

冲积扇低孔、低渗砂砾岩油藏产能指标预测 ——以准噶尔盆地西北缘Y地区三叠系百口泉组油藏为例

任涛,王彦春,王仁冲

(1. 中国地质大学 地球物理与信息技术学院,北京 100083; 2. 中国石油 海外勘探开发公司,北京 100034)

摘要:为了利用三维地震资料开展冲积扇低孔、低渗砂砾岩油藏产能指标预测研究,选取准噶尔盆地西北缘Y地区三叠系百口泉组油藏为靶区,在砂砾岩厚度与孔隙度等常规储层预测基础上,精细剖析影响油藏产能的渗透性和含油性等因素,将老区初期平均月产量数据引入三维地震反演过程中,采用层层深入、逐步逼近的思路开展油藏产能指标预测研究,总结形成了“特征曲线反演找准砂砾岩、孔隙度反演找准高物性砂砾岩、自然电位反演找准渗透性砂砾岩、电阻率反演找准含油砂砾岩、多体融合预测油藏产能指标”的研究流程。最终以月产能指标为硬数据,以波阻抗、孔隙度、电阻率和自然电位反演数据体及时间域构造为训练样本,利用神经网络模拟得到油藏产能指标数据体。研究表明,预测月产能指标与油井初期平均月产量为正相关,相关系数 $R^2=0.9487$,老井初期平均月产量大于300 t的预测误差小于10%。产能指标数据体蕴含岩性、物性、含油性和渗透性等控制油气分布的多种信息,依据Y地区相应研究成果建议部署的3口评价井试油产量均在5 t/d以上,验证了该产能指标预测技术的准确性与实用性。

关键词:三维地震反演;产能指标预测;砂砾岩油藏;准噶尔盆地西北缘

中图分类号:TE328

文献标识码:A

Productivity index prediction of alluvial fan coarse-grained clastic reservoirs with low porosity and low permeability: a case from Triassic Baikouquan Formation reservoir in Y-region at northwestern margin of Junggar Basin

Ren Tao, Wang Yanchun, Wang Renchong

(1. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Chian National Offshore Development Company, Beijing 100034, China)

Abstract: In order to use 3D seismic data for productivity index prediction of alluvial fan coarse-grained clastic reservoirs with low porosity and low permeability, we chose the Triassic Baikouquan Formation reservoir in Y-region at the northwestern margin of Junggar Basin as a case. Based on traditional reservoir prediction such as thickness and porosity of coarse-grained clastic reservoirs, we analyzed in detail factors influencing permeability and oil-bearing properties, and introduced the average monthly production data at the early stage of development into 3D seismic inversion to predict the productivity index. The following work flow was established: ‘finding coarse-grained clastic reservoirs through typical curve inversion, finding high quality coarse-grained clastic reservoirs through porosity inversion, finding permeable coarse-grained clastic reservoirs through spontaneous potential inversion, finding oil-bearing coarse-grained clastic reservoirs through resistivity inversion, and predicting reservoir productivity index with the combination of several methods’. A productivity index cube was finally generated through Neural Network modeling by using the monthly productivity as hard data and wave impedance, porosity, resistivity, spontaneous potential inversion data cube and time domain structure as training samples. The result shows that there is a positive correlation ($R^2=0.9487$) between the predicted monthly productivity and initial average monthly production. For wells with an initial monthly average production more than 300 ton, the error of prediction is less than 10%. The data cube contains various information controlling hydrocarbon distribution, such as lithology, reservoir property, oil-bearing property and permeability. The oil production of three appraisal wells deployed based on this research in Y-region reached more than 5 ton per day, which verified the accuracy and practicability of this productivity index prediction technology.

Key words: 3D seismic inversion, productivity index prediction, coarse-grained clastic reservoir, northwestern margin of Junggar Basin

收稿日期:2014-02-20;修订日期:2014-06-20。

第一作者简介:任涛(1975—),男,博士研究生,构造解释与储层预测。E-mail:121885020@qq.com。

9.71%、平均空气渗透率为 $8.51 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, T_1b^2 段储层平均孔隙度为 10.20%、平均空气渗透率为 $19.86 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 为低孔、低渗储层, 有效储层孔隙度下限为 9%。

2 砂砾岩储层预测

本次研究采用 Y 地区高精度三维地震数据开展储层预测, 地震资料采集面元 $25 \text{ m} \times 12.5 \text{ m}$, 有效频宽 5~70 Hz、视主频 50 Hz, 地震纵向分辨率可以满足油藏研究需要。借鉴“地震解释—反演处理—地质认识—再解释—再认识”的研究方法^[21-22]。在精细构造解释基础上, 利用地震属性分析、地震波形分类、三维可视化等技术, 定性确定砂砾岩展布规律; 利用地质统计学地震反演计算波阻抗、孔隙度和电阻率数据体, 精细刻画砂砾岩厚度、储层物性及有效储层分布^[23-24]。

百口泉组砂砾岩声波时差为 67~82 $\mu\text{s}/\text{ft}$, 泥质砂岩声波时差大于 77 $\mu\text{s}/\text{ft}$, 二者速度差异小, 故选用泥质含量与声波时差曲线重新构建特征曲线^[25], 公式如下:

$$dt_{\text{vsh}} = f(dt) + c_0 V_{\text{sh}} - c_1 \quad (1)$$

式中: dt_{vsh} 为特征曲线, $\mu\text{s}/\text{ft}$; $f(dt)$ 为声波时差曲线低频信息, $\mu\text{s}/\text{ft}$; V_{sh} 为泥质含量曲线, %; c_0 和 c_1 为调节量纲的常数。

特征曲线增大了不同岩性的速度差异, 砂砾岩与泥质砂岩的界限值为 82 $\mu\text{s}/\text{ft}$ 。利用声波时差标定得到的时深关系提取特征曲线并旁道子波, 与声波时差提取并旁道子波相比, 除了子波能量存在差异外, 子波频谱宽度、子波相位和旁瓣形态均保持一致, 说明特征曲线反演可以提高砂砾岩预测精度。

百口泉组砂砾岩主要分布在扇根主槽和扇中辫流沟内, 西部靠近边界断裂附近砂砾岩厚度大、平均孔隙度高, 向东向南厚度逐渐变薄、平均孔隙度变低。东北部扩边区的 T60—P202—T63 井区砂砾岩孔隙度大于 9%, 东部的 P201 井区砂砾岩孔隙度小于 9%。

T_1b^1 段油层厚度为 0~55 m、平均厚度为 25 m, 开发区内油层厚度在 15 m 以上, 东北边部扩边区油层厚度为 0~15 m; T_1b^2 段油层厚度为 0~30 m、平均厚度为 17.5 m, 开发区内油层厚度为 10 m 以上, 东北部扩边区油层厚度为 0~10 m。

3 产能指标预测

Y 地区百口泉组油藏东北部扩边区单井产量 5 t/d 以上具有开发价值。油井产能受渗透率等储层条件约束, 石油地质储量丰度相当时渗透率越大产能越好, 不

同沉积相带内储层渗透性变化大、产能差异大, 储层渗透性研究是产能指标预测的必要环节。

Y 地区百口泉组油藏砂砾岩渗透率与孔隙度、含油性及自然电位有关, 公式如下:

$$K = 1.014 FZI \times \Phi^3 / (1 - \Phi)^2, R = 0.76 \quad (2)$$

$$FZI = 0.063 RT - 0.124 5 SP + 0.023 DT - 2.38 \quad (3)$$

式中: Φ 为孔隙度, %; K 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; FZI 为流动层带指标, 无量纲; RT 为真电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; SP 为自然电位, mV; DT 为声波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$ 。

由公式(2)和(3)可知, 自然电位是指示渗透率的关键参数, 不同沉积相带内自然电位幅值差异较大, 扇根为主的开发区平均自然电位幅值大于 30 mV、扇根与扇中交替的东北部扩边区平均自然电位幅值 10~30 mV、扇中远端的开发区以南地区自然电位幅值小于 10 mV。完成自然电位基线偏移后, 参考钻井泥浆电阻率和分析化验岩心渗透率等信息, 以保证曲线变化趋势不变和尽量减小井间幅度差异为原则, 确定校正系数 C 为 50%~100%, 利用 $SP^* = 100 + SP/C$ 关系式处理得到归一化自然电位曲线 SP^* 。在孔隙度反演数据体约束下, 完成归一化自然电位和电阻率属性反演, 结果表明, 东北部扩边区的 T60—P202—T63 井区渗透性与含油性较好, 东部的 P201 井区渗透性与含油性变差。

油井产能与储层厚度、孔隙度、含油性、渗透率及构造高低之间为非线性关系, 利用百口泉组基础井网中 41 口开发井投产第 1 年的平均月产量数据构建单井月产能指标曲线, 作为待模拟区的已知硬数据, 以波阻抗、孔隙度、电阻率和归一化自然电位反演数据体及时间域构造作为已知训练样本, 利用神经网络算法^[26-27], 根据各参数对月产能指标的敏感程度确定权重系数, 最终得到产能指标反演数据体 D_p 。

地震预测月产能指标数据体多元拟合公式如下:

$$D_p = 25.9 \Phi + 11.63 RT - 0.95 SP^* + 0.35 PI - 0.29 T_0 + C_0 \quad (4)$$

式中: D_p 为月产能指标预测数据体, t; Φ 为孔隙度反演数据体, %; RT 为电阻率反演数据体, $\Omega \cdot \text{m}$; SP^* 为归一化自然电位反演数据体, mV; PI 为波阻抗反演数据体, $\text{g}/\text{cm}^3 \cdot \text{m}/\text{s}$; T_0 为时间域构造, ms; C_0 为常数, 回归确定为 -2 754.9。

预测月产能指标与油井初期平均月产油量为正相关, 相关系数 $R^2 = 0.948 7$ (图 2), 油井初期平均月产量越大预测误差越小, 初期月产量大于 300 t 时, 平均预测误差小于 10%, 能够满足生产需求 (图 3; 表 1)。

综上, 产能指标数据体是储层信息的综合反映, 蕴

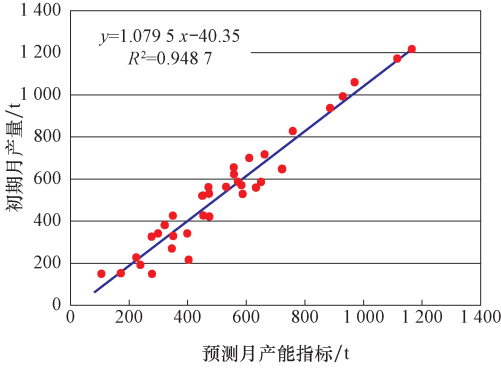


图 2 准噶尔盆地西北缘初期平均月产量与预测月产能指标拟合图

Fig. 2 Matching map of the initial monthly average production and forecasted monthly productivity index at the northwestern margin of Junggar Basin

含岩性、物性、含油性和渗透性等控制油气分布的多种信息,能够直接预测和表征单井产量,可以用于储层评价与产量趋势预测。

4 应用效果及钻井验证

4.1 储层分类评价

根据预测月产能指标平面分布,将百口泉组 T_1b^1 和 T_1b_2 段均划分为五类储层,月产能指标小于 50 t 为五类储层、月产能指标在 50 ~ 150 t 为四类储层、月产能指标在 150 ~ 250 t 为三类储层、月产能指标在 250 ~ 350 t 为二类储层、月产能指标大于 350 t 为一类储层。一类至三类储层发育区域储层条件好、含油性较好、单井产量高、预测结果与实际生产效果符合率高,高部位的开发区主要发育一类储层,油藏东北部扩边区主要发育二类和三类储层。

表 1 准噶尔盆地西北缘初期平均月产量与预测月产能指标对比
Table 1 Comparison of initial monthly average production and predicted monthly productivity index at the northwestern margin of Junggar Basin

井号	生产层位	初期月产量/t	预测月产能指标/t	绝对误差/t	相对误差/%
yc11	T_1b^{2+3}	331	353	-22	-6.6
yc20	T_1b^1	211	229	-18	-8.5
ya05	T_1b^1	597	571	26	4.4
yc24	T_1b^{2+3}	667	714	-47	-7.0
yc29	T_1b^{2+3}	1 000	943	57	5.7
yc30	T_1b^{2+3}	1 050	969	81	7.7

T_1b^1 一类储层主要分布在 ya01—ya27 井以西至边界断层的高部位,面积为 16.2 km²。二类储层主要近南北方向分布在 T17—T23—T25 井区,面积为 15.4 km²。三类储层主要分布在 T61—T60—P201 井区及 T59 井区,面积为 44.3 km²(图 4)。

T_1b^2 段一类储层主要分布在 ya25—ya51 井西北至边界断层的高部位、P202 井区和 T23 井区,面积 13.5 km²。二类储层主要分布在 T61 井区、T63 井北部和 T34 井区,面积 14.7 km²。三类储层主要分布在 T17—T64 井区,面积 34.9 km²。

4.2 有利区优选

以预测产能指标大于 150 t 及孔隙度大于 9% 的叠合线为界,分别确定油藏东北部 T_1b^1 和 T_1b^2 段有利扩边区范围,面积分别为 11.8 km² 和 13.3 km²。预测 T_1b^1 段有利区石油地质储量为 450.85 × 10⁴ t, T_1b^2 段有利区石油地质储量为 609.97 × 10⁴ t,合计储量为 1 060.82 × 10⁴ t。

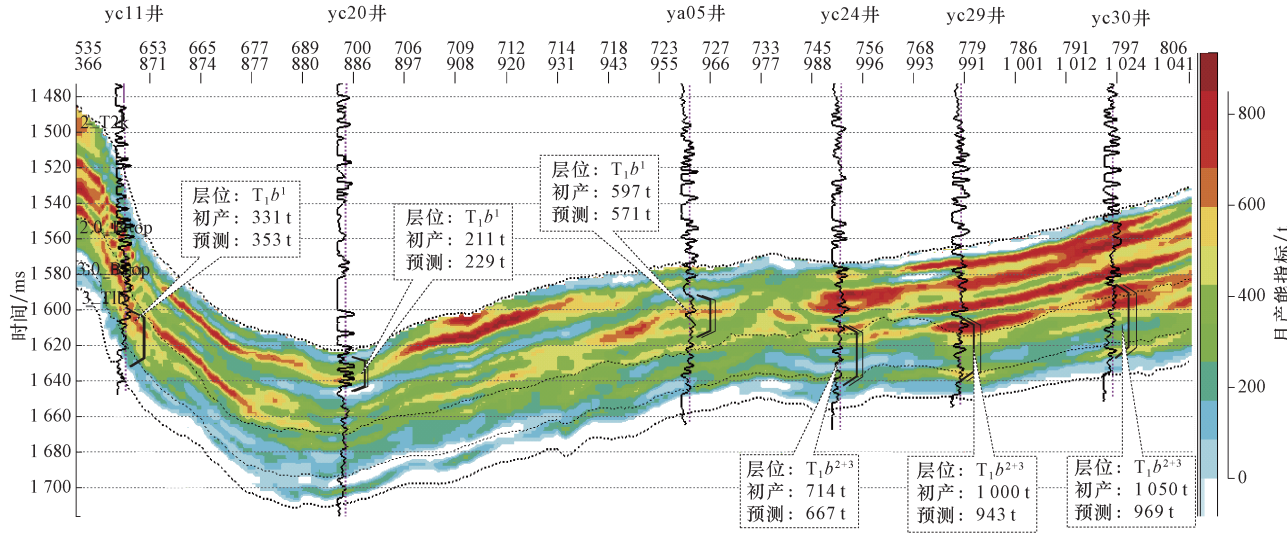


图 3 准噶尔盆地西北缘过 yc11—ya05—yc30 井百口泉组月产能指标预测剖面

Fig. 3 Monthly productivity index prediction profile crossing Well yc11 - ya05 - yc30 in the Baikouquan Formation at the northwestern margin of Junggar Basin

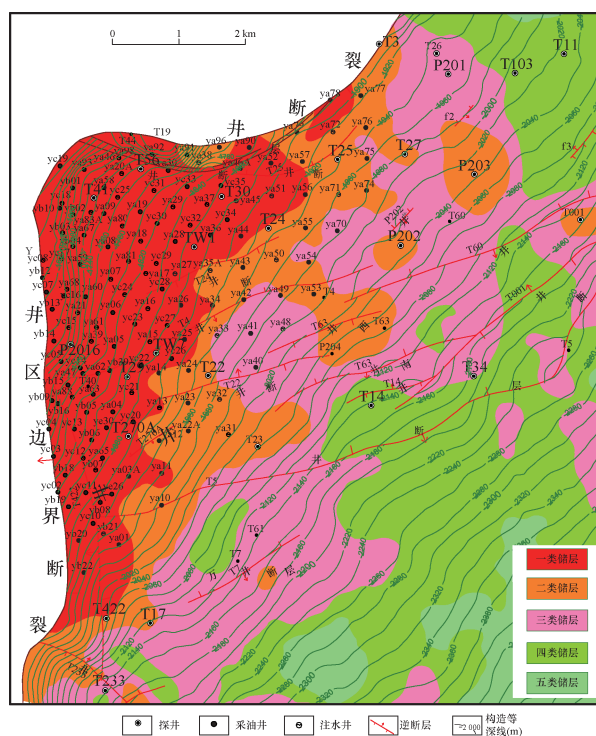


图4 准噶尔盆地西北缘百口泉组一段储层分类

Fig. 4 Reservoir classification of the 1st Member of Baikouquan Formation at the northwestern margin of Junggar Basin

T_1b^1 和 T_1b^2 两层有利扩边区叠置、且 T_1b^{1+2} 段油层厚度大于 10 m 范围为优先扩边部署区;两层有利扩边区叠置、且 T_1b^{1+2} 段油层厚度在 5 ~ 10 m 范围为次要扩边部署区;仅有单层有利扩边区的范围为接替扩边部署区。优先扩边部署区主要分布在探明区边部的 T63—P202 井区,面积为 6.1 km²;次要扩边部署区主要分布在 T23 西和 T63 井区南,面积为 5.2 km²;接替扩边部署区分布在 T14—T34 井区,面积为 4.0 km²。

4.3 钻井验证

根据本次百口泉组油藏研究成果,2013 年 4 月和 7 月分别部署扩边评价井 P203 井和 P204 井,现均已完钻,钻探效果与预测结果基本吻合,为扩边区探明储量计算与开发部署提供了可靠依据。P203 井于 2013 年 7 月完钻, T_1b^2 段射开 2 445.0 ~ 2 418.0 m (13.0 m),试油平均日产油 6.19 t,累产油 162.2 t,为油层; T_1b^1 段射开 2 400.5 ~ 2 384.0 m (9.5 m),试油平均日产油 5.09 t,累产油 81.96 t,为油层。P204 井与 2013 年 10 月完钻, T_1b^2 段射开 2 370.0 ~ 2 386.0 m (16.0 m),试油平均日产油 5.8 t,累产油 97.3 t,为油层; T_1b^1 段射开 2 306.0 ~ 2 314.0 和 2 320.0 ~ 2 326.0 m (14.0 m),试油平均日产油 7.8 t,累产油 186.4 t,为油层。

5 结论

在常规井震结合砂砾岩厚度与孔隙度预测基础

上,借助含油性和渗透性预测,引入单井初期产量数据,开展初期产能指标预测,以此开展储层分类与有利目标优选,为老区扩边部署提供了储层条件和产能指标的双重参考,新井钻探效果与预测结果基本吻合,充分说明该技术方法的可行性,为冲积扇低孔、低渗砂砾岩老油田扩边挖潜和增储上产研究提供了新思路,具有较好的推广价值和应用前景。

产能指标预测结果受油藏自身条件、地震资料品质、反演算法和参数等诸多因素影响,存在多解性和不确定性,需要在以后的深入研究过程中逐步优化与不断完善。

参考文献

- [1] 管灵,王顺华. 砂砾岩储层研究现状[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2011, 8(3): 63-65.
Zan Ling, Wang Shunhua. Research status of sandy conglomerate reservoir[J]. Journal of Yangtze University (Nat Sci Edit), 2011, 8(3): 62-65.
- [2] 徐昌海,朱迅. 国内致密砂砾岩储层研究技术及其发展趋势[J]. 内将科技, 2012, (5): 95-97.
Xu Changhai, Zhu Xun. Technology progress of tight sandy-conglomerate reservoir in China[J]. Nei Jiang Ke Ji, 2012, (5): 95-97.
- [3] 侯瑞云,刘忠群. 鄂尔多斯盆地大牛地气田致密低渗储层评价与开发对策[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 118-128.
Hou Ruiyun, Liu Zhongqun. Reservoir evaluation and development strategies of Daniudi tight sand gas field in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 118-128.
- [4] 周庆凡,杨国丰. 致密油与页岩油的概念与应用[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(4): 541-544.
Zhou Qingfan, Yang Guofeng. Definition and application of tight oil and shale oil terms[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 541-544.
- [5] 林小兵,刘莉萍,田景春,等. 川西坳陷合兴场-丰谷地区须家河组致密砂岩气藏精细勘探[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(1): 77-84.
Lin Xiaobing, Liu Liping, Tian Jingchun, et al. Fine exploration of tight sandstone gas reservoirs in the Xujiahe Formation, Hexingchang-Fenggu area, the western Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1): 77-84.
- [6] 杜建波,田景春,胡俊卿,等. 洛阳-伊川地区三叠系致密砂岩油气藏地质特征[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(2): 174-178.
Du Jianbo, Tian Jingchun, Hu Junqing, et al. Geological characteristics of the Triassic tight sandstone oil and gas reservoirs in Luoyang-Yichuan area[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2): 174-178.
- [7] 郑磊,金之钧,张哨楠. 中东鲁卜哈利盆地古生界致密砂岩储层特征及评价[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 475-482.
Zheng Lei, Jin Zhijun, Zhang Shaonan. Features and evaluation of the Palaeozoic tight sandstone reservoirs of the Rub Al Khali Basin in the Middle East[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 475-482.
- [8] 祝海华,钟大康,张亚雄,等. 川南地区三叠系须家河组致密砂岩孔隙类型及物性控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 65-76.
Zhu Haihua, Zhong Dakang, Zhang Yaxiong, et al. Pore types and controlling factors on porosity and permeability of Upper Triassic Xu-

- jiahe tight sandstone reservoir in Southern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 65–76.
- [9] 任战利,李文厚,梁宇,等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组致密油成藏条件及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 190–198.
Ren Zhanli, Li Wenhui, Liang Yu, et al. Tight oil reservoir formation conditions and main controlling factors of Yanchang Formation in southeastern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 190–198.
- [10] 王敏雪,杨凤丽. 拟声波地震反演预测近岸水下扇砂砾岩体储集层—以东营凹陷为例[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(1): 26–28.
Wang Minxue, Yang Fengli. Application of quasi-acoustic seismic inversion to prediction of glutenite reservoir in inshore submarine fan—an example from Dongying sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(1): 26–28.
- [11] 刘书会,张繁昌,印兴耀,等. 砂砾岩储集层的地震反演方法[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 124–125.
Liu Shuhui, Zhang Fanchang, Yin Xingyao, et al. Seismic inversion for granule gravel reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 124–125.
- [12] 鲜本忠,王永诗,周廷全,等. 断陷湖盆陡坡带砂砾岩体分布规律及控制因素—以渤海湾盆地济阳坳陷车镇凹陷为例[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 429–436.
Bao Benzhong, Wang Yongshi, Zhou Tingquan, et al. Distribution and controlling factors of glutenite bodies in the active region of a rift basin: an example from Chezheng Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 429–436.
- [13] 况军,齐雪峰. 准噶尔前陆盆地构造特征与油气勘探方向[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(1): 5–9.
Kuang Jun, Qi Xuefeng. The structural characteristics and oil-gas explorative direction in Junggar foreland Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(1): 5–9.
- [14] 何登发,尹成,杜社宽,等. 前陆冲断带构造分段特征以准噶尔盆地西北缘断裂构造带为例[J]. 地学前缘, 2004, 11(4): 91–101.
He Dengfa, Yin Cheng, Du Shekuan, et al. Characteristics of structural segmentation of foreland thrust belts a case study of the fault belts in the northwestern margin of Junggar Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(4): 91–101.
- [15] 蔚远江,李德生. 准噶尔盆地西北缘扇体形成演化与扇体油气藏勘探[J]. 地球学报, 2007, 28(1): 62–71.
Yu Yuanjiang, Li Desheng. Fans sedimentation and exploration direction of Fan hydrocarbon reservoirs in foreland thrust belt of the northwestern Junggar Basin[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2007, 28(1): 62–71.
- [16] 瞿建华,张顺存,李辉. 准噶尔盆地玛北地区三叠系百口泉组油藏成藏控制因素[J]. 特种油气藏, 2013, 20(5): 51–56.
Qu Jianhua, Zhang Shuncun, Li Hui, et al. Control factors of the Triassic Baikouquan reservoirs in Mabei area of Junggar Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(5): 51–56.
- [17] 郭璇,潘建国,谭开俊,等. 地震沉积学在准噶尔盆地玛湖西斜坡区三叠系百口泉组的应用[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(2): 359–364.
Guo Xuan, Pan Jianguo, Tan Kaijun, et al. Application of seismic sedimentology in Triassic Baikouquan Formation of western Mahu slope of Junggar basin[J]. Natural Gas Geosciences, 2012, 23(2): 359–364.
- [18] 查明,李秀鹏. 准噶尔盆地乌夏地区中下三叠统地震沉积学研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2010, 34(6): 8–12.
Zha Ming, Li Xiupeng. Seismic sedimentology study of Middle and Lower Triassic in Wu-Xia area, Junggar Basin[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2010, 34(6): 8–12.
- [19] 雷德文. 准噶尔盆地玛北油田孔隙度横向预测[J]. 新疆石油地质, 1995, 16(4): 296–300.
Lei Dewen. Transversal prediction of porosity in Mabei Oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1995, 16(4): 296–300.
- [20] 衣怀峰,陈新,匡立春,等. 神经网络方法确定玛北油田岩性油藏含油边界[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2005, 29(4): 15–20.
Yi Huaifeng, Chen Xin, Kuang Lichun, et al. Determining oil boundary of lithologic reservoir by neural network method in Mabei Oilfield[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2005, 29(4): 15–20.
- [21] 沈财余,崔汝国. 影响测井约束地震反演地质效果因素的分析[J]. 物探与化探, 2003, 27(2): 123–138.
Shen Caiyu, Cui Ruguo. An analysis of the factors affecting geological effects of logging constrained seismic inversion[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2003, 27(2): 123–138.
- [22] 姚逢昌,甘利灯. 地震反演的应用与限制[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(2): 53–58.
Yao Fengchang, Gan Lideng. Application and restriction of seismic inversion[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(2): 53–58.
- [23] 张国栋,刘莹. 综合应用地震属性与地震反演进行储层描述[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(增刊1): 137–144.
Zhang Guodong, Liu Xuan. Integrated application of seismic attribute and seismic inversion in reservoir characterization[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(S1): 137–144.
- [24] 王晓平,尚建林,王林生,等. 地质统计反演在准噶尔盆地玛北油田的应用[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(3): 320–323.
Wang Xiaoping, Shang Jianlin, Wang Linsheng, et al. Application of geostatistic inversion technology to mabei oilfield in junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(3): 320–323.
- [25] 张学芳,董月昌. 曲线重构技术在测井约束反演中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 32(3): 70–72.
Zhang Xuefang, Dong Yuechang. Application of log rebuilding technique in constrain inversion[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 32(3): 70–72.
- [26] 刘小亮,于兴河,李胜利. BP神经网络与多点地质统计相结合的井震约束油藏水道模拟[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(6): 36–42.
Liu Xiaoliang, Yu Xinghe, Li Shengli. Well-seismic data constrained turbidite channel modeling based on the combination of neural network BP arithmetic and multiple-point geostatistics[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(6): 36–42.
- [27] 李娟娟,崔若飞,潘冬明,等. 概率神经网络技术在煤田地震反演中的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(2): 715–721.
Li Juanjuan, Cui Ruofei, Pan Dongming, et al. Coalfield seismic inversion using probabilistic neural network[J]. Progress In Geophysics, (in Chinese), 2012, 27(2): 715–721.

(编辑 张亚雄)