

引用格式:孙小琴.基于井震结合的南川地区页岩气储层叠后裂缝预测技术[J].油气藏评价与开发,2022,12(3):462-467.

SUN Xiaoqin. Poststack fracture prediction technology of shale gas reservoir based on combination of well and seismic in Nanchuan[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(3): 462-467.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.03.008

基于井震结合的南川地区页岩气储层叠后裂缝预测技术

孙小琴

(中国石化上海海洋油气分公司勘探开发研究院,上海 200120)

摘要:页岩气储层天然裂缝发育,页岩裂缝对储层改造和后期压裂效果影响很大。基于井震结合的蚂蚁追踪技术进行裂缝预测,首先通过测井解释的天然裂缝,计算出井的裂缝发育密度曲线,然后通过多种模拟方法比较,选取高斯随机方法,该算法能体现页岩储层裂缝发育的非均质性特征,建立井间天然裂缝模型,最后通过协克里金算法体现井间裂缝发育属性,输入蚂蚁体属性进行质控,从而建立南川地区天然裂缝的预测模型。从预测结果来看,南川地区裂缝发育方向为北东向,平桥背斜东翼裂缝较核部发育,易形成网状缝,与实钻井吻合度高,裂缝预测技术能够指导该区的勘探开发。

关键词:天然裂缝;裂缝密度;蚂蚁追踪;页岩气储层;南川地区

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Poststack fracture prediction technology of shale gas reservoir based on combination of well and seismic in Nanchuan

SUN Xiaoqin

(Research Institute of Exploration and Development, Sinopec Offshore Shanghai Oil & Gas Branch, Shanghai 200120, China)

Abstract: Natural fractures are well developed in shale gas reservoirs, which have great influence on reservoir reconstruction and later fracturing effect. Therefore, the fracture prediction is carried out by ant tracking technology based on the combination of logging and seismic. Firstly, the curves for the fracture development density of the wells are obtained by the calculation of the natural fractures by well logging. Then, by the comparison of various simulation methods, the Gaussian random method is selected, which can reflect the heterogeneity of fracture development in shale reservoir and establish the natural fracture model between wells. Finally, the Co-Kriging interpolation method is used to reflect the properties of inter-well fracture development, and ant attributes are input for the quality control in order to establish the prediction model of natural fractures in Nanchuan area. According to the prediction results, the fractures in Nanchuan area develop along the NE direction. The fractures in the east wing of Pingqiao anticline are more developed than those in the core, and the fracture network are easy to form. The prediction results are highly consistent with the actual drilling wells. This fracture prediction technology can guide the exploration and development of this area.

Keywords: natural fracture; fracture density; ant tracking; shale gas reservoir; Nanchuan area

裂缝的地球物理属性识别和预测是现今世界的热点研究课题,随着裂缝检测技术的发展,地震裂缝检测的可靠程度越来越引起人们的关注^[1-2]。目前采

用地震方法检测裂缝的技术从总体上主要有如下几个方面:①基于纵波各向异性的裂缝预测^[3-5];②针对特殊情况的特色技术,诸如通过缝洞储层的地震

收稿日期:2021-03-15。

作者简介:孙小琴(1983—),女,硕士,助理研究员,主要从事地震解释和储层预测工作。地址:上海市浦东新区商城路1225号,邮政编码:200120。E-mail:sxq-3033@163.com

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“彭水地区常压页岩气勘探开发示范工程”(2016ZX05061);中国石化科技项目“南川复杂构造带页岩气勘探开发关键技术”(P19017-3)。

响应特征来识别缝洞储层^[6],例如一些“地震串珠”;
③构造应力数值模拟技术^[7-8];④测井约束波阻抗反演的裂缝预测研究^[9];⑤非线性裂缝预测技术;⑥采用边缘检测和相干数据体的裂缝预测方法研究^[10];⑦应用几何属性的裂缝检测方法研究等^[11]。

裂缝预测研究的早期阶段主要通过地表露头、岩心取样、数值模拟构造应力场、测井识别裂缝发育带等技术来直观表述裂缝,随着计算机水平的发展,已进展到利用三维纵波的裂缝检测方法、横波与多分量探测方法、相干体和图像处理技术、叠前AVO(振幅随偏移距的变化)、地震属性提取等多种裂缝地震预测方法^[12]。前人已有工作大多是在地震数据体上进行裂缝检测,存在一定的不确定性。通过研究利用实钻井上裂缝信息约束地震数据体裂缝检测,能够很好地反映本区裂缝的空间展布规律及裂缝发育强度。

泥岩中的裂缝既是油气的储集空间又是油气运移的通道,页岩气产量高低直接与泥页岩内部裂缝发育程度有关^[13]。区域应力的方向、性质及大小主导天然裂缝形成,影响着页岩裂缝的大小与规模^[14]。页岩气井获得高产的重要因素是水平井后期压裂改造缝与天然裂缝沟通产生网状缝,天然裂缝发育情况直接决定压裂改造效果,如何准确预测天然裂缝分布特征,是研究的重点。从岩心资料、测井资料和地震资料等方面,充分利用井上的裂缝特征来约束地震的蚂蚁体裂缝检测技术,开展裂缝综合约束研究,以期为该区页岩气勘探开发提供参考。

1 工区概况

南川地区位于四川盆地川东高陡构造带万县复向斜,出露地层以侏罗系、三叠系、二叠系为主,主要目的层为志留系龙马溪组页岩储层。

1.1 工区断裂特征

南川地区主要受印支期以来,尤其是燕山期—喜山期运动强烈挤压作用影响,受燕山中期构造作用影响形成北东向褶皱及断裂,晚期受挤压走滑作用形成南北向构造及“S”形断裂。两期构造作用叠加,形成隆凹相间、东西分带的构造格局。主要断裂

为三级断裂,共有5条,断距为100~200 m,走向为北东向,对保存有一定影响;其余为四级断裂,断距小于100 m,走向为北东向,断距较小,对保存无影响(图1)。

1.2 工区裂缝特征

南川地区岩心资料揭示裂缝发育具有构造分区的特点,背斜区发育高角度—垂直张性缝,而斜坡—凹陷区以发育低角度顺层剪切缝为主^[15-16](图2)。平桥背斜和东胜背斜构造缝密度分别为1.4条/m和1.0条/m,层理缝密度分别为42层/m和40层/m。裂缝发育程度与规模的差异,表明由东向西,从盆缘到盆内,构造变形变弱,裂缝发育程度降低,具有递进变形特征。

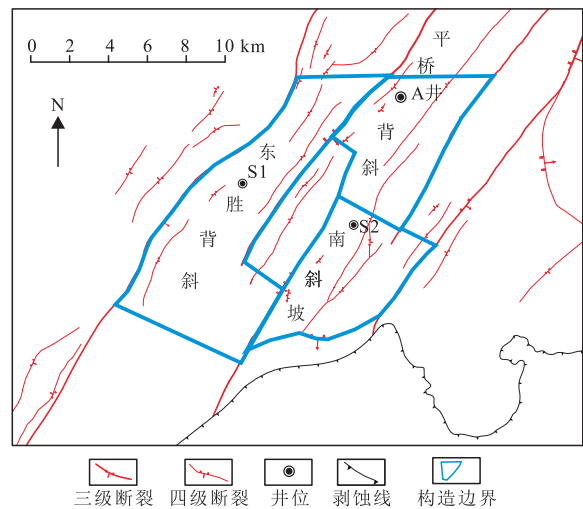


图1 南川地区五峰组断裂分布

Fig. 1 Fault distribution of Wufeng Formation in Nanchuan area

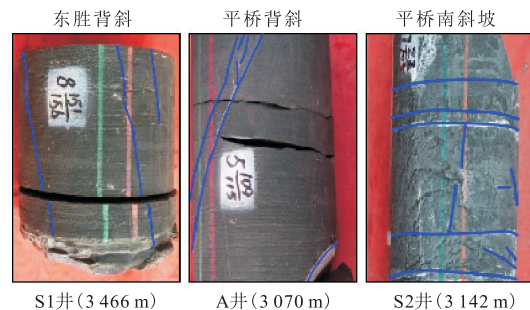


图2 南川地区龙马溪组岩心资料

Fig. 2 Core data of Longmaxi Formation in Nanchuan area

结合FMI(地层微电阻率扫描成像),从主力气层段来看,南川地区优质页岩页理缝均极为发育,构造缝发育程度不同。平桥主体区两翼纹层状层理最发育,其次为东胜背斜,背斜轴部相对不发育(图3)。

2 研究方法

三维地震体包含大量的构造和断裂信息,能够有效地反映裂缝信息。FMI成像测井能够反映井点的裂缝分布及产状,基于井震结合的蚂蚁追踪技术进行裂缝预测,预测结果更加准确,更符合地下真实的裂缝信息^[17-18]。蚂蚁追踪技术主要步骤包括以下6个方面。

1) 地震数据预处理。首先运用高斯滤波对地震数据进行去噪处理,降低噪声的影响,去噪效果明显(图4);其次是地震数据体“边缘”探测,目的是寻

找数据体中的不连续点,并应用方差属性突出裂缝的不连续性;最后利用相邻道地震信号之间的相似性来描述地层、岩性等的横向非均质性,通过计算样点的方差值,揭示数据体中的不连续信息,从而进行断层、岩性的识别。在规则层位面上,沿层振幅变化不大,方差较小,而在断层附近,振幅变化较大,方差也大^[19-20]。

2) 利用蚂蚁追踪算法计算蚂蚁体,蚂蚁体检测大中尺度裂缝。①定义种子点:对于区域大断层来说选5~7个样点,对于小断裂裂缝来说一般选3~4个;②偏移度:样点数0~3个,参数越大,搜索范围越大;③蚂蚁搜索步长:样点数2~10个,参数越小,精

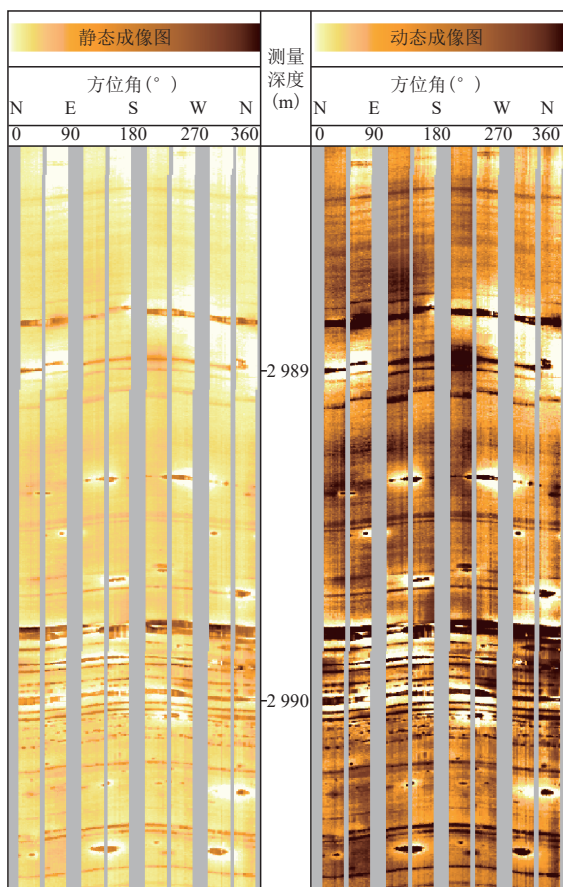


图3 南川地区A井龙马溪组电成像测井
Fig. 3 Electrical imaging logging of Longmaxi Formation in Well-A of Nanchuan area

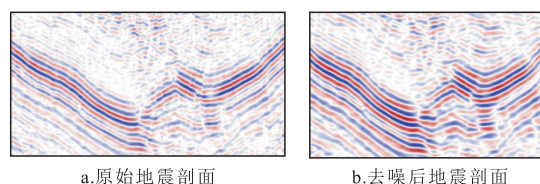


图4 去噪前后地震剖面对比
Fig. 4 Comparison of seismic profiles before and after denoising

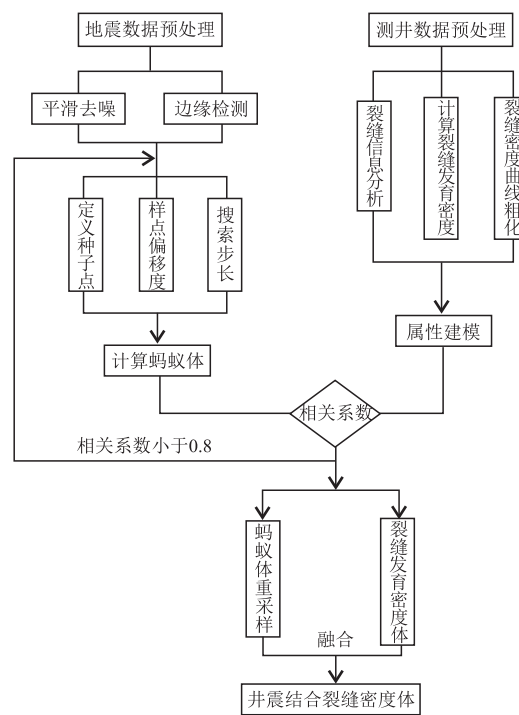


图5 井震结合裂缝预测流程
Fig. 5 Flow chart of fracture prediction technology based on combination of logging and seismic

度越高^[21]。经过反复试验,选取种子点参数为5,偏移度参数为2,蚂蚁搜索步长为3,通过蚂蚁体与南川地区构造解释断裂对比,大中断裂位置一致,裂缝分布范围吻合度高,可以判断该参数选取合理,能够刻画裂缝的空间展布特征。

3) 测井数据预处理。通过已钻井的裂缝信息,包括倾角、倾向、走向信息,计算出裂缝发育密度曲线,并对裂缝发育密度曲线进行粗化。

4) 属性建模。首先进行构造建模,利用地震解释成果,创建目的层构造模型;其次通过多种模拟方法的比较,选取高斯随机方法,计算出裂缝发育密度体。

5) 建立井上裂缝发育密度体与蚂蚁体的相关性,计算出相关系数。通过井上裂缝发育密度体与蚂蚁体进行交会图分析,相关系数达到0.8,认为可以反映南川地区的裂缝发育特征。

6) 蚂蚁体重采样。用协克里金的方法,协克里金差值是以变异函数理论和结构分析为基础,在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计的方法。通过地质模型层位约束和井上裂缝密度建模,能够体现井间裂缝的发育属性。把蚂蚁体融合到裂缝发育密度体上,重新建模,得到最终的裂缝预测平面图,技术流程见图5。

3 实例应用

南川地区构造复杂,非均质性强,古地应力变化快^[22-23],龙马溪组裂缝较发育。以平桥背斜A井为例,该井裂缝走向为北东向30°至60°,倾角60°至75°(图6),利用平桥背斜5口井(分别为核部2口井、翼部3口井),东胜背斜1口井,南斜坡1口井,建立南川地区三维裂缝发育密度体^[24-26]。

从井上裂缝密度插值建模分析,背斜区轴部裂缝不发育,东西两翼裂缝较发育,斜坡区裂缝发育。背斜轴部地应力集中,以高角度—垂直张性缝为主,平面上延伸不远,不利于人造缝横向延伸。背斜翼部断层发育区由于控边逆断层封闭性能好,同时该区地应力释放,伴生成大量天然缝网,增大了储集空间,改善了储层物性,游离气富集程度高,有利于压裂形成复杂缝网。

利用蚂蚁体追踪算法计算蚂蚁体,通过反复的

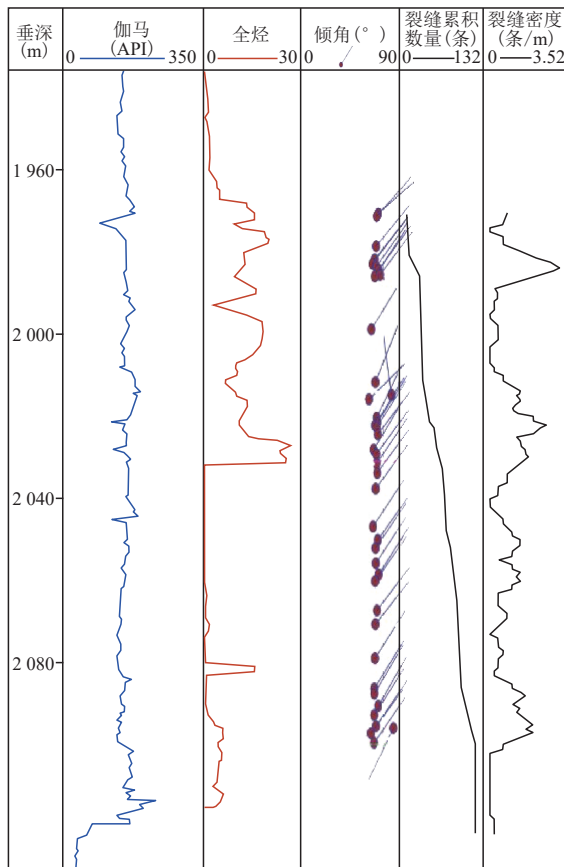


图6 南川地区A井裂缝发育特征
Fig. 6 Fracture development characteristics of Well-A in Nanchuan area

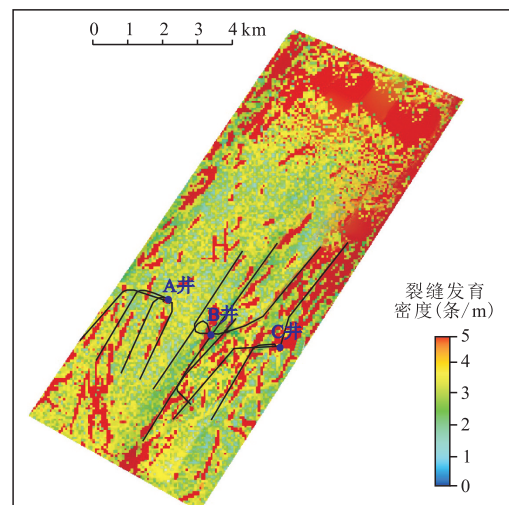


图7 南川地区基于井震结合的裂缝预测
Fig. 7 Fracture prediction based on combination of logging and seismic in Nanchuan area

参数试验,在得到蚂蚁体裂缝预测数据后,需要根据已知井和地震解释成果进行质控,蚂蚁体基本上能够清晰地看出裂缝的方向和展布特征,但存在一定的不确定性。整个地区裂缝方向为北东向,与主断裂方向一致,由于裂缝的发育程度与断层密切相关,燕山运动阶段在强烈的北西—北东挤压构造应力场作用下岩层褶皱变形比较显著,形成的断裂体系以北东为主。在挤压构造应力作用下,脆性大的基岩形成以压性为主的水平缝或北东—北东、北西向两组低角度剪切裂缝。

通过蚂蚁体重采样,用协克里金的方法,把蚂蚁体融合到裂缝发育密度体上,重新建模,得到基于井震结合的裂缝预测平面图,不仅代表了裂缝发育位置,而且能够描述裂缝的发育强度,使裂缝预测由定性转向量化(图7)。南川地区大裂缝的走向与断层展布方向、褶皱方向等基本一致,局部二者有一定夹角。工区整体以北东走向的裂缝居多,北西向裂缝主要伴随断层分布,背斜主体区裂缝密度较小,背斜东西两翼和断层附近裂缝密度较大;另外,褶皱发育的裂缝带也有了较清楚的响应,裂缝的分布情况也更符合地质情况。A井区位于背斜轴部,裂缝相对不发育,B、C井区位于背斜东翼,裂缝较发育,单井产量比A井区高,充分说明了裂缝发育区易形成复杂缝网,压裂改造效果更好。

4 结论

1) 基于地震叠后属性的蚂蚁体裂缝预测,能够体现工区断裂的大致方向,但存在一定的不确定性。通过蚂蚁体裂缝预测质控与井上裂缝密度插值建模的方法,能够很好地反映本区裂缝的空间展布规律及裂缝发育强度,使裂缝预测由定性转向量化。裂缝方向为北东向,局部发育北西向微裂缝,背斜轴部裂缝欠发育,两翼微裂缝较发育。

2) 开发实践表明,在背斜的两翼地应力释放,天然裂缝较发育,易形成复杂缝网,压裂试气井施工压力较小,改造效果明显变好,产量往往较高,对储层的改造作用更好,因此,裂缝预测结果能较准确地预测本区裂缝发育特征,与实钻井吻合度高,为后期水平井的设计提供可靠依据。

参考文献

- [1] 龙鹏宇,张金川,唐玄,等.泥页岩裂缝发育特征及其对页岩气勘探和开发的影响[J].天然气地球科学,2011,22(3):525-532.
LONG Pengyu, ZHANG Jinchuan, TANG Xuan, et al. Feature of muddy shale fissure and its effect for shale gas exploration and development[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22 (3): 525-532.
- [2] 张海涛,张颖,何希鹏,等.渝东南武隆地区构造作用对页岩气形成与保存的影响[J].中国石油勘探,2018,23(5):47-56.
ZHANG Haitao, ZHANG Ying, HE Xipeng, et al. The effect of tectonism on shale gas formation and preservation in Wulong area, southeastern Chongqing[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(5): 47-56.
- [3] 尹志恒,狄帮让.国外应用纵波各向异性技术检测裂缝的研究进展[J].科技导报,2011,29(30),73-79.
YIN Zhiheng, DI Bangrang. Progress in P-wave anisotropy technology for fracture detection[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(30), 73-79.
- [4] ZHU Y P, TSVANKIN I. Plane-wave attenuation anisotropy in orthorhombic media[J]. Geophysics, 2007, 72(1): D9-D19.
- [5] CHICHININA T, OBOLENTSEVA I, GIK L, et al. Attenuation anisotropy in the linear-slip model: Interpretation of physical modeling data[J]. Geophysics, 2009, 74(5): WB165-WB176.
- [6] 徐丽萍.多属性融合技术在塔中碳酸盐岩缝洞储层预测中的应用[J].工程地球物理学报,2010,7(1),49-22.
XU Liping. The application of multi-attribute fusion technology to the reservoir prediction of carbonate fracture and cavity in Tazhong Area[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2010, 7(1), 49-22.
- [7] 戴黎明,李三忠.亚洲大陆主要活动块体的现今构造应力数值模拟[J].吉林大学学报,2013,43(2),469-483.
DAI Liming, LI Sanzhong. Numerical modeling of present-day structural stress of major active blocks in the Asian continent [J]. Journal of Jilin university, 2013, 43(2): 469-483.
- [8] BUCHER K, STOBER I. Interaction of mantle rocks with crustal fluids, sagvandites of the scandinavian caledonides[J]. Journal of Earth Science, 2019, 30(6): 1084-1094.
- [9] 冷玥,赵迪斐.页岩气储层测井评价技术研究与应用现状[J].非常规油气,2019,6(6):117-123.
LENG Yue, ZHAO Difei. The application status of shale gas reservoir logging evaluation[J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(6): 117-123.
- [10] 李彦华.基于多尺度相干裂缝预测技术在文古4断块区的应用[J].石化技术:2018,25(8):325-326.
LI Yanhua. Application of multi-scale coherent fracture prediction technology in Wengu 4 Fault Block[J]. Petrochemical Industry Technology, 2018, 25(8): 325-326.
- [11] 马珊珊.基于地震数据曲率几何属性的裂缝预测[D].北京:中国地质大学(北京),2018.

- MA Shanshan. Fracture prediction based on curvature geometry attribute of seismic data[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2018.
- [12] 于丹平. 井震结合潜山储层裂缝预测方法研究及应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- YU Danping. The research and application of buried hill's fracture prediction with combining logging and seismic data[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [13] 倪楷, 王明筏, 李响. 四川盆地东南缘页岩气富集模式——以丁山地区上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩为例[J]. 石油实验地质, 2021, 43(4): 580-588.
- NI Kai, WANG Mingfa, LI Xiang. Enrichment model of shale gas in southeastern Sichuan Basin: A case study of Upper Ordovician Wufeng and Lower Silurian Longmaxi formations in Dingshan area[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(4): 580-588.
- [14] 柳筠, 张梦吟. 页岩气田储层含气性测井评价——以四川盆地涪陵页岩气田J区块为例[J]. 石油实验地质, 2021, 43(1): 128-135.
- LIU Yun, ZHANG Mengyin. Gas-bearing property evaluation by petrophysical logging in shale gas reservoirs: A case study in J area of Fuling shale gas field, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(1): 128-135.
- [15] 许露露, 张焱林. 鄂西地区黄陵背斜周缘五峰组—龙马溪组页岩气储层及含气性特征[J]. 特种油气藏, 2019, 26(5): 26-32.
- XU Lulu, ZHANG Yanlin. Shale gas reservoir and gas-bearing properties of Wufeng-Longmaxi Formations in the periphery of Huangling anticline of western Hubei Province[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(5): 26-32.
- [16] 何希鹏. 四川盆地东部页岩气甜点评价体系与富集高产影响因素[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 59-71.
- HE Xipeng. Evaluation system of shale gas sweet spot and influencing factors of enrichment and high yield in eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 59-71.
- [17] 代磊, 邱庆伦. 高精度三维地震技术在中牟区块页岩气勘探中的应用[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(2): 44-53.
- DAI Lei, QIU Qinglun. Application of 3D high-precision seismic technology of shale gas exploration in Zhongmu block [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2020, 34(2): 44-53.
- [18] 张淑娟, 王延斌, 梁星如, 等. 蚂蚁追踪技术在潜山油藏裂缝预测中的应用[J]. 断块油气田, 2011, 18(1): 51-54.
- ZHANG Shujuan, WANG Yanbin, LIANG Xingru, et al. Application of ant tracking technology in fracture prediction of carbonate buried-hill reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(1): 51-54.
- [19] 程超, 周大勇, 翟卫红, 等. 蚂蚁追踪技术在任丘潜山油藏的应用[J]. 西南石油大学学报, 2010, 32(2): 48-52.
- CHENG Chao, ZHOU Dayong, ZHAI Weihong, et al. Application of ant tracking technology in Renqiu buried hill reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2010, 32(2): 48-52.
- [20] 方栋梁, 孟志勇. 页岩气富集高产主控因素分析——以四川盆地涪陵地区五峰组—龙马溪组一段页岩为例[J]. 石油实验地质, 2020, 42(1): 37-41.
- FANG Dongliang, MENG Zhiyong. Main controlling factors of shale gas enrichment and high yield: a case study of Wufeng-Longmaxi formations in Fuling area, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(1): 37-41.
- [21] 张继标, 戴俊生, 冯建伟, 等. 蚂蚁追踪技术在大程庄地区断裂自动解释中的应用[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(5), 53-57.
- ZHANG Jibiao, DAI Junsheng, FENG Jianwei, et al. Application of ant tracking technology in automatic fault interpretation in Dachengzhuang area[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(5): 53-57.
- [22] 郭彤楼, 蒋恕, 张培先, 等. 四川盆地外围常压页岩气勘探开发进展与攻关方向[J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 837-845.
- GUO Tonglou, JIANG Shu, ZHANG Peixian, et al. Progress and direction of exploration and development of normally-pressured shale gas from the periphery of Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 837-845.
- [23] 张亮, 施里宇, 梁卫卫. R/S分析方法在储层裂缝预测中的应用——以定边东仁沟长73储层为例[J]. 非常规油气, 2020, 7(4): 91-96.
- ZHANG Liang, SHI Liyu, LIANG Weiwei. Application of R/S analysis method in reservoir fracture prediction—A case study of Chang-73 reservoir in Dingbian Dongrengou[J]. Unconventional Oil & Gas, 2020, 7(4): 91-96.
- [24] 张占女, 陈建波, 吕坐彬, 等. 等效裂缝密度在锦州南变质岩潜山裂缝定量表征中的应用[J]. 重庆科技学院学报, 2014, 16(1): 13-16.
- ZHANG Zhannv, CHEN Jianbo, LYU Zuobin, et al. Application of equivalent fracture density in the process of quantitative characterization of fractures in Jinzhounan metamorphic buried-hill[J]. Journal of Chongqing Institute of Science and Technology, 2014, 16(1): 13-16.
- [25] 陆红梅, 张仲培, 王琳霖, 等. 鄂尔多斯盆地南部上古生界致密碎屑岩储层预测——以镇泾地区为例[J]. 石油实验地质, 2021, 43(3): 443-451.
- LU Hongmei, ZHANG Zhongpei, WANG Linlin, et al. Prediction of tight clastic reservoirs of Upper Paleozoic in southern Ordos Basin: a case study of Zhenjing district[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(3): 443-451.
- [26] 金智荣, 孙悦铭, 包敏新, 等. 基于真三轴压裂物理模拟系统的暂堵压裂裂缝扩展规律试验研究[J]. 非常规油气, 2021, 8(6): 98-105.
- JIN Zhirong, SUN Yueming, BAO Minxin, et al. Experimental study on crack propagation law of temporary plugging fracturing based on true triaxial fracturing physical simulation system[J]. Unconventional Oil & Gas, 2021, 8(6): 98-105.