

# 苏北盆地天然气类型及成因分析

罗义, 刘义梅, 段宏亮

(中国石化江苏油田分公司勘探开发研究院, 江苏 扬州 225009)

**摘要:** 苏北盆地烃类天然气在地下赋存方式多样, 成因各异。为深化苏北盆地天然气形成和富集规律的研究, 分析天然气组成成分、稳定碳同位素、轻烃组成特征以及由它们组成的参数等, 将苏北盆地天然气划分为三种成因类型: 原油生物降解气、热解凝析气及裂解气, 并对刘庄气藏、永安地区天然气和朱家墩气田天然气进行了成因分析, 将对苏北盆地天然气勘探具有一定的指导意义。

**关键词:** 天然气组分; 碳同位素; 轻烃组成; 天然气类型; 成因分析; 苏北盆地

**中图分类号:** TE122      **文献标志码:** A

## Analysis on types and genesis of natural gas in Subei Basin

LUO Yi, LIU Yimei, DUAN Hongliang

(Exploration and Development Research Institute of Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** Hydrocarbon natural gas in Subei Basin has various underground occurrence modes with different genesis. To further study on the formation and enrichment law of natural gas in Subei Basin, it was carried out the analysis on the composition of natural gas, stable carbon isotope, light hydrocarbon composition characteristics, and their formed parameters, and so on. On this basis, the natural gas in Subei basin can be divided into three genetic types: crude oil biodegraded gas, pyrolysis condensate gas and cracked gas. And then the geneses of natural gas in Liuzhuang, Yong'an, and Zhujiadun Gasfields were further analyzed. The study results have a certain guiding significance for the natural gas exploration in Subei Basin.

**Key words:** natural gas components; carbon isotope; light hydrocarbon composition; type of natural gas; genesis of natural gas; Subei Basin

苏北盆地是一个富油贫气的含油气盆地, 已发现的天然气田及气井, 平面上主要分布于盐城凹陷、南黄海次凹深凹带、高邮凹陷深凹带、金湖凹陷外坡带及吴堡低凸起<sup>[1]</sup>。迄今在白垩系、古近系和新近系探明了刘庄、永安、肖刘庄、周庄气藏及朱家墩气田, 且多口井试获了天然气流。另外, 苏北盆地还发现少量介于烃和非烃之间的富氮过渡型气(如泰兴溪桥气藏浅层气中氮气组分占57.12%), 西园、南湖、范庄等地区的油溶气, 以及主要分布在黄桥气田和真武、许庄一带断阶带中的纯CO<sub>2</sub>气和富CO<sub>2</sub>烃类气<sup>[2-3]</sup>。

苏北盆地烃类天然气在地下赋存方式多样, 成因各异, 天然气来源也不尽相同。本文主要根据天然气组成成分、稳定碳同位素、轻烃组成特征以及由它们组成的参数等作为天然气类型划分依据, 对

苏北盆地已发现的天然气进行类型分类, 并进行成因分析。

## 1 天然气特征

### 1.1 组分特征

天然气组分是天然气的一项主要指标。根据苏北盆地不同产层有代表性的油气田及气井天然气组成资料(表1), 可将烃类气划分为干气和湿气两大类<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2019-09-12; 改回日期: 2020-02-26。

第一作者简介: 罗义(1970—), 高级工程师, 主要从事油气勘探研究工作。E-Mail: luoyi.jsyt@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技项目“苏北盆地天然气成藏主控因素与勘探潜力研究”(P17011-2)。

表1 苏北盆地天然气组分分类表

组成分类	地 区	产层	CH <sub>4</sub> /%	C <sub>2</sub> <sup>+</sup> /%	N <sub>2</sub> /%	CO <sub>2</sub> /%	C <sub>1</sub> /C <sub>1-5</sub>
干气	刘庄	E <sub>1</sub> f	94.58~96.53	0.97~1.86	1.85~3.31	0.26~1.25	0.99
	H5井	E <sub>2</sub> s	93.42	2.80	3.67	0.11	0.97
	朱家墩	E <sub>1</sub> f-K <sub>2</sub> t	91.89~96.57	2.09~4.99	0~4.37	0.20~1.49	0.95~0.98
	周庄	Ny	96.52		3.47		1.00
湿气	永安、肖刘庄	E <sub>2</sub> d	80.34~80.59	13.98~15.75	2.86~4.40	1.03~1.05	0.84~0.85
	金湖、高邮凹陷油伴生气	E <sub>1</sub> f	51.20~83.06	8.68~38.17	1.42~9.94	0.48~2.87	0.58~0.90

属于烃气中干气的有:朱家墩气田,甲烷含量最高可达到96.57%,C<sub>1</sub>/C<sub>1-5</sub>可以达到0.98;周庄气藏,甲烷含量高达96.52%,缺失重烃组分;刘庄气藏,甲烷含量最高可达到96.53%,C<sub>1</sub>/C<sub>1-5</sub>可以达到0.99;H5井、B12-1井等,发现古近系气层气或油藏气顶气,其中H5井甲烷含量虽然只有93.42%,但C<sub>1</sub>/C<sub>1-5</sub>高达0.97。

属于烃气中湿气的有:永安、肖刘庄气藏以及金湖、高邮凹陷大量的古近系油伴生气。永安、肖刘庄气藏甲烷含量最高只有80.59%,重烃组分含量较高,C<sub>1</sub>/C<sub>1-5</sub>为0.84~0.85。

1.2 碳同位素特征

同位素是天然气成因分析的重要依据,包含有C<sub>1-4</sub>、CO<sub>2</sub>等的同位素。苏北盆地大部分地区的天然气以有机热成熟气为主,如高邮凹陷、海安凹陷、金湖凹陷的气层气和油田伴生气,盐城凹陷朱家墩气田也属于有机热成因气。选取具有代表性的刘庄、永

安、肖刘庄和朱家墩地区的探井天然气碳同位素进行分析。

根据碳同位素特征(表2),总体上δ<sup>13</sup>C<sub>1</sub>值为-50.30‰~-37.77‰,大于-55.00‰;δ<sup>13</sup>C<sub>2</sub>为-43.20‰~-27.10‰,δ<sup>13</sup>C<sub>3</sub>为-31.00‰~-25.20‰,δ<sup>13</sup>C<sub>4</sub>为-31.50‰~-24.20‰,大部分样品具有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>4</sub>(甲烷及其同系物的δ<sup>13</sup>C值随烷烃气分子中碳数增加而增大)特点(图1);δ<sup>13</sup>C<sub>CO2</sub>为-20.90‰~-8.22‰,CO<sub>2</sub>碳同位素大部分小于-10.00‰,指示天然气具有有机腐泥型特征。

各地区天然气有不同的特点:①刘庄气藏甲烷、乙烷碳同位素值偏负(图2),丙烷碳同位素值偏正,与菌解有关;②朱家墩气田总体上也具有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>4</sub>特点,但个别出现倒转,可能是存在成熟度偏低的天然气混入;③朱家墩气田甲烷同位素偏正,反映有机质类型偏腐殖,且与热演化程度较高有关<sup>[5-7]</sup>。

表2 苏北盆地天然气碳同位素特征

地 区	井号	深度 /m	层位	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>4</sub> /‰	δ <sup>13</sup> C <sub>CO2</sub> /‰
刘庄	D60	1 138.00	E <sub>1</sub> f <sub>2</sub>	-50.30	-43.20	-26.90	-28.40	-15.47
	L10	1 137.00	E <sub>1</sub> f <sub>2+1</sub>	-49.40	-40.50	-27.80	-27.40	-14.28
永安	Y7	2 995.40	E <sub>2</sub> d <sub>1</sub>	-46.82	-28.40	-26.44	-26.19	-8.22
肖刘庄	X1	3 143.80	E <sub>2</sub> d <sub>1</sub>	-44.57	-27.96	-25.69	-25.78	-16.39
	YC1	3 766.00	E <sub>2</sub> f <sub>1</sub>	-39.20	-29.90	-31.00	-31.50	
朱家墩	YC1	4 028.00	K <sub>2</sub> t <sub>1</sub>	-37.77	-28.09	-26.05	-25.16	-20.09
	YC1	3 788.00	K <sub>2</sub> t <sub>2</sub>	-38.00	-27.10	-25.20	-24.20	

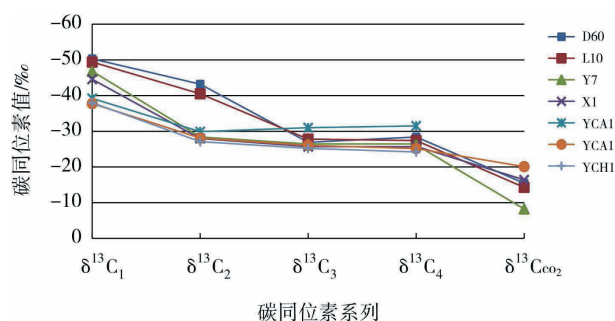


图1 天然气碳同位素系列特征

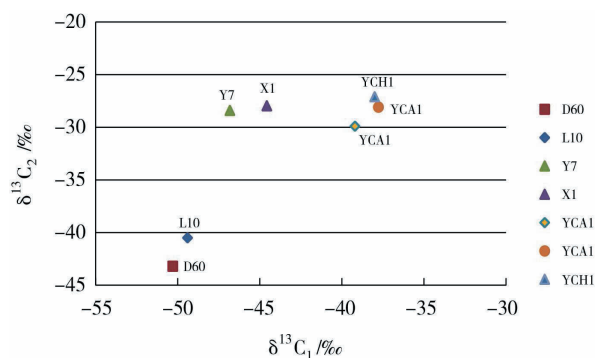
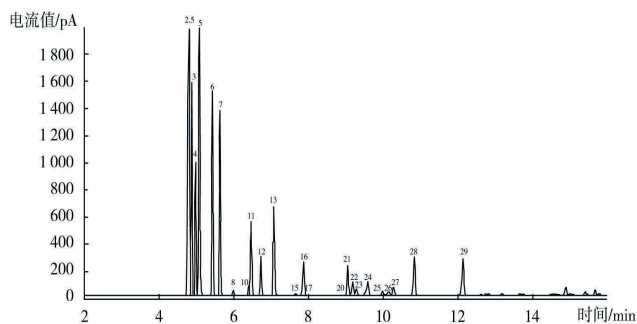
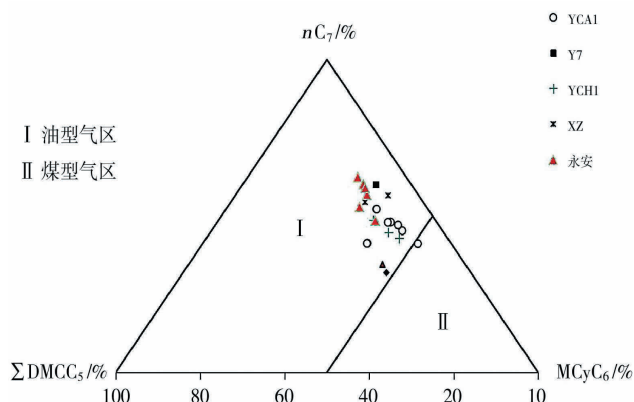


图2 天然气δ¹³C₁与δ¹³C₂关系

### 1.3 轻烃组成指纹特征

源于腐泥型母质的轻烃组分中富含正构烷烃,而源于腐殖型母质的轻烃富含异构烷烃和芳烃,富含环烷烃的凝析物也是陆源母质的重要特征。高邮凹陷原油的母质类型为腐泥型。从永安地区(6口井)戴南组一段( $E_2d_1$ )、三垛组一段( $E_2s_1$ )原油轻烃分析看出(图3),轻烃组分中富含正构烷烃,而异构烷烃和芳烃相对含量低。

苏北盆地C<sub>7</sub>轻烃系列组成中(图4),永安地区正庚烷的相对百分含量达到50%以上,表明永安地区轻烃主要源于腐泥型母质,属于油型气,而朱家墩气田正庚烷的相对百分含量较低,表明具有偏腐殖型母质的特征。

图3 Y7-27井E<sub>2s1</sub>原油轻烃色谱图4 苏北盆地C<sub>7</sub>轻烃组成三角图

轻烃异庚烷值可以反映天然气的成熟度<sup>[8]</sup>,即利用“2-甲基已烷与3-甲基已烷”之和与“1顺3-,1反3-,1反2-二甲基环戊烷”之和的比值,推算天然气成熟度,当比值小于3时,指示低熟-成熟;3~8为高成熟;大于8为过熟。

根据苏北盆地刘庄、永安、肖刘庄和朱家墩等地区的轻烃异庚烷值(无量纲)分析,按照以异庚烷值为主划分油气成熟度的原则,指示苏北盆地天然气基本达到低成熟至较高成熟阶段(图5)。刘庄、黄珏等地区浅层气轻烃异庚烷值小于3,为低成熟阶段;富民、永安、肖刘庄等地区气藏气的轻烃异庚烷值在3左右,指示为成熟气;盐城凹陷朱家墩气田天然气轻烃异庚烷值主要分布在3~8,指示为高成熟气。

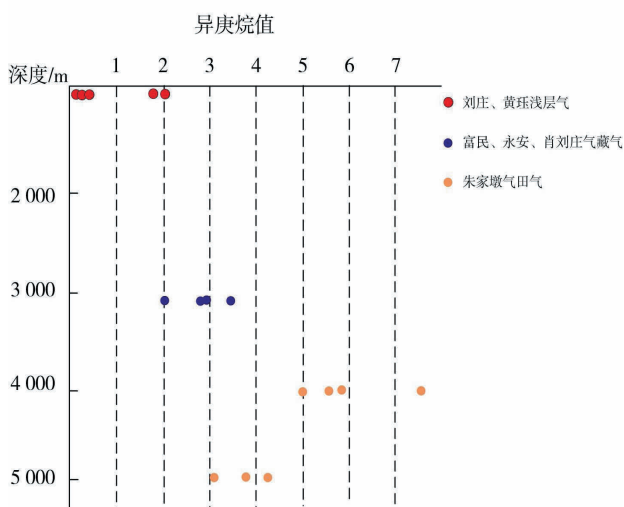


图5 异庚烷值判别苏北盆地天然气成熟度

## 2 天然气类型划分

根据苏北盆地天然气组分参数C<sub>1</sub>/(C<sub>2</sub>+C<sub>3</sub>)与甲烷碳同位素(δ¹³C<sub>1</sub>)特征(图6),将其划分为原油生物降解气、热解凝析气和裂解气等三种成因类型,其

中,热解凝析气和裂解气都属于热成因气。

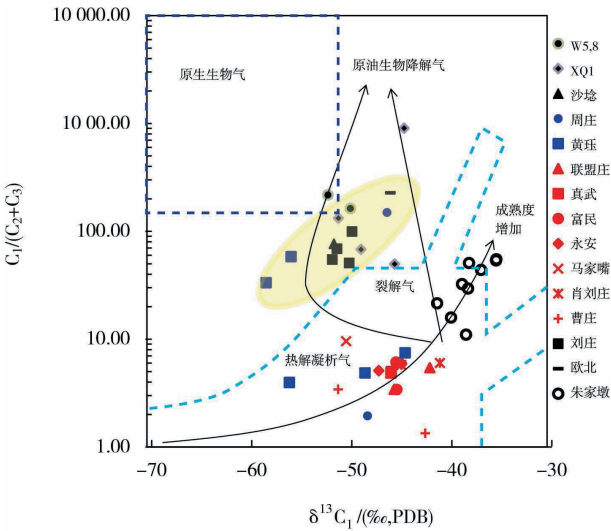


图6 苏北盆地天然气组分参数 $C_1/(C_2+C_3)$ 与甲烷碳同位素特征

①原油生物降解气。刘庄气藏、W5、H5井等样品,其碳同位素值与其它古近系气样存在明显差异,主要表现为甲烷、乙烷碳同位素偏负,丙烷碳同位素偏正。这些气藏的埋深偏浅,一般在1 000 m左右,比如刘庄气藏、周庄气藏,其原油样品存在明显的生物降解现象,表现出稠油特征。

②热解凝析气。来自高邮、金湖凹陷 $E_2d$ 、 $E_2s$ 、 $E_1f$ ,以及少部分 $K_2t$ 天然气, $\delta^{13}C_2\text{‰}$ 基本小于 $-29\text{‰}$ , $\delta^{13}C_3\text{‰}$ 基本小于 $-27\text{‰}$ ,它们主要显示腐泥气特征,比如永安、肖刘庄气藏等。该类天然气气组分以湿

气为主,多伴生有凝析油。

③裂解气。盐城凹陷朱家墩气田气样,从天然气的组分来看, $C_1/C_{1-5}$ 为0.95~0.98,为干气;其 $\delta^{13}C_1$ 为 $-41\text{‰}$ ~ $-36.7\text{‰}$ , $\delta^{13}C_2$ 为 $-27.1\text{‰}$ ~ $-26.5\text{‰}$ , $\delta^{13}C_3$ 为 $-25.6\text{‰}$ ~ $-24.9\text{‰}$ , $\delta^{13}C_4$ 为 $-25.6\text{‰}$ ~ $-24.4\text{‰}$ ,系列同位素组成面貌与古近系油伴生气存在较大的差异,总的倾向偏腐殖和腐泥型混合气特征。

### 3 成因分析

#### 3.1 刘庄降解气成因

从刘庄气藏的伴生油藏来看,原油性质差,色谱分析证实有水洗氧化、菌解现象。原油地面比重0.91~0.93,地面黏度4.91~85.7 mPa·s,地下黏度24.5 mPa·s,凝固点 $<8^{\circ}\text{C}$ ~ $17^{\circ}\text{C}$ ,说明原油性质较差。引起原油性质变差的原因一般有两个,一是成熟度低并来自半咸-盐水环境的腐泥型干酪根降解;二是原油遭受水洗氧化、细菌降解。经分析,成熟度低的原因可基本排除,色-质分析原油饱和烃中甾烷化合物成熟度参数 $\alpha\alpha\alpha C_{29}S/(S+R)$ 为0.34~0.41,属成熟油。色谱分析证实刘庄气藏原油曾遭受水洗氧化、细菌降解(图7),正烷烃已基本丧失,原油氧化严重。原油遭受氧化菌解的辅助特征,如密度、黏度增加,凝固点反而降低的现象也有所表现。丙烷、丁烷碳同位素偏正指示天然气可能属原油厌氧微生物降解成因。

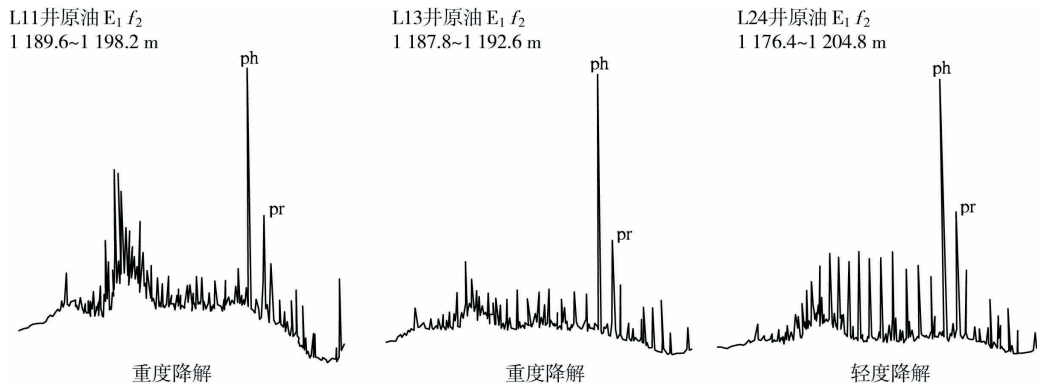


图7 刘庄气藏原油色谱

已证实<sup>[1]</sup>原油降解气与伴生稠油同源,根据油的色谱、色-质分析资料对比,刘庄气藏原油应来自阜二段( $E_1f_2$ )烃源岩。刘庄气藏油层底部存在水洗氧化、细菌降解次生蚀变作用<sup>[9]</sup>,而气顶保存条件仍十分良好,细菌作用下,一部分原油转变成了生物降解气。因而,刘庄气藏天然气应属成熟的腐泥型

油伴生气,由运移分异脱出油溶气和原油生物降解气两部分气组成。

#### 3.2 永安热解凝析气成因

永安天然气甲烷碳同位素介于 $-46.8\text{‰}$ ~ $-45.94\text{‰}$ ,乙烷碳同位素 $-30.75\text{‰}$ ~ $-29.3\text{‰}$ ;  $\text{CH}_4$ 含量为80.34%~90.34%,重烃含量7.3%~15.76%, $C_1/C_{1-5}$



为0.836~0.925,  $C_2/C_3$ 为2.12~2.51,  $iC_4/nC_4$ 为0.31~0.53 (表3), 根据天然气碳同位素组成、天然气组分特征等, 建立的不同母质在不同演化阶段生成的天然气

类型划分图(图6), 表明永安地区天然气属于热成因气中的热解凝析气。

表3 Y7断块气层气及油伴生气烃类组成分析表

指标参数	油型气				煤型气			
	生物气	过渡带气	热解气	裂解气	生物气	过渡带气	热解气	裂解气
$R_0$	$\leq 0.3$	0.3~0.6	0.6~2.0	$> 2.0$	$\leq 0.3$	0.3~0.6	0.6~2.0	$> 2.0$
$\delta^{13}C_1$	$< -55$	-55~-48	-48~-40	$> -36$	$< -60$	-60~-46	-40~-30	$> -30$
$CH_4$	$> 95$	$> 70$	$> 50$	$> 95$	$> 95$	$> 70$	$> 80$	$> 95$
重烃	$< 1\sim 2$	$> 5$	$> 5$	$< 5$	$< 1\sim 2$	10	$> 5$	$< 5$
$C_1/C_{1\sim 5}$	0.95~1	0.7~0.97	0.5~0.9	0.95~1	0.95~1	0.7~0.95	0.7~0.95	0.95~1
$C_2/C_3$	$> 2$	1~5	0.9~3.5	1~3	$> 2$	0.8~3	0.8~3	1.5~7
$\delta^{13}C_2$		$< -29$				$> -29$		

表4 Y7断块气层气及油伴生气烃类组成分析表

类型	井号	层位	$CH_4$	$C_2H_6$	$C_3H_8$	$iC_4$	$nC_4$	$C_5^+$	$C_2^+$	$C_1/\sum C_{1-n}$	$C_2/C_3$	$iC_4/nC_4$
油伴生气	Y7-1	$E_2d_1$	90.34	3.62	1.62	0.20	0.49	1.37	7.30	0.925	2.23	0.41
气层气	Y7-8	$E_2d_1$	84.90	6.39	2.55	0.40	1.28	4.20	14.82	0.851	2.51	0.31
气层气	Y7	$E_2d_1$	80.34	8.03	3.79	0.93	1.77	1.24	15.76	0.836	2.12	0.53

据戴金星等研究认为<sup>[10-12]</sup>, 油型热解气是由热催化作用形成的, 气体中甲烷含量大于50%, 重烃含量大于5%, 最高可达40%~50%,  $C_1/C_{1-5}$ 为0.5~0.90,  $C_2/C_3$ 为0.9~3.5,  $iC_4/nC_4$ 小于1,  $\delta^{13}C_1$ 为-50‰~-40‰,  $\delta^{13}C_2$ 为-29‰~-28‰, 甲烷系列碳同位素具正分布特征。永安地区天然气组分、碳同位素特征均与之一致, 表明永安地区热解凝析气属于热催化作用形成的原油伴生气和凝析油伴生气的混合气, 大致相当于 $R_0$ 为0.6%~1.3%演化阶段的产物。

已经证实, 永安地区天然气的气源主要来自深凹带 $E_1f_4$ 烃源岩。目前, 高邮凹陷已发现的凝析气藏(伴生气)平面上主要环邵伯和樊川次凹分布, 南部肖刘庄和真武地区气藏基本紧贴真2断层分布, 真2大断层起到主要输导作用, 纵向上含气层位多; 北部永-联地区含气层位主要在戴一段二、三亚段( $E_2d_1^2$ 、 $E_2d_1^3$ ), 可能断层和底部砂体共同起到输导作用。

这类气藏形成的关键因素有二: 一是有持续充

足的油气源, 且有长期活动垂向沟通气源的断层; 二是圈闭要具有良好的封闭性。

3.3 朱家墩高成熟裂解干气成因

朱家墩天然气中, 烃类气体含量 $CH_4 > 95\%$ (表1), 干燥系数 $> 20$ ;  $\delta^{13}C_1 > -38\%$ , 且大部分天然气样 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3 < \delta^{14}C_4$ , 天然气为有机成因气; 天然气 $C_7$ 轻烃系列的正构-异构-环烷烃相对百分含量三角图显示为油型气特征, 且轻烃异庚烷值主要分布在3~8, 指示为高成熟气。

将源岩热模拟试验与在线同位素两项技术结合起来进行气/岩对比, 是目前国内外气源对比方面较先进的一项技术。通过对泰州组( $K_2t$ )、阜二段( $E_1f_2$ )源岩热模拟产出的气和轻烃在线同位素检测, 发现YCA1井天然气轻烃与YCH1井泰州组源岩热模拟实验轻烃单体同位素可比性较差(图8), 试验产出的轻烃比天然气轻烃总体偏负1‰~2‰, 反映朱家墩天然气与 $K_2t$ 、 $E_1f_2$ 源岩两者亲缘关系不密切。

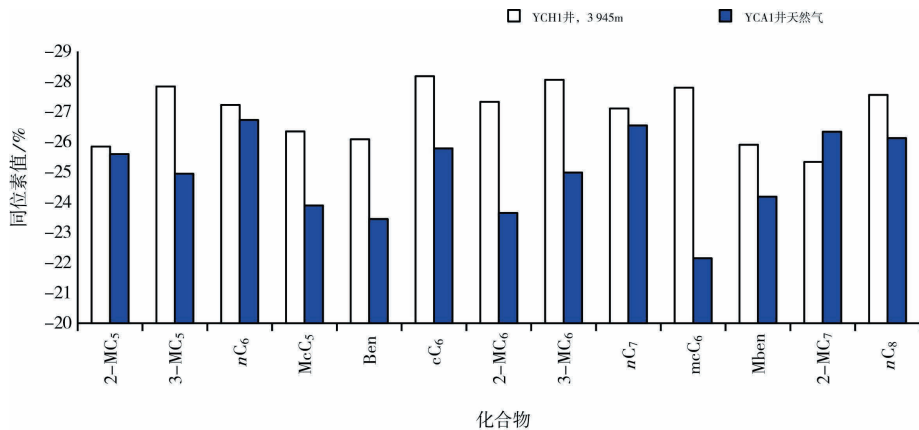


图8 YCH1天然气轻烃与泰州组源岩热模拟实验轻烃单体碳同位素对比

依据区域地质分析<sup>[13-14]</sup>,盐城凹陷深凹主体带缺失三叠系(T)-上古生界烃源岩,仅存在下古生界烃源岩(凹陷内钻遇老地层的SC1井、Z1井和YC3井均缺失石炭系(C)-T地层)。而区域海相上古生界烃源岩主要以生油为主,下古生界以生气为主,故此推测气源应主要来自下古生界的高成熟裂解气。

4 结论

(1)苏北盆地烃类气划分为干气和湿气两大类。干气油气田(藏)有朱家墩气田、周庄气藏、刘庄气藏,及H5井等气井;湿气油气田(藏)有永安、肖刘庄气藏,以及金湖、高邮凹陷大量的古近系油伴生气。

(2)苏北盆地天然气总体上具有有机腐泥型特征,但各油气田(藏)又有不同的特点:①刘庄气藏甲烷、乙烷碳同位素值偏负,丙烷碳同位素值偏正,与菌解有关;②朱家墩气田总体上也具有 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3 < \delta^{13}C_4$ 特点,但个别出现倒转,可能是存在成熟度偏低的天然气混入;③朱家墩气田甲烷同位素偏正,反映有机质类型偏腐殖,且与热演化程度较高有关。

(3)永安地区轻烃主要源于腐泥型母质,属油型气;朱家墩气田轻烃具有偏腐殖型母质的特征;刘庄、黄珏等地区浅层气为低成熟气;富民、永安、肖刘庄等地区气藏气为成熟气;盐城凹陷朱家墩气田天然气为高成熟气。

(4)苏北盆地天然气为三种成因类型:原油生物降解气、热解凝析气及裂解气。

(5)刘庄气藏天然气属于成熟的腐泥型油伴生气,由运移分异脱出油溶气和原油生物降解气两部分气组成;永安地区天然气属于热催化作用形成的原油伴生气和凝析油伴生气的混合气,大致相当于 $R_0$ 为0.6%~1.3%演化阶段的产物;朱家墩天然气为

气源主要来自下古生界的高成熟裂解干气。

参考文献:

[1] 毛凤鸣,陈安定,严元峰,等.苏北盆地复杂小断块油气成藏特征及地震识别技术[J].石油与天然气地质,2006,27(6):827-840.

[2] 张冬玲,鲍志东,刘平兰.苏北盆地浅层天然气藏成藏条件探讨[J].石油勘探与开发,2005,32(2):46-49.

[3] 郭念发,郑绍贵.苏北盆地天然气成藏特征及选区评价[J].天然气工业,1999,(3):19-27.

[4] 赵靖舟,张金川,高岗.天然气地质学[M].北京:石油工业出版社,2013:37-59.

[5] 包建平,毛凤鸣,段云鹏,等.苏北盆地盐城凹陷天然气和凝析油的地球化学特征和成因[J].天然气地球科学,2004,15(2):103-109.

[6] 陈安定,王文军.盐城朱家墩气田气源及发现意义[J].石油勘探与开发,2001,28(6):45-49.

[7] 陈安定,刘东鹰,刘子满.江苏下扬子区海相中、古生界烃源岩晚期生烃的论证与定量研究[J].海相油气地质,2001,6(4):27-33.

[8] 许怀先,陈丽华,万玉金,等.石油地质实验测试技术与应用[M].北京:石油工业出版社,2001:93-118.

[9] 刘磊.原油菌解气生成的定量研究[D].天津:河北工业大学,2009.

[10] 戴金星.各类烷烃气的鉴别[J].北京:中国科学(B辑),1992,(2):185-193.

[11] 李小地.凝析气藏的成因类型与成藏模式[J].地质论评,1998,44(2):200-205.

[12] 刘文汇,徐永昌.天然气成因类型及判别标志[J].沉积学报,1996,(1):110-116.

[13] 楼章华,马永生,郭彤楼,等.中国南方海相地层油气保存条件评价[J].天然气工业,2006,26(8):8-11.

[14] 张淮,周荔青,李建青.下扬子地区海相下组合油气勘探潜力分析[J].石油实验地质,2006,28(1):15-20.

(编辑 杨芝文)