

基于矿物组分的水平井岩石可钻性级值预测

王伟*, 李猛#, 魏健, 曾治友, 邹文彬, 王亮, 黄昱昊

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年3月11日; 录用日期: 2024年3月31日; 发布日期: 2024年4月23日

摘要

都沃内油田深部储层以页岩为主, 页岩具有明显的层理构造, 具有高地层压力、高岩石硬度、强各向异性的特点, 导致沿着水平方向钻进过程中储层可钻性差。针对以上问题, 为了方便、准确地预测都沃内油田储层段的可钻性, 本文在室内实验的基础上, 首先, 通过扫描电镜和X射线能谱仪得到该区块井的矿物组分和矿物含量, 其次为了减少可钻性级值方程的建模参数, 降低计算维度, 故将矿物组分归类为砂质、泥质、钙质并分别将其作为单参数分析与岩石可钻性的关系, 最后建立砂质、泥质、钙质与可钻性级值的多元非线性回归预测模型, 其相关性在0.9以上, 预测效果精准。依据此模型方法填补了技术空白, 完善了页岩储层横向可钻性预测理论, 为高效开发页岩油气藏钻头选型和优化钻井设计提供依据。

关键词

都沃内油田, 页岩, 多元非线性回归, 矿物组分, 横向可钻性预测

Prediction of Drillability Level of Horizontal Rock Based on Mineral Composition

Wei Wang*, Meng Li#, Jian Wei, Zhiyou Zeng, Wenbin Zou, Liang Wang, Yuhao Huang

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Mar. 11th, 2024; accepted: Mar. 31st, 2024; published: Apr. 23rd, 2024

Abstract

In the deep reservoirs of the Duvernay Oilfield, shale predominates and exhibits distinct bedding structures characterized by high formation pressure, rock hardness, and strong anisotropy. These properties contribute to poor drilling conditions along the horizontal axis. To address these chal-

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王伟, 李猛, 魏健, 曾治友, 邹文彬, 王亮, 黄昱昊. 基于矿物组分的水平井岩石可钻性级值预测[J]. 矿山工程, 2024, 12(2): 164-172. DOI: 10.12677/me.2024.122019

allenges and facilitate accurate prediction of drilling viability in the Duvernay Oilfield, this study employs a methodological approach. Firstly, based on laboratory experiments, we utilize scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) to analyze the mineral composition and content of the wells in the area. This helps us simplify the modeling process and decrease computational complexity, mineral components are categorized into sandy, clayey, and calcareous fractions. Each fraction is then analyzed individually to establish its relationship with drilling viability. Finally, a multi-dimensional nonlinear regression prediction model is developed to correlate sandy, clayey, and calcareous fractions with drilling viability, achieving a correlation coefficient of above 0.9 and ensuring precise predictive accuracy. This methodological approach fills a technological gap, enhances the lateral drilling viability prediction theory for shale reservoirs, and provides a basis for efficient drilling tool Selection and optimization of drilling designs for shale oil and gas reservoir development.

Keywords

Duvernay Oilfield, Shale, Multivariate Nonlinear Regression, Mineral Composition, Lateral Drilling Viability Prediction

Copyright © 2024 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

在石油钻井领域，如何有效地破碎岩石一直是全球石油行业专家们不懈探索和努力解决的挑战。目前地层可钻性级值建模主要分为以下三种。实验法：在室内进行实验，在进行岩石可钻性评估时，可以通过测定岩芯的物理力学性质来进行分析。这些性质可以是单一的或多种，用于表征岩石的可钻性水平。统计分析方法：通过对钻井过程中记录的数据进行统计分析，建立钻速方程，然后利用这个方程来反推岩石的可钻性。岩屑分型特征法：利用岩屑的分形特征来计算岩石的可钻，这种方法通过分析岩屑的几何形状和结构特征来评估岩石的可钻性水平。

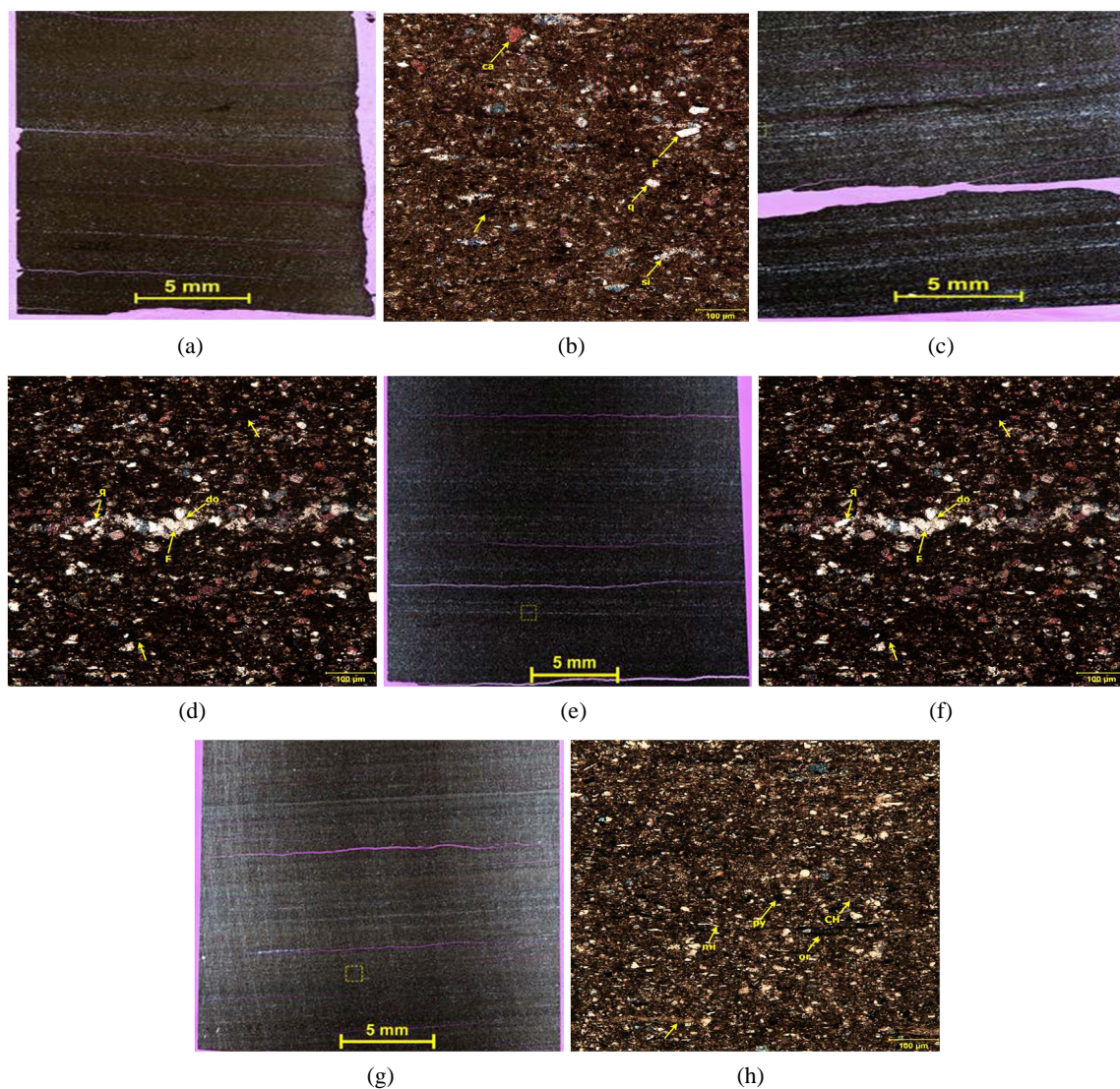
对于第一种评价方法，采样取芯是一个关键步骤，但这一过程通常需要大量时间和精力，并非所有的钻孔都具备取芯的必要条件，而且在实际操作中，取芯的成本很高。同时，在室内进行试验时，由于只能使用有限数量的岩芯样本，这也限制了实验的规模和可行性。对于第二种评价方法，在探井钻进时，如果是在新区块进行钻探，往往缺乏邻井的相关资料，即使可以获取邻井的数据，也难以实时计算出岩石的可钻性级值。钻进过程中所遇到的地层性质也可能发生变化，这会影响到钻头的选择和匹配，从而降低钻进的效率和质量。在第三种评价方法中，岩屑的返回需要一定的时间，无法实时反映地层的岩性，而且，随着钻探深度的增加，岩屑返回所需的时间也会相应增加，这导致了岩屑深度的不确定性增加，使得难以准确预测地层的性质。

以上方法虽然满足了大多数直井段储层井的可钻性级值的预测，但是对于水平井储层段可钻性级值无法预测。因此，本文首先以室内实验为基础，其次通过扫描电镜和 X 射线能谱仪分析了储层矿物含量中砂质、泥质、钙质各个单因素与水平井储层可钻性级值之间的关系式，随后通过矿物含量建立了砂质、泥质、钙质与水平井可钻性级值的非线性多元回归方程，最后通过 D1、D2 两口井的可钻性级值实验数据验证模型的精准度，确定该模型的适用性，为后续的钻头选型和优化钻井参数提供了理论模型。

2. 页岩储层基本物性特征

2.1. 都沃内区块页岩矿物组分分布

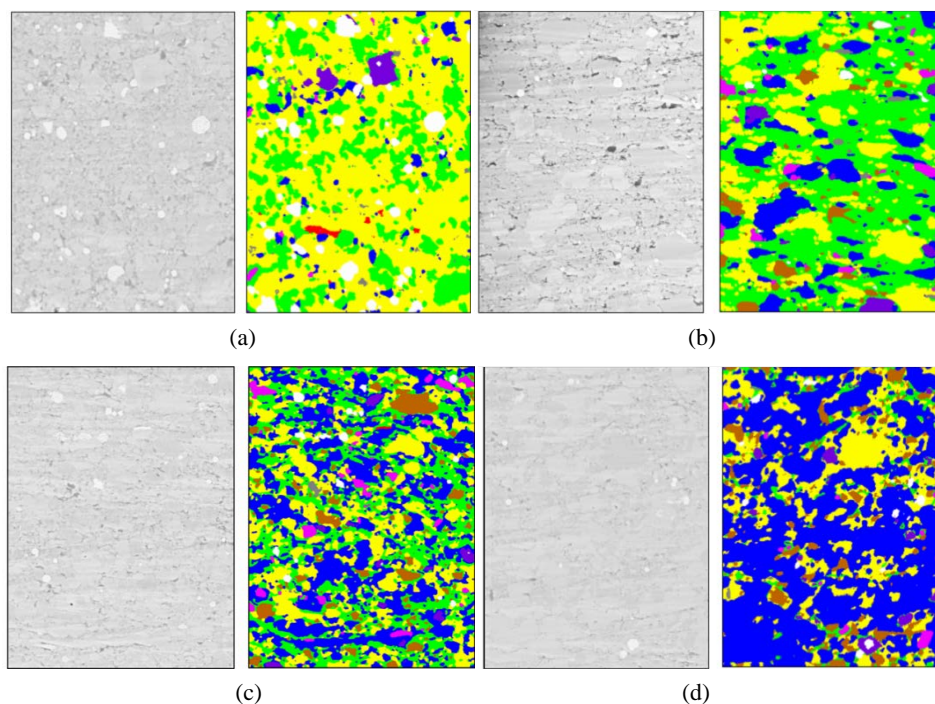
页岩具有矿物组分复杂、非均质性和纳米级孔隙的特点。传统矿物成分表征方法往往具有局限性，如岩石薄片鉴定方法难以进行定量分析，元素分析方法计算矿物含量时存在较大误差[1] [2]。利用高分辨率的扫描电镜(SEM)，可以直观地观察页岩气储层的表面形貌特征和矿物组成。结合 X 射线能谱仪(EDS)，可以进行定量或半定量的成分分析。这种方法在识别矿物组成方面发挥着至关重要的作用[3]。本文开展了加拿大都沃内页岩 4 种主要类型矿物分布进行了分析(图 1、图 2)。根据扫描电镜得出的结果，都沃内页岩的主要矿物组成包括石英、钾长石、斜长石和粘土等。



注：a-厚层浅棕色粉砂质页岩；b-粉砂级方解石、石英、长石矿物颗粒呈悬浮状于粘土级基质中；c-暗色富含有机质与浅色富硅薄互层；d-浅色纹层由碎屑石英和长石颗粒组成，颗粒边缘存在白云石胶结物；e-暗色厚层粉砂质页岩；f-粉砂级石英、长石为主，颗粒边缘发生方解石和白云石胶结；g-浅棕色富含有机质纹层页岩；h-粘土级矿物颗粒为主，含大量黄铁矿、白云石、有机质和云母颗粒。

Figure 1. Shale core slice and microscopic identification

图 1. 页岩岩心薄片和镜下鉴定



注：a-富石英的页岩；b-富粘土矿物的页岩；c-三种矿物均匀分布的页岩；d-富方解石的页岩。

Figure 2. Distribution characteristics of simple shale minerals

图 2. 页岩矿物分布特征

2.2. 页岩矿物含量测定

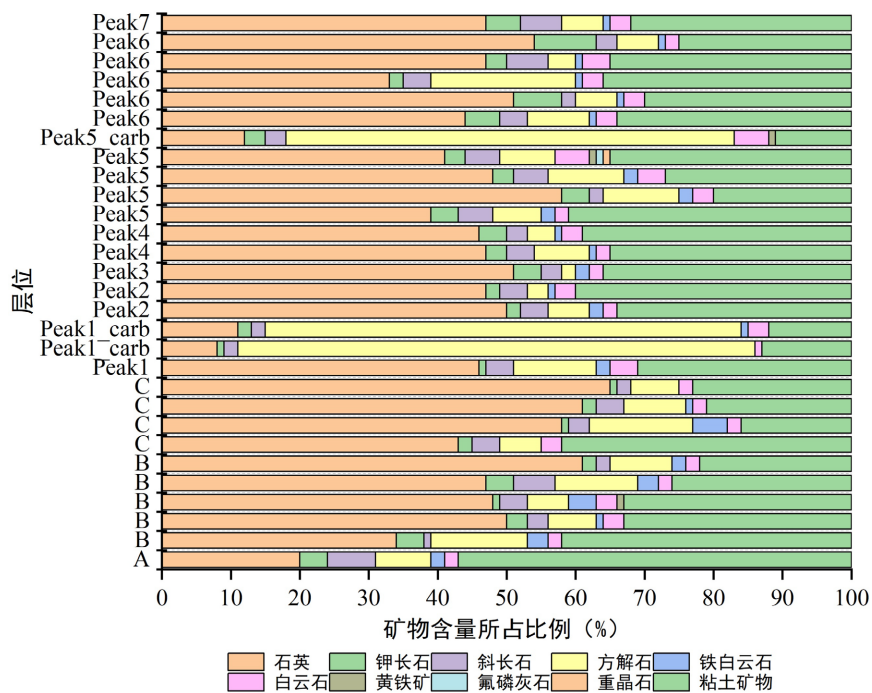


Figure 3. Distribution of mineral components in the Duvernay shale reservoir in Canada

图 3. 加拿大都沃内页岩储层矿物组分含量分布

本文选择 XRD 分析法(X 射线衍射全岩分析技术)对四组岩石的 18 个样品进行矿物含量测试。X 射线衍射分析法在矿物含量定量分析上较为成熟, 目前已成功应用于页岩样品的孔隙结构和矿物组成 [4]-[11]。

根据图 3, 都沃内页岩主要由石英、长石、方解石和粘土矿物等组成, 这些矿物的总含量超过 90%。以石英为例, 它在都沃内页岩中的含量接近 50%, 粘土约占 30%, 方解石大约占 10%, 而重晶石、白云石、黄铁矿等矿物的含量仅在 0%~3%之间。为了减少可钻性级值方程的建模参数, 降低计算维度, 故将上述矿物组分归类为砂质、泥质、钙质等, 如表 1 所示。将砂质、泥质、钙质等参数作为单参数, 并通过分析岩石的可钻性级值与单个参数之间的关系, 可以得到岩石可钻性与这些单参数之间的函数形式。这为进一步拟合岩石可钻性的多元函数提供了基础。

Table 1. Relationship between equivalent mineral content and rock drillability

表 1. 等效矿物含量与岩石可钻性的关系表

砂质%	泥质%	钙质%	岩石可钻性
51	36	13	4.70
69	26	5	4.82
63	28	9	4.94
59	24	16	5.06
64	25	11	5.18
65	24	11	5.30
56	35	8	5.42
52	42	6	5.47
80	12	6	5.39
80	12	8	5.31
66	28	5	5.23
67	27	5	5.28
70	22	9	5.40
65	28	7	5.53
66	28	5	5.65
68	24	8	5.78
65	27	7	5.85
55	31	12	5.82

根据表 1 微钻实验所得的岩石可钻性数据以及相对应岩石的砂质含量、泥质含量、钙质含量结果, 对岩石可钻性级值进行非线性拟合, 从而获得岩石可钻性级值分别与砂质、泥质、钙质含量的关系式:

$$k_d = 4.003e^{0.0091s_c} \quad (1)$$

$$k_d = 17.34a_c - 0.29 \quad (2)$$

$$k_d = 10.982c_c - 0.24 \quad (3)$$

式中, k_d 为岩石可钻性级值, 无量纲; s_c 为砂质含量; a_c 为泥质含量; c_c 为钙质含量。

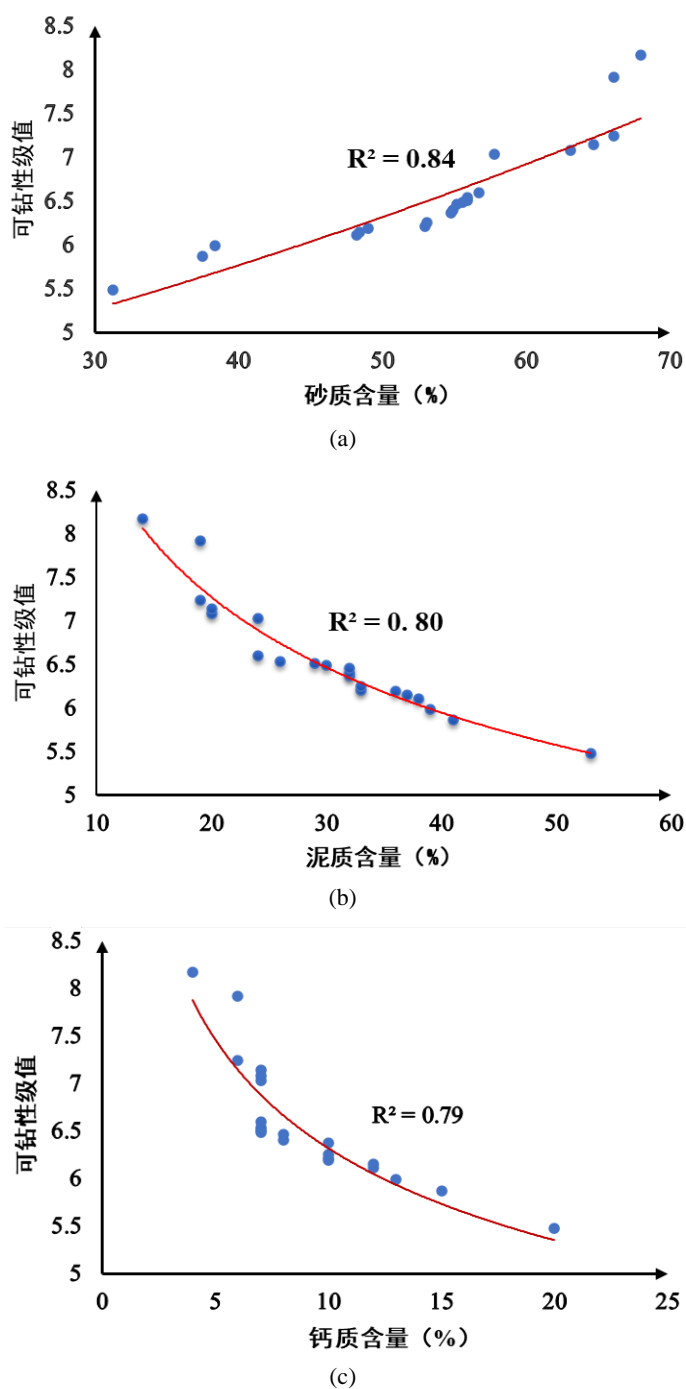


Figure 4. Correlation between drillability grade of shale and mineral content
图 4. 页岩可钻性级值与矿物含量相关关系

由于原始数据离散性较强，拟合残差较大，但整体分布属于上述指数型分布，如图 4 所示，砂质含量、泥质含量、钙质含量拟合相关度分别为 0.84、0.80、0.79 能够基本表现可钻性关系趋势，但是不够精准。采用检验法对式(1) (2) (3)进行回归显著性检验，检测结果表明，回归效果较显著，其中矿物含量中砂质含量影响可钻性级值较大，泥质含量和钙质含量影响一般，可以考虑砂质含量作为主要评价因素，泥质含量和钙质含量作为次要评价因素。

3. 页岩储层可钻性级值预测模型

石油钻井中钻遇的地层复杂多样，考虑到页岩可钻性受多种因素影响，采用多因素岩石力学参数法建立了页岩地层水平井储层可钻性预测模型。

在前人的研究基础上[12]假设页岩水平井储层可钻性预测模型为：

$$K_d = ke^{bs_c} a_c^c c_c^f \tag{4}$$

式中： b ， c ， f 和 k 为系数； k_d 为岩石可钻性级值，无量纲； S_c 为砂纸含量； a_c 为泥质含量； c_c 为钙质含量。

结合钙质页岩、铁质页岩、硅质页岩、碳质页岩、黑色页岩等十种不同页岩可钻性级值测试结果和表1中的矿物组分成分及含量、井底围压、地层钻遇角测试结果，回归求得 b ， c 和 k ，则页岩多因素可钻性级值预测模型为：

$$K_d = 0.726 \times 10^{-5} e^{0.2415S_c} a_c^{3.424} c_c^{0.171} \tag{5}$$

显著性水平 α 取0.05，查F(2, 6)表可得临界值 λ 为5.14。由于 $F = 78.3579 > \lambda$ ，故通过页岩矿物组分含量建立的非线性多元参数模型对其可钻性级值影响显著。

3.1. 预测模型的建立

为了评价所建立模型的准确性，使用均方根误差(RMSE)、均方误差(MSE)和平均绝对误差(MAE)加以检验，公式如下：

均方根误差公式：

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{SSE}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^m w_i (y_i - \hat{y}_i)^2} \times 100\% \tag{6}$$

均方误差：

$$MSE = \frac{SSE}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m w_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \times 100\% \tag{7}$$

平均绝对误差：

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \times 100\% \tag{8}$$

同时以决定系数 R^2 为参考指标，对式(1)、式(2)、式(3)和式(5)进行分析比较，结果见表2，可知式(5)的效果最好，因此确定式(5)为页岩水平储层段可钻性级值预测模型。

Table 2. Comparison of regression relations

表 2. 回归关系式比较

关系式	引入参数	意义/数值	R^2
/	k_d	可钻性级值	/
(2)	S_c	砂质含量(%)	0.84
(3)	a_c	泥质含量(%)	0.80
(4)	c_c	钙质含量(%)	0.79
(6)	S_c 、 c_c 、 a_c	/	0.90

3.2. 模型验证

根据我们建立的非线性多元参数岩石可钻性预测模型，能够计算出相应的岩石可钻性级值。通过与微钻实验中实测的 D1 和 D2 两口井的可钻性级值进行对比分析(见图 5)，我们发现室内测试得到的岩石可钻性级值与模型预测的值之间存在着良好的一致性。这表明所建立的预测模型可以较为准确地描述岩石的可钻性特征，并具有一定的预测精度和可靠性。

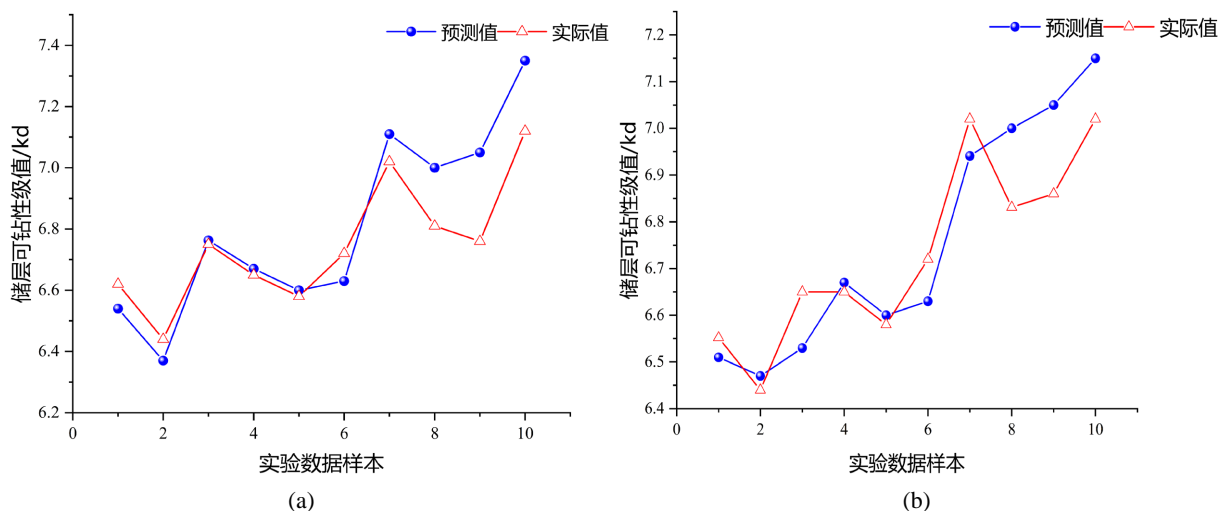


Figure 5. Sample graphs of experimental data from Wells D1 and D2

图 5. D1 井和 D2 井实验数据样本图

实验数据验证了回归模型的精度，具体误差分析如下表。

Table 3. Comparison of validation well error analysis

表 3. 验证井误差分析对比

验证井	MAE	MSE	RMSE	R ²
D1 井	0.10	0.08	0.22	0.88
D2 井	0.06	0.07	0.19	0.89

通过运用 D1、D2 两口井来验证页岩可钻性级值非线性多元回归预测模型精度，由表 3 可以看出，D1 井和 D2 井的拟合系数 R² 分别为 0.88、0.89，预测效果非常好，满足工程要求。

4. 总结与建议

4.1. 总结

借助扫描电镜、XRD 分析等工具，分别对加拿大沃内页岩中，扫描电镜和能谱分析 18 组资料，分析了矿物组分中(砂质、泥质、钙质)分别与可钻性的影响，进行了非线性拟合，其拟合精度分别为 0.84、0.80、0.79，拟合精度一般，为了使水平井储层可钻性级值预测效果更加准确，构建了矿物含量与页岩水平井储层可钻性的非线性回归方程，其精度在 0.9 左右预测效果精准，满足了对于页岩水平井储层可钻性模型的预测。

4.2. 建议

目前多为基于岩心资料进行岩石可钻性预测。基于实验的可钻性级值测量只能测定部分“点”数据，

无法测定储层段全井段可钻性级值。测井资料可预测直井可钻性级值，但页岩气多为长水平井，由于页岩区域的复杂性和测井数据不足等原因，需要结合地震数据等收集更多的地质数据，平行层理方向可钻性级值预测难度大。

基金项目

重庆科技大学研究生科技创新项目，项目编号：YKJCX2220106。

参考文献

- [1] 林春明, 张霞, 赵雪培, 等. 沉积岩石学的室内研究方法综述[J]. 古地理学报, 2021, 23(2): 223-244.
- [2] 江尧, 田茂银, 王儒洋, 等. 煤中矿物组分分析检测方法对比分析[J]. 煤质技术, 2022, 37(2): 40-47.
- [3] 卢萍, 程涌, 张金梁, 等. 页岩储层矿物的高分辨率扫描电镜和能谱仪分析[J]. 昆明冶金高等专科学校学报, 2020, 36(5): 26-33.
- [4] Dudek, T., Środoń, J., Eberl, D.D., Elsass, F. and Uhlik, P. (2002) Thickness Distribution of Illite Crystals in Shales. I: X-Ray Diffraction vs. High-Resolution Transmission Electron Microscopy Measurements. *Clays and Clay Minerals*, **50**, 562-577. <https://doi.org/10.1346/000986002320679305>
- [5] Liu, M. and Gadikota, G. (2018) Probing the Influence of Thermally Induced Structural Changes on the Microstructural Evolution in Shale Using Multiscale X-Ray Scattering Measurements. *Energy & Fuels*, **32**, 8193-8201. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b01486>
- [6] Wang, Q., Hu, Q., Ning, X., et al. (2021) Spatial Heterogeneity Analyses of Pore Structure and Mineral Composition of Barnett Shale Using X-Ray Scattering Techniques. *Marine & Petroleum Geology*, **134**, Article ID: 105354. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105354>
- [7] Rassouli, F.S. and Lisabeth, H.P. (2021) Analysis of Time-Dependent Strain Heterogeneity in Shales Using X-Ray Microscopy and Digital Volume Correlation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **92**, Article ID: 103984. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103984>
- [8] Lovesey, S.W. (2021) Diffraction of Helical X-Rays by Optically Active Achiral Crystals. *Physical Review B*, **104**, Article ID: 235106. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.104.235106>
- [9] Cheng, W., Cheng, Hao, Yu, H., et al. (2022) X-Ray Fluorescence for Laminated Silty Shale Reservoirs in Ordos Basin, China: Implications for Lithology Identification. *Geofluids*, **2022**, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2022/3207575>
- [10] 程源. Bragg 衍射型原子干涉重力测量的实验研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [11] 李瑞鹏. X 射线衍射仪控制系统设计[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [12] 毛帅, 孟英峰, 李皋, 等. 川西须家河组岩心可钻特性研究与实验评价[J]. 地下空间与工程学报, 2017(S2): 529-537.