

营潍断裂带走滑构造特征、演化及动力学机制

周 斌^{1,3}, 邓志辉¹, 晁洪太², 许华明¹,
杨竹转¹, 肖兰喜², 王志才^{1,2}, 张永祥³(1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029; 2. 山东省地震局, 山东 济南 250014;
3. 山东省东营市地震局, 山东 东营 257000)

摘要:营潍断裂带位于渤海湾,是郑庐大断裂的北延段。由于受早期NW向断裂分割构造块的影响,营潍断裂带可分为走向和构造特征有显著差异的北、中、南三段,其走滑构造特征表现的非常明显,形成了一些特征性的伴生构造。断裂带的深部结构呈现出典型的平移断层性质,已切穿莫霍面乃至岩石圈,成为地幔热物质上涌或基性物质上涌的通道。通过综合分析区域板块构造演化、沉积盆地发育和岩浆活动特征,将营潍断裂发育演化历史归结为晚侏罗世-早白垩世(J_3-K_1)左行平移期、晚白垩世-始新世(K_2-E_2)伸展拉张期和渐新世以来(E_3-Q)右行平移期三个阶段,并就其动力学机制进行了初步的讨论。

关键词:营潍断裂带; 渤海; 走滑构造; 构造演化; 动力学机制

中图分类号: P542*3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2008)02-0117-07

Strike-slip Tectonic Characteristics, Evolution and
Dynamic Mechanism of Yingwei Fault ZoneZHOU Bin^{1,3}, DENG Zhi-hui¹, CHAO Hong-tai², XU Hua-ming¹, YANG Zhu-zhuan¹,
XIAO Lan-xi², WANG Zhi-cai^{1,2}, CHEN Shi-jun², ZHANG Yong-xiang³

(1. Institute of Geology, Chinese Earthquake Administration, Beijing 100029, China;

2. Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China;

3. Earthquake Administration of Dongying City, Shandong Dongying 257000, China)

Abstract: Yingwei fault zone is the northern segment of famous Tanlu great fault system located in Bohai sea area. Owing to be influenced by some early faults in NW direction, Yingwei fault zone can be divided into three segments which have apparently strike-slipping tectonic characteristics and different accompanying tectonics. Typical strike-slip fault properties are presented in deep structure of Yingwei fault, where it cut deep into Moho and even the whole lithosphere, and become the surging passages for hot materials or basaltic materials from the mantle. By synthetically analyzing the structural evolution of regional plate tectonics, development of sediment basins and characteristics of magmatic activities, the evolution history of Yingwei fault is divided into three periods: the left-lateral strike-slipping period from late Jurassic to early Cretaceous (J_3-K_1), extensional period from late Cretaceous to early Eocene (K_2-E_2), and right-lateral strike-slipping period from Oligocene to now (E_3-Q), and the dynamic mechanism for each period are discussed also.

Key words: Yingwei fault zone; Bohai sea; Strike-slipping tectonics; Structural evolution; Dynamic mechanism

收稿日期: 2007-12-12

基金项目: 山东省地震局博士预研基金与中国地震局地质研究所所长基金联合资助

作者简介: 周 斌(1972-), 男(汉族), 山东沾化人, 博士研究生, 高级工程师, 一级地震安全性评价师, 主要从事地震地质、构造地质与构造流体动力学方面的研究。

0 引言

郯庐断裂带是我国东部一条著名的深大断裂带,对我国东部区域构造、沉积古地理、岩浆活动、矿产分布、地震活动都有重要的控制作用。不少学者已经对其陆上部分进行了较为深入的研究,取得了许多重要的成果,认为走滑活动是郯庐断裂带最主要的运动学特征,中生代以左行走滑为主,新生代转为右行走滑^[1-3]。但由于资料的限制,对渤海海域该断裂带的研究程度相对较低^[4]。郯庐断裂带总体呈 NNE 向纵贯渤海,在海域延伸长度约 400 km,称为营口-潍坊断裂带(营潍断裂带)^[5-6]。近年来在渤海海域实施的石油地震勘探资料证实营潍断裂带对渤海湾盆地的形成及其盆地基底格架的构建起着决定性的作用,同时控制了烃源岩、储集层、盖层和圈闭的分布^[4]。渤海及其周边地区蕴藏着丰富的

油气资源,同时也是现代板内地震比较活跃的地区之一。因此本文在吸收前人研究成果的基础上,充分利用最新的地质、地球物理和地球化学资料,特别是渤海海域三维地震资料,系统的研究营潍断裂带的走滑构造特征和动力学演化机制,有利于进一步认识营潍断裂带活动对渤海海域含油气盆地发育的影响和科学预测各类圈闭的分布,有利于开展该区天然地震活动性的研究。

1 营潍断裂带的基本格架和走滑构造特征

营潍断裂带纵贯渤海,自潍北凸起向北进入莱洲湾,穿过渤中凹陷和辽东湾东部边缘,进入下辽河拗陷,在海域整体上呈 NNE 向展布,延伸长度约 400 km,宽约 25 ~ 40 km(图 1)。该断裂带平面上以

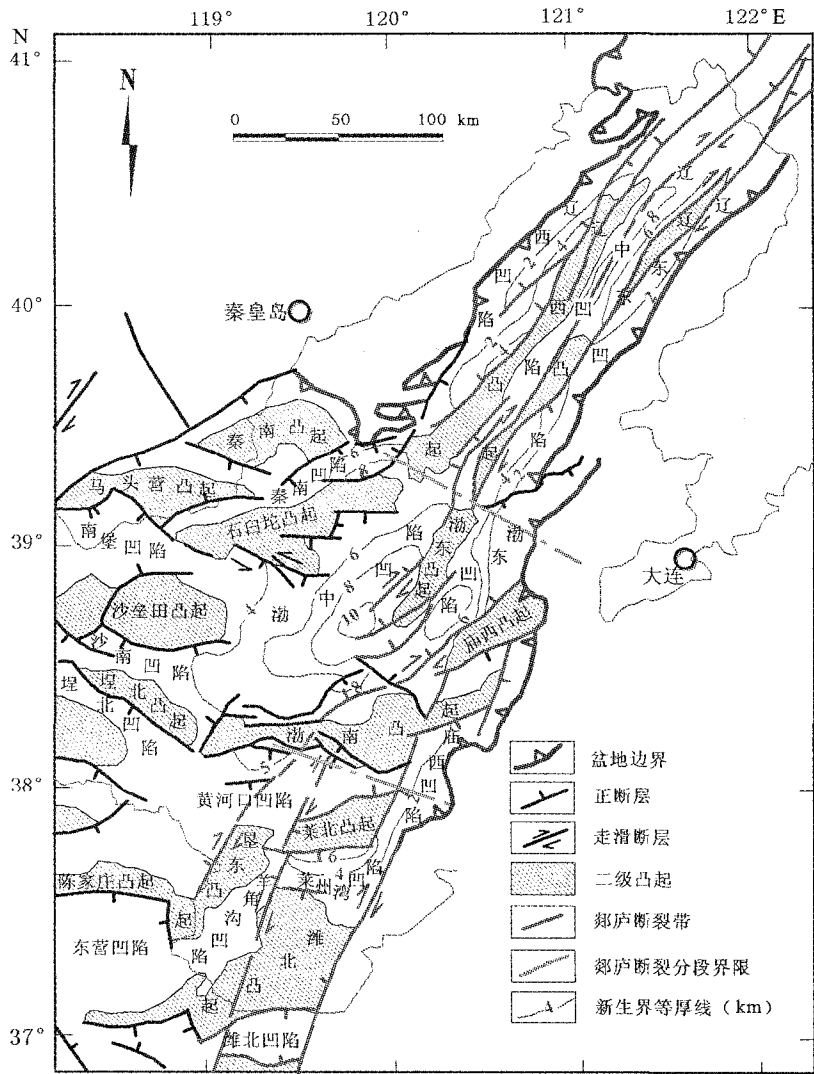


图 1 渤海海域营潍断裂带展布图(据文献[10]修改)
Fig.1 Distribution of Yingwei fault zone in Bohai sea aerass..

错列分段式形态存在,由先存主干断裂向两侧派生、延展成断裂系统;剖面上由老到新、自下而上,断裂数量由少变多,呈树枝状向上伸展。营潍断裂带是一组发育很早的继承性活动断裂,对渤海前第三系地层的控制比较明显^[7]。中生代末至新生代初,营潍断裂带主干断裂控制了渤海海域的隆、坳结构和沉积;新生代以来,断裂的剪切拉张活动在渤海海域盆地发育过程中起到了重要作用^[8-10]。由于受早期北西向断裂分割构造块的影响,断裂带可分为走向和构造特征有显著差异的北、中、南三段。南部莱州湾段是陆上郯庐断裂带东、西两支在海域的自然延伸,由两条相互平行的走向约 NE20° 的主断裂和伴生的近 EW 向张性、NE 向张剪性和少量 NNW 向压剪性的破裂面组成;中部渤中段主走滑断裂走向约 NE45°,浅层发育有一系列近 EW 向的张性和 NE 向的张剪性破裂面;北部辽东湾段主走滑断裂走向约 NE40°,主要由一系列“分支复合”的 NE 向张剪性破裂面和一系列近 EW 向张性破裂面组成。在营潍深大走滑断裂控制下,渤海海域渤海湾盆地中形成了一些特征性的走滑伴生构造,如花状构造、拉分盆地、线型地堑与地垒、牵引式褶皱、斜列的盖层正断层等(图1)。以下分三段分述之。

1.1 莱州湾段

该段营潍断裂主断裂长且平直,比较连续,总体

上呈 NE20° 方向展布,控制了黄河口凹陷、莱北低凸起、莱州湾凹陷和潍北凹陷的形成和发育。在莱州湾凹陷一带,营潍断裂分为东、西两支,断层上部近直立并几乎通达海底,表明断裂在第四纪晚期仍然活动,两侧地层均显示逆牵引现象,深部断面或陡直或倾角略缓;在黄河口凹陷—渤南凸起一带,营潍断裂表现为三个分支:推测西支从垦东凸起西侧进入渤海;中支通过 BZ34 构造群至 BZ28-1 潜山构造西侧;东支表现为两条平行的断裂^[11]。莱州湾段营潍断裂具有典型的走滑构造特征:

(1) 主断裂面陡直。横跨主断裂的地震反射剖面显示杂乱,两侧反射特征明显不同,且不同层位反映的断距相差很大,反映了主断裂比较陡直;另外一系列与断裂横切的地震反射剖面可以看出,沿主断裂走向断面倾向摇摆不定。

(2) 花状构造。基底主断裂与次级断裂在中、浅层形成“Y”字型的花状构造组合,如在莱州湾凹陷东缘沿营潍断裂东支发育的花状构造(图2)。花状构造一般包括正花状和负花状两种类型,正花状构造是聚敛型走滑断层派生的在压扭性应力状态中形成的构造,而负花状构造是离散型走滑断层派生的在张扭性应力环境中形成的构造。该段既有正花状构造,又有负花状构造,可能是两次相反构造运动作用叠加的结果。

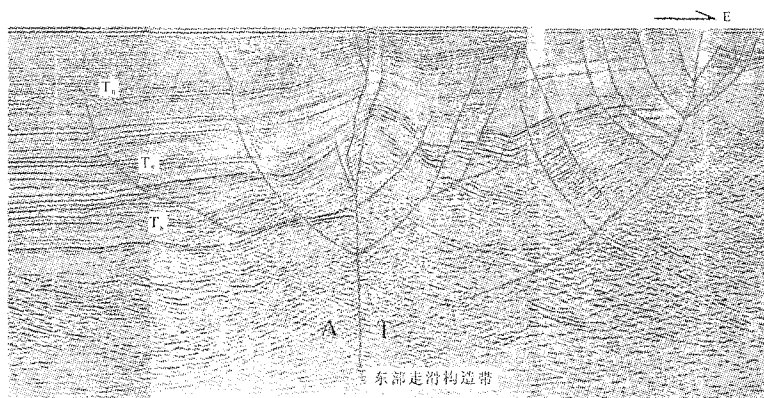


图2 莱州湾段营潍断裂东支花状构造(据中海油内部资料)

Fig. 2 The flower structure in eastern branch of Yingwei fault zone in Laizhou Bay segment.

(3) 拉分盆地和挤压隆起。受营潍断裂新生代右旋走滑活动的控制,断裂带内菱形拉分盆地和挤压隆起相间展布,自南而北发育了潍北凹陷、莱州湾凹陷等拉分盆地,面积一般较小(88 ~ 1 200 km²),均表现为菱形断陷形态,长宽比一般为4:3,东西边界具有明显的走滑特征,南北向剖面表现为北断南超的剖面结构。据研究,控制莱州湾凹陷发育的营潍走滑断裂新生代右旋走滑约40 km,平衡

剖面法计算走滑拉分的水平伸展量约5 ~ 7 km,伸展率20%左右^[12-13]。

(4) 右阶斜列次级断层。在莱州湾,东支主断裂由两段右阶斜列的次级断层组成,沿断裂带不但有明显的晚第四纪断错活动,而且还发育 NNE 向晚第四纪生长褶皱,表现出明显的晚更新世晚期至全新世活动特征。主断裂走向约 NE25° 左右,各次级活断层段的走向为 NE10 ~ 15°,与断裂带总体走向

相差 10° 左右,相当于简单剪切带内理论上次级的压剪面,说明断裂带第四纪晚期仍然以右旋单剪变形为特征^[14-15]。

1.2 渤中段

由于受NW向老断裂的影响,该段营潍断裂仅在局部基底岩性变异带存在,大部分地段不发育。表现为不连续的几条NE走向断裂,控制了渤中凹陷、渤东低凸起、渤东凹陷、庙西凸起和庙西凹陷的结构和充填,构成凹陷与凸起的边界。断裂延展趋势与莱州湾段相近,但方向上不相衔接,平面位置较辽东湾段向东偏移约40 km。地震反射剖面 and 钻探资料显示:这些断裂两侧沉积厚度存在巨大差异,剖面上有一定弯曲和倾斜,向下延伸深度不超过10~12 km,表现出大幅倾滑正断运动性质,走滑运动性质不明显。值得注意的是,该段NE向、近EW向和NW向三组断裂相互切割,如NE向的BZ34断裂切割了近EW向的垦北断裂,使之发生右旋错动,而它和KL-3断裂又被近EW向莱北断裂左旋错动。因此营潍断裂在该段显得不连续,有时甚至被认为NNE向断裂已被废弃^[6,16]。实际上营潍断裂渤中段仍然表现出了走滑断裂的特征。

(1) 雁列式断裂和褶皱。在渤东低凸起及其南北相邻区域走滑断裂的主位移带内及毗邻主位移带的地方,断裂和褶皱呈雁列式排列,如LD22-1构造西断裂、LD27-2构造西断裂和PL7-1构造西断裂,这3条断裂雁行式展布,断面倾角上陡下缓,控制了半地堑的发育。

(2) “入”字型构造。在渤中凹陷,基底主干断裂及其分支断裂表现为“入”字型构造组合形态,西支为较大型的“入”字型构造,而东支的为一些小型的“入”字型构造。这类构造是由于主断裂两侧岩体相对水平扭动时边界条件的差异造成的。

(3) 花状构造。该段花状构造十分发育,基本上是在晚第三纪到第四纪形成,表现出了南北差异的特点。在北部渤东低凸起表现为负花状构造,沿凸起的两侧形成两排,而在南部渤南凸起表现为正花状构造。这说明该段营潍断裂的晚第三纪的活动具有分段性,在北部为张性走滑而在南部为收敛性走滑。

(4) 浅层断层发育。渤中段浅层断层数量显著增加,多呈近EW向展布于营潍断裂两侧,其断距一般为20~50 m,延伸长度5~7 km。浅层断层断层面位浅(个别断至海底);上部层位断层数量多,下部层位断层数量少,如明化镇组断层数量是馆陶组

断层数量的两倍;越靠近郯庐断裂,晚期断裂活动越活跃。

(5) 构造破碎带。东支主断裂在渤南凸起的东南部表现为一条NNE向的构造破碎带。此构造破碎带宽约4~7 km,带内挤压、扭动及压扭现象共生、地层揉皱、盖层及基底都有拖曳现象。断裂带两侧地层平错现象亦很明显,地震波组反射特征差异甚大,地层明显不能相对,这显然是走滑运动造成的。

1.3 辽东湾段

该段营潍断裂有东西两支规模较大的基底主干断裂,线型延伸特征清晰,总体上沿NNE向展布,把辽东湾拗陷分割成辽西凹陷、辽西凸起、辽中凹陷、辽东凸起、辽东凹陷几个NNE向次级构造单元。两条走滑断裂大致平行,其内部发育有若干不同尺度的次级走滑断裂或走滑正断层,与主断裂组成辫状交织的复杂走滑断裂带。西支主干断裂在辽西的中、北段断距大,基底落差大于3 000 m;东支主干断裂在北段断距规模大,中、南段断裂不活跃,仅南端存在断距较小的断裂。新近纪以来,东支分解成沿主断裂分布的羽状断裂系,一端收敛在主断裂位置,另一端约呈NE 70° 方向发散;西支则仅在主断裂位置有规模很小的羽状断裂出现。该段营潍断裂走滑构造特征主要表现在:

(1) 花状构造。沿走滑断裂发育不同类型的花状构造,如辽东湾北段辽东凸起两侧的走滑断裂在地震剖面上的反射特征,近直立的主断裂面可一直断至第四系中,主断裂两侧发育一系列相向倾斜的分支正断层系并构成负花状构造。分散的小分支正断层本身亦具有走滑运动分量,它们在平面上以主干断层为轴呈左阶斜列,并构微型地堑系。

(2) 异岩异相岩层不协调。断层走滑位移导致断层两侧的地质体被水平错开,因而在剖面上观测到断裂带两侧的地质界限、地震相、沉积相和地层厚度呈不协调的对峙在一起。如过辽东湾地区营潍断裂带的水平走滑错动造成辽东凸起两侧渐新统沙一段和东营组地层厚度和沉积相差别非常大,断裂带西翼的东营组厚达2 300 m,而其东侧的辽东凸起仅600 m,凸起两翼的地震相也有较大差异。

(3) 枢纽断层。沿断裂走向不同地段其两侧断块的垂直差异活动方向常发生根本变化,显示枢纽断层的活动特点。如辽东凸起西侧的走滑断裂在辽东湾南段其两侧断块显示东升西降的差异活动,向北延伸进入辽中凹陷后则逐渐表现出西升东降的差

异活动特征。

(4) 线型地堑与地垒。两条走滑断裂交织成带,它们夹持的中间断片在断裂的走滑活动中若伴随有相对升降运动分量则常形成狭长的线型地堑与地垒。地堑和地垒的平面形态呈狭长的透镜状,并沿断裂带走向呈相间串列的特征。辽东湾地区的辽东凸起亦属于走滑断裂带伴生的地垒状凸起。这些线型地堑与地垒均是由高角度正走滑断层或走滑正断层控制,局部甚至由逆走滑断层或走滑逆断层控制,它们的形成时代基本上是一致的,即渐新世至新近纪初。

(5) 斜列的正断层组和盖层褶曲构造。沿走滑断裂带发育有一系列的近 EW 向延伸,呈 NNE 向左阶斜列的"多米诺式"正断层组。这些正断层主要发育在盆地盖层中,且以沙河街组一段-东营组中发育最多。此外,在走滑构造带内还发育有一系列小型宽缓的盖层褶曲构造,褶曲轴向为近 SN - NNW 向,在平面上呈右阶斜列。左阶斜列的正断层组与右阶斜列的盖层褶曲都与基底断裂右旋走滑活动有直接或间接的关系。

(6) 反转构造。沿辽东凸起发育反转构造,北段的反转幅度较大,是营潍段基底断裂带走滑位移的表现。LD22-1 构造及其以南的辽东凸起南段表现为典型的正反转构造,具有下凹上凸的几何学特征,渐新统东营组及其上覆地层发育大量雁列式正断层,说明反转作用应力主要是由营潍断裂带走滑活动所诱导的挤压应力造成的。

2 营潍断裂带的深部结构特征

狭长的线性正磁异常带和较高的重力异常梯度带是深断裂的主要标志,航磁和重力异常一致地反映了营潍断裂带为穿越渤海的深大断裂的性质:磁场上为整体呈 NNE 走向且向西略微突出的弧形线性正磁异常带^[17],强度达 100 ~ 500 nT,宽 20 ~ 30 km;重力场特征表现为 NNE 向线性布格重力异常梯度带,重力等值线狭长,莱州湾和辽东湾重力异常值为 $30 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,渤东重力异常值高达 $(40 \sim 50) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。此外,以莫氏面和康氏面深度图来看,营潍断裂带正处于地壳厚度长条形变薄带,显然与地幔隆起、地壳拉伸有关。利用地震层析成像技术得到的沿北纬 38°线穿越营潍断裂带渤中段的地壳和上地幔速度结构剖面显示^[18],该断裂切穿莫霍面乃至岩石圈,成为地幔热物质上涌或基性物质上涌的通道,引起壳内的速度层和壳幔界面的起伏变化。

大地电磁测深探测剖面显示,营潍断裂带在深部表现为高阻体与低阻体之间的陡立边界,呈现为典型的平移断层性质,浅部为伸展断层及断陷盆地所叠加,其伸展活动控制了浅部 5 km 以上断陷盆地的形成^[19]。居里等温面埋深和地壳厚度两方面资料揭示了营潍断裂的分段性和不同段落新生代以来地壳动力学特征的差异^[20]:渤中段,居里面最浅(13 km),地壳厚度最薄(25 km),显示地壳运动以拉张为主;辽东湾段,居里面深度 16 ~ 17 km,地壳厚度 28 ~ 30 km,显示地壳运动具有张扭性,拉张可能次于渤中段;莱州湾段,居里面深度 20 km,地壳厚度 30 ~ 32 km,显示地壳运动具有张扭性。

3 营潍断裂带构造演化及动力学机制

研究营潍断裂的构造演化及动力学机制问题,涉及到整个郯庐断裂带的形成演化和动力学背景,涉及到渤海湾盆地的形成和演化,也涉及到东太平洋板块中新代演化的影响,因而是个十分复杂的构造问题,目前认识分歧也较大。

通过综合分析区域板块构造演化、沉积盆地发育和岩浆活动特征,笔者在前人研究基础上^[2,3,21-25],大致将营潍断裂的构造发育演化历史归结为三个时期,并就其动力学机制进行初步的讨论。

3.1 左行平移期($J_3 - K_1$)

郯庐断裂带起源于印支期华北板块与华南板块的陆-陆碰撞,此后自南向北分段递进迁移生长^[2],至少在早白垩世向北延伸穿过渤海,形成了营潍断裂^[23-24]。石油钻探资料证实,在渤海中部蓬莱 7-1-1 井和莱州湾 13B5-1 井均钻遇早白垩世中基性火山岩及火山碎屑岩,是同期营潍断裂在大规模平移活动中诱发岩浆活动的结果。在郯庐断裂左行平移运动发生之前,中国东部处于古特提斯构造域板块的南北汇聚和随后的陆内俯冲、前陆变形之中,以东西向构造占主导地位。中侏罗世期间(180 Ma),西太平洋动力学机制逐渐代替古特提斯动力学机制,库拉-太平洋板块沿 NNW 方向向华北板块间歇式俯冲,郯庐断裂带形成并发生左行走滑作用。特别是到早白垩世初期(140 Ma),东亚大陆东部伊佐奈岐板块突然改变了运动方向和速度,以 30 cm/a 的高速向 NNW 斜向俯冲于东亚大陆之下,致使中国东部呈现活动大陆边缘上的左旋压扭环境,从而发生了营潍断裂左行平移及同期的岩浆活动,并使得华北板块北缘出现了约 200 km 的左行错开^[23,25]。

3.2 拉张期($K_2 - E_2$)

继早白垩世伊泽奈崎板块向 NNW 斜向俯冲于东亚大陆之下,从晚白垩世到古近纪早期,西太平洋板块转为向 NW 方向俯冲于东亚大陆之下,在 85 ~ 100 Ma 间俯冲速度猛增至 233 ~ 238 km/Ma,俯冲角由早期的 10° 逐渐变为约 80°,中国东部大陆由低角度斜向俯冲下的压扭转变成高角度俯冲下的伸展,致使岩石圈上拱、地幔隆起、地壳减薄,营潍断裂带在此背景下出现了伸展断陷,水平拉张活动和垂直差异活动都很强烈^[26]。

3.3 右行平移期($E_3 - Q$)

渐新世以来的新构造期,华北平原裂陷区裂陷作用减弱,代之热收缩和重力调整引起的区域沉降。这时期印度板块以 5 cm/a 的速度向欧亚板块强烈俯冲碰撞,引起青藏断块区受挤压快速隆升和侧向滑移,向 NE 推挤华北断块区的作用迅速增强。在 40 ~ 34 Ma,太平洋板块转为 NWW 向向华北板块俯冲,使华北断块区处于东西两侧板块和断块近于相向推挤的作用之中,出现 SWW - NEE 向挤压应力场,且这种侧向挤压作用日益增强并成为华北地区新近纪以来构造活动的主要动力因素^[6,17]。在此应力场中,营潍断裂带出现明显的右旋走滑活动,并且在走滑断裂带的转折部位派生了挤压应力,造成沿走滑构造带花状构造和反转构造发育。

4 讨论与结论

营潍断裂在渤海湾盆地的形成和演化中起着决定性的作用,深入地研究营潍断裂是研究渤海湾盆地的楔机和关键。由于受早期北西向断裂分割构造块的影响,营潍断裂带在渤海海域可分为走向和构造特征有显著差异的北、中、南三段,其走滑构造样式和特征表现得非常明显,形成了花状构造、拉分盆地、线型地堑与地垒、牵引式褶皱、斜列的盖层正断层等一些特征性的伴生构造。渤海海域在营潍断裂带内已发现的浅层大油田基本上都分布在上述三段不同走向断裂系统的平面转折处,显示出断裂带对渤海浅层大油气田的控制作用。同时,营潍断裂晚更新世以后的活动与现代地震活动性关系密切,不同的段落对地震的控制作用均有差异。有关此两方面的研究成果笔者将另文论述。

沿营潍断裂带既发育有代表挤压走滑环境下派生的正花状构造、正反转构造,又发育有代表拉张走滑环境下派生的负花状构造、负反转构造,对分析其走滑活动的性质和时间造成一定的困难。其实,在

同一时期同一区域剪切应力场作用下,因各构造段走向的不同导致了局部应力场的变化,所以各段所表现出来活动性质也不同,有的段表现为走滑挤压,有的段表现为走滑拉张,有的段可能表现出斜向 - 倾向伸展。此外,随着太平洋板块运动方向的逐步变化,各构造段的活动方式和受力性质也在逐步发生转变,原来表现为走滑挤压的逐步转变为走滑拉张,原来表现为走滑拉张的逐步转变为走滑挤压,即活动方式和构造作用性质发生了反转,导致了相反构造性质构造的叠加。

营潍断裂分段性明显。莱州湾段和辽东湾段断裂延展趋势相近,新构造活动期右旋走滑运动明显,而渤中段与上两段方向上不相衔接,平面位置较辽东湾段向东偏移约 40 km。作者认为,造成营潍断裂南、中、北三段差异性的动力学机制与渤中地区地幔强烈上隆有关。古今纪时期,三条地幔隆起带在渤中交会,使渤中成为地幔隆起的高点。在地幔拱张作用下,营潍断裂渤中段被向东推出大约 40 km 而变得与原延展方向的不连续。虽然营潍断裂不同区段在不同的阶段具有很大差别,但总体上它只是板块或块体的边界,受控于周围块体的相互作用以及深部动力学变化过程,并不具有运动的"主动"因素。营潍断裂的活动与周围的沉积盆地以及岩浆作用的阶段性演化,是在统一的动力学体制下的不同表现形式。通过综合分析区域板块构造演化、沉积盆地发育和岩浆活动特征,笔者将营潍断裂发育演化历史归结为晚侏罗世 - 早白垩世($J_3 - K_1$)左行平移期、晚白垩世 - 始新世伸展拉张期($K_2 - E_2$)和渐新世以来右行平移期($E_3 - Q$)三个阶段。

[参考文献]

- [1] 国家地震局地质研究所. 郯庐断裂[M]. 北京:地震出版社, 1987:83-116,189-216.
- [2] 王小凤,李中坚,陈柏林,等. 郯庐断裂带[M]. 北京:地质出版社,2000:1-11,349-351.
- [3] Xu Jiawei, Zhu Guang. Tectonic Moels of the TanLu Fault Zone, Eastern China[J]. International Geology Review, 1994, 36: 771 ~ 784.
- [4] 葛建党. 郯庐断裂带在渤中凹陷的构造特征与油气成藏的关系[J]. 海洋石油,2001,(总107):14-20.
- [5] 陆克政,漆家福,戴俊生,等. 渤海湾新生代含油气盆地构造模式[M]. 北京:地质出版社,1997:1-30.
- [6] 徐杰,宋长青,高占武. 营口 - 潍坊断裂带新生代活动的特征[J]. 地震地质,1999,21(4):289-300.
- [7] 龚再升,蔡东升,张功成. 郯庐断裂对渤海海域东部油气成藏的控制作用[J]. 石油学报,2007,28(4):1-9.

- [8] 童崇光. 中国东部中生代裂谷系[J]. 石油学报, 1980, 1(1):19-26.
- [9] Ye Hong, Zhang Botao, Mao Fengying. The Cenozoic tectonic evolution of the Great North China: two types of rifting and crustal necking in the Great North China and their tectonic implications [J]. Tectonophysics, 1987, 133: 217-777.
- [10] 邓起东, 闵伟, 晁洪太, 等. 渤海地区新生代构造与地震活动 [A]//卢演涛, 高维明, 陈国星, 等主编. 新构造与环境[C]. 北京:地震出版社, 2001:218-233.
- [11] 王国纯. 郯庐断裂与渤海海域反转构造及花状构造[J]. 中国海上油气(地质), 1998, 12(5):289-295.
- [12] 蔡东升, 罗毓晖, 姚长华. 渤海莱州湾走滑拉分凹陷的构造研究及其石油勘探意义[J]. 石油学报, 2001, 22(2):19-24.
- [13] 孙景耀, 刘松, 王世民, 等. 构造活动对莱州湾凹陷油气成藏的影响[J]. 中国海上油气, 2006, 18(5):300-303.
- [14] 王志才, 邓起东, 杜宪宋, 等. 莱州湾海域郯庐断裂带活断层探测[J]. 地震学报, 2006, 28(5):494-502.
- [15] 胡政. 郯庐断裂莱州湾段构造特征[J]. 西北地震学报, 1993, 15(1):75-81.
- [16] 高祥林. 渤海中部郯庐断裂带的近期活动与渤海新近纪新生断裂[J]. 地质科学, 2006, 41(2):355-364.
- [17] 周斌, 张英凯, 李继训. 渤海及邻区地震地质、地球物理场和地震活动特征[J]. 西北地震学报, 2000, 22(3):333-337.
- [18] 张岭, 刘劲松, 都天姚, 等. 渤海湾盆地及其邻域地区地壳与上地幔层析成像[J]. 中国科学 D 辑:地球科学, 2007, 37(11):1444-1455.
- [19] 宋国奇. 郯庐断裂带渤海段的深部构造与动力学意义[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2007, 30(6):663-667.
- [20] 刘光夏, 赵文俊, 张先. 郯庐断裂带渤海段的深部构造特征 - 地壳厚度和居里面的研究结果[J]. 长春地质学院学报, 1996, 26(4):388-391.
- [21] 万天丰, 朱鸿. 郯庐断裂带的最大左行走滑断距及其形成时期[J]. 高校地质学报, 1996, 2(1):14-27.
- [22] Yin A, Nie S Y. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan - Lu and Honam fault system, eastern ASIA[J]. Tectonics, 1993, 12(4):801-813.
- [23] 朱光, 王勇生, 牛漫兰, 等. 郯庐断裂带的同造山运动[J]. 地学前缘, 2004, 11(3):169-182.
- [24] Zhu G, Wang Y S, Liu G S, et al. 40Ar/39Ar dating of strike-slip motion on the TanLu fault zone. East China[J]. Journal of Structural Geology, 2005. 27(8):1379-1398.
- [25] 朱光, 刘国生, 牛漫兰, 等. 郯庐断裂带的平移运动与成因[J]. 地质通报, 2003, 22(3):200-206.
- [26] 朱光, 王道轩, 刘国生, 等. 郯庐断裂带的伸展活动及其动力学背景[J]. 地质科学, 2001, 36(3):269-278.

(上接 106 页)

- [9] Allen R. Automatic phase pickers their present use and future prospects[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1982, 72:225-242.
- [10] McEvilly T, Majer E. ASP: A Automated Seismic Processor For Microearthquake Networks[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1982, 72(1):303-325.
- [11] Baer M, Kradolfer U. An Automatic Phase Picker For Local And Teleseismic Events[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1987, 77(4):1437-1445.
- [12] Earle P, Shearer P. Characterization of global seismogram using an automatic - picking algorithm[J]. Bull. Seism. Soc. Am. 1994, 84(2):366-376.
- [13] 王继, 陈九辉, 刘启元, 等. 流动地震台阵观测初至震相的自动检测[J]. 地震学报, 2006, 28(1):42-51.
- [14] Massa M, Ferretti G, Spallarossa D, et al.. Improving automatic location procedure by waveform similarity analysis: An application in the South Western Alps (Italy) [J]. Phys. Earth Planet Interiors. 2006, 154:18-29.
- [15] Tibuleac M, Britton J. An Automated Short - Period Surface - Wave Detection Algorithm[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 2006, 96(1):334-343.
- [16] Withers M, Aster R, Yong C, et al.. A comparison of select trigger algorithms for automated global seismic. phase and event detection[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1998, 88(1):95-106.
- [17] 张贤达. 时间序列分析 - 高阶统计量方法[M]. 北京:清华大学出版社, 1996.
- [18] 唐震, 程玉胜. 舰船辐射噪声的非高斯特性和非线性检验[J]. 青岛大学学报, 2002, 15(3):63-65.
- [19] Hinich M J, Wilson G R. Detection of non-Gaussian signals in non-Gaussian noise us the bispectrum [J]. IEEE TransAcoust., Speech, Signal processing, ASSP38:1126-1131.
- [20] Jurkevics A. Polarization analysis of three-component array data [J]. Bull. Seism. Soc. Am. 1988, 78:1725-1743.
- [21] 王书名, 朱培民, 李宏伟, 等. 地球物理学中的高阶统计量方法[M]. 北京:科学出版社, 2006.