

文章编号: 1001- 6112(2004) 03- 0298- 05

成藏史数值模拟

——以渤海湾盆地文安斜坡古生界为例

侯创业¹, 孟元林², 李 臣³, 冯文彦⁴, 邵学军⁴, 杨 辉⁴, 秦建忠⁴, 聂昌谋¹

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 大庆石油学院 秦皇岛分院, 河北 秦皇岛 066004;
3. 新疆油田公司 研究院, 新疆 克拉玛依 834000; 4. 华北油田公司, 河北 任丘 062552)

摘要: 通过成藏温度、压力及生、储、盖、运、圈、保的数值模拟, 建立了成藏史数值模拟系统, 并以渤海湾盆地文安斜坡为例说明了这一系统的应用。研究表明, 渤海湾盆地文安斜坡古生界煤成烃油气藏的形成有两期: 第一期发生在中生代末, 但成藏后被其后的燕山运动破坏; 第二期在老第三纪, 是油气藏形成的主要时期。本区的油气藏形成主要取决于生、排烃史与圈闭形成期的匹配和油气藏形成之后的保存条件, 所以冀中坳陷古生界原生气藏勘探应集中于那些喜山期形成、且位于二次生烃区内及其周围的圈闭。

关键词: 成藏史; 盆地模拟; 成岩史; 油气藏; 煤成烃; 古生界; 冀中坳陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122. 3

文献标识码: A

成盆、成烃、成藏是石油地质中 3 项最重要的研究内容。针对前两者的定量分析有盆地模拟和生烃动力学模拟, 这两项技术极大地推动了石油地质理论的发展和油气田的勘探。近年来, 国内兴起的成岩作用数值模拟^[1-7], 使储、盖层发育史的研究成为可能。本文试图在上述 3 种数值模拟技术的基础上, 进一步建立成藏史数值模拟系统, 并以渤海湾盆地文安斜坡上古生界为例, 说明这一系统的应用。

1 区域地质概况

文安斜坡位于渤海湾盆地冀中坳陷的东北部, 东邻沧县隆起, 西接霸县凹陷。在太古界及下元古界变质岩基底之上, 从下到上发育中上元古界(Pt₂₋₃), 下古生界寒武系(-C)、奥陶系(O), 上古生界石炭—二叠系(C—P), 中生界(Mz), 下第三系孔店组(Ek)、沙河街组(Es)、东营组(Ed), 上第三系(N)和第四系(Q)。上古生界是一套海陆交互相—陆相含煤碎屑岩沉积, 是本区烃源岩发育的主要层段^[8]。中、新生界是一套红色陆相砂泥岩沉积, 不具生烃能力, 但可成为石炭—二叠系的盖层。1982年华北油田公司在文安斜坡古生界发现了苏桥油气田, 该油田由 8 个油气藏组成, 除苏 20、文 23 和文 23- 2 块油气藏属于石炭—二叠系自生自储的砂

岩油气藏外, 其余均为石炭—二叠纪煤系烃源岩生、奥陶纪碳酸盐岩储的上生下储型油气藏^[8]。目前苏桥油气田累计探明天然气储量 $173.32 \times 10^8 \text{ m}^3$, 凝析油 $484.9 \times 10^4 \text{ t}$, 已成为华北油田主要的油气生产基地。

2 成藏史模拟基本原理简介

成藏史数值模拟是在盆地模拟、成岩作用数值模拟和成烃动力学模拟基础上发展起来的一项新技术, 但它研究得更精细, 更能揭示石油地质学的本质、指导油气田勘探。然而迄今为止, 国内还没有统一的技术规范。本文通过成藏环境温度、压力和成藏诸要素生、储、盖、运、圈、保的数值模拟^[9-21](表 1), 研究油气藏形成的动力学过程和油气聚集规律, 确定成藏主控因素, 为油气田勘探指明有利的区域。

埋藏史、地热史、生烃史、排烃史、有机质热演化史和成岩史在有关文献已有许多介绍^[1-21], 恕不赘述。储层和盖层的发育史主要受成岩作用的影响与控制。研究表明, 在不同的成岩阶段, 储层发育不同的孔隙类型^[22, 23]。在早成岩阶段, 碎屑岩储层的储集空间以原生孔隙为主, 随埋深增加孔隙度减小; 在晚成岩阶段 A 期, 烃源岩进入生烃门限, 干酪根降解生烃的同时排放 CO₂ 和有机酸, 形成有机酸性热

收稿日期: 2003- 10- 16; 修订日期: 2004- 04- 11.

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目(2001BA605A08); 国家自然科学基金项目(40372102).

作者简介: 侯创业(1963—), 男(汉族), 山西河津人, 高级工程师, 主要从事储层研究和油田开发工作.

表1 成藏史数值模拟所使用的模型及其主要特征
Table 1 Models used in the numerical simulation of pool forming history and their main characteristics

模型名称	作者(时间)	模型类型	主要模拟功能与所计算参数
埋藏史与构造发育史	孟元林等(1994, 1997)	正演	地层古埋深 Z 、古压力 P
地热史	孟元林和吕延芳(1989), 肖丽华等(1995)	热传导	古地温 T
生烃史	秦勇(2001)	生烃图版	一次生烃和二次生烃量
排烃史	秦建忠(2000)	排烃图版	排烃量
镜质组热演化	Carr(2000)	化学动力学	(超压条件下)镜质组反射率 R_o
甾烷异构化	Mackenzie and Mckenzie(1983)	化学动力学	C_{29} 甾烷 $S/(R+S)$ (SI)
粘土矿物转化	孟元林等(1996), Huang(1993)	化学动力学	伊/蒙混层中蒙皂石层含量 S
自生石英形成	杨俊生等(2003), Walderhaug(1996, 2000)	化学动力学	自生石英含量 V_q
机械压实	李泰明(1986)	正演	固体比 G
成岩史	孟元林等(2001, 2002, 2003)	过程综合	成岩指数 I_D

流体,与储层中的易溶组分如长石、碳酸盐发生水-岩反应,形成次生孔隙,孔隙度开始增加;在晚成岩阶段B期,次生孔隙减少,并出现裂缝;在晚成岩阶段C期,裂缝发育。所以通过成岩史的模拟,即可预测地史时期碎屑岩储层的孔隙类型和次生孔隙发育史。文安斜坡石炭一二叠纪储层不同成岩阶段对应的成岩参数与储层的孔隙类型见表2。

盖层研究表明,随埋深和地温的增加,成岩强度增强,盖层的封闭能力也随之发生变化^[24]。一方面,随成岩强度的增加,压实作用增强,泥岩孔隙度减少,孔喉变细,排替压力增大;另一方面,随成岩强度的增加,粘土矿物中可塑性和膨胀性较强的蒙皂石转化为可塑性和膨胀性较差的伊利石和绿泥石,脆性增大,盖层封盖能力变小。综合考虑上述两个因素,参考国内有关盖层的分级标准,将盖层的封闭能力分为4个级别:好($I_D=0.32\sim 0.5$)、中一好($I_D=0.2\sim 0.32$ 或 $I_D=0.5\sim 0.68$)、差一中($I_D<0.2$)和差($I_D>0.68$)。

3 成藏史分析

文安斜坡发育上古生界石炭一二叠自生自储和上古生界生、下古生界储上生下储两种类型的油气藏,本文主要模拟上古生界自生自储型油气藏的成藏史。选取横切文安斜坡、穿过冀参6井一苏2井一苏33井一苏3井一苏14井的NW向剖面,应用建立的成藏史模拟系统,计算了地史时期的 Z , T , P , R_o , SI , S , V_q , G , I_D ,恢复了其埋藏史、构造发育史、地热史、生烃史、排烃史、成岩史和生储盖发育史(图1, 2, 3, 4)。

在晚古生代,文安斜坡发育一套陆相-海陆交互的煤系碎屑岩,石炭一二叠系自身沉积之后,底

界埋深在1500m左右(图1),石炭一二叠系古地温 $< 80^\circ\text{C}$, $R_o< 0.5\%$ (图1),烃源岩尚未进入生烃门限和排烃门限,没有油气生成和运移。上部地层成岩指数 $I_D< 0.19$,处于早成岩阶段A期(图2);下部地层 $I_D> 0.19$,储层处于早成岩阶段B期。储层主要发育原生孔隙,盖层已具封闭能力,但由于没有油气生成与运移,所以不可能形成油气藏。

在中生代末,石炭一二叠纪地层在深凹处可达 $90\sim 112^\circ\text{C}$, R_o 在 $0.5\%\sim 0.64\%$ 之间, $I_D> 0.28$,进入晚成岩阶段A₁期,烃源岩进入生油门限,开始一次生烃,生烃率在 5×10^{-3} 左右(图3),排烃率在 3×10^{-3} 左右(图4)。在干酪根降解生烃的同时,排放有机酸和 CO_2 ,溶于水,形成酸性有机热流体,溶蚀储层中的铝硅酸盐矿物长石和碳酸盐岩胶结物等,形成次生孔隙,储层孔隙度增加。泥岩盖层中蒙皂石的含量较高,处于有序混层带, I/S混层中蒙皂石层的含量在 $45\%\sim 60\%$ 之间,盖层的可塑性较强,封闭性能中一好,一次成藏开始。苏1块凝析油气藏苏1-14井奥陶系含油灰岩中自生伊利石K-Ar同位素测年结果支持了这一结论,其粒级为 $0.15\mu\text{m}$ 的伊利石同位素年龄为 $108.27\text{Ma}\pm 1.57\text{Ma}$,证明

表2 文安斜坡石炭一二叠系不同成岩阶段的生、储、盖特征

Table 2 Characteristics of source rocks, reservoirs and cap rocks in the different diagenetic stages of the Carboniferous-Permian in the Wen'an Slope

成岩指数 I_D	成岩阶段		有机质热演化	孔隙演化	盖层封闭性能
	阶段	期			
< 0.19	早成岩	A	未成熟	原生孔	差一中
$0.19\sim 0.28$		B	半成熟	原生孔、混合孔	中一好
$0.28\sim 0.38$		A ₁	低成熟	次生孔	好
$0.38\sim 0.67$	A ₂	成熟			
$0.67\sim 1.00$	晚成岩	B	高成熟	次生孔、裂缝	中一好
> 1.00		C	过成熟	裂缝	差

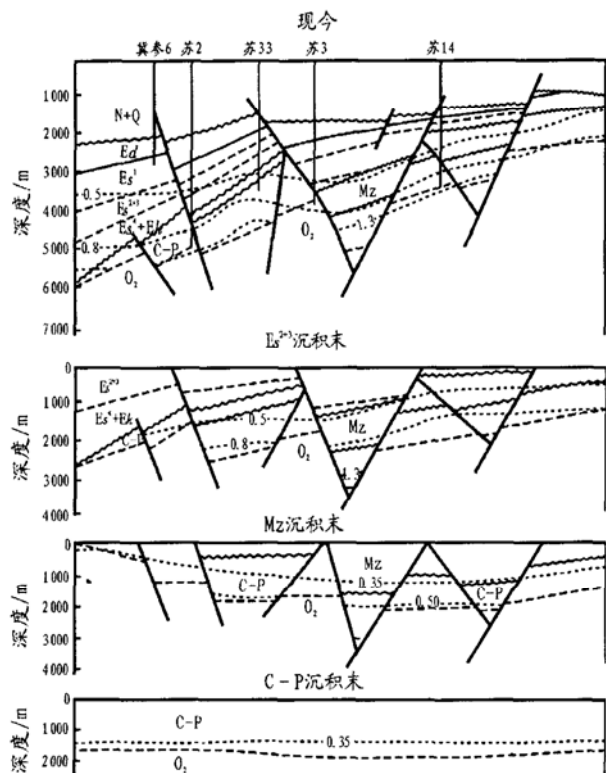


图 1 文安斜坡构造发育史和有机质热演化史图

Fig. 1 Map of structural development history and organic matter thermal evolutionary history for the Wen'an Slope

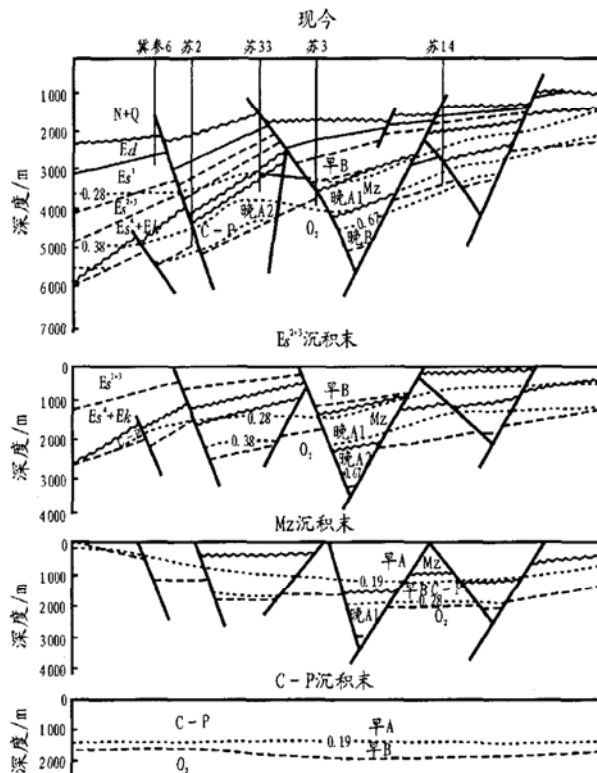


图 2 文安斜坡成岩史图

Fig. 2 Map of diagenetic history for the Wen'an Slope

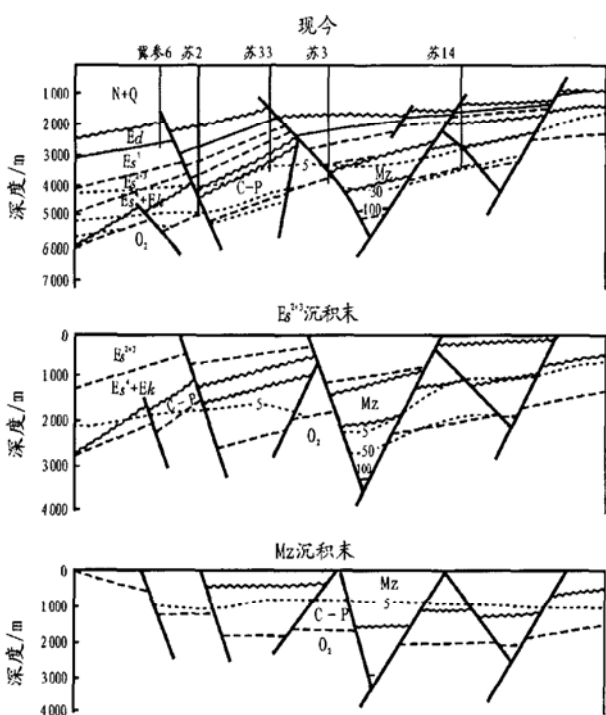


图 3 文安斜坡生烃史图

Fig. 3 Map of hydrocarbon-generating history for the Wen'an Slope

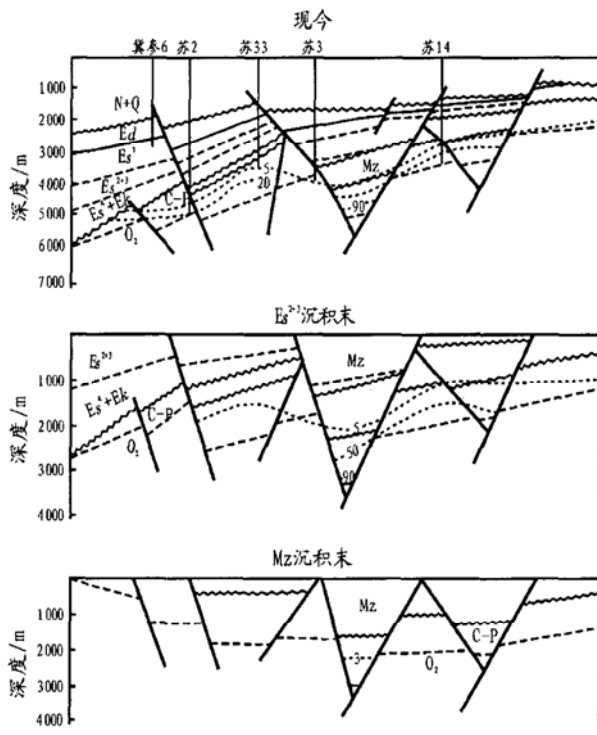


图 4 文安斜坡排烃史图

Fig. 4 Map of hydrocarbon-expelling history for the Wen'an Slope

油气藏充注的最早时间在中生代末。石炭—二叠系中与有机包裹体伴生的盐水包裹体的最低均一温度为 90°C 左右(相当于石炭—二叠系在中生代末的古地温), 也证明在中生代末有油气藏的形成过程。中生代末的燕山运动使本区古生界和中生界地层倾

斜为东倾单斜, 并形成一系列断块(图 1), 一次生烃形成的油气藏被破坏, 在镜下薄片观察和拉曼光谱中发现储层中残留有沥青碎屑。

在早第三纪, 本区进入裂谷发育期, 东部沧县隆起开始上升, 西侧霸县凹陷大幅度下降, 致使原来的

250		200		150		100		50		距今时间/Ma		
C+P		Mz						Es'+Ek'	Es''	Es'	Ed, N+Q	地层时代
一次生烃				二次生烃				生烃史				
早成岩阶段原生孔隙				晚成岩阶段次生孔隙				储层发育史				
差中	中—好			好				盖层发育史				
一次排烃				二次排烃				排烃史				
断块形成				圈闭发育期				构造发育史				
一次成藏?				二次成藏				成藏期				
各成藏要素具备 →										保存时期		

图 5 文安斜坡成藏事件与主控因素分析

Fig. 5 Analyses on the pool-forming events and major controlling factors of the Wen'an Slope

东倾单斜变为西倾单斜, 构造圈闭具锥型, 地温和有机质成熟度 R_0 迅速增加。在 E_s^{2+3} 期末, 古地温再次超过一次生烃的温度, 开始二次生烃, 大部分地区 R_0 为 0.5% ~ 0.8%, 深凹区可达 1.3% 以上, 进入湿气—凝析油气生成阶段, 大部分地区生烃率为 $5 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3}$ 。深凹处可达 100×10^{-3} 以上。文安斜坡大部分地区处于晚成岩阶段 A 期, 储层次生孔隙发育, 盖层封闭性能好, 烃源岩进入排烃门限, 开始大量排烃, 排烃率一般为 $5 \times 10^{-3} \sim 20 \times 10^{-3}$, 深凹处最大可达 90×10^{-3} , 实现了真正意义上的成藏。

在晚第三纪, 本区进入拗陷期, 基底稳定下沉, 构造圈闭的幅度进一步增大, 石炭—二叠系地温和有机质成熟度迅速增高。 R_0 在深凹区可达 0.8% ~ 1.5%, 油气大量生成, 生烃率最高可达 100×10^{-3} 以上, 排烃率可达 90×10^{-3} 以上; 斜坡东部 R_0 主要分布在 0.5% ~ 0.8%, 生烃率在 $5 \times 10^{-3} \sim 30 \times 10^{-3}$ 之间, 排烃率在 $5 \times 10^{-3} \sim 20 \times 10^{-3}$ 。文安斜坡大部分地区处于晚成岩阶段 A 期, 储层次生孔隙发育, 盖层封闭性能好; 但在深凹区, 石炭—二叠系处于晚成岩阶段 B 期, 储层次生孔隙不发育, 盖层封闭能力下降。总体来看, 在早第三纪末—晚第三纪, 石炭—二叠系生、储、盖、排俱佳, 进入主成藏期。

4 成藏主控因素分析

成藏史数值模拟的意义不仅在于其本身的价值, 更重要的是它可以指导研究区成藏主控因素的分析 and 有利区域的预测。由文安斜坡的成藏动力学过程分析可见(图 5), 本区的成藏主要取决于生、排烃史与圈闭形成期的匹配和油气藏形成之后的保存条件, 其次才是储层和盖层。尽管石炭—二叠纪烃

源岩在中生代末已开始生、排烃, 并发生过一次充注, 但被后期的构造运动破坏了。值得庆幸的是, 石炭—二叠纪烃源岩在中生代末并未进入大量生排烃阶段。早第三纪期间, 构造圈闭形成之后, 本区石炭—二叠纪烃源岩开始了二次生烃, 圈闭形成与大量生、排烃的匹配良好, 开始了二次成藏。在晚第三纪进入主成藏期之后, 未发生大的构造运动, 油气藏一直保存至今。

由以上讨论可知, 冀中拗陷有利地区的预测关键问题就是寻找生、排烃史与圈闭形成期匹配良好、且成藏之后没有遭到破坏的圈闭。据此, 位于喜山期二次生烃区内或周围、且在喜山期形成的构造带和圈闭是最有利的勘探目标。

5 结论

1) 成藏史数值模拟是继盆地模拟、油气生成动力学过程模拟和成岩作用模拟之后又一种石油地质定量研究技术, 可用于成藏过程的动力学过程模拟和成藏主控因素的确定。

2) 文安斜坡有两次成藏过程: 第一次在中生代末, 但遭到后来燕山运动的破坏; 第二次在喜山期, 是本区的主要成藏时期。

3) 本区的成藏主要取决于生、排烃史与圈闭形成期的匹配和油气藏形成之后的保存条件, 其次才是储层和盖层。

4) 冀中拗陷古生界原生油气藏的勘探应集中于那些喜山期形成、且位于二次生烃区内及其周围的圈闭。

致谢: 在项目研究中, 受到李思田教授和赵长毅博士的指导与帮助, 谨表谢忱!

参考文献:

- 1 肖丽华, 孟元林, 王建国等. 碎屑岩成岩温度的数值模拟和成岩阶段的预测[J]. 中国海上油气(地质), 1995, 9(6): 389~ 394
- 2 孟元林, 肖丽华, 杨俊生等. 成岩演化数值模拟[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 430~ 435
- 3 Meng Yuanlin, Yang Junsheng, Xiao Lihua, et al. Diagenetic evolution modeling system and its application [A]. In: Hao Dongheng, ed. Treatises of (D)Kerulien International Conference of Geology[C]. Shijiazhuang, P R China: Shijiazhuang University of Economics, 2001. 25~ 27
- 4 孟元林. 成岩演化数值模拟[A]. 见: 许怀先, 陈丽华, 万玉金等编. 石油地质实验测试技术与应用[C]. 北京: 石油工业出版社, 2001. 184~ 192
- 5 孟元林, 王志国, 杨俊生等. 成岩作用过程综合模拟及其应用[J]. 石油实验地质, 2003, 25(2): 211~ 215
- 6 孟元林, 肖丽华, 杨俊生等. 渤海湾盆地老爷庙地区深层成岩作用的化学动力学分析[J]. 地球科学, 2002, 27(增刊): 275~ 279
- 7 孟元林, 肖丽华, 李杰等. 松辽盆地升平地区深层成岩作用数值模拟与次生孔隙带预测[J]. 地质论评, (待刊)
- 8 秦建忠, 贾蓉芬, 郭爱明. 华北地区煤系烃源层油气生成、运移、评价[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 285~ 289
- 9 孟元林, 肖丽华, 李泰明等. 盆地模拟在油气田勘探初期阶段的应用[J]. 天然气工业, 1994, 14(4): 6~ 9
- 10 Meng Yuanlin, Xiao Lihua, Cao Cheng Run, et al. Early basin modeling system EBMS and its application[A]. In: Jang B A, Cheong D, eds. Crustal Evolution in Northeast Asia: 4th Korea-China Joint Geology Symposium[C]. Chuncheon, Korea: Kingman Publishing Company, 1997. 125~ 132
- 11 Meng Yuanlin, Xiao Lihua, Zhang Jing. Basin modeling by gravity, magnetism and electrical information and its application[A]. In: Liu B J, Li S T, eds. Basin Analysis, Global Sedimentary Geology and Sedimentology[C]. The Netherlands: VSP, 1997. 197~ 207
- 12 孟元林, 吕延防. 地温史和有机质成岩史的一维模拟[J]. 大庆石油学院学报, 1989, 13(2): 1~ 6
- 13 秦勇. 沉积有机质二次生烃理论及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 2001. 50~ 54
- 14 Carr A D. A vitrinite reflectance kinetic model incorporating overpressure retardation [J]. Marine and Petroleum Geology, 1999, 16: 355~ 377
- 15 Mackenzie A S, Mckenzie D. Isomerization and aromatization of hydrocarbon in sedimentary basin formed by extension[J]. Geo Mag, 1983, 120: 417~ 470
- 16 孟元林, 肖丽华, 王建国等. 粘土矿物转化的化学动力学模型及其应用[J]. 沉积学报, 1996, 14(2): 110~ 116
- 17 Huang W L, Longo J M, Pever D R. An experimentally derived kinetic model for smectite to illite conversion and its use as a geothermometer[J]. Clays and Minerals, 1993, 41(2): 162~ 177
- 18 杨俊生, 孟元林, 张宏等. 石英胶结作用化学动力学模型及应用[J]. 石油实验地质, 2002, 24(4): 372~ 376
- 19 Walderhaug O. Kinetic modeling of quartz cementation and porosity loss in deeply buried sandstone reservoirs[J]. AAPG Bull, 1996, 74: 731~ 745
- 20 Walderhaug O. Modeling quartz cementation and porosity in Middle Jurassic Brent Group sandstones of the Kvitebjørn Field Northern North Sea[J]. AAPG Bull, 2000, 84: 1 325~ 1 339
- 21 李泰明. 石油地质过程定量研究概论[M]. 东营: 石油大学出版社, 1989. 4~ 10
- 22 裘祚楠, 薛叔浩, 应凤祥. 中国陆相油气储集层[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 147~ 217
- 23 薛书浩, 刘文林, 薛良清等. 湖盆沉积地质与油气勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002. 121~ 132
- 24 庞雄奇, 付广, 万龙贵等. 盖层封油气性综合定量评价——盆地模拟在盖层评价中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 1993. 14~ 16

NUMERICAL SIMULATION OF POOL-FORMING HISTORY

—A CASE STUDY OF THE PALEOZOIC IN THE WEN'AN SLOPE OF THE BOHAIWAN BASIN

HOU Chuang-ye¹, MENG Yuan-lin², LI Chen³, FENG Wen-yan⁴,
SHAO Xue-jun⁴, YANG Hui⁴, QIN Jiar-zhong⁴, NIE Chang-mou¹

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Qinhuangdao Branch, Daqing Petroleum College, Qinhuangdao, Hebei 066004, China; 3. Xinjiang Oilfield Company, Kalamay, Xinjiang 834000, China; 4. Huabei Oilfield Company, Renqiu, Hebei 062552, China)

Abstract: A numerical simulation system of pool-forming history was established by modelling the development history of source rocks, reservoirs, cap rocks and traps as well as primary migration, preservation conditions, paleotemperature and pressure. As an example, it was used in the Paleozoic of the Wen' an Slope, the Bohaiwan Basin. The results showed that the Paleozoic coal-related hydrocarbon pools in the

(to be continued on page 307)