

四川盆地元坝地区茅口组台缘浅滩相储层物理模型

秦贞超^{1,2}, 缪志伟³, 魏建新^{1,2}, 狄帮让^{1,2}

[1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

2. 中国石油大学(北京) 中国石油天然气集团公司 物探重点实验室, 北京 102249;

3. 中国石化 勘探分公司, 四川 成都 610041]

摘要:四川盆地元坝地区元坝7井在茅口组钻遇台缘浅滩储层并获得高产工业气流,取得了油气勘探新领域的重大突破。为进一步落实台缘浅滩储层地震响应特征及其识别方法,根据该区地质地震综合解释成果,构建了与野外实际地层参数相近的三维台缘浅滩储层物理模型。按照实际地震资料采集与处理流程对模型进行了实验室物理模型数据采集与处理,得到了与实际野外地震响应特征相符的物理模拟数据。在此基础上分析了储层地震响应特征及其识别方法。研究结果表明:针对台缘浅滩储层基于大时窗的地震属性分析技术不能准确刻画沉积微相的变化,而依据地质模型精细解释层位和聚焦储层,能够更好的刻画地震相带;储层发育程度影响地震振幅,储层沉积厚度大、物性好,波峰能量强;振幅类属性能够直观的识别浅滩储层发育程度,而频率属性对储层边界识别能力强。

关键词:地震响应特征;地震物理模型;台缘浅滩储层;茅口组;元坝地区;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Seismic physical model of the Maokou Formation reservoirs of platform-margin shoal in Yuanba area, Sichuan Basin

Qin Zhenchao^{1,2}, Miu Zhiwei³, Wei Jianxin^{1,2}, Di Bangrang^{1,2}

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. Geophysics Prospecting Key Lab, CNPC, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

3. Exploration Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China]

Abstract: Shoal reservoirs were encountered by Well Yuanba-7 and yielded high industrial gas flow from the Maokou Formation at the platform margins of Yuanba area in Sichuan Basin, marking a major breakthrough in oil and gas exploration frontiers. In order to confirm the seismic response characteristics and identification methods of the reservoirs, the study constructed a three-dimensional physical model of platform-margin shoal reservoirs consistent with the actual formation parameters of the studied area based on the comprehensive geological and seismic interpretations. The model were then modified according to acquired seismic data and processing procedures to obtain physical simulation data for analyzing the seismic response characteristics and assessing prediction methods of the reservoirs. The results show that the seismic attribute analysis based on large time windows for platform-margin shoal reservoirs cannot accurately describe the changes of sedimentary microfacies. Instead, the fine interpretation of strata focusing on reservoirs based on geological models does better. With reservoir thickness and property parameters affecting seismic amplitudes, the method works better with amplitudes clearly revealing the physical properties of reef-shoal reservoirs and frequency attributes mapping the reservoir boundaries.

Key words: seismic response characteristics, seismic physical model, platform-margin shoal reservoir, Maokou Formation, Yuanba area, Sichuan Basin

收稿日期:2020-12-31;修订日期:2021-04-23。

第一作者简介:秦贞超(1985—),男,博士研究生,地震物理模拟方法与储层预测。E-mail:732304963@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05005-004)。

四川盆地元坝地区茅口组为海相碳酸盐岩沉积地层,前期研究认为其构造稳定,为开阔台地或碳酸盐岩缓坡沉积^[1-2],储层类型以构造裂缝型或不整合岩溶缝洞型储层为主^[3-5]。而近期元坝7井钻遇茅口组台缘浅滩相储层,并获得高产工业气流,实现了四川盆地茅口组深层-超深层台缘高能相带油气勘探的重大突破^[6-7]。茅口组发育上下2套碳酸盐岩台缘浅滩储层,横向分布主要受台缘相带展布控制,储层类型主要为上储层灰色灰质白云岩和白云质灰岩,下储层泥晶含云灰岩和泥晶生屑灰岩。与元坝及普光生物礁储层相比,储层致密、非均质强且厚度薄,地震响应类型复杂多样,这些因素给储层识别带来了很大困难^[8-9]。

近年来,针对礁滩储集体地震响应特征开展了许多正演模拟研究。凡睿和敬朋贵等^[10-11]采用褶积的方法,在川东北礁滩相储集体地震解释中应用正演模拟结果,确定储集体地震响应特征,结合地质和测井资料,实现了储集体预测与描述;龚洪林^[12]设计了4个礁滩体储层模型,研究了塔里木盆地上奥陶统台地-陆棚边缘礁滩复合储集体地震响应特征,有效减少了礁滩储层的预测多解性;刘军迎等^[13]针对礁体等碳酸盐储层地震解释多解性问题,使用标量波动方程,研究了不同类型碳酸盐储层地震响应特征及存在的解释误区,给出了正确的解释方法和依据;李三福和李香华等^[14-15]采用有限差分弹性波动方程对深水礁滩储集体地震响应特征,如振幅、频率和相位等进行了模拟和分析;但志伟等^[16]针对礁滩储集体非均质性强的特点,使用粘弹性波动方程模拟了其地震响应特征,对比分析了时间域与深度域剖面地震响应特征的差别;熊晓军和黄继伟等^[17-20]采用频率-波数域波动方程数值模拟方法,借助波动方程延拓,在二维模拟的基础上,实现了三维礁滩储层的数值模拟,为正确认识生物礁结构等的影响提供了依据。实验室地震物理模型正演相对于数值模拟,在三维正演模拟时具有时效高、易于实现等特点^[21]。对于碳酸盐储层物理模拟,主要集中在断裂、裂缝与溶蚀孔洞的物理模拟与地震响应特征分析^[22-25]。相对地,有关礁滩储集体的地震物理模拟较少。

本文依据四川盆地元坝地区茅口组台缘浅滩相储层地质地震资料,构建了一个与研究区实际地层参数相近的三维台缘浅滩储层物理模型,按照野外三维地震资料采集与处理参数对实验室设计的物理模型进行采集与处理,在物理模拟叠前偏移数据上对储层地震响应特征及其识别方法进行了分析。

1 台缘浅滩相储层物理模型构建

物理模型的构建包括2个方面:①储层物理模型的几何形态与物性参数设计,结合地震物理模型技术方法,设计模型的大小(比例因子),模拟地质构造的形态和层数,以及模拟层的地震参数;②模拟区物理模型制作,包括模型材料的选择、模具加工、模型制作和形态测量等。物理模型设计中模型形态、物性参数以及比例因子的确定,主要是依据研究区地质情况、地震特征与实验研究目的等因素。四川盆地元坝地区茅口组三段二期台缘浅滩相储层是本文的主要研究对象,通过元坝7井测井分析,茅三段二期台缘浅滩相储层厚20 m左右,埋深超过7 000 m,岩性为泥晶含云灰岩、泥晶生屑灰岩,可以发现其特点是埋深大、储层薄。通过元坝浅滩储层沉积相划分(图1a)与地震响应特征分析(图1b)可知,在茅三段上部储层发育段,地震响应复杂多变,储层预测难度大,地震相的解释结果需要模型正演来指导与验证。

综合分析地质地震解释成果,可以发现元坝台缘浅滩储层物理模型设计需要关注其两大特点:一是储层厚度薄、埋藏深及围岩速度大。因此结合实验室物理模型地震技术^[26],为了模拟更高速度的围岩,其速度比例因子确定为1:2;空间比例因子选取主要考虑储层的厚度与埋深,为了精确模拟更薄的储层,空间比例因子不能太小,而为了模拟储层的埋藏深度,空间比例因子不能太大。综合考虑储层埋深和厚度等因素,空间比例因子确定为1:10 000,即物理模型尺寸为1 mm,转化为野外实际尺寸为10 m,可以满足实验室模拟储层厚度与埋深的要求。二是储层段地震响应复杂,需要设计多种不同类型储层发育模式。对于不同地震响应特征,通过改变元坝7井二期滩储层发育程度,共建立了10种不同参数储层发育样式。

图2a为茅三段二期滩储层发育平面设计图,其中除了储层平面分布外,还显示了茅三段厚度图;图2b为物理模型垂向剖面设计图,其中包含模拟的各个地层及其接触关系。茅三段储层发育区为台缘浅滩相沉积,沉积明显加厚,模型设计要求突出台缘区厚度变化,因此为了便于模拟茅三段厚度变化,降低模型制作难度,模型将茅三段底界面作为平层处理,茅三段顶界面起伏为其厚度变化。茅三段顶部及上部发育4套薄层,即长兴组、吴家坪、茅三段三期滩以及茅三段滩间泥,影响茅三段二期滩储层地震响应特征,因此模型设计考虑了这4套薄层的影响,由于其沉积厚度薄,且横

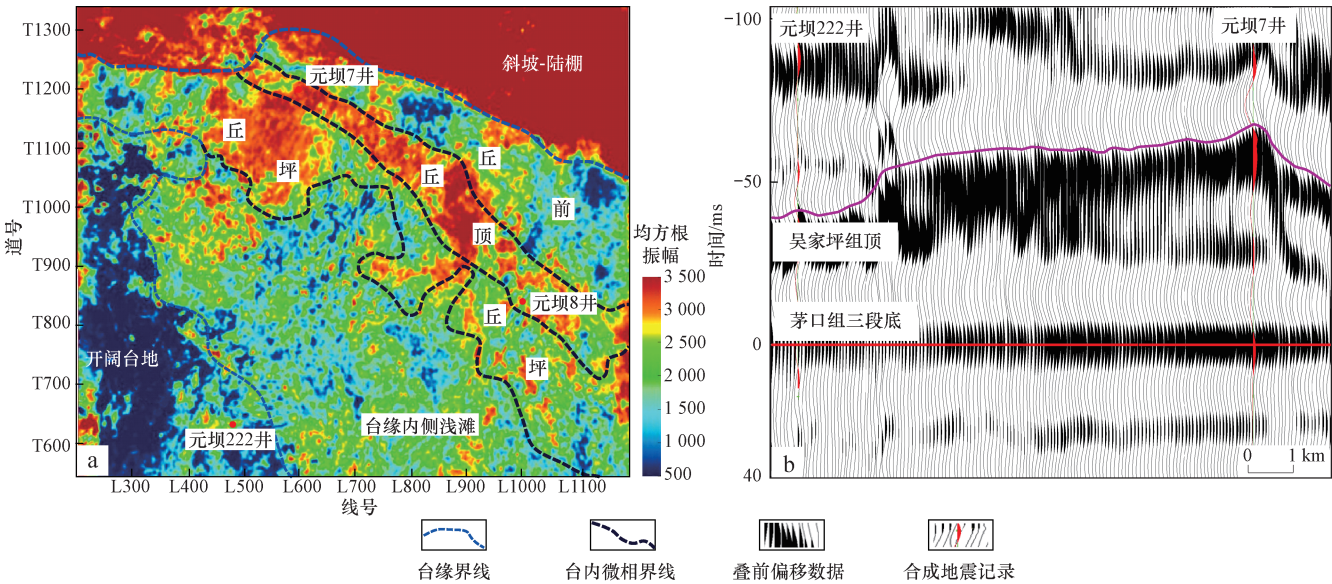


图 1 四川盆地元坝地区台缘浅滩储层地震资料

Fig. 1 Seismic data of the shoal reservoirs at the platform margins in Yuanba area, Sichuan Basin
a. 沉积相平面; b. 地震剖面

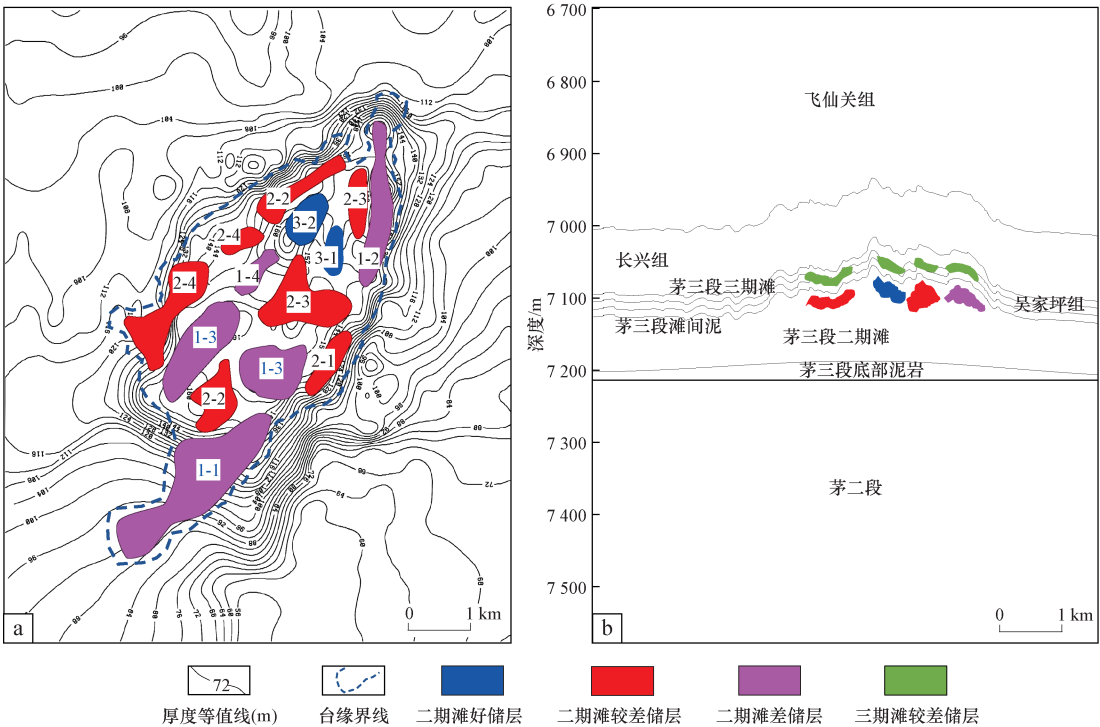


图 2 四川盆地元坝地区物理模型设计

Fig. 2 Seismic physical model design for Yuanba area, Sichuan Basin

a. 茅三段二期滩储层平面分布; b. 物理模型垂向剖面

1-1. 储层速度 5 500 m/s, 储层厚度 10 m; 1-2. 储层速度 5 500 m/s, 储层厚度 20 m; 1-3. 储层速度 5 500 m/s, 储层厚度 30 m;
1-4. 储层速度 5 500 m/s, 储层厚度 40 m; 2-1. 储层速度 5 100 m/s, 储层厚度 10 m; 2-2. 储层速度 5 100 m/s, 储层厚度 20 m;
2-3. 储层速度 5 100 m/s, 储层厚度 30 m; 2-4. 储层速度 5 100 m/s, 储层厚度 40 m; 3-1. 储层速度 4 350 m/s, 储层厚度 30 m;
3-2. 储层速度 4 350 m/s, 储层厚度 40 m

向变化小,因此作为等厚层,地层起伏与茅三段顶界面起伏相同。模型设计共有 8 层(图 2b),表 1 为实际地

层的密度和速度参数。图 2b 草绿色储层为茅三段三期滩发育的一套较差储层,其分布范围与茅三段二期

表 1 四川盆地元坝地区地层纵波速度和密度参数

Table 1 Actual formation P-wave velocity and density parameters in Yuanba area, Sichuan Basin

地层	储层类型	实际参数		
		厚度/m	纵波速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
飞仙关组	上覆层	300	4 400	2.20
长兴组	薄层	80	6 000	2.60
吴家坪组	薄层	20	4 700	2.55
茅三段	茅三段三期滩	10	6 000	2.65
	茅三段滩间泥	10	4 700	2.55
	茅三段二期滩	60 ~ 80	6 000	2.65
	茅三段底部泥岩	10 ~ 30	4 700	2.55
茅二段	下覆层	500	6 100	2.73

滩储层一致,速度为 5 900 m/s。图 2a 中不同颜色代表茅三段二期滩储层的速度不同,紫色代表差储层,速度 5 500 m/s;红色代表较差储层,速度 5 100 m/s;蓝色代表好储层,速度 4 350 m/s。相同颜色不同标号代表储层厚度不同,标号 1-1 到 1-4 和 2-1 到 2-4 代表其中心厚度由 10 m 增加到 40 m;标号 3-1 厚度 30 m,标号 3-2 厚度 40 m。物理模型模拟的区域范围为 10 km × 8 km,台缘区位于模型的中心区,满足三维满覆盖的要求,储层位于 7 100 m 附近,与实际野外储层埋深一致。

模型制作在室温下进行,材料主要为环氧树脂和硅橡胶混合物。采用逐层浇筑的方式,主要是依据地层起伏制作模具并逐层进行浇筑,然后对模型各层进行形态测量,用于物理模型数据的对比分析。由于储层空间上为不连续分布,因此不同厚度与速度的储层需要单独制作,然后放置到茅三段二期滩内。为了便于放置储层,其浇筑流程分为两部分。首先与地层沉积次序相反,反向浇筑茅三段二期滩及其下部地层,在浇筑茅三段二期滩顶部时将事先制作完成的储层放入地层中。然后正向浇筑茅三段二期滩上部地层,由于上部地层厚度很薄,采用涂抹方式浇注而不是模具浇筑,用角磨机进行表面加工,再用砂纸精磨,保证浇筑精度。

2 物理模型地震数据采集与处理

物理模型三维数据采集观测系统与野外实际三维数据采集观测系统保持一致,具体参数为:12 线、48 排炮和 240 道,测线距 400 m,排炮距 50 m,道距 50 m,最小非纵距 25 m,最大非纵距 3 375 m,工区总测线共 30 条,工区总炮线共 17 条,炮线间距 500 m,纵向滚动每次滚动 1 炮线,滚动距 500 m,横向滚动每次滚动 6 测线,滚动距 2 400 m,面元大小为纵向 25 m × 横向

25 m,覆盖次数为 12 (纵向) × 6 (横向),纵横比为 0.428 9,依据实际地震资料,物理模型震源主频为 35 Hz,采样率为 1 ms (图 3)。

实验室物理模型数据采集使用超声脉冲反射法 (图 4)。模型放置到水箱中,依据储层反射到达时与水层速度,通过调节模型下部垫块的高度,来模拟储层的不同埋深。根据模型储层设计深度,其水层高度为 420 mm。地震波的激发与接收采用单发单收方式,即一个换能器激发,一个换能器接收。通过保持激发换能器位置,移动接收换能器,来模拟单炮多道采集。这种方式效率较低,但可以尽可能保持能量激发与接收的一致性。换能器移动与激发通过电脑程序控制,在程序中载入设计好的三维观测系统,即可进行数据的采集与存储。

物理模型数据处理与野外实际地震数据处理相似,图 5 是某一单炮记录,可以发现模型地震记录信噪比高,各层反射界面清晰。但是由于模型层数较多,层厚较薄,模型内部界面间多次波较强,因此噪声压制的重难点是去除多次波。为了有效去除多次波的干扰,提高信噪比,处理时采用多种去多次波的方法,包括预测反褶积、高精度 Radon 变换滤波及统计子波反褶积等方法。

3 物理模型地震数据分析

地震响应特征分析技术在相控型礁滩储层和深层白云岩储层的分布预测得到广泛应用,包括反射振幅、反射频率和反射结构等^[27-29]。因此针对台缘浅滩储层物理模型,开展了实验室地震响应特征分析。

地震反射振幅的变化与储层形态和物性相关,实验室物理模型的优势是可以得到精确的储层几何形态和物性等信息,用于定性和定量的分析振幅与储层的关系。因此首先通过模型地震剖面与形态剖面的对比

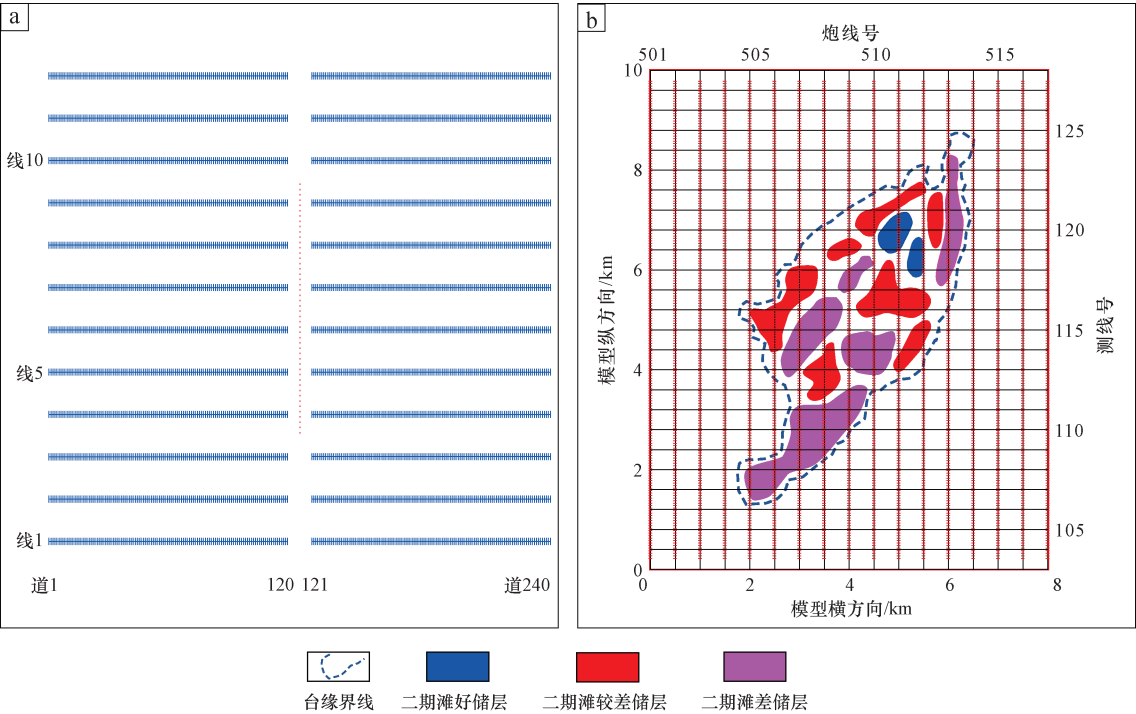


图3 四川盆地元坝地区物理模型三维观测系统

Fig. 3 Three-dimensional observation system of the physical model for Yuanba area, Sichuan Basin
a. 观测系统采集模板; b. 物理模型地震测线布置

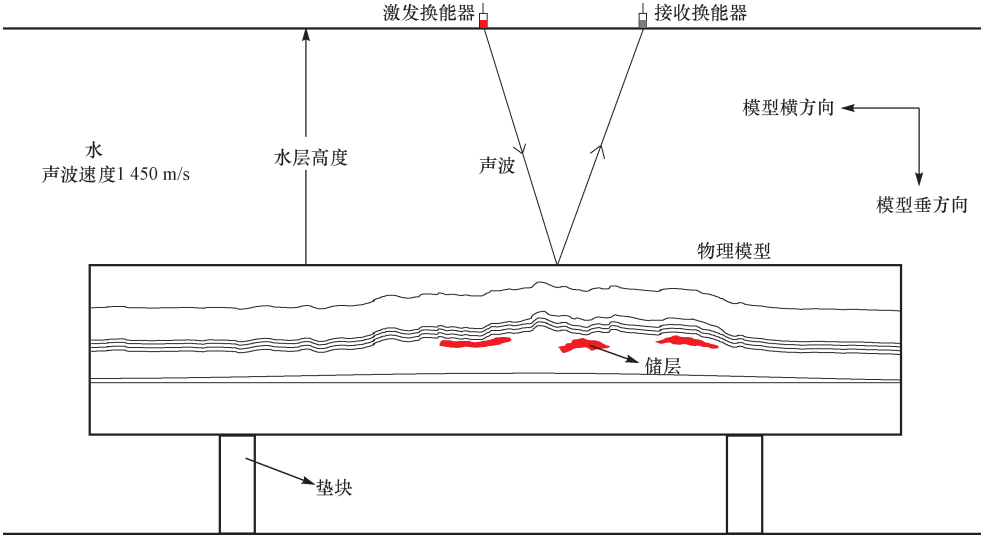


图4 四川盆地元坝地区地震物理模拟实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram showing the seismic physical modeling experiment device for Yuanba area, Sichuan Basin

来定性分析振幅变化。图6所示为过模型台缘区不同储层的横向(主测线)地震剖面与地层形态剖面对比图。由图可见,模型地震剖面与实际野外地震剖面反射特征具有很好的相似性,同时地震剖面与地层形态剖面相符,说明模型设计、制作、数据采集与处理等流程合理可靠;台缘区茅口组二期滩上覆3个薄层在地震剖面上不可分辨,其地震响应特征为强波峰;茅口组二期滩储层作为研究目标,其响应特征为

强波峰下10~20 ms处的地震响应。图6a为不同速度茅三段二期滩储层地震剖面与形态剖面对比,同一厚度,储层速度越小,波峰振幅越强。图6b为不同厚度茅三段二期滩储层地震剖面与形态剖面对比,同一速度,储层厚度大,波峰振幅越强。对比储层厚度、物性与地震反射特征,可以发现茅三段二期滩储层发育,对应位置出现波峰,当储层厚度增加、物性变好时,波峰变强。

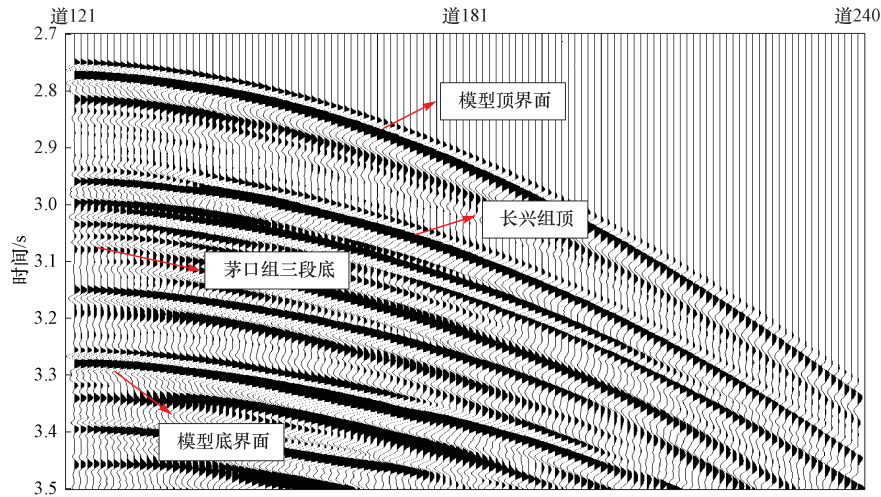


图5 四川盆地元坝地区物理模型单炮记录

Fig. 5 Single shot records of physical model in Yuanba area, Sichuan Basin

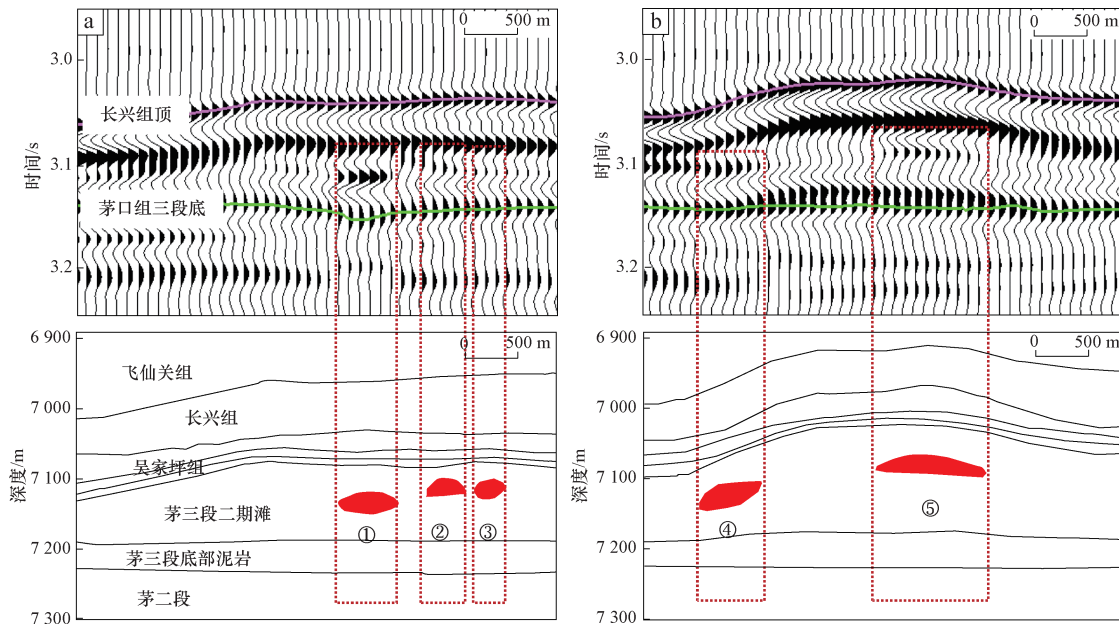


图6 四川盆地元坝地区茅三段二期滩储层物理模型地震剖面与形态剖面对比

Fig. 6 Comparison of physical model seismic section and morphological section of the Phase II shoal reservoirs of Mao 3 Member in Yuanba area, Sichuan Basin

a. 不同速度; b. 不同厚度

- ①. 储层速度 4 350 m/s, 厚度 30 m; ②. 储层速度 5 100 m/s, 厚度 30 m; ③. 储层速度 5 500 m/s, 厚度 30 m; ④. 储层速度 5 100 m/s, 厚度 40 m; ⑤. 储层速度 5 100 m/s, 厚度 30 m

为了定量分析振幅变化与储层物性的关系,在三维数据上统计了储层发育段的振幅强度。由于储层形态为透镜状,因此每种储层只统计了其中心处的厚度与振幅(图7)。由图可见,当储层速度小于 5 500 m/s,厚度大于等于 20 m 时,可以看到明显的正振幅,且随着储层厚度增加、速度减小而增大。当储层速度为 5 500 m/s,或者厚度小于 20 m 时,其正振幅较小,且随着储层厚度减小、速度增加而减小,最终由于调谐效应的影响而成为波谷。

平面地震属性分析是礁滩储层地震相刻画及储层宏观预测的关键手段,其中时窗选择影响地震相刻画及储层宏观预测精度^[30-33]。依据地震资料层位解释选择时窗能够避免属性提取时的穿层现象,而造成地质意义不明确。图8地震剖面上 T_1 与 T_2 解释层位为茅三段顶底薄层的综合响应。而茅三段二期滩顶底界面无明显地震反射轴,因此依据物理模型形态,解释了 T_1^1 与 T_2^1 层分别作为茅三段二期滩顶底界面。

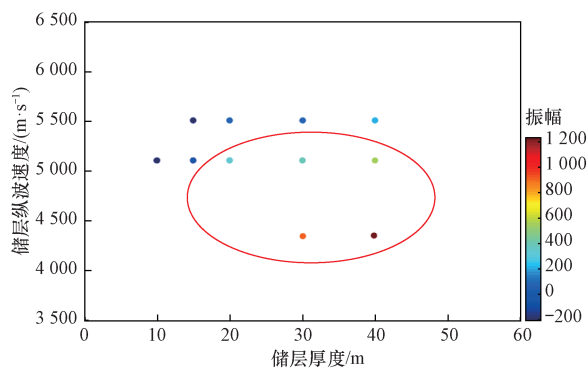


图7 四川盆地元坝地区茅三段二期滩储层发育程度与振幅交汇图

Fig. 7 Crossplot of reservoir thickness and amplitude of the Phase II shoal reservoirs of Mao 3 Member in Yuanba area, Sichuan Basin

图9a为选择 T_1 与 T_2 层作为时间窗口提取的均方根振幅,图9b为选择 T_1^1 与 T_2^1 层作为时间窗口提取的均方根振幅。可以发现图9b更加精细的小时窗属性对于台缘边界的刻画和储层物性的预测更加精细。因此可以认为针对台缘浅滩储层基于大时窗的地震属性分析技术不能准确刻画沉积微相的变化,针对储层地震响应特征,依据地质和测井等信息,精确解释聚焦储层,优化地震属性分析窗口,充分发挥地震资料的分辨能力,能够更好的刻画浅滩地震相及储层分布。

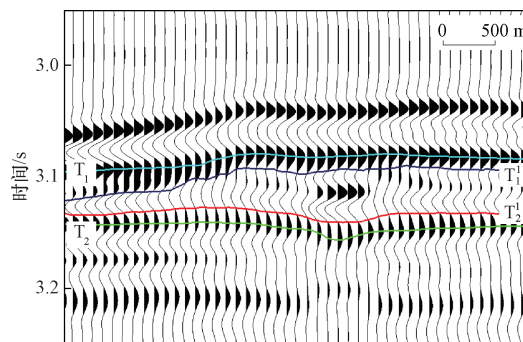


图8 四川盆地元坝地区物理模型地震剖面解释

Fig. 8 Seismic section interpretation of the physical model in Yuanba area, Sichuan Basin

多属性分析对于识别台缘浅滩储层具有很好的效果,因此在振幅属性基础上,对聚类分析与频率属性识别浅滩储层的效果进行了分析。图10给出了台缘储层发育区聚类分析(图10a)和瞬时频率(图10b)属性,由图可以看到聚类分析对于储层边界刻画较差,瞬时频率对于区分储层边界具有很好的效果。分析认为由于波形受到储层与上覆层厚度、相对位置的影响,聚类分析对于储层边界指示性较差,而瞬时频率主要受到储层发育影响,对于区分储层边界的能力更强。

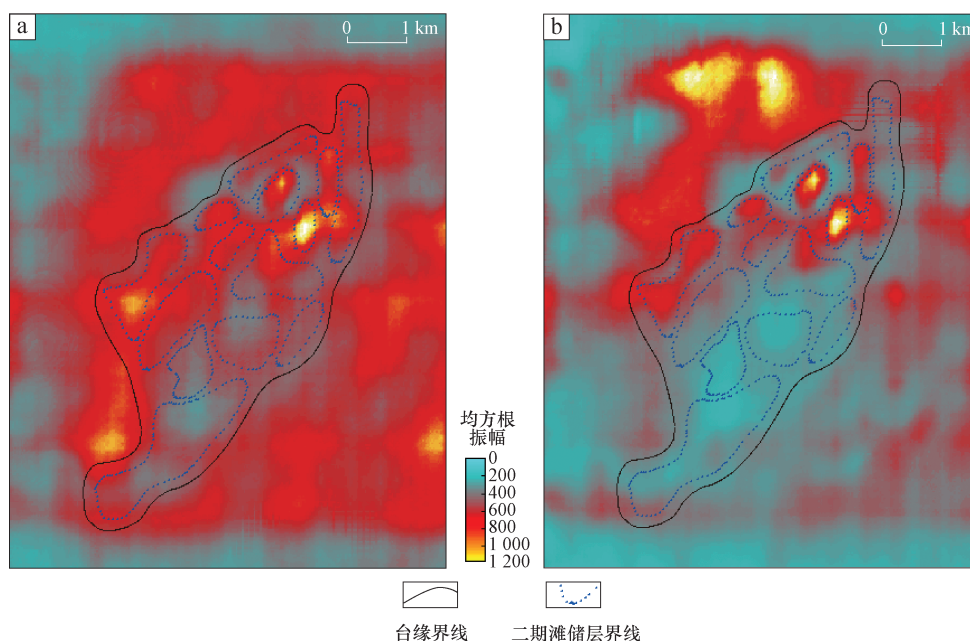


图9 四川盆地元坝地区茅口组二期滩储层发育段不同时窗均方根振幅属性

Fig. 9 RMS amplitude properties of different time windows of the Phase II shoal reservoir of Mao 3 Member in Yuanba area, Sichuan Basin

a. 基于常规解释; b. 基于物理模型形态解释

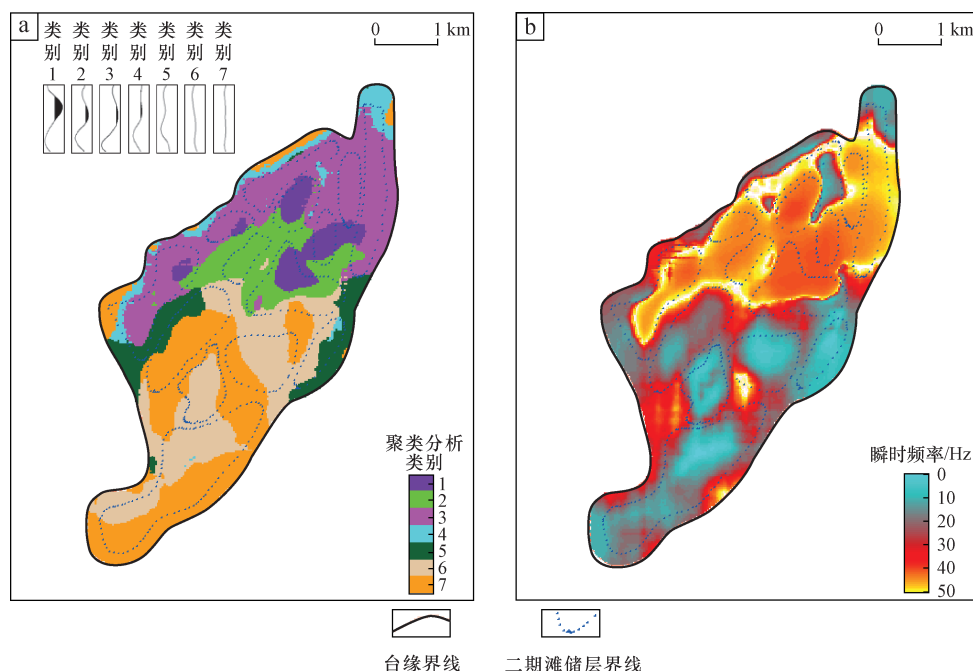


图10 四川盆地元坝地区茅口组二期滩储层发育段地震属性分析

Fig. 10 Seismic attribute analysis of the Phase II shoal reservoir of Mao 3 Member in Yuanba area, Sichuan Basin

a. 波形聚类分析; b. 瞬时频率属性

4 结论

1) 当台缘浅滩储层沉积厚度大, 储层物性好时, 地震响应特征为中强波峰。随着储层厚度减小、物性变差, 波峰能量减小, 最终由于调谐效应的影响而转变为波谷;

2) 台缘浅滩薄储层基于大时窗的地震属性分析技术不能准确刻画沉积微相的变化, 依据地质、测井等信息, 开展地层精细解释, 优化地震属性分析窗口, 充分发挥地震资料的分辨能力, 能够更好的刻画浅滩地震相及储层的分布;

3) 不同地震属性分析技术, 需要依据实际储层地质、地震特征合理使用。

参考文献

- [1] 赵宗举, 周慧, 陈轩, 等. 四川盆地及邻区二叠纪层序岩相古地理及有利勘探区带[J]. 石油学报, 2012, 33(S2): 35-51.
Zhao Zongju, Zhou Hui, Chen Xuan, et al. Sequence lithofacies paleogeography and favorable exploration zones of the Permian in Sichuan Basin and adjacent areas, China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S2): 35-51.
- [2] 胡明毅, 胡忠贵, 魏国齐, 等. 四川盆地茅口组层序岩相古地理特征及储集层预测[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 45-55.
Hu Mingyi, Hu Zhonggui, Wei Guoqi, et al. Sequence lithofacies paleogeography and reservoir prediction of the Maokou Formation in Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 45-55.
- [3] 陈更生, 岳宏. 四川盆地川西南地区下二叠统气藏类型及有效缝洞分布规律[J]. 天然气工业, 1995, 15(6): 10-13.
Chen Gengsheng, Yue Hong. Gas reservoir types and effective fracture-vug distribution laws of Lower Permian series in the southwest area of Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 1995, 15(6): 10-13.
- [4] 江青春, 胡素云, 汪泽成, 等. 四川盆地茅口组风化壳岩溶古地貌及勘探选区[J]. 石油学报, 2012, 33(6): 949-960.
Jiang Qingchun, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. Paleokarst landform of the weathering crust of Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin and selection of exploration regions[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(6): 949-960.
- [5] 李大军, 陈辉, 陈洪德, 等. 四川盆地中二叠统茅口组储层形成与古构造演化关系[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 756-763.
Li Dajun, Chen Hui, Chen Hongde, et al. Relationship between reservoir development in the Middle Permian Maokou Formation and paleostructure evolution in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 756-763.
- [6] 胡东风. 四川盆地元坝地区茅口组台缘浅滩天然气勘探的突破与启示[J]. 天然气工业, 2019, 39(3): 1-10.
Hu Dongfeng. Breakthrough in natural gas exploration in the platform margin shoal at the Maokou Fm in the Yuanba area, Sichuan Basin, and its implications[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(3): 1-10.
- [7] 黎荣, 胡明毅, 杨威, 等. 四川盆地中二叠统沉积相模式及有利储集体分布[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2): 369-379.
Li Rong, Hu Mingyi, Yang Wei, et al. Sedimentary facies model and

- favorable reservoir distribution of the Middle Permian in Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2): 369–379.
- [8] 马德芹, 田景春, 林小兵, 等. 四川盆地二叠系长兴组生物礁发育的差异性及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(6): 1176–1187.
- Ma Deqin, Tian Jingchun, Lin Xiaobing, et al. Differences and controlling factors of Changxing Formation reefs of the Permian in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(6): 1176–1187.
- [9] 郭旭升, 胡东风, 黄仁春, 等. 四川盆地深层—超深层天然气勘探进展与展望[J]. 天然气工业, 2020, 40(5): 1–14.
- Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Huang Renchun, et al. Deep and ultra-deep natural gas exploration in the Sichuan Basin: Progress and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(5): 1–14.
- [10] 凡睿, 高林, 何莉, 等. 川东北飞仙关组鲕滩储层地震预测[J]. 勘探地球物理进展, 2003, 26(3): 199–203.
- Fan Rui, Gao Lin, He Li, et al. Prediction of oolitic beach reservoir of Feixianguan Formation in northeast Xuanhan, Northeastern Sichuan[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2003, 26(3): 199–203.
- [11] 敬鹏贵. 川东北地区礁滩相储层预测技术与应用[J]. 石油物探, 2007, 46(4): 363–369.
- Jing Penggui. Reservoir prediction technology of reef-flat facies in northeast Sichuan province and its application[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2007, 46(4): 363–369.
- [12] 龚洪林. 礁滩体储层正演模拟研究[J]. 新疆石油天然气, 2010, 6(1): 1–5.
- Gong Honglin. Forward modeling for reef shoal reservoir[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2010, 6(1): 1–5.
- [13] 刘军迎, 雍学善, 高建虎. 模型正演技术在碳酸盐岩油气藏地震资料解释中的应用[J]. 岩性油气藏, 2007(1): 109–112.
- Liu Junying, Yong Xueshan, Gao Jianhu. The application of forward modeling for interpretation of seismic data of carbonate reservoir[J]. Lithologic Reservoirs, 2007(1): 109–112.
- [14] 李三福, 肖为, 朱美娟, 等. 深水礁滩相储层地震模型的正演模拟及其地震响应特征分析[J]. 工程地球物理学报, 2011, 8(1): 91–96.
- Li Sanfu, Xiao Wei, Zhu Meijuan, et al. Forward modeling and analysis of seismic Response characteristic in the deep water reef-flat reservoirs model[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2011, 8(1): 91–96.
- [15] 李香华, 张婷, 李洪玺. 阿姆河右岸区块深水低能缓坡礁滩分布综合预测[J]. 天然气工业, 2019, 39(11): 1–9.
- Li Xianghua, Zhang Ting, Li Hongxi. Integrated prediction on the distribution of reef beach in the depositional environment of low-energy deepwater slopes in the Amu Darya Right Bank Block[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(11): 1–9.
- [16] 但志伟, 肖为, 方中于, 等. 碳酸盐岩生物礁地震响应特征的数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(3): 345–349.
- Dan Zhiwei, Xiao Wei, Fang Zhongyu, et al. Numerical simulation of seismic response characteristics of carbonate reef[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2012, 40(3): 345–349.
- [17] 熊晓军, 贺振华, 黄德济. 生物礁地震响应特征的数值模拟[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 75–79.
- Xiong Xiaojun, He Zhenhua, Huang Deji. Numerical simulation on seismic response features of reef[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 75–79.
- [18] 彭才, 郑荣才, 陈辉, 等. 开江—梁平海槽东侧长兴组生物礁发育主控因素及地震精细预测技术[J]. 石油实验地质, 2019, 41(4): 614–620.
- Peng Cai, Zheng Rongcai, Chen Hui, et al. Reef control factors and new seismic prediction techniques of Changxing Formation, east of Kaijiang-Liangping Trough, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(4): 614–620.
- [19] 黄继伟, 熊晓军, 贺振华. 三维生物礁滩建模及地震数值模拟[J]. 物探化探计算技术, 2014, 36(3): 326–330.
- Huang Jiwei, Xiong Xiaojun, He Zhenhua. 3D seismic numerical simulation for biological reef and bank models[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 36(3): 326–330.
- [20] 郭军参, 张辉. 礁滩型碳酸盐岩储层建模方法研究[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(1): 16–19.
- Guo Juncan et al. Study on modeling method of reef-shoal carbonate reservoir[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2020, 34(1): 16–19.
- [21] 狄帮让, 魏建新, 夏永革. 三维地震物理模型技术的效果与精度研究[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 37(6): 562–568.
- Di Bangrang, Wei Jianxin, Xia Yongge. Study on effects and precision of 3-D seismic physical model technique[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2002, 37(6): 562–568.
- [22] 赵群, 曲寿利, 薛诗桂, 等. 碳酸盐岩溶洞物理模型地震响应特征研究[J]. 石油物探, 2010, 49(4): 351–358.
- Zhao Qun, Qu Shouli, Xue Shigui, et al. Study on the seismic response characteristics on the physical model of carbonate cave[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2010, 49(4): 351–358.
- [23] 李凡异, 魏建新, 狄帮让, 等. 碳酸盐岩孔洞储层地震物理模型研究[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(2): 272–280.
- Li Fanyu, Wei Jianxin, Di Bangrang, et al. Seismic physical model of carbonate cavern reservoirs[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(2): 272–280.
- [24] 王玲玲, 魏建新, 黄平, 等. 裂缝储层地震物理模拟研究[J]. 石油科学通报, 2017, 2(2): 210–227.
- Wang Lingling, Wei Jianxin, Huang Ping, et al. Study of seismic physical modelling of fractured reservoirs[J]. Petroleum Science Bulletin, 2017, 2(2): 210–227.
- [25] 司文朋, 薛诗桂, 马灵伟, 等. 顺北走滑断裂—断溶体物理模拟及地震响应特征分析[J]. 石油物探, 2019, 58(6): 911–919.
- Si Wenpeng, Xue shigui, Ma Lingwei, et al. Physical modeling and analysis of the characteristics of the seismic response of strike-slip faults and the associated fracture-dissolution reservoirs in the Shunbei area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(6): 911–919.

- [40] Huntington K W, Eiler J M, Affek H P, et al. Methods and limitations of 'clumped' CO₂ isotope (Δ_{47}) analysis by gas-source isotope ratio mass spectrometry[J]. *Journal of Mass Spectrometry*, 2009, 44(9): 1318–1329.
- [41] Ryb U, Eiler J M. Oxygen isotope composition of the Phanerozoic ocean and a possible solution to the dolomite problem[J]. *PNAS*, 2018, 115(26): 6602–6607.
- [42] Bonifacie M, Calmels D, Eiler J M, et al. Calibration of the dolomite clumped isotope thermometer from 25 to 350 °C, and implications for a universal calibration for all (Ca, Mg, Fe) CO₃ carbonates[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 200: 255–279.
- [43] Sun Y D, Joachimski M M, Wingnall P B, et al. Lethally hot temperatures during the early Triassic greenhouse[J]. *Science*, 2012, 338: 366–370.
- [44] 李开开, 张学丰, 贺训云, 等. 川东北飞仙关组白云岩化作用对鲕粒滩储层的孔隙改造效应[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(4): 706–718.
- Li Kaikai, Zhang Xuefeng, He Xunyun, et al. Modification of dolomitization on pores in oolitic shoal reservoirs of the Feixianguan Formation in the northeastern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(4): 706–718.
- [45] 蒋裕强, 邓虹兵, 易娟子, 等. 开江—梁平海槽西侧飞仙关组不同类型鲕粒滩储层特征及其控制因素研究[J]. *特种油气藏*, 2020, 27(1): 17–24.
- Jiang Yuqiang, Deng Hongbing, Yi Juanzi, et al. Properties of different oolitic beach reservoirs in the Feixianguan Formation of Kaijiang-Liangping Trough[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020, 27(1): 17–24.
- [46] 董庆民, 胡忠贵, 蔡家兰, 等. 层序地层与同位素地球化学响应特征及礁滩发育模式: 以川东城口—鄂西海槽边缘带长兴组为例[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(2): 243–250.
- Dong Qingmin, Hu Zhonggui, Cai Jialan, et al. Sequence stratigraphy and isotope geochemical response and development pattern of reef and shoal: A case study of Changxing Formation in the marginal zone of Eastern Sichuan Chengkou-Western Hubei Oceanic Trough[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(2): 243–250.
- [47] 吴娜珠. 鄂西—渝东飞仙关组层序地层与滩体展布研究: 以建南及周缘地区飞仙关组三段为例[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(4): 524–529.
- WU Nazhu. Sequence stratigraphy and reef beach distribution of Feixianguan Formation in western Hubei-eastern Chongqing area: A case study of the third member of Feixianguan Formation in Jiannan and adjacent area[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(4): 524–529.
- [48] 谢圣阳, 王兴志, 梅秋勇, 等. 宣汉—达县地区飞仙关组层序地层与颗粒滩特征[J]. *断块油气田*, 2018, 25(3): 310–315.
- Xie Shengyang, Wang Xingzhi, Mei Qiuyong, et al. Sequence stratigraphy and grain shoal characteristics of Feixianguan Formation in Xuanhan-Daxian zone[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2018, 25(3): 310–315.
- [49] Henkes G A, Passey B H, Grossman E L, et al. Temperature limits for preservation of primary calcite clumped isotope paleotemperatures[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 139: 362–382.

(编辑 梁 慧)

(上接第660页)

- [26] 魏建新, 牟永光, 狄帮让. 三维地震物理模型的研究[J]. *石油地球物理勘探*, 2002, 37(6): 556–561.
- Wei Jianxin, Mou Yongguang, Di Bangrang. Study of 3-D seismic physical model[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2002, 37(6): 556–561.
- [27] 曾富英, 杨威, 孙爱, 等. 四川盆地川中地区震旦系灯影组台地边缘相带地震识别及其分段特征[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(6): 1079–1086.
- Zeng Fuying, Yang Wei, Sun Ai, et al. Seismic recognition and zonation of the platform margin facies of the Sinian Dengying Formation in central Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(6): 1079–1086.
- [28] 常少英, 李昌, 陈娅娜, 等. 海相碳酸盐岩储层地震预测技术进展及应用实效[J]. *海相油气地质*, 2020, 25(1): 22–34.
- Chang Shaoying, Li Chang, Chen Yana, et al. Progress and application of seismic prediction technology for marine carbonate reservoir[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2020, 25(1): 22–34.
- [29] 李宗杰, 王鹏, 陈绪云, 等. 塔里木盆地顺南地区超深白云岩储层地震、地质综合预测[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(1): 59–67.
- Li Zongjie, Wang Peng, Chen Xuyun, et al. Integrated seismic and geological prediction of ultra-deep dolomite reservoir in Shunnan area, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(1): 59–67.
- [30] 郭彤楼. 元坝气田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. *石油学报*, 2019, 40(6): 748–760.
- Guo Tonglou. Gas accumulation conditions and key exploration & development technologies in Yuanba gas field[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(6): 748–760.
- [31] 肖秋红, 李雷涛, 屈大鹏, 等. YB地区长兴组礁滩地震相精细刻画[J]. *石油物探*, 2012, 51(1): 98–103.
- Xiao QiuHong, Li Leitao, Qu Dapeng, et al. Fine description on the seismic facies of reef-beach reservoir in Changxing Formation, YB area[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2012, 51(1): 98–103.
- [32] 王银, 李文成, 陈会霞, 等. YB地区茅口组三段礁滩地震相精细刻画技术与应用[J]. *物探化探计算技术*, 2020, 42(6): 695–703.
- Wang Yin, Li Wencheng, Chen Huixia, et al. Fine characterization technology and application of reef-beach seismic facies in the third member of Maokou Formation in YB area[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 42(6): 695–703.
- [33] 苏建龙, 蒲勇, 缪志伟, 等. 元坝地区灯影组四段丘滩体相控储层预测[J]. *石油物探*, 2020, 59(4): 607–615.
- Su Jianlong, Pu Yong, Miao Zhiwei, et al. Facies-controlled reservoir prediction for the bioherm beach of the fourth member of Dengying Formation in the Yuanba area, China[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2020, 59(4): 607–615.

(编辑 梁 慧)