of the pore structure enhances the capillary force and liquid phase retention, which dominates the water lock effect. This study proposes the average fractal dimension of medium pores as the main evaluation index of water lock risk in tight sandstone gas reservoirs, providing theoretical support for the efficient development of tight sandstone gas reservoirs.

Keywords

Tight Sandstone, Water Lock Damage, Low-Field Magnetic Resonance Imaging, Liquid Phase Retention, Fractal Dimension

Copyright © 2025 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

致密砂岩气藏作为全球非常规能源的重要组成部分, 目前已经成为国内外油气资源的主力勘探开发阵地, 但其开发效率受限于复杂孔隙结构及储层极强的非均质性导致压裂开发过程中一系列储层伤害, 包括水敏、水锁、速敏、高分子吸附伤害等, 其中水锁伤害是致密砂岩气藏最常见也是最主要的伤害类型。一般来说, 一旦发生水锁, 致密气井产能会降低 30%~70% [1]。水锁效应的本质是外来流体侵入储层后滞留于孔隙中, 通过毛细管力阻碍气相渗流, 而孔隙结构的非均质性进一步加剧了液相滞留[2]。目前对于致密气藏水锁伤害的研究多聚焦于储层的宏观物性, 如渗透率、孔隙度、黏土矿物等因素的影响, 但对岩心本身的孔隙结构对水锁伤害的影响机制仍缺乏系统性分析。近年来, 分形理论通过量化孔隙表面粗糙度与结构复杂性, 逐渐成为了表征储层非均质性的重要手段[3][4]。有学者发现分形维数与水锁伤害率呈正相关, 但未区分不同孔隙尺度的分形特征对水锁的差异性贡献[5]。此外, 传统表征技术, 如扫描电镜、CT 扫描受限于使用条件和动态分析能力, 难以揭示孔隙结构在渗流过程中的影响机制[6]。低场核磁共振技术作为一种常用的孔隙表征手段, 虽能无损分析孔隙结构与液相分布情况, 但采用分形模型在致密气藏水锁相关应用研究较少[7]-[9]。

针对致密砂岩气藏孔隙结构非均质性与水锁伤害的关系的研究不够全面, 本文以鄂尔多斯某区块一段致密砂岩岩心为研究对象, 结合低场核磁共振技术与其对应的分形模型, 阐明不同尺度的孔隙结构分形特征对水锁伤害的主控因素, 旨在为优化储层改造工艺提供理论依据。

2. 实验材料与方法

2.1. 实验材料

选取鄂尔多斯盆地某区块上古生界石盒子组的 5 块致密砂岩岩心作为研究对象。基本物性参数见表 1, 根据气藏现场地层水配制模拟地层水, 水型为氯化钙(苏林分类)型, 矿化度约 3.39×10^4 mg/L, pH 约 6.0, 实验所用所有水溶液均以此模拟水配制。

Table 1. Basic physical properties table of core

表 1. 岩心基本物性表

岩心编号	渗透率/mD	孔隙度/%	长度/mm
1	0.215	5.524	40.47
2	0.789	8.766	45.36
3	1.14	13.321	52.78
4	1.124	14.4	60.01
5	5.56	15.276	52.22

2.2. 实验方法

2.2.1. 低场核磁共振实验

参照国家标准 GB/T 42035-2022《煤和岩石孔径分布的测定: 核磁共振法》、SY/T 6490-2000《岩样核磁共振参数实验室测量规范》。将岩心在 105℃干燥 24 h 取出, 待其冷却至室温后, 在 30 MPa 下真空饱和模拟地层水 24 h, 待岩心完全饱和, 将其放入特制的聚四氟乙烯管中, 采用低场核磁共振测得岩心的饱和 T_2 谱。

核磁共振实验采用苏州纽迈分析仪器公司的 MacroMR12-150-1 型高精度低场核磁共振分析仪, 以下实验使用的低场核磁测定条件均为: 序列名称: Q-CPMG, 采样频率: 333.333 kHz, 主频: 12 Hz, 射频延时: 0.002 ms, 增益: 3, 等待时间: 4000 ms, 数据半径: 1, 累加次数: 64, 回波时间: 0.15 ms, 回波个数: 5000。

2.2.2. 岩心水锁与模拟解除实验

参照行业标准 Q/SY16832-2020《致密气储层水锁伤害评价方法》, 对岩心进行水锁伤害评价进行水锁损害测试, 计算水锁损害程度同时通过核磁进行液相滞留程度分析。

3. 实验结果与分析

3.1. 基于低场核磁孔隙结构表征

3.1.1. 核磁 T_2 谱

本文以岩石内部水流动状态的差异为标准[10], 按照弛豫时间 3 ms 和 33 ms 将孔隙划分为小孔(束缚水)、中孔(毛细管水)和大孔(自由水), 对其不同尺度的孔隙进行研究。

根据实验结果图 1 可知, 岩心的 T_2 谱形态呈单峰或双峰分布, 弛豫时间从 0.05~2213 ms 范围内皆有分布, 范围较广, 说明岩心内部不同尺度的孔喉均有发育, 非均质性较强, 但 T_2 谱均没有明显断点, 表明岩心孔喉的连通性较好, 液相返排相对容易。

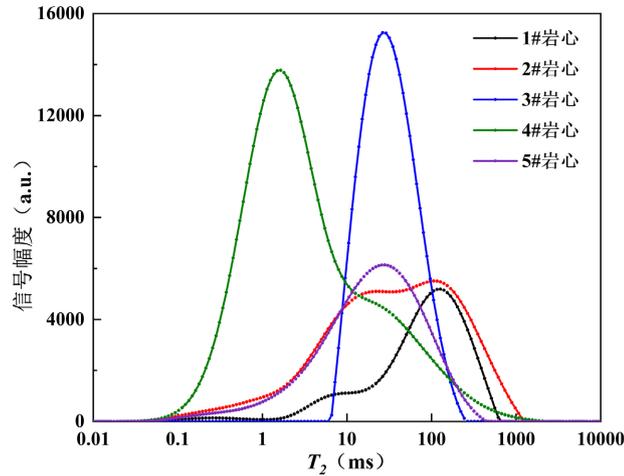


Figure 1. Core nuclear magnetic resonance T_2 spectrum
图 1. 岩心核磁 T_2 谱

3.1.2. 孔隙分形维数计算

根据岩心的饱和 T_2 谱曲线，绘制不同岩样的 $\lg S_v$ - $\lg T_2$ 双对数曲线，根据前人研究，储层岩石内部的孔隙结构一般具有多重分形特征，因此对双对数曲线按 T_2 弛豫时间的不同，小孔(<3 ms)、中孔(3~33 ms)、大孔(>33 ms)进行分段拟合，更加精确地描述致密砂岩的非均质性，公式如下：

$$\lg S_v = (3 - D) \lg T_2 + (D - 3) \lg T_{2\max} \quad (1)$$

式 1 中：

- D 为分形维数；
- S_v 为核磁累积信号；
- T_2 为横向弛豫时间；
- $T_{2\max}$ 为最大横向弛豫时间。

若岩石内部孔隙结构存在分形特征[11]，则 $\lg S_v$ 与 $\lg T_2$ 存在线性关系，根据 $\lg S_v$ 与 $\lg T_2$ 双对数曲线图中斜率计算分形维数 D ，假设斜率为 k ，则： $D = 3 - k$ ，见图 2。

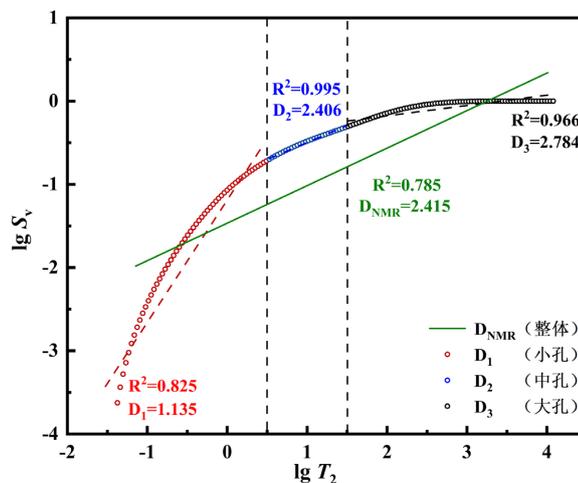


Figure 2. Nuclear magnetic resonance fractal dimension
图 2. 核磁分形维数

一般来说,分形维数的值与孔隙结构之间存在一定的关系,一般来说,岩心的分形维数介于 2~3 之间,分形维数越接近 2,说明孔隙光滑结构较为简单;分形值越靠近 3,则孔隙越复杂,潜在液相滞留风险越高。结果显示,核磁整体分形维数在 2.108~2.602 之间,平均为 2.354,中孔分形维数在 2.406~2.830 之间,平均 2.546,大孔分形维数在 2.521~2.973 之间,平均 2.799,然而小孔分形维数普遍小于 2,在孔径范围内不具有分形的意义,其中,根据 3 号岩心的核磁 T_2 谱可知,该岩心在小孔弛豫区间(<3 ms)内不存在核磁信号,故分形维数也不存在。因此,本文主要以整体孔喉与中孔、大孔段的分形维数作为评价储层微观结构复杂性与水锁伤害关联的主控因素,见表 2。

Table 2. Fractal dimensions of different holes and throats
表 2. 不同孔喉分形维数

岩心编号	整体孔喉		小孔		中孔		大孔	
	D_{NMR}	R^2	D_1	R^2	D_2	R^2	D_3	R^2
1	2.602	0.802	1.653	0.799	2.830	0.997	2.960	0.988
2	2.415	0.785	1.135	0.825	2.406	0.995	2.784	0.966
3	2.108	0.864	/	/	2.647	0.964	2.973	0.977
4	2.234	0.811	0.097	0.839	2.417	0.985	2.755	0.969
5	2.413	0.753	1.456	0.890	2.429	0.986	2.521	0.985

3.2. 水锁伤害实验分析

对于致密砂岩气藏来说,水锁损害的本质是由于外来水相占据了岩石内部不同的渗流空间,且滞留于岩心孔隙中难以返排,导致气相渗流能力降低,通过低场核磁 T_2 谱能够精确量化发生水锁及解水锁剂作用后岩心中的液相返排情况,见图 3。

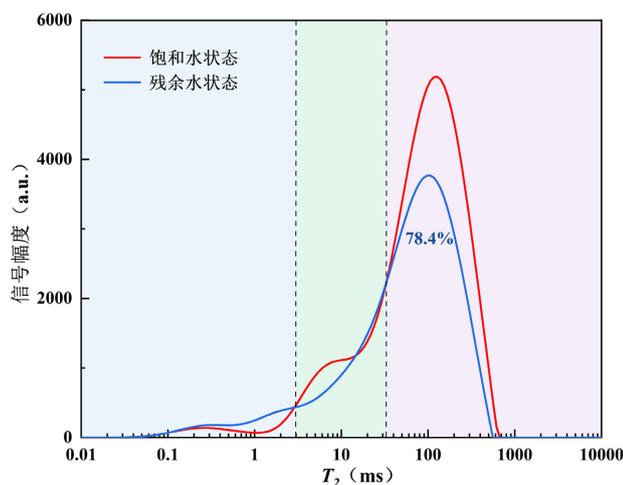


Figure 3. Shows the liquid-phase reflux situation of gas drive
图 3. 气驱液相返排情况

3.2.1. 孔隙液相滞留分析

对于致密砂岩气藏来说,水锁损害的本质是由于外来水相占据了岩石内部不同的渗流空间,且滞留

于岩心孔隙中难以返排, 导致气相渗流能力降低, 通过低场核磁 T_2 谱能够精确量化发生水锁及解水锁剂作用后岩心中的液相返排情况, 下表 3 为 5 块岩心气驱后的液相滞留程度。

Table 3. Degree of retention of water-locked liquid phase
表 3. 水锁液相滞留程度

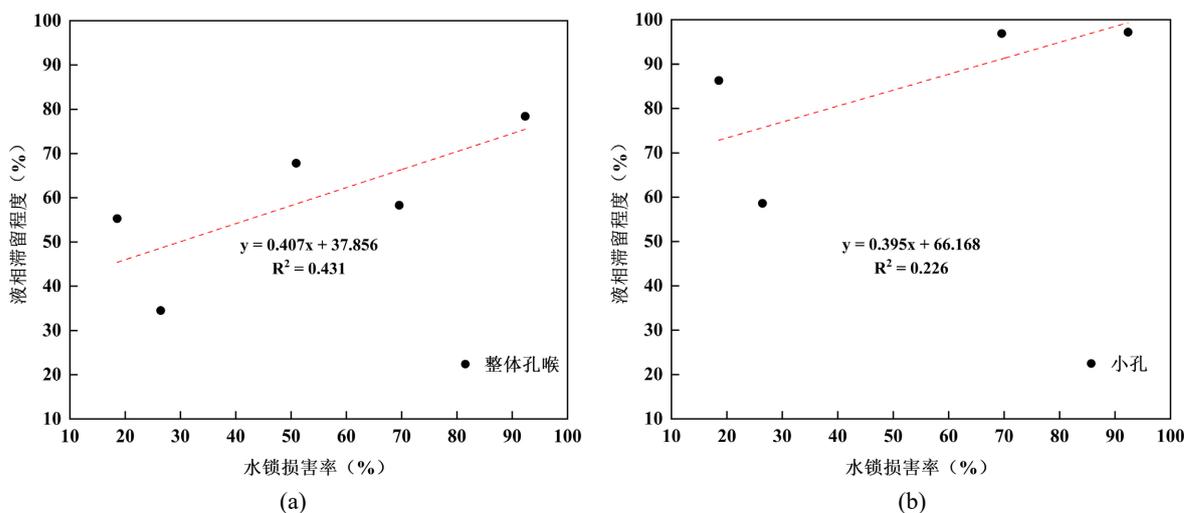
岩心编号	整体	小孔	中孔	大孔	水锁损害率
1	78.4	97.2	99.3	75.8	92.36%
2	58.3	96.9	86.1	46.7	69.56%
3	67.8	/	84.2	54.5	50.93%
4	55.3	86.3	35.2	17.4	18.55%
5	34.5	58.6	26.9	18.5	26.43%

整体孔隙的液相滞留程度在 34.5~78.4% 之间, 平均 58.9%; 小孔液相滞留在 58.6~97.2% 之间, 平均 84.8%; 中孔液相滞留在 26.9~99.3% 之间, 平均 66.3%; 大孔在 18.5~75.8% 之间, 平均 42.6%, 整体来看小孔的液相滞留程度相对较大, 中孔次之大孔最小, 因为小孔一般为束缚水所占据, 同时有可能吸附于岩石矿物颗粒表面形成水膜, 难以返排, 中孔为过渡孔段, 但也因较高的毛细管力作用, 液相滞留其中无法流动, 大孔中一般为可动流体, 相较于小孔和中孔容易返排。

进一步回归分析显示, 见图 4, 水锁损害程度与不同孔喉的液相滞留比例均呈正相关关系, 其中整体孔喉、小孔液相滞留与水锁损害率拟合结果不佳, R^2 仅为 0.431、0.226, 相较而言, 中孔和大孔与水锁损害率的相关性较强, R^2 分别为 0.845 和 0.866, 表明致密砂岩气藏的水锁损害程度主要由中孔和大孔的液相滞留比例决定。

3.2.2. 水锁与孔喉分形维数相关性

不同的岩心之间水锁伤害有所差异, 在宏观上, 这与岩心本身的物性有关, 在微观上, 则与岩心的孔隙结构有关, 水相在储层孔隙空间的分布受到孔隙结构的控制, 而分形维数是孔隙结构的综合反映, 因此认为分形维数作为水锁损害的主要影响因素, 为全面揭示致密砂岩气藏岩心的水锁损害与分形维数的关系, 由低场核磁所得到的分形维数进一步分析致密砂岩水锁损害与其孔隙结构的关系, 见图 5。



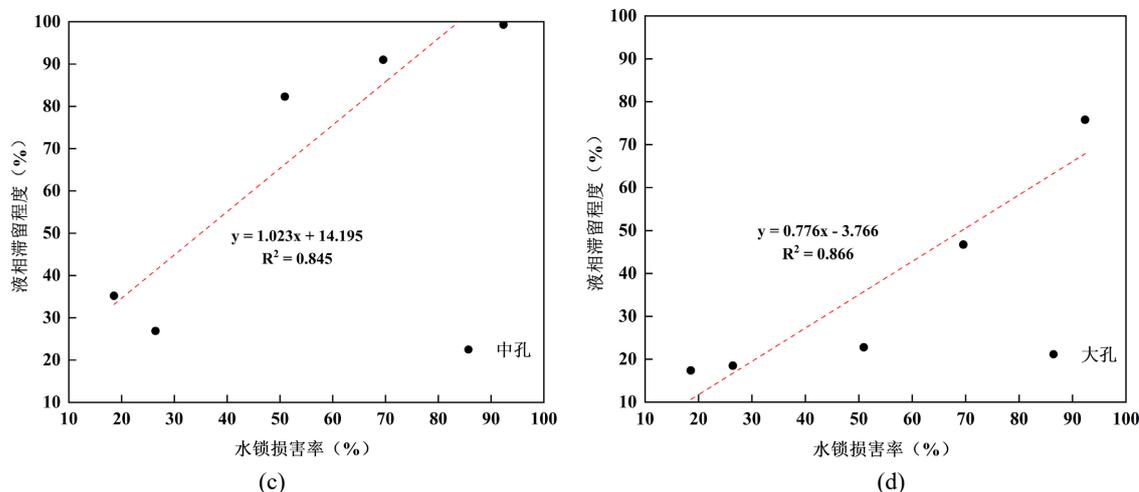


Figure 4. Relationship between liquid retention in different pore throats and water lock damage rate. (a) Integral hole throat; (b) Small hole; (c) Middle hole; (d) Large holes

图 4. 不同孔喉液相滞留与水锁损害率关系。(a) 整体孔喉; (b) 小孔; (c) 中孔; (d) 大孔

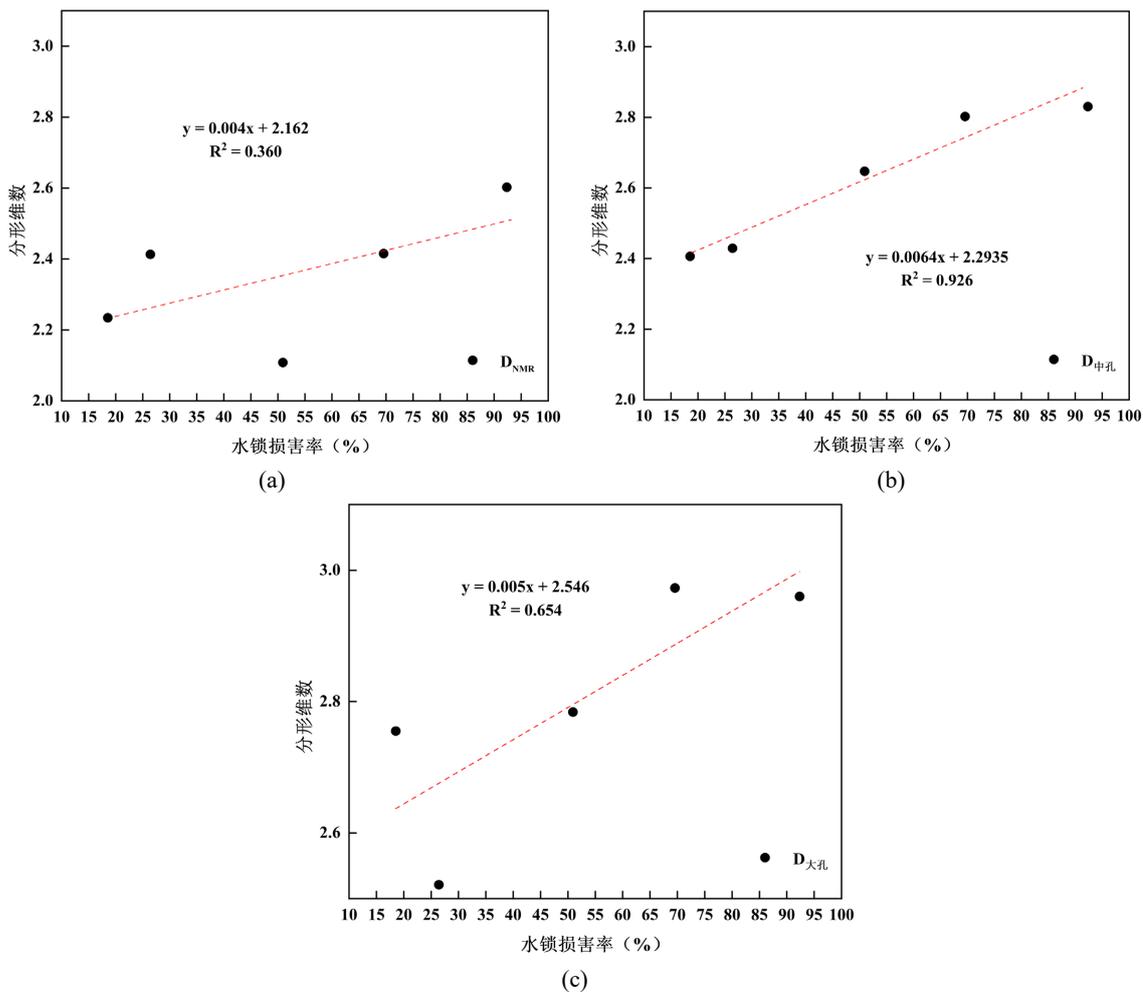


Figure 5. Relationship between the fractal dimensions of different orifice throats and the damage rate of water locks. (a) Integral hole throat; (b) Middle hole; (c) Large holes

图 5. 不同孔喉分形维数与水锁损害率关系。(a) 整体孔喉; (b) 中孔; (c) 大孔

发现中孔段分形维数 D 中孔与水锁损害率呈高度正相关($R^2 = 0.926$), 大孔次之, 整体分形维数相关性较弱。分析认为, 中孔结构越复杂, 毛细管束缚效应越强, 液体返排难度增加; 而大孔虽具较好返排通道功能, 但当其结构复杂性增大时亦易发生水膜形成与聚集滞留。因此, 认为储层中尺度孔喉结构的分形特征是控制水锁损害的核心指标。

4. 结论

(1) 研究区块核磁整体分形维数在 2.108~2.602 之间, 中孔在 2.406~2.830 之间, 大孔在 2.521~2.973 之间, 储层非均质性较强, 小孔分形维数普遍小于 2, 在孔径范围内不具有分形的意义。

(2) 小孔的水锁液相滞留程度相对较大, 中孔次之大孔最小中孔与大孔段, 小孔虽占据大量体积, 但因主要储存束缚水, 对渗流影响有限, 致密砂岩气藏的水锁损害程度主要由中孔和大孔的液相滞留比例决定。

(3) 中孔和大孔段的分形维数与水锁损害呈显著正相关, 整体分形则与水锁损害相关性较弱, 其中, 中孔的分形特征是控制水锁损害的核心参数。

参考文献

- [1] Wang, J., Zhou, F., Zhang, L., Xue, Y., Yao, E., Li, Y., *et al.* (2019) Study on Reason Analysis and Removal Solution on Water Locking Damage in Tight Sandstone Reservoirs. *Journal of Dispersion Science and Technology*, **41**, 1849-1858. <https://doi.org/10.1080/01932691.2019.1637754>
- [2] 张红, 李年银, 余金柱, 等. 一种基于桐油衍生物的复合清洁解水锁体系研究[J]. 石油与天然气化工, 2025, 51(2): 1-16.
- [3] 蒲万芬, 侯帅, 沈超, 等. 低渗透砂岩储层解水锁剂优选及效果评价——以鄂尔多斯盆地 X 气田为例[J]. 大庆石油地质与开发, 2025, 44(2): 50-57.
- [4] 孙妩娟, 杨欢, 杨志成, 等. 苏里格气田低渗储层解水锁剂的制备及性能评价[J]. 石油化工, 2024, 53(6): 878-883.
- [5] 王锦昌, 杨易骏. 大牛地气田老井水锁伤害及解除技术研究[J]. 石油工业技术监督, 2024, 40(5): 53-59.
- [6] 屈治华. 低渗气藏反凝析污染及水锁伤害解除技术研究[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2024.
- [7] 马云, 张欣瑜, 何顺安, 等. 解水锁剂的研究现状及展望[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(9): 3489-3498.
- [8] 吴轶君, 董星言, 郑兴升, 等. 苏里格桃 X 区块气藏储层的解水锁剂研究[J]. 石油与天然气化工, 2022, 51(4): 89-94.
- [9] 柯从玉, 魏颖琳, 张群正, 等. 低渗透气藏水锁伤害及解水锁技术研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(6): 1613-1617, 1621.
- [10] Zheng, S., Wang, R., Shou, Q., Zhao, J. and Zhang, Y. (2025) Analysis of Atmospheric Water Locks and Water Lock Solutions in Tight Sandstone Gas Reservoirs in the Ordos Basin. *Journal of Physics: Conference Series*, **2962**, Article ID: 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2962/1/012002>
- [11] 王文通, 郭沙, 李治兴, 等. 基于核磁共振技术的砂岩孔隙结构冻融损伤演化规律试验研究[J]. 黄金科学技术, 2025, 33(1): 114-126.