

裂谷盆地致密砂岩气成藏机制与富集规律

——以松辽盆地与渤海湾盆地为例

李 剑^{1,2}, 姜晓华^{1,2}, 王秀芹¹, 程宏岗^{1,2}, 郝爱胜^{1,2}

(1. 中国石油 勘探开发研究院 天然气地质研究所, 河北 廊坊 065007; 2. 中国石油 天然气成藏与开发重点实验室, 河北 廊坊 065007)

摘要:裂谷盆地致密砂岩气是当前勘探的新领域,本文以松辽盆地与渤海湾盆地为重点,对裂谷盆地致密砂岩气成藏机制与富集规律进行了全面系统分析,明确了裂谷盆地有别于克拉通盆地的致密砂岩气气藏特征,指出裂谷盆地致密砂岩气成藏机制上表现为:多因素促源快速生气、多物源催生有利储层、长距离运移立体成藏,先致密后成藏有利配置。气藏富集规律上具有断槽控制气藏分布、沉积相带与构造带控制成藏、次生孔隙带与物性下限控制气藏富集段的特点。分析了松辽盆地与渤海湾盆地致密砂岩气勘探前景,明确了下一步勘探方向。

关键词:气藏特征;成藏机制;致密砂岩气;裂谷盆地;松辽盆地;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Mechanisms for gas accumulation and enrichment in tight sandstone reservoir in rift basins: Cases from the Songliao Basin and the Bohai Bay

Li Jian^{1,2}, Jiang Xiaohua^{1,2}, Wang Xiuqin¹, Cheng Honggang^{1,2}, Hao Aisheng^{1,2}

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Department of Gas Geology, Langfang, Hebei 065007, China;

2. The Key Laboratory of Gas Reservoir Formation and Development, CNPC, Langfang, Hebei 065007, China)

Abstract: Tight sandstone gas in rift basins is a new play concept for exploration. This paper takes the Songliao Basin and the Bohai Bay Basin as case areas to systematically investigate the mechanisms for gas accumulation and enrichment in tight sandstones. The reservoir characteristics of tight sandstone gas in rift basins have been studied, which are different from those of craton basins. As to gas accumulation mechanism, it is demonstrated that multiple factors have accelerated the generation of gas by source rock, and multiple sediment provenance have ensured deposition of favorable reservoirs. Both the long gas migration distance and tightening of the reservoir before gas charge favors gas accumulation in multiple sections over large areas. For the enrichment controlling factors, it is concluded that the distribution of gas pools and source kitchens are located along the faulted troughs, the reservoir quality is controlled by facies and tectonic belts, while the vertical distribution of flowable gas sections is controlled by development of secondary porosity zones. Finally, the exploration potential and future exploration concepts of these two basins is analysed.

Key words: gas reservoir characteristic, accumulation mechanism, tight sandstone gas, rift basin, Songliao Basin, Bohai Bay Basin

全球致密砂岩气资源量大约为 $2\,037 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[1]。据中石油最新数据,截至2016年底,我国天然气总资源量为 $56.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中致密砂岩气资源量为 $20 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。占总资源量的35.2%。2016年我国致密砂岩气产量约 $270 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占全国天然气总产量的27.5%。裂谷盆地作为重要的含油气盆地,致密砂岩

气资源也比较丰富。随着我国经济的飞速发展,能源供给压力不断增大,致密砂岩气作为裂谷盆地一个新的接替领域的重要性凸显。

我国裂谷盆地致密砂岩气勘探起步较晚,在成藏机制及富集规律方面研究不够深入,缺乏系统的认识,制约着下一步勘探。松辽盆地与渤海湾盆地是我国最

收稿日期:2016-09-28;修订日期:2017-08-03。

第一作者简介:李剑(1966—),男,教授级高级工程师。天然气地质与地球化学。E-mail:lijian69@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05007)。

主要两大裂谷盆地,天然气资源丰富,探明率低。松辽盆地自发现油气半个多世纪以来一直以火山岩勘探为主,虽然前期已在昌德、汪家屯、兴城等气田及长深1井区发现了致密砂岩气并提交探明了储量,但储量规模整体较小。松辽盆地沙河子组作为主力烃源岩层烃源岩,与砂岩大面积互层分布,源储一体,具有形成规模致密砂岩气藏的有利条件,且近几年徐深401等一批探井证实沙河子组致密砂岩气藏巨大的勘探潜力。渤海湾盆地作为我国重要的富油型新生代裂谷盆地多年来以潜山油气藏及新近系和古近系油气藏勘探为主,其深层(埋深>3 500 m)天然气总资源量为 $9\,500 \times 10^8 \text{ m}^3$,探明储量为 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$,探明率不足2%,剩余资源潜力大。“十一五”期间,歧口凹陷滨海斜坡和歧北斜坡发现了滨海4井和滨深22井等致密砂岩气藏,目前已在滨深22井区块提交探明储量,揭示了渤海湾盆地深层致密砂岩气良好的资源前景。研究认为,沙河街组是渤海湾盆地断陷湖盆鼎盛期形成的一套主力烃源岩层系,同样具备可观的致密砂岩气资源。通过对松辽盆地致密砂岩气的深入研究,取得了其成藏及气藏富集规律方面多项认识,指导了沙河子组致密砂岩气勘探,先后在宋深9H与徐探1井获得突破。其中,宋深9H井获日产 $20.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 高产气流,徐探1井获日产 $9.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 高产气流。本文以松辽盆地与渤海湾盆地两大裂谷盆地为重点研究对象,阐述了裂谷盆地致密砂岩气成藏机制与富集规律,以期为裂谷盆地致密砂岩气勘探提供借鉴。

1 裂谷盆地致密砂岩气藏特征

克拉通盆地是指在长时间内变形很小的稳定地壳(克拉通)上形成的面积广、形状不规则、沉降速率相对较慢并以拗陷为主要特征的盆地。克拉通盆地内部发育稳定大型平缓斜坡^[2],是致密砂岩气藏发育的有利地质背景。鄂尔多斯盆地上古生界和四川盆地川中

须家河组都具有克拉通基底,构造稳定,形成了典型的克拉通盆地型致密砂岩气藏。克拉通盆地致密砂岩气藏主要为岩性气藏,且以原生气藏为主,气藏具有大面积、准连续分布的特征^[3],气藏一般无边水底水、压力系数低、储量丰度低、含气饱和度低,平均约57%~68%(表1)。

裂谷盆地这一定义是基于盆地地貌构造形态和板块构造背景提出的,是指在地质历史时期经历了裂陷作用的盆地,从盆地形成的动力学机制上分属于伸展拉张型盆地,是地壳或岩石圈在引张作用下减薄、破裂和沉陷形成的盆地。其相对于克拉通盆地而言岩浆活动强烈,构造样式复杂。松辽盆地与渤海湾盆地这两大典型裂谷盆地致密砂岩气藏与克拉通盆地致密砂岩气藏相比,存在着多项差异性。裂谷盆地气藏多位于断陷陡缓坡,以岩性气藏为主,断阶带与背斜带也发育构造-岩性气藏(图1)。由于裂谷盆地后期构造活动频繁,使得早先生成的致密砂岩气藏发生调整再次运移形成次生气藏,因此气藏类型既有原生又有次生。同时,单个气藏面积小,但横向连片,纵向叠置,部分存在边水底水,含气饱和度45%~85%,气藏压力系数大,按照压力系数大于1.35为高压气藏标准^[4-6],松辽盆地营城组及沙河子组致密砂岩气藏压力系数为1~1.5,平均约1.35,高压特征明显。渤海湾盆地歧口凹陷沙三段气藏压力系数为1.2~1.6,平均约1.4,属于高压系统。目前发现的裂谷盆地致密砂岩气藏储量丰度不太高,且差异大,大多属于中-低丰度气藏,松辽盆地致密砂岩气藏储量丰度为 $(0.73 \sim 4.97) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,渤海湾盆地致密砂岩气藏储量丰度为 $(2.4 \sim 8.6) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ (表1)。

2 裂谷盆地致密砂岩气成藏机制

前人对致密砂岩气成藏特征与机制做了大量研究^[7-12],但主要以克拉通盆地为主。克拉通盆地致密

表1 裂谷盆地与克拉通盆地致密砂岩气藏特征对比

Table 1 Comparison of tight sandstone gas accumulation characteristic between rift basins and craton basins

气藏特征	裂谷盆地		克拉通盆地	
	松辽盆地中生界白垩系沙河子组	渤海湾盆地新生界古近系沙河街组	鄂尔多斯盆地上古生界石炭-二叠系太原组-石盒子组	四川盆地中生界三叠系须家河组
气藏类型	既有原生,也有次生	既有原生,也有次生	原生为主	原生为主
边水、底水	部分存在边水、底水	部分存在边水、底水	极少数存在边水、底水	少数存在底水、边水
压力系数(平均值)	1.00~1.50,高压为主	1.20~1.60,高压为主	0.51~2.50,常压或负压 ^[5-6]	0.96~2.00 ^[6] ,常压-高压
含气饱和度/%	45.00~64.00	60.00~85.00	55.90~77.70 ^[6]	43.00~85.70 ^[6]
储量丰度/ $(10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	0.73~4.97	2.40~8.60	0.75~2.50 ^[6]	2.00~12.70 ^[6]

砂岩气藏多位于稳定宽缓的大型斜坡背景上,由造山带提供物源形成一套远源长距离搬运的大型浅水三角洲体系,与大面积分布的湖相泥岩交互叠置,形成“广覆式”致密砂岩气藏,整体上为一个含油气系统。储层岩石类型多为石英砂岩、岩屑砂岩,以岩性圈闭为主,砂岩“甜点”发育,储层本身一定程度上可起到遮挡作用,形成储盖双重阻挡,天然气近距离运移成藏。同时,克拉通背景致密砂岩气具有准连续充注,近源高效聚集的特征,天然气在超压充注与扩散作用下通过孔缝网状输导经过短距离垂向与长距离侧向运移后进入致密砂岩圈闭成藏。

裂谷盆地致密砂岩气在成藏上既具有致密砂岩气成藏的普遍规律又有其特殊性。一方面裂谷盆地与克拉通盆地一样,致密砂岩气成藏上都具有近源优先聚集的特点。同时,由于都是低孔低渗储层,主要运移方式以非达西流超压充注与扩散运动为主;另一方面,由于裂谷盆地与克拉通盆地成盆机制及地质特征的差异,成藏特征上又有明显不同于克拉通盆地的地方(表2)。裂谷盆地致密砂岩气藏多发育于断陷的陡缓坡,烃源岩分布于各生烃断槽内,平面上形成多个烃源灶,每个烃源灶自成含气系统,因此裂谷盆地具有多个含油气系统。裂谷盆地断陷期砂体具有多物源、短物

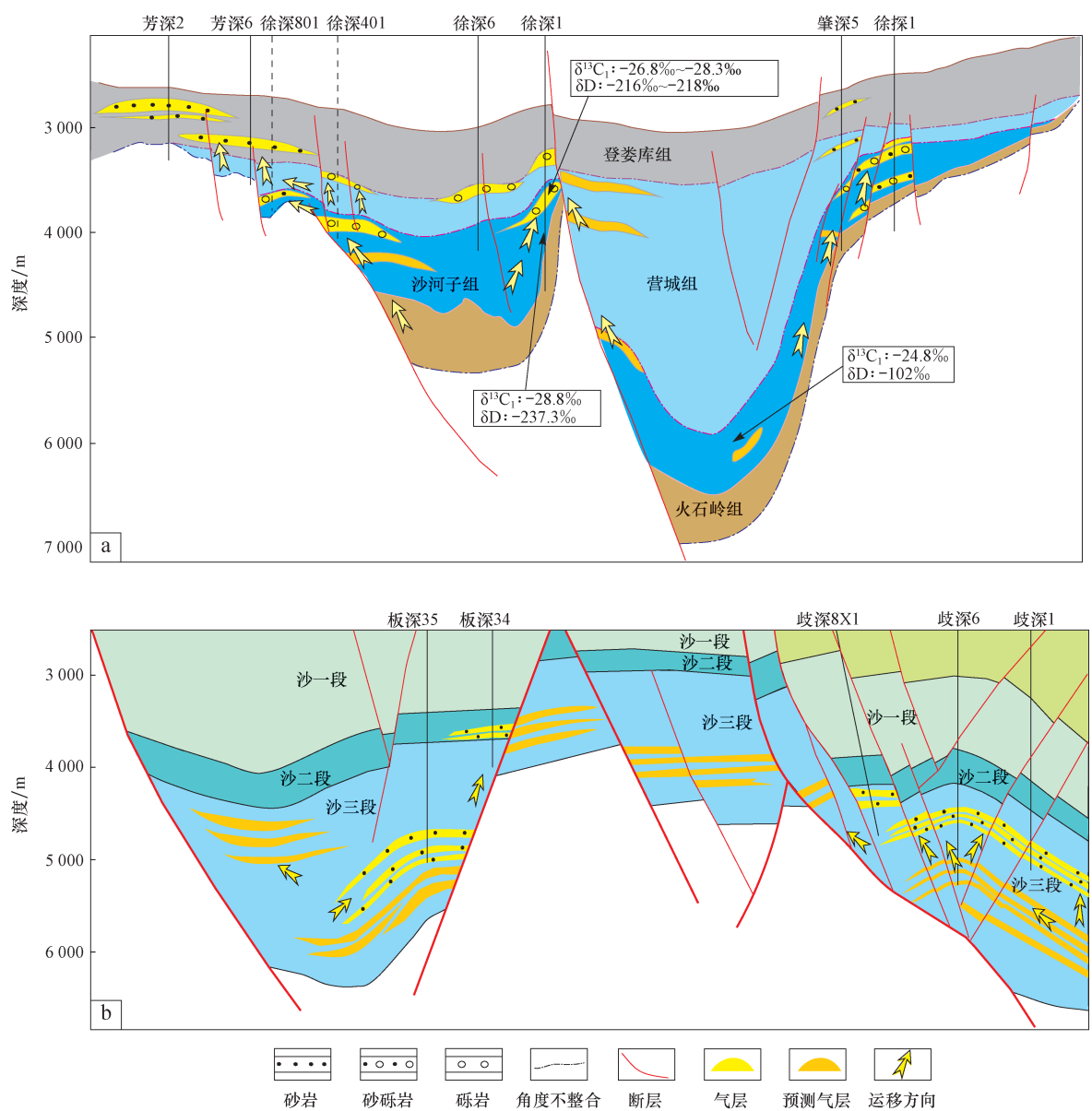


图1 裂谷盆地致密砂岩气气藏剖面
Fig.1 Tight sandstone gas reservoir cross section of rift basins
a. 松辽盆地;b. 渤海湾盆地

源为主的特点,主要由断陷间隆起提供物源,砂体多以陡坡扇三角洲、缓坡辫状河三角洲沉积的形式赋存。砂体以成分成熟度低的长石砂岩和砂砾岩为主。输导体系包括断裂、砂体和不整合多重输导,因此可长距离垂向与侧向运移形成岩性气藏以及构造背景下的构造-岩性气藏,储层致密早于成藏期,有利于天然气聚集成藏。

裂谷盆地致密砂岩气藏除了以上特征以外,在成藏过程中还具有其独有的特点,主要表现为多因素促源快速生气,多物源催生有利储层,长距离运移立体成

藏,先致密后成藏配置有利(图 2)。

2.1 多因素促源快速生气

温度在有机质演化生烃过程中具有重要作用,在烃源岩达到过成熟之前,较高的温度有利于烃源岩中的有机质向油气转化。裂谷盆地一方面岩浆活动强烈、地壳厚度较薄,具有较高的热流值和地温梯度从而形成高地温场,另一方面由于在成盆过程中的快速深埋使得烃源岩进一步在短时间内进入高的地温场。

表 2 裂谷盆地与克拉通盆地致密砂岩气成藏特征对照

Table 2 Comparison of tight sandstone gas accumulation characteristics between rift basins and craton basins

关键要素	裂谷盆地致密砂岩气藏	克拉通盆地致密砂岩气藏
构造背景	断陷内陡缓坡	克拉通稳定大型宽缓斜坡
物源及沉积体系	多物源,扇、辫状河三角洲-湖泊体系	远物源,大型三角洲-湖泊体系
烃源岩	烃源岩受生烃断槽控制,快速生气	烃源岩大面积分布,持续生气
砂体分布	砂体厚度大	薄互层叠加,横向连片,大面积分布
优势岩类	长石砂岩、长石岩屑砂岩、砂砾岩	石英砂岩、岩屑砂岩
储集空间	溶蚀孔隙、贴砾缝、砾间孔为主	次生溶蚀孔隙为主
封盖机制	泥岩封盖为主	储盖双重阻挡
圈闭类型	岩性圈闭与构造-岩性圈闭均发育	岩性圈闭为主,少数构造-岩性圈闭
输导条件	断裂、砂体、不整合多重输导	孔缝网状输导
充注机制	超压充注与扩散作用	超压充注与扩散作用
运移距离	可长距离垂向与侧向运移	短距离垂向与长距离侧向运移
富集规律	近源聚集,断阶带、背斜带高效富集	近源高效富集,局部构造高部位富集

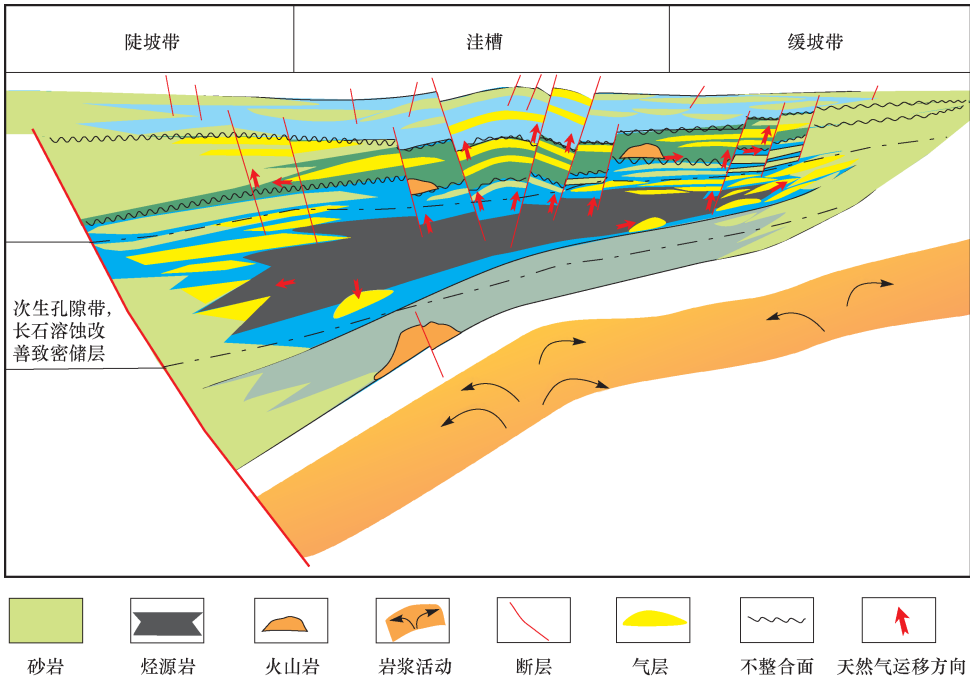


图 2 裂谷盆地致密砂岩气成藏模式

Fig. 2 Accumulation model of tight sandstone gas reservoir in rift basins

2.1.1 高地温场加快源岩成熟

裂谷盆地地温梯度高,受高热流值和强烈的火山活动影响,烃源岩更易于成熟。松辽盆地白垩纪末的地温梯度达 $42.6 \sim 48.0 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}^{[13]}$,沙河子时期地温梯度基本在 $52.6 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}^{[14]}$,高热流值加快了烃源岩成熟的进程,使得生烃门限浅。松辽盆地沙河子组烃源岩于距今 145 Ma 开始沉积,在距今 130 Ma 进入生烃门限,平均埋深 1 600 ~ 2 100 m,仅用了 10 个 Ma,即距今 110 Ma 左右 R_o 达到 1.3%,进入大量生气阶段,持续至明水期末。渤海湾盆地古近系地温梯度为 $20 \sim 50 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,沙河街组沙三、四段地温梯度则相对更高,平均达到 $40 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,渤海湾盆地古近系和新近系烃源岩在约 2 000 m 进入生烃门限,但由于新生界烃源岩有机质的受热时间短,同时受超压作用对生烃有一定的抑制^[15],所以生气门限相对变深,烃源岩基本在埋深 3 500 m 以下才进入生气阶段。以渤海湾盆地次级生油凹陷中沙河街组烃源岩演化程度最高的凹陷之一的南堡凹陷为例,沙河街组烃源岩在 3 100 m 以下进入生烃门限,约 3 700 m 进入生气门限^[16]。渤海湾盆地古近系烃源岩距今 40 ~ 50 Ma 开始沉积,距今 40 Ma 进入生烃门限,早期生油晚期生气,持续生油,集中生气。鄂尔多斯盆地上古生界烃源岩从沉积到成熟经历了 100 多个 Ma^[17],可见松辽盆地与渤海湾盆地这两大裂谷盆地烃源岩只经历 10 ~ 20 Ma 成熟,时间远小于以鄂尔多斯盆地为代表的克拉通盆地。

2.1.2 快速沉降深埋促源岩快速生气

裂谷盆地沉降速率快。松辽盆地白垩系断陷期构造沉降速率 $15.5 \sim 48 \text{ m}/\text{Ma}$,总沉降速率达到 $529.6 \sim 1\,891.2 \text{ m}/\text{Ma}^{[18]}$,渤海湾盆地第三系东营组仅构造沉降速率就达到 $50 \sim 140 \text{ m}/\text{Ma}$,而作为克拉通盆地代表的鄂尔多斯上古生界构造沉降速率仅 $5.8 \sim 12.2 \text{ m}/\text{Ma}^{[19]}$,快速深埋使得烃源岩在短时间内进入较高的地温场,促使烃源岩快速生烃。在这种地质背景下,裂谷盆地烃源岩生烃作用相对集中,不同于克拉通盆地的持续生烃缓慢成藏,而是形成短时间内快速生气快速成藏的特点。

这种多因素综合作用促进了烃源岩快速生气,而快速生气可以使源岩层在短时间内产生超压,造成源储压力差大,有利于天然气向致密砂岩储层运移成藏^[6,20]。

2.2 多物源催生有利储层

2.2.1 多物源促生砂体发育

裂谷盆地主要发育两大类物源,一是造山带远物源,二是断(坳)陷间隆起近物源(图 3)。对于断陷内砂岩而言,断陷间隆起物源是主要物源。裂谷盆地隆起与断(坳)陷相间发育,不同的隆起各自构成了物源区,具有多物源的特点,沉积供给速率快,砂体发育。裂谷盆地受构造演化、断裂活动及气候的联合作用,水进、水退频繁发生,湖盆发生多次振荡。纵向上形成多

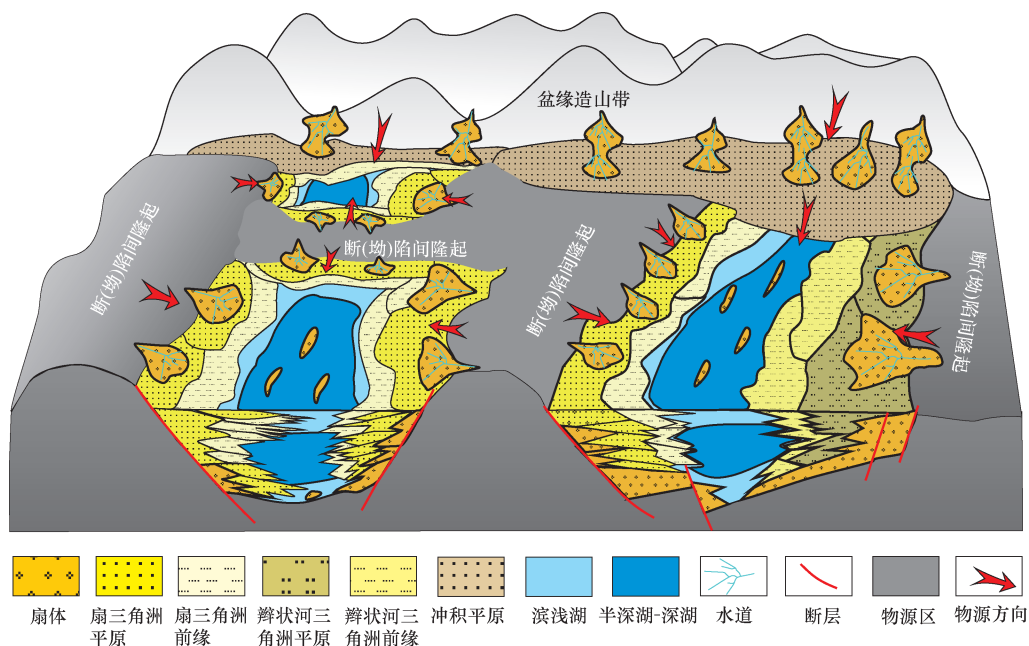


图3 裂谷盆地砂岩物源模式

Fig. 3 Sand provenance model of rift basins

套砂岩与泥岩互层砂体,与烃源岩大面积接触,为形成致密砂岩气创造了条件。松辽盆地与渤海湾盆地都属于主动裂谷盆地,主动裂谷盆地受热事件的多次扰动,存在多个次一级旋回,湖相沉积与砂体交替发育,形成了良好的生储盖组合^[21]。对松辽盆地徐家围子断陷安达地区沙河子组沉积相研究发现,砂体覆盖面积约占湖盆面积的30%~50%,最大可达80%以上。而渤海湾盆地的富油气凹陷中,主水系砂体与烃源岩接触的面积高达80%以上^[22]。

2.2.2 短物源及溶蚀作用形成有利储层

裂谷盆地快速沉降、多物源和短物源条件下往往形成成分成熟度较低的砂岩及砂砾岩,其主要特征是长石含量高,长石溶蚀孔是裂谷盆地致密砂岩储集空间的主要贡献者之一。

烃源岩生排烃过程对致密砂岩储层具有建设性作用。一方面产生大量有机酸,可以促进岩石中长石溶蚀形成次生孔隙,另一方面形成地层超压,对次生孔隙起到一定保护作用。烃源岩的生烃强度与有机酸产量呈正相关性,从而也影响了次生孔隙的发育。松辽盆地白垩系发育煤系烃源岩,煤系烃源岩相对于一般烃源岩能产生更多的有机酸,从而促进溶蚀孔隙发育。渤海湾盆地同一深度下生烃强度较高的黄骅拗陷和辽河拗陷砂岩储层物性明显好于生烃强度低的冀中拗陷砂岩储层^[23]也证明了有机酸对储层的有利改造。此外,不同温压条件下砂岩溶蚀试验发现,富含长石的砂岩对高温压条件敏感,高温压高能增大溶蚀率,改善砂岩储层物性,长石岩屑砂岩、长石石英砂岩在150~180℃,40~50 MPa下溶蚀速率增大2~3倍^[24]。

松辽盆地深层砂岩岩石类型主要为岩屑长石砂岩,长石含量平均高达25.64%。渤海湾盆地砂岩类型多为长石砂岩或岩屑长石砂岩,长石含量高,其中歧口凹陷致密砂岩长石含量平均高达46.1%。正是由于松辽盆地与渤海湾盆地在短物源条件下发育富含长

石的砂岩,深层砂岩溶蚀孔隙发育,此外,松辽盆地深层砂砾岩由于颗粒支撑结构及贴砾缝发育(图4),是致密砂岩气储层优势岩性^[25]。基于以上条件,松辽盆地与渤海湾盆地这两大裂谷盆地深层发育多个次生孔隙带。松辽盆地砂岩储层约在3 000 m以下达到致密,砂砾岩储层约4 280 m以下达到致密,渤海湾盆地砂岩储层虽然随着埋深增加物性变差,但由于特殊的沉积机制及欠压实作用存在,在深埋条件下物性仍然相对较好,4 270 m砂岩储层变致密,但致密带非常窄,很快进入次生孔隙发育带。5 000 m以下孔隙度仍能达到10%,渗透率达到 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。通过对大量样品物性数据的统计发现,松辽盆地在3 200~4 500 m发育次生孔隙带(图5)。渤海湾盆地发育两个次生孔隙带,第一个为3 700~4 000 m,第二个约在4 500~5 000 m。第一个次生孔隙带较窄,以第二个次生孔隙带为主(图5)。

2.3 长距离运移立体成藏

裂谷盆地致密砂岩气除了同克拉通盆地一样具有近源聚集的特点,其成藏上还具有长距离运移的优势。克拉通盆地由于地势平缓,不可能形成较大的浮力,同时由于构造稳定,断裂、不整合面等运移疏导体系不发育,因此多不具备天然气大规模长距离运移的条件。鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩气藏主要为初次运移和短距离二次运移^[26]。对于裂谷盆地而言,一方面断陷深而陡,同时由于较高的温度与压力,天然气携水能力增强,气藏多具有底水与边水,因此天然气浮力较大;另一方面,由于断裂、不整合面发育^[27],断裂往往直接沟通烃源岩通过断裂本身或联合不整合面、砂体等构成“T”型、阶梯型等多种立体疏导格架^[28-32],使得天然气进行二次运移形成致密砂岩气藏。浮力及以断裂为主的多疏导体系的存在使得裂谷盆地致密砂岩气运移距离增大,在侧向与垂向上长距离运移进入不同层系圈闭中成藏,形成立体成藏的格局(图2)。

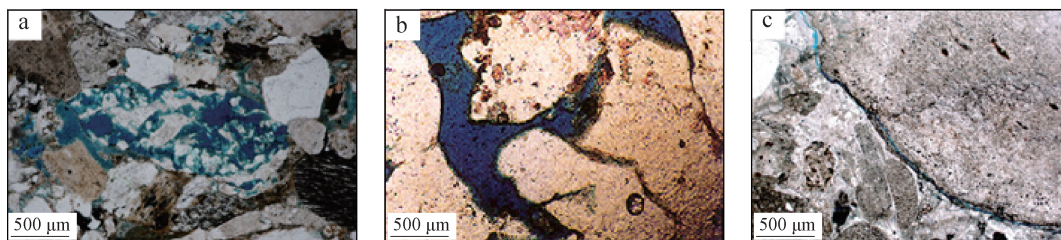


图4 致密砂(砾)岩溶蚀孔隙、贴砾缝镜下照片

Fig.4 Pore characteristics of tight sandstone under microscope

- a. 砂砾岩,长石内溶蚀孔,宋深4井,埋深2 773.14 m,单偏光; b. 砂岩,长石粒间溶孔,板深35井,埋深5 075.63 m,单偏光; c. 砂砾岩,贴砾缝,达深21井,埋深4 101.00 m,单偏光

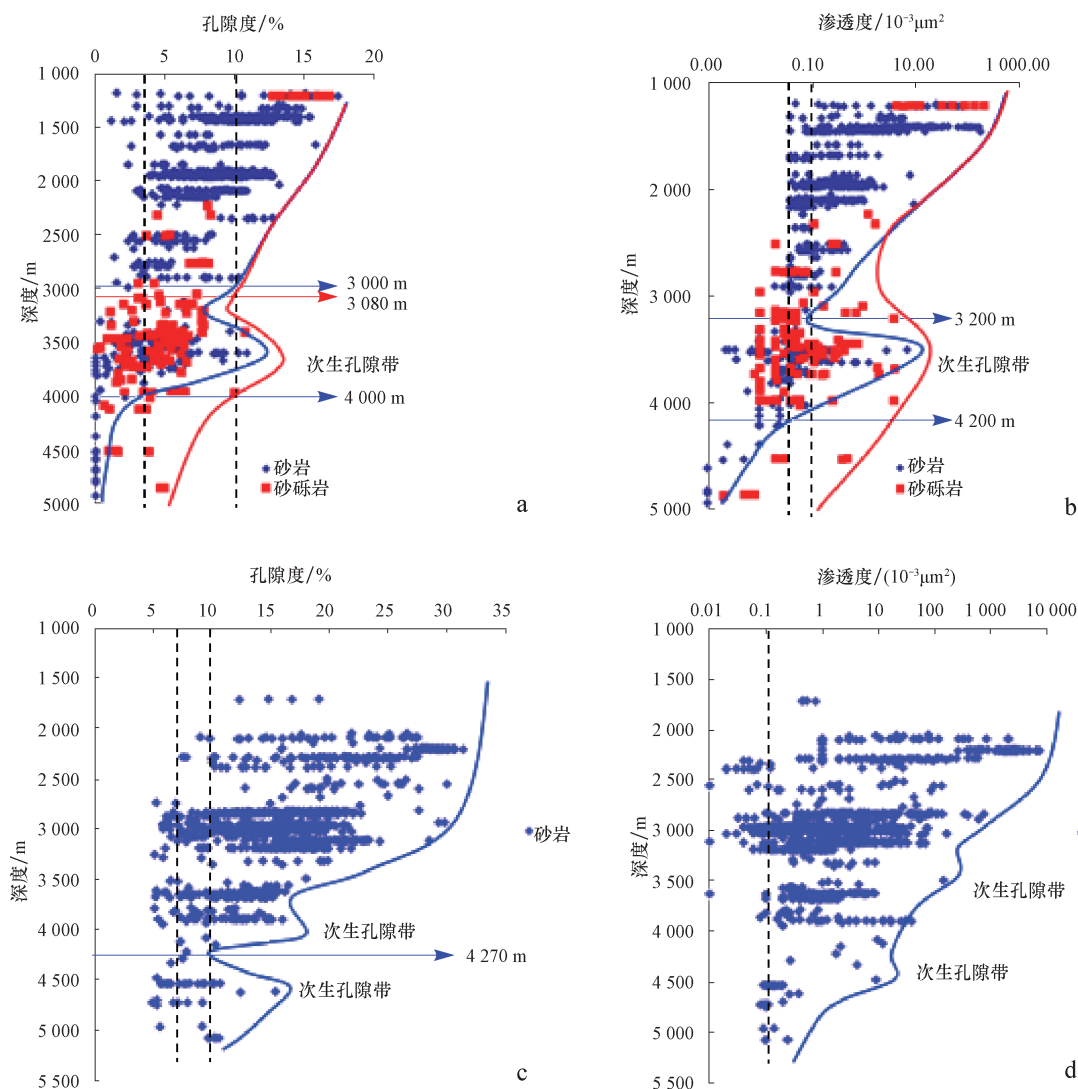


图5 松辽盆地与渤海湾盆地砂(砾)岩物性随深度变化

Fig. 5 Sandstone reservoir property vs. depth in the Songliao Basin and the Bohai Bay Basin

a. 松辽盆地砂(砾)岩孔隙度随深度变化图; b. 松辽盆地砂(砾)岩渗透率随深度变化图; c. 渤海湾盆地砂岩孔隙度随深度变化图; d. 渤海湾盆地砂岩渗透率随深度变化图; a, b 中蓝线对应砂岩深度, 红线对应砂砾岩深度

松辽盆地除了在主力烃源岩层系沙河子组内部形成致密砂岩气藏外,通过断层及其联合体系疏导,可在下部火石岭组、上部营城组及登娄库组成藏。目前已经在松辽盆地发现了以沙河子组烃源岩为源的不同层系的致密砂岩气藏^[33-37]。渤海湾盆地致密砂岩气除了在主力烃源岩层系沙河街组内部成藏以外,同样可以在下部孔店组和上部东营组及馆陶组中成藏。

2.4 先致密后成藏有利配置

通过对裂谷盆地致密砂岩储层的研究认为砂岩致密成因主要受两大方面影响,一是岩石成分,二是成岩作用。石英、长石和岩屑作为砂岩的3大主要成分,抗

压实能力由强到弱。松辽盆地与渤海湾盆地致密砂岩主要为岩屑长石砂岩和长石砂岩,岩屑与长石含量高,其抗压实能力差,因此在受到机械压实作用尤其是裂谷盆地快速沉降深埋这种强压实作用下孔隙度迅速减小。另一方面胶结作用也是减孔导致储层致密的主要因素,对松辽盆地与渤海湾盆地致密砂岩的镜下分析发现岩石颗粒之间以线接触为主,胶结物主要为碳酸盐,呈孔隙式或基底式胶结,岩石孔隙被大量充填,储层致密(图6)。

通过对松辽盆地致密砂岩气主力层系沙河子组(K_1sh)与渤海湾盆地致密砂岩气主力层系沙河街组(E_s)埋藏史与孔隙度演化史分析认为,松辽盆地与渤海湾盆地砂岩储层致密期早于成藏期(图7)。前已分

析松辽盆地砂岩储层 3 000 m 以下达到致密,对应埋藏史约为 110 Ma 开始致密,渤海湾盆地砂岩储层 4 270 m 以下达到致密,对应埋藏史约 27 Ma 开始致密。松辽盆地天然气主成藏期为 100 ~ 75 Ma^[38],渤海湾盆地天然气存在两期成藏,东营期—馆陶期与明化镇期^[39-40],以明化镇期为主,成藏时间为 10 Ma 以后。可见,松辽盆地与渤海湾盆地砂岩储层在主成藏期以前已经达到致密,这种储层致密期早于成藏期有利于形成大面积规模储层,从而形成大面积岩性气藏。

3 裂谷盆地致密砂岩气富集规律

3.1 近源聚集,断槽控制气藏分布

裂谷盆地致密砂岩气与常规天然气一样,具有近源优势聚集的特点。由于烃源岩分布受生烃断槽的控制,断槽从而控制了致密砂岩气气藏的分布。徐家围

子断陷与歧口凹陷分别是目前松辽盆地与渤海湾盆地致密砂岩气勘探程度最高的地区,致密砂岩气气藏临近断槽分布,受断槽控制(图 8)。

松辽盆地徐家围子断陷徐深 1 井区沙河子组致密砂岩气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 $-26.8\text{‰} \sim -28.3\text{‰}$, δD 为 $-216\text{‰} \sim -218\text{‰}$ ^[41],而该井区烃源岩 $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 -28.8‰ , δD 为 -237.3‰ ^[42],沉降中心徐东断槽深洼处烃源岩 $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 -24.8‰ , δD 为 -102‰ (图 1a),可见徐深 1 井区致密砂岩气藏 $\delta^{13}\text{C}_1$ 与 δD 值与该井区烃源岩更接近,从而说明了该井区烃源岩对致密砂岩气的成藏贡献更大,而距离较远的沉降中心徐东断槽烃源岩贡献较小,说明致密砂岩气近源成藏的规律。渤海湾盆地歧口凹陷歧深 1 井气源对比分析表明,该井沙三段天然气与沙三段泥岩热解轻烃可比性好,均含有高丰度的苯与甲苯,从而证实了气源来自沙三段烃源岩,为自源型气藏^[43],也体现了致密砂岩气近源聚集的特点。

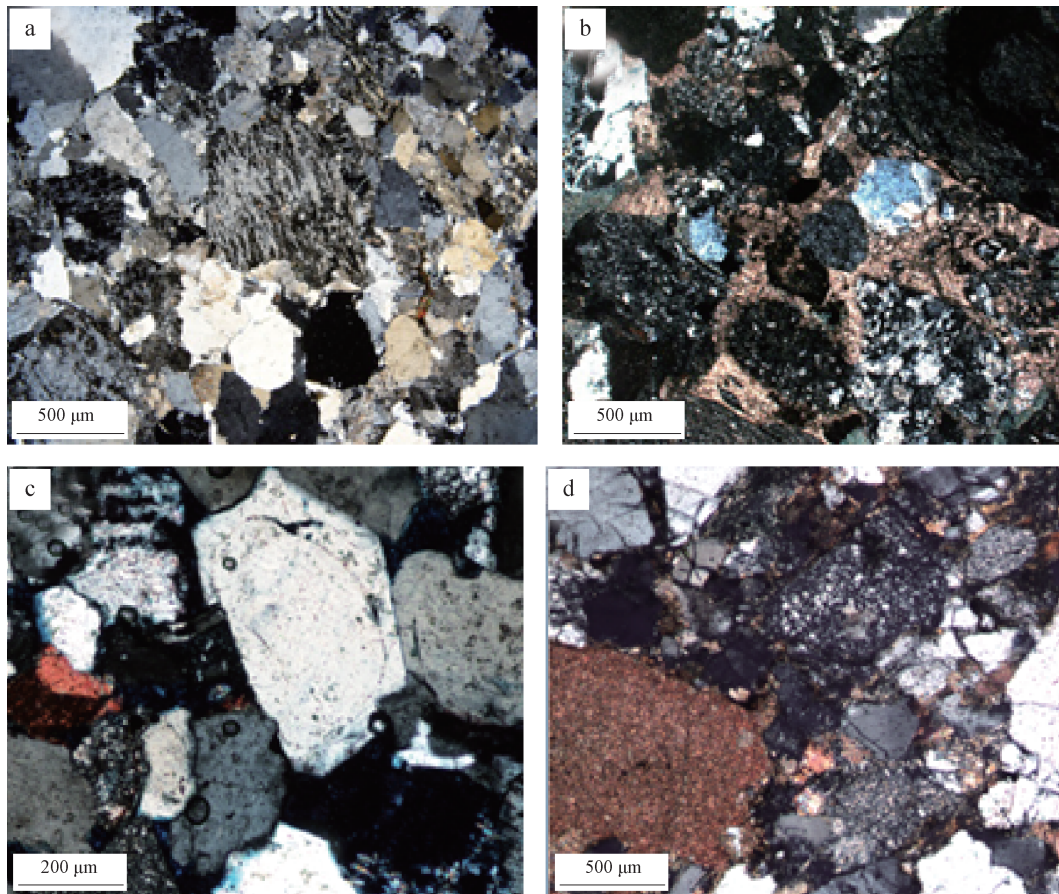


图 6 裂谷盆地致密砂岩镜下特征

Fig. 6 Petrological characteristics of tight sandstone under microscope in rift basins

a. 长石岩屑砂岩,颗粒线—凹凸接触,压实作用强,徐深 44 井,埋深 4 135.90 m,沙河子组,正交偏光;b. 岩屑长石砂岩,碳酸盐基底式胶结,孔隙被充填,达深 21 井,埋深 3 886.00 m,沙河子组,正交偏光;c. 长石岩屑砂岩,颗粒线—凹凸接触,板深 35 井,埋深 4 180.56 m,正交偏光;d. 岩屑长石砂岩,碳酸盐孔隙式—基底式胶结,孔隙被充填,板深 35 井,埋深 4 731.20 m,正交偏光

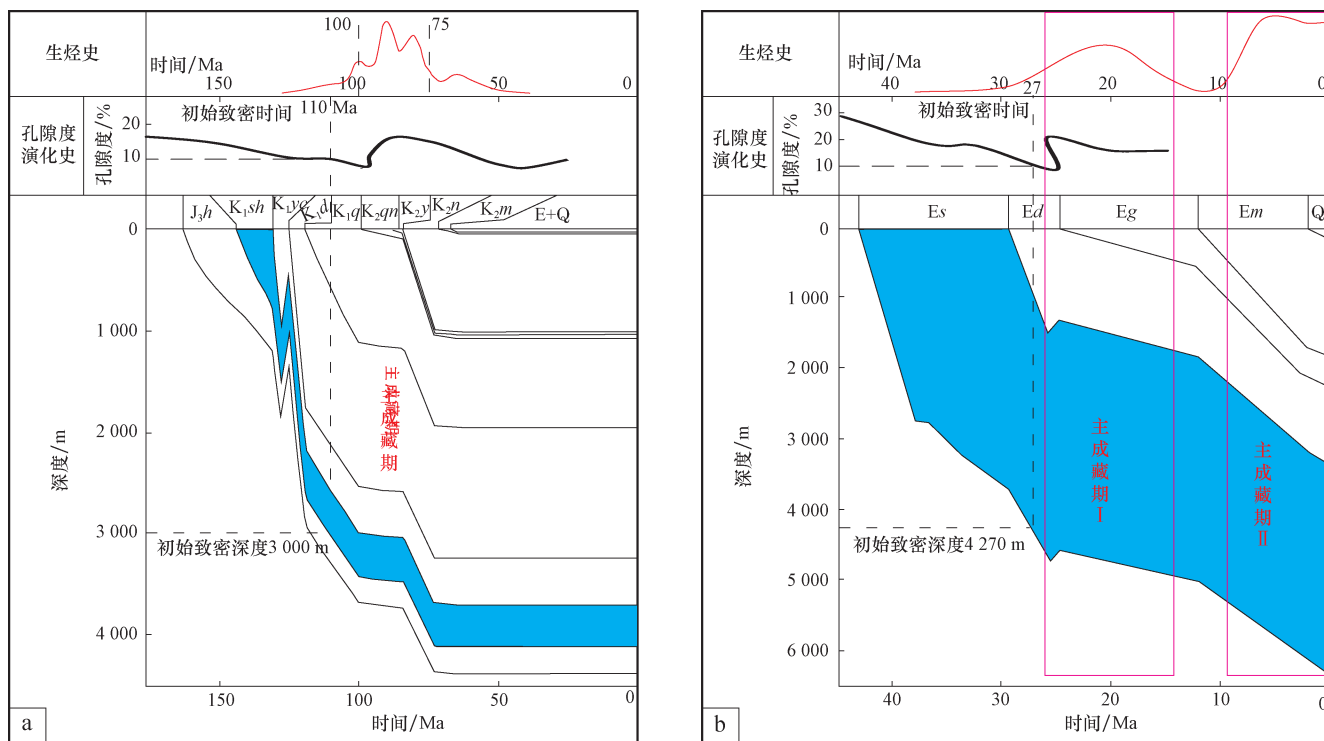


图7 裂谷盆地砂岩储层致密期与成藏期分析

Fig. 7 Analysis on the timing for sandstone tightening and that for gas accumulation in the rift basins

a. 松辽盆地沙河子组储层致密期与成藏期分析; b. 渤海湾盆地沙河街组储层致密期与成藏期分析

J₃h. 火石岭组; K₁sh. 沙河子组; K₁yc. 营城组; K₁d. 登娄库组; K₁q. 泉头组; K₂qn. 青山口组; K₂y. 姚家组; K₂n. 嫩江组; K₂m. 明水组;

E + Q. 第三系 + 第四系; Es. 沙河街组; Ed. 东营组; Eg. 馆陶组; Em. 明化镇组; Q. 第四系

3.2 沉积相带与构造带控制成藏有利区

3.2.1 陡缓两带三角洲前缘相为有利相带

裂谷盆地湖盆陡缓坡是天然气运移的指向区,在具备有利圈闭条件下富集成藏(图2)。裂谷盆地砂体主要以陡缓两带扇三角洲与辫状河三角洲形式存在。三角洲前缘砂体一方面与湖盆内流体接触面积大,时间长,受流体溶蚀作用易发育溶蚀孔隙,另一方面与湖盆内烃源岩指状接触,互层发育,烃源岩生烃过程中排酸进一步对储层进行溶蚀改造形成大量溶蚀孔隙从而形成有利储层。松辽盆地陡坡带扇三角洲前缘与缓坡带辫状河三角洲前缘砂体物性好,砂砾岩平均孔隙度超过5.0%,砂岩平均孔隙度超过4.0%^[44]。渤海湾盆地歧口凹陷研究资料表明,辫状河三角洲前缘及扇三角洲前缘砂岩物性好,平均孔隙度分别可达到9.7%,9.2%,扇/辫状河三角洲前缘砂岩物性好于扇/辫状河三角洲平原物性,孔隙度大于6%的砂岩可达93%。

3.2.2 断阶带与背斜带是有利构造带

对于克拉通盆地而言,致密砂岩气的分布主要受

岩性控制,而对于裂谷盆地而言,由于其盆地内部构造样式多样,构造带是控制致密砂岩气富集的一个不可忽视因素。裂谷盆地构造带主要包括断阶带及背斜带,二者都是有利的致密气聚集区(图2)。断阶带由多组同向断层及之间夹持的地层组成,是致密砂岩气富集有利区,松辽盆地新突破的徐探1井就是典型的断阶带致密砂岩气藏类型(图1a)。在渤海湾盆地歧北斜坡也发现了断阶型致密砂岩气藏。背斜带型致密砂岩气藏目前主要在渤海湾盆地有发现,如歧口凹陷歧深6井。因此,断阶带及背斜带等构造带往往也是致密砂岩气聚集成藏的有利指向区(图1b)。

3.3 次生孔隙带与物性下限控制气藏富集段

次生孔隙带的出现打破了常规条件下储层物性随埋深增大变差的规律,改善了致密砂岩储层物性,为深层致密砂岩气勘探带来了新希望^[45]。通过对松辽盆地与渤海湾盆地致密砂岩气产气井的统计发现,在较大的深度中仍然可以获得高产气流(图9),这也侧面印证了次生孔隙带往往也是致密砂岩气富集段。

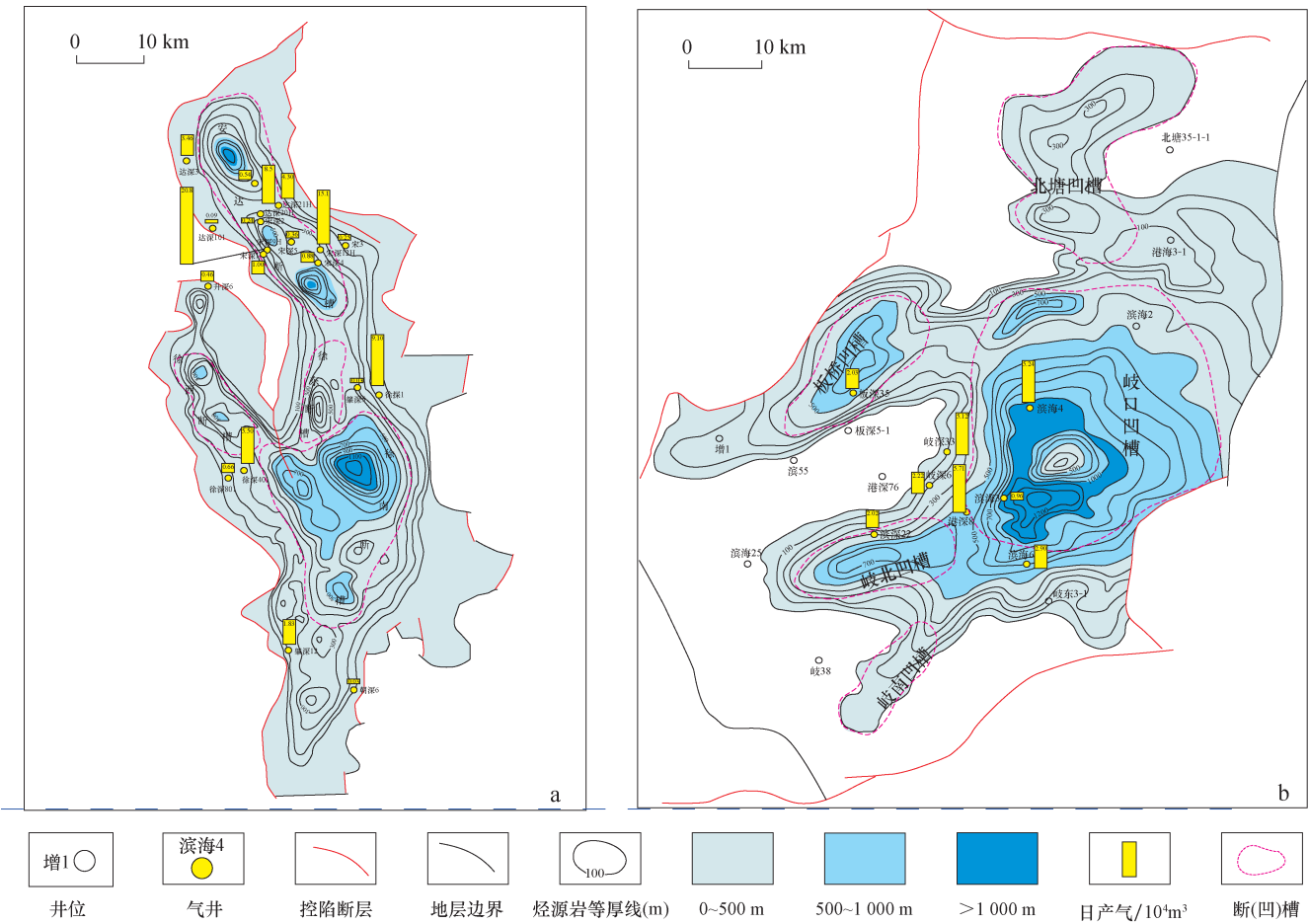


图 8 徐家围子断陷与歧口凹陷气井与生烃断(凹)槽分布

Fig. 8 Distribution of gas wells and hydrocarbon source kitchen in the faulted troughs of Xujiaweizi fault Depression and Qikou Sag
a. 徐家围子断陷; b. 歧口凹陷

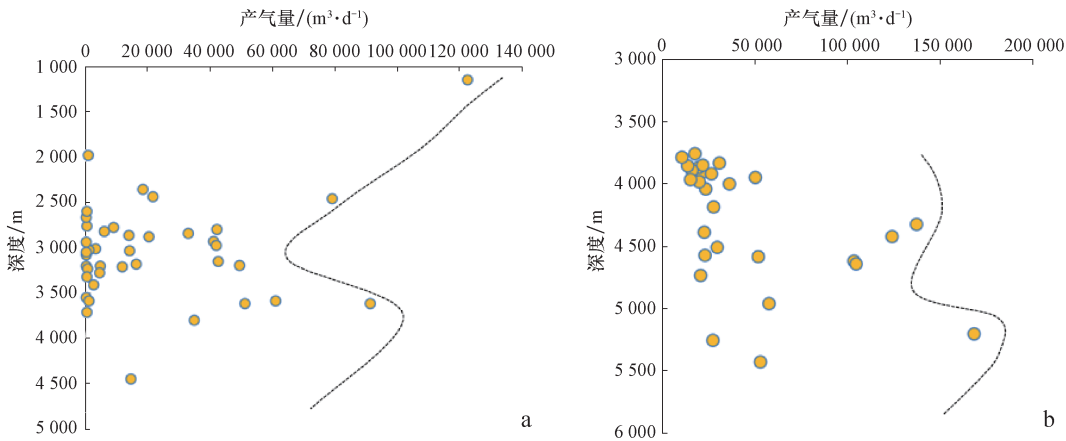


图 9 裂谷盆地致密砂岩气井产气量与深度关系

Fig. 9 Gas well production rate vs. reservoir depth in rift basins
a. 松辽盆地; b. 渤海湾盆地

除了次生孔隙带以外,储层物性下限也控制气藏富集段,同时也一定程度决定了勘探深度。不同的裂谷盆地,储层致密程度随深度变化不同,致密砂岩气藏的储层物性下限也存在差别。前人对松辽盆地沙河子

组碎屑岩致密储层的物性下限进行了研究,对于不同类型致密砂岩气储层,物性下限存在差异。砾岩由于裂缝发育,排驱压力明显低于砂岩以及压裂效果好于砂岩等原因物性下限较砂岩低。前人研究提出砂岩物

性下限为孔隙度为 3.5%,渗透率为 $0.053 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,砾岩物性下限为孔隙度 2.7%,渗透率 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ [44,46]。渤海湾盆地目前针对少数凹陷开展了致密砂岩储层物性下限研究,且各凹陷由于构造演化背景及储层成岩演化过程存在差异,物性下限也不一样。有学者对渤海湾盆地歧口凹陷砂岩储层物性下限进行了研究,认为深层天然气孔隙度下限 7%,推测砂岩有效勘探深度大于 5 800 m [47]。在不考虑次生孔隙发育假设储层物性随深度是线性变化的情况下,结合松辽盆地深层沙河子组砂砾岩致密砂岩气物性统计图(图 5),分析认为沙河子组致密砂岩气砂岩储层有效勘探深度为 4 000 m 左右,砂砾岩储层物性受深度增加影响小,推测有效勘探深度达到 5 000 m 甚至更深。与松辽盆地相比,同样深度下,渤海湾盆地砂岩储层物性明显要好,由于缺少 5 000 m 以下深层物性数据,根据现有数据推测,以孔隙度下限为 7% 作为标准,推测深层致密砂岩气有效勘探深度大于 6 000 m。

4 裂谷盆地致密砂岩气勘探应用与前景

4.1 勘探应用

在裂谷盆地致密砂岩气成藏理论认识的指导下,在松辽盆地徐家围子断陷陡坡与缓坡先后部署了宋深 9H 井与徐探 1 井,两口井均在沙河子组砂砾岩中获得高产气流。宋深 9H 井位于安达宋站地区陡坡扇三角洲前缘相,出气段砂砾岩储层孔隙度平均为 4.1%,渗透率平均为 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,徐探 1 位于徐东地区缓坡断阶带辫状河三角洲前缘相,出气段砂砾岩储层孔隙度平均为 5.3%,渗透率平均为 $0.44 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。宋深 9H 井与徐探 1 井的突破打开了松辽盆地深层沙河子组致密砂岩气勘探的场面。

自宋深 9H 井和徐探 1 井获得突破后,先后又在安达、徐西部署完钻了宋深 12H 井、达深 20HC 井、宋深 10 井和徐深 46H 等 12 口井,目前 9 口井获得工业气流,2 口待试。宋深 9H 井采用定产降压试采,压降基本稳定,产量 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,累计产气 1 219.36 $\times 10^4 \text{ m}^3$,证实沙河子致密气可有效动用。2016 年在安达宋站地区提交了预测储量。

4.2 勘探前景与方向

我国裂谷盆地数量多,包括二连盆地、松辽盆地、渤海湾盆地等 11 个,总面积达 $1.35 \times 10^6 \text{ km}^2$,这些裂谷盆地油气资源丰富,同时也蕴含丰富的致密砂岩气资源。目前,由于受勘探程度的限制,致密砂岩气勘探主要在松辽盆地和渤海湾盆地有发现,这两大裂谷盆地致密砂岩气资源量高达 $2.67 \times 10^{12} \text{ m}^3$,是近期增储稳产的重点现实领域。

中石油第四次资源评价结果揭示松辽盆地致密砂岩气资源量约为 $2.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$,仅徐家围子断陷致密砂岩气资源量约为 $2.395 \times 10^8 \text{ m}^3$ [8]。以致密砂岩气勘探程度最高的徐家围子安达地区作为刻度区,优选断陷面积等 5 项参数对全盆地 26 个重点断陷进行排队,优选徐家围子、长岭等 8 个有利断陷作为松辽盆地致密砂岩气勘探有利区,预测有利面积约为 5 673 km^2 ,总资源量约为 $1.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (表 3)。

渤海湾盆地深层致密砂岩气目前勘探程度非常低,有学者估算渤海湾盆地致密砂岩气资源量达到 $6.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ [48],而古近系致密砂岩气资源量约 $4.200 \times 10^8 \text{ m}^3$ (埋深 > 4 000 m),主要分布在黄骅拗陷得歧口凹陷及辽河拗陷,渤海湾盆地相比松辽盆地致密砂岩气藏具有埋藏更深的特点,但物性却相对更好。热演化程度相比松辽盆地低,既生油又生气。因此,对于渤

表 3 松辽盆地致密砂岩气有利断陷资源分布

Table 3 Distribution of fault depressions favorable for tight sandstone gas exploration of the Songliao Basin

断陷	面积/ km^2	烃源岩厚度/m	砂岩有利面积/ km^2	生气强度/ $(10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	资源量/ (10^{12} m^3)
徐家围子	3 731	500 ~ 1 200	1 295	135.1	3 500
长岭	3 010	600 ~ 1 000	1 053	88.6	2 500
梨树	2 500	500 ~ 1 100	875	110.5	2 000
德惠	2 608	400 ~ 800	900	58.5	1 200
王府	1 718	400 ~ 900	620	74.5	1 000
莺山	1 661	400 ~ 900	350	46.75	500
英台	688	400 ~ 900	300	59.9	600
孤店	603	200 ~ 800	280	40.9	500

海湾盆地而言,应结合不同凹陷地质特征、成烃演化史,准确评价烃源岩演化阶段,寻找有利气源岩,以气源灶为中心寻找有利砂岩储层。通过对渤海湾盆地综合地质特征及勘探现状分析认为,歧口凹陷歧北斜坡、滨海斜坡、板桥次凹、辽河西部凹陷双南-双台子构造带、辽河滩海中央构造带两翼斜坡带及冀中霸县凹陷文安斜坡等6个区带是致密砂岩气勘探的有利地区。

5 结论

1) 以松辽盆地与渤海湾盆地为代表的裂谷盆地致密砂岩气藏是受生烃断槽控制下的一类非常规气藏,气藏多发育于断陷陡缓坡,以岩性气藏为主,断阶带与背斜带发育构造-岩性气藏。气藏类型既有原生又有次生,高压特征明显,气藏部分存在边水底水,含气饱和度45%~85%。大多属于中-低丰度气藏。

2) 裂谷盆地致密砂岩气成藏机制上表现为多因素促源快速生气、多物源催生有利储层、长距离运移立体成藏,先致密后成藏有利配置。气藏富集上具有近源聚集、断槽控制气藏分布,沉积相带与构造带控制成藏有利区,次生孔隙带与物性下限控制气藏富集段的特点。

3) 中国裂谷盆地分布面积大,致密砂岩气资源量丰富。松辽盆地与渤海湾盆地致密砂岩气资源量达 $2.67 \times 10^{12} \text{ m}^3$,具备良好的勘探前景。

参 考 文 献

- [1] Dong Z, Holditch S A, McVay D A, et al. Global unconventional gas resource assessments[R]. SPE, 2011.
- [2] 田纳新,殷进垠,陶崇智,等. 中东-中亚地区重点盆地油气地质特征及资源评价[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(3): 582-591.
Tian Naxin, Yin Jinyin, Tao Chongzhi, et al. Petroleum geology and resources assessment of major basins in Middle East and Central Asia[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3): 582-591.
- [3] 赵靖舟,李军,曹青,等. 论致密大油气田成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 573-583.
Zhao Jingzhou, Li Jun, Cao Qing, et al. Hydrocarbon accumulation patterns of large tight oil and gas fields[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5): 573-583.
- [4] 国家能源局. SY/T 6168-2009 气藏分类[S]. 北京:石油工业出版社, 2009.
National Energy Administration. SY/T 6168-2009 The classification of gas pool[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [5] 杨华,刘新社,闫小雄. 鄂尔多斯盆地晚古生代以来构造-沉积演化与致密砂岩气成藏[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 174-183.
Yang Hua, Liu Xinshe, Yan Xiaoxiong. The relationship between tectonic-sedimentary evolution and tight sandstone gas reservoir since the late Paleozoic in Ordos Basin, Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 174-183.
- [6] 李剑,魏国齐,谢增业,等. 中国致密砂岩大气田成藏机理与主控因素——以鄂尔多斯盆地和四川盆地为例[J]. 石油学报, 2013, 34(增刊1): 257-264.
Li Jian, Wei Guoqi, Xie Zengye, et al. Accumulation mechanism and main controlling factors of large tight sandstone gas field in China: cases study on Ordos Basin and Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(S1): 257-264.
- [7] 李建忠,郭彬程,郑民,等. 中国致密砂岩气主要类型、地质特征与资源潜力[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(4): 607-615.
Li Jianzhong, Guo Bincheng, Zheng Min, et al. Main types, geological features and resource potential of tight sandstone gas in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(4): 607-615.
- [8] 邹才能,陶士振,袁选俊,等. “连续型”油气藏及其在全球的重要性:成藏、分布与评价[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(6): 669-682.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, et al. Global importance of “continuous” petroleum reservoirs: Accumulation, distribution and evaluation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(6): 669-682.
- [9] 孙丽娜,张明峰,吴陈君,等. 不同成因类型致密砂岩气成藏过程及机理研究进展[J]. 沉积学报, 2015, 33(5): 1013-1022.
Sun Lina, Zhang Mingfeng, Wu Chenjun, et al. A review of the accumulation process and formation mechanism about different genetic types of tight-gas sandstone reservoir[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(5): 1013-1022.
- [10] 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.
- [11] 蒋裕强,郭贵安,陈义才,等. 川中地区须家河组天然气成藏机制研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(11): 1-3.
Jiang Yuqiang, Guo Gui'an, Chen Yicai, et al. Mechanism of gas reservoiring in Xujiache Formation in Center Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(11): 1-3.
- [12] 徐昉昊,袁海峰,黄素,等. 川中地区须家河组致密砂岩气成藏机理[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2012, 39(2): 158-163.
Xu Fanghao, Yuan Haifeng, Huang Su, et al. Accumulation mechanism of the compacted sandstone gas in Xujiache Formation of Central Sichuan in China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2012, 39(2): 158-163.
- [13] 任战利,萧明德,迟元林. 松辽盆地古温度恢复[J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(1): 13-15.
Ren Zhanli, Xiao Mingde, Chi Yuanlin. Restoration of the paleogeotherm in Songliao basin[J]. Petroleum geology and Oilfield Development in Daqing, 2001, 20(1): 13-15.
- [14] 杜金虎. 松辽盆地中生界火山岩天然气勘探[M]. 北京:石油工

- 业出版社,2010:1-187.
- Du Jinhui. Natural gas exploration of Mesozoic volcanic rocks in Songliao Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 1-187.
- [15] 张守春,张林晔,查明,等. 压力抑制条件下生烃定量模拟实验研究——以渤海湾盆地济阳坳陷为例[J]. 石油实验地质,2008,30(5):522-526.
- Zhang Shouchun, Zhang Linye, Cha Ming, et al. An experimental simulation on the hydrocarbon quantity generated under pressure suppression: A case from the Jiyang depression of the Bohai Bay basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(5): 522-526.
- [16] 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.
- [17] 杨华,席胜利,魏新善,等. 鄂尔多斯盆地大面积致密砂岩气成藏理论[M]. 科学出版社,2016,1-378.
- Yang Hua, Xi Shengli, Wei Xinshan, et al. Accumulation theory of giant tight sandstone gasfield of Ordos Basin [M]. Beijing: Science Press, 2016: 1-378.
- [18] 胡望水,吕炳全,张文军,等. 松辽盆地构造演化及成盆动力学探讨[J]. 地质科学,2005,40(1):16-31.
- Hu Wangshui, Lyu Bingquan, Zhang Wenjun, et al. An approach to tectonic evolution and dynamics of the Songliao Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2005, 40(1): 16-31.
- [19] 卞从胜,汪泽成,徐兆辉,等. 构造沉降梯度对盆地沉积体系发育的控制作用[J]. 中国石油勘探,2014,19(3):31-39.
- Bian Congsheng, Wang Zecheng, Xu Zhaoxue, et al. Controlling effect of structural sedimentation gradient on development of Basin sedimentation system [J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(3): 31-39.
- [20] 马德文,邱楠生,谢增业,等. 川中地区上三叠统须家河组气田异常高压演化研究[J]. 沉积学报,2011,29(5):953-961.
- Ma Dewen, Qiu Nansheng, Xie Zengye, et al. Analysis on evolution of abnormal high formation pressure in gas fields of Upper Triassic Xujiache Formation, central Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(5): 953-961.
- [21] 窦立荣. 陆内裂谷盆地的油气成藏风格[J]. 石油勘探与开发,2004,31(2):29-31.
- Dou Lirong. Formation style of oil accumulation in interior basins [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(2): 29-31.
- [22] 赵文智,邹才能,汪泽成,等. 富油气凹陷“满凹含油”论——内涵与意义[J]. 石油勘探与开发,2004,31(2):5-13.
- Zhao Wenzhi, Zou Caineng, Wang Zecheng, et al. The intension and signification of “Sag-wide Oil-Bearing Theory” in the hydrocarbon-rich depression with terrestrial origin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(2): 5-13.
- [23] 孟元林,李亚光,牛嘉玉,等. 渤海湾盆地北部深层碎屑岩储层孔隙度影响因素探讨[J]. 中国海上油气,2007,19(3):154-156.
- Meng Yuanlin, Li Yaguang, Niu Jiayu, et al. A discussion on factors to control porosity of deep-buried clastic reservoirs in the northern Bohai Bay basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2007, 19(3): 154-156.
- [24] 刘锐娥,吴浩,魏新善,等. 酸溶蚀模拟实验与致密砂岩次生孔隙成因机理探讨:以鄂尔多斯盆地盒8段为例[J]. 高校地质学报,2015,21(4):758-766.
- Liu Ruie, Wu Hao, Wei Xinshan, et al. Experimental study on the genesis of secondary porosity in tight sandstone with the acid corrosion-model: A case from He 8 Member of Upper Paleozoic in Ordos Basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2015, 21(4): 758-766.
- [25] 赵泽辉,徐淑娟,姜晓华,等. 松辽盆地深层地质结构及致密砂岩气勘探[J]. 石油勘探与开发,2015,43(1):12-23.
- Zhao Zehui, Xu Shujuan, Jiang Xiaohua, et al. Deep strata geologic structure and tight conglomerate gas exploration in Songliao Basin, East China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 43(1): 12-23.
- [26] 李军,赵靖舟,凡元芳,等. 鄂尔多斯盆地上古生界准连续型气藏天然气运移机制[J]. 石油与天然气地质,2013,34(5):592-599.
- Li Jun, Zhao Jingzhou, Fan Yuanfang, et al. Gas migration mechanism of quasi-continuous accumulation in the Upper Paleozoic of Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5): 592-599.
- [27] 胡阳,吴智平,钟志洪,等. 珠江口盆地珠一坳陷始新世—晚期构造变革特征及成因[J]. 石油与天然气地质,2016,37(5):779-785.
- Hu Yang, Wu Zhiping, Zhong Zhihong, et al. Characterization and genesis of the Middle and Late Eocene tectonic changes in Zhu 1 Depression of Pearl River Mouth Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 779-785.
- [28] 张善文,张林晔,李政. 济阳坳陷孤北潜山煤成气成藏过程分析[J]. 天然气地球科学,2009,20(5):670-677.
- Zhang Shanwen, Zhang Linbi, Li Zheng. Analysis of accumulation process of coal-formed Gas in gubei buried hill of Jiyang Depression [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(5): 670-677.
- [29] 李丕龙,庞雄奇. 陆相断陷盆地隐蔽油气藏形成——以济阳坳陷为例[M]. 北京:石油工业出版社,2009:54-94.
- Li Pilong, Pang Xiongqi. Subtle reservoir formation in continental fault basin—a case study in Jiyang depression [M]. Beijing: Petroleum industry press, 2009: 54-94.
- [30] 李运振,刘震,赵阳,等. 济阳坳陷断陷湖盆类型与输导体系发育特征的关系分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2007,22(4):47-52.
- Li Yunzhen, Liu Zhen, Zhao Yang, et al. Relationship between the characteristics of passage systems and the types of faulted lake basins in Jiyang Depression [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2007, 22(4): 47-52.
- [31] 张成,解习农,郭秀蓉,等. 渤中坳陷大型油气系统输导体系及其对油气成藏控制[J]. 地球科学—中国地质大学学报,2013,38(4):807-818.
- Zhang Cheng, Xie Xinong, Guo Xiurong, et al. Pathway system of large-scale petroleum system and its controls on hydrocarbon accumulation in the Bozhong sub-basin, Bohai Bay basin [J]. Earth Science—Journal of China University of Geoscience, 2013, 38(4): 807-818.

- [32] 李洪香,董越琦,王国华,等. 歧口凹陷斜坡区岩性油气藏成藏机制与富集规律[J]. 特种油气藏, 2013, 20(3): 19–22.
Li Hongxiang, Dong Yueqi, Wang Guohua, et al. The mechanism and regularity of hydrocarbon accumulation of the lithologic reservoirs in the slope region of Qikou Sag[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2013, 20(3): 19–22.
- [33] 贾东,武龙,闫兵,等. 全球大型油气田的盆地类型与分布规律[J]. 高效地质学报, 2011, 17(2): 170–184.
Jia Dong, Wu Long, Yan Bing, et al. Basin types and distribution of the global giant oil and gas fields[J]. Geological Journal of China Universities, 2011, 17(2): 170–184.
- [34] 张晓东,于晶,张大智,等. 徐家围子断陷沙河子组致密气成藏条件及勘探前景[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(5): 86–91.
Zhang Xiaodong, Yu Jing, Zhang Dazhi, et al. Accumulation conditions and exploration prospect for Shahezi formation tight sandstone gas in Xujiaweizi fault depression[J]. Petroleum geology and Oilfield Development in Daqing, 2014, 33(5): 86–91.
- [35] 张大智,张晓东,杨步增. 徐家围子断陷沙河子组致密气地质甜点综合评价[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(5): 98–103.
Zhang Dazhi, Zhang Xiaodong, Yang Buzeng. Comprehensive evaluation of geological sweet point of tight gas of Shahezi Formation in Xujiaweizi fault depression[J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(5): 98–103.
- [36] 刘超. 徐家围子断陷沙河子组致密气生储盖条件及成藏特征研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2015.
Liu Chao. Study on reservoir-forming conditions and accumulation property of tight sandstone gas of Shahezi formation in Xujiaweizi fault depression[D]. Daqing: Northeast University of Petroleum, 2015.
- [37] 冯子辉,王循,李欣,等. 致密砂砾岩气形成主控因素与富集规律—以松辽盆地徐家围子断陷下白垩统营城组为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(6): 650–656.
Feng Zihui, Wang Xun, Li Xin, et al. Formation and accumulation of tight sandy conglomerate gas: A case from the Lower Cretaceous Yingcheng Formation of Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 650–656.
- [38] 陆加敏,刘超. 断陷盆地致密砂砾岩气成藏条件和资源潜力—以松辽盆地徐家围子断陷下白垩统沙河子组为例[J]. 中国石油勘探, 2013, 40(6): 53–60.
Lu Jiamin, Liu Chao. Accumulation conditions and resource potential of tight glutenite gas in fault depression basins: A case study on Lower Cretaceous Shahezi Formation in Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2013, 40(6): 50–60.
- [39] 于学敏,姜文亚,何炳振,等. 歧口凹陷古近系天然气藏主要特征[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(2): 183–189.
Yu Xuemin, Jiang Wenya, He Binzhen, et al. Characteristics of the Paleogene gas reservoirs in Qikou Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 183–189.
- [40] 董越琦,李洪香,王莉,等. 歧口凹陷歧北斜坡岩性油气藏及其勘探方法[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(10): 1630–1636.
Dong Yueqi, Li Hongxiang, Wangli, et al. Theory and methods of lithological reservoir exploration in Qibei Slope of Qikou Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(10): 1630–1636.
- [41] 戴金星,等. 中国煤成气大气田及气源[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1–424.
Dai Jinxing, et al. Giant coal-derived gas fields and their gas sources in China[M]. Beijing: Science Press, 2014: 1–424.
- [42] 薛海涛,刘海英,卢双舫,等. 松辽盆地徐深1井气藏气源的氢、碳同位素特征[J]. 地质科学, 2009, 44(2): 635–644.
Xue Haitao, Liu Haiying, Lu Shuangfang, et al. Characteristics of hydrogen and carbon isotopes of gas sources in the well Xushen 1 gas reservoir of the Songliao Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2009, 44(2): 635–644.
- [43] 国建英,于学敏,李剑,等. 歧口凹陷歧深1井气源综合对比[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(3): 392–399.
Guo Jianying, Yu Xuemin, Li Jian, et al. Gas source of Qishen-1 well in Qikou Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(3): 392–399.
- [44] 王成,赵海玲,邵红梅,等. 松辽盆地北部登娄库组砂岩次生孔隙形成时期与油气成藏[J]. 矿物岩石学杂志, 2007, 26(3): 253–258.
Wang Cheng, Zhao Hailing, Shao Hongmei, et al. Formation time of secondary pores in the sandstone and hydrocarbon reservoir of Denglouku Formation in Songliao Basin[J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2007, 26(3): 253–258.
- [45] 秦伟军,李娜,付兆辉. 高邮凹陷深层系有效储层形成控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(5): 788–792.
Qin Weijun, Li Na, Fu Zhaohui. Factors controlling formation of effective reservoirs in deep of the Gaoyou Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(5): 788–792.
- [46] 蔡来星,卢双舫,王蛟,等. 松辽盆地北部肇州区块沙河子组致密储层主控因素[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2016, 43(1): 24–34.
Cai Laixing, Lu Shuangfang, Wang Jiao, et al. Characteristics and controlling factors of tight reservoir in Shahezi formation of Zhaozhou, northern Songliao basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2016, 43(1): 24–34.
- [47] 滑双君,于超,孙超因. 歧口凹陷深层储层控制因素与有效储层下限分析[J]. 延安大学学报学报(自然科学版), 2014, 33(4): 56–60.
Hua Shuangjun, Yu Chao, Sun Chaonian. Reservoir controlling factors for deep clastic reservoir and analysis on lower limits of effective reservoir in the Qikou Sag[J]. Journal of Yanan University (Natural Science Edition), 2014, 33(4): 56–60.
- [48] 李欣,李建中,杨涛,等. 渤海湾盆地油气勘探现状与勘探方向[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(2): 140–144.
Li Xin, Li Jianzhong, Yang Tao, et al. Oil-gas exploration status and future targets in Bohai Bay basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(2): 140–144.