

大洋核杂岩与拆离断层研究进展^{*}

于志腾¹, 李家彪^{1*}, 丁巍伟¹, 张 洁^{1,2}, 梁裕扬¹, 朱 磊³

(1. 国家海洋局 第二海洋研究所, 浙江 杭州, 310012; 2. 浙江大学 地球科学系, 浙江 杭州, 310027;

3. 中国大洋矿产资源研究开发协会, 北京, 100860)

摘 要:大洋核杂岩和拆离断层是洋中脊中发育的重要构造, 被广泛关注。拆离断层一般为长期活动的, 低角度的, 大断距的正断层, 绝大多数形成于慢速和超慢速扩张洋中脊的内侧角上, 其将地壳深部和上地幔的物质拆离到海底面形成大洋核杂岩。大洋核杂岩因其表面发育了窗棱构造, 在多波束图像上更容易识别。大洋核杂岩所处的地壳年龄较年轻, 为 0~10 Ma。洋中脊半扩张速率约为 10 mm/a, 具有不对称扩张的特点, 有拆离断层的一侧扩张速率更快。在大洋核杂岩取得的岩芯中代表性岩石为辉长岩, 地震资料解释认为大洋核杂岩下具有一个大的辉长岩侵入体。发育大洋核杂岩和拆离断层的区域有升高的布格重力异常, 高的 P 波速度和抬升的莫霍面。拆离断层起源于岩浆供给不足的区域, 大多在大洋中脊洋脊段(segment)的末端, 其演化会受到上地幔辉长岩体侵入的影响, 通过旋转铰链的模式进行。总结了全球大洋核杂岩和拆离断层的分布情况, 讨论了其岩石特征、地球物理场特征, 探讨其成因机制和演化模式, 并探讨了未来的研究方向。

关键词:拆离断层; 大洋核杂岩; 窗棱构造; 辉长岩; P 波速度; 不对称扩张; 岩浆供给; 起源与演化

中图分类号: P736

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2014)03-0415-12

在传统的洋中脊模型中, 扩张中心处岩浆的充分供给和两侧朝向扩张中心的短断距高角度的正断层共同导致了新洋壳的产生^[1]。然而, 在慢速扩张或超慢速扩张洋中脊, 有拆离断层(detachment faults)发育的洋中脊是新洋壳形成的另一种模式。大洋拆离断层是发育在洋脊段末端内侧角上的、长时间活动(1~2 Ma)的、大断距(>10 km)的、低角度(15°~30°)的正断层^[2-4]。大洋中拆离断层一般与大洋核杂岩(Oceanic core complexes)相伴相生。大洋核杂岩是由拆离断层将地壳深部和上地幔的物质拆离到洋底表面并在表面形成窗棱构造的一种特殊的穹状构造单元^[1,5]。Buck^[6]最早称其为核杂岩块体, Tucholke 等^[5]称其为大洋变质核杂岩, 国内学者称之为海洋核杂岩^[7]。Cann 等^[8]在大西洋 30°N 第一次将大洋核杂岩从地貌上清晰地标识出来后, 一系列的大洋核杂岩在慢速和超慢速扩张洋中脊被发现, 它们成为大洋中脊研究的焦点之一, 它们的形成演化也是未来 IODP 10 年发展计划中的重要科学问题之一^[9]。

低角度的拆离断层已经被认为是一个重要的洋脊扩张过程^[10], 超过 20 多个拆离断层面被研究^[11-15]。大洋核杂岩和拆离断层暴露了地壳深部和上地幔的物质, 是直接观察地球深部结构的窗口^[16], 在新生洋壳的产生和演化中起着重要的作用, 并且可以观察洋中脊内部岩浆活动与构造运动之间的相互作用。大洋核杂岩和拆离断层的发现, 丰富了洋中脊扩张类型, 非对称的扩张模式与传统的对称扩张的洋脊有着明显的不同, 对认识地球深部结构、扩张中心岩浆供给、热液循环和成矿作用具有重要意义, 它们可能在慢速和超慢速扩张洋中脊的扩张中发挥着更为重要的作用。尽管对于大洋核杂岩和拆离断层的研究已经引起国外学者足够多的重视, 然而在国内的研究还停留在较为基础的阶段。近年随着对西南印度洋研究工作的深入, 对于大

^{*} 收稿日期: 2013-09-12

资助项目: 国家自然科学基金重点项目——南海西南次海盆中脊 3D 地震成像及其构造演化(91028006); 中国大洋协会十一五研究课题——西南印度洋中脊热液压 OBS 深部构造及其动力过程的综合研究(DYXM-15-02-3-01); 国家自然科学基金青年科学基金——南海东北部俯冲边界构造演化特征(41206046)

作者简介: 于志腾(1988-), 男, 山东威海人, 硕士研究生, 主要从事海洋地质方面研究。E-mail: zhitengy@gmail.com

^{*} 通讯作者, E-mail: jbli@sio.org.cn

(陈 靖 编辑)

洋核杂岩和拆离断层的研究才逐渐增多。我们在总结前人研究的基础上,着重介绍它们的地貌特征、岩石特征、地球物理场特征、扩张模式,探讨其起源与演化,引出亟待解决的科学问题,并对以后的研究方向和研究方法做一定的展望。

1 大洋核杂岩和拆离断层的识别

1.1 地形地貌特征

大洋核杂岩暴露的区域表面的几何特征和拆离断层的表面特征可以通过多波束图像和侧扫声纳图像很好地呈现出来。拆离断层系统在多波束图像上的特征:1)一条与磁异常条带平行的山脊,定义为线形山脊^[1],也称为脱离带,标志着拆离断层的开端;2)相对窄的沉降地壳;3)包含窗棱构造的穹状平坦区域(大洋核杂岩);4)末端^[5]。如图1所示。图1中表示的是4个不同区域的典型的大洋核杂岩构造:北大西洋13°N大洋核杂岩,北大西洋15°45'N西洋大洋核杂岩,Kane Megamullion和 Atlantis Massif。

大洋核杂岩在多波束图像上的特征是:1)范围宽阔、外形呈穹状、沿着扩张方向延伸;2)表面有擦痕,可形成向斜和背斜,其轴部方向与磁异常条带平行,称为窗棱构造,可以延伸几米到几百米的距离不等^[12,15,17-18]。大洋核杂岩和拆离断层规模大多在数十千米的量级,大洋核杂岩的穹状面通常比周围洋底的平均深度浅1~2 km^[16],穹状面大小通常在15~32 km²的范围变化,拆离断层的下盘面积通常在约100~400 km²变化^[5],在大洋核杂岩的擦痕表面末端呈现出5°~15°的倾角。

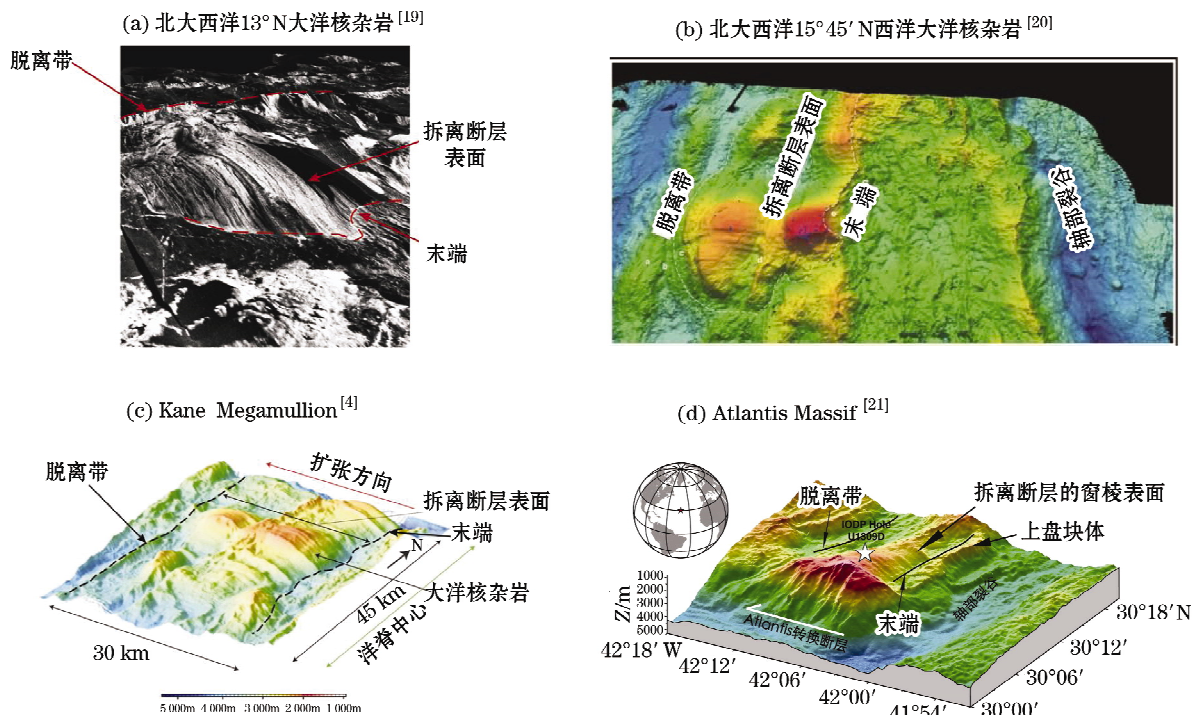


图1 大洋核杂岩和拆离断层的多波束图像和侧扫声纳图像^[4,19,20-21]

Fig. 1 The multibeam bathymetry image and sidescan sonar imagery of OCCs and detachment faults on the mid-ocean ridges^[4,19,20-21]

对全球范围内发现的大洋核杂岩和拆离断层进行汇总,发现它们通常出现在超慢速、慢速和中速扩张的洋中脊区域,在快速扩张的洋中脊区域还没有发现大洋核杂岩^[16],见表1。

表 1 全球已确定的大洋核杂岩分布列表
Table 1 The Global distribution of oceanic core complexes

序 号	名称或经纬度	区 域	参考文献
1	5°S	南大西洋	Reston 等 ^[26]
2	130°N	北大西洋	Smith 等 ^[21]
3	Logachev massif	北大西洋	Fujiwara 等 ^[12]
4	15°45'N	北大西洋	Macleod 等 ^[19]
5	Kane Megamullion	北大西洋	Macleod 等 ^[18]
6	TAG Massif	北大西洋	deMartin 等 ^[34]
7	Dante's Dome	北大西洋	Tucholke 等 ^[5]
8	Atlantis Massif	北大西洋	Cann 等 ^[8]
9	Saldanha Massif	北大西洋	Miranda 等 ^[35]
10	Atlantis Bank	西南印度洋	Baines 等 ^[36]
11	Fuji Dome	西南印度洋	Searle 等 ^[30]
12	62°~65°E	西南印度洋	Cannat 等 ^[37]
13	Vityaz Megamullion	中印度洋	Drobia 等 ^[31]
14	25°S	中印度洋	Mithell 等 ^[32]
15	125°E	东南印度洋	Okino 等 ^[9]
16	Godzilla Megamullion	菲律宾海	Ohara 等 ^[33]

1.1.1 大西洋区域

大西洋中脊(MAR)30°N 区的大洋核杂岩和拆离断层是最早被识别的区域^[8]。在北大西洋 13°N 区, Smtih 等^[22]认为这里附近分布着 4 个大洋核杂岩构造, 其中一个典型构造如图 1a 所示; 在 Fifteen-Twenty 断裂带和 Marathon 断裂带之间的 14°00'~16°30'N 区, Smith 等^[23]认为此区的大洋核杂岩构造有 40 多个, 其中一个典型构造如图 1b 所示; 在 23°N 区, 发现了 Kane Megamullion^[4-5,24], 如图 1c 所示; 在 30°N 区, 发现研究最为深入的大洋核杂岩构造之一: Atlantis Massif^[8,25-26], 如图 1d 所示。在南大西洋 5°S 区域也有发现大洋核杂岩构造, 该大洋核杂岩经过后期的裂谷作用, 被分成了东西两部分^[27]。

1.1.2 印度洋区域

在超慢速扩张的西南印度洋中脊(SWIR)的 57°E 地区, Atlantis Bank 是最早在超慢速扩张洋中脊发现的大洋核杂岩^[28-29]; Cannat 等^[30]指出在西南印度洋的 61°~67°E 有 4% 的区域被窗棱表面覆盖; 在 64°E 也发现了大洋核杂岩: Fuji Dome^[31]。在中印度洋中脊(CIR)的 5°S^[32]和 25°15'S^[33]区域也有发现大洋核杂岩。在东南印度洋中脊(SEIR)的澳大利亚-南极不整合带(AAD)区域, Okino 等^[10]做了大量的研究, 在不对称扩张的区域发现了拆离断层。

1.1.3 太平洋区域

在太平洋的菲律宾海地区, Ohara 等^[34]在 Parece Vela 盆地发现了大规模的窗棱构造, 这些窗棱构造, 与其他慢速和超慢速洋中脊发育的大洋核杂岩的窗棱构造相比, 规模更大, 从脱离带到末端, 拆离断层延伸宽度约为 125 km, 它们的表面形态有很多相似之处。在菲律宾海的 Parece Vela 盆地和澳大利亚-南极不整合带发现的大洋核杂岩是目前在中速扩张洋中脊仅有发现的 2 处, 具有重要的研究价值。

对全球已发现的大洋核杂岩和拆离断层区域与地壳年龄和洋脊扩张速率联系起来(图 2 和图 3), 其中, 洋脊扩张速率数据来自 <http://www.earthbyte.org>^[39], 洋脊边界数据来自 <ftp://ig.utexas.edu/pub/PLATES/Data/>^[40]。从图中发现它们存在地区洋脊的扩张速率约为 10 mm/a, 地壳年龄为 0~10 Ma。为何它们大部分分布在扩张速度较慢的扩张洋脊上, 这可能与相对于快速的扩张洋脊, 慢速扩张的洋脊更容易

发生岩浆供给不足的情况,而岩浆供给不足是拆离断层发育的一个重要因素,下文将有更详细的阐述。大洋核杂岩和拆离断层存在的广泛性说明它们是在慢速扩张洋脊中的一个重要过程,对它们的研究可以加深我们对海底扩张和新洋壳产生的理解。

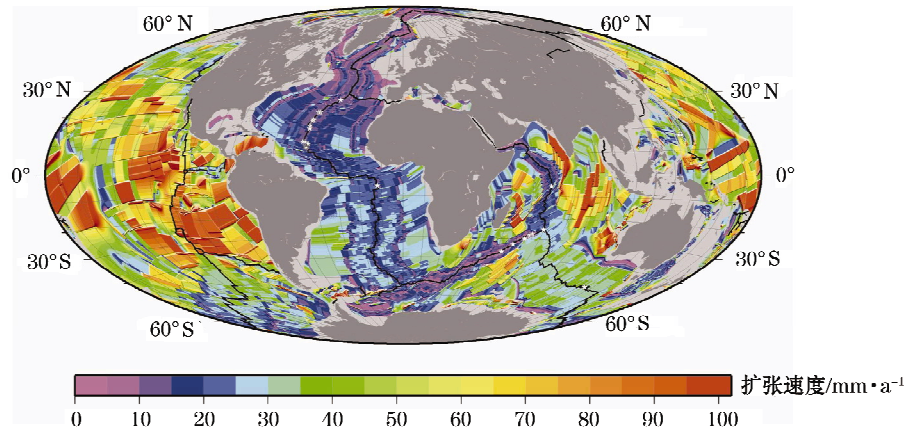


图2 大洋核杂岩和拆离断层(白色星星)随洋脊扩张速率的分布^[39-40]

Fig. 2 The distribution of OCCs and detachment faults (white stars) along with the spreading rates of mid-ocean ridges^[39-40]

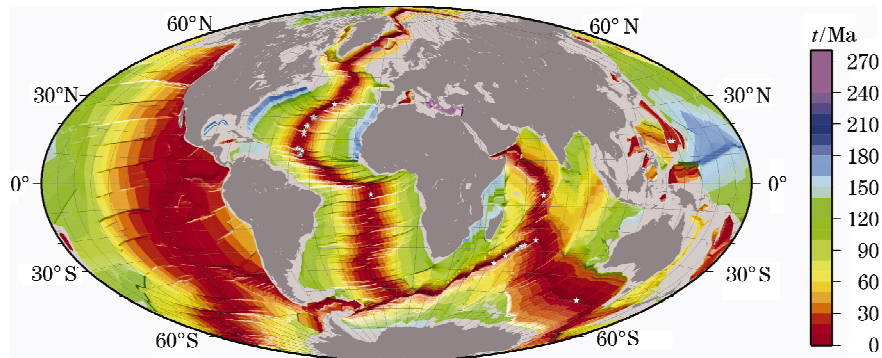


图3 大洋核杂岩和拆离断层(白色星星)随洋壳年龄的分布^[39-40]

Fig. 3 The distribution of the OCCs and detachment faults (white stars) along with crustal age^[39-40]

1.2 岩石学特征

大洋核杂岩和与之相关的拆离断层的下盘通常暴露出地幔岩石或者次火山的物质,如辉长岩和蛇纹石化的橄榄岩^[22],也有升高的布格重力异常^[41]。为了了解大洋核杂岩地区的岩石学特征,已经有3个在大洋核杂岩的表面取得了岩芯,分别是北大西洋中脊的15°45'N的IODP 1275D站位、北大西洋中脊30°N Atlantis Massif的IODP 1039D站位和西南印度洋中脊的Atlantis Bank ODP 735B站位,钻井深度分别为200, 1 415和1 500 m^[42-44]。这些取得的岩芯都表明,岩芯的大部分为辉长岩,也有部分的蛇纹石化的橄榄岩,很少有玄武岩的存在。其中,1039D站位和735B站位岩芯内岩石类型变化如图4所示^[21,48],mbsf为岩芯距离洋底面的深度(meter below seafloor)。在北大西洋中脊的30°N的Atlantis Massif的穹状面进行的IODP钻探,取得岩芯中,认为其中91.4%的岩芯是辉长岩,5.7%是少量的超基性岩石,2.9%的是拉斑玄武岩或辉绿岩^[43],如图4。1309D站位的钻探结果可以推断大洋核杂岩下有一个大的辉长岩侵入体。在对西南印度洋Atlantis Bank进行的ODP钻探取得的岩芯分析认为,其中76%为辉长岩、橄榄石辉长岩、橄长岩,24%为氧化的辉长岩和少量的长英脉体,氧化的辉长岩分布于整个岩芯,集中在上部的1 100 m^[44-45],如

图 4。Dick 等^[28]认为 Atlantis Bank 大洋核杂岩暴露的辉长岩和橄榄岩至少有 35 km,方向与扩张方向平行,在 ODP 735B 取得的辉长岩内也发现了高温塑性变形的构造。在 Atlantis Bank 的深潜器调查发现,拆离断层的表面暴露大量的氧化的辉长岩^[46]。Devey 等^[47]在南大西洋中脊 5°S 区的条痕状表面取样,得到了橄榄岩,还有小数量的辉长岩。Reston 等^[27]同样在该区的陡坡上取得了辉长岩。Macleod 等^[20]对北大西洋中脊 15°45'N 的调查认为,该地区大洋核杂岩的下盘暴露着蛇纹岩化的斜方橄榄岩、纯橄榄岩和橄长岩,在末端区域有辉长岩;深潜器 Shinkai 6500 号在窗棱构造表面取样也证实其主要暴露的是辉长岩和地幔橄榄岩^[18]。因此,辉长岩是大洋核杂岩和拆离断层的一个重要的组成部分,它们暴露出更深部的岩石,存在一个大的辉长岩侵入体。

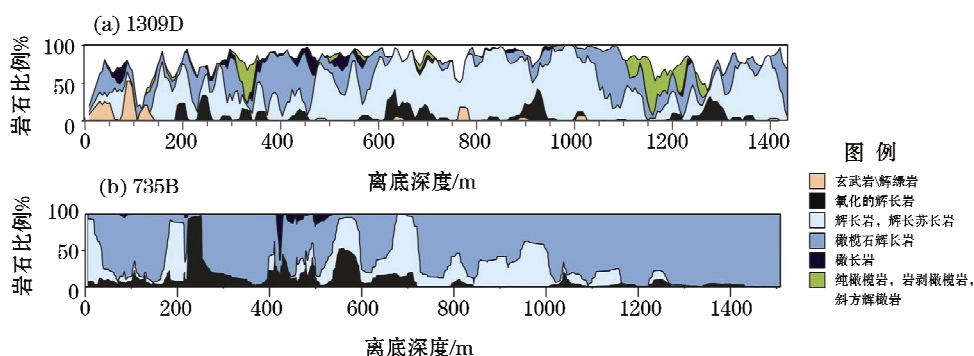


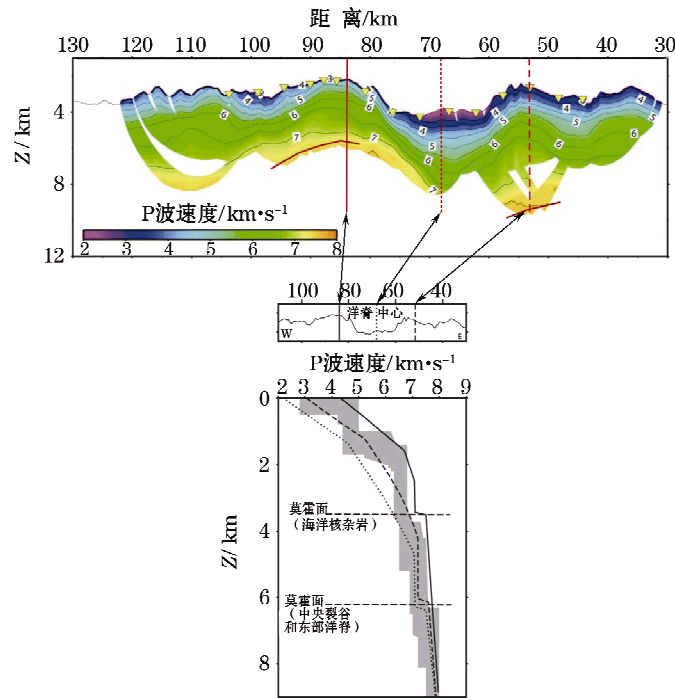
图 4 1039D 和 735B 岩芯内岩石类型变化图^[21,48]

Fig. 4 Summary of lithology in boreholes 1039D and 735B^[21,48]

1.3 地球物理综合特征

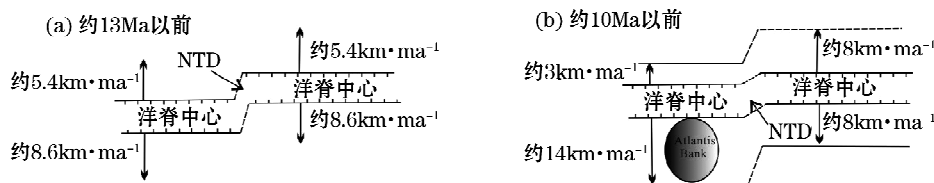
大洋核杂岩存在的地区通常会有高的重力异常值。在移除自由空气重力异常中地形的影响因素后,大洋核杂岩处仍然会呈现 10~20 毫伽的高的布格重力异常^[5,11-13],这说明大洋核杂岩下的地壳更薄。Blackman 等^[49]在研究 Atlantis Massif 的重力资料时,发现大洋核杂岩区域有明显的升高的布格重力异常。沿着大洋核杂岩的重力模型可以用来估测表面的密度分布。许多学者认为穹状面下的岩层密度比其他有火山块体覆盖的区域密度高 200~400 kg/m⁻³,高的密度带发生在穹状面下^[12,51,50-51]。在大洋核杂岩下和相邻块体之间密度分布的不同可能是辉长岩与火山岩密度差异的一种体现。

在大洋核杂岩和拆离断层处所做的地震测线,揭示出在穹顶面下的 P 波速度更快,莫霍面有明显的抬升^[52-53]。从 Dannowski 等^[52]在北大西洋 22°19'N 的大洋核杂岩区域做的 OBH 测线的地震解释结果可知(图 5):从扩张中心到拆离断层发育地区大约 5~7 km 的范围内,P 波速度增加很快,从 2.3 m/s 增加到 4.5 m/s。拆离断层发育的部分下部的地壳 P 波速度更快,在 1.5 km 的范围内 P 波速度增加到了 7 km/s,这与我们认为的大洋核杂岩下有大的辉长岩体相一致^[53]。Ohara 等^[53]对 Paece Vela 盆地的地壳 P 波速度结构分析后认为有擦痕表面的地壳更薄,变化从 3.4~5.5 km,P 波速度变化更快,达到 >6 km/s。Planert 等^[54]在南大西洋的地震探测结果也证实了在拆离断层窗棱构造下的浅地层有升高的 P 波速度(6~7 km/s),支持了辉长岩体的存在。在脱离带下的速度更低,也说明拆离断层刚发育时的地壳速度低,而后由于拆离断层的作用,辉长岩的侵入使拆离面下的 P 波速度更快。

图5 P波速度随洋壳深度变化图^[52]Fig. 5 P-wave velocity versus depth profiles^[52]

1.4 拆离断层的扩张模式

在传统的洋中脊扩张模型中,有2种扩张模式:对称扩张和不对称扩张^[2]。对称扩张的模式已经被广泛研究,洋脊受到岩浆充分供给的作用,在两侧形成了高角度的断层和对称的深海丘陵。随着对拆离断层的研究,不对称扩张的模式被重视起来。Okino等^[10]对澳大利亚-南极不整合带的研究认为:拆离断层在其演化过程中扮演着重要的角色,表明该区域有很少的岩浆供给和极其不对称的扩张。Escartín等^[28]认为北大西洋 $12^{\circ}30' \sim 35^{\circ}00'N$ 50%的地区都是不对称扩张的。拆离断层通常发育在非转换不连续带的内侧角,导致内侧角扩张速率比外侧角更快,使拆离断层可以延伸到非转换不连续带更老的一侧^[10],使非连续不转换带的间距变短,如图6所示,在西南印度洋 Atlantis Bank 处的大洋核杂岩发现了这种现象^[29]。古地磁的证据也证明了这一点,在澳大利亚-南极不整合断裂带区域发现的拆离断层区域有明显的不对称扩张的特点,有拆离断层的一侧磁异常条带之间的范围更大^[10]。Smith等^[55]通过对大西洋中脊 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}N$ 的地震研究发现在断距大于5 km的地区,66%的地震事件是发生在内侧角的,显示出内侧角地壳更薄,这也与不对称扩张的观念相符合。不对称扩张可以作为发育拆离断层和大洋核杂岩的重要特征之一,这种模式受到岩浆供给和构造作用的双重影响,需要进一步的研究才能明白它们之间的相互关系。

图6 拆离断层的不对称扩张示意图^[29]Fig. 6 A mode of asymmetric spreading of detachment faults^[29]

2 大洋核杂岩和拆离断层的起源和演化

2.1 岩浆供给

大多数学者认为大洋核杂岩和拆离断层更容易发生在岩浆供给不足的区域,像在快速扩张的东太平洋洋脊是不太可能有大洋核杂岩构造,除非有特殊的条件才能发生^[16-17]。Cannat 等^[88]在西南印度洋洋脊东部的岩浆供给不足的地方发现了 39 处波痕状的表面,认为擦痕表面的形成需要在全洋脊岩浆供给平均值一半的地方,拆离断层底层进一步地削弱才能形成。Cannat 等^[80]对西南印度洋脊和 Smith 等^[22]对北大西洋的 13°N 区域的研究发现,大洋核杂岩和拆离断层可以发生在洋脊段的任何地方。Escartín 等^[56]对大西洋 15°45'N 区域研究认为,岩浆供给不足并不是拆离断层发生的必需条件,拆离断层可以起源于岩浆供给丰富的地区。基于此,Olive 等^[3]对大洋核杂岩和拆离断层的形成进行数值模拟分析,注意到它们的形成受到脆性岩石圈岩浆的侵入的影响,而脆韧性转换带下的岩浆的侵入是对于大洋核杂岩的发育没有影响的,大洋核杂岩之所以能够在岩浆侵入多的地方形成,是因为岩浆侵入是发生在韧性的软流圈内的,对于大洋核杂岩的发育影响很小,这就解释了大洋核杂岩能够出露在岩浆供给多的地方。因此我们可以认为,大洋核杂岩和拆离断层的形成最开始是受到岩浆供给的变少,地壳冷却造成的。

2.2 大洋核杂岩和拆离断层的起源

岩浆供给和动力过程的时空变化的多样性,导致了大洋核杂岩构造上的多样性,基于此,许多学者提出了不同的模型。Escartín^[56]通过对拆离断层表面取得的岩石进行分析发现,断层下盘岩石大多是没有变形的橄榄岩和被辉绿岩墙切割的辉长岩,显示出很少的脆性和与熔岩有关的变形,所以认为拆离断层起源于浅的、冷的岩石圈,在岩浆活动的时期仍然活动,辉长岩随着拆离断层的发育侵入到地壳,提供一定的热源,如图 7a。Tucholke 等^[5]认为由拆离断层形成的大洋核杂岩起源于岩石圈的底部,拆离断层一侧的不对称扩张和拆离断层的发育导致暴露出深部岩石圈的物质,如图 7b。Dick 等^[28]认为,拆离断层可能起源于靠近扩张中心的岩浆供给丰富的地方或者附近,在拆离断层的持续的岩浆过程导致暴露出高温变形的辉长岩,如图 7c。在大洋核杂岩表面发现了大量来自岩石圈深部的物质,而钻井资料和拖网资料都显示出其下存在着辉长岩侵入体,可以认为大洋核杂岩已经将深部物质拆离出洋底面,下地壳很有可能已经拆离到洋底面,岩浆供给的减少也是拆离断层发育的特征之一。因此,Tucholke 等的观点更为合理,也被广泛接受。

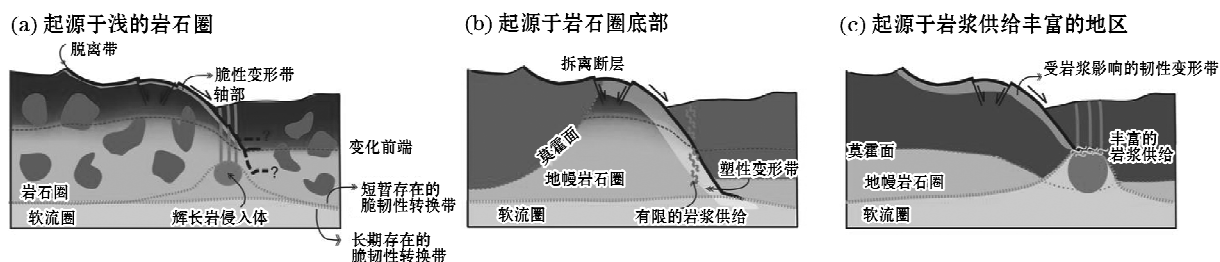


图 7 拆离断层起源的模型图^[56]

Fig. 7 A model of the origination of detachment faults^[56]

2.3 大洋核杂岩和拆离断层的演化

对于拆离断层的演化,学者做了很多的研究^[2,5,19,23,57]。Tucholke 等^[5]最早提出了拆离断层的演化模式,他们认为拆离断层在脆韧性转换带下的塑性带形成一个正断层,且正断层继续发育直到被后来的岩浆活

动中断,形成新的断层。另一种观点认为有 2 种模式的拆离断层^[23,57],一种是暴露出大洋核杂岩的拆离断层,另一种是表面覆盖着相对一系列的较小的块体的拆离断层。2 种拆离断层通过一个旋转铰链(Rolling Hinge)的机制形成^[6],它们的不同之处在于断层是否能够被“锁住”(lock up),如果断层被锁住,就会在拆离断层表面形成一系列的新断层,叫做竹筏状块体(rafted blocks);如果没有被锁住,在洋脊段的末端,断层会继续滑脱形成大洋核杂岩,如图 8^[57]。从这个意义上看来,拆离断层存在的区域可能比现在所发现的拆离断层的区域大得多,更多的拆离断层可能是埋藏于基底,辨别它们更加困难,而且当拆离断层延伸到整个段的时候是否会被后期增强的岩浆作用所代替也是不明确的。“锁住”所控制的是断层能否活动,如果“锁住”就意味着不活动,会形成新的断层和一些列的竹筏状块体;没有“锁住”就意味着活动,断层进一步发育形成大洋核杂岩。根据传统的摩尔-库伦条件,断层在倾角是 35° 以下才能够继续活动,在实际发育的拆离断层,这个角度可能会更低。图 9 为推测的大洋核杂岩和拆离断层的内部结构^[57],可以与图 1(a)中的侧扫声呐图像很好得对应起来,在洋脊段末端岩浆供给少,发育大洋核杂岩,而在洋脊段中心岩浆增多,不容易暴露出大洋核杂岩。

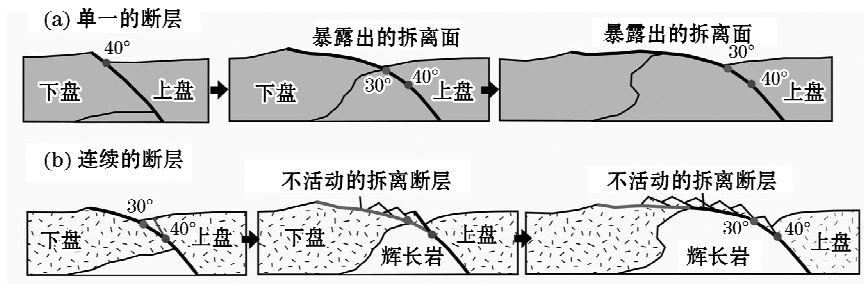


图 8 拆离断层形成的旋转铰链(Rolling Hinge)模型^[57]

Fig. 8 The Rolling Hinge model of the formation of detachment faults^[57]

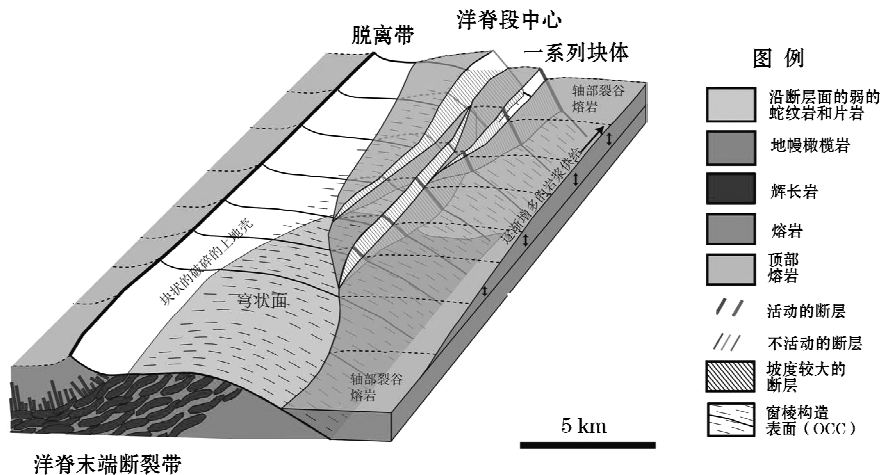


图 9 发育大洋核杂岩和拆离断层的慢速扩张洋脊段末端的地壳结构^[57]

Fig. 9 The crustal structure of segment end on the slow-spreading ridges, where the OCCs and detachment faults developed^[57]

3 展 望

大洋中脊是观察地球内部结构的窗口,而大洋核杂岩和拆离断层是大洋中脊中重要的组成部分,大洋中脊附近广泛发育的大洋核杂岩和拆离断层为我们展示了一种新的地貌形。随着研究的深入,关于它们的构造、成因、演化还有许多问题亟需解决。

1) 岩浆供给量与大洋核杂岩和拆离断层形成之间的关系还是需要进一步地研究。岩浆供给的减少是否是拆离断层形成的关键因素? 还是拆离断层的发育导致了岩浆供给的变化? 这些都需要更多的地球物理资料、数值模拟和物理模拟研究来证实。

2) 大洋核杂岩和拆离断层的发育通常会和热液活动联系起来,对于它们的热液通道、形成机理等研究,可以对大洋矿产调查具有重要的指示意义。

3) 在大洋核杂岩形成的扩张洋脊两侧的构造仍不清晰,尤其对于外侧角的岩石圈结构和特性研究很少,需要进一步地研究。

4) 南海存在着大量的残留扩张洋脊,其上有大量沉积物覆盖,在沉积层下是否也存在着大洋核杂岩和拆离断层,如果存在将对南海演化历史的重建具有重要的作用。

5) 大洋和大陆的核杂岩和拆离断层在形成机理和演化有何不同? 对于大陆裂解和海底扩张它们的作用是如何的?

参考文献(References):

- [1] SMITH D K, ESCARTÍN J, SCHOUTEN H, et al. Active long-lived faults emerging along slow-spreading Mid-Ocean Ridges[J]. *Oceanography*, 2012, 25(1): 94-99.
- [2] ESCARTÍN J, SMITH D K, CANN J, et al. Central role of detachment faults in accretion of slow-spreading oceanic lithosphere[J]. *Nature*, 2008, 455(7214): 790-794.
- [3] OLIVE J A, BEHN M D, TUCHOLKE B E. The structure of oceanic core complexes controlled by the depth-distribution of magma emplacement[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(7): 491-495.
- [4] CHADLE M J, GRIMES C B. To fault or not to fault[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(7): 454-456.
- [5] TUCHOLKE B E, LIN J, KLEINROCK M C. Megamullions and mullion structure defining oceanic metamorphic core complexes on the Mid-Atlantic Ridge[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(B5): 9857-9866.
- [6] BUCK W R. Flexural rotation of normal faults[J]. *Tectonics*, 1988, 7(5): 959-973.
- [7] LI S Z, LV H Q, HOU F H, et al. Oceanic Core Complex[J]. *Marine geology & Quaternary geology*, 26(1): 47-52. 李三忠, 吕海青, 侯方辉, 等. 大洋核杂岩[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(1): 47-52.
- [8] CANN J R, SMITH D K, MCALLISTER E, et al. Corrugated slip surfaces formed at North Atlantic ridge-transform intersections on the Mid-Atlantic Ridge[J]. *Nature*, 1997, 385(23): 329-332.
- [9] BICKLE M, ARCULUS R, BARRETT P, et al. Illuminating Earth's past, present, and future[J]. *The Science Plan for the International Ocean Discovery Program 2013-2023*. 2011: 42-43.
- [10] OKINO K, MATSUDA K, CHRISTIE D M, et al. Development of oceanic detachment and asymmetric spreading at the Australian-Antarctic Discordance[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2004, 5(12): 1-22.
- [11] TUCHOLKE B E, LIN J. A geological model for the structure of ridge segments in slow spreading ocean crust[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*(1978-2012), 1994, 99(86): 11931-11958.
- [12] BLACKMAN D K, CANN J R, JANSSEN B, et al. Origin of extensional core complexes: Evidence from the Mid-Atlantic Ridge at Atlantis Fracture Zone[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(B9): 21315-21333.
- [13] FUJIWARA T, LIN J, MATSUMOTO T, et al. Crustal evolution of the Mid-Atlantic Ridge near the fifteen-twenty fracture zone in the last 5 Ma[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(3): 1-25.
- [14] RANERO C R, RESTON T J. Detachment faulting at ocean core complexes[J]. *Geology*, 1999, 27(11): 983-986.
- [15] TUCHOLKE B E, J LIN, KLEINROCK M C, et al. Segmentation and crustal structure of the western Mid-Atlantic Ridge flank, 25°

- 25°-27°10'N and 0-29 m. y. [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B5): 10203-10223.
- [16] BLACKMAN D K, CANALES J P, IIARDING A. Geophysical signatures of oceanic core complexes[J]. *Geophysical Journal International*, 2009, 178(2): 593-613.
- [17] JOHN B E, CHEADLE M J. Deformation and alteration associated with oceanic and continental detachment fault systems; Are they similar? [J]. *Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges*, 2010: 175-205.
- [18] CANALES J P, TUCHOLKE B E, COLLINS J A. Seismic reflection imaging of an oceanic detachment fault; Atlantis megamullion (Mid-Atlantic Ridge, 30°10'N)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 222(2): 543-560.
- [19] MACLEOD C J, SEARLE R C, MURTON B J, et al. Life cycle of oceanic core complexes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 287(3): 333-344.
- [20] MACLEOD C J, CARLUT J, ESCARTÍN J, et al. Quantitative constraint on footwall rotations at the 15°45'N oceanic core complex, Mid-Atlantic Ridge; Implications for oceanic detachment fault processes[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2011, 12(5): 1-29.
- [21] MORRIS A, GEE J S, PRESSLING N, et al. Footwall rotation in an oceanic core complex quantified using reoriented Integrated Ocean Drilling Program core samples[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 287(1): 217-228.
- [22] SMITH D K, CANN J R, ESCARTÍN J. Widespread active detachment faulting and core complex formation near 13° N on the Mid-Atlantic Ridge[J]. *Nature*, 2006, 442(7101): 440-443.
- [23] SMITH D K, ESCARTÍN J, SCHOUTEN H, et al. Fault rotation and core complex formation; Significant processes in seafloor formation at slow-spreading mid-ocean ridges (Mid-Atlantic Ridge, 13°-15° N)[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(3): 1-23.
- [24] DICK H J B, TIVEY M A, TUCHOLKE B E. Plutonic foundation of a slow-spreading ridge segment; Oceanic core complex at Kane megamullion, 23°30'N, 45°20'W[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(5): 1-44.
- [25] BLACKMAN D K, KARSON J A, KELLEY D S, et al. Geology of the Atlantis Massif (Mid-Atlantic Ridge, 30° N); Implications for the evolution of an ultramafic oceanic core complex[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 23(5-6): 443-469.
- [26] KARSON J A, FRÜH-GREEN G L, KELLEY D S, et al. Detachment shear zone of the Atlantis Massif core complex, Mid-Atlantic Ridge, 30° N[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2006, 7(6): 1-29.
- [27] RESTON T J, WEINREBE W, GREVEMEYER I, et al. A rifted inside corner massif on the Mid-Atlantic Ridge at 5° S[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 200(73): 255-269.
- [28] DICK H J B, NATLAN J H, ALT J C, et al. A long in situ section of lower oceanic crust; Results of ODP Leg 176 drilling at the Southwest Indian Ridge[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 179(1): 31-51.
- [29] BAINES A G, CHEADLE M J, JOHN B E, et al. The rate of oceanic detachment faulting at Atlantis Bank, SW Indian Ridge[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 273(1-2): 105-114.
- [30] CANNAT M, SAUTER D, MENDEL V, et al. Modes of seafloor generation at a melt-poor ultraslow-spreading ridge[J]. *Geology*, 2006, 34(7): 605-608.
- [31] SEARLE R C, CANNAT M, FUJIOKA K, et al. FUJI Dome; A large detachment fault near 64 E on the very slow-spreading Southwest Indian Ridge[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(8): 1-25.
- [32] DROLIA R K, DEMETS C. Deformation in the diffuse India-Capricorn-Somalia triple junction from a multibeam and magnetic survey of the northern Central Indian ridge, 3-10 S[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2005, 6(9): 1-22.
- [33] MITHELL N C, ESCARTÍN J, ALLERTON S. Detachment faults at Mid-Ocean Ridges garner interest[C]. *Eos Transaction American Geophysical Union*, 1998, 79(10): 125-127.
- [34] OIIARA Y, YOSHIIDA T, KATO Y, et al. Giant Megamullion in the Parece Vela Backarc Basin[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2001, 22(1): 47-61.
- [35] deMARTIN B J, SOHN R A, PABLO CANALES J, et al. Kinematics and geometry of active detachment faulting beneath the Trans-Atlantic Geotraverse (TAG) hydrothermal field on the Mid-Atlantic Ridge[J]. *Geology*, 2007, 35(8): 711-714.
- [36] MIRANDA J M, SILVA P F, LOURENÇO N, et al. Study of the Saldanha Massif (MAR, 36°34'N); Constrains from rock magnetic and geophysical data[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2002, 23(4): 299-318.
- [37] BAINES A G, CHEADLE M J, DICK H J. Mechanism for generating the anomalous uplift of oceanic core complexes; Atlantis Bank, southwest Indian Ridge[J]. *Geology*, 2003, 31(12): 1105-1108.
- [38] CANNAT M, SAUTER D, ESCARTÍN J, et al. Oceanic corrugated surfaces and the strength of the axial lithosphere at slow spreading ridges[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 288(1-2): 174-183.
- [39] MÜLLER R D, SDROLIAS M, GAINA C, et al. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust[J]. *Geo-*

- chemistry, *Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(4): 1-19.
- [40] BIRD P. An updated digital model of plate boundaries[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(3): 1-52.
- [41] TUCHOLKE B E, BEHN M D, BUCK W R, et al. Role of melt supply in oceanic detachment faulting and formation of megamullions[J]. *Geology*, 2008, 36(6): 455-458.
- [42] KELEMEN P B, KIKAWA E, MILLER D J, et al. Leg 209 summary: processes in a 20-km-thick conductive boundary layer beneath the Mid-Atlantic Ridge, 14°–16° N[C]// *Proceedings of the ocean drilling program, scientific results*. College Station, TX: Ocean Drilling Program, 2007, 209: 1-33.
- [43] BLACKMAN D K, ILDEFONSE B, JOHN B E, et al. Drilling constraints on lithospheric accretion and evolution at Atlantis Massif, Mid-Atlantic Ridge 30° N[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012), 2011, 116(B7):1-25.
- [44] NATLAND J H, DICK H J B. Stratigraphy and composition of gabbros drilled in Ocean Drilling Program Hole 735B, Southwest Indian Ridge: a synthesis of geochemical data[C]// *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*. 2002, 176: 1-69.
- [45] JOHN B E, FOSTER D A, MURPHY J M, et al. Determining the cooling history of in situ lower oceanic crust-Atlantis Bank, SW Indian Ridge[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 222(1): 145-160.
- [46] SCHWARTZ J J, JOHN B E, CHEADLE M J, et al. Cooling history of Atlantis Bank oceanic core complex: Evidence for hydrothermal activity 2.6 Ma off axis[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2009, 10(8): 1-28.
- [47] DEVEY C W, GERMAN C R, HAASE K M, et al. The relationships between volcanism, tectonism, and hydrothermal activity on the Southern Equatorial Mid-Atlantic Ridge[J]. *Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges*, 2010, 188: 133-152.
- [48] ILDEFONSE B, BLACKMAN D K, JOHN B E, et al. Oceanic core complexes and crustal accretion at slow-spreading ridges[J]. *Geology*, 2007, 35(7): 623-626.
- [49] BLACKMAN D K, KARNER G D, SEARLE R C. Three-dimensional structure of oceanic core complexes: Effects on gravity signature and ridge flank morphology, Mid-Atlantic Ridge, 30° N[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(6): 1-20.
- [50] TUCHOLKE B E, JUIOKA K, ISHIHARA T, et al. Submersible study of an oceanic megamullion in the central North Atlantic[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(B8): 16145-16161.
- [51] NOONER S L, SASAGAWA G S, BLACKMAN D K, et al. Constraints on crustal structure at the Mid-Atlantic Ridge from seafloor gravity measurements made at the Atlantis Massif[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(8): 1446.
- [52] DANNOWSKI A, GREVEMEYER I, RANERO C R, et al. Seismic structure of an oceanic core complex at the Mid-Atlantic Ridge, 22°19'N[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(B7): 1-15.
- [53] OHARA Y, OKINO K, KASAHARA J. Seismic study on oceanic core complexes in the Parece Vela back-arc basin[J]. *Island Arc*, 2007, 16(3): 348-360.
- [54] PLANERT L, FLUEH E R, TILMANN F, et al. Crustal structure of a rifted oceanic core complex and its conjugateside at the MAR at 5 S: implications for melt extraction during detachment faulting and core complex formation[J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 181(1): 113-126.
- [55] SMITH D K, ESCARTÍN J, CANNAT M, et al. Spatial and temporal distribution of seismicity along the northern Mid-Atlantic Ridge (15°~35° N)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(B3): 1-22.
- [56] ESCARTÍN J, MÉVEL C, MACLEOD C J, et al. Constraints on deformation conditions and the origin of oceanic detachments: The Mid-Atlantic Ridge core complex at 15°45'N[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(8): 1-37.
- [57] RESTON T J, RANERO C R. The 3-D geometry of detachment faulting at mid-ocean ridges[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2011, 12(7): 1-19.

Progress in Researches on Oceanic Core Complexes and Detachment Faults

YU Zhi-teng¹, LI Jia-biao¹, DING Wei-wei¹, ZHANG Jie^{1,2}, LIANG Yu-yang¹, ZHU Lei³

(1. *The Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China;*

2. *Zhejiang University Department of Earth Science, Hangzhou 310027, China;*

3. *China Ocean Mineral Resources Research and Development Association, Beijing 100860, China*)

Abstract: Oceanic core complexes and detachment faults are important structures on mid-ocean ridges (MORs) and increasingly become a hot in recent decades. Oceanic core complexes have been widely identified from the multibeam bathymetry images due to their megamullion structure. Detachment faults are commonly long-lived low angle normal faults, and mostly occur at the inside corner of the slow or ultra-slow spreading ridges with dominant half-spreading rates of 0~10 mm. The detachment faults, with age range from 0Ma to 10Ma, are associated with asymmetric spreading, representing the spreading is faster and the detachment faults are active. Drilled cores obtained below the domes of oceanic core complexes indicate a giant gabbros incursion. Detachment faults are characterized by elevator residual Bouguer gravity anomaly, high P-wave velocity and uplifted Moho. It has been widely accepted that they would develop at the time when magma supply was limited, and would be controlled by the rolling-hinge model. In this paper, we systematically presented some aspects of oceanic core complexes and detachment faults, including their morphology, global distribution, lithology signatures, geophysical structure, evolutionary mechanism. Finally, we put forward some prospects on the research of oceanic core complexes and detachment faults in Chinese deep-sea geology and their research in the future.

Key words: oceanic core complexes; detachment faults; megamullion structure; gabbros; P-wave velocity; asymmetric spreading; magma supply; origin and evolution

Received: September 09, 2013