

低渗储气库水平井砂厚计算与测井沉积学方法研究

——以榆林气田南部 L37 储气库为例

刘志军¹, 潘晓丽², 张建国¹, 郝晓凡³, 王德龙¹, 夏 勇¹, 谢 俊³, 王金凯³

(1. 中国石油长庆油田 勘探开发研究院, 陕西 西安 710021;

2. 中国石油长庆油田公司 第一采气厂, 陕西 西安 710000;

3. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘 要:由于砂体预测偏差及岩性复杂导致的沉积相变, 榆林气田存在砂体钻遇率低及水平井提前完钻问题, 影响了储气库的注采能力与开发效益。本研究以 L37 储气库为例, 采用水平井砂厚计算、统计学与克里金插值方法, 对研究区沉积模式进行了深入研究。首先, 结合岩性、测井等特征, 认为研究区发育辫状河三角洲平原亚相, 并细分为 4 种沉积微相类型; 然后, 对穿层水平井入靶处运用公式进行砂厚计算, 认为砂体由东北向西南呈席状展布, 核心发育区与河道主带展布高度吻合; 应用概率分布统计法, 建立测井相定量识别标准; 选取累计贡献率 75% 的 4 条曲线参与权重计算, 综合考虑测井曲线的组合类型及其权重, 对识别结果进行叠加, 最终识别准确率 80%, 通过克里金插值明确储气库沉积相平面展布特征; 最后, 综合各种沉积相标志, 结合储气库构造背景, 建立 L37 储气库辫状河三角洲沉积模式, 指导水平井开发部署方案的制定。

关键词:榆林气田; 山西组二段; 砂厚计算; 沉积微相识别; 沉积模式

中图分类号: TE327

文献标志码: A

Sand thickness calculation of horizontal wells and logging sedimentology methods in low-permeability gas storage reservoirs:

A case study of L37 gas storage reservoir in southern Yulin gas field

LIU Zhijun¹, PAN Xiaoli², ZHANG Jianguo¹, HAO Xiaofan³, WANG Delong¹,

XIA Yong¹, XIE Jun³, WANG Jinkai³

(1. Exploration and Development Research Institute, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710021, China;

2. No. 1 Gas Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710000, China;

3. College of Earth Sciences and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Due to sedimentary facies changes caused by sandbody prediction deviations and complex lithology, the Yulin gas field faces the problems of low sandbody encountering rate and premature drilling completion of horizontal wells, which have affected the injection-production capacity and development efficiency of gas storage reservoirs. Taking the L37 gas storage reservoir as the research object, this study conducted an in-depth investigation of the sedimentary model in the study area by employing horizontal well sand thickness calculation methods, statistical analysis, and Kriging interpolation. Firstly, an analysis of the lithological and logging data was made, finding that braided fluvial delta plain sub-facies was developed in the study area, which were further subdivided into four types of sedimentary microfacies. Subsequently, a formula was applied to calculate the sand

收稿日期: 2025-12-03

基金项目: 新型油气勘探开发国家科技重大专项(2025ZD1407105)

作者简介: 刘志军(1979—), 男, 湖北天门人, 高级工程师, 主要从事低渗-致密气田开发、储气库建设研究。

郝晓凡(2001—), 女, 山东济宁人, 博士研究生, 主要从事油气田开发方面的研究, 本文通信作者。

E-mail: haoxf0532@163.com

thickness at the entry points of layered horizontal wells. The results showed that the sand bodies exhibited sheet-like distribution from northeast to southwest, with the core development area highly consistent with the main channel belt distribution. A quantitative identification standard for log facies was established using probability distribution statistics. Four curves with a cumulative contribution rate of 75% were selected for weight calculation. By comprehensively considering the combination types and their weights, the identification results were superimposed, ultimately achieving an identification accuracy greater than 80%. Kriging interpolation was used to clarify the planar distribution characteristics of sedimentary facies in the gas storage reservoir. Finally, by integrating various sedimentary facies indicators with the structural setting of the gas storage reservoir, a braided fluvial delta sedimentary model for L37 gas storage reservoir was established to guide the formulation of horizontal well development deployment plans.

Key words: Yulin gas field; the second member of Shanxi Formation; sand thickness calculation; sedimentary microfacies identification; sedimentary model

地下储气库是将天然气注入地下封闭空间、在需要时进行开采的人工气藏,核心作用是调节季节性供需矛盾、保障能源供应安全与战略储备^[1-2]。榆林气田 L37 储气库地质条件复杂,北部主河道向南分为多条支流,河道改道频繁^[3],砂体横向非均质性强,砂体展布与沉积微相精细刻画难度大,造成部分水平井提前完钻,严重制约了储气库水平井的高效部署。因此,亟需提高该类复杂储层沉积特征的认识精度。

众多学者对榆林气田沉积相进行研究,大部分观点认为山西组二段为三角洲沉积,但对于三角洲的成因以及类型划分存在不同观点。周祺等^[4]认为气田为辫状河三角洲平原亚相,并将其划分为心滩、分流河道、洪泛平原等微相。崔瑾等^[5]则认为研究区位于辫状河三角洲平原和前缘的交界处,识别出水上、水下分流河道、分流间湾等沉积微相。更有学者认为,榆林气田南区具有海相三角洲特征^[6],但总体均基于以河流作用为主的海陆过渡相沉积模式。上述不同认识共同揭示了榆林气田山西组二段沉积环境的复杂性与过渡性特征。

测井资料信息丰富、连续性好,是沉积相识别的重要依据^[7]。传统方法依赖岩心观察与测井曲线人工解释,但易受裂缝、溶蚀孔洞等后期改造作用影响^[8],存在效率低、耗时长等问题。近年来,支持向量机^[9]、神经网络^[10]、梯度提升决策树^[11]等机器学习方法已被广泛应用于测井岩性识别。郭智等^[12]采用主成分分析优选测井参数,实现沉积微相自动判别;Yuan 等^[13]将测井曲线图形化,通过卷积神经网络识别出 6 种沉积微相;刘昕等^[14]融合地震与测井数据,利用生成对抗网络实现沉积微相从单井到平面的智能预测。上述方法显著提升了沉积相的识别效率,但在强非均质、多期河道叠置的复杂储层中,对砂体厚度与沉积微相耦合关系的定量刻画仍显不足;且前人研究未充分利用密集的水平井资料,难以实现对砂体展布和沉积微相的精细表征,无法完全满足储气库水平井精准部署的需求。

本次研究依托丰富的水平井资料,充分结合取心、岩性及测井数据,采用水平井砂厚计算方法精细刻画砂体,并运用概率分布统计学与克里金插值法明确沉积相展布规律。该套方法有效解决了原始地质认识与水平井实钻偏差的问题,丰富和完善了沉积相定性定量识别技术,为储气库后续水平井的精准部署提供了可靠地质依据。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北地块西缘,为大型多旋回克拉通盆地,具多构造体系、多旋回演化、多沉积类型特征,划分为渭北隆起、天环拗陷、陕北斜坡等 6 个构造单元。榆林气田位于陕北斜坡东北部,发育多排北东向鼻隆构造,整体东北高、西南低^[15-17],物源主要来自北部(图 1(a))。

气田上古生界自下而上发育本溪组、太原组、山西组和石盒子组。主力储层山西组二段(S_2),划分为 S_2^1 、 S_2^2 、 S_2^3 三个亚段^[18]。L37 储气库位于榆林气田西南部,多期辫状河道叠置形成大面积连片砂体。气藏类型为砂岩岩性气藏,埋深 2 850~3 100 m,储气库规划部署注采井 40 口,其中水平井 31 口、定向井 9 口(图 1(b))。本次研究的目层为 S_2^3 亚段。

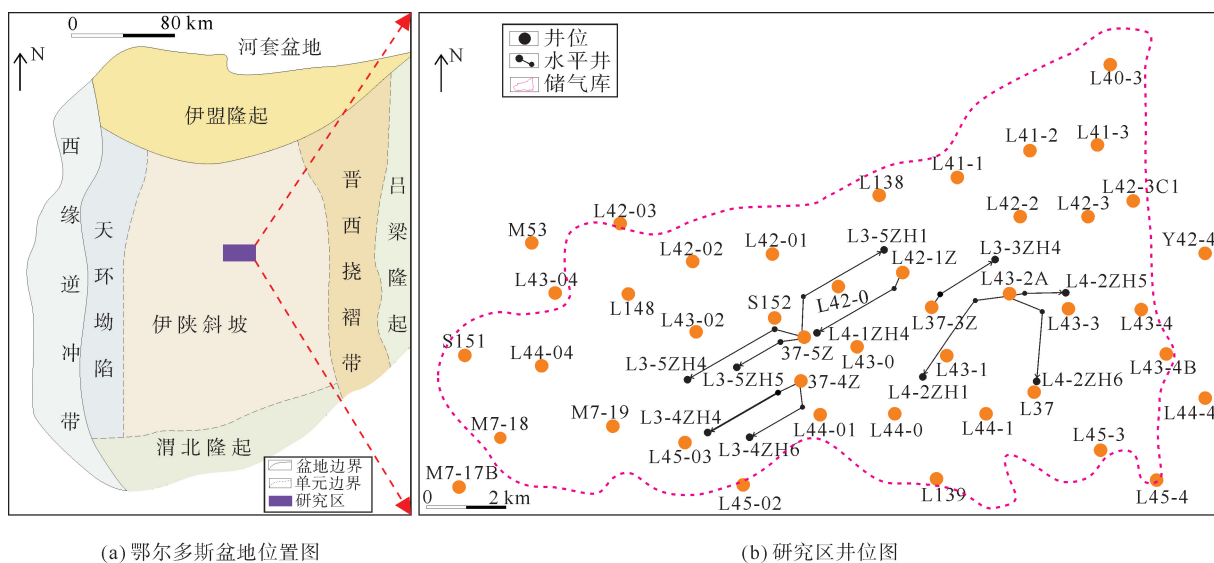


图 1 研究区区域位置图

Fig. 1 Regional location map of the study area

2 方法与数据

2.1 方法

2.1.1 水平井砂体厚度计算方法

采用公式法求取地层真厚度的核心是基于三角函数和空间几何关系,利用井轨迹、分层、地层倾角及倾向资料,通过实测参数进行计算(图 2)。本次研究采用该方法对穿层水平井入靶处的砂体厚度进行计算,以精细刻画砂体平面展布。

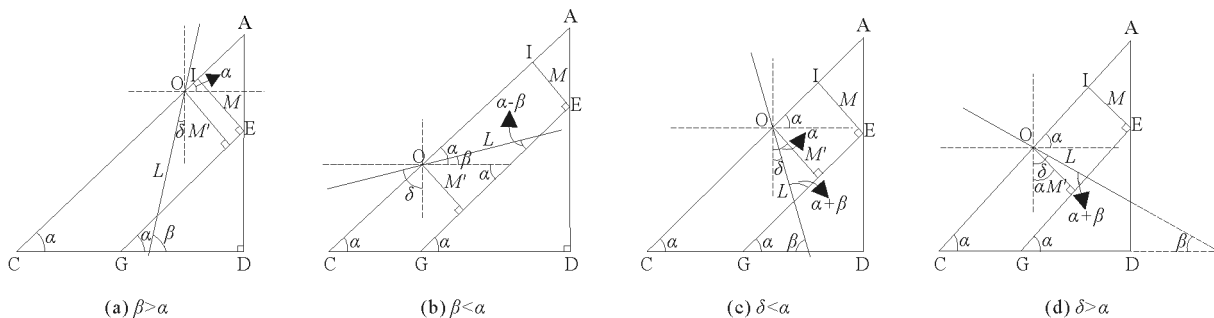


图 2 井筒与地层关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the relationship between wellbore and formation

式(1)~(3)为井筒与地层走向垂直时地层真厚度的计算式。当井筒方向与地层倾向相同时(如图 2(a)、2(b)),有:

$$M = L \times \sin(\beta - \alpha), \beta > \alpha; \quad (1)$$

$$M = L \times \sin(\alpha - \beta), \beta < \alpha. \quad (2)$$

当井筒方向与地层倾向相反时(如图 2(c)、2(d)),有:

$$M = L \times \sin(\beta + \alpha), \delta > \alpha. \quad (3)$$

式中: M 为地层真厚度, α 为地层倾角, δ 为井斜角, β 为井筒倾角($\delta + \beta = 90^\circ$), L 为井筒钻遇地层长度。

L37 储气库构造总体平缓(地层倾角 $\alpha \leq 0.5^\circ$),故研究区只存在井筒倾角 β 大于地层倾角 α 、井斜角 δ 大于地层倾角 α 两种情况。

2.1.2 沉积相识别方法

本研究在自然伽马(gamma ray, GR)、自然电位(spontaneous potential, SP)等测井曲线、岩性及沉积构造的定性分析基础上,引入概率分布统计学与克里金插值法,实现沉积相的定量识别。选用 GR、SP、声波时差(acoustic compressional slowness, AC)、密度(bulk density, DEN)、光电吸收截面指数(photoelectric effect, PE)及 ΔRLL (ΔRLL 为深侧向电阻率(deep laterolog resistivity, RLLD)与浅侧向电阻率(shallow laterolog resistivity, RLLS)的差值)6 条测井曲线进行定量识别:GR 用于岩性识别,泥岩呈高值、砂岩呈低值;AC 反映声波速度,砂岩声波速度大于泥岩;DEN 随砂岩含量的升高而增大;PE 随砂岩含量的升高而降低;SP 对渗透性及流体性质响应明显,砂岩多表现为显著负异常; ΔRLL 利用电阻率差判断流体性质与沉积微相。

以取心井的岩心资料为基础开展单井沉积微相分析,分析岩性、沉积构造、测井响应与沉积微相之间的对应关系,统计不同微相 SP、GR 等测井曲线的数值分布区间,建立初步判别标准。经多轮区间测试与验证,确定各微相的有效识别区间及单条曲线的识别精度。依据识别精度完成贡献度排序,分析曲线间信息冗余度,剔除高相关、低贡献曲线;兼顾模型简洁性与泛化能力,降低多曲线带来的过拟合风险。按照累计贡献率原则,选取累计贡献率 75% 的 4 条曲线参与权重计算。在此基础上,按照优化权重与识别概率叠合结果,利用克里金插值得到沉积微相概率分布图,从而实现沉积微相展布特征的精细刻画。

2.2 数据统计与处理

不同类型测井曲线的量纲和数量级存在差异,若直接将测井数据作为划定标准区间的原始数据,其差异性会对沉积相识别精度产生影响^[19]。因此,在进行区间标准测试前,需对数据进行预处理。本研究采用 min-max 标准化法对数据进行归一化处理,原始数据经标准化处理后,各项指标处于同一数量级,适合进行综合评价。归一化处理的计算式如下:

$$x_{\text{norm}} = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4)$$

式中: x_i 为原始数据集中第 i 个测井数据, $x_{\max}$ 为该类测井数据的最大值, $x_{\min}$ 为该类测井数据的最小值, x_{norm} 为第 i 个样本归一化后的测井值。

3 沉积相标志

3.1 岩石学特征

L37 储气库 S_2^3 亚段岩性以中-粗砂岩为主,局部含细砾岩。地层厚度 30 m,下部发育深灰-灰黑色泥岩、粗砂岩及细砾岩,中上部为浅色泥岩与中砂岩互层。岩石类型以石英砂岩和岩屑石英砂岩为主(图 3)。碎屑颗粒粒径 0.5~2.0 mm,呈次圆状,分选中等-好,孔隙式胶结,颗粒支撑(表 1),反映了距物源近、高能快速堆积的河流相沉积特征。

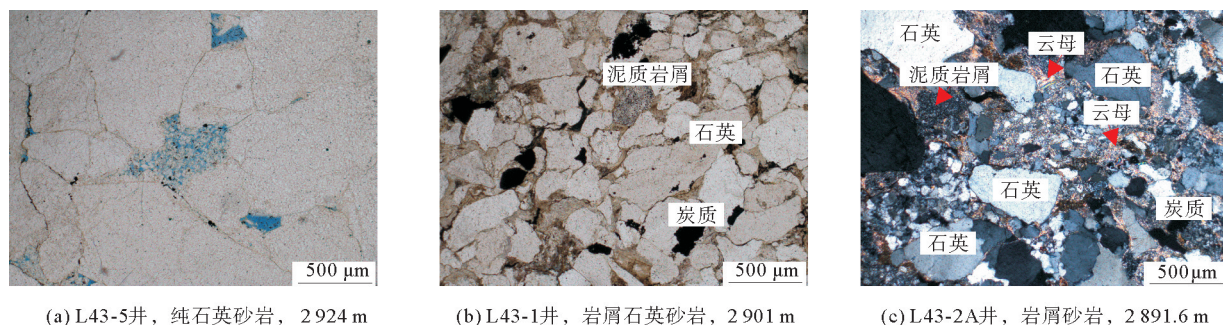


图 3 研究区岩性特征

Fig. 3 Lithologic characteristics of the study area

根据铸体薄片观察,研究区砂岩粒度概率累积曲线以两段式为主(图 4(a)),少量为两段过渡式(图 4(b))或三段式(图 4(c))。两段式中,跳跃组分粒度在 0.5~2.5 ϕ ,含量 70%,斜率 60°~75°,悬浮组分粒

度 $2.5\sim4.0\phi$,斜率 $10^{\circ}\sim20^{\circ}$,反映水动力条件复杂。在 C-M(C 为概率累积曲线上颗粒含量 1%时对应的粒径,M 为颗粒含量 50%时对应的粒径)图中(图 4(d)),递变跃移段(QR 段)最为发育,推移段(PQ 段)次之,说明研究区水动力较强且以牵引流为主,反映了辫状河河道反复迁移、频繁改道的复杂水动力特征。

表 1 碎屑岩结构成熟度统计表

Table 1 Statistics of the structural maturity of clastic rocks

井名	深度/m	粒径/mm	磨圆度	分选性	胶结类型	支撑类型
L148	3 010.2	0.3~0.9	次圆	中	再生	颗粒
L148	3 011.8	0.7~2.0	次圆	中	孔隙	颗粒
L148	3 005.5	0.2~0.4	次圆	好	再生-孔隙	颗粒
L148	3 007.0	0.3~0.5	次圆	好	再生-孔隙	颗粒
L148	3 007.8	0.3~0.5	次圆	好	再生-孔隙	颗粒
L148	3 008.6	0.3~0.7	次圆	好	再生-孔隙	颗粒
L148	3 009.7	0.3~1.0	次圆	中	再生-孔隙	颗粒
L45-4	2 894.0	0.5~1.2	次圆	好	再生	颗粒
L45-4	2 894.2	0.5~1.0	次圆	好	再生	颗粒
L45-4	2 897.0	0.7~1.5	次圆	中-好	再生	颗粒
L45-4	2 898.5	0.3~3.0	次圆	中	孔隙	颗粒
L45-4	2 894.0	0.5~1.2	次圆	好	再生	颗粒
L37	2 881.7	1.6~3.0	次圆	中	再生	颗粒
L37	2 884.5	1.2~3.5	次圆	好	再生-孔隙	颗粒

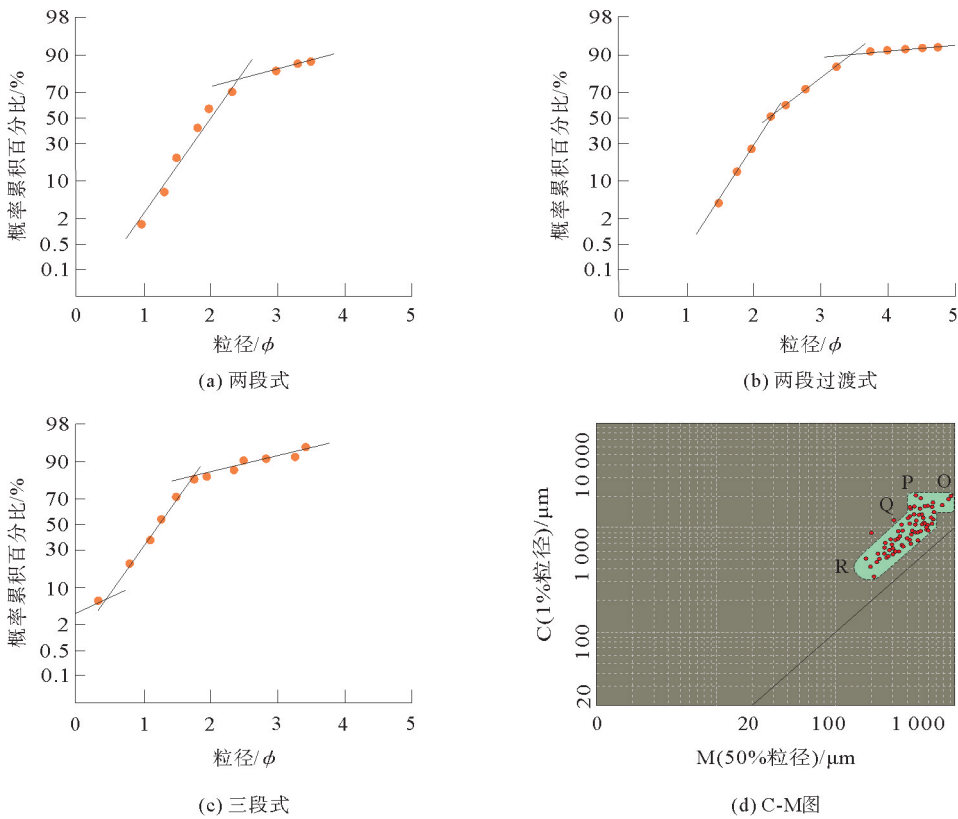
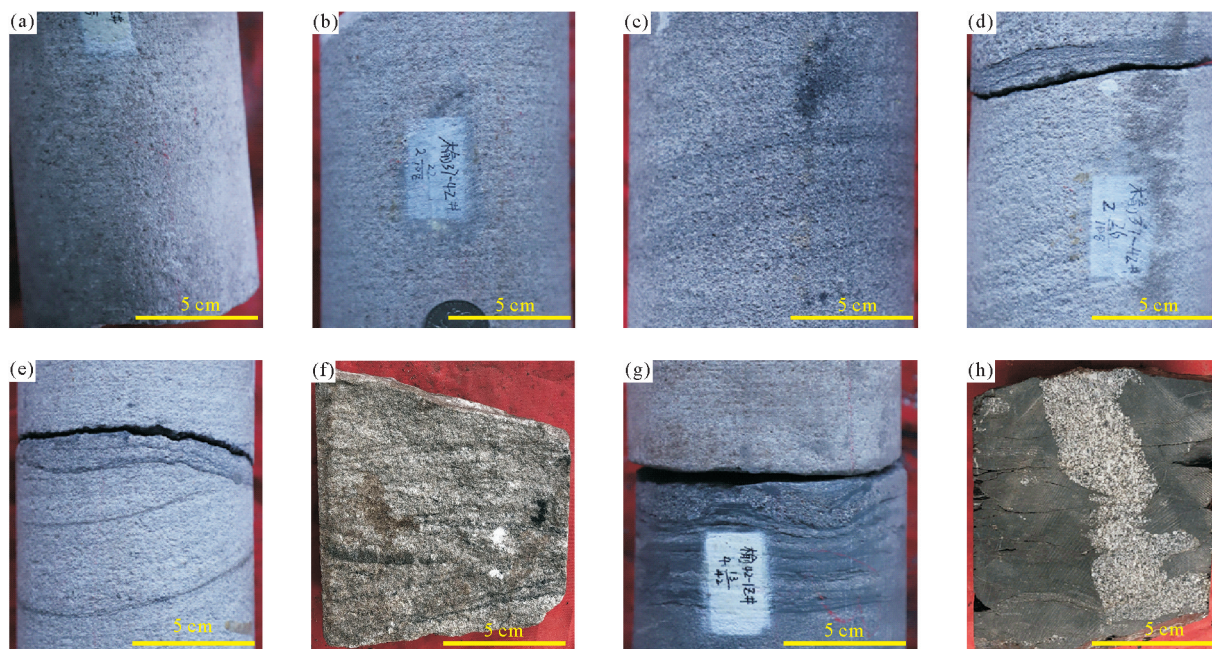


图 4 研究区粒度概率累积曲线图及 C-M 图

Fig. 4 Cumulative probability curve and C-M diagram of grain size in the study area

3.2 沉积构造特征

研究区岩心观察表明, S_2^3 亚段底部发育冲刷构造,见大量大型槽状交错层理,反映了较强的水动力特征,部分发育落淤层和缝合线,另外,发育低角度交错层理、板状交错层理及平行层理,反映了沉积时高能河道水动力环境,部分井段见叠置冲刷构造(图5)。



(a) L42-1Z 井, 平行层理, 2 984.46 m; (b) L37-4Z 井, 平行层理, 2 934.29 m; (c) L37-4Z 井, 斜层理, 2 919.7 m;
(d) L37-4Z 井, 斜层理, 2 934.78 m; (e) L37-4Z 井, 槽状交错层理, 2 933.19 m; (f) L37-4 井, 槽状交错层理, 2 877.31 m;
(g) L42-1Z 井, 底冲刷构造, 2 997.09 m; (h) M1 井, 正韵律, 2 961.59 m

图5 研究区沉积构造

Fig. 5 Sedimentary structures in the study area

3.3 岩相特征

根据 L37 储气库 9 口取心井的沉积学观察, 识别出 8 种单一岩相类型: 板状交错层理砾岩相(Gp)、槽状交错层理砾岩相(Gt)、槽状交错层理中-粗砂岩相(St)、板状交错层理中-粗砂岩相(Sp)、细-中砂岩相(Sh)、砂泥薄互层相(Fl)、泥岩相(Fm)、煤或碳质泥岩相(C)。

基于研究区构造背景与岩相特征, 认为沉积相类型为辫状河三角洲平原亚相, 可划分为分流河道、心滩、洪泛平原及河漫沼泽 4 种微相类型(图6)。

1) 分流河道(Fm-St-Sp-Fm 或 Fm-St-Sp-Sh): 水动力较强, 以中砂岩、粗砂岩及细砾岩为主, 发育平行层理、斜层理及大型槽状交错层理, 底部常见滞留砾石沉积, 整体呈正韵律, GR 曲线呈钟型。典型岩相组合包括多期河道叠置型(Fm-St-Sp-Fm)与分流河道型(Fm-St-Sp-Sh)(图6(a)、6(e)、6(f))。

2) 心滩(Fm-Gp-Sp-Fm 或 Fm-Gt-Fm-Sp-Fm): 河道拓宽使流速降低, 碎屑物在河道中心加积成滩。洪水期滩体扩大, 中-粗粒碎屑物纵向叠置, 中部常发育泥岩夹层; 岩性以中砂岩、粗砂岩为主, 发育平行层理与交错层理, GR 曲线呈锯齿状箱型或平滑箱型(图6(b)、6(g)、6(h))。

3) 洪泛平原(Fm-Fl-Fm): 洪水期水流漫溢河床, 携带细粒碎屑散布于河道周边, 砂体厚度 1~3 m, 以细粉砂岩和泥岩为主, 常见砂泥互层, GR 曲线呈锯齿状(图6(c)、6(i))。

4) 河漫沼泽(Fm-C-Fm): 发育于河道间洼地与沼泽, 规模较小且无固定水源补给, 以泥岩和碳质泥岩为主, 中部偶见煤层, GR 曲线呈低幅特征(图6(d)、6(j))。

3.4 测井定量识别

以 12 口井 S_2^3 亚段沉积相分析为基础, 将归一化处理后的测井曲线数据作为初始区间样本, 选取包含均值、覆盖总区间 80% 的数值作为沉积微相判别初始区间。利用机器学习计算优势值, 结合测井与岩

心资料构建 Petrel 模型,将初始区间输入模型,利用已有测井数据完成模型训练与验证(图 7)。将验证结果与单井相进行对比较正,采用二分查找法反复修正调优测井曲线的范围区间,得到最终的测井曲线定量识别标准(表 2)。其中,利用 GR 曲线识别心滩微相结果如图 7(a)所示。

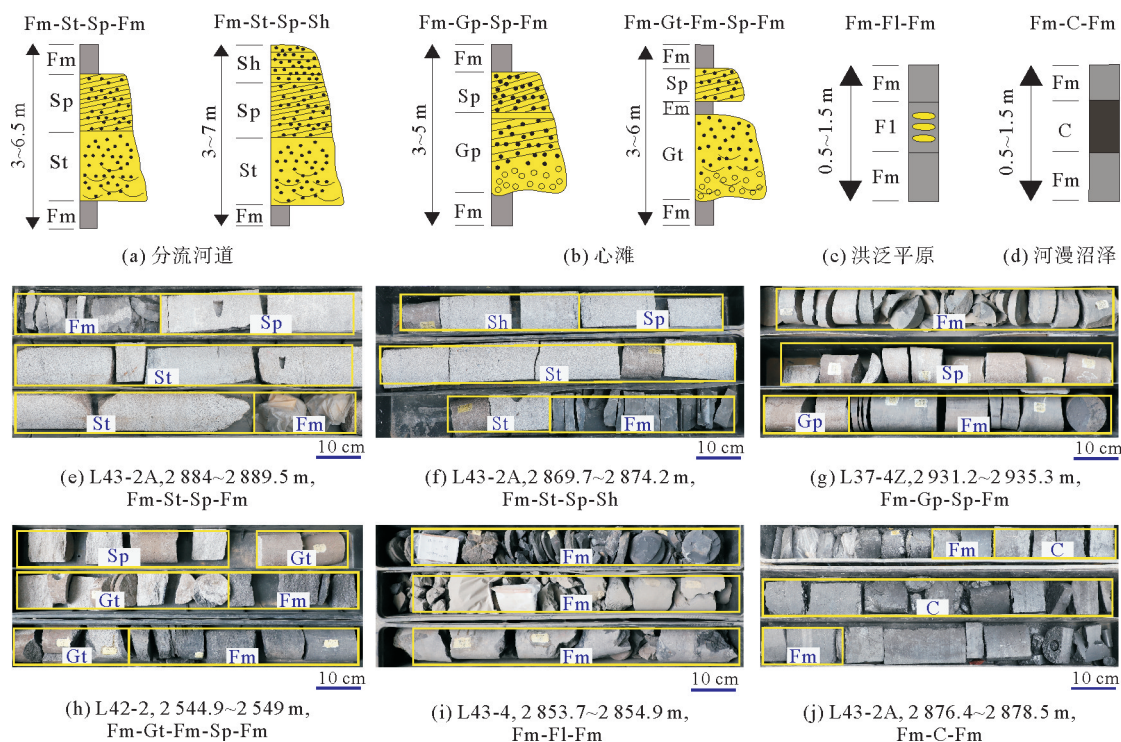


图 6 研究区岩相组合类型

Fig. 6 Lithofacies association types in the study area

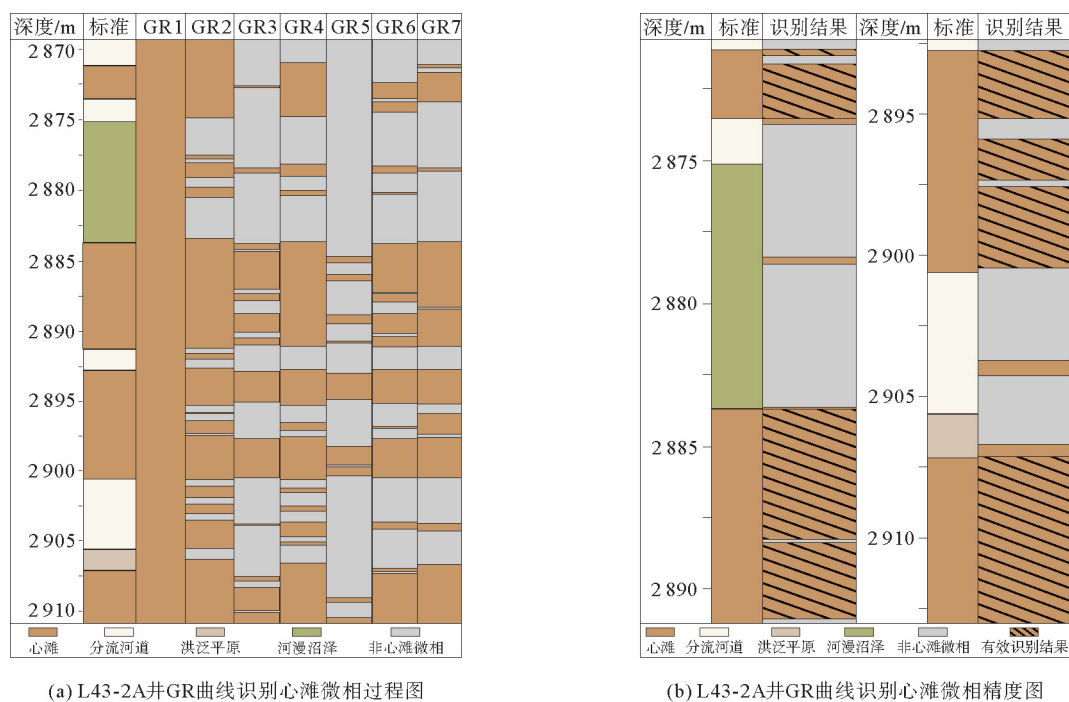


图 7 利用 GR 曲线识别沉积微相效果及精度图

Fig. 7 Effect and accuracy diagram of sedimentary microfacies identification using GR log curve

表 2 不同沉积微相测井曲线定量识别标准

Table 2 Standard for quantitative identification of microfacies logging curves of different sediments

曲线类型	心滩	分流河道	洪泛平原	河漫沼泽
GR	0~0.11	0.11~0.20	0.20~0.23	0.23~1.00
AC	0~0.20	0.25~0.31	0.31~0.34	0.34~1.00
SP	0~0.62	0.62~0.72	0.72~0.75	0.75~1.00
DEN	0~0.83	0.83~0.89	0.89~0.93	0.93~1.00
PE	0~0.42	0.42~0.53	0.53~0.69	0.69~1.00
ΔRLL	0~0.20	0.20~0.29	0.29~0.50	0.50~1.00

将标准范围内的识别结果作为有效结果,并将总有效结果与总识别结果相比,得到精度值 S :

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{eff}}} h_i}{\sum_{i=1}^N h_i} \times 100\% \quad (5)$$

式中: N 为总识别段数, N_{eff} 为有效识别段数, h_i 为第 i 段识别的微相厚度, $\sum_{i=1}^{N_{\text{eff}}} h_i$ 为有效识别段总厚度, $\sum_{i=1}^N h_i$ 为识别段总厚度。通过识别结果分别计算分流河道、心滩、洪泛平原及河漫沼泽微相对应的测井曲线识别精度值(图 7(b))。

依据精度指标综合排序结果,筛选出识别效果好的 4 条测井曲线组成识别曲线组,确保所选曲线可有效覆盖不同沉积微相的测井响应差异。计算每条曲线的权重系数(x_i),进而提升复杂辫状河沉积体系中各类沉积微相的识别精度与解释可靠性。即:

$$x_i = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} = \frac{S_i}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} \quad (6)$$

式中: x_i 为第 i 条测井曲线的归一化权重; S_i 为第 i 条测井曲线的精度值; $\sum_{i=1}^n S_i$ 为识别曲线组的总精度值,此处 $n=4$ 。

各沉积微相测井曲线精度值及权重计算结果如表 3 所示:

表 3 沉积微相测井曲线精度值及权重计算结果

Table 3 Calculation results of logging curve accuracy and weight for sedimentary microfacies

微相	曲线类型	精度值/%	累计贡献率	权重	微相	曲线类型	精度值/%	累计贡献率	权重
心滩	GR	88.4	0.20	0.283	分流河道	PE	80.6	0.23	0.299
	DEN	74.7	0.38	0.239		GR	74.5	0.44	0.276
	ΔRLL	74.9	0.55	0.240		DEN	68.2	0.63	0.253
	AC	74.0	0.72	0.237		AC	46.0	0.76	0.170
	PE	61.0	0.86	—		SP	42.7	0.88	—
	SP	60.7	1.00	—		ΔRLL	42.3	1.00	—
洪泛平原	DEN	73.6	0.21	0.273	河漫沼泽	SP	96.0	0.24	0.325
	PE	70.9	0.40	0.263		GR	70.0	0.42	0.237
	SP	63.3	0.58	0.235		AC	64.3	0.58	0.218
	GR	60.2	0.75	0.224		ΔRLL	63.7	0.75	0.216
	AC	40.7	0.86	—		PE	56.0	0.89	—
	ΔRLL	50.0	1.00	—		DEN	44.0	1.00	—

状展布,由东北向西南逐渐缩小,具有中部富集、西北变薄的特征,核心发育区与河道展布高度吻合。研究区主要发育分流河道和心滩微相,其中 S_2^{3-1} 小层河道宽阔,心滩规模较大、数量多且分散; S_2^{3-2} 小层水动力增强,心滩数量和规模相对较大,分流河道范围收缩,连通性变弱,仅边缘保留少量洪泛平原沉积; S_2^{3-3} 小层物源供给减少,分流河道范围明显收缩,河漫沼泽广泛发育。

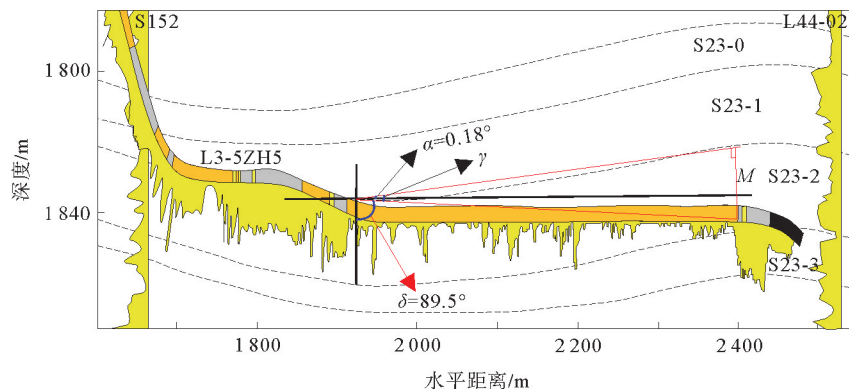
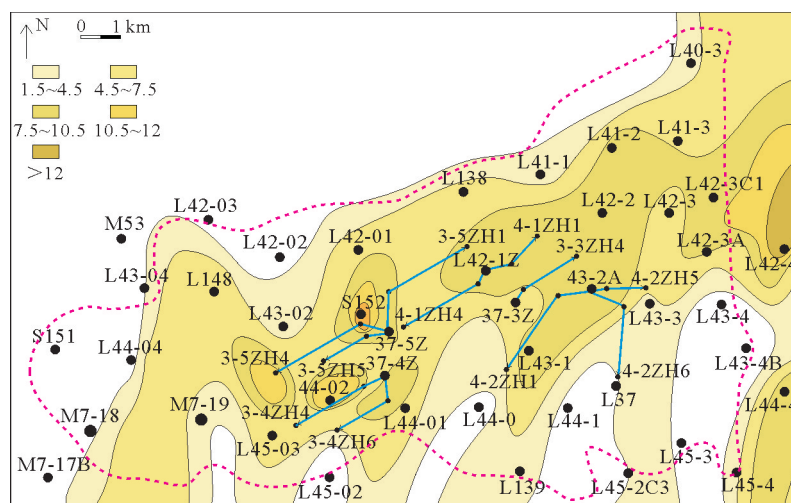
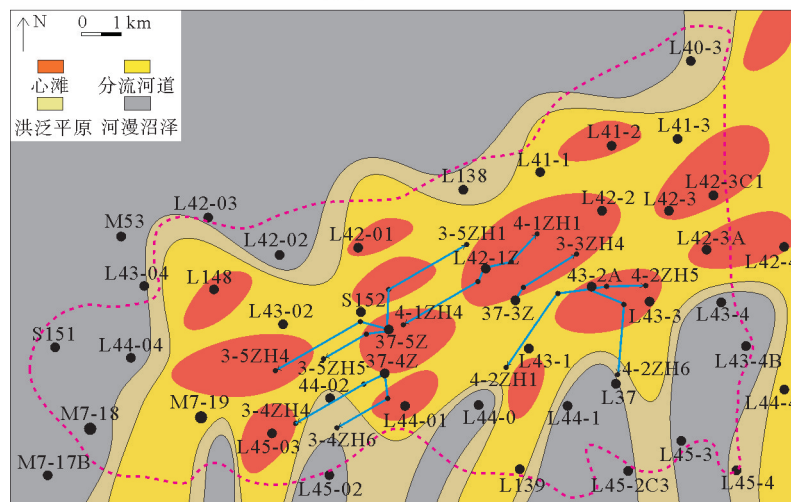


图 9 L3-5ZH5 井 S_2^{3-2} 小层砂厚分布图

Fig. 9 Sand thickness distribution chart of S_2^{3-2} submember for Well L3-5ZH5



(a) S_2^{3-2} 小层砂厚图



(b) S_2^{3-2} 小层沉积微相平面图

图 10 研究区 S_2^{3-2} 小层砂体厚度及沉积相分布图

Fig. 10 Sand body thickness and microfacies distribution of S_2^{3-2} submember in the study area

4.2 沉积模式

晚石炭世早期 S_2 段沉积时期,受祁连-中亚海槽拉张与盆地坳陷沉降控制,鄂尔多斯盆地在奥陶系侵蚀面之上接受石炭一二叠系沉积。经本溪期、太原期海相沉积后,华力西末期受南北海槽挤压影响,海相沉积结束,进入山西期、下石盒子期的海-陆交互相及陆相沉积阶段,形成山西组-石盒子组含气层系。

受北部物源与盆地缓坡背景共同控制,研究区发育辫状河三角洲平原亚相(图 11),进一步划分为分流河道、心滩、洪泛平原及河漫沼泽微相。分流河道迁移频繁,不断分叉改道;心滩内充填多个垂向加积的正韵律砂岩,砂体横向连片、纵向多期叠置,展布稳定且连通性较好,心滩及分流河道中部为优质储层;洪泛平原与河漫沼泽的细粒沉积为储气库提供了关键侧向封堵。沉积微相对气藏分布具有显著控制作用,其中,心滩和分流河道的物性较好,为优质储层。

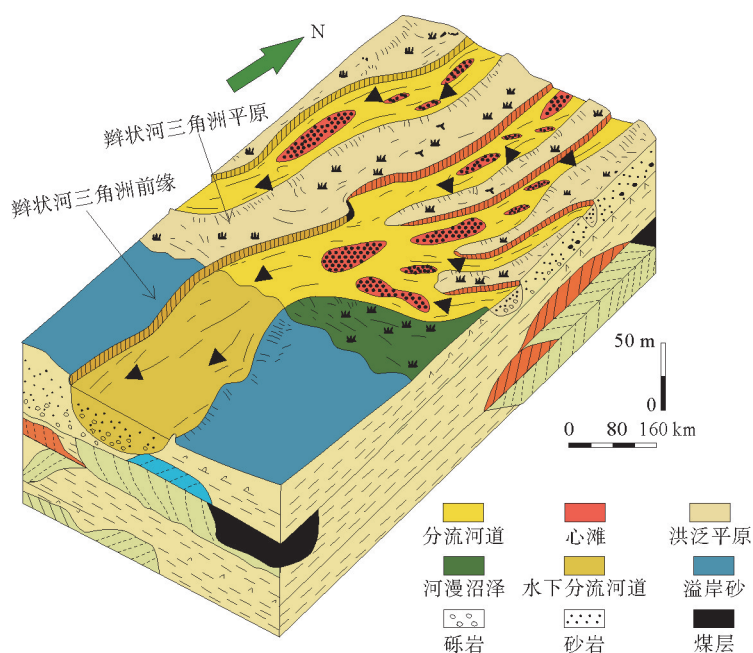


图 11 研究区 S_2^3 亚段辫状河三角洲沉积模式

Fig. 11 Sedimentary model of braided river delta in the S_2^3 sub-member of the study area

5 结论

1) 基于岩心、岩相及测井综合研究,采用概率累积分布统计与克里金插值方法,结合穿层水平井砂体厚度计算,刻画了鄂尔多斯盆地 L37 储气库砂体与沉积相展布,建立了 S_2^3 亚段辫状河三角洲沉积模式。

2) 研究区 S_2^3 亚段以石英砂岩为主,概率累积曲线以两段式为主,C-M 图具牵引流特征,反映水动力条件复杂、河道反复迁移分流的沉积特征。识别出 8 种单一岩相,以颗粒支撑砾岩(Gp)、槽状交错层理砾岩(Gt)和槽状交错层理砂岩(St)为主,主要岩相组合为 Fm-St-Sp-Sh,呈现正韵律主导的砂体垂向叠置特征。

3) 通过水平井砂厚计算式对穿层水平井入靶点进行精细计算,结果显示砂体厚度中部富集、西北减薄,核心区与河道展布吻合。研究区属辫状河三角洲平原亚相,发育河漫沼泽、洪泛平原、分流河道及心滩微相。基于 4 条优选测井曲线的加权叠加与克里金插值,识别准确率达 80%。

4) S_2 段沉积时期,北部碎屑物质经辫状河搬运进入湖盆,在缓坡地带形成宽浅河道,碎屑物质垂向加积形成心滩;漫出河道的细粒物质形成洪泛平原及河漫沼泽。心滩与分流河道砂体叠置连片,构成主力储层,洪泛平原与河漫沼泽则提供侧向封堵。

参考文献:

- [1] 马新华,郑得文,魏国齐,等.中国天然气地下储气库重大科学理论技术发展方向[J].天然气工业,2022,42(5):93-99.
MA Xinhua,ZHENG Dewen,WEI Guoqi,et al. Development directions of major scientific theories and technologies for underground gas storage[J]. Natural Gas Industry,2022,42(5):93-99.
- [2] 郑得文,完颜祺琪,赵凯.中国天然气地下储气库发展现状与前景展望[J].国际石油经济,2025,33(7):37-45.
ZHENG Dewen,WANYAN Qiqi,ZHAO Kai. Development status and prospect of underground natural gas storage in China[J]. International Petroleum Economics,2025,33(7):37-45.
- [3] 贾爱林,孟德伟,王国亭,等.鄂尔多斯盆地不同类型气藏开发技术与开发模式[J].石油勘探与开发,2025,52(3):692-703.
JIA Ailin,MENG Dewei,WANG Guoting,et al. Development technologies and models of different types of gas reservoirs in Ordos Basin,NW China[J]. Petroleum Exploration and Development,2025,52(3):692-703.
- [4] 周祺,郑荣才,赵正文,等.高分辨率层序地层学的应用:以鄂尔多斯盆地榆林长北气田山西组2段为例[J].石油物探,2008,47(1):77-82.
ZHOU Qi,ZHENG Rongcai,ZHAO Zhengwen,et al. Application of high resolution sequence stratigraphy:Case study of the second member of Shanxi formation in Yulin Changbei gas field,Ordos basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,2008,47(1):77-82.
- [5] 崔瑾,郑荣才,张建武,等.鄂尔多斯盆地榆林气田山二段沉积微相及砂体展布规律[J].成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(1):25-33.
CUI Cui,ZHENG Rongcai,ZHANG Jianwu,et al. Sedimentary microfacies and sandbody distribution rule of Member 2 of Shanxi Formation in the Yulin gas field,Ordos Basin,China[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science and Technology Edition),2013,40(1):25-33.
- [6] FU J H,WANG J M,LI C,et al. Study on the sedimentary characteristics of braided fluvial fan:Taking the Shan-2 Member of the Shanxi Formation with XQ gas storage in the Ordos Basin as an example[J/OL]. Journal of Taibah University for Science,2024,18(1). DOI:10.1080/16583655.2023.2286715.
- [7] 余继峰,付文钊,袁学旭,等.测井沉积学研究进展[J].山东科技大学学报(自然科学版),2010,29(6):1-8.
YU Jifeng,FU Wenzhao,YUAN Xuexu,et al. Research progress of logging sedimentology[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2010,29(6):1-8.
- [8] FENG Q F,XIAO Y X,HOU X L,et al. Logging identification method of depositional facies in Sinian Dengying Formation of the Sichuan Basin[J]. Petroleum Science,2021,18(4):1086-1096.
- [9] 管耀,王清辉,冯进,等.基于机器学习的蚀变火成岩测井综合岩性识别:以南海北部珠江口盆地惠州26-6井区为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2024,54(1):345-358.
GUAN Yao,WANG Qinghui,FENG Jin,et al. Comprehensive lithology recognition of altered igneous reservoirs based on machine learning for wireline and cutting logs in Huizhou Depression,Pearl River Mouth Basin,Northern South China Sea[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition),2024,54(1):345-358.
- [10] 向旻,齐兴华,张峰玮,等.深度学习在煤层气测井解释中的应用研究[J].地质与勘探,2020,56(6):1305-1312.
XIANG Min,QI Xinghua,ZHANG Fengwei,et al. Application of deep learning to coalbed methane logging interpretation[J]. Geology and Exploration,2020,56(6):1305-1312.
- [11] 马陇飞,萧汉敏,陶敬伟,等.基于梯度提升决策树算法的岩性智能分类方法[J].油气地质与采收率,2022,29(1):21-29.
MA Longfei,XIAO Hanmin,TAO Jingwei,et al. Intelligent lithology classification method based on GBDT algorithm[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2022,29(1):21-29.
- [12] 郭智,杨少春,贾爱林,等.薄砂层多开发层系油田测井精细解释方法[J].石油学报,2013,34(6):1137-1142.
GUO Zhi,YANG Shaochun,JIA Ailin,et al. Fine log interpretation for oilfields with thin sands and multiple developed layer systems[J]. Acta Petrolei Sinica,2013,34(6):1137-1142.
- [13] YUAN X Y,WANG X D,WANG S T,et al. Research on an intelligent sedimentary microfacies recognition method based on convolutional neural networks within the sequence stratigraphy of well logging curve image groups[J/OL]. Applied Sciences,2025,15(13). DOI:10.3390/app15137322.
- [14] 刘昕,孙胜,张立强,等.地震属性驱动的条件生成对抗网络沉积微相模型构建[J].中国石油大学学报(自然科学版),

2025,49(4):1-10.

LIU Xin, SUN Sheng, ZHANG Liqiang, et al. Construction of sedimentary microfacies model based on conditional generative adversarial network[J]. Journal of China University of Petroleum(Natural Science), 2025, 49(4): 1-10.

- [15] 周义军, 邓秀芹, 董迎春, 等. 鄂尔多斯盆地西缘天环坳陷洪德地区断裂发育特征及成藏意义[J/OL]. 地质学报, 2025, 1-11[2025-12-03]. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2025426>.

ZHOU Yijun, DENG Xiuqin, DONG Yingchun, et al. Characteristics of fault development and their significance in hydrocarbon accumulation in Hongde area, Tianhuan depression, western margin of Ordos basin[J/OL]. Acta Geologica Sinica, 2025, 1-11[2025-12-03]. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2025426>.

- [16] 胡芸冰, 刘燕, 郭英海, 等. 鄂尔多斯盆地南缘上石炭统本溪组泥岩元素地球化学特征及沉积环境启示[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(1): 13-23.

HU Yunbing, LIU Yan, GUO Yinghai, et al. Elemental geochemical characteristics of mudstones in Upper Carboniferous Benxi Formation southern Ordos Basin and their enlightenment to sedimentary environment[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2022, 41(1): 13-23.

- [17] 吴勇, 王旭旭, 李永洲, 等. 海陆过渡相页岩层系沉积与古地貌空间格局的响应关系: 以鄂尔多斯盆地东缘山西组 Sh_3^2 亚段为例[J/OL]. 天然气地球科学, 1-17[2026-03-05]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1177.TE.20251029.1132.002>.

WU Yong, WANG Xuxu, LI Yongzhou, et al. Response relationship between sedimentation and paleogeomorphic spatial pattern of marine-continental transitional shale strata: A case study of the $Shan_3^2$ sub-member of Shanxi Formation, eastern margin of Ordos Basin[J/OL]. Natural Gas Geoscience, 1-17[2026-03-05]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1177.TE.20251029.1132.002>.

- [18] 孙予舒, 黄芸, 梁婷, 等. 基于 XGBoost 算法的复杂碳酸盐岩岩性测井识别[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(4): 98-106.

SUN Yushu, HUANG Yun, LIANG Ting, et al. Identification of complex carbonate lithology by logging based on XGBoost algorithm[J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(4): 98-106.

- [19] 高丽华, 夏迪, 韩作振, 等. 临南洼陷北部沙三中亚段砂质碎屑流储层定量分类评价[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(1): 71-81.

GAO Lihua, XIA Di, HAN Zuozhen, et al. Reservoir quantitative classification and evaluation of sand debris flow in middle-Es3 of north of Linnan subsag[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2018, 37(1): 71-81.

(责任编辑: 高丽华)