

## 天然气地球化学

# 塔里木盆地天然气地球化学特征与成因类型研究

刘全有<sup>1</sup>, 金之钧<sup>1</sup>, 张殿伟<sup>1</sup>, 刘志舟<sup>2</sup>, 李 剑<sup>3</sup>

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;

3. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007)

**摘要:**通过统计分析塔里木盆地的234个天然气样品指出:该盆地的天然气主要以烃类气体为主(烃类气体含量为80%以上,占样品总数的84%);古生界和中生界天然气中的非烃气体 $N_2$ 含量高于新生界,且 $N_2$ 与烃类气体( $C_{1-4}$ )之间存在正相关性;古生界和中生界天然气主要为油型气,而新生界天然气则为煤成气,且 $\delta^3C_2$ 和 $\delta^3C_3$ 存在一定的正相关性; $^3He/^4He$ 值一般为 $n \times 10^{-8}$ 数量级,表现为壳源特征,且 $^3He/^4He$ 值与天然气类型没有明显关系;古生界和中生界天然气的 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 值整体上要略高于新生界(这与形成天然气母质中K丰度有关)。根据以上地球化学参数判定塔里木盆地天然气以有机成因类型为主。

**关键词:**塔里木盆地;天然气;稳定同位素;成因

中图分类号:TE122.1<sup>+</sup>13

文献标识码:A

文章编号:1672-1926(2008)02-0234-04

在塔里木盆地已发现很多天然气藏,储层主要是古生界的奥陶系和石炭系、中生界的三叠系、侏罗系和白垩系,新生界的第三系<sup>[1]</sup>。目前的研究认为海相腐泥型天然气来自古生界的寒武系—奥陶系海相烃源岩<sup>[2]</sup>,而腐殖型天然气来自三叠系—侏罗系煤系<sup>[3]</sup>。由于具有多源、多阶形成和多运移相的特点,塔里木盆地天然气分布规律与天然气类型的识别,对塔里木盆地天然气成藏研究和天然气勘探具有重要意义。本文主要研究目的是:①论述该盆地天然气的地球化学特征与分布规律和②探讨天然气的成因及来源。

## 1 塔里木盆地基本地质特征

塔里木盆地是在前震旦系陆壳基底上发育起来的大型克拉通盆地,基底为前元古代变质岩<sup>[4]</sup>。在基底上发育震旦纪—古生代海相地层和中生代、新生代陆相地层。该盆地基本构造格架为三隆四坳。3个隆起包括塔北隆起、塔中(中部)隆起和塔南隆起(南部)隆起;4个坳陷为库车坳陷、北部坳陷、西南坳陷和东南坳陷<sup>[5]</sup>。塔里木盆地巨厚沉积岩依其

沉积特征、构造演化史和热演化程度可分为震旦系一下古生界构造层、上古生界构造层和中新生界构造层<sup>[5]</sup>。震旦系一下古生界构造层除志留系和中—上奥陶统的部分沉积为海相碎屑沉积外,其他均为海相碳酸盐岩。震旦系一下古生界构造层经历了多次构造活动,且大部分地区都达到了过成熟热演化阶段,特别是坳陷地区<sup>[5-6]</sup>。上古生界构造层除石炭系为碳酸盐岩和局部地区发育膏岩层外,主要为碎屑岩,在下二叠统有较厚的且分布广泛的火成岩。该套地层主要处于成熟到高成熟阶段。中、新生界构造层分布于整个盆地,该构造层具有2个沉积中心,一个是库车坳陷,另一个是西南坳陷<sup>[4]</sup>。除在西南坳陷局部地区分布有上第三系海相碳酸盐岩以外,其余均为陆相碎屑沉积。

## 2 塔里木盆地天然气地球化学特征研究

### 2.1 塔里木盆地烃源岩

“八五”期间研究认为塔里木盆地内有4套烃源岩,即寒武系—奥陶系源岩、石炭系—下三叠统源岩、上三叠统一—中下侏罗统源岩以及上白垩统一—

收稿日期:2007-11-27;修回日期:2008-02-01

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(编号:2005CB422108);石油化工联合基金(编号:40739904);中国石油天然气有限公司科学研究与技术开发项目(编号:07-01C-01-07)联合资助。

第一作者 E-mail: qyoliu@sohu.com.

第三系源岩。“九五”以后普遍主张将塔里木盆地源岩划分为2套主力烃源岩:一套是海相的寒武系、奥陶系泥质碳酸盐岩<sup>[6]</sup>,其有相对较高的有机质丰度,如塔东1井和库南1井TOC平均值分别为1.24%和2.28%,最好可达5.52%,方1井下寒武统烃源岩TOC值为0.21%~2.14%,平均为0.81%;另一套主力气源岩是陆相三叠系、侏罗系泥岩,主要与煤系地层有关<sup>[3]</sup>,分布在库车和塔西南2个前陆盆地。库车坳陷是勘探前景最为看好的前陆坳陷,其三叠系和侏罗系烃源岩的成烃母质具有湖泊—沼泽相烃源岩特征,多形成腐殖型(II型)干酪根,为一套湖—沼相煤系泥岩、碳质泥岩和煤岩。库车坳陷烃源岩包括侏罗系恰克马克组、克孜勒努尔组、阳霞组和三叠系塔里奇克组、黄山街组、克拉玛依组。

## 2.2 塔里木盆地天然气化学组分特征

通过统计塔里木盆地的234个天然气样品发现:该盆地天然气化学组分主要以烃类气体为主,绝大多数样品烃类气体大于80%,占总样品数的84%以上(图1),说明天然气以有机成因为主;烃类气体的干燥系数变化较大, $C_1/C_{1-4}$ 为53.4%~99.9%,

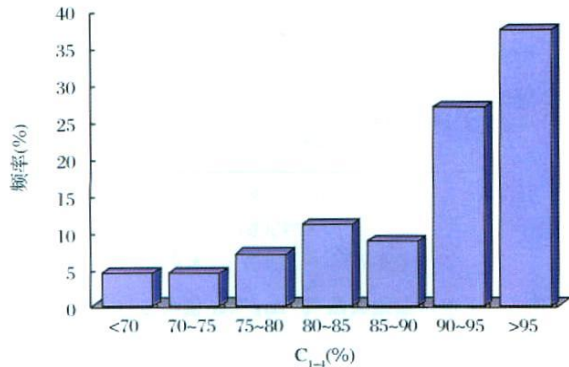


图1 塔里木盆地天然气烷烃气频率分布

反映了成母质、成熟度和成气作用具有较大差异;烃类气体以甲烷为主,重烃含量也较高, $C_{2+}$ 为0~39.87%。研究表明<sup>[7-10]</sup>:随着天然气成熟度的增加,甲烷和重烃含量呈有规律的变化,即未熟阶段甲烷含量较高,重烃含量低;成熟阶段甲烷相对含量降低,而重烃增加;高一过成熟阶段,则以甲烷为主,重烃含量极低。塔里木盆地天然气中非烃气体主要以氮气和二氧化碳为主,其他非烃气体组分含量极少或无。其中氮气组分含量变化较大,变化范围为0~52.56%。在塔中和东河塘等古生界、中生界气藏中 $N_2$ 普遍含量偏高。通常将含 $N_2 \geq 15\%$ (V/V)的天然

气称为高氮天然气<sup>[12-13]</sup>。陈践发等<sup>[14]</sup>对塔里木盆地天然气中氮的研究表明,塔里木盆地富含氮的天然气中的 $N_2$ 主要是由沉积有机质热解生成。依据 $N_2/Ar > 84$ 排除空气中氮的混入和 $^3He/^4He$ 值为 $n \times 10^{-8}$ 可认为 $N_2$ 并非来源于深部气体。同时, $N_2$ 与烃类气体具有明显的负相关性(图2)。在 $N_2$ 含量较高时,烃类气体,特别是重烃气体含量明显降低。在热成因形成的天然气中,富氮天然气藏一般暗示了该气藏源岩成熟度偏高,因为源岩中的氮只有在过高成熟阶段才会大量释放<sup>[15]</sup>。

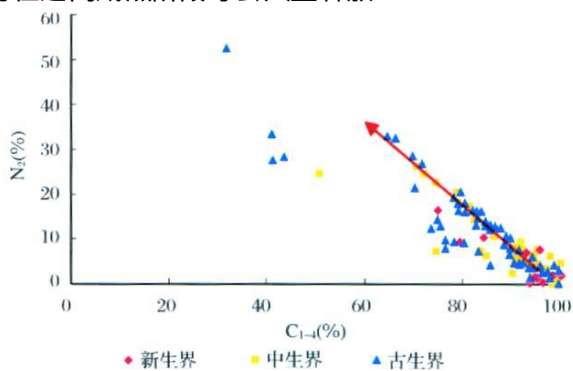


图2 塔里木盆地天然气烷烃气( $C_{1-4}$ )与 $N_2$ 关系

## 2.3 塔里木盆地天然气碳同位素特征

甲烷同系物的碳同位素对天然气成因类型、成熟度演化、气—气对比和气—源对比提供了关键的科学依据。以 $\delta^3C_2$ 值等于 $-28.0\%$ 为界可将塔里木盆地天然气划分为2个区,即 $\delta^3C_2 > -28.0\%$ 的煤成气区和 $\delta^3C_2 < -28.0\%$ 的油型气区<sup>[16]</sup>。塔里木盆地储集于新生界的天然气的 $\delta^3C_2$ 值一般重于 $-28.0\%$ ,以煤成气为主;储集于古生界、中生界的天然气 $\delta^3C_2$ 值均小于 $-28.0\%$ ,以油型气为主(图3)。煤成气 $\delta^3C_1$ 值一般也重于油型气的 $\delta^3C_1$ 值, $\delta^3C_1$ 值在 $-39\%$ ~ $-33\%$ 之间油型气和煤成气存在重叠,因此利用 $\delta^3C_1$ 值进行天然气类型判识需谨慎。塔里木盆地天然气中 $\delta^3C_2$ 和 $\delta^3C_3$ 值明显

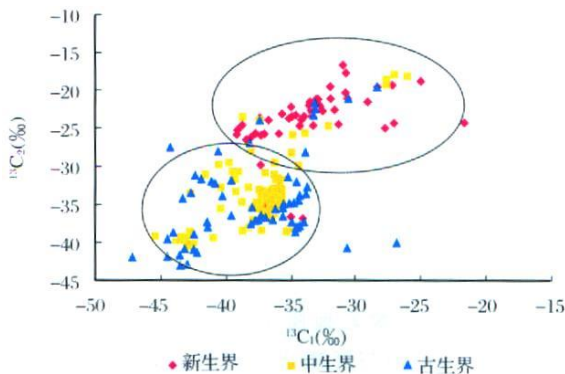


图3 塔里木盆地天然气烷烃气 $\delta^3C_1$ 值与 $\delta^3C_2$ 值关系

存在一定的相关性,一般随着  $\delta^{13}\text{C}_2$  值变重,  $\delta^{13}\text{C}_3$  值也变重(图4),反映了乙烷与丙烷之间具有同源性。

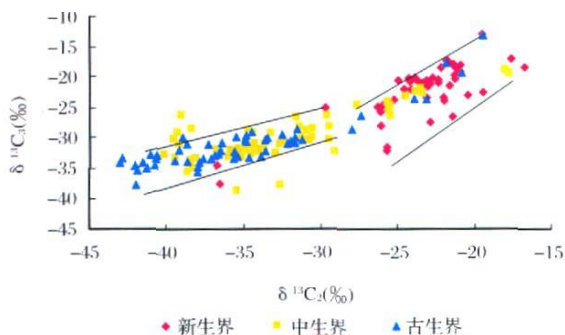


图4 塔里木盆地天然气烷烃气  $\delta^{13}\text{C}_2$  值与  $\delta^{13}\text{C}_3$  值关系

#### 2.4 塔里木盆地天然气稀有气体同位素特征

通常利用天然气中稀有气体 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值来鉴别天然气中是否存在深部幔源氦的混入<sup>[17-20]</sup>。当天然气中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $n \times 10^{-8}$ 时,表明天然气氦同位素为壳源特征; $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $n \times 10^{-6}$ 反映了天然气中有深部幔源氦的混入。而 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值则可以粗略估算天然气源岩的地质年代<sup>[21-23]</sup>。塔里木盆地天然气中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值一般为 $n \times 10^{-8}$ 数量级,表现为壳源特征,仅在部分古、中生界天然气中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $n \times 10^{-7}$ 。在我国西部的前陆盆地,天然气中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值有时表现为 $n \times 10^{-7}$ ,与盆地构造处于次稳定状态有关<sup>[18, 20]</sup>。图5为 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值与 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值关系图,从图中发现,天然气类型与 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值不存在相关性,即 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值与天然气类型(煤成气或油型气)无关<sup>[19]</sup>,主要与气藏形成的地质构造背景有关<sup>[18, 20]</sup>。

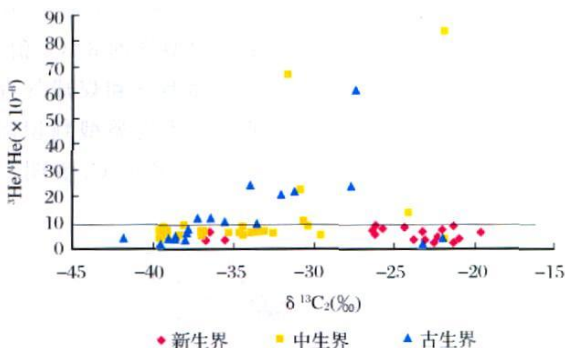


图5 塔里木盆地天然气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值与  $\delta^{13}\text{C}_2$  值关系

稀有气体氩同位素组成 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值取决于 $^{40}\text{Ar}$ 的年代积累效应和源岩中母体元素K的丰度<sup>[18, 24]</sup>,天然气源岩地质年代越老, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值越大。 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值与烃源岩中母体元素K的丰度有关,是因为天然气中放射成因 $^{40}\text{Ar}$ 与岩石中矿物K

的含量成正比例线性关系<sup>[23, 25]</sup>。塔里木盆地古生界、中生界储层天然气的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值整体上要略高于新生界(图6),古生界、中生界天然气的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值介于340~2400之间,而新生界储层天然气的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值介于450~980之间。塔里木盆地古生界、中生界天然气多为油型气,母质类型主要为寒武系和奥陶系碳酸盐岩和泥岩,新生界天然气多数为煤成气,烃源岩主要与三叠系和侏罗系煤系有关。根据天然气中 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值与源岩地质年代<sup>[18, 22, 24, 26]</sup>,塔里木古盆地古生界、中生界油型气中 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值应高于新生界煤成气的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值。但是在塔里木盆地有部分古生界、中生界天然气中 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值明显偏低,且低于煤成气中 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值。造成塔里木盆地寒武系、奥陶系烃源岩生成的油型气的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值偏低的主要原因是碳酸盐岩含K丰度(0.133%~0.221%)明显低于三叠系、侏罗系煤系的含K丰度(0.241%~2.64%)<sup>[27-28]</sup>。因此,在利用天然气中 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值进行天然气地质年代估算时需要考虑天然气母质类型。

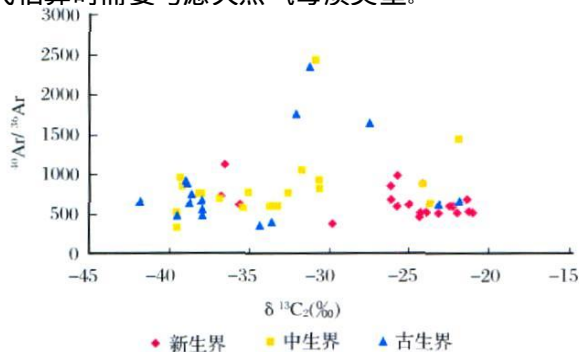


图6 塔里木盆地天然气 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值与  $\delta^{13}\text{C}_2$  值关系

### 3 结论

塔里木盆地天然气主要为有机成因类型,且以烃类气体为主,古生界、中生界天然气中的非烃气体 $\text{N}_2$ 高于新生界,且 $\text{N}_2$ 与烃类气体( $\text{C}_{1-4}$ )之间存在相关性。烷烃系列碳同位素表明:古生界、中生界天然气主要为油型气,而新生界天然气则为煤成气,且 $\delta^{13}\text{C}_2$ 和 $\delta^{13}\text{C}_3$ 值存在一定的正相关性。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值一般为 $n \times 10^{-8}$ 数量级,表现为壳源特征,仅在部分古生界、中生界天然气中该值为 $n \times 10^{-7}$ ,且与天然气类型没有明显关系。古生界、中生界储层的天然气的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值整体上要略高于新生界,部分古生界、中生界天然气该值偏低与形成天然气的母质中的K丰度有关。

## 参考文献:

- [1] Chen J, Xu C, Huang D. Geochemical characteristics and origin of natural gas in Tarim basin, China[ J ]. AAPG Bulletin, 2000, 84(5): 591-606.
- [2] 黄第藩. 塔里木盆地东部天然气的成因类型及成熟度判别[ J ]. 中国科学: D 辑, 1996, 26(4): 365-372.
- [3] Liang D, Zhang S, Chen J, *et al.* Organic geochemistry of oil and gas in the Kuqa depression, Tarim Basin, NW China[ J ]. Organic Geochemistry, 2003, 34(7): 873-888.
- [4] 贾承造, 魏国齐. 塔里木盆地构造特征与含油气性[ J ]. 科学通报, 2002, 47(增刊): 1-8.
- [5] 童晓光. 塔里木盆地的地质结构和油气聚集[ M ]. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1992: 19-22.
- [6] 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: 433.
- [7] 戴金星, 裴锡古, 戚厚发. 中国天然气地质学[ M ]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 35-87.
- [8] Fuex A N. The use of stable carbon isotopes in hydrocarbon exploration[ J ]. Journal of Geochemical Exploration, 1977, 7: 155-188.
- [9] Schoell M. Genetic characterization of natural gas[ J ]. AAPG Bulletin, 1983, 67(12): 2225-2238.
- [10] 徐永昌. 天然气成因理论及应用[ M ]. 北京: 科学出版社, 1994: 413.
- [11] 张子枢. 气藏中氮的地质地球化学[ J ]. 地质地球化学, 1988, 13(2): 51-56.
- [12] Maksimov S P, Muller E P, Botneva T A, *et al.* Origin of high nitrogen gas pools[ J ]. International Geology Review, 1975, 18(5): 551-556.
- [13] 朱岳年. 天然气中  $N_2$  的成因与富集[ J ]. 天然气工业, 1999, 19(3): 23-27.
- [14] 陈践发, 朱岳年. 天然气中氮的来源及塔里木盆地东部天然气中氮地球化学特征[ J ]. 天然气地球科学, 2003, 14(3): 172-176.
- [15] Krooss B M, Littke R, Muller B, *et al.* Generation of nitrogen and methane from sedimentary organic matter: Implications on the dynamics of natural gas accumulations[ J ]. Chemical Geology, 1995, 126(3/4): 291-318.
- [16] 徐永昌, 沈平, 刘全有. “西气东输”探明天然气的地球化学特征及资源潜势[ J ]. 沉积学报, 2002, 20(3): 447-455.
- [17] 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): 31-38.
- [18] 徐永昌, 刘文汇, 沈平, 等. 天然气地球化学的重要分支——稀有气体地球化学[ J ]. 天然气地球科学, 2003, 14(3): 157-166.
- [19] 戴金星, 李剑, 侯路. 鄂尔多斯盆地氦同位素的特征[ J ]. 高校地质学报, 2005, 11(4): 473-478.
- [20] Xu S, Nakai S, Wakita H, *et al.* Helium isotope compositions in sedimentary basins in China[ J ]. Applied Geochemistry, 1995, 10(6): 643-656.
- [21] Xu Y, Shen P. A study of natural gas origins in China[ J ]. AAPG Bulletin, 1996, 80(10): 1604-1614.
- [22] 刘文汇, 孙明良, 徐永昌. 鄂尔多斯盆地天然气稀有气体同位素特征及气源示踪[ J ]. 科学通报, 2001, 46(22): 1902-1905.
- [23] 张殿伟, 刘文汇, 郑建京, 等. 氦同位素应用于库车坳陷天然气主力气源岩判识[ J ]. 地球化学, 2005, 30(4): 103-107.
- [24] 刘文汇, 徐永昌. 沉积岩钾、氩分布与天然气氩同位素——以渤海湾、四川和鄂尔多斯盆地为例[ J ]. 沉积学报, 1992, 10(1): 83-92.
- [25] Kelley S P. K-Ar and Ar-Ar dating[ J ]. Review of Mineralogy and Geochemistry, 2002, 47: 785-818.
- [26] 刘全有, 刘文汇, 徐永昌, 等. 苏里格气田天然气运移与气源分析[ J ]. 天然气地球科学, 2007, 18(5): 697-702.
- [27] 张殿伟, 刘文汇, 郑建京, 等. 塔中地区天然气氦、氩同位素地球化学特征[ J ]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 43-46.
- [28] 刘文汇, 徐永昌. 天然气中氦同位素组成的意义[ J ]. 科学通报, 1993, 38(9): 818-821.

## Geochemical Characteristics and Genesis of Natural Gas in Tarim Basin

LIU Quan-you<sup>1</sup>, JIN Zhi-jun<sup>1</sup>, ZHANG Dian-wei<sup>1</sup>, LIU Zhi-zhou<sup>2</sup>, LI Jian<sup>3</sup>

(1. Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 3. Longfang Branch of Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Langfang 065007, China)

**Abstract:** According to statistical measurement of 234 gas samples, natural gas in the Tarim basin is dominant hydrocarbon gas, in which more than 80% of hydrocarbon gases accounts for 84% of all the samples. The contents of non-hydrocarbon gas ( $N_2$ ) in the Paleozoic and Mesozoic are higher than those in Cenozoic, with the positive correlation of nitrogen and hydrocarbon gases ( $C_{1-4}$ ). Based on carbon isotope fractionation of hydrocarbon gases, the natural gases in Paleozoic and Mesozoic are mostly classified as oil-type gas, whereas gas in Cenozoic is coal-type gas derived from humic matters. A positive correlation between  $\delta^{13}C_2$  and  $\delta^{13}C_3$  in natural gas from the Tarim basin suggests that natural gases were mainly derived from the thermal decomposition of organic matters. The noble gas isotopes ( $^3He/^4He$ ) in the order of  $n \times 10^{-8}$  indicate natural gas in the Tarim Basin is of crust origin, in which there is no correlation between  $^3He/^4He$  ratios and types of natural gases. The little higher ratios of  $^{40}Ar/^{36}Ar$  in Paleozoic and Mesozoic than those in Cenozoic resulted from the different K abundance in source rocks. In combination with the geochemical information above, the natural gas is of thermal genesis, mostly derived from organic matters in the Tarim basin.

**Key words:** Tarim basin; Natural gas; Stable isotopes; Genesis.