

Hao T Y, Liu J H, Guo F, et al. Research on crustal structure and lithosphere property in the Okinawa area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(3): 462 ~ 468

冲绳海槽地区地壳结构与岩石层性质研究

郝天珧¹ 刘建华¹ 郭 锋² 黄忠贤³
胥 颐¹ 戴明刚¹ 李安春⁴ 付永涛⁴

1 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

3 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

4 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071

摘 要 使用冲绳海槽地区地质、地球物理、地球化学数据与资料,对横跨大陆边缘—大洋板块的中国东部—冲绳海槽—琉球岛弧地区进行综合研究。根据地震体波、面波成像结果,空间与布格重力异常及磁力异常的综合解释等结果,利用调和系数法对该研究区的地壳厚度进行了计算,并对地壳属性进行分析。同时,选择中国东部东北地区的宽甸、华北地区的汉诺坝、华南的闽溪和台湾海峡的澎湖列岛与冲绳海槽和日本岛弧的新生代玄武岩开展元素—同位素对比研究。结果认为冲绳海槽岩石层明显减薄,上地幔低速层已达到莫霍面,在地幔中已形成交代软流层。元素—同位素研究表明:它不同于中国东部,与琉球岛弧地区的特点也不相同。综合分析认为:冲绳海槽地壳属于过渡型地壳,与大洋地壳的许多特点颇为相似。

关键词 冲绳海槽 地壳结构 层析成像 同位素对比

文章编号 0001-5733(2004)03-0462-07 **中图分类号** P313 **收稿日期** 2003-04-11,2003-12-15收修定稿

RESEARCH ON CRUSTAL STRUCTURE AND LITHOSPHERE PROPERTY IN THE OKINAWA TROUGH AREA

HAO Tian-Yao¹ LIU Jian-Hua¹ GUO Feng² HUANG Zhong-Xian³
XU Yi¹ DAI Ming-Gang¹ LI An-Chun⁴ FU Yong-Tao⁴

1 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 Guangzhou Institute of Geochemistry, China Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

3 Institute of Crustal Dynamics, Chinese Seismological Bureau, Beijing 100085, China

4 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

Abstract A mass of geological, geophysical and geochemical data and information from the Okinawa Trough area are collected for comprehensive research in the study area from East China to Okinawa Trough and then to Ryukyu Island Arc region. According to the seismic tomography result (P and S wave) and the processing result of free-air and Bouguer gravity anomaly and magnetic anomaly data in the study area, the comprehensive interpretation is carried out. The Moho depth distribution of the study area is obtained by the inversion calculation based on gravity data using the Harmonious Series method. The crust properties are analyzed. Meantime, some Cenozoic basalt data from Kuandian (NE China), Hannuoba (North China), Minxi (South China),

基金项目 国家基础研究 973 项目 (G20000467-01), 国家自然科学基金项目 (40074021).

作者简介 郝天珧,女,生于 1957 年,1982 年毕业于长春地质学院,研究员,主要从事海、陆油气盆地综合地球物理研究.

E-mail: tyhao@mail.igcas.ac.cn

Penghu Islands (Taiwan Strait), Okinawa Trough and Japan Island Arc regions are chosen to make the comparison research on element-isotopes. The result indicates that the lithosphere thickness in the Okinawa Trough area has obviously decreased, where a Low-velocity layer of upper-mantle has reached the Moho interface and the metasomatized asthenosphere has formed. The research result on element-isotopes shows that the characteristic of the crust in the Okinawa Trough area is different from that in East China area and the Ryukyu Island Arc area. It is considered that the crust in the Okinawa Trough area belongs to the transition type, which is quite similar to the feature of the oceanic crust.

Key words Okinawa Trough, Crustal structure, Tomography, Isotope comparison.

1 引言

冲绳海槽位于中国东海与琉球岛弧之间,为欧亚板块与菲律宾海板块之间的过渡地区。关于冲绳海槽的地壳和岩石层性质,许多作者作了大量研究工作,并持有不同的观点。金翔龙等^[1]在 20 世纪 80 年代早期就认为冲绳海槽盆地已为成熟的弧后盆地,开始了大陆地壳向大洋地壳的转化。刘光鼎^[2]同样认为冲绳海槽盆地是由于菲律宾海板块向西俯冲而形成的弧后扩张盆地,而且南部至今仍在扩张之中。秦蕴珊等^[3]也明确指出冲绳海槽的地壳性质较大陆地壳有了明显的改变,持有以上观点的还有 Sibuet 等^[4]。有些学者指出冲绳海槽属于大陆裂谷阶段或大陆裂谷发展的高级阶段^[5~7]。Shinjo 和 Kato^[8]则认为,南部冲绳海槽玄武岩年龄局限在第四纪,而且与台湾造山作用联系紧密,因此南部冲绳海槽可能不是典型的弧后盆地,而是世界上仅有的具有以下特征的地方,刚刚开始的大陆裂解、刚刚开始火山前锋,是在大陆汇聚边缘的早期沟弧盆系统。无论是哪一种观点,都表明冲绳海槽的地壳、上地幔结构的研究对于揭示大陆边缘海的形成、演化有着重要的科学意义。

本文选择冲绳海槽及其以东的岛弧和海沟进行综合研究,以期理解在大洋板块的俯冲作用下,不同构造域的岩石层结构和地幔性质,为深入探讨中国东部边缘海的形成机制提供地球物理、地球化学信息与证据。依据现代岩石成因理论推断其熔融源区的矿物相组成以及岩浆起源深度,建立起不同构造背景下岩石层结构和玄武岩浆作用的动力学模式。

2 数据选择与数据处理

地震层析成像 P 波研究区范围为 10°N ~ 45°N

和 105°E ~ 145°E,选用研究区内 27909 个地震的 479707 个 P 波到时和研究区外 4995 个远震的 90530 个 P 波到时,共有 32904 个地震的 570237 条 P 波到时数据参加反演。这些数据主要来自中国固定地震台网(1980 ~ 1998 年),NEIC 报告(1994 ~ 1998 年)和 ISC 报告(1989 ~ 1997 年)。共使用了研究区内 1222 个地震台记录的地震数据,研究区震中和台站分布示于图 1(见图版)。面波研究中将研究区向南扩展到南纬 10°,并充分收集了穿越海洋路径的大量地震波形记录。除利用 CDSN、IRIS 世界数字台网和在西藏布设的流动数字台网的面波波形资料以外,还收集到斯里兰卡、新加坡、菲律宾、印尼及日本 OHP 台网(台站)记录到的面波资料。这些资料经过初步处理,并对其中的长周期记录开展了时频分析,提取了面波频散信息,用于速度结构和各向异性的反演研究中。重力和磁力数据来自《中国海区及邻域地质地球物理系列图集》^[2]数据库。数据网格间距为 20km × 20km。地球化学研究中,主要选择中国东部新第三纪到第四纪的碱性玄武岩、冲绳海槽第四纪玄武岩和琉球岛弧的玄武质火山岩开展元素-同位素地球化学对比。数据来源于近年来对中国东部新生代玄武岩的数据,包括中国东部地区、苏鲁-郯庐断裂带、台湾海峡、冲绳海槽和琉球岛弧地区^[9~25]。

在地球物理数据处理中,P 波成像反演采用 LSQR 方法对研究区进行速度重建。在反演基础上分别给出地壳和上地幔的速度图像,速度分布用色标表示,红色代表低速区,蓝色代表高速区,相对扰动量的大小用“±%”表示。面波数据除了完成初步处理外,还对其中的长周期记录开展了时频分析,提取了面波频散信息,用于速度结构和各向异性的初步反演研究中。

重磁数据处理过程中除了进行常规处理外,还进行小波变换与多尺度分析,并利用调和系数法计算了莫霍面深度分布^[26]。同时参考了 863 高技术计划在东海的综合探测解释结果作为约束条件^[1]。

所采用的计算参数为:地壳底部和上地幔的界面密度差选用 $0.43\text{g}/\text{cm}^3$;选用标准地壳深度为 27km 。

3 冲绳海槽地区的重磁场与莫霍深度分布特征

图 2a(见图版)是研究区的布格重力异常 g 图。可以看到,大陆地区是明显的负异常区;东海陆架是低值异常区;海沟以东为 NE 向延伸的正高异常为特点,最高可以达到 300mGal 以上。冲绳海槽地区总体为 $80\sim 120\text{mGal}$ 的异常,NE 向延伸,显示过渡性地壳区的重力特征。特别是海槽的南部,出现 $120\sim 180\text{mGal}$ 的正异常,表明该区的地壳厚度已与洋壳特点十分近似。

图 2b(见图版)是研究区的莫霍深度 (D_M) 分布图。整个沟—弧—盆地区反映出 NE—NNE 向走向的莫霍面等深线,是菲律宾海板块与欧亚板块的相互作用在深部结构上的反映。研究区中大陆地区的地壳厚度最大,为 $30\sim 33\text{km}$,有厚度很大的沉积层和花岗质岩层。东海陆架地区的地壳厚度比大陆地区略有减薄,在 $27\sim 30\text{km}$ 之间。冲绳海槽的地壳厚度已开始明显减薄,在岛弧地区又开始增厚,海沟区及以东地区地壳厚度减薄到 12km 左右。说明莫霍面起伏形态受到板块作用的制约,也从一个侧面反映出冲绳海槽,特别是冲绳海槽的南部明显具有地壳减薄的特征。

研究区的磁场特征主要参考《中国海区及邻域地质地球物理图集》中的磁力异常平面图^[21]。冲绳海槽地区为平缓的磁场特征。中段为负背景场,但是南段以宽缓的正异常为主。磁场特征表明了冲绳海槽地区南北段的扩张程度不一致,这与布格重力异常所反映出的异常规律也很吻合。同时,大面积宽缓的低负异常也反映出很厚的新生代沉积的存在。

总之,无论是重力场特征还是磁场特征都表明冲绳海槽的地壳厚度较之大陆与大陆架地区有了明显的减薄。许多地球物理场特征已与大洋地区十分相似。地壳的减薄、重力场与大洋地区的相似性以及较厚的新生代沉积等,都表明它符合弧后扩张的特点。NE 向延伸的特点则反映了菲律宾海板块与欧亚板块相互作用的过程。

4 岩石层结构特征

图 3a(见图版)是 32^+ km 深度处的 P 波速度图像。它反映出莫霍界面正下方的速度分布特征及莫霍面的起伏形态。其特点是:从北部的日本列岛向西南经琉球群岛至台湾东,再向南至菲律宾群岛的西北太平洋岛弧带存在明显的低速条带,扰动量为 2% 左右。低速条带两侧的海域则主要为高速,高速扰动量的大小不等,表明岛弧区的地壳厚度大于两侧海域。同时也可以发现,冲绳海槽的地壳厚度明显小于岛弧及大陆地区,有向洋壳过渡的趋势。

$70\sim 110\text{km}$ 深度处的速度成像结果反映出岩石层的速度分布和相应的性质与形态(图 3b,见图版)。在上地幔的顶部,显示出冲绳海槽到琉球海沟一带为负扰动,扰动量在 $1\%\sim 2.6\%$ 之间。特别是在冲绳海槽的南部表现得更加明显。这表明,随着扩张的不断加大,上地幔物质逐渐上涌,低速层逐渐上升。这与面波的研究结果具有相同的结论^[27]。图 3c(见图版)是采用 Rayleigh 波成像法得到的沿 30°N 纬线的 S 波速度剖面。图中表明东海大陆架有较厚的沉积层,但地壳厚度是自西向东逐渐减薄,软流层也自西向东抬升,到达冲绳海槽时 ($127^\circ\text{E}\sim 130^\circ\text{E}$),低速层上升至莫霍面,上地幔盖层缺失。在 130°E 以东,太平洋板块俯冲痕迹依然清晰可见。这些证据都说明由于太平洋板块的俯冲,在冲绳海槽发生了强烈的弧后扩张作用,因此引发的地壳的拉张减薄以及地幔物质的上涌。 34s 周期瑞利波群速度分布表明冲绳海槽表现为显著的低速带²⁾。表明菲律宾海板块向欧亚大陆下的俯冲引起了地幔热物质的上升,冲绳海槽处于强烈的弧后扩张状态。

5 冲绳海槽、中国东部现代岩石层结构与地幔性质的地球化学对比

根据已有的资料,我们选择中国东部的东北地区的宽甸、华北地区的汉诺坝、东南沿海(华南)的闽溪和台湾海峡的澎湖列岛与冲绳海槽和日本岛弧的新生代玄武岩进行元素—同位素对比研究。为了更

1) 高德章,赵金海等. 东海地球物理综合探测剖面研究. 中国地球物理学会 2002 年刊. 2002, 241

2) 郝天珧,李安春等. 中国边缘海岩石层结构(G20000467-01)中期研究报告. 中国科学院地质与地球物理研究所. 2002

好地认识中国东部的岩石层结构,选择的玄武岩以富含地幔岩包体的碱性玄武岩为主,以及冲绳海槽、日本岛弧拉斑质-钙碱性玄武岩的代表性样品^[19-25]. 本次研究主要以微量元素和 Sr-Nd 同位素为重点.

5.1 REE 地球化学特征对比与熔融源区特征

在 REE 配分模式上(图 4),冲绳海槽拉斑玄武岩表现出 LREE(轻稀土元素)略微富集 ($La/Yb_{CN} = 2.4$)、HREE(重稀土元素)无分馏 ($Gd/Yb_{CN} = 1.2$) 的平坦型配分模式,类似于岛弧钙碱性火山岩但明显的低 REE 含量,并且明显不同于 HREE 富集型的正常大洋中脊拉斑玄武岩(N-MORB). 相对于中国东

部新第三纪-第四纪碱性玄武岩,其具有明显低的 REE 含量和无 LREE/HREE 分馏特征. 这些稀土元素的地球化学对比暗示冲绳海槽拉斑玄武岩的熔融源区以尖晶石相橄榄岩为主,而中国东部碱性玄武岩主要来自石榴子石橄榄岩^[15,16].

根据现代实验岩石学资料,尖晶石在正常的地温梯度下在地幔中的稳定范围小于 80km,而石榴子石的稳定范围则大于 80km,因此,通过 REE 配分模式可以大致地估计当时的熔融源区深度范围,即冲绳海槽拉斑玄武岩和琉球岛弧钙碱性玄武岩的熔融深度应小于 80km,而明显不同于中国东部新生代碱性玄武岩.

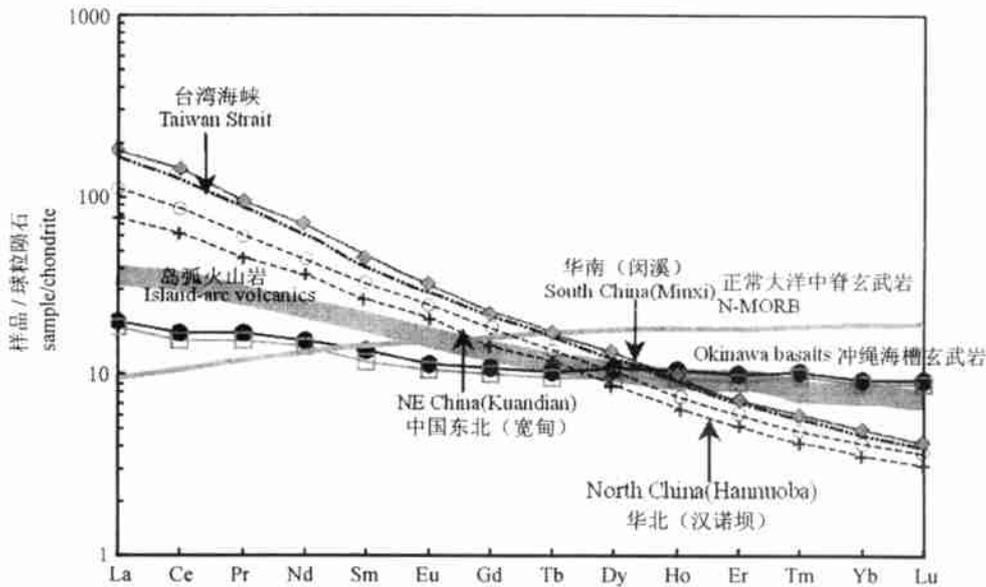


图 4 冲绳海槽玄武岩与中国东部新生代碱性玄武岩(N-Q)的 REE 配分模式对比

Fig. 4 Comparison of rare earth element distribution patterns of the basalts from Okinawa Trough with the Cenozoic alkali basalt (N-Q) from East China

5.2 微量元素组成特征对比

在原始地幔标准化不相容元素蛛网图上(图 5)可见,冲绳海槽拉斑玄武岩相对岛弧型钙碱性玄武岩具有相对低的微量元素含量,但基本无 Nb-Ta 异常的分布模式与岛弧火山岩所表现出明显 HFSE(高场强元素)以及亏损特征存在差异,因此其熔融源区受到来自俯冲板片的改造作用相对要弱得多,不大可能为弧下交代地幔楔部分熔融的产物. 与此同时这些玄武岩也表现出与 N-MORB(正常大洋中脊拉斑玄武岩)不同的微量元素分布模式,且相对 N-MORB 要明显地富集大离子不相容元素(如 Rb、Ba、K 和 LREE 如 La、Ce 等). 类似地,冲绳海槽玄武岩明显地较中国东部新生代碱性玄武岩和洋

岛玄武岩(OIB)低不相容元素含量,反映了其熔融源区相对较浅和熔融比例较大的特征.

冲绳海槽玄武岩与 N-MORB 同为拉斑质玄武岩系列,除 LILE(大离子亲石元素)、LREE 外,二者之间具有较为相似的微量元素地球化学特征,说明它们可能具有相似的源区矿物组成,而冲绳海槽玄武岩表现出相对较高的 LILE 和 LREE 含量可能主要受到熔融程度的控制或是熔融源区的性质有所差异. 其中一种可能是冲绳海槽玄武岩的熔融源区于岩浆生成之前经历了 LILE、LREE 的富集作用,这一推断与其当前所处大地构造背景——弧后盆地的构造属性相吻合.

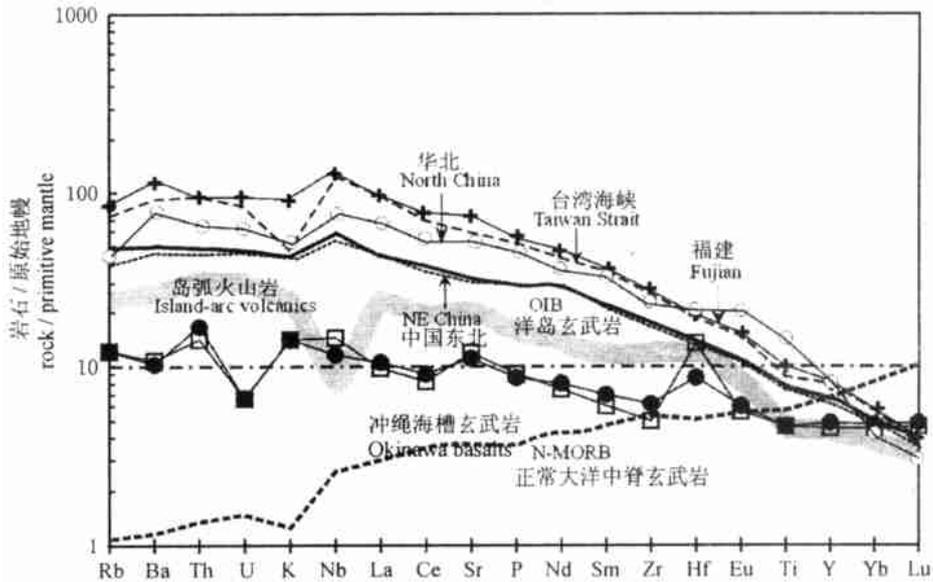


图 5 冲绳海槽玄武岩与中国东部新生代碱性玄武岩 (N-Q) 的微量元素蛛网图对比

Fig. 5 Comparison of the spider-pattern of trace element of the basalts from Okinawa Trough with the Cenozoic alkali basalt (N-Q) from East China

5.3 Sr-Nd 同位素组成对比

Sr-Nd 同位素组成在不同源区存在显著差别,对于岩石层地幔常划分为 DMM、MORB-OIB、EM1 和 EM2 四种类型,分别对应着大洋型极端亏损的地幔域、软流圈地幔-地幔热柱、大陆古老克拉通陆下富集型岩石层地幔和富集型岩石层地幔. 冲绳海槽拉斑玄武岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 变化为 0.7038 ~ 0.7048, Nd 变化在 2.1 ~ 5.0 之间,显示出 Sr-Nd 同位素组

成相对整体地球亏损的特征. 在 Sr-Nd 同位素变化图上(图 6),它们相对 MORB 和中国东部新生代含地幔包体的碱性玄武岩具有高 Sr 和低 Nd 同位素比值,而较琉球火山岛链的钙碱性火山岩则为低 Sr 和高 Nd 同位素比值,反映了其熔融源区地幔类型介于软流圈地幔和交代地幔楔之间,为受到俯冲流体改造的亏损地幔. 同样地, Hondam 等^[12]在 1991 年报道的冲绳海槽拉斑玄武岩的 O 同位素组成也明显地显示出较 N-MORB 和亏损地幔橄辉岩高,也反映了其源区经历了一定程度的俯冲流体改造作用. 这些观察事实与这些玄武岩在 REE 和微量元素地球化学特征上是完全一致的.

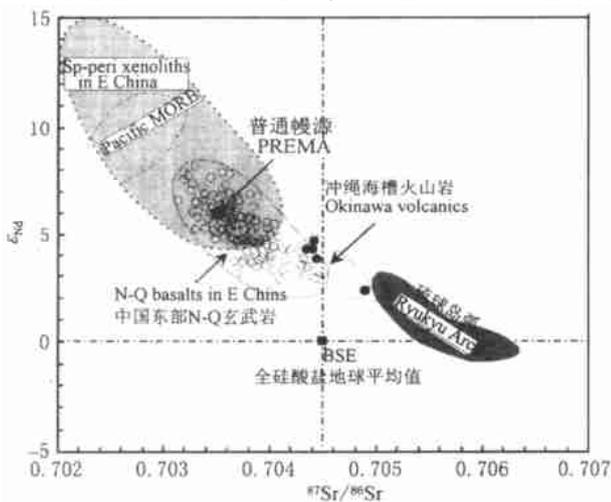


图 6 冲绳海槽拉斑玄武岩与中国东部新生代碱性玄武岩 (N-Q) 的 Sr-Nd 同位素组成对比

Fig. 6 Comparison of the variation in Sr-Nd isotope composition of the tholeiite from Okinawa Trough with the Cenozoic alkali basalt (N-Q) from East China

6 结论与认识

综合研究的结果表明,冲绳海槽已进入弧后扩张阶段(特别是在海槽的南部),地壳结构、岩石层性质等都向大洋方面转化,为过渡性质. 冲绳海槽、琉球岛弧与中国东部的火山岩形成构造背景及与菲律宾海板块俯冲作用间的关系结构的对比示意于图 7 (见图版).

6.1 地球物理场特征表明冲绳海槽与中国大陆东部及东海陆架地区的特征完全不同,与洋区的特点却比较近似.

6.2 岩石层深部结构的研究表明,冲绳海槽的岩石

层已明显减薄,上地幔盖层已经缺失,低速层直接到达莫霍面。

6.3 冲绳海槽的地壳厚度相对于中国大陆和东海陆架地区明显减薄,特别是海槽的南部。只有16km左右。为明显的过渡型地壳,应为大洋俯冲引起的弧后扩张所造成。

6.4 对比冲绳海槽新生代玄武岩、中国东部新生代碱性玄武岩和岛弧玄武岩的元素—同位素地球化学特征,其结果反映冲绳海槽玄武岩与N-MORB同为拉斑质玄武岩系列,除LILE、LREE外,二者之间具有较为相似的微量元素地球化学特征,说明它们可能具有相似的源区矿物组成。该区岩石层地幔既与现今中国东部的岩石层特点有所区别(晚中生代中国东部岩石层厚度约从150km减薄到60km左右,在新生代又略微加厚到约平均78km^[28]),也不同于岛弧地区的特点。其熔融源区应为受到俯冲大洋板片析出流体交代的软流圈地幔,与大洋弧后盆地玄武岩相似。

6.5 通过中国东部新生代碱性玄武岩、冲绳海槽拉斑玄武岩和琉球岛弧的钙碱性火山岩的元素—同位素对比研究,我们发现在新生代尤其是晚新生代期间,太平洋板块的俯冲作用/俯冲后撤作用^[29,30]起到了控制性的作用,这些同时代的玄武质火山岩代表了大洋板块俯冲动力学背景下,不同构造单元由于受到来自俯冲板片在深部析出流体或大洋沉积物的改造程度差异而引起的元素—同位素地球化学差别。实际上,中国东部一直到冲绳海槽地区的岩石层减薄诱发了壳幔的相互作用,对这个地区的地壳、地幔结构产生了重要的影响^[28]。关于俯冲后撤作用的证据,将另文讨论与论述。

感谢973项目“中国边缘海形成演化及其重大资源问题”专家组的刘光鼎、秦蕴珊、金翔龙院士、冯志强教授以及中石化上海海洋油气分公司研究院的高德章教授,他们为本文提供了大量的资料并给予很重要的建议。特别是刘光鼎院士的综合研究思路,使我们受益匪浅。同时感谢本项目李家彪首席科学家、高抒研究员及项目办公室主任江为为副研究员给予的真诚帮助。

参考文献

[1] 金翔龙,喻普之,林美华等. 冲绳海槽地壳结构性质的初步探讨. 海洋与湖沼, 1983, 14(2): 105~116
Jin XL, Yu P Z, Li M H, et al. Preliminary study on the characteristics of crustal structure in the Okinawa Trough. *Oceanol. Limnol* (in

Chinese), 1983, 14(2): 105~116
[2] 刘光鼎主编. 中国海区及邻域地质地球物理场系列图. 北京: 科学出版社, 1992
Liu GD ed. Geophysical Series Maps in China Sea and Adjacent Regions (in Chinese). Beijing: Science Press, 1992
[3] 秦蕴珊,赵一阳,陈丽蓉等主编. 东海地质. 北京:科学出版社, 1987. 277~278
Qin Y S, Zhao Y Y, Chen L R, et al. Geology of East China Sea (in Chinese). Beijing: Science Press, 1987. 277~278
[4] Sibuet J C, et al. Back arc extension in the Okinawa Trough. *J. Geophys. Res.*, 1987, 92: 14041~14063
[5] Kimura M, et al. Report on DELP 1984 cruises in the middle Okinawa Trough, 5, topography and geology of the central grabens and their vicinity. Univ. Tokyo: *Bull. Earthquake Res. Inst.* 1986, 61: 269~310
[6] Kimura M. et al. Submersible SHINKAI 2000 study on the central rift in the middle Okinawa Trough. In: 3rd Symposium on Deep-Sea Research Using the Submersible "SHINKAI 2000" System. Jap. Mar. Sci. Technol. Cent., Yokosuka, Japan. 1987
[7] 高德章,赵金海. 东海综合地球物理探测剖面研究. 见:中国地球物理学会年刊, 2002. 241
Gao D Z, Zhao J H. Studing profile of integrated geophysical survey in the East China Sea. In: Annual of the Chinese Geophysical Society (in Chinese), 2002. 241
[8] Shinjo R, Kato Y. Geochemical constraints on the origin of bimodal magmatism at the Okinawa Trough, an incipient back-arc basin. *Lithos*, 2000, 54: 117~137
[9] Basu A R., Wang, J W, Huang W K, et al. Tatsumoto, M., Major element, REE and Pb, Nd and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of eastern China: implications for origin from suboceanic-type mantle reservoirs. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1991, 105: 149~169
[10] Chung S L. Trace element and isotope characteristics of Cenozoic basalts around the Tanlu Fault with implications for the eastern plate boundary between North and South China. *J. Geol.*, 1999, 107: 301~312
[11] Chung S L, Sun S S, Tu K. et al. Late Cenozoic basaltic volcanism around the Taiwan Strait, SE China: product of lithosphere-asthenosphere interaction during continental extension. *Chem. Geol.*, 1994, 112: 1~20
[12] Honda H, Kusakabe N, Kagami, H et al. Major and trace element chemistry and D/H, ¹⁸O/¹⁶O, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr and ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd ratios of rocks from the spreading center of the Okinawa Trough, a marginal back-arc basin. *Geochem. J.*, 1991, 25: 121~136
[13] Zhang M, Suddaby P, Thompson R N et al. Thirdwall, M. F., Menzies, M. A., Potassic volcanic rocks in NE China: geochemical constraints on mantle source and magma genesis. *J. Petrol.*, 1995, 36: 1275~1303
[14] Zhou X H, Armstrong, Cenozoic volcanic rocks of eastern China—secular and geographic trends in chemistry and strontium isotopic composition. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1982, 59: 301~329
[15] 刘丛强,解广轰,增田彰正. 中国东部新生代玄武岩的地球

- 化学. 主量元素和微量元素组成. 地球化学, 1995, **24**(1): 1~19
- Liu C Q, Xie G H, Akimasa Masuda. Geochemistry of Cenozoic Basalts from Eastern China. Major Element and Trace Element Compositions: Petrogenesis and Characteristics of Mantle Source. *Geochimica* (in Chinese), 1995, **24**(1): 1~19
- [16] 刘丛强, 解广轰, 增田彰正. 中国东部新生代玄武岩的地球化学. Sr、Nd、Ce 同位素组成. 地球化学, 1995, **24**(3): 203~214
- Liu C Q, Xie G H, Akimasa Masuda. Geochemistry of Cenozoic Basalts from Eastern China. Sr, Nd and Ce Isotopic Compositions. *Geochimica* (in Chinese), 1995, **24**(3): 203~214
- [17] Zhi X C, Song Y, Frey F A, et al. Geochemistry of Hannuoba basalts, eastern China: constraints on the origin of continental alkalic and tholeiitic basalt. *Chem. Geol.*, 1990, **88**: 1~33
- [18] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes. In: Saunders A D, et al eds, *Magmatism in the Ocean Basins*, *Geol. Soc. Spe. Pub.* 1989, **42**: 313~345
- [19] Hunter A G, Blake S. Petrogenetic evolution of a transitional tholeiitic-calc-alkaline series: Towada volcano, Japan. *J. Petrol.*, 1995, **36**: 1579~1605
- [20] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell: Oxford Press. 1985, 312
- [21] Nakamura, Y., Tatsumoto, M., Sr-Nd-Pb isotope ratios for submarine rocks from the Japan Sea (in Japanese). *Marine Sciences*. 1988, **222**: 743~748
- [22] Notsu K, Ono K, Soya T. Strontium isotopic relations of bimodal volcanic rocks at Kikai volcano in the Ryukyu arc. *Japan. Geology*, 1987, **15**: 345~348
- [23] Fan W M, Zhang H F, Baker J, et al. Orr craton and off-craton Cenozoic spinel peridotites in eastern China: Similarity and difference. *J. Petrol.*, 2000, **41**: 933~950
- [24] Tatsumoto M, Basu A R, Huang W K, et al. Sr, Nd and Pb isotopes of ultramafic xenoliths in volcanic rocks of eastern China: enriched components EM₁ and EM₂ in subcontinental lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1992, **113**: 107~128
- [25] 陈丽蓉, 翟世奎, 申顺喜. 冲绳海槽浮岩的同位素特征及年代测定. 中国科学, 1993, **23**(3): 324~329
- Chen L R, Zhai S K, Shen S X. Isotopic characteristics and dating of holstones from Okinawa Trough. *Science in China (B)* (in Chinese), 1993, **23**(3): 324~329
- [26] 江为为. 调和系数法与重力资料反演地壳构造. 中国科技大学研究生院学报, 1989, **6**(1): 96~104
- Jiang W W. The Harmonious Series and Gravitational Data Used to Inverse Crustal Structure. *Journal of Graduate School, USTC* (in Chinese), 1989, **6**(1): 96~104
- [27] 郑月军, 黄忠贤, 刘福田等. 中国东部海域地壳—上地幔瑞利波速度结构研究. 地球物理学报, 2000, **43**(4): 480~487
- Zheng Y J, Huang Z X, Liu F T, et al. Rayleigh wave velocity and structure of the crust and upper mantle beneath the seas in eastern China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, **43**(4): 480~487
- [28] 杨文采. 大别苏鲁地区层状地幔反射体及其解释. 地球物理学报, 2003, **46**(2): 191~196
- Yang W C. Layered mantle reflectors in Dabie-Sulu areas and their interpretation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, **46**(2): 191~196
- [29] Hart S R. Heterogeneous mantle domains: signature, genesis and mixing chronologies. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1988, **90**: 273~296
- [30] Seghedi I, Balintoni, I, Szakács A. Interplay of tectonics and neogene post-collisional magmatism in the intracarpathian region. *Lithos.*, 1998, **45**: 483~497

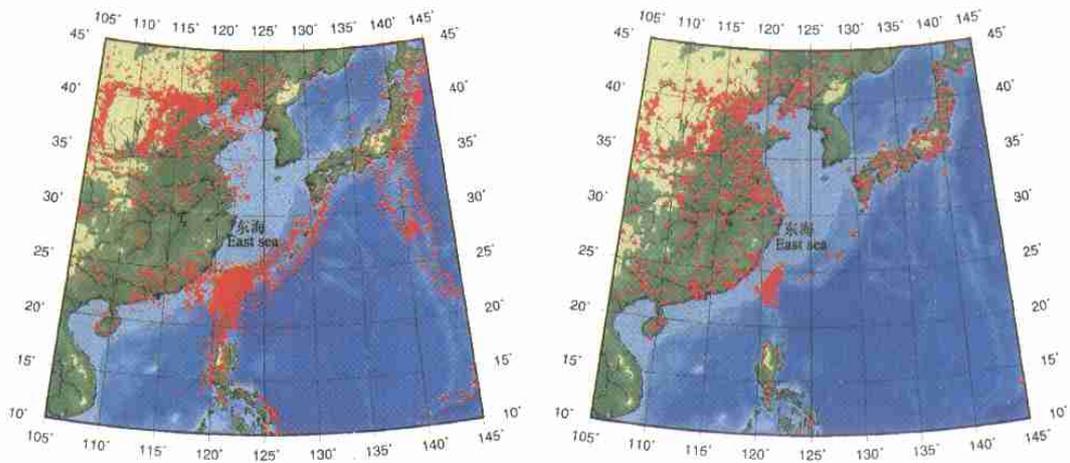


图1 研究区所用地震震中 (a) 和台站分布 (b)
 Fig.1 Distribution of epicenter (a) and earthquake recording stations (b)

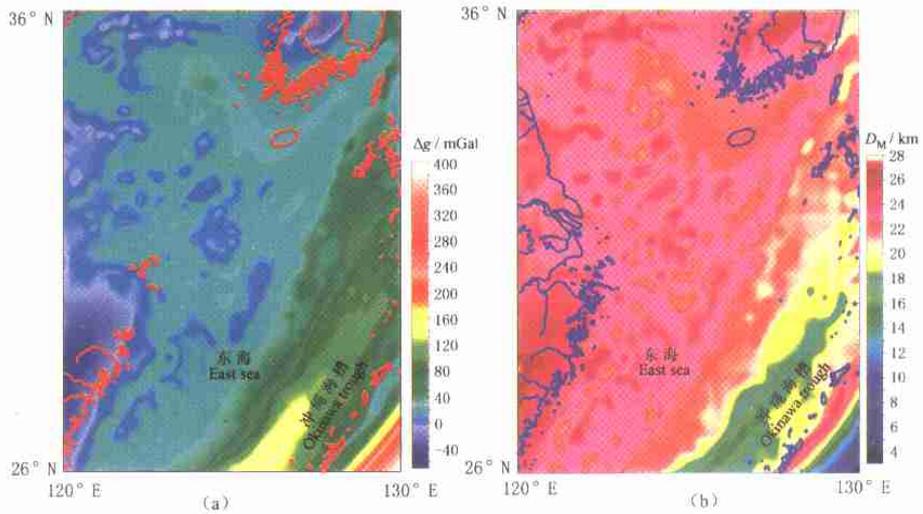


图2 研究区布格重力异常图 (a) 与莫霍深度 D_M 分布图 (b)
 Fig.2 Bouguer gravity anomaly map (a) and distribution of Moho depth (D_M) in research region

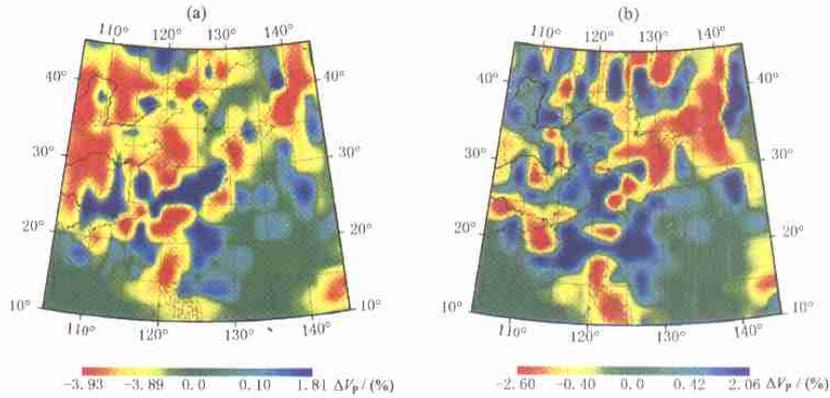


图3a 32^(±) km深度的速度成像
 Fig.3a Velocity perturbation in depth 32^(±) km

图3b 地震层析成像(71km)水平速度扰动图像
 Fig.3b Velocity perturbation in depth 71km

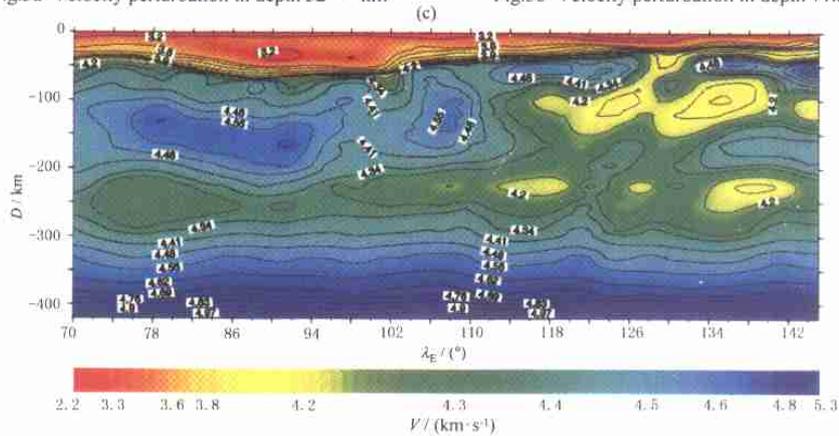


图3c 沿30° N纬线的S波速度剖面
 Fig.3c Velocity profile of S-wave along 30°N

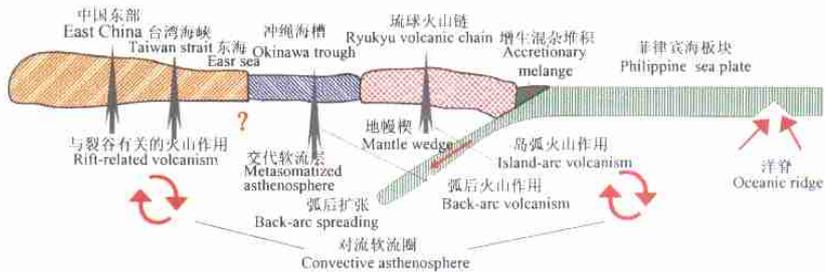


图7 冲绳海槽、琉球岛弧与中国东部的火山岩形成构造背景与菲律宾海板块俯冲作用间的关系
 Fig.7 The tectonic background of volcanism in Okinawa Trough, Ryukyu Island Arc and East China and the relationship with subduction of Philippine sea plate