

文章编号: 1001-1986(2005) 05-0029-04

# 应用生烃动力学方法研究库车坳陷烃源岩生烃史

李贤庆<sup>1,2</sup>, 肖贤明<sup>3</sup>, 米敬奎<sup>4</sup>, 肖中尧<sup>5</sup>, 方家虎<sup>1,2</sup>, 唐永春<sup>6</sup>, 刘德汉<sup>3</sup>, 申家贵<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学煤炭资源教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学资源与地球科学系, 北京 100083; 3. 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 4. 湖南科技大学土木工程系, 湖南 湘潭 411201; 5. 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000; 6. 美国加州理工学院石油能源与环境研究中心, 美国 加州 91789)

**摘要:** 根据烃源岩生烃动力学参数, 结合沉积埋藏史和古热史资料, 本文应用生烃动力学方法研究了塔里木盆地库车坳陷三叠—侏罗纪烃源岩生烃史。研究表明, 无论是煤, 还是泥岩, 库车坳陷三叠—侏罗纪烃源岩生气时间发生得晚, 主生气期出现在 10 Ma 以来的喜山期晚期, 生气高峰期出现在 5 Ma 之后。中上三叠世烃源岩生气时间和主生气期均早于中下侏罗世烃源岩。烃源岩这种晚期生气特征, 为库车坳陷天然气的晚期聚集成藏提供了非常有利的烃源条件。

**关键词:** 生烃史; 动力学; 模拟参数; 烃源岩; 库车坳陷

**中图分类号:** P618.11 **文献标识码:** A

## The study on hydrocarbon generation histories in Kuqa depression using the method of kinetics

LI Xian-qing<sup>1,2</sup>, XIAO Xian-ming<sup>3</sup>, MI Jing-kui<sup>4</sup>, XIAO Zhong-yao<sup>5</sup>,  
FANG Jia-hu<sup>1,2</sup>, TANG Yong-chun<sup>6</sup>, LIU De-han<sup>3</sup>, SHEN Jia-gui<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Coal Resources, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. The Department of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 3. The State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 4. The Department of Civil Engineering, University of Human Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 5. The Research Institute of Exploration and Development, Tarim Oil Field Company, Petro-China, Kuerle 841000, China; 6. The Research Center of Petroleum Energy and Environment, California Institute of Technology, California 91789, USA)

**Abstract** On the basis of the kinetic parameters of source rocks, with the combination of the data of sedimentary burial and paleothermal histories, hydrocarbon generation histories of Triassic-Jurassic source rocks in Kuqa Depression, Tarim Basin were studied using the method of kinetics in this paper. It demonstrated that Triassic-Jurassic source rocks (e.g. coal and mudstone) in Kuqa Depression generated gas relatively later, which mainly occurred at the late stage of Himalayan Period (after 10 Ma) and main gas peak was in the last 5 Ma. The gas generation time and main gas peak of the Middle and Upper Triassic source rocks were slightly earlier than those of the Middle and Lower Jurassic coal-bearing source rocks. The characteristics of late gas generation would provide the favorable hydrocarbon source for the late accumulation of natural gas in Kuqa Depression.

**Key words:** hydrocarbon generation history; kinetics; modelling parameter; source rock; Kuqa Depression

## 1 引言

烃源岩烃类生成历史是油气藏形成条件研究的重要内容, 它决定了油气运移时间、充注方向及成藏

规模。通常采用盆地模拟方法进行烃源岩生烃史研究, 这种方法较简便, 只需输入沉积埋藏史与热史数据, 计算机可自动生成生烃演化和成熟度结果。国内学者已对塔里木盆地库车坳陷三叠—侏罗纪烃源

收稿日期: 2004-11-28

基金项目: 国家“十五”重点科技攻关项目(编号: 2001BA605A02—03—01、2004BA616A02—01—01)和中国博士后科学基金项目(批准号: 2002031282)资助

作者简介: 李贤庆(1967—), 男, 浙江富阳人, 中国矿业大学教授, 博士, 主要从事煤油气地质、有机地球化学、成藏动力学及有机岩石学方向的教学与科研工作。

岩特征及其生烃史作过研究,取得了一些研究成果<sup>[1~6]</sup>,但已有的研究基本上采用盆地模拟的方法。该方法的主要缺点是没有针对烃源岩具体的特征进行生烃动力学参数研究和生烃史模拟,研究结果偏重于反映成熟度演化,而说明不了某一烃类组分的生烃特征。

油气勘探实践和热模拟实验充分证明<sup>[7~9]</sup>,烃源岩生成油气的过程中,温度和时间呈互补的关系,油气生成速率符合化学反应的动力学规律,因而可以用动力学方法外推地质条件下的生烃过程。应用生烃动力学方法研究烃源岩的生烃史,近年来已在油气评价中得到了较为广泛的应用<sup>[10~14]</sup>。生烃动力学方法的最大优点是根据烃源岩生烃母质的具体特点,获得生烃动力学参数,进行地质条件下的生烃史模拟,可较准确地评价特定烃类成份的生成历史。

本文拟在烃源岩生烃动力学参数研究<sup>[15]</sup>的基础上,结合盆地沉积埋藏史和热史资料,应用生烃动力学方法对塔里木盆地库车坳陷三叠—侏罗纪烃源岩的生烃史进行研究。

## 2 生烃史模拟基本原理

应用动力学方法描述烃源岩的生烃过程,有两个关键问题:一是反应动力学模型;二是热解实验装置。基于不同的化学反应(如总包反应、串联反应和平行反应),国内外发展了多种计算生烃动力学参数的数学模型<sup>[9, 10, 12, 13, 16]</sup>。大量研究表明,平行一级反应的动力学模型在国际上应用最为广泛,对实验数据的模拟计算比较合理,是目前广泛采用的动力学模型<sup>[10, 12, 13, 16]</sup>。热解实验装置主要有两种:开放体系与封闭体系,均可应用于生烃动力学研究<sup>[10~18]</sup>。其中黄金管热解装置是目前封闭体系较好的实验装置<sup>[13, 14, 18]</sup>。

烃源岩干酪根生烃情况可用一系列平行的一级化学反应来描述<sup>[7~10]</sup>。在反应时间  $t$  生成的烃类总量表达式为:  $X(t) = \sum(X_i(t))$ 。

对于第  $i$  个生烃母体,其在时间  $t$  时生成的烃量为:

$$X_i(t) = X_{i0}(1 - \exp(-k_i(t)))$$

式中  $X$  为时间  $t$  时总的烃类生成量;  $X_i$  为第  $i$  个生烃母体在时间  $t$  时生成的烃量;  $X_{i0}$  为第  $i$  个生烃母体可生成的最大潜力;  $k_i$  为绝对温度  $T$  时的反应速率;  $k_i = A_i \cdot \exp(-E_i/RT)$ , 其中  $A_i$  为频率因子;  $E_i$  为活化能;  $R$  为气体常数。

通过两种以上不同升温速率热解实验产烃数

据,可知  $T$  及其相对应的  $X_i$ , 理论上可求出  $A_i$  以及  $E_i$ 。然而,实际上  $X_i$  与  $T$  为连续变化的量,必须应用动力学专用软件方能完成相应计算<sup>[10~14]</sup>。

## 3 与生烃史模拟有关的地质参数

对库车坳陷三叠—侏罗纪烃源岩生烃史进行模拟计算,所采用的地质参数如下:

a. 目标层 中下侏罗统( $J_{1+2}$ )及中上三叠统( $T_{2+3}$ )的顶界和底界;

b. 古地表温度  $14^\circ\text{C}$ ;

c. 生烃动力学参数 采用库车坳陷依南 2 井侏罗纪煤、煤系泥岩及三叠纪泥岩生烃动力学参数,详见文献[15];

d. 古地温梯度 采用梁狄刚等<sup>[19]</sup>在国家“九五”科技攻关中所取得的古地温研究成果,库车坳陷在地史时期古地温梯度逐渐降低(侏罗纪时为  $3.0 \sim 3.1^\circ\text{C}/\text{km}$ ; 白垩纪为  $2.9 \sim 3.0^\circ\text{C}/\text{km}$ ; 古近纪时  $2.8 \sim 2.9^\circ\text{C}/\text{km}$ ; 新近纪时  $2.6 \sim 2.8^\circ\text{C}/\text{km}$ ; 第四纪时  $2.6^\circ\text{C}/\text{km}$ ), 且相对较明显的降温过程与新近纪快速埋藏过程相对应;

e. 模拟计算点 拜城凹陷中心、克拉 2 井、阳霞凹陷中心、依南 2 井。

本研究采用甲烷转化率评价天然气生成: 生气门限, 甲烷转化率为 0.1; 主生气阶段, 甲烷转化率为 0.2~0.9; 生气晚期, 甲烷转化率为 0.9~1.0。下面分别讨论库车坳陷各模拟计算点的生烃史模拟结果。

## 4 生烃史模拟结果

### 4.1 中下侏罗统烃源岩生烃史

#### 4.1.1 拜城凹陷中心

拜城凹陷中心侏罗纪烃源岩的生烃史模拟计算结果见图 1a~b。总的来讲, 侏罗纪烃源岩(煤和煤系泥岩)生烃作用时间晚, 大量生气主要出现在 10 Ma 以来。侏罗纪煤在  $J_{1+2}$  顶界和底界时生成甲烷的最大转化率分别为 0.75 和 0.89, 甲烷累积产率各为  $150 \text{ ml/g}^\circ\text{TOC}$  和  $190 \text{ ml/g}^\circ\text{TOC}$ ; 侏罗纪泥岩在  $J_{1+2}$  顶界和底界时生成甲烷的最大转化率分别为 0.95 和 0.99, 甲烷累积产率分别为  $180 \text{ ml/g}^\circ\text{TOC}$  和  $185 \text{ ml/g}^\circ\text{TOC}$ 。

#### 4.1.2 克拉 2 井

克拉 2 井侏罗纪烃源岩的生烃史模拟计算结果见图 1c~d。侏罗纪烃源岩生烃比拜城凹陷中心时间晚。侏罗纪煤生气门限出现在 18 Ma, 主生气期

始于 5 Ma,  $J_{1+2}$ 底生成甲烷的最大转化率为 0.79, 甲烷累积产率达 172 ml/g $^{\circ}$ TOC。煤系泥岩生气门限出现在 15 Ma, 主生气阶段出现在 10 Ma 以后,  $J_{1+2}$ 底生成甲烷的最大转化率为 0.91, 甲烷累积产率为 180 ml/g $^{\circ}$ TOC。

4.1.3 阳霞凹陷中心

阳霞凹陷中心侏罗纪烃源岩的生烃史模拟计算结果见图 1e~f。该凹陷总的规律与拜城凹陷中心相似, 生气时间也晚。侏罗纪煤在 10 Ma 之后才开

始明显生烃, 主生气期发生在 4~0 Ma。目前,  $J_{1+2}$ 底界煤生成甲烷的最大转化率为 0.46, 甲烷累积产率达 97 ml/g $^{\circ}$ TOC; 煤系泥岩生气门限在 10 Ma 左右, 主生气期出现在 5 Ma 左右, 生成甲烷的最大转化率为 0.75, 甲烷累积产率为 140 ml/g $^{\circ}$ TOC。

4.1.4 依南 2 井

依南 2 井煤系烃源岩的生烃史模拟计算结果见图 1g~h。与其他模拟计算点相比, 其生烃出现最晚。侏罗纪煤在 4 Ma 才进入生气门限, 目前, 甲烷转

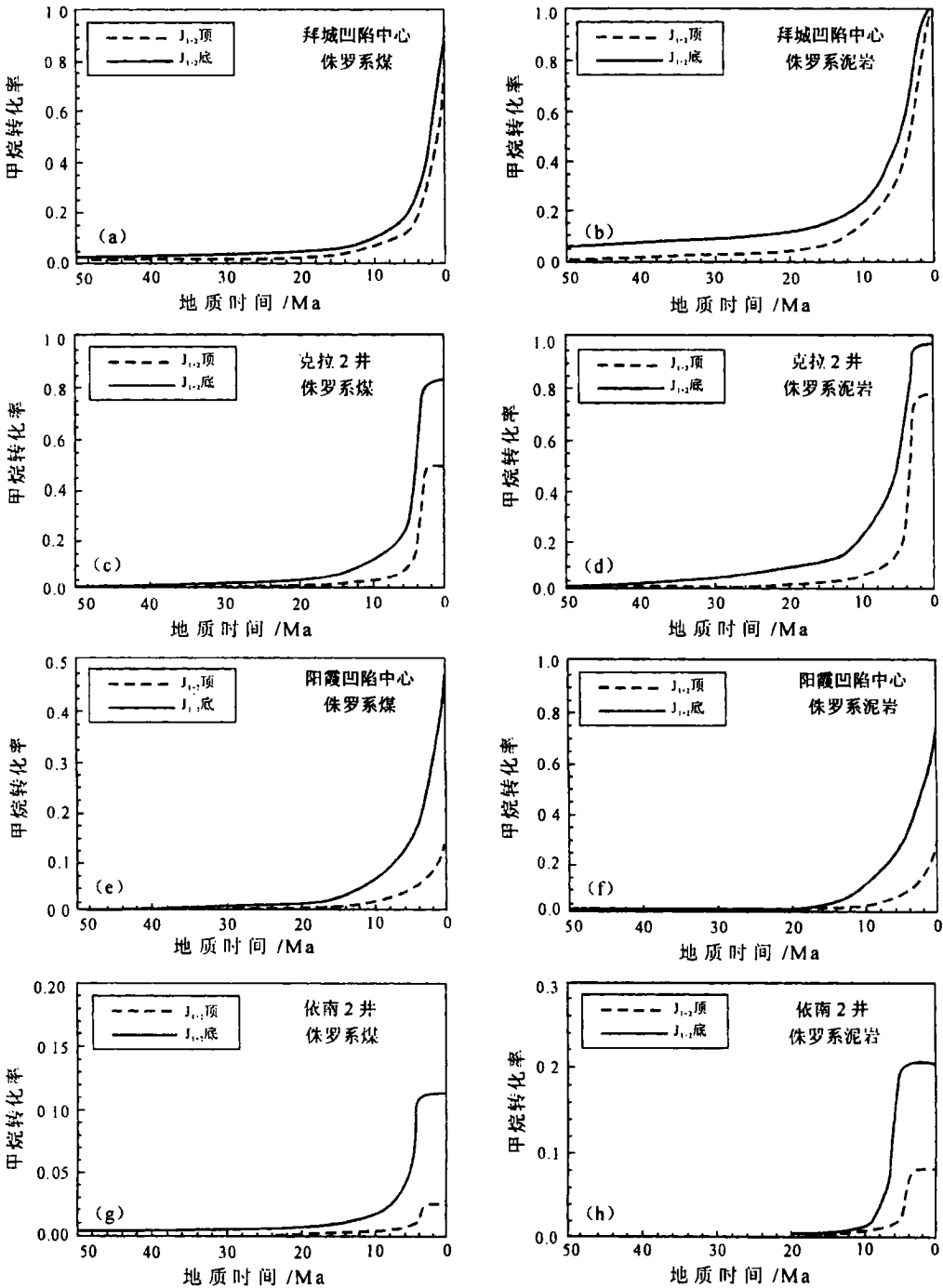


图 1 库车坳陷侏罗纪煤和泥岩的生烃史模拟结果

Fig. 1 The modeling results of hydrocarbon generation history of Jurassic coal and mudstone in Kuqa Depression

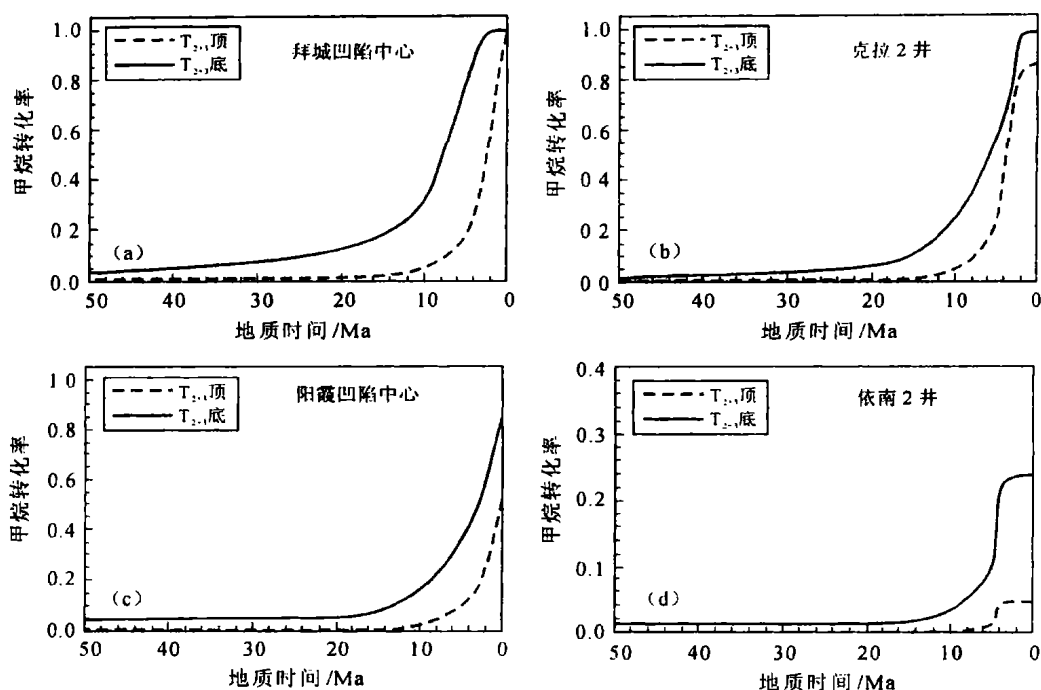


图 2 库车坳陷三叠纪泥岩的生烃史模拟结果

Fig. 2 The modeling results of hydrocarbon generation history of Triassic mudstone in Kuqa Depression

化率只有 0.11, 甲烷产率  $23 \text{ ml/g}^\circ\text{TOC}$ 。侏罗纪泥岩在 6 Ma 开始进入生气门限, 目前甲烷转化率为 0.20, 甲烷产率为  $30 \text{ ml/g}^\circ\text{TOC}$ 。因此, 这套烃源岩尚处于生气早期阶段。

## 4.2 中上三叠世烃源岩生烃史

### 4.2.1 拜城凹陷中心

拜城凹陷中心中上三叠世烃源岩的生烃史模拟计算结果见图 2a。由图可见, 该套烃源岩生烃时间早于侏罗纪源岩。总体来讲, 生气门限出现在 20 Ma 之后, 主生气峰期出现于 10~3 Ma。目前, 中上三叠世烃源岩生成甲烷的转化率为 1.0, 甲烷累积产率达  $150 \text{ ml/g}^\circ\text{TOC}$ 。

### 4.2.2 克拉 2 井

克拉 2 井中上三叠世烃源岩的生烃史模拟计算结果见图 2b。由图可见, 其生气门限出现在 15 Ma, 主生气期出现在 12~2 Ma。该套烃源岩生成甲烷的最大转化率超过 0.9, 甲烷累积产率达  $140 \text{ ml/g}^\circ\text{TOC}$  以上。

### 4.2.3 阳霞凹陷中心

阳霞凹陷中心中上三叠世烃源岩的生烃史模拟计算结果见图 2c。该套烃源岩大约在 10 Ma 左右进入生气门限, 主生气阶段出现在 6 Ma 以后, 目前中上三叠统底烃源岩生成甲烷的最大转化率为 0.87, 甲烷累积产率达  $115 \text{ ml/g}^\circ\text{TOC}$ 。

### 4.2.4 依南 2 井

依南 2 井中上三叠世烃源岩的生烃史模拟计算

结果见图 2d。中上三叠世烃源岩生气门限出现在 5 Ma 左右, 顶界和底界时生成甲烷的最大转化率分别为 0.05 和 0.24, 甲烷累积产率各为  $10 \text{ ml/g}^\circ\text{TOC}$  和  $45 \text{ ml/g}^\circ\text{TOC}$ 。

## 5 结论

a. 库车坳陷中上三叠世烃源岩和中下侏罗世烃源岩的生烃史显示出差异, 前者的生气时间和主生气期均早于后者。

b. 库车坳陷三叠—侏罗纪烃源岩(煤和泥岩)生气时间发生得晚, 主生气期出现在 10 Ma 以来的喜山晚期, 生气高峰期出现在 5 Ma 之后。这种晚期生气特征与库车坳陷克—依构造带圈闭及运移通道相匹配<sup>[1~3]</sup>, 为库车坳陷天然气的晚期聚集成藏提供了非常有利的气源条件。

## 参考文献

- [1] 贾承造, 秦胜飞, 李启明. 塔里木盆地库车坳陷油气的形成与分布[A]. 煤成烃国际学术研讨会论文集[C], 北京: 石油工业出版社, 2000. 176—190.
- [2] 梁狄刚, 张水昌, 赵孟军等. 库车坳陷的油气成藏期[J]. 科学通报, 2002, 47(增刊): 56—63.
- [3] 赵靖舟, 戴金星. 库车前陆逆冲带天然气成藏期与成藏史[J]. 石油学报, 2002, 3(2): 6—10.
- [4] 王飞宇, 张水昌, 张宝民等. 塔里木盆地库车坳陷中生界源岩有机成熟度[J]. 新疆石油地质, 1999, 20(3): 221—224.
- [5] 何光玉, 吴冲龙, 陈荣书. 煤生烃史系统动力学模拟[J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27(6): 29—32.
- [6] 何光玉, 卢华复, 王良书等. 库车盆地烃源岩特征及生烃史特征[J]. 煤炭学报, 2002, 27(6): 570—575.

文章编号: 1001-1986(2005)05-0033-04

# 地下水流线的数值算法研究

胡立堂<sup>1</sup>, 陈崇希<sup>2</sup>, 王忠静<sup>1</sup>, 王旭升<sup>3</sup>

(1. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084; 2. 中国地质大学环境地质研究所, 湖北 武汉 430074; 3. 中国地质大学水资源与环境工程学院, 北京 100083)

**摘要:**地下水流线的生成是数值模拟结果显示中的一个重点。根据地下水流线可方便分析地下水的运动态, 而常见的工具不能满足要求。论文探讨并提出了流线的“质点追踪”生成算法, 这为流线数据可视化显示及其地下水年龄计算提供了一定的依据。最后, 进行了实例研究, 结果显示了设计算法的正确性。

**关键词:**地下水流线; 数值算法; 地下水年龄

**中图分类号:** P641.2      **文献标识码:** A

## Researches on numerical algorithm of groundwater flowline

HU Li-tang<sup>1</sup>, CHEN Chong-xi<sup>2</sup>, WANG Zhong-jing<sup>1</sup>, WANG Xu-sheng<sup>3</sup>

(1. Department of Hydraulic and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Institute of Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Institute of water resources and environment engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Groundwater flowline generation is one difficulty in results visualization of groundwater simulation, by which we could analyze groundwater movement easily. However, common tools don't satisfy the need. This article discussed and designed the particle-tracing numerical algorithm of groundwater flowline, which would supply argument for visualization of flowline data and groundwater age calculation, and finally made a case study. The results showed the accuracy of algorithm.

**Key words:** groundwater flowline; numerical algorithm; groundwater age

## 1 引言<sup>[1]</sup>

地下水流线反映了地下水流场在空间范围内的

变化, 因而成为数值模拟后处理中的一个重点研究内容。目前, 国际上通用的软件(如 Visual ModFlow, Processing ModFlow, FeFlow 等)显示的流线是众多离

收稿日期: 2005-01-07

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(批准号: 200320150002)资助

作者简介: 胡立堂(1976—), 男, 湖北潜江人, 清华大学博士后, 主要研究方向为地下水资源评价、地下水数值模拟及地下水流软件开发。

[7] Ungerer P, Pelet R. Extrapolation of the kinetics of oil and gas formation from laboratory experiments to sedimentary basins [J]. Nature, 1987, 327: 52—54.

[8] Ungerer P. State of the art of research in kinetics modeling of oil formation and expulsion [J]. Org. Geochem., 1990, 16(1—3): 1—25.

[9] Behar F, Kressmann S, Vandenbroucke M, et al. Experimental simulation in a confined systems and kinetic modeling of kerogen and oil cracking [J]. Org. Geochem., 1991, 19: 173—189.

[10] Tang Y, Jenden P D, Nigrini A, and Teeman S C. Modeling early methane generation in coal [J]. Energy and Fuels, 1996, 10: 659—671.

[11] Behar F, Vandenbroucke M, Tang Y, et al. Thermal cracking of kerogen in open and closed systems: determination of kinetic parameters and stoichiometric coefficients for oil and gas generation [J]. Organic Geochemistry, 1997, 26(5—6): 321—339.

[12] Boreham C J, Horsfield B and Schenk H J. Predicting the quantities of oil and gas generated from Australian Permian coals, Bowen basin using pyrolytic methods [J]. Marine and Petroleum Geology, 1999, 16: 165—188.

[13] 刘金钟, 唐永春. 用干酪根生烃动力学方法预测甲烷生成量 [J]. 科学通报, 1998, 43(11): 1187—1191.

[14] 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.

[15] 李贤庆, 肖贤明, 米敬奎等. 塔里木盆地库车坳陷中生界烃源岩生烃动力学参数研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(4): 35—39.

[16] 卢双舫. 有机质成烃动力学及其应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 1—56.

[17] 高喜龙, 肖贤明, 刘中云等. 用开放体系的热解方法对烃源岩生烃动力学的研究: 以东营凹陷某生油岩为例 [J]. 地球化学, 2003, 32(5): 486—490.

[18] 李贤庆, 肖贤明, Tang Y 等. 库车坳陷煤成甲烷碳同位素动力学研究 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 21—25.

[19] 梁狄刚, 张水昌, 金之钧等. 塔里木盆地油气源及成藏研究 [A]. “九五”国家重点科技攻关项目 (99—111—01—03) 成果报告 [R]. 北京: 中国石油勘探开发研究院, 2000: 132—166.