

# 济阳拗陷不同类型页岩油差异性分析

宁方兴

(中国石化胜利油田分公司 地质科学研究院, 山东 东营 257015)

**摘要:** 济阳拗陷具备形成页岩油气的有利条件,但勘探效果不理想,亟需深入研究。为此,从划分页岩油类型入手,分析不同类型页岩油的差异性。根据页岩油的赋存空间和赋存岩石类型,可将研究区的页岩油划分为泥页岩型和夹层型页岩油2种类型;其中,泥页岩型页岩油可划分为基质型和裂缝型页岩油2个亚类,夹层型页岩油可划分为砂岩夹层型和碳酸盐岩夹层型页岩油2个亚类。提出根据裂缝发育系数划分页岩油类型的方法,将济阳拗陷裂缝发育系数大于0.2的泥页岩型页岩油确定为裂缝型页岩油,裂缝发育系数小于0.2的确定为基质型页岩油。研究区不同类型页岩油在空间分布、流体、物性、储集空间、赋存状态和产能等方面均存在差异。裂缝型页岩油和夹层型页岩油赋存于较大的储集空间,物性较好,赋存状态以游离态为主,因此裂缝型页岩油和夹层型页岩油的产能高于基质型页岩油。夹层型页岩油的储集空间小于裂缝型页岩油,气油比高,因此夹层型页岩油的产能低于裂缝型页岩油。

**关键词:** 页岩油 基质型 裂缝型 夹层型 差异性 裂缝发育系数 济阳拗陷

**中图分类号:** TE112

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2014)06-0006-04

页岩油是指在以页岩为主的地层中,以游离态为主,吸附态和溶解态为辅,赋存于页岩地层中的热成因石油资源;包括泥页岩孔隙和裂缝中的石油,也包括泥页岩层系中的致密碳酸盐岩或碎屑岩邻层和夹层中的石油资源<sup>[1-3]</sup>。近十几年来,由于水平钻井和多段水力压裂等技术的进步,美国页岩油气的产量逐年升高,引起了全球对页岩油气的广泛关注<sup>[4-9]</sup>;目前,包括中国在内的多个国家亦开始了对页岩油气的理论研究、勘探及开发<sup>[10-18]</sup>。

20世纪60年代,在济阳拗陷的常规油气钻探过程中偶然发现了页岩油气,当时称为泥岩裂缝油气藏<sup>[19-20]</sup>;但由于该类油气藏的初期产能高、递减快,因此一直未获得足够的重视。在北美页岩油气成功开发之后,自2008年对济阳拗陷胜利油区的页岩油气开展了大量研究工作;近几年,在东营凹陷和渤南洼陷共部署13口页岩油探井,但勘探效果均不太理想。为此,笔者对济阳拗陷不同类型页岩油的差异性进行分析,明确不同类型页岩油在空间分布、流体、物性、储集空间和赋存状态等方面的差异性,以及由这些差异造成不同类型页岩油产能的差异,以期为陆相断陷盆地页岩油气的勘探和开发提供借鉴。

## 1 地质概况

济阳拗陷为渤海湾盆地东南部的次级盆地,是在前古近系基底上发育的断陷—拗陷复合盆地<sup>[21-22]</sup>,由东营、惠民、沾化、车镇4个凹陷和若干分隔凹陷的凸起组成。其东南与鲁西—胶东隆起区相邻,西北由埕宁隆起与黄骅拗陷相隔,东北部深入渤海过渡至渤中拗陷,西南与临清拗陷相接,面积为25 510 km<sup>2</sup>。济阳断陷湖盆于始新世早期进入断陷鼎盛期,构造运动相对稳定,湖盆持续下沉,气候温暖潮湿,陆源碎屑向湖泊注入,带来大量的营养物质,湖生生物大量生长繁盛,形成了巨厚的湖相沉积。钻井资料揭示,济阳拗陷页岩层主要发育于古近系沙四段上亚段、沙三段下亚段和沙一段<sup>[23]</sup>;其中,沙四段上亚段泥页岩为咸水—半咸水湖相沉积,沙三段下亚段泥页岩为淡水—微咸水湖相沉积,沙一段泥页岩为咸水—半咸水湖相沉积。这3套泥页岩累积厚度可达一千多米,有机质丰度大于2%,有机质成熟度为0.5%~1.3%,有机质类型以腐泥型—混合型为主,具备形成页岩油气的地质条件和物质基础。

收稿日期:2014-09-01。

作者简介:宁方兴,男,高级工程师,硕士,从事油气勘探及油气成藏研究。联系电话:(0546)8715536, E-mail: ningfangxing.slyt@sinopec.com。

基金项目:国家“973”计划“陆相页岩油富集要素与有利区预测”(2014CB239104)。

## 2 页岩油类型及划分依据

### 2.1 页岩油类型

根据页岩油的赋存空间和赋存岩石类型,可将济阳拗陷的页岩油划分为泥页岩型和夹层型页岩油2种类型<sup>[1]</sup>。

#### 2.1.1 泥页岩型页岩油

泥页岩型页岩油是赋存于泥页岩孔隙和裂缝中的石油资源,可进一步划分为基质型和裂缝型页岩油2个亚类。基质型页岩油主要赋存于泥页岩基质中的有机质和粘土矿物的粒间、粒内及溶蚀等微孔隙、微裂缝中,为低孔低渗透页岩油,对其进行开发相对较为困难。裂缝型页岩油主要以游离态赋存于泥页岩层系的裂缝及微裂缝中,其富集程度受控于裂缝及裂缝体系的发育程度,储集及采出条件好,可开采程度高<sup>[1,24]</sup>。

#### 2.1.2 夹层型页岩油

相对于泥页岩型页岩油,夹层型页岩油是以砂岩和碳酸盐岩类夹层作为油气赋存的主要空间,可进一步划分为砂岩夹层型和碳酸盐岩夹层型页岩油2个亚类。虽然夹层型页岩油的单层厚度较薄,但物性条件相对较好,其上、下邻层泥页岩中的油气经过较短距离运移即可进入夹层成藏。根据济阳拗陷常规油气探明储量单层有效厚度分布特征、页岩地层中夹层的厚度及夹层比例分布特征,考虑

页岩油的流动性相对差于气体等因素,将单层厚度小于2.5 m且单层厚度占所在层组厚度的比例小于20%的砂岩和碳酸盐岩定义为夹层。

### 2.2 划分依据

根据岩性易于识别出夹层型页岩油,但济阳拗陷泥页岩型页岩油的取心资料较少,测井和地震资料的分辨率较低,根据岩心、测井和地震资料难以区分基质型和裂缝型页岩油,因此笔者重点论述泥页岩型页岩油的划分依据。

济阳拗陷储集油气的裂缝大多由构造作用所形成,为此,主要考虑断层对裂缝的影响因素,包括断层的级别、活动强度以及断层距裂缝的距离等,而断距可以反映断层的级别和活动强度。统计结果表明,页岩油探井的产油量与断层的断距成正比(图1a),而与页岩油探井距断层的距离成反比(图1b)。综合考虑断层的级别、活动强度以及断层距页岩油探井的距离,提出裂缝发育系数的概念。裂缝发育系数是断层的断距与页岩油探井距最近断层距离的比值,其表达式为

$$F = \frac{H}{L} \quad (1)$$

式中: $F$ 为裂缝发育系数; $H$ 为断层的断距,m; $L$ 为页岩油探井距最近断层的距离,m。

裂缝发育系数与济阳拗陷页岩油探井的产油量具有较好的正相关性,相关系数为0.786 7;裂缝发育系数越大,表明裂缝越发育,页岩油探井的产

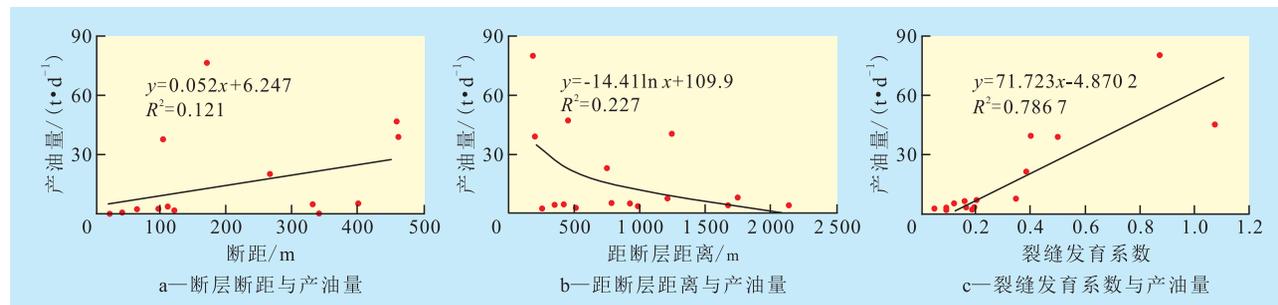


图1 断层断距、页岩油探井距断层的距离及裂缝发育系数与页岩油探井产油量的关系

油量越高(图1c)。

研究区完井、试油和测井资料的统计结果表明,基质型页岩油的二氧化碳含量较低,一般小于1%或为0;基质型页岩油在生产过程中的综合含水率保持不变,而裂缝型页岩油的综合含水率是逐渐升高的;基质型页岩油的物性较差,而裂缝型页岩油的物性相对较好;基质型页岩油的产油量较低,而裂缝型页岩油的产油量较高;此外,裂缝在成像、地层倾角和三孔隙度测井曲线上均具有独特的响应特征。综合考虑泥页岩的二氧化碳含量、综合含

水率、岩心物性、产油量及测井响应特征等因素,将裂缝发育系数大于0.2的泥页岩型页岩油确定为裂缝型页岩油,裂缝发育系数小于0.2的泥页岩型页岩油确定为基质型页岩油。

## 3 不同类型页岩油差异性分析

截至2012年底,在济阳拗陷的泥页岩中钻遇丰富的油气显示,其中有38口探井获得工业油气流或

低产油气流。在研究区各凹陷中,以东营凹陷的页岩油流井最多,以沾化凹陷沙三段下亚段3层组的页岩油流井产能最高。在研究区各洼陷中,以渤南—四扣洼陷的页岩油流井最多,其次为博兴和利津洼陷。不同类型的页岩油在空间分布、流体、物性、储集空间、赋存状态和产能等方面均存在着较大的差异。

### 3.1 空间分布的差异性

泥页岩型页岩油主要分布于沙四段上亚段和沙三段下亚段,以沙三段下亚段分布较多。其中,基质型页岩油在平面上相对于其他类型页岩油更临近于洼陷带;纵向上分布于沙四段上亚段2层组及沙三段下亚段2和3层组,且主要分布于沙三段下亚段3层组。裂缝型页岩油在平面上主要分布于断层附近,纵向上分布于沙四段上亚段1和2层组以及沙三段下亚段3和4层组,主要分布于沙四段上亚段2层组和沙三段下亚段3层组。

夹层型页岩油主要分布于沙四段上亚段、沙三段下亚段和沙一段,以沙三段下亚段为主。其中,研究区砂岩夹层型页岩油在平面上主要分布于深洼带或大型扇体的前端,纵向上分布于沙四段上亚段1和3层组以及沙三段下亚段2和3层组,以沙三段下亚段3层组为主。灰岩夹层型页岩油在沙四段上亚段2—4层组、沙三段下亚段3和4层组以及沙一段均有分布,以沙三段下亚段3层组和沙一段为主。

### 3.2 流体的差异性

在济阳坳陷获得工业油气流或低产油气流的38口页岩油探井中,有26口井的泥页岩段仅产油而不产气,10口井的泥页岩段既产油又产气,2口井仅产气。其中,钻遇泥页岩型和夹层型页岩油的探井均以产油为主,钻遇基质型页岩油的探井仅产油而不产气。在既产油又产气的探井中,以钻遇裂缝型页岩油的探井最多,其次为灰岩夹层型页岩油,而钻遇砂岩夹层型页岩油的探井仅有1口井既产油又产气。此外,随着埋深的增大,页岩油的气油比逐渐增高;其中,裂缝型页岩油的气油比较低,而灰岩夹层型页岩油的气油比则较高。

### 3.3 物性的差异性

页岩油的密度多分布于 $0.745 \sim 0.93 \text{ g/cm}^3$ ,粘度一般为 $0.74 \sim 208 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,且其密度和粘度均具有随着埋深的增加而逐渐降低的趋势。其中,夹层型页岩油的密度和粘度要小于泥页岩型页岩油;以基质型页岩油的密度和粘度最大,其次为裂缝型页岩油,而砂岩夹层型页岩油的密度和粘度则最小。

### 3.4 储集空间的差异性

济阳坳陷泥页岩的储集空间主要为方解石晶间孔、白云石晶间孔、粘土矿物晶间孔和黄铁矿晶间孔等,以及层间裂缝和构造裂缝(图2)。其孔隙直径多为 $1 \sim 15 \mu\text{m}$ ,层间裂缝的宽度多为 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 。研究区的主要岩相包括富(含)有机质纹层状灰质泥岩相、富(含)有机质纹层状泥质灰岩相、富有机质层状灰质泥岩相、富有机质层状泥质灰岩相、富有机质块状泥岩相和含有机质块状灰质泥岩相。不同岩相的储集空间不同,其中基质型和裂缝型页岩油主要赋存于富有机质纹层/层状泥质灰岩相和富有机质纹层/层状灰质泥岩相中,其岩相由方解石和富含有机质泥岩互层组成,有机质含量高,利于形成大量的油气;此外,方解石的矿物晶间孔发育,是重要的储集空间,且脆性矿物含量高,易于形成裂缝,可有效沟通孔隙,形成网络状的储集空间,整体上以富有机质纹层状和层状岩相的孔隙最为发育,物性最好。砂岩夹层型页岩油的储集体主要为深水浊积岩,碳酸盐岩夹层型页岩油主要分布于白云岩中,占碳酸盐岩夹层型页岩油的62.6%,这可能与白云岩化作用过程中形成的大量白云石晶间孔和颗粒边缘孔有关。

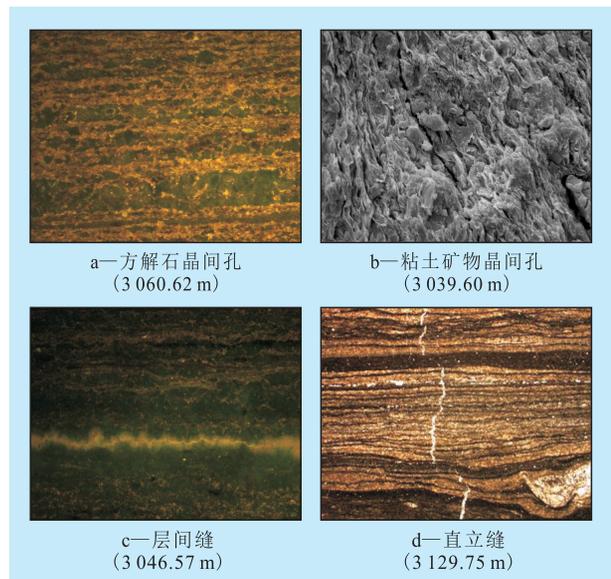


图2 济阳坳陷罗69井泥页岩储集空间类型

### 3.5 赋存状态差异性

济阳坳陷页岩油的赋存状态分为游离态、溶解态和吸附态,以游离态和吸附态为主,亦含有少量溶解态页岩油,而在页岩油探井中仅发现游离态和溶解态页岩油。研究区不同类型页岩油在地层中赋存状态的多样性和差异性,导致其在生产过程中的综合含水率也存在差异。

基质型页岩油的赋存状态为溶解态,其页岩油溶解于地层水中,随着页岩油的开采,综合含水率基本保持不变,为1.6%,以新义深9井和罗19井为代表。裂缝型页岩油的赋存状态为游离态,其开采初期的综合含水率较低,随着页岩油的开采,综合含水率逐渐升高,由4%升至26.7%,以罗42井为代表。夹层型页岩油的赋存状态为游离态,其开采初期不含水,随着页岩油的开采,综合含水率逐渐升高,由0升至30%,以义21井和河54井为代表。

### 3.6 产能的差异性

济阳拗陷页岩油探井的初期产能最高可达127.6 t/d,随后递减较快,大致可分为2~3个生产周期;第1个生产周期初期的油气能量足、产能最高,之后逐渐降低;第2个生产周期初期的产能较高,但衰减较快;第3个生产周期初期的产能和累积产能均较低。整体上,页岩油探井以第1和第2个生产周期的产能为主,可占总产能的80%以上<sup>[21]</sup>。

#### 3.6.1 页岩油类型与产能

不同类型页岩油在空间分布、流体、物性、储集空间和赋存状态的差异性,造成其产能亦存在差异。钻遇裂缝型页岩油的探井具有产能最高、产油量下降较快的特点,其平均产油量为54.1 t/d,平均累积产油量为3 874.2 t。其次为灰岩夹层型和砂岩夹层型页岩油,钻遇夹层型页岩油的探井具有产能高且相对稳定、生产周期相对较长的特点。钻遇基质型页岩油的探井产油量最低,平均产油量仅为1.43 t/d,平均累积产油量为37.9 t(图3)。

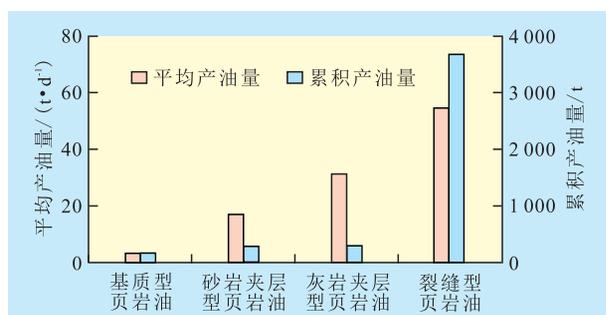


图3 济阳拗陷页岩油探井平均产油量与累积产油量对比

#### 3.6.2 页岩油埋深与产能

获得工业油流的页岩油层埋深一般超过2 200 m,主要位于埋深超过2 800 m的地层中。其产能随埋深的增大呈正态分布,表明泥页岩在低成熟、成熟和高成熟演化阶段皆可形成页岩油,但在成熟演化阶段之后更有利于页岩油的生成。基质型和裂缝型页岩油主要分布于埋深大于3 800 m的地层中,夹层型页岩油的埋深可达4 500 m。

## 4 结束语

济阳拗陷的页岩油可划分为泥页岩型和夹层型页岩油2种类型。其中,泥页岩型页岩油可划分为基质型和裂缝型页岩油2个亚类,夹层型页岩油可划分为砂岩夹层型和碳酸盐岩夹层型页岩油2个亚类。提出了易于操作的泥页岩型页岩油类型划分方法,将研究区裂缝发育系数大于0.2的泥页岩型页岩油确定为裂缝型页岩油,裂缝发育系数小于0.2的泥页岩型页岩油确定为基质型页岩油。不同类型的页岩油在空间分布、流体、物性、储集空间和赋存状态等方面均存在差异,由这些差异造成不同类型页岩油产能的差异。

### 参考文献:

- [1] 张金川,林腊梅,李玉喜,等.页岩油分类与评价[J].现代地质,2003,17(4):466-466.
- [2] 柳波,郭小波,黄志龙,等.页岩油资源潜力预测方法探讨:以三塘湖盆地马朗凹陷芦草沟组页岩油为例[J].中南大学学报:自然科学版,2013,44(4):1 472-1 477.
- [3] 范昌育,王震亮.页岩气富集与高产的地质因素和过程[J].石油实验地质,2010,32(5):465-469.
- [4] Bustin R M. Gas shale tapped for big pay [J]. AAPG Explorer, 2005,26(2):5-7.
- [5] Ronald J H, Daniel M J, John Zumberge, et al. Oil and gas geochemistry and petroleum systems of the Fort Worth Basin [J]. AAPG Bulletin, 2007,91(4):445-473.
- [6] Curtis J B. Fractured shale-gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11):1 921-1 938.
- [7] 关德师,牛嘉玉,郭丽娜.中国非常规油气地质[M].北京:石油工业出版社,1995.
- [8] 徐建永,武爱俊.页岩气发展现状及勘探前景[J].特种油气藏,2010,17(5):1-7.
- [9] 杨一鸣,毛俊莉,李晶晶.页岩气藏地质特征及地质选区评价方法——以辽河拗陷东部凸起为例[J].特种油气藏,2012,19(2):46-49.
- [10] 王永诗,李政,巩建强,等.济阳拗陷页岩油气评价方法——以沾化凹陷罗家地区为例[J].石油学报,2013,34(1):83-91.
- [11] 张金川,金之钧,袁明生.页岩气成藏机理和分布[J].天然气工业,2004,24(7):15-18.
- [12] 郝运轻,谢忠怀,周自立,等.非常规油气勘探领域泥页岩综合分类命名方案探讨[J].油气地质与采收率,2012,19(6):16-19.
- [13] 张金川,徐波,聂海宽,等.中国天然气勘探的两个重要领域[J].天然气工业,2007,27(11):1-11.
- [14] 张善文,张林晔,李政,等.济阳拗陷古近系页岩油气形成条件[J].油气地质与采收率,2012,19(6):1-5.

(下转第14页)