

文章编号: 0253-9985(2005)04-0455-06

# 塔里木盆地和田河气田天然气裂解类型

秦胜飞<sup>1</sup>, 李梅<sup>2</sup>, 戴金星<sup>1</sup>, 肖中尧<sup>2</sup>, 张秋茶<sup>2</sup>1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083 2. 中国石油塔里木油田公司  
勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000)

**摘要:** 和田河气田天然气来自寒武系高-过成熟烃源岩, 气田大体上呈长条状东西向展布。和田河气田天然气组分具有随  $C_1/C_2$  增加  $C_2/C_3$  变小、碳同位素  $\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3$  值变化较大、 $\ln(C_2/C_3)$  值变化较小的特点。根据目前惯用的干酪根裂解气和原油二次裂解气判识标准, 和田河气田的天然气应属于干酪根裂解气。和田河气田东、西部井区天然气干燥系数、甲烷碳同位素值及二氧化碳含量存在明显的差异。伴随晚喜山期和和田河圈闭的形成, 干酪根裂解生成的天然气以水溶方式自东部高压区向西部低压区运移, 由于甲烷在水中的溶解度大于重烃、 $\delta^{13}CH_4$  溶解度大于  $\delta^{12}CH_4$ 、 $CO_2$  在天然气组分中溶解度最大, 造成天然气组分和甲烷碳同位素的分馏, 使西部井区天然气具有干燥系数偏高、甲烷碳同位素值偏重、二氧化碳含量明显偏高等特点。

**关键词:** 裂解气; 水溶气; 运移; 和田河气田; 塔里木盆地

**中图分类号:** TE112.1 **文献标识码:** A

## Types of cracking gas in Hetianhe gas field in Tarim basin

Qin Shengfei<sup>1</sup>, Li Mei<sup>2</sup>, Dai Jinxing<sup>2</sup>, Xiao Zhongyao<sup>2</sup>, Zhang Qiucha(1. Exploration and Development Research Institute, PetroChina, Beijing;  
2. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Xinjiang)

**Abstract** Natural gas in Hetianhe gas field, which is distributed in an elongated E-W direction as a whole, have been sourced by the high- and overmature Cambrian source rocks. The components of natural gas in Hetianhe gas field have the following characteristics:  $C_2/C_3$  decreases with increasing  $C_1/C_2$ , variation of carbon isotope value of  $\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3$  is relatively large, while variation of  $\ln(C_2/C_3)$  value is relatively small. According to the conventional diagnostic criteria of kerogen cracking gas and secondary cracking gas from oil, the gas in Hetianhe gas field should be of kerogen cracking gas. The dry coefficients, methane carbon isotope values and  $CO_2$  contents of natural gas are obviously different in the western and eastern wellblocks of Hetianhe gas field. Accompanying the formation of Hetianhe trap in late Himalayan, the kerogen cracking gas migrated from the high pressure zone in the east to the low pressure zone in the west in the form of dissolved gas. The solubility of methane in water is larger than that of heavy hydrocarbons, the solubility of  $\delta^{13}CH_4$  is larger than that of  $\delta^{12}CH_4$ , and  $CO_2$  has the largest solubility among the components of natural gas, all these would lead to the fractionation of natural gas components and methane carbon isotope. As a result, the natural gas in the western wellblock is characterized by larger dry coefficient, heavier methane carbon isotope and obviously higher  $CO_2$  content.

**Key words** Tarim Basin; Hetianhe gas field; cracking gas; water-soluble gas; migration

和田河气田是塔里木盆地发现和探明的第 一个碳酸盐岩整装大气田, 探明储量  $616.94 \times$

**基金项目:** “十·五”国家重点科技攻关项目“中国大中型气田勘探开发关键技术研究”(2001BA605A-06)和国家重点基础研究发展规划项目(973)(2002CB211705)

**第一作者简介:** 秦胜飞, 男, 36岁, 高级工程师(博士), 天然气地质、地球化学及油气成藏

**收稿日期:** 2005-07-05

$10^8 \text{ m}^3$ , 天然气来自下伏寒武系烃源岩<sup>[1, 2]</sup>, 成因类型属于油型气<sup>[1, 3]</sup>。由于对和田河气田天然气主要是干酪根裂解气还是油的二次裂解气认识不同, 在一定程度上影响了勘探的部署和进展。对于和田河气田东、西部天然气地球化学特征的差别, 目前存在有不同的观点。有些学者认为和田河气田天然气主要是寒武系古油藏原油二次裂解气<sup>[2, 4, 5]</sup>, 东、西部天然气地球化学特征的差别是由于东部井区主要以原油裂解气为主, 西部井区主要为干酪根裂解气和原油裂解气的混合气<sup>[2]</sup>。也有人认为和田河气田东、西部天然气地球化学特征的差异, 是由于硫酸岩还原菌作用 (BSR) 的结果<sup>[6]</sup>。笔者以前认为和田河气田东、西部天然气地球化学的差异是成藏过程中油气运移所致, 但对运移的方式却认识不足<sup>[1]</sup>。本文根据目前所惯用的干酪根裂解气和原油二次裂解气判识标准, 重新对和田河气田天然气裂解类型进行全面分析, 并对气田东、西部天然气地球化学特征的差异提出新的观点。

为了确保数据的可靠, 同时确保数据能够全面反映整个气田的特征, 笔者几年前在塔里木会战期间, 对现场实验室和田河气田所有近 200 个样品的天然气组分资料进行了整理和筛选。删去空气含量大于 10% 的样品及同一深度所取样品的异常分析数据, 取其余样品组分的平均值, 作为该深度天然气组分数据。分析天然气碳同位素时, 则采用相应样品的天然气组分数据。

## 1 裂解气鉴别图版

裂解气包括干酪根裂解气和原油裂解气, 理论上两种裂解气在自然界都存在, 但要鉴别这两种成因类型的天然气难度很大。目前主要是依据 Prinzhofer 等<sup>[7]</sup>根据 Behar 等<sup>[8]</sup>开展的模拟实验数据作出的鉴别图版 (图 1a)。

干酪根裂解气和油的二次裂解气的鉴别特征为: 干酪根裂解气  $C_1/C_2$  增加很快, 而  $C_2/C_3$  却增加较慢、或基本不变 (甚至可能变小); 油的二次裂解气  $C_1/C_2$  增加较小或基本不变,  $C_2/C_3$  比值却急剧增加<sup>[7]</sup>。根据该鉴别图版, Prinzhofer 等判断安哥拉气田为干酪根裂解气 (图 1b), 堪萨斯气田为油的二次裂解气 (图 1c)。前者属于干酪根裂解气中随  $C_1/C_2$  增加, 而  $C_2/C_3$  变小的类型; 后

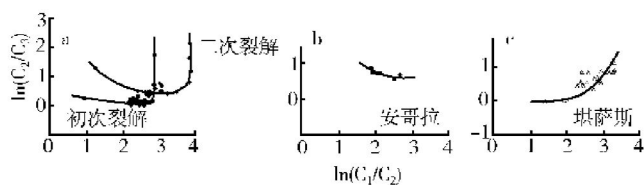


图 1 干酪根裂解气与油的二次裂解气组分鉴别模式图<sup>[7]</sup>

Fig. 1 Mode charts for discriminating kerogen cracking gas and secondary cracking gas from oil by components

(图 1a—鉴别图版; 图 1b—安哥拉干酪根裂解气; 图 1c—堪萨斯油的二次裂解气)

者属于原油二次裂解气, 随  $C_1/C_2$  增加,  $C_2/C_3$  增加较快。由于 Behar 的模拟实验产物只进行了组分分析, 没有分析产物的碳同位素, Prinzhofer 等<sup>[7]</sup>还建立了用天然气组分结合碳同位素值来鉴别裂解气类型的图版, 即  $\ln(C_2/C_3)$  与  $\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3$  关系图 (图 2), 认为干酪根裂解气  $\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3$  值变化较大,  $\ln(C_2/C_3)$  值变化较小; 而原油二次裂解气  $\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3$  值变化较小,  $\ln(C_2/C_3)$  值变化较大, 并认为堪萨斯为油的二次裂解气, 加利福尼亚为干酪根裂解气。陈世加等<sup>[9]</sup>也曾经根据这些鉴别图版用于鉴别塔里木盆地腐泥型天然气成因类型。

## 2 气田特征

### 2.1 概况

和田河构造位于塔里木盆地巴楚凸起南侧的玛扎塔格断裂构造带<sup>[1, 2]</sup>, 构造由一系列构造高点组成, 自西往东分别是玛 8 号高点, 玛 3 号高点、玛 2 号高点、玛 5 号高点和玛 4 号高点。其中, 玛 8 号、玛 3 号、玛 2 号高点及其相关的钻井组成西部井区, 玛 5 号和玛 4 号高点及其相关钻井组成东部井区。东、西部井区之间的玛 7 井位于构造低部位, 钻探为空井。构造总体上呈东西向长条状展布 (图 3), 西部井区位置高于东部, 相对高差 100~300 m<sup>[1]</sup>。目前, 分别在玛 4 号、玛 3 号和玛 8 号高点石炭系的砂泥岩段 (C2)、标准灰岩段 (C4)、生屑灰岩段 (C6)、下泥岩段 (C7)、砂砾岩段 (C8) 和奥陶系 (O) 6 个层段获高产气流。气水界面西部井区高于东部井区。

### 2.2 裂解气特征

由于东部井区天然气产层主要为奥陶系, 且

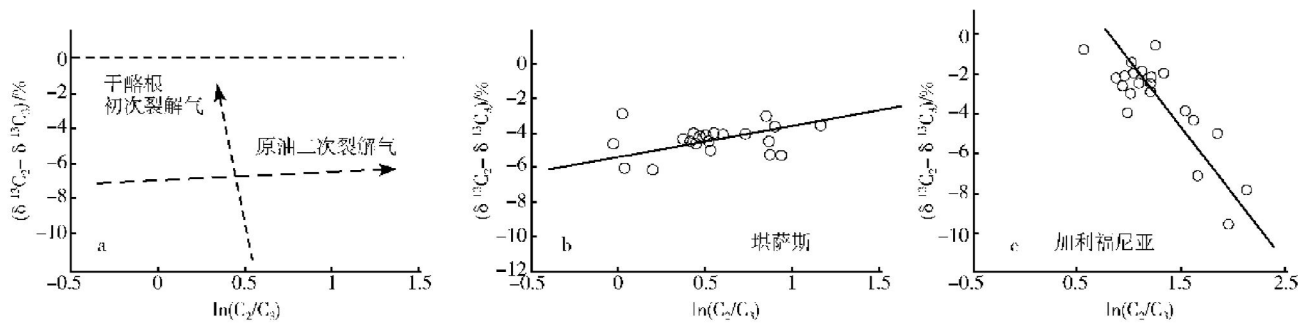


图 2 干酪根裂解气和油的二次裂解气碳同位素和组分关系鉴别图版<sup>[7]</sup>

Fig. 2 Mode chart for discriminating kerogen cracking gas and secondary cracking gas from oil by components and carbon isotopes

根据图版判断, 堪萨斯为油的二次裂解气, 加利福尼亚为干酪根裂解气

具有相同的气水界面(图 3), 天然气组分特征比较相近, 很难用干酪根裂解气和原油二次裂解气组分的鉴别图版(图 1)判断天然气裂解类型。而西部井区天然气产层较多, 每口井的趋势线都明显反映出干酪根裂解气的特征, 变化趋势与安哥拉干酪根裂解气相似(图 1b), 属于随  $C_1/C_2$  增加,  $C_2/C_3$  变小的类型(图 4)。

由于和田河气田天然气碳同位素分析样品数量有限, 因此把东、西部井区分析的天然气  $\ln(C_2/C_3)$  与  $(\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3)$  数据放在同一张图上(图 5), 可以看出, 其总体变化趋势与加利福尼亚干酪根裂解气相似。根据天然气组分和碳同位素值联

合建立的鉴别图版(图 2-a c)判别, 和田河气田天然气也应属于干酪根裂解气。

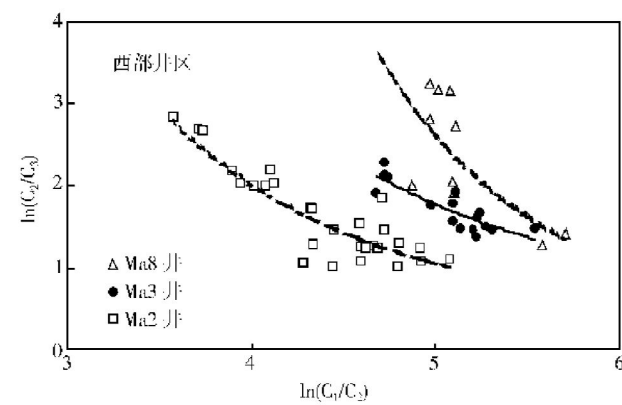


图 4 和田河气田西部井区天然气  $\ln(C_1/C_2)$  与  $\ln(C_2/C_3)$  关系图

Fig. 4  $\ln(C_1/C_2)$  vs  $\ln(C_2/C_3)$  of gas in western wellblock of Hetianhe gas field

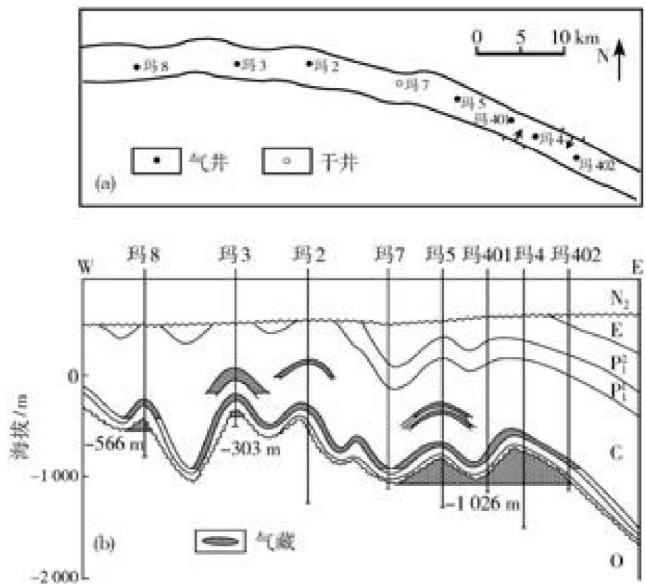


图 3 和田河气田平面和剖面图

Fig. 3 Plane view and profile of Hetianhe gas field

注: 图中- 566 - 303 - 1026 m 分别是玛 8、玛 3 和玛 4 的气水界面

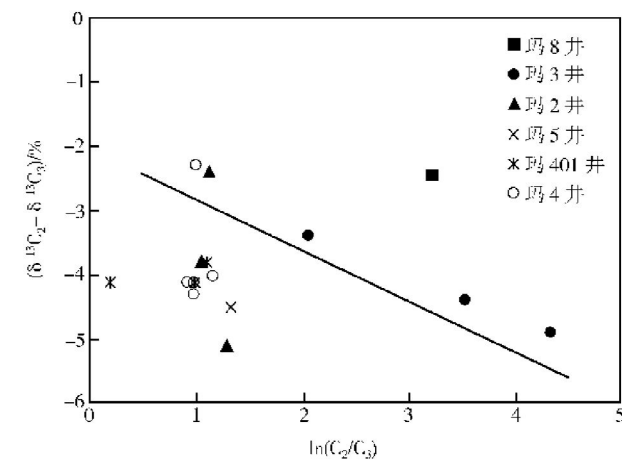


图 5 和田河气田天然气  $\ln(C_2/C_3)$  与  $(\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3)$  关系

Fig. 5  $\ln(C_2/C_3)$  vs  $(\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3)$  of gas in Hetianhe gas field

### 3 东、西部差异及成因

水溶气运移、溶解气脱溶成藏是天然气运聚成藏的重要特点<sup>[10]</sup>。水溶气沿储集层作侧向长距离运移过程中,因温度和压力逐渐降低,其溶解的天然气经历了由未饱和-饱和-过饱和而逐渐析出,游离气在运移路径上的适宜条件下聚集成藏,致使天然气呈串呈带分布<sup>[11,12]</sup>。

和田河气田天然气虽然都属于干气,但东、西部天然气地球化学特征仍有明显差异<sup>[1,2]</sup>。主要表现在:西部井区天然气  $\text{CO}_2$  含量明显高于东部井区;④西部井区天然气干燥系数略高于东部;④甲烷碳同位素值西部井区重于东部井区。

在相同条件下天然气组分在水中的溶解能力顺序为:  $\text{CO}_2 > \text{CH}_4 > \text{N}_2 > \text{C}_2\text{H}_6 > \text{C}_3\text{H}_8$ <sup>[13,14]</sup>。由于和田河气田天然气以水溶方式自东向西运移的过程中,东、西部井区天然气在水中的溶解度不同,而造成西部井区天然气组分和甲烷碳同位素的分馏,形成东、西部井区天然气组分上的差别。

#### 3.1 $\text{CO}_2$ 含量

和田河气田西部井区的玛 8 井天然气  $\text{CO}_2$  平均含量为 12.8%,玛 3 为 10.2%;东部井区的玛 5、玛 401 和玛 4 井  $\text{CO}_2$  平均含量仅为 1.86%。

由于和田河气田西部井区储集层压力明显低于东部井区<sup>[1]</sup>,水溶气在从东往西运移的过程中,由于压力不断降低,天然气不断从水中释出并聚集气藏。基于  $\text{CO}_2$  在天然气组分中溶解度最大,因而水溶气运移到西部井区才大量析出  $\text{CO}_2$ , 而造成和田河气田西部井区  $\text{CO}_2$  含量明显高于东部井区。

#### 3.2 干燥系数

对于烃类气体而言,水溶气的运移是富集甲烷的过程,因为甲烷在水中的溶解度大于重烃气。所以水溶气运移的结果是天然气干燥系数 ( $C_1/C_1^+$ ) 不断增大。

和田河气田天然气干燥系数西部井区略高于东部。气田西部的玛 8 井和玛 3 井天然气干燥系数最高,平均为 0.992 和 0.993;东部井区的玛 5 井、玛 401 井和玛 4 井天然气干燥系数相对较低,分别为 0.964、0.960 和 0.967;玛 2 井位于西部和东部的过渡区,天然气干燥系数处于东部井区和西部井区之间,平均为 0.983。

### 3.3 甲烷碳同位素

水溶气可以使甲烷碳同位素发生分馏作用,是因为  $\delta^{13}\text{CH}_4$  溶解度大于  $\delta^{12}\text{CH}_4$ 。随运移路径的增加,水溶气会逐渐富集  $\delta^{13}\text{CH}_4$ 。张晓宝等用热真空脱气法对吐哈盆地台北坳陷水溶气进行研究,并与同一地区的常规的天然气进行对比,发现水溶气甲烷碳同位素明显比天然气偏重<sup>[15]</sup>。说明水更容易溶解  $\delta^{13}\text{CH}_4$ , 进而说明流动的地下水更容易把  $\delta^{13}\text{CH}_4$  溶解带走。

和田河气田天然气甲烷碳同位素东部和西部井区亦有明显差别,自东向西逐渐变重:由东部井区平均值的 -37.7 ‰变化到西部井区的玛 8 井的 -34.8 ‰,玛 2 井平均为 -36.67 ‰,仍处于东部和西部井区之间(图 6)。

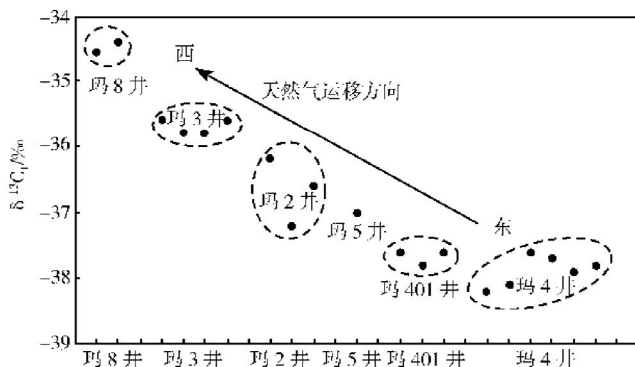


图 6 和田河气田东、西部井区甲烷碳同位素值分布图

Fig. 6 Distribution of methane carbon isotopes in the eastern and western well blocks of Hetaohe gas field

## 4 讨论

和田河气田所在的巴楚凸起于泥盆纪末期开始隆起,二叠纪末期进一步发展,三叠纪以后,西南坳陷开始下沉,巴楚凸起现今的构造构架主要形成于中新生代<sup>[16]</sup>。喜山运动时期随着天山、昆仑山迅速隆升,前陆冲断-褶皱活动进一步加剧,使巴楚凸起持续隆升<sup>[17,18]</sup>,大面积缺失中、新生界<sup>[19]</sup>。断裂和不整合面都是巴楚地区油气运移的主要通道<sup>[20,21]</sup>。因此,在紧邻和田河气田南部的西南坳陷由于大幅度沉降而产生异常高压,使流体沿大型断裂及不整合面往巴楚凸起方向运移。深部寒武系高-过熟烃源岩产生的天然气在异常高压作用下大量溶解于水,并沿断裂向上运移至和田河气田构造位置较低的东部井区中,然后再沿不整合面作长距离侧向运移,在压力驱使下水

溶气运往气田构造位置相对较高的西部井区中。在水溶气作长距离侧向运移同时,由于沿运移路径压力降低,水中溶解气不断析出,并沿构造高点聚集成藏,形成条带状分布的和田河气田。

### 参 考 文 献

- 秦胜飞,贾承造,李梅. 和田河气田天然气东西部差异及成因[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(5): 16~18  
Qin Shengfei, Jia Chengzao, Li Mei. The difference on geochemical characteristics of natural gases in the eastern and western parts of Hetianhe gas field in Tarim basin and its origin [J]. Petroleum Exploration & Development, 2002, 29(5): 16~18
- 赵孟军. 塔里木盆地和田河气田天然气的特殊来源及非烃组分的成因[J]. 地质论评, 2002, 48(5): 480~486  
Zhao Mengjun. Special source of the natural gas in Hetianhe gas field and the origin of its non-hydrocarbon gas [J]. Geological Review, 2002, 48(5): 480~486
- 秦胜飞,李先奇,肖中尧,等. 塔里木盆地天然气地球化学、成因与分布特征[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 68~76  
Qin Shengfei, Li Xianqi, Xiao Zhongyao, et al. The geochemistry, origin and occurrence of natural gases in Tarim basin of China [J]. Petroleum Exploration & Development, 2005, 32(4): 68~76
- 赵孟军,张水昌,廖志勤. 原油裂解气在天然气勘探中的意义[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(4): 47~56  
Zhao Mengjun, Zhang Shuichang, Liao Zhiqin. The cracking gas from crude oil and its significance in gas exploration [J]. Petroleum Exploration & Development, 2001, 28(4): 47~56
- 赵孟军,曾凡刚,卢双舫,等. 塔里木发现和证实两种裂解气[J]. 天然气工业, 2001, 21(1): 35~38  
Zhao Mengjun, Zeng Fangang, Lu Shuangfang, et al. Two kinds of cracking gas found and proved in Tarim basin [J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(1): 35~38
- Cai Chunfang, Worden R H, Wang Qinghua, et al. Chemical and isotopic evidence for secondary alteration of natural gases in the Hetianhe field, Bachu uplift of the Tarim basin [J]. Organic Geochemistry, 2002, 33: 1415~1427
- Prinzhofer A, Huc A Y. Genetic and post-genetic molecular and isotopic fractionations in natural gases [J]. Chemical Geology, 1995, 126: 281~290
- Behar F, Kressmann S, Rudkiewicz J L, et al. Experimental simulation in confined system and kinetic modeling of kerogen and oil cracking [J]. Organic Geochemistry, 1992, 19: 173~189
- 陈世加,马力宇,付晓文,等. 塔里木盆地海相腐泥型天然气的成因判识[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(2): 100~101  
Chen Shijia, Ma Liyu, Fu Xiaowen, et al. Genetic discrimination of marine sapropelic type gas in Tarim basin [J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(2): 100~101
- 蒋有录,张一伟. 天然气藏与油藏形成机理及分布特征的异同[J]. 地质科技情报, 2000, 19(1): 69~72  
Jiang Youlu, Zhang Yiwei. Similarity and differences between oil pools and gas pools in their formation mechanisms and distribution characteristics [J]. Geological Science & Technology Information, 2000, 19(1): 69~72
- 付广,张云峰,陈章明. 有效水溶释放气量及其研究意义[J]. 沉积学报, 2000, 18(1): 157~161  
Fu Guang, Zhang Yunfeng, Chen Zhangming. Effective amount of gas released from water and its significance [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(1): 157~161
- 于建成,乔敏,付广,等. 天然气相态的转变及对成藏的作用[J]. 新疆石油学院学报, 2003, 15(2): 1~3  
Yu Jiancheng, Qiao Min, Fu Guang, et al. Transform of gas phases and their effect on formation of gas reservoirs [J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2003, 15(2): 1~3
- 郝石生,张振英. 天然气在地层水中的溶解度变化特征及地质意义[J]. 石油学报, 1993, 14(2): 12~22  
Hao Shisheng, Zhang Zhenying. Natural gas in formation waters and its geological significance [J]. Acta Petrolei Sinica, 1993, 14(2): 12~22
- 付晓泰,卢双舫,王振平,等. 天然气组分的溶解特征及其意义[J]. 地球化学, 1997, 16(3): 60~66  
Fu Xiaotai, Lu Shuangfang, Wang Zhenping, et al. Dissolving character of the components of natural gas and its significance [J]. Geochimica, 1997, 16(3): 60~66
- 张晓宝,徐永昌,刘文汇,等. 吐哈盆地水溶气组分与碳同位素特征形成机理及意义[J]. 沉积学报, 2002, 20(4): 705~709  
Zhang Xiaobao, Xu Yongchang, Liu Wenhui, et al. A discussion of formation mechanism and its significance of characteristics of chemical composition and isotope of water-dissolved gas in Turpan-Hami Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(4): 705~709
- 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 317~320  
Jia Chengzao. The structure and petroleum of Tarim basin in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997. 317~320
- 何文渊,李江海,钱祥麟,等. 塔里木盆地巴楚断隆中新生代的构造演化[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2000, 36(4): 539~546  
He Wenyu, Li Jianghai, Qian Xianglin, et al. The Mesozoic evolution of Bachu fault uplift in Tarim Basin [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2000, 36(4): 539~546
- 付建奎,张光亚,马郡,等. 塔里木盆地巴楚地区构造样式与演化[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(5): 10~11  
Fu Jiankui, Zhang Guangya, Ma Jun, et al. The structural styles & their evolution in Bachu area of Tarim basin [J]. Petroleum Exploration & Development, 1999, 26(5): 10~11
- 肖安成,杨树锋,李曰俊,等. 塔里木盆地巴楚-柯坪地区新

- 生代断裂系统 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1): 78~85
- Xiao Ancheng Yang Shufeng Li Yuejun et al The Cenozoic fracture systems in Bachu-Keping area of Tarim basin [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(1): 78~85
- 20 余晓宇, 施泽进, 刘高波. 巴楚-麦盖提地区油气成藏的输导系统 [J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 346~349
- She Xiaoyu Shi Zejin Liu Gaobo Pathway system of oil and gas migration in Bachu-Maigaiti area [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(4): 346~349
- 21 杨威, 王清华, 赵仁德, 等. 和田河气田奥陶系碳酸盐岩裂缝 [J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(3): 252~255
- Yang Wei Wang Qinghua Zhao Rende et al Fractures of Ordovician carbonate rocks in Hetianhe gasfield [J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(3): 252~255

(编辑 李树森)

(上接第 454 页)

- Dai Jinxing Qi Houfa Hao Shisheng Natural gas geology [M]. Beijing Petroleum Industry Press, 1989, 75, 93~95
- 13 康玉柱. 塔里木盆地古生代海相油气田 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992, 160~165, 142
- Kang Yuzhu Paleozoic marine facies oil & gas field [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992, 160~165, 142
- 14 陈正辅, 罗宏. 油气资源 [A]. 见: 康玉柱. 中国塔里木盆地石油地质特征及资源评价 [C]. 北京: 地质出版社, 1996, 179
- Chen Zhengfu Luo Hong Oil and gas resources [A]. In: Kang Yuzhu The characteristics of petroleum geology and resource assessment in Tarim Basin, China [C]. Beijing Geological Publishing House, 1996, 179
- 15 杨克明, 龚明, 段铁军, 等. 塔里木盆地断裂的输导和封闭性 [J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(2): 123~127
- Yang Keming Gong Ming Duan Tiejun et al Carrying and sealing properties of faults in Tarim basin [J]. Oil & Gas Geology, 1996, 17(2): 123~127
- 16 黄海军, 许晓宏. 天然气同位素特征及作用 [J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(21): 136~137
- Huang Haijun Xu Xiaohong The characteristics and function of natural gas isotope [J]. Oil & Gas Geology, 1997, 18(21): 136~137
- 17 汤良杰, 黄太柱, 王士敏. 塔里木盆地东北部断裂构造特征及控油作用 [A]. 见: 贾润胥. 中国塔里木盆地北部油气地质研究 (第二辑): 构造与油气 [C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991, 46~47
- Tang Liangjie Huang Taizhu Wang Shimin The characteristics of fault structure and its dominating petroleum function in northeastern Tarim basin [A]. In: Jia Yunxu Study on oil & gas geology in northern Tarim basin, China (Vol 2): structure and oil & gas [C]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991, 46~47
- 18 刘锦才, 陈志高. 塔里木盆地凝析油气及其运移模式 [J]. 石油与天然气地质, 1992, 13(1): 67
- Liu Jincan Chen Zhigao Condensate oil and gas and their migration model in Tarim basin [J]. Oil & Gas Geology, 1992, 13(1): 67
- 19 Eilertsen R H, Kaltenback A J, Lindberg F A. Source and migration of light hydrocarbons indicated by carbon isotopic ratios [J]. AAPG Bull, 1981, (66): 1536~1541
- 20 付晓泰, 王振平. 气体在水中的溶解机理及溶解度方程 [J]. 中国科学 (B) 辑, 1996, 126(2): 124~130
- Fu Xiaotai Wang Zhenping Gas dissolution mechanism and its solubility equation in water [J]. China Sciences (B), 1996, 126(2): 124~130
- 21 刘崇禧, 赵克斌, 余刘应. 中国油气化探 40 年 [M]. 北京: 地质出版社, 2001, 5, 17
- Liu Congxi Zhao Kebin Yu Liuying Forty years of geochemical prospecting for oil & gas in China [M]. Beijing Geological Publishing House, 2001, 5, 17
- 22 吴传壁, 邱郁文, 陈玉明, 等. 油气化探发展脉络与思考 [M]. 北京: 地质出版社, 1996, 103~104, 121~124
- Wu Chuanbi Qiu Yuwen Chen Yuming et al The developmental route and consideration of geochemical prospecting for oil and gas [M]. Beijing Geological Publishing House, 1996, 103~104
- 23 程军, 刘崇禧, 赵克斌, 等. 油气垂向微运移的证据及特点 [J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(3): 236~240
- Cheng Jun Liu Congxi Zhao Kebin et al Evidence and Characteristics of oil & gas vertical microseepage [J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(3): 236~240
- 24 Aleksyev F A. Isotope composition of carbon in gaseous hydrocarbon and conditions for accumulation of natural gas [J]. Intern Geol Rev, 1973, 15, 300
- 25 吴学明, 王福. 浅层酸解烃气地球化学方法在塔东北地区的应用效果 [A]. 见: 贾润胥. 中国塔里木盆地北部油气地质研究 (第三辑): 物化探与钻井 [C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991, 101~109
- Wu Xueming Wang Fu The application effect of surface adsorbed hydrocarbon method in northeastern Tarim Basin, China [A]. In: Jia Runxu Study on oil & gas geology in northern tarim basin, China (No 3): Geophysical and geochemical exploration and drilling [C]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991, 101~109

(编辑 李树森)