

# 江汉盆地潜江凹陷潜江组盐间页岩油储层特征研究

——以潜 3<sup>4</sup>-10 韵律为例

刘心蕊<sup>1</sup>, 吴世强<sup>2</sup>, 陈凤玲<sup>2</sup>, 张亮<sup>2</sup>, 杜小娟<sup>2</sup>, 管文静<sup>2</sup>, 梁文川<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074; 2. 中国石化江汉油田分公司, 武汉 430035)

**摘要:**江汉盆地始新统潜江组盐间页岩油是近年来研究的热点和难点。为了明确盐间页岩储层岩相及其储集物性, 综合运用岩心观测、岩石薄片鉴定、X 衍射、高压压汞和页岩孔渗等资料, 对潜江凹陷潜江组盐间页岩油储层岩相发育特征及其对储集物性的影响进行了研究。该区盐间页岩油储层主要包括富碳纹层状泥质白云岩相、富碳纹层状云/灰质泥岩相和钙芒硝充填富碳纹层状云质泥岩相 3 种不同类型的岩相类型, 前 2 种岩相的孔隙度明显高于后者。不同岩相孔径分布差异明显, 富碳纹层状泥质白云岩相以孔径大于 41 nm 的孔隙为主, 中值孔喉半径为 219 nm; 而富碳纹层状云/灰质泥岩相和钙芒硝充填富碳纹层状云质泥岩相则以孔径小于 41 nm 的孔隙为主, 中值孔喉半径为 21 nm。富碳纹层状泥质白云岩相岩性均一, 具有良好的储集空间和较大的孔喉结构, 页岩储层中的含油性较高, 为盐间页岩油储层中的优势岩相, 是研究区最有利的页岩油勘探目标。

**关键词:**页岩油; 盐间页岩; 岩相特征; 储集物性; 潜江组; 潜江凹陷; 江汉盆地

中图分类号: TE122.23

文献标识码: A

## Characteristics of reservoirs for inter-salt shale oil of Qianjiang Formation, Qianjiang Sag, Jianghan Basin:

a case study of the Eq<sub>3</sub><sup>4</sup>-10 rhythm

LIU Xinrui<sup>1</sup>, WU Shiqiang<sup>2</sup>, CHEN Fengling<sup>2</sup>, ZHANG Liang<sup>2</sup>,

DU Xiaojuan<sup>2</sup>, GUAN Wenjing<sup>2</sup>, LIANG Wenchuan<sup>2</sup>

(1. School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, SINOPEC Jianghan Oilfield Branch Company, Wuhan, Hubei 430223, China)

**Abstract:** The inter-salt shale oil of the Eocene Qianjiang Formation in the Jianghan Basin is a hot and difficult research target in recent years. In order to clarify the lithofacies and physical properties of the inter-salt shale reservoirs, based on core observation, thin section observation, X-ray diffraction, high-pressure mercury intrusion and shale porosity and permeability analyses, a case study was carried out for the Qianjiang Formation in the Qianjiang Sag of Jianghan Basin. Results showed that there were three types of lithofacies, including carbonaceous laminar argillaceous dolomites, carbonaceous lamellar dolomitic/lime mudstones and carbonaceous lamellar dolomitic mudstones filled with glauberites. The porosities of the first two lithofacies were significantly higher than that of the latter. The pore size distribution of different lithofacies showed that the carbonaceous laminar argillaceous dolomites were dominated by pores with radius greater than 41 nm, and the median pore-throat radius was 219 nm, while the other two facies were dominated by pores with pore radius less than 41 nm and the median pore-throat radius was 21 nm. The carbonaceous laminar argillaceous dolomites were indicated to be homogeneous in lithology. As reservoir, they have good reservoir space, larger pore-throat structure and higher oil content, and was the dominant facies in the inter-salt shale oil reservoir and is promising to be the most favorable shale oil exploration target in the study area.

**Key words:** shale oil; inter-salt shale; lithofacies characteristics; reservoir properties; Qianjiang Formation; Qianjiang Sag; Jianghan Basin

近年来,随着国内外非常规油气资源理论水平逐步提升、技术日趋完善,页岩油成为油气勘探开

发的前沿和热点研究领域<sup>[1-2]</sup>。中国是世界能源需求大国,2018年数据显示,我国石油对外依存度

收稿日期: 2020-04-22; 修订日期: 2021-03-08。

作者简介: 刘心蕊(1997—), 女, 硕士, 从事地质勘查及地质勘探研究。E-mail: 835534721@qq.com。

通信作者: 吴世强(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事页岩油综合研究。E-mail: wusq.jhyt@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05049-005)资助。

超过 70%<sup>[3]</sup>,因此,亟需建立和发展适用于中国复杂地质条件的非常规油气资源理论,加大页岩油气的勘探开发力度,为国家能源安全提供保障<sup>[4-5]</sup>。我国页岩油资源总体较丰富,但较国外资源条件具有特殊性。北美主要为海相盆地页岩油,我国主要为陆相盆地页岩油<sup>[6-7]</sup>。在中国陆相盆地中,江汉盆地属于典型的陆相盐湖盆地,在古近系潜江组盐间页岩中油气显示丰富,录井均为油浸页岩,120 多口井见槽面显示,50 多口井获工业油流,展现出良好的勘探开发前景。

目前,学者们针对江汉盆地潜江凹陷盐间页岩油储层的生烃条件和含油性等陆续开展了大量研究并取得了丰富的成果<sup>[8-11]</sup>,探讨了页岩油储层矿物组成、脆性特征、含油性、资源潜力和页岩油富集机理等方面的关键问题。然而,由于盐间储层盐韵律十分发育,岩性复杂多样,碳酸盐和硫酸盐等矿物对储层储集空间影响较大,导致盐间储层岩相特

征与储集物性关系的研究相对薄弱<sup>[12]</sup>。为此,本文以潜江凹陷页岩油显示较好的 4 口探井/兼探井潜三段第四油组的第十韵律层(潜 3<sup>4</sup>-10)取心段为剖析对象,在岩心系统观察描述基础上,选取典型样品开展岩石薄片鉴定、X 衍射、高压压汞和孔渗等分析,评价潜 3<sup>4</sup>-10 韵律盐间页岩矿物组成和岩相特征,分析岩相类型与储集特征,落实盐间页岩油勘探有利岩相,以期为江汉盆地盐间页岩油勘探开发和有利层段的优选提供依据。

### 1 区域地质背景

江汉盆地是我国东部古近纪陆相含油盐湖盆地,属燕山运动发展起来的白垩纪—古近纪断陷盆地,经历了 2 个断—拗旋回,主要发育了新沟嘴组 and 潜江组 2 套生储油层系<sup>[13]</sup>。江汉盆地由枝江、江陵、陈沱口、潜江、小板、云梦、沔阳 7 个次级凹陷组成<sup>[13-14]</sup>(图 1),其中又以潜江凹陷为沉积沉降中

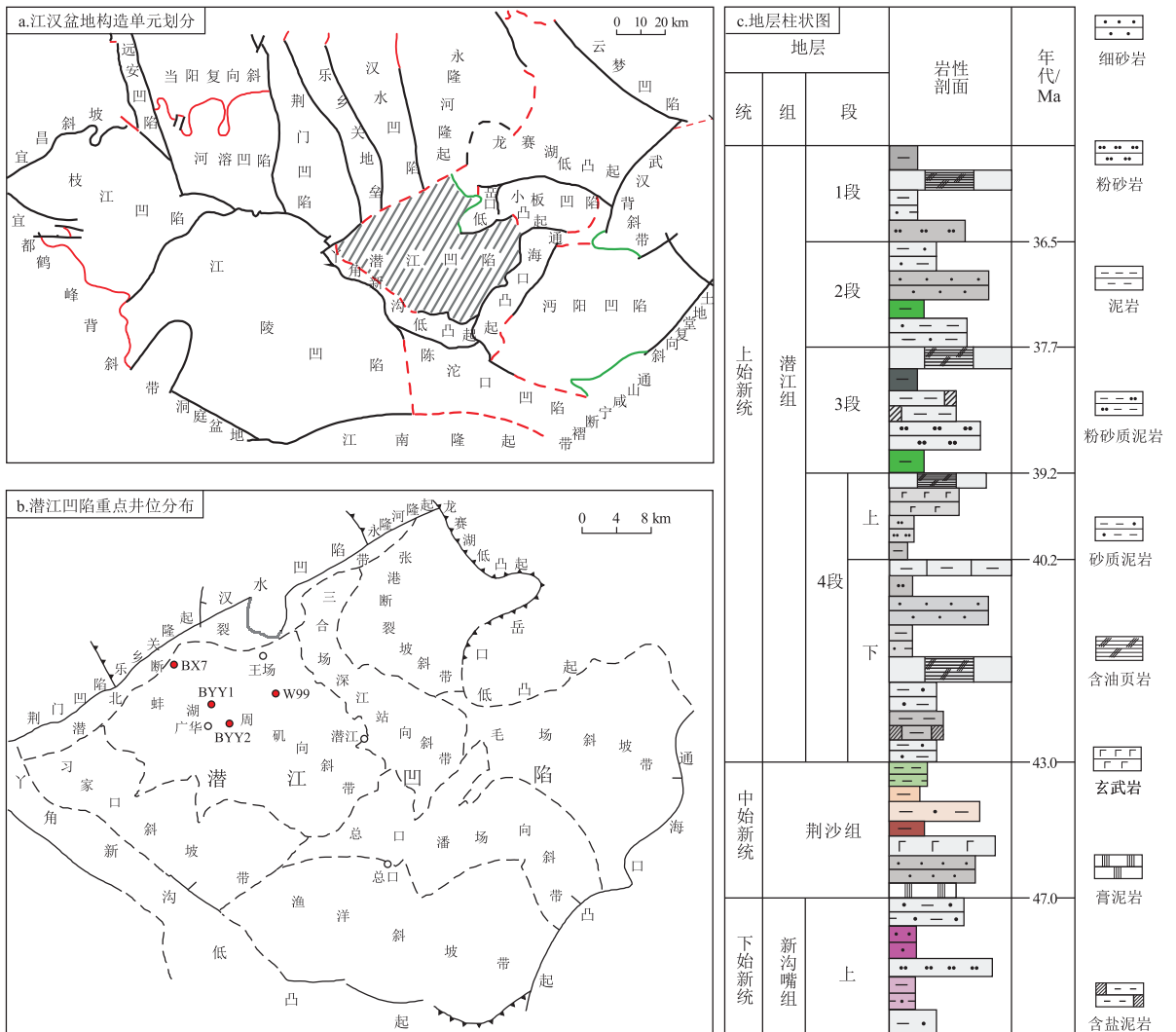


图 1 江汉盆地潜江凹陷构造位置与剖析井分布  
Fig.1 Tectonic units and well locatins in Qianjiang Sag, Jianghan Basin

心<sup>[9,15]</sup>,面积约 2 530 km<sup>2</sup>。潜江凹陷潜江组由砂泥岩层和盐韵律层频繁交互而成,其中盐韵律层由盐岩层与盐间页岩层组成,共有 193 个盐韵律层<sup>[16-17]</sup>。纵向上,潜二段沉积早期、潜三段沉积中期、潜四下段沉积晚期沉积的盐间页岩,既是高效优质烃源岩<sup>[18-20]</sup>,又是储集岩。由于上下盐岩分隔、纵向运移条件差,形成了封闭的盐间页岩油系统。

## 2 矿物组成及岩相特征

### 2.1 矿物组成与岩相类型

根据潜江凹陷 4 口页岩油专探井/兼探井 (BYY2 井、BYY1 井、W99 井和 BX7 井)潜江组潜 3<sup>4</sup>-10 韵律盐间页岩层系取心段岩心系统观察结果,对典型岩性样品进行了系统采集与分析测试。表 1 为样品全岩 X 衍射分析的统计结果,很显然潜 3<sup>4</sup>-10 韵律盐间页岩层系纵横向矿物组成变化大,矿物成分复杂,主要矿物包括白云石、黏土矿物、钙芒硝、方解石、石英等。其中,BX7 井白云石、黏土矿物、钙芒硝、方解石、石英含量平均分别为 31.8%,20.7%,2.2%,22.6%,8.2%;BYY1 井白云石、黏土矿物、钙芒硝、方解石、石英含量平均分别为 28.7%,12.2%,18.5%,10.9%,7.3%;BYY2 井白云石、黏土矿物、钙芒硝、方解石、石英含量平均分别为 30.9%,12.4%,23.4%,9.8%,6.7%;W99 井白云石、黏土矿物、钙芒硝、方解石、石英含量平均分别为 23.6%,26.7%,22.3%,9.7%,10.8%。总的来说,该韵律层主要矿物的平均含量白云石为 29.3%,黏土矿物为 16.0%,钙芒硝为 17.6%,方解石为 12.6%,石英为 7.8%。

传统的页岩岩相分类主要采用脆性矿物、黏土矿物和碳酸盐矿物作为 3 个单元,再结合有机碳含量、纹层发育程度等特征划分岩相。考虑到研究区

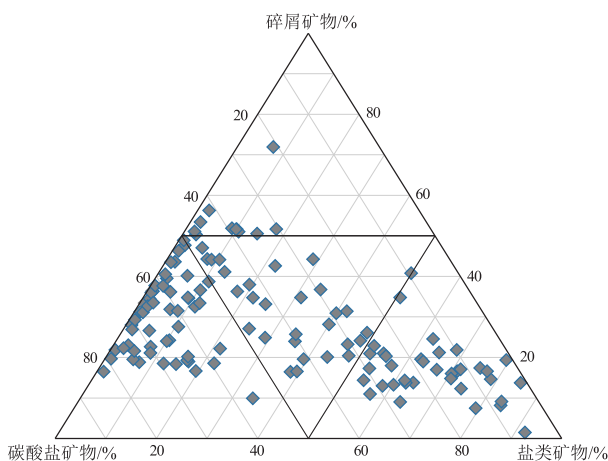


图 2 江汉盆地潜江凹陷潜 3<sup>4</sup>-10 韵律盐间页岩层主要矿物组成和岩相划分方案  
Fig.2 Major mineral composition and lithofacies division of inter-salt shales in E<sub>3</sub><sup>4</sup>-10 rhythm, Qianjiang Formation, Qianjiang Sag, Jiangnan Basin

的盐湖背景和较高的盐类矿物含量,本文以碎屑类矿物(石英+黏土+长石)、碳酸盐类矿物(方解石+白云石)和盐类矿物(钙芒硝+石盐)3 大类矿物组成为基础(图 2),按照矿物成分—层理构造—有机质丰度作为岩相定名主要依据,识别出研究区盐间页岩主要的岩相类型,分别为富碳纹层状泥质白云岩相、富碳纹层状云/灰质泥岩相和钙芒硝充填富碳纹层状云质泥岩相(图 3)。

### 2.2 岩相特征

研究表明,潜江凹陷潜江组盐间页岩层系厚度一般为 5~10 m,部分层系在局部地区可达 20 m 以上。4 口探井揭示潜 3<sup>4</sup>-10 韵律盐间页岩层系厚度较小(取心显示在 10 m 左右),但由于盐间沉积具有成盐多期性和长期性,导致不同岩相特征具有显著差异<sup>[21]</sup>。

富碳纹层状泥质白云岩相主要发育在潜 3<sup>4</sup>-10

表 1 江汉盆地潜江凹陷潜江组潜 3<sup>4</sup>-10 韵律盐间页岩层矿物成分统计

Table 1 Mineral composition of inter-salt shales in E<sub>3</sub><sup>4</sup>-10 rhythm, Qianjiang Formation, Qianjiang Sag, Jiangnan Basin

井号	黏土矿物	硬石膏	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	菱铁矿	黄铁矿	石盐	钙芒硝
BX7	0.6~39.1 20.7/(72)	0.3~17.1 1.3/(72)	3.8~15.6 8.2/(72)	0.5~4.4 1.1/(72)	1.6~7.1 4.3/(72)	2.7~50.8 22.6/(72)	12.1~73.8 31.8/(72)	0.1~13.1 0.6/(72)	1.9~12.6(72) 7.1/(72)	0.1~0.3 0.2/(72)	0.4~5.8 2.2/(72)
BYY1	0.1~33.3 12.2/(117)	0.4~41.2 3.4/(117)	0.1~15 7.3/(117)	0.2~10.6 0.7/(117)	1.9~20 6.7/(117)	0.3~65.1 10.9/(117)	2.0~70.3 28.7/(117)	0.0 (117)	1.0~28.2 4.3(117)	0.6~92 3.7(117)	1.4~91.3 18.5(117)
BYY2	1.5~42.3 12.4/(128)	0.1~0.6 0.2/(128)	1.9~16.4 6.7/(128)	0.2~9 0.5/(128)	2.7~15.5 7.1/(128)	1.0~45.0 9.8/(128)	3.7~74.3 30.9/(128)	0.0 (128)	1.1~32.8 5.4(128)	0.6~63.2 3.0(128)	3.0~84.1 23.4(127)
W99	5.7~54.7 26.7/(54)	0.0 (57)	2.6~17.6 10.8/(57)	0.1~2.2 0.3/(57)	0.2~5.6 1.8/(57)	1.5~39.8 9.7/(57)	2.8~76.9 23.6/(57)	0.0 (57)	1.5~9.3 3.2(57)	0.8~6.3 1.5(57)	3.6~82.5 22.3(57)
平均	16.0	1.4	7.8	0.7	5.7	12.6	29.3	0.1	5.1	2.5	17.6

注:表中数据意义为最小值~最大值/平均值(样品数)。

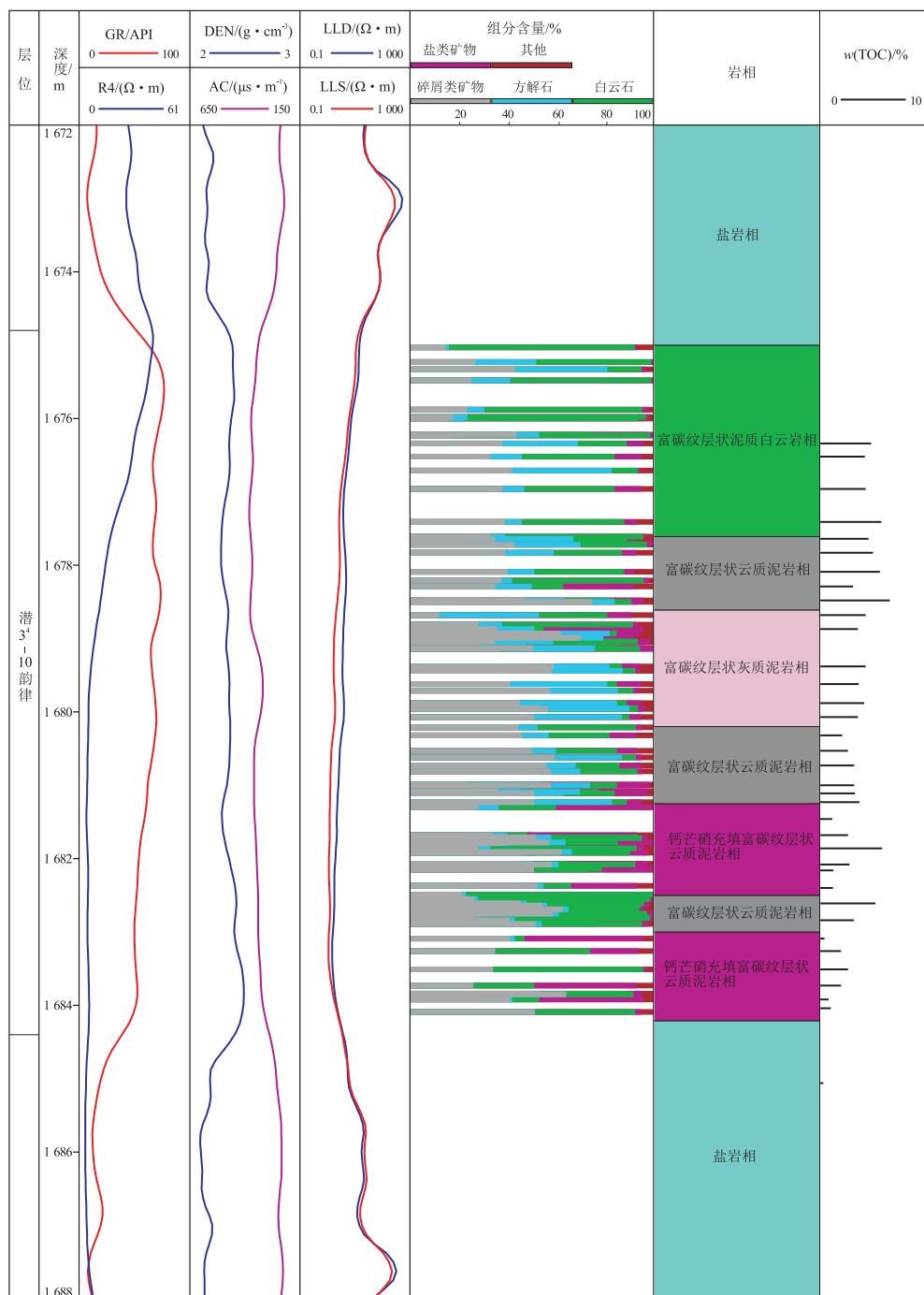


图 3 江汉盆地潜江凹陷 W99 井潜江组潜 3<sup>4</sup>-10 盐间页岩岩相划分

Fig.3 Lithofacies division of inter-salt shales in Eq<sub>3</sub><sup>4</sup>-10 rhythm, Qianjiang Formation, well W99, Qianjiang Sag, Jiangnan Basin

韵律中上部,岩石多呈深灰、黄褐色。该岩相矿物学特征表现为白云石含量最高,平均为 44.1%,黏土矿物含量平均为 20.3%,方解石含量平均为 16.8%,石英和长石含量平均为 14.7%,其余还有少量钙石盐、黄铁矿及石膏等(图 3,图 4)。富碳纹层状泥质白云岩相基质具泥晶结构,泥质、云质相互混杂,陆屑颗粒少量,部分岩石表面被石盐覆盖;晶间孔隙较不发育,部分岩石具纹层构造(图 5),具有较高的有机碳含量(图 3)。

富碳纹层状云/灰质泥岩相主要发育在潜 3<sup>4</sup>-10 韵律中部,岩心呈灰色。该岩相矿物特征表现为黏土矿物含量较高(平均为 32.3%),石英、长石含量平均为 17.4%。其中,云质泥岩中白云石含量平均为 23.5%,方解石含量平均为 18.3%;灰质泥岩中白云石含量平均为 7.3%,方解石含量平均为 35.8%(图 3,图 4)。此外,富碳纹层状云/灰质泥岩相含少量其他矿物,如钙芒硝、黄铁矿等。富碳纹层状云/灰质泥岩相纹层发育,富碳质暗色纹层

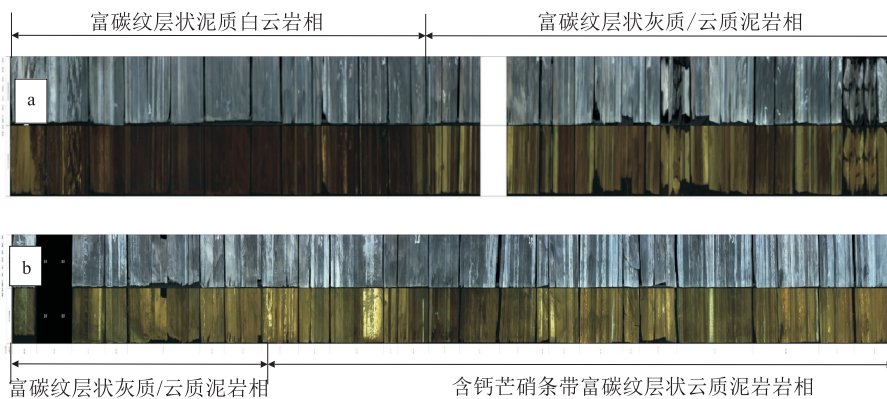


图 4 江汉盆地潜江凹陷潜江组盐间页岩岩心扫描照片

图版上部为白光照片,下部为荧光照片。a.纹层状泥晶白云岩(2 813.7~2 816.2 m),纹层状灰质/云质泥岩(2 816.2~2 819.3 m);  
b.纹层状灰质/云质泥岩(2 819.3~2 820.43 m),含钙芒硝条带纹层状云质泥岩(2 820.43~2 823.78 m)

Fig.4 White light and fluorescence scanning photos of inter-salt shales in Qianjiang Formation, Qianjiang Sag, Jiangnan Basin

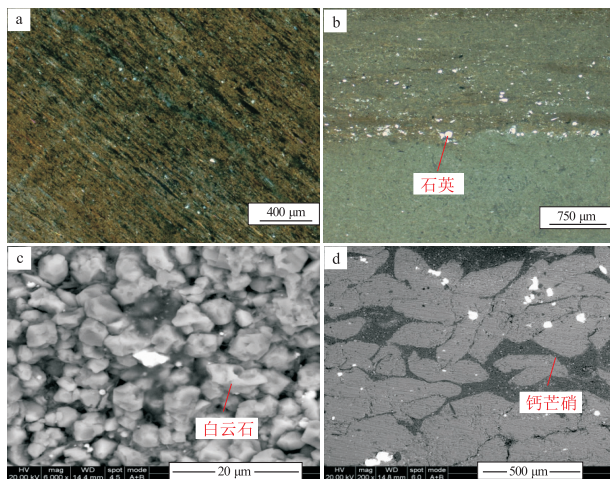


图 5 江汉盆地潜江凹陷潜江组盐间页岩主要矿物结构、结构特征

a.纹层状泥晶白云岩(BYY2井,潜 $3^4-10$ ,2 818.0 m);  
b.纹层状白云岩(W99井,潜 $3^4-10$ ,1 679.0 m);c.纹层状泥晶白云岩(W99井,潜 $3^4-10$ ,1 678.1 m);d.钙芒硝充填纹层状白云岩(W99井,潜 $3^4-10$ ,1 688.2 m)

Fig.5 Petrographic structure of inter-salt shales in Qianjiang Formation, Qianjiang Sag, Jiangnan Basin

与富灰质亮色纹层间互层,层间缝较为发育,可见局部夹有黄褐色纹层状泥晶白云岩;泥晶灰岩纹层厚度小于 1 mm,荧光下纹层内部可见波状有机质条带,具有较高的有机碳含量(图 3,图 5)。

钙芒硝充填富碳纹层状云质泥岩相主要发育在潜 $3^4-10$ 韵律底部。岩心呈浅灰色,矿物成分以黏土矿物为主,平均为 34.7%,白云石含量平均为 27.2%,钙芒硝含量平均为 25.5%,黄铁矿含量平均为 5.8%,石盐含量平均为 3.2%,其余矿物成分还包括方解石、石膏及硬石膏等(图 3,图 4)。钙芒硝呈板块状分布,存在钙芒硝充填,其粒径为 0.02~0.20 mm;晶间孔及微裂缝发育程度低,具有较高有机碳含量(图 3,图 5)。

### 3 岩相类型与页岩储集物性

根据潜江凹陷典型样品储集物性分析结果(表 2),潜江组潜 $3^4-10$ 韵律盐间页岩储层孔隙度较高,为 1.9%~31.3%,平均总孔隙度为 6.0%~22.%;但渗透率相对较低,为  $(0.06 \sim 5.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均为  $(0.55 \sim 2.18) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (表 2)。总的来说,研究区潜 $3^4-10$ 韵律页岩储层为中孔—特低渗页岩储层。进一步的分析表明,研究区不同岩相的储集物性具有较大的差异,即同一韵律层储集物性受岩相控制明显。由图 6 可见,3 种岩相中富碳纹层状泥质白云岩相、云质/灰质泥岩相储集空间发育程度较好,其孔隙度分别为 23.83%和 29.38%;而钙芒硝充填富碳纹层状云质泥岩相储集空间发育程度较差,其孔隙度约为 14.97%。

另一方面,基于高压压汞测试分析显示,富碳纹层状泥质白云岩相孔喉半径主要为 6~410 nm,中值孔喉半径为 219 nm,孔径大于 41 nm 的孔隙占总数的 81%,压汞孔隙度为 19.07%,综合表明该岩相储集物性相对较好(图 7)。富碳纹层状灰质泥岩相储层孔喉半径集中分布在 6~64 nm,中值孔喉半径为 21 nm,孔径大于 41 nm 的孔隙占总数的 18%,

表 2 江汉盆地潜江凹陷潜江组潜 $3^4-10$ 韵律盐间页岩储集物性数据

Table 2 Reservoir properties of inter-salt shales in  $Eq_3^4-10$  rhythm, Qianjiang Formation, Qianjiang Sag, Jiangnan Basin

井号	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
BX7	1.9~9.1/6.0(18)	0.06~1.6/0.55(18)
BYY1HF	4.1~10.2/8.5(65)	0.13~3.6/1.5(40)
BYY2	5.1~18/11.9(78)	0.23~5.1/2.18(47)
W99	14.2~31.3/22.(4)	0.7~1.3/1.0(2)

注:表中数据意义为,最小值~最大值/平均值(样品数)。

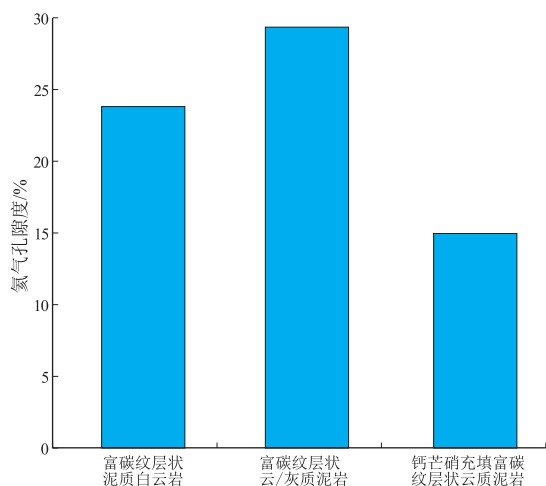


图 6 江汉盆地潜江凹陷王 99 井潜江组潜 3<sup>4</sup>-10 韵律盐间页岩相与孔隙度关系

Fig.6 Relationship between lithofacies and porosity of inter-salt shales in Eq<sub>3</sub><sup>4</sup>-10 rhythm, Qianjiang Formation, well W99, Qianjiang Sag, Jianghan Basin

压汞孔隙度为 25.17% (图 7)。钙芒硝充填纹层状灰质泥岩相储层孔喉半径主要分布在 6~64 nm 左右,中值孔喉半径为 21 nm,孔径大于 41 nm 的孔隙占总数的 27%,压汞孔隙度为 13.40%,综合表明,该岩相储集物性相对较差 (图 7)。

### 4 有利岩相

页岩储层中烃类富集层段是页岩油勘探开发的首选目标。目前,页岩油开发普遍采用压裂增产措施,即页岩含油气层段能否高产,在一定程度上由烃类含量以及烃类物质在压裂改造过程中的可流动性共同决定。因此,页岩油富集层段孔渗特征和游离烃含量是评价页岩油经济开发的重要参数<sup>[12,22-23]</sup>。

目前,国内外学者普遍采用热解参数 S<sub>1</sub>来代替游离烃含量以进行页岩含油潜力分析。前人<sup>[24]</sup>研

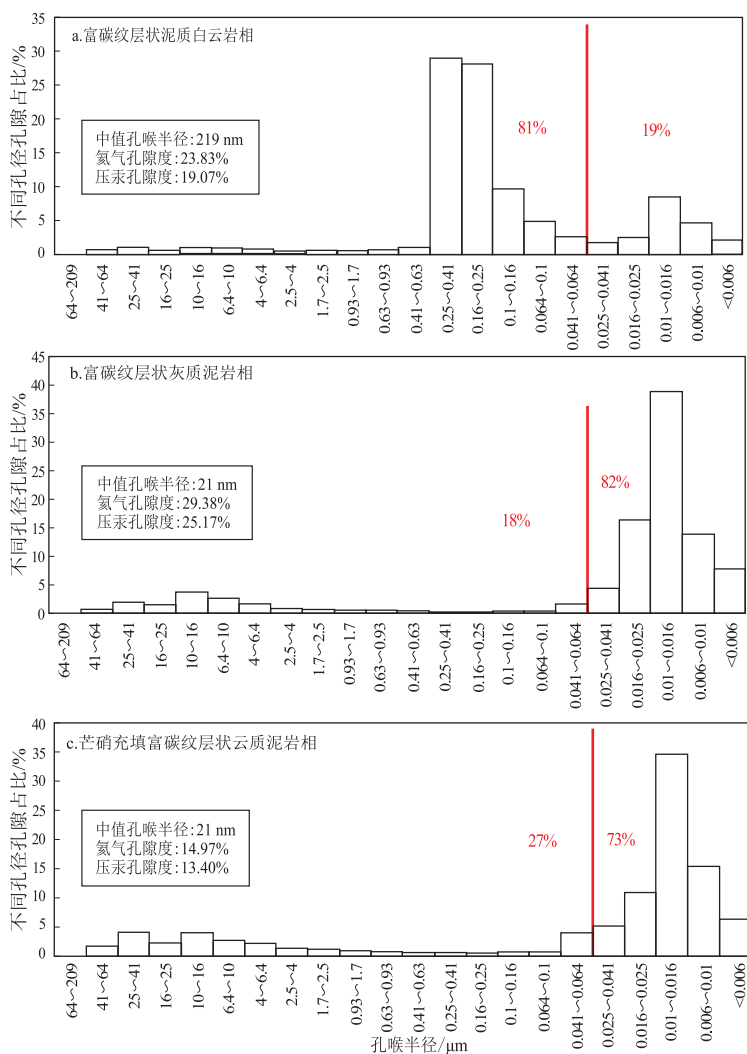


图 7 江汉盆地潜江凹陷潜江组不同岩相储层孔径表征

Fig.7 Distribution of pore size of shale reservoirs with different lithofacies in Qianjiang Formation, Qianjiang Sag, Jianghan Basin

研究表明,潜江凹陷潜江组潜 $3^4-10$ 韵律层的 $S_1$ 介于2.73~28.47 mg/g之间,平均值为14.14 mg/g,明显高于美国的巴肯页岩( $S_1$ 平均值为2.93 mg/g)和国内鄂尔多斯盆地长7段页岩( $S_1$ 平均值为5.24 mg/g),表明研究区页岩含油率较高。研究区潜 $3^4-10$ 韵律页岩层上部的富碳纹层状泥质白云岩相岩性均一,TOC含量较高(图3), $S_1$ 值约为18.47 mg/g(图8),表明页岩储层中的含油性较好。同时,其孔隙度较高,约为23.83%,孔径大于41 nm的孔隙占总数的81%,孔喉半径中值高达219 nm(图7),有利于页岩油的储集和产出。因此,富碳纹层状泥质白云岩相为盐间页岩油储层中的优势岩相,可作为研究区页岩油勘探中的“甜点”。富碳纹层状云/灰质泥岩相TOC含量与富碳纹层状泥质白云岩相相当(图3), $S_1$ 值也保持在10 mg/g左右(图8),孔隙度高达29.38%(图6),有利于页岩油的储集。但富碳纹层状云/灰质泥岩相页岩孔喉较小,孔喉半径集中在6~64 nm(中值为21 nm),孔径大于41 nm的孔隙仅占总数的18%(图7),不利于页岩油的产出。因此,富碳纹层状云/灰质泥岩相开发潜能中等<sup>[12,23]</sup>。钙芒硝充填富碳纹层状云质泥岩相TOC含量较低(图3), $S_1$ 值低于5 mg/g(图8),表明页岩含油稳定性较差<sup>[8,10]</sup>。该岩相孔隙度较低,孔喉半径为6~64 nm,中值孔喉半径为21 nm,孔径大于41 nm的孔隙占总数的27%(图7),其较差的孔隙空间和致密的孔喉结构不利于页岩油的富集和产出<sup>[23-24]</sup>。此外,由于该种类型岩相页岩盐类含量高,在开发过程中易造成储层结盐、堵塞,导致开发效果较差<sup>[12]</sup>,因此,其开发潜力相对最低。

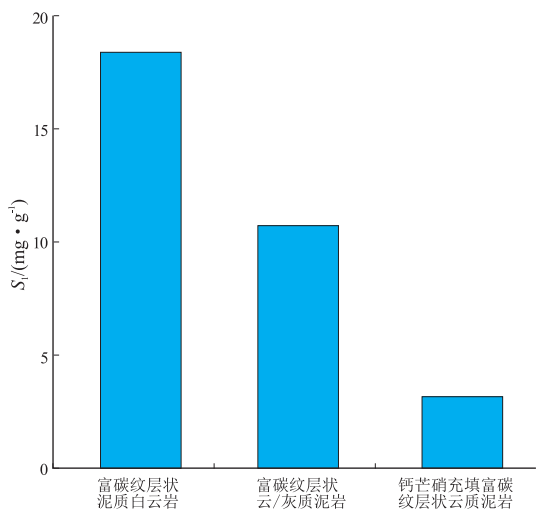


图8 江汉盆地潜江凹陷潜江组不同岩相游离烃含量分布

Fig.8 Free hydrocarbon contents of different lithofacies in Qianjiang Formation, Qianjiang Sag, Jiangnan Basin

## 5 结论

(1) 江汉盆地潜江凹陷潜江组盐间页岩主要可以划分为3种岩相类型,分别为富碳纹层状泥质白云岩相、富碳纹层状云/灰质泥岩相和钙芒硝充填富碳纹层状云质泥岩相。

(2) 研究区不同岩相的储集物性具有较大差异,其中富碳纹层状泥质白云岩相和富碳纹层状云/灰质泥岩相孔隙度相对较高,分别为23.83%和29.38%,而钙芒硝充填富碳纹层状云质泥岩相孔隙度较低,为13.4%。不同岩相孔径分布差异明显,富碳纹层状泥质白云岩相孔喉半径分布范围广,以孔径大于41 nm的孔隙为主,中值孔喉半径为219 nm;而富碳纹层状云/灰质泥岩相和钙芒硝充填富碳纹层状云质泥岩相孔喉半径分布范围小,以孔径小于41 nm的孔隙为主,中值孔喉半径为21 nm。

(3) 富碳纹层状泥质白云岩相岩性均一,页岩储层中的含油性较好,良好的储集空间和较大的孔喉结构为页岩油的储集和产出提供了有力的保障,是盐间页岩油储层中的优势岩相,可作为研究区页岩油勘探中的“甜点”。

### 参考文献:

- [1] ZOU Caineng, YANG Zhi, CUI Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 15-27.
- [2] 杨智, 侯连华, 陶士振, 等. 致密油与页岩油形成条件与“甜点区”评价[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 555-565. YANG Zhi, HOU Lianhua, TAO Shizhen, et al. Formation conditions and “sweet spot” evaluation of tight oil and shale oil[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5): 555-565.
- [3] 白静. 我国页岩油资源勘探潜力巨大[N]. 中国矿业报, 2019-11-12(5). BAI Jing. Oil shale resources in China has large prospecting potential[N]. China Mining Magazine, 2019-11-12(5).
- [4] 邹才能, 杨智, 朱如凯, 等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. 地质学报, 2015, 89(6): 979-1007. ZOU Caineng, YANG Zhi, ZHU Rukai, et al. Progress in China's unconventional oil & gas exploration and development and theoretical technologies [J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(6): 979-1007.
- [5] 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.

- [6] ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Exploration breakthroughs and geological characteristics of continental shale oil: a case study of the Kongdian Formation in the Cangdong Sag, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 102: 544-556.
- [7] YANG Zhi, ZOU Caineng, WU Songtao, et al. Formation, distribution and resource potential of the "sweet areas (sections)" of continental shale oil in China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 102: 48-60.
- [8] LI Wenhao, LU Shuangfang, XUE Haitao, et al. Oil content in argillaceous dolomite from the Jiangnan Basin, China: Application of new grading evaluation criteria to study shale oil potential [J]. *Fuel*, 2015, 143: 424-429.
- [9] 王芙蓉, 何生, 郑有恒, 等. 江汉盆地潜江凹陷潜江组盐间页岩油储层矿物组成与脆性特征研究 [J]. *石油实验地质*, 2016, 38(2): 211-218.  
WANG Furong, HE Sheng, ZHENG Youheng, et al. Mineral composition and brittleness characteristics of the inter-salt shale oil reservoirs in the Qianjiang Formation, Qianjiang Sag [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(2): 211-218.
- [10] HOU Yuguang, WANG Furong, HE Sheng, 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.
- [11] 李乐, 王自翔, 郑有恒, 等. 江汉盆地潜江凹陷潜三段盐韵律层页岩油富集机理 [J]. *地球科学*, 2019, 44(3): 1012-1023.  
LI Le, WANG Zixiang, ZHENG Youheng, et al. Mechanism of shale oil enrichment from the salt cyclotherm in Qian3 member of Qianjiang Sag, Jiangnan Basin [J]. *Editorial Committee of Earth Science - Journal of China University of Geosciences*, 2019, 44(3): 1012-1023.
- [12] 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 Ershe, TAO Guoliang, LI Zhiming, et al. Microscopic reservoir characteristics of different lithofacies from inter-salt shale oil reservoir in Qianjiang Sag, Jiangnan Basin: a case study of Paleogene E<sub>q3</sub>-10 rhythm [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(2): 193-201.
- [13] 郑有恒. 江汉盆地潜江凹陷潜江组岩性油藏勘探方向及对策 [J]. *石油实验地质*, 2010, 32(4): 330-336.  
ZHENG Youheng. Exploration direction and strategy for lithologic accumulations in Qianjiang Formation of the Qianjiang Sag, Jiangnan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(4): 330-336.
- [14] 张永生, 杨玉卿, 漆智先, 等. 江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组含盐岩系沉积特征与沉积环境 [J]. *古地理学报*, 2003, 5(1): 29-35.  
ZHANG Yongsheng, YANG Yuqing, QI Zhixian, et al. Sedimentary characteristics and environments of the salt-bearing series of Qianjiang formation of the paleogene in Qianjiang Sag of Jiangnan Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2003, 5(1): 29-35.
- [15] 方志雄. 潜江盐湖盆地盐间沉积的石油地质特征 [J]. *沉积学报*, 2002, 20(4): 608-613.
- FANG Zhixiong. Hydrocarbon exploration signification of inter-salt sediments in Qianjiang Saline Lake Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(4): 608-613.
- [16] 陈树杰, 赵薇. 江汉盆地潜江凹陷盐间泥质白云岩油藏储层物性特征探讨 [J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2010, 7(1): 168-170.  
CHEN Shujie, ZHAO Wei. Study on physical properties of inter-salt argillaceous dolomite reservoirs in Qianjiang Sag of Jiangnan Basin [J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2010, 7(1): 168-170.
- [17] 熊智勇, 吴世强, 王洋, 等. 江汉盐湖盆地盐间泥质白云岩油藏地质特征与实践 [J]. *地质科技情报*, 2015, 34(2): 181-187.  
XIONG Zhiyong, WU Shiqiang, WANG Yang, et al. Geological characteristics and practice for intersalt argillaceous dolomites reservoir in the Qianjiang Depression of Jiangnan Salt Lake Basin [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2015, 34(2): 181-187.
- [18] 江继纲. 潜江凹陷潜江组油源的探讨 [J]. *石油学报*, 1985, 6(2): 23-29.  
JIANG Jigang. About the source of oil in the Qianjiang formation [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1985, 6(2): 23-29.
- [19] CARROLL A R, BOHACS K M. Lake-type controls on petroleum source rock potential in nonmarine basins [J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85(6): 1033-1053.
- [20] BAO Jianping, ZHU Cuishan, MA Anlai. The relationship between methylated chromans and maturity of organic matter in the source rocks from Jiangnan hypersaline basin [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(S1): 34-41.
- [21] 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 Zhongliang, WANG Furong, HE Sheng, 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 & Engineering)*, 2019, 36(3): 289-297.
- [22] 胡莹, 卢双舫, 李文浩, 等. 江汉盆地新沟嘴组泥质白云岩含油性分析 [J]. *东北石油大学学报*, 2015, 39(3): 76-82.  
HU Ying, LU Shuangfang, LI Wenhao, et al. Analysis of oil-bearing property of argillaceous dolostone in Xingouzui formation, Jiangnan basin [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2015, 39(3): 76-82.
- [23] 龙玉梅, 陈曼霏, 陈凤玲, 等. 潜江凹陷潜江组盐间页岩油储层发育特征及影响因素 [J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(1): 59-64.  
LONG Yumei, CHEN Manfei, CHEN Fengling, et al. Characteristics and influencing factors of inter-salt shale oil reservoirs in Qianjiang Formation, Qianjiang Sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(1): 59-64.
- [24] 陶国亮, 刘鹏, 钱门辉, 等. 潜江凹陷潜江组盐间页岩含油性及其勘探意义 [J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(6): 1256-1265.  
TAO Guoliang, LIU Peng, QIAN Menhui, et al. Oil-bearing characteristics and exploration significance of inter-salt shale in Qianjiang formation, Qianjiang depression, Jiangnan basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(6): 1256-1265.