

引用格式: 孙雅雄, 朱相羽, 邱旭明, 等. 苏北盆地高邮凹陷阜宁组二段页岩裂缝特征分析[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(3): 414-424.  
SUN Yaxiong, ZHU Xiangyu, QIU Xuming, et al. Characteristics of shale fractures in the second member of Funing Formation in Gaoyou Sag of Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(3): 414-424.  
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024.03.011

## 苏北盆地高邮凹陷阜宁组二段页岩裂缝特征分析

孙雅雄<sup>1,2</sup>, 朱相羽<sup>1</sup>, 邱旭明<sup>1</sup>, 刘启东<sup>1</sup>, 段宏亮<sup>1</sup>, 仇永峰<sup>1</sup>, 巩磊<sup>2</sup>

(1. 中国石化江苏油田分公司, 江苏 扬州 225009; 2. 东北石油大学地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318)

**摘要:** 苏北盆地高邮凹陷阜宁组二段(以下简称阜二段)页岩油勘探获得突破, 是未来增储上产的现实目标。裂缝作为储集空间和运移通道, 在页岩油勘探开发中发挥着重要作用。以X1井为研究对象, 根据成像测井、岩心和微观薄片观察结果, 分析了高邮凹陷阜二段页岩油储层不同尺度裂缝发育特征; 结合裂缝参数统计和裂缝充填物稳定碳氧同位素分析, 确定了裂缝形成期次, 讨论了裂缝动态演化过程及裂缝对页岩油气富集的影响。结果表明: 构造裂缝总体较为发育, 主要为脆性剪切裂缝和张剪性裂缝, 剪切裂缝长度长, 横向连通性好; 非构造裂缝主要为层理缝和顺层方解石脉, 在部分亚段异常发育。不同类型的天然裂缝后期均遭受了一定程度的改造, 未被完全充填的裂缝、裂缝充填物溶蚀形成的孔洞, 以及超压层理缝和微裂隙, 均是页岩油有利的储集空间。研究结果为高邮凹陷深层页岩油选区、选段提供了新的思路和理论依据。

**关键词:** 高邮凹陷; 阜二段; 页岩; 裂缝特征; 形成期次

中图分类号: TE122

文献标识码: A

### Characteristics of shale fractures in the second member of Funing Formation in Gaoyou Sag of Subei Basin

SUN Yaxiong<sup>1,2</sup>, ZHU Xiangyu<sup>1</sup>, QIU Xuming<sup>1</sup>, LIU Qidong<sup>1</sup>, DUAN Hongliang<sup>1</sup>, QIU Yongfeng<sup>1</sup>, GONG Lei<sup>2</sup>

(1. Sinopec Jiangsu Oilfield Company, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;

2. College of Geosciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

**Abstract:** Recent exploration within the second member of Funing Formation (hereinafter referred to as Fu-2 member) in Gaoyou Sag of Subei Basin has marked a significant advancement in the understanding of shale oil potential, highlighting its role in enhancing future reserves and production. This study focuses on Well-X1, utilizing a comprehensive suite of analytical techniques, including imaging logging, core examinations, and micro thin section analysis, to investigate the fracture characteristics across different scales. Additionally, statistical analysis of fracture parameters and isotopic studies of stable carbon and oxygen in fracture fillings provide insights into the formation stages of the fracture. The research delves into the dynamic evolution of fractures and their influence on the accumulation of shale oil and gas. Key findings indicate that structural fractures, predominantly brittle shear and tensile shear fractures, are prevalent and characterized by substantial length and excellent transverse connectivity. Non-structural fractures, including bedding fractures and calcite veins, exhibit some areas of abnormal development. These natural fractures have undergone modifications during later stages, with incompletely filled fractures, pore spaces from dissolved fracture fillers, overpressure bedding fractures, and micro fractures identified as particularly favorable reservoir spaces for shale oil. The results of this study not only shed light on the complex fracture dynamics within the shale but also provide a robust theoretical foundation for evaluating deep shale oil prospects in Gaoyou Sag.

**Keywords:** Gaoyou Sag; Fu-2 member; shale; characteristics of fractures; formation stage

收稿日期: 2023-01-09。

第一作者简介: 孙雅雄(1993—), 男, 博士, 副研究员, 从事非常规油气地质理论与评价研究。地址: 江苏省扬州市文汇西路1号江苏油田分公司, 邮政编码: 225009。E-mail: sunyaxiong2015@163.com

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“裂缝连通性定量表征及其动态演化过程研究”(42072155); 中国石化科技部项目“内陆断陷湖盆断块型页岩油勘探开发关键技术”(P23189); 中国石化江苏油田分公司科研课题“高邮凹陷阜二段页岩油储层裂缝定量描述与控油作用研究”(JD22002)和江苏省卓越博士后计划共同资助。

中国页岩油主要发育在陆相地层,资源潜力巨大,存在一场革命的新机遇<sup>[1-4]</sup>。现今,东部断陷盆地新生代页岩油勘探如火如荼,不断有新的突破和发现<sup>[3-4]</sup>。页岩储层低孔低渗的特征,决定了需要经过压裂改造才能获得高产稳产<sup>[7-9]</sup>。页岩储层中天然裂缝发育,一方面改善了储层的物性,影响页岩油的富集和保存;另一方面有利于压裂过程中与压裂裂缝一并形成复杂的缝网系统<sup>[10-15]</sup>。因此,裂缝的研究越发地受到研究人员重视。

高邮凹陷是苏北盆地页岩油地质资源量最大、最具有勘探潜力的地区。高邮凹陷古近系阜宁组二段页岩是一套厚度巨大、沉积广泛、有机碳含量较高的深湖一半深湖相沉积,具有发育页岩油良好的地质条件<sup>[16-20]</sup>。2022年年初,中国石化江苏油田分公司在高邮凹陷内坡带花庄构造钻探的水平井X1HF,

目的层段是阜二段V亚段中下部,经过压裂改造,获得最高29.7 t/d的产量。阜二段厚度大,地层纵向非均质性强,不同亚段的裂缝发育情况差异显著;阜二段沉积至今经历了多期次的构造运动,形成了较为复杂的天然裂缝系统。开展天然裂缝特征与活动期次的研究,进一步明确天然裂缝与页岩油富集的关系,有利于深化高邮凹陷页岩油富集规律的认识,对于指导页岩油勘探选区、选段具有现实意义。

## 1 区域地质概况

高邮凹陷位于苏北盆地南部,南靠苏南隆起、北接建湖隆起、东临吴堡低凸起、西至菱塘桥低凸起(图1)。凹陷内广泛发育有中、新生界地层,自下而上发育有白垩系泰州组、古近系阜宁组、戴南组、三

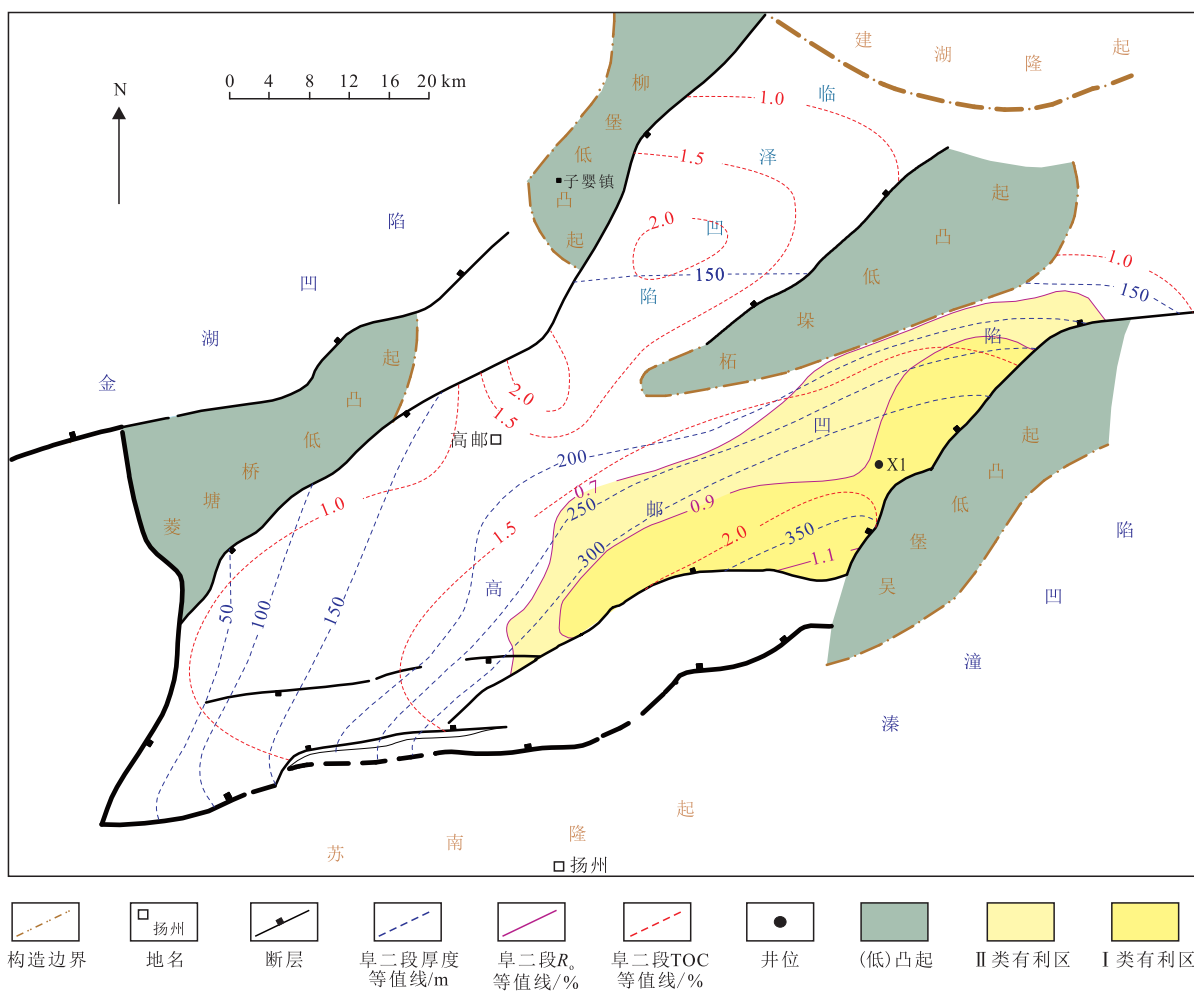


图1 苏北盆地高邮凹陷阜宁组二段页岩厚度、TOC、 $R_o$ 等值线综合图

Fig. 1 Planar contour map of shale thickness, TOC, and  $R_o$  in Fu-2 member in Gaoyou Sag of Subei Basin

垛组、新近系盐城组和第四系的东台组,累计沉积厚度超过5 000 m。其中,泰州组泰二段、阜宁组阜二段、阜四段为较稳定的深湖一半深湖相沉积,发育有大套的暗色泥页岩。尤其是阜二段,厚度大、有机质含量高、演化程度适中,是非常规油气勘探的首要突破方向。

高邮凹陷阜二段厚度较大,新钻井X1揭示其厚度为346.5 m。根据岩性、电性特征将阜二段分为5个亚段、23个小层(图2)。其中,上部Ⅰ、Ⅱ亚段是块状结构,中下部Ⅲ—Ⅴ亚段成层性较好,纹层结构发育。Ⅱ亚段有机碳含量最高,在2.0%左右,Ⅲ亚段、Ⅳ亚段次之,Ⅴ亚段最差,约为1.0%<sup>[18]</sup>。通过页岩油储层“四性”综合评价,初步落实了阜二段纵向上发育3套有利的页岩油层段。

## 2 裂缝发育特征与形成期次

前人对致密储层裂缝的研究,逐渐形成了不同尺度裂缝表征测量精度体系<sup>[21]</sup>。目前,裂缝研究逐步从宏观走向微观,包括:以测井资料和地震资料为代表的宏观大型裂缝,尺度在“分米级”及以上;以岩心资料为基础的宏观中小型裂缝,尺度在“毫米级”到“分米级”;以显微镜和扫描电镜为典型观察手段的微观裂缝研究,尺度在“纳米级”到“毫米级”。

### 2.1 宏观尺度裂缝

目前,由于成像测井技术的不断发展,其较好的连续性、较为便捷的操作性得到越来越多油田企业

的认可。成像测井资料主要能识别宏观裂缝中较为大型的高导缝、高阻缝、层理缝等不同类型的天然裂缝,且已形成一套较为成熟的判别标准。在X1井阜二段成像测量井段内,所能识别的裂缝主要包括高导缝和高阻缝。

高导缝在动态图像上往往表现为黑褐色正弦曲线(图3a),有的连续性较好,有的呈半闭合状,图像上的黑褐色表明此类裂缝未被方解石等高阻矿物完全充填,属于有效缝,但部分高导缝也不排除被低阻泥质充填的可能性。高导缝属于以构造作用为主形成的天然裂缝,对于储层的形成和改造具有重要作用,对油气的储渗具有现实意义。

高阻缝在动态图像上多为亮黄色正弦曲线(图3d),主要被电阻率较高的矿物如方解石充填,或者为闭合缝,大多属于无效裂缝,也有部分裂缝充填物后期被溶蚀改造,因而保存有一定的储集空间。研究区的高阻缝主要为顺层方解石脉,在阜二段的中下部较为发育。初步分析认为其发育与原岩的碳酸盐岩矿物含量有一定的关系,与原岩的纹层结构发育情况密切相关。岩心资料显示部分方解石脉溶蚀孔洞发育,含油性较好,是主要的储集空间之一。

由于成像测井资料尺度较大,对中小尺度裂缝的识别存在一定的缺陷。因此,对于取心井段的岩心进行细致的裂缝观察是研究裂缝的最直观和最真实的方法。丁文龙等<sup>[12]</sup>依据成因将泥页岩储层裂缝划分为构造裂缝和非构造裂缝2种大类以及11个亚类,并对每个裂缝亚类特征和形成机理进行了总结(表1)。

表1 泥页岩天然裂缝常见分类方案  
Table 1 Classification for natural fractures in shale

分类方案	类型	亚类	特征参数或主要成因	研究方法
裂缝成因	构造裂缝	剪切裂缝	区域构造应力作用下,页岩发生韧性剪切破裂	应力性质
		张剪性裂缝		
		滑脱裂缝	沿页岩层面顺层滑动形成	
		构造压溶缝合线	水平挤压作用压溶形成	
	非构造裂缝	垂向载荷裂缝	垂向载荷不均或超出页岩抗压强度	成岩演化
		成岩收缩缝	成岩过程中页岩脱水收缩形成	
		成岩压溶缝合线	页岩成岩期沉积载荷引起的压溶	
		超压裂缝	页岩层内异常高的流体压力	
		热收缩裂缝	页岩受侵入岩浆烘烤后冷却收缩破裂	
		溶蚀裂缝	页岩差异溶蚀作用	
层理缝	页岩纹层之间的非均质性			

2.1.1 构造裂缝

构造裂缝是岩石在构造应力场中受到的构造应力超过其破裂强度而形成的,包括有剪切缝、张剪性

裂缝、张性缝、滑脱缝和小断层等(图4)。剪切裂缝,是剪切应力超过岩石的抗剪强度而形成的,缝面一般较为平直,延伸距离远,一般未充填(图4a)。张性裂缝,是拉张应力超过岩石的抗张强度而形成的,缝

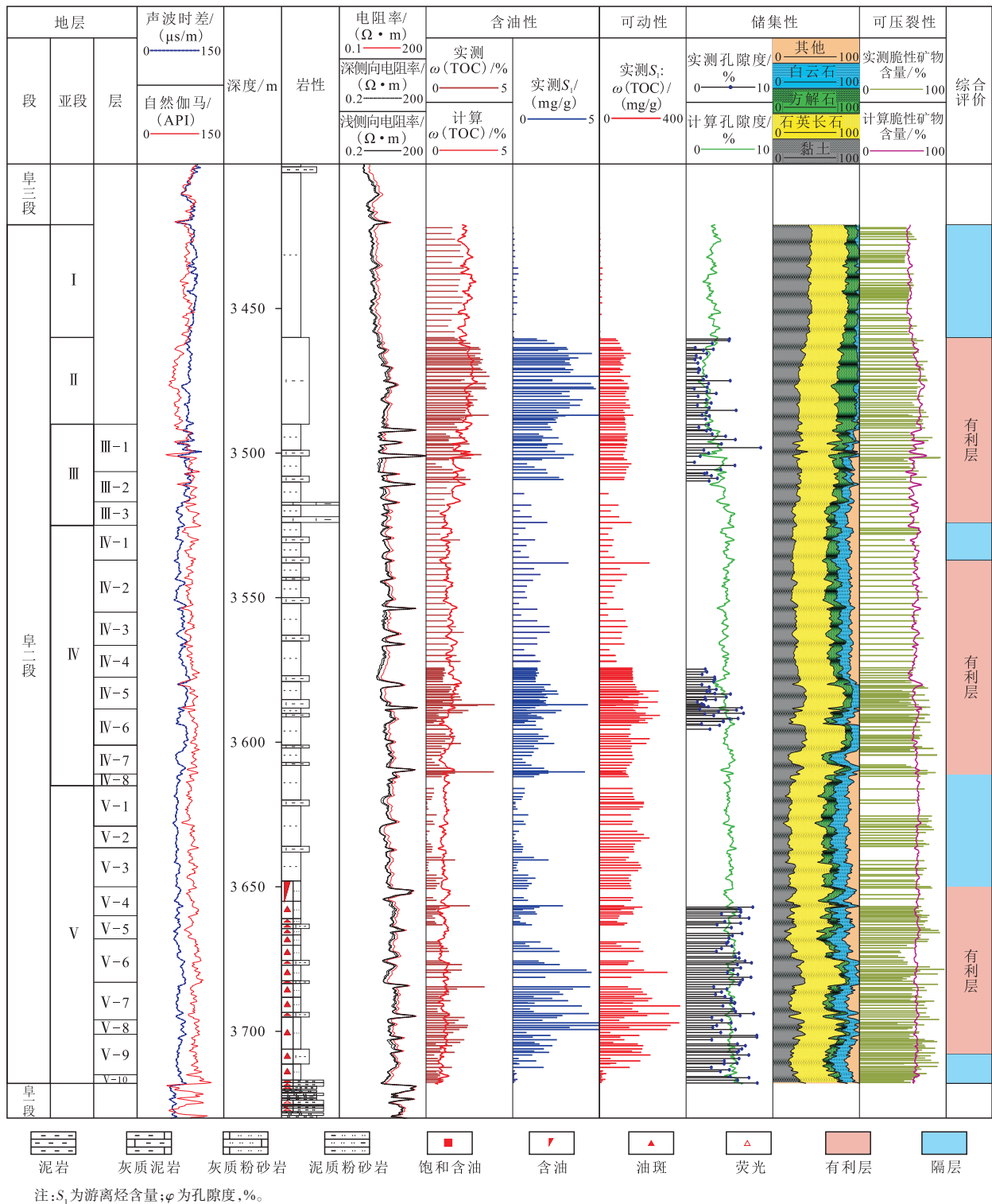


图2 苏北盆地高邮凹陷X1井阜宁组二段综合柱状图

Fig. 2 Stratigraphic characteristics of Fu-2 member of Well-X1 in Gaoyou Sag of Subei Basin

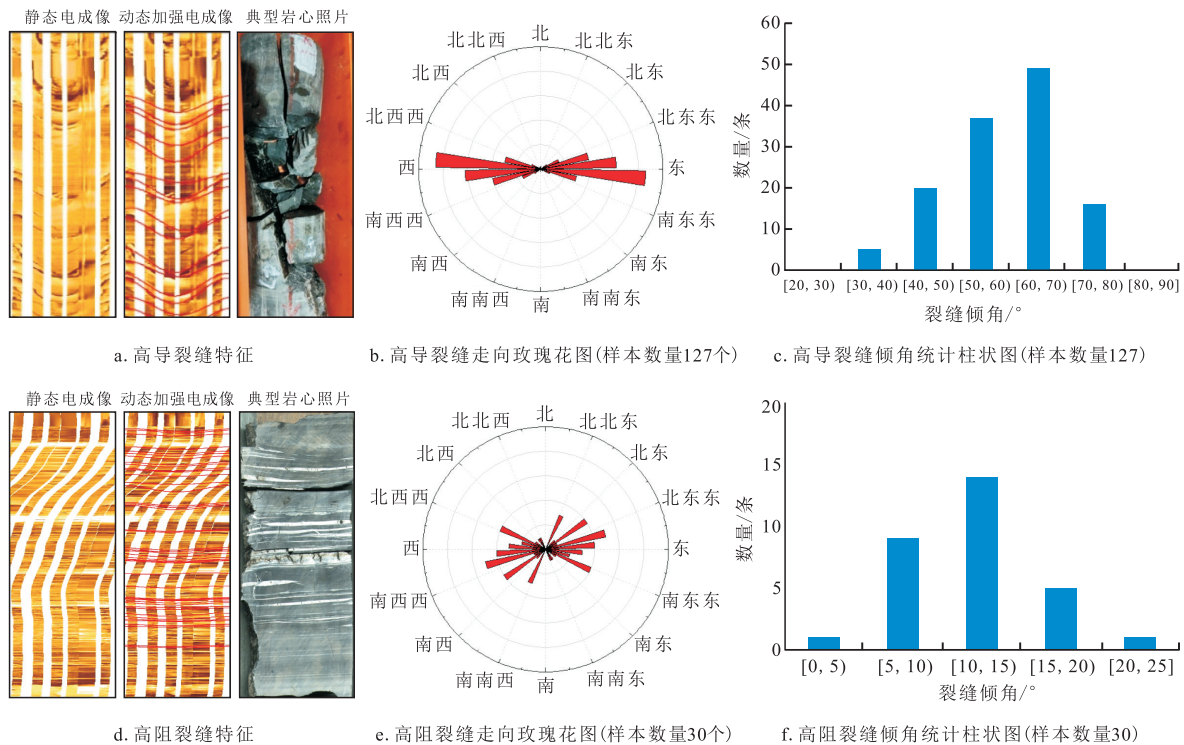


图3 苏北盆地高邮凹陷X1井阜二段成像测井及裂缝特征参数

Fig. 3 Imaging logging and characteristic parameters of fractures of Fu-2 member of Well-X1 in Gaoyou Sag of Subei Basin

面一般较为不规则,延伸距离短,一般被方解石充填(图4b)。张剪性裂缝是上述2类裂缝的复合形态,缝面较为规则,但规模有限,延伸距离较短,在研究区广泛发育(图4c、图4d)。研究区的部分张剪性裂缝未充填(图4d),部分被方解石充填的裂缝的有效性大大降低;同时,在粉砂质泥岩、灰质泥岩夹层中发育的方解石充填张剪性裂缝中可以观察到,裂缝充填物被溶蚀的现象较为明显,部分溶蚀孔洞内油迹明显(图4c)。另外,研究区还存在2种较为常见的构造裂缝:滑脱缝(图4e)和小断层。滑脱缝是由于上覆重力差异性导致的,一般是低角度或顺层发育的。

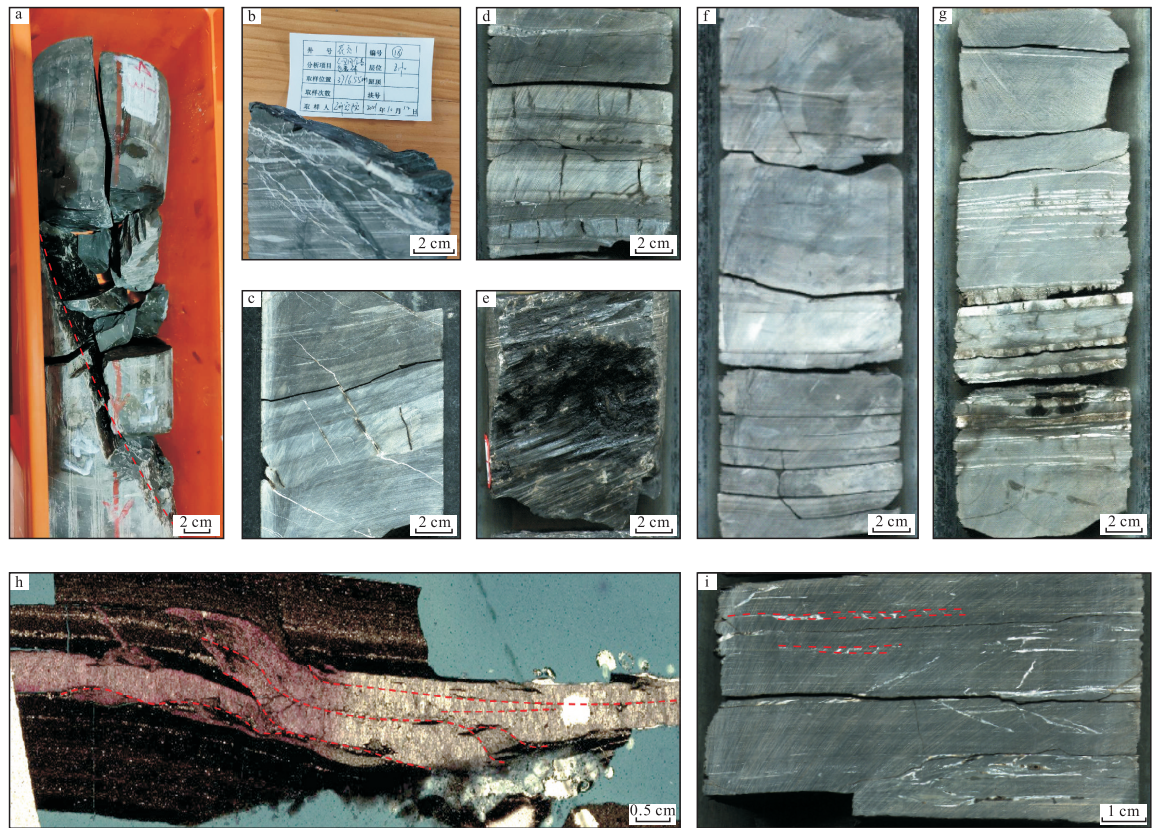
### 2.1.2 非构造裂缝

研究区较为常见的非构造裂缝有2种,一种是层理缝,另一种是顺层纤维状方解石脉。层理缝的发育,与泥页岩的结构密切相关。成层性好的泥页岩,纹层结构发育,层理缝最为发育(图4f);块状结构发育的层段,层理缝最不发育。层理缝的识别主要依靠岩心资料,由于岩石在地下所处的高压环境,地面上岩心观察到的层理缝在地下不一定处于开启状

态。顺层纤维状方解石脉(图4g—图4i),在含油气盆地中,特别是生油层系中普遍发育。在研究区,顺层方解石脉主要发育在阜二段的中下部,与纹层、层理缝的发育密度密切相关。纹层等层理结构面越发育,潜在的层理缝越多,有机质生烃时,产生的有机酸溶解方解石等碳酸盐岩矿物,生烃异常高压打开层理缝,为方解石提供结晶生长富集空间。在岩心中观察到顺层纤维状方解石脉呈现出多期生长的特征(图4h),一般认为流体异常高压是顺层方解石脉形成的关键,推测其可能与有机质幕式排烃产生的异常高压有关。此外,顺层的方解石脉,并不是顺层生长,而是垂直沉积界面生长,在横向上互相沟通,为油气运移的通道;顺层方解石裂缝与近垂直或垂直压力诱导裂缝相互连接,作为运移通道,允许油气发生垂向运移(图4i)。

## 2.2 微观尺度裂缝

研究区页岩中发育的微裂缝根据构造、沉积、成岩等不同成因可划分为4种类型:构造微裂缝、纹层缝、晶间缝和粒缘缝(图5)。



注:a为区域剪切缝,阜二段V亚段,X1井3 655.10 m;b为张性裂缝,阜二段V亚段,X1井3 716.55 m;c为张剪性裂缝,阜二段V亚段,X1井3 700.90 m;d为张剪性裂缝,阜二段IV亚段,X1井3 585.55 m;e为滑脱缝,阜二段V亚段,X1井3 701.55 m;f为层理缝,阜二段IV亚段,X1井3 584.97 m;g为层理缝与顺层方解石脉,阜二段V亚段,X1井3 683.18 m;h为顺层纤维状方解石脉,阜二段V亚段,X1井3 683.18 m;i为顺层纤维状方解石脉与超压缝,阜二段IV亚段,X1井3 586.35 m。

图4 苏北盆地高邮凹陷X1井阜二段岩心裂缝特征

Fig. 4 Characteristics of fractures in cores of Fu-2 member of Well-X1 in Gaoyou Sag of Subei Basin

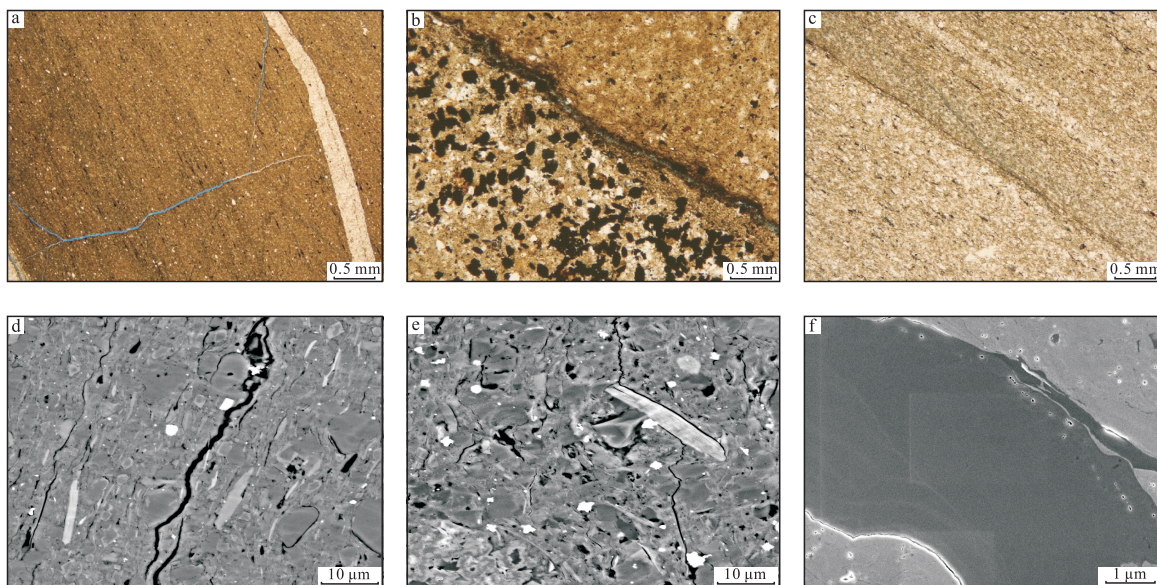
构造成因微裂缝缝面一般较为平直,常常呈组系发育,彼此之间相互平行或切割交错,形成了错综复杂的网状裂缝,纵向上穿层现象明显,常见终止于沉积界面,产状变化较大(图5a、图5b)。纹层缝,又称层间页理缝,其常常沿着沉积纹理面发育,基本无穿层现象,其延伸方向与页岩沉积矿物的排列方向基本一致(图5c),延伸距离缝较长,开度也更加明显。晶间缝主要是指矿物晶片之间的微裂缝,常见于黏土矿物中(图5d),受蒙脱石转化的控制明显。粒缘缝是沿着较大矿物颗粒边缘发育的微裂缝,又称贴粒缝,主要是由于大矿物颗粒与周围碎屑物质的力学性质差异大,对应力的敏感性不同而形成的(图5e)。

### 2.3 裂缝形成期次

阜二段富有机质页岩沉积至今经历了吴堡、真武、三垛、和盐城等多期次的构造运动,形成了相对

较为复杂的天然裂缝系统。现今观察到的裂缝是多期构造运动叠加改造的结果。以往对裂缝形成期次的研究,主要以地质分析法为主,即通过对裂缝之间的交切关系、终止关系来判断裂缝形成时期的相对先后顺序,或是通过裂缝产状与古构造应力场之间的匹配关系大致推断。目前,通过以裂缝充填物为研究对象,借助于稳定同位素等手段,可以对不同类型裂缝的活动期次进行“定性—半定量”研究。

首先,对成像测井识别的裂缝形成期次进行大致的研究。对成像测井识别的高导缝产状进行统计,阜二段一共识别出127条高导缝,走向都在近东西向(图3b),倾角集中在 $45^{\circ}\sim 75^{\circ}$ (图3c),属于同一时期形成的高角度构造未充填裂缝。对成像测井识别的高阻缝的产状进行统计,阜二段一共识别出30条高阻缝,走向在东北向与南东东向之间,没有特定的规律(图3e),倾角集中在 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ (图3f),岩心观察



注:a为单偏光,高角度半充填裂缝终止于顺层方解石脉,阜二段V亚段,X1井3 674.5 m;b为单偏光,不规则张裂缝顺层发育,阜二段IV亚段,X1井3 585.2 m;c为单偏光,层理缝,阜二段IV亚段,X1井3 682.8 m;d为黏土矿物晶间缝,阜二段IV亚段,X1井3 584.91 m;e为粒缘缝,阜二段V亚段,X1井3 680.35 m;f为有机质收缩缝,X1井3 718.20 m。

图5 苏北盆地高邮凹陷X1井阜二段微观裂缝特征

Fig. 5 Characteristics of microfractures of Fu-2 member of Well-X1 in Gaoyou Sag of Subei Basin

结果证实其为厚度较大的顺层方解石脉。

岩心观察到的裂缝较成像测井更为精细。构造裂缝除了高角度未充填的大型剪切裂缝,还有很多高角度方解石充填的张性裂缝、方解石充填的张剪性裂缝和未充填的张剪性裂缝。岩心观察结果显示:方解石充填张性缝切穿顺层方解石脉(图4b)、方解石充填张剪性缝切穿、终止于顺层方解石脉(图4c)、构造未充填裂缝同时切穿张性裂缝和顺层方解石脉(图4b)以及构造未充填裂缝终止于顺层方解石脉和层理缝(图4d)。微观尺度也证实构造裂缝终止于顺层方解石脉(图5a、图5b),表明顺层方解石脉形成时间较早,张性缝次之,构造未充填裂缝最晚形成。

此外,裂缝充填物的稳定碳氧同位素含量差异也能反映裂缝充填物形成时流体性质和物理化学环境的差异性。通过对研究区20块岩心样品的裂缝充填物(白云石、方解石)的稳定碳氧同位素进行测定(表2),建立了 $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$ (碳同位素)值与 $\delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})}$ (氧同位素)值交会图(图6a)。分析可知:样品点主要分布在6个区域,且白云石条带、顺层方解石脉和方解石充填构造裂缝之间差异显著。其中,方解石充填的构造裂缝主要分为2个区域,20号样品为代表的

张剪性裂缝为一期,18号样品为代表的张性裂缝为另外一期,表明至少存在2期的裂缝形成期次;顺层方解石脉主要分为2个区域,证实顺层方解石脉并不是一期形成的,可能与有机质的幕式排烃密切相关。

许多学者提出了应用 $\delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})}$ 值来测定其形成的温度。采用经典公式<sup>[22]</sup>来计算白云石及方解石的形成温度 $t$ :

$$t=14.8-5.41\delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})} \quad (1)$$

式中: $\delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})}$ 为样品实测氧同位素值(VPDB,美洲似箭石),‰; $t$ 为白云石及方解石的形成温度,单位 $^{\circ}\text{C}$ 。

计算结果显示,白云石条带中白云石形成时的温度介于 $61.3\sim 71.6^{\circ}\text{C}$ ;顺层方解石脉体中方解石形成时的温度有2个区间,分别介于 $71.6\sim 73.8^{\circ}\text{C}$ 和 $80.8\sim 81.8^{\circ}\text{C}$ ;构造缝中充填的方解石形成时的温度有2个区间,分别介于 $77.0\sim 82.9^{\circ}\text{C}$ 和 $84.0\sim 86.2^{\circ}\text{C}$ 。

结合X1井区埋藏史和热史,可以恢复出上述裂缝充填物形成的时期和古埋深(图7)。白云石条带形成时间最早,距今约 $53\sim 52\text{ Ma}$ (吴堡早期),埋深在1 000 m左右;顺层方解石脉形成时间次之,距今约 $51\sim 50\text{ Ma}$ (吴堡中期),埋深介于1 300~1 500 m;方解石充填的构造裂缝形成时间分为2期,距今约

50~48 Ma(吴堡中晚期)和24 Ma左右(三垛末期),埋深分别对应应在1 400~1 600 m和2 500 m左右。

前人研究结果表明,高邮凹陷深凹带阜二段富有机质页岩进入低熟生油的时间介于50.85~50.00 Ma<sup>[23]</sup>,结合阜一段、阜三段常规油气主要的成藏期次为距今约53~46 Ma和距今约46~37 Ma<sup>[24-25]</sup>,证实顺层方解石脉形成期次与低熟生油期大致相匹配,且具有多幕次的特征。

此外,结合未充填构造裂缝的走向与现今水平最大主应力的方向近乎平行的特点,推断其形成于最新的一次构造运动,即盐城运动,距今不超过20 Ma。

综上所述,研究区天然裂缝系统形成具有多期性。非构造裂缝白云石条带形成时间最早;顺层方解石脉形成时间次之,具有多幕次特征。构造裂缝的形成至少分为3期:即方解石充填的构造裂缝分2期;未充填构造裂缝至少有1期,且形成时间最晚。

表2 苏北盆地高邮凹陷X1井裂缝充填物碳氧同位素  
Table 2 Carbon and oxygen isotope of fracture fillings of Well-X1 in Gaoyou Sag of Subei Basin

编号	裂缝类型	充填物特征	井深/ m	$\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}/$ ‰	$\delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})}/$ ‰	温度/ ℃
1	非构造缝	白云石条带	3 585.71	1.7	-10.5	71.605
2	非构造缝	白云石条带	3 655.28	-0.8	-8.6	61.326
3	非构造缝	顺层方解石脉	3 676.30	1.7	-12.2	80.802
4	非构造缝	顺层方解石脉	3 676.95	1.1	-12.4	81.884
5	非构造缝	顺层方解石脉	3 683.30	1.1	-12.4	81.884
6	非构造缝	顺层方解石脉	3 686.47	-1.2	-10.9	73.769
7	非构造缝	顺层方解石脉	3 689.31	-0.8	-10.5	71.605
8	非构造缝	顺层方解石脉	3 693.62	0.6	-12.3	81.343
9	构造缝	方解石充填	3 696.92	-1.7	-12.8	84.048
10	构造缝	方解石充填	3 700.39	-0.5	-12.8	84.048
11	非构造缝	顺层方解石脉	3 701.40	0.5	-12.2	80.802
12	构造缝	方解石充填	3 704.25	-1.7	-13.1	85.671
13	非构造缝	白云石条带	3 706.42	-3.0	-8.7	61.867
14	构造缝	方解石充填	3 708.40	-2.1	-12.9	84.589
15	构造缝	方解石充填	3 709.60	-2.9	-13.0	85.13
16	构造缝	方解石充填	3 711.00	-1.8	-12.6	82.966
17	构造缝	方解石充填	3 713.20	-3.1	-13.1	85.671
18	构造缝	方解石充填	3 716.55	-3.7	-13.2	86.212
19	非构造缝	白云石条带	3 718.45	-5.2	-8.9	62.949
20	构造缝	方解石充填	3 721.70	-4.8	-11.5	77.015

注: $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$ 为碳同位素,‰; $\delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})}$ 为氧同位素,‰。

### 3 裂缝与页岩油气的富集

页岩储层发育的多期次、多组系、多类型、多尺度的裂缝,并非都有利于改善储层的物性。只有开启的、未被完全充填的,或保存有效的储集空间,才是有效的裂缝,影响页岩油的富集。

根据前人对裂缝有效性的研究,天然裂缝形成时期越晚、后期遭受溶蚀作用越强、流体异常压力越高、晚期构造活动抬升强度越大,天然裂缝的有效性越好。其中,地应力的方向和强度,对构造裂缝有效性影响较大;与现今水平最大水平主应力方向夹角越小,应力强度越大,裂缝的有效性越好。研究区成像测井识别的高导缝有效性与此存在一定的关联。

对于具有超低基质孔隙度和渗透率的页岩储层来说,有效裂缝的发育增加了储集空间和比表面积,其次沟通了有机质孔和无机矿物孔等一系列页岩孔隙空间,增加了岩石内部的有效渗流路径,发挥了改善储层孔渗性能的重要作用。

研究区的有效裂缝主要有:①晚期形成的未被充填的构造剪切缝;②异常高压下,具有开启性的层理缝、微裂缝;③生油期形成的顺层方解石脉,晚期遭受一定程度的溶蚀改造;④白云石条带中广泛发育的近垂直裂缝,方解石充填为主,经受溶蚀作用形成的孔洞、裂缝空间。

晚期形成未被充填的构造剪切缝,在阜二段各亚段、各小层均有发育,有效性较好,但保存条件随其发育程度升高而变差。一方面,这一类裂缝形成时间较晚(图7),充填程度较低,是有效的储集空间和高效的渗流通道;另一方面,其发育与断层、褶皱等变形构造联系较为紧密,平面上断层、褶皱附近裂缝发育程度较高,间接导致保存条件相对较差。

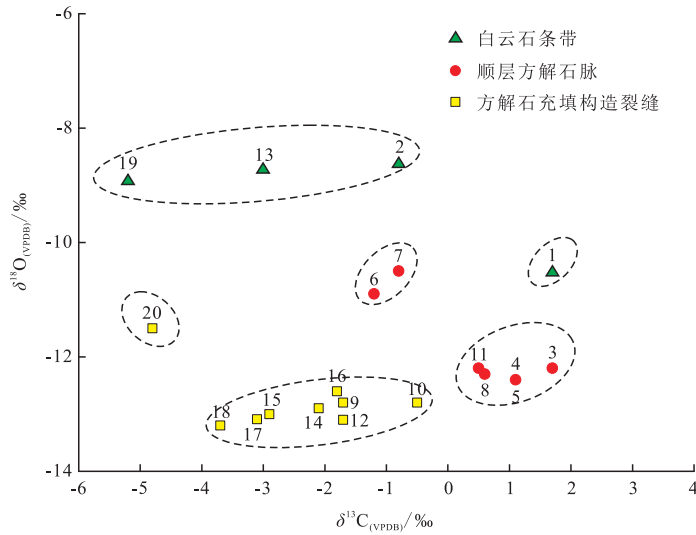
层理缝在阜二段3套有利层内是广泛发育的,其发育程度与纹层的发育密度、黏土矿物的含量呈现明显的正相关关系。在地下高温高压环境下,由于上覆岩层的静岩压力,常压状态下的层理缝一般处于闭合状态。因此,有效层理缝的分布区域与现今的流体超压区域基本一致。

顺层方解石脉纵向上主要发育在V亚段的中下部(下有利层),脉体上溶蚀孔洞、裂缝发育,方解石脉与暗色泥岩层频繁互层,是有利的源储组合。它的存在是古流体超压的证据之一,越早进入生油期

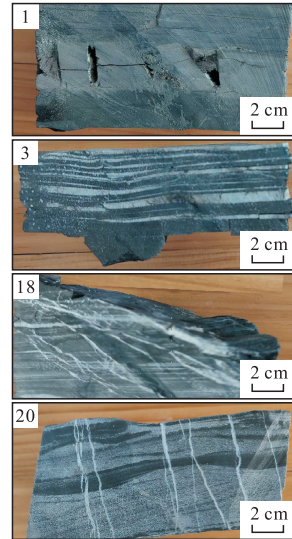
的古深洼是该类型发育的优势区带。

白云石条带在阜二段中、下部,2套有利层内均较为发育。相比于上下的泥页岩,白云石条带脆性矿物含量更高,在相同的构造应力条件下更易形成

裂缝。初步分析认为白云石形成于准同生期(图7),白云石条带中白云石含量达到70%~90%,在后期构造作用下白云石条带内部形成有效开度为“毫米级”至“纳米级”的孔隙、裂缝系统;白云石条带上下泥岩



a. 裂缝充填物碳氧同位素分布



b. 典型样品对应照片和典型样品对应照片

图6 苏北盆地高邮凹陷X1井阜二段裂缝充填物碳氧同位素分布

Fig. 6 Distribution of carbon and oxygen isotope of fracture fillings of Fu-2 member of Well-X1 in Gaoyou Sag of Subei Basin

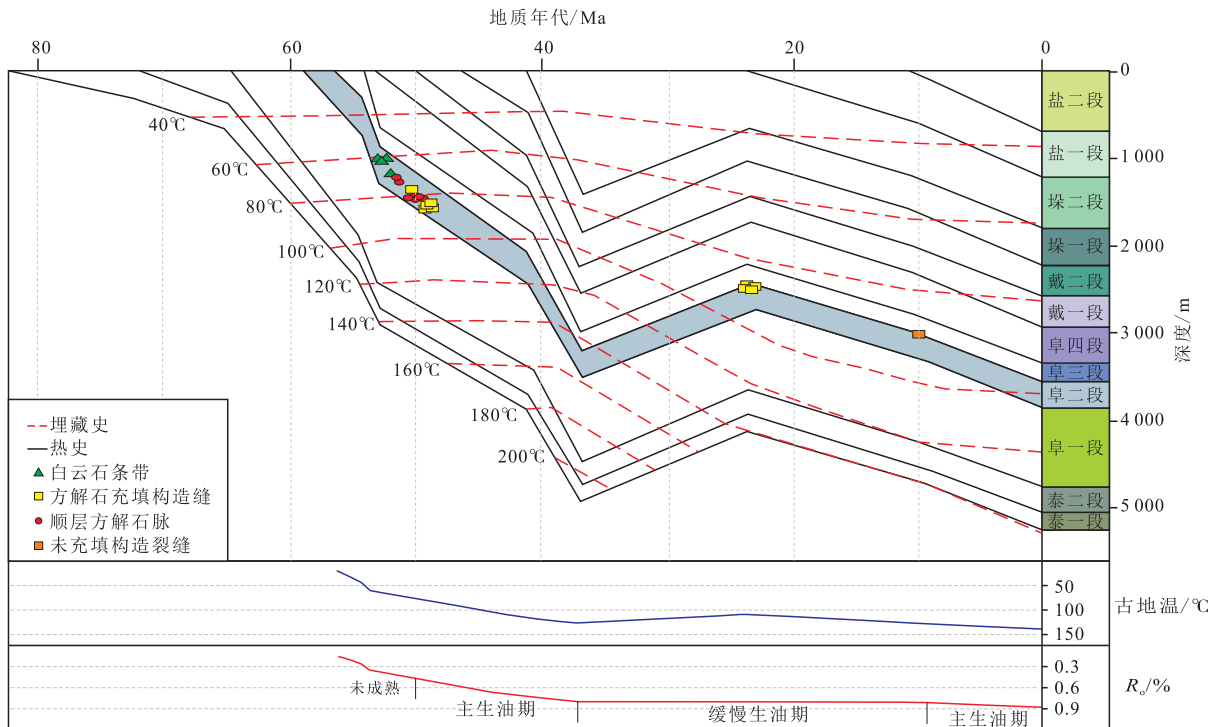


图7 苏北盆地高邮凹陷X1井阜二段演化模式

Fig. 7 Evolution model of Fu-2 member of Well-X1 in Gaoyou Sag of Subei Basin

层有机质丰度高,生油条件优越,两者互层构成优质的源储组合,多级孔、缝系统协同发育有利于油水高效置换。白云石条带与上下的暗色泥页岩构成了良好的源储组合,发育有优质的孔-缝体系,具有含油性好和流动性高的特点,已有的生产动态资料表明其具有较好的页岩油产能,是苏北盆地阜二段较为优质的岩相组合。

## 4 结论

1) 高邮凹陷阜二段页岩油储层主要发育有剪切缝、张剪性裂缝、张性缝、滑脱缝和小断层5种构造裂缝及层理缝、顺层纤维状方解石脉2种非构造缝。

2) 非构造裂缝白云石条带形成时间最早,顺层方解石脉形成时间次之,且具有多幕次的特征;构造裂缝的形成至少分为3期:方解石充填的构造裂缝分2期;未充填构造裂缝至少有1期,且形成时间最晚。

3) 有效裂缝有4种类型,其中顺层方解石脉、白云石条带剪切缝和超压层理缝在阜二段的中下部广泛发育,对页岩油气的富集最为有利。

### 参考文献

- [1] 赵文智,朱如凯,胡素云,等.陆相富含有机质页岩与泥岩的成藏差异及其在页岩油评价中的意义[J].石油勘探与开发,2020,47(6):1079-1089.  
ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, HU Suyun, et al. Accumulation contribution differences between lacustrine organic-rich shales and mudstones and their significance in shale oil evaluation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1079-1089.
- [2] 李明,王民,张金友,等.中国典型盆地陆相页岩油组分评价及意义[J].石油与天然气地质,2023,44(6):1479-1498.  
LI Ming, WANG Min, ZHANG Jinyou, et al. Evaluation of the compositions of lacustrine shale oil in China's typical basins and its implications[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1479-1498.
- [3] 周庆凡.页岩油气资源评价基本问题的讨论[J].石油与天然气地质,2022,43(1):26-33.  
ZHOU Qingfan. Discussion on key issues of shale oil/gas resource assessment[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 26-33.
- [4] 赵文智,张斌,王晓梅,等.陆相源内与源外油气成藏的烃源灶差异[J].石油勘探与开发,2021,48(3):464-475.  
ZHAO Wenzhi, ZHANG Bin, WANG Xiaomei, et al. Differences in source kitchens for lacustrine in-source and out-of-source hydrocarbon accumulations[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 464-475.
- [5] 金之钧,朱如凯,梁新平,等.当前陆相页岩油勘探开发值得关注的几个问题[J].石油勘探与开发,2021,48(6):1276-1287.  
JIN Zhijun, ZHU Rukai, LIANG Xinping, et al. Several issues worthy of attention in current lacustrine shale oil exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(6): 1276-1287.
- [6] 印森林,谢建勇,程乐利,等.陆相页岩油研究进展及开发地质面临的问题[J].沉积学报,2022,40(4):979-995.  
YIN Senlin, XIE Jianyong, CHENG Leli, et al. Advances in continental shale oil research and problems of reservoir geology[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(4): 979-995.
- [7] 郭彤楼.涪陵页岩气田发现的启示与思考[J].地质前缘,2016,23(1):29-43.  
GUO Tonglou. Discovery and characteristics of the Fuling shale gas field and its enlightenment and thinking[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 29-43.
- [8] 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].地质前缘,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 Wufeng-Longmaxi Formations, southeastern Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 1-10.
- [9] 邹才能,董大忠,王玉满,等.中国页岩气特征、挑战及前景(二)[J].石油勘探与开发,2016,43(2):166-178.  
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Shale gas in China: characteristics, challenges and prospect ( II ) [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 166-178.
- [10] 聂海宽,张金川.页岩气储层类型和特征研究—以四川盆地及其周缘下古生界为例[J].石油实验地质,2011,33(3):219-225.  
NIE Haikuan, ZHANG Jinchuan. Types and characteristics of shale gas reservoir: A case study of Lower Paleozoic in and around Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(3): 219-232.
- [11] 邹才能,董大忠,王社教,等.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J].石油勘探与开发,2010,37(6):641-653.  
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 641-653.
- [12] 丁文龙,许长春,久凯,等.泥页岩裂缝研究进展[J].地球科学进展,2011,26(2):135-144.  
DING Wenlong, XU Changchun, JIU Kai, et al. The research progress of shale fracture[J]. Advance in Earth Science, 2011, 26(2): 135-144.
- [13] 丁文龙,李超,李春燕,等.页岩裂缝发育主控因素及其对含气性的影响[J].地质前缘,2012,19(2):212-220.  
DING Wenlong, LI Chao, LI Chunyan, et al. Dominant factor of fracture development in shale and its relationship to gas accumulation[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 212-220.
- [14] DING W L, WAN H, ZHANG Y Q, et al. Characteristics of the Middle Jurassic marine source rocks and prediction of favorable source rock kitchens in the Qiangtang Basin of Tibet[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 66(8): 63-72.
- [15] DING W L, DAI P, ZHU D W, et al. Fractures in continental shale reservoirs: a case study of the Upper Triassic strata in the SE Ordos Basin, Central China[J]. Geological Magazine, 2015, 153(4): 1-18.
- [16] 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.  
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 Shiyu University (Natural Science Edition), 2014, 29(6): 13-20.
- [17] 米立军, 徐建永, 李威. 渤海海域页岩油资源潜力[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1366-1377.  
MI Lijun, XU Jianyong, LI Wei. Shale oil resource potential in the Bohai Sea area[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1366-1377.
- [18] 段宏亮, 刘世丽, 付茜. 苏北盆地古近系阜宁组二段富有机质页岩特征与沉积环境[J]. 石油实验地质, 2020, 42(4): 612-617.  
DUAN Hongliang, LIU Shili, FU Qian. Characteristics and sedimentary environment of organic-rich shale in the second member of Paleogene Funing Formation, Subei Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(4): 612-617.
- [19] 荆晓明. 苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段页岩油甜点评价[J]. 非常规油气, 2023, 10(3): 31-38.  
JING Xiaoming. Evaluation of shale oil sweet spots in the second member of Paleogene Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(3): 31-38.
- [20] 龙海岑, 李绍鹏. 泥页岩层系非均质性及其控制因素研究——以苏北盆地阜宁组二段为例[J]. 非常规油气, 2022, 9(4): 78-90.  
LONG Haicen, LI Shaopeng. The research on the heterogeneity of shale formations and its controlling factors——A case study of the second member of Funing Formation in Subei Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2022, 9(4): 78-90.
- [21] 刘敬寿, 丁文龙, 肖子亢, 等. 储层裂缝综合表征与预测研究进展[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(6): 2283-2300..  
LIU Jingshou, DING Wenlong, XIAO Zikang, et al. Advances in comprehensive characterization and prediction of reservoir fractures[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(6): 2283-2300.
- [22] 刘德良, 孙先如, 李振生, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系白云岩碳氧同位素分析[J]. 石油实验地质, 2006, 28(2): 155-161.  
LIU Deliang, SUN Xianru, LI Zhensheng, et al. Analysis of carbon and oxygen isotope on the Ordovician dolostones in the Ordos basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(2): 155-161.
- [23] 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.  
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.
- [24] 李儒峰, 陈莉琼, 李亚军, 等. 苏北盆地高邮凹陷热史恢复与成藏期判识[J]. 地学前缘, 2010, 17(4): 151-159.  
LI Rufeng, CHEN Liqiong, LI Yajun, et al. The thermal history reconstruction and hydrocarbon accumulation period discrimination of Gaoyou Depression in Subei Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(4): 151-159.
- [25] 潘雪峰, 段永刚, 曹景洋, 等. 利用微裂隙内流体包裹体面研究构造运动——以苏北盆地富民、花庄油田为例[J]. 地质学刊, 2013, 37(4): 535-539.  
PAN Xuefeng, DUAN Yonggang, CAO Jingyang, et al. Study on tectonic movement by use of fluid inclusion planes in micro fissures: A case study of Fumin and Huazhuang oilfields in northern Jiangsu[J]. Journal of Geology, 2013, 37(4): 535-539.

(编辑 徐佩)

(上接第413页)

- [35] 朱维耀, 鞠岩, 赵明, 等. 低渗透裂缝性砂岩油藏多孔介质渗吸机理研究[J]. 石油学报, 2002, 23(6): 56-59.  
ZHU Weiyao, JU Yan, ZHAO Ming, et al. Spontaneous imbibition mechanisms of flow through porous media and waterflooding in low-permeability fractured sandstone reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(6): 56-59.
- [36] 刘敦卿. 页岩储层微观渗吸效应及其对油气产出的影响[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.  
LIU Dunqing. Microscopic imbibition effects in shale reservoir and its impact on production[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2021.
- [37] 冯绪宝. 页岩油油藏渗吸提高采收率实验研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.  
FENG Xubao. Experimental study on enhancing oil recovery by imbibition in shale oil reservoir[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2020.
- [38] 杨坤. 裂缝性致密砂岩油藏渗吸规律及其影响因素研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.  
YANG Kun. Research on imbibition law of fractured tight sandstone reservoir and its influencing factors[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2020.
- [39] MASON G, FISCHER H, MORROW N R, et al. Correlation for the effect of fluid viscosities on counter-current spontaneous imbibition[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2010, 72(1): 195-205.
- [40] 龚小平, 唐洪明, 赵峰, 等. 四川盆地龙马溪组页岩储层孔隙结构的定量表征[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(3): 48-57.  
GONG Xiaoping, TANG Hongming, ZHAO Feng, et al. Quantitative characterization of pore structure in shale reservoir of Longmaxi Formation in Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(3): 48-57.
- [41] 程志林. 致密油砂岩渗吸实验及孔隙尺度模拟研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.  
CHENG Zhilin. Investigation on counter-current spontaneous imbibition in tight oil sandstones by experiments and pore scale simulation[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2021.

(编辑 李青)