海底是扩张还是拉张*
—— 关于大洋中脊应力性质的新认识

THE SEA FLOOR: SPREADING OR TENSION—— A NEW VIEW ABOUT THE STRESS STATE OF MIDOCEAN RIDGE

史学建[1]　　彭　红[2]

([1] 中国科学院南京地理与湖泊研究所 210008)
([2] 河南大学地理系 开封 475001)

自 60 年代中期, 板块构造学说诞生以来, 关于板块运动的力学机制问题一直没有很好解决。大洋中脊是公认的重要板块分界线, 也是全球连续性最好最长的板块分界线, 对大洋中脊应力性质的认识将有利于探讨全球板块的运动机制。海底扩张学说为认识板块运动方向提供了许多令人信服的事实, 但是, 其运动力学机制并非符合后来发现的一些新的事实。本文试图进一步阐明海底是主动扩张还是被动拉张。

1　海底扩张说的发展回顾

海底扩张一词源于本世纪 60 年代, 美国地质学家 **Hess** (1962) 和 **Dietz**(1961) 在地幔对流的基础上提出海底扩张学说, 认为大洋中脊顶部是地幔物质上升的涌出口, 上涌物质在此冷却凝固形成新的洋壳。新的洋壳不断形成, 推动先形成的洋壳向两侧扩张。并认为海底扩张有两种情况, 一种是: 扩张着的洋底同时把邻接的大陆向两侧推开, 形成新的大洋, 如大西洋的形成。另一种是: 当洋底扩张移动到大陆边缘, 洋壳与大陆地壳相遇, 发生挤压, 洋壳向下俯冲潜没, 如太平洋的洋底扩张。

上述论点受到海底磁异常规律的支持, 本世纪 50 年代后期, 英国学者 **R. Mason** 首先发现东北太平洋洋底存在着条带状的磁异常, 强度一般是千万分之几个特斯拉(**T**), 自大洋中脊轴部向两侧减小, 大体上平行于大洋中脊轴线延伸, 正异常和负异常相间排列, 对称分布于大洋中脊两侧, 单个磁异常条带宽度约数公里至数十公里, 纵向绵延数百公里以上, 在遇到洋底断裂时被整体错开, 但在断裂两侧的起伏情况可以对比。大洋中脊两侧正负磁异常条带相间排列对称分布, 反映大洋中脊两侧岩石形成年龄的对称性。

海底沉积岩芯磁化方向的确定, 从另一方面支持了上述的观点, 海底沉积物在沉积过程中, 被当时的地磁场磁化, 因此, 在垂直方向上保存了正负方向的磁化记录。结合放射性同位素测年法和沉积地层的古生物测年法, 确定地层转向的年代, 甚至编出海底年龄等时线图。这些研究成果都肯定了海底年龄以大洋中脊为对称轴向两侧逐渐变老。世界各大洋钻探所取得的最老沉积物年龄不超过 170 **Ma**(晚侏罗纪), 表明海底确实在不断地生成和更新, 更老的洋底已被席卷到大陆底下。本世纪 70 年代初, 对大洋中脊上转换断层的考察, 进一步确定了海底自大洋中脊向两侧运动的事实。

至此, 海底扩张学说得到了充分的发展, 连同相继产生的板块学说, 被誉为地球科学史上的一场革命。海底扩张学说和板块学说的产生, 为人们在更广泛的基础上阐明地壳运动和演化提供了一个全新的观点。

2　大洋中脊地质地貌特征

大洋中脊大多位于大洋的中部, 少数偏向大洋的一侧, 通常高于两侧大洋盆地 2 000~ 3 000 **m**, 宽度数百公里到上千公里以上不等, 甚至全球大洋中脊可连成一体。大洋中脊

* 国家自然科学基金资助项目 49271012 号。
本文研究中得到施雅风院士多方面无私帮助和指导, 同济大学金性春先生为本文研究提供资料及指导, 在此表示感谢。
收稿日期: 1997-07-03

轴部为巨大的裂谷, 亦称中央裂谷, 这在大西洋中脊最为突出, 据有关文献描述, 中央裂谷的宽度一般在 10~ 40 km, 谷底宽可达数公里, 裂谷长度延伸数百公里, 谷底平均位于海平面下深度 2 750~ 4 570 m, 与两侧中脊海山高差一般大于 1 800 m。从脊顶到谷底发育约 1 000~ 2 000 m 的倾向谷内的断崖, 许多学者认为这种中央裂谷具有断层成因, 象东非大裂谷一样, 中央裂谷属于一种巨大的地堑。

中央裂谷在世界大洋中脊分布差异较大, 据分析, 与板块扩张速度有关, 在全扩张速度 1~ 5 cm/a 的慢速扩张脊, 如大西洋中脊和西南印度洋中脊, 中央裂谷的宽度为 10~ 30 km, 深 1 500~ 3 000 m; 全扩张速度 5~ 9 cm/a 中速扩张脊, 中央裂谷的宽度 7~ 20 km, 深 50~ 400 m; 全扩张速度 9~ 10 cm/a 的快速扩张脊, 如东太平洋中脊, 无中央裂谷。有学者认为, 这一现象取决于岩浆供给和拉张量的关系, 岩浆供给充分, 地幔上涌形成的新洋壳跟得上板块拉张分离过程, 无中央裂谷, 反之, 岩浆供给欠充分, 形成的新洋壳跟不上板块分离拉张, 就形成裂谷地形[3]。

3 一些值得注意的新事实

3.1 裂谷的前展性

本世纪 80 年代人们对洋底磁异常的详细分析发现[1], 一些以转换断层为界的中脊段, 其端部可以伸长或退缩, 向前伸展的裂谷(或扩张轴)称为前展性裂谷, 后退的裂谷段称为衰退性裂谷。前者总是避开衰退段原来的裂谷而另在其一侧洋壳上不断开劈新的途径, 转换断层的长度逐渐加大, 这往往发生在两段扩张轴方向不一致的地方, 前展性扩张轴的走向与

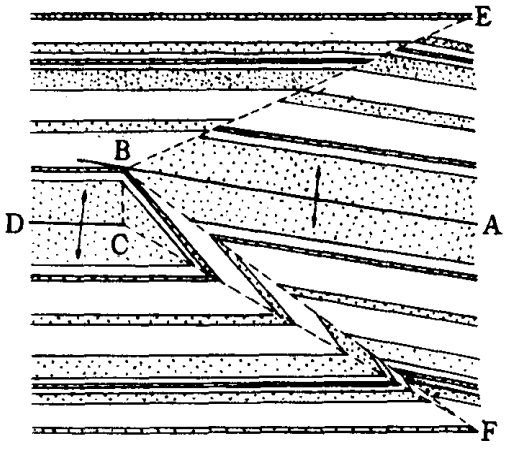

图 1 前展性裂谷示意(Hey, 1982)

AB 为前展性裂谷; CD 为衰退性裂谷; BCF 为剪切变形带

扩张方向垂直, 衰退性扩张轴与扩张方向斜交, 见图 1。木玉贤等(1990)认为, 衰退性裂谷两侧板块的背离运动一定受到其他运动方向力的拉张, 前展性裂谷的形成与拉张应力相一致, 即同拉张方向一致则发展, 不一致则衰退, 与板块之间相对运动的变化相适应, 扩张轴必须作重新排列[2]。"如果板块运动方向发生变更, 就可能通过适应板块运动方向的新扩张轴向前伸展的方式来调整整个扩张轴的方向[1]。"

3.2 重复扩张中心

过去, 认为大洋中脊扩张中心(轴)只有一条, 但是, 近年来随着大洋测深技术的发展以及测量精度的提高, 人们发现, 大洋中脊存在双重扩张轴, Macdonald 等(1982)运用多波束回声测深技术[1], 发现东太平洋海隆 8~ 18°N 地段存在 8 个重叠扩张中心, 4 条转换断层, 重叠扩张轴之间没有转换断层相连接, 自由端彼此相向弯曲, 并列延伸, 间距 1~ 15 km 不等, 重叠长度约为其间距的 3 倍。大洋中脊为一些不连续的段, 各段的长度 10~ 300 km, 各段的中部水深较浅, 火山活动和热液活动比较强烈, 向两端接近重叠部分, 水深加大 100~ 300 m, 火山活动和热液活动也减弱, 以至消失。重叠的两扩张轴之间为"三明治式"的椭圆形深洼地, 至转换断层处, 地势更低, 水深更大, 见图 2。这一新发现, 不仅丰富了对大洋中脊地形形态的认识, 而且, 也给予一些新的启示, 即海底扩张中心并不一定是地幔上涌的中心。因为, 在扩张轴重叠的地段, 岩浆活动并不强烈, 扩张量也并非较大, 两扩张轴之间并没有因新的洋壳形成而发生挤压和地壳物质的隆起, 而事实也是如此。如果用"拉张"的观点解释这一现象也许更好。Ken C. Macdonald 等(1983)蜡模实验也证明重复扩张中心是快速拉张的结果。

3.3 大洋钻探所揭示的事实

大洋钻探第 109 航次在百幕大东南的大西洋中脊轴部布孔钻探, 其中, 670 号钻孔位于中央裂谷西缘下部, 距中央活火山轴仅 6 km, 在几米的沉积物和破碎岩之下钻遇到蛇纹岩, 30 m 以下为蛇纹石化方辉橄榄岩。据分析, 橄榄岩为洋壳底部或上地幔的产物, 如今出露于洋壳的表层, 应是地壳强烈拉张和构造剥露的结果, 说明这里大洋中脊受机械拉张比岩浆活动的影响更大[1]。第 118 航次在西南印度洋中脊中央裂谷和横向的断裂带交汇处钻探, 也揭示大洋中脊的裂谷地形形态和构造, 与大陆裂谷和非火山型被动大陆边缘颇为相似。

1992 年 ODP147 航次[2]在东太平洋赫斯海渊布孔钻探, 赫斯海渊位于科科斯-纳兹卡板块之间的前展性扩张轴的前端, 向西前展的扩张轴延伸侵入原先由东太平洋海隆扩张形成的洋壳, 894 号孔钻探见到辉长岩, 895 号孔见辉长岩、纯橄榄岩和方辉橄榄岩, 这些岩石应为地壳与地幔过渡带的产物, 而今却见于洋壳的表层, 看来, 扩张轴前展端楔入先成的洋壳, 引起了强烈的构造拉张, 赫斯海渊可能存在低角度拉离断层, 强烈拉张使断层下盘的地壳深部岩石出露于海底。

3.4 大洋中脊的火山与地震活动

据 V. Mendel 等(1997)对极慢速扩张的西南印度洋海岭的火山活动进行较详细的研究, 发现西南印度洋 57~ 70°E 中脊段有 523 座火山, 分布极不均匀, 62°E 以西的地区海山群有火山锥 314 座, 平均密度为每 1 000 km^2 103± 34 座, 大大高于 62°E 以东的密度(每 1 000 km^2 8± 3 座)。洋中脊总地势

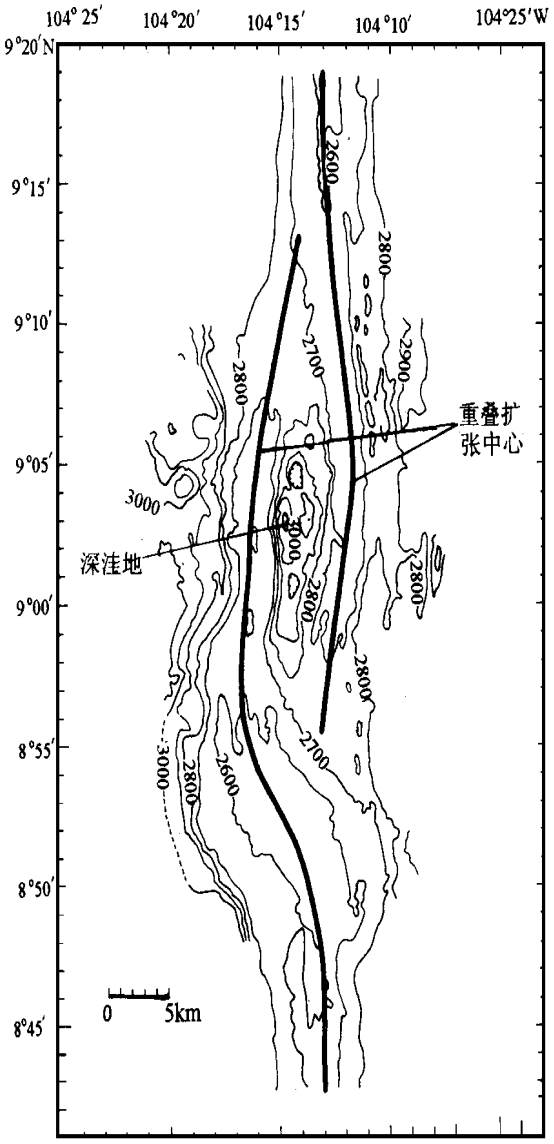

图 2　东太平洋海隆的重叠扩张中心

(Macdonoald 等, 1983)

表现西段高于东段, 而火山的特征高度西部(48± 4 m)低于东部(105± 22 m)。根据火山密度, Mendel 等认为西南印度洋中脊东段可能具有相对更冷的地幔[3], 而根据海山相对高度推测, 东部地区的拉张地形表现更突出。与大西洋相比, 印度洋 57~ 62°E 中脊段的火山密度只有大西洋 24~ 30°N 中脊段火山密度的一半, 而构造上表现为更明显的拉张。ODP 的第 735B 钻孔位于上述印度洋中脊的西段, 该钻孔不仅揭示下地壳和地幔岩石在海底出露, 而且还钻遇数层低角度张性剪切带[3]。

另外, 地震震源机制解释表明, 大洋中脊缺乏推挤应力下的地震发生机制, 对发生在大西洋中脊的近轴地震的断层面解释指出, 与大洋中脊走向平行的倾角约 45~ 70°的断层为正断层, 23°N 大西洋中脊中央裂谷底部下 6 000~ 7 000 m 深处的微地震发生在断层面倾角为 30°或更大的正断层上。

4　转换断层的特征再分析

大洋中脊被一些横向的断裂错开, 其间距约为 50~ 300 km, 这种断裂带大多与中脊轴段正交, 好象是后期形成的"平移断层", 将中脊轴线错开, 实际上, 这并非一般的平移断层, 而是大洋板块向两侧运动所形成的一种特殊断裂, Wilson (1965) 称之为转换断层, 它具有以下重要特征: (1) 断层两侧的错动并不是发生在整个断裂带上, 而只发生在两中脊段端点之间的地段; (2) 在错动方向上, 转换断层与平移断层相反。这些特征曾被做为经典的海底扩张学说的三大证据之一。

上述特征反映大洋中脊两侧板块运动方向是十分清楚的, 但是, 并没有反映两侧板块运动的力学机制(是推还是拉)。从另一个角度去观察, 把中脊深大断裂(包括中央裂谷和转换断层)作为划分两侧板块的分界线, 这个边界线不是平滑的, 而是阶梯状或锯齿状。按地幔上涌推动的观点, 随着新的洋壳的生成, 锯齿状的板块边界就会愈来愈模糊, 最后, 表现为平滑的线状或带状。但是, 实际上大洋中脊的岩浆活动主要集中在纵向的中央裂谷一带, 显然, 纵向的深断裂与横向的深断裂的应力性质不同, 前者为张性, 而后者为非张性。

5　结语

从以上分析看来, 所谓"海底扩张"实际上是大洋中脊两侧板块在某种拉张应力的作用下的分离运动, 岩浆活动受张裂制约, 在拉张应力条件下, 岩浆沿中脊轴部裂谷上涌, 即张裂在先, 地幔上涌形成新洋壳在后。这一观点并不否认岩浆上涌冷却形成新洋壳对分离运动的贡献, 岩浆供给充分条件下, 不断生成新洋壳有利于中脊两侧的分离运动; 岩浆供给欠充分条件下, 生成新洋壳不足以拉张, 就形成裂谷, 表现中央裂谷的地堑特征。如果中脊两侧板块分离运动的方向发生变化, 扩张轴也发生相应的调整, 与分离运动方向不协调的老的扩张轴则衰退。中脊轴部岩浆活动的差异性使岩浆补偿弱的地方地壳受拉张更强烈, 形成重叠扩张中心(或双重裂谷), 因此, 扩张轴可以认为是张性裂隙。人们曾对出露海面的大洋中脊部分—— 冰岛裂谷带进行地质调查, 也进一步证实中脊裂谷的拉张性质。

其实, 早就有人对"地幔上涌推动"海底扩张的观点提出疑问[1], 认为上涌的热地幔物质处于可塑状态, 不可能推动宽度达数千公里的大洋板块向两侧运动。现在, 我们可以认为大洋中脊是受拉张形成的板块边界, 板块运动的力源在板块本身及其深部或其他边界。有学者研究认为, 在俯冲带存在一种"负浮力"使大洋板块不断向海沟之下沉没消减, 这种负浮力可作为板块运动的一种重要驱动力。Uyeda(1984) 指出, 所有与下潜(俯冲)板片相联系的大洋板块向消减带的运动速度大于其他板块, 证明下潜板片的牵引力是强烈的。把俯冲带上大

洋板片下潜的牵引力作为洋底运动的驱动力, 就能比较好地解释太平洋中脊扩张较其他大洋中脊快的事实。对于大西洋和印度洋, 因其两侧为无俯冲带的“被动大陆边缘”, 洋底的扩张只能用大陆的移动来解释, 即假设美洲大陆向西移动, 因非洲大陆东侧也存在东非大裂谷和印度洋中脊等张裂构造, 其西移的速度较小或相对静止, 欧亚大陆相对向东移动, 澳洲大陆向北运动, 就可以造成印度洋和大西洋的张开。这一假设对于解释“被动大陆边缘”的张裂现象要比“中脊扩张, 推挤大陆向两侧运动”的解释要好得多。总之, 板块运动力学机制问题是一个复杂的问题, 只有全面认识全球板块运动的构造环境才有可能圆满解决。

主要参考文献

1 金性春等。大洋钻探与中国地球科学。上海: 同济大学出版社, 1995, 153~159

2 Mevel, C. *et al.*. *Proc. ODP, Init. Repts.*, 1993, 147/148: 5~14

3 Mendal, V. and Sauter, D.. *Geology*, 1997, 25: 2