



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

煤炭科学技术

滇东北地区勺寨复向斜五峰组龙马溪组页岩气地质特征及含气性控制因素

李遇 薛晓辉 张金彪 李金龙 胡琳 王玲 陈志军

引用本文:

李遇, 薛晓辉, 张金彪, 等. 滇东北地区勺寨复向斜五峰组龙马溪组页岩气地质特征及含气性控制因素[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 255–264.

LI Yu, XUE Xiaohui, ZHANG Jinbiao. Geological characteristics and gas bearing control factors of shale gas in the Wufeng–Longmaxi Formation of the Shaozhai syncline in northeastern Yunnan[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 255–264.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0235>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

川东北地区五峰组龙马溪组页岩地球化学特征及有机质富集模式

Geochemical characteristics and organic matter enrichment model of Wufeng–Longmaxi formations shale in northeast Sichuan China
煤炭科学技术. 2024, 52(8): 124–138 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0946>

四川盆地南缘龙马溪组混合岩相页岩及其沉积环境

Mixed lithofacies shale and depositional environment of Longmaxi Formation in southern margin of Sichuan Basin
煤炭科学技术. 2021, 49(5): 208–217 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/805c4237-8935-47b4-a4a8-7105c998c691>

临兴地区下二叠统太原组页岩气地质特征及勘探潜力

Shale gas geological characteristics and exploration potential of lower permian Taiyuan Formation in Linxing Area
煤炭科学技术. 2023, 51(5): 140–148 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-1073>

六盘水地区煤层含气性地质特征及差异成因

Difference characteristics and main controlling factors in gas-bearing of coal seams in Liupanshui Area
煤炭科学技术. 2022, 50(11): 122–130 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ecb6a475-7c24-44bc-a4b3-dfcc8d3bcab5>

复杂构造区页岩孔隙结构、吸附特征及其影响因素

Pore structure, adsorption capacity and their controlling factors of shale in complex structural area
煤炭科学技术. 2023, 51(2): 269–282 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1576>

沁水盆地煤系气含气层段发育特征及其地质控制效应

Distribution and geological controls on gas-bearing section of coal measure gases in Qinshui Basin
煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 141–151 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2081>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

李 遇, 薛晓辉, 张金彪, 等. 滇东北地区勺寨复向斜五峰组-龙马溪组页岩气地质特征及含气性控制因素[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 255-264.
LI Yu, XUE Xiaohui, ZHANG Jinbiao, *et al.* Geological characteristics and gas bearing control factors of shale gas in the Wufeng-Longmaxi Formation of the Shaozhai syncline in northeastern Yunnan[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 255-264.

滇东北地区勺寨复向斜五峰组-龙马溪组页岩气地质特征及含气性控制因素

李 遇^{1,2}, 薛晓辉^{1,3}, 张金彪⁴, 李金龙⁵, 胡 琳⁶, 王 玲⁶, 陈志军²

(1. 云南煤层气资源勘查开发有限公司, 云南 曲靖 655000; 2. 云南省一九九煤田地质勘探队, 云南 楚雄 675000; 3. 云南省煤炭地质勘查院 云南 昆明 650218; 4. 黑龙江省自然资源调查院, 黑龙江 哈尔滨 150000; 5. 云南省煤田地质局, 云南 昆明 650000; 6. 云南省煤炭产品质量检验站, 云南 曲靖 655000)

摘 要:滇东北地区勺寨复向斜五峰组-龙马溪组发育一套富有机质页岩, 具有较好的勘探潜力; 但关于其地质特征、含气性特征和主控因素尚不明确。通过系统梳理前人资料并结合最新钻井、剖面资料, 对勺寨复向斜五峰组-龙马溪组富有机质页岩的岩石学特征、有机质特征、储集空间特征和含气性特征进行了分析, 并就含气性控制因素进行了探讨。结果表明: 勺寨复向斜五峰组-龙马溪组为浅水陆棚-深水陆棚沉积, 富有机质页岩厚度介于 35~105 m; 五峰组上段和龙马溪组下段富有机质页岩 TOC 含量高, 多在 2% 以上, 有机质类型好, 具有良好的生烃潜力; 优质页岩脆性矿物含量较高, 具有较好的可压裂性; 储层空间类型多, 既有有机质孔、晶间孔、粒内孔为主的页岩气储集孔, 又有沟通压裂通道、宏观裂缝的矿物碎裂缝和黏土矿物层间缝。研究区页岩含气量差异较大, 高桥地区含气量相对较高但 CH₄ 无空气基含量较低, 而莲峰地区含气量相对较低但 CH₄ 无空气基含量高, 均在 95% 以上。研究认为: 同一构造位置页岩总含气量受控于 TOC 含量、孔体积、孔比表面、黏土矿物含量、黄铁矿含量和碳酸盐岩矿物含量, 不同构造部位页岩气含量受控于构造控制下的沉积环境及构造保存条件, 构造控制下的深水陆棚、远离大断裂和具有褶皱遮挡的宽缓向斜含气性较好, 是研究区页岩气富集的有利区带。

关键词:勺寨复向斜; 五峰组-龙马溪组; 地质特征; 含气性特征; 控气因素

中图分类号: TE132

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)05-0255-10

Geological characteristics and gas bearing control factors of shale gas in the Wufeng-Longmaxi Formation of the Shaozhai syncline in northeastern Yunnan

LI Yu^{1,2}, XUE Xiaohui^{1,3}, ZHANG Jinbiao⁴, LI Jinlong⁵, HU Lin⁶, WANG Ling⁶, CHEN Zhijun²

(1. Yunnan Coalbed Methane Resource Exploration and Development Co., Ltd., Qujing 655000, China; 2. Yunnan Province 199 Coalfield Geological Exploration Team, Chuxiong 675000, China; 3. Yunnan Provincial Coal Geological Exploration Institute, Kunming 650218, China; 4. Natural Resources Investigation Institute of Heilongjiang, Harbin 150000, China; 5. Yunnan Coalfield Geological Bureau, Kunming 650000, China; 6. Yunnan Coal Product Quality Inspection Station, Qujing 655000, China)

Abstract: A set of organic rich shale with good exploration potential is developed in the Wufeng Formation Longmaxi Formation of the Shaozhai Syncline in northeastern Yunnan; However, its geological characteristics, gas bearing characteristics, and main controlling factors are still unclear. By systematically reviewing previous data and combining with the latest drilling and profile data, the petrological characteristics, organic matter characteristics, reservoir space characteristics, and gas bearing characteristics of organic shale rich in the Wufeng-Longmaxi Formation of the Shaozhai Syncline were analyzed, and the controlling factors of gas bearing properties were discussed. The results show that the Wufeng-Longmaxi Formation in the Shaozhai Syncline is a shallow water shelf deep water shelf deposit,

收稿日期: 2024-02-26

策划编辑: 宫在芹

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.12438/cst.2024-0235

基金项目: 云南省 2023 年度新一轮找矿行动资助项目(Y202307); 云南省发展和改革委员会资助项目(云发改投资[2019]292号-2)

作者简介: 李 遇(1991—), 男, 陕西渭南人, 中级地质工程师。E-mail: 1536665203@qq.com

通讯作者: 薛晓辉(1989—), 男, 山东巨野人, 高级工程师, 硕士。E-mail: 651962123@qq.com

with a thickness of organic rich shale ranging from 35 to 105m; The organic rich shale in the upper section of the Wufeng Formation and the lower section of the Longmaxi Formation has a high TOC content, mostly above 2%, with good organic matter types and good hydrocarbon generation potential; High quality shale has a high content of brittle minerals and good fracturing performance. There are multiple types of reservoir spaces, including shale gas storage pores mainly composed of organic matter pores, intergranular pores, and intra particle pores, as well as mineral fractures and interlayer fractures of clay minerals that communicate with fracturing channels and macroscopic fractures. The gas content of shale in the study area varies greatly. The gas content in the Gaoqiao area is relatively high, but the CH₄ air free base content is low. The gas content in the Lianfeng area is relatively low, but the CH₄ air free base content is high, both of which are above 95%. The study found: the difference in total gas content of shale at the same structural location is controlled by TOC content, pore volume, pore specific surface area, clay mineral content, pyrite content, and carbonate mineral content. The shale gas content at different structural locations is controlled by the sedimentary environment and preservation conditions under structural control. The deep water continental shelf, wide and gentle synclines far from major faults and with fold shielding under structural control have better gas bearing properties, it is a favorable area for shale gas enrichment in the study area.

Key words: Shaozhai syncline; Wufeng-Longmaxi Formation; geological characteristics; gas bearing characteristics; gas control factors

0 引言

页岩气是一种自生自储、原地聚集成藏的非常规天然气资源,是一种优质高效的清洁能源^[1-2]。在我国页岩气勘探开发历程中涪陵示范区建立了海相页岩气“二元富集”理论、高效开发气藏工程理论、页岩气丛式水平井组优快钻井技术和页岩储层差异化缝网压裂技术等勘探开发地质理论和技术^[3],昭通示范区提出了“多场协同多元耦合”山地页岩气富集成藏赋存理论和山地页岩气勘探开发技术^[4],长宁—威远示范区形成了地质工程一体化技术、页岩气综合地质评价技术和“六化”管理模式^[5],3个海相页岩气示范区相继实现了商业化开发。

随着国内页岩气商业化开发进程的推进,国内学者对甜点区评价和控气因素分析方面进行理论研究,并获得了诸多成果。张培先等^[6]从资源基础、保存条件、地应力场等方面建立了16项关键指标页岩气甜点目标评价体系。张廷山等^[7]从沉积地貌、岩性岩相、储集空间和保存条件方面对页岩气的控气因素进行了分析,认为古地貌直接控制了储层的品质,优势岩相控储控气,纳米孔隙控气,顶底板封盖是富集控气的关键因素。何梅朋^[8]研究认为:有机质含量、脆性矿物含量和孔隙度均与含气性呈正相关,黏土矿物含量与含气性呈负相关。总体而言,页岩的含气性与地质特征密切相关,也是非常规天然气勘探开发的重要依据。然而,位于示范区外围的页岩气矿业权空白区五峰组—龙马溪组海相页岩气的勘探仍处于起始阶段,由于复杂的构造保存条件,适用于商业开采区的关键地质参数和控气因素不能完全用于复杂构造带页岩气有利区的预测。

滇东北地区位于四川盆地南缘复杂构造区,通过近几年的调查评价,部署在木杆向斜的某页岩气

参数井直井地层含气性测试获得页岩气工业气流,抽油机求产折算日产5608 m³,达到工业气流标准,证实了盆地外缘同样具有较好的页岩气资源条件。为了进一步拓宽滇东北地区页岩气富集区域,本次工作以木杆向斜南部的勺寨向斜为重点,结合区内剖面、钻井资料,对该区的五峰组—龙马溪组页岩气地质条件进行研究,并在此基础上分析研究区含气性控制因素,以期为天然气资源的接替提供依据。

1 研究区地质背景

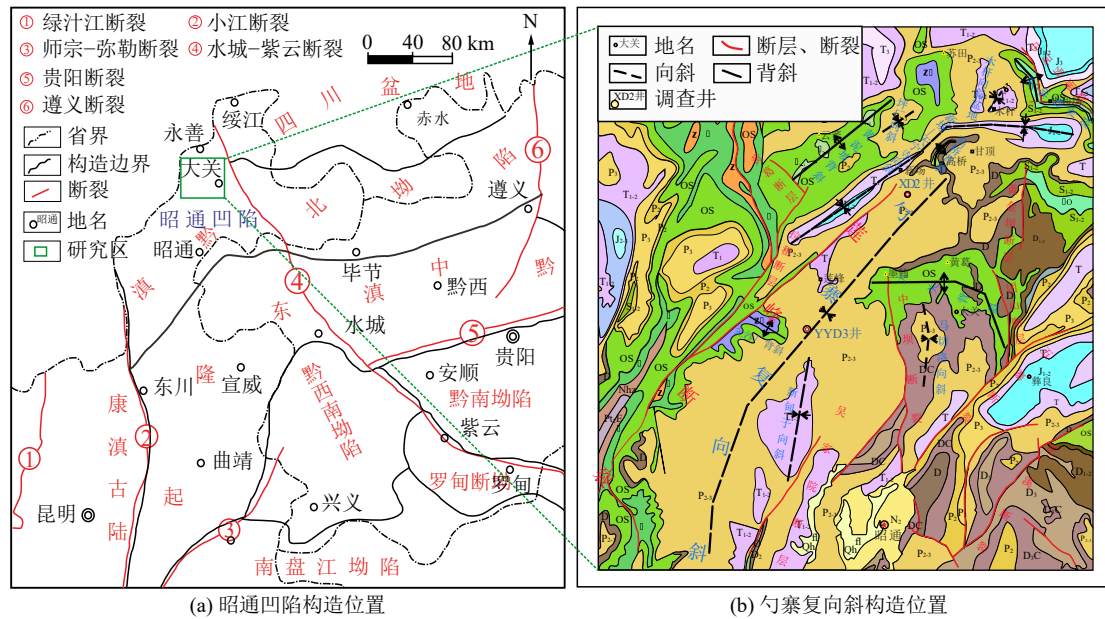
研究区位于云南省昭通境内。构造上位于小江断裂东部、水城—紫云断裂西部,处于扬子地台西南边缘的滇黔北坳陷—昭通凹陷。该凹陷为早古生代凹陷,南接黔中滇东隆起,北邻四川盆地;介于盆地和古隆起之间(图1a),具有构造挤压强烈、地表地形复杂的特征;发育北东向具有“向斜宽缓,背斜窄陡”的隔挡式褶皱^[9-10](图1b)。不同于盆地内部的保存条件好、构造变形弱的构造背景。

区域地层受构造运动控制,晚震旦世至早古生代地壳相对平静,下古生界寒武系、奥陶系、志留系地层较为发育;海西运动作用下,黔中滇东同时缺失了中晚泥盆世和石炭世地层。早二叠世,区内大面积海进,使得下二叠统以平行不整合超覆于不同时代的老地层之上。受东吴运动影响,晚二叠世峨眉山玄武岩岩浆大量喷出,增加了研究区的热流值,加快了五峰组—龙马溪组页岩层系的生烃进程^[10]。

2 储层特征

2.1 岩石学特征

研究区内五峰组—龙马溪组为一套深灰色至灰黑色炭质泥页岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩,五峰组和龙马溪组分为2段;其中有利层段为五峰组上段、

图 1 昭通凹陷构造位置及勺寨复向斜构造位置^[9]Fig.1 Structural location map of Zhaotong Depression and location map of Shaozhai synclinal structure^[9]

龙马溪组下段,主要发育钙质泥页岩、含炭钙质页岩、含钙粉砂质页岩,并见大量的笔石发育,夹多层黄铁矿,间夹灰岩透镜体(图 2)。

2.2 矿物学特征

XD2 井位于勺寨向斜北东端,其 71 件泥页岩样品 X-衍射测试结果显示:区内五峰组-龙马溪组泥页岩以石英、长石和碳酸盐岩等脆性矿物为主,脆性矿物质量分数介于 52.00%~92.00%,平均值为 73.61%;石英质量分数介于 7.00%~78.00%,平均值为 27.68%;黏土矿物质量分数介于 8.00%~45.00%,平均值为 25.35%;样品中普遍发育黄铁矿,质量分数介于 2.00%~5.00%,平均值为 3.22%(图 2)。研究区五峰组-龙马溪组较高的脆性矿物含量有利于诱导裂缝的形成^[11],从而联通裂隙与储层孔隙,实现页岩气的运移。研究表明, H_2S 含量与海水深度呈一定的正相关^[12], H_2S 含量决定矿物类型, H_2S 含量少主要形成菱铁矿, H_2S 量大则形成黄铁矿,研究区样品测试均为黄铁矿不含菱铁矿表明具有硫化氢富集特征,指示储层处于水深较深的还原环境,有机质得以充分保存。垂向上石英含量高值点位于五峰组二段的顶部和龙马溪组一段的底部也是目前勘探开发的有利层段。

黏土矿物测试结果显示,五峰组-龙马溪组样品以伊利石为主,质量分数介于 54.00%~94.00%,平均值为 68.63%;其次为绿泥石和伊/蒙混层,质量分数平均值均在 10% 以上;大多数样品也含有少量的高岭石,不含蒙脱石和绿/蒙混层。魏祥峰等(2013)研

究发现泥页岩的伊蒙间层矿物含量与孔比表面积关系间呈现良好的对数关系,样品中伊/蒙混层质量分数介于 6.00%~39.00%,平均值为 12.58%,有利于页岩气的吸附富集。

2.3 有机地化特征

XD2 井五峰组-龙马溪组 10 块样品显微组分的分析测试显示:显微组分主要表现为腐泥组,缺乏惰质组和壳质组。与震旦系和寒武系干酪根显微组份不同的是,上奥陶统-志留系开始出现少量的镜质组,壳质组体积分数平均值为 4.3%,该特征可能和奥陶纪晚期维管陆地植物的出现有关。有机质类型指数介于 86.00%~98.30%,为 I 型干酪根,具高氢低氧含量,生气潜能大。

有机碳含量在深水陆棚区总体较高,TOC 含量均大于 1.0% 层段厚度为 105 m,TOC 含量大于 2.0% 层段厚度为 35 m(图 2)。龙马溪组下段上部零星可见 TOC>1.0%,龙马溪组一段中下部及五峰组上部 TOC 质量分数均大于 1.0%,龙马溪组一段下部及五峰组上部为 TOC 质量分数大于 2.0% 的优质页岩段。整体观察,由上向下 TOC 含量逐渐增大,高 TOC 段主要分布在五峰组上部和龙马溪组底部,可见明显异常高 GR 峰。

2.4 孔缝特征

泥页岩在演化过程中,由于构造作用、热力作用及生排烃作用形成了复杂的微裂缝与孔隙,其既是天然气的储集空间,又是天然气的渗流通道^[13]。通过对 XD2 井页岩进行宏观裂缝观测和扫描电镜测

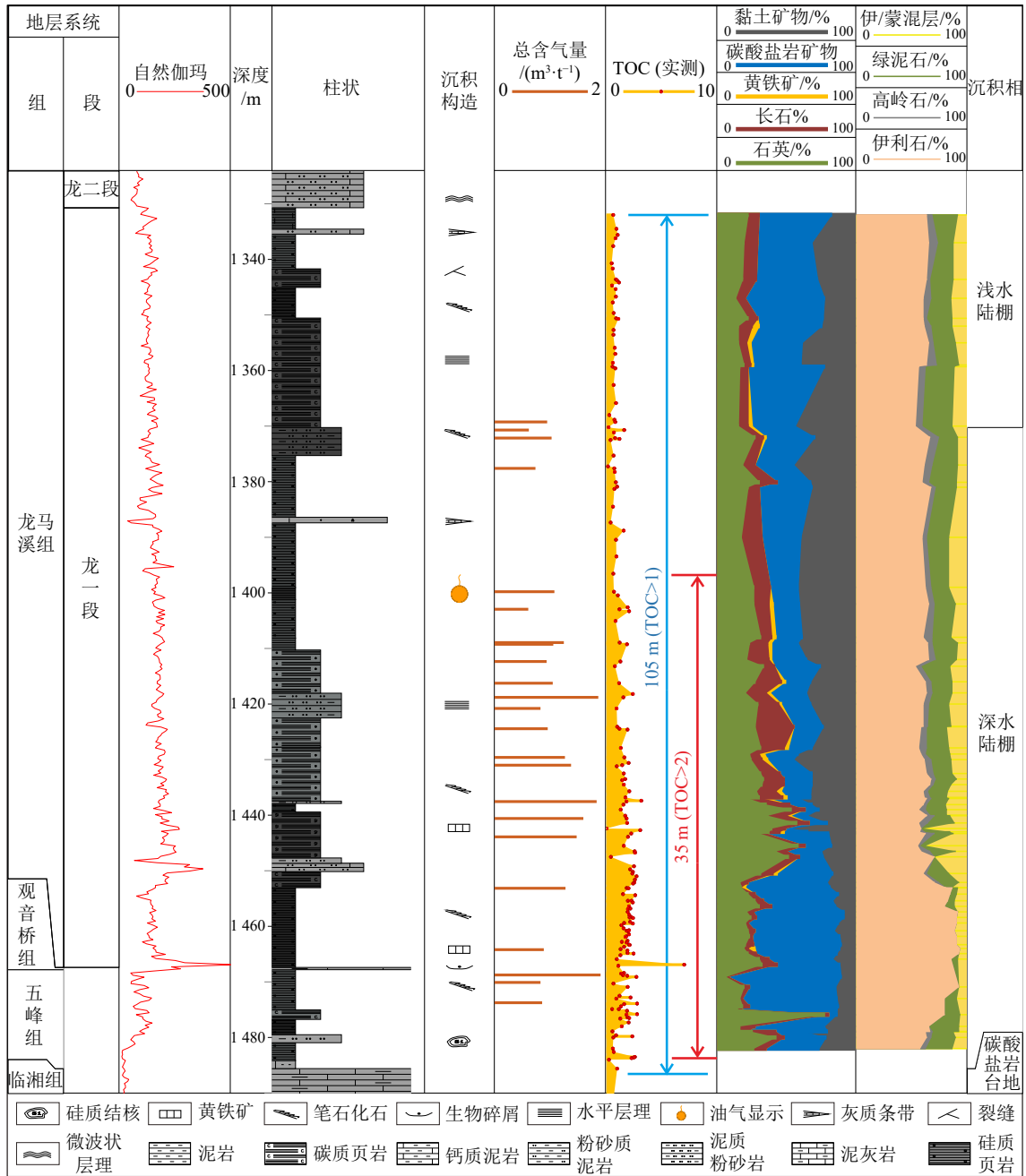


图 2 XD2 井综合柱状图
Fig.2 Comprehensive Histogram of Well XD2

试,发现研究区页岩储层发育宏观裂缝(图 3a),黏土矿物成平行密集排列(图 3f),二者一方面增加了气体的储集空间,另一方面增大了储层的比表面积,对吸附态页岩气和游离页岩气的富集均有积极的作用。

黄铁矿晶间孔和长石粒内溶蚀孔(图 3d、图 3e)等无机孔的发育为游离态页岩气缝有高角度剪切裂缝、层间裂缝,微观的孔-裂隙有黏土矿物层间缝、脆性矿物破裂缝、有机质孔、粒内孔、粒间孔。页岩气主要赋存状态为吸附态和游离态。宏观高角度剪切裂缝,总体上呈开启状态,不利于页岩气的保存(图 3a)。从页岩气储集方面看:微观的蜂窝状有机

质孔(图 3b)、无机的矿物溶蚀孔和晶间孔为页岩气的富集提供了空间。从排采运移的角度看,黏土矿物层间缝(图 3f)、脆性矿物破裂缝(图 3c)等微裂缝为沟通宏观裂隙及后期压裂裂缝提供了有效通道。

研究区处于深水陆棚相到浅水陆棚相的过渡区, XD2 井处五峰-龙马溪组黄铁矿发育,沉积环境为深水陆棚。页岩层段脆性矿物含量较高,有利于开发阶段的压裂。富有机质钙质页岩层段厚度大, TOC 大于 2% 的优质层段厚度相对较大,与长宁 A 井钙质页岩平均值 2.36% 接近^[14],并且有机质类型为 I 型干酪根,生气潜力大。但研究区页岩储层局部受

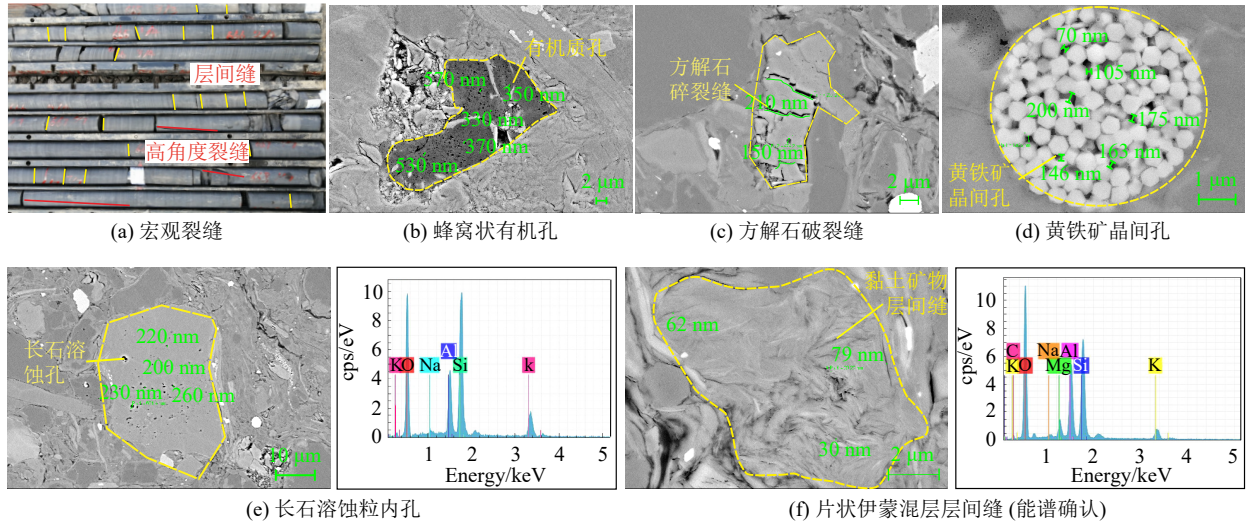


图 3 勺寨复向斜五峰组-龙马溪组泥页岩孔-裂隙特征

Fig.3 Characteristics of shale pores and fractures in the Wufeng - Longmaxi Formation of Shaozhai Syncline

到断裂构造影响,宏观裂隙发育,页岩气随着断裂逸散,不利于页岩气的保存。得益于研究区内页岩储层发育蜂窝状有机质孔、无机矿物粒内孔、粒间孔等,降低了构造作用对页岩气逸散的影响程度。

3 含气性特征

XD2 井的页岩样品模拟原始地层温度,在温度为 65℃ 时,甲烷等温吸附量在 2.12 ~ 4.28 m³/t,平均含量为 2.74 m³/t,反映了研究区五峰组-龙马溪组页岩气储层具有较好的吸附能力。

对 XD2 井 1369 ~ 1473 m 井段总计 23 个页岩岩心样品进行含气量测定,富有机质页岩水浸试验冒泡较为剧烈,解吸气体呈淡蓝色(图 4)。现场解吸气量介于 0.26 ~ 1.45 m³/t,平均 0.73 m³/t,其中最大

现场解吸气量位于五峰组顶部黑色炭质页岩。实测总含气量(解吸气量+残余气量+损失气量)为 0.61 ~ 1.87 m³/t,平均为 1.14 m³/t。纵向上,以五峰组-龙马溪组下部含气性较高。现场解吸气体组分分析表明气体组分主要为 N₂ 和 CH₄, N₂ 体积分数分布范围为 29.60% ~ 89.36%,平均含量为 54.40%; CH₄ 体积分数分布范围为 3.85% ~ 70.01%,平均含量为 43.84%。含少量 CO₂(含量 0.22% ~ 6.75%)、C₂H₆(平均体积分数 ≤ 0.29%)、C₃H₈(体积分数 ≤ 0.02%)和 CO(体积分数 ≤ 0.01%)。现场解吸气含量平均值不到甲烷等温吸附气含量一半,且组分中含有大量的 N₂。分布范围 94.78% ~ 97.87%,平均体积分数 96.18%,含少量 N₂,平均体积分数 3.05%,含极少量乙烷和 CO₂。较高的 CH₄ 含量和较低的含量表明其保存条件较好,有利于页岩气的富集。

对于 XD2 井与 YYD3 井页岩气组分差异因素进行分析:本次研究两口井使用的解吸气量均为无空气基;两口钻井均位于勺寨复向斜轴部附近,地层分布较为相似;XD2 井距离莲峰断裂近,富有机质页岩厚度大、埋深大,YYD3 井距离莲峰断裂远,富有机质页岩厚度小、埋深小;莲峰断裂为高角度断裂, XD2 井页岩层段受莲峰断裂影响大,YYD3 受断裂影响小。因此, XD2 与 YYD3 井页岩气组分差异是由于莲峰断裂的影响, XD2 井页岩层段裂隙发育,部分导通地表,使其 N₂ 含量远高于保存条件较好的 YYD3 井。结合 XD2 井与 YYD3 井页岩气含气量数据分析:二者数据差异较小,虽然研究区北东部受断裂影响较大,导致部分地层沟通空气,但莲峰断裂为逆冲断层,勺寨复向斜受挤压应力,对原位赋存的

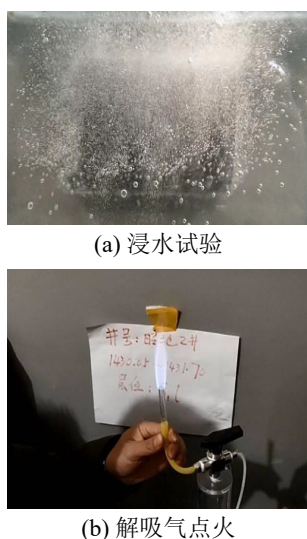


图 4 典型钻井水浸试验和点火试验

Fig.4 Typical Drilling Water Immersion Test and Ignition Test

页岩气影响具有一定的局限性。

4 含气性控制因素

页岩含气性是页岩气资源潜力预测、地质评价和探矿权设置的重要指标,其一定程度上决定了页岩气藏是否具有商业开发价值^[15-16]。一般认为页岩气含气性受沉积、古地貌、岩浆活动、保存条件、TOC、矿物成分、储层物性等多方面影响^[17-20]。本次重点从构造控制下的沉积环境、页岩本身特征以及保存条件 3 方面展开讨论。

4.1 构造控制下的沉积环境对含气性的影响

研究区位于昭通凹陷内,昭通凹陷北邻四川盆地,南接黔中滇东隆起;研究区地层沉积过程受黔中

滇东隆起控制,其是形成于加里东晚期(O-S)的隆起^[21]。在隆起过程中:

晚奥陶世五峰期靠近古陆的金阳、巧家等地为潮坪相沉积,发育有白云岩及含燧石条带泥质白云岩,夹少量的粉砂岩^[21];中部大关的莲峰(云永地 3 井)、黄葛溪为浅水陆棚相沉积,发育碳质钙质泥岩、粉砂质泥岩、泥灰岩,含笔石;北部的高桥(XD2 井)、木杆(XY1 井)为深水陆棚沉积,发育碳质钙质泥岩、含硅碳质粉砂质泥岩、含钙碳质粉砂质泥岩,笔石化石丰富集中且见数层疑似斑脱岩发育(图 5a)。

早志留世龙马溪期早期滇东北北部海水漫漫,深水陆棚相沉积扩展到莲峰地区(YYD3 井),发育黑

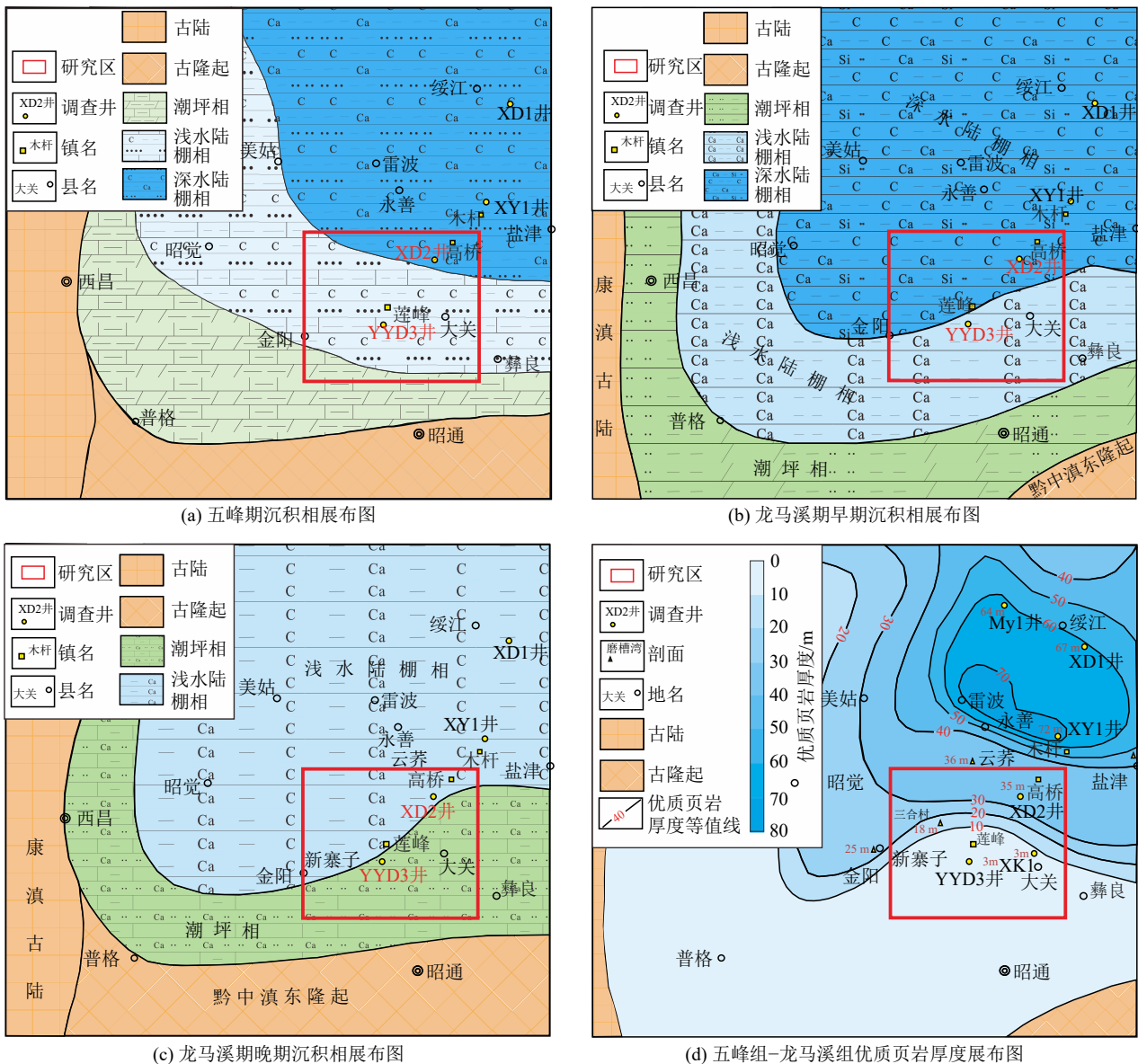


图 5 勺寨复向斜五峰期-龙马溪期沉积及五峰组-龙马溪组优质页岩厚度展布图

Fig.5 Distribution Map of Sedimentary Facies from the Wufeng- Longmaxi Periods of the Shaozhai Syncline and Distribution Map of High Quality Shale Thickness from the Wufeng- Longmaxi Formations

色碳质硅质页岩及碳质页岩,含粉砂碳质页岩、硅质页岩等,笔石种类丰富且数量较多,黄铁矿晶粒呈分散状和条带状、纹层状(图 5b)。

早志留世龙马溪期晚期古陆抬升,海水退却,研究区水体深度快速变浅,物源供给更为充分,沉积速率亦明显变大。研究区结束了黑色页岩的沉积,开始演变为富氧浅色的粉砂质泥岩、泥灰岩、钙质泥岩沉积。在研究区南部的 YYD3 井,岩性浅灰色-灰绿色的钙质泥岩、泥灰岩,往北至高桥发育灰色、深灰色泥岩、粉砂质泥岩(图 5c)。

研究区总体上在加里东晚期构造运动控制下的黔中滇东隆起的升降运动,在其控制下的沉积环境呈靠近古陆的潮坪相、中部的浅水陆棚相以及远离古陆的深水陆棚相展布。垂向上 XD2 井的五峰组上段和龙马溪组下段底部的深水陆棚环境发育优质的烃源岩;平面上在加里东晚期构造控制下由北向南水体变浅,表现在研究区北部 XD2 井五峰组-龙马溪组富有机质页岩厚度达 105 m,优质页岩厚度为 35 m;而南部莲峰一带 YYD3 井为 71 m,优质页岩厚度为 3 m(图 5d)。

4.2 页岩自身特征对含气性影响

在对 XD2 井进行含气量测试基础上,系统采集了样品进行有机地化、岩石学、储集特征等测试;并对总含气量与有机碳(TOC)含量、碳酸盐岩矿物含

量、黏土矿物含量、孔总体积、孔比表面积进行了相关性分析。结果显示 TOC 与总含气量呈线性正相关, R^2 达 0.62(图 6a),相关性较强,表明研究区 TOC 含量对页岩总含气量具有较强的控制作用;一方面有机质是生烃演化的重要物质基础,充足的有机质才能够形成更多的页岩气;另一方面有机质在热演化生烃过程中,形成了大量的有机质纳米孔,为页岩气提供了大量储集空间,与此同时增大了储层比较面积,提高了页岩气储层的吸附能力^[22]。

泥页岩孔体积、比表面积与总含气量均呈线性正相关, R^2 分别为达 0.59 和 0.34(图 6b、图 6c),相关性较强。泥页岩中的孔-缝为游离态的页岩气赋存提供了空间,有机质纳米孔和黏土矿物孔增大了储层的比表面积,为吸附态页岩气的赋存提供了场所。因此泥页岩的孔体积、比较面积对总含气量有一定的控制作用。

黏土矿物含量与总含气量之间呈一定的正相关, R^2 为 0.35(图 6d),相关性中等。表明黏土矿物对总含气量具有一定的控制作用;这与黏土矿物的孔隙结构有关:黏土矿物颗粒间、粒内多发育纳米级孔以及微裂缝,可以赋存大量游离气,与此同时黏土矿物尤其是矿伊蒙间层矿物具有较大的比表面积,能够增强页岩储层的吸附能力。

黄铁矿含量与总含气量之间表现为正相关, R^2

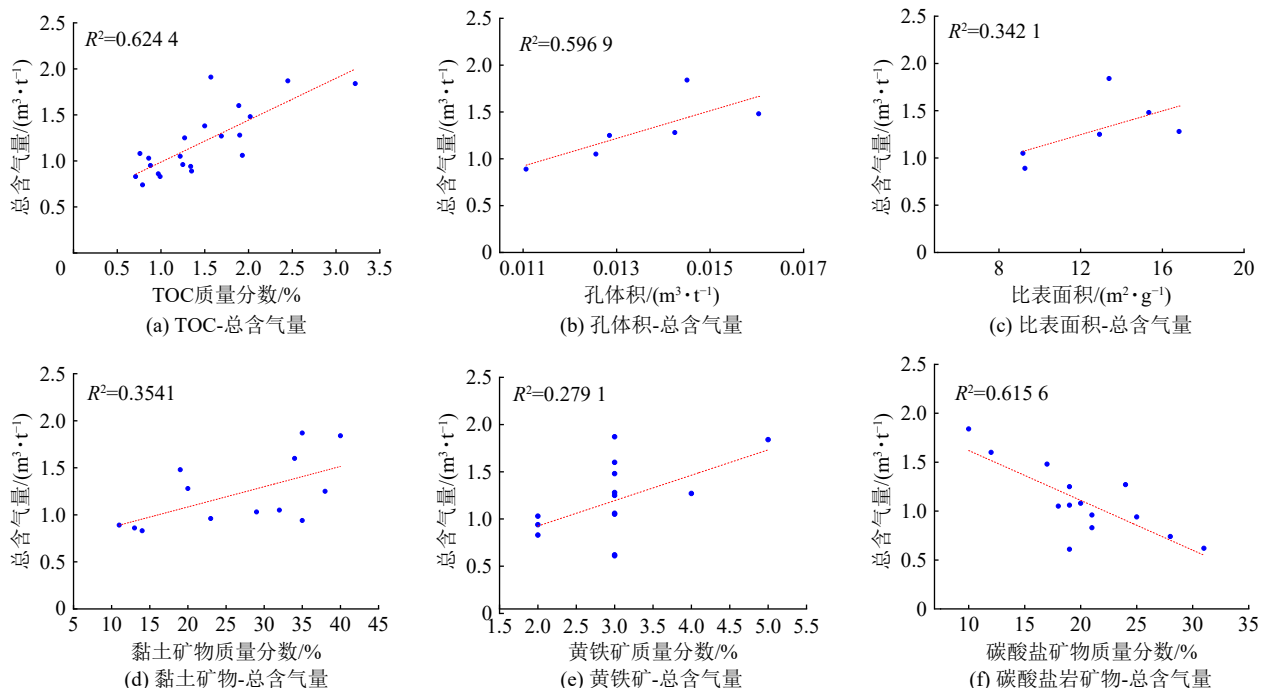


图 6 研究区 XD2 井五峰组-龙马溪组各储层参数与总含气量相关关系

Fig.6 Correlation between Reservoir Parameters and Total Gas Content in the Wufeng - Longmaxi Formation of Well XD2 in the Study Area

为0.28(图6e),相关性较弱。因为原生黄铁矿含量指示着水体的深度,其含量越高代表水体越深还原性越强,形成黄铁矿所必须的 H_2S 和 Fe^{2+} 含量越高,有机质富集程度就越高,但其形成会挤占有机质的空间,从而一定程度上减弱了地层的吸附能力,因此虽然黄铁矿对总含气量具有一定的控制作用,但相关性较弱。

碳酸盐岩矿物含量与总含气量呈负相关, R^2 为0.61(图6f),相关性较强。主要原因为碳酸盐岩矿物属于成岩作用过程中的产物,其形成会充填封堵孔裂隙,见较小页岩气的富集空间。因此碳酸盐的形成不利于页岩气的富集,对总含气量呈负向控制。

4.3 保存条件

昭通凹陷位于盆地外围,经历了加里东期、海西期、印支期、燕山期等多期次构造运动。形成一系列北东向和近东西向的逆断;同时形成一套向斜宽缓、背斜紧闭的复向斜(图1b)。研究区位于昭通凹陷西北部的勺寨复向斜区,构造改造相对较弱,向斜舒缓开阔,地层倾角在 $10^\circ \sim 20^\circ$,形态较完整,构造圈闭保存完好,对页岩气的保存具有积极作用。断层主要以挤压性的逆断层为主,封闭性较好。优质页岩的顶板龙马溪组下段上部发育的泥页岩、粉砂质泥岩,下志留统黄葛溪组发育的泥灰岩以及上志留统嘶风崖组的泥岩、厚层状石英砂岩,总厚度约300~600 m。目的层段底板的下奥陶统临湘组、中奥陶统宝塔组沉积一套瘤状灰岩,顶底板均属于低孔低渗的致密岩层,分布广泛而连续,厚度大,可作为五峰组-龙马溪组含气层的优质盖层和底板,在纵向上可阻止气体的逸散。断层两侧致密岩层连续对接,在页岩储层两侧形成封堵,阻止页岩气在横向上向两侧运移,具备良好的三维封闭体系。

以往的研究认为烃源岩的厚度和埋深也至关重要^[23-24],但在研究区内初步分析发现关键的控制因素是断裂:以XD2井和YYD3井进行剖析发现, XD2井优质页岩厚度35 m,目的层埋深在1380 m~1485 m; YYD3井优质页岩厚度3 m,目的层埋深在1000 m。云永地3井距离莲峰断裂直线距离为10 km, XD2井距莲峰断裂的直线距离为3.1 km,莲峰断裂为深大断裂对周边地层原始状态影响较大,与此同时YYD3井因金沙厂背斜的遮挡受到构造影响进一步降低(图1b)。主要表现在XD2井发育高角度的裂缝、局部岩芯破碎(图3a), CH_4 无空气基组分含量最高为70.01%,最低为3.85%, N_2 无空气基组

分含量最高89.36%,最低为26.90%,表明其页岩气保存遭受破坏,沟通地表导致大气成分如 N_2 等增多。而距离断裂远,有金沙厂向斜遮挡的YYD3井虽然埋深浅、优质页岩厚度只有3 m,但 CH_4 无空气基组分含量分布范围94.78%~97.87%,平均含量96.18%,仅含少量 N_2 ,表明其在后期改造过程中受扰动较小,保存条件好。

4.4 勘探开发有利区

研究区含气性受控于构造条件、储层特征的影响。分析结果显示,页岩储层的总含气量与TOC含量、孔体积、比表面积、黏土矿物含量、黄铁矿含量均呈正相关关系,与碳酸盐岩矿物的含量呈负相关关系。与TOC含量、孔体积正相关性较强,因此,页岩含气性主控因素为TOC含量,是页岩气的来源;孔体积是页岩气的赋存空间,而与比表面积较小相关性说明吸附态页岩气含量较小;碳酸盐岩矿物则封堵储层孔隙空间,导致页岩气储存空间减少。逆冲推覆构造对下盘断层具有一定的封闭性,储层底部和顶部的封闭性较好,有利于页岩气的保存,具有逆断层封堵的成藏特征,莲峰断裂对页岩储层局部有一定破坏,导致沟通大气,但较为局限。

研究区位于勺寨复向斜,受挤压应力,虽然发育莲峰断裂,影响部分储层,但影响局限,总体保存条件较好,具有逆断封堵、向斜成藏的特点。页岩储层具有厚度大,TOC含量良好,总含气量较好,脆性矿物含量高特点,具有较好的勘探开发前景。勺寨复向斜北东端(高桥一带)具备远离莲峰断裂、优质页岩厚度大的条件,是五峰组-龙马溪组页岩气富集有利区。

5 结 论

1)受海西运动控制,滇东北地区勺寨复向斜五峰组-龙马溪组沉积自南东至北西由浅水陆棚向深水陆棚转变,富有机质泥页岩主分布在五峰组上段和龙马溪组下段底部,岩性主要为碳质泥岩、含炭钙质页岩、含钙粉砂质页岩,并见大量的笔石发育。页岩TOC含量高,有机质类型为I型,生烃潜力大。

2)勺寨复向斜五峰组上段和龙马溪组下段页岩的有机质含量、矿物组成及储集空间对其含气性均有一定的控制作用。TOC含量、孔体积、孔比表面积、黏土矿物含量、黄铁矿含量、碳酸盐岩矿物含量与总含气量呈线性相关关系,TOC含量、孔体积、孔比表面积、黏土矿物含量、黄铁矿含量的发育对页岩

气的生成、储集及开发具有促进作用。其中 TOC 含量、孔体积是研究区优质页岩段页岩含气性的主要控制因素,孔比表面积、黏土矿物含量、黄铁矿含量的控制作用稍弱。碳酸盐岩矿物含量对含气性呈削弱作用。

3)在勺寨复向斜生烃条件、页岩储层储集条件等同时具备的基础之上,远离断裂,具有褶皱遮挡的宽缓向斜区,是研究区五峰组-龙马溪组页岩气富集有利区。

参考文献(References):

- [1] 邹才能,赵群,丛连铸,等.中国页岩气开发进展、潜力及前景[J].天然气工业,2021,41(1):1-14.
ZOU Caineng, ZHAO Qun, CONG Lianzhu, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 1-14.
- [2] 薛晓辉,胡琳,李金龙,等.昭通地区龙马溪组页岩气勘探开发可行性研究[J].云南地质,2020,39(2):153-158.
XUE Xiaohui, HU Lin, LI Jinlong, et al. The feasibility study of exploration and development of Longmaxi Formation shale gas in Zhaotong area[J]. Yunnan Geology, 2020, 39(2): 153-158.
- [3] 郭旭升,胡德高,舒志国,等.重庆涪陵国家级页岩气示范区勘探开发建设进展与展望[J].天然气工业,2022,42(8):14-23.
GUO Xusheng, HU Degao, SHU Zhiguo, et al. Exploration, development and construction in the Fuling national shale gas demonstration area in Chongqing: Progress and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(8): 14-23.
- [4] 梁兴,单长安,王维旭,等.昭通国家级页岩气示范区勘探开发进展及前景展望[J].天然气工业,2022,42(8):60-77.
LIANG Xing, SHAN Chang'an, WANG Weixu, et al. Exploration and development in the Zhaotong national shale gas demonstration area: Progress and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(8): 60-77.
- [5] 谢军.长宁:威远国家级页岩气示范区建设实践与成效[J].天然气工业,2018,38(2):1-7.
XIE Jun. Practices and achievements of the Changning-Weiyuan shale gas national demonstration project construction[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(2): 1-7.
- [6] 张培先,何希鹏,高玉巧,等.川东南五峰组-龙马溪组页岩气目标评价及水平井设计技术[J].科学技术与工程,2023,23(3):1024-1032.
ZHANG Peixian, HE Xipeng, GAO Yuqiao, et al. Shale gas target evaluation techniques and horizontal well design technology of Wufeng-Longmaxi Formation in southeast Sichuan[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(3): 1024-1032.
- [7] 张廷山,陈雷,梁兴,等.昭通国家级页岩气示范区五峰组:龙马溪组页岩气富集地质主控因素[J].天然气工业,2023,43(4):93-102.
ZHANG Tingshan, CHEN Lei, LIANG Xing, et al. Geological control factors of shale gas enrichment in the Wufeng-Longmaxi Formation of the Zhaotong National Shale Gas Demonstration Area[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(4): 93-102.
- [8] 何梅朋.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,2023,10(3):64-73.
HE Meipeng. 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, 2023, 10(3): 64-73.
- [9] 翟光明主编.苏浙皖闽油气区石油地质志编写组编.中国石油地质志-卷八-苏浙皖闽油气区[M].北京:石油工业出版社,1992.
- [10] 云南省地质局第二区队七分队,1/20万昭通幅区域地质调查报告[R].1978.
- [11] 沈仲辉,周令剑,李希建,等.含层理页岩水压致裂特性及对破裂压力的启示[J].煤炭科学技术,2023,51(11):119-128.
SHEN Zhonghui, ZHOU Lingjian, LI Xijian, et al. Hydraulic fracturing characteristics of shale with bedding planes and their implications for fracturing pressure[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(11): 119-128.
- [12] 徐蝶,古家青,贺维胜,等.塔中奥陶系硫化氢成因及寒武系油气勘探潜力[J].新疆地质,2019,37(4):525-531.
XU Die, GU Jiaqing, HE Weisheng, et al. Origin of hydrogen sulfide in Ordovician in Tazhong area and exploration potential of Cambrian oil and gas[J]. Xinjiang Geology, 2019, 37(4): 525-531.
- [13] 魏祥峰,刘若冰,张廷山,等.页岩气储层微观孔隙结构特征及发育控制因素:以川南-黔北XX地区龙马溪组为例[J].天然气地球科学,2013,24(5):1048-1059.
WEI Xiangfeng, LIU Ruobing, ZHANG Tingshan, et al. Micropores structure characteristics and development control factors of shale gas reservoir: A case of Longmaxi Formation in XX area of southern Sichuan and northern Guizhou[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(5): 1048-1059.
- [14] 单玄龙,邢健,苏思远,等.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),2023,53(5):1323-1337.
SHAN Xuanlong, XING Jian, SU Siyuan, et al. Shale lithofacies and gas-bearing characteristics of the lower Paleozoic Wufeng Formation-member 1 of Longmaxi Formation in Changning area, southern Sichuan[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(5): 1323-1337.
- [15] 黄金亮,邹才能,李建忠,等.川南下寒武统筇竹寺组页岩气形成条件及资源潜力[J].石油勘探与开发,2012,39(1):69-75.
HUANG Jinliang, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Shale gas generation and potential of the lower Cambrian qiongzhusi formation in southern Sichuan basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 69-75.
- [16] 李玉乔,乔德武,姜文利,等.页岩气含气量和页岩气地质评价综述[J].地质通报,2011,30(S1):308-317.
LI Yuxi, QIAO Dewu, JIANG Wenli, et al. Gas content of gas-bearing shale and its geological evaluation summary[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(S1): 308-317.
- [17] 林拓,张金川,李博,等.湘西北常页1井下寒武统牛蹄塘组页岩气聚集条件及含气特征[J].石油学报,2014,35(5):839-846.
LIN Tuo, ZHANG Jinchuan, LI Bo, et al. Shale gas accumulation

- conditions and gas-bearing properties of the Lower Cambrian Niutitang Formation in Well Changye 1, northwestern Hunan[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(5): 839–846.
- [18] 邹才能,董大忠,王玉满,等. 中国页岩气特征、挑战及前景(一)[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(6): 689–701.
- ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects(I) [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(6): 689–701.
- [19] 孙健. 黔北地区浅层龙马溪组页岩含气性及其控制因素 [D]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2020.
- SUN Jian. Gas in place and its controlling factors of the shallow Longmaxi shale in the northern Guizhou area[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [20] 杨光,田伟志,吕江,等. 威远构造 W202 区块龙马溪组龙₁~1 亚段页岩气储集层岩石学特征[J]. *特种油气藏*, 2021, 28(2): 34–40.
- YANG Guang, TIAN Weizhi, LYU Jiang, et al. Petrological characteristics of shale gas reservoirs in Long₁ sub-member of Longmaxi Formation in W202 block of Weiyuan structure[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021, 28(2): 34–40.
- [21] 云南省地质矿产局. 云南岩相古地理图集 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 1995.
- [22] 尚福华,苗科,朱炎铭,等. 复杂构造区页岩孔隙结构、吸附特征及其影响因素[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(2): 269–282.
- SHANG Fuhua, MIAO Ke, ZHU Yanming, et al. Shale pore structure, adsorption characteristics, and influencing factors in complex structural areas[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 269–282.
- [23] 汪正江,余谦,杨平,等. 川滇黔邻区龙马溪组页岩气富集主控因素与勘探方向[J]. *沉积与特提斯地质*, 2018, 38(3): 1–15.
- WANG Zhengjiang, YU Qian, YANG Ping, et al. The main controlling factors of shale gas enrichment and exploration prospect areas in the Sichuan-Yunnan-Guizhou border areas, southwestern China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2018, 38(3): 1–15.
- [24] 赵迪斐,焦伟伟,魏源,等. 页岩储层成岩作用及其对储层脆性的影响: 以渝西地区五峰组—龙马溪组深层页岩为例[J]. *沉积学报*, 2021, 39(4): 811–825.
- ZHAO Difei, JIAO Weiwei, WEI Yuan, et al. Diagenesis of a shale reservoir and its influence on reservoir brittleness: Taking the deep shale of the Wufeng-Longmaxi Formation in western Chongqing as an example[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(4): 811–825.