

文章编号: 0253-9985(2009)05-0519-11

# 四川盆地须家河组煤系烷烃气碳同位素特征及气源对比意义

戴金星<sup>1</sup>, 倪云燕<sup>1</sup>, 邹才能<sup>1</sup>, 陶士振<sup>1</sup>, 胡国艺<sup>1</sup>, 胡安平<sup>2</sup>, 杨 春<sup>1</sup>, 陶小晚<sup>1</sup>

(1. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 浙江大学 地球科学系, 浙江 杭州 310027)

摘要: 四川盆地上三叠统须家河组煤系是陆相含煤地层。须家河组一、三、五段以暗色泥岩和煤为主, 是气源岩。泥岩干酪根以 II 型和 III 型为主, 有机碳含量平均为 1.96%, 在川中处于成熟阶段, 在川西处于高成熟阶段。由于源岩以腐殖型为主, 故以形成气为主, 气中仅有少量轻质油或凝析油。须家河组二、四、六段以砂岩为主, 故有 3 套生储盖组合, 形成许多自生自储煤成气田。在四川盆地须家河组发现的天然气储量仅次于下三叠统飞仙关组, 并有该盆地第二大气田(广安气田)。须家河组煤成气碳同位素特征: 一是绝大部分具有正碳同位素系列, 即  $\delta^3\text{C}_1 < \delta^3\text{C}_2 < \delta^3\text{C}_3 < \delta^3\text{C}_4$ ; 二是  $\delta^3\text{C}_2$  值是全盆地 9 个产气层系中最重的, 为  $-20.7\text{‰} \sim -28.3\text{‰}$ ; 三是川中地区有一批轻的  $\delta^3\text{C}_1$  值, 最轻为  $-43.0\text{‰}$ 。在川东和川南须家河组变薄的地区还发现少量油型气藏, 这些气藏碳同位素特征是  $\delta^3\text{C}_2$  值轻, 一般轻于  $-30\text{‰}$ , 最轻为  $-36.3\text{‰}$ , 易与煤成气区分。

关键词: 碳同位素; 气源对比; 烷烃气; 须家河组; 四川盆地

中图分类号: TE135; TE122.2 文献标识码: A

## Carbon isotope features of alkane gases in the coalmeasures of the Xujiahe Formation in the Sichuan Basin and their significance to gas-source correlation

Dai Jinxing<sup>1</sup>, Ni Yunyan<sup>1</sup>, Zou Caineng<sup>1</sup>, Tao Shizhen<sup>1</sup>, Hu Guoyi<sup>1</sup>, Hu Anping<sup>2</sup>, Yang Chun<sup>1</sup>, Tao Xiaowan<sup>1</sup>

(1. PetroChina Exploration and Development Research Institute, Beijing 100083, China;

2. Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: The coalmeasures in the Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin are coal-bearing continental strata. Its first, third, and fifth members are dominated by dark mudstone and coal and are gas source rocks. The kerogen of the mudstone are mainly of type II and III with an average TOC of 1.96%. They are mature in the central Sichuan Basin and are highly mature in the western Sichuan Basin. Since the organic matter of source rocks are dominated by huminite, the source rocks are gas prone and the gas generated only contains minor light oil or condensate. The second, fourth and sixth members consist mainly of sandstone. There are three sets of source-reservoir-caprock combinations, resulting in many indigenous coal-derived gas fields. The gas reserves discovered in the Xujiahe Formation is only next to that in the Lower Triassic Feixianguan Formation. The Guangan gas field, the second largest gas field in the basin, produce gas from the Xujiahe Formation. The carbon isotope of the coal-derived gas have the following features: 1) most of them are positive carbon isotopes (i.e.,  $\delta^3\text{C}_1 < \delta^3\text{C}_2 < \delta^3\text{C}_3 < \delta^3\text{C}_4$ ), 2) its  $\delta^3\text{C}_2$  value is between  $-20.7\text{‰} \sim -28.3\text{‰}$ , the heaviest among that of the 9 gas pays in the whole basin, 3) there are lighter  $\delta^3\text{C}_1$  in central Sichuan Basin with the lowest value of  $-43.0\text{‰}$ . A few gas reservoirs sourced from oil-prone kerogens had been discovered in eastern and southern Sichuan Basin, where the Xujiahe Formation thins out. These reservoirs have light carbon isotopes (typically lighter than  $-30\text{‰}$ , and in extreme cases as light as  $-36.3\text{‰}$ ) and can be easily distinguished from coal-derived gases.

Key words: carbon isotope; gas-source correlation; alkane gas; Xujiahe Formation; Sichuan Basin

收稿日期: 2009-05-26

第一作者简介: 戴金星(1935—), 男, 中国科学院院士, 天然气地质与地球化学。



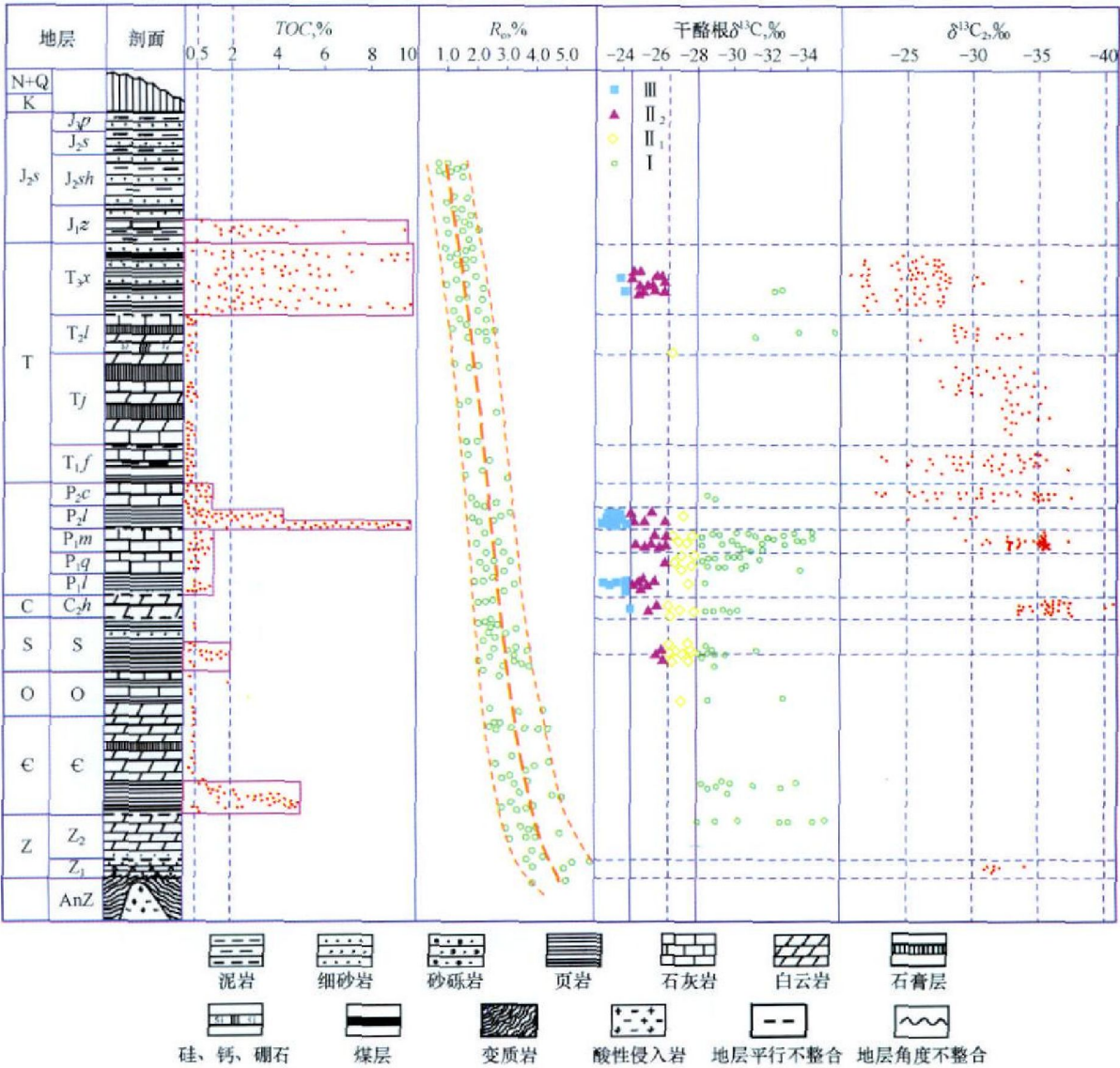


图 2 四川盆地地层、源岩及天然气地化剖面

Fig. 2 Geochemical profiles of strata source rocks and gas in the Sichuan Basin

山前带最发育,一般厚 10 m 以上,最大累计厚度在 35 m 以上,具有多层分布的特点;其次为盆地中、北部地区;川东及川南地区煤层较少或无煤层分布<sup>[2]</sup>。暗色泥质烃源岩是上三叠统须家河组主

要的烃源岩。泥质烃源岩在全盆地广泛发育(图 1),主要发育在须一、须三、须五段;须二、须四、须六段以砂岩为主(图 3),但仍有一定厚度的暗色泥质岩分布。泥质烃源岩一般厚 200 m 以上,最

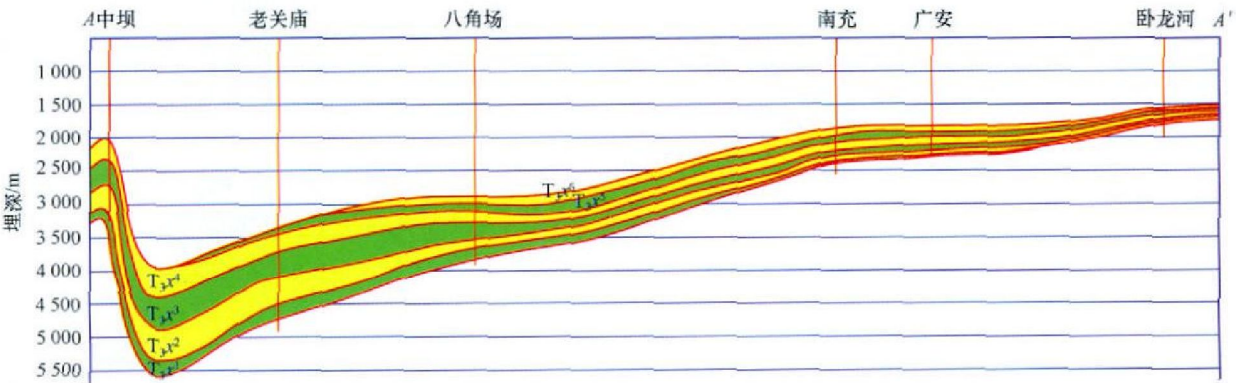


图 3 四川盆地须家河组埋藏深度与厚度剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 3 Burial depth and thickness section of the Xujiache Formation in the Sichuan Basin (see Fig. 1 for profile location)

厚达到 1 000 m 以上,具有明显的向东南方向减薄的趋势(图 1,图 3)。须家河组泥岩有机质极为丰富,有机碳含量分布范围为 0.50%~9.70%、平均 1.96%,干酪根类型以 II 型和 III 型为主(图 2),是一套良好的生气源岩。

上三叠统须家河组气田(藏)或以须家河组为主要气源的气田共计 39 个,主要分布在川西北和川中地区;川东和川南地区的须家河组产层多为气田的某一含气层段,储层厚度和气藏规模均较小,例如卧龙河气田与合江气田的须家河组含气层(图 1)。川西北和川中地区源岩厚度大(图 1,图 3),源岩类型好(以生气为主的腐殖型干酪根),具有很高的生气强度,为须家河组储层提供了充沛的气源条件;而在川东和川南地区,须家河组源岩厚度薄(图 1,图 3),生气强度小,难以充满自身储层,因此这两个地区的须家河组天然气具有一定其他气源。

## 2 分析方法

天然气组分分析采用 HP 6890 型气相色谱仪,在中国石油勘探开发研究院廊坊分院测定。单个烃类气体组分通过毛细柱分离(Plot A  $1/2$  O<sub>3</sub> 50 m×0.53 mm)。通过两个毛细柱分离稀有气体(Plot 5 Å 分子筛 30 m×0.53 mm, Plot Q 30 m×0.53 mm)。气相色谱仪炉温首先设定在 30℃ 保持 10 min,然后以 10℃/min 的速率升高到 180℃。

天然气碳同位素分析采用 Delta S GC/C/IRMS 同位素质谱仪,同样在中国石油勘探开发研究院廊坊分院完成。气体组分通过气相色谱仪分离,然后转化为 CO<sub>2</sub> 注入到质谱仪。单个烷烃气组分(C<sub>1</sub>—C<sub>5</sub>)和 CO<sub>2</sub> 通过色谱柱分离(Plot Q 30 m),色谱柱升温过程为 35~80℃(升温速率 8℃/min),一直到 260℃(升温速率 5℃/min),在最终温度保持炉温 10 min。一个样品分析 3 次,分析精度达到 ±0.5‰。

## 3 须家河组煤系烷烃气碳同位素特征

王世谦(1994)研究四川盆地侏罗系至震旦系天然气的地球化学特征后指出,煤成气的  $\delta^3\text{C}_2$  值大于 -29‰<sup>[13]</sup>。戴金星等(2005)研究了中国天

然气后指出,油型气的  $\delta^3\text{C}_2$  值小于 -29‰<sup>[14]</sup>。据此,须家河组天然气可分为两种类型:煤成气占绝大部分,为自源的;油型气仅占小部分,为它源的。

### 3.1 煤成气烷烃碳同位素特征

须家河组煤系天然气绝大部分是煤系本身源岩生成的煤成气。在该组 76 个气样中,煤成气占 72 个(表 1,表 2)<sup>[11,12,15~18]</sup>,占总数的 94.7%。经统计,表 1 和表 2 共 72 个气样,其中 60 个气样的烷烃碳同位素具正碳同位素系列(即  $\delta^3\text{C}_1 < \delta^3\text{C}_2 < \delta^3\text{C}_3 < \delta^3\text{C}_4$ )<sup>[19]</sup>(图 4),有 12 个气样的烷烃碳同位素发生倒转。由图 4c 可以看出,须家河组天然气发生  $\delta^3\text{C}_2 > \delta^3\text{C}_3$  和  $\delta^3\text{C}_3 > \delta^3\text{C}_4$  倒转,并且倒转幅度很小。除了角 47 井发生  $\delta^3\text{C}_3 > \delta^3\text{C}_4$  倒转幅度达到 2.35‰ 外,其余发生碳同位素倒转的气样倒转幅度均小于 1‰。须家河组气藏甲烷及其同系物以正碳同位素系列为主,少数发生倒转的气样倒转幅度小,这说明须家河组天然气未受到次生改造作用或者受次生改造作用影响小。戴金星等(2003)曾提出致使碳同位素倒转的原因:①有机烷烃气与无机烷烃气的混合;②煤成气和油型气的混合;③同型不同源气或同源不同期气的混合;④烷烃气中某一或某些组分被细菌氧化<sup>[20]</sup>。经分析,川中地区具有区域构造稳定、断层不发育等特点<sup>[12]</sup>,故可以排除无机成因气与有机成因气混合的可能;其次,表 1 和表 2 中须家河组天然气均是自生自储的煤成气,无油型气混合,也排除了煤成气与油型气混合形成倒转的可能;另外,气藏深度大多在 2 000 m 以下,受细菌改造作用影响较小,并且发生碳同位素倒转的组分含量变化正常,由此排除了细菌氧化作用的影响。因此,本文认为须家河组气藏少数气样发生碳同位素倒转的原因是同源不同期气混合所致使。流体包裹体岩相学与显微测温分析结果表明,四川盆地中部上三叠统须家河组致密砂岩储层存在早、晚两期流体包裹体,这也证明了此点<sup>[21]</sup>。

须家河组煤成气的  $\delta^3\text{C}_2$  值在四川盆地所有层位天然气中是最重的。由表 1、表 2 可知,  $\delta^3\text{C}_2$  值最重为 -20.7‰(大兴 5 井)<sup>[15]</sup>,最轻为 -28.3‰(西 72 井)。从图 5 可知,  $\delta^3\text{C}_2$  频率峰值在 -24‰~-28‰。四川盆地是个含气盆地,由于

表 1 四川盆地须家河组气藏天然气地球化学参数  
Table 1 Geochemical parameters of the natural gas from the Xujiache Formation in the Sichuan Basin

| 井号          | 层位                         | 井深/m                | 主要组分含量, %     |                        |                        |               |               |               |               | $\delta^{13}\text{C(PDB)}, \%$ |              |       |              |              |              |               |               |
|-------------|----------------------------|---------------------|---------------|------------------------|------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------------------------|--------------|-------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
|             |                            |                     | $\text{CH}_4$ | $\text{C}_2\text{H}_6$ | $\text{C}_3\text{H}_8$ | $i\text{C}_4$ | $n\text{C}_4$ | $i\text{C}_5$ | $n\text{C}_5$ | $\text{CO}_2$                  | $\text{N}_2$ | He    | $\text{C}_1$ | $\text{C}_2$ | $\text{C}_3$ | $n\text{C}_4$ | $i\text{C}_4$ |
| 中 29        | $\text{T}_3\text{x}^2$     | 2 269.00 ~ 2 361.00 | 87.86         | 6.53                   | 2.10                   | 0.60          | 0.83          |               |               | 0.39                           | 0.28         | 0.030 | -34.8        | -24.8        | -23.7        | -23.5         | -23.5         |
| 中 31        | $\text{T}_3\text{x}^2$     | 2 522.00 ~ 2 590.00 | 91.74         | 5.44                   | 1.45                   | 0.35          | 0.67          |               |               | 0.27                           | 0.08         | 0.008 | -36.4        | -25.6        | -24.0        | -23.6         | -23.6         |
| 中 34        | $\text{T}_3\text{x}^2$     | 2 373.00 ~ 2 409.00 | 90.71         | 5.53                   | 1.65                   | 0.31          | 0.36          |               |               | 0.49                           | 0.70         | 微量    | -36.1        | -26.0        | -23.4        |               |               |
| 中 39        | $\text{T}_3\text{x}^2$     | 2 422.09 ~ 2 461.00 | 87.82         | 6.36                   | 2.70                   | 0.93          | 1.38          |               |               | 0.32                           | 0.03         | 0.015 | -36.9        | -25.6        | -23.2        |               |               |
| 中 60        | $\text{T}_3\text{x}^3$     |                     |               |                        |                        |               |               |               |               |                                |              |       |              |              |              |               |               |
| 文 4         | $\text{T}_3\text{x}^3$     | 3 791.59 ~ 3 696.95 | 92.64         | 5.24                   | 0.95                   | 0.20          | 0.13          | 0.08          | 0.02          | 0.36                           | 0.37         | 0.011 | -37.0        | -24.1        | -19.9        | -23.2         | -23.2         |
| 文 9         | $\text{T}_3\text{x}^2$     | 4 495.78 ~ 4 258.22 | 94.06         | 3.69                   | 0.69                   | 0.17          | 0.11          | 0.07          | 0.02          | 0.75                           | 0.44         | 0.006 | -34.8        | -23.8        | -19.2        |               |               |
| 文 16        | $\text{T}_3\text{x}^2$     | 4 486.77 ~ 4 575.00 | 97.08         | 2.11                   | 0.24                   | 0.62          | 0.01          |               |               | 0.34                           | 0.19         | 0.008 | -35.3        | -24.2        |              |               |               |
| 拓 2         | $\text{T}_3\text{x}^2$     | 4 331.24 ~ 4 489.50 | 93.51         | 4.49                   | 0.84                   | 0.16          | 0.05          |               |               | 0.43                           | 0.41         | 0.007 | -37.5        | -25.2        |              |               |               |
| 角 13        | $\text{T}_3\text{x}^{2+4}$ | 2 963.50 ~ 3 341.00 | 94.66         | 2.35                   | 0.60                   | 0.11          | 0.10          | 0.06          | 0.01          | 0.27                           | 1.78         | 0.023 | -38.9        | -27.0        | -25.6        |               |               |
| 角 23        | $\text{T}_3\text{x}^2$     | 3 336.69 ~ 3 337.71 | 93.17         | 3.24                   | 1.85                   |               |               |               |               | 0.40                           | 0.30         |       | -38.4        | -27.2        | -24.6        | -25.1         | -25.1         |
| 角 47        | $\text{T}_3\text{x}^6$     | 2 746.18 ~ 2 746.33 | 89.60         | 6.22                   | 2.02                   | 0.39          | 0.97          | 0.19          | 0.18          | 0.29                           | 0.64         |       | -39.5        | -25.1        | -21.7        | -24.1         | -24.1         |
| 角 48        | $\text{T}_3\text{x}^6$     | 3 383.39 ~ 3 395.00 | 87.53         | 6.26                   | 2.65                   | 0.41          | 0.48          | 0.16          | 0.08          | 0.27                           | 1.96         | 0.023 | -40.6        | -26.4        | -23.6        |               |               |
| 角 49        | $\text{T}_3\text{x}^{2+4}$ | 3 393.77 ~ 3 455.04 | 94.01         | 3.12                   | 0.72                   | 0.15          | 0.13          | 0.07          | 0.02          | 0.33                           | 1.38         | 0.005 | -37.6        | -27.1        | -23.7        |               |               |
| 角 53        | $\text{T}_3\text{x}^4$     | 3 016.60 ~ 3 109.90 | 92.95         | 4.93                   | 1.14                   | 0.20          | 0.24          | 0.07          | 0.08          | —                              | 0.38         |       | -40.1        | -27.4        | -24.6        | -24.4         | -24.8         |
| 遂 8         | $\text{T}_3\text{x}^2$     | 2 265.00 ~ 2 284.00 | 86.27         | 7.00                   | 2.33                   | 0.48          | 0.43          | 0.22          | 0.07          | 0.54                           | 2.38         | 0.053 | -41.4        | -27.3        | -22.7        |               |               |
| 通 1         | $\text{T}_3\text{x}^2$     | 2 314.07 ~ 2 428.00 | 82.34         | 10.10                  | 4.03                   | 0.82          | 0.83          | 0.44          | 0.23          | 0.26                           | 0.90         | 0.028 | -41.3        | -27.0        | -24.2        | -23.1         | -24.3         |
| 广安 2        | $\text{T}_3\text{x}^6$     | 1 764.70 ~ 1 800.20 |               |                        |                        |               |               |               |               |                                |              |       | -40.2        | -27.6        | -26.4        | -25.0         | -24.3         |
| 广安 5 ~ 1    | $\text{T}_3\text{x}^6$     | 1 745.00 ~ 1 769.00 |               |                        |                        |               |               |               |               |                                |              |       | -39.2        | -27.4        | -26.0        | -23.4         | -25.0         |
| 广安 106      | $\text{T}_3\text{x}^4$     | 2 506.00 ~ 2 512.00 | 94.16         | 4.78                   | 0.49                   | 0.09          | 0.07          | 0.03          | —             | —                              | 0.39         |       | -37.8        | -25.7        | -24.7        | -22.1         | -23.1         |
| 广安 128      | $\text{T}_3\text{x}^4$     | 2 322.00 ~ 2 327.00 | 94.31         | 4.33                   | 0.54                   | 0.20          | 0.07          | —             | —             | —                              | 0.59         |       | -37.7        | -25.2        | -23.3        | -21.1         | -22.0         |
| 广安 002 ~ 39 |                            |                     |               |                        |                        |               |               |               |               |                                |              |       | -38.8        | -26.9        | -25.6        | -24.8         | -24.5         |
| 西 20        | $\text{T}_3\text{x}^4$     |                     | 90.84         | 6.06                   | 1.55                   | 0.33          | 0.38          | 0.13          | 0.08          | —                              | 0.64         |       | -42.2        | -28.2        | -25.2        | -24.2         | -23.2         |
| 西 35 ~ 1    | $\text{T}_3\text{x}^2$     |                     |               |                        |                        |               |               |               |               |                                |              |       | -41.7        | -27.8        | -25.4        | -24.6         | -23.7         |
| 西 51        | $\text{T}_3\text{x}^4$     |                     |               |                        |                        |               |               |               |               |                                |              |       | -42.8        | -28.2        | -24.9        | -24.5         | -22.9         |
| 西 72        | $\text{T}_3\text{x}^4$     |                     |               |                        |                        |               |               |               |               |                                |              |       | -40.4        | -27.0        | -24.5        | -22.9         | -23.3         |
| 磨 64        | $\text{T}_3\text{x}^4$     |                     |               |                        |                        |               |               |               |               |                                |              |       | -41.7        | -28.3        | -26.0        | -25.6         | -24.3         |
| 磨 85        | $\text{T}_3\text{x}^2$     | 2 095.00 ~ 2 096.80 | 91.37         | 6.06                   | 1.29                   | 0.31          | 0.25          | 0.13          | 0.08          | —                              | 0.51         |       | -42.5        | -28.2        | -25.3        | -25.8         | -24.0         |
| 莲深 1        | $\text{T}_3\text{x}^2$     |                     | 91.88         | 5.92                   | 1.22                   | 0.21          | 0.22          | 0.08          | 0.05          | —                              | 0.42         |       | -42.3        | -27.9        | -24.6        | -25.2         | -23.4         |
| 潼南 101      | $\text{T}_3\text{x}^2$     | 2 231.80 ~ 2 251.00 |               |                        |                        |               |               |               |               |                                |              |       | -40.5        | -27.4        | -24.5        | -23.4         | -23.0         |
| 金 2         | $\text{T}_3\text{x}^{2+4}$ | 3 074.00 ~ 3 390.00 | 91.57         | 5.72                   | 1.60                   | 0.16          | 0.32          | 0.15          | 0.15          | —                              | —            |       | -42.2        | -27.4        | -24.2        | -26.4         | -23.8         |
| 金 17        | $\text{T}_3\text{x}^2$     |                     | 92.20         | 5.88                   | 1.07                   | 0.20          | 0.20          | 0.09          | 0.07          | —                              | —            |       | -38.4        | -26.3        | -22.9        |               |               |
| 川 35        | $\text{T}_3\text{x}^4$     | 3 970.00            | 91.89         | 6.36                   | 0.51                   |               |               |               |               | 0.45                           | 0.63         |       | -38.9        | -24.3        | -21.2        | -21.6         | -21.6         |
| 川 93        | $\text{T}_3\text{x}^4$     | 2 625.00 ~ 2 630.00 | 88.75         | 4.02                   | 1.31                   | 0.15          | 0.22          | 0.04          | 0.07          | 0.36                           | 3.94         |       | -35.0        | -24.4        | -21.6        | -20.8         | -20.8         |
| 川 96        | $\text{T}_3\text{x}^5$     | 3 356.40            | 90.32         | 7.45                   | 1.20                   | 0.16          | 0.22          | —             | —             | 0.24                           | 0.39         |       | -38.9        | -26.0        | -22.3        | -22.3         | -22.3         |

表 2 四川盆地须家河组烷烃气碳同位素组成

Table 2 Carbon isotopic composition of the alkane gases from the Xujiahe Formation of the Sichuan Basin

| 气田  | 井号     | 层位                            | $\delta^3\text{C (PDB) } \text{‰}$ |                |                |                | 文献                               |
|-----|--------|-------------------------------|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------------------------|
|     |        |                               | C <sub>1</sub>                     | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> |                                  |
| 广安  | 广安 1   | T <sub>3</sub> x <sup>6</sup> | -39.3                              | -27.3          | -25.1          | -23.9          | 李登华等 (2007) <sup>[11]</sup>      |
|     | 广安 7   | T <sub>3</sub> x <sup>6</sup> | -42.5                              | -28.0          | -24.2          | -23.8          |                                  |
|     | 广安 11  | T <sub>3</sub> x <sup>6</sup> | -37.1                              | -27.4          | -22.7          | -23.7          |                                  |
|     | 广安 12  | T <sub>3</sub> x <sup>6</sup> | -38.8                              | -25.5          | -23.1          | -22.9          |                                  |
|     | 广安 15  | T <sub>3</sub> x <sup>6</sup> | -42.4                              | -27.8          | -25.9          | -25.6          |                                  |
|     | 广安 101 | T <sub>3</sub> x <sup>6</sup> | -38.2                              | -26.2          | -25.1          | -23.6          |                                  |
|     | 广安 3   | T <sub>3</sub> x <sup>4</sup> | -37.7                              | -24.2          | -22.1          | -20.4          |                                  |
|     | 广安 5   | T <sub>3</sub> x <sup>4</sup> | -37.2                              | -25.0          | -23.7          | -22.2          |                                  |
|     | 广安 12  | T <sub>3</sub> x <sup>4</sup> | -42.2                              | -25.7          | -22.5          | -21.4          |                                  |
|     | 广安 13  | T <sub>3</sub> x <sup>4</sup> | -42.2                              | -24.5          | -21.4          | -19.6          |                                  |
|     | 广安 14  | T <sub>3</sub> x <sup>4</sup> | -43.0                              | -26.0          | -21.2          | -20.5          |                                  |
| 南充  | N-X2   | T <sub>3</sub> x <sup>2</sup> | -40.5                              | -26.5          | -23.9          |                | 陈义才等 (2007) <sup>[12]</sup>      |
|     | N-X6   | T <sub>3</sub> x <sup>4</sup> | -41.3                              | -26.3          | -23.7          |                |                                  |
|     | N-X35  | T <sub>3</sub> x <sup>2</sup> | -42.0                              | -27.7          | -24.2          |                |                                  |
| 龙女寺 | L-X1   | T <sub>3</sub> x <sup>2</sup> | -39.4                              | -25.7          | -23.0          |                |                                  |
|     | L-X2   | T <sub>3</sub> x <sup>4</sup> | -41.1                              | -26.1          | -22.8          |                |                                  |
| 平落坝 | 平落 1-2 | T <sub>3</sub> x              | -34.3                              | -22.7          | -22.8          | -21.8          | 樊然学 (2005) <sup>[15]</sup>       |
|     | 平落 1-3 | T <sub>3</sub> x              | -33.8                              | -22.4          | -22.0          | -20.6          |                                  |
|     | 平落 3   | T <sub>3</sub> x              | -33.3                              | -21.7          | -21.3          | -20.3          |                                  |
|     | 平落 6   | T <sub>3</sub> x              | -33.5                              | -21.7          | -22.6          | -22.1          |                                  |
|     | 平落 6-1 | T <sub>3</sub> x              | -33.6                              | -22.0          | -22.6          | -22.2          |                                  |
|     | 平落 8   | T <sub>3</sub> x              | -33.6                              | -21.6          | -21.6          | -20.0          |                                  |
|     | 平落 10  | T <sub>3</sub> x              | -33.7                              | -21.7          | -22.7          | -22.6          |                                  |
| 大兴  | 大兴 5   | T <sub>3</sub> x              | -32.7                              | -20.7          | -21.6          | -20.2          |                                  |
| 邛西  | 邛西 3   | T <sub>3</sub> x <sup>2</sup> | -33.8                              | -21.8          | -22.1          |                | 王顺玉等 (2007) <sup>[16]</sup>      |
|     | 邛西 4   | T <sub>3</sub> x <sup>2</sup> | -33.7                              | -22.0          | -22.1          |                |                                  |
|     | 邛西 5   | T <sub>3</sub> x <sup>2</sup> | -36.5                              | -24.2          | -21.2          |                |                                  |
|     | 邛西 6   | T <sub>3</sub> x <sup>2</sup> | -34.6                              | -22.1          | -22.0          |                |                                  |
|     | 邛西 8   | T <sub>3</sub> x <sup>2</sup> | -34.2                              | -21.9          | -21.7          |                |                                  |
|     | 邛西 12  | T <sub>3</sub> x <sup>2</sup> | -35.1                              | -22.1          | -21.0          |                |                                  |
|     | 邛西 13  | T <sub>3</sub> x <sup>2</sup> | -33.2                              | -21.5          | -21.7          |                |                                  |
|     | 邛西 16  | T <sub>3</sub> x <sup>2</sup> | -34.1                              | -22.0          | -21.7          |                |                                  |
| 普光  | PG-1   | T <sub>3</sub> x              | -37.4                              | -27.0          |                |                | Hao Fang等 (2008) <sup>[17]</sup> |
|     | PG-2   | T <sub>3</sub> x              | -30.8                              | -26.0          |                |                |                                  |
| 新场  | X851   | T <sub>3</sub> x <sup>2</sup> | -30.3                              | -27.1          |                |                |                                  |
| 合兴场 | CH127  | T <sub>3</sub> x <sup>2</sup> | -32.0                              | -26.0          |                |                | 叶军 (2001) <sup>[18]</sup>        |
|     | CH100  | T <sub>3</sub> x <sup>4</sup> | -34.6                              | -21.4          |                |                |                                  |

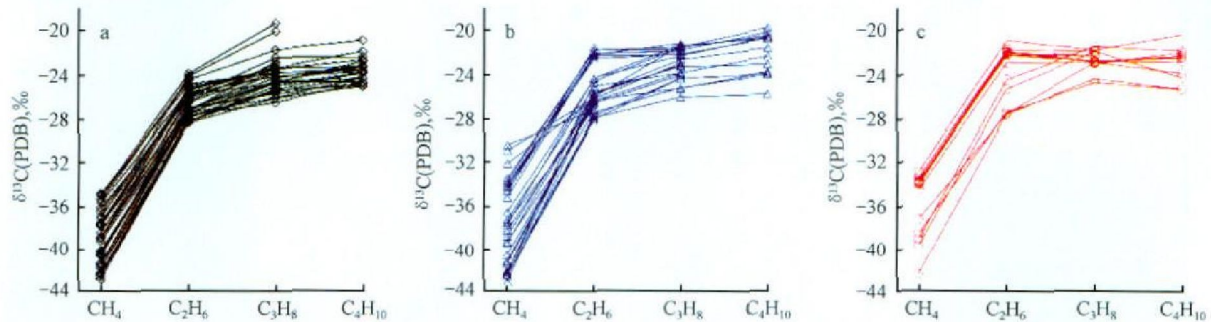


图 4 四川盆地须家河组天然气碳同位素系列折线图

Fig 4 Line chart of carbon isotopes for natural gas in the Xujiahe Formation of the Sichuan Basin

a. 表 1 中的正碳同位素系列; b. 表 2 中的正碳同位素系列; c. 表 1、表 2 中的碳同位素倒转

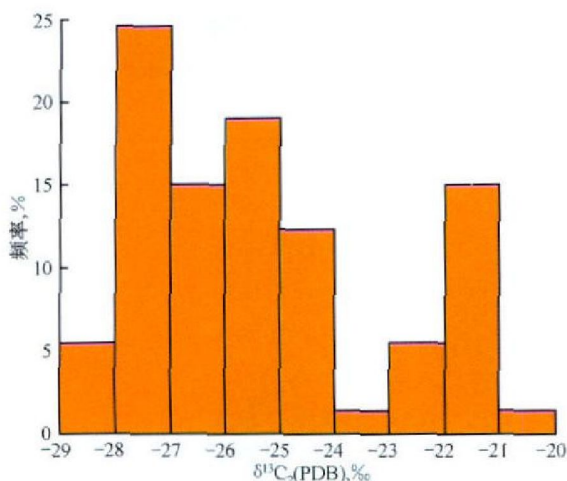
图 5 四川盆地须家河组煤成气  $\delta^3\text{C}_2$  值频率图

Fig 5 Histogram of the  $\delta^3\text{C}_2$  value of coal-derived gases in the Xujiahe Formation of the Sichuan Basin

三叠系及其以下层位,除须家河组外,所有其他层系的源岩均处于裂解成气阶段(图 2),故三叠系及其以下地层发现的均是气藏(田)。须家河组虽在四川中部和东部还处于成熟阶段,但由于是煤系源岩,在成熟阶段以成气为主、成油为辅(仅有少量轻质油或凝析油)<sup>[22-23]</sup>,故须家河组以形成气藏为主。由图 2 可知,须家河组煤成气的  $\delta^3\text{C}_2$  值在四川盆地所有层位天然气中是最重的,这是由于须家河组以下层位其他源岩(除龙潭组有相对薄的煤系外)主要是腐泥型形成的油型气,所以  $\delta^3\text{C}_2$  值轻。

在四川盆地 72 个须家河组煤成气样品中,川中地区发现的  $\delta^3\text{C}_1$  值轻于  $-40\text{‰}$  的气样有 22 个(表 1、表 2)。其中,最轻的为广安 14 井,  $\delta^3\text{C}_1$  值为  $-43.0\text{‰}$ 。故川中地区是中国煤成气  $\delta^3\text{C}_1$  值最轻的地区之一。在中国吐哈盆地中一下侏罗统煤系形成的自生自储煤成气,其  $\delta^3\text{C}_1$  值也有一批轻于  $-40\text{‰}$  的。此外,在准噶尔盆地也有煤成气  $\delta^3\text{C}_1$  值轻于  $-40\text{‰}$  的。由于这些煤成气  $\delta^3\text{C}_1$  值最轻的天然气都伴有乙烷、丙烷和丁烷,并具有  $\delta^3\text{C}_1 < \delta^3\text{C}_2 < \delta^3\text{C}_3 < \delta^3\text{C}_4$  的正碳同位素系列,说明烷烃气是原生型,未受次生改造或混合<sup>[19]</sup>。Patience(2003)指出,煤成气  $\delta^3\text{C}_1$  值在  $-22\text{‰} \sim -38\text{‰}$ <sup>[24]</sup>。由表 1、表 2 可见,须家河组煤成气  $\delta^3\text{C}_1$  值最轻的为  $-43.02\text{‰}$  (广安 14 井)<sup>[11]</sup>。由图 6 在中国四川盆地、吐哈盆地和准噶尔盆地,煤成气  $\delta^3\text{C}_1$  值有轻于  $-40\text{‰}$  的,且  $\delta^3\text{C}_2$  值均重于  $-29\text{‰}$ ,具有煤成气特征。故 Patience 指出的煤成

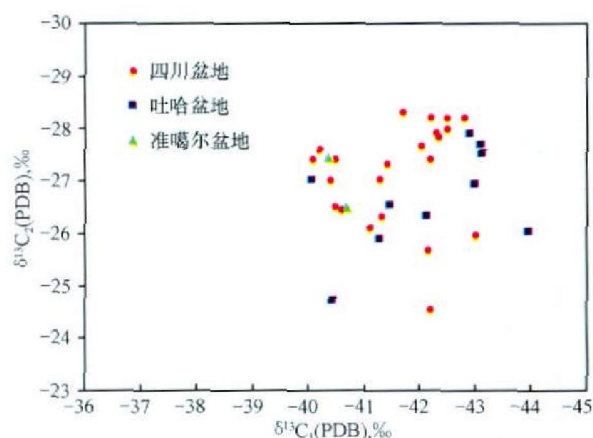


图 6 中国煤成气  $\delta^3\text{C}_1$  值小于  $-40\text{‰}$  的  
烷烃气甲烷、乙烷碳同位素的关系

Fig 6 Carbon isotopic relationship between methane and ethane in coal-derived gases with  $\delta^3\text{C}_1 < -40\text{‰}$  in China

气  $\delta^3\text{C}_1$  上限最轻值为  $-38\text{‰}$  值得商榷,根据中国的资料煤成气  $\delta^3\text{C}_1$  最轻值应在小于  $-44\text{‰}$  较合适。

### 3.2 须家河组油型气碳同位素特征

戴金星等(2005)研究中国天然气的碳同位素后指出,油型气的  $\delta^3\text{C}_2$  值小于  $-29\text{‰}$ <sup>[14]</sup>。据此,在须家河组煤系砂岩中显然存在油型气气藏(卧龙河、纳溪和合江气藏)(表 3—表 5)。该煤系中发现的油型气藏仅占很少比例(5.3%),并且仅在须家河组气源岩明显变薄的川南和川东地区(图 1、图 3)。根据须家河组油型气藏和下伏各层系气藏的烷烃气碳同位素组成和硫化氢含量对比可以确定,须家河组煤系中油型气藏的气源来自下伏相关地层。根据油型气来自下伏气藏层位的不同,可以分为两种类型。

#### 3.2.1 油型气来自下伏嘉陵江组气藏

卧龙河气田和纳溪气田的须家河组气藏(卧浅 1 井、纳浅 2 井和纳 14 井)(表 3 表 4)气源来自下伏嘉陵江组气藏,其证据有二。

1) 卧龙河气田和纳溪气田须家河组气藏与嘉陵江组气藏的烷烃气碳同位素组成相似(表 3 表 4)。

烷烃气碳同位素值都随分子中碳数递增而有序增重,即具有正碳同位素系列<sup>[19-25]</sup>,各气藏对应的组分  $\delta^3\text{C}_1$ ,  $\delta^3\text{C}_2$ ,  $\delta^3\text{C}_3$  值相近或基本相近,  $\delta^3\text{C}_1$ ,  $\delta^3\text{C}_2$ ,  $\delta^3\text{C}_3$  值连线呈线状(图 7a、b);而嘉

表 3 四川盆地卧龙河气田须家河组气藏及其下伏各气藏天然气地球化学参数

Table 3 Geochemical parameters of the natural gas from gas reservoirs in and underlying the Xujiahe Formation, Wolonghe gas field, the Sichuan Basin

| 井号    | 层位                              | 井深 /m             | 主要组分含量, %       |                               |                               |                 |                 |                  |                 |                | $\delta^3\text{C}$ (PDB), ‰ |                |                |                |
|-------|---------------------------------|-------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|
|       |                                 |                   | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | iC <sub>4</sub> | nC <sub>4</sub> | H <sub>2</sub> S | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | C <sub>1</sub>              | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> |
| 卧浅 1  | T <sub>3</sub> x                | 244.00~290.45     | 95.96           | 1.18                          | 0.47                          | 0.10            | 0.04            | 0.24             | 1.01            | 0.44           | -36.5                       | -30.3          | -25.3          |                |
| 卧 2   | T <sub>1</sub> j                | 1 633.00~1 673.00 | 92.53           | 0.83                          | 0.21                          | 0.04            | 0.02            | 4.48             | 0.74            | 0.58           | -32.8                       | -28.7          | -23.5          |                |
| 卧 12  | T <sub>1</sub> j                |                   | 96.74           | 1.42                          | 0.50                          | 0.30            | 0.30            |                  | 0.33            | 0.51           | -33.4                       | -33.4          | -30.0          | -25.8          |
| 卧 13  | T <sub>1</sub> j                | 1 570.00          | 92.40           | 0.80                          | 0.20                          | 0.06            | 0.10            | 4.97             | 0.46            | 0.78           | -33.1                       | -28.7          | -25.9          | -24.2          |
| 卧 25  | T <sub>1</sub> j                | 1 649.50~1 690.00 | 92.27           | 0.87                          | 0.23                          | 0.04            | 0.03            | 4.56             | 0.71            | 0.55           | -33.0                       | -29.0          | -24.2          |                |
| 卧 5   | T <sub>1</sub> j <sup>3-4</sup> | 1 783.00~1 890.00 | 93.97           | 0.79                          | 0.19                          | 0.05            | 0.08            | 3.73             | 0.29            | 0.76           | -33.5                       | -29.2          | -23.9          |                |
| 卧 50  | T <sub>1</sub> j <sup>3-4</sup> | 1 855.00~1 950.00 | 95.82           | 0.81                          | 0.19                          | 0.04            | 0.02            | 3.74             | 0.88            | 0.25           | -33.6                       | -30.2          | -24.2          |                |
| 卧 67  | P <sub>1</sub> <sup>3</sup>     | 3 275.00~3 368.50 | 97.80           | 0.33                          | 0.02                          |                 |                 | 0.48             | 1.09            | 0.26           | -31.9                       | -32.2          | -26.7          |                |
| 卧 127 | P <sub>1</sub> <sup>2</sup>     | 4 245.50          | 92.02           | 0.26                          | 0.01                          |                 |                 | 2.09             | 5.29            | 0.32           | -31.4                       | -32.8          | -31.4          |                |
| 卧 48  | C <sub>2</sub> h                | 3 804.50~3 829.81 | 97.87           | 0.43                          | 0.03                          |                 |                 | 0.17             | 0.81            | 0.65           | -32.9                       | -33.3          |                |                |
| 卧 58  | C <sub>2</sub> h                | 3 752.00          | 97.13           | 0.46                          | 0.05                          | 0.002           | 0.003           | 0.24             | 1.44            | 0.66           | -32.7                       | -36.3          | -27.1          |                |
| 卧 88  | C <sub>2</sub> h                | 4 372.00          | 97.02           | 0.52                          | 0.06                          | 0.002           | 0.002           | 0.12             | 1.38            | 0.86           | -32.7                       | -34.6          | -31.5          |                |
| 卧 120 | C <sub>2</sub> h                | 4 439.00          | 96.40           | 0.65                          | 0.06                          |                 |                 |                  | 1.19            | 1.65           | -32.1                       | -36.1          | -32.0          |                |

表 4 四川盆地纳溪气田须家河组气藏及其下伏各气藏天然气地球化学参数

Table 4 Geochemical parameters of the natural gas from gas reservoirs in and underlying the Xujiahe Formation, Naxi gas field, the Sichuan Basin

| 井号   | 层位                              | 井深 /m             | 主要组分含量, %       |                               |                               |                 |                 |                  |                 |                | $\delta^3\text{C}$ (PDB), ‰ |                |                |
|------|---------------------------------|-------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------|-----------------------------|----------------|----------------|
|      |                                 |                   | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | iC <sub>4</sub> | nC <sub>4</sub> | H <sub>2</sub> S | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | C <sub>1</sub>              | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> |
| 纳浅 1 | T <sub>3</sub> x <sup>6</sup>   | 440.00~441.95     | 97.16           | 0.69                          | 0.08                          |                 |                 |                  | 0.75            | 1.18           | -36.6                       | -30.0          | -25.2          |
| 纳 14 | T <sub>3</sub> x <sup>4-6</sup> | 530.09~651.69     | 96.95           | 1.24                          | 0.29                          | 0.03            | 0.05            | 0.01             | 0.53            | 0.79           | -36.4                       | -30.7          | -27.6          |
| 纳 10 | T <sub>1</sub> j <sup>-2</sup>  | 1 793.50~1 831.00 | 94.58           | 2.00                          | 0.70                          | 0.19            | 0.31            | 0.03             | 0.04            | 1.69           | -34.7                       | -32.1          | -27.7          |
| 纳 58 | T <sub>1</sub> j <sup>-2</sup>  | 2 008.17~2 049.64 | 89.48           | 4.17                          | 1.61                          | 0.54            | 0.68            |                  | 0.05            | 1.49           | -35.3                       | -33.2          | -30.7          |
| 纳 1  | T <sub>1</sub> j                | 1 165.50~1 185.00 | 96.28           | 1.36                          | 0.37                          | 0.07            | 0.10            |                  | 0.25            | 1.13           | -33.4                       | -33.0          | -29.9          |
| 纳 6  | P <sub>1</sub> <sup>(2)</sup>   | 2 300.00~2 339.24 | 97.62           | 1.21                          | 0.27                          | 0.01            | 0.02            | 0.02             | 0.72            | 0.09           | -32.3                       | -35.2          | -31.9          |
| 纳 17 | P <sub>1</sub> <sup>(2)</sup>   | 2 051.00~2 052.31 | 97.63           | 1.08                          | 0.21                          |                 |                 | 0.02             | 0.75            | 0.24           | -32.9                       | -35.4          | -31.9          |
| 纳 21 | P <sub>1</sub> <sup>(2)</sup>   | 2 543.00~2 649.00 | 97.31           | 0.81                          | 0.20                          |                 |                 | 0.07             | 0.73            | 0.84           | -32.1                       | -35.1          | -31.9          |
| 纳 33 | P <sub>1</sub> <sup>(2)</sup>   | 2 333.50~2 355.00 | 97.30           | 1.08                          | 0.22                          | 0.005           | 0.008           | 0.02             | 0.73            | 0.59           | -33.0                       | -35.4          | -31.7          |

表 5 四川盆地合江气田须家河组气藏及其下伏各气藏天然气地球化学参数

Table 5 Geochemical parameters of the natural gas from gas reservoirs in and underlying the Xujiahe Formation, Hejiang gas field, the Sichuan Basin

| 井号   | 层位                             | 井深 /m             | 主要组分含量, %       |                               |                               |                  |                 |                |  | $\delta^3\text{C}$ (PDB), ‰ |                |                |
|------|--------------------------------|-------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------|-----------------|----------------|--|-----------------------------|----------------|----------------|
|      |                                |                   | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | H <sub>2</sub> S | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |  | C <sub>1</sub>              | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> |
| 合 8  | T <sub>3</sub> x <sup>6</sup>  | 1 262.00~1 276.98 | 98.49           | 0.65                          | 0.07                          | 0.03             | 0.24            | 0.41           |  | -30.2                       | -33.8          |                |
| 合 10 | T <sub>1</sub> j               | 1 882.00~1 918.68 | 98.21           | 0.42                          | 0.03                          | 0.49             | 0.08            | 0.76           |  | -29.9                       | -35.1          |                |
| 合 12 | T <sub>1</sub> j               | 1 935.00~1 975.00 | 98.76           | 0.44                          | 0.06                          | 0.25             | 0.03            | 0.42           |  | -30.2                       | -33.8          |                |
| 合 9  | T <sub>1</sub> j <sup>-2</sup> | 2 000.00~2 195.00 | 97.25           | 0.46                          | 0.07                          | 0.44             | 0.08            | 1.66           |  | -29.4                       | -33.2          | -29.5          |
| 合 18 | T <sub>1</sub> f               | 2 694.50~2 700.50 | 98.80           | 0.52                          | 0.08                          |                  | 0.37            | 0.10           |  | -30.8                       | -33.9          | -30.5          |
| 合 4  | P <sub>1</sub> <sup>(3)</sup>  | 2 891.00~2 897.20 | 98.06           | 0.58                          | 0.11                          | 0                | 0.85            | 0.36           |  | -30.7                       | -34.7          | -31.1          |

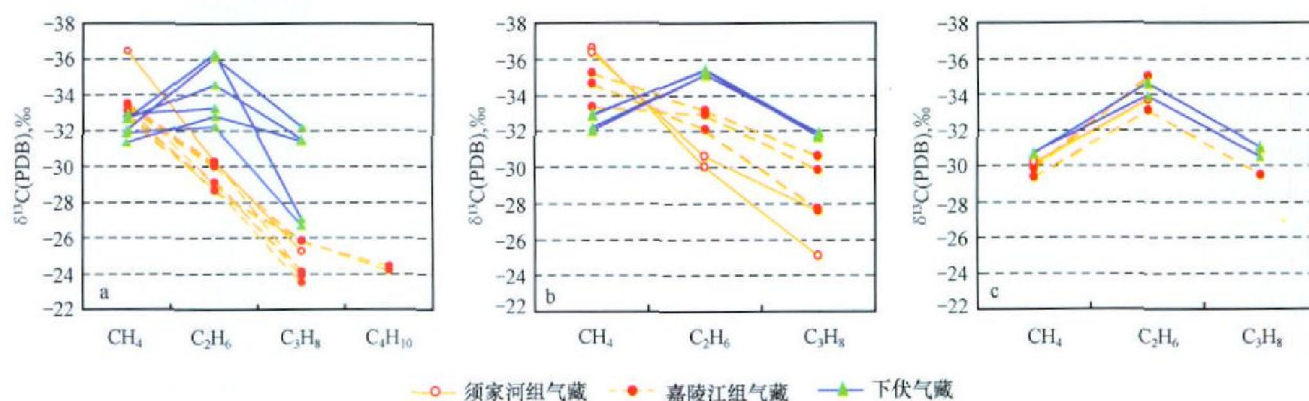


图 7 四川盆地须家河组气藏及其下伏气藏烷烃气碳同位素系列

Fig 7 Carbon isotopes of the alkane gases from gas reservoirs in and underlying the Xujiahe Formation of the Sichuan Basin  
a. 卧龙河气田; b. 纳溪气田; c. 合江气田

陵江组气藏下伏 (卧龙河气田) 的下二叠统和黄龙组气藏 (图 7a), 以及纳溪气田下二叠统气藏 (图 7b) 的烷烃气碳同位素系列发生倒转 ( $\delta^3 C_1 > \delta^3 C_2 < \delta^3 C_3$ ), 其连线呈反 V 型。这些碳同位素发生倒转气藏的气源经大量研究证明来自志留系泥质烃源岩<sup>[17-26]</sup>。关于嘉陵江组气藏的气源来自何方气源岩, 以往的观点认为, 主要来自上二叠统龙潭组煤系, 并有腐泥型志留系烃源岩的贡献<sup>[20-27]</sup>。但当深入研究嘉陵江组各层气藏烷烃气的碳同位素后, 上述有关气源岩和天然气类型的观点值得商榷, 因为  $\delta^3 C_2$  值轻重是衡量气类型的重要指标。卧龙河气田须家河组气藏和嘉陵江组各气藏  $\delta^3 C_2$  值相当接近, 从  $-28.7\%$  ~  $-30.3\%$ , 平均为  $-29.4\%$ ; 纳溪气田须家河组和嘉陵江组各气藏  $\delta^3 C_2$  值比较接近, 从  $-30.0\%$  ~  $-33.2\%$ , 平均为  $-31.8\%$  (表 3 表 4)。王世谦 (1994) 研究四川盆地各层系天然气碳同位素组成时煤成气的  $\delta^{13}C_2$  值大于  $-29\%$ <sup>[13]</sup>, 而上述两气田须家河组和嘉陵江组气藏的  $\delta^3 C_2$  平均值均小于  $-29\%$ 。因此, 卧龙河气田和纳溪气田须家河组和嘉陵江组气藏应属油型气, 其气源岩不是龙潭组煤系。

龙潭组煤系源岩形成的煤成气  $\delta^3 C_2$  值重, 近年来的研究证明了此点。普光气田普光 2 井龙潭组气源岩形成的煤成气向上运移至长兴组和飞仙关组, 其  $\delta^3 C_1$  值十分接近。普光 2 井龙潭组天然气的  $\delta^3 C_2$  值为  $-25.2\%$ <sup>[17]</sup>, 具有典型的煤成气特征。川东北和川北地区龙潭组煤系形成的煤成气向上覆长兴组和飞仙关组运移,

其天然气也同样表现出  $\delta^3 C_2$  值重的特征。如龙岗气田 LG1 井<sup>[28]</sup>、毛坝气田毛坝 1 井及元坝气田元坝 1 一侧 1 井的天然气  $\delta^3 C_2$  值重, 从  $-22.7\%$  ~  $-25.3\%$ , 也具有从龙潭组煤系生成的典型煤成气的特征<sup>[29]</sup>。故卧龙河气田和纳溪气田嘉陵江组天然气的  $\delta^3 C_2$  值较轻, 为  $-28.7\%$  ~  $-33.2\%$  (表 3 表 4), 它不是来自龙潭组生成的煤成气, 可能是有机碳含量基本达到  $0.50\%$ , 高的达  $1.06\%$ <sup>[7-26]</sup> 的长兴组碳酸盐岩的产物 (图 2)。

2) 卧龙河气田和纳溪气田须家河组砂岩储层中天然气具有相对高含量的  $H_2S$

中国天然气中  $H_2S$  含量有无和高低明显受储层岩性控制。在碎屑岩里天然气中  $H_2S$  含量很低至没有; 而碳酸盐岩中天然气则较普遍含  $H_2S$  有时含量很高。中国砂岩储层主要发育在石炭—二叠系、上三叠统及较晚地层中。石炭—二叠系碎屑岩气主要在鄂尔多斯盆地, 绝大部分不含  $H_2S$  或含量极低。南海和东海大陆架上崖 13—1、东方 1—1 构造和春晓大气田第三系砂岩中基本不含  $H_2S$ 。渤海湾盆地砂岩中天然气也几乎不含  $H_2S$ 。辽河油田砂岩储层中 900 口井经 2 800 井次天然气组分分析均是贫  $H_2S$  的 ( $H_2S$  含量小于  $4 \text{ mg/m}^3$ , 即小于  $0.000 25\%$ ); 大港油田各区砂岩中天然气  $H_2S$  含量也很低, 414 个样品分析中 413 个  $H_2S$  含量为  $4.3 \sim 17.0 \text{ mg/m}^3$ , 仅有一个样品  $H_2S$  含量超过民用标准而达到  $21 \text{ mg/m}^3$  ( $0.001 3\%$ ); 胜利油田胜坨地区和孤岛地区气层气和伴生气中  $H_2S$  含量绝大多数在

70 mg/m<sup>3</sup> 以下, 仅有 1 口井最高含量达 1 296 mg/m<sup>3</sup> (0.084 1%)<sup>[30]</sup>。四川盆地虽天然气产层很多, 但除上三叠统须家河组储层为砂岩外, 其他的均为碳酸盐岩, 根据对须家河组 113 口井 225 井次气组分分析统计, 不含硫化氢的井 104 口、204 井次, 其余 9 口井除卧龙河气田的卧浅 1、卧浅 2 井外, H<sub>2</sub>S 含量小于或等于 0.03%。砂岩中 H<sub>2</sub>S 含量极低或没有是因为: ①砂岩一般在氧化环境中沉积而有较多氧化剂 (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 故砂岩中即使聚集有 H<sub>2</sub>S 也易被氧化为黄铁矿; ②砂岩表面积大而具有脱硫作用, 致使 H<sub>2</sub>S 无法存在; ③在碳酸盐岩和膏盐组合地层中, 通过 TSR (硫酸盐热化学还原反应) 形成 H<sub>2</sub>S<sup>[31-33]</sup>, H<sub>2</sub>S 有利于在缺乏 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的碳酸盐岩储层中储存。

由表 3、表 4 可知, 卧龙河气田除碳酸盐岩储层的黄龙组气藏 (C<sub>2h</sub>)、下二叠统气藏 (P<sub>1</sub><sup>2</sup>, P<sub>1</sub><sup>3</sup>) 和嘉陵江组气藏 (T<sub>1j</sub><sup>3-4</sup>, T<sub>1j</sub><sup>5</sup>) 均含 H<sub>2</sub>S 外, 卧浅 1 井须家河组砂岩中气藏 H<sub>2</sub>S 含量高达 0.24%, 是四川盆地须家河组砂岩中最高 H<sub>2</sub>S 含量 0.03% 的 8 倍。卧龙河气田须家河组气藏中卧浅 2 井是中国碎屑岩中 H<sub>2</sub>S 含量最高的井, H<sub>2</sub>S 含量达 0.68%<sup>[30]</sup>。卧龙河气田须家河组砂岩中 H<sub>2</sub>S 含量高, 它是由下伏嘉陵江组高含 H<sub>2</sub>S 的各气藏通过断裂或裂缝系统运移来的, 是次生成因的, 而且这种运移至今还未结束<sup>[30]</sup>。在中亚卡拉库姆盆地塔巴德—顿麦兹气田下白垩统沙特雷克层红色砂岩的天然气中 H<sub>2</sub>S 含量高达 0.94%, 它是沿着断裂和大裂缝系统从穆尔加勃勃陷等深部含 H<sub>2</sub>S 的流体运移来的, 这种运移至今仍在进行, 故致使红色砂岩保持着高 H<sub>2</sub>S 含量<sup>[34]</sup>。

由表 3 可见, 卧龙河气田以嘉陵江组各层气藏 H<sub>2</sub>S 含量最高, 从 3.73% ~ 4.97%; 下二叠统气藏 H<sub>2</sub>S 含量从 0.48% ~ 2.09%; 而黄龙组气藏 H<sub>2</sub>S 含量最低, 仅 0.12% ~ 0.24%, 与须家河组气藏 H<sub>2</sub>S 含量相当, 甚至还低。从烷烃气碳同位素组成和系列倒转及 H<sub>2</sub>S 含量看, 由下伏碳酸盐岩向上覆砂岩 H<sub>2</sub>S 含量必降低, 故须家河组气藏中 H<sub>2</sub>S 不可能来自黄龙组和下二叠统气藏, 而是来自嘉陵江组各层的气藏。用以上同样的原则分析与对比表 4 纳溪气田须家河组天然气也

是来源于嘉陵江组气藏, 不来自于下二叠统气藏。

### 3.2.2 油型气来自下伏下二叠统 (P<sub>1</sub><sup>(3)</sup>) 及更老气藏

由表 5 可知, 合江气田须家河组气藏 (合 8 井) 与卧龙河气田及纳溪气田的须家河组气藏不同 (表 3、表 4), 其须家河组气藏之下虽有嘉陵江组气藏 (合 9、合 10、合 12 井)、飞仙关组气藏 (合 18 井) 和下二叠统气藏 (合 4 井), 但以上 4 个气藏烷烃气碳同位素值都非常接近, 如  $\delta^3\text{C}_1$  值从 -29.4‰ ~ -30.8‰,  $\delta^3\text{C}_2$  值从 -33.2‰ ~ -35.1‰,  $\delta^3\text{C}_3$  值从 -29.5‰ ~ -31.1‰ (表 5); 并且碳同位素系列均发生倒转, 即  $\delta^3\text{C}_1 > \delta^3\text{C}_2 < \delta^3\text{C}_3$ ; 各气藏的  $\delta^3\text{C}_1 - \delta^3\text{C}_2 - \delta^3\text{C}_3$  连线呈反 V 字型并十分一致 (图 7c)。这些特征均说明须家河组气藏的天然气来自下二叠统及更老气藏。

合江气田须家河组气藏到底来源于下伏什么气源岩? 从表 3—表 5 与图 7 可见, 下二叠统气藏和黄龙组气藏才出现烷烃气碳同位素系列倒转, 且  $\delta^3\text{C}_1 - \delta^3\text{C}_2 - \delta^3\text{C}_3$  连线呈反 V 字型, 合江气田须家河组气藏也具此特征, 故其气源可追踪到黄龙组气藏。上面已经指出黄龙组气藏的气源岩为志留系泥质烃源岩<sup>[17, 26]</sup>, 因此合江气田须家河组气藏的气源岩也是志留系烃源岩。

## 4 结论

四川盆地上三叠统须家河组煤系须一、三、五段以暗色泥岩和煤为主, 泥岩干酪根以 II 和 III 型为主; 该组须二、四、六段以砂岩为主。故须家河组有 3 套生储盖组合, 形成许多自生自储煤成气田。在四川盆地须家河组发现的天然气储量仅次于下三叠统飞仙关组, 并且在须家河组有该盆地第二大气田 (广安气田)。须家河组煤成气碳同位素特征: 一是绝大部分具有正碳同位素系列, 即  $\delta^3\text{C}_1 < \delta^3\text{C}_2 < \delta^3\text{C}_3 < \delta^3\text{C}_4$ ; 二是  $\delta^3\text{C}_2$  值是全盆地 9 个产气层系中最重的, 为 -20.7‰ ~ -28.3‰; 三是川中地区有一批轻的  $\delta^3\text{C}_1$  值, 最轻为 -43.0‰。在川东和川南须家河组变薄的地区还发现少量油型气藏, 这些气藏的碳同位素特征是

$\delta^3\text{C}_2$  值轻,一般轻于  $-30.0\%$ ,最轻为  $-36.3\%$ ,易与煤成气区分。

### 参 考 文 献

- 1 汪泽成,赵文智,张林,等.四川盆地构造层序与天然气勘探[M].北京:地质出版社,2002:1~9
- 2 王兰生,陈盛吉,杜敏,等.四川盆地三叠系天然气地球化学特征及资源潜力分析[J].天然气地球科学,2008,19(2):222~228
- 3 杨建红,公禾,申洪亮.2007年中国天然气行业发展综述[J].世界石油经济,2008,16(6):14~18
- 4 马永生,蔡勋育.四川盆地川东北二叠系—三叠系天然气勘探成果与前景展望[J].石油与天然气地质,2006,27(6):741~750
- 5 戴金星,夏新宇,卫延召,等.四川盆地天然气的碳同位素特征[J].石油实验地质,2001,23(2):115~121
- 6 朱光有,张水昌,梁英波,等.四川盆地天然气特征及气源[J].地学前缘,2006,13(2):234~248
- 7 黄籍中,陈盛吉,宋家荣,等.四川盆地烃源体系与大中型气田形成[J].中国科学(D辑),1996,26(6):504~510
- 8 冉隆辉,谢姚祥,王兰生.从四川盆地解读中国南方海相碳酸盐岩油气勘探[J].石油与天然气地质,2006,27(3):289~294
- 9 翟光明.中国石油地质志(卷十二)[M].北京:石油工业出版社,1992:68~70
- 10 马永生,蔡勋育,郭彤楼.四川盆地普光大型气田油气充注与富集成藏的主控因素[J].科学通报,2007(增刊I):149~155
- 11 李登华,李伟,汪泽成,等.川中广安气田天然气成因类型及气源分析[J].中国地质,2007,34(5):829~836
- 12 陈义才,郭贵安,蒋裕强,等.川中地区上三叠统天然气地球化学特征及成藏过程探讨[J].天然气地球科学,2007,18(5):737~742
- 13 王世谦.四川盆地侏罗系—震旦系天然气的地球化学特征[J].天然气工业,1994,14(6):1~5
- 14 戴金星,秦胜飞,陶士振,等.中国天然气工业发展趋势和天然气地球化学理论重要进展[J].天然气地球科学,2005,16(2):127~142
- 15 樊然学,周洪忠,蔡开平.川西坳陷南段天然气来源与碳同位素地球化学研究[J].地球学报,2005,26(2):157~162
- 16 王顺玉,明巧,黄羚,等.邛崃地区邛崃构造须二段气藏流体地球化学特征及连通性研究[J].天然气地球科学,2007,18(6):789~792
- 17 Hao Fang. Evidence for multiple stages of oil cracking and thermochemical sulfate reduction in the Puguang gas field, Sichuan Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(5): 611~637
- 18 叶军.川西新场 851 井深部气藏形成机制研究——X851 井高产工业气流的发现及其意义[J].天然气工业,2001,21(4):16~20
- 19 Dai Jinxing, Xia Xinyu, Qin Shengfei et al. Origins of partially reserved alkane  $\delta^3\text{C}$  values for biogenic gases in China[J]. Organic Geochemistry, 2004, 35(4): 405~411
- 20 戴金星,夏新宇,秦胜飞,等.中国有机烷烃气碳同位素系列倒转的成因[J].石油与天然气地质,2003,24(1):3~6
- 21 李云,时志强.四川盆地中部须家河组致密砂岩储层流体包裹体研究[J].岩性油气藏,2008,20(1):27~32
- 22 戴金星.成煤作用中形成的天然气和石油[J].石油勘探与开发,1979,6(3):10~17
- 23 戴金星,夏新宇,秦胜飞,等.中国天然气勘探开发的若干问题[A].见:中国石油天然气股份有限公司 2000 年勘探技术座谈会报告集[C].北京:石油工业出版社,2001:186~192
- 24 Patience R. Where did all the coal gas go? [J]. Organic Geochemistry, 2003, 34: 375~387
- 25 Galimov E M. Isotope organic geochemistry[J]. Organic Geochemistry, 2006, 37: 1200~1262
- 26 胡光灿,谢姚祥.中国四川东部高陡构造石炭系气田[M].北京:石油工业出版社,1997:47~62
- 27 胡安平,陈汉林,杨树峰,等.卧龙河气田天然气成因及成藏主要控制因素[J].石油学报,2008,29(5):643~649
- 28 陈盛吉,谢邦华,万茂霞,等.川北地区礁滩气藏的烃源条件与资源潜力分析[J].天然气勘探开发,2007,30(4):1~6
- 29 戴金星,倪云燕,周庆华,等.中国天然气地质和地球化学研究对天然气工业的意义[J].石油勘探与开发,2008,35(5):513~525
- 30 戴金星.中国含硫化氢天然气分布特征、分类及其成因探讨[J].沉积学报,1985,3(4):109~120
- 31 Cai C F, Worden R H, Bottrell S H et al. Thermochemical sulphate reduction and the generation of hydrogen sulphide and thiols (mercaptans) in Triassic carbonate reservoirs from the Sichuan Basin, China[J]. Chemical Geology, 2003, 202: 39~57
- 32 Zhang S C, Zhu G Y, Liang Y B et al. Geochemical characteristics of the Zhaokanzhuang sour gas accumulation and thermochemical sulfate[J]. Organic Geochemistry, 2005, 36: 1717~1730
- 33 Zhu G Y, Zhang S C, Liang Y B. The controlling factors and distribution prediction of  $\text{H}_2\text{S}$  formation in marine carbonate gas reservoir, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(Suppl I): 150~163
- 34 Lomako P M, Hudaynazarov G B. Some features of the propagation of hydrogen sulphide gases of the sublat deposits of eastern Turkmenistan[J]. Geology of Oil and Gas, 1983, (9): 41~46

(编辑 李 军)