

# 胶东半岛牟平—即墨断裂带晚中生代 运动学转换历史

张岳桥<sup>1)</sup>, 李金良<sup>2)</sup>, 张田<sup>1)</sup>, 袁嘉音<sup>2)</sup>

1) 南京大学地球科学系, 南京, 210093; 2) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081

**内容提要:**牟平—即墨断裂带不仅构成了苏鲁造山带与胶北地块(华北地块)的边界,也是中国东部巨型郯庐走滑断裂系(即郯城—庐江走滑断裂系)的主要组成部分。基于野外断层滑动矢量分析和古构造应力场反演、侵入岩和火山岩锆石 U-Pb 离子探针和 Ar-Ar 测年分析,结合海域地球物理资料解释成果,研究了该断裂带平面展布形态和晚中生代构造演化历史。结果表明,牟平—即墨断裂带在晚侏罗世—白垩纪时期经历了挤压左旋平移—引张伸展—右旋走滑拉分等3个显著不同的运动学转变历史。晚侏罗世是重要的挤压作用时期,沿断裂带发生显著的左旋走滑活动,牟平—即墨断裂带东支桃村—东陡山断裂记录了约30 km的左旋错移量。早白垩世时期,构造体制以引张伸展活动为主,引张应力方向为NW—SE至近W—E向,沿断裂带形成一系列深而狭长的断陷盆地;盆地中侵入岩和火山喷发岩锆石 U-Pb 离子探针和 Ar-Ar 测试,获得了一致的年龄在106~123 Ma。晚白垩世—古新世时期,断裂带以右旋走滑活动为主,右旋剪切拉分作用控制了胶县—莱阳伸展断陷盆地的发育,沿断裂带局部凹陷区控制了晚白垩世王氏群沉积。早、晚白垩世之间发生一期构造挤压事件,挤压方向NW—SE,导致断陷盆地构造反转和断裂带左旋走滑活动,但这期走滑位移量不大。牟平—即墨断裂带运动学历史和构造应力场演化较完整地记录了中国东部晚中生代构造体制转换过程,并对构造体制转换过程的动力学背景提供了重要的构造地质学制约。

**关键词:**牟平—即墨断裂带;断层运动学;构造应力场;走滑断裂作用;伸展断裂作用;晚中生代;胶东半岛

牟平—即墨断裂带(后简称牟-即断裂带)发育于郯庐断裂带东侧的鲁东地区,由多条NNE向、呈雁列展布的断裂组成,延伸长约200 km,宽20~40 km,斜切胶东半岛(图1)。通常认为,该断裂带与五莲断裂带一起,构成了苏鲁造山带的北界(周存亭等,2003),同时控制了白垩纪胶莱盆地的形成和发育。因此,这是一条重要的构造边界带(宋明春等,2000;王来明等,2001)。活动构造研究表明,该断裂带中的海阳断裂是一条晚第四纪以来活动的右旋走滑断裂(周本刚等,2002)。

从区域上看,牟-即断裂带是中国东部巨型郯庐走滑断裂系统的主要组成之一,向北越过北黄海,与鸭绿江断裂相接,向南斜切苏鲁造山带,与日照断裂相连,构成一条延伸长达1600 km的鸭绿江—青岛断裂带(Xu et al., 1987)。通过断裂带两侧晚燕山期花岗岩体错移特征的观察和研究,Cui等(1994)认为该断裂带晚中生代发生重要的左旋走滑运动,估算横跨断裂带累积走滑位移量达100 km。

从盆地研究角度出发,许多学者强调牟-即断裂带是一条重要的控盆边界断裂带(陆克政等,1994;

戴俊生等,1995;唐华凤等,2003;翟慎德,2003;刘建忠等,2004),其白垩纪伸展活动不仅控制了胶莱盆地形成和发育,同时沿断裂带形成一系列凹陷。

显然,牟-即断裂带的构造演化历史极其复杂,其晚中生代运动学历史、变形方式和活动时代记录了中国东部构造体制转换过程。本文基于野外断层运动学分析和古构造应力场反演、侵入岩体和火山岩高精度同位素年代学测试,结合盆地地层充填序列分析和北黄海地球物理资料解释成果,研究了牟-即断裂带晚中生代运动学演化历史和构造应力场转换序列,阐述了断裂带从左旋平移体制向引张伸展构造体制、再向右旋走滑体制转换过程,在此基础上探讨了该断裂带运动学转换历史对中国东部晚中生代构造体制转换过程的制约。

## 1 牟平—即墨断裂带组成及其几何学特征

该断裂带由一系列NE走向的断裂、残留凹陷和凸起组成,形态复杂。断裂带航磁特征表现为显著的负异常条带,指示其深部为不同基底的边界

注:本文为国家自然科学基金资助项目(批准号40572120)的成果。

收稿日期:2006-09-26;改回日期:2006-12-04;责任编辑:章雨旭。

作者简介:张岳桥,男,1963年生。教授,博士生导师。构造地质专业。Email: yueqiao-zhang@sohu.com。

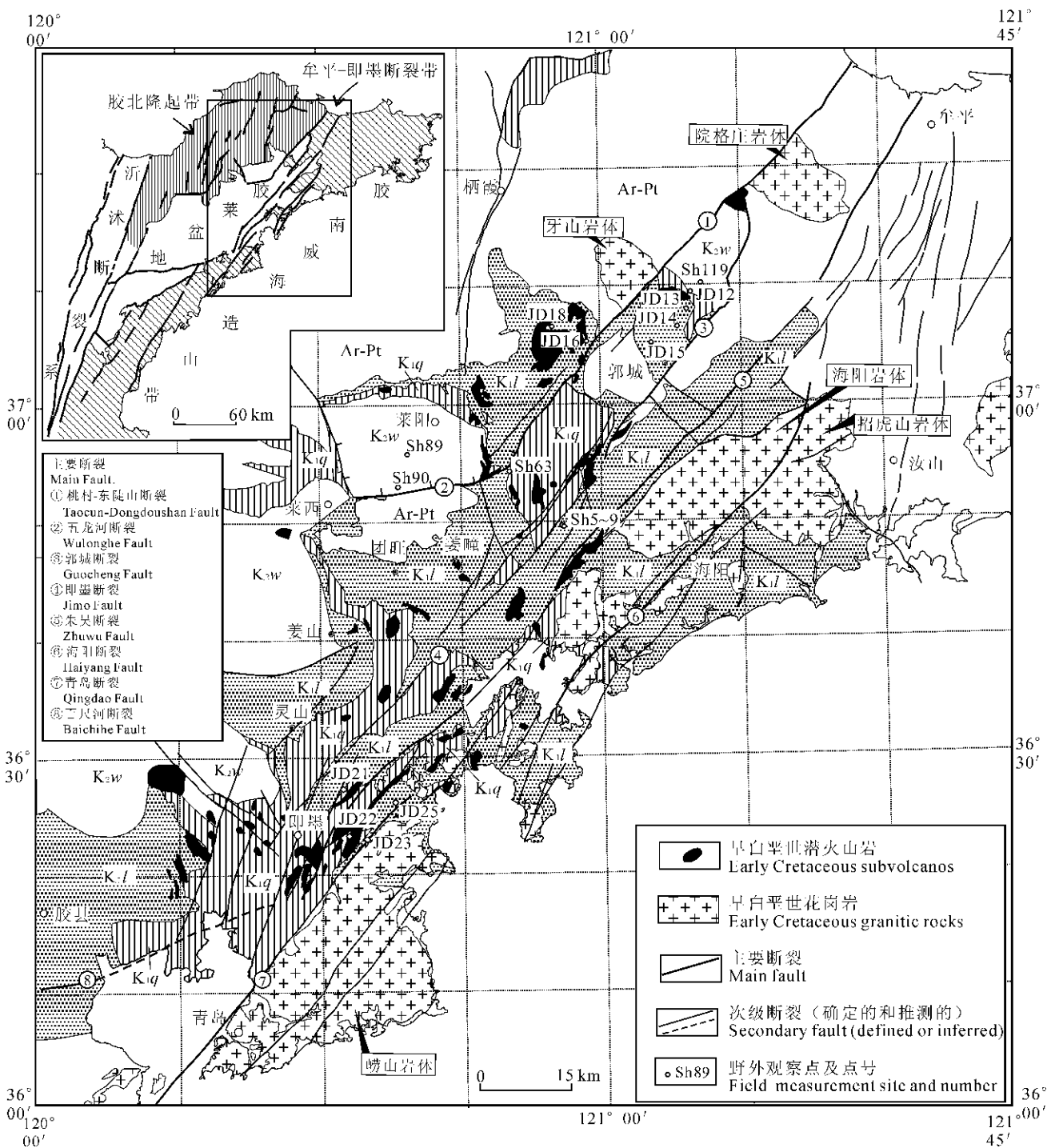


图1 牟平—即墨断裂带构造纲要图

Fig. 1 Structural outline of the Muping—Jimo fault zone

带。有6条主要断裂:桃村—东陡山断裂、郭城断裂、朱吴断裂、海阳断裂、即墨断裂和青岛断裂(图1),它们主体呈左阶雁列展布。每条断裂以脆性变形为特征,破碎带发育,断层面陡立。这些断裂切割基底变质岩系、燕山期花岗岩体、白垩纪盆地充填序列等,不同地段断裂表现形成和活动方式存在差异,

尤其对白垩纪断陷盆地的控制方式不同。根据断裂展布特征和与断陷盆地的关系,可将该断裂带进一步分为东、西两个亚带。

西亚带由桃村—东陡山断裂和郭城—即墨断裂及其间狭长的郭城凹陷和万第—中荆凹陷组成。郭城断裂向北延伸交汇于桃村—东陡山断裂,而桃村

断裂向南延伸与 W—E 向的五龙村断裂斜接,它们共同控制了西侧莱阳凹陷的发育。郭城凹陷和万第一中凹洼陷是早白垩世莱阳期沉积和沉降中心,青山群时成为火山喷发中心,断裂构造以 NE 向为主,NW 向次之。

东亚带以朱吴断裂和青岛断裂为轴心、以朱吴凹陷和即墨凹陷为主体。朱吴凹陷为一向西倾的单斜构造,褶皱不发育,断裂和节理较发育,断裂走向以 NNE—SSW 为主。凹陷内充填一套河湖相地层,下部为一套近源的冲积扇相巨砾岩沉积。即墨凹陷的最大特点是青山期火山岩极其发育,厚度巨大(>3000m),是胶莱盆地火山喷发活动中心。沿朱吴断裂和青岛断裂以东发育的海阳凹陷,是一个早白垩世残留断陷盆地,其中发育莱阳组河湖相沉积地层,大量的晚燕山期花岗岩体侵入,使凹陷中莱阳组地层发生烘烤和变质,泥岩普遍角质化。

## 2 盆地断层滑动矢量分析与古构造应力反演

沿牟—即断裂带发育一系列白垩纪断陷盆地,其中充填了 3 套地层序列:早白垩世莱阳群河湖相沉积、早白垩世青山群火山喷发岩系、晚白垩世王氏群红色河湖相碎屑岩系。这 3 套地层代表胶莱盆地白垩纪—古新世三个显著不同的伸展断陷阶段。在盆地充填序列中,断层发育,其滑动矢量记录了盆地形成和演化过程中不同阶段的伸展应力方向。为了确定每个伸展时期的伸展方向和构造反转事件,在详细的野外观察和测量的基础上,对盆地不同地层或岩石单元的断层滑动矢量进行系统的测量,对不同观察点的测量资料进行筛分,并用计算机反演程序计算各观察点的古应力方向,最后建立该断裂带白垩纪—古新世时期应力场演化序列。

### 2.1 郭城凹陷

郭城凹陷是一个独立的菱形状断陷盆地,东侧为东陡山断裂,西侧为郭城断裂,南界莱阳组地层超覆不整合在变质基底荆山群之上。凹陷内地层发育齐全,莱阳群河湖相沉积厚大于 2250 m;青山群火山岩和王氏群沉积主要发育在凹陷北部地区。总体来说,凹陷沉积由南向北迁移,主要受东西两侧断裂控制。

野外断层滑动矢量测量和反演结果揭示了 6 期应力作用,其中 3 期为引张应力,引张方向分别为近 NW—SE、W—E 和近 N—S 向;3 期为挤压应力,挤压方向分别近 W—E、NW—SE 和 NE—SW 向。

NW—SE 向伸展应力主要记录在凹陷东西两侧边界断层的下盘基底岩系中。在凹陷东缘,一组 NE—SW 走向的大型正倾滑断层被近东西向的逆冲断层所切割,正倾滑运动指示 NW—SE 向引张,逆冲运动方向指示 NE—SW 向挤压。盆地断层测量和运动分析表明,近 W—E 向引张应力作用和 NW—SE 向挤压应力作用记录在莱阳群和青山群地层中,在王氏群中没有记录;近 N—S 向引张应力和 NE—SW 向挤压应力作用不仅在下白垩统中有良好记录,同时已影响到了王氏群地层。另外,莱阳群地层发育近 N—S 走向、胶结良好的构造破碎带,宽 1~2m,长数十米,推测是同沉积时期地震破裂的产物。根据断层滑动矢量叠加关系,并结合凹陷沉积充填序列推断,近 W—E 向引张应力发生在青山群喷发与沉积时期,NW—SE 向挤压作用发生在青山群沉积末期、王氏群沉积之前,对应于早、晚白垩世之间构造反转应力场(张岳桥等,2006);近 N—S 向引张发生在晚白垩世王氏群沉积时期,而 NE—SW 向挤压可能发生在古新世末期。

上述古应力分析结果显示,早白垩世时期,郭城凹陷处于 NW—SE 向和近 W—E 向引张应力作用之下,NW—SE 引张控制了凹陷伸展和莱阳群河湖相沉积,而近 W—E 向引张作用控制了凹陷内火山喷发活动。早白垩世末期,凹陷遭受 NW—SE 向挤压,早白垩世地层发生褶皱和断裂变形,这期挤压应力作用使凹陷东西两侧边界断裂左旋走滑活动。晚白垩世,构造应力转换为近 N—S 引张,受到凹陷两侧断裂的右旋剪切作用的影响,凹陷发生拉分断陷,北部地区发生沉降,堆积了王氏组砂砾层。白垩纪末期至古近纪,在 NE—SW 向挤压应力作用下,凹陷再次发生收缩变形,从而结束了沉积,进入了长期隆升和剥蚀阶段。

### 2.2 莱阳—海阳地区

在莱阳—海阳地区,牟—即断裂带由 4 条主要断裂组成,从西到东分别为:桃村—东陡山断裂、郭城断裂、朱吴断裂和海阳断裂。这些断裂控制了该区断陷盆地的形成和演化。该区白垩纪地层出露完整,我们分别对莱阳凹陷和赤山—朱吴凹陷中的莱阳群、青山群和王氏群地层进行了断层运动学观察和测量,初步获得了该区白垩纪盆地构造应力场转换序列。

莱阳群断层运动学与古应力方向:莱阳组地层中断裂构造很发育,断层滑动矢量记录了 2 期引张

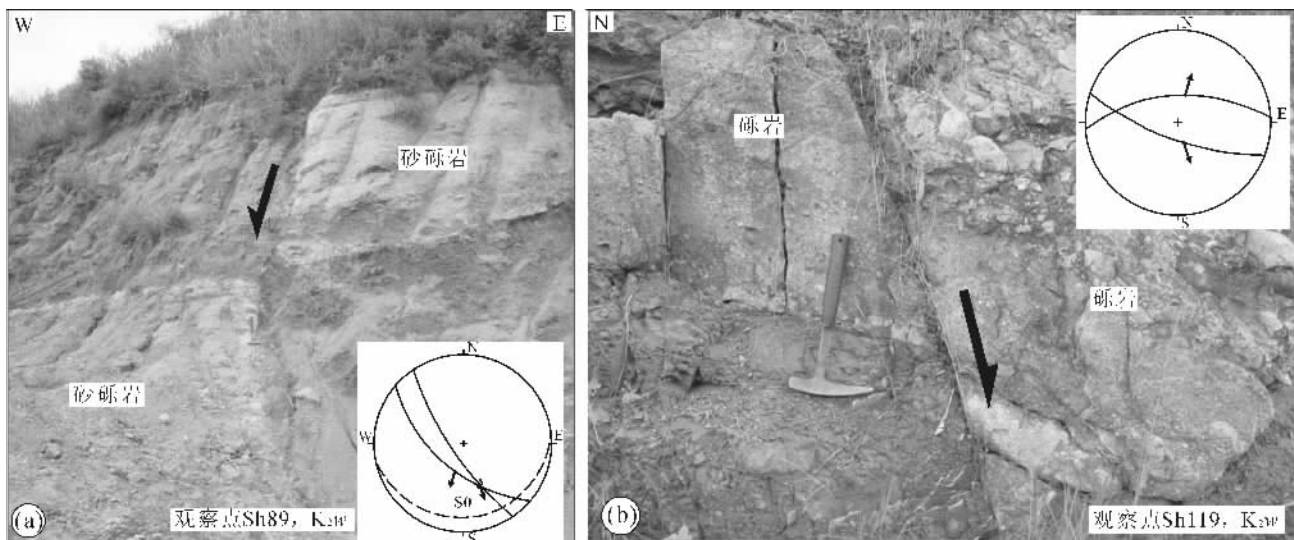


图 2 莱阳凹陷(a)和郭城凹陷(b)王氏群砂砾岩中正断层及其滑动矢量(观察点位置见图 1)

Fig. 2 Normal faults and slip vectors affecting conglomeratic rocks of the Wangshi Group in the Laiyang and Guocheng depressions(see fig. 1 for site location)

应力和 2 期挤压应力。2 期引张应力方向分别为近 W—E 和近 N—S; 2 期挤压应力方向分别为 NW—SE 向和 NE—SW 向。

青山群断层运动学与古应力方向: 青山组火山岩层记录了 2 期挤压应力和 2 期引张应力, 2 期挤

压应力方向分别为 NW—SE 向和 NE—SW 向, 且前者早于后者; 2 期引张应力方向分别为近 W—E 向和 N—S 向, 前者早、后者晚。

王氏群断层运动学与古应力方向: 王氏组地层仅发育在莱阳凹陷西部地区, 由于覆盖严重, 断层露

表 1 牟平—即墨断裂带两侧白垩纪构造应力方向反演结果

Table 1 Parameters of Cretaceous stress inversions along the Muping—Jimo fault zone

序号	观察点	地理坐标		影响岩石或地层	断层数量	主应力方向			应力系数 R
		北纬	东经			$\sigma_1(ax, pl)$	$\sigma_2(ax, pl)$	$\sigma_3(ax, pl)$	
1	JD10	37°07.410'	121°01.303'	黑云二长岩	3	204, 63	355, 24	91, 11	0.219
2	JD12	37°10.394'	121°09.010'	K <sub>1</sub> l 砂砾岩	5	131, 8	12, 74	223, 14	0.554
3			6		172, 61	352, 29	260, 0	0.713	
4			4		345, 55	82, 11	189, 32	0.175	
5	JD14	37°04.889'	121°07.583'		4	15, 66	196, 24	106, 0	0.634
6				4	128, 16	32, 23	250, 62	0.817	
7	JD15	37°01.922'	121°06.249'	K <sub>1</sub> l 砂砾岩	4	69, 67	197, 15	291, 17	0.704
8			5		340, 0	249, 74	70, 16	0.42	
9	JD16	37°04.700'	120°58.223'		4	128, 4	345, 84	218, 3	0.61
10				5	250, 1	158, 64	341, 26	0.724	
11				5	123, 6	223, 56	29, 33	0.781	
12				6	79, 14	263, 76	169, 1	0.692	
13	JD21	36°27.286'	120°32.797'	K <sub>1q</sub> 火山岩	6	190, 69	350, 20	82, 7	0.078
14			4		41, 14	135, 16	273, 69	0.575	
15	JD22	36°23.168'	120°33.065'	K <sub>1q</sub> 火山岩	4	120, 62	323, 26	228, 10	0.811
16	JD23	36°22.874'	120°30.924'	K <sub>1q</sub> 火山岩	6	157, 86	336, 4	66, 0	0.639
17			6		135, 77	305, 13	35, 2	0.601	
18			4		331, 18	159, 72	61, 3	0.131	
19			4		192, 53	49, 31	308, 18	0.269	
20	JD25	36°26.739'	120°38.586'		K <sub>1</sub> l 砂砾岩	4	58, 4	182, 83	328, 6

注:  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  分别为最大、中间、最小主应力轴,  $ax$ : 主应力轴倾向,  $pl$ : 主应力轴倾角,  $R$ : 应力椭圆系数 [ $R = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1)$ ]; K<sub>1</sub>l, K<sub>1q</sub> 分别代表早白垩世莱阳群和青山群。

头点不多。有限的断层滑动矢量测量资料和分析结果表明,王氏群沉积时期应力方向为近 N—S 向引张(图 2),与郭城凹陷的应力方向一致。

### 2.3 即墨地区

即墨地区出露大量的青山组火山喷发岩,局部地区出露莱阳群水南组地层,被即墨断裂和青岛断裂所切。对这 2 套地层进行了详细的断层测量和运动学分析,结果表明,白垩纪时期,该区牟—即断裂带经历了与郭城凹陷和莱阳—海阳地区相同的构造应力场演化历史。在早白垩世莱阳群和青山群中,

记录了 2 次引张应力事件和 2 次挤压应力事件。2 次引张应力事件分别为近 W—E 向和 NNE—SSW 向,2 次挤压应力事件分别为 NW—SE 和 NE—SW 向。与郭城凹陷和莱阳—海阳地区类比,近 W—E 向引张作用发生在青山组堆积时期,NW—SE 向挤压作用发生在早白垩世末期的构造运动时期;NNE—SSW 向引张作用发生在晚白垩世时期,而 NE—SW 向挤压应力作用发生在白垩纪末期。由此,牟—即断裂带运动方向发生相应的转换,从青山期引张伸展到早白垩世晚期的左旋走滑,再到晚白

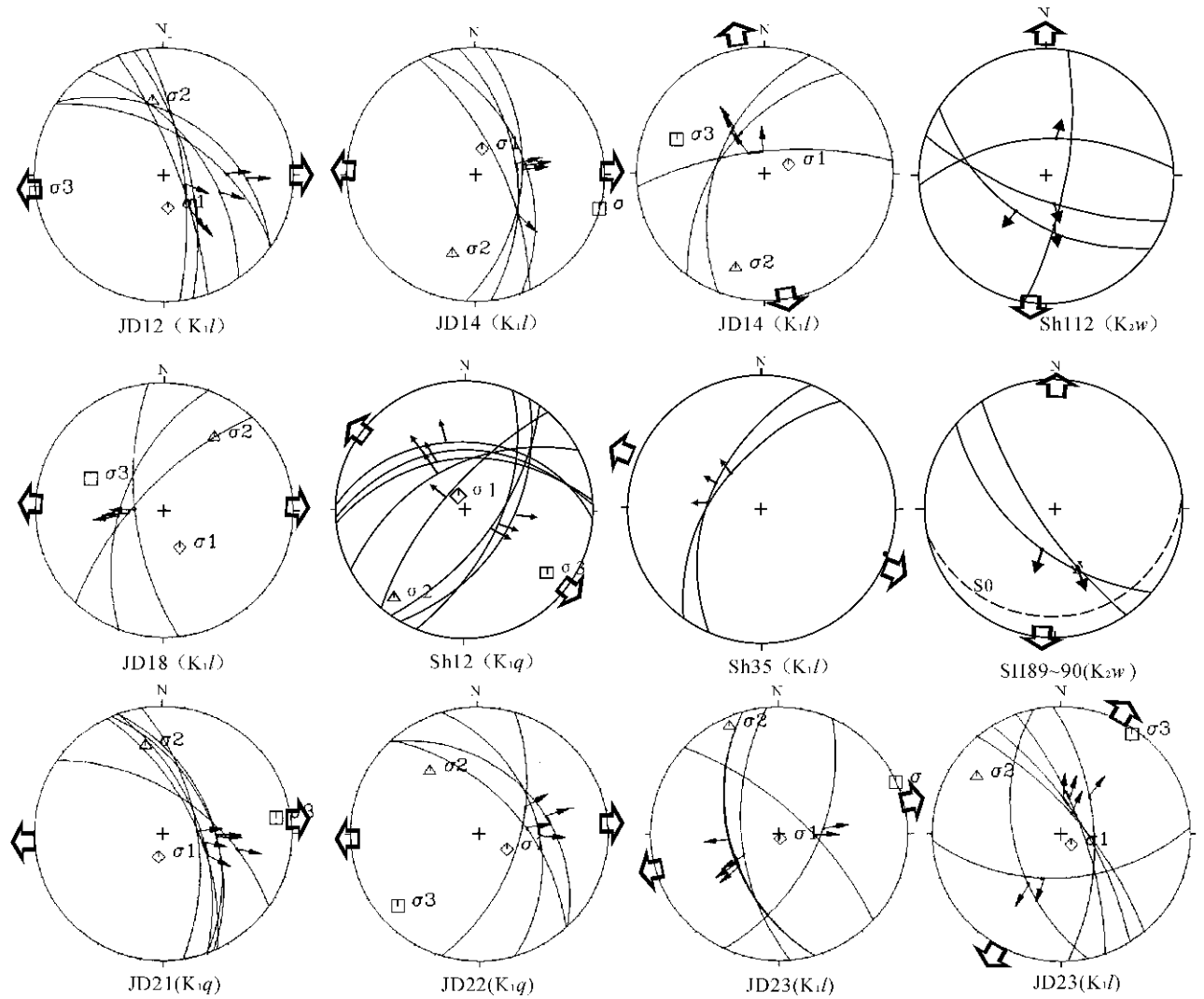


图 3 沿牟平—即墨断裂带正断层滑动矢量赤平投影及其伸展构造应力场反演(野外测量点位置见图 1)

Fig. 3 Stereonet projection of measured fault slip vectors and extensional stress inversions along the Muping—Jimo fault zone

(see fig. 1 for location of field measurement sites)

小箭头代表断层面上滑动矢量,空心大箭头指示伸展方向; $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  分别为最大、中间、最小主应力轴;

赤平图下方为野外观测点编号,括弧中为地层, $K_{1l}$  和  $K_{1q}$  分别对应早白垩世莱阳群和青山群

Small arrows inside the stereonet represent slip vectors on fault plane; hollow heavy arrows indicate orientation of extension;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  correspond to maximum, intermediate and minimum principal stress axis; below the stereonet is the number of the field measurement site, in bracket is stratigraphic symbol,  $K_{1l}$  and  $K_{1q}$  correspond to Early Cretaceous Laiyang Group and Qingshan Group, respectively

歪世的右旋伸展走滑拉分和右旋走滑挤压。

### 2.4 牟平—即墨断裂带白垩纪构造应力场演化

图3和图4展示了野外观察点断层滑动矢量的测量和构造应力反演结果,表1列出了各点古应力

轴的方向和应力椭圆系数。图5对白垩纪应力场的反演进行了统计分析。从图中可以看出,牟-即断裂带在白垩纪时期经历了多期不同性质和不同方向的构造应力作用,断层运动性质也相应发生变化。结

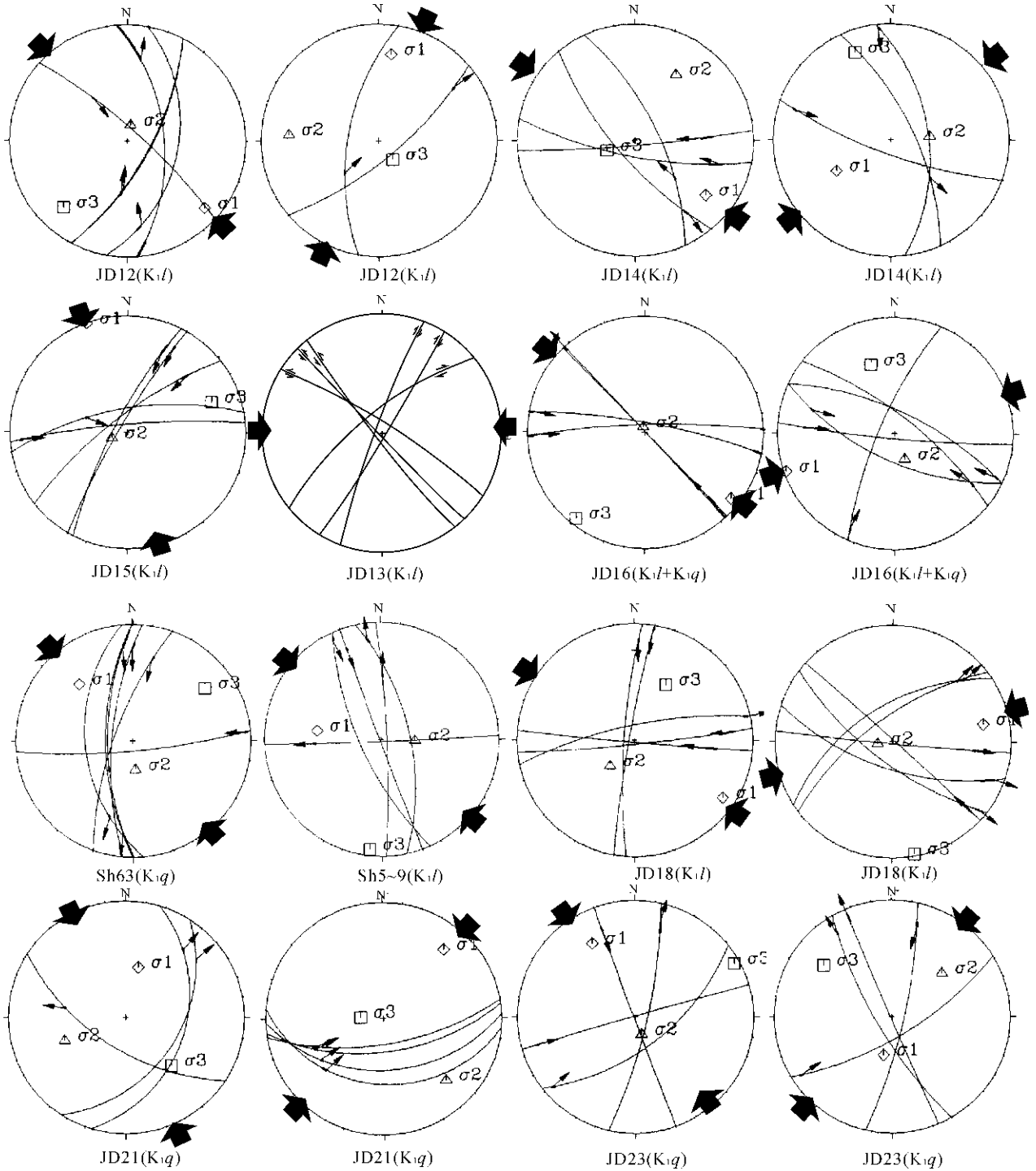


图4 沿牟平—即墨断裂带断层滑动矢量及其挤压应力场反演(野外测量点位置见图1)

Fig. 4 Fault slip vectors and compressional stress inversions along the Muping—Jimo fault zone (see fig.1 for location of field measurement sites)

实心大箭头指示挤压方向,其他同图3

Black heavy arrows indicate orientation of compression, other symbols are same as in fig. 3

合胶莱盆地沉积充填序列和岩浆作用, 将牟—即断裂带白垩纪运动历史划分为下列 5 个阶段。

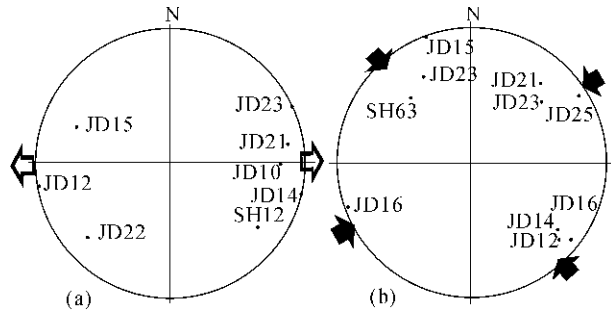


图 5 沿牟平—即墨断裂带早白垩世 E—W 向引张应力方向(a)和两期挤压应力方向(b)赤平投影

Fig. 5 Stereonet projection of the calculated stress axis for Early Cretaceous E—W extension (a) and two compressions (b)

(1) 早白垩世莱阳期 NW—SEE 向伸展: 该期伸展控制了莱阳组沉积, 但伸展应力方向主要记录在盆地基底。伸展作用控制了胶莱原型盆地的发育。在莱阳群沉积之后和青山群组发育之前, 存在一期轻微的近 W—E 向挤压, 在莱阳组沉积地层中形成一组初始共轭节理。

(2) 早白垩世青山期近 W—E 向伸展: 这期伸展发生在青山群火山岩喷发阶段, 牟—即断裂带以伸展活动为主, 与沂沭裂谷系大盛群沉积时期的伸展构造应力场一致。

(3) 早白垩世末期 NW—SE 向挤压: 这期挤压应力作用发生在早、晚白垩世之间, 是区域构造作用的结果, 挤压作用导致牟—即断裂带左旋走滑复活, 并使早白垩世地层发生褶皱变形。这次构造挤压事件使胶莱盆地产生东、西分异, 东部海阳凹陷整体抬升, 并处于隆升剥蚀状态。

(4) 晚白垩世近 N—S 向伸展: 该时期伸展作用主要发生在桃村—东陡山断裂带以西的莱阳凹陷和郭城凹陷的局部地区, 伸展方向为近 N—S 向, 伸展作用与牟—即断裂带的右旋剪切拉分作用有关。根据莱阳凹陷地层记录, 推断这期伸展作用可能一直持续到整个古新世, 因为莱阳凹陷中金岗口组是一个跨晚白垩世和古新世的地层单位。

(5) NE—SW 向挤压: 这期挤压作用记录在所有白垩纪地层和基底岩石中, 根据盆地地层记录推断, 该挤压事件很可能发生在古新世晚期或末期(50~42Ma)。它使 NE 向牟—即断裂带发生右旋走滑

活动, 但走滑量较小; 同时, 这期挤压作用结束了胶莱盆地的沉积历史, 使盆地整体隆升, 并遭受剥蚀。

### 3 牟平—即墨断裂带运动历史的年代学制约

沿牟—即断裂带两侧发育燕山期花岗岩体, 它们的相互错位关系为确定该断裂左旋走滑运动提供了重要的地质标志, 为此, 前人做了观察和研究(如 Xu et al., 1987; Cui et al., 1994)。如 Cui 等(1994)研究认为, 沿牟—即断裂带两侧分布的 12 个花岗岩体是由原始 5 个岩体经断裂错移的结果, 经恢复, 断裂错动的累积位移量达 100 km。这些岩体主要岩性为花岗岩和二长花岗岩。在牟—即断裂带以东的胶南隆起区, 以海阳地区的招虎山岩体、海阳岩体和青岛地区的崂山岩体为代表, 侵入时代为早白垩世晚期(单颗粒锆石 U-Pb 和 Rb-Sr 年龄在 110~126Ma, 少数 147Ma)(赵广涛等, 1997; 山东省第四地质矿产勘察院, 2003)。

为了确定牟—即断裂带构造活动时代, 本文对沿断裂带发育的花岗岩体、岩脉和火山喷发岩进行了锆石 U-Pb 离子探针和 Ar-Ar 测年, 获得了 4 个花岗岩体、7 个火山岩体的年龄数据(表 2), 详细的年龄测试结果分析将另文发表。2 个样品的锆石 U-Pb 离子探针测年结果显示牙山岩体和院格庄岩体的结晶年龄分别为  $117.7 \pm 2.9\text{Ma}$  和  $113.4 \pm 2.5\text{Ma}$ , 年龄非常接近, 与胶南地区崂山花岗岩基本同时, 表明这两个岩体侵入发生在郭城盆地形成之后(莱阳群沉积之后), 即早白垩世中晚期。对凹陷中的侵入到莱阳组的花岗岩体和正长斑岩脉进行锆石 U-Pb 离子探针测年, 获得的 2 个结晶年龄在 116~123Ma 之间。这些年龄界定了莱阳期伸展作用时代的上限。

7 个青山群火山岩的 Ar-Ar 年龄主要分布在 107~120Ma 之间, 与深成侵入岩体是几乎同时代的。火山岩的年龄代表了牟—即断裂带主要伸展作用时代, 即早白垩世晚期。

然而, 牙山岩体和院格庄岩体之间的错位关系及其结晶年龄给桃村断裂带左旋走滑位移量时代的确定提出了重大的挑战。因为, 牙山岩体和院格庄岩体的侵入时代在郭城盆地形成之后。断层运动学和构造应力场研究表明, 尽管早、晚白垩世之间存在一次重要的挤压走滑变形, 但沿桃村—东陡山断裂带左旋位移量是很小的, 它并没有错开胶莱盆地莱阳组的沉积相带分布, 即沿断裂带后期位移量不可

能达约 30km。显然,牙山岩体和院格庄岩体之间的错位关系并不是在岩体侵位之后发生的,先前认为的这两个岩体的左旋错移,其实是一个假象,岩体侵位时,它们并不在一起,即不是同一个岩体。那么,为什么会产生这种假象呢?这儿笔者提出一种先走滑、后侵入的构造解释。沿断裂早期走滑活动肯定存在的。而这两个燕山晚期岩体的侵位显然继承了早期深部构造格局,即现今两个岩体所在的位置,原来应在一起的,桃村断裂的左旋走滑使早期深部构造错移了约 30km。而晚燕山岩体侵入继承了这种格局,结果出现了错移的假象。

那么,桃村断裂左旋错移在什么时间发生的呢?显然,约 30km 左旋走滑位移必定发生在断陷盆地内莱阳群沉积之前。尽管没有确切的年代学证据,但笔者推测其很可能发生在晚侏罗世时期。在胶北隆起区,发现了大量的晚侏罗世侵入岩体,即胶北玲珑期岩体侵入岩,该类岩体呈岩基产出,侵入时代在 150~160Ma(Miao et al., 1997; 苗来成等, 1998; 关康等, 1998)。在招远地区,可见岩体被 NNE 向断裂左旋错动,表明岩体侵入之后、白垩纪盆地发育之前,存在一次重要的左旋走滑活动。由此推断,在玲珑期花岗岩体侵入之后、胶莱盆地莱阳组沉积之前,沿 NE 向牟-即断裂带存在一期重要的左旋走滑活动,走滑量超过几十千米。

#### 4 牟平—即墨断裂带在北黄海盆地的延伸

区域构造研究早已指出,牟-即断裂带是青岛—鸭绿江断裂带的组成部分,是郯庐断裂带东侧一条大型的走滑构造带(Xu et al., 1987)。但这条断裂带在北黄海海域如何延伸、其活动方式如何,一直没

有做过详细研究。本文根据地震剖面资料和区域编图,简略阐述牟-即断裂带在北黄海的延伸及其构造演化。

图 6 展示了胶莱盆地和北黄海盆地中部断陷带的分布特征及其构造样式。中部断陷带由南、北两个狭长展布的 NE 向断陷盆地组成。牟-即断裂带向海域延伸,正好经过中部断陷带,再向 NE 延伸,与鸭绿江断裂带相连。因此,北黄海盆地中部断陷带应是牟-即断裂带在北黄海盆地的具体表现。中部断陷带的发育可能继承了牟-即断裂带,但在白垩纪—古新世时期,经历了复杂的构造变动。

地震剖面解释结果显示,中部断陷带受两侧断层的控制,断陷盆地窄而深,具有裂陷性质,其形态特征与沂沭裂谷系马站—苏村盆地或与郭城凹陷相似,表明断陷盆地的发育明显继承了基底断裂构造(图 6)。在断陷盆地内,发育 3 套地层:下白垩统下部、下白垩统上部和上白垩统—古新统。其上为中新生—第四纪水平地层所披盖,之间缺失始新世—渐新世沉积。断陷内上、下白垩统之间为明显的角度不整合接触,表明早白垩世末期存在一次重要的构造挤压反转事件。下白垩统上部地层已遭受不同程度的剥蚀,地层厚度横向变化较大。晚白垩世—古新世地层也发生褶皱变形,指示在古新世晚期盆地又发生了一次构造挤压反转。因此,中部断陷带的演化经历了 2 个成盆阶段和 2 次构造反转事件。2 个成盆阶段分别发生在早白垩世和晚白垩世—古新世,而 2 次挤压反转事件分别发生在早白垩世末期和古新世末期。这个构造演化序列与沂沭裂谷系和胶莱盆地是一致的(Zhang et al., 2003; 张岳桥等, 2006)。

表 2 沿牟平—即墨断裂带侵入岩和火山喷发岩 Ar-Ar 和 SHRIMP U-Pb 测年结果一览表

Table 2 Ar-Ar and SHRIMP U-Pb dating results of intrusive and eruptive rocks along the Muping—Jimo fault zone

样品编号	地点	野外点号	岩石野外定名	单矿物或全岩	Ar-Ar 坪年龄 (Ma)	Ar-Ar 等时年龄 (Ma)	锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 (Ma)
8-14-3	海阳朱吴地区	Sh33	肉红色花岗岩脉	锆石			115.7 ± 3.1
8-23-2	盆地中花岗岩	Sh97	花岗岩(脉)	锆石			122.5 ± 5.1
8-16-1	牙山岩体	Sh39	粗晶花岗岩	黑云母, 锆石	116.0 ± 0.5	116.9 ± 0.7	117.7 ± 2.9
8-24-1	院格庄岩体	Sh107	巨晶花岗岩	黑云母, 锆石	116.6 ± 0.6	116.8 ± 1.4	113.4 ± 2.5
8-13-4	朱吴高家庄	Sh23	火山喷发岩	全岩	116.8 ± 0.7	118.5 ± 2.3	
8-13-6	朱吴高家庄火山岩	Sh26	火山岩	全岩	106.7 ± 0.9	109.6 ± 3.2	
8-14-2	海阳朱吴地区	Sh33	玄武岩(脉)	全岩	110.6 ± 1.0	118.0 ± 2.0	
8-19-1	海阳青山组底部	Sh63	灰黑色火山岩	全岩	117.1 ± 0.8	119.3 ± 3.3	
8-25-1	海阳万第	Sh115	细晶玄武岩	全岩	119.2 ± 0.6	122.7 ± 1.7	

注: 锆石 SHRIMP U-Pb 测试由北京离子探针中心完成; Ar-Ar 年龄测试分析由中国地质大学(北京)地质实验中心完成。



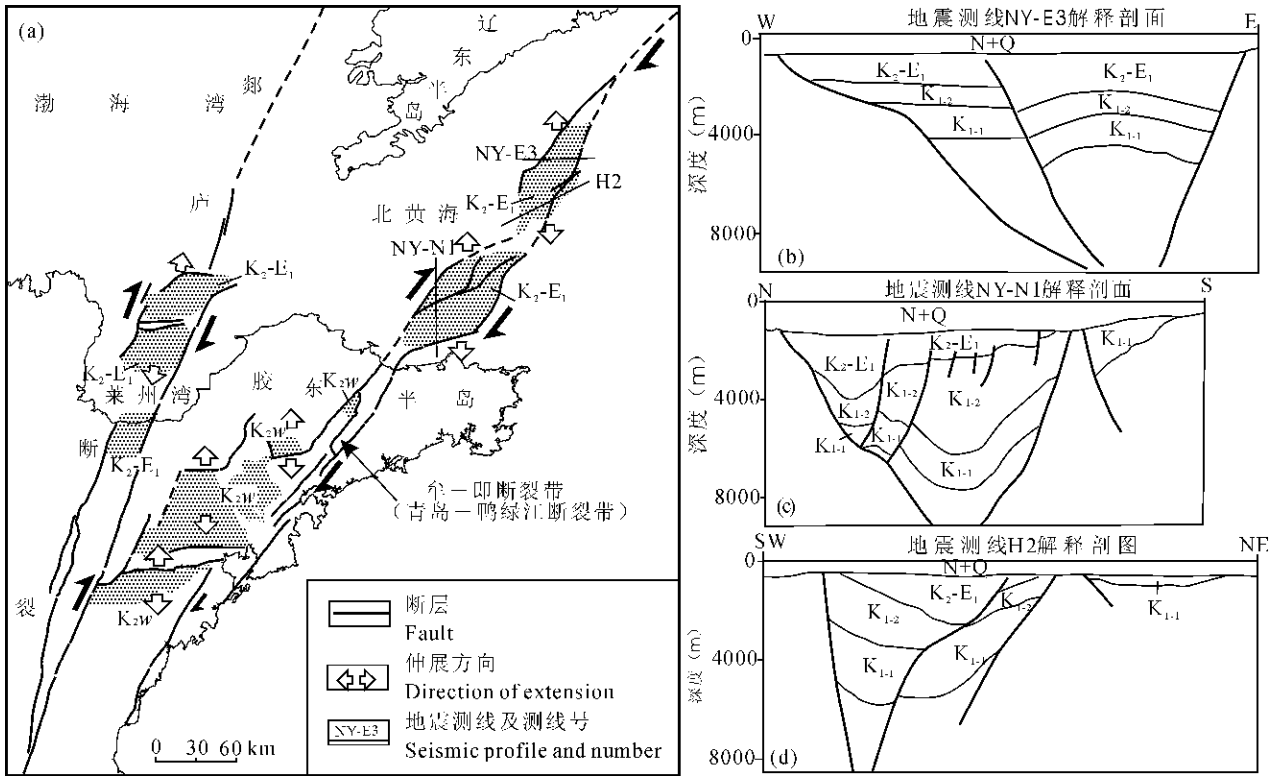


图 6 牟平—即墨断裂带在北黄海盆地中的延伸及其晚白垩世—古新世运动学(a)及盆地构造样式(b-d)  
 Fig. 6 NNE prolongation in the North Yellow Sea of the Muping—Jimo fault zone and Late Cretaceous to Paleogene kinematics (a) and structural style of basin (b-d)

### 5 牟平—即墨断裂带晚中生代运动学转换序列

通过上述断裂带地质体错移分析、不同构造部位、影响不同时代地层的断层运动矢量野外测量和反演结果分析和同位素年代学测试分析,可以清楚地看出,牟-即断裂带在晚中生代经历了多变的运动历史,断裂运动方向、构造应力体制和应力场方向发生多次重大转换。笔者将这段时期的构造演化历史划分为 3 个大的阶段:晚侏罗世挤压左旋平移阶段、早白垩世引张伸展断陷阶段、晚白垩世—古新世右旋走滑阶段。在早白垩世晚期和古新世晚期,分别发生区域构造挤压事件。

(1) 晚侏罗世挤压左旋平移 (left-lateral transpression) 阶段: 断裂带左旋平移年代下限为 150Ma 左右 (玲珑岩体侵入时代), 上限为 135Ma (郭家岭岩体侵入时代), 持续时间在约 15Ma。这个阶段正是郯庐巨型左旋走滑断裂系统发育时期, 在郯庐断裂带不同部位所获得的糜棱岩同位素年龄 (K-Ar, Ar-Ar, 138~143Ma) 证实了这期左旋走滑变形 (徐嘉炜等, 1992, 1995; 朱光等, 2002, 2004)。

(2) 早白垩世伸展断陷 (transtensional faulting) 阶段: 早白垩世, 引张构造应力体制占主导, 牟-即断裂带引张伸展控制了胶莱盆地东部断陷的形成和发展, 这个阶段经历了 2 期引张伸展作用和一期构造挤压平移作用。莱阳组沉积时期 (135~120 Ma) NW—SE 向伸展控制深而狭长的断陷盆地发育, 沿朱吴断裂带东侧局部地区有少量中基性、中酸性火山喷发岩发育。青山期 (120~107 Ma) 伸展方向转为近 W—E 向, 以强烈的火山喷发和玄武岩脉发育为特征, 牟-即断裂带成为火山喷发活动的中心。至早白垩世末期, 受到区域 NW—SE 向构造挤压作用, 整个胶莱盆地早白垩世地层发生褶皱变形, 在王氏群底部形成角度不整合接触; 牟-即断裂带发生左旋走滑活动。尽管这次构造挤压具有重要的区域意义, 但与晚侏罗世挤压平移作用相比, 这次挤压事件没有导致牟-即断裂带显著的走滑错距。

(3) 晚白垩世—古新世右旋伸展走滑和挤压走滑 (right-lateral transtension and transpression) 阶段: 晚白垩世时期, 盆地构造应力体制转为近 N—S 向引张, 伸展作用主要集中在莱阳凹陷西部地区 and 郭城凹陷, 沿断裂带局部地段发生拉分, 形成断陷盆

地,如北黄海中部断陷带。该时期岩浆活动较弱,以幔源基性、超基性玄武岩脉灌入为主,表明断裂右旋走滑拉分作用影响到上地幔。这个时期的伸展断陷主要是牟-即断裂带右旋剪切拉分作用的结果,根据盆地中地层推断,右旋伸展走滑作用一直持续到古新世。至古新世晚期,构造应力作用转为右旋挤压走滑,晚白垩世拉分断陷停止发育,盆地地层发生褶皱变形,继而整体隆升而处于剥蚀状态。

## 6 牟平—即墨断裂带晚中生代构造演化对中国东部构造体制转换过程的制约

已有大量研究成果表明,中国东部晚中生代经历了以挤压为主到伸展为主的构造体制重大转换,岩石圈从古生代的 120~180 km 减薄到现今的 70~80 km(Zhou et al., 2003; Zhai et al., 2003; 翟明国等, 2004; 吴福元等, 2003)。这个过程深部机理和区域动力学背景早已引起了我国地学界的高度重视,成为中国东部大地构造研究的热点(任纪舜等, 1990; 吴福元等, 1999; 董树文等, 2000; 邓晋福等, 2003)。牟-即断裂带运动学演化历史较完整地记录了中国东部晚侏罗世—白垩纪时期构造体制重大转换过程,并对构造体制转换过程的动力学背景提供了重要的构造地质学制约。

晚侏罗世挤压左旋平移作用的动力主要来自于板块之间汇聚产生的边界动力。这个时期古太平洋板块向北北东方向运动,在东亚大陆边缘产生一个南北向剪切力偶,从而导致了我国东部 NNE 向巨型郯庐左旋走滑断裂系统的发育(Xu et al., 1987, 朱光等, 2002, 2004)。同时由于古太平洋板块与亚洲大陆斜向汇聚,引起东亚大陆边缘地壳收缩变形和岩石圈增厚作用。

早白垩世时期,随着古太平洋板块向亚洲大陆俯冲作用加强和海沟向大洋方向的后退,板块边界动力条件发生变化,东亚大陆岩石圈深部构造—热体制发生深刻的变化,引张构造应力体制占主导地位,岩石圈拆沉、地幔底辟等深部作用过程主导了地表伸展构造的发育和岩浆活动,东亚岩石圈发生巨量减薄。研究表明,早白垩世早期(莱阳群沉积时期)的伸展作用往往与碰撞造山带构造塌陷有关;真正的大规模陆内裂谷作用和岩浆活动发生在早白垩世中晚期(青山期, Ar—Ar 年龄在 106~120 Ma),其显著的特征是沿郯庐断裂带发生裂陷,郯庐裂谷系由此产生;在断陷盆地中发生广泛而强烈的、具双

峰式特征的火山喷发活动,沿碰撞造山带,下地壳熔融形成中国东部巨型 A-型花岗岩带(王德滋等, 1998)。笔者推测,这个时段是中国东部岩石圈巨量减薄的最主要时期,也是中国东部大兴安岭—太行山构造—地貌阶梯带形成的主要时期。早白垩世末期,岩石圈减薄作用基本告一段落,而古太平洋板块向东亚大陆斜向俯冲汇聚产生的走滑应力场又占据主导地位,在中国东部产生 NW—SE 向挤压,郯庐断裂系以左旋走滑活动为主。这个走滑应力场持续时间较短( $<10$  Ma),产生的走滑变形相对较弱。

晚白垩世时期,古太平洋板块运动方向发生了变化,俯冲方向从 NNW 向转为 NW 向,东亚大陆的构造属性也随之发生变化,以俯冲为主,大陆边缘构造应力场以右旋走滑应力场占据主导地位,这个应力场可能一直持续到古近纪。笔者曾推测(Zhang et al., 2003),产生这个构造应力场的动力来源不仅与古太平洋向亚洲大陆俯冲作用有关,而更多地与中国西部特提斯构造域地块碰撞产生的远程效应有关,两者的联合共同主导了东亚大陆边缘晚白垩世构造演化。

## 7 主要结论

盆地断层运动学分析、古构造应力方向反演、岩体错移分析,结合锆石 U-Pb 离子探针、Ar-Ar 年代学测试结果,表明牟平—即墨断裂带在晚侏罗世—白垩纪时期经历了 3 个显著不同的演化阶段,构造应力体制和运动方向经历了从晚侏罗世挤压左旋走滑平移、到早白垩世引张伸展、再到晚白垩世—古新世右旋走滑拉分的转变过程。晚侏罗世左旋走滑平移发生在玲珑岩体(时代 150~160 Ma)侵入之后和早白垩世莱阳组沉积之前(上限年龄为 135 Ma)。早白垩世引张方向为 NW—SE 至近 W—E 向,青山组火山喷发时代在 107~120 Ma。晚白垩世伸展方向近 N—S,指示牟平—即墨断裂带右旋走滑活动,并控制了胶莱拉分盆地的东界。在早、晚白垩世之间发生这一次构造挤压事件,挤压方向 NW—SE,牟平—即墨断裂带发生左旋走滑活动,但错移量不大,早白垩世断陷盆地发生构造反转。牟平—即墨断裂带晚侏罗世—白垩纪运动学历史和构造应力场演化较完整地记录了中国东部晚中生代构造体制转换过程。

## 参 考 文 献 / References

戴俊生, 陆克政, 宋全友, 陈书平. 1995. 胶莱盆地的运动学特征. 石油

- 大学学报(自然科学版),19(2):1~6.
- 邓晋福,苏尚国,赵海玲,莫宣学,肖庆辉,周肃,刘翠,赵国春. 2003. 华北地区燕山期岩石圈减薄的深部过程. 地学前缘,10(3):41~50.
- 董树文,吴锡浩,吴珍汉,邓晋福,高锐,王成善. 2000. 论东亚大陆的构造翘变——燕山运动的全球意义. 地质论评,46(1):8~13.
- 关康,罗镇宽,苗来成,黄佳展. 1998. 胶东招远郭家岭型花岗岩锆石 SHRIMP 年代学研究. 地质科学,33(3):318~328.
- 刘建忠,李三忠,周立宏,高振平,郭晓玉. 2004. 华北板块东部中生代构造变形与盆地格局. 海洋地质与第四纪地质,24(4):45~54.
- 陆克政,戴俊生. 1994. 胶莱盆地的形成和演化. 山东东营:石油大学出版社. 1~174.
- 苗来成,罗镇宽,关康,黄佳展. 1998. 玲珑花岗岩中锆石的离子质谱 U-Pb 年龄及其岩石学意义. 岩石学报,14(2):198~206.
- 任纪舜,陈廷愚,牛宝贵,刘志刚,刘凤仁. 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京:科学出版社,1~194.
- 宋明春,王来明. 2000. 对胶南造山带基础地质问题的新认识. 中国区域地质,19(1):1~6.
- 唐华风,程日辉,白云凤,孔庆莹. 2003. 胶莱盆地构造演化规律. 世界地质,22(3):246~251.
- 山东省第四地质矿产勘察院. 2003. 山东省区域地质. 济南:山东省地图出版社,1~970.
- 王德滋,赵广涛,邱建生. 1995. 中国东部晚中生代 A 型花岗岩的构造制约. 高校地质学报,1(2):13~21.
- 王来明,宋明春,王沛成. 2001. 胶南—威海造山带研究进展及重要地质问题讨论. 山东地质,18(3~4):78~83.
- 吴福元,孙德有. 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄. 长春科技大学学报,29(4):313~318.
- 吴福元,葛文春,孙德有,郭春丽. 2003. 东部岩石圈减薄研究中的几个问题. 地学前缘,10(3):51~60.
- 徐嘉炜,朱光,吕培基,郑学信,孙世群. 1995. 郯庐断裂带平移年代学研究的进展. 安徽地质,5(1):1~12.
- 徐嘉炜,马国锋. 1992. 郯庐断裂研究的十年回顾. 地质论评,38(4):316~324.
- 翟明国,孟庆任,刘建明,侯泉林,胡圣标,李忠,张宏福,刘伟,邵济安,朱日祥. 2004. 华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨. 地学前缘,11(3):285~298.
- 翟慎德. 2003. 胶莱盆地莱阳凹陷构造特征及演化. 石油实验地质,25(2):137~142.
- 张岳桥,李金良,柳宗泉,任风楼,袁嘉音. 2006. 胶莱盆地深部拆离系统及其区域构造意义. 石油与天然气地质,27(4):504~511.
- 赵广涛,王德滋,曹钦臣. 1997. 崂山花岗岩岩石地球化学与成因. 高校地质学报,3(1):1~15.
- 周本刚,冉勇康,环文林,冉洪流. 2002. 山东海阳断裂东石兰沟段晚更新世以来地表断错特征与最大潜在地震估计. 地震地质,24(2):160~166.
- 周存亭,周高志,胡云琴. 2003. 大别—苏鲁造山带地质图. 北京:地质出版社.
- 朱光,牛漫兰,刘国生,王道轩,宋传中. 2002. 郯庐断裂带早白垩世走滑运动中的构造、岩浆、沉积事件. 地质学报,76(3):325~324.
- 朱光,王道轩,刘国生,牛漫兰,宋传中. 2004. 郯庐断裂带的演化及其对西太平洋板块运动的响应. 地质科学,39(1):36~49.
- Cui Kerui, Shi Yangshen. 1994. Offset of rock bodies on the both sides of Muping—Qingdao fault zone in eastern Shandong, China. Journal of Nanjing University (Natural Science edition), 30(4):648~661.
- Miao Laicheng, Luo Zhenkuan, Huang Jiazhan, Guan Kang, L G Wang, N J McNaughton, D I Groves. 1997. Zircon sensitive high resolution microprobe (SHRIMP) study of granitoid intrusions in Zhaoye gold belt of Shandong province and its implication. Science in China(Series D),27(3):207~213.
- Xu J W, Zhu G, Tong W X, et al. 1987. Formation and evolution of the Tancheng—Lujiang wrench fault system: a major shear system to the northwest of the Pacific Ocean. Tectonophysics, 123:173~310.
- Zhai Mingguo, Zhu Rixiang, Liu Jianming, Meng Qingren, Hou Quanlin, Hu Shengbiao, Li Zhong, Zang Hongfu, Liu Wei. 2003. Time range of Mesozoic tectonic regime inversion in eastern North China Block. Science in China (Series D), 33(10):913~920.
- Zhang Yueqiao, Shuwen Dong, Wei Shi. 2003. Cretaceous deformation history of the middle Tan-Lu fault zone in Shandong Province, eastern China. Tectonophysics, 363(3~4):243~258.
- Zhao Guantao, Wang Dezi, Cao Qingchen, Yu Liansheng. 1998. Thermal evolution and its significance of I—A-type granitoid complex. Science in China (Series D),41(5):529~536.
- Zhou Xinhua, Yang Jinhui, Zhang Lianchang. 2003. Metallogenesis of superlarge gold deposits in Jiaodong region and deep processes of subcontinental lithosphere beneath North China craton in Mesozoic. Science in China (Series D),46(Supp.):14~25.

## Late Mesozoic Kinematic History of the Muping—Jimo Fault Zone in Jiaodong Peninsula, Shandong Province, East China

ZHANG Yueqiao<sup>1</sup>, LI Jinliang<sup>2</sup>, ZHANG Tian<sup>1</sup>, YUAN Jiayin<sup>2</sup>

1) Department of Earth Science, Nanjing University, Nanjing, 210093;

2) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081

### Abstract

The Muping—Jimo fault zone not only forms the boundary between the Su-Lu (Jiangsu—Shandong) orogenic belt and Jiaobei(north Jiaodong Peninsula) block (North China Block), but also consists of the huge Tancheng—Lujiang left-lateral strike-slip fault system in East China. Based on field analysis of fault slip data and paleostress inversion, zircon SHRIMP and Ar/Ar dating of intrusive and volcanic rocks, and

combining with the results of geophysical interpretations in the North Yellow Sea, this paper presents evidences for the distribution and tectonic evolution history of the Muping—Jimo fault. The results show that this fault zone experienced, during the period from the late Jurassic to Cretaceous, three distinct periods of fault motion, characterized by left-slip transpression during the late Jurassic, extension or transtension during the Early Cretaceous and right-slip transtension during the Late Cretaceous and Paleogene. Late Jurassic was an era for important left-lateral strike-slip motion along the Tancheng—Lujiang fault system, which is marked by about 30 km offset along the Taocun—Dongdoushan fault. The tectonic stress regime changed to extension during the Early Cretaceous and the Muping—Jimo fault zone was dominated by normal faulting which resulted in formation of deep and narrow fault-down troughs. The direction of extension during this period was NW—SE to W—E. Dating of granites intruded in the Early Cretaceous Laiyang Group and basalts of the Early Cretaceous Qingshan Group yielded consistent results bracketed between 106 Ma and 123 Ma. During the Late Cretaceous and possibly lasted for Paleogene, the Muping—Jimo fault zone moved right-laterally and controls pull-apart opening of the Jiaolai (Jiaoxian—Laiyang) basin. A phase of transpression, characterized by NW—SE compression, occurred near the end of the Early Cretaceous, which caused the Early Cretaceous basins to be deformed and inverted, and the Muping—Jimo fault zone to be activated left-laterally. The kinematic history of the Muping—Jimo fault zone and the change in tectonic stress regimes during the Late Jurassic to Cretaceous well record the transformation of late Mesozoic tectonic regimes in East China, and provide important structural geology constraint on geodynamic setting of the tectonic regime transformation.

**Key words:** Muping—Jimo fault zone; fault kinematics; tectonic stress field; strike-slip faulting; extensional faulting; tectonic regime transformation; late Mesozoic; Jiaodong peninsula

