

# 煤生烃史系统动力学模拟<sup>\*</sup>

何光玉 (南京大学地球科学系 210093)

吴冲龙 陈荣书 (中国地质大学资源学院 武汉 430074)

**摘要** 煤成烃是目前国内油气勘探的新领域, 是油气地质研究新的热点和重点。本文基于煤成烃研究的最新成果, 运用“系统论”的原理和“系统动力学”的工作方法, 将煤生烃史系统划分为古温度和有机质成熟史、烃源岩发育史和有机质降解史等三个子系统。在泥岩生烃史模拟方法的基础上, 建立了煤生烃史系统的系统动力学模型。模型的特点是各子系统内部及其间充满了控制和反馈控制信息。将该模型应用于辽河盆地东部坳陷荣兴屯地区的煤生烃史研究中, 取得了令人满意的效果。

**主题词** 煤 生烃 系统动力学模型 反馈控制 辽河盆地

**中国图书资料分类法分类号** P618.11 P618.13

**作者简介** 何光玉 男 30岁 博士后 构造地质、煤油气地质

## 1 引言

目前国内外已经发现了大量的煤成油气田, 如澳大利亚的吉普斯兰盆地和印度尼西亚的马哈卡姆三角洲等地的大油田以及国内的吐哈油田<sup>[1,2]</sup>等都是煤成油气的有名例子。这表明煤成烃是油气勘探的新领域, 研究煤成烃具有特别重要的意义。目前国内外都在致力于这方面的研究, 煤成烃已经成为油气地质领域研究中新的热点和重点。然而目前有关煤成烃的研究主要集中于定性分析和实验室模拟, 很少涉及动态的、历史的和定量的研究。即使有也由于人们对煤成烃的机理特别是其中存在的反馈控制

信息等认识不够, 导致所建模型不够完善, 从而实际应用价值不大<sup>[3]</sup>。

在此, 作者从“系统论”和“控制论”这一全新的角度出发来探讨煤岩的生烃机理, 揭示其中存在的各种控制和反馈控制信息, 并将社会科学和经济学领域中的“系统动力学”引进来, 探索解决这一问题的有效途径, 以期推动煤成烃勘探和研究的发展。

## 2 系统动力学模型

采用系统动力学研究问题时, 首先是进行系统分析, 分析系统的反馈机制, 把握系统总体的与局部的反馈机制。然后建立流图, 以进行更细致的分析。在此基础上根据系统动力学特有的 DYNAMO 语言建立模型, 即系统动力学模型<sup>[4]</sup>。

\* 国家重点基金项目(编号 49832040) 和中国海洋石油总公司 95·  
重点攻关项目(编号 9618) 资助

# THE HYDROCARBON SOURCE ROCK OF LATE PALEOZOIC COAL MEASURES IN BOHAI BAY BASIN AND ITS HYDROCARBON GENERATION EVALUATION

Ai Tianjie (China University of Mining and Technology)

Li Rongxi (China Marine Petroleum Bohai Co.)

**Abstract** Based on the study of hydrocarbon-source rock of Late Paleozoic coal measures in Bohai Bay Basin, the hydrocarbon-generating properties are evaluated from the main hydrocarbon-generating component, the types of organic matter and hydrocarbon-generating threshold, respectively. It is considered that the hydrocarbon-generating properties of source rock in Taiyuan Formation is better than those in Shanxi Formation; the source rock has the better material basis for hydrocarbon generation, higher hydrocarbon-generating capacity and thermal mature condition, as well as the better prospect for the natural gas exploration.

**Keywords** coal; hydrocarbon source rock; type of organic matter; hydrocarbon-generating properties; evaluation

## 2.1 煤岩生烃系统中的反馈控制机理

从控制论的角度来看,盆地系统及其各级子系统可以划分为开环系统和闭环系统。所谓开环系统是指系统的输入量对系统的输出量没有影响,即对系统的控制作用没有影响的系统。显然这种系统不是反馈控制系统。闭环系统是指输出对输入有影响的系统,亦即输出状况对系统的控制作用有直接影响的系统,因此这种系统是反馈控制系统。

油气地质研究及勘探实践表明,煤岩生烃系统是闭环系统,亦即反馈控制系统。例如热模拟实验结果表明,随着煤岩中有机质温度的升高生烃作用的不断进行,煤岩中的孔隙流体压力不断增大。当压力增大到一定程度时,必将对有机质成熟和生烃产生抑制作用<sup>[5,6]</sup>,这种作用就是反馈控制作用<sup>[3]</sup>。(图1④)此外,煤岩生烃系统各子系统如古地温与有机质成熟史、成熟源岩发育史和有机质降解史等,其中也充满了反馈控制关系,属于反馈控制系统。例如我们知道随着有机质成熟度升高,生烃速率增加,生烃量也增加,可降解有机质的量减少,从而使生烃速率降低。可见有机质降解史子系统是一个负的反馈控制系统。在因果回路图上它表现为一个负反馈回路。(图1③)古地温史子系统(图1①)和成熟源岩发育史子系统(图1②)也是负的反馈控制系统,因为它们和有机质降解史子系统一样都对一个变量的改变作出与初始扰动方向相反的反应。

需要说明的是,在煤岩生烃演化的过程中,上述三个子系统中有机质降解史子系统(图1③)自始至终是主导的反馈控制系统,其他两个子系统自始至终属于次要的反馈控制系统,不存在主回路随时间的转移。

## 2.2 系统动力学模型(DYNAMO 方程)

系统动力学 DYNAMO 基本方程主要形式有水位方程(*L* 方程)和速率方程(*R* 方程)。它们分别用来计算动态系统水位变量的时刻值与速率变量的区间值。此外还有辅助方程(*A* 方程)、初值方程(*N* 方程)和常量方程(*C* 方程),它们为水位方程和速率方程的求解提供参数。基于上述分析和系统动力学的建模方法可以得到煤岩生烃史的系统动力学模型如下:

$$L \cdot T \cdot K = T \cdot J + TR \cdot JK$$

$$N \cdot T = T^1$$

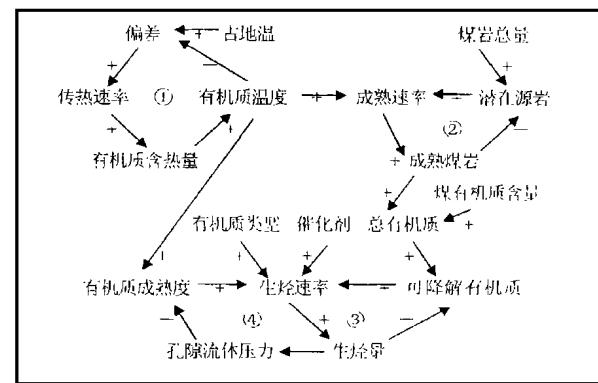


图 1 煤岩生烃史系统因果回路图

(图中①、②、③、④为负反馈系统序号)

$$C \cdot T^1 = 0$$

$$R \cdot TR \cdot KL = C^2 * DISC \cdot K$$

$$L \cdot IM \cdot J + DT * MR \cdot JK$$

$$N \cdot IM = IM$$

$$C \cdot IM^0 = 0$$

$$A \cdot ELM \cdot K = TABHL(TELM, T, T^1, TN, 10)$$

$$T \cdot TELM =$$

(式中 10 为步长, *TELM* 的值由经验或智能模拟结果给出)

$$R \cdot MR \cdot KL = ELM \cdot K * SM \cdot K$$

$$R \cdot R_o \cdot K = CLIP(R_o^1 \cdot K, R_o^2 \cdot K, TTI \cdot K, R_o^0)$$

$$L \cdot QRGO \cdot K = QRGO \cdot J + DT * RGOR \cdot JK$$

$$QRGO^0 = 0$$

$$C \cdot R \cdot RGOR \cdot KL = DELAY_3(GOR \cdot KL, DELG)$$

$$C \cdot DELG = ?$$

$$R \cdot RGOR \cdot KL = RGO \cdot K * AC \cdot K * 1E - 7$$

$$A \cdot RGO \cdot K = CF \cdot K * RGH O \cdot K$$

式中 *J*、*K*——水位变量的今值和过去值;

*KL*、*JK*——速率变量的今值和过去值;

*DT*——时间步长, Ma;

*T*——有机质温度, K;

*TR*——传温速率, K/Ma;

*T*<sup>1</sup>——有机质初始温度, K;

*C*<sup>2</sup>——传温系数;

*DISC*——有机质温度与所处温度场的偏差, K;

*IM*、*IMO*——成熟源岩厚度及初值, m;

*MR*——烃源岩成熟速率, m/Ma;

*SM*——潜在成熟源岩的厚度, m;

$ELM$  —— 潜在源岩进入成熟阶段的比例因子,  $m/(K \cdot Ma)$ ;  
 $TABHL$  —— 表函数;  
 $TN$  —— 生烃终止温度,  $K$ ;  
 $R_o$  —— 镜质体反射率, %;  
 $CLIP$  —— 分枝函数;  
 $R_o^1, R_o^2$  —— 当  $TTI \geqslant < R_o^0$  时的镜质体反射率计算公式;  
 $TTI$  —— 时温指数(无量纲);  
 $QRGO$  —— 生油量,  $10^4 t/km^2$ ;  
 $RGOR, GOR$  —— 考虑和不考虑延迟时的生油速率,  $10^4 t/(km^2 \cdot Ma)$ ;  
 $DELAY_3$  —— 延迟函数;  
 $DELG$  —— 生烃延迟时间,  $Ma$ ;  
 $RGO$  —— 生油强度,  $kg/(t_{Toc} \cdot Ma)$ ;  
 $AC$  —— 可降解有机质的量,  $t_{Toc}/km^2$ ;  
 $CF$  —— 有机碳恢复系数;  
 $RGOH$  —— 产油率,  $kg/(t_{Toc} \cdot Ma)$ ;

上述模型中计算源岩成熟速率时采用了与经验或智能模拟相结合的方法,表明该模型与定性分析结合得十分紧密。此外,该模型在计算生烃速率时还考虑了其中存在的延迟现象等,这表明它较常规模型更完善。

### 3 模拟结果分析

以辽河盆地东部坳陷荣兴屯地区为例。辽河盆地东部坳陷经历了裂陷发育阶段和裂后发育阶段。裂陷阶段主要发育了沙河街组三段和一段;裂后阶段主要发育了东营组一、二、三段、馆陶组、明化镇组及第四系。层面间重大不整合面一个,位于沙河街组一段与东营组三段之间。

荣兴屯地区位于辽河盆地东部坳陷的南部。目前已在该区发现了大量的石油,油源岩主要是下第表1 用两种不同方法计算的研究区煤岩生烃强度结果表

	累积生烃强度 $/10^4 t \cdot km^{-2}$	东三末 $/-30.5 Ma$	东一末 $/-25.0 Ma$	现今 $/0.0 Ma$
系统动力学模拟	油	364	805	1 648
	气	242	880	1 764
非系统动力学模拟	油	566	1 483	1 880
	气	301	1 608	2 007

三系沙河街组三段泥岩和煤系以及沙河街组一段泥岩。该区下第三系沙三上段中煤层发育,单层厚达27 m,累积厚度达50多米,分布面积达40多平方公里。

地史研究表明,煤岩埋深在2 000~5 000 m(洼陷中)以上,因此具有从未熟~过熟的完整演化序列。地化研究表明,该区煤岩有机碳含量高,平均为45.83%;有机质类型好,以II<sub>2</sub>型为主,II<sub>1</sub>型居次。显微组分中壳质组和镜质组含量高,分别为5%~42.5%和57.5%~93.8%,表明该区煤岩具备成烃,特别是成油的有利条件<sup>[6]</sup>。

根据上述系统动力学模型和地质模型,作者对辽河盆地东部坳陷荣兴屯地区的煤岩生烃进行了模拟研究。模拟结果见表1。

表1表明,该区下第三系沙三上段煤岩具有如下生烃特征:

a. 一般认为煤以生气为主,生油很少,而表1则表明本区煤岩具有很大的生油能力;在东营组三段沉积末( $-30.5 Ma$ )累积生油强度高达 $364 \times 10^4 t \cdot km^2$ ,之后不断上升,到了现今( $0.0 Ma$ ),累积生油强度高达 $1 648 \times 10^4 t/km^2$ ;

b. 在东营组一段沉积末( $-25.0 Ma$ )以前,本区煤岩累积生油强度( $364 \times 10^4 t \cdot km^2$ )大于累积生气强度( $242 \times 10^4 t \cdot km^2$ ),而在东营组一段沉积末( $-25.0 Ma$ )以后则累积生油强度( $805 \times 10^4 t/km^2$ )小于累积生气强度( $880 \times 10^4 t/km^2$ ),表明煤岩成油、成气具有不同的规律。

此外,作者还采用常规模拟方法(即非系统动力学模拟方法)对该区煤岩生烃进行了模拟<sup>[7]</sup>, (表1)以对两种模拟方法进行比较。由表1可知:

a. 在数量上,系统动力学模拟结果较非系统动力学模拟结果要小得多,如在东营组三段沉积末( $-30.5 Ma$ )本区煤岩累积生油、气强度采用系统动力学模拟的结果分别为 $364 \times 10^4 t/km^2$ 和 $242 \times 10^4 t/km^2$ ,而采用非系统动力学模拟的结果分别为 $566 \times 10^4 t/km^2$ 和 $301 \times 10^4 t/km^2$ ,究其原因,主要是系统动力学模拟考虑了生烃系统中存在的反馈控制作用(如压力对有机质成熟和生烃等的抑制作用)的缘故;

b. 在进入和结束生烃高峰期的时间上,系统动力学模拟结果较非系统动力学模拟结果要晚得

多,如系统动力学模拟结果表明在东营组一段沉积末( $-25.0$  Ma)本区煤岩正处于生烃高峰期,累积生油强度达 $805 \times 10^4$  t/km<sup>2</sup>,累积生气强度达 $880 \times 10^4$  t/km<sup>2</sup>;而非系统动力学模拟结果则表明本区煤岩正处于生烃高峰期的晚期,累积生油强度为 $1483 \times 10^4$  t/km<sup>2</sup>,累积生气强度为 $1608 \times 10^4$  t/km<sup>2</sup>,究其原因,除了由于系统动力学模拟考虑了生烃系统中压力对有机质成熟和生烃等的抑制作用外,还由于它考虑了生烃系统中存在的延迟现象。(如有机质降解成烃过程有延迟现象的发生等)

#### 4 结论及建议

在上述分析的基础上,可以得到如下结论及建议:

a. 系统动力学模拟方法在建立模型时,先从分析煤岩系统生烃机理入手,看到了其中存在的反馈控制机理,看到了其中存在的延迟现象,因此,所得到的模拟结果必较其它非系统动力学模拟结果要合理得多。

b. 模拟结果表明,辽河盆地东部坳陷荣兴屯地区煤岩在东营组三段沉积末( $-30.5$  Ma)已进入生烃高峰期,累积生油、气强度分别为 $364 \times 10^4$  t/km<sup>2</sup> 和 $242 \times 10^4$  t/km<sup>2</sup>,到了现今( $0.0$  Ma)仍处于生烃高峰期,累积生油、气强度分别为 $1648 \times 10^4$  t/km<sup>2</sup> 和 $1764 \times 10^4$  t/km<sup>2</sup>。这一模拟结果比非系统动力学模拟结果在时间上要晚,在数量上也要小。

c. 由于生烃史系统与排烃史系统之间也存在

着复杂的反馈控制作用,而这一作用的存在也将对煤岩有机质的演化有重大影响。因此建议进一步开展这方面的研究,以建立起一个更加合理的生烃史模型。

感谢中国地质大学资源学院王燮培教授、张家骅教授和南京大学地球科学系卢华夏教授等的热情指导和帮助!

#### 参考文献

- 1 黄第番. 煤成油研究新进展. 北京:石油工业出版社, 1994
- 2 傅家模, 刘德汉, 盛国英. 煤成烃地球化学. 北京:科学出版社, 1990
- 3 吴冲龙, 王燮培, 毛小平, 何光玉等. 油气系统动力学的概念模型与方法原理——盆地模拟和油气成藏动力学模拟的新思路、新方法. 石油实验地质. 1998;20(4):319~327
- 4 王其藩. 系统动力学. 北京:清华大学出版社, 1988
- 5 Price L C, Barker C E. Suppression of vitrinite reflectance in amorphous rich kerogen—a major unrecognized problem. Journal of Petroleum Geology, 1985;8:59~84
- 6 Law B E, Nuccio V F, Barther CE. Kinky vitrinite reflectance well profiles: evidence of paleopore pressure in Low-permeability, gasbearing sequences in Rocky Mountain Foreland Basin. AAPG Bulletin, 1989;73:999~1010
- 7 何光玉, 陈荣书, 张家骅等. 辽河盆地桃园—荣兴屯地区煤和炭质泥岩成烃模拟. 长春地质学院学报, 1997;27(4):393~396
- 8 陈荣书, 张家骅, 唐仲华等. 辽河盆地桃园—荣兴屯地区沙上段煤成烃特征, 潜量及油气分布特征. 辽河油田研究院(内部报告), 1996

(收稿日期 1999-05-13)

## SYSTEM-DYNAMICS SIMULATION OF HYDROCARBON-GENERATION OF COAL

He Guangyu (Dept. of Geosciences, Nanjing University)

Wu Chonglong Chen Rongshu (Dept. of Resource, China University of Geoscience)

**Abstract** Research on hydrocarbon-generation of coal is a new hot point in the world now. According to the Principle of System theory and the methods of system-Dynamics, the author built a hydrocarbon-generation history system of coal based on the latest researches that includes three subsystems, namely, paleo-temperature, sources-rocks and metamorphosing of organic matter et al. Subsystems. Furthermore, the author also built a System-Dynamics model of hydrocarbon-generation of coal based on the present simulation of that of mud-stones in this paper. The new model has one important feature, namely, it is full of messages of control and feedback control. In the end, The author designed a program based on the new model and used it to study the characteristics of hydrocarbon-generation of coal in Rongxintun area of East Liaohe basin, China. The results of the simulation are satisfying.

**Keywords** Coal; Hydrocarbon-generation; System-Dynamics Model; Feedback Control; Liaohe Basin