

文章编号：1000-0747(2025)06-0000-15 DOI: 10.11698/PED.20250140

致密砂岩储层断层及其相关裂缝带智能识别与分布规律 ——以川东北五宝场地区三叠系须家河组五段为例

李浩^{1,2}, 张航³, 曾联波^{1,2}, 曾令平³, 王珍^{1,2}, 章海燕³, 杨子艺^{1,2}, 刘世强^{1,2}

(1. 油气资源与工程全国重点实验室(中国石油大学(北京)), 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)

基金项目：国家自然科学基金企业创新发展联合基金重点项目(U21B2062)

摘要：为明确川东北五宝场地区三叠系须家河组五段致密砂岩断层及其相关裂缝带的分布规律，通过迁移训练的卷积神经网络模型和基于极端梯度提升树的地震属性智能融合方法，分别对断层与裂缝带进行识别，并精细刻画了其空间分布。研究表明，五宝场地区的断层可以划分为4级，断层上盘平均裂缝带宽度大于下盘，断层相关裂缝带宽度与断距具有良好的正相关关系。研究区可划分为南部、中部、北部3个具有不同变形特征的区域，发育对冲构造、对冲-背冲构造、叠瓦状构造、复向斜叠瓦-背冲构造与复背斜叠瓦-背冲构造5种断层构造样式，以及对冲构造型、对冲-背冲构造型、复向斜叠瓦-背冲构造型与复背斜叠瓦-背冲构造型4种裂缝带发育模式。根据断层对天然气富集的控制作用，认为断层双源供烃区主要分布于北部与中部地区，西南部与东南部为断层泄气区。结合有利储层发育区和裂缝带的分布，划分出I类和II类天然气有利富集区。I类区主要分布在北部和南部至中部的过渡区，II类区主要分布在中部地区。I类区具备双源供烃条件，且裂缝带发育规模更大，有利程度高于II类区；I类区内部断控褶皱裂缝带聚气有效性较高，而II类区内部断控裂缝带聚气有效性更高。最终提出了五宝场地区“双源断层控制富集、有效裂缝带控制高产、高基质孔隙确保稳产”的高产气井模式，并明确了不同有利区的下一步钻探方向。

关键词：三叠系须家河组；致密砂岩；裂缝带；人工智能；分布规律；天然气有利富集区；川东北；四川盆地

中图分类号：TE122.1 文献标识码：A

Intelligent identification and distribution patterns of faults and associated fracture zones in tight sandstone reservoirs: A case study of Member 5 of Xujiahe Formation in Wubaochang area, northeastern Sichuan Basin, SW China

LI Hao^{1,2}, ZHANG Hang³, ZENG Lianbo^{1,2}, ZENG Lingping³, WANG Zhen^{1,2},
ZHANG Haiyan³, YANG Ziyi^{1,2}, LIU Shiqiang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Northeast Sichuan Gas District, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Dazhou 635000, China)

Abstract: The faults and associated fracture zones in the tight sandstone reservoirs of the fifth member of the Triassic Xujiahe Formation (Xu-5 Member) in the Wubaochang area, northeastern Sichuan Basin, play a critical role in controlling gas well productivity. To delineate the distribution patterns of faults and associated fracture zones in this area, a transfer-trained convolutional neural network (CNN) model and an XGBoost-based intelligent seismic attribute fusion method were employed to identify faults and fracture zones, respectively, enabling precise characterization of their spatial distribution. The faults in the Wubaochang area are classified into first- to fourth-order structures, with the average fracture zone width on the hanging wall exceeding that of the footwall, demonstrating a strong positive correlation between fracture zone width and fault displacement. The study area is subdivided into three distinct deformation regions (southern, central, and northern regions) featuring five fault structural styles (imbricate thrust, imbricate-backthrust, duplex, composite syncline imbricate-backthrust, and composite anticline imbricate-backthrust) and four corresponding fracture zone development patterns (imbricate thrust, imbricate-backthrust, composite syncline imbricate-backthrust, and composite anticline imbricate-backthrust). Based on the controlling effects of faults on gas enrichment, the dual-source hydrocarbon-generating zones are interpreted to be predominantly distributed in the northern and central regions, while the southwestern and southeastern sectors are identified as fault-induced gas-escape zones. By integrating the distribution of favorable reservoir development areas and fracture zones, two classes of gas enrichment zones (Class I and II) are delineated. Class I zones are primarily distributed in the northern region and the transitional zone from the southern to central regions, whereas Class II zones are concentrated in the central region. Class I zones

exhibit dual-source hydrocarbon-generation conditions, larger-scale fracture zone development, and higher favorability compared to Class II zones. Analysis of local stress fields and drilling fluid loss data indicates that within Class I zones, fault-controlled fold-related fracture zones demonstrate higher effectiveness, whereas fault-controlled fracture zones dominate in Class II zones. A high-productivity gas well model for the Wubaochang area is proposed, emphasizing “dual-source faults controlling enrichment, effective fracture zones controlling high production, and high matrix porosity ensuring sustained production”. Targeted drilling directions for different favorable zones are further optimized based on this model.

Key words: Triassic Xujiahe Formation; tight sandstone; fracture zone; artificial intelligence; distribution pattern; gas enrichment zone; northeastern Sichuan Basin; Sichuan Basin

引用: 李浩, 张航, 曾联波, 等. 致密砂岩储层断层及其相关裂缝带智能识别与分布规律: 以川东北五宝场地区三叠系须家河组五段为例[J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(6): 1-15.

LI Hao, ZHANG Hang, ZENG Lianbo, et al. Intelligent identification and distribution patterns of faults and associated fracture zones in tight sandstone reservoirs: A case study of Member 5 of Xujiahe Formation in Wubaochang area, northeastern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(6): 1-15.

0 引言

在致密砂岩天然气勘探开发过程中, 断层解释及其派生裂缝的分布规律预测非常关键。一定规模的断层可以有效沟通烃源岩与储层, 其派生的裂缝可以改善致密砂岩储层的物性^[1-4]。同时, 相较于对裂缝进行逐个详细统计分析, 研究裂缝密集发育带与断层的关系对于气藏建产更具实际意义^[4-7]。

四川盆地上三叠统须家河组的致密砂岩气藏勘探已经取得了众多成果, 目前已经发现的大中型气藏主要分布在川西、川中与川北地区, 如新场、八角场、安岳、马路背气田等^[7-10]。近年来, 在川东北五宝场地区以须家河组致密气藏为目标部署的气井已经获得工业气流, 但由于对断层及其相关裂缝带的分布规律和控产机理认识不清, 导致各井产量差异较大。同时五宝场地区欠缺有针对性的断层与裂缝带识别方法, 制约了该地区有利区带的优选。因此, 对五宝场地区须家河组断层及其相关裂缝带进行精细识别, 弄清其发育规律及对天然气富集的控制作用, 对该地区致密砂岩气勘探开发具有重要意义。

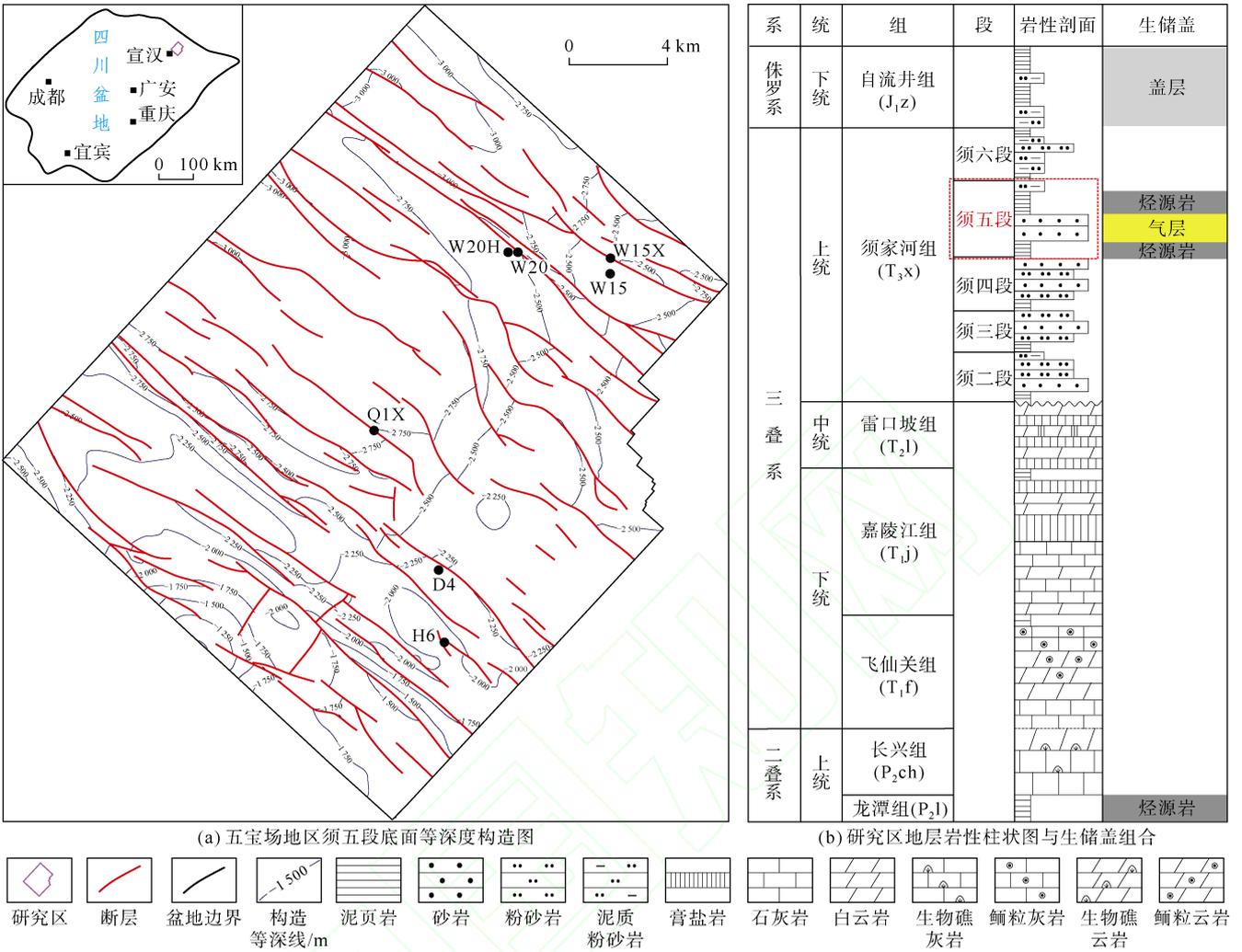
传统的断层敏感类地震属性(相干体、方差体、结构张量等)根据地震反射轴的不连续特征来进行断层的自动识别, 这使得它们很难将其他因素(如噪声、地质体边界等)造成的不连续特征与断层区分开^[11-13]。对于五宝场地区具有复杂变形特征的逆断层而言, 传统地震属性难以对断点进行高效、正确的组合来刻画断层的样式, 从而影响对构造特征的认识。使用人工智能模型来识别断层的优势在于, 其通过前期大量人工解释的标签来学习断层的特征, 从而可以更准确、高效地刻画断层的空间分布^[14-17]。前人在对致密储层中断层相关裂缝带进行识别时, 对于地震属性体多采

用人为给予的权重来进行融合^[18-21], 且这些地震属性未能考虑裂缝带内部的不同结构。在地震属性智能融合算法方面, 与BP神经网络、支持向量机和多核Fisher判别分析等方法相比, 集成学习中的推进算法可以通过学习过程中的误差传递来自动调整样本权重, 从而规避单个模型分类能力的局限所导致的识别效果下降, 具有更强的泛化能力和稳定性^[22-24]。

本文以川东北五宝场地区须家河组五段(简称须五段)致密砂岩为研究对象, 采用基于卷积神经网络和集成学习的人工智能方法, 对多级次断层及其相关裂缝带进行识别, 刻画其发育特征与分布; 结合断层、裂缝带与储层的空间分布规律, 识别天然气富集区, 并阐明断层及其相关裂缝带对气井产能的控制作用。

1 地质背景

五宝场区块地处四川盆地东北部, 位于宣汉县以北, 开州区以西, 面积为708 km²。构造位置处于川东隔档式褶皱带北部, 紧邻大巴山弧形构造带。区块东南方向雪峰山自印支中期开始隆升, 东北方向大巴山自燕山早期开始进入碰撞造山阶段^[25-26], 在研究区内部先后形成了北西向与北东向挤压应力。受此影响, 自燕山期至今, 研究区内部发育了走向相互垂直的北东向与北西向断褶体系(见图1a)。研究区上三叠统须家河组厚300~650 m, 为一套深灰—浅灰色砂岩与黑色—深灰色泥页岩互层的陆相沉积序列(见图1b)。须家河组自下而上可以划分为须一段—须六段, 研究区须一段普遍缺失, 与下伏中三叠统雷口坡组碳酸盐岩夹膏盐岩地层不整合接触。研究区靠近物源区, 须家河组内部砂体非常发育, 砂地比为50%~80%, 沉积相主要为三角洲相—湖泊相^[27]。



(a) 五宝场地区须五段底面等深度构造图

(b) 研究区地层岩性柱状图与生储盖组合

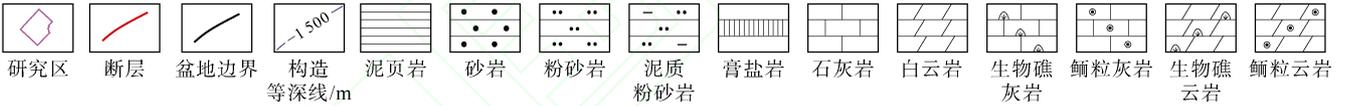


图 1 四川盆地五宝场地区须五段底面构造图及地层柱状图

五宝场地区须家河组的主要含气层位为须五段，其岩性主要为中—细粒岩屑石英砂岩和长石岩屑砂岩，发育大规模压实、胶结与裂缝化作用。须五段储层的孔隙度为 0.34%~7.62%，平均为 3.55%，渗透率为 $(0.0001 \sim 0.0274) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均为 $0.0015 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，孔隙连通性差，为典型的特低孔超低渗储层。五宝场地区存在须五段陆相页岩与上二叠统龙潭组海相页岩两套烃源岩，可以直接或通过断层输导向须五段储层供烃，供烃强度较大^[27-28]。断层及其相关裂缝带对于研究区天然气的成藏具有两方面的作用：一是裂缝改善储层连通性，形成有效的裂缝-孔隙型储层；二是断层沟通浅部、深部两套烃源岩与储层，成为天然气的有利运移通道^[27]。因此在研究区开展断层及其相关裂缝带分布规律研究具有重要意义。

2 断层智能识别与分布规律

2.1 断层智能识别方法

在众多人工智能断层识别方法中，基于卷积神经

网络 (CNN) 的断层智能识别方法自主学习能力强，模型参数调整最灵活，因此应用最为广泛^[14-17]。本次研究采用了一种 U-Net 结构的 CNN 断层识别模型，该结构最早由 Wu 等在 2019 年解决断层识别有关问题时提出^[15]。该模型由编码器与解码器两个部分组成 (见图 2a)，每个编码器都包含两个卷积层，其作用是提取地震数据中的特征图，卷积层之后紧邻的 ReLU 激活函数可以根据模型学习到的特征来调整其参数。最大池化层则通过对特征图进行采样操作，提取其中的高级像素特征 (如断层整体的构造样式)。解码过程是编码过程的反运算，通过对特征图进行逐层恢复，从而获取特征图的低级像素特征 (如断层局部的细节)，并最终输出与输入地震数据大小相同的断层概率体，即断层识别的结果^[16]。相比于传统三维 CNN 网络，U-Net 网络结构的优势在于连接编码部分和解码部分的全连接层，可将来自解码器的深层高级特征与来自编码器的浅层低级特征相结合，从而建立更加完整的断层空间结构 (见图 2a)。本次研究采用的开源 CNN 断层识

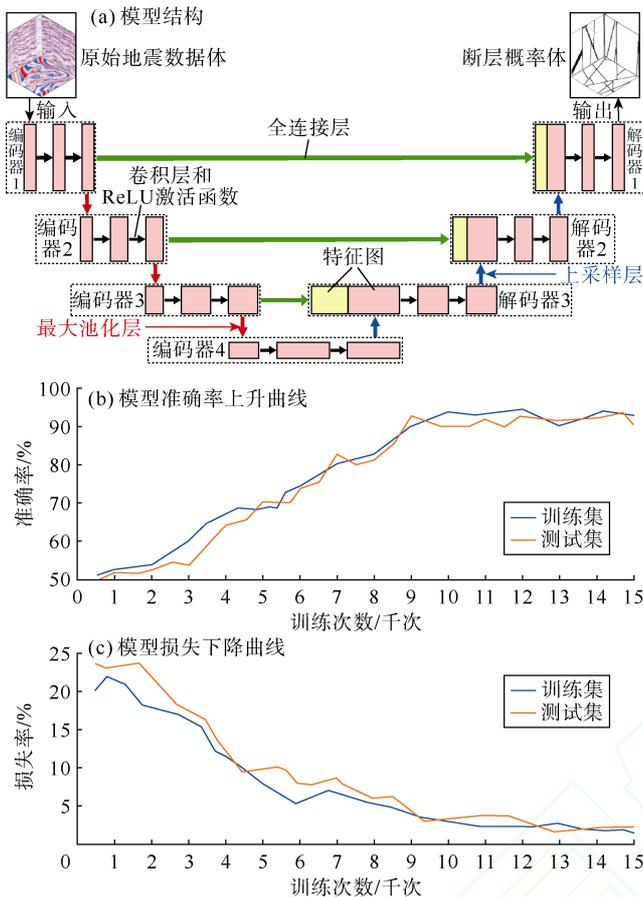


图2 U-Net 结构 CNN 断层识别模型与迁移训练过程

别模型由 Li 等在 2024 年提出^[29], 该模型前期经历了 10^5 个不同类型、不同尺度断层标签的训练, 已具备了一定的泛化能力^[30]。

五宝场地区构造活动强烈, 龙潭组至须家河组断层变形强度大, 构造样式复杂。上述 CNN 模型在进行前期训练时并没有对此类断层特征进行针对性的学习, 直接将其用于识别会产生许多“假断层”和错误的断层组合, 因此有必要建立适应研究区的断层标签库来对初始 CNN 模型进行迁移学习训练, 从而调整模型参数使其更加适用于五宝场地区的断层识别。通过引进研究区 15 条典型地震剖面的标准断层解释结果, 建立了由 760 条断层线及其周围地震反射特征组成的标签库。从库中随机挑选 200 个标签作为迁移训练的测试集, 剩下的样本作为训练集, 对初始 CNN 模型进行训练。训练结果显示, 当训练次数达到 9 700 次时, 模型准确率达到 90% 以上(见图 2b), 模型损失下降到 5% 以下(见图 2c), 并保持相对稳定至训练结束。

采用迁移训练后的 CNN 模型对研究区的三维地震数据进行断层识别, 输出的断层概率体值域为 $[0, 1]$, 其值越高代表存在断层的可能性就越高。根据构造解

析和过断层钻井标定结果, 将能够代表有效断层的概率值设定为 $0.2 \sim 1.0$ 。为了更严谨地对比断层识别效果, 同样将地震相干属性 $0.2 \sim 1.0$ 设定为有效断层(见图 3)。从须五段底面切片来看, CNN 模型得到断层轨迹相比于相干属性更加清晰, 同一条断层内部的连续性更好且细节更加丰富(见图 3)。从同一剖面的断层识别效果来看, CNN 模型相较于传统地震属性主要具有以下 3 方面的优势: ①对于一些地震响应较弱或断距较大的断层能够进行有效识别, 而相干属性则无法识别出这些断层, 如图 4 中的①、②和③处; ②能够进行断层线(断点)之间的正确组合, 而相干属性则将具有不同倾向和断距的断层扭曲的组合在一起, 得到错误的构造样式, 如图 4 中的④和⑤处; ③CNN 模型能够建立正确的断层性质, 如图 4 中⑥处所示, CNN 模型过龙潭组的通源断层正确地识别为倾向为北东向的逆断层, 较为符合两盘地层的变形特征。而相干属性则将该断层错误地识别为倾向南西向的正断层。

相比于前人方法, 本次研究在采用成熟的 CNN 断层识别模型的基础上, 进行少量的迁移训练调整, 既高效又有针对性的完成了研究区的断层识别任务, 同时断层识别结果相较于传统属性有更高的准确性, 因此认为该断层概率体可以作为断层发育规律研究的依据。

2.2 不同级次断层发育特征

断层断穿地层的数量(垂向延伸长度)是断层活动强度最直接的证据, 也是划分断层级次的主要依据。本研究以是否断穿须五段、三叠系雷口坡组—嘉陵江组膏盐岩段及二叠系龙潭组等层位为依据, 将研究区的断层划分为一至四级(见表 1)。其中一级断层(4 条)断穿龙潭组至须五段底面; 二级断层(39 条)断穿含膏盐岩段底面至须五段底面, 未断至龙潭组; 三级(58 条)断层自须家河组底面断至须五段底面, 未断穿含膏盐岩段; 四级断层(62 条)断至须五段, 未断穿须家河组底面(见表 1、图 5)。

一级断层的走向主要为北东—南西向与北西—南东向, 每条断层只有部分分段断至须五段底面。二至四级断层以北西—南东向为主(走向平均约为 310°), 同时也发育少量较小尺度的北东—南西向断层(见图 6)。统计发现随着断层级次的降低, 其断距也相应减小(见表 1), 说明了该分级方案具有较好的合理性。结合剖面构造特征, 可将五宝场地区划分为南部、中部和北部 3 个具有明显构造变形差异的区域(见图 5、图 6)。南部地区处于构造高部位, 变形最为强烈, 二级、三级断层密集出现, 发育被断层复杂化的高陡斜

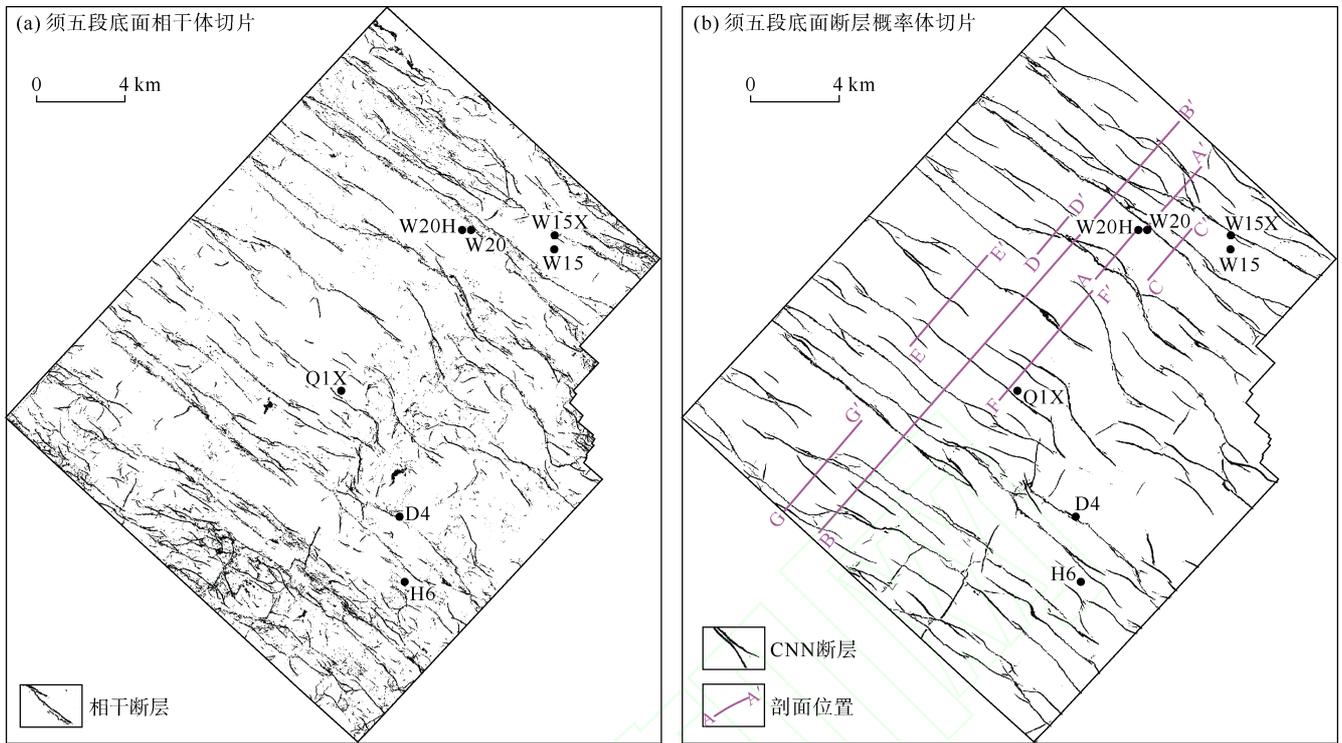


图 3 五宝场地区相干属性与 CNN 模型断层识别效果对比

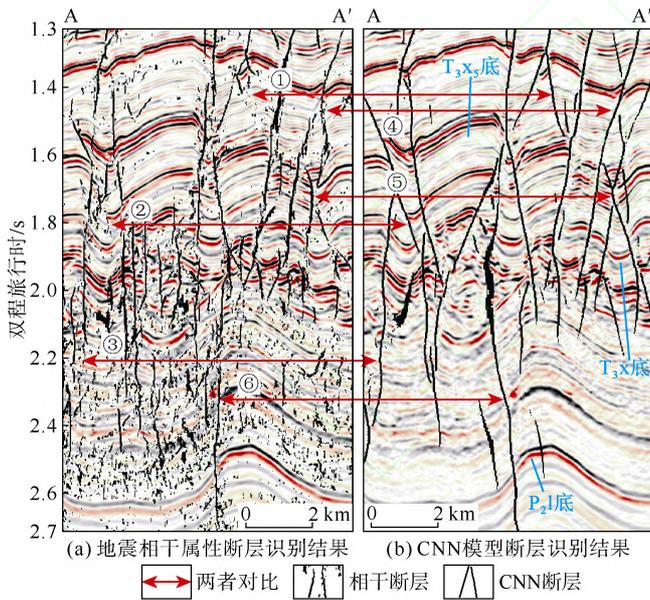


图 4 过 W20H 井剖面相干属性与 CNN 模型断层识别效果对比 (剖面位置见图 3b)

坡带与背斜带。中部地区变形程度相对较弱，断层数量少，西部表现为受多条近平行断层控制的向斜带，向东过渡为受北东—南西向一级断层控制的大型背斜 (见图 5、图 6)。北部地区变形程度介于南部与中部之间，大型二级断层间发育北西—南东向褶皱带，东部北东—南西向背斜被北西—南东向断层切割 (见图 5、图 6)。

表 1 五宝场地区断层分级与要素统计表

断层级次	断穿层位	条数	走向	断距/m
一级断层	龙潭组底至须五段底	4	北北东—南南西向、北西—南东向	233~510 (379)
二级断层	青盐岩段底至须五段底	39	北西—南东向为主，少量北北东—南南西向	100~458 (260)
三级断层	须家河组底至须五段底	58	北西—南东向为主，少量北北东—南南西向	25~365 (96)
四级断层	须五段未至须家河组底	62	北西—南东向为主，少量北北东—南南西向	23~217 (58)

注：括号内数值为平均值

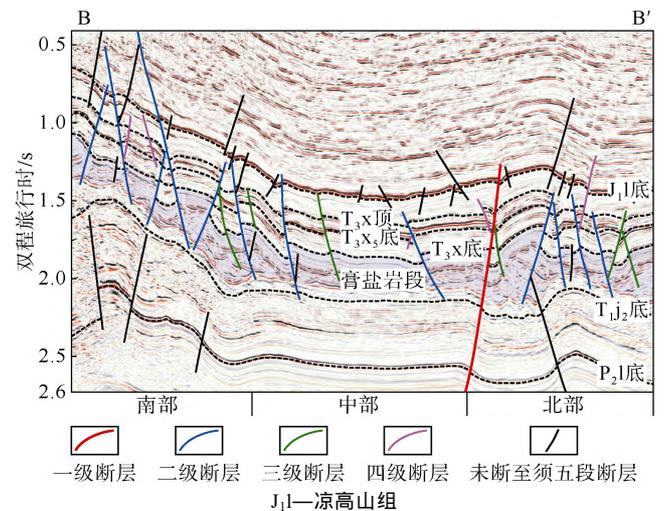


图 5 五宝场地区断层级次划分剖面 (剖面位置见图 3b)

2.3 断层构造样式

五宝场地区须家河组逆断层发育 5 种常见构造样

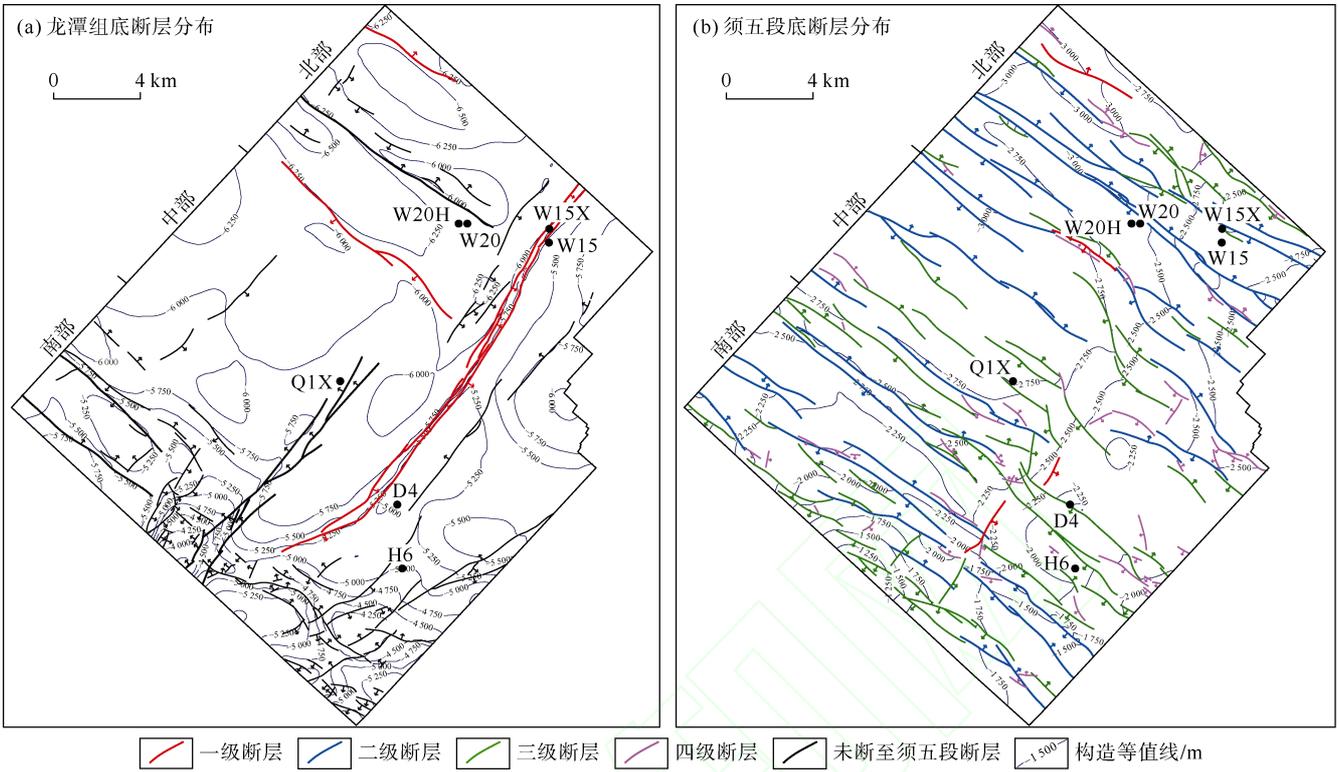


图 6 五宝场地区不同级次断层平面分布

式：对冲构造、对冲-背冲构造、叠瓦状构造、复向斜叠瓦-背冲构造与复背斜叠瓦-背冲构造（见图 7）。对冲构造是研究区最常见的构造样式，由两条共用下降盘的倾向相背的逆断层组成，且主断层一侧的隆起程

度大于次断层一侧（见图 7a）。对冲-背冲构造由对冲构造发育而来，表现为由底部的对冲构造和上部的背冲构造组合而成的“X”型断层形态（见图 7b）。叠瓦状构造由多条同向倾斜的逆断层组成，形成于变形程

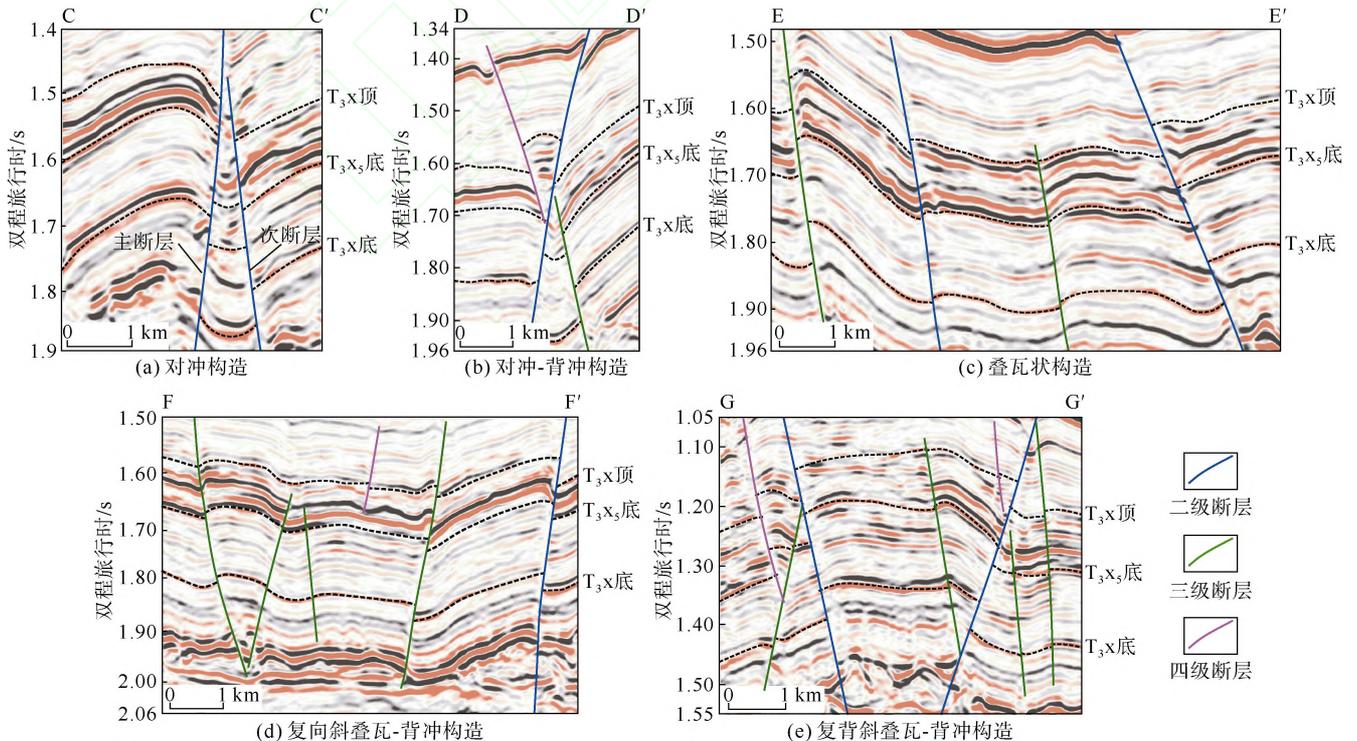


图 7 五宝场地区须家河组典型断层构造样式（剖面位置见图 3b）

度较低的研究区中部地区。断层的断距整体较小，具有由中间向两侧逐渐增大的趋势（见图 7c）。五宝场地区的背冲构造特征较为复杂，通常与叠瓦状断层同时出现，存在复向斜叠瓦-背冲构造与复背斜叠瓦背冲构造两种形式。复向斜叠瓦-背冲构造主要发育在中部地区，由宽缓的向斜构造发育而来，地势表现为中心低于两翼（见图 7d）。复背斜叠瓦-背冲构造主要分布在南部地区的高陡构造带，由原背冲构造的共用上盘演变而来，中心地势高于翼部（见图 7e）。

3 断层相关裂缝带智能识别与分布规律

3.1 断层相关裂缝带智能识别方法

本次研究采用地震属性智能融合方法对断层相关裂缝带进行识别。首先需要选取适宜的地震属性作为融合的基础，断层对裂缝发育的控制作用主要是通过断层活动产生的应力导致围岩破裂而实现的，因此可以根据裂缝带不同部位的变形特征来针对性的选取地震属性。从剖面上看，五宝场地区断层断相关裂缝带普遍宽度较大，其内部结构可以划分为微断裂、断控裂缝与断控褶皱裂缝 3 部分。

微断裂是指断层破碎带中调节上下盘之间断距的次要滑动面，其地震响应为同相轴的微错断（见图 8a）。断层概率体虽然能够很好的构建大尺度断层的构造样式，但是对于微断裂而言其响应并不敏感。通过计算最大似然属性可以较好地识别微断裂（见图 8b）^[12, 31]。断控裂缝是指由断面摩擦和挤压在岩层中产生的裂缝，

断控裂缝带的地震响应为平行于断面的杂乱反射带，与展现出连续层状反射的围岩具有显著差异（见图 8a）。通过对原始地震数据进行基于构造导向的平滑滤波，然后对滤波残差数据计算振幅包络属性（见图 8c、图 9），可以很好地对断控裂缝带进行刻画^[32-33]。断控褶皱裂缝是指受断层控制的地层褶皱变形产生的裂缝，其地震响应为同相轴的高曲率部位（见图 8a）。断控褶皱裂缝带的规模和地震响应要弱于断控裂缝带，这使得利用原始地震数据对其进行识别具有一定困难。为了增强地震数据对断控褶皱裂缝带的响应，通过广义频谱分解处理来提取地震数据的高频部分，然后使用高频地震数据计算最大正曲率属性来识别断控褶皱裂缝带（见图 8d、图 9）^[34-35]。同时，最大正曲率属性对于断面裂缝带也有较好的响应，可以进一步增强其识别效果。

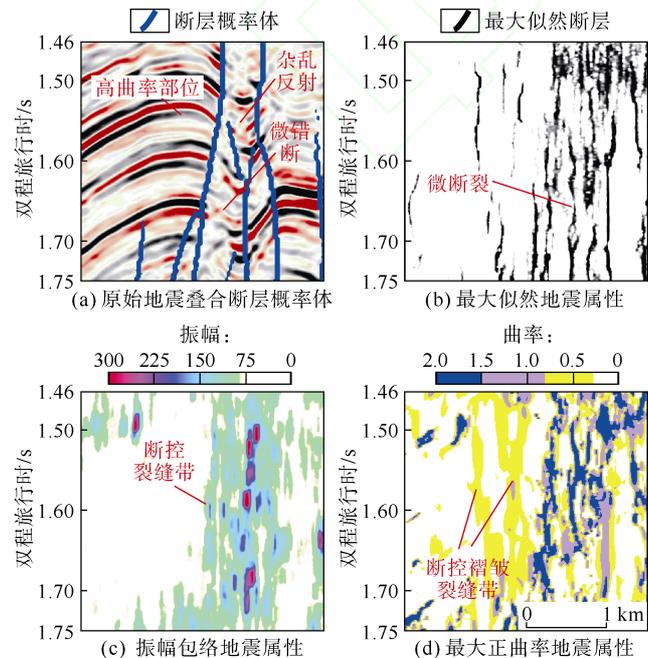


图 8 裂缝带相关地震属性优选

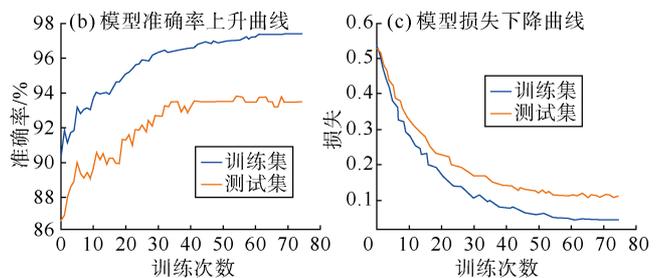
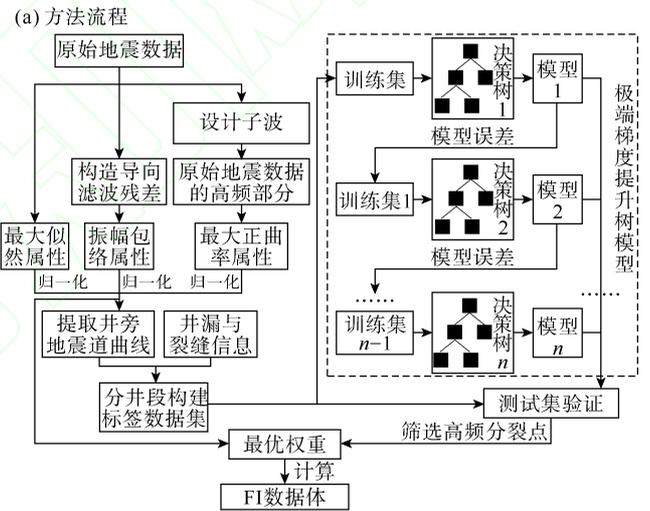


图 9 基于极端梯度提升树的地震属性智能融合裂缝带识别流程与训练过程

本次研究选用集成学习推进算法中的极端梯度提升树（XGBoost）作为地震属性智能融合的算法^[23-24]。首先通过对上述 3 种地震属性提取井旁地震道曲线，与对应井段的井漏和成像测井裂缝发育信息组成 272 个标签数据集，从中随机选取 62 个标签作为测试集，剩余 210 个标签作为训练集输入模型。如图 9a 所示，模型中的决策树 1 通过初始权重学习训练集中属性与井漏、

裂缝信息的对应性并得到模型 1,同时根据学习结果的误差来提高训练集中误差较高样本的权重,从而得到训练集 1。如此往复循环,每一次均需要对现有模型全部进行加权求和后对测试集进行验证,直至得到一定数量的模型,能够确保获得最优的学习率和最少的损失。在最终得到的 n 个决策树中,可根据 Lu 等提出的筛选高频分裂点方法拟合得到模型的最优权重^[36]。将 3 个属性体带入最优权重就可计算得到表征裂缝带分布的裂缝指示 (FI) 数据体 (见图 9)。该地震属性智能融合方法不仅针对裂缝带的不同结构优选了敏感性较高的地震属性,还在极端梯度提升模型的基础上得到了适用于属性体融合的最优权重,相比前人实现的对曲线和平面属性的融合,其显著提高了方法的适用性^[22-24]。

使用上述训练集与测试集对极端梯度提升树模型进行训练。当 $n=75$ 时,模型在训练集与测试集上的准确率均稳定保持在 0.92 以上,且损失维持在 0.15 以下 (见图 9b、图 9c)。选取此时的模型,对最大似然属性、振幅包络属性和最大正曲率属性提取的最优权重系数分别为 0.19、0.38 和 0.43。根据这些权重系数对 3 种属性加权求和得到了值域为 $[0, 1]$ 的 FI 数据体,其值越高代表裂缝发育程度越高。

为了确定能够表征有效裂缝带发育范围的数据值域,本次研究通过将 FI 数据体与断层识别结果和井筒

数据进行比对,认为当阈值调整为 0.1 时, FI 数据体所表征的裂缝带分布与断层分布具有较高的一致性 (见图 3b、图 10),且能够很好地与须五段 5 口测试气井的漏失井段 (见图 11a、图 11b、图 11c、图 11e)

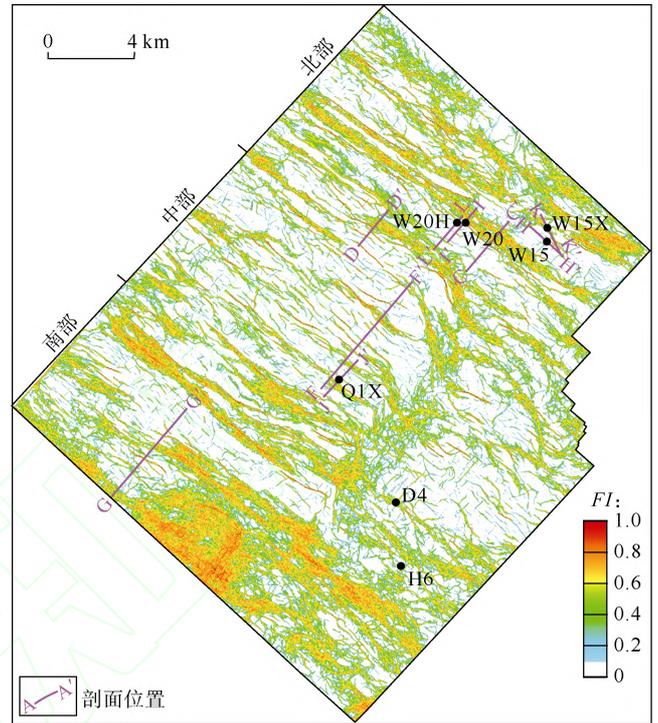


图 10 五宝场地区须五段断层相关裂缝带平面分布

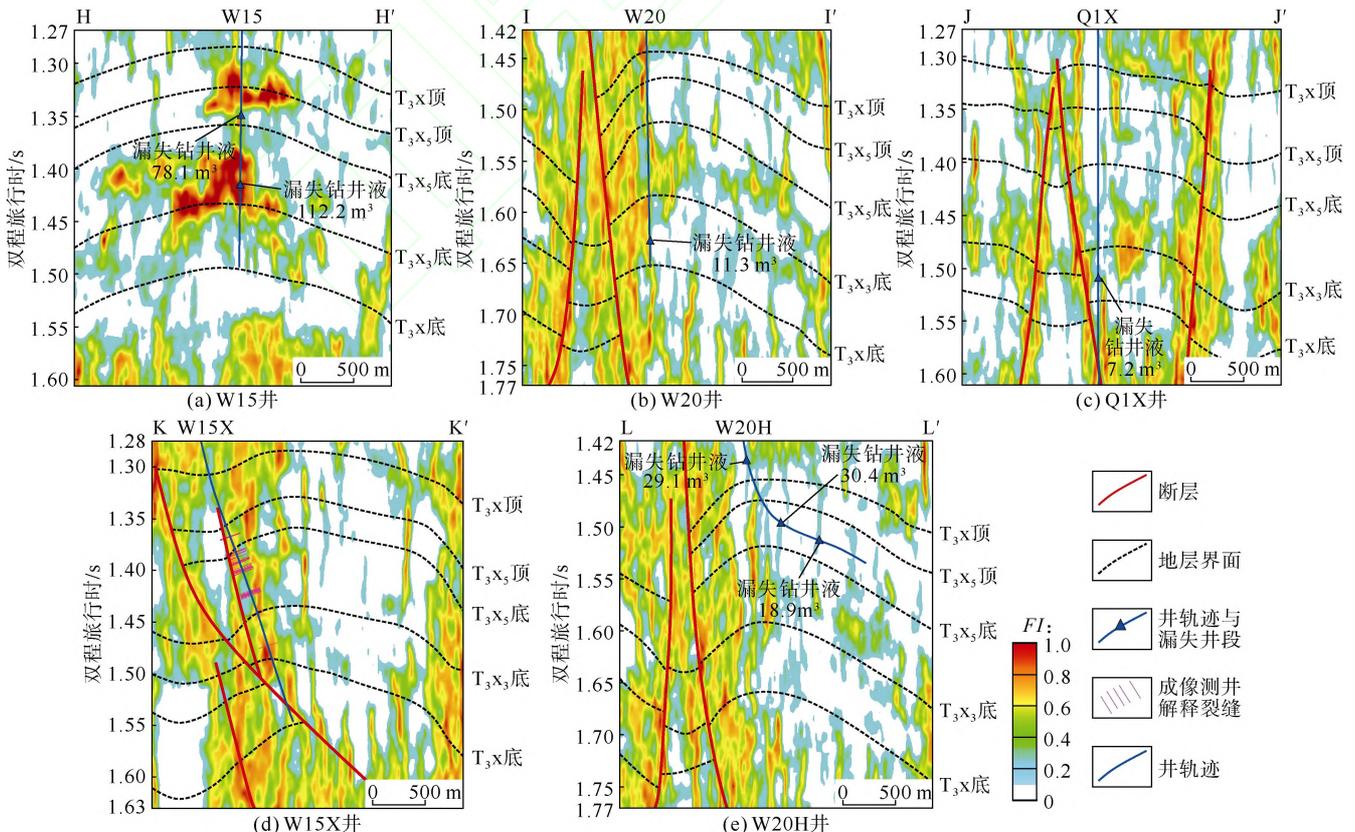


图 11 五宝场地区过气井裂缝带发育剖面 (剖面位置见图 10)

成像测井解释裂缝等对应(见图 11d)。从过井剖面上看, FI 数据体不仅刻画出了断控裂缝带、断控褶皱裂缝带, 还在断控裂缝带内识别出多个高值条带(见图 11), 这些条带较好的代表了微断裂的发育部位, 因此可以认为该 FI 数据体具有较高的可靠性。

3.2 断层相关裂缝带发育特征

通过成像测井得到的五宝场地区须五段天然裂缝走向以北西西—南东东向至北西—南东向为主($280^{\circ}\sim 310^{\circ}$), 北东—南西向为辅($40^{\circ}\sim 50^{\circ}$)。 FI 数据体中须五段断层相关裂缝带的走向以北西—南东向为主($290^{\circ}\sim 320^{\circ}$), 北东—南西向($40^{\circ}\sim 50^{\circ}$)为辅(见图 12a、图 12b), 两者基本一致, 与须五段内断层及其相关褶皱的走向平行或小角度相交, 展现出裂缝与断层、褶皱间良好的成因相关性。

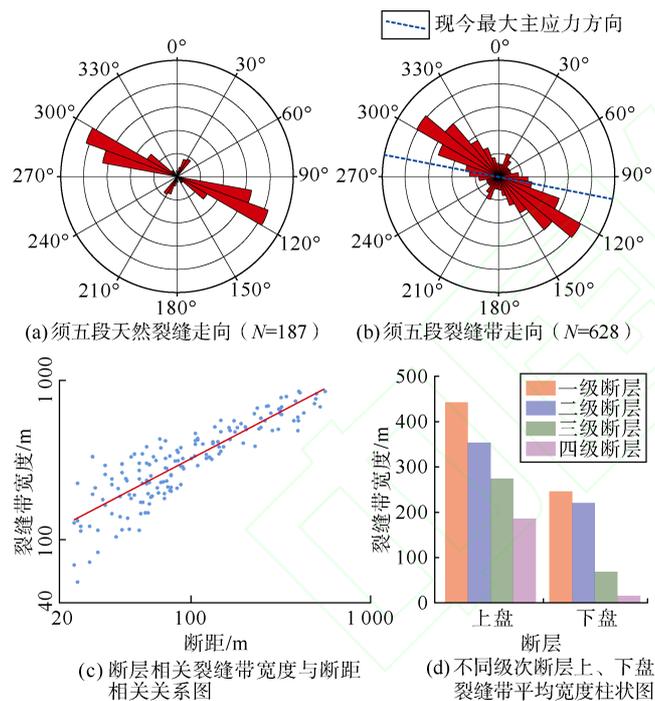


图 12 五宝场地区须五段裂缝发育特征

由图 12c 可见, 五宝场地区断层相关裂缝带宽度与断距具有良好的线性正相关关系, 这表明随着断层级次的升高, 其引起的地层断距与褶皱效应就越强, 产生的断层相关裂缝带宽度也越大。不同级次断层的上盘相关裂缝带宽度要显著大于下盘, 说明逆断层在形成时其上盘活动性与变形程度要高于下盘(见图 12d)。一至四级断层的上盘平均裂缝带宽度与下盘平均裂缝带宽度之比分别为 1.8、1.6、4.0 与 12.2。一级断层与二级断层下盘远离主断层的一端往往与其他断层组合形成复杂构造样式, 从而增大裂缝带的宽度,

这导致它们的上、下盘裂缝带宽度之比较小。三、四级断层活动强度偏低, 其下盘变形程度更低, 一些四级断层的下盘几乎不发育裂缝带, 因此它们的上、下盘平均裂缝带宽度之比要远大于一、二级断层(见图 12d)。

3.3 断层相关裂缝带发育模式

五宝场地区的裂缝带分布与断层构造样式高度关联, 形成了 4 种典型的裂缝带发育模式: 对冲构造型模式、对冲-背冲构造型模式、复向斜叠瓦-背冲构造型模式与复背斜叠瓦-背冲构造型模式。

对冲构造型模式内两条断层共用的下盘变形程度较大, 造成其断控裂缝带的上、下盘宽度较为接近。断控褶皱裂缝带主要发育于上盘背斜顶部, 规模较大, 纵向可从须家河组顶面延伸到底面(见图 13a)。对冲-背冲构造型模式与对冲构造型裂缝带的显著区别有两点: ①在断层的交汇处, 断控裂缝带宽度显著增大; ②断层共用上盘的弯曲程度明显增大, 使得断控褶皱裂缝带宽度增大(见图 13b)。复向斜叠瓦-背冲构造型模式主要出现在研究区中部, 断控裂缝带宽度相对较小, 上盘宽度显著大于下盘。断控褶皱裂缝带与断控裂缝带的间距增大, 纵向延伸长度较小(见图 13c)。复背斜叠瓦-背冲构造型模式主要分布在研究区西南缘与东南缘, 断控裂缝带宽度略小于对冲构造型与对冲-背冲构造型模式。断控褶皱裂缝带主要发育在背冲构造的共用上盘, 其底部向断控裂缝带汇聚, 纵向延伸长度大(见图 13d)。

综上所述, 对冲构造型与对冲-背冲构造型模式最有利于裂缝的发育, 复背斜叠瓦-背冲构造型模式次之, 复向斜叠瓦-背冲构造型模式最差。

4 油气地质意义

4.1 断层及其相关裂缝带对天然气富集的控制作用

断层相关裂缝对于天然气富集的影响主要体现在对储层质量的改造上。五宝场地区须家河组经历了强烈的压实作用, 在岩心薄片中普遍可见其证据, 如塑性矿物变形和缝合线构造等(见图 14a、图 14b)。压实作用是造成须五段储层致密化的关键因素, 其造成的减孔可达原生孔隙度的 80%以上。后期断层活动产生的裂缝不但可以作为储集空间, 还能起到沟通孤立孔隙, 增强储层连通性的作用(见图 14c)。更重要的是, 裂缝通过输导酸性流体(如生烃产生的有机酸), 成为溶蚀作用产生的有利空间, 产生一定规模的次生溶孔从而改善储集空间(见图 14d)。

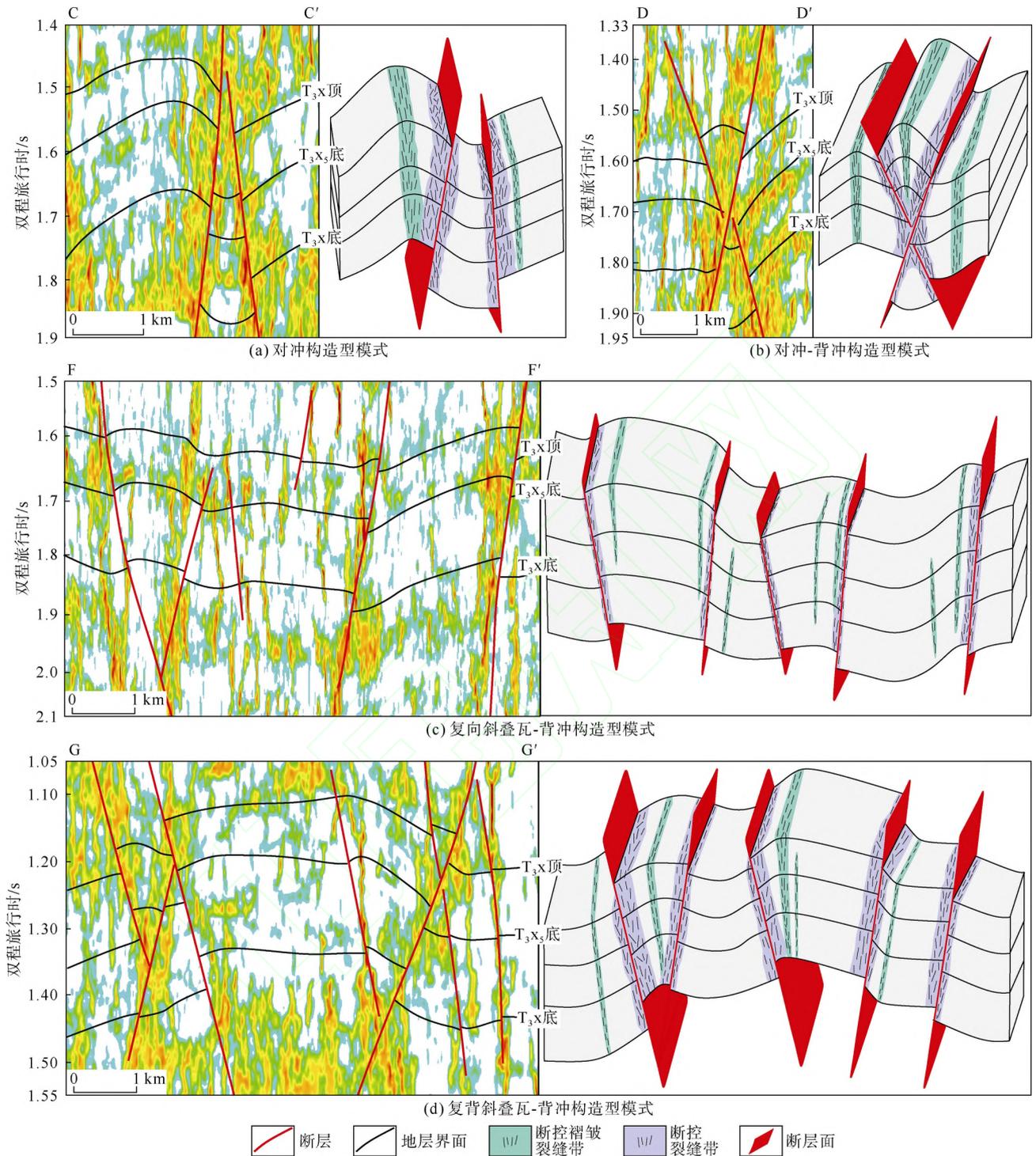
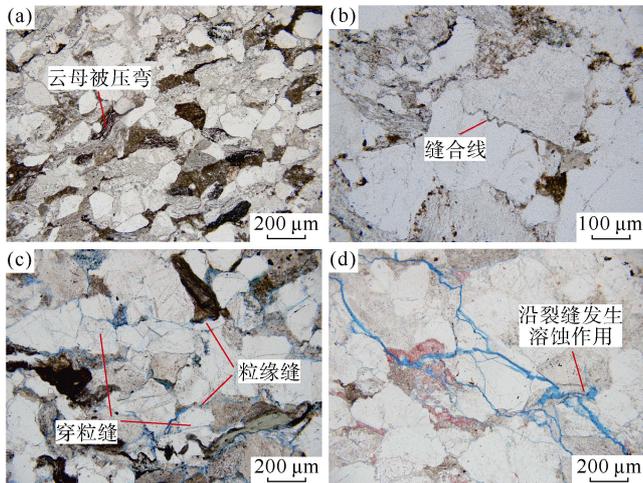


图 13 五宝场地区断层相关裂缝带发育模式(剖面位置见图 10)

断层对天然气富集的控制作用包括供烃条件和气藏保存条件两方面。对五宝场地区和四川盆地其他地区须家河组气样的甲烷、乙烷碳同位素组成数据进行投点后发现, Q1X 井、W20 井与 W15 井的天然气均具有混源特征^[37-38], 而 D4 井则表现为须五段气源气(见图 15)。这说明须家河组储层与龙潭组烃源岩存在较为广泛的连接通道。根据断层识别结果, 研究区内的 4

条一级断层和另外 4 条过龙潭组的断层能够以直接或间接与过须五段断层搭接的方式, 对龙潭组烃源岩生成的油气构成有效的运移通道(见图 5、图 16a)。五宝场地区南缘须家河组处于构造高部位, 加之断层活动强烈, 发育多条断至地表的大型断层(见图 5)。对 H6 井须五段进行上返试气, 结果未获气, 这表明该地区保存条件较差, 断至地表的断层导致须五段天然气溢



(a) 塑性矿物受挤压变形, W15 井, 2 669.34 m, 须五段, 铸体薄片, 单偏光; (b) 缝合线构造, W15X 井, 2 580.13 m, 须六段, 铸体薄片, 单偏光; (c) 穿粒缝与粒缘缝, W20 井, 3 829.10 m, 须五段, 铸体薄片, 单偏光; (d) 沿裂缝发生溶蚀作用, W15 井, 2 965.85 m, 须五段, 铸体薄片, 茜素红染色, 单偏光

图 14 五宝场地区须家河组致密砂岩薄片照片

失。根据以上分析, 在须五段内划分出了双源供烃区与保存条件较差的断层泄气区, 其余区域则为须五段单源供烃区 (见图 16a)。双源供烃区共有 3 个, 主要分布在北部和南部至中部的过渡区, 总面积为 271.07

km²。研究区东南部与西南部均为断层泄气区, 不利于天然气的聚集。对于不同裂缝带发育模式而言, 对冲构造型、对冲-背冲构造型与复向斜叠瓦-背冲构造型模式供烃条件、保存条件均较好, 有利于天然气的富集。而复背斜叠瓦-背冲构造型模式供烃、保存条件较差, 不利于天然气的富集, 在有利区优选中应当予以排除。

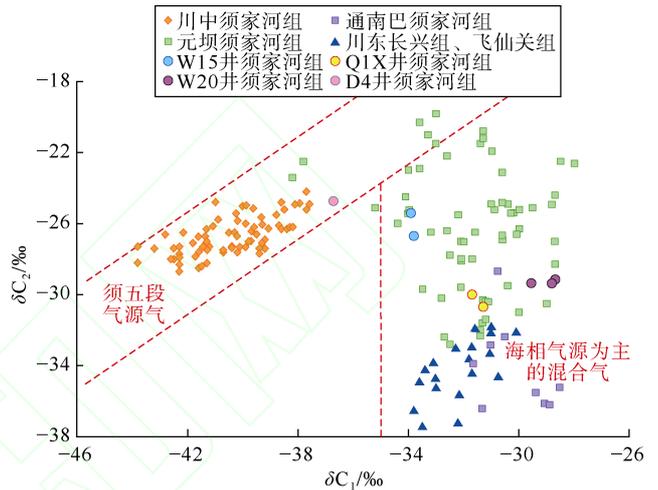


图 15 五宝场地区天然气甲烷、乙烷碳同位素关系图 (其他地区天然气同位素数据来源于文献[39-42])

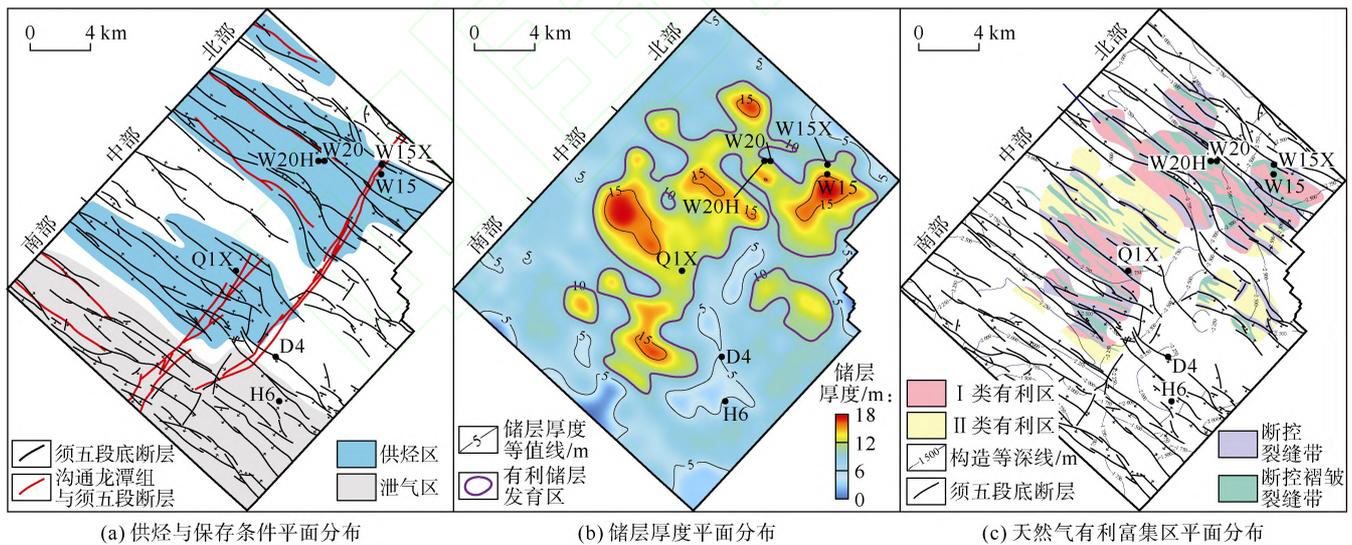


图 16 五宝场地区须五段天然气有利富集区划分

4.2 天然气有利富集区

高基质孔隙砂体的发育是天然气富集的必要条件。本次研究利用叠前同时反演得到的纵横波速度比与纵波阻抗数据体, 去除泥岩后, 再根据井上拟合关系换算得到须五段的孔隙度数据体。按照储层孔隙下限设定孔隙度大于 3.5% 为有效储层, 并以储层厚度大于 10 m 的范围作为有利储层发育区 (见图 16b)。须五

段有利储层发育面积为 234.53 km², 储层厚度最大可达 18 m, 平均孔隙度为 4.7%。

结合断层及裂缝带识别结果、供烃保存条件和有利储层分布, 划定了五宝场地区须五段的 I 类与 II 类天然气有利富集区范围 (见图 16c)。I 类区为双源供烃有利区, 总面积为 130.06 km², 主要位于研究区北部和南部至中部的过渡区。I 类区内主要发育对冲型

和对冲-背冲型裂缝带模式,其中断控裂缝带总面积为 36.80 km²,断控褶皱裂缝带面积为 26.40 km²(见图 16c)。II类区为单源供烃有利区,总面积为 89.11 km²,主要分布在研究区中部。II类区主要发育复向斜叠瓦-背冲构造型裂缝带模式,断控裂缝带总面积为 17.56 km²,断控褶皱裂缝带面积为 10.86 km²(见图 16c)。对比来看,I类区不仅供烃强度更大,而且裂缝带发育规模也要显著大于II类区,并且I类区的构造变形强度大,许多区域高部位均发育规模裂缝带(见图 16c),因此I类区是五宝场地区内最有利于天然气富集的区域,II类区则为次有利区。

4.3 高产气井模式

五宝场地区以须五段为主要产层的5口气井在测试与产能上具有较大的差异,尤其是W15井与W15X井、W20井与W20H井位置相近,均开采同一气藏,但是在累计产量和产能上相差较多(见表2)。分析认为裂缝的有效性与优质储层的匹配关系导致了不同气井的产能差异。

表2 五宝场地区须五段气井产能分析表

井名	储层厚度/ m	平均孔隙度/ %	张开缝密度/ (条·m ⁻¹)	试气产能/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	累计产量/ 10 ⁴ m ³	产能/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)
W15	15.1	5.4	0.46	20.47	6 400	6
W20	12.5	4.0	0.24	16.16	252	1
W15X	10.1	3.6	0.40	6.96	434	2
W20H	12.7	4.5	0.51 (水平段)	20.73	3 385	5
Q1X	13.0	5.1	0	3.73		未投产

通过粘滞剩磁岩心定向实验,测得五宝场地区的现今大水平主应力方向为 281°,与绝大部分裂缝走向呈小角度相交(见图 12b),因此从宏观应力的角度难以区分须五段内不同裂缝的有效性差异。断控裂缝形成于断面的挤压与相互滑动,主要为剪切裂缝。而断控褶皱裂缝则受局部地层弯曲形成,这些区域(如背斜顶部)会形成局部张性环境,使得断控褶皱裂缝以张裂缝为主,其开度与保持开启性的能力一般都要优于断控裂缝,但是裂缝的有效性不能以其成因类型一概而论,还要考虑到构造应力的作用和裂缝带整体的规模。

张开缝密度与钻井液漏失情况可以用来评价裂缝带的有效性。W15井、W20H井、W15X井与W20井均位于I类有利区内(见图 16c),W20井与W15X井均钻遇断控裂缝带,储层内的张开缝密度分别为 0.24 条/m 与 0.40 条/m(见表 2)。W20井在须二段发生少量漏失(见图 11b),W15X井未见明显漏失(见图 11d)。

而W20H井与W15井均钻遇断控褶皱裂缝带,储层张开缝密度分别为 0.51 条/m 与 0.46 条/m(见表 2)。这两口井在须五段的漏失量分别达到了 49.3 m³ 与 78.1 m³(见图 11a、图 11e)。张开缝密度与漏失量的差异表明了I类有利区内断控褶皱裂缝带的有效性更好。Q1X井位于II类有利区内,在须二段靠近断控裂缝带时发生了漏失(见图 13c),说明了断控裂缝带在II类有利区内具有更好的有效性。进一步分析可知,I类有利区内的对冲型、对冲-背冲型模式中的断控裂缝带长期受到垂直于断面应力的强烈挤压,导致其断控裂缝带开启性较差,而挤压造成的大幅度地层弯曲反而促进了断控褶皱裂缝带的成规模发育和开启,使其具有较好的有效性(见图 13a、图 13b)。II类有利区复向斜叠瓦-背冲构造型模式中的断控裂缝带在演化过程中受到的挤压作用更弱,可以保持一定的有效性。较弱的构造变形导致其断控褶皱裂缝带的发育规模很小,且无法与断层有效的沟通(见图 13c),有效性较差。因此,在五宝场地区I类有利区内断控褶皱裂缝带的有效性要高于断控裂缝带,而在II类有利区内断控裂缝带的有效性则要高于断控褶皱裂缝带。

W15井和W20H井在须五段均表现为高有效性的断控褶皱裂缝带与高基质孔隙储层匹配的形式(见图 17a、图 17e),因此这两口井不仅测试产量最高,累计产量与产能两项也位居前列(见表 2)。而W15X井与W20井钻遇有效性低的断控裂缝带,它们靠近须五段有效储层的边缘,储层孔隙度相比W15井与W20H井也变差(见图 17b、图 17d),因此这两口井测试产量要低于W15井与W20H井,且长期稳产能力显著下降(见表 2)。Q1X井虽然储层物性较好,但是在须五段未钻遇有效裂缝带(见图 17c),因此其测试产量最低且未投产(见表 2)。由此可见,有效裂缝带配合高基质孔隙储层是须五段气井能够高产、稳产的关键控制因素。

基于以上分析,五宝场地区高产气井模式可以总结为“双源断层控制富集、有效裂缝带控制高产、高基质孔隙确保稳产”,即沟通上下两套烃源岩的断层控制了气藏内天然气的富集,开启性较高的有效裂缝带控制了气井初期的高产,一定规模的高基质孔隙度储层则保障了气井的长期稳产。按照此模式,在I类有利区内,下一步的有利钻探方向应该是对冲型与对冲-背冲型模式中的背斜顶部断控褶皱裂缝带,而在II类有利区内,钻探方向应该瞄准复向斜叠瓦-背冲构造型模式中的较大规模断控裂缝带。

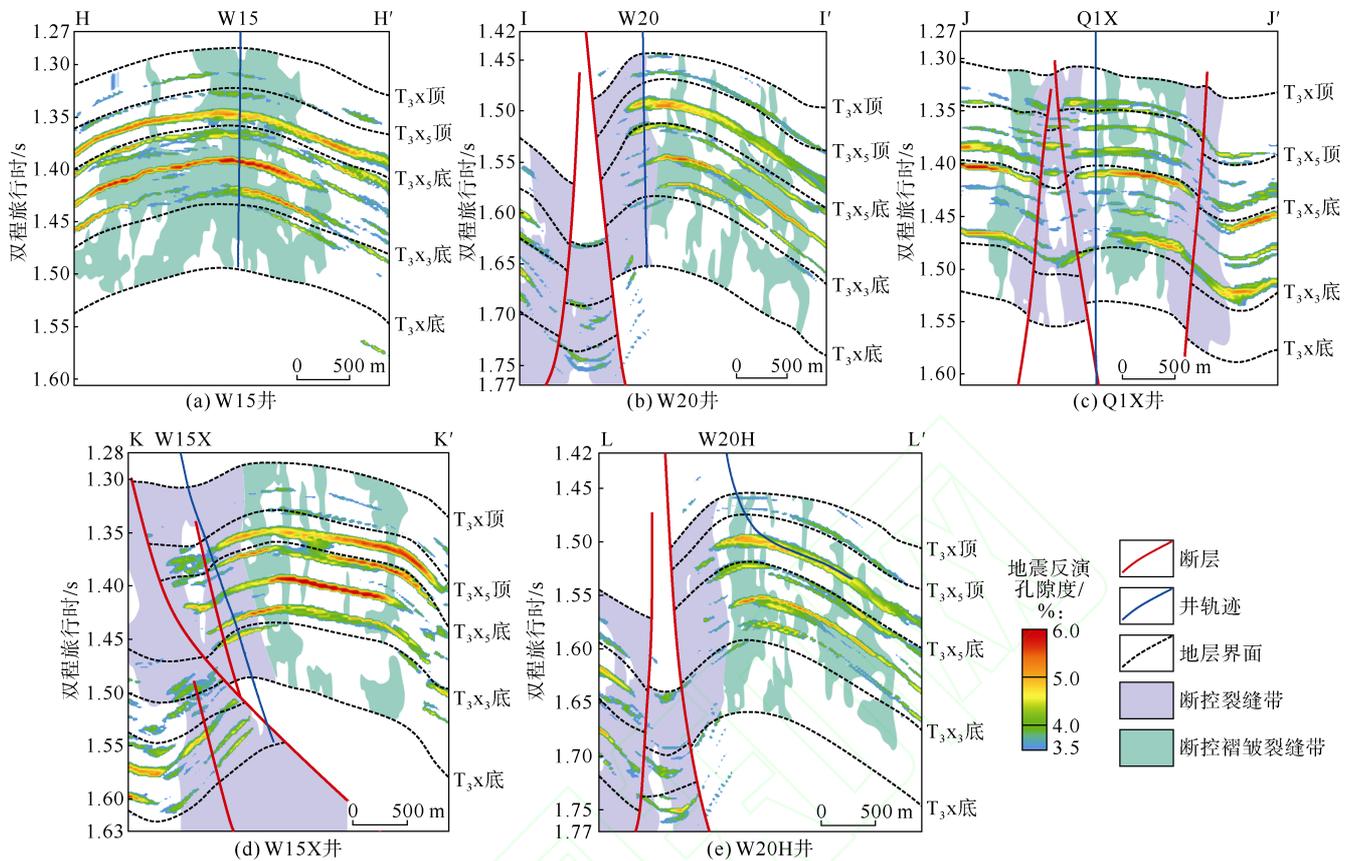


图 17 五宝场地区过井孔隙度与断层相关裂缝带叠合剖面 (剖面位置见图 10)

5 结论

进行迁移训练的 CNN 模型能够高效、准确地刻画五宝场地区断层的空间变形特征。研究区须家河组断层可以划分为一至四级，随断层级次的升高断距也不断增大。五宝场地区南部构造变形程度最强，北部次之，中部则最为平缓。须家河组逆断层存在对冲构造、对冲-背冲构造、叠瓦状断层、复向斜叠瓦-背冲构造与复背斜叠瓦-背冲构造 5 种构造样式。

利用基于极端梯度提升树的地震属性智能融合方法对断层相关裂缝带进行识别，得到的裂缝带空间分布与钻井数据对应较好，且与断层分布一致性较高。裂缝带走向以北西—南东向为主。断层相关裂缝带宽度与其断距具有良好的正相关关系，断层上盘裂缝带宽度普遍大于下盘。五宝场地区发育对冲构造型、对冲-背冲构造型、复背斜叠瓦-背冲构造型与复向斜叠瓦-背冲构造型 4 种裂缝带发育模式，其中对冲构造型、对冲-背冲构造型裂缝带模式最有利于裂缝的发育。

断层相关裂缝通过沟通孔隙和产生次生溶孔改善储层的储集空间。按照断层的发育方式可在须五段划分出双源供烃区、单源供烃区与断层泄气区，天然气有利富集区可以划分为 I 类与 II 类。I 类区具备双源供烃条

件，且裂缝带发育规模更大，有利程度高于 II 类区。

I 类有利区内断控褶皱裂缝带的有效性要高于断控裂缝带，而在 II 类有利区内断控裂缝带的有效性则更高。五宝场地区具有“双源断层控制富集、有效裂缝带控制高产、高基质孔隙确保稳产”的高产气井模式，下一步的有利钻探方向为 I 类有利区内的断控褶皱裂缝带和 II 类有利区内断控裂缝带。

致谢：在本文写作过程中，得到了中国石油西南油气田公司川东北气矿徐小童博士及梁宝雨博士的指导与帮助，谨致谢意！

参考文献：

[1] 刘君龙, 刘忠群, 刘振峰, 等. 四川盆地新场构造带深层须二段致密砂岩断褶裂缝体特征和地质模式[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 530-540.
LIU Junlong, LIU Zhongqun, LIU Zhenfeng, et al. Geological characteristics and models of fault-fold-fracture body in deep tight sandstone of the second member of Upper Triassic Xujiahe Formation in Xinchang structural belt of Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 530-540.

[2] 毛哲, 曾联波, 刘国平, 等. 准噶尔盆地南缘侏罗系深层致密砂岩储层裂缝及其有效性[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(6): 1212-1221.
MAO Zhe, ZENG Lianbo, LIU Guoping, et al. Characterization and

- effectiveness of natural fractures in deep tight sandstones at the south margin of the Junggar Basin, northwestern China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(6): 1212-1221.
- [3] 周心怀, 徐国盛, 崔恒远, 等. 东海西湖凹陷中央反转构造带古近系花港组致密砂岩储集层裂缝发育特征与油气成藏关系[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(3): 462-475.
ZHOU Xinhui, XU Guosheng, CUI Hengyuan, et al. Fracture development and hydrocarbon accumulation in tight sandstone reservoirs of the Paleogene Huagang Formation in the central reversal tectonic belt of the Xihu Sag, East China Sea[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(3): 462-475.
- [4] 曾联波, 王正国, 肖淑容, 等. 中国西部盆地挤压逆冲构造带低角度裂缝的成因及意义[J]. *石油学报*, 2009, 30(1): 56-60.
ZENG Lianbo, WANG Zhengguo, XIAO Shurong, et al. The origin and geological significance of low dip-angle fractures in the thrust zones of the western basins of China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(1): 56-60.
- [5] 郭彤楼, 熊亮, 叶素娟, 等. 输导层(体)非常规天然气勘探理论与实践: 四川盆地新类型页岩气与致密砂岩气突破的启示[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(1): 24-37.
GUO Tonglou, XIONG Liang, YE Sujuan, et al. Theory and practice of unconventional gas exploration in carrier beds: Insight from the breakthrough of new type of shale gas and tight gas in Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(1): 24-37.
- [6] 刘振峰, 刘忠群, 郭元岭, 等. “断缝体”概念、地质模式及其在裂缝预测中的应用: 以四川盆地川西拗陷新场地区须家河组二段致密砂岩气藏为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(4): 973-980.
LIU Zhenfeng, LIU Zhongqun, GUO Yuanling, et al. Concept and geological model of fault-fracture reservoir and their application in seismic fracture prediction: A case study on the Xu 2 Member tight sandstone gas pool in Xinchang area, western Sichuan Depression in Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(4): 973-980.
- [7] 李吉通. 断缝体形成演化机制与精细刻画: 以川西新场须二气藏为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2023.
LI Jitong. Formation and evolution mechanism and fine characterization of fracture bodies—Taking Xinchang Xu'er gas reservoir in western Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2023.
- [8] 李国辉, 李楠, 谢继容, 等. 四川盆地上三叠统须家河组前陆大气区基本特征及勘探有利区[J]. *天然气工业*, 2012, 32(3): 15-21.
LI Guohui, LI Nan, XIE Jirong, et al. Basic features of large gas play fairways in the upper Triassic Xujiahe Formation of the Sichuan Foreland Basin and evaluation of favorable exploration zones[J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(3): 15-21.
- [9] 赵正望, 谢继容, 李楠, 等. 四川盆地须家河组一、三、五段天然气勘探潜力分析[J]. *天然气工业*, 2013, 33(6): 23-28.
ZHAO Zhengwang, XIE Jirong, LI Nan, et al. Gas exploration potential of the 1st, 3rd and 5th members of Xujiahe Fm reservoirs in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(6): 23-28.
- [10] 王威, 林良彪. 四川盆地东北部马路背地区上三叠统须家河组二段气藏高产机制[J]. *天然气工业*, 2017, 37(12): 11-17.
WANG Wei, LIN Liangbiao. High-yield mechanism of the second member of Upper Triassic Xujiahe reservoir in the Malubei area, NE Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(12): 11-17.
- [11] MARFURT K J, SUDHAKER V, GERSZTENKORN A, et al. Coherency calculations in the presence of structural dip[J]. *Geophysics*, 1999, 64(1): 104-111.
- [12] HALE D. Methods to compute fault images, extract fault surfaces, and estimate fault throws from 3D seismic images[J]. *Geophysics*, 2013, 78(2): O33-O43.
- [13] WU X M. Directional structure-tensor-based coherence to detect seismic faults and channels[J]. *Geophysics*, 2017, 82(2): A13-A17.
- [14] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation[C]//NAVAB N, HORNEGGER J, WELLS W M, et al. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention—MICCAI 2015*. Cham: Springer International Publishing, 2015: 234-241.
- [15] WU X M, LIANG L M, SHI Y Z, et al. FaultSeg3D: Using synthetic data sets to train an end-to-end convolutional neural network for 3D seismic fault segmentation[J]. *Geophysics*, 2019, 84(3): IM35-IM45.
- [16] 陈俊安, 陈海东, 龚伟, 等. 深度学习与边缘增强相结合的断裂综合检测技术: 顺北地区超深走滑断裂检测应用实例[J]. *石油地球物理勘探*, 2022, 57(6): 1304-1316.
CHEN Junan, CHEN Haidong, GONG Wei, et al. Application of comprehensive fault detection technology combining deep learning with edge enhancement in detecting ultra-deep strike-slip faults in Shunbei block[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2022, 57(6): 1304-1316.
- [17] 李相文. 富满油田致密灰岩断控储层地震预测方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.
LI Xiangwen. Seismic prediction method of tight limestone fault controlled reservoir in Fuman Oilfield[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2022.
- [18] 刘俊州, 韩磊, 时磊, 等. 致密砂岩储层多尺度裂缝地震预测技术: 以川西 XC 地区为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(3): 747-754.
LIU Junzhou, HAN Lei, SHI Lei, et al. Seismic prediction of tight sandstone reservoir fractures in XC area, western Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 747-754.
- [19] 姚迎涛, 曾联波, 张航, 等. 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[J]. *地球科学*, 2023, 48(7): 2643-2651.
YAO Yingtao, ZENG Lianbo, ZHANG Hang, et al. Fracture development laws of Feixianguan Formation carbonate reservoirs in Huanglongchang-Qilibei area, northeast Sichuan[J]. *Earth Science*, 2023, 48(7): 2643-2651.
- [20] 凡睿, 曾韬, 雷克辉, 等. 川东北地区须家河组“断缝体”气藏立体雕刻技术及应用[J]. *石油物探*, 2023, 62(2): 336-344.
FAN Rui, ZENG Tao, LEI Kehui, et al. Application of 3D “fault-fracture reservoirs” engraving technology to the Xujiahe formation in the northeastern Sichuan Basin[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2023, 62(2): 336-344.
- [21] 杨旭, 白鸣生, 龚汉渤, 等. 川西新场地区三叠系须二段构造裂缝特征及定量预测[J]. *岩性油气藏*, 2025, 37(3): 73-83.
YANG Xu, BAI Mingsheng, GONG Hanbo, et al. Characteristics and quantitative prediction of structural fractures in the second member of Triassic Xujiahe Formation in Xinchang area, western Sichuan Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2025, 37(3): 73-83.
- [22] 董少群, 曾联波, 杜相仪, 等. 致密碳酸盐岩储集层裂缝智能预测方法[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(6): 1179-1189.
DONG Shaoqun, ZENG Lianbo, DU Xiangyi, et al. An intelligent prediction method of fractures in tight carbonate reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(6): 1179-1189.
- [23] 陆国青, 董少群, 黄立良, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组陆相页岩油储层测井裂缝智能识别[J]. *地球科学*, 2023, 48(7): 2690-2702.
LU Guoqing, DONG Shaoqun, HUANG Liliang, et al. Fracture intelligent identification using well logs of continental shale oil

- reservoir of Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(7): 2690-2702.
- [24] 鲍明阳, 董少群, 曾联波, 等. 基于地震属性的致密碳酸盐岩储层裂缝分布的人工智能预测方法[J]. 地球科学, 2023, 48(7): 2462-2474.
BAO Mingyang, DONG Shaoqun, ZENG Lianbo, et al. Artificial intelligence prediction method for tight carbonate reservoir fracture distribution based on seismic attributes[J]. Earth Science, 2023, 48(7): 2462-2474.
- [25] 石书缘, 杨威, 周刚, 等. 特提斯域演化对四川超级盆地油气系统形成的影响[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(5): 1024-1039.
SHI Shuyuan, YANG Wei, ZHOU Gang, et al. Impact of Tethyan domain evolution on the formation of petroleum systems in the Sichuan super basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(5): 1024-1039.
- [26] 吴永辉, 姜振学, 吴建发, 等. 渝西地区高含水页岩气藏特征、形成机理及地质意义[J]. 天然气工业, 2024, 44(8): 58-71.
WU Yonghui, JIANG Zhenxue, WU Jianfa, et al. Characteristics, formation mechanism and geological implications of high water-cut shale gas reservoirs in western Chongqing area[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(8): 58-71.
- [27] 赵正望, 张航, 张晓丽, 等. 川东北地区上三叠统须家河组致密气成藏地质特征及成藏模式[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(3): 121-131.
ZHAO Zhengwang, ZHANG Hang, ZHANG Xiaoli, et al. Geological characteristics and gas accumulation pattern of tight gas reservoirs in the Upper Triassic Xujiahe Formation in northeastern Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(3): 121-131.
- [28] 张心罡, 庞宏, 庞雄奇, 等. 四川盆地上二叠统龙潭组烃源岩生、排烃特征及资源潜力[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 621-632.
ZHANG Xingang, PANG Hong, PANG Xiongqi, et al. Hydrocarbon generation and expulsion characteristics and resource potential of source rocks in the Longtan Formation of Upper Permian, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 621-632.
- [29] LI X, LI K W, XU Z F, et al. Fault-Seg-LNet: A method for seismic fault identification based on lightweight and dynamic scalable network[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 127(Part A): 107316.
- [30] DOU Y M, LI K W, DONG M H, et al. FaultSSL: Seismic fault detection via semisupervised learning[J]. Geophysics, 2024, 89(3): M79-M91.
- [31] 李飞跃, 王涛, 曾清波, 等. 基于构造导向的高清似然属性在白云凹陷深层断裂预测中的应用[J]. 石油物探, 2023, 62(1): 163-172.
LI Feiyue, WANG Tao, ZENG Qingbo, et al. Application of high-definition likelihood attributes based on structure orientation in the prediction of deep faults in Baiyun Sag[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2023, 62(1): 163-172.
- [32] FEHMERS G C, HÖCKER C F W. Fast structural interpretation with structure-oriented filtering[J]. Geophysics, 2003, 68(4): 1286-1293.
- [33] 郑马嘉, 陈珂磷, 蔡景顺, 等. 基于振幅梯度凌乱性检测算法的页岩气裂缝预测在长宁地区的应用[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(5): 2110-2117.
ZHENG Majia, CHEN Kelin, CAI Jingshun, et al. Application of shale gas fracture prediction based on amplitude gradient messy detection algorithm in Changning area[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(5): 2110-2117.
- [34] CHOPRA S, MARFURT K J. Volumetric curvature attributes for fault/fracture characterization[J]. First Break, 2007, 25(7): 35-46.
- [35] SCHWARZ B, VANELLE C, GAJEWSKI D, et al. Curvatures and inhomogeneities: An improved common-reflection-surface approach[J]. Geophysics, 2014, 79(5): S231-S240.
- [36] LU K P, CHANG S T. An advanced segmentation approach to piecewise regression models[J]. Mathematics, 2023, 11(24): 4959.
- [37] 戴金星. 天然气中烷烃气碳同位素研究的意义[J]. 天然气工业, 2011, 31(12): 1-6.
DAI Jinxing. Significance of the study on carbon isotopes of alkane gases[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 1-6.
- [38] 彭平安, 侯读杰, 腾格尔, 等. 天然气成因鉴别指标体系与关键图版: 理论内涵、科学意义与实践作用[J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(3): 513-525.
PENG Pingan, HOU Dujie, TENGER, et al. Identification indexes and diagrams for natural gas origin: Connotation, significance and application[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(3): 513-525.
- [39] 谢增业, 杨春龙, 李剑, 等. 四川盆地致密砂岩天然气成藏特征及规模富集机制: 以川中地区上三叠统须家河组气藏为例[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(8): 1201-1211.
XIE Zengye, YANG Chunlong, LI Jian, et al. Accumulation characteristics and large-medium gas reservoir-forming mechanism of tight sandstone gas reservoir in Sichuan Basin: Case study on the Upper Triassic Xujiahe Formation gas reservoir in central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(8): 1201-1211.
- [40] 印峰, 刘若冰, 王威, 等. 四川盆地元坝气田须家河组致密砂岩气地球化学特征及气源分析[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(3): 621-627.
YIN Feng, LIU Ruobing, WANG Wei, et al. Geochemical characters of the tight sandstone gas from Xujiahe Formation in Yuanba Gas Field and its gas source[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(3): 621-627.
- [41] 吴小奇, 刘光祥, 刘全有, 等. 四川盆地元坝-通南巴地区须家河组天然气地球化学特征和成因[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(6): 955-962.
WU Xiaoqi, LIU Guangxiang, LIU Quanyou, et al. Geochemical characteristics and origin of natural gas in the Xujiahe Formation in Yuanba-Tongnanba area of Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(6): 955-962.
- [42] 张鹏伟, 张洪安, 王学军, 等. 四川盆地普光和通南巴地区须家河组气藏气源探讨[J]. 断块油气田, 2022, 29(2): 145-151.
ZHANG Pengwei, ZHANG Hongan, WANG Xuejun, et al. Origin of natural gas in the Xujiahe Formation in Puguang and Tongnanba area, Sichuan Basin, China[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(2): 145-151.

第一作者简介: 李浩(1995-), 男, 河北任丘人, 中国石油大学(北京)在读博士研究生, 主要从事致密储层断层裂缝综合研究。地址: 北京市昌平区府学路18号, 中国石油大学(北京)地球科学学院, 邮政编码: 102249。E-mail: 1789098232@qq.com

通讯作者简介: 曾联波(1967-), 男, 湖南沅江人, 中国石油大学(北京)教授, 主要从事复杂油气储层成储理论与方法研究。地址: 北京市昌平区府学路18号, 中国石油大学(北京)地球科学学院, 邮政编码: 102249。E-mail: lbzeng@cup.edu.cn

收稿日期: 2025-03-11 修回日期: 2025-10-09

(编辑 黄昌武)