

# 天然气运移的气体同位素地球化学示踪\*

张同伟 陈践发 王先彬 邵波 李春园

(中国科学院兰州地质研究所, 兰州 730000)

**提 要** 本文通过鄂尔多斯等含油气盆地内岩石酸解烃、罐顶气和同源多产层天然气碳同位素组成的变化, 从实例剖析出发, 探讨了天然气运移时气体同位素组成的变化及其对天然气运移的示踪。天然气在通过沉积地层中孔隙系统和微裂隙运移时, 天然气中的甲烷碳同位素会发生一定的分馏, 而乙烷以上重烃碳同位素几乎不发生分馏; 在天然气层所在深度, 罐顶气甲烷碳同位素组成与天然气一致, 在天然气层附近, 罐顶气甲烷碳同位素则明显偏离了热演化趋势线; 烃源岩酸解烃与其同源的天然气重烃碳同位素组成具有较好的一致性和可比性。由此, 可利用气体组分碳同位素的上述变化特征, 追索天然气的运移作用。

**关键词** 天然气运移 同位素示踪

**第一作者简介** 张同伟 男 30 岁 副研究员 石油地质和地球化学

应用天然气中气态烃类的碳氢同位素组成特征, 进行天然气成因类型判识, 追索生气母质的类型及其热演化程度, 并开展气—气、气—源对比, 国内外学者已作了大量的理论研究和实际应用工作, 收到了极好的效果。而在应用天然气中同位素组成变化研究运移的问题上, 研究工作相对较少。主要的争论点在于天然气运移时同位素是否发生分馏的问题上。针对该问题, 目前主要有三种看法: 以 Schoell(1980) 为代表学者在获得了浅层聚集气与地面沼泽气在烃类组成、甲烷碳氢同位素方面的相似性后, 提出了天然气形成的垂向分带理论, 认为天然气的运移不会造成甲烷碳同位素组成的变化; Stahl 等(1975), Faber 等(1979), Fuex 等(1979) 学者认为运移引起的碳同位素分馏可忽略不计, 一般小于 1%, 极少大于 8%, 因而可依据气态烃的同位素组成确定其成因, 气源岩的成熟度。近年来, 我国学者陈安定(1994) 通过实验模拟和天然气中甲烷碳同位素变化在平面上的分布的研究结果表明, 天然气的运移会造成明显的甲烷碳同位素分馏, 并依据其在平面上的变化, 区分运移气、残留气等。本文通过酸解烃、罐顶气及成藏气中气态烃同位素组成的变化, 从实例剖析出发, 探讨天然气运移时气体同位素组成的变化及对天然气运移的示踪。

## 1 酸解烃同位素组成的变化

获取烃源岩生成的气态烃同位素组成的信息, 是进行成藏气—烃源岩对比的最直接的方法。通过对鄂尔多斯盆地古生界天然气和古生界气源岩酸解气同位素组成变化的研究表明, 烃源岩的酸解烃能够指示由其生成天然气的直接地球化学信息。

表 1 是鄂尔多斯盆地 7 口天然气井中天然气及烃源岩酸解气碳同位素组成对比表。以陕

\* 本文系“八五”国家重点科技攻关项目 85-102-15-03-02 研究成果之一。

参 1 井为例,天然气中甲烷、乙烷、丙烷和丁烷碳同位素值分别为  $-33.9\%$ 、 $-27.6\%$ 、 $-26.0\%$  和  $-22.8\%$ ,上古生界太原组烃源岩酸解气甲烷、乙烷、丙烷和丁烷碳同位素值分别为  $-33.8\%$ 、 $-22.1\%$ 、 $-21.5\%$  和  $-20.9\%$ ,重烃部分同位素组成与天然气中重烃部分相差非常显著,下古生界奥陶系马家沟组烃源岩酸解气甲烷及乙烷的碳同位素值分别为  $-35.6\%$  和  $-29.6\%$ ,与天然气中乙烷碳同位素值很接近。

表 1 鄂尔多斯盆地天然气和源岩酸解气态烃碳同位素组成( $\%$ )

Table 1 Carbon isotope ratios of natural gases and acidlysis hydrocarbons from Ordos Basin

井号	井深(m)	层位	$\delta C_1$	$\delta C_2$	$\delta C_3$	$\delta C_4$	备注
陕参 1	3334.83-3334.98	C <sub>3t</sub>	-33.8	-22.1	-21.5	-20.9	酸解气
		O <sub>1m</sub> <sub>五</sub>	-35.6	-29.6	-31.0	-29.2	
	3443-3472	O <sub>1m</sub> <sub>五</sub>	-33.9	-27.6	-26.0	-22.8	天然气
陕参 6		O <sub>1m</sub> <sub>五</sub>	-34.7	-29.6	-31.0	-29.2	酸解气
	3582-3585	O <sub>1m</sub> <sub>五</sub>	-33.9	-30.0	-24.4	-24.4	天然气
陕 17	3122.3-3132.4	O <sub>1m</sub> <sub>五</sub>	-35.6	-26.4	-27.6		酸解气
	3177-3182	O <sub>1m</sub> <sub>五</sub>	-33.2	-30.7	-26.9		天然气
镇川 1	2195.7-2195.9	C	-38.4	-23.5			酸解气
	2041-2061	C	-34.1	-23.4			天然气
榆 4	2186-2208	C <sub>3t</sub>	-39.1	-22.8			酸解气
	2210.5-2210.6	C <sub>3t</sub>	-33.9	-22.5	-21.9		天然气
陕 20	3605-3606	O <sub>1m</sub>	-37.9	-28.4	-24.8		酸解气
	3522-3524	O <sub>1m</sub>	-34.6	-30.9	-27.6		天然气
陕 28	3426-3427	O <sub>1m</sub>	-33.8	-31.6			酸解气
	3366-3371	O <sub>1m</sub>	-34.1	-28.3			天然气

由表 2 可知,源于奥陶系的油型气和石炭-二叠系煤型气甲烷碳同位素近于一致,而乙烷碳同位素则明显不同,前者富集碳的轻同位素组成,后者富集碳的重同位素组成。陕参 1 井天然气中乙烷碳同位素组成与奥陶系烃源岩酸解气相一致,且与中部气田奥陶系油型气的碳同位素值相接近,与石炭-二叠系煤型气差别很大,从而表明陕参 1 井储层中的天然气应主要源于奥陶系烃源岩,也表明天然气与烃源岩酸解气的乙烷碳同位素组成具有较好的可比性。

图 1 是鄂尔多斯盆地中部气田石炭-二叠系煤型气与其烃源岩酸解气,奥陶纪油型气与其烃源岩酸解气甲烷和乙烷碳同位素组成对比结果。由图可以看出,石炭-二叠系烃源岩酸解气的乙烷碳同位素大于  $-28\%$ ,与典型的石炭-二叠系煤型气的近于一致,二者具有较好的可比性;奥陶系烃源岩酸解气的乙烷碳同位素统计值小于  $-28\%$ ,与源于奥陶系的油型气乙烷碳同位素值相近,二者也有较好的可比性。因此,可利用天然气乙烷碳同位素与烃源岩酸解气乙烷碳同位素的这种可比性进行气源对比,追索天然气的来源。

但不论是石炭-二叠系烃源岩和奥陶系的烃源岩,其酸解气的甲烷碳同位素组成均小于对应的天然气中甲烷的碳同位素组成,显示出酸解气中甲烷相对富集轻碳同位素组成。造成这种同位素分馏可能有以下两种主要的原因:①酸解气甲烷碳同位素可能代表烃源岩生成气态

烃的真实同位素组成,而富集成藏的天然气是散失和供给达到平衡的产物,在富集成藏的过程中,甲烷碳同位素由于散失已发生了分馏,结果使成藏气的同位素组成相对偏重;②酸解烃是指由碳酸盐、铝硅酸岩等矿物所包裹的  $C_1-C_5$  的气态烃。因而它除主要包裹烃源岩成烃高峰期的气态烃外,还会混有成熟度相对较低时烃源岩转化而成的少量气态烃,从而使酸解甲烷碳同位素值相对成藏气偏小。

表2 鄂尔多斯盆地中部气田天然气及其酸解气碳同位素对比表

Table 2 Comparison of the carbon isotopic compositions of natural gases and acidlysis hydrocarbons from the central gas field of Ordos Basin

类型	时代	$\delta^{13}C_1$ (‰)	$\delta^{13}C_2$ (‰)	统计样品数
天然气*	C-P	$-31.0 \sim -35.4$ -33.3	$-23.4 \sim -27.4$ -25.2	6
酸解气		$-33.8 \sim -38.4$ -37.1	$-22.1 \sim -23.5$ -22.8	3
天然气*	O <sub>1m</sub>	$-30.9 \sim -38.3$ -33.7	$-23.5 \sim -31.9$ -29.3	32
酸解气		$-33.8 \sim -38.6$ -36.0	$-26.4 \sim -31.6$ -28.9	6

\* 天然气资料引自陈安定(1994)

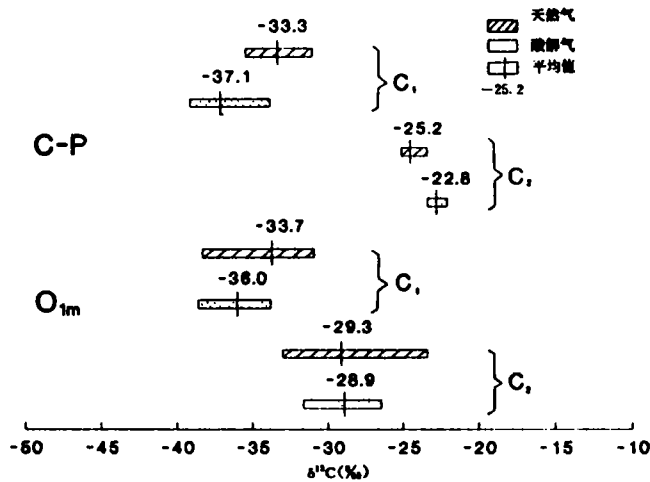


图1 鄂尔多斯盆地中部气田天然气与酸解气碳同位素对比图

Fig.1 Comparative diagram of the natural gases and acidlysis hydrocarbons from the central gas field of Ordos Basin

## 2 罐顶气同位素组成变化

图2是莺歌海盆地罐顶气及天然气中甲烷碳同位素随深度的变化。由图2可看出,随着埋深的增大,罐顶气甲烷碳同位素值偏大,逐渐富集碳的重同位素组成,即 $^{13}C$ 。但在天然气产层

所在的三个层段,即 1284—1452m,2200—2625m 和 3586—3961m 三个井段,罐顶气甲烷碳同位素值明显地偏正,甚至在储集层与天然气的甲烷同位素组成近于一致,从而表明储集层中的罐顶气主要代表了储层中天然气同位素组成的信息。可利用罐顶气气态烃同位素组成在垂向上的变化,示踪天然气层的存在。

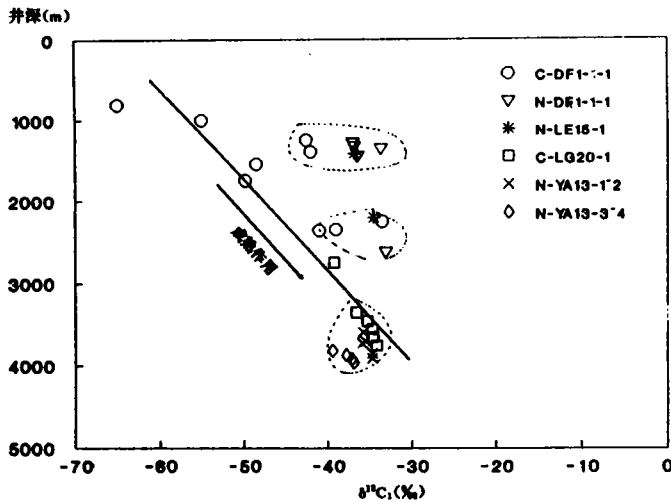


图 2 莺歌海盆地罐顶气和天然气甲烷碳同位素随深度变化

Fig. 2 Change of the carbon isotope ratios of methane with depth from the natural gases and canned gases of Ying Gehai Basin

### 3 多产层天然气同位素组成变化

#### 3.1 塔里木盆地多产层油气藏

表 3 是塔里木盆地塔北隆起轮南构造桑塔木圈闭—多产层油溶气的同位素组成。油溶气的乙烷碳同位素值在 -34.9~ -35.5‰,为典型的油型气。谢增业等 (1992)对轮南地区石炭系油源及烃源岩成烃史研究表明,轮南地区石炭系产层中的原油主要源于石炭系自身,属自生自储式油藏。轮南地区三叠系烃源岩的成熟度较低,  $R_o$  值平均约 0.72%,与解放 124 井紧邻的沙 14 井,在井深为 4685~4850m 井段,三叠系烃源岩的  $R_o$  值在 0.57~0.62% (王社教,1992),处于未成熟和低成熟阶段,表明解放 124 井三叠系油溶气应为运移气。

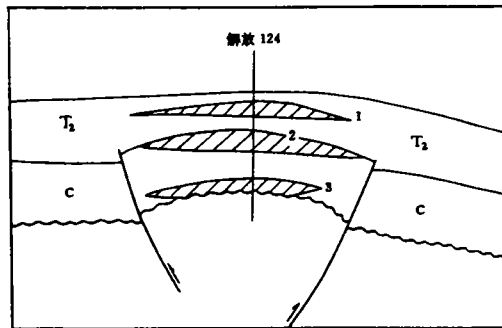


图 3 桑塔木油气藏构造示意图  
Fig. 3 Structural outline map of Sha Tamu oil-gas reservoir

由图3可看出,断层没有切穿T—C纪界面,故断层不可能作为石炭系油气向三叠系储集层运移的通道,而三叠系油溶气中碳同位素值与下伏石炭系两层油溶气中重烃碳同位素组成一致,表明三叠系储层中的油溶气应与下伏石炭系油溶气具有同源性。且三叠系储层中天然气中甲烷的碳同位素组成与石炭系储层中的天然气具有很好的可比性,表明天然气短距离运移时,基本不发生同位素的分馏。

表3 解放124井三层油溶气同位素组成表(‰)

Table 3 Carbon isotopic composition of three oil-associated gases from Well Jiefang 124

产层	井深(m)	时代	$\delta^{13}C_1$	$\delta^{13}C_2$	$\delta^{13}C_3$
1	4420	T <sub>2</sub>	-36.5	-35.3	-32.2
2	4946	C	-35.2	-34.9	-29.8
3	5081	C	-35.6	-35.5	-29.9

表4 莺歌海盆地不同井多产层天然气碳同位素组成(‰)

Table 4 Carbon isotope ratios of the natural gases from multizone gas production wells in Ying Gehai Basin

井号	井深(m)	$\delta^{13}C_1$	$\delta^{13}C_2$	$\delta^{13}C_3$	$\delta^{13}C_4$
东方1-1-1	1284	-36.0	-26.2	-24.9	
	1296	-36.9	-26.7		-23.6
	1331	-36.8	-24.8	-24.5	-23.5
	1361	-33.6	-27.1		-22.1
	1452	-34.6			
	2625	-33.1	-26.9	-27.5	-25.6
乐15-1-1	1420	-36.8			
	2200	-34.5	-24.1	-24.6	-23.9
崖13-1-1	3586	-35.8	-25.2	-24.2	
	3702	-35.5			
崖13-1-2	3725	-35.9	-24.0		
	3849	-34.7	-24.6		
	3907	-34.7			
崖13-1-3	3817	-39.4	-26.5	-25.0	
	3871	-37.8	-26.0		
崖13-1-4	3921	-37.1	-26.3		
	3961	-36.9	-26.3	-25.2	

### 3.2 莺歌海盆地多产层天然气

表4是莺歌海盆地不同井多产层天然气碳同位素组成表。盆地内垂向上天然气的分布有三个明显的深度段:1284~1452m井段,2200~2625m井段及3586~3961m井段。除崖13-1-3和崖13-1-4两井天然气甲烷碳同位素略偏轻外,其它井不同深度段天然气的同位素组成具有很好的一致性,反映了它们来源具同源性。由图4可看出,盆地内在埋深达2600m±时, $R_o$ 值达到0.6%,有机质刚进入热成因烃的生烃门限,也就是说在2600m之上,有机质处于未

成熟的热演化阶段,气态烃应以生物气和生物热催化过渡带气为主,生物气以甲烷为主,其  $\delta^{13}\text{C}_1$  一般小于  $-55\text{‰}$ (Fuex, 1979),生物热催化过渡带气  $\delta^{13}\text{C}_1$  值在  $-48\sim-55\text{‰}$ (徐永昌等, 1994)。而盆地内 2600m 之上的两套天然气层,  $\delta^{13}\text{C}_1$  值在  $-33.4\sim-36.9\text{‰}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_2$  值在  $-24.1\sim-21.9\text{‰}$ ,同位素组成显示出典型成熟煤型气的特征,与原地未成熟阶段生成的生物气和生物热催化过渡带气碳同位素组成不一致。以上天然气同位素组成特征充分表明 2600m 之上天然气是由成熟阶段生成的天然气经长距离运移在浅层储集而成。

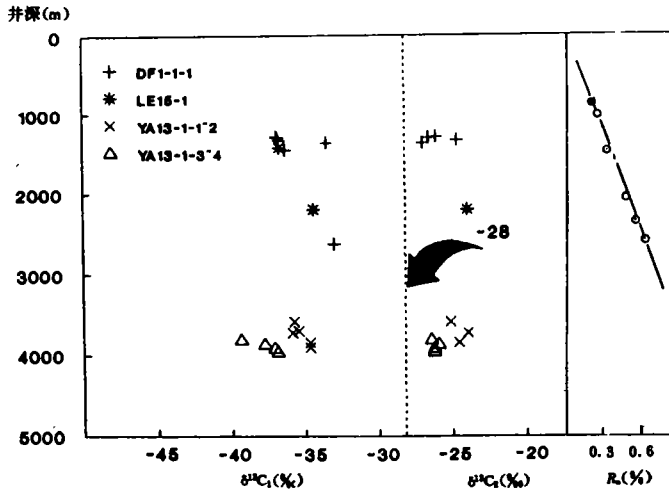


图 4 莺歌海盆地天然气碳同位素随深度变化

Fig. 4 Change of the carbon isotope compositions of natural gases with depth in Ying Gehai Basin

天然气经过长距离垂向运移时甲烷碳同位素会发生一定的分馏,而乙烷碳同位素组成则几乎不发生分馏。以东方 1-1-1 井为例,6 层天然气层的乙烷碳同位素在  $-24.8\sim-27.1\text{‰}$  之间,多层天然气显示明显的一致性,而随着天然气层埋深变浅,天然气中甲烷碳同位素趋于变小,最深层和最浅层甲烷碳同位素值相差达  $3\text{‰}$ 。乐 15-1-1 井也与东方 1-1-1 井相似,浅层天然气甲烷相对富集轻碳同位素组成,浅层与深层甲烷碳同位素差值为  $2.3\text{‰}$ 。

## 结 语

天然气通过沉积地层中孔隙系统和微裂隙发生长距离运移时,天然气中甲烷碳同位素会发生一定的分馏,而乙烷以上重烃组分的碳同位素几乎不发生分馏。这种分馏对判识天然气成因类型时影响不大,而对于利用天然气中甲烷碳同位素计算运移距离和源岩埋深时,则有一定影响,应全面统计某一地区或某一盆地天然气同位素组成的变化特征,对运移造成的甲烷碳同位素分馏作一定的校正,以有效地进行气源追索。烃源岩酸解烃与其同源的天然气重烃碳同位素组成具有较好的一致性和可比性,可利用二者之间的这种一致关系,进行气源直接对比。在天然气产层所在深度,罐顶气同位素组成与天然气一致,在天然气层附近,罐顶气甲烷碳同位素组成则明显地偏离了正常随深度变化的趋势线,垂向上罐顶气同位素组成的这种变化特征,

可指示天然气层的存在。

收稿日期:1994年10月15日

### 参 考 文 献

- [1]Schoell, M., 1983, Genetic Characterization of natural gases, AAPG Bulletin, 67: 2225—2238.
- [2]Stahl W., 1977, Carbon and nitrogen isotopes in hydrocarbon research and exploration, Chem. Geology, V. 20: 121—149.
- [3]Faber E., Stahl, W. J., 1984, Geochemical surface exploration for hydrocarbons in North sea. AAPG Bulletin 68, No. 3: 363—386.
- [4]Fuex, A. N., 1977, The use of stable carbon isotopes in hydrocarbon exploration; Jour. Geochem Exploration, V. 7: 55—188.
- [5]陈安定等, 1994, 陕甘宁盆地中部气田奥陶系天然气的成因和运移, 石油学报, 15(2): 1—10.
- [6]谢增业等, 1992, 轮南地区石炭系油源及烃源岩成烃史分析, 塔里木盆地油气勘探论文集, 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社: 363—374.
- [7]王社教等, 1992, 塔里木盆地三套生油层成熟演化和成烃期研究, 塔里木盆地油气勘探论文集, 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社: 331—342.
- [8]徐永昌等著, 1994, 天然气成因理论及应用, 北京: 科学出版社。

## Isotopic Geochemical Traces of Gaseous Hydrocarbons for Natural Gas Migration

Zhang Tongwei Chen Jianfa Wang Xianbin Shao Bo Li Chunyuan

(State Key Laboratory of Gas Geochemistry, Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

### Abstract

A lot of theoretical and practical studies have been done on applying the carbon and hydrogen isotopic compositions of gaseous hydrocarbons to identify the type of natural gas and trace the type and maturation of potential gas source rocks. However, there are few studies on the application of the isotopic character of natural gas to gas migration. The main argument point on the above case is whether the isotopic fractionation occurs during gas migration. In this paper, according to the characteristics of the carbon isotopic composition from acidlysis gas, canned gas and natural gas of Ordos and other oil-gas bearing basins, the changes of carbon isotope compositions of gaseous hydrocarbons during gas migration are discussed and the following conclusions are obtained.

1. While natural gas migrates a long distance through microfractures and the pore system in strata, a certain isotopic fractionation for methane occurred but little isotopic fractionation for heavier hydrocarbons.

2. A relatively good concordant and comparative relation exists between the carbon isotope compositions of heavier hydrocarbons from acidlysis gas of source rocks and those from natural gas originated from the same source rocks. The correlation of direct gas and its source rocks was carried on from this coincidence.

3. The carbon isotope ratios of methane from canned gas are equal to those of natural gas at gas production layers and show much heavier than the normal increase tendency with depth near gas production layers. The existence of gas layers may be indicated according to the vertical isotope characters of methane from canned gas.

Key Words: Natural gas migration, isotopic trace