

西昌盆地五峰组—龙马溪组页岩气保存条件研究

李桃^{1,2}, 杨贵来³, 何伟^{1,2}, 陈杨^{1,2}, 周瑞琦^{1,2},
牟必鑫^{1,2}, 魏洪刚^{1,2}

(1. 四川省煤田地质工程勘察设计院, 四川 成都 610072; 2. 页岩气评价与开采四川省重点实验室, 四川 成都 610091; 3. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要:保存条件是影响页岩气富集高产的关键因素。本文综合利用地质、钻井等资料,分析了西昌盆地五峰组—龙马溪组的顶底板条件、构造特征、地层压力特征和气体组分,从宏观和微观两个方面对影响页岩气保存的主要指标进行了研究,在此基础上开展了西昌盆地保存条件综合评价。结果表明:盆地各凹陷主要由走滑—冲断带相隔,凹陷内地层缓倾,构造样式表现为宽缓—开阔褶皱,由于受到盆缘断裂冲断作用的影响,盆缘褶皱常表现为紧闭—闭合褶皱,地层近于直立,局部发生倒转;西昌盆地内部构造缩短量较少,缩短率均 $<20\%$,指示整个盆地内部构造变形强度较弱;盆地南部布拖区域,龙马溪组页岩可形成典型压力封存箱式地质结构,箱内与箱外存在一定压力系数差,箱内地层压力稳定,保存条件好;综合多期构造作用下的断裂和裂缝发育状况、隆升剥蚀、构造变形条件等因素,在西昌盆地东缘优选出昭觉和布拖两个页岩气有利区。

关键词:五峰组—龙马溪组;构造特征;页岩气;保存条件;西昌盆地

中图分类号:P618.13

文献标识码:A

类比于北美页岩气,我国学者对中国南方的龙马溪组页岩开展了大量有关沉积、烃源岩、古生物、储层、富集模式等评价与研究(黄金亮等,2012;王世谦等,2009;何伟等,2015;聂海宽等,2020),这些指标的评价与研究有效地促进构造稳定区或者保存条件较好的区域页岩气大规模的勘探开发。随着中国南方页岩气勘探“向深层”和“向盆外”两个方向的发展,页岩气富集因素研究的不断深入,中国海相页岩气与北美页岩气富集的差异性也随之表现得越明显。中国南方页岩气的地质条件要比北美复杂得多,页岩地质年代更老,在构造复杂区普遍经历了深埋藏(高演化)、后期强隆升、强剥蚀和强变形等多期构造改造(刘树根等,2011,2016;程克明等,2009)。越来越多的学者也注意到中国

南方页岩气有其自身客观条件和特殊的评价方法。近年来,众多学者对页岩气评价已经由早期的静态指标评价向静态指标和动态因素综合评价转变。页岩本身例如有机碳等静态指标不再是页岩气富集差异的主因,而现今页岩的分布、保存及其经历的构造演化过程,才是决定因素(郭彤楼,2016)。

上世纪90年代以来,中石油等多家单位在西昌盆地开展了油气地质综合评价,针对上三叠统白果湾组完成了多口钻井,但均未获得油气发现(段伟刚,2004;邵红君等,2019),相关学者从构造(刘树根等,2004;刘丽华等,2003;王运生和李云岗,1996;杨平等,2021a,2021b)、沉积(杨威等,2020;伏明珠和覃建雄,2011;唐勇和覃建雄,2007;刘树根等,2004)、流体(覃建雄等,1994;从柏林等,1973)、化

收稿日期:2021-04-25; **改回日期:**2021-07-08

作者简介:李桃(1989—),女,工程师,主要从事石油地质调查与评价。E-mail:569111244@qq.com

通讯作者:杨贵来(1984—),男,工程师,主要从事石油地质调查与评价。E-mail:1799744480@qq.com

资助项目:四川省重大项目“西昌盆地页岩气资源调查评价和区块优选”(DK-2017-F-008);四川省科技基金项目“西昌盆地构造特征及页岩气保存条件研究”(2018JY0625)

探(张朝文,1979;宋玉光等,1998;颜自给等,2004)等方面对常规油气保存条件做了相关的讨论,已有的这些研究涉及到五峰组—龙马溪组的相对较少。已有的钻井钻遇龙马溪组的分布情况差异较大,在喜德1井、普格1井和布地1井钻遇五峰组—龙马溪组,其他井均未钻遇该层位。由于沉积相的变化,盆地西部总体缺失五峰组—龙马溪组,在西昌盆地东南部及北部分布稳定的龙马溪组陆棚相黑色页岩。野外露头 and 钻井岩心的观察发现,龙马溪组主要岩性为钙质泥岩、泥质白云岩、泥质灰岩、粉砂岩、钙质粉砂岩和黑色页岩,具有发育页岩气储层的基本条件。由于西昌盆地经历了多期构造变形,尤其是新生代以来,发生了强烈隆升、挤压变形和走滑运动,导致西昌盆地演化成几个次级构造组成的残余盆地。多期构造运动对页岩气保存条件的优劣起着关键作用,如何在构造复杂的强改造区寻找页岩气保存有利区是西昌盆地龙马溪组页岩气勘探的重要问题。本文在前人研究的基础上,利用关键地质露头、典型钻井岩心等资料,对西昌盆地五峰组—龙马溪组的顶底板条件、构造变形强度、裂缝发育、地层压力与含气性特征等保存条件进行了深入分析,优选了保存条件有利区,为该区页岩气勘探和类似构造区保存条件的评价提供借鉴。

1 地质概况

西昌盆地位于扬子地块西缘和青藏高原东缘的交接部位,经历了长期复杂的演化历程,受控于晚三叠世之前伸展背景下差异升降活动和晚三叠世以来自西向东逆冲挤压—走滑活动控制,形成南北分块、东西分带的构造格局,西以安宁河断裂为界,东界可达峨边—雷波断裂,南界为则木河断裂,向北延伸至大渡河附近,为南北向展布的狭长构造盆地,中生代以来盆地面积约1.6万平方千米。现今地貌主要表现为高山峡谷地貌,与四川盆地相比,二者存在较大的地貌高差,因此,认为西昌盆地亦为受构造强烈改造的中生代残留盆地(刘树根等,2004;刘丽华等,2003;范明等,2018),主要由米市凹陷(面积约为6000km²)、麻姑山凹陷(1500km²)、甘洛凹陷(1300km²)、昭觉凹陷(700km²)、美姑凹陷(3000km²)等5个凹陷组成(图1)。

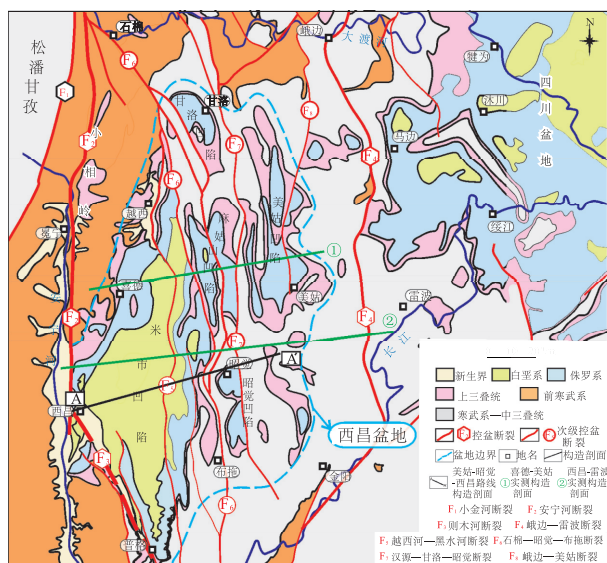


图1 西昌盆地地质简图

Fig. 1 Geological map of Xichang Basin

1.1 地层特征

上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组为西昌盆地的主要富有机质泥页岩层系之一。在四开断裂以西,龙马溪组与下伏地层呈不整合接触,在四开断裂以东,龙马溪组与下伏地层呈整合接触,五峰组—龙马溪组在西昌盆地的分布总体受康滇古隆起、滇中和黔中古隆起共同控制,向西和西南尖灭,表现为东厚西薄,主要分布于北部的甘洛—峨边及东部的美姑及东南部的布拖一带,向盆地西部龙马溪组缺失。

由于靠近康滇古陆边缘,沉积环境变化较大,岩性差异明显(杨威等,2020;伏明珠和覃建雄,2011)。北部龙马溪组主要分布于普雄河以东,其岩性为黑色、深灰色、黄灰色碳质、钙质、砂质页岩及粉砂岩,局部夹灰黑色薄层状泥灰岩,微细水平层理发育,底部有一层10~30cm厚的红褐色含砾石英砂岩。中部龙马溪组出露较少,仅在竹核一带有龙马溪组出露,厚度达90m。其岩性为灰黑色薄层钙质页岩、粉砂岩夹黑色薄层泥灰岩及砂岩,底部为厚20~50cm的砾状砂岩。根据钻井揭示,下志留统龙马溪组富有机质泥页岩厚20~40m,为一套外陆棚相灰黑色、深灰色、黄灰色生物碎屑、富含笔石的碳质页岩(图2)。

1.2 构造作用

1.2.1 构造样式

总体上,西昌盆地各次级凹陷主要由走滑—冲断带相隔,凹陷内地层缓倾(中心常呈近水平发育),

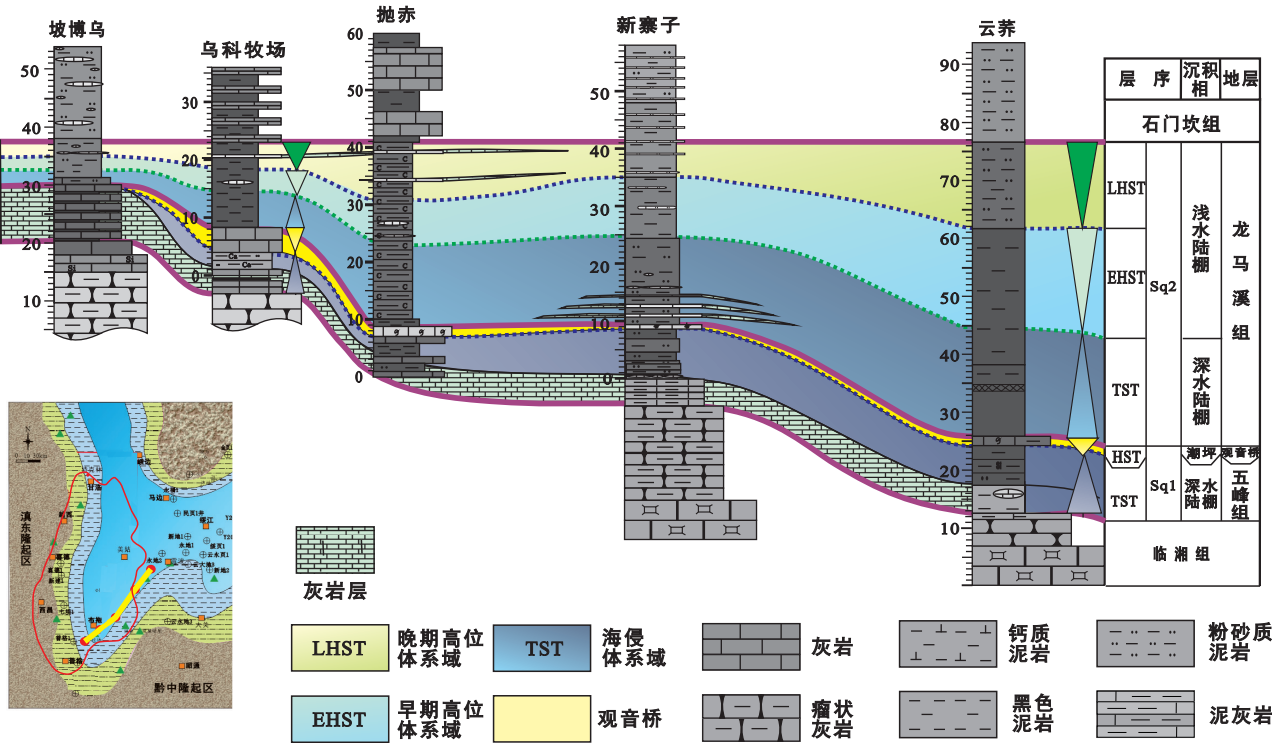


图2 西昌盆地五峰组—龙马溪组地层展布图

Fig. 2 Stratigraphic columns of Wufeng-Formation to Longmaxi Formations in Xichang Basin

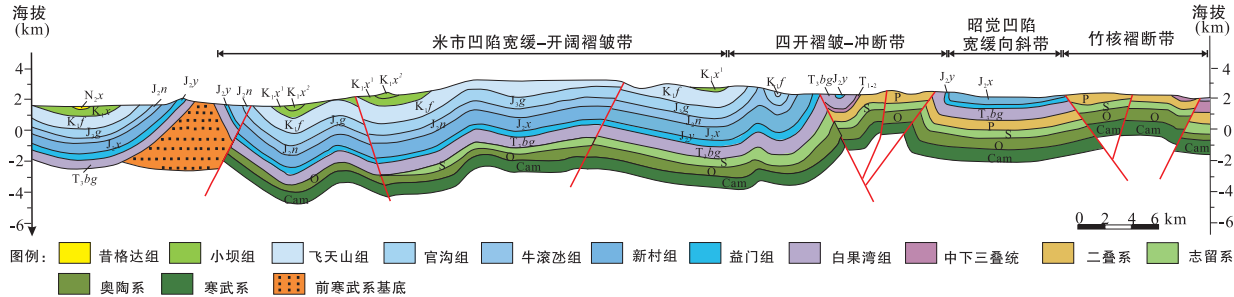


图3 美姑—昭觉—西昌路线构造剖面 A-A' (位置见图1)

Fig. 3 Structural section A-A' of Meigu-Zhaojue-Xichang (location see Figure 1)

构造样式表现为宽缓—开阔褶皱,由于受到盆缘断裂冲断作用的影响,盆缘褶皱常表现为紧闭—闭合褶皱,地层近于直立,局部发生倒转(图3)。

1.2.2 断层分布特征

根据断裂对盆地的控制作用、对区域地层的影响、断裂的延伸展布和规模结合区域构造演化,初步将盆内的断裂分为4个等级(图4)。

一级断裂,即一级控盆断裂,断裂对盆地和区域地层具有明显的控制作用,同时区域上表现为深大断裂,区域上延伸长远、断距大,构造活动通常具有为多期性、继承性和新生性;盆内主要为则木河断裂,对页岩气保存影响最大。二级断裂主要为次

级控盆断裂,即盆地内控制米市凹陷、昭觉凹陷、甘洛凹陷、美姑凹陷和麻姑山凹陷的断裂,主要有石棉—昭觉断裂(东支和西支),汉源—甘洛断裂和峨边—美姑断裂等,这些断裂通常也是古生代断裂,在中新生代复活,区域上延伸较好,具有明显的线性地貌,同时对中生代或二叠系峨眉山玄武岩等地层具有明显的控制作用,断距一般较大。三级断层主要为盆内次级断层,错切二级断裂或与二级断裂平行展布,一般延伸较短,断裂规模较小,断距小,断层性质明显,具有一定的地貌显示等;盆内如司果庄断层、竹核断层等。四级断层主要指露头尺度的断层,一般延伸短、断距小,无地貌显示,露头见

牵引变形、构造透镜体、碎斑岩、碎粉岩和断层泥等,一般为主干断裂的派生断层。

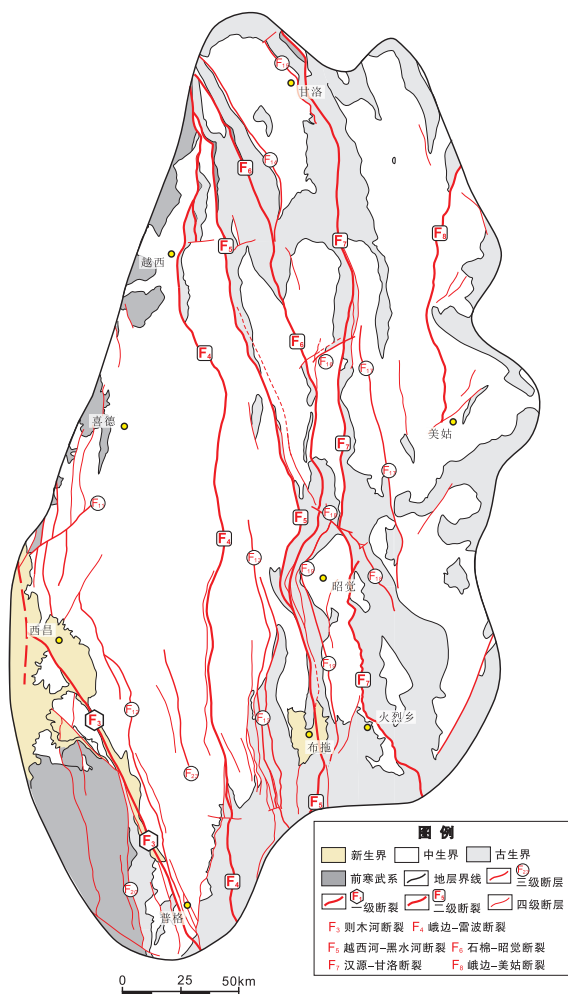


图4 西昌盆地断裂分布图

Fig. 4 Distribution of faults in Xichang Basin

2 页岩气保存条件

2.1 顶底板条件

顶底板条件是阻碍页岩气垂向运移散失的关键因素,也影响着页岩气开发过程中的压裂效果(Xuet al., 2014;魏祥峰等,2017;胡明等,2017;罗兵等,2018;邹玉涛等,2016)。如果顶底板岩性的孔隙度和渗透率均较小,断裂相对不发育,对页岩气的垂向逸散起到阻挡作用,可以认为该页岩层系的顶底板条件较好。一般来说,泥页岩、致密砂岩和膏岩层等均可作为页岩气较好的顶底板(图5)。

西昌盆地下古生界主要发育五峰组—龙马溪组页岩,由西向东增厚,底部主要为黑色碳质页岩和粉砂岩,是区内重要的烃源岩层系。与志留系龙

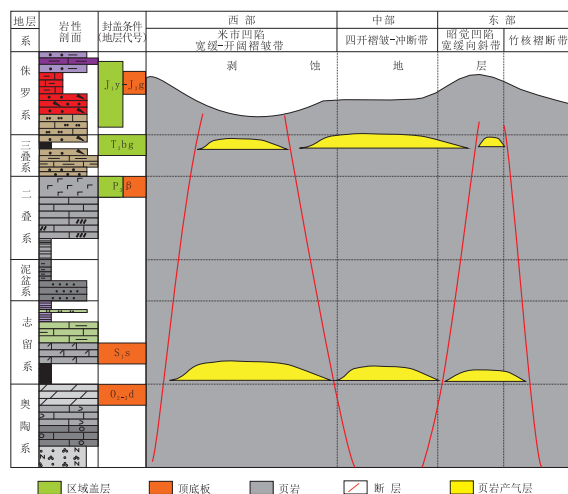


图5 西昌盆地封盖条件

Fig. 5 Sealing conditions of Xichang Basin

马溪组直接接触的下伏地层为奥陶系大筭组,大筭组以灰白色中细粒结晶白云岩、白云质灰岩为主,含有较薄的膏盐层,说明大筭组有过短暂地处于蒸发相的过程,主体为碳酸盐岩台地相沉积。通过喜德1井岩心物性分析表明,大筭组平均孔隙度为1.276%,渗透率为0.2051mD,属低孔低渗型(图6a,b)。

大筭组孔缝洞较发育,多数未充填或半充填,充填物为石英、方解石及次生石英晶族等,但孔洞大多孤立存在,连通性较差。类比于四川盆地宝塔组,宝塔组龟裂纹灰岩为台地前缘斜坡—广海陆棚相沉积,龟裂纹属成岩—后生阶段压溶作用结果,灰岩具有低孔低渗特点,但成缝和溶蚀作用对改善其渗滤性能极为有利,形成以裂缝和次生溶蚀孔、洞、缝为主的储集空间,成为天然气富集的良好场所(李天生,1989)。

页岩层的顶板条件则相对复杂,龙马溪组有机质含量较高,其脆性矿物含量也较低,地层塑性相对较强、裂隙较发育,作为自身的封盖层稍有不足;而上覆石门坎组主要为深灰色钙质页岩、泥质灰岩与灰绿色泥岩、泥质条带灰岩夹生物碎屑灰岩,平均孔隙度为0.59%,渗透率为0.0026mD,可以有效地阻止页岩气的垂向逸散,为有利的页岩层顶板条件(图6c-d)。除这套直接盖层外,喜德1井侏罗系钻厚1683.00m,如此巨厚且以泥质岩为主的地层,对于下伏志留系龙马溪组是良好的区域盖层。总体来说,西昌盆地五峰组—龙马溪组页岩气顶底板条件较好(图7)。

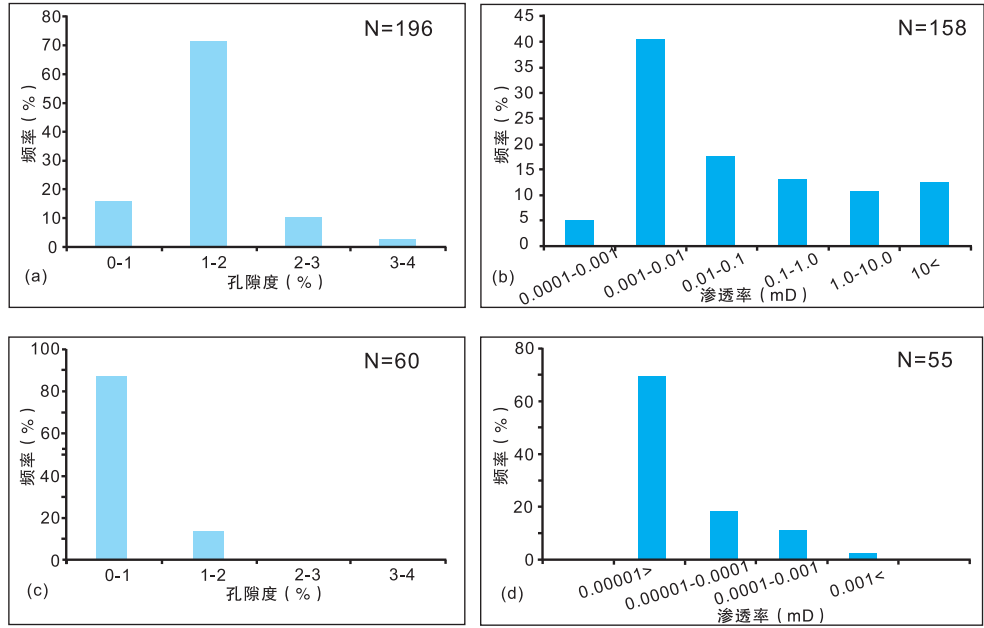


图6 五峰组—龙马溪组页岩顶底板岩性孔隙度和渗透率直方图(据大庆油田资料)

Fig. 6 Histogram of porosity and permeability of roof & floor rocks in Wufeng-Longmaxi Formations (Daqing Oilfield information)

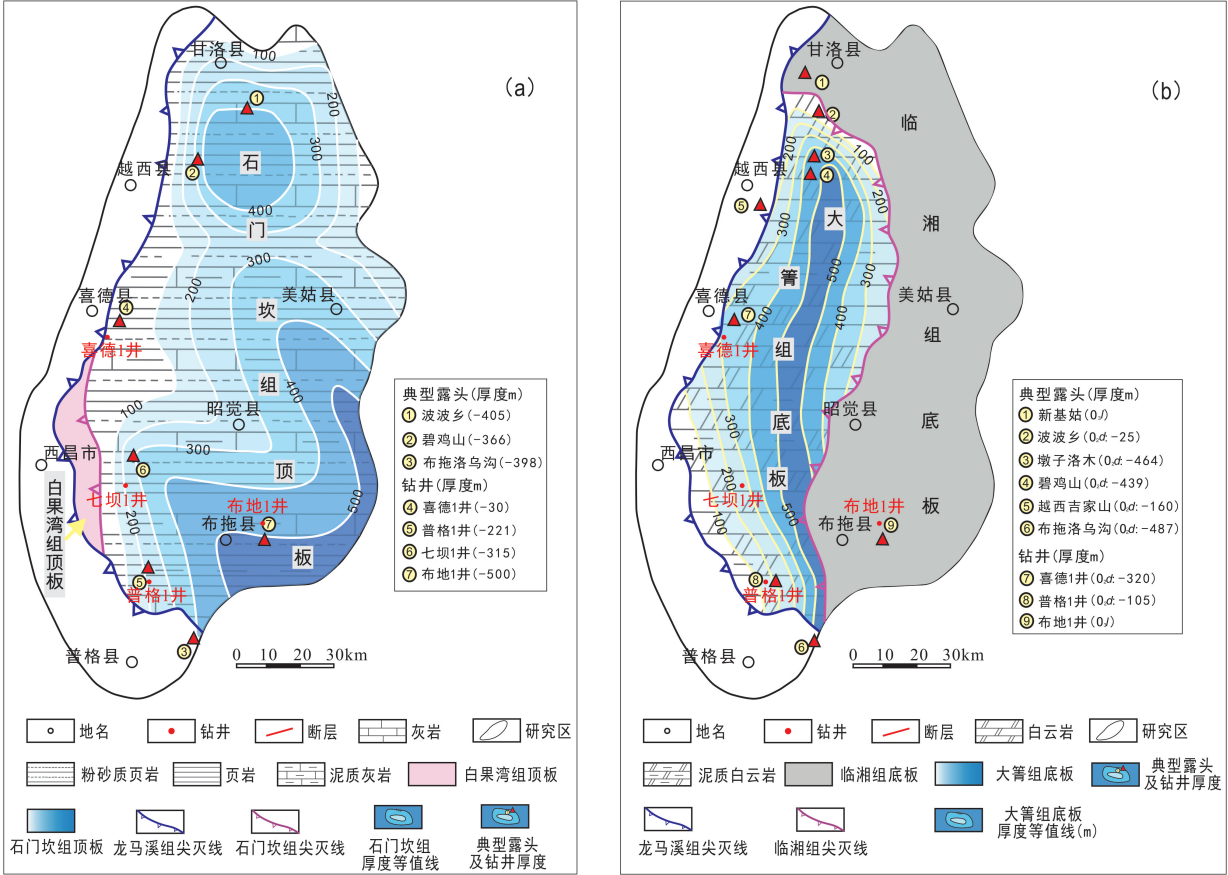


图7 西昌盆地龙马溪组页岩顶板(a)及底板(b)分布与厚度图(据童馥,2021 修改)

Fig. 7 Distribution and thickness diagrams of roof (a) & floor (b) shale rocks of Longmaxi Formation in Xichang Basin (modified from Tongkui,2021)

2.2 构造变形强度

综合前人研究成果,在盆地内实测了两条 NEE—SWW 向的格架构造剖面(美姑—喜德剖面,西昌—雷波剖面),均显示了近东西向的挤压,并叠加区域强烈左旋走滑运动。基于平衡剖面原理,根据物质守恒定律认为变形前后岩石总体积不变,其面积守恒和层长守恒(Dai et al., 2012; Feng et al., 2017; Deng et al., 2018)。以上三叠统白果湾组为标志层,将其上的地层层序平衡恢复。其中,喜德—美姑剖面全长 137.4km,恢复断裂产生的缩短量再展开后的长度约 168.4km,缩短量为 31km,缩短率为 18% (图 8A)。西昌—雷波剖面全长 184.8km,恢复断裂产生的缩短量再展开后的长度约 197.0km,缩短量为 12.2km,缩短率为 6.2% (图 8B)。需要指出的是,西昌盆地中生代地层褶皱轴走向总体为近 SN 向,说明总体缩短方向为近 EW 向,但是褶皱轴的弯曲会使得 EW 向剖面与实际的缩短方向之间存在一定的偏差。尽管如此,这种偏差不会大于 30°。通常如果地质剖面的方向与实际缩短方向之间的偏差不超过 30°,缩短量的误差不会超过缩短量的 15%。由此计算得知,美姑—喜德剖面缩短误差不会超过 4.6km,西昌—雷波剖面误差不超过 1.8km,因此,两条剖面的缩短量分别为

(31 ± 4.6)km 和 (12.2 ± 1.8)km,指示西昌盆地构造带较少的构造缩短变形,变形强度较弱。

前人也对西昌盆地内部构造变形进行过分析(陈长云和何宏林,2008),得出越西—甘洛—美姑剖面恢复断裂产生的缩短量再展开后的长度约 52.9km,缩短量为 10.6km,缩短率为 20.2%;冕宁—美姑剖面恢复断裂产生的缩短量再展开后的长度约 72km,缩短量为 10.8km,缩短率为 14.9%;喜德剖面恢复断裂产生的缩短量再展开后的长度约 60.3km,缩短量为 7.3km,缩短率为 12.1%;布拖剖面恢复断裂产生的缩短量再展开后的长度约 63km,缩短量为 15km,缩短率为 17.8%;总体表明整个西昌盆地内部构造变形较弱。

构造作用会使地层发生变形、褶皱、倒转,往往使岩层产生倾斜。利用地层产状在一定程度上能够反映区域变形程度。倾角指数就是把地层倾角以 10°为间隔划分 0~9 级别(0 代表 0°,9 代表 90°)。一般情况下,地层产状越大,倾角指数越大,页岩保存条件越差。基于前人的研究成果和页岩气勘探实践,倾角指数 < 3,属于页岩气保存有利区;倾角指数 ≥ 3,即地层产状 ≥ 30°页岩气保存条件变差。

通过大量野外地质构造形态的实测工作,同时收集前人资料,共收集了西昌盆地及其周缘地层产

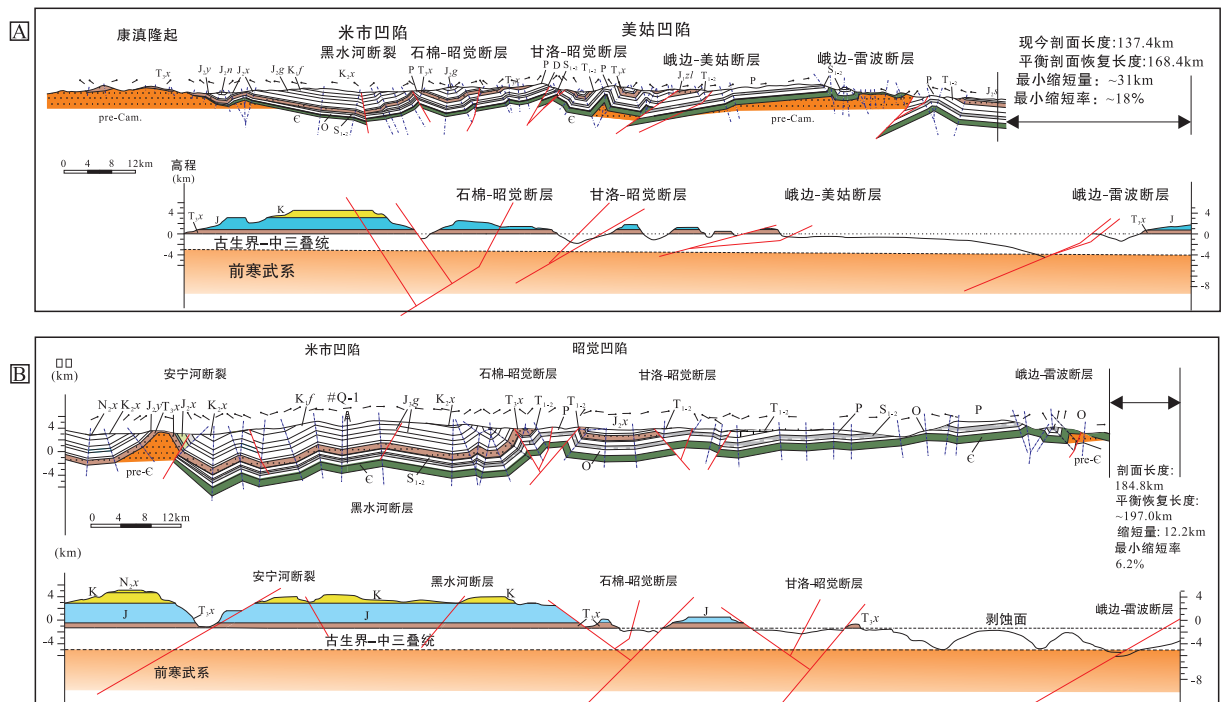


图8 西昌盆地实测构造剖面及平衡恢复图(位置见图1,据 Deng et al,2018 修改)

Fig. 8 Cross section and restoration diagram of Xichang Basin (see Figure 1 for locations, modified from Deng et al,2018)

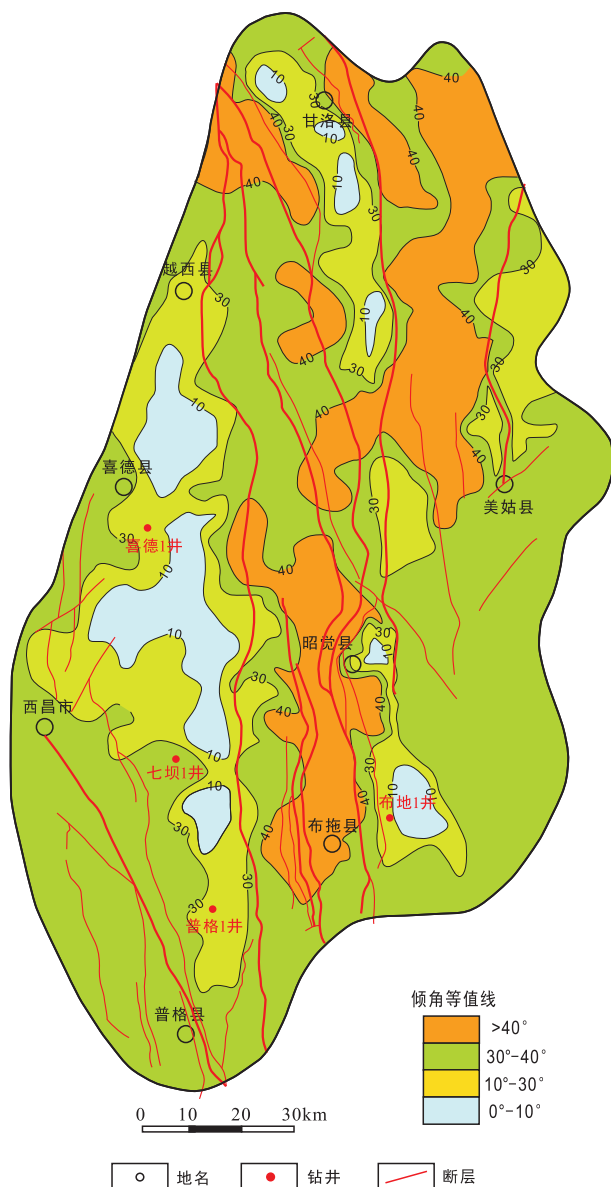


图9 西昌盆地地层倾角等值线图

Fig. 9 Contour map of stratigraphic dip angles in Xichang Basin

状约 1700 余个,通过等值线分析能够较好地反映西昌盆地地层倾角展布实际情况,从而客观地反映西昌盆地不同构造单元构造变形强度的差异。因此,将地层倾角等值线图可作为评判构造变形强度的参考指标之一。盆地内部总体地层倾角平缓,构造样式主要表现为盆内宽缓开阔褶皱带,盆缘构造表现为褶皱冲断带、对冲带或走滑挤压带,变形强烈,地层发生较强改造,呈陡立或倒转产出,在断裂附近常见构造角砾、碎斑岩等构造发育,同时沿断裂带向两盘延伸有劈理密度减弱的趋势。通过西昌盆地地层倾角等值线图可知,西昌盆地盆地内部总

体地层倾角平缓,其中倾角小于 30° 、变形微弱的围限区域有 5 个,这与西昌盆地的 5 个凹陷整体构造具有良好的耦合性;在弱变形区外围地层倾角通常较陡,特别是沿着断裂附近,地层倾角可达 80° 以上(图 9)。因此,认为西昌盆地内断裂的改造是控制变形强度的主要因素,通常断裂带附近表现为强变形带,受断裂的围限的盆地表现为弱变形带。这与地层缩短率特征、西昌盆地构造组合样式特征和西昌盆地主干断裂分布具有良好的耦合性。因此,认为西昌盆地保存有利区主要分布于凹陷内部。

2.3 裂缝发育特征

强烈的断裂破碎作用对页岩气藏具有显著的破坏作用,强烈的构造变形造成页岩气层和顶底板中裂缝发育,进而导致页岩气逸散(Zeng et al., 2016; 刘鹏等, 2016; Yi et al., 2019)。西昌盆地内主要发育的构造裂隙类型有透镜体、劈理、节理和断层等,研究认为地层层面亦是原生裂隙的表现。因此,将原生裂隙与次生裂隙进行统一研究。

西昌盆地的龙马溪组页岩在乌科牧场露头较好,顶底可见。通过对乌科牧场剖面进行测量,发现该剖面页岩裂缝较为发育(图 10),走向主要在 $70^\circ \sim 120^\circ$,为近东西向展布。研究层系内可见多类型裂缝发育,以层内节理缝与层间 X 型共扼节理最为常见。从节理交切关系可以看出,地层发生倾斜或者褶皱之前,较早时期形成近东西走向的较陡裂缝,较晚时期形成近东西向缓倾的裂缝,最后发生区域隆升过程中,发生了不规则拉张裂缝。这两种裂缝对页岩气在目的层内的运移起到了路径的作用。

布拖地区龙马溪组裂缝多为小型裂缝,宽度多小于 1mm,布地 1 井钻探结果表明,五峰组—龙马溪组岩性较纯,仅在龙马溪底部发育少量裂缝,观察表明张性裂缝多成组存在(图 11),个别被高角度裂缝切割,裂缝微细—较细(宽约 $0.01 \sim 0.2\text{mm}$),垂直于层面,不规则,平直或弯曲,延伸远,呈垂直层面平行排列展布和斜交层面羽状排列展布。平行展布裂缝为粒状自形方解石充填,羽状裂缝为纤维状方解石充填。其中,高角度裂缝填充厚度普遍比低角度裂缝好。根据该井岩心观测,主要表现为高角度裂缝切割低角度—水平裂缝,指示低角度—水平裂缝为第一期脉体,高角度裂缝为第二期脉体。同时,在埋深 2376m 处龙马溪组泥页岩内部见大量构造角砾发育,角砾常呈棱角状,其间为方解石

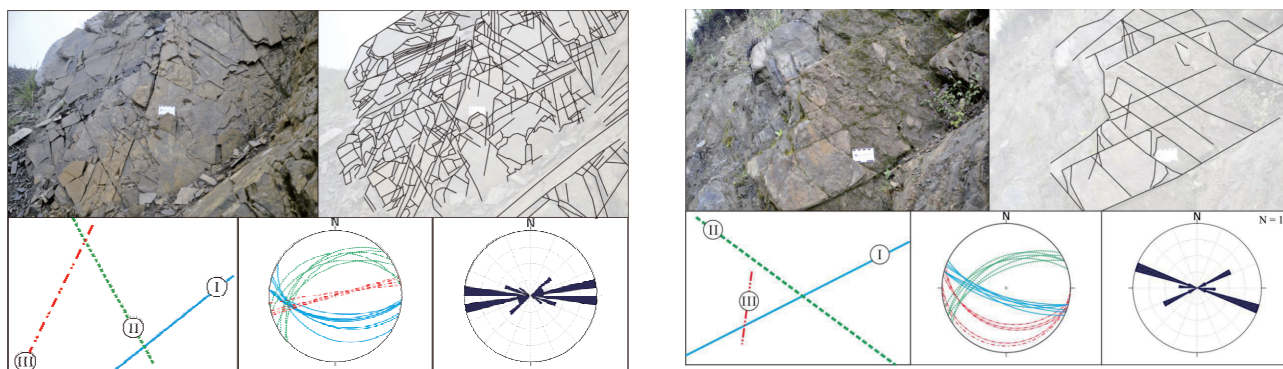


图 10 乌科牧场龙马溪组底部(左)和中部(右)页岩裂缝特征

Fig. 10 Characteristics of fractures in the bottom (left) and middle (right) shales of Longmaxi Formation in Wuke Ranch

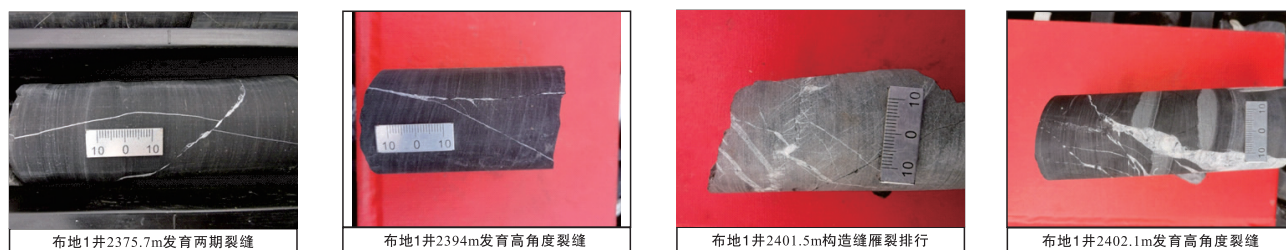


图 11 布地 1 井龙马溪组岩心裂缝特征

Fig. 11 Photos of fractures of Longmaxi Formation in cores in Budi Well 1

脉体充填,该构造角砾同时切割了高角度裂缝和低角度-水平裂缝,指示为最晚一期脉体活动,可能与晚喜山期挤压-走滑构造背景下研究区断层活动有关。综上所述,布地 1 井主要发育 3 个期次的方解石裂隙。通过研究脉体锶同位素含量发现,布拖区域龙马溪组泥页岩脉体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7092$,围岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7105$,根据脉体与围岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的纵向和横向比较分析,西昌盆地东南部地区大部分流体与围岩沉积的锶同位素物源较为一致,说明地层间的连通性较差,这对下志留统龙马溪组页岩的保存条件较为有利。

2.4 地层压力特征

强烈的构造隆升、褶皱变形和断裂破坏致使独立、封闭的页岩压力系统受到改变,流体散失必然导致地层流体能量、成分的变化,因此可通过地层压力特征来表征页岩气保存条件。地层压力系数是页岩气保存条件评价的综合指标之一(舒逸等,2018;姚雪根,2007;邓祖佑等,2000)。近年来的页岩气勘探实践证明,高压发育是页岩气保存条件良好的充分条件之一,页岩气工业产能通常与异常高压发育程度呈正相关关系。布地 1 井钻探过程中在顶底板和目的层未发生井漏,测得地层压力系数为

1.02,现场解析实验测得页岩含气量在 $0.37 \sim 2.57\text{m}^3/\text{t}$ 之间,平均为 $1.18\text{m}^3/\text{t}$,含气性较好。西昌盆地压力封存箱的顶板为中志留统石门坎组泥质岩;底板为中奥陶统大箐组泥灰岩和泥岩互层;西侧隔板为龙恩河断层、东侧隔板为于孟断层;箱内与箱外存在一定压力系数差,箱内压力系数 $1.02 \sim 1.05$,箱外表现为正常压力系数(图 12),具有压力封存箱的典型地质结构。尽管相较四川盆地来讲,西昌盆地龙马溪组的地层压力系数较低,但在本区优选靠近向斜中心部位、压力系数相对较高且埋深

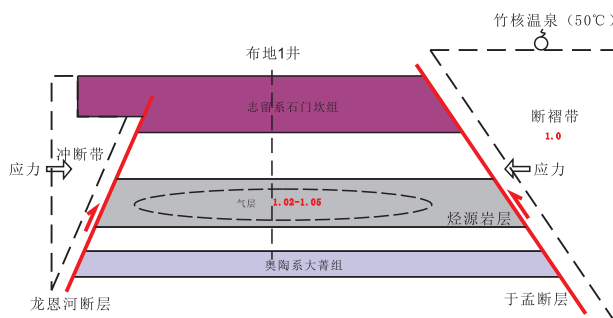


图 12 西昌盆地压力封存箱模式示意图

Fig. 12 Schematic diagram of pressure compartment mode in Xichang Basin

适中的区域开展页岩气勘探开发依然是可行的(聂海宽等,2019)。

2.5 气体组分

页岩气气体组分也可间接指示地层的封闭性,常用指标为天然气组分中 CO₂ 和 N₂ 含量和来源;当天然气组分中 CO₂ 和 N₂ 含量较高且为无机成因时,表明地层与大气之间的连通性较好。分析布地 1 井的页岩气组分,发现甲烷含量平均为 88%,乙烷和丙烷含量少,不含 H₂S,CO₂ 和 N₂ 含量分别为 6.50% 和 4.35%,CO₂ 来源为有机质热解,N₂ 应来源于地壳超深部和上地幔,并非大气来源。中外勘探开发成功盆地的页岩气组分分析结果显示,Michigan 盆地的 Antyim 页岩和 Appalachian 盆地的 Ohio 页岩气组分中 N₂ 含量为 42%~90%,表明其页岩层与大气的连通性较好,保存条件较差;而 Fortworth 盆地页岩气组分中 N₂ 含量为 0.98%~7.56%,表明其页岩层不存在大气水与地表水的频繁交替,保存条件良好;而西昌盆地布地 1 井页岩气组分中 N₂ 含量与 Fortworth 盆地相当,表明其页岩层与大气的连通性较差,保存条件良好。

3 保存条件评价

3.1 评价参数及标准

针对西昌盆地实际情况,结合多期构造作用下的断裂情况和裂缝发育状况、隆升剥蚀情况、构造变形条件等因素的指标,对西昌盆地龙马溪组页岩气保存条件进行综合评价(胡东风等,2014;何伟等,2021;Zeng et al., 2013;Guo et al., 2015;Guo et al., 2017;汤济广等,2015)(表 1)。

构造作用的影响通过构造样式、地层缩短率、距通天断裂距离、断裂倾角、地层倾角和裂缝发育程度来表征。构造变动产生的次生裂缝和引起的地层压力释放,加剧页岩内部气体的扩散和逃逸,对于页岩气藏具有破坏作用。构造样式的影响表现为向斜和翼部宽缓部位保存条件良好,主要是由于低缓背斜变形幅度相对较小,向斜核部埋深较大,裂缝相对不发育,利于页岩气保存;较窄的隔槽状构造样式是主要的应力集中区,变形幅度大,页岩气藏遭受破坏。

表 1 西昌盆地页岩气保存综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation index system of shale gas preservation in Xichang Basin

评价参数	保存指标体系		
	好(Ⅰ)	中(Ⅱ)	差(Ⅲ)
抬升时间	燕山晚期	燕山中晚期	燕山中期
构造样式	宽缓背斜	向斜核部	隔槽状构造样式
埋藏演化史类型	早期浅埋—中期深埋—晚期大幅抬升	早期生烃少—中期多次生排烃—晚期快速隆升	长期持续埋深—快速隆升
构造作用	剥蚀厚度	<2000m	2000~6000m
	断裂倾角(°)	<50	50~70
	地层倾角(°)	<20	20~30
	地层缩短率	<20%	20%~47%
	距通天断裂距离	>5km	2~5km

注:数据来自胡东风等

3.2 保存有利区评价

西昌盆地勘探程度及研究程度较低,目的层龙马溪组页岩气分布范围有限,综合利用本次研究成果及前人资料,以上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组富有机质泥页岩为目标,对西昌盆地页岩气的保存条件进行综合评价,在西昌盆地优选出昭觉和布拖 2 个页岩气有利区,为页岩气勘探开发最有潜力的区块(图 13)。

(1)昭觉有利区,该区块面积约 40km²,构造主

体为昭觉向斜。其构造形态表现为:向斜西翼地层相对较陡,地层倾角一般为 30°~65°;东翼地层相对平缓,一般为 15°~25°,为竹核断层所破坏;核部平缓,地层倾角一般为 5°~10°。上、下构造层形态基本一致,为一构造盆地,即底部宽缓,地层倾角小,断层不发育,两翼相对陡倾,断层发育。该有利区龙马溪组为深水陆棚相沉积,根据实测剖面有机地化实验数据,有利区内 TOC 值大于 2.0%,且自南西向东北呈逐渐增大的趋势;富有机质泥页岩段厚

度在 20 ~ 30m 之间;热演化程度在 2.5% ~ 3.5%, 处于高一过成熟阶段;埋藏深度在 1000 ~ 2000m;剥蚀厚度 < 2000m, 地层缩短率为 16.8%;区域地势东西部高, 中部低且平坦, 山脉多呈南北走向, 海拔在 2000 ~ 3000m 之间, 最低海拔位于昭觉县城, 地形以山间丘陵、山间谷地和高山盆地为主。

(2) 布拖有利区, 该区块面积约 200km², 构造相对简单, 位于龙恩断层以东, 该区以于孟背斜和西溪河向斜作为其主要形态;于孟背斜延伸长 35 ~ 40km, 轴面走向北北西, 倾向 80°, 倾角 60° ~ 45°, 褶皱形态不对称, 已被于孟断层破坏;西溪河向斜地层较平缓, 且倾角变化小, 在 5° ~ 30° 之间, 通常小于

20°。该有利区龙马溪组为深水陆棚相沉积, 根据实测剖面及有机地化实验数据, 有利区内 TOC 值大于 2.0%, 且自南西向北东呈逐渐增大的趋势;富有机质泥页岩段厚度在 20 ~ 30m 之间;热演化程度在 2.5% ~ 3.5%, 处于高一过成熟阶段;埋藏深度在 1000 ~ 2500m;剥蚀厚度 < 2000m, 地层缩短率为 17.9%;区域地势东西部高, 中部低且平坦, 山脉多呈南北走向, 海拔在 2400 ~ 3200m 之间, 地形以山间丘陵、山间谷地和高山盆地为主。

4 结论

(1) 西昌盆地内断裂的改造是控制变形强度的主要因素, 通常断裂带附近表现为强变形带, 受断裂围限的盆地表现为弱变形带。这与地层缩短率特征、地层倾角等值线的分布、研究区构造组合样式特征和研究区主干断裂分布具有良好的耦合性。因此, 认为西昌盆地保存有利区主要分布于凹陷内部。

(2) 西昌盆地五峰组—龙马溪组页岩气顶底板条件较好, 盆地内部构造缩短量较少, 缩短率均小于 20%, 指示整个盆地内部构造变形强度较弱。

(3) 盆地南部布拖区域, 龙马溪组页岩可形成典型压力封箱式地质结构, 箱内与箱外存在一定压力系数差, 箱内地层压力稳定, 保存条件好。

(4) 通过与构造作用关系密切的构造样式、变形强度、断裂发育情况、裂缝发育程度、地层压力系数和气体组分等参数对西昌盆地五峰组—龙马溪组页岩气保存条件进行评价, 在西昌盆地优选出昭觉和布拖 2 个页岩气有利区。

参考文献 (References):

- DAI Jinxing, NI Yunyan, GONG Deyu, et al., 2017. Geochemical characteristics of gases from the largest tight sand gas field (Sulige) and shale gas field (Fuling) in China [J]. Marine and petroleum geology, 79: 426 - 438.
- Deng Bin, Liu Shugen, Jiang Lei, et al., 2018. Tectonic uplift of the Xichang Basin (SE Tibetan Plateau) revealed by structural geology and thermochronology data [J]. Basin Research, 30(1): 75 - 96.
- FENG Ziqi, HUANG Shipeng, WU Wei, et al., 2017. Longmaxi shale gas geochemistry in Changning and Fuling gas fields, the Sichuan Basin [J]. Energy exploration & exploitation, 35(2): 259 - 278.
- GUO Tonglou and ZENG Ping, 2015. The structural and preservation condition for shale gas enrichment and high productivity in the Wufeng-Longmaxi Formation, Southeastern Sichuan Basin [J].

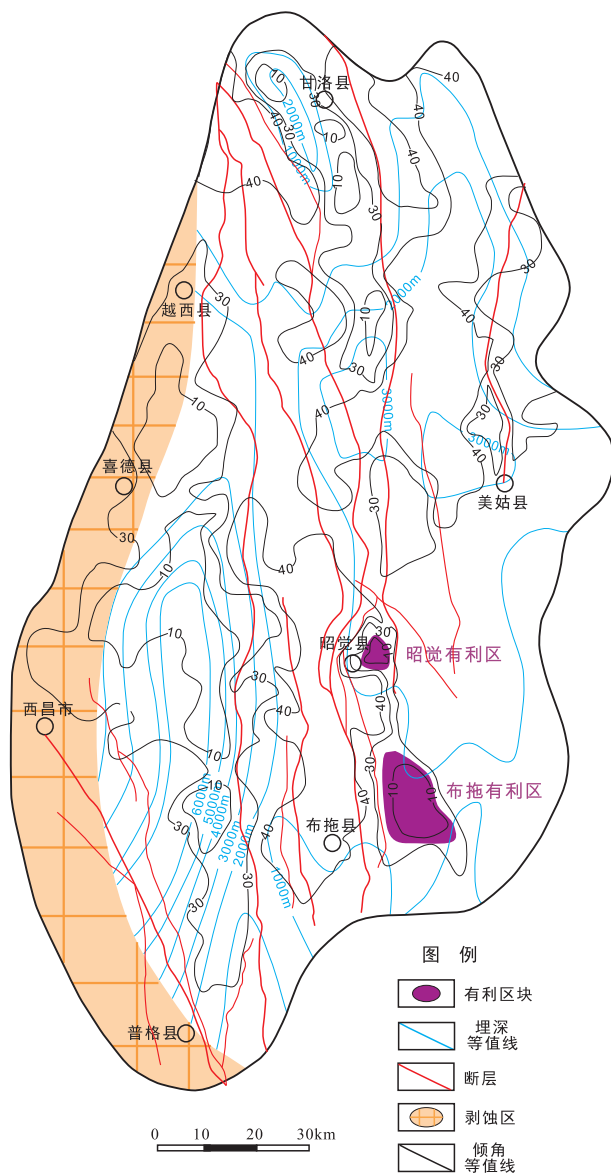


图 13 西昌盆地页岩气有利区优选图

Fig. 13 Optimal shale gas areas in Xichang Basin

- Energy exploration & exploitation, 33(3): 259–276.
- GUO Xusheng, HU Dongfeng, LI Yuping, et al., 2017. Geological factors controlling shale gas enrichment and high production in Fuling shale gas field[J]. Petroleum exploration and development, 44(4): 513–523.
- XU Zhengyu, XIONG Shaoyun, WANG Gaocheng, et al., 2014. Lower Paleozoic shale gas preservation condition analysis and evaluation in the Yangtze Block[J]. Acta geologica sinica, 88(2): 1700–1702.
- YI Jizheng, BAO Hanyong, ZHENG Aiwei, et al., 2019. Main factors controlling marine shale gas enrichment and high-yield wells in South China: a case study of the Fuling shale gas field[J]. Marine and petroleum geology, 103: 114–125.
- ZENG Lianbo, LYU Wenya, LI Jian, et al., 2016. Natural fractures and their influence on shale gas enrichment in Sichuan Basin, China[J]. Journal of natural gas science and engineering, 30: 3–8.
- ZENG Weite, ZHANG Jinchuan, DING Wenlong, et al., 2013. Fracture development in Paleozoic shale of Chongqing area (South China). Part one: fracture characteristics and comparative analysis of main controlling factors[J]. Journal of Asian earth sciences, 75: 251–266.
- 陈长云, 何宏林, CHEN Chang-yun, 等, 2008. 大凉山地区新生代地壳缩短及其构造意义[J]. 地震地质, 30(2): 443–453.
- 程克明, 王世谦, 董大忠, 等, 2009. 上扬子区下寒武统筇竹寺组页岩气成藏条件[J]. 天然气工业, 29(5): 40–44.
- 从柏林, 赵大升, 张雯华, 等, 1973. 西昌地区岩浆活动特征及其与构造地质的关系[J]. 地质科学, (3): 3–23.
- 邓祖佑, 王少昌, 姜正龙, 等, 2000. 天然气封盖层的突破压力[J]. 石油与天然气地质, 21(2): 44–46.
- 段伟刚和从七坝, 2004. 从七坝 1 井看西昌地区古生界储层特征[J]. 天然气工业, (3): 49–51+144.
- 范明, 俞凌杰, 徐二社, 等, 2018. 页岩气保存机制探讨[J]. 石油实验地质, 40(1): 126–132.
- 伏明珠和覃建雄, 2011. 四川西昌盆地沉积演化史研究[J]. 四川地质学报, 31(1): 1–5.
- 郭彤楼, 2016. 中国式页岩气关键地质问题与成藏富集主控因素[J]. 石油勘探与开发, 43(3): 317–326.
- 何伟, 陈杨, 雷玉雪, 等, 2021. 鄂西地区五峰组—龙马溪组岩石相与页岩气富集关系分析—以鄂红地 1 井为例[J]. 煤炭学报, 46(3): 1014–1023.
- 何伟, 张金川, 李莉, 等, 2015. 湘西北常页 1 井下寒武统牛蹄塘组页岩气储层特征[J]. 中国煤炭地质, 27(1): 31–39.
- 胡东风, 张汉荣, 倪楷, 等, 2014. 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, 34(6): 24–30.
- 胡明, 黄文斌, 李加玉, 等, 2017. 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, 37(8): 31–39.
- 黄金亮, 邹才能, 李建忠, 等, 2012. 川南志留系龙马溪组页岩气形成条件与有利区分析[J]. 煤炭学报, 37(5): 782–787.
- 李天生, 1989. 四川盆地宝塔组(O_2^{+3})储集性和油气远景[J]. 海相沉积区油气地质, 3(1): 63–70.
- 刘丽华, 徐强, 范明祥, 等, 2003. 西昌盆地构造特征和含油气条件分析[J]. 天然气工业, 23(5): 34–35.
- 刘鹏, 吴佩津, 彭钰洁, 等, 2018. 焦石坝地区构造特征及页岩气保存模式研究[J]. 特种油气藏, 25(2): 37–41.
- 刘树根, 邓宾, 李智武, 等, 2011. 盆山结构与油气分布——以四川盆地为例[J]. 岩石学报, (3): 621–635.
- 刘树根, 李国荣, 郑荣才, 等, 2004. 西昌盆地油气保存条件研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 31(6): 575–580.
- 刘树根, 李国蓉, 郑荣才, 等, 2004. 西昌盆地上三叠统储层特征研究[J]. 天然气工业, 24(2): 14–17.
- 刘树根, 孙玮, 李智武, 等, 2016. 四川叠合盆地海相碳酸盐岩油气分布特征及其构造主控因素[J]. 岩性油气藏, 28(5): 1–17.
- 罗兵, 郁飞, 陈亚琳, 等, 2018. 四川盆地涪陵地区页岩气层构造特征与保存评价[J]. 石油实验地质, 40(1): 103–117.
- 聂海宽, 何治亮, 刘光祥, 等, 2020. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气优质储层成因机制[J]. 天然气工业, 40(6): 31–41.
- 聂海宽, 汪虎, 何治亮, 等, 2019. 常压页岩气形成机制、分布规律及勘探前景——以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组为例[J]. 石油学报, 40(2): 131–143.
- 邵红君, 许智雄, 徐宏远, 等, 2019. 西昌盆地喜德构造奥陶系大筇竹寺组油气前景分析[J]. 山东化工, 048(12): 109–111.
- 舒逸, 陆永潮, 包汉勇, 等, 2018. 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, 38(3): 31–40.
- 宋玉光, 赵路子, 贾国相, 等, 1998. 西昌盆地七里坝构造油气化探异常特征及构造含油气评价[J]. 矿产与地质, 12(4): 275–280.
- 覃建雄, 张长俊, 李天生, 等, 1994. 西昌盆地流体包裹体及其在油气勘探中的应用[J]. 石油与天然气地质, 15(3): 216–225.
- 汤济广, 李豫, 汪凯明, 等, 2015. 四川盆地东南地区龙马溪组页岩气有效保存区综合评价[J]. 天然气工业, 35(5): 15–23.
- 唐勇和覃建雄, 2007. 四川西昌盆地三叠系沉积环境分析[J]. 四川地质学报, (2): 92–95.
- 王世谦, 陈更生, 董大忠, 等, 2009. 四川盆地古生界页岩气藏形成条件与勘探前景[J]. 天然气工业, 29(5): 137–138.
- 王运生和李云岗, 1996. 西昌盆地的形成与演化[J]. 成都理工学院学报, (1): 85–90.
- 魏祥峰, 李宇平, 魏志红, 等, 2017. 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, 39(2): 147–153.
- 颜自给, 樊建强, 贾国相, 等, 2004. 西昌盆地油气化探普查效果及下一步找油气方向[J]. 矿产与地质, (4): 39–42.
- 杨平, 陈杨, 冯伟明, 等, 2021. 西昌盆地白果湾组致密砂岩油气形成关键指标评价与有利区优选[J]. 沉积与特提斯地质, doi:10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.04001
- 杨平, 余谦, 牟传龙, 等, 2021. 四川盆地西南缘山地复杂构造区页岩气富集模式及勘探启示: 一个页岩气新区[J]. 天然气工业, 41(5): 13.
- 杨威, 魏国齐, 金惠, 等, 2020. 西昌盆地上三叠统白果湾组沉积相与油气勘探前景[J]. 天然气工业, 40(3): 14–15.
- 姚雪根, 2007. 四川盆地天然气藏的破坏与保存条件剖析[J]. 海相油气地质, 12(4): 21–36.
- 张朝文, 1979. 从岩浆活动试论安宁河深断裂带的生成和发展[J]. 成都地质学院学报, (3): 65–75.
- 邹玉涛, 李让彬, 张新, 等, 2016. 川东南涪陵地区构造演化与油气成藏关系[J]. 天然气勘探与开发, 39(1): 9–13.

Preservation condition for shale gas of Wufeng-Longmaxi Formations in Xichang Basin

LI Tao^{1,2}, YANG Guilai³, HE Wei^{1,2}, CHEN Yang^{1,2}, ZHOU Ruiqi^{1,2}, MU Bixin^{1,2}, WEI Honggang^{1,2}

(1. *Sichuan Institute of Coal Field Geological Engineering Exploration and Designing, Chengdu 610072, China*; 2. *Key Laboratory of Shale Gas Evaluation and Exploitation of Sichuan Province, Chengdu 610091, China*; 3. *Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China*)

Abstract: In this paper, based on data of drilling wells and geological survey, the main factors affecting the preservation of shale gas such as the lithological conditions of roof and floor rocks, structure conditions, pressure conditions, and gas components of the Wufeng-Longmaxi Formations in Xichang Basin are detailedly studied from both macro and micro aspects. The results show that the depressions in Xichang Basin are separated by strike-slip belts or thrust belts. Strata within depressions are gently dipping, usually developing broad, slow and open folds. Due to activities of thrust faults in basin margins, folds usually appear as tight folds and strata are often nearly upright or even overturned in basin margins. Within Xichang Basin, tectonic deformation is weak. Shale rocks of Longmaxi Formation in Butuo, which is located in the southern Xichang Basin, have formed the typical pressure sealing box-type geological structure which is propitious to shale gas. Based on an overall consideration of structural deformation conditions of fault, fracture, uplifting and the erosion of Xichang Basin, it is suggested that Zhaojue and Butuo are two favorable areas for shale gas in the eastern edge of Xichang Basin.

Key words: Wufeng-Longmaxi Formation; structural features; shale gas; preservation condition; Xichang basin