

四川盆地涪陵页岩气田构造变形特征及对含气性的影响

孙健¹, 罗兵²

(1. 中国石化 江汉油田分公司, 湖北 潜江 433124; 2. 中国石化 江汉油田分公司 勘探开发研究院, 湖北 武汉 430223)

摘要:四川盆地东部涪陵页岩气田五峰组-龙马溪组页岩气藏目前已投入商业开发,从一期开发区的开发效果来看,单井产能具有较大的差异,页岩气藏的含气性平面上也具有差异性,而造成其差异的主控因素尚不明确。根据地质评价,该区的页岩厚度、矿物成分和有机碳含量等原始品质平面展布稳定,不是影响该区页岩气藏含气性变化的主要因素,含气性的差异可能与构造变形有重要关系。从区域构造变形特征入手,对该区的结构特征、构造格架、构造样式等开展了研究,认为研究区经历了多期构造运动,发育多层次滑脱构造,纵向上可划分为3个构造变形层、7种局部构造样式,平面上的构造变形强度具有明显差异性。初步尝试对构造变形程度进行量化表征,认为断距、地层增厚比例、曲率、断裂密度为表征该区构造变形强度的关键参数。通过对构造变形的量化表征,将研究区分为4个构造变形区,不同区的页岩含气性具有明显的差异,明确了构造变形强度是造成该区含气性差异的关键因素。

关键词:滑脱构造;构造样式;构造变形强度;含气性;页岩气藏;川东地区

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Structural deformation and its influences on gas storage in Fuling shale gas play, the Sichuan Basin

Sun Jian¹, Luo Bing²

(1. Jiangnan Oilfield Company, SINOPEC, Qianjiang, Hubei 433124, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Jiangnan Oilfield Company, SINOPEC, Wuhan, Hubei 430223, China)

Abstract: The shale gas reservoirs of the Wufeng-Longmaxi Formations in the Fuling shale gas play, the eastern Sichuan Basin have been put into commercial production. In the first-phase development block, the single well productivities show a great difference and the gas storage varies laterally, but the causes are still poorly understood. The previous geological evaluation indicated that the lateral distributions of the primary reservoir qualities like shale thickness, mineral composition, and organic carbon content are stable, thus could not be the key factors affecting gas storage. Instead, the variation of gas storage may be closely related to structural deformation. Starting with the characterization of regional structural deformation, this paper presents a systematical research on the structural features, tectonic framework and structural styles in the study area. The study area experienced multi-stage tectonic movements, resulting in multi-level decollement structures, which can be vertically divided into 3 structural deformation layers and 7 structural styles, with an obvious difference in structural deformation intensity. A preliminary quantitative characterization of the structural deformation intensity shows that the fault throw, formation thickening ratio, curvature and fault density are the key parameters for characterizing the structural deformation intensity of the study area. Based on the quantitative characterization, four structural deformation areas are recognized in the study area, and they have significantly different gas storage, indicating that the structural deformation intensity is the key factor causing the variation of gas storage in the study area.

Key words: detachment structure, structural style, structural deformation intensity, gas storage, shale gas play, eastern Sichuan Basin

目前从地质评价与开发效果来看,涪陵页岩气田焦石坝一期开发区页岩品质优、资源丰度高、开发潜力大,但含气性平面上具有差异性:中部与北部孔隙度、含气

量、地层压力均较高,单井无阻流量大于 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,多数井超过 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;西南部孔隙度、含气量、地层压力变低,单井无阻流量普遍小于 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

收稿日期:2016-07-08;修订日期:2016-11-07。

第一作者简介:孙健(1962—),男,教授级高级工程师,石油天然气勘探开发与生产经营管理。E-mail:107809163@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05060)。

研究认为,该区含气页岩层段五峰组-龙马溪组一段属深水陆棚相沉积,为一套富碳、富硅、页理发育、连续沉积的黑色页岩,页岩厚度、矿物成分和有机碳含量等原始品质平面展布稳定^[1],不是造成含气性差异的主要因素。而该区中生代以来经历了多期变形,构造形成机制复杂,纵向上存在多套滑脱层,造成不同形变层构造形态差异化^[2-4],因此有必要研究构造形变特征及其对含气性的影响,用以指导二期开发的选区评价与有效开发。

1 工区概况

研究区位于川东南高褶区川东高陡褶皱带万县复向斜南部。川东高陡褶皱带西侧以华蓥山断裂为界与川中构造区相接,东侧以齐岳山断裂为界与湘鄂西断褶带相邻,北侧与秦岭褶皱带相接。整体表现为“侏罗山式”结构,以齐岳山断层为界,以东表现为“隔槽式”褶皱,以西表现为“隔档式”褶皱,二者之间的过渡带局部发育城垛式褶皱。区内发育多层次滑脱构造,具有明显的南东强北西弱、南东早北西晚的递进变形特征^[5-7]。

涪陵焦石坝地区出露地层主要为侏罗系-三叠系,具有东南老、西北新的特点,研究区主体出露三叠系雷口坡组-嘉陵江组灰岩,侏罗系主要分布于本区的北部和西部,出露最新地层为中侏罗统沙溪庙组。

钻井揭示,涪陵地区古生界奥陶系-中生界三叠系自上而下依次为:中生界下三叠统嘉陵江组、飞仙关组;古生界上二叠统长兴组、龙潭组,下二叠统茅口组、栖霞组、梁山组,中石炭统黄龙组,中志留统韩家店组,下志留统小河坝组、龙马溪组,上奥陶统五峰组、涧草沟组,中奥陶统宝塔组、十字铺组(未见底)。其中上二叠统龙潭组与下二叠统茅口组、石炭系黄龙组与上覆二叠系梁山组及下伏志留系韩家店组均为平行不整合接触(图1)。

2 构造变形特征

2.1 结构构造特征

研究区处于江南-雪峰构造域锋带,齐岳山断层以西,万县复向斜南部与方斗山背斜带西侧的交汇区域,为一个受北东向吊水岩断层、石门1号断层及北西走向的大耳山断层、乌江断层两组边界断裂控制的菱形断背斜(图2)。受多期构造活动叠加影响,研究区可分为东、西两带。东带为北东走向的焦石坝背斜带,主体表现为一平缓宽阔的箱状背斜,背斜核部构造形变弱,断裂不发育,地层平缓,倾角小于5°,两翼构造

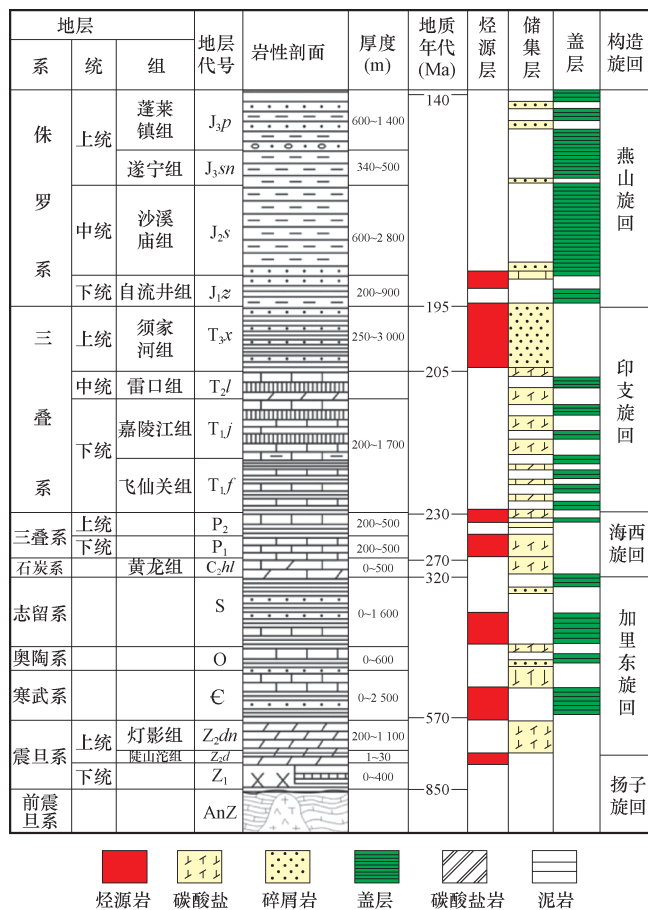


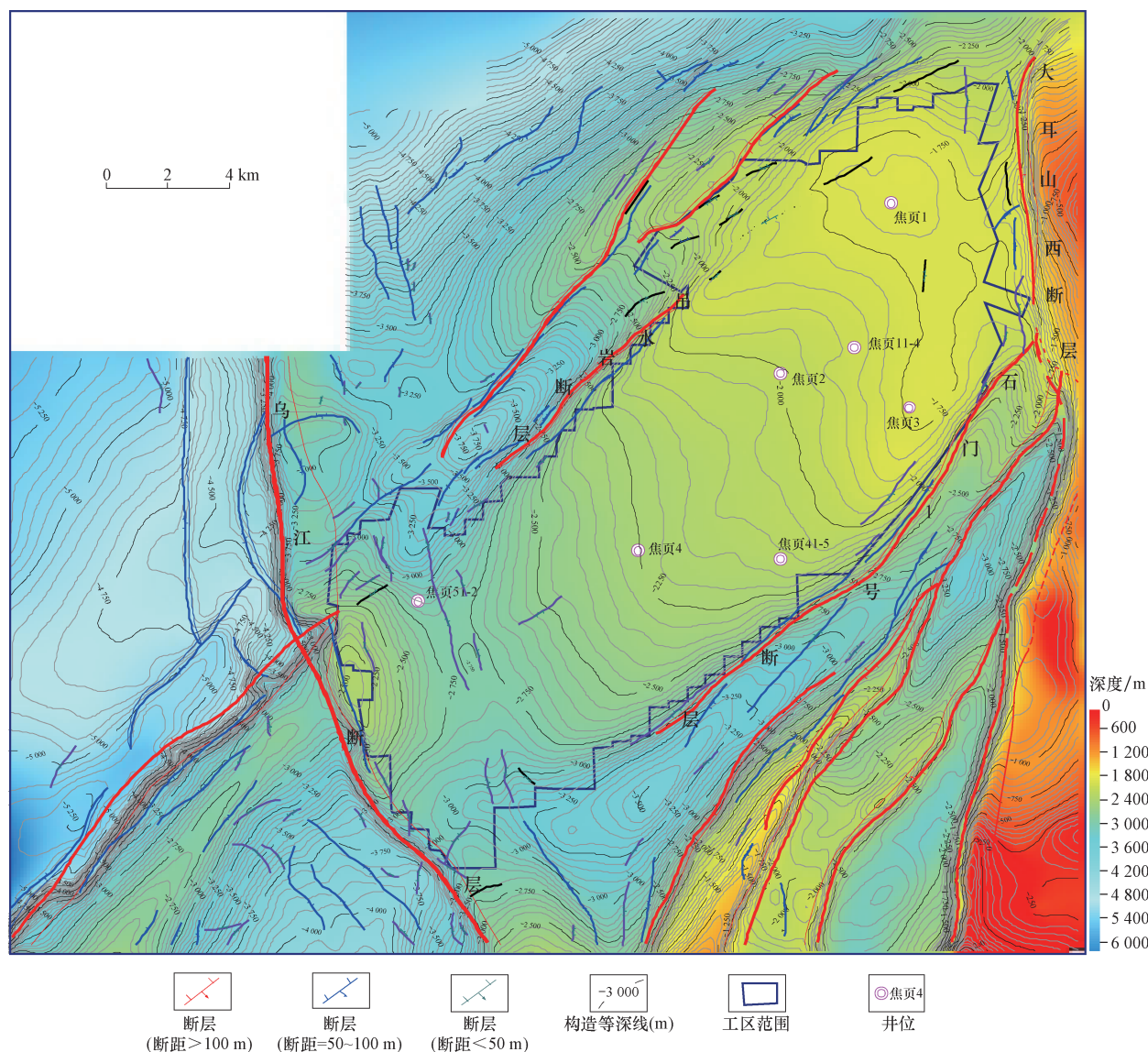
图1 川东地区地层综合柱状图

Fig. 1 Stratigraphy column in the eastern Sichuan Basin

变形较强,地层变陡,断层前缘志留系明显增厚,岩层较破碎;西带为北西走向的乌江断背斜带,构造变形较强烈,断裂发育,断层前缘志留系明显楔形增厚,地层产状横向变化大。

焦石坝背斜带西部倾末端以及两侧的白涛、吊水岩向斜西部扬起端均表现出北东向构造格局遭受北西向构造改造的变形特征。推测该区北东向构造形成较早,之后随着乌江断裂带的活动,先存构造遭受北西向改造。

研究区受多期构造应力作用影响,主要发育北东向和北西向两组方向的断层,且均为逆断层,其中焦石坝背斜主体部位断裂不发育,两翼发育北东向断层,主要形成期为晚燕山期,是太平洋板块向欧亚板块强烈俯冲产生的应力波及该区而形成;西南部乌江断背斜发育北东向和北西向两组断裂,断距多小于100 m,北西向断层形成时间相对较晚,也是晚燕山期形成的,略晚于北东向断层。断距大于100 m的断裂主要分布于研究区边界,包括北东走向的吊水岩断层、石门1号断层及北西走向的大耳山断层、乌江断层,这些断裂规模大、延伸距离长(>10 km)、断距大(>300 m),错断寒武系-三叠系。

图2 四川盆地焦石坝地区 T_{03} 反射层构造图Fig. 2 Structural map of the T_{03} reflector in Jiaoshiba area, the Sichuan Basin

2.2 纵向变形特征

研究区内共发育3套主要滑脱层系,从下至上依次为寒武系膏盐层、志留系泥页岩层与三叠系雷口坡组—嘉陵江组膏盐层。构造变形过程中,由于塑性岩层的滑脱作用,往往会造成滑脱层上下岩层的构造变形发生差异,纵向上构造变形程度及构造样式表现形式不同。受几套滑脱层系的影响,该区构造变形纵向上具有“三分性”,可划分为上、中、下3个构造形变层,不同构造层构造样式具有不协调的特征。

研究区内上部构造层侏罗系—中三叠统雷口坡组轻微褶皱变形,变形形态与地表构造基本一致,仅在向斜区可见,地层平缓,断裂基本不发育;中部构造层下三叠统—中寒武统构造较复杂,褶皱变形强烈,断层非常发育,其中又以志留系厚层泥页岩作为主要滑脱层,除少量断层断穿志留系,大多数断层发育以志留系厚

层泥岩为界,具有明显的分层性,志留系上下构造变形特征具有一定的不协调性。下部构造层中寒武统以下构造相对平缓,地层变形相对较弱,断层断距相对较小,向上消失在寒武系膏盐岩中(图3)。

2.3 构造样式组合

前人研究认为:从南东向北西、从下向上多层剥离推覆下的递进挤压作用控制了区内各构造带的基本构造样式,多层剥离滑脱构造是形成区内断层—褶皱构造样式的根本原因^[8-9]。一般将沉积盖层的变形是否受基底构造控制作为构造样式类型划分的主要标志^[10],因此,构造类型划分为基底卷入型和盖层滑脱型两大类,进而根据构造变形的力学性质、应力传递方式、几何样式进行划分^[11-13]。

研究区整体呈现前展式逆冲推覆薄皮构造样式,局部构造主要表现为7种构造样式:断展褶皱、断弯褶

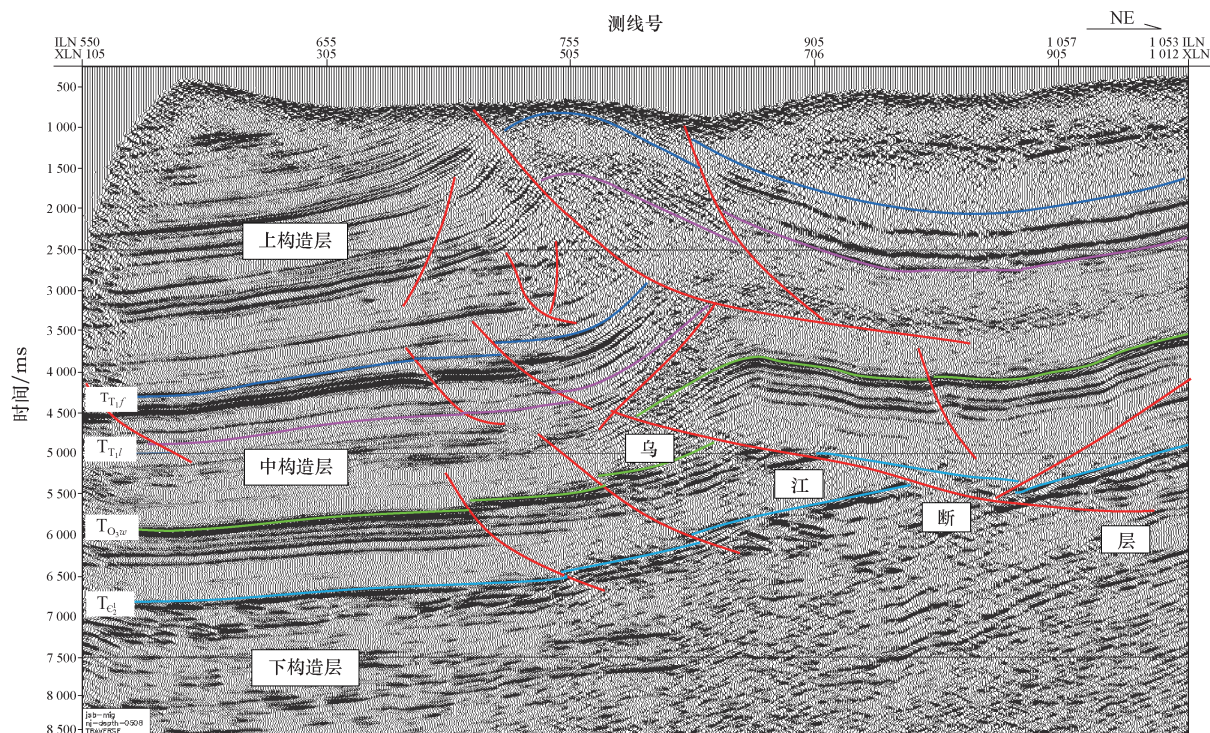


图3 四川盆地焦石坝地区西南部地震解释剖面

Fig. 3 Seismic interpretation profile across the southwest in Jiaoshiba area, the Sichuan Basin

皱、断滑褶皱、叠瓦冲断褶皱、三角带构造、冲起构造、双重构造等。其中,下构造层主要发育双重构造与断弯褶皱,中构造层变形相对较强,发育断弯褶皱、断展褶皱、冲起构造以及双重构造,上构造层在研究区内剥蚀较严重,目前残存的样式以滑脱、断展构造为主。

构造样式组合指为两种及其以上的构造样式叠加在一起的复杂构造,既可以反映为相同应力环境下持续作用产生的不同构造的叠加,也可以表现为不同时期和阶段构造应力环境中产生的叠加构造,主要揭示了多期次多阶段构造变形特征^[14]。分析和总结复合构造样式,有助于研究该区构造变形特征和变形过程。研究区主要存在两类构造样式组合。

2.3.1 同向多层滑脱逆冲背斜

典型代表为乌江断裂控制的多层滑脱逆冲背斜构造。以志留系泥岩为滑脱层系,上下发育两套断裂,向上断至地表残留三叠系,向下滑脱至中寒武统膏盐岩层。志留系以下,主断层断面较平缓,呈坡坪式,表现为断弯褶皱样式,前翼陡倾,后翼相对平缓,破碎带范围大(一般为5~6 km),次级断层发育;志留系以上,主断层断面相对较陡,表现为断展褶皱样式,断层较发育,断层出露地表。地层整体形变强,志留系明显楔形增厚,地层产状横向变化大(图4)。

该样式组合反应了由东至西的相对较强的挤压推覆,导致地层强烈褶皱和断裂,由于志留系厚层泥岩的滑脱作用,导致志留系上下构造层形成差异形

变,志留系以上构造变形更强烈,地层厚度、产状变化较大,断层向上沟通地表,根部在志留系地层中滑脱较远。

2.3.2 双重背冲背斜

典型代表为石门1号断层和吊水岩断层控制的双重背冲箱状背斜构造。背斜核部构造变形较弱,地层平缓,断裂不发育;翼部以志留系塑性地层为界,上下发育两组断裂,向上断至三叠系,向下断至震旦系层。主断层断面较陡(最大70°),断距较大(最大300 m),次级断裂发育,东翼浅层断裂断至地表(图5)。

该样式组合主断裂断面陡倾,断至基底,表现为压扭性质,大断裂附近地层变形较强烈,但影响范围有限,构造主体部位变形微弱,地层平缓。背斜两翼地层破碎,裂缝较发育,部分断层断至地表。

3 构造变形定量表征

从该区的构造变形特征看,西南部乌江背斜带为多重逆冲推覆构造,变形较强烈,东部焦石坝箱状背斜整体变形较弱,构造相对稳定,两翼表现出明显的压扭变形。从含气性研究结果看,东部焦石坝背斜主体的井在全烃显示、孔隙度、地层压力和产量等指标上均较西南部高。

根据地质研究,焦石坝地区五峰组-龙马溪组一

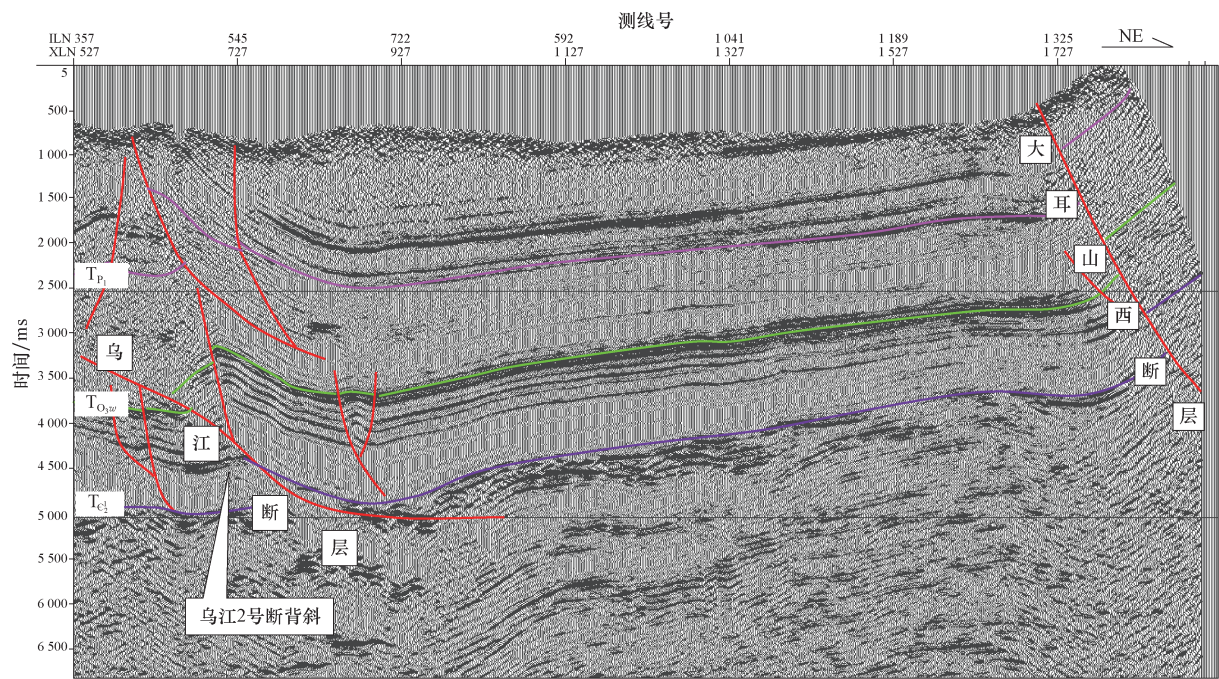


图4 四川盆地焦石坝地区多层滑脱构造地震解释剖面

Fig. 4 Seismic interpretation profile across the multi-layer decollement structure in Jiaoshiba area, the Sichuan Basin

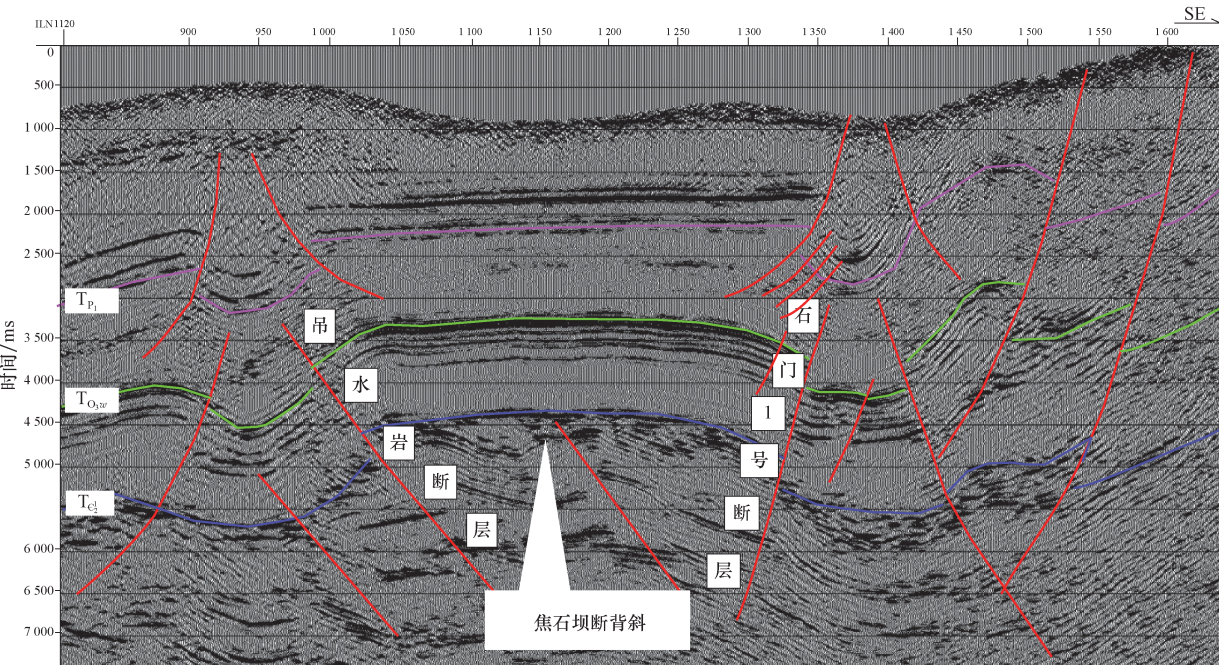


图5 焦石坝地区背冲背斜地震解释剖面

Fig. 5 Seismic interpretation profile across back thrust anticline in Jiaoshiba area, the Sichuan Basin

段页岩气层段页岩厚度、矿物成分和有机碳含量等原始品质平面展布稳定,不是造成含气性差异的主要因素,因此,该区平面含气性的差异主要取决于保存条件。

保存条件受多种因素影响,如盖层、断层、岩性、流体压力、成岩作用等^[15]。其中,盖层与断层是比较关键的两个影响因素。盖层的保留程度和有效性是垂向封闭与否的最主要因素,而断层的封闭性则决定了油气侧向保存条件^[16-18]。盖层的完整性与断层的规模、

性质主要受构造变形影响。因此,如何合理准确的评价构造变形强度对于评价油气藏的保存条件至关重要。

构造变形强度是用以衡量构造运动对于区域地质体影响强弱的定量表征参数^[19],但其一直未能清楚界定。原因在于构造运动会导致地层产生多种变形状态,这些变形状态可以用一系列相关参数进行描述,比如剥蚀量、变形特征、构造样式、断裂、裂缝发育程度、褶皱形态等^[20-21]。然而尽管其描述参数众多,但多数

参数往往不容易地进行定量表征。

本次研究中,根据两个原则来选取能够反映构造变形强度的地质参数,一是相对比较容易准确测量且能较为准确地反映构造运动的幅度大小;二是与气藏的保存有较高的相关性。

由于研究区主体部位出露地层为三叠系雷口坡组-嘉陵江组灰岩,目的层上覆地层厚度超过 2 km,因此不将剥蚀量列入影响参数内。根据大量实钻统计,工区边界断裂附近的井含气性与产量普遍降低,而断距小于 50 m 的断裂周缘和钻遇此规模断层的井基本无影响,可见断层规模是影响该区保存的重要因素,可用断距、断裂密度和曲率来定量表征其规模;西南部距边界断层 5 km 范围的井相对较差,而东部焦石坝背斜两翼较差的井距边界断层距离在 1.5 km 内,可见断层样式也是重要因素,西南部的乌江断层在志留系中滑脱较远,对页岩气藏的破坏范围更大,可用地层增厚比例来描述;东部焦石坝背斜两翼又有所区别,东翼较西翼更差,两翼的边界断层在断距、样式上类似,但东翼的主控断层断至地表,这也是导致其更差的原因。

最终优选了主断裂断距、地层增厚比例、断裂密度、曲率值等可定量参数,来构建构造变形强度指数。根据各构造变形参数对页岩气藏保存条件影响的主次分别给定权重系数 w ,本次研究将断距和地层增厚比例给定 0.3,断裂密度与曲率值给 0.2,需要指出的是,本次权重系数根据个人认识选取,不同地区需根据实际来考量;然后对不同的构造变形参数进行归一化,统一到 0~1,例如对断距进行归一化,用该断层的断距比上工区内最大的断距,再对不同变形参数进行加权求和,得到不同区块的构造变形强度指数 $I_i^{[22]}$:

$$I_i = \sum_{i=1}^n w_i d_i \tag{1}$$

式中: w_i 为权重系数, $w_i \in (0,1)$; d_i 为表征构造变形各项参数的归一化值, $d_i \in (0,1)$ 。

构造变形强度指数介于 0~1,指数越小,表明构造变形较弱,对气藏破坏的程度越小,保存条件相对较好;反之,指数越趋近于 1,表明构造变形强烈,保存条件相对较差。为方便描述与评价,将构造变形从弱至

强划分为 4 类:Ⅰ类变形带,构造变形强度指数在 0~0.25;Ⅱ类变形带,变形指数在 0.25~0.5;Ⅲ类变形带,变形指数在 0.5~0.75;Ⅳ类变形带,变形指数在 0.75~0.1(表 1)。

根据计算,焦石坝背斜核部构造变形强度指数为 0.06,属Ⅰ类变形带,构造变形最弱;焦石坝背斜北段两翼变形指数为 0.3,属Ⅱ类变形带,这两个区块保存条件好;焦石坝背斜南段两翼变形指数为 0.75,属Ⅲ类变形带,对保存有一定影响;乌江断背斜带变形指数为 0.97,属Ⅳ类变形带,构造变形最为强烈,对油气保存影响较大(图 6)。

4 构造变形特征对含气性的影响

将构造变形分区与含气性各项表征参数平面展布图进行叠合分析,不同构造变形区与页岩含气性变化吻合度高(图 7)。

变形较弱的焦石坝背斜核部(Ⅰ类变形带)和东、西两翼北部(Ⅱ类变形带)测井解释含气量较高,均大于 6 m³/t;测井解释孔隙度较高,多大于 4.6%;孔隙压力较高,大于 1.3,综合反映该区含气性好。

变形较强的焦石坝背斜东西两翼南部(Ⅲ类变形带)测井解释含气量略低,在 5.5~6 m³/t;测井解释孔隙度略低,多在 4.2%~4.6%;孔隙压力相对偏低,在 1.1~1.3,综合反映该区含气性略差。

构造变形相对最强的乌江断背斜带(Ⅳ类变形带)含气量相对最低,为 5~5.5 m³/t;测井解释孔隙度相对最低,多为 3.8%~4.2%;孔隙压力相对最低,在 1~1.3,综合反映该区含气性较差。

可以看出,研究区构造变形强弱与页岩平面含气性有很好的相关性。页岩气属连续型天然气聚集,不存在大范围的运移,但对于受多期构造作用强烈影响、以游离气为主的高演化程度页岩层系而言,必然有动态调整和平衡的过程。焦石坝背斜核部构造能够高产富集,在于其位于箱状背斜核部,构造变形弱,地层平缓,断裂极不发育,且远离边界大断裂,没有形成大规模的断—缝网络提供逸散通道,而且龙马溪组中上部

表 1 四川盆地涪陵页岩气田一期开发区构造变形强度分级
Table 1 Classification of structural deformation intensity for the first-phase development block of Fuling shale gas play, the Sichuan Basin

区块	构造样式	最大断距/m	断裂密度/ (条·km ⁻²)	志留系地层 增厚比例	曲率均值	构造变形强度指数	构造变形强度等级
焦石坝背斜核部	箱状背斜	50	0.02	1.0	0.001 5	0.06	Ⅰ类变形带
背斜北段两翼	不均衡逆冲	120	0.35	1.1	0.006 0	0.30	Ⅱ类变形带
背斜南段两翼	双重背冲	350	0.37	1.4	0.006 2	0.75	Ⅲ类变形带
乌江背斜带	同向多层滑脱逆冲	1 000	0.38	1.9	0.005 6	0.97	Ⅳ类变形带

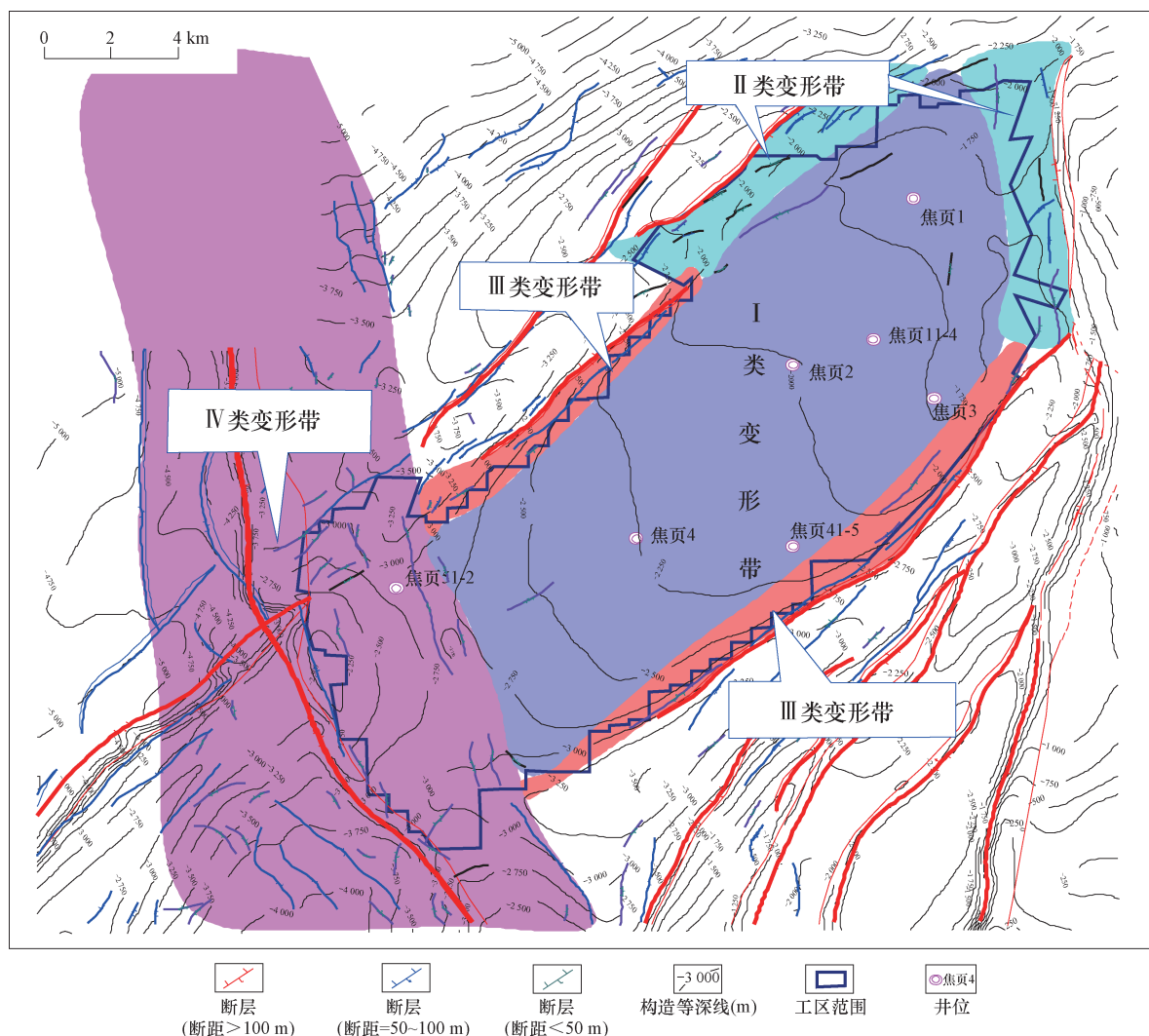


图6 四川盆地涪陵页岩气田一期开发区构造变形带划分

Fig. 6 Division of the structural deformation belts in the first-phase development block of Fuling shale gas play, the Sichuan Basin

泥质粉砂岩或粉砂质泥岩和五峰组底部涧桥沟组致密灰岩分布完整,基本未遭受构造形变,具有良好的顶底板条件,页岩含气性最好。在焦石坝箱状背斜两翼,受强烈的压扭作用,形成断层破碎带,顶部地层揉皱破碎,中底部形成高角度缝和虚脱现象,断层沿志留系滑脱层多重对冲,形成从下至上的断-缝逸散通道,使两翼的游离气部分逸散,由于压扭形成的主控断层较陡立,沿志留系地层楔入体规模较小,对页岩气藏的破坏范围相对有限。西南部的乌江背斜带,构造变形强烈,以志留系为滑脱层多重挤压推覆,断裂发育且断距大,呈坡坪式,断层沿志留系地层滑脱远,造成志留系岩层严重变形,背斜顶部断层前端突破产生高倾仰冲,地层高倾掀斜,背斜底部弯流作用和强挤破碎,形成顺层剪切缝和高角度缝,对页岩气藏有较大的破坏作用,该区页岩含气性相对最差。

综合分析表明,构造变形强度是造成涪陵页岩气田焦石坝地区一期开发区含气性差异的关键因素。主断层断距、断裂密度、有无沟通地表、地层增厚比例、曲

率等参数是判断该区构造变形强度的重要指标。南部二期开发区构造变形相对更强,断裂更发育,构造样式以多层滑脱逆冲背斜为主,从目前的勘探情况来看不同构造部位的含气性和单井产能具有较大差异,本文的研究对涪陵页岩气田二期开发的选区评价有一定的借鉴和指导意义。

5 结论

1) 涪陵页岩气田一期开发区位于江南-雪峰构造域锋带,为一个受北东向和北西向两组断裂控制的菱形断背斜,主体部位断裂不发育,西南部发育北东向和北西向两组断裂,主要形成于晚燕山期,北东向断层发育时期稍早。

2) 研究区发育寒武系膏盐层、志留系泥页岩层与三叠系雷口坡组-嘉陵江组膏盐层3套主要滑脱层系,受其控制影响发育薄皮滑脱构造,构造变形纵向上具有“三分性”。

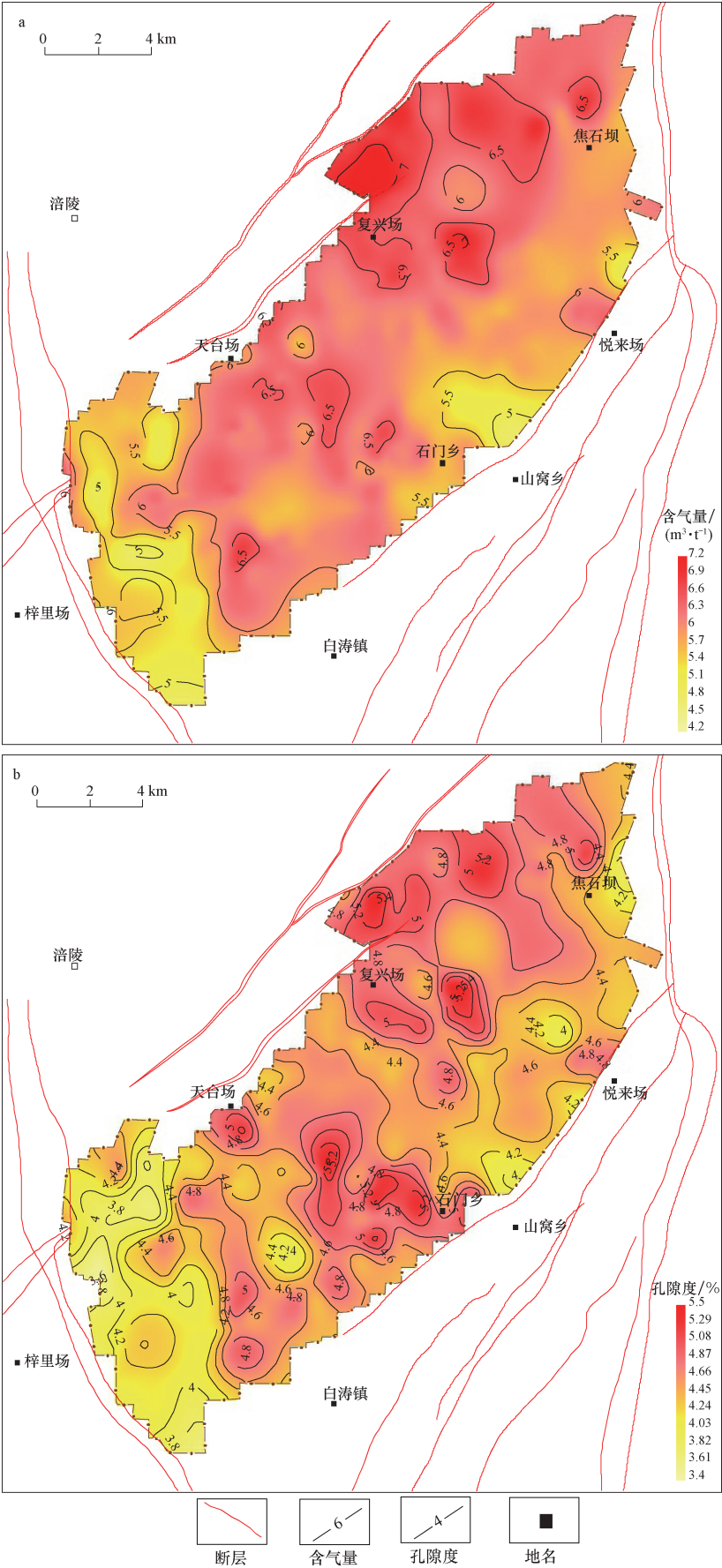
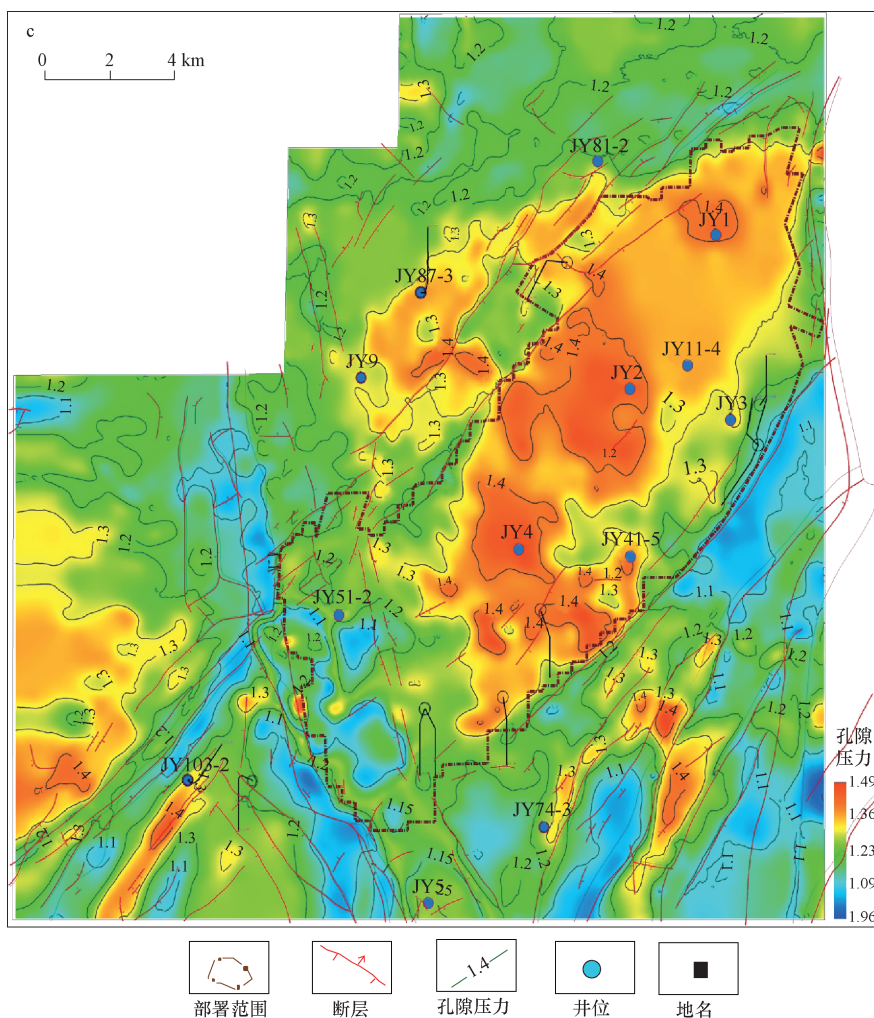


图 7 四川盆地涪陵页岩气田一期开发区①—⑤小层含气性参数

Fig. 7 Diagram showing gas-bearing parameters for sublayers① - ⑤ in the first-phase development block of Fuling shale gas play, the Sichuan Basin
a. 含气量; b. 孔隙度; c. 孔隙压力



续图7 四川盆地涪陵页岩气田一期开发区①-⑤小层含气性参数

Fig. 7(continued) Diagram showing gas-bearing parameters for sublayers①-⑤ in the first-phase development block of Fuling shale gas play, the Sichuan Basin

a. 含气量; b. 孔隙度; c. 孔隙压力

3) 研究区整体呈现前展式逆冲推覆薄皮构造样式,局部构造主要表现为7种构造样式,总体呈现为两类构造样式组合:同向多层滑脱逆冲、双重背冲背斜。

4) 主断层断距、断裂密度、有无沟通地表、地层增厚比例、曲率等参数是判断该区构造变形强度的重要指标。

5) 不同强度构造变形区,页岩含气性出现明显差异,构造变形强度是造成涪陵页岩气田一期产期区含气性差异的关键因素。

参 考 文 献

- [1] 王志刚. 涪陵页岩气勘探开发重大突破与启示[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1): 1-6.
Wang Zhigang. Breakthrough of Fuling shale gas exploration and development and its inspiration[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1): 1-6.
- [2] 朱彤, 王烽, 俞凌杰, 等. 四川盆地页岩气富集控制因素及类型[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 399-407.
Zhu Tong, Wang Feng, Yu Lingjie, et al. Controlling factors and types of shale gas enrichment in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 399-407.
- [3] 陆应新, 胡望水, 汤济广, 等. 川东南丁山构造龙马溪组页岩裂缝发育与分布[J]. 长江大学学报(自科版), 2016, 13(8): 6-10.
Lu Yingxin, Hu Wangshui, Tang Jiguang, et al. Development and distribution of shale fracture in Longmaxi Formation of Dingshan Structure in Southeast Sichuan Basin[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2016, 13(8): 6-10.
- [4] 何治亮, 聂海宽, 张钰莹. 四川盆地及其周缘奥陶系五峰组-志留系龙马溪组页岩气富集主控因素分析[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 8-17.
He Zhiliang, Nie Haikuan, Zhang Yuying. The main factors of shale gas enrichment of Ordovician Wufeng Formation-Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 8-17.
- [5] 颜丹平, 金哲龙, 张维衰, 等. 川渝湘鄂薄皮构造带多层拆离滑脱系的岩石力学性质及其对构造变形样式的控制[J]. 地质通报, 2008, 27(10): 1687-1697.
Yan Danping, Jin Zhelong, Zhang Weiai, et al. Rock mechanical characteristics of the multi-layer detachment fault system and their controls on the structural deformation style of the Sichuan-Chongqing-Hunan-Hubei thin-skinned belt, South China[J]. Geological Bulletin

- of China, 2008, 27(10): 1687–1697.
- [6] 聂海宽, 金之钧, 边瑞康, 等. 四川盆地及其周缘上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩气“源-盖控藏”富集[J]. 石油学报, 2016, 37(5): 557–571.
- Nie Haikuan, Jin Zhijun, Bian Ruikang, et al. The “source-cap hydrocarbon-controlling” enrichment of shale gas in Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation of Sichuan Basin and its periphery [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(5): 557–571.
- [7] 李飞, 尚长健, 楼章华, 等. 米仓-大巴山海相地层古流体地球化学特征与油气保存[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(3): 365–371.
- Li Fei, Shang Changjian, Lou Zhanghua, et al. Geochemical characteristics of paleofluid and hydrocarbon preservation in marine strata of Micang-Daba piedmont and its adjacent areas [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(3): 365–371.
- [8] 舒姚, 胡明. 川东北地区构造特征及变形期次探讨[J]. 复杂油气藏, 2010, 3(2): 17–20.
- Shu Yao, Hu Ming. Structural feature and deformation stages in north-east of Sichuan Basin [J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2010, 3(2): 17–20.
- [9] 刘中春, 吕心瑞, 李玉坤, 等. 断层对地应力场方向的影响机理[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 387–393.
- Liu Zhongchun, Lyu Xinrui, Li Yukun, et al. Mechanism of faults acting on in-situ stress field direction [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(2): 387–393.
- [10] 王濡岳, 丁文龙, 龚大建, 等. 黔北地区海相页岩气保存条件——以贵州岑巩区块下寒武统牛蹄塘组为例[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 45–55.
- Wang Ruyue, Ding Wenlong, Gong Dajian, et al. Gas preservation conditions of marine shale in northern Guizhou area: A case study of the Lower Cambrian Niutitang Formation in the Cen’gong block, Guizhou Province [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(1): 45–55.
- [11] 徐政语, 李大成, 卢文忠, 等. 渝东构造样式分析与成因解析[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(1): 15–22.
- Xu Zhengyu, Li Dacheng, Lu Wenzhong, et al. Pattern analysis and genetic interpretation about the geotectonics of Yudong (East Chongqing) [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2004, 28(1): 15–22.
- [12] 赵向原, 曾联波, 祖克威, 等. 致密储层脆性特征及对天然裂缝的控制作用——以鄂尔多斯盆地陇东地区长7致密储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 62–71.
- Zhao Xiangyuan, Zeng Lianbo, Zu Kewei, et al. Brittleness characteristics and its control on natural fractures in tight reservoirs: A case study from Chang 7 tight reservoir in Longdong area of the Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(1): 62–71.
- [13] 邹玉涛, 段金宝, 赵艳军, 等. 川东高陡断褶带构造特征及其演化[J]. 地质学报, 2015, 89(11): 2046–2052.
- Zou Yutao, Duan Jinbao, Zhao Yanjun, et al. Tectonic Characteristics and Evolution of the High and Steep Fault Folding Belt in East Sichuan [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(11): 2046–2052.
- [14] 邓模, 吕俊祥, 潘文蕾, 等. 鄂西渝东地区油气保存条件分析[J]. 石油实验地质, 2009, 31(2): 202–206.
- Deng Mo, Lv Junxiang, Pan Wenlei, et al. Hydrocarbon Preservation Conditions In West Hubei And East Chongqing [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2009, 31(2): 202–206.
- [15] 康德江, 马行涉. 中国西部叠合盆地构造强度定量表征及其应用[J]. 石油学报, 2009, 30(5): 642–647.
- Kang Dejiang, Ma Xingzhi. Tectonic intensity quantification method and its application to the superimposed basins in West China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(5): 642–647.
- [16] 胡宗全, 杜伟, 彭勇民, 等. 页岩微观孔隙特征及源-储关系——以川东南地区五峰组-龙马溪组为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(6): 1001–1008.
- Hu Zongquan, Du Wei, Peng Yongmin, et al. Microscopic pore characteristics and the source-reservoir relationship of shale—A case study from the Wufeng and Longmaxi Formation in Southeast Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(6): 1001–1008.
- [17] 薛冰, 张金川, 杨超, 等. 页岩含气量理论图版[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(2): 339–346.
- Xue Bing, Zhang Jinchuan, Yang Chao, et al. Theoretical chart of shale gas content [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(2): 339–346.
- [18] 胡慧婷, 王龙, 刘岩, 等. 超压泥岩盖层中断层垂向封闭能力研究方法及其应用[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(3): 359–364.
- Hu Huiting, Wang Long, Liu Yan, et al. Research method of fault vertical sealing capacity in overpressure mudstone caprock and its application [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(3): 359–364.
- [19] 丁文龙, 曾维特, 王濡岳, 等. 页岩储层构造应力场模拟与裂缝分布预测方法及应用[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 63–74.
- Ding Wenlong, Zeng Weite, Wang Ruyue, et al. Method and application of tectonic stress field simulation and fracture distribution prediction in shale reservoir [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(2): 63–74.
- [20] 袁玉松, 周雁, 邱登峰, 等. 泥页岩非构造裂缝形成机制及特征[J]. 现代地质, 2016, 30(1): 155–162.
- Yuan Yusong, Zhou Yan, Qiu Dengfeng, et al. Formation mechanism and characteristics of non-tectonic Fractures in Shales [J]. *Geoscience*, 2016, 30(1): 155–162.
- [21] 骆杨, 赵彦超, 陈红汉, 等. 构造应力-流体压力耦合作用下的裂缝发育特征——以渤海湾盆地东淮凹陷柳屯洼陷缝性泥页岩“油藏”为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 177–185.
- Luo Yang, Zhao Yanchao, Chen Honghan, et al. Fracture characteristics under the coupling effect of tectonic stress and fluid pressure: A case study of the fractured shale oil reservoir in Liutun subsag, Dongpu Sag, Bohai Bay Basin, Eastern China [J]. *Petroleum Exploration And Development*, 2015, 42(2): 177–185.
- [22] 王伟锋, 周维维, 徐政语. 黔南坳陷构造变形特征及稳定区块评价[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(2): 255–261.
- Wang Weifeng, Zhou Weiwei, Xu Zhengyu, et al. Deformation characteristics and stability zones evaluation in the southern Guizhou depression [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(2): 255–261.

(编辑 张亚雄)