

文章编号: 1001-6112(2009)04-0399-04

渤海湾盆地渤中凹陷原油成熟度的多参数综合评价

倪春华¹, 包建平², 梁世友¹

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151;

2. 长江大学 地球化学系, 湖北 荆州 434023)

摘要:成熟度是表征原油与烃源岩有机质演化阶段的地球化学参数, 是进行油—源对比的基础, 所以其评价方法显得很重要。利用轻烃、芳烃及甾萜类成熟度参数对渤海湾盆地渤中凹陷主要含油气构造第三系原油进行了综合分析, 按照成熟度的相对高低, 将其划分为高成熟凝析油和成熟原油: 前者主要分布在渤中凹陷的西南部, 表现为高石蜡指数(PI_1)、高庚烷值(PI_2)和高甲基菲比值(F_1, F_2); 其它区域的则属于成熟原油, 具有与前者相反的参数特征。对于未遭受生物降解作用的原油成熟度评价, PI_1 — PI_2, F_1 — F_2 的使用效果较好。原油成熟度的差异性也反映了渤中凹陷的油源存在多源性, 成藏存在多期性。

关键词:原油; 成熟度参数; 综合评价; 第三系; 渤中凹陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.113

文献标识码: A

OVERALL EVALUATION BY MULTI-PARAMETERS ON MATURITY OF CRUDE OIL FROM THE BOZHONG SAG, THE BOHAI BAY BASIN

Ni Chunhua¹, Bao Jianping², Liang Shiyu¹

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China;

2. Geochemistry of Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China)

Abstract: Maturity is the geochemical parameter that shows the relationship between crude oil and evolution stage of organic matter of source rock, which is the base of oil—source correlation, so evaluating method is very important. Effective appraisal range and applying condition need to be considered to use maturity parameters. Through overall evaluation on maturity by parameter of light hydrocarbon, aromatic hydrocarbon and sterane & terpane, according to the relative high or low of maturity, the Tertiary oils in the Bozhong Sag of the Bohai Bay Basin are divided into two kinds: high—mature condensate oil and mature oil. High—mature condensate oil has high paraffin index, heptane value and methyl phenanthrene ratio, which mainly distribute in the southwest of the sag. Mature oil has contrary parameter characteristic. The result also shows there are multi—fountain source and multi—period reservoir in the Bozhong Sag.

Key words: oils; maturity parameters; integrated evaluation; Tertiary; Bozhong Sag; Bohai Bay Basin

渤中凹陷位于渤海海域中部, 是渤海湾盆地中最大的凹陷, 油气资源十分丰富。前人研究发现, 该地区存在着降解原油与正常原油共存、低成熟原油与高成熟天然气共存的现象^[1]。成熟度是表征原油与烃源岩有机质演化阶段的地球化学参数, 是进行油—源对比的重要基础。目前从定量角度确定原油的成熟度相对较难, 因为还没有一个可靠的定量指标能够像镜质体反射率(R_o)那样来反映原油的真实成熟度, 因此对原油成熟度的评价多属于定性或者半定量。为了比较真实地反映渤中凹陷

第三系原油的成熟度, 笔者系统采集了该凹陷主要含油气构造上的 19 个原油样品, 通过轻烃、芳烃和甾萜类成熟度参数的综合研究, 对该区原油进行了评价。

1 区域地质背景

渤中凹陷位于渤海湾盆地的中部(图 1), 北有石臼坨凸起, 南为渤南凸起, 西邻沙垒田凸起, 东以渤东低凸起与渤东凹陷相隔, 面积约为 8 600 km², 发育了古近系(孔店组、沙河街组、东营组), 新近系

收稿日期: 2008-07-04; 修订日期: 2009-07-01。

作者简介: 倪春华(1981—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事石油地质与油气地球化学研究工作。E-mail: nichunhua@mail.wuxisuo.com。

基金项目: 国家“十五”重点攻关项目(2001BA605A02-03-01)。

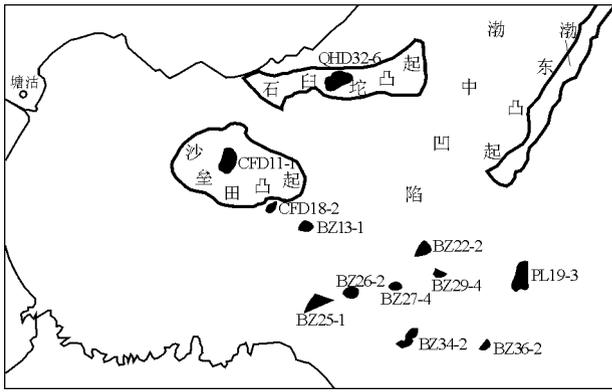


图 1 渤海湾盆地渤中凹陷构造及原油取样位置分布示意

Fig. 1 Distribution sketch map of oil samples and structural unit in the Bozhong Sag of the Bohai Bay Basin

(馆陶组、明化镇组)和第四系,凹陷内新生界最大沉积厚度超过 12 000 m,生烃物质基础相当雄厚^[2]。渤中凹陷发育了 2 个区域性不整合面,分别对应于沙河街组三段沉积末期和东营组沉积末期。可将凹陷沉积盖层分为 3 个组合:沙三、四段断陷沉积组合;沙一、二段和东营组断坳沉积组合;新近系和第四系坳陷沉积组合。

渤中凹陷古近纪断裂活动强烈,并控制了沉积作用,沉积厚度为 3 000~4 000 m。至东营组沉积期,断层拉张活动和沉降速率有所减弱,但沉积厚度一般仍大于 2 000 m。渤中凹陷烃源岩发育层位主要为沙四段、沙三段、东三段和东二段;主要含油气构造包括 BZ13-1, BZ25-1, BZ26-2 等(图 1)。

2 原油样品分析测试

本次研究共系统采集了原油样品 19 个,基本覆盖了渤中凹陷的主要含油气构造(图 1),层位上由下而上包括第三系沙河街组(E_s)、东营组(E_d)、馆陶组(N_g)、明化镇组(N_m)。

样品的分析测试由江汉石油学院分析测试中心完成,实验方法如下。

密度:采用毛细管塞比重瓶法,将原油样品装入比重瓶,恒温至 20 °C,称出其质量;粘度:使用旋转粘度计测量原油粘度;含硫量:将原油样品放在 X 射线管发出的射线束中,测定能量为 2.3 keV 的硫的特征谱线强度;含蜡量:原油样品经氧化铝色谱柱分离出油蜡部分,以甲苯—丙酮混合物为脱蜡溶剂,用冷冻结晶法测定。表 1 列出了原油样品物性参数的测试结果。

轻烃分析:采用 HP5890A 气相色谱仪和 50 m × 0.25 mm 的 PONA 毛细管柱;起始温度为 30 °C,恒温 10 min,然后以 1 °C/min 的升温速率,升温至 70 °C;再以 3 °C/min 的升温速率,升温至 200 °C,在 200 °C 恒温 20 min;用 FID 检测器检测。

GC-MS 分析:采用 HP5890 色谱仪和 5973 MSD 台式质谱仪;色谱柱为 HP-5ms 石英弹性毛细柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm);升温程序设计为:50 °C 恒温 2 min,从 50 °C 至 100 °C 的升温速率为 20 °C/min,100 °C 至 310 °C 的升温速率为 3 °C/min,310 °C 恒温 15.5 min;进样器温度 300 °C;载气

表 1 原油样品的物性参数

Table 1 The parameters of physical properties of oil samples

样品号	井号	层位	埋深/m	密度/ (g · cm ⁻³)	粘度/ (Pa · s)	含硫量, %	含蜡量, %	25-降萘烷/ (μg · mg ⁻¹)	原油性质
1	BZ13-1-2	E_d		0.803 0	1.85	0.022	11.20	0.00	凝析油
2	BZ22-2-1st		4 185.5~4 348.5					0.00	凝析油
3	BZ25-1-5	E_s^3	3 660~3 690	0.866 3	10.14	0.126	24.24	0.00	正常油
4	BZ25-1-5	E_s^2	3 323~3 339	0.856 7	8.20	0.124	29.69	0.00	正常油
5	BZ25-1-6		1 676~1 682	0.947 1	294.70	0.292	8.90	1.62	降解油
6	BZ25-1-7		1 473~1 485	0.927 4	56.38	0.203	5.41	1.39	降解油
7	BZ26-2-1	E_d^2	3 003.88~3 034.4	0.745 7	0.80	0.027	0.92	0.00	凝析油
8	BZ26-2-1	N_g	2 282~2 300	0.849 9	5.61	0.141	5.29	0.88	降解油
9	BZ26-2-1	N_g	2 480~2 490	0.810 4	1.86	0.123	4.42	0.77	降解油
10	BZ27-4-2	E_d^3	3 689.23~3 789.5	0.827 8	2.96		12.30	0.00	轻质油
11	BZ29-4-1	N_m	1 431~1 445	0.925 2	49.69	0.224	7.31	1.08	降解油
12	BZ34-2-1	E_s^3	3 337~3 376	0.859 0	7.89	0.132	20.50	0.00	正常油
13	BZ36-2-1	E_d^3	2 123~2 170	0.896 1	32.61	1.315	6.30	0.00	正常油
14	CFD18-2e-1	E_d^3	3 690~4 000	0.779 5	1.07	0.020	14.24	0.00	凝析油
15	PL19-3-2		1 349~1 380	0.925 7	78.81	0.311	3.58	0.76	降解油
16	PL19-3-5		1 259.5~1 275	0.960 6	676.60	0.349	4.04	4.13	降解油
17	PL19-3-5		1 131.6					3.51	降解油
18	QHD32-6-1		1 251~1 332	0.920 5	53.00	0.170	6.76	0.54	降解油
19	QHD32-6-8		1 286~1 290	0.942 9	229.00	0.227	6.80	0.81	降解油

为氦气,流速为 1.04 mL/min;扫描范围为 50~550;检测方式为全扫描。

3 原油成熟度研究

3.1 生物降解作用判别

理论研究表明,对于原油中由于次生原因(生物降解)所形成的 25-降藿烷化合物,其含量的高低与所受生物降解程度成一定程度的正相关关系,即生物降解程度越严重,则 25-降藿烷化合物的丰度或浓度就越高,笔者曾使用该方法并取得较好的效果^[3]。本次研究所取 19 个原油样品的生物降解作用判别结果详见表 1。

3.2 轻烃成熟度参数评价

轻烃一般指沸点小于 200 °C 的烃类化合物,包括正构烷烃、异构烷烃、环烷烃和芳烃类化合物,目前分析并应用于油气勘探研究的主要是 C₁—C₇ 化合物^[4]。石蜡指数(PI_1)和庚烷值(PI_2)是 2 个轻烃成熟度参数。一般成熟原油的 PI_1 和 PI_2 值分别介于 2~3 和 22%~30%,大于这一数值或低于这一数值的原油被认为是高成熟原油或低成熟原油^[5]。由于渤中凹陷的大多数原油遭受生物降解作用,其轻烃大多遭受了严重损失,这里着重讨论未遭受生物降解作用原油的 PI_1 和 PI_2 值。

如图 2 所示,除了 BZ25-1 构造上的两原油样品的 $PI_1 < 2.0, PI_2 < 22%$ 以外,其它非降解原油均处于成熟原油与高成熟原油范围内,其中位于渤中凹陷西南部的凝析油成熟度最高,表现为 PI_1 和 PI_2 值最大,其次为轻质油,而正常原油的 PI_1 和 PI_2 值最低。显然 PI_1 和 PI_2 值这 2 个轻烃成熟度参数基本能够反映非降解原油的真实成熟度;同时也表明原油的密度越小,其 PI_1 和 PI_2 值就越大。

3.3 芳烃成熟度参数评价

用于研究原油成熟度的芳烃成熟度参数较多,

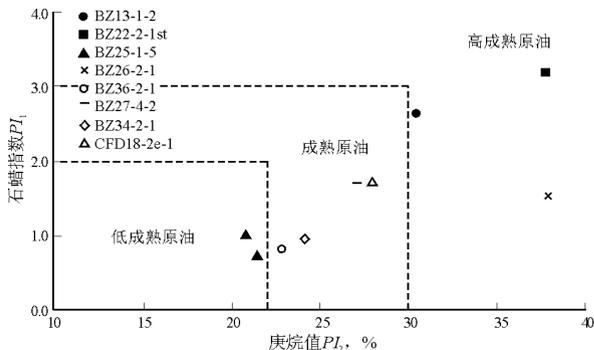


图 2 渤海湾盆地渤中凹陷非降解原油 PI_1 和 PI_2 的关系
Fig.2 Relationship between PI_1 and PI_2 of unbiodegraded oil from the Bozhong Sag of the Bohai Bay Basin

包括烷基萘、甲基菲指数及甲基菲比值等,但需要注意生物降解作用对芳烃成熟度参数的影响^[3]。故此,本文主要应用甲基菲指数和甲基菲比值来评价未遭受生物降解作用原油的成熟度。

甲基菲指数(MPI ,包括 MPI_1 和 MPI_2)是由 Radke 等首先提出用菲及甲基菲异构体的相对丰度进行计算的成熟度参数^[6]。渤中凹陷非降解原油的甲基菲指数 MPI_1 一般介于 0.50~1.00 之间, MPI_2 则一般介于 0.60~1.10 之间, BZ13-1-2 井和 BZ22-2-1st 井凝析油的 MPI_1 分别高达 1.10 和 1.08, MPI_2 亦高达 1.17 和 1.20(图 3)。这表明该参数与成熟度之间存在较好的正相关性。

包建平等在进一步研究甲基菲指数计算公式的基础上,提出了甲基菲比值(MPR ,包括 F_1 和 F_2),并进行了应用,结果表明后者与成熟度的相关关系明显优于前者,并且后者能较好地把成熟油和高成熟油区分开来^[7]。如图 4 所示,甲基菲比值

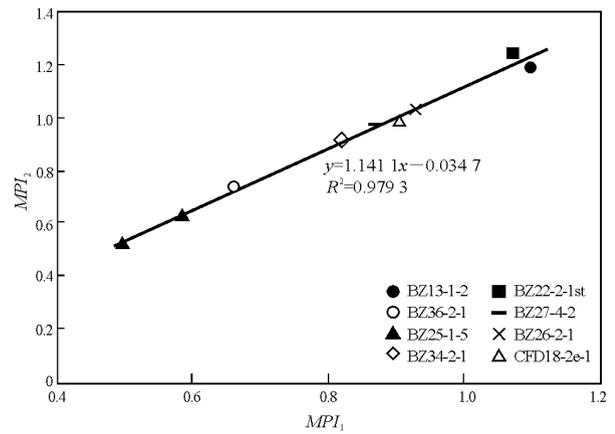


图 3 渤海湾盆地渤中凹陷非降解原油甲基菲指数 MPI_1 和 MPI_2 的关系

Fig.3 Relationship between MPI_1 and MPI_2 of unbiodegraded oil from the Bozhong Sag of the Bohai Bay Basin

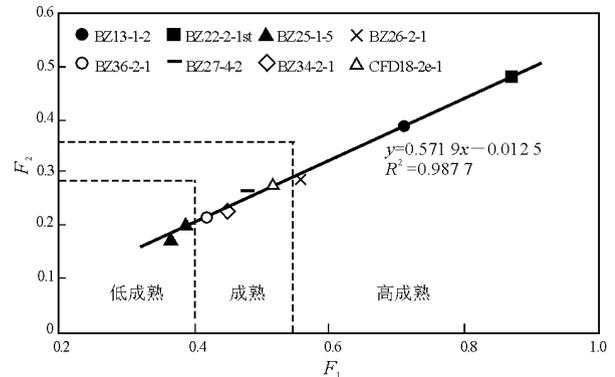


图 4 渤海湾盆地渤中凹陷非降解原油甲基菲比值 F_1 和 F_2 的关系

Fig.4 Relationship between F_1 and F_2 of unbiodegraded oil from the Bozhong Sag of the Bohai Bay Basin

F_1 一般分布在 0.40~0.70 之间, BZ13-1-2 井和 BZ22-2-1st 井凝析油该值分别高达 0.72 和 0.87, 落在高成熟油范围内。这一结果与前文采用轻烃成熟度参数评价的结论是一致的。对比甲基菲指数 MPI_1 和 MPI_2 的关系及甲基菲比值 F_1 和 F_2 的关系不难发现, 甲基菲比值较甲基菲指数能更为有效地反映有机质的真实热演化程度。

3.4 甾萜类成熟度参数评价

甾萜类成熟度参数是最常用的衡量原油成熟度的指标, 包括 C_{29} 甾烷异构体比值 [$C_{29} \alpha\alpha\alpha 20S / (20S+20R)$] 和 Ts/Tm 比值。如图 5 所示, 渤中凹陷原油的 C_{29} 甾烷异构体比值均较高, 大多数原油的 $C_{29} \alpha\alpha\alpha 20S / (20S+20R)$ 值大于 0.40, 表明这些原油大多属于成熟原油, 而且对于未遭受生物降解作用的原油, 该比值基本能够反映其热演化程度。

但需要注意的是, 其中有相当一部分原油的 $C_{29} \alpha\alpha\alpha 20S / (20S+20R)$ 值分布在 0.60~0.80 之间, 大于 0.55 的平衡值, 这可能与渤中凹陷大多数原油曾遭受过生物降解作用有关, 由于 20R 先于 20S 构型的化合物受到微生物的破坏, 因而导致该比值变大^[8]。另外, 对于未遭受降解作用的凝析油 BZ22-2-1st 样品该值仅为 0.28, 而事实上其已达到高成熟阶段, 这一现象表明甾烷异构体比值作为成熟度参数有其特定的适用范围, 实际应用时还应结合其它成熟度参数进行综合分析。

Ts/Tm 比值能够反映原油成熟度的相对高低。如图 6 所示, 未降解原油的 Ts/Tm 比值基本上随着热演化程度的升高而增大, 其中 BZ13-1-2 井凝析油的 Ts/Tm 比值高达 4.31, 显示了其高成熟度的特征, 这一结果与运用轻烃、芳烃成熟度参数判别的结论相吻合。但是同为凝析油的 BZ22-2-1st 样

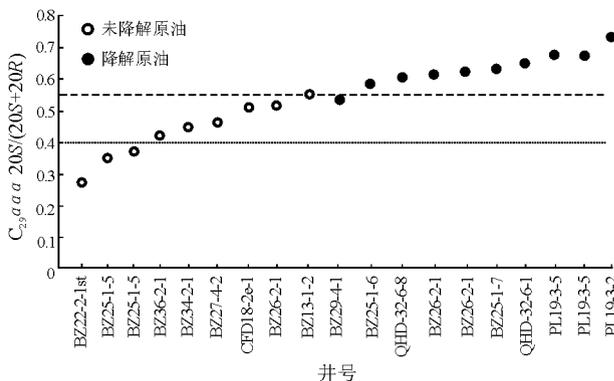


图 5 渤海湾盆地渤中凹陷原油 C_{29} 甾烷异构体成熟度参数分布特征

Fig. 5 Distribution characteristic of maturity parameters of C_{29} sterane isomer of crude oil from the Bozhong Sag of the Bohai Bay Basin

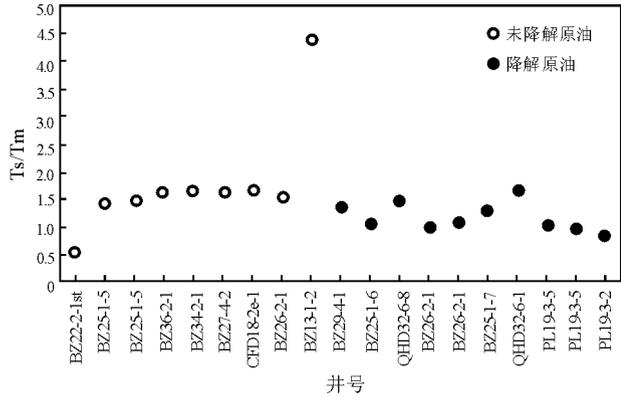


图 6 渤海湾盆地渤中凹陷不同原油 Ts/Tm 比值的分布特征

Fig. 6 Distribution characteristic of Ts/Tm value of different crude oil from the Bozhong Sag of the Bohai Bay Basin

品的比值仅为 0.44, 这与前文的评价结果产生矛盾。如何解释这一现象呢? 原因可能是 Ts/Tm 比值这一评价参数不仅与成熟度有关, 而且还受有机相的影响^[9]。

4 结论

1) 原油成熟度的评价无法直接利用 R_o 来判别, 只能借助于分子成熟度参数, 而使用这些参数时, 应充分考虑它们各自的适用条件和有效评价区间, 并进行相互检验。

2) 遇到遭受生物降解作用的原油时, 应先区分降解原油和非降解原油, 然后使用成熟度参数对非降解原油的成熟度进行判识, 最终得出客观真实的评价结果。

3) 通过对渤海湾盆地渤中凹陷第三系原油成熟度的综合评价, 建议优先选用 $PI_1 - PI_2$ 和 $F_1 - F_2$ 这两对参数来进行判别。渤中凹陷第三系原油按成熟度的相对高低分为高成熟凝析油和成熟原油两类: 前者主要分布在凹陷的西南部, 主要表现为高石蜡指数、高庚烷值、高甲基菲比值; 其它区域则属于成熟原油, 具有相反的参数特征。另外, 原油成熟度的差异性也反映了该地区的油源存在多源性, 成藏存在多期性。

参考文献:

- 李秀芬, 葛玲, 王刚. 渤中—渤南地区油气多期运聚成藏的地球化学特征[J]. 中国海上油气(地质), 2001, 15(1): 79~82
- 包建平, 张功成, 朱俊章等. 渤中凹陷原油生物标志物特征与成因类型划分[J]. 中国海上油气(地质), 2002, 16(1): 11~18
- 倪春华, 包建平, 顾忆. 生物降解作用对芳烃生物标志物参数的影响研究[J]. 石油实验地质, 2008, 30(4): 386~389

2) 英南 2 井气藏轻烃组分可通过水锁效应致密砂岩的气体扩散相进行扩散散失,也可在未发生水锁效应的致密砂岩气藏边缘区进行渗透散失;气藏边缘区的渗透散失强于气藏区的扩散散失,这种轻烃组分微渗漏差异是气藏上方吸附丝轻烃指标(C₂₋₈)剖面曲线“驼峰”形态特征的形成原因,气藏边缘区是 C₂₋₈ 指标的高值异常区(“驼峰”),而气藏区是 C₂₋₈ 指标的次高值异常区。

3) 英南 2 井气藏上方二吸附丝指标异常模式及配置关系对孔雀 1 井的钻前预测得到了后期勘探结果的有效验证,对英吉苏致密砂岩区和孔雀河古斜坡区的油气勘探亦具有借鉴意义。

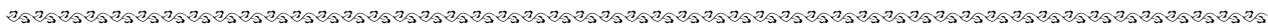
致谢:本文写作过程中,得到了赵克斌教授、程同锦教授的指导和支 持,在此表示感谢。

参考文献:

- 1 程同锦,李广之,陈银节. 吸附烃提取新技术及其在地表油气化探中的应用[J]. 石油实验地质,2007,29(2):116~119
- 2 侯镜德,张逢玉,冯建跃. 吸附丝法研究油气垂直运移理论[J]. 化学学报,1994,52:1194~1198
- 3 阮天健,费琪. 石油与天然气地球化学勘探[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1992. 46~52,67~83
- 4 蒋涛,夏响华,陈浙春. 地球化学烃场效应的探讨及应用[J]. 石油实验地质,2003,25(3):290~294
- 5 蒋涛,陈银节,赵克斌等. 已知油气藏上方油气化探指标的有效性分析[J]. 石油实验地质,2008,30(2):207~211
- 6 李红梅,夏斌,程军等. 东营凹陷花沟地区 CO₂ 气藏化探指标综合评价[J]. 油气地质与采收率,2007,14(1):44~46

- 7 杨永才,常象春,张枝焕等. 英吉苏凹陷天然气地球化学特征[J]. 天然气工业,2006,26(8):12~15
- 8 Masters J A. Deep basin gas trap[J]. AAPG Bulletin,1979,63(2):152~181
- 9 Leythaeuser D. Schaefer R G. Yukler A. Role of diffusion in Primary migration of hydrocarbon[J]. AAPG Bulletin, 1982, 66(4):408~429
- 10 金之钧,张金川,王志欣. 深盆地成藏关键地质问题[J]. 地质论评,2003,49(4):400~407
- 11 张金亮,张金功. 深盆地气藏的主要特征及形成机制[J]. 西安石油学院学报,2001,16(1):1~7
- 12 杨晓宁,张惠良,朱国华. 致密砂岩的形成机制及其地质意义[J]. 海相油气地质,2005,10(1):31~36
- 13 杨晓宁,王国林,张丽娟等. 塔里木盆地英南 2 井侏罗系气藏性质[J]. 新疆石油地质,2003,24(3):218~220
- 14 Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartment[J]. AAPG Bulletin,1990, 74(1):1~12
- 15 刘玉魁,胡剑风,闵磊等. 塔里木盆地英吉苏凹陷成藏机理分析[J]. 天然气工业,2004,24(10):6~9
- 16 尹小勇,宋海华. 基于扩散热能和自由体积的扩散模型[J]. 天津大学学报,2006.39(10):1157~1161
- 17 蒋涛,吴瑞金,程同锦等. 化探技术在我国西部油气勘探中的应用探讨[J]. 天然气地球科学,2007,18(1):117~120
- 18 蒋涛,汤玉平,程同锦. 塔北某区油气藏上方吸附丝指标异常模式研究[J]. 天然气工业,2003(增刊):32~34.
- 19 杨铭,汤达祯,邢卫新等. 塔里木盆地孔雀河古斜坡成藏条件新认识[J]. 石油实验地质,2007,29(3):275~279
- 20 张丽娟,顾乔元,邸宏利等. 英吉苏地区致密砂岩盖层形成机理及其分布预测[J]. 中国石油勘探,2003,8(4):24~28

(编辑 徐文明)



(上接第 402 页)

- 4 蒋启贵,张彩明,张美珍等. 岩石 C₆—C₁₅ 轻烃定量分析方法研究[J]. 石油实验地质,2007,29(5):512~516
- 5 许怀先,陈丽华,万玉金等. 石油地质实验测试技术与应用[M]. 北京:石油工业出版社,2001. 43~62
- 6 Radke M, Welte D H, Wilisch H. Geochemical study on a well in the Western Canada Basin: relation of the aromatic distribution pattern to maturity of organic matter [J]. Geochimica et

- Cosmochimica Acta,1982,46(1):1~10
- 7 包建平,王铁冠,周玉琦等. 甲基菲比值与有机质热演化的关系[J]. 江汉石油学院学报,1992,14(4):8~13
- 8 张渠,宋晓莹,张志荣. 原油中甾烷的生物降解模拟实验研究[J]. 石油实验地质,2007,29(1):99~102
- 9 彼得斯 K E,莫尔多万 J M. 生物标记化合物指南[M]. 北京:石油工业出版社,1995. 156~165

(编辑 徐文明)