

川东红星地区上二叠统吴家坪组页岩发育特征及其页岩气富集意义

王鹏威¹, 刘忠宝¹, 李雄², 刘皓天², 周林², 肖雄², 王濡岳¹, 李鹏¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206; 2. 中国石化江汉油田分公司, 湖北武汉 430007)

摘要:川东红星地区上二叠统吴家坪组海相富有机质页岩是四川盆地页岩气勘探的重要接替领域, 目前处于勘探初级阶段, 页岩发育特征及页岩气勘探前景尚不清楚。以HY1井为例, 通过岩石学、地球化学、储层描述和含气性等分析测试研究了川东红星地区吴家坪组页岩源、储品质及其变化规律, 探讨了页岩气勘探前景。结果表明:富有机质页岩发育于吴一¹亚段(吴家坪组一段1亚段)潮坪-泻湖环境和吴二段深水陆棚环境, 吴一¹亚段主要发育粘土质页岩相, 吴二¹亚段主要发育混合页岩相和硅质页岩相, 吴二²亚段以硅质页岩相和灰质页岩相为主。与吴一¹亚段潮坪-泻湖相页岩相比, 吴二¹亚段混合页岩相和硅质页岩相具有脆性矿物含量高(63.2%)、有机质丰度高(总有机碳含量为8.78%)、有机质类型好(Ⅱ₁型)、储层有机质孔发育且物性好(孔隙度为5.59%)的特征, 吴二¹亚段富有机质页岩是红星地区吴家坪组页岩气勘探的有利层段。

关键词:烃源岩品质; 储层品质; 深水陆棚; 页岩; 吴家坪组; 上二叠统; 红星地区; 四川盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Development of the Upper Permian Wujiaping shale in Hongxing area, eastern Sichuan Basin, and its significance to shale gas enrichment

Wang Pengwei¹, Liu Zhongbao¹, Li Xiong², Liu Haotian², Zhou Lin², Xiao Xiong², Wang Ruyue¹, Li Peng¹

(1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 2. Exploration and Production Research Institute of Jiangnan Oilfield Company, SINOPEC, Wuhan, Hubei 430007, China)

Abstract: The Wujiaping marine shale of the Upper Permian in the eastern Sichuan Basin is an important successor for shale gas exploration in the Sichuan Basin, where shale gas enrichment conditions and favorable exploration intervals are yet to be clarified. The study investigates source rocks and reservoir quality of the Wujiaping shale in Well HY 1 and their changes in vertical via petrology and geochemistry analysis, reservoir description and characterization as well as gas-bearing potential test, and the exploration prospects are thereby identified. Results show that the organic-rich shale is developed in the first sub-member of the first member of the Wujiaping Formation (Wu1¹) of tidal flat-lagoon facies and the second member (Wu2) of deep shelf facies. To be specific, the Wu1¹ is dominated by argillaceous shale, Wu2¹ by mixed siliceous shale and siliceous shale, and the Wu2² by siliceous shale and calcareous shale. Compared with the argillaceous shale in the Wu1¹, the mixed siliceous and siliceous shale in the Wu2 is characterized by high brittle mineral content (63.2%), high organic matter abundance (TOC = 8.87%), favorable organic matters (Type II₁), well-developed organic pores, and good physical properties (a porosity of 5.59%). Among others, the source rock quality and reservoir capacity of the Wu2¹ are better than those of the Wu2². It can be concluded that the organic-rich shale of the Wu2¹ is favorable for shale gas exploration in the study area.

Key words: source rock quality, reservoir quality, deep shelf facies, shale, Wujiaping Formation, Upper Permian, Hongxing area, Sichuan Basin

收稿日期:2021-10-28; 修订日期:2022-07-29。

第一作者简介:王鹏威(1986—),男,博士、副研究员,非常规油气地质。E-mail: wangpw.syky@sinopec.com。

基金项目:中国石油化工股份有限公司科技攻关项目(P22137)。

引用格式:王鹏威,刘忠宝,李雄,等. 川东红星地区上二叠统吴家坪组页岩发育特征及其页岩气富集意义[J]. 石油与天然气地质,2022,43(5): 1102-1114. DOI:10. 11743/ogg20220508.

Wang Pengwei, Liu Zhongbao, Li Xiong, et al. Development of the Upper Permian Wujiaping shale in Hongxing area, eastern Sichuan Basin, and its significance to shale gas enrichment[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1102-1114. DOI: 10. 11743/ogg20220508.

四川盆地及其周缘发育寒武系筇竹寺组,奥陶系五峰组-志留系龙马溪组,二叠系茅口组、吴家坪组和大隆组,以及侏罗系凉高山组-自流井组等多套富有有机质泥页岩^[1-7]。目前,志留系海相页岩气已实现商业开发,但稳产难度较大,页岩气勘探亟需接替层系和领域。长期以来,川东地区二叠系泥页岩作为二叠系和三叠系常规天然气藏的烃源岩备受关注,但页岩气的勘探开发程度和研究程度相对较低^[8-9]。近期,中国石化在川东红星地区针对二叠系部署钻探的HY1井,测试获得日产气 $8.9 \times 10^4 \text{ m}^3$,截至2021年9月底已试采超过270 d,累计产气 $1\,470.0 \times 10^4 \text{ m}^3$,取得四川盆地二叠系页岩气勘探的重要突破,拉开了中国南方二叠系页岩气开发的序幕。

受峨眉山玄武岩喷发及地裂运动影响,二叠世吴家坪组深水陆棚沉积主要发育在川北—川东北地区的广元—巴中—达州—恩施—黔江一带^[10-16]。受海平面剧烈变化的影响,页岩矿物组成复杂(硅质、钙质和粘土质等),岩性变化大(硅质页岩、灰质页岩、粘土质页岩、凝灰质页岩和煤层等),页岩单层厚度变化明显^[17-19]。目前川东地区吴家坪组页岩气勘探仍处于初级阶段,钻井资料较少,野外露头资料和样品品质较差,页岩发育特征尚不清楚,页岩气勘探方向仍不明确。本文以HY1井为例,综合岩心和测井资料描述吴家坪组页岩发育特征,开展有机岩石学等地球化学测试,研究不同层段烃源岩品质,采用页岩储层物性测试、氩离子抛光扫描电镜等实验手段分析不同层段页岩储层品质,在此基础上结合含气性测试等探讨并优选吴家坪组页岩气勘探有利层段。本研究对于深化四川盆地二叠系海相页岩气富集规律研究和明确二叠系海相页岩气勘探方向具有重要意义。

1 区域地质背景

川东地区先后经历了澄江期—加里东期、海西期—早印支期、晚印支期—早燕山期以及晚燕山期—喜马拉雅期等沉积—构造旋回^[20]。该地区自燕山期宁镇运动—喜马拉雅期发生褶皱变形,在北西—南东向构造应力的强烈挤压作用下形成了一系列以北东—南西向的褶皱和断裂,并发育宽缓复向斜和高陡复背斜,

整体表现为隆—凹相间的“隔档式”褶皱的特征,局部构造具有复背斜上成排成带、复向斜内呈雁行式斜列展布的特点。研究区红星地区位于湖北省利川市和重庆市石柱县境内,构造上处于川东高陡褶皱带石柱复向斜(图1),地面海拔在600~1 600 m,该地区内复向斜区变形较弱,保存条件好。建南构造较为完整,为北东向展布的宽缓箱状背斜,构造主体埋深在3 000~4 500 m,构造南翼部埋深在4 000~4 500 m。其南北分别以鞍部与盐井构造和龙驹坝构造相接,东西分别以向斜或深断凹与齐岳山复背斜和方斗山复背斜相隔。受高陡构造带及区域大断裂控制,断裂走向与构造走向基本一致,以逆冲断层为主。因受力强度相对较弱,构造纵向变异程度小,上、下变形层高点位置和形态基本一致,断层往上大多滑脱于嘉陵江组膏岩层中,构造变异程度弱。二叠系受上、下两套塑性地层控制,构造变形整体较弱,断裂不发育,北段宽缓,地层倾角较小($0^\circ \sim 5^\circ$),向南段构造逐渐收窄,倾角变大($5^\circ \sim 10^\circ$)。太平镇断层为建南构造主控断层,断层向上断至嘉陵江组膏盐岩层,未对建南构造保存条件造成影响。

受东吴运动的影响,晚二叠世吴家坪早期四川盆地大面积抬升成陆,海平面处于相对下降的过程,中—晚期四川盆地发生强烈拉张和整体沉降,川东地区陆缘/陆内裂陷内沉积了一套富有机质泥页岩^[21]。吴家坪组发育在茅口组灰黑色页岩和灰色灰岩之上,上覆长兴组灰色灰岩和灰色泥灰岩,可细分为2个段和4个亚段。

吴一段1亚段(吴一¹亚段)厚度为4.7 m,底部主要发育含灰硅质页岩,向上变为含铝土硅质岩、铝土岩,夹薄煤层,顶部为灰黑色页岩,粘土含量高、易碎,该套页岩主要发育在吴家坪初期水体较浅的潮坪—潟湖环境中^[22]。页岩自然伽马曲线(GR)表现为低幅度箱形,GR值主要介于84~96 API,局部出现GR高值。吴一段底部的铝土岩与GR曲线尖峰在四川盆地内分布稳定,横向可对比性较好,是识别吴家坪组与茅口组的标志层。吴一²亚段为灰色粉晶灰岩,局部含少量泥质,反映了向上由滨岸沼泽沉积过渡为浅水陆棚沉积。

吴二段钻遇页岩层累计厚度19.1 m,其中吴二¹亚段下部为灰黑色炭质页岩夹粉晶灰岩,见凝灰岩薄

层,中部为灰黑色炭质页岩和灰黑色硅质页岩,镜下可见丰富硅质放射虫,指示深水还原性沉积环境;吴二²亚段以硅质页岩和灰质-硅质页岩为主,局部灰质含量较高,可见灰质页岩、泥灰岩和灰岩,反映沉积水体深度变化较频繁、局部水体变浅、水动力相对较强。吴二段页岩自然伽马异常幅度较高,GR值介于70~300 API,曲线形态整体表现为箱形,具有微齿状和齿状特征,与顶、底面灰岩多为突变接触。

2 页岩岩相及发育特征

2.1 岩石矿物学特征

受沉积环境影响,吴家坪组页岩矿物含量变化较大,其中吴一段潮坪-潟湖相页岩以粘土矿物为主,吴二段深水陆棚相页岩以石英为主,局部碳酸盐矿物含量较高(图2)。吴一¹亚段页岩粘土矿物含量介于49.5%~55.5%,平均为53.2%;石英和碳酸盐矿物

含量较低,石英含量介于12.9%~17.1%,平均为15.5%,方解石含量为3.0%~3.6%,平均为3.3%。吴二段页岩石英含量分布范围在12.5%~83.2%,平均为43.5%;粘土矿物含量整体较低,介于6.1%~67.1%,平均为21.5%;方解石含量分布范围在2.4%~61.5%,平均为19.7%。吴二¹亚段石英含量整体较高,局部碳酸盐矿物含量和粘土矿物含量较高,石英含量在12.5%~83.2%,平均为35.8%;方解石含量在2.4%~42.9%,平均为15.2%;粘土矿物含量介于9.1%~55.3%,平均为26.3%。吴二²亚段页岩石英含量介于14.0%~77.4%,平均为47.6%;局部出现碳酸盐矿物含量高值,方解石含量介于48.0%~61.5%,平均为22.3%;粘土矿物含量介于6.1%~67.1%,平均为18.2%。

2.2 岩相及发育特征

结合页岩矿物组合和普通光学薄片观察认为吴家坪组页岩岩相可划分为四大类:粘土质页岩相、混合页

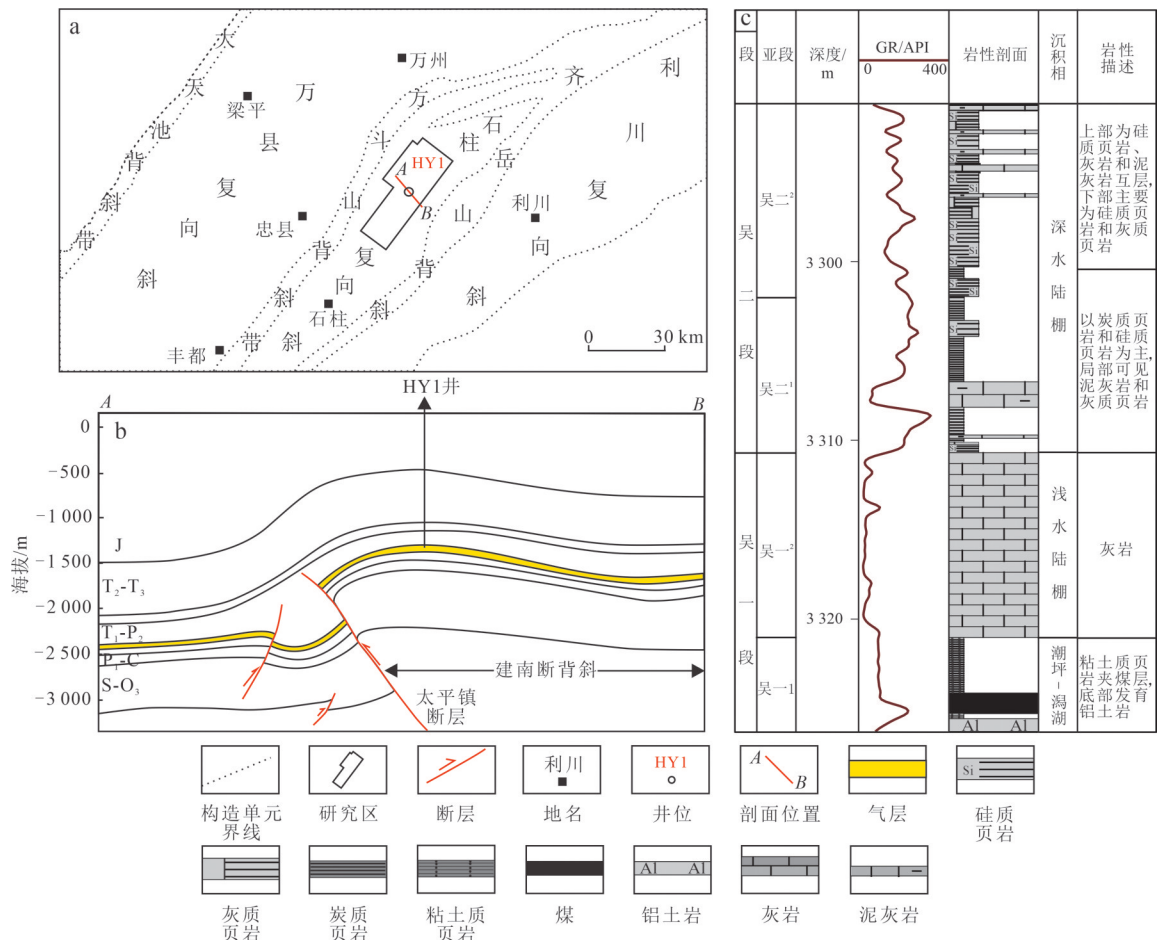


图1 川东红星地区构造位置及吴家坪组地层综合柱状图

Fig. 1 Structural location of Hongxing area and composite stratigraphic column of the Wujiaping Formation in the eastern Sichuan Basin
a. 红星地区构造位置; b. 过HY1井地质剖面; c. 地层综合柱状图

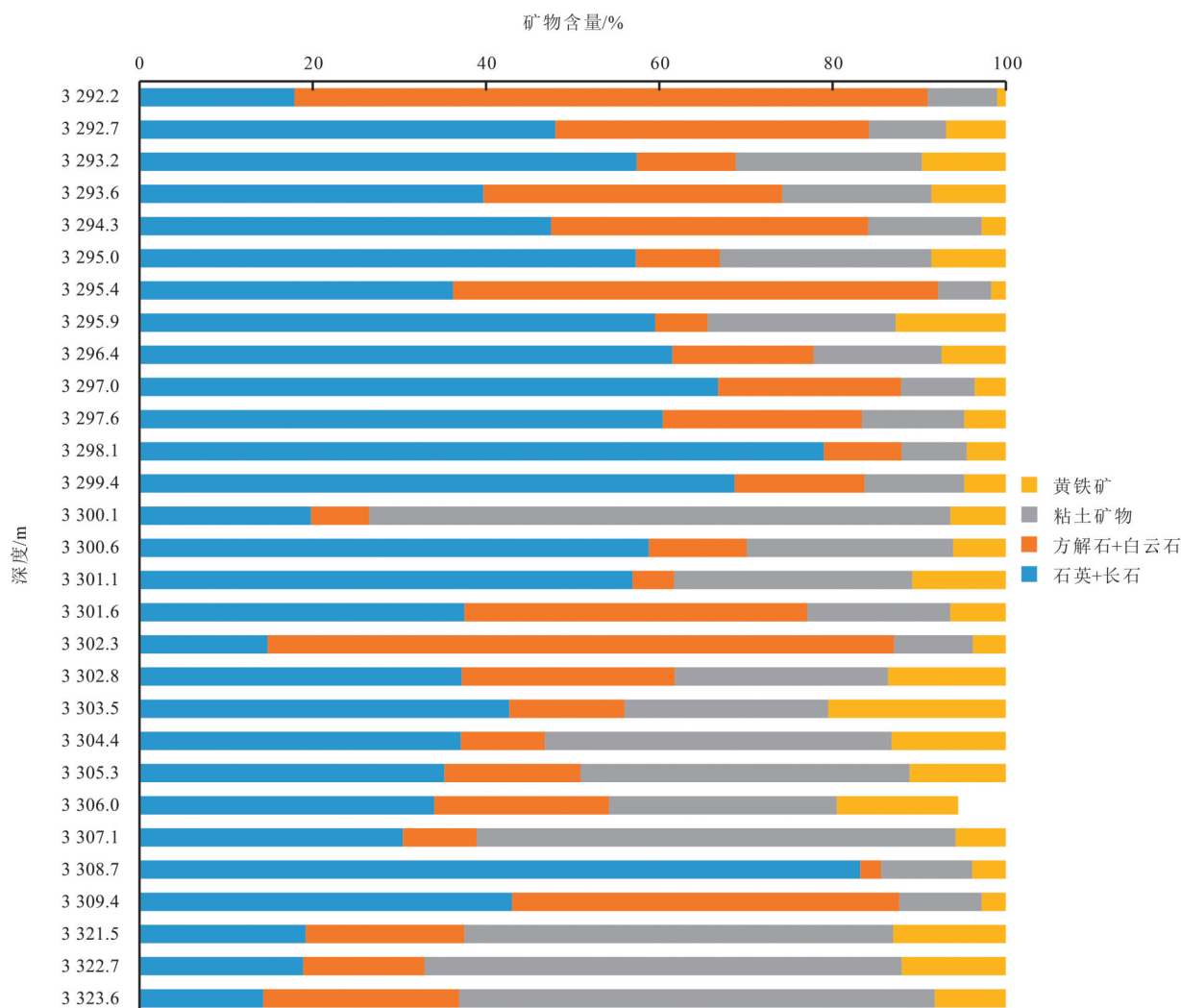


图2 红星地区HY1井吴家坪组页岩矿物组成特征

Fig. 2 Mineral compositions of the Wujiaping shale in Well HY1, Hongxing area

岩相、硅质页岩相和灰质页岩相。①粘土质页岩相薄片样品中,粘土矿物呈隐晶状与黑色炭质混杂,偏光镜下无明显的纹层发育(图3a);②混合页岩相薄片样品中可见隐晶状粘土矿物与硅质混杂散布粒间,有机质呈细条状顺层分布,生屑(介形虫为主)体腔均已重结晶(图3b),在偏光显微镜下硅质页岩相中硅质多为不定形隐晶质结构,部分呈显微晶质结构;③硅质页岩相薄片样品中,隐晶质-微晶石英多为生物成因,部分钙质生物中可见硅化交代,偏光显微镜下可见放射虫等生物残屑(图3c);④灰质页岩相薄片样品中可见大量泥晶-微晶方解石,少部分呈微晶-粉晶结构出现,含少许白云石,有机质顺层条带状分布,方解石呈密集、不均匀小球状(图3d)。吴一¹亚段主要以粘土质页岩相为主,吴二¹亚段主要发育混合页岩相,局部发育硅质页岩相,吴二²亚段以硅质页岩相和灰质页岩相为主。

3 页岩地球化学特征

HY1井吴家坪组页岩有机质丰度普遍较高,实测34块样品的有机质丰度(总有机碳含量 TOC)介于1.16%~28.94%,平均为8.46%。纵向上,实测 TOC 普遍大于2.0%,约占样品总数的94%,但不同岩相页岩的 TOC 变化较明显。吴一¹亚段粘土质页岩相有机质丰度相对较低, TOC 介于1.86%~8.60%,平均为5.19%;吴二¹亚段混合页岩相和硅质页岩相有机质丰度相对较高, TOC 介于4.78%~28.94%,平均为11.23%;吴二²亚段页岩有机质丰度低于吴二¹亚段, TOC 介于1.16%~14.59%,平均为7.60%(图4a)。吴二段深水陆棚页岩 TOC 平均为8.78%,明显高于焦页1井五峰组-龙马溪组优质页岩 TOC (平均为3.52%)(图4b)。

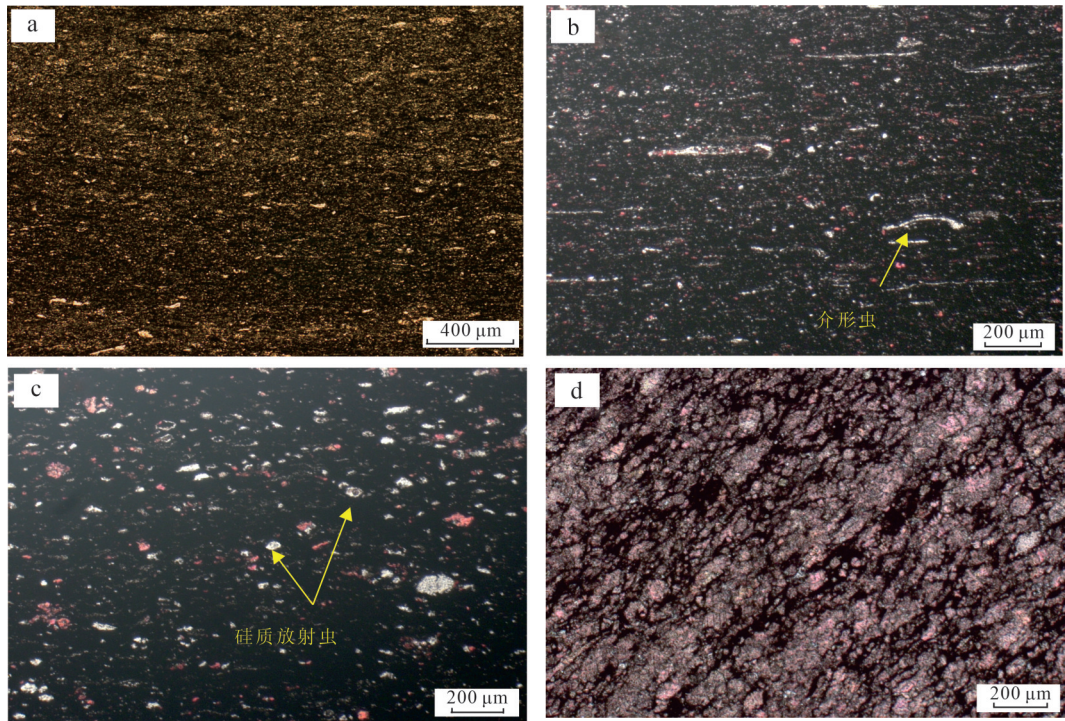


图3 红星地区HY1井吴家坪组典型页岩相普通薄片特征照片

Fig. 3 Thin section photos of the Wujiaping Formation shale in Well HY1, Hongxing area

a. 吴一¹亚段,粘土质页岩相,埋深3 322.3 m,单偏光; b. 吴二¹亚段,埋深3 302.5 m,混合页岩相,单偏光; c. 吴二²亚段,埋深3 295.8 m,硅质页岩相,单偏光; d. 吴二²亚段,埋深3 294.9 m,灰质页岩相,单偏光

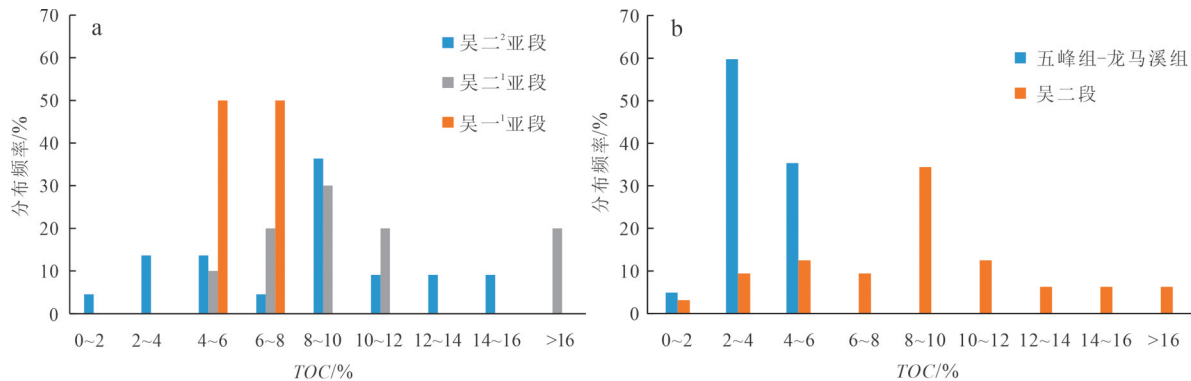


图4 红星地区HY1井吴家坪组不同层段页岩TOC对比(a)及与焦石坝地区焦页1井五峰组-龙马溪组TOC对比(b)

Fig. 4 Comparison of TOC between different members of the Wujiaping shale in Well HY1 in Hongxing area (a), and between the Wujiaping Formation and Wufeng-Longmaxi Formations in Well Jiaoye 1 in Jiaoshiba area (b)

本次研究共选取HY1井吴家坪组3个页岩样品开展镜质体反射率测定(表1),实测98个测点的随机反射率(R_b)为2.56%~2.83%,平均为2.66%,换算镜

质体反射率(R_o)为2.02%~2.20%,平均为2.11%,说明吴家坪组泥页岩有机质普遍处于过成熟阶段,均具有良好生气条件。

表1 红星地区HY1井吴家坪组干酪根镜质体反射率数据统计

Table 1 Vitrinite reflectance of the Wujiaping Kerogen in Well HY1, Hongxing area

层位	深度/m	岩性	R_b 最小值/%	R_b 最大值/%	R_b 平均值/%	测点数/个	换算 R_o /%
吴二段	3 294.05	黑色硅质页岩	2.22	3.10	2.56	30	2.02
	3 307.34	黑色硅质页岩	2.31	3.18	2.69	28	2.10
吴一段	3 323.59	泥岩	2.60	3.09	2.83	40	2.20

注: $R_o=0.656\ 9R_b+0.336\ 4$ 。

有机显微组分测试结果表明,吴二段深水陆棚页岩中有机显微组分以类镜质体为主,偶见惰屑体(图5a—d)。类镜质体在油浸反射光下呈灰色,形态以长条带状、絮状和浸染状为主,原始组分应为藻类体或席状藻类体;惰屑体多呈颗粒状,形状不规则,颗粒边界明显,在油浸反射光下呈灰白色,高凸起;次生组分以贫氢组分为主,呈细脉状充填于裂缝或者矿物晶间缝隙,在油浸反射光下呈灰—灰白色。吴二段页岩腐泥组分含量为15.0%~78.9%,平均为57.8%,表明该段原始有机质具有良好的生烃潜力。同时,该段次生沥青含量为17.5%~76.8%,平均为37.7%,表明烃源岩在热演化过程中已大量生烃。与五峰组—龙马溪组海相页岩不同^[23],吴二段深水陆棚页岩局部可见少

量惰屑体,指示藻类体为主要生源,同时存在少量陆源输入。吴一¹亚段潮坪—潟湖页岩有机显微组分以镜质体为主,在显微组分中占比约为87.3%;次生组分为少量固体沥青(图5e,f),分布在矿物粒间孔缝内,表明此沉积时期陆源高等植物输入是主要的有机质生源。根据有机质显微组分的组成判断,吴二段页岩原始有机质类型以Ⅱ₁型为主,吴一段页岩以Ⅲ型干酪根为主^[24]。

在有机质显微组分分析的基础上,重点针对吴二段页岩开展了12个样品的干酪根碳同位素测试,系统分析了吴二段深水陆棚页岩有机质类型的变化规律。测试结果表明,吴二段页岩干酪根碳同位素值($\delta^{13}\text{C}$)介于-28‰~-26‰(图6),纵向上干酪根碳同位素无

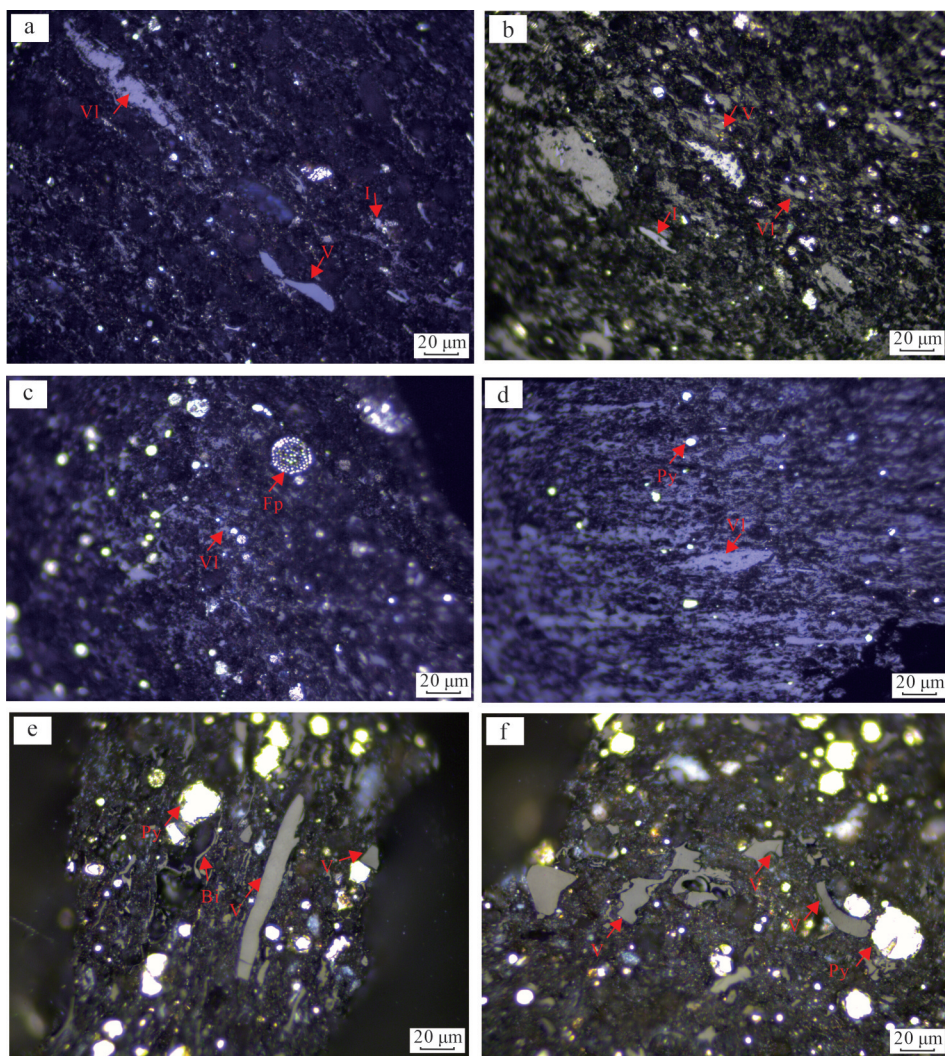


图5 红星地区吴家坪组页岩有机显微组分微观照片

Fig. 5 Micrographs showing the organic components in the Wujiaping shale, Hongxing area

- a. 吴二¹亚段,埋深3 291.6 m,灰黑色硅质页岩,TOC=1.16%,全岩光片; b. 吴二¹亚段,埋深3 303.5 m,灰黑色硅质页岩,TOC=16.98%,全岩光片;
c. 吴二²亚段,埋深3 304.6 m,灰黑色炭质页岩,TOC=8.97%,全岩光片; d. 吴二²亚段,埋深3 307.9 m,灰黑色炭质页岩,TOC=10.76%,全岩光片;
e, f. 吴一¹亚段,埋深3 323.6 m,泥岩,TOC=5.61%,全岩光片

VI. 类镜质体; V. 镜质体; L. 惰屑体; Bi. 沥青; Py. 黄铁矿; Fp. 莓状黄铁矿

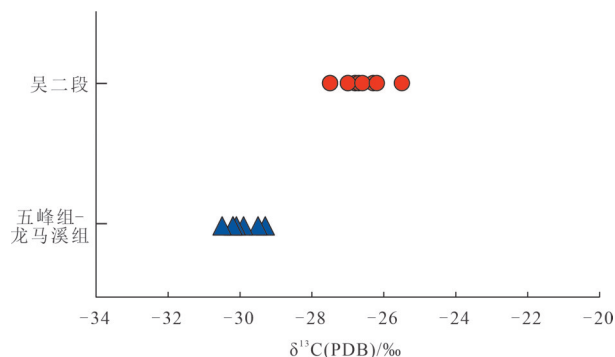


图6 红星地区吴二段页岩和焦石坝地区焦页1井五峰组-龙马溪组页岩干酪根碳同位素对比

Fig. 6 Comparison of carbon isotopes of shale kerogen between the second member of the Wujiaping Formation in Hongxing area and Wufeng-Longmaxi Formations in Well Jiaoye 1 in Jiaoshiba area

明显差异,由此进一步证实吴二段页岩有机母质以Ⅱ₁型干酪根为主,与五峰组-龙马溪组页岩有机质类型存在差异。与吴二段深水陆棚相页岩相比,吴一段潮坪-潟湖相页岩干酪根碳同位素较轻,以Ⅲ型干酪根为主^[25]。

4 页岩储层发育特征

4.1 储层物性特征

本次研究采用氦气法测试41个页岩岩心样品的孔隙度,结果表明,吴家坪组页岩孔隙度普遍大于3.0%,但不同岩相的孔隙度存在差异:吴一段粘土质页岩相储层孔隙度介于3.63%~6.38%,平均为4.62%(图7a),吴二¹亚段页岩储层孔隙度介于3.03%~9.98%,平均为5.89%,吴二²亚段页岩孔隙度介于3.86%~7.01%,平均为5.38%。总体而言,吴家坪组深水陆棚页岩相储层物性较好,平均孔隙度为

5.59%。与焦页1井五峰组-龙马溪组优质页岩储层(孔隙度平均为4.90%)相比,HY1井吴二段富有机质页岩储层物性更好(图7b)。

4.2 孔隙类型及发育特征

氩离子抛光-扫描电镜观察结果表明(图8a,b),与同期异相的龙潭组潮坪-潟湖相页岩的孔隙类型不同^[23],吴二段深水陆棚相页岩储层以有机质孔为主,有机质孔发育载体主要为原始有机质和迁移有机质。

镜下原始有机质多具有一定的形态特征,其与周围矿物具有清晰的界线,接触面平直光滑,且有机质与矿物可形成互相支撑作用。有机质内部不同程度地发育孔隙,局部发育较为集中,孔隙密度较大。孔隙形态多样,多呈不规则状、椭圆状、圆状、港湾状等;以纳米级孔隙为主,孔径大小变化明显,几十纳米至几百纳米(孔径长轴)孔隙均有发育,局部多个孔隙彼此联通,形成形状不规则的微米级孔隙。但是原始有机质内孔隙发育具有明显的非均质性,部分颜色较深的有机质内部孔隙基本不发育。该类有机质可以独立存在,与周围矿物或其他有机质具有明显的边界(图8e),或与发育孔隙的有机质混积在一起(图8f),主要为块状、条带状或分叉条带状,有机质内部质地紧密且均匀、表面干净平滑。从颜色和几何形态等判断,有机质主要为镜质体等惰性组分^[26]。前人研究表明,对于有机质丰度和热演化成熟度相同的页岩样品而言,有机质显微组分是控制有机质孔隙发育的重要因素^[27-29]。由此推断,吴二段深水陆棚页岩藻类体等富氢组分经生、排烃作用后,在其内部可伴生形成有机质孔隙,这些孔隙多具有“局部发育且密度较高”的特征,但镜质体等贫氢组分生油能力较低,在生气过程中很少发育有机质孔隙^[30]。

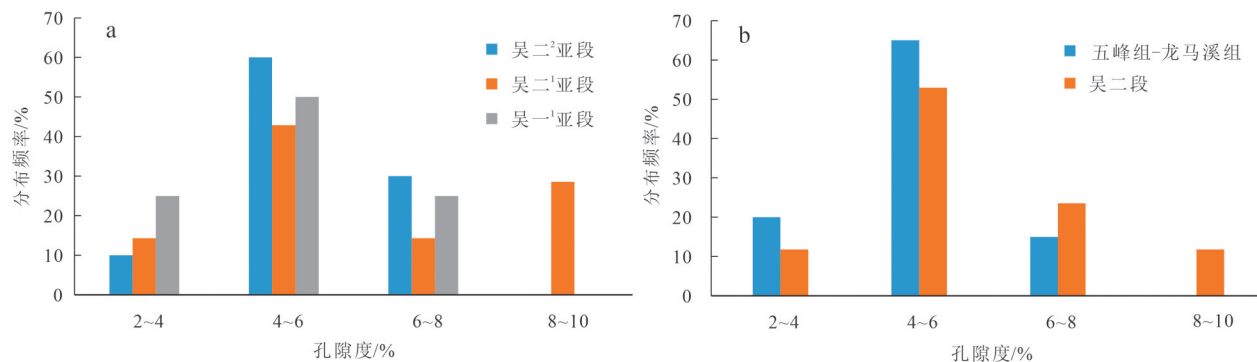


图7 红星地区HY1井吴家坪组不同层段页岩孔隙度对比(a)及与焦石坝地区焦页1井五峰组-龙马溪组孔隙度对比(b)

Fig. 7 Comparison of porosities between different members of the Wujiaping shale in Well HY1 in Hongxing area (a), and between the Wujiaping Formation and Wufeng-Longmaxi Formations in Well Jiaoye 1 in Jiaoshiba area (b)

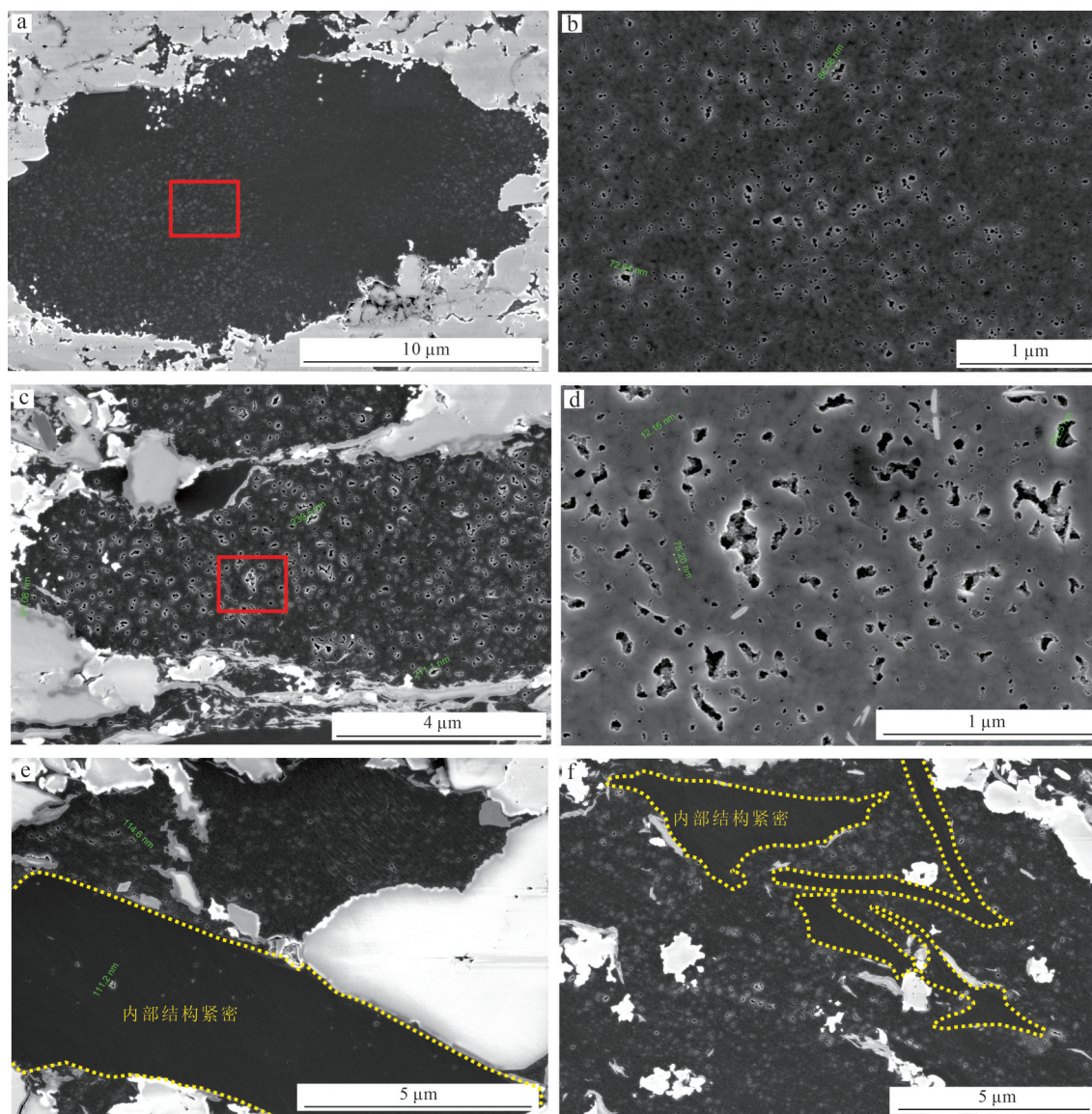


图8 红星地区HY1井吴家坪组页岩原始有机质中有机孔隙SEM照片

Fig. 8 SEM images of organic pores in original organic matter of the Wujiaping shale in Well HY1, Hongxing area
a, b. 硅质页岩相, 埋深 3 297. 2 m, 图b为图a中红框部分放大; c, d. 硅质页岩相, 埋深 3 303. 5 m, 图d为图c中红框部分放大;
e, f. 硅质页岩相, 埋深 3 294. 1 m

迁移有机质多是液态烃经过短距离迁移出原始有机质主体之后裂解生成的、充填于无机矿物颗粒之间的固体沥青。镜下观察表明, 吴二段页岩储层中迁移有机质主要赋存在3种储集空间内: ①充填于生屑内部, 如黄铁矿化海绵骨针腔体内(图9a, b); ②运移并充填至微粒状方解石粒内溶蚀孔内, 受方解石颗粒的保护, 溶蚀孔内固体沥青不受后期埋深压实作用的影响, 可以较好地保持原始形态, 多为球形或椭球形(图9c, d); ③赋存在方解石粒缘孔内(图9e)或草莓状黄铁矿晶间孔内(图9f), 其中方解石或黄铁矿颗粒多为致密接触, 局部方解石被溶蚀形成溶蚀孔隙, 孔隙形态不规则, 局部呈港湾状。固体沥青内有机质孔多呈蜂窝状,

受周围脆性矿物颗粒的支撑和保护^[31], 孔隙几何形状主要为圆形或椭圆形等, 无明显的长轴和短轴, 孔径变化较大, 主要介于几纳米至百纳米之间。

此外, 在结构紧密的高等植物碎片中, 可见分布不均匀的孔隙(图10), 这些孔隙与有机质热演化所伴生的有机质孔隙存在明显差异, 孔隙形状规则, 多为圆形或者椭圆孔, 孔径较大且相对均一, 孔径最大可达557.1 nm, 孔隙内壁多发育有闪锌矿, 孔隙彼此孤立, 连通性较差。前人研究认为, 这些孔隙可能是富氢镜质体经过细菌改造形成或者是从有机母质(树木或者叶片碎片或孢子)的原始细胞结构继承性演化而来, 与机械压实或有机质热演化过程无关^[32]。

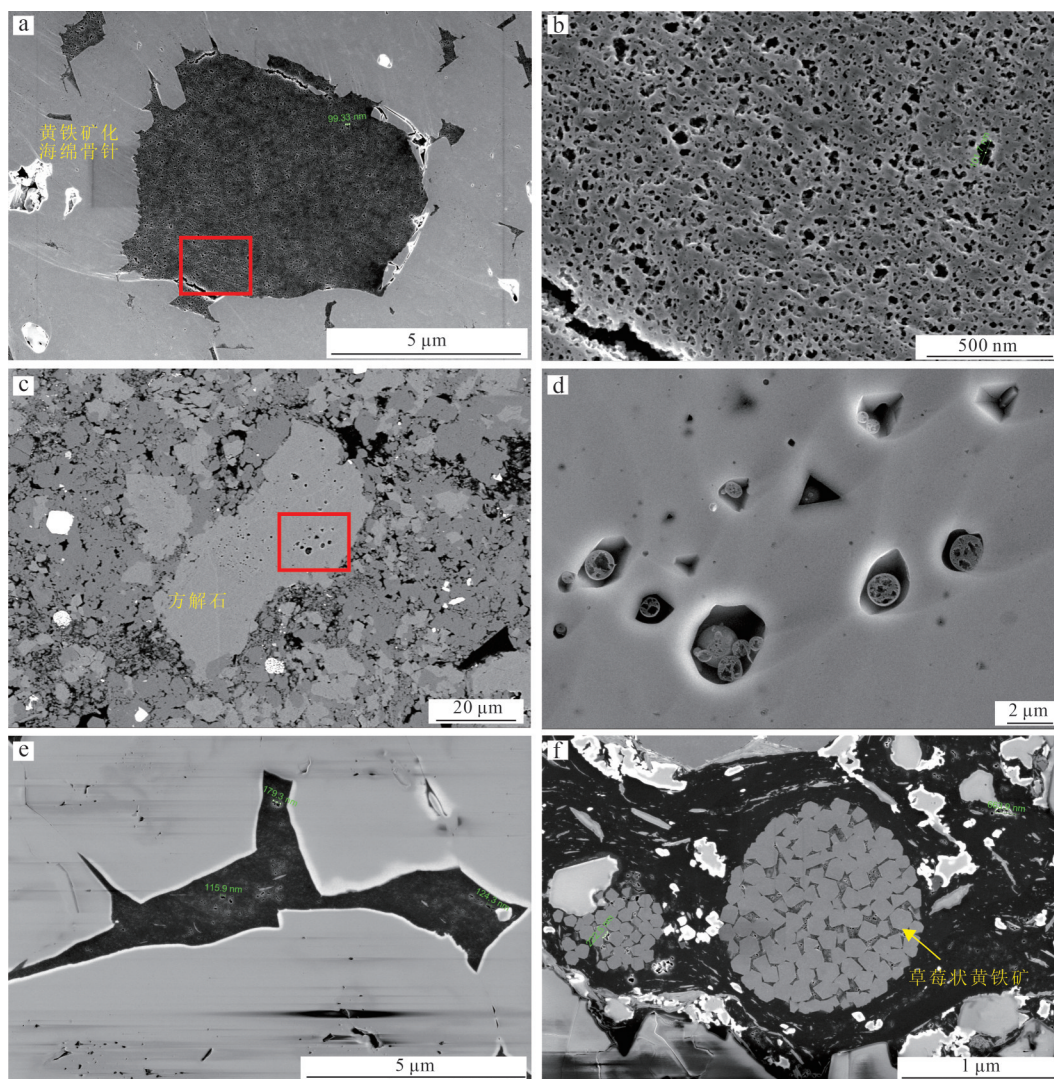


图9 红星地区HY1井吴家坪组页岩迁移有机质中有机质孔隙SEM照片

Fig. 9 SEM images of organic pores in migrated organic matter in the Wujiaping shale in Well HY1, Hongxing area

a, b. 埋深3 294.1 m, 硅质页岩相, 图b为图a中红框部分放大; c, d. 埋深3 291.6 m, 含灰硅质页岩相, 图d为图c中红框部分放大;

e, f. 埋深3 294.1 m, 硅质页岩相

5 页岩含气性特征

综合吴家坪组页岩总含气量(现场解析气量和损失气量的总和)、含气饱和度测试和气测录井数据,证实了不同层段页岩含气性差异。吴一¹亚段泥岩总含气量为1.57~1.68 m³/t,平均为1.63 m³/t;实测含气饱和度32.68%~41.89%,平均为38.44%;全烃含量为1.65%~2.26%,平均为2.09%;甲烷含量为1.03%~2.06%,平均为1.70%。吴二¹亚段页岩总含气量为0.30~9.10 m³/t,平均为4.60 m³/t;实测含气饱和度77.41%~96.32%,平均为88.38%;全烃含量为1.75%~5.82%,平均为4.42%;甲烷含量为1.60%~5.57%,平均为3.91%。吴二²亚段页岩总

含气量为1.20~7.20 m³/t,平均为4.50 m³/t;实测含气饱和度55.17%~94.61%,平均为86.65%;全烃含量为1.27%~5.98%,平均为4.08%;甲烷含量为1.23%~5.57%,平均为3.62%(表2)。

6 页岩气勘探前景

川东红星地区吴家坪组页岩具有良好的生烃和成储条件,但是纵向上不同层段页岩气富集条件存在一定的差异。吴一¹亚段潮坪-潟湖相页岩厚度较薄,有机质丰度较高,以Ⅲ型干酪根为主,储层物性较好,但以粘土矿物孔隙为主^[33];吴二段深水陆棚相页岩厚度较大,硅质及灰质等脆性矿物含量为63.2%,有机质丰度平均值高达8.78%,以腐泥型干酪根为主,储层

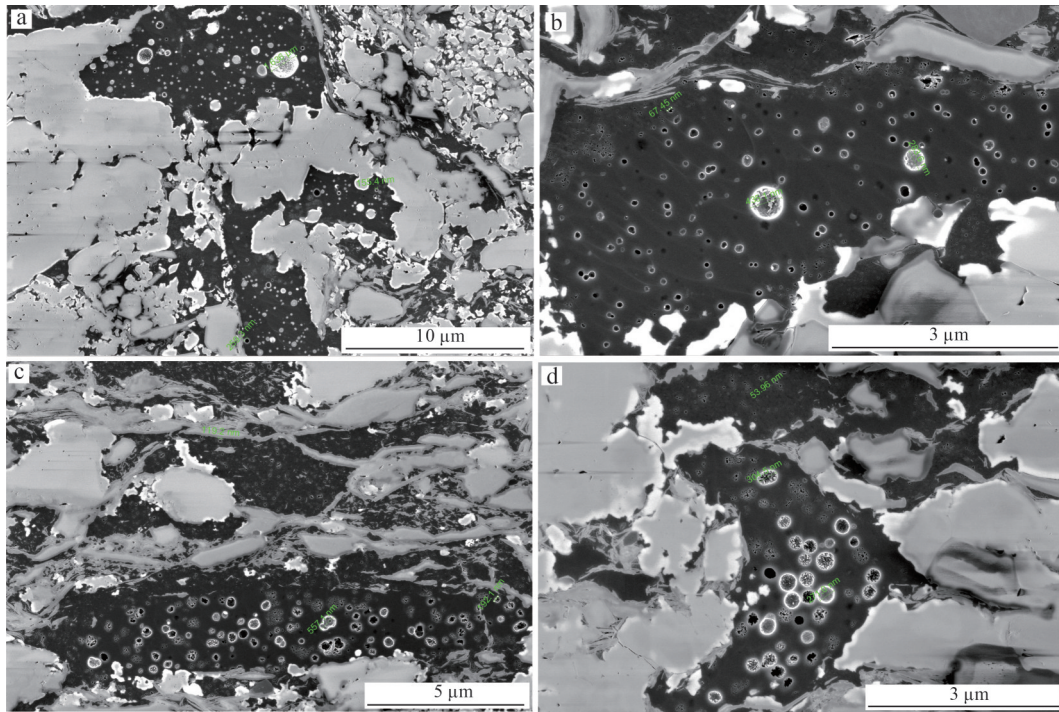


图10 红星地区HY1井吴家坪组页岩原始细胞结构孔隙SEM照片

Fig. 10 SEM images of pores related with primitive cell architecture in the Wujiaping shale in Well HY1, Hongxing area
a, b. 埋深3 294.05 m, 硅质页岩相; c. 埋深3 303.52 m, 硅质页岩相; d. 埋深3 305.11 m, 混合页岩相

表2 红星地区吴家坪组页岩气富集条件对比

Table 2 Comparison of shale gas enrichment conditions among different intervals in the Wujiaping Formation, Hongxing area

层段	沉积相	厚度/ m	硅质 含量/%	碳酸盐矿 物含量/%	粘土矿物 含量/%	TOC/%	镜质体 反射率/%	有机显微 组分	孔隙度/ %	孔隙 类型	气测全烃 含量/%	总含气量/ (m ³ ·t ⁻¹)	含气 饱和度/%
吴一 ¹ 亚段	潮坪-潟湖	4.7	15.47	3.30	53.20	5.19	2.1	镜质体为主	4.62	粘土矿物孔	2.09	1.6	38.44
吴二 ¹ 亚段	深水陆棚	8.5	35.82	15.18	26.30	11.23	2.1	藻类体为主	5.89	有机质孔	4.42	4.6	88.28
吴二 ² 亚段	深水陆棚	10.6	47.58	22.30	18.22	7.60	2.1	藻类体为主	5.38	有机质孔	4.08	4.5	86.65

物性较好且以有机质孔隙为主,整体表现出脆性矿物含量高、有机质丰度高、有机质类型好、储层品质好及含气性好等地质特征,具有优越的页岩气富集条件,有利于页岩气富集和高产^[34-35]。与吴二²亚段相比,吴二¹亚段沉积水体更深,富有机质页岩单层厚度更大,原生品质更好。岩心及成像测井资料证实吴家坪组不同层段页岩单层厚度和页理发育程度存在差异。吴一¹亚段页岩以块状为主,页理欠发育,吴二¹亚段页岩单层厚度较稳定,厚度介于5~10 cm,吴二²亚段沉积单层厚度变化较大,主要为薄层-块状,其中硅质页岩和灰质-硅质页岩厚度较薄,页理较发育,页岩单层厚度多小于10 cm,灰质页岩、泥灰岩和灰岩单层厚度较大,为10~40 cm。吴二¹亚段硅质页岩相与混合页岩相页理较发育,但吴一¹亚段和吴二²亚段页理基本不发育。吴一¹亚段页岩粘土矿物含量较高、硬度小、塑性强,岩石破坏强度较弱,可压裂性差,难以形成复杂

缝网^[36]。吴二¹亚段页岩和吴二²亚段页岩脆性矿物含量高、硬度大,页岩具有较好的可压裂性。吴二¹亚段实测杨氏模量为37.0 GPa,泊松比为0.23,抗压强度为201 MPa;吴二²亚段页岩实测杨氏模量最大值为44.8 GPa,泊松比为0.28,抗压强度为323 MPa。相比之下,吴二²亚段页岩整体具有高杨氏模量和高破裂压力,岩石抵抗变形能力强,压裂难度较大^[37-38]。岩心观察表明, HY1井吴二²亚段至少发育5条厚度大于20 cm的泥灰岩或灰岩夹层(图1),不利于压裂造缝的纵向延伸,弱化了压裂改造效果。综合页岩气富集条件和工程条件认为:吴二¹亚段页岩是川东红星地区二叠系页岩气勘探的有利层段。

晚二叠世吴家坪组沉积时期,海水从四川盆地南东和北东方向侵入,川东北巴中—达州地区到川东红星地区以及鄂西利川地区水体较深,深水陆棚沉积分布稳定^[13,39],吴二段富有机质页岩厚度普遍大于20 m,

且表现出向南西方向减薄、向北东方向增厚的趋势, TOC 普遍大于 3.0%, 烃源岩普遍处于过成熟阶段^[19], 储层有机质孔隙发育且物性较好, 普遍具有良好的页岩气富集物质。但是与志留系龙马溪组相比, 由于东吴运动造成吴家坪组沉积时期四川盆地大规模抬升成陆, 深水陆棚沉积的分布相对局限, 给页岩气勘探部署带来一定不确定性。此外, 华蓥山断裂与齐岳山断裂之间的川东高陡褶皱带宽向斜内吴家坪组埋藏较深, 部分地区埋深大于 4 000 m, 具有良好的保存条件, 但是靠近盆缘以及盆内的背斜核部的二叠系埋深较浅, 构造变形较强并伴有通天断裂发育, 保存条件也可能是决定这些地区吴家坪组页岩气能否富集和高产的重要因素之一。

7 结论

1) 吴家坪组主要发育深水陆棚相页岩和潮坪-潟湖相页岩, 岩相类型主要包括粘土质页岩相、混合页岩相、硅质页岩相和灰质页岩相。吴一¹亚段以粘土质页岩相为主, 吴二¹亚段主要发育混合页岩相和硅质页岩相, 吴二²亚段以硅质页岩相和灰质页岩相为主。

2) 吴二段混合页岩相和硅质页岩相具有脆性矿物含量高、有机质丰度高、有机质类型好、储层有机质孔隙发育且孔隙度高及含气性好等特征, 其中吴二¹亚段页岩气富集条件好于吴二²亚段。

3) 综合页岩气富集地质条件和页岩可压性特征认为, 吴二¹亚段富有机质页岩是红星地区吴家坪组页岩气勘探开发的有利层段。

参 考 文 献

- [1] 邹才能, 赵群, 丛连铸, 等. 中国页岩气开发进展、潜力及前景[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 1-14.
Zou Caineng, Zhao Qun, Cong Lianzhu, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 1-14.
- [2] 陈建平, 李伟, 倪云燕, 等. 四川盆地二叠系烃源岩及其天然气勘探潜力(一)——烃源岩空间分布特征[J]. 天然气工业, 2018, 38(5): 1-16.
Chen Jianping, Li Wei, Ni Yunyan, et al. The Permian source rocks in the Sichuan Basin and its natural gas exploration potential (Part 1): Spatial distribution of source rocks[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(5): 1-16.
- [3] 腾格尔, 秦建中, 付小东, 等. 川东北地区上二叠统吴家坪组烃源岩评价[J]. 古地理学报, 2010, 12(3): 334-245.
Tenger, Qin Jianzhong, Fu Xiaodong, et al. Hydrocarbon source rocks evaluation of the Upper Permian Wujiaping Formation in northeastern Sichuan area[J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(3): 334-245.
- [4] 聂海宽, 何治亮, 刘光祥, 等. 中国页岩气勘探发现状与优选方向[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(1): 16-38.
Nie Haikuan, He Zhiliang, Liu Guangxiang, et al. Status and direction of shale gas exploration and development in China [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(1): 16-38.
- [5] 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(二)——南方四套区域性海相烃源岩的地球化学特征[J]. 海相油气地质, 2009, 14(1): 1-15.
Liang Digang, Guo Tonglou, Chen Jianping, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, Southern China (Part 2): Geochemical characteristics of four suits of regional marine source rocks, South China[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2009, 14(1): 1-15.
- [6] 王鹏威, 陈筱, 刘忠宝, 等. 海相富有机质页岩储层压力预测方法——以涪陵页岩气田上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 1-10.
Wang Pengwei, Chen Xiao, Liu Zhongbao, et al. Reservoir pressure prediction for marine organic-rich shale: A case study of the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi shale in Fuling shale gas field [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 1-10.
- [7] 王鹏威, 张亚雄, 刘忠宝, 等. 四川盆地东部涪陵地区自流井组陆相页岩储层微裂缝发育特征及其对页岩气富集的意义[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(11): 1724-1734.
Wang Pengwei, Zhang Yaxiong, Liu Zhongbao, et al. Microfracture development at Ziliujing lacustrine shale reservoir and its significance for shale-gas enrichment at Fuling in eastern Sichuan [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(11): 1724-1734.
- [8] 郭旭升, 胡东风, 刘若冰, 等. 四川盆地二叠系海陆过渡相页岩气地质条件及勘探潜力[J]. 天然气工业, 2018, 38(10): 17-24.
Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Liu Ruobing, et al. Geological conditions and exploration potential of Permian marine-continent transitional facies shale gas in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(10): 17-24.
- [9] 刘光祥, 金之钧, 邓模, 等. 川东地区上二叠统龙潭组页岩气勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 481-487.
Liu Guangxiang, Jin Zhijun, Deng Mo, et al. Exploration potential for shale gas in the Upper Permian Longtan Formation in eastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 481-487.
- [10] 罗志立, 孙玮, 韩建辉, 等. 峨眉地幔柱对中上扬子区二叠纪成藏条件影响的探讨[J]. 地学前缘, 2012, 19(6): 144-154.
Luo Zhili, Sun Wei, Han Jianhui, et al. Effect of Emei mantle plume on the conditions of Permian accumulation in middle-upper Yangtze Area [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(6): 144-154.

- [11] 朱扬明, 顾圣啸, 李颖, 等. 四川盆地龙潭组高热演化烃源岩有机质生源及沉积环境探讨[J]. 地球化学, 2012, 41(1): 35-44.
- Zhu Yangming, Gu Shengxiao, Li Ying, et al. Biological organic source and depositional environment of over-mature source rocks of Longtan Formation in Sichuan Basin [J]. *Geochimica*, 2012, 41(1): 35-44.
- [12] 沈树忠, 张华, 张以春, 等. 中国二叠纪综合地层和时间框架[J]. 中国科学(地球科学), 2019, 49(1): 154-188.
- Shen Shuzhong, Zhang Hua, Zhang Yichun, et al. Permian integrative stratigraphy and timescale of China [J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2019, 49(1): 154-188.
- [13] 何治亮, 聂海宽, 李双建, 等. 特提斯域板块构造约束下上扬子地区二叠系龙潭组页岩气的差异性赋存[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(1): 1-15.
- He Zhiliang, Nie Haikuan, Li Shuangjian, et al. Differential occurrence of shale gas in the Permian Longtan Formation of Upper Yangtze region constrained by plate tectonics in the Tethyan domain [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 1-15.
- [14] 高平, 李双建, 何治亮, 等. 四川盆地广元-梁平古裂陷构造-沉积演化[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 784-799.
- Gao Ping, Li Shuangjian, He Zhiliang, et al. Tectonic-sedimentary evolution of Guangyuan-Liangping paleo-rift in Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(4): 784-799.
- [15] 周东升, 许林峰, 潘继平, 等. 扬子地块上二叠统龙潭组页岩气勘探前景[J]. 天然气工业, 2012, 32(12): 6-10.
- Zhou Dongsheng, Xu Linfeng, Pan Jiping, et al. Prospect of shale gas exploration in the Upper Permian Longtan Formation in the Yangtze Massif [J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(12): 6-10.
- [16] 冯庆来, 刘本培, 叶玫. 中国南方古特提斯阶段的构造古地理格局[J]. 地质科技情报, 1996, 15(3): 1-6.
- Feng Qinglai, Liu Benpei, Ye Mei. Tectonic paleogeographic pattern of paleotethyan stage in south China [J]. *Geological Science and Technology Information*, 1996, 15(3): 1-6.
- [17] 刘喜停, 马志鑫, 颜佳新. 扬子地区晚二叠世吴家坪期沉积环境及烃源岩发育的控制因素[J]. 古地理学报, 2010, 12(2): 244-252.
- Liu Xiting, Ma Zhixin, Yan Jiaxin. Sedimentary environments and controlling factors of hydrocarbon source rocks of the Late Permian Wujiaping Age in Yangtze area [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12(2): 244-252.
- [18] 何燧, 唐玄, 单衍胜, 等. 四川盆地及其周缘典型地区龙潭组页岩岩相划分对比及特征[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(2): 174-190.
- He Yi, Tang Xuan, Shan Yansheng, et al. Lithofacies division and comparison and characteristics of Longtan Formation shale in typical areas of Sichuan Basin and its surrounding [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(2): 174-190.
- [19] 赵培荣, 高波, 郭战峰, 等. 四川盆地上二叠统海陆过渡相和深水陆棚相页岩气的勘探潜力[J]. 石油实验地质, 2020, 42(3): 17-26.
- Zhao Peirong, Gao Bo, Guo Zhanfeng, et al. Exploration potential of marine-continental transitional and deep-water shelf shale gas in Upper Permian, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(3): 17-26.
- [20] 梁新权, 周云, 蒋英, 等. 二叠纪东吴运动的沉积响应差异: 来自扬子和华夏板块吴家坪组或龙潭组碎屑锆石 LA-ICPMS-U-Pb 年龄研究[J]. 岩石学报, 2013, 29(10): 3592-3606.
- Liang Xinquan, Zhou Yun, Jiang Ying, et al. Difference of sedimentary response to Dongwu Movement: Study on LA-ICPMS U-Pb ages of detrital zircons from Upper Permian Wujiaping or Longtan Formation from the Yangtze and Cathaysia blocks [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(10): 3592-3606.
- [21] 曹清古, 刘光祥, 张长江, 等. 四川盆地晚二叠世龙潭期沉积环境及其源控作用分析[J]. 石油实验地质, 2013, 35(1): 36-41.
- Cao Qinggu, Liu Guangxiang, Zhang Changjiang, et al. Sedimentary environment and its controlling on source rocks during late Permian in Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2013, 35(1): 36-41.
- [22] 田雨, 张兴阳, 何幼斌, 等. 四川盆地晚二叠世吴家坪期岩相古地理[J]. 古地理学报, 2010, 12(2): 164-176.
- Tian Yu, Zhang Xingyang, He Youbin, et al. Lithofacies palaeogeography of the Late Permian Wujiaping Age of Sichuan Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12(2): 164-176.
- [23] Nie H K, Jin Z J, Sun C X, et al. The organic matter types of the Wufeng and Longmaxi Formations in the Sichuan Basin, South China: Implications for the formation of organic matter pores [J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(9): 1-45.
- [24] 魏志福, 王永莉, 吴陈君, 等. 四川盆地上二叠统龙潭组烃源岩的地球化学特征及对有机质来源和沉积环境的指示意义[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(8): 1613-1618.
- Wei Zhifu, Wang Yongli, Wu Chenjun, et al. Geochemical characteristics of source rock from Upper Permian Longtan Formation in Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(8): 1613-1618.
- [25] 王鹏威, 刘光祥, 刘忠宝, 等. 川东南-黔西北地区上二叠统龙潭组海陆过渡相页岩气富集条件[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(3): 431-440.
- Wang Pengwei, Liu Zhongbao, Liu Guangxiang, et al. Shale gas enrichment conditions and primary controllers of Upper Permian Longtan transitional shale in Southeast Sichuan to Northwest Guizhou [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(3): 431-440.
- [26] 高凤琳, 王成锡, 宋岩, 等. 氩离子抛光-场发射扫描电镜分析方法在识别有机显微组分中的应用[J]. 石油实验地质, 2021, 43(2): 360-367.
- Gao Fenglin, Wang Chengxi, Song Yan, et al. Ar-ion polishing FE-SEM analysis of organic maceral identification [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2021, 43(2): 360-367.
- [27] 刘忠宝, 胡宗全, 刘光祥, 等. 四川盆地东北部下侏罗统自流井组陆相页岩岩储层孔隙特征及形成控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(1): 136-145.
- Liu Zhongbao, Hu Zongquan, Liu Guangxiang, et al. Pore characteristics and controlling factors of continental shale

- reservoirs in the Lower Jurassic Ziliujing Formation, northeastern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 136-145.
- [28] 高凤琳, 宋岩, 梁志凯, 等. 陆相页岩有机质孔隙发育特征及成因——以松辽盆地长岭断陷沙河子组页岩为例[J]. *石油学报*, 2019, 40(9): 1030-1044.
- Gao Fenglin, Song Yan, Liang Zhikai, et al. Development characteristics of organic pore in the continental shale and its genetic mechanism: A case study of Shahezi Formation shale in the Changling fault depression of Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(9): 1030-1044.
- [29] Ardakani O H, Sanei H, Ghanizadeh A, et al. Do all fractions of organic matter contribute equally in shale porosity? A case study from Upper Ordovician Utica Shale, southern Quebec, Canada [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 92: 794-808.
- [30] 腾格尔, 卢龙飞, 俞凌杰, 等. 页岩有机质孔隙形成、保持及其连通性的控制作用[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(4): 687-699.
- Borjigin Tenger, Lu Longfei, Yu Lingjie, et al. Formation, preservation and connectivity control of organic pores in shale[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(4): 687-699.
- [31] 聂海宽, 何治亮, 刘光祥, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气优质储层成因机制[J]. *天然气工业*, 2020, 40(6): 31-41.
- Nie Haikuan, He Zhiliang, Liu Guangxiang, et al. Genetic mechanism of high-quality shale reservoirs in the Wufeng-Longmaxi Fms in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(6): 31-41.
- [32] Ko L, Loucks R, Zhang T, et al. Pore and pore network evolution of Upper Cretaceous Boquillas (Eagle Ford-equivalent) mudrocks: Results from gold tube pyrolysis experiments[J]. *AAPG Bulletin*, 2016, 100(1-11): 1693-1722.
- [33] 何文渊. 松辽盆地古龙页岩油储层粘土中纳米孔和纳米缝的发现及其意义[J]. *大庆石油地质与开发*, 2022, 41(3): 1-13.
- He Wenyuan. Discovery and significance of nano pores and nano fractures of clay in Gulong shale oil reservoir in Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2022, 41(3): 1-13.
- [34] 张艺钟, 张茂林, 鞠斌, 等. 修正流通面积的页岩有机纳米孔真实气体运移模型[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(5): 148-155.
- Zhang Yizhong, Zhang Maolin, Ju Bin, et al. Real gas migrating model for shale organic nanopores with modified flow area [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(5): 148-155.
- [35] 张宇. 页岩孔径结构对甲烷吸附能力的影响[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(4): 169-174.
- Zhang Yu. Influences of the shale pore structure on the methane adsorption capacity[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(4): 169-174.
- [36] 郑斌嵩. 晚二叠世—早三叠世鄂西海槽沉积演化及其大地构造意义——兼论华南 PTB 斑脱岩的来源[D]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- Zheng Binsong. Sedimentary evolution of the western Hubei Trough and its tectonic implications — With discussions on the source of the PTB Bentonite in South China [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.
- [37] 龙章亮, 温真桃, 李辉, 等. 一种基于灰色关联分析的页岩储层可压性评价方法[J]. *油气藏评价与开发*, 2020, 10(1): 37-42.
- Long Zhangliang, Wen Zhentao, Li Hui, et al. An evaluation method of shale reservoir crushability based on grey correlation analysis [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2020, 10(1): 37-42.
- [38] 王乔, 李虎, 刘廷, 等. 页岩脆性的表征方法及主控因素[J]. *断块油气田*, 2020, 27(4): 458-463.
- Wang Qiao, Li Hu, Liu Ting, et al. Characterization method and main controlling factors of shale brittleness [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2020, 27(4): 458-463.
- [39] 舒志国, 周林, 李雄, 等. 四川盆地东部复兴地区侏罗系自流井组东岳庙段[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(1): 212-223.
- Shu Zhiguo, Zhou Lin, Li Xiong, et al. Geological characteristics of gas condensate reservoirs and their exploration and development prospect in the Jurassic continental shale of the Dongyuemiao Member of Ziliujing Formation, Fuxing area, eastern Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 212-223.

(编辑 张玉银)