

## 冲绳海槽的地质构造属性\*

李乃胜

(中国科学院海洋研究所, 青岛)

**提要** 冲绳海槽构造属性是地学界争论的问题之一, 迄今已提出过断陷盆地、坳陷盆地、弧间盆地、弧后盆地、边缘海盆、张裂盆地等多种看法。本文作者在多次赴冲绳海槽调查和系统总结前人研究成果的基础上提出, 冲绳海槽是一条现代活动裂谷, 具有一系列典型的裂谷构造特征, 其活动机制属于与洋壳俯冲作用有关的弧后裂谷。

位于东亚大陆东缘的冲绳海槽, 以其独特的大地构造位置和强烈的现代构造活动特征吸引了许多中外学者进行了大量调查研究, 迄今发表了几百篇研究论文。随着研究的深入, 存在的问题也愈加突出, 其中之一就是海槽的构造属性问题。为探清这一问题, 自1982年以来, 中国科学院海洋研究所岩石圈课题组利用“科学一号”船多次赴冲绳海槽调查, 获得十几条人工地震剖面并对其进行了分析解译, 得出了冲绳海槽裂谷地貌、断裂活动、水平拉张的证据。

### 一、研究方法

本文对冲绳海槽地质构造属性问题的讨论除对地震剖面进行解译外, 还主要采用了如下方法。

#### 1. 重力资料反演

根据海区情况, 采用压缩质面法的基本原理, 计算了全区的莫霍面(Moho)埋深<sup>[2]</sup>, 用以探讨海槽地壳厚度的变化情况。

#### 2. 构造应力场数学模拟

为论证冲绳海槽的水平拉张, 采用有限元弹塑性平面问题增量法<sup>1)</sup>分别模拟了中新世末和上新世末的古构造应力场。计算中将琉球岛弧、冲绳海槽、台湾—五岛列岛陆架边缘脊和东海陆架盆地作为四种不同的材料(即给出不同的弹性模量和泊松比)建立地质模型, 划分了120个单元进行了三次增量计算, 求出各单元主应力的方向和大小。

#### 3. 分析前人成果

根据国内外学者对冲绳海槽地区的研究成果进行了对比分析, 特别收集了八十年代以来日本、法国、西德等国家对冲绳海槽地区进行的地质地球物理调查资料, 如日本的岩石圈计划(DELP, 1984)、水路部调查计划、德日联合调查计划、法国海洋开发中心调查计划(POP-1, POP-2)等, 根据收集的反射地震、折射地震、电磁测深、海底热流、基岩

\* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第1854号。

国家自然科学基金资助项目。全国海洋湖沼青年学术研讨会优秀论文一等奖。

收稿日期: 1989年8月9日。

1) 万天丰, 1983。构造应力场。

拖网、重磁测量等资料进行综合讨论。

## 二、裂谷构造特征

“裂谷”这一概念的萌生,可以上溯至 18 世纪。首先正式提出这一术语的是英国地质学家格雷戈里 (J. Gregory)。他考察了东非裂谷带的肯尼亚地堑后,将裂谷定义为:“在两个平行正断层间的狭长凹陷。”后来,伯克 (K. Burke) 等人修正为:“整个岩石圈张性开裂处的长条沉降区。”到本世纪五十年代,美国学者尤因 (M. Ewing) 和希曾 (B. C. Heezen) 发现并确认了大洋裂谷系。至本世纪七十年代,由于许多典型裂谷带的研究成果公诸于世,又加之火星裂谷的发现,使裂谷概念进一步完善。虽然对于裂谷的具体定义和各个发展阶段的特征,各国学者有不同的认识,但一般认为裂谷是岩石圈在引张作用下产生的地堑谷地,具有水平张裂、地幔上拱、岩石圈减薄、岩浆活动、地震频繁等典型的构造特征。因此,本文认为,冲绳海槽具有一系列典型的裂谷构造活动特征。

### 1. 地幔上拱

据重力和地温场计算,海槽区地幔明显抬升。异常地幔发育,岩石圈厚度减薄<sup>[9]</sup>。冲绳海槽中部海底地震仪 (OBS) 折射地震表明: 即使接收距离达 130km, 也未探测到明显的 Moho 界面。这说明上地幔与下地壳分界不明显<sup>[13]</sup>, 证明了异常地幔的存在。

### 2. 地壳减薄

双船折射测得海槽南部地壳厚度约为 16km<sup>[11]</sup>, 利用重力资料反演计算, 得出冲绳海槽地区莫霍面埋深 18—24km, 而东海陆架区为 26—30km, 琉球岛弧区为 25—28km, 因此海槽区地壳减薄<sup>[2,3]</sup>(图 1)。根据艾利 (Airy) 地壳均衡模式估算海槽区地壳厚度较均衡态起码减薄 5—6km。

### 3. 水平拉张

区域构造应力场数学模拟结果表明, 海槽两坡处于明显向两侧拉张状态 (图 2)。大量发育的犁形正断层 (Listric fault) 也是海槽水平拉张的证据<sup>[4]</sup>, 这类犁形正断层有

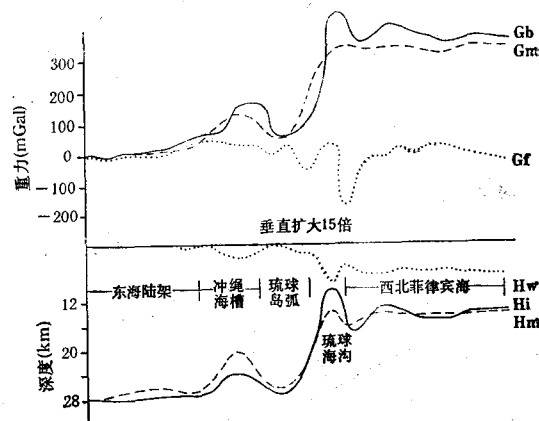


图 1 冲绳海槽地壳厚度剖面

Fig. 1 Crustal thickness profile of the Okinawa Trough

Gb: 布格异常; Gm: 莫霍面引起的异常; Gf: 自由空间异常; Hw: 水深;  
Hi: 均衡态莫霍面; Hm: 莫霍面

三大特点: (1) 断层面上陡下缓,呈弧形弯曲;(2) 断层上盘顺断层面面向海槽中心旋转滑塌,形成“逆牵引”构造;(3) 下降盘一侧地层加厚。这说明此类断层构造是在水平拉张状态下逐渐发育而成的。

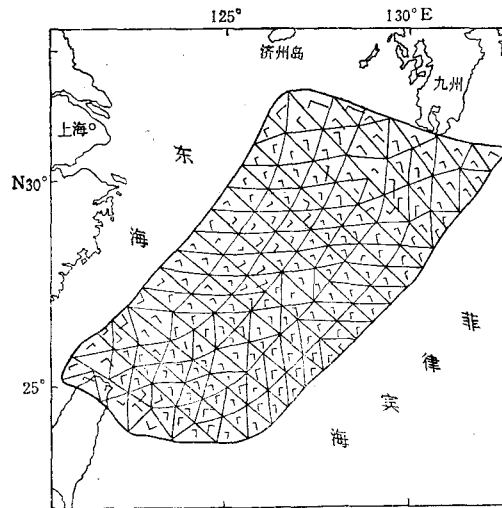


图 2 上新世末主应力图(三角形网络为计算单元划分)

Fig. 2 Main stress at the end of Pliocene

#### 4. 裂谷地貌

地形测量和声学剖面揭示出海槽内发育了壮观的裂谷地貌(图 3),在裂谷轴部又发育了次一级张裂地堑构造(槽中槽),地堑轴断断续续呈 NNE 向雁行斜列,纵贯整个冲绳海槽,成为海槽的张裂中心(图 4)。这是裂谷构造的直接可视证据。

#### 5. 热流值高

冲绳海槽热流值极高,几十个热流测点的平均值大于  $200 \text{ mW/m}^2$ ,最高值可达  $1600 \text{ mW/m}^2$ <sup>[12,15-17]</sup>(图 5)。深潜调查发现有大规模海底热液喷出,发育了较大规模的海底热液丘<sup>[9]</sup>。海槽区如此罕见的热流值远高于大洋中脊和西太平洋诸边缘海,甚至比那些“新

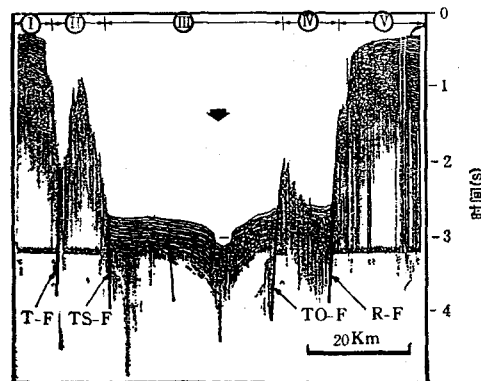
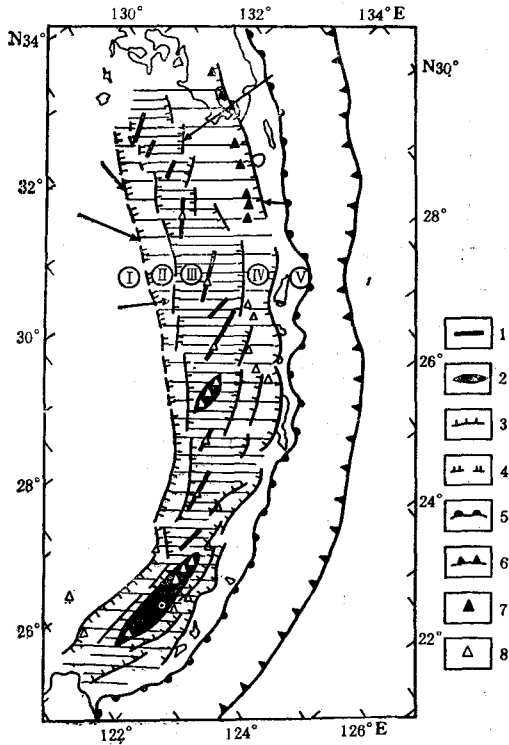


图 3 横穿海槽南部的地震剖面<sup>[8]</sup>

Fig.3 Seismic profile of the southern Okinawa Trough<sup>[8]</sup>

图4 地堑构造展布略图<sup>[8]</sup>Fig. 4 Central graben distribution<sup>[8]</sup>

1.地堑沟; 2.更新世侵入岩; 3.断层; 4.隐伏断层; 5.琉球·岛弧东界; 6.海沟; 7.活火山; 8.更新世以来的火山或侵入体。

生海洋”,如红海、亚于湾也高得多。

### 6. 火山活动

海槽区火山活动强烈,主要发育了两条现代火山链,其一在海槽东坡(吐喀喇火山链),形成了一系列活火山岛;另一条沿海槽中心张裂轴发育,有大量中性和基性火山熔岩喷出(图4)。其中的大量双峰态高铝系列拉斑玄武岩,说明了张裂环境的火山活动,其 K-Ar 年龄仅为  $0.42 \pm 0.19\text{Ma}$ <sup>[10]</sup>,证明为现代火山活动。

### 7. 地震强烈

冲绳海槽为一强震带,属于环太平洋地震活动带的一个组成部分,仅自 1900 年以来,  $M_s \geq 4 \frac{3}{4}$  级的地震就发生了 100 多次,而且多为中浅源地震<sup>[14]</sup>。微地震更加频繁<sup>[13]</sup>。

### 8. 活动断层

冲绳海槽断层构造特别发育,按其走向主要分为 NNE 和 NW 向两组<sup>[4]</sup>。从地震剖面上可明显地看出(图 6),绝大多数断层都向上切穿海底,向下切穿  $T_1^0$ (相当于上新统顶面)和  $T_2^0$ (相当于中新统顶面)反射界面,因此是现代活动断层。

### 9. 重力值高

对应着海槽张裂轴,重力场值明显增高,布格重力异常表现为一条沿海槽轴向展布

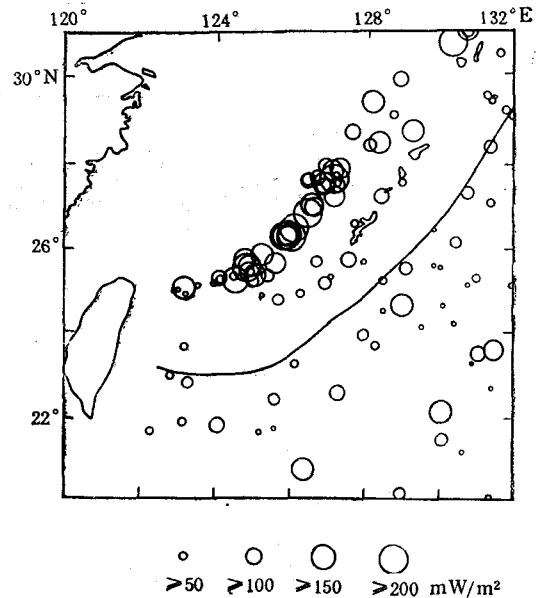


图5 热流分布

Fig. 5 Heat flow distribution

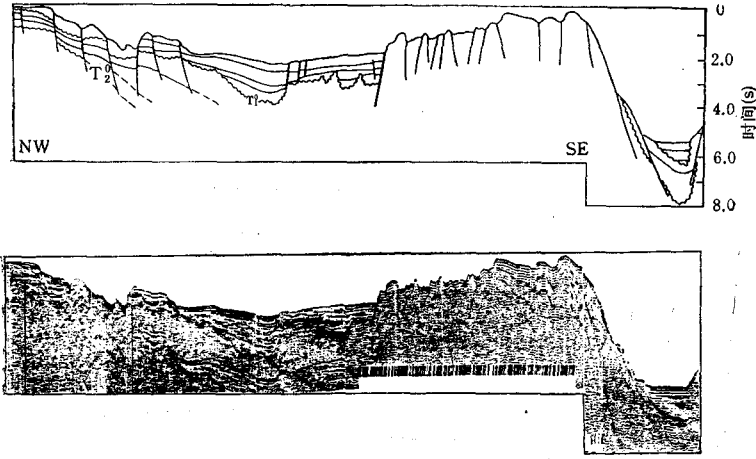


图 6 横穿海槽南部反射地震剖面

Fig.6 Seismic profile of the southern Okinawa Trough

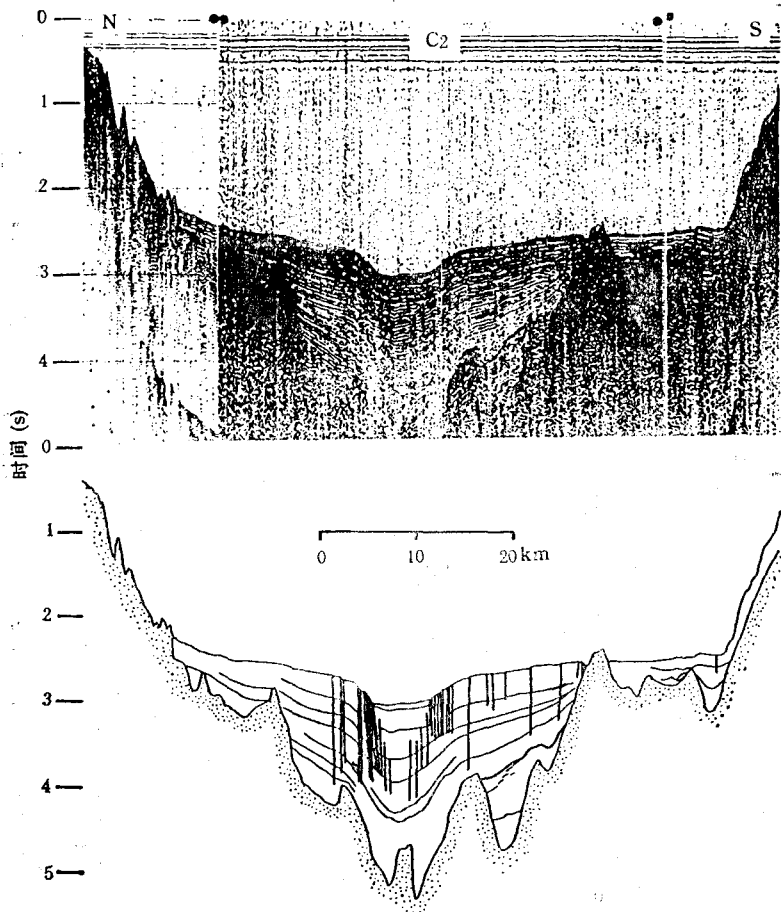


图 7 横穿海槽中部的地震剖面(据 Herman, 1978)

Fig.7 Seismic profile of the middle Okinawa Trough (By Herman, 1978)

的 NNE 向重力高值带,最高值达 160mGal<sup>[18]</sup>。

### 10. 电磁异常

电磁测深证明<sup>[6]</sup>,冲绳海槽之下存在着一个高导层,其上、下界面埋深分别为 45km 和 135km,在海槽中部其电导率高达 1.0S/m。这表明海槽区熔融层埋深小,岩石圈厚度薄。据地温场计算,海槽区岩石圈厚度为 40km 左右。

### 11. 浊流沉积

海槽内充填了较厚的浊积层。根据沉积特征认为<sup>[1]</sup>,冲绳海槽是一个快速沉降、不断拓宽的“饥饿”型裂谷盆地(图 7)。

综上所述,可以认为冲绳海槽是一条现代活动裂谷。

## 三、裂谷活动机制

裂谷构造作为整个岩石圈张裂的大型地堑谷地,其发生发展无疑将受到岩石圈板块活动的制约。在欧亚大陆地壳与太平洋大洋地壳过渡转化的东海陆缘地区,发育了一个完整的大陆边缘裂谷系,由三条裂谷带组成,自西往东依次是郟庐中生代裂谷、东海陆架早第三纪裂谷及冲绳现代裂谷。

### 1. 东海陆缘裂谷系的活动机制

由于其独特的大地构造位置,受到欧亚、印度洋、太平洋三大岩石圈板块的相互作用,东海陆缘裂谷系发育了四个明显的构造特征:

(1) 北北东向雁行斜列 三条裂谷带平行延伸,总体走向为 NE20°。但自西往东,各裂谷带依次向南延伸,呈明显雁行斜列式展布。

(2) 向东南凸出的弧形展布 在总体呈 NNE 向延伸的基础上,三条裂谷带南端均呈弧形转折而变为 SW 向,但其转折位置自西往东各裂谷带依次南移。

(3) 自西往东活动时代变新 西部的郟庐带作为一条断裂,具有漫长的活动历史。但作为一条裂谷,其活动期为中生代,主要为白垩纪。东海陆架为第三纪裂谷,主要活动期为古新世至中新世。冲绳海槽为现代活动裂谷,主要活动期为上新世至现代。

(4) 自北往南活动性增强 同一条裂谷带内表现出自北往南活动时代变新,活动性增强的趋势。郟庐裂谷带内、北部的沂沭裂谷至白垩纪末消亡,而南部的苏皖裂谷至早第三纪仍有较强烈地裂陷活动,发育了上千米厚的下第三系沉积层。东海陆架裂谷带自北往南发育了三大裂陷中心,唯南部的台北裂陷,沉积厚度最大,裂谷特征最明显。冲绳海槽裂谷带自北往南活动性增强更加明显,南部水深增大,张裂地堑发育,火山、地震活动频繁,热流值较北部也明显增大。

由此可见,东海陆缘裂谷系的发展演化主要受中生代以来太平洋与欧亚两大板块的相互作用所制约,印度洋板块的向北活动对本区也有重要影响。因此,在三大板块的相互作用下,在洋陆壳接壤的大陆边缘地区发育了这个弧后陆缘裂谷系。其发展演化与洋陆壳俯冲汇聚带的变化密切相关。随着古弧后裂谷的形成、发展、消亡,洋壳俯冲带逐渐东移,陆壳增生。在新的俯冲带位置又引起新的弧后张裂活动。如此,西面老的裂谷消亡,东面新的裂谷产生,自西往东逐渐发展。如:郟庐裂谷在中生代末消亡,东海陆架裂谷在新生代初产生。东海陆架裂谷中新世末逐渐消亡,冲绳海槽裂谷上新世初发展成形。南侧印

度洋板块的活动及菲律宾海板块运动方向的变化,造成了裂谷系向东南凸出的弧形展布特征,并使得同一条裂谷带内自北往南构造活动性增强。

## 2. 冲绳海槽裂谷的形成与发展

渐新世末至中新世初,太平洋板块运动方向由 NNW 变为 NWW,使西太平洋大陆边缘地区发生了很大变化。其中菲律宾海板块以中央盆地断裂为中心的近南北向扩张,变为以九州-帛琉海岭为残余弧的近东西向扩张,台湾-吕宋弧北移,并与古琉球弧相撞<sup>[1]</sup>。所有这些作用均对琉球弧后地区产生了复杂的影响。中新世晚期,四国海盆和帕里斯维拉海盆发展成现今的状态并停止了扩张,从而使整个西北菲律宾海盆向琉球弧下俯冲。由此引起弧后地区地幔上拱,火山活动。地幔上拱造成地壳上部拉张,从而产生了张性浅部断层。火山及断层活动释放了地壳能量,使地壳裂陷,裂谷开始萌芽。古构造应力场数学模拟结果,也表现了当时的张裂状态(图 8)。随着洋壳的不断俯冲,冲绳裂谷不断发展,逐渐形成现今状态,并将进一步裂陷,使海槽进一步加深拓宽。

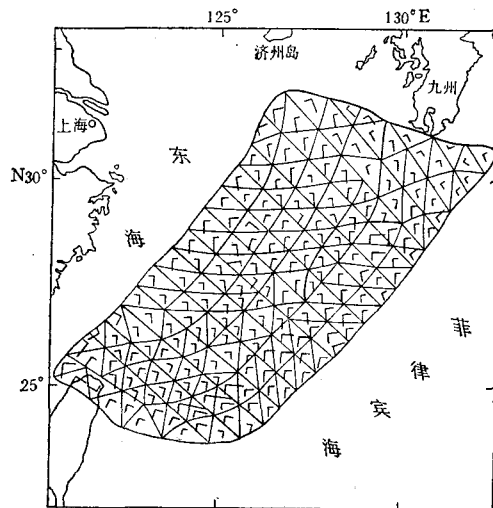


图 8 中新世末主应力(三角形网格为计算单元划分)

Fig. 8 Main stress at the end of Miocene

根据裂谷构造理论和冲绳裂谷的构造特征,本文认为它属于一种介于大陆裂谷与大洋裂谷之间的陆缘裂谷。其发展过程现属于断裂下陷阶段的后期,将逐渐转化到“红海”阶段,因此这条活动裂谷将进一步迅速发展,新的洋壳将会在裂谷轴部“萌芽”。

根据大陆边缘地区区域构造特征分析,冲绳裂谷的南端可能与台东纵谷相连,其北端可能延至日本海,与西伯利亚裂谷相接,成为一条发育在太平洋西北边缘,与板块俯冲作用有关的巨型现代弧后裂谷。

## 参 考 文 献

- [1] 业治铮、张明书、潘志良,1983.冲绳海槽晚更新世—全新世沉积物的初步研究.海洋地质与第四纪地质 3(2): 1—21.
- [2] 李乃胜,1986.用压缩质面法估算海区地壳厚度的几点认识.海洋科学 10(2): 8—12.
- [3] 李乃胜,1987.利用重力资料探讨冲绳海槽海底断裂构造.海洋科学 11(6): 11—16.

- [4] 李乃胜, 1988. 冲绳海槽断裂构造的研究. 海洋与湖沼 **19**(4): 290—301.
- [5] 金性春、戴南浔, 1984. 冲绳海槽异常地幔与地壳性质的初步分析. 海洋地质与第四纪地质 **4**(3): 17—27.
- [6] 金子康江、本藏羲守, 1987. 冲绳トウフと小笠原弧の電気伝導度構造. 水路部研究报告 **22**: 135—143.
- [7] Hilde, T. W. C. and C-S. Lee, 1984. Origin and evolution of the Philippine basin: A new interpretation. *Tectonophysics* **102**(1—4): 85—104.
- [8] Kimura, M., 1985. Back-arc rifting in the Okinawa Trough. *Mar. Petroleum Geol.* **2**: 222—240.
- [9] Kimura, M., S. Uyeda, Y. Kato, et al., 1988. Active hydrothermal mounds in the Okinawa Trough back-arc basin, Japan. *Tectonophysics* **145**: 319—324.
- [10] Kimura, M., I. Kaneoka, Y. Kato, et al., 1986. Report on DELP 1984 cruise in the Middle Okinawa Trough, Part V: Topography and geology of the central graben and their vicinity. *Bull. Earthq. Inst. Univ. Tokyo* **61**(2): 269—310.
- [11] Lee, C-S., G. G. Jr. Shor, L. D. Bibee, et al., 1980. Okinawa Trough: Origin of a back-arc basin. *Mar. Geol.* **35**(1—3): 219—241.
- [12] Lu, R. S., J. J. Pan and T. C. Lee, 1981. Heat flow in the southwest Okinawa Trough. *Ear Planet. Sci. Lett.* **55**(2): 299—310.
- [13] Nagumo, S., H. Kinoshita, J. Kasahara, et al., 1986. Report on DELP 1984 Cruise in the Middle Okinawa Trough, Part II: Seismic structural studies. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo* **61**(2): 167—202.
- [14] Shiono, K., T. Mikumo and Y. Ishikawa, 1980. Tectonics of the Kyushu-Ryukyu arc as evidenced from seismicity and focal mechanism of shallow to intermediate-depth earthquake. *J. Phys. Earth* **28**(1): 17—43.
- [15] Yamano, M., S. Uyeda, H. Kinoshita, et al., 1986. Report on DELP 1984 Cruise in the Middle Okinawa Trough, Part IV: Heat flow measurements. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo* **61**(2): 251—267.
- [16] Yamano, M., S. Uyeda and Y. Furukawa, 1986. Heat flow measurements in the northern and middle Ryukyu Arc area on R/V SONNE in 1984. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo* **61**(2): 311—327.
- [17] Yasui, M., R. Epp, K. Nagasaka, et al., 1970. Terrestrial heat flow in the seas round the Nansei shoto (Ryukyu Islands). *Tectonophysics* **10**: 225—234.
- [18] Yu, P-Z. and N-S. Li, 1988. The gravity field and deep tectonics of Ryukyu T-A-BA system. *Chin. J. Oceanol. Limnol.* **6**(2): 157—170.

## ON THE GEOLOGIC NATURE OF OKINAWA TROUGH\*

Li Naisheng

(Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao)

### ABSTRACT

The Okinawa Trough which lies at the east margin of the East China Sea has a lot of active structural features. This paper undertakes to understand the geological nature of the Okinawa Trough. Is Okinawa Trough a faulting-subsiding basin, depressed basin, mid-arc basin, back-arc basin, marginal sea, or an extending and rifting basin? Our geophysical and geological data show that the Okinawa Trough is a modern active rift valley as evidenced by the following characteristics: high heat flow (as high to 1 600 mW/m<sup>2</sup>), strong earthquake, large gravity anomaly (as much as 160 mGal), more active volcanoes, rifting land-form, horizontal extension, thin crust, doming mantle, active fault, thin lithosphere, and so on. The origin and dynamics of the rifting is the subduction of the Philippine plate under Ryukyu arc. The Okinawa Trough is now an active back-arc rift developed in the west margin of the Pacific Ocean and has relation with the plate subduction. Its rifting time may be from Pliocene to now.

\* Contribution No. 1854 from Institute of Oceanology, Academia Sinica.