

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020010301

# 苏北盆地阜宁组源储特征及页岩油勘探方向探讨

芮晓庆<sup>1,2,3</sup>, 周圆圆<sup>1,2,3</sup>, 李志明<sup>1,2,3</sup>, 张庆珍<sup>1,2,3</sup>

1. 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 无锡 214126
2. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 无锡 214126
3. 中国石化油气成藏重点实验室, 无锡 214126

**摘要:**对苏北盆地重点凹陷的 70 口钻井采集 395 件样品进行实验分析,并结合前人资料详细研究了苏北盆地古近系古新统阜宁组阜二段、阜四段两套烃源岩地化特征、岩矿特征、储集空间类型及储集性能,在重点油井解剖的基础上,探讨了页岩油的富集机理。苏北盆地阜宁组有机碳普遍大于 1.0%,有机质类型较好,整体处于低熟-成熟阶段,具备良好的生油基础;微裂缝、孔隙较发育,具有一定的储集条件,阜二段泥页岩整体黏土矿物含量低于 35%,脆性矿物含量大于 50%,有利于页岩油的开采。通过对重点凹陷典型页岩油藏的两口井的数据解剖,认为页岩油藏受高有机质丰度的成熟泥页岩、脆性矿物含量、裂缝发育程度、异常高压等因素控制。苏北盆地的金湖凹陷、高邮凹陷、海安凹陷和盐城凹陷的深凹带是泥页岩油气勘探和开发的有利区带。

**关键词:**地球化学特征;岩矿特征;储集性能;页岩油;苏北盆地;阜宁组

中图分类号:P612

文献标识码:A

## Characteristics of source rocks and reservoirs of the Funing Formation in the Subei Basin and their bearing on future shale oil exploration

RUI Xiaoqing<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Yuanyuan<sup>1,2,3</sup>, LI Zhiming<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Qingzhen<sup>1,2,3</sup>

1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi 214126, China
2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Wuxi 214126, China
3. Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, SINOPEC, Wuxi 214126, China

**Abstract:** 395 samples collected from 70 wells in the major depressions of the Subei Basin are analyzed in this paper. Combined with the previous data analyzed, we systematically studied the geochemical and lithological characteristics, accumulation space types and their distribution patterns as well as reservoir physical properties in addition to the hydrocarbon source rock of the F2 and the F4 Member of the Paleogene Funing Formation in the Basin. Based on the case studies for typical wells and oil shows, the occurrence and accumulation mechanisms of shale oil is deeply discussed. The results reveal that the average organic carbon content of the two members is over 1.0%, dominated by the type I-II in a matured stage, that found the basis for the formation of shale oil. Many kinds of micropores and micro cracks are well developed. Clay content of the Member F2 is usually lower than 35% and the content of brittle minerals is over 50%, which is in favor of shale oil mining. The study of the two well cases in the typical shale reservoir reveals that the formation of shale oil reservoir mainly depends on the existence of mature shale with high abundance of organic matter and brittle minerals, well developed fractures and abnormal high pressure. The major depressional centers of the Jinhu Sag, Gaoyou Sag, Haian Sag and Yancheng Sag in the North Jiangsu Basin are favorable zones for shale gas exploration and mining.

**Key words:** geochemical characteristics; rock characteristics; reservoir performance; shale oil; the Subei basin; the Funing Formation

苏北盆地是我国东部陆相中、新生代大型盆地之一,盆地内已发现多个富含油气的凹陷以及多套烃源岩层系,其中古近系阜宁组阜四段( $E_1f_4$ )和阜二段( $E_1f_2$ )以暗色泥岩为主的烃源岩是本区主要生

油岩,油气显示丰富,在非常规油气勘探方面(页岩油)也逐渐显示出较大潜力<sup>[1]</sup>。相关文献指出,苏北探区全区有 200 多口钻井在阜二段和阜四段泥页岩层系中见油气显示,其中多口井试获原油,如盐城

资助项目:国家科技重大专项项目(2017ZX05049-001)

作者简介:芮晓庆(1984—),女,硕士,工程师,从事有机岩石学、烃源岩评价, E-mail: ruixq.syky@sinopec.com

收稿日期:2020-01-03; 改回日期:2020-04-16. 周立君编辑

凹陷的YC1井在阜二段试获日产油 $36.83\text{ m}^3$ ,海安凹陷的H20井阜四段累计试获原油 $11.65\text{ t}$ ,说明这两套泥页岩层系也是我国页岩油气勘探的重点层系<sup>[2]</sup>。

前人虽然从烃源评价角度对阜二段、阜四段泥页岩的基本有机地球化学参数(有机碳、生烃潜量、氯仿沥青“A”含量、有机质类型与成熟度 $R_o$ )进行过统计<sup>[3-9]</sup>,但样品来源、数量、纵向变化特征等信息均没有阐述,且往往只是针对某一重点凹陷进行含油性、储集性评价,而对盆地内各凹陷之间烃源岩的生烃条件差异性、横向对比性研究不够深入;同时,对苏北盆地阜二段、阜四段页岩油的富集机理、成藏地质条件及勘探前景等虽零星有论述<sup>[10-11]</sup>,但均缺乏系统性剖析,一定程度上制约了对阜二段、阜四段富有机质泥页岩有机地球化学特征的系统认识以及对各凹陷已知油气藏贡献大小的判识。本文在对前人资料整理的基础上,采集典型样品,较为系统地对比苏北盆地阜宁组烃源岩的地球化学特征和储集性能进行分析,对阜宁组阜二段、阜四段烃源岩在各凹陷之间的展布规律进行了精细的评价,以便为该层段常规与非常规油气勘探评价、已知油气藏烃源岩贡献判识提供基础资料。

## 1 地质背景概述

苏北盆地探区属于苏北-南黄海盆地的陆上部分,东临黄海,西接鲁苏隆起,南侧为苏南隆起,北部以滨海隆起为界,总面积约 $33\,200\text{ km}^2$ (图1)<sup>[12]</sup>。盆地自形成后经历了多期构造运动的改造,以建湖隆起为界,向北为盐阜拗陷,南侧称为东台拗陷,高邮、金湖、海安、盐城、溱潼等凹陷分布其中<sup>[13]</sup>。苏北盆地基底为海相中、古生代沉积实体;盖层为陆相中、新生代断拗沉积体<sup>[14]</sup>,包括泰州组、阜宁组、戴南组、三垛组、盐城组等多套地层,地层沉积厚度超过了 $11\,000\text{ m}$ ,其中阜宁组 $E_1f_2$ 、 $E_1f_4$ 暗色泥页岩最为发育,属较稳定的较深湖沉积,是页岩油评价与勘探的主要目的层<sup>[15]</sup>。

阜二段( $E_1f_2$ )沉积期属盆地拗陷演化阶段,湖盆比较平缓,周围高差不大,基本还保持西高东低的格局。 $E_1f_2$ 在纵向上可分3个阶段:海侵开始阶段、海侵影响阶段与海侵退却阶段。地层厚度 $200\sim 300\text{ m}$ ,最大厚度约 $370\text{ m}$ ,整体以灰黑色泥岩为主,与下伏阜一段整合接触。 $E_1f_2$ 除金湖凹陷西斜坡下部为砂岩外,以富含有机质的暗色泥页岩为

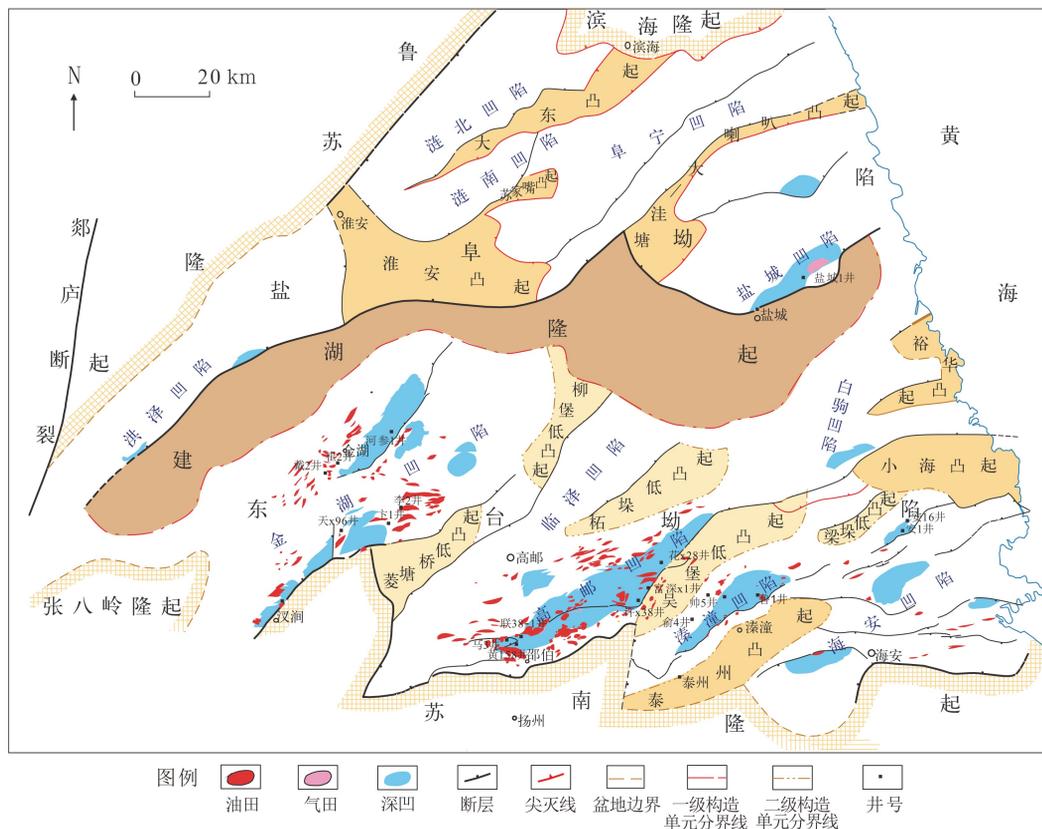


图1 苏北盆地构造单元划分略图及重点井位图<sup>[12]</sup>

Fig.1 Tectonic map of Subei Basin and locations of the key wells

主,在高邮、金湖、海安、溱潼、盐城凹陷均有分布,向西凸起,厚度逐渐减薄,直至尖灭;具厚度大、分布广的特征。

阜四段( $E_1f_4$ )沉积期属盆地拗陷演化阶段,主体为半深湖-深湖环境。该段地层主要由灰黑色泥岩夹薄层泥灰岩组成,总厚度300~400 m,最厚达500 m,受吴堡事件剥蚀现象严重,导致凹陷和低凸起及隆起部位泥页岩厚度差异较大<sup>[13]</sup>。 $E_1f_4$ 上亚段富有机质泥页岩主要分布于高邮凹陷和金湖凹陷,金湖凹陷的汊涧和龙岗次凹厚度约为300余米,厚度向凹陷边缘减薄;高邮凹陷深凹带厚度可达400余米,同样向凹陷边缘减薄。海安、盐城、阜宁凹陷仅在深凹带局部残存,厚度多小于100 m<sup>[14]</sup>。 $E_1f_4$ 下亚段泥页岩在全区分布较为普遍,特别是在深凹带和斜坡带,残存厚度均较大,多大于100 m。

## 2 样品采集与实验分析

本次研究主要采集了苏北盆地70口井的395块典型样品(部分重点井已在图1标出),涉及高邮凹陷、海安凹陷、金湖凹陷、溱潼凹陷、盐城凹陷、泰州凸起阜宁组阜二段和阜四段两套烃源岩,另外采集油样7个。根据研究需要,对采集样品开展了有效烃源岩评价、泥页岩储层评价以及含油性分析在内的20余项分析测试项目。本次测试中涉及到的所有测试项目均在中石化无锡石油地质研究所实验测试研究中心完成。

## 3 阜宁组烃源岩地球化学特征

### 3.1 阜二段、阜四段有机质丰度

众所周知,在评价烃源岩生油潜力的参数中有

机质丰度是关键指标之一,含量高低直接影响着对油气资源前景的评价。其中由于影响有机碳含量的因素较少,是有机质丰度评价中最直接也是最为重要的参数,有机质丰度越高,代表生烃能力越强<sup>[16]</sup>。

通过对苏北盆地290个阜二、阜四段泥页岩样品的热解分析结果统计,阜宁组二套陆相泥页岩层段有机质丰度基本集中于0.5%~2.0%,局部地区达到2.5%以上,纵向上富有机质泥页岩非均质性较强,横向上各凹陷之间也存在一定的差异。阜二段TOC为0.152%~6.992%,平均为2.011%,其中盐城凹陷阜二段泥页岩TOC整体较高,普遍大于2.5%,其他各凹陷泥页岩TOC含量略有差异(表1)。氯仿沥青“A”为0.010%~0.447%,平均为0.132%,生烃潜量( $S_1 + S_2$ )最大为50.824 mg/g,最小为0.032 mg/g,平均为10.241 mg/g。各凹陷含量略有不同,表明各凹陷所含页岩油资源略有差异。阜四段TOC为0.184%~4.322%,平均为1.263%,氯仿沥青“A”平均为0.025%,生烃潜量( $S_1 + S_2$ )最大为42.5 mg/g,最小为0.02 mg/g,平均为4.871 mg/g(见表2)。阜二段总体有机质丰度高于阜四段。

为了研究苏北盆地阜宁组两套陆相泥页岩层段有机质丰度在纵向上的差异性,选取了阜二段、阜四段重点层位阜2-2亚段、阜4-1亚段的TOC平面分布进行论述(图2),同时选取金湖凹陷河参1井、崔2井,海安凹陷安1井三组典型钻井取芯段进行评价(图3)。

依据纵向上 $E_1f_2$ 含油泥页岩的TOC含量变化特征,将 $E_1f_2$ 进一步划分为3个亚段。阜2-1亚段TOC总体0.5%~2.0%,各凹陷均有分布;阜2-2亚段平均TOC均值大于2%,整体为1%~3%,广泛分布于金湖、高邮、溱潼、海安及盐城凹陷,高邮凹陷深凹带厚度接近100 m,向金湖西斜坡带逐渐减薄(图2);阜2-3亚段TOC为0.5%~1.5%,分布广

表1 苏北盆地探区阜宁组阜二段富有机质泥页岩丰度统计

Table 1 Statistical table of organic matter abundance for source rocks of the F2 Member of Funing Formation in the Subei Basin

探区	TOC (%) /样品数	氯仿沥青“A” (%) /样品数	HI (%) /样品数	$S_1+S_2$ (mg/g) /样品数
高邮凹陷	1.583/38	0.034/5	362.301/38	6.823/38
金湖凹陷	1.724/42	0.208/5	328.432/42	7.854/42
海安凹陷	2.094/45	0.099/8	439.815/45	13.123/45
盐城凹陷	2.833/38	0.159/14	481.000/38	15.630/38
溱潼凹陷	1.691/19	-	393.762/19	7.351/19
泰州凸起	1.154/2	-	290.000/2	3.000/2
平均值	2.011/184	0.132/32	400.511/184	10.241/184

表2 苏北盆地探区阜宁组阜四段富有机质泥页岩丰度统计

Table 2 Statistical table of organic matter abundance for source rocks of the F4 Member of Funing Formation in the Subei Basin

探区	TOC (%) / 样品数	氯仿沥青“仿沥” (%) / 样品数	HI (%) / 样品数	S <sub>1</sub> +S <sub>2</sub> (mg/g) / 样品数
高邮凹陷	1.102/39	—	246.032/33	4.080/33
金湖凹陷	1.281/29	0.025/3	257.670/18	3.963/18
海安凹陷	0.572/1	—	144.000/1	0.834/1
盐城凹陷	1.163/17	—	348.000/2	7.891/2
溱潼凹陷	1.663/20	—	237.811/20	6.892/20
平均值	1.263/106	0.025/4	248.012/74	4.871/74

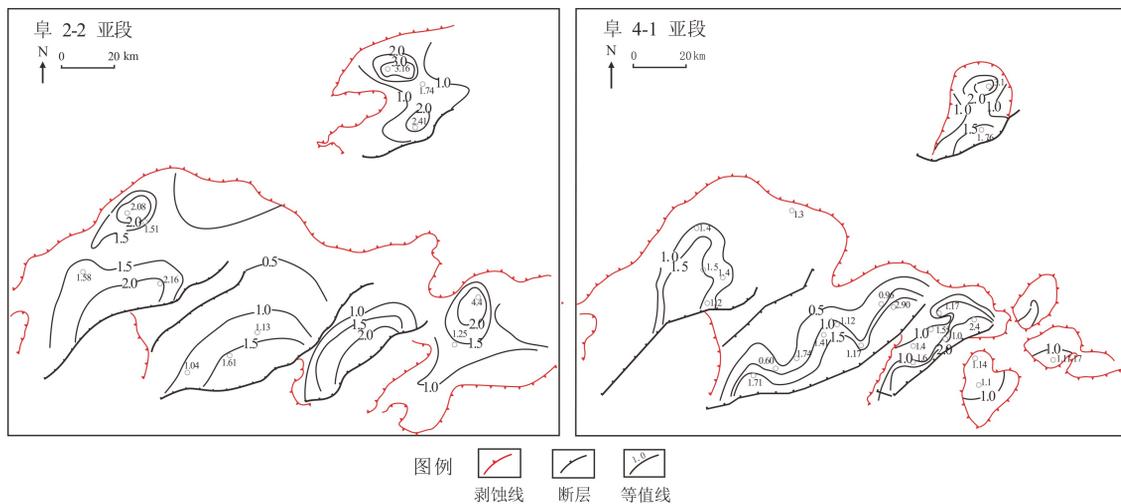


图2 苏北盆地重点凹陷阜2-2亚段、阜4-1亚段有机碳平面分布图

Fig.2 The plane distribution of total organic carbon of the Sub-members F2-1 and F4-1 in the key depressions of Subei Basin

泛。从两口重点井 TOC 的纵向分布规律看,阜 2-1、阜 2-2 的 TOC 含量都高于阜 2-3 亚段。因此,阜二段纵向上虽然 TOC 差异较大,但变化规律一致,以阜 2-1、阜 2-2 两个页岩段的 TOC 含量稍高,表明这两个页岩层段具有更高的生烃潜力。

依据纵向上 E<sub>1</sub>f<sub>4</sub> 泥页岩的 TOC 含量变化特征,将 E<sub>1</sub>f<sub>4</sub> 进一步划分为两个亚段(图 2、图 3)。阜 4-1 亚段 TOC 为 1%~1.5%,主要分布在金湖、高邮、溱潼凹陷,海安和盐城凹陷分布局限,厚度薄。阜 4-2 亚段 TOC 为 0.5%~1%,主要分布在金湖、高邮凹陷,厚度最大 140 m,溱潼凹陷次之,海安和盐城凹陷也有残存。从重点井金湖凹陷崔 2 井阜四段烃源岩 TOC 变化也可以看出,阜 4-1 亚段 TOC 含量为 0.5%~2.4%,略高于阜 4-2 亚段,纵向非均质性明显。

苏北盆地阜二段、阜四段两套泥页岩虽然纵向非均质性明显,横向非均质性在同一沉积相带内各凹陷略有差异,同一凹陷不同地区和构造单元的泥页岩地球化学特征差异不明显,虽有个别异常点,

但总体并无变化规律可循。苏北盆地阜宁组两套泥页岩地球化学特征在纵向、横向的分布特点主要与沉积特征有关。晚白垩世—古新世大型内陆拗陷沉积特征决定了区内 E<sub>1</sub>f<sub>2</sub> 和 E<sub>1</sub>f<sub>4</sub> 沉积相带规模巨大,跨构造单元,跨海陆区域,且具单一沉积中心的特征<sup>[10]</sup>。该时期,断层(包括凹陷的边界断层)虽然控制地层厚度,但并不控制沉积相,导致苏北盆地各凹陷均属同一沉积相带或沉积相变化不大,如高邮、金湖、海安、盐城、阜宁凹陷 E<sub>1</sub>f<sub>2</sub> 期均为半深湖—深湖相(金湖凹陷和高邮凹陷西部地区在 E<sub>1</sub>f<sub>2</sub> 沉积早期为浅湖相);同一凹陷内部斜坡带和深凹带沉积相带变化也不大,正是这一沉积特征决定了苏北盆地 E<sub>1</sub>f<sub>2</sub> 和 E<sub>1</sub>f<sub>4</sub> 满盆深湖,腐泥型泥页岩遍及全盆,且横向上非均质性不明显,各凹陷可对比。纵向上,苏北盆地晚白垩世—古新世在大型内陆拗陷背景下,发育 3 个次级断拗演化旋回,其中 E<sub>1</sub>f<sub>2</sub>、E<sub>1</sub>f<sub>4</sub> 均形成于拗陷演化阶段<sup>[17]</sup>。频繁的断拗转换,导致纵向上沉积相变较快,泥页岩非均质性强。

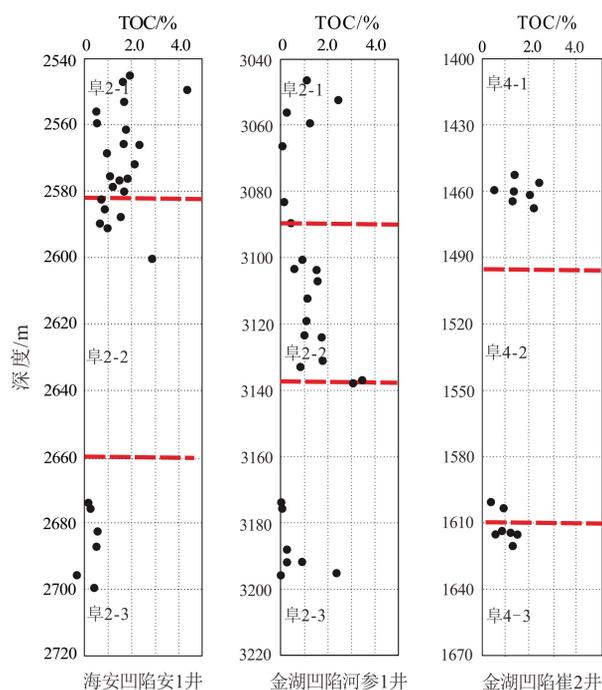


图 3 苏北盆地重点凹陷典型井阜二段、阜四段各亚段有机碳分布特征

Fig.3 The characteristics of total organic carbon in the typical wells of the F2 and F4 Members of Funing Formation in the key depressions of the Subei Basin

### 3.2 阜二段、阜四段有机质类型

有机质类型是衡量烃源岩质量的指标, 不同类型有机质反映生烃母质的质量, 不同的生烃母质其生油能力也不同, 生油门限值和生烃过程也有一定差别<sup>[18]</sup>。本次有机质类型根据大量热解数据并结合有机岩石学分析结果进行评价。

#### 3.2.1 干酪根类型

大量热解氢指数 HI—Tmax 分析资料显示, 苏北盆地阜宁组阜二段和阜四段有机质类型复杂, I 型到 III 型均有发育。阜二段主要是 I 型(腐泥型)、II 1 型(以腐泥为主的混合型)干酪根, 后者主要为 II 2—III 型(腐殖型)、少数 II 1 型(以腐殖为主的混合型)。

根据干酪根统计数据可以看出(表 3), E<sub>1</sub>f<sub>2</sub> 泥页岩 I—II 1 型干酪根所占比例最大, 达 52%~84%。

明显好于 E<sub>1</sub>f<sub>4</sub> 段; E<sub>1</sub>f<sub>4</sub> 段泥页岩 I—II 1 型干酪根占 35%~51%; 横向上, E<sub>1</sub>f<sub>2</sub> 泥页岩自西向东, I—II 1 型干酪根比例增大(表 3), 东部海安和盐城凹陷泥页岩有机质类型好于西部高邮和金湖凹陷, 这与有机质丰度变化相似; 而 E<sub>1</sub>f<sub>4</sub> 泥页岩有机质类型分布特征则相反, I—II 1 型干酪根主要分布在高邮凹陷深凹带, 并且西部金湖和高邮凹陷明显好于东部盐城和海安凹陷(表 3), 这主要与沉积相发生变化有关<sup>[19]</sup>。

#### 3.2.2 有机显微组分特征

全岩有机显微组分数据显示, 苏北盆地阜宁组显微组分以腐泥组为主, 镜质组和壳质组含量较高, 惰性组含量较低。其中腐泥组的来源主要是藻类体及其降解产物, 标志藻类微生物的生源输入, 而镜质组、壳质组和惰性组则代表陆生高等植物的生源输入<sup>[9]</sup>。

对苏北盆地样品的全岩有机岩石学统计分析表明, 苏北盆地阜二段泥页岩有机显微组分相对含量中, 平均含腐泥组 47.3%, 壳质组 9.1%, 镜质组 35.2%, 惰性组 8.6%。主要显微组分为腐泥组和镜质组, 含少量壳质组(主要是孢粉体)、惰性组。苏北盆地阜四段泥页岩有机显微组分相对含量中, 平均含腐泥组 42.2%, 壳质组 8.5%, 镜质组 41.8%, 惰性组 7.5%。与阜二段泥页岩比较, 阜四段泥页岩相对贫腐泥组、壳质组, 相对富惰性组和镜质组, 有机质类型相对差些, 与热解结果相符合。显微组分的这种分布和组成模式反映了有机质水生和陆生的双重来源<sup>[20]</sup>。

由于苏北盆地各凹陷均属同一沉积相带, 如高邮、金湖、海安、盐城、阜宁凹陷 E<sub>1</sub>f<sub>2</sub> 期均为半深湖—深湖相(金湖凹陷和高邮凹陷西部地区在 E<sub>1</sub>f<sub>2</sub> 沉积早期为浅湖相), 因此导致腐泥组是主要的生烃有机质, 其富集程度和分布范围对页岩油富集规模影响较大。本研究区腐泥组中层状藻类体和沥青质体含量占绝对优势, 主要来源于降解的藻类体(图 4c、h)。层状藻类体极为发育, 呈细长条状顺层分布, 形态保存完整, 呈黄色荧光(图 4a、b、f); 部分样品中见密集分布的线形藻类薄层(图 4d), 呈橙黄色荧

表 3 苏北盆地各凹陷泥页岩有机质类型百分含量统计表 (%)

Table 3 Statistical table of percentage content of organic matter types in each depression of the Subei Basin

层位	分析项目	金湖凹陷				高邮凹陷				海安凹陷				盐城凹陷				溱潼凹陷			
		I	II 1	II 2	III	I	II 1	II 2	III	I	II 1	II 2	III	I	II 1	II 2	III	I	II 1	II 2	III
阜二段	热解	28	34	23	15	21	31	33	15	24	53	21	2	76	8	10	6	35	30	24	11
阜四段	热解		50	17	33	7	44	29	20	6	37	32	25	4	35	39	22	8	27	41	24

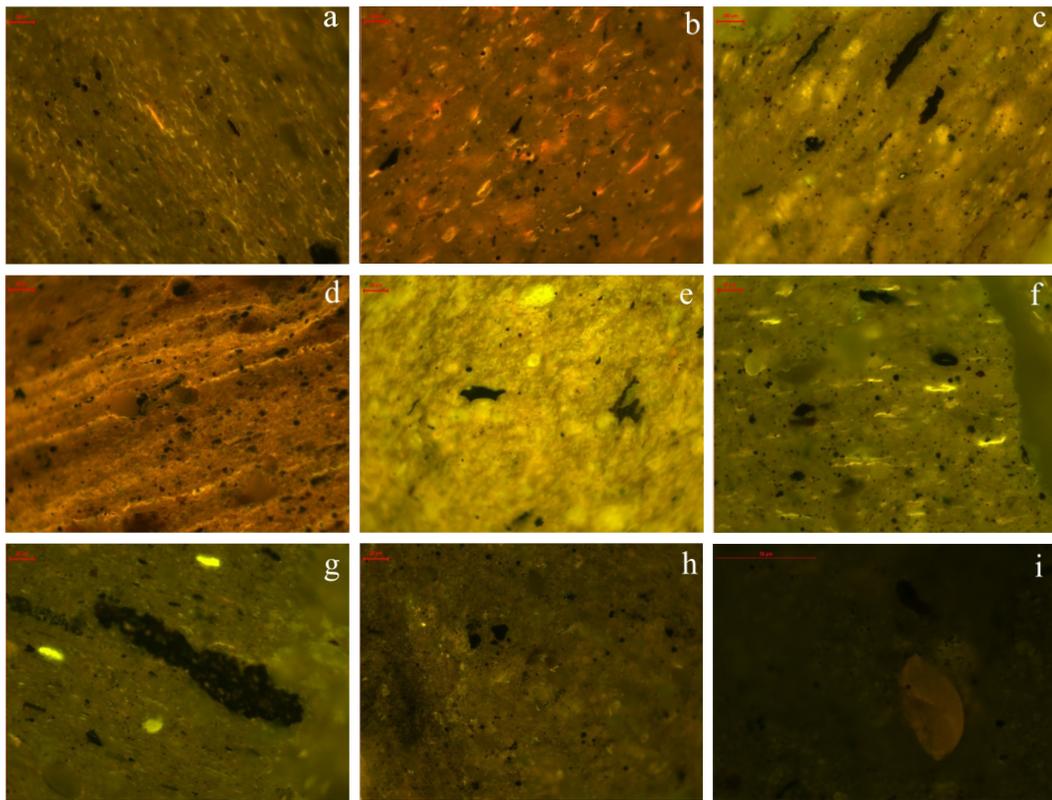


图4 阜宁组阜二段、阜四段烃源岩有机显微组分照片

a. 高邮凹陷单1井阜二段2101.8 m 灰黑色泥岩层状藻类体显微照片; b. 海安凹陷安24井阜二段3034.9 m 灰黑色泥岩层状藻类体显微照片; c. 金湖凹陷崔19井阜二段1491.1 m 沥青质体显微照片; d. 金湖凹陷河参1井阜二段3151 m 灰黑色泥岩层状藻类体显微照片; e. 盐城凹陷新朱1井阜二段2729.8 m 灰黑色泥岩沥青质体、结构藻类体显微照片; f. 金湖凹陷戴1阜二段1636 m 灰黑色泥岩层状藻类体显微照片; g. 金湖凹陷河X4井阜四段1894.2 m 深灰色灰质泥岩沥青质体、结构藻类体显微照片; h. 盐城凹陷站1井阜四段2088.1 m 深灰色泥岩矿物沥青基质显微照片; i. 海安凹陷陈3井阜四段2206.7 m 孢粉体显微照片。

Fig.4 Photos of organic macerals of source rocks of the F2 and F4 Members of Funing Formation

光<sup>[21-22]</sup>; 沥青质体或藻纹层中可见发黄绿色强荧光的结构藻类体, 主要为葡萄球藻, 其次为个体较小的甲藻(图4e、g、h)。这些结构藻类体降解后在纹层中均有残迹存在, 是最重要的生烃母质。

### 3.3 有机质成熟度特征

源于高等植物碎屑的镜质体反射率( $R_o$ )随热演化程度的升高而稳定增大, 并且有相对广泛、稳定的可比性。而镜质体测试的可靠性和有效性一直备受研究人员关注, 目前镜质体反射率的测量还有一些不足之处, 比如有机质类型与镜质体反射率的关系, 某些有机质类型对镜质体反射率具有抑制作用。许多学者均指出, 壳质组、藻类体占优势的岩石中, 镜质体反射率受到抑制<sup>[23]</sup>。目前, 解决镜质体反射率抑制问题的有效方法为 FAMM (fluorescence alteration of multiple macerals) 技术<sup>[24]</sup>。为了更好地评价镜质体反射率测定结果的合理性, 在开展镜质体反射率测定的同时, 对个别样品开展了

FAMM 分析, 使苏北盆地阜二、阜四段烃源岩成熟度评价更趋于合理。

镜质体反射率测试结果表明, 各凹陷阜二段—阜四段泥页岩镜质体反射率总体随深度的增高而增大, 但同一深度段镜质体反射率差异明显, 这可能因为各凹陷不同地区古地温存在一定的差异, 同时不同地区泥页岩的有机质类型存在差异, 从而会导致镜质体反射率抑制程度不同。另外, 各凹陷在 2500~4000 m 深度段, 其镜质体反射率值较上部深度段偏低的特点, 这可能主要与该深度段样品主要处于深洼区, 泥页岩有机质类型相对较好, 镜质体反射率受抑制程度相对大相关, 这为 FAMM 分析结果所证实。图5为溱潼凹陷鲁1井2965.62 m 深度段灰黑色灰质泥岩样品(阜四段, 有机质类型属 II 1) FAMM 分析等效镜质体反射图, 可见该样品等效镜质体反射率值为 0.76%, 镜质体反射率抑制值为 0.20%, 这意味着镜质体反射率  $R_o$  值约为 0.56%, 该样品的实测镜质体反射率  $R_o$  值为 0.55%, 两者结

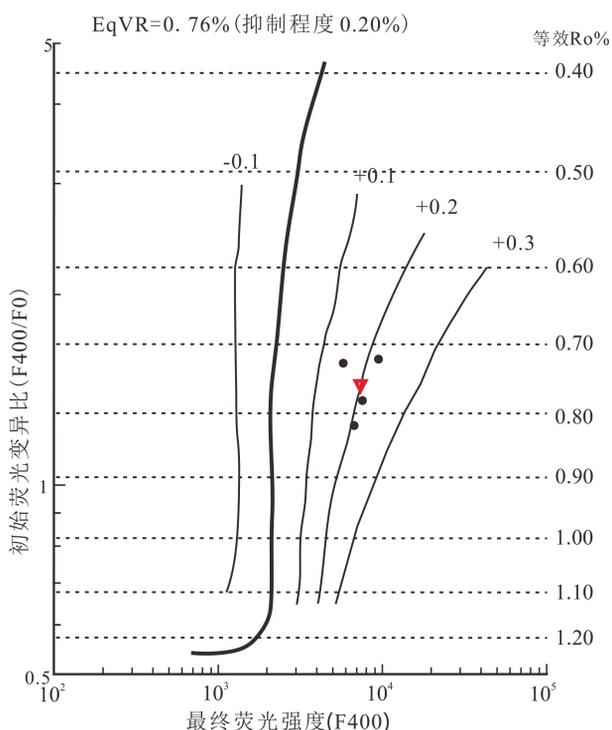


图 5 溱潼凹陷鲁 1 井 2965.62 m 灰黑色灰质泥岩 Famm 分析等效镜质体反射图

Fig.5 Famm analysis of equivalent vitrinite reflectogram of a gray black grey mudstone from well Lu1 in Qintong Sag, 2965.62 m

果相吻合。而对于有机质类型为Ⅲ型的泥页岩样品, Famm 分析结果显示其镜质体反射率抑制程度很低或无抑制现象, 镜质体反射率实测值可以代表其真实成熟度值。

研究表明(图 6), 阜二段烃源岩成熟度总体大于 0.8%, 除了高邮、溱潼凹陷深凹带为高成熟生烃阶段( $R_o > 1.2\%$ ), 其他地区, 包括高邮斜坡带、金

湖、溱潼、盐城、海安斜坡带泥页岩成熟度均小于 1.0%, 处于成熟阶段, 主要以生油为主。阜四段  $R_o$  总体上大于 0.5%, 为 0.5%~0.7%, 处于低熟—成熟生烃阶段, 除高邮凹陷深凹带、金湖三河次凹和龙港次凹、溱潼凹陷深凹带泥页岩成熟度相对较高, 大于 0.7%,  $R_o$  最大为 1.2%, 总体上成熟度低于阜四段。

苏北盆地阜宁组生油岩的演化严格受断陷制约<sup>[25]</sup>, 断陷深凹有机质演化最高, 是成熟油中心形成的中心区; 而广阔的斜坡和低凸起演化程度相对较低。盆地东部各凹陷生油岩直到新近纪深埋才进入大量生烃的晚期成油凹陷, 而中部金湖、高邮及溱潼凹陷则是一类古近系沉积时期就已进入生烃门限的早期成油凹陷, 从而决定不同地区原油的成熟度不同。

#### 4 阜二、阜四段烃源岩岩石学与储集特征

##### 4.1 阜宁组泥页岩矿物组成特征

为了获取泥页岩矿物组成特征, 对苏北盆地重点凹陷阜二、阜四段泥页岩开展全岩和黏土 X 射线衍射分析。横向上, 阜二段和阜四段不同凹陷矿物组成类似, 含量有差异。阜二段各凹陷, 以碳酸盐矿物和黏土矿物为主, 石英和方沸石含量次之, 少量黄铁矿、长石, 微量石膏(表 4)。溱潼凹陷阜二段未检测出铁白云石, 白云石含量较高, 而盐城凹陷则与之相反, 铁白云石含量相对较高, 白云石微量。阜四段矿物组成以黏土矿物为主, 次为石英和碳酸盐矿物, 少量长石、黄铁矿和石膏, 未见方沸

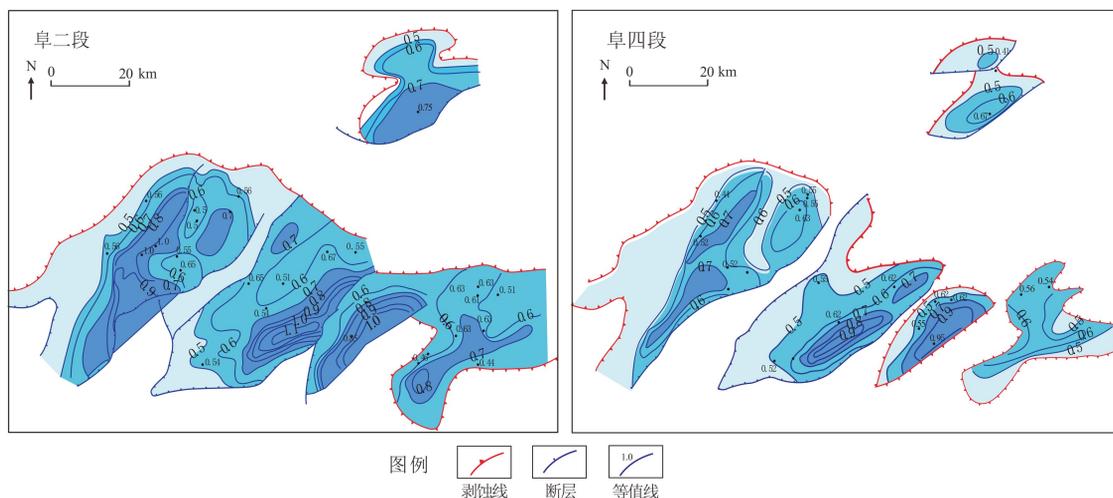


图 6 苏北盆地各重点凹陷成熟度平面分布图

Fig.6 The plane distribution of maturity of major depressions in the Subei Basin

表4 苏北盆地重点凹陷阜二段、阜四段全岩矿物组分

Table 4 The whole rock mineral components of the F2 and F4 Members of Funing Formation in the key depressions of Subei Basin

层段	重点凹陷	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	铁白云石	菱铁矿	黄铁矿	石膏	方沸石	黏土矿物	脆性矿物
阜二段	高邮凹陷	20.510	1.803	7.050	11.100	13.110	20.930	1.302	2.908	2.400	7.612	32.210	50.810
	金湖凹陷	20.301	5.323	7.621	12.604	8.513	14.109	1.032	4.101	1.621	12.701	29.616	49.088
	海安凹陷	21.205	1.514	5.080	11.203	17.609	11.314	0.819	1.795	0.91	9.910	30.712	56.013
	盐城凹陷	22.704	2.523	2.426	13.205	3.011	18.412	1.101	3.492	2.198	15.681	30.201	45.337
	溱潼凹陷	32.812	1.332	9.014	6.510	15.01		1.014	3.221	2.110	9.01	28.29	64.212
阜四段	高邮凹陷	30.193	1.702	7.813	12.301	2.615	4.217	0.798	2.113	1.701		38.706	52.811
	金湖凹陷	25.602	2.821	5.518	8.209	5.218	19.301	1.513	2.831	1.007		41.212	43.091
	海安凹陷	22.098	1.078	4.095	11.044	2.048	5.011		2.052			53.033	40.045
	盐城凹陷	20.032		1.516	12.034	7.015	2.033	1.017	4.032	2.514		49.026	40.547
	溱潼凹陷	18.032	2.818	6.312	8.065	7.6		1.020	3.302			44.207	41.811

石。阜四段泥页岩各凹陷的黏土矿物含量分布于38.7%~53%，高于阜二段28.2%~32.2%。黏土主要以伊/蒙混层矿物为主，同时含有一定量的伊利石，另含少量高岭石和绿泥石。前人研究表明，蒙脱石遇水膨胀能力是四种黏土矿物中最强的，依次为伊蒙混层、伊利石和高岭石<sup>[2]</sup>。苏北盆地黏土矿物中蒙脱石含量相对较高，页岩遇水易膨胀，对后期的压裂有一定影响。苏北盆地主要脆性矿物包括石英、长石、方解石和白云石，脆性矿物含量不仅对地层中原始裂缝发育有控制作用，而且影响后期压裂改造裂缝的条件。数据显示，苏北盆地阜二段各凹陷脆性矿物分布于49.3%~64.5%，各凹陷均值高达53.1%；阜四段脆性矿物分布于40%~52.8%，各凹陷脆性矿物含量值均在40%以上，说明阜宁组各页岩段脆性矿物含量均较高。整体上，阜二段高邮凹陷、金湖凹陷和溱潼凹陷各页岩段脆性矿物含量平均大于50%，黏土矿物含量约30%，对压裂造缝有利。这些特征与中国东部泌阳凹陷核三上(E<sub>1</sub>h<sub>3</sub>)页岩及美国Barnett页岩、Bakken页岩脆性相似<sup>[26]</sup>，有利于天然缝的形成及后期压裂。高邮凹陷E<sub>1</sub>f<sub>4</sub>各页岩段脆性矿物含量大于50%，黏土矿物含量约为38%，有利于岩石的压裂改造。而其他凹陷阜四段脆性矿物含量相对较低，整体约40%。

纵向上，以金湖凹陷河参1井阜2-2和阜2-3亚段(分界深度3138 m)为例(图7)，除了个别泥质灰岩外，金湖凹陷河参1井阜2-2和阜2-3泥页岩主要组成矿物为黏土、石英、碳酸盐、方沸石和长石。其中阜2-2亚段黏土矿物含量一般为20%~30%，以伊/蒙混层矿物占主体(相对百分含量55%左右)，

方沸石含量一般为7%~22%，并且由浅至深含量呈增高的趋势；而阜2-3段黏土矿物含量可达35%左右，同样以伊/蒙混层矿物占主体(相对百分含量55%左右)。可见，阜2-2亚段相对贫黏土矿物，并且由阜2-2顶部至阜2-3下部，黏土矿物含量总体上呈现增高的趋势；方沸石含量由阜2-2顶部至底部则具有增高的特征，总体与碳酸盐矿物含量呈反消长关系；而在阜2-3亚段，个别样品黏土矿物含量低，石英和长石矿物含量高，且不含方沸石矿物。

## 4.2 阜宁组泥页岩储集特征

### 4.2.1 储集性能

对采集的阜宁组阜二段、阜四段泥页岩进行了孔隙度分析，部分样品开展了渗透率测定，由于泥页岩本身的易碎性，获取的物性数据相对较少，但是测试结果仍然能反映该段物性相对较好，结果见表5。

各凹陷阜二、阜四段泥页岩孔隙度存在差异，其中，E<sub>1</sub>f<sub>2</sub>实测孔隙度平均10.1%，渗透率相差较大，最大为25.2×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>(偏高可能与裂缝有关)，最小0.004×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>，平均6.32×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>；E<sub>1</sub>f<sub>4</sub>实测孔隙度平均值16.52%，渗透率测点少，结果为0.023×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>。通过与泌阳凹陷核三段上部页岩基质孔隙度4%~6%、渗透率(0.0001~0.0009)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>对比可知，苏北盆地阜宁组阜二段、阜四段页岩物性总体相对较好，具有一定的储集条件。另外，各凹陷阜二段、阜四段泥页岩孔隙度值总体随埋藏深度的增加呈降低趋势，显示压实成岩作用是泥页岩孔隙度大小的重要制约因素。

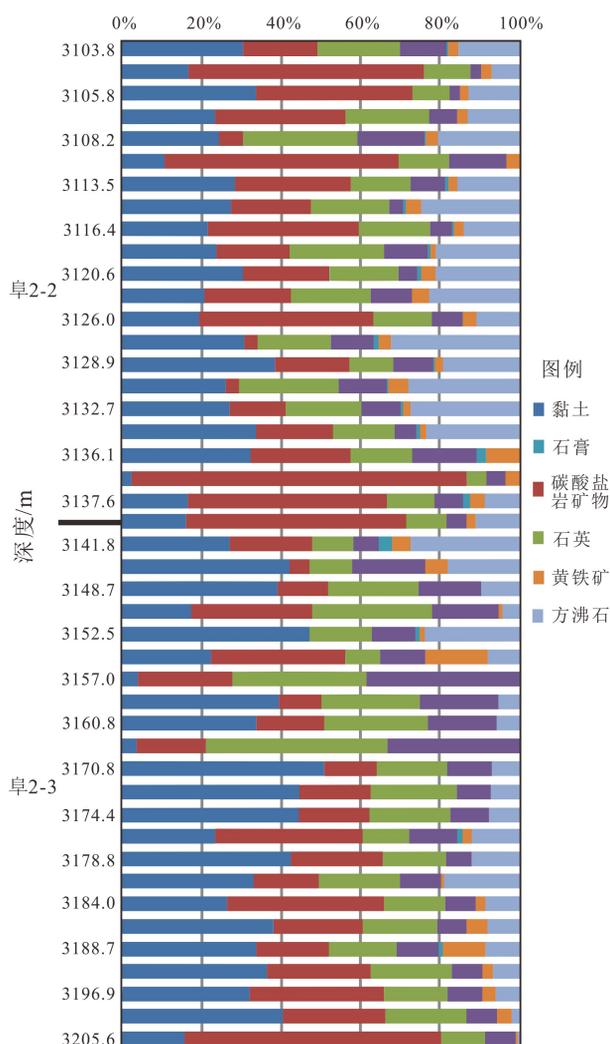


图7 金湖凹陷河参1井阜二段全岩矿物组成图

Fig.7 Mineral composition of the 2nd Member of Funing Formation, Jinhu Sag, Hecan 1 well

#### 4.2.2 储集空间

泥页岩储集空间类型、大小和排布不仅影响页岩的物性,而且还影响页岩油气的原地赋存与聚集<sup>[27]</sup>。在大量岩心观察及扫描电镜分析的基础上,结合压汞、低温液氮吸附测试结果以及前人研究成果,研究了阜二和阜四泥页岩储集空间孔隙类型与孔隙结构(图8)。苏北盆地阜宁组阜二段和阜四段泥页岩储集空间类型以裂缝和微孔隙为主,是页岩油的主要赋存空间<sup>[28]</sup>。

在宏观尺度上,苏北盆地发育4类裂缝,分别为平移式剪裂缝、正向剪裂缝、顺层缝、正向剪裂缝,裂缝内多被方解石充填,裂缝发育处可见油气显示。泥页岩中微裂缝及层理缝较为常见,通常尺寸在纳米级-微米级,主要为沉积形成的层理缝及后期构造活动引起的微裂缝,期间通常有沥青充填,为主要的储集空间类型。另外,阜宁组阜二段、阜四

段泥页岩样品氩离子抛光+扫描电镜分析发现,泥页岩样品中有机质颗粒与无机矿物颗粒之间均发育有20~100 nm不等宽度缝隙-有机质收缩缝,其成因与有机质在热演化过程中由于生烃作用,干酪根体积发生收缩有关。

苏北盆地阜二段、阜四段泥页岩发育粒(晶)间孔隙、粒(晶)内孔隙和有机质孔隙等微孔隙。粒(晶)间孔隙在研究区页岩中广泛发育,是主要的微孔隙,孔径通常为数百纳米-微米级,孔隙数量与相应矿物含量紧密相关,主要有以下几类:黏土矿物晶(粒)间孔,呈房室状、长条形或三角形等,发育于伊利石等黏土矿物之间,连通性好;碳酸盐矿物晶(粒)间孔,呈多边形或环形,发育于白云石、方解石等碳酸盐矿物间,多孤立分布;长英质等其他颗粒晶(粒)间孔,多边形或近椭圆形,发育于颗粒周边,多孤立分布<sup>[29]</sup>。粒(晶)内孔隙可进一步细分为粒(晶)内孔隙、粒(晶)溶孔和基质溶孔,溶孔形态取决于被溶颗粒和溶蚀程度,随着溶蚀程度的增强,其连通性增加。苏北盆地各凹陷阜二段、阜四段泥页岩总体处于生油窗内,故有机质孔隙不发育,但在个别泥页岩样品中也见到少量的有机孔隙,其应为有机质原生孔隙。原生有机质孔的尺度较大,孔径为微米级,其规则的几何形态继承了原始有机质的主要结构特征,原生有机质孔中通常充填同沉积的无机矿物。

根据压汞和氮吸附联合测定技术对苏北盆地阜二、阜四段泥页岩样品的孔隙结构特征进行了分析,经过简单转化后分别得到微孔孔隙度、介孔孔隙度和宏孔孔隙度。高邮凹陷富深X1井阜二段灰黑色泥岩其孔隙的孔径相对较大,以孔径大于50 nm的宏孔为主,宏孔孔隙体积占总孔隙体积75%左右,另含少量孔隙孔径为2~50 nm的介孔,介孔孔隙体积占总孔隙体积25%左右。而溱潼凹陷鲁1井阜二段灰黑色泥岩其孔隙的孔径均很小,以孔径2~20 nm的介孔为主,介孔孔隙体积占总孔隙体积90%以上,微孔孔隙体积占总孔隙体积不足10%。溱潼凹陷帅4井阜四段灰黑色含灰泥岩其孔隙的孔径分布范围相对较宽,含少量孔径大于50 nm的宏孔,宏孔孔隙体积占总孔隙体积6%左右;孔隙孔径为2~50 nm的介孔,占总孔隙体积90%以上;另含极少量孔隙孔径小于2 nm的微孔。当样品不发育裂缝时,该方法得到的孔隙度相对准确,特别是微孔孔隙度和介孔孔隙度之和可以较好地反映泥页岩基质的储集能力<sup>[30]</sup>。

表5 苏北盆地重点凹陷阜二、阜四段泥页岩孔隙度和渗透率统计表  
Table 5 Statistical table of shale porosity and permeability in the 2nd and 4th Members of Funing Formation of the key sags in the Subei Basin

层段	重点凹陷	孔隙度范围/%	孔隙度平均值/%	渗透率范围/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	渗透率平均值/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
阜二段	高邮凹陷	1.613~32.834	13.225	25.233	25.233
	金湖凹陷	3.761~17.912	8.561	0.094	0.094
	海安凹陷	1.441~12.862	7.132	0.008	0.008
	盐城凹陷	2~27.771	11.962		
	溱潼凹陷	1.774~19.915	9.650	0.004~0.115	0.005
阜四段	高邮凹陷	4.293~27.371	17.400		
	金湖凹陷	11.530	11.530		
	海安凹陷				
	盐城凹陷	16.171~20.311	17.712		
	溱潼凹陷	12.641~26.264	19.445	0.023	0.023

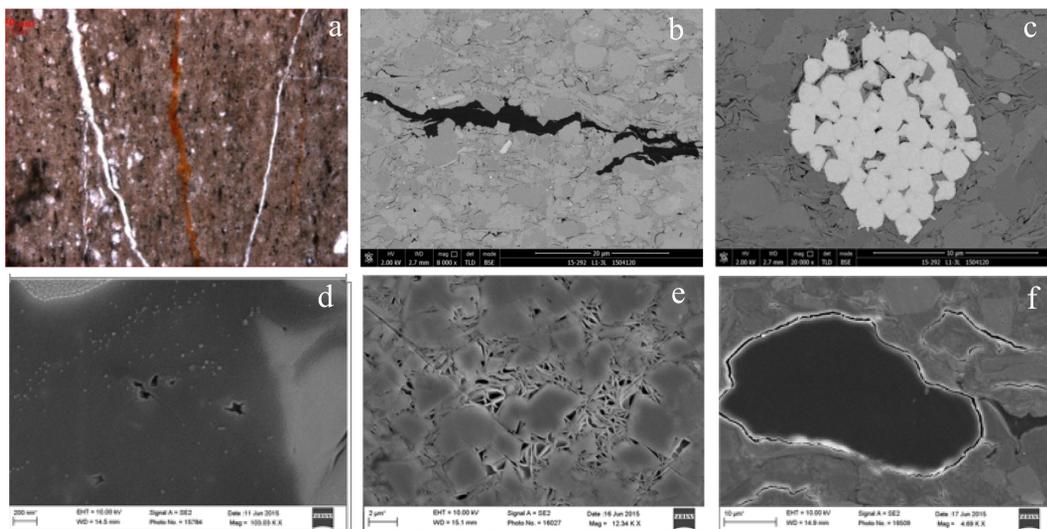


图8 苏北盆地阜二段、阜四段泥页岩裂缝和孔隙类型图

a.高邮凹陷临1井阜二段2723.0m灰色灰质泥岩微裂缝照片;b.高邮凹陷富深X1阜四段3328.4m灰黑色泥岩层理缝照片;c.高邮凹陷临1井阜二段2723.0m灰色灰质泥岩黄铁矿粒内孔隙照片;d.金湖凹陷河参1井阜二段3183.5m灰色泥岩有机质孔照片;e.盐城凹陷新洋1-5L井阜二段1686.9m白云石黏土矿物间孔隙照片;f.高邮凹陷联5-8L井阜四段2104.2m黑色泥岩有机质收缩缝照片。

Fig.8 Types of cracks and pores of shales in the F2 and F4 Members of Funing Formation

## 5 阜宁组页岩油勘探方向探讨

北美页岩油勘探实践表明<sup>[31]</sup>,获得页岩油勘探突破的层段(无论是泥页岩层还是砂岩层),其油饱和指数(热解 $S1 \times 100/TOC$ )大于100。对苏北盆地290个阜二、阜四段泥页岩样品的热解分析结果统计显示,虽然只有12个样品的油饱和指数大于或接近100,但结果表明在泥页岩层系存在具有页岩油勘探潜力的层段。本文以典型页岩油藏高邮凹

陷的许X38井和盐城凹陷盐城1井为例,进行解剖,分析该页岩油藏的成藏条件。

许X38井阜二段泥页岩地质特征统计表显示(表6),两层段岩性分别为块状灰质泥岩和纹层状钙质页岩,有机碳含量较高,分别为2.95%和1.53%;矿物组分均以碳酸盐、长英质为主,次为黏土矿物;孔隙度则块状灰质泥岩较低,为4.13%,纹层状钙质页岩较高,为10.85%;同时地层压力系数为1.233,显示为超压的特征。页岩油地表密度为 $0.858 \text{ g/cm}^3$ ,粘度为 $10.54 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,总体显示正常原油特征。盐城

表6 许X38井、盐城1井试油层地质特征统计  
Table 6 Statistical table of geological characteristics of Xu X38 well and Yancheng 1 well

井号	页岩层	岩石相	TOC/%	Ro/%	脆性矿物/%	黏土/%	孔隙度/%	页岩油密度/(g/cm <sup>3</sup> )	页岩油粘度/mPa·s	压力系数
盐城1井	E <sub>1</sub> f <sub>2</sub>	块状灰质泥岩	2.162	0.771	47.12	37	5.321	0.887	2 170	1.600
	E <sub>1</sub> f <sub>2</sub>	纹层状钙质页岩	1.884		40.431	57.401	3.711			
许X38井	E <sub>1</sub> f <sub>2</sub>	块状灰质泥岩	2.951	0.922	70.101	27.542	4.131	0.858	10.544	1.233
	E <sub>1</sub> f <sub>2</sub>	纹层状钙质页岩	1.532		65.21	26.040	10.852			

凹陷盐城1井阜二段页岩油富集层段的特征与许X38井有很多共性,该层段岩性以富含有机质的块状灰质泥岩和纹层状钙质页岩为主,脆性矿物含量相对较高,层理缝与裂缝发育,成熟度处于生油高峰期,同时地层具有异常高压。

页岩油富集层段的典型解剖结果表明,TOC大于2%、Ro大于0.8%是苏北盆地阜宁组页岩油富集的物质基础,高脆性矿物(大于45%)的有利岩相-岩性组合利于层理缝与微裂缝的发育,裂缝发育程度控制页岩油的富集程度与可动用性,异常高压是高产的关键<sup>[32-33]</sup>。根据上述标准和页岩油气显示特征,结合各钻井取心段岩心烃源岩品质评价结果,对苏北盆地阜二段、阜四段泥页岩层系的有利区进行了预测。平面上,阜二段优质烃源岩主要分布在高邮凹陷及其以东的海安、盐城等凹陷,厚度达到200~300 m,是页岩油勘探的有利区带;阜四段有利勘探层主要分布在高邮深凹、溱潼、金湖凹陷中,厚度120~260 m。其中,高邮和金湖凹陷的有机质丰度较高,成熟度大于0.7%,以I型干酪根为主,是阜四段优质“生油岩”,属于勘探页岩油气的有利区带。纵向上,阜2-1,阜2-2两个页岩段最有利,阜2-3次之。

## 6 结论

(1)苏北盆地阜宁组两套泥页岩有机质丰度较高,类型较好,阜宁组阜二段烃源岩的有机质丰度高于阜四段,烃源岩类型优于阜四段。成熟度方面,阜二段整体处于成熟阶段,阜四段处于低熟阶段,均进入生烃门限。苏北盆地阜宁组两套泥页岩均具备形成页岩油的物质基础。

(2)苏北盆地阜宁组两套泥页岩矿物成分主要为黏土、碳酸盐矿物、石英等;阜二段各凹陷脆性矿物含量均值大于50%,黏土含量低于35%,有利于页岩油的开采,对于天然缝的形成及后期压裂造缝均具备良好的条件。苏北盆地阜宁组两套泥页岩

岩储集空间包括微孔隙和裂缝,具备较好的储集物性条件。

(3)页岩油富集层段的典型解剖结果表明,TOC大于2%、Ro大于0.8%是苏北盆地阜宁组页岩油富集的物质基础,高脆性矿物(大于45%)的有利岩相-岩性组合利于层理缝与微裂缝的发育,裂缝发育程度控制页岩油的富集程度与可动用性,异常高压是高产的关键。

(4)通过对苏北盆地阜宁组阜二段、阜四段的基本石油地质条件分析,指出苏北盆地高邮凹陷、海安凹陷及盐城凹陷深凹带地区是阜二段页岩油勘探的有利区带,阜2-1、阜2-2两个页岩段最有利,阜2-3次之;阜四段有利勘探层主要分布在高邮深凹、溱潼、金湖凹陷中,其中,高邮和金湖凹陷的有机质丰度较高,成熟度大于0.7%,以I型干酪根为主,是阜四段优质“生油岩”,属于勘探页岩油气的有利区带。

## 参考文献 (References)

- [1] 刘平兰. 苏北海安凹陷泰州组烃源岩评价[J]. 石油实验地质, 2009, 31(4): 389-393. [LIU Pinglan. Source rock evaluation of Taizhou formation in Haian sag, northern Jiangsu basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(4): 389-393.]
- [2] 程海生, 刘世丽, 段宏亮. 苏北盆地阜宁组泥页岩储层特征[J]. 复杂油气藏, 2015, 8(3): 10-16. [CHENG Haisheng, LIU Shili, DUAN Hongliang. Shale reservoir characteristics of Funing Formation in Subei Basin [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2015, 8(3): 10-16.]
- [3] 仇永峰, 陈平原, 崔晓晓. 高邮凹陷北斜坡中部泰州组烃源岩评价[J]. 上海地质, 2010, 31(S1): 236-239. [QIU Yongfeng, CHEN Pingyuan, CUI Xiaoxiao. Source rock evaluation of Taizhou Formation in the central north slope of Gaoyou Depression [J]. Shanghai Geology, 2010, 31(S1): 236-239.]
- [4] 姜生玲, 聂海宽, 荆铁亚, 等. 高邮凹陷阜宁组烃源岩特征及油源对比[J]. 特种油气藏, 2014, 21(2): 66-69. [JIANG Shengling, NIE Haikuan, JING Tieya, et al. Characteristics and oil source comparison of the Funing Formation hydrocarbon source rock in the Gaoyou

- sag [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2014, 21 (2): 66-69.]
- [5] 管灵, 骆卫峰, 马晓东. 苏北盆地溱潼凹陷阜二段烃源岩生烃潜力及形成环境[J]. *非常规油气*, 2016, 3 (3): 1-8. [ZAN Ling, LUO Weifeng, MA Xiaodong. Hydrocarbon generation potential and genetic environments of second member of Funing formation in Qintong Sag, Subei Basin [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2016, 3 (3): 1-8.]
- [6] 纪亚琴, 刘义梅, 冯武军. 苏北盆地盐城凹陷阜宁组烃源岩研究与成藏模式[J]. *石油实验地质*, 2013, 35 (4): 449-452. [JI Yaqin, LIU Yimei, FENG Wujun. Source rock study and accumulation pattern of Funing Formation in Yancheng Sag, Northern Jiangsu Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35 (4): 449-452.]
- [7] 方朝合, 张枝焕, 王义凤, 等. 苏北盆地溱潼凹陷第三系烃源岩地球化学特征[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2008, 23 (6): 1-5. [FANG Chaohe, ZHANG Zhihuan, WANG Yifeng, et al. Geochemical characteristics of the lower tertiary source rock in Qintong Sag, Subei Basin [J]. *Journal of Xi'an Shiyu University: Natural Science Edition*, 2008, 23 (6): 1-5.]
- [8] 胡维强, 马立涛, 刘玉明, 等. 苏北盆地海安凹陷曲塘次阜宁组二段烃源岩地球化学特征[J]. *东北石油大学学报*, 2018, 42 (5): 73-81. [HU Weiqiang, MA Litao, LIU Yuming, et al. Geochemical characteristics of hydrocarbon source rocks in Fu2 member of Qutang subsag, Haian sag, Subei basin [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2018, 42 (5): 73-81.]
- [9] 刘世丽, 段宏亮, 章亚, 等. 苏北盆地阜二段陆相页岩油气勘探潜力分析[J]. *海洋石油*, 2014, 34 (3): 27-33. [LIU ShiLi, DUAN Hongliang, ZHANG Ya, et al. Analysis of oil and gas exploration potential in F2 member continental shale of Subei Basin [J]. *Offshore Oil*, 2014, 34 (3): 27-33.]
- [10] 毛凤鸣, 梁兵, 刘启东. 高邮凹陷断层——岩性油气藏勘探技术与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013: 24-58. [MAO Fengming, LIANG Bin, LIU Qidong. Fault-Lithologic Reservoir Exploration Technology and Practice in Gaoyou Sag[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013: 24-58.]
- [11] 吴向阳, 高德群. 苏北盆地高邮凹陷阜宁组油气成藏期研究[J]. *中国石油勘探*, 2011, 16 (4): 37-41, 86. [WU Xiangyang, GAO Dequn. Analysis on hydrocarbon accumulation period of Funing formation in Gaoyou Sag, Subei Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2011, 16 (4): 37-41, 86.]
- [12] 邱旭明, 钱诗友, 于雯泉, 等. 苏北盆地“十二五”油气勘探主要成果、新认识和技术进展[J]. *中国石油勘探*, 2016, 21 (3): 62-73. [QIU Xuming, QIAN Shiyu, YU Wenquan, et al. Main achievements, new understanding and technological progress for oil and gas exploration in North Jiangsu Basin during the 12th Five-Year Plan [J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21 (3): 62-73.]
- [13] 龚永杰. 苏北盆地泰州组、阜宁组油气成藏机理及富集规律[D]. 中国石油大学硕士学位论文, 2008. [GONG Yongjie. Forming mechanism and enrichment rules of reservoirs in Taizhou and Funing formations, Subei Basin[D]. Master Dissertation of China University of Petroleum, 2008.]
- [14] 王海方. 苏北盆地古近系页岩油储层有效裂缝识别[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2016, 38 (3): 21-27. [WANG Haifang. Recognition of effective fractures within the oil shale in the fourth member of Funing formation in Northern Jiangsu Basin [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2016, 38 (3): 21-27.]
- [15] 邱旭明, 刘玉瑞, 傅强. 苏北盆地上白垩统——第三系层序地层与沉积演化[M]. 北京: 地质出版社, 2006. [QIU XuMing, LIU YuRui, FU Qiang. Sequence stratigraphy and sedimentary evolution of Upper Cretaceous Tertiary in Subei Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.]
- [16] 陈庆, 史建南, 朱利东, 等. 西藏中仓盆地古近系丁青湖组生烃潜力与沉积有机相分析[J]. *东北石油大学学报*, 2017, 41 (4): 71-78. [CHEN Qing, SHI Jiannan, ZHU Lidong, et al. Analysis of hydrocarbon generating potential and characteristics of organic facies of Paleogene Dingqinghu formation in Zhongcang basin, Tibet [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2017, 41 (4): 71-78.]
- [17] 杨力. 苏北盆地中生代构造演化及其与油气的关系[D]. 长江大学硕士学位论文, 2015. [YANG Li. The structural evolution in the Cenozoic of Subei basin and its relationship with oil and gas[D]. Master Dissertation of Changjiang University, 2015.]
- [18] 姜敏. 东营、潍北及沾化凹陷深层烃源岩有机地球化学特征研究[D]. 成都理工大学硕士学位论文, 2011. [JIANG Min. Study on organic geochemistry features of deep source rocks in Dongying, Zhanhua and Weibei Sag[D]. Master Dissertation of Chengdu University of Technology, 2011.]
- [19] 陈安定. 苏北盆地第三系烃源岩排烃范围及油气运移边界[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27 (5): 630-636. [CHEN Anding. Range of hydrocarbon expulsion from the Tertiary source rocks and hydrocarbon migration boundary in Subei basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27 (5): 630-636.]
- [20] 李贤庆, 王铁冠, 钟宁宁, 等. 未熟—低熟烃源岩的有机岩石学研究的若干进展[J]. *地学前缘*, 2000, 7 (3): 103-110. [LI Xianqing, WANG Tieguan, ZHONG Ningning, et al. Some advances in organic petrology studies on immature source rocks [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7 (3): 103-110.]
- [21] 曲长胜, 邱隆伟, 操应长, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组烃源岩有机岩石学特征及其赋存状态[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2017, 41 (2): 30-38. [QU Changsheng, QIU Longwei, CAO Yingchang, et al. Organic petrology characteristics and occurrence of source rocks in Permian Lucaogou Formation, Jimsar sag [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2017, 41 (2): 30-38.]
- [22] 陈建平, 黄第藩. 烃源岩中矿物沥青基质成烃潜力探讨[J]. *地球化学*, 1997, 26 (6): 18-24. [CHEN Jianping, HUANG Difan. Hydrocarbon generation potential of mineral-bituminous matrix in source rocks [J]. *Geochimica*, 1997, 26 (6): 18-24.]
- [23] 赵俊峰, 刘池洋, 王晓梅. 镜质体反射率测定结果的影响因素[J]. *煤田地质与勘探*, 2004, 32 (6): 15-17. [ZHAO Junfeng, LIU Chiyang, WANG Xiaomei. The factors influencing the measurement results of vitrinite reflectance [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2004, 32 (6): 15-17.]
- [24] 李志明, 秦建中, 徐旭辉, 等. 镜质体反射率抑制与烃源岩质量关系——以渤海湾盆地东营凹陷烃源岩为例[J]. *石油实验地质*, 2008, 30 (3): 276-280. [LI Zhiming, QIN Jianzhong, XU Xuhui, et al. The relationship between vitrinite reflectance suppression and source rock

- quality-A case study on source rocks from the Dongying sag, Bohai bay basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2008, 30(3): 276-280.]
- [25] 江夏,周荔青. 苏北盆地富油气凹陷形成与分布特征[J]. 石油实验地质, 2010, 32(4): 319-325. [JIANG Xia, ZHOU Liqing. Characteristics of formation and distribution of prolific sags in the northern Jiangsu Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(4): 319-325.]
- [26] 边瑞康,武晓玲,包书景,等. 美国页岩油分布规律及成藏特点[J]. 西安石油大学学报:自然科学版, 2014, 29(1): 1-9, 14. [BIAN Ruikang, WU Xiaoling, BAO Shujing, et al. Distribution law and reservoir forming characteristics of shale oil in America [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2014, 29(1): 1-9, 14.]
- [27] 王红伟,段宏亮. 盐城凹陷阜二段页岩油形成条件及富集规律研究[J]. 复杂油气藏, 2016, 9(3): 14-18. [WANG Hongwei, DUAN Hongliang. Formation condition and enrichment rule of shale oil in the second member of Funing Formation in Yancheng Sag [J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2016, 9(3): 14-18.]
- [28] 刘平,陈书平,刘世丽,等. 苏北盆地阜宁组泥页岩裂缝类型及形成期次[J]. 西安石油大学学报:自然科学版, 2014, 29(6): 13-20, 28. [LIU Ping, CHEN Shuping, LIU Shili, et al. Types and forming epochs of the fractures in the shale of Funing Formation of Subei Basin [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2014, 29(6): 13-20, 28.]
- [29] 杨元. 苏北盆地阜二段泥页岩储层非均质性研究[D]. 中国石油大学硕士学位论文, 2015. [YANG Yuan. Shale reservoir heterogeneity of the second member of Funing formation in Subei Basin[D]. Master Dissertation of China University of Petroleum (East China), 2015.]
- [30] 马存飞. 湖相泥页岩储集特征及储层有效性研究[D]. 中国石油大学博士学位论文, 2017. [MA Cunfei. Study on characteristics and effectiveness of lacustrine shale reservoir[D]. Doctor Dissertation of China University of Petroleum (East China), 2017.]
- [31] 张林晔,李钜源,李政,等. 北美页岩油气研究进展及对中国陆相页岩油气勘探的思考[J]. 地球科学进展, 2014, 29(6): 700-711. [ZHANG Linye, LI Juyuan, LI Zheng, et al. Advances in shale oil/gas research in North America and considerations on exploration for continental shale oil/gas in China [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(6): 700-711.]
- [32] 贾承造,邹才能,李建忠,等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 343-350. [JIA Chengzao, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(3): 343-350.]
- [33] 邹才能,朱如凯,白斌,等. 致密油与页岩油内涵、特征、潜力及挑战[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(1): 1-17. [ZOU Caineng, ZHU Rukai, BAI Bin, et al. Significance, geologic characteristics, resource potential and future challenges of tight oil and shale oil [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(1): 1-17.]