

四川盆地川中地区侏罗系沙溪庙组 不同类型砂体地质特征及地震精细雕刻

付 蕾¹, 张本健², 曹正林¹, 黄 东³, 白 蓉², 李育聪², 王小兰⁴

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;

2. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 成都 610041;

3. 中国石油西南油气田公司技术咨询中心, 成都 610051;

4. 中国石油川庆钻探工程公司地球物理公司, 成都 610041

摘要:四川盆地侏罗系湖泊—河流沉积体系中的砂体是目前浅层致密油气勘探开发的现实对象。由于受沉积微相影响, 砂体具有类型多样、岩性多变、厚度变化大、非均质性强等特点, 因此预测困难。通过对侏罗系沙溪庙组沙一段砂层组类型的划分, 开展了不同类型砂体的储层分析, 指出了不同类型砂体的测井、地球物理响应特征, 分时窗对不同类型砂体进行了精细识别和空间预测。研究表明: ①沙一段可划分为5个砂层组, 其中第一砂组主要为滨浅湖相席状砂、滩坝砂, 2~5砂层组为三角洲前缘—平原相河道砂; ②河道砂平均孔隙度为4.68%, 明显高于底部席状砂孔隙度的3.1%, 且I期河道砂物性最好, 其次为IV期、II期、III期河道砂; ③河道砂的预测标准为自然伽马小于65 API, 席状砂的预测标准为自然伽马65~75 API。砂体预测中, 针对席状砂(滩坝)将研究时窗提取到0~20 ms以内; 针对河道砂将研究时窗划分在沙底向上20~100 ms范围内。最终建立起了一套适用湖泊—河流沉积体系中不同类型砂体精细刻画与预测的方法。

关键词: 湖泊—河流沉积体系; 砂体类型; 测井响应特征; 地震预测; 沙溪庙组; 侏罗系; 四川盆地

中图分类号: TE122.23

文献标识码: A

Geological characteristics and seismic fine description of different types of sand bodies in Jurassic Shaximiao Formation in central Sichuan Basin

FU Lei¹, ZHANG Benjian², CAO Zhenglin¹, HUANG Dong³, BAI Rong², LI Yucong², WANG Xiaolan⁴

1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

2. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610041, China;

3. Technical Advisory Center, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610051, China;

4. Geophysical Corporation, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company, Chengdu, Sichuan 610041, China

Abstract: Sand bodies in the Jurassic lacustrine-fluvial sedimentary system in the Sichuan Basin are realistic objects of shallow tight oil and gas exploration and development. Due to the influence of sedimentary microfacies, sand bodies have geological characteristics such as type diverse, variable lithology, significant thickness variation, and strong heterogeneity. Therefore, the fine description and prediction of different types of sand bodies is the current bottleneck for exploration and development. Based on the classification of various sand group types of the 1st member of Jurassic Shaximiao Formation, reservoir analysis was carried out, logging and geophysical response characteristics were concluded, and fine identification and spatial prediction were made by time-sharing window. Results show that: (1) The 1st member of Shaximiao Formation can be divided into 5 sand groups, among which the 1st sand group is mainly littoral-shallow lacustrine sheet sand and beach bar sand, and the 2nd to 5th sand groups are delta front facies channel-plain channel; (2) The average porosity of channel sand is 4.68%, which is significantly higher than that of bottom sheet sand (3.1%). The physical properties of the I channel are the best, followed by the IV, II, and III channels. (3) The prediction standard of channel sand is: natural gamma <65 API, and the prediction standard of sheet sand locates between 65 and 75 API. In sand body prediction, for sheet sands (beach bars), the study time window is extracted to be within 0-20 ms, and for river channels, the study time window is in the range of 20-100 ms upwards from the

收稿日期: 2021-10-06; 修订日期: 2021-12-24。

作者简介: 付蕾(1997—), 女, 硕士研究生, 从事沉积学与石油地质研究。E-mail: fl_fulei123@163.com。

基金项目: “十三五”国家油气重大专项专题“四川盆地致密油资源潜力、甜点区预测与关键技术应用”(2016ZX05046006-008)资助。

bottom of the Shaximiao Formation. Finally, a set of methods suitable for fine description and prediction of different types of sand bodies in the lacustrine-fluvial sedimentary system was established.

Key words: lacustrine-fluvial sedimentary system; sand body type; logging response characteristics; seismic prediction; Shaximiao Formation; Jurassic; Sichuan Basin

半个多世纪的勘探开发实践揭示,四川盆地侏罗系拥有丰富的致密油气资源,目前已发现五套含油气层位,其中储层条件尤以沙溪庙组河湖相砂岩最优,已申报公山庙、天池、双河等区块累计三级地质储量超 $5\,000 \times 10^4$ t。目前累产超万吨的油井有8口,主要分布在公山庙油田的沙溪庙组地层中。第四次全国资源评价表明,四川盆地侏罗系沙溪庙组河湖相砂体原油资源量达 2.4×10^8 t,进一步展示了该类型砂体油气巨大的勘探开发潜力^[1-3]。

“十二五”期间以沙溪庙组河湖相砂体为勘探对象,先后实施的 G003-H16、G117H 两口先导试验井均获得 22 t/d 的高产工业油流,表明沙一段河湖相致密油气具埋藏浅、含油气性好、经济效益可观等诸多优势条件^[4]。但与国内外其他陆相致密油气相比,还存在以下一些关键瓶颈问题^[5-8]: ①由于地层厚度大、砂体类型多、河道期次发育,还未系统开展砂层组精细划分与河道期次划分研究; ②由于不同类型砂体沉积环境、砂岩岩性、砂岩粒度、砂体厚度、砂体物性、储层非均质性、含油气性等方面存在较大差异,还未在地球物理预测中有针对性开展识别预测工作,预测精度难以满足精细化勘探开发的需要; ③在目前资源、技术等客观条件下,要实现盆地致密油气的效益开发,不同类型砂体勘探开发潜力和勘探开发模式还未明确,下步勘探方向还未指出。针对上述问题,本文以侏罗系沙溪庙组河湖相不同类型砂体为对象,通过大量的勘探开发静态数据分析,详细解剖和分析不同类型砂体特征,建立不同类型砂体的识别和预测方法,以期为进一步沙溪庙组河湖相砂体勘探开发提供有效的技术支撑和勘探开发模式。

1 不同类型砂体地质特征

1.1 沙溪庙组地质背景

沙溪庙组为四川盆地中侏罗统一套陆相砂泥岩地层,厚度约为 1 200~2 000 m,自下而上可分为沙一段和沙二段。沙溪庙组与下伏凉高山组通常分界标志明显,习惯上多采用“红黑”分界原则。但川中北部公山庙、龙岗等地区,由于紧邻沉积中心,沙一段底部岩性相变为一套灰绿色长石岩屑砂岩夹深灰、灰绿色泥岩,呈现一种弱还原—弱氧化

的沉积环境;露头剖面及钻井取心均表明,沙一段灰绿色砂岩或灰色泥岩直接不整合覆盖在凉高山组上段的黑色页岩之上。因此,如果从泥岩的颜色上看,沙底(沙一段底部)与凉高山组上段分层标志不如南部区域明显。但二者在电性特征上仍然十分清楚,沙底表现为相对低伽马、高电阻率、低声波时差的砂泥岩互层特征;凉高山组则表现为高伽马、低电阻率、高声波时差明显的黑色页岩夹粉—细砂岩特征。此外,从砂岩矿物成分上分析,沙一段矿物成熟度低,石英含量在 50%左右,长石为 10%~20%,相对凉高山组高结构成熟度及高矿物成熟度而言,具有“贫石英、富长石、富岩屑”的特征,亦可作为二者分界的辅助标志。沙一段一般厚 250~450 m,具有东厚西薄、北厚南薄的分布特征;岩性主要为紫红色、灰绿色泥岩夹薄—中厚层状砂岩组合。沙底向上大约 40~60 m 主要以灰绿色、浅灰色泥岩为主,夹薄—中厚层状粉—细砂岩^[9-12]。

1.2 砂体类型及砂层组划分

印支晚幕运动改变了四川盆地侏罗纪的沉积格局,盆地开始进入侏罗纪红色盆地演化阶段。由于四川盆地西部大面积的抬升,沙溪庙组沉积时期处于一个持续水退阶段,湖水沿近南西—北东向退出,沉积了一套以紫红色、灰绿色及浅灰色泥岩为主,夹浅灰色、灰绿色细砂岩和粉砂岩的砂泥岩碎屑岩组合。其底部砂体(“关口砂岩”)与下伏凉高山组上段黑色页岩分界,顶部与上覆沙二段黑色、深灰色页岩(叶肢介页岩)分界,上下分层特征明显^[13-15]。结合前期研究,根据岩性、沉积旋回、沉积微相等特征,进一步将沙一段中的沙—¹、沙—² 亚段细分为 5 个砂层组:第一砂组主要为滨浅湖相席状砂、滩坝砂,一般距沙底 40 m 以内;第二砂组距沙底 40~100 m,主要为三角洲前缘相河道;第三砂组距沙底 100~140 m,主要为三角洲平原相河道;第四砂组距沙底 140~210 m,主要为三角洲平原相河道;第五砂组距沙底大于 210 m,主要为三角洲前缘相河道(图 1)。前人研究揭示,有利的沉积微相主要为底部的滨浅湖相席状砂和中下部的三角洲前缘—平原相河道砂(图 2)。不同类型砂体划分为地震不同类型砂体精细刻画和准确反演以及储层

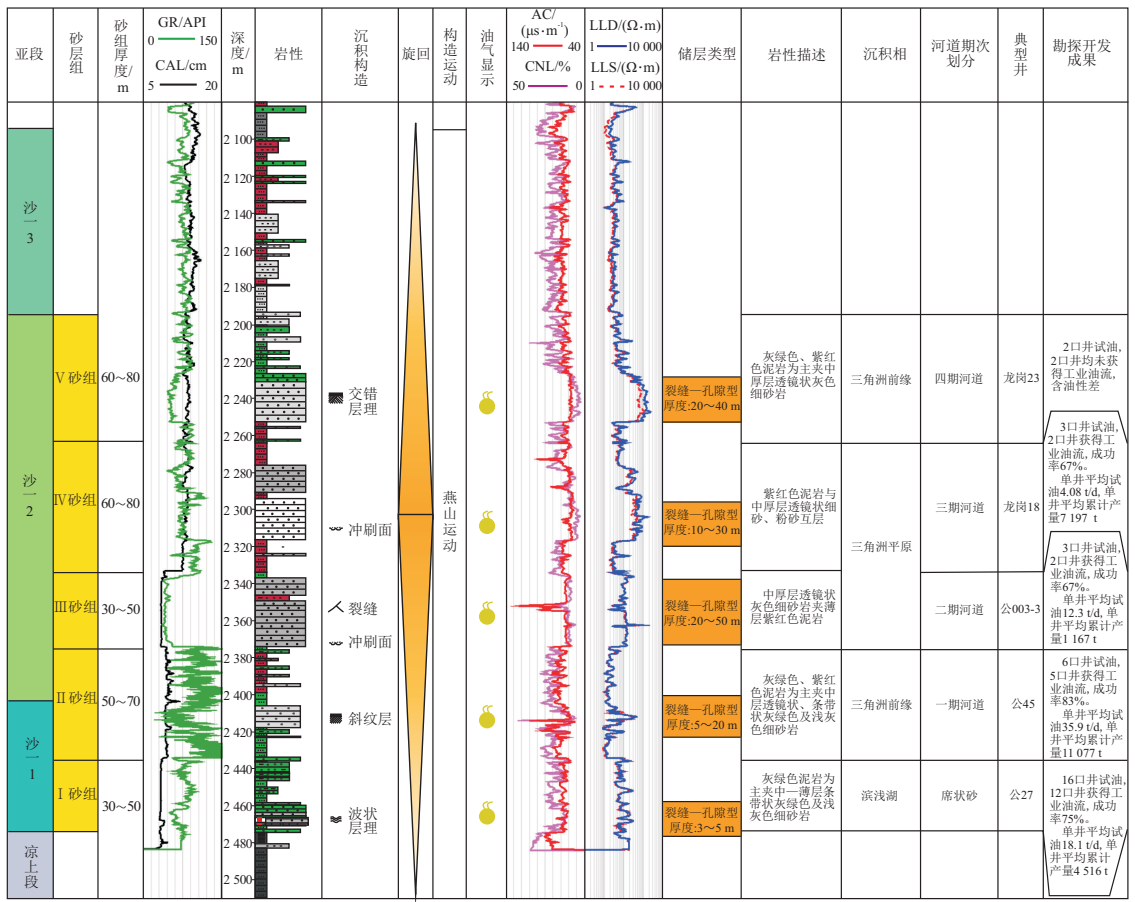


图 1 四川盆地侏罗系沙溪庙组沙一段砂层组划分示意

Fig.1 Classification of sand formations in 1st member of Jurassic Shaximiao Formation, Sichuan Basin

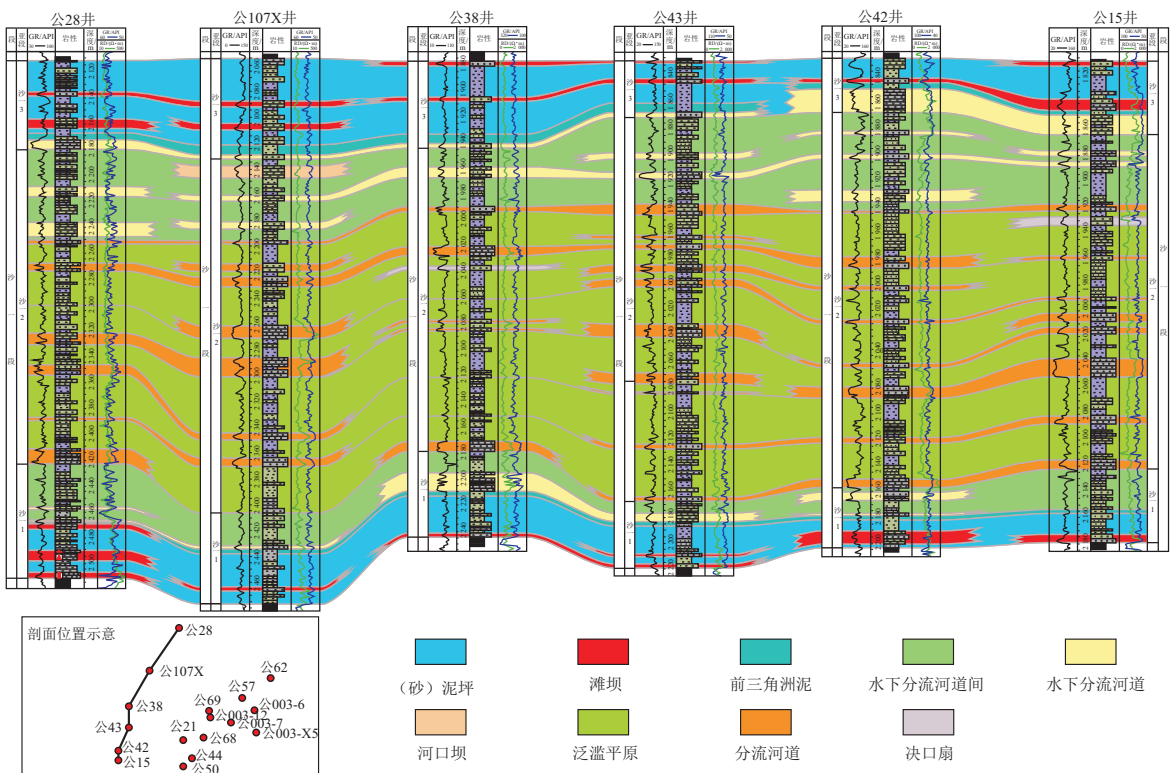


图 2 四川盆地公山庙地区侏罗系沙溪庙组沙一段沉积微相连井对比剖面

Fig.2 Sedimentary microfacies of 1st member of Jurassic Shaximiao Formation, Gongshanmiao area, Sichuan Basin

含油气性预测奠定了地质基础。

1.3 不同类型砂体储层特征

勘探开发实践表明,沙一段砂岩储层物性相对最好,根据 587 个岩心物性分析表明,沙一段储层物性孔隙度为 0.4%~9.6%,平均 3.1%;平均渗透率为 $0.23 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于超低孔、超低渗致密储层^[17-19]。不同类型的砂体具有不同的岩性、物性、孔喉以及压汞曲线特征。岩性分析表明,底部滩坝砂、席状砂粒度较细,主要为粉砂岩—细砂岩,河道砂水动力条件强,砂岩粒度较粗,主要为细砂—粗砂岩;物性分析表明,河道砂平均孔隙度为 4.68%,明显高于底部席状砂平均孔隙度(3.10%),总体上河道砂物性要好于底部席状砂、滩坝砂。席状砂、滩坝砂孔喉半径较小,一般在 $0.0074 \sim 0.74 \mu\text{m}$;河道砂孔喉半径稍大,一般在 $0.074 \sim 7.35 \mu\text{m}$,不同期次河道中尤以 I 期河道砂物性最好,其次为 IV 期、II 期、III 期河道砂(图 3)。受沉积微相控制,滩坝砂和席状砂单层厚度薄一般介于 $0.5 \sim 3.0 \text{ m}$,延伸范围广,分布稳定,规模大;河道砂体单层厚度大,一般为 $5 \sim 30 \text{ m}$,纵向上多期叠置,侧向迁移快,摆动大,横向连续性差。

2 不同类型砂体识别及预测

2.1 前期砂体识别及预测存在的问题

早期主要是将沙一段砂体作为整体来进行勘探开发,在砂体、储层预测中均按照同一套砂体识别、预测标准,如自然伽马小于 90 API 开展砂体预测,并在地震反演获得的对应弹性参数数据(纵波阻抗、横波阻抗、纵横波速度比、密度等)基础上,应用 FFP 技术即可得到砂岩概率预测结果和最大似然砂岩分布结果。在 FFP 砂岩预测结果的基础上,将反演纵波阻抗与反演密度相除得到反演速度体,利用反演速度体与砂岩提取样点相乘累加,编制各目的层砂体的厚度预测平面分布图^{20-23]}。但席状砂与河道砂由于岩性、物性、砂体分布规律以及储层非均质性等差异较大,地球物理预测无法按照不同类型砂体开展精细划分和预测,不能满足精细化勘探开发的要求(图 4)。

2.2 不同类型砂体测井响应特征

根据地层岩性特征、沉积特征及测井响应曲线组合特征及其分辨率,沙一段自然伽马曲线对岩性变化的响应最敏感,因此以自然伽马曲线为主、以

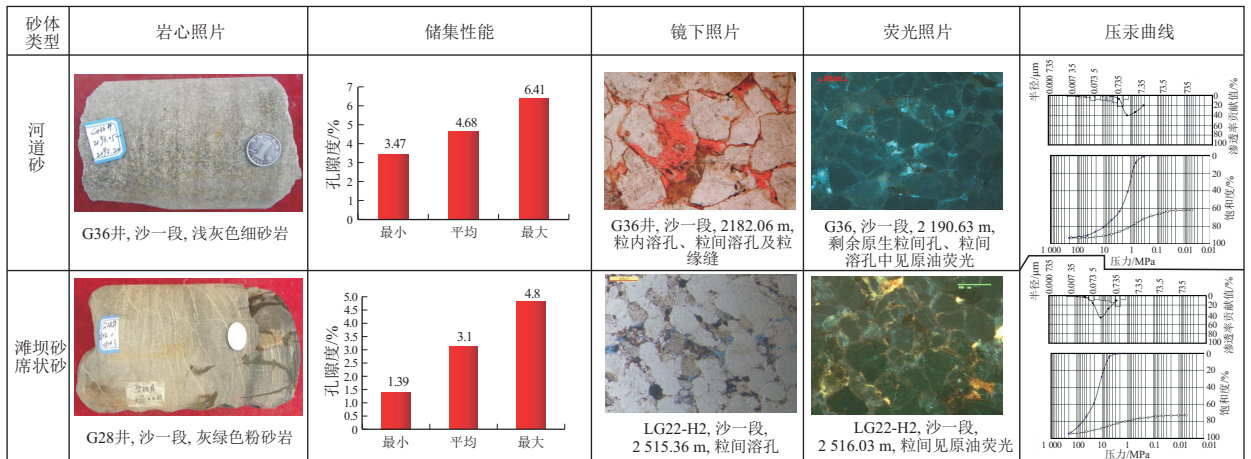


图 3 四川盆地侏罗系沙溪庙组沙一段不同类型砂体储集性能对比

Fig.3 Reservoir properties of different types of sand bodies in 1st member of Jurassic Shaximiao Formation, Sichuan Basin

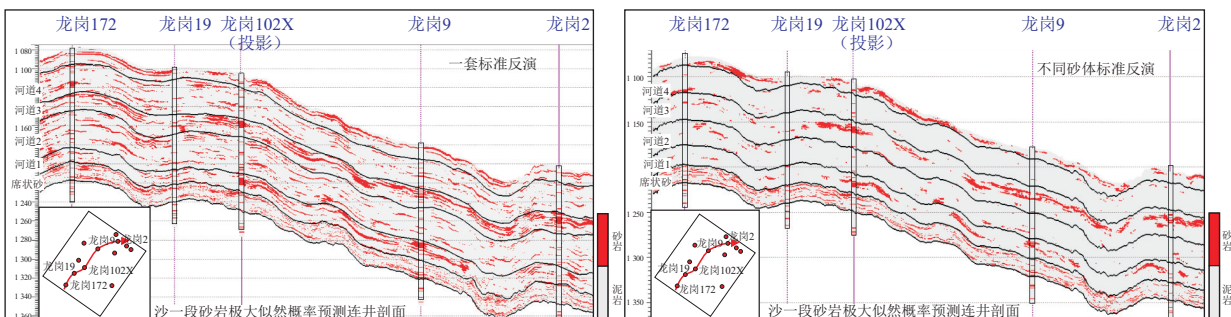


图 4 四川盆地 LG 地区侏罗系沙溪庙组沙一段砂体不同标准反演剖面对比

Fig.4 Inversion sections with different standards of sand bodies in 1st member of Jurassic Shaximiao Formation, Sichuan Basin

电阻率和声波时差曲线为辅进行沉积微相划分,并在岩心观察分析基础上,总结出沙一段不同类型砂体沉积微相的测井响应特征:(1)分流河道或水下分流河道微相,自然伽马曲线呈中—高幅,光滑程度呈现微齿状或光滑形两种,曲线形态一般呈箱形、钟形、叠置箱型或钟形—箱形的复合形,底部突变、顶部渐变或顶底面均突变,单个河道砂体的电性曲线特征呈钟形或箱形,叠置河道砂体呈叠置钟形、叠置箱形或钟形+箱形的组合形态;(2)滨浅湖席状砂微相自然伽马曲线呈中—低幅指形;(3)滩坝微相自然伽马曲线呈中—低幅漏斗形或齿化箱形(表 1)。

2.3 不同类型砂体预测标准

沉积相演化揭示,由沙底向上水体变浅,由滨浅湖向河流相转化。底部席状砂泥质含量高,粒度细,属于滨浅湖沉积相;中下部河道砂水体能量强,泥质含量低,粒度粗,属于河流相。勘探开发揭示,不同类型砂体具有不同的地质特征,为了满足不同类型砂体的精细刻画与预测要求,首先应该明确不同类型砂体的测井曲线特征和地球物理响应特征。研究表明,底部滨浅湖相席状砂(滩坝砂)自然伽马值为 50~100 API,加权平均值为 71.33 API,算术平均值为 74.76 API;中下部三角洲前缘—平原相河道砂自然伽马值约为 40~90 API,加权平均值为 62.16 API,算术平均值为 65.33 API(图 5)。

不同沉积环境砂岩具有不同的电性特征,如果按照一套自然伽马值标准来进行反演,必然导致河道地质特征不清,无法精细刻画不同类型砂体的空间展布特征。根据不同类型砂体测井曲线值分析表

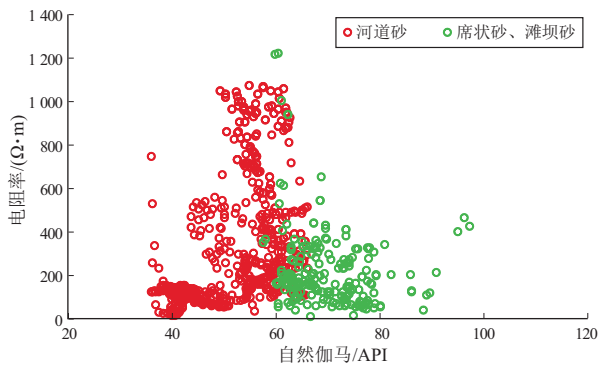


图 5 四川盆地侏罗系沙溪庙组沙一段不同类型砂体测井曲线参数交会图

Fig.5 Cross plots of logging parameters for different types of sand bodies in 1st member of Jurassic Shaximiao Formation, Sichuan Basin

明,河道砂预测标准为自然伽马值小于 65 API;席状砂预测标准为自然伽马值介于 65~75 API 之间。

2.4 不同类型砂体预测效果

由于不同类型砂体在空间发育位置不同,从沉积演化和区域内砂体纵向分布看,席状砂(滩坝)主要分布在沙底以上 40 m 的范围内,河道砂主要分布在距沙底 40 m 以上的范围。为了精细刻画和预测不同类型的砂体,针对席状砂(滩坝),将研究时窗提取在沙底向上 0~20 ms 以内,针对河道砂,将研究时窗划分在沙底向上 20~100 ms 范围内。按照 FFP 技术预测各目的层砂体的厚度预测平面分布图,与前期一套砂体预测标准、不分时窗预测结果(图 6a-c)相比,按照不同砂体预测标准、分时窗分别预测结果(图 6d-f),其河道边界更为清晰,河道

表 1 四川盆地侏罗系沙溪庙组沙一段有利砂体测井相特征
Table 1 Logging facies of favorable sand bodies in 1st member of Jurassic Shaximiao Formation, Sichuan Basin

项目	砂体类型			
	滩坝砂	滨浅湖席状砂	分流河道砂	水下分流河道砂
测井曲线				
井号	G57	G57	G003-X5	G003-X5
深度	2 374.24~2 381.20 m	1 984.36~1 986.58 m	2 105.76~2 114.72 m	1 942.22~1 948.82 m
岩性	粉—细砂岩,厚度一般 5 m 左右	粉砂岩为主,厚度一般小于 3 m	细砂岩,厚度 8~45 m	细砂岩为主, 5~10 m
沉积构造	平行层理 逆粒序层理	沙纹层理	冲刷面 斜层理	平行层理
电性	中—低幅漏斗形或 齿化箱形	中—低幅指形	中幅箱形、齿化箱形或 钟形以及钟形与箱形组成 的复合型	中幅(齿化)箱形或 (齿化)钟形

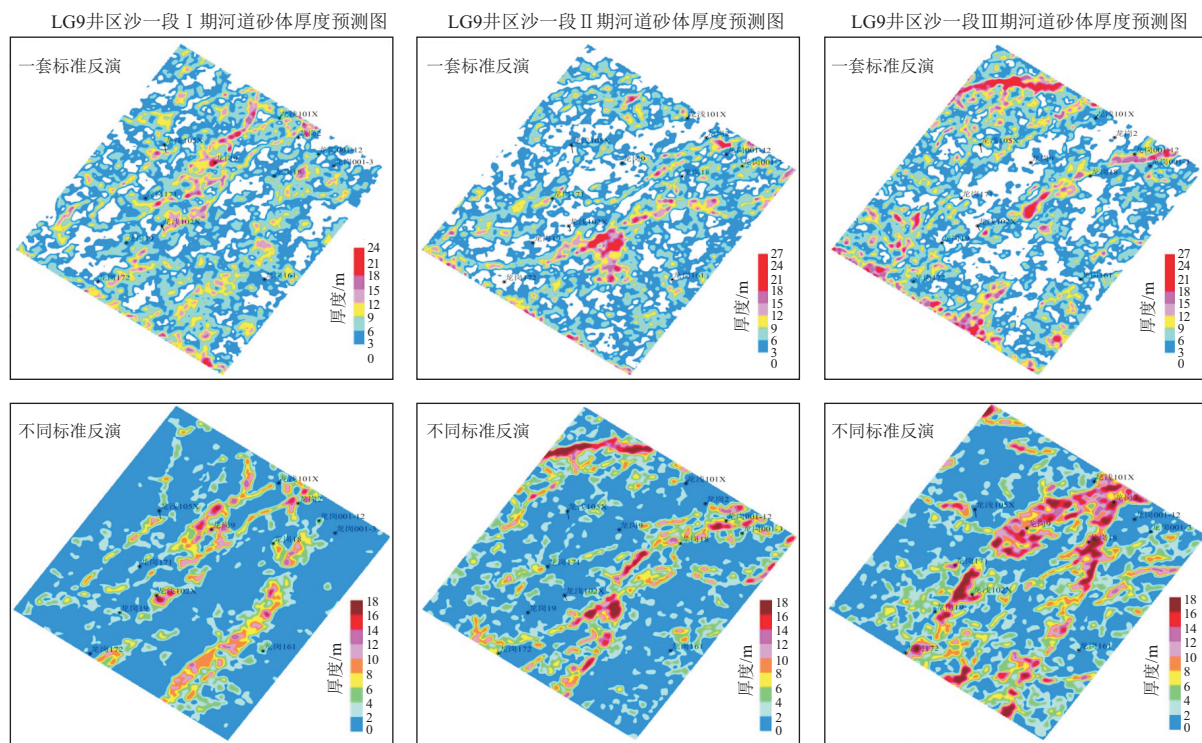


图 6 不同标准预测四川盆地侏罗系沙溪庙组沙一段砂体效果对比

Fig.6 Prediction with different standards of sand bodies in 1st member of Jurassic Shaximiao Formation, Sichuan Basin

在平面上的展布特征更符合河道沉积特征,这为后期储层预测及有利区的优选奠定了坚实的基础。

3 勘探潜力及方向

3.1 不同类型砂体勘探开发成效分析

底部席状砂(滩坝砂)虽然物性较差,厚度薄,但稳定分布,且由于直接与下伏的凉高山组烃源岩接触,因此其成藏配置条件较好,砂体普遍含油气。河道砂虽然纵向上发育期次较多,厚度大、物性好,但由于砂体与烃源岩的距离一般大于 50 m,因此需要断裂将烃源岩和砂体进行有效沟通才能成藏,河道砂的含油气性主要依靠源储断裂,成藏条件较席状砂(滩坝砂)苛刻。从目前的统计结果看^[24-25],席状砂、滩坝砂试油 16 口井,获油气井 12 口,单井平均测试产量为 18.1 t/d,单井平均累

产 4 437 t,目前已经累产原油 53 243.84 t,已有 3 口井累计产量超 10 000 t。河道砂试油 14 口井,获油气井 9 口,单井平均测试产量为 17.4 t/d,单井平均累产 7 758 t,目前已经累产原油 81 194.64 t,已有 4 口井累计产量超 10 000 t(表 2)。

由图 7 可见,砂岩厚度与累计产量存在较好的正相关关系,砂体越厚累计产量越高,因此在输导条件较好的地区,厚层河道砂是高产、稳产的主要对象。

3.2 勘探开发模式及方向

根据沙一段河道砂特有的地质特征和含油气性,勘探过程中应在凉高山组上段烃源岩发育区内,重点刻画河道的空间展布以及与之搭配的烃源岩断裂。为了降低勘探风险、减少投资、最大限度动用不同期次河道的油气,应采用立体勘探的方

表 2 四川盆地侏罗系沙溪庙组沙一段不同类型砂体勘探开发成果

Table 2 Exploration and development results of different types of sand bodies in 1st member of Jurassic Shaximiao Formation, Sichuan Basin

砂体类型	试油井/ 口	获油井/ 口	成功率/ %	单井平均 测试产量/(t·d ⁻¹)	单井平均 累计产量/t	累计产量/ t	万吨井/ 口
席状砂、滩坝砂	16	12	75.0	18.1	4 437	53 243.84	3
I 期河道砂	6	5	83.3	35.9	11 077	55 389.00	3
II 期河道砂	3	2	66.7	12.3	1 410	4 231.64	0
III 期河道砂	3	2	66.7	4.1	10 787	21 574.00	1
IV 期河道砂	2	0	0.0				0

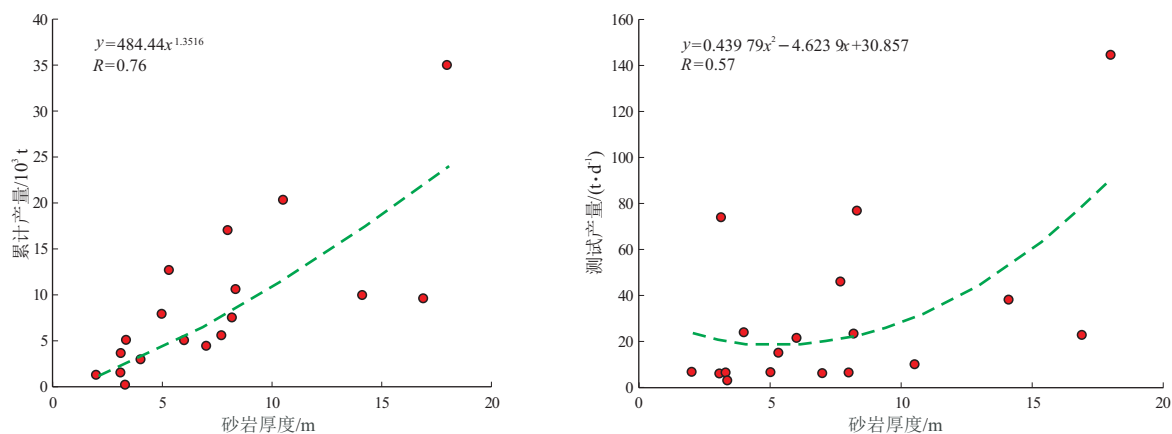


图 7 四川盆地侏罗系沙溪庙组沙一段砂体厚度与测试产量、累计产量关系

Fig.7 Sand body thickness vs. test production and cumulative production of 1st member of Jurassic Shaximiao Formation, Sichuan Basin

砂体类型	砂体特征	高产主控因素	层位	井型	典型油藏剖面	勘探开发方式
河道砂	源储分离: 厚度大、横向不连续; 分布有限, 不稳定物性好	烃储断裂, 砂体物性, 微裂缝	沙一段中下部	直井或大斜度井		多河道叠置 纵向优化 多层作用 立体勘探开发
滩坝、席状砂体	源储紧邻: 厚度薄、横向连续; 分布广, 稳定物性较好	砂体物性, 微裂缝	沙一段底部	水平井		优质砂体分布 井网优化 工厂化作业 集中勘探开发

图 8 四川盆地侏罗系沙溪庙组沙一段不同类型砂体特征及勘探开发模式

Fig.8 Characteristics and exploration/development patterns of different types of sand bodies in 1st member of Jurassic Shaximiao Formation, Sichuan Basin

式,采用直井或者大斜度井进行有效的勘探和动用。由于沙一段底部席状砂、滩坝砂厚度薄、分布稳定,勘探中重点应在凉高山组烃源岩发育区内寻找上覆沙一段优质有利砂体,并结合裂缝预测成果,落实甜点区,采用工厂化作业的方式,以水平井组进行勘探开发(图 8)。

4 结论

(1)四川盆地侏罗系沙溪庙组沙一段湖泊—河流沉积体系中的砂体,具有资源量大、物性相对较好、勘探开发效果好等特点,是目前浅层致密油气勘探开发的现实对象。底部滩坝砂、席状砂粒度较细,主要为粉砂岩—细砂岩,水动力条件弱,砂体平均孔隙度为 3.1%,具有大面积稳定分布的特点;河道砂粒度较粗,水动力条件强,主要为细砂—粗砂岩,砂体平均孔隙度为 4.68%,具有向上多期叠置、侧向迁移快、摆动大,横向连续性差的分布特点。

(2)通过对席状砂体、河道砂体的测井分析,河道砂预测标准为自然伽马值小于 65 API,席状砂预测标准为自然伽马值介于 65~75 API,在此基础上分时窗开展了不同类型砂体的精细识别和空间预测,建立起了一套适用于湖泊—河流沉积体系中不同类型砂体精细刻画与预测的方法体系。

(3)河道砂油气应采用立体勘探的方式,以直井或者大斜度井进行有效的开发和动用;底部席状砂、滩坝砂油气,可采用工厂化作业的方式,以水平井组进行勘探开发。

参考文献:

[1] 梁狄刚,冉隆辉,戴弹申,等.四川盆地中北部侏罗系大面积非常规石油勘探潜力的再认识[J].石油学报,2011,32(1): 8-17.
LIANG Digang,RAN Longhui,DAI Danshen, et al.A re-recognition of the prospecting potential of Jurassic large-area and non-conventional oils in the central-northern Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica,2011,32(1): 8-17.

- [2] 邹才能,陶士振,袁选俊,等.连续型油气藏形成条件与分布特征[J].石油学报,2009,30(3):324-331.
ZOU Caineng,TAO Shizhen,YUAN Xuanjun,et al.The formation conditions and distribution characteristics of continuous petroleum accumulations [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3):324-331.
- [3] 王毓俊.四川盆地找到大油田的可能性分析[J].石油科技论坛,2010,29(1):28-31.
WANG Yujun.Feasibility analysis of discovering large oilfield in Sichuan Basin[J].Oil Forum,2010,29(1):28-31.
- [4] 蒋裕强,漆麟,邓海波,等.四川盆地侏罗系油气成藏条件及勘探潜力[J].天然气工业,2010,30(3):22-26.
JIANG Yuqiang,QI Lin,DENG Haibo,et al.Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potentials of the Jurassic reservoirs in the Sichuan Basin[J].Natural Gas Industry,2010,30(3):22-26.
- [5] 李智武,刘树根,林杰,等.川西坳陷构造格局及其成因机制[J].成都理工大学学报(自然科学版),2009,36(6):645-653.
LI Zhiwu,LIU Shugen,LIN Jie,et al.Structural configuration and its genetic mechanism of the West Sichuan Depression in China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition),2009,36(6):645-653.
- [6] 蔡开平,廖仕孟.川西地区侏罗系气藏气源研究[J].天然气工业,2000,20(1):36-41.
CAI Kaiping,LIAO Shimeng.A research on the gas source of Jurassic gas reservoirs in west Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry,2000,20(1):36-41.
- [7] 廖静,董兆雄,翟桂云,等.渤海湾盆地歧口凹陷沙河街组一段下亚段湖相白云岩及其与海相白云岩的差异[J].海相油气地质,2008,13(1):18-24.
LIAO Jing,DONG Zhaoxiong,ZHAI Guiyun,et al.Feature of Oligocene Shahejie lower-1st member lacustrine dolostone in Qikou Depression,Bohaiwan Basin, and difference of it from marine dolostone [J]. Marine Origin Petroleum Geology,2008,13(1):18-24.
- [8] 杨晓萍,邹才能,陶士振,等.四川盆地上三叠统一侏罗系含油气系统特征及油气富集规律[J].中国石油勘探,2005,10(2):15-22.
YANG Xiaoping,ZOU Caineng,TAO Shizhen,et al.Characteristics of Upper Triassic-Jurassic oil and gas system in Sichuan Basin and oil and gas abundance law [J]. China Petroleum Exploration,2005,10(2):15-22.
- [9] 邓康龄,王信.四川盆地西部侏罗纪沉积相及油气分布[J].沉积与特提斯地质,2004,24(3):90-95.
DENG Kangling,WANG Xin.The Jurassic sedimentary facies and oil-gas distribution in western Sichuan Basin [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology,2004,24(3):90-95.
- [10] 唐大海,陈洪斌,谢继容,等.四川盆地西部侏罗系沙溪庙组气藏成藏条件[J].天然气勘探与开发,2005,28(3):14-19.
TANG Dahai,CHEN Hongbin,XIE Jirong,et al.Reservoir forming conditions of Jurassic Shaximiao Formation,west Sichuan Basin [J]. Natural Gas Exploration and Development,2005,28(3):14-19.
- [11] 李忠平,冉令波,黎华继,等.窄河道远源致密砂岩气藏断层特征及天然气富集规律:以四川盆地中江气田侏罗系沙溪庙组气藏为例[J].天然气工业,2016,36(7):1-7.
LI Zhongping,RAN Lingbo,LI Huaji,et al.Fault features and enrichment laws of narrow-channel distal tight sandstone gas reservoirs;a case study of the Jurassic Shaximiao Fm gas reservoir in the Zhongjiang Gas Field,Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry,2016,36(7):1-7.
- [12] 谢刚平,叶素娟,田苗.川西坳陷致密砂岩气藏勘探开发实践新认识[J].天然气工业,2014,34(1):44-53.
XIE Gangping,YE Sujuan,TIAN Miao.New understandings of exploration and development practices in tight sandstone gas reservoirs in Western Sichuan Depression [J]. Natural Gas Industry,2014,34(1):44-53.
- [13] 龙胜祥,肖开华,李秀鹏,等.四川盆地陆相层系天然气成藏条件与勘探思路[J].天然气工业,2012,32(11):10-17.
LONG Shengxiang,XIAO Kaihua,LI Xiupeng,et al.Gas accumulation conditions and exploration strategies of Mesozoic terrestrial strata in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry,2012,32(11):10-17.
- [14] 王丽英,王琳,张渝鸿,等.川西地区侏罗系沙溪庙组储层特征[J].天然气勘探与开发,2014,37(1):1-4.
WANG Liying,WANG Lin,ZHANG Yuhong,et al.Reservoir characteristics of Jurassic Shaximiao Formation,western Sichuan Basin [J]. Natural Gas Exploration and Development,2014,37(1):1-4.
- [15] 杜敏,陈盛吉,万茂霞,等.四川盆地侏罗系源岩分布及地化特征研究[J].天然气勘探与开发,2005,28(2):15-17.
DU Min,CHEN Shengji,WAN Maoxia,et al.Study on distribution and geo-chemical features of Jurassic source rocks in Sichuan Basin [J]. Natural Gas Exploration & Development,2005,28(2):15-17.
- [16] 李军,王世谦.四川盆地平昌—阆中地区侏罗系油气成藏主控因素与勘探对策[J].天然气工业,2010,30(3):16-21.
LI Jun,WANG Shiqian.The main factors controlling hydrocarbon accumulation in the Jurassic of Pingchang - Langzhong area in the Sichuan Basin and its exploration strategies [J]. Natural Gas Industry,2010,30(3):16-21.
- [17] 段永明,曾焱,刘成川,等.窄河道致密砂岩气藏高效开发技术:以川西地区中江气田中侏罗统沙溪庙组气藏为例[J].天然气工业,2020,40(5):58-65.
DUAN Yongming,ZENG Yan,LIU Chengchuan,et al.Technologies for the efficient development of tight sandstone gas reservoirs in narrow channels;a case study of Middle Jurassic Shaximiao Formation gas reservoir in the Zhongjiang gas field of western Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry,2020,40(5):58-65.
- [18] 干大勇,黄天俊,吕龔,等.地震振幅能量表征河道砂体及其储层物性:以川中地区中侏罗统沙溪庙组为例[J].天然气工业,2020,40(10):38-43.
GAN Dayong,HUANG Tianjun,LU Yan,et al.Characterization of channel sand body and its reservoir physical properties based on seismic amplitude energy;a case study of the Middle Jurassic Shaximiao Formation in the central Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry,2020,40(10):38-43.
- [19] 姚泾利,刘晓鹏,赵会涛,等.鄂尔多斯盆地盒8段致密砂岩

气藏储层特征及地质工程一体化对策[J].中国石油勘探, 2019,24(2):186-195.

YAO Jingli, LIU Xiaopeng, ZHAO Huitao, et al. Characteristics of He 8th member tight sandstone gas reservoir and solution based on geology-engineering integration in Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2):186-195.

- [20] 伍劲,刘占国,朱超,等.库车坳陷依奇克里克地区中—下侏罗统深层砂岩储层特征及其物性主控因素[J].中国石油勘探,2020,25(6):58-67.

WU Jin, LIU Zhanguo, ZHU Chao, et al. Characteristics of deep tight sandstone reservoirs of Middle-Lower Jurassic and the main controlling factors in the Yiqikelike area, Kuqa Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(6):58-67.

- [21] 车国琼,王立恩,汪轰静,等.断层对致密砂岩气藏甜点的控制作用:以四川盆地中部蓬莱地区须二段气藏为例[J].天然气工业,2019,39(9):22-32.

CHE Guoqiong, WANG Lien, WANG Hongjing, et al. Control action of faults on the sweet spots of tight sandstone gas reservoir: a case study of the second member of Xujiahe gas reservoir in the Penglai area, central Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(9):22-32.

- [22] 杨光,吴凯佳,黄东,等.源储异位型河道砂致密油气成藏特征及勘探模式研究:以四川盆地侏罗系沙一段致密油气为例[J].西安石油大学学报(自然科学版),2018,33(S1):10-15.

YANG Guang, WU Kaijia, HUANG Dong, et al. Study on the characteristics and exploration patterns of source reservoir heterotopic channel sand tight oil gas reservoirs; take the tight oil and

gas in the Jurassic sedimentary section of Sichuan Basin as an example[J]. Journal of Xi'an Petroleum University (Natural Science Edition), 2018, 33(S1):10-15.

- [23] 黄东,李育聪,刘敏,等.川中地区中侏罗统沙溪庙组一段油气藏特征及勘探潜力评价[J].中国石油勘探,2017,22(2):44-49.

HUANG Dong, LI Yucong, LIU Min, et al. Reservoir features and exploration potential of the 1st member of Shaximiao Formation of Middle Jurassic in central Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(2):44-49.

- [24] 杨光,吴凯佳,黄东,等.源储异位型河道砂致密油气成藏特征及勘探模式研究:以四川盆地侏罗系沙一段致密油气为例[J].西安石油大学学报(自然科学版),2018,33(S1):10-15.

YANG Guang, WU Kaijia, HUANG Dong, et al. Study on the characteristics and exploration patterns of source reservoir heterotopic channel sand tight oil gas reservoirs; take the tight oil and gas in the Jurassic sedimentary section of Sichuan Basin as an example[J]. Journal of Xi'an Petroleum University (Natural Science Edition), 2018, 33(S1):10-15.

- [25] 曾焱,黎华继,周文雅,等.川西坳陷东坡中江气田沙溪庙组复杂“窄”河道致密砂岩气藏高产富集规律[J].天然气勘探与开发,2017,40(4):1-8.

ZENG Yan, LI Huajia, ZHOU Wenyu, et al. High-yield enrichment laws of Shaximiao Formation tight sandstone gas reservoir of complex “narrow” channel in Zhongjiang gas field, in the eastern slope of West Sichuan Depression [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2017, 40(4):1-8.

(编辑 徐文明)

(上接第50页)

- [21] 李继岩.多期构造裂缝发育充填特征及其主控因素:以济阳坳陷平南潜山为例[J].沉积学报,2020,38(2):420-428.

LI Jiyang. Filling Characteristics and main controlling factors for the development of multi-phase structural fractures: a case of the Pingnan buried hill from Jiyang Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(2):420-428.

- [22] 雷涛,刘绪钢,闫淑红.大牛地气田奥陶系古地貌特征研究[J].天然气技术与经济,2014,8(1):8-11.

LEI Tao, LIU Xugang, YAN Shuhong. Ordovician palaeogeomorphologic features of Daniudi Gasfield, Ordos Basin[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2014, 8(1):8-11.

- [23] 王亚青,林承焰.山旺盆地山旺组重力滑动构造的发现及其意义[J].西北地质,2008,41(2):110-114.

WANG Yaqing, LIN Chengyan. Discovery of the gravity gliding tectonic of Shanwang Formation, Shanwang Basin[J]. Northwestern Geology, 2008, 41(2):110-114.

- [24] 高飞.利用地震正演及属性预测碳酸盐古沟槽、裂缝和孔溶洞:以鄂尔多斯盆地甘泉地区马家沟组为例[J].非常规油气,2019,6(4):25-32.

GAO Fei. Prediction of carbonate erosion flutes, fracture and cavity by seismic forward modeling and attributes: a case study of Majiagou Formation in Ganquan area of Ordos Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(4):25-32.

- [25] 黎静容,朱桦,冯晓明,等.川东北陆相储层裂缝特征差异性及其对产能的影响[J].石油实验地质,2016,38(6):742-747.

LI Jingrong, ZHU Hua, FENG Xiaoming, et al. Differences of fracture characteristics and the influence on productivity in the northeastern Sichuan continental basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(6):742-747.

- [26] 兰叶芳,邓秀芹,程党性,等.鄂尔多斯盆地华庆地区长6油层组砂岩成岩相及储层质量评价[J].岩石矿物学杂志,2014,33(1):51-63.

LAN Yefang, DENG Xiuqin, CHENG Dangxing, et al. Diagenetic facies and reservoir quality evaluation of Chang 6 sandstone reservoir in the Upper Triassic Yanchang Formation of Huaqing area, Ordos Basin [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2014, 33(1):51-63.

- [27] 卢炳雄,文华国,淡永,等.准噶尔盆地阜康凹陷阜东斜坡齐古组储层控制因素及有利区预测[J].石油与天然气地质,2018,39(3):549-557.

LU Bingxiong, WEN Huaguo, DAN Yong, et al. Favorable accumulation region prediction and controlling factors of hydrocarbon accumulation of the Qigu Formation in the Fudong Slope, Fukang Sag, Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3):549-557.

(编辑 徐文明)