

南堡凹陷中浅层盖-断组合控油模式 及有利含油层位预测

吕延防¹, 许辰璐¹, 付广¹, 刘乃瑜², 崔守凯³, 庞磊⁴

(1. 东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 中国石油 新疆油田分公司 百口泉采油厂, 新疆 克拉玛依 834000;
3. 中国石油 青海油田分公司 采油二厂, 青海 茫崖 816499; 4. 中国石油 大庆油田分公司 第二采油厂, 黑龙江 大庆 163414)

摘要:对南堡凹陷中浅层油气的垂向分布起控制作用的盖层有3套,分别是明化镇组下段泥岩、馆陶组三段火山岩和东营组二段泥岩。由于受到断层的切割,盖层封闭油气的能力受到了不同程度的破坏。通过对各盖层封闭油气的断接厚度临界值进行研究,结合断层垂向断穿层位、平面分布以及活动历史等特点,配合油气纵向和平面分布规律的分析,发现上述3套盖层与断层组合的空间匹配控油模式有3种:①下全封模式,油气有利于在东营组二段盖层之下聚集成藏;②下开中封模式,油气有利于在馆陶组三段盖层之下聚集成藏;③中下有限封盖模式,从下至明化镇组底部皆可能有油气聚集成藏。利用所提出的3种封盖模式,在研究了南堡1-5区块盖层与断层等特征的基础上,对该区的油气有利聚集层位进行了预测,指出f1-3断裂和f2-12断裂控制区域属于下开中封模式,有利油气聚集层位为馆陶组四段、东营组一段及二段以下的各套地层;f4-48断裂控制区域属于下全封模式,有利油气聚集层位在东营组二段盖层之下;f13-1断裂控制区域属于中下有限封盖模式,明化镇组下段盖层之下的所有储层均可能有油气的聚集。提出的模式有效地指导了研究区有利含油层位预测。

关键词:盖层断接厚度;控油模式;油源断裂;盖层;南堡凹陷

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Oil-controlling models of caprock-fault combination and prediction of favorable horizons for hydrocarbon accumulation in middle-shallow sequences of Nanpu sag

Lü Yanfang¹, Xu Chenlu¹, Fu Guang¹, Liu Naiyu², Cui Shoukai³, Pang Lei⁴

(1. College of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. Baikouquan Oil Production Plant, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China; 3. No. 2 Oil Production Plant, PetroChina Qinghai Oilfield Company, Mangya, Qinghai 816499, China; 4. No. 2 Oil Production Plant, PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163414, China)

Abstract: There are 3 caprocks that control the vertical distribution of oil and gas in the middle-shallow sequences of Nanpu sag, namely the mudstone caprock of the Lower Minghuazhen Formation (Nm), the volcanic caprock of the third member of Guantao Formation (Ng³) and the mudstone caprock of the second member of Dongying Formation (Ed²). The sealing abilities of the caprocks were destroyed in different degrees due to faulting. Based on analysis of the thresholds of juxtaposition thickness of faults in these caprocks and in combination the vertical positions of fault cutting cross the caprocks, areal fault distribution and faulting history, we built 3 oil-controlling models of caprock-fault combinations. ① Full sealing at the bottom. This model is favorable for oil accumulation under the mudstone caprock of the 2nd members of Dongying Formation; ② Open at the bottom but sealing in the middle. This model is favorable for oil accumulation under the volcanic caprock of Ng³; ③ Limited sealing at the bottom and middle. This model is favorable for oil accumulation all the reservoirs under the mudstone caprock of Ed² in Nanpu sag. According to these 3 models and the characteristics of caprock and faults in Nanpu 1-5 block, we predicted the horizons favorable for oil accumulation in the study area. Area under the control of fault f1-3 and f2-12 is the second model, and favorable horizons for oil accumulation are the 4th member of Guantao Formation, the 1st member and the reservoirs below the 2nd member of Dongying Formation. Area under con-

收稿日期:2013-09-17;修订日期:2013-10-21。

第一作者简介:吕延防(1957—),男,教授、博士生导师,油气成藏和油气资源评价。E-mail:571128lyf@nepu.edu.cn。

通讯作者简介:许辰璐(1988—),男,硕士研究生,矿物学、岩石学、矿床学。E-mail:shmiltw@163.com。

基金项目:国家大型油气田及煤层气开发科技重大专项(2011ZX05007-002);中国石油科技创新基金项目(2012D-5006-0110)。

trol of fault f4-48 is the first model, and the favorable horizons for oil accumulation are reservoirs below the caprock of the second member of Dongying Formation. Area under control of fault f13-1 is the third model, and all reservoirs under the caprock of the Lower Minghuazhen Formation are favorable for oil accumulation. These models have effectively guided the prediction of potential exploration targets.

Key words:juxtaposition thickness of faulted caprock ,oil-controlling model ,source rock-rooted fault ,caprock ,Nanpu sag

南堡凹陷位于渤海湾盆地北部,为黄骅坳陷中具有“断 - 坳”二元结构的一个负向构造单元,自下而上主要发育有古近系的沙河街组 (Es) 和东营组 (Ed)、新近系的馆陶组 (Ng) 和明化镇组 (Nm) 以及第四系 (Q) (图 1)。南堡凹陷中浅层 (东营组一段 ~ 明化镇组) 目前已找到了大量油气,除了陆上的老爷庙、高尚堡、柳赞构造油田以及唐海油田外,还有分布在滩海地区的南堡 1、南堡 2、南堡 3、南堡 4、南堡 5 号构造油田 (图 2)。油源对比结果表明,南堡凹陷中浅层油气主要来自下伏沙三段和沙一段 - 东三段两套烃源岩^[1-6]。从目前钻井资料及试油结论来看,

南堡凹陷储集层较为发育,从下部的沙河街组到上部的明化镇组皆有分布,但以东营组上部、馆陶组以及明化镇组底部的中浅层更为发育。钻井及地震资料解释结果表明,影响南堡凹陷中浅层油气分布的主要盖层有中浅层内发育的明下段泥岩盖层和馆三段火山岩盖层,还有发育于中浅层之下的东二段上部泥岩盖层,这种纵向上的差异除了与源储空间匹配关系、储层物性以及断裂后期破坏等因素有关外,主要是因为受到了

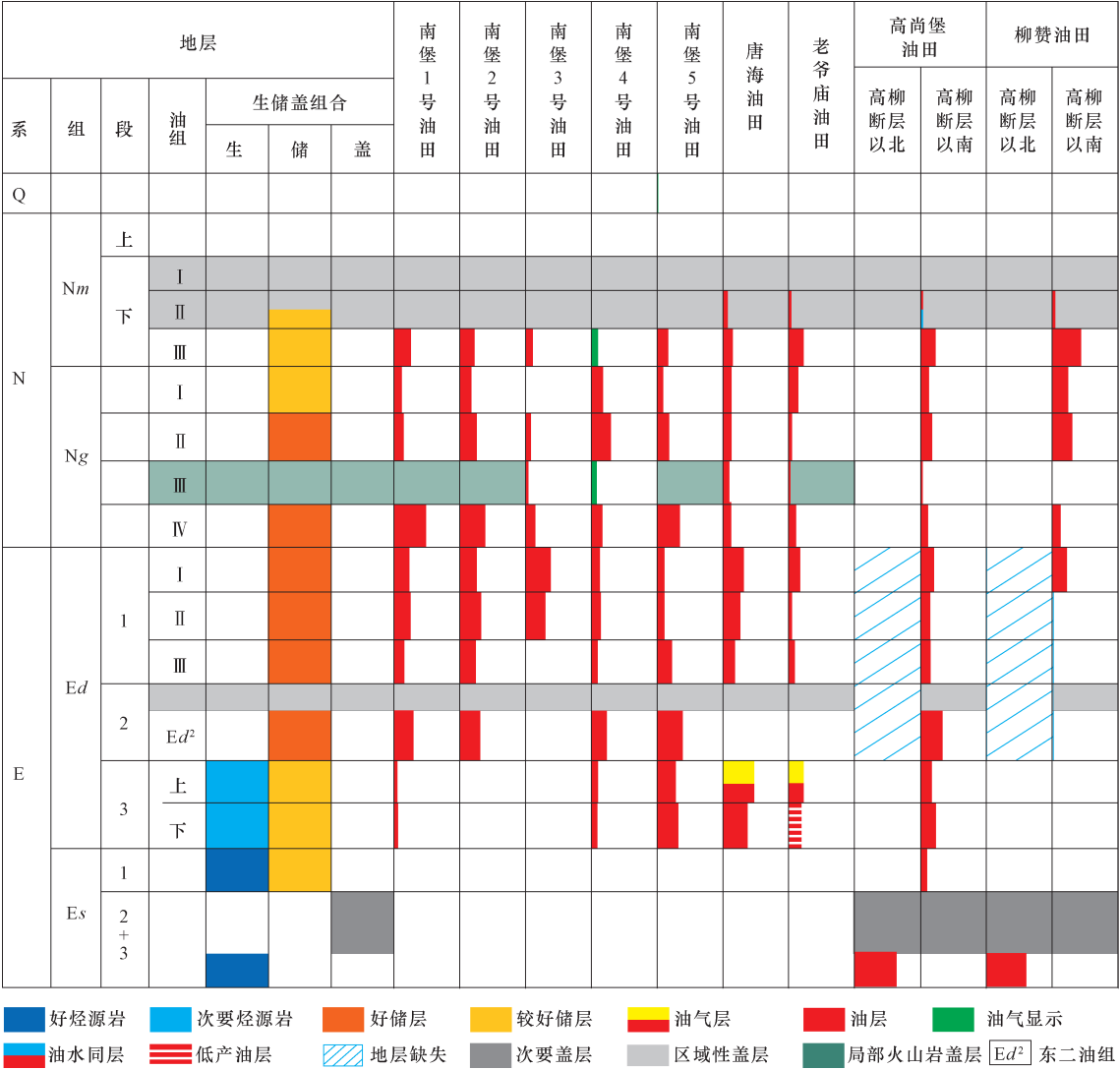


Fig. 1 Source-reservoir-caprock associations in Nanpu sag and vertical distributions of oil/gas layers in each oilfield

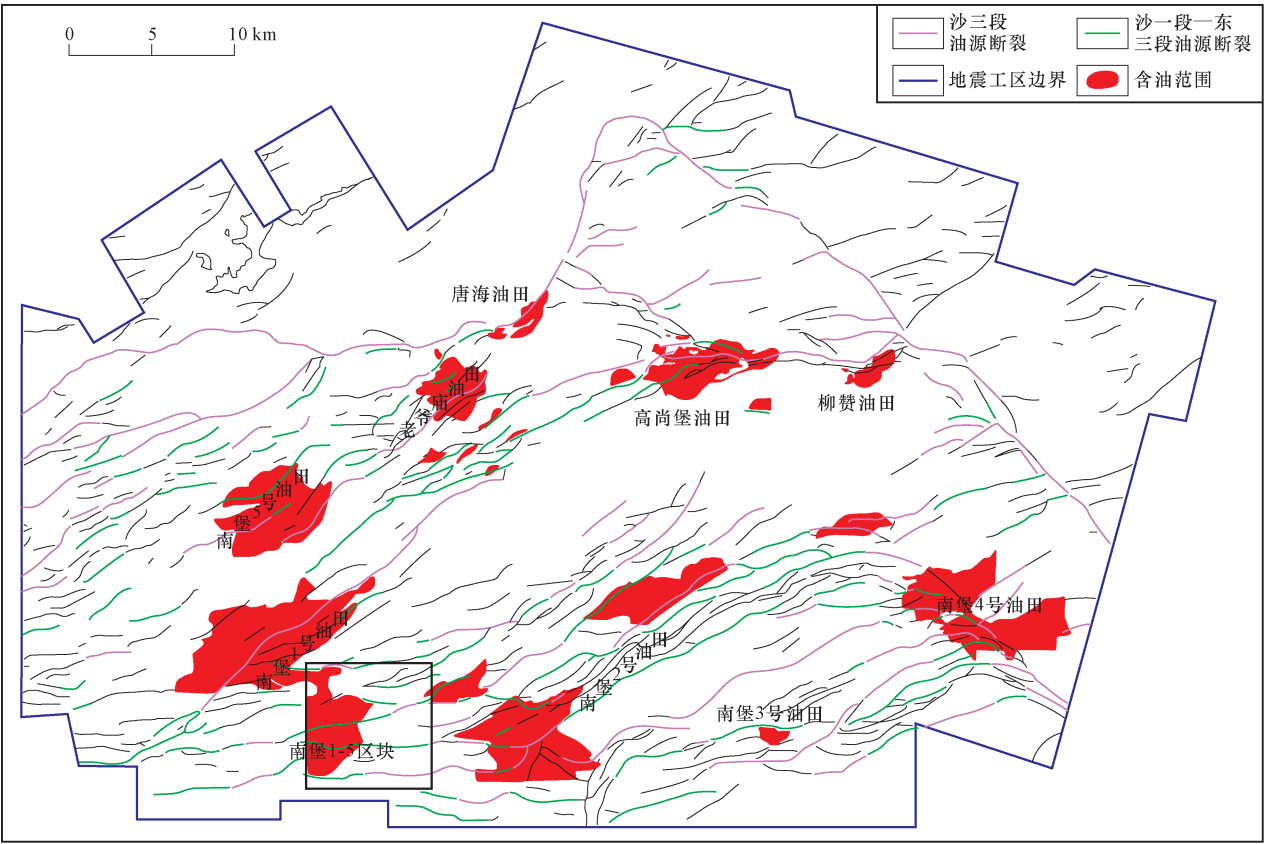


图2 南堡凹陷油田分布及明化镇组底界油源断裂与油气分布关系

Fig.2 Distribution of oilfields and the relation between source rock-rooted faults and oil-gas distribution at the bottom Nm in Nanpu sag

三套盖层空间匹配阻烃作用的影响。关于盖层分布或断裂对油气成藏与分布控制作用的研究,前人曾做过大量研究工作,但主要是针对某一套盖层对油气成藏与分布的控制作用进行的研究^[7-11],或者是针对盖层被断裂改造破坏后对油气成藏与分布的控制作用的研究^[12-17],而对两套以上被断裂破坏后盖层空间匹配对油气成藏与分布控制作用的研究很少。因此,开展南堡凹陷中浅层盖层-断层组合空间匹配关系对油气成藏与分布的控制作用研究,对预测南堡凹陷中浅层油气富集的有利层位和指导勘探均具有重要意义。

1 盖层发育特征

东营组二段泥岩盖层在南堡凹陷全区发育很广,分布较为稳定,仅在柳北地区出现缺失。两个厚度高值区主要分布在5号构造以及2号构造、2号构造东和3号构造北部。其最大厚度超过300 m。厚度由高值区向四周逐渐减小,在5号构造西部减小至0,如图3所示。

馆陶组三段火山岩盖层主要发育于南堡凹陷的西南部,盖层厚度高值区分布在南堡1号构造、2号构造

以及5号构造西侧,最大厚度可达500 m,厚度由高值区向四周逐渐减小,在其他构造部位发育较薄,如图4所示。

明化镇组下段泥岩盖层在整个南堡凹陷都有较为稳定的分布,在老爷庙油田南部及5号构造附近出现厚度高值区,最大厚度可达600 m,盖层厚度由高值区向南部逐渐减小,在南堡凹陷边缘地区厚度减小至200 m以下,如图5所示。

2 中浅层断层发育特征

南堡拗陷构造演化历经断陷(沙三段-沙二段沉积时期)、断-拗转化(沙一段-东营组沉积时期)和拗陷(馆陶组-第四系沉积时期)3个阶段,南堡凹陷中浅层主要表现为拗陷层的性质。由图2可见,南堡凹陷中浅层断层极其发育,在平面上,断层走向以北东东向为主,多数断层的延伸长度在1~4 km范围内,最大延伸长度可达10 km以上,呈密集带状分布。在剖面上,南堡凹陷中浅层发育的断层主要为平直式正断层,也发育铲式正断层,前者一般发育时期相对较短,规模比较小,而后者是在伸展背景下旋转形成,是凹陷内最常见的重要断层形态。断层的断距在东二段及东

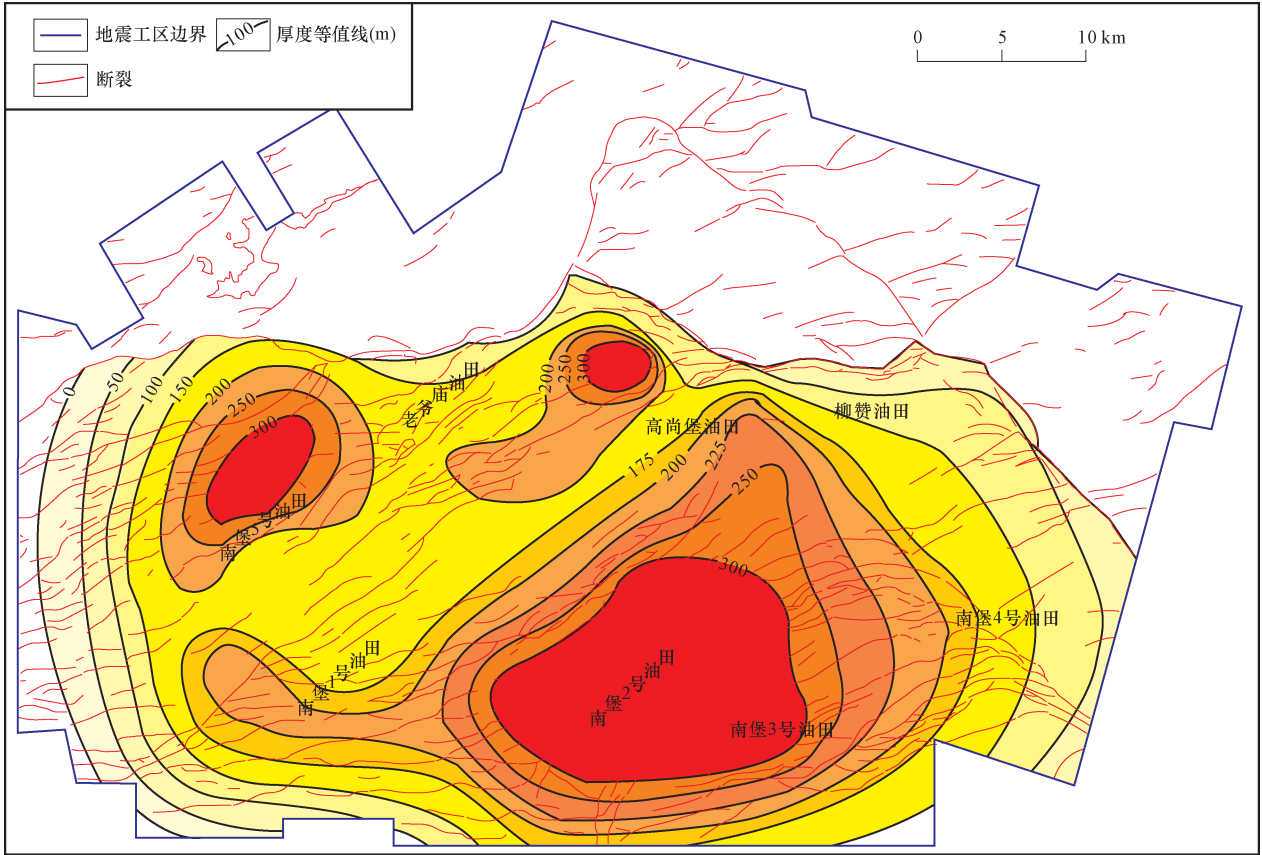


图 3 南堡凹陷东营组二段泥岩盖层厚度

Fig. 3 Thickness of mudstone caprock of Ed² in Nanpu sag

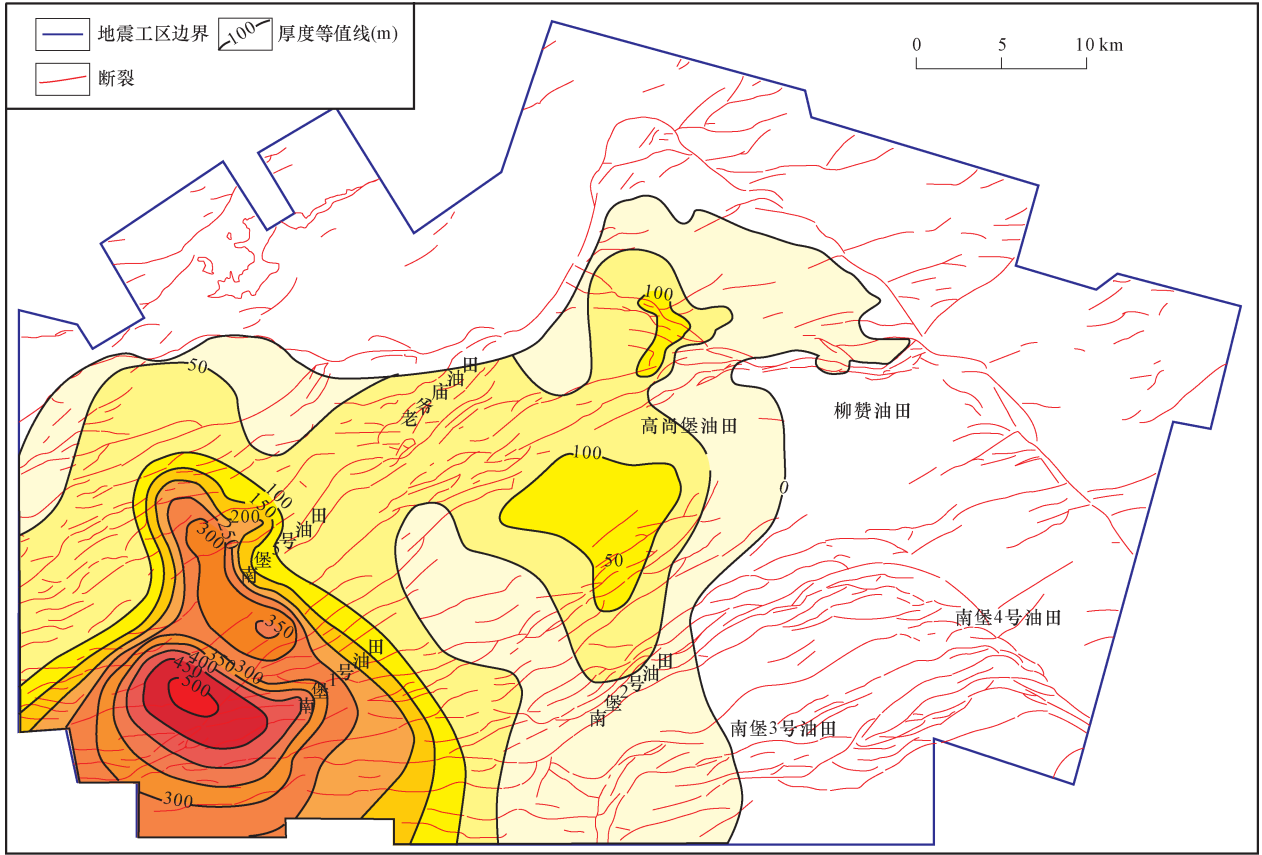


图 4 南堡凹陷馆陶组三段火山岩盖层厚度

Fig. 4 Thickness of volcanic caprock of Ng³ in Nanpu sag

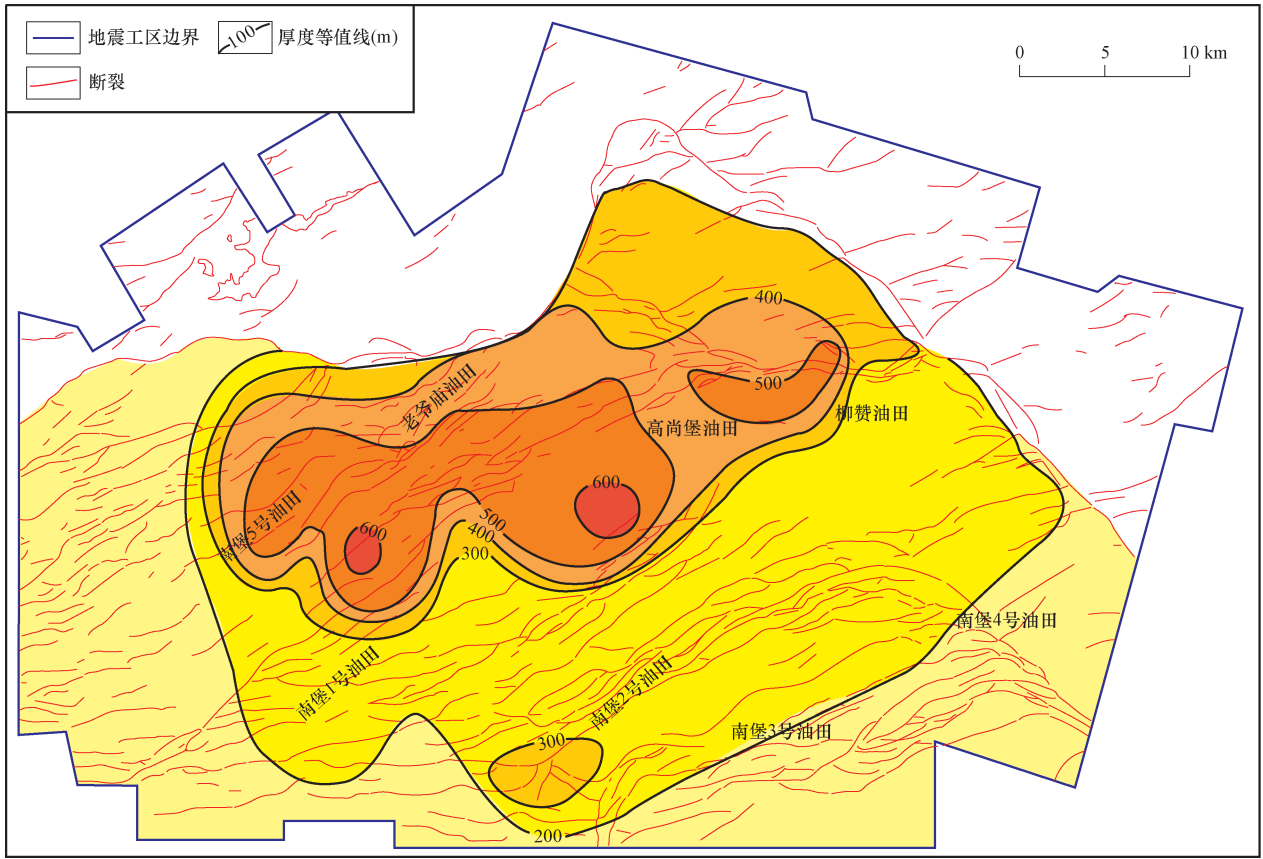


图 5 南堡凹陷明下段泥岩盖层厚度

Fig. 5 Thickness of mudstone caprock of the lower member of Nm in Nanpu sag

一段内一般为 0 ~ 200 m,在馆陶组底—明化镇组底的断距一般为 0 ~ 100 m,可以看出断裂的规模由下至上逐渐减小,反映出应力的衰减以及晚期构造变形强度的减弱。南堡凹陷中浅层断层组合主要有 3 种样式。第一种组合样式为“Y”或反“Y”字形组合,其在平面上的组合样式为分叉式组合,这种组合样式在全区广泛发育;第二种组合样式是“V”字形组合,在平面上以平行式或羽状组合为主,平行式组合在整个凹陷内部广泛发育,羽状组合主要发育于 1 号构造和 4 号构造,这些羽状断层本身又成雁列状排列;第三种组合样式为同向或反向断阶,其在平面上表现为平行式组合特征,主要发育在 1 号构造 1-5 区的东部。中浅层断裂组合样式反映了走滑(张扭)的变形特征,中浅层断裂与贯穿断陷层和断坳层的断裂在剖面上可构成“花状”及“似花状”组合,局部穿插发育“Y”或反“Y”字形组合,反映出南堡凹陷整体先伸展后走滑(张扭)的变形叠加特征。南堡凹陷断裂的强活动时期分别为沙二段—沙三段沉积时期、东一段沉积时期以及明上段—第四系沉积时期,沙三段沉积时期断裂主要发生伸展变形,沙一至东二段沉积时期断裂主要发生伸展—走滑变形,馆陶组及明下段沉积时期断裂主要为张扭变形。依据断裂变形时期及变形机制叠加关系,将南堡凹陷断裂分为 6 套断裂系统:即早期伸展断裂(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)、早期伸展—中期走滑伸展—晚期张扭断裂(Ⅵ型)(图 6)。

南堡凹陷中发育的断层在控制油气垂向运移过程中的作用主要有两个:一是破坏盖层,二是形成油气运移通道。由于南堡凹陷中浅层与下伏沙三段及沙一—东三段两套源岩之间相隔多套地层,其中包含多套泥岩层,所以源岩生成的油气难以靠浮压穿过地层的孔隙^[18]或者小型的水力裂缝^[19-20]向上运移进入中浅层内聚集,只有靠断裂活动开启时才能发生垂向输导运移^[21]。然而并非所有南堡凹陷中浅层内发育的断裂都能垂向输导油气,能否垂向输导油气,主要取决于断裂在地层中的延展性和断裂活动时期这两大因素,只有在成藏关键时刻活动并连接烃源岩层与储层的油源断裂,才能成为可以输导油气的断裂^[22]。对南堡凹陷而言,V型和Ⅵ型断裂为南堡凹陷内长期活动的断裂,在东营组和明化镇组沉积末期 2 个成藏期均明显活动^[23-24],同时这两套断裂沟通下伏沙三段及沙一—东三段两套源岩和上覆储层并断穿东二段泥岩盖层和馆三段火山岩盖层,所以 V 型和Ⅵ型断裂为南堡凹陷的油源断裂(图 6)。油源断裂为来自源岩层的油气提供了向上运移的通道,当油源断裂破坏了盖层的垂向封

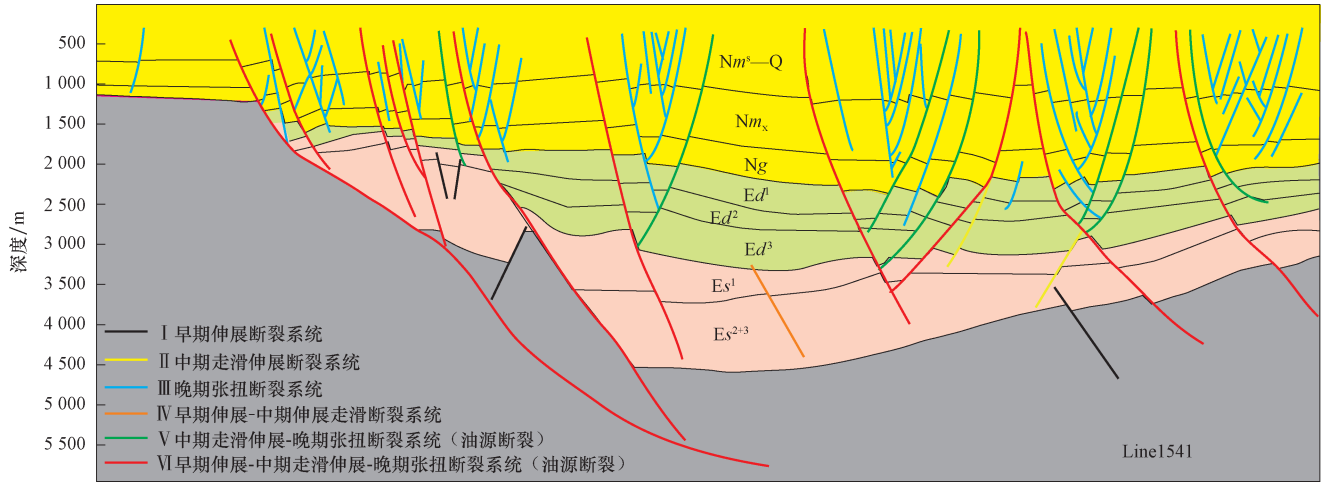


图 6 南堡凹陷断裂系统划分及油源断裂分布

Fig. 6 Fault system classification and distribution of source rock-rooted faults in Nanpu sag

闭能力时,来自源岩的油气便可沿油源断裂穿过盖层向上部地层运聚成藏。由图 2 和图 6 可以看出,南堡凹陷中浅层中油源断裂非常发育,主要分布在南堡 1 至 5 号以及老爷庙、高尚堡、柳赞构造带内,中浅层中的油气均围绕着油源断裂分布。

3 盖层断接厚度及封油临界值的确定

大量研究表明,盖层对油气聚集与分布的控制作用主要反映在其空间分布连续性上^[25]。盖层空间分布连续性越好,越有利于油气大规模聚集与分布;反之则不利于油气聚集与分布^[26]。而盖层空间分布的连续性除了受到其原始沉积厚度大小的影响外^[27],更重要的是受到后期断裂破坏作用的影响^[28]。盖层一旦被断裂破坏,聚集在盖层之下的油气就有可能沿着断裂穿越盖层向上部地层发生垂向运移,这种断裂对盖层的破坏作用可以引起油气藏的彻底破坏。然而并非所有断裂都会破坏盖层封闭油气的能力,断裂对盖层的破坏程度分为以下 3 种情况:当断裂消失在盖层之中时,盖层还保持着一定的完整性,对盖层的垂向封闭能力影响不大,油气可以在盖层之下聚集;当断裂的断距大于盖层厚度时就会将盖层完全错开,盖层的垂向封闭能力被完全的破坏,其下的油气很难继续保存;当断裂断穿盖层,但盖层未被完全错开时,盖层封闭油气的能力就取决于断距的大小与盖层厚度,盖层越厚,断距越小,盖层被破坏的程度就越小,相反,盖层厚度越小,断距越大,盖层的封闭能力就越有可能被断裂破坏。能否准确地确定断裂对盖层空间分布连续的破坏程度,同时搞清被断层破坏的盖层在什么情况下仍能保持有一定的封油气能力,对于研究油气纵向分布层位具有重要意义。

当下伏沙三段及沙一段一东三段源岩生成的油气

沿油源断裂向上部中浅层运移的过程中,必然会受到上覆盖层的阻挡作用,油气能否通过上述 3 套盖层继续向上运移,主要受上述 3 套盖层断接厚度(完整的盖层被断裂破坏之后,断层两盘内盖层对接部分的厚度)大小的控制^[19]。如果盖层被断裂完全错开或者盖层断接厚度小于某一值,油气将穿过盖层向上运移。相反,如果盖层断接厚度大于某一值,油气则不能穿过盖层向上运移。南堡凹陷明下段盖层沉积时期较晚,且该段盖层厚度大(一般厚度在 100 m 以上,而且在主要油气分布区域厚度均在 200 m 以上),盖层内断裂断距小(断裂在明下段泥岩盖层内的断距一般为 20 ~ 60 m),所以明下段盖层的断接厚度较大,加之地层埋藏浅,泥岩塑性强,因此,此盖层一般不受断层破坏,对油气的富集十分有利,通过各油田井数据分析可知,未见有油气穿越明下段泥岩盖层(图 1),故不作为盖层断接厚度研究的重点层位。而东二段泥岩盖层以及馆三段火山岩盖层受断裂切割作用明显,其上下油气层位分布情况复杂(图 1),是本文研究的重点层段。

通过统计 40 口探、评价井盖层厚度与断裂断距大小比较可以得到:当东二段泥岩盖层的断接厚度大于 90 ~ 95 m 时,油气无法穿过东二段泥岩盖层向上运移,只能分布在东二段泥岩盖层之下,如图 7 所示;当东二段泥岩盖层断接厚度小于 90 ~ 95 m 时,油气能够穿过东二段泥岩盖层向上运移,随着盖层断接厚度的继续减小,盖层垂向封闭能力减弱,断层输导能力增强,被封盖在东二段之下的油气也随之减少,直至全部穿东二段盖层进入上部储层。由此看出,东二段泥岩盖层封闭油气断接厚度的临界值为 90 ~ 95 m。

同样,统计了 44 口井在馆三段火山岩盖层内的断接厚度(图 8),发现:当馆三段火山岩盖层的断接厚度大于 130 ~ 150 m 时,从下部运移上来的油气无法穿越

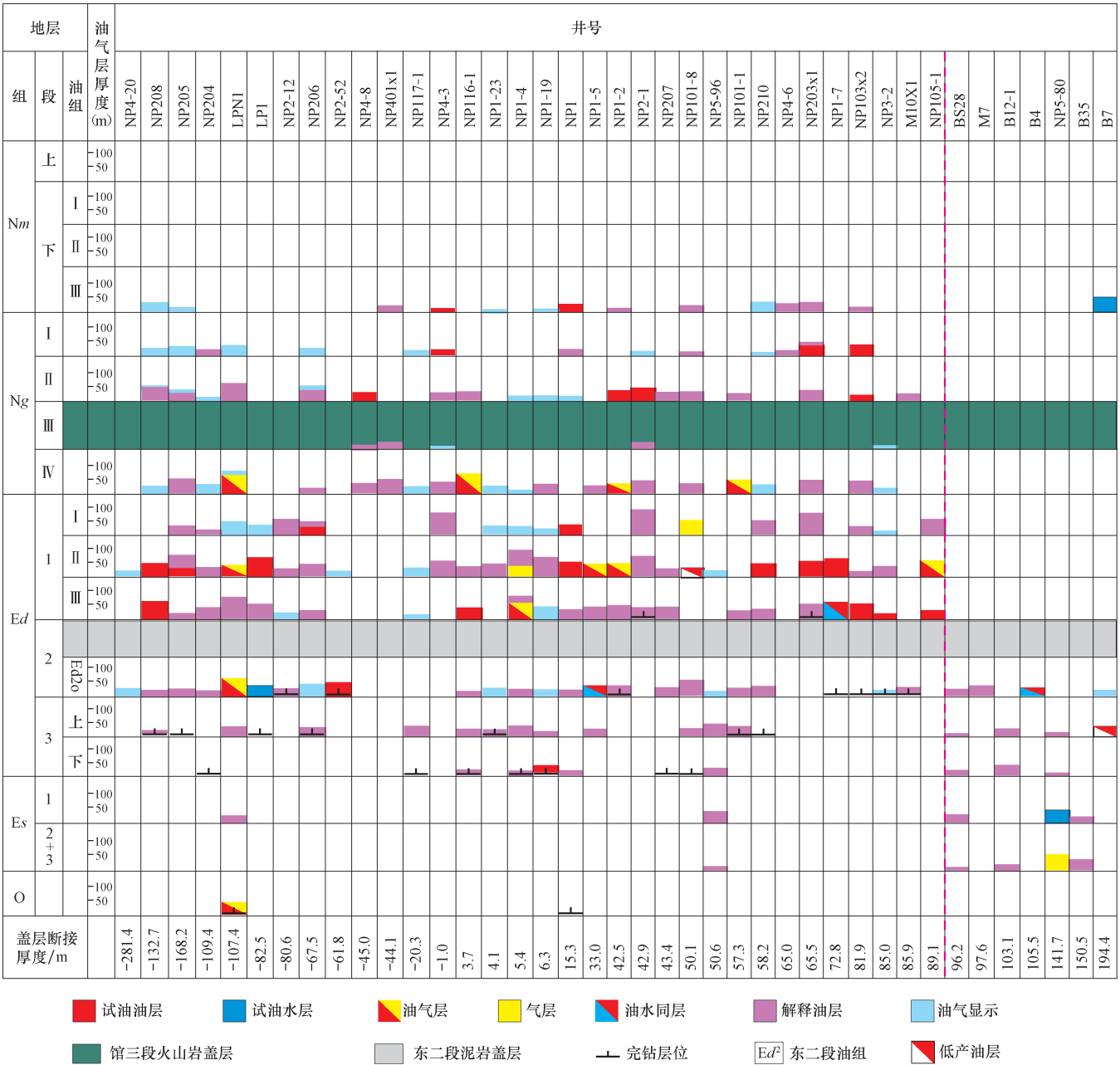


图7 南堡凹陷东营组二段泥岩盖层断接厚度与油气纵向分布关系

Fig. 7 Relation between juxtaposition thickness of the faulted Ed^2 mudstone caprock and vertical distribution of oil/gas layers in Nanpu sag

馆三段火山岩盖层继续向上运移,只能分布在馆三段火山岩盖层之下;而当馆三段火山岩盖层的断接厚度小于130~150 m时,油气可以穿过馆三段火山岩盖层继续向上部地层运移。由此厘定出馆三段火山岩盖层断接厚度的临界值为130~150 m。

通过对比可以发现,火山岩盖层的断接厚度临界值大于泥岩盖层的临界值,这是由于岩性影响所致,由于泥岩的塑性程度比火山岩高,随着断层断距的增加,断裂内部会形成以泥质成分为主的断层充填物,在断面压力的作用下,该充填物逐渐排出其孔隙水形成泥质断层岩,很容易使断层在短期内重新恢复封闭^[29];而火山岩的脆性程度远比泥岩高,随着破坏火山岩层断层断距的不断增加,在断裂带内会形成粒度很大的

火山碎屑充填^[30],该类充填物一方面在同样断面压力作用下形成断层岩所用时间比泥质充填物要长,另一方面由于碎屑颗粒大而使断层岩的封闭能力比泥质断层岩差,所以在所封油柱高度相似的情况下,火山岩盖层的断接厚度要大于泥岩盖层的断接厚度。

4 盖层-断层组合空间匹配控油模式

通过上述已厘定出的东二段泥岩和馆三段火山岩两套盖层能够封油气的断接厚度临界值,结合其上下油气分布关系,可以总结得到南堡凹陷中浅层盖层-断层组合空间匹配控油模式主要有3种:①下全封模式,该模式为东二段泥岩盖层的断接厚度大于该盖层

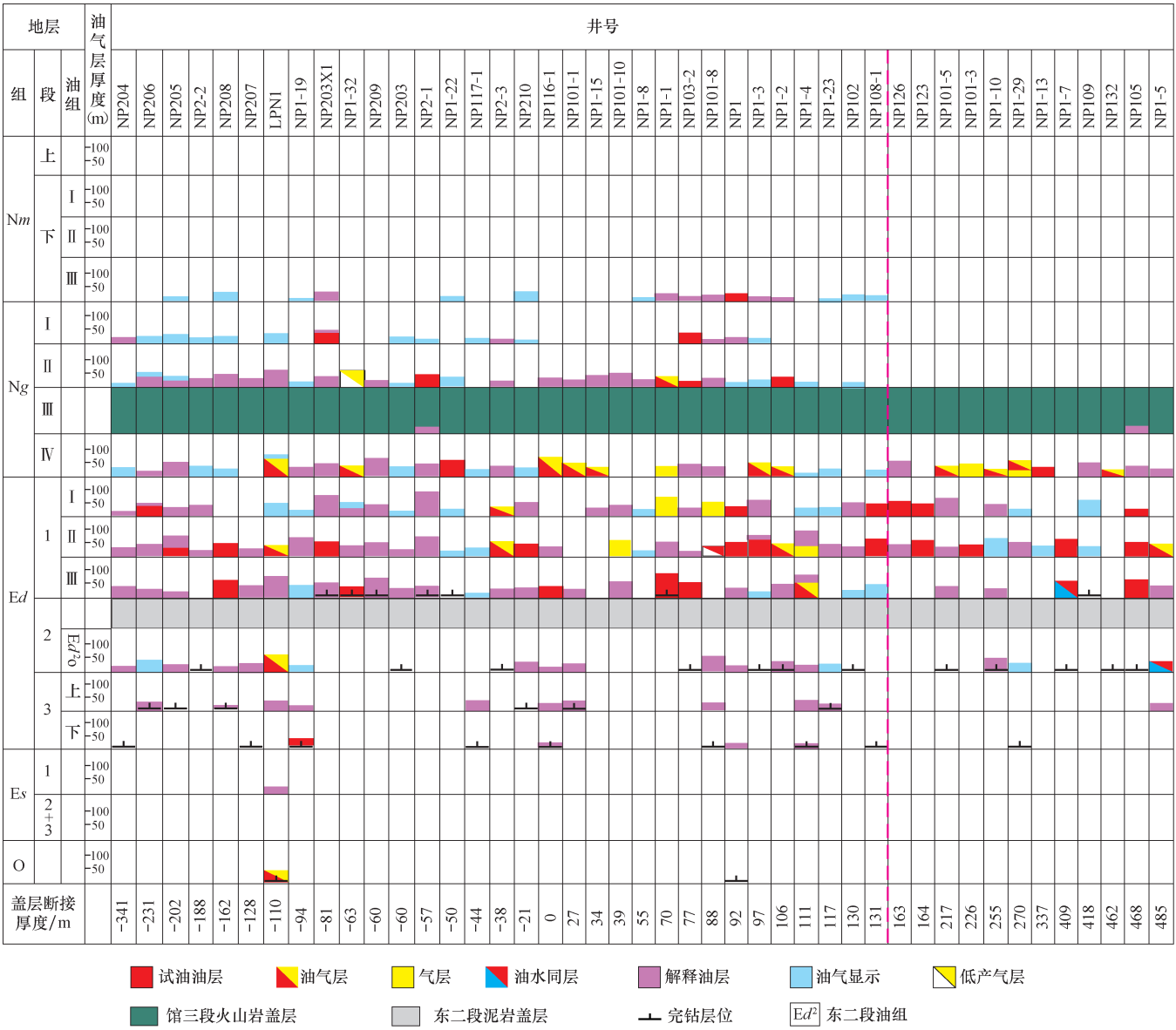


图8 南堡凹陷馆陶组三段火山岩盖层断接厚度与油气纵向分布关系

Fig.8 Relation between juxtaposition thickness of the faulted Ng³ mudstone caprock and vertical distribution of oil/gas layers in Nanpu sag

能够封盖油气的断接厚度临界值(90~95 m),其下部沙三段或者沙一—东三段两套烃源岩生成的油气就无法穿过东二段泥岩盖层向上部运移,油气只能在东二段之下聚集与分布,如图9a所选取的南堡5号构造典型油藏剖面所示;②下开中封模式,该模式为东二段泥岩盖层的断接厚度小于其能够封盖油气的断接厚度临界值(90~95 m),而馆三段火山岩盖层的断接厚度大于其能够封盖油气的断接厚度临界值(130~150 m),沙三段或沙一段—东三段两套烃源岩生成的油气可以穿过东二段泥岩盖层,但无法穿过馆三段火山岩盖层,油气将在两套盖层之间的东一段和馆四段储层中聚集与分布,也可以在东二段泥岩盖层之下也可以聚集与分布,如图9b所选取的南堡1号构造典型油藏剖面所示;③中下有限封盖模式,该模式东二段和馆三段两套盖层的断接厚度均小于能够封盖油气的断接厚度临界

值,沙三段或沙一段—东三段两套烃源岩生成的油气便可以穿过两套盖层,在东二段之下地层、东一段地层和馆陶组以及明下段地层中均可以聚集与分布,如图9c所选取的南堡1号构造典型油藏剖面所示。

5 典型区块有利含油层位预测

南堡1-5区块位于南堡1号构造南侧(图2),勘探面积约为50 km²,是南堡凹陷中浅层目前油气勘探的重点区块。本文选取其作为典型区块,利用上述盖层-断层组合空间匹配控油模式预测其有利的含油气层位。由图10及图11可以看出,勘探区域内主要发育f1-3,f4-48,f2-12以及f13-1四条油源断裂,它们均不同程度地破坏了东二段和馆三段两套盖层。通过钻井统计发现,在油源断裂f1-3控制区域内,东二

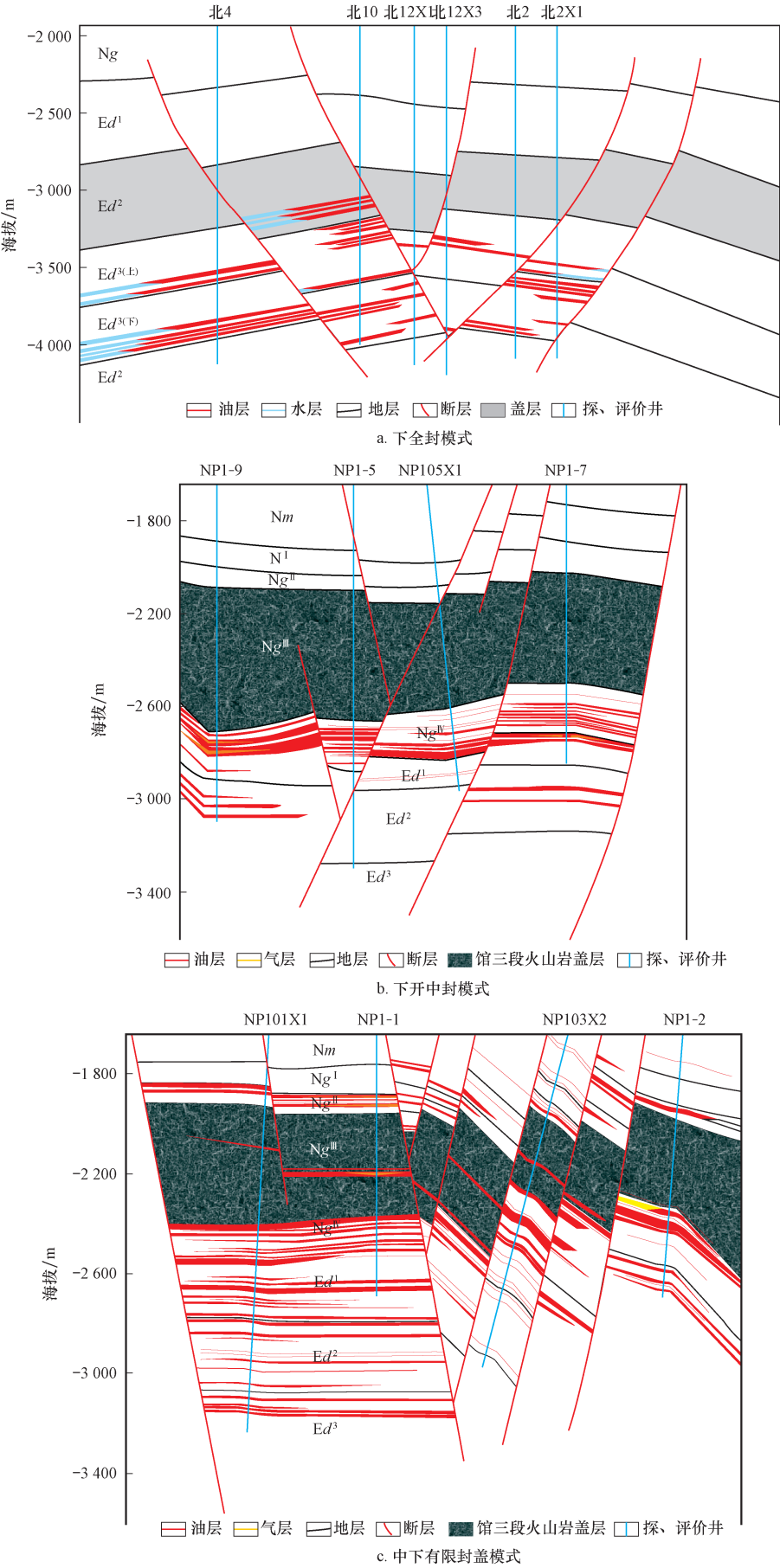


图 9 盖层 - 断层组合空间匹配控油模式典型剖面

Fig. 9 Typical reservoir sections of oil-controlling models of caprock-fault combination

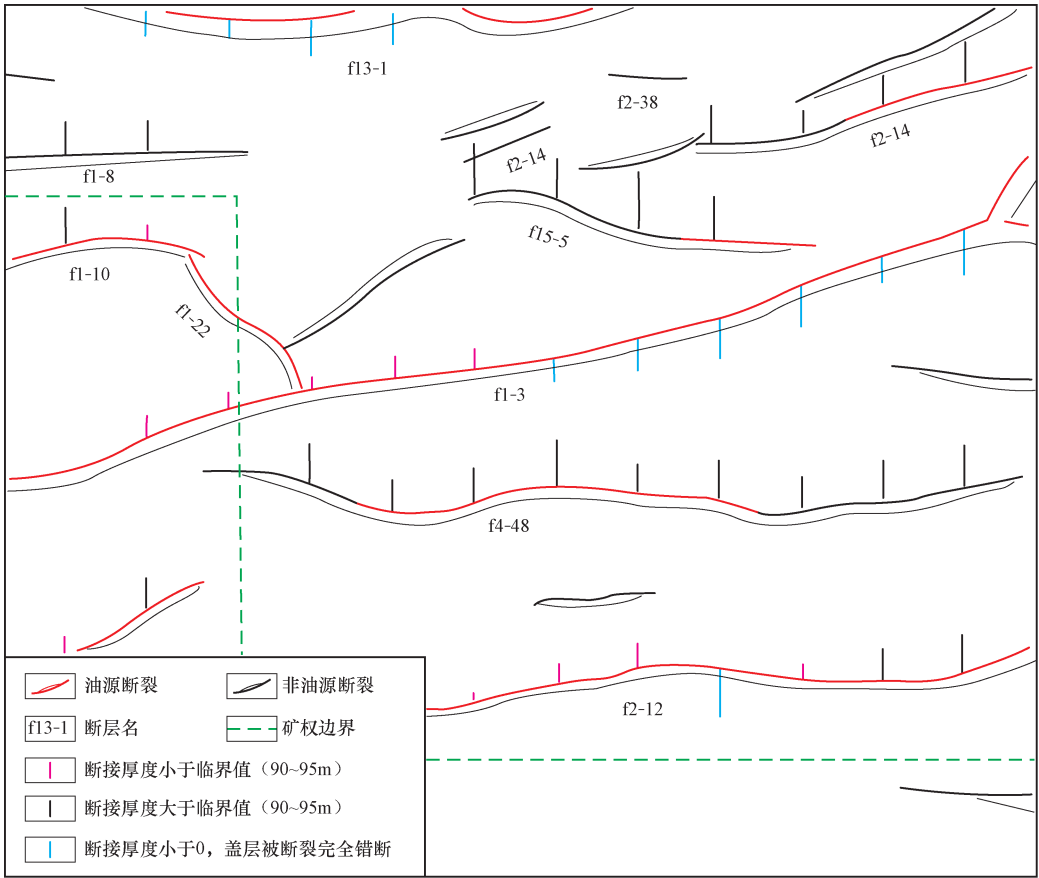


图 10 南堡 1-5 区东营组二段盖层断接厚度与油源断裂分布

Fig. 10 Juxtaposition thickness of the faulted Ed^2 caprock and distribution of source rock-rooted faults in Nanpu 1-5 block

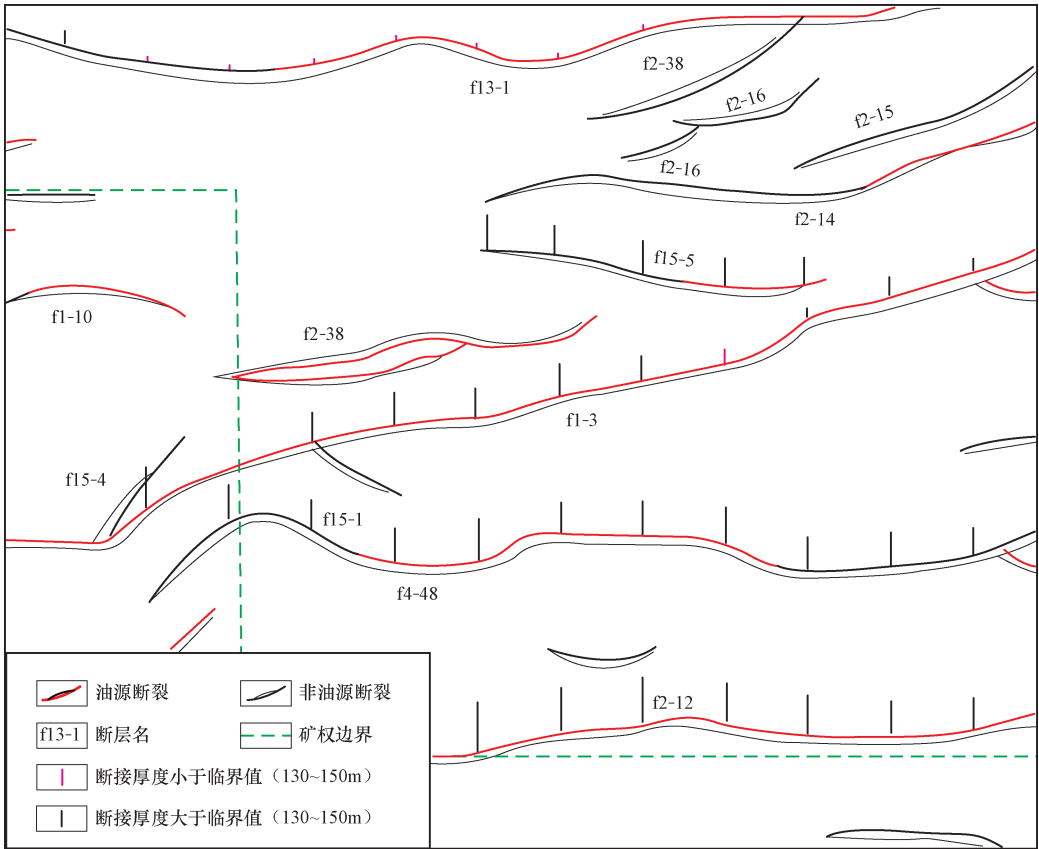


图 11 南堡 1-5 区馆陶组三段盖层断接厚度与油源断裂分布

Fig. 11 Juxtaposition thickness of the faulted Ng^3 caprock and distribution of source rock-rooted faults in Nanpu 1-5 block

段泥岩盖层的断接厚度小于(90~95 m)(图10),同时馆三段火山岩盖层的断接厚度大于(130~150 m)(图11),属于下开中封模式,按照上述盖层-断层组合空间匹配控油模式,预测f1-3断裂控制区域内的有利含油层位应为东一段、馆四段以及东二段之下地层;在油源断裂f4-48控制区域内,东二段盖层断接厚度大于(90~95 m)(图10),属于下全封模式,预测f4-48断裂控制范围内油气富集的有利层位应为东二段盖层之下;在油源断裂f2-12控制区域内,东二段泥岩盖层的断接厚度小于(90~95 m)(图10),而馆三段火山岩盖层的断接厚度大于(130~150 m)(图11),也属于下开中封模式,预测f2-12断裂控制区域内的有利含油层位应为东一段、馆四段以及东二段之下各套地层;在油源断裂f13-1控制区域内,东二段泥岩及馆三段火山岩盖层的断接厚度均小于其对应的临界值(图10,图11),属于中下有限封盖模式,从明下段、馆陶组、东一段至东二段之下各套地层均为油气聚集与分布的有利层位。

6 结论

1) 研究区有3套盖层,自下而上分别为东二段泥岩盖层、馆三段火山岩盖层以及明下段泥岩盖层。南堡凹陷东二段和馆三段是控制中浅层油气纵向分布的2套重要盖层,由于受到断裂的破坏致使盖层的有效封盖厚度减薄,其封闭油气的最小断接厚度临界值分别为90~95 m和130~150 m。明下段盖层由于其埋藏浅,其塑性相对比东二段高,断接厚度均大于东二段的临界断接厚度,推测断层对该盖层的封闭能力无破坏作用。

2) 南堡凹陷中浅层3套盖层-断层组合空间匹配控油模式有3种,分别是:下全封模式,油气的有利聚集层位位于东二段泥岩盖层之下;下开中封模式,油气聚集有利层位为东一段、馆四段以及东二段泥岩盖层之下的各套地层;中下有限封盖模式,油气聚集有利层位为东二段之下地层、东一段地层和馆陶组以及明下段地层。

3) 油源断裂f1-3及f2-12控制区域属于下开中封模式,预测其有利含油层位应为馆四段、东一段及东二段泥岩盖层之下地层;油源断裂f4-48控制区域属于下全封模式,预测油气聚集的有利层位应为东二段泥岩盖层之下的各套地层;油源断裂f13-1控制区域属于中下有限封盖模式,油气可能聚集在明下段盖层之下的所有储层。

参考文献

[1] 刘蕴华,周海民,熊保贤,等.南堡凹陷的含油气系统分析[J].石

油与天然气地质,2000,21(4):364-374.

Liu Yunhua, Zhou Haimin, Xiong Baoxian, et al. Analysis of petroleum system in nanpu sag[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(4): 364-374.

[2] 周海民,魏忠文,曹中宏,等.南堡凹陷的形成演化与油气的关系[J].石油与天然气地质,2000,21(4):345-349.

Zhou Haimin, Wei Zhongwen, Cao Zhonghong, et al. Relationship between formation, evolution and hydrocarbon in Nanpu sag[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(4): 345-349.

[3] 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.

[4] 孙永河,赵博,董月霞,等.南堡凹陷断裂对油气运聚成藏的控制作用[J].石油与天然气地质,2013,34(4):540-549.

Sun Yonghe, Zhao Bo, Dong Yuexia, et al. Control of faults on hydrocarbon migration and accumulation in the Nanpu Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 540-549.

[5] 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.

[6] 范柏江,董月霞,庞雄奇.有效源岩的精确厘定及其排烃量:以南堡凹陷为例[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(1):229-237.

Fan Bojiang, Dong Yuexia, Pang Xiongqi. Establishment of effective source rock and hydrocarbon expulsion quantity; taking nanpu sag for example[J]. Journal of Central South University(Science and Technology Edition), 2012, 43(1): 229-237.

[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] 肖军, Kamaye Tourbal, 王华, 等.渤海湾盆地南堡凹陷火山岩特征及其有利成藏条件分析[J].地质科技情报,2004,(1):53-57.

Xiao Jun, Kamaye Tourbal, Wang Hua, et al. Characteristics of igneous rocks and their favorable forming conditions in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Science and Technology Information, 2004, (1): 53-57.

[9] 王家豪,王华,王根发.南堡凹陷厚层泥岩的封盖作用及期与油气的关系[J].石油实验地质,2001,4(23):418-423.

Wang Jiahao, Wang Hua, Wang Genfa. Capping of thick mudstones and its relationship with oil and gas in the Nanpu depression[J]. Experimental Petroleum Geology, 2001, 4(23): 418-423.

[10] 史集建,付广,吕延防,等.歧口凹陷沙河街组一段中部区域盖层封气能力综合评价[J].石油与天然气地质,2011,32(5):671-681.

Shi Jijian, Fu Guang, Lü Yanfan, et al. Comprehensive evaluation of regional seal in the middle of the first member of Shahejie Fm in the

- Qikou Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(5): 671-681.
- [11] 史集建, 吕延防, 付广, 等. 松辽盆地徐家围子断陷火山岩盖层封气能力综合定量评价[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 424-431.
- Shi Jijian, Lü Yanfang, Fu Guang, et al. Synthetically and quantitatively assessing gas-sealing ability of volcanic cap rocks in the Xujia-weizi Sag of the Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 424-431.
- [12] 田涛, 蒋有录, 万涛, 等. 南堡凹陷断裂发育特征及其演化机制[J]. 断块油气田, 2012, 19(04): 409413.
- Tian Tao, Jiang Youlu, Wan Tao, et al. Development characteristics of fault and its evolution mechanism in Nanpu Sag[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2012, 19(04): 409413.
- [13] 刘哲, 付广, 吕延防, 等. 南堡凹陷断裂对油气成藏控制作用的定量评价[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(1): 27-34.
- Liu Zhe, Fu Guang, Lü Yanfang, et al. Quantitative evaluation for control of faults on hydrocarbon accumulation in Nanpu sag[J]. Journal of China University of Petroleum, 2013, 37(1): 27-34.
- [14] 史集建, 李丽丽, 付广, 等. 盖层内断层垂向封闭性定量评价方法及应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(增刊2): 162-170.
- Shi Jijian, Li Lili, Fu Guang, et al. Quantitative evaluation method and application of vertical sealing property of faults in caprock[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2012, 42(S2): 162-170.
- [15] 付广, 张超群. 气源断裂与盖层时空匹配关系及对天然气成藏的控制作用——以徐家围子断陷为例[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(1): 51-55.
- Fu Guang, Zhang Chaoqun. Time and space matching relation between gas source faults and cap rocks and its controlling action on gas accumulation; an example from Xujiaweizi Depression[J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(1): 51-55.
- [16] 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): 754-761.
- Li Hongyi, Zhang Zhenxue, Dong Yuexia, et al. Control of faults on hydrocarbon migration and accumulation in Nanpu sag, Bohai Bay Basin[J]. Geoscience, 2010, 24(4): 754-761.
- [17] 董月霞, 汪泽成, 郑红菊, 等. 走滑断层作用对南堡凹陷油气成藏的控制[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(4): 424-430.
- Dong Yuexia, Wang Zecheng, Zheng Hongju, et al. Control of strike-slip faulting on reservoir formation of oil and gas in Nanpu sag[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(4): 424-430.
- [18] 付广, 付晓飞, 吕延防. 盖层对油气聚集的控制作用[J]. 天然气地球科学, 1999, 10(5): 17-22.
- Fu Guang, Fu Xiaofei, Lü Yanfang. Controlling effect of cap rock on oil-gas accumulation[J]. Natural Gas Geoscience, 1999, 10(5): 17-22.
- [19] 吕延防, 万军, 沙子萱, 等. 被断裂破坏的盖层封闭能力评价方法及其应用[J]. 地质科学, 2008, 43(1): 162-174.
- Lü Yanfang, Wan Jun, Sha Zixuan, et al. Evaluation method for sealability of caprock destructed by faulting and its application[J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(1): 162-174.
- [20] 曹成润, 吕延防, 陈章明. 盖层有效封盖厚度定量分析[J]. 中国海上油气(地质), 1998, 12(5): 328-331.
- Cao Chengrun, Lü Yanfang, Chen Zhangming. Quantitative analysis of effective seal rock thickness[J]. China Offshore Oil and Gas, 1998, 12(5): 328-331.
- [21] Ingram G M, Urai J L. Top-seal leakage through faults and fractures: the role of mudrock properties[C]//Aplin A C, Fleet A J, Macquaker J H S. Muds and mudstone; physical and fluid-flow properties. Geological Society Special Publications, 2011, 158: 125-135.
- [22] 付广, 周亮, 安立刚. 油源断裂输导油气能力定量评价与油气聚集——以南堡凹陷东一段为例[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(4): 8-12.
- Fu Guang, Zhou Liang, An Ligang. Quantitative evaluation for hydrocarbon transport ability of faults connected with source rocks and relation with hydrocarbon accumulation: An example from Ed¹ of Nanpu Depression[J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(4): 8-12.
- [23] 谢建磊, 杨坤光. 冀东南堡凹陷关键成藏时刻主要断裂封闭性分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2006, 21(3): 5-9.
- Xie Jianlei, Yang Kunguang. Analysis of the closeness of the main faults in Nanpu Sag in southeastern Hebei at key hydrocarbon accumulation moments[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2006, 21(3): 5-9.
- [24] 周海民, 董月霞, 刘蕴华, 等. 断陷盆地油气勘探理论与实践——以渤海湾盆地南堡凹陷为例[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
- Zhou Haimin, Dong Yuexia, Liu Yunhua, et al. Theory and practice of petroleum exploration in fault basin—take Nanpu Sag in Bohai bay basin as an example[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005.
- [25] Watts N L. Theoretical aspects of cap-rock and fault seals for single and two phase hydrocarbon columns[J]. Marine and Petroleum Geology, 1987, 4: 274-307.
- [26] Caillet G, Judge N C, Bramwell N P, et al. Overpressure and hydrocarbon trapping in the Chalk of the Norwegian Central Graben[J]. Petroleum Geoscience, 1997, 3(1): 33-42.
- [27] Holm G M. Distribution and origin of overpressure in the central Graben of the North Sea[C]. American Association of Petroleum Geologists Memoirs, 1998: 123-144.
- [28] H Sibson R. Conditions for fault-valve behavior[J]. Geological Society, 1990, 54: 15-28.
- [29] Holland M, Urai J L, Van Der Zee, et al. Fault gouge evolution in highly overconsolidated claystones[J]. Journal of Structural Geology, 2006, 28(2): 323-332.
- [30] Gray M B, Stamatakis J A. Fault-zone deformation in welded tuffs at Yucca Mountain, Nevada, USA[J]. Journal of Structural Geology, 2005, 27: 1873-1891.

(编辑 董立)