

四川盆地涪陵地区页岩气层构造特征与保存评价

罗兵, 郁飞, 陈亚琳, 丁红伟

(中国石化江汉油田分公司勘探开发研究院, 武汉 430223)

摘要:四川盆地涪陵页岩气田五峰组—龙马溪组含有丰富的页岩气资源,但该区经历了多期构造叠加作用,对页岩气保存条件成了重要影响。系统研究了涪陵地区的构造特征和保存条件。该区发育北东向、北西向2组构造体系,主要形成于晚燕山期,受3套滑脱层系影响,纵向上变形特征存在差异性,可划分出3个构造变形层,中构造层变形相对强烈。将构造样式、断裂规模、剥蚀程度、裂缝密度作为构造变形的主要评价指标,可将涪陵地区平面上按构造变形分为东、西2带,西带构造变形较弱,保存条件较好。为进一步落实页岩气开发有利区,在“东西分带”认识的基础上,通过构造变形定量表征和地震预测,建立了一种涪陵地区保存条件量化评价方法。根据评价结果,在西带优选出3个有利目标区,在东带优选出2个有利目标区。

关键词:页岩气;滑脱层;构造变形;保存评价;涪陵地区;四川盆地

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

Structural features and preservation evaluation of shale gas reservoirs in the Fuling area, Sichuan Basin

LUO Bing, YU Fei, CHEN Yalin, DING Hongwei

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, SINOPEC Jianghan Oilfield Company, Wuhan, Hubei 430223, China)

Abstract: The Wufeng-Longmaxi formations in the Fuling shale gas play contain abundant shale gas resources, but the multiple tectonic superimposition had an important impact on shale gas preservation conditions in the area. We systematically studied the structural features and preservation conditions of shale gas in the Fuling area by detailed structural interpretation. There are two structural systems with NE and EW trends in the area, mainly formed in the late Yanshanian. Multi-level detachment structures were developed in the study area due to multi-phase tectonic movements. The detachment structures can be vertically divided into 3 different structural deformation layers. Structural style, fracture scale, erosion extent and fracture density were used as the main evaluation indicators for structural deformation, and the Fuling area was divided into the eastern and western belts. The structural deformation of the western belt was relatively weak, and the preservation conditions were relatively better. For further clarifying the favorable areas for shale gas development, a quantitative characterization method of preservation conditions was established by means of structural deformation characterization and reservoir prediction. According to evaluation results, three target units including Jiangdong, Pingqiao and Zilichang were selected in the western belt, and two target units including Baima and Baitao were selected in the eastern belt.

Key words: shale gas; detachment layer; structural deformation; preservation evaluation; Fuling area; Sichuan Basin

中国南方海相页岩气开发潜力巨大,四川盆地及周缘下古生界海相页岩气大量的基础研究和勘探实践均表明,海相泥页岩具有良好的物质基础。但与北美地区页岩气相比,中国南方页岩气具有其特殊性。四川盆地及周缘地表条件复杂,经历了多期次复杂的构造运动,保存条件差异大^[1-3]。钻探结果也证实,不同区块的含气性、产能具有较大的差异。笔者在川东涪陵地区地震精细解释的基础上,

研究总结了该区的构造特征与演化过程,认为构造作用是影响该区页岩气保存条件的主要因素,从构造变形的区域差异性来探讨该区的页岩气保存条件,优选页岩气保存有利区,以期指导勘探开发。

1 区域地质概况

川东高陡褶皱带位于四川盆地东部,西起华蓥山断层,东至齐岳山断层,南达南川—开隆一线,

收稿日期:2017-10-30;修订日期:2017-11-23。

作者简介:罗兵(1985—),男,硕士,高级工程师,从事油气勘探开发工作。E-mail:luobing1029@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05060)和中国石化科技项目(P17014-2)联合资助。

东北以万源断裂带与大巴山相接,大地构造位置上属江南—雪峰造山带锋带;整体呈现为“隔档式”褶皱样式,宽缓向斜与窄陡背斜平行排列。北部为北东向构造走向,中部呈北东构造走向,往南转为北北西构造走向,平面上表现为向北西方向突出的弧形^[4-7]。涪陵地区位于川东弧形褶皱带的东南部,在齐岳山断层以西,研究区主体构造隶属于万县复向斜(图 1)。

晚奥陶世四川盆地发生海侵,至早志留世初期引起全球大规模的海平面上升,在四川盆地龙马溪早期达到高潮^[8],并在其周缘北西高、南高和北东低的古地理格局制约下,沿川西南及川东南等地区形成了龙马溪早期相对滞留、缺氧、水体较深的深水陆棚沉积环境,从而发育了一套巨厚的暗色碳质笔石页岩^[9-11],是四川盆地主要的烃源岩系,也是目前涪陵地区页岩气勘探开发的目的层系。

涪陵地区在背斜带出露地层主要为二叠系—三叠系,主要分布在研究区东南部,高陡背斜带局部剥蚀出露志留系地层,向斜带出露地层主要为侏罗系,主要分布在研究区西部和北部。钻井揭示,涪陵地区地层主要为古生界和中生界,缺失泥盆系

和石炭系,仅局部残留石炭系黄龙组,其中志留系由下统龙马溪组、小河坝组和中统韩家店组组成,与下伏奥陶系整合接触,与上覆石炭系黄龙组平行不整合接触,厚度超过 1 000 m。目的层段上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组一段在焦石坝地区分布稳定,厚度将近 100 m。

2 构造变形特征

中生代以来,川东地区经历了多期构造变形,构造较复杂,纵向上构造变形具有差异性,地表与地下构造不一致。

涪陵地区位于江南雪峰造山系锋带,总体表现为“隔档式”褶皱样式,背斜狭窄紧闭,向斜平缓宽阔。根据构造形态可分为 5 个次级正向构造和 6 个次级负向构造,受江南雪峰造山带由南东向北西的递进变形影响,焦石坝地区总体呈北东向隆凹相间的构造格局,局部受后期改造出现北西向构造,具有明显的南东强北西弱、南东早北西晚的递进变形特征。

2.1 断裂特征

涪陵地区发育北东向、北西向 2 组逆断层,北

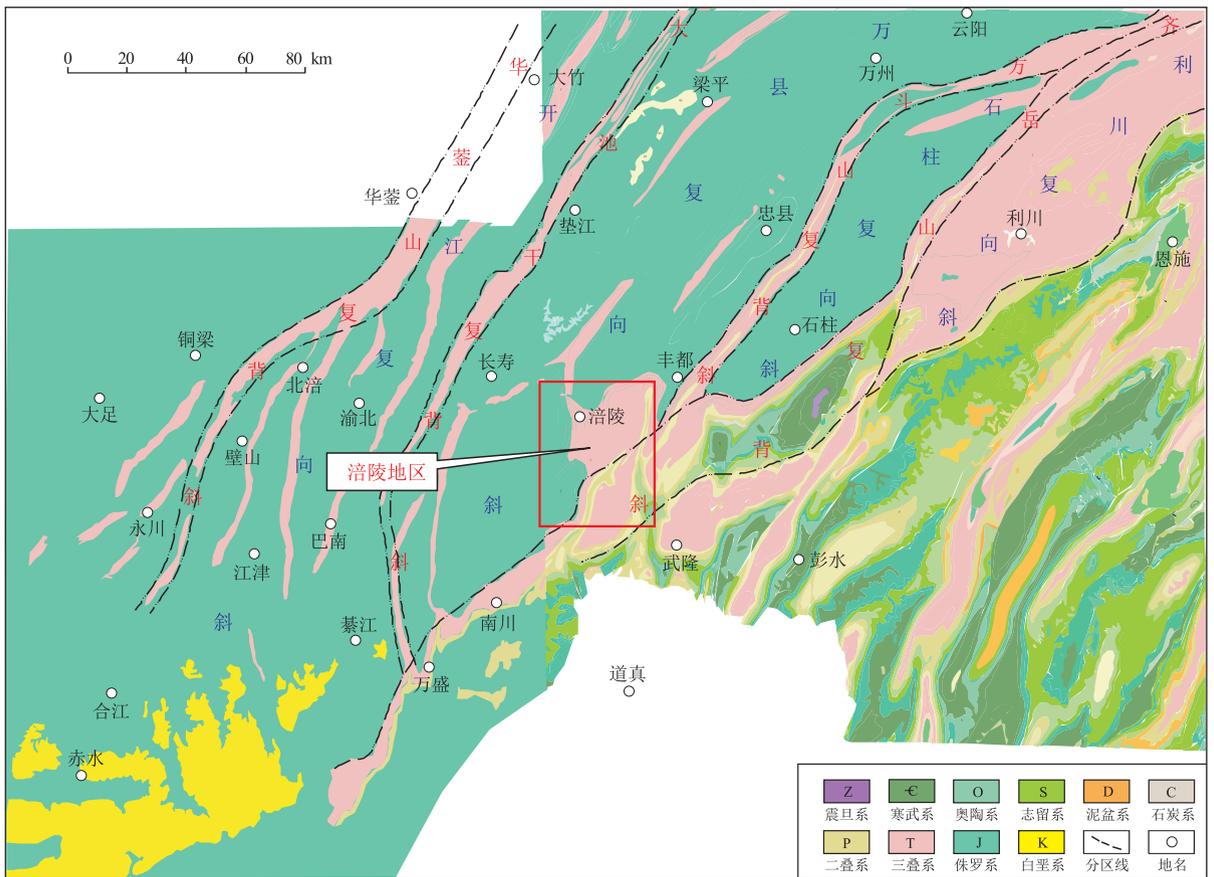


图 1 四川盆地东部地区地质概况
Fig.1 Geological map of the eastern Sichuan Basin

嘉陵江组在研究区东部遭受部分剥蚀,在西部向斜带保存完整,断层向上终止于该层,是研究区较重要的一套滑脱层。此外,志留系龙马溪组的泥页岩也是一套非常重要的滑脱层,多条断层向上终止或向下消亡于志留系泥页岩中,上、下构造变形也具有不一致性。

涪陵地区的构造变形主要受这 3 套区域滑脱层的影响,塑性岩层的滑脱作用造成滑脱层上、下岩层构造变形的不均一性,各构造层内部变形程度不一致,发育不同的构造样式组合,控制了该区构造变形的层次性。

以区域滑脱层为界,涪陵地区的沉积盖层纵向上可划分为上、中、下 3 套构造变形层(图 3)。下构造层为震旦系—中寒武统地层,构造起伏相对较小,多发育断展褶皱和滑脱褶皱,断层相对不发育,断距较小,向上消减于寒武系膏盐层中;中构造层为上寒武统一中三叠统地层,构造变形最为强烈,发育断展褶皱、断弯褶皱、背冲、对冲构造及双重构造,主控断层断距较大,最大可超过 1 000 m,除研

究区东部少量断层从寒武系直接断至三叠系,大多数断层和褶皱又以志留系厚层泥页岩作为主要滑脱层,向上终止或向下消亡于该层段中,志留系上、下构造变形特征具有差异性;上构造层由侏罗系陆相碎屑岩组成,在向斜区可见,构造形态与地表一致,有轻微褶皱变形,断裂不发育。

2.3 构造平面分区

涪陵地区的构造变形由南东向北西逐渐减弱,构造样式、断裂规模、剥蚀程度等在不同区域具有较大的差异,平面上以研究区中部北东走向的石门—金坪断层为界,可将涪陵地区分为东、西 2 带(图 4),东带构造变形明显强于西带。

东带:石门—金坪断层以东,包括白马向斜带与石门—金坪背斜带 2 个次级构造带,紧邻齐岳山大断裂,构造变形较强烈,以冲断—褶皱变形为主,发育大量北东向逆断层,断距较大,平面延伸较长,主控断层断至地表,以叠瓦状逆冲、反冲、挤出构造、三角带构造为主。白马向斜带受较强烈挤压,向斜内部微构造较发育;背斜带形态不对称,西翼

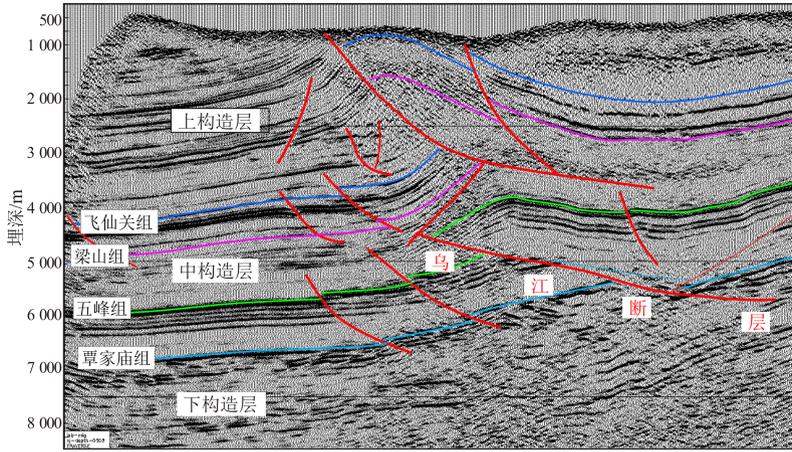


图 3 四川盆地涪陵地区西南部地震解释剖面

Fig.3 Seismic interpretation profile across the southwestern Fuling area, Sichuan Basin

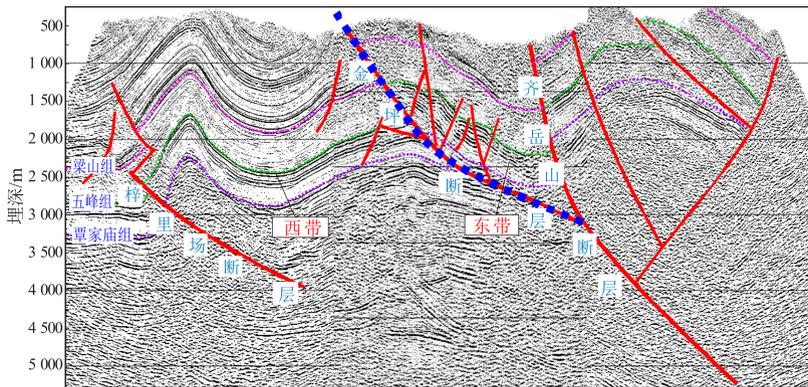


图 4 四川盆地涪陵地区“东西分带”地震解释剖面

Fig.4 Seismic interpretation profile showing east-west zonation in Fuling area, Sichuan Basin

较窄,背斜转折端被多条断层切割,构造较破碎,剥蚀量大,背斜带出露二叠系,局部剥蚀至志留系。

西带:石门一金坪断层以西,包括焦石坝背斜带、平桥背斜带、梓里场背斜带、乌江背斜带、江向东向斜带、凤来向斜带、白涛向斜带、涪陵向斜带和双河口向斜带共9个次级构造带。该带远离齐岳山大断裂,受山前冲断作用影响相对减弱,以褶皱变形为主,断裂发育程度明显降低,断裂规模减小,向上多终止于中一下三叠统膏岩层,剥蚀量较东带小,背斜带仍保留有三叠系地层,具有良好的封盖条件,且构造变形程度适中,保存条件明显好于东带。但需要注意的是,西带中北西走向的乌江断裂带形成时期相对较晚,明显改造北东向构造,主控断层规模较大,向上沟通地表,周缘6~8 km 派生多条北西向断层,切割背斜构造,地层产状变化大,整个乌江断裂带构造变形相对较强。

3 保存评价

前期研究认为涪陵地区五峰组—龙马溪组一段页岩层段的厚度、矿物成分和有机碳含量等原始品质平面展布稳定,构造作用是影响涪陵地区页岩气保存的主控因素,构造变形的差异性导致了焦石坝不同区块保存条件的变化。构造变形所产生的大断裂及其破碎作用,切穿储层至盖层的所有层系,并在周围形成大量小断裂和裂缝,成为油气散失的主要通道^[18-20]。同时,构造变形对盖层的封盖有极大的影响。构造作用导致的强烈抬升导致盖层暴露遭受剥蚀,也能在盖层中产生大量裂隙、微裂隙,破坏原封盖层的整体塑性,使其封盖性能大大降低,甚至失去封盖作用^[21-26]。总体而言,构造变形越强烈,对页岩气的保存影响越大。

涪陵地区根据构造变形特征划分的东、西2带。从保存条件来看,东带强烈的构造变形对页岩气藏保存带来不利影响。东带整体地层压力系数低于1.2,也反映东带整体保存条件较差,仅在构造变形相对较弱的斜坡部位地层压力系数超过1.3,因此,东带页岩气藏勘探开发的有利区带不是背斜构造,而是构造相对简单且埋藏适中的斜坡部位。西带整体构造变形较弱,保存条件较好,整体地层压力系数高于1.3,部分区域地层压力系数超过1.5,也反映西带整体保存条件好;而乌江断裂带对页岩气藏保存起破坏作用,其影响范围内地层压力系数小于1.3,因此西带页岩气藏勘探开发的有利区带为远离乌江断裂带的正向构造。

但评价构造变形对保存的影响目前主要还是

基于定性的判断,用于指导勘探阶段的选区选带;定性的认识则比较粗放,而且评价结果因人而异,难以建立有效的量化指标来指导开发。为进一步落实页岩气开发有利区,笔者在“东西分带”的定性认识基础上,根据研究区的构造变形特征和实际资料情况,尝试建立一种涪陵地区保存条件的量化评价方法。

涪陵地区的保存条件主要是构造影响,要量化评价保存条件,重点是对构造变形特征进行量化表征。另外,一些地质参数也可以有效评价保存条件,如含气量、孔隙压力和孔隙度等。涪陵地区前后采集了2块三维地震资料,通过地震预测开展与保存相关的参数预测,也是一项有效的定量评价手段。笔者从构造变形量化表征和“甜点”地震预测2方面出发,对保存条件尝试进行量化评价。

构造变形的定量描述一直是业界难题,原因在于构造运动导致地层变形状态可以用很多种相关参数进行描述,可从构造样式、剥蚀程度、破裂程度等方面进行综合表征,但多数参数往往只能用于定性描述,难以量化表征。本次研究根据相关性高、易测量、可量化的原则,优选了主断裂断距、褶皱缩短率、裂缝密度、地层增厚比例、曲率等5个参数,通过对这几项参数进行归一化后的加权求和,得到构造变形强度指数,对涪陵地区的构造变形进行量化表征。图5a中,红色为构造变形强度指数低值区,代表构造变形较弱;蓝色为高值区,代表构造变形相对较强。构造变形强度指数小于0.5的区域,构造变形较弱,主要分布在“西带”,属I类变形带;变形指数0.50~0.75的区域,构造变形较强,主要分布在斜坡部位的断裂带,属II类变形带;变形指数大于0.75的区域,主要分布在“东带”的背斜带、复杂断裂带与西带的乌江断背斜带,构造变形最为强烈,属III类变形带,对页岩气保存的破坏最大。

同时,对涪陵地区开展了地震预测,求得涪陵地区页岩层段的含气量、地层孔隙压力、孔隙度3项参数。这3项参数值越高,代表保存条件越好。将这3项参数进行归一化处理做加权求和,得到含气性综合指数,用作对该区保存条件的量化评价。图5b中,红色为含气性综合指数低值区,代表页岩气保存条件较好;蓝色为高值区,代表页岩气保存条件相对较差。通过与实际井测试产量进行对比,发现位于含气性综合指数大于0.6区域的井,产量均大于 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,因此将含气性综合指数大于0.6作为保存条件较好的评价指标。

综合构造变形定量表征和地震预测评价结果,

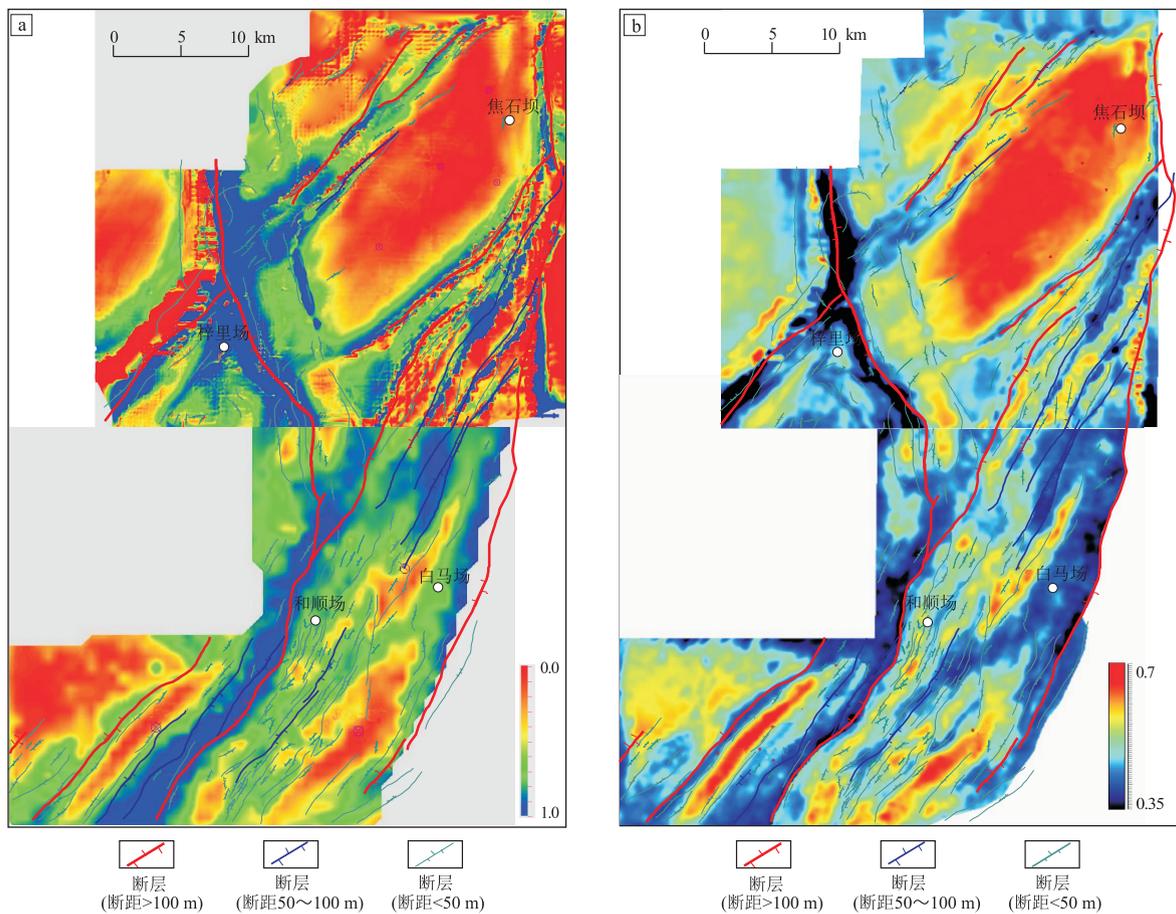


图 5 四川盆地涪陵地区页岩层段构造变形强度指数(a)和含气性综合指数(b)

Fig.5 Structural deformation intensity index and gas preservation index of shale in Fuling area, Sichuan Basin

对涪陵地区的保存条件进行深入评价,将构造变形强度指数小于0.5和含气性综合指数大于0.6作为评选标准,并结合目前的压裂工艺水平,在埋深小于4 000 m的范围内,优选出江东、平桥、白马、白涛、梓里场5个有利目标区。

4 结论

(1)涪陵地区位于江南雪峰造山系锋带,总体呈“隔档式”褶皱样式,区内发育北东向、北西向2组逆断层;构造形成于晚燕山期,北西向构造发育时期稍晚。

(2)涪陵地区纵向上发育3套滑脱层,沉积盖层的构造变形纵向上具有“三分性”,中构造层构造变形相对强烈。

(3)以石门—金坪断层为界,涪陵地区的构造变形存在明显的“东西分带”特征,西带保存条件好于东带。

(4)综合构造变形定量表征和地震预测,对涪陵地区的保存条件进行量化评价,在西带优选出3个有利目标区,在东带优选出2个有利目标区。

参考文献:

[1] 康建威,林小兵,余谦,等.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[J].石油实验地质,2017,39(4):437-443.
KANG Jianwei, LIN Xiaobing, YU Qian, et al. Shale gas enrichment conditions in complex geological structure areas: A case study in the front margin of Daba Mountain [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(4): 437-443.

[2] 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.

[3] 耿一凯, 金振奎, 赵建华, 等. 页岩储层孔隙类型控制因素研究: 以川东焦石坝地区龙马溪组为例[J]. 石油实验地质, 2017, 39(1): 71-78.
GENG Yikai, JIN Zhenkui, ZHAO Jianhua, et al. Controlling factors of pore types in shale reservoirs: A case study from the Longmaxi Formation in Jiaoshiba area, eastern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(1): 71-78.

[4] 汤良杰, 崔敏. 中上扬子区关键构造变革期、构造变形样式

- 与油气保存[J].石油实验地质,2011,33(1):12-16.
- TANG Liangjie, CUI Min. Key tectonic changes, deformation styles and hydrocarbon preservations in Middle-Upper Yangtze region[J].Petroleum Geology & Experiment,2011,33(1):12-16.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 王平,刘少峰,郜瑛琪,等.川东弧形带三维构造扩展的 AFT 记录[J].地球物理学报,2012,55(5):1662-1673.
- WANG Ping, LIU Shaofeng, GAO Tangjun, et al. Cretaceous transportation of Eastern Sichuan arcuate fold belt in three dimensions: Insights from AFT analysis[J].Chinese Journal of Geophysics,2012,55(5):1662-1673.
- [8] 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 analyses and genetic interpretation about the geotectonics of Yudong (East Chongqing) [J]. Geotectonica et Metallogenia,2004,28(1):15-22.
- [9] 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 northeast of Sichuan Basin [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs,2010,3(2):17-20.
- [10] 朱彤,王烽,俞俊杰,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.
- [11] 燕继红,李启桂,朱祥,等.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, et al. 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.
- [12] 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.
- [13] 郭卫星,熊亮,魏力民.川东南构造变形特征及其对页岩气保存的影响[J].煤田地质与勘探,2016,44(6):21-26.
- GUO Weixing, XIONG Liang, WEI Limin. Structure deformation of southeast Sichuan and its influences on preservation of shale gas[J].Coal Geology & Exploration,2016,44(6):21-26.
- [14] 吴礼明,丁文龙,曾维特,等.滑脱构造与油气成藏的关系[J].特种油气藏,2011,18(5):60-63.
- WU Liming, DING Wenlong, ZENG Weite, et al. The relationship between detachment structure and hydrocarbon accumulation[J].Special Oil and Gas Reservoirs,2011,18(5):60-63.
- [15] 金文正,万桂梅,王俊鹏,等.龙门山冲断带滑脱构造变形样式[J].西南石油大学学报(自然科学版),2011,33(5):9-13.
- JIN Wenzheng, WAN Guimei, WANG Junpeng, et al. Deformation types of detachment structure [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition),2011,33(5):9-13.
- [16] 颜丹平,金哲龙,张维宸,等.川渝湘鄂薄皮构造带多层剥离滑脱系的岩石力化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 Weichen, 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 Gansu, China[J]. Geological Bulletin of China,2008,27(10):1687-1697.
- [17] 魏祥峰,李宇平,魏志红,等.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, et al. 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.
- [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] 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, L? Junxiang, PAN Wenlei, et al. Hydrocarbon preservation conditions in West Hubei and East Chongqing [J]. Petroleum Geology & Experiment,2009,31(2):202-206.
- [20] 李飞,尚长健,楼章华,等.米仓一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.
- [21] 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.

- Oil & Gas Geology, 2016, 37(6): 809-818.
- [15] 蒋凤仙. 用地震层速度预测地层压力的方法特点及精度[J]. 江汉石油学院学报, 1988, 10(1): 50-56.
JIANG Fengxian. Some methods for predicting the layer's pressure using seismic interval velocity and the prediction precision [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1988, 10(1): 50-56.
- [16] 屈大鹏, 陈超, 王明飞, 等. 川东南地区基于海相泥页岩地层的压力系数预测: 以丁山区块为例[J]. 物探与化探, 2016, 40(2): 349-352.
QU Dapeng, CHEN Chao, WANG Mingfei, et al. Researches based on the prediction methods of marine-shale pressure coefficients in southeastern Sichuan Basin: A case study of DS area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(2): 349-352.
- [17] 叶志, 樊洪海, 蔡军, 等. 一种异常高压形成机制判别方法与应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(3): 102-107.
YE Zhi, FAN Honghai, CAI Jun, et al. Investigation and application of a discrimination method for abnormal high formation pressure forming mechanism [J]. Journal of China University of Petroleum, 2012, 36(3): 102-107.
- [18] SWARBRICK R E, OSBORNE M J. Mechanisms that generate abnormal pressures: An overview [R]. Tulsa, OK: AAPG, 1998: 13-34.
- [19] BOWERS G L. Detecting high overpressure [J]. The Leading Edge, 2002, 21(2): 174-177.
- [20] 李兰斌, 孙家振, 陈文礼, 等. 舞阳盐湖盆地地层压力特征与成因机理探讨[J]. 石油实验地质, 2000, 22(3): 265-269.
LI Lanbin, SUN Jiazhen, CHEN Wenli, et al. Characteristics and genetic mechanism of formation pressure in the Wuyang salt-lake Basin [J]. Experimental Petroleum Geology, 2000, 22(3): 265-269.
- [21] 刘洪林, 王红岩, 方朝合, 等. 中国南方海相页岩气超压机制及选区指标研究[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 48-54.
LIU Honglin, WANG Hongyan, FANG Chaohe, et al. The formation mechanism of over-pressure reservoir and target screening index of the marine shale in the South China [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 48-54.
- [22] 郑民, 李建忠, 吴晓智, 等. 海相页岩岩系中有机质的高温裂解生气潜力[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(3): 1-11.
ZHENG Min, LI Jianzhong, WU Xiaozhi, et al. High-temperature pyrolysis gas-sourcing potential of organic matter in marine shale source rock system [J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(3): 1-11.
- [23] 高岗, 黄志龙, 王兆峰, 等. 地层异常高压形成机理的研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2005, 20(1): 1-7.
GAO Gang, HUANG Zhilong, WANG Zhaofeng, et al. Study on the mechanisms of the formation of formation abnormal high-pressure [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2005, 20(1): 1-7.

(编辑 黄娟)

(上接第109页)

- [22] 申宝剑, 仰云峰, 腾格尔, 等. 四川盆地焦石坝构造区页岩有机质特征及其成烃能力探讨: 以焦页1井五峰—龙马溪组为例[J]. 石油实验地质, 2016, 38(4): 480-488.
SHEN Baojian, YANG Yunfeng, TENGGER, et al. Characteristics and hydrocarbon significance of organic matter in shale from the Jiaoshiba structure, Sichuan Basin: A case study of the Wufeng-Longmaxi formations in well Jiaoye1 [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(4): 480-488.
- [23] 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.
- [24] 康德江, 马行陟. 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.
- [25] 王伟锋, 周维维, 徐政语. 黔南拗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. Deformation characteristics and stability zones evaluation in the southern Guizhou Depression [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(2): 255-261.
- [26] 刘超英. 页岩气勘探选区评价方法探讨[J]. 石油实验地质, 2013, 35(5): 564-569.
LIU Chaoying. Discussion on methods of shale gas exploration evaluation [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(5): 564-569.

(编辑 韩彧)