

# 川西新场地区须二段天然气成因类型和来源

白帆<sup>1</sup>, 吴小奇<sup>2</sup>, 曾华盛<sup>2</sup>, 袁晓宇<sup>2</sup>

(1. 中国石化石油物探技术研究院, 南京 211103; 2. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126)

**摘要:** 须二段是四川盆地陆相天然气勘探的重要层系之一。天然气地球化学特征研究表明, 新场地区须二段天然气干燥系数普遍高于 0.95, 为典型干气;  $\delta^{13}\text{C}_1$  和  $\delta^{13}\text{C}_2$  值分别为  $-34.5\text{‰} \sim -30.3\text{‰}$  和  $-29.1\text{‰} \sim -23.4\text{‰}$ ,  $\delta\text{D}_1$  值介于  $-168\text{‰} \sim -157\text{‰}$  之间, 烷烃气碳、氢同位素系列主体表现出典型正序特征, 部分样品发生了乙、丙烷碳同位素的部分倒转。新场须二段天然气为混合成因, 重烃气表现出以原油裂解气为主并混有部分煤型气的特征, 而甲烷则主要表现出煤型气的特点。气源对比研究表明, 新场须二段天然气主要来自马鞍塘组—小塘子组烃源岩, 须二段自身烃源岩也有一定的贡献。

**关键词:** 天然气; 地球化学特征; 气源对比; 新场构造带; 川西坳陷; 四川盆地

中图分类号: TE122.1<sup>+</sup>11

文献标志码: A

## Genetic types and sources of natural gases reservoired in the second member of the Xujiahe Formation in the Xinchang area of the Western Sichuan Depression

Bai Fan<sup>1</sup>, Wu Xiaoqi<sup>2</sup>, Zeng Huasheng<sup>2</sup>, Yuan Xiaoyu<sup>2</sup>

(1. SINOPEC Geophysical Research Institute, Nanjing, Jiangsu 211103, China;

2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

**Abstract:** The second member of the Upper Triassic Xujiahe Formation is an important exploration target for terrestrial natural gases in the Sichuan Basin. The geochemical characteristics of natural gases indicated that the gases reservoired in the second member of the Xujiahe Formation in the study area have high dryness coefficients generally over 0.95. The  $\delta^{13}\text{C}_1$ ,  $\delta^{13}\text{C}_2$  and  $\delta\text{D}_1$  values are in the ranges of  $-34.5\text{‰} \sim -30.3\text{‰}$ ,  $-29.1\text{‰} \sim -23.4\text{‰}$  and  $-168\text{‰} \sim -157\text{‰}$ , respectively. The alkane gases mainly display positive stable carbon and hydrogen isotope values with several samples being partially reversed between ethane and propane carbon isotopes. These gases are of mixed origin, and the heavy hydrocarbon gases were mainly derived from the secondary cracking of oil augmented with coal-type gas, whereas methane was mainly a coal-type gas. Gas-source correlations indicated that the natural gases reservoired in the second member of the Xujiahe Formation were derived mainly from the source rocks in the Ma'antang and Xiaotangzi formations and augmented by those in the second member of the Xujiahe Formation itself.

**Key words:** natural gas; geochemical characteristics; gas-source correlation; Xinchang tectonic belt; Western Sichuan Depression; Sichuan Basin

四川盆地是我国陆上重要的天然气产区之一, 近年来在海相层系天然气勘探不断取得重要突破<sup>[1-3]</sup>的同时, 陆相层系上三叠统须家河组和侏罗系也显示出巨大的勘探潜力<sup>[4-10]</sup>。川西坳陷是四川盆地重要的勘探阵地之一, 须家河组煤系为须家河组和侏罗系气藏提供了充足的气源<sup>[4-10]</sup>。须家河组自下而上可以分为六段, 其中须家河组一、三、五段以偏腐殖型暗色泥岩和煤为主, 常作为主力气源岩及区域性盖层, 二、四、六段以砂岩为主, 常

为主力储层, 从而构成了 3 套生储盖组合, 形成许多自生自储煤型气田<sup>[6]</sup>。在川西地区, 须一段又常被细分为马鞍塘组和小塘子组<sup>[11]</sup>。

须二段是川西地区陆相天然气勘探的重要目的层, 目前已经在中坝、邛西、新场等地区发现了须二段气藏<sup>[6]</sup>, 展示出良好的勘探前景, 如新场气田新 851 井须二段测试获日产天然气高达  $42 \times 10^4 \text{m}^3$ <sup>[12]</sup>。前人对川西坳陷须二段天然气的组分和同位素地化特征进行了一些研究, 并对其成因

收稿日期: 2014-10-20; 修订日期: 2015-08-03。

作者简介: 白帆 (1986—), 女, 硕士, 助理工程师, 从事储层与烃源岩预测研究。E-mail: baifan.swty@sinopec.com。

基金项目: 国家自然科学基金 (青年科学基金) 项目 (41302118) 资助。



表 1 川西坳陷新场地区须二段天然气组分和碳氢同位素组成

Table 1 Composition and carbon and hydrogen isotopes of natural gases reservoird in the second member of the Xujiahe Formation in the Xinchang area of the Western Sichuan Depression

井号	井深/ m	组分/%						$\delta^{13}C/‰$				$\delta D/‰$		
		CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	$\delta^{13}C_1$	$\delta^{13}C_2$	$\delta^{13}C_3$	$\delta^{13}C_{CO2}$	$\delta D_1$	$\delta D_2$	$\delta D_3$
川合 127	4 530	97.86	0.83	0.07	0.02	0.37	0.69	-30.71	-24.94	-25.46				
川合 127	4 517	97.72	1.23	0.38	0.24	0.30	0.05	-32.10	-26.80	-27.00		-163	-161	-123
新 2	4 749	98.14	0.77	0.06	0.02	0.30	0.66	-31.88	-28.31					
新 3	4 951	97.57	0.77	0.09	0.02	0.27	1.25	-31.36						
新 5	4 957	97.54	0.94	0.10	0	0	1.42	-31.60	-28.40	-28.20	-8.10	-166		
新 8-1H	5 022	97.27	0.80	0.08	0	0.55	1.28	-32.20	-26.70	-25.50		-159	-148	
新 856	4 835.5	97.10	0.70	0.07	0.02	0.62	1.40	-30.80	-29.10	-28.10		-157	-151	-115
新场 6		97.39	1.06	0.12	0	0	1.43	-31.90	-26.40	-26.80	-7.50	-165		
川高 561	4 921	97.41	0.97	0.10	0	0	1.52	-32.90	-28.30	-27.80	-7.70	-168		
川合 137	4 613	93.03	3.77	0.81	0.34	0.55	1.23	-34.48	-23.97	-21.36	-5.93	-164	-125	
新 853	5 049	97.12	0.82	0.08	0.02	0.42	1.44	-31.16	-27.34		-2.40	-159		

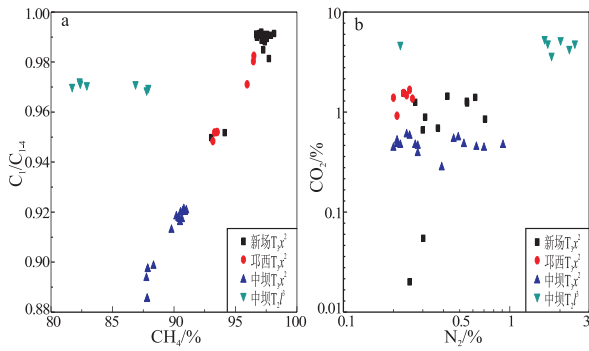


图 2 川西坳陷须二段天然气组分特征  
数据来源:本次工作及文献[4,7-8,26]。

Fig.2 Compositional characteristics of natural gases reservoird in the second member of the Xujiahe Formation in the Western Sichuan Depression

川西坳陷中段须二段天然气中非烃气体含量普遍较低,CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>含量分别为 0.02%~1.54%和 0~0.71%(表 1,图 2);与之相比,邛西地区须二段天然气普遍具有较低的 N<sub>2</sub>含量(0.20%~0.26%),而

中坝地区须二段天然气则普遍具有略低的 CO<sub>2</sub>含量(0.28%~0.60%)(图 2)。川西坳陷中段须二段天然气中均不含 H<sub>2</sub>S。中坝地区雷三段天然气具有较高的 H<sub>2</sub>S(1.78%~7.77%)、CO<sub>2</sub>(3.65%~5.37%)和 N<sub>2</sub>(0.22%~2.46%)<sup>[4,7]</sup>含量,这与川西坳陷须二段天然气具有明显不同的非烃气体组成(图 2)。

2.3 碳同位素特征

在烷烃气碳同位素组成方面,新场地区须二段天然气  $\delta^{13}C_1$ 值介于-34.5‰~-30.3‰之间, $\delta^{13}C_2$ 值介于-29.1‰~-23.4‰之间;邛西地区须二段天然气  $\delta^{13}C_1$ 值(-33.7‰~-30.5‰)与之类似,但  $\delta^{13}C_2$ 值分布较为集中且整体较高,介于-24.1‰~-22.4‰之间;中坝地区须二段天然气  $\delta^{13}C_1$ 值(-38.0‰~-34.0‰)整体略低, $\delta^{13}C_2$ 值则介于-26.0‰~-23.0‰之间(图 3)。中坝雷三段天然气  $\delta^{13}C_1$ 值介于-36.9‰~-33.7‰之间,与该区须二段天然气类似,而  $\delta^{13}C_2$ 值介于-31.1‰~-27.7‰之

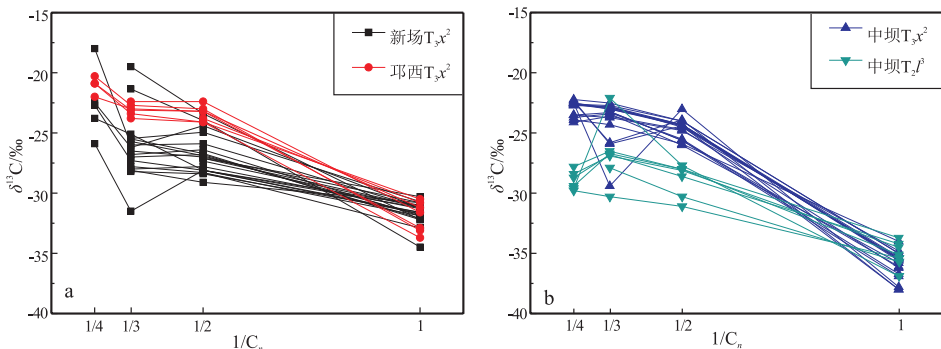


图 3 川西坳陷须二段天然气  $\delta^{13}C-(1/C_n)$ 相关关系  
数据来源:本次工作和文献[4,7-8,26]。

Fig.3  $\delta^{13}C$  vs.  $(1/C_n)$  of natural gases reservoird in the second member of the Xujiahe Formation in the Western Sichuan Depression

间,整体明显低于须二段天然气的值(图 3)。

川西坳陷须二段烷烃气主体具有碳同位素正序特征( $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3 < \delta^{13}C_4$ ),与典型有机成因气特征一致,其中新场须二段部分气样发生了乙、丙烷碳同位素的部分倒转( $\delta^{13}C_2 > \delta^{13}C_3$ ),中坝须二段有部分气样发生了乙、丙烷或丙、丁烷碳同位素的部分倒转( $\delta^{13}C_3 > \delta^{13}C_4$ ) (图 3)。中坝雷三段天然气均表现出甲烷至丙烷正序特征,但多数发生了丙、丁烷碳同位素的部分倒转( $\delta^{13}C_3 > \delta^{13}C_4$ )。

## 2.4 氢同位素特征

新场须二段天然气  $\delta D_1$  值介于  $-168\text{‰} \sim -157\text{‰}$  之间(表 1),邛西地区须二段天然气  $\delta D_1$  值与之较为一致,介于  $-159\text{‰} \sim -157\text{‰}$  之间,中坝地区须二段天然气  $\delta D_1$  值明显较低,介于  $-173\text{‰} \sim -170\text{‰}$  之间;中坝雷三段天然气  $\delta D_1$  值明显较高,介于  $-141\text{‰} \sim -140\text{‰}$  之间<sup>[7]</sup>。

川西坳陷须二段烷烃气氢同位素系列特征整体与碳同位素系列一致,普遍表现出典型正序特征( $\delta D_1 < \delta D_2 < \delta D_3$ ),仅邛西须二段有部分样品发生了乙、丙烷氢同位素的部分倒转( $\delta D_2 > \delta D_3$ )<sup>[7]</sup>;中坝气田雷三段烷烃气均表现出氢同位素正序特征<sup>[7]</sup>。

## 3 天然气成因和来源

### 3.1 天然气成因

川西坳陷须二段天然气在烷烃气碳氢同位素系列上均普遍表现出正序特征(表 1,图 3),与有机成因烷烃气一致;这些天然气具有较高的甲烷碳同位素值( $-38.0\text{‰} \sim -30.3\text{‰}$ ),而与生物气有明显区别,在 Bernard 图上与热成因气特征一致(图 4)。根据原始有机质类型不同,可以概括性地将有机成因气划分为油型(腐泥型)气和煤型(腐殖型)气<sup>[27]</sup>。邛西和中坝地区须二段天然气在 Bernard 图上与Ⅲ型干酪根生成的天然气一致,而新场须二段和中坝雷三段天然气则介于Ⅱ型和Ⅲ型干酪根生成的天然气范围之间,表现出混合型母质的特点。

一般认为,乙烷碳同位素具有较强的原始母质继承性,是鉴别煤型气和油型气的有效指标<sup>[29]</sup>,国内学者常采用  $-28.0\text{‰}$  作为分界值<sup>[30]</sup>;煤型气与油型气丙烷的碳同位素值则常常以  $-25.5\text{‰}$  作为分界<sup>[27,31]</sup>。川西坳陷须二段天然气乙、丙烷碳同位素值具有较好的正相关性,其中邛西和中坝地区须二段天然气具有较重的乙、丙烷碳同位素组成,二者分别普遍高于  $-28.0\text{‰}$  和  $-25.5\text{‰}$ <sup>[4,7-8]</sup>,表现出典型煤型气特征;新场须二段天然气则  $\delta^{13}C_3$  值普

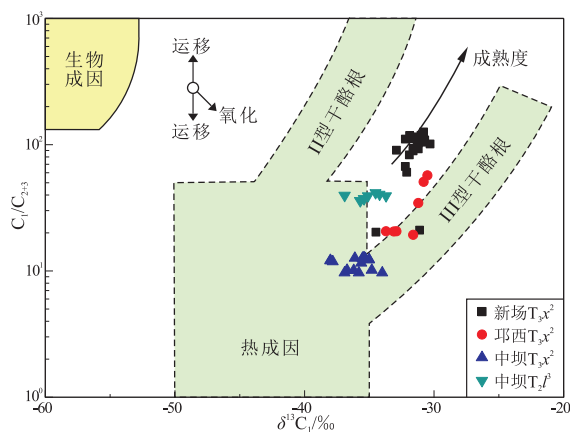


图 4 川西坳陷须二段天然气  $(C_1/C_{2+3})-\delta^{13}C_1$  相关性底图据 Bernard<sup>[25]</sup>;数据来源:本次工作和文献<sup>[4,7-8,23]</sup>。

Fig.4  $(C_1/C_{2+3})$  vs.  $\delta^{13}C_1$  of natural gases reservoird in the second member of the Xujiahe Formation in the Western Sichuan Depression

遍低于  $-25.5\text{‰}$ ,  $\delta^{13}C_2$  值也普遍低于邛西和中坝须二段天然气,部分样品甚至低于  $-28.0\text{‰}$ ,表现出受油型气混合的影响;中坝地区雷三段天然气  $\delta^{13}C_2$  和  $\delta^{13}C_3$  值分别普遍低于  $-28.0\text{‰}$  和  $-25.5\text{‰}$ <sup>[4,7]</sup>,表现出典型油型气特征。

不同类型有机质生成的天然气在甲、乙烷碳同位素值相关图上表现出不同的趋势,在  $\delta^{13}C_1$  值相近的情况下,腐殖型母质生成的天然气比腐泥型母质生成的天然气具有更高的  $\delta^{13}C_2$  值<sup>[32]</sup>。川西坳陷须二段天然气  $\delta^{13}C_1$  和  $\delta^{13}C_2$  值之间没有明显的相关性,邛西和中坝地区须二段天然气在  $\delta^{13}C_1$  和  $\delta^{13}C_2$  值相关图上与 Niger 三角洲和 Sacramento 盆地Ⅲ型干酪根生成的天然气一致,表现出典型煤型气特征;新场须二段天然气与中坝雷三段天然气特征类似,由于具有明显较低的  $\delta^{13}C_2$  值而主体表现出与邛西和中坝地区须二段天然气明显不同的分布趋势,接近 Delaware/Val Verde 盆地Ⅱ型干酪根生成的天然气分布趋势线,重烃气表现出以油型气为主并混有部分煤型气的特征(图 5)。

腐泥型有机质生成油型气的途径有干酪根直接降解和原油(包括聚集型原油和分散可溶有机质)裂解这两种<sup>[34]</sup>。基于不同类型模拟实验提出的  $(\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3) - (C_2/C_3)$  图可有效地识别原油裂解气和干酪根裂解气<sup>[32]</sup>。新场地区须二段具有油型气特征的重烃气( $\delta^{13}C_2 < -28.0\text{‰}$ ,  $\delta^{13}C_3 < -25.5\text{‰}$ ) 在  $(\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3) - (C_2/C_3)$  图(图 6)上表现出二次裂解气特征,表明这些油型气主要为原油裂解气。须二段储层中发现的沥青热演化程度极高,为古油藏高温裂解成气后的残余物<sup>[36]</sup>。

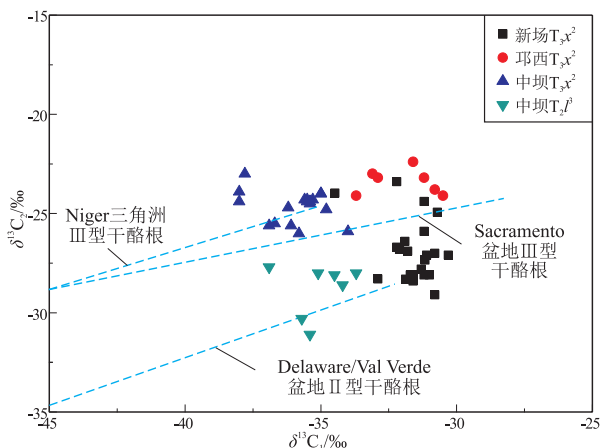


图5 川西拗陷须二段天然气  $\delta^{13}C_2-\delta^{13}C_1$  相关性

数据来源:本次工作;文献[4,7-8,23];Sacramento 盆地据 Jenden 等[33],Niger 三角洲和 Delaware/Val Verde 盆地据 Rooney 等[32]。

Fig.5  $\delta^{13}C_2$  vs.  $\delta^{13}C_1$  of natural gases reservoid in the second member of the Xujiahe Formation in the Western Sichuan Depression

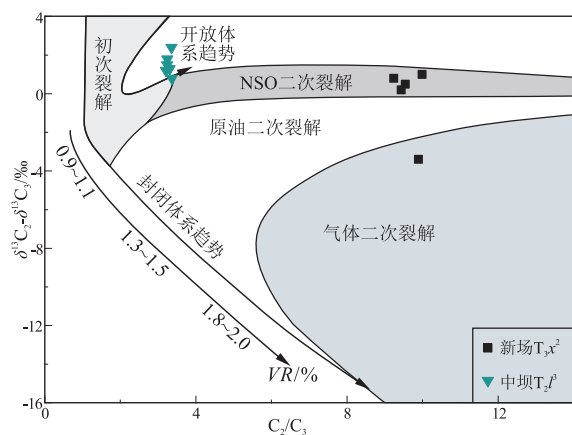


图6 川西拗陷新场须二段天然气  $(\delta^{13}C_2-\delta^{13}C_3)-(C_2/C_3)$  相关性

底图据 Lorant 等[35];数据来源:本次工作和文献[26]。

Fig.6  $(\delta^{13}C_2-\delta^{13}C_3)$  vs.  $(C_2/C_3)$  of natural gases reservoid in the second member of the Xujiahe Formation in the Western Sichuan Depression

对于干燥系数较高的天然气而言,由于重烃气含量较低,仅根据其碳同位素组成来推断天然气中占主体的甲烷的成因有时会得出片面的认识。氢同位素组成在揭示沉积环境等方面具有独特的优势[37],陆相淡水环境生成的甲烷其  $\delta D$  值一般小于海相咸水环境生成的甲烷[38],我国主要盆地的煤型气和油型气  $\delta D_1$  值均随其源岩形成时水介质盐度的增大而增大[30]。由于烷烃气氢同位素组成受源岩沉积环境、成熟度和有机质类型等3个因素制约[27],很难有统一的划分标准[5],如塔里木盆地油型气和煤型气  $\delta D_1$  值分布范围就没有清晰的分界特征[37]。四川盆地须家河组煤系烃源岩生成的天

然气其氢同位素值普遍低于海相烃源岩生成的天然气[7],前人采用的分界值不尽相同,  $-140\text{‰}$ [5]、 $-150\text{‰}$ [15]或 $-160\text{‰}$ [39]均有。川西拗陷须二段天然气  $\delta D_1$  值介于 $-173\text{‰}$ ~ $-157\text{‰}$ 之间,明显低于中坝雷三段天然气的值( $-141\text{‰}$ ~ $-140\text{‰}$ );在甲烷碳氢同位素相关图上,须二段天然气与德国西北部煤型气特征一致,而中坝雷三段天然气则与 Delaware/Val Verde 盆地油型气特征接近(图7)。

由此可见,邛西和中坝地区须二段天然气为典型煤型气,中坝地区雷三段天然气则为典型油型气,与前人研究结果[7,14-15]一致。对新场地区须二段天然气而言,其乙、丙烷碳同位素值具有较好的正相关性,一种可能是反映了母质成熟度的影响,但这些天然气甲、乙烷碳同位素值并没有明显的正相关性,受成熟度影响不明显(图5),且干燥系数普遍比较高(图2),表明热演化程度均比较高且差异不大,因此这种可能性可以排除;另一种可能是反映了油型气和煤型气混合的趋势,从甲、乙烷碳同位素值相关关系来看,在  $\delta^{13}C_1$  值主体变化范围较窄的情况下,  $\delta^{13}C_2$  值变化范围明显较宽,同样表现出油型气受煤型气混合的趋势(图5)。与邛西和中坝须二段典型煤型气相比,新场须二段天然气中的乙烷和丙烷等重烃气具有明显较低的碳同位素值,甚至与中坝雷三段油型气[7]较为接近,表明这些重烃气中有相当部分的油型气;与中坝雷三段典型海相油型气相比,新场须二段天然气中的甲烷具有明显较轻的氢同位素组成,与邛西和中坝地区须二段典型陆相煤型气一致(图7),表明甲烷主体为煤型气。因此,新场地区须二段天然气为混合成

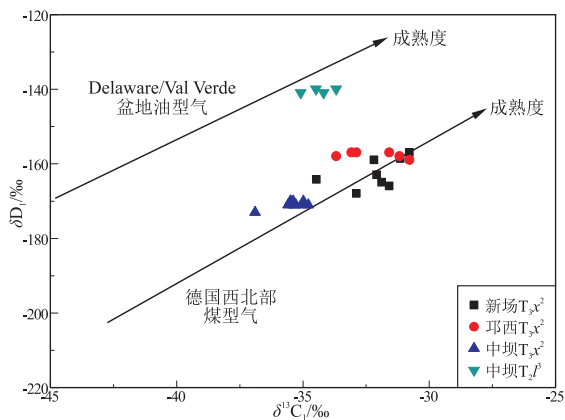


图7 川西拗陷须二段天然气  $\delta D_1-\delta^{13}C_1$  相关性

数据来源:本次工作和文献[7];Delaware/Val Verde 盆地油型气和德国西北部煤型气据 Schoell[38]。

Fig.7  $\delta D_1$  vs.  $\delta^{13}C_1$  of natural gases reservoid in the second member of the Xujiahe Formation in the Western Sichuan Depression

因,重烃气多数表现出油型气特征,而甲烷则表现出煤型气为主的特点。

### 3.2 天然气来源

由于新场须二段天然气中既有油型气也有煤型气,根据混源气母质演化程度计算公式<sup>[40]</sup>,并采用戴金星等<sup>[27]</sup>提出的经验公式参数,计算所得成熟度  $R_o$  主体介于 2.04% ~ 2.61% 之间,平均为 2.31%,与新场地区马鞍塘组一小塘子组烃源岩现今  $R_o$  主体介于 1.9% ~ 2.7%<sup>[41]</sup> 相一致。从生储盖的配置来看,四川盆地须二段天然气以须三段泥岩为有效盖层,以须一段(马鞍塘—小塘子组)为主要烃源岩<sup>[6,24]</sup>。

前人对须二段烃源岩地化特征研究程度较低,根据须三段烃源岩现今  $R_o$  主体介于 1.7% ~ 2.1%<sup>[41]</sup> 并结合马鞍塘组一小塘子组烃源岩现今成熟度,推断须二段烃源岩现今  $R_o$  主体介于 1.8% ~ 2.4% 之间,达到了高一过成熟阶段,也是须二段天然气可能的来源之一。川西坳陷须二段中的泥岩则是次要的烃源岩之一<sup>[11]</sup>,如新场地区须二段“腰带子”泥岩在钻井过程中气显示丰富,在新 851 井该泥岩段厚达 30 m<sup>[25]</sup>。

川西坳陷马鞍塘组一小塘子组 ( $T_3m+T_3t$ ) 沉积于海陆过渡相,物源供给在横向和纵向上变化较大,在坳陷北段和南段基本上都是Ⅲ型有机质,而在坳陷中段则以Ⅲ型有机质为主<sup>[11]</sup>。干酪根显微组分统计结果表明,川西坳陷中段马鞍塘组一小塘子组烃源岩中Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ型干酪根分别占 35%、20%和 45%,而须二段则以Ⅲ型干酪根占绝对优势,与须三、五段类似<sup>[42]</sup>。从川西坳陷天然气地化特征横向对比来看,位于坳陷北部的中坝气田和南部的邛西气田其须二段天然气主体均表现出典型煤型气特征,与马鞍塘—小塘子组烃源岩在凹陷北段和南段基本是Ⅲ型有机质<sup>[11]</sup> 相一致;而位于坳陷中段的新场地区其须二段天然气则表现出以煤型气为主混有部分油型气的特征,这也与坳陷中段马鞍塘—小塘子组烃源岩以Ⅲ型有机质为主并混有Ⅰ、Ⅱ型有机质<sup>[11,42]</sup> 相匹配。因此,川西坳陷须二段天然气在横向上表现出来的地化特征差异主要源自马鞍塘组一小塘子组烃源岩地化特征的差异。这也表明,新场须二段天然气主要来自马鞍塘组一小塘子组烃源岩,须二段自身烃源岩也有一定的贡献。

此外,新场地区须二段部分气样发生了乙、丙烷碳同位素的部分倒转,表明其不是原生的。生物成因烷烃气碳同位素系列部分倒转可能有多种原因<sup>[43]</sup>。川西新场地区未发现明显的非生物成因

气,碳氢同位素系列也主体表现出典型正序特征,因此非生物成因气与生物成因气混合的可能性可以排除;须二段气藏埋深较大不利于细菌活动,丙烷含量和碳同位素特征也未表现出受细菌氧化的特征;考虑到相对较轻的重烃气碳同位素组成及天然气为混合成因,新场须二段烷烃气碳同位素的部分倒转主要源自油型气和煤型气的混合。

## 4 结论

(1) 川西坳陷新场地区须二段天然气以烃类气体为主,干燥系数介于 0.950 ~ 0.992 之间,为典型干气,非烃气体  $CO_2$  和  $N_2$  含量较低,不含  $H_2S$ ;  $\delta^{13}C_1$  和  $\delta^{13}C_2$  值分别介于 -34.5‰ ~ -30.3‰ 和 -29.1‰ ~ -23.4‰ 之间,  $\delta D_1$  值介于 -168‰ ~ -157‰ 之间,烷烃气碳、氢同位素系列主体表现出典型正序特征,部分样品发生了乙、丙烷碳同位素的部分倒转。

(2) 新场须二段天然气为混合成因,重烃气表现出以原油裂解气为主并混有部分煤型气的特征,而甲烷则主要表现出煤型气的特点。气源对比研究表明,新场须二段天然气主要来自马鞍塘组一小塘子组烃源岩,须二段自身烃源岩也有一定的贡献。烷烃气碳同位素的部分倒转主要源自油型气和煤型气的混合。

致谢:样品采集与分析测试分别得到了中国石化西南油气分公司和中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所的大力协助与支持,审稿专家提出了宝贵修改意见,在此一并深表谢意!

### 参考文献:

- [1] 蔡立国,饶丹,潘文蕾,等.川东北地区普光气田成藏模式研究[J].石油实验地质,2005,27(5):462-467.  
Cai Liguang, Rao Dan, Pan Wenlei, et al. The evolution model of the Puguang gas field in northeast of Sichuan[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 27(5): 462-467.
- [2] Ma Y S, Zhang S C, Guo T L, et al. Petroleum geology of the Puguang sour gas field in the Sichuan Basin, SW China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2008, 25(4/5): 357-370.
- [3] Hao F, Guo T L, Zhu Y M, et al. Evidence for multiple stages of oil cracking and thermochemical sulfate reduction in the Puguang gas field, Sichuan Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(5): 611-637.
- [4] 秦胜飞,陶士振,涂涛,等.川西坳陷天然气地球化学及成藏特征[J].石油勘探与开发,2007,34(1):34-38.  
Qin Shengfei, Tao Shizhen, Tu Tao, et al. Characteristics of natural gas geochemistry and accumulation in Western Sichuan depression [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(1): 34-38.

- [5] 沈忠民,姜敏,刘四兵,等.四川盆地陆相天然气成因类型划分与对比[J].石油实验地质,2010,32(6):560-565.  
Shen Zhongmin, Jiang Min, Liu Sibing, et al. Partition and contrast on genetic type of continental natural gas in the Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(6): 560-565.
- [6] Dai J X, Ni Y Y, Zou C N, et al. Stable carbon isotopes of alkane gases from the Xujiahe coal measures and implication for gas-source correlation in the Sichuan Basin, SW China [J]. Organic Geochemistry, 2009, 40(5): 638-646.
- [7] Dai J X, Ni Y Y, Zou C N. Stable carbon and hydrogen isotopes of natural gases sourced from the Xujiahe Formation in the Sichuan Basin, China [J]. Organic Geochemistry, 2012, 43(1): 103-111.
- [8] 吴小奇, 黄士鹏, 廖凤蓉, 等. 四川盆地须家河组及侏罗系煤成气碳同位素组成 [J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(4): 418-427.  
Wu Xiaoqi, Huang Shipeng, Liao Fengrong, et al. Carbon isotopic compositions of coal-derived gas in the Xujiahe Formation and Jurassic in the Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(4): 418-427.
- [9] 王东. 阆中地区须家河组烃源岩动态演化模拟 [J]. 断块油气田, 2014, 21(1): 18-23.  
Wang Dong. Dynamic evolution simulation of Xujiahe Formation source rocks in Langzhong Area [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2014, 21(1): 18-23.
- [10] 赖锦, 王贵文, 郑懿琼. 川中蓬莱地区须二段储层岩性岩相类型及解释方法 [J]. 断块油气田, 2013, 20(1): 33-37.  
Lai Jin, Wang Guiwen, Zheng Yiqiong. Types and interpretation methods of lithology and lithofacies of the second member of Xujiahe Formation in Penglai Area, Central Sichuan Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2013, 20(1): 33-37.
- [11] 杨见, 张敏, 陈晓娜. 川西坳陷上三叠统须一段烃源岩地球化学特征分析 [J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2012, 9(12): 41-43.  
Yang Jian, Zhang Min, Chen Xiaona. Identification of Xu1 Member as main source rock in Upper Triassic from West Sichuan Depression [J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2012, 9(12): 41-43.
- [12] 杨克明, 叶军, 吕正祥. 川西坳陷上三叠统须家河组天然气分布及成藏特征 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(5): 501-505.  
Yang Keming, Ye Jun, Lv Zhengxiang. Characteristics of gas distribution and reservoiring in Upper Triassic Xujiahe Formation in Western Sichuan depression [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(5): 501-505.
- [13] Xiong Y Q, Geng A S, Liu J Z. Kinetic-simulating experiment combined with GC-IRMS analysis: application to identification and assessment of coal-derived methane from Zhongba Gas Field (Sichuan Basin, China) [J]. Chemical Geology, 2004, 213(4): 325-338.
- [14] Zhu G Y, Zhang S C, Huang H P, et al. Gas genetic type and origin of hydrogen sulfide in the Zhongba gas field of the western Sichuan Basin, China [J]. Applied Geochemistry, 2011, 26(7): 1261-1273.
- [15] 廖凤蓉, 于聪, 吴伟, 等. 四川盆地中坝气田天然气碳、氢同位素特征及气源探讨 [J]. 天然气地球科学, 2014, 25(1): 79-86.  
Liao Fengrong, Yu Cong, Wu Wei, et al. Stable carbon and hydrogen isotopes of natural gas from the Zhongba Gasfield in the Sichuan Basin and implication for gas-source correlation [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(1): 79-86.
- [16] 沈忠民, 潘中亮, 吕正祥, 等. 川西坳陷中段须家河组天然气地球化学特征与气源追踪 [J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2009, 36(3): 225-230.  
Shen Zhongmin, Pan Zhongliang, Lv Zhengxiang, et al. The geochemical characteristics of natural gas and the gas-sources tracing of Xujiahe Formation in the middle member of West Sichuan depression [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2009, 36(3): 225-230.
- [17] 叶军. 川西新场 851 井深部气藏形成机制研究; X851 井高产工业气流的发现及其意义 [J]. 天然气工业, 2001, 21(4): 16-20.  
Ye Jun. Research on the mechanism of forming deep  $T_3x^2$  gas reservoir in Xinchang gas field in west Sichuan depression; A discovery of high-production commercial gas in well X-851 and its significance [J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(4): 16-20.
- [18] 王睿婧, 刘树根, 张贵生, 等. 川西坳陷孝泉—新场—合兴场地区须二段天然气气源判定及成藏分析 [J]. 岩性油气藏, 2011, 23(4): 100-105.  
Wang Ruijing, Liu Shugen, Zhang Guisheng, et al. Judgement of natural gas resource and accumulation analysis of the second member of Xujiahe Formation in Xiaoquan - Xinchang - Hexingchang area of West Sichuan depression [J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(4): 100-105.
- [19] 秦胜飞, 赵孟军, 宋岩, 等. 川西前陆盆地天然气成藏过程 [J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 517-524.  
Qin Shengfei, Zhao Mengjun, Song Yan, et al. The gas accumulation process in Western Sichuan Foreland Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 517-524.
- [20] 罗啸泉, 陈兰. 川西坳陷形成演化及其与油气的关系 [J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(1): 16-19.  
Luo Xiaoquan, Chen Lan. Forming evolution of western Sichuan Depression and its relation with oil and gas [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2004, 11(1): 16-19.
- [21] 冷济高, 杨克明, 杨宇. 川西坳陷孝泉—丰谷构造带须家河组超压与天然气成藏关系研究 [J]. 石油实验地质, 2011, 33(6): 574-579, 586.  
Leng Jigao, Yang Keming, Yang Yu. Relationship between natural gas accumulation and overpressure in Xujiahe Formation, Xiaoquan - Fenggu structural belt, Western Sichuan Depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(6): 574-579, 586.
- [22] 杨克明. 四川盆地“新场运动”特征及其地质意义 [J]. 石油实验地质, 2014, 36(4): 391-397.  
Yang Keming. Characteristics of Xinchang Movement in Sichuan Basin and its geological significance [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(4): 391-397.
- [23] 杨克明. 川西坳陷须家河组天然气成藏模式探讨 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 786-793, 803.  
Yang Keming. Gas reservoiring mode in Xujiahe Formation of western Sichuan depression [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 786-793, 803.
- [24] 叶军. 川西坳陷马鞍塘组; 须二段天然气成矿系统烃源岩评

- 价[J].天然气工业,2003,23(1):21-25.
- Ye Jun.Assessment of hydrocarbon source rocks in Xu-2 Member, Ma'antang Formation, gas system in West Sichuan Depression[J].Natural Gas Industry,2003,23(1):21-25.
- [25] 叶军,曾华盛.川西须家河组泥页岩气成藏条件与勘探潜力[J].天然气工业,2008,28(12):18-25.
- Ye Jun,Zeng Huasheng.Pooling conditions and exploration prospect of shale gas in Xujiahe Formation in Western Sichuan Depression[J].Natural Gas Industry,2008,28(12):18-25.
- [26] 冷济高,杨克明,叶军,等.孝泉—丰谷构造带须家河组天然气烷烃碳同位素特征及气源对比[J].石油天然气学报,2011,33(6):16-21.
- Leng Jigao,Yang Keming,Ye Jun,et al.Carbon isotope features of alkane gases of Xujiahe Formation in Xiaoquan - Fenggu structural belt and their gas - source correlation[J].Journal of Oil and Gas Technology,2011,33(6):16-21.
- [27] 戴金星,裴锡古,戚厚发.中国天然气地质学(卷一)[M].北京:石油工业出版社,1992:1-149.
- Dai Jinxing,Pei Xigu,Qi Houfa.Natural gas geology in China: Vol.1[M].Beijing:Petroleum Industry Press,1992:1-149.
- [28] 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.
- [29] 张士亚,郜建军,蒋泰然.利用甲、乙烷碳同位素判识天然气类型的一种新方法[M]//石油与天然气地质文集(第一集).北京:地质出版社,1988:48-58.
- Zhang Shiya,Gao Jianjun,Jiang Tairan.A new approach to identify the natural gas types by carbon isotopes of methane and ethane[M]//Collected works on oil and gas geology (Vol 1). Beijing:Geological Press,1988:48-58.
- [30] 陈践发,李春园,沈平,等.煤型气烃类组分的稳定碳、氢同位素组成研究[J].沉积学报,1995,13(2):59-69.
- Chen Jianfa,Li Chunyuan,Shen Ping,et al.Carbon and hydrogen isotopic characteristics of hydrocarbons in coal type gas from China[J].Acta Sedimentologica Sinica,1995,13(2):59-69.
- [31] 戴金星,秦胜飞,陶士振,等.中国天然气工业发展趋势和天然气地质理论重要进展[J].天然气地球科学,2005,16(2):127-142.
- Dai Jinxing,Qin Shengfei,Tao Shizhen,et al.Developing trends of natural gas industry and the significant progress on natural gas geological theories in China[J].Natural Gas Geoscience,2005,16(2):127-142.
- [32] Rooney M A, Claypool G E, Moses Chung H. Modeling thermogenic gas generation using carbon isotope ratios of natural gas hydrocarbons[J].Chemical Geology,1995,126(3/4):219-232.
- [33] Jenden P D, Kaplan I R. Origin of natural gas in Sacramento Basin, California[J].AAPG Bulletin,1989,73(4):431-453.
- [34] 刘文汇,张建勇,范明,等.叠合盆地天然气的重要来源:分散可溶有机质[J].石油实验地质,2007,29(1):1-6.
- Liu Wenhui,Zhang Jianyong,Fan Ming,et al.Gas generation character of dissipated soluble organic matter[J].Petroleum Geology & Experiment,2007,29(1):1-6.
- [35] Lorant F,Prinzhofer A,Behar F,et al.Carbon isotopic and molecular constraints on the formation and the expulsion of thermogenic hydrocarbon gases[J].Chemical Geology,1998,147(3/4):249-264.
- [36] 罗小平,曹军,沈忠民.川西坳陷中段上三叠统须家河组储层沥青地球化学特征及成因研究[J].矿物岩石,2009,29(1):93-98.
- Luo Xiaoping,Cao Jun,Shen Zhongmin.Geochemical characteristics and genesis of reservoir bitumen of Xujiahe Formation in the Upper Triassic of Western Sichuan Depression[J].Journal of Mineralogy and Petrology,2009,29(1):93-98.
- [37] Liu Q Y,Dai J X,Li J,et al.Hydrogen isotope composition of natural gases from the Tarim Basin and its indication of depositional environments of the source rocks[J].Science in China: Series D:Earth Sciences,2008,51(2):300-311.
- [38] Schoell M.The hydrogen and carbon isotopic composition of methane from natural gases of various origins[J].Geochimica et Cosmochimica Acta,1980,44(5):649-661.
- [39] 于聪,龚德瑜,黄士鹏,等.四川盆地须家河组天然气碳、氢同位素特征及其指示意义[J].天然气地球科学,2014,25(1):87-97.
- Yu Cong,Gong Deyu,Huang Shipeng,et al.Geochemical characteristics of carbon and hydrogen isotopes for the Xujiahe Formation natural gas in Sichuan Basin[J].Natural Gas Geoscience,2014,25(1):87-97.
- [40] 庞雄奇,周海燕,李建青,等.判别混源气母质转化程度的定量模式及其应用[J].石油学报,2000,21(5):16-20.
- Pang Xiongqi,Zhou Haiyan,Li Jianqing,et al.The quantitative identification model of the evolution degree of mixing natural gas source material and the application of this model[J].Acta Petrolei Sinica,2000,21(5):16-20.
- [41] 江兴歌,曾华盛,朱建辉,等.川西坳陷中部上三叠统烃源岩动态演化模拟[J].石油与天然气地质,2012,33(4):545-551.
- Jiang Xingge,Zeng Huasheng,Zhu Jianhui,et al.Dynamic evolution simulation of the Upper Triassic source rocks in central part of western Sichuan Depression[J].Oil & Gas Geology,2012,33(4):545-551.
- [42] 刘四兵.川西坳陷中段须家河组流体成因与天然气动态成藏特征研究[D].成都:成都理工大学,2010.
- Liu Sibing.Research on origin of fluid and gas dynamic accumulation characteristics of Xujiahe Formation in the Middle Member of West Sichuan Depression[D].Chengdu:Chengdu University of Technology,2010.
- [43] Dai J X,Xia X Y,Qin S F,et al.Origins of partially reversed alkane  $\delta^{13}\text{C}$  values for biogenic gases in China[J].Organic Geochemistry,2004,35(4):405-411.