

文章编号: 0253-9985(2007)02-0191-07

埕北断阶带沙河街组油气运移动力学过程模拟分析

罗晓容¹, 张立宽¹, 廖前进², 苏俊青², 袁淑琴², 宋海明¹, 周波¹, 侯平¹

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

(2. 中国石油天然气股份有限公司大港油田公司勘探开发研究院, 天津 300280)

摘要: 在对渤海湾盆地埕北断阶带沙河街组含油气系统油气地质条件认识的基础上, 运用盆地模型方法恢复研究区的盆地演化过程、相应的油气成熟范围和不同时期的运移动力条件。重点分析了研究区内不同输导体的孔隙度、渗透率等物性特征, 用开启概率和砂地比分别表征断层和砂岩输导体的连通特征。采用以逾渗理论为基础的油气运聚模拟方法, 在根据实际资料建立的二维输导格架模型上实现运移动力和通道的耦合。模拟结果显示研究区沙河街组目的层段的油气运移路径及其油气运移相对流量, 结合其他油气地质条件确定张东东构造带、张东构造带、庄海 12—庄海 9×3 井地区等为有利勘探目标区。

关键词: 运移模型; 输导格架; 断层开启概率; 逾渗; 成藏动力学; 埕北断阶带

中图分类号: TE112.3 **文献标识码:** A

Simulation of hydrocarbon migration dynamics in Shahejie Formation of Chengbei fault step zone

Luo Xiaorong¹, Zhang Likuan¹, Liao Qianjing², Su Junqing², Yuan Shuqin²,Song Haiming¹, Zhou Bo¹, Hou Ping¹

the Shahejie Formation. These study results, in combination with other geological conditions, are successfully used in identifying the prospective target zones, including eastern Zhangdong structural belt, the Zhangdong structural belt, and area around the Well Zhuanghai-12 and Well Zhuanghai-9x3.

Key words: migration model; carrier framework; fault opening probability; percolation; migration and accumulation dynamics

油气通过运移而聚集成藏的机理和过程一直是石油地质学研究的核心^[1]。在实际盆地中各种通道的非均一性非常明显^[2], 因而在油气运聚分析中仅仅考虑流体势的空间分布和变化远远不够, 必须把运移动力与输导格架有机地结合起来

才能解决问题^[3-4]。England 等^[5-6]曾在这方面做过努力, 尝试把毛细管力加入流体势的计算, 但未产生明显的效果, 输导层的非均匀性特征未能得到体现^[5-7]。而建立在逾渗理论基础上的通过定量描述输导体输导物性特征空间分布的方法显示

收稿日期: 2007-02-06

第一作者简介: 罗晓容(1959—), 男, 研究员, 博士, 油气地质学基础

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2006CB202305, G1999043310)资助

出解决该难题的广阔前景^[8]。

渤海湾盆地在第三纪主要断陷成盆时期广泛发育张性或张扭性同沉积生长断裂,断裂-裂隙系统在油气运聚过程中往往起着至关重要的作用^[9]。这些断裂与连通砂体和不整合面组合,构成了复杂的三维运移通道,油气通常呈折线式运移,造成油气分布复杂,规律不清^[10]。认识研究区主要成藏期运移通道的非均匀性特征及其对油气运聚过程的影响对于进一步勘探部署十分重要。

本文作者采用油气成藏动力学的思想方法,重点分析埕北断阶带沙河街组内运移通道组合的空间分布和非均匀输导特征,采用以逾渗理论为基础的油气运聚模拟方法,实现运移动力和通道的耦合,定量、半定量地分析研究区主要目的层段的油气运、聚过程。

1 方法简介

在先前的研究中,作者等^[8 11~13]曾通过物理

模拟实验总结出石油运移路径的 3 种模式,并提出在实际地质条件下,当油气在水中的浮力起主导作用时,运移的路径多表现为爬藤式的优势路径。进一步针对二次运移过程中浮力是主要运移动力的事实,作者研制了以浮力为主要动力的数学模型,并根据动力学相似原理扩展数学模型的研究范围和尺度,该模型在鄂尔多斯盆地三叠系延长统内油气运移研究中取得了良好的效果^[8]。

在上述模型的基础上,作者对模型中确定输导体输导能力的方法加以改进,增加了通过概率统计方法确定输导层网格节点和连线上突破压力的模块,加强了描述输导层非均匀性的能力。

2 地质背景及石油地质条件

埕北断阶带位于渤海湾盆地埕宁隆起向歧口凹陷过渡的斜坡部位(图 1),北起歧东构造带,南至埕宁隆起北缘,西到友谊油田,东至沙垒田凸起西端,勘探面积约 500 km²。研究区自下而上揭

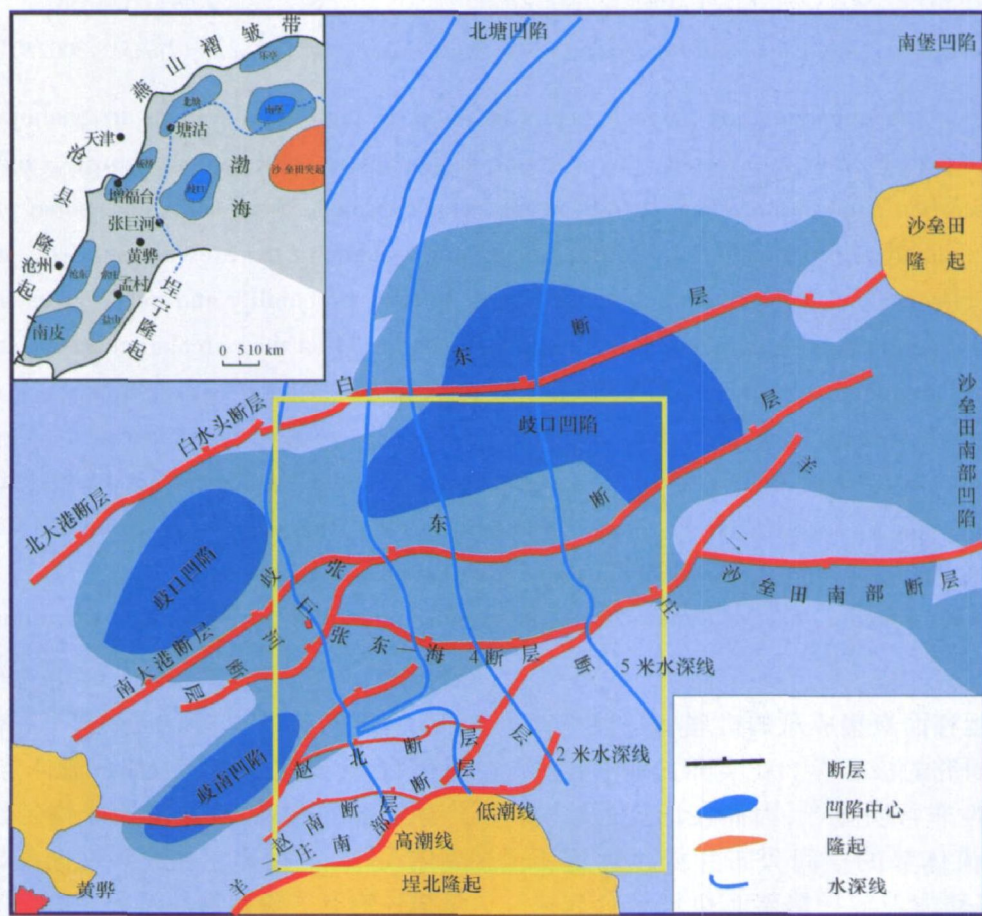


图 1 埕北断阶带位置及盆地特征示意图

Fig. 1 Location of Chenbei fault step zone and characteristics of the basin

注: 图中黄色方框为研究区

示了古生界、中生界、古近系沙河街组和东营组、新近系馆陶组和明化镇组及第四系平原组。研究区因南边埕宁隆起在新生代持续隆升,前新生界长期遭受剥蚀,古近系由北向南底超顶剥,新近系逐层超覆;古近系内部亦见局部不整合面。新生界沉积地层厚度整体向隆起方向减薄。

燕山和喜山构造运动期间,受北东向郯庐断裂系和北西向张家口—蓬莱断裂系的控制,在大港—冀东滩海区第三系中形成了北东向、近东西向、北西向 3 组断裂系^[14]。研究区北东向断裂系发育(图 1),其中羊二庄断层为一级断层,是埕宁隆起的边界断层,为隆起区和斜坡带的分界线;赵北、张东、张北歧东等断层侧列式展布,层层北掉,形成了研究区断阶状的盆地构造形态^[15]。这些断层延伸长度为 16~35 km,上下盘最大落差可超过 1 500 m,控制了古近系的沉积及构造圈闭发育,造成埕北断阶带基底则呈现东西向隆凹相间的特点^[16]。这些断层在新近纪仍然活动,均断穿新近系中下部地层,到第四纪断层的活动明显减弱,基本定型^[17~19]。

研究区沙河街组物源主要来自于埕宁隆起,而歧口凹陷则长期保持深湖至半深湖环境。凹陷范围内沉积了多套暗色泥岩、油页岩及白云岩地层;沙河街组三段和一段烃源岩厚度大,分布稳定,有机质类型较好、成熟较高,是研究区的主力供烃层段;沙河街组二段烃源岩分布局限,东营组烃源岩成熟度偏低,为次要烃源岩。由凹陷向南,沙河街组中粗碎屑沉积逐渐增加,主要发育东、西两个近岸水下扇相扇体,东部扇体储层物性较好,平均孔隙度达 20% 以上,西部扇体储层物性较差,平均孔隙度在 10% 左右。

前人研究^{④[20]}认为,埕北断阶带已发现的油气主要源于歧口凹陷,歧南凹陷也有一小部分贡献;断层的活动对研究区油气成藏和调整起着重要的作用。与沙河街烃源岩的成熟及排烃期相比,古近纪的断层活动发生在油气生成之前,对本区油气的运移意义不大;东营末期断层活动时沙三段已进入生烃阶段,但规模较小,断层活动对油气的输导作用有限;而明下段沉积末期的断层活动与油气的主要成藏期配置关系好,应该是本区最有效的油气运聚期^[17]。

3 输导体系

3.1 砂岩输导体

砂岩输导层能否作为良好的侧向运移通道,与砂岩的发育程度密切相关。在其他石油地质条件相类似的前提下,砂岩发育程度越高,连通性越好,作为油气运移输导层的概率越大^[21]。研究区沙河街组沉积厚度相对较大、砂泥岩频繁互层,为了解沙河街组砂岩的发育程度及空间分布,借助储层描述的思想对砂岩输导层的空间发育特征和连通性进行了刻画。

利用研究区同一地层内成岩序列对比的方法^[8],分析这些砂体之间的相互连通性。选择 400 余个铸体薄片和常规沉积岩薄片进行了系统的镜下观察,总结本区的成岩特征,分析成岩的过程;将井中获得的岩心物性测试结果和对应井段的测井曲线对比,建立砂岩物性与测井参数间的关系模型;在确定成岩序列及其与油气成藏时间关系的基础上,考虑成岩产物对砂岩孔渗物性的影响,确定砂岩输导层在主要成藏期的连通性特征。

图 2 为根据上述工作采用孔隙度值刻画的沙河街组三段砂岩输导层物性平面分布图。由图可见,沙河街组三段砂岩输导层的孔隙度分布总体上具有海域高于陆地、南部高于北部的特点。高孔隙度区主要对应于东部的水下扇砂体,孔隙度在 12% 以上,海 4 井—赵东 C 区孔隙度可达 20% 以上;在庄浅 13 井和庄 37—庄 51 井区发育两个较高的孔隙度带;受次生溶蚀作用的影响,张东地区孔隙度也较高;而西部扇体的扇根部分主要为砾岩,孔隙度极低,小于 6%。

3.2 不整合面输导体

地震资料显示,研究区沙河街组三段顶部存在一区域性的不整合面,上覆地层轻微地截切了沙河街组三段,在赵北地层以南,沙河街组三段直接与沙河街组一段接触。通过对测井曲线组合特征以及录井资料的分析,区内该不整合面呈现出明显的上砂下泥结构,即不整合面上的底砾(砂)岩层和不

高嘉瑞,廖前进,周立宏,等. 大港滩海区构造解析及有利方向选择. 2003

④ 苏俊青,袁淑琴,段润梅,等. 埕宁隆起北部断阶区预探目标研究. 2003

④ 刘吉余,王明明,吕静,等. 大港滩海油气运聚史研究与有利区带预测. 2001

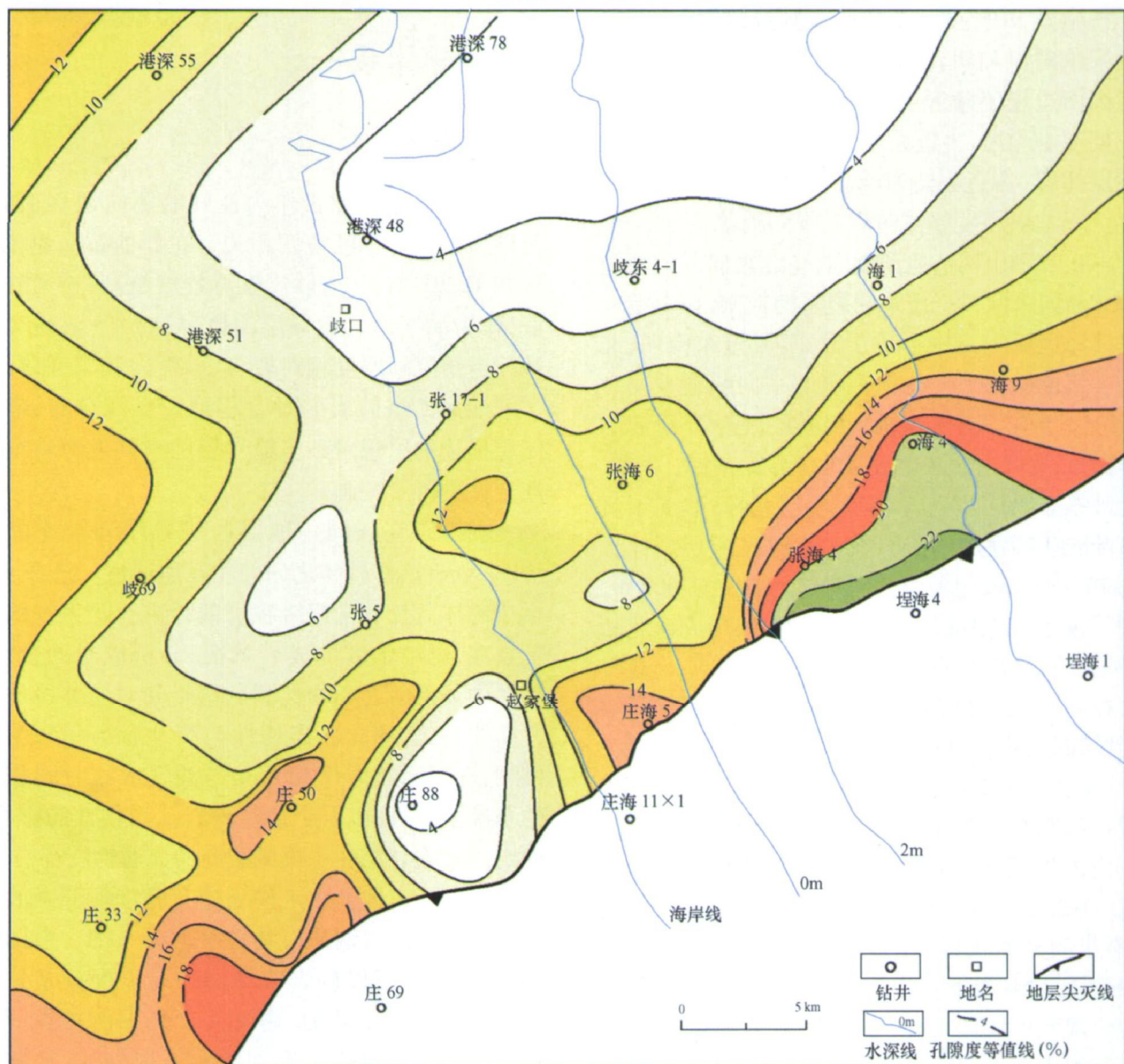


图 2 埕北断阶带沙河街组三段以孔隙度表示的砂岩输导层物性平面分布图

Fig. 2 Plane distributions of thickness (a), percentage (b), and porosity (c) of sandstone carriers in the 3rd member of Shahejie Formation in Chengbei fault step zone

整合面下的风化泥岩地层。经分析认为,不整合面上的底砾(砂)岩可以构成油气运移的通道,而不整合面下的风化泥岩往往构成封闭性较好的盖层。

因而,在研究中对该不整合面不作特殊处理,而把其上覆的底砾(砂)岩归为一般的砂岩储层或输导层来考虑。

3.3 断层输导体

断层在油气的运移过程中的启闭特征受到诸多因素的影响,主要的有断层性质、断面产状、地层两侧岩石性质、断层两侧地层对接情况、断层带泥岩涂抹程度等等。在同一构造应力场作用下,

同一断层面的不同部位的开启与否及开启程度千差万别。研究中,我们考虑歧东、张东-海 4 井、羊二庄、赵北、羊二庄南等主要控烃断层活动时在断层面形成渗流能力的岩石力学条件,尝试把各种因素归纳为地层流体压力、断面正应力、断层涂抹因子 3 个方面。较高的异常流体压力可以改变地层的力学强度,有利于断层的开启;而断面正应力和断层涂抹因子都趋向于减小断层面的开启程度即断面压应力越大,涂抹因子越大(泥质含量越高、地层两盘相对位移越大),断层输导的能力越差。由这 3 个参数可构成一个表征断层面的启闭能力的无量纲数-断层启闭系数^[22]。

为使得对断层启闭性的描述有意义, 在断层面上划分网格, 令网格范围足够小, 认为油气的运聚主要发生在明化镇下段沉积末期, 每个网格上下与断层接触的地层有油气显示者为开启, 反之为封闭^[22]。按此原则分析研究区主要控烃断层的启闭特征, 统计断层启闭系数值与全部网格启闭性的对应关系; 在一定的断层启闭系数区间内将开启的网格样本与总样本的比值称为断层输导概率, 并建立起启闭系数与断层输导概率间的关系^[22]。

上述模型经可靠性检验(张立宽等, 2007)后, 应用于研究区主要控烃断层的启闭性分析。系统选择基本与断层走向垂直、穿过断层的地震剖面群进行断层输导概率的描述工作。在地震剖面上测量各网格对应断面处的埋深、断距、断面倾角等参数, 结合邻近井分析获得的岩性剖面, 计算泥岩涂抹因子, 由此获得各基础参数在断层面的分布, 然后按照启闭系数与断层输导概率间的关系获得对应的断层输导概率的分布^[22]。断层开启概率的空间分布反映出断层面在断层活动时并非铁板一块, 而是在不同的位置呈现不同的开启状态, 表现出断层对于油气运聚过程的控制^[22]。这种断层输导概率分布除了与沉积条件的空间变化有关, 还可能与晚新近纪以来渤海湾盆地因北东向断裂右行扭动在南北-北北西向派生的张性应力有关^[10, 18]。

3.4 输导格架建立

埕北断阶带具有复杂的地质条件, 油气的运移通道不是单一类型的断层、连通砂体或者不整合, 而是由它们组合而成的复杂立体网络体系, 油气通常沿连通砂体(不整合)-断层-连通砂体(不整合)-断层的输导体系, 形成曲折复杂的运移路径, 并在本区断阶斜坡背景下发育的各种圈闭中聚集成藏, 从而导致研究区不同层位、不同类型油气藏相互叠置、连片富集。

在上述单因素输导体输导特征分析的基础上, 我们将 3 类输导体在时间和空间上进行交叉配置, 进而建立起主要运聚期的输导格架。由于目前我们只有二维的油气运移模型^[8], 因而依据沙河街组内含油气层层位的分布和断层输导体控油规律, 建立了明化镇末期-第四纪成藏时期的 4 个输导模型, 分别由不同层位的输导层通过断层和地层尖灭线连接而成。图 3 为其中一个模型。

图 3a 为沙河街组三段-二段-一段输导模型, 该模型自北向南不同层位砂岩输导层由几条控烃断层连接起来称为一个完整的输导格架: 在张东-海 4 井断层以北地区以沙河街组三段连通砂体为侧向运移输导体, 张东-海 4 井断层以北至赵北断层沙河街组二段尖灭处为沙河街组二段连通砂体输导层, 赵北-羊二庄南地区则以沙

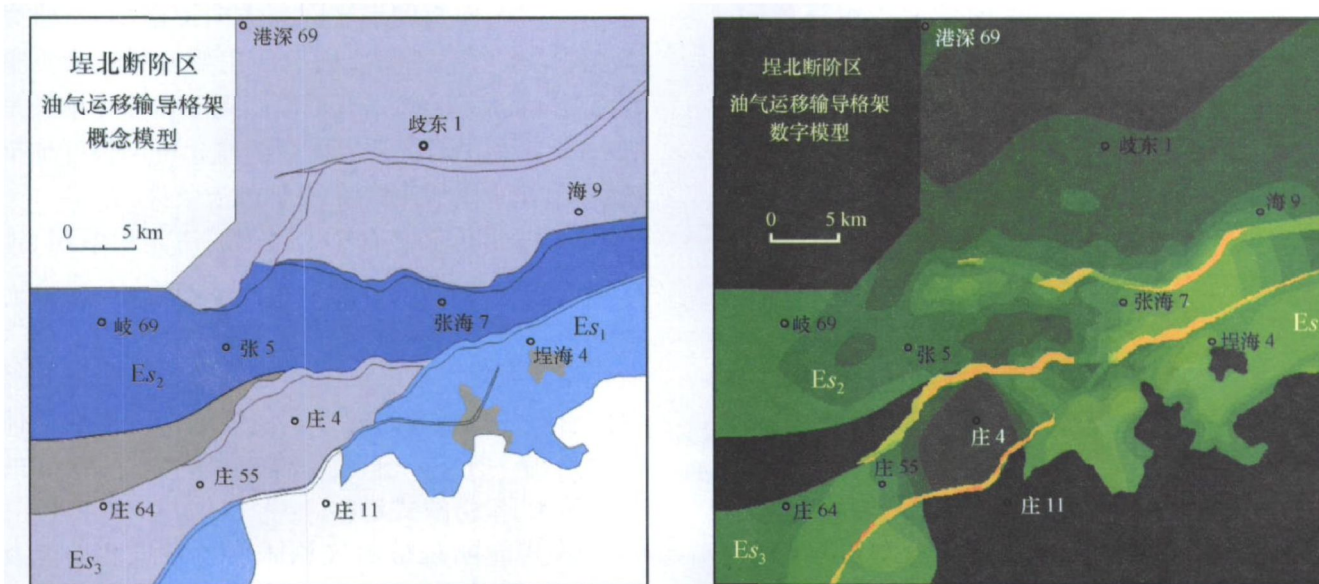


图 3 埕北断阶带复合输导格架平面分布特征

Fig. 3 Plane distribution of the compound carrier framework in Chenbei fault step zone

a. 沙三段-沙二段-沙一段输导格架模型; b. 模型中各种输导体对应的输导特征描述:

砂体输导层中绿色越浅, 输导性能越好, 断层中颜色越偏向橙红输导性能越好

河街组三段连通砂体为油气侧向运移输导体, 羊二庄—羊二庄南断层以南地区以沙河街组一段河道连通砂体为输导层。图 3b 为用不同颜色描述的各种输导体对应的输导特征: 砂体输导层的输导性能用绿色色阶来表示, 绿色由浅到深, 输导层的平均喉道半径由 0.25 mm 减小到 0.05 mm; 断层的输导性能与断层开启概率相对应^[22], 颜色越

位^[24]。如果这个平衡部位的圈闭体积足够大, 就有可能形成工业油气藏。当一旦该部位的流体动力学条件发生变化, 油气将继续运移^[25]。

在前述工作的基础上, 进行了运移动力与油气输导体系耦合条件下的油气运移过程模拟分析。模拟中有效源岩范围依据前人对歧口凹陷含油气系统研究的成果 (吴元燕等, 2000; 杨池银等, 2000) 和我们盆地模拟结果综合确定。

图 4 是对图 3b 中所示的沙河街组三段—二段—一段输导格架模型所进行的运移模拟结果。由图可见, 明化镇末期自歧口凹陷内排出的油气沿

由图 4 可见, 优势运移路径的形成受输导物性的控制, 但运移的油气遇到断层时, 若断层的输导概率高, 油气便进入断层, 在断层内将概率值高的空间充填满之后才继续向流体势小的方向、选择输导物性好的输导体继续运移。

综合对主要成藏时期全部模型油气运聚模拟结果的分析, 油气在流体动力和输导体系的控制

井—庄海 4×1 井区—庄海 11×1 井区、埕海 4 井及以西地区等。另外油气在张东、歧东等有效烃源岩范围内的岩性圈闭中也可聚集成藏。

5 认识和结论

1) 研究区沙河街组砂体发育, 连通性良好, 构成重要的油气侧向运移输导层, 但其物性特征在空间上不均匀, 向南朝埕宁隆起方向逐渐变好; 研究区沙河街组内部不整合面上的主要输导体为不整合面之上的底砾 (砂) 层, 可以归到砂岩输导体系类型

明显, 庄海 8 井区、埕海地区均被运移范围所覆盖。

此外, 歧南凹陷生成的油气可沿沙河街组二段连通砂体向南北两侧运移, 歧南凹陷南、北斜坡运聚过程明显。

南东运移聚集的趋势; 油气运聚成藏主要发生在明化镇组沉积末期。依据油气运聚动力学过程的模拟结果, 综合考虑各种控制油气成藏的主要因素, 在主要的油气运移路径和聚集方向上, 张东东

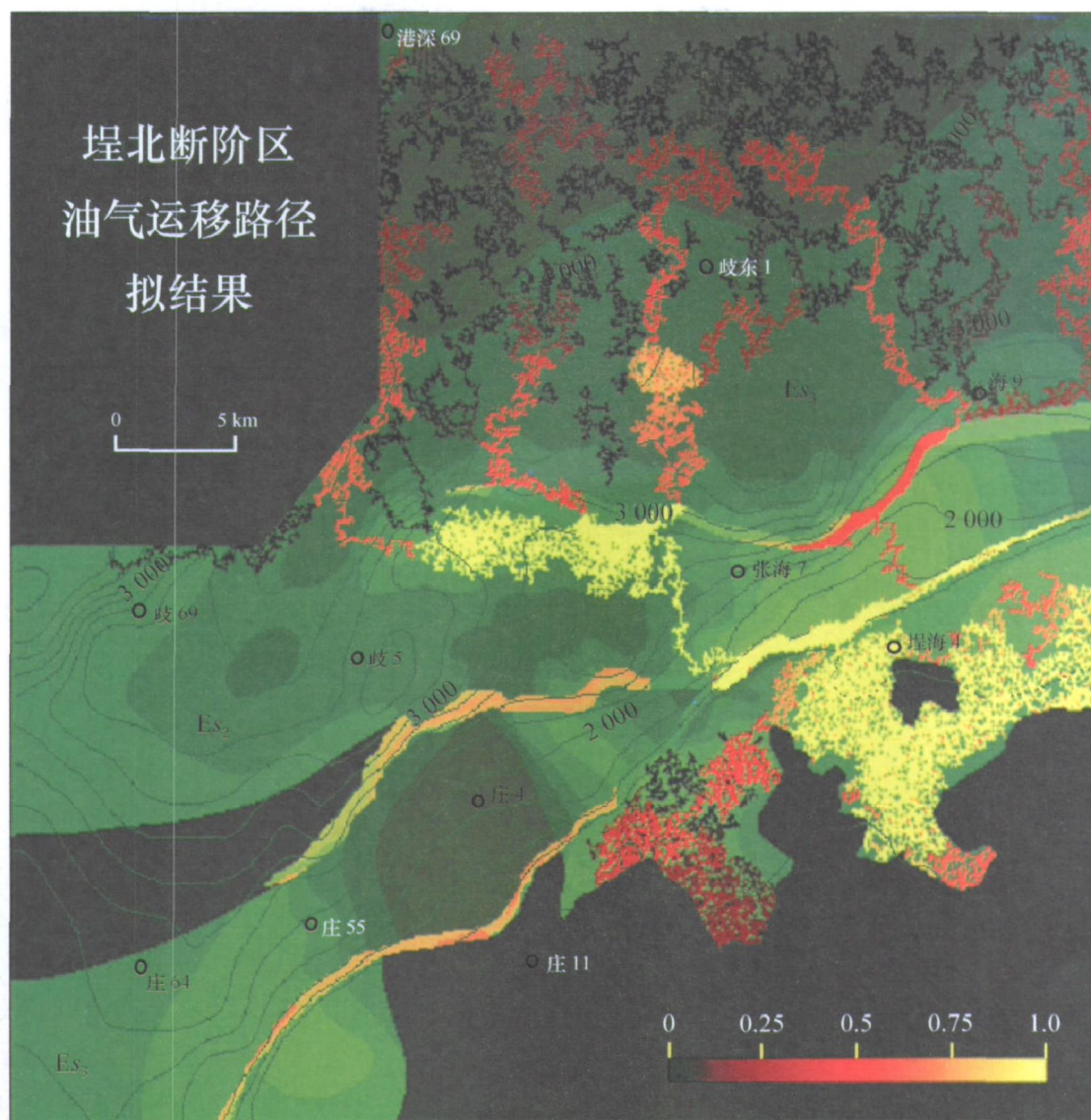


图 4 明化镇组沉积末期沙河街组三段 (E_{s3})—二段 (E_{s2})—一段 (E_{s1})
输导格架模型中油气运移的模拟结果

Fig. 4 Simulation of hydrocarbon migration in the carrier frameworks of E_{s3} , E_{s2} , and E_{s1} at the last
sedimentary stage of the Minghuazhen Formation

注: 图下侧色标为运移路径内油气运移通量的相对大小。

构造带、张东构造带、庄海 12—庄海 9 $\times 3$ 井地区等应该是有利的勘探目标区。

参 考 文 献

- 1 张厚福, 方朝亮, 张枝焕, 等. 石油地质学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999
- 2 Weber K J. How heterogeneity affects oil recovery [A]. In: Lake L W, Carroll Jr H B, eds. Reservoir characterization [C]. New York: Academic Press, 1986. 487~544
- 3 罗晓容. 油气运聚动力学研究进展及存在问题 [J]. 天然气地球科学, 2003, 14(5): 337~346
- 4 金之钧, 张发强. 油气运移研究现状及主要进展 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 263~271
- 5 England W A, Mackenzie A S, Mann D M, et al. The movement

and entrapment petroleum fluids in the subsurface [J]. Journal Geological Society, 1987, 144: 327~347

- 6 England W A, Muggoridge A H. Modelling density-driven mixing rates in petroleum reservoirs on geological timescales with application to the detection of barriers in the Forties Field (UKCS) [A]. Curbitt J M, England W A, eds. The Geochemistry of reservoirs [C]. Geological Society Special Publication, 1995, 86: 185~201
- 7 Bekele E, Person M, de Marsily G. Petroleum migration pathways and charge concentration: a three-dimensional model discussion [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(6): 1015~1019
- 8 罗晓容, 喻健, 张发强, 等. 油气运移路径数学模拟及其应用 [A]. 见: 2004 中国石油地质年会论文集 [C]. 北京: 石油工业出版社, 347~359

(下转第 215 页)

- 1966 50(10): 2 058– 2 067.
- 3 Cordell R J How oil migrates in elastic sediments[J], World oil (Part 3), 1977, 184(1): 97– 100
- 4 Berg R R. Capillary pressures in stratigraphic traps[J]. AAPG Bull 1975, 59(5): 939– 956
- 5 陈冬霞, 庞雄奇, 邱楠生, 等. 砂岩透镜体成藏机理 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2004 29(4): 483~ 488
- 6 邹才能, 贾承造, 赵文智, 等. 松辽盆地南部岩性—地层油气藏成藏动力和分布规律 [J]. 石油勘探与开发, 2005 32(4): 29(4): 379~ 383
- 11 Chapman R E. Effects of oil and gas accumulation on water movement[J]. AAPG Bull 1982, 66(3): 368– 372
- 12 万晓龙, 邱楠生, 张善文, 等. 东营凹陷砂岩透镜体油气藏成藏特征探讨 [J]. 中国海上油气, 2004 16(2): 89~ 92
- 13 林景晔, 门广田, 黄微. 砂岩透镜体岩性油气藏成藏机理与成藏模式探讨 [J]. 大庆石油地质与开发, 2004 23(2): 5~ 7
- 14 王克, 查明. 考虑烃源岩非均质性的排烃模型 [J]. 石油与天然气地质, 2005 26(4): 440~ 443, 449
- 9 李大伟. 新构造运动与渤海湾盆地上第三系油气成藏 [J]. 石油与天然气地质, 2004 25(2): 170~ 175
- 10 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 渤海中、新生代盆地构造活动与沉积作用的时空关系 [J]. 石油与天然气地质, 2000 21(2): 201~ 206
- 11 张发强, 苗盛, 王为民, 等. 石油二次运移优势路径形成过程实验及机理分析 [J]. 石油实验地质, 2003 25(1): 69~ 75
- 12 张发强, 苗盛, 王为民, 等. 石油二次运移优势路径形成过程实验及其影响因素 [J]. 地质科学, 2004 39(2): 159~ 167
- 13 侯平, 周波, 罗晓容. 石油二次运移路径的模式分析 [J]. 中国科学, 2004 34(S1): 162~ 168
- 14 赵贤正, 郑良合, 李廷辉, 等. 渤海湾滩海地区构造和沉积特征及有利勘探区带 [J]. 石油地球物理勘探, 2004 39(3): 348~ 353
- 15 袁淑琴, 丁新林, 苏俊青, 等. 大港油田滩海区埕北断阶带油气成藏条件研究 [J]. 江汉石油学院学报, 2004 26(S0): 8~ 9
- 16 李廷辉, 梁惠兰, 胡永军, 等. 渤海湾埕北断阶区油气二次运移模式及其对勘探的作用 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2004 19(1): 19~ 23
- 17 刘伟兴, 谭守强, 袁淑琴. 歧口凹陷中浅层油气富集因素及成藏模式 [J]. 中国海上油气 (地质), 2002 16(3): 40~ 45
- 18 王光奇, 漆家福, 岳云福. 歧口凹陷及周缘新生代构造的成因和演化歧口凹陷中浅层油气富集因素及成藏模式 [J]. 地质科学, 2003 38(2): 230~ 240
- 19 樊敬亮, 黄志全, 樊卫花. 歧口凹陷新生代构造演化与油气 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2004 34(4): 536~ 541
- 20 吴元燕, 付建林, 周建生, 等. 歧口凹陷含油气系统及其评价 [J]. 石油学报, 2000 21(6): 18~ 12
- 21 贾爱林, 肖敬修. 油藏评价阶段建立地质模型的技术与方法 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002 1~ 232
- 22 张立宽, 罗晓容, 廖前进, 等. 埕北断阶带断层封闭性研究及其应用 [J]. 石油与天然气地质, 2007 28(2): 181~ 190
- 23 Lerche I Thomsen R O. Hydrodynamics of oil and gas[M]. H ingham: Plenum Press 1994 1– 308
- 24 Dahlberg E C. Applied hydrodynamics in petroleum exploration [M]. New York Springer-Verlag 1982 1– 171
- 25 Tissot B P, Welte D H. Petroleum formation and occurrence[M]. Heidelberg Springer-Verlag 1984 1– 699

(编辑 高 岩)