

# 直井注-水平井采组合井网优化研究及应用

吴小张,江聪,张博,王龙,何芬

(中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459)

**摘要:**水平井开发技术在油田矿场的广泛应用促进了水平井渗流理论的完善,如何保证水平井有较高的产能,同时避免水平井快速见水是矿场面临的重要难题。针对水平井在开发过程中有效控水难的问题,基于渗流力学中势的分布理论,通过定义偏移率和注采垂距比2个参数,利用数学中的保角变换方法,建立了直井注-水平井采的地层势的分布计算式。在此基础上,编程计算并分析了偏移率和注采垂距比对注水开发效果的影响。结果表明:直井注-水平井采开发井网的注水能量利用状况与偏移率、注采垂距比成反比,即偏移率越大,注采垂距比越大,能量利用越差;其注水舌进程度随着偏移率增大和注采垂距比增大而减弱。研究成果指导了海上某油田的井位优化,对于同类开发井网的优化部署具有一定的借鉴意义。

**关键词:**水平井 直井 偏移率 注采垂距比 井网优化

**中图分类号:**TE324 **文献标志码:**A

## Optimization and application of combined well pattern with vertical injector and horizontal producer

WU Xiaozhang, JIANG Cong, ZHANG Bo, WANG Long, HE Fen

(Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China)

**Abstract:** The widespread use of horizontal well development techniques in oilfields promotes the perfection of the seepage theory of horizontal wells. How to ensure a higher productivity of horizontal well and avoid rapid water breakthrough is an important problem to be solved. To solve this problem, it was firstly defined two parameters, offset ratio and vertical distance ratio between vertical injection well and horizontal production well. Based on the theory of potential distribution in seepage mechanics, using conformal mapping, it was established a calculation formula for the distribution of the potential of vertical injection well and horizontal production well. And then it was compared the effects of offset ratio and vertical distance ratio on water injection energy utilization and injection fingering. The result showed that the energy utilization of injection wells in horizontal well is inversely proportional to the offset ratio and vertical distance ratio. That is the energy utilization becomes worse as the offset ratio and vertical distance ratio increases, the degree of fingering decreases with the increase of offset ratio and vertical distance ratio. The research results guided the well location optimization in an offshore field and have some reference significance for the optimal deployment of similar development well pattern.

**Key words:** horizontal well; vertical well; offset ratio; vertical distance ratio; optimization of well pattern

随着水平井开发技术的日趋成熟,其在国内外油田中得到了广泛应用,针对水平井开展的相关研究也取得了较多成果<sup>[1-3]</sup>。这些研究主要集中在水平井的产能公式上,最具代表性的是国外学者JOSHI<sup>[4-6]</sup>提出的水平井产能计算公式,以后众多学者的研究大多与此类似,只是假设条件不同<sup>[7-9]</sup>。现场实施水平井技术的成熟使得直井与水平井组合开发成为很多油田采用的井网方式,而直井与水平井组合开发的理论研究目前主要以规则井网的产能

研究为主,研究的井网类型主要有直井与水平井五点法井网、七点法井网以及九点法井网等<sup>[10-15]</sup>,针对不规则井网的研究较少。同时,对于直井注水平

收稿日期:2018-03-14;改回日期:2018-05-15。

第一作者简介:吴小张(1981—),硕士,工程师,现从事海上油气田开发研究工作。E-mail:wuxzh@cnooc.com.cn。

攻关项目:国家科技重大专项“渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范”(2016ZX05058-001)。

井采的组合井网,如何通过井网优化既能保证采油井具有较高的产能,又能控制含水上升速度,相关报道不多。为此,本文从渗流力学中的势场理论出发,应用数学中的保角变换方法,从理论上分析了偏移率、注采垂距比等因素对注水效果的影响,并应用研究成果对海上某油田的水平井开发井网提出了优化调整的建议。

## 1 直井注-水平井采组合井网中势的分布

渗流力学理论及油藏数值模拟研究表明,水平井附近的势场分布呈椭圆形<sup>[16]</sup>。在直角坐标系中,直接计算水平井形成的势场较为困难。为此,引入数学中的保角变换<sup>[17]</sup>,将水平井椭圆型流场转换为直线型流场,进而可以方便地计算地层中势场的分布。

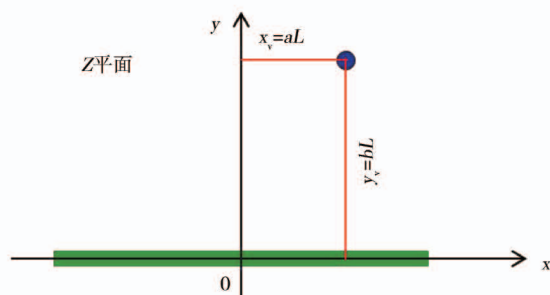


图1 直井注水平井采开发井组示意

$$\text{其中 } \xi(x, y) = \ln \left[ \sqrt{\frac{(X^2 + Y^2 + L^2) + \sqrt{(X^2 + Y^2 - L^2) + 4Y^2 L^2}}{2L^2}} + \sqrt{\frac{(X^2 + Y^2 - L^2) + \sqrt{(X^2 + Y^2 - L^2) + 4Y^2 L^2}}{2L^2}} \right].$$

根据势的叠加原理,复杂井网的势场可视为多个油水井势的叠加,由此可以获得直井水平井组合井网任意一点势的计算公式,从而得到地层中势的分布。考虑一注一采井组(直井注水平井采),其产生的势计算公式为

$$\phi(x, y) = \frac{q_1}{2\pi} \xi(x, y) - \frac{q_1}{2\pi} \ln \left[ \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \right] + c \quad (7)$$

其中: $x, y$  为  $Z$  平面任意点坐标,  $x_1, y_1$  为直井所在位置坐标,  $q_1$  为水平采油井产油量,  $q_2$  为直井注水井注入量。

对于水平井井点和直井井点有:

$$\phi(x_v, y_v) = \frac{q_1}{2\pi} \xi(x_v, y_v) - \frac{q_2}{2\pi} \ln \left[ \sqrt{(x_h - x_1)^2 + (y_h - y_1)^2} \right] + c \quad (8)$$

$$\phi(x_v, y_v) = \frac{q_1}{2\pi} \xi(x_v, y_v) - \frac{q_2}{2\pi} \ln(r_{wv}^2) + c \quad (9)$$

假设条件:①储层上、下封闭,且为水平、均质、等厚和各向同性。②储层原油为不可压缩的单相流动,不与岩石发生任何物理化学反应。③原油在地层中的渗流为稳态渗流,不考虑重力和毛管压力的影响(见图1)。

取水平段中点为坐标原点,水平井方向为  $x$  轴,垂直于水平井方向为  $y$  轴,定义偏移率  $a$  表示直井井点偏移水平井中心的距离与水平井水平段半长的比值,注采垂距比  $b$  表示直井水平井井距与水平井水平段半长的比值。假设在  $Z(xy)$  平面内有一口水井,水平井长度为  $2L$ 。取如下保角变换函数<sup>[18]</sup>:

$$Z = Lch\omega \quad (1)$$

$$Z = x + yi \quad (2)$$

$$\omega = \xi + \eta i \quad (3)$$

将上半  $Z$  平面变换为  $\omega$  平面中宽度为  $\pi$  的带状油层( $\xi > 0$ ),长度为  $2L$  的水平井变换为  $\omega$  平面上位于  $\eta$  轴,长度为  $\pi$  的排油坑道。变换后坐标对应关系为:

$$x = Lch\xi \cos\eta \quad (4)$$

$$y = Lch\xi \sin\eta \quad (5)$$

经过保角变换后  $\omega$  平面中水平井的势函数为:

$$\phi = \frac{q}{2\pi} \xi(x, y) + c \quad (6)$$

其中: $\phi(x_h, y_h)$  为水平井井底的势; $\phi(x_v, y_v)$  为直井井底的势; $r_{wv}$  为直井井筒半径,  $x_v = aL, y_v = bL$ 。根据式(7),可以利用下式计算流体的渗流速度:

$$v_x = -\frac{\partial \phi}{\partial x}, v_y = -\frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (10)$$

## 2 直井注-水平井采注水效果影响因素分析

注水开发主要通过注水保持地层能量来稳定油井的生产能力,同时通过对井网进行优化来控制含水上升状况,提高驱油效果<sup>[19-21]</sup>。以海上某典型油藏为例,分析直井水平井组合井网中偏移率和注采垂距比对注水开发效果的影响。该油藏以岩性-构造油藏为主,油田平均渗透率  $183 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,流体类型为常规轻质油,地层原油粘度为  $8.21 \sim 34.43 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,采用直井注水、水平井采油的不规则井网开发,其水平井水平段长度为  $400 \text{ m}$ ,直井井径为  $0.178 \text{ m}$ ,油水井日产液量及日注入量均为  $200 \text{ m}^3$ 。

## 2.1 偏移率的影响

基于势的分布计算式(7)及流速计算式(10),保持注采垂距比不变,通过编写数值化程序绘制了注采井组不同偏移率下的地层势场分布及流体流速等值线图。通过分析不同参数组合的效果,表现出随着偏移率的增加,注水能量利用状况由好变差,舌进现象由强减弱。由于图幅较多,这里以两组图幅进行说明,如图 2 所示,图中  $x, y$  轴代表井所处的坐标位置,  $\Phi$  轴代表该处地层势的大小。当偏移率为 0 时,注水井周围形成的高势区较小,势场分布较为均匀,注水能量充分利用;当偏移率为 0.5 时,注水井右侧形成大范围高势区,势场分布极不均衡,采油井受效较差,注水能量利用降低。

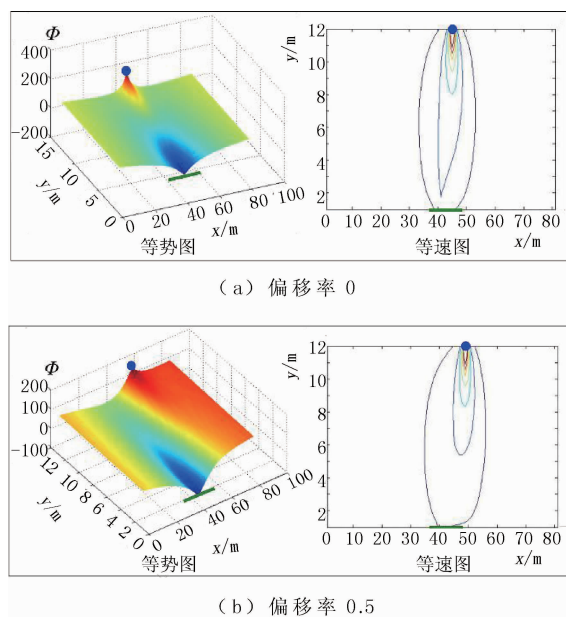


图 2 不同偏移率下地层势场分布及流体流速等值线图

由于注水井与采油井之间形成较大的势差,注入水沿流速最高方向快速流向采油井,使得注入水向油井突进,形成舌进现象。势差越大,注水舌进现象越严重。从图 2 的等速图可以看出,当偏移率较小时,流速带尖端距离水平井较近,而随着偏移率增大,流速带尖端距离水平井越远,舌进现象减弱。可见,适当的偏移率有利于减弱注入水的舌进现象,控制含水上升。

## 2.2 注采垂距比的影响

同样,保持偏移率不变,绘制了注采井组不同垂距比下的地层势场分布及流体流速等值线图(见图 3)。通过分析不同参数组合的效果,表现出随着注采垂距比的增加,注水能量利用状况由好变差,舌进现象由强减弱。这里以典型的两组图幅进行说明,

对比注采垂距比分别为 1.5 和 3.0 的势场分布图可知,当注采垂距比为 3.0 时,注水井附近形成的高势区范围较大,注水能量未充分被利用于驱替原油。可见,注采垂距比越大,注水能量利用越低。同时,由图 3 的等速图可以看出,注采垂距比增大,流速带尖端距离水平井越远,舌进现象减弱。因此注采垂距比越小,越容易产生舌进现象。因此,注水井与采油井需保持适当的距离,以控制采油井的含水过早上升。

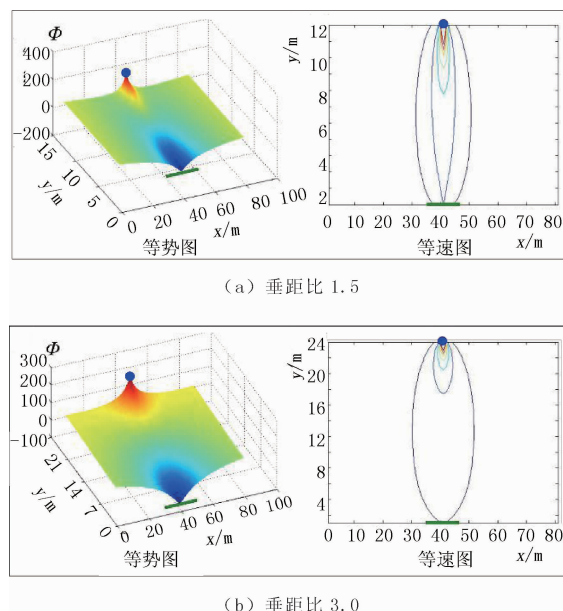


图 3 不同注采垂距比下地层势场分布及流体流速等值线图

通过绘制地层势场分布和流速等值线图,形象地显示了直井注水平井采注采井组中偏移率和注采垂距比对井组注采效果的影响。随着偏移率的增加,注水能量利用状况由好变差,舌进现象由强减弱;随着注采垂距比的增加,注水能量利用状况也表现出由好变差,舌进现象由强减弱。

## 3 应用实例

海上某油田以岩性-构造油藏为主,边底水较发育,单砂体厚度较薄。该油田依据单砂体的发育形态布井,以直井注水、水平井采油为主,开发井网为不规则井网。

油田投产以来,早期采用少井高产的策略,井位部署主要考虑砂体地质发育特点,未充分进行局部井位的优化,由此产生的现象是部分采油井见水较早,含水上升速度较快。以 B 砂体水平采油井 A8H 与直井注水井 A9 所形成的注采井组为例,该砂体平均渗透率  $180 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,地层原油粘度 8.21



mPa·s。A8H井位于油藏高部位,其水平段长度为400 m, A9处于低部位,与A8H井井距为400 m(即

注采垂距比为2.0),投产后日产油量下降,含水上

升迅速(见图4)。

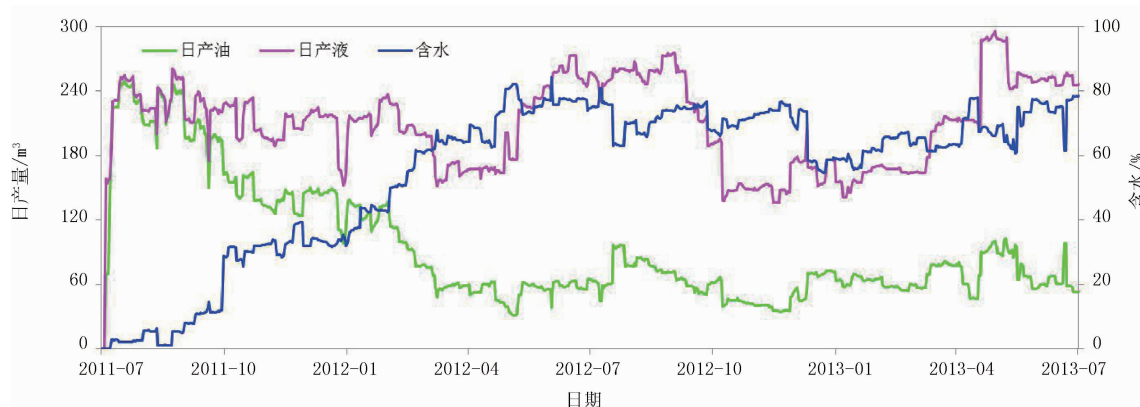


图4 海上某油田A8H井开采曲线

目前油田正在实施综合调整及治理,以期进一步优化井网,提高开发效果。选取该油田综合调整K砂体先导试验井组水平采油井A45H与直井注水井A29形成的注采井网进行井位优化设计试验,该砂体平均渗透率 $200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,地层原油粘度9.12 mPa·s。该井组所处的地质特点及构造部位与A9井组相似,综合调整中设计水平井水平段长度为400 m,直井井径0.178 m。根据本文所提出的

方法建立数值模型进行计算和优选,推荐该井组注采垂距比为1.5,偏移率为0.4(即注采井距为300 m,直井与水平段中心偏移距为80 m)。实际结果表明,A45H井投产后生产稳定,含水上升缓慢(见图5)。与前述早期投产的类似井组相比,开发效果有所改善。可见,应用本文方法优化直井注水-水平井采油开发井网的注采井距及注采井位,可以起到延长稳产时间,控制含水过早快速上升的效果。

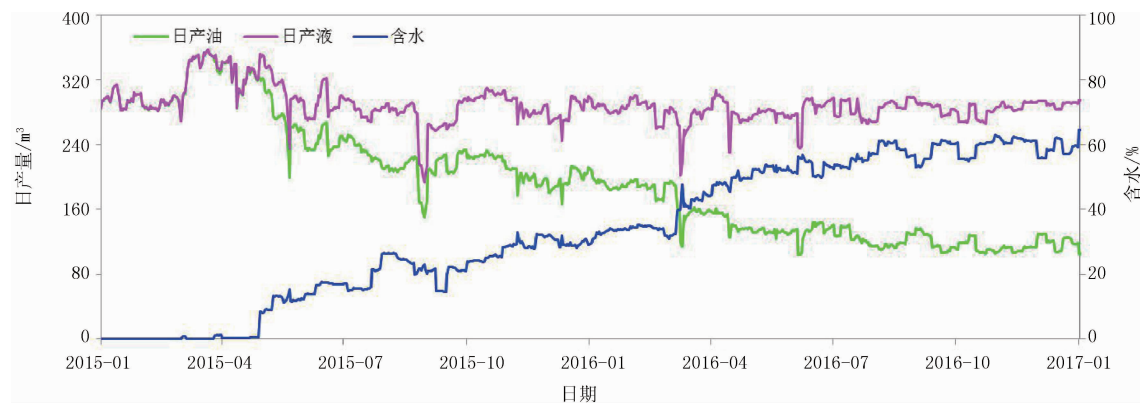


图5 海上某油田A45H井开采曲线

## 4 结论

(1)从渗流力学中的势场理论出发,通过定义偏移率和注采垂距比2个参数,利用保角变换方法,建立了直井注-水平井采组合井网中地层势的分布计算式。

(2)通过计算直井注-水平井采组合井网地层中势的分布,分析了偏移率和注采垂距比等因素对注水开发效果的影响规律。结果表明:直井注-水平井采开发井网的注水能量利用状况与偏移率、注采垂距比成反比,即偏移率越大,注采垂距比越大,

能量利用越差;注水舌进现象则随着偏移率增大和注采垂距比增大而减弱。

(3)应用该方法对海上某油田的水平井开发井网提出了优化调整建议,评价结果与矿场实际效果相符,表明本文所提出的方法可用于指导直井注-水平井采组合井网的井位设计和优化部署。

### 参考文献:

- [1] 赵斌,李闯,吴月先,等.我国复杂油气藏水平井规模化开发成效及进展[J].钻采工艺,2011,34(1):1-3.
- [2] 王大为,李晓平.水平井产能分析理论研究进展[J].岩性油气藏,2011,23(2):118-123.

- [3] 屈亚光,安桂荣,周文胜,等. 层状砂岩油藏水平井与定向井适应性探讨[J]. 断块油气田,2013,20(2):216-220.
- [4] JOSHI S D. Augmentation of well production using slant and horizontal wells[R]. SPE 15375,1986.
- [5] JOSHI S D. A review of horizontal well and drainhole technology[R]. SPE 16868,1987.
- [6] JOSHI S D. Horizontal well technology[M]. Pennwell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma,1991:73-94.
- [7] 汪子昊,李治平,赵志花. 水平井产能影响因素综合分析[J]. 断块油气田,2009,16(3):58-61.
- [8] 罗远儒,陈勉,金衍,等. 水平井不同产能计算方法探讨[J]. 断块油气田,2012,19(1):95-98.
- [9] 郭大立,郭玉龙,陈祥,等. 封闭边界水平井压后产量预测模型[J]. 石油天然气学报,2014,36(7):122-125.
- [10] 赵春森,翟芳芳,曹乐陶,等. 水平井五点法矩形井网的产能计算及其优化[J]. 大庆石油学院学报,2000,24(3):23-25.
- [11] 李春兰,程林松,张丽华,等. 水平井九点井网产能研究[J]. 西南石油学院学报,1998,20(1):56-58.
- [12] 周洪亮,尹洪军,李美芳,等. 各向异性油藏水平井井网渗流场分析[J]. 特种油气藏,2010,17(1):81-84.
- [13] 王春红,刘月田,马翠玉,等. 薄浅层稠油油藏热采水平井合理井网形式研究[J]. 特种油气藏,2013,20(4):88-91.
- [14] 武兵厂,姚军,张继宏,等. 水平井与直井联合井网见水时间的确定方法[J]. 石油学报,2005,26(4):111-114.
- [15] 屈继峰,党少敏. 低渗透油藏水平井与直井混合井网形式优选[J]. 辽宁化工,2013,42(2):129-130.
- [16] 葛家理,宁正福,刘月田,等. 现代油藏渗流力学原理[M]. 北京:石油工业出版社,2001:73-84.
- [17] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1999:75-81.
- [18] 刘振宇,李功,王胡振,等. 七点法井网任意方位水平井产能研究[J]. 水动力学研究与进展, A 辑,2010,25(4):500-505.
- [19] 聂仁仕,贾永禄,沈楠,等. 油藏天然能量指标在注水动态分析中的应用[J]. 新疆石油地质,2010,31(2):174-177.
- [20] 王涛,赵进义. 底水油藏水平井含水变化影响因素分析[J]. 岩性油气藏,2012,24(3):103-107.
- [21] 王友启. 胜利油田高含水期油藏水驱精细调整技术方向[J]. 石油钻探技术,2011,39(1):101-104.

(编辑 谢 葵)

(上接第 11 页)

- [2] 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.
- [3] 刘军,刘喜玲,田骏. 苏北盆地金湖凹陷油气运移与聚集规律[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报),2005,27(6):693-694.
- [4] 能源,漆家福,张春峰,等. 金湖凹陷断裂特征及其石油地质意义[J]. 大地构造与成矿学,2012,36(2):16-23.
- [5] 丁玉盛,蒋弋平,周巨标,等. 金湖凹陷大程庄地区构造特征研究[J]. 复杂油气藏,2011,4(3):25-27.
- [6] 葛金虎,罗红霞,阳芬,等. 金湖凹陷杨村断裂及控藏作用研究[J]. 复杂油气藏,2015,8(2):19-24.
- [7] 张宏国,戴俊生,王霞田,等. 苏北盆地金湖凹陷西斜坡构造特征及构造演化[J]. 地球科学与环境学报,2011,33(4):349-353.
- [8] 能源,漆家福,张春峰,等. 金湖凹陷石港断层构造演化及油气聚集特征[J]. 石油学报,2009,30(5):667-671.
- [9] 邱旭明. 扭动作用在苏北盆地构造体系中的表现及其意义[J]. 江汉石油学院学报,2002,24(2):5-7.
- [10] 叶绍东. 金湖凹陷铜城断层构造特征与油气成藏[J]. 地质力学学报,2012,18(2):187-193.
- [11] 张祥成,戴俊生,邹娟,等. 金湖凹陷铜城断裂带断层活动特征[J]. 地质力学学报,2014,20(4):424-432.
- [12] 张卫海,王韬,何畅,等. 金湖凹陷铜城断层构造特征与成因分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(5):18-25.
- [13] 马洪坤,王新新,商琳,等. 苏北盆地金湖凹陷铜城断裂带的构造演化特征[J]. 地质论评,2015,61(4):767-775.
- [14] 张云峰. 金湖凹陷汉涧地区油气富集规律分析[J]. 内蒙古石油化工,2010,5:140-141.
- [15] 邓丽娟,徐春贵,刘红正. 苏北盆地高邮、金湖凹陷勘探潜力分析[J]. 科技创新导报,2008,36:67-68.
- [16] 张照录,王华,杨红. 含油气盆地的输导体系研究[J]. 石油与天然气地质,2000,21(2):133-135.
- [17] 张卫海,查明,曲江秀. 油气输导体系的类型及配置关系[J]. 新疆石油地质,2003,24(2):118-120.
- [18] 杨淑宏. 断裂输导通道类型及输导油气特征[J]. 大庆石油学院学报,2005,29(2):43-66.
- [19] 葛金虎,罗红霞,阳芬,等. 金湖凹陷杨村断裂及控藏作用研究[J]. 复杂油气藏,2015,8(2):19-24.
- [20] 张凡芹,王伟锋,张晶,等. 沾化凹陷断层对沉积的控制作用[J]. 石油大学学报(自然科学版),2005,29(5):1-6.
- [21] 张建林,林畅松,郑和荣. 断陷湖盆断裂、古地貌及物源对沉积体系的控制作用[J]. 油气地质与采收率,2002,9(4):24-27.
- [22] 纪亚琴,刘喜欢,刘义梅,等. 金湖凹陷油气初次运移及输导作用研究[J]. 复杂油气藏,2013,6(3):6-9.
- [23] 商琳,戴俊生,王霞田,等. 金湖凹陷西斜坡阜宁期构造-沉积演化与油气聚集[J]. 沉积与特提斯地质,2013,33(4):33-38.
- [24] 鲁东升,薛建华. 苏北金湖凹陷生油岩热演化研究[J]. 石油实验地质,1999,21(2):180-183.

(编辑 杨芝文)