

南冲绳海槽岩石圈构造动力作用机制探讨*

高金耀[†] 李家彪[†] 林长松[†](国家海洋局第二海洋研究所 海底科学重点实验室 杭州 310012;中国科学院海洋研究所 青岛 266071)
(国家海洋局第二海洋研究所 海底科学重点实验室 杭州 310012)

提要 由最新获得的重磁、地震和多波束地形数据,结合多尺度的地幔流动力分析,展示了南冲绳海槽岩石圈构造动力的多样性特征和其内在的联系。从上新世开始的三幕张性断陷活动是在以前的压性断裂构造的基础上发展起来的,向岛弧侧迁移,岩浆、火山活动主要集中在正断层与平移断层的交汇处。深部动力源可归结为上地幔对流产生的菲律宾海板块俯冲,引起岛弧岩石圈挤压褶皱而向海沟旋张掀斜,产生弧后岩石圈的张性构造;进一步引起弧后软流圈挤压隆起,岩石圈与软流圈耦合作用导致海槽断陷张裂、岩浆活动。冲绳海槽仍是一个软流圈在汇聚的弧后盆地。全球性左旋扭滑移背景,琉球海沟南段俯冲受阻小、强度大,台湾—吕宋的北向挤压,使海槽表现为剪张性,由平移断层调控使张性断裂左旋雁行排列,整个海槽张性构造由北向南推进,张应力方向由 NW 过渡到 NNW。

关键词 南冲绳海槽,张性断陷,岩石圈,软流圈,地幔流

中图分类号 P738

冲绳海槽位于东海大陆架的外缘,北起日本九州南止中国台湾全长约 1200km,在琉球沟弧系的内侧,并与之平行一起向菲律宾海凸出。槽底自北向南加深,北部水深可浅于 200m,中部水深在 1000m 左右,南部水深可超过 2300m;海槽宽度却北宽南窄,北部有 230km 宽,南部只有 60—100km 宽(图版 I :a)。作为深而窄长的弧后盆地,冲绳海槽新生代张裂构造活动特征明显,是西太平洋最年轻的弧后盆地(金翔龙,1992),其起源演化和张裂机制备受中外学者的关注(Wageman *et al*, 1970; Herman *et al*, 1978; Lee *et al*, 1981; Jin, 1984; 金翔龙等, 1987、1992; 喻普之, 1992)。由于受研究资料的限制和 Karig (1971)弧后对流扩张假说的影响,在涉及冲绳海槽构造演化的动力来源时,无法客观估算软流圈及上地幔的动力状态,同时存在着采用弧后地幔对流扩张来掩盖冲绳海槽岩石圈本身所具有的一些构造动力特征的问题。

针对上述问题,冲绳海槽所特有的一些构造特征开始被注重起来,弧后地幔对流扩张受到质疑,认为岩石圈本身的裂离、裂陷和沉降机制起着重要作用(金性春等, 1984; 李乃胜等, 1998; 黄福林, 1989; 林长松等, 1999)。但是,来自岩石学、地热学和热液矿物学的证据表明,地幔动力的强度仍是不可忽视的(Chen *et al*, 1995; 翟世奎等, 1995; 姜效典等, 1996; 李巍然等; 1997; 于增慧等, 2001)。

* 国家重点基础研究发展规划项目, G2000046703 号。高金耀, 男, 出生于 1962 年 12 月, 博士, 研究员, E-mail: jy-gao@mail.hz.zj.cn

收稿日期: 2001-06-12, 收修改稿日期: 2002-01-03

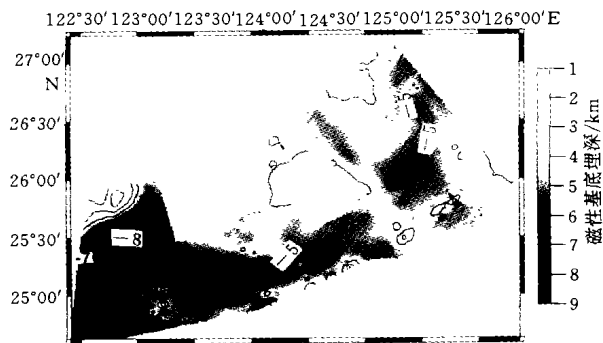


图 1 南冲绳海槽磁性基底埋深(单位:km)

Fig.1 Magnetic basement depth (in km) of southern Okinawa Trough

由于冲绳海槽南部的构造活动比北部表现得更集中、剧烈,国家海洋局第二海洋研究所从 1995 年起,在该地段先后进行了地质取样、重磁地震测量和多波束高分辨率地形扫描,下面依据这些宝贵的第一手资料,并结合整个东亚区域的地球动力学状况的分析,提出关于南冲绳海槽岩石圈构造动力特征的一些新认识,以便下一步更深入、全面和真实地构建冲绳海槽岩石圈构造动力学机制。

1 断裂和岩浆活动特征

1.1 主构造走向的张性断裂

南冲绳海槽的地壳厚度只有 15—20km(图版 I : a)¹⁾,被一系列平行于海槽中轴线的 N65°—85°走向的张性断裂切割陷落。其中,北侧断裂带重磁场上反映明显,是一个重力异常梯级带,空间异常由 40—80mGal 向轴部递减至 0—30mGal,布格异常由 50—75mGal 向轴部递增至 150—200mGal,磁异常向上延拓 20km 仍然保留断裂痕迹,属于切割基底的区域性深大断裂,磁性基底错落可以达到 2—3km(图 1)。该断裂带造成陡峻的地形,断崖和滑塌地块随处可见。有不下十条规模大小不一的海底峡谷横切该断裂带,其中钓鱼岛以西和赤尾岛以东的峡谷可与陆架古河道展布连接,由一系列支流汇合而成,并表现出弯曲状,接近槽底分布有陆架出露时形成的冲积堤和冲积扇。显然,南冲绳海槽的张裂活动可以追溯到最后一次冰期的低水位时期之前。

N65°走向的张性断裂主要分布于陆架陡坡和海槽的西南端,而 N85°走向的张性断裂主要分布于槽底和靠琉球一侧(图版 I : b、c)。横切这些断裂的地震剖面表明,N65°断裂在晚中新世时期(6—7Ma)曾是左旋走滑兼压性的深大断裂(Sibuet *et al*, 1998),可与台湾隆起期的冲断层相连,造成压性构造上的上新世沉积缺失。N65°断裂在上新世与更新世的交替期(2Ma)开始转化为正断层,进一步出现平行的正断层或铲状断层,

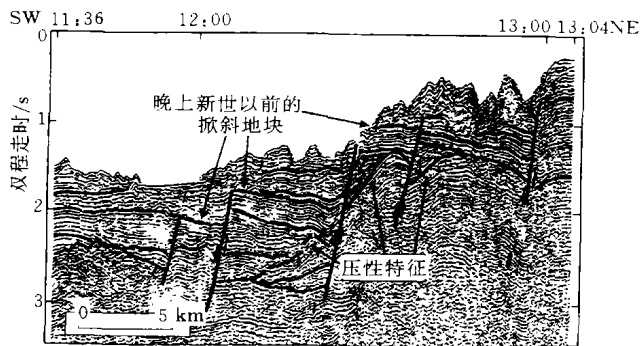


图 2 由地震剖面反映的张性断陷特征

Fig.2 Extensional depression characterized by seismic profile

导致地块的垂直掀斜错动,断距可达 1km(图 2),并部分伴有火山活动。N85°走向的张性断裂始于晚更新世,垂直断距在 100m 左右。在槽底北缘的近 E—W 向的正断层错断了一些古河道,诱发了晚近期的滑坡,表明张裂活动一直持续着。由南冲绳海槽全覆盖多波束

1) 图版 I : a 中的图例单位同图版 I : b

地形可显示张性断裂的左旋雁行排列,及在槽底发育的近 E—W 向的次级凹地。靠琉球一侧的近 E—W 向的正断层相互间距不足 10km,至台湾宜兰平原外海更加密集,海槽也逐步收缩在十几 km 宽的范围内。这些断裂和凹地越靠近台湾越往南偏,而可与宜兰平原相接。

图 3 总结了由重磁场分布、多波束地形地貌及地震剖面联合给出的主构造走向张性断裂及与之垂直的平移断层。由海槽两侧至中央主构造走向张性断裂的规模和切割陷落程度减低,具有明显的裂谷型断陷盆地特征。同时,由陆架侧至琉球一侧、台湾一端张性断裂的方向由 NE 向逐步过渡为近 E—W 向,活动时代也趋新,与琉球岛弧和台湾的岩石圈构造活动关系密切。从东北往西南,调控张性断裂方向和活动时代变化的平移断层有:中南部的分界断裂、宫古北断裂、宫古南断裂、石垣断裂、仲神断裂和与那国断裂。

1.2 岩浆、火山活动与断裂的关系

上述平移断层明显地改变了磁异常分布的特征,磁异常上延 20km 仍有反映,磁性基底起伏受影响(图 1)。在槽底两侧及中央沿这些断层火山相对集中,岩浆活动强烈,有多处热液活动和矿化,与主构造走向张性断裂活动向琉球一侧迁移相一致,大部分的火山靠琉球一侧分布(图版 I :b、c)。事实上,这些热活动更多地体现了平移断层与 N65°—85°正断层的交汇,并伴随有频繁的地震和火山活动。而且岩浆活动以中酸性或中基性为主,槽底第四纪的沉积厚度超过 500m,往轴部方向可加厚到 1600m(金翔龙,1992),这些特征与洋中脊地幔物质上涌引起海底增生扩张的热构造活动是不同的。在与那国断裂附近采集到的属亚碱性的橄榄拉斑玄武岩,分异程度低,受地壳混合作用弱,结晶温度高达 1200℃(李巍然等,1997)。事实上,该处的玄武岩样品落在图版 I :b 和 c 所标示的大片岩浆出露范围内,地震活动相对集中,恰恰是菲律宾海的加瓜脊俯冲的地段,Benioff 带的深度在 100km 左右(图版 I :a)。由于 Benioff 带的阻断,在它下面的地幔物质上升、发散诱发岩浆活动的可能性很小,而它上面的软流圈物质受到压力和摩擦的作用,熔融底劈的可能性很大,而且岩浆活动可能带有俯冲的菲律宾海板块的脊岭构造特性。因此,海槽的岩浆活动与洋中脊地幔对流发散诱发的岩浆活动是不同的,而不能推断出冲绳海槽是由地幔对流直接驱动的弧后扩张产物。

2 构造动力作用分析

2.1 全球性构造动力背景

地震剖面上显示的张性断裂的发育背景为左旋走滑兼压性的深大断裂,反映了全球性构造动力所起的作用,由大尺度的下地幔流应力场所驱动的上地幔和岩石圈的运动态势也说明了这一点(金翔龙等,2001)。欧亚大陆在总体向 SE 方向蠕散的前提下,陆缘各

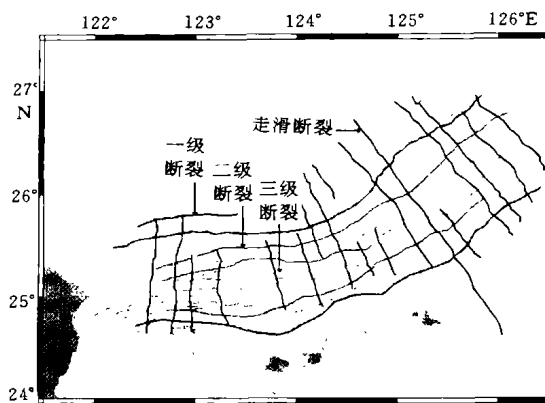


图 3 由重、磁和地震反映的南冲绳海槽断裂分布
Fig.3 Fault distribution traced by gravity anomaly, magnetic anomaly and seismic profile

个区段表现出不同的特点。日本岛弧、菲律宾岛弧都基本上与来自太平洋的扩张应力场方向垂直,而直接受控于全球性构造动力格局。琉球沟弧系、台湾—吕宋段构造走向恰恰展示了欧亚蠕散应力场在太平洋扩张应力场的冲击下,分别向北和向南滑移的形迹。台湾岛以北近似正东向蠕散,应力有偏小的迹象,而来自太平洋的应力越过日本岛弧由 NWW 向转为 NW 向,两股应力向日本海盆北侧汇聚,晚中新世时期的左旋走滑兼压性的深大断裂可能与此有关。太平洋扩张应力场并不直接造成琉球沟弧及冲绳海槽的形成,而是提供了有利于它们发展的左旋走滑兼压性的深大断裂的构造背景。

2.2 中尺度上地幔对流与岩石圈断裂构造演变

由 12—36 阶重力扰动位球谐系数推算的中尺度上地幔流应力场(图版 II :a)主要反映了上地幔的动力状况。菲律宾海是上地幔物质的涌升扩散区,上地幔流应力方向与琉球沟弧系垂直,数量级达 4MPa,而全球性大尺度地幔流应力平行岛弧走向最大也只有 1MPa 左右,说明菲律宾海板块俯冲的直接动力来源是上地幔对流,而来自于两大板块的大尺度地幔流汇聚造成的滑移有利于菲律宾海板块的俯冲。菲律宾海上地幔流与内陆上地幔流的汇聚带与闽浙隆起带对应,说明菲律宾海板块的俯冲挤压对东海大陆架的构造格局起着重要作用。正是中尺度上地幔对流诱发的菲律宾海板块俯冲,引起琉球岛弧和台湾的岩石圈构造活动,大地水准面、重力异常和莫霍面起伏等反映琉球沟弧段的俯冲强度弱于其他沟弧段,其提供的能量不足以使东海像日本海和南海那样发育起大的成熟的海盆,而冲绳海槽紧贴琉球沟弧系发育却与这种稍弱的沟弧构造活动是相称的。因为这种沟弧构造活动从横向上改变了位于冲绳海槽的原先左旋走滑兼压性的深大断裂的状态,而表现出目前张性断裂的一些特点。

首先,俯冲引起琉球岛弧岩石圈挤压褶皱而向海沟旋张掀斜(林长松等,1999),使弧后地块沿原先的压性断裂陷落(图 2),陆架侧早期的铲状断层和海槽内的张性断裂由此演变而来。随着岛弧挤压褶皱的继续,断裂和火山活动有向琉球一侧迁移的趋势,即岛弧旋张可能是弧后盆地早期拉张的一个力源。

其次,菲律宾海板块对台湾的碰撞,以及吕宋岛的北向推挤,会使琉球弧后原先的压应力分布失去平衡,出现冲绳海槽(特别是南部)绕台湾的剪张性作为对台湾压性汇聚的调节。这种类似剪刀伸张的张性断裂,决定了南冲绳海槽内张性断裂的左旋雁行排列和朝台湾方向的收缩。当远处张到一定的极限程度停止后,近处继续剪张,两者之间便由平移断层出现。这种剪张性使得近处比远处张性弱但作用时间长,而能使海槽往西南方向变得窄而深,即围绕台湾岛的剪张性可以更好地解释发生在冲绳海槽内张性断裂的左旋雁行排列和与之垂直的平移断层的左旋滑移。

2.3 小尺度软流圈动力作用和岩浆活动

由波长在 50—1000km 范围内的高频均衡大地水准面给出的小尺度地幔流应力场(图版 II :b)基本反映了软流圈层内部的地幔流应力状态,与均衡重力异常(图版 II :c)反映的深部物质敛散状况可以吻合。琉球海沟是一条负均衡异常带,幅值低达 -60—-100mGal,对应于小尺度地幔流应力的发散带。海沟外侧均衡异常可升到 10—40mGal,又是应力汇聚带,但强度低于弧后的应力汇聚。海沟外侧的正均衡异常和应力汇聚,代表了俯冲板块所受到的部分阻挡作用。由于琉球海沟的俯冲主要由菲律宾海的上地幔对流

体系驱动而偏弱,其中北段受海岭、高地的阻挡,俯冲更趋弱;而南段外侧没有明显的应力汇聚,海沟的应力扩散又明显大于北段。海沟北段的 Benioff 带所反映的地震条带宽度达不到海槽中央,俯冲角度陡达 73° ,俯冲深度超不过 200km,俯冲速度不到 5cm/a ;海沟南段的 Benioff 带所反映的地震条带宽度越过海槽中央,俯冲角度稍缓在 $50^\circ\text{—}60^\circ$ 之间,俯冲深度可达到 300km,俯冲速度可超过 6cm/a (黄培华等,1994)。因此,南段仍能以较大速度和强度冲入上地幔,导致剧烈的力学、热力学效应,其岩浆活动规模、强度比北段强,地壳演变进入洋壳化阶段。冲绳海槽是一条正均衡异常带,幅值高达 $40\text{—}80\text{mGal}$ (图版 II :c),也是小尺度地幔流应力的汇聚带(图版 II :b),说明软流圈物质受海沟侧和东海陆架应力发散的推挤,不能完全往下回流,部分上涌侵入岩石圈,再熔融对地壳产生底劈作用。由震源机制解给出的 Benioff 带应力状态为,北段呈张性,而在南段 100km 深度以上呈张性、以下呈压性(黄培华等,1994),这与以上小尺度地幔流在海沟侧发散、在海槽侧汇聚的分析较接近。上述分析表明,弧后盆地的发育不是与地幔对流无关,而是牵涉到弧后地幔对流状态演变的问题。

2.4 弧后地幔对流状态演变

马利亚纳海槽是另一条小尺度地幔流汇聚带,也对应于均衡异常正值带,其强度、规模超过冲绳海槽。从地形上来看,马利亚纳海槽的负地形及中央已初步发育有类似扩张脊的海岭构造形迹,其地壳、岩石圈张性特征比冲绳海槽还明显。一个可能的解释是在弧后盆地的起始阶段,地壳、岩石圈受岛弧挤压隆升的影响,弧后区发生掀斜向下挠曲,而在海槽下面俯冲板块插入上地幔,引起软流圈挤压隆起。在高温高压状态下软流圈岩浆熔融分异上升,大部分垫托于岩石圈下,通过热传导活化了塑性流变层,使下地壳和岩石圈地幔的有效强度降低,挤压软流圈诱发的这种岩浆活动与岩石圈上部的张性断裂发生耦合作用,容易在海槽中央引发岩浆底劈和喷发。

随着岩石圈和地壳的减薄,受挤压上涌的软流圈物质才会慢慢演变为发散地幔流,并与周围的小尺度发散地幔流同化,最后发展出中尺度发散地幔流,推动弧后盆地的发育。马利亚纳海槽可能处在这种地幔流状态的转变阶段。由于冲绳海槽在地形、均衡异常、地幔流汇聚特征上还没有达到马利亚纳海槽的水平,而未到弧后对流扩张的阶段。只要菲律宾海板块俯冲强度不减弱,地幔流汇聚还将继续下去,现有的岩浆活动强度会维持下去。马利亚纳海槽已处于正常热流水平($70\text{—}85\text{mW/m}^2$)(Anderson *et al.*, 1978),而冲绳海槽与全球任何一个边缘海和海槽相比,热流值显得特别高(平均值达 140mW/m^2 ,测得的最大值达 375mW/m^2)(金翔龙,1992),热液活动强烈,也指示它是一个软流圈仍在汇聚的弧后盆地。

3 结论

3.1 南冲绳海槽的张性断陷活动是在晚中新世以前的压性断裂构造的基础上发展起来的,可分成三幕:上新世、更新世和全新世,活动时代向岛弧侧趋新,张应力方向由 NW 过渡到 NNW。

3.2 左旋走滑兼压性的深大断裂背景是由 NW 向的太平洋扩张应力场与近似正东向的欧亚蠕散应力场联合产生的,有利于菲律宾海上地幔对流产生板块俯冲和冲绳海槽紧贴琉球沟弧系发育。

3.3 主构造走向张性断裂的演变受到琉球岛弧和台湾岩石圈压性构造的影响。俯冲引起岛弧岩石圈挤压褶皱而向海沟旋张掀斜,产生弧后岩石圈的张性构造,台湾—吕宋的北向挤压,使海槽表现为剪张性,由平移断层调控使张性断裂左旋雁行排列,整个海槽张性构造由北往南推进。

3.4 岩浆、火山活动以中酸性或中基性为主,随断陷活动也向岛弧侧迁移,主要集中在正断层与平移断层的交汇处,并与岛弧外的火山脊俯冲位置对应,海槽两侧向中央沉积厚度趋厚,槽中央火山和热液活动不及岛弧侧密布,均表明海槽张裂与洋中脊的海底增生扩张方式有区别。

3.5 中尺度地幔对流驱动板块俯冲引起弧后软流圈挤压隆起,与岩石圈本身的张性断裂演变发生耦合作用,导致海槽的断陷张裂和岩浆活动。这种耦合作用在深部表现为,岩石圈地幔的强度降低,产生塑性流变。在岩石圈、地壳变薄的同时,弧后小尺度地幔流会从汇聚演变成发散。冲绳海槽仍是一个软流圈在汇聚的弧后盆地。

冲绳海槽既有弧后盆地特性,又有陆缘地堑式裂谷特性;既受控于大、中尺度的构造动力背景;又有在横向上与周边岩石圈构造活动性相关的继承性活动特征,在纵向上也体现了地壳、岩石圈、软流圈及地幔之间的耦合作用。只有从时空的整体性上辩证把握构造动力的多样性,才能深化认识冲绳海槽的构造演化,提高边缘海起源演化研究的水平。

致谢 在写作过程中得到了金翔龙院士的具体指导;卫星测高数据的使用,得到了法国空间局 AVISO 工作中心的帮助;大部分插图由 GMT 绘制(Wessel *et al*, 1991);审稿者提供了具体有益的修改意见,谨致谢忱。

参 考 文 献

- 于增慧,翟世奎,赵广涛,2001. 冲绳海槽浮岩中岩浆包裹体岩石成分特征. 海洋与湖沼, 32(5):474—482
- 李巍然,杨作升,张保民等,1997. 冲绳海槽南部橄榄拉斑玄武岩研究. 海洋与湖沼, 28(6):665—672
- 李乃胜,姜丽丽,李常珍,1998. 冲绳海槽地壳结构的研究. 海洋与湖沼, 29(4):441—450
- 林长松,王英,1999. 论冲绳海槽的张裂运动. 海洋学报, 21(5):95—100
- 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
- 金翔龙,喻普之,1987. 冲绳海槽的特征与演化. 中国科学(B辑), 2:196—203
- 金翔龙主编,1992. 东海海洋地质. 北京:海洋出版社, 271—379
- 金翔龙,高金耀,2001. 西太平洋卫星测高重力场与地球动力学特征. 海洋地质与第四纪地质, 21(1):1—6
- 姜效典,王硕儒,1996. 用样条函数计算结果研究冲绳海槽热源机制. 海洋与湖沼, 27(4):394—399
- 黄福林,1989. 冲绳海槽的形成与演化探讨. 海洋地质与第四纪地质, 9(1):43—51
- 黄培华,苏维加,陈金波,1994. 冲绳海槽和琉球岛弧的地震活动与应力场. 地震学报, 16(4):408—415
- 喻普之,1992. 冲绳海槽的深部构造机制和它的演化. 见:李继亮主编. 中国东南海陆岩石圈结构与演化研究. 北京:中国科学技术出版社, 148—153
- 翟世奎,于晓群,1995. 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. 海洋与湖沼, 26(2):115—123
- Anderson R N, Langseth M C, Hayes D E *et al*, 1978. Heat flow, thermal conductivity, thermal gradient. In: Hayes D E ed. A Geophysical Atlas of the East and Southeast Asian Seas. The Geological Society of America, 8
- Chen C H, Lee L, Shieh Y N *et al*, 1995. Magmatism at the onset of back-arc basin spreading in the Okinawa Trough. J Volca Geother Res, 69:313—322

- Herman B M, Anderson R N, Truchan M *et al.*, 1978. Extensional tectonics in the Okinawa Trough. *AAPG Memoir*, 29:199—208
- Jin Xianglong, 1984. The tectonics beneath the Okinawa Trough. *J Chin Oceanol Limnol*, 2(1):73—80
- Karig D E, 1971. Origin and development basin in the western Pacific. *J Geophys Res*, 76(2):2542—2651
- Lee C S, Jr, Shor G G, Bibe L *et al.*, 1981. Okinawa Trough: origin of back-arc basin. *Marine Geology*, 35(1—3):219—241
- Sibuet J C, Deffontaine B, Hsu S K *et al.*, 1998. Okinawa trough backarc basin: early tectonic and magmatic evolution. *J Geophys Res*, 103(B12):30245—30267
- Wageman J M, Hide T W C, Emery K O *et al.*, 1970. Structural framework of East China Sea and Yellow Sea. *Bull. AAPG*, 54(9): 1611—1643
- Wessel P, Smith W M F, 1991. Free software helps map and display data. *EOS Trans. AGU*, 72:441—446

PROBING INTO LITHOSPHERIC TECTONIC MECHANICS OF SOUTHERN OKINAWA TROUGH

GAO Jin-Yao[†], LI Jia-Biao[†], LIN Chang-Song

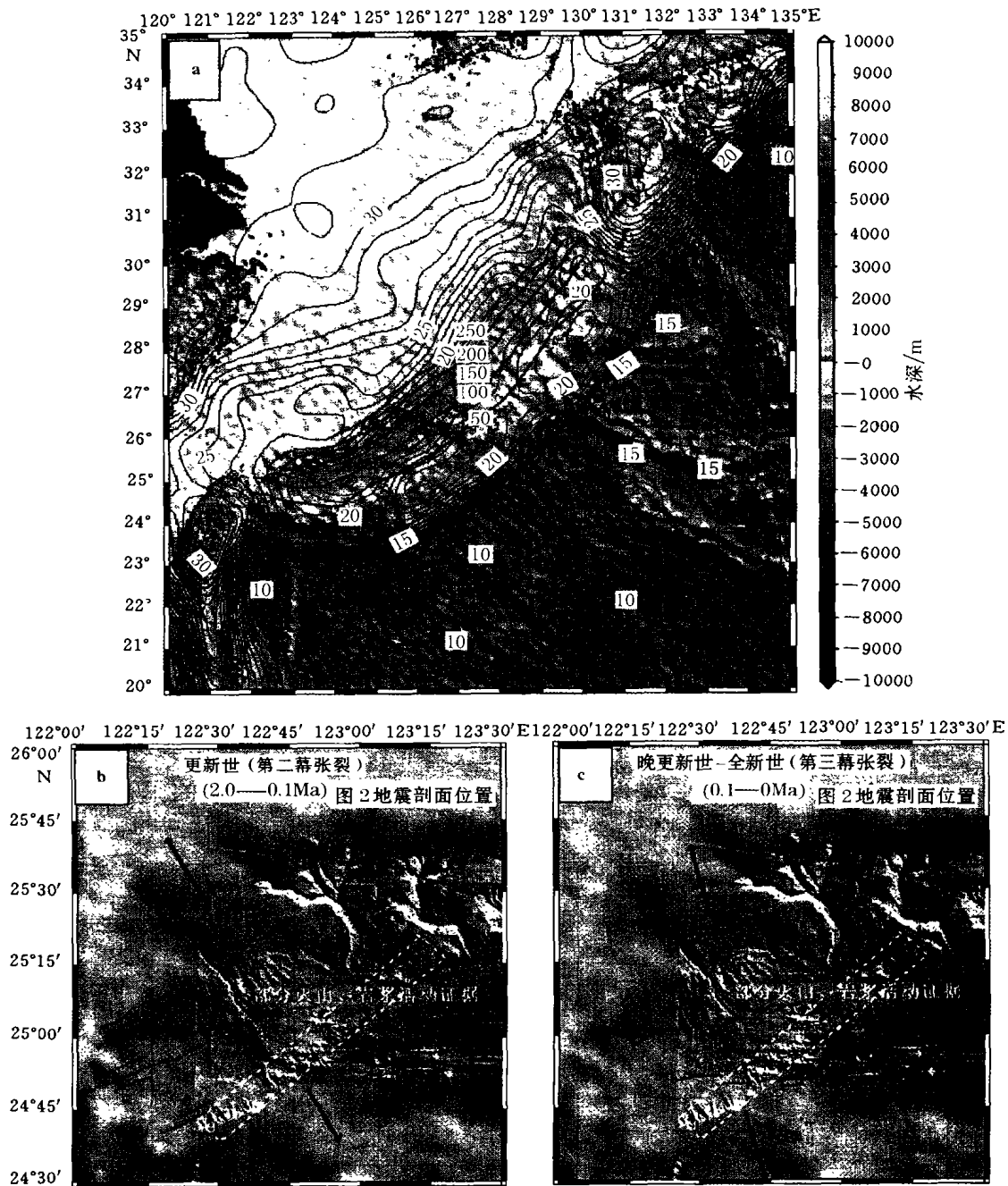
[†](*Second Institute of Oceanography & Key Lab of Submarine Geosciences, State Oceanic*

Administration, Hangzhou, 310012; Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071)

(Second Institute of Oceanography & Key Lab of Submarine Geosciences, State Oceanic Administration, Hangzhou, 310012)

Abstract On the basis of recently acquired gravity, magnetics, seismic and multibeam data, complemented with multi-scale stress fields of mantle flow, the diversity and relation of tectonic characteristics of the southern Okinawa Trough lithosphere are displayed. Three phases of rifting depression after the Miocene are developed upon the original compressive belts migrating toward Ryukyu Islands. Volcanic and magmatic activities are closely distributed at crosses of the normal and strike-slip faults. Deep tectonic origin can be attributed to subduction of the Philippine Sea plate driven by its upper mantle convection flow, which makes lithosphere rotate, tilt toward the trench along the island-arc and extend, causing sink behind the arc, and also makes asthenosphere converge, causing uplift behind the arc. Interaction between lithosphere and asthenosphere causes magmatic intrusion with the trough rifting depression. The Okinawa Trough is a back-arc basin still driven by the converging asthenosphere. The large scale background of sinistral compresso-shear, intense subduction at the south and northward advance of the Taiwan-Luzon block are all coherent with the shear-opening feature around the northern end of Taiwan, which leads to the sinistral en echelon normal faults adjusted by strike-slip faults. The shear-opening advancing from the north towards the south makes the trough rifting trend change from NW to NNW.

Key words Southern Okinawa Trough, Rifting depression, Lithosphere, Mantle flow

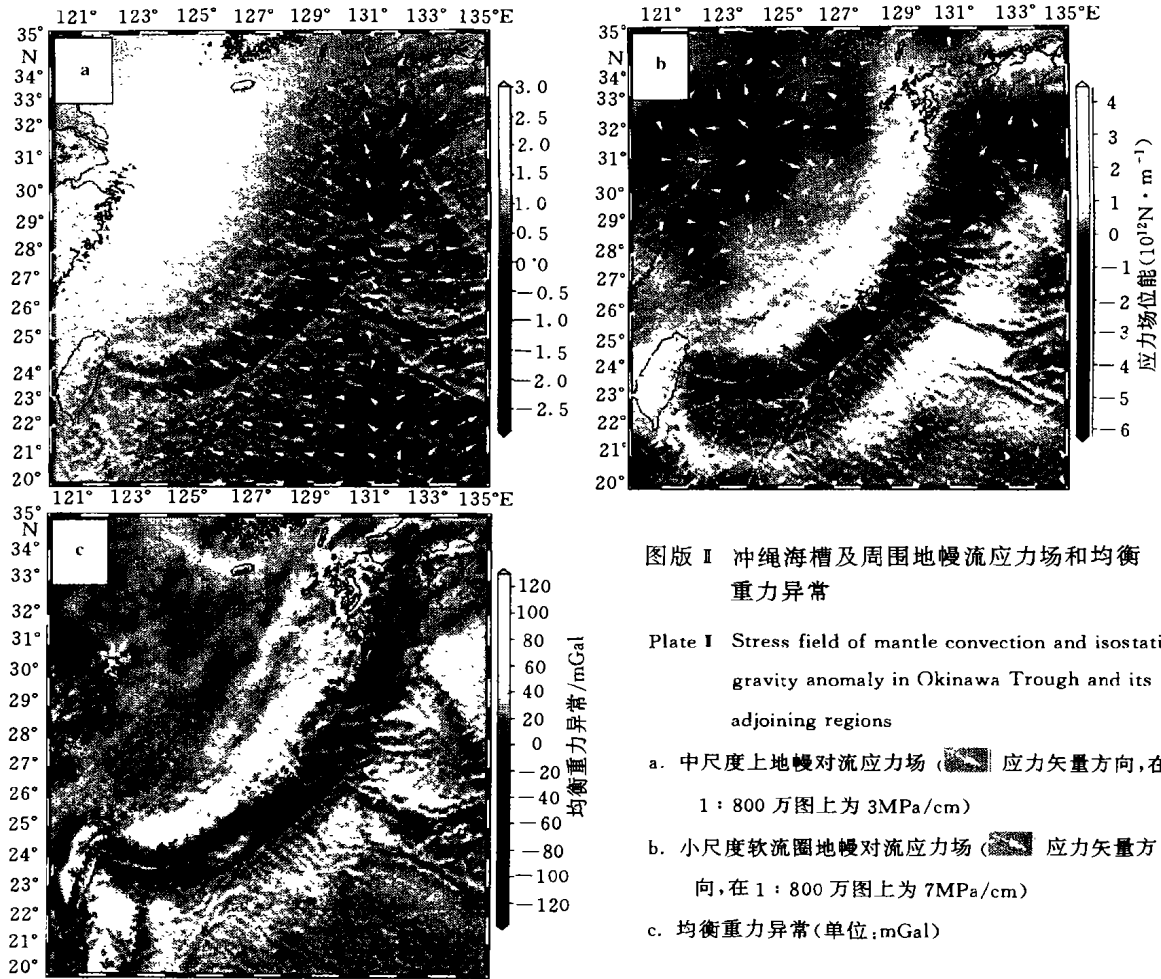


图版 I 南冲绳海槽及周围海底地形、构造分布

Plate I Topographic and tectonic patterns of Okinawa Trough and its adjoining regions

a. 莫霍面埋深(细线,单位:km)和贝尼奥夫带深度(粗线,单位:km)

b,c. 多波束地形与断裂、火山分布 (■ 断裂构造 ▲ 张裂方向)



图版 II 冲绳海槽及周围地幔流应力场和均衡重力异常

Plate I Stress field of mantle convection and isostatic gravity anomaly in Okinawa Trough and its adjoining regions

- a. 中尺度上地幔对流应力场 (应力矢量方向, 在 1:800 万图上为 3MPa/cm)
- b. 小尺度软流圈地幔对流应力场 (应力矢量方向, 在 1:800 万图上为 7MPa/cm)
- c. 均衡重力异常(单位:mGal)