

印度洋无震海岭及海底高原的初步研究*

王述功 高仰

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266003)

提要 根据 1986 年 10 月—1987 年 5 月第三次南极考察和首次环球科学考察所获的印度洋实测重力资料,对印度洋一些典型构造进行了分析研究。初步认为:无震海岭、海底高原和大洋中脊都有着复杂的壳-幔结构,其上都伴有一个布格异常的低值带,但引起这种布格异常低值带的原因却不尽相同。虽然上述 3 者都是大洋中的隆起地带,但前两者的地壳增厚,莫氏面下拱,软流圈变深,影响布格异常的主要因素是其下存在着一个较大的负山根。相反,在大洋中脊处,地壳变薄,莫氏面上拱,软流圈抬升,影响布格异常的主要因素是其下存在着一个高热、低速、低密度的异常地幔。构造运动剧烈的大洋中脊系,其强大的外力来源为地幔的热动力,它的地壳年龄虽新,但活动历史却很老,并已达到热动力平衡状态,而不是处于均衡状态。

关键词 无震海岭 海底高原 大洋中脊 重力异常 深部构造

1986 年 10 月—1987 年 5 月中国进行了第三次南极考察和首次环球科学考察,其中重力调查取得了连续的三大洋剖面资料,它穿切了三大洋中脊,不同类型的大陆边缘,著名的海岭、海底高原、海山链和大小不等的大洋海盆,为我国地质、地球物理学的研究和地球形状学的研究提供了丰富的资料。本文旨在对印度洋无震海岭、海底高原和大洋中脊的重力异常、地壳结构、深部构造、动力机制、均衡状态进行探讨。

1 研究区概况

印度洋是世界大洋中结构最复杂的大洋之一。本次环球科学考察的印度洋路线是从南非的好望角开始,途经莫桑比克海峡、塞舌尔滩、索马里海盆、印度洋中脊(卡尔斯伯格海脊段)、阿拉伯海盆、查戈斯-拉克代夫海岭、中印度洋海盆、东经 90° 海岭、Wharton 海盆,至巽它-爪哇海沟岛弧系结束(图 1),使我国首次在印度洋获得了完整、连续、记录面貌良好的重力剖面资料,具有非常大的研究价值。

印度洋的一个重要特征是在大洋里广泛存在着浅滩、海台、海岭、海底高原和隆起。这些构造大都在南北方向上延伸,把印度洋分割成一个个大小不等的深水盆地。“无震海岭”是 60 年代初期地质、地球物理学家在大洋上初次划分出的一种特殊的地貌构造单元。它们在构造上既不同于海洋过渡带的岛弧,更不同于构造活动激烈的大洋中脊,而是大洋地

* 国家海洋局第一海洋研究所南极考察课题, 102101 号。

收稿日期: 1992 年 3 月 27 日,接受日期: 1993 年 5 月 30 日。

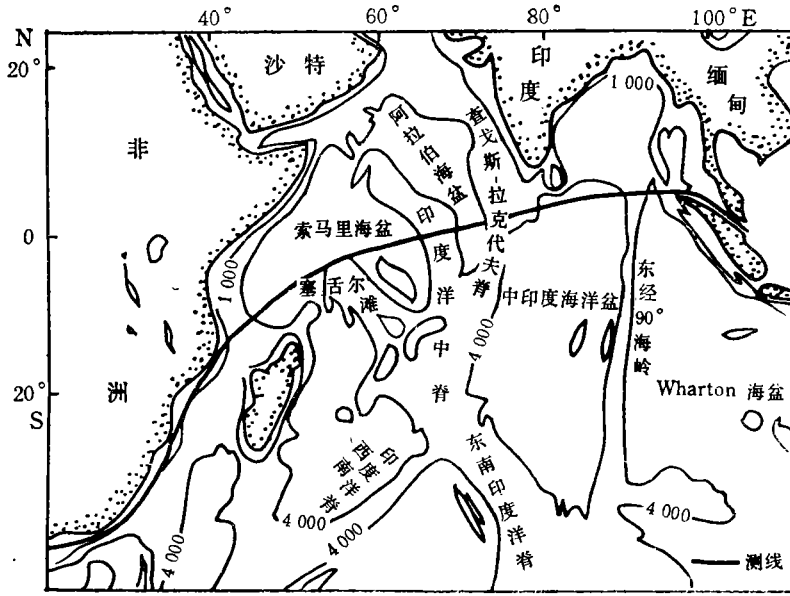


图 1 印度洋的地形和测线的位置

Fig. 1 Topography of the Indian Ocean and position of measured line

壳的增厚(主要是地壳的层 2 增厚)地带。在现代构造上,无震海岭为“热点”成因,以缺少地震活动为其主要特点。而海底高原有些则是沉入大洋的大陆碎块,地壳性质与大陆型地壳相类似。从表面上看,无震海岭和海底高原同属大洋中的地壳稳定区,但是,它们的成因不同,引起重力异常的原因不同,而大洋中脊又与它们更有着较大的区别。无疑,它们对于印度洋的形成和演化起着很大的制约作用。

2 无震海岭

从总体上讲,大洋中的无震海岭以正的重力异常为其主要背景,但不同的无震海岭其上的重力异常却不尽相同,有的甚至相差很大。这反映了它们形成的地质时期和方式的不同、演化过程的差异以及当前所处状态的不同。下面仅对印度洋中两个无震海岭作一探讨。

2.1 东经 90° 海岭 该海岭在 9°N 和 31°S 之间,南北延伸达 5 000km,其宽度一般在 150—250km 之间变化,它标出了中印度洋海盆的东界和 Wharton 海盆的西界(图 1)。它的起源是火山性的,其下存在着辉长岩和橄榄岩,在该海岭的东侧明显存在着一条南北走向的大转换断层 (Alan et al., 1982)。

东经 90°海岭是印度洋中典型的无震海岭,其顶部水深约 2500m。本次测量在 5—6°N 处通了海岭的北部,这里靠近该海岭与巽它海沟的交汇处。海岭上以正的空间异常为主,最大值可达 $40 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$,恰与该海岭的轴部对应。而在岭的东坡上还存在着 $-20 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 的负异常,其宽度近 50km (图 2)。这种在海岭上出现不对称的正、负伴生的空间异常在其它大洋中的无震海岭上还不多见,这说明该海岭在历史上曾发生过较强烈的构造活动,其应力状态也是十分复杂的。为了验证这一点,特对该海岭之下的深部构造作

了探讨(图 2)。

从印度洋磁条带分布图 (Alan et al., 1982) 查出,本次测量所经过的地方,该海岭以西的中印度洋海盆的磁条带异常序号为 30 (70 百万年前),而海岭以东的 Wharton 海盆磁条带异常序号小于 17 (约 43 百万年前)。由此可见,海岭两侧的地壳年龄相差很大。根据海底岩石圈厚度 (H_i) 与年龄 (t) 的经验公式 $H_i = 7.49\sqrt{t}$ (式中 H_i 以 km 为单位, t 以百万年计) (Yoshii, 1975), 我们估算中印度洋海盆的岩石圈深度为 70km, 而 Wharton 海盆的岩石圈深度为 50km, 它们的接触带即位于上述的大转换断层之上(图 2)¹⁾。从计算得知,断层两侧的岩石圈发生了约 20km 的升降。由于软流圈的密度比正常地幔低,故它产生的引力值是负的。所以在海岭的东坡便出现了较大的负异常,这一点与我们实测的空间异常是非常一致的。

2.2 查戈斯-拉克代夫海岭 该海岭标出了阿拉伯海盆和中印度洋海盆的界限,它在 14°N 和 9°S 之间绵延达 2 500km, 宽度一般不超过 200km, 水深通常在 2 000—3 000m

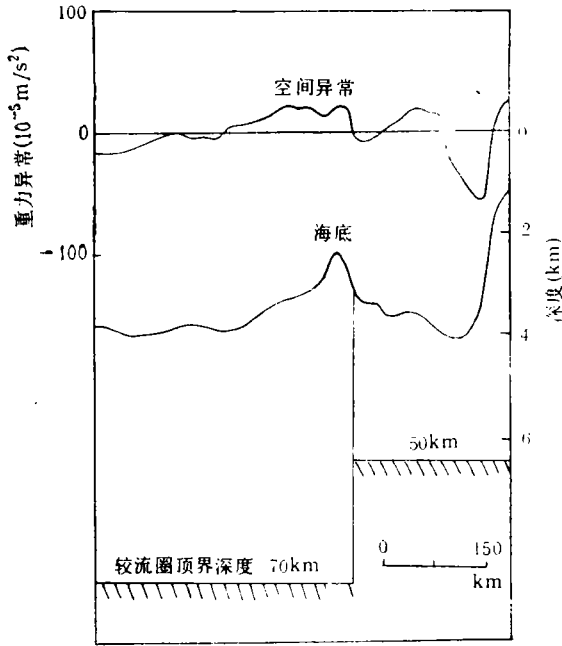


图 2 东经 90° 海岭上重力异常与深部构造的关系

Fig. 2 The relationship between gravity anomalies and deep tectogenesis on the Ninetyeast Ridge, 90°E

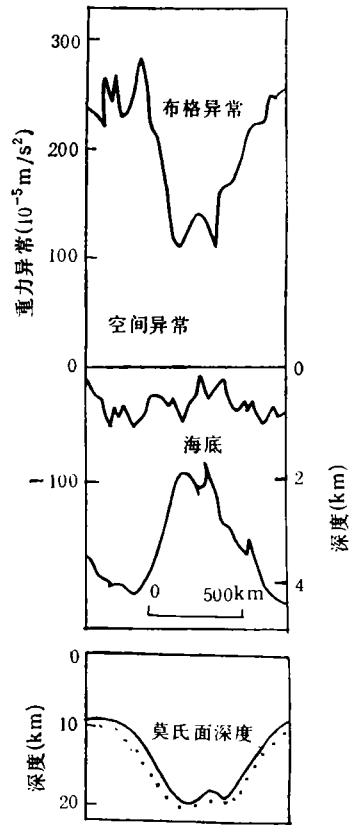


图 3 查戈斯-拉克代夫海岭上的重力异常与地壳结构的关系

Fig. 3 The relationship between gravity anomalies and crust structure on the Chagos-Laccadive Ridge

1) 吴金龙等, 1991, 环球重力调查, 国家海洋局第一海洋研究所科技档案室, 编号: 102101, 42—50。

之间(图 1)。该海岭为火山成因,其上覆盖了珊瑚礁,从白垩纪到始新世期间海岭是活动的,根据地震资料确定的莫氏面深度为 16—22km (Alan et al., 1982),这与我们根据本次实测的重力资料所估算的地壳厚度十分接近(图 3)。这说明该海岭之下为一变厚的大洋地壳。

对于该海岭形成和演化机制,目前尚无统一的看法。Sclater 曾提出 (Alan et al., 1982),该海岭和东经 90° 海岭一样,是冈瓦纳大陆破裂之后,印度向北移动时而留下的痕迹, Bunce (Alan et al., 1982) 则主张该海岭的中段是从印度分裂出来的大陆碎块。笔者认为,该海岭原先可能属于印度洋庞大的 X 形洋中脊系统的一部分,它曾经是活动的、有震的。但是,由于它地处洋中脊的末端,其活动程度远远没有洋中脊的中间部分强烈,大约在始新世之后,该海岭的活动便已停止。其上不甚发育的裂谷,也已被广泛发育的珊瑚礁和其它沉积物所充填,从地形上已无法辨认出海岭上原先的裂谷,这就是为什么许多学者把印度洋中脊系说成是倒“Y”形,而不认为其成“X”形的原因。对于上述种种推断,目前尚不能定论,还需要进一步的地质、地球物理资料的验证。不过,有一点是肯定的,即除了在该海岭的对面不远的地方确定出一个地震群外,该海岭的大部分地区则是无震的 (Alan et al., 1982)。

该海岭上所具有的重力异常与通常的无震海岭上所具有的重力异常截然不同。其上展示的是宽缓变化的负的空间异常,最低值为 $-45 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$,基本上与岭轴相对应(图 3)。造成这种负空间异常可能有两种原因:其一,原先的中央裂谷由于被一些珊瑚礁之类的低密度物质所填充,所以海岭轴部出现了最低的负异常;其二,在海岭的东西两坡上存在着近 3km 厚的沉积物¹⁾,这可能是造成整个海岭上出现负异常背景的主要原因。据实测重力异常估算的地壳厚度为近 20km,这里的地壳厚度较大,在海岭之下出现了一个较大的负山根(图 3)。经布格改正后,在海岭上得到了一个平均值约为 $120 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 的布格异常低值带,比其左右的洋盆低约 $150 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$,这也正说明该海岭之下莫氏面的深度要比其左右的洋盆深。

3 海底高原

它是大洋中一种特殊的构造类型,其地壳类型不够统一,有些为大陆型地壳,有些则为大洋型地壳。塞舌尔滩为印度洋中一海底高原,它是沉入大洋中的大陆碎块,它的地壳性质为大陆型的。

塞舌尔滩位于 4—6°S, 54—62°E 之间,地形起伏很大,西、北、东被索马里海盆所包围(图 1)。滩上花岗岩广泛出露,根据钾氩法测定年代为 650 百万年,并被年轻的(时代为 50 百万年)的碱性花岗岩所切割,地震和重力资料在该滩上确定的地壳厚度最大约为 33km (Alan et al., 1982),可见塞舌尔滩有着和陆架区相类似的地壳结构。但是,从本次实测重力资料看,滩中央有一个明显的布格异常低值带,其值约在 $(170-190) \times 10^{-5} \text{m/s}^2$,既大大高于大陆架区,又不到正常洋盆的一半,空间异常在 $\pm 40 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 之间变化,显示出它是一个既不同于大陆架,又不同于大洋型的特殊重力组合关系(图 4)。塞舌尔滩的地壳结构和深部构造及重力异常组合关系与我们 1983 年对太平洋中著名的翁通-爪哇海底高原的调查结果(吴金龙等, 1986)十分相似,因此,我们初步认为,塞舌尔滩为一海

1) 吴金龙等, 1991, 全球重力调查, 国家海洋局第一海洋研究所科技档案室。编号: 102101, 44。

底高原。

塞舌尔高原的水深为 2 500—3 000m, 是大陆水深的 10 倍以上。高原上空间异常的变化与局部地形的起伏有着明显的反映, 这说明它似乎已处于均衡状态。象塞舌尔滩这样的大洋中的大陆碎块, 根据测深和地震资料, 当它们与陆壳有着相似的地壳结构(即具有相同的地壳质量)时, 它们要比陆架的地壳多沉入地幔 2—2.5km (吴金龙等, 1986)。

要使大陆碎块沉入地幔, 就必须有一个向下的拉力。按均衡说, 塞舌尔高原上的空间异常应为负值, 而且下沉的深度越大, 负值就越大, 可从实测的重力资料看, 塞舌尔高原空间异常却很小。为了进一步探讨塞舌尔高原下沉的原因和下沉力的来源及为什么其上没有出现较大负异常的原因, 根据塞舌尔高原的情况, 做了一个简单的模型计算。为简化计算,

在大陆地壳和大洋地壳内部都未分层, 且认为整个地壳密度是均匀的, 同时假定莫氏面之下的地幔密度亦是均匀的。由此分别计算了海底起伏引起的垂直引力和莫氏面起伏引起的垂直引力, 两者的叠加之和近似地认为是“空间异常”(图 5)。从计算结果看, 大陆架和大洋海盆的异常基本在 $\pm 10 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 内变化, 而大洋中的大陆碎块可达 $-200 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$, 这无疑是由于大陆碎块在大洋中的下沉所引起的巨大的负垂直引力, 这个结果与上述的定性解释是完全一致的, 但与实测的空间异常的结果却完全不同。为此, 我们用直立板状体公式在计算机上反演模拟估算了塞舌尔高原之下的软流圈顶界深度约为 140km (图 4)。由此可见, 塞舌尔高原之下, 软流圈发生了大幅度的下沉。由于正常地幔的密度比软流圈的密度要高, 所以它引起的引力值是正的, 这就有可能抵消由于地壳的下沉而引起的负异常, 这也就是实测的空间异常没有出现较大负值的原因。软流圈的大幅度沉降, 就有可能使其上部的地壳下沉。

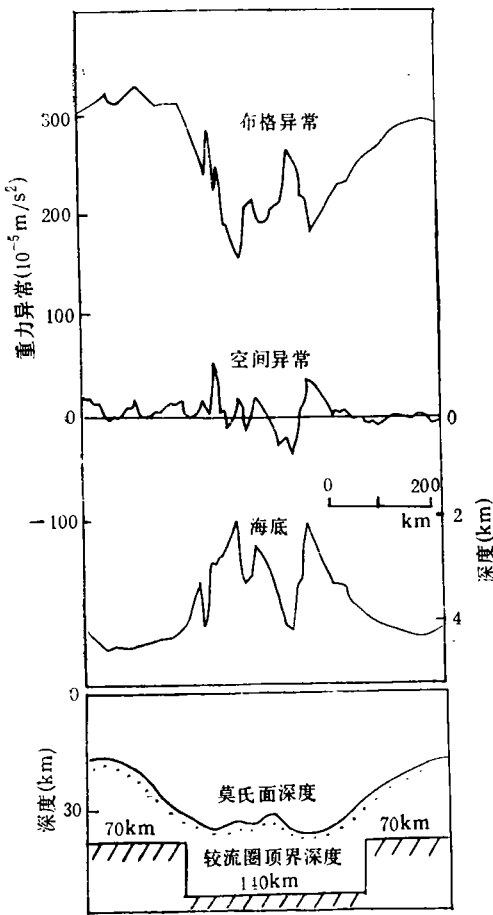


图 4 塞舌尔滩上的重力异常、地壳结构和深部构造

Fig. 4 The gravity anomalies, crust structure and deep tectogenesis on the Seyelles Bank

4 印度洋中脊同无震海岭和海底高原的比较

本次测量, 从印度洋中脊的北部(赤道线)穿过(图 1)。中脊之上以短波长变化的、低幅度的空间异常为其主要特征。布格异常与中脊地形成“镜像”对称, 与无震海岭和海底高原的布格异常形态相似(图 6)。

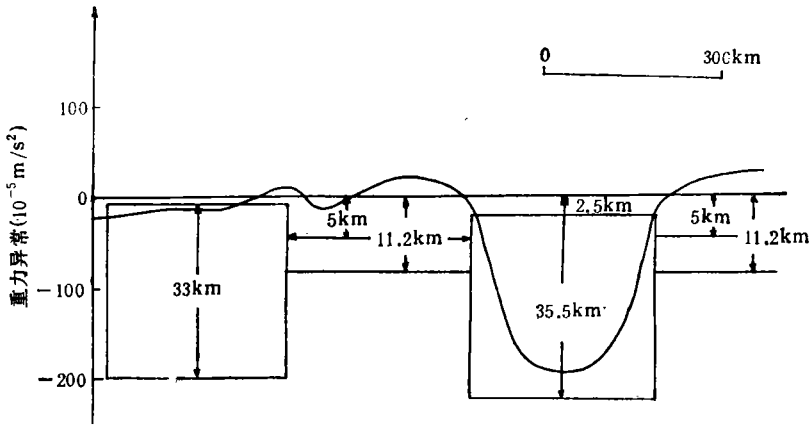


图 5 大洋中残留的陆块(模型)及其引起的垂直引力

Fig. 5 The remnant continental block (model) in ocean and vertical gravitation caused by it

根据“国际印度洋考察计划”(梁元博编著, 1981)的考察结果,在中脊的中央裂谷内,坡面上缺少沉积物覆盖,但底部却充塞着火山沉积层,它相当于地壳的层 2,厚度约为 2.0—2.5km,其下便是地震波速为 7.0—7.2km/s 的过渡层,层 3 缺失。地壳厚度最薄处约 5km,恰与脊轴对应,比其左右的洋盆地壳薄约 2km,地壳明显出现了上拱形状(图 6)。

就洋中脊之上出现的短波长变化的、低幅度的空间异常,长期以来不少学者把它一级近似地视为均衡异常,从而断定洋中脊是处在均衡状态之中,并且认为海底及整个地壳隆起的质量过剩是通过低速、低密度的地幔抬升得以补偿。世界的大洋中脊系,是现代世界构造活动最强烈的地区之一,这从它的大规模的海底隆起、强地震、高热流、多火山得以证明,把这样一个强构造活动中心看成是已达到均衡状态显然与实际情况是十分矛盾的。因为现代板块构造的核心之一是地幔的热对流,洋中脊系则是热地幔的上升区,这个热动力应成为破坏地壳均衡的向上的外力,即洋中脊的地壳虽“新”,但那里的构造活动的历史却很“老”,这同海水与洋壳年代不同十分相似。根据本次环球科学考察的重力资料,根据对太平洋、大西洋和印度洋三大洋中脊系进行的综合性研究结果,我们认为,构造活动剧烈的大洋中脊系,其强大的外力来源为地幔的热动力。它的活动历史是长的,且已达到热动力平衡状态,但并非处于均衡状态¹⁾。这个观点一提出,便得到了许多学者的赞同²⁾。洋中脊的中央裂谷带,为地幔的低速、低密度物质进入地壳和涌出地表提供了一个重要的通道。如果说中脊之上短波长变化的空间异常是由于中脊处强烈变化的地形引起的,那么,它的低幅度的空间异常则暗示着地幔物质的上涌。因此,不能简单地、一级近似地把中脊之上的空间异常视为均衡异常,更不能以此为依据把大洋中脊地区说成是已处于均衡状态。为此,我们估算了印度洋中脊的地幔结构。中脊之下,软流圈的顶界深度约为 25km,而其左右的索马里海盆和阿拉伯海盆软流圈顶界深度约为 65km(图 6)。从水深资料、地壳厚度和软流圈深度的计算表明,在印度洋中脊处,海底、莫氏面和软流圈 3 个界面都

1) 吴金龙等, 1991, 环球重力调力, 国家海洋局第一海洋研究所科技档案室, 编号: 102101, 49。

2) 科学技术成果鉴定书, 1992, 3—4。

发生了不同程度的抬升,而软流圈抬升的幅度最大,从而造成了中脊之上低幅度的空间异常。这说明,地幔物质的上涌、软流圈的抬升在洋中脊的强烈构造活动中起着明显的主导作用。这与上述的无震海岭和海底高原的地幔结构明显不同。

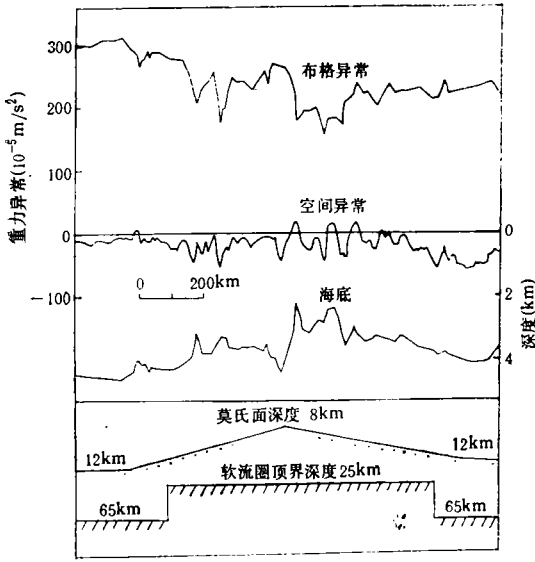


图 6 印度洋中脊的重力异常、地壳结构和深部构造
Fig. 6 The gravity anomalies, crust structure and deep tectogenesis on the Mid-Indian Ridge

同。虽然上述三者都是大洋中的隆起地带,但是前两者的地壳增厚,莫氏面下拱,软流圈变深,影响布格异常的主要因素是其下存在着一个较大的负山根。相反,在大洋中脊处,地壳减薄,莫氏面上拱,软流圈抬升,影响布格异常的主要因素是其下存在着一个高热、低速、低密度的异常地幔。

构造活动强烈的大洋中脊处,其强大的外力来源为地幔的热动力。它的地壳虽新,但活动历史却很长,且已达到热动力平衡状态,并非处于均衡状态。

参 考 文 献

吴金龙等, 1986, 中太平洋北部锰结核调查综合研究报告, 海洋出版社(北京), 150—154。
 梁元博编著, 1981, 海底构造, 科学出版社(北京), 159—160。
 Alan, E. M. N. et al., 1982, The ocean basins and margins, *The Indian Ocean*, 6: 63—65。
 Alan, E. M. N. et al., 1982, The ocean basins and margins, *The Indian Ocean*, 6: 132—133。
 Yoshii, T., 1975, Earth planet, *Sci. Lett.* 25: 305—312。

5 结 论

广泛分布于印度洋的无震海岭、海底高原具有复杂的壳幔结构,它们以缺少地震活动为主要特点。

无震海岭是大洋地壳的增厚地带,其地壳厚度一般在 14—25km 之间变化,它比通常的大洋地壳厚约 10 km;而塞舌尔高原则与陆架区有着类似的地壳结构,这里可能有增厚的岩石圈。

无震海岭和海底高原及大洋中脊之上都伴有一个布格异常的低值带,但引起这种低值带的原因却不尽相同。

A PRELIMINARY STUDY ON ASEISMIC RIDGES AND SEA-FLOOR PLATEAU IN THE INDIAN OCEAN

Wang Shugong, Gao Yang

(First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao, 266003)

ABSTRACT

From October, 1986 to May, 1987 Chinese scientists carried out their third Antarctic scientific expedition and first round the world scientific investigation, during which a amount of marine gravity data were obtained by the geophysists from the First Institute of Oceanography (FIO), State Oceanic Administration (SOA). These data filled in their data gap in the Atlantic and Indian Ocean. Based on the data a Preliminary study has been made in this paper on the gravity anomalies of the aseismic ridges, sea-floor plateaus and the Mid-Ridge of the Indian Ocean. The results suggest that the aseismic ridges, sea-floor plateau and Mid-Ocean Ridge exist with a low value zone of Bouguer anomalies. However the reasons causing the low Bouguer anomalies are different. The former two have a crust thickening, a Moho discontinuity arching down and asthenosphere deepening. So the low value zone may be mainly caused by an anti-root lying beneath them. On the contrary in the later case of the Mid-Ocean Ridge the crust is becoming thinner, Moho arching up and asthenosphere lifting. So an anomalous mantle with high temperature, low velocity and low density may be main reason of the low Bouguer anomalies. The strong tectonic activities of the Mid-Ocean Ridge system seem to be driven by a thermodynamics of the mantle. Although the crust of the Mid-Ocean Ridge is new, its activity has a long history and has reached to a balance state in thermodynamics. There is almost no doubt that the free-air anomalies of the low amplitude on the Mid-Ocean Ridge mean a lifting of the mantle material with a low velocity and low density, but can not be seen approximately as a first-order of isostatic anomaly. The Mid-Ocean Ridge can not be concluded to be in an equilibrium state, either. The studies mentioned above have provided with an important basis for the further researches on deep tectogenesis, equilibrium state and dynamic mechanism of the tectonic belts in the Indian Ocean and will be of far reaching importance to the further approach to the formation and evolution of the Indian ocean.

Key words Aseismic ridge Sea-floor plateau Mid-Indian Ridge
Gravity anomalies Deep tectogenesis