

# 台湾增生楔的构造单元划分及其变形特征

丁巍伟<sup>1</sup>,程晓敢<sup>2</sup>,陈汉林<sup>2</sup>,吴能友<sup>3</sup>

(1. 国家海洋局海底科学重点实验室, 浙江 杭州 310012; 2. 浙江大学地球科学系, 浙江 杭州 310027;  
3. 国土资源部广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075)

**摘要:**台湾增生楔位于欧亚板块、菲律宾海微板块和南海的结合部位,是现代弧陆碰撞研究的理想场所。通过对南海 973 航次在该区域的多道地震剖面的解释,对该增生楔进行了构造单元的划分,并分析了变形特征。认为台湾增生楔是由 3 个部分,即弧陆碰撞产生的增生部分、洋内俯冲产生的增生部分和增生楔后端在恒春海脊和北吕宋海槽之间的构造楔组成,研究区的高屏斜坡、恒春海脊和北吕宋海槽西端变形带分别是 3 个部分的反映。自中新世以来,南海洋壳开始沿着马尼拉海沟向菲律宾海微板块俯冲,形成增生楔中洋内俯冲增生部分;与此同时菲律宾海微板块开始向 NW 方向移动,前缘的吕宋岛弧自 6.5Ma B. P 以来与亚洲陆缘斜向碰撞,形成增生楔中弧陆碰撞增生部分。碰撞首先发生在台湾岛的北部,由于弧陆强烈的挤压作用,增生楔后端部分向北吕宋海槽倒冲楔入,使得上部的北吕宋海槽的沉积发生隆升变形。滨海的各个地貌单元可以和台湾陆上的地貌单元相联系,它们具有相似的地质特征,但是由于陆上部分增生历史久,不仅抬升为陆,而且地层的年代也更老。

**关键词:**台湾增生楔;弧陆碰撞;动力学机制;南海

**中图分类号:**P736.12      **文献标识码:**A

台湾增生楔是指台湾岛南部滨海的地形隆起区,在地貌上由高屏斜坡和恒春海脊两个近 N-S 向的海底隆起带组成。前人研究认为台湾增生楔是洋内俯冲和弧陆碰撞共同作用的结果<sup>[1-3]</sup>,同时由于是斜向碰撞,增生楔的形成具有从北向南发育的穿时性<sup>[4-7]</sup>,台湾增生楔的北端已经隆升为现在的台湾岛,而在台湾增生楔的南端,洋内的俯冲仍在继续进行。该地区是研究洋洋俯冲和弧陆碰撞进程以及变形特征的一个理想场所。

国土资源部广州海洋地质调查局于 2001 年 6 月至 12 月利用“探宝号”调查船开展了南海 973 航次的调查研究,在南海东北部至菲律宾海盆进行了地震数据采集,对地震资料进行切除、滤波、叠加、反褶积与偏移处理。本文重点研究和分析了位于南海东北部的一条多道地震测线(图 1),该剖面经过南海北部陆坡、南海海盆、台湾增生楔和北吕宋岛弧,最终进入花东海盆。本文选取其中经过台湾增生楔和吕宋岛弧的一段(图 1 中的 A—D 剖面)进行研究,对台湾增生楔进行了构造单元划分,并对台湾增生楔的形成演化过程进行反演。

## 1 区域地质特征

台湾增生楔位于南海的东北角、台湾岛的西南部(图 1),处于欧亚板块和菲律宾海微板块的结合带上,受到欧亚板块、南海微板块和菲律宾海微板块的共同影响。南海微板块从中新世开始沿着马尼拉海沟向菲律宾海微板块俯冲消减,同时菲律宾海微板块也以  $70\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$  的速

收稿日期:2004-12-20;修订日期:2005-03-12

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(G2000046704)

作者简介:丁巍伟(1977—),男,浙江省义乌市人,博士,主要从事构造地质、地球物理研究。E-mail: wwding@bjpeu.

度向 NW 方向移动<sup>[8]</sup>,其最前端的吕宋岛弧已经与欧亚板块碰撞,导致强烈的变形。由图 1 可以看出,台湾增生楔呈现一个倒三角形,向北与台湾最南端的恒春半岛相连,向南逐渐变窄尖灭。该地区西面是发育在被动大陆边缘背景上的一系列断陷盆地,东侧是 NW 向移动的非律宾海微板块最前沿的吕宋岛弧。台湾增生楔处于强烈的碰撞挤压应力场中,叠瓦状推覆构造发育,构造活动复杂。

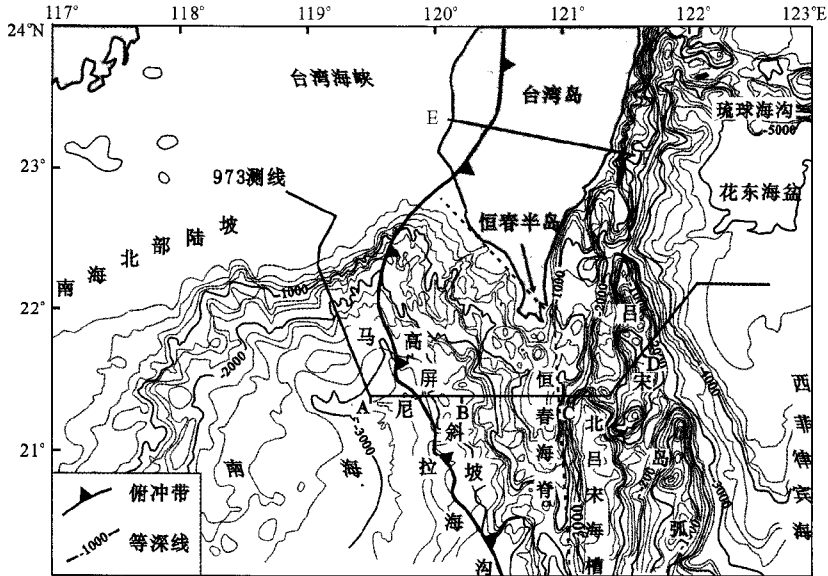


图 1 台湾岛南部滨海地区地形图

图中等深线间隔为 200m,数据来源于国土资源部广州海洋地质调查局。虚线范围内为台湾增生楔位置。

A—D 剖面为 973 测线经过台湾增生楔中的一段, E—F 剖面为横穿台湾的地质剖面

Fig. 1 General bathymetric and topographic map of offshore Taiwan Island

## 2 台湾增生楔的地质特征

经过台湾增生楔的 973 航次多道地震剖面显示(图 2—4),台湾增生楔大体可以分为 3 个部分:地震反射清晰,地势较为平缓,较低的高屏斜坡;地震反射模糊,变形强烈,地势较高的恒春海脊;位于恒春海脊和吕宋岛弧之间的增生楔后端构造楔。作者对这几个部分的地震剖面进行逐一分析,并将它们分别与穿过台湾岛上的一条地质剖面进行比较,讨论台湾增生楔的地质特征和演化规律。

### 2.1 高屏斜坡

高屏斜坡位于马尼拉海沟的东部,呈 NW-SE 向展布(图 1)。马尼拉海沟标示了一个构造间断,构造特征从南海北部陆缘的正断层变为高屏斜坡的逆断层(图 2)。剖面经过的高屏斜坡是台湾增生楔的最前端,宽度大约为 4km,地震反射显示发育了一些东倾的逆断层,地层基本上为水平状,但是与南海海盆的沉积相比明显发生褶皱变形。同时还发现有泥底辟穿刺入较厚的快速堆积的沉积物中,泥底辟作用一般沿着冲断带发育,甚至突出地表形成泥火山,如紧挨着马尼拉海沟的泥火山(图 2)。海中的高屏斜坡可以一直向北延伸,与台湾岛上的西部丘陵带相连。西部丘陵带与高屏斜坡具有十分相似的地质特征,左边为水平沉积的海岸平原,右边为更高的中央山脉,由一系列褶皱冲断带组成,同时,在西部丘陵带也有泥火山发育<sup>[9]</sup>。

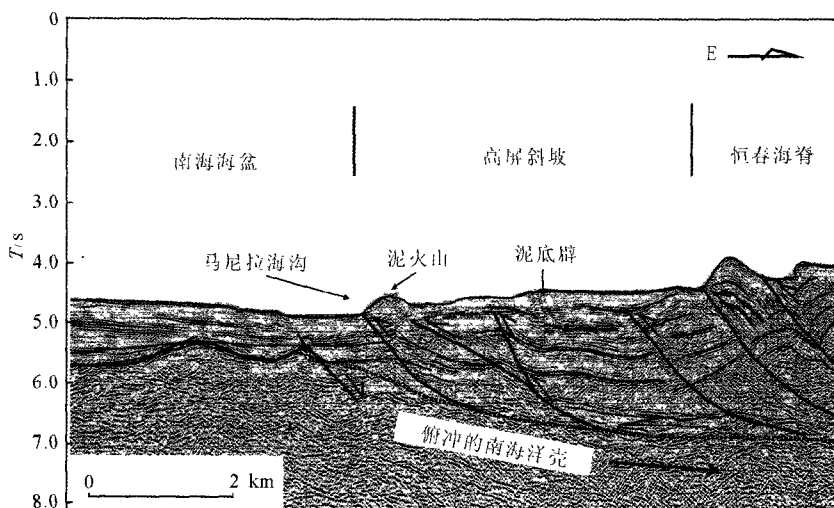


图 2 高屏斜坡段地震剖面

位置见图 1 中 A—B

Fig. 2 Seismic section across Gaoping Slope

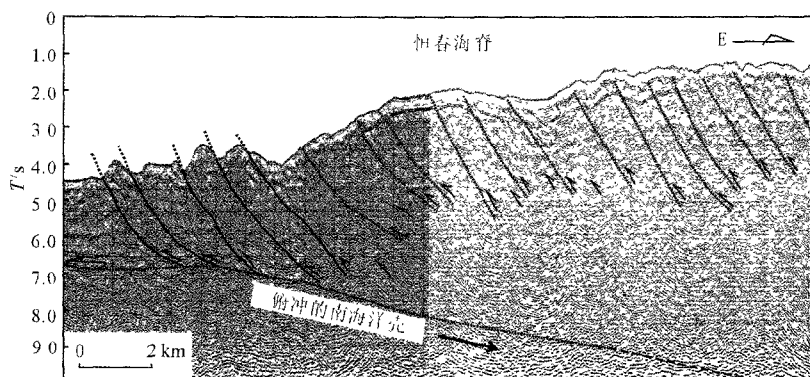


图 3 恒春海脊段地震剖面

位置见图 1 中 B—C; 由于剖面右侧的地震数据质量不好, 断层为推测性示意表示

Fig. 3 Seismic section across Hengchun Ridge

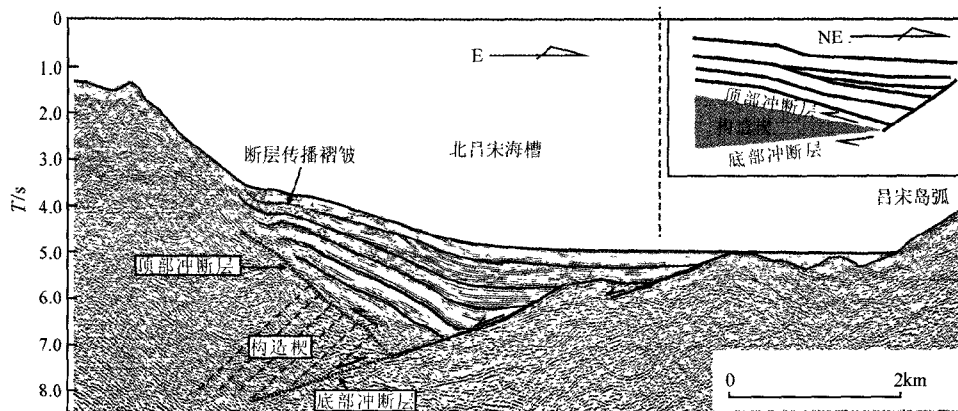


图 4 北吕宋海槽地震剖面

位置见图 1 中 C—D; 虚线表示推测的冲断层和地层; 右上方方框内为构造楔的一般结构样式<sup>[10]</sup>

Fig. 4 Seismic section across North Luson Through

先前的海沟可能位于西部丘陵带和海岸平原之间,由于隆升而消失。西部丘陵带的宽度远大于地震剖面经过位置的高屏斜坡,而且变形也更为强烈,隆升为陆(图5)。这些表明增生楔体由北往南变形变弱,宽度也变窄。根据对岩性的分析,西部丘陵带为中新世浅变质作用的板岩<sup>[6]</sup>,而高屏斜坡岩性为更新世至现代的浅海相硅质岩<sup>[11]</sup>,沉积由北往南变新,也说明了碰撞由北向南进行。

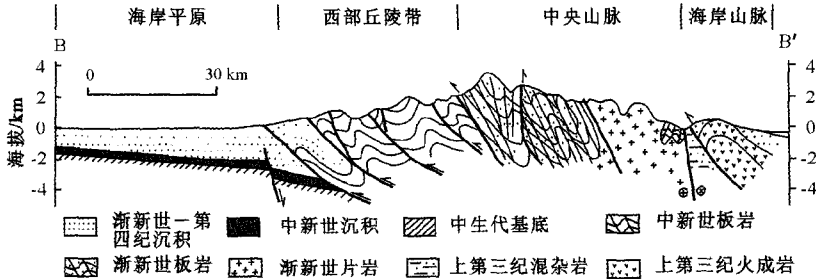


图5 台湾岛地质横剖面图<sup>[3]</sup>

位置见图1中E-F

Fig. 5 Schematic cross-section of Taiwan Island<sup>[3]</sup>

## 2.2 恒春海脊

恒春海脊位于高屏斜坡东侧,也是由一系列褶皱冲断带组成,表明向西的冲断,但是展布方向转为近N-S向(图1),而且地震反射的样式与高屏斜坡相比有明显不同。西部高屏斜坡为较清晰的水平状反射,东部恒春海脊为模糊的反射,变形更为强烈,这些特征可能揭示两者是由不同的动力学过程所形成(图3)。恒春海脊组成了台湾增生楔体的最高部分,地层比高屏斜坡更早的结合进增生楔中,这符合菲律宾海微板块向欧亚板块西向运动过程中首先发生的是南海洋壳的俯冲,形成了俯冲增生部分,而后随着弧陆碰撞,形成了碰撞增生部分的动力学特征。恒春海脊向北和台湾南部的恒春半岛相连,并可一直延续到中央山脉(图5)。根据前人研究,在恒春海脊到恒春半岛之间并未发现有构造剪断或者明显的E-W向走滑带,说明它们之间的连续性<sup>[1,3,12]</sup>。中央山脉、恒春半岛到滨海的恒春海脊相似的地质特征说明它们均为洋内俯冲产生的俯冲增生部分,由于碰撞作用的先后而呈现出由陆到海、由高到低的不同地貌特征。中央山脉南部为早一中中新世深海相的浊积岩和板岩,恒春半岛为中一晚中新世深海相的浊积岩和板岩,推测恒春海脊为类似的深海相沉积<sup>[5]</sup>。恒春海脊的沉积特征与高屏斜坡的更新世-现代浅海相硅质岩<sup>[11]</sup>在岩性和地层年代上都存在差异,也说明了台湾增生楔中恒春海脊和高屏斜坡形成的不同时代和经历的不同动力学过程。

## 2.3 增生楔后端构造楔

在台湾增生楔和吕宋岛弧之间是作为弧前盆地的北吕宋海槽,呈N-S向展布,水深最深处超过了3000m。从地震剖面中可以看出(图4),东部的吕宋岛弧地震反射零乱,没有相位显示,属于岩浆岩反射,而西部的恒春海脊为褶皱冲断的沉积岩。北吕宋海槽东段的沉积为水平沉积,并不整合覆盖于吕宋岛弧之上,而西段的沉积却发生了隆升变形,并形成褶皱。本文引用了构造楔这一概念来解释变形产生的原因。构造楔是由一个顶端冲断带和底端冲断带为边界的楔状体(图4),在很多水下增生楔或者冲断带与弧前盆地之间都有发现<sup>[13-16]</sup>。从图4可以看出,由于弧陆强烈的挤压作用,增生楔朝向弧前盆地的一端以构造楔的形式向东楔入了北吕宋海槽的西端,使得原来的水平沉积发生隆升和变形。构造楔由东倾的底部冲断层和西倾

顶端冲断层挟持,底部冲断层的冲断作用只是表现为构造楔所在位置的一段,上部北吕宋海槽的沉积并未产生逆冲变形,断层也仍然表现为正断层。顶部的冲断层使得上部的地层产生挤压变形,表现为断层传播褶皱,地层的厚度也逐渐减薄。随着挤压碰撞的继续,构造楔将继续往东楔入,北吕宋海槽的水平沉积都将发生隆升变形作用,而北吕宋海槽也将变窄消失,并最终在台湾形成中央山脉东端的一部分(图 5)。

### 3 讨 论

从台湾滨海增生楔组成的 3 个构造单元即高屏斜坡、恒春海脊和增生楔后端构造楔的构造特征及其与台湾陆上的对比可以看出,台湾增生楔是由洋内俯冲和弧陆碰撞的增生部分共同形成的,滨海和陆上地区有很好的延续性和相似性,并分别代表了弧陆碰撞的不同阶段。

自古新世以来,整个欧亚大陆的东部陆缘都处于太平洋构造域的影响范围内,属于伸展的构造环境,南海北部陆缘的珠江口盆地、台西南盆地等都具有类似的构造特征,形成了大量的地堑-半地堑构造<sup>[17-19]</sup>。台湾岛现在所处位置与珠江口盆地、台西南盆地等类似,构造特征也类似。

随着伸展作用的继续,晚渐新世以来南海发生了海底扩张运动,并在早中新世开始沿着马尼拉海沟俯冲到菲律宾海微板块的下部。此时的俯冲属于洋内俯冲,洋壳上早中新世以后的深海相沉积在马尼拉海沟东部堆积形成俯冲产生的增生楔部分(图 6a),在陆上对应于中央山脉和恒春半岛,在海域对应于恒春海脊。

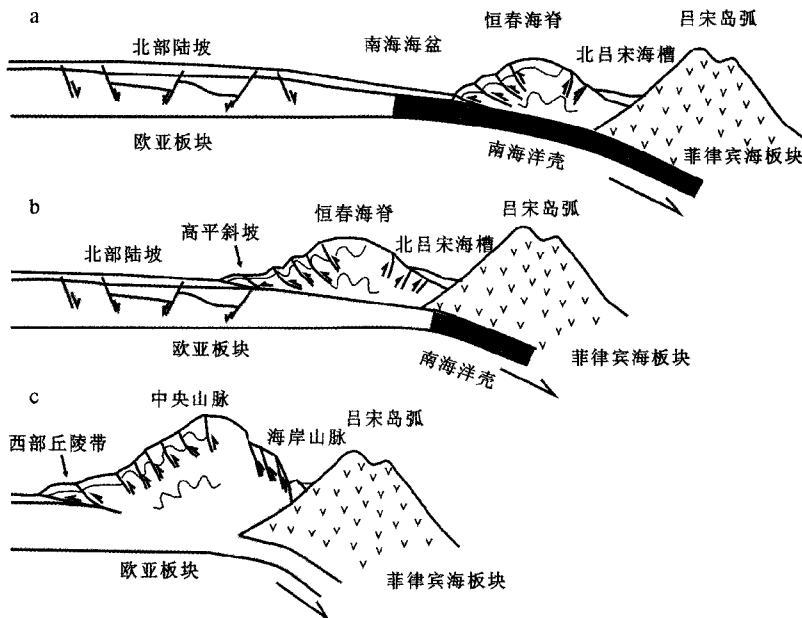


图 6 台湾增生楔演化过程示意图

a. 洋内俯冲阶段;b. 弧陆开始碰撞阶段;c. 弧陆碰撞后期阶段

Fig. 6 Sketch map showing tectonic evolution of Taiwan accretionary prism

随着俯冲作用的继续和菲律宾海微板块向西北方向移动,自 6.5Ma B. P 以后发生菲律宾海微板块最前端吕宋岛弧和欧亚板块之间的碰撞(图 6b)<sup>[7,20]</sup>。由于欧亚板块和菲律宾海微

板块展布方向不同,使得碰撞倾斜发生并具有穿时性。碰撞首先在台湾的北部发生,然后由北向南继续进行<sup>[4-7]</sup>。先前俯冲作用产生的增生楔隆升得更高,而在增生楔俯冲增生部分的西面产生了碰撞增生部分,变形作用要弱于俯冲增生部分。973 测线所经过的滨海地区台湾增生楔就处于弧陆碰撞的开始阶段,产生了宽度不大的高屏斜坡。碰撞增生部分由于在北部碰撞发生时间早,增生时间长,所以由北往南宽度变小,增生的沉积物年代也依次变新。

强烈的挤压作用使得增生楔东端的构造楔逐渐向东面的北吕宋海槽楔入,使得上部的地层逐渐发生隆升和变形,北吕宋海槽的宽度由南向北变窄(图 1),地层也由水平状变为东倾的倾斜地层。

随着碰撞作用的进一步进行,高屏斜坡可能会发生顺时针转动而形成类似西部丘陵带的 NE-SW 向构造,而恒春海脊隆升为最高的类似中央山脉的构造,北吕宋海槽最终也隆升成为类似于台湾岛中央山脉东部的一部分(图 6c)。由于弧陆的直接碰撞,俯冲的陆缘沉积也会被吕宋岛弧“刮擦”而堆积于增生楔的东部。如在台湾中央山脉的西部为渐新世的经过变质作用的板岩,而东部出现了中新世的板岩,并且冲断片的倾向相反<sup>[9]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] Suppe J. Kinematics of arc-continent collision, flipping of subduction and back-arc spreading near Taiwan[J]. Mem. Geol. Soc. China, 1984, **6**: 21—33.
- [2] Angelier J. Geodynamics of the Eurasia-Philippine Sea plate boundary[J]. Tectonophysics, 1986, **125**: 161—178.
- [3] Teng L S. Geotectonic evolution of late Cenozoic arc-continent collision in Taiwan[J]. Tectonophysics, 1990, **183**: 57—76.
- [4] Reed D L, Lundberg N, Liu C S. Structural relations along the margins of the offshore Taiwan accretionary wedge: implications for accretion and crustal kinematics[J]. Acta. Geol., 1992, **30**: 105—122.
- [5] Huang C H, Wu W Y, Chang C P. Tectonic evolution of accretionary prism in the arc-continent collision terrane of Taiwan[J]. Tectonophysics, 1997, **281**: 31—51.
- [6] Hall R. The plate tectonics of Cenozoic SE Asia and the distribution of land and sea[A]. In: Hall R, Holloway J D, eds. Biogeography and Geological Evolution of SE Asia[M]. Leiden: Backhuys Publisher, 1998. 99—132.
- [7] Huang C H, Xia K Y, Perter B. Structural evolution from Paleogene extension to Latest Miocene-Recent arc-continent collision offshore Taiwan: comparison with on land geology[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2001, **19**: 619—639.
- [8] Seno T, Stein S, Gripp A E. A model for the motion of the Philippine Sea plate consistent with NUVEL-1 and geologic data[J]. Journal of Geophysical Research, 1993, **98**: 17 941—17 948.
- [9] Sun S C, Liu C H. Mud diapirs and submarine channel deposits in offshore Kaohsiung-Hengchun, southwest Taiwan [J]. Petroleum Geology of Taiwan, 1993, **28**: 1—14.
- [10] Reed D L, Silver E A. Sediment dispersal and accretionary growth of the North Panama deformed belt: Special paper [J]. Geological Society of America, 1995, **295**: 213—223.
- [11] Chi W C, Reed D L, Moore G, *et al.* Tectonic wedging along the rear of the offshore Taiwan accretionary prism[J]. Tectonophysics, 2003, **374**: 199—217.
- [12] Chemenda A I, Yang R K, Stephan J F. New results from physical modeling of arc-continent collision in Taiwan: Evolutionary model[J]. Tectonophysics, 2001, **333**: 159—178.
- [13] Westbrook G K, Ladd J W, Buhl P. Cross section of an accretionary wedge: Barbados ridge complex[J]. Geology (Boulder), 1998, **16**(7): 631—635.
- [14] Silver E A, Reed D. Backthrusting in accretionary wedges[J]. Journal of Geophysical Research, 1988, **93**(4): 3 116—3 126.
- [15] Torrin Jr. R, Speed R C. Tectonic wedging in the forearc basin-accretionary prism transition, Lesser Antilles forearc [J]. Journal of Geophysical Research, B, Solid Earth and Planets, 1989, **94**(8): 10 549—10 584.

- [16] Silver E A, Abbott L, Kirchoff-Stein K S. Collision propagation in Papua New Guinea and Solomon Sea[A]. Fifth Circum-Pacific Energy and Mineral Resources Conference[C]. Honolulu, HI, USA, 1990. 1001.
- [17] Zhou D, Ru K, Chen H Z. Kinematics of Cenozoic extension on the South China Sea continental margin and its implications for the tectonic evolution of the region[J]. Tectonophysics, 1995, **251**: 161—177.
- [18] 阎 贫, 刘海龄. 南海北部陆缘地壳结构探测结果分析[J]. 热带海洋学报, 2002, **21**(2): 1—12.
- [19] 丁巍伟, 王渝明, 陈汉林, 等. 台西南盆地构造特征与演化[J]. 浙江大学学报(理学版), 2004, **31**(2): 216—220.
- [20] Hall R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer-based reconstructions, model and animations[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2002, **20**: 353—431.

## GEOLOGICAL CHARACTERISTICS AND TECTONIC MECHANISM OF TAIWAN ACCRETIONARY PRISM: EVIDENCES FROM A MULTI-CHANNEL SEISMIC PROFILE OF A "973" SURVEY

DING Wei-wei<sup>1</sup>, CHENG Xiao-gan<sup>2</sup>, CHEN Han-lin<sup>2</sup>, WU Neng-you<sup>3</sup>

1. Laboratory of Submarine Geoscience, SOA, Hangzhou 310012, China;

2. Earth Science Department, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Marine Geology Survey of Guangzhou, Guangzhou 510075, China)

**Abstract:** Taiwan accretionary prism lies in the conjunction area of the Eurasian Plate, the Philippine Sea Plate and the South China Sea, and is characterized by the young age of the arc-continent collision. The structural geometry, kinematics and density structure of the Taiwan accretionary prism were studied based on the interpretation of a multi-channel seismic profile obtained during a "973" survey. Geological evidence showed that the Taiwan accretionary prism consists of three distinct structural domains; the collision prism caused by the arc-continent collision, the subduction prism caused by the inner-ocean subduction, and the tectonic wedge between the Luzon arc and the prism. In the studied area, the three domains are the Gaoping Slope, the Hengchun Ridge and the west part of Luzon Through, respectively. Since the middle Miocene, the South China Sea had subducted beneath the Philippine Sea Plate along the Manila Trench, and the subduction prism came into being. The Philippine Sea Plate also moved northwestward and collided obliquely with the Asian continent since 6.5 Ma B. P. . The arc-continent collision made the collision prism west of the subduction prism, together forming the Taiwan accretionary prism. With the continuous process of the arc-continent collision, a tectonic wedging took place along the rear of Taiwan accretionary prism and caused the uplift and deformation of the strata in the west part of the North Luzon Through. Compared with the onshore geology, the offshore Taiwan accretionary prism has the similar and relevant structure characteristics. They have the same tectonic mechanism but different deformation history, i. e. the collision began in the north of Taiwan, and then propagated southward. The onshore Taiwan has much longer deformation history.

**Key words:** Taiwan accretionary prism; arc-continent collision; tectonic mechanism; South China Sea