

桂中坳陷下石炭统黑色页岩发育特征及页岩气勘探潜力

胡东风 魏志红 刘若冰 范志伟 韩京

中国石化勘探分公司

摘 要 位于广西壮族自治区中部的桂中坳陷石炭系具有较好的页岩气勘探前景,但优质页岩的分布、品质和勘探潜力不清制约了该区页岩气的勘探成效。为了指导该坳陷石炭系页岩气的勘探,以下石炭统鹿寨组页岩为研究对象,利用该坳陷及周缘野外露头、钻井录井、分析测试等资料,对页岩地层的分布特征、有机地球化学特征、储集特征、保存条件等进行了系统研究,落实黑色页岩发育特征,总结优质页岩展布规律,分析页岩气勘探潜力,圈定勘探有利区带。研究表明:①桂中坳陷鹿寨组页岩以深水陆棚相沉积的碳质页岩、硅质页岩为主;②鹿寨组优质页岩厚度介于 20~60 m,有机碳含量高、有机质类型好、有机质成熟度适中、脆性矿物含量高、储集物性较好、有机质孔隙发育;③柳城斜坡和宜山凹陷发育良好的区域盖层和顶底板,构造变形程度较弱,抬升剥蚀作用较弱,远离走滑性质较强的逆断层,具有良好的保存条件;④该坳陷早期地表构造所钻浅井气显示丰富、多口井获得天然气流,揭示了较好的页岩气勘探前景。结论认为,柳城斜坡带、宜山凹陷埋藏深度较大的宽缓向斜是该坳陷页岩气勘探的有利区。

关键词 桂中坳陷 早石炭世鹿寨期 页岩 厚度 有机地球化学特征 保存条件 页岩气勘探潜力 勘探有利区

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2018.10.004

Development characteristics and shale gas exploration potential of the Lower Carboniferous black shale in the Guizhong Depression

Hu Dongfeng, Wei Zhihong, Liu Ruobing, Fan Zhiwei & Han Jing
(Sinopec Exploration Company, Chengdu, Sichuan 610041, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 38, ISSUE 10, pp.28-37, 10/25/2018. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The Carboniferous shale in the Guizhong Depression of central Guangxi presents good exploration potential of shale gas, but its exploration effectiveness is restricted by the unclear distribution, quality and potential of high-quality shale. In this paper, the Lower Carboniferous Luzhai shale was taken as the research object in order to guide the exploration of Carboniferous shale gas in the Guizhong Depression. Based on the field outcrops, well drilling, well logging and test data of the Guizhong Depression and its surrounding areas, the shale formation was studied systematically based on the characteristics of distribution, organic geochemistry and reservoir, and the preservation conditions. Then, the development characteristics of black shale were confirmed and the distribution laws of high-quality shale were summarized. Finally, shale gas exploration was analyzed and the favorable exploration areas were defined. And the following research results were obtained. First, the Luzhai Fm shale in the Guizhong Depression is mainly carbonaceous shale and siliceous shale of deepwater continental shelf facies. Second, the high-quality Luzhai shale is 20–60 m thick and it is characterized by high total organic carbon, good type of organic matters, moderate maturity of organic matter, high content of brittle minerals, good reservoir property and developed pores of organic matters. Third, regional caprocks and roofs & floors are well developed in the Liucheng Slope and the Yishan Sag. They are weakly deformed, suffer from less uplift and denudation, and are far away from the strong strike-slip reverse fault, so they have good preservation conditions. Fourth, shallow wells which were drilled in the surface structures of the Guizhong Depression in the early stage present abundant gas shows, and most of them produce gas flow, which reveals a promising prospect of shale gas exploration in this area. In conclusion, the wide and gentle synclines with large burial depth in the Liucheng Slope and the Yishan Sag are the favorable areas for shale gas exploration in the Guizhong Depression.

Keywords: Guizhong Depression; Luzhai Fm of Lower Carboniferous; Shale; Thickness; Organic geochemical characteristic; Preservation conditions; Shale gas exploration potential; Favorable exploration area

基金项目: 国家科技重大专项“页岩气区带目标评价与勘探技术”(编号: 2017ZX05036)。

作者简介: 胡东风, 1964年生, 教授级高级工程师; 现任中国石化勘探分公司总地质师, 主要从事油气田勘探综合研究与技术管理工作。地址: (610041) 四川省成都市高新区吉泰路 688 号。ORCID: 0000-0001-6409-0680。E-mail: hudf.ktnf@sinopec.com

0 引言

伴随涪陵、长宁、威远等页岩气田的发现,国内众多学者在页岩气基础理论研究^[1-4]和勘探评价技术^[5-6]方面取得了诸多认识,对于中国南方复杂改造区选区和目标评价具有重要的参考意义。桂中坳陷作为南方海相页岩气勘探开发的重要潜力接替区,越来越受到石油地质学家的重视。

桂中坳陷下石炭统鹿寨组具有富有机质页岩厚度大、有机碳含量(TOC)高、有机质成熟度(R_o)高等特点^[7],且多口井见良好的天然气显示,揭示该区良好的页岩气勘探潜力。前人关于桂中坳陷鹿寨组页岩沉积环境^[8]、有机地球化学^[9]、储层特征^[10]以及保存条件^[11-12]的研究已取得部分进展,对该区页岩气勘探潜力评价具有重要参考价值。但受限于勘探程度和研究手段,桂中坳陷鹿寨组黑色页岩发育特征及勘探潜力还存在许多亟需解决的问题,主要表现为:①桂中地区早石炭世具有台盆相间的沉积格局^[13],在“槽—台”格局下页岩非均质性较强,深水陆棚相优质页岩纵向上分布位置在哪里?平面上分布规律如何?②与四川盆地早古生代海相优质页岩相比,鹿寨组优质页岩品质如何?是否也具有较好的页岩气勘探潜力?③桂中地区经历了多期的构造运动改造^[14],构造变形复杂,有利的保存区分布在哪里?目前关于这些方面的研究较为薄弱,也成为制约该区页岩气勘探成效的关键问题。

桂中坳陷前期以常规油气勘探为主,页岩气勘探尚处于起步阶段,虽然以往的很多钻井在石炭系页岩中见天然气显示^[7,15],但年代久远,大多未获取系统的页岩气评价参数和岩心资料。因此,笔者研究的资料主要取自野外露头资料和部分公开发表的地质调查井。笔者在分析桂中地区典型野外露头剖面 and 钻井资料的基础上,利用地球化学、岩石矿物以及地球物理等实验分析手段和方法,查明鹿寨组黑色页岩发育特征,总结优质页岩展布规律,分析鹿寨组页岩气勘探潜力,以期为该区下一步页岩气勘探提供依据。

1 区域地质背景

桂中坳陷位于雪峰山隆起南部,东部以龙胜—永福断裂及宾阳—大黎断裂为界,与大瑶山隆起相邻,西部以南丹—都安断裂为界,与南盘江坳陷相邻,西北以三都断裂为界,与黔南坳陷相邻,面积 4.6×10^4

km²。桂中坳陷发育 NNE—NE、NW、近 EW 与近 SN 向四组规模不等的断裂系,近 EW 与近 SN 向断裂是坳陷内的主要断裂,它控制着坳陷的主体。根据构造单元的划分,可将桂中坳陷划分为宜山凹陷、红渡凹陷、象州凹陷,马山凸起、柳江凸起、柳城斜坡,即“三凹两凸一斜坡”6个次级构造单元(图 1-a)。

研究区先后经历了早古生代褶皱基底形成、泥盆世—中三叠世陆缘裂陷、晚三叠世—早侏罗世前陆盆地形成和中侏罗世—现今陆内改造 4 大阶段,沉积了以变质岩为基底、沉积岩为生储盖层的岩性组合,地表主要分布大片石炭系和泥盆系,二叠系、三叠系多分布在向斜核部。在中泥盆世—早石炭世陆缘裂陷阶段,受海西期区域拉张应力影响,桂中坳陷发育河池—宜州、南丹—都安、龙胜—永福 3 个裂陷槽,盆地相区沉积了下石炭统鹿寨组及中泥盆统纳标组、罗富组 3 套页岩。其中,早石炭世鹿寨期以坳陷为主,随着大规模海侵作用^[16],在鹿寨期中期海平面达到最高,深水陆棚相广泛分布在坳陷内部,岩性以碳质页岩、硅质页岩为主(图 1-b),靠近北部雪峰山古陆发育滨岸—浅水陆棚相,岩性以粉砂岩、含灰泥岩为主,靠近南部马山—柳江—象州等孤立台地则发育碳酸盐台地相,岩性以石灰岩为主;中泥盆世以裂陷为主,深水陆棚相主要沿南丹—都安、龙胜—永福两个裂陷槽分布在桂中坳陷东西两侧,分布较为局限,坳陷主体则发育斜坡—浅水陆棚相。

2 黑色页岩发育特征

2.1 页岩分布特征

早石炭世鹿寨期,在晚泥盆填平补齐基础上,桂中地区出现隆坳格局,坳陷区发育浅水—深水陆棚相页岩,受构造—岩相古地理格局控制,区域上沉积了一套厚度较大的黑色页岩。鹿寨期整体呈现早期海侵晚期海退的特征,纵向上鹿寨组自下而上可划分为四段:鹿一段为浅水陆棚沉积,岩性主要为灰色泥岩夹少量浅灰色硅质岩,黏土质含量较高,自然伽马值较低;鹿二段为深水陆棚沉积,岩性主要为灰黑色薄层页岩、硅质页岩、碳质页岩,竹节石等浮游生物化石含量较高,自然伽马值稳定分布在高值区,黄铁矿以薄层、条带状富集;鹿三段、鹿四段为浅水陆棚沉积,岩性以泥岩、钙质泥岩为主,钙质夹层明显增加,竹节石迅速下降,自然伽马值较低,电阻率曲线呈现明显锯齿状,黄铁矿以团块状富集(图 2)。

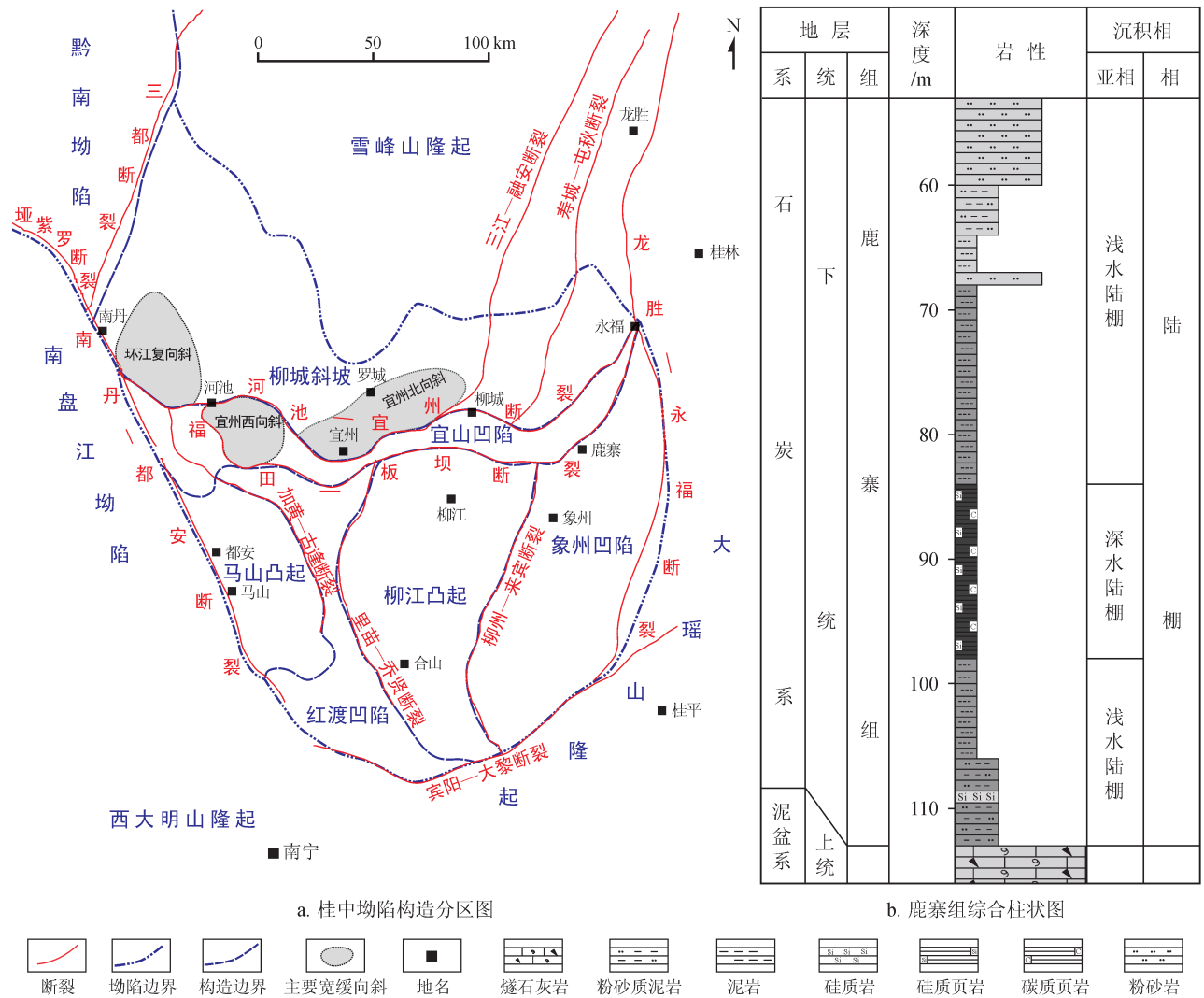


图 1 桂中坳陷构造区划图及地层综合柱状图

根据实测野外露头剖面及周缘资料，黑色页岩的沉积中心主要沿河池—宜州断裂一线分布，其中河池—宜州—柳城一带厚度达到 100 ~ 200 m (图 3)。此外，结合地震资料，采用正演模型分析、钻井标定和波阻抗反演等技术，研究发现桂中地区鹿寨组黑色页岩的地震响应通常表现为“双强轴”特征。平面上，靠近北部连陆台地表现为“单强轴”特征，往南过渡为连续稳定的“双强”特征，至持续深水背景厚度较大的区域表现为“多强轴”特征(图 4-a)，再往南又过渡为“双强轴”特征，靠近孤立台地地区则具有“单强轴”特征(图 4-b)，反映鹿寨组黑色页岩呈现往北部雪峰古陆和往南部柳江凸起方向变薄的特征。优质页岩(TOC > 2%，下同)厚度一般介于 20 ~ 60 m，其中南丹、鹿寨等地区优质页岩厚度超过 60 m。

2.2 岩石矿物学特征

根据宜州峡口、河池龙头等露头剖面及 DY2

井鹿寨组页岩 X 射线衍射分析结果，石英含量介于 39% ~ 88%，平均值为 58%；黏土矿物含量介于 9% ~ 45%，平均值为 35%；长石平均含量为 0.48%；碳酸盐矿物含量为中，白云石、方解石平均含量分别为 0.69%、1.07%。纵向上，自下而上石英、长石等脆性矿物含量呈现先增加后减少的趋势(图 2)，有机碳含量与石英含量呈现明显的正相关性(图 5-a)，与黏土矿物含量则呈现明显的负相关(图 5-b)。宜州峡口、河池龙头等露头剖面鹿寨组页岩中可见到大量的硅质海绵骨针等化石，是页岩脆性矿物含量高的主要原因之一。

2.3 有机地化特征

根据野外露头、岩心分析测试结果，研究区鹿寨组页岩具有有机碳含量高、有机质类型好、热演化程度适中等特点。宜州峡口、河池龙头、宜山洛东等剖面有机碳测试样品 186 个，有机碳含量介于

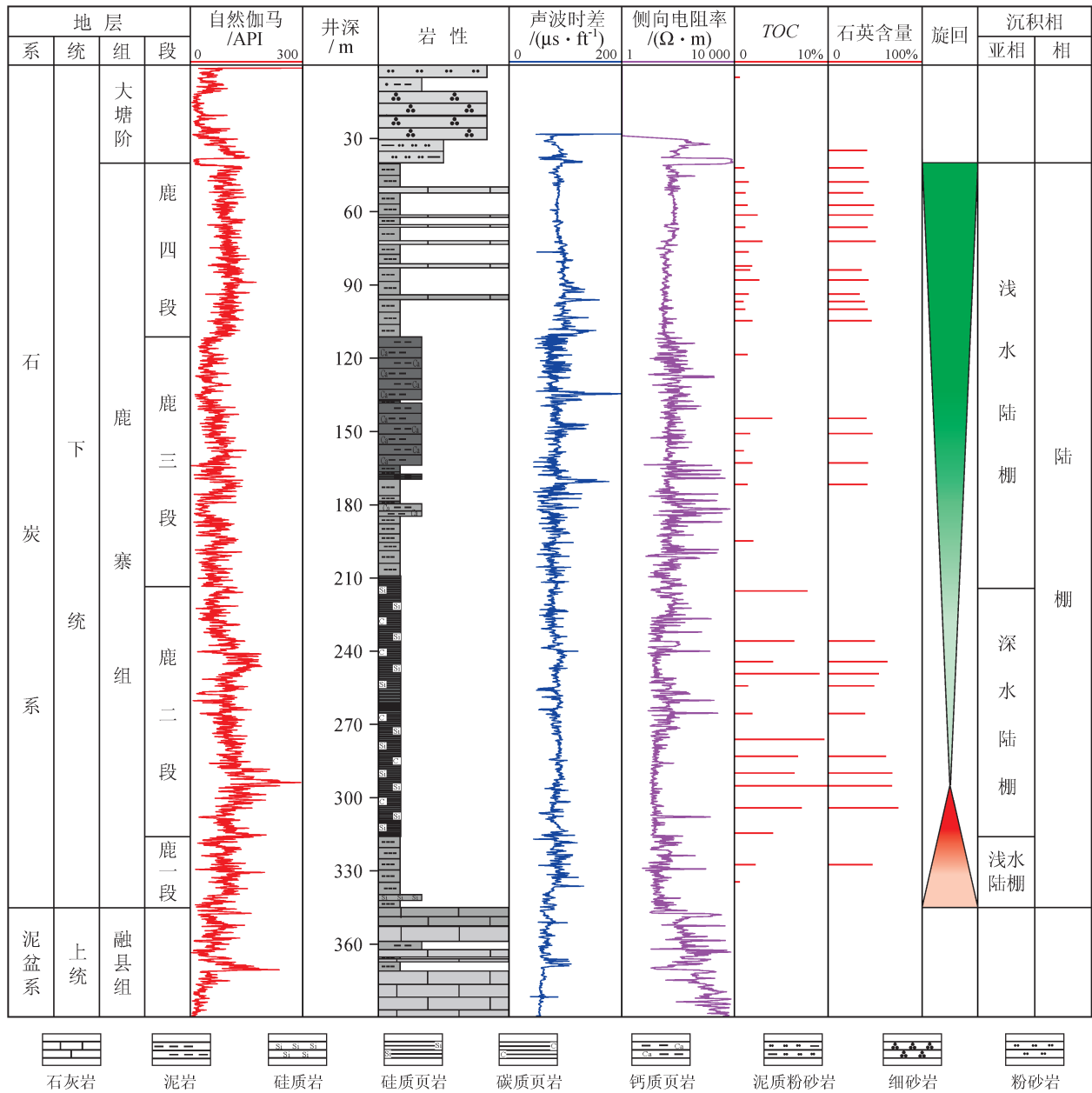


图 2 桂中坳陷下石炭统鹿寨组典型单井地层综合柱状图 (据罗胜元等^[10] 修改)

注: 1 ft=0.304 8 m, 下同

0.47% ~ 9.50%，平均值为 3.08%，有机碳含量大于 2% 的样品主要分布在鹿二段；干酪根镜检样品 14 个，有机质显微组分测定显示腐泥组含量最高，介于 44% ~ 62%，其次为藻类体，表明有机质类型主要为腐泥型；测定了 14 块样品的沥青反射率，换算镜质体反射率介于 1.89% ~ 2.68%，平均值为 2.19%，表明鹿寨组页岩进入高演化阶段，以生气为主，平面上呈现自南向北减小的趋势。

与四川盆地龙马溪组页岩有机地化指标相比 (表 1)，桂中地区鹿寨组页岩有机碳含量、有机质类型相似，有机质成熟度适中，具有较好的生烃潜力。

2.4 储层发育特征

2.4.1 储层物性

从桂中地区露头及钻井取心物性分析资料来看，鹿寨组页岩具有较好的储集物性。宜州峡口、DY2 井以及 HY1 井^[17] 等鹿寨组页岩物性数据显示，比表面积介于 6.60 ~ 20.89 m²/g，平均值为 9.73 m²/g，孔隙度介于 1.45% ~ 11.22%，平均值为 4.99%；渗透率介于 0.006 1 ~ 0.049 1 mD，平均值为 0.018 7 mD，且 HY1 鹿寨组页岩储层孔隙度与有机碳含量之间存在明显的正相关性，这与四川盆地海相页岩孔隙度和

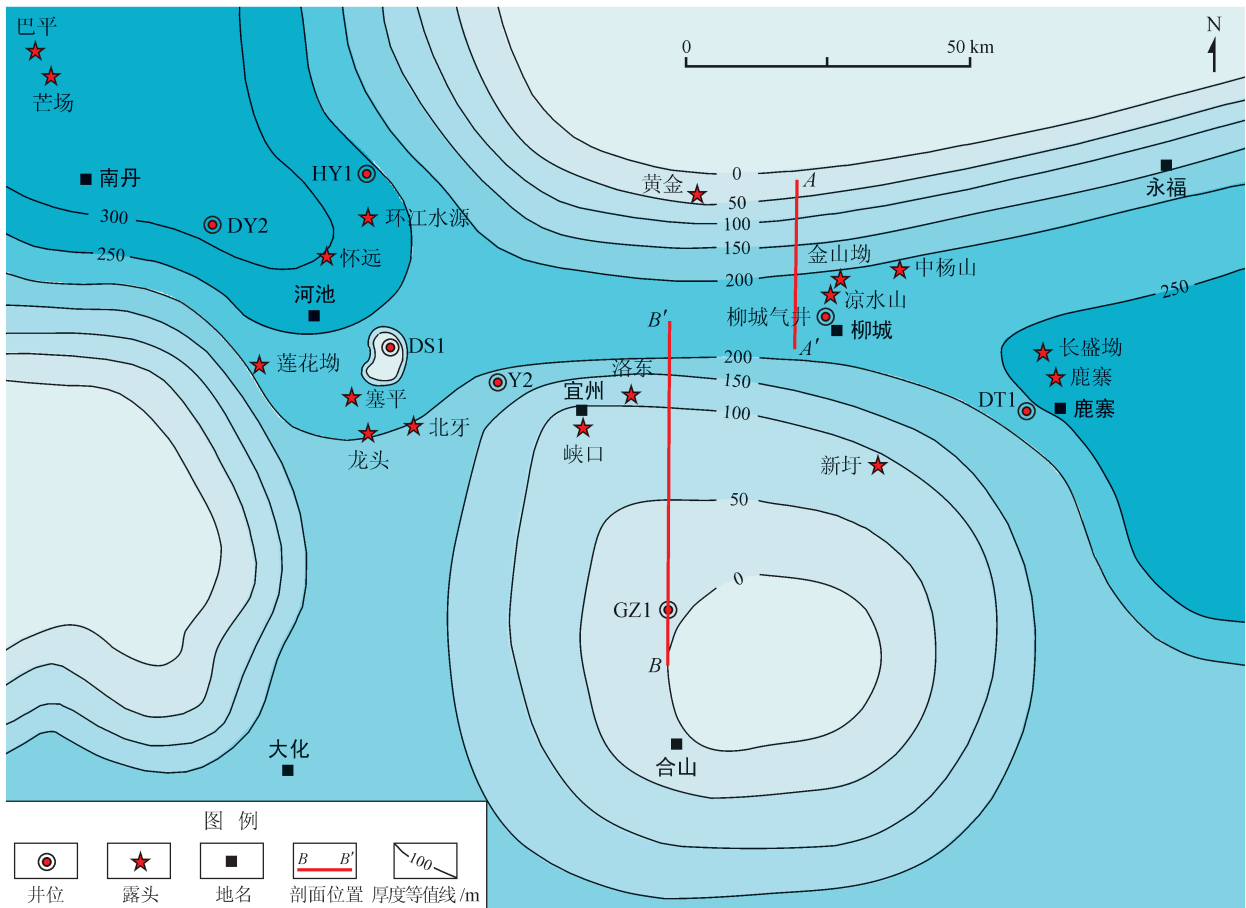


图 3 桂中坳陷及周围鹿寨组黑色页岩厚度等值线图

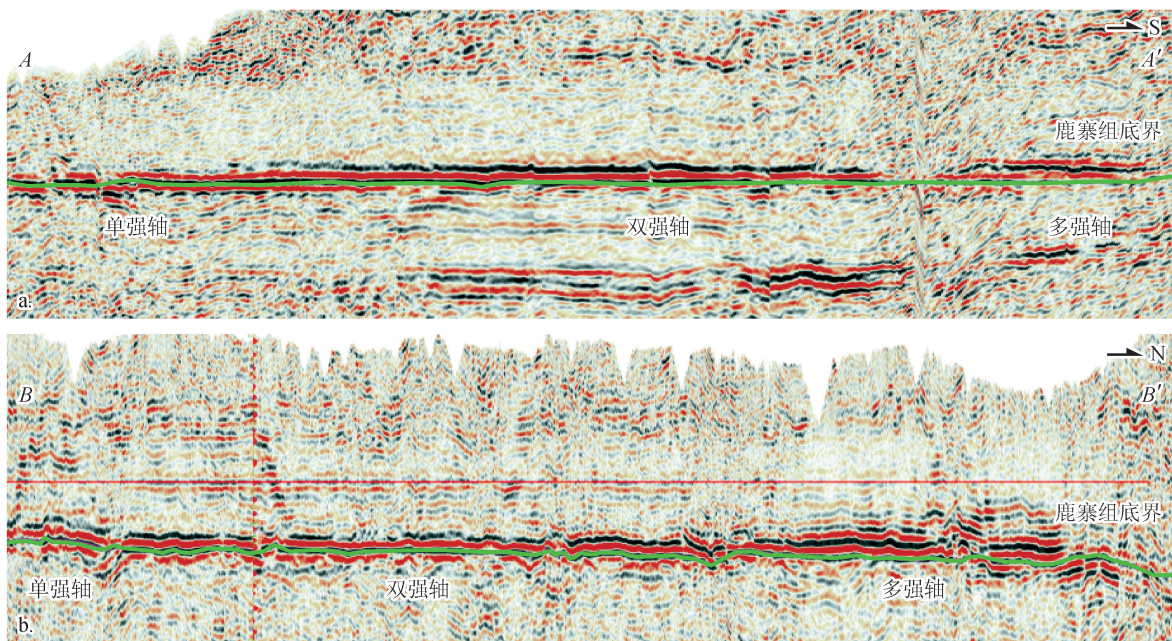


图 4 桂中坳陷鹿寨组黑色页岩地震响应特征图

有机碳含量的相关性较好相似。综上所述，桂中坳陷鹿寨组页岩与四川盆地海相页岩在物性特征上相似，

具有较好的储集物性，其有机质是提供鹿寨组页岩储层孔隙发育的重要物质。

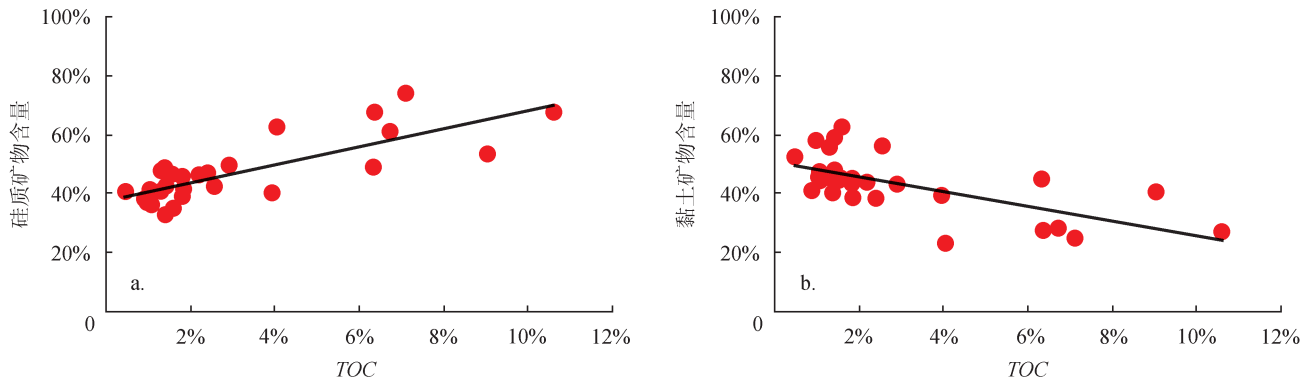


图 5 鹿寨组页岩有机碳含量与硅质矿物、黏土矿物含量关系图

表 1 桂中坳陷鹿寨组与四川盆地龙马溪组页岩物质基础指标对比表

层位	优质页岩厚度/m	孔隙类型	孔隙度	硅质含量	TOC	R_o
鹿寨组	20 ~ 60	有机孔为主	1.45% ~ 11.22% (4.99%)	39% ~ 88% (58%)	0.47% ~ 9.50% (3.08%)	1.89% ~ 2.68% (2.19%)
龙马溪组	38	有机孔为主	1.17% ~ 7.98% (4.61%)	23% ~ 70% (44%)	0.22% ~ 5.89% (2.54%)	2.20% ~ 3.13% (2.65%)

注：括号内为平均值

2.4.2 储层空间类型

页岩储集方式不同于常规的油气储层，表现为页岩气主要以吸附状态赋存在微孔隙的内表面及以游离状态存在于页岩的孔隙和裂隙中^[18-20]。通过氩离子抛光扫描电镜观察发现，鹿寨组富有机质页岩中储集空间类型多样，主要包括有机质孔、黏土矿物粒间孔、晶间孔以及裂缝等类型。

2.4.2.1 有机质孔

桂中地区鹿寨组页岩中观察到的有机质孔隙主要为纳米孔，孔径主要介于 20 ~ 300 nm，平面上通常为似蜂窝状的不规则椭圆形（图 6-a）；部分有机质内部纳米孔数量丰富，一个有机质片内部可含几百到几千个纳米孔，在有机质中的面孔率一般介于 20% ~ 30%，局部可达到 60% ~ 70%。

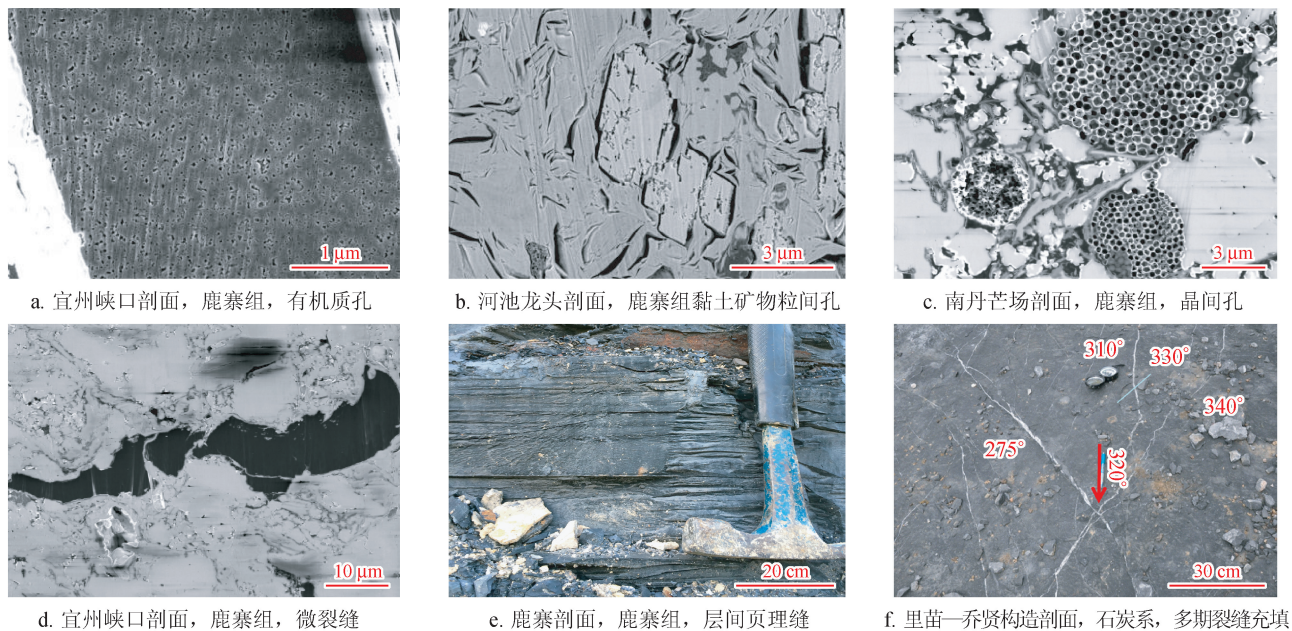


图 6 桂中坳陷鹿寨组页岩储集空间类型以及构造裂缝特征

2.4.2.2 黏土矿物粒间孔

鹿寨组页岩中黏土矿物粒间微孔多表现为片状黏土矿物边缘的微小裂隙,宽度一般小于 $1\ \mu\text{m}$,于黏土矿物周缘不均匀分布(图6-b)。

2.4.2.3 晶间孔

主要以草莓状黄铁矿晶间孔为主,黄铁矿集合体直径多介于 $3\sim 6\ \mu\text{m}$,黄铁矿晶粒间存在一定数量的纳米级孔隙,孔径介于 $20\sim 200\ \text{nm}$ (图6-c)。另外,还见到少量重结晶形成的方解石晶间孔和自生硅质矿物形成的硅质矿物晶间孔。

2.4.2.4 裂缝

通过氩离子抛光扫描电镜发现,鹿寨组富有机质页岩中微裂缝较发育,微裂缝多呈锯齿状,并且延伸较好(图6-d)。根据桂中地区及周缘岩心资料,鹿寨组页岩中宏观裂缝也较发育,主要为构造裂缝、成岩收缩缝以及层间页理缝(图6-e)。裂缝以高角度裂隙为主,少量低角度裂缝,局部见高角度裂缝相切,裂缝大多被方解石充填(图6-f),偶尔见少量黄铁矿。

2.4.3 储层含气性分析

通过等温吸附试验对宜州峡口、德胜寨平、宜州怀远以及DY2井4个样品进行了测试,根据测试结果和兰格缪尔模型计算,鹿寨组页岩在初始压力介于 $1.52\sim 2.12\ \text{MPa}$ 时,最大吸附含气量可达 $3.66\ \text{m}^3/\text{t}$ (图7)。随着有机碳含量增加,最大吸附气量也出现一定程度的增加,表明鹿寨组页岩具有较强的吸附能力。

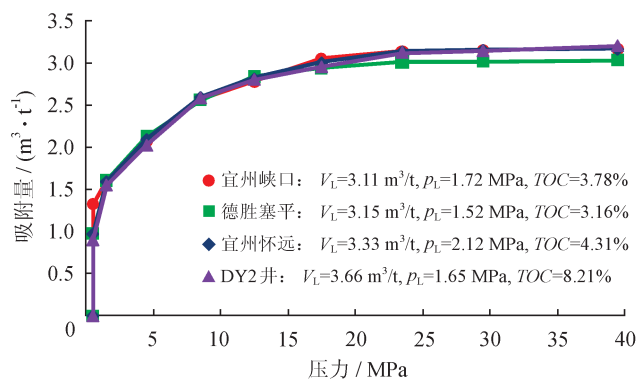


图7 桂中坳陷鹿寨组页岩等温吸附曲线图(100 °C,干样体系)
注: V_L 表示兰格缪尔最大吸附量, m^3/t ; p_i 表示兰格缪尔初始压力, MPa

根据邻区黔南坳陷内DY1井和CY1井鹿寨组页岩现场解析情况来看,DY1井井深446~530 m段页岩现场解吸量介于 $0.15\sim 2.02\ \text{m}^3/\text{t}$,总含气量介于 $0.40\sim 4.97\ \text{m}^3/\text{t}$,CY1井井深708~933 m段页

岩现场解析气量介于 $0.51\sim 2.08\ \text{m}^3/\text{t}$,总含气量介于 $0.9\sim 2.84\ \text{m}^3/\text{t}$,整体呈现较好的含气性特征。与焦石坝地区相比,桂中坳陷鹿寨组页岩含气量整体偏低,这可能与这些井的页岩埋深较浅有关。

3 桂中坳陷保存条件分析

参考四川盆地及周缘下古生界海相页岩保存条件的评价方法和综合评价指标体系^[21-22],结合桂中坳陷及周缘典型钻井的解剖研究,笔者主要从封盖条件以及构造变形作用两方面探讨桂中坳陷鹿寨组页岩气保存条件。

3.1 封盖条件

3.1.1 盖层条件

影响盖层的质量有诸多因素,主要宏观因素包括盖层厚度、岩石类型、区域分布情况,微观评价参数包括岩石的突破压力等。桂中坳陷地表出露地层以古生界为主,且多以碳酸盐沉积为主,封盖条件较好的泥质岩、膏岩等岩石类型在研究区主要发育在中泥盆统(纳标组和罗富组)和下石炭统(鹿寨组和寺门组),呈现较大面积连片分布,而下三叠统泥岩则分布非常局限。因此,下石炭统大塘阶寺门组泥质岩可作为鹿寨组页岩气的区域盖层,盖层厚度总体上具有坳陷区相对稳定、往雪峰山隆起方向减薄、台地区缺失的特征。其中,桂中坳陷南部红渡凹陷、象州凹陷,马山凸起、柳江凸起寺门组相变为碳酸盐岩,而宜山凹陷、柳城斜坡寺门组泥质岩厚度介于 $30\sim 200\ \text{m}$,柳城气井寺门组突破压力介于 $31.8\sim 51.0\ \text{MPa}$,且柳城斜坡带柳城气井及宜山凹陷DT1井两口井在该套盖层之下获得油气流,表明桂中坳陷柳城斜坡带和宜山凹陷盖层条件较好。

3.1.2 顶底板条件

顶底板作为直接与含气页岩层段接触的上覆、下伏地层,与页岩气层接触关系以及物性特征对含气页岩的保存条件非常关键。桂中地区台盆相区泥盆系—石炭系地层为整合接触关系,底板为上泥盆统融县组顶部石灰岩和泥质灰岩,顶板为下石炭统大塘阶底部石灰岩和致密砂岩;台地相区石炭系—泥盆系地层多为不整合接触关系,发育石炭系风化壳,其接触面成为常规油气和页岩气逸散的主要通道,如宜山地区DS1井中、上泥盆统生物礁储层发育,但钻井效果不佳,与该不整合面的存在有较大关系^[13]。罗城黄金以及河池龙头等剖面物性分析资料表明,作为

底板的融县组石灰岩孔隙度平均值为 1.28%，渗透率平均值为 0.001 2 mD，突破压力为 62.4 MPa；作为顶板的罗城组石灰岩孔隙度平均值为 1.56%，渗透率平均为 0.009 2 mD，突破压力为 56.54 MPa，反映桂中地区柳城斜坡、宜山凹陷、红渡凹陷、象州凹陷等区鹿寨组含气页岩的顶底板条件良好。

3.2 构造变形作用

3.2.1 构造剥蚀程度

构造剥蚀程度越强，对页岩气保存条件破坏越严重。桂中拗陷自海西期以来，经历了东吴运动、印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动，而尤以印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动对页岩气的成藏和保存影响较大。前人大量研究表明^[11-12,14]，中三叠世末印支运动使桂中拗陷“山字形”构造定型；燕山运动使拗陷发生全面的褶皱和断裂，并对印支运动形成的构造进一步改造，使之复杂化；喜马拉雅运动造成拗陷全面抬升剥蚀，使泥盆系及其以上地层遭受了不同程度的剥蚀。结合前人测试的成熟度、均一温度和碳氧同位素等资料^[11]，海西运动对桂中拗陷影响很小，地层为间断性连续沉积，上、下二叠统之间为平行不整合；印支运动影响也不大，剥蚀厚度普遍介于 300 ~ 800 m；但经过燕山—喜马拉雅运动的强烈抬升剥蚀，累计剥蚀厚度约 3 500 m，其中宜山凹陷区西部、柳城斜坡南部、象州凹陷北部，红渡凹陷北部剥蚀厚度介于 1 500 ~ 3 000 m，出露地层以二叠系和三叠系为主，柳江凸起、马山凸起以及柳城斜坡北部剥蚀厚度普遍超过 3 500 m，出露地层以泥盆系和石炭系地层为主，且平面上呈现中部剥蚀程度较弱，往北部雪峰山古陆、南部柳江凸起，西部马山凸起，西部大瑶山隆起剥蚀作用变强的特征。通过上述分析，桂中拗陷宜山凹陷、柳城斜坡带南部统鹿寨组地层存在相对较好的保存条件。

3.2.2 断裂发育情况

四川盆地页岩气勘探开发实践表明，走滑性质较强的逆断层和张性正断层对页岩气保存条件影响最大，而逆冲断层或具弱走滑性质的逆断层对页岩气保存条件影响较小。桂中拗陷早期形成的断层多为走滑逆断层（河池—宜州、福田—板坝、南丹—都安、龙胜—永福等断层），也有与逆断层伴生的正断层，后期则主要发育逆冲断层。区内主要钻井情况揭示，正断层对该区页岩气保存具有较大的破坏作用，例如 HY1 井紧邻南丹—都安断裂派生的正断层，气体成分主要以 N₂ 为主，保存条件较差；走滑

性质较弱的逆断层对该区页岩气保存条件影响较弱，例如距走滑逆断层垭紫罗断裂北段 3 km 的 SY1 井在未实施压裂技术改造的情况下测试日产气 2 × 10⁴ m³，紧邻福田—板坝断裂的 Y2 井放喷火焰高 1.4 m，反映保存条件较好；而走滑性质较强的逆断层对页岩气保存条件影响较大，例如走滑性质较强的加黄—古逢断层和里苗—乔贤断层附近，地表裂缝可见 2 ~ 3 期剪切缝（图 6-f），GZ1 井在钻遇良好的页岩储层中未见气显示，保存条件较差。通过统计分析，结合区内老井钻探显示情况分析认为，河池—宜州断裂、福田—板坝断裂是区内走滑作用相对较弱的逆断层，对保存条件影响较弱。

3.2.3 地层变形强度

地层产状是反映地层变形强度的重要指标。本区及邻区勘探实践证明，远离出露区、地层相对宽缓的褶皱保存条件较好。南部柳江凸起带和马山凸起位于福田—板坝断裂以南，邻近构造强烈的大瑶山和西大明山隆起，受推覆挤压逆冲作用，地层近乎直立，保存条件较差；中部宜山凹陷处于走滑断褶带，受南北两条区域走滑断裂夹持，西部相对平缓，发育宽缓向斜构造，如宜州西向斜，构造走向近东西，面积为 460.6 km²，长轴为 30.6 km，短轴为 22.1 km，地层倾角为 2.5° ~ 5.5°，埋深适中，保存条件好；北部柳城斜坡带整体表现为向北抬升的斜坡构造，靠近河池—宜州断裂发育大型宽缓向斜，如宜州北向斜，构造北东走向，面积为 732.8 km²，长轴为 47.1 km、短轴为 14.3 km，长短轴比为 3.3，地层倾角为 9.5° ~ 12.5°，埋深适中，保存条件好。

4 桂中拗陷页岩气勘探潜力分析

四川盆地及周缘海相页岩气勘探实践中形成了中国南方复杂改造区海相页岩气具有“二元富集”理论，即深水陆棚优质泥页岩发育是页岩气富集的基础，良好的保存条件是页岩气高产的关键^[3]。结合桂中拗陷的地质背景，笔者从物质基础和保存条件两方面探讨该区页岩气勘探潜力。

1) 桂中拗陷北缘发育深水陆棚相优质页岩。桂中拗陷鹿寨组页岩厚度、有机地化特征、储集物性、压裂品质等基本地质特征方面与四川盆地及周缘海相页岩相似，特别是桂中拗陷北缘河池—宜州—柳城一带，具有优质页岩厚度大、有机碳含量高、有机质类型好、有机质成熟度适中、储集物性好、压裂品质好的特征。

2) 桂中坳陷柳城斜坡和宜山凹陷为构造变形相对较弱区域,页岩气保存条件较好。柳城斜坡和宜山凹陷发育良好的区域盖层和顶底板,具有岩性致密、厚度大、大面积连片分布的特征,构造变形程度较弱,特别是该带内宜州北向斜、宜州西向斜和环江复向斜等一系列宽缓向斜地层变形程度较弱,抬升剥蚀作用较小,远离走滑性质较强的逆断层,具有良好的保存条件。从桂中坳陷及周缘早期浅层地表构造的钻探资料来看^[23-24],区内下石炭统气显示丰富,多口井获得天然气流。因此,构造完整、埋藏深度较大的宽缓向斜构造更值得探索。

埋深条件一方面影响地层中裂缝的发育进而影响页岩气的保存,另一方面也是工程压裂需要考虑的重要指标。研究发现,桂中坳陷柳城斜坡以及宜山凹陷一系列宽缓向斜整体埋深在 2 000 ~ 4 000 m,埋深条件适中,具有经济开发的价值。

根据鹿寨组页岩发育特征、保存条件和埋深条件等综合分析认为,桂中坳陷北缘整体含气较好,早期地表构造浅井气显示丰富,多口井获得天然气流,因此,桂中坳陷柳城斜坡带、宜山凹陷埋藏深度较大的宽缓向斜具有较好的页岩气勘探潜力。

5 结论

1) 桂中坳陷鹿寨组发育深水陆棚相优质页岩,优质页岩平面上沿河池—宜州断裂一线分布,厚度介于 20 ~ 60 m,呈现中部宜山凹陷往北部雪峰古陆和南部柳江凸起方向变薄的特征。

2) 桂中坳陷柳城斜坡和宜山凹陷发育良好的区域盖层和顶底板,具有岩性致密、厚度大、大面积连片分布的特征,构造变形程度较弱,特别是该带内宜州北向斜、宜州西向斜和环江复向斜等一系列宽缓向斜地层变形程度较弱,抬升剥蚀作用较小,远离走滑性质较强的逆断层,具有良好的保存条件。

3) 桂中坳陷北缘鹿寨组页岩整体含气较好,早期地表构造浅井气显示丰富,多口井获得天然气流,柳城斜坡带、宜山凹陷埋藏深度较大的宽缓向斜具有较好的页岩气勘探潜力。

参 考 文 献

[1] 魏志红,魏祥峰.页岩不同类型孔隙的含气性差异——以四川盆地焦石坝地区五峰组—龙马溪组为例[J].天然气工业,2014,34(6):37-41.
Wei Zhihong & Wei Xiangfeng. Comparison of gas-bearing prop-

erty between different pore types of shale: A case from the Upper Ordovician Wufeng and Longmaxi Fms in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 37-41.

[2] 谢军,赵圣贤,石学文,张鉴.四川盆地页岩气水平井高产的地质主控因素[J].天然气工业,2017,37(7):1-12.
Xie Jun, Zhao Shengxian, Shi Xuewen & Zhang Jian. Main geological factors controlling high production of horizontal shale gas wells in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(7): 1-12.

[3] 郭旭升.南方海相页岩气“二元富集”规律——四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J].地质学报,2014,88(7):1209-1218.
Guo Xusheng. Rules of two-factor enrichment for marine shale gas in Southern China—Understanding from the Longmaxi Formation shale gas in Sichuan Basin and its surrounding area[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(7): 1209-1218.

[4] 石强,陈鹏,王秀芹,刘凤新.页岩气水平井高产层段判别方法及其应用——以四川盆地威远页岩气示范区下志留统龙马溪组为例[J].天然气工业,2017,37(1):60-65.
Shi Qiang, Chen Peng, Wang Xiuqin & Liu Fengxin. A method for identifying high-productivity intervals in a horizontal shale gas well and its application: A case study of the Lower Silurian Longmaxi Fm in Weiyuan shale gas demonstration area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 60-65.

[5] 舒逸,陆永潮,包汉勇,王超,刘占红.四川盆地涪陵页岩气田3种典型页岩气保存类型[J].天然气工业,2018,38(3):31-40.
Shu Yi, Lu Yongchao, Bao Hanyong, Wang Chao & Liu Zhanhong. Three typical types of shale gas preservation in the Fuling Shale Gas Field, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(3): 31-40.

[6] 梁兴,王高成,徐政语,张介辉,陈志鹏,鲜成钢,等.中国南方海相复杂山地页岩气储层甜点综合评价技术——以昭通国家级页岩气示范区为例[J].天然气工业,2016,36(1):33-42.
Liang Xing, Wang Gaocheng, Xu Zhengyu, Zhang Jiehui, Chen Zhipeng, Xian Chenggang, et al. Comprehensive evaluation technology for shale gas sweet spots in the complex marine mountains, South China: A case study from Zhaotong national shale gas demonstration zone[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 33-42.

[7] 周雁,朱东亚,孟庆强,张殿伟,沃玉进.桂中盆地页岩气地质条件及潜力分析[J].成都理工大学学报(自然科学版),2014,41(5):529-537.
Zhou Yan, Zhu Dongya, Meng Qingqiang, Zhang Dianwei & Wo Yujin. Geological conditions and exploration potential of shale gas in Central Guangxi Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(5): 529-537.

[8] 彭中勤,王传尚,李志宏,王保忠.广西桂中坳陷东缘早石炭世斜坡相层序地层研究[J].中国地质,2014,41(5):1503-1514.
Peng Zhongqin, Wang Chuanshang, Li Zhihong & Wang Baozhong. The Early Carboniferous sequence stratigraphy on the eastern margin of the Guizhong Depression, Guangxi[J]. Geology

- in China, 2014, 41(5): 1503-1514.
- [9] 王保忠, 欧文佳, 王传尚, 彭中勤, 张国涛. 桂中坳陷早石炭世泥页岩地球化学特征及近源气成藏模式 [J]. 地球科学, 2018, 43(7): 2222-2233.
Wang Baozhong, Ou Wenjia, Wang Chuanshang, Peng Zhongqin & Zhang Guotao. Geochemical characteristics of the Early Carboniferous shale in Guizhong Depression and their contribution to adjacent gas reservoirs[J]. Earth Science, 2018, 43(7): 2222-2233.
- [10] 罗胜元, 王传尚, 彭中勤. 桂中坳陷下石炭统鹿寨组页岩气研究 [J]. 华南地质与矿产, 2016, 32(2): 180-190.
Luo Shengyuan, Wang Chuanshang & Peng Zhongqin. Shale gas research of Luzhai Formation, Low Carboniferous in Guizhong Depression[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2016, 32(2): 180-190.
- [11] 楼章华, 尚长健, 姚根顺, 陈子料, 金爱民. 桂中坳陷及周缘海相地层油气保存条件 [J]. 石油学报, 2011, 32(3): 432-441.
Lou Zhanghua, Shang Changjian, Yao Genshun, Chen Ziliao & Jin Aimin. Hydrocarbon preservation conditions in marine strata of the Guizhong Depression and its margin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 432-441.
- [12] 潘仁芳, 唐小玲, 孟江辉, 张喜满, 龚宇. 桂中坳陷上古生界页岩气保存条件 [J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(4): 534-541.
Pan Renfang, Tang Xiaoling, Meng Jianghui, Zhang Ximan & Gong Yu. Shale gas preservation conditions for the Upper Paleozoic in Guizhong Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4): 534-541.
- [13] 胡东风, 李宇平, 段金宝, 张矿明, 范志伟. 桂中地区泥盆纪碳酸盐岩沉积特征与孤立台地礁滩演化 [J]. 岩石学报, 2017, 33(4): 1135-1147.
Hu Dongfeng, Li Yuping, Duan Jinbao, Zhang Kuangming & Fan Zhiwei. Sedimentary features of carbonates and evolution of isolated platforms in Devonian in Guizhong area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(4): 1135-1147.
- [14] 吴国干, 姚根顺, 徐政语, 郭庆新, 陈子料. 桂中坳陷改造期构造样式及其成因 [J]. 海相油气地质, 2009, 14(1): 33-40.
Wu Guogan, Yao Genshun, Xu Zhengyu, Guo Qingxin & Chen Ziliao. Structural patterns and origin of tectonic reformation in Guizhong Depression[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2009, 14(1): 33-40.
- [15] 黄羚, 徐政语, 王鹏万, 熊绍云. 桂中坳陷上古生界页岩气资源潜力分析 [J]. 中国地质, 2012, 39(2): 497-506.
Huang Ling, Xu Zhengyu, Wang Pengwan & Xiong Shaoyun. An analysis of resource potential of Upper Paleozoic shale gas in Guizhong Depression[J]. Geology in China, 2012, 39(2): 497-506.
- [16] 梅冥相, 马永生, 邓军, 初汉民, 刘智荣, 张海. 滇黔桂盆地及其邻区石炭纪至二叠纪层序地层格架及三级海平面变化的全球对比 [J]. 中国地质, 2005(1): 13-24.
Mei Mingxiang, Ma Yongsheng, Deng Jun, Chu Hanmin, Liu Zhirong & Zhang Hai. Carboniferous to Permian sequence stratigraphic framework of the Yunnan-Guizhou-Guangxi Basin and its adjacent areas and global correlation of third-order sea-level change[J]. Geology in China, 2005(1): 13-24.
- [17] 毛佩筱, 王星星, 吴凯凯, 李梦瑶, 朱振宏, 金爱民, 等. 桂中坳陷西北部下石炭统岩关组泥页岩储层特征研究: 以环页 1 井为例 [J]. 地质科技情报, 2018, 37(3): 169-176.
Mao Peixiao, Wang Xingxing, Wu Kaikai, Li Mengyao, Zhu Zhenhong, Jin Aimin, et al. Characteristics of shale gas reservoir in the Lower Carboniferous Yanguan Formation, Northwestern Guizhong Depression: A case study of Well Huanye 1[J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(3): 169-176.
- [18] Curtis ME, Cardott BJ, Sondergeld CH & Rai CS. Development of organic porosity in the Woodford Shale with increasing thermal maturity[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 103(23): 26-31.
- [19] Clarkson CR, Solano N, Bustin RM, Bustin AMM, Chalmers GRL, He Lilin, et al. Pore structure characterization of North American shale gas reservoirs using USANS/SANS, gas adsorption, and mercury intrusion[J]. Fuel, 2013, 103(1): 606-616.
- [20] Giffin S, Littke R, Klaver J & Urai JL. Application of BIB-SEM technology to characterize macropore morphology in coal[J]. International Journal of Coal Geology, 2013, 114(4): 85-95.
- [21] 胡东风, 张汉荣, 倪楷, 余光春. 四川盆地东南缘海相页岩气保存条件及其主控因素 [J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 17-23.
Hu Dongfeng, Zhang Hanrong, Ni Kai & Yu Guangchun. Main controlling factors for gas preservation conditions of marine shales in southeastern margins of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 17-23.
- [22] 魏祥峰, 李宇平, 魏志红, 刘若冰, 余光春, 王庆波. 保存条件对四川盆地及周缘海相页岩气富集高产的影响机制 [J]. 石油实验地质, 2017, 39(2): 147-153.
Wei Xiangfeng, Li Yuping, Wei Zhihong, Liu Ruobing, Yu Guangchun & Wang Qingbo. Effects of preservation conditions on enrichment and high yield of shale gas in Sichuan Basin and its periphery[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(2): 147-153.
- [23] 卢树藩, 何犇, 杜胜江. 黔南代页 1 井下石炭统打屋坝组页岩气地质条件及勘探前景 [J]. 中国地质调查, 2016, 3(4): 6-11.
Lu Shufan, He Ben & Du Shengjiang. Geological conditions and exploration prospect of shale gas in Dawuba Formation of Lower Carboniferous of Daiye-1 well in southern Guizhou Province[J]. Geological Survey of China, 2016, 3(4): 6-11.
- [24] 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 Jiushi Formation shale sedimentary environment in Southwestern Guizhou[J]. Coal Geology of China, 2016, 28(4): 35-40.