

引用格式:李伟,王民,肖佃师,等.天然裂缝发育特征及智能化识别方法:以四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组为例[J].油气藏评价与开发,2025,15(3):443-454.

LI Wei, WANG Min, XIAO Dianshi, et al. Development characteristics and intelligent identification method of natural fractures: A case study of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(3): 443-454.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.03.011

天然裂缝发育特征及智能化识别方法 ——以四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组为例

李伟^{1,2}, 王民^{1,2}, 肖佃师^{1,2}, 金惠³, 邵好明^{1,2}, 崔俊峰³, 贾益东^{1,2}, 张泽元^{1,2}, 李明⁴

(1. 中国石油大学(华东)深层油气重点实验室, 山东 青岛 266580; 2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 重庆科技大学非常规油气开发研究院, 重庆 401331)

摘要:四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组是四川盆地致密砂岩气(以下简称致密气)增储上产的重要领域。在实际生产中,高产稳产井与裂缝密集发育高度相关,裂缝为气体的运移和保存提供了路径和场所,裂缝发育与否成为制约优质储层形成的关键因素。为了评价须家河组气藏富集“甜点”区,依据岩心观察、测井资料及智能化算法,明确裂缝发育特征并建立有效的裂缝识别方法。研究认为:研究区的构造裂缝、成岩裂缝与异常高压裂缝均有发育。其中,构造裂缝主要分为3期,第1期NW—SE(北西—南东)向主要发育低角度裂缝,偶尔可见高角度裂缝;第2期NNE—SSW(北北东—南南西)向主要发育高角度裂缝;第3期E—W(东—西)向主要发育高角度裂缝。致密气储层裂缝层段具有低密度、高补偿中子、高声波时差、冲洗带电阻率和地层电阻率呈现正幅度差。对带有裂缝和非裂缝标签的常规测井数据进行归一化处理,应用机器学习算法进行裂缝智能化预测,K近邻算法、支持向量机、极端梯度提升树算法和随机森林算法的 F_1 分数分别为0.65、0.83、0.88、0.91,发现随机森林算法具有较强的鲁棒性和抗干扰能力,预测精确度和效率均高于其他3种算法。同时,为了兼顾运算效率与准确性,选择基因遗传算法作为优化算法进行超参数调优,优于网格搜索、贝叶斯优化及粒子群优化算法。使用沙普利可加性特征解释方法(SHapley Additive Explanations, 简称SHAP)计算不同影响因素对预测的贡献值,发现声波时差、补偿中子和补偿密度为主要影响预测效果的测井曲线。裂缝密度呈现出明显的空间分布规律,即从四川盆地西南部至四川盆地西北部,裂缝密度依次降低。研究结果可为四川盆地西部地区致密气储层裂缝“甜点”区预测提供一套切实可行的智能化预测模型,为致密气增储上产奠定基础。

关键词:川西坳陷;须家河组;裂缝发育特征;智能化预测方法;随机森林

中图分类号: TE122

文献标识码: A

Development characteristics and intelligent identification method of natural fractures: A case study of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the western Sichuan Depression, Sichuan Basin

LI Wei^{1,2}, WANG Min^{1,2}, XIAO Dianshi^{1,2}, JIN Hui³, SHAO Haoming^{1,2}, CUI Junfeng³, JIA Yidong^{1,2}, ZHANG Zeyuan^{1,2}, LI Ming⁴

(1. State Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China; 2. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China; 3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China; 4. Institute of Unconventional Oil and Gas Development, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: The Upper Triassic Xujiahe Formation in the western Sichuan Depression, Sichuan Basin is an important area for the increase in reserves and production of tight sandstone gas (hereinafter referred to as “tight gas”) in the Sichuan Basin. In practical production, high-yield and stable production wells are highly correlated with the dense development of fractures. Fractures provide pathways and spaces for gas migration and storage, and whether fractures develop is a key factor restricting the formation of high-quality reservoirs. To evaluate the “sweet spot” enrichment area of the Xujiahe Formation gas reservoir, fracture development characteristics are identified and an effective fracture recognition method is established based on core observation, logging data, and intelligent algorithms. The research suggests that structural fractures, diagenetic fractures, and overpressure fractures all develop in the study area. The structural fractures are mainly divided into three phases: Phase 1 (NW—SE orientation) predominantly develops low-angle fractures, with occasional high-angle fractures; Phase 2 (NNE—SSW orientation) mainly develops high-angle fractures; Phase 3 (E—W orientation) predominantly develops high-angle fractures. The fracture

收稿日期:2024-08-17。

第一作者简介:李伟(1999—),男,在读硕士研究生,主要从事石油地质勘探研究。地址:山东省青岛市黄岛区长江西路66号中国石油大学,邮政编码:266580。E-mail: david0li@126.com

通信作者简介:王民(1981—),男,博士生导师,教授,主要从事致密/页岩油气地质与资源评价等工作。地址:山东省青岛市黄岛区长江西路66号中国石油大学,邮政编码:266580。E-mail: wangm@upc.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目“非常规油气地质评价”(41922015);国家自然科学基金项目“电磁波辐射页岩原位转化中的非热效应机理及其意义”(42072147);国家自然科学基金项目“湖相页岩纹层对有机-无机协同成储及页岩油富集的影响”(42472217)。

segments in the tight gas reservoir display characteristics of low density, high neutron density, high sonic time difference, and positive amplitude differences in deep and shallow lateral resistivity. The conventional logging data with fracture and non-fracture labels were normalized, and machine learning algorithms were applied for fracture intelligent prediction. The F1 scores for the K-nearest neighbors (KNN), support vector machine (SVM), extreme gradient boosting (XGBoost), and random forest algorithms were 0.65, 0.83, 0.88, and 0.91, respectively. It was found that the random forest algorithm demonstrated strong robustness and anti-interference capabilities, with higher prediction accuracy and efficiency compared to the other three algorithms. Additionally, to balance computational efficiency and accuracy, the genetic algorithm was selected as the optimization algorithm for hyperparameter tuning, outperforming grid search, Bayesian optimization, and particle swarm optimization algorithms. Shapley Additive Explanations (SHAP) were used to calculate the contribution of different influencing factors to the predictions. It was found that the sonic time difference, neutron density, and compensated density were the main logging curves influencing prediction accuracy. The fracture density exhibited a clear spatial distribution pattern, decreasing from the southwestern part to the northwestern part of the Sichuan Basin. The research results can provide a practical and feasible intelligent prediction model for the fracture "sweet spot" zone in tight gas reservoirs in the western Sichuan Basin, laying the foundation for increasing reserves and production of tight gas.

Keywords: western Sichuan Depression; Xujiahe Formation; fracture development characteristics; intelligent prediction method; random forest

作为维系中国能源安全的重要资源之一,截至2020年底,中国天然气累计探明地质储量 $17.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中致密砂岩气(以下简称致密气)探明储量 $5.49 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占探明总量的32%,是天然气增储上产的重要发展方向^[1-3]。自1977年四川盆地西北部中坝上三叠统须家河组气藏发现以来,相继发现天府、秋林、新场等大中型气田,证明了四川盆地川西坳陷须家河组致密气的潜力巨大^[4-5]。然而,尽管须家河组致密气勘探取得了丰硕成果,但是须家河组气藏储层具有低孔隙度、低渗透率和油水边界不清等特征,导致资源的发现率较低。在实际生产中,裂缝发育的位置往往是高产区,适当的裂缝为气体的运移和保存提供了路径和场所,裂缝发育与否成为制约优质储层形成的关键因素^[6-10]。须家河组致密气储层经历了印支、燕山、喜马拉雅多期构造运动作用,发育多种类型的裂缝,发育规律受构造、岩性、断裂、构造高部位等多重因素影响,但是由于缺乏有效的裂缝测井评价技术,制约了致密气“甜点”区的勘探。

为了勘探致密气有利富集区,前人针对致密储层裂缝预测做了大量工作。印兴耀等^[11-12]利用储层等效各向异性岩石物理理论和五维地震数据进行裂缝预测,在探测整个研究区或者深部地层裂缝展布方面具有优势,但是地震预测精度远不如测井技术,对于细小裂缝识别较差;刘志远等^[13]通过线性分析方法探究裂缝与常规测井曲线的关系,应用于常规储层,裂缝对测井曲线响应较明显,但是由于致密储层裂缝开度小、非均质性强,裂缝对于储层/油层影响难以厘清等难点,无法应用于致密砂岩裂缝预测;陆国青等^[14]使用极端梯度提升树等机器学习算法,探究裂缝发育情况与常规测井曲线在线性、非线性上的关系,但是由于该算法对噪声与异常值较为敏感,当数据集存在测井曲线缺失、异常值、新老仪器测量差异等情况,裂缝预测结果有一定的偏差。近些年,随着油气公司加快勘探数智化转型,针对研究区新老测井资料质量不一的特点,亟待形成一套基于测井数据抗干扰能力强的机器学习裂缝预测方法。

1 研究区概况

川西坳陷位于四川盆地西部的典型前陆盆地结构带,呈NE—SW(北东—南西)向展布,西以安县—都江堰断裂与龙门山冲断带为界,东以龙泉山—南江一线为界,南以峨眉—荣经断裂与川滇南北构造带为界,北至米仓山前缘,面积约为 $4.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[15-17](图1)。受印支期逆冲推覆作用影响,古特提斯海闭合,四川盆地接受沉积,在中三叠统碳酸盐岩之上,形成了上三叠统须家河组碎屑岩沉积,须家河组地层自下而上分为须家河组一段(以下简称须一段)至须家河组六段(以下简称须六段),为砂泥岩交互沉积,须家河组三段下亚段(以下简称须三下)和须家河组四段(以下简称须四段)为主要的沉积砂体,须六段在川西坳陷大部分地区发生抬升剥蚀^[18-19]。川西坳陷经历了印支、燕山、喜马拉雅多期构造运动作用,产生了一系列的推覆体及断裂,释放了大量的挤压应力,多期裂缝形成的复杂裂缝网络,是川西坳陷在致密砂岩条件下获得高产稳产气井的关键所在^[20-21]。

须家河组致密气储层埋藏深度普遍超过4 000 m,属于深—超深非常规储层,伴有较强的构造和成岩作用,只有在规模较大的裂缝网络与优质储层叠加构成的高效储渗体分布区内勘探才能获得高产稳产^[22-23]。生产动态资料显示:须家河组致密储层单井产能差异较大,在主要的产气层段天然裂缝普遍发育,且裂缝有效性好,少数裂缝被充填;而气测显示差的井段,通常裂缝发育程度差,故而裂缝是高产的主要控制因素^[24-25]。

2 须家河组裂缝特征

2.1 裂缝成因类型

针对研究区54口井4 547 m岩心进行观察及取样制片,岩心尺度上,发现须家河组裂缝根据地质成因可划分

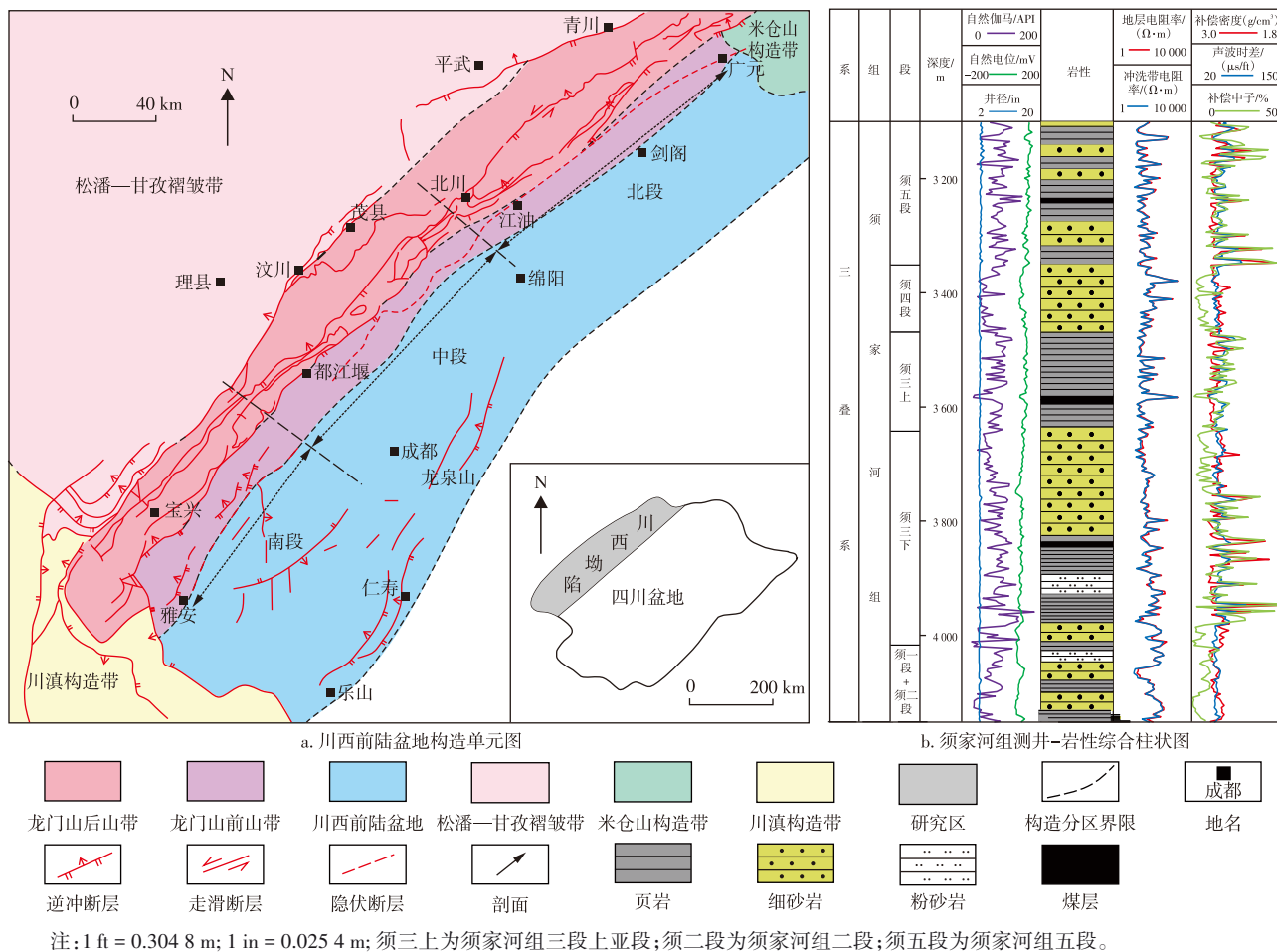


图1 川西坳陷构造区划与须家河组综合柱状图

Fig. 1 Structural zoning of Western Sichuan Depression and comprehensive stratigraphic column of Xujiahe Formation

为构造裂缝、成岩裂缝和异常高压缝3种类型(图2)。其中,构造裂缝按照所受力学性质分为张裂缝和剪切裂缝^[26]。张裂缝在拉张作用下形成,发育在泥岩中,产状不稳定,延伸短;裂缝面粗糙不平,近垂直或者高角度。剪切裂缝在剪切作用下形成,按照倾角产状分为高角度($\geq 45^\circ$)和低角度($< 45^\circ$)剪切裂缝。低角度剪切裂缝表面平直而光滑,低角度剪切裂缝的裂缝面与层面小角度斜交,常见擦痕。成岩裂缝以层理缝为主,在构造作用和成岩作用的共同影响下形成,泥岩和砂岩中均有发育,沿层理方向近水平破裂。异常高压缝在异常地层压力下形成^[27],发育在中粗砂岩中,表现出混杂出现、分布杂乱、走向不定的特征。

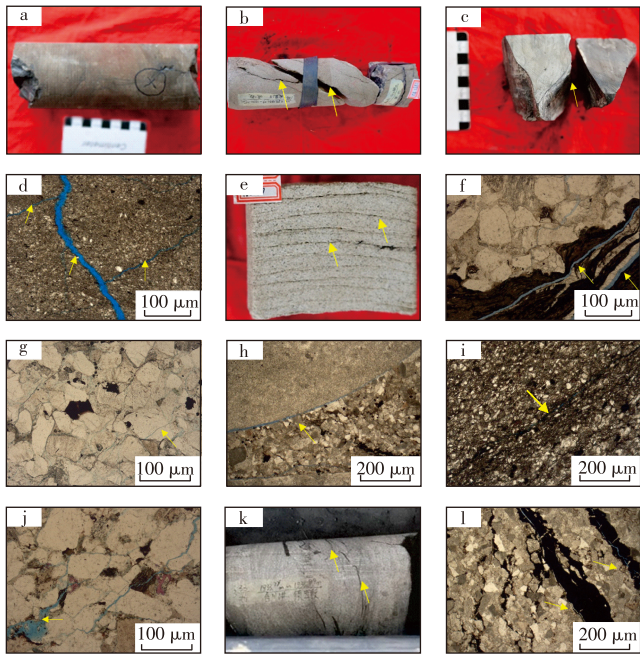
薄片尺度上,成岩微裂缝可进一步划分为层理缝、粒内缝、粒缘缝、溶蚀缝、泥岩收缩缝,普遍被方解石、铁泥质、有机质和沥青质等物质充填,由于须家河组埋藏较深,大部分成岩微裂缝延伸较短,在原始的地下深部对油气的运移和保存作用不大。构造裂缝受应力影响,破裂延伸距离长,并且在构造裂缝附近产生一系列构造微裂缝,打开地下封闭环境,有利于发生烃-水-岩等物质交换,伴随着溶蚀缝的产生,共同构成复杂的裂缝网络系统,便于油气的运移和保存。

2.2 裂缝发育特征

常规测井是对井壁周围岩石、孔隙、流体、裂缝、钻井液等地层特征的综合响应,裂缝发育段具有对应的测井响应特征,并且资料来源方便、价格低廉、数据丰富,但是由于裂缝产状、充填导致的强非均质性、岩石物理响应不敏感及外部因素干扰等缺点,依靠单一的测井曲线并不能准确地进行裂缝识别^[28-29]。以LQ1井为例(图3),根据常规测井曲线和岩心观察裂缝特征进行吻合,探究常规测井曲线在裂缝发育层段存在的对应关系。

据统计,四川盆地西北部主要分为2期构造裂缝(图4)。倾角集中于 $20^\circ \sim 40^\circ$,NW—SE(北西—南东)向主要发育低角度裂缝,偶尔可见高角度裂缝;NNE—SSW(北北东—南南西)向主要发育高角度裂缝;E—W(东—西)向主要发育高角度裂缝,细砂岩最为发育裂缝,其次为砾岩。

裂缝密度是指裂缝面法线方向单位长度上的裂缝条数,是衡量裂缝发育程度的重要参数。岩心观察结果表明:南段裂缝密度平均值为1.163条/m,北段裂缝密度平均值为0.552条/m,反映四川盆地西部地区不同构造段裂缝的发育程度不同,南段至北段的裂缝发育程度降低。



注:a. PLA8井,须五段,2 420.08 m,泥岩,张裂缝;b. LQ1井,须三下,1 891.82 m,细砂岩,高角度剪切裂缝;c. QL12井,须三下,3 920.26 m,低角度剪切裂缝;d. QL2井,须五段,3 243.65 m,泥岩,构造微裂缝;e. YQ101井,须四段,2 765.2 m,层理缝;f. W4井,须四段,3 525.16 m,含泥砾细砂岩,泥岩收缩缝;g. JM103井,须四段,4 196.21 m,细砂岩,粒内缝;h. G2井,须三上,3 733.46 m,含砾屑石灰岩,粒缘缝;i. GT1井,须三下,3 447.55 m,岩屑杂砂岩,层理缝;j. W4井,须四段,3 522.15 m,细砂岩,溶蚀缝;k. HC1井,须五段,1 933.2 m,粗砂岩,异常高压缝;l. G2井,须三上,3 737.9 m,白云质石灰岩,异常高压缝。

图2 川西坳陷须家河组储层宏观和微观的裂缝照片

Fig. 2 Macroscopic and microscopic fracture photos of reservoir in Xujiahe Formation, western Sichuan Depression

统计不同类型裂缝与岩性的关系中发现,张裂缝主要在泥岩或粉砂质泥岩等细粒岩性中发育,且发育数量较少,基本被碳质充填;剪切裂缝数量较多且在各个岩性中均有发育,在中砂岩和细砂岩中尤为发育;层理缝数量较多且在各个岩性中均有发育,在泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩等细粒岩性中尤为发育;超压缝主要出现在粗砂岩中,基本被沥青充填。

2.3 裂缝测井响应特征

根据8条常规测井曲线建立交汇图,探究裂缝层段与非裂缝层段测井特征(图5)。自然电位是测量地层的自然电位,对比发现裂缝发育与否并不能引起地层电位的变化,自然电位介于23.074~40.764 mV;井径测量井眼的大小和形状,裂缝发育层段易发生垮塌导致井径扩大,然而松散地层也会引起数值的变大,然后对比发现由于中—细砂岩较为致密,不易发生井眼的变化,井径介于6.108~6.565 in(1 in=0.025 4 m);自然伽马测量来自井眼周围地层的自然伽马辐射,空裂缝在可能积累放射性元素导致数值升高,但是特殊矿物和薄层泥岩等情况也会导致数值升

高,自然伽马在裂缝层段介于75.259~157.965 API,在非裂缝层段介于61.089~169.037 API,自然伽马影响因素较多,可以作为划分裂缝层段的参考;补偿密度测量地层的体密度,地下开启的空裂缝会使数值减小,然而,薄层泥岩和高孔隙度地层等情况也会使补偿密度减小,研究区补偿密度在裂缝层段介于2.233~2.675 g/cm³,在非裂缝层段介于2.373~2.675 g/cm³;声波时差测量声波穿过地层的速度,在裂缝段声波速度会由于介质突变而变小,引起声波时差曲线增大,然而高角度裂缝和直立裂缝对波速下降的影响很小,变化并不明显,声波时差在裂缝层段介于57.693~87.477 μs/ft(1 ft=0.304 8 m),非裂缝层段介于56.900~77.752 μs/ft;补偿中子测量地层对 neutron 辐射的响应,在裂缝段,如果裂缝处于张开并充满流体,会引起数值的变大,但是裂缝中其他流体也会引起变化,补偿中子在裂缝层段介于2.974%~16.477%,在非裂缝层段介于3.166%~17.019%;冲洗带电阻率、地层电阻率测量地层的电阻率在裂缝层段由于泥浆侵入的存在通常会正幅度差的特征,变化介于17.039~73.577 Ω·m。

通过图5分析可知,裂缝层段具有低密度、高补偿中子、高声波时差的特征,同时冲洗带电阻率和地层电阻率呈现正幅度差,但是这种线性关系不足以完全划分裂缝层段和非裂缝层段,仍然存在较大的重合部分,需要使用智能算法进一步探索2类数据的线性和非线性关系,实现高效、准确地划分裂缝层段和非裂缝层段。

3 裂缝智能化预测方法及应用

3.1 数据预处理

归一化处理是机器学习分类的1项基础工作。由于各类测井曲线的量纲不同且差异较大,如果直接将测井数据作为输入训练模型,会影响裂缝识别的结果。为了消除量纲对分类效果的影响,需要对数据进行归一化处理,通过最大最小归一化函数将输入曲线值映射到[0,1],即该组曲线中最大值为1,最小值为0。定义如下:

$$x^* = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式中: x^* 为归一化的数据; x_{\min} 为样本数据最小值; x_{\max} 为样本数据最大值。归一化后,所有测井数据值均介于[0,1]。

3.2 随机森林算法

随机森林(Random Forest,简称RF)算法是1种使用自举聚合和随机预测方法来实现高预测精度的决策树算法^[30]。单个决策树通常难以处理复杂因变量的任务,然而创建大量随机化的决策树,对分类问题进行加权投票,大大增强了预测结果的可信度^[31]。

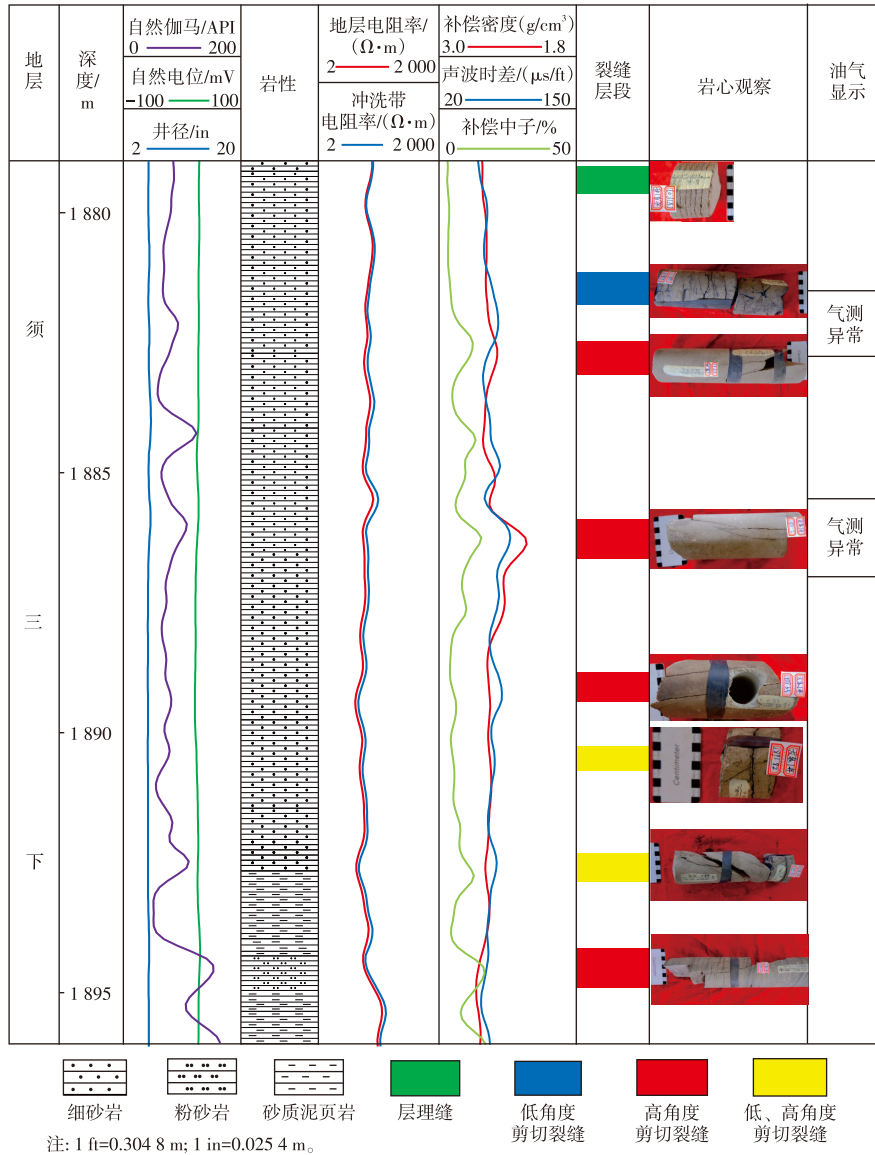


图3 岩心观察裂缝与测井曲线对应关系

Fig. 3 Corresponding relationship between core observation fractures and logging curves

分类与回归树(Classification And Regression Trees, 简称 CART)算法是常用的决策树生成算法之一,可以处理高度倾斜或多态的数值型数据,也可处理顺序或无序的类属型数据^[32]。决策树计算速度快,且容易转化为分类规则,但是容易过拟合,泛化能力不强,划分偏向于拥有更大样本占比,忽略属性间的相关性。

随机森林基于 CART 决策树改进,通过有放回抽取样本和无放回选择特征构建多棵树,并通过加权投票组合生成最终预测结果。

随机森林算法的工作流程为:①按照 3:7 的比例随机划分测试集和训练集;②从训练样本集 S 中随机有放回抽取 n 个子样本集,并结合特征参数训练决策树;③加权汇总决策树结果与测试集进行对比,通过网格搜索算法改进不同特征参数权重;④优选最佳权重汇总决策树并输出最后结果。

3.3 模型参数优选

为了得到最佳的模型分类性能,一般使用网格搜索和 K-折交叉验证法为模型选取合适的参数。在基于随机森林算法建立的裂缝识别模型中,包含对模型性能影响较大的参数,例如迭代次数(决策树数量)过多易导致过拟合,过少则可能欠拟合,均会削弱模型的泛化能力。森林中树木数量决定每次分裂时的特征选择,较小值增加随机性,有助于防止过拟合,但可能降低性能。最大树深度控制模型复杂度,过小会欠拟合,降低准确率;过大则易过拟合,影响泛化能力。分裂时的特征数量影响模型复杂性、训练速度和泛化性能。节点分裂的最小样本数设限,可控制树深度并防止过拟合。随机森林算法的重要参数、搜索范围及步长如表 1 所示。

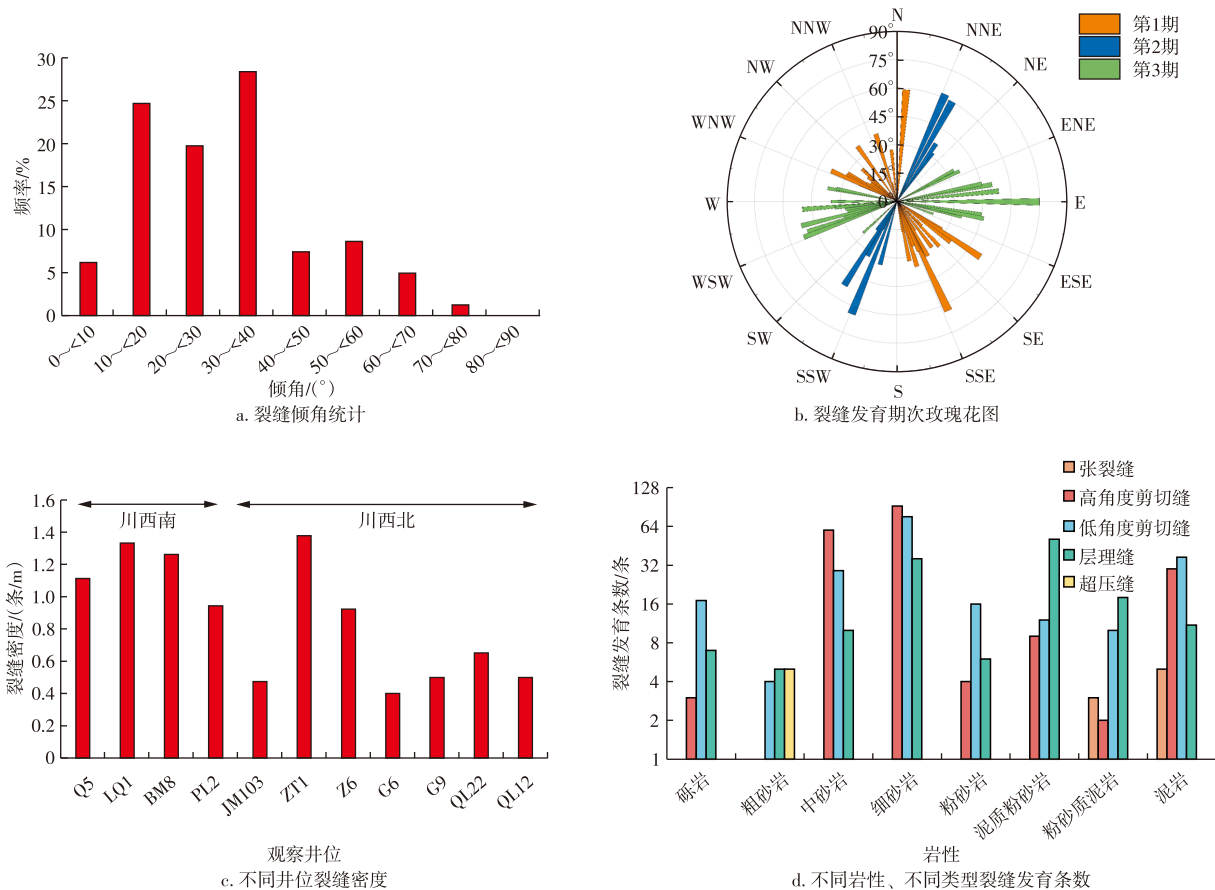
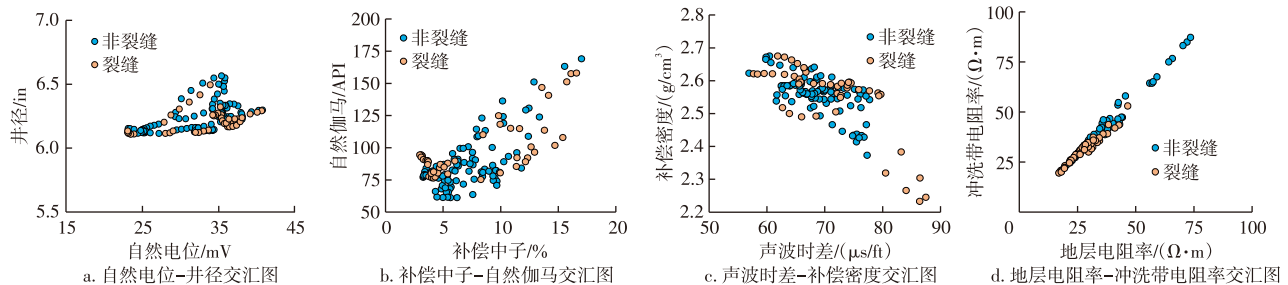


图4 裂缝特征及发育情况统计

Fig. 4 Fracture characteristics and development statistics



注: 1 ft=0.304 8 m; 1 in=0.025 4 m。

图5 8种常规测井曲线裂缝层段交汇图

Fig. 5 Intersection diagrams of 8 conventional logging curves for fracture zones

表1 随机森林超参数类型

Table 1 Random forest hyperparameter types

超参数	搜索空间	步长	最优值
迭代次数	(100,500)	2.0	120.0
森林中的树木数量	(2,500)	1.0	15.0
寻找最佳拆分时考虑的功能数量	(2,50)	1.0	15.0
最大树深度	(1,50)	1.0	25.0
叶子结点最小样本数量	(1,100)	1.0	1.0

由于样本数量较少,故使用5-折交叉验证对模型的参数进行调优。5-折交叉验证将训练集随机分为5个等大小子集,依次用4个训练,1个验证,循环5次,取验证

结果的平均值作为评分。多组参数中,选择评分最高的1组作为最佳参数。完成参数调整后,确定随机森林算法最优参数组合。

在使用随机算法的同时,应用KNN、SVM、XGB的算法进行裂缝预测,并且按照不同的模型进行参数优选(表2)。

3.4 模型评价

采用查准率、查全率和 F_1 分数评价分类模型的优劣。 F_1 分数为查准率和查全率的调和平均数,是统计学中用来衡量二分类模型精确度的1种标准。以上评价指标公式如下:

表2 传统算法超参数类型
Table 2 Hyperparameter types for traditional algorithms

算法	工作原理	超参数	搜索范围/类别	步长	最优值
KNN	新样本根据其临近的若干个已知样本的标签来进行分类,或者通过临近的若干个样本的平均值进行回归	近邻数量	(3,9)	1.0	4.0
		距离度量方法	uniform/distance		distance
		距离阶数	(1,6)	1.0	3.0
SVM	通过在高维空间寻找1个决策边界,将不同类别的数据差点分开	正则化参数	(20,75)	1.0	25.0
		核函数参数	(5,15)	1.0	12.0
		多项式参数	(2,5)	1.0	3.0
XGB	通过构建多个弱学习器(通常为决策树),并依此对前一个模型的残差进行拟合,以此来提升模型性能	决策树数量	(10,100)	5.0	45.0
		树的最大深度	(3,12)	1.0	7.0
		叶子结点最小样本权重和	(1,10)	1.0	1.0
		分裂阈值	(0,0.5)	0.1	0.1

注:KNN为K近邻算法;SVM为支持向量机算法;XGB为极端梯度提升决策树算法;uniform为均匀间隔采样;distance为距离优化采样。

$$P = \frac{T_p}{T_p + F_p} \quad (2)$$

$$R = \frac{T_p}{T_p + F_N} \quad (3)$$

$$F_1 = 2 \frac{PR}{P + R} \quad (4)$$

式中: P 为查准率,指预测为正例的预测集内,正例预测正确的比事例; R 为查全率,指整个正类样本中,预测正确的样本所占的比事例; T_p 为真正例,指预测为正的样本; F_p 为假正例,指预测为正的负样本; F_N 为假负例,指预测为负的正样本。

通过比较4种算法预测裂缝结果的查准率、查全率与 F_1 分数(表3),随机森林模型正确预测的样本数占总样本数的比例最高。KNN、SVM、XGB、RF的 F_1 分数分别为0.65、0.83、0.88、0.91,随机森林模型的预测性能表现最为良好,综合发现随机森林算法均优于其他3种算法。

表3 4种算法的查准率、查全率与 F_1 分数

Table 3 Precision rate, recall rate, and F_1 score of four algorithms

评价指标	查准率	查全率	F_1 分数
RF	0.82	0.88	0.91
KNN	0.77	0.69	0.65
SVM	0.65	0.77	0.83
XGB	0.76	0.84	0.88

单井裂缝预测表明:KNN、SVM、XGB、RF各算法在裂缝预测中均表现出一定的有效性(图6),但在实际应用中,算法的鲁棒性和准确度至关重要。具体来说,随机森林模型在多种评估指标上均优于其他模型,显示出其卓越的抗干扰能力。这表明随机森林在处理高维度和噪声较大的数据时,能够保持稳定的预测性能。此外,随机森林模型对裂缝层段和非裂缝层段的分类表现尤为出色,其高识别精度使其在实际应用中具有重要的参考价值。该模型

在未知裂缝数据集上的识别精度均超过80%,反映了模型的良好泛化能力,证明其在裂缝预测任务中的应用潜力。

3.5 测井参数重要性分析

SHAP(SHapley Additive exPlanations,简称SHAP,中文为“沙普利可加性特征解释”)模型是由LUNDBERG等^[33]提出的一种基于附加特征属性的解释机器学习模型的方法。使用沙普利可加性特征解释方法来计算不同特征对预测的贡献值,可以用于解释各种分类和回归模型中不同参数对模型预测结果的重要性^[34],与随机森林中的特征重要性分析或统计学习中的P值(P value,用来判定假设检验结果的1个参数)等传统方法相比,SHAP模型在评估特征重要性时能够进一步提高了模型的透明度,了解单个特征对模型预测的影响,促进更好的决策和优化^[35],其计算公式为:

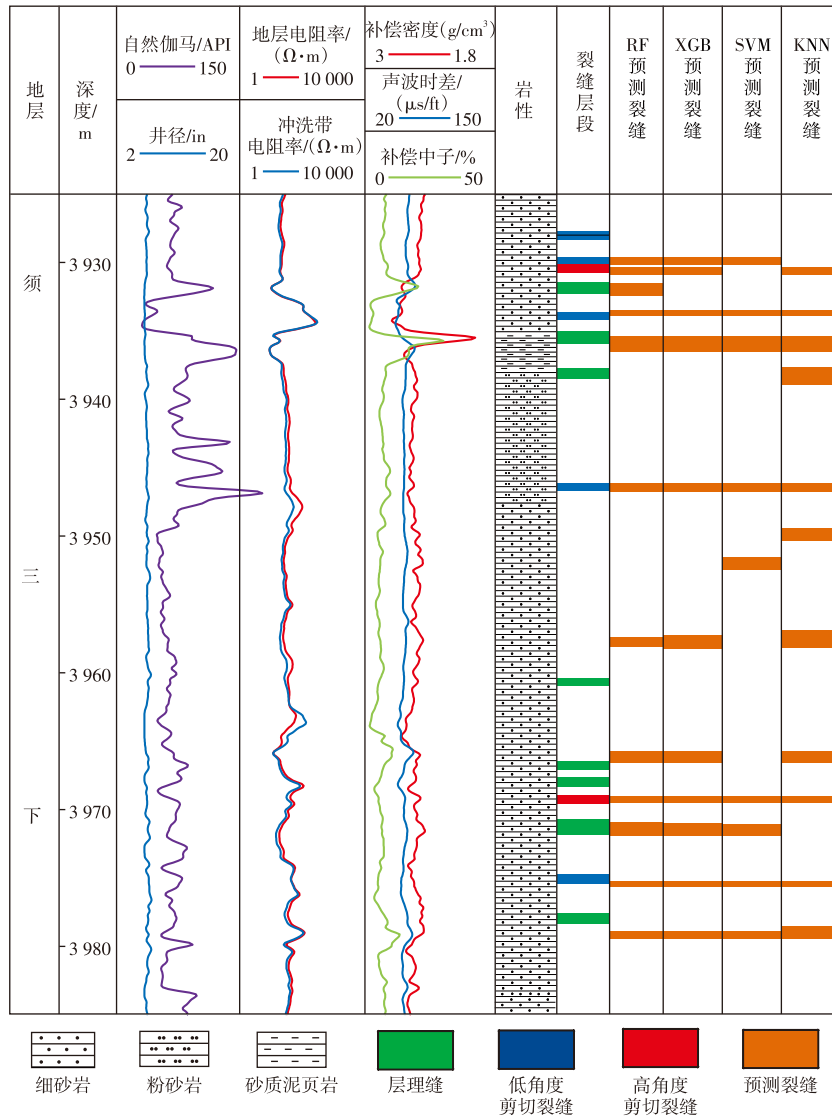
$$\phi_j = \sum_{S \subseteq \{x_1, x_2, \dots, x_p\} \setminus \{x_j\}} \frac{|S|!(p-|S|-1)!}{p!} [f_x(S \cup \{x_j\}) - f_x(S)] \quad (5)$$

式中: ϕ_j 为特征 j 的贡献度; S 为输入特征的可能的子集, $\{x_1, \dots, x_p\}$ 是所有输入特征的集合; p 为输入特征的个数; $\{x_1, x_2, \dots, x_p\} \setminus \{x_j\}$ 为不包括 $\{x_j\}$ 的所有输入特征可能的集合; $f_x(S)$ 为特征子集 S 的预测; $\frac{|S|!(p-|S|-1)!}{p!}$ 为子集 S 的特征组合情况占比。

使用SHAP方法量化测井参数重要性(图7),其结果表明,声波时差、补偿中子、补偿密度为主要影响预测效果的测井曲线。

3.6 模型优化

网格搜索算法虽然是1种常见的超参数寻优方法,但是其在寻找到全局最优解方面存在一定的局限性。考虑引入优化算法,比如基于不同替代函数的贝叶斯优化



注: 1 ft=0.304 8 m; 1 in=0.025 4 m。

图6 4种模型预测裂缝与岩心观察裂缝对比

Fig. 6 Comparison of fractures predicted by four models and observed in core

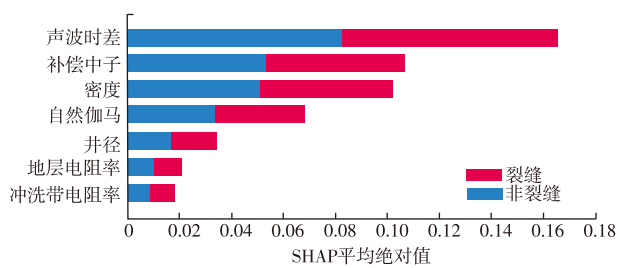


图7 SHAP方法量化测井参数重要性

Fig. 7 SHAP method for quantifying importance of logging parameters

算法^[36], 还有通过进化算法的思想来实现基因遗传算法以及粒子群优化算法^[37-38], 以此来进一步提升超参数调优的效率和效果, 用以评估其在超参数选择中的性能差异。

对比网格搜索算法、贝叶斯算法、基因遗传算法和粒子群算法4种优化算法(表4), 通过最佳得分以及运行时间进行对比, 发现网格搜索算法的运行时间最短, 同时也

表4 4种优化算法的准确率与运行时间

Table 4 Accuracy and running time of four optimization algorithms

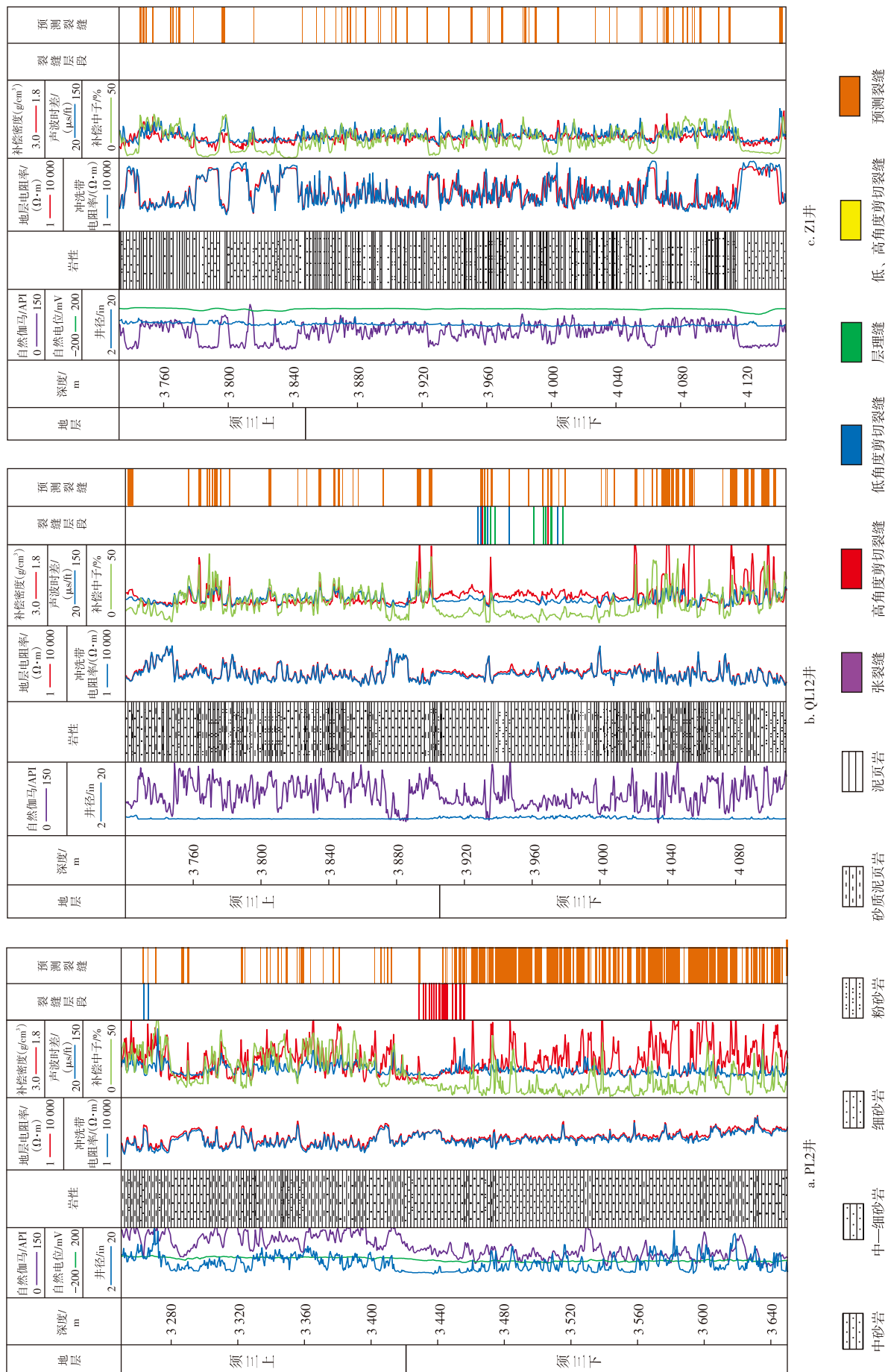
优化算法	准确率	运行时间/s
网格搜索算法	0.903 625	2.87
贝叶斯算法	0.898 794	61.68
基因遗传算法	0.927 711	38.05
粒子群算法	0.915 667	401.42

注: 准确率为预测正确样本比例占总预测样本比例的百分比。

具有较高的准确率, 但是基因遗传算法具有4种算法最高的准确率, 以及较高的运行效率, 为了同时兼顾预测准确性和时间, 选择基因遗传算法作为优化算法效果最佳。

3.7 裂缝智能化预测方法应用

对四川盆地西南部至四川盆地西北部3个典型井进行裂缝预测研究(图8), 结果表明裂缝密度呈现出明显



注: 1 ft=0.304 8 m; 1 in=0.025 4 m。

图8 川西坳陷PL2井—QL12井—Z1井须三段裂缝预测
Fig. 8 Fracture prediction of the third member Xujiahe Formation in well PL2, well QL12, and well Z1, western Sichuan Basin Sag, western Sichuan Depression

的空间分布规律,即从四川盆地西南部至四川盆地西北部,裂缝密度依次降低,这一现象反映了构造作用在不同区域的强度差异。具体而言,川西南段的裂缝密度最高,表明该区域的构造应力作用较为强烈。随着研究区域向北推进,裂缝密度逐渐减少,表明川西坳陷的构造作用在南段的强度高于北段。这种分布规律可能与区域构造背景的差异、应力场的变化以及地质构造演化过程中的差异有关。

4 结论

1) 四川盆地西北部主要分为3期构造裂缝,形成低角度和高角度裂缝,为致密气导输和储存提供空间。第1期NW—SE向主要发育低角度裂缝,偶尔可见高角度裂缝;第2期NNE—SSW向主要发育高角度裂缝;第3期E—W向主要发育高角度裂缝。

2) 致密砂岩储层的陷陷层段表现出低密度、高补偿中子、高声波时差、冲洗带电阻率和地层电阻率呈正振幅差的特征。采用基因遗传算法进行参数调优的随机森林算法在处理高变异和高噪声数据时保持了较好的预测稳定性,预测精度和效率均优于其他模型。声波时差、补偿中子、补偿密度为主要影响预测效果的测井曲线。

参考文献

- 贾爱林,位云生,郭智,等.中国致密砂岩气开发现状与前景展望[J].天然气工业,2022,42(1):83-92.
JIA Ailin, WEI Yunsheng, GUO Zhi, et al. Development status and prospect of tight sandstone gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 83-92.
- 李鹭光.中国天然气工业发展回顾与前景展望[J].天然气工业,2021,41(8):1-11.
LI Luguang. Development of natural gas industry in China: Review and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 1-11.
- 祝彦贺,赵志刚,路媛媛,等.中国海油陆上致密砂岩气勘探研究进展及关键技术[J].中国海上油气,2024,36(6):13-25.
ZHU Yanhe, ZHAO Zhigang, LU Yuanyuan, et al. Research progress and key technologies for exploration of onshore tight sandstone gas by CNOOC[J]. China Offshore Oil and Gas, 2024, 36(6): 13-25.
- 张烈辉,胡勇,李小刚,等.四川盆地天然气开发历程与关键技术进展[J].天然气工业,2021,41(12):60-72.
ZHANG Liehui, HU Yong, LI Xiaogang, et al. History and key technological progress of natural gas development in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(12): 60-72.
- 张道伟,杨雨.四川盆地陆相致密砂岩气勘探潜力与发展方向[J].天然气工业,2022,42(1):1-11.
ZHANG Daowei, YANG Yu. Exploration potential and development direction of continental tight sandstone gas in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 1-11.
- 王溯,陈勉,吕嘉昕.水力压裂多裂缝扩展诱发光纤应变演化试验研究[J].石油机械,2024,52(8):101-107.
WANG Su, CHEN Mian, LYU Jiixin. Experimental study on fiber strain evolution induced by multi-fracture propagation in hydraulic fracturing[J]. China Petroleum Machinery, 2024, 52(8): 101-107.
- 陈旋,贾雪丽,王波,等.吐哈盆地丘东洼陷深层致密砂岩油气富集主控因素[J].中国海上油气,2024,36(6):26-38.
CHEN Xuan, JIA Xueli, WANG Bo, et al. Main controlling factors for the enrichment of oil and gas in deep tight sandstone in the Qiudong Sub-sag of the Turpan-Hami Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2024, 36(6): 26-38.
- 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:以四川盆地川西坳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.
- 雷越,黄崧,王旭丽,等.川西北地区须家河组二段致密砂岩储层特征及其主控因素[J].特种油气藏,2023,30(5):50-57,66.
LEI Yue, HUANG Qian, WANG Xuli, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of tight sandstone in member 2 of the Xujiahe Formation in Northwest Sichuan[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2023, 30(5): 50-57, 66.
- 梁霄.川西坳陷北段复杂地质构造背景下深层海相油气成藏过程研究[D].成都:成都理工大学,2020.
LIANG Xiao. The deep marine hydrocarbon accumulation process under complex tectonic background in the Northern Segment of Western Sichuan Depression[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- 印兴耀,马正乾,宗兆云,等.地震岩石物理驱动的裂缝预测技术研究现状与进展(II):五维地震裂缝预测技术[J].石油物探,2022,61(3):373-391.
YIN Xingyao, MA Zhengqian, ZONG Zhaoyun, et al. Review of fracture prediction driven by the seismic rock physics theory (II): Fracture prediction from five-dimensional seismic data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(3): 373-391.
- 周康,王强,乔永亮.龙门山造山带与川西前陆盆地的盆山耦合关系对油气成藏的控制作用[J].地球科学与环境学报,2011,33(4):378-383.
ZHOU Kang, WANG Qiang, QIAO Yongliang. Control of the basin-range coupling relationship between Longmen Mountain Orogenic Belt and Western Sichuan Foreland Basin to hydrocarbon accumulation[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(4): 378-383.
- 刘志远,李浩,武清钊,等.致密砂岩裂缝测井识别特色技术及其应用效果:以四川盆地川西坳陷新场气田上三叠统须家河组二段为例[J].石油与天然气地质,2021,42(4):981-991.
LIU Zhiyuan, LI Hao, WU Qingzhao, et al. Characteristics and application effect of logging-based fracture identification in tight

- sandstones: A case study of the Upper Triassic Xu 2 Member in Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(4): 981-991.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 李双建,李智,张磊,等.四川盆地川西坳陷三叠系盐下超深层油气成藏条件与勘探方向[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(6): 1555-1567.
- LI Shuangjian, LI Zhi, ZHANG Lei, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration targets of the Triassic subsalt ultra-deep sequences in the western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1555-1567.
- [17] 曹正林,张本健,杨荣军,等.川西地区上三叠统须家河组全油气系统成藏模式新认识[J]. *天然气工业*, 2023, 43(11): 40-53.
- CAO Zhenglin, ZHANG Benjian, YANG Rongjun, et al. New understanding of hydrocarbon accumulation model in whole petroleum system of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the western Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(11): 40-53.
- [18] 邱玉超,许强,李一博,等.四川盆地天府地区上三叠统须家河组四段致密储层砂体刻画及有利储层预测[J]. *特种油气藏*, 2024, 31(3): 18-26.
- QIU Yuchao, XU Qiang, LI Yibo, et al. Characterization of tight sandstone reservoirs and prediction of favorable reservoirs in the Fourth Member of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Tianfu area of the Sichuan Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2024, 31(3): 18-26.
- [19] 刘忠群,徐士林,刘君龙,等.四川盆地川西坳陷深层致密砂岩气藏富集规律[J]. *天然气工业*, 2020, 40(2): 31-40.
- LIU Zhongqun, XU Shilin, LIU Junlong, et al. Enrichment laws of deep tight sandstone gas reservoirs in the western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(2): 31-40.
- [20] 姜自然,陆正元,刘斐,等.川西拗陷新场气田须家河组宽大裂缝及其油气地质意义[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 50(1): 34-42.
- JIANG Ziran, LU Zhengyuan, LIU Fei, et al. Study of Xujiahe Formation macro-fractures in Xinchang Gas Field in western Sichuan Depression and their oil & gas geological significance[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 2023, 50(1): 34-42.
- [21] 李智武,宋天慧,王自剑,等.川西-龙门山盆山系统走向差异演化的变形、隆升和沉积记录及关键构造变革期讨论[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(3): 257-282.
- LI Zhiwu, SONG Tianhui, WANG Zijian, et al. Strike variation evolution of the basin-mountain system in western Sichuan Longmenshan as recorded by deformation, exhumation and deposition and discussion on the period of key structural transformation[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 2021, 48(3): 257-282.
- [22] 黄莉莎,闫建平,刘明洁,等.深层致密砂岩气储层成岩相测井识别及应用:以川西坳陷大邑须家河组须三段为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(1): 107-123.
- HUANG Lisha, YAN Jianping, LIU Mingjie, et al. Diagenetic facies logging identification and application of deep tight sandstone gas reservoir: A case study of the third member of Xujiahe formation in Dayi area of western Sichuan depression[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(1): 107-123.
- [23] 郑和荣,刘忠群,徐士林,等.四川盆地中国石化探区须家河组致密砂岩气勘探开发进展与攻关方向[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(4): 765-783.
- ZHENG Herong, LIU Zhongqun, XU Shilin, et al. Progress and key research directions of tight gas exploration and development in Xujiahe Formation, Sinopec exploration areas, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(4): 765-783.
- [24] 吕文雅,苗凤彬,张本健,等.四川盆地剑阁地区须家河组致密砾岩储层裂缝特征及对天然气产能的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(3): 484-491.
- LYU Wenya, MIAO Fengbin, ZHANG Benjian, et al. Fracture characteristics and their influence on natural gas production: A case study of the tight conglomerate reservoir in the Upper Triassic Xujiahe Formation in Jian'ge area, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(3): 484-491.
- [25] 叶泰然,张虹,唐建明.深层裂缝性致密碎屑岩气藏高效储渗区识别:以川西新场气田上三叠统须家河组气藏为例[J]. *天然气工业*, 2009, 29(11): 22-26.
- YE Tairan, ZHANG Hong, TANG Jianming. Identification of high efficiency payzones with high permeability in deep fractured tight detrital reservoirs: A case study of gas reservoirs in the Upper Triassic Xujiahe Formation of Xinchang gas field in western Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(11): 22-26.
- [26] 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.
- [27] 高志勇,崔京钢,樊小容,等.流体异常高压对深层储集层物理性质的作用机理:以准噶尔盆地南缘侏罗系头屯河组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(6): 1221-1232.
- GAO Zhiyong, CUI Jinggang, FAN Xiaorong, et al. Action mechanisms of abnormal fluid pressure on physical properties of deep reservoirs: A case study on Jurassic Toutunhe Formation in the southern margin of Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(6): 1221-1232.
- [28] 杨秀春,宋柏荣,陈国辉,等.大宁-吉县区块深层煤岩多尺度孔隙结构特征[J]. *特种油气藏*, 2022, 29(5): 94-100.

- YANG Xiuchun, SONG Bairong, CHEN Guohui, et al. Characteristics of multi-scale pore-fracture structure of deep coal rocks in the Daning-Jixian Block[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(5): 94-100.
- [29] 钟高润, 张小莉, 杨振, 等. 鄂尔多斯盆地定边—志丹地区延长组致密砂岩储层裂缝测井识别[J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(4): 1669-1675.
- ZHONG Gaorun, ZHANG Xiaoli, YANG Zhen, et al. Logging identification method for fractures in tight sandstone reservoirs of Yanchang Formation in Dingbian-Zhidan area, Ordos Basin[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(4): 1669-1675.
- [30] RIGATTI S J. Random forest[J]. *Journal of Insurance Medicine*, 2017, 47(1): 31-39.
- [31] BREIMAN L. Random forests[J]. *Machine learning*, 2001, 45: 5-32.
- [32] 栾丽华, 吉根林. 决策树分类技术研究[J]. *计算机工程*, 2004(9): 94-96.
- LUAN Lihua, JI Genlin. The study on decision tree classification techniques[J]. *Computer Engineering*, 2004(9): 94-96.
- [33] LUNDBERG S M, LEE S I. Proceedings of the 31st information conference on neural information proceeding systems[C]. California: Curran Associates, 2017: 4768-4777.
- [34] KIM Y, KIM Y. Explainable heat-related mortality with random forest and SHapley Additive exPlanations (SHAP) models[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 79: 103677.
- [35] BAIG N, ABBA S I, USMAN J, et al. Bio-inspired MXene membranes for enhanced separation and anti-fouling in oil-in-water emulsions: SHAP explainability ML[J]. *Cleaner Water*, 2024, 2: 100041.
- [36] ZHOU N, SHANG B, XU M, et al. Enhancing photovoltaic power prediction using a CNN-LSTM-attention hybrid model with Bayesian hyperparameter optimization[J]. *Global Energy Interconnection*, 2024, 7(5): 667-681.
- [37] ŞAHIN C, TEMEL F A, YOLCU O C, et al. Simulation and optimization of cheese whey additive for value-added compost production: Hyperparameter tuning approach and genetic algorithm [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 370: 122796.
- [38] CHANG X, LIU T, SHI B, et al. An improved algorithm with particle swarm optimization-extreme gradient boosting to predict the contents of pyrolytic hydrocarbons in source rocks[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2024, 276: 106367.

(编辑 常燕)

(上接第442页)

- [19] 吕辉军, 王晔, 李德毅, 等. 逆向云在定性评价中的应用[J]. *计算机学报*, 2003, 26(8): 1009-1014.
- LU Huijun, WANG Ye, LI Deyi, et al. The application of backward cloud in qualitative evaluation[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2003, 26(8): 1009-1014.
- [20] 刘常昱, 冯芒, 戴晓军, 等. 基于云X信息的逆向云新算法[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(11): 2417-2420.
- LIU Changyu, FENG Mang, DAI Xiaojun, et al. A new algorithm of backward cloud[J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(11): 2417-2420.
- [21] 王惠君, 卢双舫, 乔露, 等. 南川页岩气地质工程一体化优化中的参数敏感性分析[J]. *地球科学*, 2023, 48(1): 267-278.
- WANG Huijun, LU Shuangfang, QIAO Lu, et al. Parameter sensitivity analysis in geology-engineering integration optimization for shale gas in Nanchuan Block[J]. *Earth Science*, 2023, 48(1): 267-278.
- [22] 王珂, 张荣虎, 赵继龙, 等. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带走滑作用对构造裂缝的影响[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(8): 1316-1327.
- WANG Ke, ZHANG Ronghu, ZHAO Jilong, et al. Implication of strike-slipping to tectonic fractures in the Kelasu structural belt, Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(8): 1316-1327.
- [23] 王珂, 慈兴华, 杜焕福, 等. 塔里木盆地顺北碳酸盐岩元素地球化学特征与油气富集机制[J]. *世界石油工业*, 2024, 31(2): 55-64.
- WANG Ke, CI Xinghua, DU Huanfu, et al. Geochemical characteristics and oil & gas enrichment mechanisms of carbonate rocks in Shunbei area of Tarim Basin[J]. *World Petroleum Industry*, 2024, 31(2): 55-64.
- [24] 胡来东, 张志林, 徐雷良, 等. 塔里木盆地顺北地区碳酸盐岩断控储集体连通性量化表征[J]. *世界石油工业*, 2024, 31(6): 30-37.
- HU Laidong, ZHANG Zhilin, XU Leiliang, et al. Internal connectivity quantitative characterization of fault-controlled grid reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin[J]. *World Petroleum Industry*, 2024, 31(6): 30-37.
- [25] 杨宁, 王贵文, 李潮流, 等. 塔里木盆地大北地区巴什基奇克组成岩相测井识别[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(5): 18-24.
- YANG Ning, WANG Guiwen, LI Chaoliu, et al. Reservoir diagenetic facies of Bashijiqike Formation in Dabei gas field compartmentalization and quantitative evaluation[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2014, 38(5): 18-24.
- [26] 邓美洲, 牛娜, 尹霜, 等. 各向异性致密砂岩气藏分段压裂水平井气水两相产能预测模型[J]. *油气地质与采收率*, 2024, 31(3): 99-111.
- DENG Meizhou, NIU Na, YIN Shuang, et al. Gas-water two-phase productivity prediction model of multistage fractured horizontal wells in anisotropic tight sandstone gas reservoirs[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2024, 31(3): 99-111.

(编辑 尹淑容)