

文章编号: 1671-1505(2025)03-0746-17 DOI:10.7605/gdxb.2025.046

基于无监督学习技术的碎屑岩储集层成岩相测井识别与应用：以沾化凹陷三台组为例

孟 圆¹ 贾光华² 李传华² 张立强¹ 张曙光³

1 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

2 中国石化胜利油田分公司油气勘探管理中心, 山东东营 257015

3 中国石油渤海钻探工程有限公司, 天津 300450

摘 要 渤海湾盆地济阳坳陷沾化凹陷埋岛一桩海地区侏罗系三台组近年来成为油气勘探重点层系, 但受构造演化复杂、沉积类型多样、岩性多变的影响, 储集层非均质性极强, 储集层质量预测难度大, 而成岩相类型的精确识别与划分对储集层的评价起至关重要的作用。传统利用有监督学习识别全井成岩相的方法在学习样本数目较少的情况下实用性有限, 本研究开展基于单因素约束的无监督全井成岩相测井识别方法研究。结合视压实率、胶结物含量、面孔率和裂缝率将研究区成岩相划分为致密压实相、碳酸盐胶结相、溶蚀与裂缝相和不稳定成分弱溶蚀相。确定了 GR (自然伽马)、AC (声波时差)、DEN (密度)、RD (深侧向电阻率) 4 条对成岩作用敏感的测井曲线作为成岩相测井识别的依据。分别对 4 条曲线聚类范围进行约束, 确保了无监督学习方法与成岩相良好的映射关系。基于无监督学习划分的测井相种类, 利用铸体薄片等资料实现测井相与成岩相的标定, 完成地区成岩相的识别与划分。划分结果表明, 溶蚀与裂缝相、不稳定成分弱溶蚀相为研究区储集层有利成岩相, 2 类成岩相对应较高的孔渗度, 溶蚀与裂缝主要分布在含砾砂岩等粗粒岩中, 不稳定成分弱溶蚀相主要分布在粉砂岩等细粒岩中。通过盲井成岩相对比, 验证学习方法的准确性, 进而为缺乏取心井段的储集层成岩相识别提出新的预测方法, 对有利储集层的评价及预测具有一定意义。

关键词 济阳坳陷 沾化凹陷 三台组 成岩相测井识别 单因素约束 无监督学习

第一作者简介 孟圆, 女, 1999 年生, 硕士研究生, 主要从事成岩相测井解释和机器学习等研究。E-mail: 754586279@qq.com。

通讯作者简介 张立强, 男, 1970 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事油气储层地质学研究。E-mail: liqiangzhangwxm@163.com。

中图分类号: TE122.2 文献标志码: A

Logging identification and application of diagenetic facies of clastic reservoir by unsupervised learning technology: a case study of the Santai Formation in Zhanhua sag, Bohai Bay Basin

MENG Yuan¹ JIA Guanghua² LI Chuanhua² ZHANG Liqiang¹ ZHANG Shuguang³

1 School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Shandong Qingdao 266580, China

2 Oil and Gas Exploration Management Center, Sinopec Shengli Oilfield Company, Shandong Dongying 257015, China

3 CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Tianjin 300450, China

Abstract The intricate tectonic evolution, coupled with diverse sedimentary environments and highly variable lithologies, results in strongly heterogeneous reservoirs in the Santai Formation of the Zhanhua sag, making reservoir quality prediction particularly challenging. This highlights the critical importance of accurately identifying and classifying diagenetic facies for effective reservoir evaluation. Traditional supervised learning methods for whole-well diagenetic facies identification are limited by the availability of training samples and thus often impractical in data-scarce scenarios. To address this, an unsupervised learning approach constrained by single-factor analysis is proposed for the logging-based identification of diagenetic facies. By integrating parameters such as apparent compaction rate, cement content, porosity, and fracture density, four diagenetic facies were identified: dense compaction facies, carbonate-cemented facies, dissolution-fracture facies, and weakly dissolved facies with unstable components. Four diagenesis-sensitive logging curves—GR (natural gamma), AC (acoustic travel time), DEN (density), and RD (deep lateral resistivity)—were selected as inputs for the unsupervised clustering algorithm. The clustering ranges of these curves were individually constrained to establish a reliable correlation between logging responses and diagenetic facies. Calibration of logging facies with diagenetic facies was conducted using core data, including thin-section analysis of cast samples, allowing for regional-scale identification and classification of diagenetic facies. The results show that the dissolution-fracture facies and weakly dissolved facies with unstable components represent the most favorable diagenetic facies for reservoir development. These are associated with relatively high porosity and permeability and are mainly distributed in coarse-grained rocks such as conglomeratic sandstones and, while the weakly dissolved facies with unstable components are mainly distributed in fine-grained rocks like siltstone. The accuracy of the proposed method was validated through comparisons with blind wells, demonstrating its effectiveness in non-cored intervals. This approach provides a novel method for predicting reservoir diagenetic facies and offers practical implications for the evaluation and prediction of high-quality reservoir zones in data-limited settings.

Key words Jiyang Depression, Zhanhua sag, Santai Formation, diagenetic facies logging identification, single factor constraints, unsupervised learning

About the first author MENG Yuan, born in 1999, is a master's degree candidate. Her primary research interests include diagenetic facies logging interpretation and machine learning. E-mail: 754586279@qq.com.

About the corresponding author ZHANG Liqiang, born in 1970, is a professor and doctoral supervisor. His main research focus is on oil and gas reservoir geology. E-mail: liqiangzhangwxm@163.com.

随着油气勘探开发进展，济阳坳陷中生界潜山碎屑岩储集层已经成为渤海湾盆地、甚至中国重要勘探领域（张光亚等，2015；赖锦等，2018）。埕岛一桩海地区位于济阳坳陷沾化凹陷，钻遇多口工业油流井或高产井，但由于该地区储集层研究程度低，中生界勘探一直是零星发现，没有形成规模发现（陈亮，2017）。成岩相可以直接反映储集层类型以及储集层质量（高辉和孙卫，2010；赖锦等，2014；萧高健，2022）。但中生界一直作为兼探层系，取心井段有限，通过传统的岩心观察和铸体薄片鉴定无法分析全井段的成岩相类型和分布。前人

多采用的随机森林、BP神经网络等有监督机器学习的方法（白焱等，2013；李政宏，2020；李宁等，2021；李明强等，2021）对成岩相全井预测同样难度很大。利用无监督学习方法识别成岩相的实践较少。

结合研究区样品数目有限，有监督学习检测结果可靠性差的事实，开展无监督学习对研究区成岩相测井识别的研究。以往无监督学习方法流程是：确认聚类数目后，将依据的几条测井曲线一起聚类，最后利用地质资料实现成岩相与测井相标定（Wu *et al.*, 2020；李昌等，2021；Wang and Lu,

2021; 张东晓等, 2021)。这样虽解决样品点较少的问题, 但测井相分类时完全不考虑其数据对应的成岩相含义, 分类结果与成岩相对应关系存疑。为解决以上问题, 在测井相分类时不再将依据的曲线放在一起聚类, 而是对每条曲线进行单独聚类, 即单因素约束。利用交会图将单因素约束的测井相类型进行种类合并, 最终获得研究区测井相类型。通过深度数据将无监督学习确定的测井相种类与样品点成岩相标定, 利用样品点检验单因素约束的无监督学习方法关于成岩相测井识别的可靠性。通过识别结果明确各种成岩相的分布规律, 以期为埕岛—桩海地区侏罗系三台组有利储集层预测和评价提供依据。

1 区域概况

济阳拗陷位于渤海湾盆地东南部, 在平面上以埕宁隆起和鲁西隆起为边界, 具有向西收敛、向东散开的形态特点(袁静等, 2022; 朱世发等, 2022)。济阳拗陷沾化凹陷东北部的埕岛—桩海地区位于济阳拗陷的极浅海—浅海海域(孙超, 2021), 是埕岛低凸起、桩西洼陷、桩海洼陷和长堤低凸起的结合部位(图 1)。该地区发育太古界、古生界、中生界和新生界。其中, 济阳拗陷中生界

从下而上发育侏罗系坊子组、三台组、白垩系蒙阴组和西洼组(王科, 2020), 三台组为本研究主要的目的层位。三台组发育冲积平原、辫状河三角洲沉积及湖泊相沉积。岩性主要包括泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩、细砂岩和含砾砂岩, 泥岩互层较多, 岩性及砂体厚度相差大, 差异性明显, 储集层非均质性强, 有利储集层预测困难。

2 岩石学特征

2.1 岩石类型

通过薄片镜下观察及数据统计, 结合前人岩石薄片分析结果, 认为埕岛—桩海地区三台组储集层岩石类型主要为岩屑长石砂岩, 部分为长石岩屑砂岩(图 2)。石英、长石、岩屑分布较为平均, 其中长石含量最高, 含量介于 20%~50%之间, 平均值为 36.19%, 其次为石英 18%~46%, 平均值为 35.16%, 岩屑占比最少, 平均值为 29.37%。

研究区储集层岩屑成分主要以变质岩为主, 其次为岩浆岩, 沉积岩最少。根据岩屑在成岩过程中表现出的特征大致可以分为易受挤压变形的塑性岩屑和受挤压而发生破裂的刚性岩屑 2 类(朱世发等, 2022)。

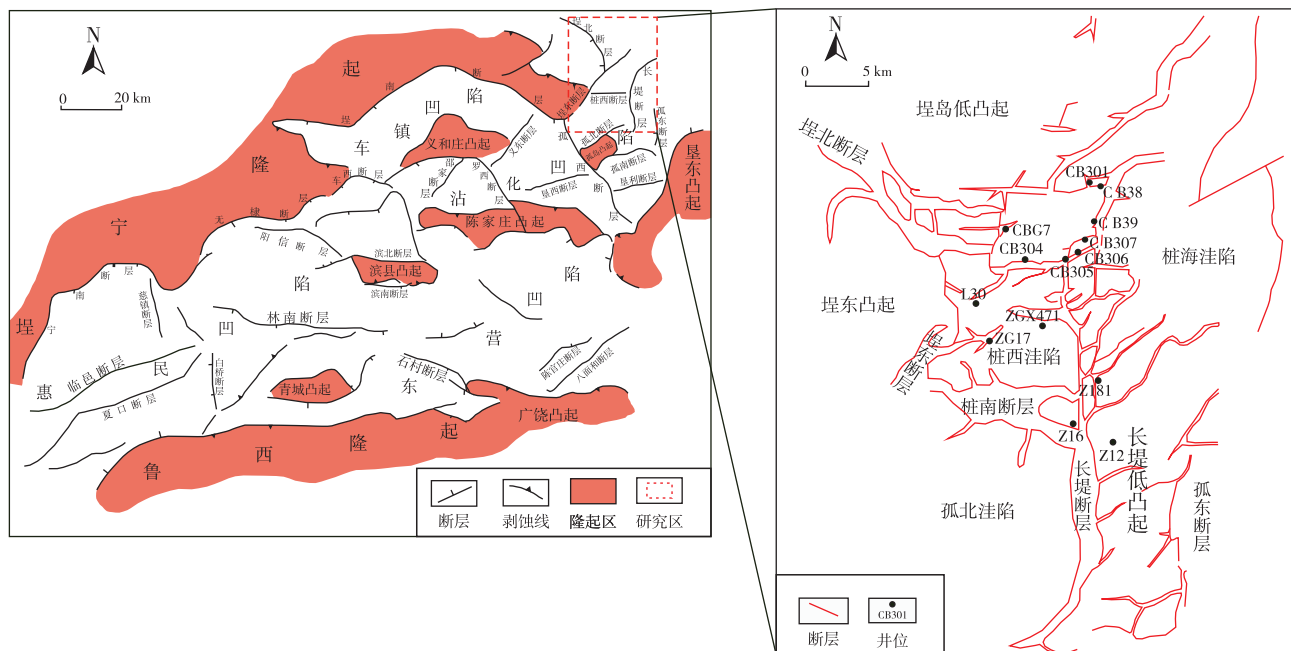


图 1 济阳拗陷沾化凹陷埕岛—桩海地区构造位置(据侯旭波, 2010; 朱世发等, 2022; 修改)

Fig. 1 Structural locations of Chengdao-Zhuanghai area in Zhanhua sag, Jiyang depression, Bohai Bay Basin (modified from Hou, 2010; Zhu *et al.*, 2022)

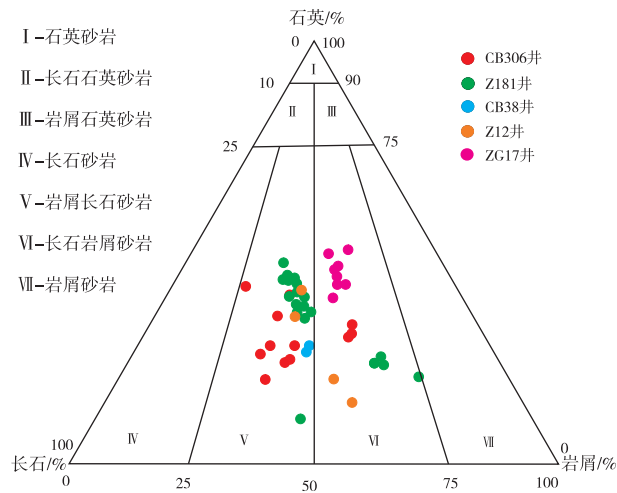


图 2 沾化凹陷埕岛一桩海地区三台组储集层砂岩岩石类型
Fig. 2 Sandstone rock type of the Santai Formation reservoir in Chengdao-Zhuanghai area, Zhanhua sag

埕岛一桩海地区三台组储集层砂岩分选中等一较好，颗粒磨圆以次棱角状为主，接触关系以点一线、凹凸一线为主，具有成分成熟度、结构成熟度

中等的特征。杂基含量较少，以泥质杂基为主。胶结物主要为铁方解石、方解石和铁白云石，白云石胶结物相对较少，胶结类型主要以孔隙型为主。

2.2 成岩作用及成岩演化

利用铸体薄片鉴定及观察等分析手段，总结研究区共有 5 类主要成岩作用：压实作用、胶结作用、溶蚀作用、破裂作用和交代作用。其中压实作用和胶结作用对储集层孔隙有破坏作用，溶蚀作用和破裂作用对储集层孔隙有建设性作用，交代作用对储集层孔隙无明显影响。压实作用通过压力减少储集层孔隙，在强压实作用下可见颗粒定向排列(图 3-a)、塑性颗粒压实变形(图 3-b)、刚性颗粒压实破裂(图 3-c)，在较弱的压实作用下原生孔隙发育，流体可沿原生孔隙进入，溶蚀长石、岩屑等不稳定成分，产生次生孔隙(图 3-d)。研究区储集层胶结作用可以分为方解石胶结(图 3-e, 3-f)、高岭石胶结(图 3-g)、白云石胶结(图 3-h)和硅质胶结，其中碳酸盐胶结分布最广。硅质胶结主要表现

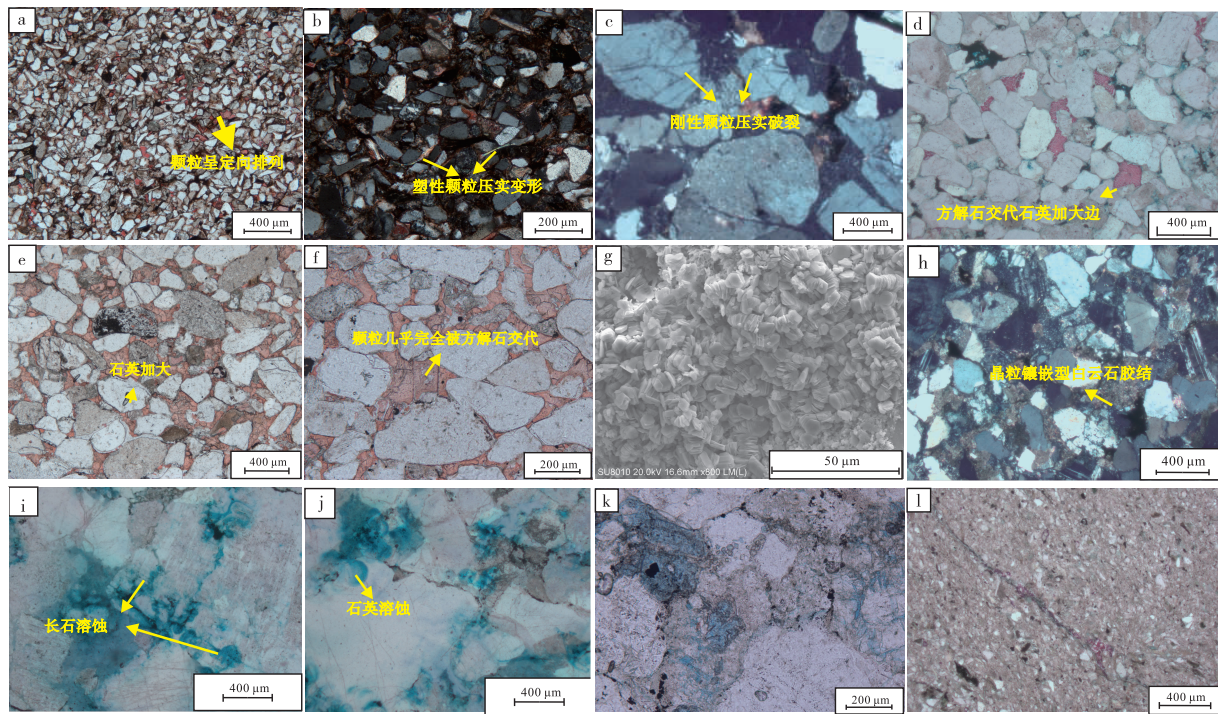


图 3 沾化凹陷埕岛一桩海地区三台组储集层成岩作用类型微观特征
Fig. 3 Microscopic characteristics of diagenesis types of the Santai Formation reservoir in Chengdao-Zhuanghai area, Zhanhua sag

为石英加大(图 3-e), 碳酸盐胶结作用较弱时, 主要为孔隙型胶结, 胶结物分布在颗粒接触处, 含量较少(图 3-d)。当碳酸盐胶结作用较强时, 表现为孔隙型胶结, 碳酸盐胶结物填充粒间孔隙, 此时孔隙基本不发育(图 3-e, 3-f)。溶蚀作用通过溶蚀颗粒产生次生孔隙, 当溶蚀较弱时, 长石、岩屑等不稳定成分受溶蚀产生少量次生孔隙(图 3-d), 在强溶蚀作用下发生石英溶蚀, 次生孔隙大量发育(图 3-i 至 3-k)。破裂作用产生的裂缝可增加储集空间, 裂缝分为沉积成因(图 3-c) 和构造成因(图 3-l) 2 种。交代作用在研究区最常见类型为方解石交代长石和石英加大边(图 3-e, 3-f)。

根据铸体薄片观察, 绘制埕岛一桩海地区三台

组成岩演化序列。在埕岛一桩海地区三台组成岩阶段大致可分为 3 期: 早期初次埋藏, 中期构造抬升接受剥蚀及二次埋藏(王科, 2020)。

埕岛一桩海地区三台组初期随着埋深加强, 具有较强的压实作用, 颗粒产生微裂缝, 流体沿孔隙流入产生溶蚀作用, 同时发生方解石胶结及方解石交代。中期构造抬升, 地层接受剥蚀及大气淋滤, 长石、岩屑等不稳定组分发生强烈溶蚀, 部分基质高岭石化。在第 2 次埋深时有机酸注入继续溶蚀不稳定组分, 此时溶蚀作用伴生破裂作用, 形成了较好的疏导网络。后期发生石英加大, 石英加大边部分被方解石交代, 方解石充填孔隙使孔隙减小。综上, 绘制埕岛一桩海地区三台组储集层成岩演化序列(图 4)。

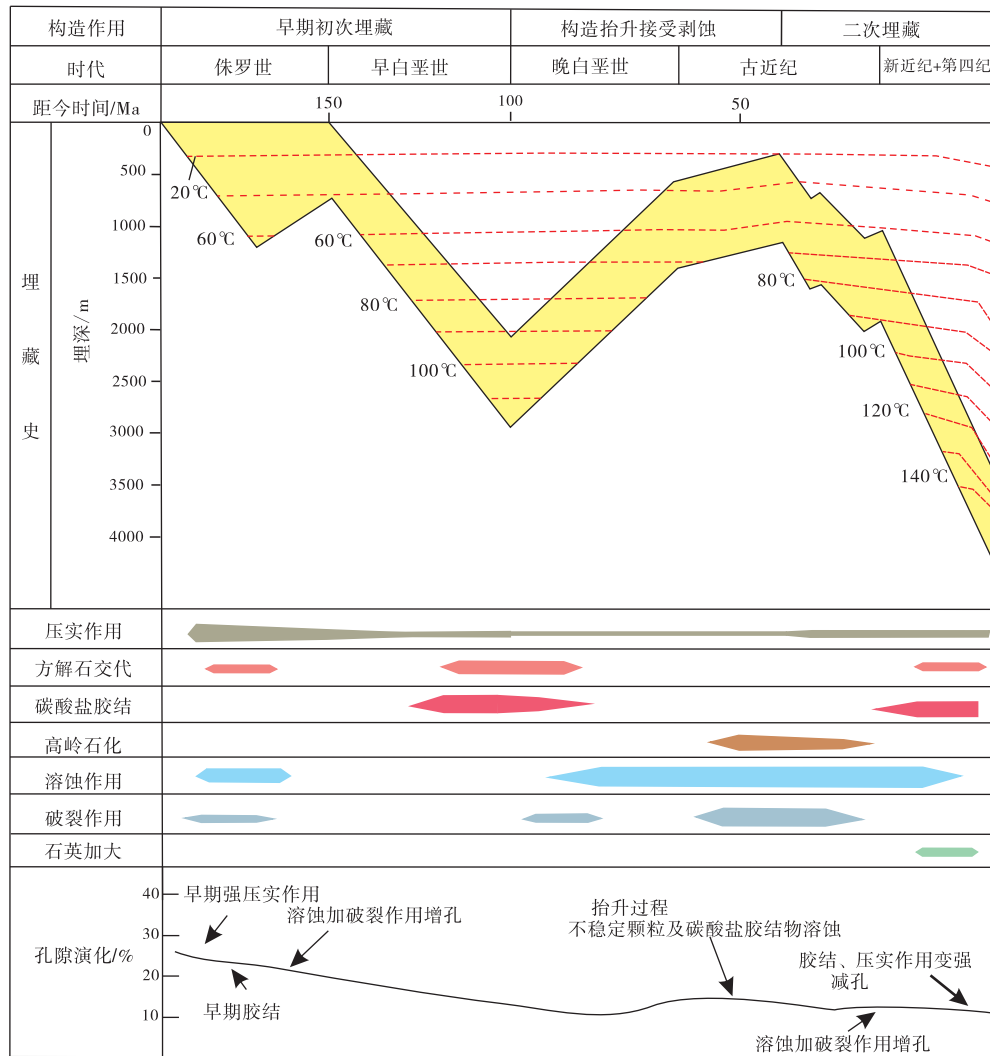


图 4 沾化凹陷埕岛一桩海地区三台组储集层成岩演化序列 (埋藏史-热史据侯旭波, 2010; 修改)

Fig. 4 Diagenetic evolution sequence of the Santai Formation reservoir in Chengdao-Zhuanghai area, Zhanhua sag (buried history-thermal history modified from Hou, 2010)

3 成岩相标定

成岩相是特定成岩环境中碎屑岩经受各种有机、无机反应形成的具有一定矿物组合和成岩组构特征，反映成岩演变结果的岩石单元 (Lai *et al.* 2018; 何庆斌和张继红, 2022)。根据成岩作用类型与矿物成分将研究区成岩相划分为致密压实相、碳酸盐胶结相、不稳定成分弱溶蚀相和溶蚀与裂缝相。

当储集层在强压实作用下，杂基充填孔隙，孔隙基本不发育，压实作用是影响储集空间最核心的因素时，将成岩相划分为致密压实相(图 5-a, 5-b)。该成岩相视压实率大于 65%，因孔隙与裂缝基本不发育，面孔率小于 5%，裂缝率小于 0.5%，胶结物含量少，小于 10%。研究区中胶结物类型主要为碳酸盐胶结，其他胶结物对成岩相划分无明显影响，因此当碳酸盐矿物为充填孔隙的主要矿物、储集层孔隙基本不发育时，将成岩相划分为碳酸盐胶结相(图 5-c)，该成岩相视压实率在 65% 以下，碳酸盐胶结物含量分布范围为 25%~30%，孔隙和裂缝发育较少，面孔率小于 5%，裂缝率小

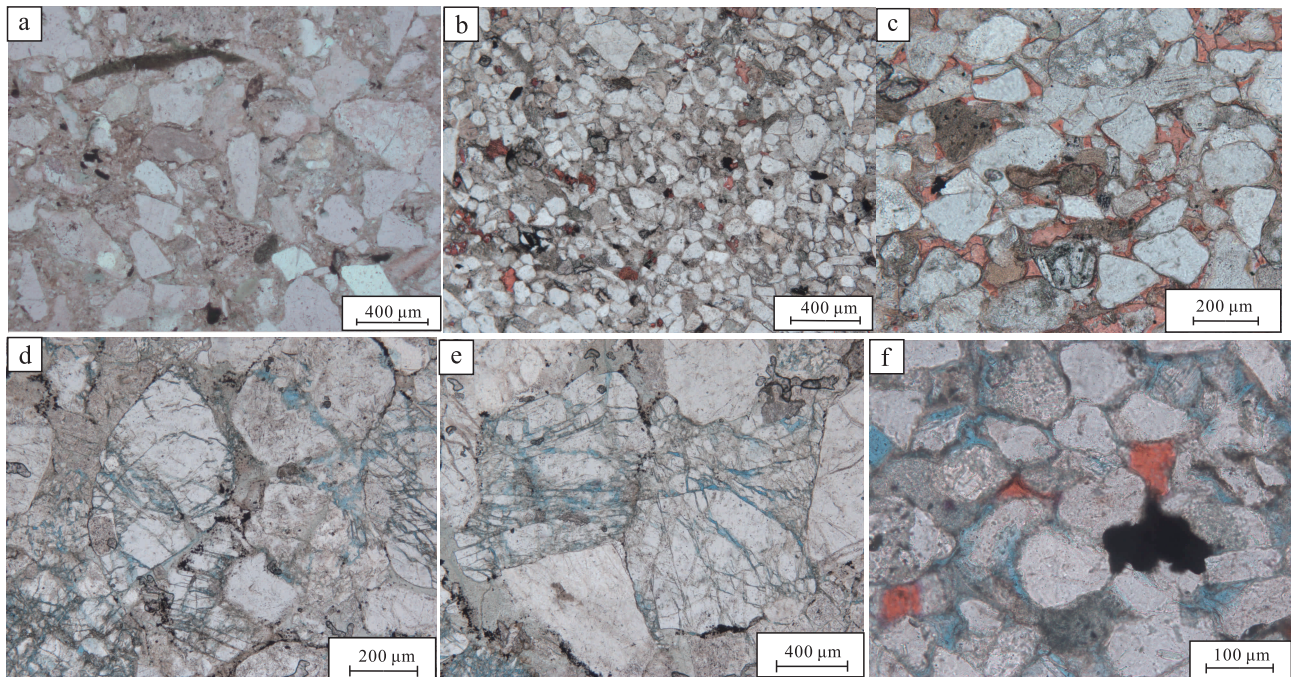
于 0.5%；当流体沿孔隙溶蚀长石、岩屑等不稳定成分产生少量次生孔隙时，将成岩相划分为不稳定成分弱溶蚀相(图 5-f)，该成岩相视压实率小于 65%，胶结物含量在 5%~10% 之间，面孔率为 15%~20%，裂缝基本不发育，裂缝率小于 0.5%；当刚性颗粒压实破裂，生成裂缝，流体流入裂缝促进溶蚀作用，破裂作用和溶蚀作用共同作用并生成传输网络时，将此时储集层成岩相划分为溶蚀与裂缝相(图 5-d, 5-e)，该成岩相视压实率在 65%~75% 之间，胶结物含量较少，在 2%~5% 之间，面孔率在 8%~30% 之间，裂缝发育，裂缝率一般分布在 0.5%~1.1% 之间。

结合前人成岩相划分标准 (赖锦等, 2015)，并通过数据整理，利用视压实率、胶结物含量、面孔率和裂缝率总结 4 种成岩相划分标准(表 1)。

4 成岩相测井识别

4.1 测井曲线选取和数据预处理

前人对于成岩相测井识别通常选取 GR (自然伽马)、AC (声波时差)、DEN (密度)、CNL



a—CB38 井, 3538.49 m, 致密压实相, 单偏光; b—Z181 井, 3019.8 m, 致密压实相, 单偏光; c—Z181 井, 3105.65 m, 碳酸盐胶结相, 单偏光; d—CB306 井, 3316 m, 溶蚀与裂缝相, 单偏光; e—3320.27 m, 溶蚀与裂缝相, 单偏光; f—Z181 井, 3096.42 m, 不稳定成分弱溶蚀相, 单偏光

图 5 沾化凹陷埕岛一桩海地区三台组储集层成岩相微观特征

Fig. 5 Microscopic characteristics of diagenetic facies of the Santai Formation reservoir in Chengdao-Zhuanghai area, Zhanhua sag

表 1 沾化凹陷埕岛一桩海地区三台组
储集层成岩相划分标准

Table 1 Standard of diagenetic facies classification of the Santai Formation reservoir in Chengdao-Zhuanghai area, Zhanhua sag

成岩相类型	视压实率 /%	胶结物含量 /%	面孔率 /%	裂缝率 /%
致密压实相	> 65	< 10	< 5	< 0.5
碳酸盐胶结相	< 65	25~30	< 5	< 0.5
不稳定成分弱溶蚀相	< 65	5~10	15~20	< 0.5
溶蚀与裂缝相	65~75	2~5	8~30	0.5~1.1

(中子)、RD (深侧向电阻率) 测井曲线作为分类依据 (冉冶等, 2016; 李国欣等, 2018; 黄莉莎等, 2022; 李嘉奇等, 2022; Zhao *et al.*, 2023)。本研究提取 45 个划分好成岩相类型的样品测井数据, 统计各成岩相 GR、AC、DEN、CNL、RD 测井曲线数值分布范围及平均值 (表 2)。

结合统计结果,致密压实相因泥质含量高, GR 值偏高, 因黏土矿物含有结晶水, CNL 值偏高; 碳酸盐胶结相碳酸盐矿物导电性差、含氢指数低, 所以电阻率高、CNL 值低; 不稳定成分弱溶蚀相因原生孔隙发育、AC 值偏高; 溶蚀与裂缝相原生孔隙发育较少, AC 值偏低。致密压实相和碳酸盐胶结相因孔隙不发育, DEN 值比溶蚀与裂缝相、不稳定成分弱溶蚀相高。5 条测井曲线数值对不同成岩相表现出一定差异。

对研究区 45 个样品点的测井数据进行相关性分析, 结果如图 6 所示。埕岛一桩海地区三台组与储集层孔隙度相关性较强的曲线为 SP (自然电位)、AC、CNL、GR, 与渗透率相关性较强的曲线为 DEN、CNL、GR。自然电位曲线可能受泥浆滤液电阻率和地层水电阻率的影响, 不同井自然电位差异性大, 因此不作为成岩相测井识别依

表 2 沾化凹陷埕岛-桩海地区三台组储集层成岩相对应测井数据统计

Table 2 Statistics of logging data corresponding to diagenesis facies of the Santai Formation reservoir in Chengdao-Zhuanghai area, Zhanhua sag

成岩相类型	GR/API	AC/ $\mu\text{s}\cdot\text{ft}^{-1}$	DEN/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	CNL/%	RD/ $\Omega\cdot\text{m}$
致密压实相	77.5~107.7(89.09)	66.8~74.4(68.36)	1.98~2.61(2.31)	4.3~12.9(6.65)	2.06~5.42(4.45)
碳酸盐胶结相	38.79~79.97(43.03)	68.96~78.83(77.26)	1.92~2.56(2.35)	11.07~14.8(12.09)	12.4~19.56(16.4)
不稳定成分弱溶蚀相	47.24~57.63(53.14)	80.07~85.59(83.14)	1.96~2.25(2.15)	18.49~20.2(19.42)	11.02~13.29(12.6)
溶蚀与裂缝相	51.453~72(60.7)	65.81~78.85(75.94)	2.32~2.24(2.26)	13.64~22.4(17.02)	3.4~15.59(12.69)

注: 数据表示: 最小值~最大值 (平均值)。

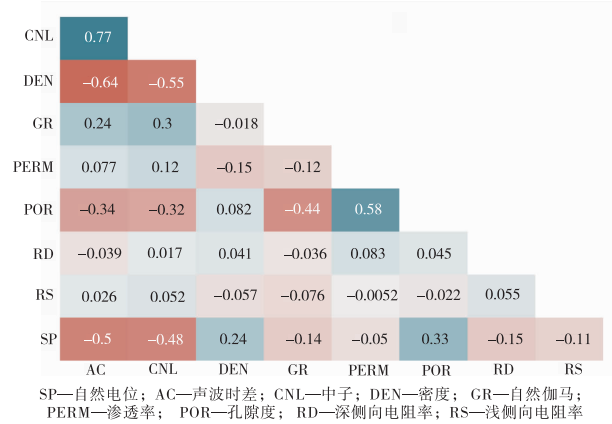


图 6 沾化凹陷埕岛一桩海地区三台组
储集层测井曲线相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of logging curves of the Santai Formation reservoir in Chengdao-Zhuanghai area, Zhanhua sag

据。DEN 与 CNL 曲线均代表总孔隙度, 考虑到研究区样本数量有限, 分类依据过多影响机器学习结果正确率, 因此不将 CNL 曲线作为区分成岩相的依据。综上, 通过 GR、AC、DEN 和 RD 测井曲线验证分析其与成岩相的关系。

由于不同测井参数量纲不同, 井间环境受钻井液等因素的影响, 智能性算法的学习会受到极大的影响。因此, 在进行测井特征选取时, 将测井数据的异常值去除并利用 SPSS 软件对全井数据进行标准化处理。同时, 对于岩心薄片的样品点进行严格的深度归位和井径矫正。

4.2 成岩相测井响应

4.2.1 致密压实相

致密压实相储集层岩石粒度较细, 泥质、自生黏土矿物含量高, 强烈的压实作用使颗粒原始体积变小, 孔隙基本不发育。该成岩相储集层测井曲线特征为 GR 高值、RD 低值、DEN 高值、AC 低值 (图 7)。

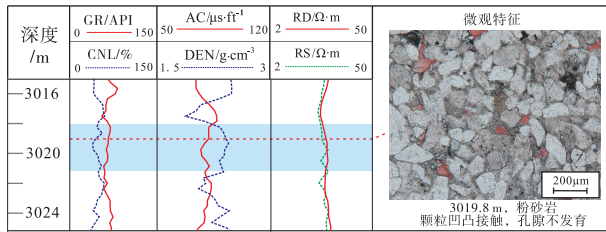


图 7 沾化凹陷埕岛一桩海地区 Z181 井三台组致密压实相储集层测井响应与微观特征

Fig. 7 Logging response and microscopic characteristics of tight compaction facies reservoir of Well Z181 in Chengdao-Zhuanghai area, Zhanhua sag

4.2.2 碳酸盐胶结相

碳酸盐矿物一般不具有放射性，导电性差，碳酸盐胶结物填充在孔隙中，孔隙度较低。碳酸盐胶结相储集层测井曲线特征为 GR 中低值、DEN 高值、AC 中低值、RD 高值(图 8)。

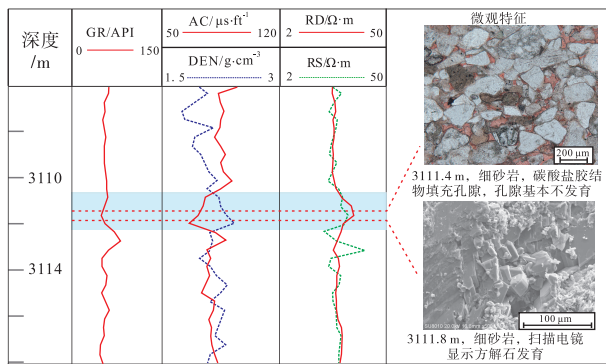


图 8 沾化凹陷埕岛一桩海地区 Z181 井三台组碳酸盐胶结相储集层测井响应与微观特征

Fig. 8 Logging response and microscopic characteristics of carbonate cementation facies reservoir of Well Z181 in Chengdao-Zhuanghai area, Zhanhua sag

4.2.3 溶蚀与裂缝相

溶蚀与裂缝相储集层溶蚀作用和破裂作用共同对储集层物性产生影响。该成岩相储集层次生孔隙大量发育，孔隙泥质杂基较少，孔隙类型主要为次生孔隙。测井曲线特征为 GR 低值、DEN 中低值、RD 低值、AC 值无明显变化(图 9)。

4.2.4 不稳定成分弱溶蚀相

不稳定成分弱溶蚀相储集层压实作用较弱，有少量原生孔隙分布，溶蚀作用导致电阻率偏低。不稳定成分弱溶蚀相储集层测井曲线特征为 AC 中高值、DEN 低值、RD 低值(图 10)。

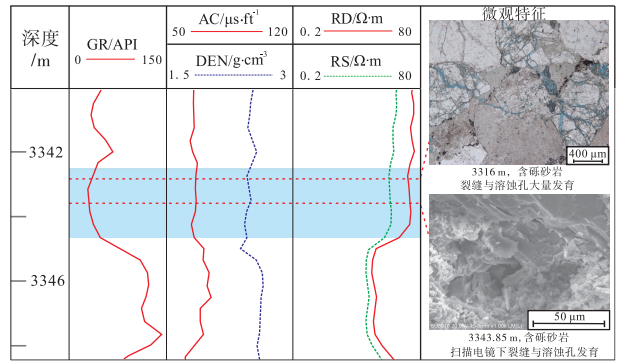


图 9 沾化凹陷埕岛一桩海地区 CB306 井三台组溶蚀与裂缝相储集层对应测井曲线特征与微观特征

Fig. 9 Logging response and microscopic characteristics of dissolution and fracture phase facies reservoir of Well CB306 in Chengdao-Zhuanghai area, Zhanhua sag

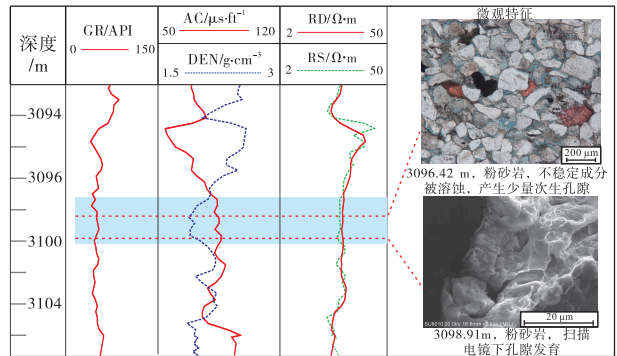


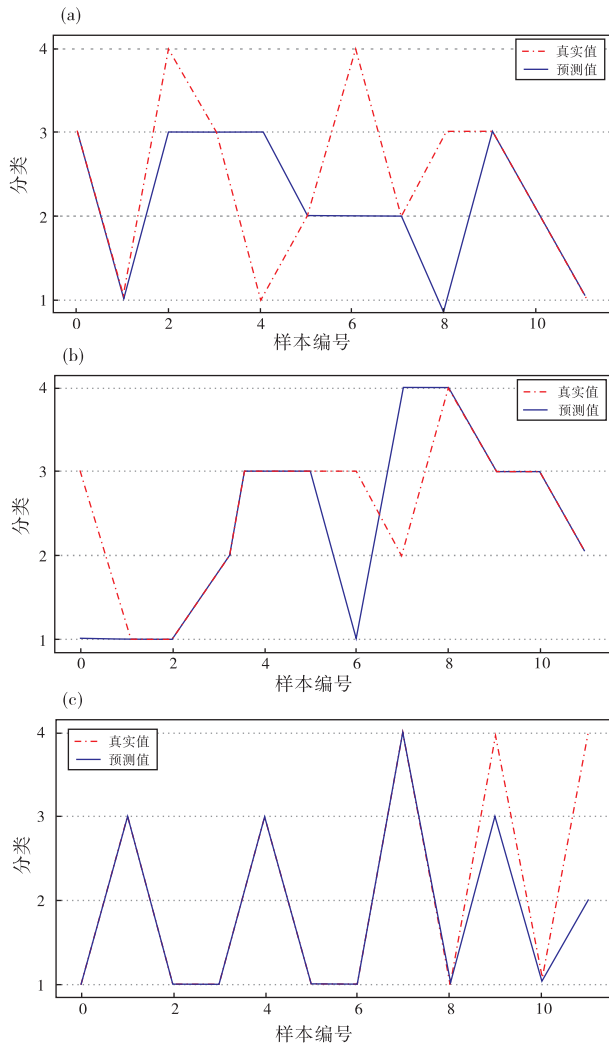
图 10 沾化凹陷埕岛一桩海地区 Z181 井三台组不稳定成分弱溶蚀相储集层对应测井曲线特征与微观特征

Fig. 10 Logging response and microscopic characteristics of unstable component weak dissolution facies reservoir of Well Z181 in Chengdao-Zhuanghai area, Zhanhua sag

5 成岩相测井识别方法

5.1 基于有监督学习的成岩相测井识别

通过调用 Sklearn 数据库实现随机森林、XGboost、BP 神经网络 3 种学习能力较强的有监督学习方法对研究区储集层成岩相进行学习与预测。将测井参数作为输入层，成岩相类型作为输出层，选取 45 个样本点，按照 3:7 比例分为训练样本和测试样本，函数输出 1-4 分别代表致密压实相、碳酸盐胶结相、溶蚀与裂缝相、不稳定成分弱溶蚀相，3 种学习方法预测结果的正确率分别为 67%、75%和 83%。所得预测结果如图 11 所示。图 11 中显示，3 种有监督学习方法除对物性相似的成岩相识别有混淆以外，对致密压实相和溶蚀与裂缝相、



成岩相: 1-致密压实相 2-碳酸盐胶结相 3-溶蚀与裂缝相 4-不稳定成分弱溶蚀相
a—随机森林成岩相测井识别结果; b—XGboost 成岩相测井识别结果; c—BP 神经网络成岩相测井识别结果

图 11 沾化凹陷埕岛一桩海地区三台组储集层有监督学习方法成岩相预测结果

Fig. 11 Prediction result of diagenetic facies by supervised learning method of the Santai Formation in Chengdao - Zhuanghai area, Zhanhua sag

碳酸盐胶结相与不稳定成分弱溶蚀相物性相差较大的成岩相识别也有混淆。导致这种情况的原因是有监督学习的学习样本数目较少,且 45 个学习样本中致密压实相样本的数目有 25 个,样本数目不均匀,有监督学习方法对成岩相测井识别的结果偏向于致密压实相。在学习样本数目较少且种类数目不均匀的情况下,有监督学习实用性有限。本研究将利用无监督学习具有不需要学习样本的特点,开展对研究区成岩相测井识别的研究,其中比较常见的无监督学习方法为 K-means 聚类方法。

5.2 基于单因素约束的无监督学习成岩相测井识别

5.2.1 K-means 聚类算法原理

K-means 聚类算法使用欧氏距离作为样本之间的距离度量,认为特征越接近的样本之间的距离越小,它们之间的关联性也就越强。K-means 聚类算法随机选择 k 个初始类簇中心,将样本依次划分至距离最近的类簇中心所在类簇中,计算各簇的均值向量作为新的类簇中心,依次迭代,直至收敛 (Aguiar *et al.*, 2022; 陈晓曼和苏欢, 2023)。算法原理如图 12 所示,按照 K-means 聚类算法的第 1 步(图 12-a),选择 k 个初始化聚类中心(图中 $k=3$,分别对应图 12-a 中的绿色、黄色、橙色圆点),计算数据对象到这 3 个聚类中心的距离,并选择聚类最近的形成一个集合。在得到集合后,计算数据对象到聚类中心距离的均值,将距离均值作为新的聚类中心点(图 12-b,新的聚类中心为蓝色圆点)。在形成新的聚类中心后,重新计算全部数据对象到聚类中心的距离,重新分簇(图 12-c)。多次重复此类方法,不断迭代,直至所有的数据对象无法更新到其他数据集时,该算法结束(图 12-d)。

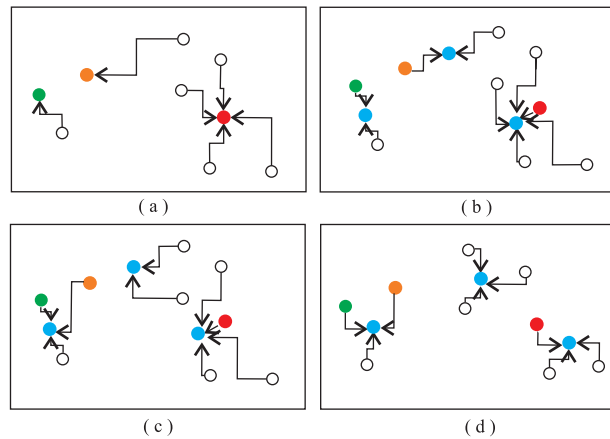


图 12 K-means 聚类算法原理 (据张浩, 2023; 修改)

Fig. 12 Principle of K-means clustering algorithm (modified from Zhang, 2023)

5.2.2 单因素约束的无监督学习方法区分测井相

通过对前人有关无监督学习的调研,认为无监督学习结果虽具有明显的聚类特征,但聚类过程完全通过欧式距离划定(陈晓曼和苏欢, 2023; Zhao *et al.*, 2023),聚类结果与成岩相映射关系

有待验证。

结合前文关于成岩相测井响应特征，提出用单因素约束进行无监督聚类的方法。由于 GR、AC、RD、DEN 曲线对成岩相较为敏感，每条曲线数值的高低可分别对应不同的成岩相，比如致密压实相和碳酸盐胶结相相较于溶蚀与裂缝相声波时差一般较低，致密压实相和碳酸盐胶结相由于泥质含量较高往往具有较高的自然伽马值，所以提出直接将各曲线分为高、中、低 3 个等级进行聚类。首先选一个变量进行 K-means 聚类，将聚类种类定为 3 类，因为是一元聚类，3 类结果会呈现高、中、低 3 类。将 4 条曲线的 3 个等级进行组合，最终可以获得 81 类。分类原则如图 13 所示，在高 GR 情况下将 AC 分为高、中、低 3 类（此时有 3 类）。在高 AC 情况下又可将 DEN 分为高、中、低 3 类，同样，中低 AC 也对应 DEN 高、中、低 3 类（此时有 $3 \times 3 = 9$ 类）；在高 DEN 情况下又可将 RD 分为高、中、低 3 类，中、低 DEN 也可对应 RD 高、

中、低 3 类（此时对应 $9 \times 3 = 27$ 类）。同理，中、低 GR 也可分为这 27 类，因此总共可分为 81 类。

5.2.3 交会图合并冗杂种类

将 4 条曲线的 3 个等级进行组合，最终可以获得 81 类，但结合实际，有些测井的分类并不存在，通过对已有井数据的分析与分类的总结，认为通常可获得 30~48 类。同时，由于无监督学习有分类冗杂的缺点，利用交会图将可看出明显聚类特征的特点，将聚类相近的种类进行合并。此次聚类合并利用的交会图为“GR-AC 交会图”、“DEN-RD 交会图”，将明显聚类成团的种类合并为一类。以 CB306 井为例，利用单因素约束的分类可以将 CB306 井三台组分为图 14-a 中的 45 种，在“GR-AC 交会图”中，可看出 8 个聚类区域，将其聚类明显种类合并，结果如图 14-b 中“GR-AC 交会图”所示。在图 14-a “DEN-RD 交会图”中可看出 5 种明显聚类区域，将其合并结果如图 14-b 中“DEN-RD 交会图”所示。在合并过程中，通过两交会图的种类，分别将聚类明显的种类标为一类。最后，再将两交会图种类有重合的标为同一类，没有重合的作为新的一类(图 15)。

利用 45 个样品点录井资料、岩心铸体薄片、孔渗数据对单因素约束的无监督学习测井相结果与 4 种成岩相进行标定。最终标定结果如表 3 所示，表中显示测井曲线特征与成岩相标定关系。致密压实相对 GR 曲线较为敏感，与其他 4 种成岩相有明显不同，对 DEN、RD 曲线敏感度较低；碳酸盐胶结相对应较低的 GR 和 AC 值、较高的 DEN 和 RD 值，这与碳酸盐矿物放射性弱及不导电性有关，通过测井曲线分类及铸体薄片观察，碳酸盐胶结相原生孔隙与次生孔隙较少发育；不稳定成分弱溶蚀相泥质杂基分布较少，GR 值较低，原生孔隙与次生孔隙的发育导致 AC 值高、DEN 值低，当不稳定成分弱溶蚀相孔隙存在胶结作用时，会导致导电性变低，不发育时导电性较高，导致其对 RD 曲线不敏感；溶蚀与裂缝相泥质杂基少，碳酸盐矿物偶有分布，从而 GR 值偏低，溶蚀与裂缝相原生孔隙发育较少，因此 AC 值偏低，次生孔隙大量发育从而使 DEN 值偏低，碳酸盐矿物的发育导致导电性不稳定，因此对 RD 曲线不敏感。

5.2.4 单因素约束的无监督学习预测效果

以 CB306 井为例，将单因素约束无监督学习

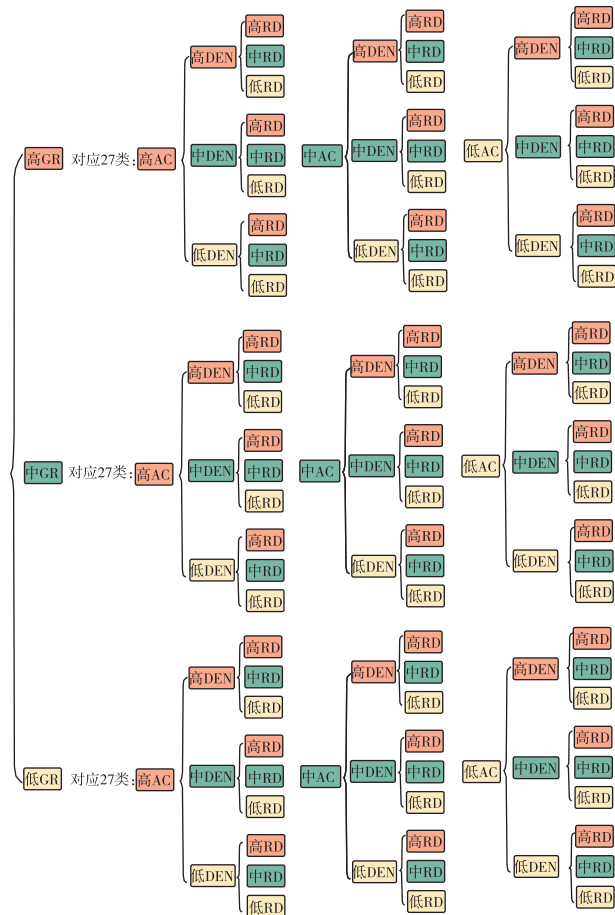
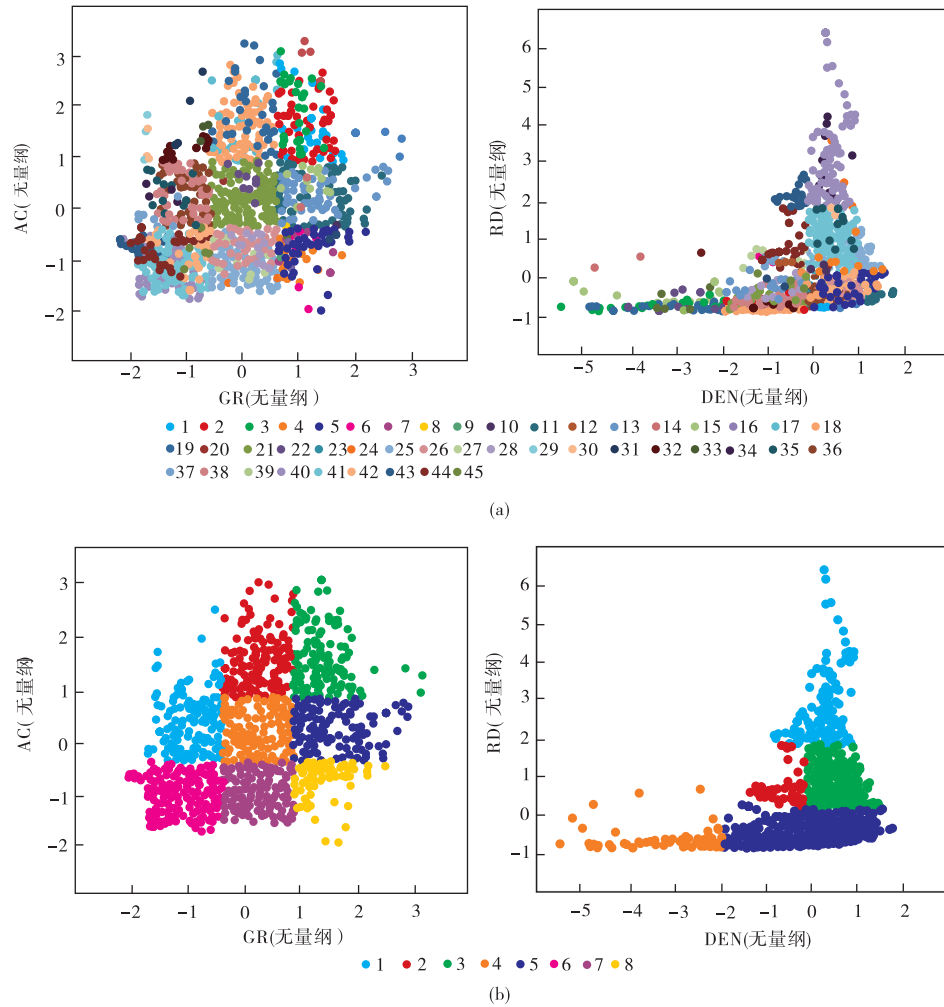


图 13 测井相划分原理

Fig. 13 Principle of logging phase division



a—各分类 GR-AC、DEN-RD 交会图 (图中数值均为标准化以后的数值); b—将聚类相近种类合并后交会图 (图中数值均为标准化以后的数值)

图 14 利用 GR-AC、DEN-RD 交会图合并相近种类示意图

Fig. 14 Schematic diagrams of using GR-AC and DEN-RD crossplots to merge similar types

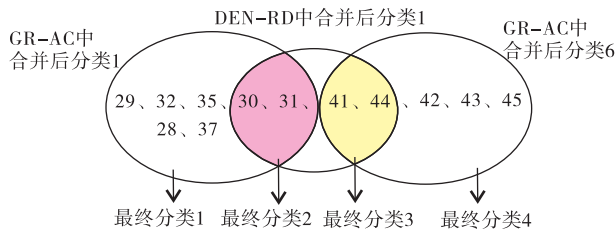


图 15 分类合并方法示意图

Fig. 15 Schematic diagram of classification merging method

的分类结果及其对应的测井曲线值每隔 1 m 取 1 个样品作为学习样本, 共获得 256 个学习样本。利用 Sklearn 数据库调用随机森林学习方法, 4 条测井参数作为输入层, 无监督学习获得的成岩相分类作为输出层进行深度学习训练, 测试集识别结果正确率

表 3 沾化凹陷埕岛一桩海地区三台组储集层测井曲线特征与成岩相标定关系

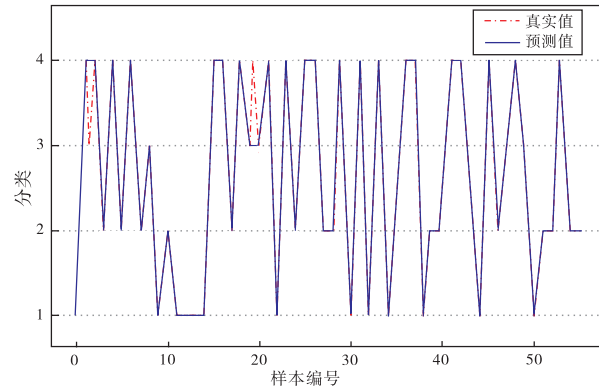
Table 3 Relationship between logging curve characteristics and diagenetic facies of the Santai Formation reservoir in Chengdao-Zhuanghai area, Zhanhua sag

测井曲线特征				成岩相类型
GR	AC	DEN	RD	
中高	中低	3 种等级均有分布	3 种等级均有分布	致密压实相
中低	中低	中高	中高	碳酸盐胶结相
低	中高	中	3 种等级均有分布	不稳定成分弱溶蚀相
中低	中低	中低	3 种等级均有分布	溶蚀与裂缝相

为 94%。所得结果如图 16 所示，以单因素约束的无监督学习成岩相测井识别结果作为学习样本，可以实现成岩相较为精确的细分，说明利用单因素约束的无监督学习方法有一定可靠性。结果偶会出现不稳定成分弱溶蚀相和溶蚀与裂缝相的混淆，这与两者的岩石的物理性质密不可分，即均具有较高的孔隙度和较低的密度。该方法一定程度上可以解决有监督学习在学习样本较少时不能精确识别成岩相的问题。

5.3 机器学习方法应用性对比

分别利用随机森林、XGboost、BP 神经网络、单因素约束的无监督学习方法对 CB306 井三台组 (3138~3395 m)、Z181 井三台组 (2980~3200 m) 的碎屑岩储集层进行成岩相测井识别，绘制随机森



1-致密压实相 2-碳酸盐胶结相 3-溶蚀与裂缝相 4-不稳定成分弱溶蚀相

图 16 沾化凹陷埕岛一桩海地区三台组储集层单因素约束的无监督学习方法预测结果

Fig. 16 Reservoir prediction result of unsupervised learning method with single factor constraint of the Santai Formation in Chengdao-Zhuanghai area, Zhanhua sag

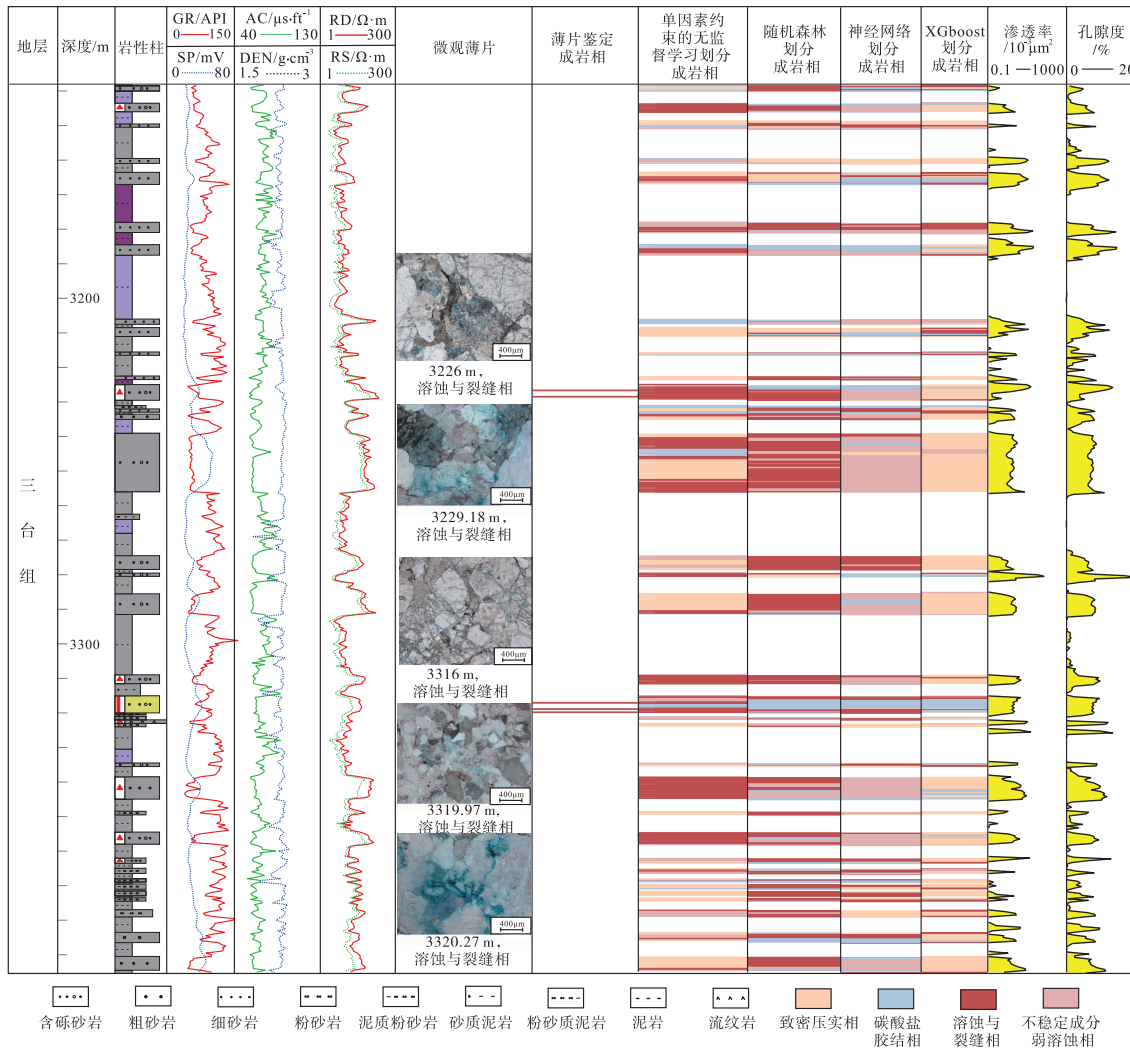


图 17 沾化凹陷埕岛一桩海地区 CB306 井成岩相测井识别结果对比

Fig. 17 Comparison of logging identification results of diagenetic facies in Well CB306 in Chengdao-Zhuanghai area, Zhanhua sag

林、XGboost、BP 神经网络、单因素约束的无监督学习方法预测结果与样品对比图(图 17; 图 18)。

通过对比发现,单因素约束的无监督学习与微观薄片照片匹配度最高,随机森林、XGboost、BP

神经网络的成岩相预测结果部分与实际成岩相不符合。根据图 17 所示,随机森林、XGboost、BP 神经网络常将溶蚀与裂缝相识别成碳酸盐胶结相和致密压实相,预测结果物性与实际物性相差较大。导

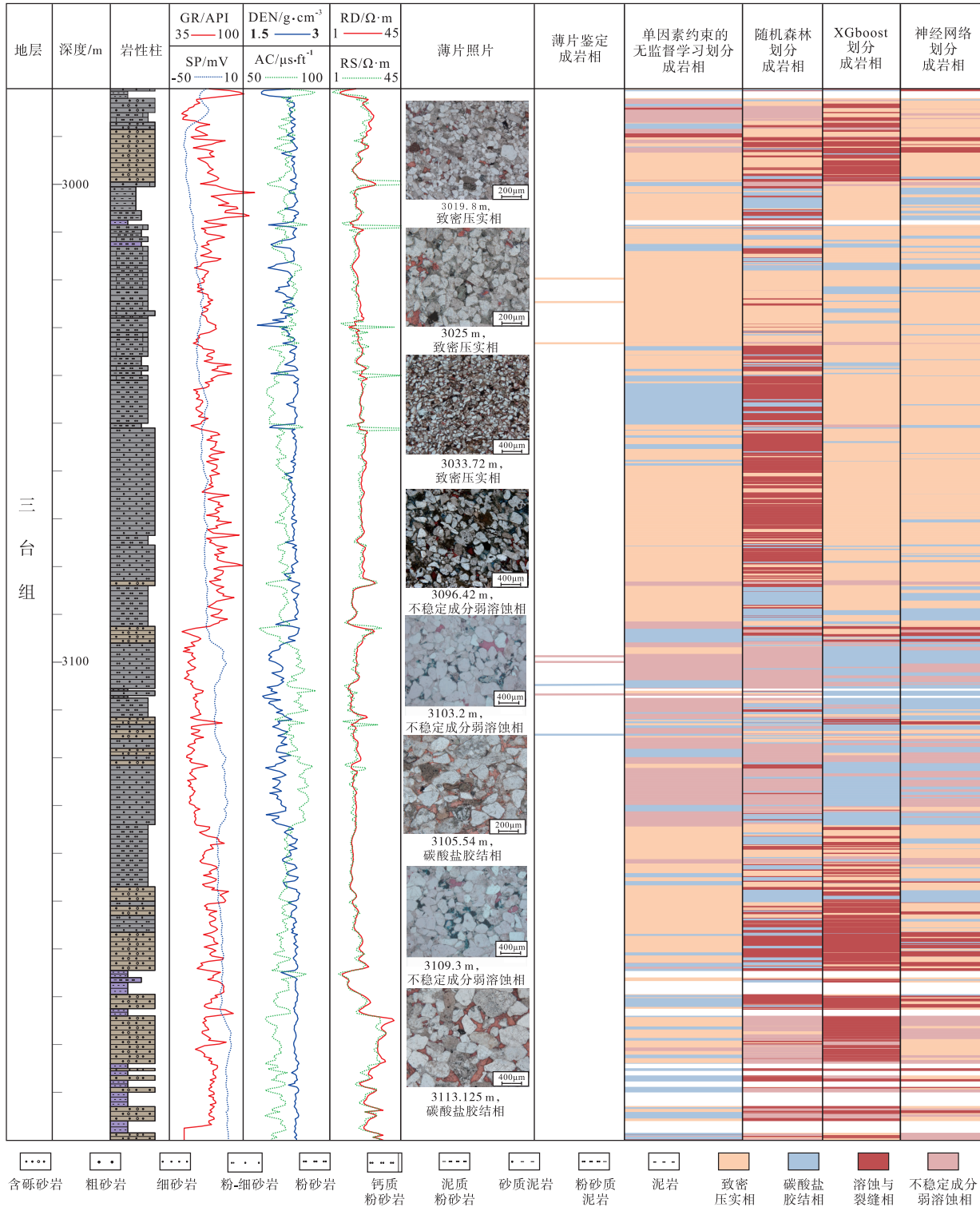


图 18 沾化凹陷埕岛一桩海地区 Z181 井成岩相测井识别结果对比

Fig. 18 Comparison of logging identification results of diagenetic facies in Well Z181 in Chengdao-Zhuanghai area, Zhanhua sag

致这种现象的原因是：致密压实相学习样本数量多，有监督学习因为其数目多，其他成岩相数目少，常造成将其他成岩相识别为致密压实相的现象；溶蚀与裂缝相因为主要发育次生孔隙，因此 AC 值与碳酸盐胶结相相差不大，DEN 值是 2 类成岩相区分的重要依据，但因为样本数目较少，有监督学习不能将 2 类成岩相很好地区分。图 18 中，除单因素约束的无监督学习方法外，其他 3 种机器学习方法常出现将不稳定成分弱溶蚀相预测成碳酸盐胶结相以及将孔渗度较低的砂岩储集层识别为溶蚀与裂缝相的现象。导致这个现象的原因是：不稳定成分弱溶蚀相常伴随碳酸盐胶结的现象，当溶蚀作用较弱并伴随一定胶结作用时，有监督学习将其预测为碳酸盐胶结相；当溶蚀与裂缝相泥质杂基较多时有监督学习方法将其识别为致密压实相。综上，认为单因素约束的无监督学

习方法更适用于埕岛-桩海地区三台组储集层成岩相识别。

6 单因素约束的无监督学习方法盲井检验

为测试单因素约束的无监督学习方法对研究区成岩相的应用性，利用 CBG7 井对成岩相识别结果进行检验。首先对 CBG7 井进行单因素约束的无监督学习测井相分类，测井相与成岩相的对应关系根据表 3 的测井曲线特征进行标定。结果如图 19 所示，将预测结果与 45 个样品点以外的 5 个样品点进行成岩相对比，可知 5 个样品点的成岩相类型与预测结果相同。

通过 CBG7 井预测结果统计成岩相孔隙度和渗透率数据，并绘制孔渗交会图(图 20)，显示 4 类成岩相孔渗关系相关性较好。致密压实相与碳

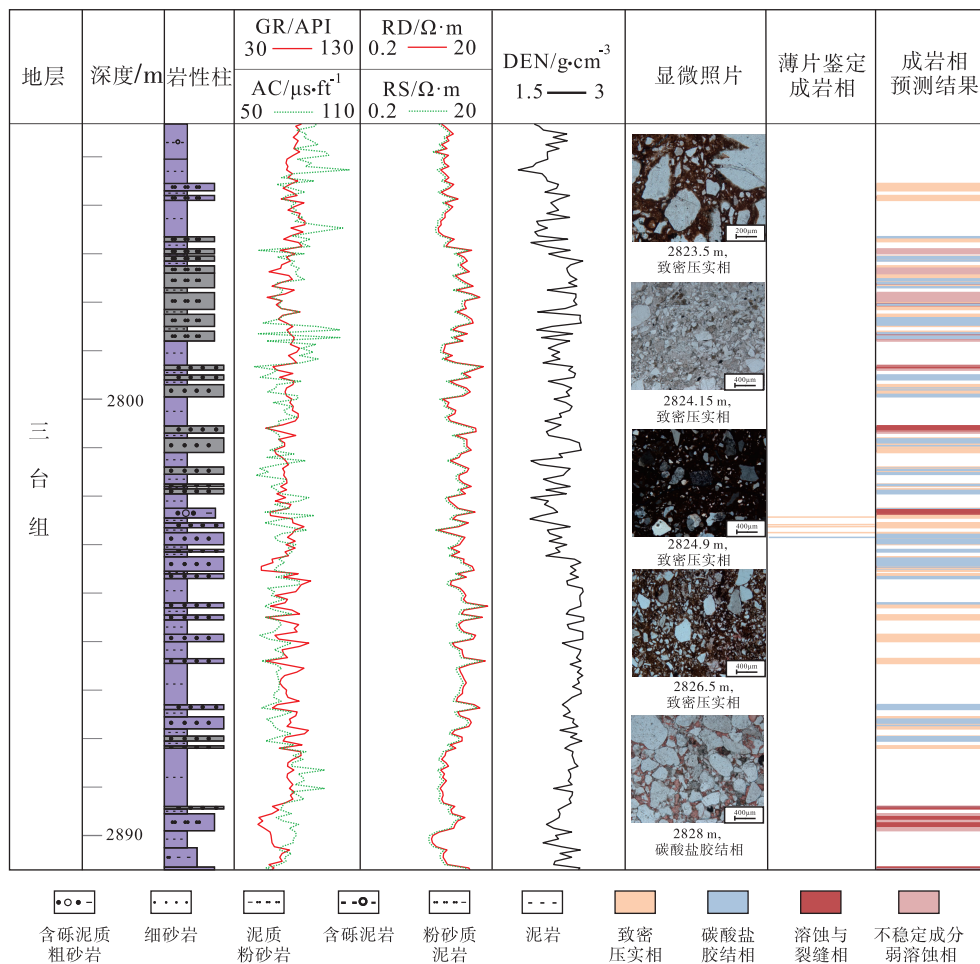


图 19 沾化凹陷埕岛-桩海地区 CBG7 井成岩相测井识别结果对比

Fig. 19 Comparison of logging identification results of diagenetic facies in Well CBG7 in Chengdao-Zhuanghai area, Zhanhua sag

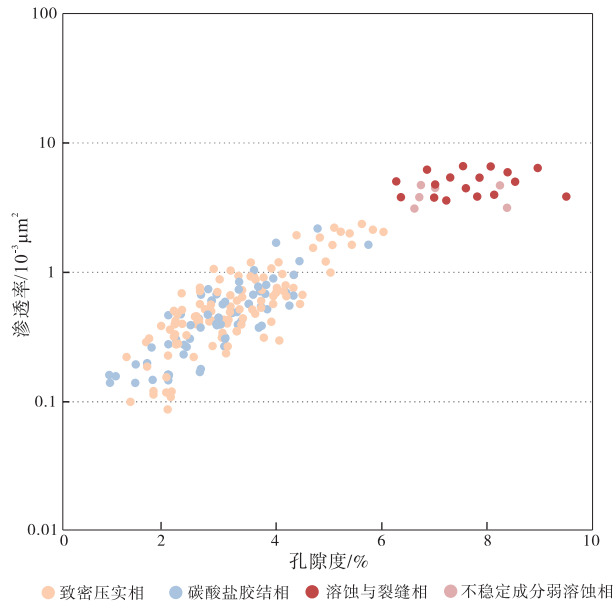


图 20 沾化凹陷埕岛一桩海地区 CBG7 井成岩相孔隙度和渗透率交会图

Fig. 20 Crossplot of porosity and permeability of diagenetic facies in Well CBG7 in Chengdao-Zhuanghai area, Zhanhua sag

酸盐胶结相孔渗差，两者重合部分较多，孔隙度分布范围为 0.78%~6.04%，渗透率分布范围为 $(0.09\sim 3.76)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。溶蚀与裂缝相和不稳定成分弱溶蚀相孔渗度高，这与 2 种成岩相孔隙发育有关，其中溶蚀与裂缝相具有最高的孔渗度，孔隙度分布范围为 6.29%~9.42%，渗透率分布范围为 $(7.06\sim 8.94)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，是研究区最好的一类储集层；不稳定成分弱溶蚀相孔隙度范围为 6.31%~8.24%，渗透率范围为 $(6.28\sim 7.67)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。成岩相预测结果孔渗交会图进一步验证单因素约束学习的无监督学习方法测井相识别结果与研究区成岩相具有一定的映射关系。

CB306、Z181、GBG7 等 3 口井的含油气性表明油气主要分布在溶蚀与裂缝相中，这与前文分析的溶蚀与裂缝相溶蚀作用和破裂作用形成传输网络有关，进一步验证了单因素约束的无监督学习在研究区成岩相识别的可靠性。溶蚀与裂缝相主要分布在含砾砂岩、砂岩等粒径较粗的岩石中，不稳定成分弱溶蚀相主要分布在粉砂岩、粉细砂岩等细粒岩中。致密压实相和溶蚀与裂缝相厚度最大，碳酸盐胶结相和不稳定成分弱溶蚀相厚度较小。

综上，认为单因素约束的无监督学习方法可以较好地区分埕岛一桩海地区三台组储集层成岩相类型，根据该方法所得结果可以进一步分析成岩相的含油气性、物性及岩石学特征，有利于探明油气分布规律，对油气的勘探开发具有一定意义。

7 结论

1) 渤海湾盆地济阳坳陷沾化凹陷埕岛一桩海地区三台组经多期构造运动和复杂成岩作用的强烈改造后，储集空间受沉积、构造和成岩作用等因素的综合控制，非均质性强。以成岩作用作为成岩相主要划分依据，结合视压实率、胶结物含量、面孔率和裂缝率进行成岩相的标定，最终将埕岛一桩海地区三台组碎屑岩储集层划分为 4 类成岩相：致密压实相、碳酸盐胶结相、不稳定成分弱溶蚀相和溶蚀与裂缝相。

2) 通过数据统计和测井曲线相关性分析，选取 GR、AC、DEN、RD 等 4 条测井曲线作为成岩相测井划分依据。利用无监督学习方法不需要学习样本的特点，解决有监督学习在学习样本数目较少的情况下准确率有限的问题。为确保无监督学习与成岩相的映射关系，对每条曲线聚类范围进行约束。经样品点与机器学习结果的对比，认为单因素约束的无监督学习方法更适用于研究区成岩相测井识别。

3) 通过单因素约束的无监督学习，并利用交会图将无监督冗余的分类合并，最终获得测井相结果。利用样品点实现测井相与成岩相的标定。为确保单因素约束的无监督学习方法对研究区成岩相划分的可靠性，利用 CBG7 井进行盲井检测，通过孔隙数据和薄片照片得知单因素约束的无监督学习对研究区成岩相测井识别有一定的可靠性。埕岛一桩海地区 4 种成岩相有明显的分布规律：致密压实相和溶蚀与裂缝相厚度最大，碳酸盐胶结相和不稳定成分弱溶蚀相厚度较小。溶蚀与裂缝相主要分布在含砾砂岩、砂岩等粒径较粗的岩石中，不稳定成分弱溶蚀相主要分布在粉砂岩、粉细砂岩等细粒岩中。

参考文献 (References)

- 白焯, 薛林福, 石玉江, 潘保芝, 张海涛, 王建强. 2013. 测井成岩相自动识别及其在鄂尔多斯盆地苏里格地区的应用. 中国石油大学

- 学报(自然科学版),37(1): 35-41. [Bai Y, Xue L F, Shi Y J, Pan B Z, Zhang H T, Wang J Q. 2013. An automatic identification method of log diagenetic facies and its application in Sulige area, Ordos Basin. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 37(1): 35-41]
- 陈亮. 2017. 埕岛油田中生界潜山油气藏勘探潜力分析. 中国石油大学(华东)硕士学位论文. [Chen L. 2017. Exploration potential analysis of Mesozoic buried hill reservoir in Chengdao oilfield. Masteral dissertation of China University of Petroleum (East China)]
- 陈晓曼, 苏欢. 2023. 基于核 KMeans 和 SOM 神经网络算法的海况聚类分析. *陕西科技大学学报*, 41(3): 208-214. [Chen X M, Su H. 2023. Sea state clustering analysis based on kernel KMeans and SOM neural network algorithm. *Journal of Shaanxi University of Science & Technology*, 41(3): 208-214]
- 高辉, 孙卫. 2010. 鄂尔多斯盆地合水地区长 8 储层成岩作用与有利成岩相带. *吉林大学学报(地球科学版)*, 40(3): 542-548. [Gao H, Sun W. 2010. Diagenesis and favorable diagenetic facies of Chang 8 reservoir in Heshui area, Ordos Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(3): 542-548]
- 何庆斌, 张继红. 2022. 松辽盆地南部大安地区姚一段特低渗砂岩成岩作用与成岩相. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 49(6): 674-686. [He Q B, Zhang J H. 2022. Diagenesis and diagenetic facies of ultra-low permeability sandstone in the first member of Yaojia Formation in Da'an area, South Songliao Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 49(6): 674-686]
- 侯旭波. 2010. 济阳拗陷构造反转特征及其与叠合盆地演化关系. 中国石油大学(华东)博士论文. [Hou X B. 2010. Characteristics of structural inversion in Jiyang depression and its relationship with the evolution of superimposed basin. Doctoral dissertation of China University of Petroleum (East China)]
- 黄莉莎, 闫建平, 刘明洁, 张庄, 叶素娟, 张帆, 钟光海, 王敏, 王军, 耿斌. 2022. 深层致密砂岩气储层成岩相测井识别及应用: 以川西拗陷大邑须家河组须三段为例. *中国矿业大学学报*, 51(1): 107-123. [Huang L S, Yan J P, Liu M J, Zhang Z, Ye S J, Zhang F, Zhong G H, Wang M, Wang J, Geng B. 2022. Diagenetic facies logging identification and application of deep tight sandstone gas reservoir: a case study of the third member of Xujiahe Formation in Dayi area of western Sichuan depression. *Journal of China University of Mining & Technology*, 51(1): 107-123]
- 赖锦, 王贵文, 信毅, 周磊, 肖承文, 韩闯, 郑新年, 吴庆宽. 2014. 库车拗陷巴什基奇克组致密砂岩气储层成岩相分析. *天然气地球科学*, 25(7): 1019-1032. [Lai J, Wang G W, Xin Y, Zhou L, Xiao C W, Han C, Zheng X N, Wu Q K. 2014. Diagenetic facies analysis of tight sandstone gas reservoir of Bashijiqike Formation in Kuqa Depression. *Natural Gas Geoscience*, 25(7): 1019-1032]
- 赖锦, 王贵文, 黄龙兴, 官斌, 蒋晨, 冉冶, 张晓涛, 李梅, 王迪. 2015. 致密砂岩储集层成岩相定量划分及其测井识别方法. *矿物岩石地球化学通报*, 34(1): 128-138. [Lai J, Wang G W, Huang L X, Guan B, Jiang C, Ran Y, Zhang X T, Li M, Wang D. 2015. Quantitative classification and logging identification method for diagenetic facies of tight sandstones. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(1): 128-138]
- 赖锦, 韩能润, 贾云武, 季玉山, 王贵文, 庞小娇, 贺志博. 2018. 基于测井资料的辫状河三角洲沉积储层精细描述. *中国地质*, 45(2): 304-318. [Lai J, Han N R, Jia Y W, Ji Y S, Wang G W, Pang X J, He Z B. 2018. Detailed description of the sedimentary reservoir of a braided delta based on well logs. *Geology in China*, 45(2): 304-318]
- 李昌, 沈安江, 常少英, 梁正中, 李振林, 孟贺. 2021. 机器学习法在碳酸盐岩相测井识别中应用及对比: 以四川盆地 MX 地区龙王庙组地层为例. *油气藏评价与开发*, 11(4): 586-596. [Li C, Shen A J, Chang S Y, Liang Z Z, Li Z L, Meng H. 2021. Application and contrast of machine learning in carbonate lithofacies log identification: a case study of Longwangmiao Formation of MX area in Sichuan Basin. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 11(4): 586-596]
- 李国欣, 赵太平, 石玉江, 胡琮, 陈阵, 凡雪纯, 李栋, 赖锦. 2018. 鄂尔多斯盆地马家沟组碳酸盐岩储层成岩相测井识别评价. *石油学报*, 39(10): 1141-1154. [Li G X, Zhao T P, Shi Y J, Hu C, Chen Z, Fan X C, Li D, Lai J. 2018. Diagenetic facies logging recognition and evaluation of carbonate reservoirs in Majiagou Formation, Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 39(10): 1141-1154]
- 李嘉奇, 鲜本忠, 王剑, 连丽霞, 陈思芮, 贺静. 2022. 四棵树凹陷清水河组测井成岩相识别与储层评价. *东北石油大学学报*, 46(1): 1-14. [Li J Q, Xian B Z, Wang J, Lian L X, Chen S R, He J. 2022. Logging diagenetic facies identification and reservoir evaluation of Qingshuihe Formation in Sikeshe Sag. *Journal of Northeast Petroleum University*, 46(1): 1-14]
- 李明强, 张立强, 李政宏, 张亮, 毛礼鑫, 徐小童. 2021. 塔里木盆地下侏罗统阿合组下砂砾岩段致密砂岩成岩相划分及测井识别: 以库车拗陷依奇克里克地区为例. *天然气地球科学*, 32(10): 1559-1570. [Li M Q, Zhang L Q, Li Z H, Zhang L, Mao L X, Xu X T. 2021. Diagenetic facies division and logging identification of tight sandstone in the lower conglomerate member of lower Jurassic Ahe Formation in Tarim Basin: case study of Yiqikelike area in Kuqa Depression. *Natural Gas Geoscience*, 32(10): 1559-1570]
- 李宁, 徐彬森, 武宏亮, 冯周, 李雨生, 王克文, 刘鹏. 2021. 人工智能在测井地层评价中的应用现状及前景. *石油学报*, 42(4): 508-522. [Li N, Xu B S, Wu H L, Feng Z, Li Y S, Wang K W, Liu P. 2021. Application status and prospects of artificial intelligence in well logging and formation evaluation. *Acta Petrolei Sinica*, 42(4): 508-522]
- 李政宏. 2020. 库车拗陷东部下侏罗统阿合组致密砂岩成岩相测井识别. 中国石油大学(华东)硕士学位论文. [Li Z H. 2020. Logging identification of diagenetic facies of tight sandstone in Ahe Formation of Lower Jurassic in eastern Kuqa Depression. Masteral dissertation of China University of Petroleum (East China)]
- 冉冶, 王贵文, 赖锦, 周正龙, 崔玉峰, 代全齐, 陈晶, 王抒忱. 2016. 利用测井交会图法定量表征致密油储层成岩相: 以鄂尔多斯盆地

- 华池地区长 7 致密油储层为例. 沉积学报, 34(4): 694-706. [Ran Y, Wang G W, Lai J, Zhou Z L, Cui Y F, Dai Q Q, Chen J, Wang S C. 2016. Quantitative characterization of diagenetic facies of tight sandstone oil reservoir by using logging crossplot: a case study on Chang 7 tight sandstone oil reservoir in Huachi area, Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34(4): 694-706]
- 孙超. 2021. 济阳坳陷埕岛一桩海地区中生界潜山储层岩性与储层质量. 科学技术与工程, 21(36): 15411-15420. [Sun C. 2021. Lithology and reservoir quality of Mesozoic buried hill in the Chengdao-Zhuanghai area, Jiyang depression. *Science Technology and Engineering*, 21(36): 15411-15420]
- 王科. 2020. 济阳坳陷中生界碎屑岩储层储集特征及储层发育模式. 中国石油大学(华东)硕士学位论文. [Wang K. 2020. Reservoir characteristics and development model of the Mesozoic clastic reservoirs in Jiyang Depression. Masteral dissertation of China University of Petroleum(East China)]
- 萧高健. 2022. 鄂尔多斯盆地红河油田长 8 段致密裂缝砂岩储层表征及“甜点油层”综合评价研究. 中国地质大学(武汉)博士学位论文: 42-48. [Xiao G J. 2022. Characterization and comprehensive evaluation of 'Sweet Spots' in the Chang 8 tight fractured sandstone reservoir in Honghe Oilfield, Ordos Basin, China. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Wuhan): 42-48]
- 袁静, 吴兵, 王永诗, 马立驰, 杨贵丽. 2022. 胜利滩海地区馆上段—明化镇组底部河流类型及演变. 沉积学报, 40(3): 813-824. [Yuan J, Wu B, Wang Y S, Ma L C, Yang G L. 2022. Fluvial types and evolution of the upper member of Guantao Formation and bottom of Minghuazhen Formation of Neogene in Shengli offshore area. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(3): 813-824]
- 张东晓, 尉玉龙, 李三百, 陈云天, 徐加放. 2021. 基于无监督机器学习的多段射孔压裂的分段优化. 中国石油大学学报(自然科学版), 45(4): 59-66. [Zhang D X, Yu Y L, Li S B, Chen Y T, Xu J F. 2021. Staging optimization of multi-stage perforation fracturing based on unsupervised machine learning. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 45(4): 59-66]
- 张光亚, 马锋, 梁英波, 赵喆, 秦雁群, 刘小兵, 张可宝, 客伟利. 2015. 全球深层油气勘探领域及理论技术进展. 石油学报, 36(9): 1156-1166. [Zhang G Y, Ma F, Liang Y B, Zhao Z, Qin Y Q, Liu X B, Zhang K B, Ke W L. 2015. Domain and theory-technology progress of global deep oil & gas exploration. *Acta Petrolei Sinica*, 36(9): 1156-1166]
- 张浩. 2023. 基于约束聚类算法的跳频信号分选与定位技术研究. 电子科技大学硕士学位论文. [Zhang H. 2023. Research on frequency hopping signal sorting and location technology based on constrained clustering algorithm. Masteral dissertation of University of Electronic Science and Technology of China]
- 朱世发, 贾业, 马立驰, 崔殿, 景安语, 佟欢. 2022. 渤海湾盆地济阳坳陷中生界复杂岩性风化壳储层特征、质量控因与甜点模型. 石油与天然气地质, 43(3): 514-527. [Zhu S F, Jia Y, Ma L C, Cui D, Jing A Y, Tong H. 2022. Characteristics, quality-controlling factors and sweet spot model of the Mesozoic weathering crust reservoirs with complex lithologies in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 43(3): 514-527]
- Aguiar Nascimento R, Neto Á B, Bezerra Y S F, do Nascimento H A D, Lucena L D S, de Freitas J E. 2022. A new hybrid optimization approach using PSO, Nelder-Mead Simplex and Kmeans clustering algorithms for 1D Full Waveform Inversion. *PLoS One*, 17: e0277900.
- Lai J, Wang G W, Wang S, Cao J T, Li M, Pang X J, Zhou Z L, Fan X Q, Dai Q Q, Yang L, He Z B, Qin Z Q. 2018. Review of diagenetic facies in tight sandstones: diagenesis, diagenetic minerals, and prediction *via* well logs. *Earth-Science Reviews*, 185: 234-258.
- Wang Y, Lu Y. 2021. Diagenetic facies prediction using a LDA-assisted SSOM method for the Eocene beach-bar sandstones of Dongying Depression, East China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196: 108040.
- Wu D, Liu S B, Chen H D, Lin L B, Yu Y, Xu C, Pan B. 2020. Investigation and prediction of diagenetic facies using well logs in tight gas reservoirs: evidences from the Xu-2 member in the Xinchang structural belt of the western Sichuan Basin, Western China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 192: 107326.
- Zhao X B, Chen X J, Chen W, Liu M Q, Yao Y, Wang H, Zhang H, Yao G Q. 2023. Quantitative classification and prediction of diagenetic facies in tight gas sandstone reservoirs *via* unsupervised and supervised machine learning models: Ledong area, Yinggehai Basin. *Natural Resources Research*, 32: 2685-2710.

(责任编辑 李新坡; 英文审校 徐 杰)