

复杂构造背景区页岩气富集条件研究

——以大巴山前缘地区为例

康建威^{1,2}, 林小兵¹, 余谦², 田景春¹, 门玉澎², 闫剑飞², 林家善², 孙媛媛²

(1. 成都理工大学 沉积地质研究院, 成都 610059; 2. 成都地质调查中心, 成都 610081)

摘要:通过大巴山前缘地区五峰—龙马溪组富有机质泥岩的野外露头、钻井、岩心等资料的研究,对一系列岩石样品进行了显微薄片、扫描电镜、有机地化、孔渗性、比表面积、含气性解析等多项实验测试分析,对五峰—龙马溪组页岩气的富集条件进行了综合研究。结果表明:大巴山前缘地区富有机质泥岩总体处在浅水—深水陆棚沉积环境下,其沉积厚度在 40~70 m 左右,平均有机碳含量大于 2%;有机质类型为腐泥型 I 型干酪根,有机质成熟度多数为 0.82%~3.04%,达到高一过成熟阶段;低渗透—低孔特征,并发育多种微观空隙结构。典型钻井解剖分析认为,页岩气保存条件是该区富集条件中最为关键的因素;未被断裂破坏的箱状背斜是最有利的构造保存条件。

关键词:富有机质泥岩;页岩气富集条件;构造复杂区;五峰—龙马溪组;大巴山前缘

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

Shale gas enrichment conditions in complex geological structure areas:

A case study in the front margin of Daba Mountain

Kang Jianwei^{1,2}, Lin Xiaobing¹, Yu Qian², Tian Jingchun¹,

Men Yupeng², Yan Jianfei², Lin Jiashan², Sun Yuanyuan²

(1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: A series of investigations on both outcrops and drilling cores from the front edge of Daba Mountain were carried out. Organic-rich mudstones collected from the Wufeng-Longmaxi formations in Fengjie-Kaixian-Baiquan-Manyue areas were sampled and analyzed. Information was obtained from thin sections and Scanning Electron Microscopy (SEM), and some relevant laboratory tests including organic geochemistry, X-ray diffraction, He-porosity and permeability and Specific Surface Area were made to summarize the basic geological conditions of Wufeng-Longmaxi formations in the study area. The results show that the organic-rich mudstones in the front edge of Daba Mountain were probably formed in a shallow to deep shelf during the Late Ordovician-Early Silurian. The thicknesses of these mudstones range 40-70 m, and the average total organic carbon (TOC) content is more than 2%. The kerogen mainly shows characteristics of type I. The thermal maturity of mudstones ranges 0.82%-3.04%, indicating a high to over mature stage. Additionally, the features of low permeability and low porosity as well as several types of pore microstructures were observed in these mudstones. The analyses of typical wells indicate that the preservation of shale gas is a key element for hydrocarbon accumulation. The well-preserved box-shaped anticlines are most favorable for shale gas preservation.

Key words: organic-rich mudstone; shale gas preservation condition; complex geological structure area; Wufeng-Longmaxi formations; front margin of Daba Mountain

美国页岩气田具有页岩分布广泛、埋藏浅、厚度大、成熟度低等特征,尤其重要的是美国页岩气往往分布在构造稳定的地区。近年来,中国的页岩气

勘探开发取得了突破性进展,处于构造相对稳定地区的长宁、昭通、威远和焦石坝地区的上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩气已实现商业开发。

收稿日期: 2017-03-06; 修订日期: 2017-06-10。

作者简介: 康建威 (1980—), 男, 在读博士, 工程师, 从事沉积与油气地质研究。E-mail: best_kang@163.com。

通信作者: 林小兵 (1980—), 博士, 讲师, 从事沉积地质学的教学与科研工作。E-mail: linxiaobing07@cduet.cn。

基金项目: 中国地质调查局“四川盆地古生界海相页岩气基础地质调查”(DD20160176)和重庆市国土资源和房屋管理局“重庆富有机质页岩沉积特征与储层评价研究”(渝地调设审字[2013]032号)资助。

近期,位于四川盆地边缘构造复杂区的贵州省北部正安地区安页 1 井获得重大突破,有望成为千亿立方储量的大型页岩气田。这些成功均证明不仅仅在盆内稳定构造区有着良好的页岩气勘探前景,在复杂构造背景区同样值得我们进一步研究。因此,中国页岩气的发展不能简单复制美国页岩气的成功经验,应结合我国复杂的地质背景,探索中国式的页岩气勘探理论。

大巴山前缘地区处于四川盆地北部边缘,由北向南分布着逆冲推覆区、断层结合带、褶皱结合带,具有较为复杂的构造背景。总体上该区的页岩气勘探开发处于探索阶段,勘探方向并不明确^[1-12]。截至目前,该区共实施了 14 口页岩气调查井,但是多数钻井并未取得良好的页岩气显示。不过最新的井 3 井良好的页岩气显示又为该地区页岩气勘探提供了新的希望。因此有必要综合该地区页岩气多种地质要素,对五峰—龙马溪组页岩气地质特征及富集条件进行深入研究。本文通过对该区大量的野外露头剖面实测,结合最新的钻井资料,分析、综合已取得的研究成果,研究了构造复杂背景下的页岩气地质条件和富集因素,划定有效的勘探有利区,以期为后期勘探开发提供依据。

1 构造特征

大巴山前缘地区主体位于上扬子地块北缘、四川盆地与秦岭造山带的过渡带上,西与米仓山基底

冲断隆起带相连,东南部与川东高陡褶皱带毗邻,整体上为一向南西凸出的弧形构造带。大巴山现今构造格局呈现为一系列由北东向南西推挤的逆冲推覆构造,形成叠瓦状逆冲推覆构造系和滑脱—拆离构造^[13-18](图 1)。习惯上,以规模巨大的城口—房县深断裂为界,将大巴山冲断带划分为 2 个构造—地层单元:即北大巴山逆冲推覆构造带和南大巴山冲断带。前者以城口断裂为南界,由秦岭区浅变质的震旦系至下古生界火山—沉积岩系构成;后者以城口断裂为界,南以铁溪—巫溪隐伏断裂与四川盆地为界,卷入变形的地层从震旦系至侏罗系。

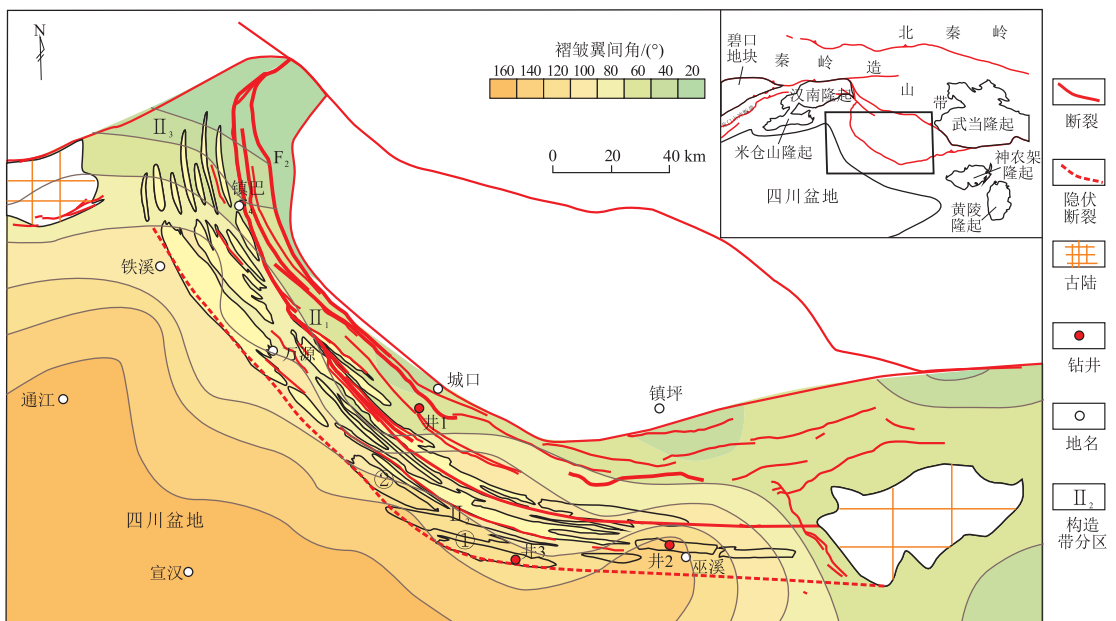
2 页岩气富集的物质条件特征

2.1 富有机质泥岩平面分布特征

作为页岩气载体的富有机质泥岩,其平面分布的规律和特点是研究页岩气富集最根本的物质基础。

通过对大巴山前缘地区五峰—龙马溪组野外剖面实测、钻井资料分析(图 1),并选取总有机碳(TOC)含量大于 1% 作为该区的富有机质泥岩进行研究^[19-22]。

在研究区东部,受麻柳—大竹潜隆起的影响,由皮窝至双河五峰—龙马溪组富有机质泥岩厚度逐渐增大,由 31.5 m 增厚至 51 m,在城口明通地区如明通剖面厚度达 74 m,白泉剖面厚度达 70.8 m;向大巴山前缘厚度增大,并在田坝地区形成厚度相



II₁,南大巴山叠瓦断层带; II₂,南大巴山滑脱褶皱带; II₃,米仓山—南大巴山叠加变形区
F1.城口断层; F2.兴隆场断层; F3.坪坝断层; F4.镇巴断层; F5.鸡鸣寺断层; F6.铁溪断层; ①田坝背斜; ②满月向斜

图 1 大巴山地区构造分带特征

Fig.1 Structural zoning of Daba Mountain

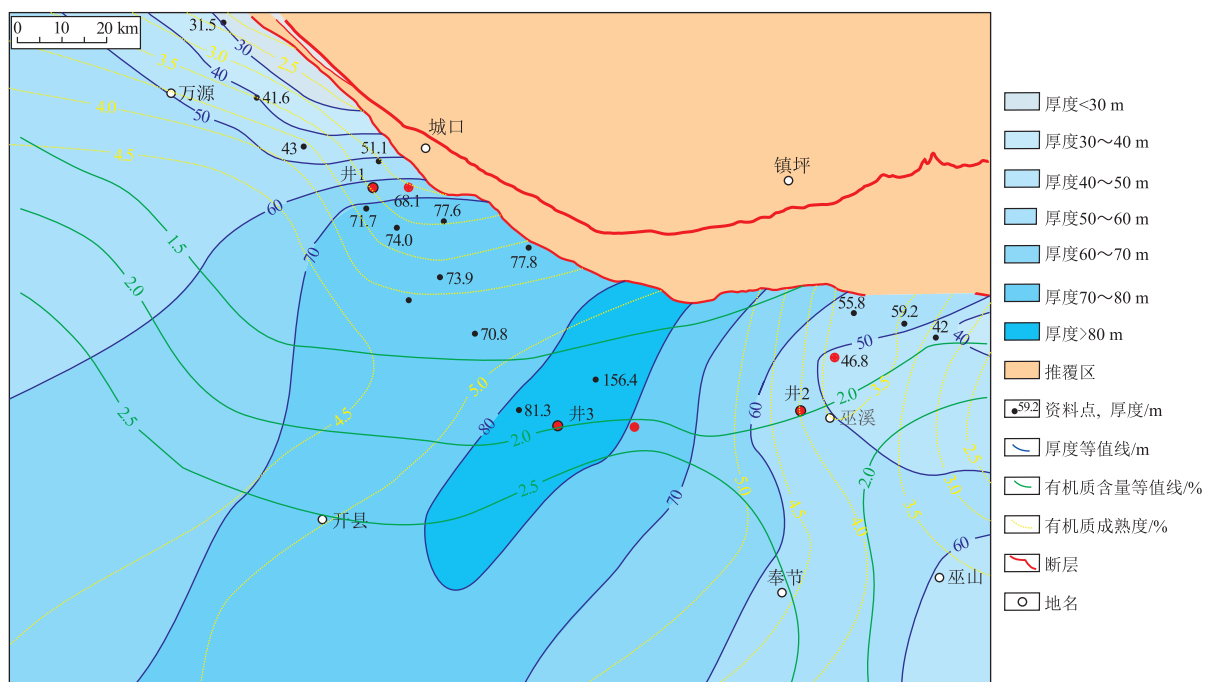


图2 大巴山前缘地区五峰—龙马溪组富有机质泥岩厚度、含量、成熟度特征
 Fig.2 Thickness, TOC content and maturity of organic-rich mudstones in the Wufeng-Longmaxi formations, the front margin of Daba Mountain

对较大的沉积区,厚度可达 70 m;向西往城口方向至白泉、中岗一带,再到明通、庙坝,最后至双河地区沉积水体变浅,厚度呈逐渐减薄的趋势。其中,位于最西侧的皮窝地区的富有机质泥岩厚度为 31.51 m;白泉、中岗及周边地区的厚度则为 34.9~47.3 m;明通与庙坝一带厚度为 38.1~41.46 m。田坝向东往巴东方向至白鹿地区,再到栗子坪一带,最后至巴东县两河口、大桥滩及周边地区,由西向东富有机质泥岩厚度呈逐渐减薄的趋势。栗子坪地区富有机质泥岩厚度为 35.82 m;继续向东至巴东县两河口,大桥滩及周边地区厚度逐渐减薄,为 26.12~26.92 m(图 2)。

总体上,研究区的大部分地区都具有较厚的富有机质泥岩,能够为页岩气富集提供最基本的条件。

2.2 有机碳含量及其变化特征

总有机碳含量是评价页岩有机质丰度的一项主要指标,也是生烃量和生烃强度的重要决定因素,较高的有机碳含量是页岩气富集高产的根本要素。

在纵向上,以井 2 井剖面为例(图 3),从下至上,五峰组富有机质泥岩段的 TOC 值介于 1.79%~6.53%之间,平均为 3.67%;龙马溪组下部富有机质泥岩段的 TOC 值在 1.91%~3.38%之间,平均值为 2.57%;龙马溪组上段非黑色泥岩段的有机碳含量明显降低,为 1.35%。

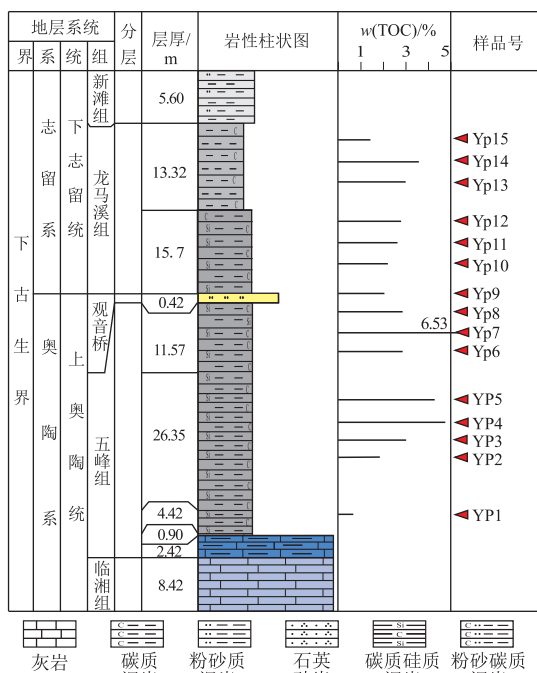


图3 大巴山前缘地区井 2 井有机碳含量变化
 Fig.3 Changes of TOC content of Jing2 well in the front margin of Daba Mountain

TOC 变化显示了 3 个峰值,分别出现在五峰组中部、上部及龙马溪组中下部,其中,以五峰组上部(纵向上第二个)峰值最为突出(TOC 含量达到 6.53%)。由此可知,该剖面 TOC 高值主要集中在五峰组黑色泥岩段,龙马溪组黑色泥岩次之,龙马

溪组非黑色页岩段 TOC 含量最小。该剖面有机碳含量大于 2.0% 的泥岩厚度为 34.9 m。

平面上,向西到大巴山前缘的镇巴地区,有机碳含量相对稳定。大巴山前缘地区镇巴—万源一线,TOC 由渔渡剖面的 2.01% 到万源皮窝剖面的 3.56%,显示有机碳含量向万源地区增大;而在巫溪中岗、田坝地区 TOC 达到了 5.13% 和 5.17%;向西的白鹿、沿渡河镇 TOC 下降至 3.15% 和 2.73% (图 2)。因此,从总体上显示在开县—奉节形成了有机碳含量的最大值区,这与富有机质泥岩厚度在一定程度上一致。

2.3 有机质成熟度特征

研究区五峰组—龙马溪组富有机质页岩经历了多期的热演化,成熟度 R_o 大部介于 1.5% ~ 3.04% 之间,平均 1.93%,基本处于成熟阶段。

平面上,受断裂和埋深的影响,由北向南,五峰组—龙马溪组富有机质页岩热演化程度逐渐升高 (图 2)。开县田坝—巫溪田坝—巫溪双阳一线以南地区, R_o 一般大于 2.5%;向北至万源白沙—城口满月—巫溪中良—巫溪双桥一带,向东至巴东张家坡一带, R_o 值介于 1.5% ~ 2.0% 之间。在大巴山前缘万源—曹家地区,受星子山隆起及平坝断裂逆冲推覆的影响,万源曹家—城口明通—巫溪白鹿地区以及巴东沿渡河地区以 $1.3% < R_o < 2.0%$ 为主,属于高成熟演化阶段。而庙坝—蓼子湾地区 R_o 多数小于 1.3%,属于低成熟演化阶段。

2.4 孔隙度和渗透率特征

对大巴山前缘典型剖面和钻井五峰—龙马溪组样品进行了孔隙度和渗透率测定,并在此基础上进行综合分析认为:研究区孔隙度最高值多数为 1% ~ 3%,最低值为一般 0.8% ~ 0.9%,平均值多数为 1.5% ~ 1.9%,具有中—高孔隙度特征;渗透率最高值多数在 $(0.01 \sim 0.015) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,最低值在 $(0.001 \sim 0.002) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,平均值在 $(0.002 \sim 0.004) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,具有低渗透率特征。总体来说,龙马溪组上部地层孔隙度比下部略高,渗透率也略

呈现此特征,但孔隙度、渗透率比较差,具有低孔—超低渗的特征,而且具有孔隙度分散、渗透率接近的特点。

2.5 岩石比表面特征

大巴山前缘地区五峰—龙马溪组地表剖面富有机质页岩 BET 比表面积在 $3.41 \sim 27.32 \text{ m}^2/\text{g}$,平均为 $8.94 \text{ m}^2/\text{g}$ 。井 2 井五峰—龙马溪组 BET 比表面积在 $8.09 \sim 23.02 \text{ m}^2/\text{g}$,平均 $14.27 \text{ m}^2/\text{g}$ (表 1)。对比涪陵焦石坝区块五峰组—龙马溪组富有机质页岩样品 BET 比表面积为 $8.4 \sim 33.3 \text{ m}^2/\text{g}$,平均为 $18.9 \text{ m}^2/\text{g}$ [23]。页岩比表面积巨大,能为页岩吸附提供非常有利的条件。

3 页岩气富集关键因素分析

在构造背景复杂区,大巴山前缘地区断裂褶皱十分发育 (图 4),把原本分布面积广、厚度大、有机质含量高的富有机质泥岩重新分布在不同构造区带里。其中井 1、井 2、井 3 井分别处在不同的构造带内,受不同的构造作用控制。三者在富有机质泥岩厚度、TOC 含量、有机质成熟度、孔隙物性参数、比表面积、埋深特征等方面都存在着较大的相似性,

表 1 大巴山前缘地区井 2 井五峰—龙马溪组富有机质泥岩比表面积分析

Table 1 Specific Surface Area of organic-rich mudstones in Wufeng-Longmaxi formations in Jing2 well, the front margin of Daba Mountain

样品	层位	深度/m	比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$
B1	五峰组	1 295.4	10.31
B2	五峰组	1 290.5	11.94
B3	五峰组	1 285.7	8.09
B4	五峰组	1 279.8	13.65
B5	五峰组	1 273.7	15.65
B6	五峰组	1 258.7	9.84
B7	五峰组	1 256.5	19.18
B8	五峰组	1 251.8	18.25
B9	龙马溪组	1 248.7	23.02
B10	龙马溪组	1 243.8	12.74
B11	龙马溪组	1 238.6	14.31

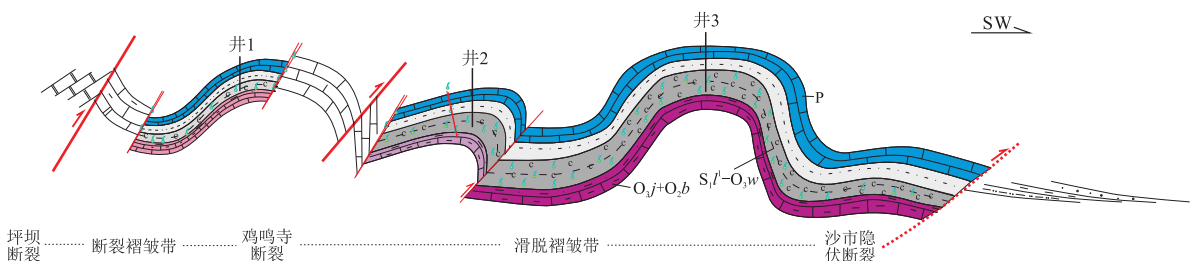


图 4 大巴山前缘地区井 1—井 2—井 3 井位构造样式示意图

Fig.4 Structural styles of Jing1,2,3 wells in the front margin of Daba Mountain

表2 大巴山前缘地区不同构造区各钻井富集条件对比
Table 2 Enrichment conditions in wells of different structural styles in the front margin of Daba Mountain

钻井	富有机质泥岩厚度/m	平均 TOC 含量/%	R_o /%	孔隙度	渗透率	含气性
井1	74	4.5	1.5	纳米孔为主	低	总含气量 0.03~2.4 m ³ /t 之间,平均 0.5 m ³ /t; 含 37% 氮气,53% 甲烷气
井2	83	3.8	2.7	纳米孔为主	低	总含气量 0.01~0.22 m ³ /t, 平均为 0.07 m ³ /t; 含 41% 氮气,51% 甲烷气
井3	89	4.7	2.4	纳米孔为主	低	总含气量 1~8 m ³ /t, 平均为 3.4 m ³ /t; 含 95.17% 甲烷气

但是最终含气性却出现了较大的偏差(表2)。

以井2、井1井为例,二者具备了页岩气富集的多种要素,并且在富有机质泥岩和有机碳含量方面远比礁石坝页岩气田典型页岩气钻井——JY1井优越,孔隙度和比表面积条件也达到了页岩气富集条件的要求,但是最终含气性却存在很大差异。值得注意的是,其解析气中均含有一定比例的氮气,说明井2、井1井富有机质泥岩段与大气连通,散失了大部分游离气。通过对页岩气其他富集要素的分析,发现解析气含量与比表面呈现较高的相关性,而与有机碳含量、有机质成熟度、渗透率、孔

隙度、黏土矿物均呈现较低的相关性(图5)。因此,从一定程度讲,保存条件是研究区页岩气富集最为关键的因素。

从所处构造位置看,井2、井1井位于坪坝断裂和镇巴—鸡鸣寺断裂中间夹持的断裂褶皱带内,其间断裂密集分布,局部褶皱翼间角较小(图1),使得褶皱多以斜歪紧闭褶皱存在,而且褶皱之间多以断层相连,造成了富有机质泥岩分布地表的不连续,地覆的不统一,在一定程度上甚至以断片的形式存在,造成了其范围和状态发生了不可预测的变化。

构造作用对页岩气保存是一把双刃剑,适当的

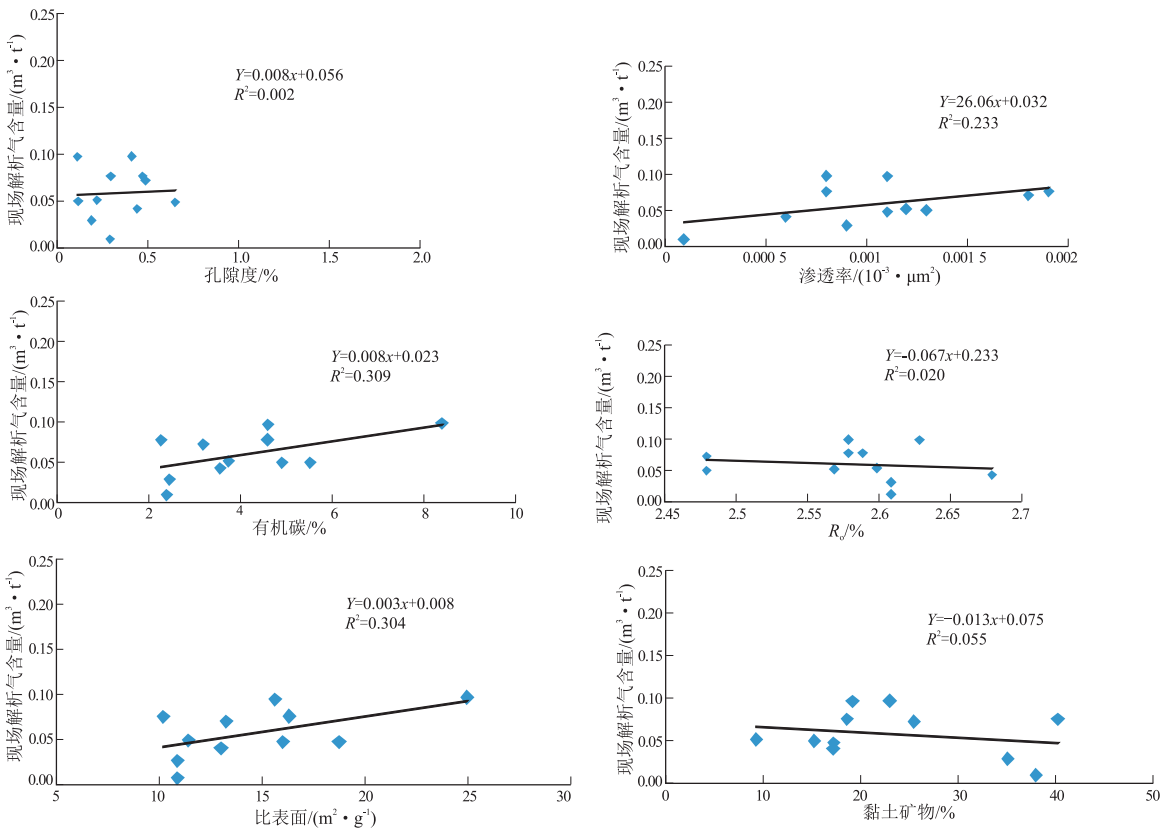


图5 大巴山前缘地区井2井解析气量相关性

Fig.5 Different influencing factors for gas amount in Jing2 well in the front margin of Daba Mountain

构造挤压富有机质泥岩段获得较大的地层或者岩石压力,在挤压应力场下会形成多种裂隙,增大可容纳空间,处在这种压而不破状态下的富有机质泥岩会更利于页岩气的聚集以及后期的开发。但是断裂尤其是“通天”断裂会破坏压力场下的平衡,甚至会使压力场转变为张力场,并形成常压状态,从而使游离气大量散失,不利于页岩气的保存。井2、井1井含气较差的原因就是保存条件遭到了破坏,而这种破坏的直接原因就是复杂构造背景下褶皱紧闭斜歪和大量“通天”断裂带发育。

根据钻井资料显示,井3井含气量为 $1\sim 2\text{ m}^3/\text{t}$ 的含气层段34 m,含气量为 $2\sim 3\text{ m}^3/\text{t}$ 的富含气层段25 m,含气量大于 $3\text{ m}^3/\text{t}$ 的高含气层段34 m,最高含气量超过 $8\text{ m}^3/\text{t}$,气体组分以甲烷为主(甲烷平均含量95.17%),是大巴山前缘地区最具有良好的页岩气显示和资源潜力的页岩气钻井。初步分析表明,解析气含量与有机碳含量、有机质成熟度、渗透率、孔隙度、黏土矿物、比表面积均呈现很好的正相关性。

井3井构造上位于铁溪—巫溪隐伏断裂带以北、平坝断裂以南的南大巴山褶皱带内,是造山与盆地的盆缘过渡带。该区域内断裂发育一般,规模较小,多数以隐伏断裂为主,井3井位于田坝箱状背斜北翼,在应力上以挤压应力为主。由于背斜向底部的收敛作用,使得地层由上到下挤压应力是增加的,五峰组—龙马溪组地层承受较强的应力作用,富有机质泥岩段上下面具有较大的应力差异。在这种应力挤压下,泥岩段发育大量的网状裂隙、裂缝,部分半充填裂缝、裂隙,这为游离气的存在提供了一定的空间,同时也有利于页岩储集层的后期压裂改造。

综上所述,分布广泛的富有机质泥岩、较高的有机碳含量、合理的有机质成熟度、较大的比表面积、多种孔隙的发育等是页岩气富集的基本条件,而这些基本条件在构造背景复杂的大巴山地区多数地方均已具备,但是研究区多数的钻井失败和井3井的成功表明,必须具备较好的保存条件才是该区页岩气富集最为关键的要素。而影响研究区构造保存的是大量发育的通天断裂和被断裂破坏了的斜歪褶皱。根据大巴山前缘地区构造发育特征,结合埋深的影响,坪坝断裂以南靠近盆地的滑脱褶皱带断裂发育较少,向斜和背斜分布广泛,该区域内相对宽缓的箱状背斜是勘探的目标和方向,如田坝背斜、满月背斜。

4 结论

(1)在构造背景复杂的大巴山前缘地区,五峰—龙马溪组沉积厚度在40~70 m左右,平均有机碳含量大于2%,有机质类型为腐泥型I型干酪根,有机质成熟度多数为0.82%~3.04%,达到高一过成熟阶段,具低渗透—低孔特征,并发育多种微观孔隙结构,具备了页岩气富集的基本条件。

(2)复杂构造背景下的大巴山前缘地区的页岩气富集条件中,厚层的富有机质页岩为页岩气的生成提供了物质基础,高有机碳含量提供了生烃潜力,合理的有机质成熟度提供了生气动力,良好储集物性提供了容纳空间。但是较好的保存条件才是该区页岩气富集最为关键的要素。

(3)影响研究区构造保存的是大量发育的通天断裂和被断裂破坏了的斜歪褶皱。因此在大巴山盆缘地区的褶皱带内,二叠系或者三叠系覆盖的田坝背斜、满月背斜是最佳的勘探目标区。

参考文献:

- [1] 高长林,刘光祥,张玉箴,等.东秦岭—大巴山逆冲推覆构造与油气远景[J].石油实验地质,2003,25(S):523-531.
Gao Changlin, Liu Guangxiang, Zhang Yuzhen, et al. Thrusting nappe structure and oil-gas potential in eastern Qinling and Daba mountain[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(S): 523-531.
- [2] 张晓斌,范增辉,欧阳诚,等.董大巴山—米苍山前缘地区油气主控因素及勘探有利区分析[J].复杂油气藏,2014,7(1):21-24.
Zhang Xiaobin, Fan Zenghui, Ouyang Cheng, et al. Main factors controlling hydrocarbon accumulation and favorable exploration targets in the front of Daba - Micang Mountain [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2014, 7(1): 21-24.
- [3] 肖开华,沃玉进,周雁,等.中国南方海相层系油气成藏特点与勘探方向[J].石油与天然气地质,2006,27(3):316-325.
Xiao Kaihua, Wo Yujin, Zhou Yan, et al. Petroleum reservoiring characteristics and exploration direction in marine strata in southern China[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(3): 316-325.
- [4] 贾锦生,宋华颖,伊海生,等.米仓山—大巴山前缘古生界重点剖面烃源岩特征研究[J].天然气地质科学,2001,22(6):1046-1053.
Jia Jinsheng, Song Huaying, Yi Haisheng, et al. Characteristic of Paleozoic hydrocarbon source rocks from key sections of frontal Micangshan-Daba [J]. Natural gas geoscience, 2001, 22(6): 1046-1053.
- [5] 燕继红,李启桂,朱祥.四川盆地及周缘下寒武统页岩气成藏主控因素与勘探方向[J].石油实验地质,2016,38(4):445-452.
Yan Jihong, Li Qigui, Zhu Xiang. Main factors controlling shale gas accumulation and exploration targets in the Lower Cambrian,

- Sichuan Basin and its periphery[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(4): 445-452.
- [6] 余谦,牟传龙,张海全,等.上扬子北缘震旦纪—早古生代沉积演化与储层分布特征[J]. *岩石学报*, 2011, 27(3): 672-680.
- Yu Qian, Mu Chuanlong, Zhang Haiquan, et al. Sedimentary evolution and reservoir distribution of northern Upper Yangtze Plate in Sinian-Early Paleozoic[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(3): 672-680.
- [7] 梁榜,何生,陈学辉,等.鄂西渝东地区东岳庙段页岩气勘探潜力研究[J]. *断块油气田*, 2015, 22(1): 36-41.
- Liang Bang, He Sheng, Chen Xuehui, et al. Exploration potential of Dongyuemiao Member shale gas in western Hubei - eastern Chongqing area [J]. *Fault - Block Oil and Gas Field*, 2015, 22(1): 36-41.
- [8] 余江浩,周世卿,王亿,等.中扬子长阳地区寒武系牛蹄塘组页岩气成藏地质条件[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(5): 9-15.
- Yu Jianghao, Zhou Shiqing, Wang Yi, et al. Geological conditions of shale gas reservoiring in the Cambrian Niutitang Formation, the Middle Yangtze region of Changyang area [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(5): 9-15.
- [9] 刘伟,余谦,闫剑飞,等.上扬子地区志留系龙马溪组富有机质泥岩储层特征[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(3): 346-352.
- Liu Wei, Yu Qian, Yan Jianfei, et al. Characteristics of organic-rich mudstone reservoirs in the Silurian Longmaxi Formation in Upper Yangtze region [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(3): 346-352.
- [10] 梁峰,拜文华,邹才能,等.渝东北地区巫溪2井页岩气富集模式及勘探意义[J]. *石油勘探开发*, 2016, 43(3): 350-358.
- Liang Feng, Bai Wenhua, Zou Caineng, et al. Shale gas enrichment pattern and exploration significance of well Wuxi-2 in northeast Chongqing, NE Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(3): 350-358.
- [11] 要继超,王兴志,罗兰,等.渝东地区龙马溪组页岩气成藏地质条件研究[J]. *特种油气藏*, 2016, 23(4): 77-80.
- Yao Jichao, Wang Xingzhi, Luo Lan, et al. Geology of Longmaxi shale gas accumulation in Eastern Chongqing [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2016, 23(4): 77-80.
- [12] 武瑾,梁峰,拜文华,等.渝东北地区下志留统龙马溪组页岩气勘探前景[J]. *特种油气藏*, 2015, 22(6): 50-55.
- Wu Jin, Liang Feng, Bai Wenhua, et al. Exploration prospect of Lower Silurian Longmaxi Formation shale gas in northeastern Chongqing City [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2015, 22(6): 50-55.
- [13] 许志琴,卢一伦,汤耀庆,等.东秦岭造山带的变形特征及构造演化[J]. *地质学报*, 1986, 60(3): 237-247.
- Xu Zhiqin, Lu Yilun, Tang Yaoqing, et al. Deformation characteristics and tectonic evolution of the eastern Qinling orogenic belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1986, 60(3): 237-247.
- [14] 李智武,刘树根,罗玉宏,等.南大巴山前陆冲断带构造样式及变形机制分析[J]. *大地构造与成矿学*, 2006, 30(3): 294-304.
- Li Zhiwu, Liu Shugen, Luo Yuhong, et al. Structural style and deformational mechanism of southern Dabashan foreland fold-thrust belt in central China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2006, 30(3): 294-304.
- [15] 张国伟,张本仁,袁学诚,等.秦岭造山带与大陆动力学[M].北京:科学出版社,2001.
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, et al. Orogenic belt of Qinling Mountains and continental dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [16] 张岳桥,施炜,李建华,等.大巴山前陆弧形构造带形成机理分析[J]. *地质学报*, 2010, 84(9): 1300-1315.
- Zhang Yueqiao, Shi Wei, Li Jianhua, et al. Formation mechanism of the Dabashan foreland arc-shaped structural belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(9): 1300-1315.
- [17] 肖安成,魏国齐,沈中延,等.扬子地块与南秦岭造山带的盆地系统与构造耦合[J]. *岩石学报*, 2011, 27(3): 601-611.
- Xiao Ancheng, Wei Guoqi, Shen Zhongyan, et al. Basin - mountain system and tectonic coupling between Yangtze block and South Qinling orogen [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(3): 601-611.
- [18] 陈旭,徐均涛,成汉钧,等.论汉南古陆及大巴山隆起[J]. *地层学杂志*, 1990, 14(2): 81-116.
- Chen Xu, Xu Juntao, Cheng Hanjun, et al. On the Hannan old land and Dabashan uplift [J]. *Journal of Stratigraphy*, 1990, 14(2): 81-116.
- [19] 涂乙,邹海燕,孟海平,等.页岩气评价标准与储层分类[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(1): 153-158.
- Tu Yi, Zou Haiyan, Meng Haiping, et al. Evaluation criteria and classification of shale gas reservoirs [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(1): 153-158.
- [20] 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.
- [21] 张金川,徐波,聂海宽,等.中国页岩气资源潜力[J]. *天然气工业*, 2008, 28(6): 136-140.
- Zhang Jinchuan, Xu Bo, Nie Haikuan, et al. Exploration potential of shale gas resources in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(6): 136-140.
- [22] 王茂桢,柳少波,任拥军,等.页岩气储层粘土矿物孔隙特征及其甲烷吸附作用[J]. *地质论评*, 2015, 61(1): 207-216.
- Wang Maozhen, Liu Shaobo, Ren Yongjun, et al. Pore characteristics and methane adsorption of clay minerals in shale gas reservoir [J]. *Geological Review*, 2015, 61(1): 207-216.
- [23] 杨锐,何生,胡东风,等.焦石坝地区五峰组—龙马溪组页岩孔隙结构特征及其主控因素[J]. *地质科技情报*, 2015, 34(5): 105-113.
- Yang Rui, He Sheng, Hu Dongfeng, et al. Characteristics and the main controlling factors of micro-pore structure of the shale in Wufeng Formation - Longmaxi Formation in Jiaoshiaba area [J]. *Geological Science and Technology Information* 2015, 34(5): 105-113.