

doi: 10.12029/gc20231205001

邓乃尔, 徐浩, 邓虎成, 何建华, 刘邵军, 李坤, 郑紫芸, 盛烈豪, 宋威国. 2025. 断裂系统对现今地应力扰动特征研究——以四川盆地泸州北区深层页岩气为例[J]. 中国地质, 52(1): 95–110.

Deng Naier, Xu Hao, Deng Hucheng, He Jianhua, Liu Shaojun, Li Kun, Zheng Ziyun, Sheng Liehao, Song Weiguo. 2025. Characteristics of fracture system disturbance on present-day geostress: An example of deep shale gas in the North Luzhou district, Sichuan Basin[J]. Geology in China, 52(1): 95–110(in Chinese with English abstract).

断裂系统对现今地应力扰动特征研究——以四川盆地 泸州北区深层页岩气为例

邓乃尔¹, 徐浩², 邓虎成², 何建华², 刘邵军³, 李坤¹,
郑紫芸¹, 盛烈豪¹, 宋威国¹

(1. 成都理工大学能源学院, 四川 成都 610059; 2. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059; 3. 中国石油西南油气田公司, 四川 成都 610051)

摘要:【研究目的】随着中国页岩气勘探开发进入快速规模上产阶段, 埋深 3500~4500 m 的深层领域成为下一步页岩气勘探的重要接替区块。但深层页岩气地质条件复杂, 断裂系统对地应力的扰动严重影响了气田开发效果。【研究方法】为进一步明确断裂扰动特征, 以四川盆地南部泸州北区深层五峰组—龙马溪组页岩气为例, 通过对断裂分布范围、开展单井地应力分析基础上, 总结了泸州北区地应力场分布特征, 明确了断裂对应力扰动规律, 建立了断裂对应力扰动要素表及扰动范围分布图。【研究结果】(1) 泸州区块北区断裂发育特征表现为类型多、期次多, 形成了以“向斜、斜坡、背斜”为主的构造样式, 断裂组合以“对冲向斜式、叠瓦式、背冲背斜式”为主。(2) 研究区地应力状态复杂, 三向应力值均值为 $S_H(112.7 \text{ MPa}) > S_V(106.6 \text{ MPa}) > S_h(98.8 \text{ MPa})$, 断裂区应力值相比非断裂区降低 5~35 MPa; 水平最大主应力方向介于 $75^\circ \sim 120^\circ$, 不同井区间的地应力方向存在较大差异。(3) 断裂对地应力扰动分析显示, 相同走向断裂随着断裂级次的增加, 应力扰动范围逐渐增大, II 级断裂扰动范围介于 1.43~1.85 km; 不同走向断裂中 NEE—EW 走向断裂对应力扰动范围最大, 介于 0.94~1.85 km。【结论】基于断裂对应力扰动规律分析, 刻画出泸州北区断裂扰动分布图, 将研究区划分为断裂区和非断裂区 2 类, 实现开发单元分级评价, 并完善了断裂区与非断裂区水平井段布井模式, 以期后续建产区井位部署优化提供指导意见。

关键词: 深层页岩气; 五峰组—龙马溪组; 断裂系统; 地应力扰动; 油气勘查工程; 泸州北区; 四川省

创新点: 总结了泸州北区构造与断裂分布特征; 刻画出泸州北区断裂对应力扰动图, 完善了断裂非断裂区内水平井段布井模式。

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)01-0095-16

Characteristics of fracture system disturbance on present-day geostress: An example of deep shale gas in the North Luzhou district, Sichuan Basin

DENG Naier¹, XU Hao², DENG Hucheng², HE Jianhua², LIU Shaojun³, LI Kun¹,

收稿日期: 2023-12-05; 改回日期: 2024-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(42002157)和四川省科技计划杰出青年科技人才项目(2020JDJQ0058)联合资助。

作者简介: 邓乃尔, 男, 2000 年生, 硕士, 油气藏开发地质专业; E-mail: 2516101958@qq.com。

通信作者: 徐浩, 男, 1990 年生, 副教授, 主要从事油气储层评价; E-mail: xuhao19@cdut.edu.cn。

ZHENG Ziyun¹, SHENG Liehao¹, SONG Weiguo¹

(1. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. National Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. Petro China Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610051, Sichuan, China)

Abstract: This paper is the result of oil and gas exploration engineering.

[Objective] With the rapid expansion of shale gas production in China, deep shale gas reservoirs at burial depths of 3500–4500 m have become critical targets for exploration. However, complex geological conditions and stress disturbances from fracture systems significantly hinder development. **[Methods]** This study focuses on the Wufeng–Longmaxi Formation in the North Luzhou district of the southern Sichuan Basin. By analyzing the spatial distribution of fractures and conducting single-well geostress evaluations, the characteristics of stress disturbance caused by fractures were clarified. A comprehensive table and distribution map of stress disturbance elements were created. **[Results]** (1) Fractures in the study area exhibit diverse types and phases, with a tectonic style dominated by "syncline, slope, and anticline slope." The fracture combinations primarily follow a pattern of "syncline, superposition, and anticline backslope". (2) The regional geostress state is complex, with average stress values of $S_H(112.7 \text{ MPa}) > S_V(106.6 \text{ MPa}) > S_h(98.8 \text{ MPa})$. Fractured zones exhibit stress values 5–35 MPa lower than non-fractured zones. The maximum horizontal stress orientation ranges from 75° to 120°, showing significant variability across wells. (3) Fractures influence stress distribution, with stress disturbance increasing alongside fracture levels. The disturbance range of Class II fractures spans 1.43–1.85 km. NEE–EW fractures exhibit the largest disturbance ranges 0.94–1.85 km. **[Conclusions]** A fracture disturbance distribution map was developed for the North Luzhou district, dividing the area into fracture and non-fracture zones to enable hierarchical evaluation of development units. Optimized layouts for horizontal well sections in fractured and non-fractured zones were proposed, offering guidance for future production.

Key words: deep shale gas; Wufeng–Longmaxi Formation; fracture system; geostress disturbance; oil and gas exploration engineering; North Luzhou district; Sichuan Province

Highlights: This study delineates fracture and stress distribution characteristics in the North Luzhou district, provides a stress perturbation template, and refines the horizontal well section layout for improved production planning.

About the first author: DENG Naier, male, born in 2000, master, majors in oil and gas reservoir development geology; E-mail: 2516101958@qq.com.

About the corresponding author: XU Hao, male, born in 1990, associate professor, engaged in oil and gas reservoir evaluation research; E-mail: xuhao19@cdut.edu.cn.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No.42002157), Sichuan Science and Technology Programm for Outstanding Young Talents in Science and Technology (No.2020JDJQ0058).

1 引 言

经过十多年的理论探索与技术实践,中国页岩气勘探开发取得了令人瞩目的成果,形成了具有中国地质特色的页岩气地质理论,确立了具有针对性的勘探开发技术(张金川等, 2021; 邹才能等, 2022; 包书景等, 2023)。随着页岩气勘探开发进入快速规模上产阶段,中—浅层(埋深 3500 m 以浅)页岩气勘探开发技术不断成熟,深层领域(埋深 3500~4500 m)成为下一步页岩气勘探的重要接替区块(谢军, 2017; 贾承造, 2020)。但与中浅层页岩气井

相比,深层页岩气井面临地质稳定性差导致的套变频发等难题,严重影响气田开发效果(郭彤楼等, 2022; 韩玲玲等, 2023)。因此,加快深层页岩气地质条件分析,明确断裂影响下应力场扰动特征,对进一步支撑深层页岩气开发具有重要意义。

目前已有学者针对泸州地区沉积演化特征(施振生等, 2022; 杨雪等, 2022)、储层特征(王濡岳等, 2021; 李跃纲等, 2022; 石学文等, 2023)、页岩气富集特征(杨洪志等, 2019)、构造特征(黄涵宇, 2018; 赵圣贤等, 2023)、裂缝发育特征(董敏等, 2022; 闫建平, 2022)、地应力场分布特征(佟恺林等,

2023)方面开展了研究,初步明确了研究区为“储层埋深大、微幅构造发育、局部构造差异明显、微小断裂发育、应力状态复杂、地质导向难”的复杂地质条件(姜振学等, 2023),形成了以五峰组龙一₁亚段(龙一段 1 亚段)为主产层, L03、Y 井区为有利区范围的页岩气立体开发区域(杨洪志等, 2022)。然而对于泸州地区断裂分布特征及断裂对地应力扰动特征缺乏深入的研究,仅初步明确了研究区 I~IV 级断裂识别方法、地震响应特征及构造变形特征,未结合断裂与地应力场系统开展地质条件分析,难以解决勘探开发生产实际需求(罗超等, 2022; 谢凌峰等, 2023)。受多期构造运动、多级断裂等地质条件影响,明确研究区断裂对地应力扰动特征,是后续建产区井位部署及开发方案优化调整的关键。

因此,笔者在对构造类型、断裂分布范围、单井现今地应力特征及研究区地应力场模拟分析的基础上,明确了研究区不同级次、不同走向断裂对地应力扰动规律,刻画出断裂与非断裂区扰动范围,分别建立了两种适用的水平井段布井模式,以期对泸州北区深层页岩气高效开发提供指导。

2 地质概况

泸州区块北区构造上位于川南低构造带,介于川中古隆起南部与川东南坳褶带之间,褶皱变形整体表现强烈(杨洪志等, 2019)。受复杂地构造背景影响,断裂发育呈现多类型、多时期和多方向的特征(陈更生等, 2022)。复杂的地质条件是影响建产区产能的主要因素。

2.1 构造特征

受多期构造运动叠加,泸州区块北部构造断裂呈现复式褶皱特征,华蓥山构造带南段呈现北东向南西扫帚状发散的特征,整体构造特征为隆坳交错(图 1a)。泸州北区褶皱构造可划分为向斜、斜坡、背斜三种类型,形成了“宽斜窄背”的构造特征(吴建发等, 2023)。向斜构造以福集向斜、得胜向斜等 6 个向斜为主,地层视倾角介于 0~5°,微幅构造欠发育,占比研究区面积 49.75%;斜坡地层视倾角介于 5°~15°,微幅构造较发育,占比研究区面积 32%;以云顶场、龙洞坪背斜为主的 9 个背斜,地层视倾角大于 15°,微幅构造发育,占比研究区面积 18.25%(图 1b、c)。

2.2 断裂特征

研究区断裂复杂多样,呈现出多期次、多类型、多级别等特征。目的层受印支期、燕山末期—喜山早期与喜山中—晚期 3 期构造应力叠加,分别形成了 NEE—EW 向、NE 向和 NNE—NS 向 3 组断裂(罗超等, 2022)。

区域断裂组合样式主要包括对冲向斜式、叠瓦式和背冲背斜式 3 种断裂(表 1)。对冲向斜式断裂主要分布在福集向斜南部和宝藏向斜西部,叠瓦式断裂主要分布在福集向斜北部、得胜向斜以及宝藏向斜东部,背冲背斜式断裂主要分布在云顶山、龙洞坪等背斜带高部位。

研究区断裂目前可划分出 I 至 IV 级断裂(表 2)。

I 级断裂为向上断开至地面的大断裂,断距由中部向北部和南部减小,地震响应特征为同相轴明显错断。II 级断裂通常发育在背斜高部位,主要为 NNE 走向,平面延伸长度超过 5 km,断距介于 42.4~712.6 m,地震响应特征为五峰组底错断明显。III 级断裂通常分布在宽缓向斜区及受扰动影响较小的区域,断裂走向以 EW 走向为主,平面延伸长度普遍超过 1 km,断距介于 31.3~128.0 m,地震响应特征为五峰组底错断较明显。IV 级断裂发育规模较小,通常分布在宽缓向斜区内,断裂走向以 NE 走向为主,平面延伸长度介于 0.4~1 km,断距介于 17.7~66.8 m,地震影响特征为三维曲率体切片平面延续较弱。

3 明确单井现今地应力

在多期构造运动和多级别断裂影响下,泸州北区深层页岩地应力状态复杂。本文基于地应力实验测试与压裂参数分析,明确单井地应力特征,为后续断裂系统应力特征及应力扰动规律研究提供数据支撑。

3.1 明确单井地应力大小

单井地应力大小可通过声发射实验(刘利斌等, 2020)、差应变实验(何小东等, 2020; 何建华等, 2023; 黄滔等, 2024)以及水力压裂参数(Bröker and Ma, 2022)计算获得。水力压裂参数计算得到的应力值相比前两种方法更精确(林长城等, 2018),本文通过水力压裂曲线测量出破裂压力、瞬间停泵压力、裂缝闭合压力等参数,依据这些参数结合孔隙压力等数值完成水平两向主应力的计算,形成单井

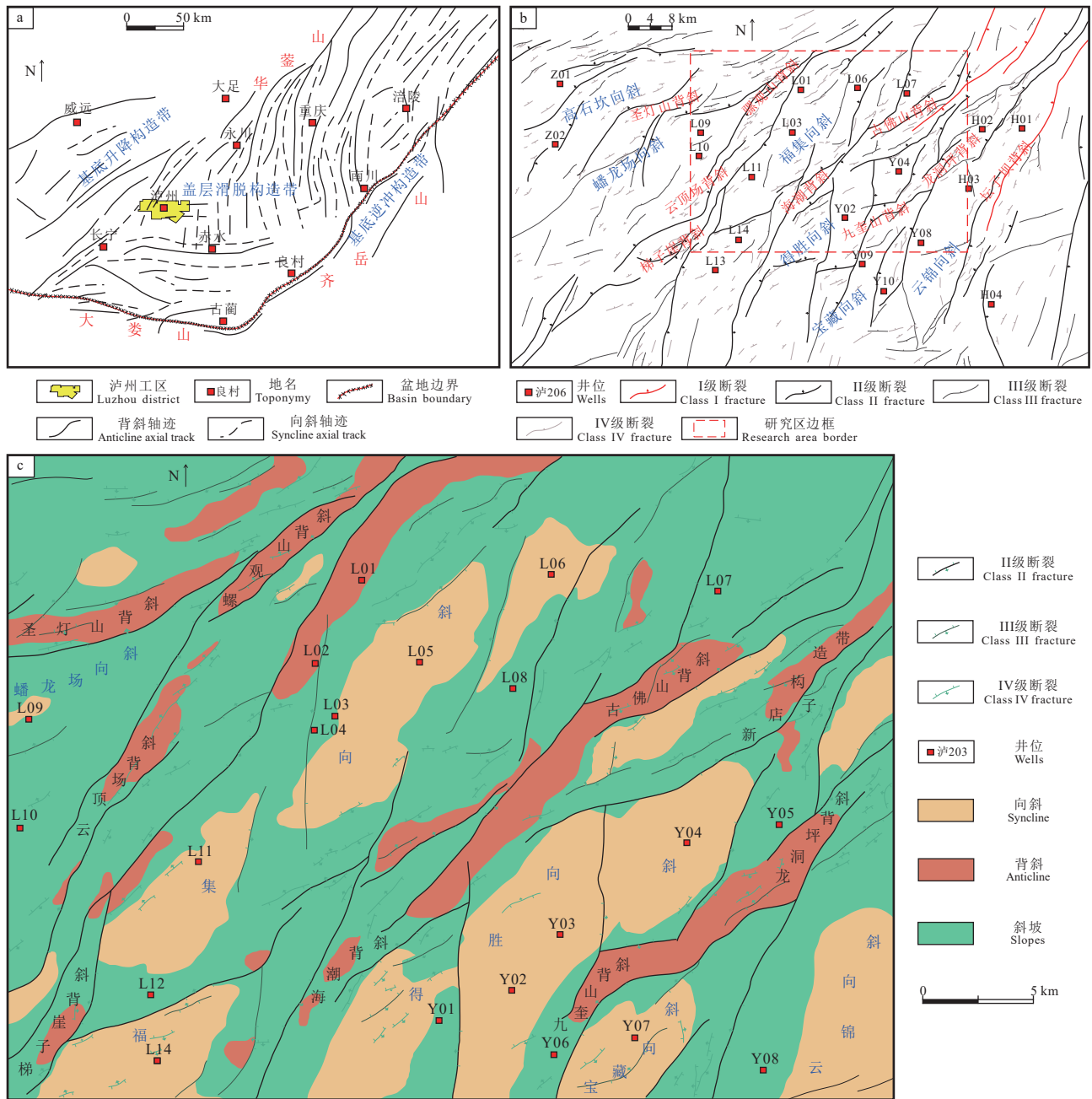


图1 泸州北区构造与断裂分布图

a—川南构造分布图(据郭卫星等, 2021 修改); b—泸州北区构造断裂分布图; c—研究区构造断裂分布图; d—AA'地震剖面断裂纵向分布图
Fig.1 Tectonic and fracture distribution of the North Luzhou district
a—Tectonic distribution map of South Sichuan (modified from Guo Weixing et al., 2021); b—Tectonic fracture distribution map of the North Luzhou district; c—Tectonic fracture distribution map of the study area; d—Vertical distribution map of fracture in AA' seismic section

水平段应力大小分布图,且多井段的应力值利于不同距离下断裂扰动规律分析(图2)。

以水平段平均应力值表征单井地应力值,表明研究区三向应力值总体呈现出: $S_H(112.7 \text{ MPa}) > S_v(106.6 \text{ MPa}) > S_h(98.8 \text{ MPa})$,为走滑应力状态

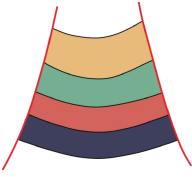
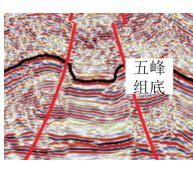
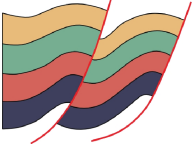
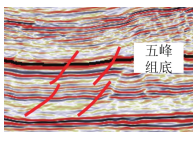
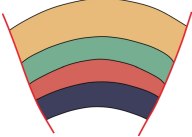
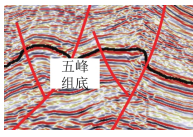
(表3)。不同研究区块三向应力值差异较明显,其中Y井区(94~109 MPa) > L13井区(90~104 MPa) > L06井区(87~100 MPa) > L03井区(88~102 MPa)。

3.2 明确单井地应力方向

单井地应力方向可通过实验测试和测井解

表 1 研究区断裂组合样式特征要素

Table 1 Characteristic elements of the fracture assemblage style in the study area

组合样式	示意图	典型地震剖面	分布范围	
断裂组合样式	对冲向斜式			福集向斜南部及宝藏向斜西部
	叠瓦式			福集向斜北部、得胜向斜及宝藏向斜东部
	背冲背斜式			云顶山、龙洞坪等背斜带高部位

注: 断裂组合样式示意图中不同颜色仅表示地层, 不具体指某一地层。

表 2 研究区 I~IV 级断裂特征要素

Table 2 Characteristic elements of class I-IV fractures in the study area

断裂级别	I 级	II 级	III 级	IV 级
分类原则	断距/m	—	42.4~712.6 (均值177.7)	31.3~128.0 (均值73.9)
	延伸长度/km	—	$L > 5$	$1 < L < 5$
	断开层位	顶部断开至地面, 对构造具有控制作用	向上延伸至志留系或三叠系, 向下延伸至寒武系盐层	向上延伸至志留系, 向下延伸至寒武系盐层或基底
识别方法	常规地震剖面解释方法可准确识别	常规地震剖面解释方法可准确识别	通常以方差体为主, 曲率体和蚂蚁体可作为验证方法进行识别	以方差体和曲率体为主, 蚂蚁体作为验证方法进行识别
地震响应特征	同相轴明显错断	剖面五峰组错断明显, 断面形态以板式冲断为主	剖面五峰组错断明显, 方差体切片平面连续性较强, 断面形态以板式冲断为主	三维曲率体切片平面连续较弱, 剖面以低角度铲式逆冲为主, 普遍表现为同相轴绕曲错断及次级褶皱形态

释获取, 实验测试方法包括古地磁定向实验 (Bilardello, 2021)、波速各向异性实验 (闵建等, 2020), 测井解释方法主要依据偶极阵列声波 (吴晓光等, 2016)、井壁崩落 (Allawi and Al-Jawad, 2021)、钻井诱导缝 (Mehrvash et al., 2021)、多臂井径测井 (Nazir et al., 2022) 以及微地震监测 (蔡敦科和刘建中, 2017; 尹帅等, 2023) 分析。分析表明波速各向异性实验和偶极阵列声波测井解释结果需进一步验证, 为第三梯次解释手段; 成像测井钻井诱导缝、井壁崩落和多臂井径测井可明确分析地应力方向, 为第二梯次解释手段; 微地震监测裂缝走向可获得水平井段地应力方向, 并分析验证垂直井段地应力方向解释结果, 为第一

梯次解释手段 (图 3)。微地震裂缝走向分布范围见图 2。

基于上述地应力方向解释体系完成单井地应力方向解释, 表明研究区不同井区地应力方向存在较大差异。泸州北区区域应力方向介于 $105^{\circ} \sim 115^{\circ}$, L03 井区应力方向介于 $75^{\circ} \sim 85^{\circ}$, 相较于区域应力方向发生逆时针偏转; L06 井区应力方向介于 $94^{\circ} \sim 105^{\circ}$, 与区域应力方向差异较小; L13 井区应力方向介于 $105^{\circ} \sim 120^{\circ}$, 相较于区域应力方向发生顺时针偏转; Y 井区应力方向介于 $110^{\circ} \sim 120^{\circ}$ (表 4)。

4 断裂系统及附近现今地应力特征

结合前期单井地应力分析结果, 开展研究区应

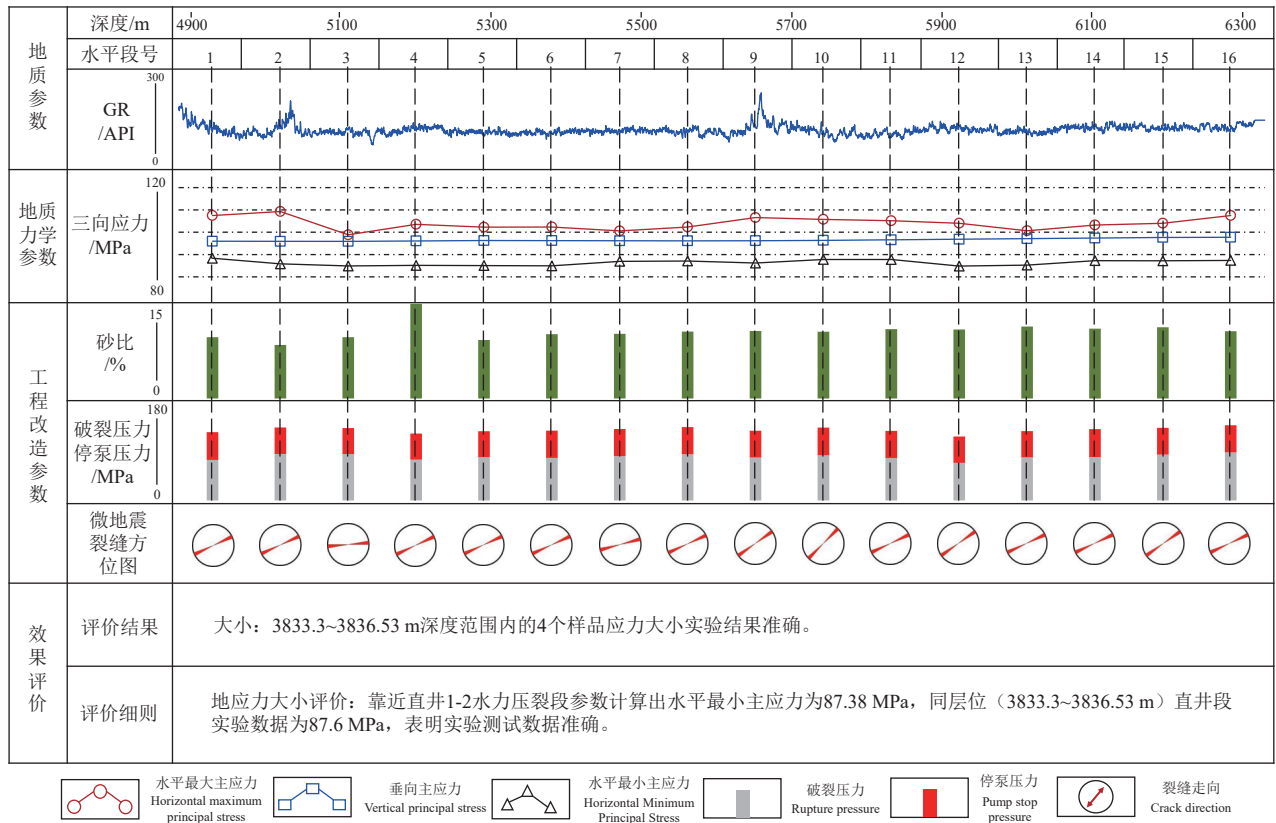


图2 L11井水平段地应力解释分布图
Fig.2 Interpreted geostress distribution map of horizontal section of L11 well

表3 研究区单井三向应力表征值

Table 3 Characteristics values of three-way stress in a single well in the study area

研究区块	井位	层位	三向应力值/MPa			应力结构
			S_H	S_h	S_v	
L03井区	L03	五峰组	109.64	93.57	101.34	走滑态
	L04	龙一 ₁ ² 小层	101.73	88.72	95.42	走滑态
	L11	龙一 ₁ ¹ 小层	103.61	89.20	98.23	走滑态
	L12	龙一 ₁ ¹ 小层	103.52	88.02	98.21	走滑态
	L02	龙一 ₁ ¹ 小层	105.45	92.33	99.42	走滑态
	L01	龙一 ₁ ² 小层	88.37	77.32	86.65	走滑态
L13井区	L14	龙一 ₁ ¹ 小层	113.11	97.92	106.91	走滑态
	L15	龙一 ₁ ¹ 小层	114.32	99.11	108.23	走滑态
	L13	龙一 ₁ ¹ 小层	103.58	90.65	101.12	走滑态
L06井区	L06	龙一 ₁ ¹ 小层	104.82	92.21	97.96	走滑态
	L07	龙一 ₁ ¹ 小层	100.53	84.44	93.86	走滑态
	L08	龙一 ₁ ¹ 小层	96.92	86.52	93.33	走滑态
Y井区	Y03	龙一 ₁ ¹ 小层	115.26	99.09	105.31	走滑态
	Y06	五峰组	98.41	86.13	90.74	走滑态
	Y02	龙一 ₁ ¹ 小层	113.51	97.94	103.68	走滑态
	Y01	龙一 ₁ ¹ 小层	101.33	88.51	99.12	走滑态
	Y04	龙一 ₁ ¹ 小层	109.23	96.04	105.11	走滑态
	Y07	龙一 ₁ ¹ 小层	111.82	95.53	106.52	走滑态
	Y09	五峰组	115.84	100.01	106.73	走滑态
	Y10	龙一 ₁ ¹ 小层	106.81	94.62	102.14	走滑态
	Y08	龙一 ₁ ¹ 小层	114.31	99.32	108.94	走滑态
	Y05	龙一 ₁ ¹ 小层	105.45	92.33	99.44	走滑态

注：龙一₁¹为龙马溪组龙一段1亚段中的1小层，龙一₁²为龙马溪组龙一段1亚段中的2小层； S_H 为水平最大主应力， S_h 为水平最小主应力， S_v 为垂向主应力；走滑应力状态结构为： $S_H > S_v > S_h$ （据鞠玮等, 2020）。

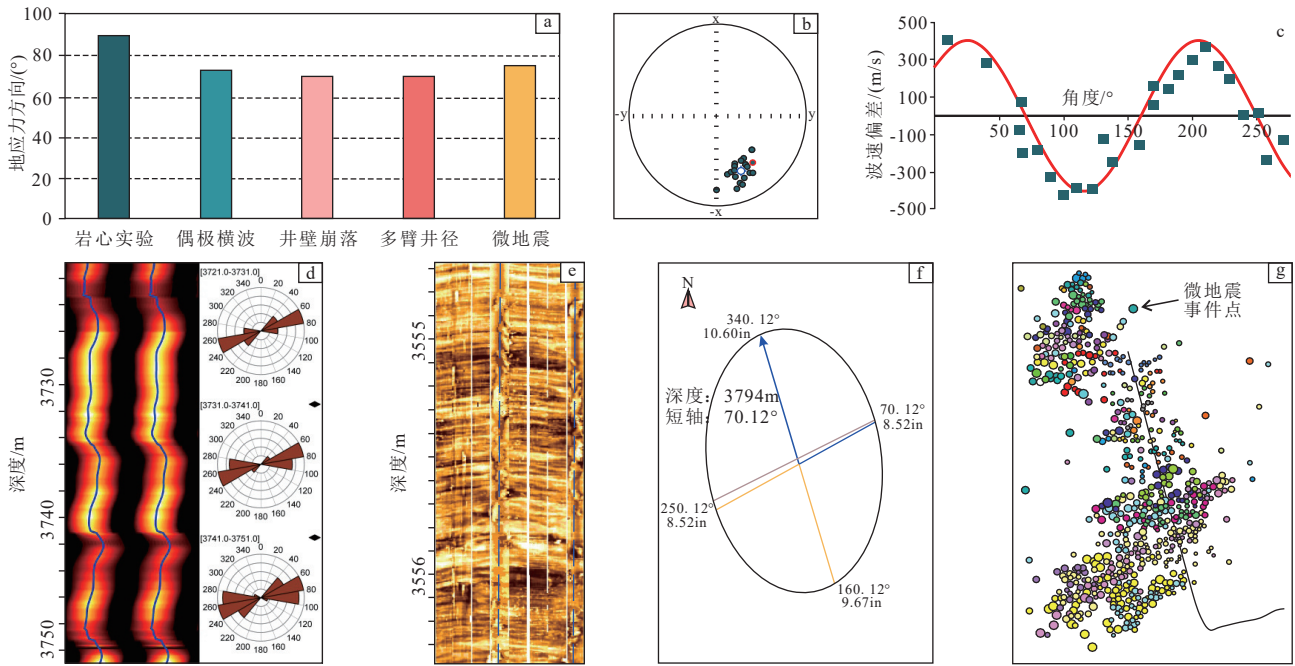


图 3 研究区不同地应力方向解释方法结果对比图

a—不同地应力方向解释方法的结果对比; b—古地磁定向实验解释图; c—波速各向异性实验解释图; d—偶极阵列声波测井解释图; e—井壁崩落测井解释图; f—多臂井径测井解释图; g—微地震监测解释图

Fig.3 Comparison of the results of different geostress direction interpretation methods in the study area

a-Comparison of results of different geostress direction interpretation methods; b-Paleomagnetic orientation experimental interpretation map; c-Wave velocity anisotropy experimental interpretation map; d-Dipole array acoustic wave logging interpretation map; e-Wall collapse logging interpretation map; f-Multiple-arm well logging interpretation map; g-Microseismic monitoring interpretation map

表 4 研究区单井地应力方向解释结果数据

Table 4 Results of the geostress direction of a single well in the study area

研究区块	井位	不同方法解释单井应力方向结果/°					最终应力解释方向/°
		波速各向异性	偶极阵列声波	井壁崩落	钻井诱导缝	微地震监测	
L03井区	L03	102.8	70~75	73	—	70	75
	L04	107.5	75~83	—	80~90	—	80
	L11	103.6	75~85	—	—	64~68	75
	L12	90	70	75	70	75	75
	L01	108.2	90~100	110	—	105~110	110
L13井区	L14	105.7	113	105	—	—	105
	L14	106.4	110~115	120	—	116~120	120
	L13	112.9	120~125	—	—	120	120
L06井区	L06	104.9	70~80	100~105	—	—	100
	L07	104.1	—	103	—	—	105
	L08	94	—	90	93.4	—	94
Y井区	Y03	108.6	110	100	—	115	110
	Y06	120.5	—	110	—	—	120
	Y02	108.6	105~110	—	—	120	110
	Y01	108.3	—	110	—	110	110
	Y04	117.2	110~115	105~110	—	—	110
	Y07	124.9	115	—	—	120	120
	Y09	113.8	113	105	—	115	115
	Y10	100.9	—	110~115	110	110	115
	Y08	116	—	113.9	—	110~116	116
	Y05	111.1	—	110	—	113	111.1

注: 表中“—”符号表示缺失此类解释数据。

力场模拟预测,分析断裂系统及附近应力场变化,为后续地应力扰动规律分析提供数据支撑。

4.1 应力场建模

结合地震资料与单井测试资料,分别建立研究区构造模型、岩石力学模型,随后基于数值模拟软件完成应力场模拟预测。构造模型的建立主要基于构造等值线、断裂特征参数(图 4a)。岩石力学模型的建立需结合研究区杨氏模量、泊松比的分布趋势,形成 5 类岩石力学参数区块(图 4b、c、d);并对

不同的区块赋以相应的岩石力学参数,形成研究区岩石力学参数要素(表 5)。

断裂系统内岩石力学参数主要依据断裂级别和发育期次进行赋值,相比较非断裂区,断裂系统内杨氏模量减小至 13.750~36.973 GPa,而泊松比则增加至 0.272~0.413,内摩擦力、内摩擦角和抗拉强度数值均减小。结合单井实验测试数据明确研究区应力边界条件,水平最大主应力介于 97.9~118.1 MPa(均值 104.1 MPa),应力梯度为 2.742 MPa×

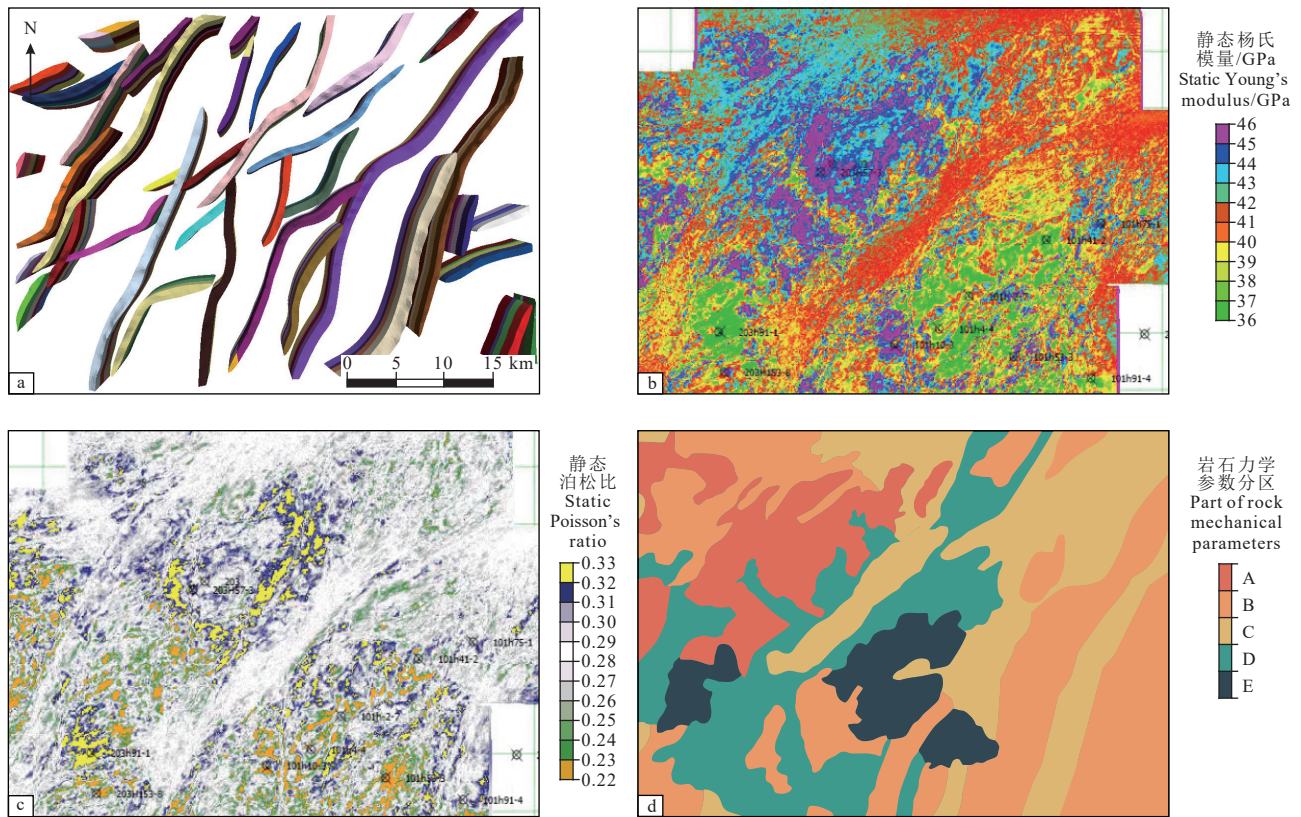


图 4 研究区应力场模拟模型属性图

a—研究区断裂模型; b—研究区静态杨氏模量分布图; c—研究区静态泊松比分布图; d—研究区岩石力学参数区块

Fig.4 Properties of the stress field simulation model in the study area

a—Fracture model of the study area; b—Distribution of static Young's modulus of the study area; c—Distribution of static Poisson's ratio of the study area; d—Block of rock mechanical parameters of the study area

表 5 泸州北区岩石力学参数单元要素

Table 5 Unit elements of rock mechanical parameters in the North Luzhou district

岩石力学参数	力学单元				
	A	B	C	D	E
杨氏模量/GPa	45.575	42.600	40.975	39.575	36.411
泊松比	0.324	0.295	0.274	0.260	0.224
内摩擦力/MPa	29.560	27.638	26.588	25.684	24.639
内摩擦角/°	46.738	43.283	41.398	39.771	36.096
抗拉强度/MPa	12.230	11.041	10.391	9.834	8.564

100/m; 水平最小主应力介于 86.1~103.1 MPa(均值 95.81 MPa), 应力梯度为 2.324 MPa×100/m。泸州北区区域应力方向介于 105°~115°, 考虑在不同构造背景下应力方向的偏转情况, 明确区域模拟应力加载方向为 105°。

4.2 应力场模拟结果

应力场平面模拟结果表明, 研究区三向应力值 (S_H 、 S_h 、 S_v) 介于 85~140 MPa、60~100 MPa、70~110 MPa(图 5a、b、c)。断裂区应力值相比非断裂区降低 5~35 MPa, 且不同级次和不同期次的断裂应力值呈现不同趋势的降低。随着断裂级次的降低, 断裂内应力值降低程度减小; 不同级次断裂中, NEE—EW 走向断裂应力值降低程度最大。研究区水平最大主应力方向介于 75°~120°, L03 井区应力方向介

于 75°~105°, Y 井区应力方向介于 110°~120°, 断裂区内水平最大主应力方向相较于非断裂区偏转 4°~25°(图 5d)。

5 断裂系统对现今地应力扰动规律

基于上述应力场特征解释, 统计分析相同级次不同走向、相同走向不同级次断裂对现今地应力的扰动规律。断裂对应力场扰动模拟结果表明, 断裂对地应力大小扰动呈现出离断裂距离的增加, 即从断层核到断层围岩, 地应力大小增加至区域应力大小(翁剑桥等, 2020)(图 6a)。对地应力方向的扰动则呈现出, 从断层核到断层围岩, 地应力方向逐渐朝着区域应力方向偏转(刘中春等, 2016)(图 6b)。

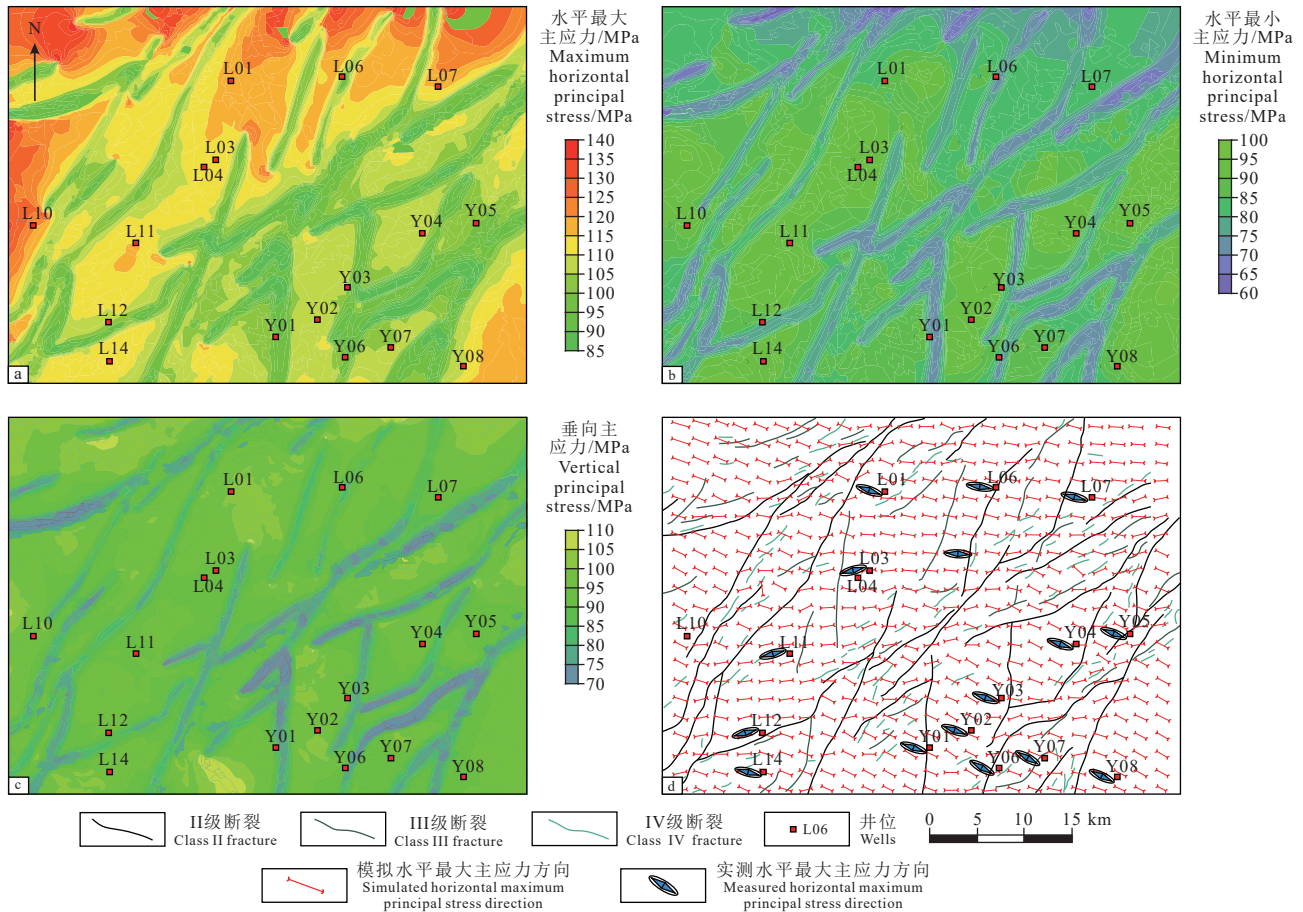


图 5 研究区应力场模拟结果平面分布图

a—水平最大主应力模拟平面分布图; b—水平最小主应力模拟平面分布图; c—垂向主应力模拟平面分布图; d—水平最大主应力方向模拟平面分布图

Fig.5 Plane distribution of simulated stress field results in the study area

a—Horizontal maximum principal stress simulation plan; b—Horizontal minimum principal stress simulation plan; c—Pendant principal stress simulation plan; d—Horizontal maximum principal stress direction simulation plan

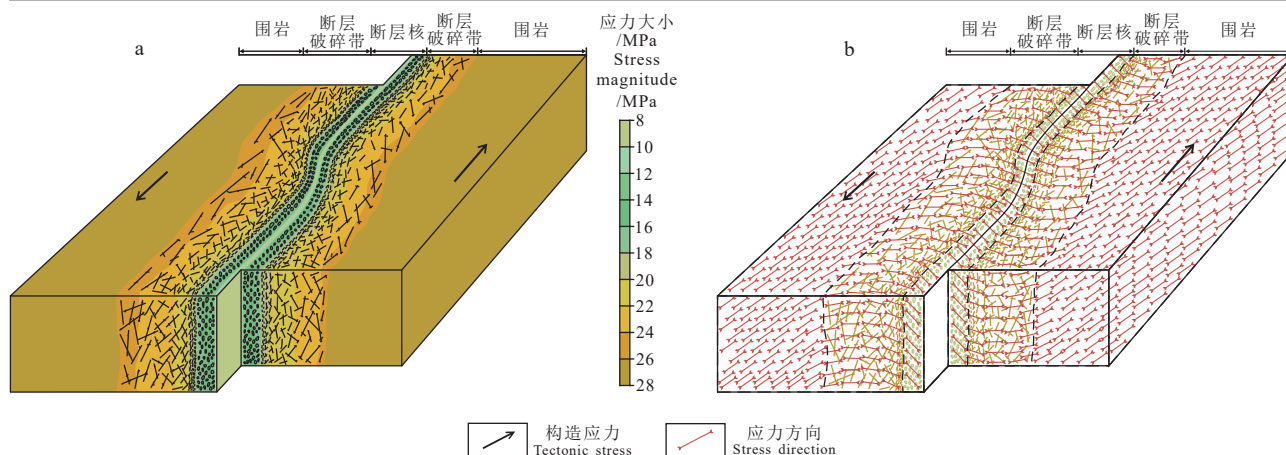


图6 断裂对地应力扰动模拟模式图

Fig.6 Simulation model diagram of fracture to ground stress perturbation

5.1 相同走向不同级次断裂扰动

相同走向不同级次断裂对地应力扰动统计规律显示,相同走向断裂随着断裂级次的增加,应力扰动范围逐渐增大,呈现出 II 级(1.43~1.85 km) > III 级(1.11~1.52 km) > IV 级(0.71~0.94 km)。不同级次断裂内水平最小主应力梯度次序为: II 级(1.96~2.11 MPa×100/m) < III 级(2.06~2.21 MPa×100/m) < IV 级(2.22~2.31 MPa×100/m) (图 7a、b、c);随着断裂级次的增加,水平最大主应力方向偏转幅度逐渐增大,偏转次序为 II 级(27.52~36.42°) > III 级(19.24~28.42°) > V 级(13.12~20.06°) (图 7d、e、f)。其中,II 级与 III 级断裂内应力梯度差值(0.0633 MPa×100/m)远小于 III 级与 IV 级断裂内的应力梯度差值(0.1233 MPa×100/m),不同级次断裂间地应力方向偏转幅度差值相近。进一步表明岩石破碎程度对地应力大小扰动影响大于断裂宽度的影响,而对于地应力方向,则是断裂宽度较岩石破碎程度对地应力方向扰动影响大。

5.2 相同级次不同走向断裂扰动

相同级次不同走向断裂对地应力扰动规律分析显示,不同走向断裂内地应力梯度次序为: NEE—EW(1.96~2.22 MPa×100/m) < NE(2.11~2.27 MPa×100/m) < NNE—NS(2.17~2.31 MPa×100/m) (图 8a、b、c),断裂内水平最大主应力方向偏转幅度则呈现出: NEE—EW(20.06°~36.42°) > NE(17.52°~32.08°) > NNE—NS(13.12°~27.52°) (图 8d、e、f),进一步得出不同走向断裂应力扰动范围次序为: NEE—EW

(0.94~1.85 km) > NE(0.79~1.56 km) > NNE—NS(0.71~1.43 km)。结合研究区区域应力方向介于 SEE105°~115°, NEE—EW、NE、NNE—NS 走向断裂与其夹角分别介于 20°~37.5°、50°~65°、75°~95°,表明研究区断裂对地应力扰动强度并未随断裂走向与地应力方向夹角的增大而增强,而是趋于一定的夹角范围(20°~40°)时,扰动强度逐渐趋于最大。

基于上述研究区相同走向不同级次、同级次不同走向断裂对地应力扰动统计结果,形成研究区 II~IV 断裂对地应力扰动范围、应力大小梯度、应力方向偏转统计结果(表 6)。

6 应用

依据前期断裂对地应力扰动特征要素统计结果,完成研究区 II~IV 级断裂对地应力扰动图(图 9)。刻画出断裂扰动区与非断裂扰动区,为后续生产区井位部署再优化、降低产能建设风险提供数据支撑。

考虑地应力和断裂走向分布特征,分别建立断裂区与非断裂区布井模式。断裂扰动区占比研究区面积 40%,断裂扰动常导致区域内地应力方向发生偏转;区域内水平井轨迹与水平最大主应力方向需介于 40°~75°,或与断裂走向介于 50°~85°;井间距以 300~400 m 为主,水平段长以 1.5~1.8 km 为主。非断裂区占比研究区面积 60%,区域内受构造断裂影响较小,水平井轨迹方位与垂直于水平最大主应力方向即可,井间距以 300 m 为主,水平段长以 1.7~2.1 km 为主。

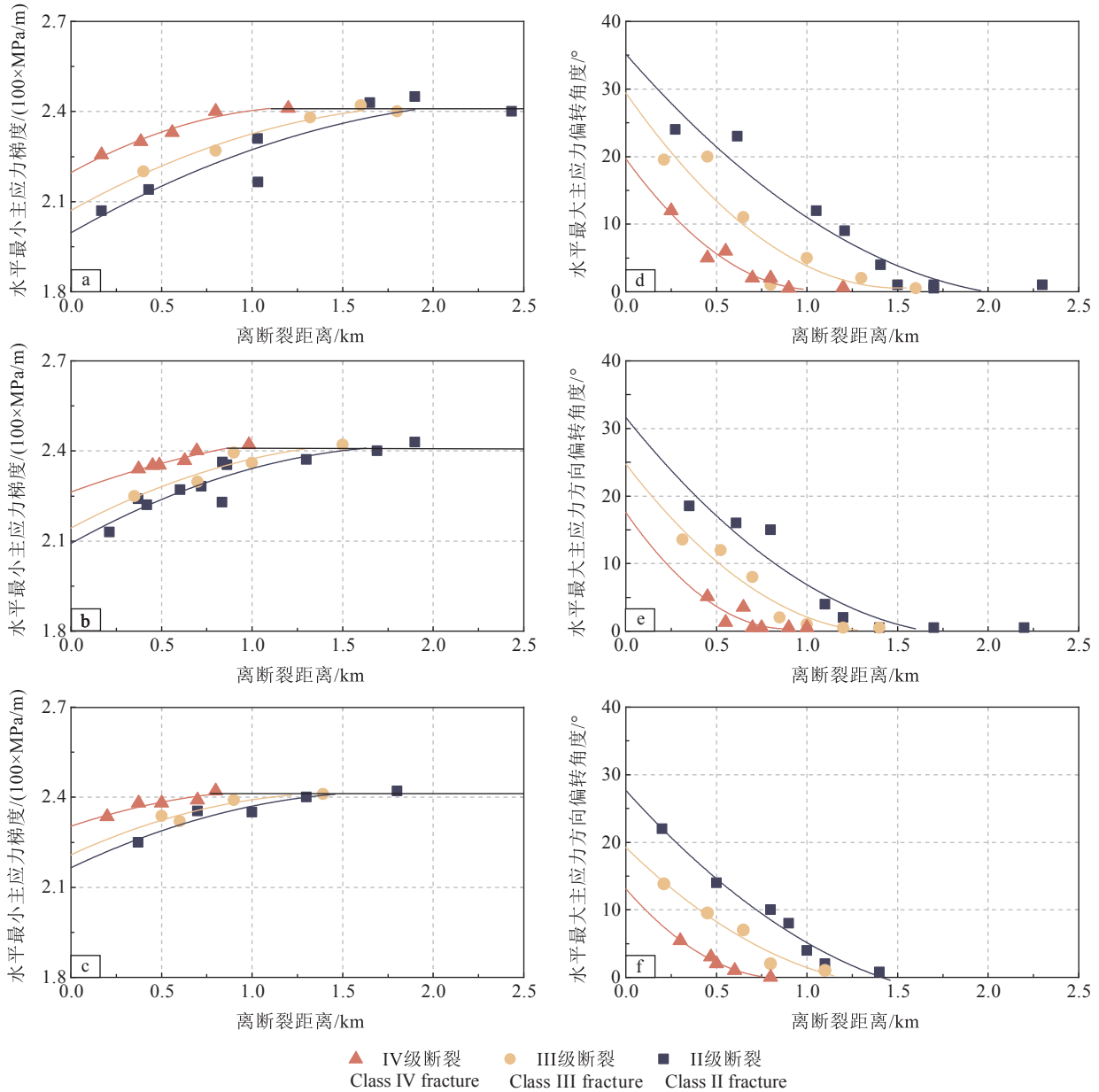


图 7 研究区相同走向不同级次断裂应力扰动统计图

a、d—NEE—EW 走向断裂应力大小、方向扰动统计图; b、e—NE 走向断裂应力大小、方向扰动统计图; c、f—NNE—NS 走向断裂应力大小、方向扰动统计图

Fig.7 Statistical map of stress disturbances of different levels of fracture on the same strike in the study area

a, d—Statistical map of fracture stress magnitude and direction perturbation towards NEE—EW; b, e—Statistical map of fracture stress magnitude and direction perturbation towards NE; c, f—Statistical map of fracture stress magnitude and direction perturbation towards NNE—NS

7 结论

(1) 泸州北区深层页岩气地质条件复杂, 可划分出 6 个向斜、9 个背斜及斜坡 3 种构造类型; I~II 级断裂主要发育在背斜高部位, III~IV 级断裂集中在宽缓向斜区, 断裂走向以 NEE—EW、NE、NNE—

NS 走向为优势方向。

(2) 基于应力场模拟分析, 明确了研究区断裂对地应力扰动规律。随着断裂级次的增加, 应力扰动范围呈现出 II 级 (1.43~1.85 km) > III 级 (1.11~1.52 km) > IV 级 (0.71~0.94 km); 不同走向断裂中 NEE—EW 走向断裂对应力扰动强度最大, 应力扰

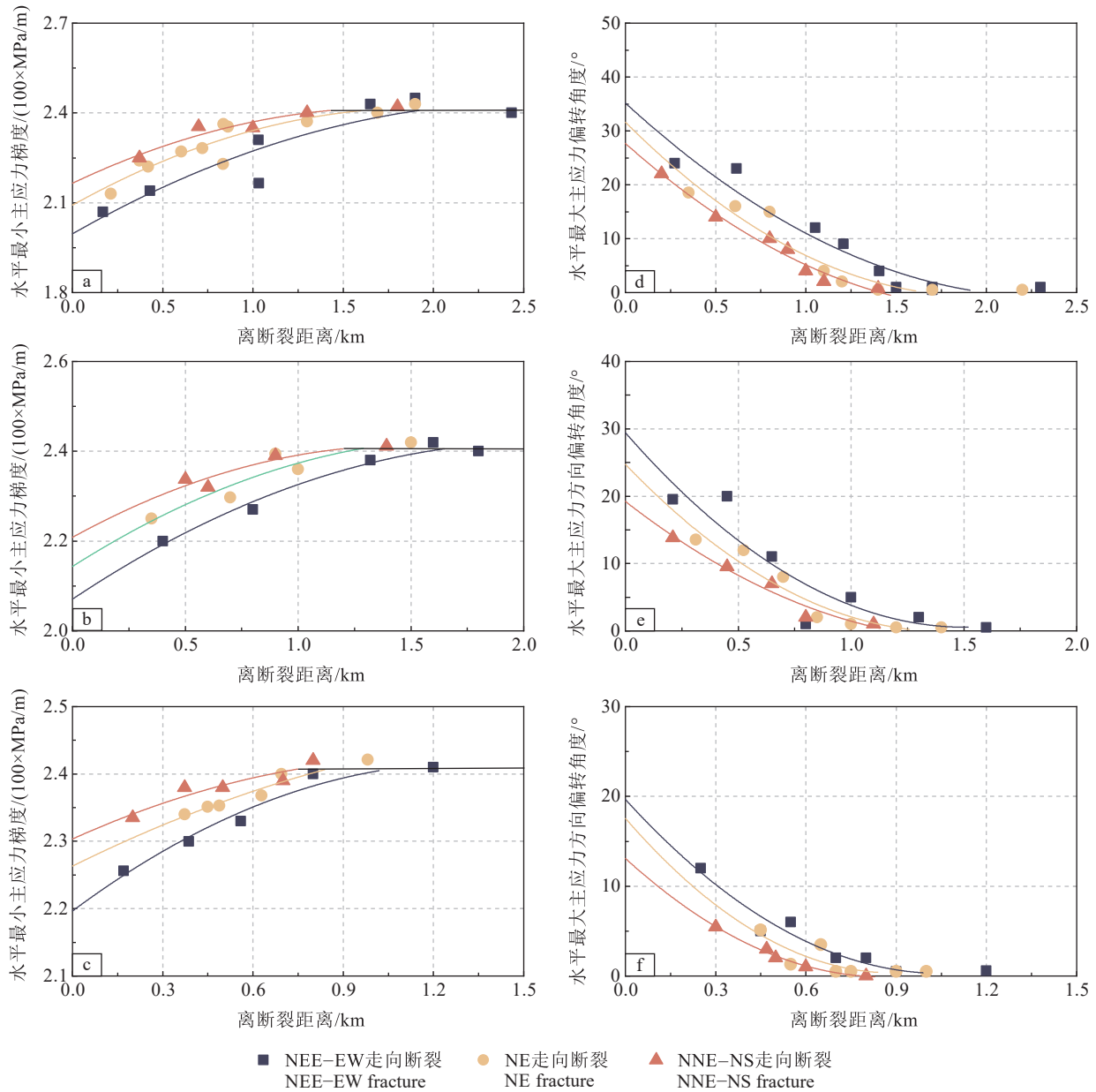


图8 研究区相同级次不同走向断裂应力扰动统计图

a、d—II级断裂的应力大小、方向扰动统计图; b、e—III级断裂的应力大小、方向扰动统计图; c、f—IV级断裂的应力大小、方向扰动统计图

Fig.8 Statistical map of stress disturbances of different strike fractures of the same magnitude in the study area

a, d—statistical map of stress magnitude and direction perturbation for class II fracture; b, e—statistical map of stress magnitude and direction perturbation for class III fracture; c, f—statistical map of stress magnitude and direction perturbation for class IV fracture

表6 研究区II~IV级断裂对应力扰动特征要素

Table 6 Elements characteristics stress perturbation by class II-IV fracture in the study area

断裂级别	断裂走向	应力扰动范围/km	断裂内应力梯度/(100×MPa/m)	水平最大主应力方向偏转角度/°
II级	NE	1.56	2.11	32.08
	NNE-NS	1.43	2.17	27.52
	NEE-EW	1.85	1.96	36.42
III级	NE	1.24	2.16	24.81
	NNE-NS	1.11	2.21	19.24
	NEE-EW	1.52	2.06	28.42
IV级	NE	0.79	2.27	17.52
	NNE-NS	0.71	2.31	13.12
	NEE-EW	0.94	2.22	20.06

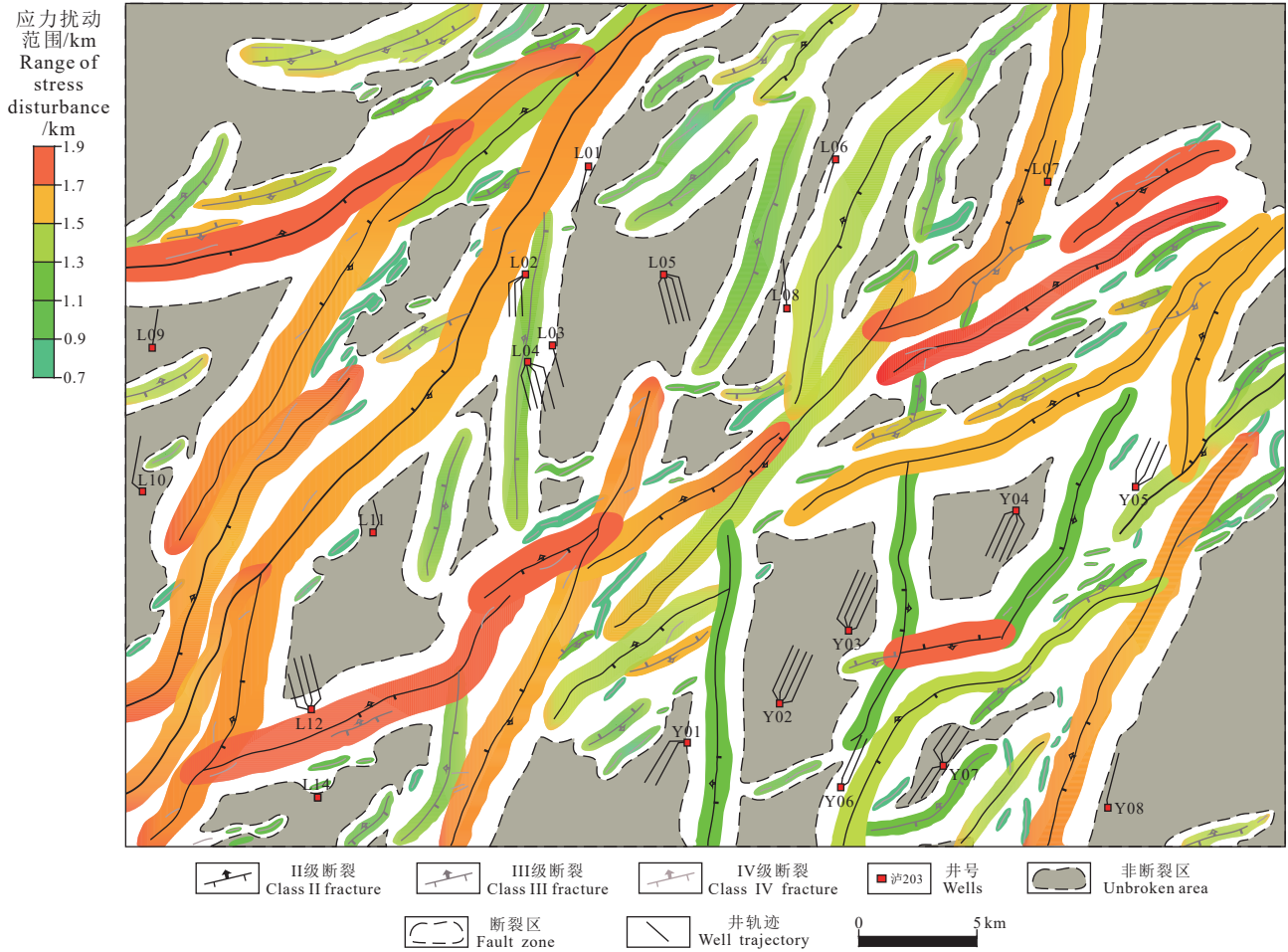


图 9 研究区 II~IV 级断裂对地应力扰动范围图
(断裂周围填充的颜色范围为实际扰动范围的等比例缩小范围距离, 断裂实际扰动范围以白色区域边缘黑色散点线为准)

Fig.9 Extent map of geostress disturbance by class II-IV fracture in the study area

(The range of colours filled around the fracture is an equal reduction in range distance from the actual range of disturbance, the actual range of disturbance of the fracture is based on the black scatter line at the edge of the white area)

动范围呈现出 NEE—EW(0.94~1.85 km) > NE(0.79~1.56 km) > NNE—NS(0.71~1.43 km)。

(3)建立了研究区断裂对应力扰动图, 刻画出断裂与非断裂区扰动区域。优化了水平井段布井模式, 断裂扰动区内井轨迹与水平最大主应力方向需介于 40°~75°, 或与断裂走向介于 50°~85°; 非断裂区井轨迹方位与垂直于水平最大主应力方向即可。

References

Allawi R H, Al-Jawad M S. 2021. Wellbore instability management using geomechanical modeling and wellbore stability analysis for Zubair shale formation in Southern Iraq[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 11(11): 4047-4062.
Bao Shujing, Ge Mingna, Xu Xingyou, Guo Tianxu, Lin Yanhua, Mou Degang, Liang Hongbo. 2023. Progress and development proposals

in the exploration and development of continental shale oil in China[J]. Geology in China, 50(5): 1344-1354(in Chinese with English abstract).

Bilardello D. 2021. Late Paleozoic depositional environments and sediment transport directions of the itararé group rocks from the state of São Paulo, Brazil, determined from rock magnetism and magnetic anisotropy[J]. Earth and Space Science, 8(7): 1201-1216.
Bröker K, Ma X D. 2022. Estimating the least principal stress in a granitic rock mass: Systematic mini-frac tests and elaborated pressure transient analysis[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 55(4): 1931-1954.
Cheng Gengsheng, Xie Qinghui, Wu Jianfa, Zhao Chunduan, Xu Ersi, Pan Yuanwei. 2022. Comprehensive application of the seismic multi-attribute technique combination in the tectonic interpretation of the Luzhou shale gas block[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 46(6): 1349-1358(in Chinese with English abstract).
Dong Min, Guo Wei, Zhang Linyan, Wu Zhonghai, Ma Licheng, Dong

- Hui, Feng Xingqiang, Yang Yuehui. 2022. Characteristics of paleotectonic stress field and fractures of Wufeng–Longmaxi Formation in Luzhou area, Southern Sichuan Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 34(1): 43–51(in Chinese with English abstract).
- Guo Tonglou, Xiong Liang, Lei Wei, Zhao Yong, Pang Heqing. 2022. Deep shale gas exploration and development in the Weirong and Yongchuan areas, South Sichuan Basin: Progress, challenges and prospect[J]. *Natural Gas Industry*, 42(8): 45–59(in Chinese with English abstract).
- Guo Weixing, Tang Jjianming, Ouyang Jiasui, Wang Tong, Wang Xin, Wang Yan. 2021. Characteristics of structural deformation in the southern Sichuan Basin and its relationship with the storage condition of shale gas[J]. *Natural Gas Industry*, 41(5): 11–19(in Chinese with English abstract).
- Han Lingling, Li Xizhe, Liu Zhaoyi, Duan Guifu, Wan Yujin, Guo Xiaolong, Guo Wei, Cui Yue. 2023. Influencing factors and prevention measures of casing deformation in deep shale gas wells in Luzhou block, southern Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 50(4): 853–861(in Chinese with English abstract).
- He Jianhua, Cao Feng, Deng Hucheng, Wang Yuanyuan, Li Yong, Xu Qinglong. 2023. Evaluation of in–situ stress in dense sandstone reservoirs in the second member of Xujiahe Formation of the HC area of the Sichuan Basin and its application to dense sandstone gas development[J]. *Geology in China*, 50(4): 1107–1121(in Chinese with English abstract).
- He Xiaodong, Ma Junxiu, Shi Shanzhi, Liu Gang, Tan Qiang. 2020. Core differential strain test of tight glutinite reservoir in Mahu oilfield[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 32(3): 86–93(in Chinese with English abstract).
- Huang Hanyu. 2018. Formation and Evolution of Paleo–uplift in Southeastern Sichuan Basin and its Control on Hydrocarbon accumulation[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–164 (in Chinese with English abstract).
- Huang Tao, Liu Yan, He Jianhua, Ye Tairan, Deng Hucheng, Li Ruixue, Li Kesai, Zhang Jiawei. 2024. Evaluation method and engineering application of in–situ stress of deep tight sandstone reservoir in the second member of Xujiahe Formation in Xiaoquan–Fenggu area, western Sichuan[J]. *Geology in China*, 51(1): 90–104(in Chinese with English abstract).
- Jia Chengzao. 2020. Development challenges and future scientific and technological researches in China's petroleum industry upstream[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 41(12): 1445–1464(in Chinese with English abstract).
- Jiang Zhenxue, Liang Zhikai, Shen Yinghao, Tang Xianglu, Wu Wei, Li, Zhuo, Xue Zixin, Shi Xuewen, Guo Jie. 2023. Coupling key factors of shale gas sweet spot and research direction of geology–engineering integration in southern Sichuan[J]. *Earth Science*, 48(1): 110–129(in Chinese with English abstract).
- Ju Wei, Niu Xiaobing, Feng Shengbin, You Yuan, Xu Haoran, Wang Shengyu. 2020. The present day insitu stress state and fracture effectiveness evaluation in shale oil reservoir: A case study of the Yanchang Formation Chang7 oil bearing layer in the Ordos Basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 49(5): 931–940(in Chinese with English abstract).
- Li Yuegang, Zhou Anfu, Xie Wei, Qiu Xunxi, Dai Yun, Hu Xi, Cheng Xiaoyan, Jiang, Yuqiang, Fu Yonghong, Wang Zimeng. 2022. Lithofacies division and main controlling factors of reservoir development in Wufeng Formation–Long₁ sub–member shale in the Luzhou region, south Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 42(8): 112–123(in Chinese with English abstract).
- Lin Changcheng, Ding Wenlong, Wang Xinhua, Gu Yang, Yin Shuai, Liu Jingshou. 2018. Research progress of geostress in shale reservoir[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 34(7): 1–8, 20(in Chinese with English abstract).
- Liu Libin, Duan Dong, Zheng Chaoyang. 2020. Study on insitu stress testing based on Kaiser effect of rock acoustic emission[J]. *Coal Science and Technology*, 48(12): 45–50(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhonghe, Lyu Xinrui, Li Yukun, Zhang Hui. 2016. Mechanism of faults acting on in–situ stress field direction[J]. *Oil & Gas Geology*, 37(3): 387–393(in Chinese with English abstract).
- Luo Chao, Li Jinxi, Li Zhiwu, Zhang Dongjun, Tong Kailin, Dai Yun, Hu Xi, Liu Aodong, Ye Yuehao, Zhong Kesu, Yang Yuran, He Yifan, Li Yi, Huang Ruiguang, Gong Zilong. 2022. Structural deformation characteristics and formation process of Luzhou Block in Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 49(6): 665–673(in Chinese with English abstract).
- Mehrvash N, Kouros Y, Bahman S, Abdolmajid A. 2021. Analysis of fractures in the Dalan and Kangan carbonate reservoirs using FMI logs: Sefid–Zakhur gas field in the Fars Province, Iran[J]. *Carbonates and Evaporites*, 36(2): 1103–1116.
- Min Jian, Ma Huiyun, Pen Juanliang, Han Huifen, Wang Du. 2020. Study on determination of insitu stress direction using wave velocity anisotropy method combined with paleomagnetism method[J]. *Drilling & Production Technology*, 43(z1): 17–19(in Chinese with English abstract).
- Nazir M B, Lin Weiren, Murata S, Yousefi F, Radwan A E. 2022. Magnitudes and orientations of present–day in–situ stresses in the Kurdistan region of Iraq: Insights into combined strike–slip and reverse faulting stress regimes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 239: 105398–105416.
- Qi Dunke, Liu Jianzhong. 2017. Determination of maximum horizontal principal stress orientation by monitoring the extending direction of micro–seismic multiple staged fractures in horizontal wells[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 39(5): 814–817(in Chinese with English abstract).
- Shi Zhensheng, Zhou Tianqi, Guo Wei, Liang Pingping, Cheng Feng. 2022. Quantitative paleogeographic mapping and sedimentary

- microfacie division in a deep-water marine shale shelf: Case study of Wufeng Formation–Longmaxi Formation shale, southern Sichuan Basin, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(6): 1728–1744(in Chinese with English abstract).
- Shi Xuewen, Wu Wei, Hu Haiyan, Liu Lihang, Zhu Yiqing, Pan Renfang, Meng Jianghui, Wang Tao. 2023. The whole apertures of deeply buried Wufeng–Longmaxi Formation shale and their controlling factors in Luzhou district, Sichuan Basin[J]. *Earth Science*, 48(1): 158–172(in Chinese with English abstract).
- Tong Kailin, Cai Hongyan, Li Jinxi, He Jianhua, Luo Chao, Liu Aodong, Tang Rong, Dai Yun, Hu Xi. 2023. Present stress orientations and controlling factors of shale reservoirs in LZ region, Sichuan Basin: Example of the first member of Longmaxi Formation[J]. *Science Technology and Engineering*, 23(8): 3224–3236(in Chinese with English abstract).
- Wang Ruyue, Hu Zongquan, Dong Li, Gao Bo, Sun Chuanxiang, Yang Tao, Wang Guanping, Yin Shuai. 2021. Advancement and trends of shale gas reservoir characterization and evaluation[J]. *Oil & Gas Geology*, 42(1): 54–65(in Chinese with English abstract).
- Weng Jianqiao, Zeng Lianbo, Lyu Wenya, Liu Qi, Zu Kewei. 2020. Width of stress disturbed zone near fault and its influencing factors[J]. *Journal of Geomechanics*, 26(1): 39–47(in Chinese with English abstract).
- Wu Jianfa, Zhang Chenglin, Zhao Shengxian, Zhang Jian, Feng Jiangrong, Xia Ziqiang, Fang Yuan, Li Bo, Yin Meixuan, Zhang Dekuan. 2023. Typical types of shale gas reservoirs in southern Sichuan Basin and enlightenment of exploration and development[J]. *Natural Gas Geoscience*, 34(8): 1385–1400(in Chinese with English abstract).
- Wu Xiaoguang, Ji Fengling, Li Decai. 2016. Application status and research progress of dipole acoustic well logging[J]. *Progress in Geophysics*, 31(1): 380–389(in Chinese with English abstract).
- Xie Jun. 2017. Rapid shale gas development accelerated by the progress in key technologies: A case study of the Changning – Weiyuan national shale gas demonstration zone[J]. *Natural Gas Industry*, 37(12): 1–10(in Chinese with English abstract).
- Xie Lingfeng, Chen Wei, Yu Yangli. 2023. Identification of secondary faults and hydrocarbon significance in Luzhou area, southern Sichuan[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 30(2): 152–154(in Chinese with English abstract).
- Yan Jianping, Luo Jingchao, Shi Xuewen, Zhong Guanghai, Zheng Majia, Huang Yi, Tang Hongming, Hu Qinghong. 2022. Fracture development models and significance of Ordovician WuFeng–Silurian Longmaxi shale in Luzhou area, Southern Sichuan Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 34(6): 60–71(in Chinese with English abstract).
- Yang Hongzhi, Zhao Shengxian, Liu Yong, Wu Wei, Xia Ziqiang, Wu Tianpeng, Luo Chao, Fan Tianyou, Yu Linyao. 2019. Main controlling factors of enrichment and high-yield of deep shale gas in the Luzhou block, Southern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 39(11): 55–63(in Chinese with English abstract).
- Yang Hongzhi, Zhao Shengxian, Xia Ziqiang, Yang Xuefeng, Zhang Chenglin, Zhang Deliang, Zhang Jian, Yuan Shusheng, Feng Jiangrong, Xie Wei, He Yuanhan, Hu Haoran, Li Bo, Wang Gaoxiang. 2022. Target selection of tridimensional development of deep shale gas in the Luzhou region, South Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 42(8): 162–174(in Chinese with English abstract).
- Yang Xue, Shi Xuewen, Zhu Yiqing, Liu Jia, Li Yi, He Liang, Xu Liang, Li Yanyou, Chen Yao, Jiang Jiayu. 2022. Sedimentary evolution and organic matter enrichment of Katian–Aeronian deep-water shale in Luzhou area, southern Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 43(4): 469–482(in Chinese with English abstract).
- Yin Shuai, Liu Hanlin, He Jianhua, Wang Ruifei, Li Xiangxue, Huang Zheng, Zhou Yongqiang, He Zixiao. 2023. Comprehensive evaluation of geo-stress sandstone under constraint of dynamomechanical methods[J]. *Advance in Earth Science*, 38(12): 1285–1296(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinchuan, Shi Miao, Wang Dongsheng, Tong Zhongzheng, Hou Xudong, Niu Jialiang, Li Xingqi, Li Zhongming, Zhang Peng, Huang Yuqi. 2021. Fields and directions for shale gas exploration in China[J]. *Natural Gas Industry*, 41(8): 69–80(in Chinese with English abstract).
- Zhao Shengxian, Xu Wenqiao, Yang Xuefeng, Yin Hongwei, Li Bo, Wang Wei, Zhang Chenglin, Jia Dong, Liu Yongyang, Xie Wei, Zhang Dongjun, Li Changsheng. 2023. The structural characteristics and deformation mechanisms of multiple detachments in Luzhou Area, Southeastern Sichuan basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 29(5): 726–735(in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Zhu Rukai, Dong Dazhong, Wu Songtao. 2022. Scientific and technological progress, development strategy and policy suggestion regarding shale oil and gas[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 43(12): 1675–1686(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 包书景, 葛明娜, 徐兴友, 郭天旭, 林燕华, 牟德刚, 梁宏波. 2023. 我国陆相页岩油勘探开发进展与发展建议[J]. *中国地质*, 50(5): 1344–1354.
- 陈更生, 谢清惠, 吴建发, 赵春段, 徐尔苏, 潘元炜. 2022. 地震多属性技术组合在泸州页岩气区块构造解释中的综合应用[J]. *物探与化探*, 46(6): 1349–1358.
- 董敏, 郭伟, 张林炎, 吴中海, 马立成, 董会, 冯立强, 杨跃辉. 2022. 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*, 34(1): 43–51.
- 郭彤楼, 熊亮, 雷炜, 赵勇, 庞河清. 2022. 四川盆地南部威荣、永川地区深层页岩气勘探开发进展、挑战与思考[J]. *天然气工业*, 42(8): 45–59.
- 郭卫星, 唐建明, 欧阳嘉穗, 王同, 王信, 王岩. 2021. 四川盆地南部构造变形特征及其与页岩气保存条件的关系[J]. *天然气工业*,

- 41(5): 11-19.
- 韩玲玲, 李熙喆, 刘照义, 段贵府, 万玉金, 郭晓龙, 郭伟, 崔悦. 2023. 川南泸州深层页岩气井套变主控因素与防控对策[J]. 石油勘探与开发, 50(4): 853-861.
- 何建华, 曹峰, 邓虎成, 王园园, 李勇, 徐庆龙. 2023. 四川盆地 HC 地区须二段致密砂岩储层地应力评价及其在致密气开发中的应用[J]. 中国地质, 50(4): 1107-1121.
- 何小东, 马俊修, 石善志, 刘刚, 谭强. 2020. 玛湖油田致密砂岩储层岩心差应变实验[J]. 中国海上油气, 32(3): 86-93.
- 黄涵宇. 2018. 川东南地区古隆起形成演化及其控油气作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1-164.
- 黄滔, 刘岩, 何建华, 叶泰然, 邓虎成, 李瑞雪, 李可赛, 张家维. 2024. 川西孝泉—丰谷地区须二段深层致密砂岩储层地应力大小评价方法及其工程应用[J]. 中国地质, 51(1): 90-104.
- 贾承造. 2020. 中国石油工业上游发展面临的挑战与未来科技攻关方向[J]. 石油学报, 41(12): 1445-1464.
- 姜振学, 梁志凯, 申颖浩, 唐相路, 吴伟, 李卓, 薛子鑫, 石学文, 郭婕. 2023. 川南泸州地区页岩气甜点地质工程一体化关键要素耦合关系及攻关方向[J]. 地球科学, 48(1): 110-129.
- 鞠玮, 牛小兵, 冯胜斌, 尤源, 徐浩然, 王胜宇. 2020. 页岩油储层现今地应力场与裂缝有效性评价——以鄂尔多斯盆地延长组长 7 油层组为例[J]. 中国矿业大学学报, 49(5): 931-940.
- 李跃纲, 周安富, 谢伟, 邱响晰, 戴赞, 胡曦, 程晓艳, 蒋裕强, 付永红, 王子萌. 2022. 四川盆地南部泸州地区五峰组—龙一₁亚段页岩岩相划分及储层发育主控因素[J]. 天然气工业, 42(8): 112-123.
- 林长城, 丁文龙, 王兴华, 谷阳, 尹帅, 刘敬寿. 2018. 页岩储层地应力研究进展[J]. 科技通报, 34(7): 1-8, 20.
- 刘利斌, 段东, 郑朝阳. 2020. 基于岩石声发射 Kaiser 效应的地应力测试研究[J]. 煤炭科学技术, 48(12): 45-50.
- 刘中春, 吕心瑞, 李玉坤, 张辉. 2016. 断层对地应力场方向的影响机理[J]. 石油与天然气地质, 37(3): 387-393.
- 罗超, 李金玺, 李智武, 张洞君, 佟恺林, 戴赞, 胡曦, 刘傲东, 叶玥豪, 钟可塑, 杨雨然, 何一凡, 李怡, 黄瑞广, 公子龙. 2022. 四川盆地泸州区块构造变形特征及形成过程[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 49(6): 665-673.
- 闵建, 马辉运, 彭钧亮, 韩慧芬, 王都. 2020. 波速各向异性结合古地磁测试地应力方向研究[J]. 钻采工艺, 43(z1): 17-19.
- 綦敦科, 刘建中. 2017. 利用水平井分段压裂微地震裂缝方位监测确定最大水平主应力方位[J]. 地震学报, 39(5): 814-817.
- 施振生, 周天琪, 郭伟, 梁萍萍, 程峰. 2022. 海相页岩定量古地理编图及深水陆棚沉积微相划分——以川南泸州地区五峰组—龙马溪组龙一₁⁴小层为例[J]. 沉积学报, 40(6): 1728-1744.
- 石学文, 吴伟, 胡海燕, 刘立航, 朱逸青, 潘仁芳, 孟江辉, 王涛. 2023. 泸州地区深层五峰—龙马溪组页岩气储层全孔径表征及其主控因素[J]. 地球科学, 48(1): 158-172.
- 佟恺林, 蔡鸿燕, 李金玺, 何建华, 罗超, 刘傲东, 唐荣, 戴赞, 胡曦. 2023. 四川 LZ 页岩储层现今地应力方向及主控因素——以龙一段为例[J]. 科学技术与工程, 23(8): 3224-3236.
- 王濡岳, 胡宗全, 董立, 高波, 孙川翔, 杨滔, 王冠平, 尹帅. 2021. 页岩气储层表征评价技术进展与思考[J]. 石油与天然气地质, 42(1): 54-65.
- 翁剑桥, 曾联波, 吕文雅, 刘奇, 祖克威. 2020. 断层附近地应力扰动带宽度及其影响因素[J]. 地质力学学报, 26(1): 39-47.
- 吴建发, 张成林, 赵圣贤, 张鉴, 冯江荣, 夏自强, 方圆, 李博, 尹美璇, 张德宽. 2023. 川南地区典型页岩气藏类型及勘探开发启示[J]. 天然气地球科学, 34(8): 1385-1400.
- 吴晓光, 季凤玲, 李德才. 2016. 偶极声波测井技术应用现状及研究进展[J]. 地球物理学进展, 31(1): 380-389.
- 谢军. 2017. 关键技术进步促进页岩气产业快速发展——以长宁—威远国家级页岩气示范区为例[J]. 天然气工业, 37(12): 1-10.
- 谢凌峰, 陈伟, 余养里. 2023. 川南泸州地区次级断裂识别及其油气意义[J]. 石化技术, 30(2): 152-154.
- 闫建平, 罗静超, 石学文, 钟光海, 郑马嘉, 黄毅, 唐洪明, 胡钦红. 2022. 川南泸州地区奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩裂缝发育模式及意义[J]. 岩性油气藏, 34(6): 60-71.
- 杨洪志, 赵圣贤, 刘勇, 吴伟, 夏自强, 吴天鹏, 罗超, 凡田友, 余林瑶. 2019. 泸州区块深层页岩气富集高产主控因素[J]. 天然气工业, 39(11): 55-63.
- 杨洪志, 赵圣贤, 夏自强, 杨学锋, 张成林, 张德良, 张鉴, 苑术生, 冯江荣, 谢伟, 何沅翰, 胡浩然, 李博, 王高翔. 2022. 四川盆地南部泸州区块深层页岩气立体开发目标优选[J]. 天然气工业, 42(8): 162-174.
- 杨雪, 石学文, 朱逸青, 刘佳, 李怡, 何亮, 徐亮, 李彦佑, 陈瑶, 蒋佳玉. 2022. 四川盆地南部泸州地区凯迪阶—埃隆阶深水页岩沉积演化与有机质富集[J]. 石油学报, 43(4): 469-482.
- 尹帅, 刘翰林, 何建华, 王瑞飞, 李香雪, 黄郑, 周永强, 贺子潇. 2023. 动静态地质力学方法约束的致密油砂岩地应力综合评估[J]. 地球科学进展, 38(12): 1285-1296.
- 张金川, 史淼, 王东升, 全忠正, 侯旭东, 牛嘉亮, 李兴起, 李中明, 张鹏, 黄宇琪. 2021. 中国页岩气勘探领域和发展方向[J]. 天然气工业, 41(8): 69-80.
- 赵圣贤, 徐雯峒, 杨学锋, 尹宏伟, 李博, 汪伟, 张成林, 贾东, 刘永咏, 谢伟, 张洞君, 李长圣. 2023. 川东南泸州地区多滑脱层构造特征及变形机制[J]. 高校地质学报, 29(5): 726-735.
- 邹才能, 朱如凯, 董大忠, 吴松涛. 2022. 页岩油气科技进步、发展战略及政策建议[J]. 石油学报, 43(12): 1675-1686.