

松南中央坳陷泉四段上生下储式致密砂岩 油成藏主控因素

蔡来星^{1,2,3}, 卢双舫¹, 张训华^{2,3}, 黄文彪¹, 肖国林^{2,3}, 吴志强^{2,3}

(1. 中国石油大学非常规油气与新能源研究院, 山东青岛 266580; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 山东青岛 266071; 3. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266071)

摘要:基于“优质源岩控藏”理论和“储层甜点找油”思想,应用测、录井、试油、薄片等资料,系统总结松南中央坳陷区泉四段致密油的分布规律,剖析不同类型致密砂岩油成藏的主控因素。研究表明:致密砂岩油藏集中分布在长岭凹陷内及其周边斜坡区,具有“满坳含油、宏观连片”的特征和“东富西贫、南富北贫”的差异性;青一段下段烃源岩残余有机碳含量(TOC)大于2.0%的优质源岩展布范围控制致密油藏分布格局;异常高压与源储断层的空间配置关系控制下部砂组含油性,剖面上油气下排深度最大为140 m;平面上超压大于10 MPa、与断层距离小于2500 m的区域是Ⅱ~Ⅳ砂组的致密油藏富集区;优质储层物性“甜点”控制致密油富集程度及产量;坳陷型湖盆上生下储式致密砂岩油藏的形成主要存在凹陷区“源内直排倒灌”和斜坡区“源边反转断层遮挡”两种成藏模式。

关键词:主控因素;致密砂岩油藏;上生下储;泉四段;松南中央坳陷区

中图分类号:TE 122.1

文献标志码:A

引用格式:蔡来星,卢双舫,张训华,等.松南中央坳陷泉四段上生下储式致密砂岩油成藏主控因素[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(6):9-21.

CAI Laixing, LU Shuangfang, ZHANG Xunhua, et al. Main controlling factors of above-generation and below-storage tight sandstone oil reservoirs of Quantou 4 Formation of central depression in southern Songliao Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(6):9-21.

Main controlling factors of above-generation and below-storage tight sandstone oil reservoirs at Quantou 4 Formation of central depression in southern Songliao Basin

CAI Laixing^{1,2,3}, LU Shuangfang¹, ZHANG Xunhua^{2,3},
HUANG Wenbiao¹, XIAO Guolin^{2,3}, WU Zhiqiang^{2,3}

(1. Research Institute of Unconventional Petroleum and Renewable Energy in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China;

3. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China)

Abstract: This paper systematically studied different types of tight sandstone oil reservoirs in Quantou 4 Formation, based on the theory of "high-quality source rocks control hydrocarbon accumulation" and the idea of "explore tight oil through sweet spots". Extensive field data such as logging, oil tests and sandstone thin sections were used. The results show that the tight sandstone oil reservoir is widely distributed in Changling depression and its surrounding slope area, which is characterized as full oil whole depression but with rich deposition imbalancedly distributed more in the eastern and southern regions. The dis-

收稿日期:2016-06-25

基金项目:国家“973”专项课题(2014CB239005);国家重点自然科学基金项目(41330313);国家自然科学基金项目(41402109);国家油气重大专项(2011ZX05007-001)

作者简介:蔡来星(1985-)男,博士,研究方向为地质资源与地质工程。E-mail:qingxin717717@126.com。

通讯作者:卢双舫(1962-)男,教授,博士,博士生导师,研究方向为油气地球化学及油气地质学。E-mail:lushuangfang@qq.com。

tribution range of high-quality source rocks whose TOC>2.0% at bottom of Qingshankou 1 Formation controls the pattern of the tight sandstone oil reservoir. The relation between abnormally high pressure and source faults controls the formation of oil reservoir in the lower part of Quantou 4 Formation. The maximum depth of down-migration is estimated 140 m. The area whose overpressure higher than 10 MPa and distance faults shorter than 2500 m is an enrichment area of tight sandstone oil reservoir in II ~ IV sand group of Quantou 4 Formation. These sweet spots of high-quality reservoir control the degrees of enrichment and production of tight sandstone oil reservoir. Our research indicates that "directly drained migration" within source rocks area and "reverse fault screened" in the side slope are two main models for above-generation and below-storage tight sandstone oil reservoirs to formed in depressed lake basins.

Keywords: main controlling factors; tight sandstone oil reservoirs; above-generation and below-storage; Quantou 4 Formation; central depression in southern Songliao Basin

虽然目前国内外学者对“致密油”的概念认识不一^[1-5],但预计到2030年全球石油产量将较目前增长1 610万桶/d,其中有近一半来自致密油^[6]。对于松辽盆地南部中央坳陷区而言,泉四段致密砂岩油预测地质储量约 1.0×10^9 t。针对松辽盆地南部中央坳陷区泉四段致密砂岩油的成藏机制,不同学者持有不同观点,李传亮^[7]、张景廉等^[8]认为上生下储式油气成藏的模式不可能成立,因为上部烃源岩生烃过程中不会产生超压,油气“倒灌”运移缺少最根本的动力^[7-8];然而在非均质性强烈的泥岩中因欠压实作用、生烃增压作用等产生异常高压的观点已经得到国内外大量专家学者的认同^[9-12],同时通过一系列物理模拟实验和数值模拟实验可以确定,上生下储式油藏的形成以超压作为驱动力,具有科学性和必然性^[13-17]。另外,一些学者通过油源对比等方法,确定泉四段的油源来自于青一段生油层^[17-19];在青山口组沉积时期松辽盆地南部中央坳陷区迅速扩张,青一段泥岩在快速沉降过程中受到上覆地层的不均衡压实作用,于嫩江组时期开始形成古超压,之后在喜山Ⅲ幕运动影响下,盆地深部第三次热流高峰促使青一段泥岩在嫩江组沉积时期(距今80~76 Ma)开始大量生烃,古超压值进一步增大^[20]。至明水组末期,青一段异常高压促使烃类沿断层、微裂缝向下运移至泉四段储层中聚集成藏^[21-23]。众多学者对松辽盆地泉四段油藏的主控因素进行过总结^[24-26],如黄薇等^[24]提出“ $R_o > 0.7\%$ 的成熟源岩控制致密油分布范围”;孙雨等^[25]通过研究证明青一段超压是油气向下运移的动力。笔者旨在明确研究区内致密砂岩油藏富集规律,总结优质源岩、优质储层、异常高压及油源断层的控藏作用,注重分析超压与断层的空间配置关系在油气下排运移中的作用,建立坳陷型湖盆上生下储式致密砂岩油藏成藏模式,为下一步勘探提供指导。

1 研究区地质概况

松辽盆地南部中央坳陷区面积约 1.72×10^4 km²,可以分为长岭凹陷、红岗阶地、华字井阶地、扶新隆起带和东南隆起带共5个二级构造带,研究区分布在长岭凹陷及周边斜坡区,展布面积约5 000 km²。青一段呈不整合接触关系覆盖在泉四段之上,主要发育大套厚层暗色泥岩,具有高强度生、排烃特征且发育强超压^[25];而泉四段由上至下发育I~IV砂组,砂岩类型主要为长石质岩屑砂岩和岩屑质长石砂岩,在经历强压实、强胶结、弱溶解的成岩作用后,物性特征表现为近95%的样品孔隙度 $\varphi < 12\%$ 和渗透率 $k < 1 \times 10^{-3}$ μm。由含烃流体包裹体测试和热史、埋藏史分析,长岭凹陷内砂岩储层在约距今87 Ma已达到致密上限;在约距今80 Ma时,青一段泥岩生成的油气在超压推动下充注至泉四段致密储层中聚集成藏^[25-27],目前已发现了海坨子、两井和大安北等致密油藏(图1,据吉林油田勘探院,略有修改)。

2 致密油藏富集规律

松辽盆地南部中央坳陷区泉四段沉积时期以弱还原—弱氧化环境为主^[28],主要发育水下分流河道与河口坝砂体,在此地质框架内致密油藏呈条带状展布特征。从致密油油层厚度平面分布特征来看,泉四段砂体具有“满拗含油、宏观连片”的特征。

对研究区180余口井的测、录井资料进行统计,结合试油试采等生产数据,绘制致密油区内油层厚度等值线图。结果表明,平面上在整个致密储层展布范围内均可见油层,其中长岭凹陷内中、南部的让字号井区、乾字号井区和华字井阶地靠近凹陷区的孤字号井区,致密油最为富集,油层厚度集中在40~50 m范围内,日产油量为10.15~28.2 t;而长岭凹陷北部查字号井区、红岗阶地大字号井区的油层

厚度较薄,多为 4~8 m,日产油量仅 0.31~3.41 t,是研究区内的资源匮乏区。

剖面上,对比 4 个砂组的油层厚度可以看出,Ⅱ、Ⅲ砂组是致密油最为富集的层段,大部分油层厚度集中在 12~20 m,只在长岭凹陷中部和红岗阶地斜坡区发育少量厚度小于 8 m 的油层;Ⅳ砂组油层厚度最薄且呈现零星分布的特征,除长岭凹陷让 53 井区发育小片厚约 20 m 的油层外,其他位置的油层

厚度多小于 8 m,甚至不见油气显示。顶部砂组与下部砂组的砂体含油性呈现极高的互补特征:在Ⅰ砂组中油气富集的区块 1、2 位置在Ⅲ砂组中只发育非常薄的油层;而Ⅰ砂组中不见油气显示的区块 3 位置却是Ⅲ砂组的油气富集区;Ⅱ砂组砂体夹于Ⅰ、Ⅲ砂组之间,其油层厚度及展布特征也呈现过渡性趋势,充分体现了油气在泉四段致密储层中下排倒灌的运移路径(图 2)。

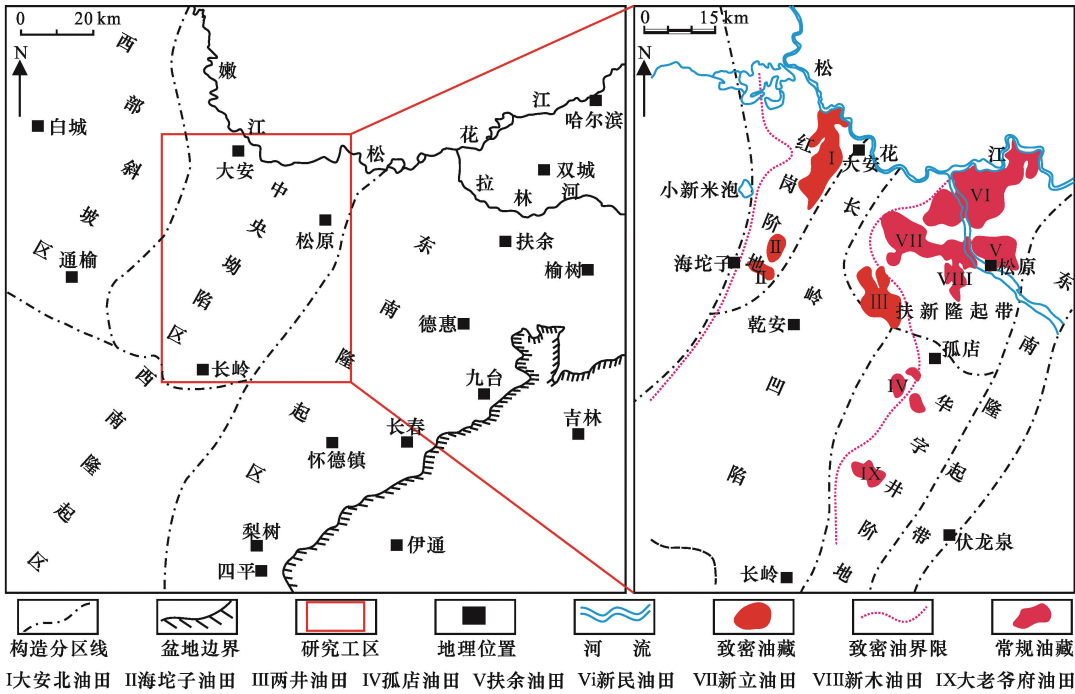


图 1 松南中央坳陷区地理位置及构造分区

Fig.1 Location and structure of central depression in southern Songliao Basin

3 致密油成藏主控因素

3.1 优质源岩展布范围控制致密油藏分布格局

在致密油气成藏过程中,“优质源岩控藏”的观点得到了众多学者的一致认同^[29-31]。参考卢双舫等^[31]提出的优质源岩评价方法,笔者利用源岩排烃量与有机质丰度的拐点厘定源岩级别,认为在拐点之上随烃源岩残余有机碳含量(TOC)增大,排烃量明显升高的源岩为优质源岩,其对应的 TOC 下限为 2.0%^[17]。

3.1.1 优质源岩发育范围

在确定上述优质源岩 TOC 下限后,应用 $\Delta\log R$ 方法对 TOC 数据进行测井拟合^[34],拟合效果良好,符合率高达 92%。进而统计研究区 266 口井中 TOC 大于 2.0% 的优质源岩厚度,对源岩空间展布规律进行详细解剖;纵向上,青一段下段优质源岩的厚度在长岭凹陷中部达到 40~50 m,且横向连接成

片,上段优质源岩厚度仅约 10 m 且展布不稳定;平面上,厚度大于 40 m 优质源岩的排烃强度也多大于 $50\times 10^4\text{ t/km}^2$,集中发育在长岭凹陷和西部斜坡带^[17],基本涵盖了致密油藏富集范围(图 3)。

3.1.2 优质源岩厚度

在优质源岩发育区(厚度大于 45 m),泉四段油气下排最大深度可达 160 m,其生、排烃贡献明显大于有效源岩,对致密油成藏的控制作用也最强^[17];劣质源岩的排烃贡献最差,甚至随着其厚度的增加,石油下排深度呈变小趋势,说明劣质源岩对致密油成藏基本没有贡献(图 4(a))。同时,青一段下段优质源岩的控藏作用明显强于上段优质源岩^[17],这是因为虽然两者的生、排烃强度相似,且生成的石油均在上覆超压驱动下向下运移、充注(图 4(b)),但上段源岩排出的烃类会受到下段泥岩的阻挡。紧邻泉四段砂岩的青一下段优质源岩具有“多生优排”的特征,是泉四段成藏的主力烃源岩,在其累计厚度

为 40 m 时,石油下排深度便可达 160 m^[17]。

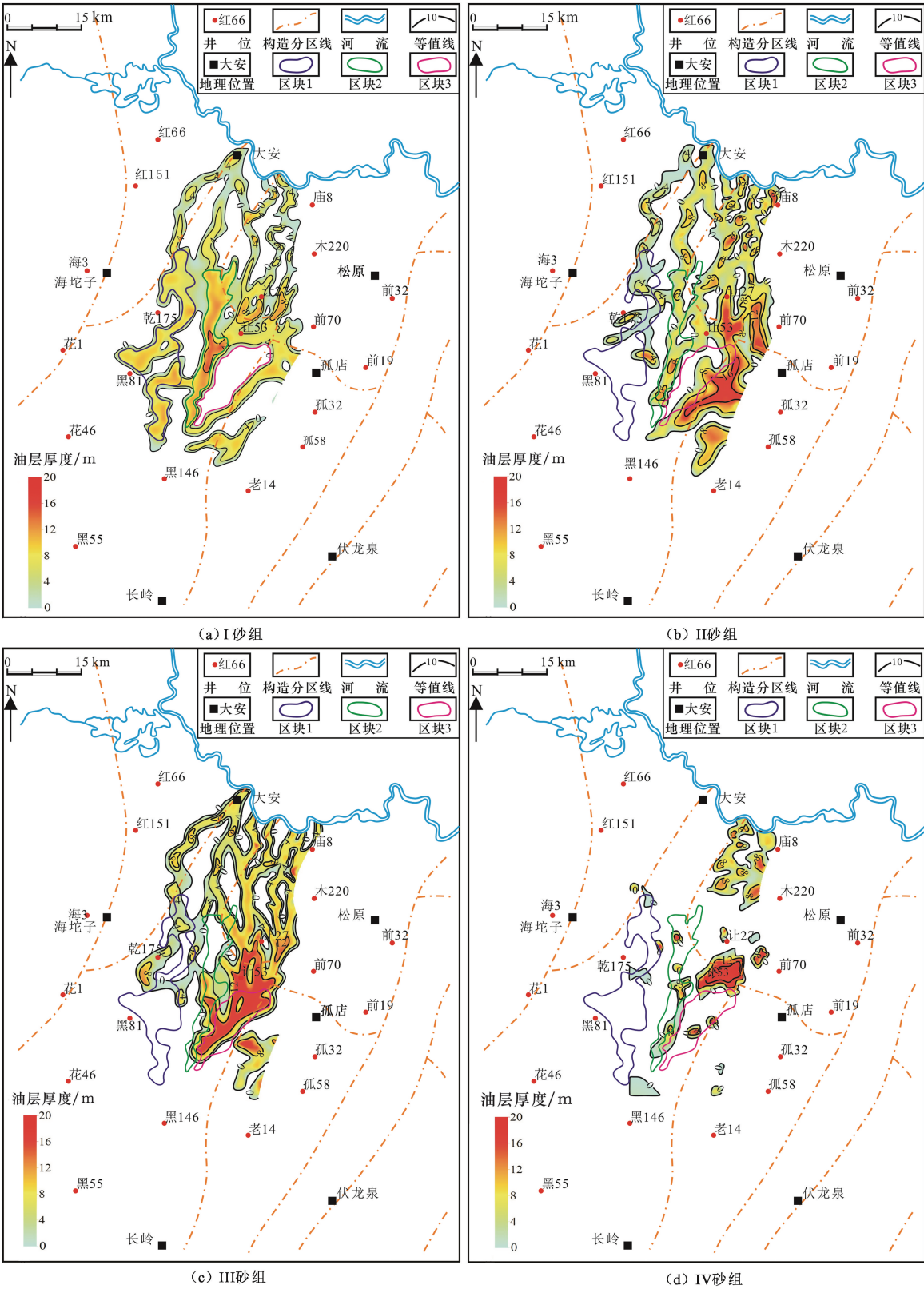


图 2 松南中央坳陷区泉四段致密油油层厚度等值线图

Fig. 2 Contour maps of tight oil reservoir thickness in Q₄ Formation at central depression in southern Songliao Basin

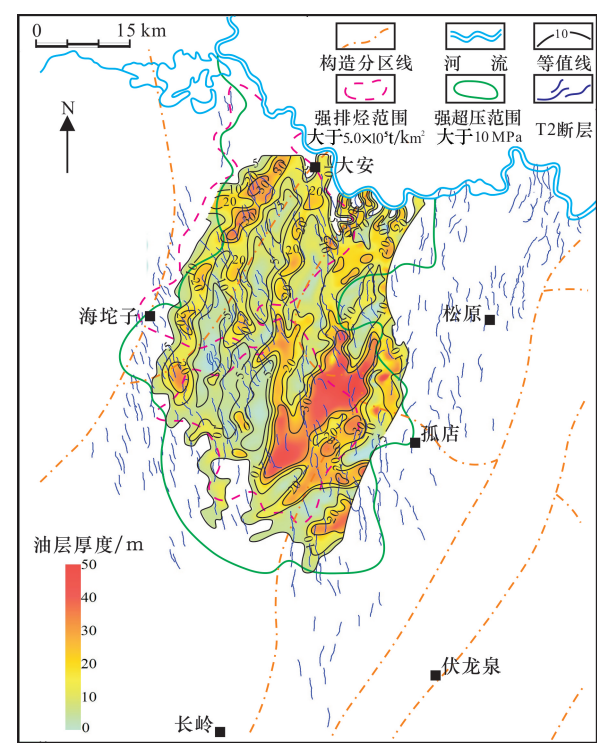


图 3 松南中央坳陷区青一段优质源岩、超压、 T_2 断层及泉四段油层厚度平面分布叠合图

Fig. 3 Overlapping map of high-quality source rocks and overpressure in Q_{n1} and distribution of reservoir thickness in Q_4 and T_2 fault at central depression in southern Songliao Basin

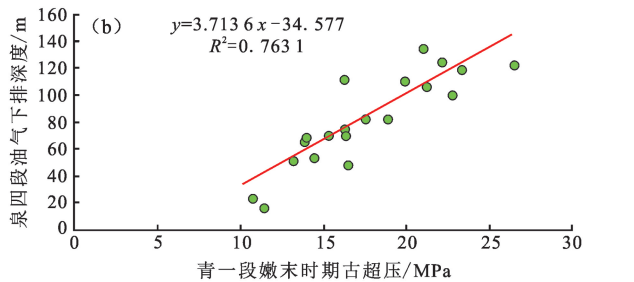
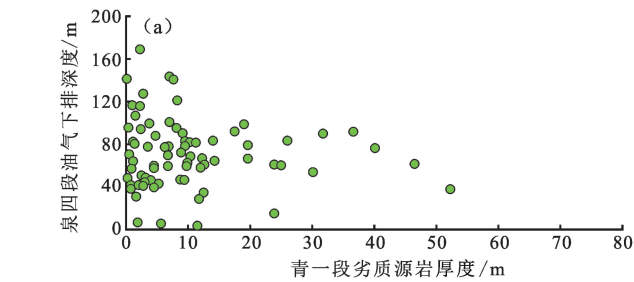


图 4 青一段源岩、古超压与泉四段油气下排深度关系

Fig. 4 Correlation diagrams of source rock thickness, ancient overpressure in Q_{n1} Formation and oil discharge depth in Q_4 Formation

T_2 断层密集带作为沟通源储的重要运移通道,对泉四段下部砂组的油气富集程度也具有明显的控制作用;随着探井与断层距离的不断增大,含油砂体累计厚度逐步减薄、单砂体含油饱和度逐渐降低。油气由青一段下排至泉四段储层时首先充注 I 砂组砂体,在多通道、足油源的影响下, I 砂组砂体的最远侧向运移距离约为 5000 m;与此同时部分油气也已到达下部 II ~ IV 砂组并在物性较好的砂体中进行短距离侧向运移,但随着砂组埋深的增大,油源减少

3.2 异常高压与源储断层的空间配置关系

在嫩末沉积时期,松南中央坳陷区内沟通青一段源岩与泉四段储层的 T_2 断裂活动开启,密度可达 0.12 条/ km^2 ,以北北西为主要走向,南北走向的断层次之,北北东走向的断层较少,延伸长度一般超过 5 km^[35]。此时青一段古超压得以释放^[36],青一段生成的油气克服毛细力和浮力的阻挡作用,下排至泉四段致密储层。对于顶部 I 砂组砂体而言,除了近源优势,其输导体系也具有多样性,沟通源储的 T_2 断层、超压作用下产生的泥岩微裂缝以及断层两盘砂泥对接的方式^[22]都可以为油气充注提供运移通道;但对于下部 II ~ IV 砂组,上覆异常高压和源储断层的空间匹配关系才是制约其含油性的关键地质因素^[23]。

3.2.1 超压和 T_2 源储断层平面配置

基于 Petromod 软件,对研究区内 188 口单井的超压史模拟结果进行分析后认为,在长岭凹陷内古超压最高可达 20 MPa,而相应高压发育部位的油层累计厚度也约 50 m;同时,斜坡带油气富集区域也被涵盖在古超压值大于 10 MPa 的平面范围内,否则即使 T_2 源储断层存在致密油也难以下排成藏(图 3)。

且超压降低,油气侧向运移的最远距离逐渐减小;在 II、III 砂组中,探井与断层距离 2500 ~ 2600 m 时,砂体含油饱和度递减为 0;而在底部 IV 砂组中,油气侧向运移的最远距离仅为 1600 m(图 5(a) ~ (d))。由此可见,限于下部砂组“远源少油”的劣势,上覆超压和源储断层的平面匹配关系,成为制约其油气富集范围的关键因素。

3.2.2 超压和 T_2 源储断层剖面配置

在相同的地质背景下,断层可作为沟通源储的

优势运移通道。相比距离断层较远的井位,近断层砂体具有快速捕获油气的优势,尤以泉四段下部砂组最为明显^[17]。研究区内让 53-37、让 70 等单井的泉四段油层厚度达 42~46 m,平均产油为 7.2 t/d,含油饱和度处于 36%~59% 范围内,这说明泉四段致密油藏以双油源断层控制下的地堑、地垒最为富集,上覆青一段烃源岩生成的石油在双向超压驱动下克服毛管阻力、浮力后,通过“双通道”运移至泉四段储层,所以这样的构造位置是油气聚集的优

势部位(图 6(a)、(b));而单油源断层控制下的砂体中,若是地层上倾,则油气相对富集(图 6(b)),但不能与深大断裂相交,否则油气会顺断层而上,在砂体中形成“过而不留”的现象(图 6(c));若地层下倾,则油气只聚集在近断层位置,尤其是下部砂组,含油饱和度会明显减低(图 6(b)、(c)),这是因为随着油气的不断运移、充注,下部砂组的油源逐步减少、超压逐渐衰减,且运移阻力明显增大。

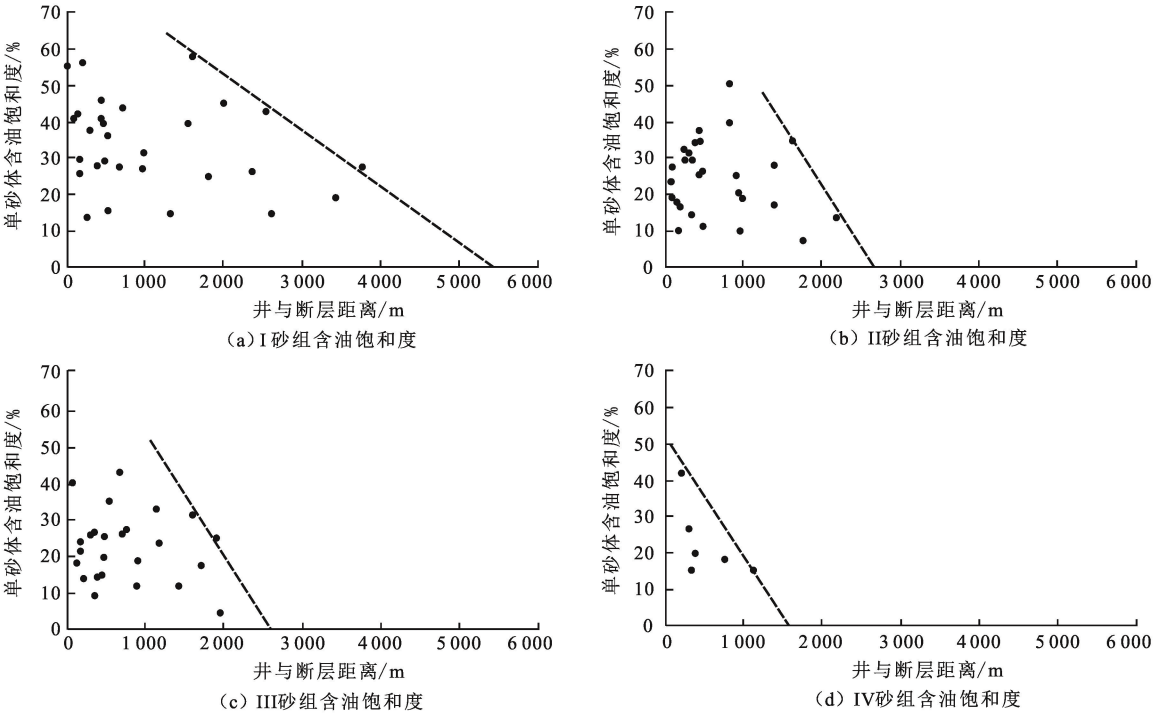


图 5 青一段超压、 T_2 断层与泉四段砂体含油饱和度关系

Fig. 5 Correlation diagrams of overpressure in Qn_1 Formation, fault of T_2 and reservoir oil saturation in Q_4 Formation

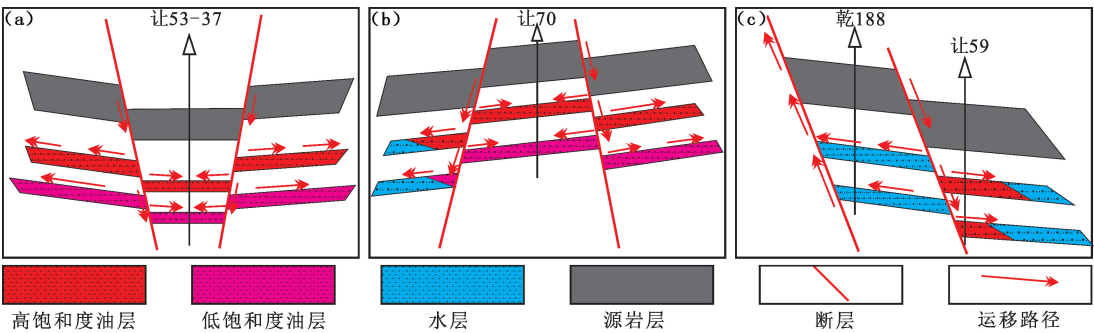


图 6 泉四段断裂控藏模式

Fig. 6 Pattern of fault in controlling hydrocarbon accumulation of Q_4 Formation

3.3 优质储层控制致密油富集程度

3.3.1 砂体展布控制油层累计厚度

松辽盆地南部中央坳陷区泉四段主要发育的水

下分流河道与河口坝砂体作为油气富集的主要场所,是制约其分布特征及富集程度的地质框架。以研究区内乾安构造带为例进行解剖发现,水下分流

河道以条带状展布,河口坝以透镜状存在,钻遇这两种砂体的乾深12、乾215、乾深1、让40等多口井的泉四段油层富集程度高,其累计厚度处于15~25 m范围内;而乾207、乾深3等位于河道间湾的井,其

泉四段岩性主要发育泥质粉砂岩和粉砂质泥岩,砂岩粒度细、杂基含量高且砂体厚度较薄,加之距离T₂断层较远,缺乏优势运移通道,导致其相应的油层累计厚度多小于5 m,甚至不见油气显示(图7)。

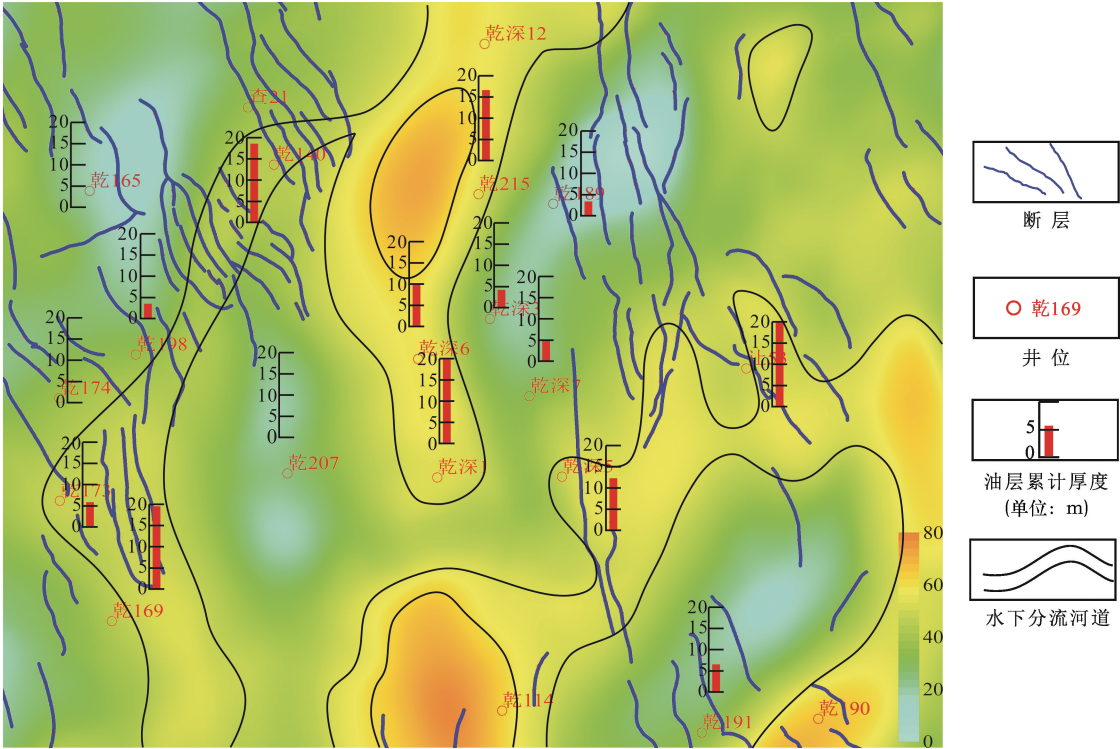


图7 乾安构造带泉四段砂体展布特征及油层累计厚度

Fig.7 Sandbody distribution and cumulative thickness of Q₄ Formation in Qian'an tectonic belt

3.3.2 物性“甜点”控制砂体含油饱和度及产量

“甜点”是指在砂岩整体物性较差背景下的局部高孔高渗区^[37]。在致密储层中,物性的好坏,尤其是渗透率的高低对含油性具有明显的影响,在相同的地质条件下,储层渗透率越好的砂体其含油性越好。在油水界面张力和润湿角一定的前提下,毛管压力(充注阻力)的大小取决于砂体中喉道的宽度,喉道宽、渗透率高的储层具有优先聚集油气的优势^[38]。

统计储层物性与砂体含油饱和度的关系发现,无论顶部Ⅰ砂组砂体还是下部Ⅱ~Ⅳ砂组砂体,随着储层渗透率的增大,储层品质明显改善,其相应的砂体含油饱和度显著增高,两者呈线性正相关关系(图8(a)、(b))。在Ⅰ砂组虽然质量较差的储层也存在个别含油饱和度较高的异常点,但这主要是因为Ⅰ砂组距离源岩近,具有“源储紧邻”的优势,且超压动力较大所致。

物性较好的致密砂岩储层不仅含油饱和度高,而且由于其杂基含量和胶结物含量相对较少,在后

期开发过程中对压裂、酸化的要求也相应降低。随着砂体物性逐渐增高,油区日产量也相应增加,孔隙度小于10%,渗透率小于 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂体,日产量小于 $0.4/(t \cdot m)$ (图8(c)、(d));而在此界限值之上,日产量随着物性条件的改善呈指数趋势增加,最高可达 $1.2 t/(d \cdot m)$ 。

3.3.3 古隆起带顶部及溶解作用

隆起带顶部乾深4、乾深1井青一段泥岩厚度处于88~92 m范围内,而两翼的乾113井、乾188井青一段泥岩厚度处于96~101 m范围内(图9(a)),由此可以确定,该隆起带在泉四段沉积时期就已经具备此地貌特征。由于古隆起带核部处于湖泊浪基面之上,在湖浪高能带的强烈冲刷作用下,顶部砂岩被层层筛洗,其成分成熟度和结构成熟度逐步提升,孔渗条件也较隆起带两翼部位有所增高。同时,由于古隆起带两翼沉积了相对较厚的泥岩地层,在差异压实作用下,处于陡缓转折带的泉四段地层应力较为集中,易形成张扭裂缝,从而改善古隆起带顶部砂体物性^[39]。由此可知,尽管隆起带顶部乾

深 4、乾深 1 井上覆源岩质量较差,但翼部青一段源岩排出的原油在通过断层下排至泉四段砂体后,沿

砂体上倾方向进行侧向运移,从而在古隆起带顶部聚集成藏。

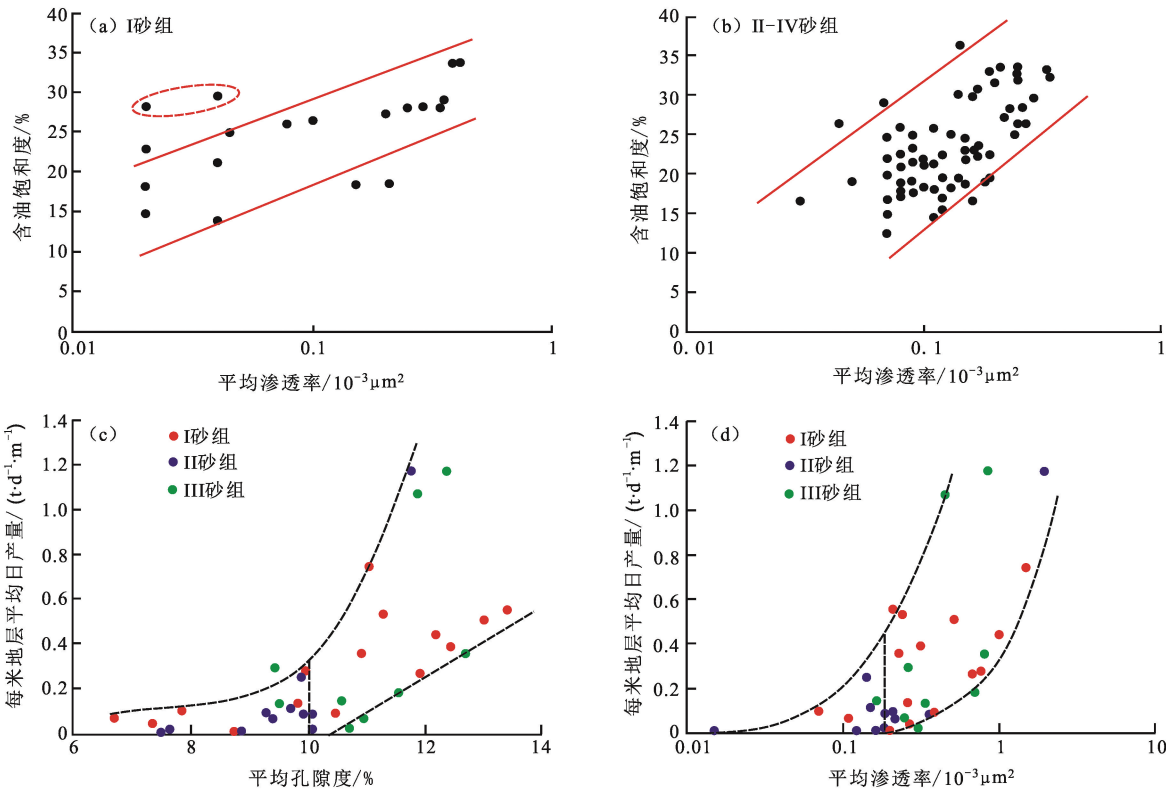


图 8 泉四段储层物性、含油饱和度及产油量关系

Fig. 8 Correlation diagrams of reservoir property, oil saturation and production of Q₄ Formation

同样,因为强烈构造运动引发的深断裂活动和火山岩浆喷发,使得地层流体富含 HCO_3^{3-} 或 CO_2 [40],长石、岩屑等颗粒在酸性流体的作用下发生局部溶解作用,并伴随片钠铝石的交代作用发生(图 9(b)).由于渗透性的改善和储集空间的增加,在乾 240、乾 239 井的泉四段 4 个砂组内均发育了多套油层。

4 致密油成藏模式

4.1 凹陷区“源内直排倒灌”成藏模式

具有此类成藏模式特征的致密油藏主要分布于长岭凹陷内,由于青一段暗色泥岩埋藏深、有机质类型好、丰度高,且已达到成熟—高成熟阶段,加之湖盆中心沉积速率大,在欠压实作用和生烃作用控制下,青一段发育强超压。在距今约 80 Ma 的嫩江组沉积时期,青一段暗色泥岩生成的烃类在强超压驱动下开始向泉四段致密储层运移,由于 I 砂组砂体紧靠源岩,其输导体系具有多样性,既包括青一段泥

岩在超压背景下发育的微裂缝,也包括断层背景下产生的砂泥对接;另外,断层也作为“直排倒灌”的主要运移通道存在,而物性较好的砂体可以为油气提供侧向运移。基于 I 砂组油源充足且输导体系多样,认为储层物性是控制其成藏的主要因素。下部 II ~ IV 砂组距离上覆源岩较远,在超压驱动下,原油以油源断裂为通道,克服浮力和毛管压力的阻挡作用,向下运移至致密储层中物性较好的砂体内,然后在超压和浮力作用下沿砂体或次级断裂展开侧向运移,但由于泉四段砂岩埋藏深度大、压实强度高、胶结作用强烈,导致储层致密、孔喉连通性差,原油只能进行很短距离的侧向充注,最终在“先直排倒灌、后侧向运移(短距离)”的成藏机制下[25]形成致密砂岩油藏,如图 10 中让 58—让 54—孤 19 井所示的源内区。其中,强超压、双油源控制下的地堑、地垒以及单油源断层控制下的上倾砂岩是油气成藏的有力位置,但深大断裂的逸散作用不利于油气聚集(图 10)。

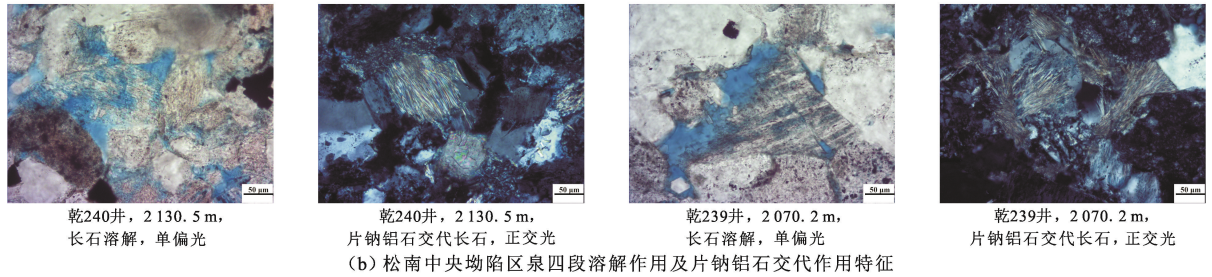
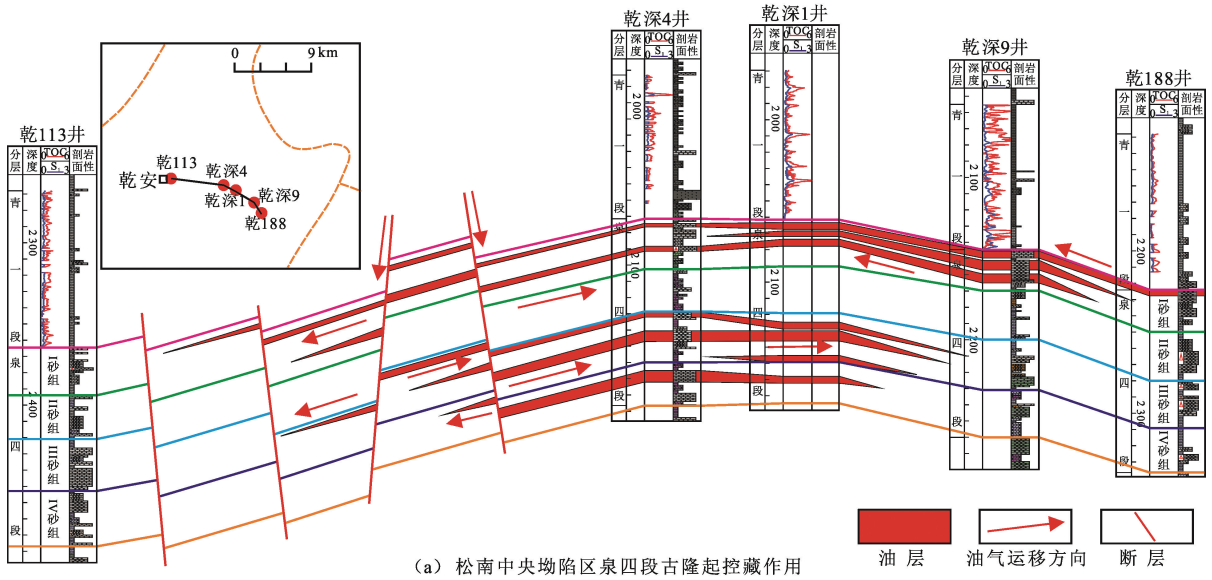


图 9 古隆起带油藏剖面及溶解作用特征

Fig. 9 Profile of oil reservoir and dissolution in ancient uplift belt

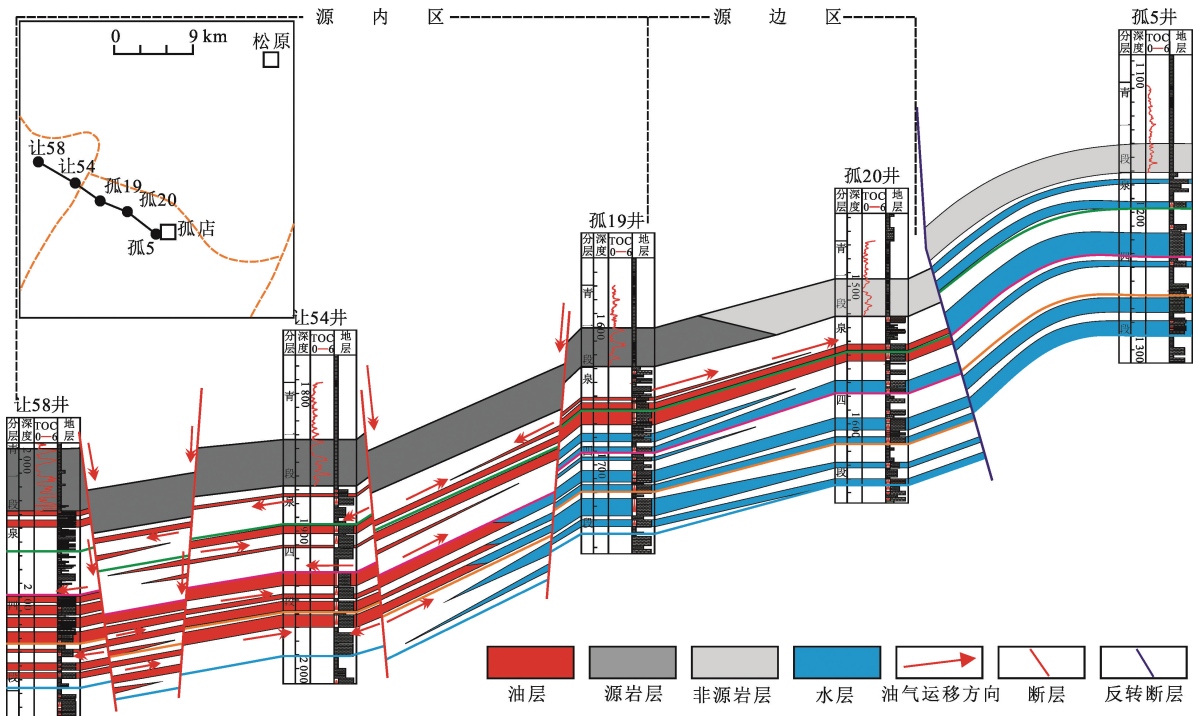


图 10 泉四段上生下储式致密砂岩油成藏模式

Fig. 10 Hydrocarbon accumulation model of above-generation and below-storage tight sandstone oil reservoirs of Q_4 Formation

4.2 斜坡区“源边反转断层遮挡”成藏模式

具有此类成藏模式的致密油藏分布于近凹陷的斜坡区,包括华字井阶地、扶新隆起带西部及红岗阶地,边界与致密储层边界相同(图1)。来自于保康、怀德和长春水系的陆源碎屑物质充沛,在斜坡区沉积了大片条带状水下分流河道砂体和透镜状河口坝砂体,砂质纯净且分选较好,加之压实作用和后期胶结作用均较沉积中心弱,储层物性优于长岭凹陷,砂体不仅便于原油聚集,还可为其提供侧向运移通道;虽然斜坡区自身范围内源岩多处于低熟状态、排烃量小,难以为大规模的油气运聚提供充足油源,但继承性发育的斜坡带处于凹陷区和隆起区的过渡带位置,是成熟源岩区生成的油气向隆起区大规模运移的必经之路,油源充足。当横向展布的砂体与反转断层相交时,砂泥斜接和泥岩涂抹作用使得断层封闭,有效地防止了油气继续逸散而得以聚集、成藏,形成斜坡区源边成藏模式,如图10中孤19—孤20井所示区域。在该模式中,充足油源、砂体物性以及输导体系都具有先天优势,上倾反转断层以及反转断层与水下分流河道砂体的匹配关系成为控制油藏形成的关键地质因素^[25](图10)。

5 结 论

(1)松南中央坳陷区泉四段“上生下储”式致密砂岩油藏集中分布在长岭凹陷内及其周边斜坡区,具有“满坳含油、宏观连片”的特征和“东富西贫、南富北贫”的差异性。平面上,长岭凹陷内让字号井区、乾字号井区和华字井阶地靠近凹陷区的孤字号井区是致密油最为富集的区块;剖面上,Ⅱ、Ⅲ砂组中致密油最为富集,而Ⅳ砂组油层厚度最小且呈现零星分布的特征。

(2)优质源岩、上覆异常高压、优质储层及油源断层是控制致密油成藏的主要地质因素,其中青一段下段TOC大于2.0%的优质源岩展布范围控制致密油藏分布格局;异常高压与源储断层的空间配置关系控制下部砂组含油性,剖面上油气下排深度最大为140 m;平面上超压大于10 MPa、与断层距离小于2500 m的区域是Ⅱ~Ⅳ砂组的致密油藏富集区;优质储层控制致密油富集程度及产量。

(3)坳陷型湖盆上生下储式致密砂岩油藏的形成主要存在凹陷区“源内直排倒灌”和斜坡区“源边断层遮挡”两种成藏模式。

参考文献:

[1] U. S. Energy Information Administration. Annual energy

outlook 2012, with projections to 2035 [R]. United States; Energy Information Administration, 2012.

[2] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.

JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.

[3] 曹喆, 柳广第, 柳庄小雪, 等. 致密油地质研究现状及展望[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(10): 1499-1508.

CAO Zhe, LIU Guangdi, LIUZHUANG Xiaoxue, et al. Research status on tight oil and its prospects [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(10): 1499-1508.

[4] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望: 以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187.

ZOU Caineng, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.

[5] 贾承造, 邹才能, 李建忠, 等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 343-350.

JIA Chengzao, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 343-350.

[6] IEA. World energy outlook 2009 [R]. Washington D C: IEA, 2012.

[7] 李传亮. 岩石欠压实概念质疑: 兼谈岩石压缩阶段排烃的不可能性[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(4): 450-452.

LI Chuanliang. Discussion of undercompaction of rocks and impossibility of hydrocarbon expulsion during rock compression [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(4): 450-452.

[8] 张景廉. 油气“倒灌”论质疑[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(3): 122-128.

ZHANG Jinglian. Query about petroleum downward migration [J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(3): 122-128.

[9] VLADIMIR A, SEREBRYAKOV, GEORGE V, et al. Abnormal pressure regime in the former USSR petroleum Basins [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1995, 13(1): 65-74.

[10] SHI Wanzhong, XIE Yuhong, WANG Zhenfeng, et al. Characteristics of overpressure distribution and its implication for hydrocarbon exploration in the Qiongdongnan

- Basin[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 66: 150-165.
- [11] 张学军,徐兴友,王永诗,等. 烃源岩非均质性与异常高压形成机制[J]. 中国科学:地球科学, 2014, 44(3):439-444.
- ZHANG Xuejun, XU Xingyou, WANG Yongshi, et al. Relationship between heterogeneity of source rocks and genetic mechanism of abnormally high pressure[J]. Science China:Earth Sciences, 2014, 44(3):439-444.
- [12] 翟普强,陈红汉,谢玉洪,等. 琼东南盆地深水超压演化与油气运移模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(10):4187-4201.
- ZHAI Puqiang, CHEN Honghan, XIE Yuhong, et al. Modelling of evolution of overpressure system and hydrocarbon migration in deepwater area of Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2013, 44(10):4187-4201.
- [13] PI Xuejun, XIE Huiwen, ZHANG Cun, et al. Mechanisms of abnormal overpressure generation in Kuqa foreland thrust belt and their impacts on oil and gas reservoir formation[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47: 85-93.
- [14] 郝雪峰,单亦先,劳海港. 渤海湾盆地济阳坳陷车镇凹陷西部深层油气倒灌的物理模拟实验[J]. 石油实验地质, 2013, 35(1):87-91.
- HAO Xuefeng, SHAN Yixian, LAO Haigang. Physical modeling of petroleum downward migration: a case study of western Chezhen Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(1):87-91.
- [15] 周一博,柳广第,钟佳倚,等. 酒泉盆地营尔凹陷下白垩统异常高压成因及模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(6):2402-2409.
- ZHOU Yibo, LIU Guangdi, ZHONG Jiayi, et al. Origin and modeling of overpressure in lower cretaceous of Ying'er Sag, Jiuquan Basin, Northwest China[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(6):2402-2409.
- [16] 王永诗,单亦先,劳海港. 油气“倒灌”的物理模拟及其石油地质意义[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014, 36(2):45-50.
- WANG Yongshi, SHAN Yixian, LAO Haigang. Physical simulation of oil and gas backflow and its geological significance[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2014, 36(2):45-50.
- [17] 蔡来星,卢双舫,黄文彪,等. 上覆优质源岩对上生下储式致密油成藏的控制作用:以松南中央坳陷区青一段泥岩为例[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 45(2):280-292.
- CAI Laixing, LU Shuangfang, HUANG Wenbiao, et al. Controlling function of overlying high-quality source rocks on above-generation and below-storage tight oil reservoir: taking mudstone in Q_{n1} formation at central depression in southern Songliao basin as an instance[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 45(2):280-292.
- [18] 谭保祥,侯德艳,林景晔. 三肇地区扶余、杨大城子油层油源与油气运移模式探讨[J]. 大庆石油地质与开发, 1995, 14(1):5-8.
- TAN Baoxiang, HOU Deyan, LIN Jingye. Discussion on source rocks and hydrocarbon migration type of Fu-Yang reservoirs in Sanzhao area[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1995, 14(1):5-8.
- [19] 王雪. 松辽盆地齐家凹陷与大庆长垣扶杨油层油源[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3):294-298.
- WANG Xue. Oil sources of Fuyang oil formation in Qijia sag and Daqing placanticline, Songliao Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3):294-298.
- [20] 唐振兴,苗洪波,李爱民,等. 松辽盆地南部嫩江组—泉四段油气运移特征[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(6):40-46.
- TANG Zhenxing, MIAO Hongbo, LI Aimin, et al. Hydrocarbon migration characteristics of Nenjiang formation-member 4 of Quantou formation in southern Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(6):40-46.
- [21] FENG Zhiqiang, ZHANG Shun, FENG Zihui. Discovery of "enveloping surface of oil and gas overpressure migration" in the Songliao Basin and its bearings on hydrocarbon migration and accumulation mechanisms[J]. Sci China Earth Sci, 2012, 55(12):2005-2017.
- [22] 李丹,董春梅,林承焰,等. 松辽盆地南部让字井斜坡带超压特征及其对源下油藏运聚模式的控制[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(3):326-332.
- LI Dan, DONG Chunmei, LIN Chengyan, et al. Characteristic of overpressure and its control on migration and accumulation for hydrocarbon reservoirs below source rocks in Rangzijing slope zone of southern Songliao Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(3):326-332.
- [23] 王雅春,王胜男. 源岩、超压和断裂空间匹配对三肇凹陷扶杨油层油成藏的控制作用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(4):656-661.
- WANG Yachun, WANG Shengnan. Controlling of the

- match of source rock, overpressure and fault on oil accumulation of Fu-Yang oil layer in Sanzhao Depression [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(4): 656-661.
- [24] 黄薇, 梁江平, 赵波, 等. 松辽盆地北部白垩系泉头组扶余油层致密油成藏主控因素[J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 635-644.
HUANG Wei, LIANG Jiangping, ZHAO Bo, et al. Main controlling factors of tight oil accumulations in the Fuyu layer of Cretaceous Quantou Formation in northern Songliao Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 635-644.
- [25] 孙雨, 陈晨, 马世忠, 等. 松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层油气运移机制与成藏模式研究[J]. 地质论评, 2013, 59(3): 501-509.
SUN Yu, CHEN Chen, MA Shizhong, et al. Hydrocarbon migration mechanism and accumulation models of the Fuyu oil layer in southern Fuxin uplift, Songliao Basin [J]. Geological Review, 2013, 59(3): 501-509.
- [26] 王雅春, 陈崇光, 王璐, 等. 杏北西斜坡区扶余油层成藏模式及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 614-621.
WANG Yachun, CHEN Chongguang, WANG Lu, et al. Oil accumulation patterns and key controlling factors of Fuyu oil layer in the western slope of the northern Xingshugang Oilfield, Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 614-621.
- [27] 陶士振, 邹才能, 袁选俊, 等. 流体包裹体在油气勘探中的应用: 以吉林油田扶新隆起扶余油层为例[J]. 中国石油勘探, 2006, 4: 46-51.
TAO Shizhen, ZOU Caineng, YUAN Xuanjun, et al. Application of fluid inclusion in oil-gas exploration [J]. China Petroleum Exploration, 2006, 4: 46-51.
- [28] 潘树新, 卫平生, 王天奇, 等. 大型坳陷湖盆“洪水-河漫湖”沉积: 以干旱背景下的松南泉四段为例[J]. 地质论评, 2012, 58(1): 41-52.
PAN Shuxin, WEI Pingsheng, WANG Tianqi, et al. Sedimentary characteristics of flood-overlake in large depression basin: taking the 4th member, Quantou formation, lower cretaceous, in southern Songliao Basin as an example [J]. Geological Review, 2012, 58(1): 41-52.
- [29] 金强, 朱光有, 王娟. 咸化湖盆优质烃源岩的形成与分布[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008, 32(4): 19-23.
JIN Qiang, ZHU Guangyou, WANG Juan. Deposition and distribution of high-potential source rocks in saline lacustrine environments [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(4): 19-23.
- [30] 付金华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地石油勘探地质理论与实践[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(16): 1091-1101.
FU Jinhua, LI Shixiang, LIU Xianyang. Geological theory and practice of petroleum exploration in the Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(16): 1091-1101.
- [31] 卢双舫, 马延伶, 曹瑞成, 等. 优质烃源岩评价标准及其应用: 以海拉尔盆地乌尔逊凹陷为例[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2012, 37(3): 535-544.
LU Shuangfang, MA Yanling, CAO Ruicheng, et al. Evaluation criteria of high-quality source rocks and its applications: taking the Wuershun Sag in Hailaer Basin as an example [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(3): 535-544.
- [32] 庞正炼, 邹才能, 陶士振, 等. 中国致密油形成分布与资源潜力评价[J]. 中国工程科学, 2012, 14(7): 60-67.
PANG Zhenglian, ZOU Caineng, TAO Shizhen, et al. Formation, distribution and resource evaluation of tight oil in China [J]. Engineering Sciences, 2012, 14(7): 60-67.
- [33] 黄薇, 梁江平, 赵波, 等. 松辽盆地北部白垩系泉头组扶余油层致密油成藏主控因素[J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 635-644.
HUANG Wei, LIANG Jiangping, ZHAO Bo, et al. Main controlling factors of tight oil accumulations in the Fuyu layer of Cretaceous Quantou Formation in northern Songliao Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 635-644.
- [34] 刘超, 卢双舫, 薛海涛. 变系数 $\Delta \log R$ 方法及其在泥页岩有机质评价中的应用[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(1): 312-317.
LIU Chao, LU Shuangfang, XUE Haitao. Variable-coefficient $\Delta \log R$ model and its application in shale organic evaluation. [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(1): 312-317.
- [35] 赵志魁, 张金亮, 赵占银, 等. 松辽盆地南部坳陷湖盆沉积相和储层研究 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 158-159.
- [36] 迟元林, 萧德铭, 殷进垠. 松辽盆地三肇地区上生下储“注入式”成藏机制[J]. 地质学报, 2000, 74(4): 371-377.
CHI Yuanlin, XIAO Deming, YIN Jinyin, et al. The injection pattern of oil and gas migration and accumulation in the Sanzhao area of Songliao Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2000, 74(4): 371-377.

[37] 杨升宇,张金川,黄卫东,等.吐哈盆地柯柯亚地区致密砂岩气储层“甜点”类型及成因[J].石油学报,2013,34(2):272-282.
YANG Shengyu, ZHANG Jinchuan, HUANG Weidong, et al. "Sweet spot" types of reservoirs and genesis of tight sandstone gas in Kekeya area, Turpan-Hami Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2):272-282.

[38] 谭丽娟,郭松.东营凹陷博兴油田沙四上亚段滩坝砂岩油气富集特征及成藏主控因素[J].中国石油大学学报(自然科学版),2011,35(2):25-31.
TAN Lijuan, GUO Song. Hydrocarbon accumulation features and main controlling factors of beach bar sandstone in upper Es4 formation in Boxing Oilfield, Dongying depression[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2011, 35(2):25-31.

[39] 罗文军,李延钧,李其荣,等.致密砂岩气藏高渗透带与古构造关系探讨:以川中川南过渡带内江-大足地区上三叠统须二段致密砂岩气藏为例[J].天然气地球科学,2008,19(1):70-74.
LUO Wenjun, LI Yanjun, LI Qirong, et al. Relationship between high permeability zones and palaeostructures in tight gas reservoirs [J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(1):70-74.

[40] 张庆春,胡素云,王立武,等.松辽盆地含CO₂火山岩气藏的形成和分布[J].岩石学报,2010,26(1):109-120.
ZHANG Qingchun, HU Suyun, WANG Liwu, et al. Formation and distribution of volcanic CO₂ gas pools in Songliao Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1):109-120.

(编辑 徐会永)