

文章编号: 1000-0747(2011)04-0418-10

# 四川盆地须家河组及侏罗系煤成气碳同位素组成

吴小奇<sup>1,2</sup>, 黄士鹏<sup>1</sup>, 廖凤蓉<sup>1</sup>, 李振生<sup>3</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院; 2. 中国科学技术大学地球和空间科学学院; 3. 合肥工业大学资源与环境工程学院)

基金项目: 国家自然科学基金(40702021; 40972134); 中国科学技术大学研究生创新基金项目(KD2007061)

**摘要:** 四川盆地须家河组煤系烃源岩为须家河组自生自储气藏和上覆侏罗系次生气藏提供气源。须家河组气藏主要分布在川西和川中气区, 侏罗系气藏主要分布在川西气区。须家河组煤系烃源岩生成的天然气为典型热成因气, 表现出腐殖型气的特点。整体上看侏罗系天然气的碳同位素特征与须家河组天然气基本一致, 须家河组煤成气碳同位素组成表现出自下而上逐渐变轻的趋势; 侏罗系各层天然气则由于来源不尽相同而碳同位素组成规律性不明显, 但具有近源聚集的特点。横向上川西气区南部烷烃气  $\delta^{13}\text{C}$  值大于北部, 且均明显大于川中和川南气区的值。须家河组和侏罗系中少许气样发生了碳同位素的倒转, 主要是受同源不同期气混合的影响。油型气的混合不仅使得川中气区部分煤成气气样  $\delta^{13}\text{C}$  值偏小, 而且导致部分气样发生碳同位素的倒转。图 9 表 1 参 32

**关键词:** 四川盆地; 须家河组; 侏罗系; 煤成气; 碳同位素

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

## Carbon isotopic compositions of coal-derived gas in the Xujiahe Formation and Jurassic in the Sichuan Basin

Wu Xiaoqi<sup>1,2</sup>, Huang Shipeng<sup>1</sup>, Liao Fengrong<sup>1</sup>, Li Zhensheng<sup>3</sup>

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China; 2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. College of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Coal-measure source rocks of Xujiahe Formation in the Sichuan Basin are important gas-source rocks, and provide sufficient natural gas for self-generation and self-storage gas reservoirs in the Xujiahe Formation and secondary gas reservoirs in the overlying Jurassic. The gas reservoirs in the Xujiahe Formation are mainly located in the western and central Sichuan gas provinces, while those in the Jurassic in the western Sichuan gas province. Natural gas derived from coal-measure source rocks in the Xujiahe Formation are typical thermogenic gas and shares the same characteristics of humic type gas. The carbon isotopic characteristics of gas samples in the Jurassic are generally identical to those in the Xujiahe Formation. The carbon isotopic compositions of the coal-derived gas tend to become lighter from bottom to top in the Xujiahe Formation. The gases in the Jurassic have no clear rule due to their coming from different members of the Xujiahe Formation, and they tend to accumulate near the source. Horizontally, the  $\delta^{13}\text{C}$  values of alkane gas from the southern part of the western Sichuan gas province are heavier than those from the northern part, while both are obviously greater than those in the central and southern Sichuan gas provinces. Several gas samples in the Xujiahe Formation and Jurassic are characterized by partially reversed carbon isotopic series, mainly due to the influence of mixing of gas from the same source but different periods. The mixing of oil-associated gas not only reduces the  $\delta^{13}\text{C}$  values of several coal-derived gas samples in the central Sichuan gas province, but also causes the partial reversal of carbon isotopic series of some gas samples.

**Key words:** Sichuan Basin; Xujiahe Formation; Jurassic; coal-derived gas; carbon isotope

### 1 研究区概况

四川盆地是中国陆上重要的天然气产区之一。该盆地可分为 4 个油气聚集区(见图 1): 川东气区、川南气区、川西气区和川中油气区<sup>[1]</sup>, 其中川西气区又大致以绵竹—新场和大邑—成都为界分为北部、中部和南部<sup>[2]</sup>。

四川盆地上三叠统须家河组( $T_3x$ )主要为一套滨

湖、沼泽相沉积, 其暗色泥质岩和所夹煤层是主要烃源岩。须家河组自下而上可以分为 6 段( $T_3x_1$ — $T_3x_6$ ), 其中须一、须三、须五段以泥岩、页岩为主, 夹薄层粉砂岩、炭质页岩和煤线, 须二、须四、须六段以灰色、灰白色砂岩为主, 夹薄层泥岩<sup>[3-4]</sup>。须家河组泥岩有机质极为丰富, 有机碳含量为 0.50%~9.70%, 平均 1.96%, 干酪根类型以 II 型和 III 型为主, 是一套良好的

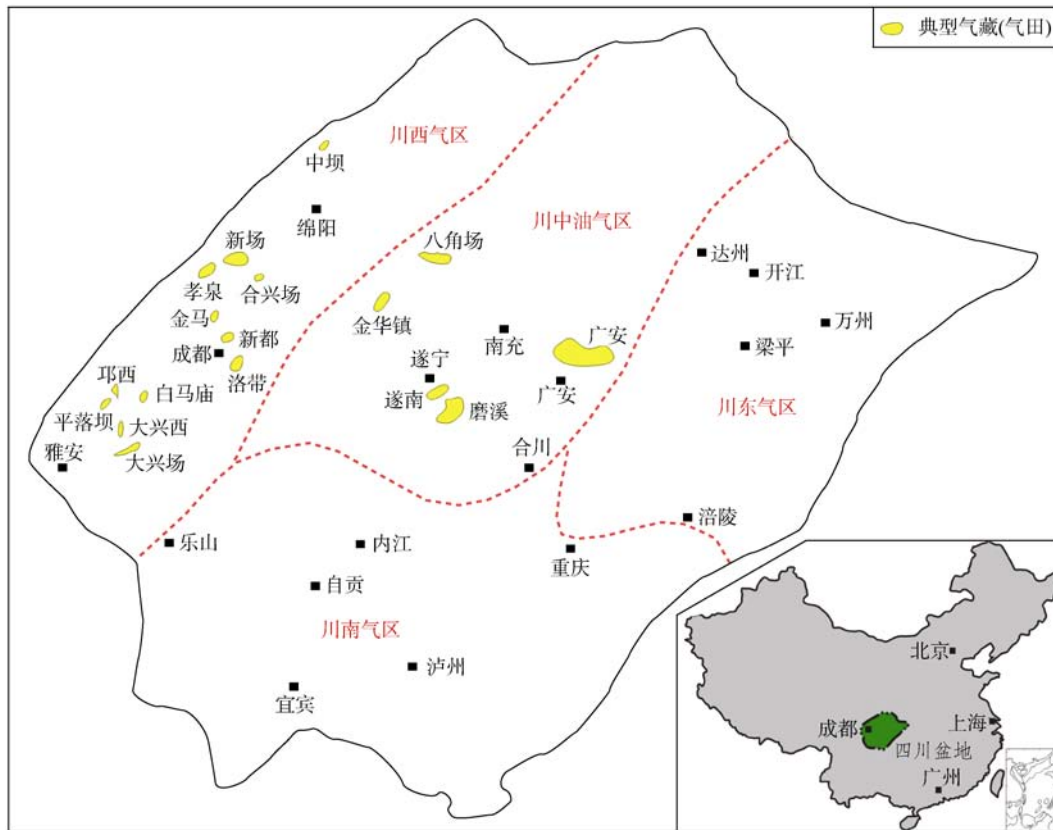


图 1 四川盆地位置及须家河组和侏罗系典型气藏分布图

生气源岩<sup>[1]</sup>。川西北和川中地区须家河组烃源岩厚度大、类型好（以生气为主的腐殖型干酪根），具有很高的生气强度，为须家河组和上覆侏罗系储集层提供了充沛的气源条件；在川东和川南地区，须家河组烃源岩厚度薄，生气强度小，难以充满自身储集层，因此这两个地区的须家河组天然气具有其他气源<sup>[1,3]</sup>。

近年来，随着勘探不断取得突破，上三叠统须家河组已成为四川盆地仅次于飞仙关组的天然气储集层，显示出巨大的勘探潜力<sup>[1]</sup>。须家河组气田（藏）或以须家河组为主要气层的气田共计 39 个，主要分布在川西北和川中地区，川东和川南地区须家河组储集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<sup>[1]</sup>。

四川盆地早在 1977 年就发现了第 1 个侏罗系气藏——川西大兴西沙溪庙组气藏，但直到 20 世纪 90 年代才真正取得较大发现，在川西地区陆续发现了平落坝、孝泉—新场、松华—白马庙和洛带等侏罗系气田（藏），到 2001 年已获得天然气探明加控制储量近  $1.500 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[5]</sup>。四川盆地侏罗系从上到下依次可分为蓬莱镇组（ $J_{3p}$ ）、遂宁组（ $J_{3s}$ ）、沙溪庙组（ $J_{2s}$ ）、千佛崖组（ $J_{2q}$ ）和自流井组（ $J_{1z}$ ），目前各层中均发现了天然气。四川盆地侏罗系天然气集中在川中和川西气区<sup>[5-12]</sup>。川西地

区侏罗系总体上缺乏生烃条件，泥岩有机质丰度极低，有机碳含量一般小于 0.2%，基本不具备生油气能力，天然气普遍被认为来自下伏的须家河组煤系烃源岩<sup>[2,6,8-10]</sup>，但在孝泉—新场—合兴场地区自流井组烃源岩可能有一定程度的贡献<sup>[6]</sup>。在川中油气区，除八角场气田在侏罗系中发现部分油型气外<sup>[11]</sup>，侏罗系中的气样均为煤成气<sup>[12]</sup>，其气源亦主要来自三叠系须家河组煤系烃源岩<sup>[7]</sup>。

须家河组煤系烃源岩不仅为须家河组气藏提供了充足的气源，而且也是上覆侏罗系中天然气的主要源岩。从烷烃气碳同位素组成、碳同位素序列、垂向和横向分布特征等角度探讨须家河组煤系生成的天然气的地球化学特征，不仅有利于明确其与烃源岩成熟度、成藏期次和次生作用的关系，而且可以为进一步深化勘探提供理论指导。

## 2 须家河组及侏罗系煤成气特征

本次研究采集了川西气区须家河组和侏罗系共 22 个气样，天然气组分和甲烷及其同系物碳同位素组成分析均在中国石油勘探开发研究院廊坊分院进行，分别采用 HP 6890 型气相色谱仪和 Delta S GC/C/IRMS 同位素质谱仪测定，分析结果见表 1。此外，笔者还收

表1 川西气区侏罗系和须家河组煤成气地球化学参数

气田	井号	层位	深度/m	组分/%							$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$				
				$\text{N}_2$	$\text{CO}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_3\text{H}_8$	iC <sub>4</sub>	nC <sub>4</sub>	$\delta^{13}\text{C}_1$	$\delta^{13}\text{C}_2$	$\delta^{13}\text{C}_3$	$\delta^{13}\text{C}_4$	
合兴场	川合 117	J <sub>2s</sub>	2 000.00									-34.85	-23.52	-20.97	-19.83
	川孝 105	J <sub>2s</sub>	2 481.62									-33.03	-23.11	-20.99	-20.00
新场	川孝 135(2)	J <sub>2q</sub>	2 747.00~2 756.00									-34.67			
	川孝 133	J <sub>3p</sub>	609.00~635.00									-33.03			
	新浅 6	J <sub>3p</sub>	780.00									-33.98	-24.06	-21.46	-20.42
	川孝 134	J <sub>3s</sub>	1 786.12									-32.27	-25.68	-23.60	-18.87
	川孝 129	J <sub>2s</sub>										-32.97			
洛带	龙遂 24D	J <sub>3s</sub>										-36.24	-23.62	-19.55	-21.33
新都	都遂 3	J <sub>3s</sub>										-34.49	-23.94	-20.79	-20.19
	都遂 10	J <sub>3s</sub>										-34.80	-22.98	-18.52	-19.00
金马	金遂 12-1	J <sub>3s</sub>										-38.48	-23.53	-19.86	-19.95
	川聚 618	J <sub>2q</sub>	2 986.80									-34.29	-21.53	-19.20	
邛西	QX006-X1	T <sub>3x2</sub>	3 605.09	0.26	1.36	93.17	4.12	0.71	0.13	0.11		-31.60	-22.40	-22.40	
	QX6	T <sub>3x2</sub>	3 360.00	0.21	0.92	95.95	2.48	0.30	0.04	0.04		-31.20	-23.20	-23.10	-20.90
	QX14	T <sub>3x2</sub>	3 410.85	0.23	1.55	96.5	1.57	0.12	0.02	0.01		-30.50	-24.10	-23.80	
	QX16	T <sub>3x2</sub>	3 374.20	0.20	1.39	96.46	1.74	0.16	0.02	0.02		-30.80	-23.80		
中坝	中 54	T <sub>3x2</sub>		0.24	0.60	87.76	6.41	2.64	0.63	0.76		-34.00	-25.90	-24.30	-23.90
	中 16	T <sub>3x2</sub>	2 446.00	0.49	0.56	89.80	6.10	1.65	0.38	0.43		-35.64	-24.31	-22.79	
	中 19	T <sub>3x2</sub>	2 602.00	0.63	0.45	90.36	5.81	1.53	0.31	0.36		-35.01	-23.95	-22.54	-22.20
	中 4	T <sub>3x2</sub>	2 578.50	0.46	0.54	90.53	5.75	1.46	0.32	0.36		-35.27	-24.30	-22.96	-22.60
	中 63	T <sub>3x2</sub>	2 366.00	0.28	0.46	91.00	5.75	1.43	0.31	0.35		-35.54	-24.37	-23.01	-22.50
	中 48	T <sub>3x2</sub>		0.25	0.58	88.34	6.30	2.44	0.56	0.67		-36.20	-24.70	-23.60	-24.10

集了 68 井次侏罗系煤成气气样数据和 134 井次须家河组煤成气气样数据<sup>[1,3-4,6-8,10-11,13-26]</sup>，以便于综合分析。

## 2.1 煤成气的鉴别

前人提出了多种鉴别煤成气和油型气的指标，考虑到前人发表的数据以烷烃气碳同位素组成为主，因此本研究也选用碳同位素组成进行鉴别比较。

乙烷碳同位素组成具有较强的原始母质继承性，其受烃源岩热演化程度的影响远小于甲烷碳同位素组成，因此，乙烷碳同位素组成是区别煤成气和油型气最常用的有效指标<sup>[27]</sup>。王世谦<sup>[12]</sup>研究了四川盆地侏罗系—震旦系天然气的地球化学特征后指出，煤成气的  $\delta^{13}\text{C}_2$  值大于  $-29\text{‰}$ ；刚文哲等<sup>[28]</sup>研究认为， $\delta^{13}\text{C}_2$  值对天然气的母质类型反应比较灵敏，腐殖型天然气  $\delta^{13}\text{C}_2$  值大于  $-29\text{‰}$ ，腐泥型天然气  $\delta^{13}\text{C}_2$  值小于  $-29\text{‰}$ ；戴金星等<sup>[1]</sup>综合研究了中国天然气特征后指出，油型气的  $\delta^{13}\text{C}_2$  值小于  $-29\text{‰}$ ，而煤成气的  $\delta^{13}\text{C}_2$  值大于  $-27.5\text{‰}$ ；肖芝华等<sup>[4]</sup>认为，腐泥型天然气碳同位素组成比腐殖型天然气轻，尤其是  $\delta^{13}\text{C}_2$  值有较明显的区别，腐泥型气的  $\delta^{13}\text{C}_2$  值一般小于  $-30\text{‰}$ ，而腐殖型气的  $\delta^{13}\text{C}_2$  值一般

大于  $-28\text{‰}$ 。

综合前人提出的判别标准，笔者采用  $\delta^{13}\text{C}_2$  值  $-29\text{‰}$  作为油型气和煤成气的界限，即  $\delta^{13}\text{C}_2$  值大于  $-29\text{‰}$  的天然气主要为煤成气， $\delta^{13}\text{C}_2$  值小于  $-29\text{‰}$  的天然气则以油型气为主。依据这一原则选出的须家河组和侏罗系煤成气在  $(\text{C}_1/\text{C}_{2+3})-\delta^{13}\text{C}_1$  相关图（见图 2）上均表现出热成因气的典型特征，且基本落在 I 型干酪根生成的天然气范围附近，表现出腐殖型气的特点。

## 2.2 烷烃气碳同位素组成

### 2.2.1 须家河组天然气

研究区须家河组埋深差异很大<sup>[1]</sup>，使得须家河组烃源岩的热演化程度存在较大差别。秦胜飞等<sup>[2]</sup>研究指出，须家河组须一、须三和须五段烃源岩演化程度有明显差别，如白马庙气田白马 9 井随埋藏深度增加，镜质体反射率  $R_o$  值明显增大，须一段烃源岩  $R_o$  值最高，须五段最低。这也使得须家河组自生自储的煤成气碳同位素组成具有较大的分布范围。

从图 3 可以看出，须一、须三、须五段作为烃源岩层，其中发现的气样较少；天然气主要分布在须二、

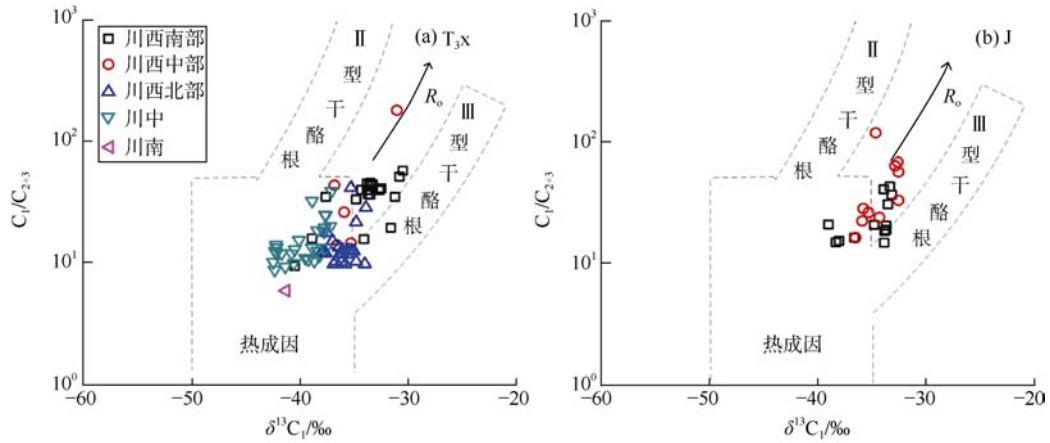


图2 四川盆地须家河组和侏罗系煤成气(C<sub>1</sub>/C<sub>2+3</sub>)-δ<sup>13</sup>C<sub>1</sub>相关图(底图及部分数据来自文献[1,3-4,6-8,10-11,13-26,29])

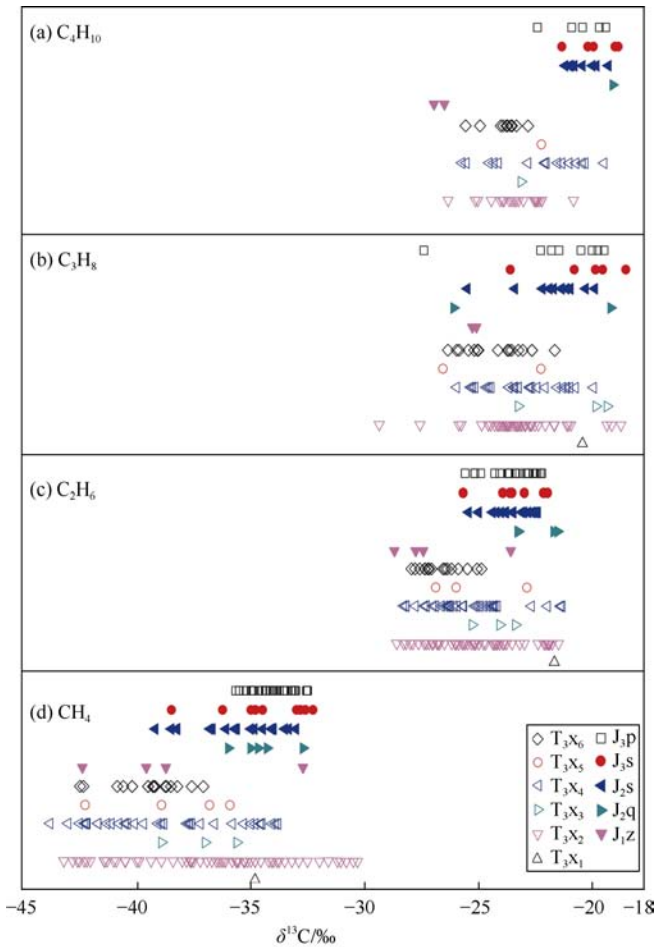


图3 四川盆地须家河组和侏罗系煤成气δ<sup>13</sup>C<sub>1-4</sub>值分布(部分数据来自文献[1,3-4,6-8,10-11,13-26,29])

须四、须六段储集层中，故这些地层中发现的气样明显较多。

从须家河组天然气δ<sup>13</sup>C值(见图3)的分布特征看，尽管不同层位δ<sup>13</sup>C分布范围有所差异，但其平均值从须一段到须六段整体表现出逐渐变小的趋势。

### 2.2.2 侏罗系天然气

川西地区只有1个侏罗系气样(新场气田)位于下侏罗统，其余均位于中、上侏罗统，且中侏罗统下

部千佛崖组中气样也较少，这主要是由于川西地区构造活动较为强烈，须家河组气样多沿断裂向上逸散，在侏罗系上部层位中发生聚集。这也正是该区上三叠统天然气勘探未取得明显突破，却在侏罗系红层中陆续发现气田(藏)<sup>[5]</sup>的原因。

中、上侏罗统不同层位天然气δ<sup>13</sup>C值分布区间有一定的差异，但各层位烷烃气碳同位素值分布范围大体一致，未表现出明显的分馏趋势，这是由于川西地区断裂切穿了须家河组不同层位，侏罗系聚集了来自不同层位烃源岩的天然气。

中、上侏罗统烷烃气的δ<sup>13</sup>C值基本落在须家河组气样范围内，表现出同源的特征；部分气样的δ<sup>13</sup>C<sub>3</sub>和δ<sup>13</sup>C<sub>4</sub>值偏大，个别大于须家河组气样值。考虑到须家河组气样中有很少部分来自须一段，δ<sup>13</sup>C<sub>3</sub>和δ<sup>13</sup>C<sub>4</sub>值大于须家河组气样的个别样品可能直接来自须一段，断裂直接沟通须一段烃源岩。如川西白马庙气田上侏罗统天然气δ<sup>13</sup>C<sub>1</sub>值大于须二段、须三段、须四段天然气，表明该气田侏罗系烷烃气可能来自须一段烃源岩<sup>[2]</sup>。

川中地区侏罗系气样均位于下侏罗统自流井组中。川中地区区域构造稳定，自流井组沉积时受到的区域构造应力较弱，断层不发育<sup>[13]</sup>。因此，川中地区须家河组生成的天然气除了在须家河组中聚集成藏外，还在其上覆自流井组中发生近源聚集成藏。由于缺乏断裂的连通，中、上侏罗统中未发现须家河组煤成气。

对于下侏罗统烷烃气，除川西新场地区报道了一个气样(δ<sup>13</sup>C<sub>1</sub>和δ<sup>13</sup>C<sub>2</sub>值明显偏大)外，其余气样均来自川中地区；图3中δ<sup>13</sup>C<sub>1</sub>、δ<sup>13</sup>C<sub>2</sub>和δ<sup>13</sup>C<sub>4</sub>值较小的下侏罗统气样均分布在川中气区；此外，川中地区下侏罗统煤成气δ<sup>13</sup>C值与四川盆地须家河组煤成气δ<sup>13</sup>C值相比整体较小，δ<sup>13</sup>C<sub>4</sub>值明显小于须家河组气样，不落入须家河组气样δ<sup>13</sup>C<sub>4</sub>值分布范围(见图3)。这些都表明川中气区的煤成气受到了侏罗系自流井组油型气的

明显影响。

### 2.3 甲烷和乙烷碳同位素组成出现频率

四川盆地须家河组煤成气  $\delta^{13}C_1$  值分布表现出宽峰特征，峰值范围为 $-43\text{‰} \sim -33\text{‰}$ ； $\delta^{13}C_2$  值分布则具有双峰特征，峰值范围分别为 $-28\text{‰} \sim -24\text{‰}$ 和 $-22\text{‰} \sim -21\text{‰}$ （见图 4）。

四川盆地侏罗系煤成气  $\delta^{13}C_1$  值和  $\delta^{13}C_2$  值分布均

具有单主峰特征，主峰值范围分别为 $-35\text{‰} \sim -33\text{‰}$ 和 $-24\text{‰} \sim -22\text{‰}$ （见图 5），这与四川盆地须家河组煤成气  $\delta^{13}C_1$  值和  $\delta^{13}C_2$  值分布特征明显不同。考虑到不同地区须家河组埋深和厚度具有明显的差异<sup>[1]</sup>，笔者针对在侏罗系中发现天然气的气田，统计其须家河组天然气的  $\delta^{13}C_1$  和  $\delta^{13}C_2$  值，且分川中和川西地区分别进行统计（见图 5）。

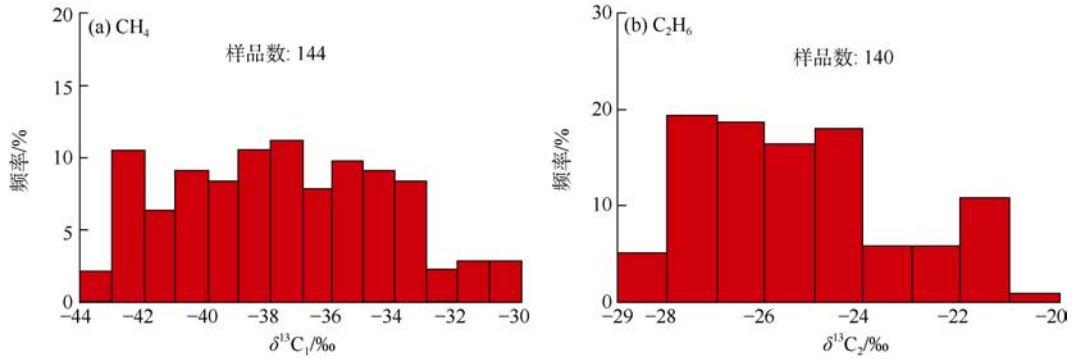


图 4 四川盆地须家河组煤成气  $\delta^{13}C_1$  和  $\delta^{13}C_2$  频率分布  
(除本文所测数据外，其余数据来自文献[1,3-4,7-8,10,13-14,16,19-21,24-26])

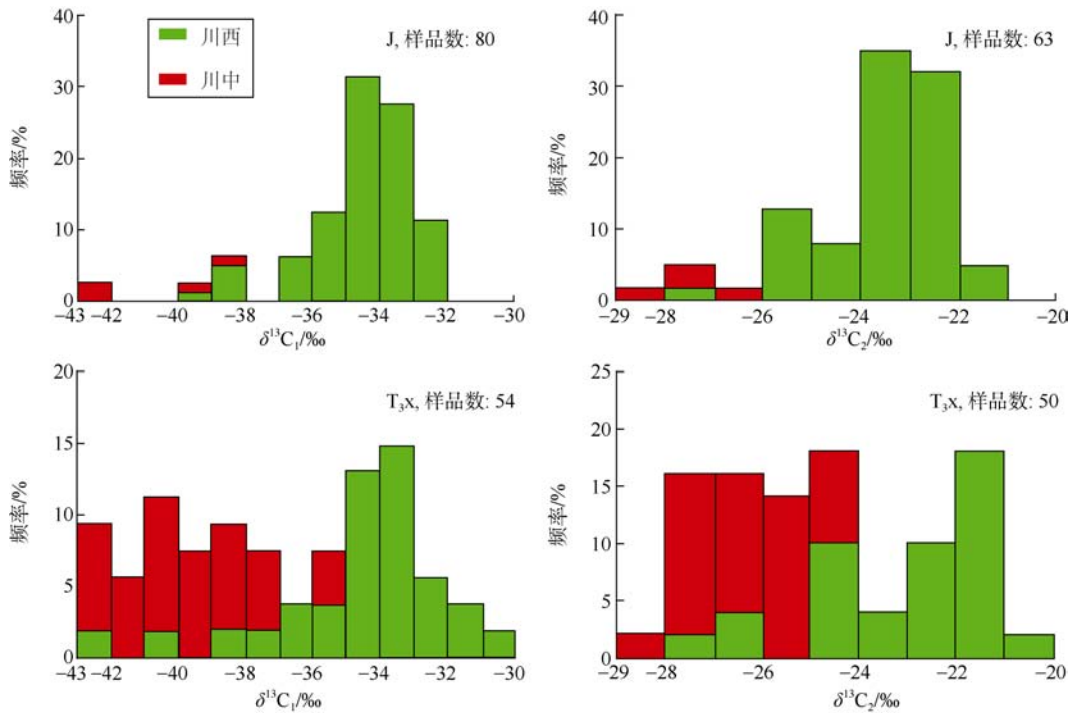


图 5 四川盆地侏罗系及下伏须家河组煤成气  $\delta^{13}C_1$  和  $\delta^{13}C_2$  频率分布  
(除本文所测数据外，其余数据来自文献[1,3-4,6-8,10-11,13-15,17-18,20-23,26])

从图 5 可以看出，川西气区须家河组和侏罗系煤成气的碳同位素分布特征具有较好的对应性： $\delta^{13}C_1$  峰值均为 $-35\text{‰} \sim -33\text{‰}$ ，且后者主峰值较小；须家河组  $\delta^{13}C_2$  主峰值为 $-23\text{‰} \sim -21\text{‰}$ ，次峰值为 $-25\text{‰} \sim -24\text{‰}$ ，侏罗系  $\delta^{13}C_2$  主峰值为 $-24\text{‰} \sim -22\text{‰}$ ，次峰值为 $-26\text{‰} \sim -25\text{‰}$ ，侏罗系峰值略小。这反映了须家河组煤系生成的甲烷和乙烷在向上运移进入侏罗系的过程

中发生了轻微的碳同位素分馏。

对川中地区而言，由于构造稳定，断裂不发育，侏罗系仅在下侏罗统自流井组发现有小部分煤成气，气样数明显少于川西侏罗系的气样数。从有限的样品数据来看，川中地区侏罗系  $\delta^{13}C_1$  和  $\delta^{13}C_2$  值均落在其下伏须家河组煤成气  $\delta^{13}C_1$  和  $\delta^{13}C_2$  值范围内，且整体略小，这与川西地区的特征一致。

从区域上看,川中地区须家河组煤成气的  $\delta^{13}C_1$  和  $\delta^{13}C_2$  值明显小于川西地区,侏罗系煤成气也表现出同样的区域性差异,且特征更为明显,这主要是因为川中地区须家河组埋藏深度比川西地区浅<sup>[1]</sup>,烃源岩热演化程度较低;此外,川中地区下侏罗统自流井组油型气与须家河组煤成气发生一定程度的混合,也会使得该区煤成气的  $\delta^{13}C_1$  和  $\delta^{13}C_2$  值变小。

结合图4和图5可以看出,四川盆地侏罗系煤成

气具有近源聚集成藏的特点,主要来自与其紧邻的下伏须家河组煤系,且未发生大规模、远距离的运移。

### 2.4 烷烃气碳同位素序列

四川盆地部分气田在侏罗系和须家河组中均发现了天然气,也有部分气田在须家河组中发现了天然气而在侏罗系中未发现天然气。对这两类气田天然气甲烷及其同系物碳同位素序列分别作图,见图6和图7。

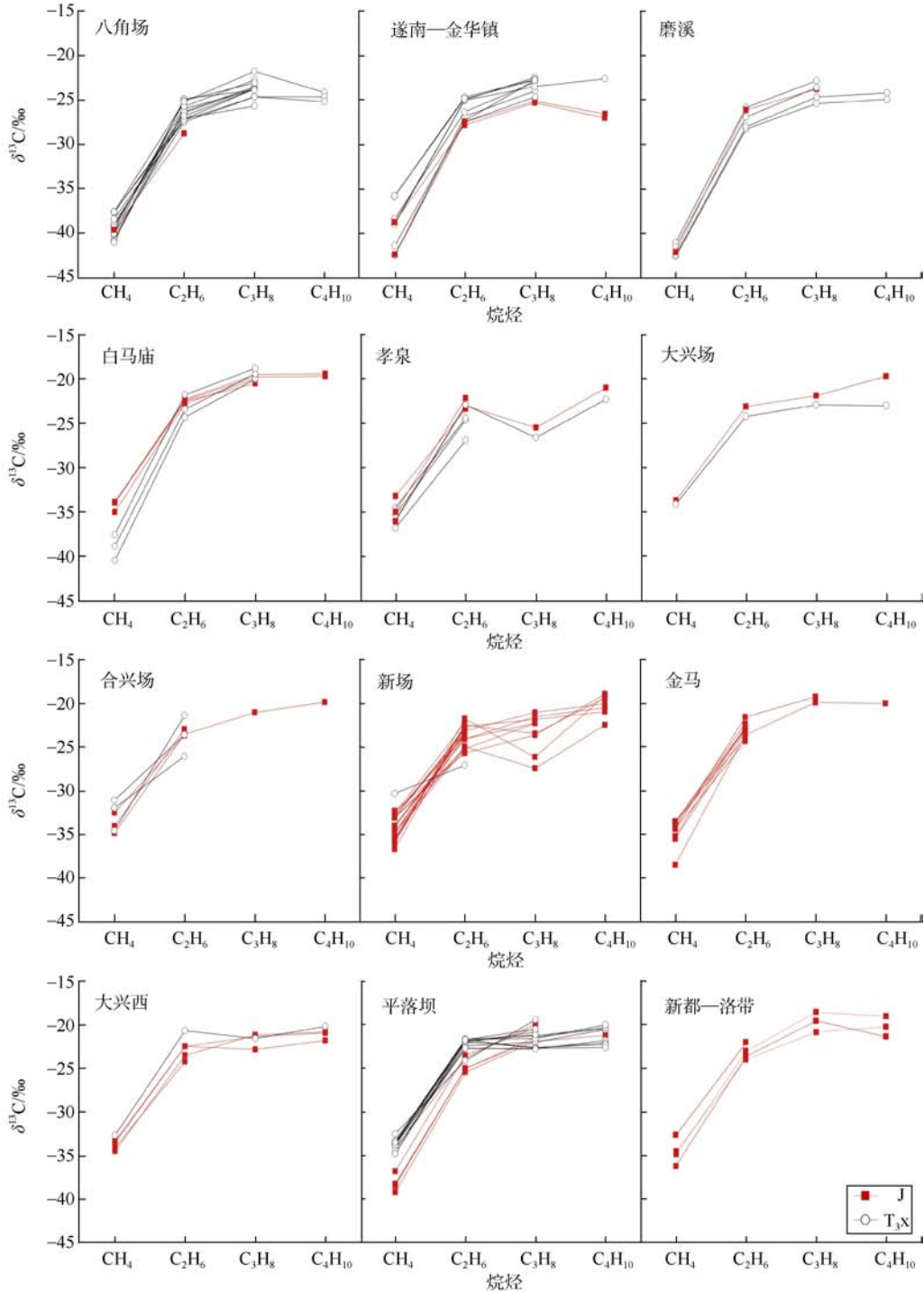


图6 四川盆地部分气田侏罗系和须家河组煤成气烷烃碳同位素序列对比 (除本文所测数据外,其余数据来自文献[1,3-4,6-8,10-11,13-15,17-18,20-23,26])

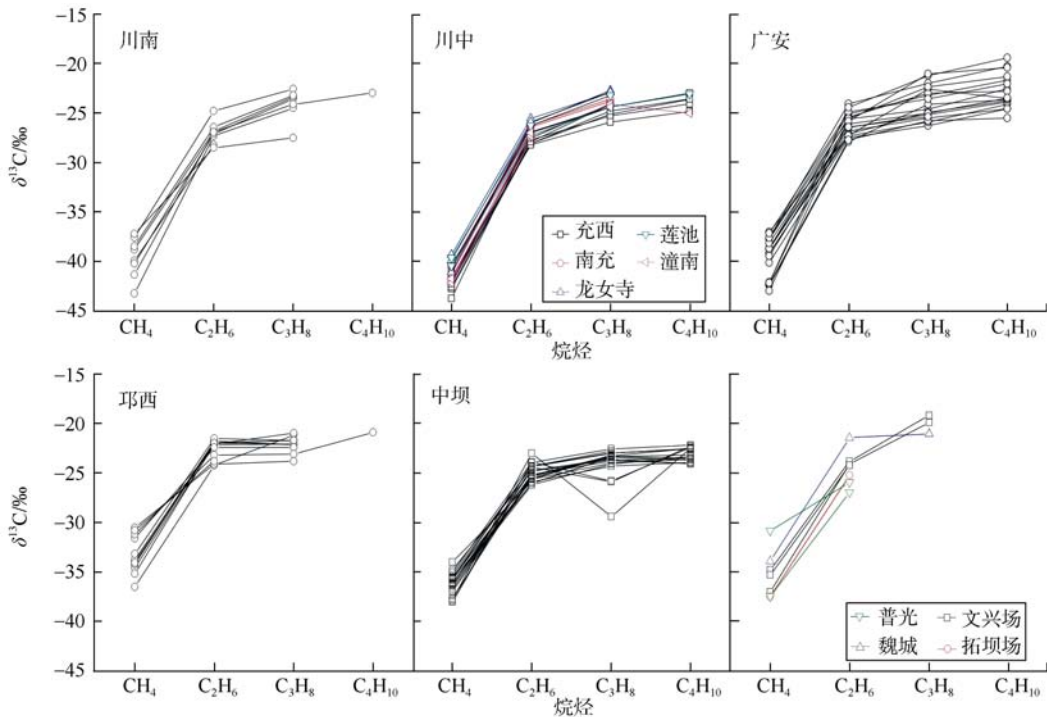


图7 四川盆地部分气田须家河组煤成气烷烃碳同位素序列  
(除本文所测数据外,其余数据来自文献[1,3-4,7-8,13,19,24-25])

侏罗系煤成气与其所在气田须家河组煤成气碳同位素序列(见图6)一致,但二者碳同位素组成的相对大小却表现出不同的特征,可以分为3种。

大多数气田侏罗系煤成气与其所在气田的须家河组煤成气 $\delta^{13}\text{C}$ 值一致,如磨溪、孝泉、合兴场等气田。在这些气田中,侏罗系和须家河组煤成气碳同位素序列基本重合,反映出同源的特征。

部分气田侏罗系煤成气碳同位素组成普遍大于其所在气田须家河组煤成气碳同位素组成,如白马庙、大兴场等气田。以白马庙气田为例,上侏罗统一须二段—须三段—须四段,煤成气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值逐渐降低<sup>[2]</sup>,反映侏罗系煤成气可能直接来自须一段。

部分气田侏罗系煤成气碳同位素组成普遍小于其所在气田的须家河组煤成气碳同位素组成,如八角场、金华镇、平落坝等气田。这可能有两种原因:一是可能混合了 $\delta^{13}\text{C}$ 值较小的油型气,如川中地区在八角场等气田下侏罗统中发现了油型气;另外一种则是由于须家河组煤成气在向上运移进入侏罗系的过程中发生了碳同位素分馏而使得 $\delta^{13}\text{C}$ 值有所降低,川西气区侏罗系中没有发现油型气,因而该区煤成气较低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值很可能源自自下而上运移过程碳同位素的分馏效应。

四川盆地须家河组和侏罗系煤成气少许气样发生了部分碳同位素倒转(见图6、图7),具体有两种, $\delta^{13}\text{C}_2 > \delta^{13}\text{C}_3$ 或 $\delta^{13}\text{C}_3 > \delta^{13}\text{C}_4$ 。烷烃气碳同位素倒转的原

因有4种<sup>[30]</sup>:生物成因与非生物成因烷烃气混合;煤成气和油型气混合;同型不同源气或同源不同期气混合;烷烃气中某一或某些组分被细菌氧化。从图6和图7可以看出,四川盆地须家河组和侏罗系煤成气没有表现出完全反序的碳同位素序列,与典型非生物成因气不同;四川盆地迄今未发现非生物成因烷烃气的报道,因此可以排除非生物成因气与生物成因气混合的可能。重烃气某组分被细菌氧化,在使得该组分含量降低的同时还会使剩余部分碳同位素组成变重<sup>[31]</sup>。四川盆地须家河组气藏深度大多大于2000m,受细菌改造作用影响较小<sup>[1]</sup>,且发生碳同位素倒转的侏罗系和须家河组气样组分含量变化正常,甚至部分样品碳同位素变化趋势与细菌氧化后的趋势完全相反,如孝泉地区川孝96井须五段2625~2630m煤成气 $\text{C}_1$ — $\text{C}_4$ 的含量依次为95.36%、2.95%、0.74%、0.83%,即丙烷的含量小于乙烷和丁烷的含量,但 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为-35.9‰、-22.9‰、-26.6‰、-22.3‰, $\delta^{13}\text{C}_2 > \delta^{13}\text{C}_3$ , $\delta^{13}\text{C}_3 < \delta^{13}\text{C}_4$ 。因此,可以排除细菌氧化作用的影响。

戴金星等研究指出,须家河组少数气样发生碳同位素倒转是同源不同期气混合所致<sup>[1]</sup>。流体包裹体岩相学与显微测温分析结果<sup>[32]</sup>表明,四川盆地中部上三叠统须家河组致密砂岩储集层存在早、晚两期流体包裹体,证明了这一观点。当然,考虑到川中地区下侏罗统油型气的存在,该区侏罗系和须家河组部分烷烃气碳同位素倒转也可能源自油型气混合的影响。

## 2.5 甲烷与其同系物碳同位素相关性

由须家河组煤成气  $\delta^{13}\text{C}_1$ - $\delta^{13}\text{C}_2$  相关图(见图8)可见,川中和川南气区煤成气  $\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$  值特征类似,均明显小于川西气区,主要是因为这两个地区须家河组埋藏相对较浅,烃源岩厚度较薄,热演化程度比川西要低;川东气区样品很少(仅在普光气田有2个气样),其  $\delta^{13}\text{C}_1$  值与川西气区气样范围类似,但  $\delta^{13}\text{C}_2$  值小于川西气区的值,而与川中和川南气区的值接近;川西气区北部气样具有较低的  $\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$  值,南部气

样的  $\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$  值明显偏高,而中部地区  $\delta^{13}\text{C}_1$  值与南部类似,但  $\delta^{13}\text{C}_2$  值偏小,与北部地区类似。

由侏罗系煤成气  $\delta^{13}\text{C}_1$ - $\delta^{13}\text{C}_2$  相关图(见图8)可见,川中地区气样的  $\delta^{13}\text{C}_1$  与  $\delta^{13}\text{C}_2$  值明显小于川西气区的值,这与须家河组气样的特征一致,一方面反映其继承了下伏须家河组气样的特征,另一方面也反映其受到了下侏罗统油型气的影响致使  $\delta^{13}\text{C}_1$  与  $\delta^{13}\text{C}_2$  值降低;川西气区侏罗系烷烃气主要分布在其南部和中部,且两个地区气样的  $\delta^{13}\text{C}_1$  与  $\delta^{13}\text{C}_2$  值范围基本重合。

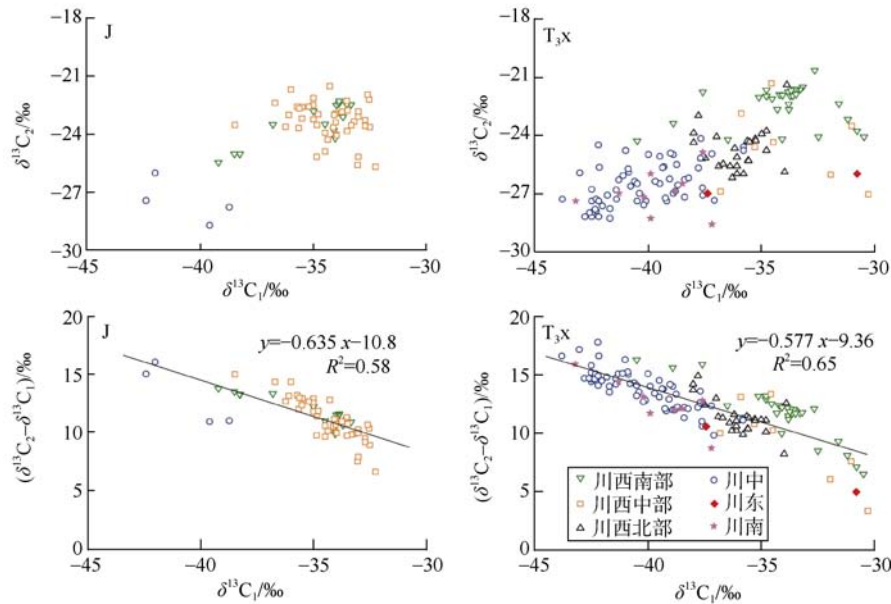


图8  $\delta^{13}\text{C}_2$ - $\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $(\delta^{13}\text{C}_2 - \delta^{13}\text{C}_1) - \delta^{13}\text{C}_1$  相关图解  
(部分数据来自文献[1,3-4,6-8,10-11,13-26,29])

四川盆地侏罗系和须家河组烷烃气  $\delta^{13}\text{C}_2 - \delta^{13}\text{C}_1$  值与  $\delta^{13}\text{C}_1$  值表现出良好的线性相关性,且二者趋势基本一致(见图8)。少数气样由于  $\delta^{13}\text{C}_2$  值偏小而落在数据点主体部分的下方。这可能有两种原因: 甲烷菌的氧化作用会使得  $\delta^{13}\text{C}_1$  值增大而  $\delta^{13}\text{C}_2$  值保持不变,从而数据点表现出异常。但是甲烷菌的氧化作用会使得甲烷含量明显减小,而上述异常气样其甲烷的含量却基本大于97%,没有表现出减小趋势。因此,这些气样受到甲烷菌影响的可能性很小。在相同  $\delta^{13}\text{C}_1$  值时,油型气的  $\delta^{13}\text{C}_2$  值明显小于煤成气的  $\delta^{13}\text{C}_2$  值,因此这些气样中如果混合了部分油型气就会使得  $\delta^{13}\text{C}_2$  值明显偏小而表现出异常。须家河组中也发现了部分油型气,如川南气区合江气田合8井1262.00~1276.98m井段天然气  $\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$  值分别为-30.2‰、-33.8‰<sup>[1]</sup>,赤水地区官8井须一段烷烃气  $\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$ 、 $\delta^{13}\text{C}_3$  值分别为-32.4‰、-32.81‰、-28.65‰<sup>[3]</sup>,因此,油型气的混

合会使得烷烃气碳同位素组成特征与典型煤成气不同而表现出异常。川南气区丹凤场气田丹2井的  $\delta^{13}\text{C}_2$  值为-28.6‰,因此在图8中均落在主体数据点的下部,这类气样可能混有深部以腐泥型为主的天然气<sup>[4]</sup>。对于侏罗系煤成气而言,受下侏罗统自流井组油型气的影响,川中地区部分气样表现出较低的  $\delta^{13}\text{C}_2$  值。沈忠民等<sup>[6]</sup>研究认为,川西孝泉—新场—合兴场地区部分侏罗系气样表现出  $\delta^{13}\text{C}_2$  值较低的特征,也可能与该区自流井组烃源岩的贡献有关。

与此类似,四川盆地侏罗系和须家河组煤成气在  $\delta^{13}\text{C}_3 - \delta^{13}\text{C}_1$  相关图上表现出与  $\delta^{13}\text{C}_1 - \delta^{13}\text{C}_2$  相关图(见图8)类似的特征,在  $(\delta^{13}\text{C}_3 - \delta^{13}\text{C}_1) - \delta^{13}\text{C}_1$  相关图(见图9)上也表现出与  $(\delta^{13}\text{C}_2 - \delta^{13}\text{C}_1) - \delta^{13}\text{C}_1$  图(见图8)类似的线性趋势,个别气样落在主体区域的下方,亦是受到了油型气混合的影响。

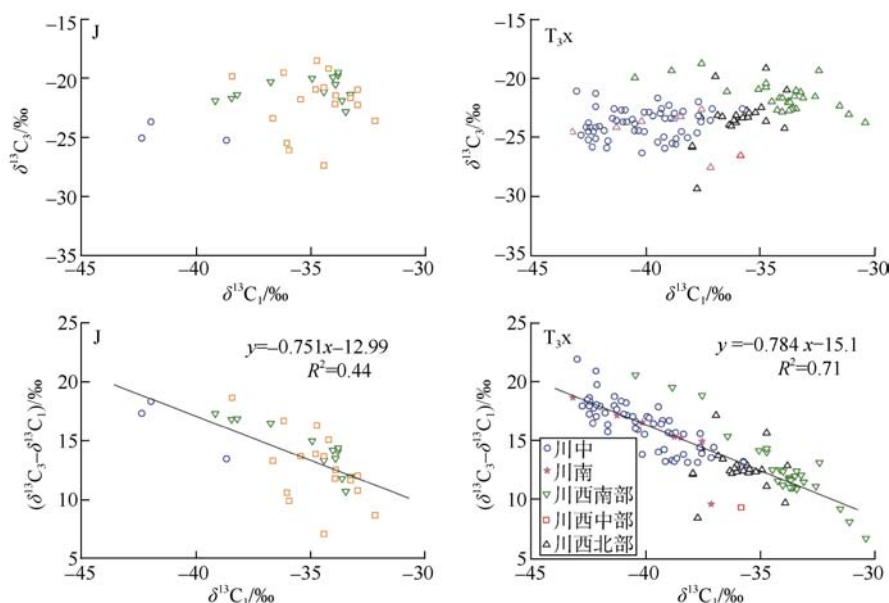


图9  $\delta^{13}\text{C}_3-\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $(\delta^{13}\text{C}_3-\delta^{13}\text{C}_1)-\delta^{13}\text{C}_1$  相关图解  
(部分数据来自文献[1,3-4,6-8,10-11,13-26,29])

### 3 结论

四川盆地须家河组气藏主要分布在川西和川中气区,而侏罗系气藏则主要分布在川西气区。须家河组煤系烃源岩生成的天然气在 $(\text{C}_1/\text{C}_{2+3})-\delta^{13}\text{C}_1$ 相关图上均表现出典型的热成因气特征,基本落在型干酪根生成的天然气范围附近。

侏罗系中烷烃气 $\delta^{13}\text{C}$ 值基本落在须家河组范围内,但由于断裂切穿了须家河组不同层位,使得侏罗系中天然气的来源不尽相同,因此侏罗系天然气 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布没有明显的规律性。

由于埋深等的区域性差异,须家河组和侏罗系天然气 $\delta^{13}\text{C}$ 值具有明显的区域性差异,川西气区烷烃气 $\delta^{13}\text{C}$ 值南部大于北部,且均明显大于川中和川南气区。侏罗系天然气具有近源聚集的特点。

须家河组和侏罗系少许气样发生了碳同位素的倒转,主要是受同源不同期气混合的影响,但在川中气区也可能源自油型气混合的影响。

须家河组煤系生成的烷烃气在 $(\delta^{13}\text{C}_2-\delta^{13}\text{C}_1)-\delta^{13}\text{C}_1$ 相关图和 $(\delta^{13}\text{C}_3-\delta^{13}\text{C}_1)-\delta^{13}\text{C}_1$ 相关图上均表现出明显的线性相关性,受油型气混合的影响,部分气样 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现出异常。

#### 参考文献:

- [1] Dai Jinxing, Ni Yunyan, Zou Caineng, et al. Stable carbon isotopes of alkane gases from the Xujiahe coal measures and implication for gas-source correlation in the Sichuan Basin, SW China[J]. Organic Geochemistry, 2009, 40(5): 638-646.
- [2] 秦胜飞, 戴金星, 王兰生. 川西前陆盆地次生气藏天然气来源追踪[J]. 地球化学, 2007, 36(4): 368-374.  
Qin Shengfei, Dai Jinxing, Wang Lansheng. Different origins of

- natural gas in secondary gas pool in Western Sichuan foreland basin[J]. Geochimica, 2007, 36(4): 368-374.
- [3] 黄世伟, 张廷山, 王顺玉, 等. 四川盆地赤水地区上三叠统须家河组烃源岩特征及天然气成因探讨[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(6): 590-592.  
Huang Shiwei, Zhang Tingshan, Wang Shunyu, et al. Research on source characteristics and origin of Xujiahe Formation, Upper Triassic in Chishui area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(6): 590-592.
- [4] 肖芝华, 谢增业, 李志生, 等. 川中—川南地区须家河组天然气同位素组成特征[J]. 地球化学, 2008, 37(3): 245-250.  
Xiao Zhihua, Xie Zengye, Li Zhisheng, et al. Isotopic characteristics of natural gas of Xujiahe Formation in southern and middle of Sichuan Basin[J]. Geochimica, 2008, 37(3): 245-250.
- [5] 王世谦, 罗启后, 邓鸿斌, 等. 四川盆地西部侏罗系天然气成藏特征[J]. 天然气工业, 2001, 21(2): 1-8.  
Wang Shiqian, Luo Qihou, Deng Hongbin, et al. Characteristics of forming Jurassic gas reservoirs in the west part of Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(2): 1-8.
- [6] 沈忠民, 刘涛, 吕正祥, 等. 川西坳陷侏罗系天然气气源对比研究[J]. 高校地质学报, 2008, 14(4): 577-582.  
Shen Zhongmin, Liu Tao, Lü Zhengxiang, et al. A comparison study on the gas source of Jurassic natural gas in the Western Sichuan depression[J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(4): 577-582.
- [7] 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.  
Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. The characteristics of natural gas in Sichuan Basin and its sources[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(2): 234-248.
- [8] 秦胜飞, 陶士振, 涂涛, 等. 川西坳陷天然气地球化学及成藏特征[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(1): 34-38.  
Qin Shengfei, Tao Shizhen, Tu Tao, et al. Characteristics of natural gas geochemistry and accumulation in Western Sichuan depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(1): 34-38.
- [9] 秦胜飞, 赵孟军, 宋岩, 等. 川西前陆盆地天然气成藏过程[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 517-524.  
Qin Shengfei, Zhao Mengjun, Song Yan, et al. The gas accumulation process in Western Sichuan Foreland Basin[J]. Earth Science

- Frontiers, 2005, 12(4): 517-524.
- [10] 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.  
Fan Ranxue, Zhou Hongzhong, Cai Kaiping. Carbon isotopic geochemistry and origin of natural gases in the southern part of the Western Sichuan depression[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2005, 26(2): 157-162.
- [11] 韩耀文, 王廷栋, 王海清, 等. 四川八角场油气田大安寨组凝析气藏的地质-地球化学研究[J]. 沉积学报, 1990, 8(4): 94-103.  
Han Yaowen, Wang Tingdong, Wang Haiqing, et al. Geological and geochemical study on gas-condensating reservoir of Daanzhai Formation, Bajiaochang, Sichuan province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1990, 8(4): 94-103.
- [12] 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.  
Wang Shiqian. Geochemical characteristics of Jurassic-Sinian gas in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 1994, 14(6): 1-5.
- [13] 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.  
Chen Yicai, Guo Guian, Jiang Yuqiang, et al. Geochemical features of natural gas and the process of Upper Triassic hydrocarbon accumulation in Middle Sichuan area[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(5): 737-742.
- [14] 樊然学. 川西坳陷中段气藏天然气形成、运移的碳同位素地球化学证据[J]. 自然科学进展, 1999, 9(12): 1126-1132.  
Fan Ranxue. Origin and migration of natural gas in the central segment of Western Sichuan depression: Evidence from carbon isotope geochemistry[J]. Progress in Natural Science, 1999, 9(12): 1126-1132.
- [15] 樊然学. 四川盆地西部天然气碳同位素组成分析及应用[J]. 质谱学报, 2003, 24(1): 257-260.  
Fan Ranxue. Analysis and application of carbon isotopic composition of natural gases in the Western Sichuan Basin[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2003, 24(1): 257-260.
- [16] 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.  
Li Denghua, Li Wei, Wang Zecheng, et al. Genetic type and source of gas in the Guang'an gas field, central Sichuan[J]. Geology in China, 2007, 34(5): 829-836.
- [17] 田军, 沈忠民, 吕正祥, 等. 川西坳陷中段新场地区天然气研究及气源对比[J]. 四川地质学报, 2009, 29(1): 20-23.  
Tian Jun, Shen Zhongmin, Lü Zhengxiang, et al. Natural gas and correlation of gas source rocks in the Xinchang area, middle section of the West Sichuan depression[J]. Acta Geologica Sichuan, 2009, 29(1): 20-23.
- [18] 王顺玉, 戴鸿鸣, 王海清, 等. 白马庙气田侏罗系天然气地化特征[J]. 天然气工业, 2004, 24(3): 12-15.  
Wang Shunyu, Dai Hongming, Wang Haiqing, et al. Geochemical characteristics of Jurassic gas in Baimamiao gas field[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(3): 12-15.
- [19] 王顺玉, 明巧, 黄羚, 等. 邛西地区邛西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.  
Wang Shunyu, Ming Qiao, Huang Ling, et al. Study on geochemical characteristics of fluids and reservoir connectivity of Xujiache Formation in Qiongxian gas field, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(6): 789-792.
- [20] 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.  
Ye Jun. Research on the mechanism of forming deep  $T_3x_2$  gas reservoir in Xinchang gas field in west Sichuan depression: A discovery of high-production commercial gas in well X851 and its significance[J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(4): 16-20.
- [21] 尹长河. 川西白马松华地区和平落坝构造上三叠统—侏罗系气藏地球化学研究[D]. 南充: 西南石油学院, 2000.  
Yin Changhe. Geochemical study on Upper Triassic-Jurassic gas reservoirs in Baima-Songhua area and Pingluoba structure in western Sichuan[D]. Nanchong: Southwest Petroleum Institute, 2000.
- [22] 张学玉, 李国建. 新场气田上侏罗统蓬莱镇组气藏成藏条件及模式[J]. 西南石油学院学报, 1999, 21(增刊): 92-94.  
Zhang Xueyu, Li Guojian. Reservoir formation conditions and modes of gas reservoirs in Penglaizhen Formation, Upper Jurassic in Xinchang gas field[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1999, 21(Supp.): 92-94.
- [23] 周文. 川西孝泉构造中侏罗统“次生气藏”特征及成藏机理探讨[J]. 石油实验地质, 1992, 14(4): 399-409.  
Zhou Wen. In approaching the characteristics and the formative mechanism of secondary gas pools in Middle Jurassic series within the Xiaoquan structure of west Sichuan[J]. Petroleum Geology & Experiment, 1992, 14(4): 399-409.
- [24] Hao Fang, Guo Tonglou, Zhu Yangming, et al. 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.
- [25] 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.  
Dai Jinxing, Xia Xinyu, Wei Yanzhao, et al. Carbon isotope characteristics of natural gas in the Sichuan Basin, China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 23(2): 115-121.
- [26] 戴金星. 中国煤成气研究 30 年来勘探的重大进展[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(3): 264-279.  
Dai Jinxing. Major developments of coal-formed gas exploration in the last 30 years in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(3): 264-279.
- [27] 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质理论重要进展[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(2): 127-142.  
Dai Jinxing, Qin Shengfei, Tao Shizhen, et al. Developing trends of natural gas industry and the significant progress on natural gas geological theories in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(2): 127-142.
- [28] 刚文哲, 高岗, 郝石生, 等. 论乙烷碳同位素在天然气成因类型研究中的应用[J]. 石油实验地质, 1997, 19(2): 164-167.  
Gang Wenzhe, Gao Gang, Hao Shisheng, et al. Carbon isotope of ethane applied in the analyses of genetic types of natural gas[J]. Petroleum Geology & Experiment, 1997, 19(2): 164-167.
- [29] Whiticar M J. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane[J]. Chemical Geology, 1999, 161(1/2/3): 291-314.
- [30] Dai Jinxing, Xia Xinyu, Qin Shengfei, et al. Origins of partially reversed alkane  $\delta^{13}C$  values for biogenic gases in China[J]. Organic Geochemistry, 2004, 35(4): 405-411.
- [31] 戴金星, 裴锡古, 戚厚发. 中国天然气地质学: 卷一[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.  
Dai Jinxing, Pei Xigu, Qi Houfa. Natural gas geology in China: Vol.1[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.
- [32] 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.  
Li Yun, Shi Zhiqiang. Study on fluid inclusion of tight sand reservoir of Upper Triassic Xujiache Formation in central Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2008, 20(1): 27-32.

第一作者简介: 吴小奇 (1982-), 男, 江苏盐城人, 中国石油勘探开发研究院在站博士后, 主要从事天然气地质和地球化学研究工作。地址: 北京市海淀区学院路 20 号, 中国石油勘探开发研究院石油地质研究所, 邮政编码: 100083, E-mail: wuxiaoqi@petrochina.com.cn

收稿日期: 2010-11-17 修回日期: 2011-03-15

(编辑 单东柏 绘图 许晓萌)