

文章编号: 0253-3782(2004)04-0396-08

渤海盆地现代构造应力场与强震活动^{*}

陈国光 徐 杰 马宗晋
邓起东 张 进 赵俊猛

(中国北京 100029 中国地震局地质研究所)

摘要 渤海位于北华北新生代裂陷盆地的东部, 是一个晚第四纪形成的内陆海盆。渤海盆地活动断裂发育, 地震活动强烈, 交会于渤海中部的 NE 向营口—潍坊断裂带北段、庙西北—黄河口—临邑断裂带及 NW 向北京—蓬莱断裂带是主要的活动构造带, 将海区分成 4 个次级新构造区, 成为现代应力场作用的构造基础。综合研究 38 个震源机制解和 75 个井区应力场等资料, 以及构造应力场二维数值模拟计算结果表明, 渤海及其邻区现代构造应力场的压应力方向为 NE60°~90°, 张应力为 SN—NW30°; 以水平和近水平应力作用为主; 不同构造区主应力方向存在一定的差异。现今渤海地区地壳发育以 NNE—NE 和 NW—WNW 走向的共轭剪切破裂为特征, 是控制地震活动的主要构造。

关键词 现代应力场 地震活动 渤海盆地 北华北裂陷盆地

中图分类号: P315.72⁺⁷ **文献标识码:** A

引言

现代渤海是一个盘踞于我国华北地区东北部的半封闭的陆表海, 面积约 $7.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在地质构造上, 它位于北华北新生代裂陷盆地, 但形成历史不长。据已有研究(王强, 李凤林, 1983; 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室, 1985; 黄福林等, 1993), 第四纪初地处东海陆架区的福建—岭南隆起逐渐沉入海底, 使海水得以“倒灌式”的内侵而出现了古渤海, 中更新世末海水退出成为“渤海湖”(泻湖); 晚更新世又发生较大海侵, 全新世海水淹没整个渤海地区, 故本研究将晚第四纪形成的海盆称为渤海盆地。

渤海盆地是北华北盆地中油气资源最为丰富的地区, 已探明有近 10 个大、中型油田(邓远华, 2002)。渤海周边人口稠密, 大、中和小型城市密布, 是我国北方工业和高新技术高度发展的地带。然而, 渤海盆地及其邻近地区活动断裂相当发育, 现代构造活动强烈, 是我国大陆东部强震的多发区(邓起东等, 2001), 仅渤海盆地就记有 7 级以上大震 3 次。其中, 以 1888 年 7½ 级地震为最大。所以, 研究本区的现代构造应力场及其与地震活动的关系, 对探讨地震活动特征、防震减灾及保障区域经济发展等都具有重要意义。一些研究者^①(丁健民, 梁国平, 1985; 丁健民等, 1986; 董瑞树, 蒋秀琴, 1986; 周翠英等, 1990)根据震源机制解或井区应力场等资料的分析及二维数值模拟计算等, 对本区的现代构造应力场已作过不同程度的研究。本文拟在地质构造分析的基础上, 综合多种资料对渤海盆地的

* 国家自然科学重点基金项目(40238059)和国家自然科学基金项目(40172101)共同资助。

① 中国地震局地质研究所. 1999. 渤海晚第三纪以来构造应力场与断裂活动关系及其在油气勘探开发中的应用.
2003-12-09 收到初稿, 2004-01-29 收到修改稿, 2004-03-16 决定采用.

现代构造应力场及其与地震活动的关系作一较深入的研究。

1 渤海盆地的构造背景和新构造分区

渤海盆地所在的北华北盆地是一个大型的新生代裂陷盆地。其构造演化经历了早第三纪断陷或裂陷(rifting)及晚第三纪以来坳陷或后裂陷(post-rifting)两个阶段。

早第三纪时, 盆地区的地壳在 NW-SE 向拉张作用下, 沿一些前新生代的区域性 NNE-ENE 走向的逆和逆平移断裂(带)(如营口-潍坊断裂带北段、沧东断裂、陵县-阳信断裂和太行山山前断裂带等拉张滑脱), 形成一系列断陷盆地(凹陷)(徐杰等, 2002)。它们成带(群)分布, 相应构成如辽东湾、渤中、黄骅、济阳、冀中等早第三纪的坳陷, 其间隔以如埕宁、沧县等隆起, 总体组成一个呈中部膨大的“N”字形 NE 向展布的裂陷盆地。NW 向北京-蓬莱断裂带和隆尧-高唐断裂将北华北盆地分成 3 段, 中段是其主体部分。晚第三纪以来北华北盆地整体沉降。在此背景上, NE 向营口-潍坊断裂带北段和 NW 向北京-蓬莱断裂带仍明显活动(徐杰等, 1998, 1999), 而 NNE 向沧东断裂和太行山山前断裂带则逐渐失去活动性(高战武等, 2000; Xu *et al.*, 2001a); 与此同时, 还新产生了 NE 向唐山-河间-磁县和庙西北-黄河口-临邑等断裂带(徐杰等, 1996; Xu *et al.*, 2001b, c)。NE 和 NW 走向的断裂带分别具右旋和左旋走滑性质, 它们一起构成共轭活动构造带(Xu *et al.*, 2001b; 徐杰等, 2002; 陈国光等, 2003)。

渤海盆地位于北华北盆地中段的东部和北段的南部, 包括渤中和辽东湾坳陷, 以及黄骅、济阳坳陷和埕宁隆起的一部分。晚第三纪以来的新构造时期, 本区活动断裂发育, 存在 NNE, NE, NW 和近 EW 向等几组活动断裂。其中, 营口-潍坊断裂带北段、北京-蓬莱断裂带和庙西北-黄河口-临邑断裂带是主要的活动构造带。它们将渤海及邻区分成渤海东南(I)、渤海西南(II)、渤海西北(III)和渤海东北(IV)4 个次一级的新构造区(图 1)。渤海东南包括渤海东、黄河口、庙西和莱州湾等早第三纪的凹陷; 渤西南有歧口、沙南、埕北等凹陷及渤中凹陷的一部分; 渤西北有辽西和秦南凹陷; 渤东北有辽中和辽东凹陷。此新构造分区与早第三纪的构造格局明显不同, 它是现代构造应力场作用的构造基础。

2 现代构造应力场的基本特征

众所周知, 用地震震源机制解研究现代构造应力场是一种有效的方法。本研究收集了前人(魏光兴等, 1982, 1988; 董瑞树, 蒋秀琴, 1986; 环文林等, 1989; 周翠英等, 1990)所作的渤海及邻区自 1969 年渤海 7.4 级地震以来 38 次 2 级以上地震的震源机制解和 4 个单台平均震源机制解。但这些地震大多数位于渤海周围, 而海域很少且分布也不均匀(图 1)。

20 世纪 70 年代以来一些研究者发现, 石油钻井井孔受现今地应力作用, 井壁应力集中导致剪切破裂(Bell, Gough, 1979)形成井壁崩落椭圆, 其长轴与地应力的压应力轴垂直。因此, 由地层倾角测井方法测到的四壁井径曲线和方位角曲线而求得的崩落椭圆井孔长轴的方位, 可确定钻井区现代构造应力场的方向。故收集了渤海及邻区以井壁崩落^{①②③}

① 中国地震局地质研究所. 1999. 渤海晚第三纪以来构造应力场与断裂活动关系及其在油气勘探开发中的应用.

② 中国地震局地质研究所、中国石油天然气总公司大港石油管理局. 1991. 大港油田现代构造应力场及其与井网布置的关系.

③ 中国地震局地质研究所. 2003. 辽河大民屯凹陷潜山裂缝发育特征及其与油气成藏关系研究.

和应力解除法(丁健民等, 1985)取得的 75 个井区应力场的资料(图 1)。这对渤海海域震源机制解资料不足是一个很好地补充。

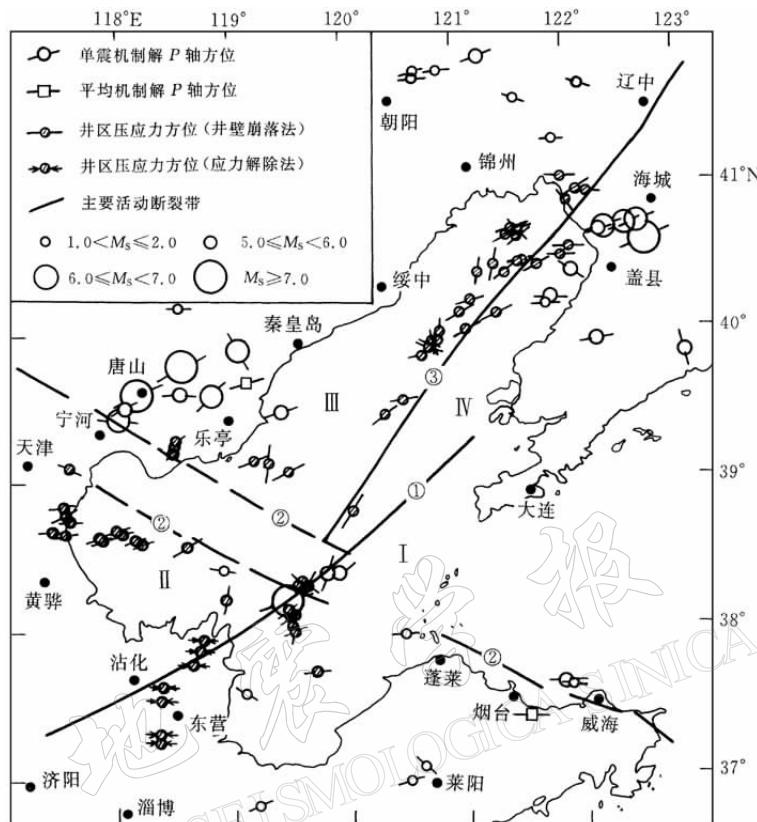


图 1. 渤海盆地及邻区新构造分区、震源机制解和井区压应力轴分布图
I 渤东南; II 渤西南; III 渤西北; IV 渤东北; ① 煤西北—黄河口—临邑断裂带;
② 北京—蓬莱断裂带大致边界; ③ 莒口—潍坊断裂带北段西界

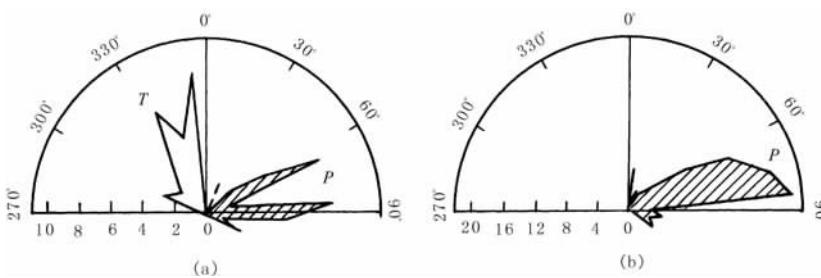


图 2. 渤海盆地及邻区现代构造应力场压应力轴分布方位玫瑰图
(a) 单震震源机制解压应力(P)和张应力(T)分布方位; (b) 井壁崩落和
应力解除法取得的井区压应力轴分布方位

2.1 主应力方向

对 38 个震源机制解主应力轴的统计分析(图 2a)表明, 渤海及邻区现代构造应力场压应力轴的优势方位为 NE60°—EW 向, 可分 NE60°~70° 和 NE80°—EW 向两组; 张应力轴

的优势方位是 SN—NW30°, 同样分为 NW20°~30°和 NW10°左右两组。这说明本区应力方向分布比较复杂。单台平均震源机制解数量少, 分布也不广, 其压应力和张应力轴的方位分别为 NE70°~80°和 NW10°~20°, 与上述结果相符。

根据 75 个井区应力资料统计结果(图 2b), 压应力轴优势方位亦为 NE60°—EW 向, 主要是 NE80°左右, 与震源机制解的结果基本一致。综上所述, 渤海盆地及邻区现代构造应力场的压应力轴为 NE60°—EW 向, 主要为 NE80°左右; 张应力为 NW10°~30°。这与华北地区现代构造应力场的方向(魏光兴等, 1982; 许忠淮等, 1983)大体相符。

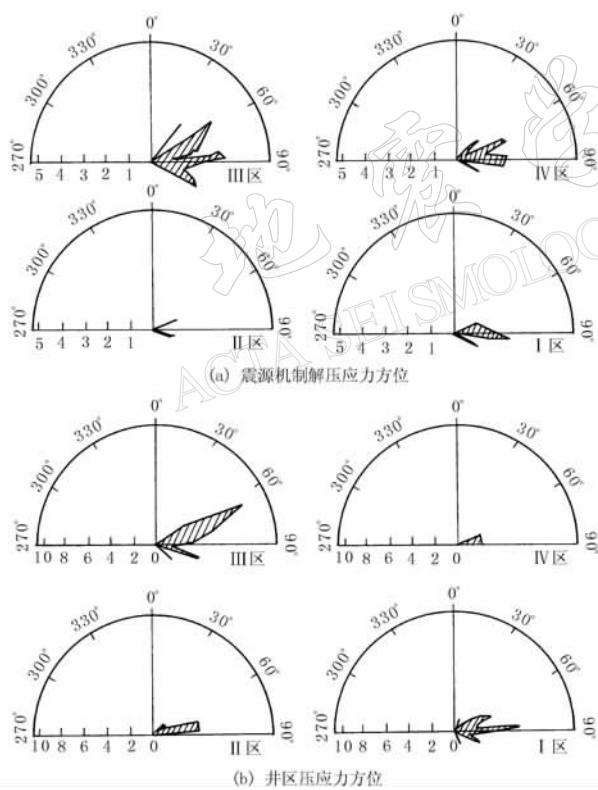


图 4 渤海盆地及其邻区次级新构造区压应力轴方位分布玫瑰图

由图 4 可见, 渤东南区压应力方向为 NE80°—SE80°, 渤西南为 NE70°~80°, 渤西北为 NE60°~80°, 渤东北为 NE80°—SE80°。其中, 渤东南和渤东北差异不大。

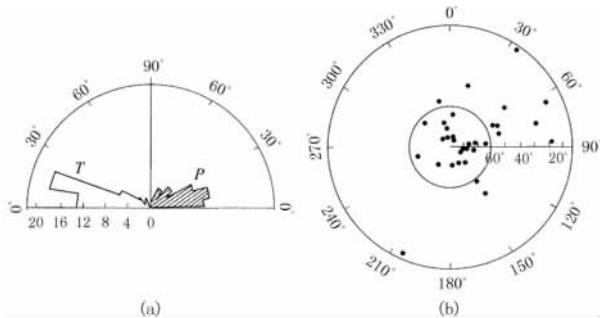


图 3 渤海盆地及邻区震源机制解主应力仰(倾)角分布图
(a) 压应力(P)和张应力(T)轴仰角分布;
(b) 中间应力(N)轴分布

2.2 应力作用方式

分别统计分析震源机制解压应力和张应力轴出地点仰角(α)大小(图 3a)表明, 其仰角绝大多数在 0° ~ 30° 之间, 属于水平($\alpha \leqslant 10^{\circ}$)和近水平($10^{\circ} < \alpha \leqslant 30^{\circ}$)。所以, 渤海盆地及邻区现代构造应力场以水平和近水平应力作用为主, 仅局部地方有斜向力的作用。

2.3 应力方向的分区性

前述及, 渤海及其邻区压应力和张应力方向的分布比较复杂。这可能与本区发育多组活动断裂, 尤其是存在 3 条不同走向的主要活动断裂带关系密切。这几条断裂带把本区分成 4 个次级新构造区。现根据震源机制解和井区应力场资料, 以及现代应力场数值模拟计算的结果, 分别分析各区的压应力方向。

2.3.1 震源机制解和井区应力资料分析

2.3.2 现代构造应力场数值模拟计算结果

对于不连续的非均匀介质组成的复杂地质体,一般可运用有限单元方法进行数值模拟计算研究构造应力场的特征。中国地震局地质研究所^①曾以此方法对渤海地区的现代构造应力场作过模拟分析。

工作中,以渤海地区的盆地基底断裂分布图作为地质模型,并据此建立相应的有限元模型。模型材料的主要力学参数见表1。其边界条件是根据北华北盆地现代构造应力场二维有限元数值模拟计算结果,西部边界加力方向是NE60°,东部边界加力方向为EW向;西部边界加力的强度是东部边界的2倍。图5是模拟计算得到的应力方向的分布。

由图5可见,渤海地区现代应力场压应力方向的分布比较复杂,不同的构造区有着明显差异。渤东南以近EW向为主,东南边缘转为ESE向;渤西南为ENE向;渤西北压应力总体为NE向,但其西南和东北两端转为ENE向;渤东北以近EW—ESE向为主。此结果与上面由震源机制解和井区应力资料统计分析各区的应力方向基本相符。由图5还可看出,不同构造区的交接地带应力方向变化明显,说明营口—潍坊断裂带北段、北京—蓬莱

表1 二维有限单元材料参数

单元类别	弹性模量/MPa	泊松比
活动断裂	10 000	0.30
一般断裂	15 000	0.28
非断裂单元 (基底岩石)	48 000	0.24

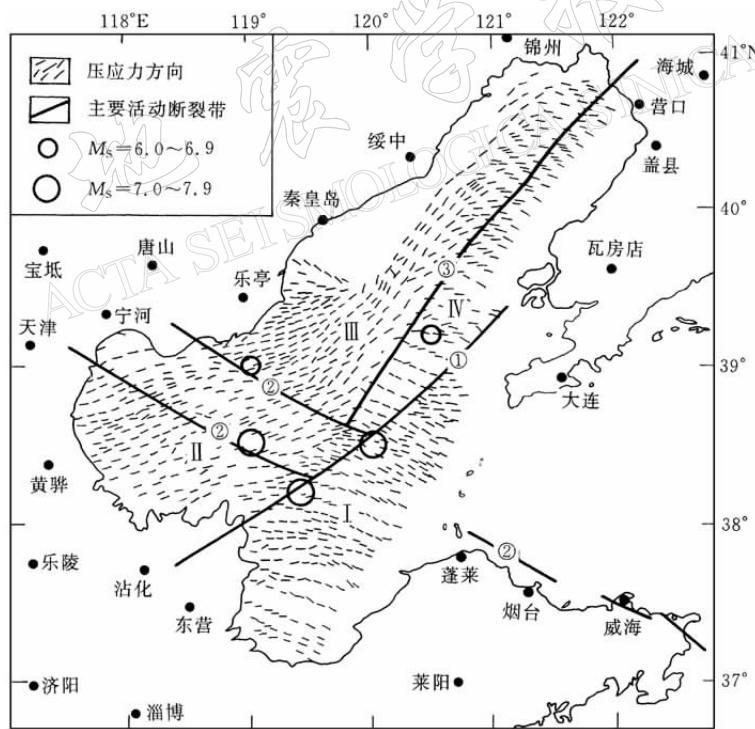


图5 数值模拟渤海地区现代构造应力场压应力方向分布图^①

I. 渤东南; II. 渤西南; III. 渤西北; IV. 渤东北。①为庙西北—黄河口—临邑断裂带;
②为北京—蓬莱断裂大致边界; ③为营口—潍坊断裂带北段西界

① 中国地震局地质研究所. 1999. 渤海晚第三纪以来构造应力场与断裂活动关系及其在油气勘探开发中的应用.

和庙西北—黄河口—临邑断裂带对渤海盆地现代构造应力的分布有着明显的影响。

3 现代地壳破裂特征

渤海盆地及邻区的地壳厚度为 28~32 km(卢造勋等, 1999), 而地震震源深度为 6~30 km, 主要集中在 10~20 km 的深度范围, 故震源破裂属地壳破裂范畴。

震源机制解的节面代表了震源破裂, 亦即地壳破裂面的分布。两组节面的走向主要为 NE20°~50° 和 NW50°~70°(图 6a), 它们的倾角大多数是在 60°~90° 之间, 其中以 70°~80° 为主(图 6b), 基本属于高角度。

震源机制解两组节面的交线即为中间应力(N)轴。它在吴尔夫网上投影的位置可直接反映震源断层的产状和两盘的相对错动。通常据断层两盘相对错动的方式可分倾滑、斜滑和走滑 3 种基本的断层错动类型, 其中倾滑和斜滑型还可分为正和逆两种活动方式。中间应力轴倾角(β)统计结果(图 3b)表明, 震源断层错动以走滑($\beta>80^\circ$, 占 18%)、近走滑($60^\circ<\beta\leq 80^\circ$, 占 39%)和斜滑($30^\circ\leq\beta\leq 60^\circ$, 占 27%) 3 种类型为主。而且 NW—WNW 走向的震源断层以左旋走滑为主, NNE—NE 向具右旋走滑特征。

综上, 渤海盆地及其邻区的地壳现代以 NW—WNW 和 NNE—NE 走向的共轭剪切破裂(活动)为特征。

4 现代应力场与地震活动的关系

渤海盆地是华北地震活动最强烈的地区之一。自 1568 年以来记有 6 级以上地震 5 次, 其中 7~7.5 级大震 3 次(图 5)。除 1969 年 7.4 级地震的主震有仪器记录和宏观破坏调查资料及余震有较好的定位之外, 其余地震的震中位置都是根据史载资料推断的, 精度较差。这些地震大多位于北京—蓬莱断裂带和庙西北—黄河口—临邑断裂带的交会地区。1970~2000 年 3 级以上的地震也基本沿这两条断裂带分布, 形成两条地震带。

北京—蓬莱断裂带走向 NW70° 左右, 其两盘的压应力轴向基本一致, 为 NE80° 左右(图 5)。受此应力作用, 断裂带具左旋走滑性质。庙西北—黄河口—临邑断裂带走向 NE45° 左右, 在 ENE—EW 向挤压作用下(图 5)表现为右旋走滑特征。对于营口—潍坊断裂带北段, 其西盘压应力轴向 NE60°~80°, 东盘则转为近 EW—WNW 向。其结果使断裂带平均正应力值增高, 而最大剪应力值减小^①, 明显具挤压剪切性质。所以, 本区在现代构造应力场作用下, 北京—蓬莱和庙西北—黄河口—临邑断裂带成为一对主要的共轭活动构造带, 控制了渤海盆地地震的孕育和发生; 营口—潍坊断裂带北段则地震活动微弱。由于渤海地

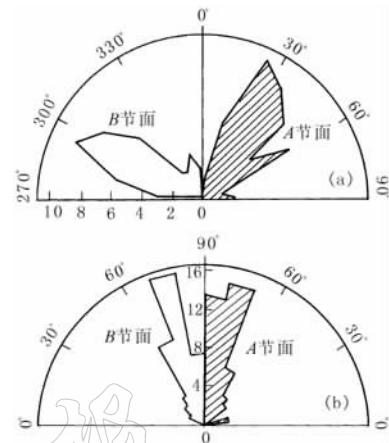


图 6 渤海盆地及邻区震源机制解节面参数统计图
(a) 节面走向玫瑰图; (b) 节面倾角分布

^① 中国地震局地质研究所. 1999. 渤海晚第三纪以来构造应力场与断裂活动关系及其在油气勘探开发中的应用.

区地壳发育 NNE—NE 和 NW—WNW 走向的共轭剪切破裂, 所以它们往往成为发震构造, 如 1969 年 7.4 级地震的发震断裂走向 NE45° 左右 (Xu *et al*, 2001c).

5 结语

本研究可以得出以下初步的认识:

1) 位于北华北新生代裂陷盆地的渤海是一个晚第四纪形成的内陆海盆。渤海盆地及邻区发育多组活动断裂, 其地震活动强烈。交会于渤海中部的 NE 向营口—潍坊断裂带北段、庙西北—黄河口—临邑断裂带和 NW 向北京—蓬莱断裂带是主要的活动构造带, 将海区分为渤海东南(I)、渤海西南(II)、渤海西北(III)和渤海东北(IV)4 个次级新构造区, 成为现代构造应力场作用的构造基础。

2) 震源机制解和井区应力资料分析, 以及应力场数值研究结果表明, 渤海及邻区现代构造应力场的主应力方向分布比较复杂, 方位角域的范围较宽, 压应力为 NE60°—EW 向, 张应力方向为 NW10°~30°, 以水平和近水平应力作用为主, 局部地方有斜向力的作用。

3) 各次级新构造区的压应力方向存在一定的差异, 渤海东南为 NE80°—SE80°, 渤西南为 NE70°~80°, 渤西北为 NE60°~80°, 渤东北为 NE80°—SE80°。这表明营口—潍坊断裂带北段等 3 条主要的活动构造带, 对本区现代构造应力作用起到明显的控制作用。

4) 在这种应力场的作用下, 渤海及其邻区的地壳以 NNE—NE 和 NW—WNW 走向的高角度破裂或陡倾断裂活动为主, 基本表现为走滑、近走滑和斜向滑动; 前者为右旋走滑, 后者是左旋走滑, 二者一起构成地壳的共轭剪切破裂系统。

5) 北京—蓬莱断裂带和庙西北—黄河口—临邑断裂带是渤海及其邻区一对主要的共轭活动构造带, 对本区地震活动起着重要的控制作用。

本项工作得到中国海洋石油研究中心勘探研究室龚再升、张功成和蔡东升等高级工程师的热情支持和帮助, 在此谨表谢忱。

参 考 文 献

- 陈国光, 徐杰, 高战武. 2003. 北华北盆地大震的构造特征[J]. 华北地震科学, 21(2): 7~15
- 丁健民, 梁国平. 1985. 唐山、天津和沧州地区的油井水力压裂应力测量[J]. 地震学报, 7(4): 363~373
- 丁健民, 梁国平, 郭启良. 1986. 山东渤海沿岸地区深部应力测量——主应力方向的测定[J]. 地震学刊, (1): 1~9
- 董瑞树, 蒋秀琴. 1986. 渤海周围地区地震震源机制解和应力场特征[J]. 东北地震研究, 2(1): 56~62
- 邓起东, 闵伟, 晁洪太, 等. 2001. 渤海地区新生代构造与地震活动[A]. 见: 卢演畴等主编. 新构造与环境[C]. 北京: 地震出版社, 218~233
- 邓远华. 2002. 渤海油气勘探历程回顾[J]. 中国海上油气(地质), 16(2): 98~101
- 高战武, 徐杰, 宋长青, 等. 2000. 华北沧东断裂的构造特征[J]. 地震地质, 22(4): 125~133
- 环文林, 汪素云, 常向东, 等. 1989. 渤海地震活动特征[J]. 地震研究, 12(1): 1~10
- 黄福林, 胡连英, 徐学思, 等. 1993. 中国海新构造特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 13(增刊): 1~34
- 卢造勋, 姜秀琴, 白云, 等. 1999. 胶辽渤海地区地壳上地幔结构特征与介质的横向非均匀性[J]. 华北地震科学, 17(2): 43~51
- 魏光兴, 周翠英, 赵兴兰. 1982. 华北地区中小地震应力场的优势方向[J]. 地球物理学报, 5(4): 333~343
- 魏光兴, 周翠英, 胡政, 等. 1988. 沂沭断裂带现代构造应力场及震源错动性质[J]. 中国地震, 4(3): 96~101
- 王强, 李凤林. 1983. 渤海湾西岸第四纪海陆变迁[J]. 海洋地质与第四纪地质, 3(4): 83~90
- 徐杰, 牛立芳, 王春华, 等. 1996. 唐山—河间—磁县新生地震构造带[J]. 地震地质, 18(3): 193~198

- 徐杰, 宋长青, 楚全芝. 1998. 张家口—蓬莱断裂带地震构造特征的初步探讨[J]. 地震地质, 20(2): 146~154
- 徐杰, 宋长青, 高占武. 1999. 营口—潍坊断裂带新生代活动的特征[J]. 地震地质, 21(4): 289~300
- 徐杰, 马宗晋, 高战武, 等. 2002. 渤海湾盆地的一些重要构造特征[A]. 见: 中国石油学会地质专业委员会编. 油气盆地研究新进展. 第一辑[C]. 北京: 石油工业出版社, 170~179
- 许忠淮, 阎明, 赵仲和. 1983. 由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向[J]. 地震学报, 5(3): 268~279
- 周翠英, 周焕鹏, 李人杰. 1990. 渤海及其周围地区现代构造应力场特征[J]. 地震学刊, (3): 18~25
- 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室. 1985. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 191~222
- Bell J S, Gough D I. 1979. Northeast-Southwest compressive stress in Alberta: Evidence from oil wells[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 45: 475~482
- Xu Jie, Gao Zhanwu, Song Changqing, et al. 2001a. Structural characteristics of the Taihangshan piedmont fault zone [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 10(1): 51~69
- Xu Jie, Gao Zhanwu, Song Changqing. 2001b. Newly generated seismotectonic zones in North China and its regional seismotectonic framework[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 10(3): 159~168
- Xu Jie, Gao Zhanwu, Sun Jianbao, et al. 2001c. A preliminary study on geological and seismogenic structures in the region of 1969 M7.4 Bohai Sea earthquake[J]. *Earthquake Research in China*, 15(4): 365~379

RECENT TECTONIC STRESS FIELD AND MAJOR EARTHQUAKES OF THE BOHAI SEA BASIN

Chen Guoguang Xu Jie Ma Zongjin Deng Qidong Zhang Jin Zhao Junmeng

(Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

Abstract: The Bohai Sea basin is located in the east to the Cenozoic rift basin of North China. It is an inner-land sea basin formed during Late Quaternary time. In this basin there are numerous active faults and many major earthquakes have occurred. Its major active tectonic zones are the northern section of the NE trending Yingkou-Weifang fault zone, Miao-xi-bei-Huanghekou-Linyi fault zone, and NW striking Beijing-Penglai fault zone, which intersect at the center of the Bohai Sea basin. These tectonic zones subdivide the sea area into four secondary neotectonic areas, which are subject to the recent tectonic stress field. Using the data of 38 focal plane solutions and 75 drill stress measurements, and the result of numerical modeling, we analyze the recent tectonic stress field of this region. Our result shows that this stress field is characterized by dominant horizontal or nearly horizontal stress. Its compressive stress is in the direction NE60°~90°, and the tensional stress is in NS—NW30°. There are some differences of principal stress between secondary tectonic areas. A remarkable feature of the Bohai Sea basin is a conjugate shear rupture zone, which develops in the crust and is the major seismogenic structure.

Key words: recent stress field; seismicity; Bohai Sea basin; northern rift basin of North China