

沾化凹陷沙四上亚段湖相碳酸盐岩储层岩石物理特征与模型

苏朝光¹, 金杰华^{1,2*}, 巴素玉¹, 刘升余¹, 杨田³, 宋晓倩¹, 何青³

¹中国石化胜利油田分公司物探研究院, 山东 东营

²胜利石油管理局博士后科研工作站, 山东 东营

³成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都

收稿日期: 2023年7月10日; 录用日期: 2023年9月19日; 发布日期: 2023年9月26日

摘要

沾化凹陷是渤海湾盆地济阳拗陷重要的油气勘探区, 其中沙四上亚段湖相碳酸盐岩油藏是凹陷内关键的勘探目标。为进一步认识湖相碳酸盐岩储层岩性、沉积微相与岩石物理参数之间的关系, 本文以沾化凹陷沙四上亚段湖相碳酸盐岩储层为目标, 综合利用岩石学、物性表征、岩石物理测试等多种分析测试资料, 系统表征湖相碳酸盐岩储层的岩石学特征、沉积微相、岩石物理参数及参数敏感性特征, 并开展储层岩石物理建模。结果表明: 沾化凹陷沙四上亚段湖相碳酸盐岩以灰岩为主, 次为混积岩, 白云岩发育较少。主要发育灰礁、灰滩、灰泥亚相, 包括礁核、礁前、礁间水道、礁后、礁缘、滩核、滩缘、滩间水道微相。在样品干燥和饱水情况下, 滩核微相纵波速度、横波速度、体积模量、剪切模量、杨氏模量、泊松比中相较于滩缘微相较高; 生物灰岩纵、横波速度、体积模量较高, 砂屑灰岩纵、横波速度、体积模量变化范围较大, 灰质白云岩、砂屑灰岩、砂质灰岩及泥晶灰岩的泊松比偏低。密度、纵横波速度比和 λ 常数交汇, 作为岩性敏感性参数反映流体对储层岩性无影响; 纵、横波速度比值与 λ 常数在不同流体情况下对区分沉积微相的敏感性特征不同。碳酸盐岩储层整体符合Gassmann岩石物理模型预测, 但局部符合DEM岩石物理模型预测; DEM岩石物理模型作为微裂缝发育的非均质储层的岩石物理模型较Gassmann模型预测结果更准确。

关键词

岩性参数, 岩石物理模型, 参数敏感性, 湖相碳酸盐岩, 沙四上亚段, 沾化凹陷

Petrophysical Characteristics and Model of Lacustrine Carbonate Reservoir in the Upper Fourth Member of Shahejie Formation in the Zhanhua Sag

*通讯作者。

文章引用: 苏朝光, 金杰华, 巴素玉, 刘升余, 杨田, 宋晓倩, 何青. 沾化凹陷沙四上亚段湖相碳酸盐岩储层岩石物理特征与模型[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(9): 1114-1126. DOI: 10.12677/ag.2023.139106

Chaoguang Su¹, Jiehua Jin^{1,2*}, Suyu Ba¹, Shengyu Liu¹, Tian Yang³, Xiaoqian Song¹, Qing He³

¹Institute of Geophysical Exploration, Shengli Oilfield Company, Sinopec, Dongying Shandong

²Post-Doctoral Research Station, Shengli Petroleum Administration Bureau, Dongying Shandong

³Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Received: Jul. 10th, 2023; accepted: Sep. 19th, 2023; published: Sep. 26th, 2023

Abstract

The Zhanhua Sag is a significant oil and gas exploration area in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin. Lacustrine carbonate reservoirs of the upper fourth member of Shahejie Formation are the key exploration target in this sag. To further reveal the relationship between lithology, sedimentary microfacies and petrophysical parameters of lacustrine carbonate reservoir, in this paper, the upper fourth member of Shahejie Formation in Zhanhua Sag was taken as the target. The petrological characteristics, sedimentary microfacies, petrophysical parameters and parameter sensitivity characteristics of lacustrine carbonate reservoirs are systematically characterized by comprehensive use of petrological, physical characterization and petrophysical testing data, and reservoir petrophysical modeling is carried out. The results show that the lacustrine carbonate rocks in the upper fourth member of Shahejie Formation in the Zhanhua Sag are mainly limestone, the secondary is mixed rock, and the dolomite is less developed. It mainly develops lime-reef, lime-beach and lime-mud, including microfacies of reef core, reef front, channel among reefs, reef back, reef margin, beach core, beach margin and channel among beaches. In the case of dry and saturated samples, the velocity of P-wave, S-wave, bulk modulus, shear modulus, Young's modulus and Poisson's ratio of the beach core microfacies are higher than those of the beach margin microfacies. The velocity of P-wave, S-wave and volume modulus of biogenic limestone is higher, the velocity of P-wave, S-wave and volume modulus of calcarenite is larger, and the Poisson's ratio of limy dolomite, calcarenite, sandy limestone and micrite is lower. The intersection of the density, the ratio of P-wave velocity to S-wave velocity and λ shows that fluid has no influence on the reservoir lithology. The ratio of P-wave velocity to S-wave velocity and shear waves and λ has different sensitivity characteristics to distinguish sedimentary microfacies under different fluid conditions. The carbonate reservoir is predicted by Gassmann petrophysical model as a whole, but locally by DEM petrophysical model. The DEM petrophysical model is more accurate than the Gassmann model as a petrophysical model of heterogeneous reservoir with micro-fracture development.

Keywords

Petrophysical Parameters, Petrophysical Model, Parameter Sensitivity, Lacustrine Carbonate, Upper Fourth Member of the Shahejie Formation, Zhanhua Sag

Copyright © 2023 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

湖相碳酸盐岩是碳酸盐岩重要类型之一，也是重要的生油岩，但长期未受到重视[1] [2]。伴随着近年

来国内外一些盆地中发现的油气藏，湖相碳酸盐岩相关研究得到进一步深入[3] [4] [5]。我国湖相碳酸盐岩广泛发育于各陆相含油气盆地，常备有良好的生油、储油能力，存在巨大的勘探潜力[2] [6]。以渤海湾盆地济阳凹陷为例，湖相碳酸盐岩主要发育于古近系沙河街组沙一段和沙四上亚段，其中，沙四上亚段湖相碳酸盐岩展现出良好的勘探前景[2]，如沾化凹陷邵家地区沙四上亚段碳酸盐岩储层中探明含油面积积 7.20 km²，探明地质储量 603.00 × 10⁴ t，预测潜在资源量 1.00 × 10⁸ t [7]。前人对相关湖相碳酸盐岩储层岩石研究主要包括湖相碳酸盐岩储层发育特征[8]、成岩作用[9]、构造特征[10]、沉积特征[11] [12]、地球化学特征[13]、油气成藏特征[14]等，但是对岩石物理参数与储层特征和发育规律的相关认识十分有限，严重制约了油气勘探开发。由于湖相碳酸盐岩储层具有岩石类型多样、物源复杂、单层厚度薄、成岩作用复杂、储层非均质性极强的特点[15] [16] [17]，为了达到地球物理预测的目的，更需要将储层特征与岩石物理响应更好结合。因此，为更好地适应目前油气勘探进程，亟需借助岩石物理实验，建立储层岩性、沉积微相与岩石物理参数之间的关系，以进一步指导地球物理预测。

针对此情况，以沾化凹陷沙四上亚段湖相碳酸盐岩储层为研究对象，综合岩石学分析、物性测试、岩石物理测试等多种技术手段，系统表征湖相碳酸盐岩储层的岩石学特征、沉积微相、岩石物理参数及参数敏感性等特征，并进一步探讨湖相碳酸盐岩储层岩石物理模型，以期通过地球物理手段来有效预测湖相碳酸盐岩储层。

2. 地质概况

沾化凹陷位于济阳凹陷东北部，属于济阳凹陷的次级构造单元，是一个东北向延伸、北陡南缓的断陷盆地[10] [18]。自印支运动以来，经历多个构造演化阶段，形成多个次级洼陷和洼间低凸起[19] [20] (图 1(a))。沾化凹陷古近系沙四段整体厚度可达 1735.50 m [21]，自上而下发育沙河街组四段、沙河街组三段、沙河街组二段和沙河街组一段。其中，沙四上亚段沉积时期是沾化凹陷从初始断陷向快速裂陷转变的构造转换期[22]，主要发育灰白色、深灰色碳酸盐岩，常混入泥质、砂质等碎屑组分和膏质等化学组分，整体混积特征明显(图 1(b))。

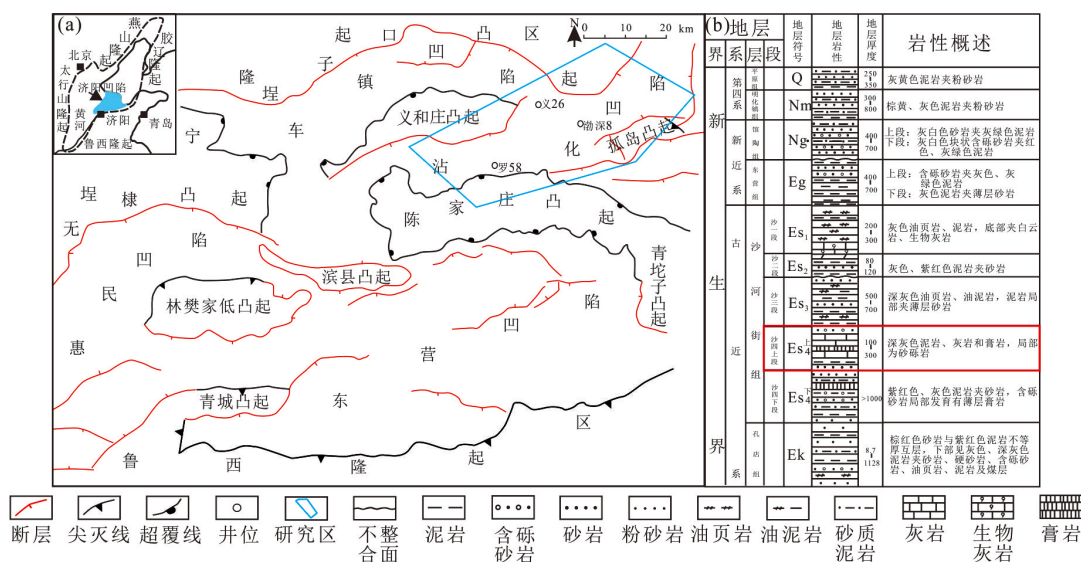


Figure 1. Distribution and stratigraphic characteristics of the study area. (a) The study area and geographical location of Zhanhua Sag; (b) Comprehensive histogram of stratigraphic characteristics of Zhanhua Sag (modified according to [21])
图 1. 研究区分布范围和地层特征。(a) 沾化凹陷研究范围及地理位置；(b) 沾化凹陷地层特征综合柱状图(据[21]修改)

3. 储层类型与特征

3.1. 储层岩石类型与特征

以研究区内 29 口岩心, 288 块岩石样品铸体薄片镜下鉴定资料为基础, 结合全岩 X-射线衍射资料, 将研究区内古近系沙四上亚段湖相碳酸盐岩储层岩石类型主要分为石灰岩、白云岩、混积岩三类。以石灰岩为主, 全岩 X-射线衍射结果显示, 物质组成中方解石平均含量占 90.17% (表 1), 发育少量白云岩。石灰岩主要包括颗粒灰岩、泥晶灰岩等, 其中, 颗粒主要由内碎屑颗粒组成, 以砂屑为主, 颗粒间通常呈点接触-不接触(图 2(a)), 主要产出于水动力较强的区域; 生物灰岩在研究区内分布较广泛, 主要包括螺灰岩(图 2(b))、介壳灰岩(图 2(c))、支管藻灰岩等(图 2(d)), 各类生物颗粒形态保存较完整; 研究区还

Table 1. X-ray diffraction analysis data of lacustrine carbonate reservoir in the upper fourth member of Shahejie Formation (Es4) in Zhanhua Sag

表 1. 沾化凹陷沙四上亚段湖相碳酸盐岩储层全岩 X-射线衍射分析数据表

井号	井深	岩性	全岩定量分析(%)											
			黏土总量	石膏	硬石膏	石英	钾长石	斜长石	方解石	铁白云石	白云石	菱铁矿	黄铁矿	
XL39	2901.7	砂质灰岩	1.6	0.6	13.2	2.4				81.8			0.4	
XL39	2920.48	砂屑灰岩	0.7			1.9				96.6		0.2		0.6
S543-1	2819.8	泥晶灰岩	0.9			3				92.1	3.4			0.6

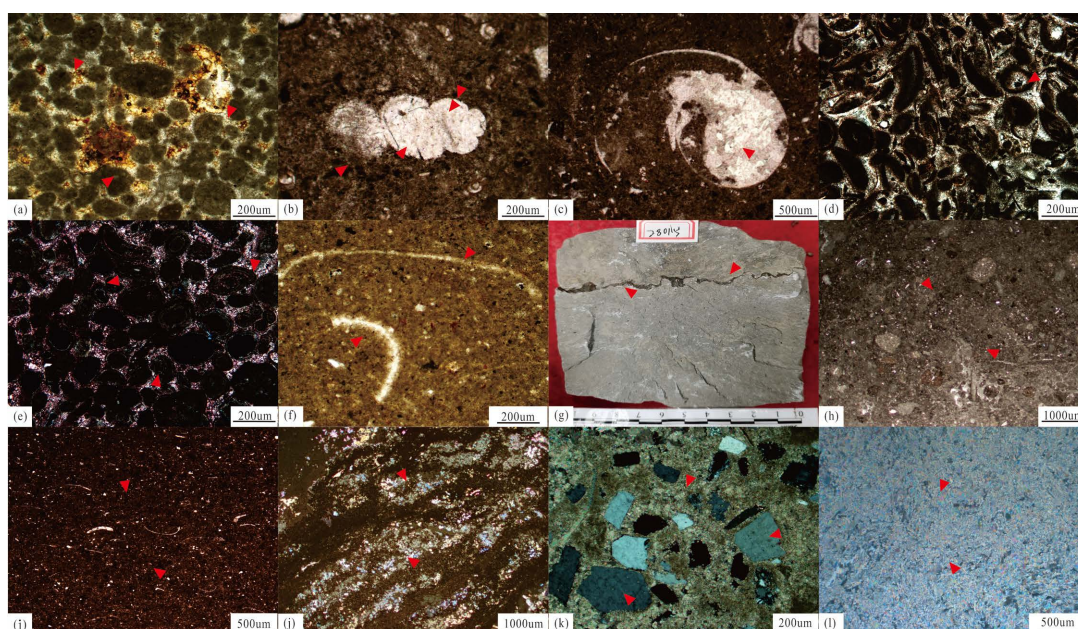


Figure 2. Petrological characteristics of lacustrine carbonate reservoir in the upper Es4 of the Zhanhua Sag
图 2. 沾化凹陷沙四上亚段湖相碳酸盐岩储层岩石学特征

发育少量鲕粒灰岩, 鲕粒以表皮鲕粒为主(图 2(e)); 泥晶灰岩发育较多, 结构较为致密且单一, 部分含少量生物碎屑、碎屑颗粒等(图 2(f)), 发育少量孔隙、裂缝等(图 2(g))。白云岩分布较少, 以藻格架白云岩、灰质白云岩为主(图 2(h))。研究区内混积岩较为发育, 包括泥质灰岩、膏质灰岩、砂质灰岩等, 其中, 泥质灰岩中粘土矿物含量较高, 包括蒙脱石、伊利石等粘土矿物(图 2(i)); 膏质灰岩中膏质组分与灰质组分互层, 或呈团块状分布(图 2(j)); 砂质灰岩中混入陆源碎屑物质, 颗粒成分主要包括方解石、长石、石英等(图 2(k)); 此外, 研究区内还发育部分石膏岩, 镜下颗粒具定向性(图 2(l))。

3.2. 储层沉积微相类型与特征

研究区内湖相碳酸盐岩储层沉积相主要涉及滨浅湖、浅湖相、半深湖-深湖相, 结合岩心、薄片资料等, 对其岩性特征及发育构造位置分析, 将研究区内沙四上亚段湖相碳酸盐岩储层划分为灰滩、灰礁和灰泥三种沉积亚相[23], 其中, 灰滩亚相可以分为滩核、滩缘、滩间水道 3 种沉积微相; 灰礁亚相可以分为礁核、礁缘、礁前、礁后和礁间水道 5 种沉积微相, 各沉积微相根据发育沉积环境不同, 具有不同的沉积特征(表 2)。

Table 2. Sedimentary facies characteristics of lacustrine carbonate reservoirs in the upper Es4 of the Zhanhua Sag
表 2. 沾化凹陷沙四上亚段湖相碳酸盐岩储层沉积相特征

沉积相	亚相	微相	岩性特征
滨浅湖	灰滩	滩核、滩缘、滩间水道	颗粒灰岩/云岩、泥灰岩、砂质灰岩、砂岩、粉砂岩等
	灰礁	礁前、礁后、礁核、礁缘、礁间水道	骨架灰岩/云岩、生物灰岩、灰质砂岩、泥晶灰岩等
浅湖	灰礁	礁前、礁后、礁核、礁缘、礁间水道	骨架灰岩/云岩、生物灰岩、灰质砂岩、泥晶灰岩等
半深湖 - 深湖	灰泥	/	膏岩、泥灰岩、泥晶灰岩/云岩等

灰礁亚相中礁核中主要发育颗粒灰岩、生物灰岩、泥晶灰岩等较纯的石灰岩及颗粒云岩, 原生骨架孔隙、生物体腔孔隙及次生溶孔孔隙发育(图 3(a)); 礁间水道微相陆源输入较多, 砂质灰岩、灰质砂岩较发育, 孔缝较发育(图 3(b)); 礁缘微相主要发育泥晶灰岩, 含少量生物碎屑, 孔缝少量发育(图 3(c)); 礁前微相位于较高能的沉积环境, 发育颗粒灰岩/云岩, 发育微裂缝(图 3(d)); 礁后微相处于半封闭水域, 泥晶灰岩发育, 孔缝基本不发育或被方解石充填(图 3(e))。灰滩亚相中滩核微相主要发育颗粒灰岩/云岩、泥晶灰岩等, 发育微裂缝(图 3(f)); 滩间水道陆源碎屑物质较多, 发育泥灰岩、砂质灰岩等, 微裂缝较发育(图 3(g)); 滩缘微相主要发育颗粒灰岩、泥灰岩等, 孔缝发育较少(图 3(h))。灰泥亚相位于较低能沉积环境, 为泥质、膏质混合沉积, 岩石类型主要包括泥灰岩、泥晶灰岩、膏质灰岩等, 孔缝基本不发育(图 3(i))。

4. 储层岩石物理参数特征

选取研究区内碳酸盐岩储层沙四上亚段 20 块岩心样品进行岩石物理实验, 获得各岩石物理参数。20 块样品主要发育于礁核、礁间水道、礁前、滩核、滩缘微相及灰泥亚相中, 岩性以砂屑灰岩、泥晶灰岩、生物灰岩、砂质灰岩、灰质白云岩、泥灰岩、膏质灰岩为主。由于不同沉积相、岩性所组成的矿物成分、孔隙度、裂缝等发育不同, 表现出的岩石物理参数同样具有明显的不同特征。

4.1. 纵波速度和横波速度

纵、横波速度是最重要的岩石物理弹性参数之一, 常作为确定储层岩性及识别孔隙流体检测油气的



(a) 礁核相, 生物灰岩, 孔缝发育, SG2 井, 2585.80 m; (b) 礁间水道相, 砂屑灰岩, 孔缝较发育, YD301 井, 3596.30 m; (c) 礁缘相, 泥晶灰岩, 孔缝少量发育, S271 井, 2463.26 m; (d) 礁前相, 泥晶灰岩, 发育微裂缝, YD301 井, 3596.30 m; (e) 礁后相, 泥晶灰岩, 微裂缝被方解石充填, S10 井, 2709.30 m; (f) 滩核相, 鲕粒灰岩, 发育微裂缝, S54 井, 2793.52 m; (g) 滩间水道相, 泥晶灰岩, 微裂缝较发育, L14 井, 2955.10 m; (h) 滩缘相, 泥晶灰岩, 孔缝发育较少, XL39 井, 2920.48 m; (i) 灰泥相, 泥晶灰岩, 孔缝基本不发育, XL39 井, 2943.25 m

Figure 3. Sedimentary facies characteristics of lacustrine carbonate reservoir in the upper Es4 of the Zhanhua Sag

图 3. 沾化凹陷沙四上亚段湖相碳酸盐岩储层沉积相特征

关键性依据[24]。通过对干燥样品和饱和水样品的纵、横波速度随压力的变化曲线分析可知, 整体纵、横波速度随压力升高而增加(图 4)。在样品干燥情况下, 纵波速度分布在 4400.00 m/s~6400.00 m/s 之间, 横波速度分布在 2600.00 m/s~3400.00 m/s 之间。沉积微相中滩核微相纵、横波速度偏高, 纵波速度分在 5800.00 m/s~6400.00 m/s 之间, 横波速度分在 3000.00 m/s~3400.00 m/s 之间。滩缘微相纵、横波速度偏低, 纵波速度分布在 4400.00 m/s~5200.00 m/s 之间, 横波速度集中在 2600.00 m/s~3200.00 m/s 之间。其中, 滩核微相中发育生物灰岩纵、横波速度较高, 由不同微相控制的砂屑灰岩纵、横波速度变化范围较大(图 4(a)和图 4(b))。而在样品饱和水情况下, 纵波速度和横波速度随压力的增加呈线性变化趋势, 主要原因是流体抑制了孔隙结构的影响。表现为纵波速度分布在 4500.00 m/s~6200.00 m/s 之间, 横波速度在 2700.00 m/s~3500.00 m/s 之间。滩核微相纵、横波速度偏高, 纵波集中在 5800.00 m/s~6300.00 m/s 之间, 横波速度集中在 3100.00 m/s~3500.00 m/s 之间。滩缘微相则偏小, 集中在 4500.00 m/s~5300.00 m/s 之间, 横波速度集中在 2700.00 m/s~3300.00 m/s 之间(图 4(c)和图 4(d))。此外, 礁核微相、礁间水道、礁前微相、灰泥相在干燥情况下和饱和水情况下纵、横波速度差异不明显。

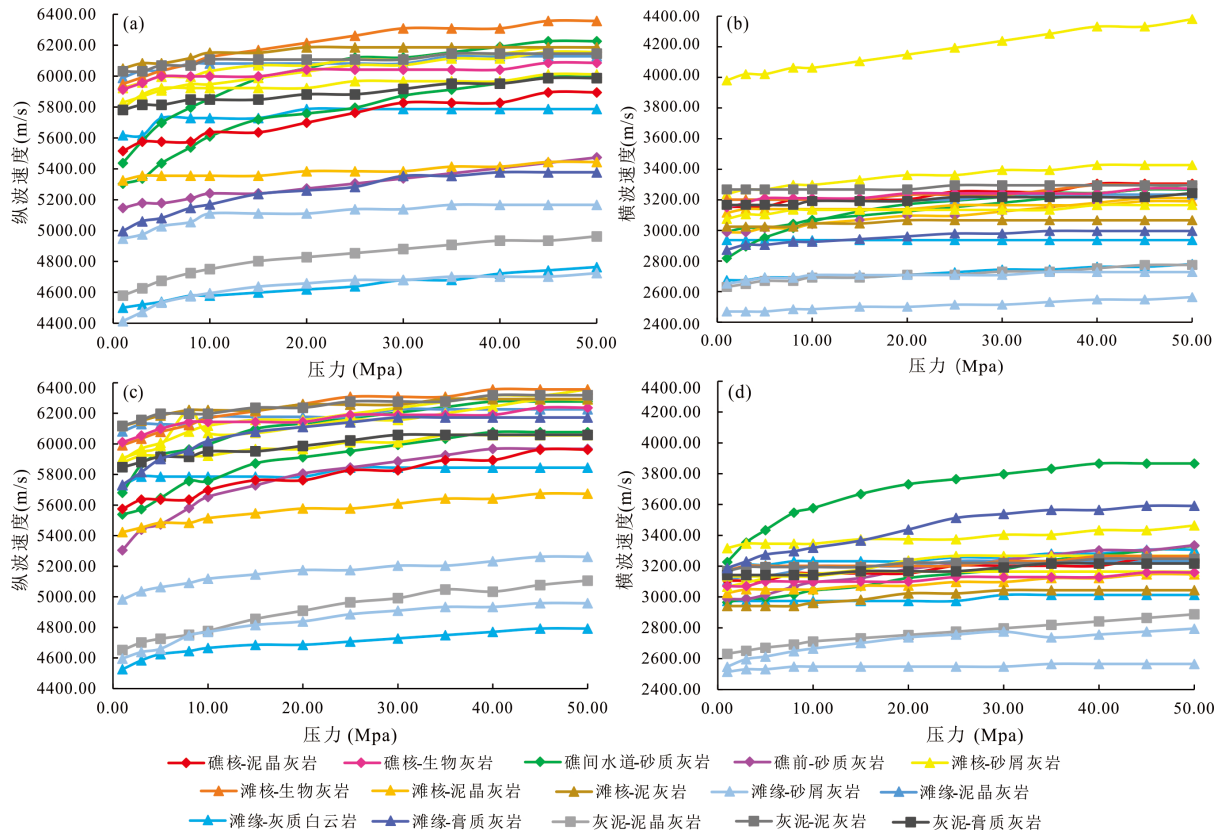


Figure 4. Variation characteristics of P-wave and S-wave velocity with confining pressure of lacustrine carbonate reservoir in the upper Es4 of the Zhanhua Sag. (a) The variation trend of P-wave velocity of dry lacustrine carbonate with confining pressure; (b) The variation trend of S-wave velocity of dry lacustrine carbonate with confining pressure; (c) The variation trend of P-wave velocity of saturated water lacustrine carbonate with confining pressure; (d) The variation trend of S-wave velocity of saturated water lacustrine carbonate with confining pressure

图 4. 沾化凹陷沙四上亚段湖相碳酸盐岩储层纵横波速度随围压变化特征。(a) 干燥湖相碳酸盐岩纵波速度随围压变化趋势；(b) 干燥湖相碳酸盐岩横波速度随围压变化趋势；(c) 饱和水湖相碳酸盐岩纵波速度随围压变化趋势；(d) 饱和水湖相碳酸盐岩横波速度随围压变化趋势

4.2. 体积模量和剪切模量

体积模量 K 和剪切模量 G 是常用的岩石弹性参数之一，是表征岩石应力 - 应变关系的基础参数[25][26]。在样品干燥情况下，滩核微相中体积模量偏大，主要分布在 40.00 GPa~70.00 GPa，滩缘微相中体积模量偏小，主要分布在 30.00 GPa~50.00 GPa，礁核微相、礁间水道微相、灰泥相分布范围体积模量上不易区分。岩性上，生物灰岩体积模量偏高，砂质灰岩体积模量偏低，而砂屑灰岩体积模量小于生物灰岩体积模量，但与砂质灰岩有重叠的部分，存在较大的模量差异，具有一定非均质性特征。泥晶灰岩变化差异较大，表明部分样品中可能存在微裂隙，导致岩石的非均质性强。剪切模量也存在类似特征，滩核微相中剪切模量偏高，主要分布在 25.00 GPa~30.00 GPa，滩缘微相中剪切模量偏低，主要分布在 15.00 GPa~25.00 GPa (图 5(a)和图 5(b))。在饱水情况下，整体体积模量、剪切模量增大，其中砂屑灰岩和泥晶灰岩的剪切模量略微减小，意味其存在非常微弱的润湿性效应(图 5(c)和图 5(d))。

4.3. 杨氏模量和泊松比

杨氏模量 E 和泊松比 σ 同样是表征岩石的重要弹性参数[27]。在样品干燥情况下，滩核微相杨氏模量偏高，主要分布在 65.00 GPa~100.00 GPa，滩缘微相杨氏模量偏低，主要分布在 35.00 GPa~60.00 GPa，

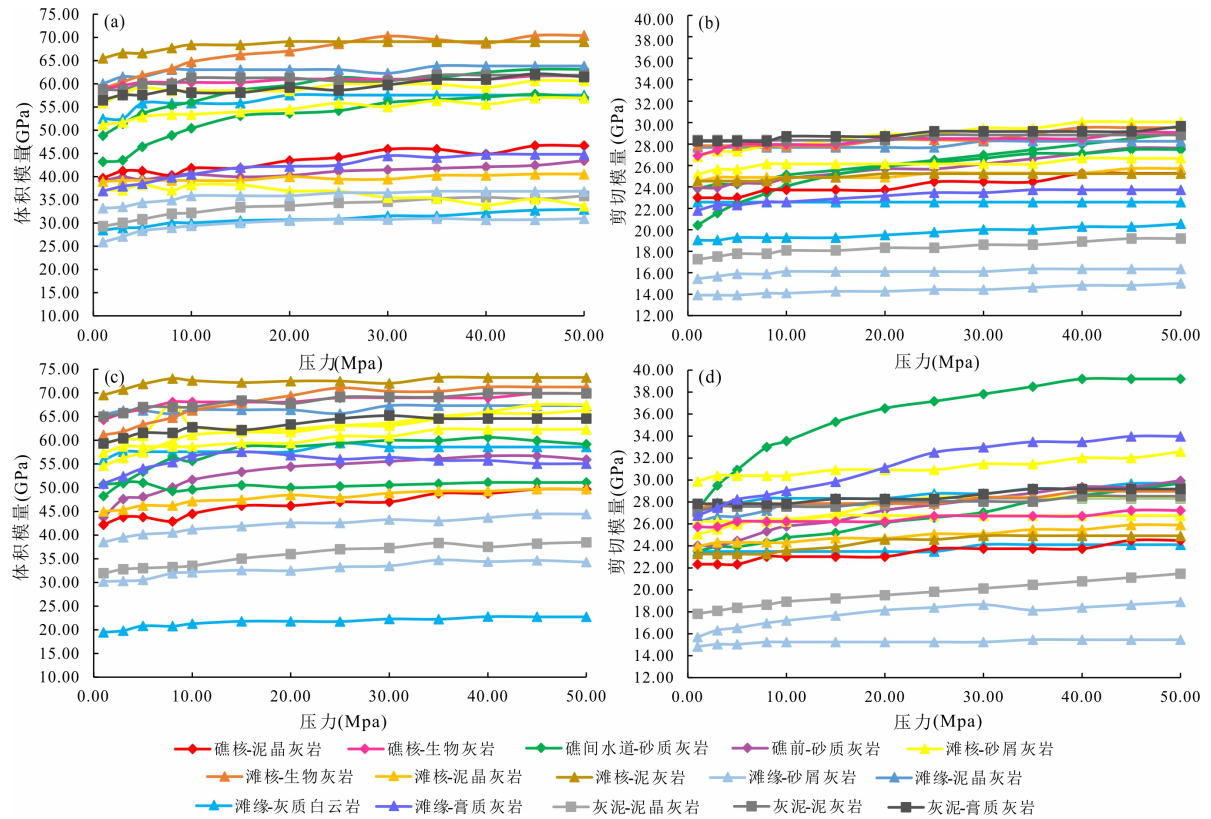


Figure 5. Variation characteristics of the bulk modulus and shear modulus of lacustrine carbonate reservoir in the upper Es4 of the Zhanhua Sag. (a) The variation trend of bulk modulus of dry lacustrine carbonate with confining pressure; (b) The variation trend of shear modulus of dry lacustrine carbonate with confining pressure; (c) The variation trend of bulk modulus of saturated water lacustrine carbonate with confining pressure; (d) The variation trend of shear modulus of saturated water lacustrine carbonate with confining pressure

图 5. 沾化凹陷沙四上亚段湖相碳酸盐岩储层体积模量和剪切模量随围压变化特征。(a) 干燥湖相碳酸盐岩体积模量随围压变化趋势；(b) 干燥湖相碳酸盐岩剪切模量随围压变化趋势；(c) 饱和水湖相碳酸盐岩体积模量随围压变化趋势；(d) 饱和水湖相碳酸盐岩剪切模量随围压变化趋势

滩核微相和滩缘微相分布区间大小差异较大，较大的数值差异表明存在较大非均质性特征。滩核微相泊松比较滩缘相偏大，主要分布在 0.28 GPa~0.34 GPa。岩性上，灰质白云岩、砂屑灰岩、砂质灰岩及泥晶灰岩的泊松偏低，可能与微裂缝有关(图 6(a)和图 6(b))。而在样品饱和水后，杨氏模量变化较小，泊松比在整体范围内有所增加(图 6(c)和图 6(d))。

5. 储层岩石物理参数敏感性分析

岩石弹性参数对储层特征的敏感性各异[28] [29]，分析敏感弹性参数可有效指导地震属性的提取，为储层预测和油气识别服务[28]及更好地识别和预测研究区内沙四上亚段湖相碳酸盐岩储层岩性、沉积相提供依据。

5.1. 岩性敏感参数

优选密度、纵横波速度比、 λ (拉梅常数)作为研究区内碳酸盐岩储层岩性敏感参数。当填充流体为空气时，可以将泥晶灰岩，砂质灰岩，砂屑灰岩以及生物灰岩等分开，而泥灰岩和膏质灰岩无法区分(图 7(a))。当填充流体为水时，仍然可以将泥晶灰岩，砂质灰岩，砂屑灰岩以及生物灰岩等分开，反映孔隙流体对研究区内碳酸盐岩储层岩性几乎没有影响(图 7(b))。

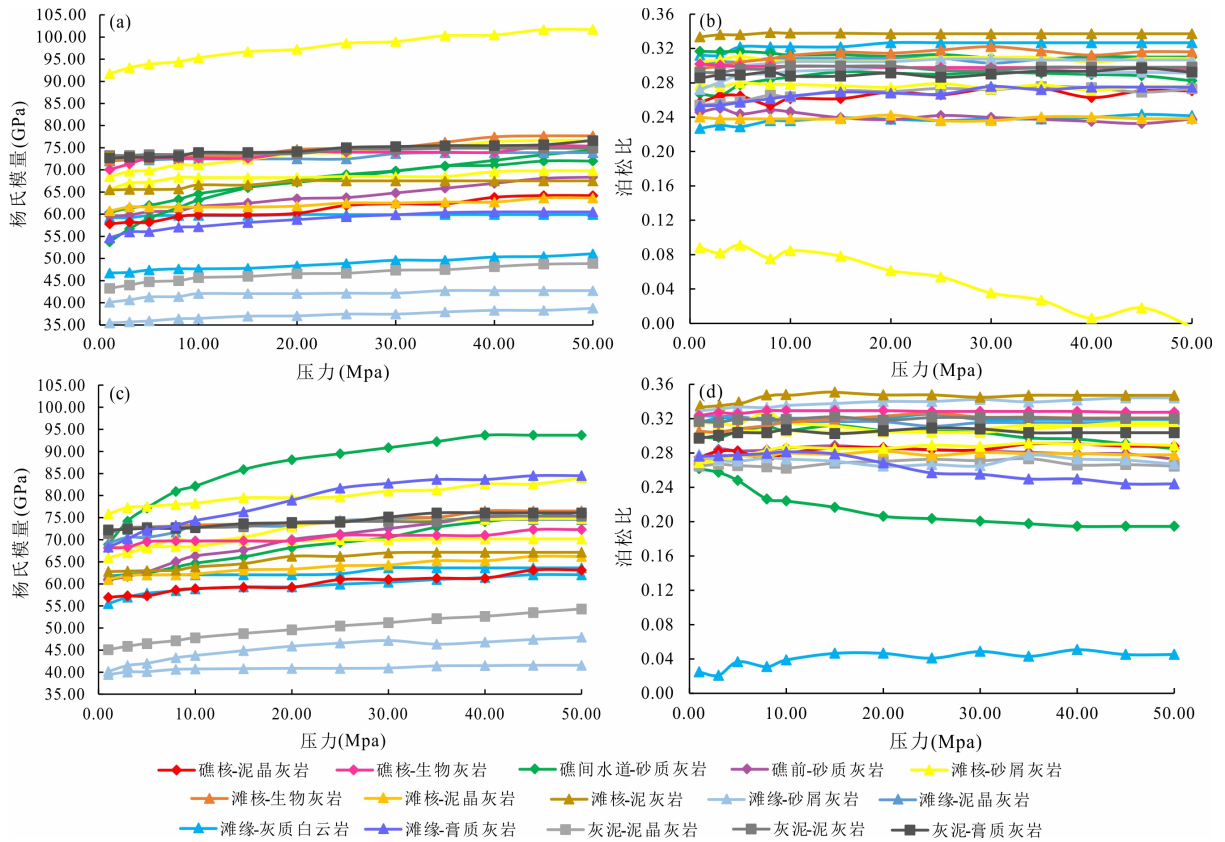


Figure 6. Variation characteristics of Young's modulus and Poisson's ratio with confining pressure of lacustrine carbonate reservoir in the upper Es4 of the Zhanhua Sag. (a) The variation trend of Young's modulus of dry lacustrine carbonate with confining pressure; (b) The variation trend of Poisson's ratio of dry lacustrine carbonate with confining pressure; (c) The variation trend of Young's modulus of saturated water lacustrine carbonate with confining pressure; (d) The variation trend of Poisson's ratio of saturated water lacustrine carbonate with confining pressure

图 6. 沾化凹陷沙四上亚段湖相碳酸盐岩储层杨氏模量和泊松比随围压变化特征。(a) 干燥湖相碳酸盐岩杨氏模量随围压变化趋势; (b) 干燥湖相碳酸盐岩泊松比随围压变化趋势; (c) 饱和水湖相碳酸盐岩杨氏模量随围压变化趋势; (d) 饱和水湖相碳酸盐岩泊松比随围压变化趋势

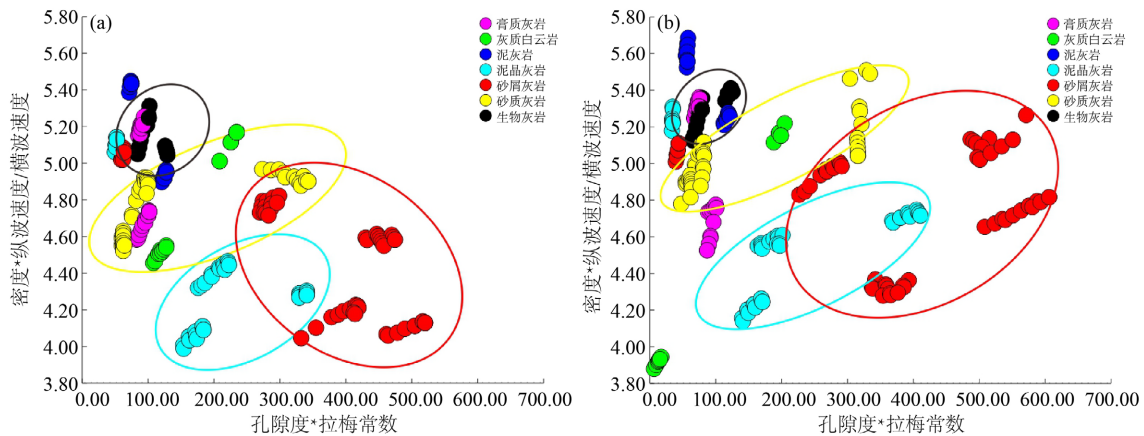


Figure 7. Lithology sensitive parameter crossplot of lacustrine carbonate reservoir in the upper Es4 of the Zhanhua Sag. (a) Lithology sensitive parameters crossplot of dry lacustrine carbonate; (b) Lithology sensitive parameters crossplot of saturated water lacustrine carbonate

图 7. 沾化凹陷沙四上亚段湖相碳酸盐岩储层岩性敏感参数交会图。(a) 干燥湖相碳酸盐岩岩性敏感参数交会图; (b) 饱和水湖相碳酸盐岩岩性敏感参数交会图

5.2. 沉积微相敏感参数

优选纵、横波速度、 λ 等敏感参数对研究区内碳酸盐岩储层沉积微相进行区分。以纵、横波速度为优选对象时,当填充流体为空气时,可以将滩缘微相、礁间水道微相,以及滩核微相等区分(图 8(a));而岩石饱和水后,沉积微相区分较模糊,反映在饱和流体后上述敏感参数基本丧失区分能力(图 8(b))。以纵、横波速度比值(V_p/V_s)、 λ 为优选敏感参数对象时,当敏感参数流体是空气时,可以将滩缘微相、礁间水道微相和滩核微相等分开(图 8(c));当流体介质为水后,沉积相区分更清晰,体现纵、横波速度比值(V_p/V_s)与 λ 常数作为敏感参数在不同流体情况下对沉积微相区分能力增强(图 8(d))。

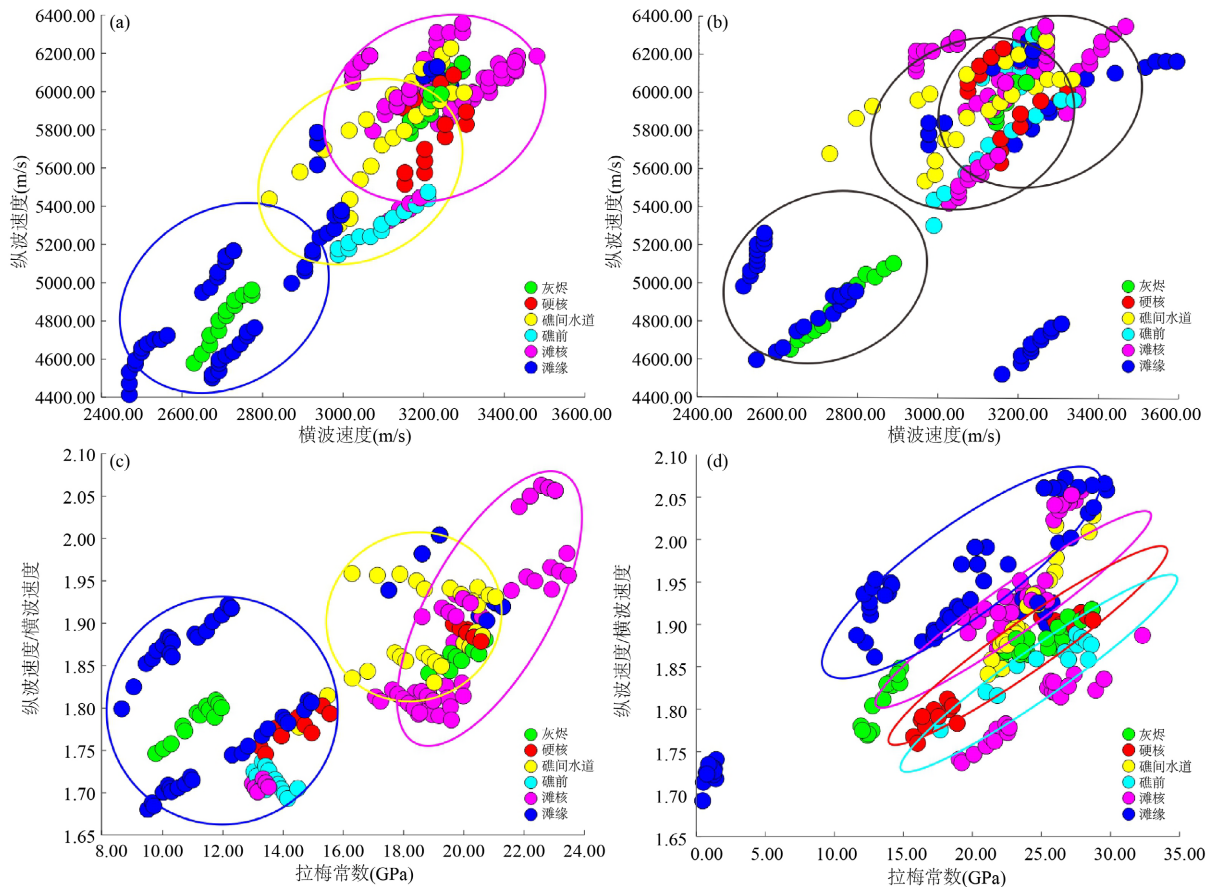


Figure 8. Sedimentary microfacies sensitive parameter crossplot of lacustrine carbonate reservoir in the upper Es4 of the Zhanhua Sag. (a) P-wave and S-wave velocity sensitive parameter crossplot of dry lacustrine carbonate; (b) P-wave and S-wave velocity sensitive parameter crossplot of saturated water lacustrine carbonate; (c) Lamé constant and P-wave velocity/S-wave velocity sensitive parameters crossplot of dry lacustrine carbonate; (d) Lamé constant and P-wave velocity/S-wave velocity sensitive parameters crossplot of saturated water lacustrine carbonate

图 8. 沾化凹陷沙四上亚段湖相碳酸盐岩储层沉积微相敏感参数交会图。(a) 干燥湖相碳酸盐岩纵、横波速度敏感参数交会图; (b) 饱和水湖相碳酸盐岩纵、横波速度敏感参数交会图; (c) 干燥湖相碳酸盐岩拉梅常数与纵波速度/横波速度敏感参数交会图; (d) 饱和水湖相碳酸盐岩拉梅常数与纵波速度/横波速度敏感参数交会图

6. 储层岩石物理量版

与碎屑岩相比,碳酸盐岩孔隙结构特征更为复杂[30]。研究区内湖相碳酸盐岩储层中复杂的孔隙结构主要表现为孔隙几何形状、矿物组分的排列方式以及微裂缝的含量等。为更加直观通过弹性参数解释岩性特征,需构建岩石物理量量版。

6.1. 基于 Gassmann 岩石物理模型构建量版

Gassmann 模型是岩石物理领域预测流体效应最常用的岩石物理模型。通过 Gassmann 模型建立量版, 分析可知: 大部分实验测试数据落在矿物颗粒体积模量(K_0) 75.00 GPa (方解石)和 50.00 GPa (混合物)之间, 这与岩石的矿物成分主要为方解石的 XRD 分析结果一致, 表明 Gassmann 模型基本有效。尽管如此, 大孔隙度的砂屑灰岩, 其预测并不在 Gassmann 模型构建的量版内。因此, 需要构建更为准确的岩石物理量版(图 9)。

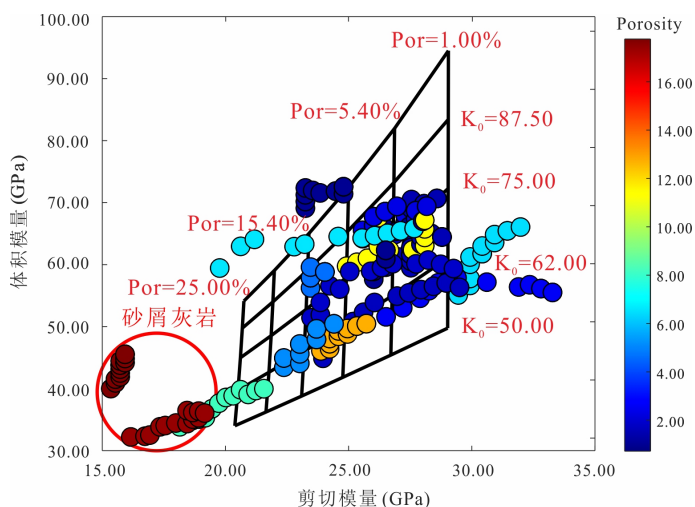


Figure 9. Gassmann petrophysical model of lacustrine carbonate reservoir in the upper Es4 of the Zhanhua Sag

图 9. 沾化凹陷沙四上亚段湖相碳酸盐岩储层 Gassmann 岩石物理模型

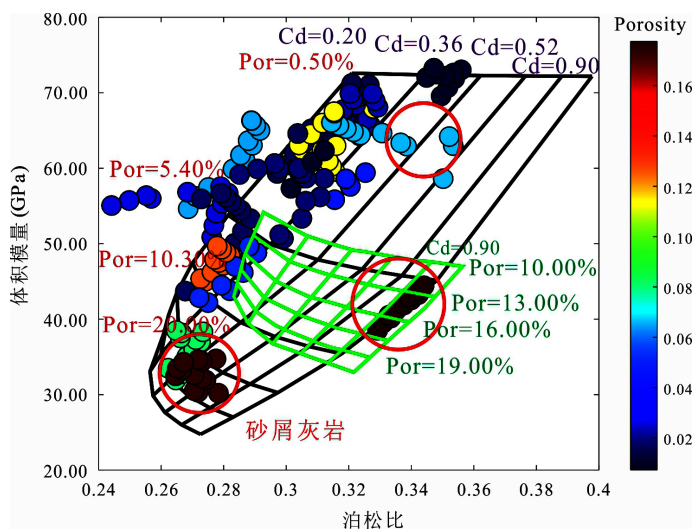


Figure 10. DEM petrophysical model of lacustrine carbonate reservoir in the upper Es4 of the Zhanhua Sag

图 10. 沾化凹陷沙四上亚段湖相碳酸盐岩储层 DEM 岩石物理量版

6.2. 基于 DEM 岩石物理模型构建量版

考虑到研究区内沙四上亚段湖相碳酸盐岩储层除孔隙外, 还受裂缝的影响, 因而进一步使用微分等

效介质(DEM)进行预测[31],分析可知:大部分石灰岩裂缝密度(Cd)在0.36以下。然而,砂屑灰岩与其他灰岩表现出明显差异,裂缝密度高达0.52,表明其裂缝更加发育,其内部喷射流效应更加明显[32]。值得注意,Gassmann岩石物理模型构建的岩石物理量版无法正确解释大孔隙度的砂屑灰岩,在DEM岩石物理模型构建的量版中得到正确解释(图10)。基于DEM岩石物理模型构建的量版对砂屑灰岩裂缝密度解释,较大的裂隙密度表明砂屑灰岩可能是潜在的储层。因此DEM岩石物理模型可用于研究区域解释实验数据,预测储层和流体检测。

7. 结论

1) 研究区内湖相碳酸盐岩以石灰岩为主,主要包括颗粒灰岩和泥灰岩,其次为混积岩,白云岩发育较少。沉积亚相类型主要分为灰滩、灰礁和灰泥,包括滩核、滩缘、滩间水道、礁核、礁缘、礁前、礁后、礁间水道8种沉积微相。

2) 不同沉积相、岩性下纵波速度 V_p 、横波速度 V_s 、体积模量 K 、剪切模量 G 、杨氏模量 E 、泊松比 σ 具有不同特征:在样品干燥和饱水情况下,滩核微相 V_p 、 V_s 、 K 、 G 、 E 、 σ 相较于滩缘微相较高;生物灰岩 V_p 、 V_s 、 K 较高,砂屑灰岩 V_p 、 V_s 、 K 变化范围较大,灰质白云岩、砂屑灰岩、砂质灰岩及泥晶灰岩 σ 偏低。

3) 优选密度、纵横波速度比(V_p/V_s)、 λ 作为岩性、沉积微相敏感参数。密度、 V_p/V_s 不受孔隙流体对储层岩性影响,可将泥晶灰岩,砂质灰岩,砂屑灰岩以及生物灰岩等分开;以 V_p/V_s 、 λ 为沉积微相敏感参数,水作为流体介质比空气更能清晰地将滩核微相、滩缘微相、礁间水道微相等分开。

4) 优选出Gassmann、DEM岩石物理模型作为非均质储层的岩石物理模型,大部分储层孔隙度渗透率较低的储层可用Gassmann模型进行预测,对于大孔隙度的砂屑灰岩可采用DEM模型进行正确预测,砂屑灰岩裂隙密度更大,是潜在的优质储层发育岩相类型。

基金项目

中国石油石化股份有限公司科技攻关项目(P21019),胜利石油管理局博士后科研课题(YKB2207),胜利油田分公司科技攻关项目(YKW2204)。

参考文献

- [1] Williamson, C.R. and Picard, M.D. (1974) Petrology of Carbonate Rocks of the Green River Formation (Eocene). *Journal of Sedimentary Research*, **44**, 738-759. <https://doi.org/10.1306/212F6B95-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- [2] 初广震,张矿明,柳佳期.湖相碳酸盐岩油气资源分析与勘探前景[J].资源与产业,2010,12(2):99-102.
- [3] Eardley, A.J. (1938) Sediments of Great Salt Lake, Utah. *AAPG Bulletin*, **22**, 1305-1411. <https://doi.org/10.1306/3D932FFA-16B1-11D7-8645000102C1865D>
- [4] Herlinger Jr., R., Zambonato, E.E. and De Ros, L.F. (2017) Influence of Diagenesis on the Quality of Lower Cretaceous Pre-Salt Lacustrine Carbonate Reservoirs from Northern Campos Basin, Offshore Brazil. *Journal of Sedimentary Research*, **87**, 1285-1313. <https://doi.org/10.2110/jsr.2017.70>
- [5] 刘震,张军华,王静,等.湖相碳酸盐岩研究进展及展望[J].石油地球物理勘探,2022,57(2):487-497+250.
- [6] 杜江民,龙鹏宇,杨鹏,等.中国陆相湖盆碳酸盐岩储集层特征及其成藏条件[J].地球科学进展,2020,35(1):52-69.
- [7] 师涛,苏朝光,张营革,等.碳酸盐岩沉积相带分析及地震预测——以邵家地区沙四段为例[J].复杂油气藏,2012,5(4):23-26.
- [8] 黄铮.邵家地区沙四上亚段碳酸盐岩储层发育特征[J].石化技术,2018,25(3):124+99.
- [9] 夏伟.邵家洼陷沙四段湖相白云岩成因及其储层发育规律研究[D]:[硕士学位论文].青岛:中国石油大学(华东),2017.

- [10] 杜彦男, 吴孔友, 徐天野, 等. 沾化、车镇凹陷构造样式差异特征对比[J]. 甘肃科学学报, 2021, 33(5): 35-46.
- [11] Peng, C. (2011) Distribution of Favorable Lacustrine Carbonate Reservoirs: A Case from the Upper Es4 of Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin. *Petroleum Exploration and Development*, **38**, 435-443. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(11\)60046-3](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(11)60046-3)
- [12] 高晓鹏. 沾车地区沙四上亚段湖相碳酸盐岩沉积特征研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- [13] 蔡观强, 郭峰, 刘显太, 等. 沾化凹陷新近系沉积岩地球化学特征及其物源指示意义[J]. 地质科技情报, 2007(6): 17-24.
- [14] 林承焰, 朱兆群, 刘魁元, 等. 济阳坳陷邵家地区沙四段油气成藏差异性及其定量评价[J]. 地学前缘, 2018, 25(4): 155-167.
- [15] Bolhar, R. and Van Kranendonk, M.J. (2007) A Non-Marine Depositional Setting for the Northern Fortescue Group, Pilbara Craton, Inferred from Trace Element Geochemistry of Stromatolitic Carbonates. *Precambrian Research*, **155**, 229-250. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.02.002>
- [16] 闫伟鹏, 杨涛, 李欣, 等. 中国陆上湖相碳酸盐岩地质特征及勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(4): 11-17.
- [17] Lv, Z., Qing, Y., Zhao, F., et al. (2018) Diagenetic Evolution Characteristics of Paleogene Lacustrine Carbonate Reservoirs in Central Bohai Sea, China. *Journal of Natural Gas Geoscience*, **3**, 243-252. <https://doi.org/10.1016/j.jnggs.2018.11.003>
- [18] 陈立. 微古地貌对湖相碳酸盐岩储层的控制作用——以沾化凹陷沙四上亚段储层为例[C]//中国地质学会沉积地质专业委员会, 中国矿物岩石地球化学学会沉积学专业委员会. 2015 年全国沉积学大会沉积学与非常规资源论文摘要集, 2015: 2.
- [19] 吴智平, 李伟, 郑德顺, 等. 沾化凹陷中、新生代断裂发育及其形成机制分析[J]. 高校地质学报, 2004(3): 405-417.
- [20] 张凡芹, 王伟锋, 张晶, 等. 沾化凹陷断层对沉积的控制作用[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2005(5): 1-6.
- [21] 穆娜娜. 沾车凹陷沙四上亚段湖相碳酸盐岩储层研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- [22] 孙耀庭, 刘雅利, 巩建强, 等. 济阳坳陷沾化凹陷沙四上亚段灰质滩坝储层评价[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(5): 62-69.
- [23] 苏朝光. 沾车地区沙四段湖相碳酸盐岩沉积特征及储层物性[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(6): 20-22+26+112.
- [24] 吕姗姗. 基于岩石物理测试的碳酸盐岩弹性参数特征分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- [25] 邢文军, 吴开龙, 吴鑫, 等. 储层砂岩宽频段地震岩石物理特征的实验研究[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(4): 1609-1616.
- [26] 唐杰, 郭渊, 孙成禹, 等. 碳酸盐岩波速与弹性模量变化规律试验研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(5): 62-66+71.
- [27] 杜炳毅, 杨午阳, 王恩利, 等. 基于杨氏模量、泊松比和各向异性梯度的裂缝介质 AVAZ 反演方法[J]. 石油物探, 2015, 54(2): 218-225.
- [28] Pei, F.G., Zou, C.C., He, T., et al. (2010) Fluid Sensitivity Study of Elastic Parameters in Low-Medium Porosity and Permeability Reservoir Rocks. *Applied Geophysics*, **7**, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s11770-010-0005-2>
- [29] 孙兴刚, 魏文, 李红梅. 岩石物理参数的流体敏感性分析[J]. 油气藏评价与开发, 2012, 2(1): 37-40+49.
- [30] 张秉铭, 刘致水, 刘俊州, 等. 鄂尔多斯盆地北部复杂碳酸盐岩横波速度预测研究[J]. 石油物探, 2017, 56(3): 328-337.
- [31] Adelinet, M., Fortin, J. and Guéguen, Y. (2011) Dispersion of Elastic Moduli in a Porous-Cracked Rock: Theoretical Predictions for Squirt-Flow. *Tectonophysics*, **503**, 173-181. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.10.012>
- [32] Sun, C., Borgomano, J.V.M., Fortin, J., et al. (2020) Effect of Pore Collapse and Grain Crushing on the Frequency Dependence of Elastic Wave Velocities in a Porous Sandstone. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **53**, 5081-5093. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02213-0>