

文章编号: 0253-9985(2005)05-0618-05

塔河油田天然气的碳同位素特征及其成因类型

高波¹, 范明², 刘文汇¹, 南青云³, 张殿伟¹

(1 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

(2 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)

(3 中国科学院兰州地质研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要: 塔河油田天然气组分以烃类气体为主, 平均含量占气体总体积的 94.09%; 非烃气体以 N_2 和 CO_2 为主, 平均含量分别占 4.2% 和 1.19%。烃类气体中以甲烷占绝对优势, 平均含量为 76.23%; 重烃含量较高, 平均含量为 17.86%; 干燥系数 (C_1/C_{1-5}) 平均为 0.81, 整体上属典型的湿气。塔河油田所有样品的 $\delta^{13}C_2$ 都轻于 -30‰ , 属于典型的油型气范畴; 天然气的 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3$, 呈明显的正序排列, 显示天然气为典型的有机成因。塔河油田伴生天然气主体属于典型油型气, 未发现其他母质类型天然气的混入。甲烷碳同位素组成反映其母质演化程度已处于成熟-过成熟阶段, 且以高过成熟阶段为主。结合地质背景进行分析, 源岩应属寒武-奥陶系。部分系列碳同位素的非线性分布模式显示, 塔河油田的天然气具有两期充注特征: 早期充注的为原油伴生气; 晚期充注的为高温裂解气。

关键词: 组分; 碳同位素; 油型气; 天然气; 塔河油田

中图分类号: TE112.1 **文献标识码:** A

Carbon isotope features and genetic type of natural gas in Tahe oilfield

Gao Bo¹, Fan Ming², Liu Wenhui¹, Nan Qingyun³, Zhang Dianwei¹

(1 Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing)

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

(3 Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu)

Abstract Natural gas in Tahe oilfield is mainly composed of hydrocarbon gas with an average content of 94.09%. The non-hydrocarbon gas is mainly composed of N_2 and CO_2 , with average contents of 4.2% and 1.19%, respectively. Hydrocarbon gas is mainly composed of methane with an average content of 76.23%; while the heavy hydrocarbon has an average content of 17.86%. The drying coefficient (C_1/C_{1-5}) averages 0.81, indicating typical wet gas as a whole. The $\delta^{13}C_2$ values of all samples in this area are less than -30‰ , indicating that it is of petroleum gas and the $\delta^{13}C$ values are in obvious positive sequence, i.e. $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3$, indicating that it is typically of organic origin. The associated gas in Tahe oilfield mostly belongs to typical petroleum gas without any mixture of gas from other sources. The carbon isotope composition of methane reveals that the evolution of its source rocks is in the range of mature to overmature stages and is mainly in highly overmature stage. Analysis in combination with geologic setting indicates that the source rocks are of Cambrian-Ordovician. The non-linear distribution of some series of carbon isotopes shows that the gas in Tahe oilfield has been charged in two stages. Associated gas has been charged in the early stage, while pyrolysis gas has been charged in the late stage.

Key words component; carbon isotope; petroleum gas; natural gas; Tahe oilfield

前人对塔里木盆地宏观油气地球化学和塔河油田及其外围地区原油的地球化学特征已进行了

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科技项目 (P04090)

第一作者简介: 高波, 男, 36岁, 博士, 油气地质与地球化学

收稿日期: 2005-06-10

较多研究^[1~5], 但对于塔河油田区域天然气的地球化学特征却未作系统的研究。天然气烷烃气的碳同位素组成特征主要受控于成气母质的同位素组成和在地质历史过程中生物、化学、物理作用所造成的同位素分馏作用, 蕴藏着丰富的母质来源、成烃演化、成藏过程和次生变化等方面的重要信息, 是进行天然气成因判识和气源追踪的主要手段^[6~8]。本次研究中, 我们在对塔河油田及其外围地区 11 个天然气样进行组分及碳同位素分析的基础上, 结合前人对邻近地区天然气的研究成果, 对塔河油田天然气的地球化学特征进行了研究, 并对天然气的成因进行了探讨, 以期加深对该区油气成藏过程的认识。

1 地质概况

塔河油田位于塔里木盆地沙雅隆起阿克库勒凸起中南部。阿克库勒凸起为一个以寒武系和奥陶系碳酸盐岩为主体的长期继承性发育的大型古隆起, 东邻草湖凹陷, 西邻哈拉哈塘凹陷, 北依沙雅-轮台断隆带, 南接顺托果勒隆起和满加尔坳陷(图 1)。作为塔里木盆地的一个重要组成部分, 该区经历了复杂的演化过程。受加里东、海西和印支-燕山等多期构造运动的影响, 该区大部分地区缺失中上奥陶统、志留系一中、下泥盆统、上石炭统、二叠系和上侏罗统等, 形成了多个不整合界面^[9~10]。目前, 塔河油田已发现奥陶系碳酸盐岩及石炭系和三叠系碎屑岩 3 个油气产层。其中又以中下奥陶统碳酸盐岩岩溶缝洞型储层最为发育, 为该油田的最主要产层^[11~12]。

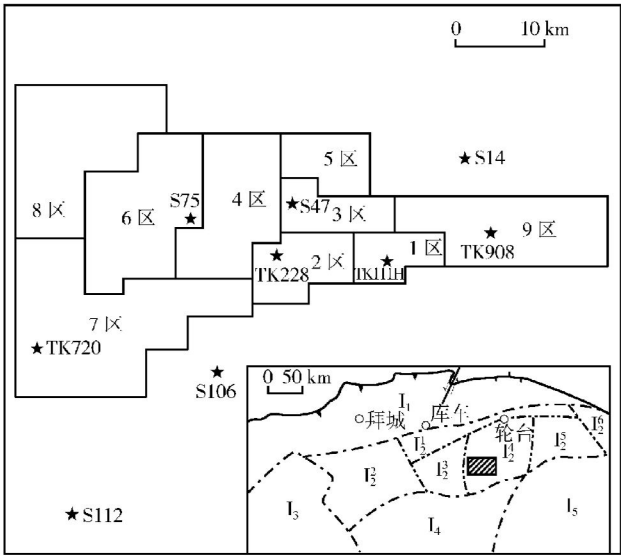


图 1 塔河油田采样位置图

Fig. 1 Location map of sampling points in Tahe oilfield
iv₁—库车坳陷; iv₂—沙雅隆起; iv₂¹—沙雅-轮台断隆, iv₂²—沙西隆起, iv₂³—哈拉哈塘凹陷, iv₂⁴—阿克库勒凸起, iv₂⁵—草湖凹陷, iv₂⁶—库尔勒鼻凸; iv₃—阿瓦提断陷; iv₄—顺托果勒隆起; iv₅—满加尔坳陷

2 天然气组分特征

塔河油田天然气的组分以烃类气体为主, 占气体总体积的 73.62% ~ 98.23%, 平均为 94.09%; 非烃气体以 N₂ 和 CO₂ 为主, 其平均含量分别占气体的 4.2% 和 1.19%。烃类气体中以甲烷占绝对优势, 含量为 52.06% ~ 91.68%, 平均为 76.23%; 重烃含量较高, 平均为 17.86%; 干燥系数 (C₁/C₁₋₅) 介于 0.71~0.94 平均为 0.81, 整体上属典型的湿气(表 1)。位于塔河油田东部 1

表 1 塔河油田和雅克拉气田天然气的地球化学特征

Table 1 Geochemical behaviors of natural gas in Tahe oilfield and Yakela gas field										
地区	井号	产层 层位	组分含量 /%			碳同位素 /‰			C ₁ /C ₁₋₅	R _o /%
			CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	δ ¹³ C ₁	δ ¹³ C ₂	δ ¹³ C ₃		
塔河油田	S112	O ₃ l	71.83	12.00	7.13	-43.0	-34.6	-32.2	0.74	0.89
	S106	O ₁₋₂ y	72.99	9.29	7.08	-40.1	-38.4	-34.2	0.76	1.35
	TK720	O ₁₋₂ y	68.41	11.70	7.84	-37.5	-35.8	-33.1	0.72	1.98
	S75	C ₁ k ¹	52.06	8.58	6.97	-42.8	-34.7	-32.4	0.71	0.92
	S47	O ₁₋₂ y	86.35	6.31	3.11	-40.7	-35.2	-33.3	0.88	1.25
	TK228	O ₁₋₂	78.63	7.27	4.84	-40.4	-39.2	-35.3	0.83	1.31
	TK11H	T ₂ a	87.90	4.36	1.91	-36.5	-35.1	-32.4	0.92	2.28
	TK908	T	91.68	3.81	1.44	-36.8	-35.0	-32.6	0.94	2.20
外围	S14	O ₁₋₂ y	95.95	1.64	0.38	-35.1	-33.9	-31.9	0.98	2.80
雅克拉气田	YK1	K ₁ k _p	87.92	5.27	1.77	-40.8	-31.0	-29.1	0.92	1.22
	YK2	K ₁ k _p	89.30	5.35	1.77	-40.8	-31.0	-29.2	0.92	1.23

注: R_o 根据戴金星等的油型气公式 δ¹³C₁ ≈ 15.80lgR_o - 42.20 计算得到^[15]

区和 9 区的产层为三叠系的 TK111H 和 TK908 井天然气的干燥系数相对较高,与这些地区天然气具有较高的成熟度相一致。塔河油田主体天然气的干燥系数相对较低,明显低于轮台断隆带的雅克拉凝析气田和其外围的 S14 井以及其东南部的桑塔木、解放渠东和吉拉克气田的天然气^[2]。这与该区天然气主要为原油伴生气且具有相对较低的成熟度相一致。塔河油田天然气的组成特征较为复杂,无论是同一地区的不同产层还是不同地区的相同产层,其天然气的组成特征都存在着较大的差异,这可能与北部坳陷区发育多套烃源岩、经历了多次生排烃过程致使塔河油田经历了多期油气充注和聚集成藏过程有关。

3 天然气同位素特征

天然气中甲烷及其同系物 ($\delta^{13}\text{C}_{1-4}$) 的碳同位素组成是划分天然气成因类型、判识其来源的重要标志。 $\delta^{13}\text{C}_2$ 受生气母质类型和成熟度的影响,主要反映母质碳同位素的继承效应。一般将 $\delta^{13}\text{C}_2$ 小于 -28‰ (-29‰) 作为油型气的重要判识指标之一。对于油型气而言,正常原油伴生气的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值为 $-48\text{‰} \sim -40\text{‰}$,凝析油伴生气的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值为 $-40\text{‰} \sim -36\text{‰}$,高温裂解气的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值大于 -36‰ ^[6]。从表 1 可以看出,本区所有样品的 $\delta^{13}\text{C}_2$ 都轻于 -30‰ ,属于典型的油型气范畴。其中, S112 井、S106 井、S75 井、S47 井和 TK228 井天然气的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 介于 $-48\text{‰} \sim -40\text{‰}$,为正常的原油伴生气; TK111H 井、TK908 井和 S14 井 $\delta^{13}\text{C}_1$ 接近或重于 -36‰ ,加之干燥系数大,显示了高温裂解气的特征; TK720 井 $\delta^{13}\text{C}_1$ 较重,但干燥系数较小 (0.72),可能是与早期的原油遭受后期高过成熟天然气的气侵作用有关。本区天然气的 $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3$,呈明显的正序排列,显示天然气为典型的有机成因。

4 天然气成因

天然气的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 是反映其母质类型和成熟度的一项重要地球化学指标。20 世纪 70 年代以来,国内外学者通过大量的研究,先后提出了基于天然气碳同位素与其母质类型及演化阶段的相关模式,并以此来进行天然气的成因判识,在天然气的成因判识中得到了很好的应用^[13~18]。根据戴

金星等的油型气回归方程 $\delta^{13}\text{C}_1 \approx 15.80 \lg R_o - 42.20$ 计算^[15],塔河油田主体区天然气相应 R_o 的端元值为 $0.89\% \sim 2.28\%$,属于成熟-过成熟阶段。雅克拉凝析气田天然气的相应 R_o 为 $1.22\% \sim 1.23\%$,与该区原油为凝析油相一致。位于塔河油田外围的 S14 井 $\delta^{13}\text{C}_1$ 达 -35.4‰ ,其相应的 R_o 为 2.80% ,显示其演化程度已进入过成熟阶段,这也与其天然气干燥系数 C_1/C_{1-5} 达 0.98,为典型的干气相一致。

对于母质类型相同的天然气而言,天然气烃类气体碳同位素组成由 C—C 键断裂过程的动力学分馏效应所控制,而不受同位素平衡效应的影响。从理论上来说,对于具有单一来源的天然气,其烃类气体组分的 $\delta^{13}\text{C}_n$ 与 $1/n$ 之间呈线性关系^[19]。在地质条件下,由于成气地质营力较为复杂, $\delta^{13}\text{C}_n$ 与 $1/n$ 之间多表现出准线性关系。因此, $\delta^{13}\text{C}_n$ 与 $1/n$ 之间的关系可提供气体是否为单一营力作用成气、多源复合、多阶连续成气等方面的信息。图 2 为塔河油田和雅克拉凝析气田天然气系列碳同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}_1 - \delta^{13}\text{C}_4$) 与碳原子倒数 ($1/n, n = 1, 2, 3, 4$) 关系图。由图可见,塔河油田 S75 井和 S112 井天然气 $\delta^{13}\text{C}_n$ 与 $1/n$ 之间具有很好的线性关系,表明是相同母质在单一营力作用下的产物。塔河油田主体区天然气碳同位素分布曲线呈现明显的两段模式,表明塔河油田主体

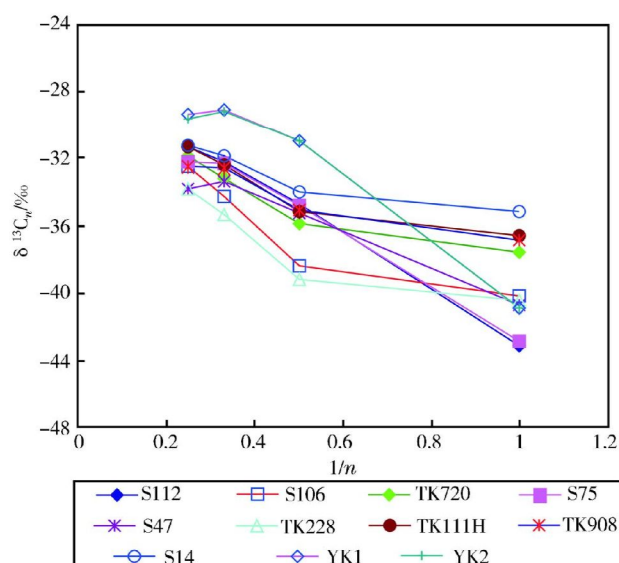


图 2 塔河油田及雅克拉气田天然气
烃类组分 $1/n$ 与 $\delta^{13}\text{C}_n$ 关系图

Fig. 2 Hydrocarbon component $1/n$ vs $\delta^{13}\text{C}_n$ of
natural gas in Tahe oilfield and Yakela gas field

区天然气的甲烷与乙烷和丙烷存在不同的来源,显示了该区天然气具有两期充注、复合的特征。雅克拉凝析气田 YK1 井、YK2 井天然气的碳同位素分布样式也呈现出较好的准线性关系,显示该区天然气亦为相同母质在单一营力作用下的产物,但天然气甲烷和乙烷碳同位素反映的成熟度存在着较大的差异,乙烷碳同位素明显偏重,可能与雅克拉凝析气田毗邻轮台断裂、处于沙雅隆起海相天然气区和陆相天然气区的分界部位并受到过断裂北部库车坳陷三叠—侏罗系煤系烃源岩生成的煤型气向南运移的影响有关。

当母质类型一定时,天然气甲烷碳同位素主要受成熟度效应的控制,而乙烷碳同位素则受母质继承效应的制约更为明显。因此,将 $\delta^{13}\text{C}_1$ 与 $\delta^{13}\text{C}_2$ 相结合也可有效地划分天然气的成因类型。由图 3 可见,塔河油田和雅克拉凝析气田的天然气与同属于沙雅隆起东部的轮南断垒、桑塔木断垒、解放渠东、吉拉克气田的天然气一样均属于典型的油型气,而与位于塔北隆起北斜坡的牙哈 4 井、英买 7 井以及位于库车坳陷克依构造带上的克拉 2 井、依西 1 井、克孜 1 井、大北 1 井典型的煤型气存在明显的差异^[1~3,20]。塔河油田和雅克拉气田天然气的成熟度与轮南断垒上的 LN10 井、LN101 等井大致相当,但其成熟度明显低于塔河油田东南部的桑塔木、解放渠东、吉拉克的天然气。从塔河油田主体区天然气具有干燥系数由东向西逐渐减小、成熟度逐渐降低的特征来看,该区

晚期干气的充注方向是自东到西。赵孟军等^[2]认为塔河油田外围天然气充注方向为吉拉克—解放渠东—轮南。二者有较好的一致性。

张水昌等和王飞宇等的研究表明^[21,22],塔里木盆地中上奥陶统源岩的有机成熟度较低, R_o 介于 0.81%~1.30%,演化程度相对较低,尚未进入有机质生烃的高成熟阶段(湿气—凝析油阶段);寒武系源岩均处于高过成熟阶段,尚未发现仍处于生油窗阶段的寒武系中等成熟的源岩。塔中和塔北隆起区中下寒武统镜质体反射率 R_o 约在 1.8%~3.0%,满加尔凹陷中下寒武统源岩镜质体反射率在 3% 以上。根据塔北隆起天然气甲烷碳同位素值所计算的天然气成熟度变化范围较大,相应的 R_o 为 0.89%~2.28%,属于成熟—过成熟阶段,表明该区天然气的主力气源岩为寒武—奥陶系。从塔河油田东南部桑塔木、解放渠东和吉拉克以及塔河油田东部天然气的甲烷及其同系物碳同位素所指示的过成熟阶段特征来看,塔里木盆地天然气的主力烃源岩应为寒武系。

5 结 论

1) 塔河油田天然气的组分以甲烷为主,平均 76.23%;重烃含量较高,平均占 17.86%; $\text{C}_1/\text{C}_{1-5}$ 介于 0.71~0.94 平均为 0.81。天然气整体上属典型的湿气。

2) 塔河油田天然气的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值为 $-43.0\text{‰} \sim -36.5\text{‰}$, 平均 -39.7‰ , $\delta^{13}\text{C}_2$ 值为 $-39.2\text{‰} \sim -34.6\text{‰}$, 平均 -36.0‰ , $\delta^{13}\text{C}_3$ 值为 $-35.3\text{‰} \sim -32.2\text{‰}$, 平均 -33.2‰ 。 $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3$, 因此天然气为典型的油型气。

3) 塔河油田的天然气具有两期充注特征。早期充注的为典型的原油伴生气,晚期充注的为高温裂解气,晚期天然气的充注方向为从东向西。

参 考 文 献

- 梁狄刚,贾承造.塔里木盆地天然气勘探成果与前景预测[J].天然气工业,1999,19(2):3~12
Liang Digang Jia Chengzhao Natural gas exploration achievements and its prospects evaluation in Tarim basin[J]. Natural Gas Industry, 1999, 19(2): 3-12
- 赵孟军,周兴熙,卢双舫,等.塔里木盆地天然气分布规律及勘探方向[M].北京:石油工业出版社,2002 128~219
Zhao Mengjun Zhou Xingxi Lu Shuangfang et al Natural gas distribution and prospecting of the Tarim basin[M]. Beijing Petroleum Industry Press 2002 128-219

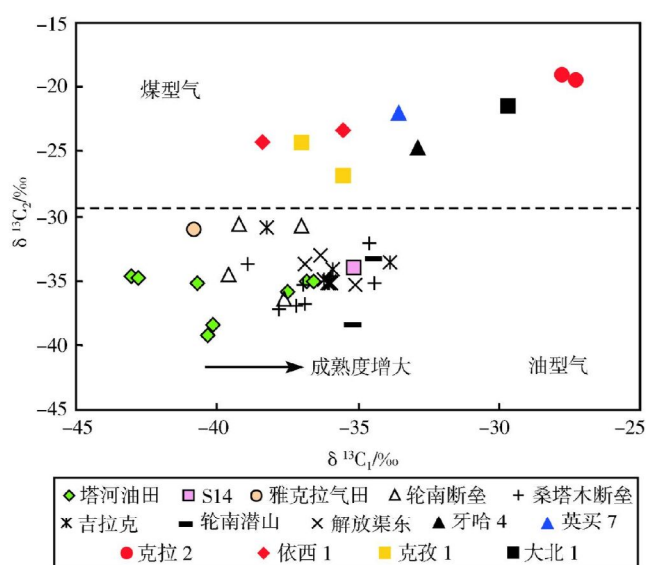


图 3 塔里木盆地北部天然气的成因类型图

Fig. 3 Genetic types of natural gas in northern Tarim basin

- 3 张水昌, 梁狄刚, 张宝民, 等. 塔里木盆地海相油气的生成 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004 201~ 407
Zhang Shuichang Liang Digang Zhang Baomin et al Marine petroleum generation in Tarim basin [M]. Petroleum Industry Press 2004 201~ 407
- 4 顾忆, 黄继文, 邵志兵. 塔河油田奥陶系油气地球化学特征与油气运移 [J]. 石油实验地质, 2003 25(6): 746~ 750
Gu Yij Huang Jiwen Shao Zhibin Petroleum geochemistry and hydrocarbon migration in Tahe oilfield of the Tarim basin [J]. Petroleum Geology & Experiment 2003 25(6): 746~ 750
- 5 马安来, 张水昌, 张大江, 等. 轮南、塔河油田稠油油源对比 [J]. 石油与天然气地质, 2004 25(1): 31~ 38
Ma Anlai Zhang Shuichang Zhang Dajiang et al Oil and source correlation in Lunan and Tahe heavy oil fields [J]. Oil & Gas Geology 2004 25(1): 31~ 38
- 6 徐永昌. 天然气成因理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1994 84~ 222
Xu Yongchang Genetic theory of natural gas and its application [M]. Beijing Science Press 1994 84~ 222
- 7 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别 [J]. 天然气地球科学, 1993 3(2~ 3): 1~ 41
Dai Jinxing Carbon and hydrogen isotope characteristics and its application to natural gas [J]. Natural Gas Geoscience 1993 3(2~ 3): 1~ 41
- 8 刘文汇, 张殿伟, 王晓峰, 等. 天然气气源对比的地球化学研究 [J]. 沉积学报, 2004 22(增刊): 27~ 32
Liu Wenhui Zhang Dianwei Wang Xiaofeng et al Geochemistry study on gas-source correlation of natural gas [J]. Acta Sedimentologica Sinica 2004 22(S0): 27~ 32
- 9 康玉柱. 塔里木盆地塔河大油田形成的地质条件及前景展望 [J]. 中国地质, 2003 30(3): 315~ 319
Kang Yuzhu Geological characteristics of the formation of the large Tahe oilfield in the Tarim basin and its prospects [J]. Geology in China 2003 30(3): 315~ 319
- 10 徐国强, 刘树根, 李国蓉, 等. 塔中、塔北古隆起形成演化及油气地质条件对比 [J]. 石油与天然气地质, 2005 26(1): 114~ 119
Xu Guoqiang Liu Shugen Li Guorong et al Comparison of tectonic evolutions and petroleum geological conditions in Tazhong and Tabei palaeohighs in Tarim basin [J]. Oil & Gas Geology 2005 26(1): 114~ 119
- 11 张抗. 塔河油田的发现及其地质意义 [J]. 石油与天然气地质, 1999 20(2): 120~ 124
Zhang Kang The discovery of Tahe oilfield and its geologic implication [J]. Oil & Gas Geology 1999 20(2): 120~ 124
- 12 闫相宾. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层特征 [J]. 石油与天然气地质, 2002 23(3): 262~ 265
Yan Xiangbin Characteristics of Ordovician carbonate rock reservoirs in Tahe oilfield [J]. Oil & Gas Geology 2002 23(3): 262~ 265
- 13 Stall W J Carbon and nitrogen isotopes in hydrocarbon research and exploration [J]. Chemical Geology 1977 20 121~ 149
- 14 Schoell M. Genetic characterization of natural gas [J]. AAPG Bull 1983 67 2 225~ 2 238
- 15 戴金星, 戚厚发. 鉴别煤成气和油型气等指标的初步探讨 [J]. 石油学报, 1985 6(2): 31~ 38
Dai Jinxing Qi Houfa Primary study on some indexes of coal-type gas and oil-type gases identification [J]. Acta Petrolei Sinica 1985 6(2): 31~ 38
- 16 沈平, 徐永昌. 中国陆相成因天然气同位素组成特征 [J]. 地球化学, 1991 20(2): 144~ 152
Shen Ping Xu Yongchang Characteristics of terrigenous natural gases isotopic compositions in China [J]. Geochemistry 1991 20(2): 144~ 152
- 17 徐永昌, 沈平. 中原-华北油气区“煤型气”地球化学特征初探 [J]. 沉积学报, 1985 3(2): 37~ 46
Xu Yongchang Shen Ping A preliminary study on the geochemical characteristics of the coal-type gas in the Zhongyuan-Huabei oil-gas area [J]. Acta Sedimentologica Sinica 1985 3(2): 37~ 46
- 18 刘文汇, 徐永昌. 煤型气碳同位素演化二阶段分馏模式及机理 [J]. 地球化学, 1999 28(4): 359~ 366
Liu Wenhui Xu Yongchang A two-stage model of carbon isotopic fractionation in coal-type gas [J]. Geochemistry 1999 28(4): 359~ 366
- 19 Chung H M. Origin of gaseous hydrocarbons in subsurface environments: theoretical considerations of carbon isotope [J]. Chemical Geology 1988 71: 71~ 103
- 20 李剑, 谢增业, 李志生, 等. 塔里木盆地库车坳陷天然气气源对比 [J]. 石油勘探与开发, 2001 28(5): 29~ 32 41
Li Jian Xie Zengye Li Zhisheng et al A gas source study for Kuqa depression of Tarim basin [J]. Petroleum Exploration & Development 2001 28(5): 29~ 32 41
- 21 张水昌, 王飞宇, 张宝民, 等. 塔里木盆地中上奥陶统油源层地球化学研究 [J]. 石油学报, 2000 21(6): 23~ 28
Zhang Shuichang Wang Feiyu Zhang Baomin et al Middle-Upper Ordovician source rock geochemistry of the Tarim basin [J]. Acta Petrolei Sinica 2000 21(6): 23~ 28
- 22 王飞宇, 刘长伟, 朱雷, 等. 塔里木盆地台盆区寒武系烃源岩有机成熟度 [J]. 新疆石油地质, 2002 23(5): 372~ 375
Wang Feiyu Liu Changwei Zhu Lei et al Study on organic maturity of Cambrian source rocks in Tarim platform area [J]. Xinjiang Petroleum Geology 2002 23(5): 372~ 375

(编辑 李 军)