

文章编号:0253-9985(2010)03-0271-06

塔里木盆地塔北隆起天然气轻烃地球化学特征及应用

陈践发,苗忠英,张 晨,陈鸿雁

(中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249)

摘要:通过分析塔里木盆地塔北隆起天然气中轻烃组分的特征,认为塔北隆起油型气、煤型气和混合型 3 类天然气藏中轻烃的分布特征具有明显的差异。分布在英买力低凸起和哈拉哈塘凹陷的油型气,其轻烃组分中正构烷烃和正庚烷的相对含量较高;分布在轮台断隆的煤型气,其轻烃组分中异构烷烃、甲基环己烷和苯的相对含量较高;分布在东河塘断裂带附近的混源气,其轻烃组分中苯、甲基环己烷和正庚烷的相对含量均较高。根据甲烷碳同位素和轻烃成熟度参数估算的成熟度特征,认为提尔根、羊塔克断裂带和英买 32 潜山构造带天然气至少应存在两期成藏;英买 7、东河塘断裂带和英买 2 潜山构造带天然气为一期成藏。天然气中轻烃参数显示,轮台断隆西段的天然气具有自库车坳陷向塔北前缘隆起带运移充注的特征。

关键词:庚烷值;异庚烷值;Mango 参数;运移方向;轻烃;天然气;塔北隆起;塔里木盆地

中图分类号:TE122.1 **文献标识码:**A

Geochemical characteristics of light hydrocarbons in natural gas in the Tabei Uplift of the Tarim Basin and their implications

Chen Jianfa, Miao Zhongying, Zhang Chen and Chen Hongyan

(State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Based on the analysis of light hydrocarbons in natural gas in the Tabei Uplift of the Tarim Basin, obvious differences are found in the distribution characteristics of light hydrocarbon in 3 types of natural gas: petroliferous gas, coal-related gas and mixed gas. For petroliferous gas, which is distributed in the Yingmaili low uplift and the Halahatang sag, relative contents of n-alkane and n-heptane are high; for coal-related gas, which is distributed in the Luntai fault uplift, relative contents of isoparaffin, methylcyclohexane and benzene are high; for mixed gas, which is distributed in the Donghetang fault belt, relative contents of benzene, methylcyclohexane and n-heptane are high. According to gas maturity estimated using parameters such as carbon isotope of methane and the maturity of light hydrocarbon, we believe that (1) there were at least two-phases of pool-forming for natural gas in the Ti'ergen fault belt, the Yangtake fault belt and the Yingmai 32 buried hill structural zone; (2) natural gas in the Yingmai 7 fault belt, the Donghetang fault belt and the Yingmai 2 buried hill structural zone experienced one-phased pool-forming process; (3) parameters of light hydrocarbon reveal that natural gas in the western part of the Luntai fault uplift has features of migrating and charging from the Kuqa depression to the Tabei forebulge belt.

Keywords: value of heptane, value of isoheptane, parameter of Mango, migration direction, light hydrocarbon, natural gas, Tabei Uplift, Tarim Basin

轻烃是天然气和原油中非常重要的组分,一般是指分子碳数为 C_5-C_{10} 的化合物,蕴含着丰富的地质地球化学信息^[1]。可以根据其组分特征进行天然气类型、成熟度特征、油气源对比、烃类运

收稿日期:2010-06-21。
第一作者简介:陈践发(1961—),教授、博士生导师,石油地质,地球化学。
基金项目:国家自然科学基金项目(40773039);国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2006CB202307)。

移方向和次生改造等方面的研究^[2~6]。塔北隆起天然气中轻烃含量普遍较高,分析其组成特征可为判识天然气的成因和探讨天然气成藏特征提供重要的信息。

1 地质背景及样品分布

塔北隆起位于塔里木盆地北部,是盆地“三隆四坳”构造格局中的一级构造单元之一(图1)。它北临库车坳陷,南与北部坳陷相接,是陆相腐殖型油气和海相腐泥型油气的有利聚集区。其上发育4个隆起和2个凹陷,分别为轮台断隆、英买力低凸起、轮南低凸起、库尔勒鼻隆、哈拉哈塘凹陷和草湖凹陷。轮台大断裂、东河塘断裂带、红旗断裂带和英买7断裂带将轮台断隆与其他构造单元分隔开来,目前除库尔勒鼻隆和草湖凹陷外均已发现工业性油气藏。油气产层时代分布广,从寒武系、奥陶系、志留系、石炭系、侏罗系、白垩系到古近系和新近系。天然气藏的类型既有气油比很高的凝析气藏,也有气油比稍低的凝析油藏,还有正常的原油伴生气。为探讨该区天然气中轻烃组成特征,选取轮台断隆东段提尔根断裂带,轮台断隆中段红旗断裂带,轮台断隆西段羊塔克、英买7断裂带和英买32潜山构造带,英买力低凸起英买2潜山构造带,哈拉哈塘凹陷北缘的东河塘断裂带等有代表性的天然气藏为研究实例。

2 天然气中 $C_5—C_7$ 轻烃组分特征

现有研究表明,源于腐泥型母质的轻烃组分中富含正构烷烃,源于腐殖型母质的轻烃组分中则富含异构烷烃和芳烃,来源于陆源母质的凝析油,其轻烃组分中富含环烷烃^[1]。对塔北隆起天然气中 $C_5—C_7$ 轻烃组成分析表明,该区天然气环烷烃相对含量最低,变化范围在3%~25%之间;异构烷烃相对含量高于环烷烃,变化范围在35%~60%之间;正构烷烃相对含量与异构烷烃相近,在30%~55%之间(图2a)。根据轻烃中 $C_5—C_7$ 相对含量特征可将该区天然气分为两类:一类是源于哈拉哈塘凹陷腐泥型母质,产层为东河塘断裂带的石炭系和侏罗系天然气,其轻烃中环烷烃含量低于15%,异构烷烃含量低于50%,正构烷烃含量大于45%;另一类是源于库车坳陷

的腐殖型母质,主要产自轮台断隆的白垩系、古近系和新近系吉迪克组,其轻烃中环烷烃含量为25%到5%,异构烷烃含量在45%~60%之间,正构烷烃含量均低于45%。在该区的天然气中英买力低凸起上的英买201井奥陶系产出油气来源于海相烃源岩^[7],但天然气轻烃 $C_5—C_7$ 组分中异构烷烃的相对含量高于50%,显示出异构烷烃含量相对较高的特征。该油气藏成藏期较早、经历较多调整改造作用^[8]可能是造成该井天然气中异构烷烃含量较高的主要因素。轮台断隆中段东河12井侏罗系和古近系产出的天然气,其 $C_5—C_7$ 轻烃中正构烷烃相对含量较高,在50%左右,与腐泥型轻烃相近,可能是因为该井紧邻哈拉哈塘凹陷,受腐泥型母质影响所致。

天然气的轻烃中甲基环己烷和苯的相对含量与母质类型有关,来源于腐殖型母质的天然气其甲基环己烷和苯相对含量较高,而腐泥型烃源岩生成的天然气其正庚烷含量相对较高^[9],塔北隆起天然气这3种轻烃中甲基环己烷的相对含量均低于40%,且不同构造单元之间变化不甚明显;而正庚烷和苯的含量变化较大,不同类型的天然气正庚烷和苯的含量具有明显的差别(图2b)。其中东河塘断裂带和英买力低凸起油型气轻烃中,苯的相对含量均低于10%,甲基环己烷相对含量在20%~40%,正庚烷相对含量较高,在50%~70%之间;轮台断隆绝大部分天然气轻烃中正庚烷相对含量很低,在5%~20%之间,甲基环己烷的相对含量在5%~30%之间,而苯的相对含量较高,在55%~85%之间,系腐殖型母质产物的特征。东河12井古近系和东河23井侏罗系苯和正庚烷的相对含量比较接近,均在40%左右,介于油型气和煤型气之间,这与其特殊的构造位置有关,它们位于轮台断隆与哈拉哈塘凹陷相接的部位,海相腐泥型和陆相腐殖型烃类都可以在这里聚集,所以应为不同类型轻烃混合所致。

轻烃中 C_7 系列有重要的生源意义^[10]:甲基环己烷主要来自高等植物木质素、纤维素和糖类等,热力学性质相对稳定,是反映陆源母质类型的良好参数,相对较高的甲基环己烷是煤成气的标志;各种结构的二甲基环戊烷主要来自水生生物类的脂化合物,并受成熟度影响,较高的二甲基环戊烷是油型气的特征;正庚烷主要来自藻类和细菌,对成熟作用十分敏感,是良好的成熟度指标。塔北

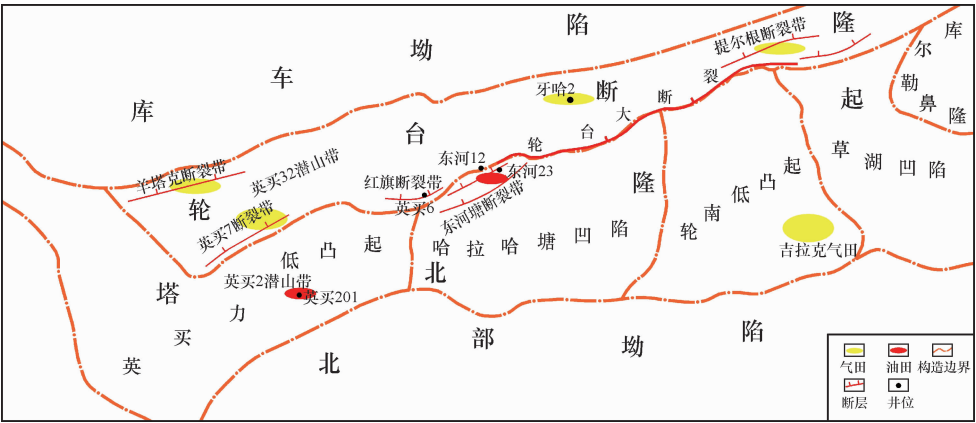


图1 塔北隆起构造划分及样品分布位置示意图

Fig. 1 Structural division and location of samples in the Tabei Uplift

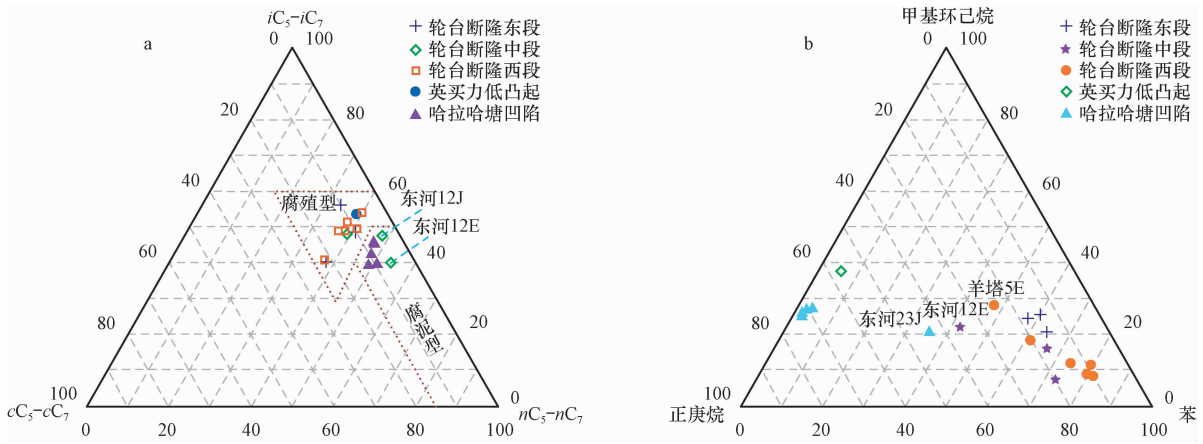


图2 塔北隆起天然气中轻烃组成特征

Fig. 2 Light hydrocarbon composition characteristics of natural gas in the Tabei Uplift

a. 正构-异构-环状轻烃相对含量;b. 苯-甲基环己烷-正庚烷相对含量

隆起天然气 C_7 系列轻烃中二甲基环戊烷相对含量普遍较低,绝大多数样品低于 20%;正庚烷相对含量变化较大,在 30%~65%之间;甲基环己烷相对含量也有较大的变化,在 20%~60%之间(图 3)。其中轮台断隆东部、西部和中部煤型气中甲基环己烷相对含量高于 35%,变化范围在 36%~58%之间;英买力低凸起和哈拉哈塘凹陷周边油型气中 C_7 系列轻烃正庚烷相对含量较高,一般大于 45%,甲基环己烷含量一般低于 35%,变化范围在 22%~31%之间,与胡惕麟等(1990)研究的成果相一致^[10]。轮台断隆中段东河 12 井侏罗系和古近系天然气中 C_7 系列轻烃中甲基环己烷相对含量为 24%到 34%,反映该井天然气为海相腐泥型与陆相腐殖型天然气混合成藏的结果。

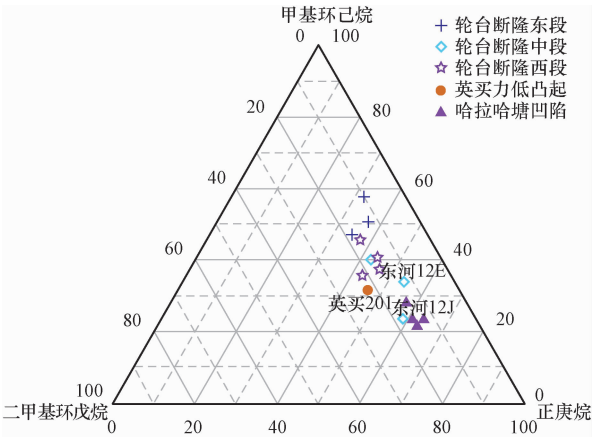


图3 塔北隆起天然气中轻烃 C_7 系列组成特征

Fig. 3 C_7 light hydrocarbon series composition characteristics of natural gas in the Tabei Uplift

3 轻烃中成熟度参数特征

Thompson(1979)通过分析岩屑和岩心吸附轻烃的组成特征指出:一些轻烃的组成特征与沉积岩在埋藏史中经历的最高温度有关,可用作原油成熟度表征的参数^[11];并于1983年提出了庚烷值和异庚烷值与凝析油的成熟度的关系式^[12]。程克明等^[13]认为利用异庚烷值和庚烷值的相对大小可把陆相原油及凝析油划分为4类:低成熟原油,其异庚烷值<1.0,庚烷值<20%;正常原油,其异庚烷值为1~3,庚烷值为20%~30%;高成熟原油(轻质油),其异庚烷值为3~10,庚烷值为30%~40%;过成熟油,其异庚烷值>10,庚烷值>40%。塔北隆起煤型气轻烃庚烷值变化范围在13.4%~23.5%之间,平均值18.7%;异庚烷值变化范围在2.1~5.2,平均值为3.3。据上述划分标准,塔北隆起煤型气多数处于成熟-高成熟阶段(图4)。

东河塘断裂带石炭系和侏罗系油型气庚烷值在28.4%~42.6%之间,平均值为35%,异庚烷值在2.4~4.8之间,平均值为3.7,分布于高成熟-过成熟范围(图4),但从同位素组成和其他地球化学参数研究表明,该区天然气为成熟到高成熟的天然气,即由天然气中轻烃参数估算的天然气的烃源岩热演化程度偏高。笔者认为这主要是天然气的母质类型差异所致,因为庚烷值和异庚烷值参数即与烃源岩的成熟度有关,也受母质类型的影响,在相同热演化阶段时腐泥型有机质形成的烃类比腐殖有机质生成的烃类具有更高的庚烷值^[12]。

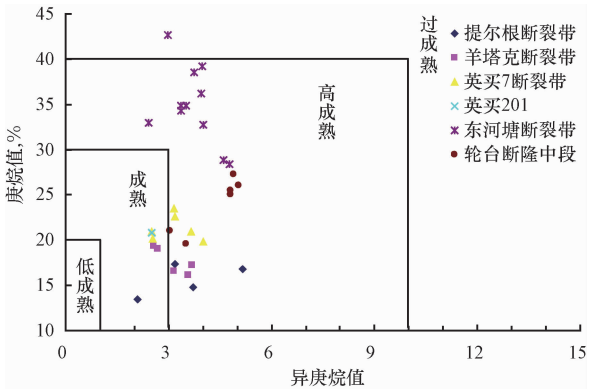


图4 塔北隆起天然气轻烃成熟度
Fig. 4 Maturity of light hydrocarbon in natural gas in the Tabei Uplift

Mango 稳态催化动力学轻烃成因理论认为^[4],烷基环丙烷是干酪根支链烷烃降解的中间产物,不同的开环反应产物不同,反应速率常数满足阿伦尼乌斯公式,因此其产物质量分数比值的对数与温度具有线性关系。以C₇系列轻烃为例,2,4-二甲基戊烷/2,3-二甲基戊烷值(2,4-DMC5/2,3-DMC5)的自然对数与温度(T)呈线性相关,其关系式为 $T(^{\circ}\text{C}) = 140 + 15 \times \ln(2,4 - \text{DMC}5/2,3 - \text{DMC}5)$ 。

由Mango轻烃参数计算出的温度为原油或天然气母质经历的最高地温,根据此温度可求出烃源岩层的最大埋深,根据深度与成熟度之间的经验公式可以求出烃源岩的成熟度参数R_o^[14]。利用Mango轻烃参数计算出的塔北隆起各构造带天然气源岩有机母质所经历的最高地层温度(表1),对应的烃源岩热演化程度(图5)。从表1和

表 1 轻烃与天然气成熟度对比
Table 1 Comparison of maturity between light hydrocarbon and natural gas

构造带	庚烷值, %	异庚烷值	R _o (据 δ ¹³ C ₁), %	T/℃
轮台断隆西段	$\frac{15.7(5)}{13.4 \sim 17.4}$	$\frac{3.0(5)}{0.9 \sim 5.1}$	$\frac{0.7(4)}{0.5 \sim 0.9}$	$\frac{140(4)}{139 \sim 143}$
	$\frac{17.7(5)}{16.1 \sim 19.4}$	$\frac{3.1(5)}{2.6 \sim 3.7}$	$\frac{0.6(7)}{0.3 \sim 1.2}$	$\frac{139(5)}{138 \sim 141}$
	$\frac{21.3(7)}{19.8 \sim 23.5}$	$\frac{3.1(7)}{2.5 \sim 4.0}$	$\frac{1.0(16)}{0.6 \sim 1.3}$	$\frac{139(7)}{136 \sim 141}$
	22.2		$\frac{2.2(6)}{1.3 \sim 2.9}$	
	20.8	2.5	1.0	133
哈拉哈塘凹陷东河塘断裂带	$\frac{34.9(11)}{28.4 \sim 42.6}$	$\frac{3.7(11)}{2.4 \sim 4.8}$	$\frac{1.2(7)}{0.7 \sim 2.3}$	$\frac{130(11)}{126 \sim 134}$

注:表中部分数据为 $\frac{\text{平均值(样品数)}}{\text{最小值} \sim \text{最大值}}$ 。

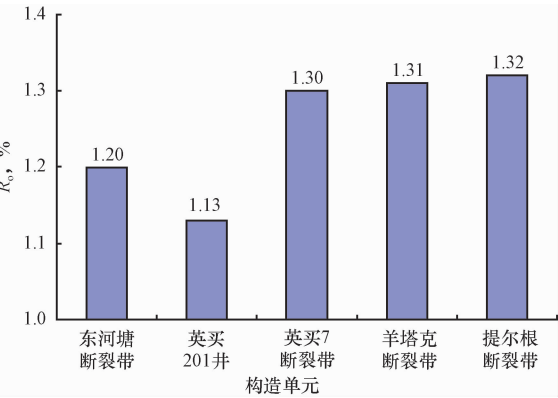


图5 塔北隆起天然气源岩有机母质成熟度
Fig.5 Maturity of organic parent materials of natural gas in the Tabei Uplift

图5中可以看出,提尔根、羊塔克和英买7断裂带天然气中轻烃估算的地温最高,都在140℃左右,对应的烃源岩成熟度参数 $R_o \geq 1.3\%$,处于高过成熟阶段;英买力低凸起和东河塘断裂带天然气的轻烃估算的地层温度相对较低,在130℃左右;由于古地温梯度的差异,东河塘断裂带轻烃母质成熟度相对较高, R_o 平均值为1.2%,处于成熟-高成熟阶段;英买力低凸起轻烃母质成熟度相对较低,英买201井轻烃母质 R_o 为1.1%,处于成熟阶段。这一结论与庚烷值和异庚烷值反映的成熟度特征一致。

4 由轻烃参数探讨成藏特征

在探讨天然气成熟度时,前人提出了甲烷碳同位素值与 R_o 之间关系的经验公式^[1]。天然气中轻烃的庚烷值、异庚烷值和Mango参数也是估算天然气源岩热演化程度的良好指标。由于这两类方法估算出的热演化程度分别反映天然气中轻质组分(甲烷)和重质组分(C_5^+)热演化程度,因此,可以根据这两种方法得出的成熟度结果来判断油气的成藏特征,即如果甲烷碳同位素与轻烃组分估算的成熟度相同,则表明天然气可能是同源、一期成藏;如两者估算的成熟度不同,则表明可能是多期成藏或混合成藏。由甲烷碳同位素计算的塔北隆起天然气成熟度 R_o (表1)可以看出,提尔根、羊塔克断裂带天然气成熟度较低, R_o 平均值分别为0.7%和0.6%,而与之伴生的轻烃成熟度参数多已达到高-过成熟阶段,这两个地区烃源均为库车凹陷煤型气^[14],不存在混源问题,所以

天然气至少应存在两期成藏。英买32潜山构造带天然气来源于库车坳陷^[7],由甲烷碳同位素估算的天然气成熟度 R_o 平均值为2.2%,已经达到过成熟阶段,而伴生的轻烃庚烷值只在22.2%左右,显示成熟阶段的特征,所以该构造带也存在两期成藏。英买7、东河塘断裂带和英买2潜山构造带天然气甲烷碳同位素估算的成熟度 R_o 平均值在1%~1.2%之间,处于成熟-高成熟演化阶段,与轻烃反映出的成熟度特征一致,所以这些地区天然气应为一期成藏。

成藏过程中,轻烃运移相态的差异可以引起组分特征显著变化。烃类以游离相运移时,影响组分特征变化的主要因素是烃类分子的极性。由于地质色层作用,极性强的分子在运移过程中沿烃类运移方向含量逐渐降低。芳香烃的极性明显大于烷烃,随运移距离的增加含量相对减少;水溶相运移的烃类,各组分水溶性差异是决定其变化特征的重要因素。烷烃中随碳数增加溶解能力逐渐减弱,相同条件下,同碳数的芳烃溶解度明显高于烷烃,如苯的溶解度可达 $1\,740 \times 10^{-6}$ mg/L,而相同条件下正己烷的溶解度仅为 9.5×10^{-6} mg/L^[15],所以沿运移路径前方芳烃/烷烃值呈增加趋势。对比分析轮台断隆西段不同区块天然气苯的相对含量表明,紧邻库车坳陷的羊塔克断裂带,处于烃类运移路径的后方,天然气中苯/正己烷和苯/环己烷的平均值分别为1.2和4.5;而处于运移路径前方的英买7断裂带对应值分别为1.6和5.6。这一差异说明轮台断隆西段烃类沿库车坳陷-羊塔克断裂带-英买7断裂带方向运移充注,同时也说明塔北隆起西段轻烃的运移方式为水溶相。

天然气中丁烷的同分异构体相对含量特征可作为探讨天然气运移方向的参数^[16~20]。沿孔喉大、输导性能好的砂岩运移时分子动力直径相对小的正丁烷运移速率快,导致沿运移方向 iC_4/nC_4 值减小。库车坳陷所产油气沿不整合面或碎屑岩体向塔北隆起充注,多富集于古近系和新近系碎屑岩储层。羊塔克断裂带 iC_4/nC_4 值在0.79~0.84之间,平均值为0.82;英买7断裂带 iC_4/nC_4 值在0.44~0.82之间,平均值为0.58,这一特征也表明了轮台断隆西段天然气由羊塔克向英买7断裂带运移充注,也与轻烃参数反映天然气运移方向相符。

5 主要认识和结论

1) 通过对塔北隆起天然气轻烃组分特征分析,认为该区存在腐泥型、腐殖型和混合型天然气;腐殖型天然气主要分布在轮台断隆,腐泥型天然气主要分布在轮台大断裂以南,混合型天然气主要分布在轮台大断裂附近。

2) 塔北隆起天然气多处于成熟-高成熟演化阶段。通过甲烷碳同位素与轻烃参数反映的成熟度特征对比认为该区天然气存在一期和多期成藏两种模式。

3) 塔北隆起西段 iC_4/nC_4 、苯/正己烷和苯/环己烷的变化特征表明天然气以自库车坳陷经羊塔克断裂带向英买 7 断裂带方向运移,且轻烃的运移方式为水溶相。

参 考 文 献

1 戴金星,裴锡古,戚厚发. 中国天然气地质学(卷一)[M]. 北京:石油工业出版社,1992. 75~80
2 胡国艺,李剑,李谨,等. 判识天然气成因的轻烃指标探讨[J]. 中国科学(D辑,地球科学),2007,37(增刊II):111~117
3 Mango F D. An invariance in the isoheptanes of petroleum[J]. Science,1987,273: 514~517
4 Mango F D. The light hydrocarbons in petroleum: A critical review [J]. Organic Geochemistry, 1997,26(7/8):417~440
5 张林晔,李钜源,李祥臣,等. 细菌降解气轻烃组成及气源对比[J]. 石油实验地质,1996,18(1):88~95
6 谢增业,杨威,胡国艺,等. 四川盆地天然气轻烃组成特征及其应用[J]. 天然气地球科学,2007,18(5):720~725

7 苗忠英,张秋茶,陈践发,等. 英买力地区天然气地球化学特征[J]. 天然气工业,2008,28(6):40~43
8 李小地,张光亚,田作基,等. 塔里木盆地油气系统与油气分布规律[M]. 北京:地质出版社,2000. 16~26
9 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
10 胡惕麟,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
11 Thompson K F M. Light hydrocarbons in subsurface sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta,1979,43(5):657~672
12 Thompson K F M. Classification and thermal history of petroleum based on light hydrocarbons [J]. Geochim et Cosmochim Acta, 1983,47(2):303~316
13 程克明,金伟明,向忠华,等. 陆相原油及凝析油的轻烃单体烃组成特征及地质意义[J]. 石油勘探与开发,1987,14(1):33~34
14 梁狄刚,陈建平,张宝民,等. 塔里木盆地库车坳陷陆相油气的生成[M]. 北京:石油工业出版社,2004. 108~118
15 Price L C. Aqueous solubility of petroleum as applied to its origin and primary migration[J]. AAPG Bulletin,1976,60(2):213~244
16 王廷栋,杨远聪. 地质色层作用与川中上三叠统天然气的运移[J]. 天然气工业,1986,6(1):15~20
17 兰晓东,朱炎铭,冉启贵,等. 塔东地区天然气地球化学特征及运聚探讨[J]. 石油与天然气地质,2009,30(3):324~328
18 郝石生,黄志龙,高耀斌. 轻烃扩散系数的研究及天然气运聚动平衡原理[J]. 石油学报,1991(12):17~24
19 李广之,吴向华. 异构比 ϕ_{iC_4}/ϕ_{nC_4} 和 ϕ_{iC_5}/ϕ_{nC_5} 的石油地质意义[J]. 物探与化探,2002,26(2):135~139
20 朱怀平,程同锦,李武,等. 塔北地区甲烷碳同位素特征与烃类运移方式[J]. 石油与天然气地质,2005,26(4):450~453

(编辑 高 岩)

(上接第 270 页)

4 结束语

我国有机地球化学研究领域还存在着大量的问题没有解决。无论是油气领域还是环境、生物等领域,无论是东部成熟盆地的勘探还是中西部叠合盆地中下部的勘探,无论是油还是气,无论是深层还是浅层,都还存在着许多与油气生成与成藏相关的问题。而我国有机地球化学界之所以还有这样大的凝聚力,学术空气这样活跃,出了这么多成果,就是因为这支队伍有很强烈的科学探索、发展技术、解决生产难题、振兴油气工业、发展有机地球化学学科的责任感。从大家展示的这

许多研究成果的背后可以看出我国有机地化界的一种精神,那就是团结、和谐、奋发、向上的精神。这种精神将继续激励我们一代又一代地球化学工作者勇往直前。

总而言之,这次学术会议是 21 世纪初对我国有机地球化学学科发展的一次大检阅,展示的成果琳琅满目、丰富多彩。正像学术委员会主任梁狄刚教授所说,这次会议我们“收获了知识,收获了成果,收获了友谊,收获了团结”;也如组委会主任王招明教授所说,这次会议真正成为了“交流认识成果,共同促进提高”的平台。

(编辑 李 军)