

# 冀北坳陷中元古界洪水庄组页岩油勘探前景探讨

李志明<sup>1,2,3</sup>, 孙中良<sup>1,2,3</sup>, 鲍云杰<sup>1,2,3</sup>, 徐二社<sup>1,2,3</sup>, 周勇水<sup>4</sup>, 张云献<sup>4</sup>

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

2. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 江苏 无锡 214126;

3. 中国石化 油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126;

4. 中国石化 中原油田分公司 勘探开发研究院, 河南 濮阳 457001

**摘要:**为评价冀北坳陷中元古界洪水庄组页岩油勘探前景,对钻井岩心和露头剖面典型样品开展热解、基质孔隙度与渗透率、压汞+氮吸附、氩离子抛光+扫描电镜、X 衍射全岩矿物等分析,综合前人分析与研究成果,剖析了洪水庄组页岩油形成条件,估算了页岩油资源潜力并探讨勘探前景。冀北坳陷洪水庄组中部潟湖相黑色泥页岩厚度主要介于 35~55 m,有机质类型以 II<sub>1</sub>、II<sub>2</sub> 型为主,为一套富有机质的好一极好烃源岩,等效镜质体反射率处于 0.80%~1.25%;基质孔隙度主要介于 1.0%~8.0%,基质渗透率介于  $(2\sim 100)\times 10^{-6}\mu\text{m}^2$ ,孔隙以孔径大于 50 nm 的无机孔缝为主;恢复后热解游离烃 S<sub>1</sub> 主要介于 1.60~6.50 mg/g,残余气态烃介于 0.13~0.24 m<sup>3</sup>/t,具有较好的含油气性;脆性矿物含量平均介于 61.9%~72.3%,具备良好的可压裂改造性。冀北坳陷洪水庄组富有机质页岩型页岩油地质资源量约为 12×10<sup>8</sup> t,可采资源量为 0.72×10<sup>8</sup> t,具备针对洪水庄组富有机质泥页岩开展页岩油勘探的资源基础,具有较好的基质型页岩油勘探前景。

**关键词:**资源潜力;勘探前景;页岩油;洪水庄组;中元古界;冀北坳陷

中图分类号: TE122

文献标识码: A

## Discussion on prospecting shale oil potential of Mesoproterozoic Hongshuizhuang Formation in the Jibei Depression

LI Zhiming<sup>1,2,3</sup>, SUN Zhongliang<sup>1,2,3</sup>, BAO Yunjie<sup>1,2,3</sup>, XU Ershe<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Yongshui<sup>4</sup>, ZHANG Yunxian<sup>4</sup>

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

2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

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

4. Exploration and Production Research Institute of Zhongyuan Oilfield Branch Company, SINOPEC, Puyang, Henan 457001, China

**Abstract:** In order to evaluate the shale oil prospecting potential of the Mesoproterozoic Hongshuizhuang Formation in the Jibei Depression, the analyses of routine Rock-Eval pyrolysis, matrix porosity and permeability, mercury intrusion and nitrogen adsorption, argon ion polishing SEM and X-ray diffraction of bulk rock of typical core samples were carried out in this study. The shale oil forming conditions of the Hongshuizhuang Formation were studied, the shale oil resource was assessed, and the prospecting potential was discussed based on previous results. The results show that the lagoon facies black shale in the middle section of the Hongshuizhuang Formation is mainly 35–55 m thick with organic matter types of II<sub>1</sub> and II<sub>2</sub>, and is a set of good- to excellent-quality source rock. The equivalent vitrinite reflectance of organic-rich black shale is 0.80%–1.25%. The matrix porosity is mainly 1.0%–8.0%, and the matrix permeability is  $(2\sim 100)\times 10^{-6}\mu\text{m}^2$ . The pores are dominated by inorganic pores and fissures with the diameter of pore larger than 50 nm. The values of S<sub>1</sub> after recovery is mainly 1.60–6.50 mg/g, and the content of residual hydrocarbon gas distributes 0.13–0.24 m<sup>3</sup>/t, indicating good hydrocarbon potential. The average content of brittle minerals is 61.9%–72.3%, with good frangibility. The shale oil geological resource is about 12×10<sup>8</sup> t, and the shale oil recoverable resource is about 0.72×10<sup>8</sup> t for organic matter rich shale of the Hongshuizhuang Formation. These suggested that the organic matter rich shale of the Hongshuizhuang Formation in the Jibei Depression has a resource basis for shale oil exploration with good prospecting potential.

收稿日期: 2022-01-03; 修订日期: 2022-11-10。

作者简介: 李志明 (1968—), 男, 博士, 研究员, 从事油气地球化学、页岩油气地质研究。E-mail: lizm.syky@sinopec.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42090022) 和中国石化科技开发部项目 (P18084、P20049-1) 联合资助。

**Key words:** resource potential; prospecting potential; shale oil; Hongshuizhuang Formation; Mesoproterozoic; Jibei Depression

国内外油气勘探开发实践表明,古老的元古宙地层不仅具有生油气潜力,而且也可以形成工业性油气聚集<sup>[1-2]</sup>。燕辽裂陷带是全球中—新元古界最发育并保存完整的地区之一。冀北拗陷北以承德—平泉—凌源大断裂与“内蒙地轴”相邻,南以山海关隆起分隔冀东拗陷,东以凌源—叨尔登走滑断裂为界与辽西拗陷相接,西以密怀隆起和宣龙拗陷相隔(图1),总面积 8 733 km<sup>2</sup>。冀北拗陷内油气显示异常丰富,地表露头与一些浅井揭示在雾迷山组和铁岭组碳酸盐岩地层中发现液态油苗和沥青共计 80 处,在下马岭组底部发现沥青砂岩点 20 处。针对雾迷山组、铁岭组等碳酸盐岩储层为目标的常规油气勘探虽揭示了丰富的油气显示,但均未取得工业油流。已有研究表明,燕辽裂陷带中元古界发育串岭沟组、洪水庄组、下马岭组 3 套黑色富有机质泥页岩层系<sup>[1,3]</sup>和高于庄组、雾迷山组、铁岭组、下马岭组 4 套碳酸盐岩烃源岩<sup>[4-5]</sup>,但在冀北拗陷仅发育高于庄组黑色泥晶白云岩和洪水庄组黑色页岩 2 套烃源层。同时,生物标志物油源对比分析认为,冀北拗陷雾迷山组和铁岭组等碳酸盐岩溶蚀孔洞与裂缝系统中的液体油苗以及下马岭组沥青砂岩中的可溶烃组分,均与洪水庄组富有机质黑色页岩层关系最为密切<sup>[6]</sup>,说明洪水庄组富有机质黑色页岩层是冀北拗陷中元古界最有

效的烃源岩,并且现今仍处于成熟—高成熟早期阶段。学者们针对华北北部中—新元古界页岩气成藏地质条件进行了探讨<sup>[7-10]</sup>,但针对冀北拗陷洪水庄组富有机质黑色页岩层段是否具有页岩油勘探前景尚无文献报道。为此,本文从页岩油勘探评价角度出发,聚焦冀北拗陷中元古界,在对冀浅 1 井洪水庄组岩心和露头剖面(宋杖子、龙潭沟、双洞、孙家庄—北仗子等)泥页岩发育特征观测基础上,采集典型样品开展实测分析,并综合前人对化 1 井、冀元 1 和元基 2 井洪水庄组取心段分析、研究成果,开展洪水庄组页岩油形成条件研究、资源潜力评价,探讨其页岩油勘探前景,以期冀北拗陷页岩油勘探部署决策提供依据与基础资料。

## 1 样品采集和分析测试

为了获取冀北拗陷洪水庄组泥页岩的烃源品质、成熟度、储集物性与微观孔隙结构、含油气性、可压性等信息,在前人分析结果的基础上,对冀浅 1 井洪水庄组钻井岩心的泥页岩样品以及冀北拗陷洪水庄组露头剖面泥页岩层段典型样品进行了采集,合计采集样品 69 件,其中岩心样品 29 件,露头样品 40 件。对采集样品系统开展了岩石热解、全岩镜质体反射率、孔隙度与渗透率、盖层微观联合测定(压汞+氮吸附)、氩离子抛光+扫描电镜、

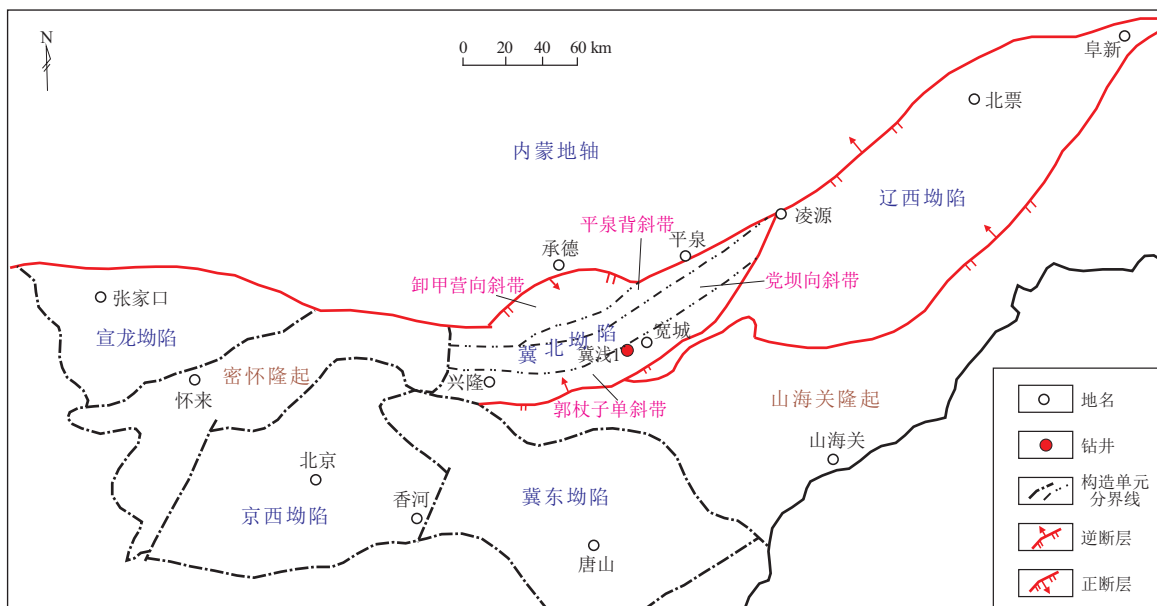


图 1 燕辽裂陷带地层构造单元与冀北拗陷构造位置简图

据文献[6]修编。

Fig.1 Tectonic units of Yanliao fault belt and tectonic location of Jibei Depression

X 衍射全岩矿物等分析测试, 分析测试工作均在中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所实验测试研究中心完成。

## 2 洪水庄组页岩油形成条件剖析

### 2.1 构造沉积背景

冀北拗陷发育巨厚的中元古界长城系、蓟县系与新元古界青白口系<sup>[11-13]</sup>。中元古界厚度巨大, 约 7 931.1 m; 新元古界青白口系厚度较薄, 仅 111.8 m。上覆古生界与中生界沉积盖层。拗陷由北至南依次划分为卸甲营向斜带、平泉背斜带、党坝向斜带和郭杖子单斜带(图 1)。

中—新元古代, 冀北经历了中元古代早期大陆裂谷阶段、中期被动陆缘阶段、晚期活动陆缘阶段、末期陆块碰撞阶段以及新元古代地壳伸展断陷 5 个构造演化阶段<sup>[14]</sup>(图 2)。距今 1 800~1 600 Ma, 随着华北地块发生伸展裂解, 形成裂陷槽沉积环境, 沉积了长城系常州沟组至大红峪组; 进一步伸展和洋壳的形成, 使研究区逐步向被动大陆边缘演化, 构造环境相对稳定, 浅海沉积体系总体呈面状分布,

高于庄组至铁岭组形成以碳酸盐潮坪和静海潟湖为主的碳酸盐岩和细碎屑岩沉积体系。在铁岭组沉积后, 受华北地块北缘可能演化为活动大陆边缘影响, 弧后发生挤压和抬升(“芹峪抬升”), 导致铁岭组发生抬升与剥蚀, 而后期洋壳高角度的俯冲又造成弧后区域发生强烈的伸展与断陷, 沉积了下马岭组滨浅海至浅海陆棚细粒碎屑岩系, 并伴随辉绿岩侵入。华北地块与相邻地块之间的碰撞, 导致下马岭组沉积后的抬升(“蔚县上升”)以及碰撞花岗岩的形成; 华北陆块自 900 Ma 起又开始裂解, 并造成区内新元古界青白口系长龙山组的超覆沉积和景儿峪组滨浅海碳酸盐岩台地的形成。

古生代时期, 研究区从早寒武世府君山期开始接受沉积, 为碳酸盐岩层系, 在早、中奥陶世时发育陆表海碳酸盐岩沉积, 中奥陶世末期的加里东运动, 导致研究区整体抬升, 持续时间较长, 使石炭系上统直接覆盖于奥陶系之上, 其间普遍缺失晚奥陶世、志留纪、泥盆纪和早石炭世的沉积, 沉积间断达 130 Ma, 直至晚石炭世再次接受沉积。海西运动在区内主要表现为轻缓的震荡运动, 形成了浅海及台

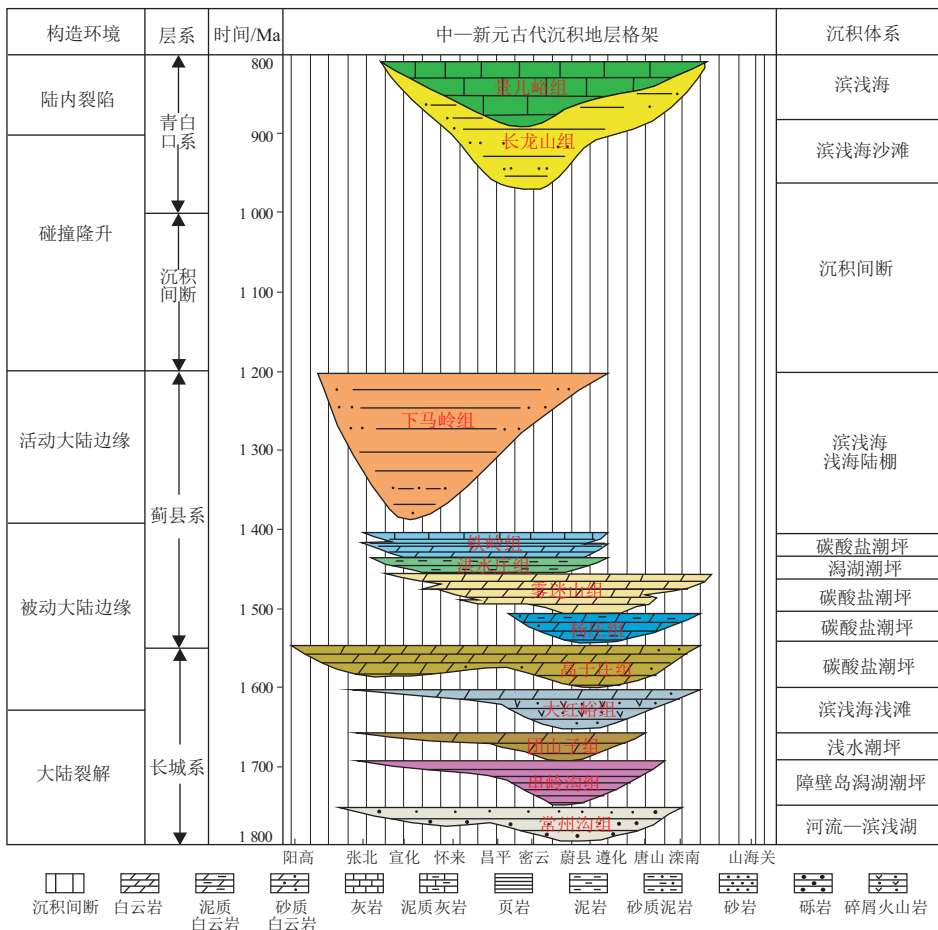


图 2 冀北拗陷构造沉积演化简图

Fig.2 Tectonic and sedimentary evolutions of Jibei Depression

地相碳酸盐岩沉积以及滨海平原和海陆交互相含煤沉积。

三叠纪末的印支运动在研究区以褶皱作用为主,以张家营—叨尔登断裂为界,断裂以西的冀北地区褶皱轴向以东西向为主;而断裂以东的辽西地区褶皱轴向为北东向。这次褶皱的幅度不大,地形高差较小,但印支运动影响广泛,表现为下侏罗统和上三叠统与下伏地层的角度不整合关系。侏罗纪—白垩纪的燕山运动,以断裂、褶皱活动和强烈的岩浆活动为主,可分为 5 个构造幕,每个构造幕由前期的拉张阶段和后期的挤压阶段组成。拉张阶段断裂强烈活动,形成断陷盆地并导致火山作用,堆积厚度较大的陆相碎屑岩建造;挤压阶段以褶皱作用为主,岩浆侵入活动和冲断活动相伴出现。

新生代的喜马拉雅运动对本地区的改造作用较弱,由于张性或扭性断裂的差异性活动,导致断块升降的显著差异。燕山地区主要表现为抬升,其断裂活动相对南部地区较弱,新生界分布很零星,厚度也较小,大部分地区在新生代没有接受沉积,而是经受较强烈的抬升,现今的高山和深谷均反映出这种抬升作用的强烈程度,但新生代的断裂作用对中元古界的褶皱构造的改造作用较弱<sup>[15]</sup>。

在上述区域构造沉积演化背景下,冀北拗陷北部卸甲营向斜带和南部郭杖子单斜带的新元古

界一下古生界普遍缺失,存在数亿年的沉积间断,地层遭受严重剥蚀。因此,中元古界洪水庄组仅在冀北拗陷中部平泉背斜带和党坝向斜带保存相对较好,而随着中新生界地层的沉积,中元古界富有机质泥页岩进一步熟化,可形成新的油气藏<sup>[1]</sup>,这也为中元古界富有机质泥页岩层系形成页岩油奠定了基础。

### 2.2 富有机质泥页岩发育特征、品质与成熟度

根据洪水庄组上覆铁岭组(1 422 Ma±22 Ma)和下伏雾迷山组(1 487 Ma±16 Ma)SHRIMP U-Pb 年龄推算,洪水庄组形成于 1 422 Ma 之前<sup>[16]</sup>,沉降中心主要分布于蓟县、兴隆、宽城一带,沉积环境以潮坪、潟湖相为主,地层厚度分布较稳定<sup>[10]</sup>。冀北拗陷区钻井与露头剖面揭示:洪水庄组发育了一套以黑色页岩、白云质泥岩、泥质白云岩、白云岩为主的岩性组合,且黑色页岩富含有机质,是中国大陆最古老的富有机质的沉积岩和烃源岩之一(图 3)。

自下而上洪水庄组可分为下、中、上 3 个岩性段,下段以浅灰色泥质白云岩、灰色页岩、硅质页岩互层为特征,中段则以黑色、深灰色页岩为主,上段主要为浅灰色泥晶白云岩、泥质白云岩,总厚度为 71~130 m,其中富有机质(TOC 大于 2.0%)泥页岩厚度为 35~48 m(表 1),并集中分布于洪水庄组中段(图 3)。依据钻井和露头剖面揭示结果,综合

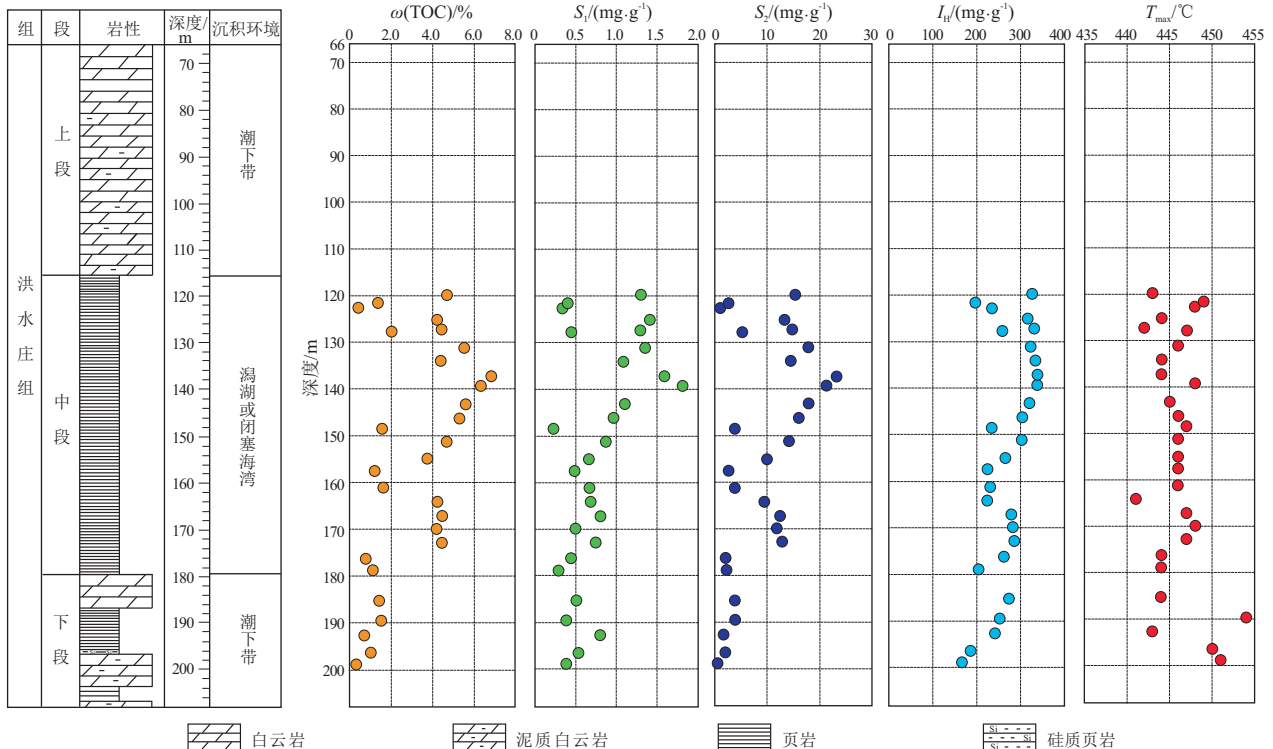


图 3 冀北拗陷冀浅 1 井洪水庄组岩性与地球化学综合柱状图

Fig.3 Lithological and geochemical columns of Mesoproterozoic Hongshuizhuang Formation, well Jiqian 1, Jibei Depression



表 1 冀北拗陷钻井与露头剖面洪水庄组与富有机质页岩厚度  
 Table 1 Thickness of Mesoproterozoic Hongshuizhuang Formation and organic-rich shale from wells and outcrop sections in Jibei Depression

钻井/剖面	地层总厚度/m	富有机质页岩厚度/m	备注
冀浅 1 井	142	43	
冀元 1 井	71	35	参考文献 [18]
元基 2 井	109	42	参考文献 [16]
宽 1 井	109	42	参考文献 [18]
化 1 井	145	46	参考文献 [17]
双洞	140	48	
龙潭沟	112	43	
宋杖子	110	42	
清河	130	43	参考文献 [12]
孙家庄—北仗子	102	41	
柳树底	105	40	参考平泉幅 1:20 万地质图说明书
二道杖子	99	43	参考平泉幅 1:20 万地质图说明书
北水泉	125	46	参考兴隆幅 1:20 万地质图说明书

孙枢等<sup>[17]</sup>和张新生等<sup>[19]</sup>研究结果以及区域地质背景,编制了冀北拗陷洪水庄组富有机质泥页岩厚度等值线图(图 4),明确了洪水庄组富有机质泥页岩主要分布于兴隆县北—宽城—凌源龙潭沟以南、平泉—承德县以北的区域。其中,宽城至承德县西一带受洪水庄组沉积时期存在一北西向水下隆起影响<sup>[16]</sup>,导致除该区带洪水庄组富有机质泥页岩的厚度小于 45 m 外,党坝凹陷的其他区域推断富有机质泥页岩的发育厚度一般均在 50 m 以上。洪水庄组富有机质泥页岩厚度大、分布稳定,可为页岩油形成提供丰富的物质基础。

考虑到露头剖面风化作用强,对烃源品质影响大,故本文依据冀浅 1 井洪水庄组取心段典型岩性热解实测分析结果和文献 [16] 中元基 2 井洪水庄组典型岩性热解分析结果,对洪水庄组泥页岩的品质进行了分析。两口钻井分析结果表明,洪水庄组黑色页岩 TOC 含量主要介于 1.0%~6.8%,平均高达 4.7%;生烃潜量  $PG(S_1+S_2)$  主要介于 6.0~24.0 mg/g,平均 15.8 mg/g,以好—极好烃源岩为主;而深灰色泥岩和泥质白云岩 TOC 含量小于 1.0%,生烃潜量小于 4.0 mg/g,主要属差烃源岩(图 5)。高渐珍等<sup>[19]</sup>的研究揭示,冀元 1 井洪水庄组受雾迷山组

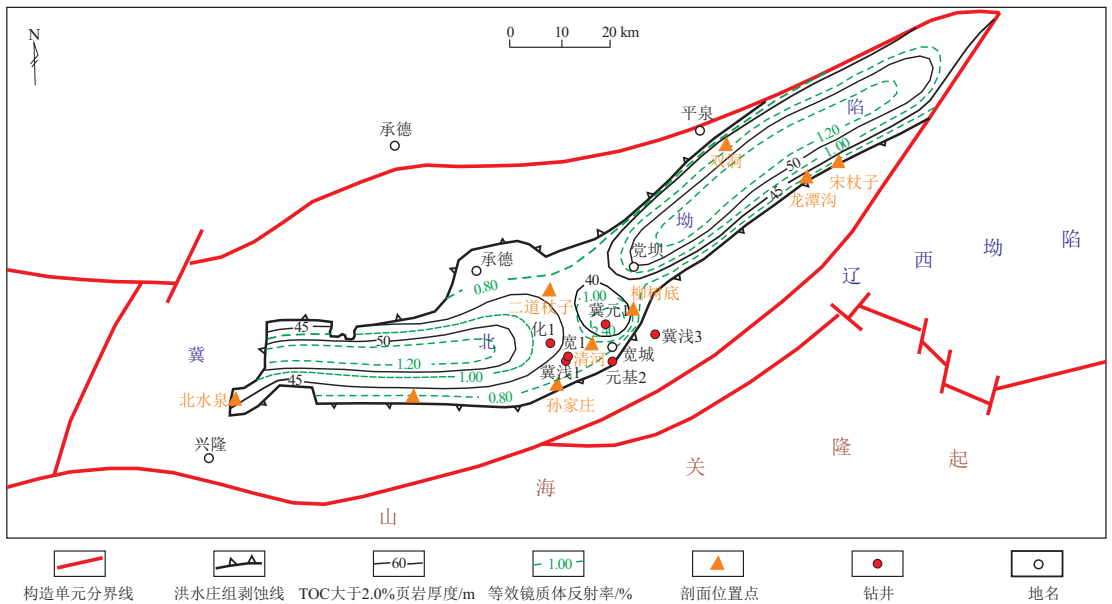


图 4 冀北拗陷中元古界洪水庄组富有机质页岩厚度与等效镜质体反射率等值线图  
 Fig.4 Contours of thickness and equivalent vitrinite reflectance of organic matter rich shale of Mesoproterozoic Hongshuizhuang Formation in Jibei Depression

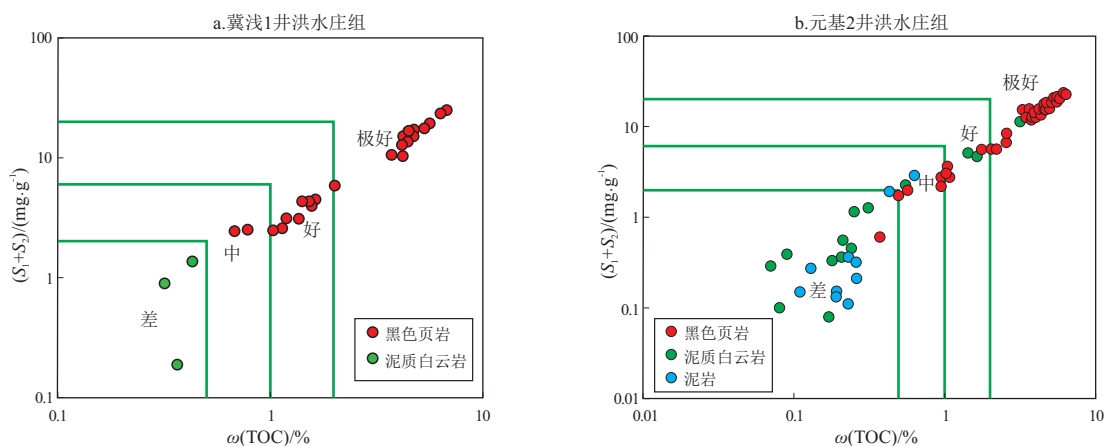


图 5 冀北拗陷中元古界洪水庄组泥页岩总有机碳含量 (TOC) 和生烃潜量 ( $S_1+S_2$ ) 的关系

Fig.5 TOC vs. PG ( $S_1+S_2$ ) of mudstone and shale from Mesoproterozoic Hongshuizhuang Formation in Jibei Depression

顶部侵入岩影响, 尽管洪水庄组黑色页岩 TOC 含量为 1.53%~4.97%, 平均 2.46%, 但生烃潜量均小于 0.10 mg/g, 反映富有机质页岩在侵入岩高温烘烤作用影响下, 局部会导致其 TOC 显著降低, 生烃潜力耗尽。冀浅 1 井洪水庄组黑色页岩热解氢指数  $I_H$  和氧指数  $I_O$  图解、氢指数  $I_H$  和热解峰温  $T_{max}$  图解揭示, 洪水庄组黑色页岩有机质类型以  $II_1$ 、 $II_2$  型为主 (图 6), 与典型海相富有机质烃源岩的有机质类型一致。中元古代时期高等植物尚未发育, 海洋中有机质生源单一, 以发育低等浮游生物为主<sup>[16]</sup>。洪水庄组黑色页岩有机岩石学分析揭示, 原生显微组分包括壳质组、腐泥组和类镜质组<sup>[3]</sup>。综上分析, 冀北拗陷中元古界洪水庄组黑色页岩为一套富有机质的好—极好烃源岩, 具备形成规模页岩油的能力。

烃源岩成熟度是控制基质型页岩油甜点区分布的重要因素<sup>[20]</sup>, 其不仅制约着基质型页岩油的

富集与分布, 而且控制着页岩油组分、可动性以及页岩的储集性与可压性等。北美投入大规模商业开发的海相页岩油区带剖析揭示, 优质烃源岩的热演化程度主要处于生油高峰期至轻质油—凝析油气阶段, 如墨西哥湾盆地 Eagle Ford 组页岩油产量主要来自成熟度  $R_o$  为 1.10%~1.30% 的区域, 属与湿气伴生的轻质油和凝析油<sup>[18]</sup>; 甜点区成熟度  $R_o$  界限为 0.85%~1.50%<sup>[20]</sup>。钟宁宁等<sup>[21]</sup>研究表明, 无结构藻类体  $R_o$  和类镜质体  $R_o$  可以作为表征中—新元古界海相地层热演化程度的最重要参数, 其有机质的真实热演化程度可以通过换算为等效镜质体反射率  $EqVR_o$  表示。冀北拗陷洪水庄组有机质的等效镜质体反射率 ( $EqVR_o$ ) 主要介于 0.80%~1.25%, 平均为 1.10%, 局部如冀元 1 井区受侵入岩烘烤作用影响, 则处于过成熟度阶段 (等效镜质体反射率已达 2.40% 以上) (图 4)。同时, 冀浅 1 井洪水庄

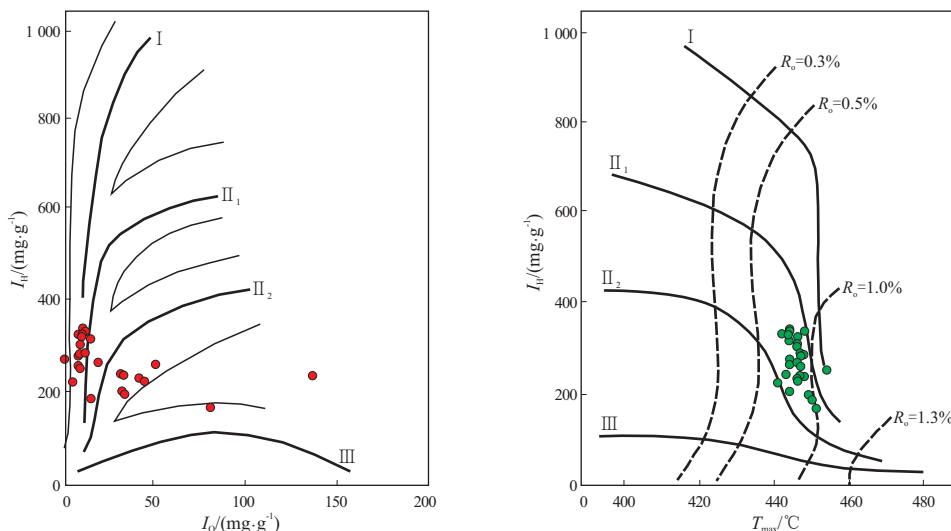


图 6 冀北拗陷中元古界洪水庄组富有机质页岩有机质类型图解

Fig.6 Organic matter types of organic rich shale of Mesoproterozoic Hongshuizhuang Formation in Jibei Depression

组富含有机质黑色页岩典型样品的热解峰温  $T_{max}$  值主要处于 442~454 °C, 平均为 446 °C (图 3), 相对应的等效镜质体反射率 ( $E_qVR_o$ ) 为 0.80% ~ 1.00%, 平均 0.90% (图 6b)。另外, 冀浅 1 井富含有机质页岩样品的沥青反射率  $R_o$  最高值为 0.78%, 等效镜质体反射率 ( $E_qVR_o$ ) 为 0.88%。很显然, 尽管洪水庄组富含有机质页岩地层时代古老, 但未遭受侵入岩侵位影响的地区, 现今有机质热演化仍处于生油高峰期至高成熟度的早期阶段, 为页岩油滞留富集的最佳热演化期。

### 2.3 富含有机质页岩储集物性与孔隙结构特征

冀北拗陷洪水庄组黑色页岩典型样品基质孔隙度与脉冲法基质渗透率分析结果如图 7 所示。可见洪水庄组富含有机质页岩基质孔隙度较低, 主要介于 1.0%~8.0%, 平均 4.7%, 与纯页岩储层孔隙度一般为 4.0%~6.0%<sup>[22]</sup> 相接近; 基质渗透率很低, 主要介于  $(2\sim 100) \times 10^{-6} \mu m^2$ , 与郝石生等<sup>[23]</sup> 的分析结果[洪水庄泥页岩渗透率主要介于  $(1\sim 260) \times 10^{-6} \mu m^2$ ] 基本一致, 比北美西墨西哥湾盆地 Eagle Ford 页岩的渗透率主要介于  $(100\sim 1\ 500) \times 10^{-6} \mu m^2$ <sup>[24]</sup> 还低, 反映黑色页岩总体很致密, 基质渗透能力弱,

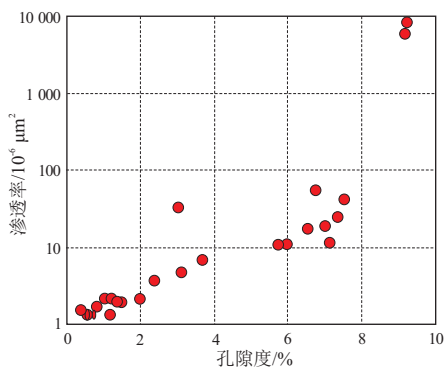


图 7 冀北拗陷中元古界洪水庄组典型富含有机质页岩基质孔隙图解

Fig.7 Matrix porosity and permeability of typical organic matter rich shale of Mesoproterozoic Hongshuizhuang Formation in Jibei Depression

只有在微裂缝或人工压裂有效改造下, 才会形成有效渗流能力。同时, 利用压汞与氮吸附联合分析技术对冀浅 1 井典型黑色页岩样品开展孔隙结构分析揭示 (图 8), 富含有机质黑色页岩的孔隙明显以孔径大于 50 nm 的宏孔为主, 孔隙体积占比一般在 50% 以上; 次为孔径介于 2~50 nm 的介孔, 孔隙体积占比一般为 10%~40%; 微孔含量最低, 孔隙体

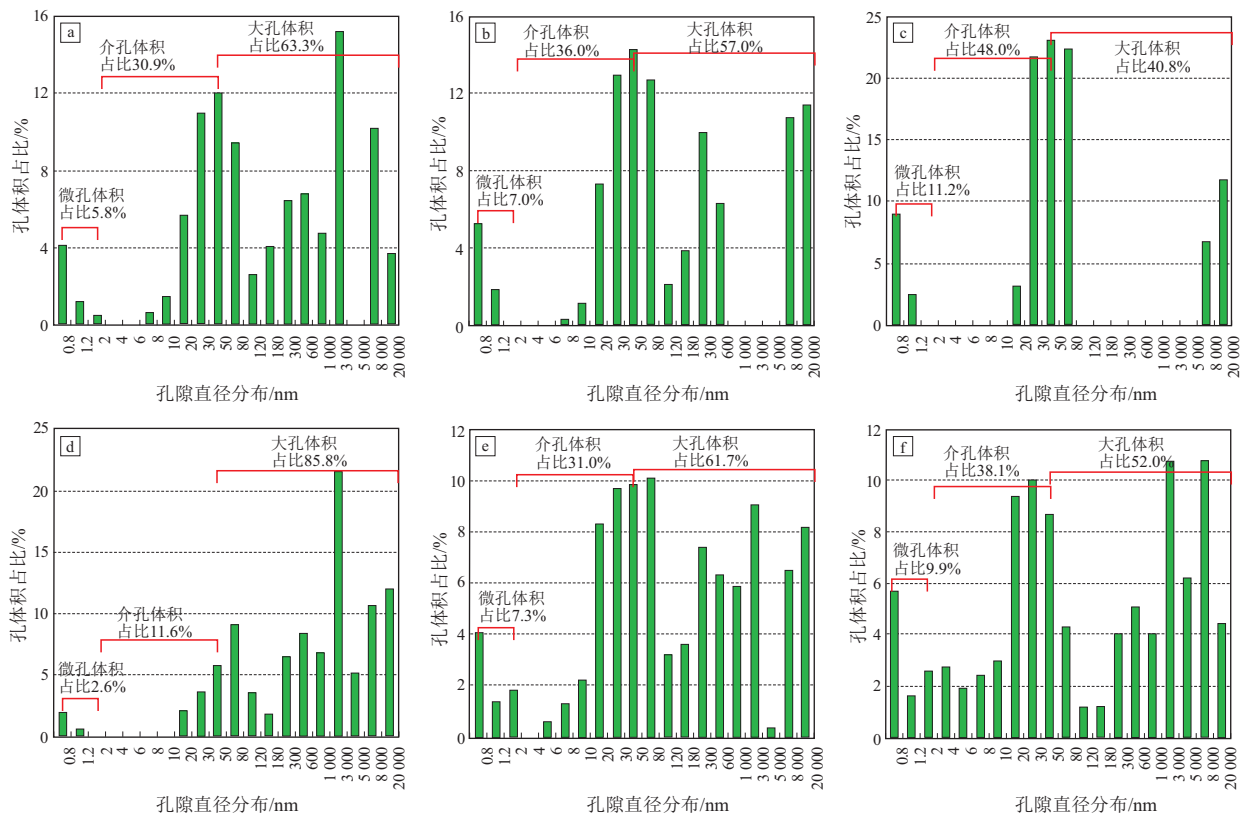


图 8 冀北拗陷中元古界洪水庄组典型富含有机质页岩孔隙结构

a.冀浅 1 井, 127.23 m, 黑色页岩; b.冀浅 1 井, 131.10 m, 黑色页岩; c.冀浅 1 井, 137.28 m, 黑色页岩; d.冀浅 1 井, 155.00 m, 黑色页岩; e.冀浅 1 井, 172.80 m, 黑色页岩; f.冀浅 1 井, 189.58 m, 黑色硅质岩

Fig.8 Pore structure of typical organic matter rich shale of Mesoproterozoic Hongshuizhuang Formation in Jibei Depression

积占比均在 10% 以下。典型样品氩离子抛光扫描电镜分析结果表明,洪水庄组页岩孔隙类型以无机矿物残余粒间孔、黏土矿物晶间孔、磷灰石球粒粒内溶孔、高镁方解石等粒内微裂缝、无机矿物颗粒与有机质之间粒缘缝为主,有机质颗粒中有机孔总体不发育,仅在少量有机质中发育有机孔。因此,无机孔缝是冀北坳陷洪水庄组富有机质页岩层段页岩油的主要赋存空间。

## 2.4 富有机质页岩含油气性特征

泥页岩含油气性表征方法主要包括有机地球化学方法和岩心物理方法两类<sup>[25-33]</sup>,由于有机地球化学方法既快速又经济,并且不易遗漏岩石封闭孔隙中的烃类<sup>[25]</sup>,故该表征方法是泥页岩含油气性表征最实用的方法,尤其是热解游离烃  $S_1$ <sup>[26-30]</sup>。泥页岩样品的含油气性分析结果影响因素复杂,除与泥页岩本身的有机质丰度、有机质类型和热演化程度有关外,由于赋存于泥页岩中的气态烃和轻烃在常温、常压下极易逸散损失,以及页岩中滞留油在近地表、地表或室内长期放置会遭受微生物降解等作用影响,故也与样品保存方式、新鲜程度、放置时间长短、储集物性与孔隙结构特征以及碎样方式、碎样后分析的及时性等密切相关。因此,页岩样品实测含油气性分析结果往往较地质埋藏条件下的原地含油气量明显偏低。冀北坳陷剖面露头中洪水庄组黑色页岩样品均已遭受了复杂的物理化学风化作用与微生物作用等影响,几乎所有样品热解游离烃  $S_1$  均小于 0.10 mg/g,故其含油气性特征采用区内冀浅 1 井、元基 2 井取心段岩心热解分析结果,并结合前人含气量分析结果来进行评价。但岩心样品取样分析时也已放置近 9 年,故实测分析获得的游离烃  $S_1$  [0.40~1.6 mg/g, 平均为 1.0 mg/g (图 9a)]

已无法真实地反映其在地质条件下的原位含量,同样需要进行校正。前期对富有机质、特低渗泥页岩新鲜样品与放置 5 个月后样品的热解游离烃  $S_1$  对比研究揭示,长期放置后游离烃  $S_1$  损失恢复系数介于 1.33~1.89,平均为 1.50<sup>[34-35]</sup>。对苏北盆地处于生烃高峰期 ( $R_0$  为 0.80%~1.00%) 的阜二段特低渗富有机质灰质泥页岩的研究表明,新鲜样品热解游离烃  $S_1$  含量是放置 3~6 年以上样品热解游离烃  $S_1$  的 2.52~5.56 倍,平均 4.04 倍<sup>[36]</sup>。目前苏北盆地阜二段基质型页岩油已取得规模突破<sup>[37]</sup>,这为本次研究洪水庄组岩心样品热解  $S_1$  恢复系数的确定提供了依据。考虑到洪水庄组岩心样品已放置 9 年,故针对洪水庄组岩心样品热解游离烃  $S_1$  采用恢复系数 4.0 进行恢复 (图 9b)。可见,当页岩的 TOC 含量小于 2.0% 时,恢复后热解游离烃  $S_1$  主要介于 0.88~2.63 mg/g,平均 1.63 mg/g,油饱和指数  $OSI$  主要介于 55~307 mg/g,平均为 196 mg/g;当页岩的 TOC 含量大于 2.0% 时,恢复后  $S_1$  主要介于 1.60~6.50 mg/g,平均 3.90 mg/g,油饱和指数  $OSI$  主要介于 50~135 mg/g,平均为 85 mg/g。另外,据吴迪<sup>[38]</sup>对冀浅 1 井和冀元 1 井洪水庄组典型黑色页岩残余气态烃含量定量分析揭示,洪水庄组黑色页岩残余气态烃含量较高,介于 0.13~0.24 m<sup>3</sup>/t,高于苏北盆地阜二段页岩油富集层段典型样品在钻井现场分析的气态烃含量 (0.05~0.14 m<sup>3</sup>/t),气态烃组分由 CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>、iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>、nC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>、iC<sub>5</sub>H<sub>12</sub>、nC<sub>5</sub>H<sub>12</sub> 组成。因此,冀北坳陷洪水庄组富有机质页岩具有较好的含油气性和一定的页岩油资源潜力。

## 2.5 富有机质页岩可压性与页岩油保存

富有机质页岩的全岩矿物组成是影响页岩可压性的关键因素<sup>[39-41]</sup>。冀北坳陷冀浅 1 井和野外露

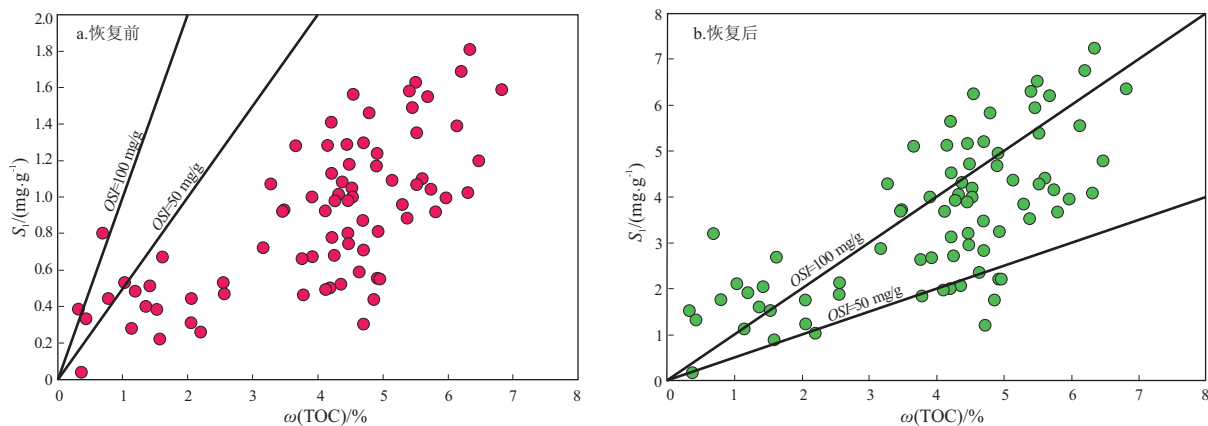


图 9 冀北坳陷中元古界洪水庄组典型富有机质页岩游离烃  $S_1$  恢复前后与 TOC 的关系

Fig.9 TOC vs.  $S_1$  before and after recovery of typical organic matter rich shale of Mesoproterozoic Hongshuizhuang Formation in Jibe Depression



表 2 冀北拗陷中元古界洪水庄组富有机质页岩矿物组成

Table 2 Mineral compositions of organic matter rich shale of Mesoproterozoic Hongshuizhuang Formation in Jibei Depression

样品来源	样品数	矿物成分含量/%										
		黏土矿物	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	菱铁矿	黄铁矿	石膏	硬石膏	钙芒硝
冀浅 1 井岩心	27	13.2~35.0	31.7~77.0	0~4.0	0~1.7	0.1~2.5	1.5~36.5	0.6~4.3	1.0~13.9	0~0.3	0~3.2	0
		27.2	54.4	2.1	0.5	1.1	7.0	2.3	4.9	0.1	0.4	0
野外露头	25	23.5~52.5	38.9~73.1	0.9~3.8	0~1.2	0.1~4.8	0.2~3.5	0.2~1.8	0.1~1.5	0~0.2	0~0.8	0~5.7
		36.2	55.2	2.1	0.4	0.8	1.9	1.1	0.4	0.0	0.2	1.7

注:表中分式的意义为  $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$ 。

头洪水庄组富有机质页岩典型样品全岩矿物组成分析结果(表 2)表明,洪水庄组富有机质页岩矿物组成主要为石英和黏土矿物,次为白云石、黄铁矿,另含少量菱铁矿、钾长石、斜长石、方解石、硬石膏和石膏。其中冀浅 1 井样品中石英含量介于 31.7%~77.0%,平均为 54.4%( $n=27$ ),黏土矿物含量 13.2%~35.0%,平均为 27.2%( $n=27$ ),脆性矿物总量平均达 72.3%;野外露头样品中石英含量介于 38.9%~73.1%,平均为 55.2%( $n=25$ ),黏土矿物含量 23.5%~52.5%,平均为 36.2%( $n=25$ ),脆性矿物总量平均为 61.9%。这表明洪水庄组富有机质页岩具备良好的可压裂改造性。

同时,冀浅 1 井等取心段洪水庄组富有机质页岩局部微裂缝异常发育,并被白云石脉和石英脉充填<sup>[38]</sup>,反映在地质条件下洪水庄组富有机质页岩脆性较好,容易破裂,进一步说明洪水庄组富有机质页岩具有良好的可压性。

发育区域广泛分布的致密顶底板是北美海相页岩层系页岩油得以有效保存的关键必要条件,致密顶底板以致密灰岩或页岩为主<sup>[18, 42-43]</sup>。冀北拗陷洪水庄组富有机质页岩的顶板为洪庄水组上部的致密泥质白云岩与铁岭组致密白云岩,底板为洪水庄组下部的致密泥质白云岩、泥岩和雾迷山组致密白云岩、灰岩。但在断裂构造发育区,裂缝系统沟通洪水庄组富有机质页岩层系与上、下致密顶底板,受此影响,则容易导致洪水庄组富有机质层系的页岩油发生散失与运移,洪水庄组下伏雾迷山组和上覆铁岭组白云岩中的油苗可能与此有关。因此,在裂缝系统欠发育的凹陷带(洼陷区),应是洪水庄组富有机质页岩层系页岩油保存条件相对有利的地区。

### 3 页岩油资源潜力与勘探前景探讨

页岩油地质资源量的评价方法与常规油气类似,也可分为动态法和静态法。由于全球范围内除

美国外,对于页岩油的研究仍处于勘探评价阶段,因此,目前国内页岩油地质资源量评价的方法主要是静态法,如类比法、统计法和成因法<sup>[44]</sup>。基于研究区油气勘探程度极低,资料有限,本文采用体积法中的热解  $S_1$  法,对冀北拗陷洪水庄组富有机质页岩层段的页岩油地质资源量进行估算,估算公式参考文献[45],具体如下:

$$Q = AH\rho S_1 K / 100$$

式中: $Q$  为页岩油资源量,  $10^4$  t;  $A$  为评价单元有效面积,  $\text{km}^2$ ;  $H$  为富有机质页岩厚度, m;  $\rho$  为含油泥页岩密度,  $\text{t}/\text{m}^3$ ;  $S_1$  为热解游离烃含量,  $\text{mg}/\text{g}$ ;  $K$  为  $S_1$  的校正系数。

根据钻井揭示、野外剖面露头结合区域地质资料(重点 1:20 万区域地质图),确定冀北拗陷洪水庄组主要分布于党坝向斜带、郭杖子单斜带的北缘和平泉背斜带南缘,有效分布面积约为  $2\,620\text{ km}^2$ ; TOC 大于 2.0% 的富有机质页岩厚度主要介于 35~55 m, 平均 45 m(图 4); 富有机质泥页岩密度取  $2.55\text{ t}/\text{m}^3$ ; 游离烃  $S_1$  平均  $1.0\text{ mg}/\text{g}$ ;  $S_1$  校正系数  $K$  取 4.0。计算结果表明,冀北拗陷洪水庄组富有机质页岩层段页岩油地质资源量为  $120\,258 \times 10^4\text{ t}$ , 即约为  $12 \times 10^8\text{ t}$ 。北美页岩油开发实践结果表明,页岩油可采系数一般在 5%~7%<sup>[34]</sup>, 本文取可采系数 6% 计算,则冀北拗陷洪水庄组富有机质页岩层段的可采页岩油资源量为  $0.72 \times 10^8\text{ t}$ , 说明冀北拗陷洪水庄组富有机质页岩具有一定的页岩油资源潜力。

炆源条件系统剖析表明,冀北拗陷洪水庄组中部的黑色泥页岩有机质丰度高、有机类型与典型海相富有机质炆源岩的有机质类型一致,以  $\text{II}_1$ 、 $\text{II}_2$  型为主,等效镜质体反射率主要处于 0.80%~1.20%,热演化程度适中,页岩油地质资源量约为  $12 \times 10^8\text{ t}$ , 可采资源量为  $0.72 \times 10^8\text{ t}$ , 具备开展页岩油勘探的资源基础。区内探井岩心富有机质泥页岩热解游离烃含量经恢复后普遍大于  $2.0\text{ mg}/\text{g}$ , 并且近 40%

样品的油饱和指数大于 100 mg/g, 具有形成工业页岩油的一定潜力。另外富有机质泥页岩上下发育致密白云岩或泥质白云岩顶底板, 在断裂系统相对不发育的位置保存条件优越; 孔隙度与国内外页岩型页岩油储层基本一致, 尽管基质渗透率极低, 但洪水庄组泥页岩脆性矿物含量高 (70% 左右), 易于压裂改造形成有效缝网。因此, 综合评价认为, 冀北坳陷洪水庄组富有机质泥页岩层段应具有较好的基质型页岩油勘探前景。

## 4 结论

(1) 冀北坳陷洪水庄组中部潟湖相黑色泥页岩厚度主要介于 35 ~ 55 m, TOC 含量主要介于 1.0% ~ 6.8%, 平均高达 4.7%; 生烃潜力 ( $S_1 + S_2$ ) 主要介于 6.0 ~ 24.0 mg/g, 平均 15.8 mg/g; 有机质类型以 II<sub>1</sub>、II<sub>2</sub> 型为主, 为一套富有机质的好—优质烃源岩, 具备形成规模页岩油的物质基础; 有机质的等效镜质体反射率 ( $EqVR_0$ ) 主要介于 0.80% ~ 1.25%, 平均为 1.10%, 处于页岩油滞留富集的最佳热演化阶段。

(2) 洪水庄组富有机质泥页岩孔隙度主要介于 1.0% ~ 8.0%, 平均 4.7%, 基质渗透率很低, 主要介于  $(2 \sim 100) \times 10^{-6} \mu\text{m}^2$ ; 孔隙以孔径大于 50 nm 的宏孔为主, 其孔隙体积占比一般在 50% 以上; 无机孔隙是冀北坳陷洪水庄组富有机质页岩层段页岩油的主要赋存空间。

(3) 洪水庄组富有机质泥页岩热解游离烃  $S_1$  含量经恢复后普遍大于 2.0 mg/g, 40% 的样品油饱和指数  $OSI$  大于 100 mg/g, 具有形成工业页岩油的一定潜力, 并且富有机质泥页岩上下发育致密白云岩或泥质白云岩顶底板, 在断裂系统相对不发育的位置保存条件优越; 孔隙度与国内外页岩型页岩油储层基本一致, 尽管基质渗透率极低, 但洪水庄组富有机质页岩脆性矿物含量高 (平均介于 61.9% ~ 72.3%), 易于压裂改造形成有效缝网。

(4) 冀北坳陷洪水庄组富有机质页岩型页岩油地质资源量约为  $12 \times 10^8$  t, 可采资源量为  $0.72 \times 10^8$  t, 具备针对洪水庄组富有机质泥页岩开展页岩油勘探的资源基础, 具有较好的基质型页岩油勘探前景。

## 参考文献:

[1] 赵文智, 王晓梅, 胡素云, 等. 中国元古宇烃源岩成烃特征及勘探前景[J]. 中国科学(地球科学), 2019, 49(6): 939-964. ZHAO Wenzhi, WANG Xiaomei, HU Suyun, et al. Hydrocarbon generation characteristics and exploration prospects of Proterozoic source rocks in China [J]. Science China (Earth Science),

2019, 62(6): 909-934.

- [2] 王铁冠, 韩克猷. 论中—新元古界的原生油气资源[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 1-7. WANG Tieguan, HAN Keyou. On Meso-Neoproterozoic primary petroleum resources [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 1-7.
- [3] 秦婧, 钟宁宁, 齐雯, 等. 华北北部洪水庄组有机岩石学[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(3): 367-374. QIN Jing, ZHONG Ningning, QI Wen, et al. Organic petrology of the Hongshuizhuang Formation in northern North China [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(3): 367-374.
- [4] 方杰, 刘宝泉, 金凤鸣, 等. 华北北部中—上元古界生烃潜力与勘探前景分析[J]. 石油学报, 2002, 23(4): 18-23. FANG Jie, LIU Baoquan, JIN Fengming, et al. Source potential for generating hydrocarbon and exploration prospects of Middle-Upper Proterozoic in the Northern China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(4): 18-23.
- [5] 王丽娟, 杨树杰. 华北中元古界海相碳酸盐岩烃源岩评价[J]. 海洋科学集刊, 2010(50): 111-119. WANG Lijuan, YANG Shujie. Evaluation marine carbonate source rocks of Middle-Upper Proterozoic in North China [J]. Studia Marina Sinica, 2010(50): 111-119.
- [6] 王铁冠, 钟宁宁, 王春江, 等. 冀北坳陷下马岭组底砂岩古油藏成藏演变历史与烃源剖析[J]. 石油科学通报, 2016, 1(1): 24-37. WANG Tieguan, ZHONG Ningning, WANG Chunjiang, et al. Source beds and oil entrapment-alteration histories of fossil-oil-reservoirs in the Xiamaling Formation basal sandstone, Jibe Depression [J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 1(1): 24-37.
- [7] 荆铁亚, 杨光, 林拓, 等. 中国中上元古界页岩气地质特征及有利区预测[J]. 特种油气藏, 2015, 22(6): 5-9. JING Tiewa, YANG Guang, LIN Tuo, et al. Geological characteristics and prospective zone prediction of Meso-Epioproterozoic shale gas in China [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2015, 22(6): 5-9.
- [8] 刘静, 周志, 刘喜恒, 等. 燕山地区中元古界页岩气成藏地质条件[J]. 石油学报, 2019, 40(3): 268-278. LIU Jing, ZHOU Zhi, LIU Xiheng, et al. Geological conditions of the Mesoproterozoic shale gas accumulation in Yanshan area, North China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(3): 268-278.
- [9] 牛露, 朱如凯, 王莉森, 等. 华北地区北部中—上元古界泥页岩储层特征及页岩气资源潜力[J]. 石油学报, 2015, 36(6): 664-672. NIU Lu, ZHU Rukai, WANG Lisen, et al. Characteristics and evaluation of the Meso-Neoproterozoic shale gas reservoir in the northern North China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(6): 664-672.
- [10] 王浩. 燕山地区中—新元古界页岩气成藏地质条件研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019: 1-53. WANG Hao. Study of accumulation conditions of the Meso-Neoproterozoic shale gas in Yanshan area, North China [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019: 1-53.
- [11] 罗情勇, 钟宁宁, 朱雷, 等. 华北北部中元古界洪水庄组埋藏有机碳与古生产力的相关性[J]. 科学通报, 2013, 58(11): 1036-1047.

- LUO Qingyong, ZHONG Ningning, ZHU Lei, et al. Correlation of burial organic carbon and paleoproductivity in the Mesoproterozoic Hongshuizhuang Formation, northern North China [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(11): 1299-1309.
- [12] 马奎,肖南,蒲钰龙,等.华北北部中元古界洪水庄组物源和沉积环境分析[J].中国地质,2021,48(1):309-321.
- MA Kui, XIAO Nan, PU Yulong, et al. Provenance and sedimentary environment of the Mesoproterozoic Hongshuizhuang Formation in northern part of North China [J]. Geology in China, 2021, 48(1): 309-321.
- [13] 刘岩,钟宁宁,田永晶,等.中国最老古油藏——中元古界下马岭组沥青砂岩古油藏[J].石油勘探与开发,2011,38(4):503-512.
- LIU Yan, ZHONG Ningning, TIAN Yongjing, et al. The oldest oil accumulation in China: Meso-Proterozoic Xiamaling Formation bituminous sandstone reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(4): 503-512.
- [14] 潘建国,曲永强,马瑞,等.华北地块北缘中元古界沉积构造演化[J].高校地质学报,2013,19(1):109-122.
- PAN Jianguo, QU Yongqiang, MA Rui, et al. Sedimentary and tectonic evolution of the Meso-Neoproterozoic strata in the northern margin of the North China block [J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(1): 109-122.
- [15] 彭钰洁.燕山地区下马岭组泥页岩孔隙结构特征研究[D].徐州:中国矿业大学,2017:1-124.
- PENG Yujie. Research on pore structure characteristics of shale in Xiamaling Formation of Yanshan [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2017: 1-124.
- [16] 王雪琪.中元古代河北燕辽裂陷槽洪水庄组有机质来源和赋存环境[D].西安:西安石油大学,2019:1-44.
- WANG Xueqi. Sources of organic matter and environment of the Hongshuizhuang Formation of the Yanliao gully in the Middle Proterozoic of Hebei province [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2019: 1-44.
- [17] 孙枢,王铁冠.中国东部中—新元古界地质学与油气资源[M].北京:科学出版社,2016.
- SUN Shu, WANG Tieguan. Meso-Neoproterozoic geology and petroleum resources in Eastern China [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [18] 高渐珍,李泽斌.承德地区冀元1井综合地质研究[R].濮阳:中石化中原油田分公司勘探开发科学研究院,2014.
- GAO Jianzhen, LI Zebin. Comprehensive geological study on Jiyuan-1 well in Chengde area [R]. Puyang: Research Institute of Exploration and Development, Zhongyuan Oilfield Branch, SINOPEC, 2014.
- [19] 张新生,于海成,张华.河北省页岩分布及页岩气前景[J].中国煤炭地质,2019,31(1):59-65.
- ZHANG Xinsheng, YU Haicheng, ZHANG Hua. Shale distribution in Hebei province and shale gas prospect [J]. Coal Geology of China, 2019, 31(1): 59-65.
- [20] 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.
- [21] 钟宁宁,张枝焕,黄志龙,等.燕山地区中—新元古界热演化生烃与油气成藏史[R].北京:中国石油大学(北京),2010.
- ZHONG Ningning, ZHANG Zhihuan, HUANG Zhilong, et al. The histories of hydrocarbon generation and oil and gas reservoir for Meso-Neoproterozoic in Yanshan area [R]. Beijing: China Petroleum University (Beijing), 2010.
- [22] 王茂林,程鹏,田辉,等.页岩油储层评价指标体系[J].地球化学,2017,46(2):178-190.
- WANG Maolin, CHENG Peng, TIAN Hui, et al. Evaluation index system of shale oil reservoirs [J]. Geochimica, 2017, 46(2): 178-190.
- [23] 郝石生,高耀斌,张有成,等.华北北部中—上元古界石油地质学[M].北京:石油大学出版社,1990:131-132.
- HAO Shisheng, GAO Yaobin, ZHANG Youcheng, et al. Petroleum geology of Meso-Neoproterozoic in the northern of North China [M]. Beijing: Petroleum University Press, 1990: 131-132.
- [24] 崔景伟,朱如凯,杨智,等.国外页岩层系石油勘探开发进展及启示[J].非常规油气,2015,2(4):68-82.
- CUI Jingwei, ZHU Rukai, YANG Zhi, et al. Progresses and enlightenment of overseas shale oil exploration and development [J]. Unconventional Oil & Gas, 2015, 2(4): 68-82.
- [25] 郭小波,黄志龙,陈旋,等.马朗凹陷芦苇沟组泥页岩储层含油性特征与评价[J].沉积学报,2014,32(1):166-173.
- GUO Xiaobo, HUANG Zhilong, CHEN Xuan, et al. The oil-bearing property characteristics and evaluation of Lucaogou Formation shale reservoirs in Malang Sag [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(1): 166-173.
- [26] 李志明,钱门辉,黎茂稳,等.中—低成熟湖相富有机质泥页岩含油性及赋存形式:以渤海湾盆地渤南洼陷罗63井和义21井沙河街组一段为例[J].石油与天然气地质,2017,38(3):448-456.
- LI Zhiming, QIAN Menhui, LI Maowen, et al. Oil content and occurrence in low-medium mature organic-rich lacustrine shales: a case from the 1st member of the Eocene-Oligocene Shahejie Formation in well Luo-63 and Yi-21, Bonan Subsag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3): 448-456.
- [27] JARVIE D M. Shale resource systems for oil and gas: part 2—shale-oil resource systems [M]//BREYER J A. Shale reservoirs: giant resources for the 21st century. Tulsa: AAPG, 2012: 89-119.
- [28] 卢双舫,黄文彪,陈方文,等.页岩油气资源分级评价标准探讨[J].石油勘探与开发,2012,39(2):249-256.
- LU Shuangfang, HUANG Wenbiao, CHEN Fangwen, et al. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: discussion and application [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 249-256.
- [29] 李志明,刘鹏,钱门辉,等.湖相泥页岩不同赋存状态油定量对比:以渤海湾盆地东营凹陷页岩油探井取心段为例[J].中国矿业大学学报,2018,47(6):1252-1263.
- LI Zhiming, LIU Peng, QIAN Menhui, et al. Quantitative comparison

- of different occurrence oil for lacustrine shale; a case from cored interval of shale oil special drilling wells in Dongying Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(6): 1252-1263.
- [30] 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.
- [31] 罗超, 张焕旭, 张纪智, 等. 岩石密闭热释方法评价页岩含油性特征: 以四川盆地侏罗系大安寨段为例[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(4): 712-719.  
LUO Chao, ZHANG Huanxu, ZHANG Jizhi, et al. Evaluation of oil content in shale by sealed thermal desorption: a case study of Jurassic Da'anzhai Member, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(4): 712-719.
- [32] 钱门辉, 王绪龙, 黎茂稳, 等. 玛页 1 井风城组页岩含油性与其烃类赋存状态[J]. *新疆石油地质*, 2022, 43(6): 693-703.  
QIAN Menhui, WANG Xulong, LI Maowen, et al. Oil-bearing properties and hydrocarbon occurrence states of Fengcheng formation shale in Well MaYe-1, Mahu sag [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2022, 43(6): 693-703.
- [33] 彭君, 周勇水, 李红磊, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷盐间细粒沉积岩岩相与含油性特征[J]. *断块油气田*, 2021, 28(2): 212-218.  
PENG Jun, ZHOU Yongshui, LI Honglei, et al. Lithofacies and oil-bearing characteristics of fine-grained sedimentary rocks of salt-layers in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2021, 28(2): 212-218.
- [34] 李志明, 蒋启贵, 钱门辉, 等. 东部古近系页岩层系含油性评价[R]. 北京: 中国石化石油勘探开发研究院, 2017.  
LI Zhiming, JIANG Qigui, QIAN Menhui, et al. Oiliness evaluation of Paleogene shales in eastern area of China [R]. Beijing: Petroleum Exploration and Production Research Institute of SINOPEC, 2017.
- [35] 钱门辉, 黎茂稳, 蒋启贵, 等. 页岩岩心样品烃类散失特征与地质意义[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(3): 497-504.  
QIAN Menhui, LI Maowen, JIANG Qigui, et al. Evaluation of evaporative loss of hydrocarbon in shale samples and its geological implications [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(3): 497-504.
- [36] 李志明, 梁世友, 杨振恒, 等. 苏北盆地阜宁组烃源岩评价与致密油资源潜力研究[R]. 北京: 中国石化石油勘探开发研究院, 2016.  
LI Zhiming, LIANG Shiyu, YANG Zhenheng, et al. Study on source rock evaluation and tight oil resource potential of Funing Formation in Subei Basin [R]. Beijing: Petroleum Exploration and Production Research Institute of Sinopec, 2016.
- [37] 姚红生, 晷灵, 高玉巧, 等. 苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段页岩油富集高产主控因素与勘探重大突破[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(5): 776-783.  
YAO Hongsheng, ZAN Ling, GAO Yuqiao, et al. Main controlling factors for the enrichment of shale oil and significant discovery in second member of Paleogene Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(5): 776-783.
- [38] 吴迪. 冀元 1 井及邻区中元古界流体包裹体与油气运移期次研究[D]. 北京: 核工业北京地质研究院, 2015.  
WU Di. Study on Mesoproterozoic fluid inclusion and oil and gas migration stages in Jiyuan 1 well and adjacent area [D]. Beijing: Beijing Institute of Geology of Nuclear Industry, 2015.
- [39] 郭旭升, 赵永强, 张文涛, 等. 四川盆地元坝地区千佛崖组页岩油气富集特征与主控因素[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(5): 749-757.  
GUO Xusheng, ZHAO Yongqiang, ZHANG Wentao, et al. Accumulation conditions and controlling factors for the enrichment of shale oil and gas in the Jurassic Qianfoya Formation, Yuanba area, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(5): 749-757.
- [40] 曹小朋. 矿物组成对页岩油渗流机理的影响[J]. *断块油气田*, 2021, 28(5): 609-613.  
CAO Xiaopeng. Influence of mineral composition on shale oil seepage mechanism [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2021, 28(5): 609-613.
- [41] 吕照, 刘叶轩, 陈希, 等. 页岩油储层可压性分析及指数预测[J]. *断块油气田*, 2021, 28(6): 739-744.  
LÜ Zhao, LIU Yexuan, CHEN Xi, et al. The fracability analysis and index prediction of shale oil reservoir [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2021, 28(6): 739-744.
- [42] 白国平, 邱海华, 邓舟舟, 等. 美国页岩油资源分布特征与主控因素研究[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(4): 524-532.  
BAI Guoping, QIU Haihua, DENG Zhouzhou, et al. Distribution and main controls for shale oil resources in USA [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(4): 524-532.
- [43] 李倩文, 马晓潇, 高波, 等. 美国重点页岩油区勘探开发进展及启示[J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(5): 630-640.  
LI Qianwen, MA Xiaoxiao, GAO Bo, et al. Progress and Enlightenment of Exploration and Development of Major Shale Oil Zones in the USA [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(5): 630-640.
- [44] 邱振, 卢斌, 施振生, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油滞留聚集机理及资源潜力探讨[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(1): 1817-1827.  
QIU Zhen, LU Bin, SHI Zhensheng, et al. Residual accumulation and resource assessment of shale oil from the Permian Lucaogou Formation in Jimusar Sag [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(1): 1817-1827.
- [45] 王韶华, 聂惠, 马胜钟, 等. 江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组盐间页岩油资源评价与甜点区预测[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(1): 94-101.  
WANG Shaohua, NIE Hui, MA Shengzhong, et al. Resource evaluation and sweet-spot prediction of inter-salt shale oil of Paleogene Qianjiang Formation, Qianjiang Sag, Jiangnan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(1): 94-101.