

doi: 10.12097/gbc.2024.01.003

关琳琳, 王庆之, 高全芳, 刘琳, 李彦婧. 2025. 重庆市武隆地区五峰组-龙马溪组常压页岩气勘探潜力分析[J]. 地质通报, 44(6): 982-992.

Guan Linlin, Wang Qingzhi, Gao Quanfang, Liu Lin, Li Yanjing. 2025. The potential of normal-pressure shale gas exploration of the Ordovician Wufeng Formation and the Lower Silurian Longmaxi Formation in Wulong area, Chongqing[J]. Geological Bulletin of China, 44(6): 982-992(in Chinese with English abstract).

重庆市武隆地区五峰组-龙马溪组常压页岩气勘探潜力分析

关琳琳^{1,2}, 王庆之^{1,2}, 高全芳^{1,2}, 刘琳^{1,2}, 李彦婧^{1,2}

(1. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 江苏南京 210000; 2. 中国石化华东油气分公司勘探开发研究院, 江苏南京 210000)

摘要:【研究目的】为查明重庆市武隆地区五峰组-龙马溪组页岩气地质特征与保存条件, 分析常压页岩气勘探潜力, 为武隆地区实现效益开发提供参考。【研究方法】综合渝东南地区页岩气勘探开发前期的认识与成果, 从地质认识、区域构造演化、地震精细解释等方面开展研究。【研究结果】武隆地区奥陶系五峰组-志留系龙马溪组下部页岩层各项静态指标较优越, 具有良好的页岩气勘探潜力, 造成武隆地区与盆缘焦石坝、南川地区单井产能差异主要受构造作用的影响。武隆地区燕山早期和燕山中晚期以挤压应力为主, 有利于页岩气储层的改造和保存, 喜马拉雅期以伸展应力为主, 由于地层剥蚀、断裂发育、应力释放等因素, 局部页岩气保存条件变差。【结论】武隆地区具有“深水陆棚相带控制生烃基础、构造运动期次控制页岩气保存、构造样式控制页岩气富集”的特征, 武隆地区东部地堑区位于伸展构造区, 断层开启导致保存条件较差, 不利于页岩气的勘探开发; 南部凹中隆区、中部断展褶皱区为挤压应力区, 正向构造的发育有利于常压页岩气的富集和高产, 为页岩气勘探开发的有利目标区。

关键词: 常压页岩气; 保存条件; 构造样式; 勘探潜力; 重庆

创新点: 提出了武隆地区深水陆棚相带控制生烃基础、构造运动期次控制页岩气保存、构造样式控制页岩气富集的观点。

中图分类号: P618.1; TE122 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)06-0982-11

The potential of normal-pressure shale gas exploration of the Ordovician Wufeng Formation and the Lower Silurian Longmaxi Formation in Wulong area, Chongqing

GUAN Linlin^{1,2}, WANG Qingzhi^{1,2}, GAO Quanfang^{1,2}, LIU Lin^{1,2}, LI Yanjing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Efficient Development, Nanjing 210000, Jiangsu, China;
2. Research Institute of Exploration and Development, Sinopec East China Oil and Gas Company, Nanjing 210000, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] To clarify the geological characteristics and preservation conditions of the Ordovician Wufeng Formation and the Lower Silurian Longmaxi Formation shale gas, and to analyze the potential of the shale gas under normal pressure, this paper provides a reference for the efficient development of the Wulong area. [Methods] Based on the knowledge and achievements of shale gas exploration and development in southeast Chongqing, the research was conducted through the aspects of geological knowledge, regional tectonic evolution and fine seismic interpretation. [Results] The static evaluation indexes are superior and have good shale gas exploration potential of the Ordovician Wufeng Formation and the Lower Silurian Longmaxi Formation in this area. The difference of single well productivity is mainly due to the influence of tectonics between Wulong, Jiaoshiba and Nanchuan area. The compressive

收稿日期: 2024-01-22; 修订日期: 2025-04-25

资助项目: 中国石化科技部项目《渝东南地区浅层页岩气勘探开发关键技术》(编号: P24115)和《四川盆地及周缘资源评价》(编号: P23221)

作者简介: 关琳琳(1990-), 女, 硕士, 助理研究员, 从事页岩气勘探研究。E-mail: guanlinlin_upc@163.com

stress of Yanshan period was dominant in Wulong area, which was conducive to the transformation and preservation of shale gas reservoirs, and the extension stress was dominant in the Himalayan period, which made local shale gas preservation conditions deteriorate due to formation denudation, fracture development, stress release and other factors. **[Conclusions]** The Wulong area has the characteristics of "deep-water shelf facies controlling hydrocarbon generation, tectonic movement periods controlling shale gas preservation, and tectonic styles controlling shale gas enrichment". The eastern graben is located in the extensional tectonic zone, and the fault opening leads to poor preservation conditions, which is not conducive to shale gas exploration and development. The central uplift area in the southern depression and the fault-developed fold area in the central part under compressive stress are favorable targets for shale gas exploration.

Key words: normal-pressure shale gas; preservation conditions; tectonic styles; exploration potential; Chongqing

Highlights: It had been proposed that Wulong area has the characteristics of deep-water shelf facies controlling hydrocarbon generation, tectonic movement periods controlling shale gas preservation, and tectonic styles controlling shale gas enrichment.

About the first author: GUAN Linlin, female, born in 1990, master, assistant researcher, mainly engaged in shale gas exploration research; E-mail: guanlinlin_upc@163.com

Fund support: Supported by Sinopec Technology Department projects (Nos.P24115; P23221)

为探索渝东南地区盆外常压页岩气特征及勘探开发潜力, 中国石化华东油气分公司近年来部署了多口探井, 但单井日产气量仅处于 $1.7 \times 10^4 \sim 9.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 之间。重庆市武隆地区由于投资成本高、产气量较低, 目前尚未形成效益开发(何希鹏等, 2018, 2019, 2023; 何贵松等, 2020; 冯动军等, 2022; 薛冈等, 2023)。因此, 深入研究武隆地区常压页岩气地质条件、构造特征、演化历史及保存条件, 为武隆地区实现效益开发提供技术支撑与参考, 具有非常重要的意义。

1 地质概况

武隆地区位于渝东南地区, 构造位置位于四川盆地东南缘利川-武隆复向斜带内, 受到雪峰山和黔中隆起分别由南东向北西方向、由南向北方向的挤压推覆作用, 形成北北东向条带状构造形态, 长 57 km, 宽 27 km, 面积 1105 km²。五峰组-龙马溪组埋深 500~4500 m, 核部地层平缓, 倾角 5°~10°, 两翼倾角较陡, 为 15°~40°。核部发育南北向胡家园断层, 将武隆向斜分为团堡次凹和火炉次凹 2 个次级构造单元。该区地层压力系数 0.9~1.2, 为典型的盆外常压页岩气。地层出露三叠系、二叠系、志留系。2015 年在武隆地区部署实施 LY1HF 井, 测试稳定产量 $4.6 \times 10^4 \text{ m}^3$, 目前日产气量 $2.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 已累产气 $4127 \times 10^4 \text{ m}^3$, 表明武隆地区具有较好的勘探潜力(图 1)。

2 页岩气藏基本特征

2.1 沉积特征

重庆市武隆地区在五峰组-龙一段沉积期整体处

于深水陆棚相带, 沉积了黑色富笔石页岩及粉砂质泥页岩。其中, 龙马溪组中上部发育粉砂质纹层沉积构造(图 2-a); 五峰组-龙马溪组下部页岩储层发育大量笔石化石(图 2-b), 颜色较深, 沉积构造主要以水平层理为主(图 2-c)(何梅朋, 2023)。富有机质页岩厚度在 90~130 m 之间, TOC 大于 2% 的优质页岩厚度为 25~40 m; TOC 和脆性矿物含量高, 为有利的沉积相带。

2.2 地球化学特征

武隆地区靠近深水陆棚沉积中心, 优质页岩 TOC 高, 通过岩石有机碳测定试验, 五峰组-龙一段实测 TOC 为 0.5%~6.3%, 平均值大于 2%, ①~⑤小层 TOC 一般为 2.05%~6.3%, 平均值达到 4.0%, 上部 ⑥~⑨小层 TOC 相对偏低, 一般为 0.03%~2.0%, 平均值为 1.1%。武隆地区 ①~⑤小层烃源岩有机质类型主要为 I 型干酪根, 镜质体反射率 R_o 。分布在 2.0%~3.76% 之间, 平均值为 2.7%, 表明页岩成熟度较高, 产生的天然气处于干气阶段。

2.3 矿物组成特征

通过全岩 X 射线和粘土矿物 X 射线衍射试验, 测得武隆地区优质页岩段矿物组成以石英、粘土矿物、长石、碳酸盐岩和黄铁矿为主(图 3), 其中, 石英含量 38%~80%, 平均 59.8%; 粘土矿物含量 10.2%~31.7%, 平均 21.2%; 长石含量 3.4%~16%, 平均 8.0%; 碳酸盐岩含量 2.5%~11.7%, 平均 7.1%; 黄铁矿含量 2.1%~7.8%, 平均 3.9%。从上到下页岩段脆性矿物含量逐渐增高, 可压性较好。

2.4 储层物性特征

武隆地区优质页岩储层物性较好, 氩离子抛光

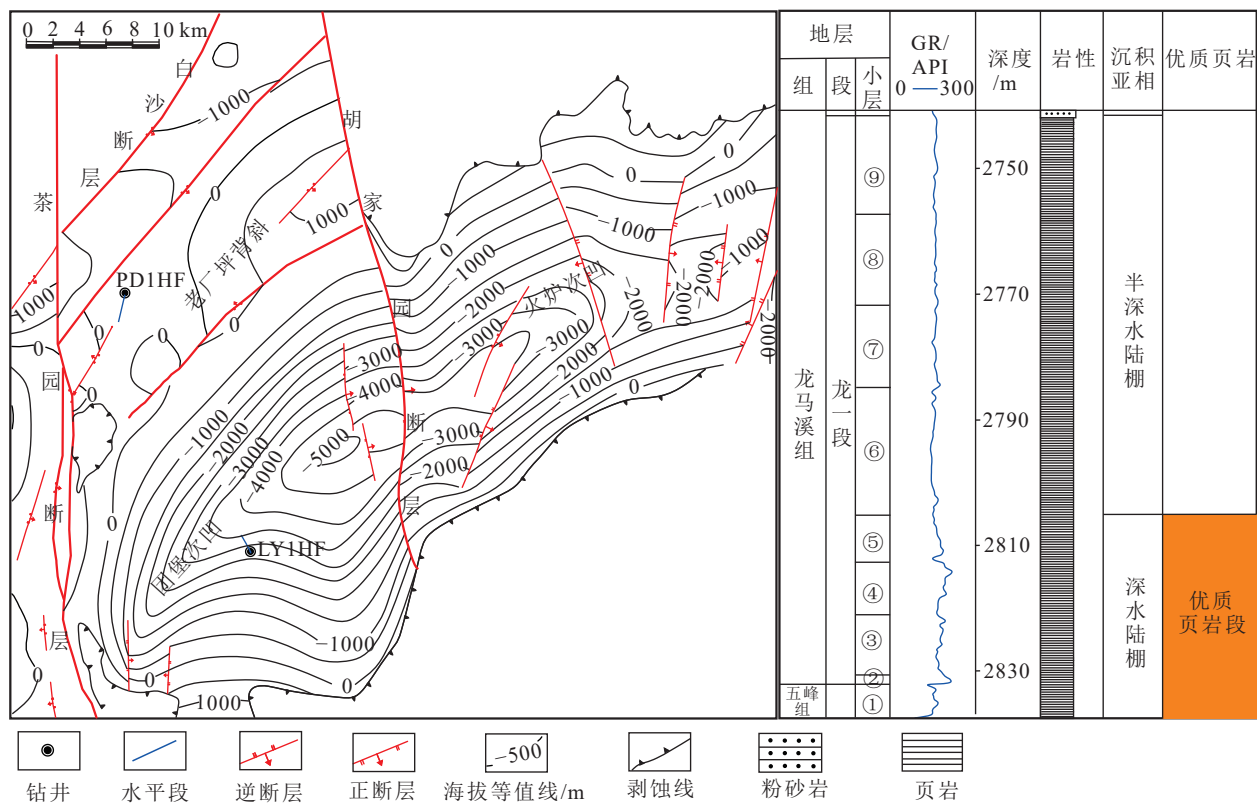


Fig. 1 Structural map and stratigraphic column of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Wulong area

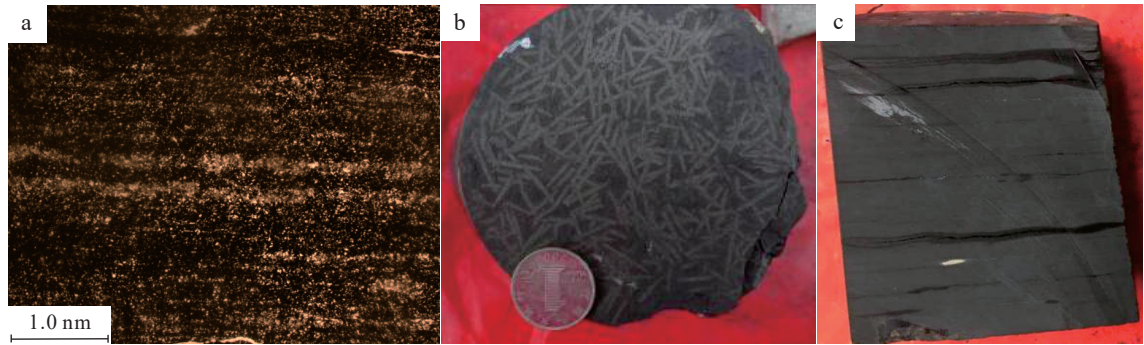


图 2 龙马溪组页岩扫描电镜(a)及岩心观察(b, c)

Fig. 2 Scanning electron microscopy (a) and core observation (b, c) in the Longmaxi Formation

a—粉砂质纹层, LY1 井, 2780.4 m, ⑦小层; b—优质页岩段笔石特征, LY1 井, 2817.52 m, ④小层;
c—水平层理缝, LY1 井, 2826.36 ~ 2826.48 m, ③小层

扫描电镜揭示, 优质页岩段发育有机孔隙(图 4-a, b)和无机孔隙(图 4-c, d), 以有机孔为主, 孔径较大, 介于 50~200 nm 之间, 连通性好。优质页岩段孔隙度为 1.63%~6.21%, 平均 4.36%。

2.5 含气性

武隆地区优质页岩含气性较好(单玄龙等, 2023), 由上向下页岩含气性逐渐变好, 含气量逐渐增大(图 5), 通过开展岩心样品含气量解析试验, 武隆地

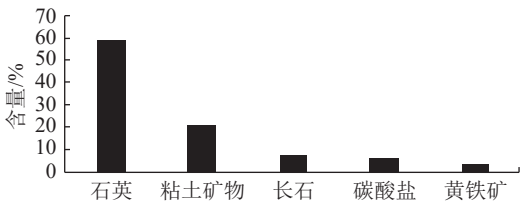


图 3 武隆地区优质页岩段矿物组成

Fig. 3 Mineral composition of high quality shale section in Wulong area

区五峰组-龙一段暗色页岩现场解吸气含量为 0.4~2.1 m³/t, 平均值为 1.0 m³/t, 总含气量一般为 0.9~5.1 m³/t, 平均值为 2.1 m³/t; 下部①~⑤小层优质页岩段含气量较高, 解吸气含量 1.8~2.1 m³/t, 平均值为 1.5 m³/t, 总含气量 1.3~5.1 m³/t, 平均值为 3.2 m³/t; 上部⑥~⑨小层解吸气含量 0.4~1.1 m³/t, 平均值为 0.6 m³/t, 总含气量 0.9~2.0 m³/t, 平均值为 1.4 m³/t。

2.6 样品及测试方法

通过对武隆地区下志留统龙马溪组暗色页岩样品开展 TOC、成熟度、矿物组成、孔隙度、岩石比表面积、氩离子抛光+扫描电镜等测试, 对武隆地区静态指标进行评价。实验分析项目均在中国石化华东油气分公司勘探开发研究院实验中心完成, 页岩样品完整, 分析化验资料丰富, 分析项目齐全, 代表性强。其中, 优质页岩段 TOC、矿物组成、物性等分析化验资料满足 1 块/m, 含气量参数满足 1 块/2 m, 取样间隔及分析化验精度较高(表 1)。

3 构造特征

渝东南地区宏观沉积环境相似, 均位于深水陆棚相带区内, 有机质普遍大量生烃, 静态指标具有一

定相似性(表 2), 造成盆外武隆地区与焦石坝、南川地区单井产能差异主要是构造作用的影响(Wei et al., 2017; Ma, 2019; 李金磊等, 2019; 姜振学等, 2020; 魏祥峰等, 2020; 汤济广等, 2021; 熊小林等, 2024)。

受江南雪峰隆起北西—南东向挤压递变的影响, 渝东南地区构造变形程度、断裂发育程度、构造样式有显著差异: 焦石坝地区构造变形较弱, 断裂发育程度低, 整体构造样式为箱状背斜, 压力系数为 1.55~1.62, 为高压区, 保存条件较好, 单井测试气量较高, 单井日产量普遍超过 10×10⁴ m³; 南川地区受压形成北东向长轴复背斜, 断层较发育, 实钻揭示断层封闭性较好, 埋深适中, 压力系数 1.0~1.35, 为常压—超压过渡区, 页岩气保存条件较好, 单井测试气量较高(测试日产气 15.4×10⁴~89.5×10⁴ m³)(Chen et al., 2011; Guo et al., 2014, 2020; 何贵松等, 2020; 马军等, 2022); 武隆地区构造变形程度较大, 构造样式整体以向斜为主, 压力系数 0.9~1.2, 为常压区, 单井测试气量较低(测试日产气 1.7×10⁴~9.2×10⁴ m³)。因此, 构造作用整体控制了页岩气的保存, 决定了页岩气藏的富集程度(张勇等, 2023; 拜文华等, 2024)。

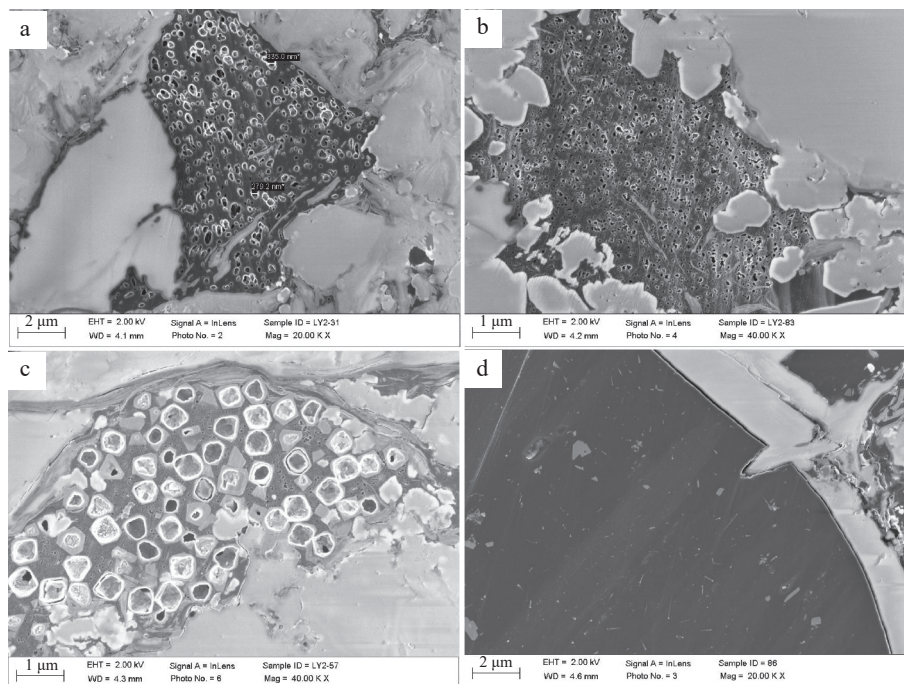


图 4 龙马溪组页岩微观孔隙结构特征

Fig. 4 Characteristics of microscopic pore structure in the Longmaxi Formation

a—沥青孔, LY1 井, 2823.47 m, ③小层; b—有机质孔, LY1 井, 2830.81 m, ②小层; c—溶蚀孔, LY1 井, 2815.92 m, ④小层; d—收缩缝, LY1 井, 2767.5 m, ⑧小层

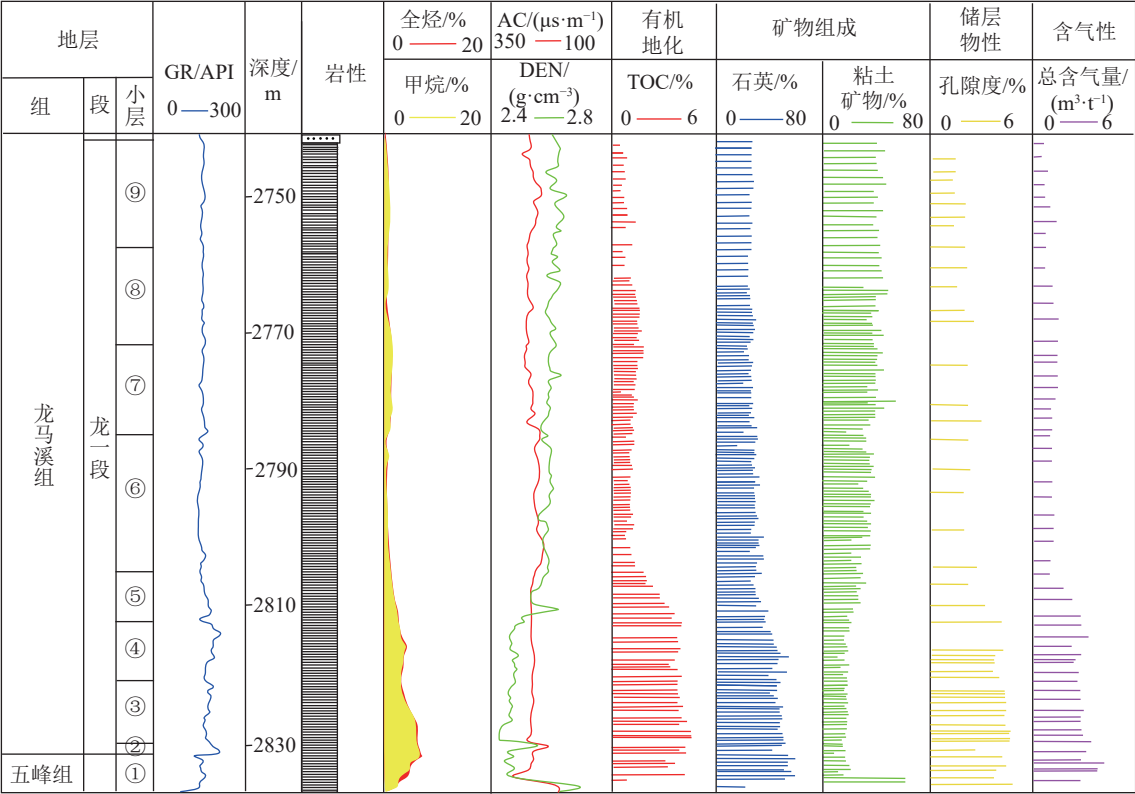


图 5 武隆地区五峰组-龙马溪组页岩综合柱状图

Fig. 5 Stratigraphic column from Wufeng Formation to Longmaxi Formation in Wulong area

表 1 样品实验测试分析内容

Table 1 Contents of samples test and analysis

测试内容	分析项目	样品类型	⑥~⑨小层 ①~⑤小层		测试仪器	执行标准
			取样原则	取样原则		
岩石学分析	岩石薄片鉴定	岩心	1个/8 m	1个/2 m	高分辨率显微镜	SY/T 5368—2000 岩石薄片鉴定
	全岩X射线衍射	岩心	1个/m	2个/m	X射线粉晶衍射仪	SY/T5163—2010 沉积岩中粘土矿物和常见非粘土矿物X射线衍射分析方法
	粘土矿物X射线衍射	岩心	1个/10 m	1个/10 m		
地球化学分析	岩石有机碳测定	岩心	1个/m	2个/m	碳测定仪	GB/T 19145—2003 沉积岩中总有机碳的测定
	镜质体反射率 (R _o)	岩心	1个/10 m	1个/10 m	光学反射率测试仪	SY/T 5124—2012 沉积岩中镜质体反射率测定方法
含气性分析	天然气组分分析	解吸气	1个/4 m	1个/2 m	天然气全组分析仪	GB/T 13610—2020 天然气的组成分析 气相色谱法
物性分析	气测孔隙度、脉冲渗透率	岩心	1个/4 m	1个/m	氦孔隙度测试仪、脉冲衰减气体渗透率测定仪	GB/T 34533—2017 页岩氦气法孔隙度和脉冲衰减法渗透率的测定
	孔径分布、比表面积测量	岩心	1个/4 m	1个/2 m	全自动比表面积及孔径分析仪	SY/T 6154—2019 岩石比表面和孔径分布测定静态吸附容量法
	页岩孔隙结构	岩心	1个/2 m	1个/m	离子抛光装置+ZEISS SIGMA场发射扫描电子显微镜	SY/T 5162—1997 岩石样品扫描电子显微镜分析方法SY/T6103—2019 岩石孔隙结构特征的测定 图像分析法

表 2 渝东南地区不同区块典型井优质页岩段评价参数对比

Table 2 Comparison of evaluation parameters in high-quality shale section of typical wells in different areas in southeast Chongqing

地区	代表井	优质页岩段(①~⑤小层)							压力系数	测试日产量/10 ⁴ m ³
		厚度/m	TOC/%	孔隙度/%	R _d /%	石英含量/%	粘土含量/%	含气量/(m ³ ·t ⁻¹)		
焦石坝	JY1	38	3.6	5.86	2.65	48.56	31.35	3.8-10.0	1.55	20.3
南川	JY194-3	35	3.2	3.77	2.72	54.87	28.64	1.3-7.7	1.3	34.3
武隆	LY1	31	4	4.36	2.7	59.8	21.2	1.3-5.1	1.08	4.6

3.1 构造运动期次控制页岩气保存

燕山早期,武隆地区受到北西向的挤压应力,形成北东向逆断层白沙断裂、平安断裂,以及北东向褶皱老厂坪背斜、武隆向斜,奠定了现今隆凹相间的构造基础。燕山中晚期,受到南北向压扭走滑作用,并由于扬子板块西缘和黔中隆起的限制,发育南北向走滑断裂胡家园断裂、茶园断裂,其中,中间发育的胡家园断裂将武隆向斜分割为团堡次凹和火炉次凹(图 6)(高全芳,2019)。喜马拉雅期进入后造山伸展阶段,受太平洋构造域的影响,湘鄂西地区进入后造山伸展阶段,表现出拉张变形,局部地区因为地层抬升剥蚀作用,应力释放。总体而言,武隆地区燕山

期以挤压应力为主,断层封闭,页岩气保存条件较好。喜马拉雅期以抬升剥蚀和伸展作用为主,局部地区由于地层抬升,使地层剥蚀较严重,进而应力释放,页岩气纵向逸散,保存条件变差;同时地层伸展表现出弱拉张变形,局部地区形成正断层,断层开启,页岩气沿断层面逸散,保存条件变差。

3.2 构造样式控制页岩气富集

通过构造演化分析和三维地震资料的精细解释,识别武隆地区五峰组-龙马溪组主要受到 2 种应力:挤压应力和伸展应力,发育 2 套构造样式:挤压构造样式和伸展构造样式。在挤压应力条件下,局部形成背斜、凹中隆、断展褶皱、冲起、对冲构造形

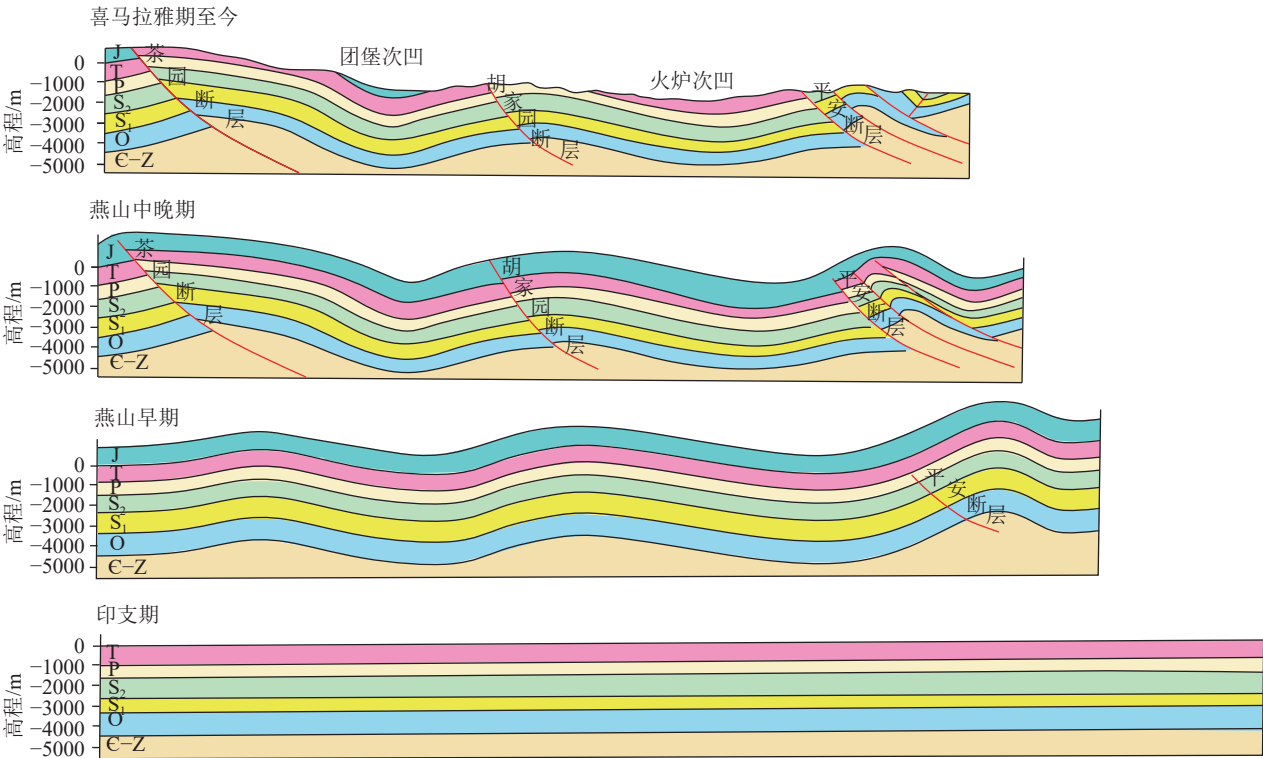


图 6 武隆地区构造演化分析图

Fig. 6 Map showing tectonic evolution in Wulong area

J—侏罗系; T—三叠系; S₂—中志留统; S₁—下志留统; O—奥陶系; C—Z—寒武系-震旦系

式。在伸展拉张的应力条件下,形成地堑的构造样式(表3)。

(1)凹中隆

在南东—北西向挤压应力下形成的正向构造,主要形成于燕山早期,发育在武隆向斜内部的局部隆起,微裂缝较发育,有利于气体富集,保存条件较好。位于凹中隆构造的 LY1HF,目前已累计产气 $4127\times10^4\text{ m}^3$, EUR= $0.56\times10^8\text{ m}^3$ 。

(2)断展褶皱

在受限地层受挤压应力沿断层面向上爬升的过程中,逆断层断距逐渐减小至消失,断层的缩短量被上覆膏泥岩吸收,在断层上盘形成断展褶皱(邹玉涛等,2015)。断展褶皱两翼不对称,前翼较高陡、倾角大,后翼宽缓、倾角较小,背斜核部变形程度高。逆断层向上延伸距离短,切割上覆地层少。主要形成

于燕山中晚期,位于武隆向斜火炉次凹,受胡家园断层牵引形成正向褶皱。

(3)冲起构造

地层受到 2 条或以上倾向相对逆断层围限,因挤压应力沿断层面上升,形成变形程度较高的背斜形态,背斜幅度较高,两翼倾角较大。主要形成于燕山早期,位于武隆向斜火炉次凹和老厂坪背斜,在该构造样式下的 PD1HF 井日产气 $4.0\times10^4\sim4.5\times10^4\text{ m}^3$ 。

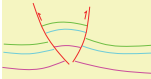
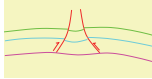
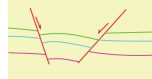
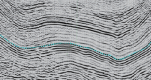
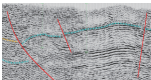
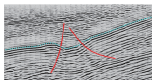
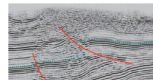
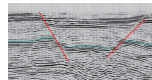
(4)对冲构造

受 2 条或以上倾向相背的逆断层挤压,在逆断层下盘形成向斜,逆断层上盘分别形成背斜形态,向斜核部应力较高。主要形成于燕山早期,位于武隆地区火炉次凹。

(5)地堑构造

在喜马拉雅期,湘鄂西进入后造山伸展阶段,局

表 3 构造样式与保存条件
Table 3 Tectonic styles and preservation conditions

构造样式	挤压构造样式				伸展构造样式
	凹中隆	背斜/冲起构造	对冲构造	断展褶皱	地堑
模式示意图					
地震剖面特征					
主要形成期	燕山早期	燕山早期	燕山早期	燕山中晚期	喜马拉雅期
应力类型	挤压应力	挤压应力	挤压应力	挤压应力	伸展拉张应力
成因分析	南东—北西向挤压应力下形成的正向褶皱	南东—北西向挤压应力作用下,2条或以上相向倾斜的断层反向逆冲形成背斜	南东—北西向持续挤压作用下,2条或以上倾向相背的逆断层相对逆冲形成向斜	南东—北西向和南北向挤压应力双重作用下,逆冲断层沿着断坡的位移逐渐消减,于断层上方形成背斜	湘鄂西地区进入后造山伸展阶段,同时地层抬升剥蚀导致应力释放,局部地区表现出弱拉张变形
保存条件	向斜内部局部隆起,微裂缝发育有利于气体富集,保存条件好	挤压应力条件下,断层封闭,在断层上盘形成局部背斜形态,微裂缝发育,有利于气体富集,保存条件好	挤压应力条件下,断层封闭,在断层下盘形成向斜,保存条件好。向斜应力较大,压裂难以形成复杂网缝;断层上盘微裂缝发育,有利于页岩气富集	挤压应力条件下,断层封闭,在断层上盘形成局部背斜形态,微裂缝发育,有利于气体富集,保存条件好	伸展拉张应力条件下,断层开启,页岩气沿着断面逸散,保存条件变差
典型井	LY1HF井: 压力系数1.08, 日均产气 $2.1\times10^4\text{ m}^3$, 已累计产气 $4127\times10^4\text{ m}^3$, EUR $0.56\times10^8\text{ m}^3$	PD1HF井: 压力系数0.99, 目前产气量 $4.0\times10^4\sim4.5\times10^4\text{ m}^3$			

部地区表现出伸展拉张的变形形态。在弱拉张条件下,地层两侧被高角度正断层围限,形成中间下降的槽形断块构造。主要形成于喜马拉雅期,位于火炉次凹东部边界,局部正断层开启且沟通地表,页岩气沿着断面逸散,保存条件变差。

4 勘探潜力

4.1 生烃物质基础较好

有利的沉积相带是控制生烃的基础,武隆地区五峰组-龙马溪组页岩整体处于深水陆棚相带,分布范围广,厚度大(90~100 m),优质页岩厚 30~40 m,页岩岩石类型主要为黑色硅质页岩,平面连续分布,有机质丰度较高,TOC 含量平均值为 4.0%,有机质类型为 I 型,处于过成熟阶段,镜质体反射率 R_o 平均值为 2.7%,具备较好的生烃潜力,为页岩气富集提供了充分的气源基础。

4.2 优质储集空间发育

武隆地区五峰组-龙马溪组优质页岩孔隙度较高,平均 4.36%,储集空间以有机孔隙为主,孔径 100~300 nm,且连通性较好,易形成良好的储集空间,利于页岩气的储集和吸附。

4.3 发育多种构造样式,保存条件存在差异

武隆地区隆凹相间的构造格局定型于燕山期,综合分析武隆地区构造样式、变形特点、成因分析和保存条件,将武隆地区分为南部凹中隆区、北部斜坡区、中部断展褶皱区和东部地堑区。

南部凹中隆区:地层主要位于武隆地区团堡次凹南翼,该区断层发育程度低,在燕山早期受北西向挤压应力,在向斜内部形成局部隆起,微裂缝发育,有利于页岩气的富集,保存条件好。

北部斜坡区:位于武隆地区团堡次凹北翼,该区为斜坡形态,构造改造作用较弱,断层发育规模较小,保存条件较好。

中部断展褶皱区:主要位于胡家园断层以东,该区呈隆凹相间的构造形态。受燕山早期北西向和燕山中晚期近南北向 2 期挤压应力的双重影响,武隆地区中部地层受断层面牵引弯曲,形成断展褶皱,南部地层较陡,北部地层较缓,往东地层逐渐变缓。褶皱核部储层多处于相对高压状态,有利于页岩气的成藏与保存。

东部地堑区:主要位于武隆地区东部,该区由于喜马拉雅期地层抬升剥蚀,应力释放,页岩气纵向逸

散;同时在伸展拉张的环境下发育地堑构造,正断层沟通地表破坏了页岩气的成藏,保存条件变差。

4.4 综合评价

综合考虑地质条件和构造作用两大方面的指标,提高构造改造期次、构造样式权重赋值,建立武隆地区页岩气综合评价体系,对武隆地区开展页岩气潜力评价,优选有利目标区(表 4)。

结合武隆地区页岩气综合评价体系,各构造单元评价指标介于 0.49~0.86 之间,其中南部凹中隆区综合评价指标为 0.86,中部断展褶皱区评价指标为 0.8,为勘探最有利区;北部斜坡区评价指标为 0.74,为勘探较有利区;东部地堑区评价指标为 0.49,为勘探不利区(表 5、图 7)。

5 结 论

(1)重庆市武隆地区深水陆棚相带控制生烃基础。五峰组-龙马溪组发育厚层优质页岩,具有厚度大(30~40 m)、分布范围广、有机质丰度高(TOC 平均 4.0%)、储层物性较好(孔隙度平均 4.36%)、含气性高(含气量 1.3~5.1 m³/t),热演化程度适中(R_o 平均 2.7)的特征,优质页岩各项静态评价指标较优越,为页岩气成藏奠定了良好的烃源基础和储集空间。

(2)武隆地区构造运动期次控制页岩气保存。燕山早期和燕山中晚期构造运动以挤压应力为主,有利于页岩气储层的改造和保存;喜马拉雅期以伸展应力为主,由于地层剥蚀、断裂发育、应力释放等因素,使局部页岩气保存条件变差。

(3)构造样式控制了页岩气富集。武隆地区受 2 期应力影响,发育挤压应力构造样式和伸展构造样式。武隆地区东部地堑区位于伸展构造区,断层导

表 4 武隆地区五峰组-龙马溪组页岩气综合评价体系

Table 4 Evaluation system of Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale gas in Wulong area				
评价参数	权重	好(0.75,1]	较好(0.5,0.75]	差[0,0.5]
优质页岩厚度/m	0.1	>30	20~30	<20
优质页岩分布面积/km ²	0.1	>100	50~100	<50
TOC/%	0.1	>3	2~3	<2
孔隙度/%	0.1	>4	2~4	<2
构造改造期次	0.3	燕山早期	燕山中晚期	喜马拉雅期
构造样式	0.3	背斜、凹中隆、断展褶皱	斜坡	地堑

表 5 武隆地区五峰组-龙马溪组页岩气综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of Wufeng Formation-Lonmaxi Formation shale gas in Wulong area

构造单元	优质页岩厚度/m	优质页岩分布面积/km ²	有机质类型	TOC/%	孔隙度/%	热演化程度	构造改造期次	构造样式	保存条件	综合评价
南部凹中隆区	30~38	338.7	I型	3.8~4.4	4.4~5.0	过成熟阶段	燕山早期	凹中隆	好	最有利区
北部斜坡区	35~40	277.4		4.0~4.4	4.2~4.8		燕山中晚期	斜坡	较好	较有利区
中部断展褶皱区	35~38	348.2		3.6~4.0	3.8~4.2		燕山中晚期	断展褶皱	好	最有利区
东部地堑区	30~35	151.7		3.0~3.2	3.2~3.5		喜马拉雅期	地堑	差	不利区

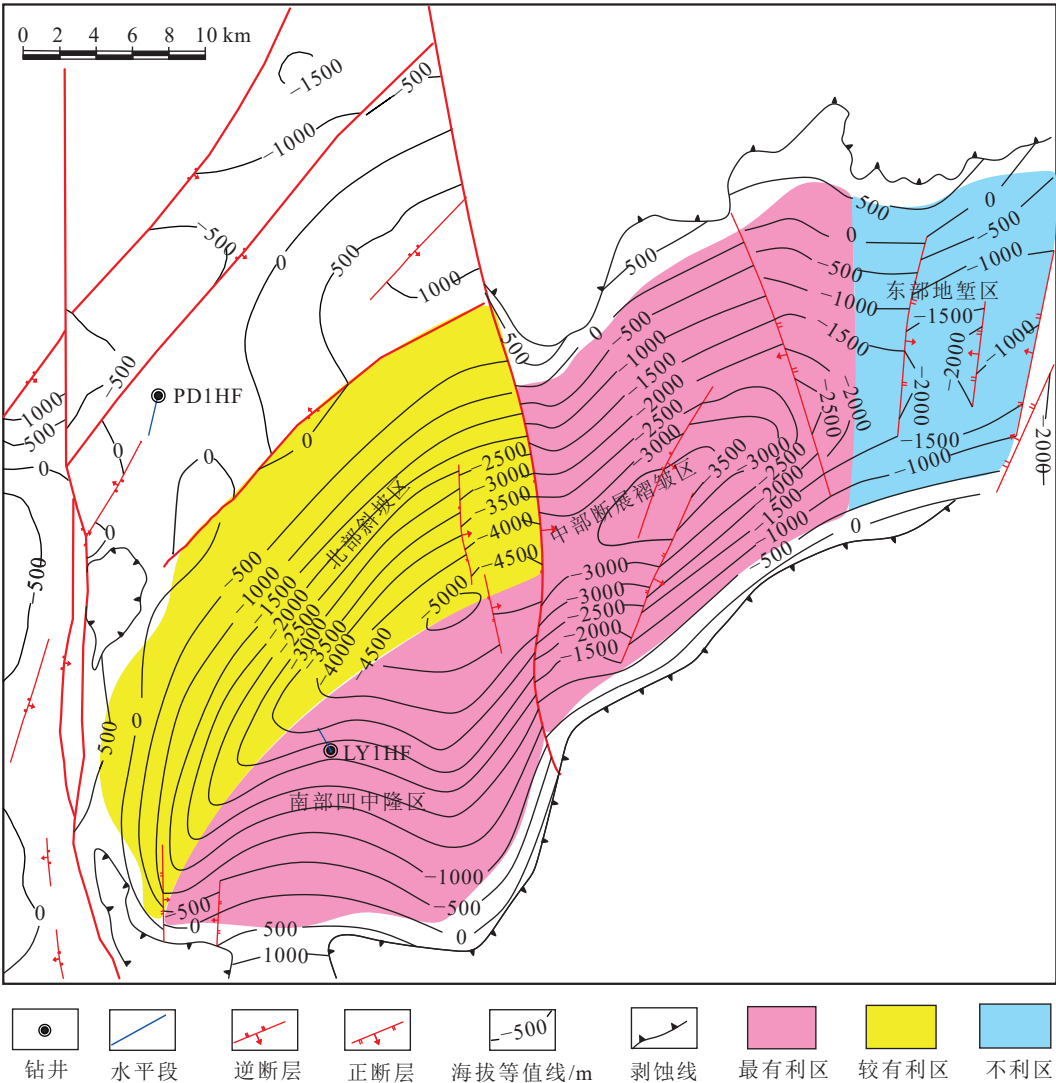


图 7 武隆地区五峰组-龙马溪组页岩气有利区分布图

Fig. 7 Distribution of favorable areas for Wufeng Formation-Longmaxi Formation shale gas in Wulong area

致保存条件较差;南部凹中隆区、中部断展褶皱区为挤压应力区,正向构造的发育有利于常压页岩气的富集和高产。

(4)建立武隆地区页岩气综合评价体系,评价结果显示南部凹中隆区和中部断展褶皱区为下步勘探

开发的最有利区,北部斜坡区次之,东部地堑区为勘探开发不利区。

References

Bai W H, Xu S H, Liu Z Q, et al. 2024. Classification of shale gas

- enrichment patterns based on structural styles: A case study of the Wufeng Formation and Longmaxi Formation in Sichuan Basin, China[J]. North China Geology, 47(1): 52–65 (in Chinese with English abstract).
- Chen S B, Zhu Y M, Wang H Y, et al. 2011. Shale gas reservoir characterisation: A typical case in the southern Sichuan Basin of China[J]. Energy, 36(11): 6609–6616.
- Feng D J, Li W P. 2022. Controlling effect of structure on shale gas of the Silurian Longmaxi Formation in Wulong-Baima area, Eastern Marginal zone of Sichuan Basin[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 24(1): 7–14 (in Chinese with English abstract).
- Gao Q F. 2019. The high-quality shale characteristics of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Wulong Syncline and the best target of horizontal well[J]. Unconventional Oil & Gas, 6(3): 99–105 (in Chinese with English abstract).
- Guo T L, Jiang S, Zhang P X, et al. 2020. Progress and direction of exploration and development of normally-pressured shale gas from the periphery of Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 42(5): 837–844.
- Guo T L, Zhang H R. 2014. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 41(1): 31–40.
- He G S, He X P, Gao Y Q, et al. 2020. Enrichment model of normal-pressure shale gas in the Jinpo slope of the basin-margin transition zone in Southeast Chongqing[J]. Natural Gas Industry, 40(6): 50–60 (in Chinese with English abstract).
- He M P. 2023. Development characteristics and gas-bearing factors of high-quality shallow ordinary-pressure shale reservoirs in Wufeng-Longmaxi Formation in Wulong area[J]. Unconventional Oil & Gas, 10(3): 64–73 (in Chinese with English abstract).
- He X P, He G S, Gao Y Q, et al. 2018. Geological characteristics and enrichment laws of normal-pressure shale gas in the basin-margin transition zone of SE Chongqing[J]. Natural Gas Industry, 38(12): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- He X P, Qi Y P, He G S, et al. 2019. Further understanding of main controlling factors of normal pressure shale gas enrichment and high yield in the area with complex structure of the southeast area of Chongqing[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 9(5): 32–39 (in Chinese with English abstract).
- He X P, He G S, Gao Y Q, et al. 2023. Progress in and research direction of key technologies for normal-pressure shale gas exploration and development[J]. Natural Gas Industry, 43(6): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Z X, Song Y, Tang X L, et al. 2020. Controlling factors of marine shale gas differential enrichment in southern China[J]. Petroleum Exploration and Development, 47(3): 617–628 (in Chinese with English abstract).
- Li J L, Yin C, Wang M F, et al. 2019. Preservation condition differences in Jiaoshiba area, Fuling, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 41(3): 341–347 (in Chinese with English abstract).
- Ma J, Guan L L, Gao Q F, et al. 2022. Exploration and discovery of normal pressure shale gas in shallow anticline in southeast Chongqing area[J]. China Petroleum Exploration, 27(3): 47–60 (in Chinese with English abstract).
- Ma X H. 2019. Enrichment laws and scale effective development of shale gas in the southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry B, 6(3): 240–249.
- Shan X L, Xing J, Su S Y, et al. 2023. Shale lithofacies and gas-bearing characteristics of the lower Paleozoic Wufeng Formation-Member I of Longmaxi Formation in Changning area, southern Sichuan[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 53(5): 1323–1337 (in Chinese with English abstract).
- Tang J G, Wang K M, Qin D C, et al. 2021. Tectonic deformation and its constraints to shale gas accumulation in Nanchuan area, southeastern Sichuan Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 40(5): 11–21 (in Chinese with English abstract).
- Wei X F, Li Y P, Wei Z H, et al. 2017. Effects of preservation conditions on enrichment and high yield of shale gas in Sichuan Basin and its periphery[J]. Petroleum Geology & Experiment, 39(2): 147–153.
- Wei X F, Liu Z J, Wang Q, et al. 2020. Analysis and thinking of the difference of Wufeng-Longmaxi shale gas enrichment between Dingshan and Jiaoshiba areas in southeastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 31(8): 1041–1051.
- Xiong X L, Zhang J W, Meng Y, et al. 2024. Structural analysis of multi-stage superimposed deformation in the southwestern Sichuan Basin: An example from the Ziliujing anticline[J]. Geological Bulletin of China, 43(10): 1788–1800 (in Chinese with English abstract).
- Xue G, Xiong W, Zhang P X. 2023. Genesis analysis and effective development of normal pressure shale gas reservoir: A case of Wufeng-Longmaxi shale gas reservoir in southeast margin of Sichuan Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 13(5): 668–675 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y, Li Y J, Pan L, et al. 2023. The influence of structural characteristics on the preservation conditions of shale gas in Nanchuan area, Chongqing[J]. Geological Bulletin of China, 42(5): 680–686 (in Chinese with English abstract).
- Zou Y T, Duan J B, Zhao Y J, et al. 2015. Tectonic characteristics and evolution of the high and steep fault folding belt in east Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 89(11): 2046–2051 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 拜文华, 徐思煌, 刘昭茜, 等. 2024. 基于构造样式的页岩气富集模式分类——以四川盆地五峰-龙马溪组为例[J]. 华北地质, 47(1): 52–65.
- 冯动军, 李王鹏. 2022. 川东盆缘带武隆-白马地区构造对志留系龙马溪组页岩气的控制作用[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 24(1): 7–14.
- 高全芳. 2019. 武隆向斜五峰组-龙马溪组优质页岩特征及水平井靶窗优选[J]. 非常规油气, 6(3): 99–105.
- 何贵松, 何希鹏, 高玉巧, 等. 2020. 渝东南盆缘转换带金佛山斜坡常压页岩气富集模式[J]. 天然气工业, 40(6): 50–60.

- 何梅朋. 2023. 武隆地区五峰组-龙马溪组优质浅层常压页岩储层发育特征及含气性影响因素[J]. 非常规油气, 10(3): 64-73.
- 何希鹏, 何贵松, 高玉巧, 等. 2018. 渝东南盆缘转换带常压页岩气地质特征及富集高产规律[J]. 天然气工业, 38(12): 1-14.
- 何希鹏, 齐艳平, 何贵松, 等. 2019. 渝东南构造复杂区常压页岩气富集高产主控因素再认识[J]. 油气藏评价与开发, 9(5): 32-39.
- 何希鹏, 何贵松, 高玉巧, 等. 2023. 常压页岩气勘探开发关键技术进展及攻关方向[J]. 天然气工业, 43(6): 1-14.
- 姜振学, 宋岩, 唐相路, 等. 2020. 中国南方海相页岩气差异富集的控制因素[J]. 石油勘探与开发, 47(3): 617-628.
- 李金磊, 尹成, 王明飞, 等. 2019. 四川盆地涪陵焦石坝地区保存条件差异性分析[J]. 石油实验地质, 41(3): 341-347.
- 马军, 关琳琳, 高全芳, 等. 2022. 渝东南地区背斜型浅层常压页岩气勘探发现[J]. 中国石油勘探, 27(3): 47-60.
- 单玄龙, 邢健, 苏思远, 等. 2023. 川南长宁地区下古生界五峰组-龙马溪组一段页岩岩相与含气性特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 53(5): 1323-1337.
- 汤济广, 汪凯明, 秦德超, 等. 2021. 川东南南川地区构造变形与页岩气富集[J]. 地质科技通报, 40(5): 11-21.
- 魏祥峰, 刘珠江, 王强, 等. 2020. 川东南丁山与焦石坝地区五峰组-龙马溪组页岩气富集条件差异分析与思考[J]. 天然气地球科学, 31(8): 1041-1051.
- 熊小林, 张金武, 孟也, 等. 2024. 四川盆地西南部多期叠加变形构造解析: 以自流井背斜为例[J]. 地质通报, 43(10): 1788-1800.
- 薛冈, 熊炜, 张培先. 2023. 常压页岩气藏成因分析与有效开发——以四川盆地东南缘地区五峰组-龙马溪组页岩气藏为例[J]. 油气藏评价与开发, 13(5): 668-675.
- 张勇, 李彦婧, 潘兰, 等. 2023. 构造特征对重庆南川地区页岩气保存条件的影响[J]. 地质通报, 42(5): 680-686.
- 邹玉涛, 段金宝, 赵艳军, 等. 2015. 川东高陡断褶带构造特征及其演化[J]. 地质学报, 89(11): 2046-2051.

《地质通报》第 44 卷第 7 期要目预告

- 锡的赋存状态及迁移规律：对锡铁山矿床成因的启示 张紫皓等
- 安塞油田致密砂岩储层成岩作用及演化特征——以化子坪地区延长组长 6 段为例 向佳等
- 赣北彭山地区老屋舒砂卡岩型锡矿床地质特征及找矿前景 邢新龙等
- 小兴安岭地区碳储量时空格局演化及驱动力分析 董春等
- 基于碳足迹的黑龙省黑河市农田生态系统碳源/汇时序变化及其对碳减排的贡献 齐宏运等
- 基于多种方法的赤峰市撰山子矿区资源环境承载力评价 孙家全等
- 基于因子分析的广西平果市土壤地球化学分区及农业种植建议 胡兆鑫等
- 基于卫星遥感数据的矿山生态修复评价体系及其修复建议——以云南省三江成矿带为例 徐容等
- 北大别木子店岩体的岩石成因和构造背景：Sr-Nd-Pb-Hf 同位素制约 胡俊良等
- 西准噶尔阿拉特组与阿腊德依克赛组新老关系新证 刘凯等
- 基于无人机倾斜摄影的地震勘探创新应用技术 卓武等
- 基于微生物菌剂强化城市固废的内蒙古某铁矿尾矿库植被恢复技术研究 高琪等
- 基于机器学习的新疆东天山黄山地区遥感岩性自动分类及其识别精度分析 刘磊等
- 基于 InVEST-PLUS 模型的首都西部生态涵养区碳储量时空演替及预测 万路通等