

文章编号: 1000-0550(2002)03-0493-06

辽河盆地埋藏史及烃源岩成熟度演化史的数值模拟^①

秦承志^{1,2} 王先彬¹ 林锡祥¹ 妥进才¹ 周世新¹

1(中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室 北京 100101)

2(中国科学院兰州地质研究所 兰州 730000)

摘要 对辽河盆地烃源岩的埋藏史、热演化史建立了准三维模型(X、Y和纵向的地质层段,加时间)并编制了相应程序。模型采用回剥法并考虑了不整合情况以恢复各凹陷的埋藏史,根据古地温资料计算相应的TTI史,依据TTI—R₀关系式得出烃源岩R₀的演化过程,进而恢复成熟度演化史。模拟结果表明:东部凹陷发育了牛居地区和高力房—荣兴屯两个沉积中心,西部凹陷发育了台安地区和盘山—大清水沟两个沉积中心,大民屯凹陷发育了静安堡以北地区和荣胜堡两个沉积中心;东部凹陷沙三段、西部凹陷沙四段及沙三段、大民屯凹陷沙四段及沙三段至今均已全段或大范围进入生油门限,是辽河盆地主要生烃段。

关键词 辽河盆地 埋藏史 TTI法 镜质体反射率

第一作者简介 秦承志 男 1977年出生 硕士 地球化学

中图分类号 TE121.1+5 **文献标识码** A

1 前言

自1978年Yükler等人建立了世界上第一个盆地模拟系统以来^[1],盆地数值模拟因其较其它技术可更有效地从时间—空间的角度来定量模拟含油气盆地的形成和演化,进而指导油田的油气勘探工作,所以得到了迅速的发展和广泛的应用。Durand和Ungerer先后建立、完善了二维盆地模拟系统并进行了应用^[2,3,4],国内冯石、石广仁等^[5,6]在总结国外盆地模拟模型的基础上,推出了BAS1系统。对埋藏史模型的研究工作相对开展较早,Welte等^[7]、Nakayama等^[8]、Beaumont等^[9]、Guidish等^[10]、Ungerer等^[3]各自提出了定量进行地史分析的数学模型。对盆地热演化史的数值模拟研究工作开展时间并不长,Nakayama^[11]、Peter K.^[12]、Cao S.与Lerche I.^[13]对恢复古热流和古地温史做了系统的研究。

本文建立了准三维模型(X、Y和纵向的地质层段,加时间)对辽河盆地各凹陷的埋藏史和热演化史进行了数值模拟,并对结果进行了讨论。

2 辽河盆地地质概况

辽河盆地是中、新生代以来形成的陆相沉积盆地,面积约为12 400 km²。

断裂运动将早第三纪的辽河盆地分割成三个凹陷(东部凹陷、西部凹陷、大民屯凹陷)和三个凸起(中央

凸起、西部凹陷西外侧的西部凸起和东部凹陷东外侧的东部凸起)^①(图1)。

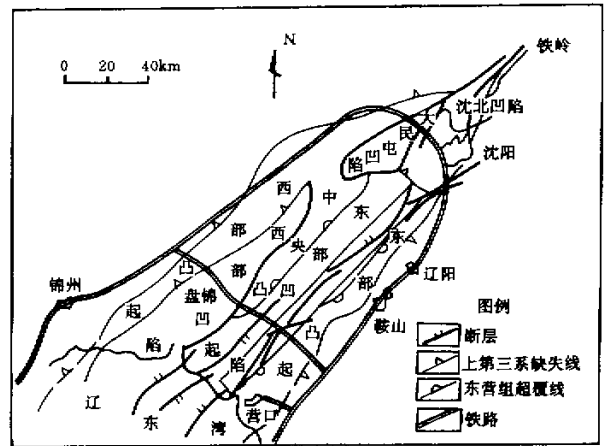


图1 辽河盆地地区构造图(据谭时勇等,1994)

Fig. 1 The geotectonic map of Liaohe Basin (after Tan Shiyong et al. 1994)

自晚侏罗世至晚第三纪,辽河裂谷经历了拱张、裂陷、拗陷三大阶段,相应产生了上侏罗统—白垩系、下第三系、上第三系—第四系三套面貌不同的构造层,分别形成了三种不同类型的沉积盆地。其中以早第三纪,即裂陷期的沉积层最为发育,是辽河盆地盖层中的主体部分。裂陷期的构造运动直接控制了盆地内早第三纪各阶段的沉积作用,其运动强度由弱—强—衰的

① 谭时勇,吴铁生.辽河油田资源评价.1994(内部报告)

规律变化造成了沉积上的多旋回性。与盆地构造演化相对应,下第三系沉积演化由老至新可划分为四个沉积旋回:岩浆喷溢旋回(早期旋回——房山泡组)、第一旋回(沙河街组四段至三段)、第二旋回(沙河街组二段至一段)、第三旋回(东营组)。

3 埋藏史模型

3.1 回剥法

本模拟系统采用的埋藏史模型是 Watts 和 Ryan^[14]首先提出的回剥法(Backstripping)。其思路是根据已知的盆地现状,把各个时代的沉积物逐一移出并进行压实、古水深和古今海平面变化等校正,从而恢复或再现盆地的沉积史和构造史。它与其他的地层压实校正的数学模型一样基于如下三个前提假定^[15,16]:①压实过程中沉积物横向上的形变可忽略不计,全部形变都表现在沉积地层厚度在纵向上的变化;②在压实过程中,地层厚度的减小是因孔隙度的减小而造成的,而沉积物基质颗粒的体积保持不变;③压实不可逆。回剥法的数学模型描述如下。

首先需求各沉积层的骨架厚度:

$$H_s = \int_{z_1}^{z_2} [1 - \phi(z)] dz \quad (1)$$

式中 H_s 为沉积层骨架厚度(m); z_1 、 z_2 分别为沉积层顶、底界埋深(m); $\phi(z)$ 是作为深度函数的孔隙度。

根据 Athy^[17]和 Hedberg(1936)给出的正常压实下孔隙度—深度方程,孔隙度与埋深呈指数关系:

$$\phi z = \phi_0 e^{-c \cdot z} \quad (2)$$

式中 ϕ 为埋深 z 时的孔隙度; ϕ_0 为地表初始孔隙度; c 为压实系数(m⁻¹),随岩性不同其取值不同; z 为地层埋深(m)。其中初始孔隙度和压实系数可根据井的实测孔隙度资料采用最小二乘法拟合得出。

将(2)式代入(1)式积分后得出:

$$H_s = z_2 - z_1 - \frac{\phi_0}{c} (e^{-c \cdot z_2} - e^{-c \cdot z_1}) \quad (3)$$

当存在剥蚀情况时, z_1 、 z_2 分别为沉积层顶、底界的最大埋深(m)。

(3)式经变换得:

$$z_2 = z_1 + H_s + \frac{\phi_0}{c} (e^{-c \cdot z_1} - e^{-c \cdot z_2}) \quad (4)$$

根据由(3)式所求得的骨架厚度,依(4)式进行迭代可得到各沉积层的原始厚度,进而按地层年代由老至新逐层叠加上(4)式采取迭代法可得到不同时期各层的埋藏深度,地层埋藏史即得以重建。

3.2 处理不整合情况的模型

在盆地的发展与演化历史中,一个很重要的事件

是地壳被抬升剥蚀所造成的不整合。对不整合的假设与处理直接影响到不整合面下各地层单元达到最大古埋深的时间与深度及其孔隙度和古厚度的演化途径。

本模拟系统采用 Guidish 模型^[10]处理不整合情况:

$$R_1 \cdot (AGE_e - AGE_1) = R_2 \cdot (AGE_2 - AGE_e) \quad (5)$$

$$H = R_1 \cdot (AGE_e - AGE_1) \quad (6)$$

式中 AGE_1 、 AGE_2 分别为紧接不整合面上、下的地质年代(Ma); AGE_e 为剥蚀作用开始年代(Ma); R_1 为 $(AGE_e - AGE_1)$ 期间的地层被侵蚀速度(m/Ma); R_2 为 $(AGE_2 - AGE_e)$ 期间的沉积物堆积速度(m/Ma); H 为剥蚀厚度(m)。

4 烃源岩成熟度演化史模型

本模型采用的方法是应用古地温资料计算 TTI 史来模拟成熟度随时间和深度的变化,再按照 R_o —TTI 关系式把 TTI 史换算成 R_o 史。

4.1 TTI 法

计算 TTI 采用 Waples^[18,19]提出的计算有机质成熟度的时间—温度指数法(简称 TTI 法):

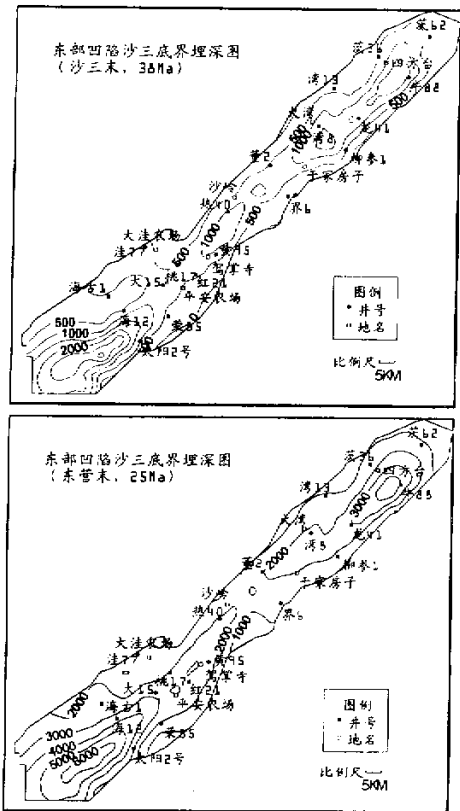


图 2 东部凹陷沙三段主要时期底界埋深图
Fig. 2 Depth contour of the base of Es³ of East Depression at main stages (m)

$$TTI = \int_0^t r^{T(z,t) - 105/10} dt \quad (7)$$

式中, r 为地温每升高 10℃ 时反应速度增加的倍数, 它接近一个常数, 取为 $2^{[19]}$; t 为温度 (℃); $T(z, t)$ 为古地温。

4.2 R_o —TTI 关系

R_o 与 TTI 之间存在着如下形式的线性关系式:

$$R_o = a + b \cdot \lg(TTI) \quad (8)$$

其中系数 a 、 b 可根据钻井剖面中若干个实测镜质体反射率 R_o 值与对应的 TTI 值用最小二乘法拟合求得。

5 辽河盆地埋藏史及烃源岩成熟度演化史分析

5.1 埋藏史模拟结果及分析

东部凹陷在沙三段沉积时期可分为北部牛居地区和南部高力房到荣兴屯地区两个沉积中心, 且在该时期沉积速度较快。在沙一及沙二段沉积时期, 在沙三段沉积时期形成的两个沉积中心仍继续发育, 北部沉积中心最大沉积厚度超过 1400m, 南部最大沉积厚

度约 1 200 m。在东营组沉积时期南部沉积中心较发育, 北部的沉积中心发育较差。自馆陶组后, 北部沉积中心基本消失, 主要沉积中心在南部荣兴屯及以南地区。现列出东部凹陷沙三段在沙三段沉积末期与东营组沉积末期的埋藏情况, 见图 2。

西部凹陷在沙四段沉积时期可分为北部台安地区和南部盘山到大清水沟两个沉积中心, 北部地区沉积速率明显快于南部沉积速率, 北部沉积中心最大沉积厚度超过 1 200 m, 而南部沉积中心最大沉积厚度为 900 m 左右。在沙三段沉积时期, 这两个沉积中心继续发育, 南部地区沉积速率远大于北部地区沉积速率, 南部地区大清水沟附近沉积中心最大沉积厚度约 2 800 m, 而北部地区最大沉积厚度仅 1 600 m。在沙一与沙二段沉积时期, 依然继续发育南、北两个沉积中心, 但南部沉积中心向南移至于大清水沟以南地区。从东营组沉积开始, 北部沉积中心基本消失, 主要沉积中心在大清水沟以南的地区。图 3 列出了西部凹陷沙四段在沙四段沉积末期与东营组沉积末期的埋藏情况。

大民屯凹陷在沙四段沉积时期形成静安堡北部和荣胜堡两个沉积中心, 以荣胜堡沉积中心较发育, 最大沉积厚度达 2200m, 沙三段沉积时期仅有南部荣胜

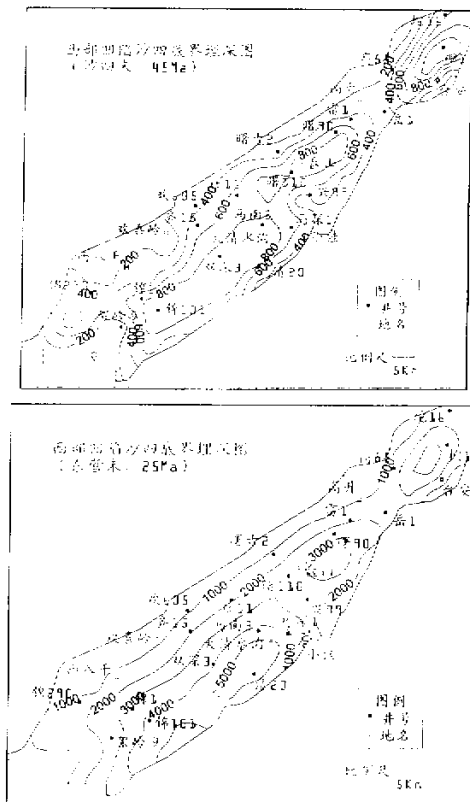


图 3 西部凹陷沙四段主要时期底界埋深图

Fig.3 Depth contour of the base of Es^4 of West Depression at main stae(m)

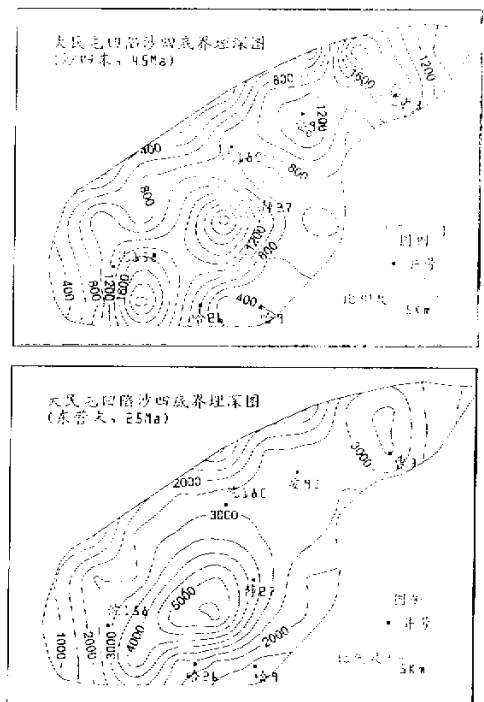


图 4 大民凹陷沙四段主要时期底界埋深图

Fig.4 Depth contour of the base of Es^4 of Deamintun Depression at main stages(m)

堡一个沉积中心,最大沉积厚度约4 000 m。从沙一及沙二段开始沉积以后,北部沉积中心再次出现,不过仍以南部沉积中心较为发育。图4列出了大民屯凹陷沙四段在沙四段沉积末期与东营组沉积末期的埋藏情况。

5.2 烃源岩成熟度演化史模拟结果及分析

镜体反射率 R_o 作为有机质成熟度的演化指标,一般以 $R_o=0.5\%$ 为有机质成熟门限(生油门限), $R_o=0.5\% \sim 0.8\%$ 为低成熟阶段, $R_o=0.8\% \sim 1.3\%$ 为成熟阶段, $R_o>1.3\%$ 为高熟阶段。

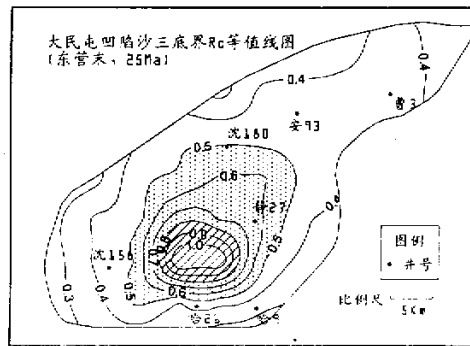
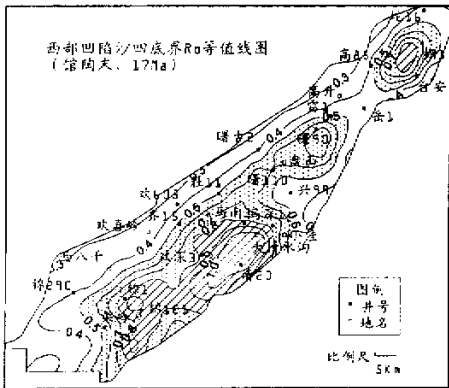
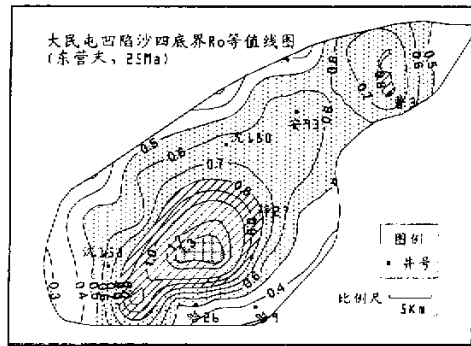
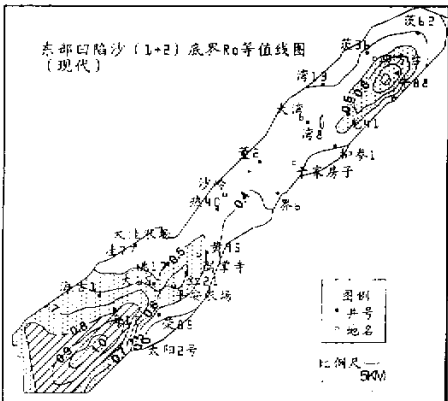
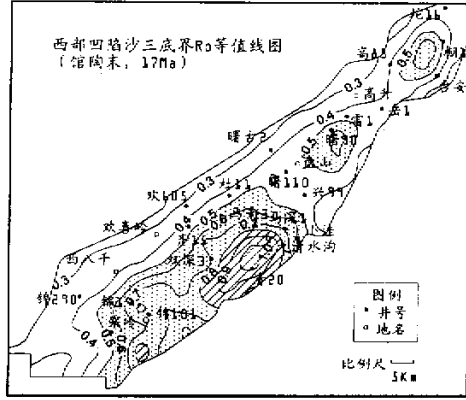
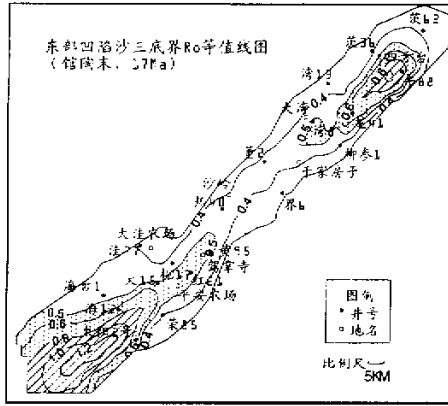


图5 辽河盆地主要层段底界在主要时期的 R_o 等值线图

Fig. 5 Contour diagram of R_o for the base of main source layers of Liaohe Basin at main stages

经拟合得辽河盆地 $TTI-R_0$ 关系式为：

$$R_0 = 0.411 + 0.111 \cdot \lg(TTI) \quad (TTI < 10) \quad (9)$$

$$R_0 = 0.324 + 0.239 \cdot \lg(TTI) \quad (TTI \geq 10)$$

由模拟结果看出,东部凹陷沙三段直到沙₁₋₂末期才在南、北部的沉积中心已进入了低成熟阶段,这时可生成一定量的未熟气。到东营末期,南部荣兴屯和北部牛居地区已进入成熟阶段,从馆陶末期开始,沙三段北部从青龙台到牛居,南部从高力房至荣兴屯地区烃源岩都进入了成熟阶段,该段约 1/4 的地区进入生油门限,开始大量生烃,现今沙三段已基本进入生油门限。而沙一及沙二段在东营末期才在沉积中心开始进入生油门限,至今南、北两个沉积中心地区(约占该段的 1/4)处于低成熟阶段。东营组至今才在沉积中心处进入低熟阶段。

对西部凹陷,沙四段到沙三末期,在北部台安地区的沉积中心、中部盘山地区和南部大清水沟地区的沉积中心开始进入低成熟阶段,并在东营末开始进入成熟阶段,而在东营末,沙四段超过 2/3 的地区都进入了低成熟阶段,开始大范围生烃,从馆陶末期至今,沙四段正处于生烃高峰期。沙三段至沙₁₋₂末期才在大清水沟地区的沉积中心处开始进入低成熟阶段,到东营末在北部台安地区和南部地区(约占全段 1/3)进入低成熟阶段,至馆陶末在大清水沟沉积区沙三段进入成熟阶段,至今仍处于生烃高峰期,其余地区至今大多处于低成熟阶段。沙₁₋₂段直至馆陶末期才在大清水沟以南地区进入低成熟阶段,现今该地区处于成熟阶段,大量生烃,约占全段 1/4 的地区进入了生油门限。东营组至今才在大清水沟以南地区(约占该段的 1/5)刚开始进入低成熟阶段。

在大民屯凹陷,沙四段至沙三末在北部静安堡以北沉积中心地区及南部以荣胜堡地区为中心的较大范围(约占全段 1/4)进入低成熟阶段,南部沉积中心进入成熟阶段大量生烃,自东营末期后,南部沉积中心位置开始进入高成熟阶段,此时全段已开始生烃,现今沙四段约一半地区进入了成熟阶段,处于生烃高峰期。沙三段在沙三末期开始在凹陷南部的荣胜堡地区进入低成熟阶段,沙₁₋₂末期至东营末期,南部沉积中心进入成熟阶段,至今全段已基本进入了低成熟阶段,南部沉积中心地区(约占全段的 1/7)处于成熟阶段的生烃高峰期。沙一、沙二段及东营组至今 R_0 值都在 0.4% 以下,未达生油门限。

图 5 显示了东部凹陷沙三段与沙一及沙二段、西部凹陷沙四段与沙三段、大民屯凹陷沙四段与沙三段烃源岩开始较大范围进入成熟阶段的情况。

6 结论

由上述分析可见:1)东部凹陷有北部牛居地区和南部高力房—荣兴屯两个沉积中心,以南部沉积中心较发育,西部凹陷存在北部台安地区和南部盘山—大清水沟两个沉积中心,以南部沉积中心为主,且其中心位置有逐渐南移的趋势;大民屯凹陷有北部静安堡以北和南部荣胜堡两个沉积中心,以南部沉积中心为主;2)东部凹陷沙三段至今全段进入生油门限,是主要生烃段,西部凹陷沙四段的大部分地区与沙三段的较大范围自东营末起已超过生油门限,是主要生烃层段,大民屯凹陷沙四段在东营末期已开始全段生烃,沉积中心进入高熟阶段,沙三段至今已全段进入生油门限,这两段为大民屯凹陷的主要生烃段。

参考文献 (References)

- 1 Yüklér, Cornford A C, Welte D H. One-dimension model to simulate geologic, hydrodynamic and thermodynamic Development of a sedimentary basin [J]. Geol. Rundschau, 1978, 67: 960~979
- 2 Durand B, Ungerer P 编. 张万选等译. 第 11 届世界石油会议报告文集(第一分册) [C]. 北京:石油工业出版社, 1984. 85~97
- 3 Ungerer P, et al. Basin evaluation by integrated two-dimension modeling of heat transfer, fluid flow, hydrocarbon generation, and migration [J]. AAPG Bull., 1990, 74: 309~335
- 4 Ungerer P. State of the art of research in kinetic modeling of oil formation and expulsion [J]. Org. Geochem., 1990, 16: 1~25
- 5 冯石, 石广仁. 一维盆地模拟系统 Bas1 在临清凹陷东部的应用 [J]. 石油大学学报(自然科学版), 1989, 13(3): 1~10 [Feng S, Shi G R. The application of one-dimension basin modeling system, Bas1, in East Depression in Linqing [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1989, 13(3): 1~10 (in Chinese)]
- 6 石广仁. 油气盆地数值模拟方法 [M]. 北京:石油工业出版社, 1994 [Shi G R. Numerical Modeling Method [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994]
- 7 Welte D H, Yüklér. Petroleum origin and accumulation in basin evolution-A quantitative model [J]. AAPG Bull., 1981, 65: 1: 387~1: 396
- 8 Nakayama K, Van Siclun D C. Simulation Model for Petroleum Exploration [J]. AAPG Bull., 1981, 65: 1: 230~1: 255
- 9 Beaumont C, Boutilier R, Mackenzie A S. Isomerization and aromatization of hydrocarbons and the paleothermometry and burial history of the Alberta Foreland Basin [J]. AAPG Bull., 1985, 69: 546~566
- 10 Guidish T M, et al. Basin evaluation using burial history calculation: An Overview [J]. AAPG Bull., 1985, 69: 92~105
- 11 Nakayama K. Hydrocarbon-expulsion model and its application to Niigata Area, Japan [J]. AAPG Bull., 1987, 71: 810~821
- 12 Peter K, et al. 郑朝阳译. 模拟埋藏史、温度和成熟作用 [M]. 1985. 石油地质与实验, 1990, (3): 107~118 [Peterk et al. Model-

- ing of buried history and temperature maturation [M]. 1985]
- 13 Cao S, Lerche I. Geohistory, thermal history and hydrocarbon generation history of Navarin Basin Cost No. 1 well, Bering Sea, Alaska [J]. Journal of Petroleum Geology, 1989, 1(3): 325~352
- 14 Watts A B, Ryan W B F. Flexure of the lithosphere and continental margin basins [J]. Tectonophysics, 1976, 36(1): 25~44
- 15 罗晓容. 沉积盆地数值模型的概念设计及检验 [J]. 石油与天然气地质, 1998, 1(3): 196~204 [Luo X R. Conceptual design and test of numerical modeling of sediment basin [J]. Oil Gas Geology, 1998, 1(3): 196~204]
- 16 叶加仁, 陆明德. 盆地地史模拟述评 [J]. 地质科技情报, 1995, 14(2): 45~50 [Ye J R, Lu M D. Review on simulation of basin history [J]. Geological Science and Technology Information, 1995, 14(2): 45~50]
- 17 Athy L F. Density, Porosity, and compaction of sedimentary rocks [J]. AAPG Bull., 1930, 14: 1~21
- 18 Cercone K R. Thermal history of Michigan Basin [J]. AAPG Bull., 1984, 68: 130~136
- 19 Waples D W. Time and temperature in petroleum formation: Application of Lopatin's method to petroleum exploration [J]. AAPG Bull., 1980, 64(6): 916~926

Basin Modeling of Buried History and Maturity History of Source Rock in Liaohe Basin

QIN Cheng-zhi^{1, 2} WANG Xian-bin² LIN Xi-xiang²
TUO Jin-cai² ZHOU Shi-xin²

1 (State Key Laboratory of Resources and Environmental Information

System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101)

2 (Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract The model system, which is an incomplete three-dimensional model (X, Y, vertical geological layers and time) about the buried history and the maturity history of source rock in Liaohe Basin, is built and programmed. The model simulates the buried history of every depression by the Backstripping method while the unconformity is considered. The R_o evolution progress of source rock is simulated by TTI- R_o relationship after the TTI history is calculated with the paleo-temperature gradients. So, the maturity history is reconstructed. According to the result of model system, there are two deposit centers of East Depression, which are Niuju and Gao-lifang-Yongxingtun area, two deposit centers of West Depression, which are Taian and Panshan-Daqingshuigou area, also two deposit centers of Damintun Depression, which are Rongshengbao and the North area of Jinganbao. And Es^3 of East Depression, Es^4 and Es^3 of West Depression, Es^4 and Es^3 of Damintun Depression, which have been in oil window, are main source layers of Liaohe Basin.

Key words Liaohe Basin, the buried history, TTI method, R_o .