

文章编号: 1006-6616 (2002) 03-0229-10

东海西湖凹陷应力场数值模拟及其应用研究

张明利¹, 谭成轩², 王震¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083;
2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要:石油和天然气是流体矿产,其最大特征具有运移性。构造应力与油气运移密切相关。引起地质环境、圈闭条件、应力状态改变的动力是构造应力场。盆地沉降、隆起、断裂构造等都是不同特点的应力状态作用下的地质痕迹。高应力区围限下的低应力区,一般是有利的储油储气构造位置。本文在东海西湖凹陷中央背斜带及其邻区构造地质、石油地质研究的基础上,对平湖组、花港组、龙井组目的层在中新世晚期的应力状态进行了数值模拟,进而分析了应力场与油气运聚的关系,研究结果与构造地质、石油地质分析结论相一致,对油气勘探开发具有指导意义。

关键词:应力场;数值模拟;油气运聚

中图分类号: P554 **文献标识码:** A

1 区域地质概况

东海西湖凹陷位于东海陆架盆地东北部,面积 $4.6 \times 10^4 \text{km}^2$,新生代最大沉积厚度超过 10000m,是目前东海油气勘探的重点地区。

西湖凹陷目前钻井揭示的沉积地层由老到新为古新统、始新统(宝石组、平湖组),渐新统(花港组),中新统(龙井组、玉泉组、柳浪组),上新统(三潭组)和第四系(东海群),前新生界基底主要为前寒武系变质岩及古生界变质岩系(表1)。

西湖凹陷自西向东可分为保 斜坡、三潭深凹、浙东中央背斜带、白堤深凹和天屏断裂带五个三级构造单元,这些构造单元呈 NNE 向展布,表现为西湖凹陷“东西分带”特征(图1)。同时该凹陷还具有“南北分段”的特点,形成了以“带”为主,以“段”为辅,带、段结合的构造格局。

西湖凹陷存在多个含油气系统,始新统泥岩和煤为本区的主力烃源岩,储集层为平湖

注:本文为中国石化科技部项目(合同编号:P00033)和国家重点基础研究规划(973)项目(编号:G1999043305)的成果。

收稿日期:2002-03-19

作者简介:张明利(1963-),男,1986年毕业于武汉地质学院,1998年于中国地质大学(北京)获博士学位,2000年在中国地质科学院完成博士后研究工作。现为中国石化石油勘探开发研究院高级工程师,主要从事盆地构造分析和石油地质研究。

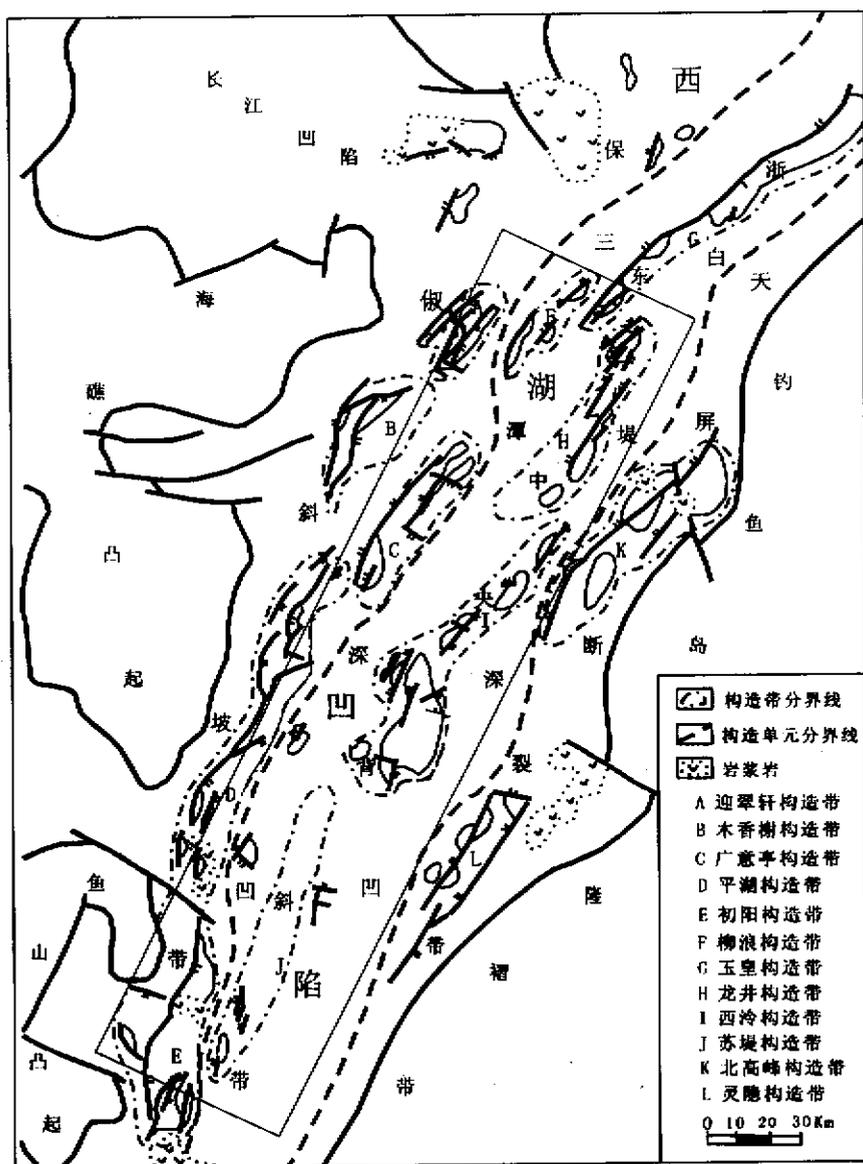


图 1 东海西湖凹陷构造区划图

Fig.1 structure section in Xihu Sag of East Sea Basin

组、花港组、龙井组砂岩，断层、裂缝是主要垂向运移通道，平湖组与花港组间的不整合面、砂岩输导层为重要横向运移通道，主要勘探层为始新统平湖组、渐新统花港组和中新统龙井组，油气藏的形成具有多期充注、多期成藏的特点，中新世晚期是油气主要成藏期。

西湖凹陷浙东中央背斜带是西湖凹陷近期勘探的重点，截止到 2001 年底，已先后完成探井 17 口，发现了 4 个油气田（残雪、天外天、春晓、断桥油气田），3 个含油气构造（龙二、龙四、玉泉含油气构造），上述现象揭示西湖凹陷中央背斜带具有很好的油气勘探远景。

表 1 西湖凹陷地层简表

Table 1 The simple stratigraphic table of Xihu Sag

统	组	代号	地震反射	接触关系	构造演化阶段
第四系	东海群	Qd	T_1	假整合	区域沉降阶段
上新统	三潭组	N_2s	T_2^0	不整合	
中新统	柳浪组	N_1l	T_2^2	整合	拗陷阶段
	玉泉组	N_1y	T_2^3	整合	
	龙井组	N_1j	T_2^4	假整合	
渐新统	花港组	E_3h	T_3^0	不整合	裂陷阶段
始新统	平湖组	E_2p	T_3^4	假整合	
	宝石组	E_2b	T_4^0	不整合	
古新统		E_1	T_6^0	不整合	裂陷阶段
前第三系		AnE			被动陆缘阶段

2 西湖凹陷应力场数值模拟

2.1 地质模型建立与网格划分

根据西湖凹陷中央背斜带二维、三维地震资料解释的成果，考虑研究区的地质层位、岩性分布、构造形态和断裂分布等因素，通过对平湖组、花港组、龙井组三个勘探层位构造图的简化分别建立了三个勘探层位的地质模型。模型选用三角形、四边形混合型有限单元；坐标系的选择是取 X 轴垂直于计算平面，Z、Y 为水平。平湖组勘探层有限元网格剖分后共有

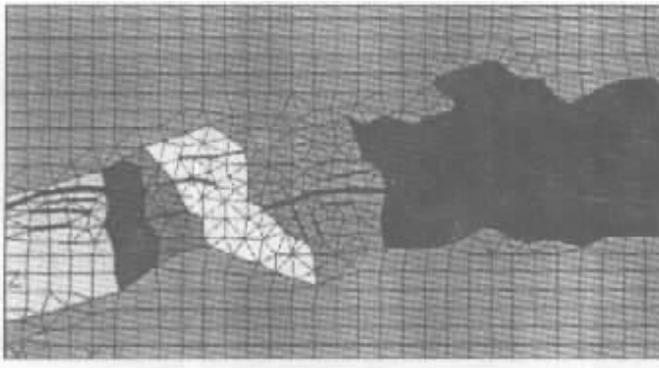


图 2-1 平湖组目的层有限元剖分及岩性块段分布图

Fig.2-1 The distribution of litho-section and finite element interpolation of the Pinghu Formation target bed

947 个节点, 1049 个单元; 花港组勘探层有限元网格剖分后共有 833 个节点, 905 个单元。龙井组勘探层有限元网格剖分后共有 817 个节点, 966 个单元 (图 2-1, 2-2, 2-3)^[1~4]。

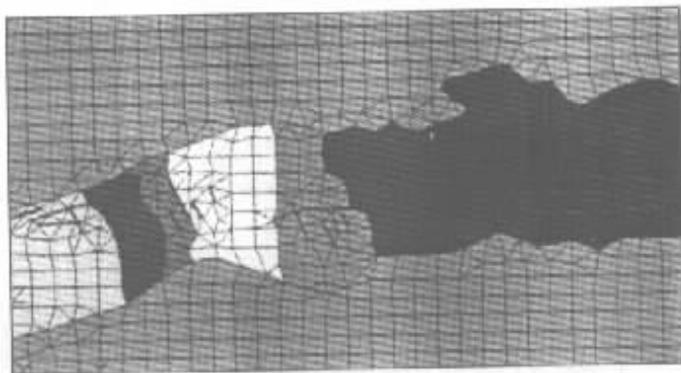


图 2-2 花港组目的层有限元剖分及岩性块段分布图

Fig.2-2 The distribution of litho-section and finite element interpolation of the Huagang formation target bed

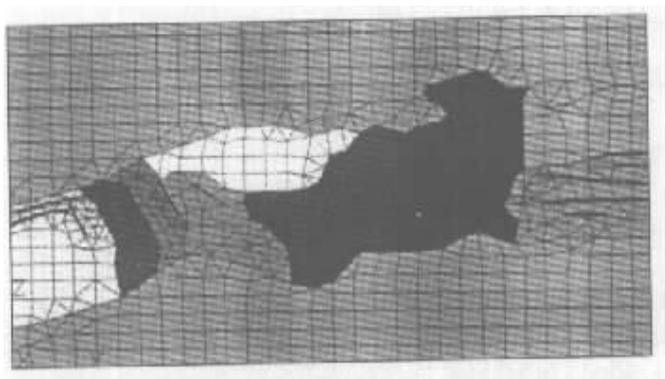


图 2-3 龙井组目的层有限元剖分及岩性块段分布图

Fig.2-3 The distribution of litho-section and finite element interpolation of the Longjing Formation target bed

2.2 岩性分布及岩石力学参数

由于地质模型的不均一性, 不同区块、不同岩相带砂泥岩百分含量不同, 其岩石力学参数的杨氏模量、泊松比及岩石密度不同, 因此以三个不同模型的构造特征、岩性分布特征为依据将模型划分为不同的块段 (平湖组划分了 7 个岩性块段; 花港组划分了 7 个岩性块段; 龙井组划分了 9 个岩性块段), 并根据各个块段代表性钻井在勘探层段的砂泥岩百分比含量来确定各块段的岩石力学参数 (表 2-1, 2-2, 2-3), 断层带赋予特殊的岩石力学参数。

2.3 边界力作用方式及约束条件

前已论及, 中新世晚期是西湖凹陷主要油气聚集期。为模拟中新世晚期不同层位的应力场特征, 据西湖凹陷局部构造展布特征和断裂构造分布特征综合分析, 东海西湖凹陷中新世晚期, 主要受到 NWW 向的挤压应力场的作用, 因此取最大主压应力方向为 N70°W。根据东海古近—新近系岩石声发射古应力测试结果, 古近—新近纪古应力值约为 50MPa, 这样的边界力作用方式基本代表了东海西湖凹陷区域构造变形情况。

表 2-1 西湖中央背斜带平湖组钻井岩性及物性参数数据表

Table 2-1 Rock types and their physical and mechanic parameters from drills in Pinghu Formation at the Central Anticline Belt of Xihu Sag

钻井	砂岩类/%	泥质岩类/%	煤/%	弹性模量/MPa	泊松比	密度/kg/m ³
龙井 1 井	35.7	63.3		18600	0.33	2.66
花港 1 井	39.9	58.8	0.6	18900	0.33	2.60
玉泉 1 井	22	77.6	1.2	17600	0.35	2.71
残雪 1 井	40	59.5	1.0	19100	0.33	2.58
断桥 1 井	55.3	42.9	1.8	20100	0.31	2.56
天外天 1 井	35.1	62.2	0.7	18300	0.33	2.67
春晓 1 井	33.2	63.3	3.5	18000	0.33	2.67

表 2-2 西湖中央背斜带花港组钻井岩性及物性参数数据表

Table 2-2 Rock types and their physical and mechanic parameters from drills in Huagang Formation at the Central Anticline Belt of Xihu Sag

钻井	砂岩类/%	泥质岩类/%	煤/%	弹性模量/MPa	泊松比	密度/kg/m ³
龙井 1 井	45.5	51.5		19100	0.31	2.57
花港 1 井	42.6	56.6	0.8	19200	0.33	2.59
玉泉 1 井	57.7	42		20500	0.31	2.52
残雪 1 井	52.6	43.1		19500	0.30	2.53
断桥 1 井	70.8	28.4		21500	0.29	2.50
天外天 1 井	67.4	32.5		21300	0.30	2.51
春晓 1 井	55.7	44.3		20400	0.32	2.53

表 2-3 西湖中央背斜带龙井组钻井岩性及物性参数数据表

Table 2-3 Rock types and their physical and mechanic parameters from drills in Longjing Formation at the Central Anticline Belt of Xihu Sag

钻井	砂岩类/%	泥质岩类/%	煤/%	弹性模量/MPa	泊松比	密度/kg/m ³
净寺 1 井	78.8	18		21700	0.28	2.45
龙井 1 井	58.2	41.7		20600	0.31	2.51
花港 1 井	65.5	30.4	0.7	20500	0.29	2.51
玉泉 1 井	44.2	55.7		19500	0.33	2.59
残雪 1 井	47.1	52.9		19700	0.32	2.57
秋月 1 井	41	58.9	0.6	19200	0.33	2.60
断桥 1 井	36.9	63.3		18900	0.34	2.61
天外天 1 井	46.7	52.6		19600	0.32	2.58
春晓 1 井	48.4	48	0.4	19200	0.31	2.55

边界约束条件的确定：模型的上下边界为水平可移动约束，模型的左右边界为垂向可移动约束，模型的左上角和右上角为固定点，其他点为 YZ 平面内自由移动。

2.4 应力场计算

运用 Super Sap 有限元程序对西湖凹陷中央背斜带及其邻区油气主要运移期三个勘探层

的地质模型进行线弹性计算。计算结果主要有：最大主应力 (σ_1) 分布图、最小主应力 (σ_2) 分布图、最大剪应力 (τ_{\max}) 分布图等。为了便于分析应力场与油气运移聚集关系，尚需对应应力场计算结果进行处理，分别计算各目的层的平均应力，并绘制到目的层构造地质图上进行油气运移综合分析 (图 3, 4, 5)。

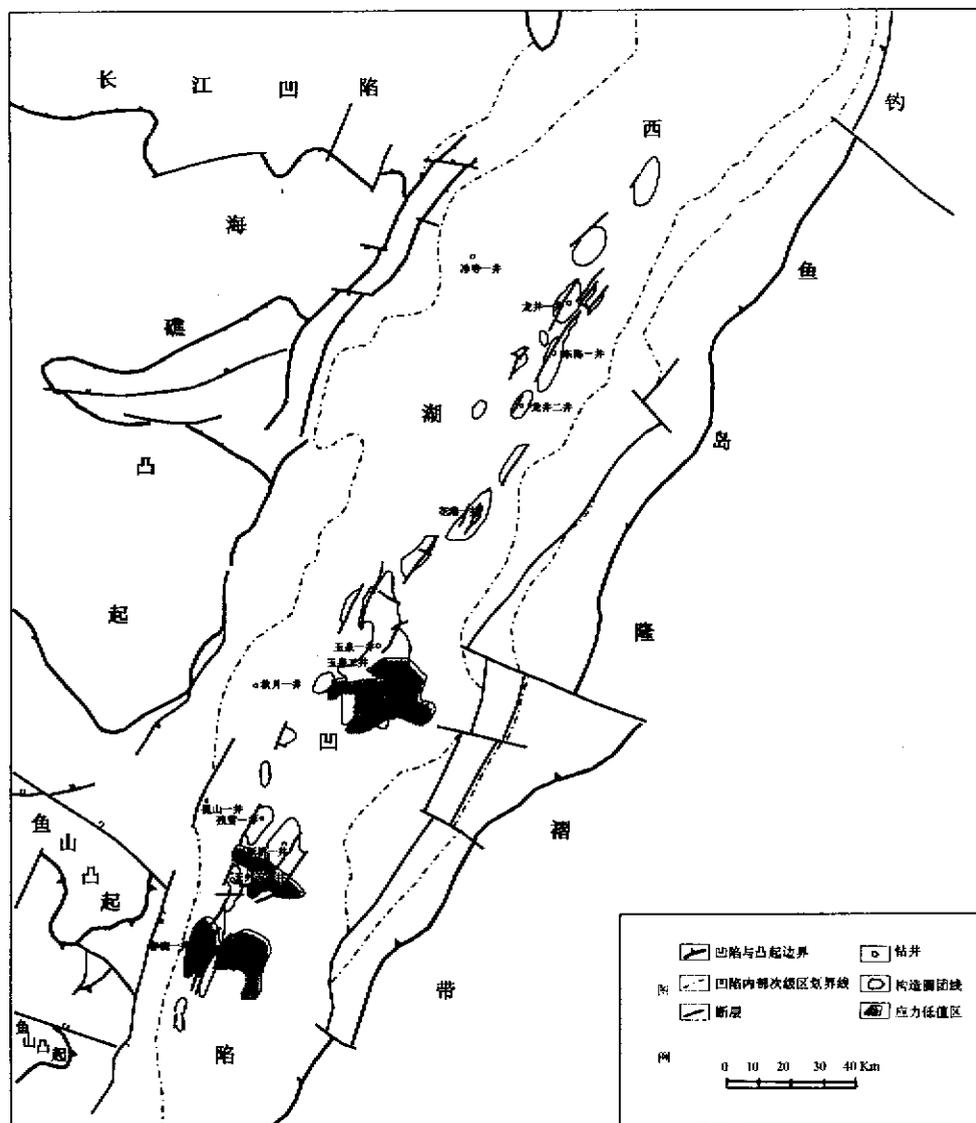


图 3 西湖凹陷中央背斜带及其邻区平湖组目的层在中新世晚期的应力低值区分布图

Fig.3 The distribution of the low stress areas in the layer of Pinghu Formation at the Central Anticline Belt and its adjacent region of Xihu Sag of East China Sea

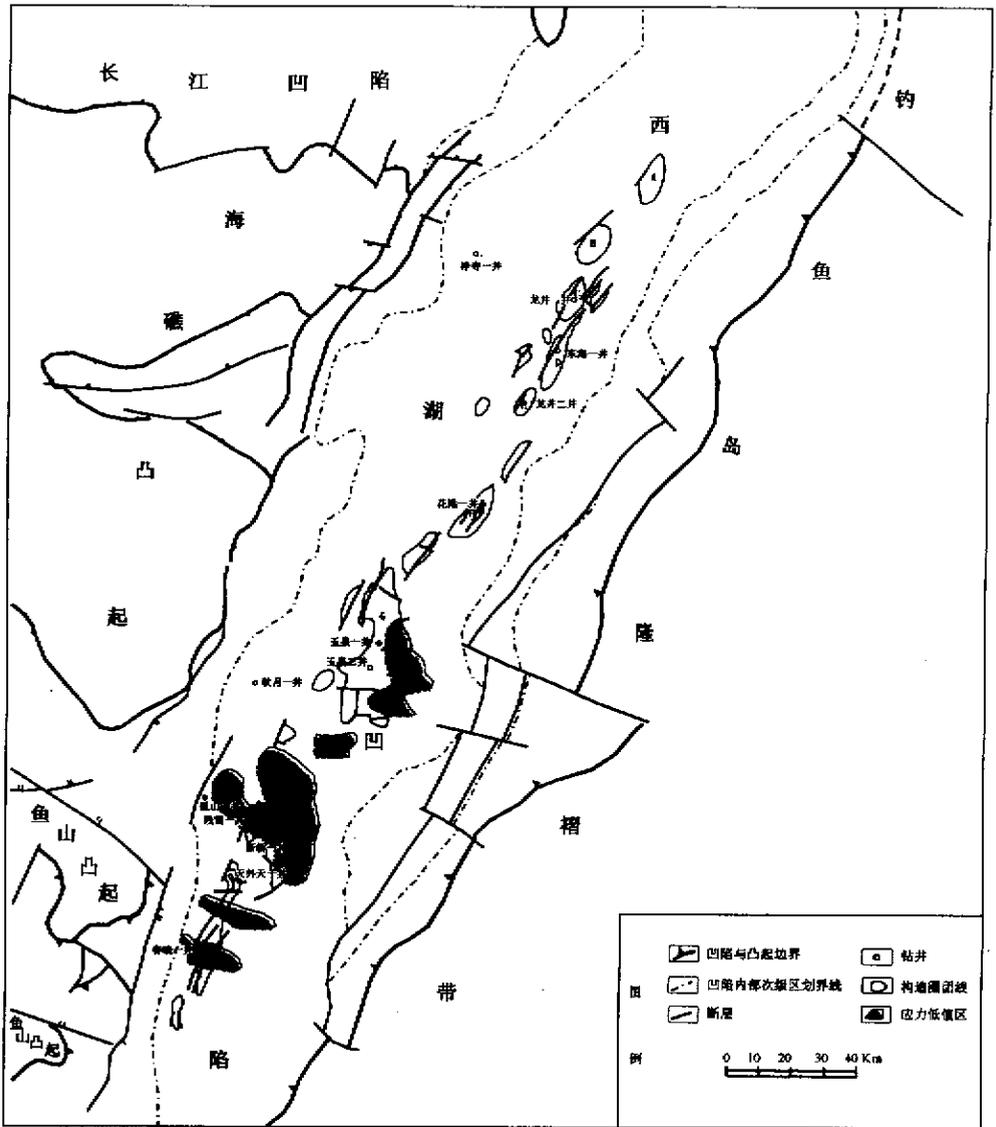


图 4 西湖凹陷中央背斜带及其邻区花港组目的层在中新世晚期的应力低值区分布图

Fig.4 The distribution of the low stress areas in the layer of Huagang Formation at the Central Anticline Belt and its adjacent region of Xihu Sag of East China Sea

3 应力场与油气运聚关系分析

石油和天然气是流体矿产，其最大的特征就是具有运移性。油气运移的主要动力包括浮力、水动力、异常压力、构造应力等，其中构造应力对油气运移具有重要作用。油气运移聚集与油气成藏期的地质环境、圈闭条件、应力状态有关，而成藏期的构造变动势必引起地质环境、圈闭条件、应力状态的改变，造成新的油气运移聚集。影响油气运移聚集诸因素是相

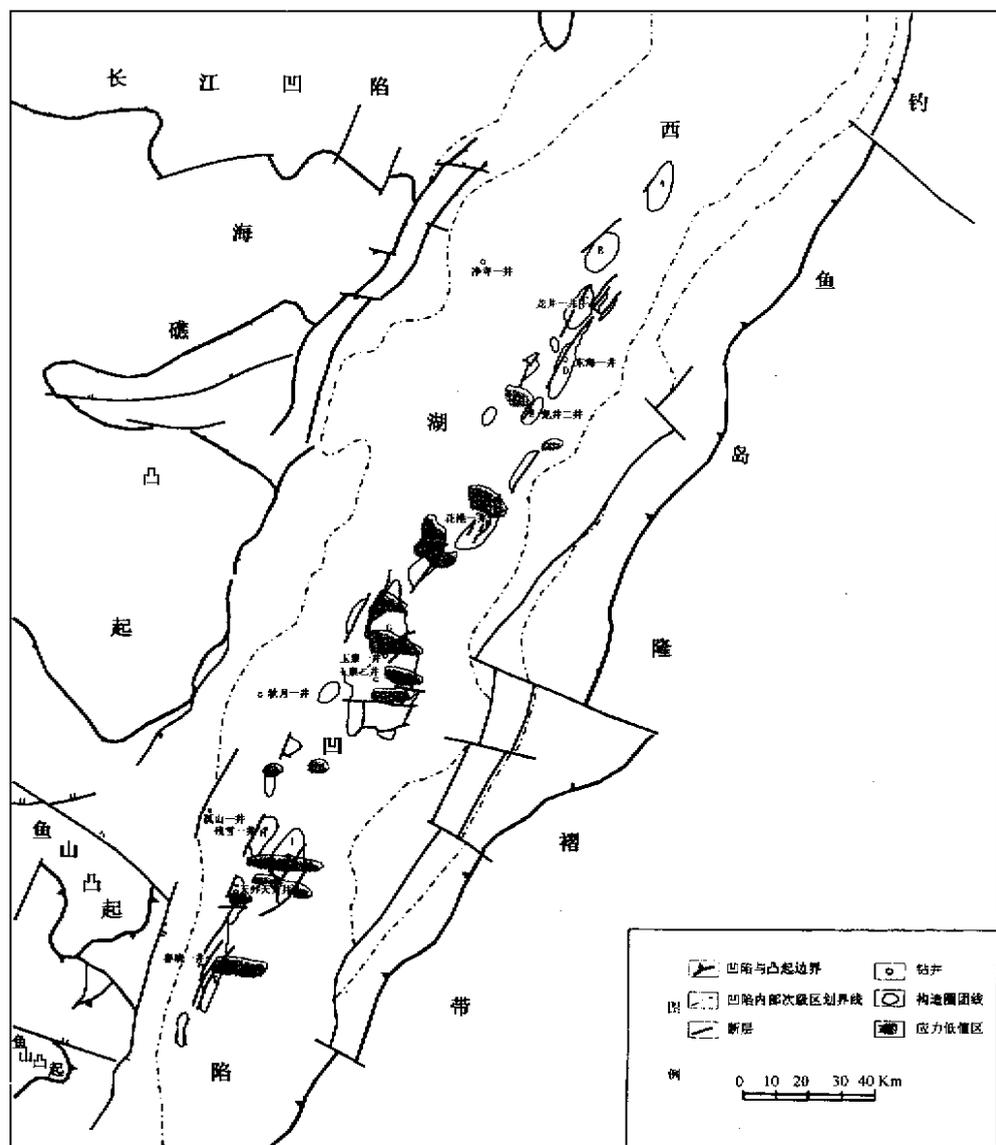


图 5 西湖凹陷中央背斜带及其邻区龙井组目的层在中新世晚期的应力低值区分布图

Fig.5 The distribution of the low stress areas in the layer of Longjing Formation at the Central Anticline Belt and its adjacent region of Xihu Sag of East China Sea

互联系、彼此作用的，而应力作用是其中一个活跃的、可控制全局的因素，因为引起地质环境、圈闭条件、应力状态改变的动力是构造应力场，所以应力场与油气运移聚集之间存在必然的联系。盆地沉陷、隆起、断裂构造等都是不同特点的应力状态作用下的地质痕迹。高应力区包围下的低应力区，一般是有利的储油储气构造位置，应力场的最大主压应力方向一般与油气的运移方向相一致。所以进行应力场分析，对油气运移聚集研究具有重要的指导意义^[5-13]。

中央背斜带平均应力值比两侧邻区相对较低表明中央背斜带是区域油气运移的主要指向

地区。

NNE 向断裂带内最大主压应力值相对较高,表明该组断裂具有双重作用:断裂静止期时断裂处于相对封闭状态,而断裂活动期时可能是油气运移通道;NWW 向断裂带内最大主压应力值最低表明断裂处于相对开启状态,说明切穿平湖组的 NWW 向断裂可能构成优势油气运移通道。

西湖凹陷中央背斜带平湖组在中新世晚期最大主压应力低值区分布比较集中(图 3),低值区的范围也相对比较大,低值区主要分布玉泉构造东南部、断桥、残雪构造南部、春晓构造及其东侧。

西湖凹陷中央背斜带花港组在中新世晚期最大主压应力低值区分布也比较集中(图 4),且低值区的范围也相对比较大,低值区主要分布玉泉构造东部和南部、断桥、残雪构造及其北部、春晓构造中部和北部。

西湖凹陷中央背斜带龙井组在中新世晚期最大主压应力低值区分布比较零散(图 5),低值区的范围也比较小,低值区主要分布龙四构造西北部、楼外楼构造东北部、花港构造北部、古珍珠构造北部、玉泉构造中部、北和东南部、残北构造及其东侧、断桥构造中南部、天外天构造南侧、春晓构造中部等。

上述地区均为高应力区包围下的低应力区,从应力场的角度分析应分别是平湖组、花港组、龙井组勘探层有利的储油储气构造区。上述研究是从量化的角度确定有利构造区范围,这一结论与构造地质、石油地质等综合分析结果一致,对油气勘探开发具有重要意义。

4 结论与研究意义

(1) 应力场是含油气盆地油气运移聚集的主要动力因素之一,进行应力场研究对油气运聚分析具有重要指导意义。

(2) 由于不同勘探目的层位构造地质、岩性、结构、石油地质特征等方面的差异,应力场分布也不同,有利的储油储气构造区也存在明显的差异,故需要对不同目的层分别进行应力场研究,方能对油气运聚作出正确评价。

(3) 应力场与油气运聚分析结果与已有研究成果相吻合,并从量化的角度确定了油气勘探开发的有利构造区,进一步说明了应力场研究的必要性和可行性。

参 考 文 献

- [1] 万天丰. 构造应力场研究的新进展[J]. 地学前缘, 1995, 2(2): 226~235.
- [2] 张明利, 万天丰. 含油气盆地构造应力场研究新进展[J]. 地球科学进展, 1998, (1): 8~17.
- [3] 李志明, 张金珠. 地应力测量技术及其在油气勘探开发中的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [4] 谭成轩, 王连捷, 孙宝珊, 等. 含油气盆地三维应力场数值模拟方法[J]. 地质力学学报, 1997, 3(1): 71~80.
- [5] 王连捷, 张利荣, 袁嘉音, 等. 地应力与油气运移[J]. 地质力学学报, 1996, 2(2): 1~10.
- [6] Tan Chengxuan, Jin Zhijun, Zhang Mingli, Tang Liangjie, et al. An approach to present-day three-dimensional(3D) stress field application in hydrocarbon migration and accumulation from the Zhangqiang depression, Liaohe field, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18(9): 983~994.
- [7] 谭成轩. 三维应力场数值模拟在油气运聚分析中的应用[J]. 新疆石油地质, 1999, 20(6): 455~458.
- [8] 郝芳, 邹华耀, 姜建群. 油气成藏动力学及其研究进展[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 11~21.

- [9] 孙雄, 马宗晋, 等. 初论“构造流体动力学”[J]. 地学前缘, 1996, 3 (3 - 4): 138 ~ 144.
- [10] 李思田. 沉积盆地地动力学分析 [J]. 地学前缘, 1995, 2 (3 - 4): 53 ~ 58.
- [11] 何登发, 李德生. 沉积盆地地动力学研究新进展 [J]. 地学前缘, 1995, 2 (3 - 4): 53 ~ 58.
- [12] 李思田. 沉积盆地地动力学与能源资源 - 世纪之交的回顾与展望 [J]. 地学前缘, 2000, 7 (3): 1 ~ 9.
- [13] 李明诚. 石油与天然气运移 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.

A STUDY ON TECTONIC STRESS FIELD NUMERICAL SIMULATION AND ITS APPLICATION IN XIHU SAG OF EAST CHINA SEA BASIN

ZHANG Ming-li¹, TAN Cheng-xuan², WANG Zhen¹

- (1. *Exploration & production research institute, China Petroleum & Chemical Coporation, Beijing, 100083;*
2. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081, China*)

Abstract : Oil and gas is fluid ore with major feature of migration. Tectonic activity is closely related with hydrocarbon migration. Stress field is the power of structural deformation and movement, which causes the change of geologic environment, trap conditions and stress state. Basin subsidence, uplift, fracture are geologic trace formed by stress state with different characters. In general, the low stress area surrounded by high stress one is a favor reservoir for oil and gas migration and accumulation. The direction of maximum principal compressive stress is accordance with the direction of oil-gas migration.

Key words : stress field ; numerical simulation ; hydrocarbon migration and accumulation