

# 双城—太平川地区稀有气体同位素特征

王杰<sup>1</sup> 陈践发<sup>2</sup> 王铁冠<sup>2</sup> (中国科学院院士) 冯子辉<sup>3</sup> 林铁锋<sup>3</sup>

(1. 中国石化石油勘探开发研究院 2. 中国石油大学“石油天然气成藏机理”教育部重点实验室·北京

3. 中国石油大庆油田石油勘探开发研究院)

王杰等. 双城—太平川地区稀有气体同位素特征. 天然气工业, 2006, 26(10): 24-27.

**摘 要** 通过对松辽盆地东部天然气中稀有气体及二氧化碳同位素组成的测试, 探讨了天然气组分中氦和二氧化碳的成因及其地质意义, 并对该区天然气气源岩年龄进行了估算。研究表明, 该区天然气中壳源氦占绝对优势, 大部分天然气中氦的含量达到了工业开采价值, 可以形成氦的气藏。天然气气源岩年龄分别为早白垩世和早—中侏罗世, 大部分天然气中的二氧化碳为有机成因。另外, 该区的大地热流值相对偏低, 说明在松辽盆地下部上地幔整体隆起幅度较高, 中、新生代构造活动强, 岩浆活动强烈的情况下, 该区的构造活动相对较弱, 岩浆活动不强烈。

**主题词** 稀有气体 二氧化碳 成因 气源岩 大地热流 松辽盆地 双城—太平川地区

由于稀有气体特有的成因、化学惰性以及相对丰度较低, 稀有气体的发现、研究及应用相对较晚。但由于稀有气体组分和同位素组成的微量变化可以在地质历史中被保留, 在现时的研究中被揭示, 并可追踪所代表的地质和地球化学历程, 故稀有气体地球化学是当前国际地质与地球化学研究的热点与前沿领域, 主要集中于稀有气体基础理论及其在天然气成因<sup>[1-5]</sup>、气源追索<sup>[6]</sup>、壳幔物质相互作用<sup>[3-7]</sup>、大地构造<sup>[7-8]</sup>和大地热流<sup>[9]</sup>等方面应用研究。

松辽盆地是中国第一大产油盆地, 在石油勘探过程中, 天然气不断被发现。近 10 年来, 双城—太平川地区中浅层天然气勘探取得重要进展, 相继发现三站、四站、五站等油气田和长春岭、太平庄气田, 显示松辽盆地也是一个天然气资源较丰富的盆地。笔者对该地区首次进行稀有气体以及二氧化碳同位素进行测定, 判断天然气成因类型和探讨二氧化碳来源, 追索气源岩, 确定烃源岩层位, 为进一步的中浅层天然气勘探开发提供地质—地球化学依据。

## 一、地质背景

松辽盆地东部三肇凹陷和莺山凹陷一带, 在晚侏罗世—早白垩世因受北东向等同沉积型基底断裂

的影响形成了徐家围子断陷和莺山断陷, 是盆地东部天然气的主要生气单元, 总沉积厚度最大超过 4000 m, 其中下白垩统沙河子组等含煤地层是煤成气源岩。晚侏罗世—早白垩世后松辽盆地进入拗陷期, 沉积了上白垩统泉头组、上白垩统青山口组和姚家组, 其中上白垩统青山口组和嫩江组沉积了巨厚的泥质岩, 成为断陷中煤成气良好的盖层。在上白垩统嫩江组末期, 徐家围子断陷和莺山断陷在断陷期控制的边界大断裂重新活动, 切断盖层, 使得其上盘地层沿断裂面逆冲回返, 煤系源岩在青山口期已开始生气, 至嫩江组生气强度越来越大, 这些煤成气以嫩江期后及之前控制边界并重新活动的大断裂及其派生断裂为通道, 在受基底断裂控制二次反转作用形成的具有古构造型的反转构造、潜山披覆和断鼻中聚集成藏, 三站、五站油气田和太平庄气田等就是断裂圈闭煤成气田, 并呈串状分布。

## 二、样品与实验

在松辽盆地东南隆起区三站、五站油气田和太平庄气田采集了 15 个气样(表 1), 分别用带双阀的高压钢瓶和玻璃瓶(用饱和食盐水排水取气)采集气样。天然气组分分析在大庆石油勘探开发研究院

**作者简介:** 王杰, 1975 年生; 2005 年毕业于中国科学院兰州地质所, 获博士学位; 现在浙江大学和中石化石油勘探开发研究院无锡博士后工作站工作, 主要从事油气地质学及有机地球化学研究。地址: (214151) 江苏省无锡市惠钱路 210 号无锡石油地质研究所。电话: 13861876253。E-mail: wangjielx@126.com

表1 松辽盆地双城—太平川地区天然气  
采样深度与产层分布表

(油)气田	采样深度(m)	层位	气样数(件)	采样井号
三站油气田	595~878.3	扶余气层	5	三2-4、三202、三203、三3、三4-2
	953	扶、扬气层	1	三4-1
	894.6	扶余气层	1	三102
五站油气田	713.1~848.4	扶余气层	5	五深1、五101、五102 五106、五109
太平庄气田	743.2~707.3	扶余气层	2	庄深1、双17
	1265	杨大城子气层	1	万11

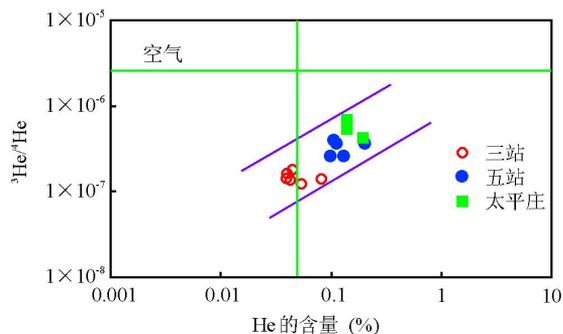
仪器 GC-14A 气相色谱仪上完成。稀有气体同位素和二氧化碳碳同位素分析分别在中国科学院兰州地质所气体地球化学重点实验室 VG-5400 质谱计和 Delta plusXL 质谱仪上测试。

### 三、结果与讨论

#### 1. $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 的分布及解释

天然气中氦的来源有3个:大气氦、壳源氦和幔源氦。大气氦的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值(Ra)为 $1.40 \times 10^{-6}$ ,地幔氦的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $(1.1 \sim 2.0) \times 10^{-5}$ <sup>[12]</sup>,常取 $1.1 \times 10^{-5}$ 作为表征值<sup>[11-12]</sup>。典型地壳氦的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $n \times 10^{-8}$ ,平均的壳源氦的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $(2 \sim 3) \times 10^{-8}$ <sup>[13]</sup>。氩在自然界有三种稳定同位素, $^{36}\text{Ar}$ 、 $^{38}\text{Ar}$ 和 $^{40}\text{Ar}$ ,放射性成因的 $^{40}\text{Ar}$ 是由 $^{40}\text{K}$ 衰变产生, $^{36}\text{Ar}$ 主要是元素合成时形成原始核素。上地幔 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值分布范围从接近大气氩值的295.5到高达 $10^4$ ;下地幔的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值则远低于上地幔,约为400。

三站、五站油气田及太平庄气田氦含量在0~0.21%,其氦同位素 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值较低,在 $1.21 \times 10^{-7} \sim 6.78 \times 10^{-7}$ 范围,R/Ra的值分布在0.09~0.48。从图1可以看出, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值与He含量具有较好的正相关性,说明随着天然气中He浓度增大,其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值越大,天然气中幔源氦的贡献也

图1 该区天然气中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值与He的关系图

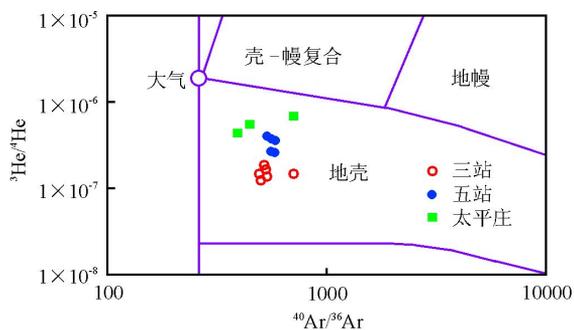
越大,并由三站—五站—太平庄方向依次增大,指示深部来源幔源挥发份贡献依次增大。

徐永昌等<sup>[14]</sup>认为当天然气藏中氦的含量为0.05%~0.1%时,就具有工业价值,可以作为氦的气藏。本区气田中He的含量在0.04%~0.21%,有11口井的氦气含量达到工业氦气藏标准。该区天然气的 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 值比大气的 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 值大3~4个数量级,而且 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值明显地大于大气氩值。因此在讨论氦的来源时,仅需讨论壳、幔两种来源,大气成因氦的份额可忽略不计<sup>[4]</sup>。天然气中幔源氦份额可用壳—幔二元复合模式计算如下:

$$\text{幔源氦} = \frac{(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{样品}} - (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{壳}}}{(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{幔}} - (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{壳}}} \times 100\%$$

式中: $^3\text{He}/^4\text{He}_{\text{样品}}$ 、 $^3\text{He}/^4\text{He}_{\text{壳}}$ 和 $^3\text{He}/^4\text{He}_{\text{幔}}$ 分别代表样品、壳源和幔源氦同位素值。计算结果表明,三站、五站油气田及太平庄气田天然气中有0.92%~5.99%幔源氦的贡献,壳源氦在天然气氦中占绝对优势,说明深部来源的幔源挥发份对天然气成分影响很小。

在图2中,大致以大气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值 $1.4 \times 10^{-6}$ 为界,可将天然气分为:地幔气、壳源复合气和壳源气,该区的天然气点落在壳源范围内, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值与 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值总体上具有一定的负相关性,也说明了以壳源为主的天然气,随着气源岩年龄增加, $^4\text{He}$ 和 $^{40}\text{Ar}$ 也随之增加, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值减小, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值增加,所以二者呈现出负相关关系的结论。

图2 该区天然气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值与 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值关系图

#### 2. 用氦、氩同位素估算气源岩年龄

在以壳源气为主的天然气中,可利用氩同位素年代积累效应来研究气源岩的年龄。本区天然气为典型壳源成因,故可利用Ar同位素组成进行气源岩年龄估计<sup>[6]</sup>。刘文汇<sup>[6]</sup>通过对我国含油气盆地天然气的氩同位素组成特征的综合研究,回归出了

$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  值与源岩时代 (Ma) 的关系式:  $T=544.5 \lg(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})-1362 (r=0.947)$ , 在扣除了幔源氩同位素组成后, 利用上式算出气源岩的时代分别为: 三站气田气源岩为早白垩世, 三 4-2 气源岩为早—中侏罗世; 五站气源岩为早白垩世; 太平庄气田除万 11 井气源岩为早—中侏罗世, 其余气井气源岩的年龄与实际有出入, 可能是由于天然气发生运移聚集后空气混入所致。

### 3. 幔源氩与大地构造分析

根据前人<sup>[7,15,16]</sup>研究, 含油气盆地中幔源氩侵入的基本地质条件包括: ①地幔上拱, 地壳厚度减薄; ②存在触发幔源脱气和作为幔源氩运移通道的深大断裂。根据天然气中氩同位素分布特征, 可将全国含油气区划分为东部活动区、中部稳定区和西部次稳定区。本区位于我国天然气幔源氩异常分布的东部活动区内, 中、新生代构造活动强, 岩浆活动频繁, 郯—庐大断裂带为深切地幔的超壳断层, 具备幔源氩异常的大地构造背景<sup>[7,15,16]</sup>; 其次松辽盆地天然气中氩同位素平均值为  $10^{-6}$ , 例如万金塔气田位于松辽盆地东南隆起区, 并且临近郯—庐大断裂带, 天然气中氩以幔源为主<sup>[1,15]</sup>。松辽盆地东部和北部分布大量中、新生代火山熔岩和火山碎屑岩<sup>[17]</sup>, 而且本区分布着哈尔滨—长春岭深大断裂<sup>[18]</sup>。根据上面的依据, 本区天然气中氩应该具有较高的同位素值, 但事实恰恰相反。这说明在松辽盆地中、新生代构造活动强, 岩浆活动强烈的背景下, 该区的构造活动相对较弱, 岩浆活动不强烈。

### 4. 二氧化碳成因探讨

利用二氧化碳的碳同位素组成可判识天然气中二氧化碳的成因。二氧化碳的成因分为有机成因和无机成因两类。戴金星<sup>[19-20]</sup>在综合国内外大量二氧化碳有关数据后, 认为无机成因二氧化碳的  $\delta^3\text{C}_{\text{CO}_2}$  值大于  $-8\%$ , 主要在  $-8\% \sim 3\%$ , 其中碳酸盐岩变质成因的  $\text{CO}_2$  其  $\delta^3\text{C}_{\text{CO}_2}$  值接近于碳酸盐岩的  $\delta^3\text{C}$  值, 为  $0 \pm 3\%$ ; 火山—岩浆成因和幔源  $\text{CO}_2$  其  $\delta^3\text{C}_{\text{CO}_2}$  值大多为  $-6 \pm 2\%$ ;  $\delta^3\text{C}_{\text{CO}_2}$  值小于  $-10\%$  为有机成因二氧化碳, 主要分布在  $-30\% \sim -10\%$ ; 当  $\delta^3\text{C}_{\text{CO}_2}$  值在  $-10\% \sim -8\%$ , 为有机成因及无机成因二氧化碳混合气的共存区。

该区天然气  $\delta^3\text{C}_{\text{CO}_2}$  值在  $-26.5\% \sim -1.6\%$ , 三 4-1 和双 17 气井  $\text{CO}_2$  为碳酸盐岩热变质成因, 三 102 和五 109 气井的  $\text{CO}_2$  可能为火山—岩浆和幔源成因; 庄深 1 井和五深 1 井二氧化碳位于共存成因区; 其余 9 口井天然气中的  $\text{CO}_2$  为有机成因。

## 四、结 论

(1) 壳源氩在本区天然气氩中占绝对优势, 深部来源的幔源挥发份对天然气影响很小, 本区天然气为壳源成因, 天然气中 He 浓度和深部来源的幔源氩贡献由三站—五站—太平庄方向逐渐增大。并利用氩同位素年代积累效应估算气源岩年龄分别为早白垩世和早—中侏罗世。大部分天然气中氩的含量达到了工业开采价值, 建议在天然气开发过程中综合利用天然气资源。

(2) 天然气氩同位素的分布特征说明了在松辽盆地下部上地幔整体隆起幅度较高, 中、新生代构造活动强, 火山岩浆活动强烈的背景下, 本区的构造活动相对较弱, 岩浆活动不强烈。

(3) 大部分天然气中的  $\text{CO}_2$  为有机成因, 部分为无机成因。无机成因  $\text{CO}_2$  中既有碳酸盐岩热变质作用产生的, 也有火山—岩浆成因和幔源成因。

## 参 考 文 献

- [1] 徐永昌, 沈平, 陶明信, 等. 东部油气区天然气中幔源挥发分的地球化学——I. 氩资源的新类型, 沉积壳层幔源氩的工业储集[J]. 中国科学: D 辑, 1996, 26(1): 1-8.
- [2] 徐永昌, 沈平, 刘文汇, 等. 东部油气区天然气中幔源挥发分的地球化学——II. 幔源挥发分中的氩、氩及碳化物[J]. 中国科学: D 辑, 1996, 26(2): 187-192.
- [3] HULSTON J R, HILTON D R, KAPLAN I R. Helium and carbon isotope systematics of natural gases from Taranaki Basin, New Zealand [J]. Applied Geochemistry, 2001, 16: 419-436.
- [4] WAKITA H, SANO Y, URABE A, et al. Origin of methane-rich natural gas in Japan: formation of gas fields due to large-scale submarine volcanism [J]. Applied Geochemistry, 1990, 5(3): 263-278.
- [5] SANO Y, URABE A, WAKITA H, et al. Chemical and isotopic compositions of gases in geothermal fluids in Iceland [J]. Geochem J, 1985, 19: 135-148.
- [6] 刘文汇, 徐永昌. 天然气中氩、氩同位素组成的意义[J]. 科学通报, 1993, 38(9): 818-821.
- [7] 陶明信, 徐永昌, 沈平, 等. 中国东部幔源气藏聚集带的大地构造与地球化学特征及成藏条件[J]. 中国科学: D 辑, 1996, 26(6): 531-536.
- [8] OXBURGH E R, O'NIONS R K. Helium loss, tectonics and the terrestrial heat budget [J]. Science, 1987, 237: 1583-1588.
- [9] POLYAK B G, PRASOLOV E M, CERMAK V, et al. Isotopic compositions of noble gases in geothermal fluids

- of the Krusne Hary Mts ,Czechoslovakiy , and the nature of the local geothermal anomaly[J].*Geochim Cosmochim Acta*,1985,49:695-699.
- [10] OXBURGH E R,O'Nions R K,Hill R I.Helium isotopes in sedimentary basins[J].*Nature*,1986,324(18/25):632-635.
- [11] LUPTON J E.Terrestrial inert gases-isotopic trace studies and clues to primordial components[J].*Annual Review Earth Planet Science*,1983,11:371-414.
- [12] KANEOKALI.TAKAOKA N.Noble gas state in the Earth's interior-some constraints on the present state[J].*Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*,1985,52:75-95.
- [13] POREDA R J,JENDEN P D,KAPLAN E R,et al. Mantle helium in Sacramento basin natural gas wells[J].*Geochim Cosmochim Acta*,1986,65(5):2847-2853.
- [14] 徐永昌,沈平,陶明信,等.中国含油气盆地天然气中氦同位素分布[J].*科学通报*,1994,39(16):1506-1508.
- [15] 徐永昌.天然气中的幔源稀有气体[J].*地学前缘*,1996,3(3/4):63-70.
- [16] 戴金星,宋岩,戴春森,等.中国东部无机成因气及其气藏形成条件[M].北京:科学出版社,1995:62-200.
- [17] 李娟,舒良树.松辽盆地中、新生代构造特征及其演化[J].*南京大学学报:自然科学版*,2002,38(4):525-531.
- [18] 罗群,孙宏智.松辽盆地深大断裂对天然气的控制作用[J].*天然气工业*,2000,20(3):16-21.
- [19] 戴金星,石昕,卫延召.无机成因油气论和无机成因的气田(藏)概略[J].*石油学报*,2001,22(6):5-10.
- [20] 戴金星.中国含油气盆地的无机成因气及其气藏[J].*天然气工业*,1995,15(3):22-27.

(收稿日期 2006-06-22 编辑 黄君权)