

渤海湾盆地孔西潜山构造带碳酸盐岩的成藏史数值模拟

孟元林¹, 王粤川¹, 罗宪婴², 高建军¹
肖丽华¹, 周新桂³, 殷秀兰⁴, 王志国¹

(1. 大庆石油学院, 黑龙江 大庆 163318;

2. 中国石油勘探开发研究院杭州地质研究所, 浙江 杭州 310023;

3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 4. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要:通过碳酸盐岩成藏要素生、储、盖、运、圈、保的数值模拟,建立了成藏史数值模拟系统,并以渤海湾盆地黄骅拗陷孔西潜山构造带为例说明了这一系统的应用。研究表明,孔西潜山构造带奥陶系烃源岩在印支期开始排烃,一次成藏开始;燕山期进入大量生、排烃阶段,成为本区的主要生烃期和成藏期;之后,一次生烃中止;喜马拉雅期该构造带进一步被埋深,开始二次生烃和第三次成藏,二次生烃的量较小。所以黄骅拗陷下古生界原生气藏的勘探应注重那些位于生烃区在印支期和燕山期形成且未被后期构造运动破坏的古构造。

关键词:成藏史;盆地模拟;碳酸盐岩;油气藏;奥陶系;黄骅拗陷;渤海湾盆地
中图分类号: P618.130.2 P588.24⁺5 文献标识码: A

我国华北地区下古生界碳酸盐岩时代较老,经历了海西运动、印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动多期构造运动的改造,发生过二次生烃。特别是印支期的逆冲断层使碳酸盐岩地层发生了重复,这就给埋藏史的恢复带来了困难。目前我国的盆地模拟软件只能处理正断层引起的地层缺失^[1],而不能处理逆断层引起的地层重复。而且碳酸盐岩油气运移和盖层封闭的机理也不同于碎屑岩,有其自己的特殊性。所有这些都阻碍了碳酸盐岩成藏过程量化研究的发展。“十五”期间,我们对此进行了探讨,初步建立了碳酸盐岩成藏史数值模拟系统。本文试图以渤海湾盆地黄骅拗陷孔西潜山构造带下奥陶统碳酸盐岩的成藏史模拟为例,说明这一系统的应用。

1 区域地质概况

黄骅拗陷位于渤海湾盆地的中部,面积为 17000km²,是一个受断层控制的不对称断陷。从下到上发育中、新元古界 (Pt₂₋₃),下古生界寒武系 (Є)、奥陶系 (O),上古生界石炭

收稿日期: 2004-12-28

基金项目: 国家“十五”重大科技攻关项目(编号: 2001BA605A08)和国家自然科学基金项目(编号: 40372102)资助。

作者简介: 孟元林(1961-),男,博士,教授,石油地质。电话: 0335-8065743; E-mail: qhdmyl@163.com

系(C)、二叠系(P)、中生界侏罗系(J)和白垩系(K),新生界古近系(E)、新近系(N)和第四系(Q)。下古生界是一套海相碳酸盐岩沉积建造,其中奥陶系烃源岩发育,其有机碳平均含量为0.16%,有机质类型主要为I型和II₁型,镜质组反射率 R_o 介于1.2%~1.8%的范围内^①。经烃源对比,孔西潜山构造带上孔古3井和孔古7井所发现的工业油气流来源于奥陶系碳酸盐岩^[2]。上古生界是一套海陆交互相-陆相的含煤碎屑岩建造。中生界属于小型陆相断陷湖盆砂泥岩沉积,分布局限。新生界是大型断陷湖盆碎屑岩沉积,生、储、盖层发育,是大港油田目前油气勘探、开发的主要层段。

2 成藏史模拟基本原理简介

本文主要通过温度、压力和成藏诸要素生、储、盖、运、圈、保的数值模拟,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,为油气勘探指明方向。

2.1 埋藏史和构造发育史

黄骅拗陷在印支期发生了挤压和断层逆冲,使古生界出现重复。这就给埋藏史和构造发育史的恢复带来技术上的困难。本文在原有埋藏史软件的基础上^[3~5],通过逆冲系数解决这一问题:

$$Kt = \frac{1}{H_0} \sum_{i=1}^N H_i \quad (1)$$

式中: H_0 —现今地层未发生逆冲时的厚度; H_i —因断层逆冲引起地层重复后每一重复层的厚度; Kt —逆冲系数,由于地层的重复,由原来的1层变为 N 层($N \geq 2$),所以逆冲系数 $Kt \geq 1$ 。

从逆冲开始后,地史时期地层古厚度由下式计算:

$$H = Kt \times H_0 \quad (2)$$

式中: H —逆冲后的地层等效厚度。

图1是用上述模型恢复的孔古7井埋藏史图,图中实线为地层的实际埋藏轨迹,虚线为假想未发生逆冲时孔古7井奥陶系的埋藏轨迹。由图可见,孔古7井在三叠纪末由于印支运动,下古生界发生逆冲,地层出现了重复,原来的奥陶系“变厚”了,其逆冲系数为1.896,从而大大增加了印支期以后奥陶系的古埋深。

2.2 地热史和生烃史

下古生界海相碳酸盐岩中有机质主要来源于低等水生生物,其中缺乏镜质体,但研究表明^[2,6],海相镜质体(或称镜状体)反射率与镜质体反射率之间有良好的可比性。本文应用Sweeney等^[7]的Easy% R_o 模型模拟下古生界的有机质热演化过程,当镜质(状)体反射率在某一地质时期的增量小于0.001%时,即表明发生了生烃过程的中断^[6]。生烃史的恢复所应用的模型是热模拟实验得出的二次生烃模板^[6]。

2.3 排烃史

碳酸盐烃源岩排烃的实际通道是由各种原因(主要是区域构造力)产生的微裂缝。排烃的时间不完全决定于有机质演化的阶段,即使进入了生烃高峰期,如果没有脆性变形所提供的通道和压力梯度,排烃作用仍然不能够进行^[2,8]。因此,通过模拟碳酸盐岩的生烃史和构

① 孟元林,等. 渤海湾盆地大港探区古生界成藏史模拟与下古生界烃源岩潜力评价, 2003.

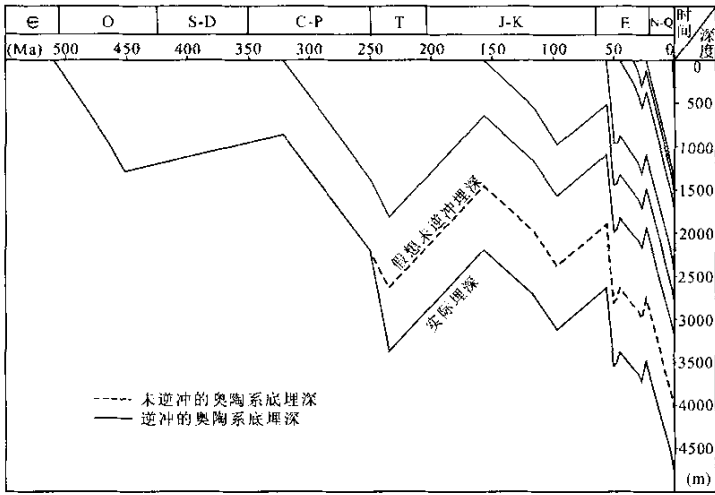


图 1 孔古 7 井埋藏史图

Fig.1 Burial history of the Konggu 7 well

造发育史，就可以确定油气运移的时期。

2.4 成岩史

综合考虑温度、压力、流体和时间 4 种因素对成岩作用的影响，通过成岩指标古地温 (T)、镜质组反射率 (R_o)、甾烷异构化指数 (SI)、伊/蒙混层中蒙皂石层的含量 (S) 在地史时期随时间变化规律的模拟和成岩指数 I_D 的计算，实现了碳酸盐岩成岩阶段划分的数值化，将早成岩阶段至中成岩阶段数值化为 $0 \sim 1^{[4,5,9]}$ 。当 $I_D = 0$ 时，成岩作用刚刚开始，地层处于早成岩阶段的初始阶段；当 $I_D = 1$ 时，地层达到中成岩阶段末； $I_D > 1$ 时，进入晚成岩阶段。黄骅坳陷下古生界各成岩阶段对应的成岩指标和生、储、盖层发育特征见表 1。

表 1 黄骅坳陷奥陶系碳酸盐岩不同成岩阶段的生、储、盖层发育特征

Table 1 Characteristics of source rocks, reservoir rocks and cap rocks in the different diagenetic stages in Ordovician carbonates of the Huanghua depression

成岩阶段	古地温/℃	R_o /%	SI	SI %	I_D	有机质	储层溶蚀孔隙	盖层封闭性
早成岩阶段	< 85	< 0.5	< 0.2	< 50	< 0.32	未—半成熟	溶孔、洞、缝	未封闭—封闭
中成岩阶段早期	85 ~ 140	0.5 ~ 1.3	> 0.2 ~ 0.4	50 ~ 35	0.32 ~ 0.68	低熟—成熟	溶孔、洞、缝	封闭
中成岩阶段晚期	140 ~ 175	1.3 ~ 2.0	> 0.2 ~ 0.4	35 ~ 15	0.68 ~ 1.0	成熟—高熟	溶孔、洞、缝	封闭
晚成岩阶段	> 175 ~ 200	> 2.0 ~ 4.0	> 0.4	< 15	> 1.0	过成熟	溶孔、洞、缝	封闭

2.5 储、盖层发育史

碳酸盐岩储层的储集空间主要为溶蚀作用形成的溶蚀孔、洞和缝。溶蚀作用包括大气降水的淋滤和干酪根降解过程中脱羧形成有机酸对碳酸盐岩的溶蚀。前者主要为发生在近地表或大气降水沿断层和不整合面进入地下所发生的溶蚀；后者则主要发生在碳酸盐岩早成岩阶段的晚期—中成岩阶段的早期， $R_o = 0.35\% \sim 1.3\%$ 。由此可见，通过构造发育史、有机质热演化史和成岩史的模拟，就可以研究碳酸盐岩储层次生孔隙的发育程度（表 1）。

奥陶系碳酸盐岩油气藏的盖层是奥陶系自身的泥灰岩，Choquette^[10]的研究表明，碳酸盐

岩在埋深至 100m 时,其厚度即可压实到原始厚度的 1/2,同时颗粒紧密排列;埋深在 240m 时,机械压实不再进行,其原始孔隙度已很小。由此可见,碳酸盐岩盖层在埋藏后不久的早成岩阶段即具封闭能力(表 1)。

3 成藏史分析

3.1 孔西潜山构造带成藏史

应用建立的成藏史模拟系统,本文计算了横穿黄骀坳陷孔西潜山构造带 33735 地震测线上,各 CDP 点和钻井不同地层单元在地史时期的古厚度 H 、古地温 T 、镜质(状)体反射率 R_o 、甾烷异构化指数 SI 、伊蒙混层中蒙皂石层的含量 S 和成岩指数 I_D ,模拟了该构造带的埋藏史、构造发育史、地热史、生烃史、排烃史、成岩史和生、储、盖层发育史。

模拟结果表明,在加里东期末,黄骀坳陷奥陶系底部埋深在 1200m 左右,古地温超过 60℃, R_o 可达 0.4% 以上, $I_D < 0.32$,处于早成岩阶段(图 2)。有机质处于未—半成熟状态,在形成干酪根的同时,也形成相当数量富含非烃、沥青质的可溶有机质(未熟油)和一定数量的有机酸^[2,6],溶解碳酸盐岩,形成溶孔、溶洞、溶沟及溶缝。在早成岩阶段,碳酸盐岩的原生孔隙就已非常小,盖层具封闭能力。但加里东运动以垂直升降为主,没有皱褶变形和剪切应力,难以形成构造圈闭和裂缝,缺乏油气运移的通道和聚集的场所。

在中奥陶世末,本区抬升,遭受了长达 1.3 亿年的风化剥蚀,碳酸盐岩储层岩溶极为发育。在中石炭世,本区下降接受了石炭系和二叠系海陆交互相—陆相的煤系地层。在海西期末,奥陶系进入中成岩阶段早期,古地温高达 120℃ 以上, $R_o > 0.6%$,烃源岩进入生油门限,干酪根开始降解生成油气,但生烃量很少,生烃率在 5mg/g 左右(图 3)。在干酪根降解生烃的同时,产生大量 CO_2 和有机酸,溶蚀碳酸盐岩储层,形成溶孔、溶洞和溶缝等次生孔隙储集空间。但由于缺乏足够的运移动力和通道,仍未发生油气初次运移,而且缺乏油气聚集的圈闭,没有形成油气藏。

在三叠纪,印支运动使古生界发生褶皱与逆冲(图 2),形成孔西潜山构造带。在印支期末,奥陶系古地温 $T > 90^\circ C$, $R_o > 0.8%$,进入大量生烃的成熟阶段,生烃率达 50mg/g 以上(图 3)。储层处于中成岩阶段早期(图 2),发育因有机酸溶蚀作用产生的次生孔隙。更重要的是,在加里东期末形成的碳酸盐岩岩溶带成为良好的储集空间。此外,印支运动使奥陶系烃源岩产生大量裂缝,成为油气运移的通道,已生成的油气被排出,进入储层中,聚集成藏。孔古 7 井碳酸盐岩中自生伊利石 K/Ar 同位素测年结果也证实了这一结论(表 2),表 2 中列出了 2 个粒级粘土的同位素年龄,但最细粒级的自生伊利石形成最晚^[11],其同位素年龄反映了油气注入储层的最早时间为 221.81Ma,相当于晚三叠世。

在燕山期末,奥陶系下部地层进入中成岩阶段晚期(图 2),古地温可达 180℃ 以上, $R_o = 0.8\% \sim 1.5\%$,烃源岩进入生烃高峰期,生烃率主要介于 100 mg/g ~ 300mg/g 之间,生成的烃类和有机酸一齐沿燕山期形成的构造裂缝排出,进入加里东期和印支—早燕山期形成的岩溶储集空间,实现了第二次油气运移和聚集。最后一幕的燕山运动使孔西潜山抬升剥蚀,但并未破坏其完整性,已形成的油气藏也未完全被破坏。因抬升剥蚀,奥陶系的古地温降低,在新生界沉积前,降至 100 ~ 130℃。由于大幅降温,奥陶系烃源岩的一次生烃被迫中断。

在喜马拉雅早期,黄骀坳陷进入断陷盆地发育阶段,在此期间快速堆积了一套湖相砂泥

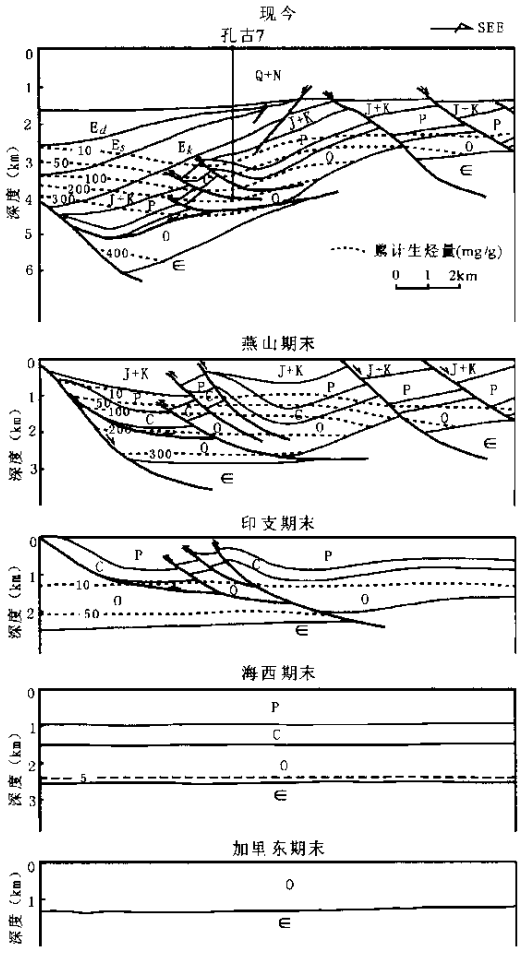
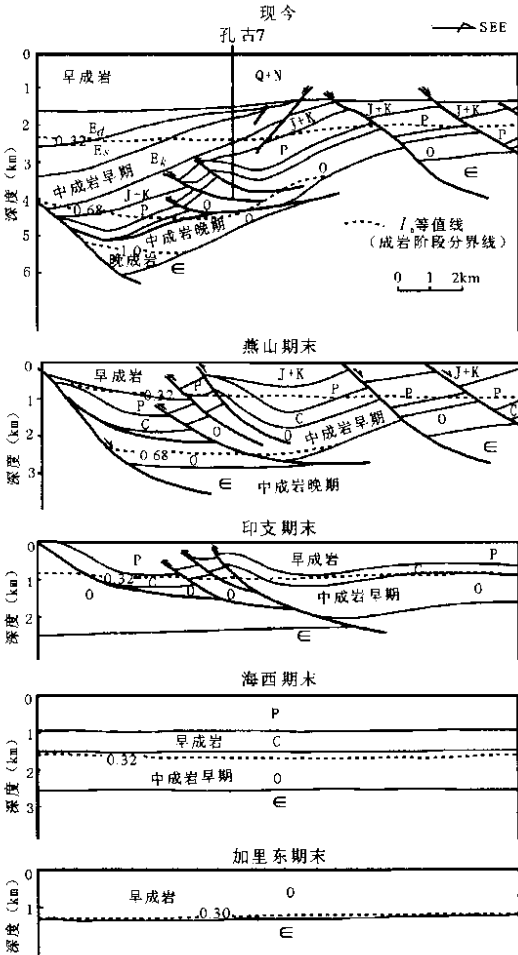


图 2 孔西潜山构造发育史^[12]与成岩史

图 3 孔西潜山生烃史

Fig.2 Structural history^[12] and diagenetic history for the Kongxi buried hill

Fig.3 Hydrocarbon generation history for the Kongxi buried hill

岩沉积，奥陶系碳酸盐岩的古地温超过了一次生烃的温度，开始二次生烃。同时，发生第三次油气运移和成藏。在早喜马拉雅期至现今，(地层重复后)最下部的奥陶系处于晚成岩阶段(图 2)，古地温 $T > 180^{\circ}\text{C}$ ， R_0 最高可达 1.5% ~ 2.2%，属于高一过成熟阶段，累积生烃率达到 300 mg/g ~ 400mg/g (图 3)。但喜马拉雅期以来的生烃量没有晚古生代—中生代一次生烃高，黄骀坳陷奥陶系的油气主要是在新生代之前生成的。

3.2 结果讨论

以前也曾有人研究过孔西潜山的成藏期次问题。基于自生伊利石测年、流体包裹体测试和二次生烃的定性研究，他们认为本区下古生界碳酸盐岩的油气藏形成主要有两期，一期为印支期，另一期为喜马拉雅期。但我们的模拟结果表明，除上述两期外，在燕山期还有一次

成藏过程，流体包裹体测温资料也支持这一观点^①。此外，燕山运动使本区下古生界碳酸盐岩产生大量张性裂缝，为油气运移提供了通道，而此时正是一次生烃的高峰期，油气不可能不发生运移。无论是地质条件，还是分析化验和数值模拟均可证明这3次油气运移的存在。

表2 孔古7井碳酸盐岩自生伊利石 K/Ar 同位素年龄测定结果

Table 2 K/Ar ages of the autogenous illites in carbonates of the Konggu 7 well

样品粒度 (μm)	1 ~ 0.5	0.5 ~ 0.15
样品称重 (g)	0.01401	0.01200
钾含量 (%)	5.08	5.38
放射成因氩 (mol/g)	2.378E-09	2.202E-09
⁴⁰ K 含量 (mol/g)	1.516E-07	1.606E-07
⁴⁰ Ar _放 / ⁴⁰ Ar _总	96.98	95.50
⁴⁰ Ar _放 / ⁴⁰ K	0.0156860	0.0137142
年龄值 (Ma)	251.57 ± 3.65	221.81 ± 3.20

常数： $\lambda_e = 0.581 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ ， $\lambda_\beta = 4.962 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ ， $^{40}\text{K}/\text{K} = 1.167 \times 10^{-4}$

测试者：中国石油天然气集团公司石油勘探开发研究院实验中心

使用仪器：MM5400 静态真空质谱仪。

4 主控因素分析

综合以上分析结果，可得孔西潜山构造带成藏事件图（图4）。由图可见，黄骅拗陷的成藏主控因素是生烃史与构造发育史的匹配及成藏后的保存条件。而奥陶系碳酸盐岩的油气主要是新生代之前的形成的，所以黄骅拗陷下古生界原生油气藏的勘探，应主要寻找那些印支期和燕山期形成、且未被后期构造运动破坏的古构造，例如大中旺潜山、齐家务潜山、徐黑逆冲构造带、灯乌逆冲构造带、孔西逆冲构造带、沧东逆冲构造带等。

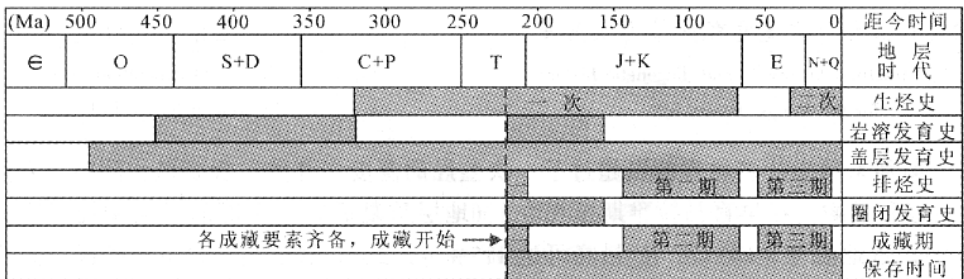


图4 孔西潜山油气成藏事件与主控因素分析

Fig.4 Reservoir-forming events and the key parameters in the Kongxi buried hill

① 孟元林，等. 渤海湾盆地大港探区古生界成藏史模拟与下古生界烃源岩潜力评价，2003.

5 结论

(1) 孔西潜山构造带的油气生成有中石炭世—白垩纪和古近纪—新近纪两期, 但以一次生烃为主; 排烃期和成藏期有印支期、燕山期和喜马拉雅 3 期。

(2) 孔西潜山构造带的成藏主控因素是生烃期与构造发育史的匹配及成藏后的保存条件。

(3) 黄骅坳陷下古生界原生油气藏的勘探应主要寻找那些位于生烃区在印支期和燕山期形成、且未被后期构造运动破坏的古构造, 如徐黑潜山构造带等。

致谢: 在项目研究中得到赵长毅博士和李思田教授的指导与帮助, 谨表谢忱!

参 考 文 献

- [1] 石广仁. 考虑断层发育史并适用于欠压实的地史模型 [J]. 石油学报, 2002, 23 (1): 24 ~ 26.
- [2] 程克明, 王兆云, 钟宁宁, 等. 碳酸盐岩油气生成理论与实践 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- [3] Meng Yuanlin, Xiao Lihua, Zhang Jing. 1997. Basin modeling by gravity, magnetics and electrical information and its application [A]. In: Liu B J, Li S T, eds., Basin Analysis, Global Sedimentary Geology and Sedimentology [C]. Amsterdam: VSP, 197 ~ 207.
- [4] Meng Yuanlin, Yang Junsheng, Xiao Lihua, et al. Diagenetic evolution modeling system and its application [A]. In: Hao Dongheng ed., Treatises of X III Kerulien International Conference of Geology [C]. Shijiazhuang, P. R. China: Shijiazhuang University of Economics, 2001. 25 ~ 27.
- [5] 肖丽华, 孟元林, 侯创业, 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, 2003, 49 (5): 544 ~ 551.
- [6] 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.
- [7] Sweeny J J, Burham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics [J]. AAPG Bull., 1990, 74: 1559 ~ 1570.
- [8] 陈义才, 沈忠民, 黄泽光, 等. 碳酸盐烃源岩排烃模拟模型及应用——以鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组为例 [J]. 石油与天然气地质, 2002, 23 (3): 203 ~ 223.
- [9] 孟元林, 肖丽华, 罗宪婴, 等. 碳酸盐岩成岩作用数值模拟及其应用 [J]. 天然气工业, 2005 (刊印中).
- [10] Choquette P W (杨锁洪译). 石灰岩的成岩作用——深埋环境 [J]. 国外地质科技, 1988, 87 (7): 59 ~ 90.
- [11] Hamilton P J. K-Ar dating of illites in Brent Group Reservoir: a regional perspective [A]. In: Morton A C, ed., Geology of the Brent Group [C]. Spec Pub Geol Soc London, 61, 1992, 377 ~ 400.
- [12] 漆家福, 杨池银, 张俊, 等. 黄骅盆地孔西潜山前第三系基底内幕构造解释 [J]. 石油与天然气地质, 2001, 22 (1): 30 ~ 37.

NUMERICAL MODELING OF THE ACCUMULATION-FORMING HISTORY OF THE KONGXI BURIED HILL , BOHAI GULF BASIN

MENG Yuan-lin¹ , WANG Yue-chuan¹ , LUO Xian-ying² , GAO Jian-jun¹

XIAO Li-hua¹ , ZHOU Xin-gui³ , YIN Xiu-lan⁴ , WANG Zhi-guo¹

(1. Daqing Petroleum Institute , Heilongjiang Daqing 163318 ;

2. Hangzhou Research Institute of Geology , CNPC , Hangzhou Zhejiang 310023 ;

3. Institute of Geomechanics , Chinese Academy of Geological Sciences , Beijing 100081 ;

4. China Institute of Geo-environmental Monitoring , Beijing 100081)

Abstract : A new numerical modeling system of the accumulation-forming history is established by numerical modeling of the essential elements of accumulation formation in carbonate rocks including source rocks , reservoir rocks , seal rocks , traps , primary migration and preservation , and the Kongxi buried hill tectonic belt in the Huanghua depression of the Bohai Gulf basin is used as an example to illustrate the application of this system. As the modeling results show , hydrocarbons were expelled from the Ordovician source rocks of the Kongxi buried hill tectonic belt in the Indosinian period and primary hydrocarbon accumulation began. The Yanshanian period was a main hydrocarbon generation stage and accumulation formation stage , when hydrocarbons were generated , expelled and accumulated in large quantity. Then primary hydrocarbon generation paused. In the Himalayan period , the tectonic belt was further buried and secondary hydrocarbon generation and tertiary hydrocarbon accumulation began. However , the amount of hydrocarbons generated during the secondary hydrocarbon generation was small. So the exploration for Lower Paleozoic primary oil/gas accumulations in the Huanghua depression should focus on the ancient structures that formed in the Indonesian and Yanshanian periods and were not destroyed by the late-stage tectonic movements.

Key words : accumulation-forming history ; basin modeling ; carbonate rock ; hydrocarbon accumulation ; Ordovician ; Huanghua depression ; Bohai Gulf basin