

文章编号:1673-064X(2010)02-0001-05

辽河东部凹陷古近系页岩气聚集条件分析

王广源¹, 张金川¹, 李晚光², 边瑞康¹, 朱华¹, 邓飞涌³, 唐颖¹

(1. 中国地质大学(北京) 能源学院 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 中国石油 辽河油田公司, 辽宁 盘锦 124010; 3. 西南油气田分公司 蜀南气矿, 四川 泸州 646001)

摘要:页岩气是一种现实的非常规天然气资源.通过对大量录井、钻井、地球化学、实验测试及生产测试结果等资料的分析,认为辽河东部凹陷古近系3套泥页岩分布面积广,厚度大,有机碳含量高,有机质类型以腐泥腐殖型和腐殖型为主,有机质成熟度变化范围宽等特点,具备形成页岩气的物质基础.泥页岩中微裂缝和裂缝发育,为游离态气体的赋存提供了有利的储集空间,且泥页岩吸附甲烷能力强,吸附量大,泥页岩段普遍存在气测全烃异常,蕴藏着巨大的页岩气资源.在新开油田、黄金带油田以及桃园气田附近气测全烃异常明显,是页岩气成藏的有利地区.

关键词:辽河东部凹陷;古近系;页岩气;有机碳含量;气测显示

中图分类号:TE122.9 文献标识码:A

页岩气是指主体位于暗色泥页岩、高碳泥页岩及其夹层状的粉砂岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、甚至细砂岩中,以吸附和游离状态为主要存在方式的天然气聚集,是天然气生成之后在源岩层内就近聚集的结果,表现为典型的“原地”成藏模式,以大面积含气、隐蔽圈闭机理、可变的盖层岩性和较短的烃类运移距离为特征^[14]. 页岩气勘探和开发研究最早始于美国,截止 2006 年,美国大约有页岩气生产井 39 500 口,占全美天然气产量的 8%^[5]. 页岩气作为一种现实的非常规天然气资源,已在国内掀起一番研究热潮^[6-12]. 笔者通过对辽河东部凹陷页岩气成藏条件进行剖析,结合研究区内实验测试分析和泥页岩中气测全烃异常显示,认为辽河东部凹陷古近系地层中蕴藏有页岩气资源,是一个值得关注的新区域.

1 区域地质概况

东部凹陷为辽河坳陷三大凹陷之一,北抵头台

子,南至辽东湾,长约 140 km,宽为 18 ~ 30 km,面积约为 3 300 km²,呈北东向(NE)展布,是辽河坳陷勘探最早的地区,经过 40 多年的勘探,已经发现了太古界、中生界、古近系沙河街组三段、一二段、东营组及上第三系明化镇组等 6 套含油气层系^[13]. 整个凹陷由南向北依次发育了二界沟洼陷、驾掌寺洼陷、黄金带洼陷、欧西洼陷、牛居 - 长滩洼陷等负向构造单元(图 1)以及荣兴屯构造带、太平房 - 桃园构造带、

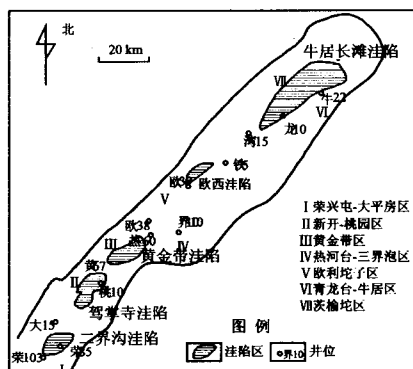


图1 辽河东部凹陷洼陷分布

收稿日期：2009-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号:40672087,40472073)资助

作者简介:王广源(1986-),男,硕士研究生,主要从事油气成藏机理与预测、非常规油气资源研究。

E-mail: helloyuan@126.com

黄于热构造带、新开-董家岗斜坡带、大湾超覆带、三界泡潜山带、牛居-青龙台构造带、茨榆坨高垒带等正向构造单元。二界沟洼陷、驾掌寺洼陷和牛居-长滩洼陷是东部凹陷古近纪的沉降-沉积中心,沉积了巨厚的砂泥岩地层。

2 东部凹陷泥页岩分布

东部凹陷在沙四段沉积时期处于隆起状态,未接受沉积。在沙三段沉积时期,东部凹陷内发生古近纪以来的第一次大规模水进,是古近纪水体最深的时期,形成了一套富含有机质的以黑灰、深灰、褐灰色泥岩为主的地层,发育了古近系沙河街组三段、一二段及东营组3套烃源岩,主要为深湖-半深湖相泥岩,部分地区夹厚度不等的沼泽相煤系地层,沿凹陷展布方向自南向北依次分布在二界沟洼陷、驾掌寺洼陷、黄金带洼陷、欧西洼陷、牛居-长滩洼陷等多个洼陷内。

2.1 沙三段

沙三段烃源岩从下至上又可分为沙三中下和沙三上两段。沙三中下段源岩在东部凹陷广泛发育,南段驾掌寺洼陷泥页岩最大厚度逾千米,其他地区厚度一般介于100~500 m之间,岩性主要为深灰、灰黑、褐色泥页岩,以深湖-半深湖相为主。沙三上段源岩岩性组合以碳质泥页岩和粉砂岩及深灰色泥岩为主,发育沼泽或泛滥平原相沉积。北段牛居-长滩洼陷黑色泥页岩厚度最大为700 m,南段驾掌寺洼陷黑色泥页岩厚度最大仅为400 m。沙三段烃源岩总体上呈现南北厚中间薄的“哑铃状”特征。

2.2 沙一二段

沙一二段烃源岩以深灰色泥页岩为主,发育扇三角洲和湖泊相沉积。北段牛居-长滩洼陷的烃源岩最为发育,黑色泥页岩厚度达600 m;南段驾掌寺、二界沟洼陷的黑色泥页岩厚度最大为400 m;中段地区源岩厚度一般200 m左右,继承了沙三段源岩南北厚、中间薄的分布特征。

2.3 东营组

东营组烃源岩以灰色泥页岩、砂质泥岩为主,主要为泛滥平原相沉积。南段二界沟洼陷的黑色泥页岩厚度最大,达到2 200 m,黄金带地区黑色泥页岩厚度达1 000 m,北段牛居-长滩洼陷的暗色泥页岩最厚达1 100 m,中段暗色泥岩较薄,累计厚度仅有400 m,也具有明显的南北厚、中间薄的分布特征。

3 页岩气成藏的有利条件分析

3.1 泥页岩地球化学特征

影响页岩气成藏的主要因素是源岩的有机质含量及其生气作用^[2]。页岩气既有生物气、未熟-低熟气、热解气、裂解气、高-过成熟气,又有原油和沥青裂解气,几乎覆盖了所有可能的有机生气作用模式^[9]。

通过实测东部凹陷古近系沙三段、沙一二段和东营组泥页岩样品的地球化学参数,认为沙三段有机碳平均含量为2.64%,最高为16.33%,沙一二段有机碳平均含量为1.17%,最高达7.15%,东营组有机碳平均含量为0.69%,最大为9.89%。该3套泥页岩有机质类型较好,干酪根大多数属于以产气为主的腐泥腐殖型(Ⅱ₂)和腐殖型(Ⅲ型)。不同层位,干酪根类型存在明显差异。东营组以腐泥腐殖型(Ⅱ₂)和腐殖腐泥型(Ⅱ₁)为主,沙一二段腐殖型(Ⅲ)明显增多,以腐泥腐殖型(Ⅱ₂)和腐殖型(Ⅲ)为主,沙三段以腐殖型(Ⅲ)和腐泥腐殖型(Ⅱ₂)为主,少数为腐泥型(Ⅰ型)。

沙三段、沙一二段和东营组泥页岩的成熟度变化范围较宽,从未成熟($R_o=0.15\%$)到高成熟($R_o=1.63\%$)阶段均有分布,沙三段 R_o 在0.24%~0.96%之间,处于未熟-成熟演化阶段;沙一二段 R_o 在0.15%~1.63%之间,主体处于成熟演化阶段,部分进入高成熟阶段;东营组 R_o 在0.23%~1.49%之间,主体处在成熟演化阶段。

与美国产气页岩地化指标对比(表1),东部凹陷古近系泥页岩的有机碳含量具有优势,成熟度变化范围宽,有机质类型丰富,泥页岩厚度也较大,这使得东部凹陷古近系泥页岩具备形成工业性页岩气藏的物质基础。

3.2 泥页岩储层特征

泥页岩本身既是烃源岩又是储集层。在页岩中,天然气的赋存状态多种多样,除极少量的溶解状态天然气以外,大部分均以吸附状态或游离状态存在^[1]。在生物化学生气阶段,天然气首先吸附在有机质和岩石颗粒表面,饱和后则富余的天然气以游离相或溶解相进行运移,当达到热裂解生气阶段时,由于压力升高,泥页岩内部沿应力集中面、岩性接触过渡面或脆性薄弱面产生裂缝,形成以游离相为主的工业性页岩气聚集^[3]。当前页岩气已经投入开发

表 1 东部凹陷页岩与美国页岩气盆地页岩主要指标对比(据文献[1]修改)

地区	层段	埋藏深度/m	w(TOC)/%	镜质体反射率/%	干酪根类型	厚度/m
阿巴拉契亚	泥盆纪	610~1524	0.00~4.70	0.40~1.30	Ⅱ	610~1524
密执安	泥盆纪	183~730	0.30~2.40	0.40~0.60	Ⅰ	183~730
伊利诺斯	泥盆纪	183~1494	1.00~25.00	0.40~1.00	Ⅱ	183~1494
福特沃斯	早石炭世	1981~2591	4.50	1.00~1.30	Ⅱ	1981~2591
圣胡安	早白垩世	914~1829	0.45~2.50	1.60~1.88	Ⅲ为主	914~1829
	东营组	750~2915	0.30~9.89	0.23~1.49	Ⅱ ₁ 、Ⅱ ₂	400~1000
东部凹陷	沙一二段	1142~2202	0.30~7.15	0.15~1.63	Ⅱ ₂ 、Ⅲ	280~600
	沙三段	1324~4400	0.3~16.33	0.24~0.96	Ⅲ、Ⅱ ₂	200~700

的地区往往裂缝系统比较发育^[14]。例如 Michigan 盆地北部 Antrim 组页岩生产带主要发育北西向和北东向 2 组近垂直的天然裂缝;Fort Worth 盆地 Newark East 气田 Barnett 组页岩气产量高低与岩石内部微裂缝发育程度有关;Illinois 盆地 New Albany 组页岩经济可采储量也与裂缝系统相关。这些状况说明裂缝改善了泥页岩的渗流能力,裂缝既是储集空间,也是渗流通道,是页岩气从基质孔隙流入井底的必要途径^[6]。

石英含量的高低是影响裂缝发育的重要因素之一,富含石英的黑色泥页岩段脆性较强,裂缝的发育程度比富含方解石的泥页岩强烈^[15]。Nelson 认为除了石英以外,长石和白云石也是泥页岩段中的易脆组分^[16]。在岩心观察的基础上,结合薄片鉴定、铸体、电镜扫描等分析手段,对东部凹陷古近系 3 套泥页岩的裂缝发育情况进行了研究,发现东部凹陷古近系泥质岩中富含石英、长石,含少量方解石、白云石和黄铁矿等,富含石英和长石的泥页岩段因脆性强易产生破裂,破裂作用的普遍发育致使泥页岩内部产生大量的微裂缝(图 2),而且在泥页岩中也发现了低角度和高角度裂缝(图 3),这些微裂缝和裂缝的发育为页岩气的赋存提供了有效的储集空间。

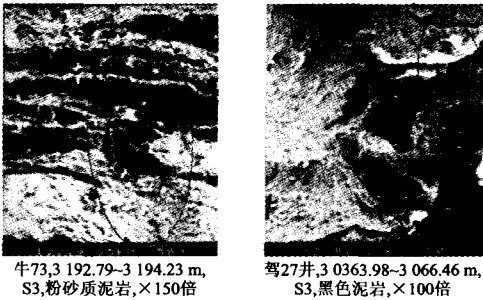


图 2 东部凹陷古近系泥页岩微裂缝



图 3 东部凹陷古近系泥页岩裂缝

表 2 东部凹陷古近系部分泥页岩样品含气量
(实验温度为 35℃)

井名	层位	深度/m	吸附气量/(m ³ /t)	w(TOC)/%	Ro/%	压力/MPa
黄 100	沙三段	3 127.91	1.92	16.33	0.511	7.92
龙 48	沙三段	2 788.76	0.54	10.75	0.375	8.30
牛 83	沙三段	3 145.00	1.98	1.52	0.34	7.80
荣 32	沙三段	2 299.90	0.51	2.19	0.33	8.21

4 页岩气显示

4.1 泥页岩吸附测试

利用等温吸附实验,对东部古近系 8 块泥页岩样品进行了吸附测试(表 2),实验结果显示每吨泥页岩的吸附气量为 0.51~1.98 m³,平均为 1.24 m³,与美国产气页岩的含气量^[15]相当。图 4 为黄 100 井 3 127.91 m 处所取岩心的等温吸附曲线,该样品为古近系沙三段碳质泥页岩,有机碳含量高达 16.33%,成熟度为 0.511%。在 35℃ 等温条件下,随着压力增高,泥页岩吸附甲烷的能力(V)逐渐增大,在压力达到 7.92 MPa 时,泥页岩的甲烷吸附能

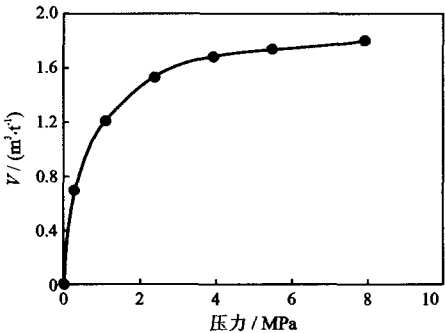


图 4 东部凹陷黄 100 井甲烷等温吸附曲线

力达到 1.92 m³/t. 其他泥页岩样品也具有类似的变化特征. 这表明东部凹陷古近系泥页岩吸附甲烷能力强, 吸附量多, 泥页岩吸附性好.

4.2 气测显示异常

通过对东部凹陷 627 口探井资料的复查, 发现共有 90 余口井的泥页岩段具有明显含气显示(图 5), 泥页岩段中微裂缝和裂缝发育, 存在钻时曲线异常(岩性差异)、钻井液漏失(裂缝发育)、气测全烃高异常等含气现象. 对应的测井曲线表现为自然伽马测井高值、地层密度中低值、电阻率高值等, 符合有机质丰度高的细粒碎屑岩往往伴随放射性元素含量增加、岩石密度降低、声波速度降低、电阻率增大以及氢和碳含量增加的一般规律, 与北美主要页岩产层特征相似^[17]. 在黄 31 井 1 471.8 ~ 1 530.2 m

的泥页岩段中, 气测全烃高异常, 异常值为 3%, 电阻率为高值, 经射孔并酸化处理后获得了 71 411 m³/d 的天然气产量. 统计 90 余口泥页岩段含气显示井的 1 650 多个气测全烃异常值(表 3)发现, 东部凹陷东营组气测异常全烃为 0.15% ~ 30.00%, 平均值为 1.83%, 主要分布在南段黄金带、新开油田和桃园气田附近, 其次是北段茨榆坨油田; 沙一二段气测异常全烃为 0.10% ~ 22.00%, 平均值为 1.86%, 主要分布在南段的新开油田、驾掌寺附近, 其次为北部的牛居油田; 沙三段气测异常全烃为 0.10% ~ 80.00%, 平均值为 4.56%, 明显高于其他 2 套层系, 主要在南段新开油田、黄金带油田和桃园气田附近, 其次南段荣兴屯地区和北段茨榆坨地区也有较高的异常全烃显示.

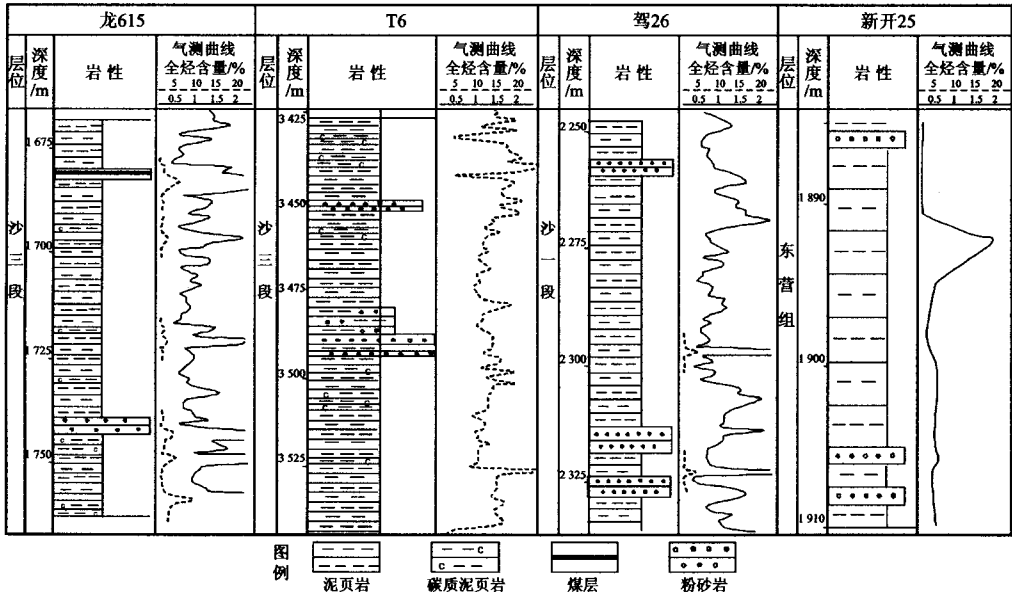


图 5 东部凹陷古近系泥页岩段气测显示异常全烃图

表 3 东部凹陷部分井的气测异常全烃值

地区	井名	异常全烃值 /%	顶深 /m	底深 /m	层位	厚度 /m	岩 性
北段	茨 2	12.0	1 744.0	1 760.0	沙一二段	16.0	泥岩
	龙 611	12.0	1 192.5	1 314.0	沙一二段	121.5	泥岩夹薄层细砂岩
	牛 602	5.0	3 864.0	3 896.5	沙三段	32.5	泥岩与粉砂质泥岩互层
中段	欧 37	16.0	3 066.0	3 081.0	沙三段	15.0	泥岩
	小 10	5.5	1 559.0	1 604.0	沙三段	45.0	炭质泥岩夹泥质粉砂岩
	小 13	20.0	1 459.0	1 475.0	沙三段	16.0	碳质泥岩
	小 5	12.0	2 823.5	2 883.5	沙三段	60.0	泥岩与碳质泥岩互层
	黄 1	6.1	1 566.0	1 592.0	东营组	26.0	砂泥岩互层
南段	荣 39	18.0	1 857.5	1 891.0	东营组	33.5	泥岩与粉砂质泥岩
	荣 103	5.0	2 300.0	2 318.0	沙一二段	18.0	碳质泥岩
	驾 601	7.0	3 131.0	3 144.0	沙三段	13.0	泥岩
	开 13	50.0	2 282.0	2 292.0	沙三段	10.0	泥岩
	开 28	12.0	2 335.0	2 340.5	沙三段	5.5	粉砂质泥岩
	桃 28	50.0	3 357.0	3 368.0	沙三段	11.0	泥岩

5 结 论

(1) 东部凹陷古近系沙三段、沙一二段、东营组普遍发育有机质类型丰富、有机碳含量高的泥页岩,与美国产气页岩具有良好的可比性,为东部凹陷古近系泥页岩形成工业性页岩气藏提供了物质基础。

(2) 东部凹陷古近系泥页岩中微裂缝和裂缝发育,为游离态气体的赋存提供了有利的储集空间,且泥页岩吸附甲烷能力强,吸附量多,吸附性好。

(3) 东部凹陷古近系泥页岩中气测全烃异常显示是页岩气存在的直接有力证据,说明该泥页岩中蕴藏着巨大的页岩气资源。在层位上,沙三段气测全烃异常显示明显高于其他 2 套层系,是发育页岩气的有利层位;平面上,在新开油田、黄金带油田以及桃园气田附近气测异常明显,是发育页岩气的有利地区。

致谢:辽河油田勘探开发研究院李晓光教授级高工等无私提供了部分研究资料,徐波、郭华强、邓飞涌、张培先等课题组成员在资料收集和整理方面完成了部分工作,在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献:

- [1] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [2] 张金川, 薛会, 张德明, 等. 页岩气及其成藏机理[J]. 现代地质, 2003, 17(4): 466.
- [3] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 14-18.
- [4] 张金川, 汪宗余, 聂海宽, 等. 页岩气及其勘探研究意义[J]. 现代地质, 2008, 22(4): 640-646.
- [5] Warlick D. Gas shale and CBM development in North A-

merica[J]. Oil and Gas Financial Journal, 2006, 3(11): 1-5.

- [6] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 392-400.
- [7] 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.
- [8] 蒲泊伶, 包书景, 王毅, 等. 页岩气成藏条件分析——以美国页岩气盆地为例[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(3): 33-39.
- [9] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 136-140.
- [10] 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.
- [11] 张金川, 聂海宽, 徐波, 等. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 151-156.
- [12] 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.
- [13] 张占文, 陈振岩, 郭克园, 等. 辽河盆地天然气地质[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 200.
- [14] Bowker K A. Barnett shale gas production Fort Worth basin: Issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [15] 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.
- [16] Nelson R A. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs: Contributions in petroleum geology and engineering[M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1985: 320.
- [17] Montgomery S. Barnett shale: a new gas play in the Fort Worth basin[J]. Petroleum Frontiers Excerpt, 2004, 20(1): 74.

责任编辑: 王 辉