

中国南方扬子地区二叠系页岩气勘探潜力与方向

金之钧^{1,2}, 刘光祥³, 王鹏威^{2,3,4}, 聂海宽^{2,3,4}, 李敏^{2,3,4}, 王冠平^{2,3,4}

(1. 北京大学 能源研究院, 北京 100871; 2. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206; 3. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 102206; 4. 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室, 北京 102206)

摘要:中国南方扬子地区二叠系页岩气虽然已获得重要勘探突破,但受限于复杂沉积相变、差异化源-储条件以及构造保存条件等多种因素,其勘探潜力与下一步方向仍不十分清楚。系统研究了二叠系页岩特征及分布、勘探潜力与页岩气保存条件,提出了勘探前景与方向。研究表明:二叠系共发育海相和海-陆过渡相2种类型页岩,孤峰组、龙潭组/吴家坪组和大隆组3套富有机质页岩地层。页岩展布受陆缘(内)裂陷和克拉通内拗陷盆地控制,海-陆过渡相龙潭组页岩主要分布在扬子西部和东南部克拉通拗陷盆地,海相孤峰组、吴家坪组和大隆组页岩主要发育在扬子北缘陆缘(内)裂陷盆地。海相页岩具有脆性矿物含量高、有机碳含量高、有机孔发育、含气量高的特点,海-陆过渡相页岩具有有机碳含量高、热演化适中、无机孔发育、含气量总体较低且变化范围大的特点。构造活动和保存条件是控制扬子地区二叠系页岩气勘探潜力的重要因素,四川盆地、鄂西地区、江汉盆地和苏北盆地等构造变形程度弱的地区,保存条件好,具有较大勘探潜力。建议加强页岩细粒沉积相带、富集动态演化规律、保存条件综合评价指标以及适应性储层改造技术体系等4个方面研究,攻克二叠系页岩勘探开发面临的地质工程难题,加快南方扬子地区二叠系页岩气勘探开发。

关键词:富集因素;勘探潜力;页岩气;二叠系;扬子地区

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

Exploration potential and targets of the Permian shale gas in the Yangtze region, South China

JIN Zhijun^{1,2}, LIU Guangxiang³, WANG Pengwei^{2,3,4}, NIE Haikuan^{2,3,4}, LI Min^{2,3,4}, WANG Guanping^{2,3,4}

(1. Institute of Energy, Peking University Beijing 100871, China; 2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 102206, China; 3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 4. Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production Technology, SINOPEC, Beijing 102206, China)

Abstract: Despite significant exploration breakthroughs, the exploration potential and targets of the Permian shale gas in the Yangtze region, South China remain poorly understood due to factors such as complex sedimentary facies variation, differentiated source rock-reservoir combination conditions, and varying tectonic activity-induced preservation conditions. A systematic investigation of the characteristics and distribution, exploration potential, and preservation conditions of the Permian shale sequences, proposes the exploration prospects and targets of the Permian shale gas in the Yangtze region. The results indicate that the studied Permian shales in the Yangtze region are of two types, namely the marine and marine-continental transitional shales, which comprise three suites of organic-rich shales, i. e., the Gufeng, Longtan (Wujiaping), and Dalong formations. The shale distribution is governed by the continental-margin (intracontinental) rift basins and intracratonic depression basins. Specifically, the marine-continental transitional shales of the Longtan Formation are mainly seen in the intracratonic depression basins in the western and southeastern parts of the Yangtze region, while the marine shales of the Gufeng (Wujiaping) and Dalong formations occur predominantly in the continental-margin (intracontinental) rift basins along the northern margin of the Yangtze region. The marine shales exhibit high brittle mineral content, high total organic carbon (TOC) content, well-developed organic pores, and high gas content. In contrast, the marine-continental transitional shales show high TOC content, moderate

收稿日期:2024-07-26;修回日期:2025-03-08。

第一作者简介:金之钧(1957—),男,中国科学院院士,石油地质理论和能源战略。E-mail: jinzhj1957@pku.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(42090025, 42172151)。

thermal evolution, well-developed inorganic pores, and generally low, highly variable gas content. Tectonic activities and associated preservation conditions represent critical factors controlling the exploration potential of the Permian shale gas in the Yangtze region. Areas with weak tectonic deformations, such as the western Hubei Province and the Sichuan, Jiangnan, and Subei basins, exhibit favorable preservation conditions, thus holding considerable exploration potential. To address geological engineering challenges and accelerate the exploration and production of the Permian shale gas in the Yangtze region, it is recommended to intensify research on fine-grained sedimentary facies zone delineation, dynamic evolutionary patterns of shale gas enrichment, comprehensive evaluation metrics for shale gas preservation conditions, and adaptive technical systems for reservoir stimulation.

Key words: enrichment factor, exploration potential, shale gas, Permian, Yangtze region

引用格式:金之钧,刘光祥,王鹏威,等.中国南方扬子地区二叠系页岩气勘探潜力与方向[J].石油与天然气地质,2025,46(2):335-347. DOI: 10.11743/ogg20250201.

JIN Zhijun, LIU Guangxiang, WANG Pengwei, et al. Exploration potential and targets of the Permian shale gas in the Yangtze region, South China [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(2): 335-347. DOI: 10.11743/ogg20250201.

全球页岩根据沉积环境可分为海相、陆相以及海-陆过渡相3种类型。其中,海相页岩勘探进展较快,在北美的泥盆系、密西西比系和宾夕法尼亚系率先实现页岩气资源的商业开发,中国上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组海相页岩气也获得规模开发,海-陆过渡相页岩气和陆相页岩气也都展现了良好的资源潜力^[1-5]。近年来的勘探发现显示,中国二叠系页岩气资源量(地质资源量 $17.81 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可采资源量 $2.67 \times 10^{12} \text{ m}^3$)与五峰组-龙马溪组页岩气资源量相当(地质资源量 $16.89 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可采资源量 $3.20 \times 10^{12} \text{ m}^3$),广泛分布于扬子地区,是页岩油气增储上产的重要接替阵地^[6-7]。该层系主要发育海相和海-陆过渡相页岩气,是目前页岩气的重点研究领域。基于中国二叠系页岩气资源的勘探历史可知,自2014年起,中国地质调查局和湖北省地质调查院等多家单位就一直持续关注扬子地区,鄂西及周缘的BY1, EJY1, EWD2, HD1, EED1, EED2及EJD3等多口探井已证实二叠系大隆组页岩气具有良好的勘探前景^[7]。2020年,中国石化江汉油田分公司在红星地区部署实施的HY1井在二叠系吴家坪组获得天然气产量 $8.90 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,实现了该层系海相页岩气的重大勘探突破;2022年,中国石化在普光部署的雷页1井在大隆组页岩层系获 $42.66 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流;2023年,中国石化在红星地区部署的红页茅1井在二叠系孤峰组页岩层段获 $6.40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业气流^[9-14]。

目前,中国二叠系页岩气资源主要分布在扬子地区,主要为发育海相和海-陆过渡相页岩气。其中,在龙潭组/吴家坪组沉积时期,以南川—丁山—东溪—林滩场为界,以北发育海相页岩,以南发育海-陆过渡相页岩。扬子板块二叠系主要发育大隆组、龙潭组/吴家

坪组以及孤峰组3套页岩层系,区域内横跨了深水陆棚、浅水陆棚、滨岸沼泽、碳酸盐台地以及潮坪-潟湖等多个沉积相带,相变较复杂;受周缘构造环境控制,二叠纪沉积作用还受到了火山活动、上升洋流、热液活动、泛大陆裂解与聚合以及峨眉山玄武岩喷发等多种地质事件的影响,导致不同岩相沉积-成烃-成岩演化差异大;发育拗陷盆地、断陷槽盆地以及断-拗盆地等多种被动大陆边缘构造盆地类型,构造条件复杂多样,以上这些差异导致扬子地区二叠系页岩气富集规律异常复杂,至今还不明晰。虽然局部地区二叠系页岩气勘探已经取得一定成效,但由于整体勘探程度较低,仍需进一步开展深入研究,以期为中国二叠系页岩气的勘探开发提供理论指导。因此,本文在系统梳理扬子地区富有机质页岩发育构造背景与分布特征的基础上,系统总结了二叠系页岩生烃潜力、储集性、含气性以及可压性,结合保存条件进一步分析该层系页岩气勘探潜力以及面临的主要问题,以期对中国二叠系页岩气的勘探开发有所裨益。

1 富有机质页岩构造背景与分布特征

1.1 构造背景

在二叠纪的中国南方扬子地区,由于古隆起和泛大陆裂解,栖霞组沉积早期的碳酸盐台地沉积环境转变为茅口组沉积晚期碳酸盐台地-台间(裂陷)盆地沉积格局。随着裂陷活动的进一步加强,形成了隆-凹相间的多套优质海相页岩和海-陆过渡相页岩。二叠纪是扬子地区古特提斯演化的转折期,期间发生了洋壳扩张-俯冲消减和局部碰撞,不同地区页岩有不同

的形成构造背景^[15]。孤峰组页岩沉积于扬子地块北缘勉略洋-苏鲁洋扩张扬子克拉通北缘的被动大陆边缘构造环境,属于陆缘伸展裂离形成的深水盆地相沉积。龙潭组/吴家坪组沉积时期,华夏古陆和川滇古陆仍处于大面积隆起状态,边缘广泛发育了河流、湖泊、滨岸、三角洲以及陆棚等多个沉积体系,扬子克拉通地区自西向东依次发育陆地-碳酸盐台地-斜坡盆地体系;大隆组/长兴组在龙潭组沉积时期受到短暂挤压后再次裂离拉张,并由于海平面全面上升导致深水盆地沉积环境进一步扩展,华南整体台-盆相间格局与中二叠世孤峰组沉积时期相似,北部深水盆地沉积了大隆组页岩,而台地相沉积了长兴组灰岩。整体而言,该时期页岩主要沉积于陆缘(内)裂陷盆地和克拉通内拗陷盆地,是目前页岩气勘探的热点(图1)。

1.2 分布特征

扬子地区二叠系整体受控于泛大陆裂解、峨眉山玄武岩喷发以及东吴运动等多期构造运动和海平面升降,发育了孤峰组、龙潭组/吴家坪组以及大隆组页岩

3套优质页岩。3套富有机质页岩均在扬子地区北部叠合分布(图2),而中部的湘中地区和湘南地区具龙潭组与大隆组叠合分布特征,东南部仅发育龙潭组富有机质页岩页岩(图3)。

孤峰组页岩仅发育在扬子北裂陷盆地,是一套盆地-深水陆棚相沉积。上扬子北部岩性以硅质页岩和钙质泥岩为主,夹灰岩层,厚度为10~20 m;中扬子北部岩性以硅质页岩、炭质页岩和黑色页岩页岩为主,厚度为20~100 m,呈近WE向展布;下扬子北部岩性以炭质页岩、硅质页岩、钙质页岩和黑色页岩页岩为主,夹薄层砂岩和灰岩透镜体,发育多层极薄层火山凝灰岩,厚度为10~100 m,主体呈NE-SW向展布,发育2个沉积中心,分别位于石台一带和镇江一带。

龙潭组和吴家坪组为同期异相沉积。龙潭组为海-陆过渡相沉积,主要分布于扬子西部和东南部克拉通拗陷盆地,沉积微相为湖坪-潟湖相和滨岸沼泽相。扬子西部龙潭组页岩页岩厚度为20~100 m,乐至一带最厚,总体呈近NS向展布;扬子东南部龙潭组受印支运动改造,主要分于湘中、湘南及赣西地区,其

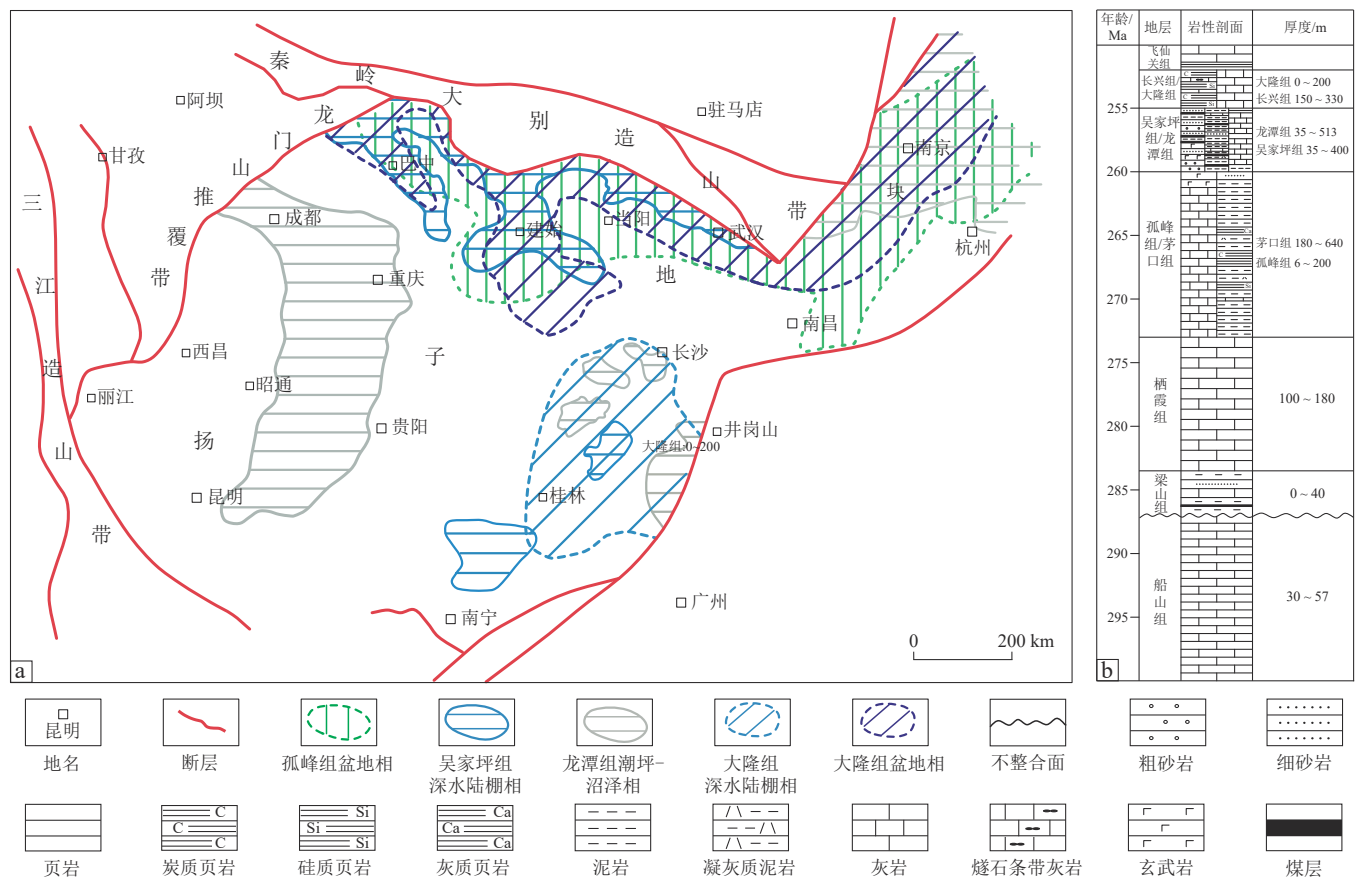


图1 扬子地区二叠系页岩分布(a)及地层综合柱状图(b) (修改自文献[15-16])

Fig. 1 Distribution map (a) and composite stratigraphic column (b) of the Permian shales in the Yangtze region (modified after references [15-16])

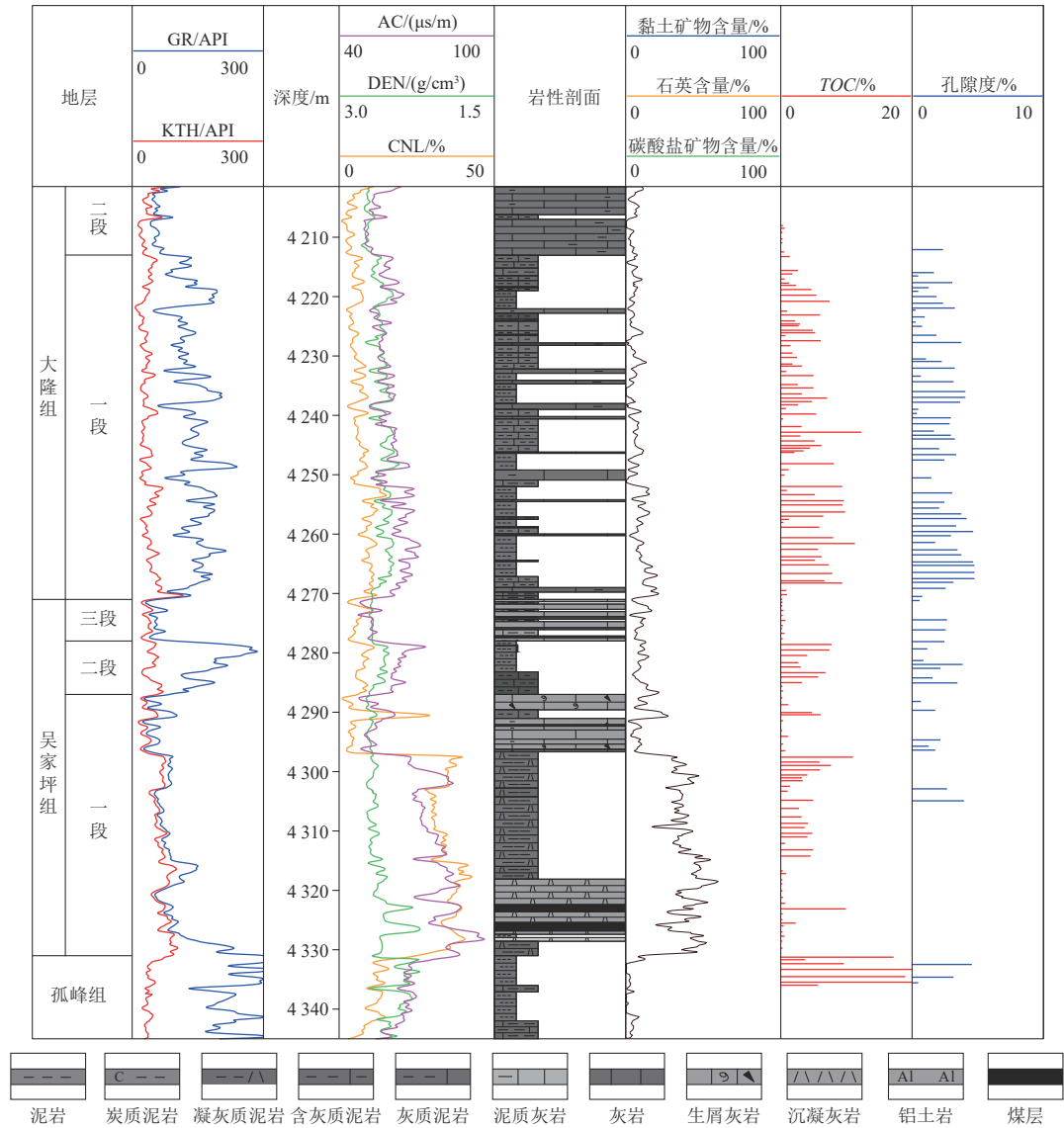


图2 川东北地区雷页1井二叠系海相页岩发育特征

Fig. 2 Development characteristics of the Permian marine shales in well LY1, northeastern Sichuan Basin

中湘中地区暗色泥页岩厚度为10~100 m,湘南地区厚度相对较大,超过250 m,而赣西地区(乐平组)最厚,可达500 m。吴家坪组页岩为海相沉积,主要分布于扬子北部的陆缘裂陷盆地(广元-武汉陆缘裂陷)及陆内裂陷(开江-梁平陆内裂陷和建始陆内裂陷)和扬子南部的陆内裂陷盆地(柳州-永州陆内裂陷),沉积微相为深水陆棚相。广元-武汉陆缘裂陷盆地属欠补偿盆地,页岩页岩厚度相对较小(20~40 m);梁平-开江陆内裂陷和建始陆内裂陷页岩略厚,厚度一般为40~80 m;扬子南部柳州-永州陆内裂陷盆地页岩页岩厚度较大,永州地区为50~150 m,柳州地区为50~200 m。

大隆组为海相沉积,主要分布在扬子北部陆缘(内)裂陷盆地内,沉积微相为深水盆地相,岩性组合为

黑-灰黑色硅质岩、硅质页岩夹黏土质页岩(局部夹硅质灰岩或泥质灰岩)。该套页岩的富有机质页岩展布面貌与龙潭组有一定的继承性,但厚度明显较薄,一般小于40 m;下扬子区南京一带大隆组页岩厚度为20~50 m,呈NE-SW向展布;湘中地区和湘南地区大隆组页岩厚度为10~50 m。

2 页岩气勘探潜力

2.1 生气潜力

有机质类型、丰度和成熟度均可影响页岩生气产率。二叠系海相页岩有机质丰度高,有机质类型以I—II型干酪根为主,具优越的生烃潜力(表1)^[18-19]。

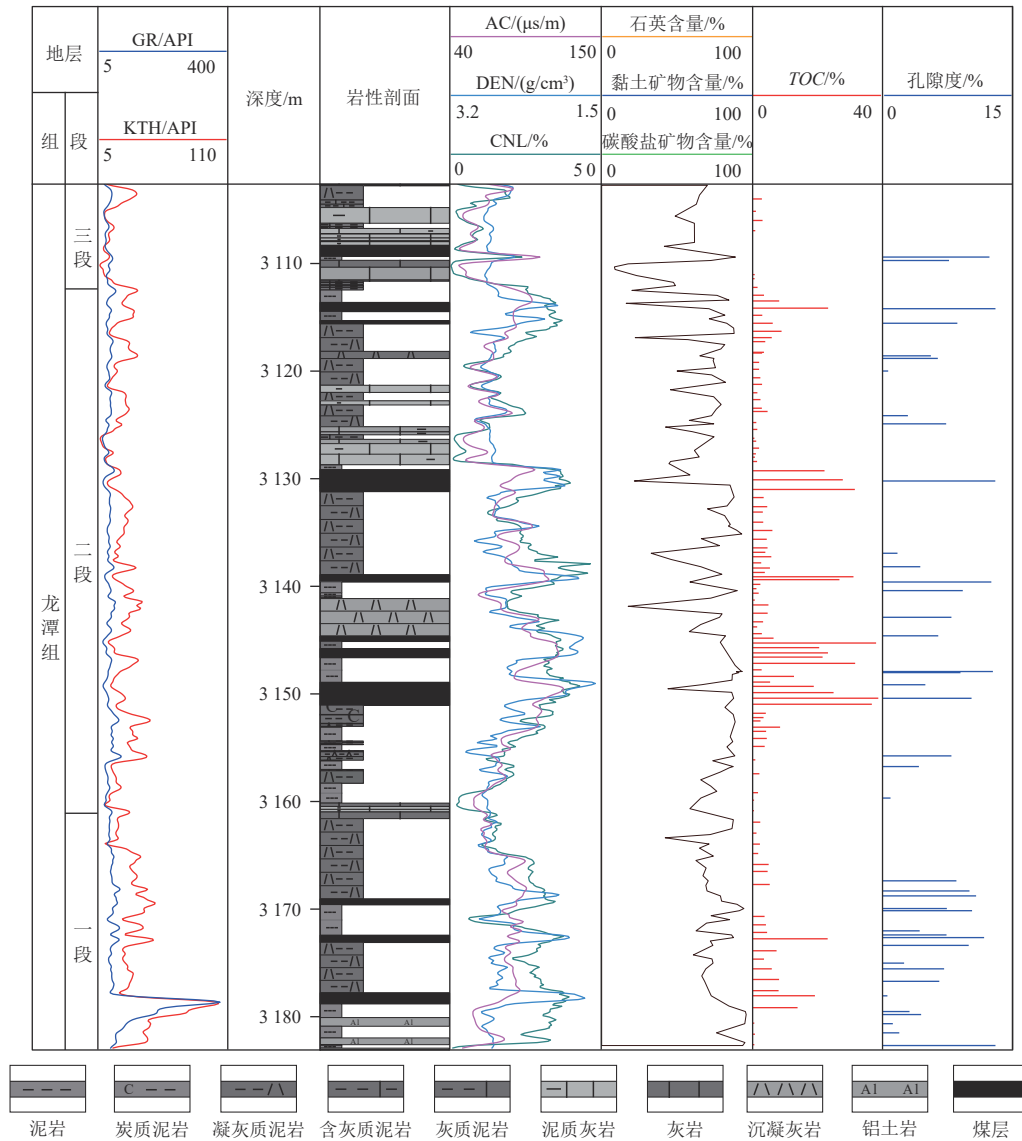


图3 川东北地区山页1井二叠系海-陆过渡相页岩发育特征

Fig. 3 Development characteristics of the Permian marine-continental transitional shales in well SY1, northeastern Sichuan Basin

开江-梁平裂陷槽内深水陆棚相大隆组富有机质页岩有机质类型以Ⅰ型和Ⅱ₁型干酪根为主,平均残余有机碳含量(TOC)为5.92%,平均生烃潜量($S_1 + S_2$)为10.32 mg/g,生气强度达 $(21 \sim 165) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,页岩气资源量约为 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$,具备形成大型页岩气田的气源条件^[20]。鄂西裂陷盆地大隆组页岩主要为盆地相沉积,沉积厚度大于20 m,TOC大于2%,有机质成熟度(镜质体反射率 R_0)约2%^[21-22],表现出良好的生气潜力。下扬子陆内裂陷盆地大隆组页岩TOC介于0.66%~5.82%, $S_1 + S_2$ 分布于0.25~62.43 mg/g,氯仿沥青“A”含量为0.02%~0.14%,总烃含量为 $(29.21 \sim 875.53) \times 10^{-6}$,黑色页岩以Ⅱ₂型干酪根为主,综合评价为较好的烃源岩。吴家坪组页岩与大隆组具有相似的源岩品质:TOC主要分布在0.17%~

8.72%,平均值为3.04%,干酪根类型以Ⅱ₁型为主, $S_1 + S_2$ 介于0.11~7.41 mg/g,平均值为0.84 mg/g, R_0 高达2.6%~3.8%,总生气强度为 $(0.5 \sim 4.5) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,页岩气有利区主要分布在达州-梁平一带,面积约为7000 km²,页岩气资源量约为 $7000 \times 10^8 \text{ m}^3$,展现了较好的源岩品质和勘探潜力^[9,23-24]。裂陷盆地相孤峰组烃源岩的TOC介于0.50%~31.00%,平均值为5.08%,干酪根类型以Ⅱ型为主^[25];川北地区孤峰组页岩的生烃强度为 $(5 \sim 25) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ^[26]。

龙潭组海-陆过渡相页岩厚度大,有机质类型以Ⅲ型干酪根为主,生烃强度大,具备形成页岩气藏的气源基础。如川西南区龙潭组页岩厚度为40~130 m,平均TOC大于2.00%,局部大于6.00%;有机显微组分以镜质组占绝对优势,富氢组分含量较低,有机质类

表1 扬子地区二叠系页岩有机地球化学参数

Table 1 Statistics of organic geochemical parameters of the Permian shales in the Yangtze region

地区	层位	厚度/m	有机质类型	TOC/%	R_o /%	数据来源
龙门山	大隆组	59.5	Ⅱ ₁ , Ⅱ ₂	2.50 ~ 8.96/4.49	1.61 ~ 1.70/1.69	文献[18]
	孤峰组	30.0	Ⅱ ₁	2.00 ~ 9.00/5.00(30)	—	
鄂西	大隆组	39.0	Ⅱ ₂	0.29 ~ 14.20/6.16(52)	1.77 ~ 2.62/2.34	鄂建页1井
	大隆组	31.5	I	0.70 ~ 13.10/6.10	1.81 ~ 2.62/2.38	鹤地1井
	龙潭组	20.0	Ⅲ	2.27 ~ 12.96/8.16(6)	1.80 ~ 2.68/2.43	高地1井
	孤峰组	24.0	Ⅲ	1.20 ~ 26.00/9.90	1.82 ~ 2.75/2.46	鹤地1井
鄂西—渝东	大隆组	15.0	Ⅱ ₁	4.20 ~ 5.80/5.00(7)	2.01 ~ 2.11/2.05	盐志1井
	龙潭组	23.8	Ⅱ ₁	1.16 ~ 28.94/8.45	2.22 ~ 2.82/2.56	建页3井
	孤峰组	33.1	Ⅱ ₁	1.86 ~ 20.5/12.82(14)	2.31 ~ 3.18/2.69	建页3井
川东北	大隆组	20.0 ~ 35.0	Ⅱ ₁	0.06 ~ 23.66/5.45	1.50 ~ 3.00/2.00	雷页1井
	龙潭组	38.0	Ⅱ ₂ —Ⅲ	0.53 ~ 18.27/3.40	2.40 ~ 3.98	大湾4井
下扬子	大隆组	40.0 ~ 70.0	Ⅱ ₂ —Ⅲ	1.71 ~ 9.28/4.13	1.10 ~ 2.00/1.35	文献[19]
	龙潭组	40.0 ~ 50.0	Ⅱ ₂ —Ⅲ	1.18 ~ 12.76/8.02(20)	1.50 ~ 3.03/2.52	
	孤峰组	30.0 ~ 90.0	Ⅱ ₁ —Ⅲ	2.00 ~ 9.00	1.50 ~ 2.00	
湘中	大隆组	54.0	Ⅱ ₁ —Ⅱ ₂	0.69 ~ 6.79/2.92(45)	1.22 ~ 1.37	湘页1井
	龙潭组	26.0	Ⅱ ₂ —Ⅲ	1.72 ~ 10.29/5.23(5)	1.41 ~ 1.42	文献[19]
川东南	龙潭组	50.4	Ⅲ	0.71 ~ 16.59/3.84	1.96 ~ 2.40/2.22	山页1井
黔西	龙潭组	35.2	Ⅲ	1.34 ~ 6.76/3.54	2.18 ~ 3.29/2.77	织8井

注:表中数据格式为最小值~最大值/平均值(样品个数);“—”表示无统计数据。

型为Ⅱ₂—Ⅲ型干酪根, R_o 介于2.0%~2.7%,处于生气高峰,生气强度为 $(10 \sim 50) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,同样具备形成页岩气的气源条件。

2.2 储集能力

二叠系海相页岩具有较低的孔隙度和较高的有机孔发育程度,而海—陆过渡相页岩具有较高的孔隙度和较高的无机孔发育程度^[27-28]。川东北地区鄂西—渝东地区吴家坪组页岩孔隙度平均值在4.8%~4.9%,而川东北地区川东南地区龙潭组页岩孔隙度平均值大于8.0%(表2)。川东北地区HY1井吴家坪组海相页岩有机孔和无机孔均较为发育,镜质组内有机孔十分发育,有机孔呈不规则状,孔径为纳米级;充填于无机矿物之间的沥青中的有机孔较为发育,孔隙多为圆形和椭圆形,孔径相对较大;无机孔主要见粒间孔、粒内孔、黏土矿物层间孔和黄铁矿晶间孔(图4a—e)。SY1井龙潭组海—陆过渡相页岩有机孔发育程度较低,有机质局部发

育纳米—微米级孔隙,无机孔相对发育,以黏土矿物孔、菱铁矿或黄铁矿晶间孔和微裂缝为主(图4f—i)。

2.3 页岩含气性

二叠系海相页岩和海—陆过渡相页岩吸附能力差异较小,均受控于有机质含量、孔隙结构与矿物组成。鄂西鹤峰地区大隆组页岩样品在14.5 MPa压力下吸附气量为0.70~2.95 m³/t,平均值为2.08 m³/t^[21];湘中坳陷大隆组页岩样品的吸附气量差异较大,分布在0.75~8.60 m³/t(实验压力约为20.0 MPa),平均值达4.59 m³/t。在30.0 MPa高压下,恩施利川地区吴家坪组页岩的吸附气量为2.08~3.96 m³/t,平均值为3.06 m³/t^[29];川东地区龙潭组页岩在相同实验压力下吸附气量分布在2.19~7.22 m³/t,平均值超过3.50 m³/t(图5a)。随着TOC增加,二叠系页岩吸附气量呈增加趋势(图5b)。海相页岩的有机孔相对发育,提供了大量的甲烷吸附位点,而海—陆过渡相页岩虽然有机孔相对不发育,但是其所含Ⅲ型干酪根的芳香族和长链脂肪族结构能够显著提高对甲烷的吸附能力。黏土矿物通常具有较大的比表面积(远大于石英和碳酸盐等脆性矿物),大大提供了吸附气的赋存空间,因此高含量的黏土矿物也进一步增加了龙潭组页岩对甲烷的吸附能力。

页岩含气量能够反映页岩的含气性(表3)。二叠

表2 扬子地区二叠系页岩孔隙度特征

Table 2 Porosity of the Permian shales in the Yangtze region

地区	层位	孔隙度/%
川东北	吴家坪组	0.48 ~ 11.08(4.94)
鄂西—渝东	吴家坪组	2.70 ~ 7.80(4.80)
川东北	龙潭组	4.04 ~ 14.57(8.51)
川东南	龙潭组	4.04 ~ 14.57(8.60)

注:表中数据格式为最小值~最大值(平均值)。

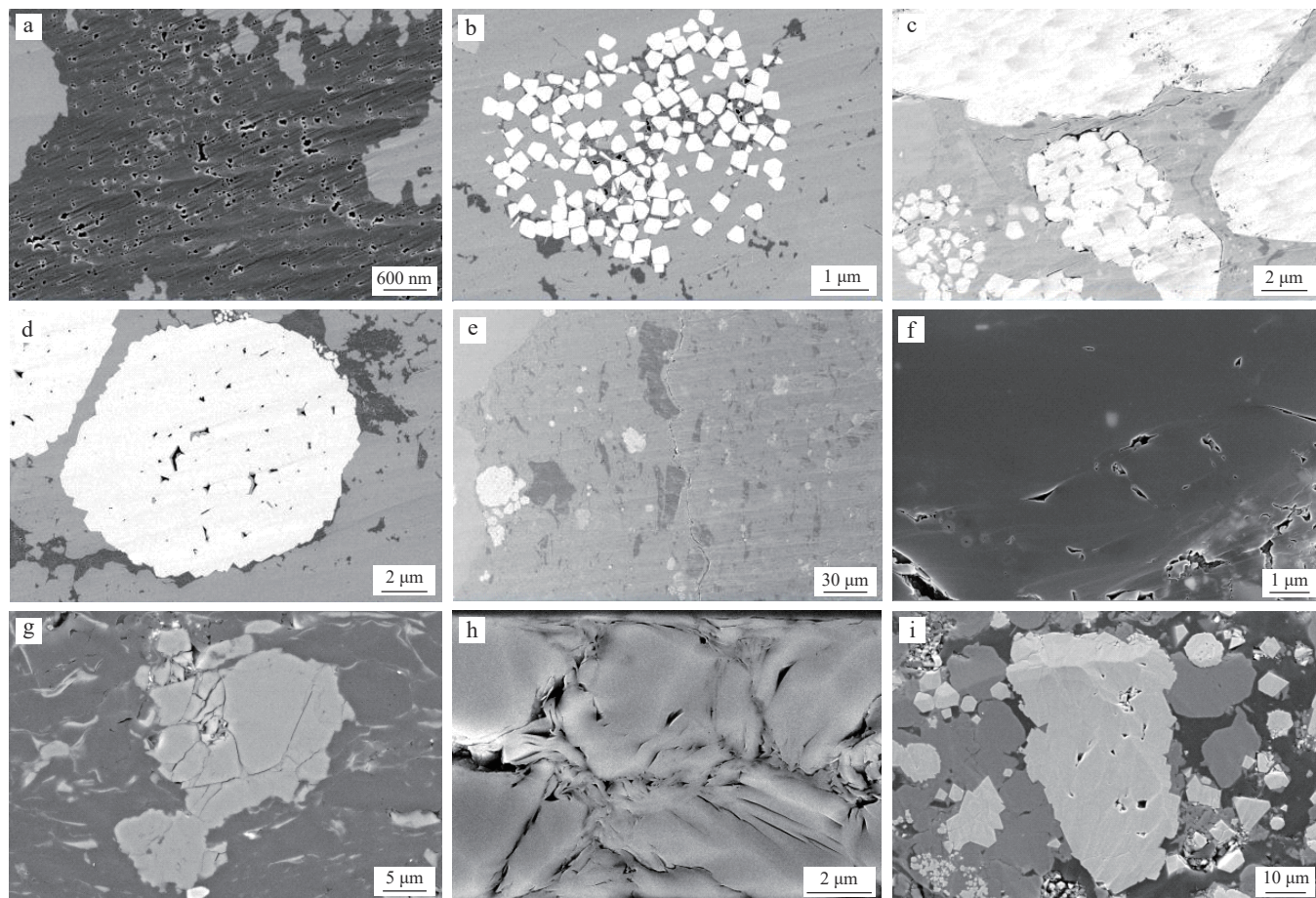


图4 川东地区吴家坪组与龙潭组页岩孔隙发育特征扫描电镜照片

Fig. 4 Scanning electron microscope (SEM) images showing the shale pore development characteristics in the Wujiaping and Longtan formations, eastern Sichuan Basin

a. 有机孔,埋深3 309.03 m,吴家坪组, HY1井; b. 有机孔,埋深3 309.03 m,吴家坪组, HY1井; c. 粒内孔,埋深3 309.03 m,吴家坪组, HY1井; d. 黄铁矿晶间孔,埋深3 309.03 m,吴家坪组, HY1井; e. 微裂缝,埋深3 323.82 m,吴家坪组, HY1井; f. 有机孔,埋深3 131.49 m,龙潭组, SY1井; g. 石英微裂缝,埋深3 131.49 m,龙潭组, SY1井; h. 黏土矿物晶间孔,埋深3 146.92 m,龙潭组, SY1井; i. 黄铁矿晶间孔,埋深3 152.24 m,龙潭组, SY1井

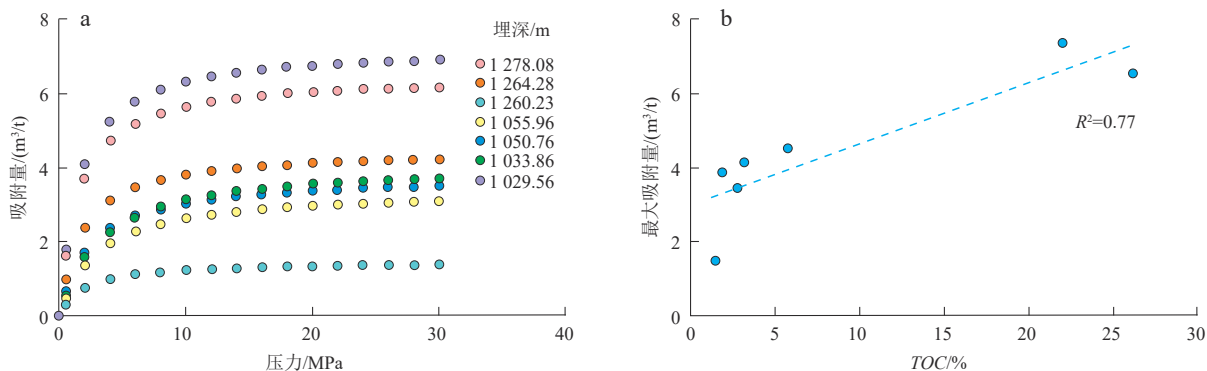


图5 基于等温吸附实验的四川盆地及周缘二叠系页岩吸附能力表征

Fig. 5 Isothermal adsorption experiment-based characterization of the adsorption capacity of the Permian shales in the Sichuan Basin and its adjacency

a. 甲烷等温吸附曲线; b. 最大吸附量与 TOC 相关性

系页岩均显示了较高的含气量。大隆组页岩在鄂西鹤峰地区含气量较低,介于0.19~3.70 m³/t,平均值

为1.43 m³/t;在川北地区含气量较高,介于0.61~11.50 m³/t,平均值为4.62 m³/t。吴家坪组页岩整体含

气量较高,在川东北、川东以及鄂西—渝东等地区的平均含气量介于3.73~6.99 m³/t。龙潭组不同岩性含气性差异较大,其中煤层和炭质页岩通常具有较好的含气性,含气量高达20.00 m³/t;而泥岩和黑色页岩的含气性较差,平均值仅分别为2.56 m³/t和1.43 m³/t。

2.4 页岩可压性

页岩的可压性直接控制着压裂改造的实施效果,进而影响页岩油气的产能^[35-36]。二叠系页岩脆性矿物含量较高,脆性指数较高,具有良好的可压性(表4)^[30,37-40]。大隆组硅质页岩在三轴压缩实验(围压30 MPa)中表现出的抗压强度为180~360 MPa,杨氏模量为50~68 GPa,泊松比为0.23~0.30;与上部相

比,大隆组下部和中部发育的页岩抗压强度和泊松比较小,杨氏模量较大,可压性较好^[41]。吴家坪组页岩的破裂压力主要分布在88.07~114.30 MPa,杨氏模量为40.59~75.17 GPa,泊松比为0.19~0.29^[31]。在模拟地层应力条件下(围压50 MPa),DW4井龙潭组下部页岩的杨氏模量分布在10.88~42.64 GPa,泊松比介于0.089~0.146;煤岩的杨氏模量和泊松比分别为5.64 GPa和0.134。对比四川盆地五峰组—龙马溪组页岩和二叠系页岩,前者的杨氏模量和泊松比分别主要分布在16.91~38.37 GPa和0.159~0.313,后者则整体具有较高杨氏模量和较低泊松比的特征,脆性更高,可压性更好。

表3 扬子地区二叠系页岩含气量特征
Table 3 Gas content of the Permian shales in the Yangtze region

地区	层位	岩性	含气量/(m ³ /t)	数据来源
川东北	吴家坪组	页岩	0.97~8.02(3.33)	文献[30]
川东红星	吴家坪组	页岩	2.82~4.35(3.74)	文献[31]
川东红星	吴家坪组	页岩	0.11~10.90(3.01)	文献[32]
鄂西—渝东	吴家坪组	页岩	0.85~6.99(3.73)	文献[32]
鄂西—渝东	吴家坪组	页岩	0.59~6.99(3.80)	本文
川南古叙	龙潭组	页岩	0.23~9.77(2.56)	文献[33]
川东南	龙潭组	黑色页岩	0.68~2.73(1.43)	本文
黔西	龙潭组	炭质页岩	6.00~20.00(8.26)	本文
鄂西鹤峰	大隆组	硅质页岩	0.19~3.70(1.43)	文献[19]
川北	大隆组	页岩	0.61~11.50(4.62)	文献[34]

注:表中数据格式为最小值~最大值(平均值)。

表4 扬子地区二叠系页岩矿物组分与脆性指数特征
Table 4 Mineral compositions and brittleness indices of the Permian shale sequences in the Yangtze region

地区	层位	岩性	矿物组分含量	脆性指数/%	资料来源
巢湖地区 清水岭剖面	孤峰组— 大隆组	页岩	石英33.50%~53.80%(40.13%);白云石1.00%~3.50%(1.78%); 黄铁矿1.50%~6.80%(4.75%);黏土矿物16.80%~48.10%(34.42%)	39.0~64.0(46.0)	文献[37]
中国南方	上二叠统	页岩	石英12.51%~91.80%(44.02%);黏土矿物7.13%~39.20%(26.00%)	15.0~93.0(60.0)	文献[38]
川东北	吴家坪组 二段	黑色页岩	石英7.90%~78.40%(36.40%);碳酸盐矿物1.00%;黄铁矿5.70%; 黏土矿物8.60%~78.60%(48.40%)	37.5	文献[30]
川东北	吴家坪组 三段	黑色页岩	石英3.00%~85.80(40.40%);碳酸盐矿物1.20%~97.90% (46.55%);黏土矿物0~54.60%(6.60%)	86.9	文献[30]
黔北	龙潭组	页岩	石英0~58.20%;黄铁矿0~38.40%;菱铁矿0~36.95%; 黏土矿物0~77.78%	22.2~80.5	文献[39]
黔北	龙潭组	页岩	石英0~58.20%;黄铁矿0~38.40%;菱铁矿0~36.95%; 黏土矿物0~77.78%	44.7~66.3(53.2)	文献[39]
黔西北大方 地区龙峰剖面	龙潭组	页岩	石英8.00%~62.00%(25.50%);碳酸盐矿物3.10%; 黏土矿物31.00%~77.00%(58.70%)	13.0~69.0(41.3)	文献[40]

注:表中数据格式为最小值~最大值(平均值)。

3 页岩气保存条件与勘探方向

扬子地区二叠系富有机质页岩分布广泛,并且具备较好的生气潜力、储集能力、含气性以及可压性,但由于构造活动差异,形成了不同的页岩气保存条件(图6)。构造活动强烈的地区页岩气保存条件通常较差,而构造活动稳定的一般较好。从埋深上看,埋深大($\geq 1\,000\text{ m}$)的页岩层系往往具有良好的保存条件,而埋深浅($< 1\,000\text{ m}$)的页岩通常较差^[42]。就目前的勘探开发技术水平而言,埋深超过4 000 m会给页岩气勘探开发造成很大难度,因此,在扬子地区二叠系页岩普遍具有良好物质基础的背景下,保存条件与埋深在一定程度上决定了二叠系页岩气的勘探前景与方向。

龙门山推覆带前缘总体出露地表,构造变形强烈,保存条件欠佳,仅狭窄范围富有机质页岩得以残留,埋深小于2 000 m,勘探潜力较差。米苍山和大巴山前缘二叠系孤峰组盆地相、龙潭组深水陆棚相以及大隆组盆地相页岩叠合分布,具备多层系立体勘探开发潜力,但构造改造和地层变形强烈,大部分二叠系页岩被剥露至地表,保存条件欠佳,仅局部二叠系页岩保存较好,埋深小于2 000 m,具备一定的勘探潜力。四川盆地(宣汉—南充以西)构造变形弱,龙潭组潮坪—潟湖相煤系页岩与深水陆棚相页岩、北部孤峰组盆地相页岩和大隆组深水陆棚相泥页岩均保留完整,但埋藏深度普遍大于5 000 m,是未来深层页岩气勘探潜力区。川中隆起周缘(华蓥山断层以西),构造变形弱,埋深介于4 000~5 000 m,勘探潜力大,是深层页岩气勘探攻关的重点领域。川东高陡构造带和川东南低缓构造带尽管经历了强烈的构造变形,但页岩总体保存较好,仅局部出露剥蚀,埋深变化较大,在1 000~5 000 m范围均

有分布,勘探潜力大,进一步考虑到五峰组—龙马溪组页岩主要分布在该地区,且早已实现商业开发,故将该地区作为二叠系页岩气勘探的首选目标区。滇黔地区二叠系仅发育龙潭组煤系页岩,页岩累计厚度为20~50 m,多与砂岩互层并夹煤层,虽然具备良好的物质基础,但是由于受后期构造改造作用,在大部分地区埋藏较浅甚至剥蚀殆尽(埋深 $< 1\,000\text{ m}$),在局部地区埋深1 000~2 000 m,勘探潜力较差^[43]。鄂西地区二叠系发育3套优质页岩,但受到印支期—燕山期构造运动强烈改造作用。窄向斜内二叠系页岩得以保留,埋深相对较浅,保存条件欠佳;利川复向斜南部与秭归向斜二叠系页岩构造变形弱,保存好,勘探潜力大。江汉盆地和苏北盆地二叠系页岩经印支—燕山运动改造后在部分地区剥蚀殆尽^[44-45],以江汉盆地为例,二叠系页岩在复背斜被大量剥蚀,而在当阳复向斜和沉湖—土地堂复向斜保存较好,埋深较大,是未来深层页岩气勘探层系,苏北盆地二叠系具相似特征。扬子地区东南部二叠系遭受后期强烈构造改造,仅在桂北、湘南、湘中、赣西及皖南等地区残留,埋深相对较浅,保存条件欠佳。在该地区部署的页岩气井(如湘页1井和涪页1井),获得低产气流,展示了该地区二叠系具有一定的勘探潜力^[46-47]。

因此,扬子地区二叠系页岩气未来勘探重点围绕川中隆起周缘、川东高陡构造带、川东南低缓构造带、鄂西利川复向斜南部与秭归向斜、江汉盆地与苏北盆地内部复向斜构造(当阳复向斜、沉湖—土地堂复向斜等)等地区开展。其中,埋深较浅的川东高陡构造带、川东南低缓构造带、鄂西利川复向斜南部与秭归向斜为目前中、浅层页岩气勘探首选目标区,而埋深较大的川中隆起周缘、江汉盆地与苏北盆地内部复向斜构造二叠系为未来深层页岩气勘探目标。

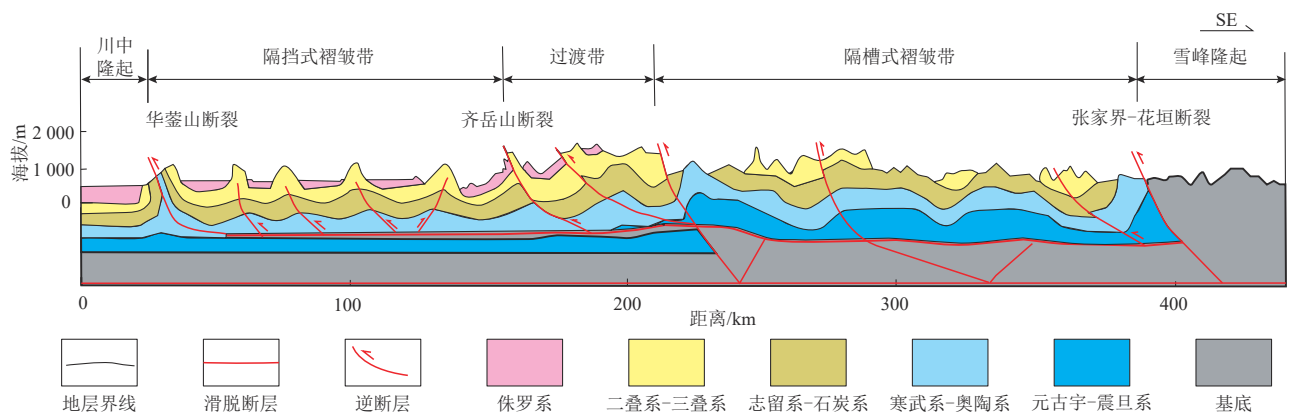


图6 川东—湘鄂西地区构造剖面^[36]

Fig. 6 Structures section for the region from the eastern Sichuan Basin to western Hunan and Hubei provinces^[36]

4 结论与展望

4.1 结论

1) 中国南方扬子地区二叠系发育海相和海-陆过渡相富有机质页岩层系。海相孤峰组、吴家坪组和大隆组页岩主要发育在扬子北部陆缘(内)裂陷盆地,其中吴家坪组页岩在扬子南部陆内裂陷盆地也有分布;海-陆过渡相龙潭组页岩主要分布在扬子西部和东南部克拉通拗陷盆地。海相页岩具有“脆性矿物含量高、有机碳含量高、有机孔发育、含气量高”特点而过渡相页岩具有“有机碳含量高、热演化适中、无机孔发育、含气量总体较低且变化范围大”特点。

2) 中国南方扬子地区二叠系页岩气的受构造背景影响,保存条件不一样,影响了勘探潜力。四川盆地宣汉—南充以西、川中隆起周缘、川东高陡构造带、川东南低缓构造带、米苍山以及大巴山前缘地区、鄂西的利川复向斜南部和秭归向斜地区、江汉盆地、苏北盆地等局部埋深较深的当阳复向斜和沉湖—土地堂复向斜等地区均展示出地层保存好,构造变形弱的特点,具有较大勘探潜力。而扬子地区其他构造变形较强的地区,页岩品质较差,保存条件欠佳,勘探潜力相对较小。目前海相吴家坪组和大隆组页岩已在川东北明1井、雷1井、大页1井以及川东红星地区获得勘探突破,显示了良好的勘探开发前景。而海-陆过渡相页岩气虽暂时未获得商业发现,但也显示出较好的勘探前景。

4.2 未来展望

二叠系页岩气勘探开发目前主要面临着以下难题:①海-陆过渡相页岩的生-储能力较弱、钻井稳产能力差;②川东北海相页岩埋深大,压裂难度较大,而川东红星和巫溪等地区的保存条件较差,页岩含气量相对较低;③储层改造技术处于探索阶段,存在页岩气藏可压性评价体系尚未建立、多层叠置储层改造技术尚未形成、差异力学地层叠置裂缝扩展规律认识不清以及高密度缝网支撑机制不明等科学问题。

针对以上这些难题,建议从以下几个方面开展研究:①加强细粒沉积学研究,明确富有机质页岩及煤、砂岩分布特征,同时开展储层成因机制研究,详细描述储集类型及其特征,明确有效储集类型组合和有利储层发育层段;②加强页岩生、排烃历史和含气性动态演化研究,明确有利的储集层段及页岩气赋存状态,确定不同层段含气量;③加强页岩气保存条件研究,重点开

展构造演化历史、断裂和裂缝发育特征及其活动期次、裂缝对页岩含气量影响以及气体组分、地层水等判识性指标等研究,综合建立二叠系保存条件评价指标体系;④加强不同岩相岩石力学研究,明确不同层段的储层改造技术和参数标准,揭示二叠系页岩大规模压裂增产机理。

参 考 文 献

- [1] CURTIS J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [2] BOWKER K A. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [3] MILKOV A V, FAIZ M, ETIOPE G. Geochemistry of shale gases from around the world: Composition, origins, isotope reversals and rollovers, and implications for the exploration of shale plays [J]. Organic Geochemistry, 2020, 143: 103997.
- [4] 金之钧, 胡宗全, 高波, 等. 川东南地区五峰组-龙马溪组页岩气富集与高产控制因素[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 1-10.
JIN Zhijun, HU Zongquan, GAO Bo, et al. Controlling factors on the enrichment and high productivity of shale gas in the Wufeng-Longmaxi formations, southeastern Sichuan Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 1-10.
- [5] 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): 467-476.
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, NE Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 467-476.
- [6] 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.
- [7] 聂海宽, 党伟, 张珂, 等. 中国页岩气研究与发展20年: 回顾与展望[J]. 天然气工业, 2024, 44(3): 20-52.
NIE Haikuan, DANG Wei, ZHANG Ke, et al. Two decades of shale gas research & development in China: Review and prospects [J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(3): 20-52.
- [8] 金之钧, 蔡勋育, 刘金连, 等. 中国石油化工股份有限公司近期勘探进展与资源发展战略[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(1): 14-25.
JIN Zhijun, CAI Xunyu, LIU Jinlian, et al. The recent exploration progress and resource development strategy of China

- Petroleum and Chemical Corporation [J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(1): 14–25.
- [9] 宋腾, 李世臻, 张焱林, 等. 鄂西地区上二叠统海相页岩气富集条件差异与控制因素——以红星区块吴家坪组二段和恩施地区大隆组为例[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(8): 1425–1441.
- SONG Teng, LI Shizhen, ZHANG Yanlin, et al. Gas differential enrichment characteristics and controlling factors of Upper Permian marine shale in western Hubei area: Case study of Wujiaping Formation II in Hongxing block and Dalong Formation in Enshi area[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(8): 1425–1441.
- [10] 胡德高, 周林, 包汉勇, 等. 川东红星地区HY1井二叠系页岩气勘探突破及意义[J]. 石油学报, 2023, 44(2): 241–252.
- HU Degao, ZHOU Lin, BAO Hanyong, et al. Breakthrough and significance of Permian shale gas exploration of Well HY1 in Hongxing area, eastern Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(2): 241–252.
- [11] 郑爱维, 孟志勇, 李凯, 等. 川东红星地区二叠系吴家坪组页岩储层纵向非均质性特征及其发育主控因素[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(9): 1500–1514.
- ZHENG Aiwei, MENG Zhiyong, LI Kai, et al. Vertical heterogeneity characteristics and main controlling factors of the Permian Wujiaping Formation shale reservoir in Hongxing area, eastern Sichuan [J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(9): 1500–1514.
- [12] 李俊, 卢和平, 胡象辉, 等. 川东红星地区二叠系吴家坪组海相页岩气钻井实践[J]. 石油实验地质, 2023, 45(6): 1189–1195.
- LI Jun, LU Heping, HU Xianghui, et al. Drilling practice of marine shale gas in Permian Wujiaping Formation in Hongxing area of eastern Sichuan[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2023, 45(6): 1189–1195.
- [13] 杨雨, 汪华, 谢继容, 等. 页岩气勘探新领域: 四川盆地开江—梁平海槽二叠系海相页岩气勘探突破及展望[J]. 天然气工业, 2023, 43(11): 19–27.
- YANG Yu, WANG Hua, XIE Jirong, et al. Exploration breakthrough and prospect of Permian marine shale gas in the Kaijiang-Liangping Trough, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(11): 19–27.
- [14] 谢武仁, 文龙, 汪泽成, 等. 四川盆地二叠系—中三叠统海相非常规资源类型及有利勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(6): 961–971.
- XIE Wuren, WEN Long, WANG Zecheng, et al. Types of unconventional marine resources and favorable exploration directions in the Permian-Middle Triassic of the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(6): 961–971.
- [15] 吴福元, 万博, 赵亮, 等. 特提斯地球动力学[J]. 岩石学报, 2020, 36(6): 1627–1674.
- WU Fuyuan, WAN Bo, ZHAO Liang, et al. Tethyan geodynamics [J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(6): 1627–1674.
- [16] 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): 160–193.
- SHEN Shuzhong, ZHANG Hua, ZHANG Yichun, et al. Permian integrative stratigraphy and timescale of China [J]. Science China Earth Sciences, 2019, 49(1): 160–193.
- [17] 申博恒, 沈树忠, 侯章帅, 等. 中国二叠纪岩石地层划分和对比[J]. 地层学杂志, 2021, 45(3): 319–339.
- SHEN Boheng, SHEN Shuzhong, HOU Zhangshuai, et al. Lithostratigraphic subdivision and correlation of the Permian in China [J]. Journal of Stratigraphy, 2021, 45(3): 319–339.
- [18] 张玺华, 陈聪, 黄婕, 等. 四川盆地中二叠世广元—巴中拉张槽的发现及其油气地质意义[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(4): 466–475.
- ZHANG Xihua, CHEN Cong, HUANG Jie, et al. The discovery of Middle Permian Guangyuan-Bazhong extensional trough in the Sichuan Basin and its petroleum geological significance [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(4): 466–475.
- [19] 翟刚毅, 王玉芳, 刘国恒, 等. 中国二叠系海陆交互相页岩气富集成藏特征及前景分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2020, 40(3): 102–117.
- ZHAI Gangyi, WANG Yufang, LIU Guoheng, et al. Enrichment and accumulation characteristics and prospect analysis of the Permian marine continental multiphase shale gas in China [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2020, 40(3): 102–117.
- [20] 郭谨豪, 胡国艺, 何坤, 等. 川北地区二叠系大隆组烃源岩地球化学特征及沉积环境[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(5): 139–152.
- GUO Jinhao, HU Guoyi, HE Kun, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of source rocks of Permian Dalong Formation in northern Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(5): 139–152.
- [21] 王登, 余江浩, 陈威, 等. 鄂西鹤峰地区上二叠统大隆组页岩储层特征及资源潜力[J]. 华南地质与矿产, 2020, 36(1): 9–18.
- WANG Deng, YU Jianghao, CHEN Wei, et al. Characteristics of shale reservoir and resource potential evaluation in the Upper Permian Dalong Formation of Hefeng area in western of Hubei Province [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2020, 36(1): 9–18.
- [22] 翟常博, 牟传龙, 梁薇, 等. 鄂西地区二叠系孤峰组—大隆组沉积演化及其页岩气地质意义[J]. 矿物岩石, 2021, 41(4): 114–124.
- ZHAI Changbo, MOU Chuanlong, LIANG Wei, et al. Sedimentary evolution characteristics of Permian Gufeng Formation-

- Dalong Formation in western Hubei Province and its geological significance for the geological survey of shale gas[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2021, 41(4): 114-124.
- [23] 王鹏威, 刘忠宝, 张殿伟, 等. 川东地区二叠系海相页岩有机质富集对有机质孔发育的控制作用[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(2): 379-392.
- WANG Pengwei, LIU Zhongbao, ZHANG Dianwei, et al. Control of organic matter enrichment on organic pore development in the Permian marine organic-rich shale, eastern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(2): 379-392.
- [24] 李敏, 刘雅利, 冯动军, 等. 中国海相页岩气资源潜力及未来勘探方向[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(6): 1097-1108.
- LI Min, LIU Yali, FENG Dongjun, et al. Potential and future exploration direction of marine shale gas resources in China[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(6): 1097-1108.
- [25] 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.
- [26] CHEN Ya'na, YANG Kai, WU Wei, et al. Favorable lithofacies and pore characteristics of the Permian Longtan Formation shale in the southern Sichuan Basin[J]. *Energy Geoscience*, 2023, 4(3): 100193.
- [27] 白帆. 下扬子西部地区中二叠统孤峰组气源岩发育特征及控制因素[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(3): 468-475.
- BAI Fan. Characteristics and controlling factors of natural gas source rocks of Middle Permian Gufeng Formation in western part of Lower Yangtze Platform, China[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2021, 43(3): 468-475.
- [28] 付小东, 陈娅娜, 罗冰, 等. 四川盆地北部中二叠统茅口组孤峰段优质烃源岩特征及其油气地质意义[J]. *地质学报*, 2021, 95(6): 1903-1920.
- FU Xiaodong, CHEN Yana, LUO Bing, et al. Characteristics and petroleum geological significance of the high-quality source rocks in the Gufeng member of the Middle Permian Maokou Formation in the northern Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(6): 1903-1920.
- [29] 曹涛涛, 曹清古, 刘虎, 等. 川东地区海陆过渡相泥页岩地球化学特征及吸附性能[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(4): 1445-1456.
- CAO Taotao, CAO Qinggu, LIU Hu, et al. Geochemical characteristics and adsorption capacity of marine-continental transitional mudrock in eastern Sichuan Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(4): 1445-1456.
- [30] 明盈, 孙豪飞, 叶玥豪, 等. 川东北地区页岩气地质条件及其勘探潜力——以峰探1井上二叠统吴家坪组为例[J]. *天然气勘探与开发*, 2023, 46(4): 133-147.
- MING Ying, SUN Hao-fei, YE Yuehao, et al. Geological conditions and exploration potential of shale gas in northeastern Sichuan Basin: A case study of Upper Permian Wujiaping Formation in Well Fengtan 1[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2023, 46(4): 133-147.
- [31] 包汉勇, 赵帅, 梁榜, 等. 川东红星地区二叠系吴家坪组页岩气富集高产主控因素与勘探启示[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(1): 71-82.
- BAO Hanyong, ZHAO Shuai, LIANG Bang, et al. Enrichment and high yield of shale gas in the Permian Wujiaping Formation in Hongxing area of eastern Sichuan and its exploration implications[J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(1): 71-82.
- [32] 王必金, 包汉勇, 刘皓天, 等. 川东红星地区吴家坪组富有机质页岩特征与发育控制因素[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(5): 70-81.
- WANG Bijin, BAO Hanyong, LIU Haotian, et al. Characteristics and controlling factors of the organic-rich shale in the Wujiaping Formation of the Hongxing area, eastern Sichuan Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(5): 70-81.
- [33] 杨粦, 方坤, 罗鹏, 等. 川南古叙地区LD1井龙潭组海陆过渡相泥页岩地质特征及其含气性[J]. *沉积与特提斯地质*, 2021, 41(3): 446-453.
- YANG Xian, FANG Kun, LUO Peng, et al. Geological characteristics and gas bearing capacity of shale from transitional marine-continental facies of Longtan Formation: A case study from the Well LD1 in Gulin-Xuyong, southern Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2021, 41(3): 446-453.
- [34] 王威, 石文斌, 付小平, 等. 川北二叠系大隆组页岩气勘探潜力及方向[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(6): 892-899, 956.
- WANG Wei, SHI Wenbin, FU Xiaoping, et al. Shale gas exploration potential and target of Permian Dalong Formation in northern Sichuan[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2020, 42(6): 892-899, 956.
- [35] 刘清友, 朱海燕, 唐焯赫, 等. 四川盆地页岩气地质工程一体化高效开发关键技术与装备[J]. *大庆石油地质与开发*, 2024, 43(4): 191-203.
- LIU Qingyou, ZHU Haiyan, TANG Xuanhe, et al. Key techniques and equipment for efficient integrated geoscience-engineering development of shale gas in Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2024, 43(4): 191-203.
- [36] 刘叶轩, 刘向君, 丁乙, 等. 考虑隔层影响的页岩油储层可压性评价方法[J]. *油气藏评价与开发*, 2023, 13(1): 74-82.
- LIU Yexuan, LIU Xiangjun, DING Yi, et al. Evaluation method of fracability of shale oil reservoir considering influence of interlayer[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*,

- 2023, 13(1): 74–82.
- [37] 李路顺, 张新. 巢湖地区二叠系孤峰——大隆组页岩脆性特征[J]. 中国金属通报, 2019(4): 129–130.
- LI Lushun, ZHANG Xin. Brittle characteristics of Permian Gufeng–Dalong shale in Chaohu area[J]. China Metal Bulletin, 2019(4): 129–130.
- [38] 陈吉, 肖贤明. 南方古生界3套富有机质页岩矿物组成与脆性分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 822–826.
- CHEN Ji, XIAO Xianming. Mineral composition and brittleness of three sets of Paleozoic organic-rich shales in China South area[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5): 822–826.
- [39] 张曼婷, 付伟. 黔北煤田上二叠统龙潭组页岩气储层可压性评价[J]. 天然气技术与经济, 2020, 14(3): 27–32.
- ZHANG Manting, FU Wei. Evaluation on fracability of shale-gas reservoirs of Upper Permian Longtan Formation, Qianbei coalfield, Guizhou Province[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2020, 14(3): 27–32.
- [40] 兰叶芳, 任传建, 潘仕辉, 等. 黔西北大方地区龙潭组海陆过渡相烃源岩特征及评价[J]. 岩石矿物学杂志, 2023, 42(6): 852–867.
- LAN Yefang, REN Chuanjian, PAN Shihui, et al. Characteristics and evaluation of marine-terrestrial transitional source rocks in the Longtan Formation in the Dafang area, northwest Guizhou[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2023, 42(6): 852–867.
- [41] 李飞, 刘珠江, 陈斐然, 等. 川东北地区二叠系大隆组泥岩硅质成因及对可压性影响[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(2): 349–358.
- LI Fei, LIU Zhujiang, CHEN Feiran, et al. Origin of siliceous mudstone in Permian Dalong Formation and its influence on compressibility, northeastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(2): 349–358.
- [42] 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.
- 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.
- [43] 吴航, 邱楠生, 常健, 等. 川东多套滑脱层褶皱构造带形成物理模拟[J]. 地球科学, 2019, 44(3): 784–797.
- WU Hang, QIU Nansheng, CHANG Jian, et al. Physical simulation on development of multilayer detachment fold belt in Eastern Sichuan[J]. Earth Science, 2019, 44(3): 784–797.
- [44] 袁玉松, 郭彤楼, 付孝悦, 等. 下扬子地区热历史与海相烃源岩二次生烃潜力[J]. 现代地质, 2006, 20(2): 283–290.
- YUAN Yusong, GUO Tonglou, FU Xiaoyue, et al. Thermal history and secondary hydrocarbon generation intensity of marine source rocks in Lower Yangtze area[J]. Geoscience, 2006, 20(2): 283–290.
- [45] 林小云. 中、下扬子区海相地层油气显示特征及成藏控制因素探讨[J]. 海洋地质动态, 2007, 23(5): 1–6.
- LIN Xiaoyun. Characteristics of oil and gas shows and controlling factors of reservoir formations of marine strata in the Middle and Lower Yangtze region[J]. Marine Geology Letters, 2007, 23(5): 1–6.
- [46] 汪凯明, 何希鹏, 许玉萍, 等. 湘中坳陷涟源凹陷湘页1井大隆组页岩气地质特征[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(1): 86–98.
- WANG Kaiming, HE Xipeng, XU Yuping, et al. Geological characteristics of shale gas in Dalong Formation of Well Xiangye 1 in Lianyuan Sag, Xiangzhong Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(1): 86–98.
- [47] 白玉坤. 下扬子地区二叠系页岩含气性特征分析[J]. 地质装备, 2022, 23(3): 41–45.
- BAI Yukun. Analysis of gas bearing characteristics of Permian shale in Lower Yangtze region[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2022, 23(3): 41–45.

(编辑 张玉银)