

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.496>



川东北黄龙场—七里北地区飞仙关组碳酸盐岩储层裂缝发育规律

姚迎涛^{1,2}, 曾联波^{1,2*}, 张航³, 张洁伟³, 管聪^{1,2}, 梁栋^{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)地球科学学院, 北京 102249

3. 中国石油西南油气田公司川东北气矿, 四川达州 635000

摘要: 四川盆地东北部下三叠统飞仙关组碳酸盐岩储层非均质性强, 天然裂缝发育, 天然裂缝分布对油气运聚和开发具有重要作用。利用三维地震属性与成像测井、岩心相结合的分析方法, 对川东北黄龙场—七里北地区飞仙关组碳酸盐岩储层天然裂缝发育规律进行了预测。飞仙关组碳酸盐岩储层主要发育NEE-SWW向、NE-SW向、NW-SE向及NWW-SEE向四组裂缝。其中NEE-SWW向裂缝最为发育, 其次发育NE-SW向和NW-SE向裂缝, NWW-SEE向裂缝发育较差, 研究区以大于70°的高角度裂缝为主。裂缝的发育程度受沉积相和断层两个主要因素控制, 其中沉积相是裂缝发育的基础, 不同沉积相的裂缝发育程度有明显的差异, 其中台缘滩亚相和台内滩亚相的裂缝最发育, 其次为滩间海亚相和台内洼地亚相, 而缓斜坡亚相的裂缝发育程度相对较差。断层是影响裂缝发育程度及其展布规律的关键, 根据裂缝发育指数(FDI)方法分析, 该区断控裂缝发育带的宽度主要分布在250~1 000 m之间, 与断层规模密切相关, 随着断层规模的增加, 断控裂缝发育带的宽度变大。

关键词: 碳酸盐岩储层; 天然裂缝; 发育特征; 地震属性; 飞仙关组; 川东北; 石油地质学。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2023)07-2643-09

收稿日期: 2022-05-07

Fracture Development Laws of Feixianguan Formation Carbonate Reservoirs in Huanglongchang-Qilibei Area, Northeast Sichuan

Yao Yingtao^{1,2}, Zeng Lianbo^{1,2*}, Zhang Hang³, Zhang Jiewei³, Guan Cong^{1,2}, Liang Dong^{1,2}

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

2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3. Northeastern Sichuan Oil and Gas District, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Dazhou 635000, China

Abstract: The carbonate reservoirs of the Lower Triassic Feixianguan Formation in the Northeast Sichuan Basin are characterized with strong heterogeneity and development of natural fractures. The distribution of natural fractures plays an important role in hydrocarbon migration and development. In this paper, the development laws of natural fractures in carbonate reservoirs of Feixianguan Formation in Huanglongchang-Qilibei area in Northeast Sichuan area are predicted by combining 3D seismic attributes with imaging logging and core analysis methods. NEE-SWW trending, NE-SW trending, NW-SE trending and NWW-SEE

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(No. U21B2062)。

作者简介: 姚迎涛(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事储层裂缝形成、分布及预测研究。ORCID: 0000-0003-1231-6160. E-mail: 13016462489@163.com

***通讯作者:** 曾联波, ORCID: 0000-0002-6470-8206. E-mail: lbzeng@sina.com

引用格式: 姚迎涛, 曾联波, 张航, 张洁伟, 管聪, 梁栋, 2023. 川东北黄龙场—七里北地区飞仙关组碳酸盐岩储层裂缝发育规律. 地球科学, 48(7): 2643—2651.

Citation: Yao Yingtao, Zeng Lianbo, Zhang Hang, Zhang Jiewei, Guan Cong, Liang Dong, 2023. Fracture Development Laws of Feixianguan Formation Carbonate Reservoirs in Huanglongchang-Qilibei Area, Northeast Sichuan. *Earth Science*, 48(7): 2643—2651.

trending fractures are mainly developed in the carbonate reservoirs of Feixianguan Formation. NNE-SSW trending fractures are the most developed, followed by NE-SW trending and NW-SE trending fractures, NWW-SEE trending fractures are relatively poorly developed, and the fractures are dominated by high angle fractures greater than 70° . The fracture development degree of carbonate reservoir in Feixianguan Formation is mainly controlled by sedimentary facies and faults. Sedimentary facies is the basis of fracture development, and the fracture development degree of different sedimentary facies is obviously different. The fractures are mostly developed in marginal-platform shoal subfacies and intra-platform shoal subfacies, followed by interbank sea subfacies and intra-platform depression subfacies, and the fracture development degree of gentle slope subfacies is relatively poor. Fault is the key to influence fracture development degree and distribution laws. According to the fracture development index (FDI) method analysis, the width of the fault-controlled fracture zones mainly ranges between 250 m and 1 000 m in this area. With the increase of the fault scale, the width of fault-controlled fracture zones increases as well.

Key words: carbonate reservoir; natural fracture; development characteristic; seismic attribute; Feixianguan Formation; Northeast Sichuan; petroleum geology.

0 引言

碳酸盐岩分布十分广泛,是世界上重要的油气产层.碳酸盐岩储层裂缝普遍发育,裂缝对碳酸盐岩油藏开发具有重要的意义,裂缝不仅可以为碳酸盐岩油藏提供渗流通道,也可以提供储集空间.因此,碳酸盐岩储层裂缝研究对优化油田开发方案设计及提高油气产能等具有重要意义(冯艳伟等, 2021;李长海等, 2021;徐豪等, 2021).我国碳酸盐岩裂缝型油气藏分布广泛,在我国油气生产中占有重要地位.前人对碳酸盐岩裂缝的分类、成因、主控因素、识别与预测进行了大量的研究(Maerten *et al.*, 2006;刘振峰等, 2012;徐敬领等, 2012;赵军龙等, 2012;孙炜等, 2014;高帅等, 2015;Lyu *et al.*, 2016;赵向原等, 2018;赫俊民等, 2019;Dong *et al.*, 2020;Zeng *et al.*, 2022),但碳酸盐岩裂缝型油气藏具有非均质性强且裂缝分布复杂的特点,如何准确有效地对地下油气储层中的裂缝进行预测和描述是碳酸盐岩油气藏勘探开发中的难点(严锐涛等, 2016;肖阳等, 2018;梁志强, 2019;Liu *et al.*, 2020;王伟等, 2021).

近年来在四川盆地海相地层中的天然气勘探不断取得重大突破,相继发现了一系列大型气田,并取得了良好的开发效果,成为我国陆上天然气生产的重要区域(Ma *et al.*, 2008;Jiu *et al.*, 2013;赵向原等, 2017).其中四川盆地东北部黄龙场—七里北地区下三叠统飞仙关组是典型的鲕粒滩气藏,显示了良好的油气开发前景.受多期构造活动影响,飞仙关组鲕粒滩储层天然裂缝普遍发育(马永生和蔡勋育, 2006),表现出强烈的非均质性,储层裂缝不仅可以作为油气运聚的通道,也可与有效孔隙配置构建有效储集空间,

是影响碳酸盐岩储层天然气勘探开发的重要因素.前人利用测井资料及有限元数值模拟等方法对黄龙场地区长兴组和飞仙关组裂缝分布进行了相关研究(王时林等, 2009, 2011;邵晓州等, 2011),得到了该区碳酸盐岩储层裂缝分布的初步认识.研究区目前尚未开展基于地震资料的裂缝工作,而且传统的地震裂缝预测方法难以定量分析断层相关裂缝的宽度.此外,断层规模对裂缝宽度的影响目前也多基于野外露头分析,缺乏基于地震资料的断层对裂缝影响分析方法.本文在提取黄龙场—七里北地区飞仙关组碳酸盐岩储层高分辨率三代相干属性进行断层识别的基础上,应用地震 AFE (Automatic Fault Extract)属性对天然裂缝发育特征进行了预测,提出了一种利用地震资料定量表征断层相关裂缝宽度的方法,综合裂缝发育规律及岩心、成像测井资料,进一步分析了影响该区碳酸盐岩储层裂缝发育的主控因素,可为碳酸盐岩储层裂缝分布预测提供参考.

1 地质背景

黄龙场—七里北气田位于四川盆地东北部宣汉—达县断褶带上,位于七里峡构造北倾末端,西面为清溪构造,东南面是东升场构造,北面隔老君向斜与铁山坡构造相望(图 1).川东北在长兴组—飞仙关组沉积阶段为碳酸盐岩台地的一部分,受北部米仓山构造带和东北部大巴山构造带以及“峨眉裂陷”运动的联合影响(Wang *et al.*, 2002; Wei *et al.*, 2004),研究区 NE 向和 NW 向构造发育,发育多条贯穿研究区的大断层,将该地区分为多个次级构造单元.研究区海相地层自下而上发育多套含气层系,目前,上二叠统长兴组和下三叠统飞仙关组为

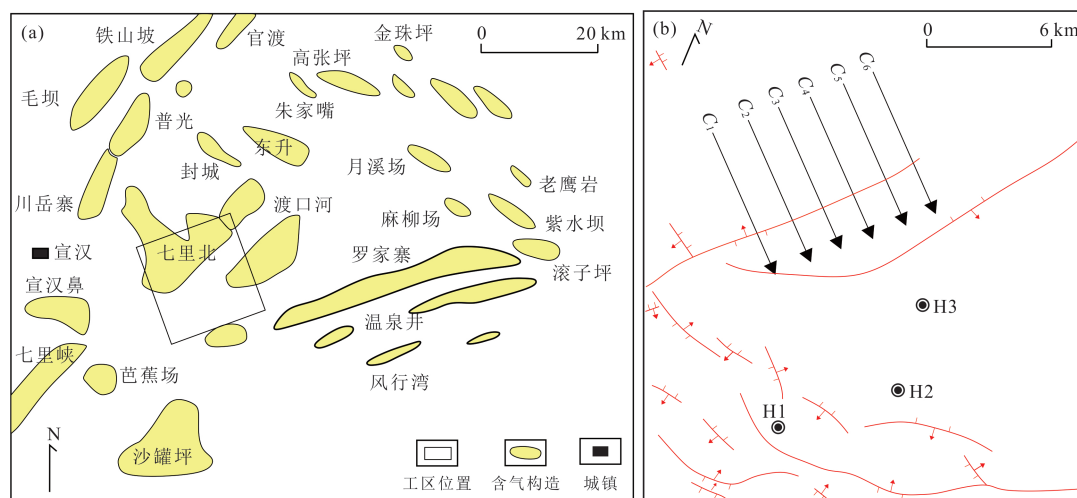


图1 研究区位置(a)及黄龙场—七里北地区断层分布(b)

Fig. 1 The location of study area (a) and fault distribution of Huanglongchang-Qilibei area (b)

主力产层.在飞一段至飞四段沉积时期,研究区总体表现为相对海平面下降,台地相整体向海盆方向迁移的趋势;飞一段主要发育斜坡相,随着相对海平面的下降,在飞二段和飞三段台地边缘相和开阔台地相广泛发育,飞四段发育局限台地相和蒸发台地相(He *et al.*, 2012).飞仙关组储层岩类型主要为鲕粒云岩、晶粒云岩及鲕粒灰岩,储集空间以溶蚀粒内孔、粒间孔、晶间孔和裂缝为主(Ma *et al.*, 2005; 王时林等, 2009).研究区天然裂缝类型主要为构造剪切裂缝,此外发育少量的构造张裂缝、层理缝和缝合线.剪切裂缝的缝面平直,擦痕发育,延伸距离远.张裂缝的缝面粗糙不平整,延伸距离较短.层理缝平行于层理面发育,顺层理面具有弯曲、断续、分叉等特点.缝合线缝面呈锯齿状,延伸方向多变.

2 方法

2.1 裂缝预测方法

传统的地震成像往往偏向于高能量事件,如来自地层边界或断层等不连续面的反射,它们通常在地震数据中占主导地位.除此之外,与小断层、裂缝、地层边缘、储层非均质性等更精细尺度特征相关的大量能量也会以“衍射”能量的形式记录下来.然而,这种精细尺度的地震事件往往被地震数据中占主导地位的高能能量事件所掩盖.相干属性作为地震属性的一种,主要是通过计算地震资料中邻近道的相似性对地层中的不连续信息进行识别和刻画,可以很好地描述地层和岩性的横向非均质性(Bahorich and Farmer, 1995; Marfurt *et al.*, 1998;

Gersztenkorn and Marfurt, 1999),使得研究断层和裂缝的展布规律成为可能(崔正伟等, 2021; 熊晓军等, 2021).当分析时窗内波形越一致,相干系数越大,裂缝带发育程度越低;反之,相干系数越小,裂缝带发育程度越高,相干属性对大尺度裂缝(断层)反映效果好.本文利用经过叠前时间偏移处理地震数据,选择合适的倾角约束、垂直孔径和空间孔径及处理算法等参数,降低随机噪声提取本征值相干属性,利用三维降噪过程改进有噪声数据的相干体结果,得到高分辨率相干体属性.

虽然相干属性对断层有很好的刻画,但是难以对裂缝进行精细预测,因此在相干体数据的基础上,进一步应用地震 AFE(Automatic Fault Extraction)属性对裂缝分布进行预测. AFE 属性是对相干体数据或者不连续体数据进行处理(Ghosh, 2019; 刘宝增等, 2020),通过线性滤波器消除因采集数据造成的条带噪声,在数据体时间切片上增强线性轮廓,增强裂缝识别能力(图2).然后通过方向滤波器,保留有利方向的相干线性特征,去除其他方向的相干特征,结合成像测井等信息可以判断应力、断层和裂缝发育的方向,采取定向滤波的方法增强有利方向的裂缝(图3).对产生的线性增强数据体进一步做去噪处理和平面增强,滤除断层时间切片上的非垂向延伸的线性条带,消除数据体中非断层原因和地层产状引起的不连续性,通过线性增强反映裂缝.在此基础上,利用滤波处理水平切片以增强平面特征得到断层增强数据体.以断层增强数据为输入,清除切向向量,编辑数字化向量,删除重叠和紧密平行的向量.将短的共线向量连接成更长的

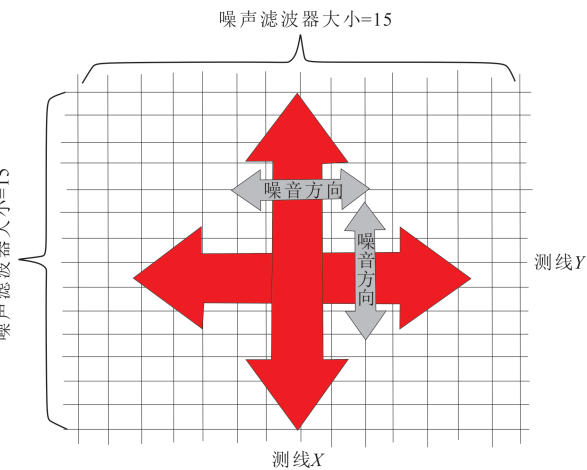


图2 线性噪音滤波示意图
Fig. 2 Linear noise filtering schematic diagram

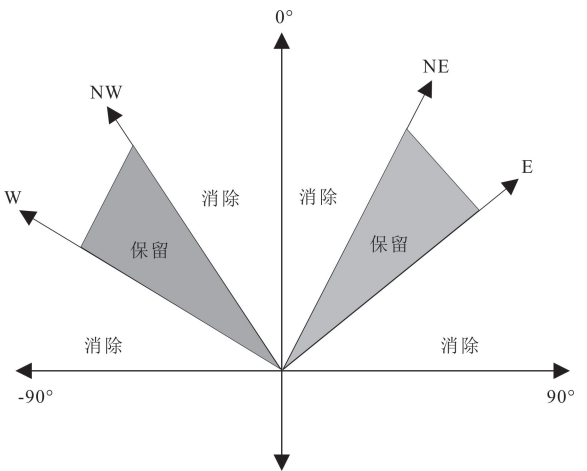


图3 定向滤波示意图
Fig. 3 Directional filtering schematic diagram

向量,设置相关参数并将其转化为种子向量.再使用断层增强数据和在断层增强步骤中生成的水平向量处理断层增强体的垂直剖面,生成剖面种子向量,清除比最小种子向量长度短的种子向量,并且将紧密平行的向量连接在一起.最后利用剖面种子向量指导水平向量,连接水平切片和剖面种子向量.AFE属性对小尺度裂缝反映效果好,相关参数设置如表1所示.本文在高分辨率相干体数据基础上,以AFE属性为基础,以成像测井解释和岩心观测裂缝结果进行约束,提取以井点为中心6.25 km²的正方形范围内的AFE属性向量,得到裂缝的走向与倾角分布,明确飞仙关组碳酸盐岩储层裂缝的空间展布规律.

2.2 断层相关裂缝发育带的刻画方法

在明确裂缝发育规律的基础上,统计随着与断层距离增大时岩心和成像测井裂缝发育密度的变

表1 地震资料预测裂缝的相关参数
Table 1 Relevant parameter settings for predicting fractures from seismic data

参数名称	参数设置
噪声滤波器方位	双向滤波
沿地震道滤波器大小	15道
走向滤波大小	25道
倾角滤波大小	31道
最小切片向量长度	17道
限制方位角范围	A: -75°, B: -15°, C: 15°, D: 75°
方位角容限	15°
倾角容限	15°
最小断层高度	16个样本
最小断层长度	14道

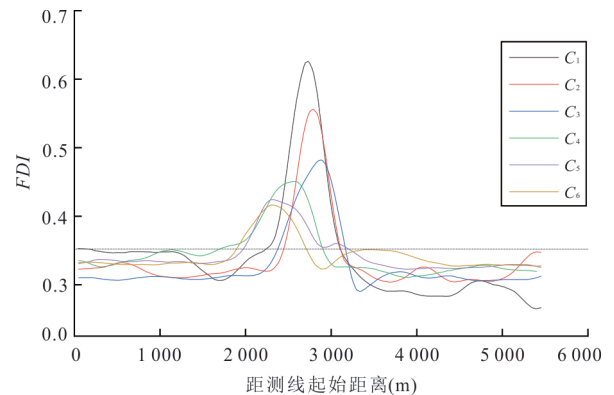


图4 沿测线裂缝发育带宽度分布
Fig. 4 The width distribution map of the fracture development zone along the measuring line
C₁~C₆为测线位置,具体位置见图1b

化,以校正 AFE 属性识别的断层相关裂缝带和周围地层区域边界,提出了利用裂缝发育指数定量分析断层相关裂缝带宽度的方法.在地震裂缝属性分析基础上,选择与断层走向垂直的一系列彼此平行、等距且垂直断层走向的测线,然后对每条测线按照间隔为 50 m 进行数据重采样,再利用测线测量穿越主断层横断面上的裂缝发育指数变化规律来确定断层相关裂缝发育带的宽度,并以此分析断层相关裂缝带的发育程度.本文主要利用裂缝发育指数(FDI)来反映裂缝发育带的分布:

$$FDI=1-\frac{\lambda_{\max}}{\sum_{j=1}^J\lambda_j}, \tag{1}$$

其中,λ_{max}是最大特征值(一般为第一本征值λ₁),代表了占优的能量,λ_j(j=1,2,⋯,J)为协方差矩阵C的第j个特征值.裂缝发育指数

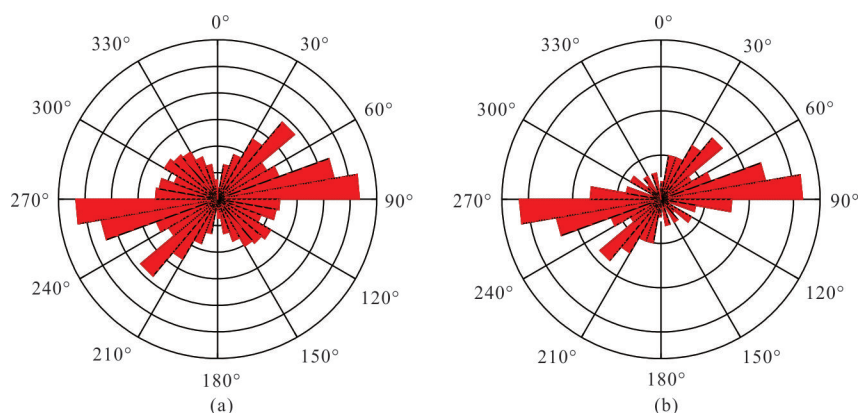


图5 黄龙场—七里北地区飞仙关组裂缝玫瑰花图

Fig. 5 Fracture rose diagrams of Feixianguan Formation in Huanglongchang-Qilibei area

a. 成像测井附近地震预测裂缝走向分布(N=4 088); b. 成像测井解释裂缝走向分布(N=99)

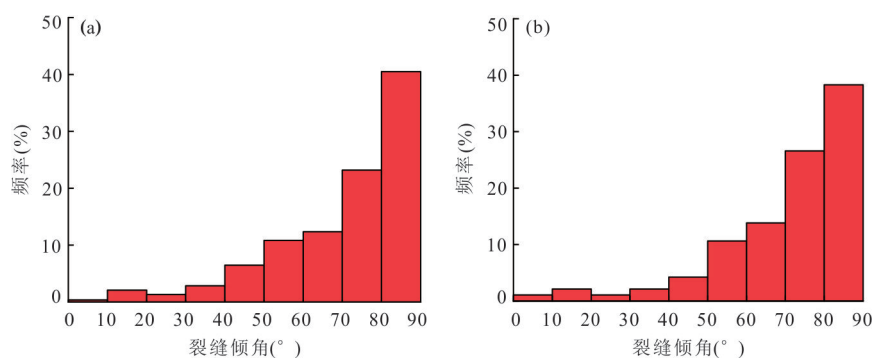


图6 黄龙场—七里北地区飞仙关组裂缝倾角分布

Fig. 6 Fracture dip angle distribution of Feixianguan Formation in Huanglongchang-Qilibei area

a. 成像测井附近地震预测裂缝倾角分布(N=4 088); b. 成像测井解释裂缝倾角分布(N=99)

(FDI)越大,表示裂缝带发育程度越高,从而可以用高于周围地层的裂缝发育指数值来表征裂缝发育带的宽度(图4)。

3 裂缝发育规律

利用上述方法对裂缝进行预测,黄龙场—七里北地区飞仙关组碳酸盐岩储层主要发育NEE-SWW向、NE-SW向、NW-SE向及NWW-SEE向四组裂缝。其中NEE-SWW向裂缝最为发育,其次为NE-SW向和NW-SE向裂缝,而NWW-SEE向裂缝发育程度相对较差(图5a)。根据预测结果的裂缝倾角统计,研究区飞仙关组碳酸盐岩储层裂缝倾角大于70°的占72.4%,裂缝倾角为40°~70°占23.3%,裂缝倾角小于40°占4.3%,反映该区飞仙关组碳酸盐岩储层裂缝以高角度为主的分布特征(图6a)。

为了验证地震裂缝预测的裂缝走向和倾角是否合理,利用研究区已有的H1井、H2井和H3井3

口成像测井附近的地震裂缝预测结果与成像测井裂缝解释结果进行对比。AFE属性分析表明3口井井周裂缝发育特征与研究区整体相似,NEE-SWW向裂缝最为发育,其次为NE-SW向和NW-SE向裂缝,而NWW-SEE向裂缝发育程度相对较差(图5a),以大于70°的高角度裂缝为主(图6a)。3口井地层微电阻率成像测井资料表明主要发育NEE-SWW向、NE-SW向、NW-SE向及NWW-SEE向四组裂缝,其中与主断层呈小角度相交的NE-SW向和NEE-SWW向裂缝最为发育,其次发育与次级断层呈小角度和近平行的NW-SE向及NWW-SEE向裂缝(图5b)。成像测井资料观察统计表明研究区飞仙关组碳酸盐岩储层裂缝以大于70°的高角度裂缝为主(图6b)。这与利用地震AFE属性得到的裂缝参数具有很好的一致性,说明AFE属性方法可以很好地表征裂缝发育参数(图5,图6)。在此基础上分析了黄龙场—七里北地区裂缝发育规律,裂缝预测分布表明在断层较多的南部裂缝发育程度高,而在断

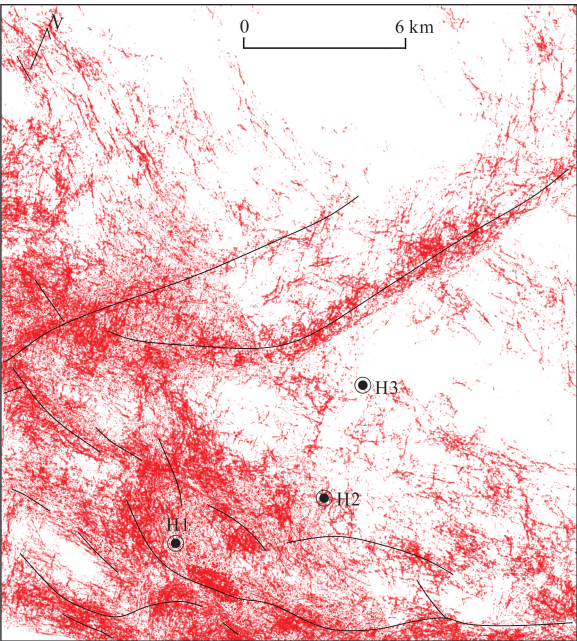


图7 黄龙场—七里北地区飞仙关组断层和裂缝分布预测
Fig. 7 Fracture distribution prediction of Feixianguan Formation in Huanglongchang-Qilibei area

层较少的北部裂缝发育程度较差(图7)。

4 裂缝发育的主控因素

4.1 沉积相对裂缝发育的影响

黄龙场—七里北地区飞仙关组碳酸盐岩储层主要发育台地边缘相、开阔台地相及斜坡相。在沉积相分析基础上,统计了不同沉积亚相的裂缝发育密度。台缘滩亚相和台内滩亚相的裂缝最发育,其次

是滩间海亚相和台内洼地亚相,而缓斜坡亚相裂缝发育程度最差(图8a)。这是由于台缘滩亚相和台内滩亚相白云化程度相对较高,导致岩石的白云石含量高,岩石整体脆性较强,更易产生裂缝;而滩间海亚相和台内洼地亚相仅局部发生白云化作用,白云化程度低,岩石的白云石含量较低,岩石脆性较弱,裂缝发育程度较低;缓斜坡亚相岩性主要以泥晶灰岩为主,基本未发生白云化作用,岩石的白云石含量低,岩石脆性弱,裂缝发育程度差(图8b)。

4.2 断层对裂缝发育的影响

黄龙场—七里北地区的断层主要发育在南部区域,北部断层发育较少。研究区主要发育两条NE-SW向和一条NEE-SSW向较大规模的逆断层,此外发育一系列规模较小的NW-SE方向逆断层和少量NE-SW方向的逆断层(图1b)。利用前面所述的断层相关裂缝刻画方法,根据裂缝发育指数(FDI)的分布能够定量地表征断层相关裂缝发育带宽度的分布规律。从垂直断层走向的FDI来看,断层周围地层的FDI最大值为0.35,因而可以把FDI大于0.35的区域作为断层相关的裂缝带发育的区域(图4)。根据与断层走向垂直的不同测线的FDI分布,研究区断层相关裂缝发育带的宽度主要分布在250~1 000 m之间。对研究区每条断层进行分析,结果表明断层规模越大,断层相关裂缝发育带的宽度就越大(图9)。对于不影响天然气保存条件的中小尺度断层,其断层相关裂缝发育带可以作为今后天然气勘探的目标区;但对于影响天然气保存条件的大尺度断层,井位部署需要避开断层相关裂缝发育带。

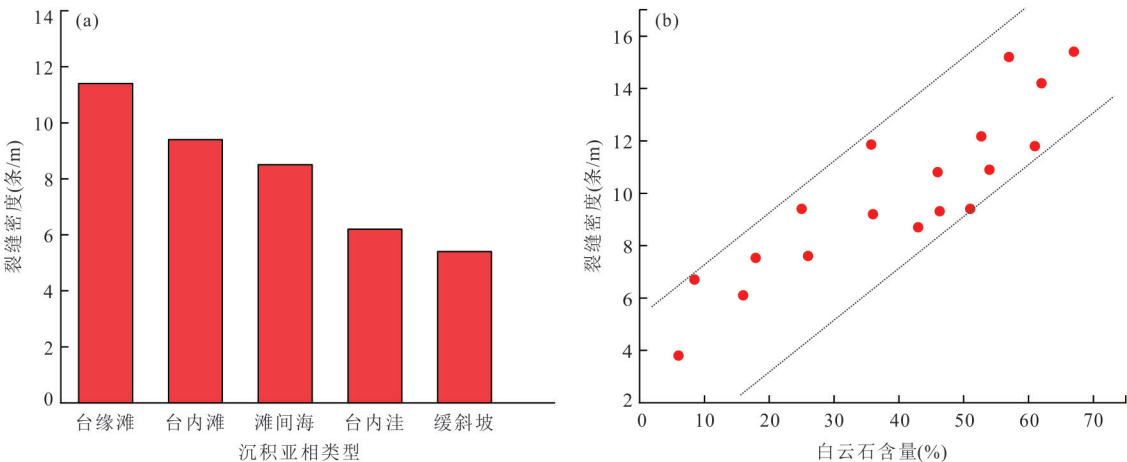


图8 黄龙场—七里北地区飞仙关组裂缝密度与沉积亚相(a)、白云石含量(b)的关系

Fig. 8 Relationship between fracture density and sedimentary subfacies (a) and dolomite contents (b) of Feixianguan Formation in Huanglongchang-Qilibei area

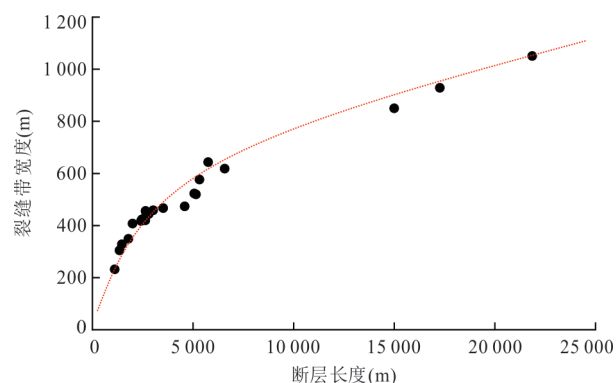


图9 裂缝带宽度与断层长度关系

Fig.9 Relationship between fracture zone width and fault length

5 结论

川东北黄龙场—七里北地区飞仙关组碳酸盐岩储层天然裂缝发育,利用岩心和成像测井约束下的三维地震AFE属性分析,能有效地识别碳酸盐岩储层裂缝的空间展布规律.飞仙关组碳酸盐岩储层主要发育NEE-SWW向、NE-SW向、NW-SE向及NNW-SEE向四组裂缝,其中NEE-SWW向裂缝最为发育,其次发育NE-SW向和NW-SE向裂缝,NNW-SEE向裂缝发育较差,且以倾角大于 70° 的高角度裂缝为主.飞仙关组碳酸盐岩储层裂缝发育程度主要受沉积相和断层两个主要因素控制,其中沉积相是裂缝发育的基础,台缘滩亚相和台内滩亚相的裂缝最发育,其次是滩间海亚相和台内洼地亚相,而缓斜坡亚相裂缝发育程度最差.断层是影响裂缝发育程度及其展布规律的关键,利用裂缝发育指数刻画断层相关裂缝带分布,表明断层相关裂缝发育带的宽度主要分布在250~1 000 m之间,并与断层规模呈良好的正相关关系,断层的规模越大,断控裂缝发育带的宽度也相应增加.对于不影响天然气保存条件的断层,断层相关裂缝发育带可以作为天然气勘探的目标区.

References

Bahorich, M., Farmer, S., 1995. 3-D Seismic Discontinuity for Faults and Stratigraphic Features: The Coherence Cube. *The Leading Edge*, 14(10): 1053—1058. <https://doi.org/10.1190/1.1437077>

Cui, Z.W., Cheng, B.J., Xu, T.J., et al., 2021. Reservoir Fracture Prediction Method and Application Based on Structure-Oriented Filtering and Coherent Attributes of

Gradient Structure Tensor. *Oil Geophysical Prospecting*, 56(3): 555—563 (in Chinese with English abstract).

Dong, S. Q., Zeng, L. B., Lyu, W. Y., et al., 2020. Fracture Identification by Semi-Supervised Learning Using Conventional Logs in Tight Sandstones of Ordos Basin, China. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 76: 103131. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.103131>

Feng, Y.W., Chen, Y., Zhao, Z.Y., et al., 2021. Migration of Natural Gas Controlled by Faults of Majiagou Formation in Central Ordos Basin: Evidence from Fluid Inclusions. *Earth Science*, 46(10): 3601—3614 (in Chinese with English abstract).

Gao, S., Zeng, L.B., Ma, S.Z., et al., 2015. Quantitative Prediction of Fractures with Different Directions in Tight Sandstone Reservoirs. *Natural Gas Geoscience*, 26(3): 427—434 (in Chinese with English abstract).

Gersztenkorn, A., Marfurt, K. J., 1999. Eigenstructure-Based Coherence Computations as an Aid to 3-D Structural and Stratigraphic Mapping. *Geophysics*, 64(5): 1468—1479. <https://doi.org/10.1190/1.1444651>

Ghosh, A., 2019. Understanding Basement Fracture Architecture in Padra Field, South Cambay Basin, India, through Full-Azimuth Imaging. *The Leading Edge*, 38(4): 262—267. <https://doi.org/10.1190/tle38040262.1>

Hao, J. M., Wang, X.Y., Sun, J.F., et al., 2019. Characteristics and Main Controlling Factors of Natural Fractures in the Lower-to-Middle Ordovician Carbonate Reservoirs in Tahe Area, Northern Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 40(5): 1022—1030 (in Chinese with English abstract).

He, Y. L., Fu, X. Y., Liu, B., et al., 2012. Control of Oolitic Beaches Sedimentation and Diagenesis on the Reservoirs in Feixianguan Formation, Northeastern Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 39(4): 466—475. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(12\)60063-9](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(12)60063-9)

Jiu, K., Ding, W. L., Huang, W. H., et al., 2013. Simulation of Paleotectonic Stress Fields within Paleogene Shale Reservoirs and Prediction of Favorable Zones for Fracture Development within the Zhanhua Depression, Bohai Bay Basin, East China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 110: 119—131. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.09.002>

Li, C.H., Zhao, L., Liu, B., et al., 2021. Research Status and Development Trend of Fractures in Carbonate Reservoir. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(4): 31—48 (in Chinese with English abstract).

Liang, Z. Q., 2019. Poststack Seismic Prediction Techniques for Fractures of Different Scales. *Geophysical*

- Prospecting for Petroleum*, 58(5):766–772 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B.Z., Qi, L.X., Li, Z.J., et al., 2020. Spatial Characterization and Quantitative Description Technology for Ultra-Deep Fault-Karst Reservoirs in the Shunbei Area. *Acta Petrolei Sinica*, 41(4): 412–420 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G. P., Zeng, L. B., Han, C. Y., et al., 2020. Natural Fractures in Carbonate Basement Reservoirs of the Jizhong Sub-Basin, Bohai Bay Basin, China: Key Aspects Favoring Oil Production. *Energies*, 13(18): 1–23. <https://doi.org/10.3390/en13184635>
- Liu, Z.F., Qu, S.L., Sun, J.G., et al., 2012. Progress of Seismic Fracture Characterization Technology. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 51(2):191–198 (in Chinese with English abstract).
- Lyu, W. Y., Zeng, L. B., Liu, Z. Q., et al., 2016. Fracture Responses of Conventional Logs in Tight - Oil Sandstones: A Case Study of the Upper Triassic Yanchang Formation in Southwest Ordos Basin, China. *AAPG Bulletin*, 100(9): 1399–1417. <https://doi.org/10.1306/04041615129>
- Ma, Y.S., Cai, X.Y., 2006. Exploration Achievements and Prospects of the Permian Triassic Natural Gas in Northeastern Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 27(6):741–750 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Y. S., Mu, C. L., Guo, T. L., et al., 2005. Sequence Stratigraphy and Reservoir Distribution of Feixianguan Formation in Northeastern Sichuan. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 25(4): 73–79. <https://doi.org/10.2991/icsee-15.2016.213>
- Ma, Y. S., Zhang, S. C., Guo, T. L., et al., 2008. Petroleum Geology of the Puguang Sour Gas Field in the Sichuan Basin, SW China. *Marine and Petroleum Geology*, 25(4–5): 357–370. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.01.010>
- Maerten, L., Gillespie, P., Daniel, J. M., 2006. Three - Dimensional Geomechanical Modeling for Constraint of Subseismic Fault Simulation. *AAPG Bulletin*, 90(9): 1337–1358. <https://doi.org/10.1306/03130605148>
- Marfurt, K. J., Kirlin, R. L., Farmer, S. L., et al., 1998. 3-D Seismic Attributes Using a Semblance-Based Coherency Algorithm. *Geophysics*, 63(4): 1150–1165. <https://doi.org/10.1190/1.1444415>
- Shao, X.Z., Qin, Q.R., Fan, X.L., et al., 2011. Fracture Prediction of the Bottom of T_1f^4 in Huanglongchang Structure, Northeastern Sichuan Basin. *Lithologic Reservoirs*, 23(5):96–100 (in Chinese with English abstract).
- Sun, W., Li, Y.F., Fu, J.W., et al., 2014. Review of Fracture Identification with Well Logs and Seismic Data. *Progress in Geophysics*, 29(3): 1231–1242 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S.L., Qin, Q.R., Dong, H.Y., et al., 2011. Fracture Prediction of Changxing Formation in Huanglongchang Structure. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 33(4):39–43 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S.L., Qin, Q.R., Su, P.D., et al., 2009. Analysis of Fracture Response Characteristics of Feixianguan Formation in Well Huanglong 8. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 6(2): 180–182 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W., Fu, H., Xing, L.X., et al., 2021. Crack Propagation Behavior of Carbonatite Geothermal Reservoir Rock Mass Based on Extended Finite Element Method. *Earth Science*, 46(10):3509–3519 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. Z., Zhang, F., Ma, Q., et al., 2002. The Characteristics of Reef and Bank and the Fluctuation of Sea-Level in Feixianguan Period of Late Permian-Early Triassic, East Sichuan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(2): 249–254. <https://doi.org/10.2523/iptc-16892-ms>
- Wei, G.Q., Chen, G.S., Yang, W., et al., 2004. Sedimentary System of Platform Trough of Feixianguan Formation of Lower Triassic in Northern Sichuan Basin and Its Evolution. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(2): 254–260. <https://doi.org/10.1306/10171312220>
- Xiao, Y., Liu, G.P., Han, C.Y., et al., 2018. Development Characteristics and Main Controlling Factors of Natural Fractures in Deep Carbonate Reservoirs in the Jizhong Depression. *Natural Gas Industry*, 38(11): 33–42 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, X.J., Zhang, X., Tong, H., et al., 2021. Prediction of Fracture Development Zones Based on Improved Coherence Analysis. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 43(3):269–274 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H., Guo, X.W., Cao, Z.C., et al., 2021. Application of Minimum Homogenization Temperatures of Aqueous Inclusions in Calcite Veins to Determine Time of Hydrocarbon Accumulation in Ordovician of Tahe Oilfield: Evidence from In-Situ Calcite U-Pb Dating by Laser Ablation. *Earth Science*, 46(10):3535–3548 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J.L., Wang, Y.J., Cao, G.W., et al., 2012. Well-

- Logging Evaluation Methods on Carbonate Reservoirs. *Geoscience*, 26(6):1265—1274 (in Chinese with English abstract).
- Yan, R. T., Zeng, L. B., Zhao, X. Y., et al., 2016. Fracture Development Characteristics and Its Formation Mechanism in Lower Member 1 Shahejie Biolithite Reservoir, Z Oilfield, Bohai Bay. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 51(2): 484—493 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. L., Gong, Z. W., Li, G., et al., 2012. A Review and Perspective of Identifying and Evaluating the Logging Technology of Fractured Carbonate Reservoir. *Progress in Geophysics*, 27(2): 537—547 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. Y., Hu, X. Y., Xiao, K. H., et al., 2018. Characteristics and Major Control Factors of Natural Fractures in Carbonate Reservoirs of Leikoupo Formation in Pengzhou Area, Western Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 39(1): 30—39 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. Y., Hu, X. Y., Zeng, L. B., et al., 2017. Evaluation on the Effectiveness of Natural Fractures in Reef-Flat Facies Reservoirs of Changxing Fm in Yuanba Area, Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 37(2): 52—61 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, L. B., Gong, L., Guan, C., et al., 2022. Natural Fractures and Their Contribution to Tight Gas Conglomerate Reservoirs: A Case Study in the Northwestern Sichuan Basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 210: 110028. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.110028>
- ### 附中文参考文献
- 崔正伟, 程冰洁, 徐天吉, 等, 2021. 基于构造导向滤波与梯度结构张量相干属性的储层裂缝预测方法及应用. *石油地球物理勘探*, 56(3): 555—563.
- 冯艳伟, 陈勇, 赵振宇, 等, 2021. 鄂尔多斯盆地中部地区马家沟组断裂控制天然气运移方向的流体包裹体证据. *地球科学*, 46(10):3601—3614.
- 高帅, 曾联波, 马世忠, 等, 2015. 致密砂岩储层不同方向构造裂缝定量预测. *天然气地球科学*, 26(3): 427—434.
- 赫俊民, 王小垚, 孙建芳, 等, 2019. 塔里木盆地塔河地区中—下奥陶统碳酸盐岩储层天然裂缝发育特征及主控因素. *石油与天然气地质*, 40(5):1022—1030.
- 李长海, 赵伦, 刘波, 等, 2021. 碳酸盐岩裂缝研究进展及发展趋势. *地质科技通报*, 40(4): 31—48.
- 梁志强, 2019. 不同尺度裂缝的叠后地震预测技术研究. *石油物探*, 58(5):766—772.
- 刘宝增, 漆立新, 李宗杰, 等, 2020. 顺北地区超深层断溶体储层空间雕刻及量化描述技术. *石油学报*, 41(4): 412—420.
- 刘振峰, 曲寿利, 孙建国, 等, 2012. 地震裂缝预测技术研究进展. *石油物探*, 51(2):191—198.
- 马永生, 蔡勋育, 2006. 四川盆地川东北二叠系—三叠系天然气勘探成果与前景展望. *石油与天然气地质*, 27(6): 741—750.
- 邵晓州, 秦启荣, 范晓丽, 等, 2011. 川东北黄龙场构造飞仙关组四段底部裂缝预测研究. *岩性油气藏*, 23(5): 96—100.
- 孙伟, 李玉凤, 付建伟, 等, 2014. 测井及地震裂缝识别研究进展. *地球物理学进展*, 29(3): 1231—1242.
- 王时林, 秦启荣, 董海英, 等, 2011. 黄龙场构造长兴组裂缝预测. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 33(4):39—43.
- 王时林, 秦启荣, 苏培东, 等, 2009. 黄龙8井飞仙关组裂缝响应特征分析. *长江大学学报(自然科学版)*, 6(2): 180—182.
- 王伟, 付豪, 邢林啸, 等, 2021. 基于扩展有限元法的碳酸盐岩地热储层岩体裂缝扩展行为. *地球科学*, 46(10): 3509—3519.
- 肖阳, 刘国平, 韩春元, 等, 2018. 冀中坳陷深层碳酸盐岩储层天然裂缝发育特征与主控因素. *天然气工业*, 38(11): 33—42.
- 熊晓军, 张鑫, 童浩, 等, 2021. 基于改进的相干体分析技术的裂缝发育带预测研究. *物探化探计算技术*, 43(3): 269—274.
- 徐豪, 郭小文, 曹自成, 等, 2021. 运用方解石中流体包裹体最小均一温度确定塔河油田奥陶系油气成藏时间: 来自激光原位方解石 U-Pb 年龄的证据. *地球科学*, 46(10):3535—3548.
- 徐敬领, 王亚静, 曹光伟, 等, 2012. 碳酸盐岩储层测井评价方法. *现代地质*, 26(6):1265—1274.
- 严锐涛, 曾联波, 赵向原, 等, 2016. 渤海湾地区 Z 油田沙一下生物灰岩油藏裂缝特征及其形成机理. *地质科学*, 51(2): 484—493.
- 赵军龙, 巩泽文, 李甘, 等, 2012. 碳酸盐岩裂缝性储层测井识别及评价技术综述与展望. *地球物理学进展*, 27(2): 537—547.
- 赵向原, 胡向阳, 肖开华, 等, 2018. 川西彭州地区雷口坡组碳酸盐岩储层裂缝特征及主控因素. *石油与天然气地质*, 39(1): 30—39.
- 赵向原, 胡向阳, 曾联波, 等, 2017. 四川盆地元坝地区长兴组礁滩相储层天然裂缝有效性评价. *天然气工业*, 37(2): 52—61.