

文章编号: 0253-9985(2009)01-0085-05

济阳坳陷民丰地区天然气成因

胡晓庆¹, 金强², 王秀红³, 林腊梅², 王力², 王娟², 王婷婷⁴

(1. 中国海洋石油总公司 北京石油研究中心, 北京 100027; 2. 中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061;

3. 中国石油化工股份有限公司 胜利油田分公司 地质科学研究院, 山东 东营 257015;

4. 中国石油天然气集团公司 辽河石油勘探局, 辽宁 盘锦 124010)

摘要: 济阳坳陷民丰地区天然气存在源岩热解和原油裂解成因的争议, 利用古近系沙四段烃源岩、原油样品的热模拟实验与地质分析相结合的方法, 提出了源岩热解气和原油裂解气的鉴别标志。源岩热解气以甲烷的快速生成为特征, 成熟阶段, 源岩热解气的环烷烃和苯含量低, 高成熟阶段, 源岩热解气和原油裂解气均以环烷烃和苯含量高为特征。民丰沙四段凝析油和天然气的 $\ln(C_1/C_2)$ 比 $\ln(C_2/C_3)$ 变化大, 且环烷烃、异构烷烃和芳烃含量较高, 具有高成熟阶段源岩热解气的特征, 研究认为民丰地区天然气为源岩热解成因。

关键词: 源岩热解气; 原油裂解气; 轻烃; 热模拟实验; 济阳坳陷

中图分类号: TE112.1 文献标识码: A

Origin of natural gas in Mingfeng area, the Jiyang Depression

Hu Xiaoqing¹, Jin Qiang², Wang Xiuhong³, Lin Lamei², Wang Li², Wang Juan², Wang Tingting⁴

(1. CNOOC Research Center, Beijing 100027, China; 2. China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China;

3. Research Institute of Geological Sciences, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257100, China;

4. CNPC Liaohe Petroleum Exploration Bureau, Panjing, Liaoning 124010, China)

Abstract: It is controversial about the origin of the natural gas in Mingfeng area. A set of indexes for differentiating kerogen pyrolysis gas and oil-cracked gas is presented based on geologic analysis and thermal simulation experiments on source rocks and crude oil samples from the Es⁴. In mature phase, the kerogen pyrolysis gas features in rapid generation of methane and low contents of cyclane and benzene. While in high mature phase, both kerogen pyrogenic gas and oil-cracked gas are characterized by high contents of cyclane and benzene. The condensate oil and natural gas in Mingfeng area show a larger scope of $\ln(C_1/C_2)$ ranging from 2 to 6 than that of $\ln(C_2/C_3)$ varying from 1 to 1.5 and have relatively high contents of cyclane, isoalkane and aromatic hydrocarbon, revealing the characteristics of kerogen pyrolysis gas in high mature phase. Therefore, it is believed that the natural gas in Mingfeng area is of kerogen pyrolysis gas.

Key words: kerogen pyrolysis gas; oil-cracked gas; light hydrocarbon; thermal simulation experiment; Jiyang Depression

济阳坳陷东营凹陷民丰地区埋深超过 4 400 m 的古近系沙河街组四段(简称沙四段)砂砾岩产出大量天然气和凝析油, 成为济阳坳陷近年来重要的勘探突破。但就该区天然气是烃源岩高成熟阶段的产物还是原油高温裂解生成的, 仍存在有争议。前人通过热模拟实验方法再现了源岩热解

气和原油裂解气生成过程^[1~4], 主要考察了压力、矿物质等外界因素对源岩生气过程的影响等^[5~7], 以及原油族组成对原油裂解生气的动力学影响^[8~10], 但对气体的轻烃组成特征研究较少, 从而影响了对天然气成因的认识。本文通过展开综合地质分析, 结合烃源岩和原油的生气热模拟

收稿日期: 2008-09-10。

第一作者简介: 胡晓庆(1982—), 女, 助理工程师, 油气地质。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40572084)。

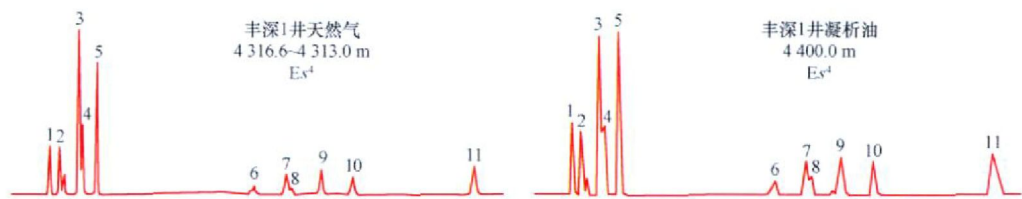


图 1 民丰地区沙四段天然气和凝析油轻烃特征分布

Fig. 1 Characteristic patterns of light hydrocarbon for natural gas and condensate oil from Es⁴ in Fengsheng-1 well
1. 甲基环戊烷 2. 环己烷 3. 甲基戊烷 4. 甲基戊烷 5. 正己烷 6. 二甲基环戊烷
7. 甲基环戊烷 8. 甲基己烷 9. 甲基己烷 10. 正庚烷 11. 苯

实验,讨论不同演化阶段源岩热解气和原油裂解气的组成特征,并且对比民丰地区天然气的组成特征,以期解释民丰地区沙四段天然气的成因。

1 天然气和沙四段烃源岩演化特征

民丰地区沙四段天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值分布在 $-51.4\text{‰} \sim -44.66\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}_2$ 值则介于 $-34.04\text{‰} \sim -30.05\text{‰}$, 碳同位素值较轻,为油型气特征。在轻烃组成中,民丰天然气和凝析油以环烷烃、异构烷烃和芳烃含量高为特征(图 1),具有腐殖型有机质生成气体的特征^[11]。C₇ 组成中,正庚烷和甲基环己烷含量接近,约为 45%。C₆ 组成中,正己烷含量为 60%,环己烷和甲基环戊烷含量约为 20%。其甲基环己烷指数为 38%~46%,环己烷指数为 21%~23%,苯指数为 11%~25%,烷芳指数为 21%~27%,庚烷值为 15%~23%,石蜡指数为 3.5~5.0。则依据胡国艺等提出的原油裂解气以环烷烃和异构烷烃高为特征,民丰天然气也有可能是原油裂解气^[12~14]。

民丰地区盐下沙四段烃源岩主要由深灰色含盐泥岩、灰质泥岩、深灰色含膏含盐泥岩、盐膏质泥岩和纹层泥岩组成,有机质类型以 I 型和 II 型为主。根据实测镜质体反射率(R_o)与深度数据回归出直线关系“深度=1 646.4 R_o +2 490.4”(图 2)。由图可以看出,民丰沙四段烃源岩成熟度主

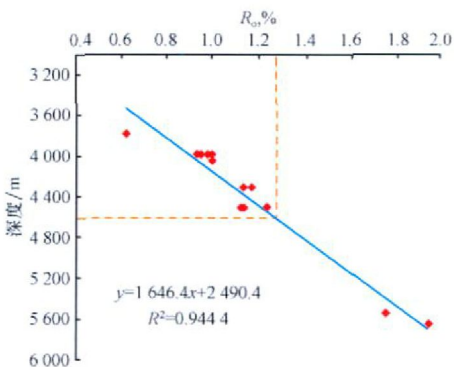


图 2 民丰地区沙四段烃源岩实测 R_o 与深度的关系

Fig. 2 Measured R_o vs. depth for the source rocks in Es⁴ in Minfeng area

要处于 0.9%~1.3% 之间,有的已达到高—过成熟阶段。当深度大于 4 600 m 时,沙四段烃源岩的 R_o 可超过 1.3%,处于高成熟阶段,则可能存在有高成熟源岩热解气,或者是原油裂解气。

2 样品与实验

2.1 样品

烃源岩样品采自汶东地区 ZK16 井 412m 的大汶口组盐湖相未熟油页岩,层位与本区沙四段相对应。为了模拟民丰地区的盐湖环境,加入了丰深 2 井 4 298.65m 深处的盐岩,二者比例为 1:1。原油样品为采自东营凹陷坨 764、王 130 和王斜 131 井的正常原油,其基本地球化学特征见表 1。

表 1 油样基本地球化学参数

Table 1 Basic geochemical parameters of the oil samples

井号	层位	井段/m	密度/(g·cm ⁻³)	族组分含量, %			
				饱和烃	芳烃	非烃	沥青质
王 130	Es ⁴	2 179.8~2 195.3	0.858 4	56.12	12.47	13.63	0
坨 764	Es ⁴	3 947.5~3 970.0	0.902 3	75.14	13.93	7.38	0
王斜 131	Es ⁴	2 467.3~2 495.8	0.832 0	58.02	11.36	9.63	5.43

2.2 实验方法

实验采用的是一套油气成因高温高压催化热模拟装置,包括有高温高压油气成因热模拟系统(图3)和气相色谱系统。本套装置可承受的最高温度可达 800 °C,最大压力为 100 MPa。天然气组分分析采用 Agilent 6890 气相色谱仪,柱系统为 HP-PLOT Al_2O_3 柱($\phi 0.53\text{ mm} \times 50\text{ m}$)、PO-RAPAK Q 柱($\phi 3.175\text{ mm} \times 1.83\text{ m}$)和碳分子筛柱($\phi 3.175\text{ mm} \times 1.525\text{ m}$),采用双阀切换系统,用高纯氢气、高纯氦气和压缩空气作载气。升温程序:初始温度 35 °C,恒温 5 min,再以 10 °C/min 的速率程序升至 190 °C,恒温 20 min。

源岩热解实验方案:每个高压釜内称取 8 g 岩石样品、8 g 盐岩和 2 mL 蒸馏水,温度范围为 300~650 °C,每隔 50 °C 一个点,升温速率选取 40 °C/h 和 180 °C/h;达到预设温度点(350~600 °C)提釜,冷却后利用排水取气法定量收集气态产物,利用色谱分析气体组成(包括非烃类 CO_2),抽提残渣得到液态产物。

原油裂解实验方案:称取 0.1~1.0 g 油样装入玻璃管内,装入高压釜密封;温度范围为 450~600 °C,每隔 50 °C 一个点,升温速率选取 20 °C/h 和 80 °C/h,到达设定温度点恒温 1 h 后提出高压釜,定量收集产物。

3 结果与讨论

3.1 $\ln(C_1/C_2)$ 与 $\ln(C_2/C_3)$ 关系的差异

通过多组原油裂解和烃源岩热模拟实验发现,原油裂解气 $\ln(C_2/C_3)$ 迅速增大,以 C_3 的快速

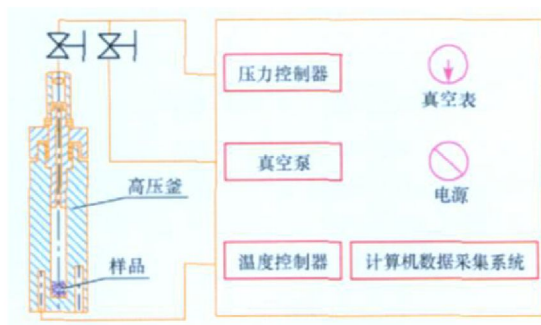


图3 油气成因热模拟装置示意图

Fig. 3 Schematic drawing of the experimental set-up for thermal simulation of hydrocarbon generation

裂解为特征。而源岩热解气 $\ln(C_1/C_2)$ 值变化范围较大,从 0 变化到 8,由于涉及到液态产物的裂解,所以 $\ln(C_2/C_3)$ 相对变化也较大,其数值范围为 0~3 (图4)。民丰天然气与源岩热解气更相似,其 $\ln(C_1/C_2)$ 值比较大(图4)。而且从图上可以看出,丰8、丰深1和丰深3天然气的 $\ln(C_1/C_2)$ 和 $\ln(C_2/C_3)$ 是呈增大的趋势,说明丰8、丰深1和丰深3井天然气的成熟度是逐渐增大的。

3.2 轻烃分布特征

烃源岩和原油样品在生烃过程中 C_6-C_8 轻烃组成的变化过程较相似(图5),均表现为成熟阶段(400~500 °C),正构烷烃含量最高,异构烷烃次之,环烷烃和芳烃较少;高成熟阶段(500~550 °C),环烷烃含量最高,正异构烷烃次之,苯含量明显有增加;过成熟阶段(550 °C以上),苯含量最高,正异构烷烃次之,环烷烃含量最低。也就是说,环烷烃和芳烃含量高并不是原油裂解气的典型特征,原油裂解气的特征也是分阶段的,只有在裂解的中、后期环烷烃和芳烃的含量才高,而且高成熟源岩热解气也具有环烷烃和芳烃含量高的特征。从成熟度角度来看,高成熟源岩热解气应该和原油裂解气的初始阶段是相对应的,则对比过程中更应该考虑成熟度的影响。而原油裂解气的初始阶段以正构烷烃含量高为特征,民丰天然气与此特征根本不相似,由此也说明民丰天然气不是原油裂解生成的,而是高成熟源岩热解生成的。

从模拟实验结果来看,源岩热解气和原油裂解气在甲基环己烷/正庚烷($\text{MCC}_6/n\text{C}_7$)和甲苯/苯比值组成上存在有差异(图6)。成熟阶段,源

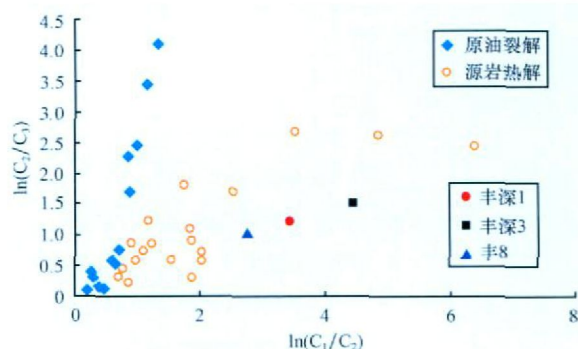


图4 源岩热解气和原油裂解气的 $\ln(C_1/C_2)$ 与 $\ln(C_2/C_3)$ 的关系

Fig. 4 $\ln(C_1/C_2)$ vs. $\ln(C_2/C_3)$ for oil-cracked gas and kerogen pyrolysis gas

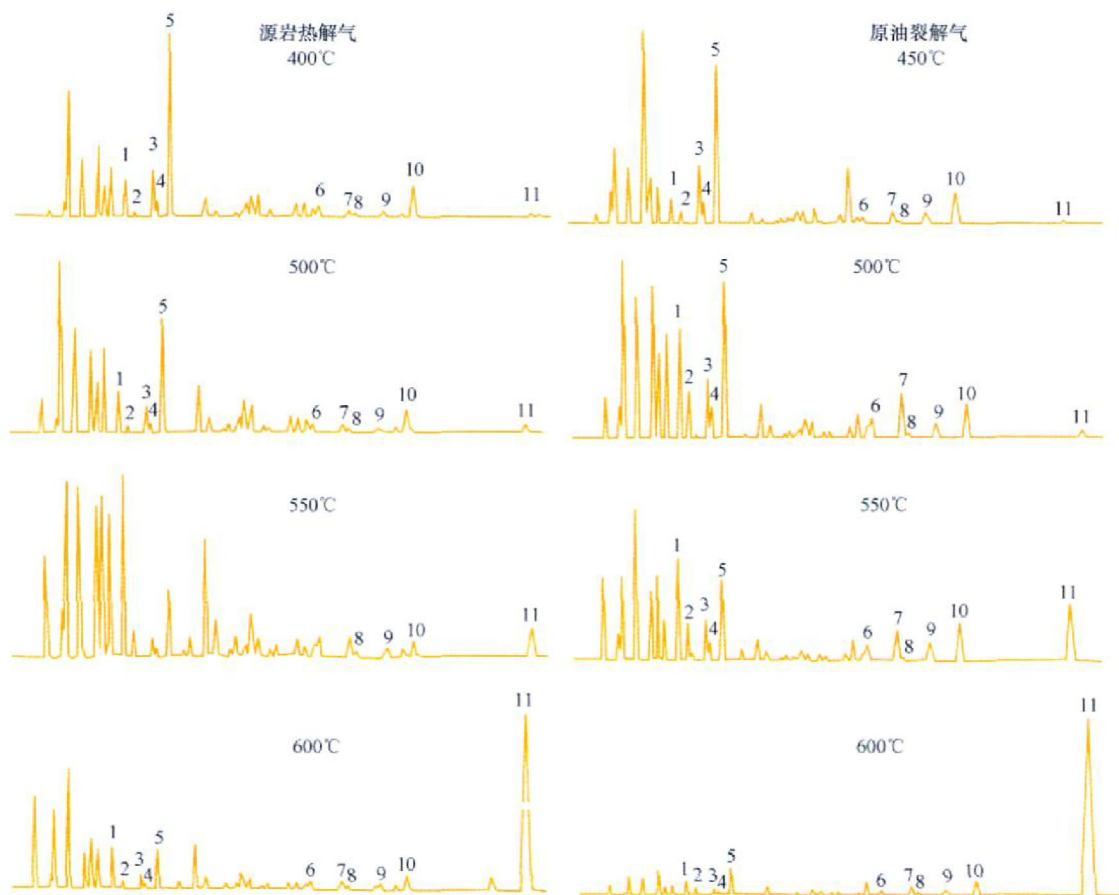


图5 源岩热解气和原油裂解气不同演化阶段 C_6-C_8 轻烃分布

Fig. 5 Characteristic patterns of C_6-C_7 light hydrocarbons from kerogen pyrolysis gas and oil-cracked gas during different stages of maturity

1. 甲基环戊烷 2. 环己烷 3. 甲基戊烷 4. 甲基戊烷 5. 正己烷 6. 二甲基环戊烷
7. 甲基环戊烷 8. 甲基己烷 9. 甲基己烷 10. 正庚烷 11. 苯

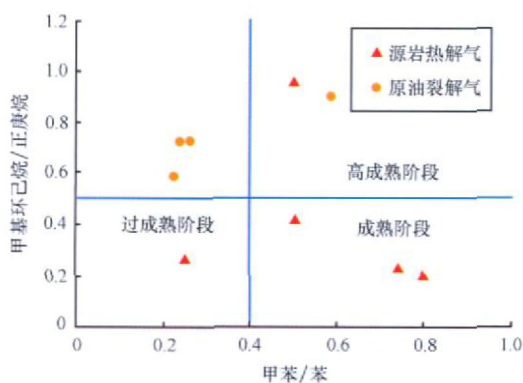


图6 源岩热解气和原油裂解气的 MCC_6/nC_7 与 甲苯/苯 的关系

Fig. 6 MCC_6/nC_7 vs. methylbenzene/benzene for oil-cracked gas and kerogen pyrolysis gas

岩热解气中甲基环己烷/正庚烷值较低, 小于 0.5, 而原油裂解气该项比值一般较高, 大于 0.5; 源岩热解气的甲苯/苯比值大于 0.4, 而原油裂解气的

甲苯/苯比值一般小于 0.4, 这可能是由于原油裂解过程中甲苯更多的向苯转化导致甲苯少, 导致苯含量高的特征。高成熟阶段, 源岩热解气和原油裂解气的甲基环己烷/正庚烷值大于 0.5, 甲苯/苯大于 0.4。

4 结论

1) 通过开展烃源岩和原油裂解实验, 发现源岩热解气以甲烷的快速生成作为特征, 其 $\ln(C_1/C_2)$ 值变化范围为 0~8, $\ln(C_2/C_3)$ 值变化范围为 0~3; 成熟源岩热解气的环烷烃和苯含量低, 其 MCC_6/nC_7 小于 0.5 和甲苯/苯大于 0.4; 高成熟源岩热解气以环烷烃和苯含量高为特征, 其 MCC_6/nC_7 大于 0.9。而原油裂解气以丙烷的快速裂解为特征, 其 $\ln(C_2/C_3)$ 值变化范围为 0~5, $\ln(C_1/C_2)$ 值变化范围为 0~2; 初始阶段原油裂解

气的环烷烃和苯含量低, 其 MCC_6/nC_7 小于 0.5 和甲苯/苯大于 0.4; 后期阶段原油裂解气以环烷烃和苯含量高为特征, 其 MCC_6/nC_7 大于 0.9。

2) 民丰沙四段天然气和凝析油的 $\ln(C_1/C_2)$ 值为 2~6, $\ln(C_2/C_3)$ 值为 1.0~1.5, $\ln(C_1/C_2)$ 比 $\ln(C_2/C_3)$ 变化大, 为源岩热解气特征。而且在 C_6-C_7 轻烃中, 以环烷烃和芳烃含量高为特征, 其甲基环己烷指数为 38%~46%, 环己烷指数为 21%~23%, 苯指数为 11%~25%, MCC_6/nC_7 为 0.8~1.3, 与高成熟阶段源岩热解气的特征相似。因此认为民丰沙四段天然气是源岩热解气成因。

参 考 文 献

- 1 秦建中, 刘宝泉, 郑伦举, 等. 海相碳酸盐岩烃源岩生排烃能力研究[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 348~355
- 2 冯子辉, 迟元林, 杜洪文, 等. 原油在储层介质中的加水裂解生气模拟实验[J]. 沉积学报, 2002, 20(3): 506~509
- 3 秦建中, 金聚畅, 刘宝泉. 海相不同类型烃源岩有机质丰度热演化规律[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 177~184
- 4 陈义才, 沈忠民, 黄泽光, 等. 碳酸盐烃源岩排烃模拟模型及应用——以鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组为例[J]. 石油与天然

气地质, 2002, 23(3): 203~206

- 5 张有生, 秦勇, 刘焕杰, 等. 沉积有机质二次生烃热模拟实验研究[J]. 地球化学, 2002, 31(3): 273~281
- 6 李术元, 林世静, 郭绍辉, 等. 矿物质对干酪根热解生烃过程的影响[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2002, 26(1): 69~74
- 7 金强. 裂谷盆地生油层中火山岩及其矿物与有机质的相互作用——油气生成的催化和加氢作用研究进展及展望. 地球科学进展, 1998, 13(6): 542~546.
- 8 卢双舫, 付晓泰, 刘晓艳, 等. 油成气的动力学模型及其标定[J]. 天然气工业, 1996, 16(6): 6~8
- 9 卢双舫, 付晓泰, 陈昕, 等. 原油族组分成气的化学动力学模型及其标定[J]. 地质学报, 1997, 71(4): 367~373
- 10 王建宝, 肖贤明, 郭汝泰, 等. 渤海湾盆地东营凹陷烃源岩生烃动力学研究[J]. 石油实验地质, 2003, 25(4): 403~409
- 11 胡锡麟, 戈葆雄, 张义纲, 等. 源岩吸附烃和天然气轻烃指纹参数的开发和应用[J]. 石油实验地质, 1990, 12(4): 375~393
- 12 胡国艺, 罗霞, 李剑, 等. 两种裂解气中轻烃组成差异性及其应用[J]. 天然气工业, 2005, 25(9): 23~25
- 13 李政, 李钜源, 徐兴友, 等. 济阳坳陷煤系烃源岩生物标志化合物与同位素对比研究[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(5): 696~701
- 14 林武, 李政, 李钜源, 等. 济阳坳陷孤北潜山带天然气成因类型分布规律[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(3): 429~426

(编辑 董立)

(上接第 84 页)

- 2 金奎励, 王宜林. 新疆准噶尔煤成油[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 109~124
- 3 张鹏飞, 金奎励, 吴涛, 等. 吐哈盆地含煤沉积与煤成油[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1997. 242~249
- 4 彭立才, 柯慧珠, 刘兰桂, 等. 柴达木盆地北缘侏罗系烃源有机相划分及评价[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(2): 178~181
- 5 Jones R. Organic facies[A]. In: Welte D, ed. Advance in petroleum geochemistry[M]. London: Academic Press, 1987. 1~89
- 6 Tyson R. Sequence stratigraphical interpretation of organic facies variation in marine siliciclastic system: general principal and application to the onshore Kimmeridge clay formation[A]. In: Hesselbo S, Parkinson D, eds. Sequence stratigraphy in British Geology[C]. London: Geology Society Special Publication, 1996. 75~96
- 7 杨明慧, 刘池洋. 鄂尔多斯中生代陆相盆地层序地层格架及多种能源矿产聚集[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(4): 563~570
- 8 陈洪德, 倪新锋. 陇东地区三叠系延长组沉积层序及充填响应特征[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(2): 143~151
- 9 胡见义, 黄第藩, 徐树宝, 等. 中国陆相石油地质理论基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991. 164~234
- 10 黄第藩, 华阿新, 王铁冠, 等. 煤成油地球化学新进展[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992. 1~20

- 11 温爱琴, 范久霄. 鄂尔多斯盆地镇-泾地区三叠系烃源岩地化特征及勘探前景[J]. 河南石油, 2003, 17(2): 15~17
- 12 马素萍, 漆亚玲, 张晓宝, 等. 西峰油田延长组烃源岩生烃潜力评价[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(3): 21~54
- 13 武明辉, 张刘平, 罗晓容, 等. 西峰油田延长组 8 段储层流体作用期次分析[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 33~36
- 14 李红, 柳益群, 刘林玉. 鄂尔多斯盆地西峰油田延长组 8-1 低渗透储层成岩作用[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(2): 209~217
- 15 Largeau C, Derenne S, Casadevall E, et al. Occurrence and origin of "ultralaminar" structure in "amorphous" kerogens of various source rocks and oil shale[J]. Organic Geochemistry, 1990, 16(4-6): 889~895
- 16 姚素平, 张景荣, 王可仁, 等. 鄂尔多斯盆地延安组煤有机岩石学研究[J]. 沉积学报, 1999, 17(2): 291~300
- 17 王双明. 鄂尔多斯盆地聚煤规律及煤炭资源评价[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996. 263~278
- 18 Diessel C. On the correlation between coal facies and depositional environments[R]. Newcastle, Australia: 20th Symposium, University of Newcastle, Australia, 1986. 19~22

(编辑 李军)