

基于灰色关联分析法的深层页岩气储层 “甜点”优选

——以川中Z3井区五峰组 - 龙一1亚段页岩储层为例

王仲旭, 李金龙, 吴骏豪, 吴欣雨

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年9月18日; 录用日期: 2025年10月18日; 发布日期: 2025年11月10日

摘 要

页岩储层普遍表现出强烈的非均质性, 且受多因素控制, 仅靠单一参数的定性评价或多参数的简单叠合难以准确评价页岩储层品质。为定量确定页岩气储层评价参数的权重, 本文以四川盆地中部Z3井区五峰组 - 龙一₁亚段为例, 基于测井和实验数据, 选取孔隙度、总有机碳含量、含气量及脆性指数四个关键参数, 以产能指数作为母序列, 采用灰色关联分析方法, 量化评估各参数对产能影响。结果表明: (1) 四个参数与产能指数的关联度大小顺序为: 含气量 > TOC > 孔隙度 > 脆性指数, 其权系数比值为0.2739: 0.2626: 0.2334: 0.2301, 明确含气量为研究区产能主要控制因素。(2) I类地质甜点主要位于五峰组上部 - 龙一₁亚段1小层, 横向发育连续性较好, 研究区西南部为下一步建议勘探区域。本研究为川中Z3井区地区页岩气勘探开发中的靶层优选提供了依据, 并表明灰色关联分析法适用于页岩储层多参数综合评价。

关键词

四川盆地, 页岩储层, 灰色关联分析, 产能指数, 地质甜点

Optimization of Deep Shale Gas “Sweet Spots” Based on Grey Relational Analysis

—A Case Study of the Wufeng Formation-The First Sub-Member of Longmaxi Formation in the Z3 Well Block, Central Sichuan Basin

Zhongxu Wang, Jinlong Li, Junhao Wu, Xinyu Wu

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

Received: September 18, 2025; accepted: October 18, 2025; published: November 10, 2025

文章引用: 王仲旭, 李金龙, 吴骏豪, 吴欣雨. 基于灰色关联分析法的深层页岩气储层“甜点”优选[J]. 矿山工程, 2025, 13(6): 1242-1251. DOI: 10.12677/me.2025.136138

Abstract

Shale reservoirs commonly exhibit strong heterogeneity and are controlled by multiple factors. Qualitative evaluation based on a single parameter or simple superposition of multiple parameters is insufficient for accurately assessing shale reservoir quality. To quantitatively determine the weighting of evaluation parameters for shale gas reservoirs, this study takes the Wufeng Formation-Long 1₁ Sub-member in the Z3 Well Block of the central Sichuan Basin as an example. Based on logging and experimental data, four key parameters were selected: porosity, total organic carbon content (TOC), gas content, and brittleness index. Using the productivity index (PI) as the reference sequence, grey relational analysis (GRA) was employed to quantitatively evaluate the influence of each parameter on productivity. The results show that: (1) The order of relational degree between the four parameters and the productivity index is: gas content > TOC > porosity > brittleness index, with weight coefficients ratios of 0.2626: 0.2334: 0.2739: 0.2301, indicating that gas content is the main controlling factor for productivity in the study area. (2) Class I geological sweet spots are mainly located in the upper part of the Wufeng Formation-Long 1₁ Sub-member, exhibiting good lateral continuity. The southwestern part of the study area is recommended as the next target for exploration. This study provides a basis for target layer optimization in shale gas exploration and development in the Z3 Well Block of the central Sichuan Basin and demonstrates that grey relational analysis is suitable for multi-parameter comprehensive evaluation of shale reservoirs.

Keywords

Sichuan Basin, Shale Reservoir, Grey Relational Analysis (GRA), Productivity Index (PI), Sweet Spot

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

页岩气是重要的非常规天然气类型，其有效开发有助于优化我国能源构成，对保障国家能源安全具备重要战略价值[1]。我国页岩气勘探与开发活动主要集中在四川盆地及周邻区域[2]。Z3 井区地处构造位置介于川中平缓构造带和川东南高陡褶皱带之间，该区域内五峰组至龙一₁亚段页岩埋深适中且层厚稳定，显示出良好的资源潜力，是当前页岩气勘探的重要接替区[3]。

页岩储层强烈的非均质性是制约其高效开发的关键地质难题[4]。储层品质在纵向上变化迅速，使得地质甜点段的预测与评价成为核心挑战。目前，前人以大安区块五峰组 - 龙一₁亚段页岩储层为研究对象结合测井资料与分析数据对研究区储层展开分析，明确储层展布规律，选取 TOC 含量、孔隙度、含气量及脆性指数四个参数进行多参数的简单叠合，建立深层页岩气有利区评价标准[5]-[7]，没有量化各参数对产能影响的相对权重，导致评价结果与实际开采效益存在一定误差。

本次研究以川中 Z3 井区五峰组 - 龙一₁亚段页岩储层为研究对象，综合利用测井及实验分析数据，选取孔隙度、TOC、含气量、脆性指数四个关键参数，以产能为母序列，开展灰色关联分析，定量计算各参数与产能指数之间的灰色关联度，厘清影响该研究区页岩气产能的主控因素及权重优先级，并结合行业标准与该研究区实际生产需要，利用直接赋值法，将关联度分析结果应用于纵向序列，完成研究区目的层段精细分类评价，优选有利甜点段，为川中 Z3 井区深层页岩气储层的有利区优选和压裂增产提供更科学的地质依据。

2. 区域地质概况与研究数据

2.1. 区域地质概况

本次研究以川中 Z3 井区为研究区，其位于四川盆地川中古隆平缓构造区东南部和川东南坳褶带西南段的交汇处，平面上整体呈条带状分布，表现为北东-南西向“隆凹相间”的构造特征[8]。本研究的目标层段为上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组。其中，五峰组-龙马溪组龙一₁亚段是该区最重要的产气层段，处于深水陆棚相沉积环境。岩性主要为黑色页岩，常见大量黄铁矿与笔石化石并发育薄层灰质页岩夹层[9]。具有较高的有机质含量和良好的储集物性。根据岩性组合特征与测井响应差异，可将五峰组-龙一₁亚段进一步划分为六个小层，自下而上依次为：五峰下、五峰上、龙一₁亚段 1 小层、龙一₁亚段 2 小层、龙一₁亚段 3 小层及龙一₁亚段 4 小层(图 1)。

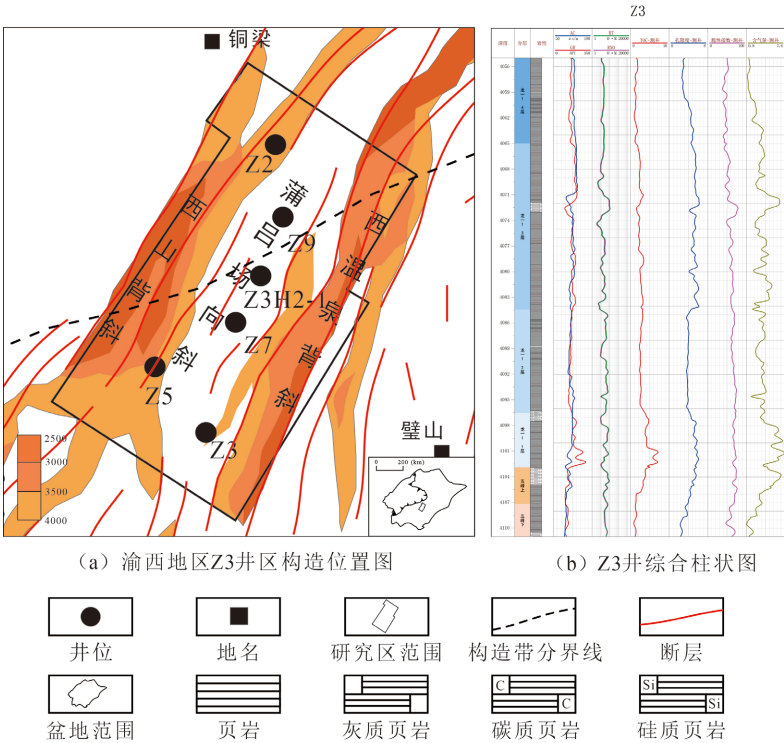


Figure 1. Regional structural location map of Z3 Well Block and single-well histogram of Well Z3
图 1. Z3 井区区域构造位置图及 Z3 井单井柱状图

2.2. 数据来源与处理

本次研究选取川中 Z3 井区五峰组-龙一₁亚段页岩储层 75 块样品，并去岩心库进行充足的岩心观察后，选区代表性样品进行总有机碳分析、全岩 X 衍射及现场解析实验获取大量深度点数据，并结合 LightGBM 算法建立预测模型，获取研究区目的层段 TOC、孔隙度、含气量及脆性指数连续测井曲线。

3. 研究方法

3.1. 灰色关联分析原理

页岩储层评价正是一个受多重地质因素影响、数据相对有限的系统，各参数与产能间的映射关系复杂且不明确，符合灰色系统的特征。灰色关联分析是该理论的核心方法之一，近些年来灰色关联法在油

气储层评价中应用较多[10][11]，其基本思想是通过比对系统数据整合后所得数列的几何关系，获得各因素间的关联性，曲线形状越接近，关联度越大，说明该子序列对母序列的影响越显著[12]。

3.1.1. 确定母序列与子序列

综合考虑页岩气储层的评价参数，将代表系统行为特征的参考序列定义为母序列，通常用以下公式来表示该母序列：

$$\{Y_i(0)\}, i=1,2,3,\dots,n \quad (1)$$

将影响评价目标的属性的比较序列定义为子序列，它可以用以下公式表示：

$$\{Y_i(k)\}, i=1,2,\dots,n; k=1,2,\dots,m \quad (2)$$

根据式 1 和式 2，建立页岩储层综合评价指标原始矩阵：

$$Y^{(0)} = \begin{bmatrix} Y_1(0) & Y_1(1) & \cdots & Y_1(m) \\ Y_2(0) & Y_2(1) & \cdots & Y_2(m) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_n(0) & Y_n(1) & \cdots & Y_n(m) \end{bmatrix} \quad (3)$$

3.1.2. 数据无量纲化处理

由于各评价参数量纲和数量级不同，为消除其影响，对原始数据进行标准化处理，常用的处理方法有初值化、极值化、均值化等[13]-[15]，本次研究采用均值化法进行处理，其计算公式为：

$$X_i(k) = \frac{Y_i(k)}{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m Y_i(k)} \quad (4)$$

其中， $i=0,1,2,\dots,n$ ，代表序列编号； $k=0,1,2,\dots,m$ ，代表数据点编号。处理后的序列记为 $X_i = [X_0, X_1, X_2, \dots, X_n]$ 。

3.1.3. 计算关联系数

通过以下公式计算母序列 X_0 与各子序列 X_i 的关联系数 $\xi_i(k)$ ：

$$\xi_i = \frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|} \quad (5)$$

式中， $|X_0(k) - X_i(k)|$ 为母序列与子序列的绝对差； $\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)|$ 和 $\max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|$ 分别为两级最小差与两级最大差； ρ 为分辨系数，用以调节计算差异的显著性范围，通常取值在 0~1 之间，本研究取 $\rho = 0.5$ 。

3.1.4. 计算灰色关联度及权系数

关联系数 $\xi_i(k)$ 是各点的关联值，为从整体上把握子序列 X_i 与母序列 X_0 的关联程度，对关联系数求平均值，得到灰色关联度 γ_i ：

$$\gamma_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \xi_i(k) \quad (6)$$

对关联度归一化，其结果为各评价参数关联度与所有关联度之和的比值，即为权系数 α_i ：

$$\alpha_i = \frac{\gamma_i}{\sum_{i=0}^m \gamma_i} \quad (7)$$

3.2. 直接赋值法

页岩气储层评价中各参数存在量纲不一的难题，导致无法直接加权汇总，本次研究采用直接赋值法对各类定性及定量参数进行标准化处理，构建页岩储层综合品质评价价值(G 值)。该方法对反映储层质量的定性分类进行赋值，将其转化为可参与数学运算的定量分值，从而实现数据的无量纲化和标准化。

3.2.1. 页岩气储层分类评价标准与赋值

参考页岩气测井评价技术规范(NB/T 10398-2020)以及川中 Z3 井区五峰组 - 龙马溪组的相关研究成果，制定了本研究区储层参数的分类评价标准，并为每个类别赋予相应的分值。

3.2.2. 逐点参数评分

对目的层段内每一个深度点的测井及实验数据，依次对照储层评价参数分类与赋值标准，确定其各参数所属的类别，并获得其对应的标准化分值(S_i)。

3.2.3. 计算综合评价值

利用上述灰色关联分析所得的各参数权系数(α_i)，对标准化后的分值进行加权求和，计算每个深度点的页岩储层综合品质评价价值(G 值)。计算公式如下：

$$G = \sum_{i=1}^m \alpha_i * S_i \quad (8)$$

式中， S_i 为每个深度点被赋予的标准化分值。

根据计算得到的 G 值(其理论范围在 0.2 至 1.0 之间)，对储层进行最终分类。

4. 结果

4.1. 产能相关性分析

页岩气产能受到多种地质因素及工程因素影响，各因素间相互制约，共同控制页岩气产能效益。本次研究从地质方面，通过测试产能、试油井段长度、总液量及总砂量构建产能指数，探讨研究区五峰组 - 龙一₁亚段储层页岩气产能控制因素。产能指数计算公式如下：

$$\text{产能指数} = \frac{\text{测试产能}}{\text{试油井段长度} * \text{总液量} * \text{总砂量}} \quad (9)$$

将产能指数与地质参数进行相关性分析，结果表明：含气量、TOC 含量与产能指数呈现显著相关性， R^2 分别为 0.7748 与 0.6528，孔隙度、脆性指数与产能指数呈现较弱相关性(图 2)。明确研究区目的层段产能主要受含气量与 TOC 含量控制，以此初步判断上述地质参数在页岩气储层甜点评价标准中权重大小：含气量 > TOC 含量 > 孔隙度 > 脆性指数。

4.2. 灰色关联度分析

结合灰色关联法综合运用多种关键地质参数对 Z3 井区五峰组 - 龙一₁亚段页岩储层进行分析，确定产能指数为母序列，TOC 含量、孔隙度、含气量、脆性指数为子序列，对其展开灰色关联度与权系数计算，如下表所示(表 1)：

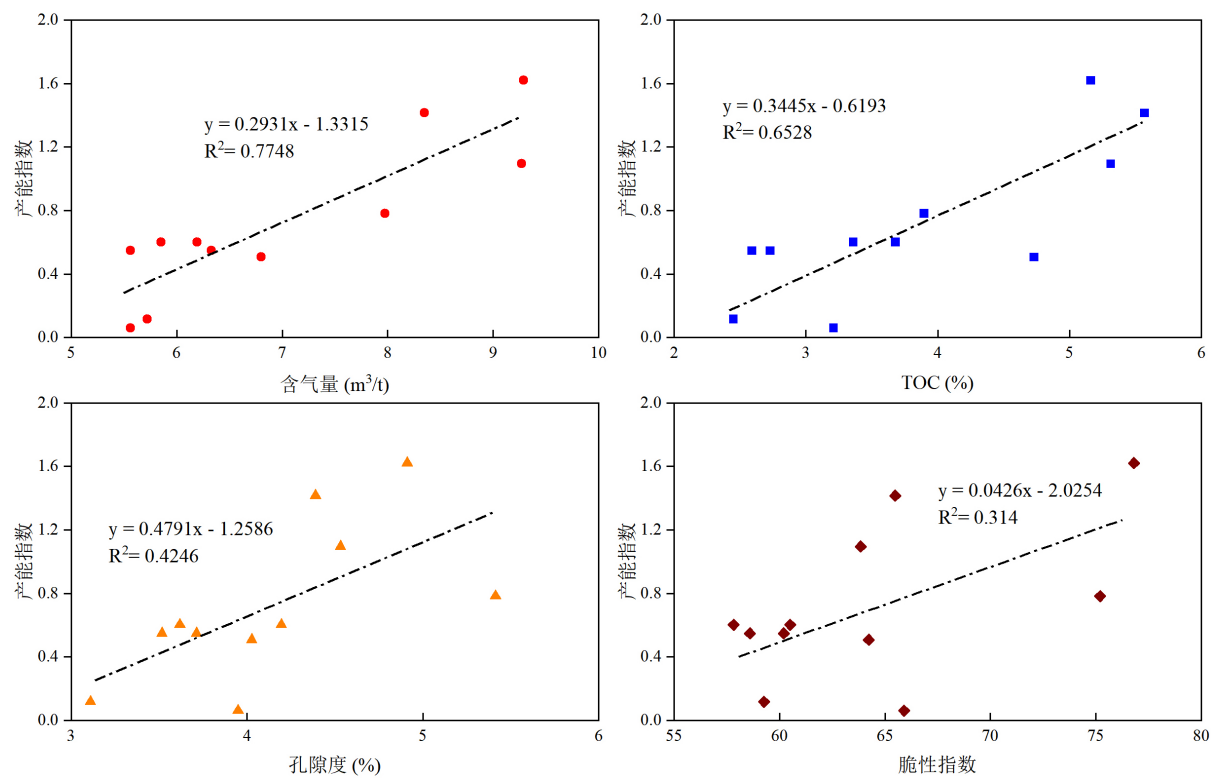


Figure 2. Correlation analysis of controlling factors for productivity index in the Wufeng-Long 1₁ Sub-member reservoir, Z3 Well Block

图 2. Z3 井区目的层段储层产能指数控制因素相关性分析

Table 1. Statistics of grey relational grades and weight coefficients

表 1. 灰色关联度及权系数统计表

井号	母序列		子序列		
	产能指数	TOC	孔隙度	含气量	脆性指数
Z1	0.7820	0.8799	0.7117	0.9844	0.8831
Z2	1.6202	0.3731	0.3524	0.3756	0.3524
Z3	0.0600	0.4406	0.3884	0.4297	0.3711
Z4	0.1156	0.5620	0.4866	0.4707	0.4233
Z5	0.5067	0.4355	0.6768	0.7084	0.7004
Z6	0.5472	0.9281	0.8111	0.9951	0.6629
Z7	0.5477	0.8747	0.8748	0.8428	0.7729
Z8	0.6020	0.8992	0.7748	0.9999	0.8585
Z9	1.0953	0.7815	0.5958	0.7479	0.4070
Z10	1.4162	0.5062	0.3913	0.4696	0.3778
Z11	0.6023	0.9975	0.7629	0.9868	0.9199
灰色关联度		0.6980	0.6206	0.7283	0.6118
权系数		0.2626	0.2334	0.2739	0.2301

由表 1 可知, TOC 含量、含气量与产能的灰色关联度均大于 0.65, 表明这两个参数与产能之间存在显著的相关性, 而孔隙度、脆性指数与产能的灰色关联度均小于 0.65, 这两个参数与产能存在较弱相关, 计算结果与 4.1 小节结论较为一致, 关联度大小顺序为: 含气量 > TOC 含量 > 孔隙度 > 脆性指数, 权系数比值为 0.2739: 0.2626: 0.2334: 0.2301。揭示了含气量是对产能影响最大的参数, 暗示在此研究区内, 页岩气的可采性主要受限于气体总储量, 高含气量通常意味着储层具有较好的气体赋存条件; TOC 含量与产能的高关联度表明其不仅控制吸附气量还通过有机质孔隙发育影响游离气储集, 但其关联度略低于含气量, 说明 TOC 对产能的贡献部分通过含气量间接体现; 孔隙度与产能关联度低于含气量与 TOC, 表明在研究区内, 孔隙度不是产能的主要限产因素, 可能因为该区域内孔隙度普遍较高, 导致其独立贡献较低; 脆性指数与产能关联度最低, 表明工程因素对该区产能控制作用较弱, 这可能是因为该区域内脆性矿物含量普遍较高, 减弱了其影响。

4.3. 储层综合评价

依据页岩气测井评价技术规范(NB/T 10398-2020)并结合研究区实际生产需要, 确定该研究去内页岩储层分类评价标准, 通过直接赋值法(选取 1, 0.7, 0.4)对其进行赋值(表 2), 再根据上述 TOC 含量、孔隙度、含气量以及脆性指数权系数 0.2626: 0.2334: 0.2739: 0.2301, 叠加各参数的单项分类权系数, 建立 Z3 井区五峰组-龙一₁亚段储层甜点综合品质分类评价标准, 其中 I 类 $\geq$ 0.85, II 类介于 0.6-0.85, III 类<0.6(表 3)。

Table 2. Shale logging classification criteria and assigned values
表 2. 页岩测井分类标准及赋值

评价参数	分类标准及赋值					
	I 类	分值	II 类	分值	III 类	分值
TOC	>3.0	1.0	2.0~3.0	0.7	<2.0	0.4
孔隙度	>5.0	1.0	3.0~5.0	0.7	<3.0	0.4
含气量(多项式法)	>10.0	1.0	6.0~10.0	0.7	<6.0	0.4
脆性指数	>55.0	1.0	35.0~55.0	0.7	<35.0	0.4

Table 3. Comprehensive quality classification and evaluation criteria for shale
表 3. 页岩综合品质分类评价标准表

评价参数	参数权系数	单项分类赋分值			综合评价分类		
		I 类	II 类	III 类	I 类	II 类	III 类
TOC	0.2626	1.0	0.7	0.4	$\geq$ 0.85	0.6-0.85	<0.6
孔隙度	0.2334	1.0	0.7	0.4			
含气量	0.2739	1.0	0.7	0.4			
脆性指数	0.2301	1.0	0.7	0.4			

4.4. 地质甜点空间分布特征

4.4.1. 地质甜点纵向分布特征

根据上述综合评价标准, 完成 Z3 单井综合评价(图 3), 结果显示: I 类储层主要分布于龙一₁亚段 I

1249

矿山工程

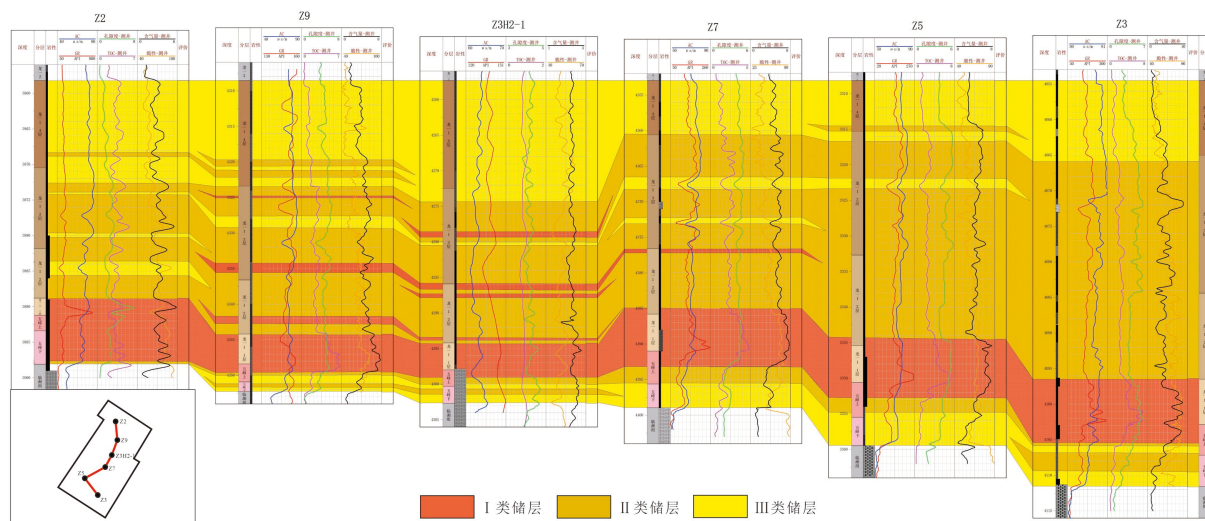


Figure 4. Cross-well profile of comprehensive shale reservoir evaluation for the target interval in Z3 Well Block

图 4. Z3 井区目的层段页岩储层综合评价连井剖面

4.4.2. 地质甜点平面分布特征

根据上述确定 Z3 井区五峰组 - 龙一₁亚段页岩储层勘探有利层位为五峰组上 - 龙一₁亚段 1 小层, 提取此层位区间内 I 类储层厚度, 绘制研究区 I 类储层厚度平面分布图(图 5), 由图得知: 研究区南西部及北西部 I 类储层厚度较厚, 东部偏薄, 其中南西部 I 类地质甜点厚度介于 8.24~9.12 m, 其位于西山背斜于西温泉背斜之间的蒲吕场向斜, 可作为下一步勘探有利区的选择目标。

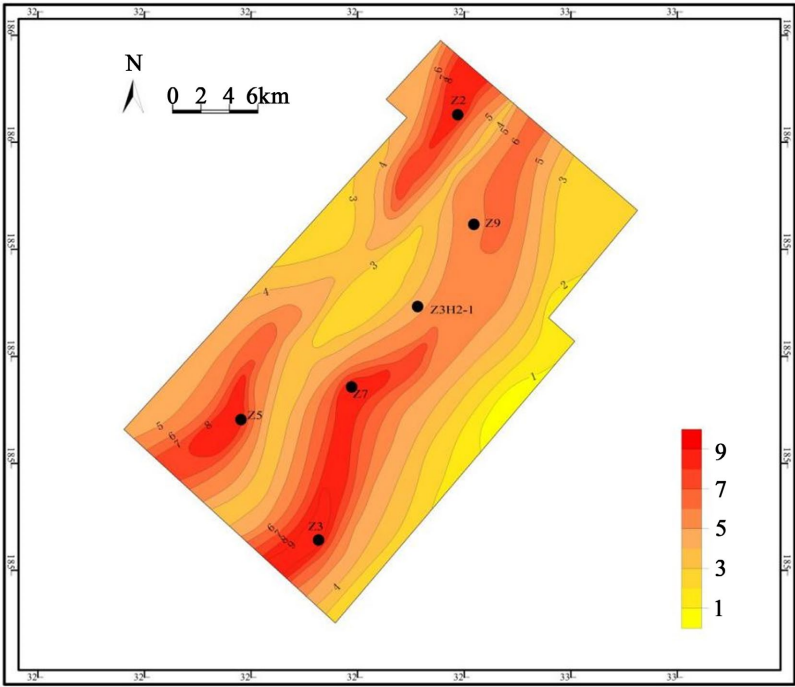


Figure 5. Thickness distribution of Class I reservoirs in the Wufeng Formation-Long 1₁¹ Sub-member, Z3 Well Block
图 5. Z3 井区五峰组 - 龙一₁亚段 1 小层 I 类储层厚度分布

5. 结论

- 1) 利用单因素相关性分析, 明确 Z3 井区五峰组 - 龙一₁亚段页岩储层产能主要受含气量与 TOC 含量控制。
- 2) 利用灰色关联分析法, 明确川中 Z3 井区五峰组 - 龙一₁亚段页岩气储层评价参数中 TOC 含量、孔隙度、含气量、脆性指数关联度大小顺序为: 含气量 > TOC > 孔隙度 > 脆性指数, 其权系数比值为 0.2739: 0.2626: 0.2334: 0.2301。
- 3) 川中 Z3 井区五峰组 - 龙一₁亚段页岩气储层 I 类地质甜点主要位于五峰组上部 - 龙一₁亚段 1 小层, 且横向发育连续性较好, 研究区西南部为下一步建议勘探区域。

基金项目

重庆科技大学科技创新基金项目“深层页岩气优质储层控制因素分析及评价标准研究——以四川盆地渝西地区足 203 井区龙马溪组页岩储层为例”(立项编号: YKJCX2420107)资助。

参考文献

[1] 祁建磊, 周丹, 喻文, 等. “双碳”背景下超临界流体技术应用与发展[J/OL]. 化工进展, 1-17.

<https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2024-1419>, 2025-11-03.

- [2] 黎茂稳, 马晓潇, 金之钧, 等. 中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 1-25.
- [3] Chen, X.J., Bao, S.J., Hou, D.J., *et al.* (2012) Method and Key Parameters for Shale Gas Resources Evaluation. *Petroleum Exploration and Development*, **39**, 566-571.
- [4] 胡曦, 李亚丁, 但霞, 等. 四川盆地泸州地区五峰组——龙一 1 亚段页岩气地质特征与富集高产主控因素[J]. 天然气技术与经济, 2024, 18(4): 15-23.
- [5] 夏勇. 复兴地区凉高山组页岩测录井解释评价与最佳靶窗选取[J]. 江汉石油职工大学学报, 2025, 38(2): 47-49.
- [6] 杨雪, 杨雨然, 张景缘, 等. 川北地区开江-梁平海槽二叠系海相页岩特征及优质储层形成机制[J]. 岩性油气藏, 2025, 37(3): 108-119.
- [7] 舒红林, 何方雨, 李季林, 等. 四川盆地大安区块五峰组——龙马溪组深层页岩地质特征与勘探有利区[J]. 天然气工业, 2023, 43(6): 30-43.
- [8] 尹兴平, 蒋裕强, 付永红, 等. 渝西地区五峰组-龙马溪组龙一 1 亚段页岩岩相及储层特征[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(4): 41-51.
- [9] 张成林, 张鉴, 李武广, 等. 渝西大足区块五峰组-龙马溪组深层页岩储层特征与勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(12): 1794-1804.
- [10] 晁会霞, 姚卫华, 杨兴科, 等. 储层综合评价方法在白豹油田中的应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2010, 25(6): 1-7.
- [11] Wu, C.F., Liu, X.L., Zhou, Q.Z. and Zhang, X. (2019) Analysis of Key Factors and Prediction of Gas Production Pressure of Coalbed Methane Well: Combining Grey Relational with Principal Component Regression Analysis. *Energy Exploration & Exploitation*, **37**, 1348-1363. <https://doi.org/10.1177/0144598719829866>
- [12] 易德生, 郭萍. 灰色理论与方法: 提要、题解、程序、应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 54-72.
- [13] 吴育平, 孙卫, 魏驰, 等. 基于聚类分析和灰色关联分析法的储层综合评价——以鄂尔多斯盆地姬塬地区长 61 储层为例[J]. 油气藏评价与开发, 2018, 8(1): 12-15+23.
- [14] 刘吉余, 彭志春, 郭晓博. 灰色关联分析法在储层评价中的应用: 以大庆萨尔图油田北二区为例[J]. 油气地质与采收率, 2005(2): 13-15.
- [15] 涂乙, 谢传礼, 刘超, 等. 灰色关联分析法在青东凹陷储层评价中的应用[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(2): 381-386.