2005 年 4 月
26 卷 2 期:157-162

地 球 学 报
ACTA GEOSCIENTICA SINICA

Apr. 2005
26(2):157-162

# 川西坳陷南段天然气来源与碳同位素地球化学研究

樊然学[1)]　周洪忠[2)]　蔡开平[2)]

1)成都理工大学,四川 成都,610059;
2)四川石油管理局川西北气矿地质勘探开发研究所,四川 江油,621709

**摘　要**　川西坳陷南段是四川盆地主要的天然气产区之一。前人对该区天然气的来源有多种见解。为了更清楚地认识此地区天然气的来源与运移,本文分析了平落坝、大兴西和白马庙气田 16 件天然气样品的 $C_1$—$C_4$ 烃及 $CO_2$ 组份的碳同位素组成。所获得的同位素数据结合化学成份和地质资料表明,3 个气田的烃类完全是热解成因的,都来源于气田下面的上三叠统烃源岩。这些气田的甲、乙烷碳同位素组成随深度呈不同规律的变化,这些变化归因于烃源岩生烃的热解过程和烃类运移的动力学过程。平落坝气田中侏罗统气藏的烃类大部份形成于烃源岩低成熟和成熟的早期阶段并受到晚期成熟气体的不断补给。平落坝和大兴西气田多数气藏的烃类被认为是从源区垂直向上运移通过上伏地层而进入气藏的,白马庙气田的烃类被认为是沿断裂通道向上侏罗统气藏聚集的。平落坝和大兴西气田的 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 值有很宽的分布范围(-10.7‰～-0.7‰),这表明气田的 $CO_2$ 由来自基底的海洋碳酸盐岩无机碳成份和沉积地层的有机碳成份混合而成。这些气田的[He/$CH_4$]-[$N_2$/$CH_4$]值之间和 $\delta^{13}C_{CO_2}$-$\delta^{13}C_1$ 值之间的相关性表明,非烃气体在进入气藏前已同烃类很好地混合,并被 $CH_4$ 为主流相的气流携带着向气藏运移。

**关键词**　天然气来源与运移　碳同位素　川西坳陷南段

## Carbon Isotopic Geochemistry and Origin of Natural Gases in the Southern Part of the Western Sichuan Depression

FAN Ranxue[1)]　ZHOU Hongzhong[2)]　CAI Kaiping[2)]

1) *Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan*, 610059;
2) *Institute of Petroleum Exploration and Development, Jiangyou, Sichuan*, 621709

**Abstract**　The southern part of the Western Sichuan Depression is one of the major gas-producing provinces in Sichuan Basin. There previously existed several different opinions on the gas origin of this area. In order to get a better understanding of the source and migration of natural gases in this area, the authors analyzed carbon isotopic compositions of $C_1$—$C_4$ hydrocarbon and $CO_2$ components of these gases. Natural gas samples were collected from 16 producing wells of well-known Pingluoba, Daxingxi and Beimamiao gas fields. Together with chemical composition and geological information, the isotope data indicate that hydrocarbons of all three gas-fields seem to be entirely thermogenic and are derived from the Upper Triassic source rocks at a relatively great burial depth. Methane and ethane of these gas fields display different trends of isotopic compositional variations with depth. These changes can be attributed to the thermal cracking process during the formation and the dynamic process during the secondary migration of these hydrocarbons. The hydrocarbons in Pingluoba and Daxingxi gas fields are assumed to have migrated from deeply buried source rocks to shallower reservoirs. In addition, the hydrocarbons of Middle Jurassic reservoirs in the Pingluoba gas field have greater wetness and lighter isotopic composition than those of Upper Triassic reservoirs, which is believed to be the result of their generation from early mature source rocks and their mixing with late mature gases. Having high wetness and heavy isotopic composition, the Beimamiao hydrocarbons are supposed to have been migrating into the Late-Jurassic reservoirs along faults and fractures.

**Key words**　source and migration of natural gases　carbon isotopic composition　Western Sichuan Depression

川西坳陷南段蕴藏着丰富的油气资源,从 20 世纪 70 年代以来,区内发现了平落坝、大兴西、白马庙等工业型气田。其中,平落坝气田的储量已探明为 $59.1\times10^8$ $m^3$,大兴西气田上三叠统气藏的储量为

本文为国家自然科学基金资助项目(编号:49773188)的成果。
改回日期:2003-6-4;责任编辑:宫月萱。
第一作者:樊然学,男,教授,同位素地球化学与同位素地质年代学专业;E-mail:frx@cdut.edu.cn。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.01 ×10$^8$ m$^3$,白马庙气田的预测储量高达 670 × 10$^8$ m$^3$;近几年还陆续发现众多的含气构造,并在新津-成都地区的侏罗系浅层气藏勘探中获得突破性进展❶❷❸。但人们对于平落坝、大兴西、白马庙等气田的气藏中天然气来源及其成藏机制的认识仍有争议。

天然气中甲、乙烷等烃类和二氧化碳的碳同位素组成及其时空变化特征是自然界生气物质成岩演化的直接结果,同气体形成与运聚的景观控制条件有耦合关系,因此,可以作为探索天然气来源的可靠地球化学示踪剂。本文通过研究川西坳陷南段平落坝、大兴西、白马庙气田天然气的甲、乙、丙、丁烷和二氧化碳的碳同位素地球化学特征,反演探讨气源岩的产气机制和烃类的运聚规律,以深化认识这些气田天然气的来源。

## 1 区域地质背景和采样位置

川西坳陷位于四川盆地西缘,是一个中新生代前陆盆地,呈 NE—SW 向带状展布,基底为一套古生代和中、下三叠世弱变质浅海相碳酸盐岩、白云岩夹板岩及片岩,埋藏深度 6 000～11 000 m。该坳陷南段地处龙门山推覆构造带之东,龙泉山推覆构造带之西,南抵峨眉-瓦山断块,北至成都-灌县一线,方圆约 1.3 ×10$^4$ km$^2$,区内基底之上快速充填了 1 200～2 400 m 巨厚的富含有机质及煤的上三叠统浅海陆棚相-浅湖沼泽相暗色砂泥质岩互层岩系,继后堆积了 2 400～3 200 m 厚的侏罗纪和白垩纪河流泛滥平原相贫有机质(有机碳含量 < 0.2 %)的红色砂泥质沉积❶❷❸。这些沉积地层是区内天然气的重要烃源层或储集层(图 1)。从晚三叠世至第三纪,区内地壳受印支、燕山和喜马拉雅构造运动幕的多次强烈影响、特别是受喜马拉雅期运动幕的继承改造而全面褶皱、抬升并产生古坳今隆的次级构造格局,同时伴生众多的逆掩断层和高度发育的裂隙网络,为油气运移、聚集提供了重要的通道和地层构造圈闭❶❷❸。

本文的采样气藏是大兴西、平落坝和白马庙气田的不同深度气藏。平落坝气田座落在川西坳陷南段西侧龙门山推复构造带山前带斜坡上,东邻呈近 SN 向的大兴西断裂带,构造为一 NNE 向短轴高丘状背斜,是以上三叠统须家河组二段、四段气藏和中侏罗统沙溪庙组气藏构成的多产层复合性气田,气藏埋藏深度为1520～4 200 m;大兴西气田座落在

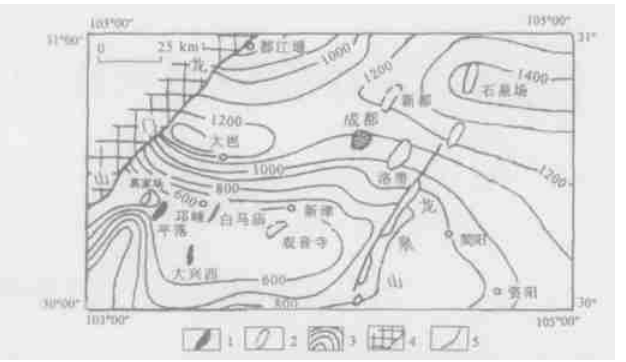



图 1 川西坳陷南段气藏位置图

Fig. 1 Location map of the natural gas reservoirs in the south area of Western Sichuan depression.

1-天然气藏;2-含气构造;3-中/下侏罗统地层厚度;4-中三叠统以下地层;5-断层

1-natural gas reservoirs; 2-gas-bearing structure; 3-thickness of Middle and Lower Jurassic strata; 4-strata below Middle Triassic; 5-fault

大兴西断裂带内,构造主要为两条走向相同而倾向相反的逆断层形成的地垒断块,主力气藏是上三叠统须家河组二段气藏和中下侏罗统沙溪庙组自流井群气藏,气藏埋藏深度 880～3 360 m;白马庙气田座落在北高南低的大兴潜伏鼻状隆起带北部低缓斜坡上,西邻大兴西断裂带,东至 NE 向龙泉山熊坡断裂带,由上三叠统须家河组二段、三段气藏和上侏罗统蓬莱镇组气藏构成,气藏埋藏深度 790～4 300 m❶❷❸。

## 2 结果与讨论

研究样品共计 16 件。其中 11 件直接采集于上述气藏的钻井井头或气水分离器蒸气端,采样前用井气对盛样钢瓶进行过反复冲洗,以驱逐瓶内残留气体与吸附气;这些样品的甲烷、乙烷、丙烷、丁烷和二氧化碳的碳同位素组成借助四川石油管理局勘探开发研究院的 MAT-252 质谱计进行分析测试,化学组成由四川石油管理局川西北矿区地质研究所无偿提供分析结果;其甲、乙、丙、丁烷和二氧化碳的碳同位素组成(分别简写为 $\delta^{13}C_1$,$\delta^{13}C_2$,$\delta^{13}C_3$,$\delta^{13}C_4$,$\delta^{13}C_{CO_2}$)分析资料(测量精确度为 ±0.1 ‰,1 σ、化学组成分析资料(测量精确度为 ±0.1 %,1 σ与地层资料,分别列于表 1 和表 2 中。表中,平落 1-1、1-2、1-3 与平落 2、大兴 2 样品的化学成份及碳同位素组成资料摘自四川石油管理局川西北矿区钻井完钻报告,化学成份资料作过100 %归一化处理,以便同其

❶ 四川石油管理局地质勘探开发研究院. 1994. 四川盆地大中型气田天然气特征.

❷ 四川石油管理局. 1995. 四川盆地中西部三叠系重点含气层系天然气富集条件研究.

❸ 四川石油管理局地质勘探开发研究院和四川石油管理局川西北矿区. 1998. 川西大兴地区上三叠统含油气性综合评价及勘探部署建议.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

他样品资料进行对比。

### 2.1　天然气组成

表 1 中,所有样品的最主要组份是甲烷,体积百分含量(简称含量)高达 92 %～98 %;乙烷、丙烷和丁烷有可检测量,$C_5$ —$C_{14}$链烷烃、环烷烃、芳烃的含量甚微;非烃组份的含量很低,除白马 1、白马 2 与平落 2 样品的 $N_2$ 含量为 1.5 ±0.1 %外,其余样品的 $N_2$、$CO_2$ 含量小于等于 0.9 %,He 含量小于等于 0.05 %;其他非烃组份(Ar, $H_2$, $H_2S$)的含量微乎其微。将甲、乙、丙、丁烷统称为烃类(即 $CH_4 + C_2H_6 + C_3H_8 + C_4H_{10}$,简写为 ∑Cn),乙、丙、丁烷简称为重烃(记为 $C_{2+}$)。所有样品的重烃同甲烷之间有着很好的含量相关性,$C_2H_6$-$CH_4$、$C_3H_8$-$CH_4$、$C_4H_{10}$-$CH_4$ 和 $C_{2+}$-$CH_4$ 含量相关系数($r$)分别为 - 0.965、- 0.949、- 0.907 和 - 0.981。$N_2$、$CO_2$、He 含量间也有良好的相关性,$N_2$-He 和 $N_2$-$CO_2$ 含量相关系数分别为 0.893 和 - 0.815。

表 2 中,所有样品的 $\delta^{13}C_1$、$\delta^{13}C_2$ 值分别在 - 39.21 ‰～ - 32.67 ‰和 - 25.45 ‰～ - 20.68 ‰范围内,$\delta^{13}C_3$、$\delta^{13}C_4$ 值有着大体相同的分布范围( - 23 ‰～ - 19 ‰)。这些样品的 $\delta^{13}C_1$ 同 $\delta^{13}C_2$ 值、$\delta^{13}C_3$ 同 $\delta^{13}C_4$ 值有着良好的函数关系(图 2),它们

**表 1　川西坳陷南段气藏天然气化学组成和钻井资料**

**Table 1　Major gas components ( %) of the natural gas reservoirs and well information in the south area of the Western Sichuan Depression**

| 样号 | 井号 | 深度 / m | 地层时代 | 层位 | $CH_4$ / % | $C_2H_6$ / % | $C_3H_8$ / % | $C_4H_{10}$ / % | He / % | $N_2$ / % | $CO_2$ / % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 大兴 2 | 1787 | 侏罗系(中统) | 沙溪庙组 | N.C. | N.C. | N.C. | N.C. | N.C. | N.C. | N.C. |
| 2 | 大兴 3 | 1982 | 侏罗系(中统) | 沙溪庙组 | 92.69 | 5.563 | 0.8149 | 0.2314 | N.C. | 0.7042 | 0.6338 |
| 3 | 大兴 4 | 2342 | 侏罗系(中下统) | 沙溪庙-自流井组 | 97.34 | 2.038 | 0.2724 | 0.0706 | 0.01715 | 0.2623 | 0.8473 |
| 4 | 大兴浅 5 | 2543 | 侏罗系(中统) | 沙溪庙组 | 96.87 | 2.331 | 0.3617 | 0.1166 | 0.01708 | 0.3014 | 0.4321 |
| 5 | 大兴 5 | 3292 | 三叠系(上统) | 须家河组 | 97.31 | 2.188 | 0.2823 | 0.0796 | 0.02319 | 0.1210 | 0.7864 |
| 6 | 平落 2 | 1605 | 侏罗系(中统) | 沙溪庙组 | 93.55 | 4.011 | 0.5701 | 0.1960 | 0.05001 | 1.620 | 0.0210 |
| 7 | 平落 1-1 | 2040 | 侏罗系(中统) | 沙溪庙组 | 92.52 | 5.051 | 1.111 | 0.4267 | 0.02481 | 0.8633 | 0.0496 |
| 8 | 平落 1-2 | 3465 | 三叠系(上统) | 须家河组 | 96.62 | 2.241 | 0.2082 | 0.0615 | 0.02875 | 0.8427 | 0.0892 |
| 9 | 平落 1-3 | 3513 | 三叠系(上统) | 须家河组 | 96.62 | 2.242 | 0.2102 | 0.0611 | 0.02903 | 0.8408 | 0.0891 |
| 10 | 平落 3 | 3710 | 三叠系(上统) | 须家河组 | 97.14 | 1.976 | 0.2419 | 0.0806 | 0.02016 | 0.5443 | 0.7560 |
| 11 | 平落 6 | 3650 | 三叠系(上统) | 须家河组 | 96.81 | 2.369 | 0.3125 | 0.1139 | 0.02319 | 0.3730 | 0.7662 |
| 12 | 平落 6-1 | 3764 | 三叠系(上统) | 须家河组 | 97.15 | 2.231 | 0.2311 | 0.0744 | 0.02010 | 0.2914 | 0.5024 |
| 13 | 平落 8 | 3594 | 三叠系(上统) | 须家河组 | 97.16 | 2.005 | 0.2419 | 0.0857 | 0.01915 | 0.4837 | 0.7356 |
| 14 | 平落 10 | 3672 | 三叠系(上统) | 须家河组 | 96.78 | 2.341 | 0.3329 | 0.1301 | 0.01816 | 0.3935 | 0.8071 |
| 15 | 白马 1 | 795 | 侏罗系(上统) | 蓬莱镇组 | 92.96 | 4.090 | 0.9223 | 0.3880 | 0.03308 | 1.604 | 0.0501 |
| 16 | 白马 2 | 870 | 侏罗系(上统) | 蓬莱镇组 | 93.46 | 3.807 | 0.8617 | 0.3366 | 0.04108 | 1.493 | 0.0501 |

注:N.C. 为未搜集到。

**表 2　川西坳陷南段气藏天然气同位素组成**

**Table 2　Isotopic composition of the natural gas reservoirs from the south area of the Western Sichuan Depression**

| 样号 | $\delta^{13}C_1$ / ‰ | $\delta^{13}C_2$ / ‰ | $\delta^{13}C_3$ / ‰ | $\delta^{13}C_4$ / ‰ | $\delta^{13}Cco_2$ / ‰ | $C_{2+}$ / ∑Cn / % | He/ $CH_4$ / % | $N_2$/ $CH_4$ / % | $CO_2$/ $CH_4$ / % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | - 34.49 | - 23.48 | - 21.15 | - 20.79 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| 2 | - 34.05 | - 24.21 | N.D. | N.D. | N.D. | 6.657 | N.D. | 0.7597 | 0.6838 |
| 3 | - 33.54 | - 22.45 | - 22.83 | - 21.81 | N.D. | 2.387 | 0.01762 | 0.2695 | 0.8705 |
| 4 | - 33.34 | - 22.47 | - 21.35 | - 20.94 | - 7.53 | 2.818 | 0.01763 | 0.3111 | 0.4461 |
| 5 | - 32.67 | - 20.68 | - 21.58 | - 20.16 | - 10.70 | 2.553 | 0.02383 | 0.1243 | 0.8081 |
| 6 | - 39.21 | - 25.45 | - 21.89 | - 21.20 | N.D. | 4.856 | 0.05346 | 1.7317 | 0.0224 |
| 7 | - 38.25 | - 25.01 | - 21.38 | - 20.44 | N.D. | 6.648 | 0.02682 | 0.9331 | 0.0536 |
| 8 | - 34.31 | - 22.67 | - 22.75 | - 21.79 | N.D. | 2.532 | 0.02976 | 0.8722 | 0.0923 |
| 9 | - 33.82 | - 22.43 | - 21.98 | - 20.55 | N.D. | 2.532 | 0.03005 | 0.8702 | 0.0922 |
| 10 | - 33.30 | - 21.66 | - 21.23 | - 20.32 | - 3.97 | 2.311 | 0.02075 | 0.5603 | 0.7783 |
| 11 | - 33.50 | - 21.70 | - 22.63 | - 22.08 | - 0.7 | 2.807 | 0.02395 | 0.3853 | 0.7914 |
| 12 | - 33.63 | - 21.99 | - 22.60 | - 22.24 | - 6.8 | 2.544 | 0.02069 | 0.2999 | 0.5171 |
| 13 | - 33.57 | - 21.64 | - 21.58 | - 20.00 | - 3.41 | 2.345 | 0.01971 | 0.4978 | 0.7571 |
| 14 | - 33.70 | - 21.72 | - 22.69 | - 22.58 | - 4.28 | 2.815 | 0.01876 | 0.4066 | 0.8340 |
| 15 | - 33.89 | - 22.43 | - 19.76 | - 19.69 | N.D | 5.490 | 0.03559 | 1.7255 | 0.0539 |
| 16 | - 33.86 | - 22.29 | - 19.48 | - 19.40 | N.D | 5.084 | 0.04395 | 1.5975 | 0.0536 |

注:N.D. 为未检测。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

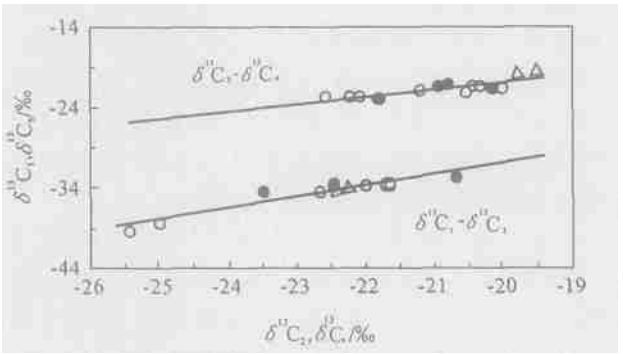



图 2 川西坳陷南段天然气 $\delta^{13}C_1$-$\delta^{13}C_2$、$\delta^{13}C_3$-$\delta^{13}C_4$ 关系图

Fig. 2 Correlation between the $\delta^{13}C_1$-$\delta^{13}C_2$ and $\delta^{13}C_3$ - $\delta^{13}C_4$ of natural gases in the south area of Western Sichuan

○表示平落坝气田样品,●表示大兴西气田样品,△表示白马庙气田样品

○indicate Pingluoba gases; ●indicate Daxingxi gases; △indicate Baimamiao gases

的线性回归方程分别为:$\delta^{13}C_1 = 1.38 \times (\delta^{13}C_2) - 3.33$‰($r = 0.943$),$\delta^{13}C_3 = 0.912 \times (\delta^{13}C_4) - 2.57$‰($r = 0.878$)。由此看出,不同地层时代(侏罗系,上三叠统)、不同构造单元、不同埋藏深度样品的 $\delta^{13}C_1$ 同 $\delta^{13}C_2$ 值、$\delta^{13}C_3$ 同 $\delta^{13}C_4$ 值在图 1 中呈规律性排列,每件样品都保持着 $\delta^{13}C_1/\delta^{13}C_2 \approx 1.38$、$\delta^{13}C_3/\delta^{13}C_4 \approx 0.912$ 的比值,这意味着川西坳陷南段平落坝、大兴西和白马庙气田的烃类来自相同的烃源岩,并且烃源岩的有机质组构是类似的,其生烃机制是相同的。从前节知道,川西坳陷南段广泛分布着富含有机质及煤的巨厚上三叠统地层、以及侏罗系红层不具备生烃能力,因此判识平落坝、大兴西和白马庙气田的烃类都是来自上三叠统烃源岩。

## 2.2 烃类的成因类型和来源

烃类的碳同位素组成和烃类中重烃所占比例($C_{2+}/\sum Cn$,称湿度)同烃类的成因密切相关即烃源岩成气机制同烃类的碳同位素组成及湿度特征有因果关系。通常,沉积物有机质经微生物菌解作用生成的烃类(主要是甲烷)的碳同位素组成较轻($\delta^{13}C_1 < -50$‰),沉积物有机质受热力作用裂解生成的烃类的碳同位素组成较重($-50$‰$< \delta^{13}C_1 < -20$‰),并且生物成因的烃类湿度较小($C_{2+}/\sum Cn < 0.5$%),热解成因的烃类湿度较大($0.5\% < C_{2+}/\sum Cn < 30\%$)。从表 2 看出,所有气田样品的 $\delta^{13}C_1$ 大于 $-39$‰、$C_{2+}/\sum Cn$ 大于 2.3%,由此判识平落坝、大兴西、白马庙气田的烃类是上三叠统烃源岩沉积有机质的热解产物。

平落坝、大兴西和白马庙气田样品的 $\delta^{13}C_1$、$C_{2+}/\sum Cn$ 值有着良好的函数关系。在图 3 中,平落坝气田样品和大兴 4、大浅 5 样品的数据点被拟合成实线,其线性回归方程为 $C_{2+}/\sum Cn$ 为 $-0.589 \times (\delta^{13}C_1) - 17.2$($r = -0.903$);大兴 3、大兴 5、白马 1 和白马 2 样品的数据点沿虚线排列($r = -0.965$)。从此图看出,平落坝气田中侏罗统气藏样品(No. 6, 7)湿度较大(> 4.8%)同位素组成较轻($\delta^{13}C_1 < -38$‰),其上三叠统气藏样品(No. 8～14)湿度较小(< 2.9%)同位素组成较重($\delta^{13}C_1 > -34.5$‰);大兴西侏罗系气藏样品(No. 2, 3, 4)有干有湿(2.4%～6.6%)、并较重($\delta^{13}C_1$ 值范围同平落坝上三叠统气藏),上三叠统气藏样品(No. 5)较干(湿度范围同平落坝气田上三叠统气藏)还最重($\delta^{13}C_1 > -32.7$‰);白马庙气田上侏罗统气藏样品(No. 15, 16)又湿又重(湿度、$\delta^{13}C_1$ 值分别落在大兴西气田侏罗系气藏和平落坝气田上三叠统气藏的湿度、$\delta^{13}C_1$ 值范围内)。

为了帮助认识平落坝、大兴西和白马庙气田的烃类干湿、轻重同烃源岩成熟演化的耦合关系,在图 3 上利用大兴地区烃源岩镜质体反射率❶(蔡开平等 2000, 尹长河等 1999)和 $\delta^{13}C_1$ 值的线性回归方程 $\delta^{13}C_1$ 约为 $5.296 \times \mathrm{Ln}(R_0) - 36.51$‰,画出 $R_0$ 刻度线。由此看出,平落坝气田中侏罗统气藏的烃类是烃源岩在低成熟至成熟阶段($0.6\% \leq R_0 \leq 0.8\%$)热解形成的;平落坝气田上三叠统气藏、大兴西气田和白马庙气田的侏罗系气藏的烃类生成于烃源岩的成熟阶段($1.4\% \leq R_0 \leq 1.8\%$);大兴西气田上三叠统气藏的烃类产生于烃源岩的高成熟阶段($R_0 \approx 2.0\%$)。

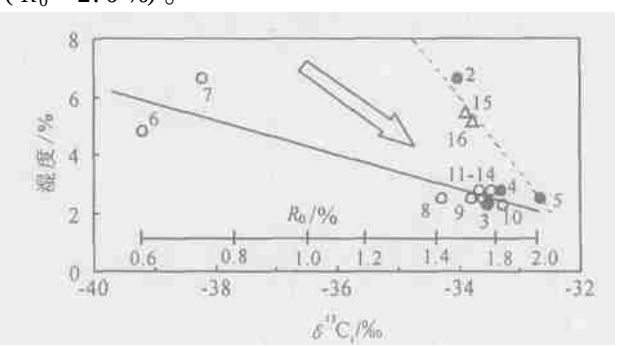



图 3 甲烷碳同位素组成-气体湿度关系图

Fig. 3 Correlation between carbon isotopic composition of methane and wetness of natural gases

○●△符号意义同图 2;箭头指示成熟方向

○●△symbols as in fig. 2; Arrow indicates direction of thermogenic gas maturation

❶ 四川石油管理局地质勘探开发研究院,四川石油管理局川西北矿区. 1998. 川西大兴地区上三叠统含油气性综合评价及勘探部署建议.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

平落坝气田的中侏罗统气藏比下伏的上三叠统气藏有较高的湿度。前人解释此现象是由中侏罗统气藏同上三叠统气藏的烃类来源不同所引起的,认为中侏罗统气藏的烃类来自上三叠统烃源岩的上段(称为须五段),上三叠统气藏的烃类来自该烃源岩的中下段(称为须一段、须三段),须五段烃源岩主要是浅湖相及三角洲相沉积,须一、三段烃源岩为海陆交互相和半深湖相沉积,来源于不同烃源岩的烃类没有亲缘关系和运移混合。本文通过研究不同沉积相烃源岩所生成的平落坝气田所有深、浅气藏的烃类化学与碳同位素组成,发现这些气藏的$\delta^{13}C_1$-$\delta^{13}C_2$值、$\delta^{13}C_3$-$\delta^{13}C_4$ 值、$CH_4$-$C_2H_6$ 含量、$C_2H_6$-$C_3H_8$ 含量、$C_3H_8$-$C_4H_{10}$含量有着很好的相关性,相关系数分别为 0.988、0.914、- 0.990、0.964、0.998。地球化学相关性虽然不能否定平落坝深、浅层气藏的烃类来源不同的判断,但由于来源不同的烃类要具有很好的化学与碳同位素组成耦合关系的几率很小,因此该气田深、浅层气藏的地球化学指纹耦合特征不支持它们的烃类之间没有亲缘关系与运移混合的结论。另外,本文根据西西伯利亚北部最大浅气藏(晚白垩世 Pokur 气藏)的甲烷主要是生成于中低温(< 100 ℃)低成熟烃源岩(含煤岩,泥碳)的早期阶段并伴生较多重烃的范例:甲烷与重烃的比例约为3∶1到 1∶1,即 $C_2+/\Sigma Cn$ 约为 25 %～50 %(Littke 等 1999),而倾向于认为平落坝气田的深、浅层气藏的烃类是同源的,中侏罗统浅层气藏的烃类主要生成于该烃源岩中下段的中低温低成熟和成熟早期阶段,并受到该段烃源岩在更成熟与更高温度状态下生成的烃类不断补给,虽然可能还有少量的该烃源岩上段所产生的烃类加入与混合但没有改变平落坝气田深、浅层气藏烃类主体的亲缘关系,这种推测能较好地解释平落坝浅层气藏的烃类湿度较大、主要在烃源岩早期阶段成气、化学与碳同位组成同下伏深层气藏的烃类有很好的耦合关系等综合特征。

白马庙气田上侏罗统气藏(产层)和大兴西气田大兴 3 中侏罗统气藏(产层)距地表较近(795～1 787 m),烃类的湿度较大、甲烷同位素组成较重、生成于烃源岩晚成熟阶段的特征,表明这些气藏的烃类离开源区向气藏运聚的过程中没有经历上三叠统和下侏罗统巨厚沉积柱的色层分离作用(Fan, 2000),由此推测该气藏的烃类是沿着源区至储集岩内的非通天断裂通道运移进入气藏的。平落坝气田的上三叠统气藏和大兴西气田的其他中下侏罗统气藏及上三叠统气藏的甲烷碳同位素组成随烃源岩成熟度的增大而变重,反映烃源岩有机质的$^{13}C$-$^{12}C$、$^{13}C$-$^{13}C$ 分子键随成熟度增加或成熟时间增长而裂解增强的动力学趋势。

### 2.3　二氧化碳等非烃气体来源

所有样品的 $CO_2$ 含量很低(< 0.9 %),能用于测试碳同位素组成($\delta^{13}C_{CO_2}$)的只有 7 件。这 7 件样品的 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 值分布在 - 10.7 ‰～ - 0.7 ‰的很宽范围内。在图 3 中,这些样品的 $\delta^{13}C_{CO_2}$、$\delta^{13}C_1$ 值大体呈直线排列($r$ = - 0.687),平落坝气田上三叠统气藏样品(No. 10, 11, 13)的 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 值分布在碳酸盐岩变质成因的 $CO_2$ 值( - 4 ‰< $\delta^{13}C_{CO_2}$ < + 0.4 ‰)范围内;其余样品(No. 12, 14)的 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 值落在壳幔岩浆成因的 $CO_2$ 值( - 7 ‰< $\delta^{13}C_{CO_2}$ < - 0.4 ‰)的范围,视为分布在沉积有机质热解成因 $CO_2$ 值($\delta^{13}C_{CO_2}$ < - 15 ‰)和碳酸盐岩变质成因 $CO_2$ 值之间;大兴西气田样品(No. 4, 5)的 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 值分布在有机成因 $CO_2$ 值和碳酸盐岩变质成因或岩浆成因 $CO_2$ 值之间( - 15 ‰< $\delta^{13}C_{CO_2}$ < - 0.4 ‰)。根据这些气田下面存在着巨厚的基底弱变质海相碳酸盐岩,推测其 $CO_2$ 是由碳酸盐岩变质成因的 $CO_2$ 和烃源岩有机质成因的 $CO_2$ 混合而成的。依据图 4 中各样品的 $\delta^{13}C_{CO_2}$、$\delta^{13}C_1$ 值的弱相关性( - 0.687)、以及 $CO_2$ 含量很低(≤0.9 %)推测,变质成因和有机成因的 $CO_2$ 是被 $CH_4$ 为主流相的气流携带着向气藏聚集的。

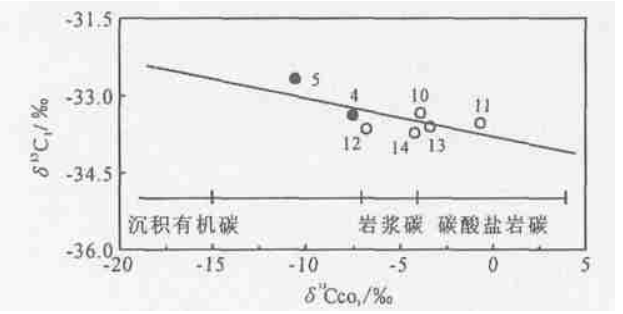



图 4　川西坳陷南段 $\delta^{13}C_{CO_2}$、$\delta^{13}C_1$/ ‰关系图

Fig. 4　Correlation between $\delta^{13}C_{CO_2}$ and $\delta^{13}C_1$ natural gases in the south area of Western Sichuan Depression

○●符号意义同图 2

○●symbols as in fig. 2

所有气田样品的非烃组份 $N_2$、He 有较好的含量相关性(0.893)、以及 He 来源于地壳或地幔的无机物质,因此推测 $N_2$ 也是无机成因的。另外,这些样品的 $N_2/CH_4$、$He/CH_4$ 比值有较好的线性关系,线性方程为[$He/CH_4$]为 47.4 ×[$N_2/CH_4$] - 0.539($r$ = 0.902),表明地壳无机成因的 $N_2$、He 混合后保持着 $N_2$/ He 约等于 47.4 的比例,并随同 $CH_4$ 为主流相的气流一道向气藏聚集。

### 2.4　烃类运移与碳同位素组成变化

平落坝、大兴西气田的中下侏罗统气藏和上三叠统气藏的甲、乙烷碳同位素组成同气藏深度有着

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

很好的函数关系。在图 5 中,两个气田样品的 $\delta^{13}C_1$ 值同深度($D_1$, $D_2$)值的线性回归方程分别为

$$D_1 = -354 \times \delta^{13}C_1 - 15548 \quad (r = -0.998)$$

$$D_2 = -827 \times \delta^{13}C_1 - 30202 \quad (r = -0.982)$$

它们的 $\delta^{13}C_2$ 值同深度($D_3$, $D_4$)值的线性回归方程为

$$D_3 = -530 \times \delta^{13}C_2 - 15247 \quad (r = -0.984)$$

$$D_4 = -414 \times \delta^{13}C_2 - 11778 \quad (r = -0.942)$$

白马庙气田上侏罗统气藏样品的 $\delta^{13}C_1$、$\delta^{13}C_2$ 值同 $D$ 值的数据点在图 5 中呈不同排列。这些图线表明,平落坝、大兴西和白马庙气田的甲、乙烷碳同位素组成有不同的时空分布规律,这意味着川西坳陷南段不同地质构造单元的上三叠统烃源岩因受地质事件的抬升剥蚀或沉降沉积的不同影响而有着不同的热演化历史,它们所产生的烃类因受地质构造和断裂系统的封堵而彼此间没有横向扩散与对流混合。图 5 还表明,平落坝、大兴西气田中下侏罗统气藏的烃类同各自下伏的上三叠统气藏的烃类是同一来源的;各中下侏罗统气藏的烃类(大兴 3 除外,见前节)都经历过由下而上的长距离垂直运移,并在运移过程中因富 $^{12}C$ 的烃类较富 $^{13}C$ 的烃类运移速度快而其前锋烃类相对富集 $^{12}C$ 核素,因此埋藏越浅的平落坝、大兴西气田的中下侏罗统气藏的甲、乙烷碳同位素组成越轻;另外,两个气田的上三叠统烃源岩埋藏深度越深,烃源岩中有机质分子的 $^{13}C$-$^{12}C$、$^{13}C$-$^{13}C$ 键的断裂几率因地温增高而增大,富 $^{12}C$ 烃类同富 $^{13}C$ 烃类的相对比例随此而降低,即富 $^{13}C$ 核素的烃类相对数量因地温增高而增多,因此在烃源岩附近聚集成藏的平落坝、大兴西气田的上三叠统气藏的甲、乙烷碳同位素组成随深度增加而变重。

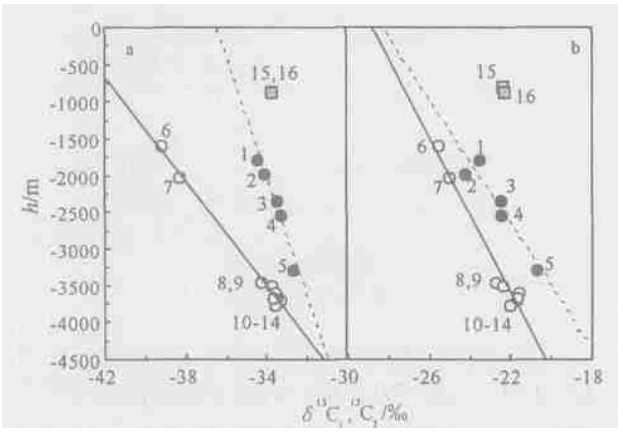



图 5 川西坳陷南段气藏甲烷碳同位素组成-深度关系图

Fig. 5 Correlation between carbon isotopic composition of methane and depth of gas reservoirs in the south area of Western Sichuan Depression.

○●△符号意义同图 2

○●△symbols as in fig. 2

## 3 结语

川西坳陷南段平落坝、大兴西和白马庙气田天然气样品的甲烷等烃类的化学与碳同位素组成资料表明,3 个气田的烃类都是热解成因气,都来自气田下面的上三叠统烃源岩,不同地质构造单元的烃源类有着不同的热演化特征,各气田的烃类间没有横向运移与混合。平落坝气田中下侏罗统气藏的烃类主要由上三叠统须一段、须三段烃源岩在早期低成熟和成熟阶段成气,并受到该段烃源岩在更成熟和更高温度的晚期阶段生成的烃类不断补给,也可能有少量的上三叠统须五段烃源岩产生的烃类加入与混合;平落坝气田和大兴西气田的上三叠统气藏的烃类是在烃源岩附近聚集成藏的,多数中下侏罗统气藏的烃类经历过由下而上的长距离垂直运移,而白马庙气田和大兴 3 的中、上侏罗统气藏(产层)的烃类被认为是沿着源区至储层间的断裂通道向气藏运聚的。平落坝、大兴西气田天然气中非烃组份($CO_2$, $N_2$, He)的化学与碳同位素组成资料揭示,气田中 $CO_2$ 是由基底碳酸盐岩高温热变质形成的 $CO_2$ 和烃源岩有机质热解产生的 $CO_2$ 混合而成的,$N_2$、He 来源于地壳无机物质,它们在进入气藏前是被 $CH_4$ 为主流相的气流携带着一起运移的。

## 参考文献

蔡开平,廖仕孟. 2000. 川西地区侏罗系气藏气源研究. 天然气工业,20 (1):36～40.

尹长河,王廷栋, 郑丽辉. 1999. 平落坝气田成藏时期的确定. 天然气地球科学,10 (3/4):70～75.

## References

Cai Kaiping, Liao Shimeng. 2000. Origin of natural gases of some Jurassic reservoirs in west Sichuan area. Natural Gas Industry, 20(1): 36～40 (in Chinese with English abstract).

Fan Ranxue. 2000. Origin and migration of natural gas in the central segment of Western Sichuan Depression: Evidence from Carbon Isotope Geochemistry. Progress in Natural Science, 10 (1): 47～53.

Littke R et al. 1999. Gas generation and accumulation in the west Siberian Basin. AAPG Bulletin, 83 (10): 1642～1665.

Yin Changhe, Wan Tingdong, Zheng Lihui. 1999. Time constrain on hydrocarbon accumulation of the Pingluoba gas field. Earth Science of Natural Gas, 10 (3/4): 70～75 (in Chinese with English abstract).

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net