

·油气地质·

济阳坳陷古近系页岩油气形成条件

张善文¹, 张林晔², 李政², 郝运轻²

(1.中国石化股份胜利油田分公司, 山东 东营 257001; 2.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:中国东部胜利油区济阳坳陷古近系主要发育陆相泥页岩沉积,至今尚未对陆相页岩油气形成进行系统研究。通过大量试油、录井、测井及测试资料分析认为,济阳坳陷发育沙四段上亚段、沙三段下亚段和沙一段3套陆相泥页岩,其分布面积广,厚度大,有机质丰度高,有机质类型以I—II₁型为主,有机质成熟度已进入低成熟—高成熟演化阶段,无机矿物中脆性矿物含量高,表现出碳酸盐岩含量高、普遍含有一定量石英的特征,且各类微孔隙、微裂缝发育,形成的网状储集体系为油气的赋存与流动提供了空间,具备形成页岩油气的物质基础和储集条件。济阳坳陷沙四段上亚段页岩油气主要分布于东营凹陷、沾化凹陷和车镇凹陷郭局子洼陷;沙三段下亚段页岩油气主要分布于各凹陷的洼陷中部地区;沙一段页岩油气分布于沾化和车镇凹陷中部地区。

关键词:页岩油气 古近系 矿物组成 含油气性 济阳坳陷

中图分类号: TE112.115

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2012)06-0001-05

页岩油气在北美的成功勘探、开发引起了勘探家的关注,目前,成功进行商业性开采的页岩油气主要产于北美海相地层^[1-6],而中国东部主要含油气盆地的泥页岩主要为陆相沉积,如何系统研究东部陆相盆地页岩油气形成条件,对推动页岩油气的勘探开发具有重要意义。中国东部济阳坳陷古近系陆相泥页岩中已发现油气,笔者利用大量分析测试、录井、测井资料,对济阳坳陷陆相含油气泥页岩的生烃条件、储集条件及含油气性进行系统分析,探讨了济阳坳陷页岩油气的形成条件,以期陆相盆地页岩油气的勘探开发提供借鉴。

1 区域地质概况

济阳坳陷属于渤海湾盆地的次级构造单元,东部以郯庐断裂带与鲁东隆起相隔,西部和北部与埕宁弧形隆起毗邻,南部以齐(河)—广(饶)断裂与鲁西隆起为界,总面积约为26 000 km²,是在华北地台基底上发育的中、新生代断陷—拗陷复合盆地。济阳坳陷内部构造极为复杂,中、晚始新世沙河街组沉积时期以来的盆—岭构造格局为断陷与拗陷的叠合,而断陷期则形成凹凸相间的结构。古近纪,拗陷内自南而北发育了东营、惠民、沾化和车镇4个凹陷以及众多的次级洼陷,其间为青城、滨县、陈家

庄、无棣、义和庄、孤岛等凸起分隔。据钻井资料揭示,济阳坳陷古近系发育多套陆相泥页岩,其中沙四段上亚段、沙三段下亚段和沙一段陆相泥页岩是已发现油气的主要烃源岩^[7-10]。

2 页岩油气的生成条件

2.1 泥页岩发育特征

沙四段上亚段泥页岩主要分布在东营和沾化凹陷,为咸水—半咸水湖相沉积,岩性以灰褐色钙质纹层泥页岩为主,厚度为250~300 m。沙三段下亚段泥页岩全区分布,主要为淡水—微咸水湖相沉积,岩性主要为油页岩、钙质泥岩和灰色泥岩,各次级洼陷相互连通,其中沾化和车镇凹陷泥页岩厚度相对较大,为300~450 m,东营和惠民凹陷厚度相对较薄,为150~300 m。沙一段泥页岩全区分布,为咸水—半咸水湖相沉积,岩性为白云岩、泥质白云岩、油页岩、钙质泥岩和暗色泥岩互层,沾化和车镇凹陷泥页岩厚度较大,为250~450 m,而东营和惠民凹陷则相对较薄,为150~250 m。

2.2 泥页岩有机质丰度、类型及成熟度

与济阳坳陷其他层系相比,沙四段上亚段、沙三段下亚段和沙一段3套泥页岩有机质丰度均较高(图1)。沙四段上亚段泥页岩有机碳含量主体为

收稿日期:2012-09-12。

作者简介:张善文,男,教授级高级工程师,中国石化股份胜利油田分公司副总经理、总地质师,从事石油地质综合研究和勘探工作。联系电话:(0546)8552515, E-mail: zhangshanwen.slyt@sinopec.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)。

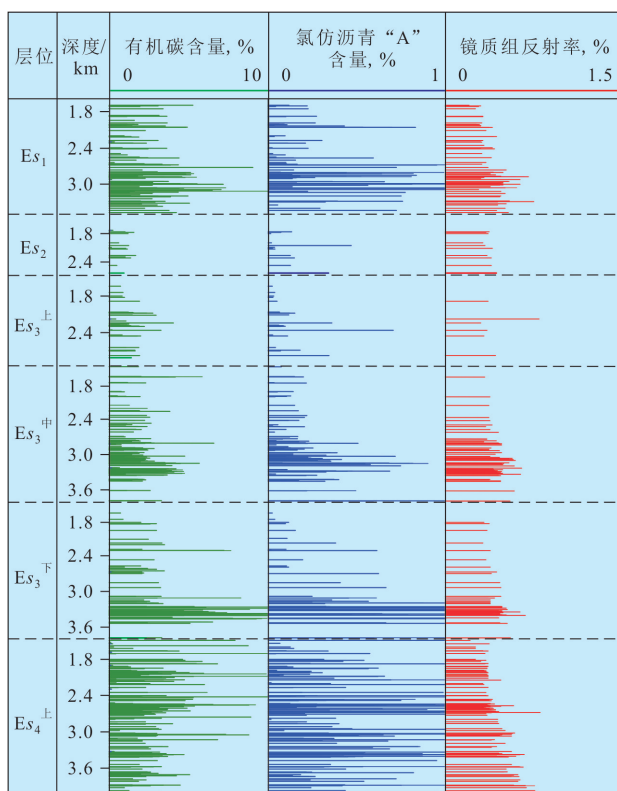


图1 济阳坳陷古近系泥页岩综合地球化学剖面

1.5%~6%,最高为10.24%,平面分布差异较大,其中东营凹陷有机碳含量最高;沙三段下亚段泥页岩有机碳含量主体为2%~5%,最高为16.7%;沙一段泥页岩有机碳含量主体为2%~7%,最高为19.6%。镜下观察表明,3套泥页岩有机显微组分以藻类体为主,源自低等水生生物,有机质类型指数一般在75以上,以I—II₁型为主。从图2可以看出,济阳坳陷不同地区3套泥页岩镜质组反射率(R_o)均随埋深的增加而增大,以 R_o 为0.5%为成熟门限, R_o 为1.3%为高成熟门限,济阳坳陷大部分地区沙四段上亚段和沙三段下亚段泥页岩已进入成熟演化阶段,各洼陷中部的局部地区进入高成熟演化阶段;车镇和沾化凹陷沙一段泥页岩部分进入成熟演化阶段,东营和惠民凹陷沙一段泥页岩仅处于低成熟演化阶段。

总体来看,济阳坳陷沙四段上亚段、沙三段下亚段和沙一段泥页岩沉积厚度大、有机质丰度高、有机质类型好,有机质成熟度已进入低成熟—高成熟演化阶段,主体处于成熟演化阶段,以生油为主,洼陷中部局部地区沙四段上亚段进入高成熟演化

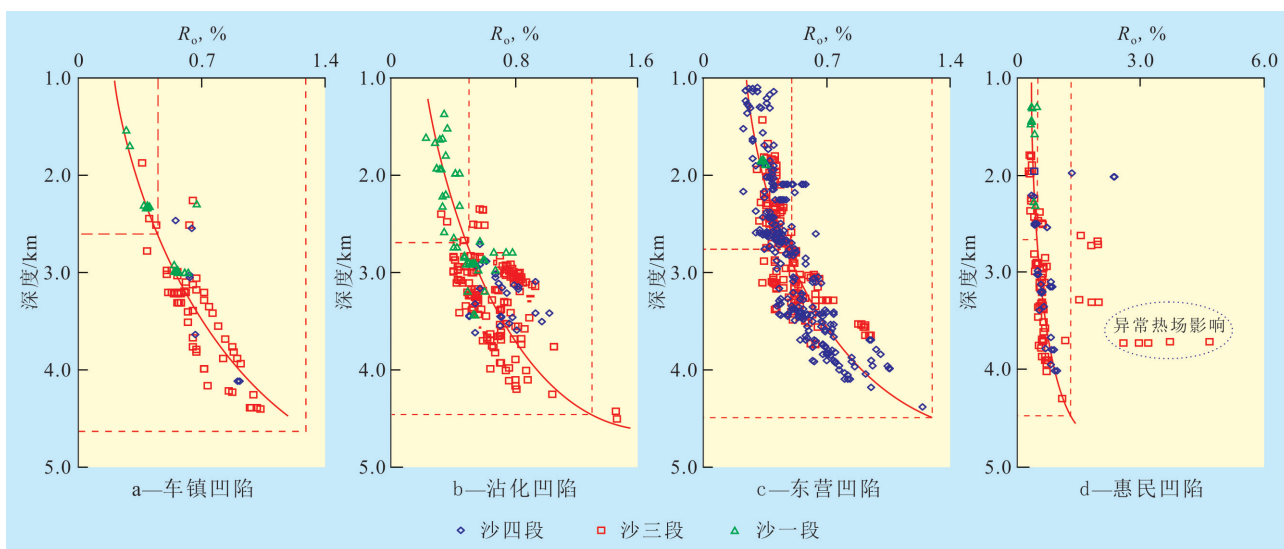


图2 济阳坳陷不同地区泥页岩镜质组反射率随埋深的变化

阶段,具备生成页岩气的条件。因此,济阳坳陷具备生成页岩油气的物质基础,且应以页岩油勘探为主,在洼陷中部地区可兼探页岩气。

3 页岩油气的储集条件

3.1 全岩矿物组成

济阳坳陷3套泥页岩686块岩石样品X衍射全岩矿物分析结果(表1)表明,全岩矿物以碳酸盐为主,其次为粘土矿物和石英,普遍含有黄铁矿,碳酸

盐均以方解石为主。沾化凹陷沙四段上亚段泥页岩碳酸盐含量最高,其次为沙三段下亚段;沙四段上亚段和沙三段下亚段泥页岩方解石含量平均值大于50%,沙一段泥页岩方解石含量略低,但平均值也在30%以上;沙四段上亚段和沙三段下亚段大部分样品含有一定量的白云石;3套泥页岩粘土矿物和石英含量均低于50%,沙四段上亚段和沙三段下亚段平均值低于20%,低于沙一段。与沾化凹陷相比,东营凹陷泥页岩矿物含量变化范围大,总体上以碳酸盐矿物为主,略低于沾化凹陷沙四段上亚段

表1 济阳拗陷3套泥页岩全岩矿物组成分析结果

| 地区 | 层位 | 样品数 | 粘土矿物 | | 石英 | | 长石 | | 方解石 | | 白云石 | | 菱铁矿 | | 黄铁矿 | | % |
|------|--------|-----|-------|--------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-----|---|
| | | | 范围 | 平均值 | 范围 | 平均值 | 范围 | 平均值 | 范围 | 平均值 | 范围 | 平均值 | 范围 | 平均值 | 范围 | 平均值 | |
| | | | 沾化凹陷 | 沙四段上亚段 | 19 | 2~44 | 14 | 3~48 | 19 | 0~15 | 1 | 3~92 | 52 | 0~70 | 10 | 0 | |
| | 沙三段下亚段 | 434 | 1~48 | 19 | 3~48 | 18 | 0~12 | 1 | 9~89 | 52 | 0~78 | 6 | 0~5 | 0.2 | 0~16 | 4 | |
| | 沙一段 | 16 | 8~44 | 24 | 17~48 | 30 | 0~14 | 5 | 1~63 | 34 | 0~10 | 3 | 0 | 0 | 1~13 | 5 | |
| 东营凹陷 | 沙四段上亚段 | 137 | 3~73 | 24 | 0~66 | 29 | 0~42 | 5 | 0~89 | 34 | 0~87 | 8 | 0~12 | 0.3 | 0~14 | 3 | |
| | 沙三段下亚段 | 78 | 8~54 | 26 | 6~50 | 29 | 0~35 | 4 | 1~68 | 34 | 0~72 | 4 | 0~3 | 0.3 | 0~13 | 3 | |
| | 沙一段 | 2 | 11~39 | 25 | 15~29 | 22 | 2~5 | 3.5 | 26~70 | 48 | 1~2 | 1.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

和沙三段下亚段,但高于沙一段;粘土矿物含量略高于沾化凹陷;石英含量高于沾化凹陷沙四段上亚段和沙三段下亚段,但低于沙一段。总体来看,3套泥页岩全岩矿物组成中脆性矿物(碳酸盐、石英和长石)含量均较高。

3.2 物性特征

镜下观察结果表明,济阳拗陷泥页岩储集空间主要为微孔和裂缝。其中,微孔主要为粘土矿物晶间微孔、碳酸盐晶间微孔、黄铁矿晶间微孔及砂质微孔,孔径为1~10 μm,最大可达50 μm;裂缝按照产状可以分为水平层理缝、直立缝和斜交缝,且以水平层理缝为主,裂缝宽度小于0.01 mm,最宽可达0.8 mm,一般为0.02~0.10 mm。利用煤油法对济阳拗陷不同埋深的3套泥页岩孔隙度进行测试,结果(图3)表明,埋深小于2 800 m时,3套泥页岩部分样品的孔隙度具有随埋深增加而降低的特征;当埋深大于2 800 m时,孔隙度发生分异,沙四段上亚段和沙三段下亚段泥页岩孔隙度随埋深增加而减小,而部分样品的孔隙度随埋深的增加而增大,沙四段上亚段孔隙度主要为0.5%~9.2%,个别样品可达

10.2%~23.8%,沙三段下亚段孔隙度为1.0%~9.8%,个别样品可达13.8%~19%。孔隙度随埋深的变化表明,深部泥页岩样品的孔隙度有其不同的演化趋势,应与不同类型泥页岩在中晚期成岩作用过程中产生的大量次生孔隙有关^[11],这些次生孔隙是页岩油气的有利储集空间。

从济阳拗陷泥页岩渗透率随深度的变化(图4)可见,渗透率随深度的增加而减小,埋深小于3 000 m时,一般为0.006 87×10⁻³~0.52×10⁻³ μm²。实验分析和生产实践表明,随着钻井完井技术的不断进步,可工业性开发的储层渗透率下限不断被打破,其中油藏可开采渗透率下限可达0.000 1×10⁻³ μm²,而气藏仅为0.000 01×10⁻³ μm²^①。且从济阳拗陷3套泥页岩全岩矿物组成分析测试数据来看,脆性矿物含量高,易于形成裂缝。镜下观察也表明济阳拗陷泥页岩中裂缝广泛发育^[12-13],裂缝在地下既是油气储集空间,同时也连通了泥页岩孔隙,通过裂缝网状系统连续分布,扩大了供烃范围,提高

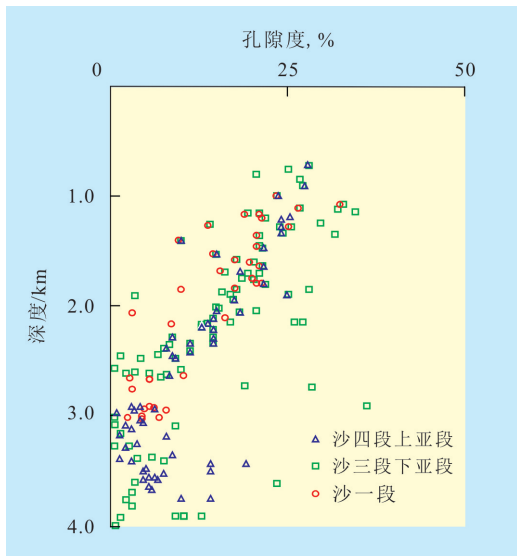


图3 济阳拗陷泥页岩孔隙度随深度的变化

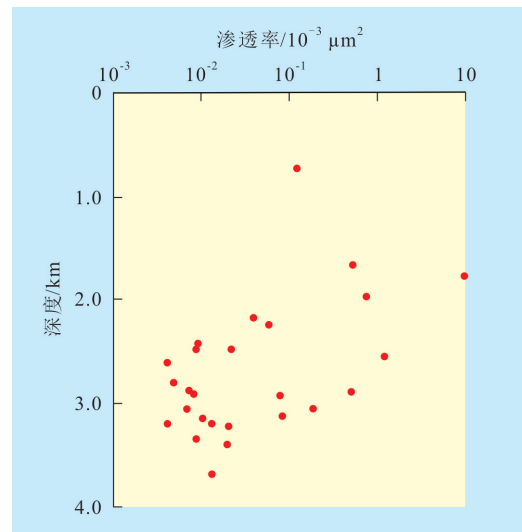


图4 济阳拗陷泥页岩渗透率随深度的变化

①陈明霜.美国页岩油开发的重大突破给我国石油工业带来希望.石油情报,2010,(44):1-6.

了储层的渗流能力^[13-15]。

4 含油气性

4.1 气测显示特征

从济阳拗陷不同地区探井的气测显示来看,沙四段上亚段、沙三段下亚段和沙一段3套泥页岩在一定埋深下,均表现出全烃含量较高的特征,气测显示全烃含量多在10%以上,最高可达100%,如东营凹陷的丰深1和河160、沾化凹陷的义170、车镇凹陷车571和惠民凹陷的临98等多口探井(图5),表明3套泥页岩中有大量油气存在。

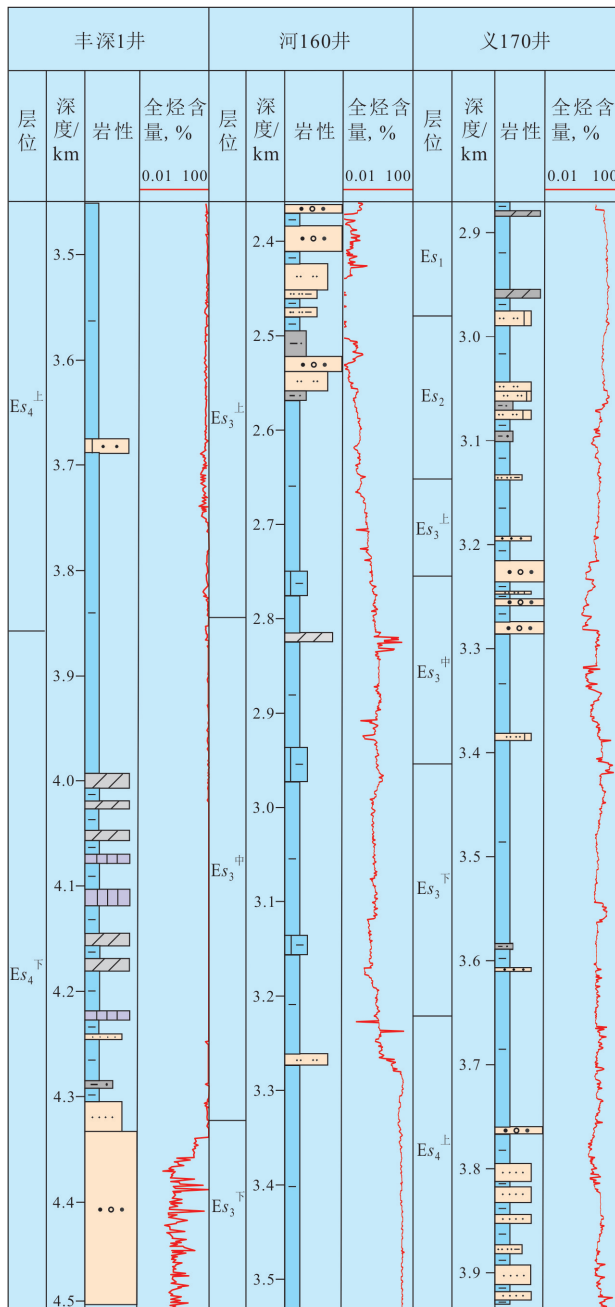


图5 济阳拗陷古近系页岩气测显示

4.2 油气显示分布

济阳拗陷不同地区油气显示结果表明,沙四段上亚段页岩油气显示主要分布于东营凹陷的次级洼陷,其次为沾化凹陷的渤南和孤北洼陷、车镇凹陷的郭局子洼陷;沙三段下亚段页岩油气显示主要分布于各洼陷中部地区;沙一段页岩油气显示发育于沾化和车镇凹陷中部地区。

济阳拗陷页岩油气的发现始于20世纪60年代,目前,已在30余口探井的泥页岩发育段获得工业油气流,4个凹陷均有发现,其中沾化和东营凹陷最多,以产油为主,获得页岩油气的主要层系为沙四段上亚段和沙三段下亚段,其次在沾化凹陷渤南洼陷和车镇凹陷郭局子洼陷的沙一段也获得了工业性页岩油气,已投产的页岩油气探井初期产能为12~72 t/d。东营凹陷河54井累积产量最高,为27 896 t,沾化凹陷罗42井、新义深9井累积产量均在10 000 t以上,展示了页岩油气在济阳拗陷良好的勘探开发前景。

5 页岩油气有利区预测

北美页岩油气的成功勘探与开发,表明页岩中蕴含着大量的油气资源,具有较好的勘探开发前景。但是页岩致密、低孔隙度、尤其是低渗透的本质,决定了其中油气较常规储层中的油气更难开采,而页岩中有机质含量及质量是形成页岩油气的物质基础,决定能否形成页岩油气。因此,可以从页岩发育及有机质性质角度,对页岩油气有利区分布进行初步预测。

大量研究表明,岩石中油气含量与有机碳含量具有正相关关系,北美的勘探实践证明工业性页岩油气主要产自有机碳含量高于2%的页岩中;页岩油气的产出要求页岩中含有油气,且其中的油气具有一定的流动性,因此,此次评价以页岩进入成熟演化阶段门限为原则,以表征成熟度的指标—— R_o 为0.5%为界, R_o 大于0.5%,处于成熟演化阶段。据张善文等^①对济阳拗陷异常高压形成机理的研究,认为生烃增压是异常高压形成的主要因素,油气大量生成使岩石孔隙中的烃饱和度迅速增加,加之可能存在的欠压实等增压机制,使得烃源岩中形成高压异常,并伴随高能量的聚集,高压异常的存在既是烃源岩中烃类初次运移的重要动力,同时对油气

①张善文,隋风贵,张林晔,等.济阳拗陷隐蔽油气藏成藏动力学研究及预测.中国石化股份胜利油田分公司,2005.

又具有较强的封盖作用,因此,较高的压力不仅使油气赋存于岩石中,而且也是热成因页岩油气高产的重要影响因素。在北美页岩油气的评价中,有机碳含量较高的页岩厚度一般不低于15 m,但这些原则主要针对相对稳定的海相地层。为确定济阳坳陷页岩气产层的有效厚度,对研究区35口井进行统计,结果表明,试油见油气的探井泥页岩厚度绝大部分为50~150 m,仅很小部分井的泥页岩厚度为45~50 m,由此,把济阳坳陷泥页岩的有效厚度下限确定为50 m。

根据泥页岩厚度、有机质丰度和热演化程度,对济阳坳陷古近系3套烃源岩的有利区域进行圈定,圈定条件为有机碳含量大于2.0%,镜质组反射率大于0.5%,泥页岩厚度大于50 m。沙四段上亚段的有利区面积为1 890 km²,沙三段下亚段的有利区面积为2 590 km²,沙一段的有利区面积为1 044 km²。其中,沙四段上亚段页岩油气主要发育于东营凹陷各次级洼陷,其次为沾化凹陷渤南和孤北洼陷、车镇凹陷郭局子洼陷;沙三段下亚段页岩油气主要分布在各凹陷的洼陷中部地区;沙一段页岩油气发育于沾化和车镇凹陷中部地区。

6 结论

济阳坳陷沙四段上亚段、沙三段下亚段和沙一段泥页岩有机质丰度高、类型好,主要处于成熟—高成熟演化阶段,具备形成页岩油气的物质基础;无机矿物中脆性矿物含量较高,利于页岩油气的开采;储集空间为微孔和微裂缝,中、晚成岩作用过程中,异常高压及大量次生孔隙的形成,利于页岩油气的保存。

济阳坳陷沙四段上亚段页岩油气主要分布于东营凹陷各次级洼陷,其次为沾化凹陷渤南和孤北洼陷、车镇凹陷郭局子洼陷;沙三段下亚段页岩油气主要分布于各凹陷的洼陷中部地区;沙一段页岩油气分布于沾化和车镇凹陷中部,其中沙三段下亚

段、沙一段泥页岩应以页岩油勘探为主,沙四段上亚段可进行页岩油气兼探。

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] Jarvie D. Evaluation of hydrocarbon generation and storage in Barnett shale, Fort Worth basin, Texas [R]. Texas: Humble Geochemical Services Division, 2004.
- [5] Montgomery S. Barnett shale: a new gas play in the Fort Worth basin [J]. Petroleum Frontiers Excerpt, 2004, 20(1): 1-76.
- [6] Ross D J K, Bustin R. Shale gas potential of the Lower Jurassic Gordondale member, northeastern British Columbia, Canada [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2007, 55(1): 51-75.
- [7] 王广利, 朱日房, 陈致林, 等. 义和庄凸起及其北部斜坡带油气运聚研究 [J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(4): 12-14.
- [8] 张林晔, 蒋有录, 刘华, 等. 东营凹陷油源特征分析 [J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(6): 61-65.
- [9] 孔祥星, 张林晔, 徐思煌. 济阳坳陷车西洼陷油-源对比及运移规律探讨 [J]. 石油实验地质, 2005, 27(2): 54-58.
- [10] 赵阳, 刘震, 戴立昌. 惠民凹陷临南地区油气输导系统及油气运移特征 [J]. 西安石油学院学报: 自然科学版, 2003, 18(3): 1-4.
- [11] 张林晔, 张春荣, 刘庆. 东营凹陷成烃与成藏关系研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [12] 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.
- [13] 张林晔, 李政, 朱日房, 等. 济阳坳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.
- [14] 纳尔逊 R A. 天然裂缝性储集层地质分析 [M]. 柳广第, 译. 北京: 石油工业出版社, 1991.
- [15] 蒋裕强, 董大忠, 漆麟, 等. 页岩气储层的基本特征及其评价 [J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 7-12.

编辑 武云云

欢迎订阅《油气地质与采收率》