

# 四川盆地罗场向斜黄金坝建产区五峰组-龙马溪组页岩气藏特征

徐政语<sup>1</sup>, 梁 兴<sup>2</sup>, 王希友<sup>2</sup>, 王高成<sup>2</sup>, 张介辉<sup>2</sup>, 熊绍云<sup>1</sup>, 鲁慧丽<sup>1</sup>, 徐 鹤<sup>2</sup>

(1. 中国石油 勘探开发研究院 杭州地质研究院, 浙江 杭州, 310023; 2. 中国石油 浙江油田分公司, 浙江 杭州 310013)

**摘要:** 罗场向斜位于四川盆地南缘, 主要目的层五峰组-龙马溪组页岩在历经印支、燕山、喜马拉雅等多期造山事件改造后, 页岩变形相对较弱、埋藏适中, 页岩气形成与保存条件良好, 成为上扬子页岩气核心区的重要组成部分。据岩性、电性、矿物组成、有机质赋存及含气性特征分析, 本套页岩地层可划分为3个三级层序、3个岩性段、3种沉积相及4种沉积亚相与多种沉积微相; 总体以深水陆棚相沉积期发育的富有机质页岩段(I层)含气性最好, 并可细分为 $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$ ,  $I_5$  5个小层。综合向斜内黄金坝建产区页岩物性与压力系数特征分析, 昭通示范区页岩气主要赋存于现今残留的深水陆棚相复向斜内, 气藏以观音桥段灰岩分隔为龙马溪组底部与五峰组两套, 结合压后评估与单井试采成果, 评价认为建产区以龙马溪组底部 $I_3$ 与 $I_4$ 小层压后改造与采气效果最好。

**关键词:** 页岩气; 五峰组; 龙马溪组; 罗场向斜; 黄金坝建产区; 四川盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

## Shale gas reservoir characteristics of the Wufeng-Longmaxi Formations in Huangjinba construction block of the Luochang Syncline, the Sichuan Basin

Xu Zhengyu<sup>1</sup>, Liang Xing<sup>2</sup>, Wang Xiyu<sup>2</sup>, Wang Gaocheng<sup>2</sup>, Zhang Jiehui<sup>2</sup>, Xiong Shaoyun<sup>1</sup>, Lu Huili<sup>1</sup>, Xu He<sup>2</sup>

(1. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

2. Zhejiang Oilfield Company, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310013, China)

**Abstract:** Luochang Syncline is located in the southern Sichuan Basin. The main target layer of Wufeng-Longmaxi Formations shale has been deformed during Indosinian, Yanshanian and Himalayan. The shale deformation was relatively weak with moderate burial, promising good condition for shale gas accumulation and preservation. Thus the syncline has become an important part of the core shale gas area in the upper Yangtze region. According to characteristics of lithology, electrical, mineral composition, organic matter and gas bearing property, Wufeng-Longmaxi Formations shale of the Syncline can be divided into three third-order sequences, three lithologic sections, three types of facies and four types of sub-facies and various of micro-facies. Deep water shelf depositional stage is the best stage (layer I) for possible organic rich shale deposition and could be subdivided into five layers, namely  $I_1$ ,  $I_2$  and  $I_3$ ,  $I_4$ ,  $I_5$ . Integrated analysis of physical property and pressure coefficient of the shale in the Huangjinba development block, shale gas is mainly preserved in the residual syncline which was the main part of deep shelf. The gas reservoirs are divided into two sets, the bottom of the Longmaxi Formation and the Wufeng Formation, separated by the Guanyinqiao Member limestone. Based on fracturing evaluation and production test results, the bottom of Longmaxi Formation  $I_3$  and  $I_4$  are the best production layers after fracture transformation.

**Key words:** shale gas, Wufeng Formation, Longmaxi Formation, Luochang Syncline, Huangjinba construction block, Sichuan Basin

罗场向斜地跨川、滇两省, 矿权隶属长宁与昭通两大国家级页岩气示范区(图1, 图2), 向斜轴呈北西-

南东走向, 主体位于四川省高县、珙县及筠连县境内, 东南延伸进入云南省威信县, 面积超过2 000 km<sup>2</sup>。构

收稿日期: 2015-12-08; 修订日期: 2016-03-15。

第一作者简介: 徐政语(1964—), 男, 博士、高级工程师, 构造地质学和石油地质。E-mail: Xuzy\_hz@petrochina.com.cn。

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科技管理部重大技术攻关项目(2014F-4702)。

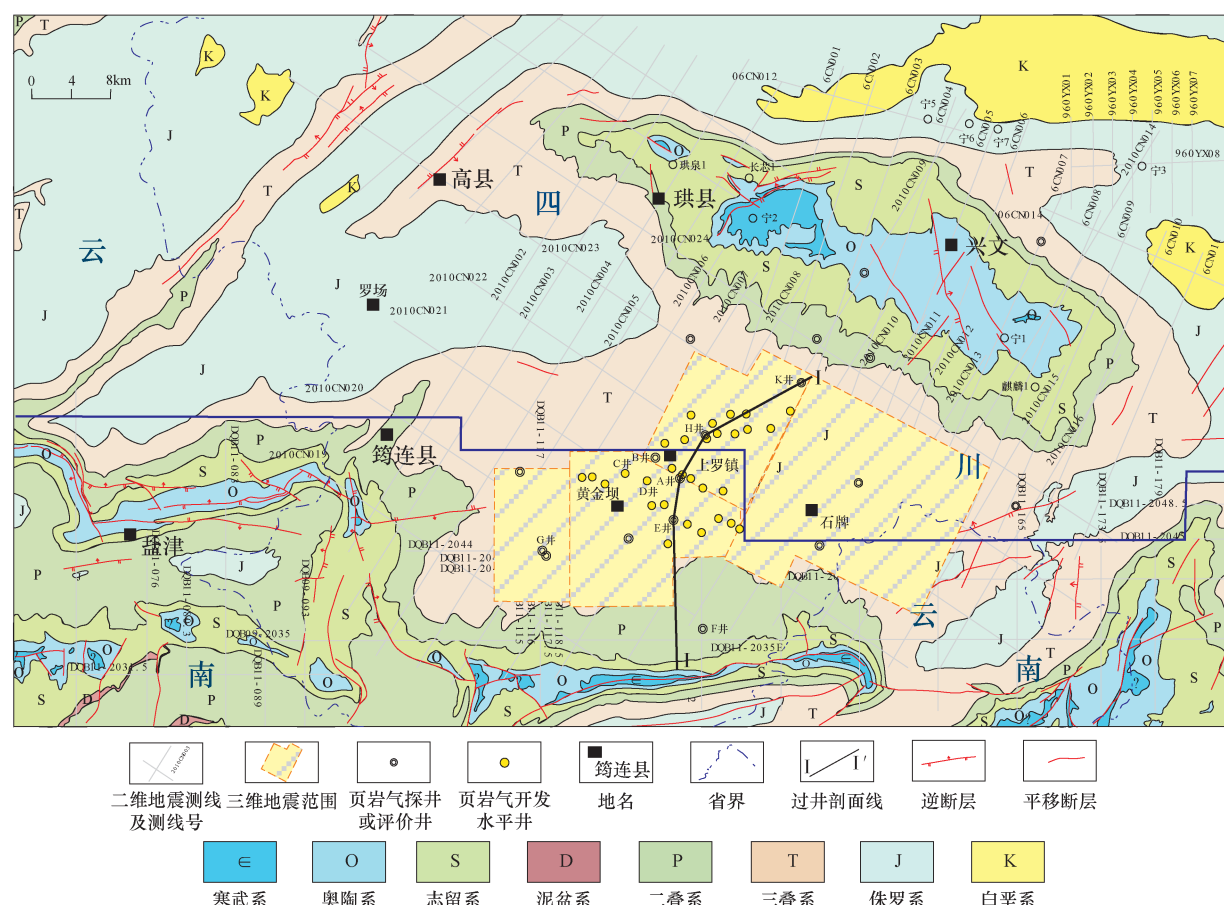


图 1 四川盆地罗场向斜勘探地质图

Fig. 1 Exploration geological map in the Luochang Syncline, the Sichuan Basin

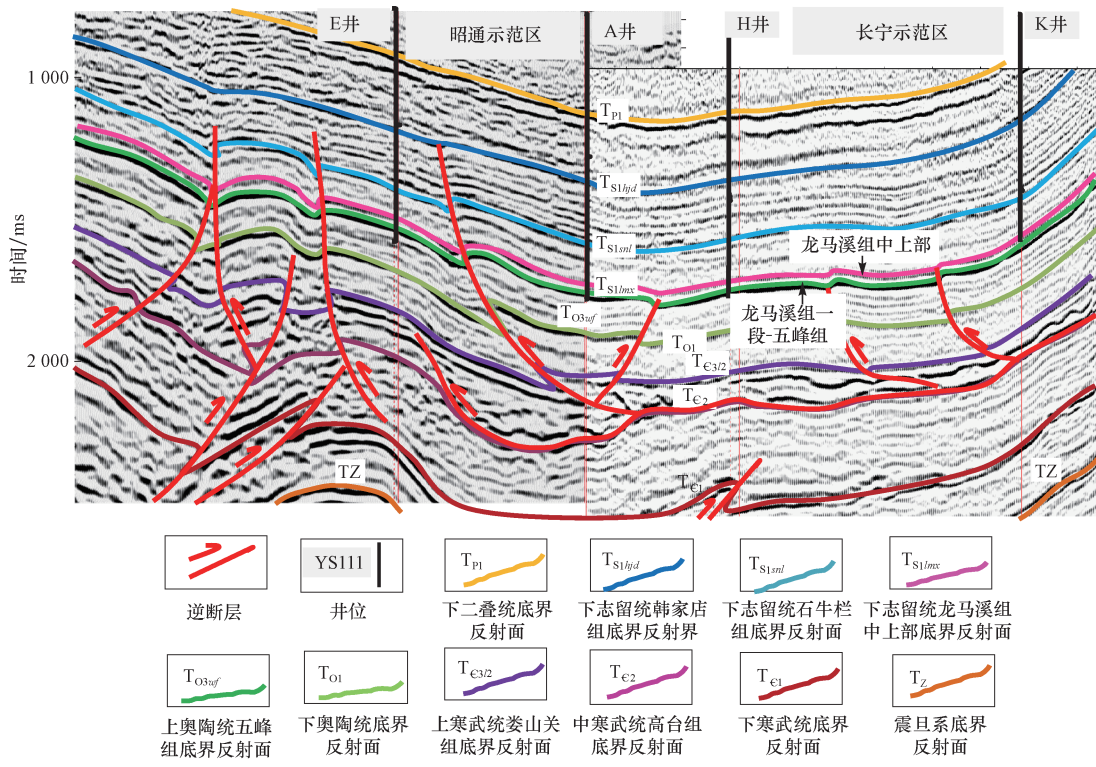


图 2 四川盆地罗场向斜南北向主测线剖面(位置见图 1 中 I - I' 线)

Fig. 2 NS section in the Luochang Syncline, the Sichuan Basin(see I - I' line position in Fig. 1)

造位置上处于四川盆地川东南坳陷珙县背斜与滇黔北坳陷威信背斜间,向斜区完成二维地震测线 1 000 km 以上、三维地震近 600 km<sup>2</sup>。目前已钻探井及评价井 15 口、开发井 30 余口,水平井单井日产量稳定在  $(5 \sim 20) \times 10^4 \text{ m}^3$ ,已成为我国南方重要的页岩气勘探开发示范区。目前探明页岩气地质储量千亿方以上,产能正在建设中。

## 1 气藏页岩发育与沉积特征

罗场向斜发育有下寒武统筇竹寺组与上奥陶统—下志留统五峰组—龙马溪组两套页岩。其中,主要目的层五峰组—龙马溪组<sup>[1]</sup>发育于广西期<sup>[2-4]</sup>,属于扬子陆块典型陆内同造山期前陆盆地闭塞海湾环境沉积物<sup>[3-5]</sup>。气藏中五峰组中、下部发育灰黑色—黑色笔石页岩,表现出典型的深水陆棚相沉积环境<sup>[3,5-6]</sup>。五峰组上部(观音桥段)为灰色钙质页岩夹泥灰岩,顶部为厚约 5~50 cm 的灰色生物介壳灰岩。五峰组累计厚度为 3.3~10.56 m,表现出由深水陆棚向浅水陆棚、潮坪及生屑滩过渡的沉积环境特征,记录有典型赫南特冰川期海平面迅速下降沉积响应特征<sup>[4,7-8]</sup>。

气藏中龙马溪组页岩自下而上划分为两段。下段为一套灰黑—黑色的泥质夹粉砂质页岩,厚 41.72 (YS107 井)~72.6 m (YS106 井),上段为一套灰黑—深灰色的灰质、泥质页岩,厚 156.74 (昭 104 井)~247.44 m (YS111 井);地层累计厚 203.12 (昭 104 井)~357.40 m (YS108 井)。依据岩性组合、沉积层理、构造及含有物等分析,龙马溪组页岩总体表现为一个海退旋回,沉积环境可划分为深水、浅水与半深水 3 种陆棚相。结合页岩中微量元素(V, Cr, Th, U)含量分析(图 3)可细分为缺氧深水陆棚、贫氧深水陆棚、贫氧半深水过渡陆棚、富氧浅水陆棚 4 种亚相<sup>[8-9]</sup>及泥质深水陆棚、灰质深水陆棚、砂质深水陆棚、灰质浅水陆棚等多种沉积微相,其中下部富有机质页岩发育段沉积于缺氧泥质—砂质深水陆棚相环境(图 3)。

## 2 气藏页岩层序划分与对比

依据向斜区五峰组—龙马溪组页岩岩相、沉积环境、水体变化与有机碳含量(TOC)有较好的相关性,即深水陆棚相沉积页岩有机碳含量高于浅水陆棚相,泥质页岩相有机碳含量高于泥灰质、灰质及砂质页岩相,水体加深时有机碳含量增加,水体变浅时有机碳含量降低<sup>[10]</sup>,凝缩层附近有机碳含量值最高等特点。结合

岩性与电性变化的旋回性特征及相关性,将本套页岩地层划分为 3 个三级层序<sup>[11]</sup>。其中,五峰组对应第一个三级层序 SQ1,龙马溪组下段对应第二个三级层序 SQ2,龙马溪组上段对应第三个三级层序 SQ3(图 3)。

为便于向斜建产区页岩气藏小层对比,结合目的层主要集中于五峰组—龙马溪组下部富有机质页岩段,即层序 SQ1 与 SQ2 海侵—高位体系域段特征。依据建产区内生产需求与富有机质页岩段沉积环境变化特征<sup>[3,10]</sup>,笔者围绕向斜内页岩气富集成藏特点从岩相组合与沉积响应特征、矿物特征、有机质赋存、储层物性以及含气性等<sup>[10]</sup>方面综合将本套页岩划分为炭质页岩发育段(I 层)、砂质页岩发育段(II 层)与灰质页岩发育段(III 层)三个岩性段,将其中富有机质页岩段(I 层)细分为 I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub>, I<sub>4</sub>, I<sub>5</sub> 5 个小层(图 3)。

### 2.1 岩相组合与沉积响应特征

#### 1) I<sub>1</sub> 小层

处于五峰组中下部,系凯迪期台内坳陷海侵沉积物<sup>[11-14]</sup>,具有陆源碎屑含量较高,发育深水陆棚缺氧泥质笔石页岩夹粉砂质页岩相沉积组合响应特征。本层灰黑色页岩镜下显现泥质结构与显微定向构造,含粉砂 3% (石英颗粒约占 2%、碳酸盐岩颗粒约占 1%),普遍见分散状有机质及水平纹理,有顺层分布和局部集中现象(图 4a)。

#### 2) I<sub>2</sub> 小层

处于五峰组上部,又称观音桥段,为赫南特冰川期沉积物。早期发育浅水陆棚贫氧钙质页岩相,灰质含量高,灰黑色含钙质页岩镜下具显微晶质结构和鳞片状构造,含有 3% 左右的粉砂级碳酸盐颗粒(包括部分白云石自形晶和呈圆形状的生物颗粒)和 2% 左右的石英粉砂,普遍含分散状有机质,略呈有水平纹理。晚期岩性相变为浅水陆棚富氧的生物滩介壳灰岩相,表现出典型的冰川期沉积组合响应特征。

#### 3) I<sub>3</sub> 小层

处于龙马溪组底部,系冰川期后鲁丹阶海侵初期沉积物,表现出下部陆源碎屑含量高,上部泥晶碳酸盐岩含量高特征。沉积上表现出早期发育深水陆棚缺氧粉砂质页岩相,沉积的灰黑色含钙质页岩镜下粉砂级颗粒含量约占 4%,主要为碳酸盐颗粒(包括白云石自形晶),其次为石英,由于分布不均、常常构成纹层。本层晚期主要发育深水陆棚缺氧泥质页岩相,常见笔石、泥晶碳酸盐岩含量为 3%~8% (图 4b)。

#### 4) I<sub>4</sub> 小层

发育于龙马溪组下段下部,系冰川期后鲁丹阶海

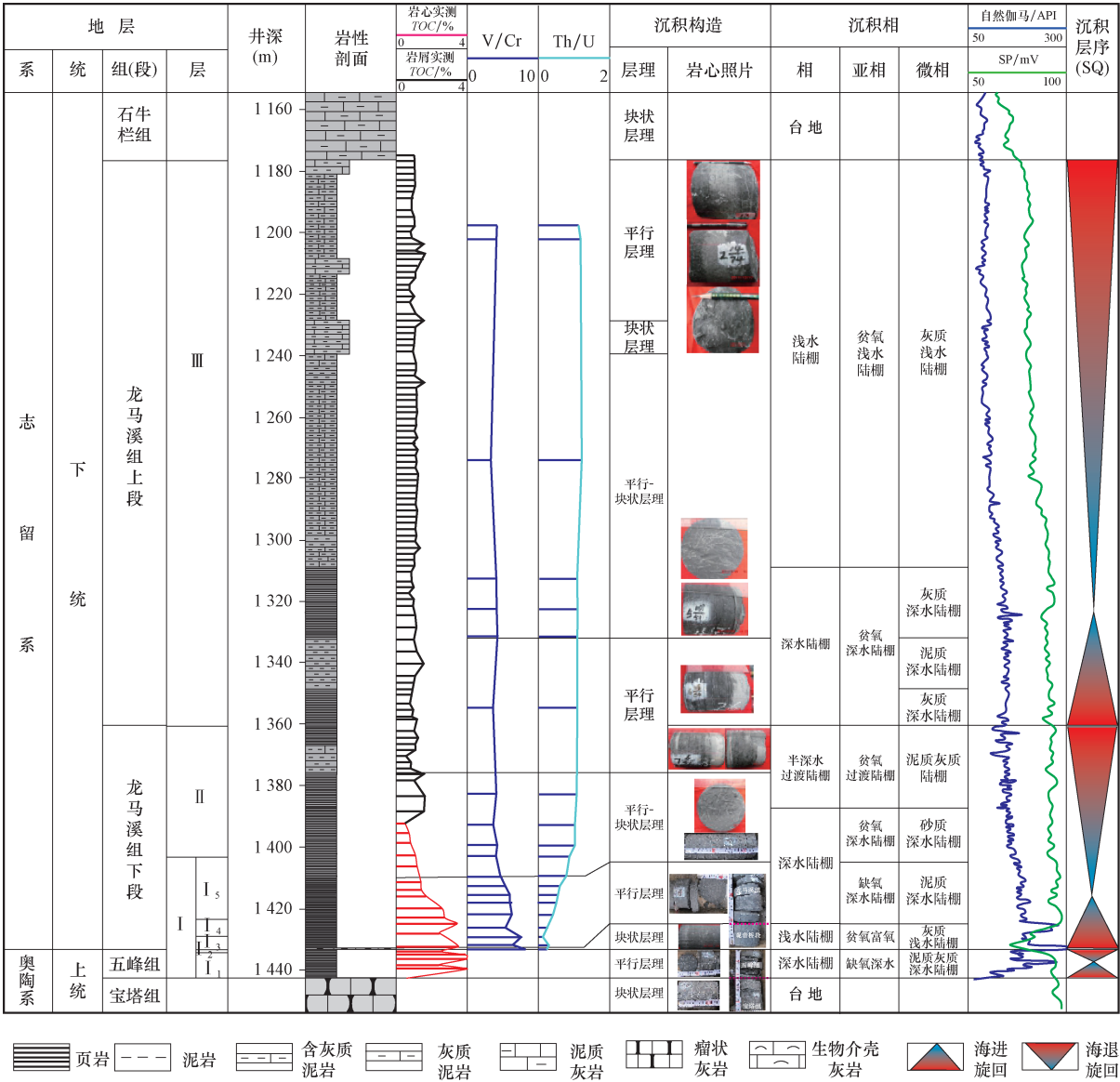


图 3 四川盆地罗场向斜 YS106 井五峰组 – 龙马溪组页岩地层层序及沉积相划分

Fig. 3 Division of shale sequences and sedimentary facies of Well YS106 in the Wufeng-Longmaxi Formations in the Luochang Syncline, the Sichuan Basin

侵早 – 中期沉积物, 主要体现为深水陆棚缺氧泥质页岩相沉积组合响应特征, 灰黑 – 黑色笔石页岩石英含量在 2% 左右, 泥晶碳酸盐岩含量少, 偶见放射虫等硅质生物化石。局部含灰泥质、云质粉砂页岩, 水平纹理发育, 镜下粉砂级颗粒以碳酸盐颗粒(包括白云石自形晶和生屑)为主, 约占 5%, 石英多相对集中构成浅色纹层(图 4c)。

5) I<sub>5</sub> 小层

发育于龙马溪组下段中下部, 系冰川期后鲁丹阶高位期 – 海退早期沉积物, 灰黑色页岩镜下呈现泥质结构和显微鳞片状构造, 发育略微波状纹层及略显水平纹理, 含少量(0.5%) 石英粉砂和 2% 左右的粉砂

级碳酸盐颗粒。自下而上陆源碎屑有明显增多的趋势, 中、下部凝缩层发育段主要沉积深水陆棚缺氧相笔石页岩, 上部渐变为深水陆棚缺氧相含粉砂、粉砂质页岩(图 4d,e)。

6) 砂质页岩发育段(Ⅱ层)

发育于龙马溪组下段上部及上段下部, 为鲁丹高位期沉积物, 砂泥结构及显微定向显层清晰(图 4f)。

2.2 矿物组合特征

页岩中矿物依据来源可划分为原生与次生两大类。其中, 粘土矿物包含物源区供给及成岩期次生两类, 石英包含物源区供给及生物成因两类, 方解石、白

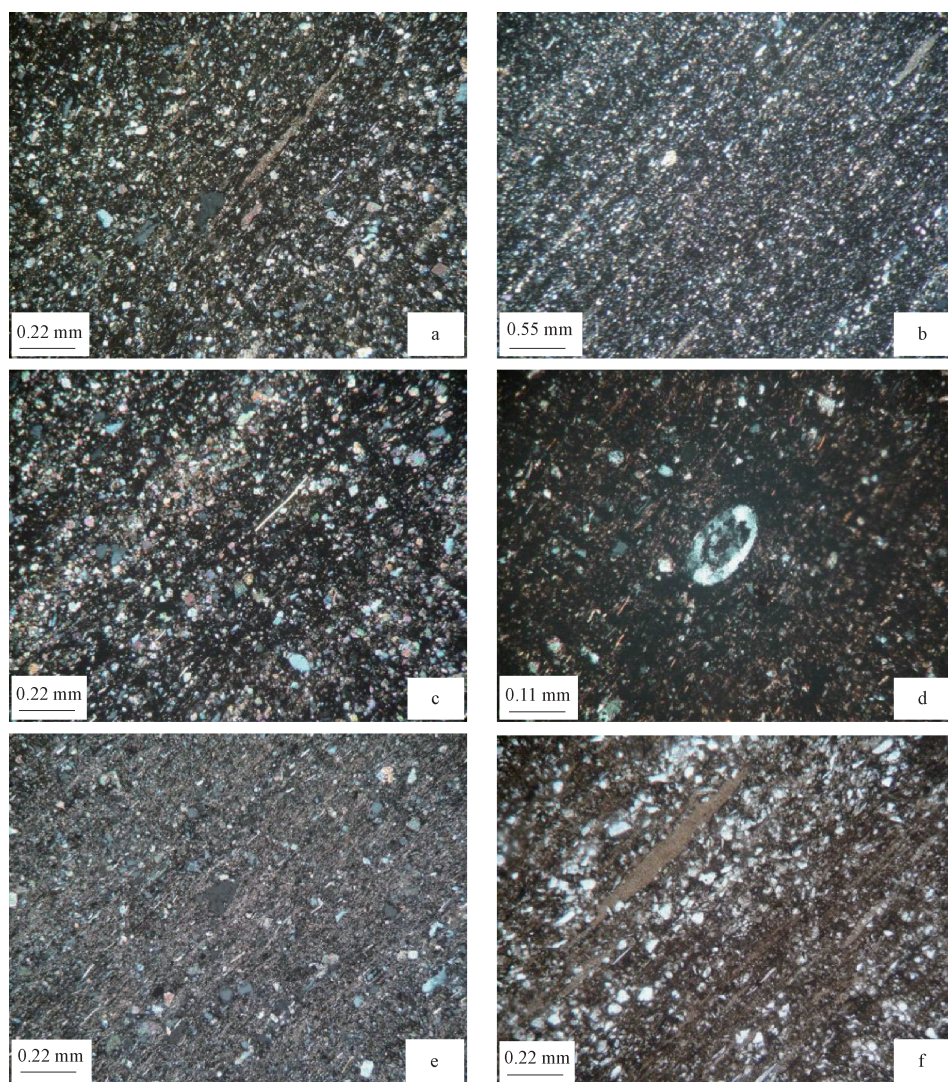


图4 四川盆地罗场向斜 YS106 井五峰组-龙马溪组富有机质页岩段岩心薄片特征

Fig. 4 Thin section characteristics of cores of organic rich shale of the Wufeng-Longmaxi Formation from Well YS106 in the Luochang Syncline, the Sichuan Basin

a. YS106 井 I<sub>1</sub> 小层, 灰黑色含钙质页岩, 埋深 1 436.83 m, 显现泥质结构与显微定向构造, 见分散状有机质及水平纹理; b. YS106 井 I<sub>3</sub> 小层, 灰黑色含钙质页岩, 埋深 1 432.97 m, 普遍见分散状有机质及水平纹理; c. YS106 井 I<sub>4</sub> 小层, 灰黑色云质页岩, 埋深 1 429.51 m, 水平纹理发育, 镜下粉砂颗粒以白云石和生屑为主, 石英构成浅色纹层; d. YS106 井 I<sub>5</sub> 小层, 灰黑色页岩, 埋深 1 419.06 m, 具泥质结构和非定向鳞片构造, 含石英和碳酸盐颗粒, 见椭圆形硅质生物化石; e. YS106 井 I<sub>5</sub> 小层, 灰黑色页岩, 埋深 1 409.68 m, 普遍含分散状有机质, 略显水平纹理, 具泥质结构和显微非定向构造, 粉砂颗粒多零星分布, 局部可见顺层富集现象; f. YS106 井 II 层, 灰黑色含粉砂质页岩, 埋深 1 401.53 m, 镜下具含粉砂泥质结构和显微定向构造, 粉砂以石英为主要、碳酸盐矿物颗粒零星分布, 泥质呈透镜状顺层产出

云石主要为成岩期次生<sup>[15]</sup>, 仅长石基本来源于物源区供给, 因此页岩矿物中以长石含量最能反映物源供给量及海平面变化。如本区 YS106 井页岩长石含量由五峰组 I<sub>1</sub> 小层 3.22%~6.60%/均值 4.63%、I<sub>2</sub> 小层 0.48%~4.06%/均值 2.27%, 上升至龙马溪组下段 I<sub>3</sub> 小层 5.85%、I<sub>4</sub> 小层 2.41%~12.47%/均值 7.37%、I<sub>5</sub> 小层 2.23%~9.52%/均值 6.35%及 II 层 8.99%~13.92%/均值 10.83%(表 1), 总体反映早期环境物源供应不足、晚期物源供给充足, 与图 3 中划分

的五峰组泥质灰质深水陆棚环境及龙马溪组下段砂质深水陆棚环境高度吻合<sup>[15]</sup>。结合五峰组与龙马溪组下段均发育有深海生物、能提供稳定生物硅的特点, 可以用能反映物源供给量的矿物确定页岩脆性矿物供给总量的变化, 即脆性指数的纵向变化。

I<sub>1</sub> 小层粘土矿物含量高于 30%, 石英含量为 15%~30%, 长石含量低于 10%, 白云石含量高于 10%, 方解石含量为 5%~20%, 矿物脆性指数为 0.33, 偏低。

表 1 四川盆地罗场向斜 YS106 井矿物成分统计

Table 1 Statistics of mineral components of Well YS106 in the Luochang Syncline, the Sichuan Basin

| 样品号      | 井深/m                  | 地层划分                       |                | 矿物百分含量/% |        |        |        |        | 矿物脆性<br>指数 |
|----------|-----------------------|----------------------------|----------------|----------|--------|--------|--------|--------|------------|
|          |                       | 组(段)                       | 层              | 粘土       | 石英     | 长石     | 方解石    | 白云石    |            |
| 9_8/42   | 1 397. 90 ~ 1 397. 92 | 龙<br>马<br>溪<br>组<br>下<br>段 | Ⅱ              | 38. 65   | 31. 43 | 13. 59 | 13. 92 | 2. 41  | 0. 450 2   |
| 9_25/42  | 1 402. 40 ~ 1 402. 44 |                            |                | 41. 97   | 32. 92 | 11. 10 | 8. 99  | 5. 01  | 0. 440 3   |
| 9_35/42  | 1 403. 53 ~ 1 403. 56 |                            |                | 48. 56   | 30. 82 | 7. 81  | 9. 44  | 3. 37  | 0. 386 3   |
|          |                       |                            |                | 均值       | 43. 06 | 31. 72 | 10. 83 | 10. 78 | 0. 425 6   |
| 9_42/42  | 1 404. 99 ~ 1 405. 00 |                            | Ⅰ <sub>5</sub> | 41. 69   | 33. 07 | 9. 52  | 11. 22 | 4. 50  | 0. 426 0   |
| 10_10/41 | 1 407. 10 ~ 1 407. 15 |                            |                | 51. 84   | 28. 43 | 6. 61  | 8. 63  | 4. 48  | 0. 350 4   |
| 10_16/41 | 1 408. 34 ~ 1 408. 40 |                            |                | 49. 91   | 24. 93 | 7. 55  | 11. 43 | 6. 19  | 0. 324 7   |
| 10_22/41 | 1 410. 11 ~ 1 410. 17 |                            |                | 51. 55   | 30. 70 | 5. 85  | 8. 95  | 2. 94  | 0. 365 5   |
| 10_33/41 | 1 411. 75 ~ 1 411. 84 |                            |                | 48. 93   | 31. 21 | 6. 85  | 10. 62 | 2. 40  | 0. 380 6   |
| 10_41/41 | 1 414. 58 ~ 1 414. 63 |                            |                | 53. 90   | 33. 51 | 2. 23  | 8. 32  | 2. 04  | 0. 357 4   |
| 11_8/37  | 1 415. 63 ~ 1 415. 66 |                            |                | 40. 72   | 36. 61 | 5. 03  | 11. 05 | 6. 59  | 0. 416 4   |
| 11_18/37 | 1 417. 98 ~ 1 418. 00 |                            |                | 36. 81   | 38. 10 | 4. 76  | 17. 56 | 2. 77  | 0. 428 5   |
| 11_23/37 | 1 419. 01 ~ 1 419. 04 |                            |                | 42. 26   | 31. 85 | 8. 76  | 13. 08 | 4. 05  | 0. 406 1   |
| 11_27/37 | 1 419. 67 ~ 1 419. 70 |                            |                | 37. 05   | 38. 35 | 6. 65  | 14. 19 | 3. 75  | 0. 450 0   |
| 11_35/37 | 1 421. 89 ~ 1 421. 91 |                            |                | 34. 92   | 39. 13 | 4. 29  | 16. 93 | 4. 73  | 0. 434 2   |
| 12_6/56  | 1 422. 96 ~ 1 422. 98 |                            |                | 27. 41   | 49. 68 | 8. 05  | 12. 09 | 2. 78  | 0. 577 2   |
|          |                       |                            | 均值             | 43. 08   | 34. 63 | 6. 35  | 12. 01 | 3. 94  | 0. 409 8   |
| 12_16/56 | 1 424. 92 ~ 1 424. 94 | 五<br>峰<br>组                | Ⅰ <sub>4</sub> | 44. 77   | 28. 57 | 7. 95  | 13. 93 | 4. 77  | 0. 365 2   |
| 12_32/56 | 1 427. 80 ~ 1 427. 84 |                            |                | 22. 92   | 20. 51 | 6. 65  | 17. 23 | 32. 69 | 0. 271 6   |
| 12_40/56 | 1 428. 29 ~ 1 428. 31 |                            |                | 24. 64   | 28. 31 | 12. 47 | 18. 22 | 16. 36 | 0. 407 9   |
| 12_52/56 | 1 429. 90 ~ 1 429. 91 |                            |                | 23. 61   | 35. 23 | 2. 41  | 25. 25 | 13. 50 | 0. 376 4   |
|          |                       |                            | 均值             | 28. 99   | 28. 16 | 7. 37  | 18. 66 | 16. 83 | 0. 355 3   |
| 13_10/38 | 1 432. 87 ~ 1 432. 93 |                            | Ⅰ <sub>3</sub> | 17. 67   | 58. 52 | 5. 85  | 9. 11  | 8. 84  | 0. 643 7   |
| 13_23/38 | 1 435. 89 ~ 1 435. 94 |                            | Ⅰ <sub>2</sub> | 22. 07   | 34. 97 | 4. 06  | 26. 78 | 12. 12 | 0. 390 3   |
| 13_31/38 | 1 437. 07 ~ 1 437. 09 |                            |                | 17. 15   | 23. 34 | 0. 48  | 19. 39 | 39. 65 | 0. 238 2   |
|          |                       |                            | 均值             | 19. 61   | 29. 15 | 2. 27  | 23. 08 | 25. 88 | 0. 314 2   |
| 14_7/46  | 1 440. 22 ~ 1 440. 24 |                            | Ⅰ <sub>1</sub> | 32. 44   | 34. 52 | 6. 60  | 12. 57 | 13. 86 | 0. 411 2   |
| 14_11/46 | 1 440. 90 ~ 1 440. 96 |                            |                | 43. 36   | 32. 51 | 4. 06  | 7. 72  | 12. 36 | 0. 3657    |
| 14_21/46 | 1 442. 81 ~ 1 442. 85 |                            |                | 38. 88   | 18. 09 | 3. 22  | 23. 94 | 15. 87 | 0. 213 1   |
|          |                       |                            | 均值             | 38. 23   | 28. 37 | 4. 63  | 14. 74 | 14. 03 | 0. 330 0   |

注:样品号 14\_21/46 表示第 14 次取心共有 46 块样,本样编号第 21;矿物脆性指数=(石英+长石)/矿物总含量。

Ⅰ<sub>2</sub> 小层粘土矿物含量为 15%~30%,石英含量为 20%~40%,长石含量低于 5%,白云石、方解石含量均高于 10%,矿物脆性指数为 0.31,最小。

Ⅰ<sub>3</sub> 小层粘土矿物含量低于 20%,石英含量高于 40%,方解石、白云石含量近 10%左右,矿物脆性指数为 0.64,最高。

Ⅰ<sub>4</sub> 小层粘土矿物含量为 15%~30%,石英含量为 20%~30%,长石含量低于 10%,方解石、白云石含量一般均高于 10%,矿物脆性指数为 0.355,适中。

Ⅰ<sub>5</sub> 小层粘土矿物含量一般高于 30%,石英含量一般为 30%~40%,长石含量一般为 5%~10%,方解石含量一般高于 10%,白云石含量低于 10%,矿物脆性指数为 0.41,较高(表 1)。

Ⅱ层页岩粘土矿物含量高于 40%,石英含量高于

30%,长石含量高于 10%,方解石含量为 10%左右,白云石含量低于 10%,矿物脆性指数亦较高,为 0.4256。

2.3 有机质赋存特征

向斜区五峰组 – 龙马溪组页岩有机质赋存总体呈现底部富集、中上部贫散特征<sup>[10]</sup>,表现为总有机碳含量(TOC)由地层底部五峰组Ⅰ<sub>1</sub>小层 6.09%、Ⅰ<sub>2</sub>小层 2.93%~5.41%向中 – 上部龙马溪组下段Ⅰ<sub>3</sub>小层 4.39%、Ⅰ<sub>4</sub>小层 3.02%~4.32%/均值 3.67%、Ⅰ<sub>5</sub>小层 1.52%~3.44%/均值 2.3%及Ⅱ层 0.66%~1.36%/均值 0.99%逐渐减小、降低趋势,有机碳含量高值段(TOC 均值≥3.0%)主要局限于地层底部Ⅰ层Ⅰ<sub>1</sub>—Ⅰ<sub>4</sub>小层沉积期泥质与灰质深水陆棚相沉积环境(表 2;图 3)。

表2 四川盆地罗场向斜 YS106 井五峰组—龙马溪组  
页岩有机碳含量统计

Table 2 Total organic carbon content (TOC) of the  
Wufeng-Longmaxi Formations shale of Well YS106 in  
the Luochang Syncline, the Sichuan Basin

| 样品编号     | 井深/m     | 层位<br>组(段)层                | 岩性                  | TOC/% |
|----------|----------|----------------------------|---------------------|-------|
| YS106-40 | 1 392.40 | Ⅱ                          | 灰黑色泥岩               | 0.66  |
| YS106-39 | 1 395.50 | Ⅱ                          | 灰黑色泥岩               | 0.92  |
| YS106-38 | 1 398.75 | Ⅱ                          | 灰黑色页岩               | 1.01  |
| YS106-37 | 1 402.67 | Ⅱ                          | 灰黑色页岩               | 1.36  |
| 均值       |          |                            |                     | 0.99  |
| YS106-36 | 1 406.40 | 龙<br>马<br>溪<br>组<br>下<br>段 | I <sub>5</sub> 黑色页岩 | 1.52  |
| YS106-35 | 1 411.40 |                            | I <sub>5</sub> 黑色页岩 | 1.77  |
| YS106-34 | 1 414.00 |                            | I <sub>5</sub> 黑色页岩 | 1.76  |
| YS106-33 | 1 416.00 |                            | I <sub>5</sub> 黑色页岩 | 2.11  |
| YS106-32 | 1 419.80 |                            | I <sub>5</sub> 黑色页岩 | 3.19  |
| YS106-31 | 1 423.00 |                            | I <sub>5</sub> 黑色页岩 | 3.44  |
| 均值       |          |                            |                     | 2.30  |
| YS106-30 | 1 425.00 | I <sub>4</sub>             | 黑色页岩                | 4.32  |
| YS106-29 | 1 428.14 |                            | 黑色页岩                | 3.02  |
| 均值       |          |                            |                     | 3.67  |
| YS106-28 | 1 432.60 | I <sub>3</sub>             | 黑色页岩                | 4.39  |
| YS106-27 | 1 434.00 | I <sub>2</sub>             | 灰黑色页岩               | 3.17  |
| YS106-26 | 1 435.00 | I <sub>2</sub>             | 黑色页岩                | 5.41  |
| YS106-25 | 1 436.50 | 五<br>峰<br>组                | I <sub>2</sub> 黑色页岩 | 4.90  |
| YS106-24 | 1 438.45 |                            | I <sub>2</sub> 黑色页岩 | 2.93  |
| 均值       |          |                            |                     | 4.16  |
| YS106-23 | 1 439.60 | I <sub>1</sub>             | 黑色页岩                | 6.09  |
| YS106-22 | 1 442.50 | I <sub>1</sub>             | 黑色灰质泥岩              | 0.71  |
| 均值       |          |                            |                     | 3.40  |

## 2.4 物性特征

据实验室岩心测试资料分析,罗场向斜区五峰组—龙马溪组页岩主要目的层 I<sub>1</sub>—I<sub>5</sub> 小层物性总体变化不大,表现为典型的低孔、超低渗储层特征,总孔隙度为 5.16%~7.06%、有效孔隙率≤4%,渗透率 < 0.01 × 10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,表明地层束缚水含量高,达 90% 以上,可动流体少(表 3)。但主要目的层 I 段表现出明显的储层非均质性特征<sup>[10,16]</sup>,其中 I<sub>1</sub>, I<sub>4</sub> 和 I<sub>5</sub> 小层有效孔隙度值略高于 I<sub>2</sub> 和 I<sub>3</sub> 小层,页岩介孔中大孔、中孔所占比例明显偏高,呈现龙马溪组底部页岩物性总体好于五峰组特征。

等温吸附实验证实:向斜区五峰组—龙马溪组富有机质页岩段储层确实存在明显的非均质性,表现出页岩对甲烷的吸附性能由 I<sub>1</sub> 小层向 I<sub>3</sub>, I<sub>4</sub> 和 I<sub>5</sub> 小

层逐渐减小、降低,Ⅱ层吸附量最少(图 5)的总趋势,实质反映了页岩储层比表面积由底层向中上部逐渐减少、减小的特征。

经结合全岩矿物成分(XRD)与全波列测井资料岩石力学参数计算成果<sup>[17-18]</sup>分析,发现向斜区目的层段 I<sub>3</sub>, I<sub>4</sub> 和 I<sub>5</sub> 小层页岩脆性指数较高, I<sub>1</sub> 和 I<sub>2</sub> 小层稍低,不同小层间页岩脆性系数存在有低值分布段,总体反映向斜区页岩物性具有垂向分异与非均质性特征(表 3)。

## 2.5 含气特征

岩心现场解析成果表明:向斜区五峰组—龙马溪组页岩非目的层段含气量相对较低、一般低于 2m<sup>3</sup>/t,主要目的层段(I<sub>1</sub>—I<sub>5</sub> 小层)含气量相对较高、一般 2.5~3.5m<sup>3</sup>/t(表 4)。主要目的层诸小层间均存在含气量低值段分隔,如 YS108 井 I<sub>2</sub> 与 I<sub>3</sub>, I<sub>3</sub> 与 I<sub>4</sub>, I<sub>4</sub> 与 I<sub>5</sub> 小层之间均见有含气量(或气测值)低值段(表 4)分隔,表明目的层段页岩含气性纵向存在分异与变化,页岩储层具有明显的分隔层与非均质性特征(表 3)。

## 3 气藏地层压力与产气特征

长宁与昭通两大示范区 2009 年以来的页岩气勘探实践证明:向斜区含气页岩与普通页岩在井、震响应上存在明显的差异与特征<sup>[19-21]</sup>,一般含气页岩层在测井曲线上表现为“高伽马、高时差与低密度”特征,在地震剖面上表现为“低频”波阻反射特征,而普通页岩层多表现为“中伽马、高中子”测井响应及“高频”波阻反射响应特征,二者较易识别与辨认。但对于建产区含气页岩层能否产气?产气量是高、还是低?常常需要结合页岩地层压力与压裂后的储层改造效果以及试气成果进行分析与评价。据罗场向斜南部黄金坝建产区现有的 7 口页岩气生产井试气成果统计资料分析(表 5),影响建产区页岩气产量的关键因素是地层压力,通常超压层段页岩气高产、常压层段页岩气低产或仅有少量显示,即便同一产区不同层段页岩由于地层压力不同,其产气量也不一样。如黄金坝产区北部 YS108 井区及上 1 井区 I<sub>1</sub>—I<sub>4</sub> 小层页岩测试地层压力系数为 1.90~1.96,接近 2.0,综合试气成果呈现典型的超压、高产气层特征;而其上覆的 I<sub>5</sub> 小层、Ⅱ,Ⅲ层页岩地层压力系数仅 1.0,表现为典型的常压、非产气层特征。此外,还发现在超压层内不同小层(如 I<sub>1</sub>—I<sub>2</sub> 小层与 I<sub>3</sub>—I<sub>4</sub> 小层)由于地层压力系数不

表 3 四川盆地罗场向斜 YS108 井五峰组 – 龙马溪组页岩物性统计

Table 3 Physical property statistics of the Wufeng-Longmaxi Formations shale of Well YS108 in the Luochang Syncline, the Sichuan Basin

| 序号 | 深度/m      | 地层                         |                | 核磁共振检测 |         |         |          |           | 常规物性检测  |                                           |
|----|-----------|----------------------------|----------------|--------|---------|---------|----------|-----------|---------|-------------------------------------------|
|    |           | 组(段)                       | 层              | 孔隙度/%  | 含气饱和度/% | 含水饱和度/% | 束缚水饱和度/% | 可动流体饱和度/% | 有效孔隙度/% | 水平渗透率/(10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup> ) |
| 1  | 2 382. 43 | 龙<br>马<br>溪<br>组<br>下<br>段 | Ⅲ              | 3. 84  | 24. 86  | 75. 14  | 99. 04   | 0. 96     | 1. 0    | 0. 006 6                                  |
| 2  | 2 386. 75 |                            | Ⅱ              | 4. 11  | 25. 74  | 74. 26  | 98. 46   | 1. 54     | 2. 1    | 0. 007 2                                  |
| 3  | 2 391. 22 |                            | Ⅱ              | 4. 18  | 26. 54  | 73. 46  | 97. 76   | 2. 24     | 3. 0    | 0. 007 5                                  |
| 4  | 2 457. 47 |                            | Ⅱ              | 4. 86  | 29. 80  | 70. 20  | 94. 47   | 5. 53     | 3. 7    | 0. 009 3                                  |
| 5  | 2 471. 28 |                            | Ⅱ              | 3. 60  | 26. 17  | 73. 83  | 96. 33   | 3. 67     | 2. 7    | 0. 007 6                                  |
| 6  | 2 475. 11 |                            | Ⅱ              | 3. 92  | 36. 08  | 63. 92  | 96. 95   | 3. 05     | 2. 2    | 0. 011 1                                  |
| 7  | 2 481. 09 |                            | Ⅱ              | 7. 73  | 38. 70  | 61. 30  | 98. 38   | 1. 62     | 2. 4    | 0. 006 7                                  |
| 8  | 2 486. 77 |                            | I <sub>5</sub> | 6. 49  | 41. 12  | 58. 88  | 97. 85   | 2. 15     | 2. 9    | 0. 006 0                                  |
| 9  | 2 491. 48 |                            | I <sub>5</sub> | 6. 13  | 41. 90  | 58. 10  | 99. 51   | 0. 49     | 3. 4    | 0. 005 2                                  |
| 10 | 2 496. 19 |                            | I <sub>4</sub> | 7. 06  | 43. 14  | 56. 86  | 99. 17   | 0. 83     | 3. 2    | 0. 004 7                                  |
| 11 | 2 501. 61 |                            | I <sub>4</sub> | 5. 76  | 47. 52  | 52. 48  | 97. 48   | 2. 52     | 2. 3    | 0. 005 0                                  |
| 12 | 2 506. 17 |                            | I <sub>4</sub> | 5. 16  | 53. 86  | 46. 14  | 92. 36   | 7. 64     | 1. 6    | 0. 004 4                                  |
| 13 | 2 510. 38 |                            | I <sub>3</sub> |        |         |         |          |           | 2. 1    | 0. 004 6                                  |
| 14 | 2 514. 06 | 五峰组                        | I <sub>1</sub> | 6. 15  | 36. 26  | 63. 74  | 99. 30   | 0. 70     | 4. 0    | 0. 004 9                                  |

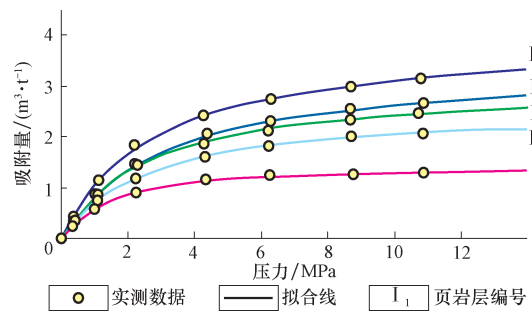


图 5 四川盆地罗场向斜 YS108 井五峰组 – 龙马溪组页岩小层等温吸附曲线对比

Fig. 5 Adsorption isotherm curve comparison of the Wufeng-Longmaxi Formations shale of Well YS108 in the Luochang Syncline, the Sichuan Basin

同,其间也存在有低值段分隔现象,表明发育有 I<sub>1</sub> – I<sub>2</sub> 小层的五峰组与发育有 I<sub>3</sub> – I<sub>4</sub> 小层的龙马溪组底段气藏压力系统不同、两者应属于两套不同气藏(图 6)。

经结合黄金坝建产区试气成果进一步分析,发现向斜内同一套含气页岩层段通常在核心区显现超压、高产特征,在外围区则表现为常压、低产或仅有显示特征,表明示范区页岩气藏压力与保存条件密切相关。如罗场向斜 I<sub>3</sub> – I<sub>4</sub> 小层在向斜轴部(YS108 井区及上 1 井区)由于断层少、顺层裂隙发育,因而储层与保存条件良好,气层呈现超压、高产特征。而在向斜轴部向南翼转折部位(YS111 井区)由于含气页岩小断层及穿层裂隙发育,气藏保存条件差,气层虽多显现超压,

但多中 – 低产。至向斜南翼翼部(YS106 井区)则由于局部地层遭受过剥露,并有通天断层发育,常常表现为常压、非产气层特征。气层压力系数亦由 YS108 井区及上 1 井区的 1.96 ~ 1.90 降至 YS111 井区的 1.62 和 YS106 井区的 1.0(表 5),总体显现向斜区气藏压力系统复杂。除与页岩储层非均质性有关外,可能主要与页岩气藏封存条件关系密切。一般在构造活动相对稳定、埋藏相对适中的复向斜轴部区,由于气藏具有抗风化、低扩散与水封作用,因而保存条件较好。至向斜翼部由于气藏埋深变浅、断层发育,气藏抗风化能力逐渐降低,水封作用减弱,气藏气体也易于扩散,因而整体保存能力降低(图 1;图 6)。

综合建产区气藏压力上述特征与特点,结合近期实施的单井压裂改造与试气成果以及微地震监测资料分析,建产区主要以矿物脆性指数及含气量相对较高的 I<sub>3</sub> 和 I<sub>4</sub> 号小层压裂效果与采气效果最好(表 1;表 5),并以向斜轴部地层相对平缓的 A 井区三口水平井压裂后造缝效果最好,试气与采气效果最佳,单井压后产量均在 20 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d 以上。至向斜轴部向南翼过渡的转折端部位,则由于地层产状转陡、埋藏变浅,E 井区页岩气保存条件变差,单井压后试气采气初产仅 1.0 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d 左右。至南翼翼部 G 井区,虽单井水平段压后造缝效果良好,但终因气藏保存条件变差,单井压后试气产量依然较低,经多月试采后产量仍维持在 1.2 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d 左右(表 5;图 1)。

表4 四川盆地罗场向斜 YS108 井五峰组-龙马溪组含气量测试统计

Table 4 Gas content statistics of the Wufeng-Longmaxi Formations shale of Well YS108 in the Luochang Syncline, the Sichuan Basin

| 样品编号     | 深度/m                | 分层             | 样品重量/g   | 解吸温度/℃ | 测量气含量<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ) | 损失气含量<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ) | 残余气含量<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ) | 现场实测<br>含气量( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ) |
|----------|---------------------|----------------|----------|--------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| YS108-1  | 2 382.43 ~ 2 382.72 | Ⅲ              | 6 016.00 | 65.00  | 0.32                                          | 1.10                                          | 0.07                                          | 1.49                                            |
| YS108-2  | 2 384.13 ~ 2 384.43 |                | 5 949.00 | 65.00  | 0.29                                          | 1.08                                          | 0.06                                          | 1.43                                            |
| YS108-3  | 2 385.46 ~ 2 385.73 |                | 5 703.00 | 65.00  | 0.34                                          | 1.15                                          | 0.05                                          | 1.55                                            |
| YS108-4  | 2 386.75 ~ 2 387.05 | Ⅱ              | 5 390.00 | 65.00  | 0.40                                          | 1.51                                          | 0.05                                          | 1.97                                            |
| YS108-5  | 2 388.16 ~ 2 388.43 |                | 5 743.00 | 65.00  | 0.33                                          | 1.25                                          | 0.07                                          | 1.65                                            |
| YS108-6  | 2 389.48 ~ 2 389.78 |                | 5 710.00 | 65.00  | 0.35                                          | 1.58                                          | 0.05                                          | 1.99                                            |
| YS108-7  | 2 391.22 ~ 2 391.49 |                | 5 466.00 | 65.00  | 0.29                                          | 1.48                                          | 0.06                                          | 1.84                                            |
| YS108-8  | 2 391.91 ~ 2 392.22 |                | 5 621.00 | 65.00  | 0.30                                          | 1.12                                          | 0.04                                          | 1.46                                            |
| YS108-9  | 2 393.19 ~ 2 393.47 |                | 5 898.00 | 65.00  | 0.38                                          | 0.91                                          | 0.06                                          | 1.35                                            |
| YS108-10 | 2 467.47 ~ 2 467.77 |                | 5 267.00 | 67.00  | 0.44                                          | 2.46                                          | 0.06                                          | 2.96                                            |
| YS108-11 | 2 469.01 ~ 2 469.3  |                | 6 055.00 | 67.00  | 0.43                                          | 2.51                                          | 0.05                                          | 2.99                                            |
| YS108-12 | 2 469.77 ~ 2 470.07 |                | 5 443.00 | 67.00  | 0.40                                          | 2.00                                          | 0.06                                          | 2.46                                            |
| YS108-13 | 2 471.00 ~ 2 471.28 |                | 5 943.00 | 67.00  | 0.39                                          | 1.86                                          | 0.06                                          | 2.31                                            |
| YS108-14 | 2 472.19 ~ 2 472.45 |                | 6 086.00 | 67.00  | 0.38                                          | 1.77                                          | 0.07                                          | 2.22                                            |
| YS108-15 | 2 472.93 ~ 2 473.22 |                | 5 417.00 | 67.00  | 0.42                                          | 2.03                                          | 0.07                                          | 2.52                                            |
| YS108-16 | 2 473.72 ~ 2 473.97 |                | 5 381.00 | 67.00  | 0.37                                          | 2.00                                          | 0.06                                          | 2.43                                            |
| YS108-17 | 2 474.82 ~ 2 475.11 |                | 6 136.00 | 67.00  | 0.40                                          | 1.83                                          | 0.05                                          | 2.28                                            |
| YS108-18 | 2 476.18 ~ 2 476.45 |                | 5 569.00 | 67.00  | 0.29                                          | 1.14                                          | 0.06                                          | 1.49                                            |
| YS108-19 | 2 477.61 ~ 2 477.91 |                | 5 474.00 | 67.00  | 0.28                                          | 1.66                                          | 0.07                                          | 2.00                                            |
| YS108-20 | 2 479.66 ~ 2 479.93 |                | 5 502.00 | 67.00  | 0.32                                          | 1.53                                          | 0.07                                          | 1.92                                            |
| YS108-21 | 2 480.34 ~ 2 480.64 |                | 5 653.00 | 67.00  | 0.36                                          | 1.89                                          | 0.06                                          | 2.32                                            |
| YS108-22 | 2 481.09 ~ 2 481.39 | I <sub>5</sub> | 5 897.00 | 67.00  | 0.43                                          | 1.77                                          | 0.06                                          | 2.27                                            |
| YS108-23 | 2 481.92 ~ 2 482.22 |                | 5 991.00 | 67.00  | 0.38                                          | 1.88                                          | 0.06                                          | 2.33                                            |
| YS108-24 | 2 482.96 ~ 2 483.23 |                | 5 280.00 | 67.00  | 0.45                                          | 2.04                                          | 0.07                                          | 2.56                                            |
| YS108-25 | 2 483.82 ~ 2 484.10 |                | 5 530.00 | 67.00  | 0.38                                          | 1.65                                          | 0.06                                          | 2.09                                            |
| YS108-26 | 2 485.19 ~ 2 485.48 |                | 5 594.00 | 67.00  | 0.58                                          | 2.14                                          | 0.06                                          | 2.78                                            |
| YS108-27 | 2 486.77 ~ 2 487.06 |                | 5 258.00 | 67.00  | 0.66                                          | 2.64                                          | 0.06                                          | 3.36                                            |
| YS108-28 | 2 487.83 ~ 2 488.11 |                | 5 712.00 | 67.00  | 0.64                                          | 2.61                                          | 0.05                                          | 3.30                                            |
| YS108-29 | 2 488.52 ~ 2 488.80 |                | 5 413.00 | 67.00  | 0.61                                          | 2.30                                          | 0.07                                          | 2.97                                            |
| YS108-30 | 2 489.48 ~ 2 489.77 |                | 5 951.00 | 67.00  | 0.50                                          | 2.31                                          | 0.07                                          | 2.87                                            |
| YS108-31 | 2 490.28 ~ 2 490.55 |                | 4 884.00 | 67.00  | 0.58                                          | 2.62                                          | 0.06                                          | 3.26                                            |
| YS108-32 | 2 491.19 ~ 2 491.48 |                | 5 617.00 | 67.00  | 0.53                                          | 2.33                                          | 0.06                                          | 2.92                                            |
| YS108-33 | 2 492.03 ~ 2 492.32 | I <sub>4</sub> | 5 143.00 | 67.00  | 0.62                                          | 2.70                                          | 0.05                                          | 3.37                                            |
| YS108-34 | 2 492.71 ~ 2 492.99 |                | 5 672.00 | 67.00  | 0.56                                          | 2.57                                          | 0.05                                          | 3.19                                            |
| YS108-35 | 2 493.37 ~ 2 493.66 |                | 5 559.00 | 67.00  | 0.45                                          | 2.22                                          | 0.06                                          | 2.72                                            |
| YS108-36 | 2 494.15 ~ 2 494.45 |                | 5 523.00 | 67.00  | 0.62                                          | 1.87                                          | 0.06                                          | 2.56                                            |
| YS108-37 | 2 495.91 ~ 2 496.19 |                | 5 601.00 | 67.00  | 0.55                                          | 1.94                                          | 0.06                                          | 2.55                                            |
| YS108-38 | 2 496.82 ~ 2 497.08 |                | 5 260.00 | 67.00  | 0.73                                          | 2.64                                          | 0.04                                          | 3.42                                            |
| YS108-39 | 2 498.44 ~ 2 498.75 |                | 5 566.00 | 67.00  | 0.46                                          | 2.68                                          | 0.06                                          | 3.20                                            |
| YS108-40 | 2 499.44 ~ 2 499.71 |                | 5 442.00 | 67.00  | 0.46                                          | 2.61                                          | 0.07                                          | 3.14                                            |
| YS108-41 | 2 500.30 ~ 2 500.57 |                | 5 405.00 | 67.00  | 0.52                                          | 2.80                                          | 0.07                                          | 3.39                                            |
| YS108-42 | 2 501.61 ~ 2 501.88 |                | 5 515.00 | 67.00  | 0.62                                          | 2.75                                          | 0.07                                          | 3.43                                            |
| YS108-43 | 2 502.86 ~ 2 503.13 |                | 5 570.00 | 67.00  | 0.51                                          | 2.45                                          | 0.06                                          | 3.02                                            |
| YS108-44 | 2 504.09 ~ 2 504.33 |                | 5 934.00 | 67.00  | 0.55                                          | 2.72                                          | 0.07                                          | 3.35                                            |
| YS108-45 | 2 504.90 ~ 2 505.17 |                | 5 604.00 | 67.00  | 0.42                                          | 1.91                                          | 0.06                                          | 2.38                                            |
| YS108-46 | 2 505.89 ~ 2 506.17 |                | 5 627.00 | 67.00  | 0.44                                          | 2.35                                          | 0.06                                          | 2.86                                            |

续表 4 四川盆地罗场向斜 YS108 井五峰 – 龙马溪组含气量测试统计  
Table 4(continued) Gas content statistics of the Wufeng-Longmaxi Formations shale of Well YS108 in the Luochang Syncline,the Sichuan Basin

| 样品编号      | 深度/m               | 分层             | 样品重量/g   | 解吸温度/℃ | 测量气含量<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ) | 损失气含量<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ) | 残余气含量<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ) | 现场实测<br>含气量( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ) |
|-----------|--------------------|----------------|----------|--------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| YS108 -47 | 2 507.40 ~2 507.67 | I <sub>3</sub> | 5 969.00 | 67.00  | 0.44                                          | 2.16                                          | 0.06                                          | 2.65                                            |
| YS108 -48 | 2 508.09 ~2 508.37 |                | 5 641.00 | 67.00  | 0.46                                          | 2.19                                          | 0.06                                          | 2.71                                            |
| YS108 -49 | 2 509.22 ~2 509.50 |                | 5 238.00 | 67.00  | 0.66                                          | 2.47                                          | 0.05                                          | 3.19                                            |
| YS108 -50 | 2 510.38 ~2 510.65 |                | 5 495.00 | 67.00  | 0.47                                          | 2.41                                          | 0.05                                          | 2.93                                            |
| YS108 -51 | 2 511.42 ~2 511.69 | I <sub>2</sub> | 5 623.00 | 67.00  | 0.67                                          | 2.36                                          | 0.06                                          | 3.08                                            |
| YS108 -52 | 2 512.15 ~2 512.42 | I <sub>1</sub> | 5 388.00 | 67.00  | 0.48                                          | 2.56                                          | 0.07                                          | 3.11                                            |
| YS108 -53 | 2 513.20 ~2 513.45 |                | 5 315.00 | 67.00  | 0.46                                          | 2.28                                          | 0.04                                          | 2.78                                            |
| YS108 -54 | 2 513.81 ~2 514.06 |                | 5 450.00 | 67.00  | 0.57                                          | 2.87                                          | 0.04                                          | 3.48                                            |

表 5 四川盆地黄金坝建产区五峰组 – 龙马溪组页岩气生产井试气成果统计

Table 5 Shale gas production test statistics of the Wufeng-Longmaxi Formations in Huangjinba development block,the Sichuan Basin

| 井号 | 地层压力<br>系数 | 单井产量/<br>( $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ) | 含气量/<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ) | 产气页岩段<br>TOC/% |
|----|------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------|
| A  | 1.96       | 压后试气 20.86                                          | 3.93                                         | 3.05           |
| B  | 1.90       | 未试气                                                 | 4.17                                         | 2.98           |
| C  | 1.94       | 正在试气                                                | 3.93                                         | 3.23           |
| D  | 1.85       | 正在试气                                                | 3.48                                         | 3.20           |
| E  | 1.62       | 初产 >1.0                                             | 3.70                                         | 3.48           |
| F  | 1.00       | 未试气                                                 | 1.00                                         | 3.59           |
| G  | 1.10       | 压后试气 1.2                                            | 1.05                                         | 0.88           |

4 结论

1) 向斜区五峰组 – 龙马溪组页岩层序、岩相及含气性特征明显,可划分为五峰组(SQ1)、龙马溪组下段(SQ2)和龙马溪组上段(SQ3)3 个三级层序,炭质页岩发育段(Ⅰ层)、砂质页岩发育段(Ⅱ层)与灰质页岩发育段(Ⅲ层),并发育深水陆棚、浅水陆棚和半深水陆棚 3 种沉积相与缺氧深水陆棚、贫氧深水陆棚、贫氧半深水过渡陆棚、富氧浅水陆棚 4 种沉积亚相,以及泥质、灰质和砂质深水陆棚等多种沉积微相。总体以深水陆棚相沉积期发育的富有机质页岩段(Ⅰ层)含气性最好,并将其细分为 I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub>, I<sub>4</sub>, I<sub>5</sub> 5 个小层。

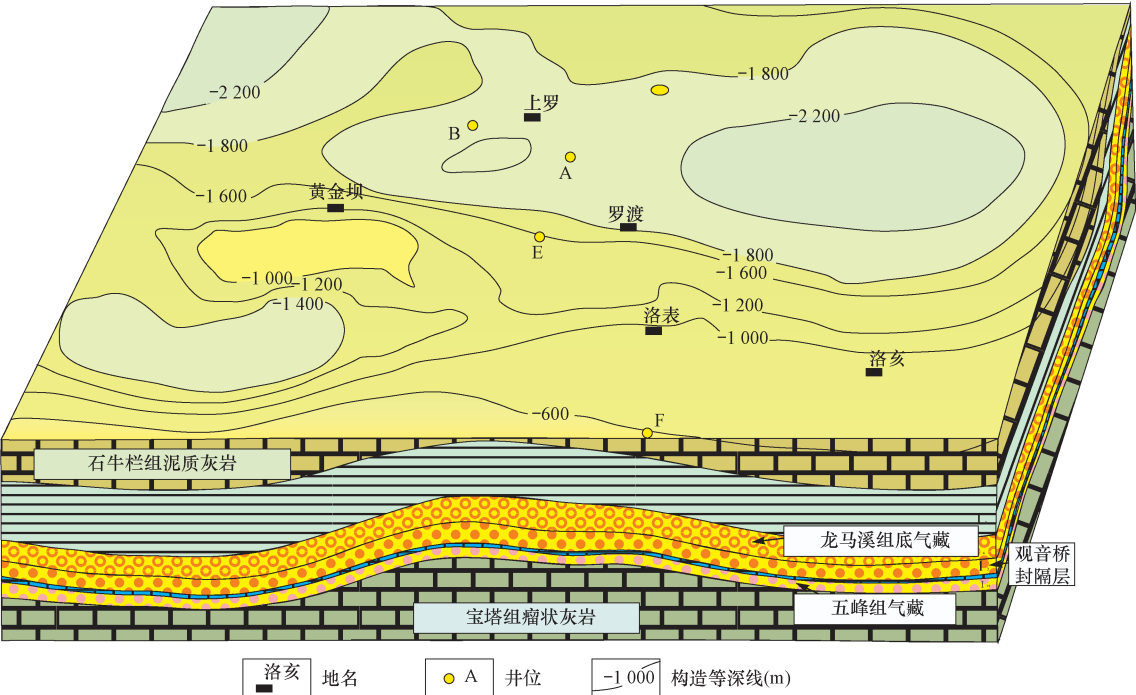


图 6 四川盆地罗场向斜黄金坝建产区气藏地质模式  
Fig. 6 Geological model of gas reservoirs in Huangjinba development block in the Luochang Syncline, the Sichuan Basin

2) 气藏产气层主要集中于富有机质页岩发育段,且  $TOC$  含量高的高碳页岩段页岩气含量高、气层压力高,  $TOC$  含量低的层段页岩气含量低、气层常压。

3) 气藏甜点主要富集于五峰组与龙马溪组底段深水缺氧陆棚相沉积中心区的残留向斜区主体部位即向斜区轴部。具体体现为向斜轴部地层平缓、埋藏适中、断层少、顺层裂缝发育,气藏储层与封存条件好,页岩气含量及地层压力高,易于气藏富集与保存。

4) 受五峰组顶部观音桥段泥质生物灰岩分隔,建产区气藏被分隔为龙马溪组底段与五峰组上、下两套。具体表现为气藏压力在测井预测曲线上呈现出五峰中下部与龙马溪底两段式特征。

5) 经结合压裂试采成果与微地震监测分析,向斜区两套气藏中以龙马溪组底气藏  $I_3$  和  $I_4$  小层储层物性最好、含气量最高,最易于压裂,气层产量最高。

致谢:感谢审稿人对本文提出的修改意见,感谢贾丹对本文修改给予的帮助。

### 参考文献

- [1] 吴奇,梁兴,鲜成钢,等.地质—工程一体化高效开发中国南方海相页岩气[J].中国石油勘探,2015,20(4):1-23.  
Wu Qi, Liang Xing, Xian Chenggang, et al. Geoscience-to-production integration ensures effective and efficient south China marine shale gas development[J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(4): 1-23.
- [2] 陈旭,张元东,樊隽轩,等.广西运动的进程:来自生物相和岩相带的证据[J].中国科学:地球科学,2012,42(11):1617-1626.  
Chen Xu, Zhang Yuandong, Fan Junxuan, et al. The process of the Guangxi movement: evidence from the biological and lithofacies belts[J]. Science China: Earth Sciences, 2012, 42(11): 1617-1626.
- [3] 徐政语,蒋恕,熊绍云,等.扬子陆块下古生界页岩发育特征与沉积模式[J].沉积学报,2015,33(1):21-35.  
Xu Zhengyu, Shu Jiang, Xiong Shaoyun, et al. Lower Paleozoic shale in the Yangtze Continental block development characteristics and depositional model[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(1): 21-35.
- [4] 苏文博,李志明, Frank R. Ettensohn, 等.华南五峰组—龙马溪组黑色岩系时空展布的主控因素及其启示[J].地球科学—中国地质大学学报,2007,32(6):819-827.  
Su Wenbo, Li Zhiming, Frank R. Ettensohn, et al. Distribution of black shale in the Wufeng-Longmaxi Formations (Ordovician-Silurian), South China: Major controlling factors and implications[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2007, 32(6): 819-827.
- [5] 张海全,许效松,刘伟,等.中上扬子地区晚奥陶世—早志留世岩相古地理演化与黑色页岩的关系[J].沉积与特提斯地,2013,33(2):17-24.  
Zhang Haiquan, Xu Xiaosong, Liu Wei, et al. Late Ordovician-Early Silurian sedimentary facies and palaeogeographic evolution and its bearings on the black shales in the Middle-Upper Yangtze area[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2013, 33(2): 17-24.
- [6] 董大忠,程克明,王玉满,等.中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征[J].石油与天然气地质,2010,31(3):288-299.  
Dong Dazhong, Cheng Keming, Wang Yuman, et al. Forming conditions and characteristics of shale gas in the Lower Paleozoic of the Upper Yangtze region, China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(3): 288-299.
- [7] 王远翀,梁薇,牟传龙,等.渝东南—黔北地区赫南特期冰川事件的沉积响应[J].沉积学报,2015,33(2):232-241.  
Wang YuanChong, Liang Wei, Mou ChuanLong, et al. The Sedimentary response to gondwana glaciation in Himmantian (Ordovician) of the eastern Chongqing and the northern Guizhou region, South China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(2): 232-241.
- [8] 严德天,陈代钊,王清晨,等.扬子地区奥陶系—志留系界线附近地球化学研究[J].中国科学:地球科学,2009,39(3):285-299.  
Yan Detian, Chen Daizhao, Wang Qingchen, et al. Geochemical study of Yangtze Ordovician-Silurian boundary near[J]. Science in China Series D (Earth Sciences), 2009, 39(3): 285-299.
- [9] 王淑芳,董大忠,王玉满,等.四川盆地南部志留系龙马溪组富有机质页岩沉积环境的元素地球化学判别指标[J].海相油气地质,2014,19(3):27-34.  
Wang shufang, Dong Dazhong, Wang Yuman, et al. Geochemistry evaluation index of Redox-sensitive elements for depositional environments of Silurian Longmaxi Organic-rich shale in the South of Sichuan basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2014, 19(3): 27-34.
- [10] 刘树根,王世玉,孙玮,等.四川盆地及其周缘五峰组龙马溪组黑色页岩特征[J].成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(6):621-639.  
Liu Shugen, Wang Shiyu, Sun Wei, et al. Characteristics of block shale in Wufeng formation and Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its peripheral areas[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and technology edition), 2013, 40(6): 621-639.
- [11] 苏文博,何龙清,王永标,等.华南奥陶—志留系五峰组及龙马溪组底部斑脱岩与高分辨综合地层[J].中国科学(D辑),2002,32(3):207-219.  
Su Wenbo, He Longqing, Wang Yongbiao, et al. Southern China Ordovician-Silurian Wufeng and Longmaxi formation at the bottom of bentonite with high resolution[J]. Science in Chinese (series D), 2002, 32(3): 207-219.
- [12] 戎嘉余,陈旭,王怿,等.奥陶—志留纪之交黔中古陆的变迁证据与启示[J].中国科学:地球科学,2011,41(10):1407-1415.  
Rong Jia Yu, Chen Xu, Wang Yi, et al. Ordovician-Silurian make Guizhou oldland change: evidence and enlightenment[J]. Science China: Earth Science, 41(10): 1407-1415.
- [13] 樊隽轩,吴磊,陈中阳,等.四川兴文县麒麟乡五峰组—龙马溪组黑色页岩的生物地层序列[J].地层学杂志,2013,37(4):513-520.  
Fan Jun-xuan, Wu Lei, Chen Zhong-yang, et al. Biostratigraphy of the Wufeng-Lungmachi black shale sat Qilin, Xingwen county. Sichuan province[J]. Journal of Stratigraphy, 2013, 37(4): 513-520.
- [14] 樊隽轩, Michael J M, 陈旭, 等.华南奥陶—志留系龙马溪组黑色笔石页岩的生物地层学[J].中国科学:地球科学,2012,42(1):130-139.

- Fan Junxuan, Michael J M, Chen Xu, et al. South China Ordovician Silurian Longmaxi group black graptolite shale of biostratigraphy [J]. Science China: Earth Sciences, 2012, 42(1): 130–139.
- [15] 张正顺, 胡沛青, 沈娟, 等. 四川盆地志留系龙马溪组页岩矿物组成与有机质赋存状态[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 766–771.
- Zhang Zheng-shun, Hu Pei-qing, Shen Juan, et al. Mineral compositions and organic matter occurrence modes of Lower Silurian Longmaxi Formation of Sichuan Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5): 766–771.
- [16] 魏祥峰, 刘若冰, 张廷山, 等. 页岩气储层微观孔隙结构特征及发育控制因素——以川南—黔北 XX 地区龙马溪组为例[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(5): 1048–1059.
- Wei Xiangfeng, Liu Ruobing, Zhang Tingshan, et al. Micro-pores structure characteristics and development control factors of shale gas reservoir: A case of Longmaxi Formation in XX area of southern Sichuan and northern Guizhou [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(5): 1048–1059.
- [17] 归榕, 王永平. 基于常规测井数据计算储层岩石力学参数——以鄂尔多斯盆地上古生界为例[J]. 地质力学学报, 2012, 18(4): 418–424.
- Gui Rong, Wan Yongping. Rock mechanics parameter calculation based on conventional logging data: A case study of upper Paleozoic in Ordos basin [J]. Journal of Geomechanics, 2012, 18(4): 418–424.
- [18] 王濡岳, 丁文龙, 王哲, 等. 页岩气储层地球物理测井评价研究现状[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 228–241.
- Wang Ruyue, Ding Wenlong, Wang Zhe, et al. Progress of geophysical well logging in shale gas reservoir evaluation [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 228–241.
- [19] 谢庆明, 程礼军, 刘俊峰, 等. 渝东南黔江地区龙马溪组页岩气储层测井解释评价研究[J]. 地球物理进展, 2014, 29(3): 1312–1318.
- Xie Qingming, Cheng Lijun, Liu Junfeng, et al. Well logging interpretation and evaluation of gas shale reservoir at Longmaxi Formation in Qianjiang area of Southeast of Chongqing area [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(3): 1312–1318.
- [20] 闫建平, 蔡进功, 赵铭海, 等. 测井信息用于层序地层单元划分及对比研究综述[J]. 地层学杂志, 2009, 33(4): 441–450.
- Yan Jianping, Cai Jingong, Zhao Minghai, et al. Advances in the study of sequence stratigraphic division and correlation using well log information [J]. Journal of Stratigraphy, 2009, 33(4): 441–450.
- [21] 伍梦婕, 钟广法, 李亚林, 等. 四川盆地龙马溪组页岩气储层地震—测井层序分析[J]. 天然气工业, 2013, 33(5): 51–55.
- Wu Mengjie, Zhong Guangfa, Li Yalin, et al. Seismic logging sequence analysis of Longmaxi shale gas reservoir in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(5): 51–55.

(编辑 张玉银)

(上接第48页)

- [23] 谭先锋, 田景春, 黄建红, 等. 陆相碎屑岩旋回沉积记录中的物质响应及聚集规律——以济阳拗陷王家岗地区古近系孔店组为例[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 332–341.
- Tan Xianfeng, Tian Jinchun, Huang Jianhong, et al. Material response and accumulation law in the Cyclic sedimentation record of Continental clastic-To the Jiyang Depression Wangjiagang Paleogene Kongdian as an example [J]. Oil and Geology, 2013, 34(3): 332–341.
- [24] 谭先锋, 蒋艳霞, 李洁, 等. 济阳拗陷古近系孔店组高频韵律旋回沉积记录及成因[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1): 61–72.
- Tan Xianfeng, Jiang Yanxia, Li Jie, et al. Sedimentary record of high frequency cycles and its origin of kongdian formation of Paleogene in jiyang depression [J]. Oil and Geology, 2015, 36(1): 61–72.
- [25] 谭先锋, 田景春, 林小兵, 等. 陆相断陷盆地深部碎屑岩成岩演化及控制因素: 以东营断陷盆地古近系孔店组为例[J]. 现代地质, 2010, 24(5): 934–944.
- Tan Xianfeng, Tian Jinchun, Lin Xiaobin, et al. Diagenetic evolution and controlling factors of deep-seated clastic rocks in Terrestrial Fault-depressed Basin [J]. Geoscience, 2010, 24(5): 934–944.
- [26] 谭先锋, 冉天, 罗龙, 等. 滨浅湖环境中“砂—泥”沉积记录及成岩作用系统——以济阳拗陷古近系孔店组为例[J]. 地球科学进展, 2016, 31(6): 615–633.
- Tan Xianfeng, Ran Tian, Luo Long, et al. The “sand-mud” sedimentary record and its Diagenetic system in shore-shallow Lacustrine—A case study of Eocene Kongdian Formation in Jiyang Depression [J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(6): 615–633.
- [27] 韦恒叶. 古海洋生产力与氧化还原指标[J]. 沉积与特提斯地质, 2012, 32(2): 76–88.
- Wei Hengye. Ancient marine productivity and redox index [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2012, 32(2): 76–88.
- [28] 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993, 18–31.
- Deng Hongwen, Qian Kai. Sedimentary geochemistry and environmental analysis [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1993, 18–31.
- [29] 常华进, 储雪蕾, 冯连君, 等. 氧化还原敏感微量元素对古海洋沉积环境的指示意义[J]. 地质论评, 2009, 55(1): 91–99.
- Chang Huajin, Chu Xuelei, Feng Lianjun, et al. The indicative significance of redox sensitive trace elements to the paleo marine sedimentary environment [J]. Geological Review, 2009, 55(1): 91–99.
- [30] 尹秀珍, 万晓樵, 司家亮. 松辽盆地 G-12 井晚白垩世青山口组沉积时期古湖泊学替代指标分析[J]. 地质学报, 2008, 82(5): 676–682.
- Yin Xiuzhen, Wan Xiaoqiao, Si Jialiang. Paleolimnological Proxies of Late Cretaceous Qingshankou Sedimentary Period from Well G12 in Songliao Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(5): 676–682.
- [31] 刘招君, 孟庆涛, 柳蓉. 古湖泊学研究——以桦甸断陷盆地为例[J]. 沉积学报, 2012, 28(5): 917–925.
- Liu Zhaojun, Meng Qingtao, Liu Rong. Paleolimnology study: Taking Huadian fault basin as an example [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 28(5): 917–925.

(编辑 董立)