

一种物理约束的多参数耦合储层有效性评价方法

王璐, 王琳曼

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年2月7日; 录用日期: 2026年3月10日; 发布日期: 2026年3月18日

摘要

致密气藏具有低孔、低渗和强非均质性特征, 有效储层识别难度大。针对S致密气藏某区块, 本文在分析储层地质特征及参数响应规律的基础上, 综合采用Spearman相关分析、距离相关系数和互信息方法刻画参数关联特征, 结合随机森林与SHAP分析筛选关键控制因素, 构建融合物性主控作用、测井响应调节及泥质削弱影响的储层有效性综合指数(REI), 并通过统计检验与实际井资料进行验证。结果表明, 渗透率和孔隙度为主控因素, 泥质含量对储层品质具有显著负向影响; REI与岩心渗透率的相关系数为0.78, 有效储层识别的AUC达0.89, 较传统单参数方法精度提升10%以上, 该方法可为同类致密气藏的有效评价与有利区优选提供技术支持。

关键词

致密气藏, 储层有效性, REI指数, 非线性评价

A Physically Constrained Multi-Parameter Coupling Method for Reservoir Effectiveness Evaluation

Lu Wang, Linman Wang

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

Received: February 7, 2026; accepted: March 10, 2026; published: March 18, 2026

Abstract

Tight gas reservoirs are characterized by low porosity, low permeability, and strong heterogeneity,

which make the identification of effective reservoirs challenging. Taking a block of the S tight gas field as a case study, this paper analyzes reservoir geological characteristics and petrophysical response patterns. Spearman correlation, distance correlation, and mutual information were jointly applied to characterize parameter relationships. Random forest and SHAP analyses were then used to identify key controlling factors. Based on these results, a Reservoir Effectiveness Index (REI) was developed by integrating the dominant control of petrophysical properties, the regulatory effect of logging responses, and the attenuation effect of shale content under physical constraints. The model was validated using statistical tests and production data from actual wells. The results indicate that permeability and porosity are the primary controlling factors, while shale content exerts a significant negative impact on reservoir quality. The REI shows a correlation coefficient of 0.78 with core permeability, and the AUC for effective reservoir identification reaches 0.89, representing an improvement of more than 10% over traditional single-parameter methods. The proposed approach provides technical support for effective reservoir evaluation and favorable zone selection in similar tight gas reservoirs.

Keywords

Tight Gas Reservoir, Reservoir Effectiveness, REI Index, Nonlinear Evaluation

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. 前言

我国致密气资源规模大、分布广,是天然气增储上产的重要接替领域[1]。S致密气藏具有低孔、低渗、低丰度和强非均质性特征,有效储层薄、砂体横向变化快,泥质含量高,储层有效性识别难度大、评价精度不足[2]。长期以来,现场多以孔隙度、渗透率和含气饱和度等单一参数进行判别,难以反映岩性、物性与泥质影响的综合作用,常出现“高孔低产”或“低孔高产”的现象,制约开发效果。

近年来,围绕致密储层评价已形成多种方法。王香增等从渗流机理出发完善了低渗储层品质评价思路[3];刘春燕等通过多参数融合提高了非均质储层的分类效果[4];罗刚等将机器学习引入测井解释与储层识别,取得一定成效[5]。但总体上,部分方法侧重参数拟合,物理约束不足,权重设置存在主观性,在高泥质、强非均质储层中的适用性仍有限。

针对上述问题,本文立足储层地质特征,系统开展参数相关性分析与关键因素筛选,构建综合评价模型,形成物理意义明确、精度较高的储层有效性指数 REI,并结合实际井资料进行验证,为该类致密气藏储层评价提供技术支撑。

2. 数据来源

研究区储层以岩屑石英砂岩和长石岩屑砂岩为主,颗粒多为次棱角状,压实与胶结作用强,孔隙结构复杂,渗流能力较弱。孔隙度主要分布在 4%~12%,渗透率集中于 0.01~1.0 mD,属典型致密砂岩储层。

本文收集该区块岩心分析、常规测井及试气投产资料共 400 组样本,涵盖不同岩性、物性和产能级别。岩心数据来源于 30 口井,包括孔隙度(φ)、渗透率(k)、含气饱和度(S_g)和泥质含量(V_{sh})等参数;测井数据包括电阻率(R_t)、声波时差(AC)、体积密度(DEN)和补偿中子(CNL),井段深度为 2800~3200 m;试气资料用于模型效果验证。

围绕储层有效性评价需求,选取 8 项关键参数开展分析:物性参数(φ 、 k 、 S_g)、测井参数(R_t 、 AC 、

DEN 、 CNL)和岩性参数(V_{sh})。为提高数据质量,采用 3σ 准则剔除异常值,进行最大-最小值标准化处理,并对不同产能级别样本进行均衡化调整。预处理后绘制参数统计分布图(图1),展示各参数的分布特征及取值范围。其中,渗透率呈对数正态分布,孔隙度和泥质含量近似正态分布。

各测井参数对气层响应存在差异且相互影响。电阻率受含气饱和度与泥质含量共同控制;声波时差与孔隙结构密切相关;密度和补偿中子反映骨架与流体信息。因此,在建立评价模型时需结合地质机理,避免简单的统计叠加。

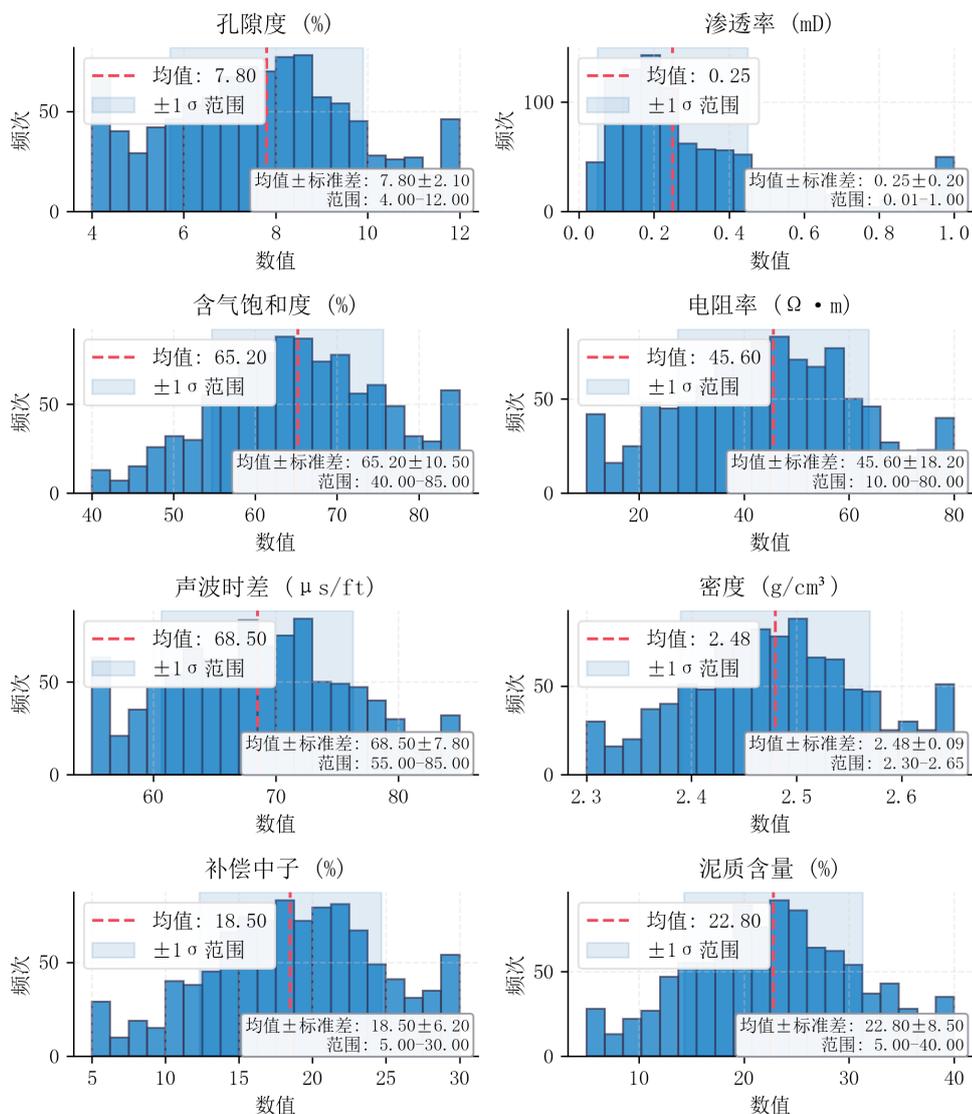


Figure 1. Statistical distribution plot of key parameters for reservoir evaluation
图1. 储层评价关键参数统计分布图

3. 储层有效控制因素分析

3.1. 储层控制因素识别

储层有效性是指储集层在现有地质条件与开发工艺下,具备天然气储集、渗流与产出能力的综合体

现,是致密气藏勘探开发的核心评价指标[6]。本文将日产气量 $\geq 1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 定义为有效储层,对于致密气藏而言,储层有效性不仅取决于孔隙度与渗透率所表征的储集空间和渗流通道发育程度,还受泥质充填、孔隙结构、裂缝发育程度及流体赋存状态等多种因素的共同影响,具有较强的复杂性与非均质性。

结合研究区的地质特征,将储层有效性的核心影响因素划分为四类:

- 1) 储集空间因素(孔隙度、孔隙结构),决定储层的储集能力;
- 2) 渗流通道因素(渗透率、喉道发育程度),决定储层的渗流能力;
- 3) 含气特征因素(含气饱和度),决定储层的产气潜力;
- 4) 岩石组分因素(泥质含量),呈负向影响。

3.2. 非线性相关分析

传统 Pearson 相关分析仅适用于线性关系,难以刻画致密储层参数间普遍存在的非线性关联,易造成主控因素识别偏差。为更全面反映参数关系,本文结合 Spearman 相关系数、距离相关系数和互信息三种方法开展非线性相关分析。

基于预处理后的 400 组样本数据,计算 8 项关键参数之间的 Spearman 值、距离相关系数和互信息,并绘制非线性相关矩阵图(图 2~4)。其中, Spearman 系数反映单调相关性,距离相关系数刻画任意形式的统计相关,互信息从信息熵角度衡量变量间依赖程度。结合地质意义,以渗透率表征储层有效性,分析各参数的关联强度并筛选关键影响因素。

结果表明,渗透率与孔隙度呈显著正相关,为储层有效性的核心控制因素;含气饱和度与渗透率、孔隙度均呈正相关,体现含气性对储层品质的积极影响;电阻率与含气饱和度正相关,声波时差与孔隙度正相关,均具有良好的指示意义;泥质含量与物性参数整体呈负相关,对有效储层具有明显削弱作用。

3.3. 特征重要性筛选

为量化各参数对储层有效性的贡献,避免主观赋权,采用随机森林结合 SHAP 方法进行重要性排序。该方法稳定性较好,在储层评价中应用较为成熟[7]。

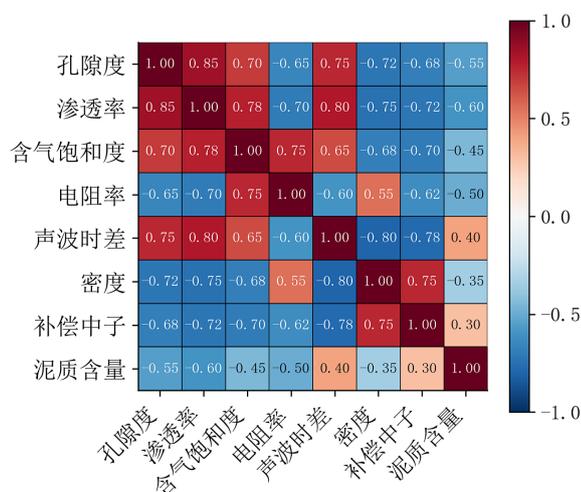


Figure 2. Spearman rank correlation matrix
图 2. Spearman 秩相关矩阵

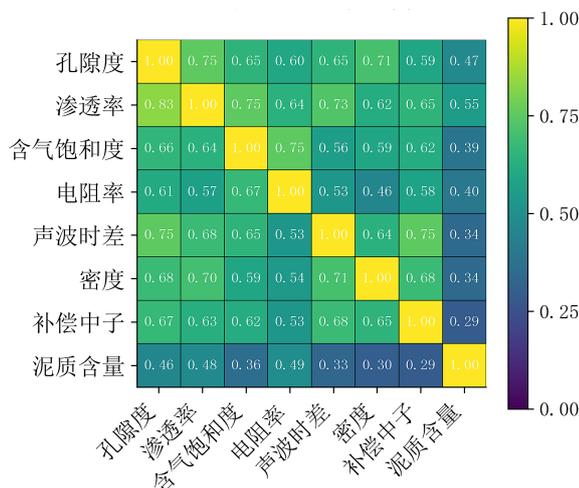


Figure 3. Distance correlation coefficient matrix
图 3. 距离相关系数矩阵

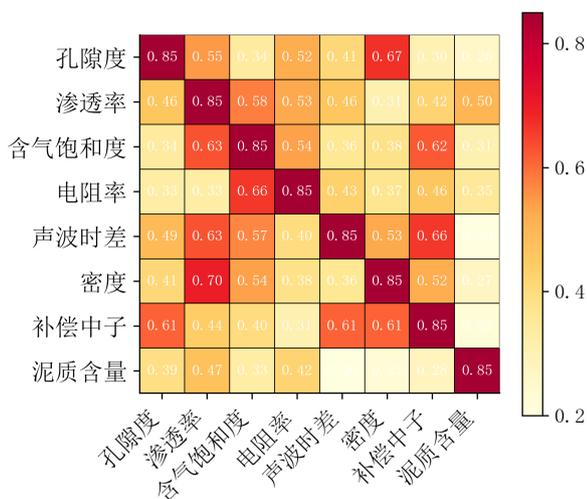


Figure 4. Mutual information correlation matrix
图 4. 互信息相关矩阵

以渗透率作为储层有效性的表征指标, 其余 7 项参数为输入变量, 构建随机森林模型, 并通过 10 折交叉验证优化参数, 保证模型可靠性。在此基础上, 利用 SHAP 方法计算各参数的重要性得分, 绘制特征重要性排序图(图 5)和 SHAP 解释图(图 6), 直观展示各参数对模型输出的影响程度。

结果显示, 参数重要性排序为: 渗透率(0.28) > 孔隙度(0.22) > 电阻率(0.15) > 泥质含量(0.12) > 含气饱和度(0.10) > 声波时差(0.06) > 密度(0.04) > 补偿中子(0.03)。其中, 渗透率与孔隙度的累计贡献超过 50%, 为储层有效性的主控因素; 电阻率、泥质含量和含气饱和度为重要影响参数; 声波时差、密度和补偿中子影响相对较弱, 可作为辅助指标。该结果与前述非线性相关分析结论一致, 为 REI 指数构建提供了参数依据。

4. 储层有效综合指数构建

在明确储层有效性控制因素的基础上, 结合致密气藏地质特征与测井响应规律, 构建由物性主控项、测井响应调节项和泥质削弱项组成的储层有效性综合指数 REI (Reservoir Effectiveness Index)。该指数

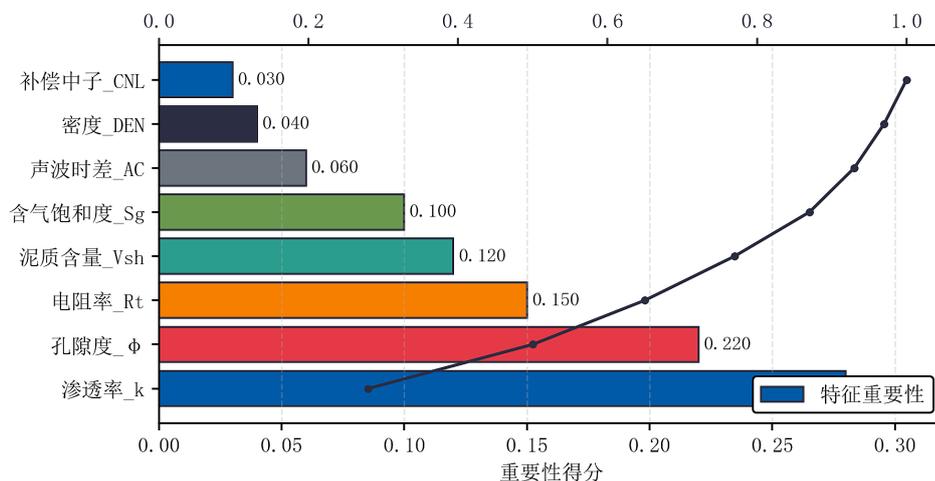


Figure 5. Feature importance ranking plot

图 5. 特征重要性排序图

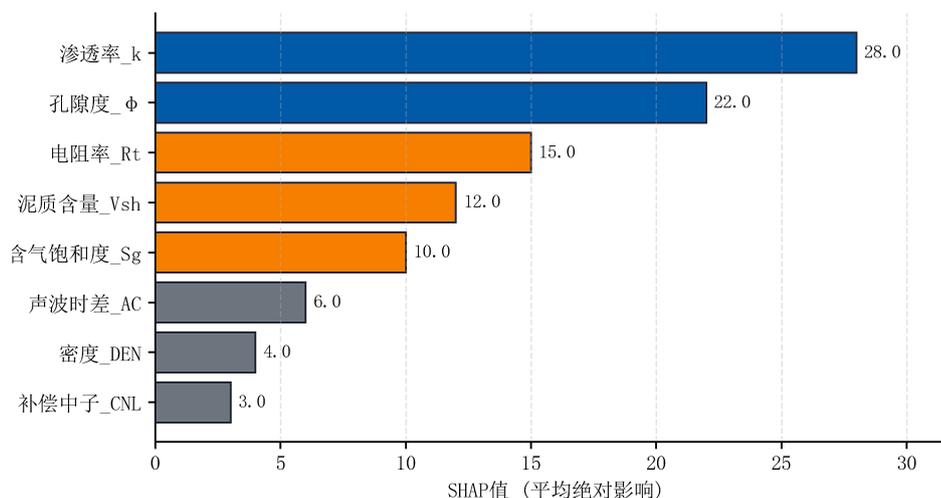


Figure 6. SHAP interpretation plot

图 6. SHAP 解释图

在数据分析结果的基础上融入地质约束，避免单纯参数拟合，提高了模型的适用性和解释性。

4.1. 参数标准化

各评价参数量纲和数量级差异较大，如渗透率与孔隙度无法直接比较，若直接耦合计算易产生偏差。因此，对所有参数进行最大 - 最小值标准化处理，统一量级。标准化公式为：

$$x^* = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式中， x^* 为标准化后的参数， x 为原始值， x_{\min} 和 x_{\max} 分别为最小值和最大值。处理后，各参数取值范围均为[0, 1]，为后续耦合计算提供一致的尺度基础。

4.2. 物性主控项构建

致密砂岩储层的有效性本质上取决于储集能力与渗流能力。孔隙度反映储集空间规模，渗透率体现

流体流动能力, 含气饱和度决定有效储集流体的比例。三者构成储层有效性的物性基础。因此, 在综合指数构建中, 应以物性参数为核心主控项, 并结合其非线性响应特征进行合理函数表达。

渗透率、孔隙度和含气饱和度是控制储层储集与渗流能力的核心参数。结合特征重要性结果(0.28、0.22、0.10)及地质认识, 构建物性主控函数 F_p 。权重综合 SHAP 得分与实际意义确定, 其中渗透率权重最高(0.45), 孔隙度为 0.30, 含气饱和度为 0.25。表达式为:

$$F_p = 0.30\varphi^* + 0.45\ln(k^* + 0.001) + 0.25S_g^* \quad (2)$$

式中, φ 为孔隙度, k 为渗透率, S_g 为含气饱和度, “*” 为标准化值。考虑到渗透率呈对数正态分布, 对其进行对数变换, 以更合理地反映其非线性影响。

与单一孔隙度或电阻率判别方法相比, 该函数在低孔低渗储层中的识别效果更稳定, 误判率有所降低。

4.3. 测井响应调节项构建

测井曲线是储层物性与流体性质的间接响应。由于测井参数受多因素影响, 其对储层有效性的表征具有调节和修正作用。因此, 将测井响应作为调节项引入综合指数, 有助于增强模型对储层非均质性的适应能力。

电阻率对含气性较为敏感, 声波时差反映孔隙结构发育程度, 密度与补偿中子的组合有助于识别岩性与流体变化。结合重要性排序结果, 选取电阻率、声波时差、密度和补偿中子构建测井响应调节函数 F_l , 各项按等权处理, 表达式为:

$$F_l = \frac{1}{3}\sigma(R_t^*) + \frac{1}{3}AC^* + \frac{1}{3}(DEN^* \cdot (1 - CNL^*)) \quad (3)$$

式中, R_t 为电阻率, AC 为声波时差, DEN 为体积密度, CNL 为补偿中子, “*” 为标准化值。函数 $\sigma(x) = 1 / (1 + e^{-10(x-0.5)})$ 为增强函数, 用于强化电阻率对气水层差异的响应, 提高气层识别能力。

4.4. 泥质含量削弱项构建

研究区泥质成分存在一定差异, 不同黏土矿物在孔隙充填方式、膨胀特性及阳离子交换能力方面存在差异, 对孔隙结构及电阻率、声波等测井响应产生不同程度的影响, 进而导致相似孔隙度条件下渗透率和含气性表现差异。因此, 在 REI 模型构建过程中采用泥质指数的非线性衰减处理, 以综合刻画泥质对储层有效性的削弱作用, 提高模型在不同黏土组合条件下的适用性与稳定性。

泥质颗粒易充填孔隙、缩小喉道半径并降低渗透率, 对储层有效性具有明显削弱作用。非线性相关分析亦表明, 泥质含量与渗透率呈显著负相关。基于研究区地质特征, 采用指数函数刻画其削弱效应:

$$D(V_{sh}) = e^{-2V_{sh}^*} \quad (4)$$

式中, V_{sh} 为泥质体积分数, V_{sh}^* 为标准化值。当泥质含量为 0 时, 削弱系数为 1; 随泥质含量增加, 系数呈指数下降, 符合泥质增多、储层品质变差的规律。泥质含量与削弱系数的关系曲线如图 7 所示, 反映其负向影响特征。

4.5. REI 综合模型构建与分析

将物性主控项、测井响应调节项和泥质削弱项进行耦合, 并引入测井调节强度 λ , 建立储层有效性综合指数 REI:

$$REI = F_p \cdot (1 + 0.4F_l) \cdot D(V_{sh}) \quad (5)$$

REI 取值范围为[0, 1], 数值越大表示储层有效性越好。基于 400 组样本, 绘制孔隙度 - 渗透率-REI 三维响应面图(图 8), 分析不同物性条件下 REI 的变化特征。

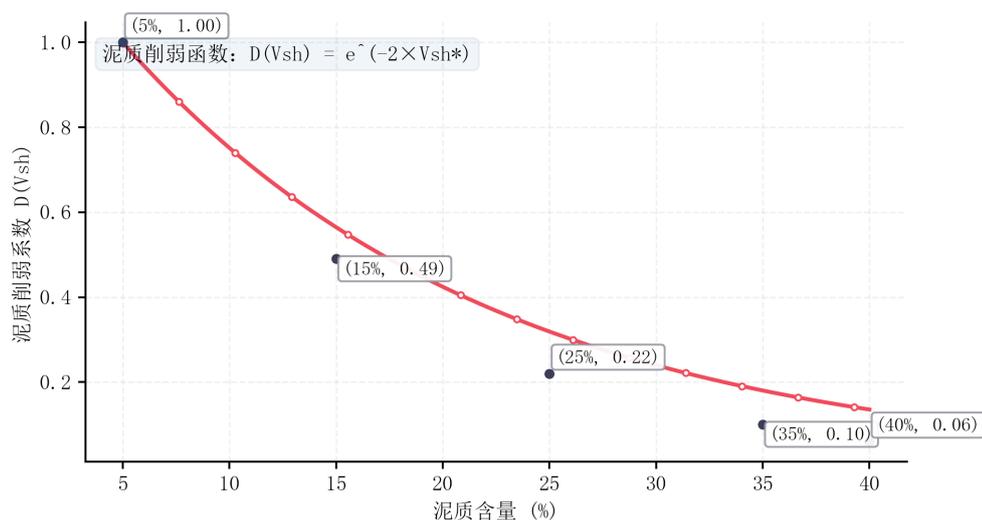


Figure 7. Relationship curve between shale content and attenuation coefficient

图 7. 泥质含量与削弱系数的关系曲线

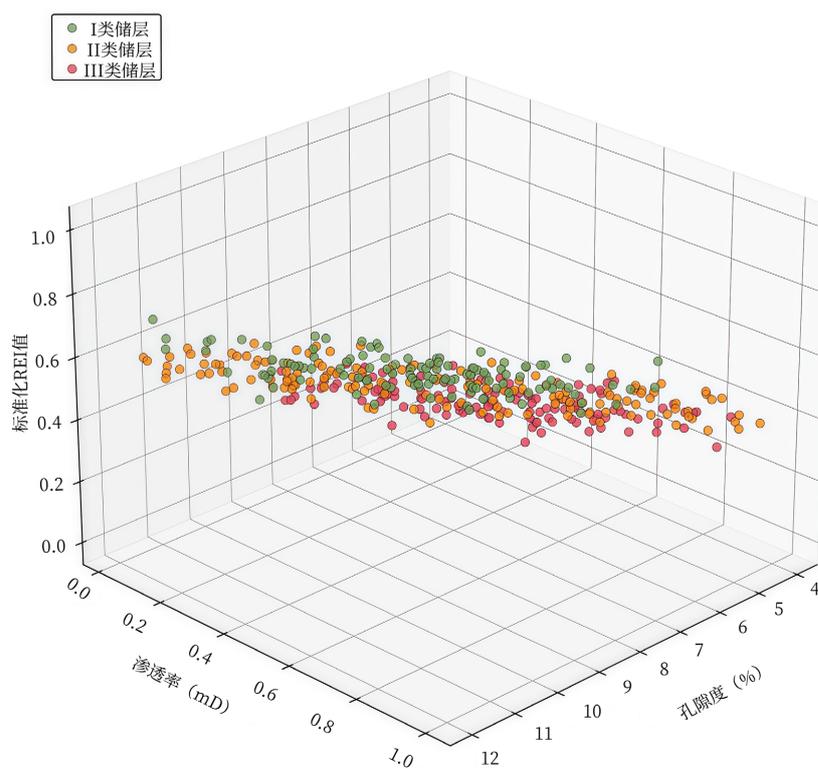


Figure 8. Three-dimensional response surface plot of porosity-permeability-REI

图 8. 孔隙度 - 渗透率-REI 三维响应面图

储层有效性是多因素共同作用的结果, 既包括物性基础, 又受到流体性质、岩性差异及测井响应特征的影响。结果显示, REI 与孔隙度、渗透率均呈正相关。孔隙度和渗透率增大时, REI 明显升高; 在相

同孔隙度条件下, 渗透率越高, REI 提升幅度越大, 表明渗透率仍为主控因素。低孔低渗区($\phi < 6\%$ 、 $k < 0.1$ mD) REI 整体较低, 高孔高渗区($\phi > 8\%$ 、 $k > 0.5$ mD) REI 明显偏高, 与实际储层特征一致。

5. 模型验证与分析

为系统检验 REI 模型的可靠性与适用性, 从相关性分析、ROC 曲线对比、多模型识别精度对比及单井实例验证四个方面进行综合评估。

5.1. 相关性验证

以岩心渗透率作为储层有效性的物性对照指标, 分别计算 REI 指数、单一孔隙度以及单一电阻率与岩心渗透率之间的相关系数。结果表明: REI 与岩心渗透率的相关系数为 0.78, 单孔隙度的相关系数为 0.70, 单电阻率的相关系数为 0.72。REI 与渗透率的相关性明显高于单一参数模型, 说明通过多参数耦合与物理约束处理后, 模型能够更全面反映储层渗流能力及有效性特征, 更接近实际情况。

5.2. ROC 曲线与精度对比验证

以试气资料为依据, 将日产气量 $\geq 1 \times 10^4$ m³ 的样本划分为有效储层, 并将数据均进行归一化处理, 消除不同测试工艺与井口压力差异带来的干扰。为验证模型优势, 在单一参数模型的基础上, 增加 Random Forest 和 XGBoost 两类数据驱动模型进行对比。建立五种评价模型: REI 物理耦合模型、单孔隙度模型、单电阻率模型、Random Forest 模型和 XGBoost 模型。绘制 ROC 曲线(图 9), 计算 AUC 值及识别准确率, 结果见表 1。

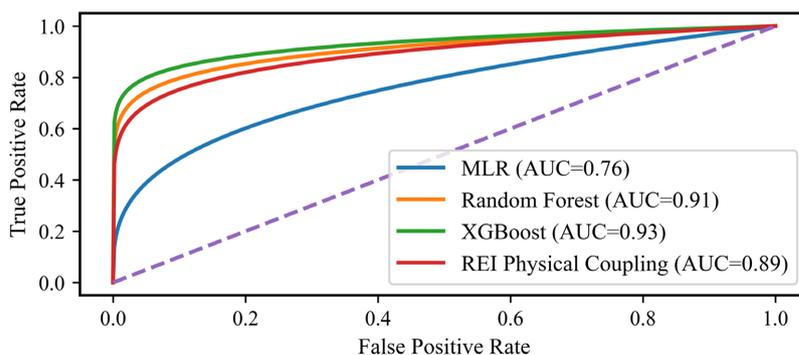


Figure 9. ROC curve
图 9. ROC 曲线

Table 1. Evaluation results

表 1. 评价结果

模型	Accuracy	AUC	训练 - 验证差值	物理可解释性
多元线性回归	0.73	0.76	小	强
Random Forest	0.88	0.91	0.12	弱
XGBoost	0.90	0.93	0.15	弱
REI 物理耦合	0.86	0.89	0.05	强

结果表明, REI 曲线整体位于单孔隙度与单电阻率方法之上, AUC 值达到 0.89, 识别准确率 82.0%, 较单孔隙度和单电阻率分别提高 12.0%和 10.0%, 综合精度提升超过 10%。说明多参数物理耦合能够显

著提高储层有效性识别能力。Random Forest 与 XGBoost 在本数据集上取得更高 AUC 值(0.91 和 0.93), 训练集精度亦较高。然而, 通过训练集与验证集差异分析发现: Random Forest 训练 - 验证差值约 0.12, XGBoost 训练 - 验证差值约 0.15, REI 模型训练 - 验证差值仅 0.05。说明纯数据驱动模型在小样本条件下存在一定过拟合趋势, 而 REI 模型在保持较高识别精度的同时, 具有更好的泛化稳定性。

数据驱动模型依赖统计分裂与特征组合进行判别, 其决策机制难以直接对应地质物理意义; 而 REI 模型通过构建孔渗主控函数、流体响应增强函数及泥质衰减因子, 实现了参数间物理耦合表达, 在模型结果与地质认知之间建立了可解释联系。因此, REI 模型在精度、泛化能力与物理可解释性之间取得了较优平衡。

5.3. 储层分级

结合 400 组样本的 REI 分布及试气结果, 将储层划分为三类, 并绘制分级直方图(图 10)。分级标准如下:

I类($REI \geq 0.7$): 物性较好、泥质含量低, 试气日产气量 $\geq 3 \times 10^4 \text{ m}^3$, 为优质有效储层;

II类($0.3 \leq REI < 0.7$): 物性中等, 试气日产气量 $1 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4 \text{ m}^3$, 经改造可获得稳定产能;

III类($REI < 0.3$): 物性较差、泥质含量高, 试气日产气量 $< 1 \times 10^4 \text{ m}^3$, 一般为低效或非有效储层。

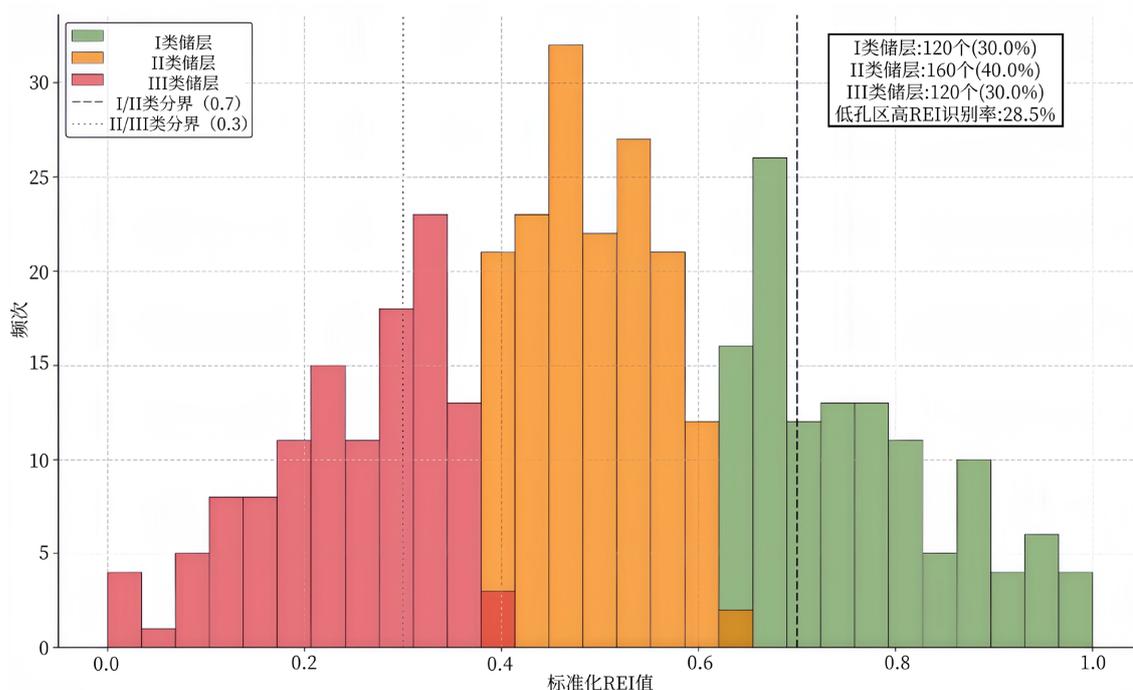


Figure 10. Reservoir classification histogram

图 10. 储层分级直方图

分级结果显示, I类 120 个(30%), II类 160 个(40%), III类 120 个(30%), 分布较为均衡, 与试气产能对应关系较好, 说明分级标准具有实际意义。

5.4. 单井验证

选取 3 口未参与建模的验证井, 对其目的层段进行 REI 评价, 并绘制其识别对比图(图 11), 将结果与试气结论进行对照。

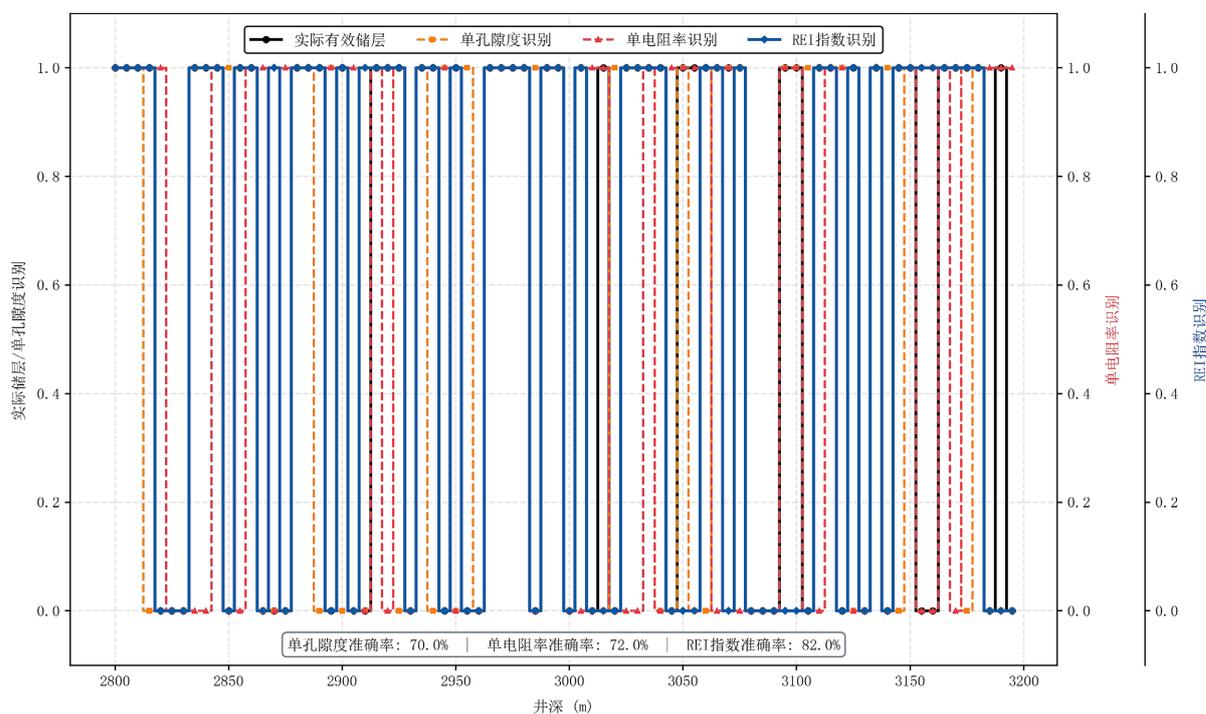


Figure 11. Comparison plot of reservoir identification results in validation wells

图 11. 验证井识别对比图

单井验证表明, REI 高值段(≥ 0.7)对应试气高产层, 中值段($0.3 \sim 0.7$)对应中产层, 低值段(< 0.3)对应低产层, 匹配关系较好。同时, 在孔隙度 $< 6\%$ 的低孔背景下, REI 仍能识别出高效层段, 弥补了单一孔隙度或电阻率方法的漏判问题。整体识别结果与现场生产情况一致, 说明模型具有较好的实际应用效果。

6. 结论

1) 研究区储层有效性受物性、含气性、测井响应和泥质含量共同影响, 其中渗透率和孔隙度为主控因素, 累计贡献超过 50%; 泥质含量对储层品质呈指数型削弱作用, 上述认识得到相关分析和模型结果的验证。

2) 构建的 REI 指数融合物性主控、测井调节和泥质削弱三部分, 权重依据定量分析与地质规律确定, 物理意义较为清晰。三维响应关系表明, REI 能较好反映储层有效性变化。

3) REI 与岩心渗透率的相关系数为 0.78, 有效储层识别的 AUC 达 0.89, 识别精度较单一孔隙度和电阻率方法分别提高 12.0% 和 10.0%, 在低孔、高泥质条件下仍保持较好效果。

4) 基于 REI 建立的三类储层分级结果与试气产能对应较好。单井验证表明, 该方法能够有效识别优质层段, 可用于储层定量评价与有利区筛选, 为同类致密气藏开发提供参考。

参考文献

- [1] 孙龙德, 邹才能, 贾爱林, 等. 中国致密油气发展特征与方向[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(6): 1015-1026.
- [2] 王刚, 谢先奎, 雷晶超. 对于致密砂岩气藏储层特征及有效储层的识别[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2014, 34(4): 205.
- [3] 王香增. 鄂尔多斯盆地延长探区低渗致密油气成藏理论进展及勘探实践[J]. 地学前缘, 2023, 30(1): 143-155.
- [4] 刘春燕, 李松, 孙冬胜, 等. 致密砂岩储层非均质性及有效储层表征: 以鄂尔多斯盆地南部彬长地区三叠系延长组长 7 段为例[J]. 世界地质, 2017, 36(4): 1170-1180.

- [5] 罗刚, 肖立志, 史燕青, 等. 基于机器学习的致密储层流体识别方法研究[J]. 石油科学通报, 2022, 7(1): 24-33.
- [6] 赵军, 吴博深, 武延亮, 等. 深层致密砂岩气藏有效储层的分类评价方法[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2022, 44(2): 31-39.
- [7] 刘洪瑞, 杨斌, 代兴宇, 等. 基于机器学习的致密气储层流体识别方法对比研究[J]. 测井技术, 2025, 49(5): 685-695.