

# 高邮凹陷原油轻烃地球化学特征及 群组划分

宋宁<sup>1</sup>, 郭海莹<sup>1</sup>, 侯鹏飞<sup>1</sup>, 杨帅帅<sup>1</sup>, 王广利<sup>2</sup>, 胡建东<sup>3</sup>

1. 常州大学石油工程学院, 常州 213016
2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249
3. 胜利油田渤海钻井一公司钻井32533队, 东营 257237

**摘要** 高邮凹陷是苏北盆地油气潜力最大的凹陷, 对该凹陷马家嘴、黄珏、富民、永安等9大油田原油样品的C<sub>6</sub>~C<sub>7</sub>轻烃特征、Mango轻烃参数及轻烃对比、蚀变星图和成熟度参数展开系统对比研究。C<sub>6</sub>~C<sub>7</sub>轻烃中富含正己烷, 苯相对含量低, 正庚烷、甲基环己烷和二甲环戊烷的相对含量相差不大, 显示高邮凹陷原油母质类型为腐泥-腐殖型。Mango轻烃参数K<sub>1</sub>平均值为0.97, 表明高邮凹陷原油具有相似的沉积环境; 上含油气系统的K<sub>2</sub>较大, 平均值为0.31, 表明陆源输入较大; 中含油气系统的K<sub>2</sub>较小, 平均值为0.22, 表明水源输入较大, 下含油气系统介于两者之间, K<sub>2</sub>平均值为0.27。由轻烃星图对比、庚烷值和异庚烷指数显示, 上含油气系统的成熟度高, 保存条件好; 中含油气系统原油成熟度低, 受次生演化作用明显; 下含油气系统原油处于成熟阶段。

**关键词** 轻烃; 原油; 地球化学特征; 高邮凹陷; 群组划分

**中图分类号** TE122.1<sup>13</sup>

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.06.006

## Geochemical Characteristics and the Group Division of Light Hydrocarbons in Crude Oil from Gaoyou Sag

SONG Ning<sup>1</sup>, GUO Haiying<sup>1</sup>, HOU Pengfei<sup>1</sup>, YANG Shuaishuai<sup>1</sup>, WANG Guangli<sup>2</sup>, HU Jiandong<sup>3</sup>

1. School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China
2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
3. Drilling Team 32533, Bohai Drilling Company 1, Shengli Oilfield, Dongying 257237, China

**Abstract** Gaoyou sag has the greatest potential in oil and gas reserves in Subei Basin. This paper investigates the characteristics of C<sub>6</sub>, C<sub>7</sub> light hydrocarbons from nine oilfields in Gaoyou sag, their Mango parameters, the transformation star diagram and maturity degree of crude oils, and makes comparisons among them. C<sub>6</sub> light hydrocarbon is rich in *n*-hexane, and relatively poor in benzene. Among the components of C<sub>7</sub> light hydrocarbon, the contents of *n*-heptane, methyl cyclohexane and dimethyl cyclopentane have little difference, indicating the organic matter sources are both sapropelic type and humic type. The average Mango parameter K<sub>1</sub> of the light hydrocarbons is 0.97, suggesting that the oils have similar sedimentary environments. The K<sub>2</sub> of the up petroleum system is large, averaging 0.31, indicative of large terrestrial input. The K<sub>2</sub> of the middle petroleum system is smaller, averaging 0.22, indicative of large water input. Comparison of the light hydrocarbons, their transformation star diagrams, heptane value, and isoheptane index indicate the up petroleum system is in high maturity and has good preservation conditions, while the middle petroleum system is in low maturity, and the down petroleum system is under the mature stage. The analysis of the crude oils in Gaoyou sag and their group division may provide help for oil and gas exploration in this area.

**Keywords** light hydrocarbons; crude oil; geochemical characteristics; Gaoyou sag; group division

石油中的轻烃信息反映油气来源、成因、形成条件和环境、运移路径、油藏后期改造等情况<sup>[1]</sup>。随着理论研究的不断

深入和技术的不断进步, 轻烃参数在许多油田得到应用<sup>[1-4]</sup>。例如, C<sub>6</sub>~C<sub>7</sub>轻烃组成特征可用于判识原油有机质类型;

收稿日期: 2013-07-24; 修回日期: 2013-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172126)

作者简介: 宋宁, 高级工程师, 研究方向为油气田地质和有机地球化学, 电子信箱: songn@sohu.com

引用格式: 宋宁, 郭海莹, 侯鹏飞, 等. 高邮凹陷原油轻烃地球化学特征及群组划分[J]. 科技导报, 2014, 32(6): 40-44.

Mango轻烃参数和碳环优势指数可判别原油沉积环境;庚烷值和异庚烷指数用以划分原油成熟度状况等。这些参数已经在吐哈盆地、四川盆地、苏北盆地金湖凹陷、松辽盆地等油气田中应用并取得较好效果<sup>[1-4]</sup>。轻烃参数对比可以反映出具有相似来源的原油由于后期改造不同在某些地球化学特征方面存在的差异。胡雄等<sup>[5]</sup>对柴达木盆地北缘马海地区原油轻烃参数进行对比研究,发现马海地区存在煤成油和混合偏腐泥型成因油两类原油;蒋兴超等<sup>[6]</sup>应用轻烃参数对比研究对松辽盆地王府凹陷进行了原油群组划分,将该凹陷分为低成熟区、中等成熟区和低—中成熟区3类,并据此分析出,低—中成熟区周缘地区的构造高部为有力勘探区域。为探讨高邮凹陷原油轻烃特征,本研究分别选取马家嘴( $E_2d_2$ )、黄珏( $E_2d$ )、富民( $E_2s$ )、永安( $E_2d$ )、周庄( $K_2t_1$ )、韦庄( $E_1f_1$ 、 $E_1f_2$ )、陈堡( $K_2t$ 、 $E_1f$ )、瓦庄( $K_2t$ )、沙埙( $E_1f$ )的原油样品开展轻烃特征研究,通过对高邮凹陷原油轻烃参数的分析,探讨油气来源、成熟度和群组划分,为该凹陷的油气勘探提供帮助。

## 1 取样和实验

高邮凹陷可划分为3个次级构造单元,南部为断阶带,中部为深凹带,北部为斜坡带,如图1所示<sup>[7-8]</sup>。其中含油气层段包括白垩系的赤山组( $K_2c$ )和泰一段( $K_2t_1$ ),古近系的阜一段( $E_1f_1$ )、阜二段( $E_1f_2$ )、阜三段( $E_1f_3$ )、戴一段( $E_2d_1$ )、戴二段( $E_2d_2$ )和垛一段( $E_2s_1$ )以及新近系盐城组一段( $Ny_1$ )<sup>[9]</sup>。上含油气系统烃源岩为阜四段( $E_4f$ ),主要向戴南组排烃( $E_2d$ );中含油气系统烃源岩为阜二段( $E_2f$ ),主要向阜一段( $E_1f$ )排烃;下

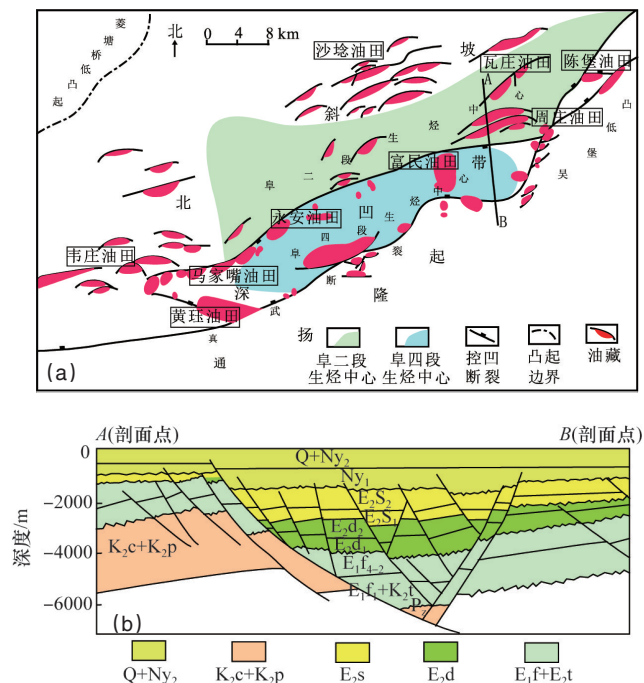


图1 高邮凹陷油藏分布(a)及地质剖面(b)

Fig. 1 Distribution of the reservoir (a) and geologic cross section (b) in Gaoyou sag

含油气系统烃源岩为泰二段( $K_2t_2$ ),主要向泰一段( $K_2t_1$ )排烃<sup>[10]</sup>。高邮凹陷构造复杂,且具有多个生烃中心,已从不同的方面对该凹陷进行了研究<sup>[11-14]</sup>。为探讨高邮凹陷原油轻烃组成特征,共采集了马家嘴、黄珏、富民、永安、周庄、韦庄、陈堡、瓦庄、沙埙分布于3个含油气系统9大油田的100多件原油样品。

色谱实验使用美国安捷伦公司的6890N气相色谱仪,色谱柱为HP—PONA弹性石英毛细柱(50 m×0.20 mm×0.50 μm),氢火焰检测器,以氦气作载气。分析条件为:升温程序为始温30℃,恒温10 min,后以3℃/min升温至140℃,进样口分流比为50:1。

## 2 结果和讨论

### 2.1 $C_6$ ~ $C_7$ 轻烃化合物组成特征

原油的 $C_6$ 轻烃组成中,苯通常在腐殖型有机质中含量较高,环烷烃常在腐泥型有机质中含量丰富,根据 $C_6$ 轻烃化合物中苯(Bz)、环己烷(CYC<sub>6</sub>)以及正己烷( $nC_6$ )的相对含量也可判断原油的母质来源<sup>[15]</sup>。原油的 $C_7$ 轻烃组成中,二甲基环戊烷(DMCC<sub>5</sub>)主要来自于水生生物体的环状脂类;具有良好陆源母质特征的甲基环己烷(MCC<sub>6</sub>)主要来自纤维素、糖类以及高等植物木质素等;受成熟度影响明显的正庚烷( $nC_7$ )主要来自细菌和藻类,这3类物质的相对组成含量可用于判别原油的有机质来源<sup>[15-17]</sup>。沈忠民等<sup>[18]</sup>根据 $C_6$ ~ $C_7$ 轻烃化合物组成将四川盆地天然气分为了两类,一类是川西坳陷III型有机质的煤型气,另一类是川南和川中地区I和II型有机质的油型气。

高邮凹陷各原油样品 $C_6$ 轻烃组成中 $nC_6$ 相对含量占绝对优势,相对含量大都在50%以上;Bz相对含量较低,相对含量低于20%;CYC<sub>6</sub>相对含量分布在20%~50%之间,大多数样品落入腐泥型有机质区域,也有部分样品落入了腐殖型有机质区域,如图2(a)所示。

高邮凹陷各原油样品 $C_7$ 轻烃组成中甲基环己烷相对含量分布在10%~50%之间;正庚烷相对含量分布范围较大,主要集中在20%~60%之间;二甲基环戊烷相对含量分布在10%~55%之间,大多数样品落入了II型有机质区域内,如图2(b)所示。

### 2.2 Mango轻烃参数特征和碳环优势指数

Mango<sup>[19,20]</sup>分析了2000多个不同类型原油中的轻烃样品,证实了具有相似来源的4个异庚烷值不变性,即 $K_1=2$ -甲基己烷和2,3-二甲基戊烷质量之和与3-甲基己烷和2,4-二甲基戊烷质量之和之比约为1.0。高邮凹陷原油轻烃总体上 $K_1$ 值集中在0.86~1.16之间,平均为0.97,符合(2-MH+2,3-DMP)/(3-MH+2,4-DMP)约为1.0的轻烃理论,来自瓦庄油田原油样品落在直线外,表明油气来源与其他油田不同,如图3(a)所示。

朱杨明等<sup>[21]</sup>认为 $P_3/(P_2+N_2)$ 即 $K_2$ 值与烃源岩的沉积环境有关,并指出海相原油的 $K_2$ 值比陆相原油低得多。其中, $P_3$

为3-乙基戊烷、3,3-二甲基戊烷、2,2-二甲基戊烷、2,3-二甲基戊烷、2,4-二甲基戊烷的质量和占轻烃的比例,  $P_2$ 为2-甲基己烷和3-甲基己烷的质量和占轻烃的比例,  $N_2$ 为1,1-二甲基环戊烷和1,3-二甲基环戊烷(顺、反)的质量和占轻烃的比例。高邮凹陷  $C_7$ 轻烃化合物中,  $(P_2+N_2)$ 值在24.19%~44.19%之间,  $P_3$ 值在14.15%~21.60%之间,  $K_2$ 值分布范围较大,在0.17~0.37

之间,平均值为0.25,反映该凹陷原油具有水陆双生的特点,如图3(b)所示。不同烃源岩来源的原油  $K_2$ 值有所差别,上含油气系统的马家嘴、黄珏、富民、永安、周庄油田原油  $K_2$ 值较高,平均值为0.31,表明陆源输入较多;中含油气系统的韦庄、陈堡、沙埕油田  $K_2$ 值较低,平均值为0.22,表明水源输入较多,下含油气系统的瓦庄油田介于两者之间,  $K_2$ 值平均为0.27。

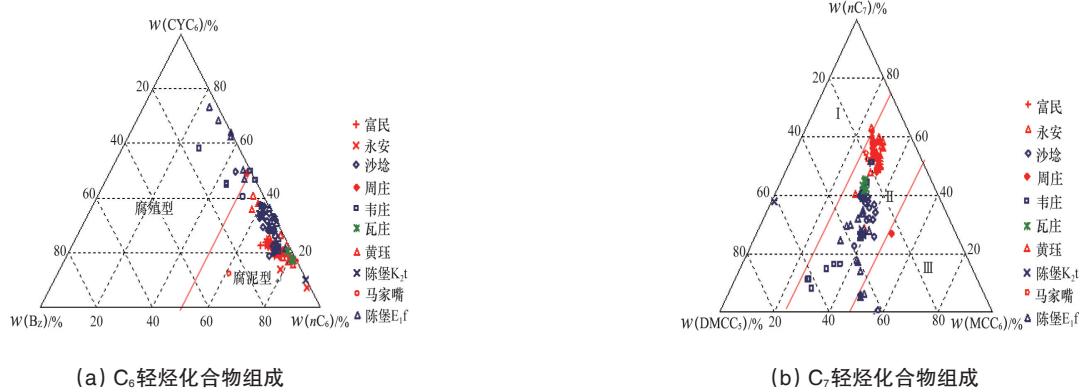


图2 高邮凹陷原油  $C_6$ ~ $C_7$ 轻烃化合物组成

Fig. 2 Composition of  $C_6$ ,  $C_7$  light hydrocarbon compounds in crude oils in Gaoyou sag

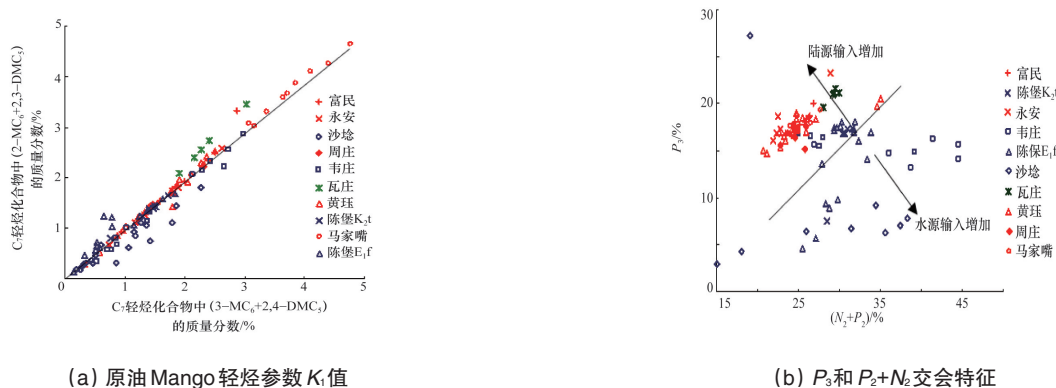


图3 高邮凹陷原油 Mango 轻烃参数特征

Fig. 3 Characteristics of the Mango parameters of light hydrocarbons in Gaoyou sag

### 2.3 原油轻烃星图对比

原油的后期改造不同,具有相似来源的原油在地球化学特征的某些方面会存在差异<sup>[22]</sup>。轻烃指纹对比星状图不仅可以判别原油有机质来源的差异,还可以反映出相同油源的原油排烃后在不同储集层中的差别<sup>[23]</sup>。Halpern<sup>[24]</sup>认为M1~M5是对生物降解作用不敏感并且与油气来源有关的轻烃参数,可用于区分来源相似的原油。图4是高邮凹陷原油轻烃对比星图和轻烃蚀变星图。其中,M1为反式-1,3-二甲基环戊烷与反式-1,2-二甲基环戊烷的质量比;M2为正己烷与(2,2-二甲基丁烷+甲基环戊烷)的质量比;M3为正庚烷与甲基环己烷的质量比;M4为3-甲基己烷与顺式-1,3-二甲基环戊烷的质量比;M5为正庚烷与(2-甲基己烷+3-甲基己烷)的质量比;Tr1为苯与1,1-二甲基环戊烷的质量比;Tr2为正庚烷与1,1-二甲基环戊烷的质量比;Tr3为3-甲基己烷与1,1-二甲基环戊烷的

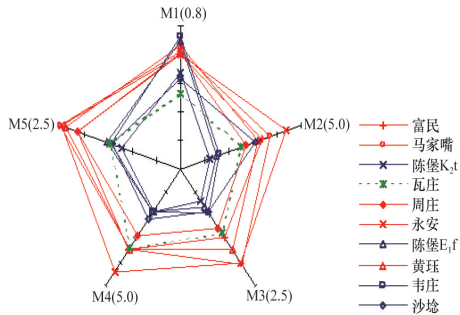
质量比;Tr4为2-甲基己烷与1,1-二甲基环戊烷的质量比;Tr5为(3-甲基己烷+2-甲基己烷)与1,1-二甲基环戊烷的质量比;Tr6为顺式-1,2-二甲基环戊烷与1,1-二甲基环戊烷的质量比;Tr7为反式-1,3-二甲基环戊烷与1,1-二甲基环戊烷的质量比;Tr8为  $P_2/P_3$ ,即(3-甲基己烷+2-甲基己烷)与(2,2-二甲基戊烷+2,3-二甲基戊烷+2,4-二甲基戊烷+3,3-二甲基戊烷+3-乙基戊烷)的质量比。M1和M4表示  $C_7$ 轻烃化合物异构化指数,M2、M3和M5表示  $C_7$ 轻烃化合物环化指数。轻烃参数Tr1是表征苯在水洗作用中的消耗程度,Tr2~Tr7分母是受地层蚀变作用不敏感的1,1-二甲基环戊烷,分子是对地层蚀变作用敏感的成分,分值大小反映在运移过程中原油的生物降解程度,Tr8是  $P_2$ 与  $P_3$ 的比值,该参数受地层蚀变作用小。

在轻烃对比星图(图4(a))中,从高邮凹陷各油田原油样品的图线形状看,可分为3类含油气系统。富民、周庄、黄珏、

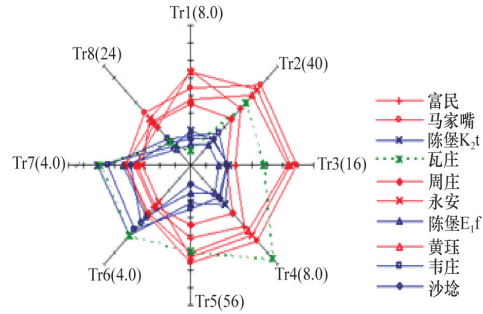


马家嘴、永安油田为上含油气系统；韦庄、陈堡、沙埝油田为中含油气系统；瓦庄油田为下含油气系统。在轻烃蚀变星图(图4(b))中,轻烃参数Tr1~Tr8的相对大小反映原油的次生演化状况,来自于上含油气系统的原油轻烃参数Tr1~Tr5相

对较大,表明原油保存条件好;来自于中含油气系统原油轻烃参数Tr1~Tr5及Tr8相对较小,表明原油生物降解程度较大;来自下含油气系统原油轻烃参数Tr1较小,苯含量较低,而其他参数相对较高,表明原油受水洗作用较大。



(a) 高邮凹陷原油轻烃对比星图



(b) 高邮凹陷原油轻烃蚀变星图

图4 高邮凹陷原油轻烃星状对比图

Fig. 4 Comparison star diagram of light hydrocarbons in crude oils in Gaoyou sag

### 2.4 异庚烷指数和庚烷值及原油形成温度

原油成熟参数庚烷值和异庚烷指数受有机质和热成熟度、次生演化作用的影响<sup>[25]</sup>。这两个参数不仅可以反映原油的成熟度状况,还反映出原油经历生物降解程度、水洗作用等次生演化作用的强弱<sup>[26]</sup>。此外,Bement等<sup>[27]</sup>提出异庚烷与原油形成温度有关系,并推导出原油形成温度的计算公式  $T=140+15\ln(2,4-DMP+2,3-DMP)$ 。

高邮凹陷的庚烷值和异庚烷指数普遍较低,异庚烷指数低于3.0,庚烷值低于45%,原油形成温度低于160°C,显示了

该凹陷原油成熟度低的特点(图5、图6)。上含油气系统原油样品轻烃的异庚烷指数在1.0~3.0之间,庚烷值在30%~45%之间,原油形成温度在130~160°C之间,大多数样品落入了高成熟原油的范围。中含油气系统原油轻烃样品异庚烷指数在1.5以下,庚烷值在30%以下,原油形成温度在110~120°C之间,样品落入了低成熟、成熟原油区域,次生演化作用相对严重。下含油气系统的原油样品轻烃的异庚烷指数在1.0~3.0之间,庚烷值在20%~30%之间,原油形成温度分布在120~130°C,属于成熟原油。

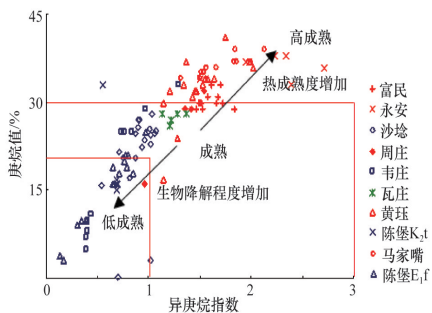


图5 异庚烷指数与庚烷值分布

Fig. 5 Distribution of Gaoyou depression light hydrocarbon oil isoheptane index and heptane value

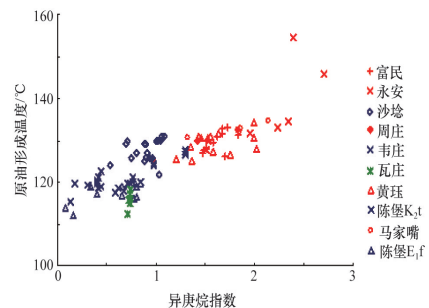


图6 异庚烷指数与原油形成温度分布

Fig. 6 Distribution of Gaoyou depression light hydrocarbon oil isoheptane index and formation temperature

### 3 结论

为了给高邮凹陷的油气勘探提供帮助,基于原油轻烃特征,通过对高邮凹陷原油轻烃参数的分析,探讨油气来源、成熟度和群组划分,主要得到以下结论:

1) 高邮凹陷原油轻烃的C<sub>6</sub>轻烃组成中nC<sub>6</sub>相对含量占优势,Bz相对含量低;C<sub>7</sub>轻烃组成中的nC<sub>7</sub>、MCC<sub>6</sub>和DMCC<sub>5</sub>的相对含量相差不大,说明该凹陷原油有机质类型为腐泥-腐殖型(II型)。

2) Mango轻烃参数K<sub>1</sub>值显示高邮凹陷原油具有相似的沉积环境;上含油气系统原油K<sub>2</sub>值较高,陆源输入较大,中含油气系统原油K<sub>2</sub>值较低水源输入较大,下含油气系统K<sub>2</sub>值在两者之间。

3) 高邮凹陷3类原油轻烃对比星图的图线形状明显不同;分析轻烃蚀变星图、庚烷值和异庚烷指数发现,上含油气系统原油成熟度高,保存较好;中含油气系统成熟度低,受次生演化作用影响严重;下含油气系统原油处于成熟阶段。

参考文献 (References)

- [1] 宋宁, 郭海莹, 刘振, 等. 金湖凹陷原油轻烃的地球化学特征及意义[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(1): 123-128.  
Song Ning, Guo Haiying, Liu Zhen, et al. Geochemical characteristics of light hydrocarbons in Jinhu sag and it's significance[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(1): 123-128.
- [2] 沈忠民, 姜敏, 刘四兵, 等. 四川盆地陆相天然气成因类型划分与对比[J]. 石油实验地质, 2010, 32(6): 560-565.  
Shen Zhongmin, Jiang Min, Liu Sibing, et al. Partition and contrast on genetic type of continental natural gas in the Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(6): 560-565.
- [3] 梁婉如, 张敏, 赵红静, 等. 吐哈盆地原油轻烃地球化学特征[J]. 天然气地球化学, 2009, 20(5): 763-767.  
Liang Wanru, Zhang Min, Zhao Hongjing, et al. Geochemical characteristics of light hydrocarbons in Tuha Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(5): 763-767.
- [4] 高丽丽, 张敏, 赵红静, 等. 松辽盆地南部梨树断陷天然气轻烃地球化学研究[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(4): 709-714.  
Gao Lili, Zhang Min, Zhao Hongjing, et al. Geochemical characteristics of light hydrocarbon in natural gas from Lishu fault depression in Songliao Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(4): 709-714.
- [5] 胡雄, 李延钧, 陈新领, 等. 柴北缘马海地区油气全烃地球化学特征与成因[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(5): 612-616.  
Hu Xiong, Li Yanjun, Chen Xinling, et al. Origin and whole-hydrocarbon geochemical characteristics of oil and gas from Mahai area, North edge of Qidam Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(5): 612-616.
- [6] 蒋兴超, 王铁冠, 冯子辉, 等. 王府凹陷及其周缘地区中浅层原油地球化学特征[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(1): 40-43.  
Jiang Xingchao, Wang Tieguan, Feng Zihui, et al. Geochemical characteristics of crude oils in mid-shallow layer of Wangfu sag and adjacent areas, Songliao Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(1): 40-43.
- [7] 张金亮, 刘宝娥, 毛凤鸣, 等. 苏北盆地高邮凹陷北斜坡阜宁组组成岩作用及储层特征[J]. 石油学报, 2003, 24(2): 23-49.  
Zhang Jinliang, Liu Baobe, Mao Fengming, et al. Clastic diagenesis and reservoir characteristics of Funing Formation in north slope of Gaoyou depression in Subei Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(2): 23-49.
- [8] 吴向阳, 李宝刚. 高邮凹陷油气运移特征研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(2): 22-25.  
Wu Xiangyang, Li Baogang. Oil and gas migration characteristics in Gaoyou depression[J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2006, 30(2): 22-25.
- [9] 李亚辉. 高邮凹陷古水动力场及其与油气运聚的关系[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(3): 13-16.  
Li Yahui. Relation between palaeohydrodynamic field and hydrocarbon migration and accumulation in Gaoyou sag[J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2006, 30(3): 13-16.
- [10] 邱旭明. 苏北盆地高邮凹陷油气输导特征及油气分布[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(4): 437-443.  
Qiu Xuming. Features of carrier beds and distribution of oil and gas in the Gaoyou sag, Subei Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(4): 437-443.
- [11] 宋宁. 苏北盆地油气藏分布规律和主要控制因素[J]. 上海地质, 2010, 31(S1): 196-199.  
Song Ning. Petroleum reservoirs distribution and controlling factors in Subei Basin[J]. Shanghai Geology, 2010, 31(S1): 196-199.
- [12] 常象春, 郭海花, 张金亮, 等. 江苏高邮凹陷永安气藏烃类流体包裹体特征和天然气成藏条件[J]. 地质通报, 2003, 22(10): 808-813.  
Chang Xiangchun, Guo Haihua, Zhang Jinliang, et al. Characteristics of hydrocarbon inclusions and formation conditions of the Yong'an gas accumulation in the Gaoyou sag, Jiangsu[J]. Geological Bulletin of China, 2003, 22(10): 808-813.
- [13] 周健, 林春明, 李艳丽. 苏北盆地高邮凹陷马家嘴地区古近系戴南组物源分析[J]. 沉积学报, 2010, 28(6): 1117-1127.  
Zhou Jian, Lin Chunming, Li Yanli. Provenance analysis of Dainan Formation (Paleogene) of Majiazui in Gaoyou sag, Subei Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(6): 1117-1127.
- [14] 王永健, 王延斌, 高莎莎. 苏北盆地高邮凹陷泰州组瓦6井油源对比[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(2): 335-339.  
Wang Yongjian, Wang Yanbin, Gao Shasha. Oil-source correlation of Wa 6 well Taizhou Formation in Gaoyou sag, Subei Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(2): 335-339.
- [15] 戴金星. 各类烷烃气的鉴别[J]. 中国科学: 化学, 1992, 22(2): 185-193.  
Dai Jinxing. Discriminate of kinds of alkane gas[J]. Science in China: Chemistry, 1992, 22(2): 185-193.
- [16] 戴金星. 利用轻烃鉴别煤成气和油型气[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(5): 26-32.  
Dai Jinxing. Identification of coal formed gas and oil type gas by light hydrocarbons[J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(5): 26-32.
- [17] Hunt J M. Generation and migration of light hydrocarbons[J]. Science, 1984, 226: 1265-1270.
- [18] 沈忠民, 姜敏, 刘四兵, 等. 四川盆地陆相天然气成因类型划分与对比[J]. 石油实验地质, 2010, 32(6): 560-565.  
Shen Zhongmin, Jiang min, Liu Sibing, et al. Partition and contrast on genetic type of continental natural gas in the Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2010, 32(6): 560-565.
- [19] Mango F D. The origin of light hydrocarbons in petroleum: A kinetic test of the steady state catalytic hypothesis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1990, 54: 1315-1323.
- [20] Mango F D. The origin of light hydrocarbon in petroleum: Ring preference in the closure of carbocyclic rings[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58(2): 895-901.
- [21] 朱杨明. 稳态催化轻烃成因理论及其应用前景[J]. 勘探家, 1998, 3(3): 5-9.  
Zhu Yangming. Novel theory and applications of steady-state catalysis of light hydrocarbons[J]. Petroleum Explorationist, 1998, 3(3): 5-9.
- [22] 蒋兴超, 王铁冠, 冯子辉, 等. 王府凹陷及其周缘地区中浅层原油地球化学特征[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(1): 41-43.  
Jiang Xingchao, Wang Tieguan, Feng Zihui, et al. Geochemical characteristics of crude oils in mid-shallow layer of Wangfu sag and adjacent areas, Songliao Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(1): 41-43.
- [23] 王宇蓉, 唐洪三. 埕北30潜山油藏的连通性[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2002, 26(5): 5-8.  
Wang Yurong, Tang Hongsan. Continuity of reservoir in Chengbei 30 buried-hill district[J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2002, 26(5): 5-8.
- [24] Halpern H I. Development and application of light-hydrocarbon-based star diagrams[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79: 801-815.
- [25] 胡惕麟, 戈葆雄, 张义刚, 等. 源岩吸附烃和天然轻烃指纹参数的开发和应用[J]. 石油实验地质, 1990, 12(4): 375-393.  
Hu Tilin, Ge Baoxiong, Zhang Yigang, et al. The development and application of finigerprint parameters for hydrocarbons absorbed by source rocks and light hydrocarbons in natural gas[J]. Petroleum Geology & Experiment, 1990, 12(4): 375-393.
- [26] 王祥, 张敏, 刘玉华. 塔中北斜坡原油轻烃组成及地球化学特征[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(5): 713-717.  
Wang Xiang, Zhang Min, Liu Yuhua. Compositions and geochemical characteristics of light hydrocarbons in northern slope of Tazhong[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(5): 713-717.
- [27] Bement W O, Levey R A, Mango F D. The temperature of oil generation as defined with  $C_7$  chemistry maturity parameter (2,4-DMP/2,3-DMP)[M]. Donostian-San Sebastian: European Association of Organic Geochemists, 1995: 505-507.

(编辑 季超)