

塔河油田天然气特征对比与成因分析

顾 忆,黄继文

(中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所,江苏 无锡 214151)

摘要:塔河油田东西部奥陶系天然气地球化学特征存在明显的差异。依靠多年勘探开发及研究积累的大量天然气分析测试数据,结合塔河油田油气成藏地质条件与主要油气成藏期次,从天然气组分特征及碳、氢同位素特征等方面进行研究,认为塔河油田西部地区奥陶系储层天然气以溶解气或伴生气为主,以甲烷碳同位素较轻为特征,其成因主要为原油初期裂解。塔河中部主体区奥陶系储层天然气主要以伴生气为主,部分是凝析气,为与原油同期次充注的成熟-高成熟天然气。塔河东部地区奥陶系储层天然气具有高干燥系数和甲烷碳、氢同位素较重的特征,成熟度高于塔河中、西部地区,部分天然气出现甲烷、乙烷碳同位素倒转,表明天然气具两期充注成藏特征。第一期天然气充注成藏时间与塔河中部主体区油气成藏时间一致;第二期充注以过成熟裂解气为主,为原油裂解气与干酪根裂解气的混合气,充注成藏期为喜马拉雅期晚期。不同成因的天然气及不同期次天然气的混合叠加,是形成塔河油田不同地区天然气特征差异的主要因素。

关键词:地球化学特征;成因类型;天然气;奥陶系;塔河油田

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Characteristics comparison and origin of natural gas in Tahe oilfield

Gu Yi, Huang Jiwen

(Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Petroleum Exploration & Production Research Institute,
SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China)

Abstract: The geochemical features of natural gas in the Ordovician vary obviously from east to west in Tahe oilfield. After years of exploration, a large amount of testing data for natural gas accumulated. In combination with analyses of the geologic conditions and stages for natural gas accumulations in Tahe oilfield, studies of natural gas compositions and C/H isotopic features, led to the following conclusions. In the western part of Tahe oilfield, the natural gas in the Ordovician reservoirs was mainly dissolved or associated gas, featuring in lighter methane carbon isotopes, and mainly originated from the initial cracking of crude oils. In the central part of Tahe oilfield, the natural gas in the Ordovician reservoirs was mainly associated gas and partially condensate gas, and was mature/high-mature gas which was charged at the same time as crude oils. In the eastern part of Tahe oilfield, the natural gas in the Ordovician reservoirs feature in highly dry coefficient and heavy methane C/H isotopes, with higher maturity than those samples from both the western and the central Tahe oilfield. For some natural gas samples, $\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2$, indicating that the natural gas were charged and accumulated in stages. The first stage of natural gas charging and accumulation took place when hydrocarbon accumulated in the central part of Tahe oilfield. In the second stage of natural gas charging, the cracking of over-mature hydrocarbon played an important role. The nature gas mainly was sourced from the cracking of crude oil and kerogen, and charged during the late Himalayan period. The different origins of natural gas and the mixing of natural gas during different stages explained the obviously different features of natural gas among different regions in the Tahe oilfield.

Key words: geochemical characteristics, genetic type, natural gas, Ordovician, Tahe oilfield

1990年部署在新疆塔里木盆地阿克库勒凸起的沙23井在古生界钻遇高产油气流,揭开了奥陶系碳酸盐岩特大型油气田——塔河油田勘探开发的序幕。历经潜山、非构造圈闭、岩溶储集体、碳酸盐岩和碎屑岩多层系立体勘探,目前已成为我国探明储量规模最大的

的海相碳酸盐岩复式油气田。近20年来累计在13个层系发现工业油气藏。塔河特大型油气田是以奥陶系碳酸盐岩岩溶缝洞型油气藏为主体,其上叠加了志留系、泥盆系、石炭系、三叠系、白垩系和古近系等多套层系。它是一个类型多样、成群成带分布的碎屑岩次生

收稿日期:2014-11-12;修订日期:2014-11-20。

第一作者简介:顾忆(1962—),男,教授级高级工程师,石油地质。E-mail: guyi_syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05005-002)。

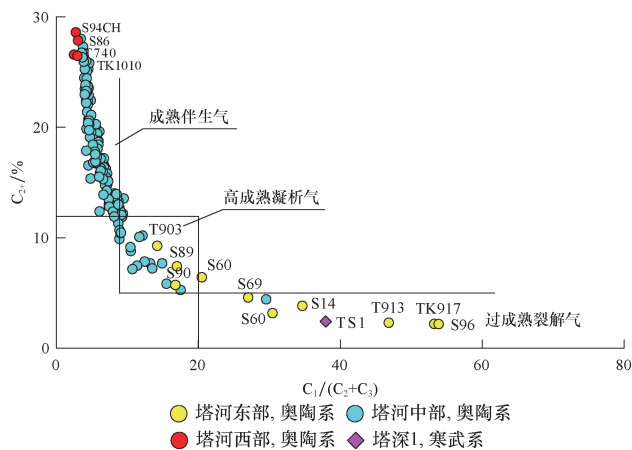
图2 塔河油田奥陶系 $C_1/(C_2+C_3) - C_{2+}$ 关系

Fig. 2 Correlation of $C_1/(C_2+C_3)$ with C_{2+} for the natural gas in the Ordovician in Tahe oilfield

含量为 2.18% ~ 9.26%, 平均为 4.71%, 干燥系数 (C_1/C_{1-5}) 分布于 0.92 ~ 0.98; 西部 6 口钻井甲烷含量为 40.86% ~ 66.53%, 平均为 57.60%, C_{2+} 含量为 26.47% ~ 49.06%, 平均为 32.25%, 干燥系数低 (0.50 ~ 0.72); 而中部重质、中质及轻质油藏 147 口钻井, 甲烷含量为 53.54% ~ 86.15%, 平均为 75.31%, C_{2+} 含量为 4.42% ~ 28.01%, 平均为 17.33%, 干燥系数分布于 0.83 ~ 0.95, 介于东、西部之间。塔河油田深层塔深 1 井下奥陶统 - 上寒武统天然气甲烷含量 86.13%, C_{2+} 含量为 2.41%, 干燥系数 (C_1/C_{1-5}) 为 0.97。

塔河油田奥陶系天然气总体表现以湿气为主的特征, 东部部分钻井及深层下奥陶统 - 上寒武统天然气为干气。图 2 中, 天然气组分结构表明塔河油田东部地区奥陶系天然气以过成熟裂解气为主, 西部以溶解气或油田伴生气为主, 中部地区则主要以油田伴生气为主, 部分为高成熟凝析气。塔河油田奥陶系天然气组分中非烃类气体主要为 CO_2 和 N_2 , 含量较少, 非烃气体含量一般小于 10%, 含微至少量 H_2S 。

2 天然气地球化学特征

2.1 碳同位素特征

塔河油田奥陶系天然气 $\delta^{13}C_1$ 值分布范围较宽, 据 112 口钻井分析数据统计, 分布于 -51.8‰ ~ -31.80‰ 。区域上, 塔河天然气 $\delta^{13}C_1$ 值具有东部地区较重, 西部地区较轻的特点。东部地区 7 口钻井天然气 $\delta^{13}C_1$ 值分布于 -36.7‰ ~ -31.80‰ , 西部地区 7 口钻井天然气 $\delta^{13}C_1$ 值分布于 -51.8‰ ~ -44.70‰ , 中部地区 98 口钻井天然气 $\delta^{13}C_1$ 值介于东、西部之间 (-43.4‰ ~ -37.66‰), 各地区尤其是东西部差异明显。塔深 1 井下奥陶统 - 上寒武统天然气 $\delta^{13}C_1$ 值为 -38.0‰ , 轻于东部奥陶系天然气, 重于中部及西部地区大部分奥陶系天然气。

塔河油田奥陶系天然气主要表现为碳同位素正序分布的特征 ($\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3 < \delta^{13}C_4$), 为典型的有机成因气特征, 与塔里木盆地台盆区其它海相天然气性质一致^[7]。塔深 1 井下奥陶统 - 上寒武统天然气、东部及中部地区少量奥陶系天然气发生了甲烷和乙烷碳同位素的部分倒转 ($\delta^{13}C_1 > \delta^{13}C_2$), 表明受到二次充注或次生改造的影响。

Chung 等人^[8]研究认为, 同来源的有机热成因天然气分子的碳同位素与其分子的倒数呈线性关系, 并以此来区分不同来源气体的混合。塔河油田东西部奥陶系天然气 $\delta^{13}C_n - C_{n(\text{碳数})}$ 关系曲线 (图 3) 呈现出良好的线性关系, 分别表明其有机质来源的单一性。虽然东、西部地区天然气成熟度差别较大, 但各地区线型具集聚性, 均表现出天然气为同一来源, 同一地区天然气具相似的成熟度特征 (图 3a)。塔河中部地区则相对较为复杂, 中部中质油区如沙 47 井

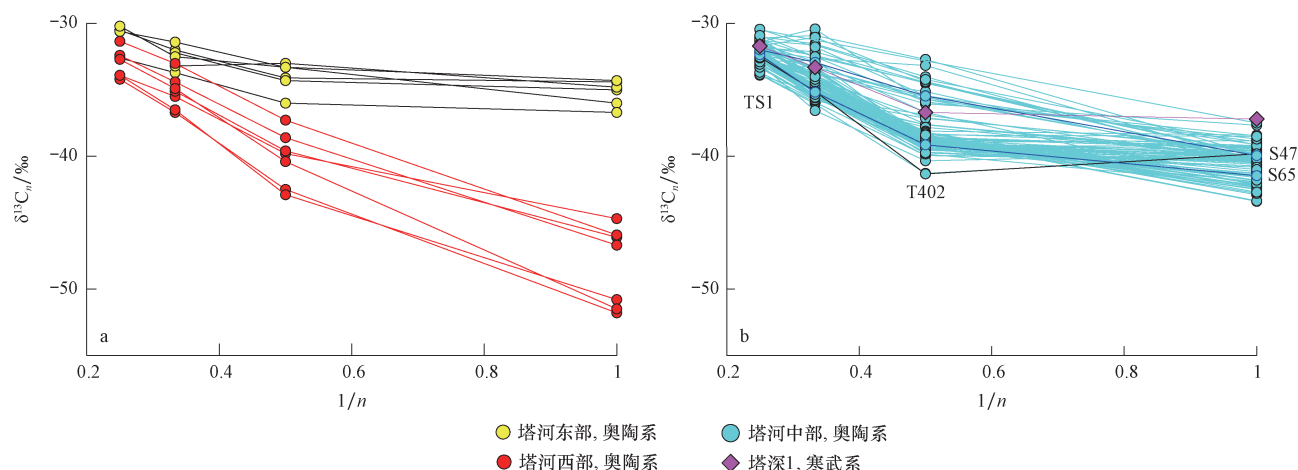
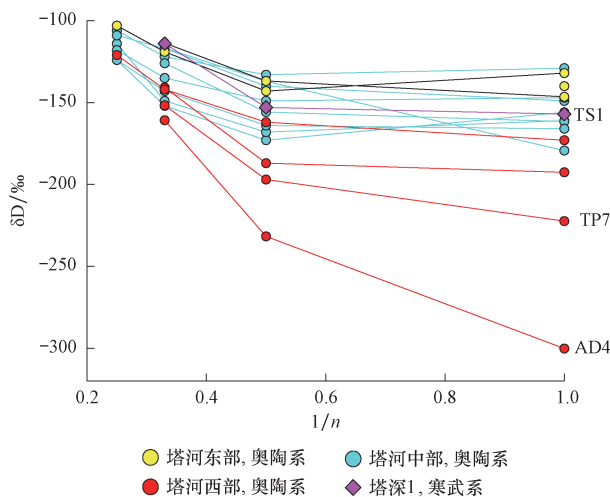
图3 塔河油田奥陶系天然气 $\delta^{13}C_n - 1/n$ 关系

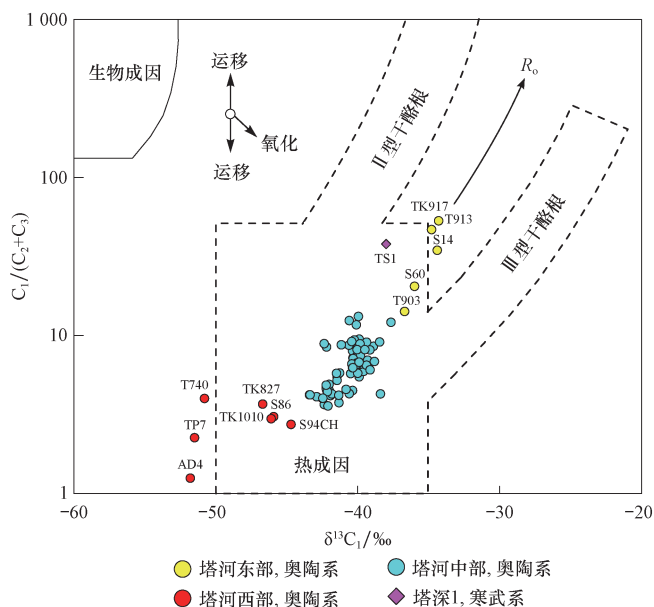
Fig. 3 Correlation of $\delta^{13}C_n$ with $1/n$ for the natural gas in the Ordovician in Tahe oilfield

图4 塔河油田奥陶系天然气 $\delta D-1/n$ 关系Fig. 4 Correlation of δD with $1/n$ for the natural gas in the Ordovician in Tahe oilfield

天然气在图上呈良好的线性关系,偏西部重质油区的沙65井天然气也表现出良好的线性关系,而中部偏东的T402井天然气则表现出甲烷和乙烷碳同位素的部分倒转($\delta^{13}C_1 > \delta^{13}C_2$),塔深1井下奥陶统一上寒武统天然气也具相似特征,同时其 $\delta^{13}C_2$ 和 $\delta^{13}C_3$ 值与中西部重质油区天然气相似,表明晚期更高成熟度天然气的混入对塔河油田中、东部地区天然气藏混合、改造的不均一性,是形成地化特征差异的主要因素(图3b)。

2.2 氢同位素特征

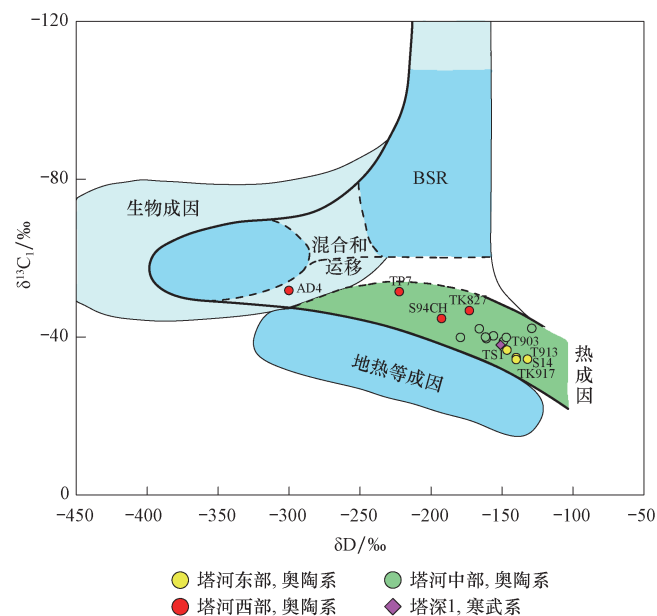
塔河油田奥陶系天然气氢同位素分析样品较少。

图5 塔河油田奥陶系天然气 $C_1/(C_2+C_3)-\delta^{13}C_1$ 关系Fig. 5 Correlation of $C_1/(C_2+C_3)$ with $\delta^{13}C_1$ for the natural gas in the Ordovician in Tahe oilfield

17口井的天然气分子氢同位素数据与其分子的倒数主要呈线性关系分布(图4),总体与天然气单体烃碳同位素分布(图3)具有良好的相似性,除东部个别井外,氢同位素均呈正序分布。西部AD4井天然气具有特轻的 δD_{CH_4} 值(-300.2‰),同样也表现出塔河油田各地区天然气在成因上的差异。一般认为有机热成因烷烃气的氢同位素组成主要受源岩沉积环境和成熟度的影响^[9],并随有机质热演化程度的增高 δD_{CH_4} 值变重,而本区天然气主力烃源岩主要为寒武系斜坡一盆相烃源岩,热成熟度是影响天然气氢同位素的重要因素,因此塔河油田东部与中部天然气特征应主要受控于其热演化程度。

3 天然气成因类型

塔河油田奥陶系天然气总体表现出碳、氢同位素正序的特征(图3,图4),为典型的有机成因气。在Bernard等^[10] $\delta^{13}C_1 - C_1/(C_2+C_3)$ 成因分类图(图5)及Whiticar等^[11] $\delta^{13}C_1 - \delta D$ 关系图版上表现出有机热成因气的特征(图6),并随着热演化程度的增加,天然气 $\delta^{13}C_1$, $C_1/(C_2+C_3)$ 和 δD 均呈变重趋势。从图中可以反映出塔河油田天然气成熟度西部较低,东部较高的特征。特别值得注意的是AD4, TP7和T740井 $\delta^{13}C_1$ 值小于 -50‰ ,如此低的甲烷碳同位素值,其成因值得关注。形成如此低的天然气 $\delta^{13}C_1$ 值,一般仅见于生物气。生物气的显著特征是干燥系数大,虽然AD4井天然气在 $\delta^{13}C_1 - \delta D$ 关系(图6)

图6 塔河油田奥陶系天然气 $\delta^{13}C_1 - \delta D$ 关系Fig. 6 Correlation of $\delta^{13}C_1$ with δD for the natural gas in the Ordovician in Tahe oilfield

油已具裂解初期的温度条件,综合表明塔河西部天然气应为原油裂解初期的天然气。

塔河东部地区奥陶系天然气总体以高 C_2/C_3 、高 C_2/iC_4 值、高干燥系数为特征,天然气成熟度高于塔河中、西部地区。塔深1井及塔河中部地区部分奥陶系天然气出现甲烷和乙烷碳同位素的部分倒转 ($\delta^{13}C_1 > \delta^{13}C_2$),表明有更高成熟度天然气的混入。塔河油田寒武系主力烃源岩主要位于油田东南外围,目前成熟度已达到过成熟阶段,深部的寒武系—奥陶系储层的埋藏深度亦比西部艾丁地区更大,原油、沥青或分散有机质的热裂解条件也好于西部。图7表明塔河油田东部地区奥陶系天然气的高干燥系数是由成因类型相异的原油裂解气二次充注混合形成的,在 $C_2/C_3 - C_2/iC_4$ 关系图上表现为相对高的 C_2/C_3 值,区别于塔河油田中部地区奥陶系天然气。在 Prinzhofer^[17] 图版上(图8),东部奥陶系天然气表现出部分原油裂解气的特征,但 $\ln(C_2/C_3)$ 缺乏垂向直线上升的原油裂解气典型特征,说明不完全是单纯的原油裂解气,应是干酪根裂解气与原油裂解气的混合气,来源于喜山晚期的油气充注。

从塔河油田中部主体区油气主要成藏期为海西晚期分析^[20],奥陶系天然气表现出以干酪根裂解气为主要特征(图8),天然气组分也表现为伴生气为主、部分凝析气的特征,奥陶系油气是同期形成、一期成藏的产物。塔河中部地区也存在东西差异,靠近东部地区显示出更多的原油裂解气特征,如 TK322 井,与晚期油气充注方向为由东向西是一致的。

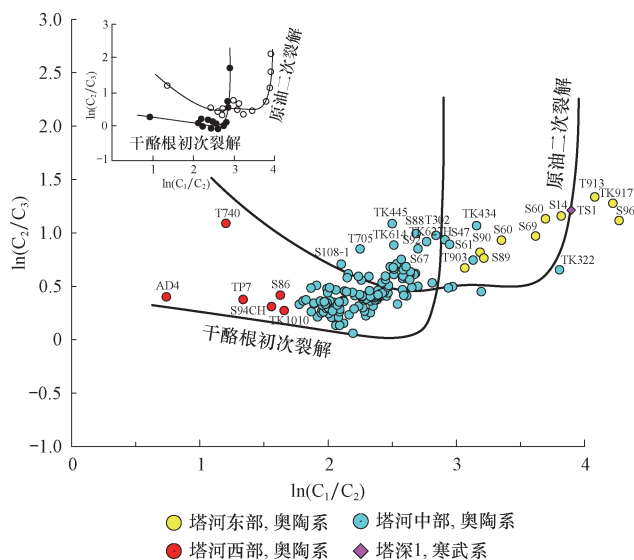


图8 塔河油田奥陶系天然气 $\ln(C_2/C_3)$ 与 $\ln(C_2/C_3)$ 关系

Fig. 8 Correlation of $\ln(C_2/C_3)$ with $\ln(C_2/C_3)$ for the natural gas in the Ordovician in Tahe oilfield

塔河油田唯一一口钻遇寒武系的塔深1井天然气 $\delta^{13}C_1$ 值为 -37.2% ,稍轻于塔河东部奥陶系天然气; $\delta^{13}C_2$ 为 -36.7% ,偏重于塔河东部奥陶系天然气及中部中质油藏天然气如沙47等井(图3),总体与塔河奥陶系东部天然气具有相似的碳、氢同位素分布特征;同时,天然气 C_5-C_7 轻烃组成分析表明,塔深1井下奥陶统—上寒武统天然气与塔河奥陶系天然气分布相似,具有相同的母质来源^[6]。塔深1井在塔河油田的地理位置上也属于中部偏东,下奥陶统—上寒武统储层油气相态分析为带油环的凝析气藏^[21]。塔深1井下奥陶统—上寒武统天然气在 $C_2/C_3 - C_2/iC_4$ 关系图上(图7b)远离东部奥陶系天然气,表明其成因仍可能以干酪根裂解气为主,原油裂解气为辅。

4 结论

1) 塔河油田奥陶系天然气主体表现为有机成因的油型气,由西向东天然气成熟度具有明显增大的趋势,东、西部差异显著。西部地区天然气以低甲烷、高重烃含量为特征,同时表现出轻甲烷、乙烷碳、氢同位素特征;东部地区则以高甲烷、低重烃含量为特征,甲烷、乙烷碳、氢同位素重,并出现甲烷、乙烷碳同位素部分倒转。中部地区天然气组分及碳、氢同位素特征介于东、西部之间。

2) 塔河油田西部艾丁地区奥陶系天然气以溶解气或伴生气为主,以低甲烷、高重烃含量、特低的甲烷碳同位素 ($\delta^{13}C_1 < -50\%$) 为特征,从原油裂解模拟实验及目前储层埋深及地层温度,综合判别主要来源于原油初期裂解的少量天然气。

3) 塔河东部地区奥陶系天然气以过成熟裂解气为主,具高干燥系数、重甲烷碳同位素特征,部分钻井天然气出现甲烷、乙烷碳同位素倒转,表明天然气具二次充注成藏特征。综合判断,天然气的二次充注主要来源于喜山晚期以来的干酪根裂解与原油裂解的混合气。塔深1井下奥陶统—上寒武统天然气与塔河东部奥陶系天然气地球化学特征相似,是同源的产物,并具二次充注成藏的特征。

4) 塔河中部主体区奥陶系天然气成熟度适中,以伴生气为主,部分凝析气,是与油气同期成藏的干酪根裂解气。

参 考 文 献

- [1] 黎玉战,徐传会. 塔里木盆地塔河油田发现历程及其意义[J]. 石油实验地质, 2004, 26(02): 180-186.
- Li Yuzhan, Xu Chuanhui. Significance and discovery history of Tahe Oilfield of the Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment,

- 2004,26(02):180-186.
- [2] 翟晓先. 塔河大油田新领域的勘探实践[J]. 石油与天然气地质, 2006,27(06):751-761.
Zhai Xiaoxian. Exploration practices in frontiers of Tahe Oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2006,27(06):751-761.
- [3] 翟晓先, 云露. 塔里木盆地塔河大型油田地质特征及勘探思路回顾[J]. 石油与天然气地质, 2008,29(05):565-573.
Zhai Xiaoxian, Yun Lu. Geology of giant Tahe oilfield and a review of exploration thinking in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008,29(05):565-573.
- [4] 翟晓先. 塔里木盆地塔河特大型油气田勘探实践与认识[J]. 石油实验地质, 2011,33(04):323-331.
Zhai Xiaoxian. Exploration practice and experience of Tahe Giant oil-and-gas field, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011,33(04):323-331.
- [5] 王杰, 顾忆, 饶丹, 等. 塔河油田奥陶系天然气地球化学特征、成因及运移充注规律研究[J]. 地球化学, 2007,36(06):633-637.
Wang Jie, Gu Yi, Rao Dan, et al. Geochemistry, genetic type and migration and filling of Ordovician natural gas in Tahe Oilfield[J]. Geochimica, 2007,36(06):633-637.
- [6] 翟晓先, 顾忆, 钱一雄, 等. 塔里木盆地塔深1井寒武系油气地球化学特征[J]. 石油实验地质, 2007,29(04):329-333.
Zhai Xiaoxian, Gu Yi, Qian Yixiong, et al. Geochemical characteristics of the Cambrian oil and gas in Well Tashen 1, the Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007,29(04):329-333.
- [7] 刘全有, 金之钧, 张殿伟, 等. 塔里木盆地天然气地球化学特征与成因类型研究[J]. 天然气地球科学, 2008,19(02):234-237.
Liu Quanyou, Jin Zhijun, Zhang Dianwei, et al. Geochemical characteristics and genesis of natural gas in Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2008,19(02):234-237.
- [8] Chung H M, Gormly J, Squires R R M. Origin of gaseous hydrocarbons in subsurface environments: theoretical considerations of carbon isotope distribution[J]. Chemical Geology, 1988(71):97-103.
- [9] 王晓锋, 刘文汇, 徐永昌, 等. 不同成因天然气的氢同位素组成特征研究进展[J]. 天然气地球科学, 2006,17(02):163-169.
Wang Xiaofeng, Liu Wenhui, Xu Yongchang, et al. The hydrogen isotopic composition of natural gases generated from different pathway[J]. Natural Gas Geoscience, 2006,17(02):163-169.
- [10] Bernard B B, Brook J M. Light hydrocarbons in recent Texas continental shelf and slope sediments[J]. Journal of Geophysical Research, 1978,83(C8):4053-4061.
- [11] Whiticar M J. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane[J]. Chemical Geology, 1999,161(1):291-314.
- [12] 王祥, 张敏, 刘玉华. 塔里木盆地塔中地区天然气成因及其差异[J]. 石油与天然气地质, 2010,31(03):335-342.
Wang Xiang, Zhang Min, Liu Yuhua. Origins of natural gas in Tazhong area, the Tarim Basin and their differences[J]. Oil & Gas Geology, 2010,31(03):335-342.
- [13] 田辉, 肖贤明, 李贤庆, 等. 海相干酪根与原油裂解气甲烷生成及碳同位素分馏的差异研究[J]. 地球化学, 2007,36(01):71-77.
Tian Hui, Xiao Xianming, Li Xianqing, et al. Comparison of gas generation and carbon isotope fractionation of methane from marine kerogen and crude oil-cracking gases[J]. Geochimica, 2007,36(01):71-77.
- [14] 王云鹏, 赵长毅, 王兆云, 等. 海相不同母质来源天然气的鉴别[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2007,37(S2):125-140.
Wang Yunpeng, Zhao Changyi, Wang Zhaoyun, et al. Identification of marine natural gases with different origin sources[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2007,37(S2):125-140.
- [15] 陈中红. 原油裂解成气研究进展[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2012,31(03):22-31.
Chen Zhonghong. Research progress of oil cracking into Gas[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology, 2012,31(03):22-31.
- [16] 黄光辉, 张敏, 胡国艺, 等. 原油裂解气和干酪根裂解气的地球化学研究(II)—原油裂解气和干酪根裂解气的区分方法[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2008(S2):9-16.
Huang Guanghui, Zhang Min, Hu Guoyi. Geochemical research of kerogen-cracked gases and oil-cracked gases (II): The distinction method of kerogen-cracked gases and oil-cracked gases[J]. Science in China (Series D), 2008(S2):9-16.
- [17] Alain A, Prinzhofer, Alain Y Huc. Genetic and post-genetic molecular and isotopic fractionations in natural gases[J]. Chemical Geology, 1995,126(3-4):281-290.
- [18] Ronald J, Hill, Yongchun Tang, et al. Insights into oil cracking based on laboratory experiments[J]. Organic Geochemistry, 2003,34(12):1651-1672.
- [19] 丁勇, 彭守涛, 夏东领. 塔河油田艾丁地区奥陶系油气藏特征与成藏期[J]. 新疆石油地质, 2013,34(03):262-264.
Ding Yong, Peng Shoutao, Xia Dongling. The reservoir characteristics and hydrocarbon accumulation stages of Ordovician in aiding area of Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013,34(03):262-264.
- [20] 顾忆. 塔里木盆地北部塔河油田油气藏成藏机制[J]. 石油实验地质, 2000,22(04):307-312.
Gu Yi. Forming mechanism of hydrocarbon pools in Tahe oilfield of the Northern Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2000,22(04):307-312.
- [21] 张海坤, 周世新, 付德亮, 等. 塔里木盆地塔深1井深层油气相态预测[J]. 天然气地球科学, 2013,24(05):999-1004.
Zhang Haikun, Zhou Shixin, Fu Deliang, et al. Petroleum phase state prediction in deep reservoir of Tashen-1 Well in Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2013,24(05):999-1004.

(编辑 董立)