

文章编号:1009-2722(2016)08-0010-14

南海扩张过程及海陆变迁沉积记录

钱 坤^{1,2}, 闫 义^{1*}, 黄奇瑜^{1,3}, 陈文煌^{1,2}, 余梦明^{1,2}, 田陟贤¹

(1 中国科学院广州地球化学研究所边缘海地质重点实验室, 广州 510640;

2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 成功大学地球科学系, 台湾台南 701)

摘 要:南海南、北共轭大陆边缘盆地的对比研究是深入了解南海扩张过程及古地理格局的重要途径。由于历史原因,目前对南海南缘盆地构造—沉积演化研究还非常薄弱,极大地限制了对南海扩张及海陆变迁等基础地质问题的整体认识。综合南海及其周缘盆地沉积地层和沉积环境的研究进展,对南海扩张过程和古地理格局演化进行了分析。南海南、北缘盆地破裂不整合面存在着明显的穿时性,从 NE 向 SW 逐渐变年轻,对应南海海底扩张从 NE 向 SW 渐进式打开。台湾新生代地层破裂不整合面位于 33~39 Ma 之间,暗示南海洋壳开始形成的时间可能在 33~39 Ma 之间,有部分较老的洋壳可能已经向东俯冲消减掉。南海经历了从早期“北陆南海”逐渐演变为现今“北海南陆”的过程,南海北缘早期存在一个向东开口的海湾,可能为古南海的一部分。伴随南海的扩张,海侵范围由东向西逐渐扩展,从一个狭窄的海湾形成今日的形貌。南海北缘盆地物源在~25 Ma 左右发生明显的改变,早期主要为华南沿海的近源剥蚀沉积。在~25 Ma 后,来自扬子地块的沉积物逐渐增多。南海南缘盆地物源在~25 Ma 前与南海北缘盆地具有相似的物质来源,~25 Ma 后南海洋盆阻挡扬子地块的物源向南输送,南海南缘仍以陆块内部中生代花岗岩及火山岩为主要物质来源。

关键词:南海; 破裂不整合; 盆地沉积环境; 古地理

中图分类号: P736.1 文献标识码: A DOI:10.16028/j.1009-2722.2016.08002

南海作为东亚—西太平洋最大的边缘海之一,位于欧亚板块、太平洋板块和印度—澳大利亚板块的交汇区,面积 $350 \times 10^4 \text{ km}^2$,水深可达 5 500 m^[1]。北部陆架自东向西发育台西盆地、珠江口盆地、琼东南盆地、北部湾盆地和莺歌海盆地;南部为民都洛—巴拉望陆块—加里曼丹岛,其北侧的陆架自东向西发育巴拉望盆地、礼乐盆地、

文莱—沙巴盆地、北康盆地、曾母盆地及南薇西盆地等;西侧为印支半岛,陆架发育中建南盆地、万安盆地等;东侧为吕宋岛弧。南海海盆整体呈向东开口的喇叭状,其洋壳沿马尼拉海沟向东俯冲于花东海盆—吕宋岛弧之下(图 1)。南海演化历史相对短暂,但是却几乎经历了一个完整的 Wilson 循环,包括大陆张裂、海底扩张、俯冲消亡(马尼拉海沟)和碰撞造山(台湾弧陆碰撞带^[2]和民都洛陆块弧陆碰撞带^[3])4 个阶段,是研究大陆边缘裂解、弧陆碰撞造山等地质问题的天然实验室。同时南海陆架发育有 20 多个陆缘沉积盆地(图 1),是我国油气勘探和开发的重点区域^[4]。因此,南海地质结构、构造演化及形成机制长期以来一直受到中外学者的普遍关注^[5-10]。

收稿日期:2016-03-22

基金项目:国家自然科学基金“南海扩张过程及海陆变迁:菲律宾巴拉望—民都洛陆块地层沉积记录”(41476036)

作者简介:钱 坤(1992—),男,在读硕士,主要从事南海扩张及演化过程方面的研究工作。E-mail: qiankun@gig.ac.cn

* 通讯作者:闫 义(1974—),男,研究员,主要从事边缘海构造与盆地演化方面的研究工作。E-mail: yanyi@gig.ac.cn

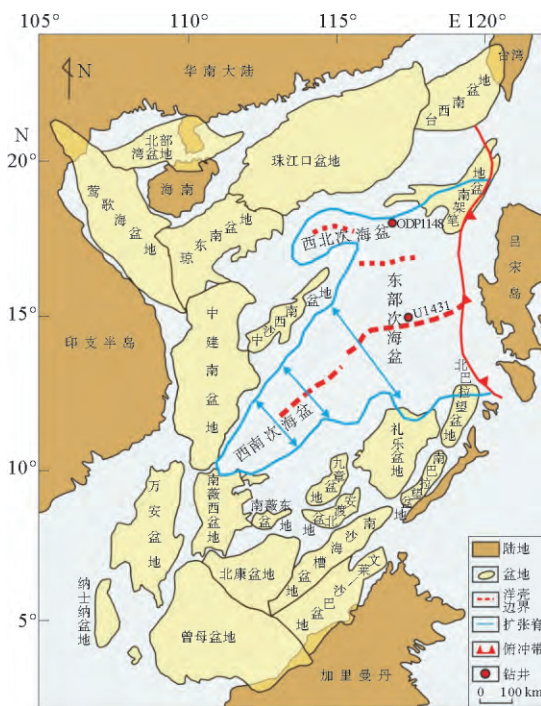


图 1 南海沉积盆地分布图(据文献[11],有改动)

Fig. 1 The distribution of sedimentary basin in South China Sea (SCS) (compiled upon reference [11])

1 研究进展及存在问题

近二三十年来,南海的地质勘探和科学调查为研究海盆的演变历史积累了大量新的资料。1999年 ODP184 航次在北部陆坡底部 1148 站位取得了渐新世(~ 30 Ma)以来的深海沉积剖面,首次为南海深海盆的形成、演化历史提供了直接证据^[12,13]。近年来的“南海深部过程计划”^[11]和 IODP349 航次大洋钻探,在南海的构造、沉积及古环境演化等方面取得了许多重大的发现:① ODP184 航次南海大洋钻探的一大收获是深海相渐新统的发现,说明早在南海海底扩张之前,已经存在深水盆地^[12-14];②另一大收获是在晚渐新世(28.5~23.8 Ma)地层发生明显的沉积间断和滑塌作用,代表着南海以及我国东部地区一次重大构造运动^[15-17],同时沉积地球化学分析的结果发现许多元素的含量和比值在此发生突变^[18-20];③ IODP349 航次在东部次海盆和西南次海盆的古扩张脊附近首次钻遇了洋壳,深拖磁异常探测和 IODP349 航次岩心的综合分析表明它们扩张停止的时间分别为 ~ 15 Ma 和 ~ 16 Ma,而南海东

北部的初始海底扩张始于 ~ 33 Ma^[21,22]。但由于技术手段的限制,以往对南海的研究主要集中在南海的北缘,对南海的其他陆缘,特别是与南海北缘具有共轭关系的南海南缘构造演化的研究还非常少,极大地限制了对南海扩张过程及盆地构造演化等基础地质问题的整体认识,目前对南海扩张过程及海陆变迁还存在很多的争议。

1.1 南海早期扩张与盆地演化的关系不清楚

南海洋壳所在的深水海盆可以分为东部、西南和西北 3 个次级海盆,不同学者在东部和西北次海盆均识别出东西向磁异常条带,而西南次海盆则发育 NE—SW 向磁异常条带^[7,8,23,24],它与东部次海盆以中南断裂为界^[25,26]。然而,不同学者对磁异常条带的解读存在明显分歧,其中东部次海盆的扩张时间争议不大,Taylor 和 Hayes 在南海东部次海盆鉴别出 5d-11(32~17 Ma)的磁异常条带,揭示扩张脊走向为近 EW 向^[27]。Briais 等进一步提出南海的 2 次海底扩张过程,第 1 次海底扩张发生在晚渐新世(32~25 Ma),开始形成东部次海盆—洋壳;第 2 次海底扩张时代为早中新世—中中新世(24~16 Ma),形成了东部次海盆和西南次海盆洋壳。两次扩张之间(25~23 Ma)发生了扩张轴走向由 E—W 向转为 NE—SW 向的跳跃^[7]。但西南次海盆的扩张时间却存在较大的多解性。Taylor 和 Hayes 通过磁异常条带对比认为,西南海盆扩张为 6b-5c,即早中新世—中中新世(23~16 Ma)^[27,28]。姚伯初^[8]在西南海盆中鉴别出 18~13 号磁异常条带,推测其形成时代为晚始新世—早渐新世(42~35 Ma)。根据 IODP349 航次在古扩张脊的钻探结果,东部次海盆和西南次海盆在 ~ 15 Ma 和 ~ 16 Ma 时几乎同时停止扩张^[21,22],这支持 Briais 等的磁异常条带解释和扩张模式,因此,通过磁异常条带基本可以确定南海东部次海盆先于西南次海盆扩张。然而南海早期扩张历史并不清楚,特别是始新世—渐新世扩张过程与南北共轭陆缘盆地的演化关系不清楚。此外,Hsu 等^[29]在南海东北缘台湾附近发现了磁异常条带 C17,表明南海最老洋壳出现在晚始新世(约 37 Ma),早于现今洋盆的年龄。南海是沿着马尼拉海沟俯冲消减后的残留海盆,是否有更老的洋壳被俯冲消减?

1.2 南海扩张前(始新世—早渐新世)古地理格局不清楚

1999年 ODP184 航次 1148 站位深海相渐新统的发现说明,早在南海海底扩张之前已经存在深水盆地。推测渐新世时的南海盆地是一个狭窄的海湾,两岸逼近^[13],但由于深海钻孔有限,同时地震资料在揭示深海深部地层方面还存在明显的局限,因此,对于南海洋盆扩张早期(始新世—早渐新世)的岩相古地理格局还缺乏完整的认识。作为南海北缘的共轭陆缘,南海南缘盆地,如礼乐盆地、巴拉望盆地等始新世—早渐新世主要为浅海—深海沉积。南海南缘始新世—早渐新世海相沉积与 ODP1148 站位所钻遇的深海相渐新统具有怎样的成因联系,在南海扩张早期,南海南、北陆缘具有怎样的古地理格局,都有待探讨。

1.3 对渐新世/中新世界线(~25 Ma)构造事件缺乏整体认识

ODP1148 站位发现 27.5~23 Ma 间的渐新世/中新世界面附近存在明显的沉积—构造不整合^[12,13,30],在地震反射剖面图上表现为双强反射层^[17],同时沉积相由晚渐新世的半远洋黏土向上变为白垩黏土或半远洋黏土与白垩团块混杂,沉积速率变慢,并且有地层缺失及沉积滑塌特征。这一不整合面不仅在 ODP1148 站深海沉积记录中存在,在南海北部珠江口盆地沉积记录中也同样存在^[17,20]。但最近对台湾西部麓山带地层的研究并未发现渐新世/中新世界面附近地层缺失或沉积崩滑现象,显示此沉积事件可能仅影响南海的深海区,而不及浅海陆棚区^[2]。这一构造事件不仅是因滑塌等因素形成的局部沉积间断事件,还是一次影响深远的构造事件。南海南缘盆地是否也经历过同样的构造事件影响?沉积地球化学分析的结果发现许多元素的含量和比值在此发生突变,尤其是钕同位素 ϵNd 值,从早渐新世的 -9~-10 降至中新世的 -12~-13,说明南海北缘盆地沉积物来源在 ~25 Ma 发生了明显的变化^[18]。一般认为 1148 站沉积物大部分应来源于珠江口或者华南^[18],但 Li 等则认为 ~27 Ma 以前 1148 站沉积物主要来自于南海西南部,~23 Ma 以后物源发生明显的改变,主要来自于华

南^[19]。这一物源转变是与南海扩张、洋脊跃迁导致的古地理格局有关,还是与青藏高原东缘隆升有关,尚认识不清。

2 南海南、北缘盆地演化特征对比

伴随南海的打开,南海海盆四周陆壳上发育有 20 多个具有不同构造发展历史的新生代沉积盆地(图 1),这些盆地包含了南海新生代区域构造演化的诸多历史信息。由于南海南北两侧陆缘具有一定的共轭关系,南海南、北缘盆地的对比成为全面揭示南海扩张过程及海陆变迁的重要途径。经过几十年的研究,特别是近年来南海北缘深水盆地油气勘探的开展,目前对南海北缘盆地构造演化及沉积过程有了比较全面的认识^[8,10,31-33]。作为南海北缘的共轭陆缘,南海南缘同样发育有一系列的新生代盆地,如曾母盆地、北康盆地、南薇西盆地、南薇东盆地、永暑盆地、礼乐盆地及北巴拉望盆地等(图 1)。这些盆地以破裂不整合面为界,发育断陷和拗陷双层结构^[11,34-37]。但不同的是南海南缘盆地始新世—渐新世沉积主要为海相沉积。由于南沙地区大部分盆地位于深水区,研究程度相对较低,钻井少且分布不均等原因,目前对于南海南缘盆地构造演化还缺少系统的研究,限制了对南海扩张过程及海陆变迁的深入认识。

2.1 盆地基底

2.1.1 南海北部盆地

已有钻井资料显示,在南海北缘的珠江口盆地、琼东南盆地及北部湾盆地均钻到了前新生代基底,岩性上以花岗岩、变质岩为主^[38]。而在莺歌海盆地,由于渐新世后海相沉积巨厚,基底未知,但在盆地东北缘莺东斜坡带钻遇基底,主要为花岗岩、变质岩、凝灰质砂岩和混合岩等^[39]。

2.1.2 南海南部盆地

南海南部盆地基底主要为前新生代中酸性—基性火成岩及变质岩^[11,37,40]。而在西北巴拉望盆地基底为变质浊积岩^[41]。礼乐盆地基底为中生代浅海相砂岩、页岩、砾岩和含煤系的砂岩^[42]。曾母盆地基底西部为中生代晚期至古近纪的深成岩和火山岩,南部主要为古新世—始新世浅变质、高变

形的类复理石油流沉积,东部可能由前新生代变质岩、沉积岩和火山岩组成,北部基底性质不明^[37]。

2.2 古新世—始新世

2.2.1 南海北部盆地

南海北缘盆地古新世地层目前仅在珠江口盆地和北部湾盆地钻遇。珠江口盆地古新世神狐组为盆地断陷初期形成的河流相快速堆积,主要为杂色及棕红色粗碎屑岩。始新世盆地发生大规模的断陷沉降,主要沉积半深湖相的暗色泥岩、页岩^[39, 43, 44]。值得注意的是,南海北缘东部台西盆地古新世至始新世主要为浅海相碎屑岩、页岩,含火山碎屑岩、灰岩沉积^[45]。据钻井揭露,晚古新世盆地主要沉积海相砂泥岩互层,始新世主要为浅海相页岩与钙质、泥质砂岩互层^[46]。

2.2.2 南海南部盆地

与南海北缘盆地相反,南海南缘盆地则主要发育浅海—半深海相沉积;西部北康盆地古新世—中始新世时西北部为冲积平原环境,以砂质沉积为主;东南部为滨—浅海相沉积环境,以砂泥互层、砂岩为主。晚始新世—早渐新世,盆地整体由陆相沉积变为海陆过渡相、潟湖相和滨海—浅海相沉积,碎屑岩粒度向上变细^[37, 47]。东部礼乐盆地古新统东坡组包含 2 套地层,下部为分布广泛的陆架灰岩,上部为冲积扇或三角洲相碎屑岩,主要为含砾砂岩、粉砂岩和泥岩。早—中始新统阳明组由灰绿—棕色钙质页岩组成,属半深海相沉积。晚始新统一早渐新统忠孝组为浅海相碎屑沉积,由灰绿色—红色泥岩和砂岩组成,与下伏地层呈区域不整合接触^[48]。西北巴拉望盆地早始新统主要为浅海相沉积,岩性以细砂岩、粉砂岩为主,夹少量页岩、泥岩^[41](图 2)。

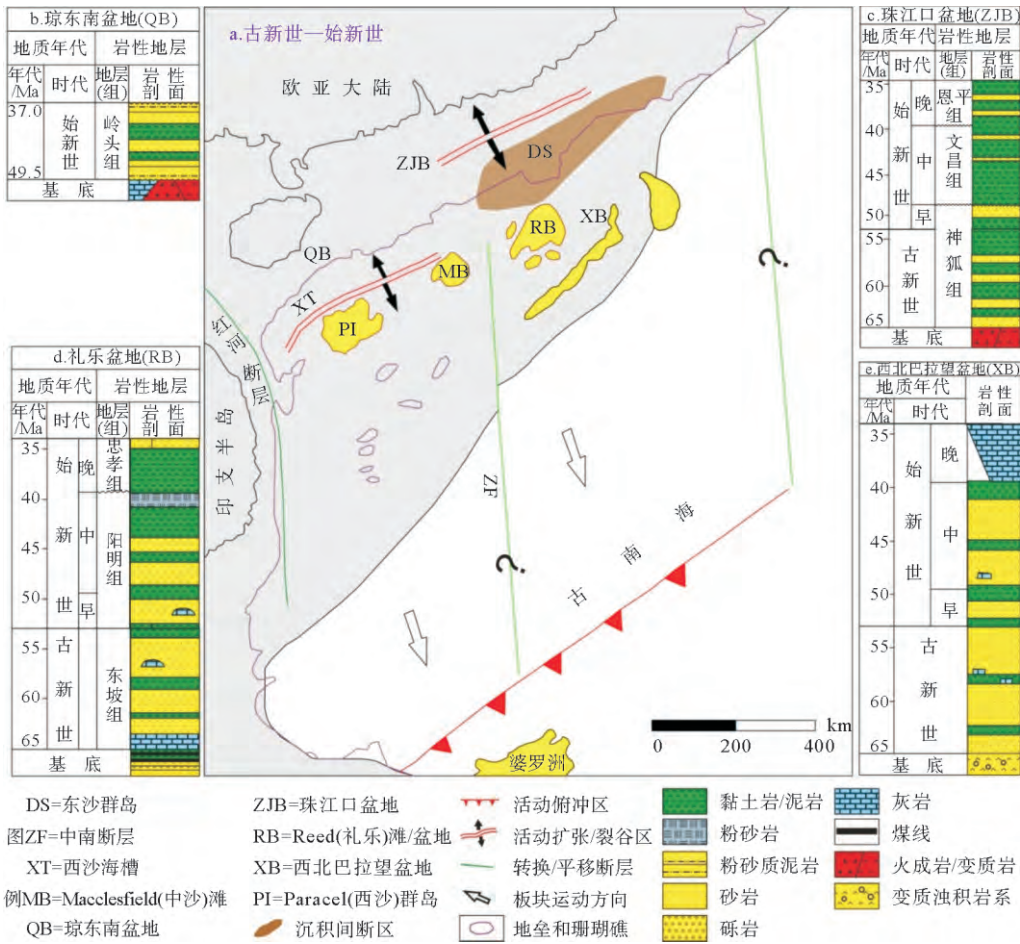


图 2 古新世—始新世南海构造地层演化(图 a 据文献[49];图 b 据文献[50]改编;图 c, d, e 据文献[48]改编)

Fig. 2 The tectonostratigraphic evolution of SCS in Paleocene to Eocene (a: compiled upon reference [49]; b: compiled upon reference [50]; c, d, e: compiled upon reference [48])

2.3 早渐新世

2.3.1 南海北部盆地

南海北缘盆地开始出现海侵,主要发育海陆交互相砂岩—泥岩沉积。琼东南盆地早渐新世崖城组岩性为灰白色砂砾岩、砂岩与深灰色泥岩互层,并可见煤层^[39],早期为陆相和海陆过渡相沉积,晚期可能完全变为海相沉积^[44]。珠江口盆地早渐新世恩平组岩性主要为碳质泥岩及煤系,为一套滨海、湖泊沼泽相沉积。东部台西盆地在早渐新世广泛沉降并接受海相沉积,主要为滨海相和浅海相砂岩—泥岩互层^[39]。

ODP184 航次 1148 站位发现渐新世半深海相沉积,大部分为单一的、富含石英的橄榄绿色钙质超微化石黏土,发育强烈的生物扰动构造,并在

早期出现快速堆积夹浊流沉积,推测为南海海底扩张之前强烈构造活动的产物^[15]。

2.3.2 南海南部盆地

南海南缘海相范围逐渐扩大,西部北康盆地在早渐新世接受从东向西的海侵,沉积环境从东部的浅海—半深海相,向西过渡为滨浅海相、三角洲相、沼泽相、冲积平原相,岩性主要以砂岩—泥岩为主^[47]。东部礼乐盆地早渐新世主要为浅海—半深海相碎屑岩沉积,岩性主要为灰绿色—红色泥岩和砂岩—泥岩互层^[42]。西北巴拉望盆地早渐新世为河流—陆架—内浅海沉积体系^[51]。民都洛陆块晚始新世—渐新世发育 Caguray 地层,岩性主要为灰绿色钙质砂岩、粉砂岩、泥岩及少量砾岩和灰岩,灰岩中含有大量的有孔虫和海藻碎屑(图 3)。

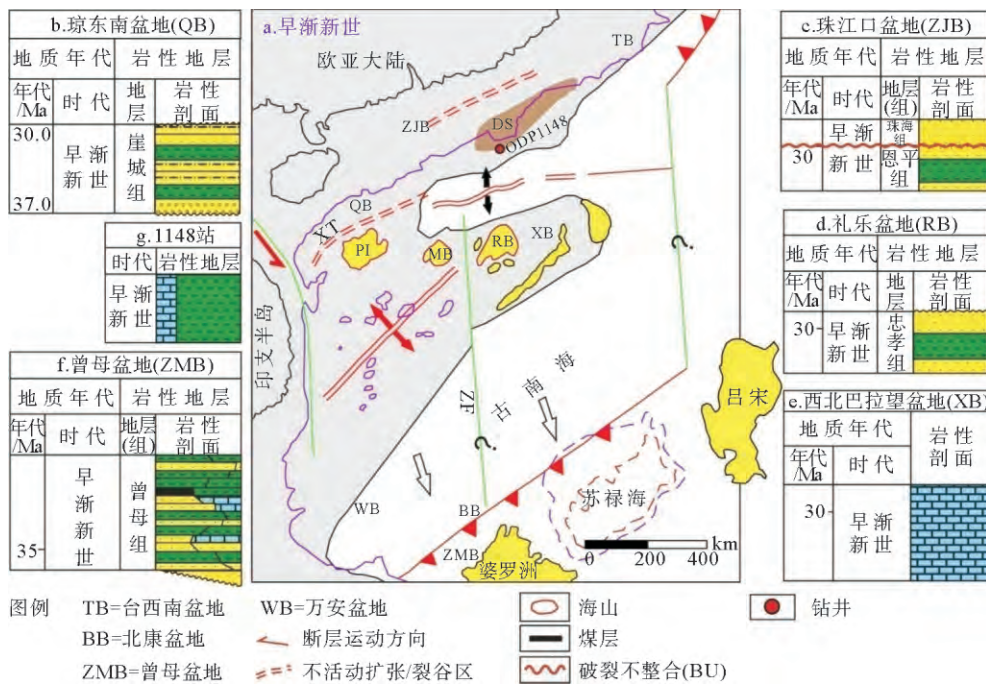


图 3 早渐新世南海构造地层演化(图 f 据文献[52]改编; 图 g 据文献[53]改编; 其他图例同图 2)

Fig. 3 The tectonostratigraphic evolution of SCS in Early Oligocene (f: compiled upon reference [52]; g: compiled upon reference [53]; Other legends are same as above)

2.4 晚渐新世—早中新世

2.4.1 南海北部盆地

南海北缘盆地海侵范围不断扩大。早渐新世,仅琼东南盆地发生海侵,至晚渐新世,南海北

缘盆地大部分地区结束裂陷期沉积,进入裂后期演化阶段,形成渐新世—中新世区域破裂不整合。琼东南盆地、莺歌海盆地和珠江口盆地均发生海侵,仅北部湾盆地为陆相^[54]。琼东南盆地上渐新统陵水组主要为滨浅海相和三角洲相浅灰色砾状

砂岩、中—粗粒砂岩与深灰色泥岩互层,局部夹灰岩,其上以砂岩夹泥岩沉积为主。下中新统三亚组分为两段,下部岩性为浅灰色中—粗粒砂岩、含砾砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩与灰—深灰色泥岩、粉砂质泥岩互层,局部含钙或煤;上部岩性为灰白、浅灰色中—细粒砂岩与灰色泥岩互层。珠江口盆地晚渐新世珠海组进入裂后沉积阶段,代表了陆相沉积趋于结束和海相沉积的开始。早中新世珠江组沉积环境为滨浅海相及碳酸盐岩台地相,岩性以碎屑岩为主,其下部主要为浅灰色砂岩、粉砂岩夹泥岩,局部区域发育碳酸盐岩台地,其上部主要为灰色泥岩、粉砂质泥岩与砂岩互层^[16]。东部台西盆地在早中新世为深海相泥岩或粉砂岩,并开始逐渐形成一套以三角洲相、滨—浅海相砂岩为主的沉积地层^[45]。

ODP184 航次 1148 站位在渐新统/中新统界面(25.5~23.8 Ma)呈现出明显的变化,表现为滑塌变形沉积带,具有明显的同生变形构造,碳酸盐岩含量明显升高。尽管这层沉积物岩性组成上仍以黏土沉积物和钙质超微化石为主,但显示出浊流沉积的特点,如旋卷层理、微弱的沉积塑性变形和浅色碳酸盐岩碎屑泥等。位于南海中央深海盆的 IODP349 航次 U1431 站位在火山岩层序(玄武岩)中发现了早中新世的沉积物夹层,主要为黄棕色黏土岩和黏土角砾岩。

2.4.2 南海南部盆地

和南海北部陆缘盆地类似,南海南缘大部分盆地在早渐新世—晚渐新世末期结束裂陷期,形成破裂不整合,盆地整体发育海相沉积。西部北康盆地从晚渐新世开始处于浅海—半深海环境,在早中新世,西纳土纳盆地也变成了海洋环境,使北康盆地远离物源区,同时由于处于温暖海域,发育大量碳酸盐台地和生物礁^[47]。而靠近南缘的曾母盆地在晚渐新世—早中新世为周缘前陆盆地演化阶段,形成一个以海退为主的沉积旋回^[37]。文莱—沙巴盆地在这一时期主要为滨浅海—深海相浊积砂岩、泥岩,含少量碳酸盐岩^[55,56]。东部礼乐盆地在早渐新世末期结束裂陷期,进入裂后期演化阶段。晚渐新世—早中新世为碎屑岩、碳酸盐岩和生物礁,以三角洲相、滨海相、浅海—半深海相沉积为主^[57]。西北巴拉望盆地晚渐新世裂陷期主要为开阔浅水陆架灰岩,早中新世裂后

沉降期出现泥质砂岩和泥岩,局部为珊瑚和红藻礁灰岩^[17]。晚渐新世为 Bugtong 地层,主要由灰岩、粉砂岩、砂岩和砾岩组成,早、晚渐新世之间的接触关系不是很清楚(图 4)。

2.5 中中新世—晚中新世

2.5.1 南海北部盆地

南海北缘盆地整体进入裂后拗陷演化阶段,普遍接受海相沉积。琼东南盆地中中新世—晚中新世沉积环境由滨浅海相及台地相变为滨浅海相。中中新统梅山组岩性主要为浅灰色厚层泥岩、细砂岩夹薄层泥岩、粉—细砂岩互层,普遍含钙质,上中新统黄流组以砂泥岩互层为主^[39]。珠江口盆地中中新统韩江组岩性以泥岩为主,夹砂岩,局部发育生物礁滩灰岩,为浅海相沉积,上中新统粤海组岩性主要为灰色泥岩与砂岩、粉砂岩互层,为一套浅海相及滨浅海相沉积,并逐渐演变为开阔浅海环境。台西盆地上中新统以三角洲相、滨—浅海相砂岩为主^[39]。

ODP184 航次 1148 站位中新统岩性主要为含钙质超微化石的橄榄灰和红棕色黏土,浅灰绿色黏土质超微化石软泥和灰绿色超微化石黏土的混合沉积物。IODP349 航次 U1431 站位中—上中新统主要为深橄榄色—棕色黏土岩和深灰绿色砂岩,为深海相沉积,在上中新统发现火山碎屑角砾岩和浊积岩,浊积岩岩性主要为深灰绿色黏土岩和粉砂黏土岩,含少量层状粉砂岩和细砂岩。粉砂质浊积岩和富超微化石/钙质浊积岩都有发现,粉砂质浊积岩可能触发自与马尼拉俯冲或台湾造山相关的火山活动和地震事件,源区在东部和东北部,钙质浊积岩可能来自邻近的源区,如发育有碳酸盐岩台地的海山。

2.5.2 南海南部盆地

南海南缘整体仍为海相沉积,但受南海洋壳俯冲造山影响,俯冲前缘逐渐由深海相向浅海相过渡。北康盆地在中中新世以浅海、半深海相沉积为主,在晚中新世水体进一步加深,同时,由于西部三角洲不断外推,在盆地西部发育三角洲相沉积^[47]。曾母盆地中中新世为前陆盆地定型和改造阶段,晚中新世后进入区域沉降阶段,以滨海—浅海相沉积为主^[37,59]。文莱—沙巴盆地在中中新世沉积相自南向北依次分布海岸平原、浅

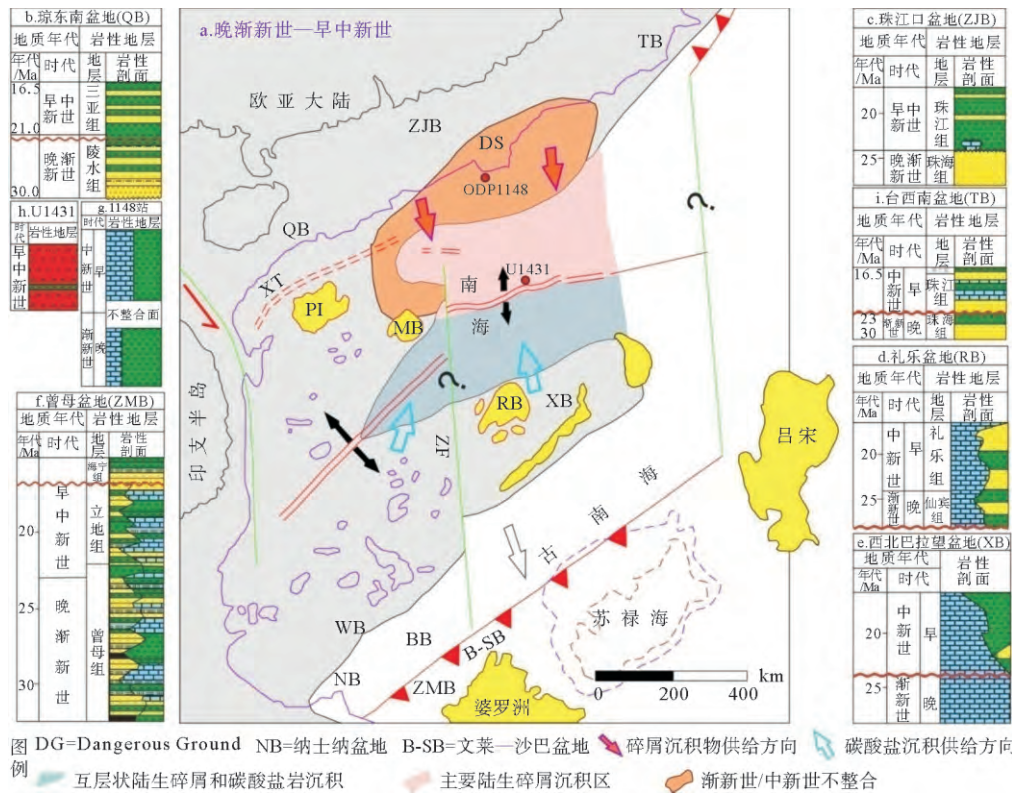


图 4 晚渐新世—早中新世南海构造地层演化 (图 h 据文献[22]改编; 图 i 据文献[58]改编; 其他图例同图 2)

Fig. 4 The tectonostratigraphic evolution of SCS in Late Oligocene to Early Miocene

(h: compiled upon reference [22]; i: compiled upon reference [58]; Other legends are same as above)

海环境、开阔海环境，以海退为主，并延续至今^[55]。东部礼乐盆地中新世礼乐组为白色、浅黄色砂岩、泥岩、碳酸盐岩和生物礁，沉积相为内浅海和亚滨海潮滩相，海相沉积覆盖了整个盆地，但在盆地周围的斜坡带，半深海相泥岩已直接覆盖在了碳酸盐岩之上^[42]。西北巴拉望盆地中中新世为厚层页岩和泥岩，夹粉砂岩与砂岩互层，晚中新世为砾岩与砂岩互层、灰岩、燧石层和页岩，与下伏地层呈不整合接触，水深逐渐变浅，沉积环境由深海—半深海相变为浅海相^[41]。民都洛陆块中新统由下到上包含 Tangon、Napisian 和 Pocanil 3 套地层，主要由灰黑色炭质页岩、砂岩、灰岩及砾岩组成。民都洛陆块晚渐新世—中中新世砂岩、灰岩对应于南海张裂后的裂后拗陷沉积，中、晚中新世之间的不整合对应于南海洋壳的俯冲造山(图 5)。

2.6 上新世之后

2.6.1 南海北部盆地

南海北部上新世地层主要为浅海—半深海相

沉积，岩性主要为深灰色泥岩、粉砂质泥岩、夹细砂岩^[39, 45]。在第四纪，大部分盆地均为一套灰色未固结的黏土层夹粉砂层及砂层，并含生物碎屑^[39]。

ODP184 航次 1148 站位中新统/上新统界面以浅色富碳酸盐超微化石黏土层的增加和黄铁矿结核的消失为特征。上新统一更新统沉积物岩性主要为含石英和超微化石的具强烈生物扰动的黏土，下部含更多的超微化石，上部含更多的黏土。上更新统则含有大量的硅质化石。IODP349 航次 U1431 站位上新世后岩性主要为深灰绿色黏土和粉砂质黏土岩，同时还频繁出现具有粒序层理的粉砂质浊积夹层。

2.6.2 南海南部盆地

北康盆地晚中新世—第四纪以半深海相沉积为主^[37]。礼乐盆地上新世后主要为滨海、浅海至半深海相砂岩、泥岩，多发育碳酸盐岩和生物礁，而沉降区主要堆积碎屑岩^[42]。西北巴拉望盆地上新世、更新世的现代沉积主要由浅水灰岩组成，局部为钙屑灰岩^[41]。民都洛陆块晚中新世至更

新世地层不整合覆盖于老地层之上,主要由砾岩、 砂岩、页岩及灰岩组成(图 6)。

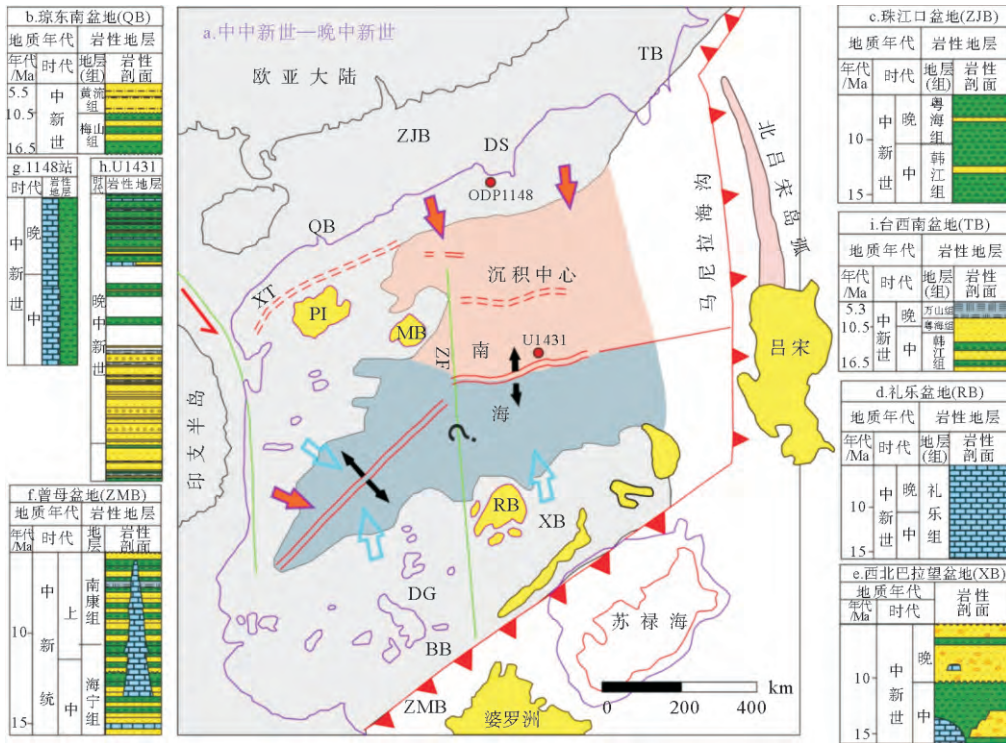


图 5 中新世—晚中新世南海构造地层演化 (图例同图 2)

Fig. 5 The tectonostratigraphic evolution of SCS in Middle Miocene to Late Miocene (Legends are same as above)

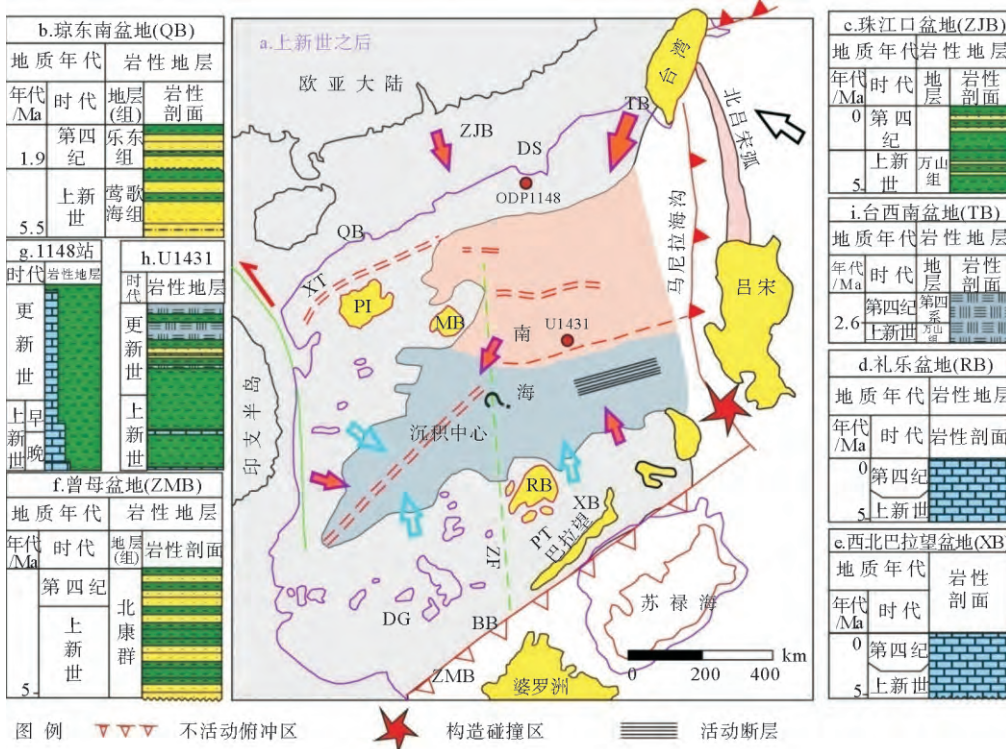


图 6 上新世后南海构造地层演化 (其他图例同图 2)

Fig. 6 The tectonostratigraphic evolution of SCS after Pliocene (Other legends are same as above)

3 南海扩张过程及古地理演化

3.1 南海扩张与盆地演化对比

任何被动大陆边缘破裂产生新洋壳的过程中(如大西洋、澳大利亚大陆北缘、南海)总存在3套层序,由下而上为:前裂陷层序(基盘)、裂陷层序(断陷盆地)及裂后层序,分别以张裂不整合面及破裂不整合面分界。被动大陆边缘因大陆地壳持续拉张减薄,最后基性岩浆冒出,海洋地壳形成。伴随大陆边缘裂解,在大陆边缘盆地裂陷期和裂后期地层之间以破裂不整合面分界,对应于洋壳的形成。南海北缘盆地具有被动大陆边缘所具备的典型双层结构,即下层为断陷和断隆,上层为披盖式坳陷,断陷与坳陷之间为破裂不整合,并以此为界划分为裂陷期和裂后期。根据大量地震剖面的对比分析,南海北缘盆地破裂不整合表现为由东向西的穿时,由珠江口盆地的T70(~32 Ma)^[60],向西穿时到琼东南盆地的T60(~23 Ma)^[61, 62]。珠江口盆地裂陷期主要为冲积相—湖相—沼泽相沉积,自下而上包括古新统神狐组、始新统文昌组和下渐新统恩平组;裂后期沉积则主要由海相地层组成^[63]。琼东南盆地裂陷期的崖城组及陵水组主要为滨岸(含沼泽)和半封闭浅海沉积环境;裂后期的三亚组、梅山组及黄流组等为浅海—半深海—深海沉积环境^[61, 62]。位于琼东南盆地南部的中建南盆地破裂不整合面的时间为~16 Ma,在地震剖面上对应于T50反射层^[63, 64]。因此,可以看出南海北缘盆地破裂不整合的时间自NE向SW方向具有穿时性,逐渐变年轻。

南海东北部台湾岛不同构造单元地层研究发现,台湾新生代地层中始新世—晚渐新世地层之间也存在一个区域性破裂不整合面,不整合面时间位于33~39 Ma之间^[65, 66]。南海IODP349航次U1435站位的钻探结果显示破裂不整合面时间为~33 Ma。南海东北缘台湾附近的磁异常条带C17表明,南海最老洋壳出现在晚始新世,约37 Ma^[29]。它们共同指示南海开始扩张的时间应该在33~39 Ma之间,早于现存海底洋壳的年龄(~32 Ma)^[7, 67]。由于南海自中中新世开始向东

俯冲于菲律宾海板块之下^[7, 68],可能有部分较老的洋壳已经向东俯冲消减掉。

南海南缘西北巴拉望盆地的破裂不整合面时间为早渐新世(32~20.5 Ma)^[69]。民都洛陆块破裂不整合的时代推测在早—中渐新世(33~28 Ma)^[70]。礼乐盆地破裂不整合面时间为~23 Ma^[11]。位于南沙地块西侧的北康盆地和南薇西盆地破裂不整合时间为~16 Ma,在地震剖面上对应为T40,其上为裂后期的半深海相泥页岩沉积,地层稳定披覆在裂陷地层之上,其下为裂陷期砂泥岩沉积,见到广泛的断裂活动和剥蚀^[71]。综上所述可知,南海南缘盆地破裂不整合同样存在着明显的穿时性,由早渐新世穿时到了中中新世,自东向西逐渐变年轻。

洋脊的渐进式扩张和海盆的渐进式演化是边缘海构造演化的一种重要形式^[72]。对南海西南次海盆的大量研究表明,西南次海盆具有明显的渐进式扩张特征^[72, 73]。通过对南海北缘盆地(包括台湾地区)与南海南缘盆地破裂不整合的研究发现,破裂不整合年代存在着明显的穿时性,从北东往南西逐渐变年轻,暗示了南海海底扩张从NE往SW渐进式打开的过程。南海IODP349航次进一步证实了这一过程,东部次海盆海底扩张的时间为早渐新世(~33 Ma),西南次海盆海底扩张的时间为晚渐新世(~25 Ma)^[69],两者停止扩张的时间均为早中新世(16~20 Ma),东部次海盆早于西南次海盆扩张。

3.2 南海古地理格局及海陆变迁

南海南北共轭陆缘盆地早期总体呈“南海北陆、东海西陆”的古地理格局。古新世—早始新世,南海北缘受NE向断裂系统的控制,形成断陷带和断隆带相间分布的地貌格局,发育陆相河—湖沉积体系,仅在东部的台西、台西南盆地出现滨海—浅海相碎屑岩沉积。晚始新世—渐新世,南海开始海底扩张,南沙陆块从华南大陆裂离并向东南漂移,南海北侧陆缘仍以陆相沉积为主(图2)。但ODP184航次在北部陆坡底部钻遇深海相渐新统,说明早在南海海底扩张之前,已经存在深水盆地。渐新世,南海盆地形成一个狭窄的海湾,两岸逼近^[13],海湾范围在北侧陆缘从台西南盆地扩展到了琼东南盆地。

南缘盆地古新世—早始新世则主要发育浅海—半深海沉积。礼乐盆地广泛分布陆架灰岩,盆地以西主要为陆相、河湖相沉积,在一些深洼槽发育中深湖相地层。西巴拉望盆地始新世—早渐新世克罗克组在尼多-1 井为深灰色泥岩、粉砂岩和极细—中砂岩,属半深海—深海沉积,不整合于白垩系之上。晚始新世—渐新世,南海南部陆缘海盆海域面积扩展至北康盆地、南薇西盆地大部分地区,沉积环境以海陆过渡相和滨海—浅海相为主,只在它们的西北及以西的地区仍以陆相—三角洲相沉积为主。早渐新世,从北康盆地西北、南薇西盆地继续向北发生海侵,此时,西南次海盆开始海底扩张,南海南部海侵范围扩展至西南次海盆的中建南、万安盆地等(图 3)。

晚渐新世以来,南海北缘盆地逐渐进入以海相沉积为主的拗陷期。到中新世,伴随南海的扩张及俯冲造山,南海北缘整体沉降,但南缘则逐渐抬升,形成南高北低的古地理格局。北部湾盆地从东南方向发生海侵,接受滨海相沉积。至此,南海北部全区发生整体沉降,陆坡基本形成,南海北缘由半封闭的沉积体系向开阔浅海沉积体系演化^[74]。整个区域以滨浅海相沉积为主,并逐渐过渡到晚中新世浅海、半深海相沉积。

南海西南部中建南、万安盆地等在中新世开始接受海侵,并在中中新世末期显著沉降,形成深海沉积并延续至今。至此,南海南部整个区域以滨海—浅海—半深海相沉积为主。早中新世,由于古南海的俯冲消亡及南海洋壳向东俯冲,导致南海东南部逐渐抬升,因此推测,西南次海盆 U1431 站位晚中新世的黏土岩和粉砂岩浊积岩流可能来自婆罗洲或巴拉望陆块,层间碳酸盐浊积岩流则可能来自礼乐滩(图 4、5)。

上新世之后,南海北部大陆边缘盆地主要为滨浅海、浅海—半深海相砂岩、粉砂岩、泥岩及未固结的海相黏土层、粉砂层及砂层沉积,并含生物碎屑。南海南部盆地基本处于区域沉降阶段,沉积浅海—半深海相碎屑沉积,东南部的礼乐盆地和西北巴拉望盆地主要沉积碳酸盐岩台地,局部为钙质灰岩。由于南海东南部的俯冲造山作用,使洋壳持续抬升,导致东南部海盆的陆源和碳酸盐沉积物主要来自南部陆块。同时,南海海盆沉积速率发生变化。晚中新世,东部次海盆北部沉

积速率最快,沉积来源可能主要来自北部大陆边缘。上新世,西南次海盆和东部次海盆南部靠近古洋脊的区域沉积速率最快,这种沉积模式和趋势开始于上新世,直延续到现在(图 6)。

3.3 渐新世/中新世界线构造事件和沉积过程

ODP1148 站以及珠江口盆地沉积物均记录了渐新世末发生的重大地质构造事件。这一构造事件导致南海北缘坡折带向北跃迁,白云凹陷由渐新世晚期的浅水陆架环境转为中新世以后的深水陆坡环境。同时,南海北部沉积物成分发生剧烈改变,出现渐新世—中新世地球化学成分上的跳跃。这一构造事件在时间上与南海扩张轴在 C7(~25 Ma)发生跳跃的时间十分吻合。如果这一构造事件与南海扩张轴的跳跃有关,那么作为共轭的大陆边缘,南海南缘同样应受到这一事件的影响。另外,沉积物地球化学的变化暗示南海北缘盆地沉积物来源发生了明显的变化,从渐新世近源以砂为主的沉积转变为中新世远源以泥为主的沉积,对应于青藏高原东缘的隆升及南海的裂后沉降。但 Li 等通过 Nd 同位素分析认为,27 Ma 以前 1148 站沉积物主要来自于南海西南部,23 Ma 以后物源发生明显的改变,主要来自于华南^[19]。如果~25 Ma 以前沉积物来自于南海西南部,那么南海南缘盆地沉积物应与南海北缘盆地沉积物具有相似的属性。

台湾新生代地层砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄的结果显示,台湾新生代地层物源在晚渐新世—早中新世(~31~25 Ma)期间发生明显变化。台湾始新世和渐新世砂岩的碎屑锆石 U-Pb 年龄谱显示含有大量的显生宙锆石颗粒,其中以燕山期(180~67 Ma)锆石颗粒为主,几乎不含新元古代(600~1 000 Ma)、古元古代晚期(1 700~2 000 Ma)和新太古代至古元古代早期(2 300~2 800 Ma)锆石颗粒。然而,在中新世砂岩中则出现明显的差别,中新世砂岩碎屑锆石颗粒以印支期(257~205 Ma)为主,燕山期则次之,同时还含有大量新元古代、古元古代晚期和新太古代至古元古代早期的锆石颗粒。由于二叠纪到白垩纪岩浆岩(分为印支期和燕山期)广泛发育在华南沿海地区,前人的研究发现这些岩石的年龄具有从沿海向内陆逐渐变年轻的趋势。结合华南地区岩石组

成特征,台湾渐新世地层与早中新世地层碎屑锆石年龄组成的变化可能反映源区向内陆的迁移。在早中新世砂岩中,明显出现华南内陆的锆石年龄信号,即含大量前寒武纪锆石颗粒,这些锆石颗粒主要位于扬子地块的东南缘,这说明中新世地层的物源区可能已经到达扬子地块的东南缘。台湾始新世—渐新世砂岩中的碎屑锆石年龄谱缺少前寒武纪和三叠纪的年龄,而该年龄段的岩石在印支—巽他陆架及婆罗洲地区广泛出露。据此推断在~31 Ma 以前南海北缘盆地沉积物来自华南沿海地区,而不是南海西南部。在~31~25 Ma 期间,源区逐渐向内陆迁移,在~25 Ma 后,台湾地层沉积物主要来自扬子地块^[75](图7左)。

民都洛陆块晚始新世 Lasala 组碎屑锆石 U-Pb 年龄谱(图7, P-06)与南海北缘台湾地层年龄谱组成相似,说明民都洛—巴拉望陆块为始新世—中新世由于南海的打开从华南大陆裂离而来,民都洛陆块早期物源同样来自华南沿海地区。但渐新世后民都洛地层物源(图7右)并没有和南海北缘盆地一样表现出向华南内陆迁移的特征,表明随着巴拉望微陆块的南移,南海洋盆扩张阻挡扬子地块的物源向南输送,民都洛物源仍以中生代花岗岩及火山岩为主,这一变化对应于南海的扩张。

4 结论

(1)南海南、北缘盆地破裂不整合面存在着明显的穿时性,从 NE 向 SW 逐渐变年轻,说明南海海底扩张从 NE 向 SW 渐进式打开。台湾新生代地层中始新世—晚渐新世地层之间破裂不整合面时间位于 33~39 Ma 之间,暗示南海洋壳开始张裂形成的时间可能在 33~39 Ma 之间,有部分较老的洋壳可能已经向东俯冲消减掉。

(2)南海古地理格局经历了从早期“北陆南海”逐渐演变为现今“北海南陆”的过程,南海北缘早期存在一个向东开口的海湾,可能为古南海的一部分。伴随南海的扩张,海侵范围由东向西逐渐扩展,从一个狭窄的海湾形成今日的形貌。

(3)南海北缘盆地物源在~25 Ma 左右发生明显的改变,早期主要为华南沿海的近源剥蚀沉积,而不是来自南海西南部。在~31~25 Ma 期间,源区逐渐向内陆迁移,在~25 Ma 后,扬子地块物源逐渐增多。南海南缘盆地物源在~25 Ma 前与南海北缘盆地具有相似的物质来源,主要为华南沿海的近源剥蚀沉积,~25 Ma 后由于南海的扩张,南海洋盆阻挡扬子地块的物源向南输送,而仍以陆块内部中生代花岗岩及火山岩为主要物质来源。

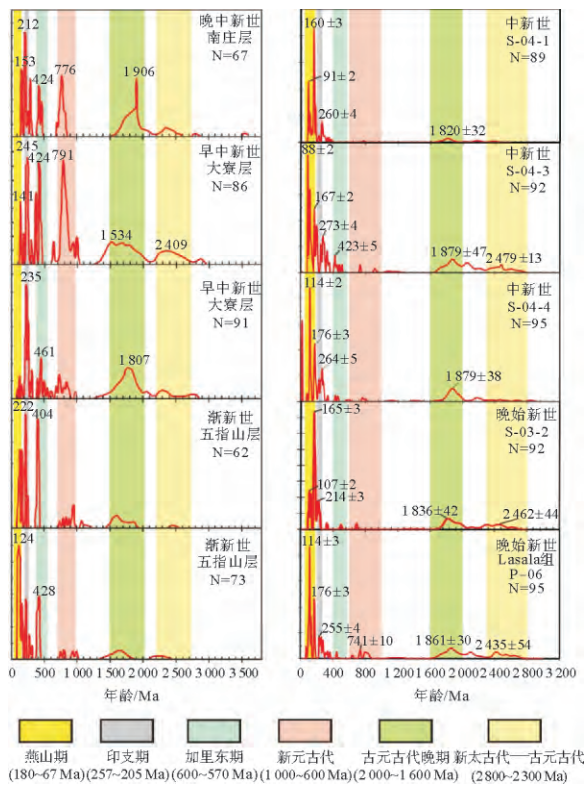


图7 左:台湾西部麓山带北部新生代地层碎屑锆石 U-Pb 年龄谱(据文献^[75]); 右:民都洛新生代地层碎屑锆石 U-Pb 年龄谱(钱坤等,未发表数据)。

Fig. 7 Left: Cenozoic detrital zircon U-Pb age spectrum of north Western foothills, Taiwan (compiled upon reference ^[75]).

Right: Cenozoic detrital zircon U-Pb age spectrum of Mindoro (Qian Kun et al. unpublished data)

参考文献:

[1] 汪品先. 追踪边缘海的生命史:“南海深部计划”的科学目标[J]. 科学通报, 2012 (20): 1807-1826.
 [2] 黄奇瑜, 闫义, 赵泉鸿, 等. 台湾新生代层序:反映南海张裂、层序和古海洋变化机制[J]. 科学通报, 2012 (20): 1842-1862.

- [3] Jr G P Y, Dimalanta C B, Jr R A T, et al. Collision, subduction and accretion events in the Philippines: A synthesis [J]. *Island Arc*, 2003, 12(2):77-91.
- [4] 朱伟林, 张功成, 钟 锴, 等. 中国南海油气资源前景[J]. *中国工程科学*, 2010, 12(5):46-50.
- [5] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Sea basin[J]. *Washington D C American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, 1983, 27:23-56.
- [6] Ru K, Pigott J D. Episodic rifting and subsidence in the South China sea[J]. *Am. Assoc. Pet. Geol., Bull., (United States)*, 1986, 70(9):1136-1155.
- [7] Briaux A, Patriat P, Tapponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: Implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1993, 98(B4):6299-6328.
- [8] 姚伯初. 中美合作调研南海地质专报[M]. 北京:中国地质大学出版社, 1994.
- [9] Zhou D, Ru K, Chen H Z. Kinematics of Cenozoic extension on the South China Sea continental margin and its implications for the tectonic evolution of the region[J]. *Tectonophysics*, 1995, 251(s 1-4):161-177.
- [10] 龚再升. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京:科学出版社, 1997.
- [11] 孙 珍, 赵中贤, 周 蒂, 等. 南沙海域盆地的地层系统与沉积结构[J]. *地球科学:中国地质大学学报*, 2011, 36(5):798-806.
- [12] Wang P, Prell W L, Blum P, et al. *Proceedings of Ocean Drilling Program, Initial Report, 184[C]// College Station, TX: Ocean Drilling Program, 2000.*
- [13] 汪品先, 赵泉鸿, 翦知湑, 等. 南海三千万年的深海记录[J]. *科学通报*, 2003, 48(21):2206-2215.
- [14] Li Q, Jian Z, Su X. Late Oligocene rapid transformations in the South China Sea[J]. *Marine Micropaleontology*, 2005, 54(s 1-2):5-25.
- [15] 邵 磊, 李献华, 汪品先, 等. 南海渐新世以来构造演化的沉积记录——ODP 1148 站深海沉积物中的证据[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(4):539-544.
- [16] 李前裕, 郑洪波, 钟广法, 等. 南海晚渐新世滑塌沉积指示的地质构造事件[J]. *地球科学:中国地质大学学报*, 2005, 30(1):19-24.
- [17] 庞 雄, 陈长民, 邵 磊, 等. 白云运动:南海北部渐新统一中新统重大地质事件及其意义[J]. *地质论评*, 2012, 53(2):145-151.
- [18] Clift P, Lee J I, Clark M K, et al. Erosional response of South China to arc rifting and monsoonal strengthening: a record from the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2002, 184(3):207-226.
- [19] Li X H, Wei G, Shao L, et al. Geochemical and Nd isotopic variations in sediments of the South China Sea: A response to Cenozoic tectonism in SE Asia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 211(3-4):207-220.
- [20] 邵 磊, 李献华, 汪品先, 等. 南海渐新世以来构造演化的沉积记录——ODP 1148 站深海沉积物中的证据[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(4):539-544.
- [21] Li C F, Xu X, Lin J, et al. Ages and magnetic structures of the South China Sea constrained by deep tow magnetic surveys and IODP Expedition 349[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2014, 15(12):4958-4983.
- [22] Expedition 349 Scientists, Opening of the South China Sea and its implications for southeast Asian tectonics, climates, and deep mantle processes since the late Mesozoic, *Int[C]// Ocean Discovery Program Prelim. Rep., 349*, 2014, 1-109, doi:10.14379/iodp.pr.349.2014.
- [23] Barckhausen U, Roeser H A. Seafloor spreading anomalies in the South China Sea revisited[J]. *Continent-Ocean Interactions Within East Asian Marginal Seas*, 2004, 149:121-125.
- [24] 李春峰, 宋陶然. 南海新生代洋壳扩张与深部演化的磁异常记录[J]. *科学通报*, 2012(20):1879-1895.
- [25] 姚伯初. 中南—礼乐断裂的特征及其构造意义[J]. *南海地质研究*, 1995(7):1-14.
- [26] Li C F, Zhou Z, Li J, et al. Structures of the northeasternmost South China Sea continental margin and ocean basin: geophysical constraints and tectonic implications[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2007, 28(1):59-79.
- [27] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Sea basin[J]. *Washington D C, American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, 1983, 27:23-56.
- [28] Hayes D E. The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands[M]// *The Tectonic and geologic evolution of Southeast Asian seas and islands*. American Geophysical Union, 1980.
- [29] Hsu S K, Yeh Y C, Doo W B, et al. New bathymetry and magnetic lineations identifications in the Northernmost South China Sea and their tectonic implications[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2004, 25(1):29-44.
- [30] Li Q, Wang P, Zhao Q, et al. A 33Ma lithostratigraphic record of tectonic and paleoceanographic evolution of the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2006, 230(s 3-4):217-235.
- [31] 李思田, 林畅松, 张启明, 等. 南海北部大陆边缘盆地幕式裂陷的动力过程及 10Ma 以来的构造事件[J]. *科学通报*, 1998(8):797-810.
- [32] 张功成, 米立军, 陶维祥, 等. 深水区—南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域[C]// *第二届中国石油地质年会——中国油气勘探潜力及可持续发展论文集*, 2006:15-21.
- [33] 朱伟林. 中国近海油气勘探进展[J]. *中国工程科学*,

- 2010, 12(5):18-24.
- [34] 金庆焕, 李唐根. 南沙海域区域地质构造[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(1):1-8.
- [35] 姚伯初. 南海海盆新生代的构造演化史[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(2): 1-13.
- [36] 万玲, 吴能友, 姚伯初, 等. 南沙海域新生代构造运动特征及成因探讨[J]. 南海地质研究, 2003, (00):8-16.
- [37] 姚永坚, 夏斌, 徐行. 南海南部海域主要沉积盆地构造演化特征[J]. 南海地质研究, 2005 (1): 1-11.
- [38] 邵磊, 尤洪庆, 郝沪军, 等. 南海东北部中生界岩石学特征及沉积环境[J]. 地质论评, 2007, 53(2):164-169.
- [39] 马文宏, 何家雄, 姚永坚, 等. 南海北部边缘盆地第三系沉积及主要烃源岩发育特征[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(1):41-48.
- [40] 徐行, 姚永坚, 王立非. 南海南部海域南薇西盆地新生代沉积特征[J]. 中国海上油气:地质, 2003, 17(3):170-175.
- [41] 张翀, 吴世敏, 丘学林. 南海南部海区前陆盆地形成与演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(1):61-70.
- [42] Yao Y, Liu H, Yang C, et al. Characteristics and evolution of Cenozoic sediments in the Liyue Basin, SE South China Sea[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 60 (Complete):114-129.
- [43] 朱伟林, 吴国璋, 黎明碧. 南海北部陆架北部湾盆地古湖泊与烃源条件[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(1):8-14.
- [44] 魏魁生, 崔阜云, 叶淑芬, 等. 琼东南盆地高精度层序地层学研究[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2001, 26 (1): 59-66.
- [45] 薛友辰, 李三忠, 刘鑫, 等. 南海东部俯冲系统分段性及相关盆地群成盆动力学机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(6): 129-147.
- [46] 钟建强, 黄慈流. 台西盆地新生代构造的演化[J]. 海洋与湖沼, 1996(3):271-278.
- [47] 王嘹亮, 吴能友, 周祖翼, 等. 南海西南部北康盆地新生代沉积演化史[J]. 中国地质, 2002, 29(1):96-102.
- [48] 李鹏春, 赵中贤, 张翠梅, 等. 南沙海域礼乐盆地沉积过程和演化[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2011, 36 (5):837-844.
- [49] Li C, Li J, Ding W, et al. Seismic stratigraphy of the central South China Sea basin and implications for neotectonics[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2015, 120(120):1377-1399.
- [50] Wang C, Liang X, Xie Y, et al. Provenance of Upper Miocene to Quaternary sediments in the Yinggehai-Song Hong Basin, South China Sea: Evidence from detrital zircon U-Pb ages[J]. Marine Geology, 2014, 355(9):202-217.
- [51] 张功成, 谢晓军, 王万银, 等. 中国南海含油气盆地构造类型及勘探潜力[J]. 石油学报, 2013, 34(4):611-627.
- [52] 周蒂, 孙珍, 杨少坤, 等. 南沙海区曾母盆地地层系统[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2011, 36(5):789-797.
- [53] Ocean Drilling Program: Leg 184 Preliminary Report[J]. 1999.
- [54] 朱伟林, 张功成, 高乐. 南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向[J]. 石油学报, 2008, 29(1):1-9.
- [55] 姚伯初, 万玲, 刘振湖. 南海海域新生代沉积盆地构造演化的动力学特征及其油气资源[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2004, 29(05):543-549.
- [56] 郑涛, 王登, 周世卿, 等. 文莱—沙巴盆地文莱区西南缘中-上新统烃源岩地球化学特征[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(5):20-24.
- [57] 熊莉娟, 李三忠, 索艳慧, 等. 南海南部新生代控盆断裂特征及盆地群成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(6):113-127.
- [58] 李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 等. 南海的盆地群与盆地动力学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(6):55-78.
- [59] 刘振湖. 南海南沙海域沉积盆地与油气分布[J]. 大地构造与成矿学, 2005, 29(3):410-417.
- [60] 陈长民. 珠江口盆地东部石油地质及油气藏形成条件初探[J]. 中国海上油气:地质, 2000, 14(2): 73-83.
- [61] 蔡佳. 琼东南盆地古近系古地貌恢复及其对层序样式和沉积特征的控制[D]. 武汉:中国地质大学, 2009.
- [62] 杜同军. 琼东南盆地层序地层和深水沉积充填特征[D]. 青岛:中国海洋大学, 2013.
- [63] 刘见宝, 孙珍, 刘彦宾, 等. 琼东南盆地新生代构造研究现状及展望[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(4):1-9.
- [64] 陈玲. 南海中建南盆地构造样式分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(1):53-58.
- [65] Huang C Y, Yi Y, Liew P M, et al. Significance of indigenous Eocene larger foraminifera *Discocyclina dispansa* in Western Foothills, Central Taiwan: A Paleogene marine rift basin in Chinese continental margin[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 62(S1): 425-437.
- [66] Huang C Y, Chi W R, Yan Y, et al. The first record of Eocene tuff in a Paleogene rift basin near Nantou, Western Foothills, central Taiwan[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 69(12):3-16.
- [67] Cande S C, Kent D V. Revised calibration of geomagnetic polarity time scale for the Late Cretaceous and Cenozoic[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1995, 100(B4):6093-6095.
- [68] Yang T F, Tien J L, Chen C H, et al. Fission-track dating of volcanics in the northern part of the Taiwan-Luzon Arc: eruption ages and evidence for crustal contamination[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 1995, 11(2):81-93.
- [69] Franke D, Savva D, Pubellier M, et al. The final rifting evolution in the South China Sea[J]. Marine & Petroleum Geology, 2014, 58:704-720.

- [70] Marchadier Y, Rangin C. Polyphase tectonics at the southern tip of the Manila trench, Mindoro-Tablas Islands, Philippines[J]. *Tectonophysics*, 1990, 183(s 1-4):273-287.
- [71] 孙 珍, 赵中贤, 李家彪, 等. 南沙地块内破裂不整合与碰撞不整合的构造分析[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(12):3196-3209.
- [72] 李家彪, 丁巍伟, 吴白银, 等. 南海西南海盆的渐进式扩张[J]. *科学通报*, 2012(20):1896-1905.
- [73] Huchon P, Nguyen T N H, Chamotrooke N. Propagation of continental break-up in the southwestern South China Sea[J]. *Geological Society London Special Publications*, 2001, 187(1):31-50.
- [74] 闫 义, 夏 斌, 林 舸, 等. 南海北缘新生代盆地沉积与构造演化及地球动力学背景[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(2): 53-61.
- [75] 兰 青. 南海扩张及华南沿海地貌和系演化:来自台湾新生代地层记录[D]. 广州:中国科学院研究生院.广州地球化学研究所, 2015.

SEA FLOOR SPREADING OF SOUTH CHINA SEA AND ITS DEPOSITIONAL RECORDS OF SEA AND LAND CHANGES

QIAN Kun^{1,2}, YAN Yi^{1*}, HUANG Qiyu^{1,3}, CHEN Wenhuan^{1,2},
YU Mengming^{1,2}, TIAN Zhixian¹

(1 Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Department of Earth Sciences, National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan, China)

Abstract: The comparative study of the southern and northern continental marginal basins of the South China Sea (SCS) is an important approach to understand the process of seafloor spreading of the SCS and its paleogeographic pattern. Due to some historical reasons, the study of the tectonic and depositional evolution of the southern marginal basins of the SCS still remains weak up to the present. It has greatly constrained the overall understanding of the basic geological problems such as the spreading of the SCS and the changes between the sea and the land. This paper has integrated the research progress of sedimentary strata and sedimentary environment in the SCS and its adjacent basins, and retrieved the spreading process of the SCS and the evolution of its paleogeographic pattern. According to the unconformity, diachronism occurs in the southern part of the SCS just like that in the northern part. It becomes younger gradually from the northeast to the southwest, suggesting a spreading process from east to west. The seafloor spreading time was Early Oligocene (~33Ma) in the northeast, but Late Oligocene (~25Ma) in the southwest. However, they ceased almost at the same time in Early Miocene (16-20Ma). The SCS was under the marine environment in the south and under the terrestrial environment in the north in early stage. The sea spread gradually from east to west. Obvious changes occurred in the northern basins of the SCS at ~25Ma. In the early stage, sediments were mainly from the provenance of Southern China. After ~25Ma, the sediments from the Yangtze block gradually increased. Southern basins of the SCS was dominated by similar sources with the northern basins before ~25Ma and sediments were mainly from Southern China. Due to the spreading of the SCS after ~25Ma, oceanic basins blocked the sediment transportation from the Yangtze block. The Mesozoic granites and volcanic rocks in the interior of the continental block provided sediments for the southern basins of the SCS.

Key words: South China Sea; unconformity; sedimentary environment of basins; paleogeographic