

川西坳陷侏罗系天然气气源对比研究

沈忠民¹, 刘涛¹, 吕正祥², 刘四兵¹

(1. 成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 成都 610059;
2. 中国石化西南分公司 勘探开发研究院, 成都 610081)

摘要: 川西坳陷侏罗系天然气具有 $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3$ 的正常系列分布特征, 为典型的热催化成因的煤型气, 天然气母质类型主要为腐殖型。通过岩石组合特征分析, 认为侏罗系天然气大部分来源于上三叠统须五段源岩, 须四段和侏罗系本身源岩(如自流井组暗色泥岩)可能也有一定贡献; 轻烃特征研究也说明了须五段源岩对侏罗系天然气有较大的贡献; $\delta^{13}\text{C}_1$ -Ro 关系更进一步说明了侏罗系天然气主要来源于须五段烃源岩, 而孝-新-合地区须四段和自流井组源岩可能有一定程度的贡献。

关键词: 川西坳陷; 侏罗系; 岩石组合特征; 轻烃; 碳同位素; 天然气

中图分类号: P618.130.26

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493(2008)-04-0577-06

A Comparison Study on the Gas Source of Jurassic Natural Gas in the Western Sichuan Depression

SHEN Zhong-min¹ LIU Tao¹ LV Zheng-xiang² LIU Si-bing¹

(1. Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation; Chengdu University of Technology; Chengdu 610059, China;
2. Exploration and Production Research Institute of Southwest Branch Company; SINOPEC; Chengdu 610081, China)

Abstract: The Jurassic natural gas in the western Sichuan depression has the normal series distribution characteristics ($\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3$), which is typical of coal type gas originated by thermal catalysis. The Kerogen of the natural gas is mainly of the humic type. Through analysis on the rock association characteristics it is suggested that most of the Jurassic natural gas was sourced from the 5th member of Xujiahe Formation of the Upper Triassic. The 4th member of Xujiahe Formation and the Jurassic (such as dark mudstone of the Ziliujing Formation) might also have some contribution for its source. The study on characteristics of light hydrocarbons also indicates important contribution of the 5th member of Xujiahe Formation source rocks. The relationship between $\delta^{13}\text{C}_1$ and Ro further evidences the same conclusion.

Key words: western Sichuan depression; Jurassic natural gas; characteristics of rock association; light hydrocarbon fingerprints; carbon isotopes

1 引言

早在20世纪70年代末, 川西坳陷即发现了大兴西自流井-沙溪庙组次生气藏, 其后又相继发现了玉泉、孝泉、平落坝、观音寺、新场、洛带、大兴断鼻隆起等侏罗系气藏(蔡开平和廖仕孟, 2000)。在研究区侏罗系气源研究方面, 前人做了大量的工作(孙甫南和曾庆庸,

1994; 郭正吾, 1997; 符晓和邓少云, 1997; 饶丹, 1999; 蔡开平和廖仕孟, 2000)。目前主要有以下几种观点: 一种观点笼统认定其气源来自上三叠统, 认为侏罗系下伏地层上三叠统是一套前陆盆地的含煤层系, 须一(即马鞍塘-小塘子组)、须三、须五段为砂页岩互层, 为侏罗系气藏烃类的主要来源(孙甫南和曾庆庸, 1994; 郭正吾, 1997), 但由于三者有机质相似, 都为腐

收稿日期: 2008-04-16; 修回日期: 2008-07-01

基金项目: 川西坳陷成藏年代地球化学特征研究(P05067-T01)

作者简介: 沈忠民, 男, 1954年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事石油地球化学及成藏研究; E-mail: szm313@cdu.edu.cn

殖型, 很难区分侏罗系气藏的气来自何段; 另一种观点认为, 侏罗系气藏的形成是先期形成的气藏被断层破坏后, 烃类沿断层面运移进入侏罗系而形成的(符晓和邓少云, 1997); 第三种观点认为, 川西地区侏罗系气藏的气源多数来自须五段生油岩, 与下伏的须家河组下部各段气藏无关, 部分地区气源来自遭断层破坏的须二段气藏(蔡开平和廖仕孟, 2000)。

总之, 对于川西坳陷侏罗系的气源至今尚无定论, 而气源研究关系到侏罗系气藏形成机制和今后的勘探部署, 是目前研究区迫切需要解决的问题。

本文在烃源岩及天然气基本地球化学特征研究的基础上, 通过轻烃指纹, 稳定碳同位素等对川西坳陷侏罗系天然气的主要来源进行了探讨, 提出了一些粗浅的认识。

2 天然气地球化学特征及成因类型

川西坳陷天然气甲烷含量主要分布在90.11%~97.86%之间, 绝大部分属于干气性质, 往下甲烷含量有增加的趋势, 反映了成熟度逐渐增高, 乙烷含量在0.51%~4.97%之间, 大部分在2%以上, 丙烷含量在0.04%~1.36%之间, 绝大部分小于1%, 丙烷以上烷烃含量很低, 一般在0.5%以下, 天然气相对密度为0.5671%~0.6098%^①。本次研究分层统计了川西坳陷31口井天然气的基本组分特征(表1), 从表1可以看到, 从上往下(J_{3p} — T_3x^2) CH_4 含量从91%~96%, C_2/C_3 从4.58~9.74, 干燥系数、 $\delta^{13}C_1$ 均呈增大趋势。干燥系数在0.94~0.98之间, 绝大部分属于干气。

研究区天然气碳同位素呈现出 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3$ 的正常系列分布特征(表1), 为典型的有机成因

气。 $\delta^{13}C_1$ 分布在-36.23‰~-32.51‰之间, $\delta^{13}C_2$ 分布在-25.59‰~-21.19‰之间, 根据前人(戴金星, 1993)天然气成因类型的判别标准, 研究区天然气为典型的煤型气。

根据张义纲(1991)的天然气成因类型判别图版, 本次研究利用 $\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_1$ 与 $\delta^{13}C_1$ 同位素的关系进一步对川西坳陷的天然气成因类型进行了划分(图1)。由图1可以看出, 川西坳陷的天然气为热成因气, 仅有一个点落在浅层混合气范围内。

而从川西坳陷天然气 C_7 指纹烃中的正庚烷(nC_7)、甲基环己烷(MCC₆)及二甲基环戊烷

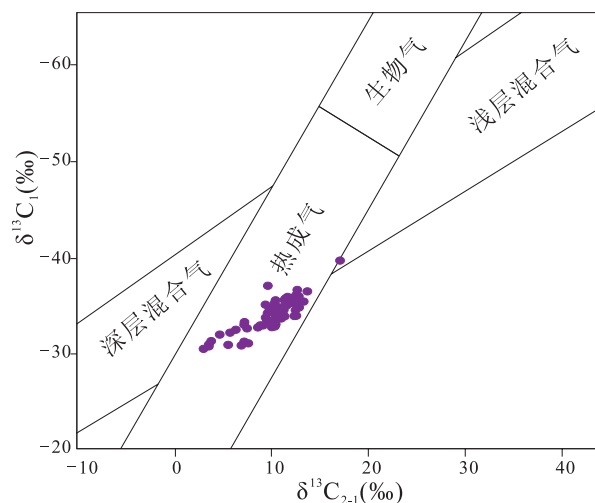


图1 川西坳陷天然气类型X型判别图

Fig. 1 X type discrimination diagram for natural gas in the western Sichuan depression

(DMCC₅)有机质类型判别图上则可看出, 研究区天然气母质类型绝大部分为III型干酪根(图2)。

3 气源对比

天然气气源对比的关键是挑选合适的气源对比指标, 如天然气组分、碳同位素、轻烃及轻烃

表1 川西坳陷侏罗系天然气基本地球化学特征统计表

Table 1 Carbon isotope compositions of the Jurassic natural gas in the western Sichuan depression

| 层位 | $C_1/\Sigma C_1-C_5$ | C_2/C_3 | CH_4 (%) | CO_2 (mg/L) | $\delta^{13}C_1$ (‰) | $\delta^{13}C_2$ (‰) | $\delta^{13}C_3$ (‰) |
|------------|----------------------|-----------|------------|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| J_{3p} | 0.94~0.98 | 3.60~5.52 | 0.47~0.96 | 0.04~3.36 | -32.51~-35.66 | -22.22~-25.59 | -19.44~-24.35 |
| | 0.95 (14) | 4.58 (14) | 0.91 (14) | 0.537 (35) | -34.036 (15) | -23.345 (15) | -20.954 (15) |
| J_{2s+x} | 0.91~0.96 | 3.70~6.45 | 0.92~0.96 | 0.039~1.14 | -32.61~-36.23 | -21.97~-23.84 | -18.62~-21.96 |
| | 0.94 (11) | 4.85 (11) | 0.93 (11) | 0.384 (64) | -34.633 (12) | -22.802 (12) | -19.911 (12) |

注: 表内数字表示最小值至最大值/平均值(样品数), J_{3p} 代表上侏罗统蓬莱镇组, J_{2s+x} 代表中侏罗统沙溪庙组。

① 沈忠民等. 2007. 川西坳陷成藏年代地球化学特征研究. 中石化西南分公司科研报告.

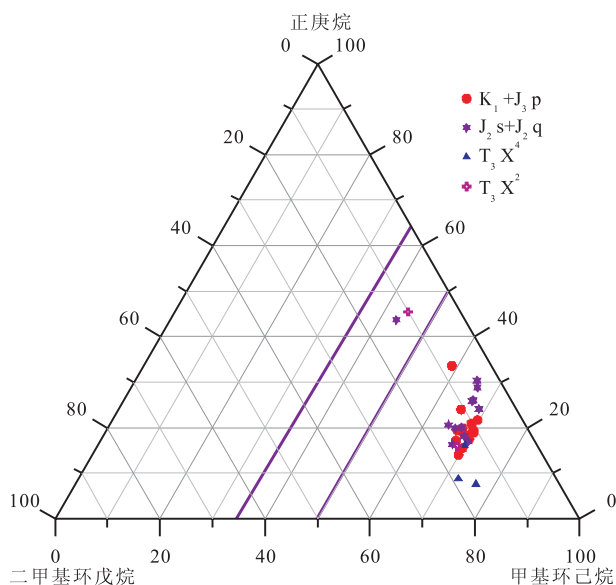


图2 川西坳陷中段天然气C₇轻烃指纹特征

Fig. 2 Characteristics of C₇ light hydrocarbon of natural gas in the middle part of the western Sichuan depression

同位素,判断出天然气性质,再结合岩石的性质和分布,确定天然气的源岩。

3.1 岩石组合特征分析

目前,整个四川盆地上三叠统地层划分方面还未统一,中石化西南油气分公司将上叠统自下而上划分为马鞍塘组(T_{3m})、小塘子组(T_{3t})及须家河组(T_{3x})三套地层,其中须家河组分为须二段(T_{3x}²)、须三段(T_{3x}³)、须四段(T_{3x}⁴)和须五段(T_{3x}⁵)4个亚段,而中石油西南油气田分公司则将上三叠统划分为须一段—须六段6个亚段。由于在马鞍塘—小塘子组地层是否对等于须一段方面仍有争议,因而本文的地层划分均沿用中石化西南油气分公司的划分方案。

川西坳陷碎屑岩领域可划出:马鞍塘—小塘子组(生)—须二段(储)—须三段(盖)、须三段(生)—须四段(储)—须五段(盖)及须五段—侏罗系砂岩(储)—侏罗系泥岩(盖)三大成藏系统(图3)。其中须四段可进一步划分出与之相关的成藏子系统^①。在图3中,为了体现上三叠统须家河组及其上地层的生信者盖组合关系,而局部放大了须家河组地层。

从岩石组合特征来看,下部马鞍塘—小塘子组烃源岩与侏罗系储层之间沉积了厚达3 000 m以

上的须二段—须四段沉积物,而须三段与侏罗系之间沉积的须四段—须五段沉积物也厚达1 000 m以上。因此,从岩石组合特征来看,马鞍塘—小塘子组和须三段烃源岩为侏罗系储层提供的气源应相对有限,而须四中亚段烃源岩与侏罗系储层相隔相对较近,可能对侏罗系天然气有一定的贡献。

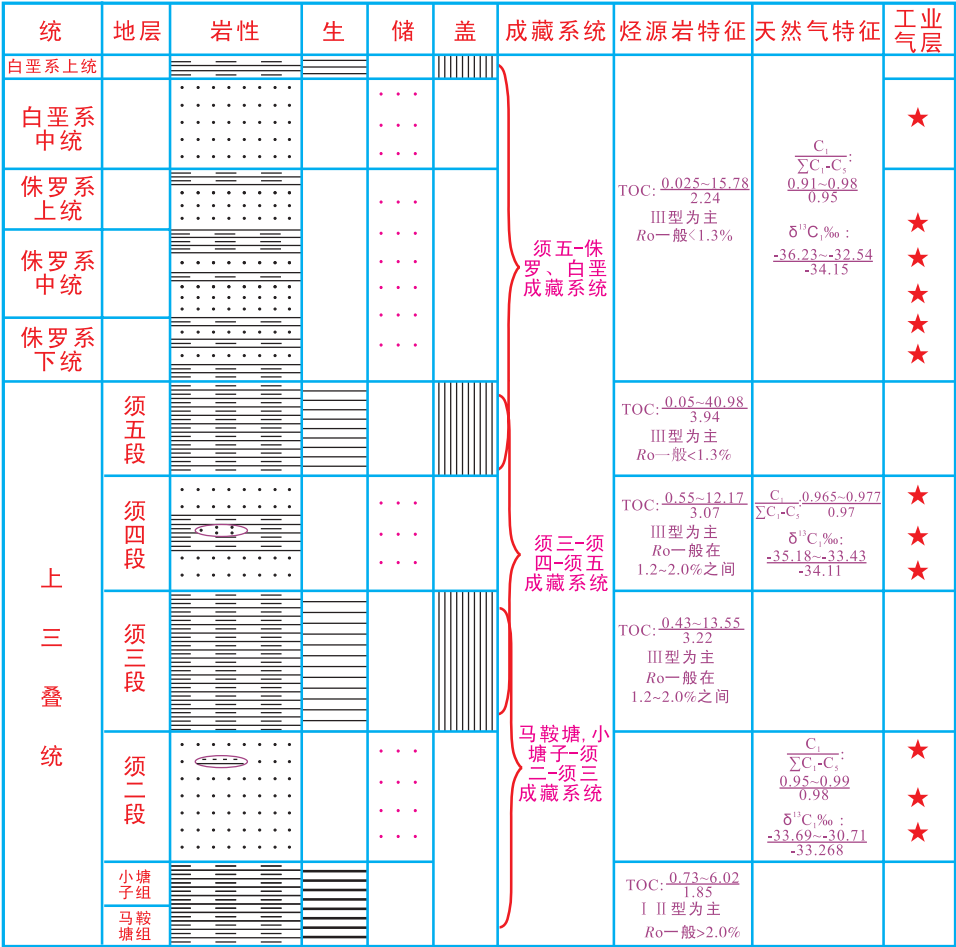
马鞍塘组—小塘子组、须三段、须五段是川西坳陷中段须家河组中较好的烃源岩发育层段(王玲辉和沈忠民,2007),从本次研究有机碳含量的统计情况来看(表2,图3),研究区烃源岩有机碳含量较高,平均值在1.85%~3.94%之间。须五段烃源岩有机碳平均值达3.94%,绝大部分样品有机碳含量在1%以上,生烃能力较强,须四段发育的烃源岩亦具有较强的生烃能力,有机碳平均值达到了3.07%,而侏罗系68个样品的有机碳平均值虽然也达到了2.24%,但其中40个样品的有机碳含量小于0.5%,生烃能力差(表2),有机碳含量较高的样品主要为自流井组的样品,绝大部分为煤层,少量样品为碳质页岩,厚度一般在1~2 m,平面上主要分布在孝—新—合一带^①。

通过上述分析,可见,对于研究区侏罗系来说,马鞍塘—小塘子组、须三段及须四段烃源岩与其相隔甚远,均在1 000 m以上,且在整个研究区稳定分布的泥岩厚度也在200 m以上,再加上研究区为典型致密—超致密砂岩这一特征,在无深大断裂发育的情况下,其所生天然气将难以运移至侏罗系成藏,而侏罗系岩石生烃能力相对有限。因此,侏罗系天然气有可能大部分来源于须五段源岩。当然,在发育深大断裂的区域,下部烃源岩可能也有一定贡献。对于这一结论,下文中将作进一步的论证。

3.2 轻烃指纹对比

随着天然气和轻质油藏的大量发现和加速开发,对轻烃的研究受到越来越多的重视。轻烃是指源岩或石油天然气中碳数小于15的烃类化合物,它们是天然气和轻质油的主要组分。天然气C₄—C₇烃类在高成熟的天然气中所占比例极少,又存在多种同分异构体,通常称为天然气“指纹”,其中蕴藏了大量的天然气母质类型信息

① 沈忠民等. 2007. 川西坳陷成藏年代地球化学特征研究. 中石化西南分公司科研报告.



3 川西坳陷上三叠统—侏罗系、白垩系成藏系统划分示意图

Fig. 3 Subdivision of the reservoir forming system for the upper Triassic, Jurassic and Cretaceous rock associations in the western Sichuan depression

表2 川西坳陷源岩有机碳含量分层统计表
Table 2 Contents of organic carbon in different layers of source rocks in the western Sichuan depression

| 层位 | 有机碳含量 (%) | | | |
|------------------------------|--------------------|------------------|------|-----|
| | 最小 | 最大 | 平均 | 样品数 |
| J | 0.025 (40个样<0.5) | 15.78 (5个样>10) | 2.24 | 68 |
| T ₃ ^{x5} | 0.05 (2个样<0.5) | 40.98 (7个样>10) | 3.94 | 120 |
| T ₃ ^{x4} | 0.55 (1个样<0.5) | 12.17 (3个样>10) | 3.07 | 77 |

(鲍典和沈忠民, 2008)。

本次研究所采用的轻烃指纹对比方法是指通过特定的方法 (鲍云杰等, 2006) 采集源岩或岩屑样品中气体, 对其组分进行分析, 得到源岩或岩屑样品中天然气的地化特征参数, 将其与储层中所采天然气的地球化学性质进行对比, 判断其相关性的方法。

根据所测数据的实际情况, 选取了*i*C₆/*n*C₆, cycC₇/(*n*+*i*) C₇, MCH/*n*C₇, MH/*n*C₇, 异庚烷值、正庚烷值、2-甲基戊烷/3-甲基戊烷几项碳数相同

或相差很小烃类进行了对比。从新856须五段源岩与川泰361Jp天然气、龙67井Jp天然气、川孝105Js天然气、龙68Jx天然气、川孝163JQ天然气几项轻烃指标的对比情况来看 (图4), 发现须五段源岩与侏罗系天然气的几项轻烃指标无论从曲线的变化趋势或是比值方面均很相似, 说明须五段源岩对侏罗系的天然气有较大贡献。

3.3 δ¹³C₁-Ro关系

在上述研究的基础上, 本文进一步通过碳同位素对侏罗系天然气源岩进行了分析, 这一方法

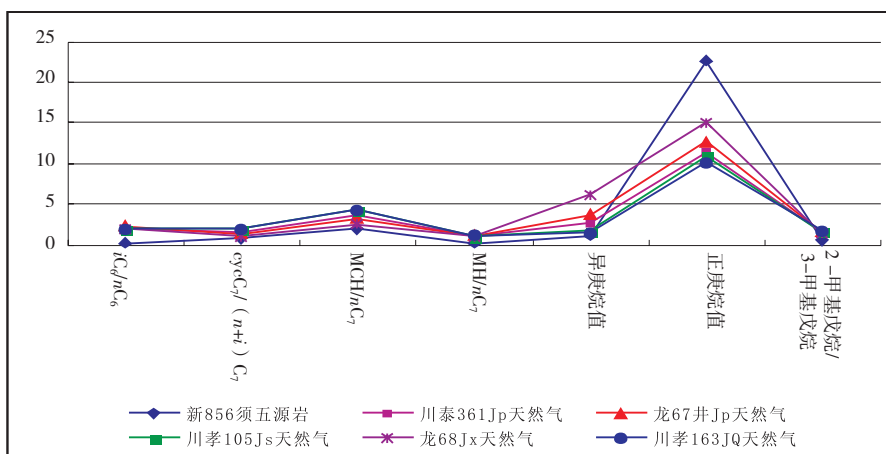


图4 川西坳陷须五源岩与侏罗系天然气轻烃指纹对比图

Fig. 4 A comparison diagram for the light hydrocarbon contents of the Jurassic natural gas in the source rocks of the 5th member of Xujiahe Formation of the upper Triassic in the western Sichuan depression

的基本原理是：以追踪煤型气源岩的 $\delta^{13}\text{C}_1\text{-Ro}$ 关系式可反推出对应天然气的 Ro ，根据源岩的实测 Ro 梯度值可进一步推出天然气对应的源岩深度和层位，减去天然气的产层深度，则得出天然气的运移距离。

本次研究利用由戴金星院士提出、考虑了天然气扩散运移影响的适用于煤成气的 $\delta^{13}\text{C}_1\text{-Ro}$ 的关系式：

$$\delta^{13}\text{C}_1 = 14.12 \log(\text{Ro}) - 34.39$$

进行计算。

据鸭子河地区川鸭91井、川鸭92井以及川鸭93井资料，该区的古地温梯度平均值为 $3.976^\circ\text{C}/100\text{ m}$ ，而孝-新-合地区古地温梯度平均值为 $3.397^\circ\text{C}/100\text{ m}$ 。计算中，考虑到坳陷中段沉积中心的鸭子河地区与东边孝泉—合兴场地区沉积厚度不同，古地温梯度不同，各按其代表性井

表3 川西坳陷天然气 Ro (%) 回归值和计算深度表Table 3 Regressional value Ro (%) and calculated formation depth of natural gas in the western Sichuan depression

| 构造带 | 井号 | 产层中深 ^① (m) | 层位 ^② | $\delta^{13}\text{C}_1$ (‰) | $\delta^{13}\text{C}_2$ (‰) | $\delta^{13}\text{C}_2 - \delta^{13}\text{C}_1$ (‰) | Ro (%) (计算值) | 计算深度 (m) | 运移距离 (m) | 对应层位 |
|-------------------|-------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--|--------------------------|-------------|-------------|------|
| 马井、 金堂及 鸭子河 | 马蓬13 | 1921 | J ₃ P | -33.54 | -22.28 | 11.26 | 1.15 | 3300 | 1379 | 须五段 |
| | 马沙1 | 3151 | J ₂ S | -33.52 | -23.84 | 9.68 | 1.15 | 3350 | 199 | 须五段 |
| | 川鸭609 | 1468 | J ₃ P | -34.37 | -24.29 | 10.08 | 1 | 2730 | 1262 | 须五段 |
| | 川泰361 | 674 | J ₃ P ¹ | -35.21 | -22.58 | 12.63 | 0.87 | 2700 | 2026 | 须五段 |
| | 龙67 | 1273 | J ₃ P | -33.5 | -22.79 | 10.71 | 1.16 | 3100 | 1827 | 须五段 |
| | 龙68D | 1503 | J ₂ X | -34.09 | -23 | 11.09 | 1.05 | 3060 | 1557 | 须五段 |
| | 金遂2 | 1641.5 | J ₃ P | -35.51 | -23.19 | 12.32 | 0.83 | 2400 | 758.5 | 须五段* |
| | 金蓬7 | 837 | J ₃ P | -33.74 | -22.85 | 10.89 | 1.11 | 3120 | 2283 | 须五段 |
| | 都遂10 | 1789.6 | J ₃ S | -32.61 | -21.97 | 10.64 | 1.34 | 3580 | 1790.4 | 须四段 |
| 孝-新-合 | 川合358 | 1048 | J ₃ P | -34.02 | -22.93 | 11.09 | 1.06 | 2550 | 1502 | 早侏罗统 |
| | 新浅31 | 1048 | J ₃ P ² | -32.54 | -22.22 | 10.32 | 1.35 | 3550 | 2502 | 须四段 |
| | 新浅100 | 954.6 | J ₃ P ² | -34.13 | -23.65 | 10.48 | 1.04 | 2700 | 1745.4 | 须五段 |
| | 新34 | 736 | J ₃ P ¹ | -33.06 | -25.59 | 7.47 | 1.24 | 3300 | 2564 | 须五段 |
| | 新浅105 | 979.2 | J ₃ P ² | -34.02 | -23.39 | 10.63 | 1.06 | 2750 | 1770.8 | 须五段 |
| | 川孝168 | 2032 | J ₂ S ¹ | -34.78 | -22.89 | 11.89 | 0.94 | 2660 | 628 | 须五段 |
| | 川孝105 | 1905 | J ₂ S ¹ | -34.3 | -22.73 | 11.57 | 1.01 | 2700 | 795 | 须五段 |
| | 川孝454 | 2310 | J ₂ S | -35.02 | -22.5 | 12.52 | 0.9 | 2600 | 290 | 须五段 |
| | 川孝163 | 2722 | J ₂ Q | -35.01 | -23.25 | 11.76 | 0.9 | 2600 | -122 | 早侏罗统 |
| | 川孝455 | 2520 | J ₃ S | -35 | -22.14 | 12.86 | 0.91 | 2450 | -70 | 早侏罗统 |
| | 孝蓬2 | 870 | J ₃ P | -33.21 | -23.36 | 9.85 | 1.21 | 3300 | 2430 | 须四段 |
| | 合蓬1 | 1033 | J ₃ P | -32.51 | -23.64 | 8.87 | 1.36 | 3550 | 2517 | 须四段 |

* 计算结果显示该井天然气应来源于早侏罗统，但从实际情况来看，该区早侏罗统不具生烃能力，因此本次研究仍将其定位须五段；①为产样深度的中间值；②J₃P为上侏罗统蓬莱镇组，J₂S为中侏罗统沙溪庙组，J₃X为中侏罗统下沙溪庙组，J₂Q为中侏罗统千佛崖组。

(CY92, CH127)的源岩实测 R_o 值和取样井深求取 R_o 梯度的平均值及源岩深度,以期计算结果更能反映实际情况。

从计算的结果来看(表3),川西坳陷侏罗系天然气在纵向上主要是向上的运移,运移距离在290~3100 m之间。孝泉地区的川孝455和川孝163井(产气层位分别为 J_{2q} 和 J_{3s})为从上往下的运移,运移距离为-100 m左右,从前文中烃源岩部分的论述中可知,研究区侏罗系的有效烃源岩主要集中在孝-新-合地区下侏罗统自流井组,而其他层位基本为红层,不具生烃能力,推测其气源可能主要由早侏罗自流井组的源岩提供,川合358井的蓬莱镇组天然气对应的源岩为早侏罗统,推测其源岩层位也可能是下侏罗自流井组的源岩;而金遂2井从计算深度来看,其烃源岩为早侏罗统,但实际上,该区早侏罗统烃源岩生烃能力差,因此本次研究将其烃源岩定位须五段;其它气井天然气主要来源于须五段和须四段烃源岩,分区来看,马井、金堂、鸭子河地区侏罗系天然气主要来自上三叠统须五段源岩,而新都、孝-新-合地区侏罗系的天然气则主要由须四、须五段共同提供(表3)。

4 结论

(1)川西坳陷侏罗系天然气具有 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3$ 的正常系列分布特征,为典型的热催化成因的煤型气,天然气母质类型主要为腐殖型。

(2)侏罗系天然气有可能大部分来源于须五段源岩,须四段和侏罗系本身源岩(如自流井组暗色泥岩)可能也有一定贡献;轻烃特征进一步说明了须五段源岩对侏罗系天然气有较大的贡献; $\delta^{13}C_1-R_o$ 关系反推源岩则更进一步说明了侏罗系天然气主要来源于须五段烃源岩,而孝-新-合地区须四段和自流井组源岩可能有一定程度的贡献。

(3)本次研究过程中,由于未能采集到马鞍塘一小塘子组和须三段的源岩样品,因此,不能完全排除这两个层段源岩对侏罗系天然气是否有贡献,这也是本文的不足之处。

References:

Bao Dian, Shen Zhongmin, Luo Xiaoping. 2008. The characteristics of

natural gas $C_4 \sim C_7$ fingerprint in the Western Sichuan Depression and its implications for gas reservoir formation [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 30(2): 113-116. (in Chinese with English abstract)

Bao Yunjie, Liu Jinling, Jin Xuande. 2006. Application of cutting gas analysis technique in the oil-gas layers evaluation [J]. *Logging Engineering*, 17(3): 16-18. (in Chinese with English abstract)

Cai Kaiping, Liao Shimeng. 2000. A research on the gas source of Jurassic gas reservoirs in west Sichuan basin [J]. *Natural Gas Industry*, 20(1): 36-41. (in Chinese with English abstract)

Dai Jinxing. 1993. Characteristics of carbon and hydrogen isotopes in natural gases and all kinds identifications of natural gas [J]. *Natural Gas Geoscience*, 3(2-3): 1-41. (in Chinese)

Fu Xiao, Deng Shaoyun. 1997. Middle and shallow gas reservoir characteristics of Xinchang gas field in west Sichuan and stereorexploration and stereodevelopment technical thinking [J]. *Natural Gas Industry*, 17(3): 14-19. (in Chinese with English abstract)

Guo Zhengwu. 1997. Natural gas exploration mode of shallow compact sand stone in the west part of Sichuan basin [J]. *Natural Gas Industry*, 17(3): 5-13. (in Chinese with English abstract)

Rao Dan. 1999. Study on facies patterns during the migration of the upper Triassic hydrocarbon in the west Sichuan depression [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 21(1): 18-21. (in Chinese with English abstract)

Sun Funan, Zeng Qingyong. 1994. Discussion on the formation mechanism of Jurassic secondary gas reservoir in the southern part of west Sichuan. *Natural Gas Industry*, 14(1): 23-26. (in Chinese with English abstract)

Wang Linghui, Shen Zhongmin, Zhao Hu. 2007. The geochemical characteristics of hydrocarbon source rock in the middle part of Xujiahe Formation in west Sichuan depression [J]. *West China Exploration Engineering*, 11: 66-69. (in Chinese with English abstract)

Zhang Yigang, et al. 1991. Origin, Accumulation and Preservation of Natural Gas [M]. Haihe University Press. (in Chinese)

参考文献:

鲍典, 沈忠民, 罗小平. 2008. 川西坳陷天然气 $C_4 \sim C_7$ 烃类“指纹”特征及在成藏研究中的意义[J]. *物探化探计算技术*, 30(2): 113-116.

鲍云杰, 刘金玲, 金玄德. 2006. 岩屑气分析技术在油气层评价中的应用[J]. *录井工程*, 17(3): 16-18.

蔡开平, 廖仕孟. 2000. 川西地区侏罗系气藏气源研究[J]. *天然气工业*, 20(1): 36-41.

戴金星. 1993. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别[J]. *天然气地球科学*, 3(2-3): 1-41.

符晓, 邓少云. 1997. 川西新场气田中、浅层气藏特征及立体勘探开发的技术思路[J]. *天然气工业*, 17(3): 14-19.

郭正吾. 1997. 四川盆地西部浅层致密砂岩天然气勘探模式[J]. *天然气工业*, 17(3): 5-13.

饶丹. 1999. 川西坳陷上三叠统烃的运移相态研究[J]. *石油实验地质*, 21(1): 18-21.

孙甫南, 曾庆庸. 1994. 川西地区南部侏罗系次生气藏形成机制探讨[J]. *天然气工业*, 14(1): 23-26.

王玲辉, 沈忠民, 赵虎. 2007. 川西坳陷中段须家河组烃源岩地球化学特征[J]. *西部探矿工程*, 11: 66-69.

张义纲, 等. 1991. 天然气的生成聚集和保存[M]. 南京: 河海大学出版社, 56.