

冲绳海槽弧后张裂构造及其动力机制讨论

高金耀, 汪俊, 杨春国, 张涛, 谭勇华

(国家海洋局海底科学重点实验室, 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

摘要 在总结、讨论冲绳海槽弧后张裂构造的地形地貌、地球物理场和动力背景特征的基础上, 归纳出海槽北、中、南三段之间的差异, 以及它们在陆坡、槽底、岛坡上的不同表现特征. 槽底雁行排列的地堑及断层斜切入陆坡, 伴随的断块隆脊作用往南加强, 使得钓鱼岛—赤尾屿隆起带区别于其北边的陆架外缘隆起带, 吕宋岛向台湾的碰撞挤压引起的旋张活动加强了海槽南段的地壳拉张, 从北往南岛坡侧都可以追踪出双列岛弧特性. 海槽内部构造现象不能为笼统的构造动力背景所能完全解释, 需要对各个典型中央地堑的具体深入探测研究. 鉴于地堑、地垒、断层以及它们所界定的构造单元和它们内部发生的岩浆作用各有特点, 最后讨论了各个地段中央地堑的构造属性、动力要素的差异及变化规律, 以期海槽构造动力的进一步深入研究提供借鉴参考.

关键词 冲绳海槽, 张裂构造, 中央地堑, 构造动力

中图分类号 P738, P736, P542

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)04-1001-12

Discussion on back-arc rifting tectonics and its geodynamic regime of the Okinawa Trough

GAO Jin-yao, WANG Jun, YANG Chun-guo, ZHANG Tao, TAN Yong-hua

(Key Laboratory of Submarine Geosciences, Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou, 310012)

Abstract Topographic relief, gravity anomalies, magnetic anomalies and geodynamic regime are pertinently discussed for back-arc rifting tectonics of the Okinawa Trough. They are of different characteristics along the continental slope, trough bottom and island slope, respectively, among the northern, middle and southern trough. En echelon grabens or faults on the trough bottom cut obliquely into the continental slope, accompanying with block ridge rifting intensively southwards. In the southern trough, the Diaoyu Island-Chiwei Islet uplift has got rid of features borne by the continental shelf edge uplift to its north, while rotational rifting driven by collision between Luzon and Taiwan has enhanced the crustal extension. Nevertheless, the inner volcanic arc can be traced to Taiwan along the island slope. Different tectonic features can hardly be interpreted only by a general geodynamic background, and there is a large room of research and study for various grabens typical of the trough. Based on different features indicated by grabens, horsts, faults and their delineating tectonic units, together with diverse magmatism, differences and originations of both tectonic attributes and geodynamic factors are mainly explored for these tectonic structures, aiming at further deepening into research of tectonics and geodynamics of the Okinawa Trough.

Key words okinawa trough, rifting tectonics, central graben, tectonic dynamics

0 引言

作为活动性大陆边缘弧后盆地的早期演化阶段, 冲绳海槽本身又具有被动大陆边缘拉张裂离的特点, 以其独特的大地构造位置和构造活动特征吸引着中外学者的探测研究兴趣.

冲绳海槽的 NNE 向主构造明显, 在其两侧的构造也与之平行分布, 西侧有东海陆架盆地和外缘隆起带; 东侧有琉球岛弧、弧前盆地和海沟. 这些 NNE 向主构造主要由分断的正断层或犁式(铲状)断层组成, 它们可能被大小不一的 NW 向走滑段裂带错断. 以分别穿过吐噶喇海峡和宫古海峡的虎皮

收稿日期 2008-02-10; 修回日期 2008-04-20.

基金项目 国家重点基础研究发展规划项目(G2007CB411702和G2000046703)资助.

作者简介 高金耀, 男, 1962年生, 浙江平湖, 研究员, 博士生导师, 主要从事海洋地球物理研究. (E-mail: jyga@mail.hz.zj.cn)

礁—奄美断裂带、渔山—久米岛断裂带为界,冲绳海槽南、中、北三段分别表现出“深”、“热”、“宽”三种构造活动特点^[1].海槽南段的“深”,与构造活动性强、张裂地貌发育良好有关;海槽中段的“热”,与火山、岩浆和热液活动分不开;海槽北段的“宽”,可能意味着张裂历史长和裂隙范围大,使得沉积物厚度相对较大.

到目前为止,关于冲绳海槽的构造属性、演化阶段和构造动力众说纷纭.海槽究竟处于裂谷、张裂或扩张的哪个阶段?构造动力究竟来源于大陆蠕散、海沟后撤、地幔底劈或次生地幔对流?这些问题均无定论.为了进一步凝练有关冲绳海槽构造动力研究的科学目标,深化对海槽构造意义的认识,下面归纳总结冲绳海槽的构造分布特征,着重阐述它们与中央地堑构造单元的关系,以为海槽构造动力的进一步深入研究提供借鉴参考.

1 冲绳海槽的基本构造轮廓

冲绳海槽与整个东海的“东西分带”和“南北分块”的构造体制相一致,张裂性质的构造特征十分显著.海槽大致呈舟状向东南突出,全长 1000 km,槽底南窄北宽,平均宽度 100 km,水深北浅(600~700 m)南深(大于 2000 m)(图 1).海槽受断裂影响,向南形成三个台阶,台阶高差逾 150~200 m,坡度较大.30°N 以北多海山、海丘群,地势起伏较大;中段也有零星分布,丘顶水深 200~500 m,相对高差 500~1000 m,与火山活动相关;28°N 以南,槽底沿轴向断续发育构造地堑,长 25~70 km,最长达 200 km,平均宽 20 km,下陷幅度 110~280 m,绝大部分槽底平坦,也有少量海丘零星分布.地堑壁呈明显阶状陷落,最深部位常有 500~600 m 宽,30~60 m 深的 V 型沟谷.冲绳海槽空间异常为 20 mGal 上下变化

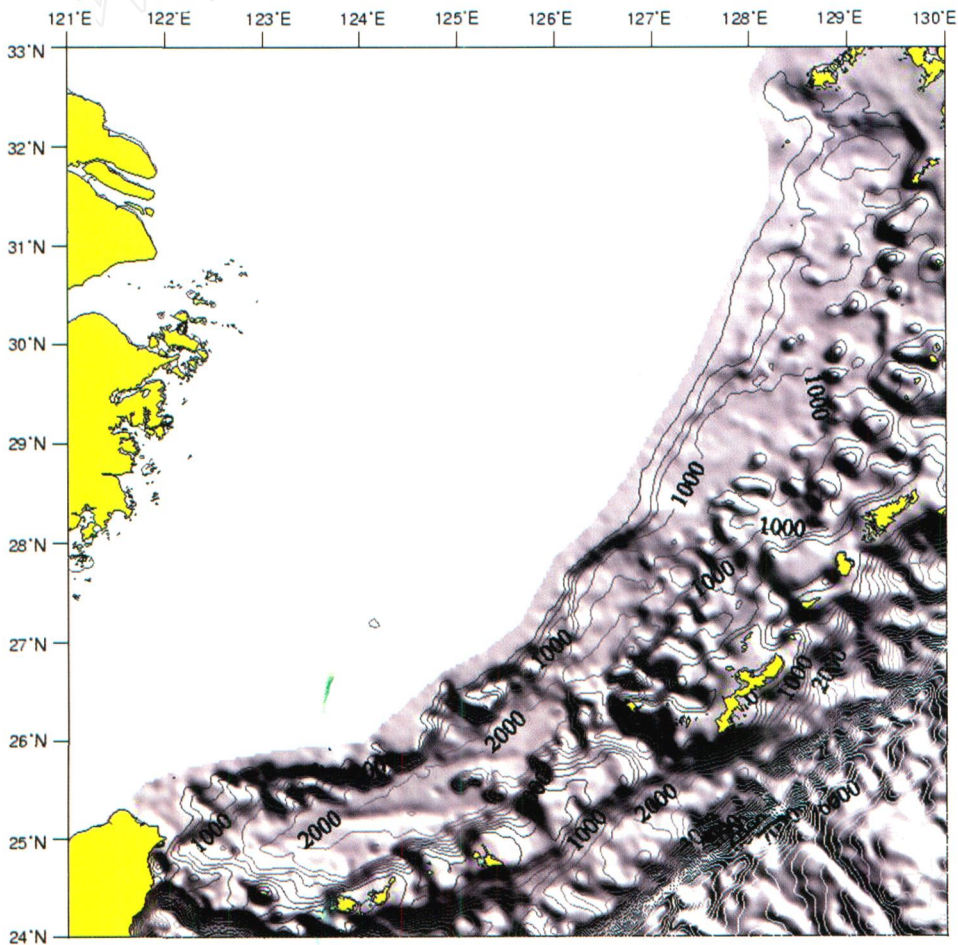


图 1 冲绳海槽及邻区水深分布(等值线间距: 250 m)

Fig. 1 Bathymetry of the Okinawa Trough and its vicinity (contour intervals: 250 m)

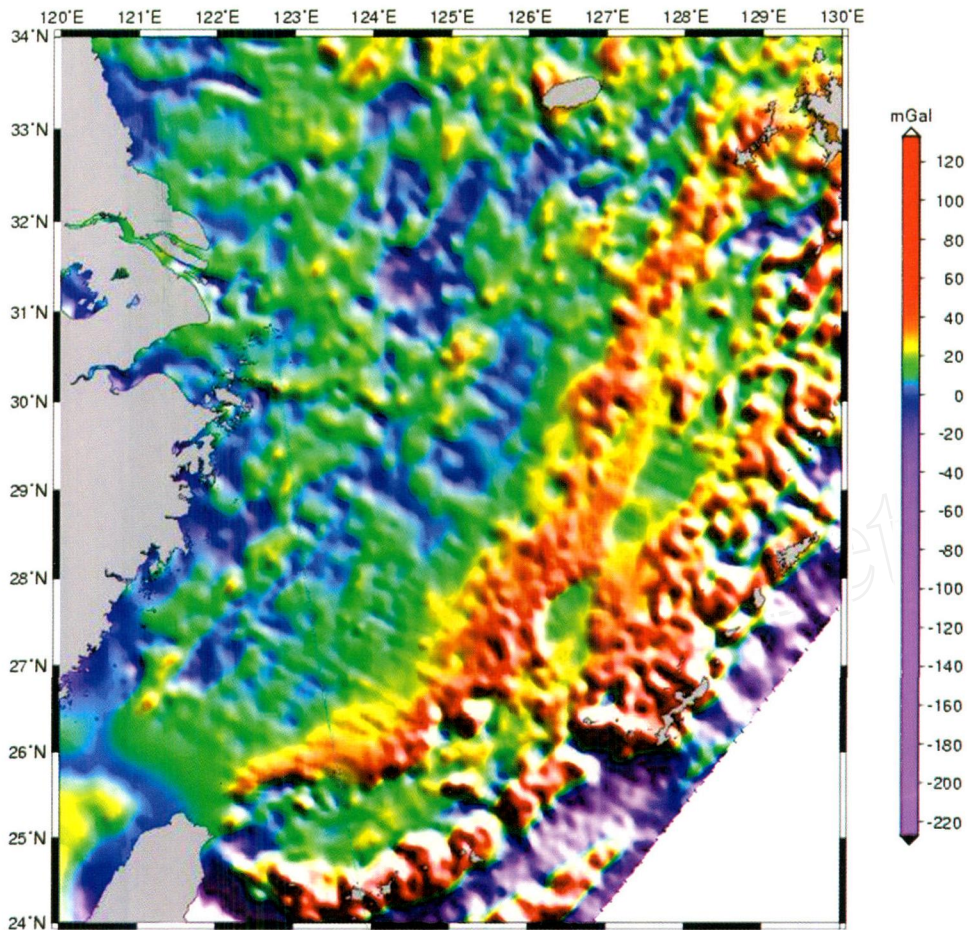


图 2 冲绳海槽及邻区空间重力异常(单位:mGal)

Fig. 2 Free-air gravity anomalies of the Okinawa Trough and its vicinity (Unit: mGal)

的降低异常带(图 2);布格异常是一个升高异常带,南段最高可超过 200 mGal,北段的升高幅度弱(最高在 120 mGal),这与冲绳海槽地壳厚度北厚南薄有关。

冲绳海槽作为东海陆架延伸的自然终止,其海槽西坡表现为类似于被动大陆边缘的陆坡,北起日本五岛列岛福江岛南,向 SW 延至台湾东北端,与海槽一致呈弧形向东南突出,北宽(70 km)南窄(20 km),平均宽 40~50 km(图 1)。陆坡上限水深 140~160 m,与槽底相适应下限水深北浅南深,在赤尾屿一带局部可深至 2000 m。坡度北缓南陡,平均 3°,在钓鱼岛附近最陡达 7°。海槽西坡次级地貌发育,数十条海底谷(沟)与陆坡断裂活动直接相关,其中最长达 200 余公里。陆坡上部断裂谷(沟)(水深 200~400 m)呈 V 型,下部(水深 400~1000 m),呈 U 型,部分可成为陆坡坡脚线^[2,3]。海槽陆坡断裂为一个重力异常梯级带(图 2),空间异常由 40~80 mGal 向轴部递减止 0~30 mGal,布格异常由 50~75 mGal 向轴

部递增至 150~200 mGal,磁异常向上延拓 20 km 仍然保留断裂痕迹(图 3)^[4,5]。陆坡海底沟谷下部常发育相对高差数百米的海底山,周边陡峭,受断裂构造围限,内部发育次一级断层,沉积结构明显,有人称之为地垒式隆脊、断块隆脊或台地,多为陆坡断块^[6]。断块与陆坡之间的海底沟谷,或称断裂峡谷,由断裂构造经浊流强烈再作用扩展而成。

冲绳海槽东界的琉球群岛由东北向西南分布的大隅、吐噶喇、奄美、冲绳、先岛五组群岛组成。冲绳海槽东坡即为岛弧西侧岛坡,北宽(80~100 km)南窄(20~40 km),也与槽底相适应下限水深北浅南深^[7]。琉球岛弧的空间重力异常以高值正异常圈闭排列方式组成升高异常带,南段异常取值普遍高于北段,圈闭中心位置与岛弧海山一一对应(图 2)。奄美群岛以北及内侧的负空间异常圈闭,取值范围为 -35~-10 mGal,是奄美凹陷构造的反映,也是双弧构造的反映。宫古海峡以北的琉球岛弧区域,为一 NE 向延伸的平缓、降低负磁异常带,磁异常背景大

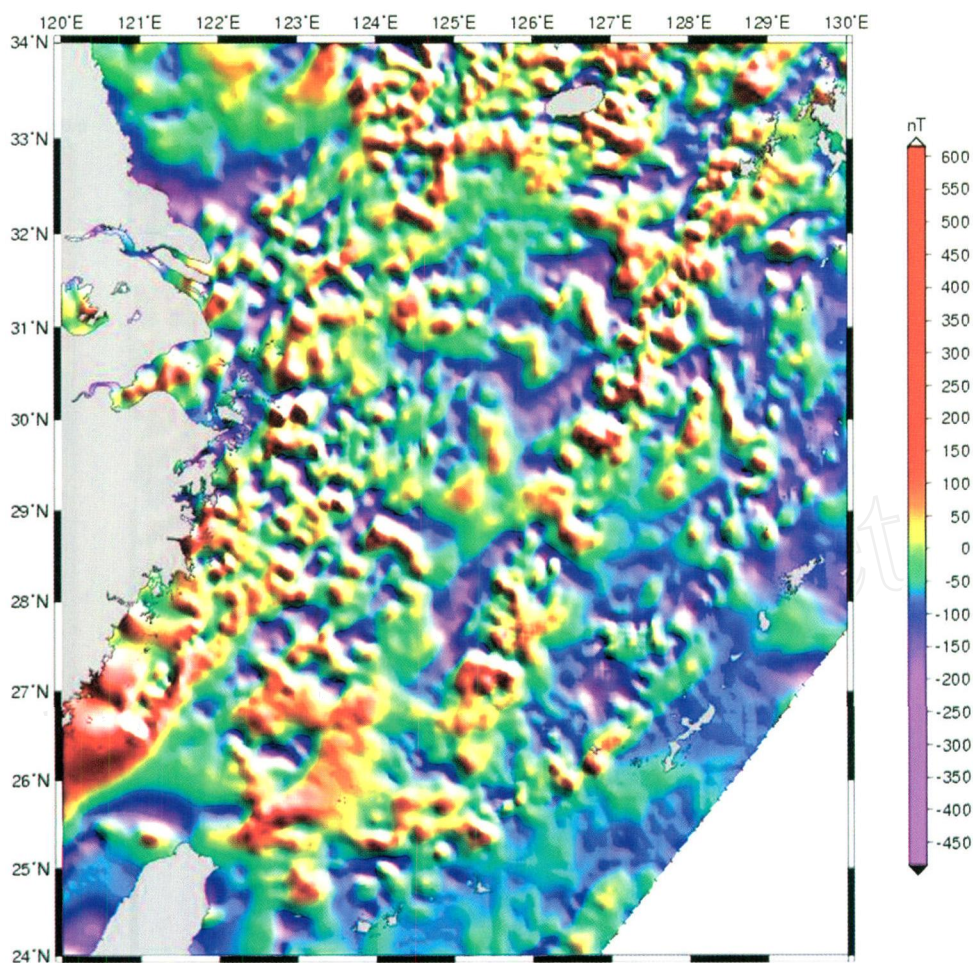


图3 冲绳海槽及邻区磁力 T 异常(单位:nT)

Fig. 3 Magnetic anomalies of the Okinawa Trough and its vicinity (Unit: nT)

致在 $0 \sim 100 \text{ nT}$ 之间。但是,在靠近海槽的内岛弧侧,由东北向西南地磁场都表现为高频强变化的椭圆状圈闭,最高正磁异常可达 $+400 \text{ nT}$ 以上(图3),在南段的槽底与岛弧之间的斜坡上也有这样的特征,显示琉球岛弧南段也具双列岛弧特性。内弧就是吐噶喇火山链,由一系列活动的第四纪火山岩或休眠的侵入岩构成的串珠状展布的活火山岛构成。从冲绳岛往西南方向,由于内弧与外弧距离较近,南段空间异常未像北段那样明显表现出双弧构造特征,但取值较高,可达 $65 \sim 90 \text{ mGal}$ 。

冲绳海槽北段的基底具有沿东西向凹—凸—凹相间的构造格局,深度在 $1 \sim 8 \text{ km}$ 之间变化,受吐噶喇断裂带的北部断裂作用,第三系基底构造发生了显著变化^[8]。冲绳海槽中段宫古海峡附近基底深度一般在 $4 \sim 6 \text{ km}$ 之间变化,表现为往南深度加大,往北段深度变小^[9]。在北西向断裂系的作用下,基底局部构造大都成北西向展布,说明早期的北东

向带状构造受到了后期的北西向构造活动的强烈改造作用。冲绳海槽南段基底埋深为 $3.5 \sim 4 \text{ km}$,主要由上古生界、中生界和下第三系组成,其中上古生界已变质,中生界和下第三系已不同程度变质;槽底基底埋深为 $5.6 \sim 7 \text{ km}$,部分中基性岩体出露^[10]。李昭兴等^[11]用双船折射法获得西南冲绳海槽地壳的纵波数据,得到海槽内莫霍面埋深最浅处厚度只有 16 km ,第一次确立了冲绳海槽地壳减薄的观念。根据布格重力异常反演的结果(图4)^[4],自东海陆架外缘隆起带向东,地壳厚度由 $28 \sim 26 \text{ km}$ 以上骤变至海槽中轴不足 20 km ,其间形成 NE-NNE 走向的莫霍面等深线梯度带(位于陆架前缘凹陷带)。沿海槽中轴,南段的地壳厚度最薄接近 13 km ,向北厚度缓慢增加,相对于两侧的东海陆架盆地和琉球岛弧,冲绳海槽整体上表现出地壳减薄状态,由北东向西南地壳性质逐渐由陆壳向洋壳转变的特征。

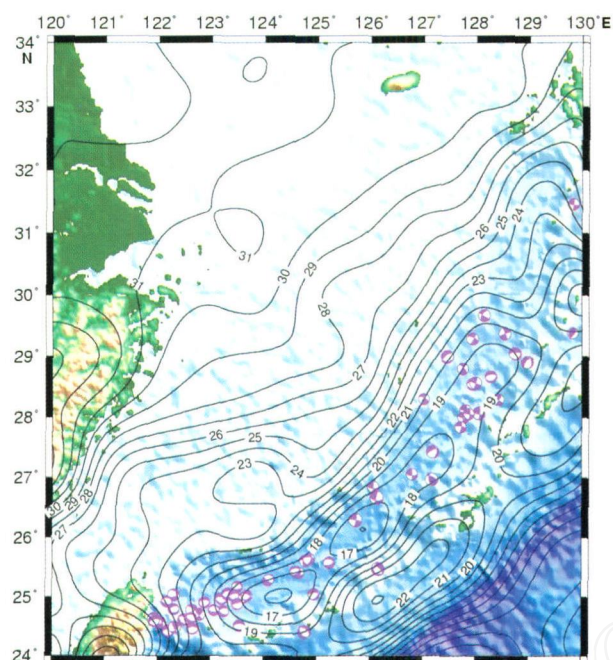


图4 冲绳海槽及邻区莫霍面埋深(单位:km)和
海槽内震源机制解(来源于美国哈佛大学 CMT 资料)
Fig. 4 Depths to the Moho of the Okinawa Trough
and its vicinity (Unit: km) and Earthquake Focal
Mechanism (from the Harvard CMT catalog)

2 冲绳海槽张裂构造动力背景

在 Karig (1971)^[12] 提出次生地幔对流产生弧后盆地的板块构造观点之后,许多学者将冲绳海槽的构造属性与各种现成的模式挂钩,分别作为断陷盆地、坳陷盆地、弧间盆地、弧后盆地、边缘海盆、张裂盆地或大陆裂谷来深化研究,对于其所处演化阶段的看法也不尽相同.这方面的观点主要有:冲绳海槽是一个经历了拱顶—裂陷—扩张三阶段的新生边缘海盆^[11,13];或处在威尔逊旋回的胚胎期与幼年期之间,既有裂陷又有扩张^[14];或是由陆壳拉张形成的大陆边缘裂谷型断陷盆地^[15];或处于扩张开始之前、洋壳即将萌芽的陆缘裂谷演化的最高阶段^[16,17];东海外缘隆起带是冲绳海槽拉张后的残留火山弧,海槽北段形成早、为被动拉张,而南段形成晚、为主动拉张^[18].

随着对冲绳海槽构造特征和活动过程认识的深化,冲绳海槽所处的构造动力环境得到重视.早期,仅从有限的地震震源机制解,得出海槽北段受到近南北向的拉伸作用,甚至海槽南段也进行着与海槽走向相一致的拉伸运动^[19,20].随着地震观测和震源机制解的增多(图4),与菲律宾海板块 NW 向俯冲相一致的冲绳海槽 NW 向张裂作用得到普遍认

可^[20,21~23].二维弹性有限元模拟表明冲绳海槽构造动力可能主要来自水平走滑断层作用,挤压方向主要是沿着海槽走向,海槽和陆架盆地没有直接受到菲律宾海板块俯冲的推挤作用^[22,23].有限元弹塑性平面问题增量法模拟的冲绳海槽中新世末和上新世末的古构造应力场,说明海槽两坡处于明显向两侧拉张状态,并找到反映海槽水平拉张的大量发育的犁状正断层^[24].

来自地热学、岩石学和热液矿物学的证据,促进了冲绳海槽地幔物质、能量交换的构造动力作用方式和过程的研究^[25~34].总的说来,冲绳海槽是一个高热流异常区,强烈的岩浆作用是造成局部高热流的重要原因,广泛分布的海底热液活动造成了局部热流值强烈的高低变化,壳幔热流比值 1:3 远大于东海陆架的 1:1, 35~40 km 的岩石圈厚度远小于东海陆架的 80~90 km^[35],说明板块俯冲导致的强烈的地幔热活动在冲绳海槽形成过程中起到了关键作用.结合热流分布、地形起伏、地层年代、地壳和岩石圈厚度,采用多层、多次和有限拉张模式进行的冲绳海槽盆地拉张、沉降和热演化模拟结果显示,6~8 Ma 以前的第一幕拉张,海槽北段较强烈;2 Ma 以前的第二幕拉张,海槽南段较强烈^[36,37].

研究发现板块俯冲不但是冲绳海槽这类盆地形成的必要条件,而且上覆岩石圈与俯冲板片之间耦合减弱,也是造成这类盆地形成的重要原因^[38].有学者认为海槽主要起因于琉球海沟后撤,而且海沟后撤可能与俯冲板片的动力不平衡以及与周围地幔的相互作用有关^[39];也有学者提出海槽是俯冲引起的岛弧向海沟旋张掀斜运动和弧后地幔流波动运动的共同产物,但不可能形成大规模的扩张^[40];甚至,有学者认为冲绳海槽主要由于大陆地壳下物质 SE 向扩张引起的^[41].冲绳海槽是一条均衡重力异常正值带,软流圈物质可能受东海陆架侧应力发散的推挤和海沟侧俯冲板片的阻挡,不能完全往下回流,成为小尺度的地幔流会聚带,而以“地幔柱”形式上涌侵入岩石圈,熔浆对地壳产生底劈作用,并与吕宋岛向台湾的碰撞挤压引起的旋张活动耦合加剧海槽的张裂洋壳化^[42].

海槽中、南段存在的条带状磁异常曾一致地被认为是海底扩张记录的地磁场极性倒转事件,并据此推断出扩张速率和年代^[11,43,44],而自然成为新生洋壳已经形成的证据.但是,随着对海槽张裂特征认识的深化,有学者倾向于认为条带状磁异常是玄武岩脉沿断裂侵入的结果^[45],或是沉积盖层下掀斜地

块的基底抬升的反映^[46]. 海槽南段陆坡侧存在形成于喜山期中基性岩浆岩, 海槽南段槽底东南缘的正负伴生高磁力异常和岛坡侧的波浪状磁力异常, 是晚新生代海槽张裂以来, 沿断裂侵入或喷发的中基性岩浆岩引起的^[10]. 实际上, 条带状磁异常及其玄武岩脉均伴随海槽的地堑及断层构造分布^[5], 海槽北段沿扩张中轴分布有孤立的海底火山^[8], 海槽中段在扩张中轴以东及岛坡侧下坡存在岩浆岩带^[9].

因此, 对海槽有关地段地壳构造属性、张裂演化阶段及模式的探讨, 离不开对地堑构造属性、动力机理及与玄武岩脉之间关系的认识.

3 冲绳海槽中央地堑构造属性

冲绳海槽中央地堑及断层的发现、追踪和确定主要得益于国内外大量的反射地震调查研究, 并起步于地震速度结构的确定和地震地层年代的划分. Kimura^[43]根据地震剖面将冲绳海槽及其东侧吐噶喇脊地层划分为 5 层: 中新世、早-中中新世(“绿色凝灰岩运动”、八重山群)、晚中新世—早更新世(岛尻群)、晚更新世和全新世. 金翔龙、喻普之^[13]根据地震地层的表现形态, 将海槽区地震地层分为三层: 中新世、上新世、全新世—更新世. 许薇龄等^[49]从代表影响整个东海六次全区性构造运动六个地震地层不整合面中, 识别出对冲绳海槽盆地具有重大影响的龙井运动和冲绳海槽运动. Park 等^[50]根据地震剖面连续、间断和透明三种震相, 在南冲绳海槽地震剖面上共识别出 7 个地层单元: 声学基底 G、始新世—早中新世的 F 层(八重山群)、上新世的 D 和 E 层(岛尻群)、早更新世的 C 层、晚更新世的 B 层(琉球群)和全新世的冲积层 A 层. Kong 等^[51]根据台湾北部的大量地震剖面, 细化出 11 个地层, 与冲绳海槽构造运动及其事件逐个对应分析.

有学者形象地将中央地堑称之为“槽中槽”^[16]. 在活动性较弱的海槽北段凹陷表现为半地堑^[52], 在海槽南段地堑表层沉积物中以浊流沉积为主. 以中更新世(0.5 Ma)为界, 沉积速率由低升高, 达到 4 km/Ma^[43], 晚更新世以来的正断层作用集中出现在地堑范围, 引起的垂直断距最大可到 40 m, 带来张裂下陷和沉积充填, 造就了海槽沉积盆地. 海槽南段早更新世沉积盆地内部的庆良间地堑、宫古地堑、八重山地堑张裂下陷活动时间较长, 形成较深的负地形沉积环境; 海槽中段张裂地堑(硫磺地堑、伊平屋地堑、栗国地堑)形成较晚, 盆地范围和深度不大, 第四纪沉积层厚度较南段盆地薄(图 5).

传统看法认为, 这类地堑及断层走向平行海槽轴向, 几乎可以纵贯整个海槽. 事实上, 槽内地堑及断层斜交于海槽中轴, 明显表现为雁行排列(图 5), 陆坡的断层面形态表现为锯齿状, 走向分别为 NNE 和 SWW, 越往南越接近 N-S 和 E-W 向^[5]. 受这种断层的作用, 海槽北段陆坡发育断块隆脊, 在断块隆脊与陆架之间存在陆架前缘凹陷^[6]; 在海槽中段识别出的龙王火山带^[53], 进入海槽南段陆坡, 截断陆架外缘隆起带, 可能与钓鱼岛—赤尾屿隆起带连接, 磁异常明显显示, 断块隆脊作用使得钓鱼岛—赤尾屿隆起带相对于陆架外缘隆起带在性质上起了变化(图 3); 海槽南段地震证据显示存在类似的构造带, 可能与台湾以北的基隆火山群、大屯火山群关连, 高金耀等^[5]称之为“棉花构造带”. 种种迹象显示海槽有些中央地堑及断层斜切入陆坡, 而互相不贯通. 李西双等^[54]认为冲绳海槽陆坡可与被动大陆边缘对比, 多有不连续的半地堑拉张断陷, 伴有高角度张性正断层, 地层由下部的浅海相到上部的半深海相, 轴部裂谷属于拉张成因的裂谷.

伊平屋凹陷作为地堑构造, 空间异常明显升高, 出现正、负磁力异常圈闭条带(图 2 和图 3), 多条线性海山平行分布^[44, 45]. Sibuet et al.^[45]认为是火山岛弧裂离迁移现象, 称之为弧后盆地火山活动过渡的转折区(VAMP). 海槽南段中央地堑雁行排列比较规整, 靠陆坡侧的断层稍陡些. 以宫古海山为界, 北部一组主要有庆良间地堑和宫古地堑; 南部一组主要有八重山地堑和与那国地堑, 西南端的地堑则可与台湾的梨山断裂相接^[48]. 在庆良间地堑和宫古地堑地段, 栾锡武等^[55]继续细分出九段地堑, 大部分属于 U 型地堑, 也有 V 型地堑或半地堑, 并以青岛的地名命名, 认为中央地堑在形态上和空间展布形式上都和慢速扩张洋脊类似. 从地堑深度较浅和发育重叠来分析, 他们认为冲绳海槽的扩张速率应当属于慢速扩张中速度最快的, 应介于慢速扩张和中速扩张之间, 推测此区域海底扩张可能正在进行^[56].

越接近台湾, 地堑走向越呈近 E-W 向, 空间异常低值带发育完整, 磁异常正负变化剧烈, 布格异常升高地壳趋薄. 海槽最深处的八重山地堑玄武岩海山化极磁异常形态、取值有对称中轴分布的迹象(图 6)^[5]. 与伊平屋凹陷相似, 与那国地堑地段玄武岩火山密布, 东段可标示出五个孤立的岩浆侵入体(图 6)^[5], 西段是一组规模更大的火山群, 伸向宜兰平原还有一段地堑, 其西端是龟山岛, 常年喷发热气, 上次岩浆喷发的时间可能在最近的 8000a 之前, 属于活火山^[57].

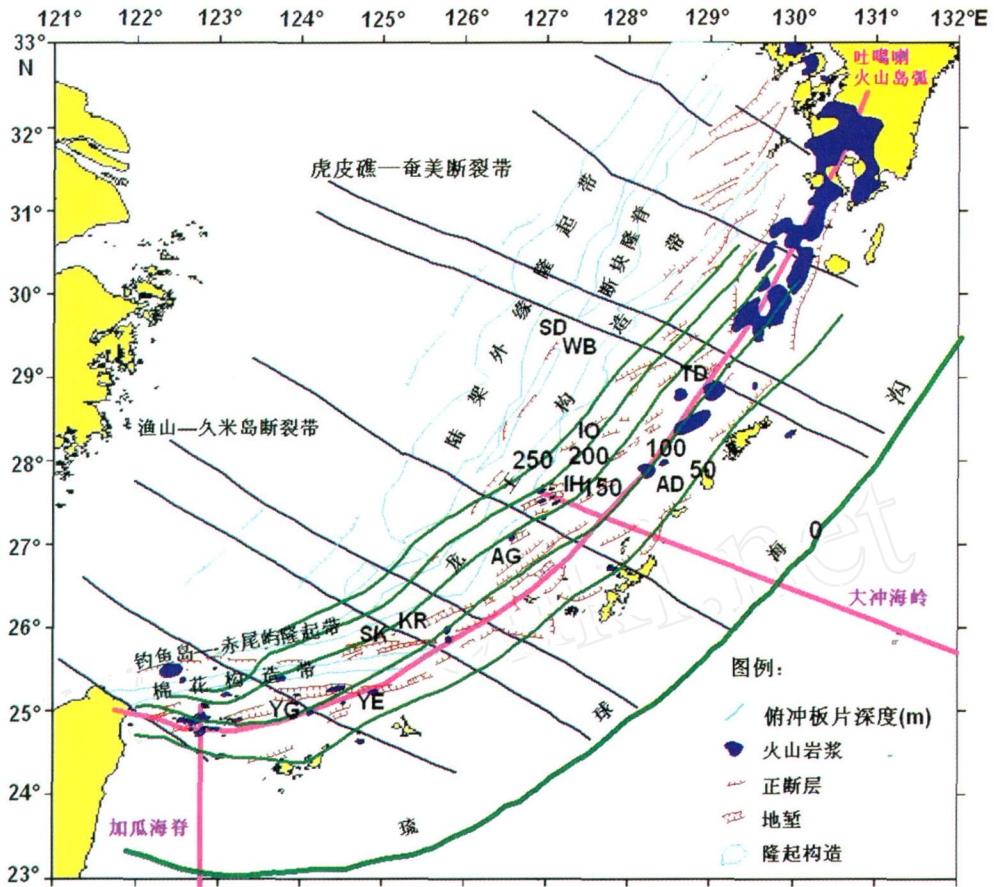


图5 冲绳海槽及邻区构造框架图^[45,47,48]

SD:陆架前缘凹陷;SW:槽西拉张盆地;TD:吐噶喇凹陷;AD:奄美凹陷;IO:硫磺地堑;IH:伊平屋地堑;AG:粟国地堑;KR:庆良间地堑;SK:宫古地堑;YE:八重山地堑;YG:与那国地堑

Fig. 5 Tectonic regime of the Okinawa Trough and its vicinity ^[47,45,48]

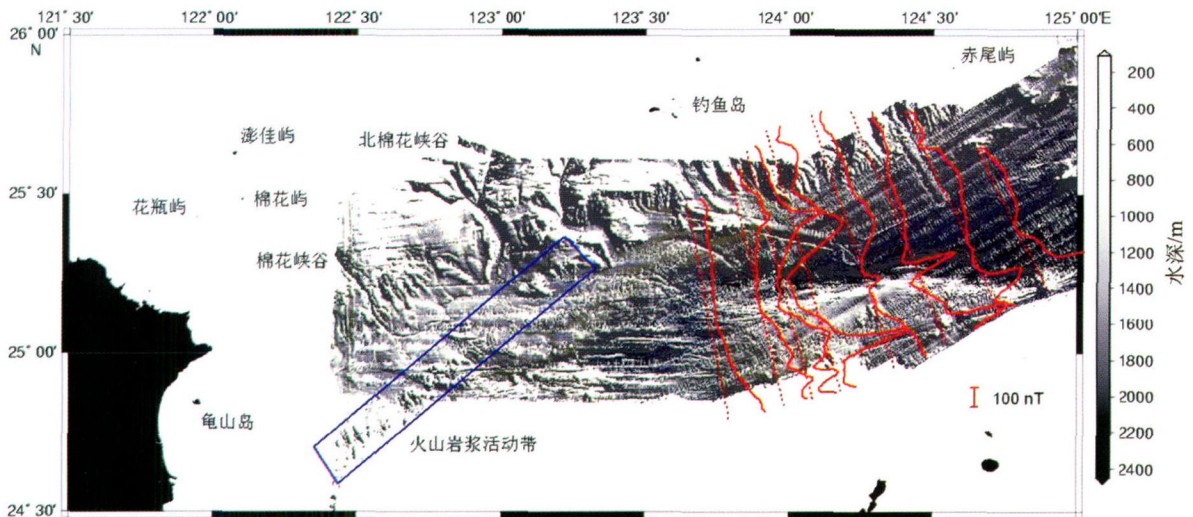


图6 八重山地堑中央海山、化极磁异常剖面和相交于与那国地堑的火山岩浆活动带

Fig. 6 The central seamount and profiles of RTP of magnetic anomalies in the Yaeyama graben, and the volcanism and magmatism belt crossing the Yonaguni graben

金翔龙^[58] 确认与正断层相交的走滑断层多数为左旋性质,部分为右旋性质,如石垣岛与西表岛附近有部分右旋扭断裂.李昭兴等、Kong 等^[11,51] 也在海槽南段附近识别出右旋走向滑动断层.这类断层往往与区域性的大的走滑段裂带相关联,可能切割整个海槽,海槽的弧状弯曲与这组断裂有关(图 5).但是,Sibuet et al.^[48] 在雁行排列的地堑之间没有找到这类走滑断层,使得这类走滑断层与中央地堑及断层之间的关系还很明白了.

4 冲绳海槽中央地堑构造动力

九州岛附近、海槽北段和中段地震震源机制显示接近 N-S 和 E-W 向断层面的走滑特性,T 轴基本取 SE 向;吐噶喇断裂带内的震源机制比较复杂,近 N-S 和 E-W 向的张性和走滑均存在;海槽南段显示近 E-W 向正断层解,T 轴基本取近 S-N 向(图 4),与海槽中北段张裂性质有区别^[59].显然,冲绳海槽和琉球岛弧震源机制提供的岛弧滑移矢量总体上朝正南方向,与海槽中轴之间的夹角从北段的斜交到南段的正交,具有明显的变化.Fournier et al.^[59] 由 Withjack 和 Jamison^[60] 的裂离模型来解释冲绳海槽这种情形.根据 Tron & Brun^[61] 的斜向裂离实验,可以得出海槽第二幕裂离方向在中段、南端分别约为 155 和 N150°,第三幕裂离方向在海槽中段、南端则均约为 N170°,相应的断层分布向岛弧侧迁移^[62,48].琉球岛弧上的古地磁数据也反映了海槽的顺时针方向裂离、迁移^[63].

Sibuet et al.^[48] 将伊平屋凹陷和与那国地堑的火山活动与一般通常发生在中央地堑内的弧后火山活动相区别,称之为斜交弧后火山活动,发现它们分别与菲律宾海的大东海岭、加瓜海脊的俯冲有关.与那国地堑的火山活动和断层活动向岛弧侧变年轻,可用海槽第二、三幕张裂活动迁移和 N308° 方向上菲律宾海 7.1 cm/a 的俯冲速度的模式获得解释^[48];伊平屋凹火山脊的走向、排列方向与海槽中段的断层走向和裂离方向吻合较好,其活动也不排除向岛弧侧迁移的可能性^[5].

这种火山、断层活动迁移,又与俯冲板片脊岭构造相关,可能意味着海沟后撤和俯冲板片的形态及结构对弧后张裂活动有重要影响.琉球海沟俯冲板片刚度比周围其它海沟要小,其中在与九州、台湾两端接触处刚度稍大些,中部俯冲板片可能年龄小、刚度弱,容易后撤,导致与岛弧之间的耦合弱.这样,海沟后撤可能对八重山地堑段附近弧后张裂非常有

利^[64,65].事实上,以加瓜海脊为界,西面的花东盆地 E-W 向磁条带的年代为 53~61 Ma,东面的菲律宾海盆 ESE-WNW 向磁条带年龄为 45 Ma^[66~68],往北年龄继续增大,隆起地形也明显.加瓜海脊东侧存在一条撕裂带,往西板片俯冲角度变陡,在弧后 20~100 km 深度范围内存在约 30 km 直径的低 V_s 、高 V_p/V_s 的岩浆通道,其中发生的丰富的脱水作用可以解释其上的火山群^[69,70].在海槽北端的地堑下面—九州岛以西 40~100 km 深度范围内,也存在很强的低速带^[71],反映出上面的张性构造与下面的上地幔熔融上升、压力增高相互配合.

理论模拟计算表明,俯冲板片年龄大、温度低、比重大和俯冲角度大,有利于海沟后撤和在弧后地区产生明显的上涌地幔流,从而导致弧后扩张^[72].对冲绳海槽而言,并不能简单地套用这个规律,应该从俯冲板片刚度的内部差异以及与岛弧之间的耦合作用差异来解释.九州、台湾两端俯冲板片刚度大、地形隆起导致强耦合而锁定,海沟中部刚度低、地形平坦导致弱耦合而相对自由、容易后撤.这样,海沟中部的俯冲角度小与后撤幅度大可以获得统一.如下板片俯冲和后撤模式很可能导致这种三维流动模式:平行板片的两个极向(垂直)流动单元,分别位于板片之上(或前面)和之下(或后面)的上地幔中;垂直板片的两个环形(水平)流动单元,分别从俯冲板片的底部(或后面)绕其两边流向地幔楔(图 7)^[73].显然,俯冲板片形态、结构和刚度的横向不连续性可使地幔流动和海沟后撤模式复杂化,冲绳海槽中央地堑的分段、雁行排列和走向变化可以与之联系起来考虑,琉球海沟中部板片年龄小、刚度低自然可使环形流动顺畅发动,同步强化弧后张裂和海沟后撤.

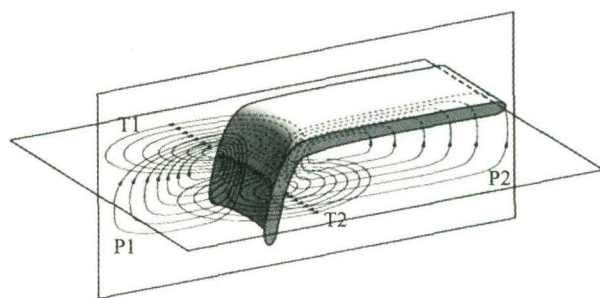


图 7 板片俯冲、后撤引起的上地幔流动^[73]

Fig. 7 Convection of upper mantle induced by slab subduction and trench roll-back^[73]

5 研究展望

从上面的研究总结、推断分析可以看出,有关冲绳海槽构造动力的认识有待于对其中央地堑、断层及岩浆的系统、深入地研究。海槽陆坡、中轴和岛坡的内部构造现象不能与构造格局等同,地堑、地垒、断层以及它们所界定的构造单元还有待于进行探测研究,揭示不同地段中央地堑、断层及岩浆的形态、属性和活动时代,并从其构造属性上加以区别、分类,展示不同地段中央地堑及断层与火山岩浆之间的相互作用方式和主、被动关系,以及它们与各种构造动力背景要素之间的关系,加深认识典型中央地堑洋壳化机理、发展阶段和地壳属性。

冲绳海槽弧后张裂的特点集中体现在分段的、斜交中轴的、雁行排列的中央地堑,聚焦中央地堑进行研究,可与 InterMargins (国际大陆边缘计划) 和 InterRidge (国际洋中脊计划) 关心的热点问题相关联,对于深刻认识大陆边缘张裂洋壳化和大洋中脊断错分段形式的初始演化阶段,具有重要的科学意义。特别是类似于洋中脊,中央地堑轴部火山岩浆活动分布集中,热液硫化物和深海生物群落发育,是研究地球各圈层之间的物质、能量循环规律及其驱动机制的理想场所。与洋中脊、热点一样,冲绳海槽中央地堑可以成为我们窥视深部构造、成矿活动和内部动力的难得窗口。

致谢 在成文和图件准备过程中,得到了当时课题组成员孙鹏、叶芳、陈美和李新的帮助,特此表示感谢。文中部分插图由 GMT 绘制^[74]。

参 考 文 献 (References):

- [1] 李乃胜. 冲绳海槽构造活动分析[D]. 青岛:中国科学院海洋研究所博士学位论文, 1996.
Li N S. On the tectonic activity of the Okinawa Trough[D]. Ph.D Thesis, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences (in Chinese). 1996.
- [2] 高金满, 李国胜, 孙家淞, 等. 冲绳海槽地形地貌特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1987, 7(1): 51~60.
Gao J M, Li G S, Sun J S, *et al.* Characteristics of topography and geomorphology of the Okinawa Trough[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1987, 7(1): 51~60.
- [3] 吴自银, 王小波, 金翔龙, 等. 冲绳海槽弧后扩张证据及关键问题探讨[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(3): 67~76.
Wu Z Y, Wang X B, Jin X L, *et al.* The evidences of the back-arc spreading and discussion on the key issues in the Okinawa Trough [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, 24(3): 67~76.
- [4] 高金耀, 李家彪, 林长松. 南冲绳海槽岩石圈构造动力作用机制探讨[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(4): 349~355.
Gao J Y, Li J B, Lin C S. Probing into lithospheric tectonic mechanics of Southern Okinawa Trough [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2002, 33(4): 349~355.
- [5] 高金耀, 叶芳, 李家彪, 等. 冲绳海槽断裂、岩浆构造活动和洋壳化过程[A]. 见: 李家彪主编. 边缘海海盆演化与资源效应 (“中国边缘海形成演化系列研究”丛书第三卷) [C]. 北京: 海洋出版社, 2004, 275~284.
Gao J Y, Ye F, Li J B, *et al.* Faulting, magmatism and crustal oceanization of the Okinawa Trough[A]. Origin and Evolution of China Marginal Seas Volume III, ed. Li Jiabiao, 2004: 275~284. Beijing: China Ocean Press.
- [6] 范奉鑫, 林美华, 江荣华, 等. 东海陆架前缘斜坡(冲绳海槽西坡)北部的断块隆脊地貌[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2000, 30(1): 73~176.
Fan F X, Lin M H, Jiang R H, *et al.* The rift block ridge in north continental shelf front slope of the East China Sea[J]. Journal Of Ocean University Of Qingdao, 2000, 30(1): 73~176.
- [7] 许东禹, 刘锡清, 张训华, 李唐根主编. 中国近海地质[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
Xu D Y, Liu X Q, Zhang X H, Li T G. China offshore geology[M]. Beijing: China Geology Press, 1997.
- [8] 刘展, 孙鲁平, 范丰鑫, 等. 冲绳海槽北部基底构造特征[J]. 地球物理学进展, 2006a, 21(4): 1086~1092.
Liu Z, Sun L P, Fan F X, *et al.* The basement tectonics in north of the Okinawa trough[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006, 21(4): 1086~1092.
- [9] 刘展, 赵文举, 吴时国, 等. 冲绳海槽南部基底构造特征[J]. 地球物理学进展, 2006b, 21(3): 814~824.
Liu Z, Zhou W J, Wu S G, *et al.* The basement tectonics in south of the Okinawa trough[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006, 21(3): 814~824.
- [10] 刘建华, 林长松, 高金耀, 等. 冲绳海槽南段基底组成分析[J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(3): 261~267.
Liu J H, Lin C S, Gao J Y. Analyses on the basement constitution of the southern okinawa trough [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2005, 36(3): 261~267.
- [11] Lee C S, Jr. Shor G G, Bibe L D, *et al.* Okinawa trough: origin of back-arc basin[J]. Marine Geology, 1980, 35(1~3): 219~241
- [12] Karig D E. Origin and development basin in the western Pacific[J]. Geophys. Res., 1971, 76(B2): 2542~2651
- [13] 金翔龙, 喻普之. 冲绳海槽的特征与演化[J]. 中国科学(B辑), 1987, 2: 196~203.
Jin X L, Yu P Z. Characters and evolution of the Okinawa Trough[J]. Scientia Sinica (B), 1987, 2: 196~203.
- [14] 金性春, 戴南浔. 冲绳海槽异常地幔与地壳性质的初步分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1984, 4(3): 17~27.
Jin X C, Dai N X. Primary analyses on anomalous mantle and

- crustal type of the Okinawa Trough[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1984, 4(3): 17~27.
- [15] 黄福林. 冲绳海槽的形成与演化探讨[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1989, 9(1): 43~51.
Huang F L. Formation and evolution of the okinawa trough [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1989, 9(1): 43~51.
- [16] 李乃胜, 姜丽丽, 李常珍. 冲绳海槽地壳结构的研究[J]. *海洋与湖沼*, 1998, 29(4): 441~450.
Li N S, Jiang L L, Li C Z. A study on the nature of crustal structures of the okinawa trough[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1998, 29(4): 441~450.
- [17] 周祖翼, 廖宗廷, 金性春, 等. 冲绳海槽—弧后背景下大陆张裂的最高阶段[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(1): 52~55.
Zhou Z Y, Liao Z T, Jin X C, *et al.* Okinawa trough: the highest stage of continental tension rifting in Back Arc Setting [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2001, 21(1): 52~55.
- [18] 赵金海, 唐建, 王舜杰. 冲绳海槽新生代构造演化讨论[J]. *海洋石油*, 2003, 23(3): 1~9.
Zhao J H, Tang J, Wang S J. Structural evolution of cenozoic of the okinawa trough[J]. *Offshore Oil*, 2003, 23(3): 1~9.
- [19] Eguchi T, Uyeda S. Seismotectonics of the okinawa trough and ryukyu arc[J]. *Memoir of Geol. Soc. of China*, 1983, 5: 89~210.
- [20] 黄培华, 苏维加, 陈金波. 冲绳海槽和琉球岛弧的地震活动与应力场[J]. *地震学报*, 1994, 16(4): 407~415.
Huang P H, Su W J, Chen J B. Seismic activities and stress field of the okinawa trough and ryukyu arc[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1994, 16(4): 407~415
- [21] 臧绍先, 宁杰远, 许立忠. 琉球岛弧地区的地震分布、Benioff带及应力状态[J]. *地震学报*, 1989, 11(2): 113~123.
Zang S X, Ning J Y, Xu L Z. Earthquake distribution, Benioff zone and stress status in the region of Ryukyu Arc[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1989, 11(2): 113~123.
- [22] 许忠淮, 吴少武. 南黄海和东海地区现代构造应力场特征的研究[J]. *地球物理学报*, 1997, 40(6): 773~781.
Xu Z H, Wu S W. A study on present-day tectonic stress in the Southern Yellow Sea and East China Sea Region[J]. *Chinese Journal Of Geophysics*, 1997, 40(6): 773~781.
- [23] 许忠淮, 徐国庆, 吴少武. 东海地区现代构造应力场及其成因探讨[J]. *地震学报*, 1999, 21(5): 495~501.
Xu Z H, Xu G Q, Wu S W. Study on recent tectonic stress fields and their origin in the East China Sea[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1999, 21(5): 495~501.
- [24] 李乃胜. 冲绳海槽横断裂初探[J]. *海洋学报*, 1990, 12(4): 455~462.
Li N S. Primary study on transverse faults of the Okinawa Trough[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1990, 12(4): 455~462.
- [25] Yasui M, Epp D, Nagasaka K, Kishii T. Terrestrial heat flow in the seas round the Nansei Shoto (Ryukyu Islands) [J]. *Tectonophysics*, 1970, 10: 225~234
- [26] Sclater J G, *et al.* The heat flow trough oceanic and continental crust and the heat loss of the Earth[J]. *Res. Geophys. Space Phys.*, 1980, 18: 269~311
- [27] 刘昭蜀, 陈雪. 冲绳海槽热流值分析及其地质解释[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1984, 4(1): 93~100.
Liu Z S, Chen X. Analysis and geological interpretation of the heat flow values in Okinawa Trough[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1984, 4(1): 93~100.
- [28] 喻普之, 李乃胜. 东海地壳热流[M]. 北京: 海洋出版社, 1992, 50~73.
Yu P Z, Li N S. Heat flow in crust of the East China Sea [M]. Beijing: China Ocean Press, 1992: 50~73.
- [29] 高金耀. 冲绳海槽及附近地区地热场[A]. 见: 金翔龙主编. 东海海洋地质[C]. 北京: 海洋出版社, 1992, 367~379.
Gao J Y. Geothermal field of the Okinawa Trough and its vicinity[A]. In: Jin Xianglong (Ed.), *Marine Geology of the East China Sea*[C]. Beijing: China Ocean Press, 1992: 367~379.
- [30] 翟世奎, 于晓群. 冲绳海槽海底热液活动区岩石矿物学和岩石化学特征及其地质意义[J]. *海洋与湖沼*, 1995, 26(2): 115~123.
Zhai S K, Yu X Q. Study of basalt from the Hydrothermal field of the Okinawa trough[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1995, 26(2): 115~123.
- [31] 李巍然, 杨作升, 张保民, 等. 冲绳海槽南部橄榄拉斑玄武岩研究[J]. *海洋与湖沼*, 1997, 28(6): 665~672.
Li W R, Yang Z S, Zhang B M, *et al.* Study on the olivine tholeiite of the southern Okinawa Trough. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1997, 28(6): 665~672.
- [32] 栾锡武. 琉球沟弧盆系的海底热流分布特征及冲绳海槽热演化的数值模拟[J]. *海洋与湖沼*, 1997, 28(1): 44~48.
Luan X W. Study of heatflow distribution of ryukyu TA-B-A system and thermo dynamic modeling of Okinawa Trough [J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1997, 28(1): 44~48.
- [33] 于增慧, 翟世奎, 赵广涛. 冲绳海槽浮岩中岩浆包裹体岩石成分特征[J]. *海洋与湖沼*, 2001, 32(5): 474~482.
Yu Z H, Zhai S K, Zhao G T. The Petrochemical feature of melt inclusion in ACID pumice in the Okinawa Trough[J]. 2001, 32(5): 474~482.
- [34] 栾锡武, 张训华. 东海及琉球沟弧盆系的海底热流测量与热流分布[J]. *地球物理学进展*, 2003, 18(4): 670~678.
Luan X W, Zhang X H. Heat flow measurement and distribution of East China Sea and Ryu Kyu trench Arc back-Arc system[J]. *Progress In Geophysics*, 2003, 18(4): 670~678.
- [35] 李官保, 刘保华, 李乃胜, 等. 冲绳海槽地热研究中若干问题的探讨[J]. *海洋通报*, 2006, 5(25): 70~76.
LI G B, Liu B H, Li N S, *et al.* Discussion on some questions in the geothermics study[J]. *Marine Science Bulletin*, 2005, 20(2): 562~565.

- [36] 刘保华,徐世浙. 冲绳海槽沉降和热演化模式初探[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(1): 59~64.
Liu B H, Xu S Z. Preliminary study on the model of subsidence and heat flow evolution in the Okinawa trough[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1998, 18(1): 59~64.
- [37] 江兴歌, 朱建辉, 蒋洪堪. 应用双层拉张模式研究冲绳海槽的拉张史[J]. 石油实验地质, 1998, 20(4): 398~404.
Jiang X G, Zhu J H, Jiang H K. Study on the extension history of the Okinawa trough by a two layer extension model[J]. Experimental Petroleum Geology, 1998, 20(4): 398~404.
- [38] Uyeda S, Kanamori H. Back-arc opening and the mode of subduction[J]. Geophys. Res., 1979, 84 (B3): 1049~1061.
- [39] 高祥林. 琉球海沟的构造和运动特征[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(2): 293~301.
Gao X L. Tectonics and motion of the Ryukyu trench[J]. Progress In Geophysics, 2003, 18(2): 293~301.
- [40] 林长松, 王英. 论冲绳海槽的张裂运动[J]. 海洋学报, 1999, 21(5): 95~100.
Lin C S, Wang Y. The tension movement of the Okinawa Trough[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1999, 21(5): 95~100.
- [41] 姜丽丽, 刘福田. 东海及其邻域地球动力学研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(3): 107~112.
Jiang L L, Liu F T. Progresses in geodynamics in the East China Sea and Its Adjacent Area[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2000, 20(3): 107~112.
- [42] 高金耀, 陈美, 金翔龙, 等. 由卫星测高数据研究琉球沟弧系的俯冲构造特点[A]. 见: 朱耀仲, 孙和平主编. 大地测量与地球动力学[C]. 湖北: 科学技术出版社, 2004, 478~486.
Gao J Y, Chen M, Jing X L, et al. Subduction tectonics of the Ryukyu Trench-Arc characterized by satellite altimeter data[A]. Geodesy and Geodynamics[C], ed. Zhu Yaozhong and Sun Hepin, Hubei Publication of Sciences and Technology. 2004: 478~486.
- [43] Kimura M. Back-arc rifting in the Okinawa Trough [J]. Mar. Pet. Geol., 1985, 2(3): 222~240.
- [44] 梁瑞才, 吴金龙, 刘保华, 等. 冲绳海槽中段线性磁条带异常及其构造发育[J]. 海洋学报, 2001, 23(2): 69~78.
Liang R C, Wu J L, Liu B H, et al. Linear magnetic anomalies and tectonic development for the middle Okinawa Trough [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(2): 69~78.
- [45] Sibuet J C, Letouzey J, et al. Back arc extension in the Okinawa trough[J]. Geophys. Res., 1987, 92(B13): 14041~14063.
- [46] Oshida A, Tamaki K, Kimura M. Origin of the magnetic anomalies in the southern Okinawa Trough [J]. Geomagn. Geoelectr., 1992, 44(5): 345~359.
- [47] 刘光鼎主编. 中国海区及邻域地质地球物理特征[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
Liu G D. Geological and geophysical features of China Seas and adjacent regions [M]. Beijing: China Science Press, 1992.
- [48] Sibuet J C, Deffontaines B, Hsu S K, et al. Okinawa trough backarc basin: early tectonic and magmatic evolution [J]. Geophys. Res., 1998, 103(B12): 30245~30267.
- [49] 许薇龄. 东海的构造运动及演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1988, 8(1): 9~21.
Xu W L. Tectonic movement and evolution of the East China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1988, 8(1): 9~21.
- [50] Park J O, Tokuyama H, Shinohara M, Suyehiro K, Taira A. Seismic record of tectonic evolution and backarc rifting in the southern Ryukyu island arc system[J]. Tectonophysics., 1998, 294 (1~2): 21~24.
- [51] Kong Fanchen, Lawver Lawrence A., Lee Tung-Yi. Evolution of the southern Taiwan-Sinzi Folded Zone and opening of the southern Okinawa trough[J]. Journal of Asian Earth Sciences., 2002, 18(3): 325~341.
- [52] Letouzey J, Kimura M. Okinawa Trough genesis: Structure and evolution of back-arc basin developed in a continent [J]. Marine and Petroleum Geol., 1985, 2: 111~130
- [53] 杨文达, 王振宇, 曾久岭. 冲绳海槽轴线地质特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(2): 1~6.
Yang W D, Wang Z Y, Zeng J L. Geologic features of The Okinawa Trough AXIS[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(2): 1~6.
- [54] 李西双, 刘保华, 吴金龙, 等. 冲绳海槽西部陆坡地震相模式与沉积体系[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(2): 121~129.
Li X S, Liu B H, Wu J L, et al. Seismic reflection facies and deposit systems in the West Slope Of The Okinawa Trough [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2004, 35(2): 121~129.
- [55] 栾锡武, 高金耀, 梁瑞才, 等. 冲绳海槽宫古段中央地堑的形态与分布[J]. 地质学报, 2006, 80(8): 1149~1155.
Luan X W, Gao J Y, Liang R C, et al. Topography and distribution of central graben in the miyoko section of Okinawa Trough[J]. Acta Geological Sinica, 2006, 80(8): 1149~1155.
- [56] 栾锡武, 岳保静. 冲绳海槽宫古段中央地堑中火山分布及地质意义[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(3): 266~271.
Luan X W, Yue B J. Topography and distribution of central grab MIYOKO section of Okinawa Trough[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2007, 38(3): 266~271.
- [57] 李昭兴. 南冲绳海槽海底火山与地震预警系统的初步构想[A]. 第五届海峡两岸台湾邻近海域海洋科学研讨会论文集. 2002, 40~41.
Lee C S. A preliminary study of submarine volcano and earthquake forecasting alarm system of the southern Okinawa Trough[A]. The Fifth Symposium across Taiwan Strait on Oceanography near Taiwan (Taipei), 40~41, 2002.
- [58] 金翔龙主编. 东海海洋地质[M]. 北京: 海洋出版社, 1992.
Jing X L. Marine geology of East China Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 1992
- [59] Fournier M, Fabbri O, Angelier J, Cadet J P. Regional seis-

- micity and on-land deformation in the Ryukyu arc: Implications for the kinematics of opening of the Okinawa Trough [J]. *Geophys. Res.*, 2001, 106(B7): 13751 ~ 13768
- [60] Withjack M, Jamison W. Deformation produced by oblique rifting[J]. *Tectonophysics*, 1986, 126: 99 ~ 124.
- [61] Tron V, Brun J P. Experiments on oblique rifting in brittle-ductile systems[J]. *Tectonophysics*, 1991, 188: 71 ~ 84
- [62] Thareau N, Sibuet J C, Nouz éH, Bern éS, *et al.* Extensional tectonics in the Middle Okinawa trough (West Pacific) [J]. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Series II: A Earth and Planetary Science*, 1997, 325(9): 683 ~ 688.
- [63] Miki Masako. Two-phase opening model for the Okinawa Trough inferred from paleomagnetic study of the Ryukyu arc [J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100(B5): 8169 ~ 8184.
- [64] 陈美, 高金耀, 金翔龙, 等. 利用大地水准面和水深数据模拟琉球海沟处岩石圈的挠曲[A]. 见:李家彪主编. 边缘海海盆演化与资源效应(“中国边缘海形成演化系列研究”丛书第三卷)[C]. 北京: 海洋出版社, 2004, 23 ~ 28.
Chen M, Gao J Y, Jin X L, *et al.* Using geoid and bathymetry data to model seaward Lithospheric flexure of the Ryukyu Trench[A]. *Origin and Evolution of China Marginal Seas Volume III*, ed. Li Jiabiao, 2004: 23 ~ 28. Beijing: China Ocean Press.
- [65] 陈美, 高金耀, 金翔龙, 等. 利用大地水准面模拟琉球海沟洋坡岩石圈的挠曲[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(4): 55 ~ 60.
Chen M, Gao J Y, Jin X L, *et al.* Using geoid to model seaward Lithospheric flexure of the Ryukyu Trench[J]. 2004, 24(4): 55 ~ 60.
- [66] Hilde T W, Lee C S. Origin and evolution of the west Philippine basin: A new interpretation[J]. *Tectonophysics*, 1984, 102: 879 ~ 905.
- [67] Hsu S K, Sibuet J C, Monti S, *et al.* Transition from the Okinawa trough backarc extension and the Taiwan collision: new insights on the southernmost Ryukyu subduction zone [J]. *Mar. Geophys. Res.*, 1996, 18: 163 ~ 187.
- [68] Hsu S K. Lithospheric structure, buoyancy and coupling across the southernmost Ryukyu subduction zone: an example of decreasing plate coupling[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 186(3 - 4): 471 ~ 478.
- [69] Lin J Y, Hsu S K, Sibuet J C. Melting features along the Ryukyu slab tear, beneath the southwestern Okinawa Trough[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2004a, 31, L19607, doi: 10.1029/2004GL020862.
- [70] Lin J Y, Hsu S K, Sibuet J C. Melting features along the western Ryukyu slab edge (northeast Taiwan): Tomographic evidence[J]. *Geophys. Res.*, 2004b, 109, B12402, doi: 10.1029/2004JB003260.
- [71] Sadeghi H, Suzuki S, Takenaka H. Tomography low-velocity anomalies in the uppermost mantle around the northeastern edge of Okinawa trough, the backarc of Kyushu [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, 27(2): 277 ~ 280.
- [72] 石耀霖, 王其允. 俯冲带的后撤与弧后扩张[J]. *地球物理学报*, 1993, 36(1): 37 ~ 43.
Shi Y L, Wang Q Y. Roll-back of subduction zone and back-arc spreading [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1993, 36(1): 37 ~ 43.
- [73] Schellart W P. Kinematics of subduction and subduction-induced flow in the upper mantle [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109, B07401, doi: 10.1029/2004JB002970.
- [74] Wessel P, Smith W M F. Free software helps map and display data, *EOS Trans. AGU*, 1991, 72: 441 ~ 446.