

松辽盆地深层天然气碳同位素倒转数值模拟

刘 婷^{1,2}, 米敬奎², 张 敏¹

(1. 长江大学地球化学系, 湖北 荆州 434023; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:松辽盆地深层天然气资源丰富,在烃类气体成因认识上存在以有机成因为主与以无机成因为主的巨大争议,持无机成因观点者的一个主要论点就是松辽盆地深层天然气的碳同位素发生了倒转。选取松辽盆地深层不同类型有机成因烃类气体和典型的无机成因烃类气体,进行不同成因气体不同比例混合的碳同位素数值模拟,结果发现:不同类型的有机成因烃类气体混合不会产生甲烷及其同系物碳同位素完全倒转,而在不同类型的有机烃类气体中加入一定量的无机成因烃类气体,混合气体中甲烷及其同系物碳同位素都会发生完全倒转。气体混合碳同位素数值模拟结果表明:①松辽盆地深层天然气碳同位素倒转是因为无机气混入的结果;②仅凭天然气负碳系列同位素不能完全断定某种气体为无机成因。

关键词:松辽盆地;无机成因气;同位素倒转;数值模拟

中图分类号:TE122.1⁺13

文献标识码:A

文章编号:1672-1926(2008)05-0722-05

0 引言

松辽盆地是我国东部最大的陆相含油气盆地,蕴含着极其丰富的油气资源。随着对该盆地中浅层油气资源的逐步勘探开发与开采,其中浅层油气资源已逐渐贫乏,目前深层已经成为勘探的重点^[1]。2001 年大庆油田在徐深 1 井深层火山岩储层天然气的勘探中获得了重大突破,目前在松辽盆地深层已经发现了徐深气田、汪家屯气田、升平气田和昌德气田等多个气田,如今整个松辽盆地深层各类天然气的三级储量已超过 9 000 亿 m³。

1 松辽盆地深层天然气成因研究概况

松辽盆地深层天然气有非常广泛的勘探前景,但是,关于松辽盆地深层天然气成因的认识目前却存在着比较大的分歧。一部分人认为松辽盆地深层天然气以有机成因为主,而另一部分人认为松辽盆地深层天然气以无机成因为主。戴金星等^[2]根据昌德气藏芳深 1 井烷烃气具有负碳同位素系列的特征,且其甲烷碳同位素值大于无机成因甲烷下限值($\delta^{13}\text{C}_1 = -30\%$),指出松辽盆地徐家围子断陷的昌

德气田是世界上第一个有地球化学依据的无机成因烃类气藏。郭占谦、王先彬^[3]也根据大部分烷烃类碳同位素系列发生倒转并且甲烷碳同位素值较重,认为松辽盆地徐家围子断陷汪家屯气田深层的天然气就是无机成因的烃类气体。崔永强等^[4]依据松辽盆地的地质条件和勘探成果并通过筛选该盆地实际气藏组分的混合模拟结果,得到了松辽盆地昌德、肇州西和升深 2 井等气藏中无机成因气的贡献率大于 80% 的结论,说明松辽盆地无机成因的气源是非常巨大的。黄海平^[5]则认为松辽盆地深层天然气为有机成因,天然气同位素倒转是由于同层中不同类型气的混和与盖层微渗漏造成的蒸发分馏作用共同引起的。门广田、霍秋立等一些油田的研究人员则根据源岩特征及模拟实验结果,认为松辽盆地深层天然气是以煤成气为主的有机气,兼有一定量的混合气和无机气。

产生上述分歧的一个主要原因是由于人们对无机成因烃类气体判识指标认识的不一致造成的。目前判别无机成因烃类气体的主要指标有 3 类:①根据甲烷的碳同位素值;②根据甲烷及其同系物的碳同

位素特征;③利用稀有气体同位素。其中稀有气体的同位素只是一个辅助指标。不同的学者给出的无机与有机成因甲烷碳同位素指标的界限值是不同的,存在无机成因甲烷的 $\delta^{13}\text{C}>-20\text{‰}$ 、 -25‰ 、 -30‰ 多种论述^[6-7];戴金星^[8-9]认为不同类型、不同成因的天然气混合可以引起天然气碳同位素发生倒转。

松辽盆地深层天然气的主要特点有 3 个:①天然气的甲烷碳同位素值较重;②大部分天然气的碳同位素系列发生倒转(包括完全倒转);③与天然气伴生的氮气的同位素比值较大。松辽盆地深层天然气包括烃类气体和非烃类气体,对于烃类气体的成因认识各家观点存在较大的分歧。许多学者根据甲烷及其同系物的特征来判断天然气的成因类型,有机成因烷烃气的碳同位素系列呈正碳同位素系列,即 $\delta^{13}\text{C}_1<\delta^{13}\text{C}_2<\delta^{13}\text{C}_3<\delta^{13}\text{C}_4$;无机成因原生烷烃气的碳同位素系列呈负碳同位素系列,即 $\delta^{13}\text{C}_1>\delta^{13}\text{C}_2>\delta^{13}\text{C}_3>\delta^{13}\text{C}_4$ ^[10-11]。但是有多种情况会造成天然气碳同位素系列的倒转乃至完全倒转成负碳同位素系列。

本研究选取几个具有不同碳同位素特征的烃类气体按不同比例进行混合,通过数值模拟观察混合后气体的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$ 、 $\delta^{13}\text{C}_3$ 和 $\delta^{13}\text{C}_4$ 值的变化规律。

2 不同类型气体混合碳同位素数值模拟

2.1 气体混合碳同位素数值模拟原理

同位素值的原始定义:

$$\frac{\delta^{13}\text{C}}{\delta^{12}\text{C}}=\frac{\frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{样品}}}{\delta^{12}\text{C}_{\text{样品}}}-\frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{标准}}}{\delta^{12}\text{C}_{\text{标准}}}}{\frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{标准}}}{\delta^{12}\text{C}_{\text{标准}}}}$$

为了便于表达,设 $b=\delta^{13}\text{C}_{\text{标准}}/\delta^{12}\text{C}_{\text{标准}}$
 $=0.011\ 237\ 2$

对于某一气体的某一组分,假如我们分析得到的碳同位素数据是 k ,由于自然界中碳稳定的同位素有 2 种,即 ^{13}C 和 ^{12}C ,设 ^{13}C 在 2 种同位素中所占的比例为 X ,那么 ^{12}C 在其中所占的比例为 $1-X$ 。故:

$$X=b(1+k)/[1+b(1+k)]$$
$$1-X=1/[1+b(1+k)]$$

如果把气体 A 和气体 B 进行混合,2 种气体按某一比例 γ 混合后,混合气体中 ^{13}C 、 ^{12}C 的绝对量分别为:

$$^{13}\text{C}_{\text{混}}=X_A\times\gamma+X_B\times(1-\gamma)$$
$$^{12}\text{C}_{\text{混}}=(1-X_A)\times\gamma+(1-X_B)\times(1-\gamma)$$

那么,混合后的气体的碳同位素

$$\frac{\delta^{13}\text{C}}{\delta^{12}\text{C}}=\frac{\frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{混}}}{\delta^{12}\text{C}_{\text{混}}}-b}{b}$$
$$=\frac{\frac{X_A\times\gamma+X_B\times(1-\gamma)}{(1-X_A)\times\gamma+(1-X_B)\times(1-\gamma)}-b}{b}$$

2.2 典型气体混合后碳同位素的数值模拟

由于不同专家认为无机成因甲烷的碳同位素指标不同(这里且不去讨论哪一指标更为科学),我们选取具负碳同位素系列的 3 个气体与不同类型的有机成因天然气混合,负碳同位素系列气体的甲烷碳同位素值分别为 $\delta^{13}\text{C}_1>-20\text{‰}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_1=-20\text{‰}\sim-25\text{‰}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_1=-25\text{‰}\sim-30\text{‰}$ 。表 1 是参与数值模拟的气体的同位素特征。

气体稳定碳同位素分析采用 IsochromⅡ型 GC-IRMS 同位素质谱仪,Poraplot Q 型色谱柱,氦气作载气。升温程序:初始温度 50℃ ,恒温 3 min,再以 $15\text{℃}/\text{min}$ 的速率升至 150℃ ,恒温 8 min。每个气体碳同位素均分析 2 次,2 次分析误差在 0.5‰ 以内。

表 1 无机气与有机气样品的同位素组成

井号	深度(m)	层位	天然气碳同位素(‰)				气体成因类型
			$\delta^{13}\text{C}_1$	$\delta^{13}\text{C}_2$	$\delta^{13}\text{C}_3$	$\delta^{13}\text{C}_4$	
芳深 1	2 926.8~2 946.2	登娄库组	-17.70	-22.10	-27.40	-28.60	无机气
昌 103	3 194.4~3 256.0	登娄库组	-21.48	-30.97	-37.80	-39.72	
升深 4	2 743.2~2 753.2	登娄库组	-26.86	-27.31	-29.6	-32.39	
升深 101	2 943~2 954	侏罗系	-47.78	-35.62	-31.62	-29.70	油型气
升深 6	3 063~3 163.4	侏罗系	-32.22	-23.27	-23.06	-21.60	煤成气 有机气
卫深 5	3 082~3 112	营城组	-27.00	-23.30	-23.10	-21.10	煤成气

3 结果与讨论

首先我们对不同类型的有机成因天然气进行混

合,图 1—图 3 是不同类型有机成因天然气按不同比例混合后混合气体碳同位素的变化特征。

图 4—图 12 是不同类型有机成因气与无机成因

气按不同比例混合后混合气体碳同位素的变化特征。

模拟结果表明:不同类型的有机成因天然气相互混合,混合气体碳同位素不会发生完全倒转;在不

同类型的有机成因天然气中加入一定量的负碳同位素系列的天然气,混合气体碳同位素会发生完全倒转。

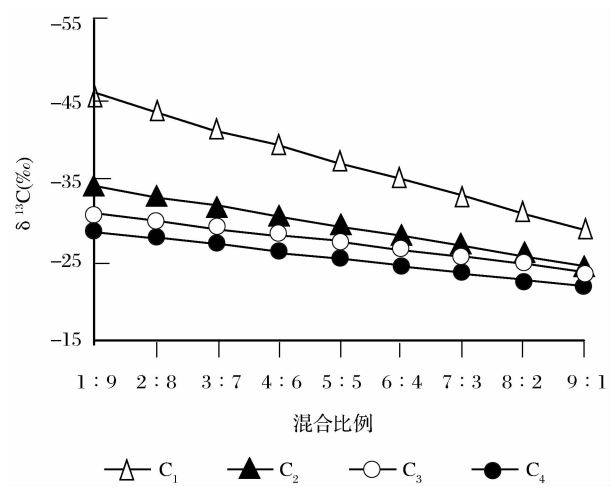


图 1 卫深 5 与升深 101 混合后碳同位素变化特征

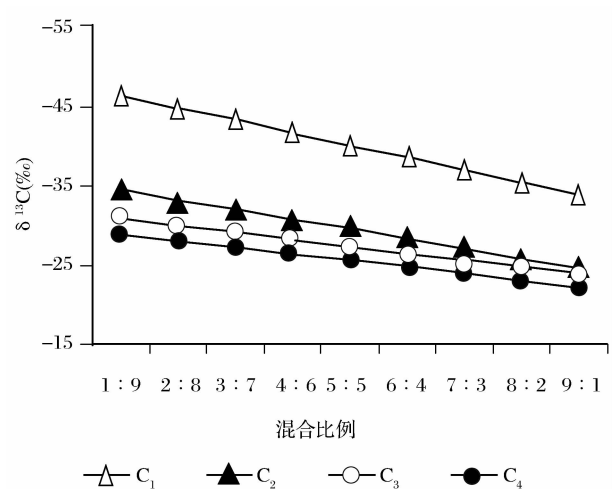


图 2 升深 6 与升深 101 混合后碳同位素变化特征

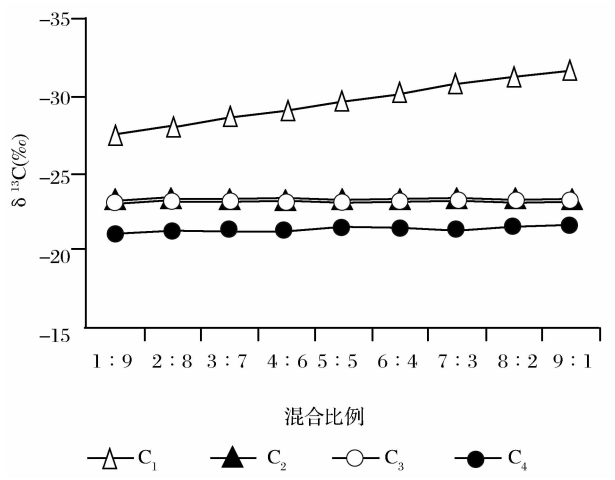


图 3 升深 6 与卫深 5 混合后碳同位素变化特征

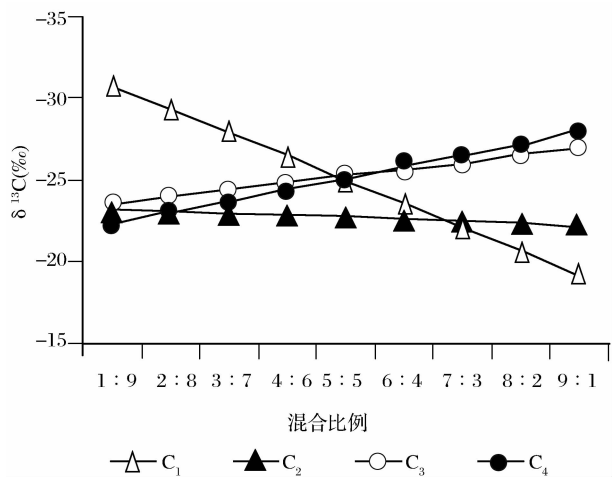


图 4 芳深 1 与升深 6 混合后碳同位素变化特征

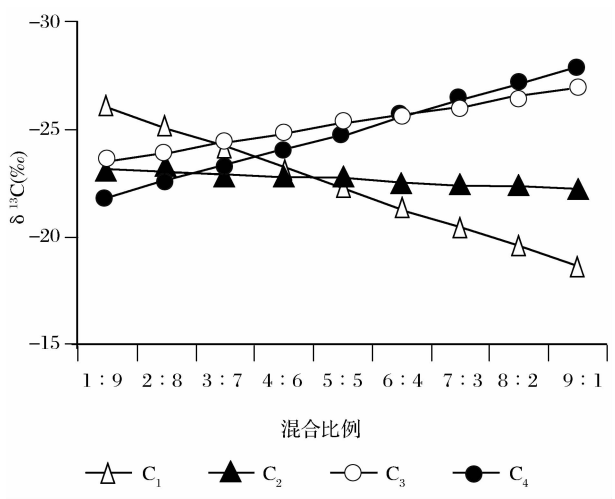


图 5 芳深 1 与卫深 5 混合后碳同位素变化特征

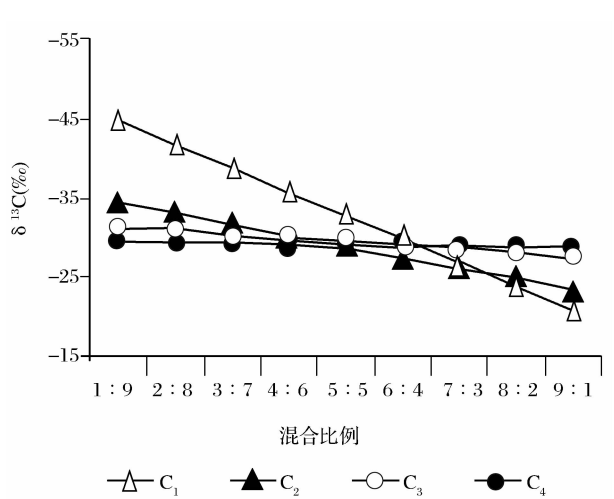


图 6 芳深 1 与升深 101 混合后碳同位素变化特征

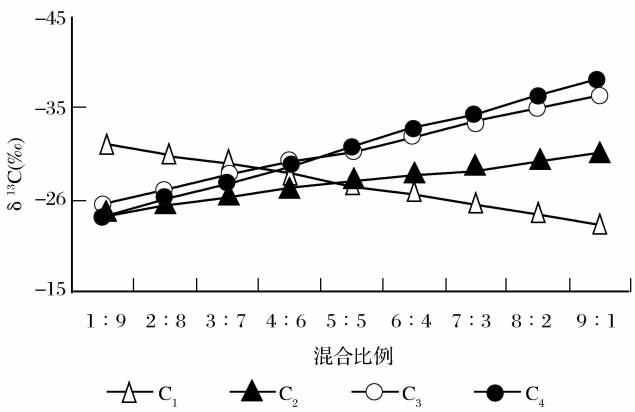


图 7 昌 103 与升深 6 混合后碳同位素变化特征

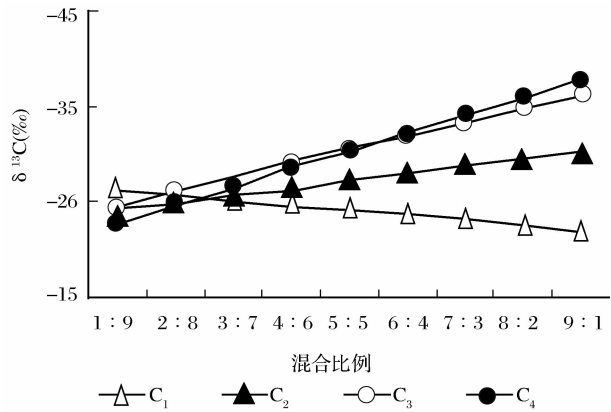


图 8 昌 103 与卫深 5 混合后碳同位素变化特征

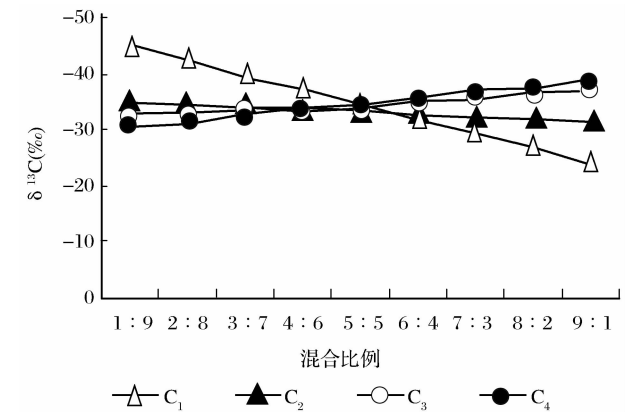


图 9 昌 103 与升深 101 混合后碳同位素变化特征

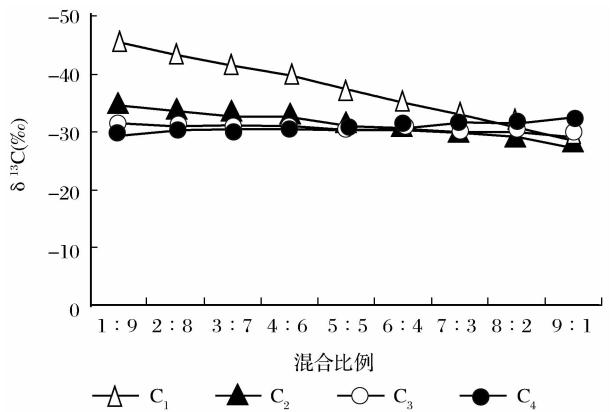


图 10 升深 4 与升深 101 混合后碳同位素变化特征

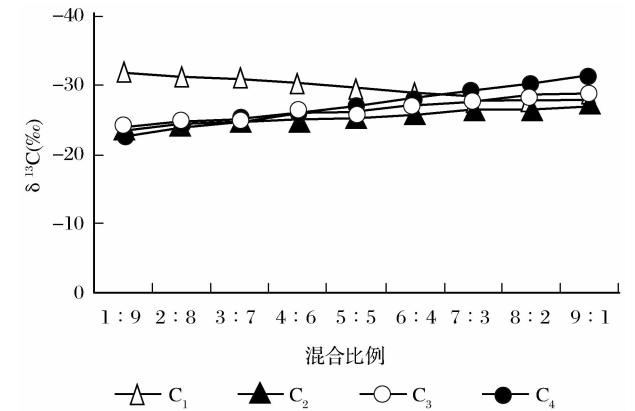


图 11 升深 4 与升深 6 混合后碳同位素变化特征

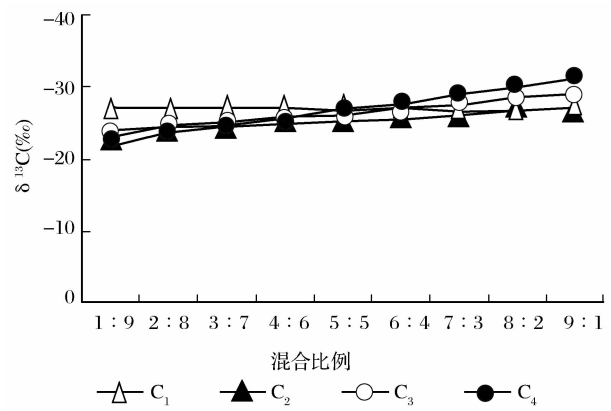


图 12 升深 4 与卫深 5 混合后碳同位素变化特征

松辽盆地位于环太平洋构造带上,盆地深部地质研究表明,地幔上隆、地壳减薄、地壳中发育的“网状”结构以及多条深大断裂,使松辽盆地具有聚集幔源无机成因烃类气体的地质条件^[12-13],同时该盆地还存在无机成因气发育的有利地带,成藏的主控因素也能得到满足^[14]。另外,在总结前人对松辽盆地深层天然气成因的研究成果时发现:不论是持以有机成因为主论者,还是持以无机成因为主论者都承

认松辽盆地深层都存在无机成因的烃类气体。其差异仅在于所确定的判断无机与有机成因烃类气体的甲烷碳同位素界限值不同。

有机源岩生成气体的碳同位素取决于源岩的有机质组成及源岩的成熟度。煤系源岩生成气体的碳同位素重于油型源岩或混合源岩生成的气体碳同位素,高成熟的有机源岩生成的气体碳同位素重于低成熟的有机源岩生成的气体碳同位素,因此研究沉

积盆地中无机成因烃类时,必须结合源岩的类型和演化程度。松辽盆地深层存在多套煤系有机源岩^[15],前人的许多生气模拟实验结果表明:煤生成的甲烷碳同位素没有大于-20‰。那么,可以肯定,我们所选取的芳深1井的天然气为无机成因烃类气体。芳深1井无机成因烃类气体与不同类型的有机成因烃类气体混合都可以使天然气中碳同位素发生完全倒转。而我们所选取的另外2个碳同位素负系列的天然气(昌103井、升深4井)有可能是无机烃类气体,也有可能是无机与有机成因的混合气体。

4 结论

通过对不同类型和不同成因天然气混合的碳同位素数值模拟结果可知:①松辽盆地深层天然气碳同位素倒转是因为无机气混入的结果,且无机气的资源量应该比较丰富;②仅凭天然气负碳系列同位素不能完全断定某种气体为无机成因,应该综合考虑气源岩所处的地质环境与其有机组成和热演化程度,全面分析气体的成因。

参考文献:

- [1] 康竹林. 中国深层天然气勘探前景[J]. 天然气工业,2000,20(5):1-4.
- [2] 戴金星,宋岩,戴春森,等. 中国东部无机成因气及其气藏形成条件[M]. 北京:科学出版社,1995:188-190.
- [3] 郭占谦,王先彬. 松辽盆地非生物成因气的探讨[J]. 中国科学(B),1994,24(3):303-309.
- [4] 崔永强,李莉,陈卫军. 松辽盆地无机成因烃类气藏的幔源贡献[J]. 大庆石油地质与开发,2001,20(4):6-8.
- [5] 黄海平. 松辽盆地徐家围子断陷深层天然气同位素倒转现象研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2000,25(6):617-623.
- [6] 王连生,郭占谦,马志红,等. 无机成因天然气的地球化学特征[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2004,34(4):542-545.
- [7] 戴金星. 中国含油气盆地的无机成因气及其气藏[J]. 天然气工业,1995,15(3):22-27.
- [8] 戴金星,夏新宇,秦胜飞,等. 中国有机烷烃气碳同位素系列倒转的成因[J]. 石油与天然气地质,2003,24(1):1-6.
- [9] 戴金星. 加强天然气地质学研究 勘探更多大气田[J]. 天然气地球科学,2003,14(1):3-14.
- [10] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气的鉴别[J]. 天然气地球科学,1993,4(2/3):1-40.
- [11] 戴金星. 概论有机烷烃气碳同位素系列倒转的成因问题[J]. 天然气工业,1990,10(6):15-20.
- [12] 宋维海,王璞瑶,张兴洲,等. 松辽盆地中生代火山岩油气藏特征[J]. 石油与天然气地质,2003,24(1):12-17.
- [13] 侯启军,杨玉峰. 松辽盆地无机成因天然气及勘探方向探讨[J]. 天然气工业,2002,22(3):5-10.
- [14] 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学理论重要进展[J]. 天然气地球科学,2005,16(2):127-142.
- [15] 肖海燕. 松辽盆地东部断陷盆地天然气特征及气源探讨[J]. 沉积学报,1994,12(3):91-98.

Carbon Isotopic Reversal Numerical Simulation of Deep-seated Gases, Songliao Basin

LIU Ting¹, MI Jing-kui², ZHANG Min¹

(1. Department of Geochemistry, Yangtze University, Jingzhou 434023, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: There are abundant natural gas resources in deep formation in the Songliao basin, but there is also a debate between organic origin and inorganic origin of those hydrocarbons. The carbon isotopic reversal of deep gas in the Songliao basin is an important argument of inorganic views. This paper selects several typical organic and inorganic hydrocarbons and makes a numerical simulation through mixing different types of hydrocarbons with different ratios. The results show that: mixing with different types of organic hydrocarbons doesn't produce a complete carbon isotopic reversal between methane and its homologues, but this complete reversal will happen in mixture of organic and inorganic hydrocarbons. The numerical simulation indicates that: (1) the reason for the carbon isotopic reversal of deep-seated gas in the Songliao basin is that some inorganic gas is mixed; (2) only relying on a complete carbon isotopic reversal between methane and its homologues can't tell which kind of gas is inorganic.

Key words: Songliao Basin; Inorganic gas; Carbon isotopic reversal; Numerical simulation.