

南堡凹陷断裂对油气运聚成藏的控制作用

孙永河¹,赵博¹,董月霞²,郑晓凤²,胡明¹

(1. 东北石油大学 地球科学学院,黑龙江 大庆 163318; 2. 中国石油 冀东油田分公司,河北 唐山 063004)

摘要:为了揭示南堡凹陷断裂对油气分布规律的影响,以断裂为主线,结合成藏地质条件,系统研究了断裂对油气运聚成藏与分布的控制作用,并通过建立断裂输导模式指出了有利勘探方向。研究表明,地垒或半地垒、背斜负花状组合和背斜断阶等正向局部构造是油气富集的有利部位。东营组二段盖层断接厚度小于90~95 m时,断裂对盖层的破坏程度大,油气可跨越盖层在中、浅层聚集成藏;且盖层段断裂密度越大,油气穿越盖层富集的层位越浅。V型和VI型断裂为油源断层,且两条或多条交叉断裂是油气垂向运移的优势通道,并选择砂地比大于20%的储层中发生断储分流运移。充注到断层圈闭中的油气在断层古、今封闭性均较强下才能大规模聚集和保存。与I型、II型和IV型断裂相关且高砂地比储层的正向局部构造,以及与V型和VI型断裂相关且东营组二段盖层断接厚度大于90~95 m的高砂地比储层的正向局部构造,是深层油气的有利勘探方向。与V型和VI型断裂相关且东营组二段盖层断接厚度小于90~95 m、高砂地比储层以及断层侧向封闭性好的正向局部构造是中、浅层油气的有利勘探方向。

关键词:砂地比;断接厚度;断裂组合;正向局部构造;断层侧向封闭性;油气富集;南堡凹陷

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Control of faults on hydrocarbon migration and accumulation in the Nanpu Sag

Sun Yonghe¹, Zhao Bo¹, Dong Yuexia², Zheng Xiaofeng², Hu Ming¹

(1. College of Geosciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China;

2. Jidong Oilfield Company, PetroChina, Tangshan, Hebei 063004, China)

Abstract: This paper systematically studies the control of faults on hydrocarbon migration and accumulation in Nanpu sag and predicts favorable exploration targets through establishing fault transporting models. Research shows that positive local structures such as horst/half horst, negative flower structure combinations of anticline, fault terrace belt of anticline and so on are the favorable for hydrocarbon accumulation. When the juxtaposition thickness of faults in Ed² cap rock is less than 90-95 m, hydrocarbons can penetrate the cap rock and accumulate in the middle-shallow layer. The greater the fault density is, the shallower the hydrocarbon accumulation is. Type V and VI faults are source rock-rooted faults and two or more intersected faults are the preponderant pathways of vertical hydrocarbon migration, and some hydrocarbons may migrate along reservoirs with a net-to-gross ratio of over 20%. The hydrocarbons charging into the fault traps can accumulate and be preserved in large scale only when both the palaeo and current sealing ability of faults are strong enough. Favorable deep exploration targets include the local positive structures related with type I, II and IV faults and reservoirs with high net-to-gross ratio as well as local positive structures related with type V and VI faults and reservoirs having a juxtaposition thickness of Ed₂ cap rock over 90-95 m and high net-to-gross ratio. While the shallow-to-moderate favorable exploration targets include positive local structures related with type V and VI faults and reservoirs having a juxtaposition thickness of Ed² cap rock less than 90-95 m and high net-to-gross ratio as well as that with good lateral fault sealing ability.

Key words: net-to-gross ratio, juxtaposition thickness, fault combination, positive local structure, lateral fault sealing ability, hydrocarbon enrichment, Nanpu Sag

1 地质概况

南堡凹陷位于渤海湾盆地北东走向的黄骅-东明

走滑断裂带^[1]和北西走向的北京-蓬莱断裂带^[2]交汇区的内侧,是在中、新生代叠合盆地基础上经过多裂陷作用演化而来的新生代裂陷盆地^[3]。北面边界为西南庄断层和柏各庄断层,分别属于上述两条区域走滑

收稿日期:2013-01-10;修订日期:2013-07-09。

第一作者简介:孙永河(1979—),男,博士、副教授,含油气盆地构造及控藏作用分析。E-mail:syh79218@126.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41202146);国家基础研究发展计划(“973”计划)项目(2012CB723102)。

断裂带的要素;南面与沙垒田凸起呈断超式接触^[4]。南堡凹陷涵盖陆地和滩海两部分领域,断裂在晚期扭动变形下^[5]形成了北东走向和北西走向展布的 11 个断裂构造带,其间已发现 10 个油气田(图 1)。南堡凹陷垂向上发育四大构造层^[6],分别为由前古近系(AnE)构成的基底构造层,由古近系沙(沙河街组)三段(Es^3)构成的断陷构造层,由古近系沙二段(Es^2)、沙一段(Es^1)、东(东营组)三段(Ed^3)、东二段(Ed^2)和一段(Ed^1)构成的断-坳构造层,及由新近系馆陶组(Ng)、明(明化镇组)下段(Nm^F)、明上段(Nm^L)和第四系平原组(Qp)构成的坳陷构造层^[7-8]。其中,沙三段和沙一段—东三段是主要的烃源岩层^[9-11],沙三段、东二段和明上段—第四系是 3 套区域性盖层。经过东营末期和明上段—第四系沉积时期的运聚成藏^[12],受区域性盖层垂直阻烃作用,形成 3 套油气系统^[13](图 2a),即沙三段为烃源岩、前古近系基岩潜山为储集层、沙三段为盖层的潜山油气系统,沙三段和沙一段—东三段为烃源岩、沙三段—东三段为储集层、东二段为盖层的深层油气系统,及沙三段和沙一段—东三段为烃源岩、东一段—明下段为储集层、明上段—第四系为盖层的中-浅层油气系统。不同油气系统彼此

分割却又受断裂沟通。研究表明,南堡凹陷断裂在沙三段沉积时期(早期)发生强烈伸展变形,东一段沉积末期(中期)发生强烈走滑伸展变形,在明上段沉积末期—第四纪时期(晚期)发生强烈张扭变形^[14-15]。据此从剖面上可将断裂划分 6 种类型^[16](图 2),分别为早期伸展断裂(I型)、中期走滑伸展断裂(II型)、晚期张扭断裂(III型)、早期伸展-中期走滑伸展断裂(IV型)、中期走滑伸展-晚期张扭断裂(V型)和早期伸展-中期走滑伸展-晚期张扭断裂(VI型)。受不同类型断裂多期活动的垂向沟通影响,不同富油构造带油气垂向上围绕不同盖层上、下富集程度的差异较大(图 2a)。平面上已发现的油气虽围绕生烃洼陷(主要是林雀次凹和拾场次凹)呈环状分布特征,但与生烃洼陷具有相似分布关系构造带的油气富集程度也存在较大差异。为了揭示油气剖面、平面的复杂分布规律,本文在三维地震解释和井资料基础上,针对中-浅层和深层油气系统以断裂为主线,系统剖析断裂对油气运聚成藏和分布规律的控制作用,建立断裂控藏模式并指出有利的勘探方向,这对南堡凹陷甚至具有相似地质条件的渤海湾盆地其它油气富集区的下一步油气勘探具有重要的指导意义。

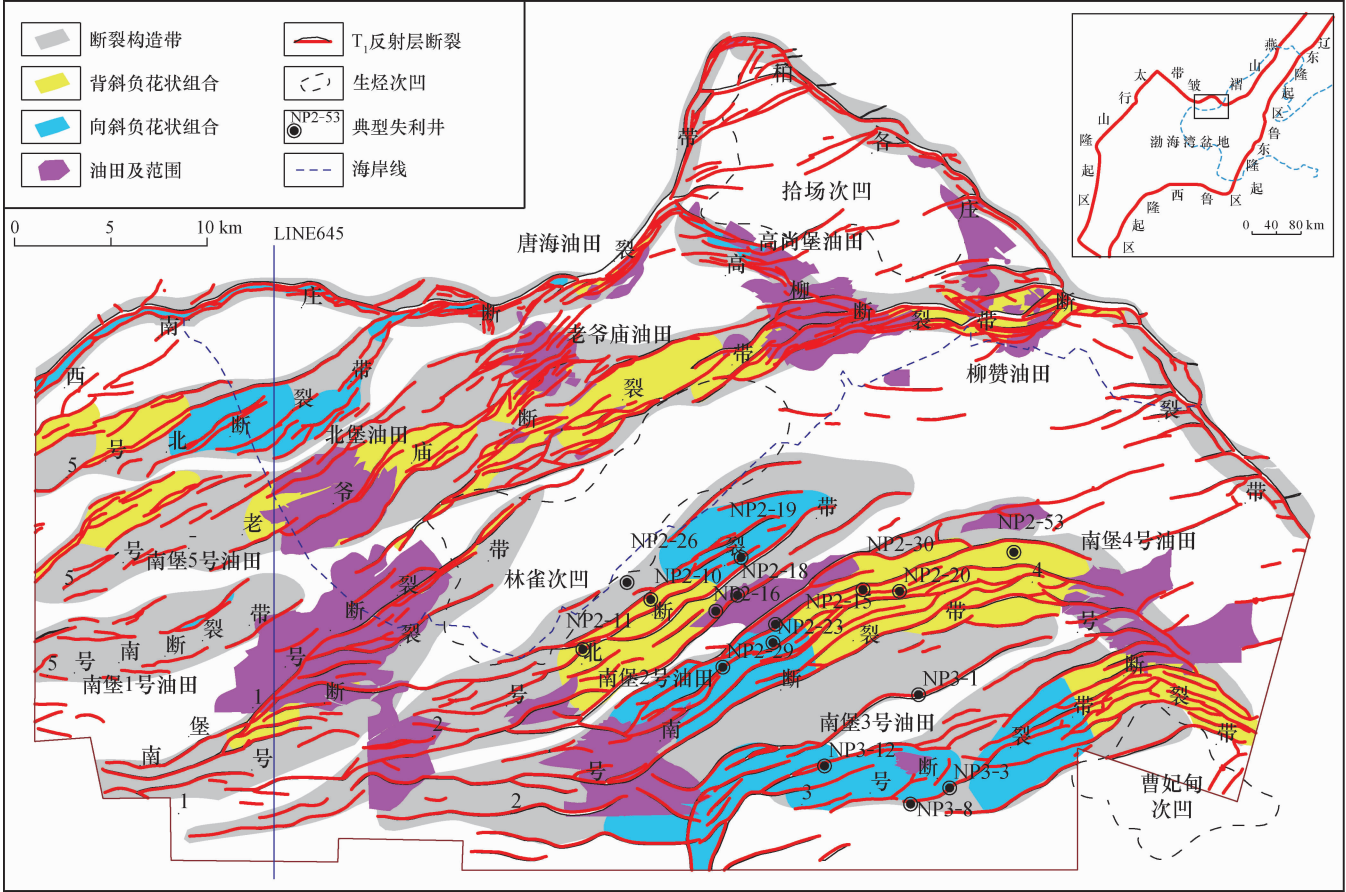


图1 南堡凹陷构造位置及生烃洼陷、构造单元、断裂密集带与油气分布关系

Fig. 1 Structural location of the Nanpu Sag and relations of hydrocarbon kitchen, tectonic units and fault dense zones to vertical hydrocarbon distribution

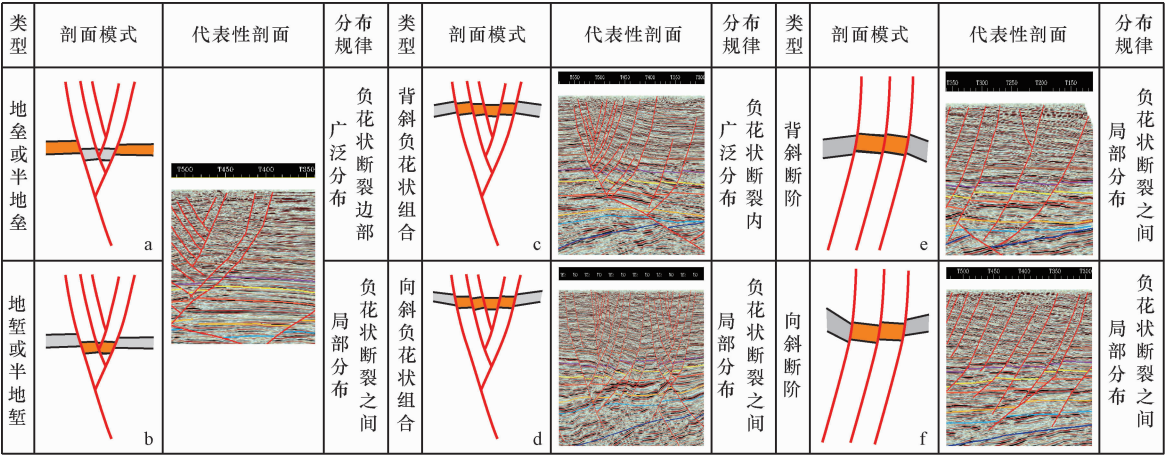


图3 南堡凹陷局部构造剖面形态模式

Fig.3 Profile morphology mode of local structures in the Nanpu Sag

3 断裂活动性与油气垂向运移规律

3.1 断裂-盖层耦合与油气垂向充注层位

油气的垂向分布层位主要受控于区域性盖层的垂向阻烃作用^[3],但断裂活动往往破坏了盖层的完整性而使油气的分布层位较为复杂。盖层的破坏程度主要取决于盖层段断裂的规模^[19],断裂规模越大,即断距越大,盖层被错断的程度越高,断层两侧盖层对接的厚度越小,从而使盖层垂向阻烃能力变弱,油气便容易穿越盖层向更浅部地层运移。为了表征盖层破坏程度与油气聚集层位的关系,统计计算了盖层的断接厚度(断

接厚度=盖层厚度-断距,若为负值代表盖层被完全错开)。统计42口井的东二段盖层断接厚度表明(图4),当断接厚度大于90~95 m,油气主要聚集在东二段区域性盖层之下的储集层中;而断接厚度小于90~95 m,盖层段断距较大,盖层被破坏程度较大,失去垂向有效阻烃作用,使烃源岩生成排出的油气或深层先期聚集的油气穿越东二段盖层向中、浅层中运移并聚集成藏。对于明上段一第四系盖层,经历断层晚期活动,活动断裂活动规模小,断距一般100~150 m,而自身厚度约800~1 000 m,故断接厚度较大,而且埋藏浅、塑性强,其破坏程度低,可有效垂向阻烃。南堡凹陷油气主要富集在中、浅层正是因为该套厚层且完整

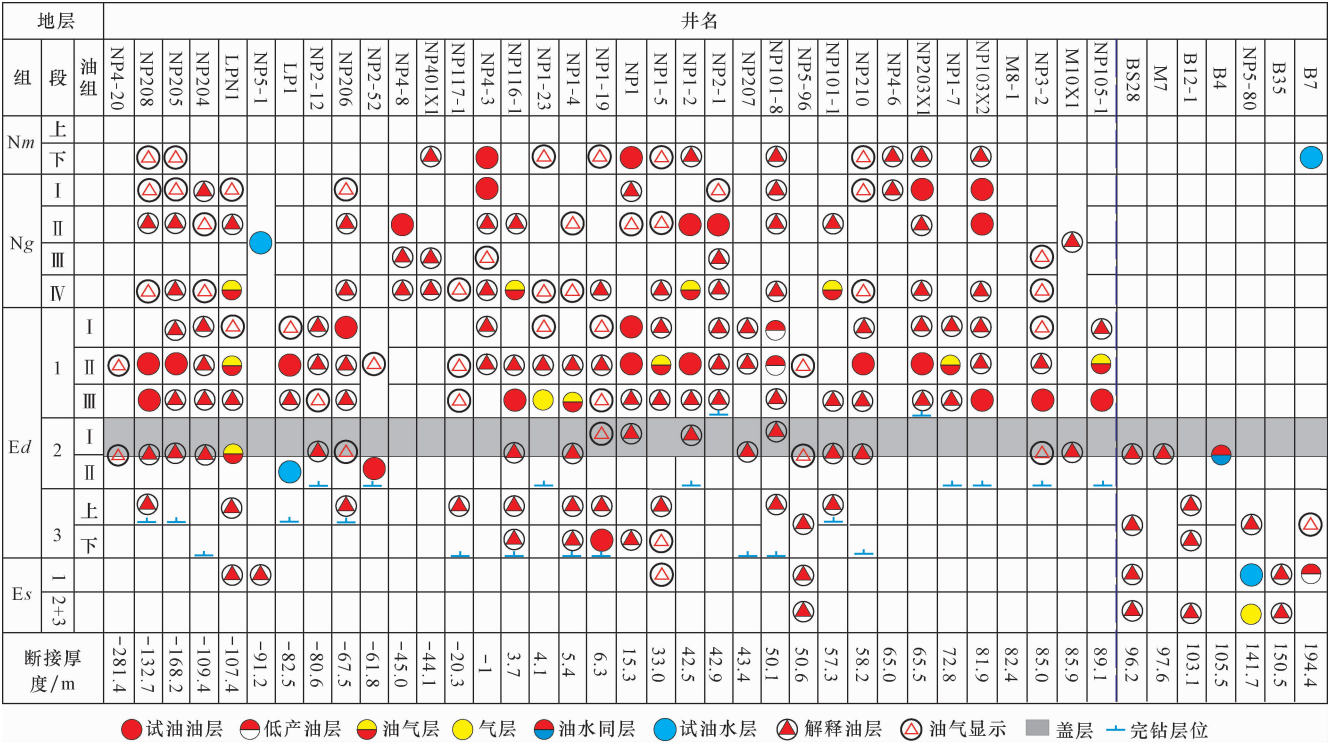


图4 南堡凹陷典型井东二段盖层断接厚度与油气垂向分布层位关系

Fig.4 Relationship between juxtaposition thickness of cap rocks in the second member of the Dongying Formation and vertical hydrocarbon distribution in typical wells in the Nanpu Sag

的盖层发育作为有利保障。

盖层的完整性除了受断裂规模影响外,还受盖层段断裂的发育程度所控制。盖层段断裂密度越大,盖层被支解破碎的程度越大,原有的致密程度大大降级,从而失去了有效阻烃作用。以南堡一号构造为例,主控断裂为南堡一号断裂(图 1),断裂西侧为 1-1 区,东侧为 1-3 区。该构造中浅层油气富集的层位与馆陶组三段局部性火山岩盖层密切相关。统计得到,1-1 区断裂密度 4~6 条/km²,油气聚集的最浅层位是馆陶组二段,1-3 区断裂密集带 6~9 条/km²,油气聚集的最浅层位是明化镇组下段。表明盖层段断裂越发育,盖层被破坏程度越高,油气越容易穿越盖层而向更浅层运聚成藏。

3.2 断裂类型与油气垂向优势运移通道关系

油气的跨层运移主要是通过断裂输导进行的,只有在成藏关键时刻活动的断裂才能作为油气运移的输导通道^[20]。油气勘探实践表明,油气大规模运聚成藏时期主要发生在明上期—第四纪,该时期活动的断裂主要有Ⅲ型、V型和Ⅵ型。Ⅲ型断裂向下未沟通烃源岩层,不是油气运移的输导通道,但可作为断圈的边界成为油气聚集成藏的遮挡物;V型和Ⅵ型分别为两期和三期活动的长期断裂,其向下沟通沙一段—东三段和沙三段烃源岩层,是油气垂向运移的主要油源断裂(图 5a)。然而这些油源断层并非都是油气垂向运移的优势通道,从部分油藏控藏断裂组合类型统计结果来看(图 5b),两条同倾相交断裂和多条相交断裂组合与油气的运移关系紧密,表明断裂交叉点是油气垂向运移的优势通道,断裂的交叉点往往是断裂活动过程中分段扩展连接的部位,该部位应力集中、应变量大,变形集中且往往伴生大量裂缝,所以该特征决定了油源断裂交叉点是控制油气垂向运移的优势通道。利用含氮化合物厘定油气运移路径^[21]也显示断裂交叉点

往往是油气分流运移或汇聚运移的发生部位。

3.3 储层砂地比与油气断储分流运移特征

沿着断裂垂向运移的油气究竟选择哪套邻近的储层进行分流运移,这主要取决于储层的砂地比,砂地比越高,储层物性越好,油气越易于向其充注。从 18 口井主力目的层的砂地比统计来看(图 6),成功的油层储层砂地比一般高于 20%,而砂地比低于 20%的储层均为不含油或差含油。表明南堡凹陷储层砂地比 20%是决定储层能否发生断储分流运移的界限,南堡凹陷东一段整体物性较好,因此是目前勘探最为成功的层位。

储层物性的好坏源于储层沉积过程中物源入盆后河道的摆布规律,即受控于沉积相带的分布。宏观上,柏各庄断层和西南庄断层为控盆断裂,其分段生长机制是控制南堡凹陷沉积相分布的主导因素^[22-23]。物源入盆后的水系摆布方向则进一步受次级主干断裂的分段活动性的影响,以南堡一号构造的主要控藏断裂南堡 I 号断裂为例,沿着断裂走向编制不同层位的断距分布规律,即位移-距离曲线^[24-25],在此基础上采用回剥技术编绘东营组末期的古位移-距离曲线(图 7a)。从图中可以看出,东营组末期断裂是分段活动生长的,分段连接处即是东一段沉积时期的转换带位置,把该转换带位置标定到东一段沉积相图中可以发现(图 7b),古转换带位置恰位于分流河道内,而且分流河道水系在南堡一号断裂上升盘途经断裂向下降盘流动过程中,水流方向发生了变化,即分流河道出现了沿着断裂下降盘走向分叉流动的趋势。受河道分叉影响,NP103X1 井位于河道内部,其东一段储层砂地比高、物性好,获得了工业油流,而南部的 NP1-9 井相对远离南堡一号断裂,河道分叉导致其位于主河道以外的滨浅湖相带内,其东一段储层砂地比低、物性差,钻井揭示其为水层。

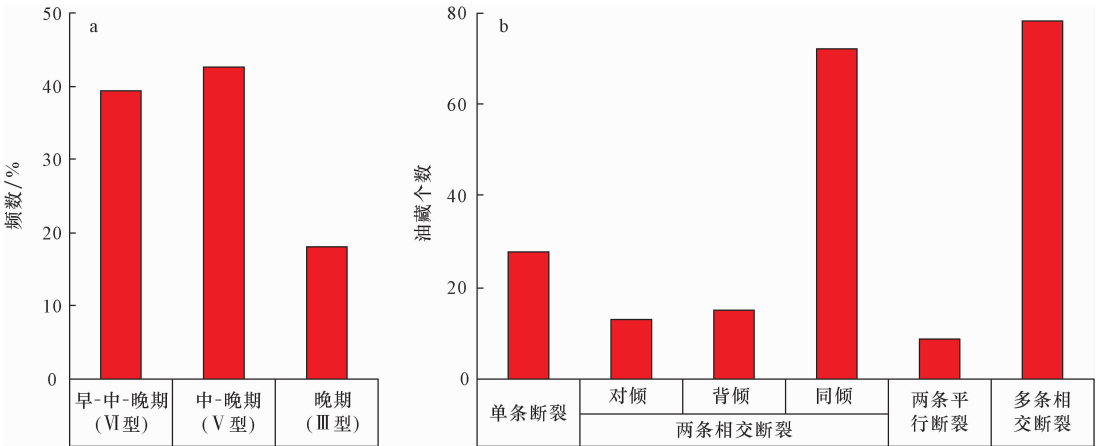


图 5 南堡凹陷控藏断裂类型及控藏断裂组合类型统计直方图

Fig. 5 Histogram for types and combination types of reservoir-controlling faults in the Nanpu Sag

a. 控藏断裂类型; b. 控藏断裂组合类型

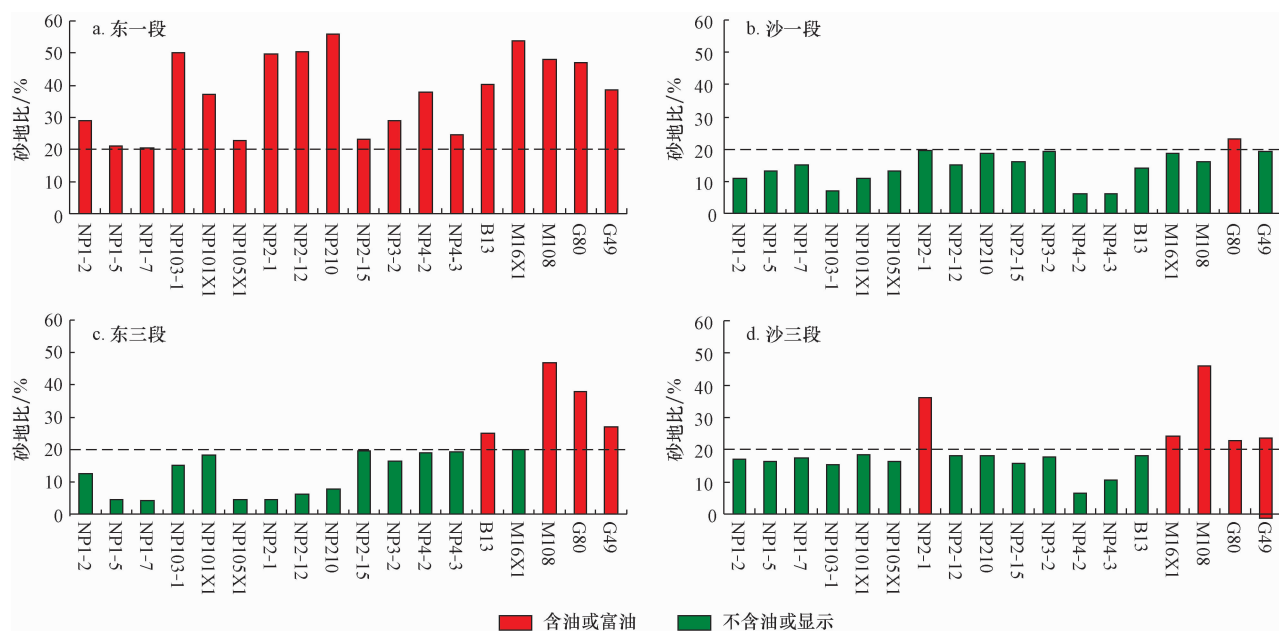


图6 南堡凹陷典型井主力目的层砂地比统计直方图

Fig. 6 Histogram of net-to-gross ratio of major target layers in the typical wells of the Nanpu Sag

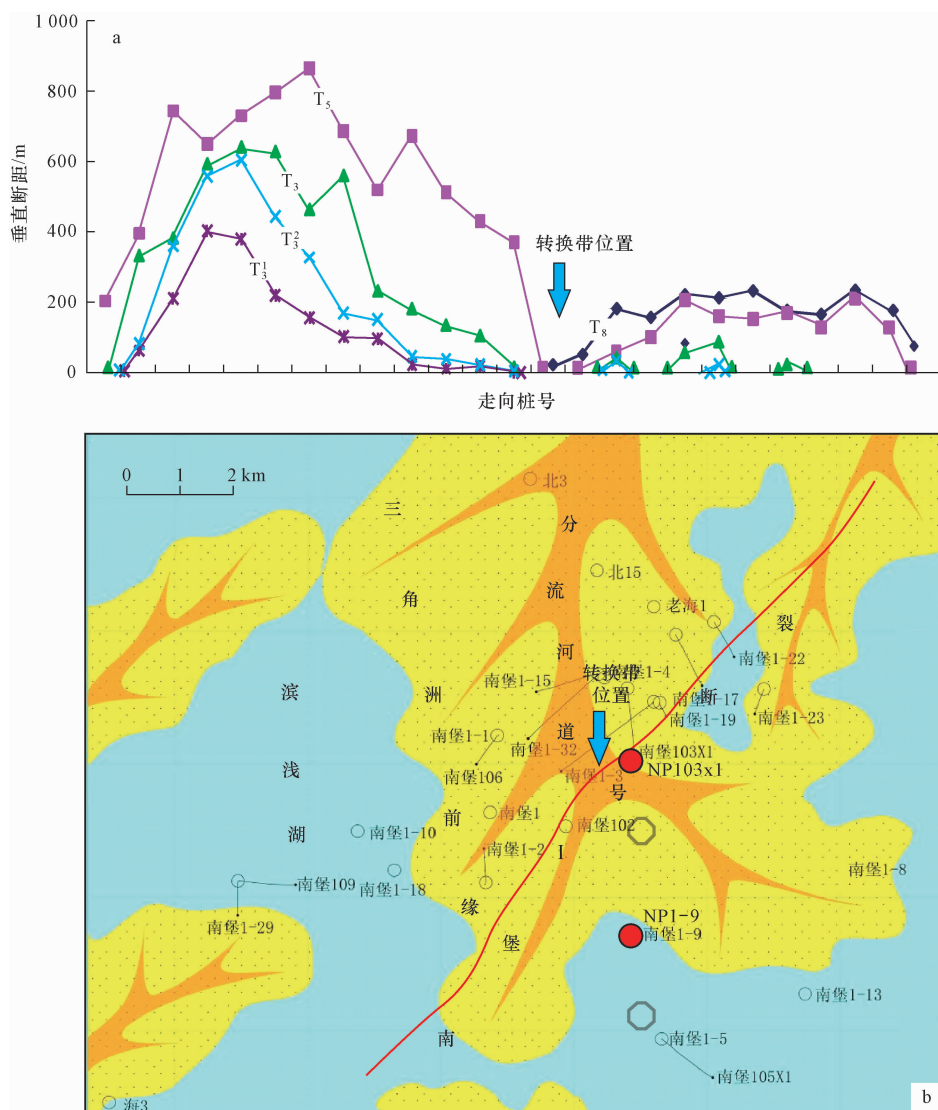


图7 南堡凹陷南堡I号断裂东一段沉积末期分段生长特征及其与沉积相关关系

Fig. 7 Relationship between segmentation growth features and sedimentary facies of No. I fault in the Late Dongying period in the Nanpu Sag

a. 断距-走向曲线;b. 东一段沉积相

综合以上,断裂分段生长控制古转换带的形成,转换带位置影响了分流河道水系的流动方向,导致同一层位不同部位的砂地比变化较大,最终影响了沿断裂垂向运移的油气的断储分流运移规律。

4 断层侧向封闭性与油气保存

对于断圈而言,断层是圈闭的边界之一,沿着断裂运移并充注到断圈中的油气能否发生有效聚集并保存下来主要受控于控圈断裂的侧向封闭性^[26]。控圈断裂在明上期—第四纪的活动实际上是多期脉冲式累加活动的结果。受断层多次错动演化、断距不断累加增大影响,断层的侧向封闭性也随着断层的演化而演化。对于明上段—第四系成藏时间段而言,成藏开始时如果断层侧向封闭性好,断圈便能将充注进来的油气大规模的聚集下来,反之,即使有大规模油气的充注,也不会形成规模的聚集;而成藏结束时如果断层侧向封闭性好,聚集来的油气便能得以大规模的保存下来,反之,即使先期聚集了大量油气,也会因封闭性差而散失,即不会大规模的保存下来。因此,只有断层古封闭性和现今封闭性都较强时,对于油气富集而言断圈才是有效的,其钻探风险也较小。采用断距回剥技术,选取 SGR(泥岩断距比率,即断层面某一点的 SGR 为滑过该点的所有泥岩累积厚度与断距的比值)评价断层侧向封闭性的方法^[27-32],分别评价了失利断圈明化镇组末期和现今的断层侧向封闭性。通过对高柳构造南、南堡一号构造的 1-5 区、南堡二号、南堡三号 and 南堡五号构造的 27 口井、69 个层位的失利断圈评价可知(图 8),因断层侧向封闭性差造成的失利断圈 38 个,其中现今封闭性差的 32 个,占失利断圈总数的 46.38%,古封闭性差的 6 个,占失利断圈总数的 8.7%。其余的失利断圈因圈闭不落实造成失利的断圈 14 个,占 20.29%,其他原因(如前述分析的内容)造成失利的断圈 17 个,占 24.64%。因此,从数据对

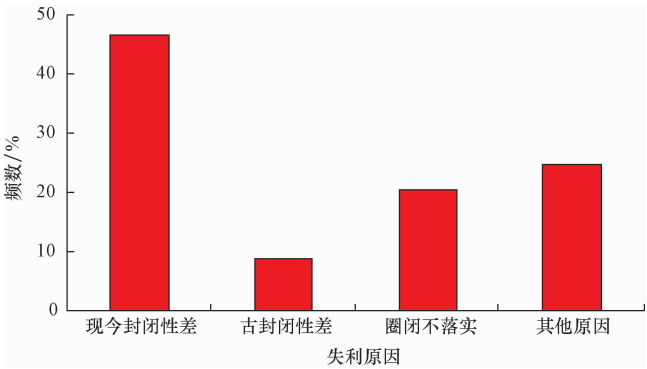


图 8 南堡凹陷部分失利断圈失利原因统计直方图
Fig. 8 Histogram of the reasons for some unsuccessful fault traps in the Nanpu Sag

比可知,断层的侧向封闭性是决定断圈能否形成大规模油气聚集并保存至今的关键因素。

综合以上分析,断裂在东营末期和明上期—第四纪的强烈活动过程中,恰为南堡凹陷油气运聚成藏的两个关键时刻,且以晚期成藏为主^[10]。不同成藏时期,活动的断裂类型不同,其与油气生、储、盖耦合关系不同,决定了断裂输导油气模式存在差异。在东营组末期的断裂变形过程中,沙三段烃源岩达到生油高峰,其排出的油沿着砂体和断裂分别发生侧向和垂向运移,受东二段区域性盖层的阻挡在沙三段—沙二段—沙一段—东三段—东二段的高砂地比储层且正向局部构造中聚集成藏,形成深层油气系统(图 9a)。东营组末期断裂变形结束后,研究区已经发育 5 种类型断裂,即 I 型、II 型、IV 型、V 型和 VI 型,但这些断裂的活动规律,其对油气输导和遮挡作用也不同。I 型断裂不活动,II 型和 IV 型断裂多数是在东二段沉积之前活动形成的。因此,这 3 种类型断裂不是油气垂向穿层运移的输导通道,其对侧向运移的油气主要起到侧向遮挡的作用。V 型和 VI 型断裂是主要活动的断裂,其对垂向运移的油气主要起到输导通道的作用,并与高砂地比储层配置使油气发生断储分流运移。这两种类型断裂虽均断穿东二段盖层,但其在盖层段内初次活动的断距相对较小,盖层断阶厚度较大,而且此时的东二段埋藏浅,故盖层没有遭受明显的破坏。当断裂活动结束后,对聚集的油气主要起到侧向遮挡作用,从而使中深层油气得以聚集和保存。

明上期—第四纪的油气大规模运聚成藏过程中,沙一段—东三段烃源岩达到生油高峰,沙三段烃源岩处于生气阶段。其生成排出的油气同样沿着砂体和断裂分别发生侧向和垂向运移,但大部分垂向运移的油气跨越断接厚度小于 90~95 m 的东二段盖层而继续向浅部运移,当受到明上段—第四系区域性盖层的阻挡时,在东一段—馆陶组—明下段的高砂地比储层且正向局部构造中聚集成藏,形成中浅层油气系统(图 9b)。明上期—第四纪的断裂变形结束后,南堡凹陷共发育现今的 6 种类型断裂。其中 I 型、II 型、IV 型不活动,主要对侧向运移的油气起侧向遮挡作用。V 型和 VI 型断裂活动强烈,大部分断裂使东二段盖层断接厚度小于 90~95 m,其对垂向运移的油气主要起到输导通道的作用,并与高砂地比储层配置使油气发生断储分流运移。III 型断裂为新生活活动形成的,其规模小,向下未沟通烃源岩层,故其对油气主要起到侧向遮挡和局部调整运移的作用。

基于上述,深层油气的有利勘探方向为与 I 型、II 型和 IV 型断裂相关且高砂地比储层的正向局部构造和与 V 型和 VI 型断裂相关且东二段盖层断接厚度大于

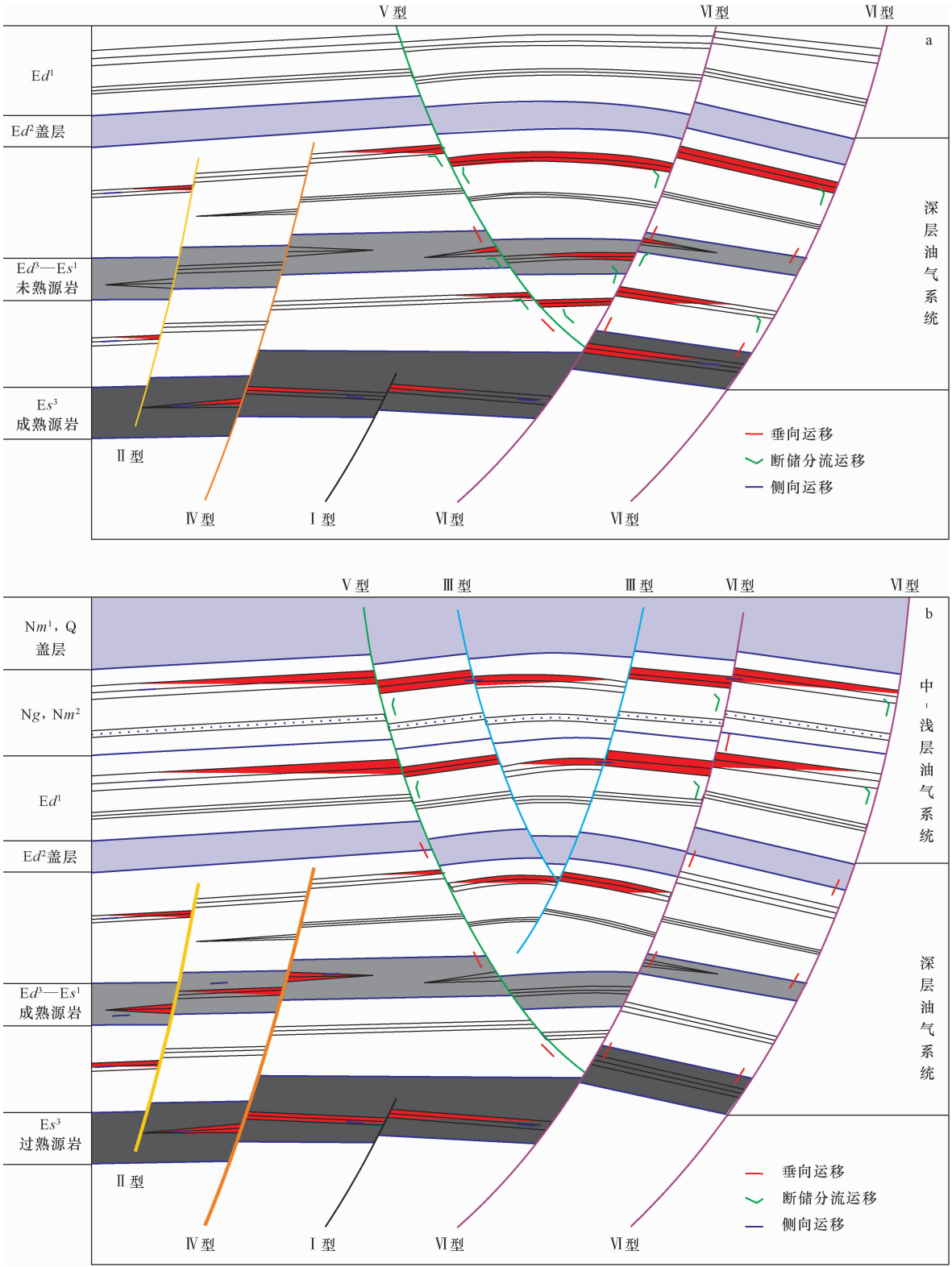


图9 南堡凹陷成藏关键时刻油气沿断裂运聚成藏过程模式

Fig. 9 Models of hydrocarbon migration and accumulation along faults at the critical periods in the Nanpu Sag
a. 东一末期油气运聚过程;b. 明上期—第四纪油气运聚过程

90 ~ 95 m 的高砂地比储层的正向局部构造。中 - 浅层油气的有利勘探方向为与 V 型和 VI 型断裂相关且东二段盖层断接厚度小于 90 ~ 95 m、高砂地比储层以及断层侧向封闭性好的正向局部构造。

5 结 论

1) 南堡凹陷油气剖面、平面的复杂分布规律与断

裂演化息息相关。生烃洼陷周边的断裂构造带为构造高部位,是油气富集的有利区带。其内的正向局部构造,即地垒或半地垒、背斜负花状组合和背斜断阶是油气富集的有利部位。盖层分割、断裂沟通控制油气的富集层位,东二段盖层断接厚度小于90~95 m时,盖层破坏程度大,油气可穿越盖层在中浅层发生聚集成藏。盖层段断裂密度越大,油气穿越盖层再聚集的层位越浅。

2) 断裂类型和断裂组合模式类型控制油气垂向运移和优势运移通道。V型和VI型断裂长期活动,是油气跨层运移的油源断层,其两条或多条断裂的交叉组合模式是激发油气垂向运移的优势通道。在断裂分段生长机制下的古转换带控砂作用影响下,沿优势通道运移上来的油气选择砂地比高于20%的储层发生断储分流运移,继而在古、今断层侧向封闭性好的断圈中聚集成藏并保存至今。

3) 成藏关键时刻,活动的长期断裂(V型和VI型断裂)对油气起到垂向输导通道作用,不活动的断裂(I型、II型和IV型断裂)和活动的III型断裂主要对油气起侧向遮挡作用。在成藏之后的断裂相对静止期,所有断裂均对油气起到侧向遮挡作用。

4) 深层油气的有利勘探方向为与I型、II型和IV型断裂相关且高砂地比储层的正向局部构造和与V型和VI型断裂相关且东二段盖层断接厚度大于90~95 m的高砂地比储层的正向局部构造。中浅层油气的有利勘探方向为与V型和VI型断裂相关且东二段盖层断接厚度小于90~95 m、高砂地比储层以及断层侧向封闭性好的正向局部构造。

参 考 文 献

[1] 漆家福. 渤海湾新生代盆地的两种构造系统及其成因解释[J]. 中国地质, 2004, 31(1): 15-22.
 Qi Jiafu. Two tectonic systems in the Cenozoic Bohai Bay basin and their genetic interpretation[J]. Geology in China, 2004, 31(1): 15-22.

[2] 李西双, 刘保华, 华清峰, 等. 张家口-蓬莱断裂带渤海段晚第四纪活动特征[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(3): 332-341.
 Li Xishuang, Liu Baohua, Hua Qingfeng, et al. Characters of the Zhangjiakou-Penglai fault zone activity in the Bohai Sea since late quaternary[J]. Advances in Marine Science, 2009, 27(3): 332-341.

[3] 徐德英, 周江羽, 王华, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷东营组地层水化学特征的成藏指示意义[J]. 石油实验地质, 2010, 32(3): 285-289.
 Xu Deying, Zhou Jiangyu, Wang Hua, et al. Chemical characteristics of formation water significant to oil reservoir in Dongying formation, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(3): 285-289.

[4] 王华, 姜华, 林正良, 等. 南堡凹陷东营组同沉积构造活动性与沉

积格局的配置关系研究[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(1): 70-77.
 Wang Hua, Jiang Hua, Lin Zhengliang, et al. Relations between synsedimentary tectonic activity and sedimentary framework of Dongying Formation in Nanpu Sag[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(1): 70-77.

[5] 马乾, 张军勇, 李建林, 等. 南堡凹陷扭动构造特征及其对油气成藏的控制作用[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(2): 183-189.
 Ma Qian, Zhang Junyong, Li Jianlin, et al. Characteristics of the shear structures in Nanpu Sag and their controls on hydrocarbon accumulation[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2011, 35(2): 183-189.

[6] 刘德志, 周江羽, 马良, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷断裂控藏特征研究[J]. 海洋石油, 2009, 29(4): 25-29.
 Liu Dezhi, Zhou Jiangyu, Ma Liang, et al. Study on the features of fault controlling pool in Nanpu Depression, Bohai Bay Basin[J]. Offshore Oil, 2009, 29(4): 25-29.

[7] 黄曼宁, 董月霞, 庞雄奇, 等. 南堡凹陷构造型油气藏分布主控因素及预测方法[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(5): 695-704.
 Huang Manning, Dong Yuexia, Pang Xiongqi, et al. Controlling factors of structural reservoir distribution and its prediction method in Nanpu depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 695-704.

[8] 刚文哲, 仵岳, 高岗, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷烃源岩地球化学特征与地质意义[J]. 石油实验地质, 2012, 34(1): 57-61.
 Gang Wenzhe, Wu Yue, Gao Gang, et al. Geochemical features and geologic significances of source rocks in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(1): 57-61.

[9] 梅玲, 张枝焕, 王旭东, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷原油地球化学特征及油源对比[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008, 32(6): 40-46.
 Mei Ling, Zhang Zhihuan, Wang Xudong, et al. Geochemical characteristics of crude oil and oil-source correlation in Nanpu sag, Bohai Bay Basin[J]. Journal of China University of Petroleum, 2008, 32(6): 40-46.

[10] 万中华, 李素梅. 渤海湾盆地南堡油田原油特征与油源分析[J]. 现代地质, 2011, 25(3): 599-607.
 Wan Zhonghua, Li Sumei. Characteristics and oil-source investigation of the oils in the Nanpu Oilfield, Bohai Bay Basin[J]. Geoscience, 2011, 25(3): 599-607.

[11] 刚文哲, 于聪, 高岗, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷滩海地区原油来源及勘探潜力分析[J]. 油天然气学报(江汉石油学院学报), 2011, 33(11): 1-7.
 Gang Wenzhe, Yu Cong, Gao Gang, et al. Analysis of crude oil source and exploration potential of offshore area in Nanpu Sag of Bohaiwan Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(11): 1-7.

[12] 万涛, 蒋有录, 董月霞, 等. 南堡凹陷1号构造带油气成藏研究[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(8): 26-30.
 Wan Tao, Jiang Youlu, Dong Yuexia, et al. Studying on hydrocarbon accumulation stages and its process in the 1st tectonic belt of Nanpu Depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(8): 26-30.

[13] 朱光有, 张水昌, 王拥军, 等. 渤海湾盆地南堡大油田的形成条件与富集机制[J]. 地质学报, 2011, 85(1): 97-113.
 Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Wang Yongjun, et al. Forming condition and enrichment mechanism of the nanpu oilfield in the Bohai

Bay Basin, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85 (1): 97-113.

[14] 张军勇,唐建超,马辉,等.南堡凹陷断裂特征及对油气藏的控制作用[J]. *石油地球物理勘探*, 2011, 46(增刊1): 134-138.

Zhang Junyong, Tang Jianchao, Ma Hui, et al. Fault characteristics in Nanpu Sag and their control of reservoirs[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2011, 46(1): 134-138.

[15] 万涛,蒋有录,董月霞,等.南堡凹陷断层活动与油气成藏和富集的关系[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(2): 60-67.

Wan Tao, Jiang Youlu, Dong Yuexia, et al. Relationship between fault activity and hydrocarbon accumulation and enrichment in Nanpu Depression[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2012, 36(2): 60-67.

[16] 孙永河,漆家福,吕延防,等.渤海中坳陷断裂构造特征及其对油气的控制[J]. *石油学报*, 2008, 29(5): 669-675.

Sun Yonghe, Qi Jiafu, Lü Yanfang, et al. Characteristics of fault structure and its control to hydrocarbon in Bozhong Depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(5): 669-675.

[17] 范柏江,刘成林,庞雄奇,等.渤海湾盆地南堡凹陷断裂系统对油气成藏的控制作用[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(2): 192-198.

Fan Bojiang, Liu Chenglin, Pang Xiongqi, et al. Control of fault system on hydrocarbon accumulation in Nanpu Sag, the Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(2): 192-198.

[18] 刘晓峰,董月霞,王华.渤海湾盆地南堡凹陷的背形负花状构造[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2010, 35(6): 1029-1034.

Liu Xiaofeng, Dong Yuexia, Wang Hua. Antiformal negative flower structure in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2010, 35(6): 1029-1034.

[19] 李宏义,姜振学,董月霞,等.渤海湾盆地南堡凹陷断层对油气运聚的控制作用[J]. *现代地质*, 2010, 24(4): 755-761.

Li Hongyi, Jiang Zhenxue, Dong Yuexia, et al. Control of faults on hydrocarbon migration and accumulation in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Geoscience*, 2010, 24(4): 755-761.

[20] 王冠民,庞小军,张雪芳,等.渤海中坳陷古近系石南断层活动性及其对油气成藏条件的控制作用[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(6): 859-866.

Wang Guanmin, Pang Xiaojun, Zhang Xuefang, et al. Activity of Shinnan fault and its control on hydrocarbon accumulation in the Paleogene in Bozhong Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(6): 859-866.

[21] 田涛,蒋有录,万涛,等.油气运移方向探讨——以南堡凹陷1号构造带为例[J]. *中国地质*, 2011, 38(6): 1485-1492.

Tian Tao, Jiang Youlu, Wan Tao, et al. A tentative discussion on oil migration orientation; a case study of 1st structural belt of Nanpu Sag[J]. *Geology in China*, 2011, 38(6): 1485-1492.

[22] 姜华,王建波,张磊,等.南堡凹陷西南庄断层分段活动性及其对沉积的控制作用[J]. *沉积学报*, 2010, 38(6): 1047-1053.

Jiang Hua, Wang Jianbo, Zhang Lei, et al. Segment activity of Xi'nanzhuang fault in Nanpu Sag and its controlling on sedimentary process[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 38(6): 1047-1053.

[23] 史冠中,王华,徐备,等.南堡凹陷柏各庄断层活动特征及对沉积的控制[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(1): 85-90.

Shi Guanzhong, Wang Hua, Xu Bei, et al. Activity of Baigezhuang fault of Nanpu depression and its controlling on sedimentation[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(1): 85-90.

[24] Peacock D C P, Sanderson D J. Displacements, Segment linkage and relay ramps in normal fault zones[J]. *Journal of Structural Geology*, 1991, 13: 721-733.

[25] Kim Y S, Sanderson D J. The relation between displacement and length of faults[J]. *Earth Science Review*, 2005, 24: 317-334.

[26] 罗群.断裂带的输导与封闭性及其控藏特征[J]. *石油实验地质*, 2011, 33(5): 474-479.

Luo Qun. Transporting and sealing capacity of fault belt and its controlling on reservoir[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2011, 33(5): 474-479.

[27] Yielding G, Freeman B, Needham D T. Quantitative fault seal prediction[J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(6): 897-917.

[28] 吕延防,黄劲松,付广,等.砂泥岩薄互层段中断层封闭性的定量研究[J]. *石油学报*, 2009, 30(6): 824-829.

Lü Yanfang, Huang Jinsong, Fu Guang, et al. Quantitative study on fault sealing ability in sandstone and mudstone thin interbed[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(6): 824-829.

[29] 孙国强,张功成,王琪,等.利用模糊综合评价法进行断层封闭性预测[J]. *断块油气田*, 2011, 18(3): 281-284.

Sun Guoqiang, Zhang Gongcheng, Wang Qi, et al. Prediction of fault sealing using fuzzy comprehensive evaluation method[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2011, 18(3): 281-284.

[30] 袁玉松,范明,刘伟新,等.盖层封闭性研究中的几个问题[J]. *石油实验地质*, 2011, 33(4): 336-340.

Yuan Yusong, Fan Ming, Liu Weixin, et al. Several discussions of sealing capacity studies of caprock[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2011, 33(4): 336-340.

[31] 尹志军,谭建财,娄国泉,等.高邮凹陷真武—吴堡断裂带断层封闭性综合评价[J]. *断块油气田*, 2012, 19(01): 32-34, 43.

Yin Zhijun, Tan Jiancai, Lou Guoquan, et al. Comprehensive evaluation on fault sealing in Zhenwu-Wubao fault zone of Gaoyou Sag[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2012, 19(01): 32-34, 43.

[32] 高岗,柳广弟,黄志龙.断层对油气的相对封闭性和绝对开启性分析——以准噶尔盆地西北缘八区—百口泉区二叠系油气特征为例[J]. *石油实验地质*, 2010, 32(3): 218-222.

Gao Gang, Liu Guangdi, Huang Zhilong. Analysis of relative sealing and absolute permeability of fault—taking Permian hydrocarbon characteristics of the region 8 and the Baikouquan area, northwest margin, the Junggar Basin for example[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(3): 218-222.

(编辑 董立)