

引用格式: 王嘉伟, 张伯虎, 胡尧, 等. 页岩气储层多期构造应力场反演与裂缝演化[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(4): 560-568.

WANG Jiawei, ZHANG Bohu, HU Yao, et al. Inversion of multiphase tectonic stress field and fracture evolution in shale gas reservoirs[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(4): 560-568.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024.04.005

页岩气储层多期构造应力场反演与裂缝演化

王嘉伟¹, 张伯虎^{1,2}, 胡尧¹, 何政毅¹, 胡欣欣¹, 陈伟¹, 罗超³

(1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 2. 西南石油大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 四川 成都 610500; 3. 中国石油西南油气田公司页岩气研究院, 四川 成都 610056)

摘要: 川南泸州区块五峰组—龙马溪组的页岩气蕴藏量大, 构造运动使地应力局部集中, 从而引起裂缝和断层的产生, 对页岩气的勘探开发有较大影响。为了优选页岩气勘探区, 采用地震综合资料、古构造图和岩石力学参数测试等方法, 运用神经网络算法和地质力学建模方法, 对研究区多期古构造应力场进行反演, 并对应力影响下的储层裂缝发育规律进行预测。研究表明: 采用数值模拟和神经网络算法, 可以进行多期构造作用下的地应力场反演。多期构造运动使地应力发生调整变化, 地层背斜部位应力较为集中, 背斜核部受到强烈构造作用而发生破裂, 应力逐步释放; 多期构造运动使储层岩石承受的应力逐步变化, 易出现破裂带而形成断层, 应力逐步减小; 原有断层周边裂缝发育较为强烈, 易出现应力衰减区域, 从而出现多而短的小型裂缝。现今应力场受多期构造运动综合影响, 分布较复杂, 裂缝发育规律性不强, 对页岩气钻井、开发等影响较大。研究成果对深层页岩气的勘探开发具有一定的指导意义。

关键词: 页岩气储层; 多期构造运动; 应力场反演; 裂缝演化; 神经网络算法

中图分类号: TE121

文献标识码: A

Inversion of multiphase tectonic stress field and fracture evolution in shale gas reservoirs

WANG Jiawei¹, ZHANG Bohu^{1,2}, HU Yao¹, HE Zhengyi¹, HU Xinxin¹, CHEN Wei¹, LUO Chao³

(1. School of Geoscience and technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

2. State Key Laboratory of Oil and Gas reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

3. Shale Gas Research Institute of Petrochina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu, Sichuan 610056, China)

Abstract: The shale gas reserves in the Wufeng Formation–Longmaxi Formation of the Luzhou Block in southern Sichuan are substantial. Tectonic movements alter the ground stress, significantly impacting the exploration and development of shale gas. To optimize exploration areas for deep shale, methods such as seismic comprehensive data, ancient structural maps, and rock mechanics parameter testing have been employed. Additionally, neural network algorithms and geological mechanics modeling analysis have been used to invert the stress field of ancient geological structures across multiple stages within the study area and to predict the development of reservoir fractures influenced by stress. The research indicates that numerical simulation methods and neural network algorithms effectively invert the crustal stress field across multiple stages. Tectonic movements have altered the crustal stress, concentrating it in the stratigraphic anticline. Here, the core of the anticline, affected by strong tectonic activity, is fractured, gradually releasing stress. The ongoing multi-stage tectonic movements have facilitated changes in the stress of the reservoir rock, making the fracture zone conducive to fault formation with decreasing stress over time. Around the original faults, crack development is pronounced, leading to stress attenuation zones prone to numerous, short, small cracks. The current stress field, shaped by multiple tectonic periods, presents a complex distribution and irregular crack development, significantly influencing shale gas drilling and development. These findings offer valuable insights for the exploration and development of deep shale gas.

Keywords: shale gas reservoirs; multiphase tectonic movement; inversion of stress field; fracture evolution; neural network algorithm

收稿日期: 2023-11-03.

第一作者简介: 王嘉伟(1999—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事地应力反演与多期地质构造方面的研究。地址: 四川省成都市新都区新都大道8号, 邮政编码: 610500。E-mail: 1273761445@qq.com

通信作者简介: 张伯虎(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事深部岩石力学及地质力学方面的教学与研究工作。地址: 四川省成都市新都区新都大道8号, 邮政编码: 610500。E-mail: zbh_cd@126.com

基金项目: 中国石油天然气集团公司-西南石油大学创新联合体合作项目“川南深层海相页岩气多幕构造演化及构造裂缝预测技术研究”(2020CX020100); 国家自然科学基金青年科学基金项目“长宁—威远地区筇竹寺组和五峰组—龙马溪组页岩储层特征对比及含气性控制因素研究”(41502150)。

四川南部深层五峰组—龙马溪组页岩气储量大,地应力和裂缝发育对其开采有较大影响。目前,从现今地应力场角度探讨构造裂缝发育的情况较多,往往带有局限性^[1]。地层中的裂缝不仅是在现今构造应力场作用下产生的,大多数是在多次古构造运动的作用下产生,经历了多期构造演化才形成了现今地质构造环境和页岩气储藏^[2-4]。因此,需要分析多期构造演化下的应力场改变和引起的裂缝发育,才能对地质构造分布规律和发展演化有全面认识。

地应力场一般采用原位测试获得,但有限的测试点使地应力代表性较差。现广泛采用数值模拟和现场测试相关联的方法^[5-6],具有全局代表性强、费用较低等优点。数值模拟中地应力反演主要采用边界荷载调整法^[7]、应力函数法^[8]、多元线性回归法^[9]、神经网络法^[10]等方法。曹文龙等^[11]考虑自重应力与构造应力的综合作用,构建有限元数学回归模型得到较为准确的地应力状态;张斗中等^[12]通过地震资料计算区内岩石力学参数的分布情况,划分地质单元,建立模型进行应力场模拟;高伟中等^[13]利用数值模拟方法,合理设置边界约束条件和网格划分,建立地质模型并模拟地应力场的分布规律。研究表明:区域古构造应力场控制着页岩储层的裂缝发育,对页岩气运移成藏起着关键作用^[14-16]。经历过强烈构造运动的地区,构造裂缝分布广泛,形成了复杂的褶皱和断裂系统^[17-18]。通过现今和古地应力的测试与模拟分析,采用神经网络算法和地质力学模型,对川南地区五峰组—龙马溪组深层页岩储层进行多期构造作用下应力场反演研究,并进行储层的裂缝预测,为该区深层页岩气勘探开发提供指导。

1 多期构造运动及其特征分析

孙玮等^[19]依据不整合面将川东南的构造演化分为5个运动阶段;覃作鹏等^[20]将川东南的构造运动分为4期。

以4期构造运动为标准,确定川南地层经历了加里东运动、海西运动、印支运动和燕山—喜山运动。

1) 加里东运动时期(Ⅰ期):川南发生了广泛的陆内造山运动^[21]。地层整体隆起抬升被剥蚀,泥盆系、石炭系和部分志留系受剥蚀作用缺失,为深部断层发育提供了有利环境。川南东侧有穿上奥陶统五峰组底界的北东—南西向大型断层F5初步发育,东侧地层向上隆起,产生背斜构造和断层相关褶皱;南侧发育东西向断层F4,穿过五峰组—龙马溪组;下寒武统筇竹寺组发育有3个断层F1、F2、F3,并未向上穿至五峰组—龙马溪组。

2) 海西运动时期(Ⅱ期):转入整个地壳比较稳定的泥盆纪,褶皱运动欠发育,以升降运动为主^[22]。东侧穿五峰组底界的北东—南西向大型断层F5继续发育,东侧背斜构造隆起进一步加大,西侧地层隆起初步发育了近南北向大型断层F7,背斜隆起使中部形成向斜构造。西侧发育北西—南东向小型断层F6。

3) 印支运动时期(Ⅲ期):印支运动导致周缘地块的古隆起,使扬子地块东南缘江南雪峰造山带自东向西挤压,导致川南低陡褶皱带整体小幅抬升^[22]。大型断层F5基本定型,发育成与现今相近的构造形态,断层F7继续发育,F5上方发育另一北东—南西向大型断层F8,背斜,向斜构造愈发明显。

4) 燕山—喜山运动时期(Ⅳ期):四川盆地周边发生褶皱抬升,导致山系的隆起和前陆盆地的形成,对四川盆地的现今构造产生了显著的影响^[23]。背斜和向斜形态稳定,断层发育定型,基本形成现今的地层。

五峰组—龙马溪组页岩是川东南地区页岩气勘探开发的层段,沉积厚度介于400~650 m。川南地区五峰组—龙马溪在加里东构造运动影响下沉降,开始逐步沉积;海西构造运动经历抬升沉降,埋深增加至1 000~2 000 m;在印支构造运动时期,埋深增加至2 000~3 500 m;在燕山构造运动下,前期增至5 000 m,后续埋深逐步稳定^[24]。地层分布概况如图1所示。

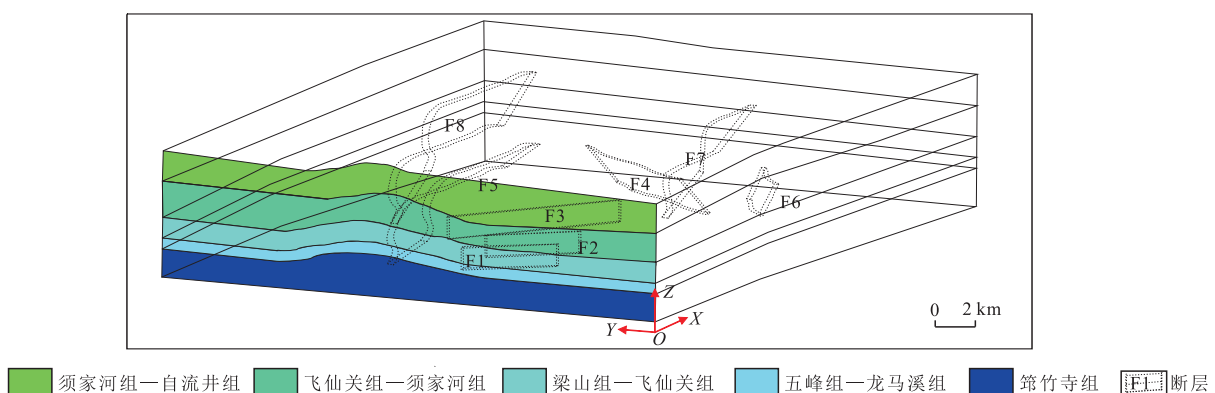


Fig. 1 Overview of stratigraphic distribution

2 多期模型的建立

2.1 地质模型和几何模型

采用三维构造平衡恢复技术,将研究区五峰组底界的二维地震解释数据向三维地质模型转化,获取地层底界的点云数据^[25],将获取的地震数据根据声速进行计算,转换为深度获取点云分布,再通过三维建模软件将点云数据拟合为曲面,建立有限元模型(图2)。

根据前人区域构造演化历史的研究,结合研究区地质构造恢复演化分析与点云分布,得到4个构造运动时期的地层形态(图3),黄色层位为目的层五峰组—龙马溪组。地质模型包含下伏地层筇竹寺组,目标地层五峰组—龙马溪组,上覆地层梁山组—飞仙关组—须家河组—自流井组,厚度分别为1 600、400、1 040、1 400、1 200 m。模型构造形态为宽缓向斜构造,在水平构造作用下两侧为构造高处,中间为构造低处,建立的地质模型尺寸为35.2 km×22.0 km×5.8 km。

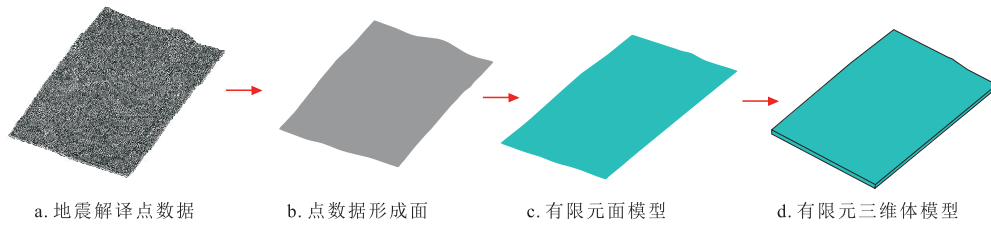


图2 数值模型建立过程

Fig. 2 Numerical model building process

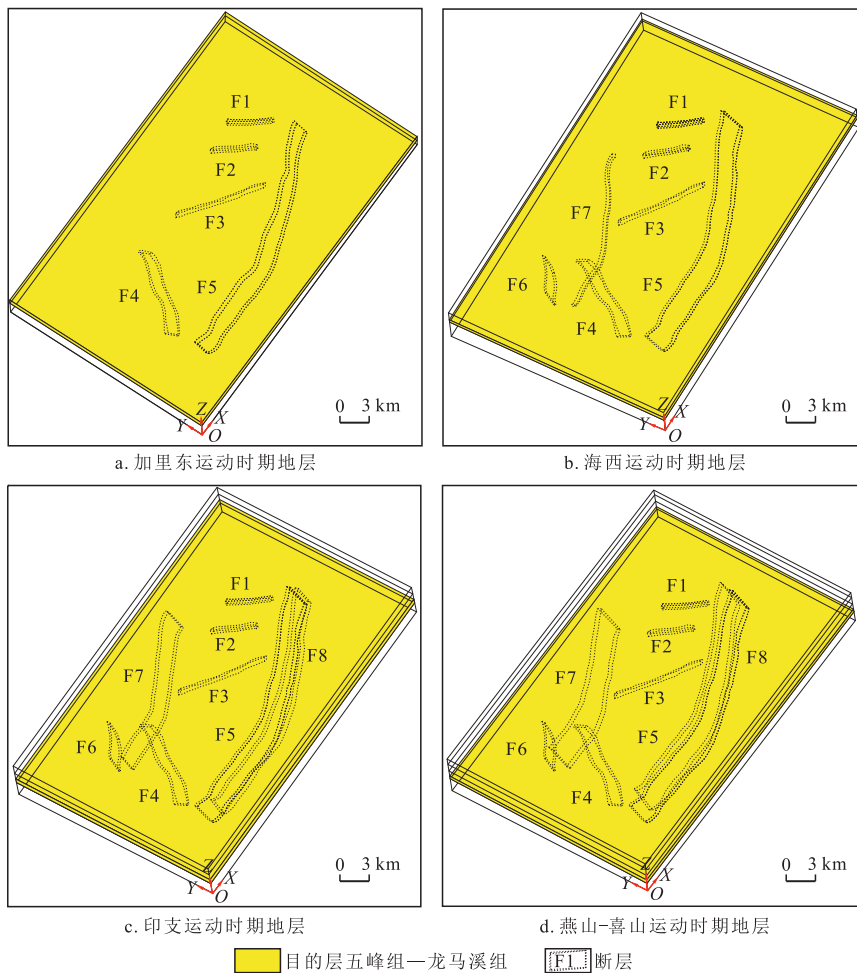


图3 不同构造运动时期的地层形态

Fig. 3 Stratigraphic patterns during different tectonic movements

分别建立地层模型和断层模型,进行布尔运算,采用四面体单元进行网格划分,数值模型边界条件如图4所示。

2.2 力学模型

采集研究区五峰组—龙马溪组的页岩,进行三轴压缩试验,获取物理力学参数,该参数随深度变化有一定的分布规律^[26]。为简化计算,考虑岩石的均质性^[27],每一层位的岩石采用相同的物理力学参数(表1)。

边界应力条件如图4所示,主要考虑自重、上覆荷载、沿深度变化的梯度荷载3种类型。边界应力通过室内页岩 Kaiser 试验^[28]和神经网络反演获得。

3 地应力反演方法

3.1 页岩 Kaiser 试验地应力反演

对研究区内取自 W1 井深度 4 280 m 左右的五峰组—龙马溪组页岩岩心,按4个方向取样,在室内开展岩石 Kaiser 声发射试验,岩样尺寸和取样方向如图5所示。

对岩样进行单轴压缩,绘制声发射 AE 累计数与外加应力曲线(图6)。加载过程中声发射信号变化剧烈的点,即曲线中的斜率陡增点为 Kaiser 点。所记录的多个

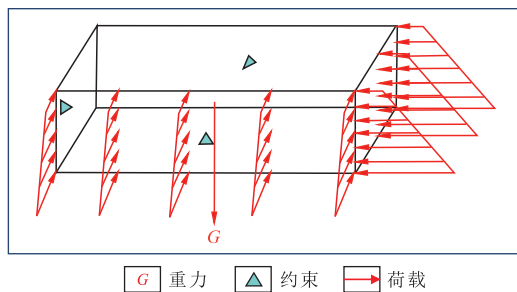


图4 数值模型边界条件

Fig. 4 Numerical model boundary conditions

表1 数值模型岩石物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of model rock

岩层(断层)	密度 $\rho/(g/cm^3)$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
须家河组—自流井组	2.800	18.193	0.278
飞仙关组—须家河组	2.590	20.404	0.268
龙马溪组—飞仙关组	2.510	21.560	0.224
五峰组—龙马溪组	2.572	22.430	0.212
筇竹寺组	2.700	24.410	0.158
断层 F1—F6	2.500	14.000	0.300
断层 F7—F8	2.500	12.000	0.300

Kaiser 点则是岩石对历史上受到的主要构造运动期次古应力值的记录^[29]。读取各 Kaiser 点对应的应力,获得多期构造下古应力的数值。

根据 Kaiser 点对应的应力值来确定古地应力,通过应力计算公式^[30]将得到的应力值转换为三向主应力,见式(1)一式(4),古地应力计算数据如表2。

$$\sigma_v = \sigma_{\perp} + \alpha p_p \quad (1)$$

$$\sigma_H = \frac{\sigma_{0^\circ} + \sigma_{90^\circ}}{2} + \frac{|\sigma_{0^\circ} - \sigma_{90^\circ}|}{2} (1 + \tan^2 2\beta)^{\frac{1}{2}} + \alpha p_p \quad (2)$$

$$\sigma_h = \frac{\sigma_{0^\circ} + \sigma_{90^\circ}}{2} - \frac{|\sigma_{0^\circ} - \sigma_{90^\circ}|}{2} (1 + \tan^2 2\beta)^{\frac{1}{2}} + \alpha p_p \quad (3)$$

$$\tan 2\beta = \frac{\sigma_{0^\circ} + \sigma_{90^\circ} - 2\sigma_{45^\circ}}{\sigma_{0^\circ} - \sigma_{90^\circ}} \quad (4)$$

式(1)一式(4)中: σ_v 为垂直方向地应力,单位 MPa; σ_{\perp} 为垂直方向岩心 Kaiser 效应对应的应力,单位 MPa; α 为有效应力系数; p_p 为孔隙压力,单位 MPa; σ_H 为水平方向最大主应力,单位 MPa; σ_{0° 、 σ_{45° 、 σ_{90° 分别为 0° 、 45° 、 90° 水平方向岩心 Kaiser 效应对应的应力,单位 MPa; β 为相对于 0° 方向的水平投影角,单位($^\circ$); σ_h 为水平方向最小主应力,单位 MPa。

3.2 模型边界条件的神经网络反演

采用边界应力迭代法和神经网络算法进行地应力反演^[31],以实测井位应力数据为基础,采用等步距方式设计边界应力条件组合,构建训练样本。通过神经网络对权

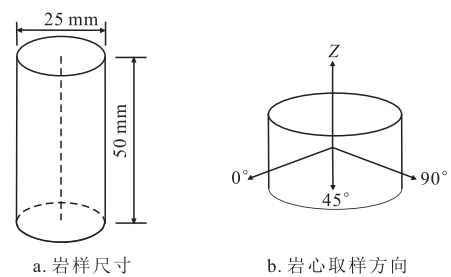


图5 岩样尺寸和岩心取样方向

Fig. 5 Core sample size and sampling direction

表2 Kaiser 反演各期次古地应力

Table 2 Kaiser inversion of paleostress in different periods

构造运动期次	各取样方向的 Kaiser 应力/MPa				三向主应力/MPa		
	垂直	0°	45°	90°	X方向	Y方向	Z方向
第 I 期	45.52	57.49	44.46	42.70	56.10	74.69	60.94
第 II 期	49.72	61.86	45.94	48.10	58.88	81.58	64.86
第 III 期	57.22	73.29	49.34	53.00	61.31	95.58	72.73
第 IV 期	70.72	84.05	54.21	56.00	64.19	106.46	86.02

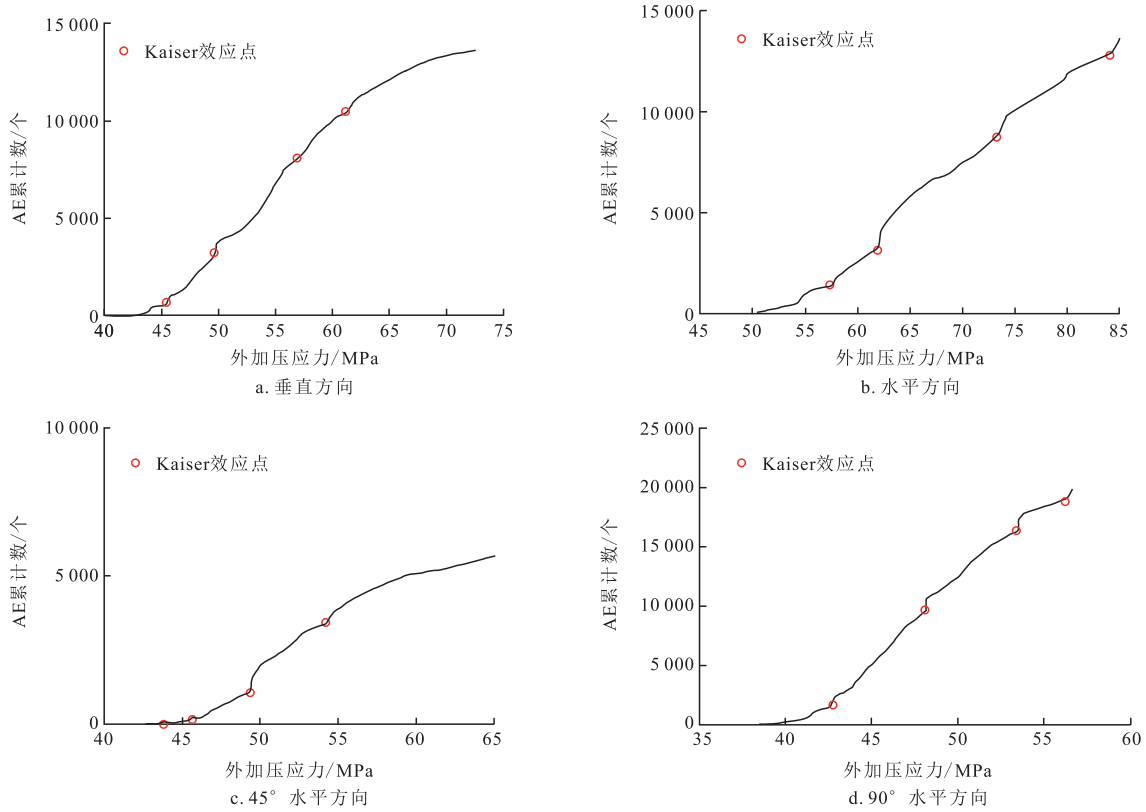


图6 声发射AE累计数与不同取样方向的Kaiser效应曲线

Fig. 6 Cumulative number of acoustic emission AE and the Kaiser effect curve in different sampling directions

值阈值的不断迭代更新,在训练结束后的网格中输入实测数据,预测出满足条件的模型应力边界条件。神经网络训练确定模型边界应力条件的变量设为X、Y、Z方向的边界应力。边界应力根据表2的三向主应力值确定荷载范围,以X向荷载和Y向荷载均为2.00 MPa的等步距构建训练样本(表3),构建边界条件组合。

将每组边界条件组合代入模型计算,得到井所在目标层位的应力值,将应力值进行神经网络训练,输出最优边界荷载,将其代入模型,对模拟值与Kaiser反馈值进行对比,符合率超过95%(表4),证明了该模拟算法的可靠性。

表3 神经网络训练样本
Table 3 Neural network training sample

序号	X向荷载/MPa	Y向荷载/MPa	Z向荷载/MPa
1	45.00	65.00	12.00
2	47.00	67.00	12.00
3	49.00	69.00	12.00
4	51.00	71.00	12.00
5	53.00	73.00	14.00
⋮	⋮	⋮	⋮
11	65.00	85.00	26.00
⋮	⋮	⋮	⋮
25	93.00	113.00	54.00

表4 Kaiser值与模拟值的误差分析
Table 4 Error analysis between Kaiser value and simulated value

主应力方向	第I期			第II期			第III期			第IV期		
	Kaiser值/MPa	模拟值/MPa	符合率/%	Kaiser值/MPa	模拟值/MPa	符合率/%	Kaiser值/MPa	模拟值/MPa	符合率/%	Kaiser值/MPa	模拟值/MPa	符合率/%
X方向	56.10	54.21	96.60	58.88	57.25	97.20	63.31	62.33	98.50	64.19	61.91	95.37
Y方向	74.69	71.56	95.80	81.58	79.89	97.90	97.58	94.26	96.59	106.46	107.60	98.93
Z方向	60.94	61.80	98.60	64.86	64.21	99.36	72.73	75.02	96.95	104.51	109.20	95.50

4 多期构造应力场演化规律

通过试验和数值模拟,可以对多期构造地应力进行反演,不同期次的最大主应力分布如图7所示。第I期最大主应力介于56.2~72.7 MPa,第IV期介于86.5~133.1 MPa,应力呈递增趋势,受构造应力影响显著。第I期次断层与周边应力差距不大,仅端部存在应力释放现象;第II期断层处应力值与周边差距明显,断层端部和内部应力释放;到第IV期,断层发育完全,应力释放显著,断层周边应力随着构造运动与周边差距更加明显。

从各构造运动时期的应力场分析可以得出,影响应力场变化的主要因素是断层发育和地层形态的改变。多期构造运动产生的变形导致地层整体隆起,地层覆盖层加厚,使地应力场发生变化,应力不均匀性也逐步增大;断层不断发育,岩石破裂而产生大量裂缝,断层内部应力与断层周边地层应力差值不断增大。

五峰组—龙马溪组页岩储层的最大主应力随着多期构造运动的推进而不断增大,在断层不断发育影响下,应力不均匀分布和应力集中现象明显。随着构造变形,最大主应力逐渐向向斜区域集中,背斜区域应力值不断减小;背斜核部和断裂处受到构造作用强烈,引起破碎,应

力释放,应力逐步减小。因此,在背斜构造和断裂处地应力向四周增加,向斜和未断裂处地应力值较大。断层周边应力虽受构造作用和断层分布位置有所不同,但应力值的总体范围随着多期构造运动不断扩大。

5 多期裂缝预测和井周裂缝分布

5.1 多期裂缝预测

根据岩石力学理论,采用莫尔-库仑强度准则进行裂缝预测,引入剪切破裂系数 $I^{[26]}$,当 $I < 1$ 时,岩石处于稳定状态,不会出现明显的破裂;当 $I \geq 1$ 时,岩石的应力状态处于或超过摩尔应力圆破裂包络线,岩石发生破裂,如式(5)、式(6)所示。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \theta + 2c \cos \theta \quad (5)$$

$$I = \frac{\sigma_1(1 - \sin \theta) - \sigma_3(1 + \sin \theta)}{2c \cos \theta} \quad (6)$$

式(5)一式(6)中: σ_1 为最大水平主应力,单位MPa; σ_3 为最小水平主应力,单位MPa; c 为黏聚力,单位MPa; θ 为岩石内摩擦角,单位($^\circ$)。

通过数值模拟获得不同期次构造运动影响下的地应力分布大小,代入式(5)和式(6),可以获得五峰组—龙马溪组页岩储层4个时期的剪切破裂系数(图8)。第I期

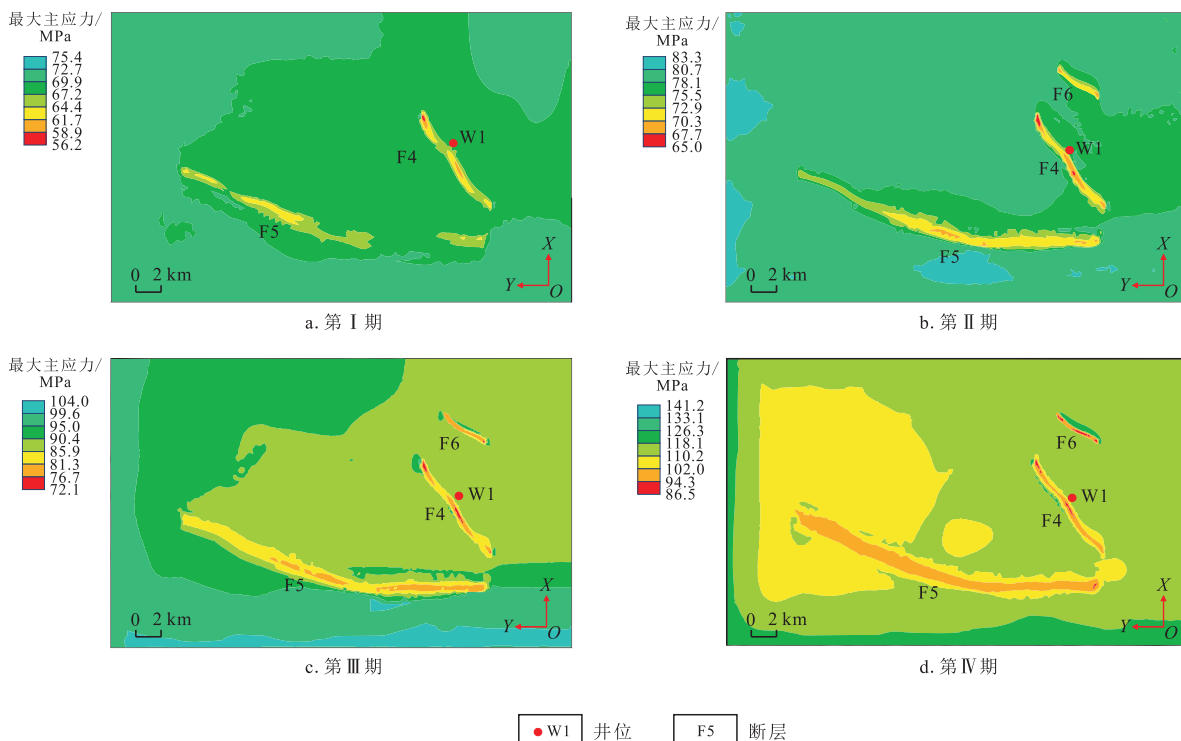


图7 多期构造运动下最大主应力演化特征

Fig. 7 Evolution characteristics of maximum principal stress under multiphase tectonic movement

的剪切破裂系数大部分介于0.55~0.94,断层部分的剪切破裂系数介于0.79~0.94,该时期断裂裂缝刚开始出现,断层尖端裂缝强烈发育,整体剪切破裂系数较小,未发生剪切破坏,发育较弱;第Ⅱ期的剪切破裂系数大部分介于0.69~1.04,断层部分的剪切破裂系数介于0.84~1.04,该时期断裂裂缝发育形成,裂缝发育均衡,剪切破裂系数较小,部分位置开始发生剪切破坏,裂缝一般发育;第Ⅲ期和第Ⅳ期的剪切破裂系数基本接近或大于1,断层中破裂系数分布均匀,发生了剪切破坏,裂缝十分发育。在多期构造运动作用下,研究区页岩储层的破裂发育程度逐步递增,断层内破裂发育较平均,尖端破裂程度较高,且断裂形成时,带动其两侧发育大量裂缝,形成小型断裂带,断层之间和小型断裂带均为裂缝发育有利区。

可以发现,地应力的大小与裂缝的发育相互影响,受多期次构造运动的控制。背斜区域受构造变形影响产生裂缝,断层周边区域易产生裂缝;高应力区裂缝发育明显,裂缝的发育会使应力逐步释放而减小,在应力低值区,裂缝欠发育甚至不发育。可结合应力与裂缝的分布特征,为研究区深层页岩气勘探开发提供相应的依据。

5.2 井周裂缝分布

分析研究区各井周应力与裂缝分布,可将页岩储层裂缝破裂系数与地应力结合来判断有利勘探区。五峰组—龙马溪组井周破裂系数分布平面和剖面如图8d和图9所示。W1井在五峰组—龙马溪组穿过断层F4;W2井在五峰组—龙马溪组临近大断层F5;W3井、W4井和W5井在五峰组—龙马溪组离断层较远。W1井穿过断

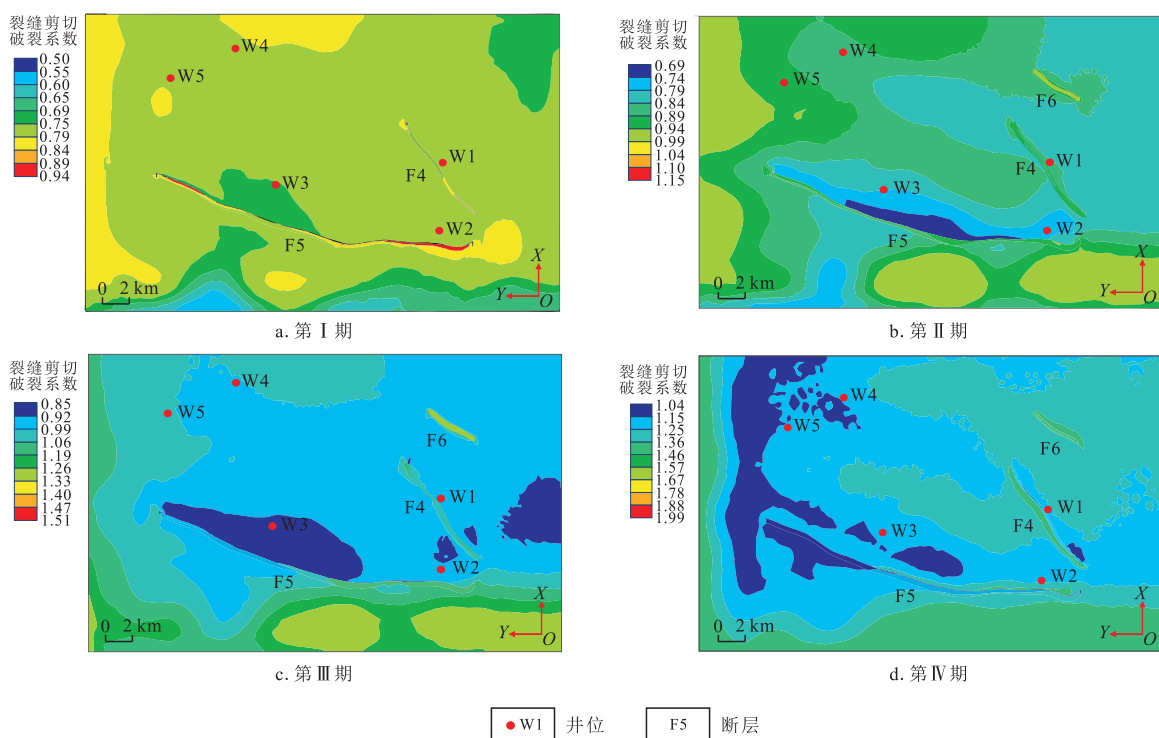


图8 不同构造运动期次裂缝剪切破裂系数变化规律

Fig. 8 Changes in shear fracture coefficient of cracks at different tectonic movement stages

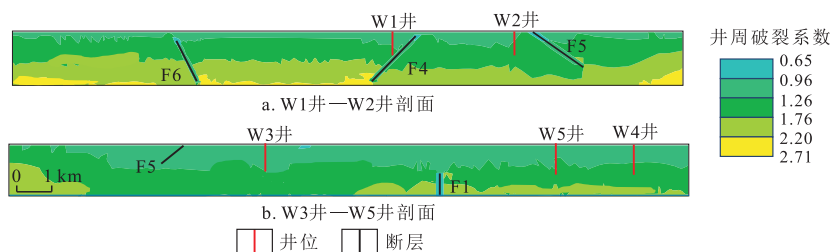


图9 五峰组—龙马溪组井周破裂系数分布剖面

Fig. 9 Distribution profile of fracture coefficient around wells of Wufeng-Longmaxi Formation

层,破裂系数大,为1.284;W2井和W3井临近断层和背斜处,破裂系数较大,分别为1.256、1.225;W4井和W5井远离断层和背斜部位,破裂系数较小,分别为1.158、1.176。

W1井虽裂缝较发育,但处于断层周边,断层存在会对页岩气储集和运移产生影响,降低页岩气开发效益;W2井与W3井周围为裂缝较发育区,具备页岩气保存条件^[32-33]。从实际的页岩气开采量来看,W1井的页岩气产量较低,大致为 $6.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;W2井和W3井的页岩气产量接近且较高,在 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右。将预测情况与实际页岩气开采情况对比分析可以推断,远离断层和背斜处,裂隙发育的区域有利于页岩气的保存。

6 结论

1) 研究区经历加里东、海西、印支和燕山-喜山4个期次构造运动,对地应力变化产生深刻影响。地应力随多期构造运动而增大,应力从背斜向四周增加,背斜核部和断裂处受到构造作用强烈,页岩产生破裂,应力值逐步变低。

2) 页岩气储层以剪切破坏为主,储层岩石破裂发育程度随构造运动的发生而逐渐递增,第I期剪切破裂系数在0.55~0.94,未发生剪切破坏,发育较弱;第II期剪切破裂系数在0.69~1.04,开始发生剪切破坏,一般发育;第III期和第四期剪切破裂系数基本接近或大于1,发生剪切破坏,裂缝十分发育;断层之间和小型断裂带为裂缝发育有利区。

3) 地应力与裂缝的发育相互影响,并受多期次构造运动的控制。高地应力区裂缝发育,也会因裂缝的发育,导致应力的释放而减小;而低地应力区,裂缝欠发育甚至不发育。

参考文献

[1] 周延豪,兰志勤,冯建伟,等.南堡地区多期构造应力叠加模拟及断裂演化研究[J].地质与勘探,2018,54(4):772-780.
ZHOU Yanhao, LAN Zhiqin, FENG Jianwei, et al. Simulation of multi-Phase tectonic stress superimposition and fault evolution in the Nanpu depression[J]. Geology and Exploration, 2018, 54(4): 772-780.

[2] 王福.柴达木盆地诺木洪凹陷构造演化及有利区预测[J].石油地质与工程,2022,36(3):13-19.
WANG Fu. Technic evolution and favorable area prediction of Nomuhong sag in Qaidam Basin[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2022, 36(3): 13-19.

[3] 于荣泽,王成浩,张晓伟,等.北美Eagle Ford深层页岩气藏开发特征及启示[J].煤田地质与勘探,2022,50(9):32-41.
YU Rongze, WANG Chenghao, ZHANG Xiaowei, et al. Development characteristics and enlightenment of Eagle Ford deep shale gas reservoirs in North America[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(9): 32-41.

[4] 王红岩,刘德勋,蔚远江,等.大面积高丰度海相页岩气富集理论

及地质评价技术进展与应用[J].煤田地质与勘探,2022,50(3):69-81.
WANG Hongyan, LIU Dexun, YU Yuanjiang, et al. Enrichment theory of large area and high abundance marine shale gas and its geological evaluation technology progress and application[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 69-81.

[5] 张玉亭.煤层分层地应力预测模型研究[J].非常规油气,2023,10(2):115-120.
ZHANG Yuting. Prediction model study of coalbed layered in-situ stress [J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(2): 115-120.

[6] 常闯,李松,汤达祯,等.基于测井参数的煤储层地应力计算方法研究——以延川南区块为例[J].煤田地质与勘探,2023,51(5):23-32.
CHANG Chuang, LI Song, TANG Dazhen, et al. In-situ stress calculation for coal reservoirs based on log parameters: A case study of the southern Yanchuan block[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(5): 23-32.

[7] 侯明勋,葛修润.岩体初始地应力场分析方法研究[J].岩土力学,2007,28(8):1626-1630.
HOU Mingxun, GE Xiurun. Study on fitting analysis of initial stress field in rock masses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1626-1630.

[8] 余成学,熊文林,陈胜宏.边坡初始地应力场的应力函数与有限元联合反演法[J].武汉水利电力大学学报,1995(4):366-371.
SHE Chengxue, XIONG Wenlin, CHEN Shenghong. The stress function and finite element joint inversion method of the initial in-situ stress field of the slope[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 1995(4): 366-371.

[9] 赵雨,白金朋.基于FLAC3D的多元线性回归法地下厂房初始地应力场反演重构[J].水电能源科学,2022,40(3):149-152.
ZHAO Yu, BAI Jinpeng. Inversion of multiple linear regression analysis of initial stress field of underground powerhouse based on FLAC3D[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(3): 149-152.

[10] 陈正林,何国志,张劭超,等.小样本数据下三维地应力反演分析[J].科学技术与工程,2022,22(22):9822-9829.
CHEN Zhenglin, HE Guozhi, ZHANG Jiechao, et al. Three-dimensional in-situ stress inversion analysis under small sample data [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(22): 9822-9829.

[11] 曹文龙,王雪彦.基于GM模型的地下采区地应力反演分析[J].矿业研究与开发,2019,39(8):87-91.
CAO Wenlong, WANG Xueyan. Inversion analysis on ground stress in underground mining area based on GM model[J]. Mining research and development, 2019, 39(8): 87-91.

[12] 张斗中,汤济广,蔡俊.渝东南川地区龙马溪组地应力场特征[J].油气藏评价与开发,2021,11(2):56-62.
ZHANG Douzhong, TANG Jiguang, CAI Jun. Characteristics of geostress field of Longmaxi Formation in Nanchuan area, Eastern Chongqing[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(2): 56-62.

[13] 高伟中,孙鹏,田超,等.东海盆地西湖凹陷地应力场与油气运移关系探讨[J].油气藏评价与开发,2015,5(1):1-6.
GAO Weizhong, SUN Peng, TIAN Chao, et al. Relation between crustal stress field and hydrocarbon migration in West Lake sag, East China Sea Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2015, 5(1): 1-6.

[14] 马新华,谢军.川南地区页岩气勘探开发进展及发展前景[J].石油勘探与开发,2018,45(1):161-169.

- MA Xinhua, XIE Jun. The progress and prospects of shale gas exploration and exploitation in southern Sichuan Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(1): 161-169.
- [15] 段洋,李琴,贾艳芬,等.北美非常规储层地应力预测技术发展现状与趋势[J]. *石油地质与工程*, 2023, 37(2): 43-50.
- DUAN Yang, LI Qin, JIA Yanfen, et al. Development status and trend of in-situ stress prediction technology for unconventional reservoirs in North America[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2023, 37(2): 43-50.
- [16] 李彦伟,朱超凡,曾壹坚,等.层理特征对油页岩水力压裂裂缝扩展规律影响的数值模拟研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(11): 44-54.
- LI Yanwei, ZHU Chaofan, ZENG Yijian, et al. Numerical simulations of the effects of bedding planes on hydraulic fracture propagation law in oil shale[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(11): 44-54.
- [17] 曹晋璐,刘之的,何福文,等.鄂尔多斯盆地中东部太原组灰岩成藏地质条件分析[J]. *石油地质与工程*, 2022, 36(2): 35-41.
- CAO Jinlu, LIU Zhide, HE Fuwen, et al. Analysis of limestone reservoir forming geological conditions of Taiyuan formation in central and eastern Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2022, 36(2): 35-41.
- [18] 丁文龙,李超,李春燕,等.页岩裂缝发育主控因素及其对含气性的影响[J]. *地学前缘*, 2012, 19(2): 212-220.
- DING Wenlong, LI Chao, LI Chunyan, et al. Dominant factor of fracture development in shale and its relationship to gas accumulation [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 212-220.
- [19] 孙玮,刘树根,王国芝,等.川东南丁山构造震旦系一下古生界油气成藏条件及成藏过程[J]. *地质科技情报*, 2010, 29(1): 49-55.
- SUN Wei, LIU Shugen, WANG Guozhi, et al. Petroleum formed condition and process research for Sinian to low paleozoic at Dingshan structure in southeast of Sichuan Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2010, 29(1): 49-55.
- [20] 覃作鹏,刘树根,邓宾,等.川东南构造带中生代多期构造特征及演化[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(6): 703-711.
- QIN Zuopeng, LIU Shugen, DENG Bin, et al. Multiphase structural features and evolution of Southeast Sichuan tectonic belt in China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2013, 40(6): 703-711.
- [21] HUANG H Y, HE D F, LI Y Q, et al. Silurian tectonic-sedimentary setting and basin evolution in the Sichuan area, southwest China: Implications for palaeogeographic reconstructions[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2018, 92: 403-423.
- [22] 黄涵宇,何登发,李英强,等.四川盆地东南部泸州古隆起的厘定及其成因机制[J]. *地学前缘*, 2019, 26(1): 102-120.
- HUANG Hanyu, HE Dengfa, LI Yingqiang, et al. Determination and formation mechanism of the Luzhou paleo-uplift in the southeastern Sichuan Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(1): 102-120.
- [23] 朱传庆,徐明,单竞男,等.利用古温标恢复四川盆地主要构造运动时期的剥蚀量[J]. *中国地质*, 2009, 36(6): 1268-1277.
- ZHU Chuanqing, XU Ming, DAN Jingnan, et al. Quantifying the denudations of major tectonic events in Sichuan Basin: Constrained by the paleothermal records[J]. *Geology in China*, 2009, 36(6): 1268-1277.
- [24] 魏力民,王岩,张天操,等.页岩气富集与高产主控因素—以川南地区五峰组—龙马溪组为例[J]. *断块油气田*, 2020, 27(6): 700-704.
- WEI Limin, WANG Yan, ZHANG Tiancao, et al. Main control factors of enrichment and high production of shale gas: a case study of Wufeng-Longmaxi Formation in Southern Sichuan[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2020, 27(6): 700-704.
- [25] 尹文韬,陈伟,余养里.川南云锦地区三维构造平衡恢复的断裂体系研究[J]. *化工设计通讯*, 2021, 47(11): 19-20.
- YIN Wentao, CHEN Wei, YU Yangli. Study on fault system of 3D structural balance restoration in Yunjin area, southern Sichuan[J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2021, 47(11): 19-20.
- [26] 董敏,郭伟,张林炎,等.川南泸州地区五峰组—龙马溪组古构造应力场及裂缝特征[J]. *岩性油气藏*, 2022, 34(1): 43-51.
- DONG Min, GUO Wei, ZHANG Linyan, et al. Characteristics of paleotectonic stress field and fractures of Wufeng-Longmaxi Formation in Luzhou area, Southern Sichuan Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022, 34(1): 43-51.
- [27] 陈颀,黄庭芳,刘恩儒.岩石物理学[M].合肥:中国科技大学出版社, 2009.
- CHEN Yong, HUANG Tingfang, LIU Enru. *Rock physics*[M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 2009.
- [28] ZHANG L Y, MA L C, ZHUO X Z, et al. Mesozoic-Cenozoic stress field magnitude in Sichuan Basin, China and its adjacent areas and the implication on shale gas reservoir: Determination by acoustic emission in rocks[J]. *China Geology*, 2020, 3(4): 591-601.
- [29] 肖睿,邓虎成,彭先锋,等.基于古应力场模拟的多期区域构造裂缝分布预测评价技术——以中国泌阳凹陷安棚油田为例[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(30): 97-105.
- XIAO Rui, DENG Hucheng, PENG Xianfeng, et al. The regional tectonic fracture distribution prediction technique of different generations based on the palaeostress field simulation——A case study from Anpeng Oil-field in Biyang Depression, China[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(30): 97-105.
- [30] 鲍洪志,孙连环,于玲玲,等.利用岩石声发射 Kaiser效应求取地应力[J]. *断块油气田*, 2009, 16(6): 94-96.
- BAO Hongzhi, SUN Lianhuan, YU Lingling, et al. Obtainment of ground stress by Kaiser effect of rock acoustic emission[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2009, 16(6): 94-96.
- [31] 王燕.基于多元回归与神经网络耦合算法的地应力反演研究[D].成都:西南石油大学, 2022.
- WANG Yan. *Research on in-situ stress inversion based on multiple regression and neural network coupling algorithm*[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2022.
- [32] 马军.页岩裂缝成因及其对含气性影响——以渝东南地区阳春沟构造带五峰组—龙马溪组为例[J]. *油气藏评价与开发*, 2020, 10(3): 126-134.
- MA Jun. Origin of shale fractures and its influence on gas-bearing properties: A case study of Wufeng-Longmaxi Formation in Yangchungou structural belt in southeast Chongqing[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2020, 10(3): 126-134.
- [33] 舒逸,郑有恒,包汉勇,等.四川盆地复兴地区下侏罗统页岩油气富集高产主控因素[J]. *世界石油工业*, 2023, 30(5): 26-38.
- SHU Yi, ZHENG Youheng, BAO Hanyong, et al. Main controlling factors for high yield and enrichment of shale oil and gas in the Lower Jurassic in the Fuxing area of Sichuan Basin[J]. *World Petroleum Industry*, 2023, 30(5): 26-38.