

文章编号: 1000-0550(2008) 05-0857-07

# 吐哈盆地丘东次凹低熟气的生成与动力学研究<sup>①</sup>

张长春<sup>1,2</sup> 陶伟<sup>1,2</sup> 张馨<sup>1,2</sup> 王晓峰<sup>2,3</sup> 邹艳荣<sup>1</sup>

(1. 中国科学院广州地球化学所有机地球化学国家重点实验室 广州 510640;

2. 中国科学院研究生院 北京 100049; 3. 中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气与资源研究中心 兰州 730000)

**摘要** 采用黄金管—高压釜封闭体系,对吐哈盆地艾试 1 井的泥岩和煤岩进行了低温热解实验。根据实验结果,分别求取了干气( $C_1$ )、湿气( $C_2 \sim C_5$ )生成过程的初始动力学参数,然后将单一活化能的动力学参数进一步优化为具有高斯分布的活化能,优化后的动力学参数能较好拟合实验数据。利用优化后的动力学模型模拟了吐哈盆地丘东次凹八道湾组天然气早期生成过程,并将模拟结果与实际地质资料进行了对比。结果表明,经过优化后的低温恒温热解动力学,能有效评价早期生气过程;在丘东次凹发现的天然气,与八道湾组源岩关系密切。

**关键词** 热解 天然气 动力学 低熟气 吐哈盆地

**第一作者简介** 张长春 男 1982 年出生 硕士研究生 油气地球化学

**通讯作者** 邹艳荣 E-mail: zouy@gig.ac.cn

**中图分类号** TE122.1 **文献标识码** A

## 0 引言

生烃动力学是用化学反应动力学原理来研究地质条件下低温长时间慢速反应过程的一种热解实验和模拟方法。它是联系盆地热史、生烃史和热模拟实验之间的纽带<sup>[1]</sup>,可以将实验室内短时间高温条件下获得的动力学参数用于研究低温长时间的地质过程。因而,近年来动力学实验得到长足发展,被应用于多个油气盆地的研究与勘探中<sup>[2~13]</sup>。

按照热解实验的加热方式,生烃动力学热解实验大体可分为二种:程序升温热解和恒温热解。程序升温热解实验的温度区间,一般为 300~600℃,通常在热解温度达到 380℃以后,气态烃产物方能达到色谱的检测限。程序升温热解适合于通常情况下的烃源岩生烃过程的研究。恒温热解实验的温度通常较低,一般不超过 400℃。目前,与恒温热解实验相关的研究相对较少,国内仅有少量文献<sup>[14,15]</sup>报道。恒温热解实验因热解温度相对较低,适合于低温生烃过程和有水参与的热解实验研究<sup>[16~19]</sup>。

吐哈盆地气源岩低温热解实验采用恒温热解实验技术,获得动力学参数,为低温条件下天然气成因研究提供基础数据。

## 1 实验

### 1.1 样品的基本地球化学特征

样品为采自吐哈盆地艾试 1 井下侏罗统八道湾组的煤和泥岩(J<sub>1</sub>b),开展了恒温热解实验和动力学研究。样品的镜质组反射率和有机碳含量由中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气与资源研究中心完成。热模拟实验在中国科学院广州地球化学所有机地球化学国家重点实验室完成。样品的基本地球化学特征列于表 1。本研究用艾试 1 井的样品均为未熟源岩( $R_o < 0.4\%$ ),为了更好的再现其早期生气过程,在四个温度(370℃、380℃、390℃和 395℃)下开展了不同时间系列的恒温热解实验。

### 1.2 实验方法

模拟实验采用金管高压釜热解系统。将样品用去离子水洗净,粉碎至 100 目,经二氯甲烷抽提 72 h,然后经 50℃烘干、备用。按样品设置的热解时间长短(6~92 h),分别将 40~100 mg 不等的样品装入黄金管,在氩气保护下焊封。黄金管置于高压釜中,高压釜放入程序控制温度的热解炉中。各高压釜间保持连通,通过外界流体加压使其始终处于 30 MPa 的压力之下。设置电炉升温程序,使温度在 6 h 内从室温分别升至 370℃、380℃、390℃和 395℃,恒温 100 h。

①国家 973 项目(2007CB209501)和国家自然科学基金项目(批准号:40572083)资助。

收稿日期:2007-11-05 收修稿日期:2008-01-08

表 1 样品基本地球化学特征

Table 1 The geochemical characteristics of the samples

井号	埋深 /m	层位	岩性	$R_o$	$TOC$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$HI$	$OI$	$T_{max}$
				%	%	$mg\ g^{-1}$	$mg\ g^{-1}$	$mg\ g^{-1}$	$mg\ gTOC^{-1}/mg\ gTOC^{-1}$	$mg\ gTOC^{-1}/mg\ gTOC^{-1}$	/°C
艾试 1	1090	J <sub>1</sub> b	煤	0.36	66.93	1.10	80.56	29.44	120	43	425
艾试 1	1098	J <sub>1</sub> b	泥岩	0.33	6.95	0.08	9.66	3.72	139	53	425

在设置的取样时间点 (8 20 32 56 72 92 h) 取出高压釜, 用冷水淬火至常温, 取出黄金管。

热解气体全组分测定: 用二氯甲烷将金管表面洗净, 然后置于气体采样系统中, 在真空条件下用针扎破金管, 待热解产物充分释放、混匀后用 W asson—ECE Agilent 6890 型气相色谱仪分析产物成分, 外标法定量, 相对误差低于  $\pm 0.5\%$ 。色谱初始温度  $70^\circ\text{C}$ , 保留 6 min 后, 以  $15^\circ\text{C}/\text{min}$  的速率升温至  $130^\circ\text{C}$ , 然后再以  $25^\circ\text{C}/\text{min}$  的速率升温至  $180^\circ\text{C}$ , 最后再保留 4 min。可以同时完成所有气态烃 ( $C_1 \sim C_5$ ) 和无机气体组分的分析。

### 1.3 实验结果

图 1 分别展示了煤和泥岩热解气态烃 ( $C_{1-5}$ ) 在不同温度、不同热解时间下的产率。

在  $370^\circ\text{C}$ 、 $380^\circ\text{C}$ 、 $390^\circ\text{C}$  和  $395^\circ\text{C}$  四个温度系列中, 煤岩总的热解气态烃产率最大值分别是 48、64、86 和  $104\text{ ml/g TOC}$ ; 泥岩则是 107、112、149 和  $159\text{ ml/g TOC}$ 。总体上, 煤和泥岩表现出相似的规律: 整个热演化过程中, 随着热模拟温度/热解时间的增加, 累计气态烃产率都相应增高。值得注意的是, 在同一温度同一时间点, 单位有机碳上泥岩的气态烃产率则要高于煤岩, 这说明泥岩的生气性能要强于煤岩。

## 2 动力学参数拟合

### 2.1 动力学参数的求取

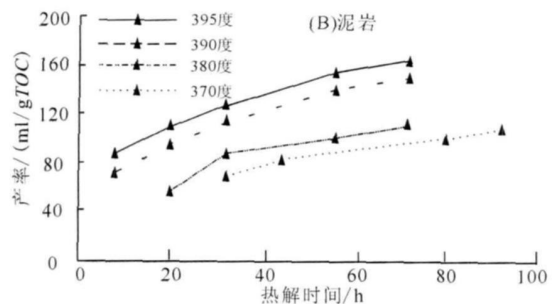
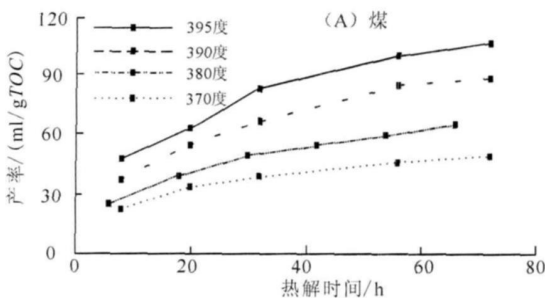


图 1 艾试 1 井煤 (图 (A))、泥岩 (图 (B)) 不同温度系列下的气态烃 ( $C_{1-5}$ ) 产率

Fig. 1 The gaseous hydrocarbon ( $C_{1-5}$ ) yields from Well AS-1 coal (A) and mudstone (B) with pyrolysis temperature

### 2.1.1 计算原理

对于恒温热解反应, 适合实验数据的动力学方程为:

$$k_T = \ln[1/(1 - X_T)] / t \quad (1)$$

式中:  $k_T$  为在温度  $T$  下的反应速率;

$X_T$  为在温度  $T$  下的转化率;

$t$  为热解时间。

将不同温度下的一系列  $X_T$  和  $t$  代入上式, 求出相应温度下的  $k_T$  值。

根据 Arrhenius 公式, 有

$$k = A e^{-E/RT} \quad (2)$$

对 (2) 式两边取自然对数, 得:

$$\ln[k_T] = -E/RT + \ln[A] \quad (3)$$

式中:  $A$ : 频率因子;  $E$ : 活化能;  $R$ : 通用气体常数。

通过不同温度下求得的  $k_T$  值代入 (3) 式即可求出活化能 ( $E$ ) 和频率因子 ( $A$ )。

### 2.1.2 计算方法

众所周知, 几何上两点决定一条直线。因而, 一般在求  $k_T$  值时, 要求最少 3 个点。为了获得较高精度的  $k_T$  值, 本次实验采用 5~6 个实验点。同理, 在计算活化能 ( $E$ ) 和频率因子 ( $A$ ) 时, 也要求至少 3 个温度的热解数据。我们采用 4 个热解温度 ( $370^\circ\text{C}$ 、 $380^\circ\text{C}$ 、 $390^\circ\text{C}$  和  $395^\circ\text{C}$ ) 进行动力学参数的拟合。详细计算步骤, 亦请参阅文献<sup>[15-19]</sup>的描述。获得的初始动力学参数列于表 2。

表 2 天然气生成动力学参数 (压力: 30 MPa)

Table 2 The kinetic parameters of natural gas generation (pressure 30 MPa)

样品与产物	初始动力学参数		优化后动力学参数 (高斯分布)				
	A	E	A	E	$\sigma$		
	$I/(s^{-1})$	$I/(kJ/mol)$	$I/(s^{-1})$	$I/(kJ/mol)$	$I/(kJ/mol)$		
吐哈煤	干气	1.07E+11	210	814	1.07E+11	209.00	6.27
	湿气	1.91E+08	171	79	1.91E+08	169.00	6.76
吐哈泥岩	干气	1.10E+10	191	75	1.10E+10	191.00	2.87
	湿气	1.42E+07	155	91	1.42E+07	147.00	7.35

2.2 动力学参数的优化

国内外进行恒温热解动力学研究不多。据我们了解的情况,国外主要是 Lewan<sup>[16]</sup>、Behar<sup>[17]</sup>等,特别是 Lewan 一直从事加水热解实验研究<sup>[16,18,19]</sup>。其动力学研究一直沿用上述方法。然而, Lewan 等没有提供动力学参数对实验数据拟合情况。我们的实验与动力学模拟结果显示,用单一的活化能 (E) 和频率因子 (A) 对实验数据的拟合并不十分理想。Waples 在研究原油在储层内裂解与天然气形成时发现:对于原油裂解而言,窄的高斯分布比单一活化能效果更好;对于拟合高温形成的凝析气效果也有改善<sup>[20]</sup>。因而,我们对单一的活化能 (E) 和频率因子 (A) 进行了进一步优化,获得了高斯分布的动力学参数 (表 2)。

图 2 至图 5 显示了不同温度下煤和泥岩甲烷与湿气 (C<sub>2-5</sub>) 产率及其动力学模拟结果。可见,优化后的高斯分布动力学参数对实验数据拟合比较理想,可以用于模拟地质条件下源岩生成天然气的生成过程。

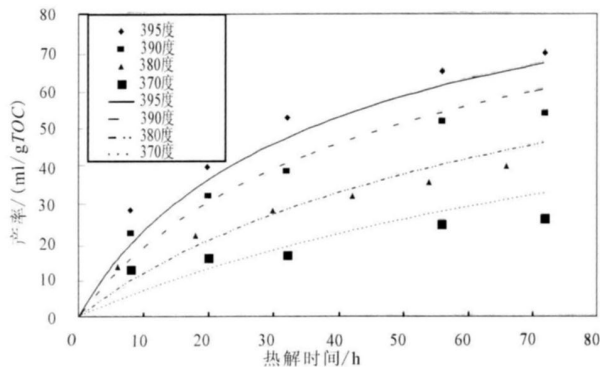


图 2 艾试 1 井煤不同温度下热解甲烷产率(点)与动力学模拟值(线)的比较

Fig 2 The comparison of methane yields between pyrolysis (dots) and kinetics modeling (lines) of Well AS-1 coal

3 地质条件下天然气生成过程

模拟地质条件下天然气生成过程是生烃动力学研究目标之一。本研究以丘东次凹为例,探讨早侏罗世八道湾组低熟气源岩的生气史。

3.1 丘东次凹地质背景概述

丘东次凹位于吐哈盆地台北凹陷中部,北起博格达山南缘,南部以七克台断裂为界,西起核桃沟—巴喀,经丘陵、鄯善、温吉桑、红胡、萨克桑,向东至萨克桑一带,勘探面积 2 600 km<sup>2</sup><sup>[21]</sup>。本研究模拟的目的层—八道湾组,属下侏罗统 (J<sub>3</sub>b),在丘东次凹发育较好,层序完整,以辫状河平原相含煤碎屑岩建造和三角洲前缘相碎屑岩沉积为主<sup>[22]</sup>。横向上,在鄯善一带最发育,最大厚度在 700 m 以上;其次为丘陵地区,一般为 300~500 m;呈西厚东薄、北厚南薄的趋势。垂向上分上下两段,下段主要发育砾岩、砂岩,上段发育砂泥岩夹煤层。其中,上段的泥岩和煤层是热演化程度较低的源岩,现今成熟度 (R<sub>o</sub>) 平均在 0.7% 左右,基本处于低熟阶段。

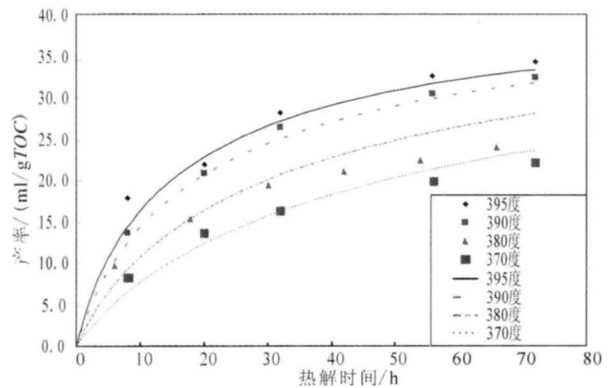


图 3 艾试 1 井煤热解湿气 (C<sub>2-5</sub>) 产率(点)与动力学模拟值的(线)比较

Fig 3 The wet gas (C<sub>2-5</sub>) yields diagram, showing a comparison between pyrolysis (dots) of Well AS-1 coal and kinetics modeling (lines)

3.2 模拟所用地质参数

丘东次凹八道湾组简化后的埋藏史—热史示于图 6。早侏罗世八道湾组沉积以来,本区地温梯度一直不断降低。晚侏罗世—早白垩世,八道湾组达到较高温度,此后一直处于相近温度范围内波动。进入新生代,地层快速沉降,地温上升。

3.3 模拟结果

根据丘东次凹源岩的埋藏史—热史,结合生烃

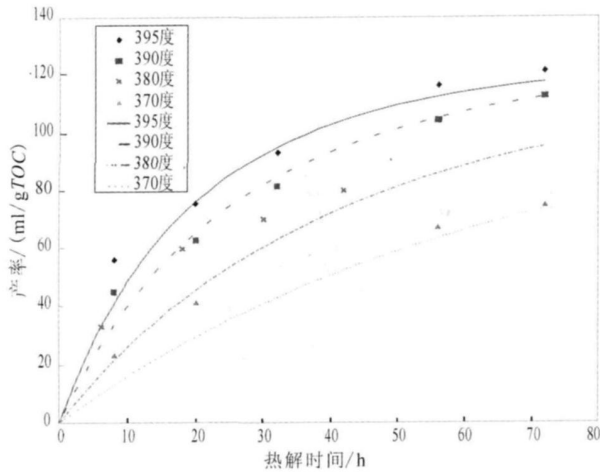


图 4 艾试 1 井泥岩不同温度下热解甲烷产率(点)与动力学模拟值的(线)比较

Fig. 4 The methane yields comparison of pyrolysis (dots) of Well AS-1 mudstone with kinetics modeling (lines)

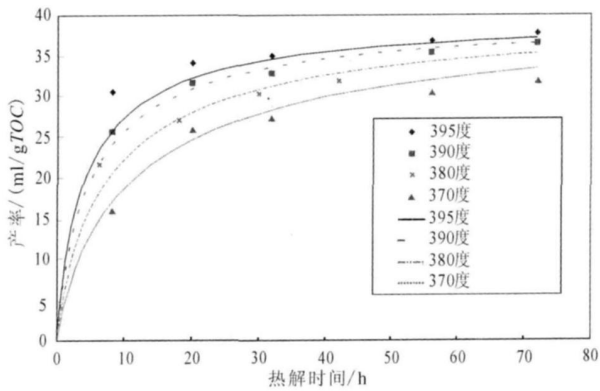


图 5 艾试 1 井泥岩热解湿气(C<sub>2-5</sub>)产率(点)与动力学模拟值的(线)比较

Fig. 5 The wet gas yields (C<sub>2-5</sub>) of Well AS-1 mudstone: pyrolysis (dots) and kinetics modeling (lines)

动力学参数, 分别对丘东次凹煤和泥岩生成天然气过程进行了模拟(图 7 & 9)。

(1) 从模拟结果中可以很清楚的看到, 就单位有机碳气态烃产率而言, 现今泥岩的产率为 160 mL / gTOC, 煤岩为 70 mL / gTOC, 泥岩产气率高于煤的产气率, 是煤的 2 倍多。这与 Rock-Eval 数据所反映的规律完全相同。如表 1 所示, 煤岩和泥岩的氢指数分别是 120 和 139 mg / gTOC, 在相同的热解温度和热解时间下, 八道湾组泥岩的产气率要高于煤岩。两种样品的生烃特征也有一定差别: 泥岩的干气产率为 110 mL / gTOC, 远高于湿气的 40 mL / gTOC; 煤岩的干气产率为 30 mL / gTOC, 则小于湿气的 40 mL / gTOC(图 7, 8), 相对而言, 泥岩显示出倾气性的特

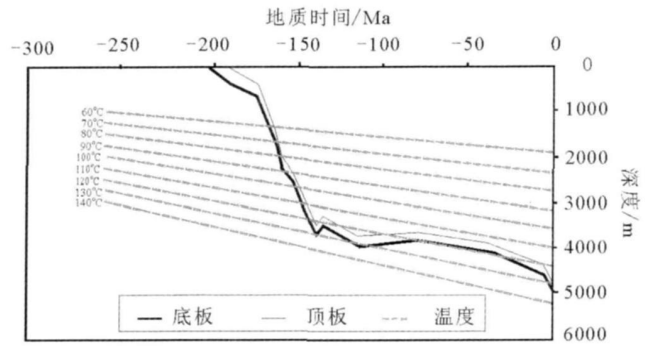


图 6 丘东次凹八道湾组埋藏史—热史 (据吐哈石油勘探指挥部简化)

Fig. 6 The thermal-burial history of the Badaowan Formation in the Qidong subsag (simplified after the Tu-Ha petroleum exploration headquarter)

点, 煤岩则显示出倾油性的特征。

(2) 湿气 (C<sub>2-5</sub>) 比干气生成略早, 主要在 165~150 Ma 间, 干气生成于 150~85 Ma 之间, 晚期甲烷生成的较少。这表明源岩早期生气以湿气为主。表 2 显示, 煤、泥岩的干、湿气生气动力学参数分别为 202.73~215.27, 162.24~175.76 和 189.13~193.87, 139.65~154.35 kJ/mol, 指前因子是 1.07E+11, 1.91E+08 和 1.10E+10, 1.42E+07 (s<sup>-1</sup>)。从中可以发现, 湿气生成的活化能和指前因子要小于生成干气的活化能和指前因子, 因而湿气比干气更早生成。这一特点在恒温热解动力学研究中得到充分的展现(图 7, 8), 而程序升温热解实验中则表现不明显。

(3) 模拟结果显示, 天然气总体上较湿。这与程克明<sup>[23]</sup>的研究“丘东气田的天然气重烃含量高, 为湿气”相吻合。具体而言, 煤成天然气干气系数不到 0.50, 泥岩生成的天然气干气系数最高在 0.75 左右(图 9)。如考虑煤成气和泥岩生成的天然气发生混合, 则干气系数应在 0.5~0.75 之间。这与 Qd3 井实测资料显示的干气系数约为 0.82<sup>[24]</sup> 有一定出入, 推测与其他来源的干气混入有关。尽管如此, 干气系数上较强的相似性, 仍旧说明了丘东次凹的天然气与八道湾组低熟源岩关系密切。这与程克明<sup>[23]</sup>、王昌桂<sup>[25]</sup>、曾凡刚<sup>[26]</sup>、陈建平<sup>[27]</sup>、苏传国<sup>[28]</sup> 等关于台北凹陷天然气主要来源于煤岩或煤系泥岩的结论是一致的。我们的结果显示, 泥岩的单位有机碳最大产气率为 160 mL / gTOC, 煤岩为 70 mL / gTOC, 所以究竟主力烃源岩是煤岩还是煤系泥岩, 取决于二者单位面积

上有机碳的质量。

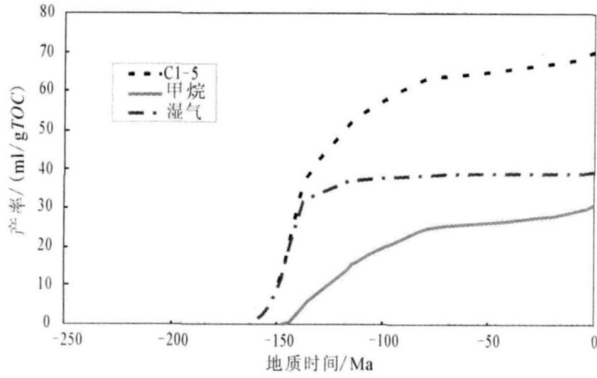


图 7 丘东次凹煤成天然气生烃史

Fig. 7 The generation history of coal-derived gas in the Qidong subsag

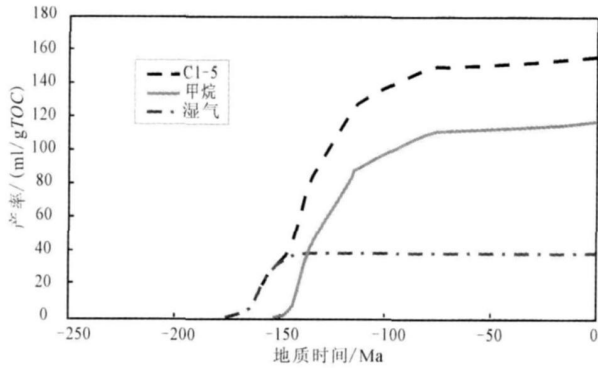


图 8 丘东次凹泥岩生成天然气过程

Fig. 8 The generation procedure of natural gas from mudstone in the Qidong subsag

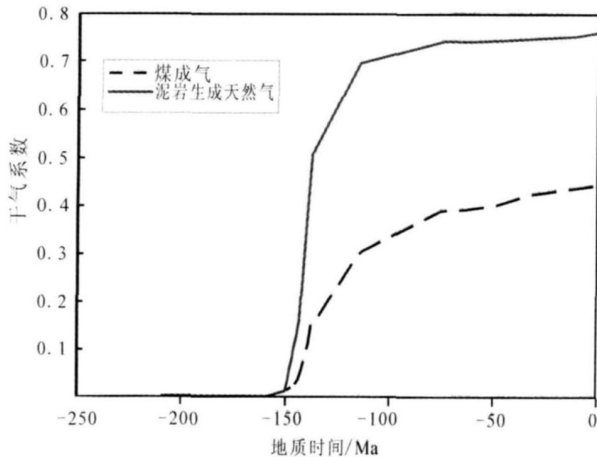


图 9 丘东次凹煤成天然气、泥岩生成天然气干气系数的变化

Fig. 9 The dryness changes of natural gases generated from coal and mudstone in the Qidong subsag

### 4 结论

(1) 采用低温恒温热解生烃动力学,研究了艾试 1 井八道湾组煤岩和泥岩的生气动力学过程,获得了符合高斯分布的动力学参数,煤岩生成 C<sub>1</sub>、C<sub>2-5</sub> 和泥岩生成 C<sub>1</sub>、C<sub>2-5</sub> 的活化能范围分别为 202.73~215.27、162.24~175.76 和 189.13~193.87、139.65~154.35 kJ/mol。

(2) 研究发现,相对于只有单一的活化能 (E) 和频率因子 (A) 的动力学模型而言,高斯分布的动力学模型能更好的模拟地质条件下源岩生成天然气的过程。

(3) 利用获得的动力学模型,模拟了吐哈盆地丘东天然气生成动力学过程,结果显示:①单位有机碳上,煤系泥岩对生成天然气的贡献较大,而煤岩贡献相对较小;②湿气 (C<sub>2-5</sub>) 比干气生成略早,主要在 165~150 Ma 间,干气生成于 150~85 Ma 之间,晚期甲烷生成的较少;③总体上,天然气较湿,煤成天然气干气系数不到 0.50,泥岩生成的天然气干气系数最高在 0.75 左右。上述模拟结果与早期研究和实际地质资料基本吻合。

(4) 与常规热解实验相比,低温下的恒温热解实验,可以更好地模拟、再现源岩早期低温生烃过程。

### 参考文献 (References):

- 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[Wang Yunpeng, Zhao Changyi, Wang Zhaojun, 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]
- 邹艳荣,刘金钟,彭平安.压力对高硫干酪根轻烃产率的影响[J].地球化学,2000,29(5):431-434[Zou Yanrong, Liu Jinzhong, Peng Ping'an. Influence of pressure on yield of light hydrocarbon from sulfur-rich kerogen[J]. Geochemistry, 2000, 29(5): 431-434]
- 付少英,彭平安,张文正,等.鄂尔多斯盆地上古生界煤的生烃动力学研究[J].中国科学(D辑),2002,32(10):812-818[Fu Shaoying, Peng Ping'an, Zhang Wenzheng, et al. Study on the hydrocarbon generation kinetics of coal from the Upper Paleozoic strata of the Ordos Basin[J]. Science in China(Series D), 2002, 32(10): 812-818]
- 邹艳荣,帅燕华,孔枫,等.煤成甲烷碳同位素演化的数学模型与应用[J].天然气地球科学,2003,14(2):92-96[Zou Yanrong, Shuai Yanhua, Kong Feng, et al. Mathematical models of stable carbon isotope compositions of coal-derived methane and their applications[J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(2): 92-96]

- 5 王建宝, 肖贤明, 郭汝泰, 等. 渤海湾盆地东营凹陷烃源岩生烃动力学研究 [ J ]. 石油实验地质, 2003, 25 (4): 403-409 [ Wang Jianbao, Xiao Xianming, Guo Rutai *et al*. Study on the hydrocarbon generation kinetics of source rocks from the Dongying depression the Bohaiwan Basin [ J ]. Petroleum Geology and Experiment, 2003, 25 (4): 403-409 ]
- 6 帅燕华, 邹艳荣, 彭平安. 塔里木盆地库车凹陷煤成气甲烷碳同位素动力学研究及其成藏意义 [ J ]. 地球化学, 2003, 32 (5): 469-475 [ Shuai Yanhua, Zou Yanrong, Peng Ping'an. Kinetics modeling of stable carbon isotopes of coal-generated methane and its significance for gases accumulation in the Kuqa Depression Tarim Basin [ J ]. Geochemistry, 2003, 32 (5): 469-475 ]
- 7 帅燕华, 邹艳荣, 彭平安. 运移、扩散、水洗对鄂尔多斯盆地中部上古生界煤成气影响的模拟研究 [ J ]. 科学通报, 2004, 49 (A01): 86-92 [ Shuai Yanhua, Zou Yanrong, Peng Ping'an. Modeling on the effects of migration, diffusion, waterwashing on the gas from coal of the Upper Paleozoic strata in the central part of Ordos Basin [ J ]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49 (A01): 86-92 ]
- 8 李贤庆, 肖贤明, 申家贵, 等. 塔西南坳陷烃源岩生烃动力学研究 [ J ]. 江汉石油学院学报, 2004, 26 (3): 1-4 [ Li Xianqing, Xiao Xianming, Shen Jiaguai *et al*. Study on the hydrocarbon generation kinetics of source rocks from Southwestern Tarim [ J ]. Journal of Jianghan Institute, 2004, 26 (3): 1-4 ]
- 9 帅燕华, 邹艳荣, 刘金钟, 等. 煤成甲烷、乙烷碳同位素动力学研究与应用——以鄂尔多斯上古生界煤成气为例 [ J ]. 地质论评, 2005, 51 (6): 665-671 [ Shuai Yanhua, Zou Yanrong, Liu Jinzhong *et al*. Carbon isotope modeling of coal-derived methane and ethane from the Upper Paleozoic of the Ordos Basin, China [ J ]. Geological Review, 2005, 51 (6): 665-671 ]
- 10 赵必强, 肖贤明, 胡忠良, 等. 莺歌海盆地东方 1-1 气田天然气来源与运聚模式 [ J ]. 沉积学报, 2005, 23 (1): 156-161 [ Zhao Biqiang, Xiao Xianming, Hu Zhongliang *et al*. Origin and accumulation model of natural gases in the Dongfang 1-1 gas field of the Yinggehai Basin [ J ]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23 (1): 156-161 ]
- 11 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 [ 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 Science), 2007, 43 (1): 15-18 ]
- 12 Yanhua Shuai, Ping'an Peng, Yanrong Zou. Kinetic modeling of individual gaseous component formed from coal in a confined system [ J ]. Organic Geochemistry, 2006, 37: 932-943
- 13 Yanrong Zou, Changyi Zhao, Yunpeng Wang *et al*. Characteristics and origin of natural gases in the Kuqa Depression of Tarim Basin, NW China [ J ]. Organic Geochemistry, 2006, 37: 280-290
- 14 Liu Jinzhong, Tang Yongchun. Kinetics of early methane generation from Green River shale [ J ]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43 (22): 1908-1912
- 15 李术元, 郭绍辉, 徐红喜, 等. 烃源岩热解生烃动力学及其应用 [ J ]. 沉积学报, 1997, 15 (2): 138-141 [ Li Shuyuan, Guo Shaohui, Xu Hongxi *et al*. Kinetics of the oil and gas generation from kerogen and its application to the Turpan-Hami Basin [ J ]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15 (2): 138-141 ]
- 16 Lewan M D, Ruble T E. Comparison of petroleum generation kinetics by isothermal hydrous and nonisothermal open-system [ J ]. Organic Geochemistry, 2002, 33: 1457-1475
- 17 Behar F, Vandenberg M, Tang Y, *et al*. Thermal cracking of kerogen in open and closed systems: determination of kinetics parameters and stoichiometric coefficients for oil and gas generation [ J ]. Organic Geochemistry, 1997, 26: 321-339
- 18 Lewan M D. Experiments on the role of water in petroleum formation [ J ]. Geochemistry & Cosmochimica Acta, 1997, 61: 3691-3723
- 19 Lewan M D. Laboratory simulation of petroleum formation-hydrous pyrolysis [ C ] // Engel M, Macko S, eds. Organic Geochemistry: Principles and Applications. New York: Plenum Press, 1993: 419-442
- 20 Douglas W. Waples. The kinetics of in-reservoir oil destruction and gas formation: constraints from experimental and empirical data and from thermodynamics [ J ]. Organic Geochemistry, 2000, 31: 553-575
- 21 赵光峰, 肖传桃. 丘东洼陷侏罗系水西沟地震地层研究 [ J ]. 石油天然气学报, 2007, 29 (1): 27-30 [ Zhao Guangfeng, Xiao Chuantao. On the seismic geology of Jurassic Shuixigou Group in Qidong Depression [ J ]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29 (1): 27-30 ]
- 22 肖传桃, 赵聪会, 付莲. 吐哈盆地丘东洼陷水西沟群的地层划分 [ J ]. 石油天然气学报, 2006, 28 (5): 24-27 [ Xiao Chuantao, Zhao Conghui, Fu Lian. Stratigraphic division of Shuixigou Formation in Qidong Depression of Tuha Basin [ J ]. Journal of Oil and Gas Technology, 2006, 28 (5): 24-27 ]
- 23 程克明. 吐哈盆地油气生成 [ M ]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 1-163 [ Cheng Keming. Oil and Gas Generation of the Turpan-Hami Basin [ M ]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 1-163 ]
- 24 龙道江, 燕烈灿. 吐鲁番—哈密盆地台北凹陷天然气的地球化学特征及其来源 [ J ]. 沉积学报, 1993, 11 (4): 42-46 [ Long Daojiang, Yan Liecan, Du Jianguo. Origin and characteristics of natural gas in Tabei Sag of Turpan-Hami Basin [ J ]. Acta Sedimentologica Sinica, 1993, 11 (4): 42-46 ]
- 25 王昌桂, 程克明. 吐哈盆地侏罗系煤成烃地球化学 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1996 [ Wang Changgui, Cheng Keming. Geochemical Characteristics of Hydrocarbon Generated from Coals of the Turpan-Hami Basin [ M ]. Beijing: Science Press, 1996 ]
- 26 曾凡刚, 苏传国, 吴朝东, 等. 吐哈盆地天然气地化特征、类型及源岩分析. 石油与天然气地质, 1998, 19 (2): 162-164 [ Zeng Fangang, Wu Chaodong, Su Chuanguo. Genetic type of natural gas in Turpan-Hami Basin [ J ]. Oil & Gas Geology, 1998, 19 (2): 162-164 ]
- 27 陈建平, 黄第藩, 李晋超, 等. 吐哈盆地侏罗纪煤系油气主力源岩探讨 [ J ]. 地质学报, 1999, 73 (2): 140-152 [ Chen Jianping, Huang Diefan, Li Jinchao *et al*. Marine source rocks of petroleum from Jurassic coal-bearing strata in the Turpan-Hami Basin, Northwest China [ J ]. Acta Geologica Sinica, 2005, 73 (2): 140-152 ]
- 28 苏传国, 朱建国, 孟旺才, 等. 吐哈盆地“煤成油”形成机制探讨 [ J ]. 吐哈油气, 2005, 11 (5): 14-20 [ Su Chuanguo, Zhu Jianguo

Meng Wangcai *et al*. Discussion on generation mechanism of coal  
formed oil in Turpan-Hami Basin[J]. *Tuha Oil & Gas*. 2005, 10(5):

14-20]

## Low Mature Gas Generation and Kinetics in Quidong Depression, Turpan-Hami Basin

ZHANG Chang-chun<sup>1, 2</sup> TAO Wei<sup>1, 2</sup> ZHANG Xin<sup>1, 2</sup> WANG Xiao-feng<sup>2, 3</sup> ZOU Yan-rong<sup>1</sup>

(1 The State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, Guangdong 510640;

2. The Graduate University of CAS, Beijing 100039;

3. Lanzhou Center of Oil & Gas Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000)

**Abstract** The low temperature pyrolysis for coal and mudstone samples collected from Well AS-1 in Turpan-Hami basin was carried out in the closed system with gold-tube autovlaves. The initial kinetic parameters of dry and wet gases generation are calculated according to the pyrolysis data. Then the kinetic parameters of single activation energy are further optimized into Gaussian distribution of activation energies, which is better to fit empirical data. The optimized kinetic parameters are applied to modeling the early gas generation of Badaowan Formation in Quidong subsag, Turpan-Hami basin, which shows that the modeling results match well with the geological process of early natural gas generation; the isothermal pyrolysis at low temperature is an effective way to evaluate the early gas generation; the natural gas discovered in Quidong subsag is closely associated with the source rocks of the Badaowan Formation.

**Key words** pyrolysis, natural gas, kinetics, low mature gas, Turpan-Hami Basin