

# 渤南洼陷页岩油气富集高产条件及勘探方向

王永诗, 巩建强, 房建军, 刘雅利, 李政, 孟涛  
(中国石化股份胜利油田分公司地质科学研究院, 山东东营 257015)

**摘要:**基于对渤南洼陷页岩油气的勘探实践,在系统分析投产井累积产油量与烃源岩特征、岩相组合、埋深、构造以及地层异常高压的基础上,总结了页岩油气富集高产的条件。有效烃源岩发育决定页岩油气的主力层系;有利岩相发育(纹层状泥质灰岩相)是页岩油气富集高产的基础;断裂裂缝发育是页岩油气富集高产的关键;地层异常高压和埋深是页岩油气富集高产的重要因素。渤南洼陷沙三段下亚段纹层状泥质灰岩相最发育的 $12^{\text{下}}-13^{\text{上}}$ 层组是页岩油气最富集的层系,综合各因素的匹配关系,整体考虑、分类分区,有针对性地部署和评价,以落实其产能情况,部署了渤页平1井等3口页岩油气水平井,并已初步实现预期效果。

**关键词:**页岩油气富集高产条件 岩相组合 断裂裂缝 异常高压 渤南洼陷

**中图分类号:** TE112

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2012)06-0006-05

20世纪90年代以来,随着水平井和针对页岩层段压裂等技术的日趋成熟,中外多个盆地开展了商业性页岩油气勘探<sup>[1-4]</sup>。截至2010年底,除美国和加拿大外,澳大利亚、德国、法国、瑞典和波兰等国家也开始了对页岩油气的研究、勘探与开发。中国页岩油气主要分布于3个古生代地区或盆地(扬子地区、华北地区和塔里木盆地)和6个中、新生代陆相盆地(松辽盆地、鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地、吐哈盆地、柴达木盆地和渤海湾盆地),具有可观的资源量<sup>[5-9]</sup>。

济阳坳陷渤南洼陷勘探早期就已发现页岩油气,如1971年钻探的义18井沙一段、1989年钻探的罗42井和1996年钻探的新义深9井沙三段下亚段均已获得工业油气流并投入开发,其中罗42井累积产油量已达 $1.36 \times 10^6$  t,表明研究区页岩油气资源丰富,具有良好的勘探前景。

## 1 地质概况

渤南洼陷为济阳坳陷沾化凹陷最大的次级洼陷,位于沾化凹陷中西部,是在古生界基岩古地形背景下、经构造运动发育形成的断—坳盆地,构造上表现为北断南超、东西双断的断陷湖盆,其北部以埕南断层与埕东凸起相邻,南部以斜坡过渡至陈

家庄凸起,东以孤西断层与孤北洼陷和孤岛低凸起相连,西以义东断层与义和庄凸起相接,勘探面积约为600 km<sup>2</sup>。研究区古近系发育齐全,自下而上包括孔店组、沙河街组和东营组,厚度达4 000多米。其中沙河街组沉积早期为渤南洼陷演化鼎盛期,构造运动相对稳定,湖盆持续沉降,气候温暖潮湿,陆源碎屑携带大量营养物质注入湖泊,水生生物生长繁盛,沉积了咸水—半咸水—淡水环境的沙四段上亚段、沙三段下亚段、沙三段中亚段及沙一段4套有效烃源岩<sup>[10-11]</sup>。钻井资料揭示,这4套有效烃源岩厚度大、有机质丰度高,有机质类型以腐泥型—混合型为主,有机质成熟度分布范围广<sup>[12-13]</sup>,具备形成大规模页岩油气的物质基础(表1)。尤其是沙三段

表1 渤南洼陷烃源岩有机地球化学参数

层系	岩性	有机碳含量, %	生烃潜量/(mg·g <sup>-1</sup> )	氯仿沥青“A”含量, %	镜质组反射率, %	有机质类型	厚度/m	面积/km <sup>2</sup>	综合评价
沙一段	泥岩、油泥岩	1.0~10.3	2.1~63	0.2~1.5	0.29~0.70	I	0~450	520	好
沙三段中亚段	油泥岩、泥岩	0.5~7.8	1.2~56	0.08~0.64	0.50~0.72	I	0~175	260	好
沙三段下亚段	油泥岩、油页岩	1.0~9.3	1~82.6	0.07~3.0	0.52~0.92	I	0~680	400	优质
沙四段上亚段	泥岩	0.5~4.2	2~12	0.12~1.37	0.54~	I	0~300	280	好
	灰岩	0.5~3.7	2~17	0.1~0.97	1.16	I	0~80		

收稿日期:2012-09-10。

作者简介:王永诗,男,教授级高级工程师,博士,从事石油地质研究与油气勘探管理工作。联系电话:(0546)8715751, E-mail: wangysh623@sina.com。

基金项目:国家重大科技专项“渤海湾盆地精细勘探关键技术”(2011ZX05006)。

下亚段烃源岩,其生烃指标好,厚度及分布范围大,油气生成量大,是研究区油气生成的主力层系,具有良好的页岩油气资源潜力。

2010年渤南洼陷完钻的沙三段下亚段页岩系统取心井——罗69井,取心井段长度达229.75 m,进行了矿物组成、有机碳含量等36项8700多次分析化验工作,为页岩油气的分析研究奠定了基础。

## 2 页岩油气产出层系

经过40多年的勘探、开发,渤南洼陷多口井在页岩中获得工业油气流(表2)。统计结果表明,5口井在沙一段获得工业油气流,如义18井采用4 mm油嘴测试,获产油量为62 t/d,产气量为2860 m<sup>3</sup>/d的高产工业油气流;7口井在沙三段下亚段获得工业油气流,如罗42井采用6 mm油嘴测试,获产油量为79.9 t/d,产气量为7750 m<sup>3</sup>/d的高产工业油气流;2口井在沙四段上亚段获得工业油气流。因此,渤南洼陷页岩油气产出层系以沙三段下亚段和沙一段为主,其次为沙四段上亚段;不同烃源岩发育层系的页岩油气产能差别较大,主要与不同时期烃源岩沉积的环境密切相关<sup>[14-17]</sup>。

层系	见油气显示井	工业油气流井	投产井
沙一段	17	5	2
沙三段中亚段	2		
沙三段下亚段	44	7	5
沙四段上亚段	5	2	

沙四段上亚段沉积时期,渤南洼陷处于断陷湖盆初始裂陷期,湖水盐度较高,烃源岩中碳酸盐含量普遍较高,洼陷内蒸发量较大,多形成泥灰岩、泥质灰岩、灰质泥岩与膏岩、含膏泥岩互层的沉积特征。碳酸盐含量高有利于提高岩石的脆性,而膏岩、含膏泥岩的发育又使得岩石的塑性增强,导致沙四段上亚段页岩油气显示较多而产能却相对较低。

沙三段沉积时期,渤南洼陷为深湖—半深湖沉积环境,处于稳定断陷期,断裂活动剧烈,气候由半干旱向温暖潮湿转化,降水充沛,基本为淡水—微咸水还原环境;造成近物源区的大范围烃源岩生源以高等植物输入为主,而洼陷中心远离物源,陆源物质难以搬运至此,其烃源岩生源仍以低等水生生物为主,形成有机质品质好、利于保存、厚度大且范围广的烃源岩。沙三段烃源岩以灰色泥岩、油页岩

和油泥岩为主,依据岩性、电性组合特征将其划分为上、中、下3个亚段,可进一步划分为0—13共14个层组。其中沙三段下亚段(10—13层组)沉积时期的水体深度适中且处于微咸水环境,有利于纹层发育和层间孔隙的形成;沙三段中亚段(2—9层组)沉积时期为沙三段水体最深的时期,以稳定的块状泥岩和灰质泥岩沉积为主,其纹层发育差、层间孔隙不发育,导致页岩见油气显示较少。现有资料表明,研究区页岩油气主要富集于沙三段下亚段的12和13层组,根据岩性、电性特征将12和13层组进一步细分为12<sup>上</sup>、12<sup>下</sup>、13<sup>上</sup>和13<sup>下</sup>层组。罗69等井的岩心观察、薄片鉴定和测井资料表明,沙三段下亚段10层组以层状泥质灰岩和泥岩为主,电阻率测井曲线呈锯齿状箱形高阻特征;11层组以块状泥岩为主,电阻率测井曲线呈锯齿状箱形低阻特征;12<sup>上</sup>层组以层状—纹层状泥质灰岩和灰质泥岩为主,局部发育纹层状泥质灰岩,电阻率测井曲线呈锯齿状丘形特征,且电阻率自上而下逐渐增大;12<sup>下</sup>层组以纹层状泥质灰岩为主,其次为纹层状—层状泥质灰岩,电阻率测井曲线呈锯齿状丘形特征,且电阻率自上而下逐渐增大;13<sup>上</sup>层组以纹层状泥质灰岩为主,其次为纹层状—层状泥质灰岩,电阻率测井曲线表现为尖峰状,且电阻率高于其他层组;13<sup>下</sup>层组以油页岩与油泥岩互层为主,电阻率测井曲线呈锯齿状低阻特征。

沙一段沉积时期,渤南洼陷又处于断陷湖盆发育的鼎盛时期,主要为灰岩、白云岩与钙质纹层状灰岩、深灰色泥岩互层的岩相组合特征。灰岩和白云岩的溶孔、裂缝较为发育,一般具有较好的储集物性,是该层系页岩油气获得较高产能的关键因素。

## 3 页岩油气产能特征

渤南洼陷已有多口井在页岩中获得工业油气流,部分井投产后获得了较高的产能,如罗42、新义深9、义18和义21等井,其中罗42和新义深9井沙三段下亚段的累积产油量均超过1×10<sup>4</sup> t(图1)。投产井的产油量和累积产油量统计结果表明,页岩油气投产可分为2—3个周期:第1个周期初期油气能量足、产能高,随后产能逐渐降低直至关井;第2个周期初期产能较高,但递减较快;第3个周期产能较低,且累积产油量较少;整体上,第1和第2个周期的累积产油量占总产油量的80%以上。罗42井的

累积产油量为13 605 t,第1、第2和第3个周期的累积产油量分别为10 322,2 547和736 t;累积产水量分别为441,369和269 m<sup>3</sup>;综合含水率分别为4%,12.6%和26.7%,且全井综合含水率较低。义18和义21井沙一段的累积产油量分别为9 658 t和10 359 t,具有较高的产能;从义21井沙一段页岩油气产能曲线(图2)来看,沙一段具有与沙三段下亚段相似的产能特征。表明研究区沙三段下亚段和沙一段页岩均以产油为主,且基本不含水。

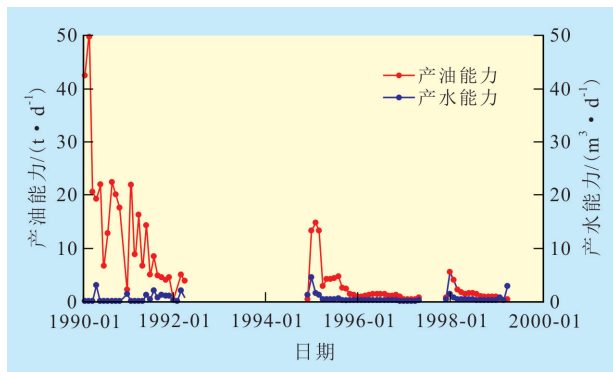


图1 渤海洼陷罗42井沙三段下亚段页岩油气产能曲线

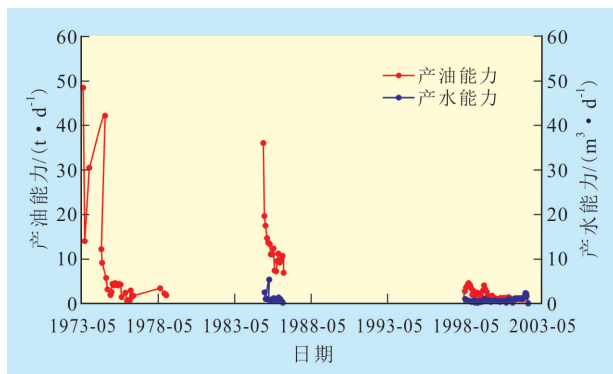


图2 渤海洼陷义21井沙一段页岩油气产能曲线

## 4 页岩油气富集高产条件

### 4.1 有效烃源岩发育决定页岩油气的主力层系

烃源岩的生烃能力直接决定页岩油气的资源量,决定烃源岩生烃能力的指标包括有机质类型、有机质含量、镜质组反射率、有效烃源岩厚度及面积等。渤海洼陷烃源岩有机地球化学参数(表1)统计结果表明,研究区4套烃源岩的有机质类型均以I型干酪根为主,有机碳含量和生烃潜量以沙三段下亚段和沙一段最高,沙三段中亚段次之,而沙四段上亚段则较低;镜质组反射率为0.29%~1.16%,以生油为主,其中沙四段上亚段、沙三段下亚段和沙三段中亚段的演化程度较高,而沙一段的演化程

度较低。从烃源岩的埋深来看,仅沙四段上亚段烃源岩的埋深超过4 200 m,以生气为主,且主要发育于孤西断层下降盘的局部地区。从渤海洼陷有效烃源岩厚度及有效烃源岩厚度大于100 m的分布面积可以看出,沙三段下亚段和沙一段烃源岩的厚度和面积较大。整体上,渤海洼陷页岩以生油为主,且以沙三段下亚段的生烃潜力最大,其次为沙一段,因此,沙三段下亚段和沙一段应是目前研究区页岩油气勘探的主力层系。

### 4.2 有利岩相是页岩油气富集高产的基础

渤海洼陷发育4套有效烃源岩,其沉积时期的盆地格架、物源供给和构造运动等地质因素不同,形成烃源岩的岩相也不同。通过各层系的岩心观察、薄片鉴定等资料分析表明,见到页岩油气显示的岩相主要为纹层状泥质灰岩相、层状—纹层状泥质灰岩相、纹层状—层状泥质灰岩相、层状泥质灰岩相、层状灰质泥岩相,以及受边界物源或碳酸盐含量影响形成的纹层状泥质灰岩夹砂质条带岩相、纹层状泥质灰岩夹碳酸盐条带岩相、层状泥质灰岩夹碳酸盐条带岩相<sup>[18]</sup>。其中沙四段上亚段以层状泥质灰岩相为主;沙三段下亚段以纹层状泥质灰岩相和纹层状泥质灰岩夹碳酸盐条带、纹层状泥质灰岩夹砂质条带岩相为主,且主要发育于12<sup>下</sup>—13<sup>上</sup>层组;沙三段中亚段以层状灰质泥岩相为主;沙一段以纹层状泥质灰岩夹碳酸盐条带岩相为主。

渤海洼陷在沙四段上亚段、沙三段下亚段和沙一段页岩层系已获得工业油气流,虽然层系不同,但其岩相和岩相组合的差别较小,主要有5种岩相(图3),分别为纹层状泥质灰岩相、纹层状泥质灰岩夹砂质条带岩相、纹层状泥质灰岩夹碳酸盐条带岩相、层状泥质灰岩相、层状泥质灰岩夹碳酸盐条带岩相,其中以纹层状泥质灰岩相和纹层状泥质灰岩夹碳酸盐条带岩相所占比例较大,分别为35%和30%。

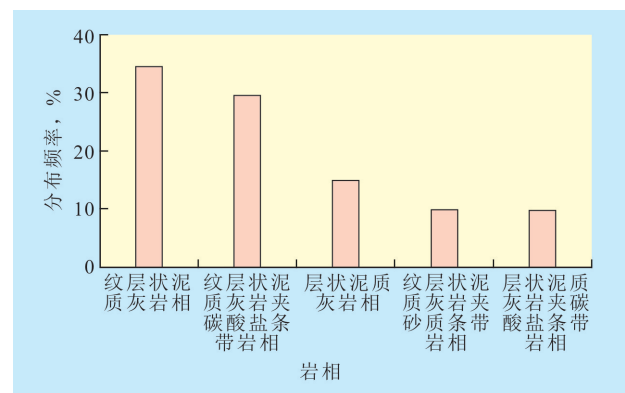


图3 渤海洼陷页岩工业油气流井的岩相分布

不同的岩相具有不同的储集物性。罗69井分析化验资料表明,纹层状泥质灰岩相具有相对较好的储集物性,这主要是由于该类岩相为方解石和富含有机质泥岩的互层,其层间微孔隙和方解石矿物晶间孔发育,且方解石含量高、脆性大,易发育裂缝,可沟通孔隙形成有效的储集体,是页岩油气重要的储集类型。纹层状泥质灰岩夹碳酸盐条带岩相中发育碳酸盐条带,增加了岩石的脆性,易发育裂缝,且碳酸盐岩重结晶作用有利于发育晶间孔、晶间溶孔等,使岩石具有更高的孔隙度和渗透率,更有利于页岩油气的富集和开采。此外,纹层状泥质灰岩夹砂质条带岩相中发育砂质条带,使岩石的渗透性得以改善,有利于页岩油气的富集和开采;而目前已获得工业油气流的岩相中,以纹层状泥质灰岩夹砂质条带岩相所占比例较低,可能与钻遇该套岩相的井较少具有一定的关系。因此,综合分析认为纹层状泥质灰岩相、纹层状泥质灰岩夹碳酸盐条带岩相和纹层状泥质灰岩夹砂质条带岩相是研究区页岩油气勘探的主要岩相类型,其发育程度决定了页岩油气的富集程度。

#### 4.3 断裂裂缝发育是页岩油气富集高产的关键

页岩是油气的储层也是生油层,一般具有较低的渗透性。渤南洼陷经历了多期构造运动,断裂较发育,断裂周围地层发育规模不等的裂缝;而裂缝既可有效改善页岩的渗透性,也沟通了页岩中的微孔隙,进而提高油气产能<sup>[19]</sup>。例如罗42井位于北西向和北东向断裂的交汇处,其微裂缝发育,未经压裂即获得了较高的产能。渤南洼陷页岩油气测试井的产油量与距断裂距离的分析表明,距断裂较近的井产能较高,距断裂较远的井产能则较低,且距断裂距离超过1 000 m的井一般难以获得较高的产能(图4);但部分井距断裂较近,却未获得较高的产能,说明断裂裂缝发育是页岩油气富集高产的关键因素,而非决定因素。

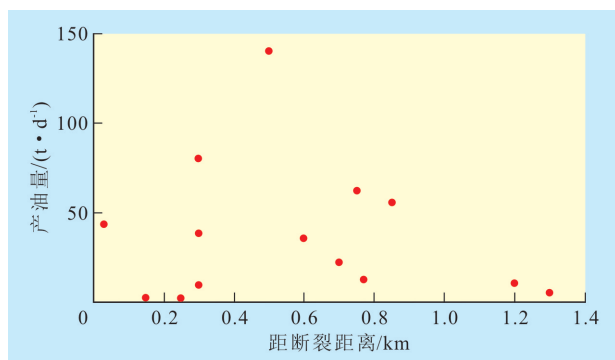


图4 渤南洼陷页岩测试井的产油量与距断裂距离的关系

#### 4.4 地层异常高压和埋深是页岩油气富集高产的重要因素

页岩中存在异常高压,具有较高的天然能量,使得页岩油气具有较高的产能。渤南洼陷沙三段下亚段页岩层压力系数与产油量的关系(图5)表明,压力系数越大,产能一般越高;而且异常高压的存在也使页岩更易于产生各种裂缝,进而提高其渗透性,有利于获得较高的产能。例如新义深9井沙三段下亚段岩心中发育多条不规则裂缝,为异常高压缝,测试产油量为38.5 t/d,产气量为870 m<sup>3</sup>/d,投产累积产油量为11 346 t,具有较高的产能。

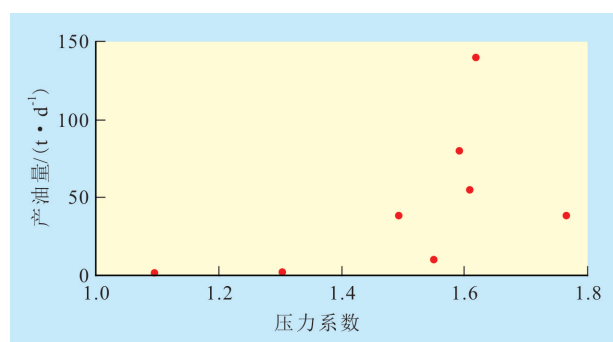


图5 渤南洼陷沙三段下亚段页岩层压力系数与产油量的关系

此外,页岩的储集物性较差,须进行大型压裂,而埋深大于3 600 m时,受现有压裂工艺技术的限制,一般不能获得较高的产能。因此,埋深也是影响页岩油气产能的重要因素。

## 5 勘探方向

通过对渤南洼陷页岩油气富集高产条件的分析,根据有效烃源岩发育特征、岩相组合、地层压力、断裂发育程度以及目的层埋深等条件的差异,进行多因素叠合,圈定有利区,整体考虑、分层分类进行部署和评价。

沙三段下亚段有效烃源岩在渤南洼陷最为发育,其生烃指标好、厚度大、分布范围广,生烃潜力大;主要发育纹层状泥质灰岩相、纹层状泥质灰岩夹砂质条带岩相和纹层状泥质灰岩夹碳酸盐条带岩相,有利于页岩油气富集;且大部分地区的沙三段下亚段位于异常高压区,压力系数最大为1.76,断裂也较为发育,是研究区页岩油气勘探的主力层系。渤南洼陷沙三段下亚段页岩油气的部署原则为:针对纹层状页岩相、异常高压、断裂发育和纹层状页岩相、正常压力、断裂不发育等不同页岩发育层段和构造部位进行评价和部署,以落实其产能情

况,并确定经济技术界限层,为页岩油气的规模化开发奠定基础;同时,页岩油气水平井水平段的走向垂直于最大主应力方向,有利于多段压裂产生更多裂缝,进而提高产能。首选渤南洼陷罗家地区沙三段下亚段部署了渤页平1等3口水平井,其中渤页平1井已完钻,水平井段长度为1 225 m,在纹层状泥质灰岩中见2层54.5 m的油斑显示,井底油气显示异常活跃,槽面见气泡40%,气测全烃值由4.09%上升至100%,初步实现了预期效果。

渤南洼陷沙一段有效烃源岩在洼陷内的分布范围最大,其生烃指标较好,生烃潜力较大,主要发育纹层状泥质灰岩夹碳酸盐条带岩相,也是研究区重要的页岩油气富集层系。现有资料表明,部分地区的沙一段处于异常高压区且断裂发育,已有义18、义21等多口井在沙一段页岩中获得高产工业油气流,部分井的累积产油量约为 $1 \times 10^4$  t。因此,沙一段是研究区下步页岩油气勘探应积极评价的层系。

沙四段上亚段和沙三段中亚段有效烃源岩在研究区也较发育,且均位于异常高压区,断裂较发育,但其岩相组合相对较差,是研究区今后页岩油气勘探应继续探索的层系。

## 6 结束语

首次对渤南洼陷页岩油气富集高产条件进行了较为系统的分析,认为有效烃源岩发育决定页岩油气的主力层系;有利岩相(纹层状泥质灰岩相)是页岩油气富集高产的基础;断裂裂缝发育是页岩油气富集高产的关键;地层异常高压和埋深是页岩油气富集高产的重要因素。研究结果表明,沙三段下亚段纹层状泥质灰岩最发育的 $12^{\text{下}}-13^{\text{上}}$ 层组是渤南洼陷页岩油气最富集的层系,沙一段是渤南洼陷页岩油气下步应积极评价的层系。针对沙三段下亚段页岩油气勘探部署应综合考虑各因素的差异性和叠加匹配关系,分类分区有针对性依次部署和评价,以落实其产能情况。在渤南洼陷罗家地区沙三段下亚段部署了渤页平1等3口页岩油气水平井,其中渤页平1井已完钻,油气显示异常活跃,应具有较好的含油气性。需要指出的是,受构造活动、沉积变迁、热力消长和流体充注等多种因素的影响,不同地区页岩的发育层系、岩相、烃源岩、储

集性能、含油气性和产能等特征均存在差异。因此,不同地区页岩油气的富集高产条件可能有所不同。

### 参考文献:

- [1] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1 921-1 938.
- [2] Ronald J H, Daniel M J, John Zumberge, et al. Oil and gas geochemistry and petroleum systems of the Fort Worth Basin [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 445-473.
- [3] Bustin R M. Gas shale tapped for big pay [J]. AAPG Explorer, 2005, 26(2): 5-7.
- [4] 关德师,牛嘉玉,郭丽娜. 中国非常规油气地质[M]. 北京:石油工业出版社,1995.
- [5] 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.
- [6] 陈尚斌,朱炎铭,王红岩,等. 中国页岩气研究现状与发展趋势[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 689-694.
- [7] 李建忠,董大忠,陈更生,等. 中国页岩气资源前景与战略地位[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 11-16.
- [8] 王社教,王兰生,黄金亮,等. 上扬子区志留系页岩气成藏条件[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 45-50.
- [9] 聂海宽,唐玄,边瑞康. 页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 484-491.
- [10] 张林晔,李政,朱日房,等. 济阳拗陷古近系存在页岩气资源的可能性[J]. 天然气工业, 2008, 28(12): 26-29.
- [11] 张林晔,李政,朱日房. 页岩气的形成与开发[J]. 天然气工业, 2009, 29(1): 124-128.
- [12] 王秉海,钱凯. 胜利油区地质研究与勘探实践[M]. 东营:石油大学出版社,1992: 76-175.
- [13] 周杰,庞雄奇,李娜. 渤海湾盆地济阳拗陷烃源岩排烃特征研究[J]. 石油实验地质, 2006, 28(1): 59-64.
- [14] 刘士林,李原,郭利果,等. 渤南洼陷古近系沙四段—沙三段烃源岩地球化学特征[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(4): 8-11.
- [15] 李丕龙,庞雄奇,陆相断陷盆地隐蔽油气藏形成——以济阳拗陷为例[M]. 北京:石油工业出版社,2004: 117-123.
- [16] 卢浩,蒋有录,刘华,等. 沾化凹陷渤南洼陷油气成藏期分析[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(2): 5-8.
- [17] 蔡忠东,单宝杰,张冲. 沾化凹陷四扣洼陷油源对比[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(4): 11-14.
- [18] 宋梅远,张善文,王永诗,等. 沾化凹陷沙三段下亚段泥岩裂缝储层岩性分类及测井识别[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(6): 18-22.
- [19] 方旭庆,蒋有录,石砥石. 济阳拗陷沾化地区断裂特征及其与成藏要素和油气分布的关系[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(2): 1-4.

编辑 邹澍滢