

黔西地区石炭系页岩气成藏地质特征及 含气性影响因素

姜秉仁¹, 邓恩德², 杨通保³, 韩明辉¹, 马子杰¹

1. 贵州省煤层气页岩气工程技术研究中心, 贵阳 550016;

2. 贵州盘江煤电集团技术研究院有限公司, 贵阳 550081;

3. 贵州省煤田地质局, 贵阳 550081

摘要: 石炭系旧司组是贵州省发育的一套重要富有机质页岩层系, 尚未取得页岩气勘探开发突破。为深入研究旧司组页岩气成藏地质特征, 分析其含气性影响因素, 选取黔西地区旧司组钻井岩心及野外露头样品为研究对象, 综合运用有机地球化学、X-射线衍射、覆压孔渗、场发射扫描电镜、液氮吸附、现场解吸、高压等温吸附等实验手段开展系统研究。旧司组泥页岩有机质类型以 II 型为主, 有机碳含量较高, 处于过成熟早期阶段; 矿物组成以石英和黏土矿物为主, 脆性矿物含量高, 有利于后期压裂改造; 储层为特低孔、特低渗, 微观孔隙类型包括粒间孔、粒内孔、有机质孔及微裂缝 4 类, 微观孔隙孔径较小, 纳米级孔隙非常发育, 比表面积和总孔体积较大, 具备较好的页岩气富集与保存条件; 现场解吸总含气量较高, 平均为 1.95 m³/t, 吸附能力较强, 吸附气量平均为 3.10 m³/t, 显示出良好的含气性; 泥页岩吸附气量与 TOC、R_o、黏土矿物含量、孔隙度、比表面积及总孔体积呈较好的正相关性, 与平均孔径呈负相关。

关键词: 页岩气; 成藏特征; 含气性; 旧司组; 石炭系; 黔西地区

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

Geological conditions and controls of gas content of Carboniferous shale gas reservoirs in western Guizhou

JIANG Bingren¹, DENG Ende², YANG Tongbao³, HAN Minghui¹, MA Zijie¹

1. Guizhou Provincial CBM and Shale Gas Engineering Research Center, Guiyang, Guizhou 550081, China;

2. Guizhou Panjiang Coal Power Group Technology Research Institute Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550081, China

3. Coal Mine Exploration of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550081, China

Abstract: The Carboniferous Jiusi Formation is an important organic-rich shale stratum developed in Guizhou province, yet no breakthrough has been achieved for shale gas exploration and development. To study the geological conditions and controlling factors of shale gas accumulation in the Jiusi Formation, core and outcrop samples from the western Guizhou were analyzed using a series of methods, including organic geochemistry, XRD, FE-SEM, under overburden pressure, in-situ desorption and high pressure isothermal. The organic matters in the Jiusi shale are primarily type II kerogen with a high organic carbon content, and are at the early stage of over maturity. Quartz and clays are the dominant minerals. The brittle mineral content is high, which is conducive to hydraulic fracturing. The reservoir is characterized by ultra-low porosity and permeability. There are mainly inter- and intragranular pores, organic pores, and micro-cracks. Small pore diameter, well-developed nano-scale pores, big specific surface area and total pore volume provide favorable conditions for shale gas enrichment and preservation. High in-situ desorption gas content (with an average value of 1.95 m³/t) and strong adsorption capacity (with a mean value of 3.10 m³/t) suggest good potential for shale gas. The adsorbed gas quantity is positively correlated with TOC, R_o, clay mineral content, porosity, specific surface area and total pore volume, and negatively correlated with average pore size.

Key words: shale gas; accumulation characteristics; gas-bearing property; Jiusi Formation; Carboniferous; western Guizhou

收稿日期: 2021-12-22; 修订日期: 2022-05-16。

作者简介: 姜秉仁 (1983—), 男, 高级工程师, 从事非常规天然气勘探开发工作。E-mail: 398696980@qq.com。

通信作者: 邓恩德 (1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事非常规油气地质研究工作。E-mail: pjmdjtdd@foxmail.com。

基金项目: 贵州省地质勘查基金项目 (2018-01 号), 国家科技重大专项 (2016ZX05034004-007) 和贵州省应用基础研究计划重大项目 (黔科合 JZ 字 [2014] 2005) 联合资助。

页岩气是一种主要以吸附态、游离态等方式赋存于暗色泥页岩中的非常规天然气^[1-2],相较于石油和煤等化石燃料,页岩气具有能量密度大、热值较高和燃烧产物清洁等优势,被认为是一种清洁能源^[3-4]。自 2009 年实施第一口页岩气参数井以来,我国页岩气逐步进入实质性勘探开发阶段,上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组海相页岩气在重庆涪陵、四川长宁—威远等地区成功实现商业化开发,上三叠统延长组陆相页岩气在鄂尔多斯盆地实施的多口钻井中获得工业气流^[5-6]。贵州地区震旦系至三叠系发育多套富有机质页岩层系,目前开展的页岩气勘探开发研究工作层系主要为志留系龙马溪组和二叠系龙潭组^[7-8],在黔北正安页岩气区块获得海相龙马溪组页岩气工业气流突破,在黔北金沙和黔西盘县等地区获得海陆过渡相龙潭组良好含气显示。

石炭系旧司组作为贵州省页岩气赋存的主要层系之一,在黔西地区广泛发育,资源潜力较大^[9]。六盘水市钟山区水页 1 井在钻至旧司组时见到良好的页岩气显示,对含气异常层段进行试气,日产气量高达 20 000 m³;六盘水市高新区黔水地 1 井在未经压裂改造的情况下获得了稳定页岩气流^[10],均显示出该地区石炭系具有良好的页岩气勘探开发潜力。目前针对石炭系旧司组页岩气赋存机理及成藏特征开展研究工作较少,主要围绕旧司组沉积环境、有机地化特征、有利区优选及勘探潜力等方面进行了少量研究工作^[11-12],缺少对旧司组富有机质泥页岩发育特征、含气特点及含气性影响因素方面的系统研究。本文以黔西地区石炭系旧司组钻井岩心样品及野外露头样品为研究对象,基于有机地球化学、X-射线衍射(XRD)、覆压孔渗、场发射扫描电镜(FE-SEM)、液氮吸附、含气量现场解吸和高压等温吸附等实验测试手段,获取页岩气发育地质特征参数,分析页岩气成藏地质特征,并探讨泥页岩含气性影响因素,以期丰富石炭系页岩气发育地质理论,为研究区页岩气勘探开发提供借鉴。

1 地质背景

黔西地区地处扬子板块西南缘,构造上褶皱和断裂较为发育,褶皱主要为隔挡式褶皱,展布方向以北西向为主,断裂展布方向主要为北东向和北西向^[13]。旧司组主要分布于贵州省西部地区,沉积环境在面上呈现出过渡变化的特点,沿北西方向至南东方向由陆相、海陆过渡相转变为海相,主要表

现为 5 种沉积相,分别为潟湖相、沼泽相、滨岸相、浅水陆棚相和深水陆棚相^[14-15]。在此沉积环境下,广泛发育了一套厚度变化较大的地层,厚度主要介于 0~992 m;地层岩性多样,主要为碳质页岩、深灰色页岩、泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩,偶夹硅质页岩及煤层/煤线,岩性在纵向上呈现出“碳质页岩、泥页岩、砂岩”频繁交替出现的特征,储层纵向上表现出较强的非均质性,黑色富有机质泥页岩较为发育,累计厚度变化较大,主体介于 30~100 m 之间(图 1)。

2 样品与实验

此次研究的实验样品采集于研究区内实施的页岩气参数井 SY1 井、LY1 井、QY2 井的岩心及少量的野外地质调查露头样品,岩性主要为黑色、灰黑色富有机质泥页岩。

干酪根显微组分鉴定和镜质体反射率均使用 Scope.A1 型显微光度计,有机碳含量的测定使用 CS230 型碳硫分析仪和 YQ-VII 油气显示评价仪,矿物组成分析使用 X'Pert Powder 型 X-射线衍射仪,孔隙度渗透率测试使用 POWER-PDP-200 型覆压孔隙度渗透率测量仪,场发射扫描电镜(FE-SEM)实验使用 ZEISS 公司的 MERLIN COMPACT 型场发射扫描电镜,液氮吸附实验使用 TriStar3020 型低温氮吸附仪,高压等温吸附实验使用 GAI-100 型高压气体等温吸附仪,所有测试分析工作均是依照相关国标或行业标准完成的。

3 页岩气成藏地质特征

3.1 有机地球化学

泥页岩有机地球化学参数主要包括有机质类型、有机碳含量、有机质成熟度(R_o)。页岩的有机质既是页岩气的物质来源,又是吸附态烃类气体的重要吸附介质,其类型影响生烃强度和烃类状态。有机碳含量是评价富有机质页岩生烃潜力重要指标,有机碳含量越高生烃潜力越强,有机质成熟阶段与烃类的状态和产量密切相关^[16]。

干酪根显微组分鉴定结果显示,显微组分以壳质组为主,含量大于 50%,其次为腐泥组和镜质组,及少量的惰质组;干酪根类型指数(TI)计算方法结果显示,TI 介于-10~86 之间,有机质类型以 II 型为主,并有少量 I 型和 III 型,表明有机质母质主要来源于海相的低等生物。当 TOC 含量大于 1.00%时,页岩气具备聚集成藏的条件^[17]。对旧司组泥页岩样品进行有机碳含量测试,结果显示,

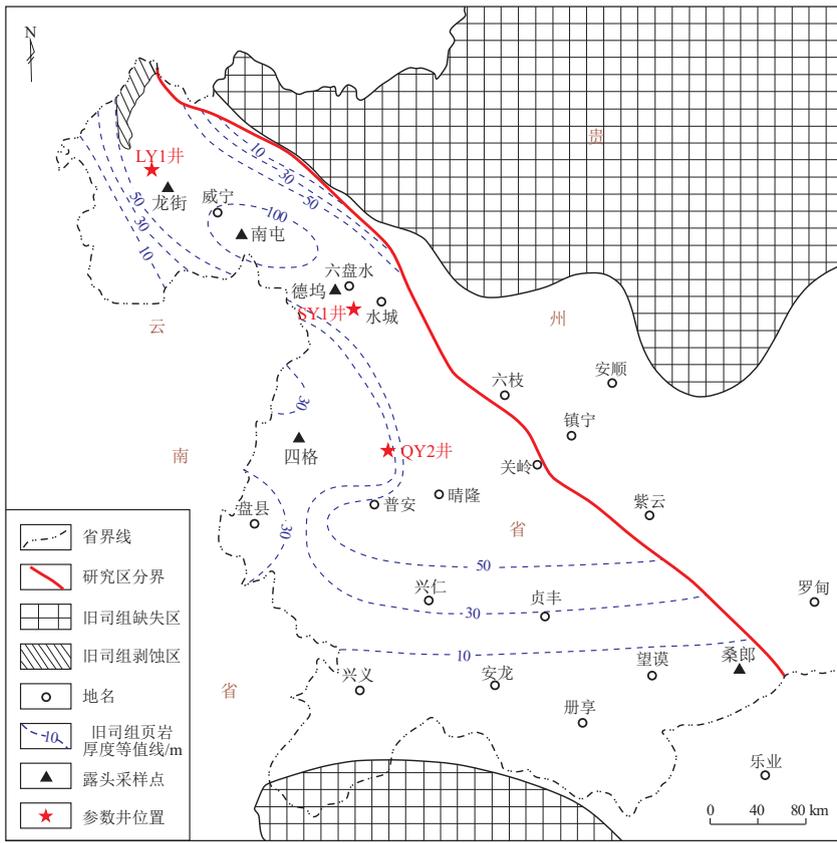


图1 黔西地区研究区石炭系旧司组页岩厚度等值线及采样位置

Fig.1 Shale thickness contours of Carboniferous Jiusi Formation and sampling location of study area in western Guizhou

TOC 含量介于 0.76%~4.16% 之间, 平均为 1.86%, 主体上介于 1%~4% 之间, 其中 TOC 含量大于 1% 的样品数占样品总数的 88.46%, TOC 含量大于 2% 的样品数占样品总数的 57.69%; LY1 井纵向上随深度的增加 TOC 呈增大的趋势 (图 2), 整体而言旧司组 TOC 含量较高, 优质页岩段位于下部, 具备

良好的页岩气发育条件。通过测定有机质镜质体反射率 (R_o) 来反映有机质成熟度, 实验结果显示, R_o 介于 1.69%~3.16% 之间, 平均为 2.36%, 主体上在 2.00%~3.00% 范围内, 处于过成熟早期阶段, II 型干酪根在过成熟阶段进入生干气高峰期^[18], 表明旧司组生成气态烃的能力较强。

3.2 矿物组成

通过 X-射线衍射实验分析泥页岩样品矿物组成, 实验结果显示, 泥页岩矿物成分主要为石英和黏土矿物, 少量的长石、方解石和黄铁矿 (图 3a)。其中石英含量最高, 介于 22.11%~67.00% 之间, 平均为 50.62%; 黏土矿物含量介于 26.00%~54.53% 之间, 平均为 39.20%; 长石含量介于 0~16.82% 之间, 平均为 4.49%; 方解石含量介于 0~22.43%, 平均为 3.96%; 黄铁矿含量介于 0~5.00%, 平均为 1.73%。整体而言, 泥页岩矿物组成中脆性矿物含量较高, 有利于页岩气开发过程中的压裂改造。

黏土矿物成分中伊利石含量最高, 其次为蒙脱石和绿泥石, 及一定量的高岭石和伊/蒙混层 (图 3b)。其中伊利石含量介于 12.90%~67.00%, 平均为 40.79%; 蒙脱石含量介于 0~55.56%, 平均为 20.33%; 绿泥石含量介于 0~47.83%, 平均为 19.73%;

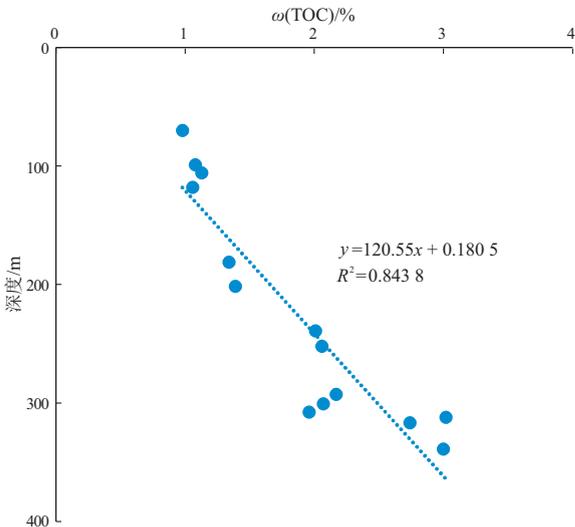


图2 黔西地区 LY1 井 TOC 含量随深度变化特征

Fig.2 TOC variation with depth of well LY 1 in western Guizhou

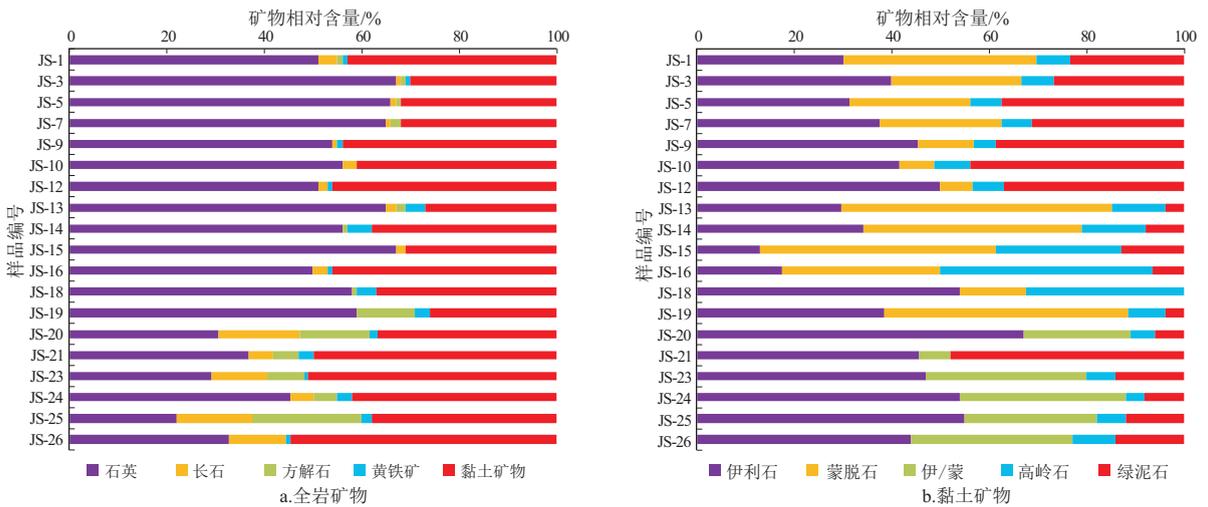


图 3 黔西地区研究区石炭系旧司组矿物成分特征

Fig.3 Mineral composition of Carboniferous Jiusi Formation of study area in western Guizhou

高岭石含量介于 0~43.48%，平均为 10.96%，伊/蒙混层含量介于 0~34.00%，平均为 8.19%。蒙脱石在碱性和高温条件下向伊利石和绿泥石转化，伊利石为富含 K^+ 的水介质环境、绿泥石为富含 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 的水介质环境，表明旧司组沉积时期及埋藏成岩过程中总体上为碱性高温环境，有利于富含有机质泥页岩的富集和保存^[19-20]。

脆性指数是反映页岩可压裂性的一个直观指标，泥页岩矿物成分中的石英、长石、方解石等脆性矿物在外力作用下极易产生裂缝，有利于页岩气的开发。参考中国海相页岩气矿物组分脆性指数方法^[21]计算旧司组泥页岩样品的脆性指数，公式如下：

$$BRIT = \frac{V_{\text{石英}} + V_{\text{长石}} + V_{\text{碳酸盐矿物}}}{V_{\text{全部矿物}}} \times 100\%$$

式中： $BRIT$ 为脆性指数； $V_{\text{石英}}$ 为石英含量； $V_{\text{长石}}$ 为长石含量； $V_{\text{碳酸盐矿物}}$ 为方解石、白云石等碳酸盐矿物含量； $V_{\text{全部矿物}}$ 为所有矿物含量之和。通过上述脆性指数公式计算实验样品脆性指数，结果显示旧司组泥页岩样品脆性指数介于 44.52%~71.00% 之间，平均为 59.07%，脆性指数整体较高，有利于页岩气开发时进行压裂改造。

3.3 储集物性

3.3.1 孔隙度和渗透率

使用覆压孔渗方法测试旧司组页岩的孔隙度和渗透率，测试的样品均取自参数井富有机质泥页岩。实验测试结果显示，页岩有效孔隙度介于 0.96%~4.21% 之间，平均为 2.15%，渗透率介于 $(0.00218 \sim 0.19001) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间，平均为

$0.09987 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，页岩的孔隙度和渗透率均非常低，表现为特低孔、特低渗储层，有机质生成的烃类气体较难运移，有利于页岩气的富集与保存。

3.3.2 微观孔隙类型

泥页岩的微观孔隙不仅能为烃类气体提供大量的储集空间，而且对泥页岩储层的储集性能有重要影响^[22]。近年来，国内外众多学者对页岩储层微观孔隙类型进行了研究，对孔隙类型的划分及成因进行分析探讨，其中孔隙分类方案最具代表性的有 SLATT 和 O'BRIEN 六分法^[23-25]。为研究黔西地区石炭系旧司组泥页岩微观孔隙类型，笔者采用氩离子抛光仪对样品进行处理，使用场发射扫描电镜定性分析泥页岩微观孔隙特征。在结合前人研究成果的基础上，将研究区泥页岩微观孔隙划分为 4 类：粒间孔、粒内孔、有机质孔及微裂缝（图 4）。

粒间孔和粒内孔在石炭系旧司组泥页岩中最为发育。粒间孔通常发育在矿物颗粒与矿物颗粒接触的位置，主要有脆性矿物（石英、长石、方解石等）之间的孔隙（图 4a, c, e）、脆性矿物与黏土矿物间的孔隙（图 4b）、黏土矿物絮状物间产生的孔隙（图 4b），微观孔隙形态各异。粒内孔通常形成于矿物颗粒内部，在成岩过程和后期构造作用均能产生粒内孔，在镜下可观察到矿物内部产生的粒内孔（图 4a, b, d）、草莓状黄铁矿晶体形成过程产生的粒内孔（图 4c）、矿物的溶蚀作用下产生的溶蚀孔（图 4f）。

有机质在生成烃类气体的过程中会在有机质表面产生有机质气泡孔，镜下可观察到大量的有机质气泡孔（图 4d, e），表明石炭系旧司组富有机质

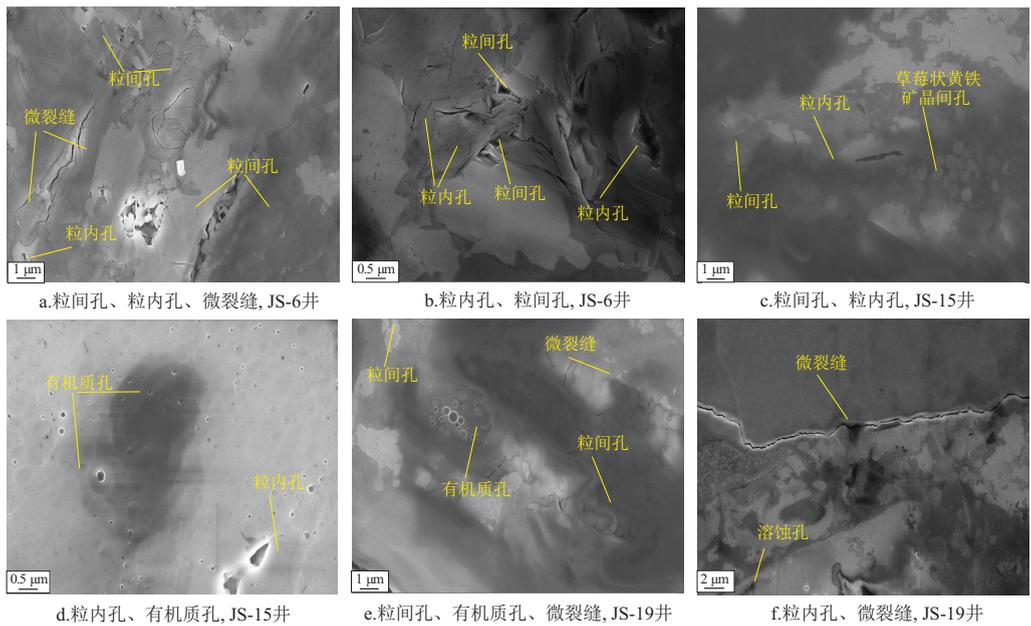


图4 黔西地区旧司组泥页岩样品场发射扫描电镜下微观孔隙类型及特征

Fig.4 FE-SEM observations of pore types and characteristics of shale from Jiusi Formation, western Guizhou

泥页岩具有较强的生烃潜力,同时,有机质孔的大量发育也为烃类气体赋存提供充足的空间。此外,在成岩和后期改造过程中会产生大量的微裂缝,镜下可观察到微裂缝较为发育(图4a, e, f),微裂缝的发育能够为油气提供存储空间及运移通道,同时有利于页岩气的成藏及后期压裂改造。

3.3.3 微观孔隙结构

泥页岩微观孔隙结构参数主要包括比表面积、总孔体积及平均孔径等,通过液氮吸附实验研究旧司组泥页岩样品的微观孔隙结构特征。页岩的比表面积和总孔体积分别采用 BET 方程、BJH 法计算。实验结果表明,旧司组泥页岩的平均孔径介于 3.15~7.68 nm 之间,平均为 4.88 nm,以中孔为主; BET 比表面积介于 10.853~30.287 m²/g 之间,平均为 19.251 m²/g,孔体积介于 0.007 8~0.031 3 m³/g 之间,平均为 0.020 4 m³/g(表1),可以看出,泥页岩的比表面积较大,能够为吸附气的赋存提供大量的场所。

3.4 泥页岩含气性

泥页岩含气性能是评价页岩气藏潜力大小的一个关键参数,对页岩含气性评价、有利区优选、资源量预测及计算至关重要^[26-27]。泥页岩含气性参数主要通过现场解吸、等温吸附等方法获取。现场解吸实验能够获得钻井岩心样品的总含气量,是评价泥页岩含气性最为直观的一个参数,总含气量由解吸气量、损失气量及残余气量三部分组成^[28]。等温吸附实验能够有效反映泥页岩的吸附性能,

表1 黔西地区旧司组泥页岩微观孔隙结构参数

Table 1 Pore structure parameters of shale from Jiusi Formation, western Guizhou

样品编号	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	孔体积/ (m ³ ·g ⁻¹)	平均孔径/ nm
JS-01	20.080	0.023 6	4.25
JS-03	15.245	0.016 6	5.59
JS-05	22.321	0.026 1	3.89
JS-07	30.287	0.031 3	3.15
JS-09	19.366	0.022 8	4.42
JS-12	10.853	0.007 8	7.68
JS-15	16.841	0.015 5	5.20
JS-16	19.016	0.019 1	4.86

通过饱和吸附气量来予以度量,饱和吸附气量越大吸附性能越好。

3.4.1 现场解吸

现场解吸实验的泥页岩样品均取自参数井岩心,样品到达地面及时装罐,减少在空气中暴露的时间。解吸气量均是在钻井现场使用仪器测得,泥页岩样品装罐后开始解吸,解吸初期定以 5 min 间隔记录解吸气量,随着解吸气量减少逐步延长记录时间的间隔,连续解吸 8 h 后可根据解吸气量的大小适当调整时间间隔,当解吸气量变化很细微的时候,结束解吸,获取解吸气量;通过 USBM 法直线趋势拟合法获取损失气量;最后将样品送至实验室获取残余气量(图5)。对研究区内实施的 SY1 井、LY1 井、QY2 井 3 口页岩气参数井岩心样品开展含气量现场解吸实验,结果显示,旧司组富有机质泥

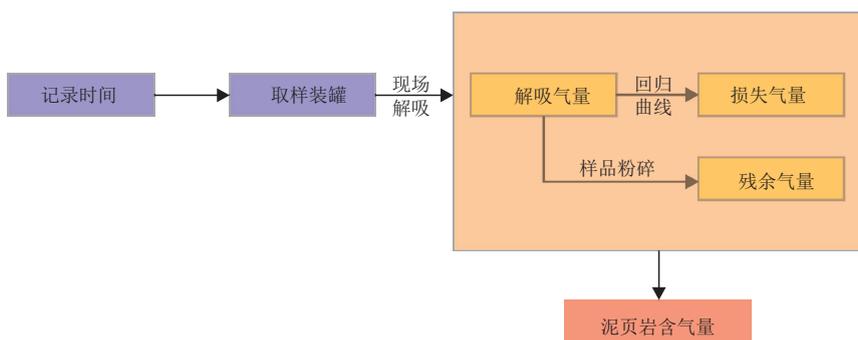


图5 泥页岩含气量现场解吸测试流程

Fig.5 Flow chart of in-situ desorption test for shale gas content

页岩现场解吸总含气量介于 1.37~2.94 m³/t 之间, 平均为 1.95 m³/t (表 2), 整体显示出较高的含气量, 达到页岩气工业开发的标准^[29]。

3.4.2 等温吸附

通过等温吸附实验分析旧司组富有机质泥页岩的吸附能力大小, 一定程度上模拟泥页岩样品对甲烷气体的吸附能力^[30]。此次等温吸附实验测试温度为 30 ℃, 共测试 8 个平衡点, 最大压力为 13 MPa, 吸附介质为甲烷气体。通过实验获取每个压力对应的吸附气量数据, 将压力和吸附气量使用

Langmuir 方程曲线拟合 (图 6), 获得饱和和吸附气量。结果显示, 旧司组泥页岩的饱和吸附气量介于 1.58~4.52 m³/t 之间, 平均为 3.10 m³/t, Langmuir 压力介于 1.76~2.55 MPa 之间, 平均为 1.99 MPa, 吸附气量总体上较高。从实验样品的等温吸附和有机碳含量测试结果可以看出 (图 6), TOC 含量越高, 吸附气量越大。如样品 JS-7 至 JS-12, 随着 TOC 含量降低, 吸附气量呈变小的趋势, 表现出旧司组泥页岩对烃类气体具备较强的吸附能力, 且与 TOC 含量呈良好的正相关性。

表 2 黔西地区石炭系旧司组泥页岩现场解吸总含气量

Table 2 Total gas content of in-situ desorption experiment of shale from Jiusi Formation, western Guizhou

样品编号	井名	深度/m	含气量/(m ³ ·t ⁻¹)	样品编号	井名	深度/m	含气量/(m ³ ·t ⁻¹)	样品编号	井名	深度/m	含气量/(m ³ ·t ⁻¹)
JS-01	SY1 井	705.17	2.35	JS-12	LY1 井	252.35	1.95	JS-19	QY2 井	671.00	1.37
JS-03	SY1 井	716.26	1.98	JS-13	LY1 井	292.92	1.70	JS-20	QY2 井	702.80	1.41
JS-05	SY1 井	750.28	2.49	JS-14	LY1 井	300.90	1.61	JS-21	QY2 井	725.56	1.58
JS-07	SY1 井	780.15	2.94	JS-15	LY1 井	307.80	2.05	JS-23	QY2 井	736.21	1.90
JS-09	SY1 井	816.22	2.17	JS-16	LY1 井	312.21	1.82	JS-24	QY2 井	746.16	2.08
JS-10	LY1 井	239.38	1.82	JS-18	LY1 井	316.83	2.00	JS-26	QY2 井	762.05	1.88

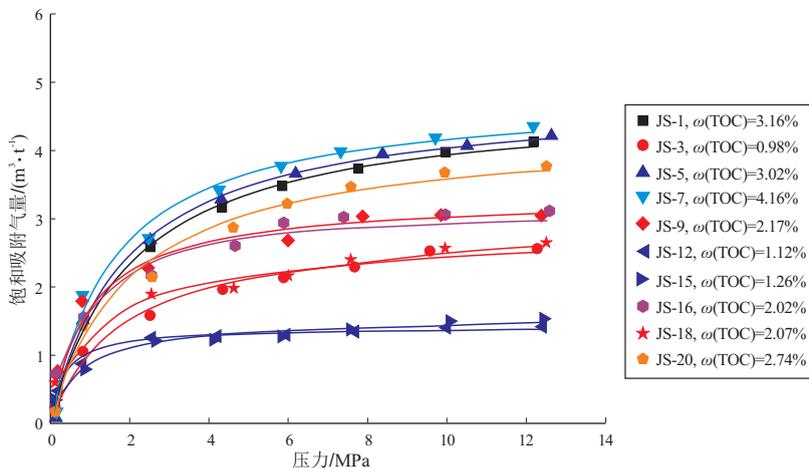


图 6 黔西地区旧司组泥页岩样品等温吸附曲线

Fig.6 Isotherm adsorption curves of shale from Jiusi Formation, western Guizhou

4 泥页岩含气性影响因素

泥页岩的含气性影响因素较多,主要包括有机地化特征、矿物成分、储集物性、孔隙结构等^[31-32]。此次研究通过分析有机碳含量、有机质成熟度、黏土矿物和石英、孔隙度、平均孔径、比表面积、总孔体积等参数与泥页岩饱和和吸附气量之间的关系,探讨泥页岩含气性的影响因素。

4.1 有机碳含量

泥页岩中有机碳含量对泥页岩吸附气量具有直接的影响,同时也是影响总含气量最主要的因素,两者表现出很好的正相关性^[31-32]。通过对旧司组泥页岩样品测试数据分析表明(图 7),饱和吸附气量随着 TOC 含量的增加呈增大的趋势,两者具有良好的正相关性,相关性系数 R^2 达 0.909 1;同时,结合表 2 中现场解吸总含气量数据分析与 TOC 含量的关系,可以看出随着 TOC 含量增加,泥页岩的总含气量表现出增大的趋势,且两者正相关性较好(图 7)。整体而言,TOC 含量对旧司组泥页岩含气性具有重要影响,同时有部分数据点未遵循上述递增规律。可见,TOC 含量并不是唯一影响因素,还存在其他因素对泥页岩含气性产生影响。图 7 中两条拟合曲线交叉点处 TOC 含量约为 2.5%, TOC 含量大于 2.5% 的区间,泥页岩总含气量约大于 $2 \text{ m}^3/\text{t}$ 、饱和吸附气量约大于 $3 \text{ m}^3/\text{t}$; TOC 含量小于 2.5% 的区间,总含气量和饱和吸附气量相对偏低。总体而言,TOC 含量为 2.5% 可以作为预测研究区旧司组页岩气勘探开发甜点层段的界限值。

4.2 有机质成熟度

有机质成熟度 (R_o) 对吸附气量大小同样存在

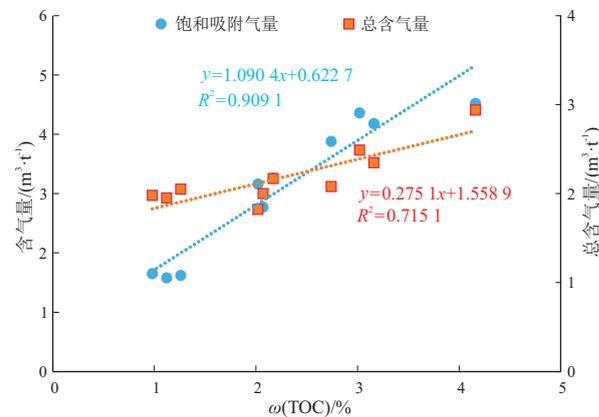


图 7 黔西地区旧司组泥页岩 TOC 含量与饱和吸附气量、总含气量关系

Fig.7 Relationship between TOC content and adsorbed gas volume, total gas content of shale from Jiushi Formation, western Guizhou

一定的影响,但看法不一。有研究认为,随着 R_o 的增加,富有机质泥页岩中的有机质热演化生烃从而产生大量纳米级孔隙,导致比表面积增加,吸附能力也随之增加^[32-33]。通过旧司组泥页岩 TOC 含量、 R_o 与吸附气量关系图(图 8)分析可知,部分实验数据点 R_o 与吸附气量表现出一定的正相关性,可能是由于有机质生成烃类气体时产生了大量的纳米级孔隙,提供更多的吸附介质;但是,可以观察到一些数据点 R_o 虽高但吸附气量较低,结合 TOC 数据进行综合考虑,发现随着 R_o 的增加,TOC 含量逐步降低,这可能是由于有机质成熟度的增加只形成了少量的有机质孔隙,并未改善有机质的吸附能力,而 TOC 的下降却使得泥页岩的吸附能力快速降低,从而使一些实验样品表现出高 R_o 、低 TOC 含量、低吸附气量的特征。

4.3 矿物成分

矿物成分是影响泥页岩吸附气量的另一个重要因素,矿物成分对泥页岩吸附气量的影响主要体现在黏土矿物含量的影响。通过黏土矿物质量分数、石英质量分数与吸附气量的关系(图 9)可以看出,泥页岩黏土矿物质量分数大小与泥页岩吸附气量大小呈现出良好的正相关性,整体上表现为黏土矿物质量分数越大,吸附气量越大。石英质量分数与吸附气量大小呈现出较低的负相关性,随着石英质量分数增大,吸附气量呈减小的趋势,但相关性不是很明显,说明石英含量对吸附气量大小影响较小。通过对旧司组泥页岩石英含量

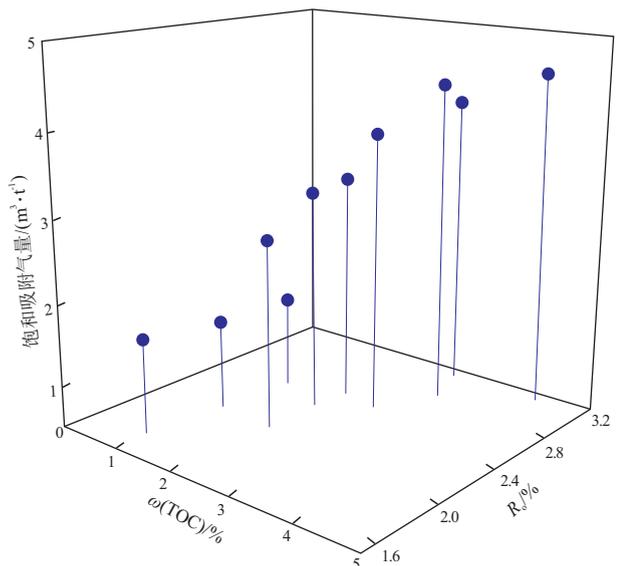


图 8 黔西地区旧司组泥页岩 TOC 含量、 R_o 与吸附气量关系

Fig.8 Relationship between TOC content, R_o and adsorbed gas volume of shale from Jiushi Formation, western Guizhou

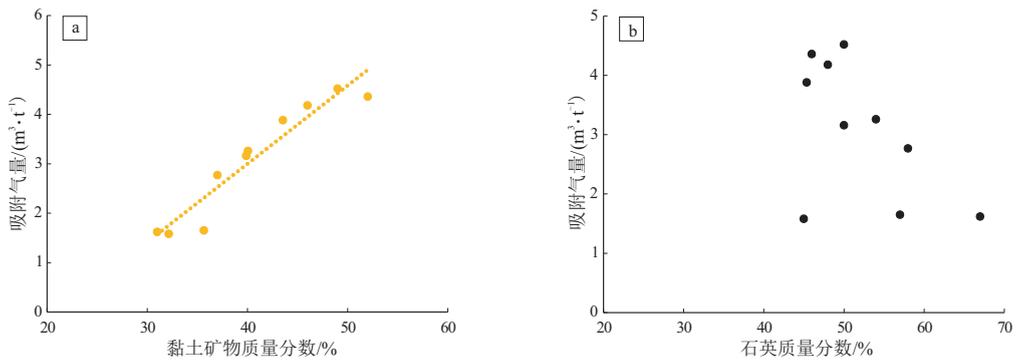


图9 黔西地区石炭系旧司组泥页岩黏土矿物、石英质量分数与吸附气量关系

Fig.9 Relationship between mass fraction of clay mineral and quartz and adsorbed gas volume of shale from Jiusi Formation, western Guizhou

与 TOC 含量相关性分析,发现两者无明显相关性(图 9b),说明该样品中的石英来源以陆源碎屑为主^[34]。等温吸附实验的泥页岩样品矿物组成中脆性矿物含量较高,脆性指数介于 53.00%~69.00%之间,平均为 60.50%,反映旧司组泥页岩脆性较好,有利于后期压裂改造。

4.4 孔隙度

泥页岩的孔隙度不仅影响泥页岩的总含气量,而且对吸附气量也存在一定的影响。通过孔隙度与吸附气量的关系(图 10)可以看出,随着孔隙度的增大,泥页岩吸附气量呈现出增大的趋势,两者表现出较好的正相关性,可能是由于泥页岩孔径主要分布在 5 nm 以内的中孔,孔隙度增加说明了岩石比表面积随之增加,可为吸附气提供更多的吸附表面。

4.5 孔隙结构参数

泥页岩的微观孔隙既能为页岩气提供大量的存储空间,又能增强泥页岩对烃类气体的吸附能力。从平均孔径、比表面积、总孔体积与吸附气量关系图(图 11)中可以看出,泥页岩平均孔径与比表面积呈负相关性,平均孔径越小,比表面积越大,大量发育的纳米级孔隙能够提供更大的比表面积;

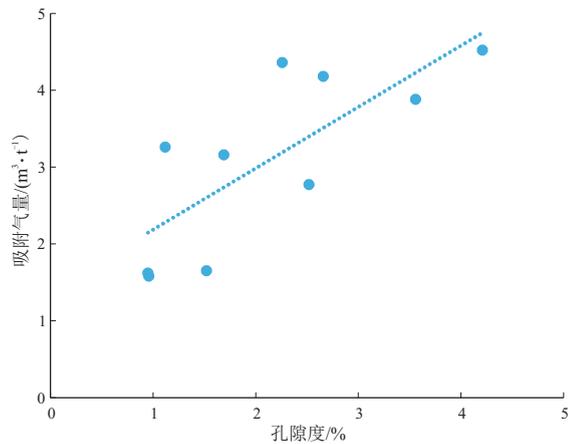


图 10 黔西地区石炭系旧司组泥页岩孔隙度与吸附气量关系

Fig.10 Relationship between porosity and adsorbed gas of shale from Jiusi Formation, western Guizhou

平均孔径与吸附气量呈负相关性,说明孔径越小越有利于页岩气的储集;泥页岩比表面积、总孔体积与吸附气量呈正相关性,表明泥页岩的比表面积和总孔体积越大,能够为吸附气提供更大的赋存空间,泥页岩的吸附气量越高。

5 结论

(1) 黔西地区石炭系旧司组泥页岩有机质类

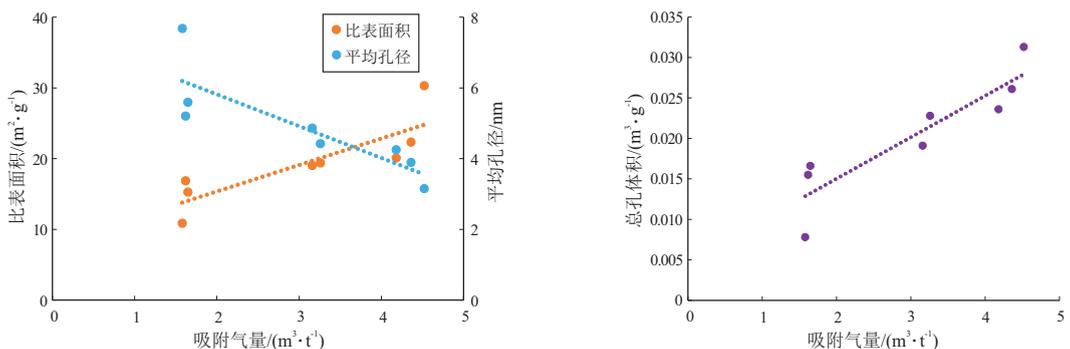


图 11 黔西地区石炭系旧司组泥页岩孔径结构参数与吸附气量关系

Fig.11 Relationship between pore structure parameters and adsorbed gas volume of shale from Jiusi Formation, western Guizhou

型以Ⅱ型为主,有机碳含量较高(TOC 含量主体上介于 1.00%~4.00%之间),有机质处于过成熟早期阶段,页岩气发育潜力较大;矿物成分以石英和黏土矿物为主,脆性矿物含量高,有利于后期的压裂改造。

(2)研究区石炭系旧司组为特低孔、特低渗储层,微观孔隙类型包括粒间孔、粒内孔、有机质孔及微裂缝 4 类,微观孔隙以中孔为主;比表面积和总孔体积较大,平均孔径较小,有利于页岩气的富集与保存。

(3)泥页岩现场解吸总含气量较高,介于 1.37~2.94 m³/t 之间,平均为 1.95 m³/t,均达到工业开发的最低标准;等温吸附实验揭示泥页岩吸附能力较强,吸附气量介于 1.58~4.52 m³/t 之间,平均为 3.10 m³/t,总体上显示出良好的含气性。

(4)泥页岩吸附气量与有机碳含量及黏土矿物含量呈良好的正相关。泥页岩孔隙度越大,泥页岩吸附气量越大;泥页岩的吸附气量与泥页岩比表面积、总孔体积呈正相关,比表面积和总孔体积越大,吸附气量越高;泥页岩吸附气量与平均孔径呈负相关,说明孔径越小的纳米级孔隙越有利于页岩气的储集。

(5)研究区石炭系旧司组下部层段泥页岩具有 TOC 含量较高、现场解吸总含气量和饱和吸附气量较大、脆性较好的特点,是旧司组页岩气勘探开发潜在的优质甜点层段。

参考文献:

- [1] 张金川,金之钧,袁明生.页岩气成藏机理和分布[J].天然气工业,2004,24(7):15-18.
ZHANG Jinchuan, JIN Zhijun, YUAN Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 15-18.
- [2] 杜伟,胡宗全,刘光祥,等.四川盆地及周缘上奥陶统五峰组岩相特征[J].石油实验地质,2020,42(3):398-404.
DU Wei, HU Zongquan, LIU Guangxiang, et al. Lithofacies of Upper Ordovician Wufeng Formation in Sichuan Basin and its periphery [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(3): 398-404.
- [3] ZHANG Qian, LITTKER R, ZIEGER L, et al. Ediacaran, Cambrian, Ordovician, Silurian and Permian shales of the Upper Yangtze Platform, South China: deposition, thermal maturity and shale gas potential [J]. International Journal of Coal Geology, 2019, 216: 103281.
- [4] 邓恩德,易同生,颜智华,等.海陆过渡相页岩气聚集条件及勘探潜力研究:以黔北地区金沙参 1 井龙潭组为例[J].中国矿业大学学报,2020,49(6):1166-1181.
DENG Ende, YI Tongsheng, YAN Zhihua, et al. Accumulation con-

dition and shale gas potential of the marine-terrestrial transitional facies: a case study of Jinshacan 1 well of Longtan Formation in northern Guizhou [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(6): 1166-1181.

- [5] 郭旭升,胡东风,段金宝.中国南方海相油气勘探展望[J].石油实验地质,2020,42(5):675-686.
GUO Xusheng, HU Dongfeng, DUAN Jinbao. Marine petroleum exploration in South China [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 675-686.
- [6] 聂海宽,何治亮,刘光祥,等.中国页岩气勘探发现状与优选方向[J].中国矿业大学学报,2020,49(1):13-35.
NIE Haikuan, HE Zhiliang, LIU Guangxiang, et al. Status and direction of shale gas exploration and development in China [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(1): 13-35.
- [7] 葛明娜,庞飞,包书景.贵州遵义五峰组—龙马溪组页岩微观孔隙特征及其对含气性控制:以安页 1 井为例[J].石油实验地质,2019,41(1):23-30.
GE Mingna, PANG Fei, BAO Shujing. Micro pore characteristics of Wufeng-Longmaxi shale and their control on gas content: a case study of well Anye 1 in Zunyi area, Guizhou province [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(1): 23-30.
- [8] 邓恩德,颜智华,姜秉仁,等.黔西地区上二叠统龙潭组海陆交互相页岩气储层特征[J].石油实验地质,2020,42(3):467-476.
DENG Ende, YAN Zhihua, JIANG Bingren, et al. Reservoir characteristics of marine-continental shale gas in Upper Permian Longtan Formation, western Guizhou province [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(3): 467-476.
- [9] 杨瑞东,程伟,周汝贤.贵州页岩气源岩特征及页岩气勘探远景分析[J].天然气地球科学,2012,23(2):340-347.
YANG Ruidong, CHENG Wei, ZHOU Ruxian. Characteristics of organic-rich shale and exploration area of shale gas in Guizhou province [J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(2): 340-347.
- [10] 陈相霖,苑坤,林拓,等.四川岷紫罗裂陷槽西北缘(黔水地 1 井)发现上古生界海相页岩气[J].中国地质,2021,48(2):661-662.
CHEN Xianglin, YUAN Kun, LIN Tuo, et al. Discovery of shale gas within Upper Paleozoic marine facies by Qian Shuidi-1 well in the northwest of Yaziluo rift trough, Sichuan province [J]. Geology in China, 2021, 48(2): 661-662.
- [11] 秦琴,龙成雄,唐显贵.黔西南地区石炭系旧司组页岩沉积环境分析[J].中国煤炭地质,2016,28(4):35-40.
QIN Qin, LONG Chengxiong, TANG Xiangui. Analysis of carboniferous Jiusi Formation shale sedimentary environment in southwestern Guizhou [J]. Coal Geology of China, 2016, 28(4): 35-40.
- [12] 陈榕,苑坤,张子亚,等.黔西地区打屋坝组富有机质页岩地球化学特征及其意义[J].石油实验地质,2019,41(1):10-15.
CHEN Rong, YUAN Kun, ZHANG Ziya, et al. Geochemical characteristics of organic-rich shale in the Dawuba Formation, western Guizhou province [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(1): 10-15.
- [13] 贵州省地质矿产局.贵州省区域地质志[M].北京:地质出版

- 社,1987.
- Guizhou Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology of Guizhou province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [14] 秦文,唐显贵,秦琴,等.黔西南区旧司组黑色页岩地球化学及储层特征分析[J].断块油气田,2014,21(2):181-186.
- QIN Wen, TANG Xiangui, QIN Qin, et al. Analysis on reservoir characteristics and geochemistry of Jiusi Formation potential shale in southwestern Guizhou [J]. Fault - Block Oil & Gas Field, 2014, 21(2): 181-186.
- [15] 苑坤,陈榕,林拓,等.贵州南部晚石炭世沉积环境与古地理特征[J].石油实验地质,2019,41(1):38-44.
- YUAN Kun, CHEN Rong, LIN Tuo, et al. Petrological characteristics and sedimentary environment in the southern Guizhou during the Late Carboniferous [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(1): 38-44.
- [16] 郭少斌,王子龙,马啸.中国重点地区二叠系海陆过渡相页岩气勘探前景[J].石油实验地质,2021,43(3):377-385.
- GUO Shaobin, WANG Zilong, MA Xiao. Exploration prospect of shale gas with Permian transitional facies of some key areas in China [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(3): 377-385.
- [17] 聂海宽,唐玄,边瑞康.页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J].石油学报,2009,30(4):484-491.
- NIE Haikuan, TANG Xuan, BIAN Ruikang. Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4): 484-491.
- [18] 林腊梅,张金川,刘锦霞,等.页岩气勘探目标层段优选[J].地学前缘,2012,19(3):259-263.
- LIN Lamei, ZHANG Jinchuan, LIU Jinxia, et al. Favorable depth zone selection for shale gas prospecting [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(3): 259-263.
- [19] 李佳昱,梁婷,朱小二,等.重庆涪陵二龙口剖面 P—T 界线附近黏土矿物特征及其古环境意义[J].地质学报,2021,95(3):868-882.
- LI Jiayu, LIANG Ting, ZHU Xiaoe, et al. Palaeoenvironmental implications of clay mineral characteristics in the Permian-Triassic transitional succession in the Erlongkou section, Fuling, Chongqing [J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(3): 868-882.
- [20] 王嵩岳,胡宗全,包汉勇,等.四川盆地上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩关键矿物成岩演化及其控储作用[J].石油实验地质,2021,43(6):996-1005.
- WANG Ruyue, HU Zongquan, BAO Hanyong, et al. Diagenetic evolution of key minerals and its controls on reservoir quality of Upper Ordovician Wufeng - Lower Silurian Longmaxi shale of Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(6): 996-1005.
- [21] 郭旭升.涪陵页岩气田焦石坝区块富集机理与勘探技术[M].北京:科学出版社,2014:73-106.
- GUO Xusheng. Accumulation mechanism and exploration technology of Jiaoshiba block in Fuling shale gas field [M]. Beijing: Science Press, 2014: 73-106.
- [22] 邓恩德,金军,王冉,等.黔北地区龙潭组海陆过渡相页岩微观孔隙特征及其储气性[J].科学技术与工程,2017,17(24):190-195.
- DENG Ende, JIN Jun, WANG Ran, et al. Characteristics of microscopic pore and gas storage on shale in Permian Longtan Formation, northern Guizhou [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(24): 190-195.
- [23] SLATT R M, O'BRIEN N R. Pore types in the Barnett and Woodford gas shales: contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2017-2030.
- [24] LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071-1098.
- [25] 蔡苏阳,肖七林,朱卫平,等.川南地区五峰组—龙马溪组页岩储层纳米孔隙发育特征及其控制因素:以四川盆地南部长宁双河剖面为例[J].石油实验地质,2020,42(6):920-927.
- CAI Suyang, XIAO Qilin, ZHU Weiping, et al. Characteristics and controlling factors of nano pores in shale reservoirs of Wufeng - Longmaxi formations in southern Sichuan Basin: insights from Shuanghe outcrop in Changning area [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(6): 920-927.
- [26] 聂海宽,张金川.页岩气聚集条件及含气量计算:以四川盆地及其周缘下古生界为例[J].地质学报,2012,86(2):349-361.
- NIE Haikuan, ZHANG Jinchuan. Shale gas accumulation conditions and gas content calculation: a case study of Sichuan Basin and its periphery in the Lower Paleozoic [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(2): 349-361.
- [27] 许露露,温雅茹,张森林,等.鄂西地区上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩含气性特征及保存条件[J].石油实验地质,2021,43(3):395-405.
- XU Lulu, WEN Yaru, ZHANG Yanlin, et al. Gas-bearing characteristics and preservation conditions of Upper Ordovician Wufeng - Lower Silurian Longmaxi shale in western Hubei [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(3): 395-405.
- [28] 唐颖,张金川,刘珠江,等.解吸法测量页岩含气量及其方法的改进[J].天然气工业,2011,31(10):108-112.
- TANG Ying, ZHANG Jinchuan, LIU Zhujiang, et al. Use and improvement of the desorption method in shale gas content tests [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(10): 108-112.
- [29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.页岩气地质评价方法:GB/T 31483-2015[S].北京:中国标准出版社,2015:3-6.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Geological evaluation methods for shale gas: GB/T 31483 - 2015 [S]. Beijing: China Standard Press, 2015: 3-6.
- [30] 高永利,李腾,关新,等.基于重量法的页岩气高压等温吸附研究[J].石油实验地质,2018,40(4):566-572.
- GAO Yongli, LI Teng, GUAN Xin, et al. Mass method adsorption characteristics of shale gas under high pressure [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(4): 566-572.

- 因与来源探讨[J].天然气地球科学,2013,24(4):755-767.
- LI Yanjun,ZHAO Shengxian,LI Yuegang,et al.Natural gas genesis and sources in Jiulongshan gas field,northwest Sichuan Basin[J].Natural Gas Geoscience,2013,24(4):755-767.
- [20] 戴金星,倪云燕,邹才能,等.四川盆地须家河组煤系烷烃气碳同位素特征及气源对比意义[J].石油与天然气地质,2009,30(5):519-529.
- DAI Jinxing,NI Yunyan,ZOU Caineng,et al. Carbon isotope features of alkane gases in the coal measures of the Xujiahe Formation in the Sichuan Basin and their significance to gas-source correlation[J].Oil & Gas Geology,2009,30(5):519-529.
- [21] 王兰生,苟学敏,刘国瑜,等.四川盆地天然气的有机地球化学特征及其成因[J].沉积学报,1997,15(2):49-53.
- WANG Lansheng,GOU Xuemin,LIU Guoyu,et al.The organic geochemistry and origin of natural gases in Sichuan basin[J].Acta Sedimentologica Sinica,1997,15(2):49-53.
- [22] 魏国齐,董才源,谢增业,等.川西北地区 ST3 井泥盆系油气地球化学特征及来源[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(4):31-39.
- WEI Guoqi,DONG Caiyuan,XIE Zengye,et al.Oil and gas geochemical characteristics and source of Devonian of well ST3 in northwest Sichuan Basin [J].Journal of China University of Petroleum,2019,43(4):31-39.
- [23] 杨跃明,文龙,罗冰,等.四川盆地乐山—龙女寺古隆起震旦系天然气成藏特征[J].石油勘探与开发,2016,43(2):179-188.
- YANG Yueming,WEN Long,LUO Bing,et al.Hydrocarbon accumulation of Sinian natural gas reservoirs,Leshan-Longnisi paleo-high,Sichuan Basin,SW China [J].Petroleum Exploration and Development,2016,43(2):179-188.
- [24] 李平平,郭旭升,郝芳,等.四川盆地元坝气田长兴组古油藏的定量恢复及油源分析[J].地球科学,2016,41(3):452-462.
- LI Pingping,GUO Xusheng,HAO Fang,et al.Paleo-oil-reservoirs reconstruction and oil correlation of Changxing Formation in the Yuanba gas field,Sichuan Basin [J].Earth Science,2016,41(3):452-462.
- [25] 杨柳,巫芙蓉,郭鸿喜,等.川南 YJ 向斜区茅口组储层地震预测与主控因素分析[J].断块油气田,2021,28(3):363-368.
- YANG Liu,WU Furong,GUO Hongxi,et al.Reservoir seismic prediction and main controlling factors analysis of Maokou Formation in YJ Syncline area, South Sichuan Basin [J].Fault-Block Oil and Gas Field,2021,28(3):363-368.
- [26] 谢知含,侯宇,雷开强,等.XC 地区茅口组岩溶储层发育有利区预测[J].断块油气田,2021,28(2):230-234.
- XIE Zhihan,HOU Yu,LEI Kaiqiang,et al.Prediction of favorable development area of Maokou Formation karst reservoir in XC area [J].Fault-Block Oil and Gas Field,2021,28(2):230-234.
- [27] 杨恒,龚文平,郑伦举,煤系烃源岩油气生成、排出与滞留特征[J].石油实验地质,2021,43(3):498-506.
- YANG Heng,GONG Wenping,ZHENG Lunju.Characteristics of oil and gas generation, expelling and retention of coaly source rock [J].Petroleum Geology & Experiment,2021,43(3):498-506.
- [28] 肖贤明,刘德汉,傅家谟.我国聚煤盆地煤系烃源岩生烃评价与成烃模式[J].沉积学报,1996,14(S1):10-17.
- XIAO Xianming,LIU Dehan,FU Jiamo.The evaluation of coal-measure source rocks of coal-bearing basins in China and their hydrocarbon-generating models [J].Acta Sedimentologica Sinica,1996,14(S1):10-17.
- [29] 吴斌,周龙刚,潘新志,等.新疆三塘湖盆地低煤阶煤层气成因探讨[J].特种油气藏,2020,27(1):47-54.
- WU Bin,ZHOU Longgang,PAN Xinshi,et al.Discussion on genesis low coal rank coalbed methane in Santanghu Basin of Xinjiang province [J].Special Oil & Gas Reservoirs,2020,27(1):47-54.
- [30] 何发岐,董绍雄,赵兰,等.深部煤层游离气形成机理及资源意义[J].断块油气田,2021,28(5):604-608,613.
- HE Faqi,DONG Zhaoxiong,ZHAO Lan,et al.Formation mechanism and resource significance of free gas in deep coalbed [J].Fault-Block Oil and Gas Field,2021,28(5):604-608,613.

(编辑 黄娟)

(上接第 638 页)

- [31] 唐玄,张金川,丁文龙,等.鄂尔多斯盆地东南部上古生界海陆过渡相页岩储集性与含气性[J].地学前缘,2016,23(2):147-157.
- TANG Xuan,ZHANG Jinchuan,DING Wenlong,et al.The reservoir property of the Upper Paleozoic marine-continental transitional shale and its gas-bearing capacity in the southeastern Ordos Basin [J].Earth Science Frontiers,2016,23(2):147-157.
- [32] 党伟,张金川,黄潇,等.陆相页岩含气性主控地质因素:以辽河西部凹陷沙河街组三段为例[J].石油学报,2015,36(12):1516-1530.
- DANG Wei,ZHANG Jinchuan,HUANG Xiao,et al.Main-controlling geological factors of gas-bearing property of continental shale gas;a case study of member 3rd of Shahejie Formation in western Liaohe Sag [J].Acta Petrolei Sinica,2015,36(12):1516-1530.
- [33] STRAPOĆ D,MASTALERZ M,SCHIMMELMANN A,et al.Geochemical constraints on the origin and volume of gas in the New Albany shale (Devonian-Mississippian), eastern Illinois Basin [J].AAPG Bulletin,2010,94(11):1713-1740.
- [34] NIE Haikuan,HE Zhiliang,LIU Guangxiang,et al.Genetic mechanism of high-quality shale gas reservoirs in the Wufeng-Longmaxi Fms in the Sichuan Basin [J].Natural Gas Industry B,2021,8(1):24-34.

(编辑 黄娟)