

# 四川盆地龙岗气田长兴组—飞仙关组 天然气地球化学特征及成因

邓 焱, 胡国艺, 赵长毅

(中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘要:**四川盆地龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气主要为烃类气体,干燥系数非常高,非烃气体以 $\text{CO}_2$ 为主, $\text{H}_2\text{S}$ 及 $\text{N}_2$ 含量较低,甲烷碳、氢同位素组成偏重,个别样品出现碳同位素倒转( $\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2$ )现象,并且天然气轻烃主体具有高甲基环己烷、低正构烷烃、低芳香烃的特点。气藏经历了较弱的TSR反应,对天然气组分及烷烃碳同位素影响较小, $\text{CO}_2$ 气体主要来源于酸性流体与碳酸盐岩储层的反应。综合天然气碳、氢同位素及轻烃特征,分析认为天然气以高—过成熟煤成气为主,并存在少量油型气混入。天然气乙烷—储层沥青—烃源岩干酪根碳同位素综合对比表明,龙岗气田天然气主体煤成气来自下二叠统龙潭组煤系气源岩,其中混有少量来自上二叠统泥质烃源岩的原油裂解气。

**关键词:**龙岗气田;长兴组—飞仙关组;天然气地球化学特征;轻烃;气源对比

**中图分类号:**TE122.1<sup>+</sup>13

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-1926(2018)06-0892-16

**引用格式:**Deng Yan, Hu Guoyi, Zhao Changyi. Geochemical characteristics and origin of natural gas in Changxing-Feixianguan Formations from Longgang Gasfield in the Sichuan Basin, China [J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(6): 892-907. [邓焱, 胡国艺, 赵长毅. 四川盆地龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气地球化学特征及成因[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(6): 892-907.]

## 0 引言

龙岗气田位于四川盆地开江—梁平海槽西侧,该地区晚二叠世长兴组与早三叠世飞仙关组沉积连续,受开江—梁平海槽控制,在台地边缘带形成了大、中型生物礁和鲕粒滩叠合沉积体<sup>[1,2]</sup>,并在2006年后于长兴组生物礁和飞仙关组鲕滩储层取得重大突破,展现出良好的勘探前景<sup>[3,4]</sup>。有关龙岗气田天然气来源的问题一直广受关注<sup>[1,4,5]</sup>,目前观点主要认为龙岗气田礁滩气藏天然气主要是来自上二叠统龙潭组烃源岩的煤成气<sup>[1-2,4-7]</sup>,但是在其他烃源岩及储层沥青对气藏有无贡献等问题上依然存在争议。

前人主要通过天然气组分和碳同位素组成特征,并结合烃源岩特征和气藏的对比来对本区气源

进行推断<sup>[1,5,6]</sup>,对龙岗气田天然气轻烃地球化学特征及其指示意义研究较少。轻烃蕴含丰富的地球化学信息,与其相关判别指标在天然气示踪、成因判别、成熟度确定等方面发挥了重要作用<sup>[8-13]</sup>。本文在对龙岗气田长兴组—飞仙关组礁滩体天然气化学组分及碳、氢同位素组成进行详细分析的基础上,重点结合天然气轻烃地球化学特征分析来探讨其天然气气源等问题,以期得到合理的解释。

## 1 地质背景

四川盆地自晚震旦系到中三叠统碳酸盐岩层系历经多个沉积旋回,厚度巨大。二叠纪东吴运动使上扬子准地台早二叠世沉积地层抬升遭受剥蚀,在峨眉地裂运动达到高潮背景下,盆地于晚二叠世发生海侵,进入长兴组后由于基底断块快速沉降而形

收稿日期:2018-02-08;修回日期:2018-03-24.

基金项目:国家科技重大专项课题“高过成熟天然气生成机理与源灶有效性评价”(编号:2016ZX05007-001)资助.

作者简介:邓焱(1993-),男,湖南邵阳人,硕士研究生,主要从事油气成藏研究.E-mail:371256523@qq.com.

通信作者:胡国艺(1968-),男,安徽桐城人,高级工程师,博士,主要从事天然气地质研究.E-mail:huguoyi69@petrochina.com.cn.

成开江—梁平海槽,边缘发育带状分布的边缘礁,这样,盆地即形成深水—浅水明显分异的沉积格局,以斜坡区过渡。早三叠世飞仙关组沉积受控于晚二叠世古构造格局,开始海退,主要以盆地充填为特征,台地及台缘广泛发育鲕粒滩沉积<sup>[1,3,7,14]</sup>。晚二叠世—早三叠世发育的长兴组—飞仙关组台缘生物礁滩气藏和广泛分布的台内浅滩气藏,勘探潜力大,主要沿开江—梁平海槽台缘两侧分布。其中,龙岗气

田(图 1)位于海槽西侧仪陇—平昌地区,华蓥山断裂带北西方向,为一个自南向北倾构造平缓的大单斜。该地区到晚三叠世以后由于四川盆地周围整体隆起抬升,转变为内陆湖盆沉积<sup>[1,15,16]</sup>。在台缘带控制下,从飞仙关组至长兴组,纵向上分布着多套含气层系。在后期印支、燕山、喜马拉雅运动的叠合构造背景影响下,油气藏发生了改造,并且由于喜马拉雅期气田的整体抬升使得气藏最终定型<sup>[5,7,14]</sup>。

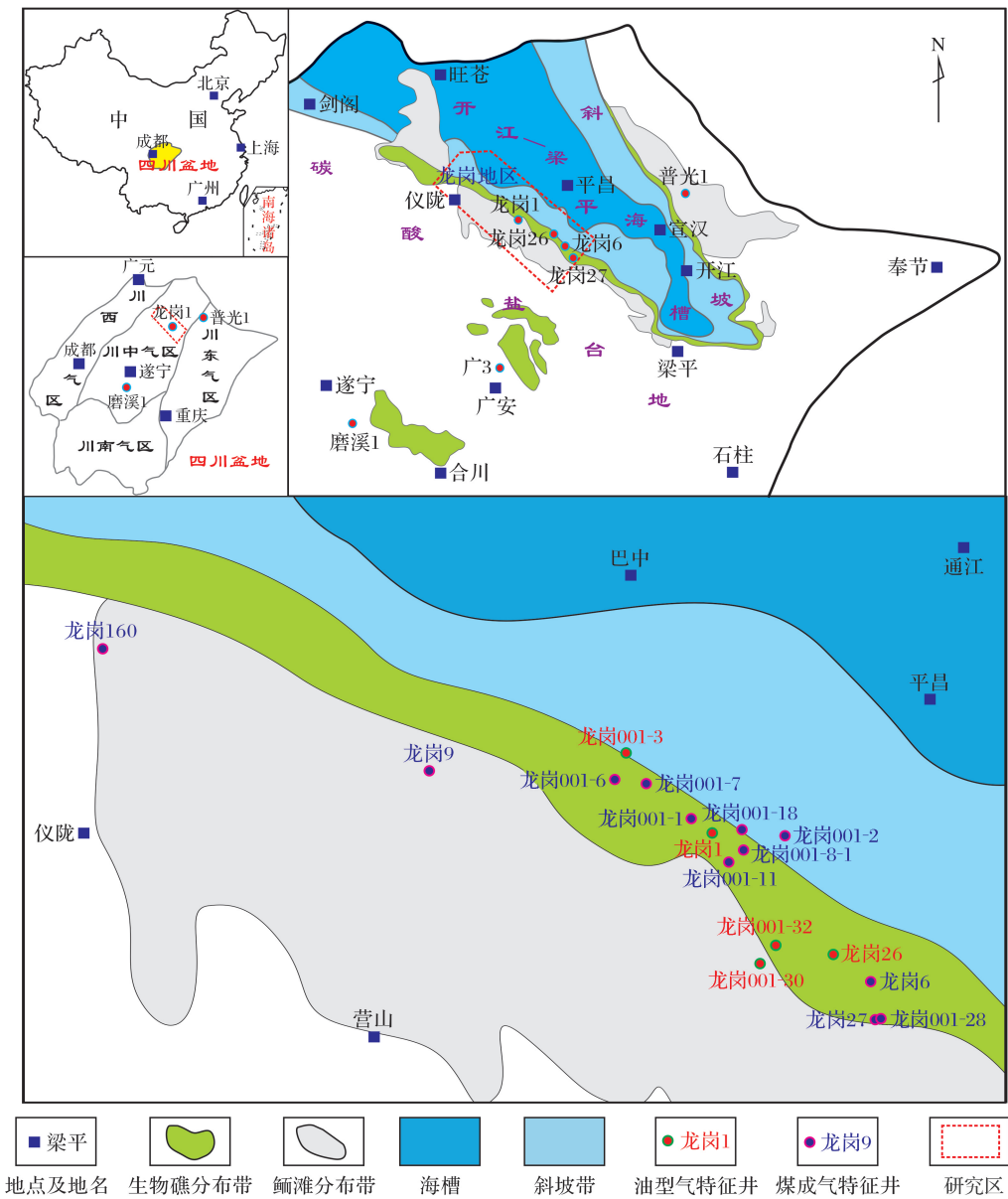


图 1 龙岗气田地质背景及取样井分布特征

Fig.1 The geological background and the distribution of sampled wells in Longgang Gasfield

2 实验条件

本文研究共采集 18 个天然气样品,样品均在井口分离后采取,采用 1L 的双头阀钢瓶,装样后进行

密封。测试在中国石油勘探开发研究院油气地球化学重点实验室完成。

天然气组分分析采用 Agilent GC6890N 气相色谱仪,以 He 作为载气,用双 TCD 检测器来进行

测试。天然气的碳、氢同位素测定在 Finnigan MAT-252 质谱仪上完成。碳同位素值是与 GBW04405 参考比较,给出相对 PDB 的值,其标准偏差为±0.04‰;氢同位素的分析标准为中国石油勘探开发研究院廊坊分院制定的新标准,给出相对 VSMOW 的值,其标准偏差为±0.3‰。天然气中轻烃(C<sub>5</sub>—C<sub>8</sub>)分析采用 HP5890 II 型气相色谱仪,色谱柱为 HP-PONA 毛细色谱柱(50m×0.2mm×0.5μm),载气为氦气。轻烃在天然气中含量一般比较低,但轻烃分析可以采用天然气直接进样方法,进样量一般为 10~15mL,用液氮冷阱在色谱柱前富集轻烃 5min。为尽可能多地检测到轻烃组分,色谱升温程序为初始温度 30℃,恒温 15min,然后分别以 1.5℃/min 程序升温至 70℃、3℃/min 程序升温至 160℃ 和 5℃/min 程序升温至 280℃,恒温

20min。色谱仪进样口温度 120℃,FID 检测器温度为 320℃。

### 3 天然气地球化学特征

#### 3.1 化学组分

龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气以烃类气体为主(表 1),其中甲烷(CH<sub>4</sub>)含量非常高,含量介于 88.4%~96.4%之间,重烃(C<sub>2</sub>—C<sub>4</sub>)气含量很低,乙烷(C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)含量多数在 0.1%以下,丙烷(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)和丁烷(C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)含量甚微或不含,因此天然气具有很高的干燥系数(C<sub>1</sub>/C<sub>1-5</sub>),分布在 0.92~1 之间,多数大于 0.99,为典型的干气。非烃气体中,CO<sub>2</sub> 及部分样品中 H<sub>2</sub>S 的含量较高,CO<sub>2</sub> 含量介于 0.85%~7.8%之间,平均为 4.20%,H<sub>2</sub>S 含量介于 0%~4.04%之间,平均为 0.97%,N<sub>2</sub> 含量相对较低,平均为 0.53%。

表 1 龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气样品地球化学参数

Table 1 The geochemical parameters of natural gases from the Changxing-Feixianguan Formations in Longgang Gasfield																
井号	层位	深度 /m	天然气组分/%									δ <sup>13</sup> C/‰				δD <sub>1</sub>
			C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	N <sub>2</sub>	C <sub>1</sub> /C <sub>1-5</sub>	δ <sup>13</sup> C <sub>1</sub>	δ <sup>13</sup> C <sub>2</sub>	δ <sup>13</sup> C <sub>3</sub>	δ <sup>13</sup> C <sub>CO<sub>2</sub></sub>	/‰
龙岗 173			95.14	3.40	0.87	0.31	0.20				0.95					
龙岗 9			91.19	5.11	1.87	0.48	0.07	0.85		0.44	0.92	-31.2	-26.3	-24.6	-2.0	-143.3
龙岗 160			95.63	2.17	0.35	0.05		1.57		0.18	0.97	-37.1	-27.6	-25.6	0.7	-189.8
龙岗 001-3	T <sub>1</sub> f	6 348~6 365	96.32	1.54	0.25	0.09		1.36		0.40	0.98	-29.3	-23.5	-21.4	0.3	-153.9
龙岗 001-1	T <sub>1</sub> f		95.38	0.07		0.01		3.87		0.67	1.00	-31.2	-27.3		-0.1	-140.7
龙岗 001-6	T <sub>1</sub> f		95.24	0.20	0.02	0.01		3.90		0.62	1.00	-37.8	-26.4		-0.2	-183.8
龙岗 001-7	T <sub>1</sub> f		94.39	0.48	0.01			2.49	1.75	0.85	0.99	-31.3	-26.6		1.1	-127.9
龙岗 001-2	P <sub>3</sub> ch	6 735~6 828	92.35	0.09	0.00			5.67	1.61	0.28	1.00	-31.6	-27.3		3.3	-127.5
龙岗 001-8-1	P <sub>3</sub> ch	6 261~6 364	96.26	0.12	0.01	0.10		3.13		0.38	1.00	-31.6	-27.0	-25.8	-3.0	-123.6
龙岗 1	T <sub>1</sub> f	6 055~6 124	95.42	0.08	0.00	0.00		3.89		0.62	1.00	-30.6	-32.3		-1.3	-149.9
龙岗 001-30	P <sub>3</sub> ch	6 238~6 346	88.40	0.06		0.10		7.68	3.37	0.39	1.00	-30.5	-26.5		4.2	-143.7
龙岗 001-32	T <sub>1</sub> f、P <sub>3</sub> ch	4 075~6 075	88.99	0.06				6.59	4.04	0.31	1.00	-31.4	-32.6		-1.5	-136.2
龙岗 001-26	P <sub>3</sub> ch	6 480.00	88.41	0.06	0.00			7.39	2.16	1.97	1.00	-30.0	-23.9		1.8	-148.0
龙岗 26	T <sub>1</sub> f、P <sub>3</sub> ch	5 536~5 796	93.78	0.06	0.40	0.99		4.63	0.15	0	0.98	-30.9	-26.3		2.2	-128.2
龙岗 6	T <sub>1</sub> f	4 781~4 889	94.13	0.06		0.01		4.34	0.89	0.57	1.00	-31.4	-25.6		0.4	-139.0
龙岗 27	T <sub>1</sub> f	5 170.00	90.71	0.08	0.37	0.16		6.32	1.86	0.51	0.99	-31.4			-0.2	-130.1
龙岗 001-28	P <sub>3</sub> ch		91.22	0.06		0.01		7.80	0.70	0.22	1.00	-30.8	-26.4		0.7	-150.8

#### 3.2 碳同位素特征

龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气甲烷碳同位素值的分布范围在-37.8‰~-29.3‰之间,平均值为-31.8‰,主体在-31.6‰~-29.3‰之间,普遍高于川西须家河组<sup>[17]</sup>及川东黄龙组<sup>[6]</sup>天然气的值,与准噶尔盆地煤成气<sup>[18]</sup>分布较为相似,但也有个别值处于须家河组及黄龙组、嘉陵江组分布范围内,除此之外总体呈现出高值特点。乙烷碳同位素

值在-32.6‰~-23.5‰之间,平均值为-26.8‰,主体介于-27.6‰~-23.5‰之间(<-28‰),值同样很高,且明显高于川东黄龙组油型气和嘉陵江组<sup>[6]</sup>混源气的值(图 2)。

总体来说,龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气甲烷、乙烷碳同位素值要略高于普光气田同层位天然气<sup>[2]</sup>而与邻区元坝气田天然气较为一致<sup>[19]</sup>,具有一定的可比性。气样的丙烷含量极低难以测定,大

部分样品不含丙烷,仅有4个样品测出丙烷的同位素值,分布在 $-25.8\text{‰} \sim -21.4\text{‰}$ 之间。从甲烷、乙烷及丙烷的碳同位素值关系来看,目的层天然气碳同位素大多表现出正序特征(图3),只有2个气样的烷烃碳同位素发生倒转( $\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2$ ),倒转幅度不大,说明其受次生改造作用影响小。

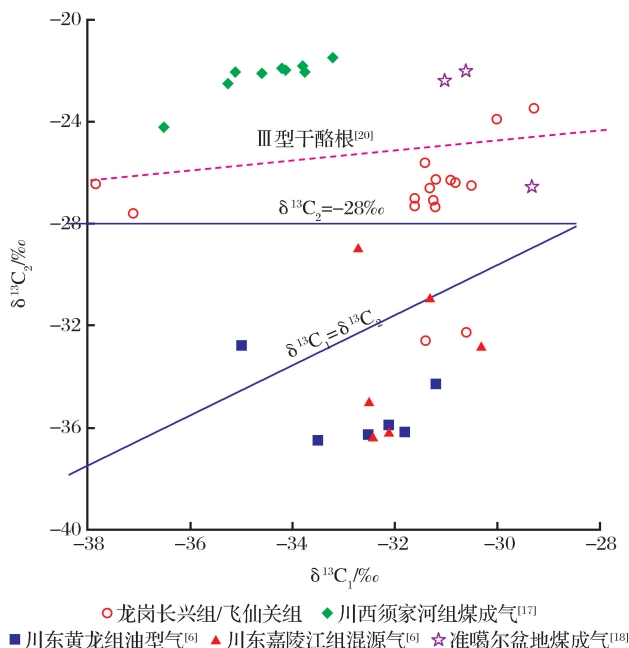


图2 龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气  
 $\delta^{13}\text{C}_1 - \delta^{13}\text{C}_2$  相关关系

Fig.2 The correlation diagram of carbon isotope ratios of methane and ethane in the Changxing-Feixianguan Formations in Longgang Gasfield

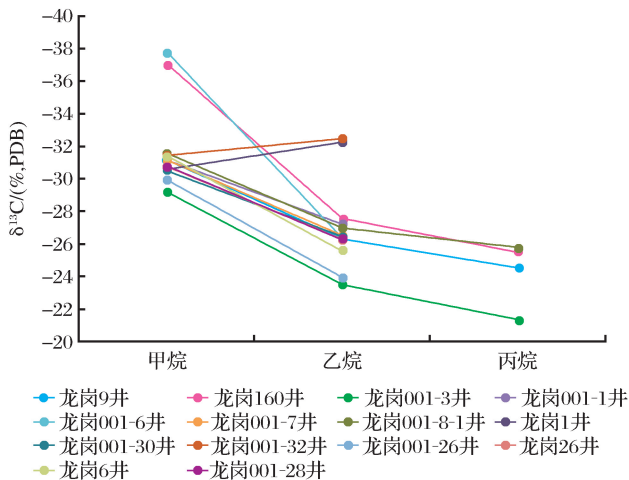


图3 龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气  
碳同位素系列折线

Fig.3 Line chart of carbon isotope for natural gases in the Changxing-Feixianguan Formations in Longgang Gasfield

同位素组成较高,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值介于 $-3.0\text{‰} \sim 4.2\text{‰}$ 之间,皆高于 $-8\text{‰}$ ,根据戴金星等<sup>[21]</sup>的 $\text{CO}_2$ 成因判别标准,无机成因的 $\text{CO}_2$ 才会具有如此之重的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值。

### 3.3 氢同位素特征

龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气的甲烷氢同位素值分布在 $-190\text{‰} \sim -124\text{‰}$ 之间,分布范围广,平均为 $-144.8\text{‰}$ ,值偏高,且大部分气样的甲烷氢同位素值大于 $-160\text{‰}$ ,集中分布于 $-154\text{‰} \sim -124\text{‰}$ 范围之内,说明其甲烷氢同位素也可能受到了成熟度的影响。

## 4 天然气成因

一直以来,气态烃稳定同位素地球化学特征作为判识天然气成因类型的重要依据而被广泛应用,轻烃化合物也在天然气地球化学示踪研究方面取得了重要进展。笔者将这二者联合应用于龙岗气田礁滩天然气示踪的研究中,借此对龙岗气田礁滩天然气成因及来源加以判识。

### 4.1 利用同位素特征判识天然气成因及来源

在甲烷、乙烷碳同位素应用中,人们普遍认为甲烷受母质热演化程度影响较大,主要反映天然气成熟度,演化程度越高甲烷碳同位素值越高;而乙烷碳同位素比较稳定并且对母源有良好的继承性,主要反映生烃母质类型,有许多学者对乙烷碳同位素的应用进行了研究,通常认为煤成气的 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值高于 $-28\text{‰}$ (或 $-29\text{‰}$ ),油型气的 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值低于 $-28\text{‰}$ (或 $-29\text{‰}$ )<sup>[22]</sup>。有关天然气氢同位素研究虽然起步较晚,但其在反映母质的沉积环境及成熟度方面具有重要意义,目前集中于甲烷氢同位素的研究<sup>[23]</sup>。

龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气具有异常高的干燥系数(多数 $>0.99$ ),碳同位素值偏高,甲烷碳同位素值平均为 $-31.8\text{‰}$ ,且多数高于 $-32\text{‰}$ ,由此说明天然气具有较高的成熟度。根据天然气 $\delta^{13}\text{C}_1 - \delta^{13}\text{C}_2$ 相关关系(图2),天然气主体处在 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值重于 $-28\text{‰}$ 的区域,初步判断其主体天然气类型应为煤成气,而且甲烷、乙烷的演化趋势基本一致,即随着天然气成熟度升高,甲烷的碳同位素值变高,乙烷的碳同位素值也随之变高,这与来自于Ⅲ型干酪根的天然气演化趋势一致<sup>[20]</sup>。但是,存在极少数天然气样品 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值略高于 $-28\text{‰}$ 而 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值偏低,同时,还存在极少数样品出现了碳同位素的倒转,与川东嘉陵江组混源气及川东黄龙组发生的碳同位素倒转都有一定可比性。由于龙岗气田礁滩气

龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气中 $\text{CO}_2$ 碳



藏中普遍存在固体沥青<sup>[24]</sup>,它们是来自志留系和上二叠统的古油藏原油裂解后的产物<sup>[1,7]</sup>,据赵文智等<sup>[1]</sup>的报道,龙岗气田台缘带的固体沥青为腐泥型来源的热成因焦沥青,因此与其同样是古油藏裂解产物的油型裂解气很有可能原地成藏混入在储层煤成气当中,从而造成烷烃碳同位素出现倒转的现象。而甲烷同位素偏轻的样品则有可能是来自原油的裂解气,混入到高一过成熟阶段的天然气中,因此乙烷碳同位素值偏重。从天然气甲烷碳同位素及甲、乙烷碳同位素差值对天然气成因的判识图(图4)中可以看出,龙岗气田天然气主体分布在煤成气趋势线附近,其应是源自于腐殖型干酪根,并有极少数样品呈油型气特征。

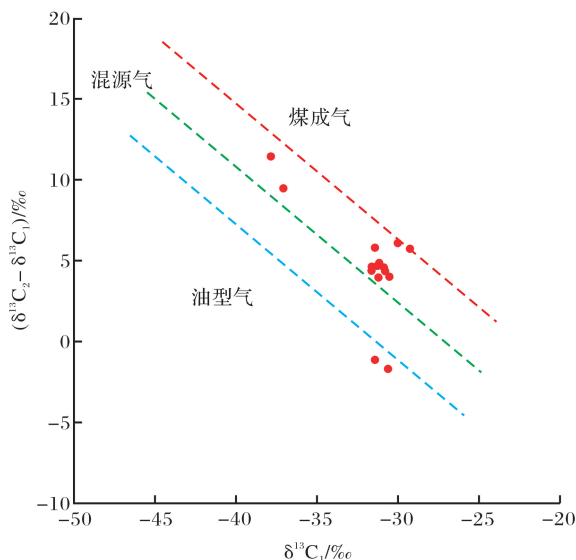


图4 龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气成因判识  
Fig.4 Genetic types of natural gas in the Changxing-Feixianguan Formations in Longgang Gasfield

根据龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气  $\delta^{13}\text{C}_1$  与  $\text{C}_1/\text{C}_{2+3}$  关系图版(图5),气样主要表现为热成因气特征,但此图版却不能很好地说明龙岗气田礁滩热成因天然气的母质来源。从图上看,龙岗气田礁滩天然气样品分布范围广,在Ⅱ型、Ⅲ型干酪根热成因气判别区域均有样本点落入,表现为煤成气与油型气混合的特点。但主体样品点落在接近Ⅱ型干酪根成因的天然气的区域中,表现出高成熟度的以腐泥型干酪根热成因气为主的特征,与之前利用  $\delta^{13}\text{C}_1 - \delta^{13}\text{C}_2$  相关关系判别研究区天然气主要为煤成气的结论有所出入,这很有可能是由于研究区天然气受高热演化程度的影响,干燥系数太大所致。

天然气甲烷的氢同位素组成主要与成熟度以及

母质的沉积环境有关。为了减小甲烷碳同位素在进行天然气示踪时存在的多解性的影响,结合甲烷氢同位素对龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气成因类型进行探讨。

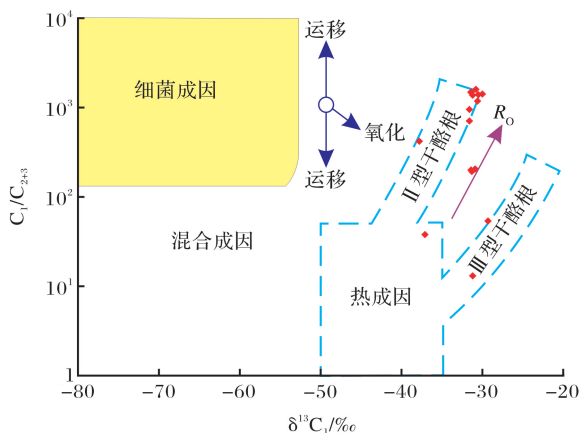


图5 龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气  $\delta^{13}\text{C}_1$  与  $\text{C}_1/\text{C}_{2+3}$  关系(底图据文献[25])  
Fig.5 The correlation diagram of  $\delta^{13}\text{C}_1 - \text{C}_1/\text{C}_{2+3}$  of gases in the Changxing-Feixianguan Formations in Longgang Gasfield(based on Ref.[25])

Wang 等<sup>[26]</sup>利用甲烷氢同位素对中国各盆地天然气的类型进行判识取得了较好效果。根据其所做  $\delta^{13}\text{C} - \delta\text{D}$  相关关系图版(图6),龙岗气田礁滩气藏天然气主要可以分成2类,主体为重  $\delta^{13}\text{C}_1$  与  $\delta\text{D}_1$  的天然气类型,且分布非常集中;少数样品为轻  $\delta^{13}\text{C}_1$  与  $\delta\text{D}_1$  类型。统计表明,四川盆地海相和陆相成因天然气其  $\delta\text{D}_1$  值大致以  $-150\text{‰}$  为界<sup>[19]</sup>,该区天然气  $\delta\text{D}_1$  值多在  $-150\text{‰}$  左右,表明其天然气的高成熟度及混合成因特征。

研究区天然气样品主体  $\delta^{13}\text{C}_1$  值较高且变化范围窄( $-31.6\text{‰} \sim -29.3\text{‰}$ ),而  $\delta\text{D}_1$  值的变化范围却比较宽,说明在高热演化程度的情况下,影响龙岗气田礁滩气藏天然气氢同位素分布的主要因素应为沉积环境。研究区天然气分布较宽的  $\delta\text{D}_1$  值是由于水介质盐度的变化引起,由此可知,天然气源岩的沉积水介质应处于动荡的海陆过渡相环境。

由于龙岗气田礁滩天然气具有很高干燥系数,  $\text{C}_2+$  组分含量甚微,因此利用甲烷和重烃的组分及碳同位素特征在对天然气成因来源时容易出现偏差<sup>[19]</sup>。并且龙岗气田礁滩体储层埋藏后被认为经历了有机酸的侵入及 TSR(硫酸盐热化学还原反应)作用,这些化学反应在促进储层溶蚀孔隙发育的同时,生成了  $\text{H}_2\text{S}$  及  $\text{CO}_2$  等酸性流体<sup>[7]</sup>,同时对  $\text{C}_2+$  烃类气体也很可能产生了影响。

4.2 利用轻烃地化特征判识天然气成因

利用天然气同位素组成对其成因类型进行判识时,由于受到成熟度及其地质条件等各种因素的影

响,很容易造成误判,因此本文利用轻烃中各类化合物与母质间的成因关系来对天然气的成因类型进行进一步研究。

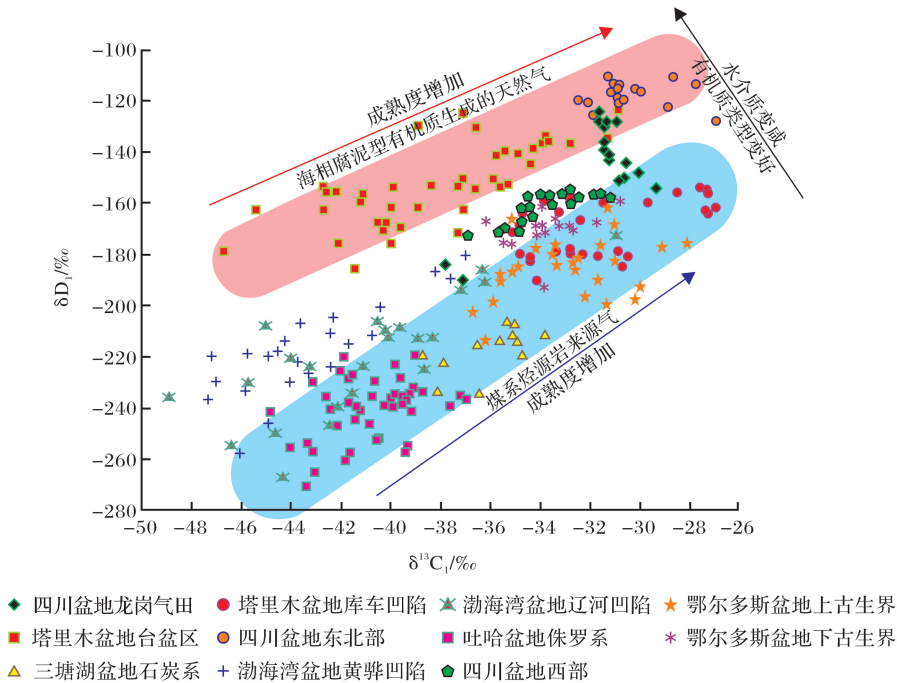


图 6 龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气碳—氢同位素组成分布特征(底图据文献[26])  
Fig.6 The distribution characteristics of carbon and hydrogen isotope compositionsof gases  
in the Changxing-Feixianguan Formations in Longgang Gasfield(based on Ref.[26])

应用轻烃组成判别天然气成因类型的指标很多,其中使用最为普遍且行之有效的方法便是利用C<sub>7</sub>轻烃系列(正庚烷 nC<sub>7</sub>、甲基环己烷 MCH、二甲基环戊烷 DMCP)和C<sub>5-7</sub>脂肪族(C<sub>5-7</sub>正构烷烃、C<sub>5-7</sub>异构烷烃、C<sub>5-7</sub>环烷烃)的组成特征来对2种成因的天然气进行区分<sup>[8-13]</sup>。

以正庚烷(nC<sub>7</sub>)、甲基环己烷(MCH)和各种结构的二甲基环戊烷(ΣDMCP)为顶点编制的三角图可以较好地应用于天然气成因类型判识<sup>[9-12]</sup>,这3种C<sub>7</sub>轻烃化合物的母源性质各不相同。其中,甲基环己烷(MCH)主要来源于腐殖型母质—高等植物木质素、纤维素和糖类等,是反映陆源母质类型的良好参数,热力学性质相对稳定<sup>[27]</sup>,它的大量存在是煤成气轻烃的一个重要特征;各种结构的二甲基环戊烷(ΣDMCP)主要来自水生生物类脂化合物,它的大量出现是油型气轻烃的一个特点<sup>[9]</sup>;正庚烷(nC<sub>7</sub>)的母源较复杂,主要来自细菌和藻类,也可来自高等植物的链状类脂体,对成熟度作用非常敏感<sup>[28]</sup>。

从相对组成来看(表2),龙岗气田天然气C<sub>7</sub>轻烃化合物中甲基环己烷占主要部分,相对含量介于35.54%~74.05%之间,平均为57.75%。而除个别样品外,各种结构的二甲基环戊烷和正庚烷的相对含量都比较低,前者全小于30%,平均为18.64%,后者含量分布在10.48%~48.83%之间,平均为23.61%。其C<sub>7</sub>轻烃化合物组成三角图如图7所示。由图可见,样品点主要分为2个部分,大部分样品点落在图的左下角,即甲基环己烷相对含量大于50%的范围内;小部分样品落在图的中下部,其各种结构的二甲基环戊烷相对含量除个别外都较低,都小于30%,而正庚烷和甲基环己烷的相对含量不相上下,都在40%左右。以胡国艺等<sup>[10]</sup>提出的C<sub>7</sub>轻烃化合物指标判识天然气成因类型的修改方案为依据,利用受其他因素影响较小的nC<sub>7</sub>相对含量和MCH相对含量来进行天然气类型判识,从图7中可以看出,大部分样品MCH相对含量较高,判断其为煤成气,而图的中下部小部分样品nC<sub>7</sub>相对含量偏高,判断其为油型气。

表 2 龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气样品轻烃参数

Table 2 The light hydrocarbon parameters of natural gases from the Changxing-Feixianguan Formations in Longgang Gasfield

井号	层位	深度/m	正庚烷 /%	异庚烷 /%	C <sub>5-7</sub> 轻烃化合物组成/%					
					<i>n</i> C <sub>7</sub>	DMCP	MCH	<i>n</i> C <sub>5-7</sub>	<i>i</i> C <sub>5-7</sub>	CYC <sub>5-7</sub>
龙岗 9			5.94	1.10	10.48	16.76	72.76	17.06	36.35	46.59
龙岗 160			6.39	1.58	13.13	20.32	66.55	19.37	42.12	38.51
龙岗 001-3	T <sub>1</sub> f	6 348~6 365	19.58	3.17	38.27	14.80	46.94	33.71	46.27	20.02
龙岗 001-1	T <sub>1</sub> f		7.76	1.21	13.50	27.04	59.46	11.45	48.55	40.00
龙岗 001-6	T <sub>1</sub> f		6.91	1.49	11.92	14.03	74.05	16.09	38.72	45.19
龙岗 001-7	T <sub>1</sub> f							9.90	73.20	16.90
龙岗 001-2	P <sub>3</sub> ch	6 735~6 828						14.95	73.20	11.84
龙岗 001-8-1	P <sub>3</sub> ch	6 261~6 364	10.15	0.90	16.43	21.67	61.90	16.33	32.59	51.08
龙岗 1	T <sub>1</sub> f	6 055~6 124						10.81	46.66	42.53
龙岗 001-30	P <sub>3</sub> ch	6 238~6 346	18.60	1.97	37.03	27.43	35.54	18.87	50.99	30.14
龙岗 001-32	T <sub>1</sub> f、P <sub>3</sub> ch	4 075~6 075	31.15	2.76	45.32	13.53	41.16	16.42	63.86	19.72
龙岗 001-26	P <sub>3</sub> ch	6 480						12.86	75.75	11.39
龙岗 26	T <sub>1</sub> f、P <sub>3</sub> ch	5 536~5 796	27.40	3.48	48.83	11.75	39.43	32.59	39.32	28.10
龙岗 6	T <sub>1</sub> f	4 781~4 889	8.78	0.94	14.19	21.40	64.42	13.36	39.52	47.12
龙岗 27	T <sub>1</sub> f	5170	6.69	0.95	10.65	16.29	73.06	12.86	22.06	65.08
龙岗 001-28	P <sub>3</sub> ch							5.38	40.85	53.77

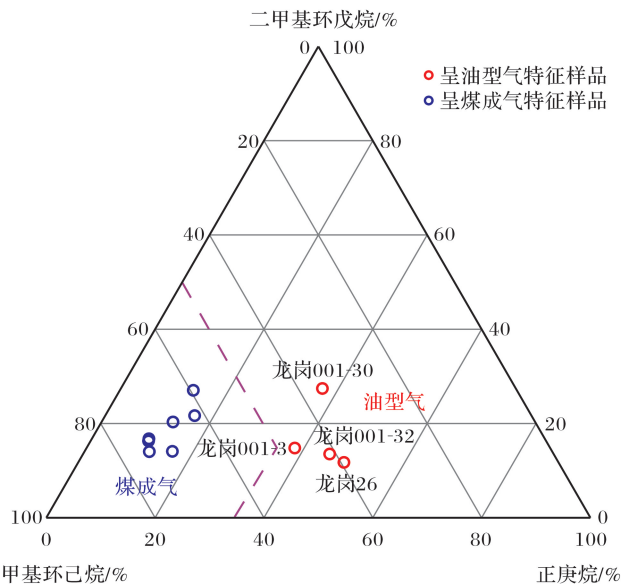


图 7 龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气 C<sub>7</sub> 轻烃化合物组成三角图(底图据文献[10])

Fig.7 Triangular plot of C<sub>7</sub> hydrocarbons of natural gases in the Changxing-Feixianguan Formations in Longgang Gasfield(based on Ref.[10])

C<sub>7</sub>轻烃系列另一应用于天然气成因判识的指标即为 C<sub>5-7</sub>正构烷烃、C<sub>5-7</sub>异构烷烃、C<sub>5-7</sub>环烷烃以及芳烃的相对含量组成<sup>[10]</sup>。源于腐泥型母质的轻烃组分中富含正构烷烃,源于腐殖型母质的轻烃组分

中则富含异构烷烃和芳烃<sup>[29]</sup>,富含环烷烃的轻烃也是陆源母质的重要特征。从龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气 C<sub>5</sub>—C<sub>7</sub>化合物正构烷烃、异构烷烃、环烷烃及芳烃的相对组成来看,异构烷烃的含量最高,介于16.5%~73.2%之间,平均为44%;其次为环烷烃,其含量介于10.7%~48.56%之间,平均为30.9%;而正构烷烃和芳烃的含量都相对较低,其中正构烷烃含量介于4.9%~27.6%之间,平均为14.6%,而芳烃含量最少,分布在0%~25.4%之间,超过半数样品小于10%,平均为10.6%。C<sub>6</sub>—C<sub>7</sub>化合物的链烷烃、环烷烃和芳烃相对组成也是链烷烃含量最高,分布在21%~92%之间,平均为51%;环烷烃含量次之,分布在8%~57%之间,平均为36%,芳烃含量最少,介于0%~27%之间,平均为13%。上述天然气 C<sub>5</sub>—C<sub>7</sub>化合物的组成特征表明其天然气应为陆相来源。

图 8 为以正构烷烃、异构烷烃和环烷烃的相对含量为三端元的三角图。从图 8 上可以看出,样品集中分布于三角图的下方,但绝大部分样品 C<sub>5</sub>—C<sub>7</sub>正构烷烃的含量小于20%,个别大于30%。根据胡国艺等<sup>[10]</sup>提出的成因类型划分,C<sub>5</sub>—C<sub>7</sub>正构烷烃相对含量大于30%的区域划为油型气,而 C<sub>5</sub>—C<sub>7</sub>正构

烷烃相对含量都小于 30% 的区域为煤成气,可以看出,龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气主体为煤成气,部分为油型气。

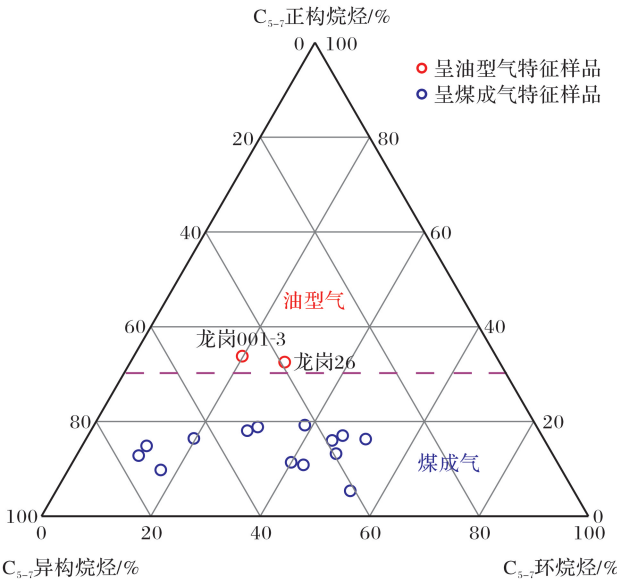


图 8 龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气 C<sub>5</sub>—C<sub>7</sub> 轻烃组成三角图(底图据文献[10])

Fig.8 Triangular plot of C<sub>5</sub>—C<sub>7</sub> hydrocarbons of natural gases in the Changxing-Feixianguan Formations in Longgang Gasfield(based on Ref.[10])

利用轻烃信息对天然气成因判别的结果显示龙岗气田礁、滩天然气藏主要为来自腐殖型干酪根的煤

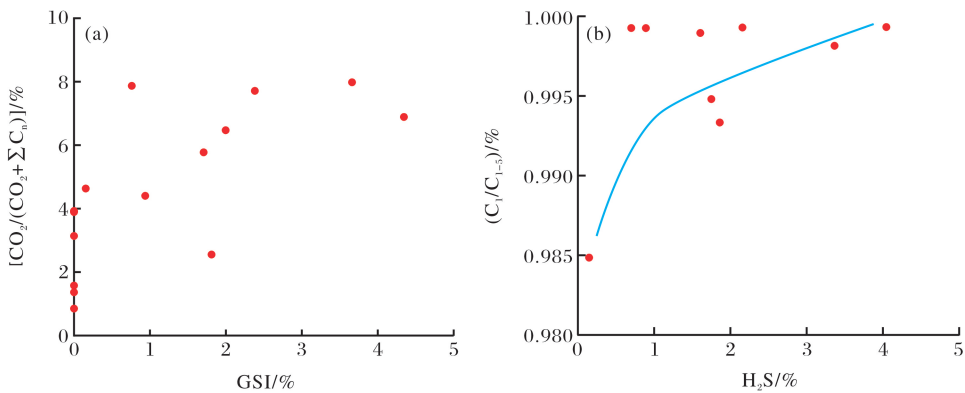


图 9 龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气中 GSI 与 CO<sub>2</sub>/(CO<sub>2</sub> + ΣC<sub>n</sub>)、H<sub>2</sub>S 含量与 C<sub>1</sub>/C<sub>1-5</sub> 的关系

Fig.9 Relationship of GSI and CO<sub>2</sub>/(CO<sub>2</sub> + ΣC<sub>n</sub>), H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub> for natural gases in the Changxing-Feixianguan Formations in Longgang Gasfield

值主体较大,但仍有部分样品 GSI 值偏小,说明研究区天然气虽有经历过 TSR 反应,却并不普遍。而从龙岗气田天然气 H<sub>2</sub>S 含量与烃类组分关系(图 9)可知,重烃气随 H<sub>2</sub>S 增加虽有降低的趋势,但该地区无论高含硫化氢气样还是低含硫化氢气样的干燥系数都非常高,如此小的变化空间不能说明其随着

成气,并存在少量油型气。这与利用天然气碳、氢同位素组成进行成因判识的结论基本一致,说明利用轻烃地球化学特征能很好地判别研究区礁滩气藏天然气来源。

### 4.3 TSR 作用对天然气的影响

四川盆地开江—梁平海槽两侧地区上二叠统一下三叠统礁、滩体高含硫化氢的气藏普遍被认为是遭受了硫酸盐热化学还原(TSR)作用改造,导致天然气组成中甲烷含量高、重烃含量低,并且 H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub> 非烃气体含量高<sup>[6,19,30-32]</sup>。TSR 是指在一定温度下硫酸盐与有机质或烃类作用,将硫酸盐矿物还原生成 H<sub>2</sub>S 及 CO<sub>2</sub> 气体<sup>[33-36]</sup>,方程式一般为:

烃类 + CaSO<sub>4</sub> → CaCO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>S + H<sub>2</sub>O ± CO<sub>2</sub> ± S (1)

虽然海槽西侧气藏中天然气组分与海槽东侧有一定区别,川东北地区飞仙关组天然气 H<sub>2</sub>S 含量一般在 10% 以上<sup>[6]</sup>,远高于海槽西侧,但是龙岗气田礁、滩气藏具备发生 TSR 反应的条件,并且 H<sub>2</sub>S 含量高的样品重烃气含量较低(表 1),反映 TSR 作用消耗重烃的选择性。本文将从天然气的地球化学特征来分析 TSR 作用对天然气组分的影响,并不涉及对 TSR 反应机理的讨论。

气体酸性指数 GSI[H<sub>2</sub>S/(H<sub>2</sub>S + ΣC<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub>)]是常用来表征 TSR 作用程度的参数<sup>[19,30,36]</sup>。从图 9 可知,龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气 GSI

硫化氢含量变化而发生变化,只能说明研究区长兴组及飞仙关组天然气普遍很干,烃源岩和储层所处的地温和热演化程度较高。

#### 4.3.1 TSR 作用对烃类气体的影响

TSR 反应消耗了烃类中的重烃气,并产生甲烷、有机 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 等气体,这些酸性气体又能通



过溶蚀碳酸盐岩的方式生成无机  $\text{CO}_2$ ,从而改变天然气中烃类及非烃类的组成<sup>[32,34,37]</sup>。但无论天然气中非烃气体之间发生何种转化,均可以应用 $(\text{H}_2\text{S}+\text{CO}_2)/(\text{H}_2\text{S}+\text{CO}_2+\sum\text{C}_n)$ 值来描述发生 TSR 反应的程度<sup>[30,38]</sup>。通过龙岗气田长兴组—飞仙关组

天然气 $(\text{H}_2\text{S}+\text{CO}_2)/(\text{H}_2\text{S}+\text{CO}_2+\sum\text{C}_n)$ 与  $\delta^{13}\text{C}_1$  及  $\delta^{13}\text{C}_2$  的关系(图 10)可知,随 $(\text{H}_2\text{S}+\text{CO}_2)/(\text{H}_2\text{S}+\text{CO}_2+\sum\text{C}_n)$ 的增加,天然气的  $\delta^{13}\text{C}_1$  值及  $\delta^{13}\text{C}_2$  值均略有上升趋势,但同位素的改变并不明显,说明反应程度较低。

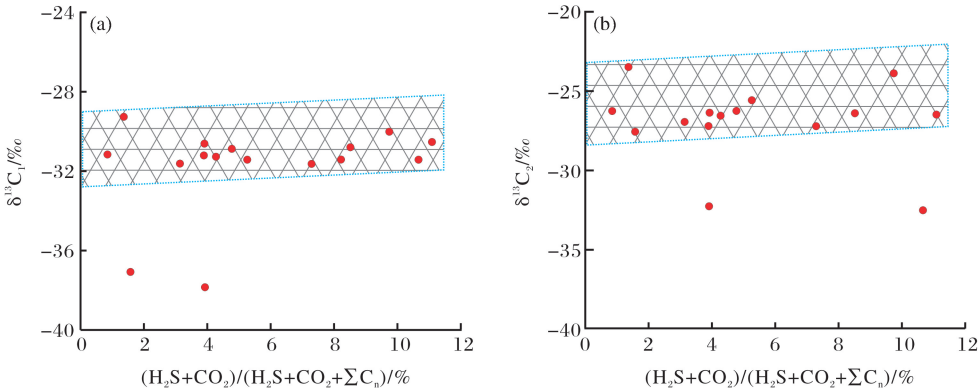


图 10 龙岗气田含  $\text{H}_2\text{S}$  天然气 $(\text{H}_2\text{S}+\text{CO}_2)/(\text{H}_2\text{S}+\text{CO}_2+\sum\text{C}_n)$ 与  $\delta^{13}\text{C}_1$  和  $\delta^{13}\text{C}_2$  的关系  
Fig.10 Relationship between  $(\text{H}_2\text{S}+\text{CO}_2)/(\text{H}_2\text{S}+\text{CO}_2+\sum\text{C}_n)$  and  $\delta^{13}\text{C}_1, \delta^{13}\text{C}_2$  for  $\text{H}_2\text{S}$  bearing natural gases in Longgang Gasfield

4.3.2 TSR 作用对  $\text{CO}_2$  的影响及  $\text{CO}_2$  的来源

研究表明 TSR 反应生成的  $\text{CO}_2$  中的碳主要来自烃类,受 C—C 键断裂过程的分馏效应影响,生成的  $\text{CO}_2$  应具有较轻的碳同位素而残余烃类碳同位素组成较重<sup>[32,39,40]</sup>。从龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气 $(\text{H}_2\text{S}+\text{CO}_2)/(\text{H}_2\text{S}+\text{CO}_2+\sum\text{C}_n)$ 以及  $\text{CO}_2$

含量与  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值之间的关系(图 11)来看,两者之间呈一定的正相关关系,说明随  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CO}_2$  含量的增加, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值有变高的趋势,并未随 TSR 反应的进行而变低。而该区天然气的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值的分布介于  $-3.0\text{‰}\sim 4.2\text{‰}$ 之间,也显示为无机来源。

目前对于四川盆地高含  $\text{H}_2\text{S}$  天然气中  $\text{CO}_2$  的

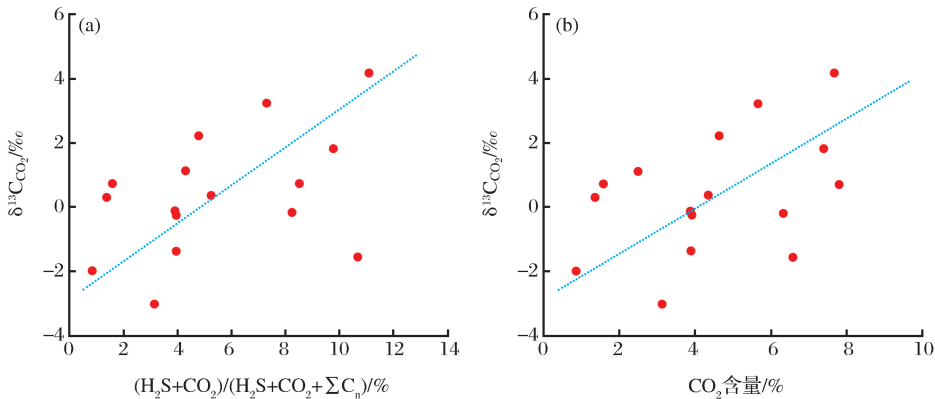


图 11 龙岗气田天然气 $(\text{H}_2\text{S}+\text{CO}_2)/(\text{H}_2\text{S}+\text{CO}_2+\sum\text{C}_n)$ 、 $\text{CO}_2$  含量与  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  的关系  
Fig.11 Relationship of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  and  $(\text{H}_2\text{S}+\text{CO}_2)/(\text{H}_2\text{S}+\text{CO}_2+\sum\text{C}_n)$ ,  $\text{CO}_2$  for natural gases in the Changxing-Feixianguan Formations in Longgang Gasfield

来源问题仍未达成统一,但多数学者认为其主要是来自于受 TSR 影响下的碳酸盐岩储层的溶蚀分解作用<sup>[38,39,41,42]</sup>。TSR 作用使得天然气中  $\text{CO}_2$  变化非常复杂,在 TSR 过程中产生大量的有机  $\text{CO}_2$  及  $\text{H}_2\text{S}$ ,之后这些  $\text{CO}_2$  会与硫酸盐中的金属离子反

应,碳同位素组成较轻的  $\text{CO}_2$  优先参与形成次生方解石沉淀,使得残留有机  $\text{CO}_2$  碳同位素值变高而碳酸盐中碳同位素组成变轻<sup>[6]</sup>,同时 TSR 反应生成的酸性气体溶于气藏中地层水,使水的 pH 值减小,地层水酸性增强,对碳酸盐岩储层有较强的腐蚀作用,

生成无机  $\text{CO}_2$ 。结合研究区较重的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  的分布来看,这些  $\text{CO}_2$  应该是由酸性气体对储集层的溶蚀产生。 $(\text{H}_2\text{S}+\text{CO}_2)/(\text{H}_2\text{S}+\text{CO}_2+\sum\text{C}_n)$  以及  $\text{CO}_2$  含量与  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值之间的正相关关系也正是说明随 TSR 反应进行,生成的酸性气体越来越多,储层溶蚀也越强烈,导致  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值增高。然而,龙岗气田礁、滩天然气  $\text{H}_2\text{S}$  含量、GSI 值均小于 5% (表 1),远低于川东北其他高含硫化氢气田,表明其经历的 TSR 反应程度较低,甚至不含  $\text{H}_2\text{S}$  的天然气中  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值也很高(图 10),这与 TSR 作用产生大量酸性气体参与储层反应是矛盾的,因此肯定还有其他来源的无机  $\text{CO}_2$ 。刘全有等<sup>[39]</sup>认为川东北地区那些含量小于 5.0%,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值小于 -2‰ 的无机  $\text{CO}_2$  来自碳酸盐岩热分解,但多数学者认为该区碳酸盐岩储层所经历的最高温度(200℃ 以上)<sup>[6,43]</sup> 尚不足以使其发生分解<sup>[41,42]</sup>,除非基底断裂活动导致深部热流体向上充注对储层产生溶蚀<sup>[1]</sup>,否则可以排除这一来源。而根据刘景东等<sup>[30]</sup>的报道,在低  $\text{H}_2\text{S}$  含量的天然气中,烃源岩热演化过程中产生的高浓度有机酸与碳酸盐岩储层之间反应是研究区无机  $\text{CO}_2$  的重要来源。

综上所述可知研究区虽经历过较弱的 TSR 反应,但是对天然气组成、烷烃碳同位素等的改变不甚明显,因此利用同位素判识天然气成因结果不会受后期 TSR 反应的影响。但是 TSR 作用对龙岗气田礁、滩天然气的综合影响仍值得探讨。

#### 4.4 天然气成熟度

国内外众多学者对甲烷碳同位素值和其烃源岩成熟度( $R_o$ )关系进行了研究,并针对不同地质背景、不同类型有机质等制约条件提出了各具代表性的  $\delta^{13}\text{C}_1-R_o$  回归方程,由此可以利用天然气的碳同位素对探区气源岩性质及成熟度进行推断<sup>[21]</sup>。根据戴金星等<sup>[44]</sup>提出的  $\delta^{13}\text{C}_1-R_o$  回归方程(即煤成气:  $\delta^{13}\text{C}_1 = 14.12\text{Lg}R_o - 34.39$ ; 油型气:  $\delta^{13}\text{C}_1 = 15.8\text{Lg}R_o - 42.20$ )对龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气的成熟度进行计算。结果表明,研究区天然气对应的成熟度  $R_o$  值介于 1.57%~2.31% 之间,处于高过成熟阶段。

轻烃组分中烷烃、环烷烃和芳烃对成熟度演化具有不同程度的敏感度,因此轻烃组分能应用于天然气成熟度研究。Thompson<sup>[45]</sup>首次提出利用庚烷值和石蜡指数(异庚烷值)这 2 项轻烃参数表征原油成熟度,并将原油划分成 4 种不同成熟度类型。根据天然气中脂肪族与芳香族组成特征也可以判别油

气的成因类型<sup>[46]</sup>。由于天然气母质结构不同,主要来自腐殖型干酪根的煤成气更富芳香族组成,而主要来自腐泥型干酪根的油型气更富脂肪族组成<sup>[47,48]</sup>。国内外许多学者<sup>[48-52]</sup>根据不同研究区地质条件提出了不同的庚烷值和异庚烷值成熟度鉴别标准,并取得了良好的应用效果。

利用庚烷值—异庚烷值关系图对龙岗气田礁、滩天然气母质类型及成熟度进行判别(图 12),可以看出,天然气样品分为 2 个区域,主体为前述煤成气样品(即甲基环己烷大于 50%),落在芳香族曲线两侧,可以推测其母质为腐殖型干酪根;少量油型气样品(即甲基环己烷小于 50%)分布较为分散,推测其母质为腐泥型干酪根。

按照 Thompson 划分的成熟度判别标准<sup>[46,49]</sup>: 以 0.8 和 16 分别确定为生物降解和低熟的划定界限,2.2 和 22 分别为低熟和成熟的界限,5 和 30 分别为成熟和高熟的界限。根据上述标准,研究区煤成气样品正庚烷值为 5.94%~10.15%,异庚烷值为 0.90%~1.58%,属于低熟—成熟气,而油型气落在了高成熟气的范围。这与前述判别结果及地质背景不相吻合。根据王培荣等<sup>[53]</sup>的报道,次生蚀变以及混源作用是改变轻烃正、异庚烷值的重要原因。因此研究区礁滩体进入埋藏阶段后发生的 TSR 作用,并且天然气多期、混合成藏都可能是造成样品点成熟度判别出现问题的原因。

为进一步确定研究区天然气成熟度,结合应用效果较好的成熟度指标  $\delta^{13}\text{C}_1$  值,做出庚烷值— $\delta^{13}\text{C}_1$  值关系图(图 12)。从图上可知,龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气样品主要落在了高成熟范围,与实际情况吻合,证实了该区天然气为高成熟的正确性。

总体来说,龙岗气田天然气同位素、轻烃化合物组成复杂,其组分呈现出低成熟与高成熟天然气并存,煤成气与油型气并存的特征,并且以高成熟的煤成气为主。研究区天然气地球化学组分受到了不同成烃母质、后期演化蚀变以及源岩沉积环境等条件共同控制,导致其干燥系数非常高,甲烷碳、氢同位素组成重以及出现部分碳同位素倒转(表 1)。

## 5 天然气来源

龙岗气田礁滩储层之下发育多套烃源岩,包括下寒武统筇竹寺组海相泥页岩、上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组泥岩、下二叠统栖霞组—茅口组海相泥质碳酸盐岩、上二叠统龙潭组海—陆过渡相

泥质岩和煤系以及海槽区与礁滩体同沉积的大隆组泥岩。这 5 类烃源岩都有可能对气藏有贡献<sup>[1-2,5-7]</sup>。同时储层孔隙中大量的热成因焦沥青也是分析天然气来源时不可忽视的部分<sup>[2,4]</sup>。目前多数学者都认为龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气是来自于龙潭组煤系<sup>[1,5,7,19]</sup>。从本文研究的天然气地球化学特征来看,龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气以煤成气为主,因此其主要来源可能就是龙潭组煤系烃源岩,但是其中混入的小部分油型气来源仍需探讨。从龙

岗气田长兴组—飞仙关组天然气乙烷—储层沥青—烃源岩干酪根的碳同位素对比(图 13)来看,烃源岩干酪根的碳同位素分布差异明显,从下至上  $\delta^{13}\text{C}$  值由低增高。而储层沥青的  $\delta^{13}\text{C}$  值分布较宽,在  $-32.3\text{‰} \sim -28.4\text{‰}$  之间,主体偏高,与志留系、下二叠统、上二叠统龙潭组、大隆组干酪根皆有亲缘关系,可能是这些烃源岩中的腐泥—偏腐泥质混合型有机质生成的液态烃裂解产物。

四川盆地上二叠统龙潭组是一套区域性的海陆

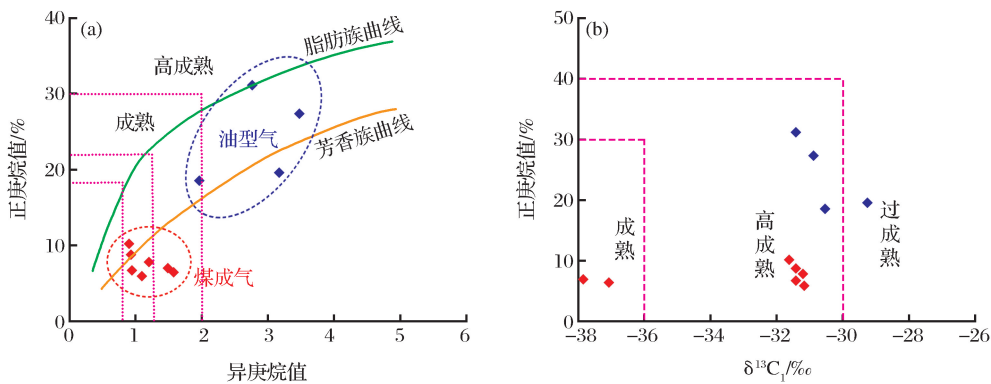


图 12 天然气轻烃 H—I(底图据文献[46])、甲烷碳同位素和庚烷值(底图据文献[49])判识图

Fig.12 H-I index of light hydrocarbons(based on Ref.[46]) and  $\delta^{13}\text{C}_1$ -heptane index of natural gases (based on Ref.[49])

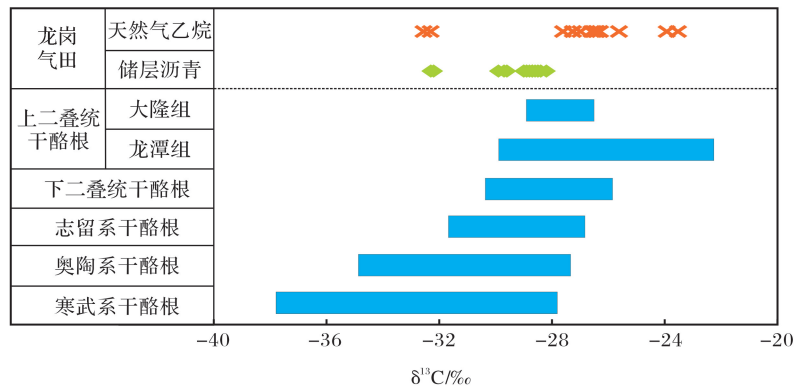


图 13 龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气乙烷—储层沥青—烃源岩干酪根  $\delta^{13}\text{C}$  值对比 (干酪根数据引自文献[4,54],储层沥青数据引自文献[5])

Fig.13 The comparison chart of the  $\delta^{13}\text{C}$  value between ethane in natural gases in the Changxing-Feixianguan Formations, reservoir bitumen(based on Refs.[4,54]) and source rock kerogens(based on Ref.[5]) in Longgang Gasfield

交互相含煤建造的泥页岩,与上二叠统长兴组储层之间呈“面状”接触,为四川盆地重要的烃源岩<sup>[55]</sup>。其烃源岩厚度大,有机质丰度高,生烃量非常可观,泥质岩厚 10~150m,平均厚度约为 49m,其中暗色泥质岩厚度多大于 20m,有机质丰度多在 3%~5%之间,有机质类型以 II 型为主<sup>[2]</sup>,煤层在研究区的分布如图 14 所示,厚度一般为 2~10m,在川中—川南地区厚度较大,女基井厚达 17.5m,有机质类型以 III

型为主, $R_o$  值在 1.91%~2.74%之间,进入了高成熟演化阶段,是本区重要的气源岩<sup>[56]</sup>。海槽中的大隆组发育富含 II 型有机质的硅质泥岩及黑色泥岩,其厚度约为 30m,有机碳含量均值为 4.08%,是一套很好的烃源岩层<sup>[57]</sup>。志留系烃源岩和下二叠统栖霞组—茅口组海相烃源岩与上部长兴组—飞仙关组储层之间有厚层的上二叠统龙潭组泥质岩层封隔,导致源—储配置关系不好。从全区来看,志留系

烃源岩生成的烃类更多地运移至石炭系储层,而下二叠统内部也发育良好的储层,烃源岩所生烃类则更多的以自生自储的方式保存。因此,志留系、下二

叠统干酪根虽在碳同位素分布上与储层沥青、天然气乙烷之间有亲缘关系,但这两者对于研究区长兴组—飞仙关组的天然气来源的贡献应该很小。

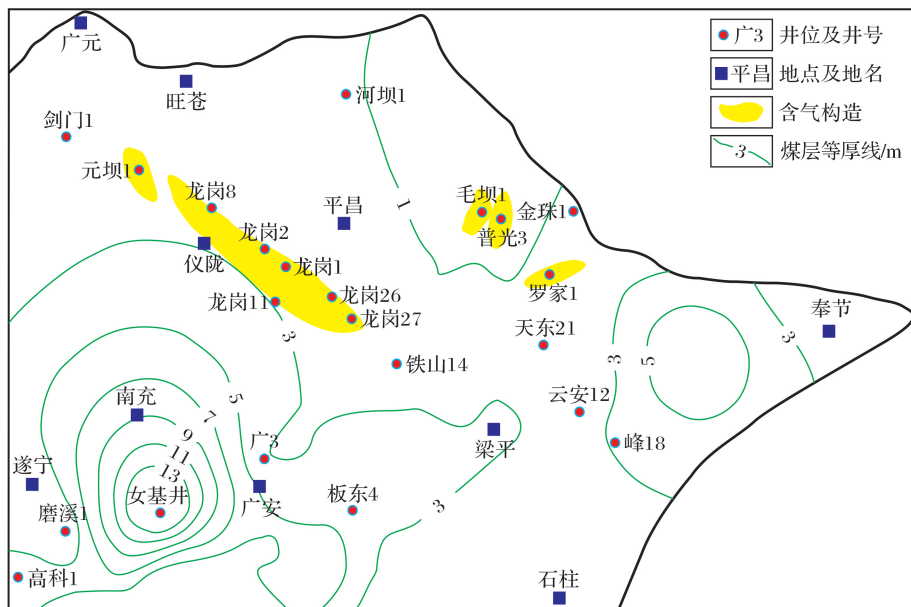


图 14 川中地区上二叠统龙潭组煤系厚度分布特征(根据文献[58],修改)

Fig.14 Thickness distribution of P<sub>2</sub>l coal in mid Sichuan Basin(based on Ref.[58])

天然气生成过程中存在碳同位素的分馏变化。一般来说,天然气  $\delta^{13}\text{C}_2$  值低于母岩干酪根  $\delta^{13}\text{C}$  值  $1\text{‰} \sim 2\text{‰}$ , 固体沥青  $\delta^{13}\text{C}$  值则可与干酪根  $\delta^{13}\text{C}$  值直接对比<sup>[1]</sup>。由龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气乙烷与烃源岩干酪根  $\delta^{13}\text{C}$  值对比(图 13)可以看出,乙烷  $\delta^{13}\text{C}$  值基本与上二叠统烃源岩干酪根的  $\delta^{13}\text{C}$  值分布区间对应,结合前述天然气地球化学特征及烃源岩发育分布情况,研究区煤成气应来自于上二叠统龙潭组煤系气源岩。而储层固体沥青  $\delta^{13}\text{C}$  值主体也是与上二叠统烃源岩  $\delta^{13}\text{C}$  值对应,结合烃源岩分布及储层沥青的生物标志化化合物的特点,长兴组和飞仙关组储层沥青中有关藿烷及三环萜烷的参数值与龙潭组源岩类似<sup>[2]</sup>,因此这些沥青主要来自于上二叠统龙潭组烃源岩中偏腐泥型有机质,不排除大隆组黑色泥岩提供烃源补充。然而,仍有极少数沥青样品  $\delta^{13}\text{C}$  值偏小,对应于志留系烃源岩  $\delta^{13}\text{C}$  值分布区域,但是龙岗气田缺乏与下部志留系沟通的深大断裂系统<sup>[7]</sup>,这些沥青是否与志留系烃源岩有关仍存在疑问。因此,龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气中混入的油型气主要来自于上二叠统泥质烃源岩。

从本文研究的井位分布(图 1)来看,样品中呈油型气特征所在的井和呈煤成气特征所在的井并没

有明显的分布规律,即呈油型气特征的井不一定靠近海槽区泥质烃源岩,同样呈煤成气特征的井也不一定更靠近台地区煤系源岩。这可能主要是由于龙岗气田构造平缓,“一礁一滩一藏”特征明显,源储间仅靠小规模断层及高角度裂缝沟通,储层侧向变化大且互不连通所致<sup>[1,7]</sup>。

根据轻烃成熟度参数及甲烷同位素估算的天然气成熟度特征(图 6,图 12)和天然气成因分析,可知气样主要分为 3 个部分,因此龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气至少应该存在 3 期成藏,即成熟煤成气充注阶段、高一过熟煤成气充注阶段和高温原油裂解气充注阶段。这与赵文智等<sup>[1]</sup>通过对礁、滩储层流体包裹体研究得出的结论类似。

事实上,二叠系腐泥型烃源岩于中三叠世进入生油门限,晚三叠世进入生油高峰,腐殖型干酪根则处于热解作用阶段,以生成凝析油为主;中侏罗世烃源岩达高成熟演化阶段,龙潭煤系开始大量生气,且随着油气藏埋深增大及温度升高,液态烃类开始发生裂解形成小分子烃类,并逐渐裂解为干气成为油型气的补充,古气藏开始形成。在晚侏罗世—白垩世烃源岩演化至过成熟阶段<sup>[2]</sup>。喜马拉雅运动使四川盆地的沉积盖层全面褶皱,而龙岗气田礁滩体未受破坏,气水分布最终调整定型<sup>[54,56]</sup>。



## 6 结论

四川盆地龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气组分以烃类为主,其中又以甲烷占主导,为典型的干气; $\text{CO}_2$ 及 $\text{H}_2\text{S}$ 等非烃气体含量丰富,分别介于0.85%~7.8%之间和0%~4.04%之间;而天然气中甲烷和乙烷的碳同位素组成素较重, $\delta^{13}\text{C}_1$ 值介于-37.8‰~-29.3‰之间,平均值为-31.8‰, $\delta^{13}\text{C}_2$ 值介于-32.6‰~-23.5‰之间,平均为-26.8‰,除个别样品碳同位素倒转外,普遍具正序特征,氢同位素组成分布较广,主体较重,值分布于-154‰~-124‰之间。

天然气轻烃中主体具有高甲基环己烷,低正构烷烃,低芳香烃的特点,生气母质类型主要为腐殖型,但个别样品甲基环己烷含量稍低,且正构烷烃含量稍高,具油型气特征,结合天然气同位素特征以及储层沥青特征,表明龙岗气田长兴组—飞仙关组天然气主体为煤成气,并存在少量原油裂解成因的油型气。

结合 $\text{H}_2\text{S}$ 含量和干燥系数、气体酸性指数及 $(\text{H}_2\text{S}+\text{CO}_2)/(\text{H}_2\text{S}+\text{CO}_2+\sum\text{C}_n)$ 值等参数,反映龙岗气田天然气经历过较弱的硫酸盐热化学还原作用改造。其 $\text{CO}_2$ 气体为无机成因,来源于酸性流体与碳酸盐岩储层的反应。

天然气轻烃庚烷值和天然气中甲烷碳同位素值的相关关系以及据 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值计算的天然气母质成熟度均说明研究区天然气处于高一过成熟阶段,这与龙潭组煤系气源岩演化阶段一致。

气源对比结果表明,龙岗气田长兴组—飞仙关组气藏中主体煤成气主要为上二叠统龙潭组煤系气源岩干酪根裂解形成,而少量的油型气则主要是上二叠统泥质烃源岩生成的原油裂解形成,并且天然气存在3期成藏过程。

## 参考文献(References)

- [1] Zhao Wenzhi, Xu Chunchun, Wang Tongshan, *et al.* Comparative study of gas accumulations in the Permian Changxing Reefs and Triassic Feixianguan oolitic reservoirs between Longgang and Luoiazhai-Puguang in the Sichuan Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(28/29): 2404-2412.  
赵文智, 徐春春, 王铜山, 等. 四川盆地龙岗和罗家寨—普光地区二、三叠系长兴—飞仙关组礁滩体天然气成藏对比研究意义[J]. 科学通报, 2011, 56(28/29): 2404-2412.
- [2] Ma Yongsheng. Geochemical characteristics and origin of natural gases from Puguang Gasfield on eastern Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(1): 1-6.
- [3] Wang Yigang, Hong Haitao, Xia Maolong, *et al.* Exploration of reef-bank gas reservoirs surrounding Permian and Triassic troughs in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(1): 22-27.  
王一刚, 洪海涛, 夏茂龙, 等. 四川盆地二叠、三叠系环海槽礁、滩富气带勘探[J]. 天然气工业, 2008, 28(1): 22-27.
- [4] Duan Jinbao, Li Pingping. Gas Exploration of Reef-bank Gas Reservoirs of Permian and Triassic Formations in Sichuan Basin[C]. Kunming: National Annual Meeting of Natural Gas, 2013: 153-160.  
段金宝, 李平平. 四川盆地二叠系、三叠系礁滩天然气勘探[C]. 昆明: 全国天然气学术年会, 2013: 153-160.
- [5] Qin Shengfei, Yang Yu, Lv Fang, *et al.* The gas origin in Changxing-Feixianguan gas pools of Longgang Gasfield in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(1): 41-49.  
秦胜飞, 杨雨, 吕芳, 等. 四川盆地龙岗气田长兴组和飞仙关组气藏天然气来源[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(1): 41-49.
- [6] Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo. Characteristics and source of natural gas in the Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(2): 234-246.  
朱光有, 张水昌, 梁英波. 四川盆地天然气特征及气源[J]. 地学前缘, 2006, 13(2): 234-246.
- [7] Zou Caineng, Xu Chunchun, Wang Zecheng, *et al.* Geological characteristics and forming conditions of the large platform margin reef-shoal gas province in the Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6): 641-651.  
邹才能, 徐春春, 汪泽成, 等. 四川盆地台缘带礁滩大气区地质特征与形成条件[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 641-651.
- [8] Hu Tili, Ge Baoxiong, Zhang Yigang, *et al.* The development and application of fingerprint parameters for hydrocarbons absorbed by source rocks and light hydrocarbons in natural gas[J]. Experimental Petroleum Geology, 1990, 12(4): 376-393.  
胡惕麟, 戈葆雄, 张义纲, 等. 源岩吸附烃和天然气轻烃指纹参数的开发和应用[J]. 石油实验地质, 1990, 12(4): 376-393.
- [9] Dai Jinxing. Identification of coal formed gas and oil type gas by light hydrocarbons[J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(5): 26-32.  
戴金星. 利用轻烃鉴别煤成气和油型气[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(5): 26-32.
- [10] Hu Guoyi, Li Jian, Li Jin, *et al.* Preliminary study on the origin identification of natural gas by parameters of light hydrocarbon[J]. Science in China: Series D, 2007, 37(2): 111-117.  
胡国艺, 李剑, 李谨, 等. 判识天然气成因的轻烃指标探讨[J]. 中国科学: D辑, 2007, 37(2): 111-117.
- [11] Hu Guoyi, Wang Weisheng, Liao Fengrong. Geochemical characteristics and its influencing factors of light hydrocarbon in coal-derived gas: A case study of Sichuan Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3): 905-915.  
胡国艺, 汪为胜, 廖凤蓉. 煤成气轻烃地球化学特征及其影响

- 因素——以四川盆地须家河组为例[J].岩石学报,2012,28(3):905-915.
- [12] Hu Guoyi, Li Jin, Li Zhisheng, *et al.* Composition and carbon isotopic distribution characteristics of light hydrocarbon in coal-derived gas and natural gas exploration[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(1): 42-47.
- 胡国艺, 李谨, 李志生, 等. 煤成气轻烃组分和碳同位素分布特征与天然气勘探[J]. 石油学报, 2010, 31(1): 42-47.
- [13] Duan Yi, Zhao Yang, Yao Jingli, *et al.* Research advance and tendency of light hydrocarbon geochemistry[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(12): 1875-1887.
- 段毅, 赵阳, 姚泾利, 等. 轻烃地球化学研究进展及发展趋势[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(12): 1875-1887.
- [14] Wang Zecheng, Zhao Wenzhi, Zhang Lin, *et al.* The Tectonic Sequence and Gas Exploration in the Sichuan Basin[M]. Beijing: Geology Publishing House, 2002.
- 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.
- [15] Wang Zecheng, Zou Caineng, Tao Shizhen, *et al.* Analysis on tectonic evolution and exploration potential in Dabashan Foreland Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(6): 23-28.
- 汪泽成, 邹才能, 陶士振, 等. 大巴山前陆盆地形成及演化与油气勘探潜力分析[J]. 石油学报, 2004, 25(6): 23-28.
- [16] Tang Dan, Study on Sequence Stratigraphy and Reservoir Characteristics of Feixianguan Formation of Longgang Area in Northeast Sichuan Basin[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012: 8-14.
- 唐丹. 川东北龙岗地区飞仙关组层序地层与储层特征研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2012: 8-14.
- [17] Wang Shunyu, Ming Qiao, Huang Ling, *et al.* Study on geochemical characteristics of fluids and reservoir connectivity of Xujiahe Formation in Qiongsi Gasfield, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(6): 789-792.
- 王顺玉, 明巧, 黄玲, 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.
- [18] Han Zhongxi, Li Jian, Gou Yanxia, *et al.* The application of methane and ethane carbon isotopes as an identification index for gas origin study[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(4): 665-671.
- 韩中喜, 李剑, 垢艳侠, 等. 甲、乙烷碳同位素用于判识天然气成因类型的讨论[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(4): 665-671.
- [19] Wu Xiaoli, Liu Guangxiang, Liu Quanyou, *et al.* Geochemical characteristics and genetic types of natural gas in the Changxing-Feixianguan Formations from Yuanba Gasfield in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(11): 2155-2165.
- 吴小奇, 刘光祥, 刘全有, 等. 四川盆地元坝气田长兴组—飞仙关组天然气地球化学特征及成因类型[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(11): 2155-2165.
- [20] Jenden P D, Kaplan I R, Poreda R, *et al.* Origin of nitrogen-rich natural gases in the California Great Valley: Evidence from helium, carbon and nitrogen isotopes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52(4): 851-861.
- [21] Dai Jinxing, Dai Chunsen, Song Yan, *et al.* Inorganic genetic carbon dioxide gas accumulations and their characteristics in east part of China[J]. *China Offshore Oil and Gas: Geology*, 1994, 8(4): 215-222.
- 戴金星, 戴春森, 宋岩, 等. 中国东部无机成因的二氧化碳气藏及其特征[J]. 中国海上油气: 地质, 1994, 8(4): 215-222.
- [22] Dai Jinxing. Significance of the study on carbon isotopes of alkane gases[J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(12): 1-5.
- 戴金星. 天然气中烷烃气碳同位素研究的意义[J]. 天然气工业, 2011, 31(12): 1-5.
- [23] Liu Wenhui, Wang Xiaofeng, Tenger, *et al.* Research progress of gas geochemistry during the past decade in China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2013, 32(3): 279-288.
- 刘文汇, 王晓峰, 滕格尔, 等. 中国近十年天然气示踪地球化学研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(3): 279-288.
- [24] Wang Tongshan, Geng Ansong, Sun Yongge, *et al.* Geochemical characteristics of solid bitumen in reservoir and their implication for the origin of natural gas of Feixianguan Formation in northeastern Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(2): 340-346.
- 王铜山, 耿安松, 孙永革, 等. 川东北飞仙关组储层固体沥青地球化学特征及其气源指示意义[J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 340-346.
- [25] Bernard B B, Brooks J M, Sackett W M. Natural gas seepage in the Gulf of Mexico[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1976, 31(1): 48-54.
- [26] Wang X, Liu W, Shi B., Hydrogen isotope characteristics of thermogenic methane in Chinese sedimentary basins[J]. *Organic Geochemistry*, 2015, (83/84): 178-189.
- [27] Galimov E M. Isotope organic geochemistry[J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(10): 1200-1262.
- [28] Dai Jinxing, Ni Yunyan, Huang Shipeng, *et al.* Significant function of coal-derived gas study for natural gas industry development in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(1): 1-22.
- 戴金星, 倪云燕, 黄士鹏, 等. 煤成气研究对中国天然气工业发展的重要意义[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(1): 1-22.
- [29] Dai Jinxing. Origin identification of different types of alkane gas[J]. *Science in China: Series B*, 1992, 22(2): 185-193.
- 戴金星. 各类烷烃气的鉴别[J]. 中国科学: B 辑, 1992, 22(2): 185-193.
- [30] Liu Jingdong, Liu Guangxiang, Wang Liangshu, *et al.* Geochemical characteristics and origin of Permian and Triassic natural gas in Yuanba-Tongnanba area, northeastern Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(3): 417-426.
- 刘景东, 刘光祥, 王良书, 等. 川东北元坝—通南巴地区二叠系—三叠系天然气地球化学特征及成因[J]. 石油学报, 2014, 35(3): 417-426.
- [31] Cai C, 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(1/2): 39-57.
- [32] Cai C, Xie Z, Worden R H, *et al.* Methane-dominated thermochemical sulphate reduction in the Triassic Feixianguan Formation, east Sichuan Basin, China; towards prediction of fatal H<sub>2</sub>S concentrations[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 20(10): 1265-1279.
- [33] Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, *et al.* Isotopic evidence of TSR origin for natural gas bearing high H<sub>2</sub>S contents within the Feixianguan Formation of the northeastern Sichuan Basin, southwestern China[J]. *Science in China; Series D*, 2005, 35(11): 1037-1046.
- 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 川东北地区飞仙关组高含 H<sub>2</sub>S 天然气 TSR 成因的同位素证据[J]. *中国科学: D 辑*, 2005, 35(11): 1037-1046.
- [34] Krouse H R, Vial C A, Eliuk L S, *et al.* Chemical and isotopic evidence of thermochemical sulfate reduction by light hydrocarbon gases in deep carbonate reservoirs[J]. *Nature*, 1988, 333: 415-419.
- [35] Machel H G, Krouse H R, Sassen R. Products and distinguishing criteria of bacterial and thermochemical sulfate reduction[J]. *Applied Geochemistry*, 1995, 10(4): 373-389.
- [36] Worden R H, Smalley P C, Oxtoby N H. Gas souring by thermochemical sulfate reduction at 140°C [J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(6): 854-863.
- [37] Worden R H, Smalley P C. H<sub>2</sub>S-producing reactions in deep carbonate gas reservoirs: Kuff Formation, Abu Dhabi [J]. *Chemical Geology*, 1996, 133(1-4): 157-171.
- [38] Liu Quanyou, Jin Zhijun, Liu Wenhui, *et al.* TSR impact on abnormal carbon and hydrogen stable isotopes in sour natural gas from marine carbonate gas fields in the eastern Sichuan Basin[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(3): 471-479.
- 刘全有, 金之均, 刘文汇, 等. 四川盆地东部天然气地球化学特征与 TSR 强度对异常碳、氢同位素影响[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34(3): 471-479.
- [39] Liu Quanyou, Jin Zhijun, Gao Bo, *et al.* Origin of sour gas in the northeastern Sichuan Basin and fate action of Thermochemical Sulfate Reduction (TSR) to natural gas[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(8): 1195-1200.
- 刘全有, 金之均, 高波, 等. 川东北地区酸性气体中 CO<sub>2</sub> 成因与 TSR 作用影响[J]. *地质学报*, 2009, 83(8): 1195-1200.
- [40] Pan C, Yu L, Liu J, *et al.* Chemical and carbon isotopic fractionations of gaseous hydrocarbons during abiogenic oxidation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 246(1/2): 70-89.
- [41] Wu Xiaoqi, Dai Jinxing, Liao Fengrong, *et al.* Origin and source of CO<sub>2</sub> in natural gas from the eastern Sichuan Basin[J]. *Science in China; Geosciences*, 2013, 43(4): 503-512.
- 吴小奇, 戴金星, 廖凤蓉, 等. 四川盆地东部天然气中 CO<sub>2</sub> 的成因和来源[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(4): 503-512.
- [42] Wang Wanchun, Zhang Xiaobao, Luo Houyong, *et al.* Carbon isotopic characteristics of hydrocarbons and CO<sub>2</sub> of H<sub>2</sub>S-rich natural gases and their origin in northeastern Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(1): 136-141.
- 王万春, 张晓宝, 罗厚勇, 等. 川东北地区富含 H<sub>2</sub>S 天然气烃类与 CO<sub>2</sub> 碳同位素特征及其成因[J]. *天然气地球化学*, 2011, 22(1): 136-141.
- [43] Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, *et al.* Effectiveness of thermochemical sulfate reduction on oil and gas industry—a H<sub>2</sub>S formation accelerating development of the secondary pores in reservoirs[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(3): 142-148.
- 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. TSR(H<sub>2</sub>S)对石油天然气工业的积极性研究—H<sub>2</sub>S 的形成过程促进储层次生孔隙的发育[J]. *地学前缘*, 2006, 13(3): 142-148.
- [44] Dai Jinxing, Qi Houfa.  $\delta^{13}\text{C-R}_O$  correlation of the coal-formed gas in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1989, 34(9): 690-692.
- 戴金星, 戚厚发. 我国煤成烃的  $\delta^{13}\text{C-R}_O$  关系[J]. *科学通报*, 1989, 34(9): 690-692.
- [45] Thompson K F M. Light hydrocarbons in subsurface sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, 43(5): 657-672.
- [46] Thompson K F M. Classification and thermal history of petroleum based on light hydrocarbons[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983, 47(2): 303-316.
- [47] Dai Jinxing, Pei Xigu, Qi Houfa. *Natural Gas Geology in China* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992: 1-149.
- 戴金星, 裴锡古, 戚厚发. *中国天然气地质学* [M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 1-149.
- [48] Wang Peng, Shen Zhongmin, Liu Sibing, *et al.* The geochemical characteristics and comparison of the terrestrial natural gas in Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(6): 1186-1195.
- 王鹏, 沈忠民, 刘四兵, 等. 四川盆地陆相天然气地球化学特征及对比[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(6): 1186-1195.
- [49] Shen Ping, Wang Xiaofeng, Wang Zhiyong, *et al.* Geochemical characteristics of light hydrocarbons in natural gases from the Turpan-Hami Basin and identification of low-mature gas[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(23): 2307-2311.
- 沈平, 王晓峰, 王志勇, 等. 吐哈盆地天然气轻烃地球化学特征与低熟气判识[J]. *科学通报*, 2010, 55(23): 2307-2311.
- [50] Chen Jianfa, Miao Zhongying, Zhang Chen, *et al.* Geochemical characteristics of light hydrocarbons in natural gas in the Taibei Uplift of the Tarim Basin and their implications[J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(3): 271-276.
- 陈践发, 苗忠英, 张晨, 等. 塔里木盆地塔北隆起天然气轻烃地球化学特征及应用[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(3): 271-276.
- [51] Gao Lili, Zhang Min, Zhao Hongjing, *et al.* Geochemical characteristics of light hydrocarbon in natural gas from Lishu Fault Depression in Songliao Basin [J]. *Natural Gas Geosci-*

- ence, 2011, 22(4): 709-713.
- 高丽丽, 张敏, 赵红静, 等. 松辽盆地南部梨树断陷天然气轻烃地球化学研究[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(4): 709-713.
- [52] Cheng Keming, Jin Weiming, Xiang Zhonghua, *et al.* Composition characteristics of light hydrocarbons in continental oil and condensate and their geological significance[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1987, 14(1): 33-34.
- 程克明, 金伟明, 向忠华, 等. 陆相原油及凝析油的轻烃单体烃组成特征及地质意义[J]. 石油勘探与开发, 1987, 14(1): 33-34.
- [53] Wang Peirong, Xu Guanjun, Zhang Daijiang, *et al.* Problems with application of heptane and isoheptane values as light hydrocarbon parameters[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(1): 121-127.
- 王培荣, 徐冠军, 张大江, 等. 常用轻烃参数正、异庚烷值应用中的问题[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(1): 121-127.
- [54] Zhang Qi, Wen Long, Xu Liang, *et al.* Types and gas accumulation patterns of large Permian and Triassic carbonate gas reservoirs in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(1): 33-38.
- 张奇, 文龙, 徐亮, 等. 四川盆地二、三叠系碳酸盐岩大气田类型及其成藏规律[J]. 天然气工业, 2012, 32(1): 33-38.
- [55] Wei Zhifu, Wang Yongli, Wu Chenjun, *et al.* Geochemical characteristics of source rock from Upper Permian Longtan Formation in Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(8): 1613-1618.
- 魏志福, 王永莉, 吴陈君, 等. 四川盆地上二叠统龙潭组烃源岩的地球化学特征及对有机质来源和沉积环境的指示意义[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(8): 1613-1618.
- [56] Xie Zengye, Wei Guoqi, Li Jian, *et al.* Reservoir characteristics and accumulation modes of large carbonate gas fields in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(1): 29-38.
- 谢增业, 魏国齐, 李剑, 等. 中国海相碳酸盐岩大气田成藏特征与模式[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 29-38.
- [57] Chen Ruiyin, Zhu Guangyou, Zhou Wenbao, *et al.* Geochemical characteristics and hydrocarbon resource potential of Dalong Formation Permian, northeast Sichuan [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(1): 99-107.
- 陈瑞银, 朱光有, 周文宝, 等. 川北地区大隆组烃源岩地球化学特征与生气潜力初探[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(1): 99-107.
- [58] Guoyi Hu, Cong Yu, Deyu Gong, *et al.* The origin of natural gas and influence on hydrogen isotope of methane by TSR in the Upper Permian Changxing and the Lower Triassic Feixianguan Formations in northern Sichuan Basin, SW China [J]. *Energy Exploration and Exploitation*, 2014, 32(1): 139-158.

## Geochemical characteristics and origin of natural gas in Changxing-Feixianguan Formations from Longgang Gasfield in the Sichuan Basin, China

Deng Yan, Hu Guo-yi, Zhao Chang-yi

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The natural gases reservoired in the Changxing and Feixianguan Formations of Longgang Gasfield in the Sichuan Basin are mainly composed of alkane gases which are dominated by methane with an extremely high dryness coefficient, and the non-hydrocarbon gases mainly consist of CO<sub>2</sub> gas, with a relative low content of H<sub>2</sub>S and N<sub>2</sub> gases. The values of carbon and hydrogen isotopes in methane are relatively high, only a few samples display positive carbon isotopic series ( $\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2$ ). And the C<sub>6</sub>-C<sub>7</sub> light hydrocarbon components in natural gases are generally rich in methyl cyclohexane but poor in n-alkane and arenes. The gases have been altered by thermochemical sulfate reduction slightly, which has less influence on the alteration of natural gases components and carbon isotopes of alkane, and most of the CO<sub>2</sub> are inorganic and were derived from the interaction between acidic fluid and carbonate reservoirs. Based on the characteristics of stable carbon and hydrogen isotope compositions and light hydrocarbons of the natural gases, the analysis of the study shows the natural gases are mainly composed of coal-related gases of high to over maturity, mixed with a small amount of oil-type gases. The comprehensive correlation of carbon isotope value distribution in ethane, bitumen and source rock kerogens have determined that the most part of the natural gases of Longgang Gasfield are coal-derived gas, which are generated by the coal measure strata in the Permian Longtan Formation, and the rest of the gases are oil cracked gases derived from the sapropelic-prone source rocks in the Upper Permian.

**Key words:** Longgang Gasfield; Changxing-Feixianguan Formations; Geochemical characteristics; Light hydrocarbon; Gas-source correlation