

盆缘非生烃洼陷它源油气运聚方式及勘探意义

——以渤海湾盆地沾化凹陷三合村洼陷为例

彭存仓

(中国石化 胜利油田分公司 石油工程监督中心, 山东 东营 257000)

摘要:盆缘非生烃洼陷的油气勘探受制于较差的油气输导条件,使之往往成为勘探“禁区”。为探索盆缘非生烃洼陷多样化的油气运聚方式,拓展油气勘探空间,以渤海湾盆地沾化凹陷三合村洼陷为例,在系统梳理前人认识基础上,基于钻井、测井、地震及分析测试资料,开展了油气运聚方式分析。结果显示:三合村洼陷存在东营组沉积期和馆陶组-明化镇组沉积期两次油气充注过程,分别对应于早期成藏与中、晚期成藏。早成藏期渤南洼陷与三合村洼陷连为一体,来自渤南洼陷的油气经侧向运聚进入三合村洼陷沙河街组聚集成藏。中、晚期成藏期,渤南洼陷生成油气经“网毯”和“不整合体”复合运聚进入三合村洼陷东营组及其以上地层中聚集成藏。盆缘非生烃洼陷油气运聚方式再认识的理论意义在于拓展了油气勘探空间,在现实上发现了三合村油田。

关键词:负向构造区;油气运聚方式;非生烃洼陷;沾化凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

A model of hydrocarbon migration and accumulation in non-hydrocarbon-generating subsag at basin margins and its exploration significance:

A case study on Sanhecun subsag of Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

Peng Cuncang

(Petroleum Engineering Supervision Center of Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China)

Abstract: The oil and gas exploration in the non-hydrocarbon-generating subsags at basin margins is usually restricted by relatively poor pathway systems, and often regarded as the “forbidden area” for exploration. In order to examine various hydrocarbon migration and accumulation patterns in non-hydrocarbon-generating subsags at basin margins and expand the realm of hydrocarbon exploration, we have taken the Sanhecun subsag of Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin as an example to analyze its hydrocarbon migration and accumulation pattern based on a systematic review of previous knowledge and data including drilling, logging, seismic analysis of Sanhecun subsag of Zhanhua Sag. The results show that Sanhecun subsag has undergone two hydrocarbon charging periods. These are the early-stage hydrocarbon accumulation during the sedimentation of Dongying Formation and the middle-late-stage hydrocarbon accumulation during the sedimentation of Guantao-Minghuazhen Formation. In the early-stage accumulating period, the hydrocarbon-generating Bonan sag was connected to Sanhecun subsag, and hydrocarbon from Bonan sag accumulated in the Shahejie Formation of Sanhecun subsag through lateral migration. In the middle-late-stage accumulating period, through combined migration and accumulation mechanisms of “meshwork-carpet” and “unconformity”, hydrocarbon generated in Bonan sag was charged to the Dongying Formation and shallower strata in the Sanhecun sag. The speculation of hydrocarbon migration and accumulation mechanisms in a non-hydrocarbon-generating subsag at basin margins has a theoretical significance by extending hydrocarbon exploration realm, and has led to the discovery of Sanhecun oilfield in practice.

Key words: negative structural zone, hydrocarbon migration and accumulation model, non-hydrocarbon-generating subsag, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin

收稿日期:2018-10-24;修订日期:2019-05-27。

作者简介:彭存仓(1967—),男,高级工程师,石油勘探与开发。E-mail: pengcuncang_slyt@sinopec.com。

基金项目:中国石化股份公司科技攻关项目(P16005)。

中国陆相断陷盆地中存在着众多的富油洼陷,富油洼陷得益于自身优越的生烃条件,油气发现较为丰富^[1-4]。但富油洼陷周缘往往存在着众多非生烃洼陷^[5-7],此类洼陷多位于大型凹陷的盆缘,埋深浅、热演化程度低,一般自身不具备生烃能力,同时往往与毗邻的富油洼陷之间还存在着正向构造,将其与富油洼陷分隔。在传统的“浮力驱动运移,正向构造运聚”这一思想影响下^[8-9],认为油气运移的方向为正向构造带,盆缘油气勘探工作主要在“网毯油气成藏”体系指导下^[10-13]针对浅层新近系,而对于传统认识下油气难以到达盆缘非生烃洼陷鲜有勘探,故而盆缘非生烃洼陷的油气勘探工作一直未得到重视。随着近期在渤海湾盆地沾化凹陷三合村洼陷部署的罗322井于中生界和沙河街组三段(以下简称“沙三段”)钻探成功^[14-15],打破了这一盆缘非生烃洼陷成藏不利的认识,也引发了对盆缘非生烃洼陷油气运聚方式的探索。由此,本文以沾化凹陷三合村洼陷为例,开展这一盆缘非生烃洼陷的油气运聚方式探讨,揭示它源油气在盆缘负向构造区的运聚规律,以期对类似盆缘非生烃洼陷的油气勘探提供借鉴。

1 区域地质概况

沾化凹陷为济阳拗陷北部的二级构造单元,北断南超,盆地分割性较强,一系列东西与南北向断层将沾化凹陷分隔为6个洼陷,三合村洼陷便是其中之一(图1)。研

究区中、古生界之上发育较为完整的新生界,新生界从下至上依次为古近系沙河街组、东营组,新近系馆陶组、明化镇组以及第四系。三合村洼陷北部紧邻富油的生烃洼陷——渤南洼陷,南部与陈家庄凸起接壤,最大埋深小于2 800 m,自身不具备生烃条件^[16-17],其北部的渤南洼陷与三合村洼陷接壤区域为一宽缓斜坡(图2),并以孤南断层为界与三合村洼陷分隔,渤南洼陷生烃层系的沙四段^[18-20]与三合村洼陷沙一段对接,而三合村洼陷沙三段与渤南洼陷中生界对接,中生界储层呈上倾状(图2)。

2 油气成藏期次

现今地质条件下,来自渤南洼陷的油气难以穿过盆缘负向构造区在三合村洼陷沙三段及其以下的中深部地层中聚集成藏,但据构造演化研究结果显示:分隔渤南洼陷与三合村洼陷的孤南断层形成时期较晚,在东营组沉积期断距还较小^[21],如若存在较早期的油气运移,即是在东营组及其以前发生成藏作用,此时渤南洼陷与三合村洼陷仍连为一体,则油气较为容易到达三合村洼陷沙三段及以下地层中聚集成藏。

大量研究已经表明三合村洼陷沙三段及其以下地层中的原油来自于渤南洼陷烃源岩,而对于渤南洼陷的油气成藏期次也已有较为统一的认识,即存在两次充注、三次成藏过程^[22-24],其中第一次油气充注发生在东

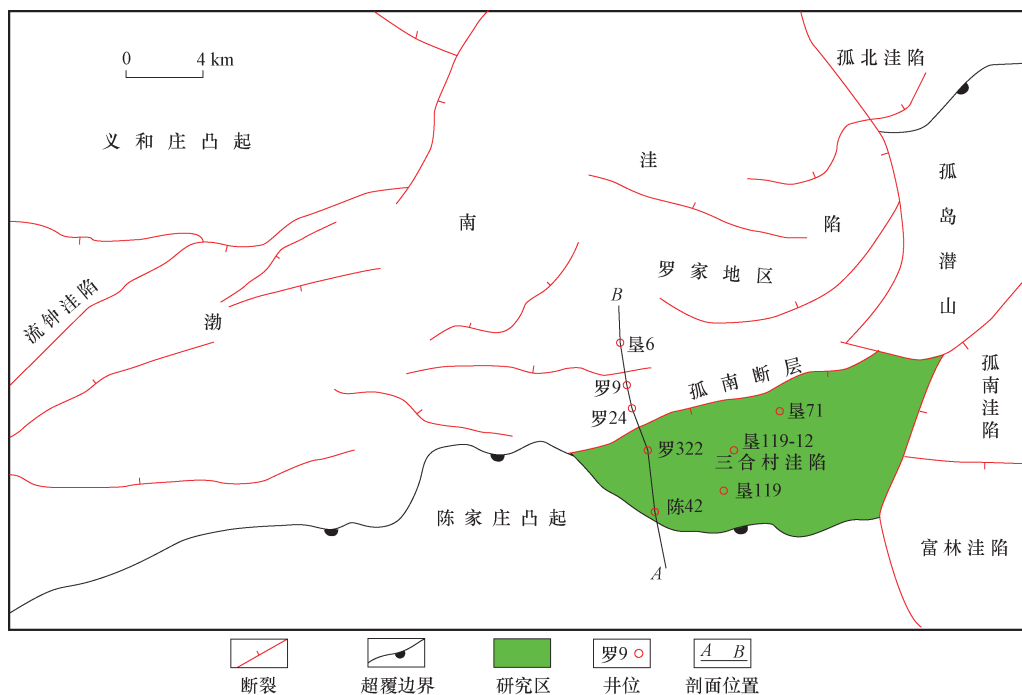


图1 沾化凹陷三合村洼陷构造位置

Fig. 1 The structural location of the Sanhecun subsag in the Zhanhua Sag

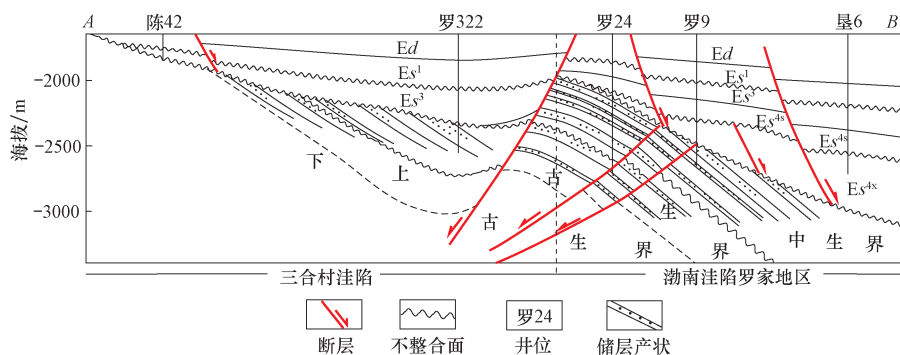


图2 渤南洼陷与三合村洼陷现今地质结构图(剖面位置见图1)

Fig. 2 The geological structure of the Bonan Sag and the Sanhecun subsag (see Fig. 1 for the section location)

Es^{4x}. 沙四下亚段; Es^{4s}. 沙四上亚段; Es³. 沙三段; Es¹. 沙一段; Ed. 东营组

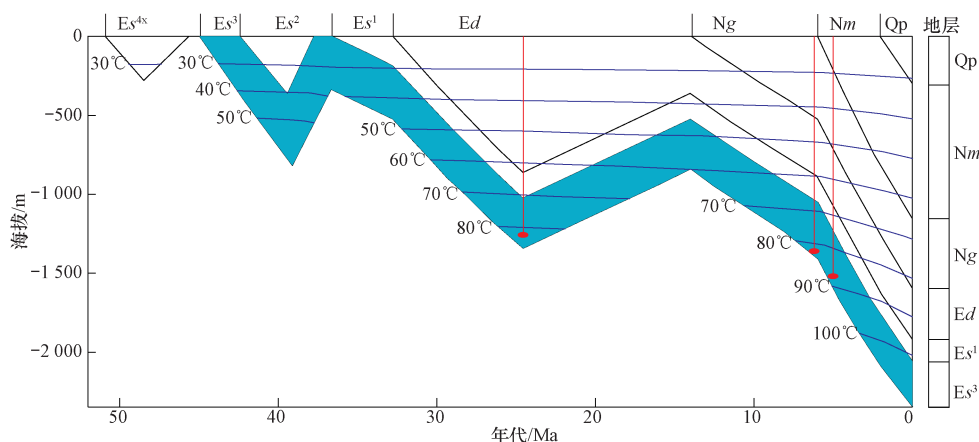


图3 三合村洼陷沙三段油藏形成期次(罗322井沉积埋藏史)

Fig. 3 Charging periods of oil accumulation in the 3rd member of Sanhecun subsag

(a diagram showing the depositional and burial history of Well L322)

Ng. 馆陶组; Nm. 明化镇组; Qp. 第四系; Es¹. 沙一段; Es². 沙二段; Es³. 沙三段; Es^{4x}. 沙四下亚段

营组沉积早期、第二次充注的早期和晚期分别为馆陶组沉积末期以及明化镇组沉积期,在前期三合村洼陷新近系油气勘探过程中,新近系油气为渤南洼陷烃源岩中、晚期生排烃成藏所致,这一认识已得到广大学者认同。而对于三合村洼陷近期在沙三段及其以下地层中发现的原油成藏期次尚未有定论,目前的地质结构不支持中、晚期成藏运聚规律,是否为早期充注形成?由此本文分别选取了三合村洼陷沙三段和新近系馆陶组含油的岩心样品,对其进行了流体包裹体的分析测试。结果表明:三合村洼陷罗322井沙三段样品流体包裹体均一温度介于80~90℃,投点到沉积埋藏史图上发现成藏期次具有多解性,分别对应于东营组沉积中早期和馆陶组沉积晚期—明化镇组沉积初期(图3),分析认为此两个时期渤南洼陷沙四段烃源岩埋深差异较大,热演化程度不同,原油成熟度应存在差异,由此对原油成熟度开展了相关分析,最终发现原油样品Ts/Tm、姥鲛烷/植烷、石蜡指数、庚烷值等可反应原油成熟度的指标都较

低^[25],总体反映出原油成熟度偏低的特点,因此认为三合村洼陷沙三段油藏应属于早期成藏。结合新近系原油成藏期次的已有认识,三合村洼陷的油气成藏可总结为早成藏期的沙三段及以下地层油气聚集,中、晚期成藏期为新近系油气聚集两种油气聚集方式。

3 不同成藏期下的油气运聚方式

3.1 早成藏期统一砂体侧向运聚

现今地质条件下,孤南断层完全断开了三合村洼陷沙三段与渤南洼陷新生界(图2),三合村洼陷西侧扇体对接北部渤南洼陷致密中生界,来自于渤南洼陷的油气难以运移至三合村洼陷(图4a)。但通过对孤南断层构造演化的恢复,发现孤南断层在东营组沉积期活动较弱,尤其是其西侧断距甚小,不足以断开缓坡扇体,东营组沉积期断层两侧圈闭统一(图4b),这一时期来自渤南洼陷的油气可沿缓坡带统一砂体进行侧

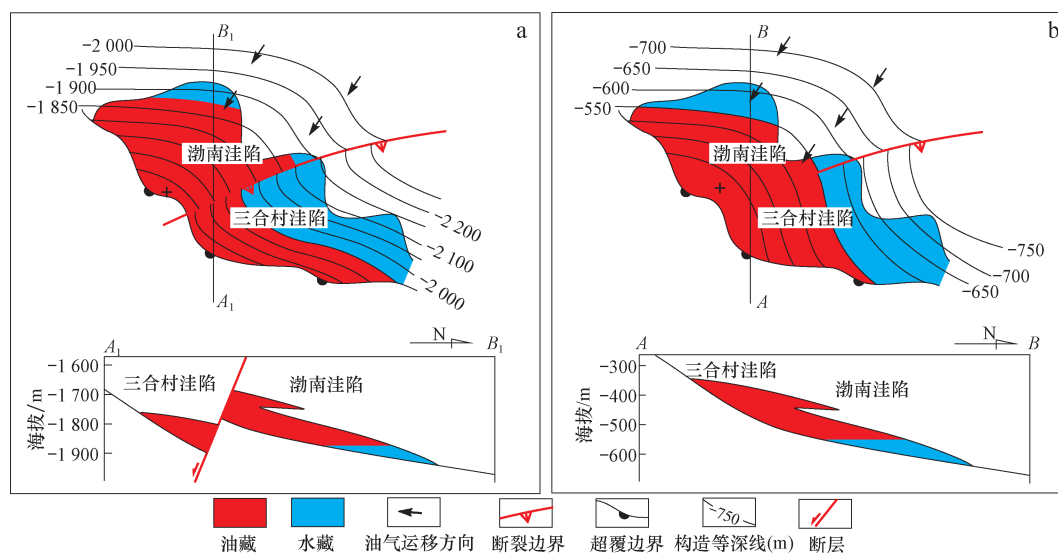


图4 沾化凹陷三合村洼陷早成藏期侧向运聚模式

Fig. 4 The lateral migration and accumulation pattern of the early accumulation period in the Sanheci subsag of the Zhanhua Sag

a. 现今; b. 东营组沉积期

向运移,穿过现今地质结构上的负向构造区——三合村洼陷深洼带,在三合村洼陷南部缓坡带形成有效的油气聚集,罗322等井正是钻遇该套油层。

3.2 中、晚成藏期复合运聚

三合村洼陷新近系以及部分东营组中的油气发现属于中、晚期成藏,此类油藏的形成存在着多种油气运聚方式。

3.2.1 “网毯”式运聚

网毯式油气成藏理论提出以来,有效指导了济阳坳陷新近系馆陶组河道砂体的油气勘探,其作为油气运聚的一种重要方式,对于三合村洼陷而言,油气自渤南洼陷烃源岩生成后首先通过古近系中切入烃源岩的断裂网向洼陷上部、边部运移,古近系断裂网构成了网毯式运聚体系的下部油源通道网,部分渤南洼陷烃源岩生成的油气通过断裂输导向南部三合村洼陷一侧运移,进入三合村洼陷新近系底部辫状河沉积形成的厚层砂砾岩体中,砂砾岩体连通性好、分布范围广,构成了网毯式运聚体系中中部仓储层,在中晚期成藏的油气幕式充注下,油气沿断裂首先充注仓储层,而后通过沟通仓储层的断裂进入新近系中上部曲流河沉积砂体中,并在断裂两侧的砂体中聚集成藏,新近系中上部断裂与砂体的交织组合构成了网毯式运聚体系的上部油气聚集网。由此可见,网毯式油气成藏理论不但为富油洼陷内潜山披覆构造油藏的勘探指明了方向,其更大的石油地质意义在于突破了油气在生烃洼陷自身正向构造中运聚的传统观念,使得盆缘非生烃洼陷成为

重要的勘探对象。在这一理论指导下,沾化凹陷包括三合村洼陷在内的多个盆缘非生烃洼陷新近系中都有油气发现,网毯油气运聚方式在盆缘非生烃洼陷新近系形成的油气藏主要包括构造岩性油气藏和岩性油气藏。同时,姜素华^[26]等把这种油气运聚方式用于东营凹陷古近系的成藏分析,对东营三角洲的油气运聚方式给出了多样化的解释,有效拓展了勘探空间。

3.2.2 “不整合体”复合运聚

有关不整合体构建样式、结构类型划分等在油气成藏中的作用已有大量研究成果^[27-28]。众多学者已认识到研究不整合面控制油气运聚,需要加强不整合面上下砂体、断层的综合分析,但总结与不整合面相关的油气运聚模式,并分析其在盆缘非生烃洼陷的负向构造区油气运聚中的作用还鲜有文献报道。

沾化凹陷三合村洼陷古近系东营组属于二级层序的高位域^[29],其上与新近系馆陶组呈角度不整合接触,东营组沉积期发育远源三角洲沉积体,此类高建设性的三角洲前缘发育大型前积朵叶体,朵叶体与三角洲平原呈高角度斜交,当后期地层抬升剥蚀后,三角洲前缘的大型前积朵叶体仍与东营组顶部区域性不整合面大角度斜交,尽管经历后期负向构造区沉积拗曲变形,但此类三角洲朵叶体仍未变形为负向构造,而是倾向北部孤南断层(图5)。孤南断层为南倾断层,与北倾的三角洲前缘朵叶体组合构成了“Y”型输导体系(图5),又或孤南断层北侧渤南洼陷沙河街组油藏与断层南侧三合村洼陷东营组砂体直接侧向对接形成“一”型输导体系(图5),孤南断层两盘砂体的对接使

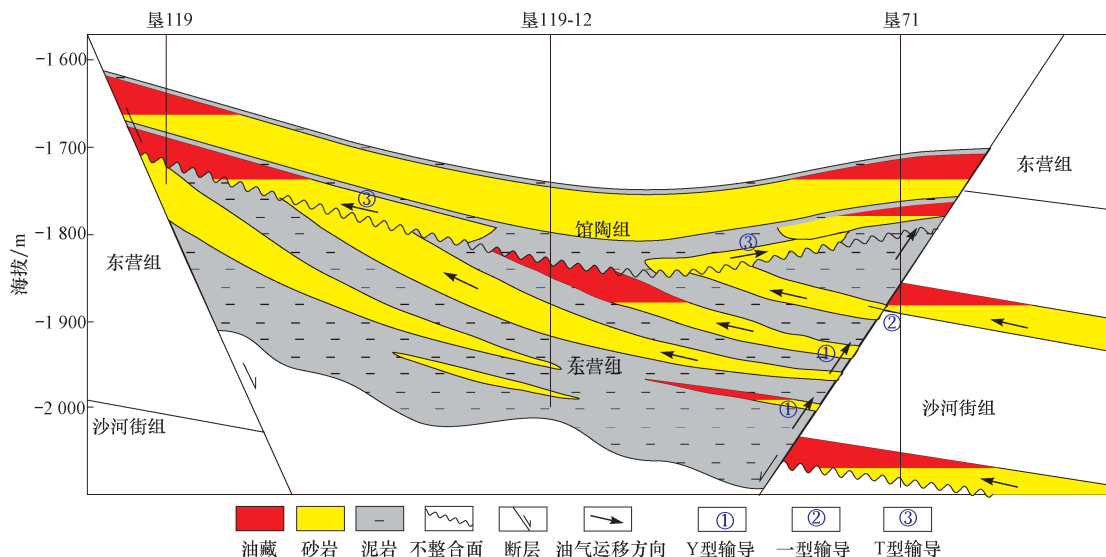


图5 盆缘负向构造区运聚模式(井位位置见图1)

Fig.5 The hydrocarbon migration and accumulation pattern in the negative structural zone at the basin margin (see Fig.1 for the well location)

得油气穿过断层直接进入三合村洼陷东营组三角洲砂体中进行横向运移,在横向运移的过程中油气在浮力作用下不断向高部位聚集,直至东营组顶部不整合面,从而实现了油气穿过负向构造运移。油气到达东营组与馆陶组之间的区域不整合面之后,一方面可通过不整合面进行短距离的侧向运移,另一方面可通过不整合面上覆的馆陶组河道砂体进行较长距离侧向运移,从而使的东营组三角洲前缘砂体与上部不整合面及上覆馆陶组河道砂体构成了“T”型输导体系(图5),通过该类型输导体系下油气进一步向缓坡带和凸起带运移。笔者将这种以不整合面为中心的复合输导体系运聚油气的方式称之为“不整合体”复合运聚,此类运聚方式是油气穿过负向构造区运聚的重要方式。当然对于某一盆缘非生烃洼陷而言,“Y”型、“一”型、“T”型输导体系并不一定同时存在,“Y”型输导体系发育区油气在边界断层中进行纵向输导,可以在靠近断层的各种圈闭聚集成藏,一般为构造类油藏,存在部分地层剥蚀不整合油藏(图5);“一”型输导体系发育区往往在不整合面之上储集体中形成油气聚集,油藏类型多样,包含岩性油藏与构造油藏;“T”型输导体系发育区油气往往运聚到缓坡凸起边缘形成岩性地层成藏(图5)。

不整合面之下的三角洲砂体剥蚀程度不同,形成的油藏类型和运聚状态也存在较大差异。在剥蚀量相对较小的区带,三角洲前缘砂体连续性好,油气在砂体之中的侧向运移较为顺畅,除靠近油源断层的浊积砂体形成砂岩上倾尖灭油藏外(图5),油气大都经历较长距离运移,聚集在有断层切割东营组三角洲砂体形成的构造圈闭中,或运移至区域性不整合之上的新近系多类型圈闭中;在剥蚀量较大的区带,三角洲前缘朵

叶体前积层的连续砂体部分往往被剥蚀殆尽,各层朵叶体之间连续性差,油气侧向运移困难,往往沿砂体往高部位运移,在不整合面之上存在泥岩遮挡条件下有利于在东营组中形成地层剥蚀油藏(图5)。

4 勘探意义

4.1 理论意义

盆缘非生烃洼陷的油气勘探受制于它源油气的输导,在缺乏有利输导条件下,非生烃洼陷这一盆缘的负向构造区往往成为勘探“禁区”。随着近年来“网毯”式输导模式的提出,济阳坳陷盆缘的非生烃洼陷浅部地层——新近系油气勘探取得了一定成果,但中、深部地层一直缺乏突破。但在早期成藏再认识基础上,认为早成藏期油气输导的地质条件可能异于现今地质条件,通过恢复早成藏期的输导条件,有望发现包括盆缘非生烃洼陷在内的其它负向构造带中有利油气勘探区,拓展勘探空间。

此外,“不整合体”复合运聚的提出为济阳坳陷盆缘非生烃洼陷东营组的油气勘探点亮明灯,此类非生烃洼陷的东营组多与生烃洼陷的沙河街组以断层为分隔,生烃洼陷油气可通过沙河街组中的输导路径运移至边界断层处,与之相接的非生烃洼陷东营组是油气再次运移的指向区,东营组普遍发育三角洲砂体,多期次的砂体横、纵向上的叠置关系较为复杂,这其中不乏一些顶部被剥蚀、底部倾向生油洼陷的三角洲前缘朵叶状砂体,来自生烃洼陷的油气可顺利进入朵叶状砂体中并向其高部位运移,直至上部不整合面处,以不整

合面为关键界面,首先其上部存在馆陶组泛滥平原泥岩时,可直接封盖下部三角洲砂体,在东营组顶部形成一系列地层不整合遮挡油气藏,其次不整合面之上若存在馆陶组河道砂体时,不整合面可起到油气中转作用,以此为节点,油气转换在上覆河道砂体中侧向运移,从而也可在新近系中形成多类型油气藏。

4.2 现实意义

盆缘非生烃洼陷油气运移方式的指导认识了三合村洼陷的勘探工作。首先,近年来在“网毯”式和“不整合体”复合运聚思想指导下,开展了以馆陶组为主力目的层的油气勘探工作,相继部署了3口探井,在馆陶组都钻遇油气显示,但由于微幅构造背景上的河道砂体油气充满度低,试采效果不理想,没有形成规模性、可动用储量;但在三合村洼陷沙三段及其以下中深部地层勘探过程中,通过早期成藏油气输导规律的再认识,率先在三合村洼陷南部缓坡带开展了全面的油气勘探部署,针对沙三段、沙四段部署的7口探井、8口滚动井均见大套油层,取得了良好的勘探效果,共计上报控制和预测石油地质储量4000余万吨,有效指导了胜利油田第81个油田——三合村油田的发现。

5 结论

1) 三合村洼陷是盆缘非生烃洼陷的典型代表,其油气成藏分为早成藏期沙三段及其以下地层油气聚集,中晚成藏期新近系油气聚集两种油气聚集方式。

2) 早成藏期,三合村洼陷与渤南洼陷连为一体,渤南洼陷生成油气通过砂体侧向运移至三合村沙河街组中聚集成藏;中、晚成藏期,在“网毯”和“不整合体”复合运聚方式下,渤南洼陷生成油气通过边界断层、砂体和不整合面进行复式运移,在三合村洼陷东营组及以上馆陶组中聚集成藏。

3) 盆缘非生烃洼陷油气运聚方式再认识的理论意义在于拓展油气勘探空间,现实意义在于发现了胜利油田第81个油田——三合村油田。

参 考 文 献

- [1] 钟锴,朱伟林,薛永安,等.渤海海域盆地石油地质条件与大中型油气田分布特征[J].石油与天然气地质,2019,40(1):92-100. Zhong Kai, Zhu Weilin, Xue Yong'an, et al. Petroleum geologic conditions and distributional features of large and medium sized oil and gas fields in Bohai Sea Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1): 92-100.
- [2] 王鑫,蒋有录,刘华,等.济阳坳陷生烃洼陷沉降类型及其油气地质意义[J].特种油气藏,2017,24(2):24-29.

- Wang Xin, Jiang Youlu, Liu Hua, et al. Settlement types of hydrocarbon-generating sag in the Jiyang Depression and their Geologic significance for hydrocarbon accumulations[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2017, 24(2): 24-29.
- [3] 包友书,张林晔,张金功,等.渤海湾盆地东营凹陷古近系页岩油可动性影响因素[J].石油与天然气地质,2016,37(2):408-414. Bao Youshu, Zhang Linye, Zhang Jingong, et al. Factors influencing mobility of Paleogene shale oil in Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 408-414.
- [4] 王永诗,王勇,郝雪峰,等.深层复杂储集体优质储层形成机理与油气成藏——以济阳坳陷东营凹陷古近系为例[J].石油与天然气地质,2016,37(4):490-498. Wang Yongshi, Wang Yong, Hao Xuefeng, et al. Genetic mechanism and hydrocarbon accumulation of quality reservoir in deep and complicated reservoir rocks: A case from the Palaeogene in Dongying Sag, Jiyang Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4): 490-498.
- [5] 李豫源,查明,高长海,等.济阳坳陷三合村洼陷浅层天然气成因分析[J].中国矿业大学学报,2017,46(2):388-396. Li Yuyuan, Zha Ming, Gao Changhai, et al. The origin of shallow-buried natural gas in Sanhecun sag Jiyang depression[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(2): 388-396.
- [6] 李丕龙,金之钧,张善文,等.济阳坳陷油气勘探现状及主要研究进展[J].石油勘探与开发,2003,30(3):1-4. Li Pilong, Jin Zhijun, Zhang Shanwen, et al. The present research status and progress of petroleum exploration in the Jiyang Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 1-4.
- [7] 吴智平,李伟,任拥军,等.济阳坳陷中生代盆地演化及其与新生代盆地叠合关系探讨[J].地质学报,2003,77(2):280-286. Wu Zhiping, Li Wei, Ren Yongjun, et al. Basin evolution in the Mesozoic and Superposition of Cenozoic Basin in the Area of the Jiyang Depression[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(2): 280-286.
- [8] 王浩然,付广,宿碧霖,等.下生上储式油气运移优势路径确定方法及其应用[J].石油与天然气地质,2018,39(6):1237-1245. Wang Haoran, Fu Guang, Su Bilin, et al. A method to determine preferential pathways for hydrocarbon migration in lower source rock and upper reservoir combination and its application[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(6): 1237-1245.
- [9] 庞小军,王清斌,崔海忠,等.渤中凹陷西部北缘生长期边界断层活动对油气富集的影响[J].西安石油大学学报(自然科学版),2016,159(4):38-43. Pang Xiaojun, Wang Qingbin, Cui Haizhong, et al. Effect of boundary fault activities on oil and gas accumulation in the Northern Margin of the West of Bozhong Sag in hydrocarbon generation period[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2016, 159(4): 38-43.
- [10] 田立新,王冰洁.渤海海域辽中凹陷LD油田油源断层运移能力定量评价及运移模式[J].石油与天然气地质,2018,39(3):567-577. Tian Lixin, Wang Bingjie. Quantitative evaluation of source tapping fault for oil migration and establishment of its migration model in LD oilfield in the Liaozhong Sag, Bohai Sea[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3): 567-577.
- [11] 江同文,徐朝晖,徐怀民,等.塔中低凸起石炭系网毯式油气成藏体系结构及输导体系[J].石油科学通报,2017,2(2):176-186. Jiang Tongwen, Xu Zhaohui, Xu Huaimin, et al. Meshwork-carpet

- structural petroleum accumulation and transportation systems of the Carboniferous in the central Tarim Uplift[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2017, 2(2): 176–186.
- [12] 钟怡江, 陈洪德, 徐长贵, 等. 辽东湾坳陷新近系馆陶组浅水三角洲的发现及其油气勘探意义[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(3): 499–507.
- Zhong Yijiang, Chen Hongde, Xu Changgui, et al. Discovery of shallow-water delta in the Neogene Guantao Formation in the Liaodong Bay Depression and its significance for oil and gas exploration[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(3): 499–507.
- [13] 张善文, 王永诗, 石砥石, 等. 网毯式油气成藏体系—以济阳坳陷新近系为例[J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(1): 1–10.
- Zhang Shanwen, Wang Yongshi, Shi Dishu, et al. Meshwork-carpet type oil and gas pool-forming system—Taking Neogene of Jiyang depression as an example[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(1): 1–10.
- [14] 孟涛, 邱隆伟, 王永诗, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷三合村洼陷油气成藏研究[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(5): 603–609.
- Meng Tao, Qiu Longwei, Wang Yongshi, et al. Hydrocarbon accumulation in Sanhecut Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(5): 603–609.
- [15] 张波. 济阳坳陷三合村油田沙三下亚段油气成藏机理[J]. *新疆石油地质*, 2017, 38(1): 22–26.
- Zhang Bo. Hydrocarbon accumulation mechanism of Lower Es³ in Sanhecut Oilfield, Jiyang Depression[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2017, 38(1): 22–26.
- [16] 方旭庆. 济阳坳陷三合村洼陷油气运移与聚集规律[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 30(3): 36–40.
- Fuang Xuqing. Hydrocarbon migration and accumulation patterns in Sanhecut Sag of Jiyang Depression[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition)*, 2015, 30(3): 36–40.
- [17] 王秀红, 张守春, 李政, 等. 沾化凹陷三合村地区油气来源及运移方向[J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(1): 47–51.
- Wang Xiuhong, Zhang Shouchun, Li Zheng, et al. Study on hydrocarbon sources and migration pathways in Sanhecut area of Zhanhua sag[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(1): 47–51.
- [18] 刘鹏. 渤南洼陷古近系早期成藏作用再认识及其地质意义[J]. *沉积学报*, 2017, 35(1): 173–181.
- Liu Peng. Geological significance of re-recognition on early reservoir forming of Bonan Sag Paleogene[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(1): 173–181.
- [19] 林红梅, 程付启, 王永诗, 等. 渤海湾盆地渤南洼陷沙四段油气多期充注的流体包裹体证据[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(2): 209–218.
- Lin Hongmei, Cheng Fuqi, Wang Yongshi, et al. Fluid inclusion evidence for multi-period oil charge Es⁴ in Bonan Sub-sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(2): 209–218.
- [20] 彭丽, 陆永潮, 彭鹏, 等. 渤海湾盆地渤南洼陷沙三下亚段泥页岩非均质性特征及演化模式——以罗69井为例[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(2): 219–229.
- Peng Li, Lu Yongchao, Peng Peng, et al. Heterogeneity and evolution model of the Lower Shahejie Member 3 mud-shale in the Bonan Sub-sag, Bohai Bay Basin: An example from Well Luo 69[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(2): 219–229.
- [21] 张波, 吴智平, 王永诗, 等. 沾化凹陷三合村洼陷油气多期成藏过程研究[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(2): 39–48.
- Zhang Bo, Wu Zhiping, Wang Yongshi, et al. Study on multi-period hydrocarbon accumulation process in Sanhecut sub-sag of Zhanhua sag[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2017, 41(2): 39–48.
- [22] 李倩倩, 刘鹏. 渤南洼陷罗家垦西地区沙三段稠油的形成与分布[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 165(04): 39–45.
- Li Qianqian, Liu Peng. Formation and distribution of heavy oil of the third Member of Shahejie Formation in Luojiakenxi Area of Bonan Sag[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition)*, 2017, 165(04): 39–45.
- [23] 卢浩, 蒋有录, 刘华, 等. 沾化凹陷渤南洼陷油气成藏期分析[J]. *油气地质与采收率*, 2012, 19(2): 5–9.
- Lu Hao, Jiang Youlu, Liu Hua, et al. Study on formation stages of oil-gas reservoirs in Bonan subsag, Zhanhua sag[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(2): 5–8.
- [24] 徐兴友, 徐国盛, 秦润森. 沾化凹陷渤南洼陷沙四段油气成藏研究[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2008, 35(2): 113–120.
- Xu Xingyou, Xu Guosheng, Qin Runsen. Study on hydrocarbon migration and accumulation of Member 4 of Shahejie Formation in Bonan sag, Zhanhua depression, China[J]. *Journal of Chengdu University of technology(Science & Technology Edition)*, 2008, 35(2): 113–120.
- [25] 宋国奇, 刘华, 蒋有录, 等. 沾化凹陷渤南洼陷沙河街组原油成因类型及分布特征[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(1): 33–39.
- Song Guoqi, Liu Hua, Jiang Youlu, et al. Genetic types and distribution characteristics of crude oils from Shahejie Formation in Bonan Sub-sag, Zhanhua Sag, Jiyang Depression[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(1): 33–39.
- [26] 姜素华, 李涛, 姜雨. 东营凹陷网毯式油气成藏体系油气运聚探讨[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2007, 31(5): 12–17.
- Jiang Suhua, Li Tao, Jiang Yu. Discussion on petroleum migrating and accumulating of meshwork-carpet type oil and gas pool-forming system in Dongying depression[J]. *China university of Petroleum*, 2007, 31(5): 12–17.
- [27] 宋国奇, 卓勤功, 孙莉. 济阳坳陷第三系不整合油气藏运聚成藏模式[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(6): 716–720.
- Song Guoqi, Zhuo Qingong, Sun Li. Hydrocarbon migration and accumulation Patterns in the Tertiary unconformity reservoirs of the Jiyang depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(6): 716–720.
- [28] 范婕, 蒋有录, 崔小君, 贾光华. 林樊家低凸起带输导体系对油气运聚的控制作用[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 166(5): 14–21.
- Fan Jie, Jiang Youlu, Cui Xiaojun, et al. Controlling effect of hydrocarbon migration systems on hydrocarbon migration and accumulation in Linfanjia Low-uplift Zone[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition)*, 2017, 166(5): 14–21.
- [29] 宋国奇, 王永诗, 程付启, 等. 济阳坳陷古近系二级层序界面厘定及其石油地质意义[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(5): 1–7.
- Song Guoqi, Wang Yongshi, Cheng Fuqi, et al. Ascertaining secondary-order sequence of Palaeogene in Jiyang depression and its petroleum geological significance[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(5): 1–7.