

# 柴北缘侏罗系烃源岩生烃动力学及其应用 ——以赛什腾凹陷为例

邢蓝田<sup>1,2</sup>, 张晓宝<sup>1</sup>, 张瑞<sup>3</sup>, 徐丽<sup>1,2</sup>, 李伟<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心, 甘肃兰州 730000;  
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 辽宁工程技术大学, 辽宁阜新 123000)

**摘要:**采用黄金管—高压釜限定体系生烃动力学设备,对柴北缘侏罗系烃源岩进行生烃动力学模拟实验研究,获得烃源岩的生烃动力学参数。结果表明甲烷生成的活化能范围分布较宽,主要介于 49~67kcal/mol 之间,有 2 个高峰,分别为 57kcal/mol 和 66kcal/mol,频率因子 A 为  $1 \times 10^{12}/s$ ;  $C_{1-5}$  生成的活化能范围分布较甲烷的窄,主要介于 52~66kcal/mol 之间,只有 1 个高峰为 59kcal/mol,频率因子 A 为  $1.10 \times 10^{15}/s$ 。然后结合建立在赛什腾凹陷中心和斜坡上的模拟井,运用 Kinetics 软件研究赛什腾凹陷烃源岩的生气史,认为凹陷中心下侏罗统烃源岩在 29.8Ma( $N_1$ ) 进入生烃门限,对应的  $R_o$  值为 0.67%;而斜坡上的烃源岩在 23.8Ma( $N_2$ ) 之后才进入生气门限,对应的  $R_o$  值为 0.87%。

**关键词:**生烃动力学;动力学参数;柴北缘;侏罗系;赛什腾凹陷

**中图分类号:** TE122.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-1926(2012)01-0161-06

**引用格式:** Xing Lantian, Zhang Xiaobao, Zhang Rui, *et al.* Kinetics of hydrocarbon generation for jurassic source rocks and application in northern Qaidam basin: Take saishenteng depression as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(1): 161-166. [邢蓝田, 张晓宝, 张瑞, 等. 柴北缘侏罗系烃源岩生烃动力学及其应用——以赛什腾凹陷为例[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(1): 161-166.]

## 0 引言

柴达木盆地北缘地区(简称柴北缘)西起鄂博梁 I 号构造,东至德令哈凹陷的大浪—土尔岗构造带,北以赛什腾山为界,南界为鄂博梁南缘—陵间断裂<sup>[1-2]</sup>,面积近  $3 \times 10^4 km^2$ 。该地区主要烃源岩为下侏罗统和中侏罗统的湖相含煤沉积。在柴北缘数十年的勘探中相继发现了冷湖三号、冷湖四号、冷湖五号、鱼卡、马海等油气田,油气勘探前景十分广阔。

多年来,许多学者<sup>[3-4]</sup>对柴达木盆地烃源岩开展了大量的研究,明确了柴北缘烃源岩的特征及分布情况,但是对烃源岩生烃动力学的研究比较少。本文在前人研究的基础上,采用快速升温的热模拟实验方法,测定了生烃过程中气态烃的产率,并对生成

甲烷的动力学进行了讨论,结合赛什腾凹陷的模拟井(图 1)资料,采用 Kinetics 软件模拟的方法<sup>[5-9]</sup>,再现烃源岩在凹陷中心和斜坡上不同地质条件下的生烃过程,为柴北缘的油气勘探和评价提供了实验依据。

## 1 样品与实验方法

### 1.1 样品

本文研究样品采自柴北缘大煤沟剖面下侏罗统大煤沟组炭质泥岩,该套泥岩在盆地内分布较为广泛。所采泥岩属于低熟—未熟样品, $R_o$  值为 0.43%,有机碳含量为 4.04%,有机质丰度较高;泥岩的 H/C 值为 0.65, O/C 值为 0.16,有机质类型属于 III 型,生烃潜力较好,具体的样品热解数据见表 1。

收稿日期:2011-11-21;修回日期:2011-12-27.

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:40472071)资助.

作者简介:邢蓝田(1985-),男,甘肃白银人,硕士研究生,主要从事矿物、地球化学研究. E-mail: lantxing@163.com.

通讯作者:张晓宝. E-mail: xzbzhang@lzb.ac.cn.

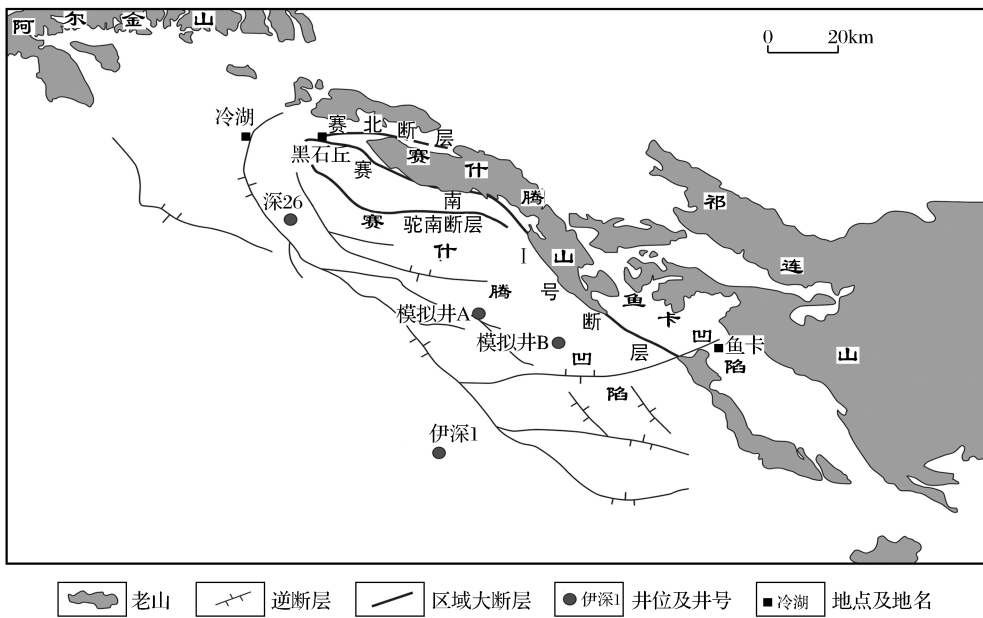


图1 研究区位置及模拟井井位

表1 研究样品热解数据

层位	岩性	TOC/%	$T_{max}/^{\circ}C$	$S_1/(mg/g)$	$S_2/(mg/g)$	$I_H/(mg/g)$	PC/%	(PC/TOC)/%	$(S_1/TOC)/(mg/g)$
J <sub>2</sub>	泥岩	4.04	431	0.06	4.01	99.26	0.34	8.36	1.49

## 1.2 实验方法

实验采用干燥无水、限定黄金管体系,具体实验方法及步骤如下:①为防止样品采集过程中的污染,先用清水洗去整块岩样表面的灰垢,然后用蒸馏水冲洗多次,等晾干后用氯仿浸泡4h,取出、风干,碎至140目以下。采用化学、物理等方法制备成干酪根。②按样品设置温度的高低(320~600℃),分别把20~50mg已制备好的干酪根在氩气保护下装入黄金管内(40mm×5mm,内径为0.5mm),然后置黄金管于高压釜内,各个高压釜之间是相互连通的。把高压釜放在同一个炉腔内,并通过外界流体增压装置向高压釜施加压力,保持在50MPa,分别以2℃/h和20℃/h的升温速率进行加温。在设置温度点取出高压釜,关闭控制该高压釜的压力开关并用冷水淬灭,直至达到常温为止,取出黄金管。③热解完成之后,用汞泵收集装置收集黄金管内的气体。使用外标法利用HP5880A色谱仪在线分析气体的成分。

## 2 热模拟实验结果及讨论

### 2.1 气体组分产率特征

图2显示了柴北缘泥岩样品热解生气过程中各烃类以及非烃类气体组分产率的变化。从图2a和图2b可以看出,样品的甲烷(C<sub>1</sub>)和总烃气体(C<sub>1-5</sub>)产率随着热模拟温度的升高,其产率都呈现出不断增加的

趋势,趋势相同可能是因为总烃气体中甲烷气体为其主导组分。在同一温度下,升温速率慢的产率比升温速率快的产率大。图2a、图2c、图2d显示甲烷、乙烷与丙烷具有不同的产率变化趋势,甲烷产率不断增加,而乙烷和丙烷的产率先增大后减小。图2e显示重烃(C<sub>2-5</sub>)产率在热解温度为430~480℃时,其产率达到最大值,然后随着温度的升高,产率不断降低,反映了重烃在高温时同时存在生成与裂解2个反应。升温速率慢的条件下重烃最大值出现的温度比升温速率快的条件下重烃最大值出现的温度低。从图2f、图2g及图2h中可以看出,非烃气体中CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>随着温度升高,其累积产率不断增加;同一温度下,升温速率慢的产率比升温速率快的产率大;H<sub>2</sub>S气体随着温度增加,先增加,后减少,升温速率慢的条件下能够在较低的温度出现H<sub>2</sub>S产率峰值。

### 2.2 活化能分布特征

本文生烃动力学参数研究采用美国加州大学劳伦斯·利物莫尔国家实验室 Robert L Brawn 和 Alau K Burham 共同研发的 Kinetics 动力学软件,该软件是基于平行一级反应动力学模型建立的,具体方法参见文献[10]。研究样品的活化能及频率因子分布见图3。从图3中可知甲烷生成的活化能范围分布较宽,主要介于49~67kcal/mol之间,有2个高峰,分别是57kcal/mol和66kcal/mol,频率因子

A 为  $1 \times 10^{12}$ /s;  $C_{1-5}$  生成的活化能范围分布较甲烷窄,主要介于 52~66kcal/mol 之间,只有 1 个高峰为 59kcal/mol,频率因子 A 为  $1.10 \times 10^{15}$ /s。经过

Kinetics 软件拟合,表明甲烷和  $C_{1-5}$  组分的动力学模拟计算结果与实验数据非常吻合(图 4),可将实验数据外推到实际的地质生烃过程中。

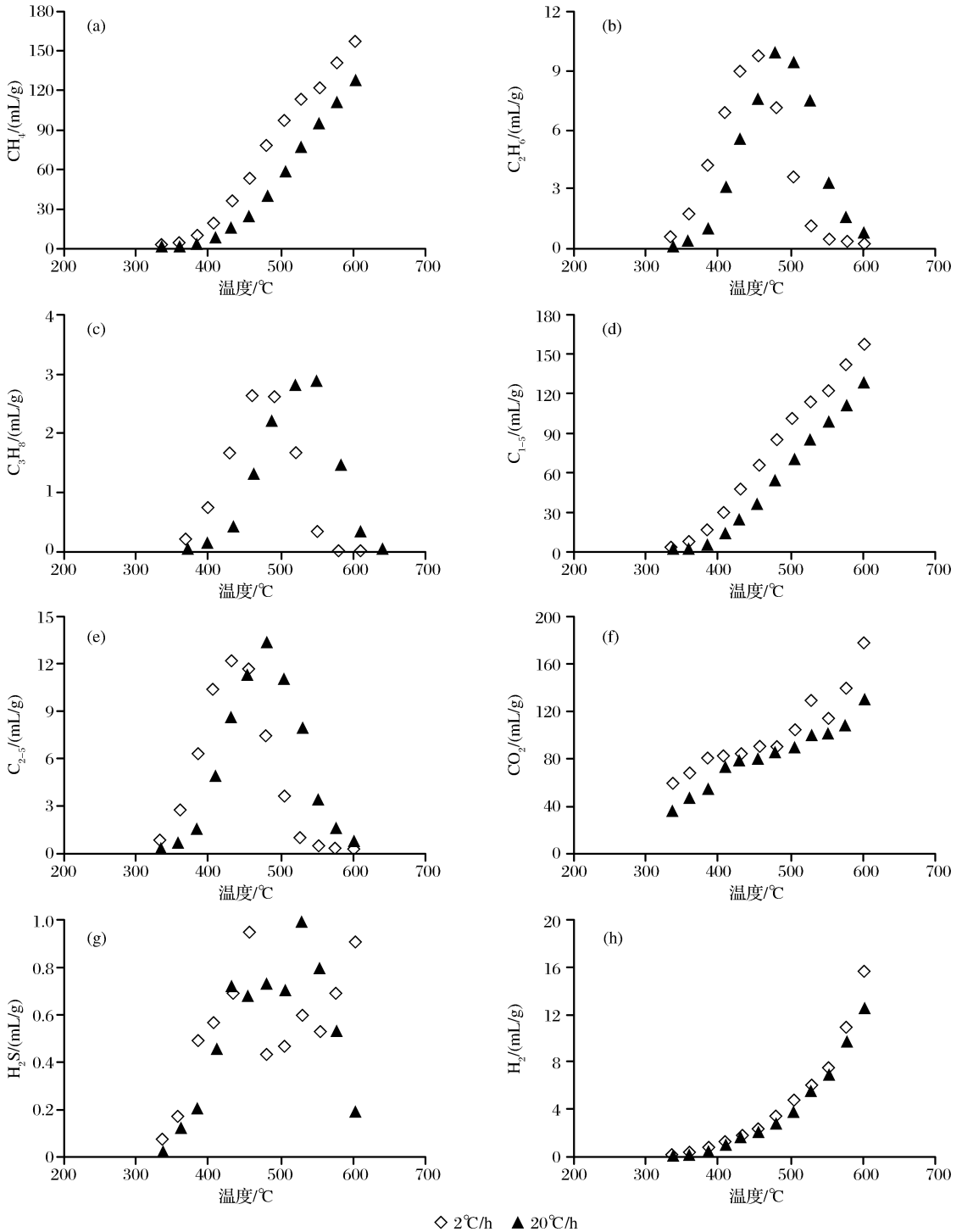


图 2 烃源岩样品热解气组分产率与温度的关系

### 2.3 动力学参数的地质应用

为了进一步对比柴北缘侏罗系的演化史,把上述热解实验结果应用到实际的地质背景下,即可计算出任一地质时期甲烷和  $C_{1-5}$  烃类气体的累积转化

率<sup>[11-13]</sup>。由于柴北缘的已有钻井大部分都在构造的隆起部位,而隆起部位的烃源岩热演化程度很低,基本达不到大量生气的成熟度,所以,本文根据地震资料和地层资料选择了 2 口具有代表性的模拟井(模拟

井 A 和模拟井 B) 来研究, 模拟 1 井位于赛什腾凹陷的斜坡部位, 代表该构造位置上烃源岩的生烃演化; 模拟井 B 选择在凹陷的中心位置, 其代表凹陷中心烃源岩的生烃演化史。邱楠生等<sup>[14]</sup>建立了柴北缘地区的古地温史, 汪立群等<sup>①</sup>在此基础上结合柴北缘埋藏

史进行了盆地模拟, 推导出侏罗纪时期柴北缘的平均地温梯度为 3.2°C/100m, 白垩纪末期地温梯度降为 2.4~3.75°C/100m, N<sub>1</sub> 末期为 2.3~3.07°C/100m, N<sub>2+3</sub> 末期与现在的地温梯度大致相当。研究中采用模拟井的古地温史、R<sub>0</sub> 值以及生烃模拟数据见表 2。

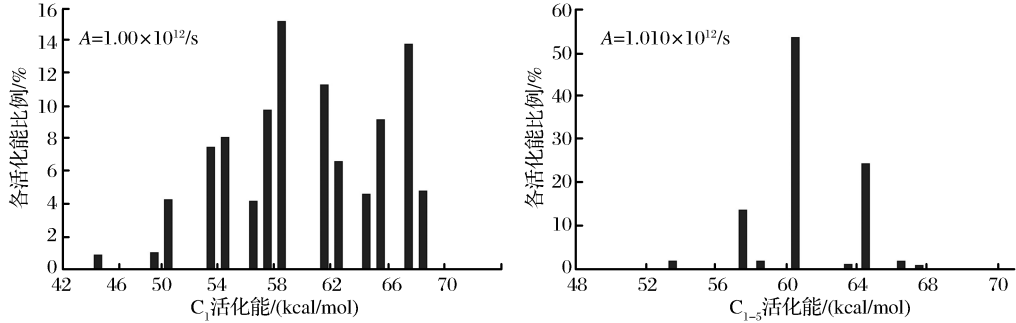


图 3 样品活化能及频率因子分布

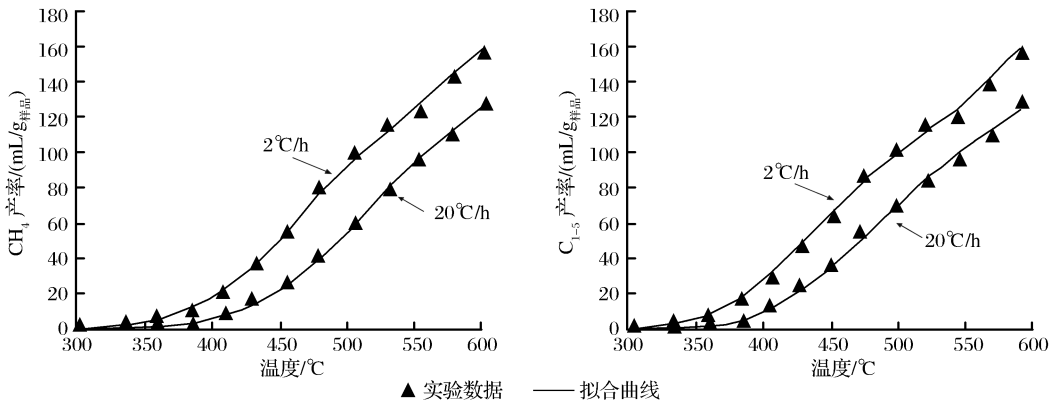


图 4 C<sub>1</sub> 和 C<sub>1-5</sub> 产率的实验数据以及拟合曲线

表 2 侏罗系古地温演化和生烃模拟数据

计算井位	地质时间/Ma	时代	温度/°C	R <sub>0</sub> /%	C <sub>1</sub> 转化率	C <sub>1</sub> 生成率/(mL/g <sub>TOC</sub> )	各阶段占总生气量比重
模拟井 A	35.8	E <sub>3</sub> <sup>1</sup>	72.64	0.38	0.00	0.13	0.11%
	32	E <sub>3</sub> <sup>2</sup>	84.52	0.42	0.00	0.26	0.11%
	29.8	N <sub>1</sub>	121.85	0.58	0.01	2.15	1.58%
	23.8	N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	141.09	0.82	0.07	11.23	7.60%
	14.5	N <sub>2</sub> <sup>2</sup>	155.24	1.08	0.14	23.50	10.27%
	7.2	N <sub>2</sub> <sup>3</sup>	181.98	1.48	0.36	59.01	29.71%
	3	Q <sub>1+2</sub>	192.26	1.79	0.49	81.23	18.60%
	0	Q <sub>3+4</sub>	204.41	1.96	0.63	103.23	18.41%
模拟井 B	35.8	E <sub>3</sub> <sup>1</sup>	88.57	0.49	0.00	0.75	0.75%
	32	E <sub>3</sub> <sup>2</sup>	103.06	0.53	0.01	1.71	0.96%
	29.8	N <sub>1</sub>	135.94	0.67	0.02	3.56	1.84%
	23.8	N <sub>2</sub> <sup>1</sup>	156.94	1.04	0.13	20.61	16.99%
	14.5	N <sub>2</sub> <sup>2</sup>	166.27	1.29	0.27	44.96	24.25%
	7.2	N <sub>2</sub> <sup>3</sup>	182.46	1.56	0.39	64.19	19.15%
	3	Q <sub>1+2</sub>	186.11	1.76	0.47	77.89	13.65%
	0	Q <sub>3+4</sub>	178.85	1.78	0.50	82.27	4.36%

① 汪立群, 罗晓容, 张晓宝, 等. 柴达木盆地北缘天然气成藏规律与有利勘探目标研究. 中国石油青海油田勘探开发研究院. 内部报告, 2008.

通过对 2 口井的模拟结果(图 5)可以看出,位于斜坡上的模拟井 A 的甲烷累积生成量为 103.23 mL/g<sub>TOC</sub>, 23.8Ma(N<sub>2</sub><sup>1</sup> 末期)进入生气门限,从 14.5Ma(N<sub>2</sub><sup>2</sup>)至今是主转化率阶段,最终甲烷转化率为 0.63。而位于凹陷中心的模拟井 B 的甲烷累积生成量为 82.27 mL/g<sub>TOC</sub>,在 23.8Ma(N<sub>2</sub><sup>1</sup> 末期)末期进入生气门限,从 14.5Ma(N<sub>2</sub><sup>2</sup>)至今是主转化率阶段,最终甲烷转

化率为 0.5。从相对产率可以看出,在 14.5Ma(N<sub>2</sub><sup>2</sup>)以前,模拟井 B 的甲烷相对产率占优势。14.5Ma(N<sub>2</sub><sup>2</sup> 早期)之后,模拟井 A 的甲烷相对产率逐渐增大,在 7Ma(N<sub>2</sub><sup>3</sup> 末期)达到峰值以后逐渐减小。此外,模拟井 B 在 14.5Ma(N<sub>2</sub><sup>2</sup>)进入生气高峰,对应的 R<sub>o</sub> 值为 1.56%,同时为其主产气期;模拟井 A 在 7.2Ma(N<sub>2</sub><sup>3</sup>)进入生气高峰和主产气期,R<sub>o</sub> 值为 1.48%。

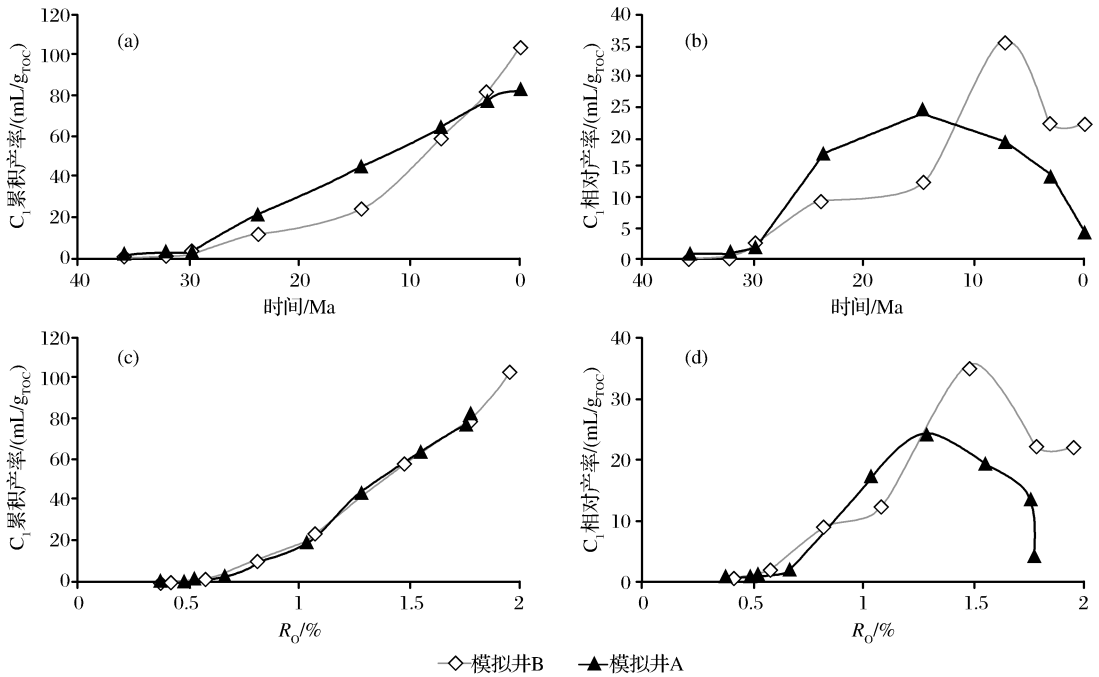


图 5 柴北缘赛什腾凹陷生气史模拟

### 3 结论

(1) 侏罗系炭质泥岩具有较高的产气率,以 2°C/h 速率升温到 601.9°C 时,热解生成的甲烷达 156.61 mL/g,总产气率(C<sub>1-5</sub>)达 156.86 mL/g,产气以甲烷为主。泥岩生成甲烷(C<sub>1</sub>)和重烃(C<sub>2-5</sub>)具有不同的产率特征,前者产率随热解温度的升高不断增大,而后者先增大后减小。

(2) 运用生烃动力学软件计算,获得了炭质泥岩生气动力学参数,即活化能分布范围主要介于 49~67 kcal/mol 之间,有 2 个高峰,分别是 57 kcal/mol 和 66 kcal/mol,频率因子 A 为 1×10<sup>12</sup>/s。

(3) 模拟井 A 和模拟井 B 的生气动力学应用表明,斜坡位置的模拟井 A 的甲烷累积生成量为 103.23 mL/g<sub>TOC</sub>,在 23.8Ma(N<sub>2</sub><sup>1</sup> 末期)进入生气门限,对应的 R<sub>o</sub> 值为 0.82%;在 7.2Ma 进入生气高峰,在 14.5Ma(N<sub>2</sub><sup>2</sup>)至今,是主转化率阶段,最终甲烷转化率为 0.63, R<sub>o</sub> 值为 1.96%。凹陷中心的模拟井 B 的甲烷累积生成量为 82.27 mL/g<sub>TOC</sub>,在 29.8Ma(N<sub>1</sub> 末期)进

入生气门限,对应的 R<sub>o</sub> 值为 0.67%;从 14.5Ma(N<sub>2</sub><sup>2</sup>)至今,是主转化率阶段,最终甲烷转化率为 0.5。

**致谢:** 本文研究得到雷天柱、马素萍等副研究员的大力帮助,在此致以诚挚的谢意!

#### 参考文献 (References):

- [1] Ma Jinlong, Li Fengjun, Chen Shulan. Law of accumulated oil-gas on the north of Qaidam basin[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2004, 28(4): 3-5. [马金龙, 李凤君, 陈淑兰. 柴达木盆地北缘地区油气聚集规律[J]. 大庆石油学院学报, 2004, 28(4): 3-5.]
- [2] Sun Deqiang, Zhang Tao, Liang Bin, et al. Reservoir-forming features of oil and gas in north of Qaidam basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(5): 652-656. [孙德强, 张涛, 梁彬, 等. 柴达木盆地北缘油气成藏特征[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(5): 652-656.]
- [3] Lin Lamei, Jin Qiang. Hydrocarbon generation history of major source rocks in the northern edge and western part of Qaidam basin [J]. Oil and Gas Geology, 2004, 25(6): 677-681. [林腊梅, 金强. 柴达木盆地北缘和西部主力烃源岩的生烃史



- [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(6): 677-681.]
- [4] Lei Tianzhu, Jin Ming, Zhang Rui, *et al.* Investigation into the hydrocarbon generation kinetics of Tertiary source rocks from the west of Qaidam basin[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2007, 43(1): 15-18. [雷天柱, 靳明, 张瑞, 等. 柴达木盆地西部第三系烃源岩生烃动力学研究[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2007, 43(1): 15-18.]
- [5] Tissot B P, Pelet R, Ungerer P. Thermal history of sedimentary basins, maturation indices, and kinetics of oil and gas generation[J]. AAPG Bulletin, 1987, 71(12): 1445-1466.
- [6] Li Xianqing, Yang Yunfeng, Tian hui, *et al.* Kinetics of natural gas generation of Mandong 1 gas pool in Tarim basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(5): 49-55. [李贤庆, 仰云峰, 田辉, 等. 塔里木盆地满东 1 气藏天然气生烃动力学研究[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(5): 49-55.]
- [7] Liu Dehan, Xiao Xianming, Tian Hui, *et al.* Methodology and results of dynamic and thermodynamic simulation for oil-cracked gas pool of Puguang[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(2): 175-185. [刘德汉, 肖贤明, 田辉, 等. 论普光原油裂解气藏的动力学和热力学模拟方法与结果[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(2): 175-185.]
- [8] Li Xianqing, Xiao Xianming, Tang Yongchun, *et al.* The generation and accumulation of natural gas from Yinan 2 gas pool in Kuqa depression[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49 (supplement D): 107-114.
- [9] Tang Y, Petty J K, Jenden P D, *et al.* Mathematical modeling of stable carbon isotope ratio in natural gases[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(15): 2673-2687.
- [10] Liu Jinzhong, Tang Yongchun. A case to predict methane generation volue through kerogen hydrocarbon generation dynamic method[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(11): 1187-1191. [刘金钟, 唐永春. 用干酪根生烃动力学方法预测甲烷生成量之一例[J]. 科学通报, 1998, 43(11): 1187-1191.]
- [11] Ma Suping, Sun Dong, Zhang Xiaobao, *et al.* The study of hydrocarbon generation kinetics in lower Cretaceous lacustrine source rocks, Qingxi depression, Jiuxi basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(2): 219-223. [马素萍, 孙东, 张晓宝, 等. 酒西盆地青西凹陷下白垩统湖相烃源岩生烃动力学研究[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(2): 219-223.]
- [12] Zhang Haizu, Geng Ansong, Xiong Yongqiang, *et al.* Kinetic simulation of natural gas generation and its geological application[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(2): 19-22. [张海祖, 耿安松, 熊永强, 等. 天然气生成动力学模拟及地质应用[J]. 地质与勘探, 2006, 26(2): 19-22.]
- [13] Wang Yunpeng, Zhao Changyi, Wang Zhaoyun, *et al.* Kinetic method for determining the main gas generation period of marine organic matters and its application[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(4): 153-158. [王云鹏, 赵长毅, 王兆云, 等. 利用生烃动力学方法确定海相有机质的主生气期及其初步应用[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 153-158.]
- [14] Qiu Nansheng, Gu Xianjue, Ding Lihua, *et al.* Tectono-thermal evolution of western Qaidam basin, northwwest China[J]. Chinese Journal of Geology, 2000, 35(4): 456-464. [邱楠生, 顾先觉, 丁丽华, 等. 柴达木盆地西部新生代的构造—热演化研究[J]. 地质科学, 2000, 35(4): 456-464.]

## Kinetics of Hydrocarbon Generation for Jurassic Source Rocks and Application in Northern Qaidam Basin: Take Saishenteng Depression as an Example

XING Lan-tian<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiao-bao<sup>1</sup>, ZHANG Rui<sup>3</sup>, XU Li<sup>1,2</sup>, LI Wei<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, CAS, Lanzhou 730000, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** A pyrolysis experiment of gas generation of source rock sampling from Qaidam basin was carried out with a high pressure and closed gold tube reaction system. The kinetic parameters of gaseous hydrocarbon generation were also obtained. The results show that activation energy of CH<sub>4</sub> ranges from 49kcal/mol to 67kcal/mol with two peaks of 57kcal/mol and 66kcal/mol in a diagram of activation energy distribution if its frequency factor of  $1 \times 10^{12}$ /s is assumed. C<sub>1-5</sub> activation energy ranges from 52kcal/mol to 66kcal/mol with a unique peak of 59kcal/mol in the diagram and its frequency factor of  $1.10 \times 10^{15}$ /s. Based on gas generation history simulated by kinetics software and two artificial simulation wells at the centre of Saishenteng depression and its slope, it is suggested that the Lower Jurassic source rock in the central Saishiteng depression and its slope entered the gas generation threshold at 29.8Ma ( $R_0$  is 0.67%) and 23.8Ma ( $R_0$  is 0.87%), respectively.

**Key words:** Hydrocarbon generation kinetics; Kinetic parameter; Qaidam basin; Jurassic; Saishiteng depression.