

鄂尔多斯盆地杭锦旗地区 上古生界煤系烃源岩生烃潜力再评价

倪春华^{1,2}, 朱建辉², 刘光祥³, 王付斌⁴, 贾会冲⁵, 张威⁵, 武英利², 缪九军²

(1. 中国石化 油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126;

2. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126;

3. 中国石化 石油勘探开发研究院 华北地区勘探开发研究中心, 郑州 450006;

4. 中国石化 华北油气分公司 油气勘探管理部, 郑州 450006;

5. 中国石化 华北油气分公司 勘探开发研究院, 郑州 450006)

摘要:鄂尔多斯盆地北缘杭锦旗地区上古生界是中国石化华北油气分公司天然气的重要增储上产领域。及时开展该地区上古生界煤系烃源岩的生烃潜力再评价研究, 有利于为下步勘探部署提供参考。综合利用有机地球化学、有机岩石学等技术手段, 结合地层孔隙热压生排烃物理模拟、TSM 盆地资源评价数值模拟等新方法和勘探新资料, 系统分析、对比研究区上古生界烃源岩的沉积环境、品质特征和展布特征, 进而深入开展生烃潜力的再评价。杭锦旗断裂带以南地区上古生界烃源岩具有“品质好、演化程度高、厚度大”的总体特征, 而断裂带以北地区则相反。基于物理模拟和数值模拟结果计算, 杭锦旗地区上古生界煤系烃源岩的总生气量为 $15.922 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 断裂带以北地区生气强度一般小于 $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 而断裂以南地区生气强度主要分布于 $(15 \sim 35) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 具备形成大中型气田的物质基础。

关键词:煤系烃源岩; 生烃潜力; 上古生界; 杭锦旗地区; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Re-evaluation of hydrocarbon generation potential of the Upper Paleozoic coal-measure source rocks in the Hangjinqi area of Ordos Basin

NI Chunhua^{1,2}, ZHU Jianhui², LIU Guangxiang³, WANG Fubin⁴,

JIA Huichong⁵, ZHANG Wei⁵, WU Yingli², MIAO Jiujun²

(1. SINOPEC Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

3. Research Center of Exploration and Development in Ordos Basin, SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Zhengzhou, Henan 450006, China;

4. Department of Oil and Gas Exploration Management, SINOPEC North China Company, Zhengzhou, Henan 450006, China;

5. Research Institute of Exploration and Development, SINOPEC North China Company, Zhengzhou, Henan 450006, China)

Abstract: The Upper Paleozoic strata in the Hangjinqi area of the Ordos Basin are an important field to increase reserves and productions for the North China Oil and Gas Branch, SINOPEC. It is necessary to conduct a re-evaluation of hydrocarbon generation potential for the Upper Paleozoic coal-measure source rocks in time, which is favorable to provide theoretical support for further exploration and deployment. The organic geochemical and organic petrological approaches were carried out in this study and integrated with the physical simulation of hydrocarbon generation and expulsion from formation pore by thermal compression, numerical simulation of TSM basin resource evaluation and new exploration data, in order to systematically analyze and compare the sedimentary environment, quality and distribution of the Upper Paleozoic source rocks, and further to conduct the re-evaluation of hydrocarbon potential. The results indicated that the Upper Paleozoic source rocks of the south of the fault belts in the Hangjinqi area appeared to have characteristics of good quality, high evolution degree, and a great thickness, whereas those in the north part of the fault belts displayed the negative characteristics. As indicated by the physical and numerical simulation results, the

收稿日期: 2021-06-28; 修订日期: 2021-07-29。

作者简介: 倪春华 (1981—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事油气地质与地球化学研究。E-mail: nichunhua.syky@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项 (2016ZX05002-006) 和国家自然科学基金项目 (41872122) 联合资助。

Upper Paleozoic coal-measure source rocks in the Hangjinqi area displayed a total gas generation amount of $15.922 \times 10^{12} \text{ m}^3$. The gas generation intensity to the north of the fault belts was less than $1 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{km}^2$, whereas that to the south ranged $(1.5-3.5) \times 10^9 \text{ m}^3/\text{km}^2$, which has provided a material basis for the generation of large and medium gas fields.

Key words: coal-measure source rock; hydrocarbon generation potential; Upper Paleozoic; Hangjinqi area; Ordos Basin

鄂尔多斯盆地是我国陆上天然气勘探的重点盆地之一,目前已经发现了包括苏里格、大牛地、神木、靖边等在内的多个大型气田。近年来,勘探范围逐渐从盆地内部向盆地边缘拓展,盆地北缘的杭锦旗地区上古生界是中国石化华北油气分公司天然气增储上产的重要领域之一,目前已在杭锦旗地区发现了东胜气田^[1]。业内对该区上古生界烃源岩有机地球化学特征开展了相关研究,并在主力烃源岩层系、生烃动态演化特征等方面取得了一些认识^[2-6],但前期对上古生界烃源岩的认识过于笼统,尤其对于断裂带两侧上古生界烃源岩发育特征的差异性缺乏对比分析,进而影响了对断裂带北侧上古生界煤系烃源岩生烃潜力及东胜气田天然气来源的研究认识,一定程度上制约了该地区的后续勘探部署。随着该地区天然气勘探开发的不断深入,亟需结合新资料、新方法等,通过微观特征与宏观特征、有机地球化学与有机岩石学、物理模拟与数值模拟相结合,开展该区上古生界煤系烃源岩的再评价工作,进一步细化上古生界煤系烃源岩的纵横向发育特征,进而深化其生烃潜力评价认识,以期对鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区上古生界天然气勘探部署进一步提供理论基础和科学依据。

1 地质背景

杭锦旗地区位于鄂尔多斯盆地北缘,处于伊盟

隆起、伊陕斜坡和天环坳陷 3 个构造单元的结合部,主要表现为从南部盆地内斜坡区向盆缘隆起区过渡的构造特征。区内发育泊尔江海子、乌兰吉林庙和三眼井三条断裂组成的近东西向断裂带(下文简称断裂带),其中泊尔江海子断裂为断面北倾的逆断层,而乌兰吉林庙和三眼井断裂均为断面南倾的正断层(图 1)。近年来该地区上古生界天然气勘探取得了一系列突破,如泊尔江海子断裂以北什股壕区带发现东胜气田,断裂以南十里加汗区带储量规模不断扩大等,其中东胜气田累计探明天然气地质储量超过 $1200 \times 10^8 \text{ m}^3$,新建年产能 $15 \times 10^8 \text{ m}^3$,展现了良好的天然气勘探前景。天然气主要富集于二叠系下石盒子组砂岩储层中,但在断裂带两侧富集层系存在差异^[7-8]。

2 样品和分析测试方法

勘探实践证实,上古生界石炭系—二叠系发育包括煤岩、碳质泥岩和暗色泥岩在内的煤系地层,其构成了鄂尔多斯盆地诸多大中型气田的主力气源岩^[9]。本次研究基于杭锦旗地区 28 口钻井、80 余件岩心样品,围绕上古生界烃源岩沉积环境、品质和演化特征与空间展布特征,对该地区上古生界煤系烃源岩的发育特征进行了系统分析。

烃源岩评价相关测试分析均由中国石化油气成藏重点实验室完成。微量元素分析采用 VISTA

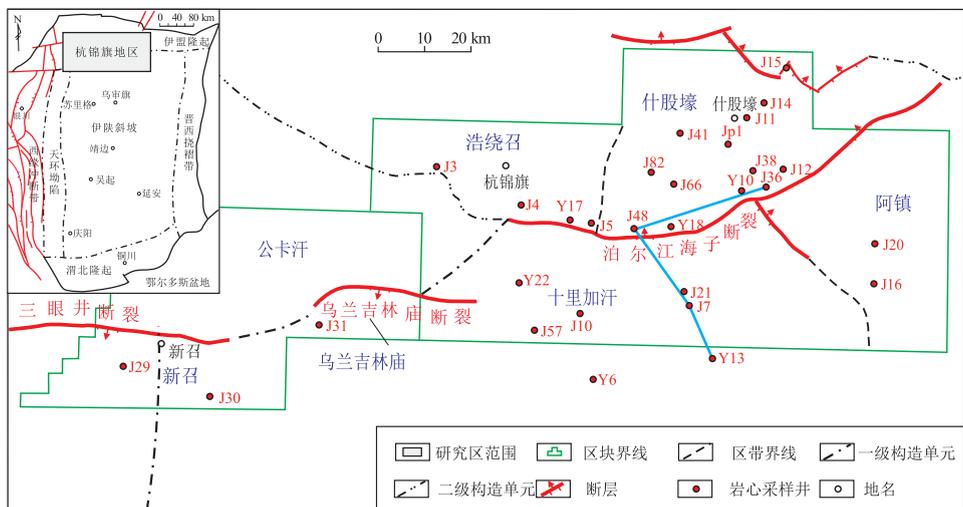


图 1 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区构造区带及岩心采样井位分布

Fig.1 Distribution of tectonic zones and wells for core sampling in Hangjinqi area, Ordos Basin

MPX 电感耦合等离子发射光谱仪;有机碳含量分析采用 CS-200 碳硫分析仪;岩石热解分析采用 Rock-Eval 6 热解仪;镜质体反射率测定采用 MPV-III 型显微光度计;干酪根碳同位素值分析采用 Thermo Finnigan Delta plus XL 稳定同位素质谱仪;烃源岩样品生排烃模拟实验采用中国石化油气成藏重点实验室自主研发的 DK-III 型地层孔隙热压生排烃模拟实验仪。

3 上古生界煤系烃源岩特征

3.1 沉积环境

鄂尔多斯盆地晚古生代发育海陆过渡相沉积体系,但石炭系—二叠系的太原组和山西组沉积期的沉积环境有所差异^[10]。受不同沉积环境的影响,烃源岩在微量元素及其组成特征方面有所差异^[11-12]。利用 Sr、Ba、Ga、Rb、B、V、Ni 等常用微量元素及其相关比值,开展杭锦旗地区纵向上和横向上古盐度、氧化还原条件等差异性对比研究。

古盐度是研究古气候和古沉积环境的重要指

标之一,水体中硼元素(B)、锶元素(Sr)的含量与其盐度存在线性关系,即含量越大,表明古盐度越高。锶元素与钡元素比值(Sr/Ba 比值)常被用来区分咸水、淡水介质,Sr/Ba 比值大于 1 为咸水介质(海相),Sr/Ba 比值小于 1 为淡水介质(陆相)^[12]。沉积水体的氧化还原条件也是反映古沉积环境的重要指标之一,较强的还原环境有利于烃源岩的形成与有机质的保存。目前常用的判别沉积水体氧化还原条件的微量元素参数主要有 V/(V+Ni)、U/Th 等。通过上述一系列微量元素含量及相关比值参数可以进行古沉积环境的判别及其差异性分析。

以杭锦旗地区泊尔江海子断裂以南 J7 井为例(图 2),纵向上可以直观地发现太原组与山西组存在显著差异:太原组 B 含量一般分布于 $(20\sim 50)\times 10^{-6}$,Sr/Ba 比值均大于 1,B/Ga 比值普遍大于 2,Rb/K 比值大于 0.02;而山西组 B 含量主要处于 $(10\sim 20)\times 10^{-6}$,Sr/Ba 比值小于 1,B/Ga 比值一般小于 2,Rb/K 比值小于 0.02,据此可以判断太原

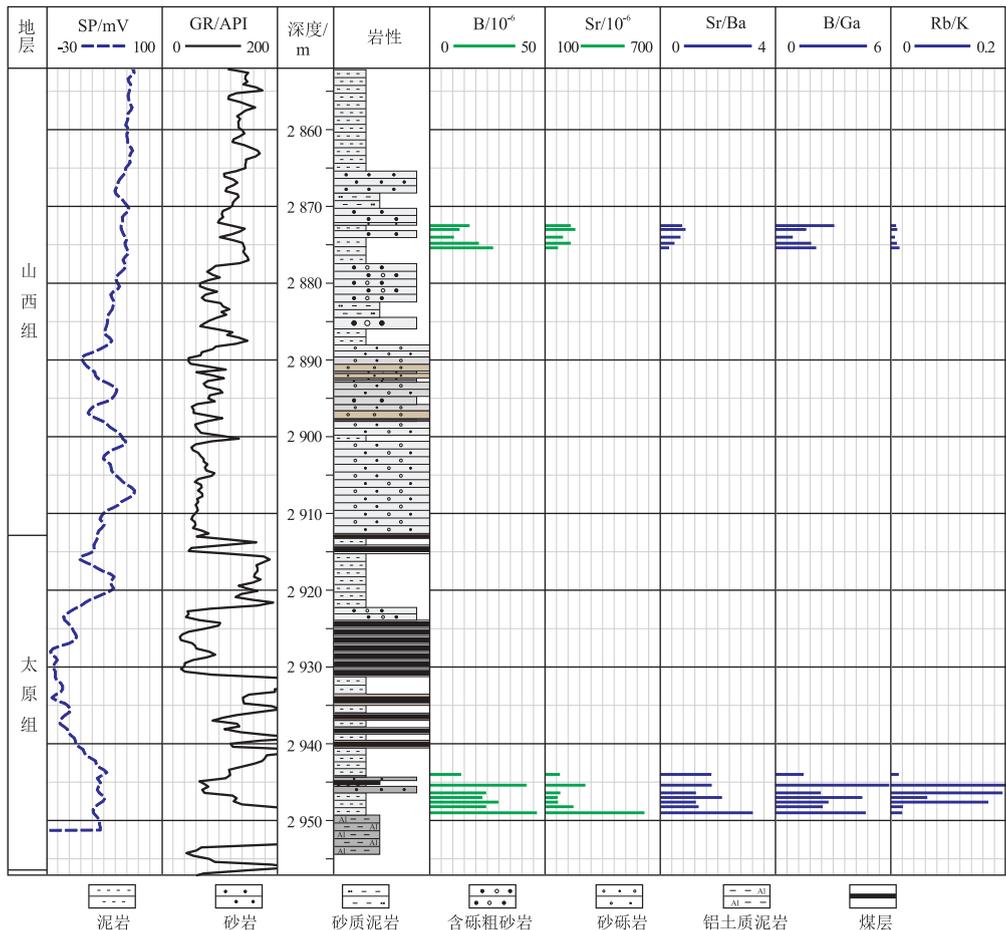


图 2 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区 J7 井上古生界太原组、山西组相关微量元素及其比值

Fig.2 Contents and ratios of trace elements in source rocks from Upper Paleozoic Taiyuan and Shanxi formations in well J7, Hangjinqi area, Ordos Basin

组沉积期沉积水体古盐度明显高于山西组沉积期。 $V/(V+Ni)$ 、 U/Th 常用于古沉积环境氧化还原条件的定性评价,一般比值越大,反映氧化性越强、还原性越弱,断裂带以南太原组样品 $V/(V+Ni)$ 、 U/Th 平均值分别为 0.72、1.49,而山西组样品则分别为 0.77、1.87,表明纵向上太原组古沉积环境还原性强于山西组。另外,断裂带以南太原组、山西组样品全硫含量实测结果差异较大:18 个太原组样品全硫含量分布于 0.02%~7.26%,平均值为 1.72%,而 21 个山西组样品全硫含量分布于 0.005%~1.38%,平均值仅为 0.19%,两者相差一个数量级。此外,在 J7、J29 等多口钻井太原组样品中发现了指示硫化、还原性环境的草莓状黄铁矿,也进一步佐证了太原组古沉积环境还原性强于山西组。

由于断裂带以北地区几乎不发育太原组,故以山西组为例进行断裂带南、北两侧同层系的横向对比:断裂带以南地区 B 含量平均值为 19.08×10^{-6} , Sr 含量平均值为 193.16×10^{-6} , Sr/Ba 平均值为 0.62, B/Ga 平均值为 1.78, $V/(V+Ni)$ 平均值为 0.77, U/Th 平均值为 1.87;而断裂带以北地区 B 含量平均值为 16.53×10^{-6} , Sr 含量平均值为 170.67×10^{-6} , Sr/Ba 平均值为 0.36, B/Ga 平均值为 1.67, $V/(V+Ni)$ 平均值为 0.82, U/Th 平均值为 1.96。因此,断裂带以南地区山西组沉积期沉积水体古盐度、还原性均强于断裂带以北地区。由此可见,该地区上古生界烃源岩沉积环境在纵向上、横向上均存在差异性,这也决定了该地区上古生界烃源岩的品质特征必然有所不同。

3.2 有机质丰度

有机质丰度评价是烃源岩基础地球化学特征分析中最基础、最重要的研究内容,国内外学者

针对不同类型的烃源岩建立了相应的评价标准^[13-16]。秦建中^[16]基于前人的研究认识及勘探实践,针对煤系地层不同岩性的烃源岩,优选针对性更强的评价指标,如对于暗色泥岩重点评价总有机碳(TOC),并依次将 $\omega(TOC) \geq 4\%$ 、 $4\% < \omega(TOC) \leq 1.5\%$ 、 $1.5\% < \omega(TOC) \leq 0.75\%$ 作为好、中等、差烃源岩的有机质丰度评价标准;而对于煤岩则着重评价生烃潜量(S_1+S_2),并依次将 $S_1+S_2 \geq 250 \text{ mg/g}$ 、 $250 \text{ mg/g} < S_1+S_2 \leq 100 \text{ mg/g}$ 、 $100 \text{ mg/g} < S_1+S_2 \leq 50 \text{ mg/g}$ 作为好、中等、差烃源岩的有机质丰度评价标准。

基于 53 个上古生界暗色泥岩样品 TOC 实测数据统计分析结果发现:断裂带以南地区太原组暗色泥岩样品 TOC 含量分布于 0.27%~5.41%之间,平均为 2.04%,其中好烃源岩占 17%,差—中等烃源岩约占 50%;而山西组暗色泥岩样品分布于 0.14%~4.67%之间,平均为 1.86%,其中好烃源岩占 10%,差—中等烃源岩占 43%,故纵向上太原组暗色泥岩有机质丰度整体高于其上部的山西组暗色泥岩。其次,断裂带以北地区山西组暗色泥岩 TOC 分布于 0.18%~2.34%之间,平均为 0.95%,其中差—中等烃源岩约占 60%,与断裂带以南地区山西组暗色泥岩相比结果显而易见。利用 TOC 与 S_1+S_2 两个指标,综合评价杭锦旗地区太原组、山西组暗色泥岩有机质丰度, S_1+S_2 与 TOC 呈现一定的正相关关系(图 3a),且断裂带以南地区太原组、山西组暗色泥岩主体属于中等烃源岩,而断裂带以北山西组暗色泥岩绝大多数属于差烃源岩、少数达到中等烃源岩标准。

基于 12 个上古生界煤样 S_1+S_2 实测数据统计分析结果发现:断裂带以南地区太原组煤样 S_1+S_2

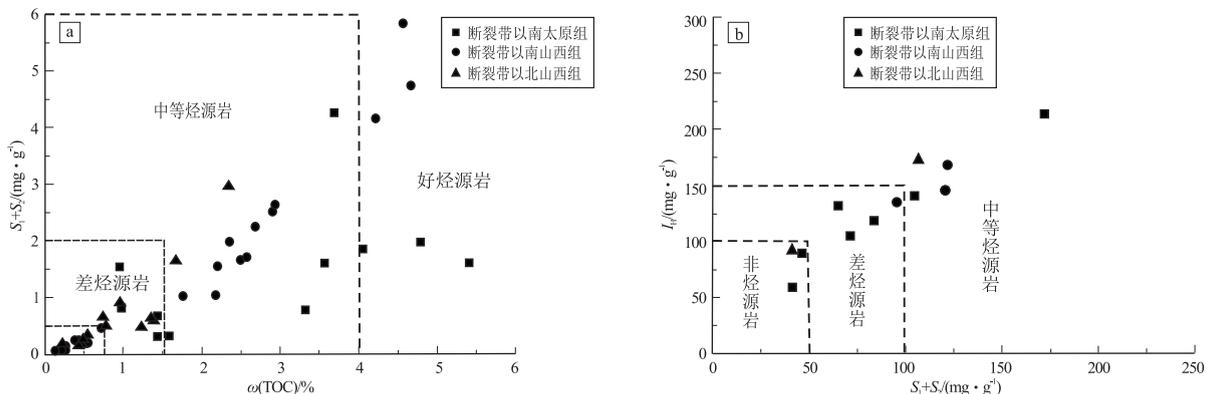


图 3 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界太原组、山西组暗色泥岩(a)、煤(b)有机质丰度分布评价标准据参考文献[13]。

Fig.3 Distribution of organic matter abundance for dark mudstones (a) and coals (b) in Upper Paleozoic Taiyuan and Shanxi formations, Hangjingqi area, Ordos Basin

分布于 41.96~171.99 mg/g, 平均为 83.67 mg/g, 山西组煤样 S_1+S_2 分布于 95.14~122.01 mg/g, 平均值为 112.42 mg/g, 而断裂带以北地区山西组煤样 S_1+S_2 分布于 41.89~106.37 mg/g, 平均为 74.13 mg/g, 明显逊色于断裂带以南地区山西组煤样。利用 S_1+S_2 与 I_H 两个指标, 综合评价杭锦旗地区太原组、山西组煤总体属于中等—差烃源岩(图 3b)。

3.3 有机质类型

烃源岩品质优劣除了受有机质丰度影响之外, 还与有机质类型密切相关, 而有机质类型则主要取决于构成烃源岩中有机质的原始成烃母质来源, 如腐泥型干酪根主要来自低等水生生物, 而腐殖型干酪根主要来自陆源高等植物^[17-19]。本次研究主要根据岩石热解参数、干酪根碳同位素进行有机质类型的综合判别。

岩石热解数据表明, 断裂带以南地区太原组样品氢指数分布于 18~213 mg/g 之间, 平均为 67.31 mg/g, 山西组样品氢指数分布于 12~182 mg/g 之间, 平均为 75.35 mg/g, 而断裂带以北地区山西组样品氢指数则分布于 38~206 mg/g 之间, 平均为 84.71 mg/g。断裂带以南地区太原组样品降解率分布于 1.51~18.27 mg/g, 平均为 5.96 mg/g, 山西组样品降解率分布于 1.04~15.56 mg/g 之间, 平均为 6.65 mg/g, 而断裂带以北地区山西组样品降解率则分布于 3.38~17.95 mg/g 之间, 平均为 7.52 mg/g。根据岩石热解参数划分标准^[20], 杭锦旗地区上古生界煤系烃源岩有机质类型以 III 型为主。

研究表明, 陆相烃源岩干酪根碳同位素值在 $-30‰ \sim -22‰$ 之间, 而海相烃源岩干酪根碳同位素值范围较宽, 在 $-50‰ \sim -10‰$ 之间, 且大多分布在 $-33‰ \sim -19‰$, 因而可利用干酪根碳同位素判断烃源岩母质类型。受控于不同的沉积环境, 杭锦旗地区太原组、山西组烃源岩的干酪根碳同位素存在一定的差异, 以 J7 井为例, 太原组烃源岩干酪根碳同位素值小于 $-23‰$, 而山西组烃源岩干酪根碳同位素值普遍大于 $-23‰$ 。对数口钻井、数十个碳同位素数据进一步统计发现, 断裂带以南地区太原组、山西组样品干酪根碳同位素平均值分别为 $-23.2‰$ 、 $-22.6‰$, 而断裂带以北地区山西组样品干酪根碳同位素为 $-22.7‰$ (图 4)。因此, 杭锦旗地区上古生界烃源岩主要为 III 型干酪根。

3.4 有机质成熟度

有机质是生成油气的物质基础, 但只有达到一定的成熟度才能有效生烃, 对于烃源岩的成熟度通常利用镜质体反射率 R_o 、热解峰温 T_{max} 、生物标志化

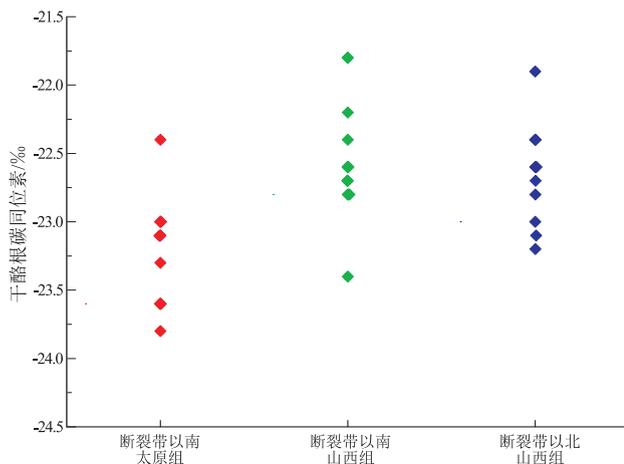


图 4 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界太原组、山西组烃源岩干酪根碳同位素值分布

Fig.4 Distribution of carbon isotopic values of kerogen in source rocks from Upper Paleozoic Taiyuan and Shanxi formations, Hangjinqi area, Ordos Basin

合物指标等有关参数进行评价^[20-22]。

基于杭锦旗地区太原组、山西组烃源岩样品热解数据统计分析, 断裂带以北地区山西组样品 T_{max} 分布于 443~516 °C, 平均值为 450 °C, 表明主要处于低成熟—成熟演化阶段; 而断裂带以南地区山西组样品 T_{max} 分布于 444~505 °C, 平均值为 476 °C, 其下部的太原组样品 T_{max} 则分布于 325~537 °C, 平均值为 480 °C, 表明主体处于成熟—高成熟演化阶段。镜质体反射率 R_o 相比较于 T_{max} , 能够提供更为准确的成熟度信息, 本次研究选择了不同区带、不同层系、不同岩性的煤系烃源岩样品开展镜质体反射率测试, 考虑到煤中镜质体相对更为富集且识别误差更小, 故以煤样为主、测点数量达到 20 个以上, 最大程度保证测试结果的准确性。根据符合上述标准的 20 个煤样 R_o 测试数据, 断裂带以南地区太原组样品 R_o 分布于 1.04%~1.85% 之间, 平均为 1.34%, 山西组样品 R_o 分布于 1.12%~1.44%, 平均为 1.20%, 而断裂带以北地区山西组样品 R_o 分布于 0.95%~1.02%, 平均为 0.92%。因此, 断裂带以南地区上古生界处于成熟晚期—高成熟演化阶段, 断裂带以北地区上古生界则主体处于成熟早期阶段, 平面上具有南高北低的总体分布特征(图 5)。

3.5 空间展布特征

前人^[4-5]对杭锦旗地区上古生界烃源岩的展布特征已开展了一些研究, 本次研究结合勘探新资料, 基于数十口新钻井不同层系、不同岩性烃源岩厚度的统计分析, 对其纵向和平面分布特征进一步开展了精细刻画。如图 6 所示, 太原组、山西组煤层呈现不同的分布特征, 以 Y13-J7-J48-J36 南北

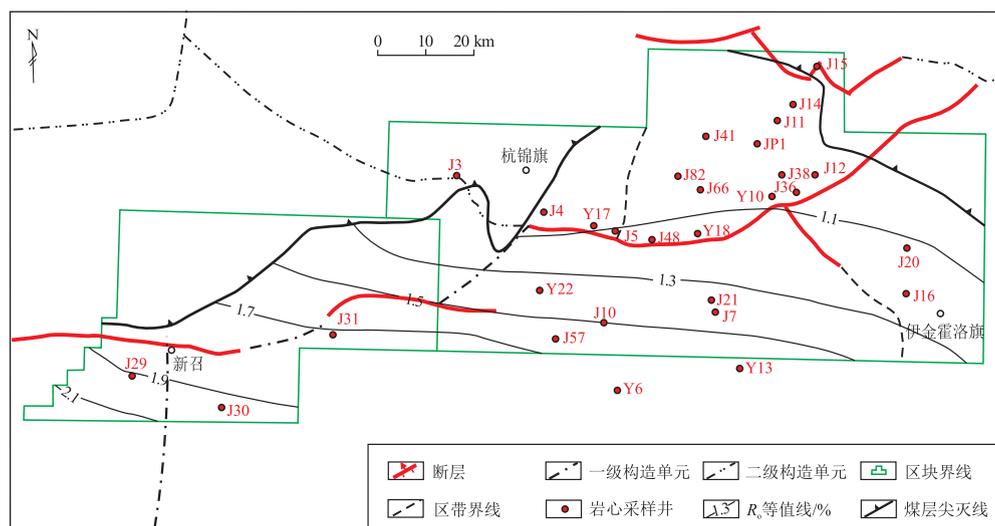


图5 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界煤系生源岩 R_0 等值线

Fig.5 R_0 contours of Upper Paleozoic source rocks in Hangjinqi area, Ordos Basin

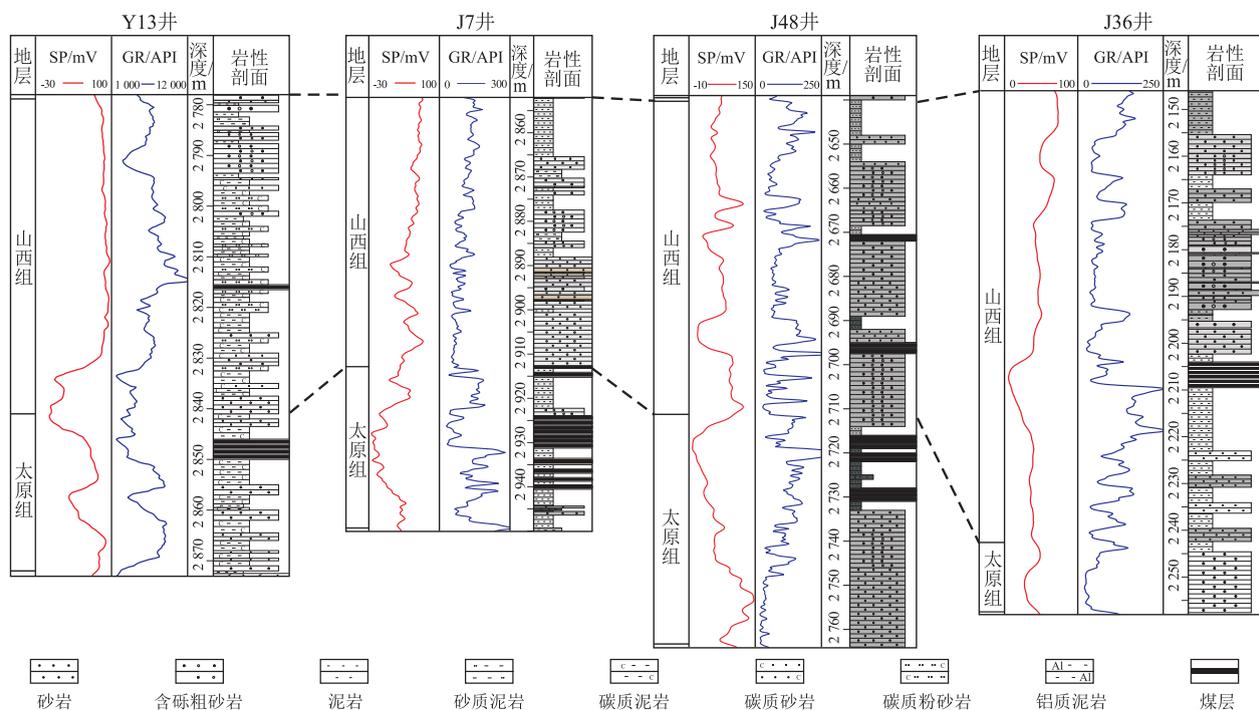


图6 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界太原组、山西组煤层南北向连井剖面剖面位置见图1。

Fig.6 SN-trending well-connecting profiles of coal seams in Upper Paleozoic Taiyuan and Shanxi formations, Hangjinqi area, Ordos Basin

向连井剖面为例,太原组煤层表现为南厚北薄的特点,而山西组煤层分布特征亦与之一致。杭锦旗地区上古生界煤系生源岩总体具有南厚北薄的平面分布趋势(图7),暗色泥岩厚度主体分布于20~50 m,其中断裂带以北地区厚度在10~30 m,而断裂带以南地区厚度在30~50 m;煤层厚度主要分布于10~30 m,其中断裂带以北地区为10~15 m,而断裂带以南地区则在10~30 m之间。

4 生烃潜力再评价

烃产率是煤系生源岩生烃潜力评价的关键参数,直接关系到生烃潜力评价结果的准确性、可靠性和客观性。与传统模拟实验方法及仪器相比,中国石化油气成藏重点实验室自主研发的地层孔隙热压生排烃模拟实验装置,充分考虑了温度、压力、流体等综合因素^[23-27],模拟条件更接近于实际地质情况。

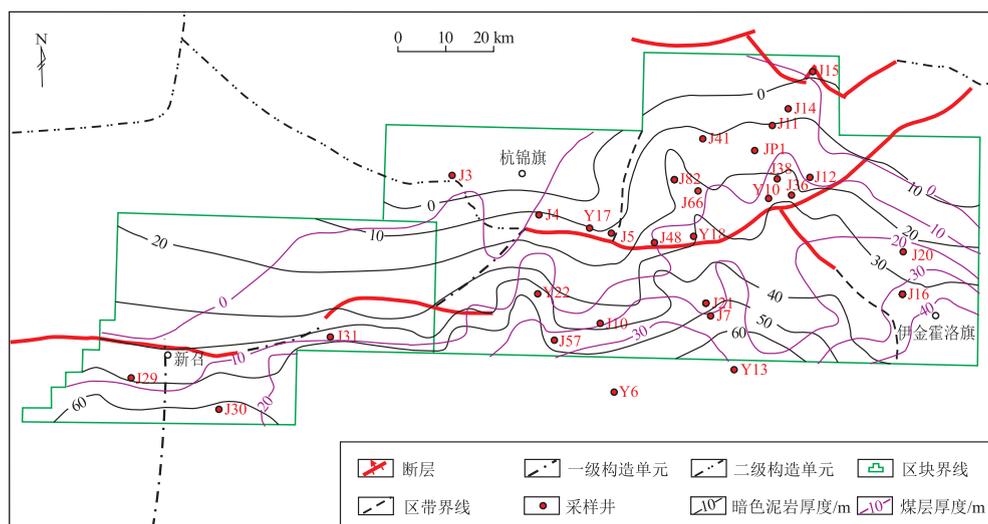


图 7 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界暗色泥岩、煤层厚度等值线

Fig.7 Thickness contours of Upper Paleozoic dark mudstones and coal rocks in Hangjinqi area, Ordos Basin

本次热模拟实验地质样品为杭锦旗地区 J6 井山西组煤样和暗色泥岩样品,代表该地区上古生界两类主要的煤系烃源岩,依据该地区典型钻井上古生界埋藏史演化特征,设置了上覆静岩压力和地层流体压力,同时结合热史—生烃史,设置了 8 个温度点: 300, 325, 350, 375, 400, 450, 500, 550 °C。模拟实验结果显示,煤岩最大烃产率可达 80 kg/t,暗色泥岩最大烃产率可达 120 kg/t。

基于上文所述杭锦旗地区上古生界煤系烃源岩厚度、有机质丰度、烃产率等参数及地质认识,利用 TSM 盆地模拟系统^[28]进行生烃量及生气强度的数值模拟。生烃量模拟结果表明,杭锦旗地区上古生界煤系烃源岩的总生气量为 $15.922 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中太原组烃源岩生气量为 $7.583 \times 10^{12} \text{ m}^3$,山西

组烃源岩生气量为 $8.339 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。如图 8 所示,杭锦旗地区平面上大致以断裂带为界,断裂带南北两侧地区上古生界烃源岩的生气强度存在较明显的差异:断裂带以北地区生气强度一般小于 $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,而断裂以南地区生气强度则主体分布于 $(15 \sim 35) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,最大值达到 $(50 \sim 55) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,反映该地区具备形成大中型气田的物质基础和形成条件^[29],且断裂带以南地区上古生界烃源条件明显优于断裂带以北地区,进而佐证了断裂带北侧地区上古生界天然气具有混源特征,且气源主要来自断裂带以南地区高成熟煤系烃源岩^[30]。对于杭锦旗地区上古生界天然气勘探而言,考虑到断裂带以南烃源岩品质相对较好,应重点关注断裂带以南地区,特别是勘探程度相对较低

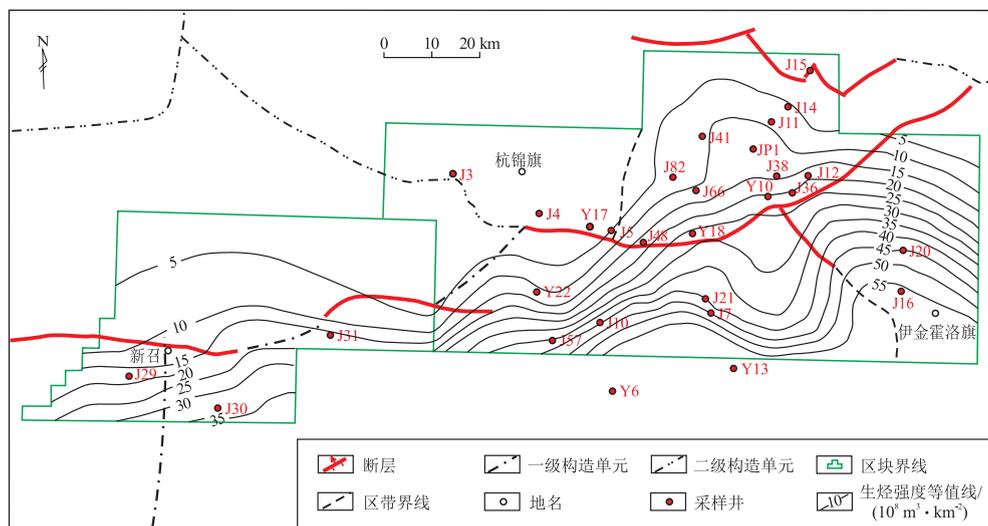


图 8 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界生气强度等值线

Fig.8 Contours of gas generation intensity of Upper Paleozoic source rocks in Hangjinqi area, Ordos Basin

的中西部十里加汗、新召等区带,同时东部的阿镇区带也值得开展积极探索,进一步扩大该地区上古生界天然气的勘探范围。

5 结论

(1)鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界古盐度、还原性具有纵向上太原组高于山西组、横向上断裂带以南高于断裂以北的整体特征。

(2)有机地球化学和有机岩石学等综合评价表明,杭锦旗地区太原组、山西组煤总体属于中等—差烃源岩;断裂带以南地区太原组、山西组暗色泥岩主体属于中等烃源岩,而断裂带以北山西组暗色泥岩绝大多数属于差烃源岩。有机质类型均以Ⅲ型为主,成熟度平面上总体具有南高北低的分布趋势。

(3)杭锦旗地区上古生界烃源岩具有南厚北薄的平面分布特征。暗色泥岩厚度主体为20~50 m,其中断裂带以北地区厚度在10~30 m,而断裂带以南地区厚度为30~50 m;煤层厚度主要分布于10~30 m,其中断裂带以北地区为10~15 m,而断裂带以南地区则在10~30 m之间。

(4)杭锦旗地区上古生界煤系烃源岩总生气量为 $15.922 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。断裂带以北地区生气强度一般小于 $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,而断裂以南地区生气强度则主体分布于 $(15 \sim 35) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,具备形成大中型气田的物质基础。

致谢:样品采集得到了中国石化华北油气分公司的大力帮助与支持,在此深表谢意!感谢吴小奇高级工程师提出的宝贵建议和官哈凝工程师给予的无私帮助!

参考文献:

- [1] 何发岐,王付斌,张威,等.鄂尔多斯盆地北缘勘探思路转变与天然气领域重大突破[J].中国石油勘探,2020,25(6):39-49.
HE Faqi, WANG Fubin, ZHANG Wei, et al. Transformation of exploration ideas and major breakthrough in natural gas discovery in the northern margin of the Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(6): 39-49.
- [2] 李良,袁志祥,惠宽洋,等.鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气聚集规律[J].石油与天然气地质,2000,21(3):268-271.
LI Liang, YUAN Zhixiang, HUI Kuanyang, et al. Accumulation regularity of Upper Paleozoic gas in north Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(3): 268-271.
- [3] 徐波,聂海宽,王敏,等.鄂尔多斯盆地杭锦旗探区烃源岩生烃能力[J].油气地质与采收率,2009,16(4):38-40.
XU Bo, NIE Haikuan, WANG Min, et al. A study of hydrocarbon-

generating potential of Hangjinqi prospect area in Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(4): 38-40.

- [4] 薛会,张金川,徐波,等.鄂尔多斯北部杭锦旗探区上古生界烃源岩评价[J].成都理工大学学报(自然科学版),2010,37(1):21-28.
XUE Hui, ZHANG Jinchuan, XU Bo, et al. Evaluation of Upper Paleozoic source rocks of the Hangjinqi block in the northern Ordos Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2010, 37(1): 21-28.
- [5] 纪文明,李滢莲,刘震,等.鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区上古生界气源岩分析[J].天然气地球科学,2013,24(5):905-914.
JI Wenming, LI Weilian, LIU Zhen, et al. Research on the Upper Paleozoic gas source of the Hangjinqi block in the northern Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(5): 905-914.
- [6] 赵桂萍.鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界烃源岩热演化特征模拟研究[J].石油实验地质,2016,38(5):641-646.
ZHAO Guiping. Thermal evolution modeling of Neopaleozoic source rocks in Hangjinqi region, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(5): 641-646.
- [7] 邱隆伟,穆相骥,李浩,等.鄂尔多斯盆地杭锦旗地区二叠系下石盒子组岩屑发育特征及其对储层物性的影响[J].石油与天然气地质,2019,40(1):24-33.
QIU Longwei, MU Xiangji, LI Hao, et al. Characteristics of detritus development in the Permian Lower Shihezi Formation in Hangjinqi area and its influence on reservoir physical properties[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1): 24-33.
- [8] 齐荣.鄂尔多斯盆地杭锦旗东部断裂特征及对天然气成藏的影响[J].特种油气藏,2019,26(4):58-63.
QI Rong. Fault Characterization and its influences on gas accumulation in the eastern Haggin Banner of Ordos Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(4): 58-63.
- [9] 戴金星,秦胜飞,胡国艺,等.新中国天然气勘探开发70年来的重大进展[J].石油勘探与开发,2019,46(6):1037-1046.
DAI Jinxing, QIN Shengfei, HU Guoyi, et al. Major progress in the natural gas exploration and development in the past seven decades in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(6): 1037-1046.
- [10] 易非凡,田景春,张翔,等.杭锦旗地区山西组沉积相及其演化特征[J].断块油气田,2019,26(4):439-443.
YI Feifan, TIAN Jingchun, ZHANG Xiang, et al. Sedimentary facies and its evolution characteristics of Shanxi Formation in Hangjinqi area[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(4): 439-443.
- [11] HATCH J R, LEVENTHAL J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) stark shale member of the Dennis limestone, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A. [J]. Chemical Geology, 1992, 99(1/3): 65-82.
- [12] 王彤,朱敏敏,董艳蕾,等.基于微量元素分析的古沉积背景重建:以准噶尔盆地西北缘古近系安集海河组为例[J].地质学报,2020,94(12):3830-3851.
WANG Tong, ZHU Xiaomin, DONG Yanlei, et al. Trace elements as paleo sedimentary environment indicators: a case study of the Paleogene Anjihaihe Formation in the northwestern Junggar Basin [J].

- Acta Geologica Sinica, 2020, 94(12): 3830–3851.
- [13] PETERS K E. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis [J]. AAPG Bulletin, 1986, 70(3): 318–329.
- [14] 徐旭辉, 申宝剑, 李志明, 等. 页岩气实验地质评价技术研究现状及展望 [J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(1): 1–8.
XU Xuhui, SHEN Baojian, LI Zhiming, et al. Status and prospect of experimental technologies of geological evaluation for shale gas [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(1): 1–8.
- [15] 陈建平, 梁狄刚, 张水昌, 等. 中国古生界海相烃源岩生烃潜力评价标准与方法 [J]. 地质学报, 2012, 86(7): 1132–1142.
CHEN Jianping, LIANG Digang, ZHANG Shuichang, et al. Evaluation criterion and methods of the hydrocarbon generation potential for China's Paleozoic marine source rocks [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(7): 1132–1142.
- [16] 秦建中. 中国烃源岩 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
QIN Jianzhong. Source rocks of China [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [17] TISSOT B, DURAND B, ESPITALIE J, et al. Influence of nature and diagenesis of organic matter in formation of petroleum [J]. AAPG Bulletin, 1974, 58(3): 499–506.
- [18] 熊德明, 马万云, 张明峰, 等. 干酪根类型及生烃潜力确定新方法 [J]. 天然气地球科学, 2014, 25(6): 898–905.
XIONG Deming, MA Wanyun, ZHANG Mingfeng, et al. New method for the determination of kerogen type and the hydrocarbon potential [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(6): 898–905.
- [19] 秦建中, 申宝剑, 陶国亮, 等. 优质烃源岩成烃生物与生烃能力动态评价 [J]. 石油实验地质, 2014, 36(4): 465–472.
QIN Jianzhong, SHEN Baojian, TAO Guoliang, et al. Hydrocarbon-forming organisms and dynamic evaluation of hydrocarbon generation capacity in excellent source rocks [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(4): 465–472.
- [20] 倪春华, 周小进, 王果寿, 等. 鄂尔多斯盆地南部平凉组烃源岩特征及其成烃演化分析 [J]. 石油实验地质, 2010, 32(6): 572–577.
NI Chunhua, ZHOU Xiaojin, WANG Guoshou, et al. Characteristics and hydrocarbon generation evolution of Pingliang Formation source rocks, southern Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(6): 572–577.
- [21] 刘学珍, 杨迎春, 周翔. 鄂尔多斯盆地代家坪地区延长组原油成因及成藏期次 [J]. 新疆石油地质, 2019, 40(4): 414–421.
LIU Xuezhen, YANG Yingchun, ZHOU Xiang. Genesis and accumulation periods of oil in Yanchang Formation of Daijiaping area, Ordos Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(4): 414–421.
- [22] 武英利, 朱建辉, 倪春华, 等. 松辽盆地南部中小断陷白垩系烃源岩成熟度综合评价: 以彰武、昌图断陷为例 [J]. 石油实验地质, 2020, 42(2): 289–295.
WU Yingli, ZHU Jianhui, NI Chunhua, et al. Comprehensive evaluation of Cretaceous source rock maturity in medium and small fault depressions in southern Songliao Basin: a case study of Zhangwu and Changtu fault depressions [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(2): 289–295.
- [23] 郑伦举, 秦建中, 何生, 等. 地层孔隙热压生排烃模拟实验初步研究 [J]. 石油实验地质, 2009, 31(3): 296–302.
ZHENG Lunju, QIN Jianzhong, HE Sheng, et al. Preliminary study of formation porosity thermocompression simulation experiment of hydrocarbon generation and expulsion [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(3): 296–302.
- [24] 郑伦举, 马中良, 王强, 等. 烃源岩有限空间热解生油气潜力定量评价研究 [J]. 石油实验地质, 2011, 33(5): 452–459.
ZHENG Lunju, MA Zhongliang, WANG Qiang, et al. Quantitative evaluation of hydrocarbon yielding potential of source rock: application of pyrolysis in finite space [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(5): 452–459.
- [25] 巢前, 蔡进功, 周祺盛, 等. 东营凹陷沙河街组 E_{s3}/E_{s4} 烃源岩热解特征及生烃差异研究 [J]. 高校地质学报, 2017, 23(4): 688–696.
CHAO Qian, CAI Jingong, ZHOU Qisheng, et al. Characteristics of rock-eval pyrolysis and hydrocarbon generation for source rocks of Eocene Shahejie Third and Fourth Members, Dongying Depression [J]. Geological Journal of China Universities, 2017, 23(4): 688–696.
- [26] 杨恒, 龚文平, 郑伦举. 煤系烃源岩油气生成、排出与滞留特征 [J]. 石油实验地质, 2021, 43(3): 498–506.
YANG Heng, GONG Wenping, ZHENG Lunju. Characteristics of oil and gas generation, expelling and retention of coaly source rock [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(3): 498–506.
- [27] 徐陈杰, 叶加仁, 刘金水, 等. 东海西湖凹陷平湖组 III 型干酪根暗色泥岩生排烃模拟 [J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(2): 359–366.
XU Chenjie, YE Jiaren, LIU Jinshui, et al. Simulation of hydrocarbon generation and expulsion for the dark mudstone with type-III kerogen in the Pinghu Formation of Xihu Sag in East China Sea Shelf Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 359–366.
- [28] 杨凤丽, 周晓峰, 胡虞杨, 等. 新元古代扬子克拉通 TSM 盆地原型分析 [J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 742–755.
YANG Fengli, ZHOU Xiaofeng, HU Yuyang, et al. TSM prototype basins on the Neoproterozoic Yangtze Craton [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 742–755.
- [29] 戴金星, 邹才能, 陶士振, 等. 中国大气田形成条件和主控因素 [J]. 天然气地球科学, 2007, 18(4): 473–484.
DAI Jinxing, ZOU Caineng, TAO Shizhen, et al. Formation conditions and main controlling factors of large gas fields in China [J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(4): 473–484.
- [30] 倪春华, 刘光祥, 朱建辉, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界天然气成因及来源 [J]. 石油实验地质, 2018, 40(2): 193–199.
NI Chunhua, LIU Guangxiang, ZHU Jianhui, et al. Origin and source of natural gas in the Upper Paleozoic in Hangjinqi area, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(2): 193–199.