

文章编号:1001-6112(2012)04-0417-05

松辽盆地梨树断陷 天然气地球化学特征及成因探讨

张俊¹, 赵红静², 张敏²

(1. 中国石油化工股份有限公司 科技开发部, 北京 100728; 2. 长江大学 地球化学系, 湖北 荆州 434102)

摘要:通过系统测试松辽盆地梨树断陷3个气田和3个油气田天然气的化学组成以及碳同位素组成,分析了天然气的组成特征与平面分布特征,综合判断了各油气田天然气的成因类型。梨树断陷的天然气以烃类为主,CO₂含量低,烃类气体和CO₂均为有机成因,可以分为3种成因类型。第一类为不同成熟度的油型气的混合气,主要分布在北部斜坡带的皮家气田和中央构造带的八屋、四五家子油气田,碳同位素多发生了倒转;第二类为高一过成熟阶段形成的煤成气,分布在中央构造带南端的孤家子气田和东南斜坡带的新立油气田,具有负碳同位素系列;第三类为油型气和煤成气的混合气,分布在中央构造带的后五家户气田。

关键词:油型气;煤成气;碳同位素;天然气地球化学;梨树断陷;松辽盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Geochemical characteristics and origin of natural gas in Lishu Fault Depression, Songliao Basin

Zhang Jun¹, Zhao Hongjing², Zhang Min²

(1. Science and Technology Development Department, SINOPEC, Beijing 100728, China;
2. Department of Geochemistry, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434102, China)

Abstract: Based on the analyses of natural gases from three gas fields and three oil fields, the composition and plane distribution of natural gases in the Lishu Fault Depression of the Songliao Basin were discussed and the genetic types of gas were identified. Natural gas in the Lishu Fault Depression contains significant alkane gases and a little nonhydrocarbon gases, especially CO₂. Alkane gases and CO₂ were organic genesis and there were three genetic types of alkane gases in the Lishu Fault Depression. The first type was mixed by oil-type gases with different maturities, mainly located in Pijia gas field, Bawu and Siwujia oil fields, with partly reserved order of $\delta^{13}\text{C}$. The second type was coal gases with high and over maturity, located in Gujiazi gas field and Xinli oil field, with reversed order of $\delta^{13}\text{C}$. The third type was mixed by oil-type gas and coal gas, located in Houwujiahu gas field.

Key words: oil-type gas; coal gas; carbon isotope; natural gas geochemistry; Lishu Fault Depression; Songliao Basin

松辽盆地梨树断陷位于松辽盆地东南隆起区南部,是晚侏罗世—白垩纪发育的下断上坳、西断东超的箕状坳陷,面积3100 km²[1]。与松辽盆地中部、北部地区相比,松南地区是一个天然气资源的相对富集区,天然气资源量约为0.98×10¹² m³,其中梨树断陷天然气资源量约为0.14×10¹² m³[2]。松南地区的长岭断陷天然气获得了重要发现,研究多见报道[3-5],但同处南部的梨树断陷虽然相继在后五家户、八屋、皮家、四五家子、孤家子等地区获得发现,但其天然气地球化学特征及成因研究则报道较少。进一步明确梨树断陷天然气成因,对指导

勘探具有重要意义。

天然气样品取自梨树断陷的皮家气田、八屋油气田、四五家子油气田、后五家户气田、孤家子气田和新立油气田(图1),进行了化学组成及同位素组成分析测试。

1 天然气化学组成特征

梨树断陷天然气富含烃类气体,非烃类化合物含量较低。各油气田烃类气体含量差异不大,含量大于90%(表1),以甲烷为主,干燥系数介于0.83~0.98之间。其中孤家子、后五家户和新立油气田的

收稿日期:2012-04-21;修订日期:2012-07-05。

作者简介:张俊(1968—),男,博士,高级工程师,从事油气地质勘探研究及科技管理工作。E-mail:zhangjuncn@sinopec.com。

基金项目:中国石化科技攻关项目(P09021)资助。

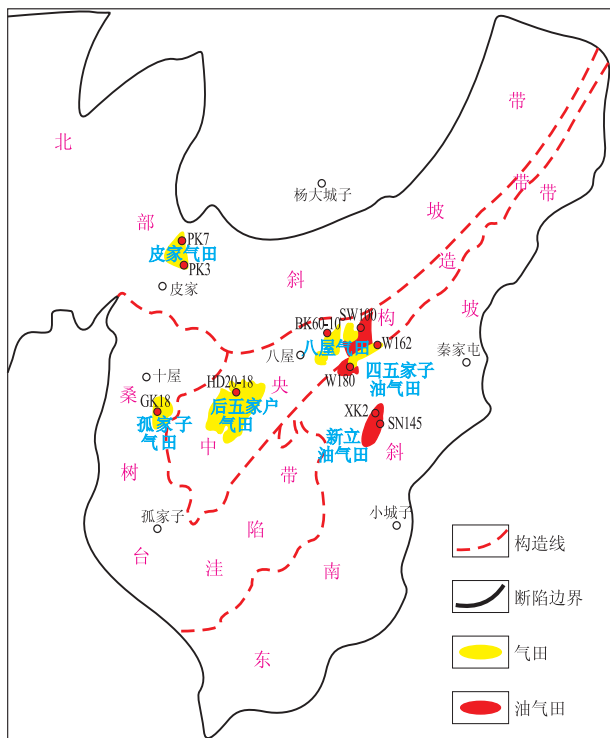


图1 松辽盆地梨树断陷油气田与样品分布

Fig.1 Distribution of gas fields and samples in Lishu Fault Depression, Songliao Basin

天然气为典型干气,干燥系数大于0.95,八屋和皮家油气田基本为湿气,干燥系数多小于0.95。分析检测出的非烃气体为N₂和CO₂,以N₂为主,含量介于1.56%~7.88%之间;CO₂含量低,普遍小于0.5%,在孤家子、新立和后五家户油气田天然气中不含CO₂。CO₂含量相对较高时,重烃含量也较高;当CO₂含量低或不合时,其重烃含量也相对较低。这种重烃含量与CO₂含量相似的变化趋势,可能说明了两者在成因上的相似。

2 烃类气体碳同位素组成特征

烃类气体的甲烷碳同位素变化范围较大,介于-45.6‰~-21.8‰之间(表2),根据数值变化可以分为3类:一是四五家子油气田W162井,δ¹³C₁为-45.6‰,明显轻于所有其他地区;二是除孤家子气田外,北部斜坡带和中央构造带多数天然气的甲烷碳同位素小于-30‰,介于-39.2‰~-28.6‰之间;三是中央构造带的孤家子和东南斜坡带的天然气甲烷碳同位素最重,大于-25‰,介于-23.1‰~-21.8‰之间。总体上,甲烷碳同位素具有北轻南重的特点。

表1 松辽盆地梨树断陷天然气化学组成

Table 1 Chemical composition of natural gases in Lishu Fault Depression, Songliao Basin

地区	油气田	井号	深度/m	层位	化学组成/%										ΣC/%	C ₁ /C ₁₋₅	C ₂₊ /%	非烃/%
					N ₂	CO ₂	C ₁	C ₂	C ₃	iC ₄	nC ₄	iC ₅	nC ₅	C ₆				
北部斜坡带	皮家子气田	PK7	1 917.2~1 961.9	K _{1yc}	2.72	0.09	90.16	4.58	1.38	0.22	0.37	0.08	0.11	0.29	97.19	0.93	7.04	2.81
		PK2	2 008.5~2 028	K _{1yc}	2.45	0.17	88.90	4.96	1.87	0.32	0.57	0.14	0.19	0.44	97.38	0.92	8.48	2.62
		PK3	2 125~2 165.8	K _{1yc}	1.60	0.23	91.87	4.54	1.12	0.15	0.25	0.06	0.08	0.11	98.17	0.94	6.30	1.83
		PK13	2 104~2 221	K _{1yc}	2.54	0.08	90.60	4.28	1.28	0.23	0.40	0.10	0.15	0.36	97.38	0.93	6.79	2.62
		PK139-1	1 860.6~2 105.2	K _{1yc}	2.78	0.09	89.93	4.55	1.50	0.24	0.42	0.09	0.14	0.26	97.13	0.93	7.21	2.87
		SN139	2 068.8~2 110.8	K _{1yc}	1.68	0.10	92.34	3.81	1.03	0.19	0.31	0.09	0.11	0.36	98.22	0.94	5.88	1.78
中央构造带	八屋油气田	BK60-10	2 099~2 134.5	K _{1yc}	1.95	0.15	89.85	5.12	1.54	0.37	0.45	0.13	0.11	0.33	97.90	0.92	8.05	2.10
		BK61-4	2 074.2~2 076.6	K _{1yc}	1.94	0.25	90.50	5.06	1.32	0.26	0.30	0.09	0.07	0.21	97.81	0.93	7.31	2.19
		BK136-1	2 283~2 314	K _{1sh}	2.94	0.49	85.92	6.43	2.58	0.50	0.80	0.11	0.10	0.13	96.57	0.89	10.66	3.43
		SW100	2 085.3~2 088.8	K _{1sh}	4.22	0.54	86.20	5.78	1.87	0.39	0.54	0.13	0.13	0.19	95.23	0.91	9.04	4.77
		SN98	1 516~1 520	K _{1d}	2.20	0.15	90.15	5.20	1.28	0.28	0.34	0.10	0.11	0.21	97.66	0.93	7.51	2.34
		BD2	1 346~1 356	K _{1d}	4.11	0.03	91.48	2.54	0.78	0.23	0.31	0.12	0.12	0.28	95.86	0.96	4.38	4.14
		BK34	2 245.6~2 284	K _{1sh}	3.17	0.26	89.61	4.64	1.27	0.29	0.37	0.10	0.12	0.18	96.57	0.93	6.95	3.43
		SN100	1 146~1 150.6	K _{1q}	4.54	0.00	92.50	2.00	0.48	0.10	0.15	0.05	0.06	0.11	95.46	0.97	2.96	4.54
	四五家子油气田	W180	1 154~1 216.9	K _{1q¹}	4.36	0.13	88.75	4.34	1.32	0.27	0.39	0.10	0.12	0.22	95.51	0.93	6.76	4.49
		W162	586~590	K _{1q²}	4.01	0.00	94.45	1.31	0.07	0.05	0.02	0.02	0.01	0.06	95.99	0.98	1.55	4.01
	后五家户气田	HD20-18	1 205~1 275	K _{1q¹}	1.56	0.00	96.68	1.51	0.15	0.02	0.04	0.01	0.01	0.03	98.44	0.98	1.76	1.56
		HD25-18	1 214~1 244	K _{1q¹}	2.61	0.00	95.64	1.50	0.16	0.01	0.03	0.01	0.01	0.04	97.39	0.98	1.75	2.61
		HD26-17	1 545~1 549	K _{1q¹}	1.65	0.00	96.50	1.61	0.15	0.02	0.03	0.01	0.01	0.03	98.35	0.98	1.86	1.65
	孤家子气田	GK21	1 406.6~1 526	K _{1q¹}	7.32	0.00	90.68	1.74	0.18	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	92.68	0.98	2.00	7.32
		GK18	1 697.4~1 721.8	K _{1d}	5.54	0.00	92.90	1.48	0.06	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	94.46	0.98	1.56	5.54
		GK4	1 517.4~1 524	K _{1q¹}	7.88	0.04	90.25	1.59	0.15	0.01	0.03	0.01	0.01	0.03	92.08	0.98	1.83	7.92
东南斜坡带	新立油气田	SN145	1 555.7~1 558	K _{1q¹}	4.88	0.00	91.53	2.42	0.48	0.11	0.18	0.05	0.07	0.28	95.12	0.97	3.59	4.88
		XK-1	1 556.7~1 559	K _{1q¹}	5.18	0.00	91.18	2.46	0.51	0.11	0.18	0.05	0.07	0.25	94.82	0.96	3.63	5.18
		XK-2	1 587~1 608	K _{1q¹}	4.93	0.00	91.90	2.25	0.40	0.08	0.13	0.04	0.05	0.22	95.07	0.97	3.17	4.93

表2 松辽盆地梨树断陷天然气碳同位素组成

Table 2 Carbon isotopic composition of natural gases in Lishu Fault Depression, Songliao Basin

‰

地区	油气田	井号	深度/m	层位	CO ₂	C ₁	C ₂	C ₃	nC ₄	nC ₅	分布特征
北部斜坡带	皮家气田	PK7	1 917.2 ~ 1 961.9	K ₁ yc		-33.9	-29.8	-27.6	-27.4	-27.9	倒转系列
		PK2	2 008.5 ~ 2 028	K ₁ yc		-34.8	-30.3	-28.2	-27.8	-28.2	倒转系列
		PK3	2 125 ~ 2 165.8	K ₁ yc		-35.1	-30.4	-28.4	-28.5	-29.0	倒转系列
		PK13	2 104 ~ 2 221	K ₁ yc	-10.3	-34.5	-29.9	-27.6	-28.1	-28.9	倒转系列
		PK139-1	1 860.6 ~ 2 105.2	K ₁ yc		-33.8	-29.7	-27.7	-27.0	-28.2	倒转系列
		SN139	2 068.8 ~ 2 110.8	K ₁ yc		-34.1	-29.7	-27.9	-28.3	-27.2	倒转系列
中央构造带	八屋油气田	BK60-10	2 099 ~ 2 134.5	K ₁ yc		-34.8	-28.3	-27.0	-27.3	-27.6	倒转系列
		BK61-4	2 074.2 ~ 2 076.6	K ₁ yc	-9.1	-35.4	-28.4	-27.3	-27.6	-27.5	倒转系列
		BK136-1	2 283 ~ 2 314	K ₁ sh	-12.1	-37.4	-29.5	-28.4	-28.4	-28.0	正碳系列
		SW100	2 085.3 ~ 2 088.8	K ₁ sh		-34.7	-29.4	-28.6	-28.8	-29.1	倒转系列
		SN98	1 516 ~ 1 520	K ₁ d		-35.8	-28.6	-27.5	-27.9	-28.6	倒转系列
		BD2	1 346 ~ 1 356	K ₁ d		-37.7	-29.0	-27.6	-27.6	-27.5	正碳系列
	四五家子油气田	BK34	2 245.6 ~ 2 284	K ₁ sh	-11.1	-34.8	-29.0	-27.4	-27.6	-28.9	倒转系列
		SN100	1 146 ~ 1 150.6	K ₁ q		-39.2	-31.0	-28.8	-26.8	-27.4	倒转系列
		W180	1 154 ~ 1 216.9	K ₁ q ¹	-11.7	-32.3	-29.0	-27.6	-28.0	-28.7	倒转系列
		W162	586 ~ 590	K ₁ q ²		-45.6	-30.4	-25.2	-25.4	-28.4	倒转系列
		HD20-18	1 205 ~ 1 275	K ₁ q ¹		-30.9	-29.3	-29.8	-29.8	-29.4	倒转系列
		HD25-18	1 214 ~ 1 244	K ₁ q ¹		-34.2	-32.5	-31.6	-29.3	-28.0	正碳分布
后五家户气田	HD26-17	1 545 ~ 1 549	K ₁ q ¹		-28.6	-29.8	-30.2	-29.1	-29.5	倒转系列	
	GK21	1 406.6 ~ 1 526	K ₁ q ¹		-23.0	-26.0	-28.9	-30.6	-31.0	负碳系列	
	GK18	1 697.4 ~ 1 721.8	K ₁ d		-22.3	-26.0	-29.9			负碳系列	
	GK4	1 517.4 ~ 1 524	K ₁ q ¹		-21.8	-25.6	-27.9	-29.8	-31.0	负碳系列	
	SN145	1 555.7 ~ 1 558	K ₁ q ¹		-22.4	-25.2	-25.9	-27.2	-28.9	负碳系列	
	东南斜坡带	新立油气田	XK-1	1 556.7 ~ 1 559	K ₁ q ¹		-23.1	-26.0	-26.2	-26.9	-28.1
XK-2			1 587 ~ 1 608	K ₁ q ¹		-23.0	-25.4	-26.4	-27.3	-28.9	负碳系列

从碳同位素系列分布特征看,也有3种模式:正碳同位素系列(即 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3 < \delta^{13}C_4 < \delta^{13}C_5$)、负碳同位素系列(即 $\delta^{13}C_1 > \delta^{13}C_2 > \delta^{13}C_3 > \delta^{13}C_4 > \delta^{13}C_5$)和同位素倒转系列(如 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3 > \delta^{13}C_4 > \delta^{13}C_5$)(表2)。其中八屋和后五家户的3个样品具有正碳系列分布,孤家子和新立天然气为负碳系列分布,北部斜坡和中央构造带的大部分地区为倒转分布区,主要是高碳数部分出现同位素倒转。

在平面分布上,碳同位素系列分布与甲烷同位素值的分布具有一定的相似性,断陷北部地区甲烷碳同位素较轻,为倒转和正碳系列分布;南部地区甲烷碳同位素较重,为负碳系列分布。这种同位素组成的多样性和分布特点,可能反映了梨树断陷天然气成因的复杂性和平面分布的规律性。

3 天然气成因探讨

3.1 CO₂ 气体成因

梨树断陷天然气CO₂含量低,其变化幅度较小,介于-9.1‰~-12.1‰。戴金星^[6]提出利用CO₂

的丰度和碳同位素判断CO₂的来源,当CO₂含量小于20%,且 $\delta^{13}C_{CO_2} < -10‰$,可认为CO₂是有机质经生物作用、热化学作用或氧化作用形成的。除个别样品外,梨树断陷CO₂碳同位素值小于-10‰,CO₂含量均小于1%,因此可认为梨树断陷的CO₂是有机成因的。这与松辽盆地的其他地区发现有大量较高丰度的无机成因CO₂气体存在明显差别^[7-8]。

3.2 烃类气体成因

烃类气体的成因往往比较复杂,从来源上包括无机和有机成因气、油型气和煤型气、干酪根裂解气和原油裂解气、生物成因和热成因气以及同型不同成熟度的天然气,生物降解、运移、蒸发分馏作用等次生变化也是烃类气体组成发生变化的原因^[9-10]。天然气的同位素组成受源岩有机质类型、热演化程度和成藏后的次生变化等多种因素的影响,其单体烃同位素分布特征是区分各种因素影响程度的地球化学指纹。

戴金星等^[9]利用天然气单体烃同位素组成建立了鉴别各类烷烃气成因的图版(图2,3)。从甲烷的 $\delta^{13}C_1 - C_1/C_{2+3}$ 成因鉴别图(图2)可以看出,

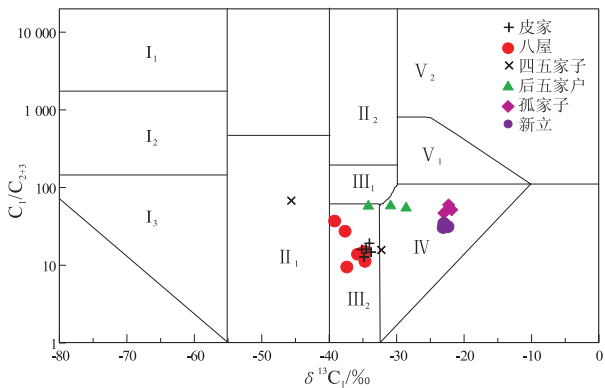


图2 松辽盆地梨树断陷不同成因甲烷的 $\delta^{13}C_1-C_1/C_{2+3}$ 鉴别图

I₁. 生物气; I₂ 生物气和亚生物气;
I₃. 亚生物气; II₁. 原油伴生气; II₂. 油型裂解气;
III₁. 油型裂解气和煤成气; III₂. 凝析油伴生气和煤成气;
IV. 煤成气; V₁. 无机气; V₂. 无机气和煤成气

Fig. 2 Identification of methane genesis by $\delta^{13}C_1-C_1/C_{2+3}$ in Lishu Fault Depression, Songliao Basin

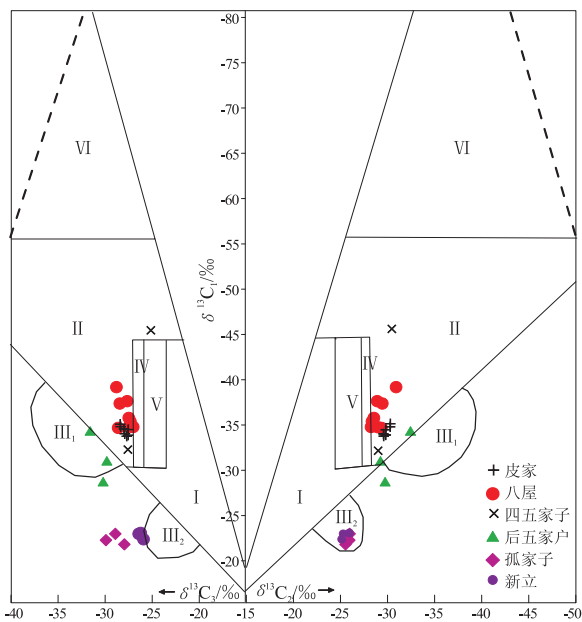


图3 松辽盆地梨树断陷不同成因烷烃气 $\delta^{13}C_1-\delta^{13}C_2-\delta^{13}C_3$ 鉴别图

I. 煤型气区; II. 油型气区; III₁. 煤成气和油型气形成混合气的碳同位素系列倒转区; III₂. 不同期的煤成气形成混合气的碳同位素系列倒转区; IV. 煤型气和油型气区; V. 煤型气、油型气和混合气区; VI. 生物气和混合气区

Fig. 3 Identification of genesis of various alkane gases by $\delta^{13}C_1-\delta^{13}C_2-\delta^{13}C_3$ in Lishu Fault Depression, Songliao Basin

梨树断陷的甲烷均为有机气,具有3种成因类型:皮家、八屋和部分四五家子、后五家户天然气落在 III₂ 区,为凝析油伴生气和煤层气的混合气;孤家子、新立和部分后五家户天然气落在 IV 区,为煤成气;四五家子的 W162 井落在 II₁ 区,为原油伴生气。

从烷烃气 $\delta^{13}C_1-\delta^{13}C_2-\delta^{13}C_3$ 成因鉴别图(图3)中也可以看出,皮家、八屋和四五家子地区的天

然气样品都落在 II 区,为油型气区;孤家子和新立天然气落在 III₂ 区,为不同期的煤成气形成的混合气;后五家户天然气落在 III₁ 区或 II 与 III₁ 的分界线,总体上为煤成气与油型气的混合气。

孤家子、新立和后五家户天然气在甲烷和烷烃气的成因鉴别图中成因一致,分别为煤成气、煤成气与油型气的混合气。而皮家、八屋、四五家子天然气在2个鉴别图中成因不一致,在甲烷成因鉴别图中为煤成气与油型气的混合气,而在烷烃气成因鉴别图中为油型气。通常甲烷碳同位素受成熟度的影响大,而乙烷碳同位素更多地反映母质来源类型,故皮家、八屋、四五家子天然气归为油型气更可信。

前文指出,皮家、八屋、四五家子和后五家户天然气碳同位素除少数样品具有正碳分布系列外,其他多数样品在高碳数部分出现倒转。致使同位素倒转的原因有:有机烷烃气和无机烷烃气的混合、煤成气和油型气的混合、同型不同源气或同源不同期气的混合、烷烃气中某一或某些组分被细菌氧化,倒转可由其中一种原因,也可由2种或更多种原因所致^[11-12]。从梨树断陷天然气化学组成来看,所有样品中单体烃的含量随碳原子数增加而降低,呈正常态势,并未出现某一或某些组分组成的异常,同时 iC_4/nC_4 比值较小(小于1),因此可排除生物降解作用导致的倒转。结合天然气成因鉴别图版的分析结果,造成皮家、八屋、四五家子地区天然气同位素倒转的原因应该是不同成熟度的油型气的混合,而后五家户地区的天然气同位素的倒转原因可能是油型气和煤成气的混合。

孤家子和新立地区的天然气具有负碳同位素系列,负碳同位素系列的天然气通常是无机成因。无机成因天然气的甲烷占绝对优势,鲜有 C₂₊ 重烃,往往伴生高含量的 CO₂ 气体和深大断裂的发育。而孤家子和新立地区的天然气均含有一定程度的重烃,几乎检测不到 CO₂ 气体,深大断裂也不发育^[13]。从天然气组成和地质背景来看,无机成因形成负碳同位素系列的可能性不大。已有的研究认为,在碳同位素交换平衡作用下,若地温高于 100 °C,则 $\delta^{13}C_3 > \delta^{13}C_2$; 地温高于 150 °C, $\delta^{13}C_2 > \delta^{13}C_1$; 当温度高于 200 °C 时,则使正碳同位素系列改变成为负碳同位素系列^[14]。秦胜飞^[15]在塔里木盆地的天然气研究认为,库车坳陷大宛齐的负碳同位素天然气是由散失分馏所致。因此,负碳同位素天然气不一定是无机成因,烃源岩在高温情况下生成的天然气,或者天然气经历散失分馏作用,也可能会形成负碳同位素系列。综合以上分析,笔者认为孤家子和新

立地区的负碳同位素系列天然气不是无机成因,可能是高一过成熟阶段形成的煤成气。

4 结论及讨论

1) 梨树断陷天然气组成以烃类为主,CO₂ 含量低,烃类气体和 CO₂ 均为有机成因,北部以油型气为主,南部以煤层气为主。

2) 北部斜坡带的皮家气田和中央构造带的八屋、四五家子油气田的天然气来自不同成熟度的油型气的混合气,中央构造带南端的孤家子气田和东南斜坡带的新立油气田天然气是高一过成熟阶段形成的煤成气,中央构造带的后五家户气田天然气是油型气和煤成气的混合气。

3) 梨树断陷与长岭等松南其他断陷不一样,没有无机成因的 CO₂ 和烷烃气,在勘探思路应有所差别。进一步开展气源直接对比,结合烃源岩生烃演化史,明确不同地区、不同成因类型天然气的来源,分析其运聚规律,可有效指导梨树断陷的勘探。

参考文献:

[1] 罗群,卢宏,刘银河,等. 梨树凹陷断裂特征及对油气的控制[J]. 大庆石油学院学报,1996,20(3):6-10.

[2] 熊海河. 松辽盆地南部天然气勘探发现现状及展望[J]. 天然气工业,2000,20(S):1-2.

[3] 秦伟军,郭金瑞. 松辽盆地南部断陷层油气勘探领域[J]. 石油实验地质,2010,32(4):326-329.

[4] 王英伟,潘保芝,王满,等. 长岭地区营城组火山岩储层参数分布规律[J]. 断块油气田,2010,17(2):134-137.

[5] 周卓明,王保华,朱廷祥,等. 长岭断陷火石岭组烃源岩特征及勘探远景分析[J]. 石油实验地质,2011,33(6):613-616.

[6] 戴金星. 各类天然气的成因鉴别[J]. 中国海上油气(地质),1992,6(1):11-19.

[7] 吴聿元,笱灵,黄军平,等. 松辽盆地长岭断陷老英台—达尔罕凸起 CO₂ 分布特征及成因分析[J]. 石油实验地质,2009,31(3):238-243.

[8] 缪卫东,罗霞,王延斌,等. 松辽盆地无机成因气碳同位素判识指标探讨[J]. 天然气工业,2010,30(3):27-30.

[9] 戴金星,邹才能,张水昌,等. 无机成因和有机成因烷烃气的鉴别[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,2008,38(11):1329-1341.

[10] 吴志勇,罗斌杰. 天然气运移地质色层效应机理和指标探讨[J]. 沉积学报,1992,10(2):119-125.

[11] 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):1-6.

[12] 黄海平. 松辽盆地徐家围子断陷深层天然气同位素倒转现象研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2000,25(6):617-623.

[13] 王守田,张春芬,周劲,等. 孤家子、后五家户、八屋南区块构造新认识[J]. 天然气工业,2000,20(S):38-41.

[14] 李赞豪,杨义康,冯明朗,等. 甲烷碳同位素在天然气勘探中的应用[J]. 石油与天然气地质,1985,6(4):426-432.

[15] 秦胜飞. 塔里木盆地库车坳陷异常天然气的成因[J]. 勘探家,1999,4(3):21-23.

(编辑 韩 或)

(上接第 416 页)

[14] 黄思静,侯中健. 地下孔隙率和渗透率在空间和时间上的变化及影响因素[J]. 沉积学报,2001,19(2):224-229.

[15] 林煜,徐樟有,吴胜和,等. 川西坳陷丰谷构造须四段沉积微相及沉积演化[J]. 断块油气田,2011,18(6):718-721.

[16] 蔡希源. 深层致密砂岩气藏天然气富集规律与勘探关键技术:以四川盆地川西坳陷须家河组天然气勘探为例[J]. 石油与天然气地质,2010,31(6):707-714.

[17] 王志萍,秦启荣,王保全,等. 川西 DY 构造须家河组致密砂岩储层裂缝分布控制因素[J]. 断块油气田,2011,18(1):22-25.

[18] 杨晓宁,陈洪德,寿建峰,等. 碎屑岩次生孔隙形成机制[J]. 大庆石油学院学报,2004,28(1):4-6.

[19] Wilinson M,Haszeldine R S,Ellam R M,et al. Hydrocarbon filling history from diagenesis evidence; Brent Group, UK north sea[J]. Marine and Petroleum Geology,2004,21(4):443-445.

(编辑 徐文明)