

济阳坳陷深层裂解气成因鉴别及其成藏差异性

杨显成^{1,2}, 蒋有录¹, 耿春雁²

(1. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 257061;

2. 中国石化股份有限公司胜利油田分公司地质科学研究院, 山东 东营 257000)

摘要:济阳坳陷深层裂解气藏成因较为复杂,影响了深层天然气的认识和勘探。利用天然气组分和碳同位素等鉴别了原油裂解气和干酪根裂解气,进一步分析了 2 类成因的成藏差异性。原油裂解气表现为 $\ln(C_2/C_3)$ 值随 $\ln(C_1/C_2)$ 值增大而增大;干酪根裂解气随 $\ln(C_1/C_2)$ 值的增大, $\ln(C_2/C_3)$ 值基本不变。在有机质类型和热演化程度大致相当的情况下,原油裂解气 $\delta^{13}C_1$ 值、 $\delta^{13}C_2$ 值、 $\delta^{13}C_3$ 值与相应的干酪根裂解气的最大差值分别为 -12.4% 、 -8.8% 和 7.5% ;随着 $\delta^{13}C_1$ 值或 $(\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2)$ 值的增大,干酪根裂解气 $(\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3)$ 值快速减小,而裂解气 $(\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3)$ 值变化微弱。干酪根裂解气藏表现为早期油气扩散、断裂活动停止和后期天然气充注,原油裂解气藏体现为早期油气充注、岩性侧向封堵和后期古油藏裂解的成藏规律。2 种裂解气成因开启了深层天然气勘探的新思路,并指出了其勘探方向,对深层勘探具有重要的指导意义。

关键词:济阳坳陷;深层;干酪根裂解气;原油裂解气;成藏差异性

中图分类号:TE122.1⁺13

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2014)08-1226-07

引用格式:Yang Xiancheng, Jiang Youlu, Geng Chunyan. Origin and accumulation of cracking gas in the deep buried horizons in Jiyang Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(8): 1226-1232. [杨显成, 蒋有录, 耿春雁. 济阳坳陷深层裂解气成因鉴别及其成藏差异性[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(8): 1226-1232.]

0 引言

济阳坳陷隶属于渤海湾盆地次一级构造单元,其形成经历了多期构造运动,形成了“凹凸相间”的构造格局,凹陷中心深埋藏的烃源岩为裂解气提供了物质条件,陡坡带、洼陷带等为裂解气富集区。随着近期勘探的不断深入,在济阳坳陷东营凹陷、沾化凹陷的渤南洼陷等发现了大量的深层裂解气藏(图 1)。前人^[1-3]分析了裂解气成藏的生、储、盖等配置关系,探讨了个别地区气藏或单个气藏的成因^[4-6],但如何进一步鉴别济阳坳陷深层干酪根裂解气和原油裂解气成因,其成藏最关键的问题是什么?一直是勘探研究人员争议的问题,因为它不仅涉及到裂解气成藏的认识问题,还关系到不同成因裂解气的评价思路、应用方法和研究重点,而且影响到了勘探

部署和勘探决策,因此,本文作者通过大量的实验数据和成藏关键要素的分析,鉴别了深层裂解气的成因,研究了 2 种成因裂解气成藏的差异性,并指出干酪根裂解气和原油裂解气成藏的有利地区或区带,明确不同成因裂解气勘探的方向,对深层勘探部署具有重要的勘探意义。

1 裂解气藏特征及气源岩分析

1.1 裂解气藏特征

济阳坳陷裂解气主要分布于东营凹陷的民丰地区和利津地区、沾化凹陷的渤南地区等,含气层位主要为沙四下亚段和沙四上亚段,气藏埋深为 4 271.2 ~ 5 163.4 m,气藏类型主要为岩性气藏和构造气藏。天然气组分甲烷含量介于 79.55% ~ 92.16% 之间,重烃含量(C_2^+)位于 0.40% ~ 16.30% 之间,

收稿日期:2013-10-26;修回日期:2013-12-30.

基金项目:中国石化攻关项目“断陷盆早期充填层系成藏要素与油气富集”(编号:P00708)资助.

作者简介:杨显成(1969-),男,四川岳池人,高级工程师,博士,主要从事油气地质综合研究. E-mail: yangxch215@163.com.

干燥系数(C_1/C)为 0.81~0.99(表 1),干湿系数(C_1/C_{2+})为 4~201,说明天然气组分主要为湿气^[7]。民丰地区的裂解气甲烷碳同位素组成轻,利津地区、渤南地区的甲烷碳同位素组成较重,显示这些地区天然气成因存在差异。

1.2 气源岩分析

通过对烃源岩脱气和裂解气藏的碳同位素对

比,东营凹陷丰深 3 井沙四下亚段 4 865.6m 泥岩脱气的 $\delta^{13}C_1$ 值为-42.5‰,4 740.0~4 847.0m 裂解气藏的 $\delta^{13}C_1$ 值为-44.7‰,两者比较接近,反映了东营凹陷深层裂解气来源于沙四下亚段烃源岩。渤南洼陷沙四上亚段气藏的气源来源于沙四上亚段烃源岩^[5]。这两者均属于自生自储的气藏类型,显示了气源岩与气藏的良好关系^[8]。

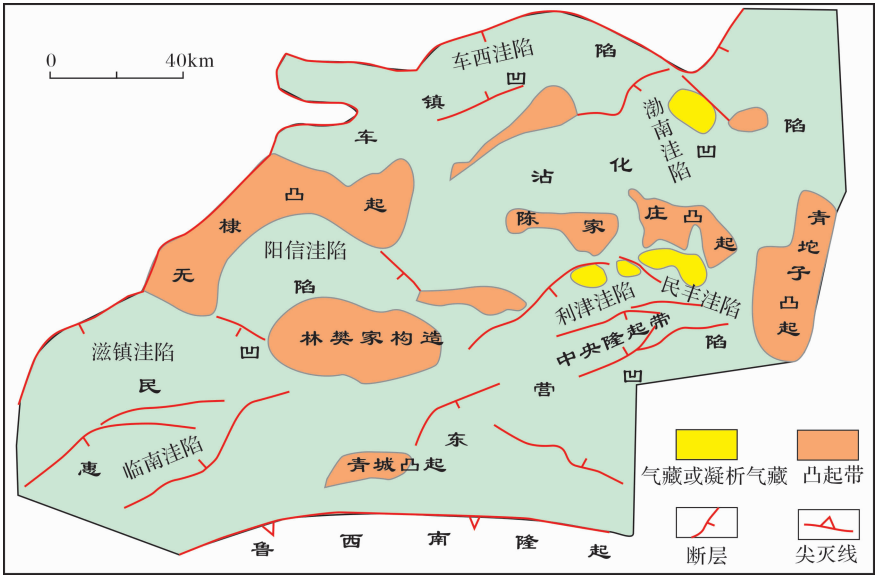


图 1 济阳拗陷构造位置及裂解气分布特征

Fig. 1 Structural location and cracking gas distribution in Jiyang Depression

表 1 济阳拗陷裂解气藏分布及天然气地球化学特征

Table 1 Cracking gas reservoirs distribution and geochemical characteristics of natural gas in Jiyang Depression

地区	井号	层位	埋深/m	CH ₄ /%	C ₂₊ /%	C ₁ /C	δ ¹³ C ₁ /‰	δ ¹³ C ₂ /‰	δ ¹³ C ₃ /‰
民丰	丰深 1	Es ₄ ^F	4 316.6~4 343.0	81.58	16.30	0.83	-50.4	-30.8	-26.8
	丰深 3	Es ₄ ^F	4 740.0~4 847.0	92.16	4.68	0.95	-44.7	-30.1	-23.4
利津	新利深 1	Es ₄ ^F	4 271.2~4 374.0	86.40	9.84	0.90	-41.8	-23.5	-24.4
	利深 101	Es ₄ ^F	4 371.3~4 464.8	88.10	8.67	0.91	-40.9	-23.9	-20.8
渤南	义 115	Es ₄ ^L	5 144.0~5 163.4	89.63	0.40	0.99	-35.9	-24.9	-21.8
	义 121	Es ₄ ^L	4 426.1~4 438.4	91.36	1.46	0.98	-40.0	-22.0	-19.3
	渤深 5	Es ₄ ^L	4 491.9~4 587.3	79.55	13.07	0.86	-38.0	/	/

东营凹陷沙四下亚段和沾化凹陷渤南洼陷沙四上亚段为盐湖沉积环境^[8-9],盐岩、石膏与泥岩等岩性及其组合为盐湖充填的显著特征。泥岩、油页岩、含盐泥岩和膏质泥岩等构成了深层裂解气的主要烃源岩,泥岩生物标志化合物 Pr/Ph 值小于 1,γ蜡烷/C₃₀藿烷值为 0.14~0.50,呈显著的植烷优势和较高的 γ蜡烷含量,表明了烃源岩形成于较高盐度和强还原底水条件(表 2)。东营凹陷沙四下亚段烃源岩厚度在 50~400m 之间,有机碳含量在 0.06%

~4.21%之间,平均为 1.26%;氯仿沥青“A”含量在 0.003 1%~1.550 1%之间,平均为 0.255 2%;有机质类型都以 I 型和 II₁ 型为主,均处于高成熟—过成熟演化阶段^[10-12]。沾化凹陷渤南洼陷沙四上亚段烃源岩厚度在 25~300m 之间,有机碳含量在 0.22%~13.9%之间,平均为 2.77%;氯仿沥青“A”含量在 0.009 1%~1.675 6%之间,平均为 0.448 2%;烃源岩饱和烃色谱主峰碳在 15~18 之间,热演化 R_o 值在 0.9%~2.4%之间(表 2);因此,济阳拗陷

深层烃源岩有机质类型好、有机碳含量高、热演化程度高,是深层裂解气的优质气源岩。

2 裂解气成因的鉴别

2.1 $\text{Ln}(\text{C}_1/\text{C}_2)$ — $\text{Ln}(\text{C}_2/\text{C}_3)$ 关系

20 世纪 90 年代以来,国内外学者^[13-16]应用天然气中 C_1 — C_3 组成及 $\delta^{13}\text{C}_1$ — $\delta^{13}\text{C}_3$ 同位素资料来鉴别原油裂解气和干酪根裂解气,目前应用于四川盆地和塔里木盆地的某些气藏的成因划分^[17-18]。干酪根裂解气是以甲烷的快速增长为特征, $\text{Ln}(\text{C}_1/\text{C}_2)$ 值随裂解的过程逐渐增大, $\text{Ln}(\text{C}_2/\text{C}_3)$ 值基本不变;原油裂解气则以重烃的递减速率大为特征。民丰地区气藏组分 $\text{Ln}(\text{C}_2/\text{C}_3)$ 值随着 $\text{Ln}(\text{C}_1/\text{C}_2)$ 值的增大而增大(图 2),利津地区、渤南地区气藏组分 $\text{Ln}(\text{C}_2/\text{C}_3)$ 值随着 $\text{Ln}(\text{C}_1/\text{C}_2)$ 值的增大而保持较稳定,这 2 种类型与堪萨斯和安哥拉天然气组分关系比较类似^[14],说明民丰地区气藏的成因以原油裂解气为主,利津地区、渤南地区的气藏为干酪根裂解气。

2.2 $\delta^{13}\text{C}_1$ — $\delta^{13}\text{C}_2$ — $\delta^{13}\text{C}_3$ 关系

通过烃源岩样品和原油样品的热模拟实验,发现 $\delta^{13}\text{C}_1$ — $\delta^{13}\text{C}_2$ — $\delta^{13}\text{C}_3$ 的关系能较好区分干酪根裂解气和原油裂解气^[14,19-20]。从 $\delta^{13}\text{C}_1$ —($\delta^{13}\text{C}_2$ — $\delta^{13}\text{C}_3$) 与 ($\delta^{13}\text{C}_1$ — $\delta^{13}\text{C}_3$)—($\delta^{13}\text{C}_2$ — $\delta^{13}\text{C}_3$) 的关系图

(图 3)上可以看出,在气源岩有机质类型和热演化程度相似的情况下,济阳坳陷民丰地区原油裂解气、渤南地区和利津地区干酪根裂解气分别位于 2 个不同的分布区域,原油裂解气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值比干酪根裂解气的低 2.9‰~14.5‰(表 1);原油裂解气($\delta^{13}\text{C}_2$ — $\delta^{13}\text{C}_3$)值为-6.0‰~-7.0‰,干酪根裂解气($\delta^{13}\text{C}_2$ — $\delta^{13}\text{C}_3$)值为 0.9‰~-4.5‰,原油裂解气($\delta^{13}\text{C}_2$ — $\delta^{13}\text{C}_3$)值比干酪根裂解气的低 1.5‰~7.9‰;反映了在成熟度增高即源岩有机质裂解的过程中,较容易断裂的¹²C—¹²C 键越来越少,而剩余有机质中¹²C—¹³C 键和¹³C—¹³C 键较丰富,形成的天然气碳同位素值也相应增大;原油裂解气是经过古油藏等原油裂解而来,古油藏中原油含有相对较多¹²C—¹²C 键和¹²C—¹³C 键,致使原油裂解气碳同位素组成相应较轻。随着 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值或($\delta^{13}\text{C}_1$ — $\delta^{13}\text{C}_2$)值的增大, ($\delta^{13}\text{C}_2$ — $\delta^{13}\text{C}_3$)值呈逐渐减小的变化趋势(图 3),干酪根裂解气($\delta^{13}\text{C}_2$ — $\delta^{13}\text{C}_3$)值快速减小,而原油裂解气($\delta^{13}\text{C}_2$ — $\delta^{13}\text{C}_3$)值变化微弱,表明原油裂解气后期主要来自重烃 C_2 — C_5 的裂解,干酪根裂解气主要来自干酪根的直接裂解^[20]。另外,利津地区的($\delta^{13}\text{C}_2$ — $\delta^{13}\text{C}_3$)值为正值,出现了乙烷和丙烷的碳同位素的反转现象,可能是混入了少量的孔店组干酪根裂解气。

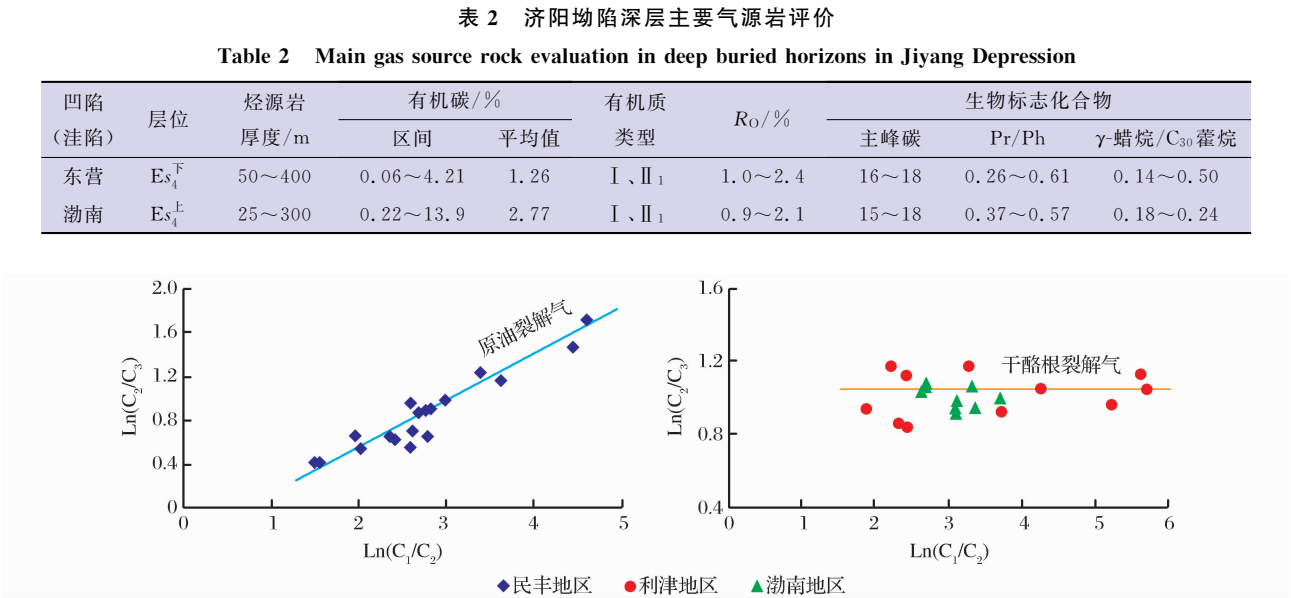


图 2 济阳坳陷裂解气组分 $\text{Ln}(\text{C}_1/\text{C}_2)$ 与 $\text{Ln}(\text{C}_2/\text{C}_3)$ 关系

Fig. 2 Cracking gas components $\text{Ln}(\text{C}_1/\text{C}_2)$ and $\text{Ln}(\text{C}_2/\text{C}_3)$ diagram in Jiyang Depression

2.3 $\text{Ln}(\text{C}_2/\text{C}_3)$ —($\delta^{13}\text{C}_2$ — $\delta^{13}\text{C}_3$) 关系

通过天然气组分与碳同位素的有机结合,能较好地鉴别原油裂解气与干酪根裂解气。 $\text{Ln}(\text{C}_2/$

$\text{C}_3)$ —($\delta^{13}\text{C}_2$ — $\delta^{13}\text{C}_3$)关系表明(图 4),原油裂解气与干酪根裂解气处于上下 2 个区域,原油裂解气 $\text{Ln}(\text{C}_2/\text{C}_3)$ 值分布在 0.5~0.7 之间,而干酪根裂解气

$\text{Ln}(C_2/C_3)$ 值分布在 0.8~1.3 之间。随着 $\text{Ln}(C_2/C_3)$ 值的增大,民丰地区原油裂解气($\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3$)值逐渐变小,但变化幅度很小;利津地区、渤南地区

干酪根裂解气($\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3$)值相对较大,随着 $\text{Ln}(C_2/C_3)$ 值的增大, ($\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3$) 值也有逐渐变小的趋势,但变化幅度相对较大。

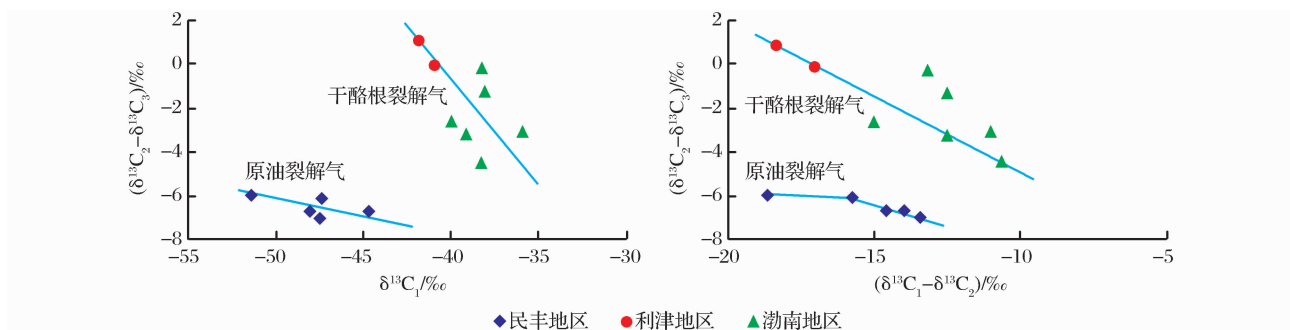


图3 济阳拗陷裂解气 $\delta^{13}C_1 - (\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3)$ 与 $(\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2) - (\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3)$ 关系

Fig. 3 Cracking gas $\delta^{13}C_1 - (\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3)$ and $(\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2) - (\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3)$ diagram in Jiyang Depression

3 成藏差异性

生烃模拟实验表明,干酪根裂解气与原油裂解气处于一个接力生气的过程^[21]。高成熟—过成熟的热演化阶段是 2 种成因的共同特点。造成现今深层裂解气藏成因差异的根本原因就是断裂活动导致的气体扩散、不同岩相储层物性差形成的侧向遮挡等地质条件。

3.1 干酪根裂解气藏

干酪根裂解气藏表现为早期扩散后期充注。早期形成的油气在断裂作用下,经断层垂向运移使早期油气向上部地层扩散,若上部地层有适宜的圈闭可能聚集成油气藏,若上部没有圈闭则向空中散失;后期生成的天然气在断裂活动减弱或停止的情况下就近向砂岩或砂砾岩等圈闭聚集形成气藏;这种类型属于济阳陆相断陷盆地深层裂解气藏的典型特征。渤南地区深部洼陷带受渤深 4 断层、渤深 3 断层、孤西断层等多条断层所挟持,断层活动性分析表明,渤深 4 断层、渤深 3 断层等在沙四段、沙三段和沙一段—东营组沉积期处于断裂活动强烈的时期(图 5)。沙四上亚段烃源岩在沙一段末期—东营组早期处于生油气高峰,此时渤深 4 断层和渤深 3 断层处于断裂活动强烈期,生成的油气经断层向上运移,一部分在义 113 井和渤深 4 断块形成油藏,另一部分在空中散失,流体包裹体实验分析也表明洼陷带沙四上亚段砂岩未成藏。在明化镇组沉积期至现今,烃源岩中部埋深约为 5 000m, R_o 值约为 2.0%,处于生气高峰时期;同时断层停止活动,生成的干酪根裂解气就近向洼陷带沙四上亚段砂岩运聚形成构

造气藏或岩性气藏(图 5),流体包裹体检测均一温度主要分布在 170~190℃ 之间,也就是在明化镇期到现今为干酪根裂解气的成藏期。因此,早期断裂活动导致早期油气扩散、晚期断裂活动停止、洼陷带圈闭的天然气充注是陆相断陷盆地干酪根裂解气的显著标志。

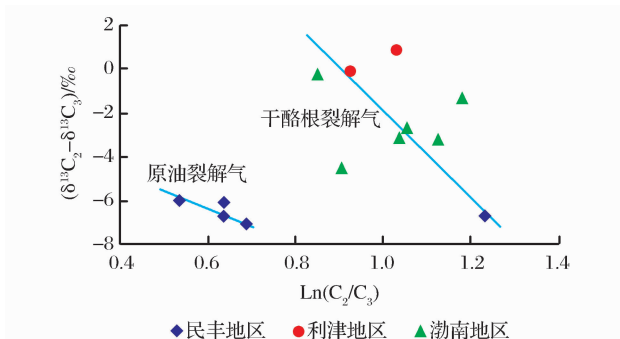


图4 济阳拗陷裂解气 $\text{Ln}(C_2/C_3)$ 与 $(\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3)$ 关系

Fig. 4 Cracking gas $\text{Ln}(C_2/C_3)$ and $(\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3)$ diagram in Jiyang Depression

3.2 原油裂解气藏

原油裂解气藏表现为早期充注后期裂解。早期生成的油气就近运移至岩性圈闭形成古油藏,经后期高温热演化作用古油藏重烃分子形成气藏或凝析气藏。民丰地区陡坡带砂砾岩储层临近深洼陷的油气源,几千米的砂砾岩体由近岸水下扇相的扇中亚相含砾砂岩与扇根亚相砾岩等组成,含砾砂岩孔隙度值一般在 3%~8% 之间,大于 4% 的频率约为 70%,砾岩孔隙度值一般在 2%~4% 之间,小于 4% 的频率约为 90%,两者之间的物性差值,构成了砂砾岩岩性圈闭的侧向封堵条件(图 6)。早期生成的

油气就近运移到含砾砂岩储层中形成古油藏;在断裂活动中,由于油气藏未与断层直接接触,断裂活动对古油藏破坏较小。在后期持续的深埋藏过程中,古油藏地温不断增高,丰深1古油藏地温达到170~190℃,模拟实验表明,原油裂解气始于160℃,在180℃时原油裂解的速度成倍地增加,大量的焦沥青

充填粒间孔隙以及天然气碳同位素等均表明原油裂解发生了大规模的裂解过程,古油藏原油的大分子烃类裂解成小分子烃类,同时有部分干酪根裂解气混入,并形成现今的砂砾岩气藏或凝析气藏。因此,早期油气充注、岩性侧向封堵、后期古油藏裂解是济阳陆相断陷盆地原油裂解气藏的一种新类型。

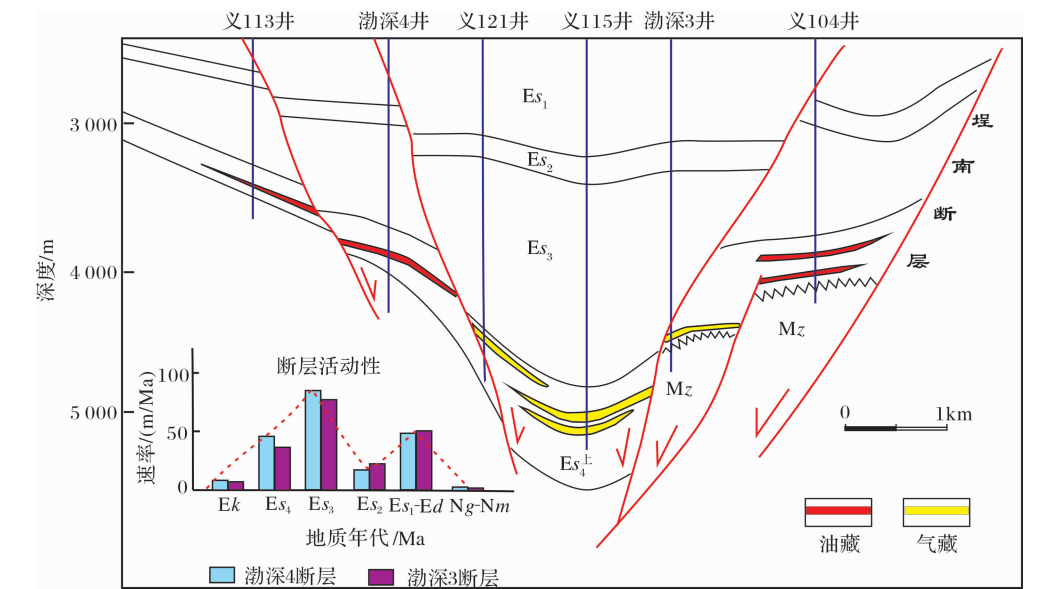


图 5 渤南洼陷深层裂解气成藏模式

Fig. 5 Cracking gas reservoir pattern in deep buried horizons in Bonan sub-sag

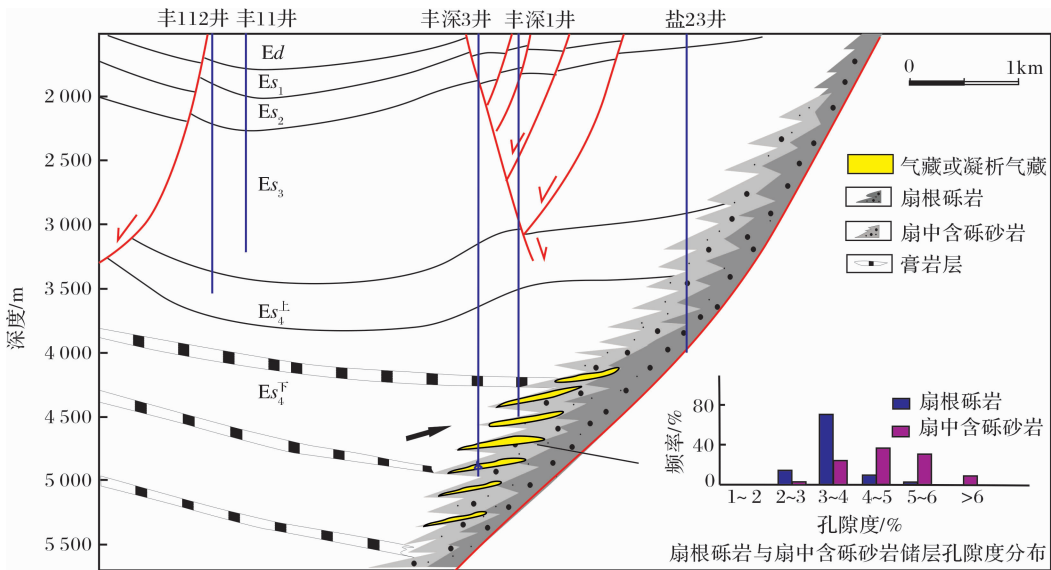


图 6 民丰地区深层裂解气成藏模式

Fig. 6 Cracking gas reservoir pattern in deep buried horizons in Minfeng area

4 勘探意义

干酪根裂解气的认识有助于重新评价济阳坳陷深洼陷区裂解气成藏条件和勘探目标,东营凹陷的

利津地区、沾化凹陷的渤南地区、车镇凹陷的车西地区 and 惠民凹陷的临南地区等(图 1),都具有后期干酪根裂解气充注的地质条件,显示了较广阔的勘探空间。目前利津地区和渤南地区已有多口井获得了

突破,如新利深1井获得日产 $25 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的工业气流,因此,干酪根裂解气的认识对深层天然气勘探具有较好的指导作用。

原油裂解气的新类型开启了寻找深层天然气的新思路,有助于重新认识济阳拗陷陡坡构造带、斜坡构造带、中央隆起带以及潜山构造带等的成藏要素、气藏规模和勘探潜力,如东营凹陷民丰地区陡坡带原油裂解气藏重新认识之后,储量规模在 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上,完全具备形成一个中型气田的条件。因此,原油裂解气的认识对于深层天然气勘探具有重要的意义。

5 结论

(1) $\text{Ln}(C_1/C_2) - \text{Ln}(C_2/C_3)$ 、 $\delta^{13}C_1 - (\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3)$ 、 $(\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2) - (\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3)$ 、 $\text{Ln}(C_2/C_3) - (\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3)$ 的关系能有效地鉴别干酪根裂解气和原油裂解气,2种成因类型分布于不同的区间,存在不同的变化趋势。

(2) 在早期断裂活动时,导致早期油气的扩散;当晚期断裂活动停止,洼陷带烃源岩干酪根裂解气充注圈闭形成干酪根裂解气藏,拓展了在济阳拗陷深洼陷区寻找干酪根裂解气的领域。

(3) 原油裂解气藏属于早期油气充注、岩性侧向封堵、后期古油藏裂解的一种新类型,开启了寻找深层天然气的新思路,并展示了较好的勘探前景。

参考文献(References):

- [1] Wang Wenlin. Formation conditions of deep-seated condensate gas reservoir in the Paleogene in Dongying Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(3): 55-57. [王文林. 东营凹陷古近系深层凝析气藏形成条件[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(3): 55-57.]
- [2] Li Xiaojun, Li Wentao, Zhang Haijun. Cracking gas reservoir-forming analysis and exploration orientation in Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(1): 42-45. [李孝军, 李文涛, 张海君. 济阳拗陷裂解气成藏条件及勘探方向[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(1): 42-45.]
- [3] Yang Xiancheng, Sui Fenggui. The main controlling factors of deep cracked gas accumulation in Dongying Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(5): 363-365. [杨显成, 隋风贵. 东营凹陷深层裂解气成藏主控因素[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(5): 363-365.]
- [4] Wang Li, Jin Qiang, Lin Lamei, *et al.* The geochemical characteristics of nature gas and discussion on gas source in Bogu 4 buried hill[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(5): 715-719. [王力, 金强, 林腊梅, 等. 济阳拗陷孤北一渤南地区渤古4潜山天然气地球化学特征及气源探讨[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(5): 715-719.]
- [5] Song Mingshui, Zhang Xuecai. Discussion on deep gas geochemical characteristics and genesis of Bonan sag in Jiyang Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(6): 646-649. [宋明水, 张学才. 济阳拗陷渤南深层天然气的地球化学特征及成因探讨[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(6): 646-649.]
- [6] Li Yanjun, Song Guoqi, Li Wentao, *et al.* A fossil oil reservoir and the gas origin in the Lower Sha-4 member of the well Fengshen 1 area, the north Dongying zone of the Jiyang Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(2): 173-179. [李延军, 宋国奇, 李文涛, 等. 济阳拗陷东营凹陷北带丰深1井区深层沙四下古油藏与天然气成因[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(2): 173-179.]
- [7] Chen Rongshu. Natural Gas Geology[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1989. [陈荣书. 天然气地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989.]
- [8] Li Xiangchen. Study on effective hydrocarbon source rocks and relationship between them and nature gas reservoirs[J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(1): 53-56. [李祥臣. 有效气源岩及其与天然气藏的关系探讨[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(1): 53-56.]
- [9] Zhu Guangyou, Jin Qiang, Zhang Shanwen, *et al.* Salt lake-saline lake sedimentary combination and petroleum accumulation in the Bonan Sag[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2004, 24(1): 25-30. [朱光有, 金强, 张善文, 等. 渤南洼陷盐湖—咸水湖沉积组合及其油气聚集[J]. 矿物学报, 2004, 24(1): 25-30.]
- [10] Wang Juan, Jin Qiang, Ma Guozheng, *et al.* Catalytic action of sulphate evaporates in pyrolytic gas generation of source rocks[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(1): 26-31. [王娟, 金强, 马国政, 等. 高成熟阶段膏岩等盐类物质在烃源岩热解生烃过程中的催化作用[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(1): 26-31.]
- [11] Yuan Dongshan, Zhang Zhihuan, Zeng Yantao, *et al.* Organic matter types and organic facies of source rocks in the 4th member of Shahejie Formation in Bonan Sub-sag Zhanhua Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(1): 125-128. [袁东山, 张枝焕, 曾艳涛, 等. 沾化凹陷渤南洼陷沙四段烃源岩有机相[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(1): 125-128.]
- [12] Ren Yongjun, Zhou Yaoqi, Zha Ming, *et al.* Maturity of Lower Tertiary source rocks in Dongying Depression[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2006, 30(2): 6-10. [任拥军, 周瑶琪, 查明, 等. 东营凹陷古近系烃源岩成熟度特征[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(2): 6-10.]
- [13] Behar F, Kressmann S. Experimental simulation in Confined system and kinetic modeling of kerogen and oil cracking[J]. Organic Geochemistry, 1991, 19(19): 173-189.
- [14] Prinzhofer A, Alain Y. Genetic and post-genetic molecular and isotopic fractionations in natural gases[J]. Chemical Geology, 1995, 126(3): 281-290.
- [15] Chen Shijia, Fu Xiaowen, Ma Lining, *et al.* Genetic identifica-

- tion method of kerogen-cracked gases oil-cracked gases[J]. *Experimental Petroleum Geology*, 2002, 24(4): 364-366. [陈世加, 付晓文, 马力宁, 等. 干酪根裂解气和原油裂解气的成因判别方法[J]. 石油实验地质, 2002, 24(4): 364-366.]
- [16] Wang Zhenping, Fu Xiaotai, Lu Shuangfang, *et al.* An analogue experiment of gas generating by crude oil cracking, Characters of products and its significance[J]. *Natural Gas Industry*, 2001, 21(3): 12-15. [王振平, 付晓泰, 卢双舫, 等. 原油裂解成气模拟实验、产物特征及其意义[J]. 天然气工业, 2001, 21(3): 12-15.]
- [17] Zhao Mengjun, Zeng Fangang, Qin Shengfei, *et al.* Two pyrolytic gases found and proved in Talimu Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2001, 21(1): 35-39. [赵孟军, 曾凡刚, 秦胜飞, 等. 塔里木发现和证实两种裂解气[J]. 天然气工业, 2001, 21(1): 35-39.]
- [18] Zhao Wenzhi, Wang Zecheng, Wang Yigang, *et al.* Formation mechanism of highly effective gas pools in the Feixianguan Formation in the NE Sichuan Basin [J]. *Geological Review*, 2006, 52(5): 708-718. [赵文智, 汪泽成, 王一刚, 等. 四川盆地东北部飞仙关组高效气藏形成机理[J]. 地质论评, 2006, 52(5): 708-718.]
- [19] Gao Shengjun, Chen Yicai, Li Yanjun, *et al.* Pyrolysis on crude oil and characteristics of Sha 4 member cracking gas, Dongying Depression [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(1): 32-35. [高生军, 陈义才, 李延军, 等. 东营凹陷沙四段原油裂解热模拟及产物特征[J]. 天然气地质科学, 2009, 20(1): 32-35.]
- [20] Tian Hui, Xiao Xianming, Li Xianqing, *et al.* Comparison of gas generation and carbon isotope fractionation of methane from marine kerogen and crude oil-cracking gases [J]. *Geochimica*, 2007, 36(1): 71-76. [田辉, 肖贤明, 李贤庆, 等. 海相干酪根与原油裂解气甲烷生成及碳同位素分馏的差异研究[J]. 地球化学, 2007, 36(1): 71-76.]
- [21] Zhao Wenzhi, Wang Zhaoyun, Zhang Shuichang, *et al.* Successive generation of natural gas from organic materials and its significance in future exploration [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(2): 1-7. [赵文智, 王兆云, 张水昌, 等. 有机质“接力生气”模式的提出及其在勘探中的意义[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 1-7.]

Origin and Accumulation of Cracking Gas in the Deep Buried Horizons in Jiyang Depression

YANG Xian-cheng^{1,2}, JIANG You-lu¹, GENG Chun-yan²

(1. *China University of Petroleum (Huadong), Qingdao 257061, China;*

2. *Geological Scientific Research Institute, Shengli Oil Field Subsidiary Company, SINOPEC, Dongying 257000, China*)

Abstract: The origin of cracking gas in the deep buried horizons is very complicated, and it is one of the main limits for gas exploration in Jiyang Depression. Based on gas component and carbon isotope analysis, it is possible to distinguish between oil cracking gas and kerogen cracking gas. Oil cracking gas is featured by $\ln(C_2/C_3)$ increasing with $\ln(C_1/C_2)$; but as for kerogen cracking gas, $\ln(C_2/C_3)$ was almost constant despite of the increase of $\ln(C_1/C_2)$. When the organic matter type is the same and thermal maturity is similar, the difference of $\delta^{13}C_1$, $\delta^{13}C_2$, and $\delta^{13}C_3$ between oil cracking gas and kerogen cracking gas can be up to -12.4‰, -8.8‰ and 7.5‰, respectively. With the increase of $\delta^{13}C_1$ or $(\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2)$, $(\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3)$ of kerogen cracking gas decreased rapidly, while that value of oil cracking gas are almost constant. This study also demonstrated the differences in gas accumulation between these two kinds of gas reservoir. As for kerogen cracking gas, fault activities damaged oil and gas reservoir that formed in early period, and gas reservoir formed in lithologic traps in low lying structural belt during late period when fault activity stopped. As for oil cracking gas, oil and gas accumulated in early period sealed by lithology difference, and oil cracked in late period to form cracking gas reservoir. Understanding in the origin of the two kinds of cracking gas reservoir opened a new concept in gas exploration, and this is significant for exploration in deep buried horizons.

Key words: Jiyang Depression; Deep buried horizons; Kerogen cracking gas; Oil cracking gas; Distinctions in gas accumulation