

# 南海中部古扩张脊的构造特征及 南海海盆的两次扩张

吴金龙 韩树桥 李恒修 赵继成 王述功 王 勇 高 仰

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛)

## 摘 要

国家海洋局第一海洋研究所和法兰西海洋开发研究院 (IFREMER) 于1985年利用“让·夏尔克”号考察船, 在南海中部成功地进行了一次综合性的地质、地球物理调查。本文利用实测的地质、地球物理资料, 较详细地研究了南海古扩张脊的地貌-构造特征, 从而进一步推测南海中部古扩张脊系由两条走向和成生时代均不相同的脊叠置而成。根据磁条带及两条脊的交切关系可推测, 南海自中渐新世以来, 可能经历了两次扩张过程, 时代较早的一次发生在南北方向, 而北西—南东方向的扩张时代开始得可能较晚。

南海的形成一直是国内外学者十分关注的研究课题之一。利用大量的实测资料提出了各类不同的演化模式, 这对认识和开发南海及其周缘的矿产资源有着十分重要的意义。

南海海盆通常被认为是一个大西洋式的小洋盆, 在洋盆的中部有一条结构复杂的古扩张脊。但与典型的大西洋盆不同的是, 在它的边缘至少存在有两种不同类型的陆缘构造, 暗示着南海海盆可能有着较为复杂的演化历史。

国家海洋局第一海洋研究所和法兰西海洋开发研究院 (IFREMER), 于1985年利用“让·夏尔克”号考察船, 在南海中部成功地进行了一次综合性的地质、地球物理调查。测区选在南海扩张脊轴部宽约200km范围内 (测区位置见图1), 主要用于探讨南海最后的扩张过程。

这次考察的重要成果之一, 是在南海东部, 即在118°E至马尼拉海沟之间, 发现南海古扩张脊的走向已改为北东向。

本文利用实测的地质、地球物理资料, 较详细地研究了南海古扩张脊的地质、构造特征, 从而进一步推测, 南海中部古扩张脊是由两条走向和成生年代均不相同的脊叠置而成。扩张脊走向的变化, 标志着板块运动方向发生变更。利用磁条带及两条脊的交切关系, 推测南海自中渐新世以来, 可能经历了两次方向不同的扩张过程: 时代较早的一次发生在南北方向; 而北西—南东方向的扩张时代可能开始得较晚。

### 一、南海古扩张脊的地貌、构造特征

南海古扩张脊位于南海海盆的中部（图1），地震剖面所揭示的海盆声波基底清楚地展示出古扩张脊的起伏形态及其两侧对称分布的深海平原以及被动的大陆边缘 三类 I 级



图1 测区位置图

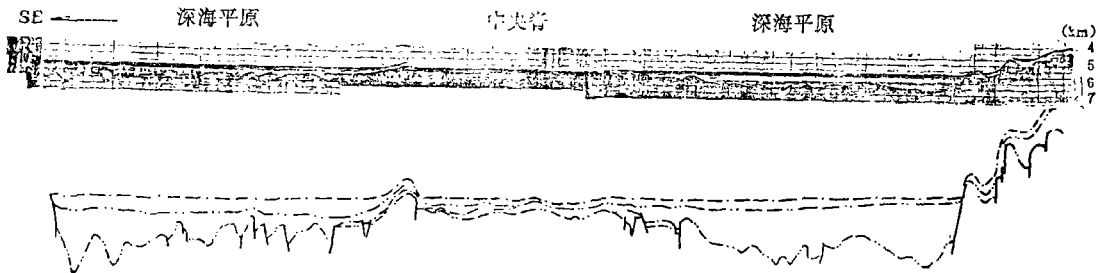


图2 穿越南海西南部的地震剖面9（剖面位置见图1）

构造带(图2),从而初步确定了南海海盆的基本构造属性.另外,从地震剖面还可得出,由于后期的构造-沉积作用,南海中部古扩张脊已被数百米厚的沉积物所夷平,表明南海扩张活动已经停止.

### (一) 中脊的地貌-构造单元

SeaBeam 首次使用于南海测量,为研究海底地貌及构造活动提供了有意义的资料.同步观测的地震剖面也取得了良好的地质效果,其最大穿透深度可达2.5s,对沉积层的分布形态、内部层理、变形程度以及对声波基底的构造特征均有清晰的反映.

南海古扩张脊的地形-地貌如图3所示,其基本特点是海底从中脊的两侧向中心呈阶梯状下降,水深不断加大,通常在中脊的轴部形成一低拗的谷地.另外SeaBeam资料揭示中脊海底陡崖十分发育,并且具有十分明显的排列规律.

中脊上的沉积层较薄,大致可分为三层,并有不同程度的变形.

南海中脊声波基底断裂构造十分发育,并多为正断层.断层的倾角较陡,其倾向在脊轴两侧分别向中央倾斜,呈轴对称分布(图4),并将基底分割成大小不等的倾斜断块.断裂不仅切割了基底,大多还错动了上覆的沉积层,甚至可达海底.

因此,根据南海古扩张脊的地形-地貌、沉积层的分布以及声波基底的形态特征等,可把南海中央脊进一步划分成如下几个次一级的地貌-构造单元,现分述如下:

#### 1. 中央峰

位于南海扩张脊的轴线附近,主要由出露于海底的火山构成,规模一般较大,在南海东部尤为发育,如振华海山、民主海山及黄岩海山等呈串珠状沿 $15^{\circ}\text{N}$ 线近东西向排列.但在南海西南部,中央峰不发育.

#### 2. 中央裂谷带(中央地堑)

通常对称分布于中央峰的两侧.在中央峰不发育的地方,扩张脊轴部将形成一统一的裂谷带.

裂谷带的海底,除中央峰外,地形十分平坦,水深较大,一般可达4 300m.在南海

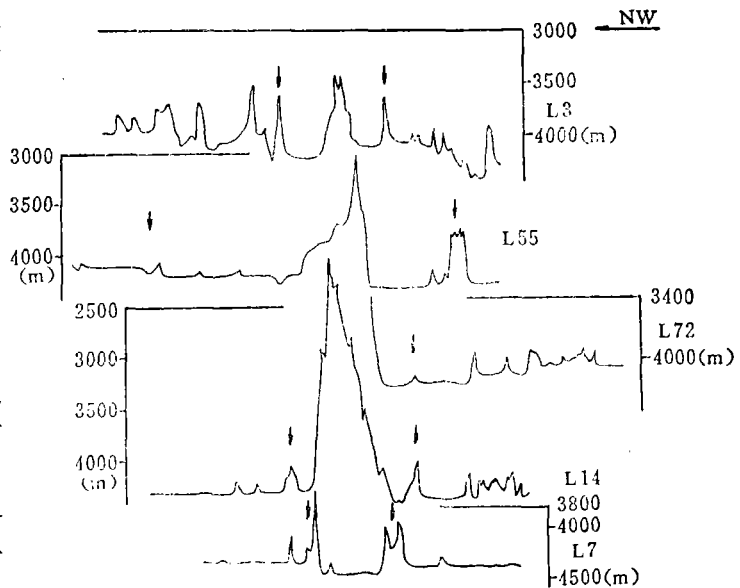


图3 海底地形剖面

箭头指示的是“裂谷边缘脊”(剖面位置见图1)



图4 地震剖面3

清楚地显示出南海中脊地形、沉积、声波基底的形态特征（剖面位置见图1）

西南部，由于缺少中央峰，水深可达4 400m以上。

根据地震剖面资料，该带是在以脊轴对称分布的正断层作用下，使基底连同海底由脊的两侧向中心呈阶梯状下断而成。这里的沉积较厚，一般可达0.5s，最大可达0.8s。沉积层序发育较全，可分为三层（ $S_1$ ， $S_2$ ， $S_3$ ），而且多呈水平层状产出，变形很小。

3. 裂谷边缘脊

裂谷边缘脊位于裂谷带的外缘，系由高出海底的倾斜断块所构成。其向谷一侧较陡，脊顶倾向外侧（见图4），它是确定中央裂谷带边界的重要标志之一。

4. 中央脊断块隆起带

该带以“边缘脊”为界，位于中央裂谷带的外侧。这里水深普遍变浅，通常在3 750—4 000m之间变化，平均较中央裂谷带高出200m左右。海底地形起伏不平。基底由正断层切割的掀斜断块所组成。断块顶部向外倾斜，基底相对抬升，沉积较薄，但通常 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 三层沉积均有发育。由于基底断块活动，上覆沉积被强烈错动变形，这与中央裂谷带水平层状沉积形成显明的对照（见图4）。另外，由于大多数断裂可达海底，故使这里的海底也变得起伏不平。

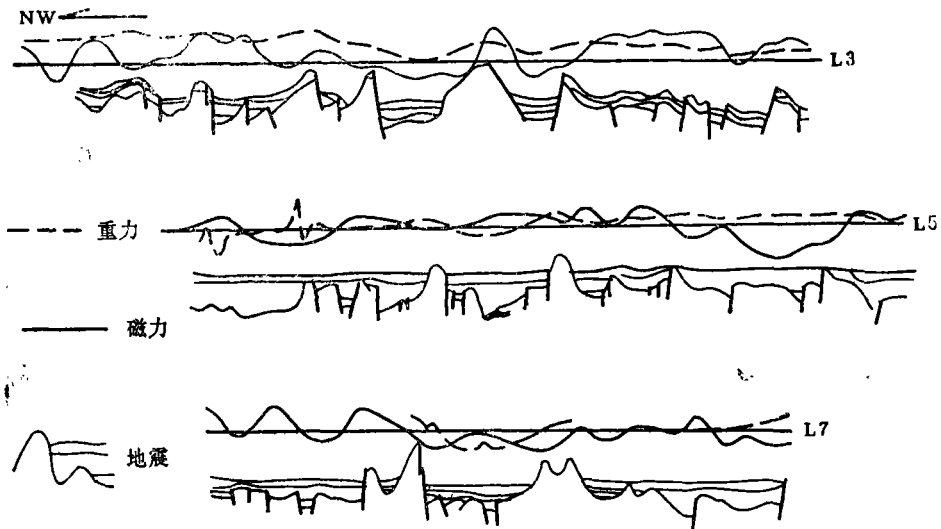


图5 剖面3、5和7综合对比剖面（剖面位置见图1）

由上所述,南海古扩张脊可划分为三类五个地貌-构造单元(图4)。它们沿走向,在各地质、地球物理综合剖面上均可相互对比(图5),构成相互平行,呈带状展布的五条地貌构造带。

## (二) 中脊的平面展布

SeaBeam圈定的南海中脊海底陡崖,大多为由地震资料所揭示的中脊基底断裂在海底的直接反映(图6)。这种成因上的联系,使我们有可能利用SeaBeam直观地判断南海古扩张脊的构造走向及其在平面上的展布特征。

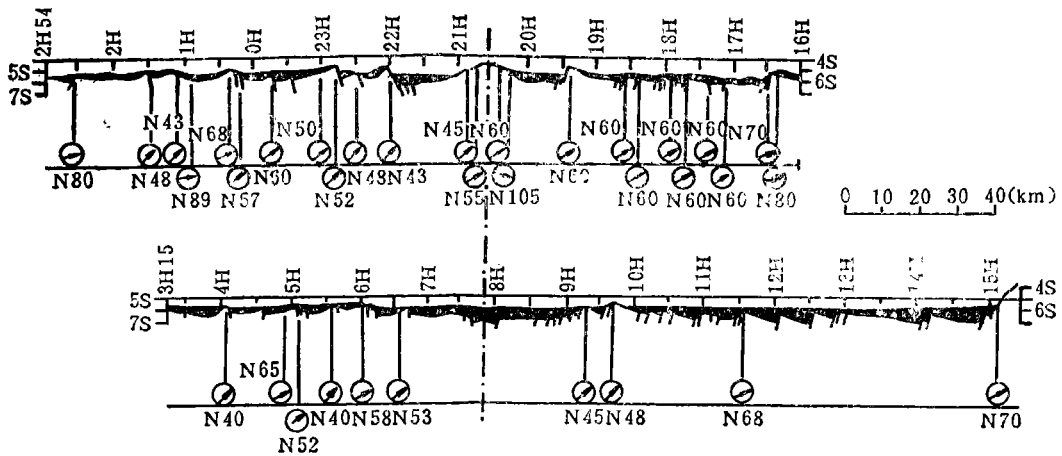


图6 SeaBeam和地震资料揭示的海底陡崖

SeaBeam测绘的海底陡崖,在南海古扩张脊上的走向分布示于图7。由图可清楚看出,海底陡崖在平面上的分布具有明显的规律性。按其统计规律大致可得出如下两个基本特点:(1)在南海古扩张脊上,可划分出三组不同走向的海底陡崖,即一组为近东西向( $N70^{\circ}-80^{\circ}E$ ),一组为北东向( $N40^{\circ}-50^{\circ}E$ ),再一组为北西向( $N125^{\circ}-140^{\circ}E$ )。(2)不同走向的海底陡崖分布在中脊上的不同部位。因此,按其统计规律可直观地展示南海古扩张脊在平面上的分布特点。在 $117^{\circ}30'E$ 以东到马尼拉海沟,距中脊轴两侧约75 km范围内,海底崖的走向均呈 $N40^{\circ}-50^{\circ}E$ ,并与南北走向的马尼拉海沟斜交。在 $116^{\circ}30'E$ 以西,向西南延伸,这里的海底崖亦以 $N40^{\circ}-50^{\circ}E$ 为主,其分布宽度至少有150 km。在南海海盆的中部,古扩张脊的中段,约 $15^{\circ}N$ 线附近,上述三组走向的海底崖均有分布,而且互相交切。在脊轴附近(约 $15^{\circ}N$ 线),由振华、民主、黄岩海山(即前述的中央峰)组成的山链呈东西向展布。另外,位于 $15^{\circ}40'N$ 以北及 $14^{\circ}30'N$ 以南,海底崖的走向亦呈近东西向。而它们之间却夹有北东向及北西向的海底崖。

由上我们可清楚看出:(1)在古扩张脊轴部宽约150 km范围内,其北东段和西南段,以 $N40^{\circ}-50^{\circ}E$ 走向为主,而中段为近东西向。(2)海盆东部远离扩张脊轴地区,构造走向以近东西向为主,它们与Taylor等观测的磁异常条带走向吻合很好(见图1和7)<sup>[2]</sup>。

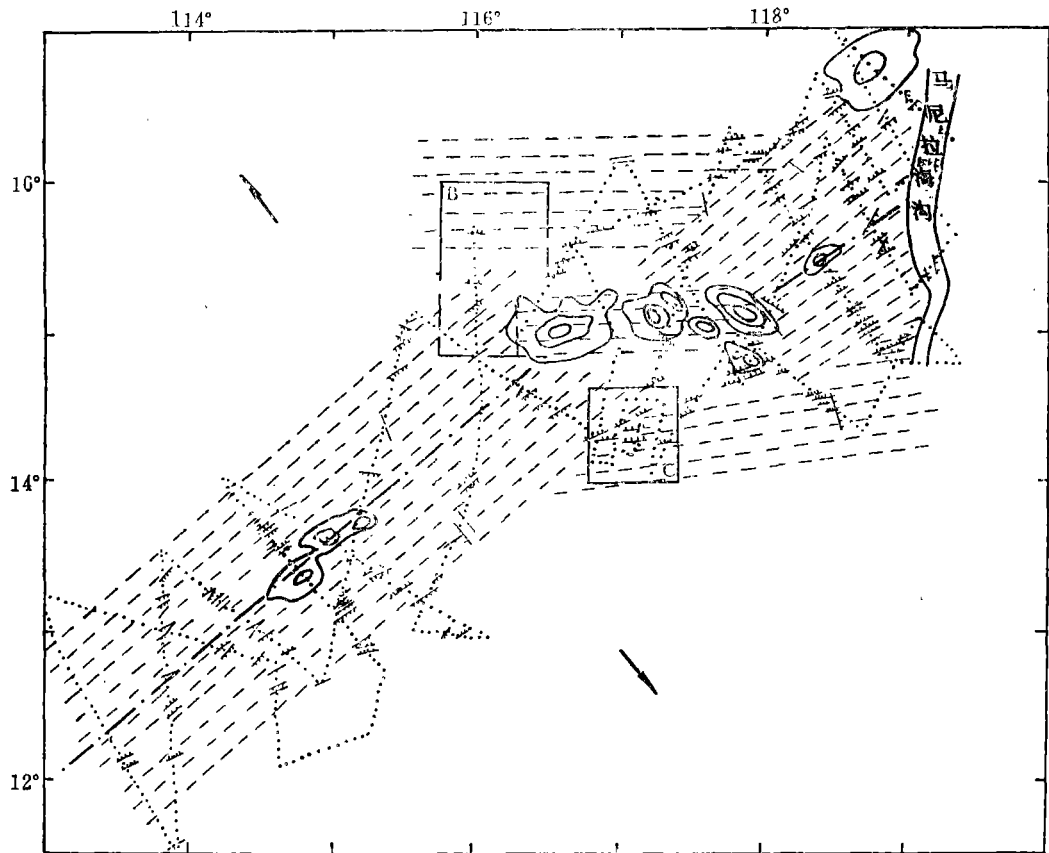


图7 南海中脊海底陡崖及某分布特征

(3) 两组构造互相切割。由图7可看出,有的部位东西向构造明显被北东向构造所截断,而另外一些部位又有北东向构造被东西向构造所截断。这表明南海古扩张脊具有一个比较复杂的构造格局,同时也暗示着南海发育过程亦比较复杂。

### (三) 中脊的交切关系

由前所述,南海古扩张脊基本构造走向具有北东和东西两组,它们互相截切,构成南海中部复杂的构造几何图形。

按照传统的概念,研究不同走向断裂之间的切割关系,可以推断其成生的时代顺序。然而,根据SeaBeam、地震、重磁等资料所展示的南海中脊不同走向的构造呈互相截切关系,那么它们的时代又如何判断呢?

图8示出了在第一详查区进行的磁力和SeaBeam详细调查的结果。其位置(图7中的B)大约位于 $15^{\circ}-16^{\circ}\text{N}$ 、 $116^{\circ}\text{E}$ 附近,是南海中段东西向脊的北翼与西南区北东向脊的西北翼的交汇处。由图可看出,磁异常的走向和海底陡崖的走向吻合甚好。大约在 $15^{\circ}30'\text{N}$ 以北,它们的走向均为 $\text{N}70^{\circ}-80^{\circ}\text{E}$ ,而南部均为 $\text{N}40^{\circ}-50^{\circ}\text{E}$ 走向,构成一“三角形交叉

区”。两者之间的交切关系是西南区的北东向脊被东西向脊所截断，其形如“T”形（注意它们不是简单的转向）。

与此相对应的，大约在 $14^{\circ}30'N$ 、 $117^{\circ}E$ 附近（见图7中的C），这里是东西向脊的南翼与西南区北东向脊东南翼的交汇处，海底崖的走向与磁异常的走向吻合得也很好，构成了第二个“三角形”构造区。两条脊的交切关系是东西向脊被北东向脊所截断，其形如“ $\perp$ ”形。

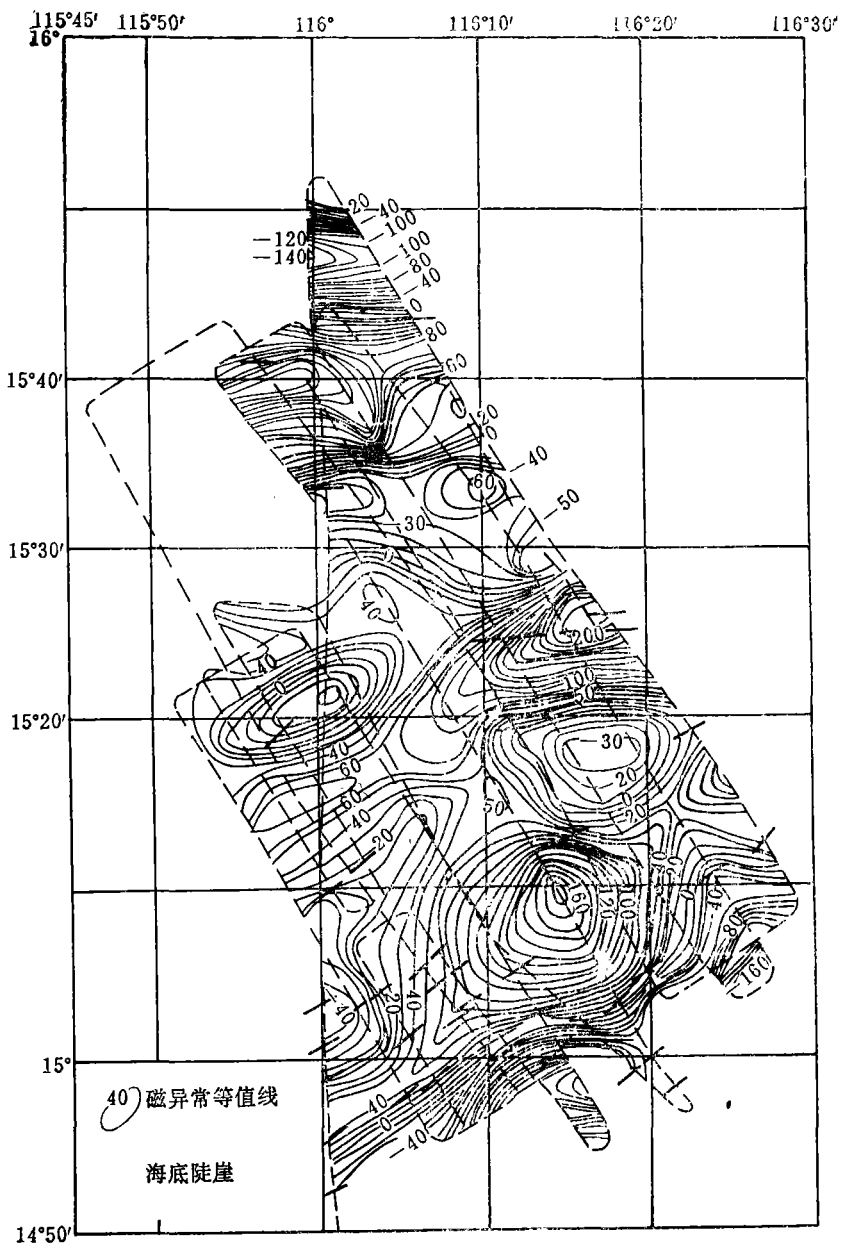


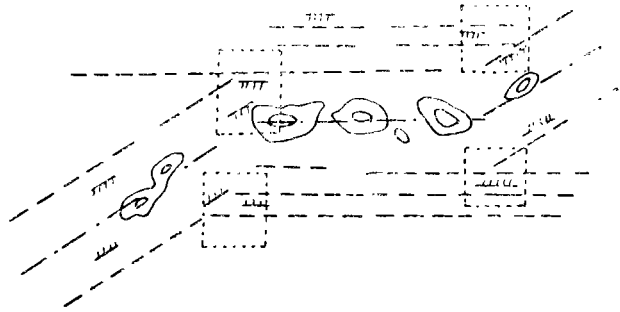
图8 第一详查区（位置见图7D）磁异常和海底陡崖分布图  
（“海底陡崖”左侧应有“-”）

沿着东西向脊的南翼（相当于6、6a号磁带条）向东，约在 $14^{\circ}30'N$ 、 $118^{\circ}20'E$ 附近，构成了第三个“三角形”构造区，它是东北区的北东向脊的东南翼与东西向脊的南翼交汇处，并且是东西向脊切断了北东向脊。由SeaBeam和磁力资料推断，东西向脊南翼可能一直延续到马尼拉海沟（图7）。

第四个“三角形”构造位于 $16^{\circ}N$ 、 $118^{\circ}E$ 附近，海底崖之间的切割关系十分明显，在这里是北东向脊的东北翼截断了东西向脊的北翼。与第三个“三角形”构造区不同的是，东西向脊的北翼不能向东继续延伸。

南海东西向脊与北东向脊的交切关系及其形成的四个“三角形”构造区的典型情况示于图9。南海古扩张脊这一典型的构造几何图形为我们研究南海海盆的扩张、扩张方向的变化及先后顺序提供了重要依据。

根据南海古扩张脊的地貌-构造特征，我们可以初步看出：（1）整个南海中央脊广泛发育着轴对称的正断层，表明它们是在张应力的作用下形成的。（2）南海中脊是由两条方向不同的脊交叉而成。按照现代的海底扩张说，可较好地解释图9所展示的几何图形。并可初步推断，北东向脊形成时代的要晚于东西向脊。（3）中脊方向由东西向北东方向的转变，反映了整个南海张应力场，从南北向向北西—南东向发生了变更。





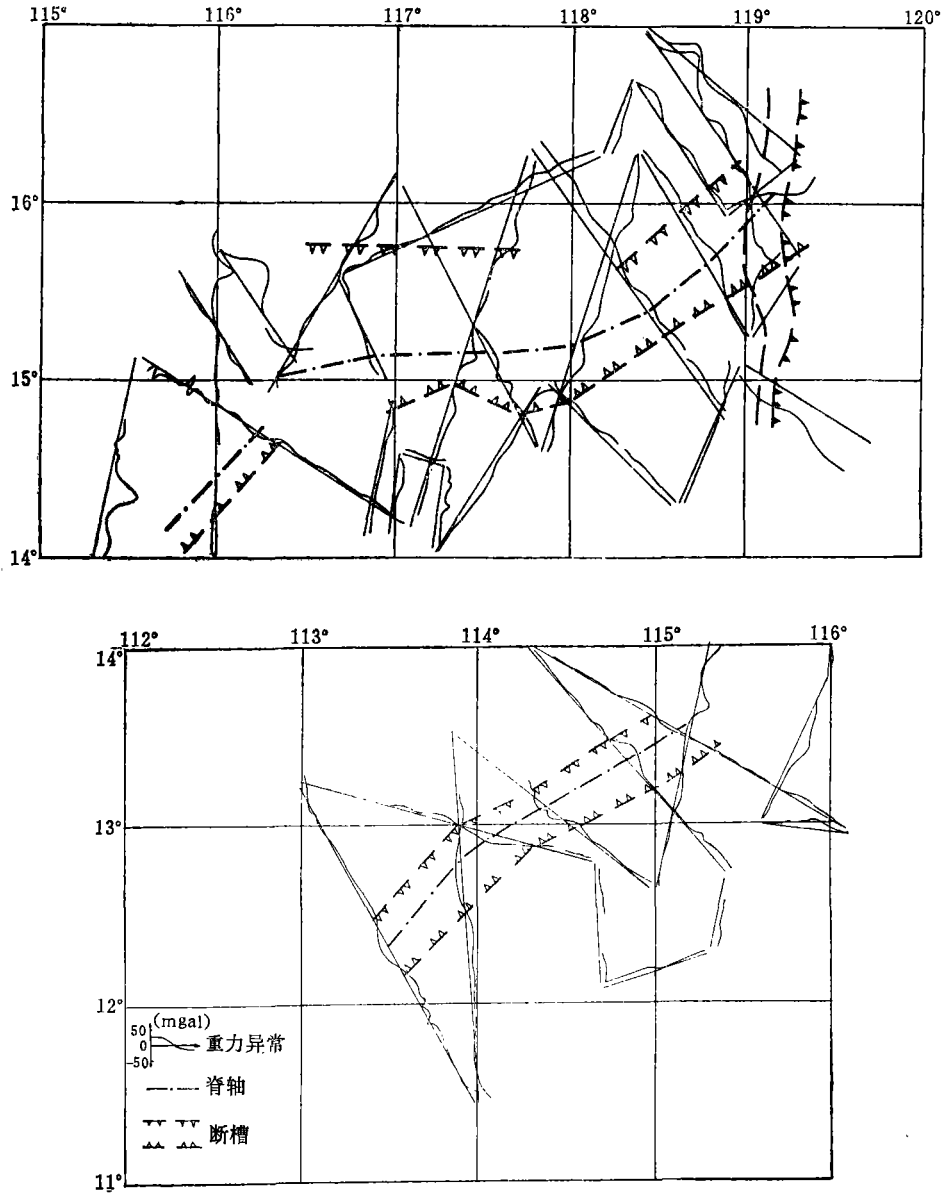


图10 测区东部(上)和西南部(下)重力异常剖面  
(mgal应为 $10^{-5}m/s^2$ )

### 三、磁异常与扩张年代

南海中部广泛发育着正负相间、波浪起伏的条带状磁异常。异常幅度在测区东部一般较大,最大可达420nT;测区西南区较小,最大值可达130nT。磁异常走向相互平行,并随中脊的走向而变化,两者之间吻合较好(图11)。

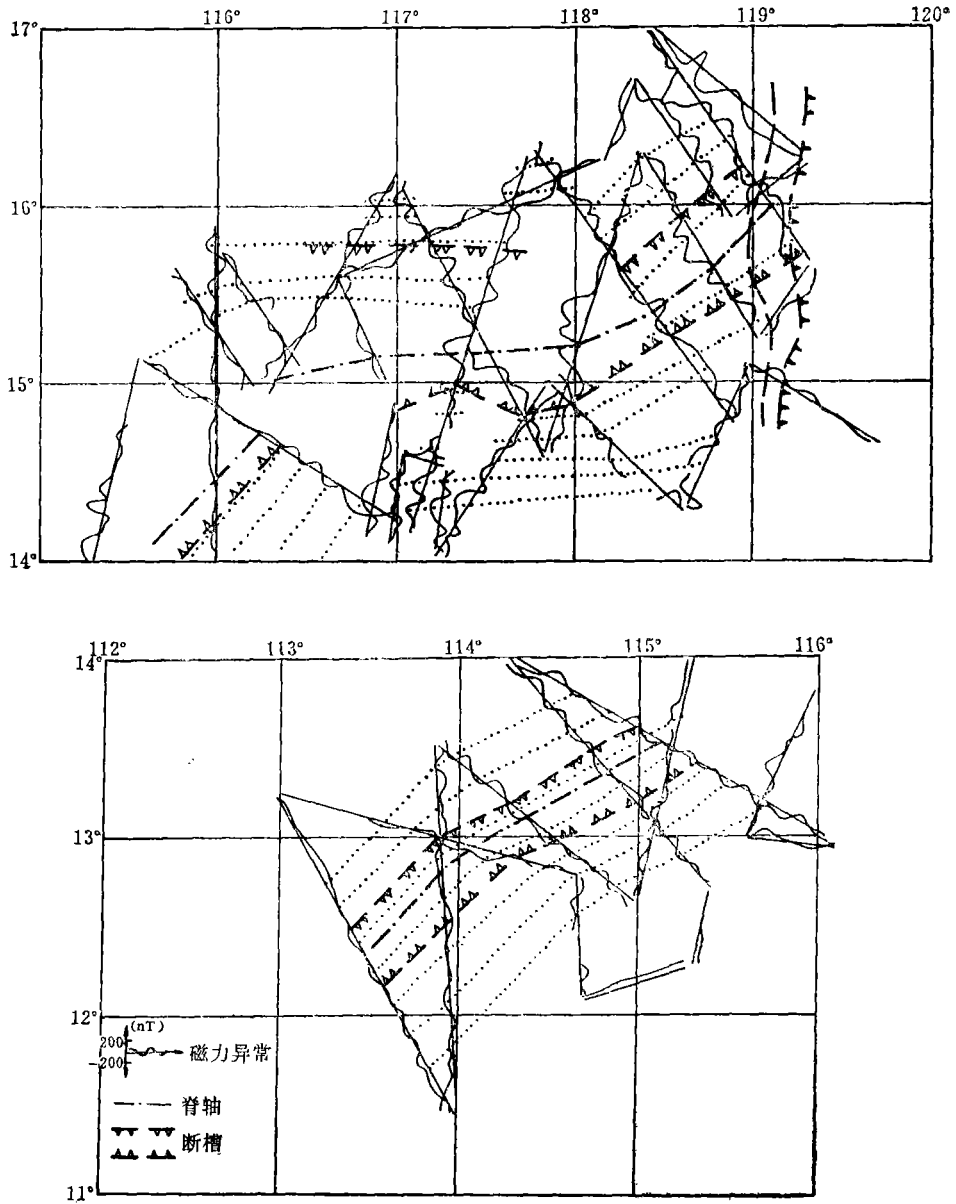


图11 测区东部(上)和西南部(下)磁异常剖面

根据拉蒙特(1977)国际地磁年表及Mckenzie和Sclate(1977)矩形板状体公式,分别计算了东西向和北东向两组理论异常剖面,并与实测磁异常剖面进行了反复对比,认为:(1)位于测区东部的东西向磁条带,属于5D、5E、6、6a号磁异常序列(图12),并大致以15°N线附近的海山链对称分布.对早于6A号的磁异常,由于已超出本测区,故无法进行对比.通常,6A号异常形态比较清晰,并在各剖面上的连续性以及与扩张中心的对称均较好,而5D、5E号异常识别比较困难.(2)北东走向的磁条带,根据对比结果,

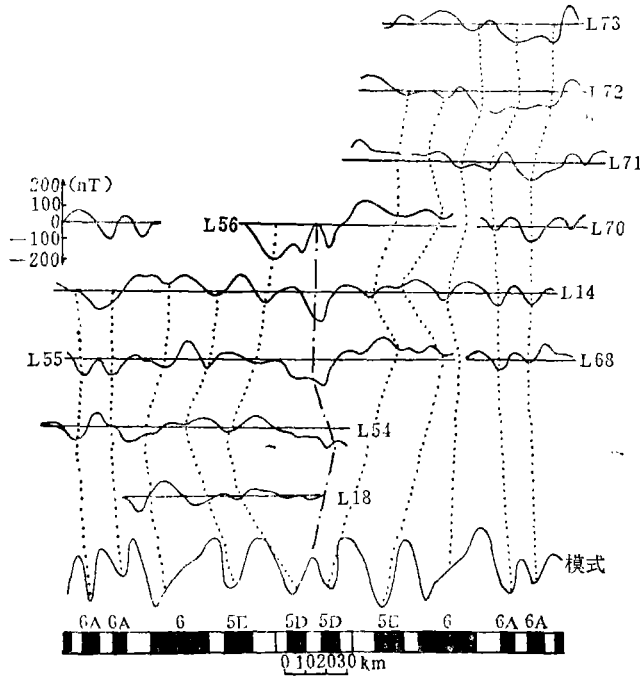


图12 东西向磁条带与理论模型对比结果

属于5C、5D、5E和6号异常序列(16 Ma—20 Ma B P, 图13). 主要分布在两个区, 一组位于南海西南部, 一组位于118°E以东的东北地区. (3) 据上述结果可得出, 东西向脊成生时代可能较早, 约为32 Ma—17 Ma B P, 而北东向脊的成生年代较晚, 约为20 Ma—16 Ma B P. 但两个方向的扩张速率基本相当, 约为2.5 cm/a(半扩张速率).

### 四、南海周围的陆缘构造

为探求南海海盆的形成, 对其周围的陆缘构造及其在南海演化中的地位进行研究也是非常必要的.

南海周围至少存在有两种性质不同的陆缘构造. 南北两侧为“大西洋”式的被动陆缘. 图14示出了我们在南海西南部北侧观测的地震剖面, 它清楚地显示了大陆—大洋之间转换带的沉积及基底的构造特征. 通常, 这里发育有向海倾斜的正断层, 使基底呈阶梯状下断并错动了沉积层. 向陆一侧, 基底表面起伏较大, 沉积较薄并有较强的变形. 但从地

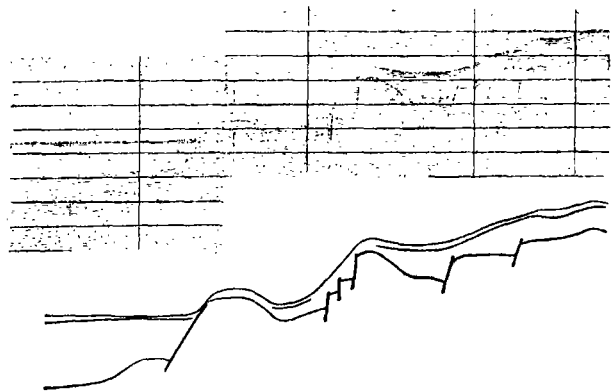


图14 横穿南海西南部北侧陆缘的地震剖面

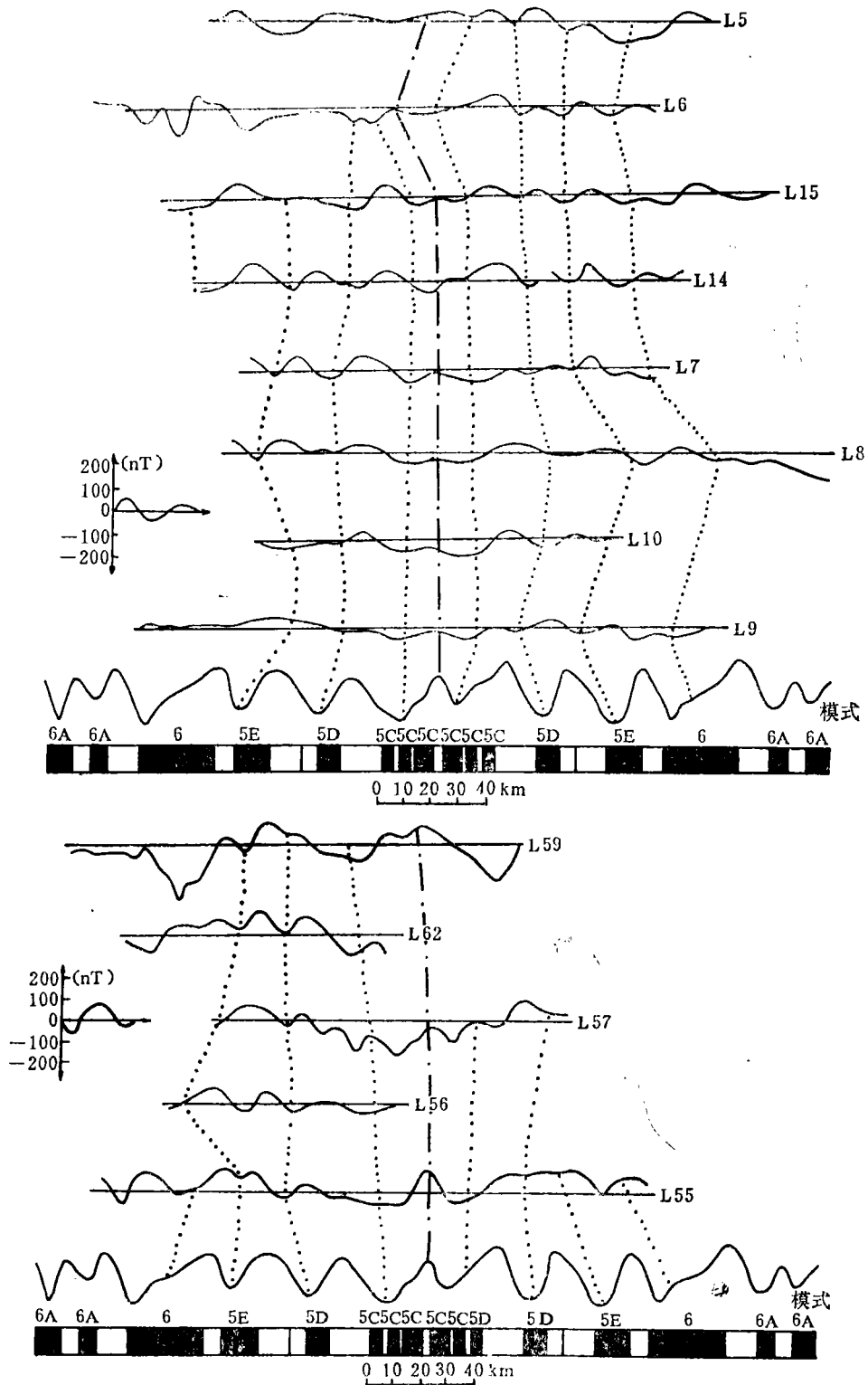


图13 北东向磁条带西南区(上)和东北区(下)与理论模式对比结果

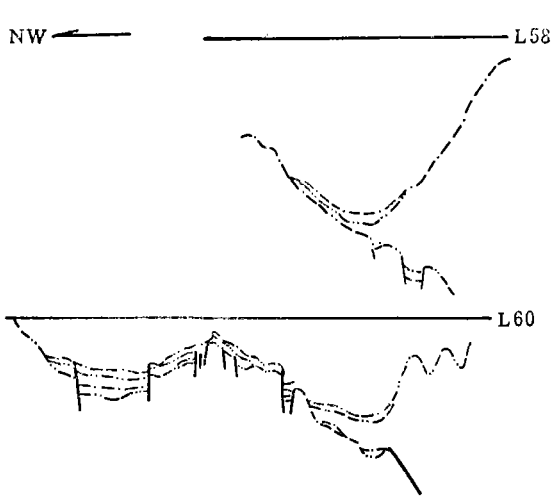


图15 穿过马尼拉海沟的地震剖面  
(剖面位置见图1)

震剖面所反映的沉积层岩性,在陆、洋两侧似乎无明显的差别.与其他的大西洋型陆缘相似,在陆坡的基部为一负重力异常,向陆逐渐变正.

南海的东侧经马尼拉海沟、吕宋海槽与菲律宾陆块相邻.根据地震剖面,南海洋壳在马尼拉海沟发生了俯冲作用(图15).沿海沟,空间重力异常为较大负值,最低可达 $-90\text{nT}$ ,异常的形态与海沟地形相似,走向相互平行,因此,这里的陆-洋边界类似于太平洋周围的活动型陆缘.

由于资料所限,尤其缺乏深部构造的资料,因此对这两种陆缘构造难以进行更深入的研究.

## 五、南海的两次扩张

有关南海的形成,国内外学者已提出了各种不同的发育模式<sup>[2-4]</sup>,如 Ben-Avraham 和 Uyeda 于 1973 年提出的南海海盆剪式张开的模式.而其中较有影响的是 1983 年 Taylor 和 Hayes 等根据东西向磁条带等提出的南北扩张模式,并认为扩张时代为中渐新世—早中新世.

本次中法南海联合考察,利用地质、地球物理综合手段,首次确认了  $118^{\circ}\text{E}$ —马尼拉海沟之间的南海古扩张脊轴走向是  $\text{N}40^{\circ}\text{—}50^{\circ}\text{E}$ ,并与南海西南部的扩张脊走向一致.在扩张脊轴中段 ( $115^{\circ}\text{—}118^{\circ}\text{E}$ 之间)以及远离脊轴的整个南海海盆东部地区,根据 Taylor 和我们在测区边缘地区观测到的资料,其构造走向以近东西向为主.

如何把北东向和东西向构造合理地协调起来,是探讨南海海盆发育的关键问题之一.

利用 Sea Beam 及重磁、地震等资料绘出的南海中部构造格架图式,结合其他资料可清楚地回答这个问题.为此,我们给出两个发育模式,图示南海的发育过程.

由前所述,在南海扩张脊轴区宽约  $150\text{—}200\text{km}$  范围内,广泛发育着轴对称、内倾正断层,这表明整个南海中脊是在张应力作用下形成的.另外由前还可得出,南海中脊是由两条方向和成生年代不同的脊交叉而成,根据它们之间的交切关系以及磁条带识别、推断,北东向脊形成的时代应晚于东西向脊.脊的方向变化表明应力场方向发生变更.东西向脊显然与南北方向的扩张相对应.即南海曾经历了两次扩张,于是构成了图 9 所示的构造格架.

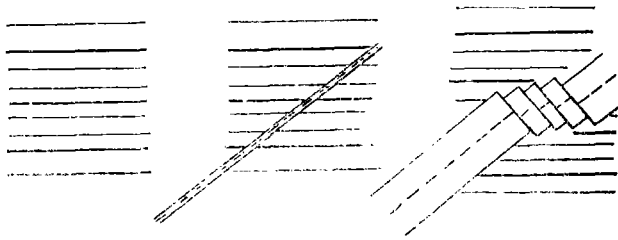


图16 推测的南海演化第一模式

在整个南海开始了北西—南东方向的第二次扩张，并形成了北东走向的脊。这个脊从南海东北部一直延伸到西南海盆，斜切了早期东西向构造。

(3) 随着扩张不断进行，使轴区构造加宽，并把东西向构造推离新的扩张轴。由于

大量右旋 $N140^{\circ}E$ 转换断层向东递增错移作用，使脊轴中段的总体走向转成东西向<sup>[1]</sup>。在扩张末期，大量火山沿着这些转换断层侵入，形成了黄岩海山链。

第二个模式如图17所示：

(1) 早期扩张仍是南北向的，同第一模式。

(2) 20 Ma B P第二次扩张开始，其方向为北西—南东向，与第一模式不同的是，由于受南海东部早期东西向脊轴薄弱带的影响，第二次扩张轴呈一反“S”形。

(3) 随着扩张不断进行，轴区加宽，形成现今的面貌。

两个模式的最后结果均与图9所示的实际结果吻合很好。SeaBeam资料证实，扩张脊中段 $N140^{\circ}E$ 走向断层比较发育，该段轴区磁条带不连续并难以辨认，中央峰（海山）比较发育，均可能与北西向断层有关。但第一个模式尚需在远离现今脊轴的外侧，找到老的扩张脊或重复的磁条带。但到目前为止，尚无这方面的报道，而第二个模式似乎弥补了这方面的不足。另外，据Taylor等人的资料<sup>[2]</sup>，在 $113^{\circ}-114.5^{\circ}E$ 之间，沿 $15^{\circ}N$ 线有一东西向的地堑式裂谷，它正好位于现今东西向脊的延伸线上，并且与我们在南海中脊圈定的中央地堑属同一构造类型。这种吻合是否可以说明， $113^{\circ}-114.5^{\circ}E$ 之间的裂谷是原来东西向脊的延续部分，并被后期北西向扩张分割开，仍是一个值得研究的问题。

大约在16 Ma B P，南海扩张活动趋于停止。由于地壳冷缩及重力均衡作用，使南海海盆的海底总体下沉，形成了披盖式的 $S_1$ 层沉积，并一直延续至今。

南海周围至少有两种性质不同的陆缘构造，它们与南海的形成直接相关。南海海盆的南北两侧为“大西洋”式的被动陆缘，这与南海第一次扩张相关。在海盆的东缘，有一条南北走向的马尼拉海沟。地震资料表明，南海洋盆的洋壳在马尼拉海沟发生俯冲。据水深测量，海沟水深最大可达5150m，沟底地形平坦，海沟两壁西缓东陡，呈不对称的“V”型

第一个模式如图16所示：

(1) 自中渐新世(32 Ma B P)，南海东部开始南北方向的扩张，形成了南海东部东西向磁条带和东西向脊。

(2) 大约在20 Ma B P（早中新世），由于应力场方向自南北转向北西—南东向，

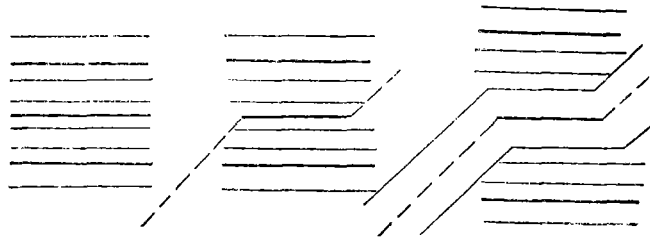


图17 推测的南海演化第二模式

谷。重力测量表明,海沟具有较大的负空间异常,最小值可达 $-9 \times 10^{-4} \text{m/s}^2$ 。均与太平洋周缘海沟具有相似的地质、地球物理特征,属于“活动型”的陆缘构造。

现代板块构造说认为,岩石圈板块的扩张漂移、碰撞无不与深部软流层的运动有关。根据我们在西太平洋进行的重磁调查结果初步认为,在西太平洋边缘,似乎是一下降的软流层(在海沟及其洋侧)与一上升的软流层(在弧后)相遇的地方,双方落差可达数十千米。如果这样一个模式也适用于马尼拉海沟,则南海海盆下的软流层向东移动,并在马尼拉海沟下沉,必然引起一个向东方向的扩张力,这个力与较老的南北方向的拉力之合力,显然是北西—南东向。据泰勒等(1983)推断,原始马尼拉海沟形成的时代为早中新世,这与我们推测的南海北东向脊活动的时代基本相符。因此可以认为,南海海盆下的软流圈东移,并在马尼拉海沟之下下沉,可能是造成南海第二次扩张的主要原因。

综上所述,南海的演化是复杂的,它既不同于单纯的大西洋式海盆,又不同于太平洋式的海盆,似乎是两种方式的综合。于是构成了南海复杂的古扩张体系及其周围的陆缘构造。

1985年中法南海联合考察是成功的,它为我们提供了许多宝贵的资料。在此,我们感谢与我们合作的G.波托博士等法国朋友及“让·夏尔克”号考察船船长和他的全体船员。

### 参 考 文 献

- [1] Guy Pautot, *et al.*, Spreading direction in the central South China Sea, *Nature*, 321 (1986), 6066: 150—154.
- [2] Taylor, B. and D.E. Hayes, Origin and history of the South China Basin, *Geophysical Monograph*, 21 (1983), 23—56.
- [3] Ben-Avraham, Z. and S.Uyeda, The evolution of the China Basin and Mesozoic paleogeography of Borneo, *Earth Planet.Sci.Letts.*, 18 (1973), 365—376.
- [4] 李声玲,南海的形成与邻区构造关系,海洋地质与第四纪地质, 5 (1985), 1:71—82.