

引用本文:严泽宇,梁兵,孙雅雄,等.苏北盆地高邮凹陷阜宁组二段深层页岩储层地应力方向及主控因素[J].石油实验地质,2024,46(6): 1187-1197.DOI:10.11781/sysydz2024061187.

YAN Zeyu, LIANG Bing, SUN Yaxiong, et al. In-situ stress orientation and main controlling factors of deep shale reservoirs in the second member of Paleogene Funing Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(6): 1187-1197. DOI: 10.11781/sysydz2024061187.

# 苏北盆地高邮凹陷阜宁组二段深层页岩储层 地应力方向及主控因素

严泽宇<sup>1</sup>, 梁兵<sup>2</sup>, 孙雅雄<sup>2,3</sup>, 段宏亮<sup>2</sup>, 邱旭明<sup>2</sup>

1. 中国石化石油物探技术研究院有限公司, 南京 211103;

2. 中国石化江苏油田分公司, 江苏扬州 225009;

3. 东北石油大学地球科学学院, 黑龙江大庆 163008

**摘要:**苏北盆地高邮凹陷阜宁组二段页岩油资源量超 7 亿吨, 但该区构造、应力双复杂的地质条件对页岩油勘探开发造成较大影响, 尤其是现今地应力方向的认识不清, 制约了水平井井组方案的部署和压裂方案的设计与优化。基于区域震源机制解、特殊测井和水平井压裂微地震监测等资料, 结合波速各向异性、古地磁等实验测试分析资料, 开展了各类地应力方向解释方法在深层页岩储层中的适用性研究, 查明了花庄地区现今地应力的分布特征, 并对其影响因素进行了分析。高邮凹陷阜二段现今水平最大主应力方向主要分布在 40°—55°, 平均方位角为 45°, 即现今水平最大主应力方向为 NE 向。平面上, 研究区地应力方向与大区域上应力方向具有较小的应力偏转, 主要受构造格局的影响; 此外, 断层附近存在应力扰动带, 扰动带内应力偏转较为明显, 扰动带的宽度与断层的断距和延伸长度成正相关。通过对比分析, 认为微地震监测、诱导裂缝/井壁崩落、岩心实测、阵列声波各向异性的适用性逐级降低, 阵列声波测井中的波速各向异性受平面上岩相相变的影响较大。结合地应力方向解释结果、天然裂缝优势走向, 建议该区水平井的部署方位为 SE155°—SSE170°。

**关键词:**页岩储层; 地应力方向; 阜宁组; 古近系; 高邮凹陷; 苏北盆地

中图分类号: TE122.23

文献标识码: A

DOI: 10.11781/sysydz2024061187

## In-situ stress orientation and main controlling factors of deep shale reservoirs in the second member of Paleogene Funing Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin

YAN Zeyu<sup>1</sup>, LIANG Bing<sup>2</sup>, SUN Yaxiong<sup>2,3</sup>, DUAN Hongliang<sup>2</sup>, QIU Xuming<sup>2</sup>

1. SINOPEC Geophysical Research Institute Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211103, China;

2. SINOPEC Jiangsu Oilfield Company, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;

3. School of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163008, China

**Abstract:** The shale oil resources in the second member of the Paleogene Funing Formation in the Gaoyou Sag, Subei Basin exceed 700 million tons. However, the complex geological conditions of both its structure and stress significantly impact the shale oil exploration and development in this area. In particular, the lack of clarity regarding the present-day in-situ stress orientations constrains the deployment of horizontal well groups and the design and optimization of fracturing projects. In this study, the applicability of various methods for interpreting in-situ stress orientations in deep shale reservoirs was investigated based on data from regional focal mechanism solutions, specialized logging, and microseismic monitoring of horizontal well fracturing, as well as the experimental analysis such as

收稿日期 (Received): 2024-02-29; 修订日期 (Revised): 2024-10-09; 出版日期 (Published): 2024-11-28.

作者简介: 严泽宇 (1998—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事油气勘探开发工作。E-mail: yanzy.swty@sinopec.com.

通信作者: 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。E-mail: sunyaxiong2015@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42072155)、中国石化科技开发部项目 (P23189、P24207)、中国石化江苏油田分公司科研课题 (JS24038) 和江苏省卓越博士后计划共同资助。

velocity anisotropy and paleomagnetic tests. The distribution characteristics of the present-day in-situ stress in the Huazhuang area were identified, and their influencing factors were analyzed. The results indicated that the present-day maximum horizontal principal stress direction in the second member of the Funing Formation mainly ranged from  $40^{\circ}$  to  $55^{\circ}$ , with an average azimuth of  $45^{\circ}$ , indicating a northeastward orientation. In the planar view, the in-situ stress orientation in the study area exhibited minor stress deviations on a larger regional scale, mainly influenced by the structural patterns. Furthermore, stress perturbation zones were found near faults, where stress deviations were more pronounced, and the width of these perturbation zones was positively correlated with fault displacement and extension length. Comparative analysis suggested a decreasing applicability of microseismic monitoring, induced fractures/wellbore collapses, core measurements, and array acoustic anisotropy. Specifically, the velocity anisotropy in array acoustic logging was significantly influenced by lithological phase transitions on a planar scale. Based on the interpretation of stress orientations and the dominant trends of natural fractures, the recommended horizontal well deployment azimuth for this area is  $SE155^{\circ}$  to  $SSE170^{\circ}$ .

**Key words:** shale reservoir; in-situ stress orientation; Funing Formation; Paleogene; Gaoyou Sag; Subei Basin

## 1 研究现状

页岩储层具有低孔、低渗的特征,常规开采方式一般不具备商业产能<sup>[1]</sup>。水平井大型体积压裂技术在北美大规模应用大获成功<sup>[2]</sup>,并迅速被引进国内开启了“东方页岩革命”。近年来,我国东部陆相页岩油勘探呈现多点开花的局面,具有较好的商业勘探开发前景<sup>[3-5]</sup>。在勘探开发过程中,各大油公司纷纷注意到,地应力场在页岩油水平井钻井、压裂过程中具有重要影响<sup>[6-8]</sup>,即现今地应力场控制着水力压裂时裂缝的延伸方向,水平应力差越大,水力压裂缝越容易沿着水平最大主应力方向进行延伸,形成单一方向的线带状展布的裂缝系统;水平主应力差越小,水力压裂缝越容易发生转向,从而形成多方向延伸的裂缝网络,达到较好的体积压裂效果<sup>[9-11]</sup>。基于这一认识,国内外进入成熟开发阶段的页岩油探区,页岩油井组大多沿着水平最大主应力方向成排布设,水平井钻进方向与水平最小主应力方向近于一致。因此,地应力的研究,尤其是现今地应力方向是每个页岩油探区需要明确的重要地质因素之一。

目前针对现今地应力方向的表征方法较为多样,包括地震震源机制解<sup>[12-13]</sup>、岩心实测<sup>[14-15]</sup>、测井资料识别<sup>[16-17]</sup>以及压裂微地震事件<sup>[18-19]</sup>等,不同方法均具有一定的适用条件和局限性。震源机制解通过分析大尺度区域内成百上千次地震事件,常用于板块级、盆地级的地应力方向研究,适用于油气或固体矿产等勘探的初期阶段;岩心实测和测井资料解释均受限于一孔之见,反映井点周边的地应力方向,适用于低勘探程度区水平井钻探之前;压裂微地震监测是针对水平井压裂过程中地下三

维空间的压裂微地震事件的采集、处理和解释,其结果基于对所有压裂段统计分析,因而最具有准确性和真实性。从高勘探程度区向低勘探程度区拓展时,一般需要采用多种方法综合进行分析,来确定并评价现今水平最大主应力的方向及其影响因素,从而为水平井部署和压裂改造提供参考。

苏北盆地古近系阜宁组(阜二段和阜四段)蕴含着超 20 亿吨的页岩油地质资源量,其中高邮凹陷阜二段和阜四段分别约为 7.56 亿吨和 4.47 亿吨,占据半壁江山,是未来增储上产的主战场。2021 年以来,高邮凹陷花庄地区阜二段接连获得重大突破<sup>[20]</sup>,2023 年页岩油产量超过 6 万吨,并正在快速建产。一方面,阜二段沉积后遭受了多期次的构造运动,断层发育、地层破碎,目前的研究和勘探实践证实四级及以上的断层附近 100~300 m 不利于页岩油保存,且断层附近应力状态较为复杂,因此水平井设计均局限在断块内部;另一方面,阜二段埋深介于 3 500~4 500 m<sup>[21-22]</sup>,属于深层页岩油储层,物性条件差,需要大型体积压裂才能获得工业产能,且压裂改造效果直接影响单井 EUR(最终可采储量),决定着是否具有经济效益。因此,开展系统的地应力研究,对该区井网部署、水平井轨迹优化显得尤为重要。

## 2 研究区概况

苏北盆地在阜宁组沉积时期为统一的拗陷大湖盆格局,后期吴堡事件、真武事件等将盆地分割成若干个 NE 向箕状断陷,形成现今“两坳夹一隆、凹—凸相间”的格局<sup>[23-24]</sup>(图 1a)。高邮凹陷位于盆地南部东台坳陷中部,东部与溱潼凹陷之间夹持着吴堡低凸起,西部与金湖凹陷之间以菱塘桥低凸

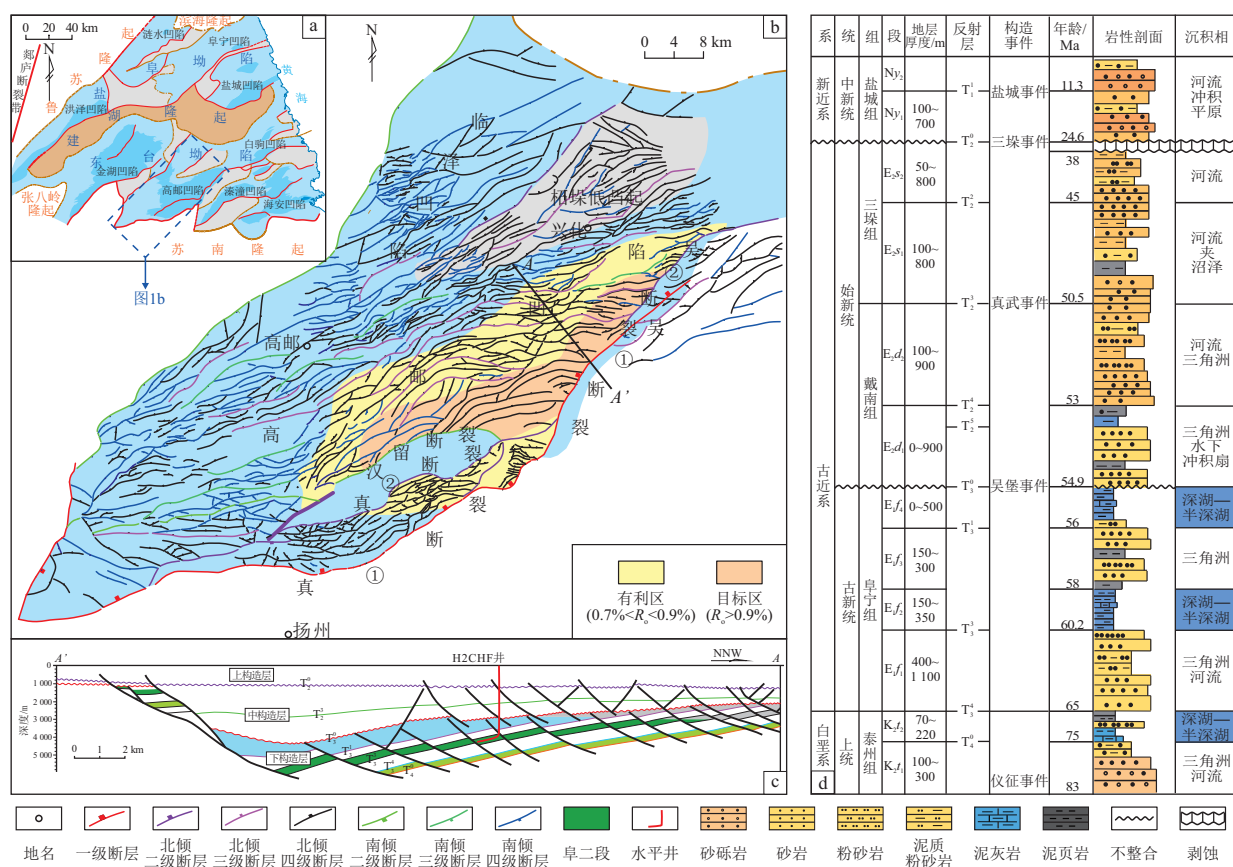


图1 苏北盆地高邮凹陷阜宁组二段断裂特征  
据方志雄等<sup>[21]</sup>修改。

a.苏北盆地构造单元划分;b.高邮凹陷阜宁组二段断裂体;c.高邮凹陷 NNW—SSE 向剖面;d.高邮凹陷地层综合柱状图。  
Fig.1 Fault characteristics of the second member of Funing Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin

起相隔,总体呈 NE—SW 走向;构造上具有南陡北缓、南断北超的特征,凹陷南部真武断裂和吴堡断裂控制着新生代以来的沉积沉降特征<sup>[25]</sup>(图 1a-b)。

高邮凹陷纵向上可以划分为 3 套构造层<sup>[26]</sup>(图 1c):上构造层为 T<sub>2</sub><sup>0</sup>界面之上的盐城组和东台组(图 1d);中构造层为 T<sub>2</sub><sup>0</sup>与 T<sub>3</sub><sup>0</sup>界面之间的戴南组和三垛组;下构造层为 T<sub>3</sub><sup>0</sup>与 T<sub>4</sub><sup>0</sup>界面之间的阜宁组(从下至上分为阜一段—阜四段),构造层间为不整合面。其中,中、下 2 套构造层内部断层极为发育,阜二段所处的下构造层,断层大多为四级断层、吴堡期断层,纵向上延伸范围局限在阜宁组内部及其下伏地层的顶部,呈现多米诺骨牌式的形态,仅有少量控凹的边界长期活动大断层(吴①断层、吴②断层等)向上延伸较远。不同级别、走向的断层将阜二段切割破碎成一系列 NEE 走向长条形断块,断块宽度介于 0.5~4 km,平均为 1.5 km。

高邮凹陷阜二段为深湖—半深湖亚相暗色泥页岩,分布范围广,有机质丰度较高,深凹区—内坡带热演化程度适中,是目前页岩油勘探主要地区和

层系。阜二段页岩厚度介于 250~350 m,根据岩性和电性特征,自上而下可划分为页 I—页 V 亚段。其中,中下部页 V、页 IV 亚段厚度均介于 80~110 m,是当前高邮凹陷已获突破的层段,其岩性主要为灰黑色层状—纹层状混积页岩、长英质页岩夹薄层白云岩;上部页 III、页 II 亚段厚度均介于 30~40 m,是有待部署水平井的层段,其岩性主要为纹层状—层状灰质/白云质页岩和混积页岩;顶部页 I 亚段厚度在 30 m 左右,岩性以块状混积页岩为主。

### 3 现今水平主应力方向

#### 3.1 震源机制解

构造应力场是地球科学领域的重要分支之一,青藏高原隆起产生的近 EW 侧向挤压应力、太平洋向西俯冲产生的 NE 向挤压应力以及菲律宾板块向北西方向的推挤作用,共同奠定了我国华北和华南地区的区域应力场背景。

在大尺度、区域应力场的研究历程中,利用震源机制解资料是较为常用和有效的方法。苏北盆地西侧紧邻郯庐断裂带南段,其控制并影响着两侧



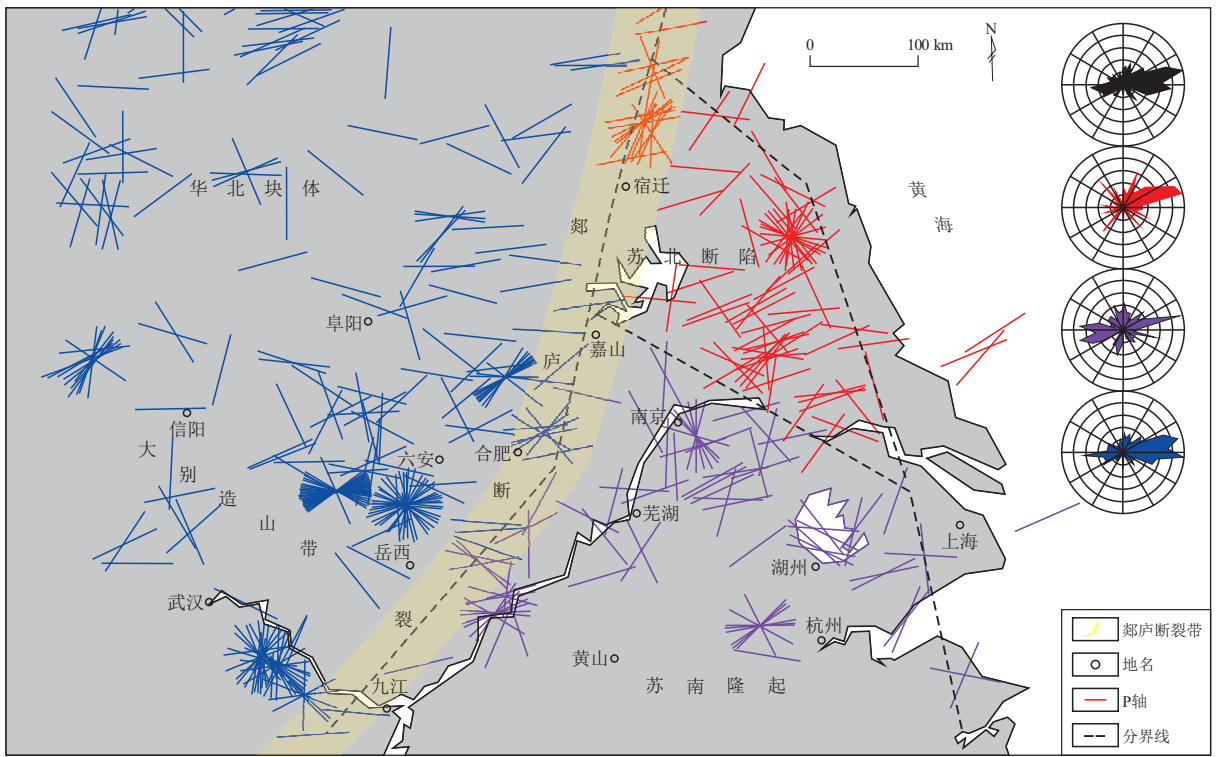


图 2 郯庐断裂带南段及其邻区水平最大主应力轴分布  
据宋尚武等<sup>[12]</sup>修改。

Fig.2 Distribution of maximum horizontal principal stress axes in southern section of Tanlu Fault and surrounding areas

的构造应力场格局。前人<sup>[12-13]</sup>通过对 2001 年以来郯庐断裂带南段及其邻区数千次中小地震(2~3 级)的震源机制解,采用阻尼张量、HASH 等方法反演获得区域应力场空间分布特征。郯庐断裂带南段东侧的苏北断陷区与苏南隆起区分别属于不同的构造区,其内部的构造应力场存在较大的差异;苏北盆地所处的苏北断陷区,水平最大主应力轴优势方向为 NEE58°,局部存在应力偏转的现象(图 2)。

### 3.2 岩心实测

岩心实测主要是利用波速各向异性联合古地磁定向实验进行地应力方向的测量。

波速各向异性实验采用 GCTS-RTR-2000 多功能岩石力学的波速各向异性模块,该测试系统通过超声波探头对全直径岩心样进行纵波(P 波)的波速测量,从标志线开始顺时针旋转岩心,每隔 10°测量不同方向的 P 波传播时间,并结合岩心尺寸计算 P 波波速。HY7 井岩心样品声波波速响应分别在 135°和 45°达到最大和最小,即水平最大主应力方向与标志线夹角为 135°,水平最小主应力方向与标志线夹角为 45°(图 3)。

古地磁岩心定向就是通过粘滞剩磁测量仪,测定岩石磁化时的地磁场方向来实现的,用 Fisher 统计法确定与岩心对应的不同地质年代的剩磁方向,

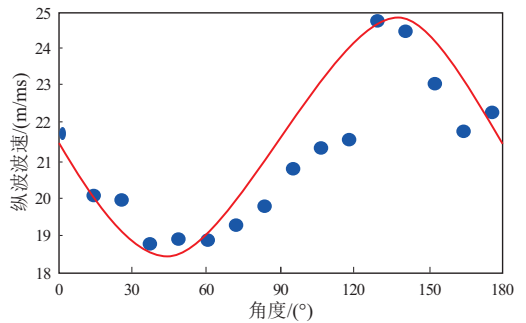


图 3 苏北盆地高邮凹陷 HY7 井阜宁组二段岩心波速各向异性实验曲线

Fig.3 Experimental curve of velocity anisotropy in core samples from the second member of Funing Formation in well HY7, Gaoyou Sag, Subei Basin

用以恢复岩心在地下所处的原始方位,从而确定岩心标志线在地下原位状态下的方向。HY7 井岩心样品古地磁定向结果显示,标志线方向在地下原位条件下的方位为 122°,因而水平最大主应力方向为 257°,即 NEE77°。

上述 2 种方法联合即可得到水平最大、最小主应力的方向。实验结果表明(表 1),高邮凹陷阜二段页岩岩心样品的最大主应力方向分布在 43.8°和 77.0°。

### 3.3 测井

高邮凹陷花庄地区 7 口水平井中 4 口具有导

表1 苏北盆地高邮凹陷阜宁组二段岩心实测地应力方向统计

Table 1 Statistics of measured in-situ stress orientations in core samples from the second member of Funing Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin

井号	层位	深度/m	标志线古地磁定向方向	水平最大主应力与标志线夹角	测试方法	水平最大主应力方向
HY1井	阜二段页V亚段	3 586.02	212.3°	191.5°	波速各向异性	NE43.8°
HY7井	阜二段页IV亚段	4 080.40	122.0°	135.0°	波速各向异性	NEE77.0°

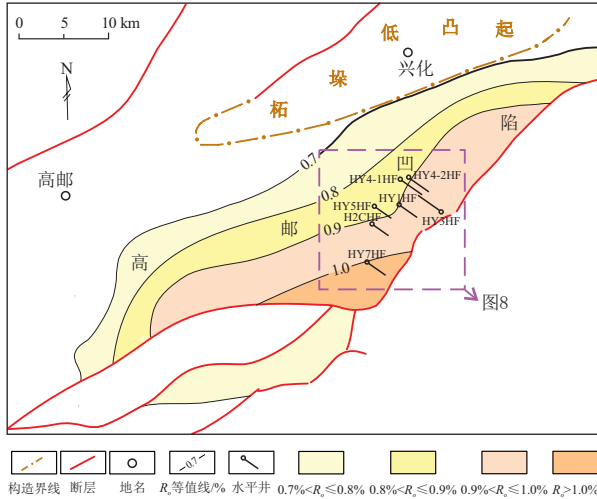


图4 苏北盆地高邮凹陷花庄地区阜宁组二段页岩油井分布

Fig.4 Distribution of shale oil wells in the second member of Funing Formation in Huazhuang area, Gaoyou Sag, Subei Basin

眼井,并分别采集了不同系列的测井资料。其中, HY1、H2C、HY3井均位于内坡带, HY7井位于深凹区( $R_0 > 1.0\%$ ) (图4)。

### 3.3.1 偶极子阵列声波各向异性

理论研究表明,阵列声波测井系列中的横波在具有方位各向异性的岩层中会分裂为快横波和慢横波,分别沿着水平最大主应力和水平最小主应力的方向进行传播<sup>[27-28]</sup>。对阵列声波资料进行处理,得到高分辨率各向异性和平均各向异性,均可用于反映应力的各向异性和水平最大、最小主应力的方向(图5)。

研究区3口井地层声波各向异性均较好, HY1、HY3和HY7井快横波方位结果显示分别为65°—75°、90°—100°和60°—70°。

### 3.3.2 电阻率成像测井诱导裂缝

通过分析井壁切向应力可知,在最大水平主应力方向上有最小的井周切向应力,当泥浆柱压力大到一定程度时,该最小井周切向应力将变成负值,即由压性应力变为张性应力,一旦该张性应力超过岩石抗张强度,就在井壁产生张性的诱导压裂缝,所以

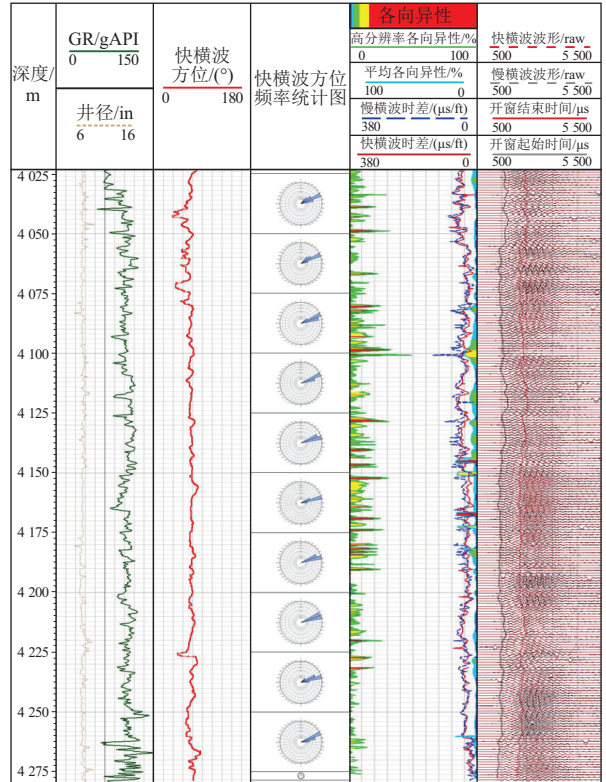


图5 苏北盆地高邮凹陷阵列声波测井地层各向异性解释成果(HY7井)

Fig.5 Formation anisotropy interpretation results from array acoustic logging in well HY7, Gaoyou Sag, Subei Basin

诱导裂缝的走向就是最大水平主应力的方向(图6)。

研究区采集有成像测井的4口导眼井,均发育有大量的诱导裂缝。其中, HY1井诱导裂缝走向主要介于35°—50°, H2C井诱导裂缝走向集中在70°—80°之间, HY3井诱导裂缝走向集中在65°—75°之间, HY7井诱导裂缝走向集中在70°—80°。

### 3.3.3 电阻率成像测井井壁崩落

针对具有方位各向异性的泥岩层,钻井过程中随着井壁崩落,井筒通常呈现为椭圆形,且泥岩层方位各向异性越强,椭圆的长轴和短轴相差越大。井壁崩落法是目前确定深部地应力方向的常用方法之一,椭圆形井眼的长轴方向即为水平最小主应力方向。

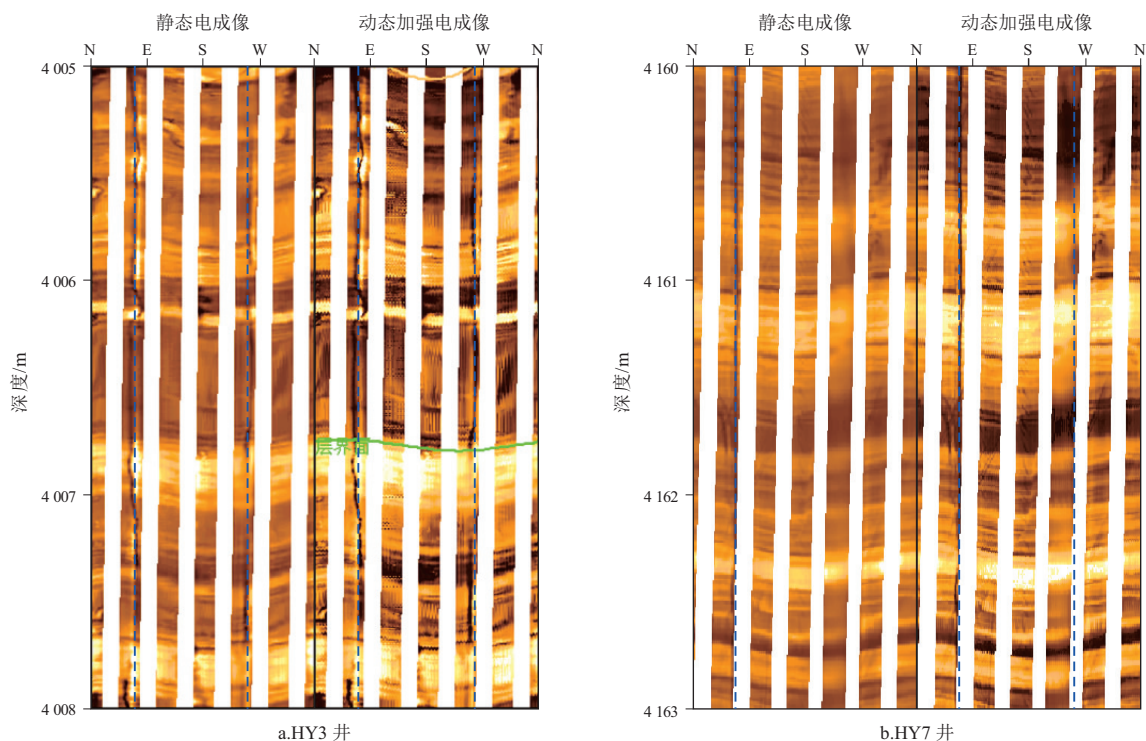


图 6 苏北盆地高邮凹陷阜宁组二段成像测井诱导裂缝图像

Fig.6 Images of drilling-induced fractures from imaging logging of the second member of Funing Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin

由于井壁发生崩落,崩落处地质特征不清,电阻率成像测井的图像特征一般呈现为  $180^\circ$  对称的暗色或黑色条带。利用这一特征即可判断水平主应力的方向。研究区阜二段井壁崩落现象相对较弱,仅 HY3 井与 HY7 井识别出崩落段的水平最大主应力的优势方向,且其与诱导裂缝走向相一致。

### 3.4 微地震监测

现今地应力场控制着水力压裂时裂缝的延伸方向,即水平井分段压裂时,水力压裂缝优先沿着水平最大主应力方向进行延伸。微地震监测即通过在地表或邻井部署检波器,在水平井压裂过程中监测并定位压裂诱发地震(微地震)事件,并提供此过程的几何信息。处理解释后形成的三维空间微地震事件椭球体的长轴方向即为水平最大主应力方向。

利用该方法来解释高邮凹陷阜二段最大水平主应力的方向。花庄地区 7 口井阜二段水力压裂缝的监测结果表明,水力裂缝的优势延伸方位较为一致,主要为  $40^\circ\text{—}55^\circ$ ,平均约为  $45^\circ$ ,即最大水平主应力的方向主要为  $NE45^\circ$ (图 7)。

### 3.5 对比分析

上述多种方法分别对地应力的方向进行了分析,不同的方法均具有局限性。

震源机制解可以为区域的构造应力场方向提

供宏观的背景,一般作为勘探初期的参考,也可作为地质建模和构造应力场模拟等的背景条件。苏北盆地整体水平最大主应力方向为  $NEE58^\circ$ (图 8)。

勘探阶段,各种表征地应力方向的方法并非同步采集的数据,而是存在先后的顺序。岩心实测和测井解释应力方向为水平井布设方向提供依据,水平段微地震监测解释结果验证其合理性。微地震监测是针对水平井压裂过程中地下三维空间的压裂微地震事件的采集、处理和解释,其结果基于对所有压裂段统计分析,因而其最具有准确性和真实性。因此,分析认为高邮凹陷目前集中勘探的花庄地区阜二段,其区域上水平最大主应力的方向为  $40^\circ\text{—}55^\circ$ ,平均为  $45^\circ$ (图 7)。

岩心实测的地应力方向受井眼条件的限制,一般需要采集多口井的岩心样品进行测试,从而使得结论具有统计学上的意义。高邮凹陷岩心实测样品较少,因而结果仅仅代表该井点的应力方向。测井方法由于是纵向上连续测得,单口井数据量大,因而常用于指示该井眼及其附近的地应力方向。综合岩心实测与测井解释方法,对导眼井地应力方向及上述方法适应性进行判别。

导眼井 HY1 井岩心实测的结果和诱导裂缝的走向具有良好的一致性,且与微地震监测解释结果一致,综合判定其水平最大主应力方向为  $35^\circ\text{—}$



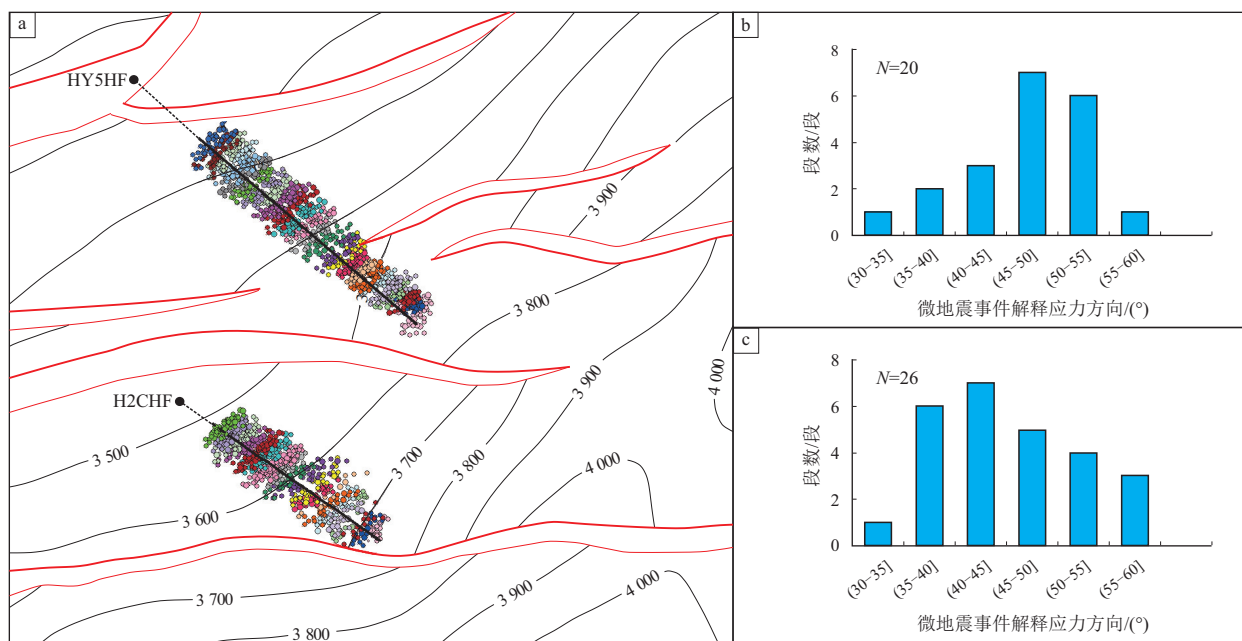


图 7 苏北盆地高邮凹陷阜宁组二段微地震事件及解释地应力方向

a. 微地震事件俯视图(底图为阜二段中部埋深等值线图, 单位 m); b. H2CHF 井微地震解释地应力方向统计直方图; c. HY5HF 井微地震解释地应力方向统计直方图。

Fig.7 Microseismic events and interpreted in-situ stress orientations in the second member of Funing Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin

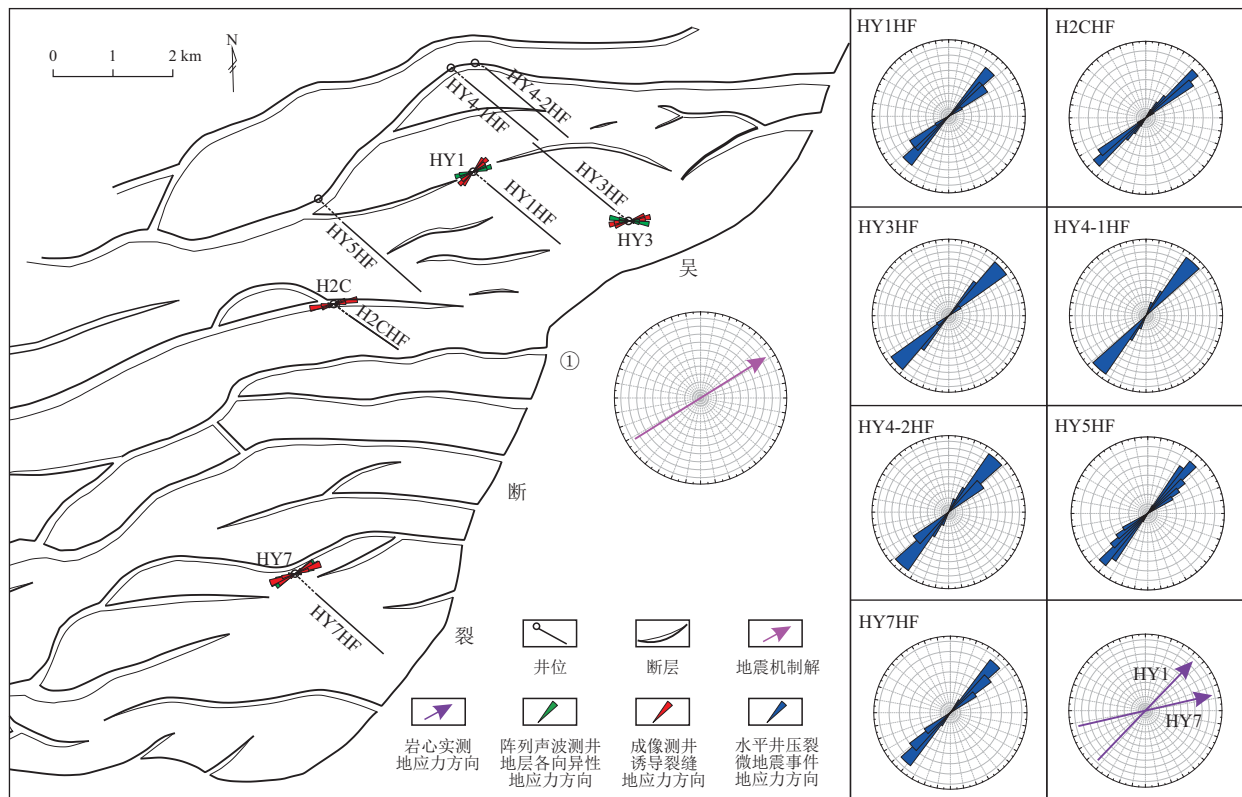


图 8 苏北盆地高邮凹陷阜宁组二段地应力方向分布

Fig.8 Distribution of in-situ stress orientations in the second member of Funing Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin

50°, 判定测井波速各向异性解释结果不准确; H2C 井利用诱导裂缝走向判定其水平最大主应力方向为 70°—80°, 导眼井所处部位应力发生偏转; HY3

井井壁崩落与诱导裂缝走向一致, 综合判定其水平最大主应力方向为 65°—75°, 判定测井波速各向异性解释结果不准确, 且导眼井所处部位应力发生

表 2 苏北盆地高邮凹陷不同方法分析水平最大主应力方向结果对比分析  
Table 2 Comparative analysis of maximum horizontal principal stress orientations interpreted by different methods in Gaoyou Sag, Subei Basin

分析方法	水平最大主应力方向			
	HY1 井	H2C 井	HY3 井	HY7 井
岩心实测	43.6°			77.0°
测井波速各向异性	65°—75°( *)		90°—100°( *)	65°—75°
成像测井诱导裂缝	35°—50°	70°—80°	65°—75°	70°—80°
成像测井井壁崩落			65°—75°	70°—80°
与区域应力方向一致性	是	否	否	否

注：“\*”表示判定为不准确。

偏转;HY7 井多种手段解释结果基本一致,综合判定其水平最大主应力方向为 70°—80°,且导眼井所处部位应力发生偏转(表 2)。

分析认为,研究区岩心实测、井壁崩落法和诱导裂缝分析法具有良好的一致性;波速各向异性受断层附近破碎带、地层倾角变化、岩相相变等多因素的影响,在部分井段解释的应力方向与另外 3 种方法相比具有一定的偏差,其准确性相对而言较差。因此,在勘探初期,建议在上述方法解释结果不统一的情况下,优先采用诱导裂缝分析法、岩心实测等解释结果。

综上所述,一方面,高邮凹陷花庄地区区域水平最大主应力方向为 NE45°,与苏北盆地整体应力方向存在一定偏差(13°左右);另一方面,4 口导眼井中,仅 HY1 井地应力方向与区域应力方向相一致,H2C、HY3、HY7 等 3 口井的地应力方向发生了偏转,其原因值得深入探讨。

## 4 现今水平主应力方向主控因素

### 4.1 区域构造因素

整体上,苏北盆地现今水平最大主应力方向为 NEE58°,各凹陷、凸起之间略有变化。具体到高邮凹陷,其深凹区和内坡带水平最大主应力方向以 40°—55°为主,与盆地整体存在较小的偏差,分析认为主要受构造格局的影响。

结合构造背景<sup>[29-30]</sup>和区域应力分析认为,吴堡事件至今,控凹断层差异化活动将盆地分割,形成现今凹—凸相间的构造格局。高邮凹陷阜二段页岩油有利区与周围(低)凸起或隆起上的地层结构、岩性等存在较大差异,不同的地质体间相互挤压碰撞,应力场相互作用较强,在一定范围内会产生应力遮挡或扭转等效应,从而导致在高邮凹陷花庄地区形成一定角度的应力偏转。

### 4.2 断裂构造因素

高邮凹陷北斜坡属于南断北超的构造形态,褶

皱和断裂较为发育。平面上,区域应力方向较为一致,但断层附近地应力方向变化较为明显,分析认为主要受断裂及其破碎带的影响。尤其是控凹边界吴①断层(延伸长度 30 km,断距 2 100 m)附近,应力扰动的范围超过 1 000 m, HY3 井距控凹边界吴①断层的距离为 500~520 m,受其影响地应力方向发生偏转。凹陷内部三、四级断层附近也存在应力扰动带, H2C 井距其北侧四级断层(延伸长度 8 km,断距 140 m)距离为 300 m, HY7 井距其北侧四级断层(延伸长度 7 km,断距 120 m)距离为 250 m, 2 口井均受断层的影响而地应力方向发生偏转,且断层应力扰动带范围与前人提出的应力扰动带图版相一致<sup>[31-34]</sup>(图 9)。HY1 井距离四级断层(延伸长度 2.5 km,断距 60 m)的距离超过 500 m,地应力方向无偏转。由此可见,凹陷内部三、四级断层应力扰动带范围多在 100~350 m。

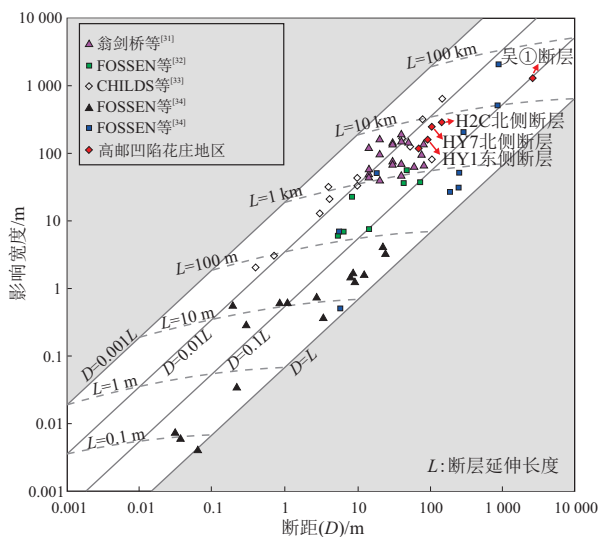


图 9 苏北盆地高邮凹陷花庄地区阜宁组二段断层附近应力扰动带宽度变化规律

底图据翁剑桥等<sup>[31]</sup>修改。

Fig.9 Width variations in stress perturbation zones near faults in the second member of Funing Formation, Huazhuang area, Gaoyou Sag, Subei Basin



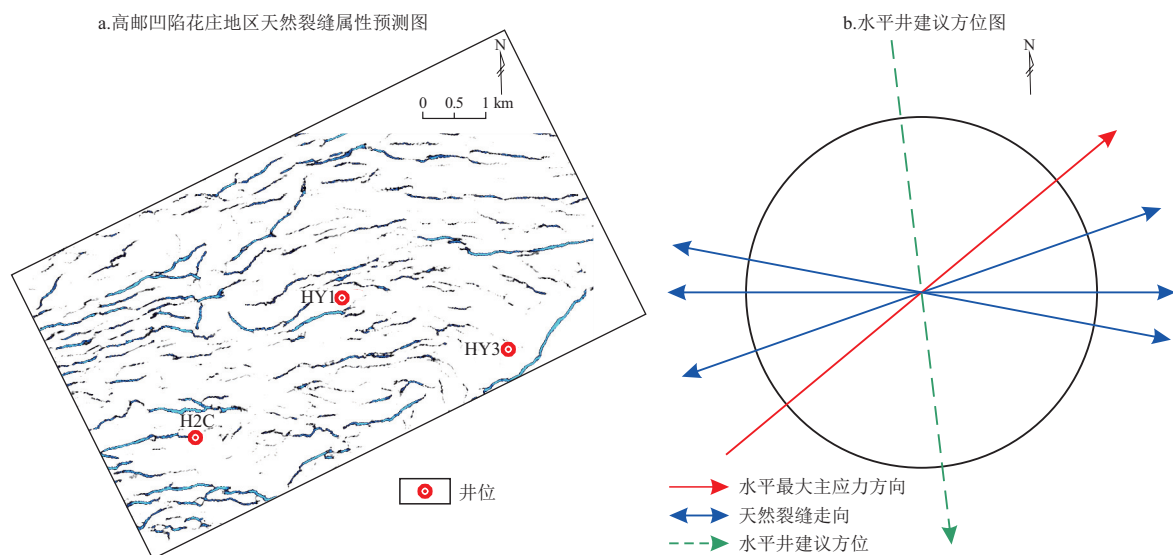


图 10 结合天然裂缝走向和地应力方向的测试结果建议水平井的部署方位

Fig.10 Recommended horizontal well deployment orientation based on test results of natural fracture and in-situ stress orientations

前人模拟研究了多断层区域水平最大主应力方向沿断层走向上的变化<sup>[35-37]</sup>,也证实了断层端部应力朝断层走向偏转。分析认为,断层附近存在天然裂缝带,地层较为破碎,与外围地层的岩石力学性质相差较大,力学性质的变化增强了应力横向上的变化,从而导致现今断裂带附近应力偏转的现象。高邮凹陷阜二段4口导眼井中有3口因为靠近断裂带出现应力方向偏转,主观因素在于:在断层较为发育的复杂断块区,为了保障水平井水平段长度,导眼井一般部署在断层周缘,从而导致导眼井应力方向不具备代表性。

## 5 水平井布井方式建议

一般情况下,现今水平主应力差越小,水力压裂时人工裂缝遭遇天然裂缝时方向易发生转向,多方向延伸的裂缝相互沟通形成网状裂缝,裂缝复杂度越高,体积压裂改造效果越好<sup>[38-39]</sup>。

高邮凹陷花庄地区阜二段天然裂缝整体较发育,且下部的裂缝发育强度很大,裂缝以高角度—垂直缝为主,天然裂缝的优势走向以NEE、近EW和SEE向为主(图10a),其中NEE向天然裂缝与现今水平最大主应力方向夹角最小,其有效性也相应最高。

结合现今水平最大水平主应力方向、天然裂缝优势延伸方向及井壁稳定性等的影响,建议水平井的部署方位为SE155°—SSE170°(图10b)。如此可以使得水平井穿过更多的天然裂缝且逼近角较小,减小“表皮效应”,从而形成最优的体积压裂改造效果。但值得注意的是,在裂缝发育带需要控制

压裂规模,避免与断层相沟通或激活断层,造成窜扰或产生套变、套损等不利现象。

## 6 结论

(1) 基于多方法对地应力方向的表征与分析,认为微地震监测、诱导裂缝/井壁崩落、岩心实测、阵列声波各向异性的准确性逐级降低。高邮凹陷阜二段现今水平最大主应力方向为40°—55°,平均为45°。

(2) 高邮凹陷阜二段地应力方向在平面上整体变化不大,主要受构造形态和断裂分布控制;控凹边界断层应力扰动的范围超过1000 m,凹陷内部三、四级断层应力扰动带范围多在100~350 m。

(3) 结合地应力方向解释结果、天然裂缝优势走向,建议水平井的部署方位为SE155°—SSE170°,如此可以形成较好的体积压裂改造效果。但值得注意的是,在裂缝发育带需要控制压裂规模,避免与小尺度断层相沟通,造成窜扰或套损等不利现象。

### 利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

### 作者贡献/Authors' Contributions

所有作者均参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

The manuscript was drafted and revised by all authors. All authors have read the last version of the paper and consented to its submission.

### 参考文献:

[1] 金之钧,王冠平,刘光祥,等.中国陆相页岩油研究进展与关

- 键科学问题[J].石油学报,2021,42(7):821-835.
- JIN Zhijun, WANG Guanping, LIU Guangxiang, et al. Research progress and key scientific issues of continental shale oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(7): 821-835.
- [2] US Energy Information Administration. Annual energy outlook 2019 with projections to 2050[R]. Washington: US Energy Information Administration, 2021.
- [3] 何文渊, 蒙启安, 冯子辉, 等. 松辽盆地古龙页岩油原位成藏理论认识及勘探开发实践[J]. 石油学报, 2022, 43(1): 1-14. HE Wenyuan, MENG Qian, FENG Zihui, et al. In-situ accumulation theory and exploration & development practice of Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(1): 1-14.
- [4] 刘惠民. 济阳拗陷页岩油勘探实践与前景展望[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 73-87. LIU Huimin. Exploration practice and prospect of shale oil in Jiyang Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 73-87.
- [5] 赵贤正, 蒲秀刚, 周立宏, 等. 深盆地相区页岩油富集理论、勘探技术及前景: 以渤海湾盆地黄骅拗陷古近系为例[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 143-162. ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, ZHOU Lihong, et al. Enrichment theory, exploration technology and prospects of shale oil in lacustrine facies zone of deep basin: a case study of the Paleogene in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 143-162.
- [6] 包友书, 陆相泥页岩在水平地应力作用下裂缝的多样性: 以济阳拗陷古近系泥页岩为例[J]. 石油学报, 2019, 40(7): 777-785. BAO Youshu. Fracture diversity of continental shale under horizontal geostress: a case study of the Paleogene shale in Jiyang Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(7): 777-785.
- [7] 张皓宇, 陈军斌, 王涛, 等. “井工厂”不同压裂模式下裂缝扩展规律数值模拟研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(9): 3561-3574. ZHANG Haoyu, CHEN Junbin, WANG Tao, et al. Numerical simulation of fracture propagation in different fracturing modes of “well factory”[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(9): 3561-3574.
- [8] 赵金洲, 赵金, 胡永全, 等. 水力压裂裂缝应力场变化规律[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(12): 1677-1683. ZHAO Jinzhou, ZHAO Jin, HU Yongquan, et al. Study on stress field distribution of hydraulic fracturing[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(12): 1677-1683.
- [9] GALE J F W, LAUBACH S E, OLSON J E, et al. Natural Fractures in shale: a review and new observations[J]. AAPG Bulletin, 2014, 98(11): 2165-2216.
- [10] DAHI - TALEGHANI A, OLSIN J E. Numerical modeling of multistranded-hydraulic-fracture propagation: accounting for the interaction between induced and natural fractures [J]. SPE Journal, 2011, 16(3): 575-581.
- [11] 蒋廷学, 卞晓冰, 王海涛, 等. 深层页岩气水平井体积压裂技术[J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 90-96. JIANG Tingxue, BIAN Xiaobing, WANG Haitao, et al. Volume fracturing of deep shale gas horizontal wells [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 90-96.
- [12] 宋尚武, 王庆良, 张佩, 等. 庐庐断裂带南段及其周边地区应力场分区与反演[J]. 地震研究, 2018, 41(3): 457-463. SONG Shangwu, WANG Qingliang, ZHANG Pei, et al. The stress field inversion and stress field partition of the southern Tanlu fault and surrounding areas [J]. Journal of Seismological Research, 2018, 41(3): 457-463.
- [13] 孙业君, 黄耘, 刘泽民, 等. 庐庐断裂带鲁苏皖段及邻区构造应力场特征及其动力学意义[J]. 地震地质, 2021, 43(5): 1188-1207. SUN Yejun, HUANG Yun, LIU Zemin, et al. 2021. Characteristics of tectonic stress field and dynamic significance in the Shandong-Jiangsu-Anhui segment of Tancheng-Lujiang fault zone and its adjacent areas[J]. Seismology and Geology, 43(5): 1188-1207.
- [14] 曹峰, 何建华, 王园园, 等. 合川地区须二段低各向异性储层现今地应力方向评价方法[J]. 地球科学进展, 2022, 37(7): 742-755. CAO Feng, HE Jianhua, WANG Yuanyuan, et al. Methods to evaluate present-day in-situ stress direction for low anisotropic reservoirs in the second member of the Xujiahe Formation in Hechuan area [J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(7): 742-755.
- [15] HAN Yannong, FENG Yongcun, LI Xiaorong, et al. Evaluation of in-situ stress orientation: a laboratory approach combining paleomagnetic test and acoustic anisotropy test [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 195: 107870.
- [16] SHEN L W, SCHMITT D R, HAUG K. Quantitative constraints to the complete state of stress from the combined borehole and focal mechanism inversions: Fox Creek, Alberta [J]. Tectonophysics, 2019, 764: 110-123.
- [17] LEE H, CHANG Chandong, ONG S H, et al. Effect of anisotropic borehole wall failures when estimating in situ stresses: a case study in the Nankai accretionary wedge [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 48: 411-422.
- [18] 尹帅, 刘翰林, 何建华, 等. 动静态地质力学方法约束的致密油砂岩地应力综合评估[J]. 地球科学进展, 2023, 38(12): 1285-1296. YIN Shuai, LIU Hanlin, HE Jianhua, et al. Comprehensive evaluation of geo-stress in tight oil sandstone under constraints of dynamic - static geomechanical methods [J]. Advances in Earth Science, 2023, 38(12): 1285-1296.
- [19] MAXWELL S C, URBANCIC T I, STEINSBERGER N, et al. Microseismic imaging of hydraulic fracture complexity in the Barnett shale [C]// Paper Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio: Society of Petroleum Engineers, 2002: 2-8.
- [20] 朱相羽, 段宏亮, 孙雅雄. 苏北盆地高邮凹陷古近系陆相页岩油勘探突破及意义[J]. 石油学报, 2023, 44(8): 1206-1221. ZHU Xiangyu, DUAN Hongliang, SUN Yaxiong. Breakthrough and significance of Paleogene continental shale oil exploration in Gaoyou Sag, Subei Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(8): 1206-1221.

- [21] 方志雄,肖秋生,张殿伟,等.苏北盆地陆相“断块型”页岩油地质特征及勘探实践[J].石油与天然气地质,2023,44(6):1468-1478.  
FANG Zhixiong, XIAO Qiusheng, ZHANG Dianwei, et al. Geological characteristics and exploration of continental fault-block shale oil reservoirs in the Subei Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6):1468-1478.
- [22] 云露,何希鹏,花彩霞,等.苏北盆地溱潼凹陷古近系陆相页岩油成藏地质特征及资源潜力[J].石油学报,2023,44(1):176-187.  
YUN Lu, HE Xipeng, HUA Caixia, et al. Accumulation characteristics and resource potential of Paleogene continental shale oil in Qintong Sag of Subei Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1):176-187.
- [23] 舒良树,王博,王良书,等.苏北盆地晚白垩世—新近纪原型盆地分析[J].高校地质学报,2005,11(4):534-543.  
SHU Liangshu, WANG Bo, WANG Liangshu, et al. Analysis of northern Jiangsu prototype basin from late Cretaceous to Neogene[J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(4):534-543.
- [24] 邱海峻,许志琴,乔德武.苏北盆地构造演化研究进展[J].地质通报,2006,25(9):1117-1120.  
QIU Haijun, XU Zhiqin, QIAO Dewu. Progress in the study of the tectonic evolution of the Subei Basin, Jiangsu, China[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(9):1117-1120.
- [25] 陈安定.苏北盆地构造特征及箕状断陷形成机理[J].石油与天然气地质,2010,31(2):140-150.  
CHEN Anding. Tectonic features of the Subei Basin and the forming mechanism of its dustpan-shaped fault depression[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(2):140-150.
- [26] 唐旭.苏北盆地高邮凹陷断裂演化及砂箱物理模拟[D].大庆:东北石油大学,2019.  
TANG Xu. Fault evolution and analogue modelling of Gaoyou Sag in Subei Basin[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2019.
- [27] 齐晴.地应力预测技术在页岩气水平井开发中的应用[J].地球物理学进展,2018,33(3):1117-1122.  
QI Qing. Application of in-suit stress prediction technology in shale gas horizontal wells development[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(3):1117-1122.
- [28] 雪宇超.井旁地应力对全波列声波测井影响的正反演研究及应用[D].西安:西安石油大学,2021.  
XUE Yuchao. Research and application of forward and inverse analysis of the influence of borehole in-situ stress on the full-wave sonic logging[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021.
- [29] 马晓鸣.高邮凹陷构造特征研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2009.  
MA Xiaoming. Research of structural characteristics of Gaoyou Depression[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2009.
- [30] 邱旭明,陈伟,李鹤永,等.苏北盆地走滑构造与复杂断块油气成藏[J].石油实验地质,2023,45(3):393-401.  
QIU Xuming, CHEN Wei, LI Heyong, et al. Strike-slip structures and hydrocarbon accumulation in complex fault blocks in Subei Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(3):393-401.
- [31] 翁剑桥,曾联波,吕文雅,等.断层附近地应力扰动带宽度及其影响因素[J].地质力学学报,2020,26(1):39-47.  
WENG Jianqiao, ZENG Lianbo, LYU Wenya, et al. Width of stress disturbed zone near fault and its influencing factors[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(1):39-47.
- [32] FOSSEN H, HESTHAMMER J. Possible absence of small faults in the Gullfaks Field, northern North Sea: implications for downscaling of faults in some porous sandstones[J]. Journal of Structural Geology, 2000, 22(7):851-863.
- [33] CHILDS C, MANZOCCHI T, WALSH J J, et al. A geometric model of fault zone and fault rock thickness variations[J]. Journal of Structural Geology, 2009, 31(2):117-127.
- [34] FOSSEN H, SCHULTZ R A, SHIPTON Z K, et al. Deformation bands in sandstone: a review[J]. Journal of the Geological Society, 2007, 164(4):755-769.
- [35] 沈海超,程远方,王京印,等.断层对地应力场影响的有限元研究[J].大庆石油地质与开发,2007,26(2):34-37.  
SHEN Haichao, CHENG Yuanfang, WANG Jingyin, et al. Study of finite element on effects of faults on ground stress field[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(2):34-37.
- [36] 刘中春,吕心瑞,李玉坤,等.断层对地应力场方向的影响机理[J].石油与天然气地质,2016,37(3):387-393.  
LIU Zhongchun, LYU Xinrui, LI Yukun, et al. Mechanism of faults acting on in-situ stress field direction[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(3):387-393.
- [37] 刘振.复杂断层构造区地应力分布规律及影响因素研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2019.  
LIU Zhen. Research on the distribution and influence factors of in-situ stress in complex fault tectonic region[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2009.
- [38] 刘向君,丁乙,罗平亚,等.天然裂缝对水力裂缝延伸的影响研究[J].特种油气藏,2018,25(2):148-153.  
LIU Xiangjun, DING Yi, LUO Pingya, et al. Influence of natural fracture on hydraulic fracture propagation[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(2):148-153.
- [39] 李建红,王延斌.临兴地区盒八段砂岩裂缝发育特征及其对压裂效果的影响[J].矿业科学学报,2021,6(4):379-388.  
LI Jianhong, WANG Yanbin. Fracture characteristics of the 8th member of Shihezi Formation in Linxing area and its influence on fracturing effect[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(4):379-388.