

# 柴达木盆地三湖地区生物气地球化学特征 及重烃组分成因分析

贾星亮<sup>1,2</sup>, 周世新<sup>1</sup>, 宋振响<sup>1,2</sup>, 王保忠<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所气体地球化学重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**柴达木盆地三湖地区的天然气区是目前我国发现的最大生物气区。系统采集了该区涩北一号气田、涩北二号气田和台南气田不同气层组的35个天然气样和11个地层水样,进行了天然气组分和碳、氢同位素分析,同时对地层水的氢、氧同位素也进行了分析。结果表明:天然气组分以甲烷为主, $\text{CH}_4 > 99\%$ ,  $\text{C}_2+ < 0.15\%$ , 干燥系数为0.999;气体同位素组成特征为 $-68.6\text{‰} < \delta^{13}\text{C}_1 < -63.9\text{‰}$ ,  $-50.6\text{‰} < \delta^{13}\text{C}_2 < -40.7\text{‰}$ ,  $-36.2\text{‰} < \delta^{13}\text{C}_3 < -31.9\text{‰}$ ,  $-234.7\text{‰} < \delta\text{D}_1 < -214\text{‰}$ ;  $\delta^{13}\text{C}_1$ 与 $\delta\text{D}_1$ 关系图和 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 与 $\delta\text{D}_1$ 关系式都显示出三湖地区生物甲烷形成途径以 $\text{CO}_2$ 还原为主。认为三湖地区生物气中重烃与该盆地热成因重烃地球化学特征明显不同,其重烃成因复杂,可能为生物成因和低温热成因共同作用的结果。

**关键词:**柴达木盆地;生物气;地层水; $\text{CO}_2$ 还原;重烃成因

**中图分类号:**TE122.1<sup>+</sup>13

**文献标识码:**A

**文章编号:**1672-1926(2008)04-0524-06

## 0 引言

柴达木盆地三湖地区的天然气田是我国现阶段发现的最大的生物气区<sup>[1]</sup>。前人对三湖地区天然气地球化学特征、生物甲烷成因已进行了许多研究工作,其甲烷的碳同位素值小于 $-60\text{‰}$ ,重烃气体在烃类组分中含量小于 $0.2\%$ <sup>[2-5]</sup>,符合生物气具有气体组成比较“干”(重烃气体组成低于 $0.2\%$ ),甲烷碳同位素轻( $< -55\text{‰}$ )的特点<sup>[6-9]</sup>。初步认为甲烷成因途径是以 $\text{CO}_2$ 还原为主<sup>[8]</sup>。但是,地层水在生物气形成过程中有着重要的作用,可能提供了生物气的氢源,并且形成途径不同地层水提供氢的数量不同,因此通过地层水氢同位素与甲烷氢同位素的关系,可以进行生物气成因类型划分。在三湖地区生物气成因研究中,目前还没有学者从这一角度来探讨甲烷形成途径。此外,生物气中微量重烃成因研究还相对较为薄弱,开展的工作较少。本文通过对三湖

地区天然气样和地层水样的测试分析,从地层水与甲烷的关系入手,对甲烷形成途径问题做进一步的分析;并根据天然气样品测试结果,对生物气中重烃的成因进行了探讨。

## 1 地质背景

柴达木盆地三湖坳陷自北向南分为北斜坡区、中央凹陷区和南斜坡区(图1),其中北斜坡构造发育,南斜坡地层平缓。三湖坳陷普遍沉积第四系地层,最大厚度3200 m,沉积层中发育有1500 m大套生气岩,其中还夹有可作为储层的泥质细砂岩和粉砂岩,形成了自生自储的成气组合。气源岩有机质类型以陆源腐殖型为主,含腐泥腐殖型。有机质的镜质体反射率 $R_o < 0.4\%$ ,有机碳含量多在 $0.11\% \sim 0.38\%$ 之间,平均值为 $0.23\%$ ,岩石热解 $T_{\text{max}} < 444^\circ\text{C}$ 。沉积环境以咸水湖相夹沼泽相为主<sup>[10]</sup>。本区自1956年开始有计划勘探以来,已发现生物气田5个,一个含

收稿日期:2008-01-08;修回日期:2008-03-07.

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:40572088);中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号:KZCX3-SW-147);中国科学院院长基金联合资助.

第一作者 E-mail:jxl200132923@126.com.

气构造,探明天然气储量  $1\,819\times10^8\text{ m}^3$ ,控制天然气储量  $430\times10^8\text{ m}^3$ 。其中具有工业开采价值的气

田 3 个,即位于北斜坡构造区的涩北一号气田、涩北二号气田和位于中央凹陷的台南气田。

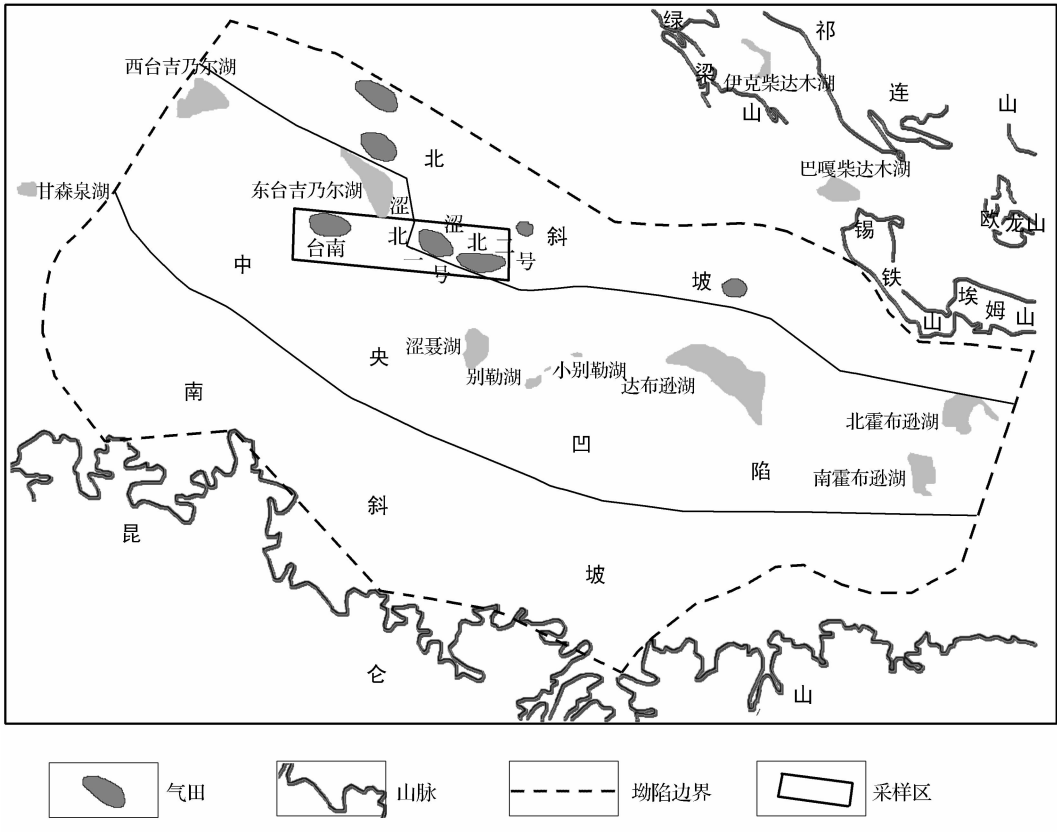


图 1 三湖坳陷构造分区示意

## 2 样品与分析

本次研究系统采集了涩北一号气田、涩北二号气田和台南气田不同气层组的 35 个天然气气样,其中,涩北一号气田 16 个,涩北二号气田 15 个,台南气田 4 个,并对气样进行了组分与碳氢同位素分析。采集地层水样 11 个,其中,涩北一号气田 4 个、涩北二号气田 2 个、台南气田 2 个以及台吉 1 井、聂深 1 井和涩浅 2 井的地层水样各 1 个,进行了水的氢氧同位素与碳酸根中碳同位素分析。

天然气组分分析和碳、氢同位素测试在中国科学院地质与地球物理研究所气体地球化学重点实验室完成。其中,组分分析使用仪器为 MAT-271 微量气体质谱计,实验条件为:EI 离子源,分辨率为 3 000,发射电流为 0.200 mA,真空度小于  $1.0\times10^{-7}\text{ Pa}$ 。碳、氢同位素测试使用仪器为 DELTA<sup>plus</sup> XP 质谱仪(GC/TC/IRMS),实验条件为:色谱柱为 AS\GDX5.6890,4 m×3 mm;实验过程中,起始温度为 30℃,起始时间为 6 min,升温程序以 2℃/min,从 30℃升温至 32℃保持,然后以 10℃/min,升

温至 54℃恒温 4 min,再以 15℃/min 升温至 120℃后恒温 32 min。测量精度:碳同位素为 0.3‰,氢同位素为 1.55‰。

此次采集不同气层组钢瓶气样共 21 个,这些样品应更具代表性,特别是钢瓶样中甲烷氢同位素,与玻璃盐水瓶样相比不会与水发生同位素交换反应,所测试的氢同位素更接近于实际值。因此本文所公布的组分和同位素数据皆为钢瓶气测试所得。

## 3 结果与讨论

### 3.1 三湖地区生物气地球化学特征

从表 1 三湖地区天然气组分来看,CH<sub>4</sub> 含量整体变化不大,基本在 99% 以上,重烃含量甚少,C<sub>2</sub><sup>+</sup> < 0.15%,干燥系数 C<sub>1</sub>/C<sub>1-5</sub> 为 0.999,趋近于 1,C<sub>1</sub>/C<sub>2</sub><sup>+</sup> 的变化范围为 696.5~1 097.6,符合生物气的定型指标,说明三湖地区天然气属生物气。并且,含有少量的 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>,CO<sub>2</sub> 的含量在 0.025%~0.140%之间,N<sub>2</sub> 的含量在 0.035%~0.297%之间。

涩北一号气田样品中,碳同位素平均值为  $\delta^{13}\text{C}_1 = -66.3\text{‰}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_2 = -45.5\text{‰}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_3 = -33.8\text{‰}$ ,氢

同位素平均值为  $\delta D_1 = -223.5$ 。涩北二号气田样品中,碳同位素平均值为  $\delta^{13}C_1 = -64.8\text{‰}$ ,  $\delta^{13}C_2 = -47.5\text{‰}$ ,  $\delta^{13}C_3 = -33.8\text{‰}$ ; 氢同位素平均值为  $\delta D_1 = -229.9\text{‰}$ 。台南气田样品中,碳同位素平均值为  $\delta^{13}C_1 = -67.5\text{‰}$ ,  $\delta^{13}C_2 = -45.9\text{‰}$ ,  $\delta^{13}C_3 =$

$-33.2\text{‰}$ ; 氢同位素平均值为  $\delta D_1 = -217.8\text{‰}$  (表 2)。比较 3 个气田碳氢同位素值,可以看出,涩北二号气田甲烷碳同位素最重,氢同位素最轻,台南气田甲烷碳同位素最轻,而氢同位素最重,涩北一号气田甲烷碳氢同位素居中。

表 1 柴达木盆地三湖地区生物气组分

气田	序号	样号	深度 (m)	层位	组 分						干燥系数	
					CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> <sup>+</sup>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	C <sub>1</sub> /C <sub>2</sub> <sup>+</sup>	C <sub>1</sub> /C <sub>1-5</sub>	
涩北一号	1	涩北 3-1	1 287.0~1 324.6	Ⅲ	99.74	0.078	0.128	0.057	0.066	776.72	0.999	
	2	涩北 2-5	1 107.6~1 140.1	Ⅱ	99.79	0.074	0.104	0.029	0.073	955.38	0.999	
	3	涩北 2-3	1 104.4~1 133.8	Ⅱ	99.79	0.066	0.116	0.025	0.062	857.93	0.999	
	4	涩北 3-8	1 261.6~1 302.2	Ⅲ	99.76	0.072	0.132	0.051	0.059	754.24	0.999	
	5	涩北 1-7	830.3~885.6	Ⅰ	99.74	0.070	0.091	0.027	0.088	1097.56	0.999	
涩北二号	6	水平 2	—	Ⅱ	99.80	0.075	0.125	0.033	0.035	796.88	0.999	
	7	涩 3-2-2	—	Ⅱ	99.74	0.073	0.143	0.030	0.076	696.50	0.999	
	8	涩 3-1-3	1 236~1 254	Ⅲ	99.73	0.073	0.123	0.064	0.080	808.94	0.999	
	9	涩 3-4-3	—	Ⅲ	99.74	0.071	0.121	0.051	0.086	822.73	0.999	
	10	涩 21(套)	1 228~1 236.2	—	99.71	0.080	0.140	0.029	0.104	709.93	0.999	
	11	涩 21(油)	1 312~1 326	—	99.60	0.080	0.130	0.140	0.132	765.54	0.999	
	12	涩 4-2-4	1 310.2~1 330.5	Ⅳ	99.46	0.075	0.126	0.023	0.297	789.22	0.999	
台南	13	台试 5	—	Ⅳ	99.67	0.072	0.133	0.074	0.112	751.21	0.999	
	14	台试 7	1 684~1 721	—	99.69	0.070	0.110	0.061	0.136	905.36	0.999	

表 2 柴达木盆地三湖地区生物气碳氢同位素值

气田	序号	样号	深度(m)	层位	同位素值(‰)			
					δC <sub>1</sub>	δC <sub>2</sub>	δC <sub>3</sub>	δD <sub>1</sub>
涩北一号	1	涩北 3-1	1 287.0~1 324.6	Ⅲ	-65.9	-45.1	-33.5	-225
	2	涩北 2-5	1 107.6~1 140.1	Ⅱ	-66.7	-47.7	-35.4	-222.5
	3	涩北 2-3	1 104.4~1 133.8	Ⅱ	-66.5	-45.9	-33.3	-224
	4	涩北 4-13	1 440.4~1 462.3	Ⅳ	/	/	/	-219.2
	5	涩北 3-8	1 261.6~1 302.2	Ⅲ	-65.7	-45.4	-33.5	-223.8
	6	涩北 1-7	830.3~885.6	Ⅰ	-66.7	-43.3	-33.2	-226.2
涩北二号	7	水平 2	—	Ⅱ	-65.8	-47.6	-34	-226.4
	8	涩 3-2-2	—	Ⅱ	-64.7	-47.5	-33.6	-228.9
	9	涩 3-1-3	1 236~1 254	Ⅲ	-64.3	-47.7	-33.5	-228.9
	10	涩 3-4-3	—	Ⅲ	-64.6	-47.8	-34.3	-230
	11	涩 1-7-2	1 048~1 056	Ⅱ	-66.8	-45.1	-31.9	-230.9
	12	涩 21(套)	1 228~1 236.2	—	-63.9	-48	-34.3	-229.7
	13	涩 21(油)	1 312~1 326	—	-64.3	-48.2	-34.4	-229.8
	14	涩 4-2-4	1 310.2~1 330.5	Ⅳ	-64.0	-48.1	-34.6	-234.7
台南	15	台试 5	—	Ⅳ	-66.6	-44.2	-32.9	-219.9
	16	台试 6	—	Ⅰ	-68.1	/	/	-219.4
	17	台试 7	1 684~1 721	—	-66.5	-43.0	-32.8	-217.7
	18	台试 5-7	—	—	-68.6	-50.6	-34	-214

“/”代表未检出

3.2 三湖地区生物气甲烷形成途径

3.2.1  $\delta^{13}\text{C}_1$  和  $\delta\text{D}_1$  图版判识方法

生物气主要有 2 种形成途径,乙酸发酵( $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$ )和  $\text{CO}_2$  还原( $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ )<sup>[8-9]</sup>,乙酸发酵的生物气特点是碳同位素较重而氢同位素较轻;相反, $\text{CO}_2$  还原的生物气特点为碳同位素较轻,而氢同位素较重。因此甲烷碳、氢同位素分布及其相互关系是判断生物气形成途径的主要根据。三湖地区  $\delta^{13}\text{C}_1$  值比较轻,分布于  $-68.6\text{‰} \sim -63.9\text{‰}$  之间, $\delta\text{D}_1$  值比较重,分布于  $-234.7\text{‰} \sim -214\text{‰}$  之间(表 2)。 $\text{CO}_2$  还原途径形成的  $\delta^{13}\text{C}_1$  值比较轻,一般小于  $-60\text{‰}$ , $\delta\text{D}_1$  值比较重,一般大于  $-250\text{‰}$ ,而乙酸发酵途径形成的  $\delta^{13}\text{C}_1$  值比较重,一般介于  $-60\text{‰} \sim -45\text{‰}$  之间, $\delta\text{D}_1$  值非常轻,一般小于  $-250\text{‰}$ ,平均值为  $-318\text{‰}$ <sup>[8]</sup>。因此,从碳氢同位素值分布范围来看,三湖地区生物气形成途径更接近于  $\text{CO}_2$  还原作用。从甲烷碳、氢同位素相互关系图(图 2)可以明显看到,气样点落在了  $\text{CO}_2$  还原作用界线内,说明三湖地区生物气主要是  $\text{CO}_2$  还原形成的。

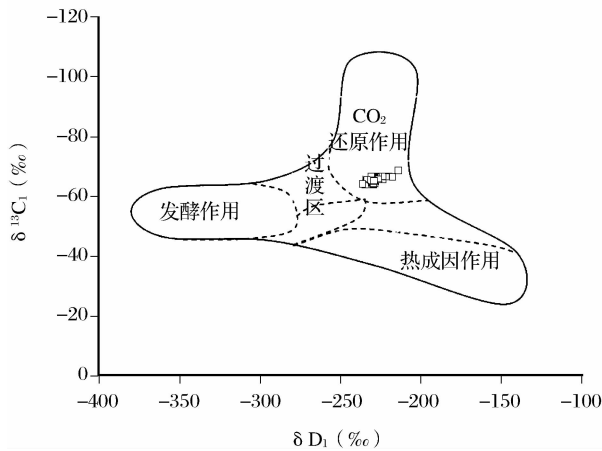


图 2 甲烷碳、氢同位素相互关系

3.2.2 地层水与甲烷关系判识方法

地层水在生物气形成过程中可能提供了氢源,并且形成途径不同地层水提供氢的数目不同,因此能通过地层水氢同位素与甲烷氢同位素的关系,进行生物气成因类型划分。目前还没有学者从这个角度来探讨三湖地区生物气甲烷的形成途径。地层水与甲烷的关系前人已有研究,认为生物甲烷氢同位素组成与共生地层水氢同位素组成密切相关, $\text{CO}_2$  还原作用生成的甲烷中,氢原子有可能全部来源于共生的水介质,乙酸发酵成因的甲烷中只有 1/4 的氢来源于水<sup>[8-9,11-12]</sup>,并有如下表达式:

$$\text{CO}_2 \text{ 还原作用: } \delta\text{D}_{\text{CH}_4} \approx \delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}} - 180\text{‰} \quad (1)$$
$$\text{或 } \delta\text{D}_{\text{CH}_4} \approx \delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}} - 160\text{‰} \quad (2)$$

$$\text{乙酸发酵作用: } \delta\text{D}_{\text{CH}_4} \approx 0.25\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}} - 321\text{‰} \quad (3)$$

将所测地层水和甲烷的氢同位素值代入表达式(1)、(2)、(3),并同时列于表 3 中。由表 3 可以看出,表达式(1)、(2)比表达式(3)计算出来的  $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$  值更接近实际所测值,而表达式(2)与表达式(1)相比,表达式(2)计算值更适合应用于三湖地区生物甲烷形成途径的判断。应用表达式(2)计算出的  $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$  值不仅与实测值相近,而且大于  $-250\text{‰}$ ,说明三湖地区生物甲烷是以  $\text{CO}_2$  还原作用为主。这一结论与甲烷碳、氢同位素分布及相互关系的判识结果相吻合,因此,通过地层水和甲烷中氢同位素的关系再次证明该区生物甲烷是以  $\text{CO}_2$  还原作用为主。

表 3 地层水氢同位素实测值、甲烷氢同位素实测值与甲烷氢同位素计算值对比 (单位:‰)

气田	$\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ (实测值)	$\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$ (实测值)	$\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$ (计算值)		
			(1)	(2)	(3)
涩北一号	-74.5	-227.2	-254.5	-234.5	-339.6
涩北二号	-79.5	-229.7	-259.5	-239.5	-340.9
台南	-72.5	-217.8	-252.5	-232.5	-339.1

注:(1)用表达式  $\delta\text{D}_{\text{CH}_4} \approx \delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}} - 180\text{‰}$  计算得出;(2)用表达式  $\delta\text{D}_{\text{CH}_4} \approx \delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}} - 160\text{‰}$  计算得出;(3)用表达式  $\delta\text{D}_{\text{CH}_4} \approx 0.25\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}} - 321\text{‰}$  计算得出

3.3 三湖地区生物气中重烃成因

生物气中重烃含量甚少,检测相对较为困难,有关成因方面的工作相对较少。前人研究认为生物气中重烃成因有以下几种解释:一种是被一些学者认可的低温热成因说,即烃源岩热演化尚未进入生油门限的未成熟—低成熟条件下,有机质经低温(温度可低至  $60\text{℃}$ ,甚至  $20\text{℃}$ )热降解作用而生成的天然气<sup>[13-15]</sup>。另外一种解释认为自然界存在重烃菌,生物气中少量重烃是重烃菌的贡献,即生物成因说。但要证明生物作用可以形成重烃,必须有以下证据:在一定的地质背景下,生物成因气中可以含有少量的重烃组分( $0.1\% \sim 0.2\%$ );乙烷的碳同位素较轻(就目前所报道的碳同位素值都在  $-70\text{‰} \sim -55\text{‰}$  之间)<sup>[16-18]</sup>;充分的证据证明无其它成因乙烷混入;还有一个重要的条件,就是在实验室内能够培养出产重烃菌。此外,热成因(是指相对低温热成因而言的常规热成因)重烃的混入也是形成生物气中少量重烃的一个主要原因。

3.3.1 热成因重烃混入的可能性探讨

三湖地区生物气中重烃含量很低,在  $0.05\% \sim$

0.16%之间变化,平均值为0.11%。乙烷碳同位素值主要在 $-50.6\text{‰} \sim -40.7\text{‰}$ 之间,平均值为 $-46.6\text{‰}$ ,丙烷碳同位素值在 $-36.2\text{‰} \sim -31.9\text{‰}$ 之间,平均值为 $-33.6\text{‰}$ 。假如三湖地区生物气中重烃是热成因重烃的混入所致,其热成因重烃的来源最有可能是该盆地侏罗系和第三系热成因天然气。张晓宝等<sup>[19]</sup>对第三系盐湖相天然气重烃组分含量和碳同位素进行了分析,乙烷含量在1.82%~23.3%之间,平均值为10.6%,丙烷的含量在1.2%~9.1%之间,平均值为4.5%; $\delta^{13}\text{C}_2$ 值在 $-37.6\text{‰} \sim -21.5\text{‰}$ 之间,平均值为 $-26.8\text{‰}$ , $\delta^{13}\text{C}_3$ 值在 $-28.4\text{‰} \sim -17.4\text{‰}$ 之间,平均值为 $-23.5\text{‰}$ 。赵东升等<sup>[20]</sup>对盆地不同地区第三系天然气重烃碳同位素进行了分析总结, $\delta^{13}\text{C}_2$ 平均值为 $-26.8\text{‰} \sim -24.1\text{‰}$ , $\delta^{13}\text{C}_3$ 平均值为 $-23.4\text{‰} \sim -22.7\text{‰}$ 。侏罗系天然气成熟度高,重烃碳同位素相对较重, $\delta^{13}\text{C}_2$ 值在 $-25.4\text{‰} \sim -21.9\text{‰}$ 之间,平均值为 $-24.3\text{‰}$ , $\delta^{13}\text{C}_3$ 值在 $-25.6\text{‰} \sim -20.1\text{‰}$ 之间,平均值为 $-22.6\text{‰}$ <sup>①</sup>。比较该盆地热成因重烃与三湖地区生物气中重烃的地球化学特征,发现热成因天然气中重烃组分含量比三湖地区生物气中重烃组分含量高10%之多,相差2个数量级,它的 $\delta^{13}\text{C}_2$ 和 $\delta^{13}\text{C}_3$ 分别比三湖地区生物气中 $\delta^{13}\text{C}_2$ 平均值( $-46.6\text{‰}$ )重20‰左右, $\delta^{13}\text{C}_3$ 平均值( $-33.6\text{‰}$ )重10‰左右,所以说热成因气混入的可能性小。为了进一步说明问题,将该盆地热成因气和该区生物气中的 $\delta^{13}\text{C}_3 - \delta^{13}\text{C}_2$ 值投放在深度剖面图3来看,该生物气中 $\delta^{13}\text{C}_3 - \delta^{13}\text{C}_2$ 值大于5‰,多数值大于10‰;而热成因气中 $\delta^{13}\text{C}_3 - \delta^{13}\text{C}_2$ 值基本小于5‰。

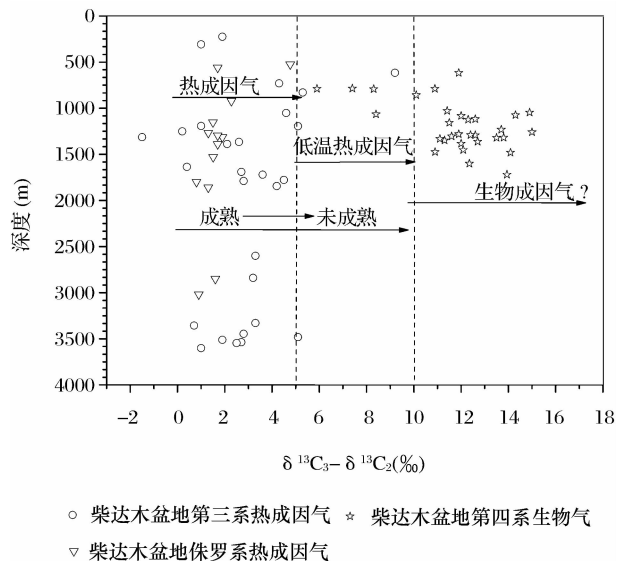


图3 生物气和热成因气中 $\delta^{13}\text{C}_2 - \delta^{13}\text{C}_3$ 值与深度的关系

更重要的是在深度较浅(小于1 000 m)时两者 $\delta^{13}\text{C}_3 - \delta^{13}\text{C}_2$ 值相差较小,而在深度较深(1 000 ~ 1 800 m)时, $\delta^{13}\text{C}_3 - \delta^{13}\text{C}_2$ 值相差却较大,即深度越深,两者 $\delta^{13}\text{C}_3 - \delta^{13}\text{C}_2$ 差值相差越大。如果有热成因气的混入,则生物气中 $\delta^{13}\text{C}_3 - \delta^{13}\text{C}_2$ 值与热成因气中 $\delta^{13}\text{C}_3 - \delta^{13}\text{C}_2$ 值应该随深度增加差距缩小,而实际恰恰相反,这不仅说明了热成因气混入的可能性小,还说明它们在成因上存在着差别。

### 3.3.2 低温热成因重烃的可能性探讨

王万春<sup>[21]</sup>根据James<sup>[22]</sup>得出的气态烃组分之间碳同位素组成的差异相对于源岩成熟度的理论成熟度关系,总结认为,同一成因的未成熟—低成熟乙烷和丙烷之间的碳同位素差值( $\delta^{13}\text{C}_3 - \delta^{13}\text{C}_2$ )应在6‰~10‰之间,而源岩热演化达到成熟以上的乙烷和丙烷之间的碳同位素差值( $\delta^{13}\text{C}_3 - \delta^{13}\text{C}_2$ )应低于5‰。因此图3中小于5‰的区域为成熟气区,5‰~10‰区域为未成熟—低成熟气区。Rowe<sup>[13-14]</sup>对加拿大西部沉积盆地Colorado组浅层(< 500 m)源岩吸附气中重烃研究后认为是低温热成因气。它的 $\delta^{13}\text{C}_3 - \delta^{13}\text{C}_2$ 值基本在4‰~10‰之间,若将其投放在图3中正好处于未成熟区—低成熟气区,证明了Rowe的观点。三湖地区部分气样的重烃 $\delta^{13}\text{C}_3 - \delta^{13}\text{C}_2$ 值落在5‰~10‰区域内,显示其可能是未成熟—低成熟气,为低温热成因作用的产物。所以 $\delta^{13}\text{C}_3 - \delta^{13}\text{C}_2$ 值可以作为一种受母质类型(第四系为陆源腐殖型为主,含腐泥腐殖型;第三系以混合型为主,Colorado组以偏腐泥型为主)影响较小,能够反映天然气演化程度的一种指标。依据此指标,从图3可以看出,自左向右天然气成熟度由成熟向未成熟过渡,天然气成因作用由常规热成因向低温热成因过渡,低温热成因再向生物成因过渡。根据这个推测,该生物气中重烃可能为低温热成因和生物成因共同作用的结果。

### 3.3.3 生物成因重烃的可能性探讨

前文中已阐明了三湖地区生物气中重烃混入热成因气的可能性较小,但可能有部分是低温热成因的贡献。研究认为主要可能为生物成因作用的结果,证据有:①重烃组分含量小于0.2%,乙烷含量不高于0.080%;②戴金星<sup>[6]</sup>认为原生生物气中 $\delta^{13}\text{C}_3 - \delta^{13}\text{C}_2$ 值大于10‰,是区分生物气与亚生物气(是指介于生物气和热解气之间的过渡型气或生

① 大庆油田公司柴北缘勘探项目经理部,柴北缘地区中新世代地层生排烃机制与潜力评价。内部资料,2000。

物—热催化过渡带气,为未成熟期产物)<sup>[23-24]</sup>的有效指标。在该区生物气中除部分  $\delta^{13}\text{C}_3 - \delta^{13}\text{C}_2$  值在 5‰~10‰ 区域内外,大部分在大于 10‰ 区域内(图 3);③前文已证明该区生物成因甲烷为  $\text{CO}_2$  还原作用的结果。因此,用该区的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值减去该区烃类气体的碳同位素值作为纵坐标得到图 4,在图中可以清楚的看到, $\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$  和  $\delta^{13}\text{C}_3$  等 3 条趋势线平行分布。乙烷和丙烷的点阵排列,除了个别点外(低温热成因的结果)与甲烷的点阵排列都有很好的一致性,这说明它们在成因上可能具有一致性,即都为生物成因气。

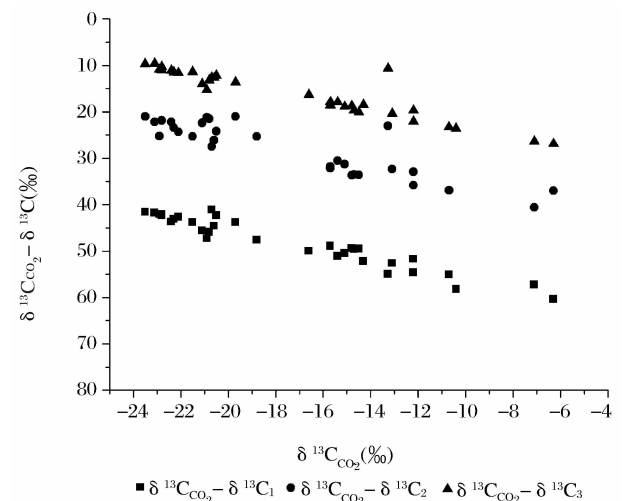


图 4  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值与烃类气体同位素的关系

## 4 结论

(1)三湖地区天然气地球化学特征为  $\text{CH}_4 > 99\%$ ,  $\text{C}_2+ < 0.15\%$ , 干燥系数为 0.999,  $\text{C}_1/\text{C}_2+$  的变化范围为 640.7~1 754.8,  $\delta^{13}\text{C}_1 < -61.8\text{‰}$ ,  $\delta\text{D}_1 < -214\text{‰}$ , 为典型的生物气特征。

(2)三湖地区生物气甲烷形成途径是以  $\text{CO}_2$  还原作用为主的,这与  $\delta^{13}\text{C}_1$  与  $\delta\text{D}_1$  图版判识方法所显示的结果一致,因此,地层水与甲烷的关系的判识结果为该区生物甲烷形成途径提供了新的佐证。

(3)三湖地区区生物气中含有微量重烃组分,平均含量为 0.11%;乙烷碳同位素值主要在一 50.6‰~−40.7‰ 之间变化,丙烷碳同位素值分布范围为 −36.2‰~−31.9‰。将该区生物气与该盆地热成因气进行了对比,两者重烃组分含量和碳同位素特征明显不同,说明该生物气中重烃混入热成因气可能性较小。通过对该区生物气中重烃  $\delta^{13}\text{C}_3 - \delta^{13}\text{C}_2$  值和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  与烃类气体碳同位素的关系图分析认为三湖地区生物气中重烃成因复杂,可能为低温热

成因和生物成因共同作用的产物,但生物成因可能占主导地位。

## 参考文献:

[1] 徐子远. 柴东生物气勘探的实践与思考[J]. 中国石油勘探, 2006, 6: 33-37.

[2] 周翥虹, 周瑞年, 管志强. 柴达木盆地东部第四系气源岩地化特征及生物气前景[J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(2): 32-37.

[3] 张晓宝, 徐子远, 段毅, 等. 柴达木盆地三湖地区第四系生物气的形成途径与运聚方式[J]. 地质论评, 2003, 49(2): 168-174.

[4] 魏国齐, 刘德来, 张英, 等. 柴达木盆地第四系生物气形成机理、分布规律与勘探前景[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 84-89.

[5] 惠荣耀, 李本亮, 丁安娜, 等. 柴达木盆地三湖凹陷岩性气藏的勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(4): 443-448.

[6] 戴金星, 陈英. 中国生物气中烷烃组分的碳同位素特征及其鉴别标志[J]. 中国科学: B 辑, 1993, 23(3): 303-310.

[7] 徐永昌. 天然气成因理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 98-99.

[8] Whiticar M J, Faber E, Schoel M. Biogenic methane formation in marine and freshwater environments:  $\text{CO}_2$  reduction vs. acetate fermentation-isotope evidence[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50: 693-709.

[9] Schoell M. The hydrogen and carbon isotopic composition of methane from natural gases of various origins[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44: 649-661.

[10] 戴金星, 裴锡古, 戚厚发. 中国天然气地质学(卷二)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 82-205.

[11] Daniels L, Fulton G, Spencer R W, et al. Origin of hydrogen in methane produced by Methane bacterium thermoautotrophicum [J]. *J Bacteriol*, 1980, 141: 694-698.

[12] Smith J W, Pallasser R. Microbial origin of Australian coal-bed methane[J]. *AAPG Bulletin*, 1996, 80: 891-897.

[13] 王万春, 刘文汇, 刘全有. 浅层混源天然气判识的碳同位素地球化学分析[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(6): 469-472.

[14] Devon Rowe, karlis Muehlenbachs. Isotopic fingerprints of shallow gases in the Western Canadian sedimentary basin: tools for remediation of leaking heavy oil wells[J]. *Organic Geochemistry*, 1999, 30: 861-871.

[15] Devon Rowe, Atis Muehlenbachs. Low-temperature thermal generation of hydrocarbon gases in shallow shales[J]. *Nature*, 1999, 398: 61-63.

[16] 徐永昌, 刘文汇, 腾格尔, 等. 陆良、保山气藏碳、氢同位素特征及纯生物乙烷发现[J]. 中国科学: D 辑, 2005, 35(8): 758-764.

[17] Mattavelli L, Martinenghic. Deep isotopic light methane in northern Italy[J]. *Bacterial Gas*, 1992, 121-132.

[18] Lewis S D. Isotope Compositions of Gases in Sediments from the Chile Continental Margin[C]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results*, 1995, 141: 307-312.

[19] 张晓宝, 胡勇, 马立元, 等. 柴达木盆地西部第三系盐湖相天然气碳氢同位素特征、成因和分布[J]. 中国科学: D 辑, 2002, 32(7): 598-608.

## An Analysis of Characteristics of Hydrocarbon Generation from Pyrolysis Experiment of Source Rock

XIAO Zhi-hua<sup>1</sup>, HU Guo-yi<sup>2</sup>, LI Zhi-sheng<sup>2</sup>

( 1. Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation in the China University of Petroleum, Ministry of Education, Beijing 102249, China; 2. Langfang Branch of Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Langfang 065007, China )

**Abstract:** By means of thermal simulating experiment in the open system, this article focused on the hydrocarbon-generating characteristics of Trias source rock from well Ha 2 in Tarim basin, it also combined with the alteration of maceral and maturation to discuss the characteristics of generating hydrocarbon. The result of experiment indicate that the accumulative yield is only 1.04 mL/g when the heating temperature is under 400°C ( value of  $R_o$  is below 0.8%), it only reach to 8.2% of the total gas yield. When the heating temperature reaches 600°C, the accumulative yield is 9.23 mL/g (about 72.7% of the total gas yield). The peak yield of hydrocarbon is between the heating temperature 500°C and 600°C (the value of  $R_o$  is from 1.24% to 1.78%), the periodical yield in this evolution period is 6.23 mL/g (about 50% of the total gas yield). Although the humin component still could generate hydrocarbon when the heating temperature reaches 700°C, it has already been entered into the period of dry gas. The period of large quantity of generation has finished.

**Key words:** Open system; Thermal simulation; Hydrocarbon generation; Maceral.

(上接第 529 页)

- [20] 赵东升,李文厚,吴清雅,等. 柴达木盆地天然气的碳同位素地球化学特征及成因分析[J]. 沉积学报, 2006, 24(1): 135-140.
- [21] 王万春, 刘文汇, 高波, 等. 我国浅层复合气藏中天然气的成因鉴别[J]. 天然气工业, 2003, 23 (3): 20-23.
- [22] James A T. Correlation of natural gas by use of carbon isotop-

ic distribution between hydrocarbon components[J]. AAPG Bulletin, 1983, 67: 1176-1191.

- [23] 戴金星. 各类烷烃气的鉴别[J]. 中国科学: B辑, 1992, (2): 183-193.
- [24] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别[J]. 天然气地球科学, 1993, 4(2): 1-40.

## Geochemical Characteristics of Biogenic Gas and Heavy Hydrocarbon Origin in Sanhu Region of Qaidam Basin

JIA Xing-liang<sup>1, 2</sup>, ZHOU Shi-xin<sup>1</sup>, SONG Zhen-xiang<sup>1, 2</sup>, WANG Bao-zhong<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Gas Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The Sanhu region in Qaidam basin is the biggest biogenic gas field in China. Thirty five gas samples and eleven formation water samples were collected from Sebei 1, Sebei 2 and Tainan gas fields. The compositions, carbon and hydrogen isotopes of the gas samples were analyzed. Oxygen and hydrogen isotopes of the water samples were also analyzed. The main composition of the natural gas is methane, which accounts for more than 99%,  $C_2^+$  is less than 0.15% and the dryness coefficient about 0.999. The isotopic values of carbon and hydrogen are:  $\delta^{13}C_1$  ranging from  $-68.6\text{‰}$  to  $-61.8\text{‰}$ ,  $\delta^{13}C_2$  from  $-50.6\text{‰}$  to  $-40.7\text{‰}$ ,  $\delta^{13}C_3$  from  $-36.2\text{‰}$  to  $-31.9\text{‰}$ , and  $\delta D_1$  from  $-234.7\text{‰}$  to  $-214\text{‰}$ . The graph of  $\delta^{13}C_1$  and  $\delta D_1$  and the relation formula of  $\delta D_{H_2O}$  and  $\delta D_1$  show that the reduction of carbon dioxide is the main way of forming biogenic methane in the area. Research shows that the biogenic gas of the Sanhu region is obviously different from the thermogenic gas in the Qaidam basin. The origin of heavy hydrocarbon in the biogenic gas of the Sanhu region is complex. It may be derived from both biogenic and low temperature thermal generations.

**Key words:** Qaidam basin; Biogenic gas; Formation water; Reduction of carbon dioxide; Heavy hydrocarbon origin.