

冲绳海槽断裂构造的研究*

李乃胜

(中国科学院海洋研究所, 青岛)

提要 通过解释反射地震剖面, 计算处理重磁资料, 数学模拟构造应力场以及综合分析其它地质、地球物理资料可知, 冲绳海槽是一个正在活动的弧后盆地, 具有高热流、强地震、多火山、薄地壳、高重力、活断层等特征。海槽内发育了两组断裂构造, 其中 NW 向断裂是具有分割控制作用的特殊断裂, NNE 向断裂是梨形正生长断层; 两组断裂从中新世活动至现代。

冲绳海槽位处东亚大陆东缘, 北起日本九州, 南达我国台湾, 为一 NNE 向朝太平洋

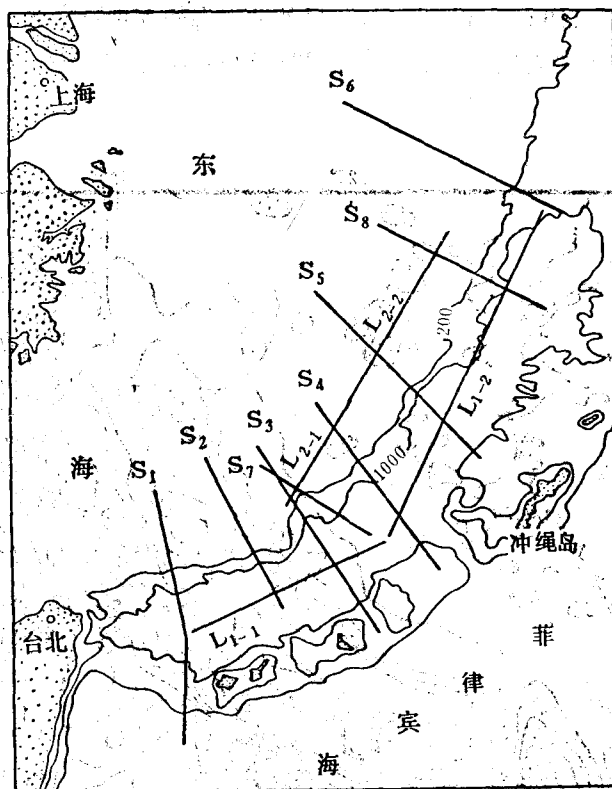


图1 冲绳海槽及测线位置图

Fig. 1. Locations of Okinawa Trough and lines.

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第1413号。
本文蒙金翔龙、喻普之老师指导帮助, 均此一并致谢。
收稿日期: 1987年2月24日。

凸出的弧形舟状盆地,平行于琉球岛弧展布约 1200km,东西宽约 120 km,主体水深大于 1000 m (图 1)。它与琉球海沟、琉球岛弧一起构成一个沟弧盆体系,成为西太平洋俯冲汇聚型大陆边缘的一个组成部分。

一、冲绳海槽新构造活动特征

大量地质、地球物理调查表明,冲绳海槽是一个正在活动的弧后盆地,具有一系列新构造活动特征。

1. 浅部断层活动

穿越冲绳海槽的所有人工反射地震剖面均表明海槽地区浅部断层活动强烈,绝大部分断层构造都切穿第四系地层,向上延伸到海底,造成了壮观的断层地貌。但几乎所有横断层 NW 向延伸穿过钓鱼岛—五岛陆架边缘脊进入东海陆架盆地后,均变为只发生在中新统以下老地层中的隐伏断层。这说明新构造活动仅在海槽区表现强烈。

2. 重力值高

重力场在海槽地区表现为较大的正值,布格异常呈 —NNE 向平行于海槽轴向展布的高值带,最高值达 160 m Gal (图 2)。虽然冲绳海槽在地形上为一深 2000 多米的盆地,但仍具有较高的自由空间异常值,多为 20—50 m Gal。这些现象暗示着海槽区的上地幔隆起。

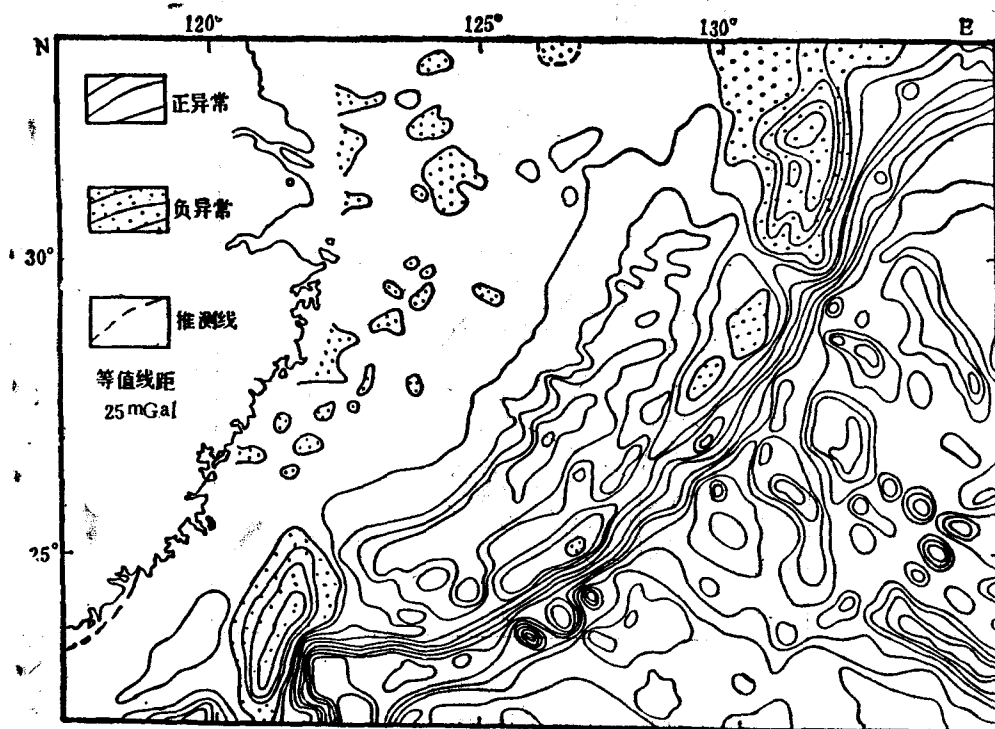


图2 布格重力异常图

Fig. 2 The Bouguer gravity field

3. 地壳减薄

根据海区特点,利用经预调整的压缩质面法,设计多套程序^[1],计算了冲绳海槽及其邻区的莫霍面深度,结果表明,海槽区地幔明显抬升,莫霍面深度变化于 19—22 km 之间,而东海陆架区为 28 km 左右,琉球岛弧区为 26—28 km (图 3)。可见海槽地区地壳减薄。根据艾利 (Airy) 地壳均衡模式估算,海槽区地壳厚度较均衡态薄了约 5—6 km。

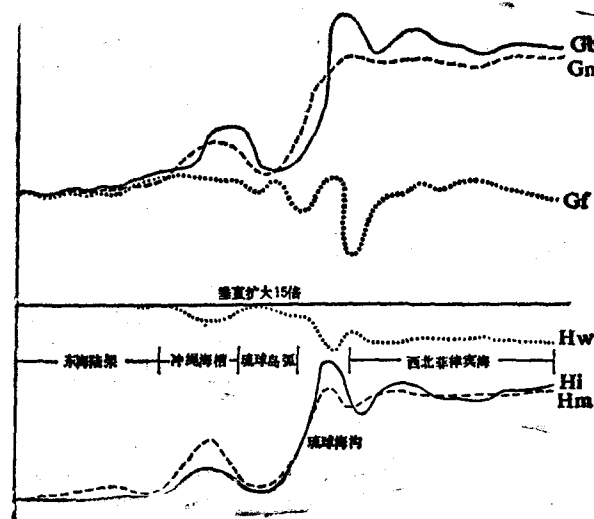


图 3 地壳厚度横剖面

Fig. 3 A cross profile of crustal thickness

Gb. 布格异常; Gf. 自由空间异常; Gm. 莫霍面引起的重力场; Hw. 水深;
Hi. 均衡地壳厚度; Hm. Moho 面。

4. 热流值大

地热流测量证明,海槽区具有相当高的热流值,据海槽内 11 个测点资料^[4],最大观测值达 10.40 HFU,平均值为 4.24,远高于全球海洋 1.5 HFU 的平均值。冲绳海槽如此高的热流值是正在扩张的大洋中脊所不能比拟的。西太平洋诸边缘海的热流值比冲绳海槽也大为逊色,甚至那些正在扩张中的“新生海洋”,如红海 (3.66)、亚丁湾 (3.95) 也不高于冲绳海槽。据最新资料¹⁾,冲绳海槽测得 37.7 HFU 的地热流,并发现海底热液喷出²⁾。由此可见,冲绳海槽具有目前世界上测得的最高热流值。

5. 地震活动频繁

整个琉球沟弧盆系为一强震带,具有频度高、震级大等特点。琉球海沟至琉球群岛一带多为浅源地震,中源地震主要集中在冲绳海槽内。仅自本世纪 50 年代以来,就有十几次 6 级以上的中源地震发生。

6. 火山作用强烈

冲绳海槽内火山活动非常强烈,且多期喷发。晚第三纪的绿色凝灰岩火山活动几乎遍及海槽的中、北部。上新世末—更新世初,在海槽中央发育了许多孤立的海底火山,地

1) 山野诚、上田诚也,1985。冲绳海槽的热流测量。

2) 海洋地质动态,1986 年第 10 期。

震测线揭示的海槽南部高出海底 800 多米的海底山即是一例。现代活火山主要发育在海槽北部东坡,形成了一条火山链(吐喀喇火山链),一系列大致等距分布的火山岛构成了琉球岛弧的内弧。

二、冲绳海槽断裂构造展布特征

冲绳海槽由于受三大板块的相互作用,构造活动非常强烈,发育了一系列断裂构造,构成了海槽最主要的构造形迹。按其平面展布方向主要分为两组:一是 NNE 向纵断裂(平行于海槽轴向),另一组是 NW 向横断裂(大致垂直于海槽轴向)。两组断裂构造组成了海槽的断裂体系。

在综合分析地质、地球物理资料的基础上,以下主要从三个方面探讨冲绳海槽断裂构造的存在。

1. 地形地貌特征

冲绳海槽作为一个正在活动的弧后盆地,发育了非常壮观的断层地貌,各地貌单元分界明显,主要类型有:(1)断裂谷与断裂

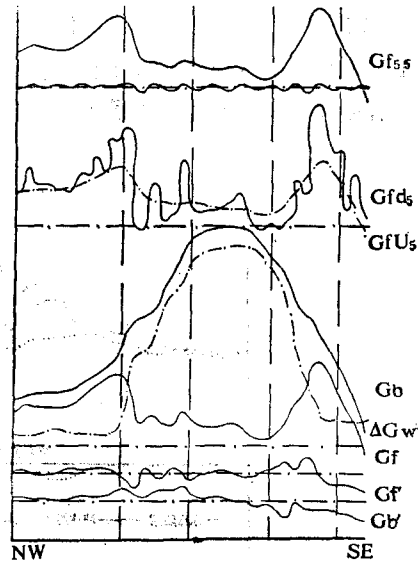


图 4 S₄ 线重力综合剖面

Fig. 4 Gravity comprehensive profile of line S₄. Gf5.5, 5km 采样平滑滤波; Gfd5, 下延 5km; Gfu 5, 上延 5km; Gb, 布格异常; ΔGw, 水层改正; Gf, 自由空间异常; Gf' 是 Gf 的一阶导数; Gb' 是 Gb 的一阶导数。

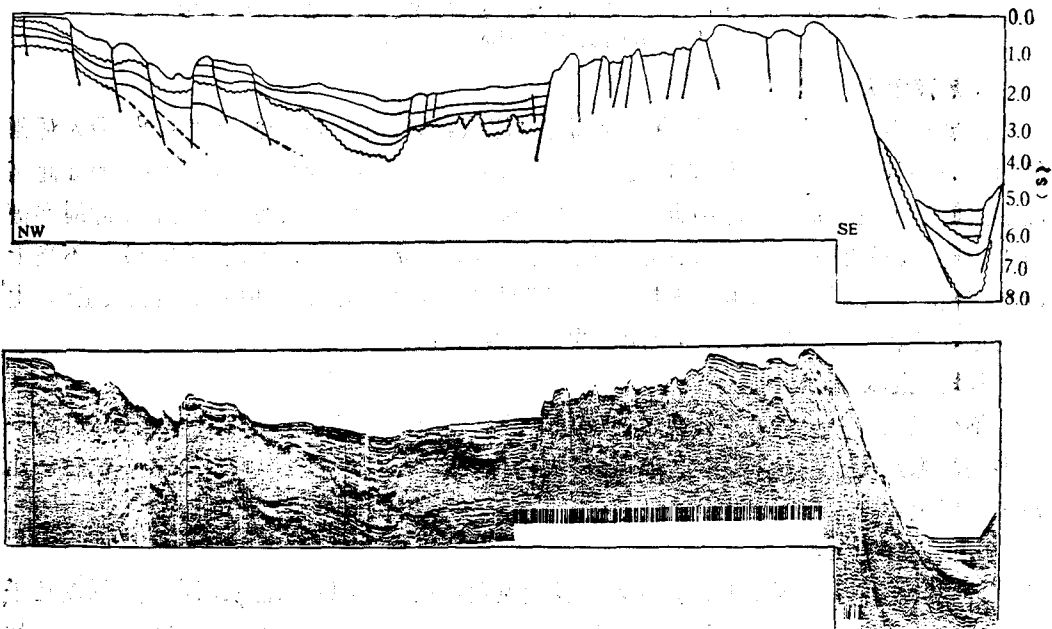


图 5 S₁ 线地震时间剖面

Fig. 5 The line S₁ seismic time profile

沟,高差大于 200m 者称谷,较浅者称沟,在海槽两坡较发育,沟谷两坡多不对称;(2)地堑槽和张裂沟,是指在海槽中央发育的深约 150—200m 的“U”型深槽和裂沟,其间有火成岩活动;(3)断块山,是由断层分割的小型海底山体;(4)断陷洼地,指的是些海山间的小型深水洼地,多呈小的箕状断陷盆地;(5)错动台阶,为一系列叠瓦状断层作用所致,地形上依次递落;(6)峡谷,由横切槽坡的断层发展而成的水流冲刷谷;(7)串珠状火山,沿大断裂带或断层交汇处发育的一系列火山。

2. 重力场特征

本文对重力资料进行了多种方法的计算处理,用以查明海底断裂构造的存在。主要作法是平滑滤波,解析延拓,水平求异,相关分析及反演莫霍面等^[1]。对照反射地震结果可知,冲绳海槽地区的重力场及其剩余场、下延场、一阶导函数均不同程度地反映了断裂

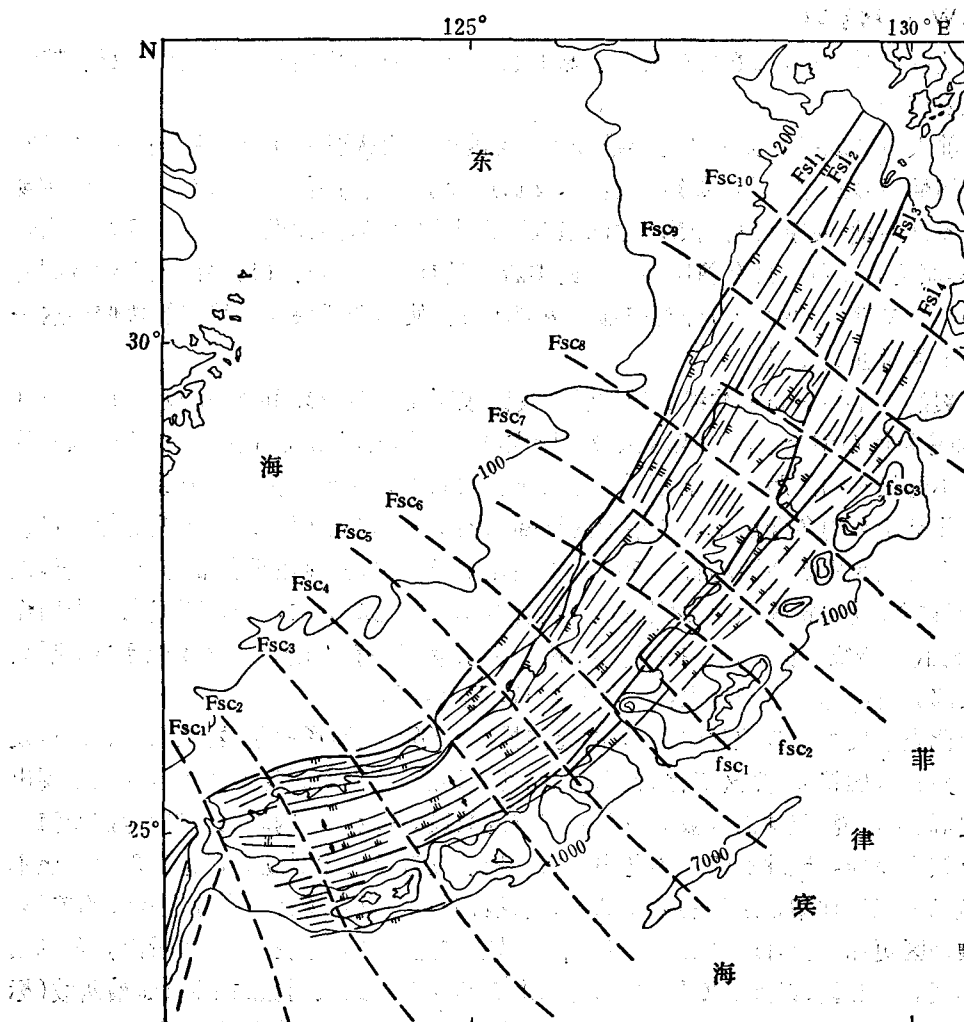


图6 冲绳海槽断裂构造图

Fig. 6 The fault map of the Okinawa Trough

构造的存在。因此,对图 1 中所有测线做综合剖面(图 4),分析确定出较大断裂的存在。

3. 反射地震特征

本文对图 1 中的所有人工反射地震剖面进行了追踪对比,得出了解译时间剖面(图 5)。其中,确定断层构造主要是根据强反射界面的明显错断、凹塌、畸变和挠曲、反射波组的突然消失或产生、几个强相位的错动和中断、同相轴数目的突然增减以及断面波、绕射波等特殊波的出现。根据人工地震结果,确定了断裂构造的展布。

综合地形地貌、重力分析、人工地震的结果,得出了冲绳海槽断裂构造图(图 6)。

三、冲绳海槽断裂构造特征

由图 6 可知,NW 向横断裂,横切琉球沟弧盆系,NW 向延伸进入东海陆架;NNE 向纵断裂平行海槽轴向展布,断断续续遍布整个冲绳海槽。

1. NW 向横断裂

根据地震资料分析,每条横断裂几乎都由数条断层组成,断层面近乎直立,断裂带内断层地貌发育。

综合前人研究成果,关于冲绳海槽 NW 向横断裂的认识可分为两大类:一是以左旋为主的扭性平移断层,二是转换断层。本文通过大量资料分析认为,由于从中新世到现代的断续多期活动,使断裂两侧断块之间造成了很大的差异,因此很难简单地确定其力学性质,但其原始萌芽可能具有剪切性质。此类断裂具有三个特点:(1)平面上大致等间距分布;(2)具有多期活动性;(3)分割控制了两侧断块,使各个断块在菲律宾板块俯冲这一主导作用下相对独立发展。

横断裂的等距性分布在冲绳海槽地区表现比较明显,各断裂间距大致为 100—120 km。这种等距性在整个东海陆架区以及中国大陆东部都表现比较明显^[2],且不同级别的断裂具有不同级别的间距。其原因可能是横断裂的原始成因系剪切作用所致。

关于此类断裂的多期活动,在平行海槽轴向的反射地震剖面上表现比较清楚。可以看出冲绳海槽地区横断裂活动有三期:第 1 期在中新世末,表现在断裂带内个别断层,仅切过 T_2^0 不整合面(中新统顶面)之下的老地层;第 2 期在上新世末,个别断层向上未切穿 T_1^0 不整合面(上新统顶面,仅在冲绳海槽、琉球海沟地区发育明显);第 3 期为现代,断裂带内的大部分断层都向上至海底,向下切穿 T_1^0 , T_2^0 界面。

由于此类断裂的分割控制作用,使冲绳海槽及其邻区在地形地貌、岩浆活动、地层发育、矿物分布、重磁特征、热流变化、震源深度、地质构造、莫霍面深度等许多方面均表现出各段差异。简单地说,琉球海沟被分成断断续续的数段,各段间海沟轴向、剖面形态及海沟深度均有较大差异。琉球岛弧上的岛屿分布、地层发育及火山活动等,也表现出明显不同。钓鱼岛—五岛陆架边缘脊的隆起高度、火成岩分布、重磁场特征也存在较大的差异。冲绳海槽地区更加明显,图 7 画出了相邻五条横穿冲绳海槽的地震剖面,可看出,各剖面的地层厚度、褶皱起伏以及纵断层发育、海槽形态等存在着比较明显的不同;海槽两坡(标注 A, B)发育也各不相同。这些现象很难简单地用平移断层或转换断层解释。

下面仅举宫古断裂一例,即可看出其两侧比较宏观的差异。

宫古断裂(FSC₄)位于海槽南部、宫古岛至赤尾岛一线。

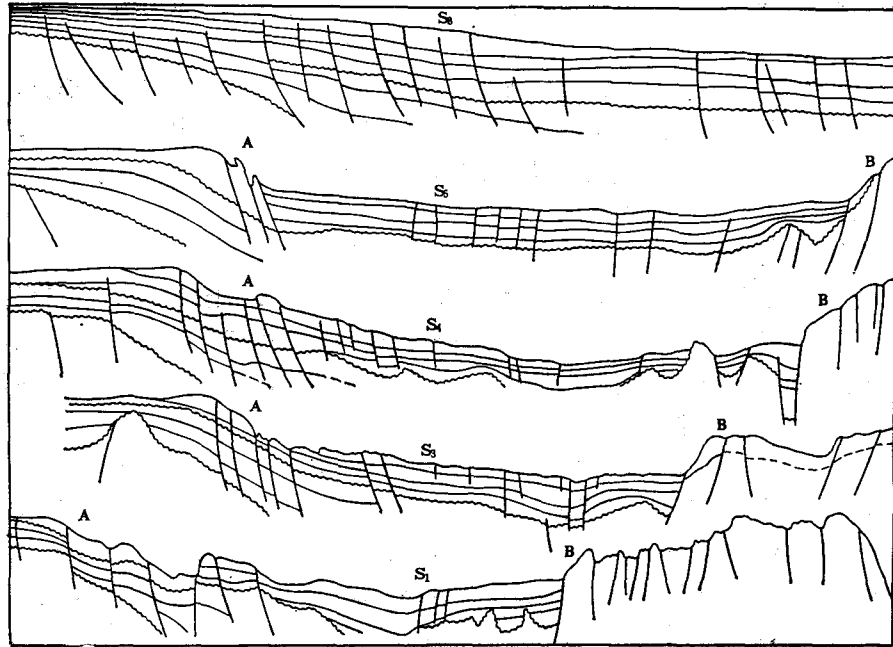


图7 横剖面间差异

Fig. 7 The difference among cross sections

(1) 琉球海沟区 该断裂南堵了 7000 m 等深线,使其至此圈闭,造成了北深南浅的格局。北侧沟底呈“V”型,起伏较大,海沟内坡崎岖不平;南侧沟底呈“U”型,地形平坦,油积层发育,海沟内坡光滑。

(2) 弧前斜坡区 其北侧仅有小型坡前隆起,隆起内侧只发育了晚第三系岛尻群,而南侧坡前隆起巨大,隆起内侧不但晚第三系岛尻群发育,而且还发育了较大的第四纪岛尻盆地。因此在坡前隆起区呈北低南高格局,而隆起内侧则表现为北浅南深。

(3) 岛弧区 它形成了南高北低的地貌景观,据一些学者研究,岛弧区该断裂南北两侧是两个不同的构造单元,表现在: a. 群岛基底,北侧为晚古生代板岩、石灰岩、辉绿质岩石;而南侧为八重山变质岩,由千枚岩、黑、绿色片岩组成,二者岩性不同。b. 基底构造,北侧基底岩系构造走向基本平行岛弧;南侧八重山变质岩主褶皱走向为 NW-SE,与岛弧走向明显相交。c. 构造活动,北侧始新统四万十群变形强烈,等斜褶皱和逆冲断层发育;而南侧始新统除有较小断层发育外,无其它变形变质现象。d. 火山活动,北侧大片分布晚第三纪绿色凝灰岩,而南侧无此现象。e. 地层发育,南侧发育了中新统八重山群,由砂泥岩组成,以含煤、交错层和少量滨海化石为特点;北侧无此地层^[6]。

(4) 海槽区 造成了一个高差近 200 m 的北高南低台阶,2200 m 等深线至此圈闭。南侧发育了较大规模的槽中地堑——槽中槽,有拉斑玄武岩出现。北侧槽中槽尖灭。

(5) 海槽西坡 该断裂南侧发育了赤尾屿等断块山,而北侧为一个深约 300 m 的断陷洼地。

(6) 陆架边缘脊区 南侧倾状变窄, 北侧相对隆起变宽。重力场也表现为南低北高。

(7) 在东海陆架盆地 该断裂将北东走向的凸起与凹陷分为南北两部分, 这两部分呈现出许多方面的差异。岩浆岩体在南侧多呈较大的岩基状产出, 北侧发育零星。

(8) 地震活动 南侧现代地震活动多, 震源深度大; 北侧则相对减弱, 而且震源深度变小。

2. NNE 向纵断裂

整个冲绳海槽地区, 从两坡到槽底发育了数十条 NNE 向纵断层, 大致平行海槽轴向展布。与其说是纵断层纵贯全区, 还不如说是被一系列横断裂所分割的各个断块内均发育了许多纵断层。总体上南部各断块内纵断层规模较大, 条数较少; 北部各断块条数繁多, 断距不大, 分布杂乱。

按其切割深度, 冲绳海槽纵断层可分为两类: 一类是切割深度大, 从海底向下切过 T_1^0 , T_2^0 界面, 继续向下延伸, 此类断层多发育在海槽两坡; 另一类是切割深度小, 仅发生在更新统一全新统地层内, 此类断层一般规模较小, 多发育在槽底中央部位。

概括起来, 冲绳海槽地区的纵断层主要组成五条 NNE 向弧形断裂带, 它们分别构成海槽中央地堑、槽底与两坡、西坡与东海陆架、东坡与琉球岛弧的分界线。

冲绳海槽的纵断层倾角较大, 一般倾向海槽中央。许多断层比较明显地表现出断层面上陡下缓, 剖面上断层面呈弧形弯曲, 断块滑动旋转, 顺断层面向槽中滑塌, 且断层两侧厚度不等, 下降盘一侧地层厚度不同程度地增大。因此, 这类纵断层具有张裂性质, 属于一类梨形正生长断层。它们是伴随着海槽的拉张逐渐发展而成的。

四、冲绳海槽断裂构造的形成和发展

第三纪以来, 太平洋板块运动方向由 NNW 变为 NWW, 使菲律宾海板块中新世以来, 由近 SN 向扩张转为近 EW 向扩张^[5], 吕宋弧北移与琉球弧相撞, 琉球群岛及陆架边缘脊一带出现了强烈的岩浆活动, 所有这些作用对琉球弧后地区产生了复杂的影响。中新世晚期, 四国海盆和帕里西维拉海盆发展成现今状态并停止了扩张, 从而使整个西北菲律宾海盆向琉球弧下俯冲^[6]。中新世末, 琉球岛弧地区火山活动减弱, 断裂构造开始活动, 冲绳海槽开始产生。这种火山活动和弧后扩张交替进行的变化方式同木座荣一^[3]等对菲律宾海周围许多岛弧区的火山活动和扩张作用交替进行的研究结果较为一致。

根据菲律宾板块俯冲于琉球弧下而导致冲绳海槽产生这一观点, 本文用数学方法模拟了区域构造应力场(计算采用有限元弹塑性平面问题增量法¹⁾进行), 结果表明: 中新世末, 剪应力数值较大(图 8), 而且在岛弧和边缘脊地区相对集中, 纵向上呈大小相间排列, 高值中心略呈等距分布, 在这种作用下, 冲绳海槽具有剪切性质雏形的 NW 向横断裂开始活动。主应力分布表明(图 9), 当时琉球群岛和钓鱼岛一带处于向两侧拉张的应力场中, 因此, 具有拉张性质的纵断层开始出现。

上新世末, 随着海槽的扩张, 剪应力数值减小(图 10), 但高值中心仍有等距排列趋

1) 万天丰, 1983。构造应力场。武汉地质学院北京研究生部教材。

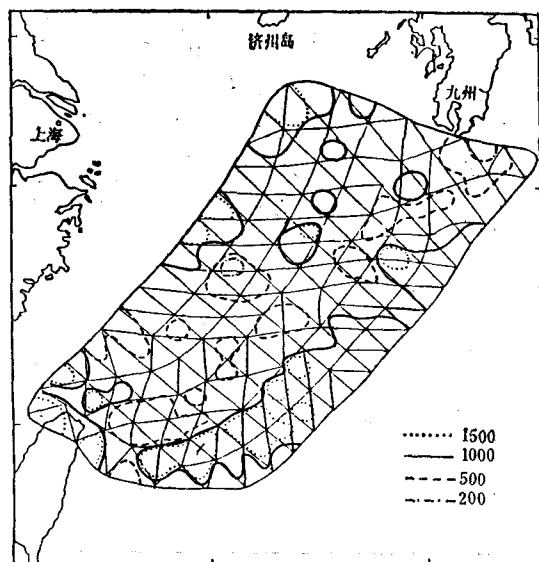


图8 中新世末剪应力等值线图

Fig. 8 Contour of shearing stress at the end of Miocene

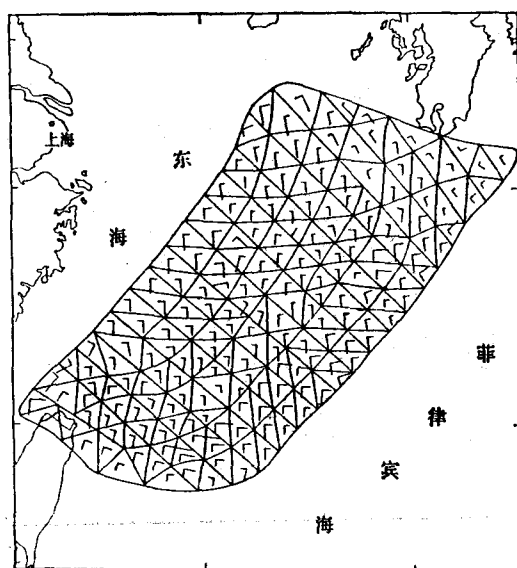


图9 中新世末主应力图

Fig. 9 Main stress at the end of Miocene

势。主应力图上(图 11) 岛弧与陆架边缘脊处于比较强烈的拉张状态。所以在此种应力场下, 海槽区的断裂构造进一步发展, 原 NW 向断裂再次活动, NNE 向纵断层随着海槽的扩张逐渐发展成为梨形正生长断层。

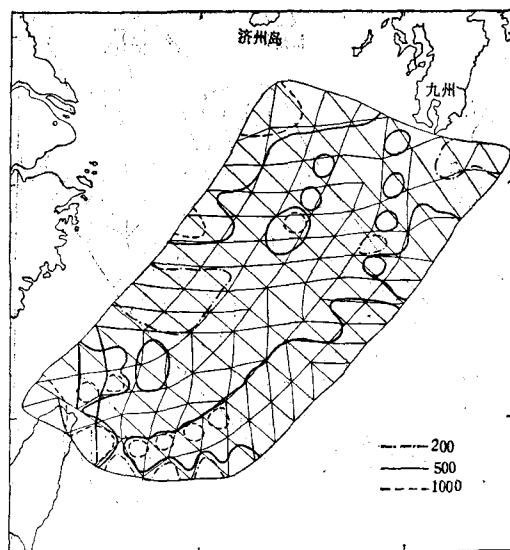


图10 上新世末剪应力等值线图

Fig. 10 Contour of shearing stress at the end of Pliocene

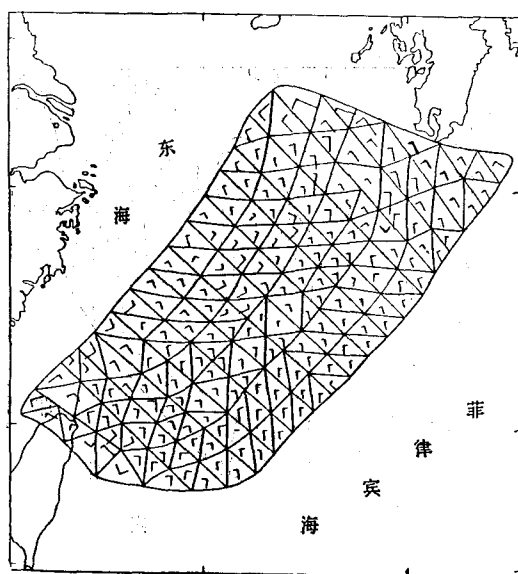


图11 上新世末主应力图

Fig. 11 Main stress at the end of Pliocene

五、结 论

1. 冲绳海槽作为一个正在扩张的弧后盆地,具有高热流、强地震、多火山、薄地壳、高重力、活断层等一系列现代构造活动特征。

2. 冲绳海槽的横断裂是一类具有分割控制作用的重要断裂构造,有三个特点:(1)平

面上大致呈等间距分布；(2)具有多期活动性；(3)分割控制两侧断块，使其相对独立发展。

3. 冲绳海槽的纵断裂属于一类在裂谷阶段极易产生的犁形正生长断层，它是随海槽扩张逐渐发育的。

4. 冲绳海槽断裂活动可分为三期：第1期形成了冲绳海槽的基底断裂，第2期产生了一些浅层断裂，第3期为现代活动断层。

5. 冲绳海槽断裂构造发生发展的主导因素是菲律宾海板块与东亚大陆板块的俯冲汇聚。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 沈振兴, 1985. 中国东部的北西向断裂. 江苏地质 3: 15—18.
- [3] Honza, E., 1981. Evolution of Arc Volcanism Related to Marginal sea Spreading and Subduction at Trench. Arc Volcanism: Physics and Tectonics. Terra Sci. Pub. Company, pp. 177—189.
- [4] Horai, K. and G. Simons, 1969. Spherical harmonic analysis of terrestrial heat flow. *Earth Planet. Sci. Letters* 6(4): 386—394.
- [5] Hilde, T. W. C. and C-S. Lee, 1984. Origin and evolution of the west Philippine basin: A new interpretation. *Tectonophysics* 102(1—4): 85—104.
- [6] Kizaki, K., 1978, Tectonics of the Ryukyu island arc. *J. Phys. Earth* 26: 301—307.

ON THE FRACTURING STRUCTURES OF THE OKINAWA TROUGH*

Li Naisheng

(*Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao*)

ABSTRACT

In order to study faulting of the Okinawa Trough, this paper, based on interpretation of seismic data, comprehensively discusses submarine land-form, volcanism, earthquake and heat flow, and does gravitational calculation by means of spectrum analysis, smooth filter, analytic extension, horizontal derivative, correlative analysis and recalculating Moho. Meanwhile, mathematic simulation of regional tectonic stress field is also made.

From the data mentioned above, some conclusions are obtained as follows.

1. The Okinawa Trough is an active back-arc spreading basin characterized by high heat-flow, strong earthquake, strong volcanism, thin crust, high gravity anomaly and active fault.
2. Two groups of fault are developed, which control the tectonic evolution of the Okinawa Trough.
3. The fracture striking in NW direction has three features:
 - (1) Equidistant distribution;
 - (2) Multi-stage activity;
 - (3) Dividing and controlling the independently developed fault blocks of the trough.
4. The longitudinal faults in NNE strike with tension feature belong to listric normal contemporaneous ones which can illustrate the mechanism of trough spreading and crustal thinning.
5. According to forming time, the faults may be divided into three stages. The first one took place at the end of Miocene and became the basement faults. The second occurred at the end of Pliocene in which some shallow faults are formed. And the last one is at the present in which the active faults brought forth the fault land-form at the bottom of Okinawa Trough.

* Contribution No. 1413 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.