

渤海湾盆地板桥凹陷烃源灶与油气生成

陈敬轶, 王飞宇

中国石油大学(北京)资源与信息学院; 油气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249

摘要 板桥凹陷在中国东部新生代湖相盆地独具特色, 现今油气藏气油比 (GOR) 变化范围为 300~3000 m³/t, 大部分属于天然气饱和-超饱和油气藏。本文首先基于大量岩石热解数据和测井、录井等资料, 精细刻划了板桥凹陷烃源灶特征, 有效源岩主要位于沙一段和沙三段, 主体为 II₂-III 型, 有机质丰度为 1%~2% 的源岩对应的氢指数 (HI , 干酪根热解烃与总有机碳的比值) 在 100~300 mg/g 之间, 源岩成熟深度范围约为 3600~3800 m。在此基础上, 计算了沙一段和沙三段源岩的生排烃特征和组分, 结果表明, 板桥凹陷湖相源岩只有在生烃转化率达到 30% 左右、镜质体反射率 (R_o) 达 0.8% 以上才能实现排烃, 沙三段排出烃类 GOR 超过 600 m³/t, 沙一段排出烃类 GOR 相对较低, 大约为 222 m³/t, 与现今油气藏性质较为一致。中国东部更多的实例剖析表明, 源岩的 HI_o 和初始有机质丰度是控制油气藏 GOR 的关键性因素, 板桥凹陷天然气大量聚集成藏归因于腐殖型源岩的存在。

关键词 烃源灶; 油气生成; 气油比; 成熟度; 渤海湾盆地; 板桥凹陷

中图分类号 TE19

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)06-0078-05

Characteristics of Source Kitchen and Hydrocarbon Generation in Banqiao Sag, Bohaiwan Basin

CHEN Jingyi, WANG Feiyu

State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, Faculty of Natural Resource and Information Technology, China Petroleum University, Beijing 102249, China

Abstract Banqiao sag is the most exceptional feature of the Mesozoic and Cenozoic lacustrine basins in eastern China. Gas to Oil Ratio (GOR) of the present reservoirs ranges from 300 m³/t to 3000 m³/t, with most of reservoirs saturated or supersaturated with gas. Based on rock-Eval data and logging data, source kitchen characteristics were evaluated. Effective source rocks chiefly lie in the first and the third members of Shahejie formation, which are of types II₂-III. Total organic carbon ranges from 1% to 2%, which corresponds to Hydrocarbon Index (HI) of from 200 mg/g to 350 mg/g. The mature depth of the source rock is below 3600~3800 m. Consequently, characteristics and components of the hydrocarbon generation and expulsion can be calculated. Significant hydrocarbon expulsion begins when the transformation rate is about 30% and vitrinite reflectance is more than 0.8%. GOR s of the hydrocarbon expulsion from the first and the third members of Shahejie formation are over 600 m³/t and 222 m³/t, respectively, which is highly consistent with the property of the present reservoirs. The analyses of more regions in eastern China show that the initial hydrogen index (HI_o) and the initial total organic carbon are key factors to control GOR of reservoirs. Most of gases trapped in Banqiao sag are attributed to the humic source rock.

Keywords source kitchen; hydrocarbon generation; gas to oil ratio; maturity; Bohaiwan basin; Banqiao sag

0 引言

近 20 年来, 烃源岩的生排烃理论研究取得了重要进展, 进一步认识并明确了排烃机理及其控制因素^[1-7], 改进了模拟实验的方法^[8-9]、建立了有机相化学动力学分类和生排烃模型^[10-12], 这使生排烃理论在地质条件下得到广泛应用^[13-19]。本文在前人有关研究的基础上, 通过分析板桥凹陷烃源灶的生排烃特征, 揭示烃源岩排油气成分的主要控制因素, 并对比

现今凝析气藏、带油环的凝析气藏、纯气藏、油藏纵向上叠合分布的特征, 阐明了地质历史上烃源岩排出的油气成分 (气油比) 和现今油气藏分布特征之间的关系, 进一步认识板桥地区油气成藏富集规律。

1 板桥凹陷油气地质背景

板桥凹陷位于渤海湾盆地黄骅坳陷的中北部 (图 1), 为

收稿日期: 2009-12-23

作者简介: 陈敬轶, 博士研究生, 研究方向为石油地质与油气地球化学, 电子信箱: jingyich@163.com; 王飞宇 (通信作者), 教授, 研究方向为油气地球化学和地质学, 电子信箱: fywang@cup.edu.cn

一北东向展布的单断箕状凹陷,东北至海河断层,西南有北西向沈青庄潜山构造带,西北紧临沧县隆起,东南属于北大港潜山构造带,面积约为 540km²,主要受北东走向的大张坨和板桥 2 条主断层切割。在区域构造演化控制下,板桥凹陷

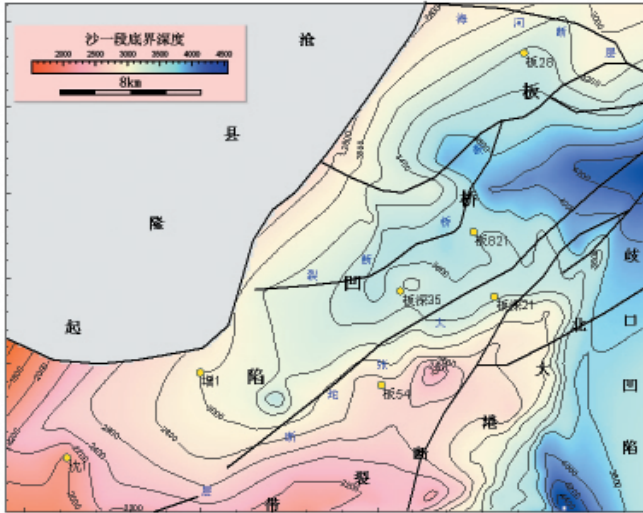


图 1 板桥凹陷构造位置图

Fig. 1 Tectonic locations of Banqiao sag

经历了以构造沉降为主的早期裂陷(始新世—渐新世)和以热沉降为主的晚期坳陷(中新世以后)两个阶段^[20]。主要发育了沙三段、沙一段和东三段 3 套源岩。

2 板桥凹陷烃源灶特征

板桥凹陷古近系源岩类型偏腐殖型,东营组和沙一段相对沙三段源岩类型较差,主体属于 III 型源岩,而沙三段属于 II₂—III 型源岩(图 2)。较好的源岩有机质丰度主要集中在 1%~2% 的范围,对应氢指数(HI,干酪根热解烃与总有机碳的比值)一般介于 100~300mg/g,平均为 180mg/g。有机质丰度大于 1%的沙三段源岩累计厚度为 300~400m,沙一段和东三段源岩厚度为 100~300m。有机质丰度大于 2%的各层段源岩数量很少。

从源岩 HI 和残留烃(TI)随深度的演化可以看出(图 3),在 3600~3800m 深度范围,HI 开始明显降低,而 TI 明显增加,说明在这个深度范围,源岩开始进入生排烃高峰期。镜质组反射率(R_o)分布特征表明,沙三段底界在凹陷中心的 R_o 高达 1.5%,凹陷边缘 R_o 为 0.7%左右,源岩总体处于生油窗的晚期阶段(图 4(a));沙一段烃源岩部分进入了生油窗阶段,R_o 一般为 0.65%~1%(图 4(b));东三段烃源岩 R_o 普遍小于 0.5%,为未熟—低熟源岩,不是主力生油源岩。

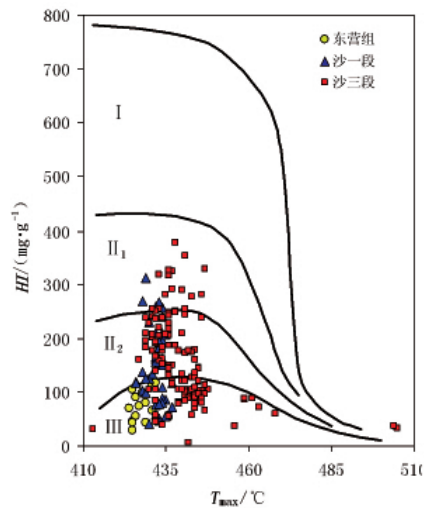


图 2 不同层段源岩有机质类型

Fig. 2 Organic matter type of source formations

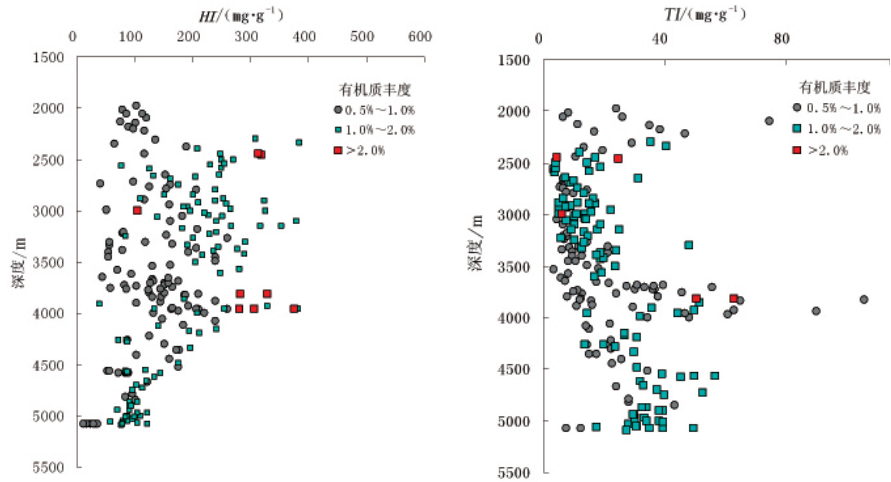


图 3 源岩 HI 和 TI 随深度的变化趋势

Fig. 3 Varying tendency of HI and TI rocks in different of source rocks with depth

3 源岩灶与油气成藏

3.1 生排烃模拟分析

按照 Pepper 和 Corvi (1995) 有机相化学动力学分类和动力学模型^[11],主要对有机相 C (初始氢指数 HI₀ 为 600mg/g, 偏腐泥型) 和有机相 D/E (HI₀ 为 333mg/g, 偏腐殖型) 两类源岩进行生烃对比模拟分析。按照生烃化学动力学和质量平衡法,在 Kinex 生烃动力学软件上实现 C₁₋₅ 烃类、C₆₊ 烃类生成和排

出数量随温度的变化(图 5)。

由图 5(a) 可得,腐泥型源岩生油窗和生气窗分别发生在 120~140℃、135~170℃范围,生烃转化率达到 0.15~0.2 时(R_o 约为 0.5%~0.6%)开始排烃;由图 5(b) 可得,腐殖型源岩生油窗和生气窗分别发生在 120~160℃、175~220℃范围,生油窗范围相对较宽,生烃转化率达到 0.3 以上(R_o 约为 0.8%~0.9%) 开始排烃,两种类型烃源岩生烃特征差别明显。

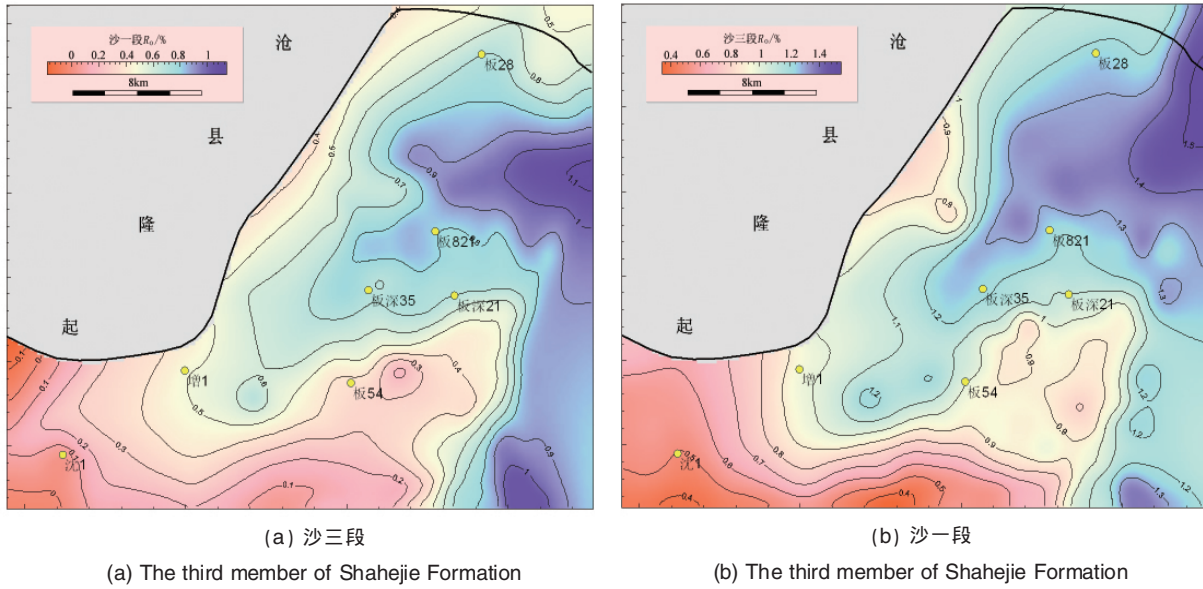


图 4 底部镜质组反射率分布

Fig. 4 Vitrinite reflectance distribution in the bottom

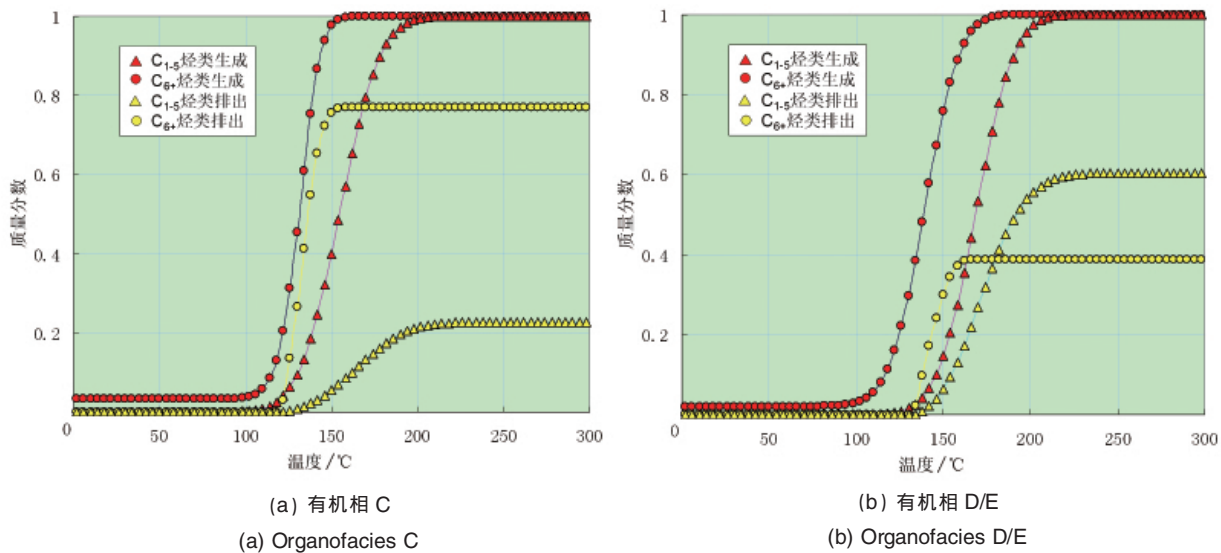


图 5 生排烃模式 (加热速率 $2^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$)

Fig. 5 Models of hydrocarbon generation and expulsion (heating rate of $2^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$)

源岩类型对排烃具有很大的控制作用,高质量的源岩(初始有机质丰度、 HI_0 较大)生烃很容易达到吸附上限,油气在低含油饱和度下即可优先排出^[21],即使是沥青质也能排出,排出的70%~80%都是液态烃^[22];而低质量的源岩(初始有机质丰度、 HI_0 较低)不能产生足够的 C_{1-5} 烃类来满足源岩吸附的需要,排出液态烃类比较困难,部分残留 C_{6+} 烃类可溶解在气态烃中排出,这有利于凝析气藏的形成,这类源岩一般能生油,但是不排油,排烃效率不高^[23]。陈中红等^[24]对东营凹陷牛38井古近系沙河街组不同类型烃源岩生排烃分析发现,I型干酪根与III型干酪根平均排烃量相差27倍。

综上所述,高有机丰度源岩排烃较早,生油窗范围较窄,

排出的GOR较低,主要为 C_{6+} 烃类;低有机丰度的源岩排烃相对滞后,因为较早生成的 C_{1-5} 烃类排出较为困难,部分可以溶解于气中排出,总体排出的GOR较高。

3.2 油气生成与油气成藏对比分析

基于板桥凹陷烃源灶定量表征和油气生排烃模型的建立,在Kinex3.5油气生成模拟分析软件上,计算了板桥凹陷沙三段和沙一段烃源岩油气的生成数量和成分(图6)。

沙三段排烃主要发生在东营组末期,排出油 3.77×10^8 (2753.54mmbbls),排出气 $0.25 \times 10^{12} \text{m}^3$ (8790.76bcf),油气比为 $661 \text{m}^3/\text{t}$ (3192.53scf/bbl),GOR相对较高,易形成气藏、凝析气藏;沙一段排烃发生在明化镇末期,生烃主要发生在凹陷中

心, 排出油 0.87×10^8 t (637.96mmbbls), 排出气 0.019×10^{12} m³ (684.49bcf), 油气比为 222m³/t (1072.94scf/bbl), GOR 相对较低, 易形成油藏。目前油气勘探表明, 板桥凹陷在埋深 1000~3000m 范围, 沙一段以上地层, 油质较重, GOR 一般小于

400m³/t; 沙一段以下第三系地层, 包括中生界、奥陶纪古潜山, 多为气藏、凝析气藏, GOR 较高, 一般大于 600m³/t。可见, 模拟分析结果和现今板桥凹陷“浅部油, 深部气”油气藏分布特征较为吻合。

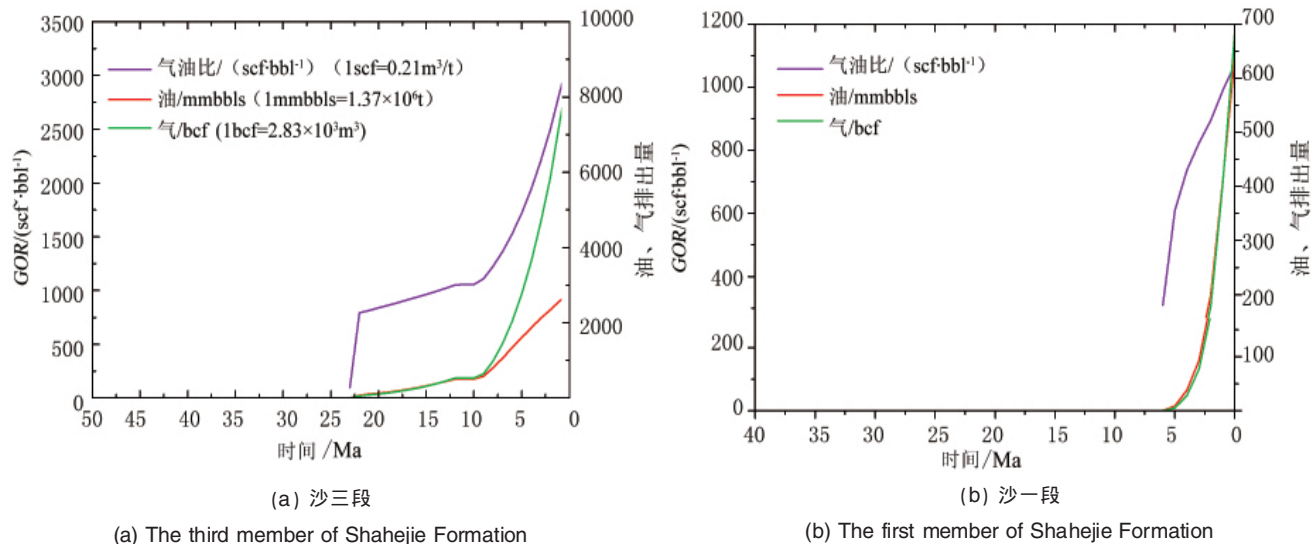


图 6 烃源岩油气生成过程

Fig. 6 Hydrocarbon generation process from source rocks

对比与板桥凹陷相邻的歧口凹陷油气成藏发现, 后者成藏以油为主, GOR 较低。因为歧口凹陷源岩质量较好, 沙三段和沙一段源岩主要以腐泥型为主, 这类源岩主要以生油为主, 如果生成的油大部分已经排出, 即使在高-过成熟阶段, 生成的天然气量也不大; 并且生成的少量天然气可以溶于生成的油中。腐泥型源岩为主的沉积盆地, 只要排出的油没有发生热裂解生气, 油气勘探应以找油为主, 只有腐殖型源岩深埋后才是优质的气源岩^[7]。

当然, 其他一些因素也会对油气性质有一定影响, 但相对源岩类型是次要的。例如, 成熟度不同, 排出的油和气具有差别; 盖层对油和气的封盖能力不同, 气比油容易散失, 不利于气藏形成; 地下特殊的温度和压力条件, 有利于凝析气藏的形成。

4 结论

1) 模拟分析表明, 不同类型或不同有机相的源岩排烃特征不同, 高有机质丰度腐泥型源岩生油窗范围较窄, 源岩排烃较早, 以 C₁₋₅ 烃类为主; 低有机质丰度的腐殖型源岩排烃相对滞后, 生气窗范围较宽, 生油窗阶段排出烃类含有更多的 C₆₊ 烃类, GOR 较低。

2) 理论分析和实例对比显示, 控制烃源岩排烃成分的主要因素是有机质类型或有机相 (初始有机质丰度、HI₀), 源岩的 HI₀ 和初始有机质丰度越低, 形成油气藏 GOR 越高, 反之, 形成油气藏 GOR 越低。另外, 成熟度、盖层的封盖能力等因素对油气藏性质也有一定的影响。

3) 高-过成熟的倾气性源岩易形成大规模天然气聚集的场面, 目前板桥凹陷天然气勘探前景远大于石油勘探前景。

致谢: 本研究得到大港油田勘探开发研究院肖敦清总地质师、蒲秀刚博士等帮助, 部分研究在 Zetaware 公司提供的生烃动力学软件 Kinex 和油气系统模拟软件 Trinity 中实现, 在此一并感谢。

参考文献 (References)

- [1] Sandvik E I, Young W A, Curry D J. Expulsion from hydrocarbon sources: The role of organic absorption [J]. *Organic Geochemistry*, 1992, 19(1-3): 77-87.
- [2] 王新洲, 周迪贤, 王学军. 烃源岩中残留死油量与运移阈值的讨论 [J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(2): 17-23.
Wang Xinzhou, Zhou Dixian, Wang Xuejun. *Petroleum Exploration and Development*, 1995, 22(2): 17-23.
- [3] 庞雄奇. 排烃门限控油气理论及应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
Pang Xiongqi. The theory of Hydrocarbon expulsion threshold controlling oil and gas and its application [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [4] 庞雄奇, 陈章明, 陈发景. 排烃门限的基本概念、研究意义与应用 [J]. 现代地质, 1997, 11(4): 510-521.
Pang Xiongqi, Chen Zhangming, Chen Fajing. *Geoscience*, 1997, 11(4): 510-521.
- [5] Inan S, Yalcin M N, Mann U. Expulsion of oil from petroleum source rocks: inferences from pyrolysis of samples of unconventional grain size [J]. *Organic Geochemistry*, 1998, 29(1-3): 45-61.
- [6] 陈中红, 查明. 济阳坳陷古近系烃源岩结构及排烃的非均一性 [J]. 石

- 油勘探与开发, 2003, 30(6): 45-47.
- Chen Zhonghong, Zha Ming. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(6): 45-47.
- [7] 王飞宇, 李洋冰, 曾花森, 等. 渤海湾盆地渤中坳陷气油比的控制因素及勘探意义[J]. 中国海上油气, 2006, 18(5): 289-295.
- Wang Feiyu, Li Yangbing, Zeng Huasen, et al. *China offshore oil and gas*, 2006, 18(5): 289-295.
- [8] Horsfield B. Practical criteria for classifying kerogens: Some observations from pyrolysis-gas chromatography[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53: 891-901.
- [9] Lafargue E. Experimental simulation of hydrocarbon expulsion[J]. *Organic Geochemistry*, 1990, 16(1-3): 121-131.
- [10] Tegelaar E W, Noble R A. Kinetics of hydrocarbon generation as a function of the molecular structure of kerogen as revealed by pyrolysis-gas chromatography[J]. *Organic Geochemistry*, 1993, 22(3-5): 543-574.
- [11] Pepper A, Corvi P. Simple kinetic models of petroleum formation(Part I: oil and gas generation from kerogen)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1995, 12(3): 291-319.
- [12] Pepper A, Corvi P. Simple kinetic models of petroleum formation(Part II: oil-gas cracking)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1995, 12 (3): 321-340.
- [13] 刘金钟, 唐永春. 多冷阱热解气相色谱仪对生烃动力学的研究[J]. 科学通报, 1996, 41(10): 1021-1024.
- Liu Jinzhong, Tang Yongchun. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41(10): 1021-1024.
- [14] Tang Y, Stauffer M. Multiple cold trap pyrolysis gas chromatography: A new technique for modeling hydrocarbon generation [J]. *Org Geochem*, 1994, 22(3-5): 863-872.
- [15] Welte D H, Horsfield B, Baker D R. Petroleum and basin evolution: insights from petroleum geochemistry, geology and basin modeling [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1997.
- [16] Behar F, Vandenbroucke M, Tang Y, et al. Thermal cracking of kerogen in open and closed systems: determination of kinetic parameters and stoichiometric coefficients for oil and gas generation [J]. *Org Geochem*, 1997, 26(5/6): 321-339.
- [17] 熊永强, 耿安松, 刘金钟, 等. 生烃动力学模拟实验结合 GC-IRMS 测定在有效气源岩判识中的应用[J]. 地球化学, 2002, 31(1): 21-25.
- Xiong Yongqiang, Geng Ansong, Liu Jinzhong, et al. *Geochimica*, 2002, 31(1): 21-25.
- [18] 高喜龙, 肖贤明, 刘中云, 等. 用开放体系的热解方法对烃源岩生烃动力学的研究: 以东营凹陷某生油岩为例 [J]. 地球化学, 2003, 32(5): 485-490.
- Gao Xilong, Xiao Xianming, Liu Zhongyun, et al. *Geochimica*, 2003, 32 (5): 485-490.
- [19] Primio R di, Horsfield B. From petroleum-type organofacies to hydrocarbon phase prediction[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(7): 1031-1058.
- [20] 邱中建, 龚再生. 中国油气勘探 (第三卷)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 604-606.
- Qiu Zhongjian, Gong Zaisheng. Oil-gas exploration in China(Vol III)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 604-606.
- [21] Okui A, Waples D W. Relative permeabilities and hydrocarbon expulsion from source rocks[C]// NPF Conference: Basin Modelling, Advances and Applications, 1991.
- [22] Pepper A, Corvi P. Simple kinetic models of petroleum formation(Part III: Modeling an open system)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1995, 12(4): 417-452.
- [23] Thomas M, Clouse J A. Primary migration by diffusion through kerogen: II. Hydrocarbon diffusivities in kerogen[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(10): 2781-2792.
- [24] 陈中红, 查明. 烃源岩排烃作用研究现状及展望 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 459-465.
- Chen Zhonghong, Zha Ming. *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20(4): 459-465.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·



“2010中国材料研讨会”征文

“2010中国材料研讨会”将于2010年6月18-21日在湖南长沙市举行,会议由中国材料研究学会主办,中南大学、湘潭大学、湖南大学、国防科技大学承办,中国科学技术协会、国家科技部、国家自然科学基金委员会等单位支持协办。

会议征文范围如下:先进钢铁材料;有色金属材料与加工技术;纳米材料和应用技术;先进储能材料;智能材料;超导材料;热电材料;磁性材料;特种粉体材料与技术;多孔材料;杂化功能材料与纳米纤维;生态环境材料与应对气候变化技术;非晶和高熵合金;材料计算与应用;材料表面与界面;先进材料测试及表征;轻合金材料;高性能陶瓷材料;先进复合材料;材料产业论坛;材料教育论坛(教指委);新材料、新工艺、新技术展览会。摘要截稿日期:2010年4月5日,全文截稿日期:2010年5月30日。

联系方式:北京市海淀区紫竹院路62号赛迪大厦4102室(100048),陈辉。

电话:010-68710443;传真:010-68722033;电子信箱:c-mrs@163.com。