

天然气轻烃指标的地质意义

——以鄂尔多斯盆地神木气田与塔西南坳陷山前带天然气藏为例

韩文学¹,麻伟娇^{1,2},侯连华¹,陶士振¹,胡国艺¹,彭威龙¹

(1. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 北京大学地球与空间科学学院,北京 100871)

摘要:轻烃中蕴含着丰富的地球化学信息,具有重要的地质意义。依据一系列轻烃参数指标,对神木气田及塔西南坳陷山前带的天然气进行了系统分析。结果显示:神木气田及阿克莫木气田以煤成气为主,前者个别井可能有少量油型气的混入,而柯克亚-柯东气田则为混合成因气。首次提出链烷烃指数标准,当其大于2时,为油型气或混合气,小于2时,为煤成气。根据Mango参数 K_1 和 K_2 值,神木气田的天然气来自同一套烃源岩,而塔西南坳陷山前带天然气则来自不同的烃源岩。根据Mango参数交会图版综合判断,神木气田及阿克莫木气田的天然气主要来源于陆相高等植物,而柯克亚-柯东气田的天然气主要为混合成因。根据异庚烷及庚烷辨识标准,神木气田处于低成熟-成熟阶段,阿克莫木气田处于成熟阶段,而柯克亚-柯东气田则属于高成熟阶段。

关键词:成熟度;轻烃指标;气源对比;成因类型;天然气;神木气田;塔西南坳陷

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Geological significance of light hydrocarbon index of natural gas: Taking Shenmu gas field and piedmont zone of the southwest Tarim Basin as examples

Han Wenxue¹, Ma Weijiao^{1,2}, Hou Lianhua¹, Tao Shizhen¹, Hu Guoyi¹, Peng Weilong¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Light hydrocarbon has abundant geochemical information and great geological significance. Using a series of light hydrocarbon parameters, the natural gas from Shenmu gas field in the Ordos Basin and piedmont zone of the southwest Tarim Basin were analyzed. The results show that the Shenmu and Akemomu gas field are mainly coal-derived gas. However, the former is mixed by partial oil-type gas. The natural gas from Kekeya-Kedong gas field is mainly mixed gas. For the first time, the alkane index parameter is put forward. When the index is above 2, it means the gas is oil-derived gas or mixed gas. When it is below 2, it means the gas is oil-derived gas. The natural gas from Shenmu gas field originated from the same source rocks according to K_1 and K_2 parameter. However, the gas from piedmont zone of the southwest Tarim Basin originated from different source rocks. According to Mango parameter intersection chart, the source rocks of Shenmu and Akemomu gas field were mainly from terrestrial higher plant origins. However, the source rocks of Kekeya-Kedong gas field are mixed. Based on isoheptane and n -heptane parameter, the maturity of Shenmu, Akemomu and Kekeya-Kedong gas field is low-normal stage, mature gas and high maturity gas stage, respectively.

Key words: maturity, light hydrocarbon parameter, gas-source correlation, genetic type, natural gas, Shenmu gas field, southwest Tarim Basin

轻烃是油气中重要的组分之一,目前学者对此尚无统一定义。戴金星^[1]认为,轻烃是指沸程在200℃以前的汽油烃,即碳数为5~10的烷烃化合物,包括天

然气中伴生的部分凝析油和轻质油;郭瑞超^[2]等将轻烃定义为 C_{4-7} 的烷烃化合物;Mango^[3]则认为轻烃为 C_{1-9} 的烷烃化合物;Odden^[4]则将轻烃定义为 C_{1-13} 的

收稿日期:2016-08-03;修订日期:2017-08-16。

第一作者简介:韩文学(1989—),男,博士研究生,天然气地球化学。E-mail:vincer0543@qq.com。

通讯作者:侯连华(1970—),男,高级工程师,油气重大勘探领域、目标评价优选。E-mail:houlh@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05046-001)。

烷烃化合物;沈忠民^[5]等将轻烃定义为 C_{5-10} 的烷烃化合物。笔者建议将 C_{1-13} 定义为广义的轻烃化合物,由于对 C_{5-9} 的化合物研究是当前分析的主流,因此将其定义为狭义的轻烃化合物。本文轻烃指的是后者,即 C_{5-9} 的烷烃化合物。

轻烃中蕴含着丰富的地球化学信息,是天然气研究中一个重要的指标,在勘探开发中得到了极其广泛的应用。可以运用轻烃指标综合判断天然气成因类型、实现气源岩对比、研究天然气成熟度、判断有机质类型及其形成环境、研究次生变化等。

本文根据笔者所做分析测试结果,综合运用多种轻烃指标,研究了鄂尔多斯盆地神木气田及塔西南坳陷山前带天然气成因类型,进行了气源对比,研究了两者有机质类型及形成环境,并对天然气成熟度进行了判断,以期对下一步的勘探开发提供有利的指导。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地神木气田位于陕西省榆林市榆阳区和神木县境内,毗邻米脂、大牛地、榆林和子洲大气田^[6],面积约 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。构造上位于二级构造单元伊陕斜坡东北部和伊盟隆起南部,为一宽缓的西倾斜坡,构造倾角非常小。断层不发育,构造稳定。沉积体系经历了由海相到陆相的演变。气源岩主要为石炭系本溪组、二叠系太原组及山西组的煤系地层和泥岩。煤层单层厚度介于 $8 \sim 10 \text{ m}$,大面积广覆式分布,厚度由北向南逐渐增加^[6]。气源岩以Ⅲ型腐殖型为主,生烃潜力巨大。煤系烃源岩有机碳含量高达 62.90% ,泥岩有机碳含量为 $2.09\% \sim 2.33\%$ ^[7]。神木气田产气层主要为太原组,以海侵型浅水三角洲相和低能碳酸盐岩滨岸相为主^[7],发育碎屑岩型、灰岩型和互层型3种地层组合,以互层型最常见^[8]。分流河道砂与大套广覆式分布的煤系烃源岩互层分布,具备形成大型自生自储式岩性气藏的有利地质条件。储集空间主要为岩屑溶孔,四周泥岩与致密砂岩组成封闭条件。

塔西南坳陷是塔里木盆地重要的一级构造单元,处于塔里木盆地的西南地区,呈北西-南东向展布。可进一步划分为4个二级构造单元^[9-11] (图2)。塔西南坳陷主要发育4套烃源岩,分别为中-下寒武统、下石炭统、二叠系和中-下侏罗统^[12-14]。其中,中-下寒武统烃源岩主要为一套泥晶灰岩与薄层状具有水平纹理的泥岩。石炭系烃源岩主要为一套海相的泥岩、

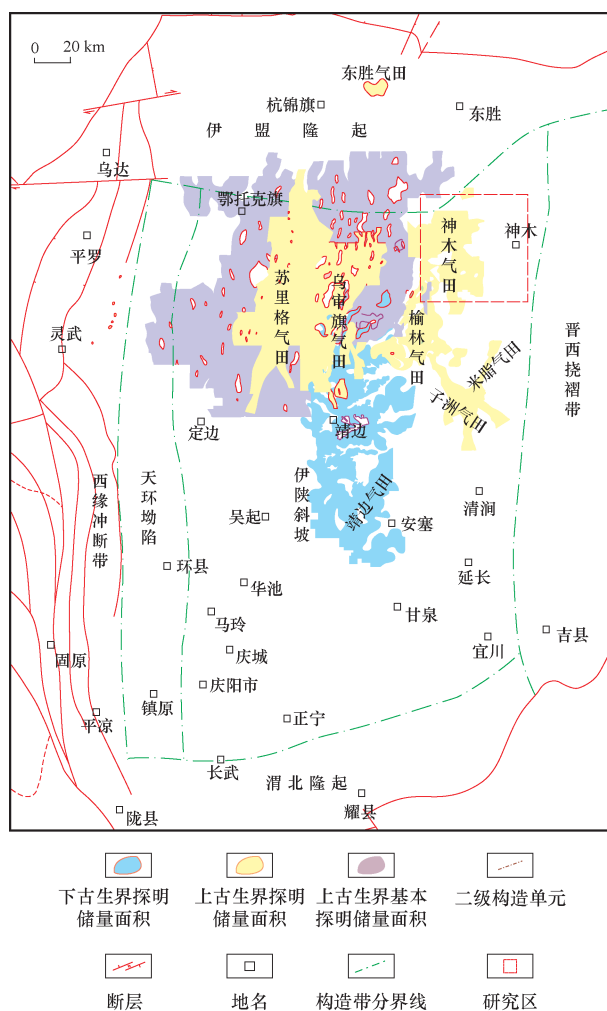


图1 神木气田地理位置

Fig.1 Location of Shenmu gas field

泥灰岩,有机质类型以Ⅰ-Ⅱ型为主^[15]。二叠系烃源岩主要为一套湖相沉积的泥质烃源岩,有机质类型以Ⅱ型为主^[14]。侏罗系烃源岩主要以沼泽相的炭质泥岩及煤为主,有机质类型主要为Ⅱ-Ⅲ型^[14]。侏罗系烃源岩具有厚度大、分布广、有机质丰度高、有机质类型较好、成熟度适中的特点,构成了喀什凹陷的主力烃源岩。整体来说,塔西南坳陷山前带烃源岩生烃潜力很大。

为了研究两个地区中天然气轻烃组成特征,本文选取鄂尔多斯盆地神木气田上古生界气样23个,下古生界气样5个。塔西南坳陷山前带阿克莫木气田气样2个,柯克亚-柯东气田气样6个。本次实验是在Agilent 7890GC气相色谱仪进行,采用 $30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm}$ 的弹性石英毛细柱 DB-5 进行分析。起始温度 30°C ,柱温 $80 \sim 310^\circ\text{C}$,升温速率为 $6^\circ\text{C}/\text{min}$ 。采用氮气作为载气,氢气 $40 \text{ mL}/\text{min}$,空气 $400 \text{ mL}/\text{min}$ 。用FID检测器检测。

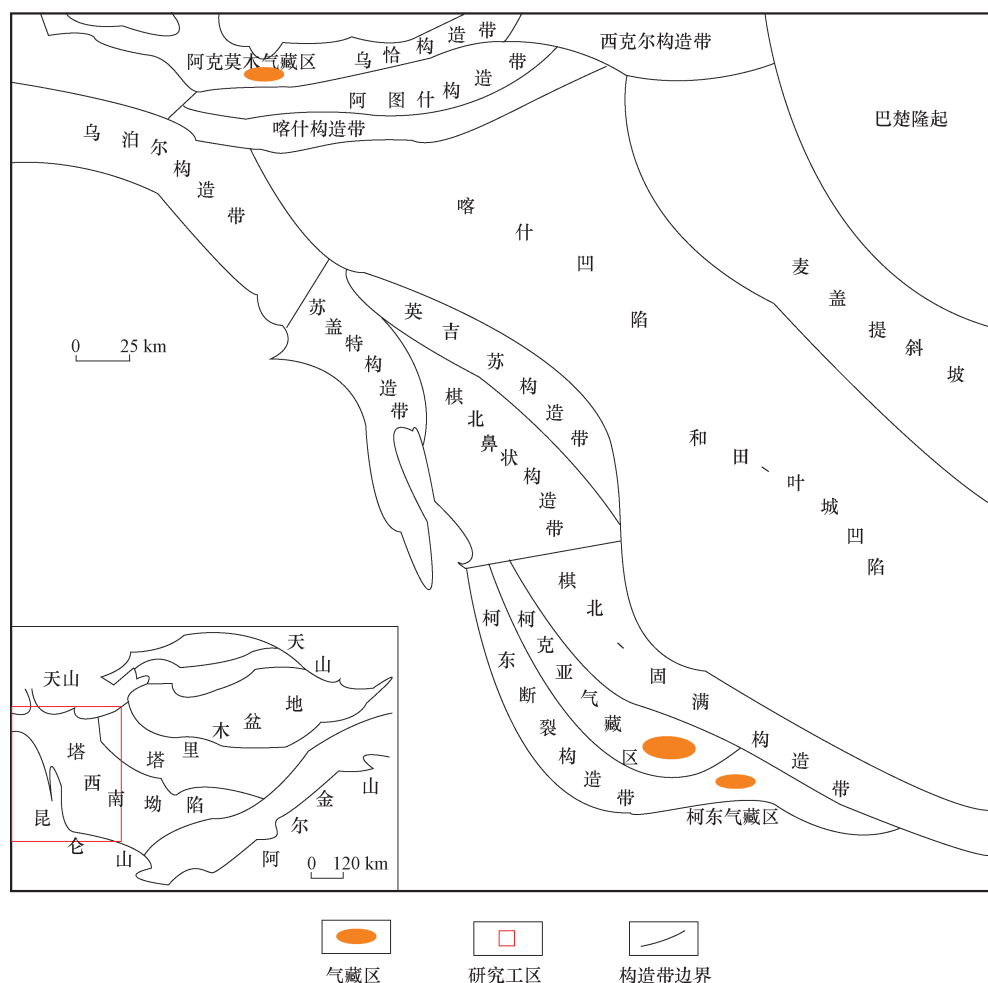


图2 塔西南坳陷区域构造及研究区块位置(据文献[10]修改)

Fig.2 Location of the study area in the regional structure map of the southwest Tarim Basin (modified from reference[10])

2 轻烃地球化学特征及应用

鄂尔多斯盆地神木气田天然气轻烃组成的一个显著特点是甲基环己烷含量很高。煤成气 C_7 化合物分布中,均表现出以甲基环己烷为主峰的特点,具有甲基环己烷分布优势。在 C_{6-7} 芳烃、链烷烃、环烷烃的相对体积含量组成中,链烷烃含量最高,分布在 54% ~ 76%,平均值为 58%;其次为环烷烃,分布在 20% ~ 40%,平均值为 33%;芳烃的相对含量较低,分布在 4% ~ 12%,平均值为 9%。

塔西南坳陷山前带天然气轻烃组成中,阿克莫木气田具有明显的甲基环己烷优势,且苯和甲苯含量极高(苯的相对含量高达 31.10% ~ 37.38%,甲苯的相对含量为 9.63% ~ 13.46%),支链烷烃的含量较低。柯克亚-柯东气田则表现出相反的趋势,即甲基环己烷、苯和甲苯含量相对较低(苯的相对含量仅为 0.80% ~ 3.93%,甲苯的相对含量仅为 0.21% ~ 1.80%),支链

烷烃的含量则相对较高。

2.1 天然气成因类型判断

准确识别天然气成因类型,对于确定气源岩具有重要意义。因此,天然气成因类型的判断就显得极其重要。除了常规的稳定碳同位素组成可用来辨识天然气成因类型之外,也可以应用轻烃组分作为辨识指标,如苯和甲苯相对含量、苯/甲苯比值、 I_{MCH6} 、 C_7 轻烃系统三角图版、 C_{6-7} 芳烃和支链烷烃组合、 C_{5-7} 正构烷烃,异构烷烃和环烷烃的相对含量等^[16-20]。笔者认为以下 3 种指标组合可以较为准确的辨识天然气成因类型,并首次提出链烷烃指数的概念。

2.1.1 甲基环己烷指数

甲基环己烷主要来自于高等植物的木质纤维素和糖类,是腐殖型有机质的主要特征^[2],它的大量出现可以作为煤成气的重要标志。胡惕麟^[18]提出了利用甲基环己烷指数(I_{MCH})辨识天然气类型的标准

(式1),当 $I_{\text{MCH}} > (50 \pm 2)\%$ 时为煤成气,当 $I_{\text{MCH}} < (50 \pm 2)\%$ 时为油型气。

$$I_{\text{MCH}} = \frac{\text{MCH}}{\text{MCH} + \text{RCPC}_7 + n\text{C}_7} \times 100\% \quad (1)$$

式中: I_{MCH} 为甲基环己烷指数,无量纲;MCH 为六元环烃;RCPC₇ 为五元环烃; $n\text{C}_7$ 为直链烃。

通过对鄂尔多斯盆地神木气田 28 个样品分析,有 25 个样品的 $I_{\text{MCH}} > (50 \pm 2)\%$,为明显的煤成气特征,这与根据 $\delta^{13}\text{C}_2 > -28.5\%$ 辨识标准一致。其中 S8-12 井的 $I_{\text{MCH}} < (50 \pm 2)\%$,按照此标准判断为油型气,但其 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值为 -24.7% ,又明显具备煤成气特征。通过对 S8-12 井碳同位素值分析,发现其碳同位素出现了部分倒转,即 $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 > \delta^{13}\text{C}_3 < \delta^{13}\text{C}_4$ 。导致碳同位素出现倒转的原因主要有:有机成因气与无机成因气的混合、煤成气与油型气的混合、同型不同源或同源不同期气的混合、烷烃气某些组分被细菌氧化^[21]。综合神木气田区域地质概况及 S8-12 临近井判断,煤成气和油型气的混合是导致该气井碳同位素出现倒转的主要原因。这也解释了为何运用 $\delta^{13}\text{C}_2$ 与 I_{MCH} 指标存在辨识结果不一致的现象。S7-11C₁ 井与 S7-11C₃ 井的甲基环己烷指数与 $\delta^{13}\text{C}_2$ ($\delta^{13}\text{C}_2$ 值分别为 -35.7% 与 -36%) 均指示其为油型气。

通过对塔西南坳陷山前带 8 个气田样品分析,阿克莫木气田 2 个样品的 $I_{\text{MCH}} > (50 \pm 2)\%$,为明显的煤成气特征,这与根据 $\delta^{13}\text{C}_2 > -28.5\%$ 辨识标准一致。柯克亚-柯东气田 6 个样品的 $I_{\text{MCH}} < (50 \pm 2)\%$,为明显的油型气特征,这与根据 $\delta^{13}\text{C}_2 > -28.5\%$ 辨识标准不一致。造成这一现象的主要原因主要是由于柯克亚-柯东气田的天然气主要为混源所致,具体原因将在后文论述。

2.1.2 链烷烃指数

有机质母质类型对 C₆₋₇ 轻烃组成具有重要影响,腐泥型母质形成的油型气中相对富集链烷烃,腐殖型母质形成的煤成气中相对富含环烷烃和芳烃^[22-23]。于聪等^[24]通过对塔里木盆地油型天然气中轻烃组成特征的研究发现,油型气轻烃组分相对含量具有链烷烃 > 环烷烃 > 芳烃的特征。笔者通过对神木气田天然气轻烃中 C₆₋₇ 链烷烃、环烷烃和芳烃相对含量研究,首次提出了链烷烃指数(I_p)的概念, I_p 计算公式如下:

$$I_p = \frac{R_p}{R_a + R_c} \quad (2)$$

式中: I_p 为链烷烃指数,无量纲; R_p 为 C₆₋₇ 化合物中链烷烃相对含量,%; R_a 为 C₆₋₇ 化合物中芳烃相对含

量,%; R_c 为 C₆₋₇ 化合物中环烷烃相对含量,%。

通过对鄂尔多斯盆地神木气田 28 个气样的计算发现(表1),25 个气样的链烷烃指数(I_p)集中分布于 1.17 ~ 1.91,其中, S8-12 井、S7-11C₁ 井和 S7-11C₃ 井的链烷烃指数(I_p)分别为 3.22、2.75 和 3.27(表1),均大于 2。与上述甲基环己烷指数判断结果一致,说明链烷烃指数(I_p)可以作为天然气成因类型的辨识标准。塔西南坳陷山前带的结果也证实了本文提出的链烷烃指数(I_p)的标准可以作为天然气成因类型的判断标准(表1)。其中柯克亚-柯东气田的链烷烃指数(I_p)分布在 2.67 ~ 5.48,与神木气田 S8-12 井、S7-11C₁ 井和 S7-11C₃ 井基本一致,说明了其为混合成因。而阿克莫木气田的链烷烃指数(I_p)则相对较小,与鄂尔多斯盆地神木气田煤成气样品基本一致。

根据上述结果,可以将链烷烃指数(I_p)以 2 作为分界线。若 I_p 小于 2,则为煤成气,若 I_p 大于 2,则可能为油型气或有油型气的混入。

2.1.3 三角图版法

常见的 C₇ 轻烃化合物主要包括:①甲基环己烷(MCH),其母质主要是腐殖型,是陆源母质类型的良好参数,它的大量存在是煤成气的重要标志;②各种结构的二甲基环戊烷(ΣDMCP),主要来自水生生物的类型化合物,是腐泥型油型气的一个显著特点;③正庚烷($n\text{C}_7$),母质来源复杂,即可以来自细菌和藻类,也可以来自高等植物,对成熟作用极为敏感,是较好的成熟度指标。因此,利用上述 3 种化合物组成的三角图可以辨识不同成因的天然气(图 3a)^[25-28]。

从 C₇ 轻烃系统三角图板中可见,鄂尔多斯盆地神木气田富集甲基环己烷(MCH),相对含量为 46% ~ 73%,平均值为 61%。正庚烷($n\text{C}_7$)的相对含量则较低,为 14% ~ 38%,平均值为 18%。胡国艺^[19]等指出,油型气的正庚烷($n\text{C}_7$)相对含量大于 30%,甲基环己烷(MCH)相对含量小于 70%;煤成气的正庚烷($n\text{C}_7$)相对含量小于 35%,甲基环己烷(MCH)相对含量大于 50%。根据这一辨识标准可知,神木气田 28 个气样中,有 25 个为煤成气,其中 S8-12 井、S7-11C₁ 井和 S7-11C₃ 井的数据落在了临界区间,是由于煤成气和油型气的混合所致。塔西南坳陷山前带的气田中,阿克莫木气田的气样落在了煤成气的范围内,而柯克亚-柯东气田的气样则落在了油型气的范围内,与根据稳定碳同位素判断结果不一致,造成这一异常的原因,也是由于柯克亚-柯东气田的天然气为混源成因。

表 1 塔西南坳陷山前带和神木气田天然气轻烃参数及链烷烃指数(I_p)
Table 1 The light hydrocarbon parameters and alkane index of natural gas from piedmont
zone of the southwest Tarim Basin and Shenmu gas field

地区	井号	层位	芳烃/ C_{6-7} 化合物	链烷烃/ C_{6-7} 化合物	环烷烃/ C_{6-7} 化合物	I_p
阿克莫木	AK1-2	N_1x	0.65	0.21	0.13	0.27
	AK1	N_1x	0.73	0.16	0.11	0.19
柯克亚-柯东	K416	N_1x	0.07	0.82	0.10	4.68
	K354	N_1x	0.06	0.85	0.10	5.48
	K8001	N_1x	0.10	0.78	0.12	3.48
	KS102	N_1x	0.11	0.76	0.14	3.13
	K7009	N_1x	0.10	0.78	0.13	3.49
	KD1	N_1x	0.12	0.73	0.15	2.67
神木	S7-11	$P_1x + P_1s$	0.08	0.57	0.36	1.30
	S3	$P_1s + P_1t$	0.11	0.56	0.33	1.30
	S5-19	$P_1x + P_1t$	0.10	0.57	0.33	1.30
	S6-18	$P_1t + P_1s + P_1x$	0.09	0.57	0.33	1.35
	S6-19	$P_1x + P_1s + P_1t$	0.11	0.57	0.32	1.33
	S7-12	$P_1h + P_1s$	0.12	0.55	0.33	1.23
	S8-8	P_1x	0.05	0.60	0.35	1.50
	S8-12	$P_1h + P_1s$	0.04	0.76	0.20	3.22
	S8-17C ₃	$P_1h + P_1s$	0.08	0.59	0.32	1.45
	S9-11	$P_1x + P_1s + P_1t$	0.09	0.61	0.30	1.58
	S9-11H ₂	P_1t	0.12	0.57	0.31	1.33
	S9-12	$P_1h + P_1s + P_1t$	0.10	0.59	0.31	1.45
	S9-13H ₂	P_1t	0.09	0.54	0.37	1.19
	S10-3	$P_1s + P_1t$	0.08	0.56	0.36	1.26
	S10-5	$P_1h + P_1s + P_1t$	0.11	0.57	0.33	1.31
	S10-9	$P_1h + P_1s + P_1t$	0.11	0.56	0.33	1.29
	S10-13	$P_1h + P_1s$	0.08	0.55	0.37	1.23
	S11-4C ₅	$P_1h + P_1s$	0.06	0.54	0.40	1.17
	S11-15C ₁	$P_1h + P_1s + P_1t$	0.10	0.56	0.34	1.25
	S11-15C ₃	$P_1h + P_1s + P_1t$	0.10	0.61	0.29	1.54
	S20	$P_1s + P_1t$	0.05	0.66	0.29	1.91
	S19-22	$P_1h + P_1s + P_1t$	0.11	0.6	0.29	1.51
	S21-12	$P_1h + P_1s + P_1t$	0.10	0.55	0.34	1.25
	S7-11C ₁	O_1m^5	0.05	0.73	0.22	2.75
	S7-11C ₃	O_1m^5	0.04	0.77	0.20	3.27
	S8-12C ₁	O_1m^5	0.11	0.56	0.33	1.27
	S8-17C ₁	O_1m^5	0.06	0.59	0.36	1.41
	S8-17C ₂	O_1m^5	0.04	0.59	0.36	1.45

注:K 为白垩系; N_1x 为中新统西河甫组; P_2x 为中二叠统下石盒子组; P_1s 为下二叠统山西组; P_1t 为下二叠统太原组; P_2sh 为中二叠统上石盒子组; O_1m 为马家沟组。

天然气中脂肪族组成受不同沉积环境、不同母质类型源岩的影响。腐泥型母质生成的油型气中富含正构烷烃,腐殖型母质形成的煤成气中富含芳烃和异构烷烃^[17],陆源母质则富含环烷烃。因此,也可以用 C_{5-7} 正构烷烃、异构烷烃和环烷烃的相对含量来鉴别不同成因的天然气(图 3b)。

胡国艺^[19]等指出:煤成气分布在 C_{5-7} 相对含量

小于 30% 的区间。根据这一标准判断,神木气田 28 个气样中,25 个属于煤成气,3 个位于煤成气与油型气的临界区域。塔西南坳陷山前带中,阿克莫木气田的天然气落在了煤成气的范围内,而柯克亚-柯东气田则落在了油型气的区间,这一结果与上文一致,也是由于柯克亚-柯东气田的天然气为混源成因。

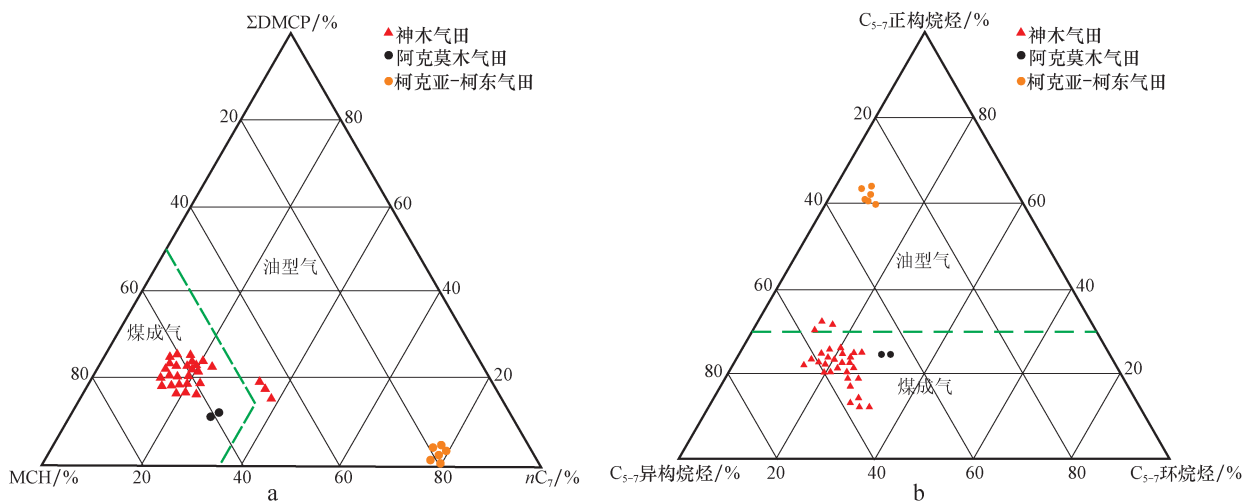


图3 塔西南坳陷山前带和神木气田天然气轻烃系统三角图版

Fig. 3 Light hydrocarbon system triangle chart of piedmont zone of the southwest Tarim Basin and Shenmu gas field

a. C₇ 轻烃系统三角图版; b. C₅₋₇ 轻烃系统三角图版

2.2 气源岩对比

Mango 通过对世界 2 000 余个轻烃样品的分析,发现 4 个异庚烷的化合物:2-甲基己烷,3-甲基己烷,2,3-二甲基戊烷和 2,4-二甲基戊烷,对于同一反应,其同分异构体产物组成具有一个相对固定的比例值,该值不随中间体和基质的浓度发生变化。Mango 将该比值定义为 K_1 常数^[29] [公式(3)]。腐殖型干酪根与腐泥型干酪根结构各异,这种差异性就会导致化学反应路径的差异,进而影响化学反应的动力学过程^[3]。鉴于此,不同母质类型就会生成丰度各异的异构烷烃,从而导致异构烷烃参数的差异性。因此,可以利用 K_1 参数实现油气源的对比。

$$K_1 = \frac{2-MH + 2,3-DMP}{3-MH + 2,4-DMP} \quad (3)$$

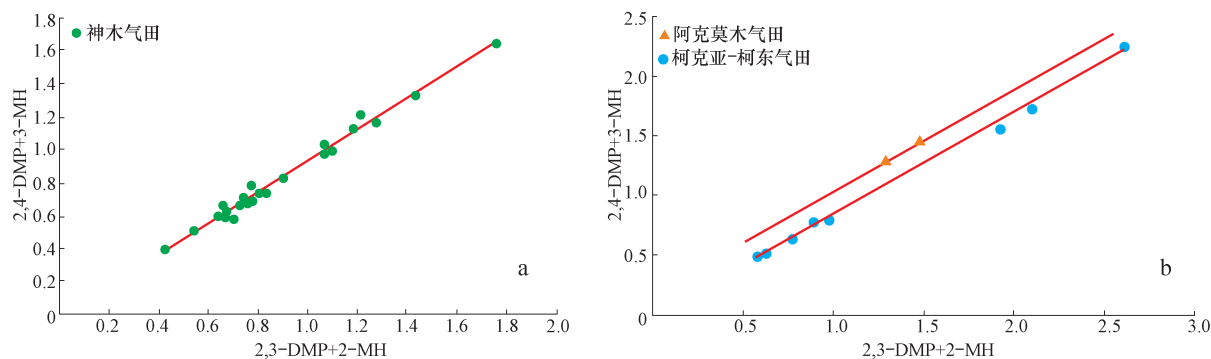
式中:2-MH 为 2-甲基己烷;2,3-DMP 为 2,3-二

甲基戊烷;3-MH 为 3-甲基己烷;2,4-DMP 为 2,4-二甲基戊烷。

神木气田 28 个气样的 K_1 值为 1.00 ~ 1.23,平均值为 1.07, K_1 值的变化趋势基本一致(图 4a)。由此可见,神木气田的天然气来自同一含油气系统。

塔西南坳陷山前带天然气 K_1 值则表现为明显的 2 条曲线,其中阿克莫木气田的 K_1 值较小,而柯克亚-柯东气田的 K_1 值则较大。两者表现为两条斜率不等的直线,但是相关性均较好说明阿克莫木气田的气源岩明显不同于柯克亚-柯东气田(图 4b)。

Mango 基于 C₇ 成因的稳态催化动力学模式提出,形成不同碳数环状化合物的反应速率相互独立,而形成相同碳数等环的反应速率是成比例的^[30]。由此, Mango 提出 K_2 参数[公式(4)]。朱杨明^[31]等认为,同一源岩,在整个生油窗范围内生成的原油轻烃,其 K_2 值应该保持不变。即环戊烷与异戊烷呈一定比例出现。

图4 塔西南坳陷山前带和神木气田天然气 K_1 值分布Fig. 4 Distribution plot of K_1 in natural gas of piedmont zone of the southwest Tarim Basin and Shenmu gas field

a. 神木气田天然气; b. 塔西南坳陷山前带天然气

$$K_2 = \frac{P_3}{P_2 + N_2} \quad (4)$$

式中: P_3 为 2,2-二甲基环戊烷+2,4-二甲基戊烷+2,3-二甲基戊烷+3,3-二甲基戊烷+3-乙基戊烷; P_2 为 2-甲基己烷+3-甲基己烷; N_2 为 1,1-二甲基环戊烷+顺-1,3-二甲基环戊烷+反-1,3-二甲基环戊烷。

神木气田 28 个气样中, K_2 值分布在 0.39~0.80, 平均值为 0.55(图 5a)。与 K_1 结果一致, 说明神木气田的天然气来自同一含油气系统。

塔西南坳陷山前带 K_2 值也明显的分为 2 个部分, 其阿克莫木气田的 K_2 值与柯克亚-柯东气田完全不一致(图 5b), 进一步说明其气源岩不是同一套。

2.3 有机质类型及沉积环境判断

Ten Haven 应用 Mango 参数交会图版成功划分了陆相高等植物来源、湖相低等生物来源及混合来源的气源岩母质^[32]。应用该图版, 对神木气田天然气及塔西南坳陷山前带的气源岩类型进行了标定。由图 6a

可见, 神木气田的气样全部落在了图版的最下方, 说明其气源岩为陆相高等植物来源。而塔西南坳陷山前带的样品中, 阿克莫木气田的样品落在了图版的右下方, 说明其为陆相高等植物来源, 柯克亚-柯东气田的样品则落入了中间的区域, 说明其为混合成因。从图 6b 可见, 源自湖相有机质的原油与源自陆生有机质原油相比, $P_3/(P_2 + N_2)$ 值更大, N_2/P_3 更小。神木气田气样落入陆相高等植物有机质来源区, 塔西南坳陷山前带中, 阿克莫木气田的样品落入了陆相高等植物来源区, 而柯克亚-柯东气田的样品则落入了混合来源区。

2.4 天然气成熟度判断

部分轻烃的特征与沉积岩在埋藏中经历的温度相关, 因此, 可以用庚烷值(H)与异庚烷值(I)的相对大小划分天然气的成熟度^[33-34]。主要包括 4 类: 生物降解气, 异庚烷值小于 0.8, 庚烷值小于 16; 低熟气, 其异庚烷值为 0.8~2.5, 庚烷值为 16~22; 成熟气, 其异庚烷值为 2.5~5, 庚烷值为 22~30; 高成熟气, 其异庚烷值大于 5, 庚烷值大于 30。

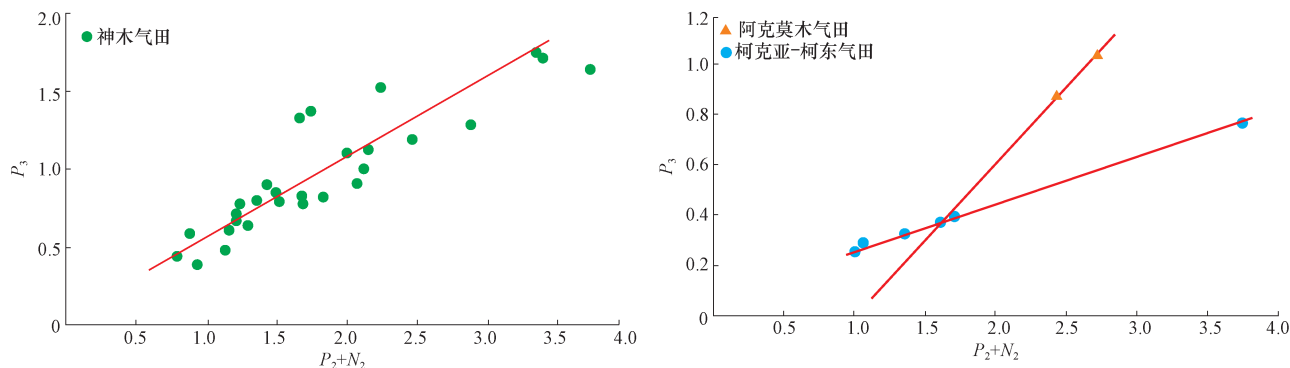


图5 塔西南坳陷山前带和神木气田天然气 K_2 值分布

Fig. 5 Distribution plot of K_2 in natural gas of piedmont zone of the southwest Tarim Basin and Shenmu gas field

a. 神木气田; b. 塔西南坳陷山前带

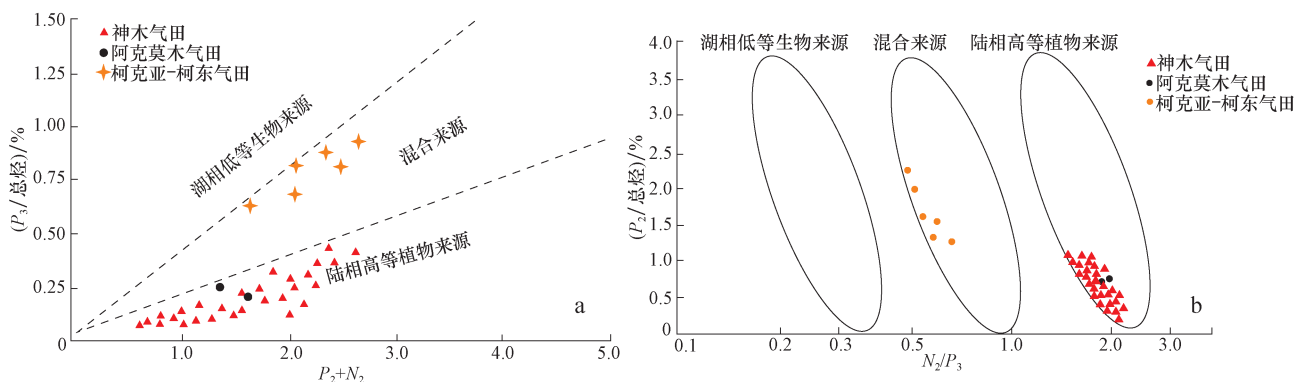


图6 塔西南坳陷山前带和神木气田天然气 $P_2 + N_2$ 与 P_3 /总烃(a)和 N_2/P_3 与 P_2 /总烃(b)交会图(据文献[32]修改)

Fig. 6 Cross plots of (a) $P_2 + N_2$ vs. P_3 /total oil and (b) N_2/P_3 vs. P_2 /total oil of piedmont zone of the southwest

Tarim Basin and Shenmu gas field (modified from reference[32])

神木气田异庚烷值分布在 1.45 ~ 6.39, 平均值为 2.49; 庚烷值分布在 9.48 ~ 17.68, 平均值为 11.80 (图 7)。根据上述辨识标准, 神木气田天然气处于低熟—成熟阶段, 部分井可达高成熟阶段。

塔西南坳陷山前带 8 个气样中, 阿克莫木气田的异庚烷值较低, 分布在 4.30 ~ 3.89, 平均值为 4.10, 柯克亚—柯东气田的异庚烷值较高, 分布在 5.47 ~ 6.62, 平均值为 5.94。与此类似, 阿克莫木气田的正庚烷值偏小, 分布在 15.30 ~ 15.16, 平均值为 15.23, 柯克亚—柯东气田的正庚烷值明显偏大, 分布在 47.73 ~ 52.39, 平均值为 49.92 (图 7)。根据上述标准, 塔西南坳陷山前带中, 阿克莫木气田的天然气属于成熟阶段, 柯克亚—柯东气田的天然气属于过成熟阶段。

3 结论

1) 根据轻烃指标甲基环己烷指数、链烷烃指数及三角图版法综合判断, 神木气田以煤成气为主, 个别井可能有少量油型气的混入。塔西南坳陷山前带中, 阿克莫木气田以煤成气为主, 柯克亚—柯东气田为油型气。

2) 首次提出链烷烃指数 (I_p) 判断指标, 神木气田天然气链烷烃指数绝大部分位于 1.17 ~ 1.91, 均小于 2, 仅有 S8—12 井、S7—11C₁ 井、S7—11C₃ 大于 2, 阿克莫木气田链烷烃指数分布于 0.19 ~ 0.27, 也小于 2, 而柯克亚—柯东气田链烷烃指数分布于 2.67 ~ 5.48, 大于 2。若天然气类型为油型气或有部分油型气的混入, 则链烷烃指数大于 2。

3) 通过对 Mango 参数 K_1 、 K_2 的计算, 神木气田 28 个气样的 K_1 值为 1.00 ~ 1.23, 平均值为 1.07, K_1 值的变化趋势基本一致, K_2 值分布在 0.39 ~ 0.80, 平均值

为 0.55, 与 K_1 结果一致。据此判断神木气田的天然气来自同一含油气系统。而塔西南坳陷山前带的 3 个气田中, 其 K_1 与 K_2 值明显不同, 说明天然气来自不同的气源岩。

4) 通过甲基环己烷指数及 Mango 参数交会图版综合判断, 神木气田与塔西南坳陷山前带的气源岩应为来自陆相高等植物的烃源岩。

5) 通过异庚烷值 (I) 和庚烷值 (H) 辨识标准, 神木气田天然气处于低成熟—成熟阶段。阿克莫木气田天然气属于成熟阶段, 柯克亚—柯东气田属于过成熟阶段。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 陈敬轶, 贾会冲, 李永杰, 等. 鄂尔多斯盆地伊盟隆起上古生界天然气成因及气源[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 205—209.
Chen Jingyi, Jia Huichong, Li Yongjie, et al. Origin and source of natural gas in the Upper Paleozoic of the Yimeng Uplift, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 205—209.
- [3] Mango F D. The light hydrocarbons in petroleum review[J]. Organic Geochemistry, 1997, 26(7): 417—440.
- [4] Odden W. A study of natural and artificially generated light hydrocarbons (C_4 — C_{13}) in source rocks and petroleum fluids from offshore Mid-Norway and the southernmost Norwegian and Danish sectors[J]. Marine and Petroleum Geology, 1999, 16(8): 747—770.
- [5] 沈忠民, 王鹏, 刘四兵, 等. 川西坳陷中段天然气轻烃地球化学特征[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2011, 38(5): 500—506.
Shen Zhongmin, Wang Peng, Liu Sibing, et al. Geochemical characteristics of light hydrocarbon in natural gas in the middle member of the west Sichuan Depression, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2011, 38(5): 500—506.
- [6] 张春林, 张福东, 朱秋影, 等. 鄂尔多斯克拉通盆地寒武纪古构造与岩相古地理再认识[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(2): 281—291.
Zhang Chunlin, Zhang Fudong, Zhu Qiuying, et al. New understanding of the Cambrian palaeotectonic and lithofacies palaeogeography in the Ordos Craton Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(2): 281—291.
- [7] 蒙晓灵, 张宏波, 冯强汉, 等. 鄂尔多斯盆地神木气田二叠系太原组天然气成藏条件[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(1): 37—41.
Meng Xiaoling, Zhang Hongbo, Feng Qianghan, et al. Gas accumulation conditions of the Permian Taiyuan Formation in Shenmu gas field, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1): 37—41.
- [8] Han W X, Tao S Z, Hu G Y, et al. Light hydrocarbon geochemical characteristics and their application in Upper Paleozoic, Shenmu gas field, Ordos Basin[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2016, 35(1): 103—121.
- [9] 张学丰, 李晓锋, 李宗杰, 等. 白云岩的残余结构及其沉积相的意

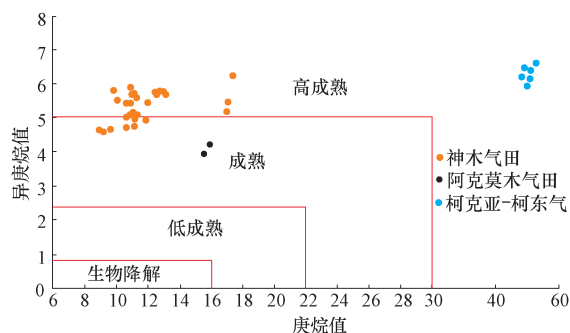


图7 塔西南坳陷山前带和神木气田天然气轻烃成熟度判别图版

Fig. 7 Maturity of natural gas judged by light hydrocarbon of piedmont zone of the southwest Tarim Basin and Shenmu gas field

- 义-以塔中地区中-下奥陶统为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 722-728.
- Zhang Xufeng, Li Xiaofeng, Li Zongjie, et al. Relict texture of dolostones and its significance to sedimentary facies: A case study from the Middle-Lower Ordovician in Tazhong area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 722-728.
- [10] 杜金虎, 王招明, 雷刚林, 等. 柯东1风险探井的突破及其战略意义[J]. 中国石油勘探, 2011, 16(2): 1-11.
- Du Jinhu, Wang Zhaoming, Lei Ganglin, et al. A discovery in well Kedong-1 and its exploration significance[J]. China Petroleum Exploration, 2011, 16(2): 1-11.
- [11] 李丹梅, 汤达祯, 荆卫新, 等. 塔西南前陆冲断带油气成藏地质条件的分段性[J]. 地学前缘, 2008, 15(2): 178-185.
- Li Danmei, Tang Dazhen, Jing Weixin, et al. Segmentation characteristics of geological conditions for reservoir forming in the foreland fold-thrust zone of the southwest Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2): 178-185.
- [12] Huang D F, Liu B Q, Wang T D, et al. Genetic type and maturity of Lower Paleozoic marine hydrocarbon gases in the eastern Tarim Basin[J]. Chemical Geology, 1999, 162(1): 65-77.
- [13] 史江龙, 李剑, 李志生, 等. 塔里木盆地塔中隆起寒武系深层油气地球化学特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(2): 302-310.
- Shi Jianglong, Li Jian, Li Zhisheng, et al. Geochemical characteristics and origin of the deep Cambrian oil and gas in the Tazhong Uplift, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(2): 302-310.
- [14] Liu Q Y, Dai J X, Zhang T W, et al. Genetic types of natural gas and their distribution in Tarim Basin, NW China[J]. Journal of Natural Science and Sustainable Technology, 2007, 1: 603-620.
- [15] 莫午零, 林潼, 张英, 等. 西昆仑山前柯东-柯克亚构造带油气来源及成藏模式[J]. 石油实验地质, 2013, 35(4): 364-371.
- Mo Wuling, Lin Tong, Zhang Ying, et al. Hydrocarbon origin and accumulation model of Kedong-Kekeya tectonic belt in piedmont of West Kunlun Mountain[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(4): 364-371.
- [16] 林壬子. 轻烃技术在油气勘探中的应用[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1990: 91-110.
- Lin Renzi. Application of light hydrocarbon technology in oil and gas exploration[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1990: 91-110.
- [17] 戴金星. 各类烷烃气的鉴别[J]. 中国科学 B 辑, 1992, 22(2): 185-193.
- Dai Jinxing. Identification of various alkane gases[J]. Science in China: Series B, 1992, 22(2): 185-193.
- [18] 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): 375-394.
- Hu Tilin, Ge Baoxiong, Zhang Yigang, et al. The development and application of fingerprint parameters for hydrocarbons absorbed by source rocks and light hydrocarbons in natural gases[J]. Petroleum Geology & Experiment, 1990, 12(4): 375-394.
- [19] 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, 2007, 37(S2): 111-117.
- Hu Guoyi, Li Jian, Li Jin, et al. Preliminary study on the origin identification of natural gas by parameters of light hydrocarbon[J]. Science in China: Series D, 2007, 37(S2): 111-117.
- [20] 秦建中, 郭树之, 王东良. 苏桥煤型气田地化特征及其对比[J]. 天然气工业, 1991, 11(5): 21-26.
- Qin Jianzhong, Guo Shuzhi, Wang Dongliang. Geochemical characteristics of Suqiao coal-formed gas field and their contrast[J]. Natural Gas Industry, 1991, 11(5): 21-26.
- [21] Dai J X, Xia X Y, Qin S F, et al. Origins of partially reversed alkane $\delta^{13}\text{C}$ values for biogenic gases in China[J]. Organic Geochemistry, 2004, 35(4): 405-411.
- [22] Snowdon, Lloyd R, Powell T G. Immature oil and condensate-Modification of hydrocarbon generation model for terrestrial organic matter[J]. AAPG Bulletin, 1982, 66(6): 755-788.
- [23] Leythaeuser D, Schaefer R G, Cornford C. Generation and migration of light hydrocarbon ($\text{C}_2 - \text{C}_7$) in sedimentary basin[J]. Organic Geochemistry, 1979, 1(4): 191-204.
- [24] 于聪, 田兴旺, 李谨. 塔里木盆地台盆区油型气轻烃组成及应用[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(4): 774-783.
- Yu Cong, Tian Xingwang, Li Jin. The characteristics of light hydrocarbon in oil-associated gas and its application in platform area of Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(4): 774-783.
- [25] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气类型鉴别[J]. 天然气地球科学, 1993, 4(3): 1-40.
- Dai Jinxing. Characteristics of carbon and hydrogen isotopic and identification of gas[J]. Natural Gas Geoscience, 1993, 4(3): 1-40.
- [26] 戴金星, 戚厚发, 宋岩. 鉴别煤成气和油型气若干指标的初步探讨[J]. 石油学报, 1985, 6(2): 35-42.
- Dai Jinxing, Qi Houfa, Song Yan. On the indicators for identifying gas from oil and gas from coal measure[J]. Acta Petrolei Sinica, 1985, 6(2): 35-42.
- [27] 戴金星, 李鹏举. 中国主要含油气盆地天然气的 C_{5-8} 轻烃单体烃系列碳同位素研究[J]. 科学通报, 1994, 39(22): 2071-2073.
- Dai Jinxing, Li Pengju. Study on carbon isotopic of the light hydrocarbon monomer of the major oil-and gas-bearing basins in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(22): 2071-2073.
- [28] Mango F D. The origin of light cycloalkanes in petroleum[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1990, 54(1): 23-27.
- [29] Mango F D. An invariance in the isoheptanes of petroleum[J]. Science, 1987, 237(4814): 514-517.
- [30] 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(5): 1315-1323.
- [31] 朱扬明, 张春明. Mango 轻烃参数在塔里木原油分类中的应用[J]. 地球化学, 1999, 28(1): 26-33.
- Zhu Yangming, Zhang Chunming. Applications of Mango's light hydrocarbon parameters in classification of oils from Tarim Basin[J]. Geochimica, 1999, 28(1): 26-33.
- [32] Ten Haven H. L. Applications and limitations of Mango's light hydrocarbon parameters in petroleum correlation studies[J]. Organic Geochemistry, 1996, 24(10): 957-976.
- [33] Thompson K F M. Classification and thermal history of petroleum based on light hydrocarbons[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1983, 47(2): 303-316.
- [34] 沈平, 王晓锋, 王志勇, 等. 吐哈盆地天然气轻烃地球化学特征与低熟气判识[J]. 科学通报, 2010, 55(23): 2307-2311.
- Shen Ping, Wang Xiaofeng, Wang Zhiyong, et al. Geochemical characteristics of light hydrocarbons in natural gases from the Turpan-Hami Basin and identification of low-mature gas[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(23): 2307-2311.