

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.05.002

构造特征对重庆南川地区页岩气保存条件的影响

张勇¹, 李彦婧², 潘兰², 俞若水², 张一陶²

ZHANG Yong¹, LI Yanjing², PAN Lan², YU Ruoshui², ZHANG Yitao²

1. 中国石化石油物探技术研究院有限公司, 江苏 南京 211100;

2. 中国石化华东油气分公司勘探开发研究院, 江苏 南京 210005

1. Sinopec Geophysical Research Institute Co.Ltd., Nanjing 211100, Jiangsu, China;

2. Research Institute of Exploration and Development, East China Branch of Sinopec, Nanjing 210005, Jiangsu, China

摘要:从渝东南盆缘转换带南川区块构造特征入手,深入分析分层和分区差异构造特征及构造演化特征,明确南川地区不同构造特征对页岩气保存条件的影响。研究表明:①南川地区在纵向上分为 4 个滑脱层系,造就了纵向上的 4 个变形层;②南川地区在横向上从东往西构造受力作用逐渐减弱,从冲断特征变为断展特征,最后变为滑脱特征;③南川地区主要构造特征形成于中燕山期及晚燕山期;④南川地区冲断构造带整体保存条件较差,不利于页岩气的勘探开发,断展构造带保存条件好,是页岩气勘探开发的有利区。滑脱构造带整体保存条件好,但由于页岩地层埋深较深,工程工艺成本高,暂时不满足效益开发要求,是未来页岩气勘探的有利目标区。

关键词:构造特征;南川地区;页岩气;压力系数;保存条件

中图分类号:P618.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)05-0680-07

Zhang Y, Li Y J, Pan L, Yu R S, Zhang Y T. The influence of structural characteristics on the preservation conditions of shale gas in Nanchuan area, Chongqing. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(5): 680-686

Abstract: Starting from the structural characteristics of the Nanchuan block in the transition zone of the southeast basin margin of Chongqing, in-depth analysis of the layered differential structural characteristics, regional differential structural characteristics, and structural evolution characteristics, so as to clarify the influence of different structural characteristics on shale gas preservation conditions in the Nanchuan area. The research results show that, ①The Nanchuan area is divided into four detachment strata in the vertical direction, creating four deformation layers in the vertical direction. ②The structural force in the Nanchuan area is gradually weakened from east to west in the horizontal direction, changing from thrust characteristics. It is a fracture feature, and finally becomes a slip feature. ③The main structural features of Nanchuan area were formed in the Middle Yanshanian and Late Yanshanian. ④The overall preservation conditions of the thrust structure belt in Nanchuan area are poor, which is not conducive to the exploration and development of shale gas; the fault extension structure belt has good preservation conditions and is a favorable area for shale gas exploration and development. The detachment structural belt has good overall preservation conditions, but due to the deep shale formation, it is a favorable target area for shale gas exploration in the next step.

Key words: structural characteristics; Nanchuan area; shale gas; pressure coefficient; preservation conditions

“十三五”以来,中国页岩气勘探开发进入创新突破与快速发展阶段,页岩气资源勘探开发取得了

良好效果(蔡勋育等,2021)。截止 2020 年,在渝东南盆缘转换带的涪陵页岩气田累产超过 $360 \times 10^8 \text{ m}^3$,

收稿日期:2021-08-26;修订日期:2021-11-21

资助项目:中国石化科技部资助项目《南川—武隆地区常压页岩气富集高产机理与目标评价》(编号:P21087-6)和《南川复杂构造带页岩气勘探开发关键技术研究》(编号:P19017-3)

作者简介:张勇(1986-),男,副研究员,从事非常规资源综合评价工作。E-mail:zyyanhua2021@163.com

提交探明储量超过 $9000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。众多学者对盆缘转换带的志留系龙马溪组页岩沉积、保存、应力场等富集主控因素(熊小辉等,2018;高玉巧等,2020;胡月等,2021;卢志远等,2021;周昊等,2021;赵越等,2022)开展了大量的研究,取得了深刻的认识。在渝东南盆缘转换带南川地区的志留系龙马溪组页岩气勘探开发实践中,发现不同构造特征,页岩气的保存条件呈现出不同特征(郭彤楼,2019;李建忠等,2021)。为揭示南川地区构造特征对页岩气保存条件的影响,本文以南川三维地震资料为基础,结合渝东南区域地质及构造资料,开展南川地区不同期次构造演化特征分析,明确各类构造作用与页岩气保存条件之间的关系,结合南川地区页岩气勘探开发实际情况,为该区下一步勘探开发提供方向及目标。

1 地质概况

南川地区构造上处于四川盆地川东高陡构造带万县复向斜南部,位于四川盆地与武陵褶皱带的过渡区(图1),总体呈现“隆凹相间”的构造格局,西部主要为隔档式褶皱,东部为隔槽式褶皱。整体是江南-雪峰陆内造山作用向北西方向递进扩展变形的结果,受大巴山、江南雪峰隆起、黄陵隆起及黔中隆起的联合控制,由于多期构造作用影响,主要发育北东向断层,局部发育近南北向断层(孙健等,2016;胡明等,2017)。南川地区基底为前震旦系板溪群浅变质岩,上覆盖层自下而上发育晚震旦世、寒武纪、奥陶纪、早中志留世、二叠纪、三叠纪、侏罗纪地层,厚度 $2000 \sim 6000 \text{ m}$,缺失晚志留世—石炭纪地层。由于后期抬升剥蚀程度不同,地表出露地层依次为志留系、二叠系、三叠系和侏罗系。

2 构造及演化特征

2.1 构造特征

2.1.1 分层差异变形特征

研究表明,南川地区在纵向上分为4个滑脱层系,分别为前寒武系基底、中下寒武统膏泥岩、下志留统泥页岩及三叠系嘉陵江组膏盐4个滑脱层,形成了纵向上的4个变形层(何希鹏,2021),分别为前寒武系变形层、下变形层、中变形层、上变形层(图2)。其中,前寒武系变形层构造变形强烈,主控断层发生基底滑脱作用,在主导断层上发育一系列

推覆形成的断层;下变形层表现为系统推覆构造特征,即主体结构由龙济桥断层+东胜背斜、平桥西断层+平桥背斜2个断层相关褶皱作用及其系列反冲断层组成。断层数量较中构造形变层少,但是断层断距更大,构造褶皱强度较大,隆起幅度较高;中变形层表现为系统对冲、背冲构造特征,陡翼、缓翼均发育断裂,并组合呈阶梯状,形成“Y”字形断裂组合,以“Y”字形断垒“对冲”和“背冲”出现时,“对冲”型一般发育向斜,“背冲”型一般发育背斜。并将构造解体为主体背斜、缓背斜,主、缓断凹及沿层逆冲断坪等次级构造单元;断层组成“Y”字形后消失于志留系。上变形层在龙济桥断层以东地层剥蚀严重,在龙济桥断层以西地层较厚,整体变形较弱,断层相对中变形层不发育。

2.1.2 分区差异变形特征

受江南雪峰造山带的陆内控制作用,从湘鄂西到川东构造发育从南东向北西逐步递进扩展,在南川地区体现为前展式结构特征(何希鹏等,2018;庹秀松等,2019)(图3),自东向西的构造变形为强烈冲断褶皱带(青龙乡断层、大千断层以东)→断展褶皱带(青龙乡断层与龙济桥断层之间)→滑脱褶皱带(龙济桥断层以西),其中,青龙乡断层、大千断层以东为冲断作用,青龙乡断层和大千断层均发生冲断作用,其间夹持断块。青龙乡断层与龙济桥断层之间为逆冲断展作用,平桥西断层、平桥东1断层、平桥东2断层、袁家沟断层及龙济桥断层控制着断层相关褶皱,且龙济桥断层、袁家沟断层、平桥西断层表现为铲状,控制断展褶皱。龙济桥断层以西递进变形作用减弱,因此在逆冲推覆构造的前锋带未发生强烈断褶作用,仅发生顺层滑脱作用,局部发育断距较小的断层。

2.2 演化变形特征

南川地区在印支期主要为垂直升降运动,发育轻微褶皱,早燕山期江南-雪峰陆内造山系统由南东向北西发生穿时扩展,地层发育微褶皱,断层不发育。随后中燕山期发育多期构造演化,根据区域构造变形性质和强度,具体可分为4个阶段(图4)。阶段一,由于江南-雪峰陆内造山带产生的北西向挤压应力加强,研究区地层形变增强,青龙乡断层发生基底逆冲,使东南部地层发生抬升变形并发育一系列北东向逆断层;阶段二,随着挤压应力进一步加强,地层形变增强,并向研究区北西向扩展,于

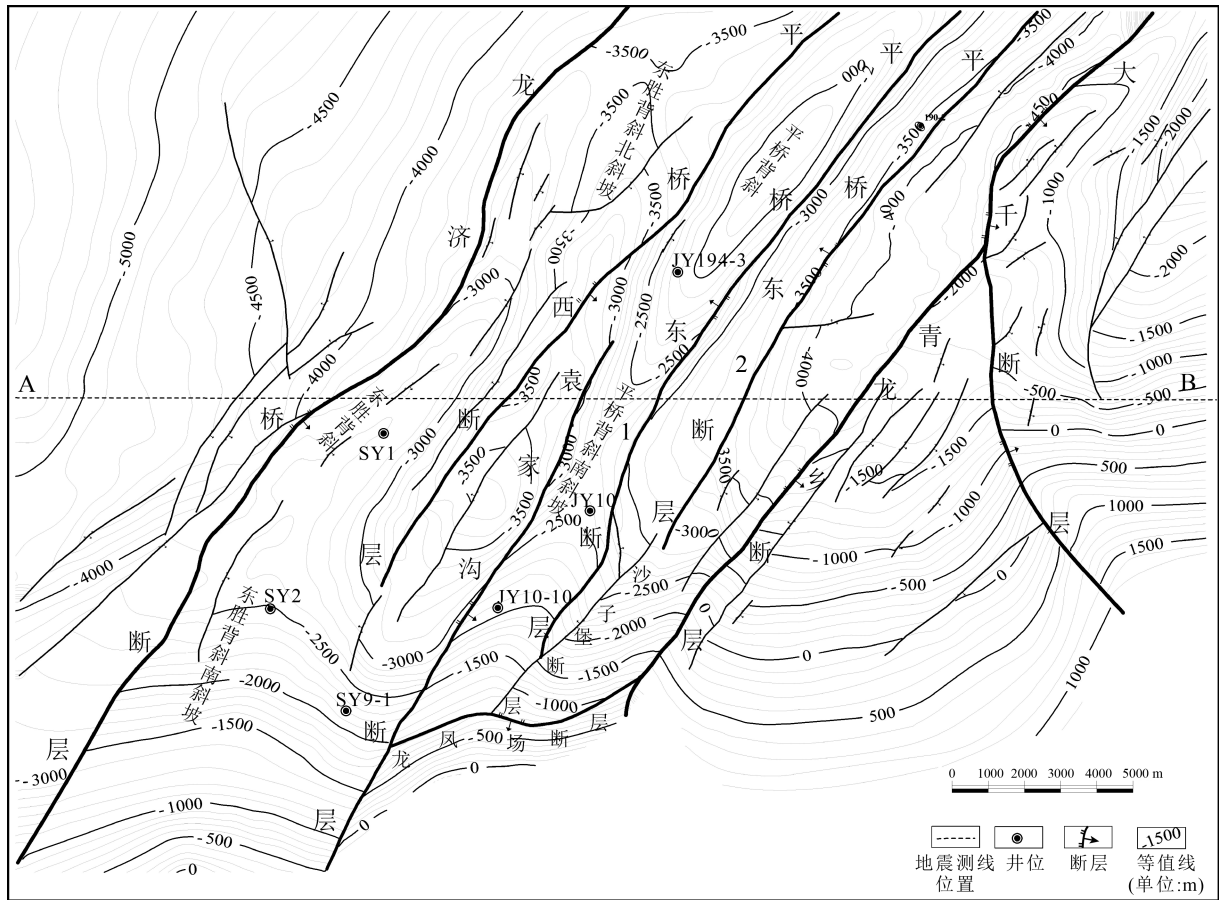


图 3 南川地区分区差异构造特征平面图

Fig. 3 Plan view of regionally differentiated structural features in the Nanchuan area

平桥地区发育断展褶皱,产生一系列走向北东、倾向南东的逆断层,青龙乡断层以东地层进一步抬升到地表,发生轻微剥蚀;阶段三,研究区地层形变继续向西北传递,地层构造变形增强,在推覆构造带前缘东胜地区发育龙济桥断层,形成断展褶皱,在反冲作用下于平桥地区发育一系列倾向北西、走向北东的小型逆断层,研究区东南部地层进一步抬升剥蚀;阶段四,由于受到近东西向的挤压应力,在西南侧形成近南北向的断层及相应的断展褶皱,地层遭受部分剥蚀。晚燕山期由于川中隆起的阻挡,区域应力场由北西向的挤压背景变为南东向的挤压背景,研究区发生较弱的南东东向反冲作用,于南川外缘斜坡带产生走向北东、倾向北西的逆断层,地层整体进一步抬升,中部地层遭受剥蚀。喜马拉雅期由于太平洋板块俯冲及印度板块向欧亚板块碰撞挤入双重影响,研究区受到北西—南东向挤压,整体发生迅速隆升,地层遭受严重剥蚀,形成现今的构

造格局(魏峰等,2019)。

3 构造特征与页岩气保存

大量研究表明,影响页岩气保存条件的因素包括构造类型、断裂特征、裂缝、离断层距离、离出露区距离、地层压力系数等(董大忠等,2018;田鹤等,2020;徐中华等,2020;周彤等,2020;周惠等,2021)。从南川地区具体勘探实践看,影响南川地区龙马溪组页岩气保存条件的主要因素为构造类型、埋深、断裂特征、裂缝发育特征、离出露区距离、地层压力系数(表1)。

3.1 冲断构造带

在青龙乡断层、大千断层以东,南川地区冲断构造带整体表现为一斜坡形态,埋深在0~5000 m,往南龙马溪组抬升至出露,主要断层断距大,在研究区青龙乡断层断距2000~2200 m,大千断层断距500~2700 m,断穿层位为下至寒武系,上至地表。

内部发育一系列北东向的小断层断距 50~200 m, 地层较破碎, 曲率属性反映大尺度裂缝极其发育, 在 5000 m 深处龙马溪组地层压力系数约为 1.3, 明显低于盆内 5000 m 地层的压力系数(1.5), 在靠近出露区的地方小于 1, 证明保存条件受到影响。冲断构造带断距大、地层破碎、大尺度裂缝发育、地

层压力系数低, 易导致页岩气散失, 整体保存条件较差。

3.2 断展构造带

断展褶皱带主要位于龙济桥断层以东、大千及青龙乡断层以西, 内部呈隆凹相间的构造格局, 西部中间为低幅背斜东胜背斜, 南北分别为南斜坡及北斜坡, 中部为袁家沟向斜, 东部平桥背斜及平桥背斜南斜坡。平桥背斜龙马溪组埋深 2500~3500 m, 东胜背斜埋深 3500~4000 m, 埋深适中, 东胜北斜坡埋深 3500~4600 m, 埋深较深, 2 个背斜南斜坡往南逐渐抬升至出露, 中部袁家沟向斜最深达到 4300 m。断展构造内部主要受龙济桥断层、平桥西断层、平桥东 2 断层控制, 断距 50~600 m, 断穿地层下至寒武系, 上至志留系, 内部同样发育一系列北东向断距小于 100 m 的断层。平桥背斜、东胜背斜、东胜背斜北斜坡及平桥南斜坡大尺度裂缝发育, 东胜背斜南斜坡大尺度裂缝不发育; 从钻井成像测井资料看, 平桥背斜高角度小尺度裂缝发育优于平桥背斜南斜坡, 东胜背斜高角度小尺度裂缝发育优于东胜南斜坡, 且具有东部裂缝发育优于西部的特征(表 2)。平桥背斜虽然埋深较浅, 但地层压力系数高达 1.5, 东胜背斜与袁家沟向斜压力系数也达到 1.35, 表现出异常高压特征, 平桥和东胜南斜坡由于龙马溪组往南抬升至出露, 地层压力系数往南逐渐降低至 1 左右。

整体看, 断展构造带龙马溪组大部分地层埋深适中, 断层未通天, 大尺度裂缝及小尺度裂缝均发育, 地层压力系数高, 保存条件好, 特别是平桥背斜与东胜背斜具有背斜构造背景, 是南川地区页岩气勘探的最有利区(崔景伟等, 2019; 郭卫星等, 2021)。这也在钻井中得到了证实, 平桥背斜的 JY194-3HF 井测试产量达 $34.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 东胜背斜的 SY1HF 井测试产量也达到 $14.36 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 断展构造内部袁家沟向斜, 由于埋深较深且小尺度裂缝不发育, 暂未钻井对向斜型气藏进行评价。

3.3 滑脱构造带

滑脱褶皱带主要位于龙济桥断层以西,

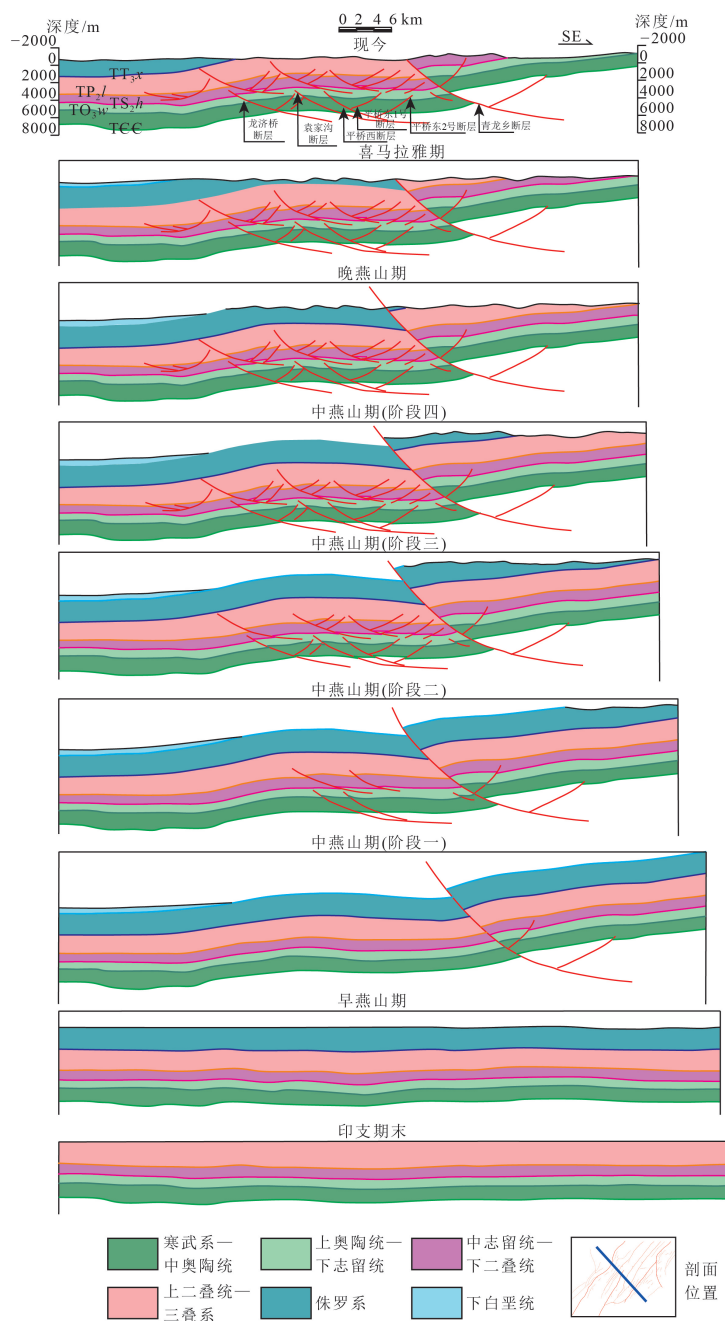


图 4 南川地区构造演化特征图

Fig. 4 Characteristics map of tectonic evolution in Nanchuan area

TT₃x—三叠系须家河组底; TP₂l—二叠系龙潭组底; TS₂h—志留系

韩家店组底; TO₃w—奥陶系五峰组底; T—寒武系底

表 1 南川地区龙马溪组构造与页岩气保存关系

Table 1 Relationship between Longmaxi Formation structure and shale gas preservation in the Nanchuan area

构造带	构造类型	埋深/m	断裂特征		离出露区 距离/km	地层压力 系数	页岩气 保存条件
			断层	裂缝			
冲断构造带	斜坡	0~5000	断层发育,主要断层通天	大尺度裂缝极其发育	0~14.7	1~1.3	保存条件差
断展构造带	平桥背斜	2500~3500	断层较发育,断距50~600 m	大尺度及小尺度裂缝发育	10~24	1.3~1.5	保存条件好
	平桥背斜南斜坡	0~3600		大尺度裂缝发育,小尺度裂缝较发育	0~10	0.95~1.3	保存条件较好,往南逐渐变差
	东胜背斜北斜坡	3500~4600		大尺度裂缝发育	26.2~35.5	1.4~1.5	保存条件好
	东胜背斜	0~3500		大尺度及小尺度裂缝发育	11.3~26.2	1.3~1.4	保存条件好
	东胜背斜南斜坡	3500~4000		大尺度裂缝不发育,小尺度裂缝不发育	0~11.3	0.8~1.3	保存条件较好,往南逐渐变差
	袁家沟向斜	4000~4300		大尺度裂缝较发育,小尺度裂缝不发育	8.9~16.1	1.25~1.35	保存条件好
滑脱构造带	斜坡	4000~6700	不发育,断距小于100 m	大尺度裂缝不发育	9~31.6	1.2~1.6	保存条件好,往南逐渐变差

表 2 南川地区导眼井龙一段裂缝统计结果

Table 2 Statistical results of fractures in the Longmaxi Formation of the Pilot Well in the Nanchuan area

裂缝	JY194-3 平桥背斜	JY10 平桥背斜南斜坡	JY10-10 平桥背斜南斜坡	SY1 东胜背斜	SY2 东胜背斜南斜坡	SY9-1 东胜背斜南斜坡
高阻缝/条	78	45	53	45	12	0
高导缝/条	1	0	2	0	0	0

属于四川盆地内部,在南川地区整体表现为一斜坡特征,龙马溪组埋深 4000~6700 m,埋深较深,内部发育断距小于 100 m 的北东向及近南北向断层,断穿下至寒武系上部,上至志留系下部,地层稳定,大尺度裂缝不发育,地层压力系数在较深的地方达到 1.6,往南由于地层逐渐抬升,压力系数逐渐减小,整体保存条件较好。2013 年在龙济桥断层以西钻探 NY1 井,龙马溪组优质页岩厚度 29 m,TOC 3.17%,含气量 3.6 m³/t,孔隙度 4.5%,静态指标优越,但由

于龙马溪组页岩埋深达到 4400 m,受制于当时压裂工程工艺,水平井测试产量较低,但现今压裂工程工艺有了很大进步,盆地内部威荣深层页岩气田也取得了良好效果,因此南川地区滑脱褶皱带是下一步勘探的有利目标区。

4 结 论

(1)南川地区在纵向上分为 4 个滑脱层系,分别为前寒武基底层、中下寒武统膏泥岩,下志留统

泥页岩,以及三叠系雷口坡组-嘉陵江组膏盐,造就了纵向上的 4 个变形层。

(2)南川地区表现为前展式结构特征,自东向西的构造变形为强烈冲断褶皱→断展→滑脱。

(3)受江南-雪峰陆内造山带产生的北西-南东向挤压应力影响,南川地区主要构造特征形成于中燕山期及晚燕山期。

(4)南川地区冲断构造带整体保存条件较差,不利于页岩气的勘探开发;断展构造带是南川地区页岩气勘探开发的有利区域,具有构造背景、埋深适中、裂缝发育、地层压力系数高,保存条件好的特点。滑脱构造带整体保存条件好,但由于页岩地层埋深较深,需要相匹配的工程技术才能实现效益开发,是下一步页岩气勘探的有利目标区。

参考文献

- 蔡勋育,赵培荣,高波,等.中国石化页岩气“十三五”发展成果与展望[J].石油与天然气地质,2021,42(1): 16-27.
- 崔景伟,朱如凯,范春怡,等.页岩层系油气资源有序共生及其勘探意义——以鄂尔多斯盆地延长组长 7 页岩层系为例[J].地质通报,2019,38(6): 1052-1061.
- 董大忠,施振生,孙莎莎,等.黑色页岩微裂缝发育控制因素——以长宁双河剖面五峰组-龙马溪组为例[J].石油勘探与开发,2018,45(5): 763-774.
- 高玉巧,蔡潇,何希鹏,等.渝东南盆缘转换带五峰组-龙马溪组页岩压力体系与有机孔发育关系[J].吉林大学学报(地球科学版),2020,50(2): 662-674.
- 郭彤楼.页岩气勘探开发中的几个地质问题[J].油气藏评价与开发,2019,9(5): 14-19.
- 郭卫星,唐建明,欧阳嘉穗,等.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,2021,41(05): 11-19.
- 何希鹏,何贵松,高玉巧,等.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,2018,38(12): 1-14.
- 何希鹏.四川盆地东部页岩气甜点评价体系与富集高产影响因素[J].天然气工业,2021,41(1): 59-71.
- 胡明,黄文斌,李加玉.构造特征对页岩气井产能的影响——以涪陵页岩气田焦石坝区块为例[J].天然气工业,2017,37(8): 31-39.
- 胡月,陈雷,周昊,等.海相页岩纹层特征及其对页岩储层发育的影响——以川南长宁地区龙马溪组为例[J].断块油气田,2021,28(2): 145-150.
- 李建忠,陶小晚,白斌,等.中国海相超深层油气地质条件、成藏演化及有利勘探方向[J].石油勘探与开发,2021,48(1): 52-67.
- 卢志远,何治亮,余川,等.复杂构造区页岩气富集特征——以四川盆地东南部丁山地区下古生界五峰组-龙马溪组为例[J].石油与天然气地质,2021,42(1): 86-97.
- 孙健,罗兵.四川盆地涪陵页岩气田构造变形特征及对含气性的影响[J].石油与天然气地质,2016,37(6): 809-818.
- 庾秀松,陈孔全,罗顺社,等.渝东大焦石坝地区差异构造变形[J].石油与天然气地质,2019,40(5): 1074-1083.
- 田鹤,曾联波,徐翔,等.四川盆地涪陵地区海相页岩天然裂缝特征及对页岩气的影响.石油与天然气地质[J],2020,41(3): 474-483.
- 魏峰,陈孔全,庾秀松.川东齐岳山断层北部差异构造变形特征[J].石油实验地质,2019,41(3): 348-354.
- 熊小辉,王剑,熊国庆,等.渝东北地区五峰组-龙马溪组页岩气地质特征及其勘探方向探讨[J].地质学报,2018,92(9): 1948-1958.
- 徐中华,郑马嘉,刘忠华,等.四川盆地南部地区龙马溪组深层页岩岩石物理特征[J].石油勘探与开发,2020,47(6): 1100-1110.
- 周彤,王海波,李凤霞,等.层理发育的页岩气储集层压裂裂缝扩展模拟[J].石油勘探与开发,2020,47(5): 1039-1051.
- 周昊,陈雷,李雪松,等.川南长宁地区五峰组和龙马溪组页岩储层差异性分析[J].断块油气田,2021,28(3): 289-294.
- 周惠,田玉昆,李娟,等.基于地震叠后反演与属性分析的页岩气有利储层预测[J].地质通报,2021,40(4): 557-564.
- 赵越,李磊,司运航,等.浅层页岩气储层孔隙分形特征及控制因素:以云南昭通地区龙马溪组为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(6): 1813-1829.