

成岩作用过程综合模拟及其应用

孟元林^{1,2}, 王志国², 杨俊生¹, 应凤祥³,
刘蕴华⁴, 罗宪婴¹, 毕研斌¹, 王家亮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. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 中科院 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

摘要: 该文根据成岩作用过程(process-oriented)模拟的原理, 综合考虑了温度、压力、流体和时间 4 种因素对成岩作用的影响, 通过模拟成岩参数镜质组反射率、古地温、伊/蒙混层中蒙皂石的含量、自生石英百分含量和甾烷异构化率在时空上的变化规律, 进而模拟一个地区的成岩史并预测成岩阶段的展布特征; 然后根据成岩作用对生、储、盖层的控制作用以及成岩史与构造发育史的匹配关系, 确定有利的勘探区域。最后, 文中以渤海湾盆地南堡凹陷老爷庙地区深层为例说明了这一方法的应用。

关键词: 成岩作用; 数值模拟; 碎屑岩储层; 次生孔隙; 酸性流体; 粘土矿物; 硅质胶结; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122. 2

文献标识码: A

石油与天然气是沉积有机矿产, 其形成和分布与成岩作用密切相关^[1,2]。然而, 目前有关碎屑岩成岩作用的研究存在下列两个问题: 其一, 常规的成岩作用只注重研究现今地层所处的成岩阶段, 而对成岩史的定量研究不够, 这将影响到成藏或含油气系统研究中各成藏要素匹配关系的研究; 其二, 盆地内成岩作用的研究过分依赖于钻井取心的分析化验, 而不能从盆地或凹陷的尺度上进行成岩作用研究和成岩阶段预测。但我国深层勘探迫切需要解决这些问题, 即在高温、高压条件下, 预测深层所处的成岩阶段和生、储、盖层的发育状态, 并寻找油气聚集的有利地区。“九五”和“十五”期间, 我们对这些问题进行了探索, 试图将常规的成岩作用研究和盆地模拟技术相结合解决这些问题。

1 基本原理

目前, 储层质量定量评价和成岩作用数值模拟分为过程模拟(process-oriented)和效应模拟(effect-oriented)两大类^[3]。前者主要是对单项成岩作用的模拟, 旨在探索成岩作用的机理, 如石英次生加大^[4]和粘土矿物转化^[5]的化学动力学模型; 后者不考虑具体的地质过程, 只考虑地质作用的综合

结果, 常见的有储层物性与深度或有机质成熟度的经验模型等, 它们各有优缺点^[3]。本文试图汲取二者的优点, 建立这两种模型相结合的综合模型。碎屑岩的成岩特征除与其原始岩性有关外, 主要受成岩场的影响与控制。成岩场是指各种成岩参量的作用范围和作用梯度, 它包括温度、压力和流体(水化学和水动力学特征)等地质因素^[6]。正是成岩场中各地质因素在地史时期规律性的演化, 形成了一系列成岩序次和成岩阶段, 同时, 也使各种成岩参数, 如镜质组反射率 R_o 和伊/蒙混层中的蒙皂石含量 S 等发生有规律的变化。所以, 通过各成岩参数随时间变化规律的模拟, 就可以综合研究一个地区的成岩史, 划分成岩阶段。本文考虑了温度、压力、流体和时间 4 种因素对成岩作用的影响, 选取古地温 T 、镜质组反射率 R_o 、甾烷异构化指数 SI 、粘土矿物伊/蒙混层中蒙皂石的含量 S 和自生石英含量 V_q 这 5 项参数作为成岩作用过程综合模拟的主要参数。在埋藏史、地热史的基础上^[7], 通过模拟 R_o 、 SI 、 S 、 V_q 这 4 项参数在时空领域内的分布^[4,5,8,9], 计算成岩指数 I_D , 然后划分成岩阶段、模拟成岩演化史:

$$I_D = \sum_{i=1}^n P_i \times Q_i / \max Q_i \quad (1)$$

收稿日期: 2002- 07- 05; 修订日期: 2003- 01- 10.

基金项目: 中国石油“九五”科技工程项目(970206- 02- 01); 国家“十五”科技攻关项目(2001BA605A).

作者简介: 孟元林(1961-), 男(汉族), 山西省繁峙县人, 副教授、博士生, 主要从事盆地模拟和储层研究工作.

式中: I_D 为成岩指数; n 为成岩指标的个数; Q_i 为第 i 个成岩指标模拟计算的结果, 如镜质组反射率、古地温等; P_i 为第 i 个成岩指标的权值; $\max Q_i$ 为第 i 个成岩指标在晚成岩阶段 B 期的最大值。

根据我国石油与天然气行业标准碎屑岩成岩阶段划分规范^[8]和陆相烃源岩评价方法中有关有机质热演化阶段的划分^[9], 可以确定出 I_D 在各成岩阶段的界限值:

$$L_k = \sum_{i=1}^m P_i \times L_{Q_i} / \max Q_i \quad (2)$$

式中: L_k 为第 k 个成岩阶段的成岩指数界限值; m 为成岩指标的个数; L_{Q_i} 为第 i 个成岩指标的界限值, 如 R_o 。在早成岩阶段 A 期和 B 期、晚成岩阶段 A 期、晚成岩阶段 B 期末期的界限值分别为 0.35%, 0.5%, 1.3%, 2.0%; $\max Q_i$ 为第 i 个成岩指标在晚成岩阶段 B 期的最大值, 对于 R_o , 该值为 2.0%。

考虑到成岩作用与有机质热演化、储层孔隙类型和储盖层封闭能力的关系^[10-12], 结合我们在渤海湾盆地的实际应用结果, 本文初步制定出各成岩阶段所对应的这 5 项成岩参数的值与 I_D 值以及各成岩阶段生、储、盖层的特征(表 1), 以便进行成岩阶段预测和成岩史研究。

2 应用实例

限于篇幅, 本文仅以渤海湾盆地老爷庙地区深层为例说明这一方法的应用。

2.1 区域地质概况

老爷庙地区位于渤海湾盆地南堡凹陷。根据其构造特征, 可进一步分为庙南斜坡带和庙北背斜带两个部分, 总面积 150km²。本区下第三系是一套半深湖—深湖、三角洲和扇三角洲沉积, 自下而上发育沙一段(E_s^1)、东三段(E_d^3)、东二段(E_d^2)、东一段(E_d^1)、馆陶组(N_g)、明化镇组(N_m)和第四系(Q)。其中下第三系生、储、盖层发育, 是本区的主

要勘探目标层段。本区深层(> 3 500m)主要包括东三段和沙一段。为了确保成岩作用模拟所建立模型和选取参数的合理性, 我们首先对老爷庙地区的储层和成岩作用进行了扎实的基础研究工作。研究表明, 本区储层以岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主, 岩屑主要为火山岩岩屑。由于其埋藏较深, 成岩作用较强。钻井所揭示的深层目前主要处于晚成岩阶段 A₂—B 期以上, 储层物性很差, 属于低孔、特低孔—低渗、特低渗储层。

2.2 单井成岩史模拟

本文遵循“从点到线, 全面铺开”的原则, 首先选取资料齐全的庙 28×1 井, 用 R_o 、 S 、 SI 、 V_q 的实测值标定模拟值, 并得出该井的成岩史图(图 1), 然后从纵、横两个方向研究深层的成岩演化特征。由图 1 可见, 在东二期初(30.02Ma)庙 28×1 井沙一段的底部由早成岩阶段 A 期进入 B 期, 在馆陶期(17.8Ma)进入晚成岩 A 期, 从明化镇期(7.5Ma)以来一直处于晚成岩阶段 B 期。该井其它各层的成岩史如图 1 所示, 恕不赘述。

2.3 $Ed^{3(下)} + Es^1$ 成岩演化特征分析与应用

老爷庙地区成岩作用过程综合模拟的输入参数主要是三维地震资料和测井资料, 模拟网络的点距为 0.5km。本文首先模拟了不同地质时期各层位的 R_o 、 T 、 S 、 SI 和 V_q , 然后编绘了这些参数不同时期的剖面等值线和平面等值线图, 在此基础上计算出 I_D , 根据 I_D 划分成岩阶段并讨论其成岩演化特征。老爷庙地区东三下亚段和沙一段在钻井剖面和测井曲线上的分界比较清楚, 但由于埋藏太深, 在地震剖面中不易区分, 所以在本次模拟计算中把 $Ed^{3(下)}$ 和 Es^1 作为一个计算单元来处理。

模拟结果表明, $Ed^{3(下)} + Es^1$ 在其自身沉积期间主要处于早成岩阶段。在东二末期, $Ed^{3(下)} + Es^1$ 底部地层的 $R_o = 0.6\% \sim 1.25\%$, $S = 50\% \sim 75\%$, $T = 140 \sim 170\text{ }^\circ\text{C}$, $SI = 0.1 \sim 0.3$, $V_q = 0.05\% \sim 0.16\%$ 。尽管地温较高, 但由于成岩时间较短, 其

表 1 不同成岩阶段所对应的成岩参数和生、储、盖层特征

Table 1 Diagenetic parameters and characteristics of source rocks, reservoirs and caprocks in different diagenetic stages

$T/^\circ\text{C}$	$R_o/\%$	SI	I/S 中 $SI/\%$	$V_q/\%$	I_D	成岩阶段 阶段 期	有机质 热演化	储层孔隙 类型	盖层封 闭性能	
< 65	< 0.35	< 0.03	> 70	< 0.005	< 0.19	早成岩	A	未成熟	原生孔	差—中
65~ 85	0.35~ 0.50	0.03~ 0.25	70~ 50	0.005~ 0.025	0.19~ 0.31		B	半成熟	原生孔为主	中—好
85~ 110	0.50~ 0.70	0.25~ 0.40	50~ 35	0.025~ 0.100	0.31~ 0.43	晚成岩	A ₁	低成熟	次生孔	好
110~ 140	0.70~ 1.30		35~ 15	0.100~ 0.250	0.43~ 0.67		A ₂	成熟	次生孔	好—中
140~ 170	1.30~ 2.00		< 15	0.250~ 1.500	0.67~ 1		B	高成熟	次生孔, 裂缝	差
170~ 200	> 2.00		混层消失	> 1.500	> 1		C	过成熟	裂缝发育	差

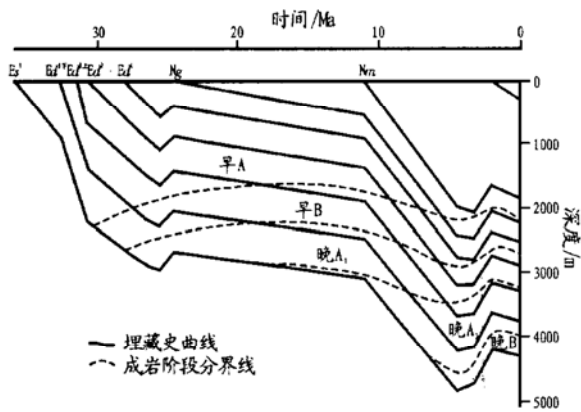


图 1 庙 28 × 1 井埋藏史和成岩史图
 Fig. 1 Burial history and diagenetic history plot of the M28 × 1 well

成岩强度仍不高, 上部地层处于早成岩阶段(图 2), 下部地层进入晚成岩阶段 A 期。在下部的烃源岩进入了生油门限, 开始生烃。在干酪根降解的同时, 脱羧生成一元、二元有机酸, 并释放 CO₂, 这些物质溶于泥岩成岩过程中释放出的压实水和层间水中, 形成高温酸性热流体, 运移到砂岩的孔隙系统中, 对其中的硅铝酸盐和碳酸盐岩矿物溶蚀, 形成次生孔隙^[13, 14]。盖层经东三期的压实后, 压实程度已较高, 但其中可塑性粘土矿物蒙皂石层的含量仍大于 50%, 封闭性能很好。生、储、盖层均发育良好, 十分有利于油气藏的形成。另外, 由图 2 可见, 老爷庙构造具有长期、继承性发育的特点, 在东一期基本定

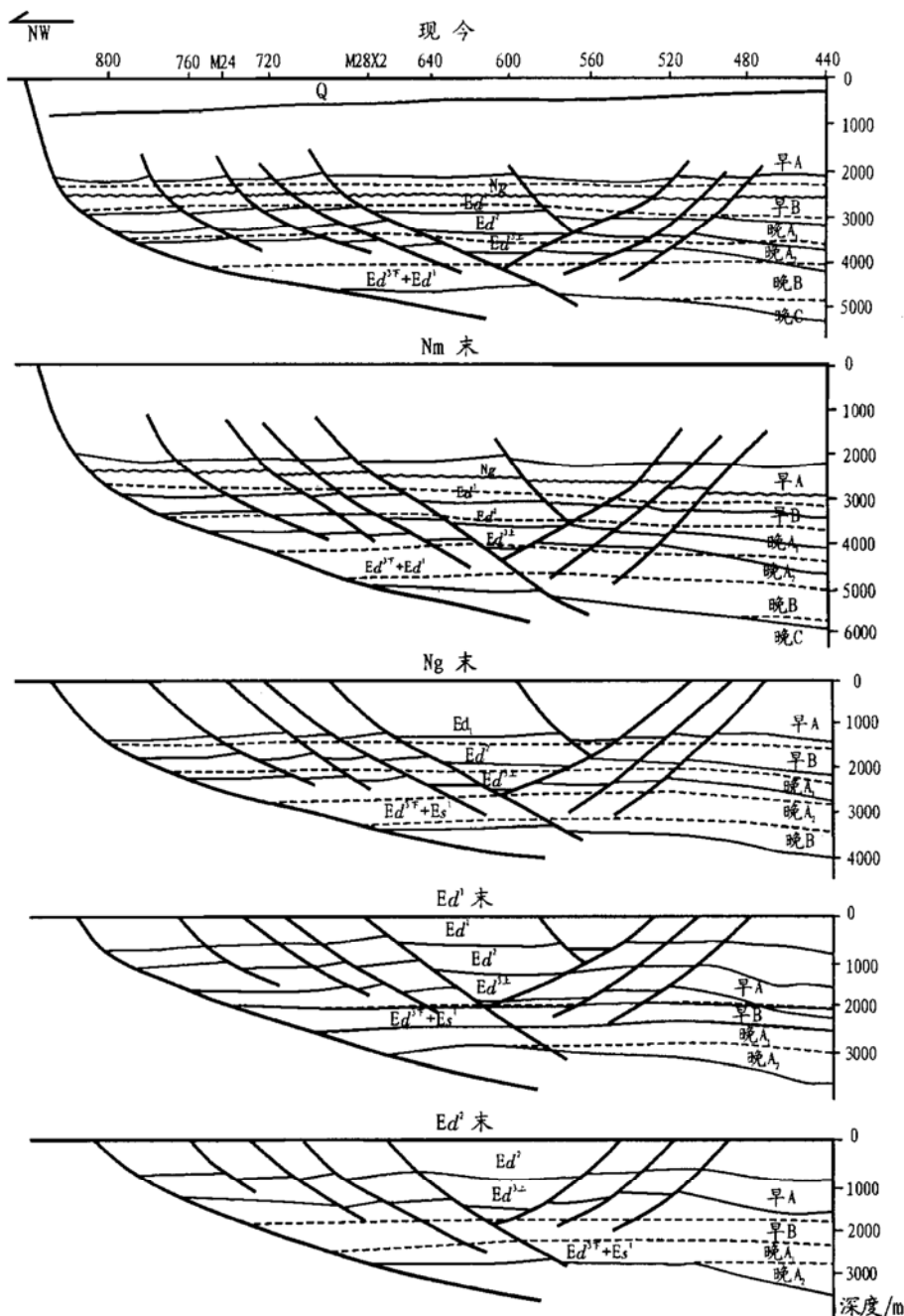


图 2 老爷庙地区成岩演化剖面图
 Fig. 2 Diagenetic evolutionary profile of Laoyemiao region

型。构造的形成时间早于生、排烃的时间。本区油气藏的形成时间主要决定于生、排烃时间,也就是说本区油藏的形成时间最早在东二期。流体包裹体测温资料也支持了这一结论,庙 1 井 $Ed^{3(下)} + Es^1$ 在 4 000m 的包裹体均一温度为 137℃, 相当于它在 Ed^2 末期的古地温。

在早第三纪东一期末, $Ed^{3(下)} + Es^1$ 所处的成岩阶段与 Ed^2 末基本相似, 但由于埋深增加, 上部地层已完全由早成岩阶段 A 期进入早成岩阶段 B 期(图 2), 下部则有更多的地层进入了晚成岩阶段 A_1 期和 A_2 期, 生、储、盖层进一步朝有利于油气藏形成的方向发展, 成藏作用持续进行。

在晚第三纪馆陶期末, $Ed^{3(下)} + Es^1$ 主要处于晚成岩阶段 $A_1 - A_2$ 期(图 2), 烃源岩进入大量生烃的成熟阶段, 可为成藏提供丰富的油源。在烃源岩干酪根降解生烃的同时, 脱羧形成丰富的有机酸和 CO_2 , 成岩环境呈酸性, 储层中的硅铝酸盐和碳酸盐岩类矿物受到强烈的溶蚀, 成为次生孔隙发育的主要时期。其上部泥岩盖层主要处于晚成岩阶段 A_1 期, 封闭性能较好。在地史时期, $Ed^{3(下)} + Es^1$ 的生、储、盖层在馆陶期发育最好, 最有利于油气藏的形成。

在明化镇期和第四纪, 本区接受了较厚的沉积, $Ed^{3(下)} + Es^1$ 下部地层主要处于晚成岩阶段 B 期和 C 期(图 2)。烃源岩已进入高一过成熟期, 以产凝析油气、湿气和干气为主。干酪根中含氧基团已基本脱尽, 有机酸的产量甚低, 成岩环境以碱性为主, 碳酸盐岩矿物开始沉淀。再胶结作用普遍发育, 物性很差, 庙 28×1 井沙一段有 78.6% 的储层属于特低孔储层, 孔隙度 < 10%。但其上部地层仍处于晚成岩阶段 A 期, 烃源岩仍有液态烃生成, 储层中还有次生孔隙发育, 其顶部泥岩仍具封闭能力。所以, 在 $Ed^{3(下)} + Es^1$ 中仍可形成原生油气藏。平面上, $Ed^{3(下)} + Es^1$ 底在中北部地区主要处于晚成岩阶段的 B 期(图 3), 储层次生孔隙减少, 裂隙开始发育; 在南部地区, $Ed^{3(下)} + Es^1$ 底处于晚成岩阶段 C 期, 储集空间以裂缝为主。造成这种展布特征的主要原因是中北部地区 $Ed^{3(下)} + Es^1$ 的埋深较小, 而南部地区埋深较大。从成岩角度来看, 庙北地区 $Ed^{3(下)} + Es^1$ 比庙南地区更有利于油气的聚集。

2.4 $Ed^{3(上)}$ 成岩演化特征分析与应用

$Ed^{3(上)}$ 埋藏相对较浅, 一直到晚第三纪馆陶期才由早成岩阶段进入了晚成岩阶段 A_1 期(图 2), 烃源岩进入了生油门限, 开始生成油气, 油气的生成时间晚于构造发育期, 二者匹配良好。在油气生成的

同时, 干酪根脱羧, 形成有机酸并释放 CO_2 , 成岩环境开始呈酸性, 储层次生孔隙发育。处于该成岩阶段的泥岩盖层中含有较高的蒙脱石 (> 35%), 其可塑性较大, 而且压实程度较高, 盖层孔隙度较低, 封闭能力较强, 成藏作用可能开始。

在晚第三纪明化镇期末, $Ed^{3(上)}$ 的下部地层进入了晚成岩阶段 A_2 期(图 2), 上部地层处于晚成岩阶段 A_1 期。现今 $Ed^{3(上)}$ 所处的成岩阶段比晚第三纪更高, 其底部地层在中北区主要处于成岩阶段 $A_1 - A_2$ 期(图 4), 烃源岩进入大量生烃的成熟阶段, 可为油气藏的形成提供丰富的油气。由于从 Nm 期以来, $Ed^{3(上)}$ 储层长期处于酸性成岩环境, 所

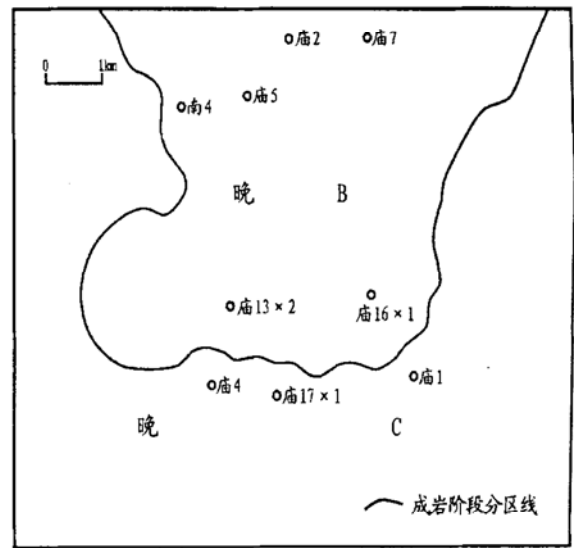


图 3 现今 $Ed^{3(下)} + Es^1$ 底成岩阶段预测图
Fig. 3 Map showing the predicted diagenetic stages of $Ed^{3(下)} + Es^1$ bottom at present

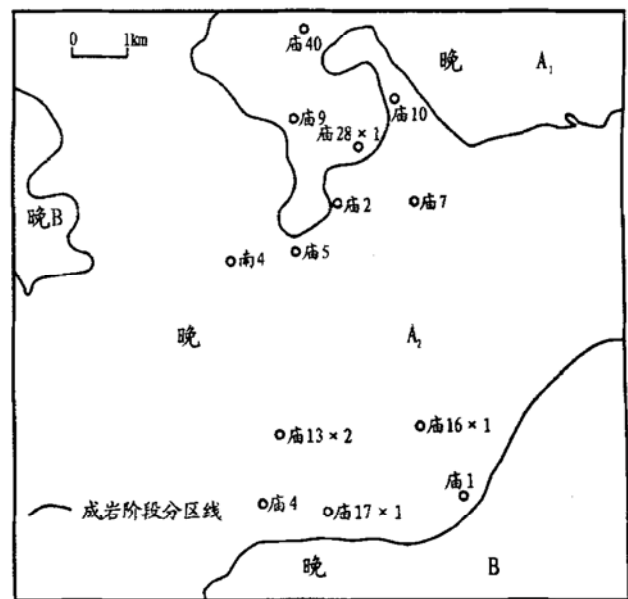


图 4 现今 $Ed^{3(上)}$ 成岩阶段预测图
Fig. 4 Map showing the predicted diagenetic stages of $Ed^{3(上)}$ at present

以十分有利于储层中不稳定矿物的溶解和迁移、次生孔隙的形成及油气的储集, 实测储层孔隙度为 10%~25%, 而且处于晚成岩阶段 A 期的盖层封盖能力亦很好。总的来看, $Ed^{3(上)}$ 的生、储、盖层从 Nm 至今发育很好。中北区位于老爷庙背斜带, 构造圈闭发育, 是油气聚集的有利地区。在南部和西部地区, 仅有小部分区域进入晚成岩阶段 B 期, 储层中次生孔隙减少, 裂缝开始发育; 泥岩盖层中蒙皂石的含量较少, 脆性较大, 出现微裂缝, 从而其封闭能力降低, 不利于油气藏的形成。此外, 南部地区主要位于庙南斜坡带, 构造圈闭不发育, 只能形成岩性和地层油气藏, 其含油气远景要比中北部地区差。

3 结论

a) 应用成岩作用过程综合模拟技术, 可以模拟一个地区任意一点(一口井)、一条平面或一套地层在任意地史时期所处的成岩阶段, 同时预测生、储、盖层的发育状态。

b) 老爷庙地区深层下部(以 $Ed^{3(下)} + Es^1$ 为代表)和中上部(以 $Ed^{3(上)}$ 为代表)先后在东二期和馆陶期末进入晚成岩阶段 A 期, 其中的烃源岩进入生油门限开始生烃, 生烃期晚于老爷庙背斜构造发育期, 二者匹配良好, 有利于油气藏的形成, 成藏时间最早在东二期末。

c) 现今老爷庙深层在庙北地区主要处于晚成岩阶段 A 期($Ed^{3(上)}$)—B 期($Ed^{3(下)} + Es^1$), 生、储、盖层发育良好, 构造圈闭发育, 是油气聚集的有利地区; 在庙南地区深层已进入晚成岩阶段 B 期—C 期, 储、盖层质量较差, 其含油气远景不如庙北地区。

参考文献:

[1] 张璞璐, 方明. 成岩体系与油气[J]. 石油实验地质, 1992,

14(4): 333-343.

- [2] 朱家祥, 李淑贞. 碎屑岩成油组合的成岩作用研究[J]. 石油实验地质, 1988, 10(3): 223-239.
- [3] Wood J R, Byres A P. Alteration and emerging methodologies in geochemical and empirical modeling[A]. Reservoir Quality Assessment and Prediction in Clastic Rocks[C]. SEPE Short Course 30, 1994. 395-400.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 孙永传, 李忠, 李惠生, 等. 中国东部含油气断陷盆地的成岩作用[M]. 北京: 科学出版社, 1996. 2-6.
- [7] Meng Y L, Xiao L H, Cao C R, et al. Early basin modeling system EBMS and its application [A]. Crustal Evolution in North-east Asia: 4th Korea-China Joint Geology Symposium [C]. Churcheon Korea: Kingman Publishing Company, 1997. 125-132.
- [8] 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.
- [9] Mackenzie A S, Mackenzie D. Isomerization and aromatization of hydrocarbon in sedimentary basin formed by extension [J]. Geo Mag, 1983, 20: 417-470.
- [10] 应凤祥. 中华人民共和国石油天然气行业标准并碎屑岩成岩阶段划分规范(SY/T5477-92)[S]. 北京: 石油工业出版社, 1993. 1-5.
- [11] 黄飞, 辛茂安. 中华人民共和国石油天然气行业标准并陆相烃源岩地球化学评价方法(SY/T5735-1995)[S]. 北京: 石油工业出版社, 1996. 1-19.
- [12] 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.
- [13] 马青, 敬国超. 砂岩在酸溶过程中的岩石学变化[J]. 石油实验地质, 1991, 13(3): 265-271.
- [14] 卢焕勇, 陈景维, 邸世祥. 内蒙乌兰格儿地区上古生界砂岩的成岩作用. 石油实验地质, 1991, 13(1): 41-51.

COMPREHENSIVE PROCESS-ORIENTED SIMULATION OF DIAGENESIS AND ITS APPLICATION

MENG Yuan-lin^{1,2}, WANG Zhi-guo², YANG Jun-sheng¹, YING Feng-xiang³,
LIU Yun-hua⁴, LUO Xian-ying¹, BI Yan-bin¹, WANG Jia-liang¹

(1. China University of Geology, Beijing 100083, China; 2. The Qinhuangdao Branch of Daqing Petroleum College, Qinhuangdao, Hebei 066004, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing 100083, China; 4. Guangzhou Research Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

(to be continued on page 220)