



潜江凹陷页岩岩相对页岩油储层的控制作用

云念寒, 王芙蓉, 侯宇光, 曾宏斌, 杨荣岩

中国地质大学 构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074

摘 要: 在岩心观察与岩石薄片鉴定的基础上, 结合 XRD 技术、氩离子抛光扫描电镜、低温氮气吸附实验、高压压汞测试和岩石热解分析, 对江汉盆地潜江凹陷潜江组页岩储层的岩石矿物组成、孔渗和孔隙结构、地球化学特征等进行分析。研究表明, 潜江凹陷潜江组页岩主要矿物组成为白云石和黏土矿物, 主要发育块状灰质泥岩相、纹层状灰质泥岩相、块状云质泥岩相、纹层状云质泥岩相以及块状泥质云岩相和纹层状泥质云岩相。页岩储层主要发育碳酸盐矿物晶间孔和黏土矿物层间孔, 孔径主要分布在 2~200 nm, 孔隙度多低于 20%, 渗透率主要为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 为低孔低渗—特低渗储层。其中黏土矿物有利于页岩储层微孔和介孔的发育, 白云石有利于大孔发育, 且生物成因的白云石有助于有机碳的富集和滞留烃的赋存。储层整体表现为纹层状页岩比块状页岩具有相对较高的孔径、较好的孔隙连通性和含油性, 尤其在纹层状泥质云岩相中, 孔隙度介于 5%~15%, 渗透率处于 $1 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 主要孔径为 50~200 nm, 连通孔径主要为 50~100 nm, TOC 含量在 1%~3%, S_1 含量分布在 $5 \times 10^{-3} \sim 35 \times 10^{-3}$, OSI 值多处于 400×10^{-3} , 是潜江组页岩油储层的优势岩相。

关键词: 页岩油储层; 孔隙结构; 页岩岩相; 潜江组; 潜江凹陷; 江汉盆地

CONTROL OF SHALE LITHOFACIES ON THE SHALE OIL RESERVOIR IN QIANJIANG SAG

YUN Nian-han, WANG Fu-rong, HOU Yu-guang, ZENG Hong-bin, YANG Rong-yan

Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The rock mineral compositions, porosity-permeability, pore structure and geochemical characteristics of the shale reservoir of Qianjiang Formation in Qianjiang Sag, Jianghan Basin, are studied on the basis of core observation and rock slice identification, combined with XRD technology, argon ion polishing scanning electron microscopy, low temperature nitrogen adsorption experiment, high pressure Hg injection test and rock pyrolysis analysis. The results show that the shale of Qianjiang Formation is mainly composed of dolomite and clay minerals, developed with massive calcareous mudstone facies, laminated calcareous mudstone facies, massive dolomitic mudstone facies, laminated dolomitic mudstone facies, massive argillaceous dolomite facies and laminated argillaceous dolomite facies. The carbonate mineral intercrystalline pores and clay mineral interlayer pores are mainly developed in the shale reservoir,

收稿日期: 2022-08-01; 修回日期: 2022-11-24. 编辑: 黄欣.

基金项目: 国家自然科学基金委员会重点项目“陆相页岩油在基质-裂缝体系中的多尺度运移机理研究”(41830431); 国家自然科学基金项目“有机质石墨化对南方下古生界海相页岩有机质孔隙结构的影响”(41772143); 科学技术部重大专项资助项目“潜江与泌阳凹陷页岩油勘探开发目标评价”(2017ZX05049-005).

作者简介: 云念寒 (1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事非常规油气地质研究, 通信地址 湖北省武汉市洪山区关山街道鲁磨路 388 号, E-mail//2578085650@qq.com

通信作者: 王芙蓉 (1979—), 女, 博士, 副教授, 主要从事储层沉积和成岩作用等方面的研究工作, 通信地址 湖北省武汉市洪山区关山街道鲁磨路 388 号, E-mail//wfr777@163.com

with the pore size of 2–200 nm, the porosity mostly lower than 20%, and the permeability of $0.1 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, belonging to low porosity and low-extra low permeability reservoir. Clay minerals are conducive to the development of micropores and mesopores in shale reservoirs, while the dolomites contribute to the development of macropores, and biogenic dolomites help the accumulation of organic carbon and occurrence of residual hydrocarbon. Generally, the laminated shale has higher pore size, better pore connectivity and oil content than the massive shale dose. Especially the laminated argillaceous dolomite facies, with porosity of 5%–15%, permeability of $1 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, main pore size of 50–200 nm, connected pore size of 50–100 nm, TOC content of 1%–3%, S_1 content of $5 \times 10^{-3} \sim 35 \times 10^{-3}$ and OSI value mostly 400×10^{-3} , is the dominant lithofacies of shale oil reservoir in Qianjiang Formation.

Key words: shale oil reservoir; pore structure; shale facies; Qianjiang Formation; Qianjiang Sag; Jiangnan Basin

0 前言

岩相是岩石的一种基本特征,通常反映一定的沉积环境和沉积过程^[1],也可以反映岩石学特征和沉积微相特征^[2]。近年来随着页岩油气勘探工作的深入,石油地质学家发现虽然泥页岩矿物成分复杂、非均质性较强,但是其有机质的成熟度、天然气的含量及气体赋存状态都与页岩中有机质的含量及矿物组成关系密切^[3],如 Jacobi 等^[4]证实了页岩岩相与 TOC 以及孔隙度的分布有密切联系,Mitra 等^[5]证实页岩岩相在 TOC 预测、岩石物理学分析、孔隙度分析和甜点预测方面具有十分重要的作用。同时国外在 Bakken 组页岩、Barnett 页岩、Marcellus 页岩和 Woodford 页岩等非常规页岩储层油气勘探和开发中,基于页岩层理、结构、生物、矿物组成、岩性等方面开展富有机质页岩岩相研究,已取得了广泛的成功^[6-9]。

相比海相页岩油储层来说,中国陆相页岩油储层的矿物组成更为多样,岩石类型更为丰富、叠置关系更为复杂,众多学者对鄂尔多斯盆地页岩、渤海湾盆地济阳拗陷页岩、黄骅拗陷沧东凹陷页岩开展岩相研究,对于油气勘探均有一定的指示意义。冯增昭^[10]、沈骋等^[11]认为不同岩相储集层形成条件存在差异,导致其矿物组成和有机碳含量存在较大差异,进而导致储层孔隙度以及页岩油的赋存机制存在差异;王圣柱、王勇、徐兴友、李士超等^[12-15]认为纹层状岩相的水平渗透率相对较高,孔渗条件好,富有机质页岩有机质多呈网状分布,含油性较好;柳波等^[16]认为块状高有机质页岩孔隙多孤立,中等有机质含量时,生油潜力好且孔隙发育较好;Iqbal 等^[17]、Shang 等^[18]认为富含泥质的页岩微孔及有机质较为发育。

江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组页岩含油性好,

可采资源量丰富,具有较大的勘探潜力。近年来,众多学者对潜江凹陷潜江组页岩开展了不同程度的研究,主要集中在页岩的岩石学组成、地球化学性质以及储层特征等方面:孙中良、Huang 等^[19-20]认为矿物组成以白云石、方解石、黏土矿物以及石英和长石为主;李乐等^[21]认为潜江凹陷页岩储层孔隙特征为高-中孔、特低渗;徐二社、刘心蕊等^[22-23]认为潜江组 34 油组第 10 韵律层为最有利于页岩油富集的层系;Wang、Hou 等^[24-25]认为该层段为缺氧环境,有利于有机质的发育及保存,而对页岩岩相对储层的控制关系的研究较为缺乏。

潜江凹陷潜江组页岩储层矿物成分复杂、岩性多样、岩相变化快,储层孔隙类型多、结构复杂,导致页岩油富集规律的研究难度增大。为此,本研究在前人研究的基础上,以潜江凹陷钻井中潜江组页岩为研究对象,通过 XRD 分析、氩离子抛光扫描电镜、低温氮气吸附、高压压汞和岩石热解分析等方法,对比研究不同岩相的岩石学特征、孔隙特征以及含油性特征,分析造成差异的相关地质因素,建立岩相与孔隙结构及含油性的关系,最终明确优势岩相,为下一步勘探部署提供依据。

1 地质概况

潜江凹陷位于江汉盆地中部,面积达 $2\,530 \text{ km}^2$ 。北部与荆门凹陷、乐乡关地垒、汉水凹陷相连,东部与江陵凹陷相邻,南部以通海口凸起为界,西部与岳口低凸起相连。始新世晚期到渐新世早期,潜北大断裂活动强烈,断裂前缘快速下陷,北东向构造特征弱化,北西向隆升的构造趋势得以加强^[26-27](图 1)。江汉盆地潜江组地层沉积时期以亚热带干旱为主,且与潮湿

环境交替较为频繁,因此,潜江组在纵向上显示出化学蒸发沉积与陆源碎屑沉积交替出现的特征^[28],地层长期处于封闭性强、蒸发性强以及高盐度环境,具有周期性浅水-半深水盐湖沉积特点^[29],最终沉积形成了巨厚的潜江组含盐系地层,普遍发育泥页岩,油气显示丰富。与北美及中国其他地区的相比,潜江组盐间地层页岩具有“高黏土、低石英、高碳酸盐”的矿物特征,同时页岩中又含有一定量的蒸发盐类矿物,对页岩油储层的孔隙和含油性产生了较大的影响。潜江组按地层层序自下而上可分为潜四段(E_{q4})、潜三段(E_{q3})、潜二段(E_{q2})和潜一段(E_{q1}),其中潜三下段和潜四下段是页岩油勘探最有利层段^[22]。

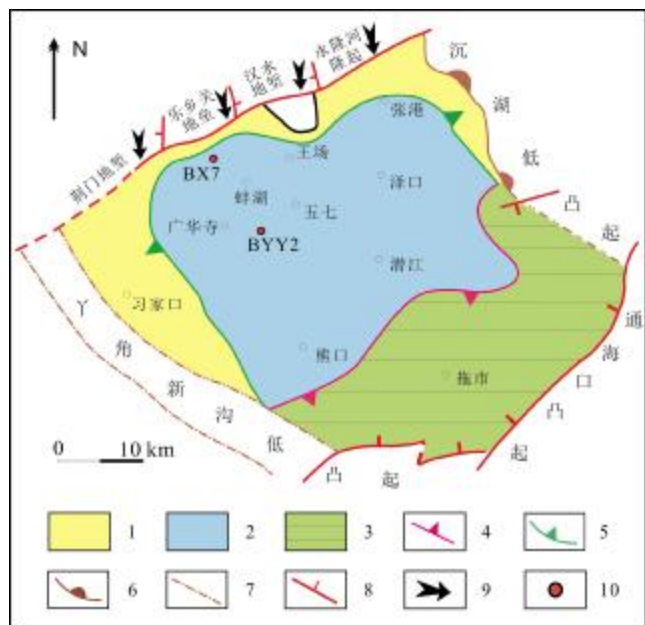


图1 潜江凹陷构造位置及取样井位图

(据文献[27]修改)

Fig. 1 Tectonic map with sampling well location of Qianjiang Sag
(Modified from Reference [27])

1—砂泥岩相区(sandy mudstone facies); 2—咸淡水过渡区(saline water-freshwater transition zone); 3—盐韵律区(salt rhythm area); 4—砂岩尖灭线(pinch-out line of sandstone); 5—岩盐尖灭线(pinch-out line of rock salt); 6—地层尖灭线(stratigraphic pinch-out line); 7—凸起边界(boundary of uplift); 8—断层(fault); 9—物源方向(source direction); 10—取样井(sampling well)

2 分析方法与样品

受北部单向碎屑物源的影响,本次实验所用样品取自潜江凹陷北部周矶向斜带 BX7 井以及南部蚌湖洼陷 BYY2 井的潜³⁴油组 10 韵律(图 1),共 37 块岩

心样。BX7 井样品的深度为 3 046~3 062 m,岩相多为浅灰色块状云-灰质泥岩相,TOC 含量 0.32%~2.58%,平均含量为 1.40%;BYY2 井样品的深度为 2 813~2 823 m,岩相多为纹层状黄褐色泥质云岩相和云质泥岩相,TOC 含量 0.49%~2.91%,平均含量为 1.58%。

XRD 分析采用 D8 DISCOVER X 射线衍射仪,通过对材料进行 X 射线衍射,分析其衍射图谱,从而计算出特征 X 射线的波长,进而可根据已有资料查出试样中所含的元素。

低温氮气吸附试验采用 ASAP2020 全自动比表面及孔径分析仪进行测试。该仪器孔径测量范围为 0.35~500.00 nm,测试条件为:低温 -195.8 °C,压力 97.3~127.0 kPa,样品要求 0.18~0.28 mm (80~60 目),以纯度大于 99.999% 的氮气为吸附质。根据 BET 方程计算出页岩的比表面积,应用 BJH 理论和 Kelvin 方程求出孔隙所对应的分布情况。

高压压汞分析采用 Autopore IV 9520 高压压汞仪进行测试。利用汞对一般固体不润湿的特性进行分析,根据相关资料得出孔径分布情况。最大进汞压力为 413 MPa,孔喉测试范围为 3 nm~800 μm,样品为 1 cm³ 的立方体。

索式抽提实验采用经典索氏提取器,以丙酮、氯仿、甲醇(体积比 19:16:15)的三元溶剂为抽提剂,在 70~90 °C 温度条件下对样品进行抽提。以上分析测试均在中国地质大学(武汉)构造与油气教育部重点实验室完成。

孔隙度采用氮孔隙度测量仪 JS 100007,渗透率采用高低渗透率测定仪 JS 100006 和 JS 100010,实验在江汉油田分公司勘探开发研究院石油地质测试中心完成。

场发射扫描电镜采用日本日立冷场发射扫描电子显微镜,型号为 SU8010,测试条件为加速电压:0.1~30 kV、0.1 kV/步,在中国科学院微生物研究所完成。

3 实验结果

3.1 储层的矿物成分及地球化学特征

XRD 分析数据显示, BX7 井及 BYY2 井样品的矿物成分主要为白云石和黏土矿物,其次为方解石和石英,以及少量长石、黄铁矿、石膏和岩盐。

两口井页岩样品中矿物含量存在差异,主要表现

在黏土矿物和白云石的含量不同, BYY2 井样品黏土矿物平均含量为 15.42%, 而 BX7 井样品黏土矿物平均含量为 25.5%; BYY2 井样品白云石平均含量为 44.89%, 而 BX7 井白云石平均含量为 29.9% (表 1).

表 1 样品矿物组分及地球化学特征
Table 1 Mineral compositions and geochemical characteristics of shale samples

测试项目	BYY2 井	BX7 井
石英/%	5.4~26.3/15.42(18)	4.0~15.6/9.3(19)
钾长石/%	0.0~2.8/0.23(18)	0.0~4.4/1.0(19)
斜长石/%	6.3~11.7/9.05(18)	2.0~5.3/4.0(19)
方解石/%	2.2~39.1/14.16(18)	12.9~42.1/22.3(19)
白云石/%	5.0~66.5/44.89(18)	6.3~57.9/29.9(19)
黏土矿物/%	5.4~26.3/15.42(18)	10.5~34.9/25.5(19)
硬石膏/%	0.0~2.2/0.46(18)	0.0~0.9/0.3(19)
黄铁矿/%	0.0~9.2/4.83(18)	5.6~10.5/7.7(19)
石盐/%	0.0~10.0/1.81(18)	/
钙芒硝/%	0.0~15.2/1.99(18)	/
脆性指数/%	59.6~87.5/75.26(18)	56.0~81.7/66.5(19)
TOC/%	1.03~2.56/1.80(18)	0.32~2.58/1.39(19)
S _i /10 ⁻³	3.36~30.46/11.74(18)	1.18~6.50/4.21(19)
OSI/10 ⁻³	211.32~1350.49/665.94(18)	2.17~527.96/80.36(19)

表中数据意义为:最小值~最大值/平均值(样品数).

两口井页岩样品中含油性参数也存在差异, 主要表现在 TOC 含量、S_i 含量和 OSI 值. BYY2 井页岩样品中含油性参数相对较高, TOC 含量多为 1%~3%, S_i 含量多为 0~15×10⁻³, 平均为 10.14×10⁻³, OSI 值多为 300×10⁻³~800×10⁻³, 平均为 793×10⁻³, 为含油且具有较高产油性的岩层. BX7 井页岩样品 TOC 含量多为 1%~2%, S_i 含量多为 0~5×10⁻³, 平均为 4.24×10⁻³, OSI 值多为 200×10⁻³~400×10⁻³, 平均 321.71×10⁻³, 为含油且具有产油性的岩层.

以“碎屑(石英、长石以及黏土矿物)-方解石-白云石”三端元分类法进行页岩岩相划分. 同时结合岩心观察发现: BX7 井页岩样品主要为浅灰色, 块状构造, 主要发育块状灰质泥岩相以及块状云质泥岩相; BYY2 井页岩样品从浅灰色到深灰色均有, 夹有黄褐色泥质岩层, 主要发育纹层状泥质云岩相并夹有黄褐色纹层状灰质泥岩相(图 2).

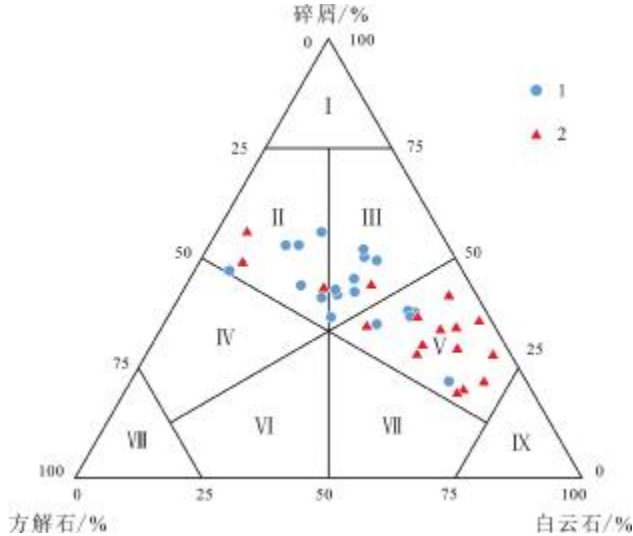


图 2 样品岩相划分散点图

Fig. 2 Lithofacies classification diagram of shale samples
I—泥岩相 (mudstone facies); II—灰质泥岩相 (calcareous mudstone facies); III—云质泥岩相 (dolomitic mudstone facies); IV—泥质灰岩相 (argillaceous limestone facies); V—泥质云岩相 (argillaceous dolomite facies); VI—云质灰岩相 (dolomitic limestone facies); VII—灰质云岩相 (calcareous dolomite facies); VIII—灰岩相 (limestone facies); IX—白云岩相 (dolomite facies); 1—BX7 井 (BX7 well); 2—BYY2 井 (BYY2 well)

3.2 孔隙结构

两口井页岩样品的脱附曲线出现了 2 种明显不同的迟滞环曲线^[30], 块状页岩相和纹层状页岩相样品孔隙结构具有较大差异. 块状页岩样品孔隙为圆柱形、平行板状狭缝形以及墨水瓶形三者混合(图 3a), 纹层状页岩样品孔隙结构多为四周开放的平行板状狭缝孔隙(图 3b).

低温氮气吸附-脱吸附曲线显示, 样品的孔径多为 2~100 nm, 其中块状页岩样品孔径多小于 10 nm, 纹层状页岩样品孔径主要集中在 10~100 nm (图 3c). 高压压汞实验结果进一步表明, 样品的孔径主要集中在 10~200 nm 之间, 且不同岩相样品的进汞曲线和孔径分布存在较大差异, 其中纹层状云质泥岩相、纹层状泥质云岩相中大孔最为发育, 孔隙体积也相对较大(图 3d).

3.3 孔隙类型

氩离子抛光扫描电镜结果显示, 潜江组页岩样品的孔隙类型主要有粒间孔、碳酸盐晶间孔、黏土矿物层间孔, 部分孔隙内可见黑色的有机质充填. 其中粒间孔主要发育于碳酸盐矿物之间以及黏土矿物颗粒间及

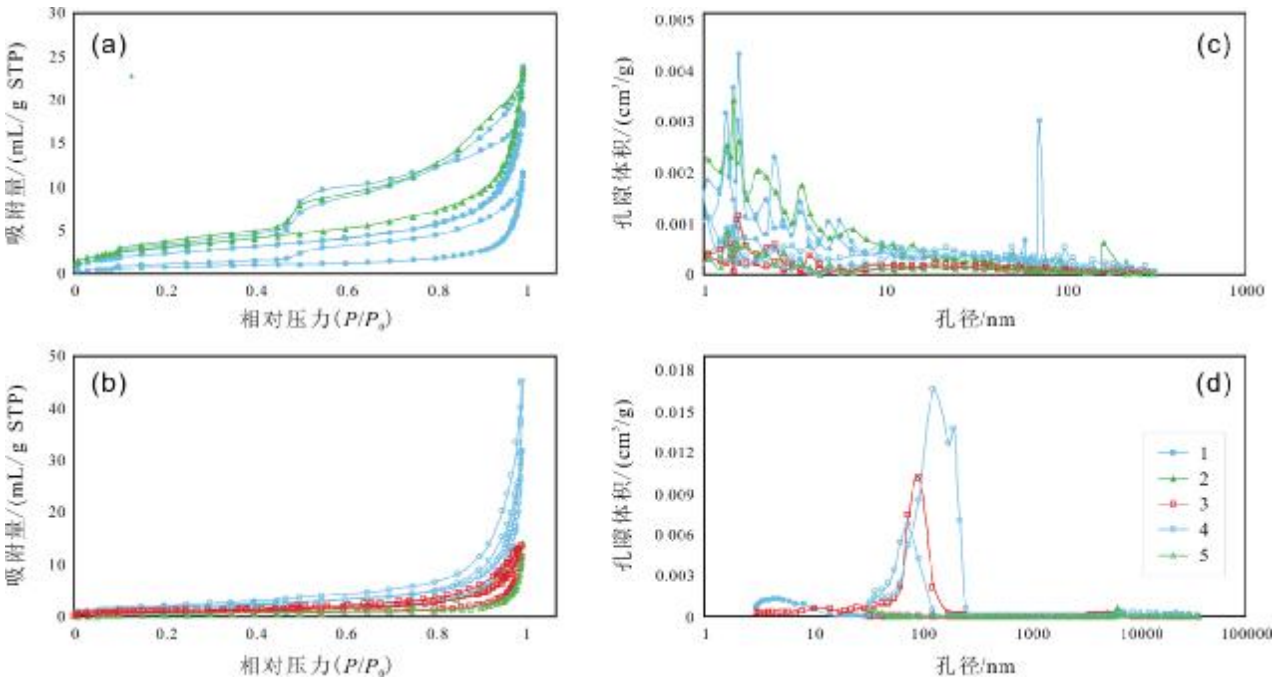


图 3 样品孔隙结构

Fig. 3 Pore structures of shale samples

a—块状页岩样品低温氮气吸附-脱附曲线(low temperature nitrogen adsorption-desorption curves of massive shale samples); b—纹层状页岩样品低温氮气吸附-脱附曲线(low temperature nitrogen adsorption-desorption curves of laminated shale samples); c—孔径分布曲线(氮气吸附)(pore-size distribution curves, nitrogen adsorption); d—孔径分布曲线(进汞增量)(pore-size distribution curves, incremental intrusion Hg); 1—块状云质泥岩相(massive dolomitic mudstone facies); 2—块状灰质泥岩相(massive calcareous mudstone facies); 3—纹层状泥质云岩相(laminated argillaceous dolomite facies); 4—纹层状云质泥岩相(laminated dolomitic mudstone facies); 5—纹层状灰质泥岩相(laminated calcareous mudstone facies)

颗粒边缘,孔径大小不一,部分孔隙边缘可见有机质赋存(图 4a);晶间孔主要发育在白云石晶体之间,多数情况下呈现出规则的多面体状,孔径较大,连通性好(图 4b,c);黏土矿物层间孔主要分布在黏土矿物之间,孔径普遍较低,多为纳米级,孔隙形状多为狭长状、扁平状(图 4d).

4 讨论

4.1 岩相对储层孔隙的影响

潜江凹陷潜江组页岩样品实测的孔隙度小于20%,大部分处于 5%~10%的范围内;渗透率主要分布范围为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $46 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (表 2).整体来看,潜江组盐间页岩属于低孔低渗-特低渗储层,孔隙度渗透率的发育与岩相之间没有明显的对应关系.比较而言,块状岩相的页岩样品的渗透率较高,与样品发育裂缝有关;纹层状岩相的页岩样品孔隙度较为发育.

相对而言,岩相对孔径的影响较为明显(图 5、6).

表 2 样品不同岩相孔渗数据统计表
Table 2 Porosity and permeability data of shale samples in different lithofacies

岩相	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
块状云质泥岩	3.7	534
块状云质泥岩	5.0	40.1
块状云质泥岩	4.2	0.212
块状云质泥岩	6.2	0.062
块状云质泥岩	2.1	0.063
块状泥质云岩	9.0	297
块状泥质云岩	9.0	1.06
块状泥质云岩	5.7	0.059
块状灰质泥岩	8.2	15.8
块状灰质泥岩	5.2	1.63
纹层状泥质云岩	12.5	6.95
纹层状泥质云岩	4.1	0.941
纹层状云质泥岩	20.0	0.229
纹层状云质泥岩	8.0	1.21
纹层状泥质云岩	4.1	0.941

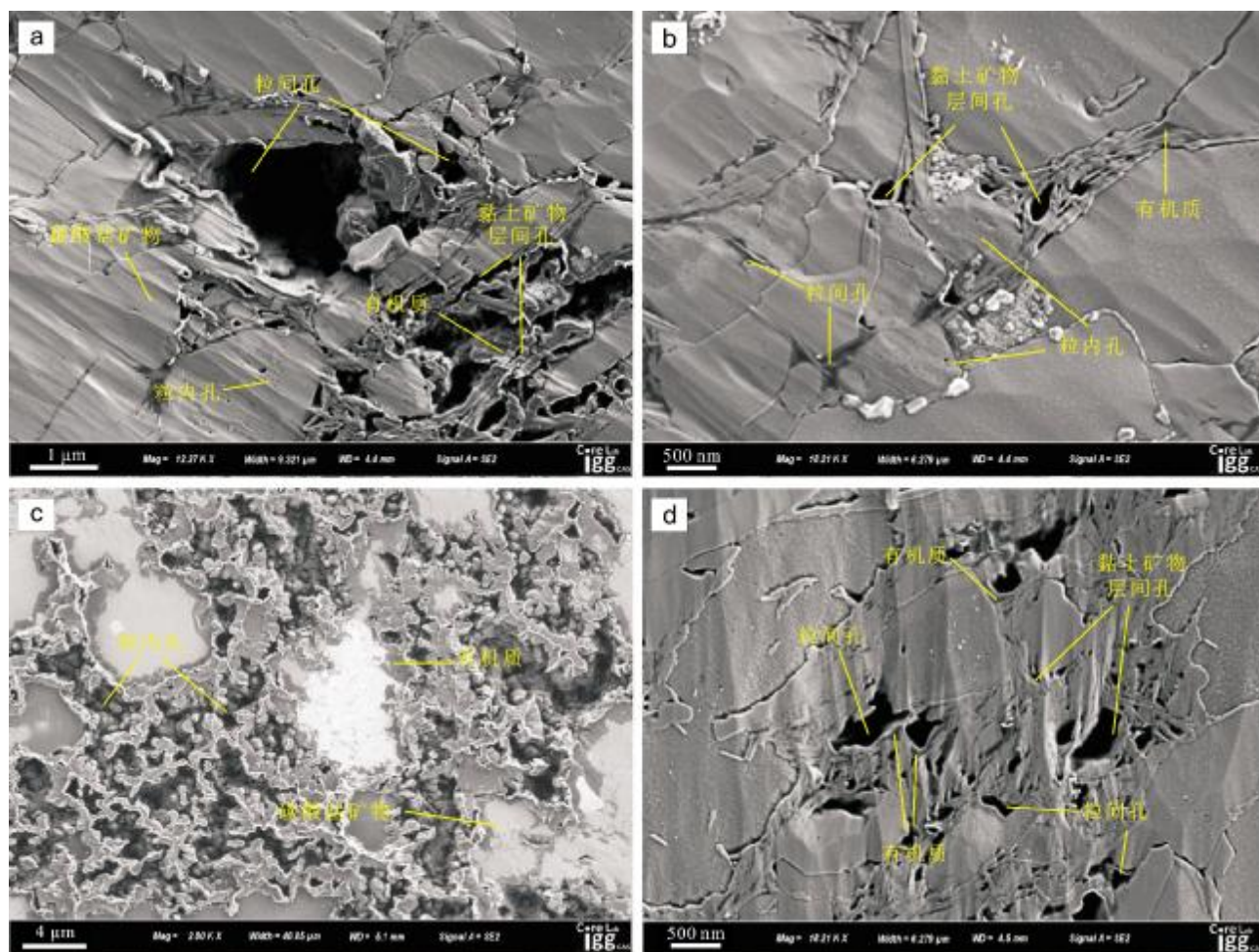


图4 页岩扫描电镜图

Fig. 4 SEM photographs of shale samples

a—BX7井,块状云质泥岩相样品,主要发育碳酸盐矿物粒间孔和黏土矿物层间孔,部分碳酸盐矿物内可见粒内孔,部分孔隙内可见少量滞留烃赋存;
b—BX7井,块状泥质云岩相样品,可见黏土矿物中发育少量的层间孔,白云石颗粒接触紧密,仅见少量的粒内溶孔;
c—BY2井,纹层状泥质云岩相样品,广泛发育白云石(粒)晶间孔,滞留烃富集;
d—BY2井,纹层状泥质云岩相样品,黏土矿物间层间孔发育,部分孔隙内可见滞留烃赋存

低温氮气吸附试验中页岩样品不同孔径下孔体积分布以及高压压汞试验中页岩样品不同孔径下进汞量分布显示,潜江凹陷潜江组页岩样品孔径分布复杂,孔径分布曲线呈多峰型,不同孔径的孔隙均有发育,其中块状云质泥岩相以及块状灰质泥岩相以微孔为主(图5a),孔径主要分布在2~8 nm;而纹层状泥质云岩相以及纹层状灰质泥岩相的微孔、介孔和大孔均发育较好,孔径主要分布在2 nm左右和40~50 nm,部分微米级孔隙(图5b);纹层状云质泥岩相样品孔隙发育相对均匀,以介孔和大孔为主,孔径主要集中在50~200 nm(图5c)。

抽提前后氮气吸附以及高压压汞增加的孔隙体积是滞留烃所占据的空间,可以用来表示页岩的孔隙连

通性^[30]。抽提前后孔径分布曲线显示,块状样品的氮气吸附以及高压压汞进汞量的增加主要集中在2~20 nm的介孔,而纹层状样品的曲线则呈现出双峰,分别在2~5 nm以及10~100 nm之间,且增量整体较大于块状样品(图6),说明岩相不仅影响了孔隙的大小,也影响了孔隙的连通性。

扫描电镜显示页岩储层中孔隙主要为碳酸盐矿物晶间孔,部分为黏土矿物层间孔(图4)。纹层状页岩相中泥晶白云石颗粒多呈环状聚集,晶间孔十分发育,孔径较大^[31]。汪品先认为藻类勃发诱发湖水中碳酸盐的周期性化学沉淀是许多湖相纹层的形成机理^[32],但以块状为主的样品中,化学沉淀的白云石占主体地位,压

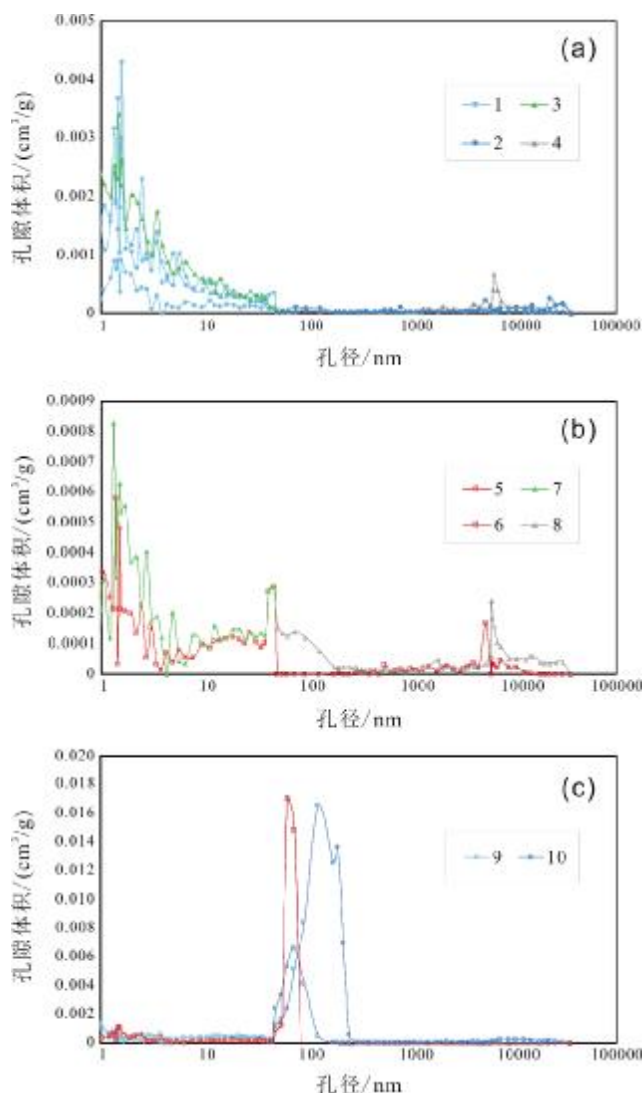


图5 样品全孔径分布曲线

Fig. 5 Full-scale pore size distribution curves of shale samples 1—块状云质泥岩相(氮气吸附)(massive dolomitic mudstone facies, nitrogen adsorption); 2—块状云质泥岩相(高压压汞)(massive dolomitic mudstone facies, high pressure Hg injection); 3—块状灰质泥岩相(氮气吸附)(massive calcareous mudstone facies, nitrogen adsorption); 4—块状灰质泥岩相(高压压汞)(massive calcareous mudstone facies, high pressure Hg injection); 5—纹层状泥质云岩相(氮气吸附)(laminated argillaceous dolomite facies, nitrogen adsorption); 6—纹层状泥质云岩相(高压压汞)(laminated argillaceous dolomite facies, high pressure Hg injection); 7—纹层状灰质泥岩相(氮气吸附)(laminated calcareous mudstone facies, nitrogen adsorption); 8—纹层状灰质泥岩相(高压压汞)(laminated calcareous mudstone facies, high pressure Hg injection); 9—纹层状云质泥岩相(氮气吸附)(laminated dolomitic mudstone facies, nitrogen adsorption); 10—纹层状云质泥岩相(高压压汞)(laminated dolomitic mudstone facies, high pressure Hg injection)

实作用强,颗粒接触紧密^[33],反而不利于孔隙的发育

(图4b)。比较而言,纹层状岩相样品比块状岩相样品的孔隙体积总体较高,且介孔和大孔相对发育(图7)。页岩储层中的黏土矿物有利于层间孔的发育,但由于黏土矿物极易挤压变形,黏土矿物的含量越高,孔隙受压实作用遭受破坏,整体表现为介孔相对发育,纹层状岩相样品在白云石含量为30%~40%时介孔及大孔更为发育(图7)。

4.2 岩相对含油性的影响

两口井的页岩样品的TOC含量和 S_1 含量普遍较高,TOC含量介于1%~3%, S_1 含量介于 $0\sim 35\times 10^{-3}$,且两者具有较为明显的正相关性。比较而言,纹层状岩相的页岩样品的TOC含量高,部分可高达3%,绝大多数样品的 S_1 含量高于 5×10^{-3} ;块状岩相的页岩样品TOC含量多低于2%, S_1 含量多低于 5×10^{-3} (表3),其中纹层状泥质云岩相具有相对高的TOC含量和 S_1 含量。

页岩矿物组成在一定程度上影响页岩油储层中的有机质富集和滞留烃的赋存。黏土矿物多为陆源碎屑,可以携带部分有机质进入,但是由于潜江凹陷有机质来源主要为水生藻类及细菌^[34],陆源碎屑所携带的有机质贡献较小,在一定程度上会稀释有机质的浓度,表现为黏土矿物与TOC含量多为负相关关系(图8)。黏土矿物中多发育微小孔径,不利于滞留烃(S_1)的大量赋存,与 S_1 含量、OSI值也多呈现负相关性(图8)。白云石含量与TOC含量、 S_1 含量及OSI值均有一定程度的正相关性,其中纹层状样品的相关性更强(图8),主要是由于这类样品多形成于还原性较强的湖泊深水區,有机质保存良好,纹层大部分呈微波状且物质组成较为复杂,高有机质含量反映了其沉积时期微生物勃发,创造了有利于碳酸盐矿物形成的沉积环境^[29]。

相比较而言,纹层状泥质云岩相具有良好的孔渗性,孔隙度一般为5%~15%,渗透率为 $1\times 10^{-3}\sim 10\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,而且纹层状泥质云岩相的页岩具有较高的TOC含量、 S_1 含量和OSI值,其中TOC含量为1%~2.5%, S_1 含量为 $7\times 10^{-3}\sim 30.5\times 10^{-3}$,OSI值范围为 $357.51\times 10^{-3}\sim 1350.49\times 10^{-3}$,是潜江组盐间地层页岩油勘探的优质岩相(图9)。

5 结论

(1)研究区潜江组页岩矿物成分复杂,主要为白云

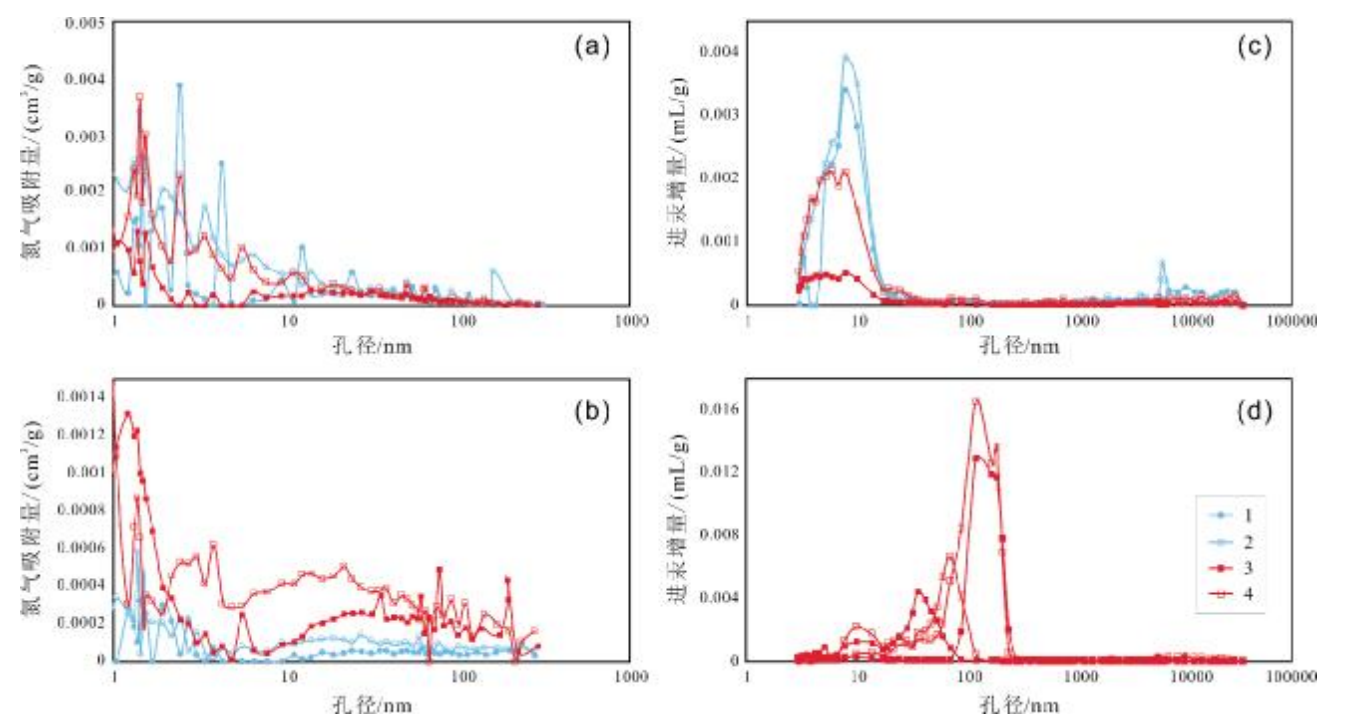


图 6 样品抽提前后氮气吸附曲线与进汞量曲线

Fig. 6 Nitrogen adsorption and incremental intrusion Hg curves before and after extraction of shale samples
a, c—块状(massive); b, d—纹层状(laminated); 1—灰质泥岩相(抽提前)(calcareous mudstone facies, before extraction); 2—灰质泥岩相(抽提后)(calcareous mudstone facies, after extraction); 3—云质泥岩相(抽提前)(dolomitic mudstone facies, before extraction); 4—云质泥岩相(抽提后)(dolomitic mudstone facies, after extraction)

表 3 样品不同岩相含油性数据统计表
Table 3 Oil-bearing property data of shale samples in different lithofacies

岩相	TOC/%	$S_i/10^{-3}$	OSI/ 10^{-3}
块状灰质泥岩	1.14~1.56/1.39(4)	1.86~5.11/3.63(4)	135.766~340.667/260.235(4)
块状泥质云岩	1.24~1.84/1.65(8)	4.46~6.22/5.43(8)	297.727~368.047/330.193(8)
块状云质泥岩	0.93~2.24/1.38(3)	3.98~5.23/4.71(3)	233.482~527.957/389.187(3)
纹层状灰质泥岩	1.32~1.76/1.56(3)	3.36~9.32/6.60(3)	211.321~706.061/1.56440.642(3)
纹层状泥质云岩	1.03~2.56/1.90(7)	6.90~30.46/14.71(7)	357.513~1350.485/806.321(7)
纹层状云质泥岩	1.79/1.79(1)	6.43/6.43(1)	359.218/359.218(1)

表中数据意义为:最小值~最大值/平均值(样品数).

石、黏土矿物、方解石、石英,以及少量长石、黄铁矿、石膏和岩盐,其中白云石和黏土矿物占主导地位.主要发育灰质泥岩相、云质泥岩相、泥质云岩相三大类.

(2)潜江组页岩主要发育碳酸盐岩晶间孔、黏土矿物层间孔,孔径分布范围主要为 2~200 nm,孔隙度多低于 20%,渗透率主要为 $0.1\times 10^{-3}\sim 100\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,为低

孔低渗-特低渗储层.

(3)潜江组页岩 TOC 含量较高,大多在 1%~2.5%, S_i 含量多处于 $5\times 10^{-3}\sim 10\times 10^{-3}$,OSI 值介于 $200\times 10^{-3}\sim 800\times 10^{-3}$,具有良好的生油性;生物成因的白云石含量与 TOC 含量、 S_i 含量及 OSI 值均有一定程度的正相关性;纹层状页岩比块状页岩具有相对较高

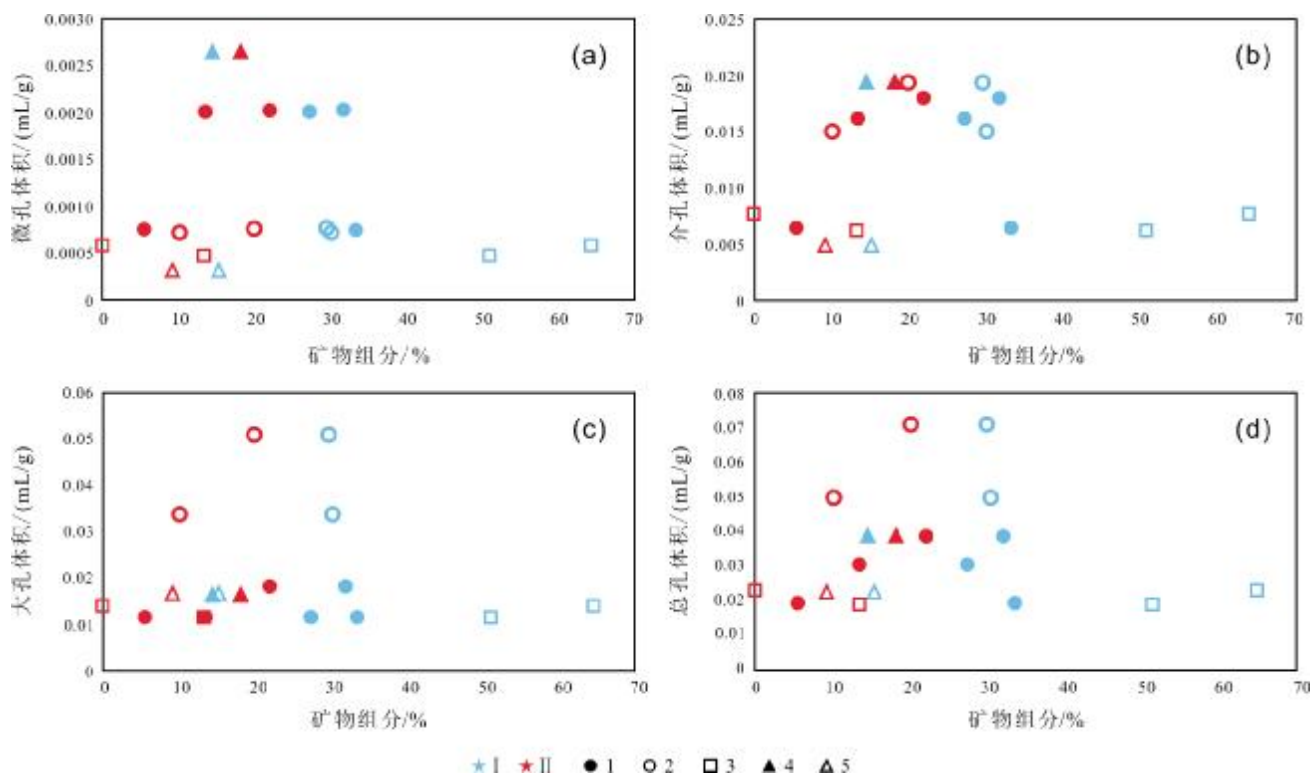


图7 样品孔隙与矿物含量相关性散点图

Fig. 7 Scatter diagrams showing the correlation between pore and mineral contents of shale samples

I—白云石 (dolomite); II—黏土矿物 (clay mineral); 1—块状云质泥岩相 (massive dolomitic mudstone facies); 2—纹层状云质泥岩相 (laminated dolomitic mudstone facies); 3—纹层状泥质云岩相 (laminated argillaceous dolomite facies); 4—块状灰质泥岩相 (massive calcareous mudstone facies); 5—纹层状灰质云岩相 (laminated calcareous dolomite facies)

的孔径、较好的孔隙连通性和含油性,是潜江组盐间地层优势岩相。

参考文献 (References):

- [1] Dapples E C, Krumbein W C, Sloss L L. Tectonic control of lithologic associations[J]. AAPG Bulletin, 1948, 32(10): 1924–1947.
- [2] 张顺, 刘惠民, 陈世悦, 等. 中国东部断陷湖盆细粒沉积岩岩相划分方案探讨——以渤海湾盆地南部古近系细粒沉积岩为例[J]. 地质学报, 2017, 91(5): 1108–1119.
Zhang S, Liu H M, Chen S Y, et al. Classification scheme for lithofacies of fine-grained sedimentary rocks in faulted basins of eastern China: Insights from the fine-grained sedimentary rocks in Paleogene, southern Bohai Bay Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(5): 1108–1119.
- [3] Wang G C, Carr T R. Marcellus shale lithofacies prediction by multiclass neural network classification in the Appalachian Basin[J]. Mathematical Geosciences, 2012, 44(8): 975–1004.
- [4] Jacobi J, Gladkikh M, Lecompte B, et al. Integrated petrophysical evaluation of shale gas reservoirs [C]//CIPC/SPE Gas Technology Symposium 2008 Joint Conference. Calgary: OnePetro, 2008.
- [5] Mitra A, Warrington D, Sommer A. Application of lithofacies models to characterize unconventional shale gas reservoirs and identify optimal completion intervals [C]//SPE Western Regional Meeting. Anaheim: OnePetro, 2010.
- [6] Milliken K L, Esch W L, Reed R M, et al. Grain assemblages and strong diagenetic overprinting in siliceous mudrocks, Barnett shale (Mississippian), Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(8): 1553–1578.
- [7] Abouelresh M O, Slatt R M. Lithofacies and sequence stratigraphy of the Barnett shale in east-central Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(1): 1–22.
- [8] Aplin A C, Macquaker J H S. Mudstone diversity: Origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2031–2059.
- [9] Bloch J D. Mud and mudstones: introduction and overview [J]. Eos, 2005, 86(14): 145.
- [10] 冯增昭. 从定量岩相古地理学谈华南地区海相地层油气勘探 [J]. 古地质量, 2005, 7(1): 1–11.
Feng Z Z. Discussion on petroleum exploration of marine strata in

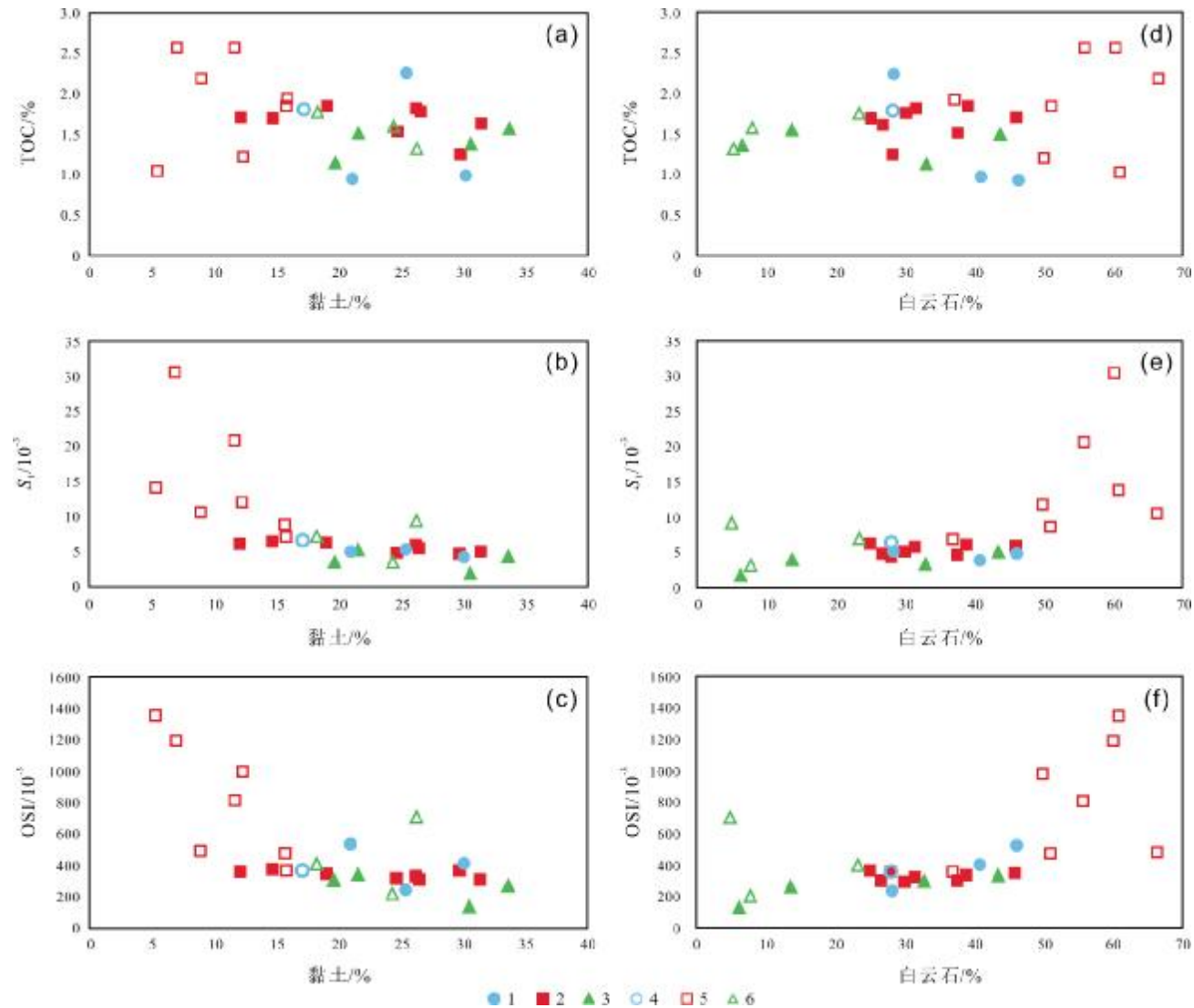


图8 样品地球化学参数与不同矿物含量分布相关性散点图

Fig. 8 Correlations between geochemical parameters and mineral contents of shale samples

1—块状云质泥岩相 (massive dolomitic mudstone facies); 2—块状泥质云岩相 (massive argillaceous dolomite facies); 3—块状灰质泥岩相 (massive calcareous mudstone facies); 4—纹层状云质泥岩相 (laminated dolomitic mudstone facies); 5—纹层状泥质云岩相 (laminated argillaceous dolomite facies); 6—纹层状灰质泥岩相 (laminated calcareous mudstone facies)

South China from quantitative lithofacies palaeogeography[J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(1): 1-11.

[11]沈骋,任岚,赵金洲,等.页岩岩相组合划分标准及其对缝网形成的影响——以四川盆地志留系龙马溪组页岩为例[J].石油与天然气地质, 2021, 42(1): 98-106, 123.

Shen C, Ren L, Zhao J Z, et al. Division of shale lithofacies associations and their impact on fracture network formation in the Silurian Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1): 98-106, 123.

[12]王圣柱.准噶尔盆地博格达地区中二叠统芦草沟组岩相类型及页岩油富集特征[J].大庆石油地质与开发, 2021, 40(1): 1-16, doi: 10.19597/j.issn.1000-3754.201912017.

Wang S Z. Lithofacies types and shale-oil accumulating characteristics of Middle Permian Lucaogou Formation in Bogda area of Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(1): 1-16, doi: 10.19597/j.issn.1000-3754.201912017.

[13]王勇,王学军,宋国奇,等.渤海湾盆地济阳坳陷泥页岩岩相与页岩油富集关系[J].石油勘探与开发, 2016, 43(5): 696-704.

Wang Y, Wang X J, Song G Q, et al. Genetic connection between mud shale lithofacies and shale oil enrichment in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(5): 696-704.

[14]徐兴友,刘卫彬,白静,等.松辽盆地南部青山口组一段页岩油富集地质特征及资源潜力[J].地质与资源, 2021, 30(3): 296-305,

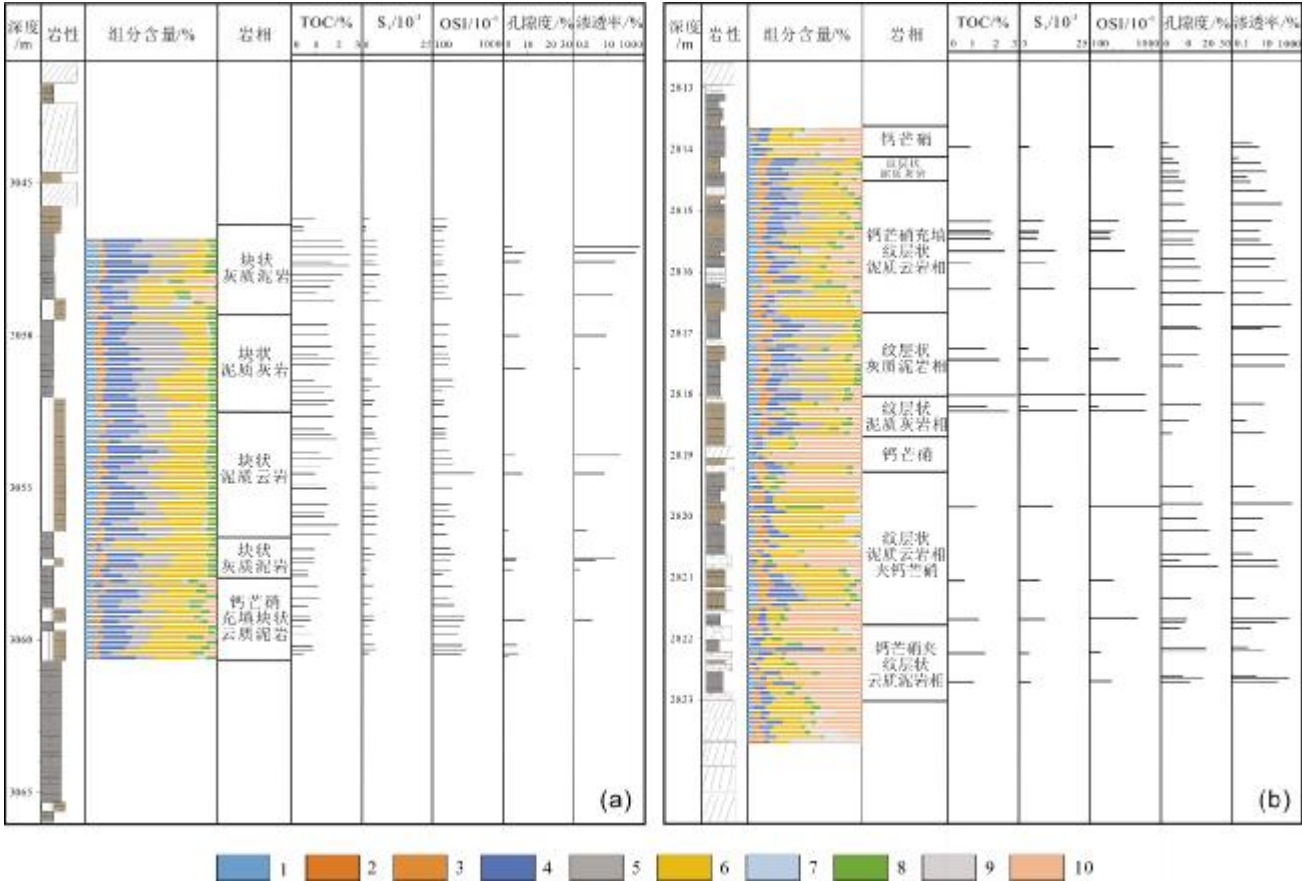


图9 潜江凹陷潜3⁴-10韵律综合柱状图

Fig. 9 Comprehensive stratigraphic column of Eq3⁴-10 rhythm in Qianjiang Sag

a— BX7 井(BX7 well); b— BYY2 井(BYY2 well); 1—石英(quartz); 2—辉长石(gabbro); 3—斜长石(plagioclase); 4—黏土(clay); 5—方解石(calcite); 6—白云石(dolomite); 7—硬石膏(anhydrite); 8—黄铁矿(pyrite); 9—石盐(halite); 10—钙芒硝(glauberite)

doi: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2021.03.011.

Xu X Y, Liu W B, Bai J, et al. Enrichment characteristics and resource potential of shale oil in the first member of Qingshankou Formation in Southern Songliao Basin [J]. *Geology and Resources*, 2021, 30(3): 296–305, doi: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2021.03.011.

[15]李士超, 杨建国, 柳波, 等. 松辽盆地三肇凹陷青山口组一段泥页岩岩石学特征及岩相划分——以松页油3井为例[J]. *地质与资源*, 2021, 30(3): 317–324, 295, doi: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2021.03.013.

Li S C, Yang J G, Liu B, et al. Petrology and lithofacies of shale from the first member of Qingshankou formation in Sanzhao Sag, Songliao Basin: a case study of SYY-3 Well [J]. *Geology and Resources*, 2021, 30(3): 317–324, 295, doi: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2021.03.013.

[16]柳波, 石佳欣, 付晓飞, 等. 陆相泥页岩层系岩相特征与页岩油富集条件——以松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段富有机质泥页岩为例[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(5): 828–838.

Liu B, Shi J X, Fu X F, et al. Petrological characteristics and shale oil enrichment of lacustrine fine-grained sedimentary system: A case study of organic-rich shale in first member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 828–838.

[17]Iqbal M A, Rezaee R, Smith G, et al. Shale lithofacies controls on porosity and pore structure: An example from Ordovician Goldwyer Formation, Canning Basin, Western Australia [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 89: 103888.

[18]Xu S, Hao F, Shu Z G, et al. Pore structures of different types of shales and shale gas exploration of the Ordovician Wufeng and Silurian Longmaxi successions in the eastern Sichuan Basin, South China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 193: 104271.

[19]孙中良, 王芙蓉, 何生, 等. 潜江凹陷古近系盐间典型韵律层页岩孔隙结构[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2019, 36(3): 289–297.

Sun Z L, Wang F R, He S, et al. The pore structures of the shale about typical inter-salt rhythm in the Paleogene of Qianjiang

- depression [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2019, 36(3): 289–297.
- [20] Huang C J, Hinnov L. Evolution of an Eocene-Oligocene saline lake depositional system and its controlling factors, Jiangnan Basin, China [J]. Journal of Earth Science, 2014, 25(6): 959–976.
- [21] 李乐, 刘爱武, 漆智先, 等. 潜江凹陷王场背斜潜四下段盐韵律层页岩储层孔隙结构特征[J]. 地球科学, 2020, 45(2): 602–616.
- Li L, Liu A W, Qi Z X, et al. Pore Structure characteristics of shale reservoir of the lower Qian 4 Member in the Wangchang anticline of the Qianjiang sag[J]. Earth Science, 2020, 45(2): 602–616.
- [22] 徐二社, 陶国亮, 李志明, 等. 江汉盆地潜江凹陷盐间页岩油储层不同岩相微观储集特征——以古近系潜江组三段4亚段10韵律为例[J]. 石油实验地质, 2020, 42(2): 193–201.
- Xu E S, Tao G L, Li Z M, et al. Microscopic reservoir characteristics of different lithofacies from inter-salt shale oil reservoir in Qianjiang Sag, Jiangnan Basin: A case study of Paleogene $Eg3^4$ –10 rhythm[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(2): 193–201.
- [23] 刘心蕊, 吴世强, 陈凤玲, 等. 江汉盆地潜江凹陷潜江组盐间页岩油储层特征研究——以潜3⁴–10韵律为例[J]. 石油实验地质, 2021, 43(2): 268–275.
- Liu X R, Wu S Q, Chen F L, et al. Characteristics of reservoirs for inter-salt shale oil of Qianjiang Formation, Qianjiang Sag, Jiangnan Basin: A case study of the $Eg3^4$ –10 rhythm[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(2): 268–275.
- [24] Wang Z X, Zheng Y H, Chen F L, et al. Biomarker geochemistry of $Eg3^4$ –10 cyclothems in Qianjiang Depression of the Jiangnan salt lake facies basin[J]. Petroleum Science and Technology, 2018, 36(2): 148–153.
- [25] Hou Y G, Wang F R, He S, et al. Properties and shale oil potential of saline lacustrine shales in the Qianjiang Depression, Jiangnan Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 86: 1173–1190.
- [26] 沈娟, 李小平, 安生婷, 等. 四川盆地志留系龙马溪组页岩储集空间及矿物组成特征[J]. 地质与资源, 2017, 26(6): 590–595, doi: 10.13686/j.cnki.dzyz.2017.06.010.
- Shen J, Li X P, An S T, et al. Reservoir space and mineral composition of the shale from Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin [J]. Geology and Resources, 2017, 26(6): 590–595, doi: 10.13686/j.cnki.dzyz.2017.06.010.
- [27] 方志雄, 陈开远, 陈凤玲, 等. 江汉盆地盐湖沉积充填模式[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- Fang Z X, Chen K Y, Chen F L, et al. Filling models of Jiangnan salt lake basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [28] 肖枫. 潜江凹陷潜江组盐间页岩储层特征研究——以潜3⁴–10韵律和潜4⁰–5韵律为例[D]. 荆州: 长江大学, 2017.
- Xiao F. Study on the characteristics of salt shale reservoir in Qianjiang Formation in Qianjiang Sag: A case study of the 10th rhythm of $Eg3^4$ and the 5th rhythm of middle $Eg4^0$ [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2017.
- [29] 陈晨, 姜在兴, 孔祥鑫, 等. 潜江凹陷潜江组盐间细粒岩沉积特征及其对页岩含油性的控制[J]. 地学前沿, 2021, 28(5): 421–435, doi: 10.13745/j.esf.sf.2020.12.8.
- Chen C, Jiang Z X, Kong X X, et al. Sedimentary characteristics of intersalt fine-grained sedimentary rocks and their control on oil-bearing ability of shales in the Qianjiang Formation, Qianjiang Sag [J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(5): 421–435, doi: 10.13745/j.esf.sf.2020.12.8.
- [30] Sun M D, Zhang L H, Hu Q H, et al. Multiscale connectivity characterization of marine shales in southern China by fluid intrusion, small-angle neutron scattering (SANS), and FIB-SEM [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 112: 104101.
- [31] 孔祥鑫. 湖相含碳酸盐细粒沉积岩特征、成因与油气聚集[D]. 北京: 中国地质大学, 2020, doi: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2020.000043.
- Kong X X. Sedimentary characteristics, origin and hydrocarbon accumulation of lacustrine carbonate-bearing fine-grained sedimentary rocks [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020, doi: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2020.000043.
- [32] 汪品先. 古海洋学研究进展——第四届国际古海洋学会议(ICP-IV)介绍[J]. 海洋地质动态, 1993, 9(4): 1–8.
- Wang P X. Progress in paleoceanography research: Introduction to the Fourth International Conference on Paleoceanography (ICP-IV) [J]. Marine Geology Frontiers, 1993, 9(4): 1–8. (in Chinese)
- [33] 吴世强, 陈凤玲, 姜在兴, 等. 江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组白云岩成因[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 201–208.
- Wu S Q, Chen F L, Jiang Z X, et al. Origin of Qianjiang Formation dolostone in Qianjiang Sag, Jiangnan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 201–208.
- [34] 孙中良, 王芙蓉, 侯宇光, 等. 盐湖页岩有机质富集主控因素及模式[J]. 地球科学, 2020, 45(4): 1375–1387.
- Sun Z L, Wang F R, Hou Y G, et al. Main controlling factors and modes of organic matter enrichment in salt lake shale [J]. Earth Science, 2020, 45(4): 1375–1387.