

基于 Fisher 判别的混积岩测井相定量表征及沉积模式分析

——以渤海湾盆地大芦湖油田为例

黄文欢¹, 蒋恕^{2,3*}, 段龙飞², 张鲁川^{2,4}, 周晓鹏², 陈全腾⁵, 丁慧霞⁵

1. 中石化胜利油田分公司鲁胜石油开发有限责任公司, 山东东营 257000
2. 中国地质大学(武汉), 构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074
3. 中国石油大学(北京), 地球科学学院油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249
4. 西南石油大学, 四川成都 610500
5. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司纯梁采油厂, 山东滨州 256504

摘要: 针对渤海湾盆地大芦湖油田西部沙四纯上亚段及沙三下亚段混积岩储层岩性复杂、非均质性强导致的岩相识别困难与沉积规律认识不足, 本研究综合利用钻录井、测井及地震资料, 在构建等时地层格架的基础上, 应用 Fisher 判别分析进行混积岩测井相定量表征, 并综合揭示了混积岩沉积演化规律。结果表明:

(1) 基于 Fisher 判别分析, 优选自然伽马(GR)、声波时差(AC)、体积密度(DEN)和补偿中子孔隙度(CNL)测井曲线, 分序列建立砂-泥和灰-泥系统岩性定量识别模型, 有效解决了灰岩与砂岩测井响应重叠问题, 显著提升了岩性识别精度, 砂-泥系统验证集岩性识别正确率为 79.5%, 粉砂岩预测精度为 95%; 灰-泥系统回判总正确率达 84.5%。(2) 沙四纯上亚段高位体系域发育浅湖-半深湖相, 岩性为灰质页岩与泥岩互层, 受古水深和盐度的控制, 有机质呈中西部富集和东南部局部发育的格局, 集中在 0.8%~1.9%; 沙三下亚段低位和湖扩体系域以半深湖相为主, 有机质北部和南部富集, TOC 含量集中在 0.9%~2.3%; 沙三下亚段 HST 发育辫状河三角洲-半深湖复合沉积体系, 盆地边缘发育三角洲前缘粉砂岩相, 致有机质保存条件变差, 洼陷中心保留半深湖灰泥韵律组合, 富有机质泥质页岩占优。(3) 建立四类岩相垂向和平面组合模式: 垂向组合为厚层砂夹薄泥型、厚层泥夹薄砂型、厚层灰质页岩夹薄泥型和厚层泥夹薄灰质页岩型。平面上, 混积岩沉积体系由西南向东北依次过渡为‘粉(细)砂岩相-泥质页岩相-灰质页岩相’, 表现出明显的带状递变格局。平面上西部及西南部陡岸发育辫状河三角洲与近岸水下扇复合体, 低位和高位体系域破折带之下的斜坡带和湖盆中发育滑塌成因浊积岩体, 东部及东北部缓坡区发育半深湖和深湖环境中灰质为主的沉积相, 泥质页岩和灰质页岩相向湖盆中心迁移。本研究为湖相混积岩测井相预测提供了定量化理论依据, 为富含有机质烃源岩预测、细粒储层类型预测、沉积规律以及油气勘探研究提供指导。

关键词: 混积岩; Fisher 判别法; 测井相定量表征; 富有机质页岩; 沉积模式

中图分类号: TE121.3 P631.8

收稿日期: 2025-09-01

1 **Quantitative Characterization of Log Facies and Depositional Model of**
2 **Mixed Siliciclastic-Carbonate Rocks Based on Fisher Discriminant -**
3 **Case Study on the Daluhu Oilfield, Bohai Bay Basin**

4 Huang Wenhuan¹, Jiang Shu^{2,3*}, Duan Longfei², Zhang Luchuan^{2,4},

5 Zhou Xiaopeng², Chen Quanteng⁵, Ding Huixia⁵

6 *1. Lusheng Petroleum Development Co., Ltd. of Shengli Oilfield Branch, Sinopec, Dongying, Shandong, 257000,*

7 *China*

8 *2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources Ministry of Education, China University of Geosciences,*

9 *Wuhan, Hubei, 430074, China*

10 *3. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum, Beijing, 102249,*

11 *China*

12 *4. Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China*

13 *5. Chunliang Oil Production Plant of Shengli Oilfield, Sinopec, Binzhou, Shandong, 256504, China*

基金项目：国家重点研发计划项目（Nos.2022YFF0801202，2022YFF0801200）；国家自然科学基金项目（No.42072174）。
作者简介：黄文欢（1985-），男，硕士学历，高级工程师，主要从事油气田开发研究。ORCID: 0009-0000-8485-9450. E-mail:
huangwenhuan.slyt@sinopec.com

*通讯作者：蒋恕, Email: jiangsu@cug.edu.cn

14 **Abstract:** The lithological complexity and strong heterogeneity of the mixed siliciclastic and
15 carbonate reservoirs result in difficulties in lithofacies identification and insufficient understanding
16 of depositional patterns in the upper Shahejie 4 Member and lower Shahejie 3 Member in the
17 western Dalu Lake Oilfield, Bohai Bay Basin. This study integrates drilling, logging, and seismic
18 data. On the basis of a chronostratigraphic framework, Fisher discriminant analysis was applied for
19 quantitative characterization of mixed siliciclastic and carbonate lithofacies from well logs, and the
20 depositional evolution of mixed sediments was comprehensively revealed. The results show that: (1)
21 Based on Fisher discriminant analysis, quantitative lithology identification models for sand -
22 mudstone and limestone - mudstone systems were established within subsequences using optimally
23 selected natural gamma ray (GR), the sensitivity of acoustic time difference (AC), density (DEN)
24 and compensated neutron (CNL) logging curves, effectively addressing the problem of overlapping
25 log responses between limestone and sandstone and significantly improving lithology identification
26 accuracy. For the sand - mudstone system, the lithology identification accuracy in the validation set
27 was 79.5%, with a siltstone prediction accuracy of 95%; for the limestone - mudstone system, the
28 overall back-prediction accuracy reached 84.5%. (2) The highstand systems tract (HST) of the upper
29 Shahejie 4 Member is dominated by shallow-lake to semi-deep-lake facies, consisting of interbedded
30 calcareous shale and mudstone. Controlled by paleo-water depth and salinity, organic matter is
31 enriched in the central - western and locally in the southeastern parts, with contents mainly between
32 0.8%-1.9%. The lowstand and lake-expansion systems tracts of the lower Shahejie 3 Member are
33 dominated by semi-deep-lake facies, with organic matter enriched in the northern and southern areas
34 and TOC content concentrated at 0.9% - 2.3%. The HST of the lower Shahejie 3 Member develops a
35 braided-delta to semi-deep-lake depositional system, with siltstone delta-front facies along basin
36 margins leading to poorer organic matter preservation, while the basin center retains semi-deep-lake
37 calcareous - shale rhythmic assemblages dominated by organic-rich argillaceous shale. (3) Four
38 types of vertical lithofacies association models were established: thick-bedded sandstone interbedded

39 with thin mudstone, thick-bedded mudstone interbedded with thin sandstone, thick-bedded
40 calcareous shale interbedded with thin mudstone, and thick-bedded mudstone interbedded with thin
41 calcareous shale. In plan view, the mixed-sedimentary depositional system transitions sequentially
42 from southwest to northeast- “silty (fine) sandstone facies-muddy shale facies-calcareous shale
43 facies” -and exhibits a pronounced belt-like zonation pattern. In the western and southwestern
44 steep-margin areas, braided river delta and nearshore subaqueous fan complexes are developed.
45 Within the slope zone and basin beneath the fault belts of the lowstand and highstand systems tracts,
46 slump-derived turbidite sand bodies occur. In the eastern and northeastern gentle-slope zones,
47 calcareous-dominated sedimentary facies formed in semi-deep to deep lacustrine environments, with
48 muddy shale and calcareous shale facies migrating toward the basin center. This study provides a
49 quantitative theoretical basis for lacustrine mixed lithofacies prediction from well logs, offering
50 guidance for organic-rich source rock and reservoir prediction, depositional pattern analysis, and oil
51 and gas exploration.

52 **Key words:** mixed siliciclastic-carbonate rocks; Fisher discriminant analysis; quantitative
53 characterization of log facies; organic-rich shale; depositional model.

54

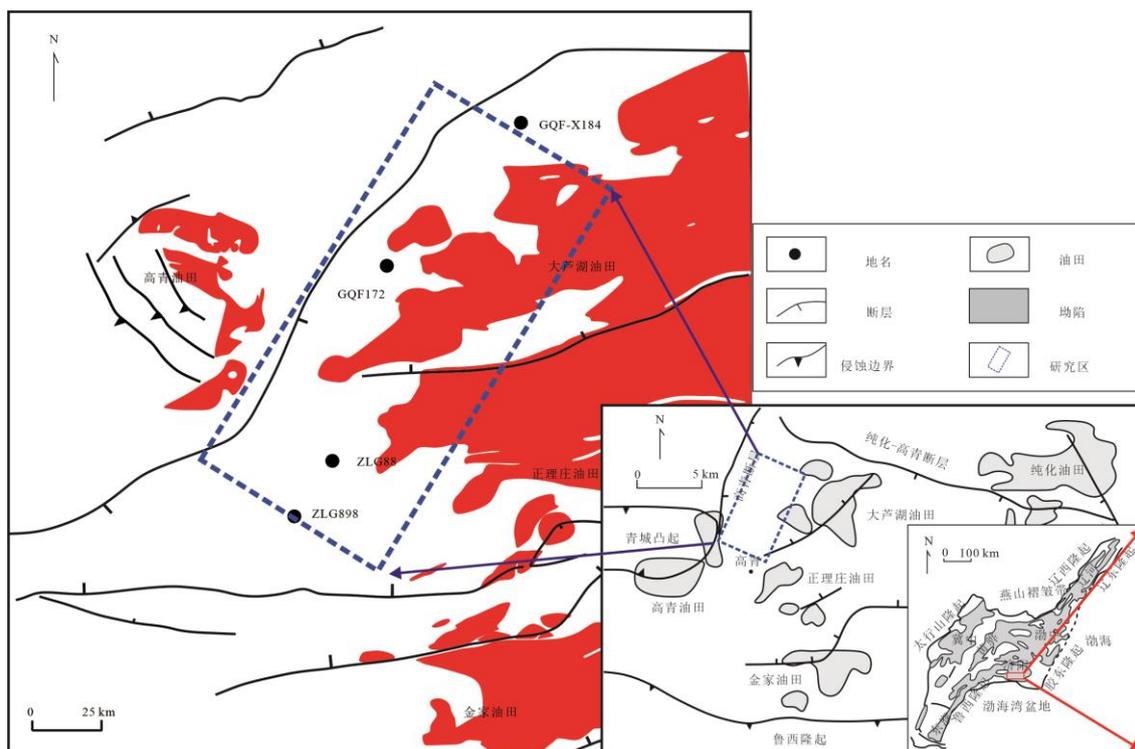
55 混积岩是指陆源碎屑与碳酸盐组份在同一岩层内的混合或者在垂向和横向空间上构成互
56 层的混合(李楚楚等, 2023)。在美国二叠盆地和渤海湾等超级盆地中发育大量的浊积岩、混积
57 岩、细粒页岩和碳酸盐岩等新领域的勘探对象(Kvale *et al.*, 2020; 蒋恕等, 2022; 邹才能等, 2023;
58 徐长贵等, 2024; 王永诗等, 2025; 叶茂松等, 2025)。混积岩作为陆源碎屑与碳酸盐组分混杂形
59 成的岩石类型, 常发育于湖泊、三角洲及海陆过渡相沉积环境, 尤其陆相混积岩岩相的复杂性
60 及强非均质性等特点导致测井响应特征重叠交错, 常规岩性识别方法难以实现精确判别, 准确
61 识别混积岩的岩相识别对于沉积相刻画、储层表征及预测等均具有重要意义(Wang *et al.*, 2014;
62 毛振强等, 2020; 潘进等, 2023)。混积岩的高精度测井识别是个难题, 冯冲等(2020)利用测井交
63 交会图和箱型图法对混积岩进行了半定量的测井识别; 李楚楚等(2022)通过测井交会图并依据自
64 然电位与自然伽马建立简单的混积岩识别参数模型; Duan *et al.*(2020)通过采用决策树方法对
65 混积岩进行逐层筛选和测井识别。这些传统的测井识别方法通过理论图版等资料对岩性进行
66 人工划分, 经多参数测井交会图建立解释标准岩性推断, 对于复杂岩性难以建立明确判别界
67 限, 岩性识别准确率偏低, 且流程繁琐、工作量大、偏定性分析(Abouelresh and Slatt, 2012; 王
68 民等, 2023)。机器学习方法在岩相测井识别中具有较高的效率与精度, 前人常通过人工神经网络
69 网络(ANN)、多分辨率图聚类(MRGC)、K最近邻(KNN)等机器学习方法, 开展砂岩类相、
70 碳酸盐岩岩相等组合较为简单的岩性识别研究(Aghchelou *et al.*, 2012; 王民等, 2023), 但MRGC
71 方法操作流程复杂且分类效果显著受人工预设聚类数影响; ANN虽具强大非线性映射能力,
72 却存在易陷入局部极值及样本依赖性强的缺陷; KNN算法样本数量不均衡或时, 预测偏差大
73 (Luo *et al.*, 2018), 且基于此类方法的混积岩测井相定量识别研究较欠缺。Fisher判别分析是一
74 种基于方差分析思想的线性判别方法, 其核心原理是通过寻找最优投影向量将高维数据降维
75 至低维判别空间, 实现组内离散度最小化与组间离散度最大化(Dong *et al.*, 2022; Zhao *et al.*,
76 2022)。Fisher判别分析具有算法稳健、准确率高及操作简便等优点, 且相较于贝叶斯判别和距
77 离判别, 在解决多指标判别问题时具有更好的数值稳定性, 且能突破常规方法的分辨率局限,
78 实现对复杂岩性组合的分类(Dong *et al.*, 2016; Song *et al.*, 2023)。

79 鉴于此, 本研究以渤海湾盆地博兴洼陷大芦湖油田西部沙三下亚段和沙四纯上亚段发育
80 的复杂多变混积岩为研究对象, 基于测井、地震及钻录井资料等建立目的层等时地层格架, 通
81 过Fisher判别分析方法构建不同准层序下混积岩测井相定量表征模型, 并通过井震联合分析
82 揭示混积岩相空间展布规律, 明确不同沉积环境岩性组合特征, 进而阐明沉积体系空间演化模
83 式, 为储层预测提供理论依据, 指导有利圈闭识别与勘探目标优选。

84

85 1 区域地质背景

86 博兴洼陷位于渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷北部断块区，其西北临青城—平方王凸起，南
87 接鲁西隆起，东北部与牛庄洼陷、利津洼陷相邻(高波等, 2025)。大芦湖油田地处博兴洼陷西北
88 部的高青断层下降盘，位于金家三角洲前缘，紧邻青城凸起，处于三角洲的前缘坡折地带，具
89 有优越的油气成藏条件。研究区处于大芦湖油田西部(图 1)，目的层沙四纯上亚段以及沙三
90 下亚段沉积主要受南部、东南部鲁西隆起的三角洲体系、西部青城凸起的近岸水下扇体系三大
91 物源体系控制，古气候呈现干旱向湿润过渡的演化特征，伴随古盐度逐渐降低、古物源输入强
92 度持续递增的动态过程，发育富有机质细粒沉积岩，岩相种类多而复杂(林中凯等, 2023)。
93



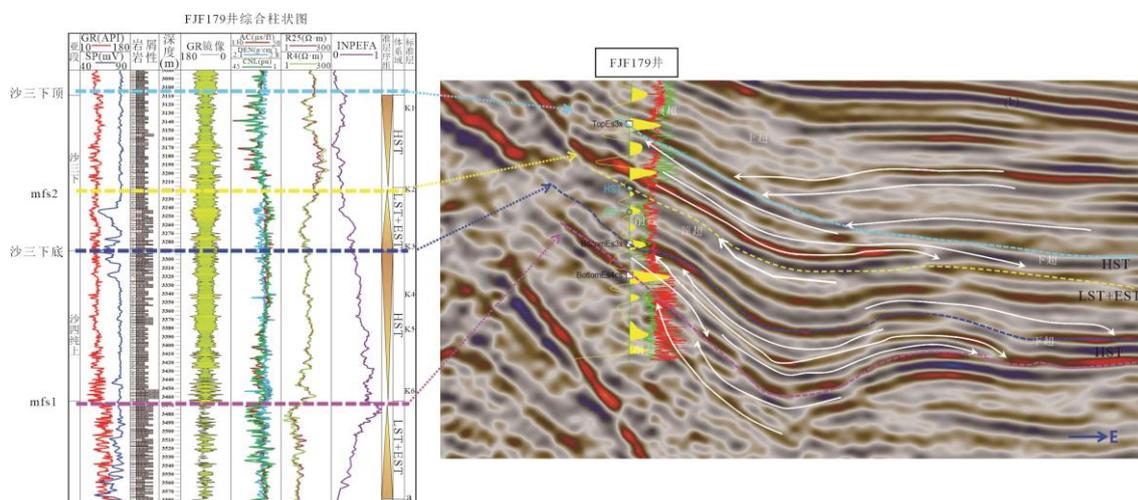
94 图 1 研究区渤海湾盆地大芦湖油田西部位置示意(Wang et al., 2017; Lu et al., 2020; 林中凯等, 2023)

95 Fig. 1 Schematic diagram of location of study area-western Daluhu oilfield in the Bohai Bay basin (Wang et al.,
96 2017; Lu et al., 2020; Lin et al., 2023)

98

99 2 研究区关键层序界面识别和层序地层

100 基于经典层序地层学理论, 综合沉积环境、岩性突变、测井响应突变及地震反射终止类型
101 (蒋恕等, 2008), 最终在研究区识别出沙三下亚段顶底界2个三级层序界面及两个最大湖泛面。
102 以东部湖盆边缘 FJF179 井为例, 沙三下亚段层序顶底界面均表现为强反射轴, 底界面发育削
103 截-上超组合, 岩性由质泥岩类过渡为粉砂岩, GR、AC 及泥质含量曲线均为低值, 且显示向
104 上增加的趋势。顶界面具顶超型前积反射-上超结构, 岩性由粉砂岩突变为灰质泥岩和泥页岩,
105 GR、AC 曲线界面处突变。最大湖泛面 mfs1、mfs2 在地震剖面显示界面以下削截反射终止,
106 以上收敛于下超界面, 测井曲线表现为 GR、TH 高值和 Rt、AC 低值的耦合响应, 指示泥质富
107 集、水体较深。基于测井曲线旋回性与岩相组合特征, 将目的层的层序地层划分为三个体系域:
108 沙四纯上亚段高位体系域 (HST)、沙三下亚段低位-湖扩复合体系域 (LST+EST)、沙三下
109 亚段高位体系域 (HST), 构建起区域等时地层格架 (图 2)。
110



111 图 2 关键层序界面测井-地震响应特征

112 Fig. 2 Logging-seismic response characteristics of key sequence boundaries

113 a. FJF179 井综合柱状图; b. FJF179 井地震剖面响应

114
115
116
117

118 3 测井相定量表征

119 为了精准预测层序地层格架内岩相的时空演化,本文首先通过测井资料预测测井相,建立
120 不同井不同体系域的岩相垂向演化,然后通过井震结合预测等时地层格架内岩相的平面展布。
121 测井相作为岩石物理性质的综合表征,其与岩相的映射关系源于不同岩性在矿物组分、有机质
122 分布等方面固存的差异,测井曲线表现为参数值、曲线形态等不同(李国欣等,2021)。本研究测
123 井相表征的关键流程包括岩相数据库构建、岩性敏感曲线优选、岩性识别模型构建与推广。

124 3.1 岩相数据库构建

125 岩相是一定沉积环境中形成的岩石或岩石组合(王林等,2022)。鉴于研究区岩性主要发育
126 富含有机质的泥质页岩、灰质页岩、泥质灰岩、灰岩/白云岩、粉(细)砂岩等,本研究区的岩
127 相划分以构造背景相似、实验测试数据较全的 FJF-Y1 井为模板,建立“有机质含量(TOC)+
128 矿物组分”的湖相泥页岩岩相分类方案,比如根据有机质含量划分为富有机质、含有机质和贫
129 有机质泥页岩,然后推广至研究区,分类依据如下:

130 1)、研究区 TOC 含量划分和测井评价

131 基于 TOC 与 S_1 /氯仿沥青“A”的“三分性”关系,研究区泥页岩有机质丰度划分为贫有机质、
132 含有机质和富有机质 3 类,不同层位的 TOC 划分标准存在差异:(1)沙三下亚段贫有机质类
133 TOC<1.0%、含有机质类 TOC 介于 1.0%~2.4%、富有机质类 TOC>2.4%;(2)沙四纯上亚
134 段贫有机质类 TOC<0.7%、含有机质类 TOC 介于 0.7%~2.0%、富有机质类 TOC>2.0%。其
135 中,富有机质类油藏饱和且具可动性,为优先勘探目标;含有机质类需结合技术突破开发,贫
136 有机质类因分散低效缺乏开采价值。

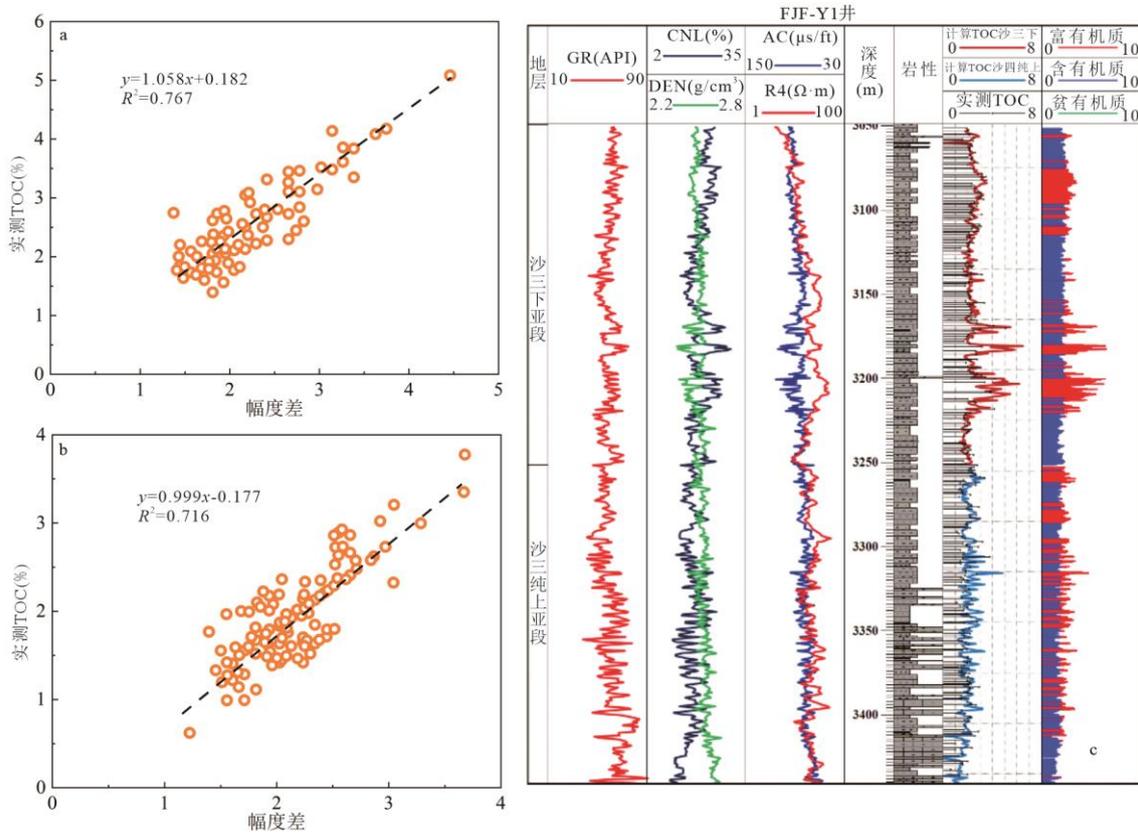
137 基于 $\Delta\log R$ 方法预测研究区泥页岩总有机碳(TOC)含量。根据 Passey 等建立的经典模
138 型,通过以合适的比例叠加声波时差与电阻率测井曲线,在非烃源岩的泥质岩段实现基线重合,
139 曲线分离间距幅度经对数转换后定义为 $\Delta\log R$ 值(公式 1),其可识别未成熟烃源岩、成熟烃
140 源岩、煤层、油层、水层等(Passey *et al.*, 1990)。结合有机质成熟度参数(LOM),建立 $\Delta\log R$
141 与 TOC 的定量关系式(公式 2)。一般情况下 $\Delta\log R$ 与源岩中 TOC 呈正相关趋势,层序界面
142 对应于 $\Delta\log R$ 低值区。
143

$$144 \quad \Delta\log R = \log\left(\frac{R}{R_{\text{基线}}}\right) + k (\Delta t - \Delta t_{\text{基线}}) \quad , (1)$$

$$145 \quad \text{TOC} = a \times \Delta\log R + b \quad , (2)$$

146 式中: R 表示地层电阻率测井数值 ($\Omega\cdot\text{m}$); $R_{\text{基线}}$ 为两条曲线叠合后确定的电阻率测井基线值
147 ($\Omega\cdot\text{m}$); Δt 为实际地层声波时差测井值 ($\mu\text{s}/\text{m}$); $\Delta t_{\text{基线}}$ 为两条曲线叠合后确定的声波时差
148 测井基线值 ($\mu\text{s}/\text{m}$), b 为地层 TOC 的基准值 (%)。
149
150

151 依据 FJF-Y1 井 RT 和 AC 测井曲线建立 TOC 预测模型，沙三下亚段和沙四纯上亚段模型
 152 参数分别为 $a=1.058$ 、 $b=0.182$ ($R^2=0.767$) 和 $a=0.999$ 、 $b=-0.177$ ($R^2=0.716$)，拟合结果与实
 153 测 TOC 趋势一致（图 3）。
 154



155 图 3 依据 FJF-Y1 井建立 TOC 预测模型

156 Fig. 3 TOC prediction model is established according to well FJF-Y1

157 a. 沙三下亚段测井幅度差与实测 TOC 值的关系；b. 沙四纯上亚段测井幅度差与实测 TOC 值的
 158 关系；c. 沙三下亚段和沙四纯上亚段实测和预测 TOC 测井综合柱状图

159 2)、研究区岩相划分

160 根据 FJF-Y1 井碎屑颗粒粒度及矿物组分(泥质-黏土+硅质, 灰质-碳酸盐矿物)相对含量,
 161 并结合岩屑录井、岩心观测及岩性测井响应特征建立沙四纯上亚段至沙三下亚段地层岩相数
 162 据库, 分别为泥质页岩(泥质含量>75%, 灰质含量<25%)、灰质页岩(泥质含量>50%,
 163 20%<灰质含量<25%)、泥质灰岩(25%>泥质含量>20%, 灰质含量>50%)、灰岩/白云
 164 岩(泥质含量<25%, 灰质含量>75%)和粉(细)砂岩(硅质含量>75%, 黏土+灰质含量<
 165 25%) (图 4)。
 166
 167

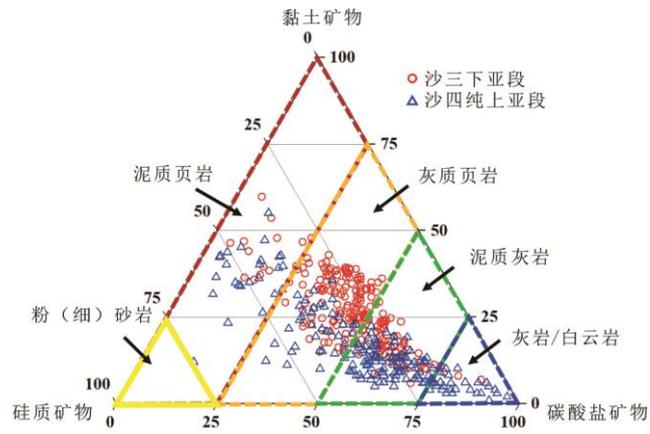


图 4 依据矿物组分岩相划分方案

Fig.4 Lithofacies classification based on mineral components ternary diagram

168
169
170
171

172 3.2 岩性敏感曲线优选

173 不同的测井曲线具有不同的岩性、物性、流体性质等反映能力。本文基于岩性识别目标，
174 关键在于分析各类测井参数的岩性响应特征，优选岩性反应灵敏的测井曲线组合。基于录井、
175 岩心等地质资料，通过箱线图工区 15 余口井的 165 组岩性-测井曲线敏感性特征发现：泥质页
176 岩测井响应特征表现为高放射性（GR 集中在 63~76 API）、低密度（DEN 约为 2.5 g/cm³）、
177 高声波时差（AC 介于 74~87 μs/ft）、高补偿中子测井（CNL 介于 16%~23%）和较低电阻（RT
178 多介于 20~52 Ω·m）；泥质灰岩整体上则测井响应特征反转，即具有低自然伽马（GR 集中在
179 47~54 API）、低声波时差（AC 介于 65~75 μs/ft）、高密度（DEN 约为 2.6 g/cm³）、低补偿
180 中子测井（介于 11%~17% CNL）及较高电阻（RT 范围在 26~69 Ω·m）；灰岩/白云岩测井响
181 应显示为极低自然伽马（GR 分布在 44~54 API）、较高 DEN 值（约 2.6 g/cm³）、较低声波时
182 差（AC 值介于 68~81 μs/ft）；特别地，粉（细）砂岩与含灰岩性具有重叠的测井响应特征，
183 两种岩性难以区分。整体上，GR、AC、DEN、CNL 对岩性反应较敏感，蕴含有一定的岩性信
184 息，而 SP、RT 岩性区分度较差。

185 进一步将 GR、DEN、AC、CNL 四条测井曲线作交会图证实该四种测井曲线能够有效区
186 分主要岩类（图 5）。然而，受复杂岩石组构和孔隙结构等因素影响，灰质和砂质成分在测井
187 响应上表现出相似性，导致含砂质和含灰质岩性在测井交会图中出现显著重叠，难以明确区分
188 （图 5b、5d、5f）。因此将目的层岩相体系划分为灰-泥系统（泥质页岩、灰质页岩、泥质灰
189 岩、灰岩/白云岩）和砂-泥系统（粉（细）砂岩、泥质页岩），显著提高了岩性区分度。此外
190 发现，不同岩相间难以通过单一测井阈值进行区分，而是存在一定的函数关系，因此，确定岩
191 性与测井曲线之间的函数关系是测井相定量表征的关键。

192
193

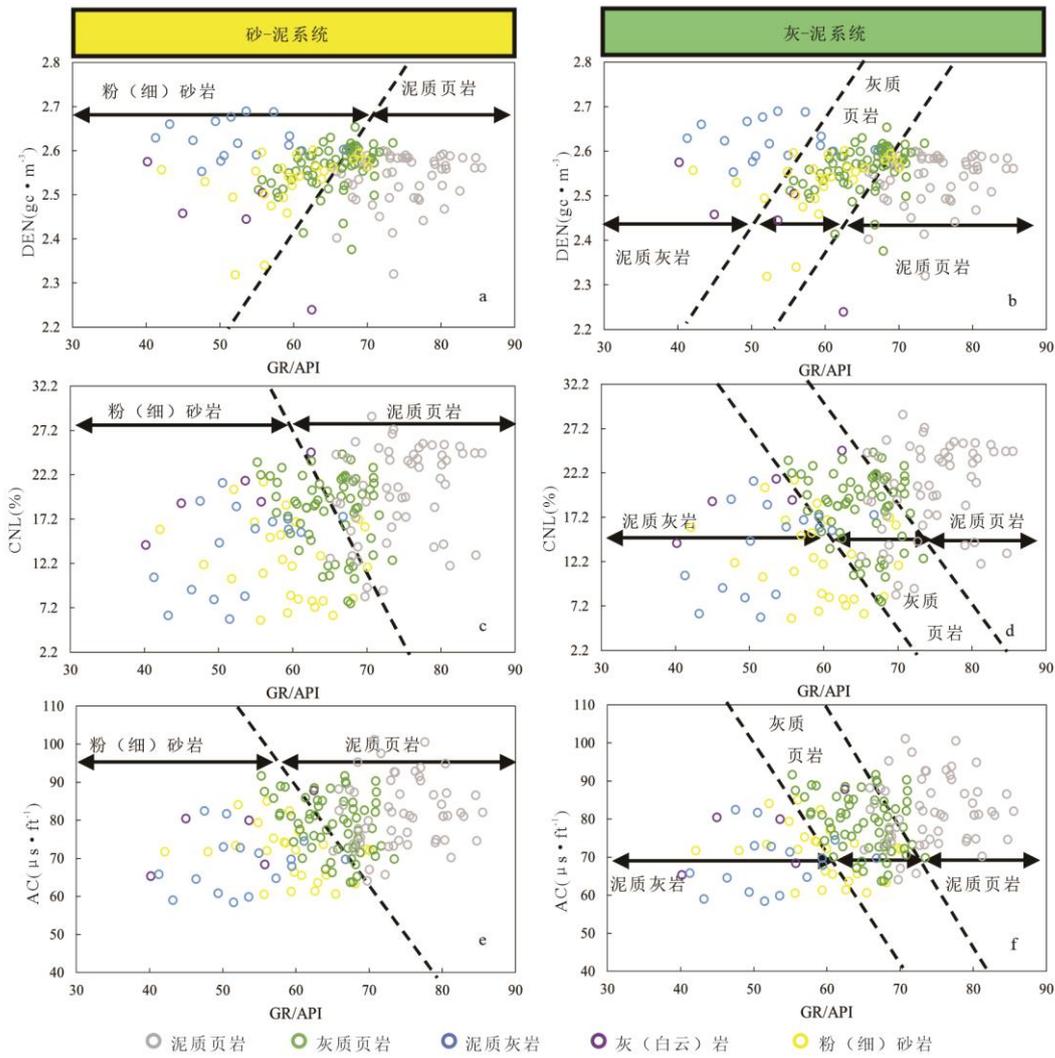


图 5 五类岩相与不同测井曲线关系交会图

Fig. 5 Crossplot of the relationship between 5 lithofacies and different logging curves

194
195
196

197 3.3 Fisher 判别模型的构建与验证

198 本研究基于 Fisher 判别分析理论通过数学统计、知识推理等手段构建测井相与岩相的线性
199 多元判别函数映射模型。具体地，假设有 N 个总体 A_1, A_2, \dots, A_N ，这 N 个总体的协方差矩
200 阵和均值向量分别为 B_1, B_2, \dots, B_N ; $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N$ 。从总体 N_i 中抽取容量为 n_i 的样本为
201 E_i^j ，向量 u 为 p 维空间上的一个方向，那么 E_i^j 在 u 上的投影以 $u^T E_i^j$ 表示，则组内差 f 为和组间
202 差 r 系列公式 3~公式 5 所示：

203

$$204 \quad E_i^j = (e_i^1, e_i^2, \dots, e_i^j), \quad u = (u_1, u_2, \dots, u_p)^T \quad , (3)$$

205

206
$$f = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} (u^T E_i^j - u^T \bar{E}_i)^2 = u^T \left\{ \sum_{i=1}^N S_i \right\} u = u^T w u \quad , \quad (4)$$

207

208
$$r = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} (u^T \bar{E}_i - u^T \bar{E})^2 = u^T \left\{ \sum_{i=1}^N \left[\sum_{j=1}^{n_i} (E_i^j - \bar{E}_i)(E_i^j - \bar{E}_i)^T \right] \right\} u = u^T B u \quad , \quad (5)$$

209

210 公式中, $i=1, 2, \dots, N$; $j=1, 2, \dots, n_i$; \bar{E}_i 和 \bar{E} 分别代表组内样本均值和总样本均值; S_i 为
211 M_i 中 n_i 个样本 e_i^j 的样本离差阵。

212 由公式 6 计算 Φ 值, 使其达到最大值同时解具有唯一性, 此时得到最大特征值 λ 及特征
213 向量 u , 并计算线性判别函数(郭剑南等, 2019)。

214

215
$$\Phi = \frac{r}{f} = \frac{u^T B u}{u^T w u} \quad , \quad (6)$$

216

217
$$(w^{-1} B - \lambda I) u = 0 \quad . \quad (7)$$

218

219 本研究利用统计软件 SPSS 建立混积岩测井相 Fisher 判别分类方程函数, 具体地, 将五类
220 岩相作为分组变量, 并设定分组变量范围, 将优选的四条测井曲线 (GR、AC、DEN 及 CNL)
221 作为输入自变量, 选择统计函数以及相关输出项目。样本数据集采用分层随机抽样划分策略,
222 遵循训练集与验证集约 0.7: 0.3 的比例原则进行模型构建与验证, 采用监督式机器学习算法构建
223 双序列判别模型, 即砂-泥系与灰-泥系统, 并最终完新样本的预测。

224 **3.3.1 砂-泥系统 Fisher 判别** 对于砂-泥系统, 共建立训练样 120 组, 其中泥质页岩数据点

225 数量为 88 组, 粉 (细) 砂岩数据点数量为 32 组, 判别函数如公式 8 所示:

226

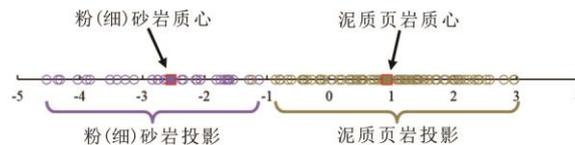
227
$$Z = 0.13GR + 0.06AC + 8.01DEN + 0.03CNL - 34.56 \quad , \quad (8)$$

228

229 泥质页岩组质心处函数为 0.92, 粉 (细) 砂岩组质心处函数为-2.54 (图 6)。岩相归属判定采
230 用最小马氏距离准则, 即样本点判别函数值越靠近某类质心, 则 p 判定为对应岩相类型。

231

232



233

234
235
236
237
238
239
240
241
242
243

图 6 砂-泥系统判别分析图

Fig. 6 Discriminant analysis diagram of sand-mud system

训练集回判检验结果显示：泥质页岩回判准确率为 97.7%，粉（细）砂岩回判准确率为 96.9%，正确地对 97.5% 的原始已分组个案进行了分类（表 1）。此外，参与验证集的数据点总共为 44 组，其中泥质页岩数据点数目为 23 组，粉（细）砂岩数据点数目为 21 组。结果为泥质页岩预测准确率为 65%，粉（细）砂岩预测准确率为 95%，验证集综合预测准确率为 79.5%。

表 1 砂-泥系统训练集各岩性回判准确率统计

Table 1 Statistics of the accuracy of lithological inversion in sand-mud system training set

分区	岩性					
	泥质页岩		粉（细）砂岩		总计	
项目	计数	概率	计数	概率	计数	概率
正确	86	97.7%	31	96.9%	117	97.5%
错误	2	2.3%	1	3.1%	3	2.5%
总计	88	100%	32	100%	120	100%

244

245 3.3.2 灰-泥系统 Fisher 判别 灰-泥系统纳入 181 组训练样本数据，其中泥质页岩数据点
246 数目为 88 组，灰质页岩数据点数目为 58 组，泥质灰岩数据点数目为 16 组，灰岩/白云岩数据
247 点数目为 19 组，构建的判别函数如下列公式 9~公式 11 所示：

248

$$249 \quad Z_1 = 0.19GR + 0.24AC - 2.03DEN - 0.06CNL - 8.33 \quad , \quad (9)$$

250

$$251 \quad Z_2 = -0.04GR + 0.24AC + 6.90DEN - 0.40CNL - 29.13 \quad , \quad (10)$$

252

$$253 \quad Z_3 = -0.02GR + 0.07AC - 5.43DEN + 0.04CNL + 9.50 \quad . \quad (11)$$

254

255 泥质页岩、灰质页岩、泥质灰岩和灰岩/白云岩 4 组岩性的空间投影分析直观揭示各岩相
256 类别在判别空间中的分布规律（图 7）。训练集回判检验获 84.5% 的总体判别精度，其中灰质
257 页岩判别准确率最优（98.3%），次为泥质页岩（80.7%），泥质灰岩与灰岩/白云岩则分别取
258 得 75% 和 68.4% 的判别效果。

259

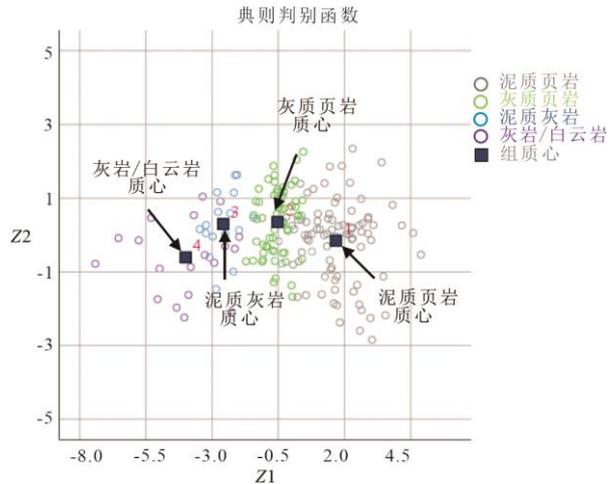


图 7 灰-泥系统判别分析图

Fig. 7 Discriminant analysis diagram of lime-mud system

260
261
262
263

264 **3.3.3 Fisher 判别模型应用** 本研究选取未参与建模的 GQF-X184 井和 ZLG-X86 井作为验
 265 证样本，该两口井具备较完整的录井岩性及岩心描述资料。基于已建立的砂-泥岩与灰-泥岩判
 266 别体系，采用 Fisher 判别分析方法对验证井进行岩性预测，绘制单井岩相剖面并与岩心数据开
 267 展对比验证。验证结果显示：GQF-X184 井粉砂岩-细砂岩预测准确度较高，部分存在灰质泥岩
 268 误判为泥质灰岩或灰岩/白云岩的现象，但都属于富含灰质的岩相，整体与取心资料符合率较
 269 高，预测结果良好；ZLG-X86 井整体预测结果良好，主要误差表现为灰质泥岩误判为灰岩/白
 270 云岩（图 8）。本次研究建立的 Fisher 判别函数岩性预测模型在研究区岩性识别中具有很好的
 271 适用性，可将 Fisher 判别分析建立的测井相预测模型推广应用，将岩性识别模型推广应用于油
 272 田范围内的所有未取心井，进行多井分析和处理，从而获得所有井在目的层段连续的岩相剖
 273 面。
 274

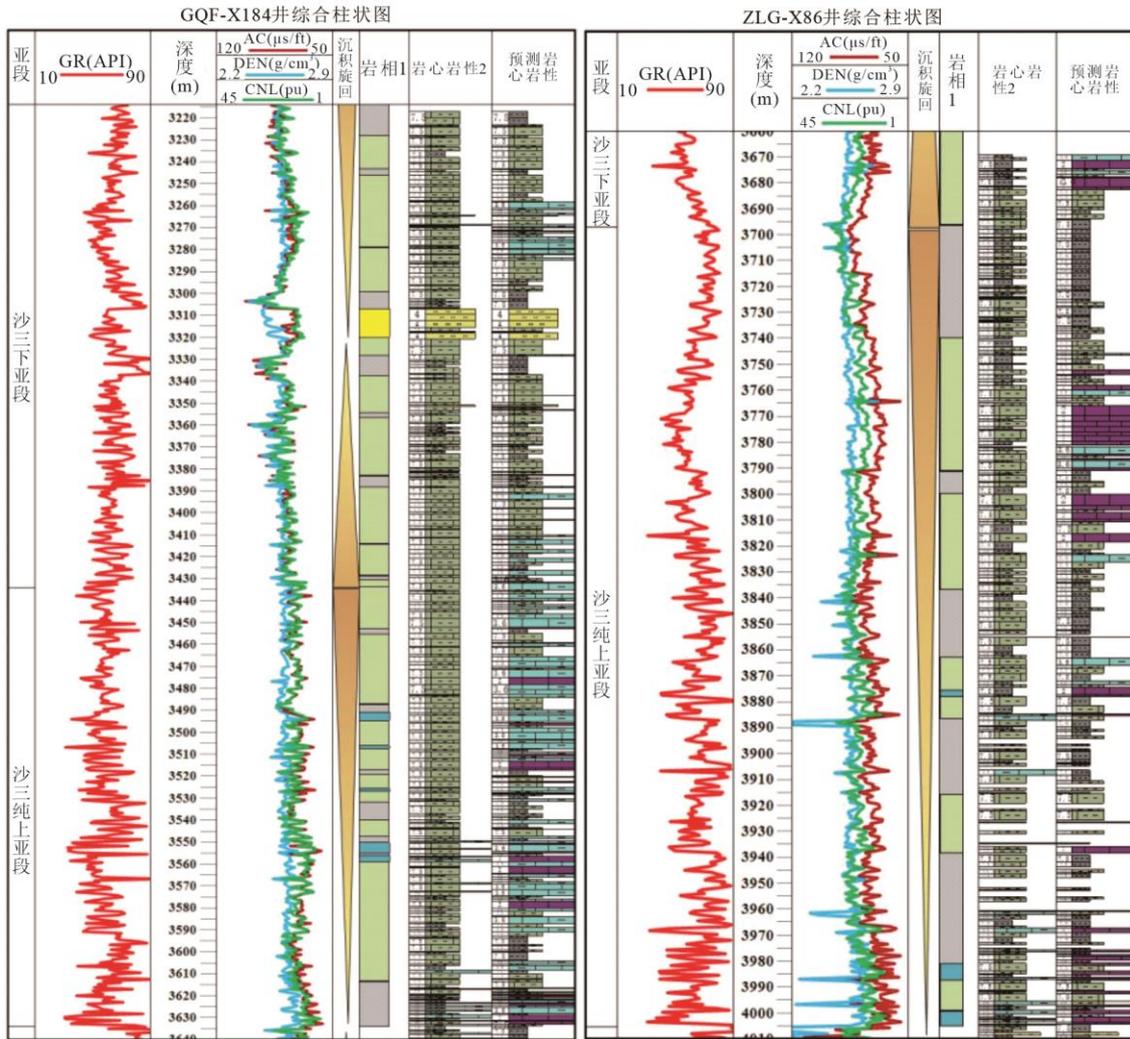


图 8 GQF-X184 井和 ZLG-X86 井 Fisher 判别模型预测岩性与岩心岩性对比

Fig. 8 Fisher discriminant model prediction lithology and core lithology correlation in wells GQF-X184 and ZLG-

X86

275
276
277
278

279 4 岩相展布特征与沉积演化模式

280 4.1 岩相和沉积相垂向演化规律

281 通过上述岩相识别方法,在工区北部、中部及南部开展了总有机碳和岩相连井剖面分析,
282 从而可以揭示沙四纯上亚段与沙三下亚段沉积体系时空演化模式。结果表明:沙四纯上亚段
283 HST 主要发育富有机质与含有机质泥岩,TOC 含量整体集中在 0.8%~1.9%,岩性以泥质页岩
284 与灰质页岩为主,夹薄层泥质灰岩。工区中部 GQF-X190 至 ZLG92 井间,页岩有机质含量呈
285 微量降低趋势;南部剖面页岩有机质普遍呈低值,仅 ZLG-X98 井发育局部富集层段,且 ZLG898
286 井附近出现浊流沉积成因的粉砂岩夹层。沙三下亚段 LST+EST 沉积期,以富有机质泥页岩为
287 主,TOC 含量集中在 0.9%~2.3%,该体系域顶界对应最大湖泛面,TOC 含量普遍较高。近物
288 源区发育中-厚层粉砂岩相,向洼陷中心过渡为泥质页岩和灰质页岩互层。沙三下亚段 HST 湖
289 盆边缘相带因粉砂岩夹层增多导致有机质保存条件劣化。岩相呈现强分异特征,盆地边缘粉砂
290 岩相发育占主导地位,向洼陷中心方向转变为泥质页岩和灰质页岩,且泥质页岩发育程度占优;
291 南部区域具有双向物源作用特征,ZLG898 井区灰质页岩有机质含量普遍高于伴生泥质页岩,
292 研究区有机质丰度分布特征主要受古水深和盐度控制,有机质主要富集在盐度较小、水深较深
293 的半深湖—深湖环境(刘惠民,2022)(图 9)。

294

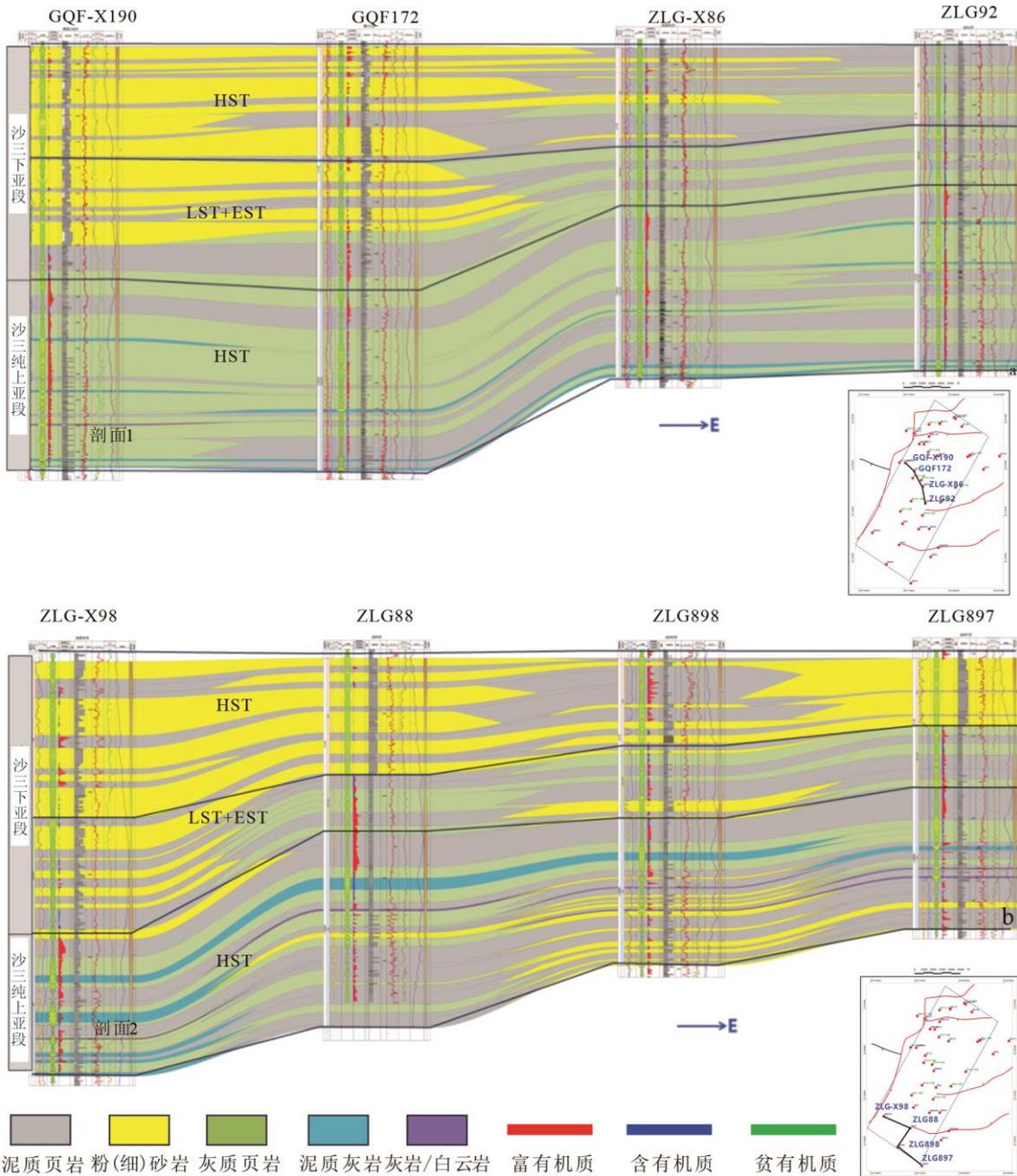


图 9 岩相连井剖面

Fig. 9 Rock connected well profile

a. GQF-X190-GQF172-ZLG-X86-ZLG92; b. ZLG-X98-ZLG88-ZLG898-ZLG897

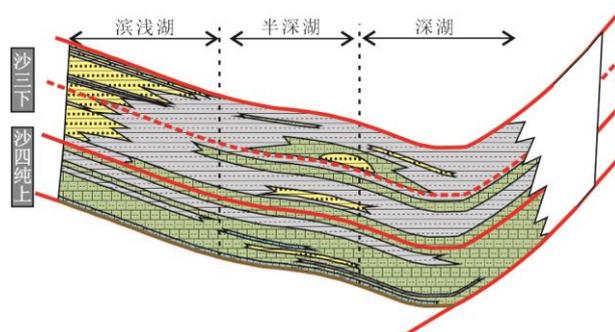
295
296
297
298
299
300
301
302

综上不同位置的连井剖面岩相时空分布规律，研究区目的层段发育 4 种典型垂向岩相组合模式。组合 1：厚层砂夹薄泥型。以粉（细）砂岩相为主，序列以多期次厚层粉（细）砂岩相垂向叠置为特征，层间夹薄层泥质页岩；组合 2：厚层泥夹薄砂型。以厚层泥质页岩相为主，夹薄层粉（细）砂岩透镜体；组合 3：厚层灰质页岩夹薄泥型。以泥质页岩相为主，夹薄层灰

303 质页岩，底部偶见薄层泥质灰岩；组合 4：厚层泥夹薄灰质页岩型。以灰质页岩相为主，夹层
304 发育泥质页岩及少量泥质灰岩、灰岩/白云岩薄层。

305 沙四纯上亚段 HST 沉积相以浅湖-半深湖相为主，发育灰质页岩与泥质页岩互层组合（组
306 合 3），灰质含量向沉积中心呈递增趋势，偶见极薄灰岩/白云岩，斜坡的坡折带下方受同沉积
307 断裂控制发育浊积砂体。沙三下亚段 LST+EST 整体为半深湖相沉积环境，湖盆边缘发育小型
308 三角洲沉积体，向盆地中心灰质组分递增，偶见坡折带下部发育浊积砂体。沙三下亚段 HST
309 湖盆边缘主要发育三角洲相，岩相主要以厚层砂岩与薄层泥质页岩互层组合（组合 1）为特征，
310 顶部过渡为泥质页岩夹薄层砂岩条带组合（组合 2）；半深湖亚相发育泥质页岩与灰质页岩韵
311 律互层组合（组合 4）（图 10）。

312



313

314

图 10 沉积相展布模式

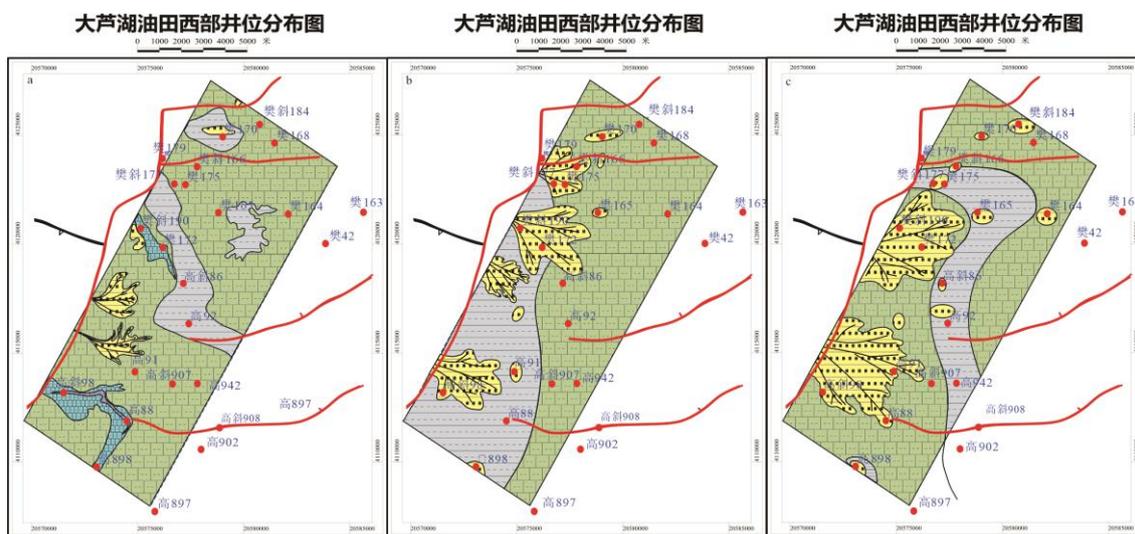
315

Fig. 10 Sedimentary facies distribution pattern

316 4.2 岩相和沉积相平面展布模式

317 基于 20 余口井的 Fisher 判别模型预测的岩相以及录井岩屑等数据进行沉积相的平面刻画。
318 沙四纯上亚段 HST 整体呈现浅湖-半深湖相沉积格局。工区西部 GQF-X190 和 GQF172 等井周
319 围发育富有机质岩性，含量约为 2%~3%。岩性组合以灰质页岩与泥质页岩互层为主，灰质组
320 分占比较高，在工区中西部和西南区域发育部分泥质灰岩相和灰岩/白云岩相，指示干旱气候
321 背景下的低陆源输入特征。受鲁西隆起与青城凸起物源体系影响，北部 GQF170 井和中西部
322 GQF-X190 井区可见孤立状浊积相（图 11a）。沙三下亚段 LST+EST 以半深湖相为主。有机质
323 分布呈现较为显著分带性，富有机质岩性整体集中在工区北部的 GQF-X184 井和 GQF170 井
324 附近的半深湖—深湖区，由北至南向沉积中心，富有机质泥页岩比例首先上升，而南部 ZLG897
325 和 ZLG898 井因物源混入导致有机质含量衰减。该时期受高青凸起物源影响，研究区西部陡坡
326 带发育近岸水下扇体系，其前缘滑塌作用形成浊积扇体。ZLG92 井、ZLG-X86 井等岩性剖面
327 显示暗色泥质页岩与灰质页岩占主导，粉砂的含量一般很低。GQF170 井揭露浊积砂体呈西南
328 -东北向展布，厚度约为 2~15 m，横向连续性差；ZLG898 井钻遇的浊积体夹杂于泥质页岩与
329 灰质页岩岩层（图 11b）。沙三下亚段 HST 发育辫状河三角洲-半深湖复合沉积体系。辫状河
330 三角洲前缘主体分布于研究区中西部（GQF-X190 和 GQF172 井区），呈扇状向东推进延伸，
331 岩性以粉砂岩为主，夹泥页岩薄层。南部一带（ZLG88-ZLG-X98 井区）发育弱均方根振幅特
332 征的低能分流间湾与浅湖泥微相，岩性以灰色泥岩、粉砂质泥岩为主。GQF-X184 井区识别出

333 近西南-东北向展布的浊积砂体，砂体厚度约 10 m，指示重力流沉积事件（图 11c）。总之，
 334 研究区沙三下亚段沉积体系具有显著的分带性与演化性，平面上自西南向东北呈现“粉（细）
 335 砂岩相-泥质页岩相-灰质页岩相”的递变格局。整体沉积体系空间展布规律为，西部及西南部
 336 陡岸发育辫状河三角洲与近岸水下扇复合体，前缘斜坡带发育滑塌成因浊积岩体，东部及东北
 337 部缓坡区发育半深湖灰质为主的混积岩沉积相。
 338



339
 340
 341
 342
 343

图 11 研究区各体系域沉积相展布模式

Fig. 11 Spatial distribution patterns of depositional facies in the study area by systems tract

a. 沙三下亚段 HST 岩相分布； b. 沙三下亚段 LST+EST 岩相分布； c. 沙三下亚段 HST 岩相分布

344 5 结论

345 (1) 基于 $\Delta\log R$ 法构建 TOC 预测模型, 并针对不同层位建立界限标准, 将有机质丰度划
346 分为贫有机质、含有机质和富有机质; 依据矿物组分、钻录井、测井、地震属性等, 将渤海湾
347 盆地大芦湖油田的沙四纯上亚段至沙三下亚段地层岩性划分为泥质页岩、灰质页岩、泥质灰岩、
348 灰岩/白云岩和粉(细)砂岩 5 类。

349 (2) 利用箱线图和交会图等优选出岩性反应较敏感的 GR、AC、DEN、CNL 测井曲线,
350 针对砂质和灰质岩性的测井响应叠置难题, 创新性基于 Fisher 判别分析分砂-泥与灰-泥系统建
351 立测井相定量表征模型。砂-泥系统验证集岩性识别准确率 79.5% (粉砂岩预测精度 95%),
352 灰-泥系统训练和验证结果回判准确率达到 84.5%, 显著提升灰岩与砂岩区分精度。

353 (3) 总结出四种岩性组合模式及空间分布规律。组合 1 为厚层砂夹薄泥型, 常发育于沙
354 三下亚段高位体修(HST)和低位及湖扩体系域(LST+EST)上部滨浅湖相带; 组合 2 为厚层
355 泥夹薄砂型, 主要分布于沙三下亚段 HST, 也见于浊积砂体发育部位; 组合 3 为厚层灰质页
356 岩夹薄泥型, 集中分布在较深湖区; 组合 4 为厚层泥夹薄灰质页岩型, 多发育于沙四纯上亚段
357 HST 和半深湖区。

358 (4) 大芦湖油田沙四纯上亚段 HST 以半深湖相为主体, 西缘和东北隅分布三角洲与浊积
359 相, 岩性以灰质页岩-泥岩韵律互层为特征, TOC 含量主要介于 0.8%~1.9%, 呈中部微量递减、
360 南部局部富集的非均质分布格局。沙三下亚段 LST+EST 以半深湖相为主, TOC 含量集中在
361 0.9%~2.3%。沙三下亚段 HST 发育辫状河三角洲-半深湖复合沉积体系, 有机质和岩性分布呈
362 现显著分异性, 盆地边缘粉砂岩相抑制有机质保存, 洼陷中心以泥质页岩占优, 且伴生浊积砂
363 体。平面上自混积岩从西南向东北呈现“粉(细)砂岩相-泥质页岩相-灰质页岩相”的递变的沉
364 积格局。
365

366 References

- 367 Abouelresh, M. O., Slatt, R. M., 2012. Lithofacies and Sequence Stratigraphy of the
368 Barnett Shale in East-Central Fort Worth Basin, Texas. *AAPG Bulletin*, 96(1):
369 1 - 22. <https://doi.org/10.1306/04261110116>
- 370 Aghchelou, M., Nabi-Bidhendi, M., Shahvar, M. B., 2012. Lithofacies Estimation by
371 Multi-Resolution Graph-Based Clustering of Petrophysical Well Logs: Case
372 Study of South Pars Gas Field of Iran. *Nigeria Annual International Conference
373 and Exhibition*. August 6-8, 2012. Lagos, Nigeria. Richardson: Society of
374 Petroleum Engineers, SPE 162991-MS. <https://doi.org/10.2118/162991-ms>
- 375 Dong, S. Q., Wang, Z. Z., Zeng, L. B., 2016. Lithology Identification Using Kernel
376 Fisher Discriminant Analysis with Well Logs. *Journal of Petroleum Science and
377 Engineering*, 143: 95 - 102. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.02.017>
- 378 Dong, S. Q., Zeng, L. B., Du, X. Y., et al., 2022. Lithofacies Identification in Carbonate
379 Reservoirs by Multiple Kernel Fisher Discriminant Analysis Using
380 Conventional Well Logs: a Case Study in a Oilfield, Zagros Basin, Iraq. *Journal
381 of Petroleum Science and Engineering*, 210: 110081.
382 <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.110081>
- 383 Duan, Y. J., Xie, J., Li, B. C., et al., 2020. Lithology Identification and Reservoir
384 Characteristics of the Mixed Siliciclastic-Carbonate Rocks of the Lower Third
385 Member of the Shahejie Formation in the South of the Laizhouwan Sag, Bohai
386 Bay Basin, China. *Carbonates and Evaporites*, 35(2): 55.
387 <https://doi.org/10.1007/s13146-020-00583-8>
- 388 Feng, C., Dai, L. M., Liu, X. J., et al., 2020. Logging Classification and Recognition of
389 Lacustrine Mixed Sedimentary Reservoirs in First and Second Members of
390 Shahejie Formation in Bohai Sea. *Earth Science*, 45(10): 3677 - 3692 (in
391 Chinese with English abstract).
- 392 Gao, B., Hao, F., Xu, S., et al., 2025. Oil Content and Its Occurrence State of Lower
393 Member of Shahejie Formation Shale in Dongying Sag. *Earth Science*, 50(6):
394 2199 - 2208 (in Chinese with English abstract).
- 395 Gao, G., et al., 2020. Characteristics and Identification of Lacustrine Sedimentary
396 Lithology in Lower Es3 Strata of Boxing Subsag. *Journal of Xi'an Shiyou
397 University (Natural Science Edition)*, 35(5): 14 - 23 (in Chinese with English
398 abstract).
- 399 Guo, J. N., Shan, X. L., Hao, G. L., 2019. Identification of Basement Lithology in
400 Central Uplift Zone of Songliao Basin by Fisher Discriminant Analysis. *Journal of*

401 *Heilongjiang University of Science and Technology*, 29(1): 60 – 65 (in Chinese
402 with English abstract).

403 Jiang, S., Wang, H., Guo, T., et al., 2022. Geomorphology of Gravity Flow Deposits in
404 the Gentle Slope Zone of Intra-Basinal High in the Liaodong Bay Depression,
405 Bohai Bay Basin and Its Controlling Factors. *Oil & Gas Geology*, 43(4): 823 – 832
406 (in Chinese with English abstract).

407 Jiang, S., Wang, H., Weimer, P., 2008. Sequence Stratigraphy Characteristics and
408 Sedimentary Elements in Deepwater. *Earth Science*, 33(6): 825 – 833 (in Chinese
409 with English abstract).

410 Kvale, E. P., Bowie, C. M., Flentrop, C., et al., 2020. Facies Variability within a
411 Mixed Carbonate – Siliciclastic Sea-Floor Fan (Upper Wolfcamp Formation,
412 Permian, Delaware Basin, New Mexico). *AAPG Bulletin*, 104(3): 525 – 563.
413 <https://doi.org/10.1306/06121917225>

414 Li, C. C., Hong, X. E., Han, D. L., et al., 2023. Identification Method of Lithology by
415 Logging in Favorable Reservoir of Lacustrine Mixed Rock—A Case Study of the
416 Small Layer 2 of the Upper Part of the Member 3 of Shahejie Formation in
417 Dawangzhuang Oilfield. *Petroleum Geology and Engineering*, 37(4): 37 – 44 (in
418 Chinese with English abstract).

419 Li, G. X., Liu, G. Q., Hou, Y. T., et al., 2021. Optimization Method of Favorable
420 Lithofacies and Fracturing Parameter for Continental Shale Oil. *Acta Petrolei
421 Sinica*, 42(11): 1405 – 1416 (in Chinese with English abstract).

422 Lin, Z. K., Zhang, S. L., Li, C. H., et al., 2023. Types of Shale Lithofacies Assemblage
423 and Its Significance for Shale Oil Exploration: a Case Study of Shahejie Formation
424 in Boxing Sag. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 13(1): 39 – 51
425 (in Chinese with English abstract).

426 Liu, H. M., 2022. Geological Particularity and Exploration Practice of Paleogene Shale
427 Oil in Jiyang Depression: A Case Study of the Upper Submember of Member 4 to
428 the Lower Submember of Member 3 of Shahejie Formation. *Acta Petrolei Sinica*,
429 43(5): 581 – 594 (in Chinese with English abstract).

430 Lu, Y., Liu, K. Y., Xu, S. Y., et al., 2020. Identifying Flow Units by FA-Assisted
431 SSOM—An Example from the Eocene Basin-Floor-Fan Turbidite Reservoirs in
432 the Daluhu Oilfield, Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China. *Journal of
433 Petroleum Science and Engineering*, 186: 106695.
434 <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106695>

435 Luo, H., Lai, F. Q., Dong, Z., et al., 2018. A Lithology Identification Method for
436 Continental Shale Oil Reservoir Based on BP Neural Network. *Journal of*

437 *Geophysics and Engineering*, 15(3): 895. <https://doi.org/10.1088/1742->
438 [2140/aaa4db](https://doi.org/10.1088/1742-2140/aaa4db)

439 Mao, Z. Q., Xia, Y., Gao, G., et al., 2020. Characteristics and Identification of
440 Lacustrine Sedimentary Lithology in Lower Es3 Strata of Boxing Subsag. *Journal*
441 *of Xi ' an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 35(5): 14 – 23 (in Chinese
442 with English abstract).

443 Pan, J., Liu, X. L., Li, H., et al., 2023. Characteristics and Distribution of Lithofacies
444 Assemblages of the Permian Lucaogou Formation in the Eastern Slope of Fukang
445 Sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(5): 1366 – 1379 (in Chinese with English
446 abstract).

447 Passey, Q. R., Creaney, S., Kulla, J. B., et al., 1990. A Practical Model for Organic
448 Richness from Porosity and Resistivity Logs. *AAPG Bulletin*, 74(12): 1777-
449 1794. <https://doi.org/10.1306/0c9b25c9-1710-11d7-8645000102c1865d>.

450 Song, Z. J., Xiao, D. S., Wei, Y. B., et al., 2023. The Research on Complex Lithology
451 Identification Based on Well Logs: A Case Study of Lower 1st Member of the
452 Shahejie Formation in Raoyang Sag. *Energies*, 16(4): 1748.
453 <https://doi.org/10.3390/en16041748>.

454 Wang, J., Cao, Y. C., Liu, K. Y., et al., 2017. Identification of Sedimentary-Diagenetic
455 Facies and Reservoir Porosity and Permeability Prediction: an Example from the
456 Eocene Beach-Bar Sandstone in the Dongying Depression, China. *Marine and*
457 *Petroleum Geology*, 82: 69 – 84.
458 <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.02.004>

459 Wang, L., Lü, Q. Q., Zhang, Y., et al., 2025. Lithofacies Characteristics and
460 Distribution Patterns of Deep Water Gravity Flow Deposits in the Chang 7 Oil
461 Member in the Southwest Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(1): 154 –
462 168 (in Chinese with English abstract).

463 Wang, M., Yang, J. L., Wang, X., et al., 2023. Identification of Shale Lithofacies by
464 Well Logs Based on Random Forest Algorithm. *Earth Science*, 48(1): 130 – 142
465 (in Chinese with English abstract).

466 Wang, Y., Liu, L. F., Meng, J. H., et al., 2014. Depositional Environment of Es₄^u and
467 Es₃^l Shales Based on Biomarkers from the Boxing Sag of Dongying Depression,
468 East China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 88(5): 1556 – 1564.
469 <https://doi.org/10.1111/1755-6724.12318>

470 Wang, Y. S., Gao, Y., Li, J. L., et al., 2025. New Exploration Fields and Resource
471 Potential of Paleogene Clastic Tight Oil in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin.
472 *Acta Petrolei Sinica*, 46(1): 118 – 136 (in Chinese with English abstract).

- 473 Xu, C. G., Zhou, J. X., Yang, H. F., et al., 2024. New Fields, New Types and Resource
474 Potentials of Oil-Gas Exploration in Bohai Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 45(1): 163 -
475 182 (in Chinese with English abstract).
- 476 Ye, M. S., Xie, X. N., Du, X. B., et al., 2025. Characteristics and Formation Mechanism
477 of Heterogeneity in “Compositional Mixing” Reservoirs: an Example from the
478 First-Second Member of the Palaeogene Shahejie Formation, Bohai Sea. *Acta*
479 *Sedimentologica Sinica*, 43(2): 635 - 652 (in Chinese with English abstract).
- 480 Zhao, H., Wang, H. L., Liu, H. M., et al., 2022. Application of Fisher Discriminant
481 Method in the Facies Division of Lake Facies-Taking the Third Member of
482 Shahejie Formation in Dongying Sag as an Example. *Energy Sources, Part A:*
483 *Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(2): 4977 - 4990.
484 <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1656680>
- 485 Zou, C. N., Feng, Y. L., Yang, Z., et al., 2023. Fine-Grained Gravity Flow
486 Sedimentation and Its Influence on Development of Shale Oil Sweet Spot Intervals
487 in Lacustrine Basins in China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(5):
488 883 - 897 (in Chinese with English abstract).
- 489 中文参考文献
- 490 冯冲, 代黎明, 刘晓健, 等, 2020. 渤海海域沙一二段湖相混积岩储层测井分类与
491 识别. *地球科学*, 45(10): 3677 - 3692.
- 492 高波, 郝芳, 徐尚, 等, 2025. 东营凹陷沙三下亚段页岩含油性及其赋存特征. *地球科*
493 *学*, 50(6): 2199 - 2208.
- 494 郭剑南, 单玄龙, 郝国丽, 2019. 松辽盆地中央隆起带基底岩性识别的 Fisher 判别
495 分析法. *黑龙江科技大学学报*, 29(1): 60 - 65.
- 496 蒋恕, 王浩, 郭涛, 等, 2022. 渤海湾盆地辽东湾坳陷盆地隆起缓坡带重力流沉积
497 形态及其控制因素. *石油与天然气地质*, 43(4): 823 - 832.
- 498 蒋恕, 王华, Paul Weimer, 2008. 深水沉积层序特点及构成要素. *地球科学*, 33(6):
499 825 - 833.
- 500 李楚楚, 洪秀娥, 韩登林, 等, 2023. 湖相混积岩有利储层岩性测井识别方法: 以大
501 王庄油田沙三上亚段为例. *石油地质与工程*, 37(4): 37 - 44.
- 502 李国欣, 刘国强, 侯雨庭, 等, 2021. 陆相页岩油有利岩相优选与压裂参数优化方
503 法. *石油学报*, 42(11): 1405 - 1416.
- 504 林中凯, 张少龙, 李传华, 等, 2023. 湖相页岩油地层岩相组合类型划分及其油气
505 勘探意义: 以博兴洼陷沙河街组为例. *油气藏评价与开发*, 13(1): 39 - 51.
- 506 刘惠民, 2022. 济阳坳陷古近系页岩油地质特殊性及其勘探实践: 以沙河街组四段上
507 亚段—沙河街组三段下亚段为例. *石油学报*, 43(5): 581 - 594.
- 508 毛振强, 夏宇, 高刚, 等, 2020. 博兴洼陷沙三下段湖相沉积岩性特征及其识别. *西安*
509 *石油大学学报(自然科学版)*, 35(5): 14 - 23.

- 510 潘进, 刘新龙, 李辉, 等, 2023. 阜东斜坡芦草沟组岩相组合特征及展布规律. 沉积
511 学报, 41(5): 1366 - 1379.
- 512 王林, 吕奇奇, 张严, 等, 2025. 鄂尔多斯盆地西南部长 7 油层组深水重力流沉积
513 岩相特征及分布模式. 沉积学报, 43(1): 154 - 168.
- 514 王民, 杨金路, 王鑫, 等, 2023. 基于随机森林算法的泥页岩岩相测井识别. 地球科
515 学, 48(1): 130 - 142.
- 516 王永诗, 高阳, 李军亮, 等, 2025. 渤海湾盆地济阳坳陷古近系碎屑岩致密油勘探
517 新领域及资源潜力. 石油学报, 46(1): 118 - 136.
- 518 徐长贵, 周家雄, 杨海风, 等, 2024. 渤海海域油气勘探新领域、新类型及资源潜
519 力. 石油学报, 45(1): 163 - 182.
- 520 叶茂松, 解习农, 杜学斌, 等, 2025. “组分混合”沉积的储层非均质性及形成机
521 理: 以渤海海域古近系沙河街组一、二段为例. 沉积学报, 43(2): 635 - 652.
- 522 邹才能, 冯有良, 杨智, 等, 2023. 中国湖盆细粒重力流沉积作用及其对页岩油“甜
523 点段”发育的影响. 石油勘探与开发, 50(5): 883 - 897.