

# 东方 1-1 气田天然气运移地球化学特征

黄志龙 柳广弟 郝石生

(石油大学 北京 100083)

**提 要** 本文通过莺歌海盆地东方 1-1 气田天然气地球化学特征的研究,探讨了天然气运移的地球化学指标。研究表明,低分子正构烷烃、异构烷烃与正构烷烃比值、芳烃与链状烷烃比值、 $\Delta R_3$  参数、同位素及非烃组分可作为较好的天然气运移地球化学指标。这些地球化学指标在垂向上的变化规律显示了东方 1-1 气田天然气垂向运移的特点。

**关键词** 天然气 油气运移 莺歌海盆地

**分类号** P 618.130.1

**第一作者简介** 黄志龙 男 34岁 副教授 石油地质

莺歌海盆地东方 1-1 气田是我国海上的第二大气田,气源被认为主要是深部梅山组—三亚组以下的烃源岩,天然气运移以垂向运移为其主要特征。在垂向运移过程中,由于受运移、分馏作用的影响,天然气会发生一系列变化参数,这些变化可作为运移地球化学指标。

## 1 烃类组分变化特征

在运移作用占主导地位时,烃类组分遵循一定规律变化

### 1.1 低分子正构烷烃

沿运移方向上,  $CH_4$  的相对含量逐渐增加,重烃组分 ( $C_2$ ) 逐渐减少。这是由于  $CH_4$  具有最强的渗透、扩散能力,而矿物和岩石对重烃组分具有较强的吸附保留能力,因此,可用以下参数来描述运移层析效应和分馏现象:  $C_2$  (%)、 $C_1/C_2$  重烃、 $C_2$  重烃含量 (%)、 $C_2/C_3$  等。

东方 1-1 气田天然气通过垂向运移至上覆莺—黄组砂岩储层中,从下部测试层 DST2 (1 431~1 452.5 m)到顶部测试层 DST4 (1 284~1 296 m),甲烷含量从 25.80% 增加到 76.39%,  $C_1/C_2 \sim C_3$  从 26.33 上升到 38.01 (表 1)。东方 1-1 气田 (2 井) 的运移特点与地质情况是吻合的,东方 1-1 气田是莺歌海盆地中央泥拱带一个与泥底壁有关的短轴背斜构造气藏,由于泥拱运动将深部天然气涌到浅部储层之后,气以扩散和渗滤方式向上运移,烃类组分的

垂向差异主要反映了垂向运移的特点。

### 1.2 分子相同而结构不同的组分

对于分子量相同的组分 (如  $iC_4 \sim nC_4$ ), 分子有效直径较小者 (如  $iC_4 = 5.278 \text{ \AA}$ ) 与矿物岩石表面的作用力也相对较弱,而分子有效直径大者 (如  $nC_4 = 5.784 \text{ \AA}$ ), 其极性较大,另一方面  $iC_4$  的扩散系数亦比  $nC_4$  的扩散系数大<sup>[1]</sup>。因此,在运移因素占主导地位时,  $iC_4/nC_4$  在运移方向上呈增加趋势。

东方 1-1 气田垂向运移剖面上,从深部至浅部,  $iC_4/nC_4$  由 1.38 增加到 1.47 (表 1, 图 1)。

### 1.3 芳烃与链状烷烃

苯是芳香环结构分子,  $nC_6$  是链状结构,从而决定了苯的极性比  $nC_6$  强。对于极性强的组分,在运移过程中将易被岩石吸附,它的速率相对较慢,某些强极性组分,由于岩石对它们的吸附力很强,可能永远滞留在运移途中;而一些极性较弱的组分,由于岩石对它们的吸附较弱,其迁移速率相对较快,因此,在运移过程中,苯 /  $nC_6$  值减小。

在东方 1-1 气田垂向运移剖面上,苯 /  $nC_6$  值有类似变化规律,由深部到浅部,该比值由 1.66 降为 0.73 (表 1, 图 1)。

### 1.4 $\Delta R_3$ 参数

$$\Delta R_3 = \frac{|R_3 - R_4|}{R_4}$$

式中  $R_3 = iC_4/nC_4$ ;  $R_4 = iC_4/nC_6$

由于  $R_3(iC_4/nC_4)$ 、 $R_4(iC_4/nC_3)$ 受母质类型影响较大,而将  $R_3$ 、 $R_4$ 按公式组合后, $\Delta R_3$ 值受母质类型的影响就大大减小。随运移距离增加, $R_3$ 不断增大, $R_4$ 不断减小。 $R_3$ 与 $R_4$ 之差绝对值 $|R_3 - R_4|$

也呈增加趋势,分子项与分母项呈相反趋势变化,使得沿运移方向 $\Delta R_3$ 增大的幅度加大,更能反映运移的变化特点。

表 1 东方 1-1气田 (2井)天然气垂向运移的地化参数

Table 1 Geochemical parameters of the vertical migration of natural gases in the Dongfang 1-1 gasfield

测试号	深度 (m)	相对密度	CO <sub>2</sub> (%)	CH <sub>4</sub> (%)	C <sub>2</sub> ~C <sub>5</sub> (%)	$\frac{C_1}{C_2 \sim C_5}$	$\frac{iC_5}{nC_5}$	$\frac{\text{苯}}{nC_6}$	运移方向
DST4	1 284~ 1 296	0.673	1.01	76.39	2.01	38.01	1.47	0.73	
DST3	1 331~ 1 361.5	1.174	57.32	30.82	1.36	22.66	1.41	0.63	↑
DST2	1 431~ 1 452.5	1.239	66.66	25.80	0.98	26.33	1.38	1.66	

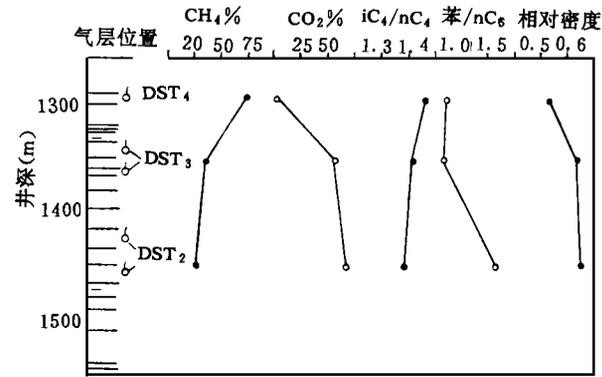


图 1 东方 1-1气田 (2井)天然气组分参数变化趋势图

Fig. 1 Variations of natural gas component parameters with depth in the Dongfang 1-1 gasfield

深至浅的测试 (DST2 DST3 DST4)研究表明, $iC_4/nC_4$ 值变化为  $0.9918 \rightarrow 1.0833 \rightarrow 1.4074$ ,而 $\Delta R_3$ 值的变化为  $3.57 \rightarrow 4.83 \rightarrow 7.52$

## 2 同位素的分馏效应

天然气在运移过程中,同位素组成将发生分馏作用,沿着运移方向  $\delta^{13}C_1$ 、 $\delta^{13}C_2$ 值逐渐变轻,C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub>烷烃系列同位素也呈递减趋势,但往往变化较C<sub>1</sub>同位素平缓

莺歌海盆地东方 1-1气田 2井 DST2气层 (1 431 ~ 1 452.2 m)向 DST4气层 (1 284 ~ 1 296 m), $\delta^{13}C_1$ 从  $-33.2\text{‰}$ 降为  $-35.8\text{‰}$ , $\delta^{13}C_2$ 从  $-119\text{‰}$ 减小到  $-136\text{‰}$ ,同时C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub>烷烃系列同位素亦呈平缓递减的趋势, $\delta^{13}C_2$ 从  $-24.8\text{‰} \rightarrow -25.4\text{‰}$ , $\delta^{13}C_3$ 从  $-24.7\text{‰} \rightarrow -27.8\text{‰}$ , $\delta^{13}C_4$ 从  $-23.8\text{‰} \rightarrow -24.0\text{‰}$ (表 2)

东方 1-1气田 (2井)是典型的垂向运移实例,由

表 2 东方 1-1气田 (2井)天然气垂向运移同位素组成变化

Table 2 Isotopic variations of the vertical migration of natural gases in the Dongfang 1-1 gasfield

测试号	深度 (m)	$\delta^{13}C_1$ (‰)	$\delta^{13}C_2$ (‰)	$\delta^{13}C_3$ (‰)	$\delta^{13}C_4$ (‰)	$\delta^{13}C_1$ (‰)	$\delta^{13}C_{CO_2}$ (‰)	运移方向
DST4	1 284~ 1 296	-35.8	-25.4	-27.8	-24.0	-136	-15.5	↑
DST3	1 331~ 1 361.5	-32.6	-25.7	-25.6	-24.0	-129	-3.2	
DST2	1 431~ 1 452.5	-33.2	-24.8	-24.7	-23.8	-119	-2.9	

天然气运移同位素分馏现象说明,当天然气以扩散渗滤方式发生运移时,重的碳同位素 ( $\delta^{13}C$ )比轻的碳同位素  $\delta^{12}C$ 易被岩石吸附;同时C<sup>12</sup>-C<sup>12</sup>链比C<sup>13</sup>-C<sup>13</sup>(或C<sup>12</sup>-C<sup>13</sup>)链容易断开,这就造成前方C<sup>12</sup>相对富集,所以,沿运移方向发生甲烷碳同位素值变轻的分馏作用。

## 3 非烃气体特征

### 3.1 CO<sub>2</sub>的成因

CO<sub>2</sub>可以是有机成因,也可以是无机成因。有机成因的CO<sub>2</sub>是有机质在不同地球化学作用中形成的。例如,有机质在生物化学作用、热解作用和裂解作用等成烃作用中形成的二氧化碳;也可

以经煤的烧变(受岩浆热力作用产生)和煤的氧化作用形成。土壤和表层沉积中的有机质,由于细菌生物化学作用也可大量产生二氧化碳。

无机成因的二氧化碳是无机矿物或元素在各种化学作用下形成的。无机成因二氧化碳的形成有多种途径。

① 岩浆—火山源成因的  $\text{CO}_2$  包括各类岩浆岩、火山气体和火山喷发衰弱期及期后的热液、温泉中所含的大量  $\text{CO}_2$ ,这种成因的  $\text{CO}_2$  在天然气中一般含量高。

② 变质成因的  $\text{CO}_2$  是由碳酸盐岩受到高温分解或变质作用而形成的  $\text{CO}_2$ ,在天然气中含量一般很高。室内实验得到碳酸盐岩分解温度为  $710\sim 940^\circ\text{C}$ 。但在水的参与下加热碳酸盐岩,在近  $200^\circ\text{C}$  时就强烈分解出  $\text{CO}_2$ 。

③ 地幔成因的  $\text{CO}_2$  即由地幔来的  $\text{CO}_2$ 。这种  $\text{CO}_2$  的特征是与其伴生的氦同位素的  $R/R_a > 1$ 。

### 3.2 在天然气运移研究中的意义

$\text{CO}_2$  是天然气中除烷烃以外最常见的非烃组分之一,通过对东方 1-1 气田的研究,认为  $\text{CO}_2$  是良好的天然气运移指标。

东方 1-1 气田储层 DST3、DST2 天然气组成中,  $\text{CO}_2$  含量高达  $57.32\% \sim 66.66\%$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值较重为  $-2.9\% \sim -3.2\%$ ,  $^3\text{He}/^4\text{He} = 9.49 \times 10^{-8}$ 。据统计资料,当  $\text{CO}_2$  含量  $< 20\%$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} < -10\%$  是有机成因的  $\text{CO}_2$ ; 当  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} > -10\%$ , 绝大多数是无机成因的  $\text{CO}_2$ ; 当  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} > -8\%$  都是无机成因的  $\text{CO}_2$ 。由天然气的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值可区分  $\text{CO}_2$  是慢源的还是壳源的,大气源的  $^3\text{He}/^4\text{He} = 1.3 \times 10^{-6} \sim 1.4 \times 10^{-6}$ ; 壳源的  $^3\text{He}/^4\text{He} = 1 \times 10^{-8}$ , 慢源的  $^3\text{He}/^4\text{He} = 1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$ , 由此看来,东方 1-1 气田 DST2、DST3 气样中的  $\text{CO}_2$  主要为壳源无机成因——碳酸盐岩热分解产物。据报道<sup>[2]</sup>,当地下水参与加热碳酸盐岩或岩石中含有 Al、Mg、Fe 等杂质时,在  $200^\circ\text{C}$  就产生强烈分解逸出  $\text{CO}_2$ 。莺歌海盆地平均地温梯度为  $4.56^\circ\text{C}/100\text{m}$ ,推测  $\text{CO}_2$  的形成深度为至少  $> 4500\text{m}$  的含钙梅山组地层。东方 1-1 气田是一个泥拱短轴背斜构造气藏,泥拱活动过程中释放出来的异常高压及产生的断裂为深部气体运移至上部储层提供了动力和通道,运移上来的  $\text{CO}_2$  在储层中进行新分布,其在垂向上的变化特点指示了由

深向浅的运移方向,由表 1 可见,从 DST2→DST4,  $\text{CO}_2$  的含量从  $66.66\%$  聚降为  $1.01\%$ 。  $\text{CO}_2$  具明显的亲水性,易溶于水;影响天然气中  $\text{CO}_2$  含量变化的重要因素还有重力分异作用,与甲烷相比,  $\text{CO}_2$  密度高,不易于运移,因此沿着运移方向  $\text{CH}_4$  增加,  $\text{CO}_2$  含量减少。

天然气在运移过程中,沿着运移方向,  $\text{CO}_2$  含量递减的同时,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值也变轻,如东方 1-1 气田由 DST2→DST4,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  从  $-2.9\%$  降为  $-15.50\%$ , 差值竟达  $-12.6\%$  (表 2),显然仅作单纯的分馏作用观点是难予解释的,这可能是多源  $\text{CO}_2$  的差异运移或色层作用所致。对于同一来源的天然气,  $\text{CO}_2$  含量及同位素组成在运移方向上的明显变化似乎暗示着有机成因的  $\text{CO}_2$  成分可能发生优先运移。上已述及,东方 1-1 气田储层天然气的  $\text{CO}_2$  主要为碳酸盐岩热分解成因,同时不可避免地混有少量有机质成烃过程生成的  $\text{CO}_2$ ,由于有机成因  $\text{CO}_2$  的碳同位素比无机成因的  $\text{CO}_2$  更富集  $\text{C}^{12}$ ,而  $\text{C}^{12}$  比  $\text{C}^{13}$  易于运移,所以,可能造成无机成因的  $\text{CO}_2$  较有机成因的  $\text{CO}_2$  运移易于滞后,结果造成运移前方的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  变轻。东方 1-1-2 井 DST4 (测试顶层)天然气的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  显著变轻 ( $-15.5\%$ ),表现为有机成因的特点,而且  $\text{CO}_2$  的相对含量亦降为  $1.01\%$ ,这两个特点表明可能有少量有机成因的  $\text{CO}_2$  率先运移起了重要作用。

## 4 结 论

东方 1-1 气田天然气运移是典型的垂向运移实例,其相应的地球化学指标变化也与之吻合。可以认为天然气的运移地球化学特征及相应地化指标的变化规律,是研究天然气运移问题的重要内容,但这些指标不是绝对的,应用时必须综合分析。作为天然气运移研究来说,首先必须吃透本地区的地质情况、条件及演化情况等,同时重视研究多个地球化学指标及其规律也显得很有必要。

### 参 考 文 献

- [1] 郝石生等. 烃扩扩散系数研究及天然气运聚平衡原理. 石油学报, 1991(12): 17~24.
- [2] 戴金星等. 中国天然气地质学. 北京: 石油工业出版社, 1992, 29~30.

# Geochemical Characteristics of the Natural Gas Migration in the Dongfang 1-1 Gasfield, South China Sea

*Huang Zhilong Liu Guangdi and Hao Shisheng*

(University of Petroleum, Beijing 100083)

## Abstract

The geochemical parameters of the natural gas migration were discussed in the paper based on geochemical study of natural gases in the Dongfang 1-1 gasfield, Yinggehai Basin, South China Sea. It showed that low molecular n-alkane, ratio of isoalkanes to n-alkane, ratio of aromatics to n-alkanes,  $\delta^{13}\text{C}$  value of alkanes and nonhydrocarbon gas content, could be used as geochemical parameters of the natural gas migration. The vertical variations of these parameters indicated the vertical migration feature of natural gases in the Dongfang 1-1 gasfield.

**Key Words** natural gas oil and gas migration South China Sea

## 中国石油学会石油地质专业委员会油气地球化学学组

组 长 黄第藩  
 副组长 傅家谟 郝石生 贝 丰  
 组 员 戴金星 徐永昌 王庭彬 范 璞 周光甲 李永康 张大江 徐 濂  
 程克明 史继扬 江继纲 林洪枝 王铁冠 廖前进 王培荣 王廷栋

## 中国地质学会沉积地质专业委员会

主任委员 孙 枢  
 副主任委员 刘宝君 傅家谟 裘亦楠 曾允孚  
 秘 书 长 李任伟  
 副 秘 书 长 冯增昭 郭师曾 李思田 刘焕杰 刘铁兵

## 中国矿物岩石地球化学沉积学专业委员会有机地球化学专业组成员

组 长 傅家谟  
 副组长 黄第藩 程志纯  
 组 员 贝 丰 王涵云 王启军 陈丕济 李永康 李赞豪 何炳骏 汪樊卿  
 周光甲 张爱云 费富安 唐运干 梁狄刚 蒋 俊 窦廷焕 范 璞