

慢速、超慢速扩张洋中脊三维地震结构研究进展与展望*

赵明辉¹, 丘学林¹, 李家彪², 陈永顺³, 阮爱国², 敖威^{1,4}, 王春龙¹, 李守军², 张佳政^{1,4}, 吴振利², 牛雄伟²

(1. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301; 2. 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 3. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 慢速与超慢速扩张洋脊是研究岩浆活动、构造运动、热液循环等相互作用的最佳场所; 其复杂的三维空间的地震结构是构建构造动力学机制的基础。文章首先结合国际深海研究发展趋势, 回顾了慢速扩张洋脊的三维地震结构研究进展, 发现慢速扩张洋中脊与快速洋脊相似, 也存在岩浆房或熔融体; 然后, 重点结合我国 2010 年 1—3 月首次在西南印度洋洋中脊开展的三维地震探测实验, 提出了今后超慢速洋中脊的重要研究方向; 此次地震数据初步处理结果表明, 数据质量良好, 为下一步三维层析成像研究打下坚实基础; 相信此次研究将在超慢速扩张洋脊的形成演化机制上取得突破性进展, 提升我国在国际大洋中脊研究中的地位。

关键词: 三维地震结构; 西南印度洋洋中脊; 慢速; 超慢速; 岩浆房

中图分类号: P738 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5470(2010)06-0001-07

Research development and prospect on three-dimensional seismic structures of slow and ultraslow spreading ocean ridges

ZHAO Ming-hui¹, QIU Xue-lin¹, LI Jia-biao², CHEN Yong-shun³, RUAN Ai-guo², AO Wei^{1,4}, WANG Chun-long¹, LI Shou-jun², Zhang Jia-zheng^{1,4}, WU Zhen-li², NIU Xiong-wei²

(1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301; 2. The Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012; 3. Computational Geodynamics Laboratory, Department of Geophysics, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 4. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Slow and ultraslow spreading ridges are the key areas for studying interplay among magmatism, tectonics, and hydrothermal circulation comparing to the fast spreading ridges. Their complicated three-dimensional (3D) seismic structures are the basis of finding their tectonic dynamic mechanism. The research on the 3D seismic structures is reviewed in terms of slow spreading ridges in deep oceans, including its developing international research trend. The new experiments have detected a magma chamber or a melt body at a slow spreading ridge, same as at a fast spreading ridge. The 3D seismic survey for the first time was carried out on the southwest Indian Ocean Ridge from January to March in 2010. The key research aspects are then put forward based on these seismic experiment data. Its preliminary disposing result of the seismic data indicates that the high quality of the seismic data is the strong foundation of the 3D tomography. It is promising to make breakthrough in mechanism on ultraslow spreading ridges. The research will surely promote the Chinese status in the field of international ocean ridges.

Key words: three-dimensional seismic structure; the southwest Indian Ocean Ridge; slow spreading ridge; ultraslow spreading ridge; magma chamber

收稿日期: 2010-04-29; 修订日期: 2010-07-19。卢冰编辑

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-Q05-04); 大洋“十一五”课题(DYXM-115-02-3-01); 国家“863”项目(2008AA093001); 科技部“973”项目(2007CB411701); 国家自然科学基金项目(41076029); 中国科学院南海海洋研究所领域前沿项目(LYQY200704)

作者简介: 赵明辉(1967—), 女, 辽宁省锦州市人, 副研究员, 博士, 主要从事海洋地球物理与深部结构研究。E-mail: mhzhao@scsio.ac.cn

* 感谢“大洋一号”DY115-21航次第6航段所有科考队员和全体船员辛勤的劳动! 感谢两位审稿人的建设性意见。

深海基础研究是地球科学的一个亮点,是21世纪国际海洋竞争的一部分^[1],同时也是走向地球系统科学的必由之路^[2-3]。随着陆地资源的日趋枯竭和人类对资源需求的不断增长,开发深海大洋资源对于我国21世纪的可持续发展更是具有深远的战略意义。

全球长达60000km的大洋中脊是地球系统中火山活动最为频繁、岩浆大规模上涌和新洋壳形成的巨型活动构造带,是海底热液活动的主要发生地。大洋中脊热液喷口更是蕴藏着丰富的热液硫化物矿产和极端生物基因资源^[4-6],其高温热液循环在地球岩石圈与海洋之间的物质能量转换中扮演着重要的角色。因此,大洋中脊是认识地球内部动力状态、深部构造、岩浆起源与演化,以及极端条件下生态系统等重大地学问题的突破口^[7]。世界上多个研究计划,如国际洋中脊计划(Inter Ridge, 2004—2013)、国际大陆边缘计划(Inter Margins)、综合大洋钻探计划(ODP, 2003—2013)等,都将洋中脊及其热液活动作为主要研究对象^[8-9]。

作为一种板块构造边界,根据扩张速率及岩浆供给量的不同,洋中脊可以分为快速、中速、慢速、超慢速等4种不同类型^[10-12],其地质地形、深部结构、岩浆作用及形成机制完全不同。1)快速扩张洋中脊,一般全扩张速率为80—180mm·a⁻¹,由于具有更多的岩浆供给量,洋脊轴部一般表现为中央隆起,转换断层一般垂直于扩张方向,其地壳增生以岩浆活动为主导;2)慢速扩张洋中脊,一般全扩张速率小于55mm·a⁻¹,轴部一般表现为巨大的中央裂谷,断层与裂隙系统发育完整,这在呈“S”形的大西洋洋中脊(MAR)中表现最为突出;3)中速扩张洋中脊介于上述二者之间;4)而超慢速扩张洋中脊(全扩张速率14—16mm·a⁻¹)是一种岩浆段与无岩浆段共同组成的曲线型构造板块边界^[12]。在快速扩张的洋中脊(如东太平洋海隆),轴部地形及地壳结构缺乏明显的变化;而慢速、超慢速扩张洋中脊被转换不连续和非转换不连续(NTO)分为许多段(segments)^[13],与快速扩张洋中脊相比,它可以更加充分地展示地壳结构沿轴部方向上随深度的变化,能更好地突出洋壳及三维地幔上隆的特征^[14]。另外,大量的地震研究表明,快速洋中脊发育有长期的、稳定的岩浆房,岩浆房中的岩浆或以岩墙形式为海洋地壳的形成提供原料,或作为熔岩喷出到海底形成海洋地壳的玄武岩层;但在慢速洋中脊却少有发

现岩浆熔融体的证据,即使存在,也是短期的、不稳定的熔融体^[15]。Chen^[16]认为透镜体状岩浆房的深度与扩张速率存在相关性,并在半扩张速率小于20mm·a⁻¹的洋中脊岩浆房在地壳中消失。以上研究说明,慢速、超慢速扩张洋中脊处的地壳增生受多种因素影响,地壳结构更为复杂,是研究岩浆活动、构造运动、热液循环之间相互作用的最佳场所。

截至目前,在长达16000km慢速扩张的大西洋洋中脊,进行的大多是二维结构研究^[17-20],只有在大西洋洋中脊的Reykjanes Ridge (57°50'N)、OH-1段(35°N)和Lucky strike段(37°N)开展了三维地震结构研究,三维深部结构研究结果却意外显示:在慢速扩张洋中脊同样存在岩浆房或熔融体^[15,21-23],那么在超慢速扩张洋中脊,作为全球洋中脊系统中重要的一部分(约10%)^[14],在地壳增生过程中是否存在短暂的岩浆房呢?由于其本身独特的结构特征及三维深地震探测的不足,更需要加大力度开展精细地震结构研究,揭示岩浆作用、构造作用与热液循环之间的相互关系,以促进大洋中脊理论的发展创新。

1 慢速扩张洋中脊热液区的三维地震结构特征

目前在慢速洋中脊热液区开展的三维地震结构研究的区域有大西洋洋中脊的Reykjanes Ridge (57°50'N)、OH-1段(35°N)和Lucky strike段(37°N)三个地区,下面详细介绍其三维地震结构特征。

1.1 大西洋洋中脊 Reykjanes Ridge (57°50'N)的三维地震结构

在Reykjanes Ridge北部由于受冰岛热点作用影响,没有发育海底峡谷,以地幔柱特征为主;在58°40'N以南开始发育有海底峡谷,到57°N(Bight断裂带)之间,洋脊没有明显转换不连续,因此,Reykjanes Ridge (57°50'N)处可以揭示形成新火山洋脊的火山作用与构造伸展作用之间的相互联系^[15]。三维地震实验部署了10台海底地震仪(OBS),并用爆炸震源与人工气枪震源进行两次激发(图1),模拟结果显示^[15,21],在Reykjanes Ridge轴部地壳厚度7.5km,远离轴部地壳变薄,并发现在慢速扩张洋脊同样存在岩浆房;在新火山岩洋脊(AVR)下覆2.5km深处发现有厚100m、宽4km的岩浆房,而部分熔融体达到8km宽,岩浆房的规模与快速、中速扩张洋

脊相当, 暗示着地壳增生的过程相似。这是第一次意外地在慢速扩张洋中脊发现岩浆房。以前在慢速扩张洋脊均没有发现, 可能由于慢速洋中脊存在较

长时间的岩浆平静期^[15], 或者是短期的、不稳定的熔融体^[21]; Chen^[24]认为发现的岩浆房也可能是由于该洋中脊受到了冰岛地幔柱所提供的额外能量所致。

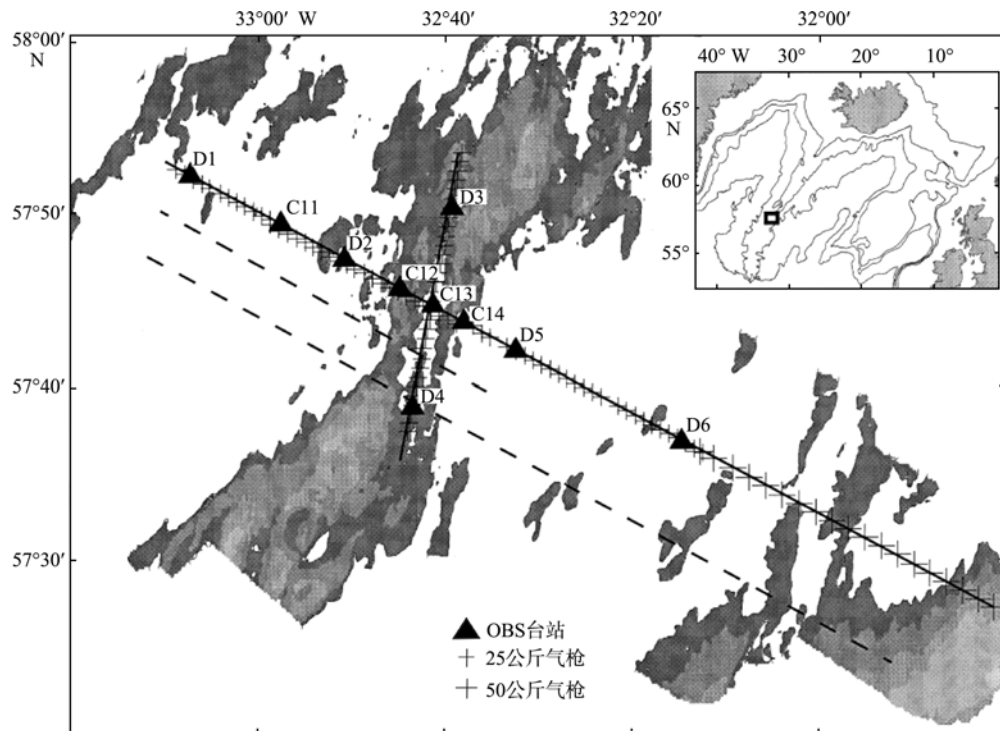


图 1 大西洋洋中脊的 Reykjanes Ridge(57°50'N)地震测线位置图^[21]

Fig. 1 Seismic experimental configuration at the Reykjanes Ridge (57°50'N) ^[21]

1.2 大西洋洋中脊 OH-1 段(35°N)的三维地震结构

大西洋洋中脊 OH-1 段位于 Oceanographer 转换断层与 1 号非转换不连续(NTO-1)之间(图 2), 长约 90km, 洋脊峡谷呈沙漏状, 中间窄而浅(宽 4—5km, 深 2200m), 两端宽且深(宽 20—40km, 深 4100m); 在 OH-1 段的中心, 洋脊特征非常明显, 东西向海山链横穿洋脊, 又细分为西部海槽与东部洋脊峡谷^[22]。前人的研究表明, 在 OH-1 段两端洋壳层 2 与层 3 缺乏明显的过渡, 上地壳中存在低速层厚度异常^[25], 并且, 地壳与地幔之间过渡层超过 3km^[19]。鉴于慢性扩张洋中脊下地壳与上地幔的三维结构认识还十分薄弱, Dunn 等^[22]综合了几次的广角地震探测数据(图 2), 进行了三维层析成像反演, 获得了研究区下地壳与上地幔的深部结构特征。多处速度异常与地壳上部年龄的不一致性表明, 地壳上部是在不稳定状态下形成的, 经历了岩浆作用、构造作用与热液循环之间强烈相互作用; 与其他慢速扩张洋脊相比具有较多的持续不断的熔融岩浆供应, 可能是由于附近的 Azores 热点的影响; 上地壳非均质性(2%—3%)顺着洋脊排列是由于压应

力岩石圈的膨胀应变, 下地壳非均质性是由于存在部分熔融岩墙, 地幔非均质性表明, 地幔应力并不是以相对扩张方向, 而是以洋脊移动的方向为主导^[22]。

1.3 大西洋洋中脊 Lucky Strike 段(37°N)的三维地震结构

Lucky Strike 段位于大西洋洋中脊 Azores 三联点南部(图 3), 海底峡谷宽 15—20km, 长近 70km, 以非转换不连续(NTO)为界, 水深为 1800—2100m, 中心发育有火山, 并在其轴部发现了地下岩浆熔融体^[26-27], 说明洋壳增生过程中岩浆作用扮演着重要角色。而三维地震结构研究, 可以从空间与时间角度上解译地壳增生的过程。SISMOMAR (Seismics of Mid-Atlantic Ridge, 大西洋洋中脊地震实验)三维地震实验结果表明^[23], 上地壳的低速异常平行于洋脊, 并以中央裂谷为界; 下覆轴部熔融体中心的低速异常可能是由于温度升高或是存在少量的熔融形成; 下地壳的低速异常体代表岩浆房的空间几何形态, 为 Lucky Strike 段的中心火山活动提供原料。

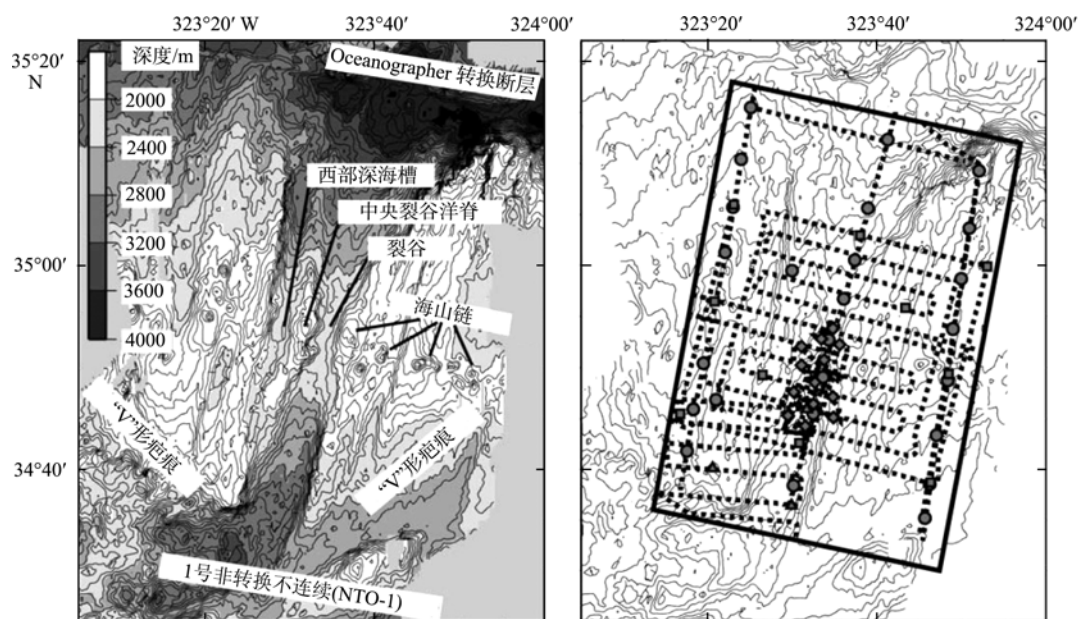


图2 大西洋洋中脊 OH-1 段(35°N)的地震测线位置及水深等值线图^[22]

Fig. 2 Layout of the seismic experiments superimposed on a bathymetry contour map centered on the “OH-1” segment along the Mid-Atlantic Ridge (35°N) ^[22]

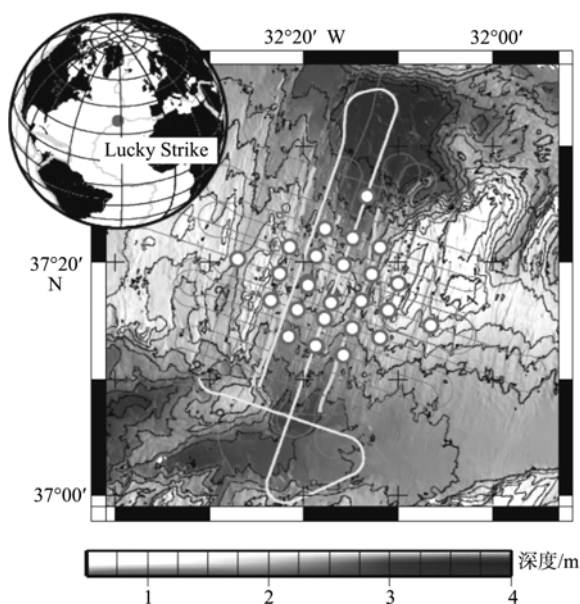


图3 大西洋洋中脊 Lucky strike 段(37°N)的地震测线位置及水深等值线图^[23]

Fig. 3 Layout of the seismic experiments superimposed on a bathymetry contour map centered on the “OH-1” segment along the Mid-Atlantic Ridge (35°N) ^[23]

2 西南印度洋热液区三维地震结构研究展望

上述 3 个研究区均显示了慢速洋中脊结构中岩浆房或地壳熔融的存在, 说明岩浆作用在地壳增生中扮演着重要角色。西南印度洋脊(SWIR)作为超慢速扩张洋中脊的代表, 是研究岩浆活动、构造运动、热液循环等相互关系的最佳场所。在 2007 年环球航

次中首次在研究区(37°50'S)发现了热液喷口(图 4 中 OBS1 台站位置), 同时进行了海区浅表的地质和化学取样、摄像、地形和重磁等方面地质与地球物理调查^[28]。热液喷口区(37°50'S)位于转换断层 Indomed TF(46°E)和 Gallieni TF (52°E)之间, 属于水深地形扩张单元的 segment 27 和 segment 28^[13-14]。但该区在洋中脊构造的调查和动力学研究方面几乎是空白, 三维精细的地震结构探测研究更是前所未有。

大洋“十一五”第 21 环球航次第 6 航段重点对西南印度洋中脊(37°50'S)进行综合地球物理调查。首席科学家李家彪研究员, 组织了多单位精湛的科研队伍, 成功实施了大容量气枪阵激发作业及大规模的海底地震仪接收实验, 标志着大洋环球航次海上地震作业一个新的里程碑。此航段自 2010 年 1 月 31 日从毛里求斯路易斯港起航至 3 月 7 日返航靠港, 历时 1 个多月。此次使用的人工震源是中科院南海海洋研究所提供的 4 支大容量气枪, 总容量达到 6000in³(98 322.6cm³), 大容量气枪阵连续作业 13 天零 5 小时, 有效放炮时间 310 小时, 共激发 10832 炮(图 4)。负责接收气枪信号的海底地震仪(OBS)实际投放 40 台, 其中 18 台是由德国 GeoPro 公司制造的短周期 OBS, 5 台国产 I-4C 型宽频带 OBS^[29], 还有法国 IPGP 研究所提供了 15 台短周期 OBS 和 2 台宽频带 OBS, 实验成功回收 38 台, 回收率达到 95%。此次洋中脊 OBS 地震调查, 无论是放炮数量、投放台数, 还是射线覆盖密度, 与国际 3D 地震探测实验相比都达到了国际先进水平(表 1)。在

热液活动区(A 区)及地壳减薄区(图 4 中 OBS27 台站位置)研究中心均具有 360° 的射线覆盖, 这对于

热液区及地壳减薄区的非均质性深部结构研究至关重要。

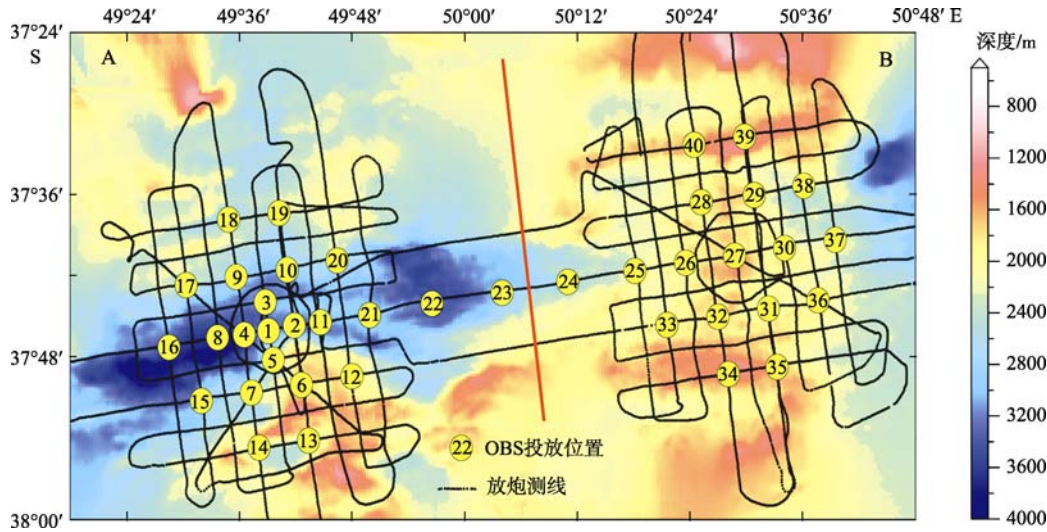


图 4 西南印度洋中脊热液区三维地震探测位置图

Fig. 4 Three-dimensional seismic experiments in the southwestern Indian Ocean Ridge

表 1 慢速、超慢速洋脊三维地震实验参数对比

Tab. 1 Parameters of 3D seismic experiments in the slow and ultraslow spreading ocean ridges

| 研究区域 | Reykjanes Ridge 大西洋洋中脊(57°50'N) ^[21] | Lucky Strike 段 大西洋洋中脊 (37°N) ^[23] | OH-1 段 大西洋洋中脊 (35°N) ^[22] | 第 28 段 西南印度洋中脊(37°S) |
|-------------------------|--|---|---|-------------------------|
| 实验名称 | RAMESSES | SISMOMAR | MARBE | DY115 |
| 3D 探测面积/km ² | 90×35 | 50×50 | 80×55 | 50×120 |
| 人工震源数量 | 110 m 间隔人工震源和 111 炮炸药 | 10403 炮 | 5000 炮 | 10832 炮 |
| OBS /个数 | 10 | 24 | 49 | 38 |
| 三维层析成像结果 | 良好, 发现岩浆房 | 良好, 发现岩浆房 | 良好, 发现熔融体 | 期望获得 良好结果 |

注: RAMESSES: Reykjanes 洋脊轴部电磁与地震联合实验(Reykjanes Axial Melt Experiment: Structural Synthesis from Electromagnetics and Seismics); SISMOMAR: 大西洋洋中脊地震实验(Seismics of Mid-Atlantic Ridge); MARBE: 大西洋洋中脊公牛眼探测实验(Mid-Atlantic Ridge Bull's Eye Experiment); DY115: 大洋 “十一五”地震实验(Dayang “11th 5 - Year Plan” seismic experiment)

3 今后西南印度洋探测研究应集中在以下三方面

3.1 研究区现今的扩张洋脊深部结构特征

深部结构研究主要通过三维层析成像方法解决研究区地震波速度分布特征及莫霍面在洋脊处的形成与展布情况。在我们研究区没有转换断层, 不同段之间以非转换不连续(NTD)分界, 那么, NTD 长度规模、段的地震波速度及地壳厚度之间一定存在着某种联系。另外, 在快速扩张的东太平洋洋脊的研究证明, 莫霍面形成在巨大岩墙下面最年轻的地壳内^[30]; 在慢速扩张洋脊也找到了形成于洋壳演化早期阶段的莫霍界面, 表现为一个突变的速度梯度面^[21], 那么在我们超慢速扩张洋脊是否也能看到莫霍面形成过程中的地球物理证据? 深部结构剖面中

是否存在速度异常? 是否存在岩浆房?

3.2 构造作用与岩浆作用

构造作用与岩浆作用的研究将解决以下问题。洋脊轴部熔融岩浆量的变化情况, 洋脊的分段与岩浆量的分段是否具有对应性? 是否在段中心岩浆量多, 而在段两端岩浆量少? 新火山岩洋脊代表着洋脊轴部, 火山喷发岩与洋脊顶部(crest)存在对应关系吗^[31]? 它们又是如何从岩墙中分离出来的? 地壳的增生必然伴随着构造变形及裂隙发育, 研究区 360°的射线覆盖为深部结构的非均质性研究提供坚实基础, 力争为构造作用机制提供证据。

3.3 热液区的动力学机制问题

科学家们一直在关注, 是什么样的地质条件及地质过程维持洋中脊热液区长期的高温热液活动? 其热液循环的动力学机制如何? 目前有两种代表性

理论,一是来自于结晶岩浆房的热能^[32],一是固体岩石破裂前缘传递的热能^[33]。Wilcock 等^[34]提出,热源机制主要依赖于与扩张速率有关的地质因素,快速扩张洋脊,如东太平洋洋脊(EPR),从浅部地壳岩浆房中得到热量进行热循环;而慢速扩张洋脊,如大西洋洋中脊,通过深穿透断层从广阔的破裂前缘处获得能量进行热循环。然而, Cann 等^[35]认为,破裂前缘不足以提供地质尺度上的高温流体。最新地震反射数据表明,在大西洋洋中脊(37°40'N)的高温热液系统中,观测到地壳熔融晶体^[30,36];同样在大西洋洋中脊(23°20'N)的层析成像结果中也发现其高温热液系统中存在地壳部分熔融的低地震波速度^[19,37],这些结果挑战破裂前缘模式。这说明,随着地质调查的深入,我们虽经知道了热液区的表征特点,诸如我们感官所能看到的热液丘、黑烟囱、白烟囱和喷口等,但是反映热液区的驱动源及其运行机制等

核心问题仍然没有得到明确解决。

此次地震探测数据质量良好,振幅能量强,震相清晰(图 5),为研究区的三维层析成像打下了坚实的基础。相信此次探测实验的研究成果不仅可以获取西南印度洋中脊的扩张轴两侧与热液活动区的深部速度结构特征,而且可以为探讨超慢速扩张洋中脊的扩张机制(扩张速率、扩张方向和应力状态等动力学参数)及热液循环机制提供科学依据,也必将对国际洋中脊计划的重要研究主题——超慢速扩张洋脊的研究做出实质性推动。当今的世界正处于深海大洋国际竞争的新阶段,国际深海研究核心计划的“综合大洋钻探(IODP)计划”,中国已计划以前所未有的姿态投入大量资金与人力开发与探索深海^[38]。而洋中脊的 3D 地震探测研究必将促进我国在新一轮的大洋资源竞争中占据有利地位,对于 21 世纪的可持续发展具有深远的战略意义!

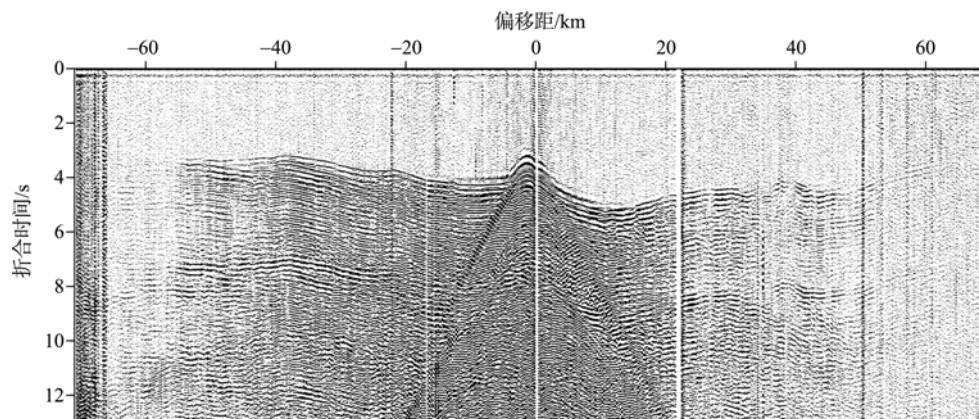


图 5 OBS23 台站综合地震记录剖面的初步成果

折合速度为 $6\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$; 折合时间=走时-距离/6

Fig. 5 Preliminary seismic record section of OBS23. The reduced velocity (v_r) is $6\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, the reduced time (t_r) = travel time - distance/6

参考文献

- [1] 孙枢. 将我国深海大洋研究推向新阶段 [J]. 地球科学进展, 2003, 18(5): 653.
- [2] 汪品先. 走向地球系统科学的必由之路 [J]. 地球科学进展, 2003, 18(5): 795-796.
- [3] 汪品先. 穿凿地球系统的时间隧道 [J]. 中国科学: D 辑, 2009, 39(10): 1313-1338.
- [4] 曾志刚, 翟世奎, 杜安道. 大西洋洋中脊 TAG 热液区中块状硫化物的 Os 同位素研究[J]. 沉积学报, 2002, 20(3): 394-398.
- [5] 卜文瑞, 石学法. 大洋中脊地质研究的进展与趋势 [J]. 海洋科学进展, 2003, 21(4): 482-486.
- [6] 薛发玉, 翟世奎. 大洋中脊研究进展 [J]. 海洋科学, 2006, 30(3): 66-72.
- [7] 陈永顺. 海底扩张和大洋中脊动力学问题概述[C]//地球的结构、演化和动力学. 北京: 高等教育出版社, 2003. 283-317.
- [8] 中国大洋钻探学术委员会. 中国加入综合大洋钻探(IODP)科学计划(2003—2013) [J]. 地球科学进展, 2003, 18(5): 662-665.
- [9] 田丽艳, 林间. 全球大洋中脊研究十年科学规划 (2004—2013) [J]. 海洋地质动态, 2004, 20(3): 10-15.
- [10] PURDY G M L, KONG S L, CHRISTESON G L, et al. Relationship between spreading rate and the seismic structure of mid-ocean ridge [J]. Nature, 1992, 355: 815-817.
- [11] MORGAN J P, CHEN Y C. Dependence of ridge-axis morphology on magma supply and spreading rate [J]. Nature, 1993, 364: 706-708.
- [12] DICK H J B, LIN J, SCHOUTEN H. An ultraslow-spreading

- class of ocean ridge [J]. *Nature*, 2003, 426: 405–412.
- [13] CANNAT M, ROMMEVAUX-JESTIN C, SAUTER D, et al. Formation of the axial relief at the very slow spreading Southwest Indian Ridge (49° to 69°E) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 2825–2843.
- [14] SAUTER D, PATRIAT P, ROMMEVAUX-JESTIN C, et al. The Southwest Indian Ridge between 49°15'E and 57°E: Focused accretion and magma redistribution [J]. *Earth and Planetary Science Letter*, 2001, 192: 303–317.
- [15] SINHA M, CONSTABLE S, PEIRCE C, et al. Magmatic processes at slow spreading ridges: implications of the RAMESSES experiment at 57°45'N on the Mid-Atlantic Ridge [J]. *Geophysical Journal International*, 1998, 135: 731–745.
- [16] CHEN Y J. Dependence of crustal accretion and ridge axis topography on spreading rate, mantle temperature, and hydrothermal cooling[C]//DILEK Y, MOORES E M, ELTHON D. Ophiolites and oceanic crust—New insights from field studies and the Ocean Drilling Program: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 349. 2000: 161–179.
- [17] KONG L S L, Solomon S C, Purdy G M. Microearthquake characteristics of a mid-ocean ridge along-axis high [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97: 1659–1685.
- [18] HOOFT E E E, DETRICK R S, TOOMEY D R, et al. Crustal thickness and structure along three contrasting spreading segments of the Mid-Atlantic Ridge, 33.5°–35°N [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(B4): 8205–8226.
- [19] CANALES J P, COLLINS J A, ESCARTIN J, et al. Seismic structure across the rift valley of the Mid-Atlantic Ridge at 23°20'N (MARK area): Implications for crustal accretion processes at slow spreading ridges [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 28, 411–28,425.
- [20] CANALES J P, SINGH S, CARBOTTE S, et al. Seismic evidence for variations in axial magma chamber properties along the southern Juan de Fuca Ridge [J]. *Earth and Planetary Science Letter*, 2006, 246: 353–366.
- [21] NAVIN D, PEIRCE C, and SINHA M. The RAMESSES experiment-II Evidence for accumulated melt beneath a slow spreading ridge from wide-angle refraction and multichannel reflection seismic profiles [J]. *Geophysical Journal International*, 1998, 135: 746–772.
- [22] DUNN R A, LEKIC V, DETRICK R S, et al. Three-dimensional seismic structure of the Mid-Atlantic Ridge (35°N): Evidence for focused melt supply and lower crustal dike injection[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: B09101. doi: 10.1029/2004JB003473.
- [23] SEHER T, CRAWFORD W C, SINGH S C, et al. Crustal velocity structure of the Lucky Strike segment of the Mid-Atlantic Ridge at 37°N from seismic refraction measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: B03103. doi: 10.1029/2009JB006650.
- [24] CHEN Y J. Influence of the Iceland mantle plume on crustal accretion at the inflated Reykjanes ridge: magma lens and low hydrothermal activity? [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 (B11): 2524–2536. doi: 10.1029/2001JB000816.
- [25] HOSFORD A, LIN J, and DETRICK R S. Crustal evolution over the last 2 m.y. at the Mid-Atlantic Ridge OH-1 segment, 35°N [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 13 269–13 285.
- [26] DETRICK R, NEEDHAM H, and RENARD V. Gravity anomalies and crustal thickness variations along the Mid-atlantic Ridge between 33°N and 40°N [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100 (B3): 3767–3787.
- [27] PARSON L, GRÁCIA E, COLLIER D, et al. Second-order segmentation; the relationship between volcanism and tectonism at the MAR, 38°N–35°40'N [J]. *Earth and Planetary Science Letter*, 2000, 178: 231–251.
- [28] TAO C H, LIN J, GUO S, et al. Discovery of the first active hydrothermal vent field at the ultraslow spreading Southwest Indian Ridge [J]. *InterRidge News*, 2007, 16: 25–26.
- [29] 阮爱国, 李家彪, 陈永顺, 等. 国产 I-4C 型 OBS 在西南印度洋中脊的试验[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(4): 1015–1018.
- [30] SINGH S C, CRAWFORD W C, CARTON H, et al. Discovery of a magma chamber and faults beneath a Mid-Atlantic Ridge hydrothermal field [J]. *Nature*, 2006, 442: 1029–1032.
- [31] BAZIN S, HARDING A J, KENT G M, et al. A three-dimensional study of crustal low velocity region beneath the 9°03'N overlapping spreading center [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(2): 1039. doi: 10.1029/2002GL015137.
- [32] CANN J R, STRENS M R, RICE A. A simple magma-driven thermal balance model for the formation of volcanogenic massive sulphides [J]. *Earth and Planetary Science Letter*, 1985, 76: 123–134.
- [33] LISTER C R B. On the penetration of water into hot rock [J]. *Geophys J R Astron Soc*, 1974, 39: 465–509.
- [34] WILCOCK W S D, DELANEY J R. Mid-ocean ridge sulfide deposits: Evidence for heat extraction from magma chambers or cracking fronts? [J]. *Earth and Planetary Science Letter*, 1996, 145: 49–64.
- [35] CANN J R, STRENS M R. Black smokers fuelled by freezing magma [J]. *Nature*, 1982, 298: 147–149.
- [36] MARTINEZ F, TAYLOR B, BAKER E T, et al. Opposing trends in crustal thickness and spreading rate along the back-arc Eastern Lau Spreading Center: Implications for controls on ridge morphology, faulting, and hydrothermal activity [J]. *Earth and Planetary Science Letter*, 2006, 245: 655–672.
- [37] DUNN R A, TOOMEY D R, and SOLOMON S C. Three dimensional seismic structure and physical properties of the crust and shallow mantle beneath the East Pacific Rise at 9°30'N [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 23537–23555.
- [38] QIU J. China outlines deep-sea ambitions [J]. *Nature*, 2010, 466: 166.