

南海深部过程的探索

汪品先

同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092

摘要 2011—2018年,国家自然科学基金委员会设立“南海深部过程演变”重大研究计划,同时推动实施了三次半的大洋钻探航次,使南海进入国际深海研究的前列,在深海盆洋陆相互作用、边缘海盆地的板缘张裂和气候演变的低纬驱动等3方面取得了突破性进展,挑战了源自西欧、北大西洋的传统观念。深海探索的进展,确立了中国在南海科学上的引导地位,下一轮的深入研究可望将南海建成世界海洋科学的天然实验室,进一步提升中国在海洋基础研究中的国际地位。

关键词 南海;边缘海;洋陆相互作用;深海盆地成因;气候长期演变

世界上深海大洋的研究极不均匀,历来是“近水楼台先得月”,富国边上的深海研究最多,处在美国和英国之间的北大西洋,就成了世界海洋科学的圭臬,而发展中国家边上的深海就显得冷落。不过,最近10年中,世界的深海研究冲出来一匹黑马,这就是中国岸外的南海。

在亚洲和太平洋之间有一系列边缘海,其中南海最大。这串边缘海介于世界最大的大陆和最大的大洋之间,对海陆之间的物质能量交换产生重大影响。2011年,国家自然科学基金委员会启动“南海深部过程演变”重大研究计划(以下简称“南海深部计划”),专攻深海盆的基础科学问题,8年时间里先后设立了50多个重点项目,全国32个单位共计700多人次参加研究,成为中国海洋科学第一个大规模的基础研究项目^[1-2]。

南海深部计划依靠群策群力,并且利用国际大洋钻探和国内载人深潜、潜标观测网等先进技术,将南海推进到国际深海研究的前沿,触及到地球科学的一些基本问题:诸如海洋盆地是如何产生的?是什么驱动着气候的长期演变?大陆和大洋之间又是如何交流物质和能量?南海的探索成果卓然,产生了不同于流行观点的新认识。

1 边缘海深海盆的洋陆相互作用

大陆和大洋的能量物质交换,是地球生态环境变化的决定性因素。如果大洋和大陆直接相连,就会沿着海岸、特别是河口发生海陆相互作用,美国的东、西两岸便属于这种类型。但是东亚大陆和太平洋两者并不直接相连,中间还有着由岛屿或者

收稿日期:2020-05-11;修回日期:2020-07-11

基金项目:国家自然科学基金重大项目(91128000)

作者简介:汪品先,教授,中国科学院院士,研究方向为海洋地质与环境演变,电子信箱:pxwang@tongji.edu.cn

引用格式:汪品先. 南海深部过程的探索[J]. 科技导报, 2020, 38(18): 6-20; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.18.001

半岛和大洋隔开的海盆,这就是边缘海。全球75%的边缘海盆集中在西太平洋,其中最大的是南海。南海最大水深5500 m,只以台湾和吕宋两岛之间的巴士海峡和太平洋相连,海槛(通道最深处)水深2600 m,是个半封闭的深海盆(图1),这种边缘海在洋、陆间能量物质交换中起着特殊的作用。

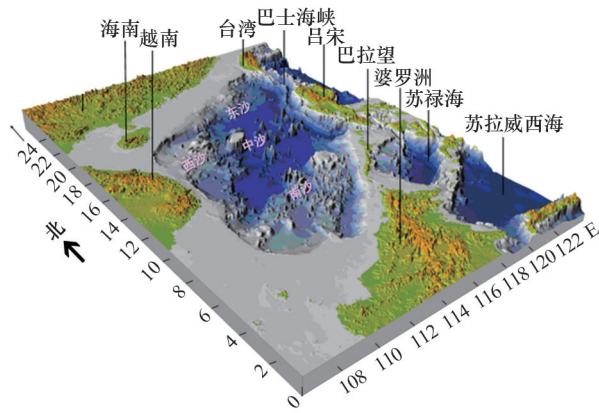
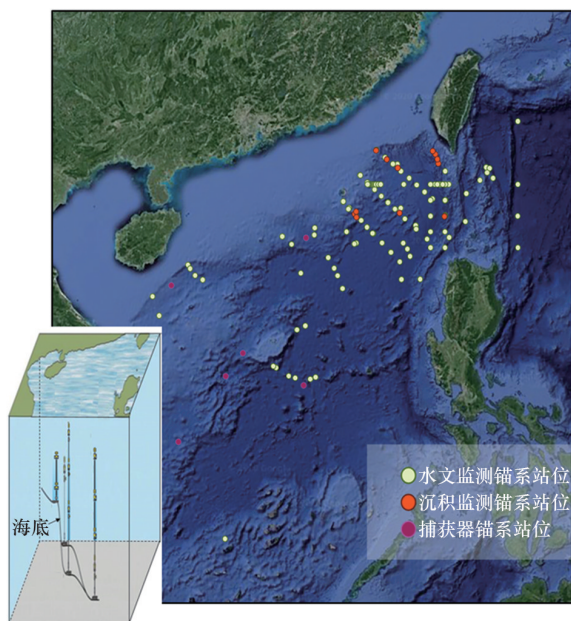


图1 南海海底地形

为了获取第一手资料,南海深部计划采取了大动作,投放了三四百套次的深水锚系潜标,进行空前规模的深海现场长期观测(图2黄色圆点),获取水文、化学和沉积多方面的深海记录,从而对深海盆的洋陆相互作用产生了崭新的认识。



注:左下方示潜标锚系
图2 深水锚系潜标分布

1.1 深水环流

对于南海深部海水怎么流这一问题,由于过去没有实测依据,只能推论。在南海深部计划开始之前,并不清楚南海深层海水的流速流向,甚至不知道是否存在深层西边界流。这些年来,南海构建了世界上最大的区域潜标观测系统,对深海环流进行多尺度的长期观测,认识到大洋水和陆地水的在南海深海盆交汇,然后回到大洋影响着太平洋的中层水,这种海水的交换发生在几千米的深部,和通常说的表层海陆相互作用大不相同,影响的范围也大得多,可以称作洋陆相互作用。

多年的观测证明,南海深部海流的源头在巴士海峡。太平洋约2000 m深处的海水翻过巴士海峡,以“深海瀑布”的势头进入南海深海盆,流量之大相当于50条长江(图3)。由于海峡的地形陡峻,在这里造成了巨大的内潮和内波,翻过海峡的海水又遇上耸立在海底的海山链,在南海深层发生强烈的混合,混合的强度比太平洋高1~2个数量级。太平洋水进入南海深部之后形成西部边界流,并且沿陆坡向上爬升,最后作为中层水又从巴士海峡返回太平洋。于是,整个南海的水流形成“三明治”结构:上层环流逆时针方向旋转,中层顺时针,深层又是逆时针方向的环流^[9]。

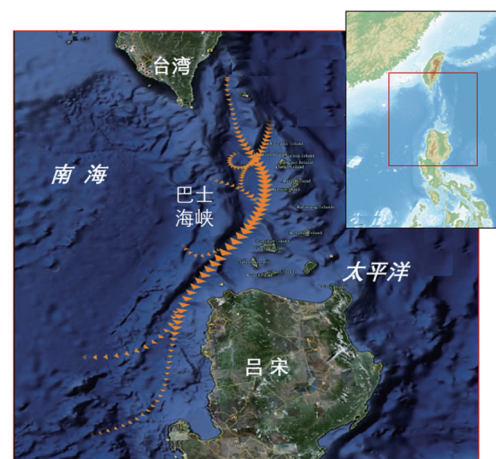


图3 翻越巴士海峡的“深海瀑布”

1.2 海水生物化学

南海独特的地形造成了深部独特的环流,也决定了深层水的快速更新:大洋深层水的更新以千年

计,而南海只要几十年。北京大学测量 2000 m 深处海水中溶解无机碳的 ^{14}C 同位素年龄,发现南海中央深层水转一圈只要 125 ± 25 a(据周力平告知)。这种活跃的海水交流,决定了海水碳平衡的特色。南海尽管有大河输入营养元素,北部陆架就是吸收大气 CO_2 而成为碳汇,但是整个南海却因为被大洋深层碳的输入所压倒,因而成为弱的碳源^[4-5]。

半封闭的南海,是太平洋水和河水相互混合的场所,引起前所未有的海水生物化学变化。举例来说,太平洋水里的惰性溶解有机碳(RDOC),随黑潮进入南海后可以被南海的细菌降解,产生 NH_4^+ 刺激南海北部硝化速率,从而提高生产力^[6]。

1.3 深海沉积

南海周围众多的热带、亚热带河流,将巨量的河水与沉积物输入海盆,仅湄公河、红河与珠江这 3 条大河就每年输入上千立方千米的淡水,携带着将近 4 亿吨的沉积物,而从台湾等高山岛屿输入的沉积物更加突出^[7]。南海截留了这些来自陆地的沉积物,覆盖在自己的陆架、陆坡和深海盆,而很少输入大洋。因此西太平洋不同于印度洋、大西洋,并没有大河沉积物堆积起来的大型深海扇。

深部计划执行的 8 年中,在南海北部布放了一系统捕获沉积物的深水锚系(图 2 的深红圆点),收集生物颗粒以研究生物泵,现在南海北部已经成为边缘海生物泵长期观测时间最长的海域。而在南海东北部投放的一系列深水锚系(图 2 的鲜红圆点),以多年的连续观测来追踪沉积颗粒的搬运,已经成为继 40 年前大西洋 HEBBLE 计划之后^[8],国际深海沉积观测的又一壮举。南海的长期观测发现 1600~2400 m 深度范围内的等深流,主导着陆坡沉积的横向搬运过程^[9],这就是大洋水流入所驱动的深层海流,对于陆地来源沉积物分布进行的改造。

1.4 边缘海的洋陆相互作用

中国学术界早就提出过南海是个大洋与河水的“混合器”(mixing mill),也指出过南海与北太平洋中层水的关系。南海深部计划研究,首次在现场长期观测的基础上展现了南海深层环流的 3 层结构,以实测数据证明太平洋深层水的输入改变着南海水的生物化学特征,影响着南海的沉积输运,而

重返大洋的输出水又影响着北太平洋中层水的性质。

各个边缘海的海流都会产生环境影响,其中又以半封闭的大型边缘海的影响最大。相比之下,日本海的海槛只有 130 m,地中海海槛 290 m,都没有与大洋深层水交流的渠道。唯有墨西哥湾和南海最为相像,与大西洋联通的尤卡坦通道海槛深度 2000 m、佛罗里达海峡海槛深 800 m,使得墨西哥湾流在这两个通道之间形成环流(loop)。墨西哥湾东部的这支环流,通过湾流影响大西洋径向流,在海洋气候环境中起着重要作用,近年来通过浮标和深潜技术取得了重大进展^[10],遗憾的是,对其深层水依然缺乏长期观测。因此,现在的南海在国际深海盆的研究上处于独特地位,通过进一步研究就有可能提出三维空间洋陆相互作用完整的系统认识,引领国际学术潮流。

2 大陆破裂形成深海盆地的机制

深海探索研究的不仅是水圈,更大的挑战是探索水圈下面的岩石圈。海洋岩石圈最大的科学问题,莫过于大陆如何破裂形成海洋盆地。这个地球科学顶级的大题目,原则上由“板块学说”提供了答案:先是大陆岩石圈发生裂谷作用,破裂之后岩浆流出海底形成大洋地壳,然后向两侧扩张形成海盆,而研究的基地就是大西洋的被动大陆边缘。不过这里说的还只是总的原理,至于裂谷作用和海底扩张的具体过程,需要通过大洋钻探从海底下方的深处取样分析,才能认识。

针对这个大题目,大洋钻探在 50 年时间里花了 22 个钻探航次,去探索大西洋海盆张裂的成因机制,结果根据岩浆作用的不同分出两大类型:火山型和非火山型。其中非火山型大陆边缘具有特殊价值,因为那是世界上很多大油田的所在。1980 年代以来,西方学者提出:南海的形成机制和大西洋一样,也属于非火山型大陆边缘^[11],只是范围小、年底短,机理是一样的,所以南海相当于一个小大西洋。这种说法虽然只是一种假说,并没有直接证据,但已经被国内外广泛采用,奉为真理。这一观

点有待钻探验证。

中国科学界在南海深部计划的执行中,提出了钻探南海深部、检验大西洋模型的建议。南海的成因机制很重要,无论对海上石油的勘探开发或者海底地形的理解,成因都是重要的关键。为此,南海深部计划进行了大量的地球物理和地质地球化学的探索,并且完成了三次半的国际大洋钻探,研究的结果对流行的假说提出挑战,形成了不同于前人的新认识^[2]。

2.1 海盆由东向西打开

南海中央是个平均水深4700 m的深海盆,基底是大洋地壳。中央深海盆略呈菱形,被海山分为东、西2个次海盆。所谓南海的形成机制,就是指的深海盆如何形成。历来南海深海的理论研究,由西方科学家主导:美国科学家根据海底磁异常条带的分布,提出南海是通过海底扩张,沿着洋中脊向

南北张裂而成^[11];法国科学家根据印度与亚洲板块的碰撞,认为是印度支那半岛沿着红河断裂向南挤出,导致南海张裂^[12];英国科学家根据婆罗洲的古俯冲带,主张有过一个古南海的板块向南俯冲,是板块俯冲的拉力打开了南海^[13]。10年前对于南海的张裂,各家众说纷纭、莫衷一是,甚至南海东西2个次海盆究竟哪个老、哪个新,中国科学家之间也有争论。

“南海深部计划”的大量调查工作,尤其是近来5年里三次半的深海盆大洋钻探(表1),开创了新局面,使得南海历史的一系列环节真相大白。2014年的IODP 349航次钻探深海盆的基底,取得大洋壳的玄武岩,经过测年证明东部次海盆3400万年前已经开始形成,而西部次海盆形成在2300万年前,然后两者的海底扩张都在1600万—1500万年前结束,所以东部海盆的历史比西部早得多^[14]。

表1 南海的大洋钻探航次

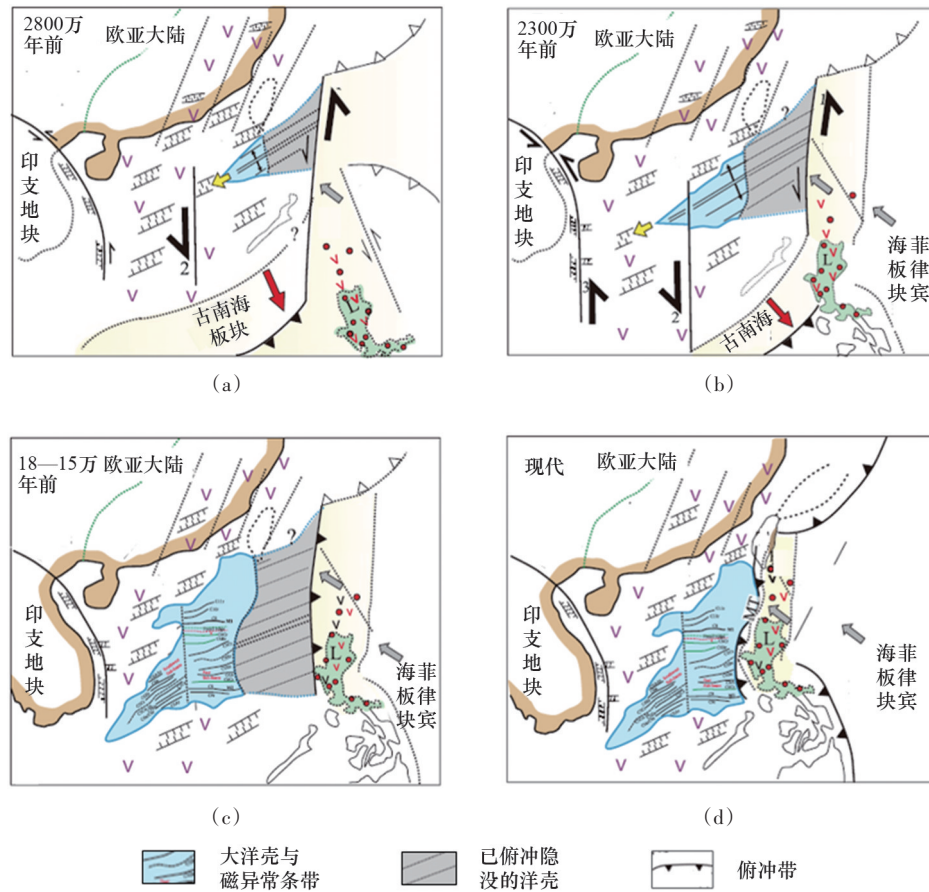
航次	年月	水深/m	站位数	位置	科学主题
ODP 184	1999/02—1999/04	2037~3294	6	陆坡	季风演变
IODP 349	2014/02—2014/04	3253~4379	5	洋盆	海底扩张
IODP 367	2017/02—2017/04	3760~3802	2	洋陆	裂谷-破裂
IODP 368	2017/04—2017/06	2843~3868	5	过渡带	
IODP 368X	2018/11—2018/12	3868	1		

而后的大洋钻探航次IODP 367、368、368X,对洋陆过渡带进行钻探,揭示了东部次海盆的张裂机制,提出了南海从东边破裂,然后向西推进的形成模式。具体说,大约3400万年前沿着欧亚大陆和中生代板块间的转换断层发生左行走滑,导致南海东部的海底扩张(图4(a));大约2300万年前扩张轴向西跳跃,使得西部次海盆张裂(图4(b));在1600万—1500万年前海底扩张结束,菲律宾岛弧北移就位,南海洋壳朝东向着新产生的马尼拉海沟俯冲(图4(c)),使得南海洋壳的东部俯冲隐没在菲律宾岛弧之下(图4的灰色部分),最终形成现代的南海深海盆(图4(d)),因而现在的大洋壳比原来的最盛期(图4(c))小得多^[15]。

2.2 岩浆活动出人意外

经过大洋钻探证实,南海的海底扩张发生在距今大约3400万—1600万年。以往在南海周围打过许多钻井,地层里都没有发现火山活动的记录,于是得出结论:南海张裂时岩浆活动并不活跃,属于“非火山型”被动边缘。可是这些钻井打的都是陆架和上陆坡,这几年大洋钻探在深水洋盆和陆坡底部的洋陆过渡带打井,发现南海从张裂一开始就有玄武岩溢出^[16],扩张结束后还有强烈的岩浆活动^[17],发现“非火山型”其实是一场误会。

按照大西洋的模型,非火山型大陆边缘的岩浆活动应当很晚才发生,先是地壳破裂海水渗入,经过长期风化使地幔岩发生蛇纹岩化而变得脆弱,然



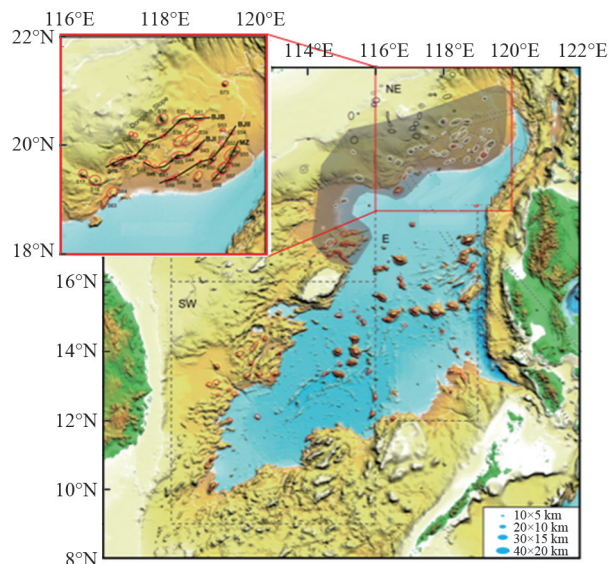
注:L为菲律宾岛弧的吕宋岛,MT为马尼拉海沟

图4 南海形成过程示意(据文献[15]改绘)

后才有岩浆上涌产生玄武岩洋壳。但是南海大洋钻探发现 3400 万年前就有玄武岩,而蛇纹岩却连碎屑也没有找到,可见南海成因并不属于大西洋的“非火山型”。

南海大洋钻探一项重要发现是岩浆活动的持续性。在基底玄武岩之上几百万年时间的地层里,在多个钻井见到了岩浆活动的证据,从玄武岩、火山碎屑岩到热液活动的踪迹都有发现。考虑到地震剖面里还非常可能有岩浆底侵的证据,南海张裂与张裂后岩浆作用的规模和活跃程度,都远远超出原先的估计^[18]。

尤其值得提出的是南海深部的海山(图 5)。众多的海山链是南海深部地形的一大特色,海盆内的海山大多沿着残留洋脊分布,主要形成于距今 800 万年前后,这就又一次证明南海岩浆活动的长期性。只有少数位于海盆北部的海山形成于南海



注:灰色区表示南海东北统计的 45 座海山,

左下方椭圆表示海山范围的大小

图5 南海深部海山的分布与岩浆活动(据文献[19]改绘)

扩张期,目前测得的最老海山年龄为2380万年^[17]。根据南海东北部陆坡下部45座火山的统计(图5灰色区),每座海山的岩浆量平均 53 km^3 ,超过了泰山的体积,而莫霍面以上岩浆的总量高达 15 万 km^3 ,可以与世界上大火成岩省的喷发量相比^[19]。如此规模的岩浆活动,刷新了人们对南海历史的认识。

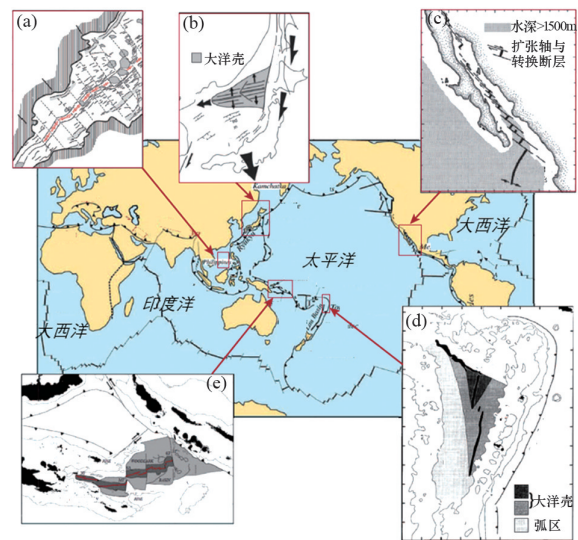
2.3 板缘张裂边缘海盆

南海的形成机制和大西洋非火山型有着根本的不同^[20]。两者都有共轭边缘,周围也没有发现强烈的岩浆活动,因此表面上有所相似。但是深海盆的探索发现,南海的形成过程从开始到结束之后,岩浆作用始终活跃,在大陆岩石圈破裂之初就有大量洋中脊型的玄武岩溢出,和大西洋的岩石圈有着本质的不同。这种区别其实不难理解:大西洋破裂的是超级大陆的中央,那里的大陆岩石圈经过造山运动变得十分坚固;南海破裂发生在西太平洋俯冲带,那里经过两亿多年的板片俯冲,地幔含水量高,岩石圈容易破裂。因此,大陆岩石圈有两种不同的破裂机制:大西洋是板内张裂,南海是板缘张裂^[21-22],把南海看作“小大西洋”、在南海简单地套用大西洋模式,是错误的。

当然,板缘张裂并非南海的专有机制,而是太平洋俯冲带众多边缘海盆地的共同特征,例如日本海(图6(b))、劳盆地(Lau Basin;图6(d))、伍德拉克盆地(Woodlark Basin;图6(e))以至于东太平洋的加利福尼亚湾(图6(c))都是在张裂后裂谷向前推进,最晚扩张的部分最窄。由于板缘张裂的历史不长,通常只有一二千万年的寿命,比大西洋之类板内张裂海盆的寿命要短一个量级,因此海盆以楔形的轮廓出现(图6)^[20]。与大西洋板内张裂的海盆形成历史相比,太平洋的板缘裂谷缺乏系统研究,以往只是当作大西洋模式的“例外”处理。南海的发现向地球科学界尤其是中国的地质界,提出的新任务,应当走出南海放眼大洋,对众多边缘海的构造历史开展实地研究和比较,从而求取对板缘张裂的系统认识。

2.4 西太平洋边缘海系列

板缘张裂之所以在西太平洋发生,是因为西太平洋大陆边缘有着当今地球上最大的俯冲带,长期



(a)南海西南次海盆;(b)日本海;(c)加利福尼亚湾;
(d)劳盆地;(e)伍德拉克盆地

图6 板缘张裂盆地的裂谷推进

的俯冲作用使得这里成为地球上板片俯冲的“坟场”^[22],俯冲板片携带的水分使得这里的地幔含水量高,岩浆活动活跃,由此产生的小板块带来了众多的边缘海,全世界3/4的边缘海盆地在这里聚集^[23],绝非偶然。

总体看来,西太平洋边缘海的成因机制虽然各有特色,整体上却构成一个相互间有成因联系的海盆系统。如果比较西太平洋边缘海洋盆的年龄,很容易看出由西向东,从亚澳大陆向太平洋由老变新的总体趋势(图7),表明其成因与太平洋板块的后退相关。与大西洋相比,西太平洋的构造研究程度低得多,因为大量板块的俯冲隐没,构造变动的证据埋入地幔,给西太平洋的地质研究制造了巨大的障碍。近年来深部地震、层析成像的技术进步(例如文献[24]所示)带来了希望;与此同时,地质界又将研究重点聚集到残留在地面的岛屿和海底岩层上来,只有靠两者的结合才有可能为板块学说攻下海洋里最后的堡垒。

板缘张裂概念的提出,为南海和西太平洋边缘海的研究指出了方向。地质历史上裂谷作用的发生并不均匀,大西洋等板内裂谷发生在中生代裂谷期,相当于联合大陆崩解的阶段;西太平洋边缘的形成则属于新生代中后期,两者分属威尔逊旋回的

不同阶段(图7右上角)^[20]。如果说大西洋张裂在50年前板块学说建立时就已经开始研究,那么西太平洋边缘海的张裂机制,是当前才出现在我们面前的研究任务。中国学术界应当抛弃长期以来套用西方模式的习惯,轻装上阵探索边缘海构造演变的新机制。

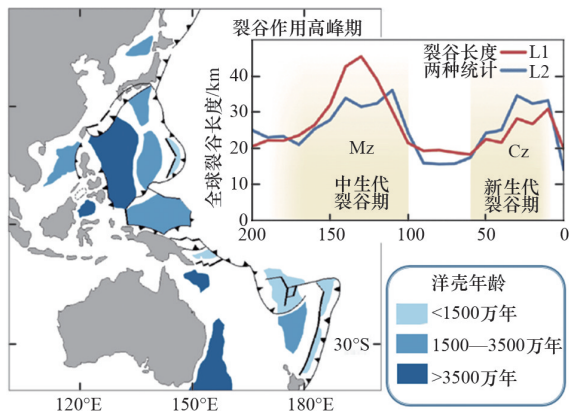


图7 西太平洋边缘海系统:海盆洋壳的形成年龄
(据文献[20]改绘)

3 沉积记录中的海水与气候演变

南海深部计划的主题是探索“深部过程演变”,而研究演变就需要沉积记录。无论水圈还是岩石圈的地质演变,都会记录在海底的沉积地层中,其中陆坡下部的沉积记录最有价值,因为能够保存碳酸钙的化石记录,而在深海盆由于溶解作用则不能保存。笼统说来,深海沉积记录的水圈、岩石圈历史都属于古海洋学,但是西太平洋海域由于海水过深、碳酸盐溶解作用强烈,缺乏良好的深海沉积记录,以致长期以来古海洋学研究不如大西洋。1999年在大洋钻探 ODP1 84 航次(表1)中,从南海陆坡下部取得了将近 5500 m 岩心,为西太平洋地区提供了 3000 万年以来最好的沉积记录^[25],近年来的大洋钻探又取得了新生代中期的沉积记录,为研究南海的地质演变提供了无可替代的珍贵资料。

南海的沉积记录提供了两方面的信息:一是南海构造演变过程中海水与水流的变化,二是气候变化在南海沉积中的反映。前者属于区域性信息,而

后者可以反映大洋以至全球的气候演变。由于以往西太平洋缺乏跨越长时期的高分辨率记录,南海的成果富有新意,其结果挑战了古气候研究的流行观点。

3.1 水文格局的地质演变

随着海盆的构造演变,南海深层水的性质与环流格局发生着相应的改组。南海半封闭的地形并非与生俱来,在张裂和扩张的时期,南海是个向西收缩的海湾(图4),与大洋畅通连接并不封闭。有人通过数值模拟论证,2000 万年前的南海有过世界上最强的潮汐^[26]。1600 万年前菲律宾岛弧北移就位,挡住了南海的东大门,650 万年前台湾岛和巴士海峡的海脊隆起,形成了海槛,南海终于变成半封闭的深海盆^[27]。

地形的变化改造了南海深层水的性质。南海北陆坡底部 ODP 1148 井的记录证明,1600 万年前后底栖生物发生改组,说明底层水含氧量增高,底栖有孔虫的碳同位素也突然偏离世界大洋平均值,标志着菲律宾岛弧的阻挡,改变了南海深层水的来源^[28]。到 650 万年前,底栖有孔虫的碳同位素出现极端负值,南海南北深水碳同位素差值突然变大,意味着现代模式深部海流格局的形成^[29]。

至于南海海底的沉积作用,不仅受深部水流的控制,更受周围陆地地质演变的影响,南海碳酸盐台地的历史就是证明。目前,南海的珊瑚礁群岛总面积约 8000 km²,构成耸起在深海底上的碳酸盐台地,但是距今 2000 万年前,南海珊瑚礁碳酸盐台地的分布要广泛得多,现在保留的只是其残留部分^[30]。南海碳酸盐台地收缩的原因,主要在于周围陆地的变化。随着陆地的构造演变、水系发育,大约距今 1160 万年开始有大量陆源碎屑物输入海盆^[31],阻碍了珊瑚的生长。深海沉积的分析,还见证了南海北部水系的演变,南海张裂的早期,有一条源自西部山区的东流大河,而现在规模珠江水系的形成,已经是距今大约 1160 万年前的事情了^[32]。

3.2 气候演变的两种模式

深海沉积不但记录了南海的盆地演化,同时也提供了气候演变的历史档案。气候的长期变化受什么控制,是地球科学又一个顶级科学问题。20

世纪地球科学有两大突破:一个是板块理论,另一个就是冰期旋回的米兰科维奇学说。米兰科维奇根据北纬 65°N 夏季太阳辐射量的变化,发现地球运行轨道的周期性,可以造成冰期旋回,从而开创了定量古气候学的先河。经过几十年的发展,到 20 世纪晚期,形成了北半球高纬过程决定全球气候演变的理论假说:认为北极冰盖的消长,通过北大西洋深层水的生产驱动“大洋传送带”,带动着全球的气候演变。与此相应,反映冰期气候的深海有孔虫氧同位素曲线,也成为全球第四纪地层对比的标准(图 8(f))。学术界对此深信不疑,直到新世纪的新发现,对这种传统观点提出挑战。

近 20 余年出现了一种新型的古气候记录,即洞穴石笋碳酸盐的氧同位素,由于分辨率极高而且可以通过铀系法独立测年,石笋为低纬地区提供了绝佳的气候记录^[34]。但是石笋和深海有孔虫的氧同位素曲线十分不同:深海记录以 10 万年周期为主(图 8(f)),而石笋记录却以 2 万年周期为主(图 8(b)),后者和地球轨道的岁差周期相对应(图 8(a)),南极冰盖的冰芯气泡里氧气的同位素,显示的也是岁差周期(图 8(c))。分析表明,石笋氧同位素可以看作雨水的“ $\delta^{18}\text{O}$ ”化石”,反映的是季风降雨的信息;而冰芯气泡中的气体是大气的“化石”,两者同样显示出 2 万年岁差周期,反应出低纬区水文循环演变的周期性特征。

有趣的是,南海深海沉积中浮游有孔虫的氧同位素曲线,同样发现有突出的 2 万年岁差周期(图 8(d)),可以和石笋记录相比;而同一剖面中底栖有孔虫的氧同位素却以 10 万年周期为主(图 8(e)),和世界大洋的底栖有孔虫记录保持一致(图 8(f))^[33]。这样,近几十万年来地球表面的气候演变出现了两种模式:深海记录的传统米兰科维奇周期记录了北极冰盖的信息,反映气候演变的高纬驱动;石笋和南海表层水的记录记录了季风降水的变化,属于气候演变的低纬驱动。全球气候由高纬过程垄断的传统认识,已经被新世纪的新发现所否定。

3.3 水和碳循环的长周期

气候变化的低纬驱动,有着深厚的历史依据。回顾 5 亿多年显生宙的地质历史,两极发育冰盖并

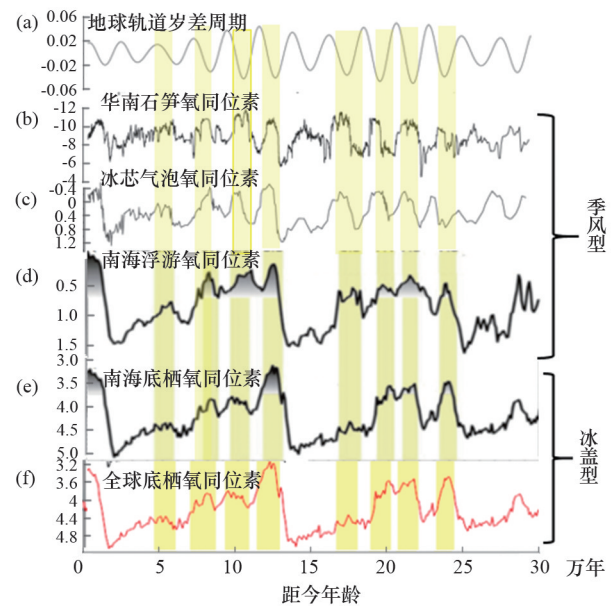


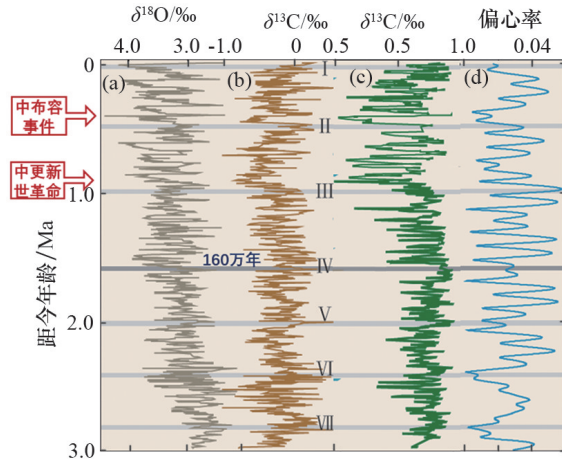
图 8 近 30 万年来的两类氧同位素曲线
(据文献[33]改绘)

且出现频繁的冰期旋回,只是最近百万多年的特色,在大部分时间里极地虽然没有大冰盖,气候仍有周期性的变化,其驱动力只能是低纬过程。地球轨道的岁差周期决定着气候的季节性,驱动着季风气候的强弱;而黄道的偏心率则调控着气候岁差的强度,因此 40 万年的偏心率长周期,就成为调节全球季风长期变化的轨道因素^[35]。由于碳在大洋里的滞留时间长达 10 余万年,海洋沉积中有孔虫的碳同位素几亿年来一直是气候变化的记录者,被喻为地球表层的“心跳”^[36]。南海大洋钻探的沉积剖面,清晰地记录了大洋碳储库的这种长周期变化(图 9)^[37]。

南海 500 万年来的地层和世界大洋一样,普遍记录了碳同位素的 40 万年长周期,唯独在最近 160 万年发生了变化。那是因为在随着极地冰盖的增大,南大洋深处形成了全大洋最大的碳储库,从此以后冰盖的变化就可以影响大洋碳循环,反过来大洋碳循环的变化又会引起北半球冰盖的转型。从图 9 可见:在 160 万年前南海碳同位素显示出偏心率长周期,每隔 40 万年出现一次碳同位素重值期($\delta^{13}\text{C}_{\text{max}}$);但是 160 万年之后发生变化,在最近的 100 万年里都是延长到 50 万年方才出现 $\delta^{13}\text{C}_{\text{max}}$,

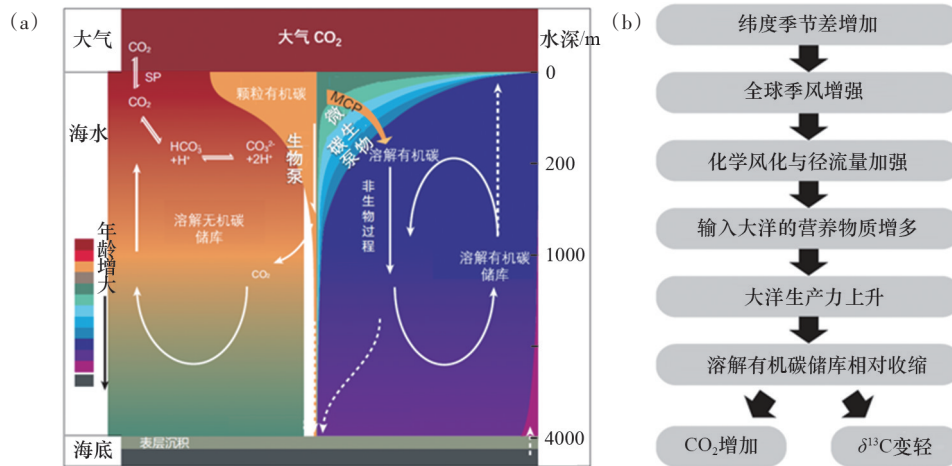
然而每次重值期又会引来北半球冰盖的重大变化,反映在氧同位素曲线上(图9(a))。100万年前的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{max-III}}$ 重值期之后,出现了90万年前的“中更新世革命”,北极冰盖体积大增,冰期旋回的长度从4万年延长到10万年;50万年前的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{max-II}}$ 重值期之后,出现了40万年前的“中布容事件”,北极冰盖进一步增大,氧同位素震荡的幅度显著加强(图9)^[37]。

大洋碳储库的长周期变化,居然能产生如此重大的气候效应,那么究竟是什么机制控制着碳储库?近年来发现的海洋微生物碳泵给了启发。原来大洋碳循环不仅有浮游植物的生物泵,还有微生物的碳泵,前者产生颗粒有机碳,后者产生溶解有机碳,现在大洋的生物量微生物占90%,海水里的有机碳溶解占90%(图10(a))^[38],但是在研究大洋碳循环时只注意生物泵和颗粒有机碳,并不考虑微生物碳泵和溶解有机碳的作用,是一种严重的疏漏。



注:(a) 底栖氧同位素; (b) 浮游碳同位素; (c) 底栖碳同位素; (d) 偏心率周期
I-VII表示碳同位素重值期($\delta^{13}\text{C}_{\text{max}}$)

图9 南海南部大洋钻探钻井(ODP 1143)记录的300万年碳同位素长周期
(据文献[37]改绘)



注:(a) 微生物碳泵示意(据文献[38]改绘); (b) 大洋碳储库长周期的溶解有机碳假说^[37]

图10 微生物碳泵和溶解有机碳假说

海洋里生物泵和微生物泵的消长,取决于营养物质的输入。如果河流输入的营养物质稀少,海水里浮游植物的生长受到遏制,碳循环主要依靠微生物碳泵运行,颗粒有机碳和溶解有机碳的比例下降;一旦营养物质输入增多,就会激发浮游植物的生物泵,产生大量的颗粒有机碳,颗粒有机碳和溶解有机碳的比例上升,海水的碳同位素正是随着颗

粒有机碳和溶解有机碳的比例而发生变化。当偏心率高值期全球季风强盛,化学风化加剧,河流输入海洋的营养元素增多,海洋浮游植物生产力上升,颗粒有机碳和溶解有机碳的比例就相应上升,导致海水碳同位素变轻。这就是大洋碳储库长周期的“溶解有机碳假说”(图10(b))^[37]。

虽然新提出的“溶解有机碳假说”尚待进一步

验证,却为气候演变的跨冰期现象提供了有力的解释。40万—50万年长周期的发现,打破了第四纪古气候研究只看重10万年冰期的偏向,表明还有更长的周期性控制着冰期的变化。现在看来,季风是低纬区水文循环最活跃的过程,而大洋碳储库的40万年周期反映的正是这种低纬驱动的气候变化,构成了地质历史上的基本节律。在最近160万年期间,冰盖的消长压倒了固有的40万年周期,而大洋碳储库的巨变又引起冰期的转型,证明了气候演变中高、低纬过程相互作用的重要性。

3.4 气候演变的低纬驱动

南海深海沉积的分析,提出了气候演变中的一个根本问题:低纬过程究竟起多大的作用?无论是氧同位素记录中的2万年岁差周期,还是碳同位素记录中的40万年周期,都是低纬区水文循环、尤其是季风降水在地球轨道周期控制下的产物。水的三相转换,是地球表面的气候变化的主要载体,但其形式随纬度而不同:高纬过程以固态与液态的转换、亦即冰盖消长为主,低纬过程以气态和液态的转换、首先是季风降水为主。这两种转换的气候意义并不对等:水的气/液态转换的能量是固/液态转换的7倍。更何况,地球表面的太阳辐射量本来就低纬区为主,由低纬向高纬输送。总体说来,低纬过程是地球表面气候变化的主力^[39]。

然而,现代的古气候研究发源于阿尔卑斯山的冰川遗迹,定量古气候学起步于最近两百万年的第四纪,而这正是地球两极都有大冰盖覆盖的特殊时期,属于五六亿年来地质历史上绝无仅有的特例。在这种特殊条件下,冰盖的消长成为古气候研究的主要对象,是完全可以理解的;但是忽视低纬过程就等于无视地球表层气候演变的基本现象,即便在两极发育冰盖的第四纪,正是因为忽视了低纬过程的重要性,造成了米兰科维奇学说中出现的各种“难题”,使得观察到的许多现象无从解释^[37]。

4 立足西太平洋,探索学术新方向

“南海深部计划”的8年探索,取得了众多的科学成绩,其中具有显著突破性的进展就是上列的3

项:深海盆水体的洋陆相互作用、深海盆形成的板缘张裂机制和气候演变的低纬驱动。三者探讨的都是地球科学顶级的重大问题,提出的都是挑战传统认识的新观点。

大洋和大陆的水在边缘海盆地发生交换,会发生相互影响,但是像南海这样的深层交流却与众不同:大洋深部水进入边缘海,改造以后返回大洋影响北太平洋中层水,并且在南海上返改变南海的上复水体,这种三维空间的深海洋陆相互作用属于首次发现。研究程度较高的边缘海,比如墨西哥湾流穿越尤卡坦通道和佛罗里达海峡形成环流,对湾流产生影响,但只是上层海水发生交换,并没有深层水的上返;地中海有>36.5‰的高盐水穿越直布罗陀海峡进入北大西洋,影响着北大西洋的水文,但这只是地中海上层的水,并不涉及深部。可见,南海观察到的深层洋陆相互作用,是全球范围内新发现的独特现象,属于有待开发的研究新领域。

套用大西洋模型解释南海成因,多年来已经成为南海从基础研究到油气勘探共同遵守的信条。尤其是深部勘探大量使用地震剖面,而这种间接证据必须依靠一定的理论模型才能解释,一旦模型错误解释就会全盘失真,而这正是在南海发生偏差的原因。大西洋破裂的是联合大陆板块内部坚固的岩石圈,除非被地幔上涌的岩浆冲开(火山型被动边缘),否则就需要地壳先破,经过海水入侵的长期风化,使橄榄岩地幔发生蛇纹岩化,岩石圈才会破裂(非火山型被动边缘)。南海也有共轭边缘,近二三十年来被认为属于“非火山型”的大西洋模式,误以为南海的洋陆过渡带也应该和大西洋一样,发育蛇纹岩化的地幔岩。国内外的地震剖面解释,也普遍套用大西洋模式,在洋陆过渡带“发现”蛇纹岩化地幔。图11是德国科学家(图11(a))和法国科学家(图11(b))对南海地震剖面所作的解释^[40-41]。

南海IODP 167/168航次的首要目标,就是钻探洋陆过渡带寻找蛇纹岩,以检验大西洋模式的普适性。但是钻探结果否定了原先的猜测,照搬大西洋模式的地质设想已经破灭,南海的深部构造需要在板缘张裂的基础上重新认识。和西太平洋众多的边缘海一样,南海是在板块边缘张裂形成,这里

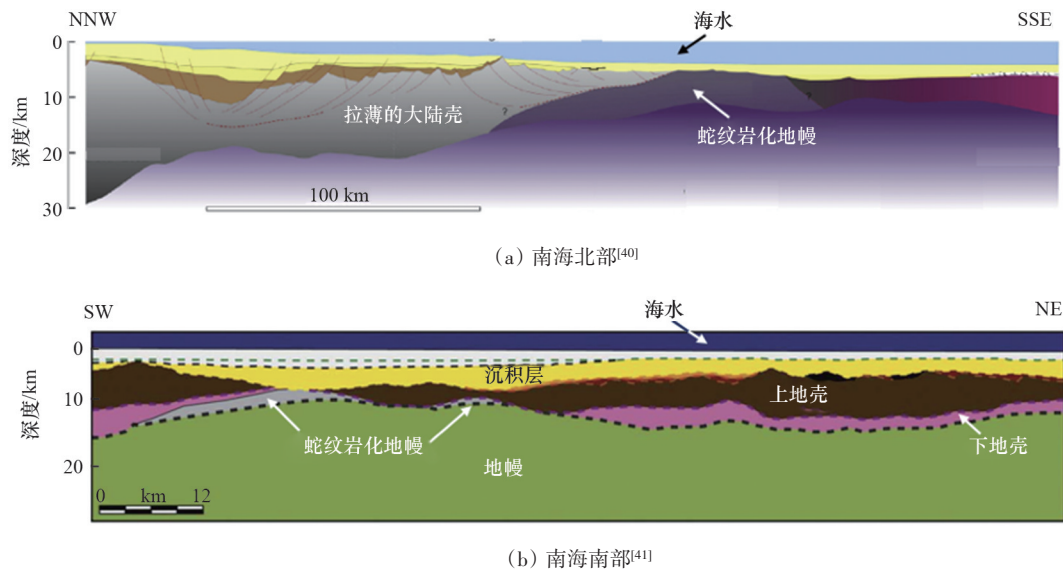


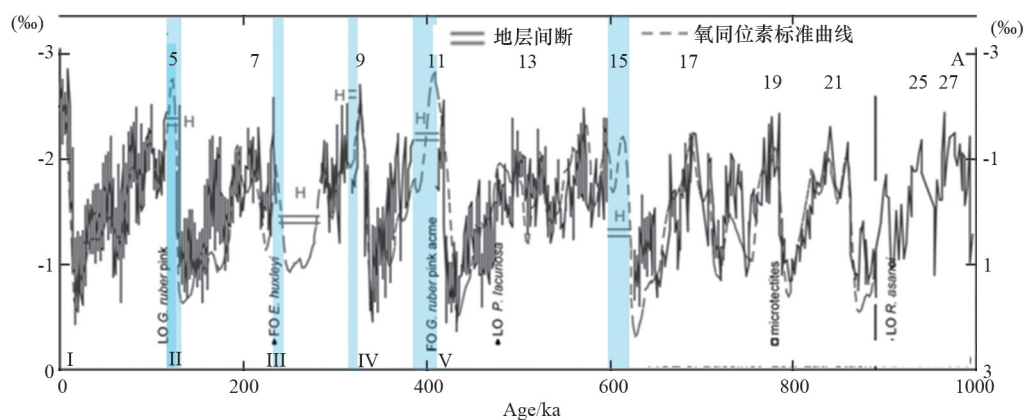
图11 误解的“蛇纹岩”:南海洋陆过渡带地震剖面被误解为“蛇纹岩化地幔”的海区

的岩石圈已经减弱,岩浆活动很容易开始,套用大西洋板内张裂的模式是一种误会。现在的任务是和大量的边缘海盆地一道,重新研究南海的张裂机制和西太平洋边缘海系统的成因。

同样,多年来气候演变的研究,也是在套用欧美与北大西洋建立起来的模型,以为北极冰盖和北大西洋深层水主宰着全球的气候变化,不能容忍与此不同的地质记录。南海大洋钻探地层分辨率最高的ODP1144井,分析浮游有孔虫氧同位素的结果,得出了百万年来的气候变化曲线。因为具有季风型氧同位素的特征(图8(d)),间冰期没有出现

轻值的尖峰,就被德国学者认为是地层缺失,而且每个间冰期都不能幸免(图12的蓝色时段)^[42],殊不知这正是季风影响区表层海水的特色,地层并不缺失^[33]。盲目套用传统模式的危害,可见一斑。

可见,研究气候演变应当采用低纬驱动的新概念,从只见冰盖张缩的习惯性思维里解脱出来。站在地球系统的高度看,低纬过程驱动的水文循环和碳循环,正是地质历史上气候演变的基本模式;第四纪期间两极冰盖变化的高纬过程确实特别突出,但仍然不能埋没低纬过程的重要作用。如何从地质历史和地球系统整体的高度,重新认识气候演变



注:根据与标准曲线的对比,蓝色时段被错误解释为“地层间断”^[42]

图12 误解的“地层间断”:南海北部大洋钻探ODP1144井近百万年来浮游有孔虫的氧同位素记录

的机制,是古气候学当前的重要任务。

无论海盆形成还是气候演变,都是南海深部计划在分析实际材料的过程中,发现与传统概念不合,于是对“公认”的传统进行追究,发现这些误会的来源,都是因为欧洲、大西洋的区域性研究被赋予全球通用的“普适性”,被奉为举世皆准的模板。南海的研究分析了本区域的特色,揭示了传统认识的局限性,进而提出了自己的理论模型和假说(图13)。新提出的概念当然并不成熟,但是有力地挑战了传统的偏见,相信通过进一步深入的工作,终能揭出自然界的真谛。



图13 南海深部计划的两大突破

5 南海成为深海科学天然实验室

在深海科学研究中,大洋钻探是最大的国际合作计划,半世纪来始终引领着地球科学的学术前沿。南海深部探索取得的上述突破性进展,大多与大洋钻探有关,凭借着近年来连接的钻探航次,南海的深海基础研究已经进入世界上边缘海的前列。

当前世界上深海研究程度最高的边缘海有3个:墨西哥湾、日本海和南海。三者相比,南海的面积最大、海水最深,目前大洋钻探的研究程度也最高。若论钻探航次的数量和钻井的站位数,墨西哥湾和日本海都超过南海,但是那里的钻探航次都以沉积层的古海洋学研究为主,只有南海是在深海盆底部钻探了大洋地壳和洋陆过渡带,是唯一从深部系统获取了从裂谷到扩张过程地质证据的边缘海。

深海的钻探分大类:一类是研究沉积层,取芯比较容易,可以提供古环境、古气候的信息;另一类研究岩石基底,技术难度要大得多,不但深度大而且岩层硬,钻探很不容易,南海大洋钻探的特殊价值正在于此。再者,墨西哥湾、日本海的钻探主要在20世纪70—80年代,属于大洋钻探计划的初期,而南海的钻探主要在新世纪(图14),两个不同时期钻探能力和岩芯质量都相差悬殊,不可同日而语。因此,可以当之无愧地说,南海已经成为深海基础科学探索程度最高的边缘海。

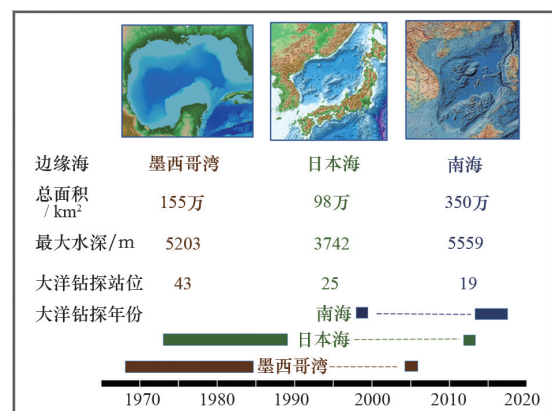


图14 比较大洋钻探研究程度最高的3个边缘海

进一步说,南海又是深海探索最有潜力的边缘海。以墨西哥湾和日本海作比较,前者海底的沉积层厚逾万米,又有广泛发育的盐层和盐丘,根本不可能钻穿盖层进入基底,至今连海盆形成的年龄还是悬案。后者的封闭性太强,底层水温只有0~1℃,水深超过1600 m就不能保存碳酸盐,从而为深海沉积的古海洋学分析带来困难。相比之下,南海既适于钻探基底探索海盆形成,又能提供高质量的沉积剖面进行古环境再造,很少有其他大型边缘海能够与之匹敌。

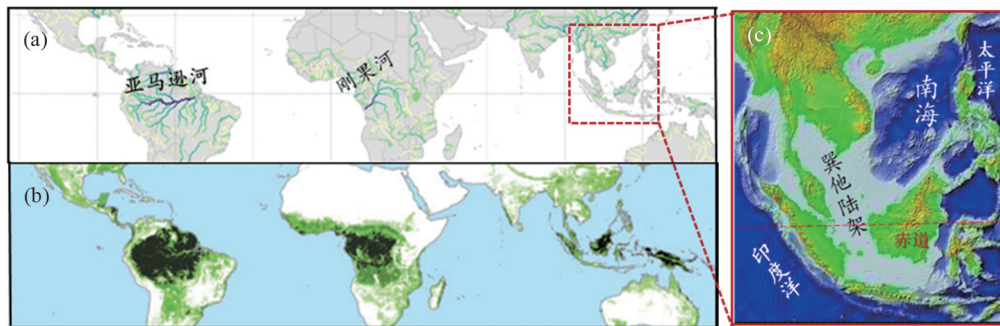
经过8年南海深部计划的研究,现在南海不仅为深海探索积累了丰富的基础资料,为进一步深入研究准备了基础,而且随着成果的涌现发现了一系列新的科学问题,吸引着更多的科学投入。南海深部计划过去把重点放在12°N以北,今后的研究应当向南挺进,通过国际合作在整个南海开展新一轮的深海探索。可以期望,在中国学术界主导下的南

海深部探索,将会进入国际合作的新阶段,一系列深海科学的基本问题将在南海获得答案,从而使南海成为深海科学的天然实验室,为国际海洋科学做出更大的贡献。

当前,中国学术界再接再厉,正在争取实现南海新的大洋钻探航次,探索海盆形成和气候演变的新问题,即花东海盆和巽他陆架的大洋钻探。南海板缘裂谷是在俯冲带发生的岩石圈张裂,大量的地质证据已经随着板片俯冲隐没在地幔深处,幸好还有少量地质体残留在海底,南海东北台湾以东的花东海盆,推测是中生代残留的大洋壳,可望为南海从东边打开提供见证。现在,中国地质界正在积极

开展地球物理调查,力争早日实现花东盆地的大洋钻探航次。

在气候演变方面,南海南边的巽他陆架是当今地球上低纬区最大的陆架浅海(图 15(c)),海底的地层里蕴藏着几百万年来气候变化和陆地碳循环的地质记录。热带雨林是低纬陆地最大的碳储库,南美的亚马逊河流域是当今世界最大的雨林(图 15(a)、(b)),但是冰期低海面时巽他陆架出露形成雨林,为陆地增添了另一个巨大的碳储库,对全球气候与碳循环必然起过重要而尚未认识的作用^[43]。中国地质界正在密锣紧鼓推动国际合作,争取早日在巽他陆架以我为主实现大洋钻探航次。



(a) 地理位置与河系分布;(b) 热带树林植被分布;(c) 巽他陆架位置

图 15 世界赤道地区的 3 大河系

此外,深海探索新技术的引入,正在为南海开拓更新的研究领域。南海深部计划通过深潜技术发现了深海的冷水珊瑚林^[44],发现了多金属/结核等多种矿产资源^[45],有待在后续计划里拓展范围、开展系统的调查研究。

南海是中国岸外最大的海域,可以预期,新一轮的南海深部探索必将使科学研究得到一步的深入,中国必将进一步掌握南海科学研究的主导权,力争在中国主导下,掀起空前活跃的国际科学合作高潮。

致谢:周力平提供数据、温廷宇协助作图。

参考文献(References)

[1] Wang P X, Li Q Y, Dai M H. The South China Sea deep:

Introduction[J]. *Deep Sea Research II*, 2015, 122: 1-5.

[2] 汪品先, 翦知潜. 探索南海深部的回顾与展望[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(10): 1590-1606.

[3] 王桂华, 田纪伟. 南海深层水的来龙去脉[J]. *科技导报*, 2020, 38(18): 21-25.

[4] Dai M H, Cao Z M, Guo X H, et al. Why are some marginal seas sources of atmospheric CO₂? [J]. *Geophysical Research Letter*, 2014, 40: 2154-2158.

[5] 戴民汉, 孟菲菲. 南海碳循环: 通量、调控机理及其全球意义[J]. *科技导报*, 2020, 38(18): 30-34.

[6] Xu M N, Zhang W J, Zhu Y F, et al. Enhanced ammonia oxidation caused by Lateral Kuroshio Intrusion in the boundary zone of the Northern South China Sea[J]. *Geophysical Research Letter*, 2018, 45(13): 6585-6593.

[7] 刘志飞, 张艳伟, 赵玉龙. 深海风暴的原位观测[J]. *科技导报*, 2020, 38(18): 26-29.

[8] Hollister C D, Nowell A R M. Prologue: Abyssal storms as a global geologic process[J]. *Marine Geology*, 1991, 99: 275-280.

- [9] Zhao Y L, Liu Z F, Zhang Y W, et al. In situ observation of contour currents in the northern South China Sea: Applications for deepwater sediment transport[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 430: 477–485.
- [10] Hamilton P, Leben R, Bower A, et al. Hydrography of the gulf of Mexico using autonomous floats[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2018, 48: 773–794.
- [11] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Sea Basin[M]. *Geophysical Monograph Series*, 1983: 23–56.
- [12] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine[J]. *Geology*, 1982, 10: 611–616.
- [13] Hall R. Reconstructing Cenozoic SE Asia[C]. London: Special Publications, 1996: 153–184.
- [14] 李春峰, 李志康, 李亚清, 等. 南海海盆东-西部地质特征存在巨大差异[J]. *科技导报*, 2020, 38(18): 40–45.
- [15] Huang C Y, Wang P X, Yu M M, et al. Mechanism and processes for opening up the South China Sea[J]. *National Science Review*, 2019, 6(5), doi.org/10.1093/nsr/nwz119.
- [16] Larsen H C, Mohn G, Nirrengarten M, et al. Rapid transition from continental breakup to igneous oceanic crust in the South China Sea[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11: 782–789.
- [17] 黄小龙, 徐义刚, 杨帆. 南海玄武岩: 扩张洋脊与海山[J]. *科技导报*, 2020, 38(18): 46–51.
- [18] Sun Z, Lin J, Qiu N, et al. Why did the “magma-poor” South China Sea margin have so much magma? [J]. *National Science Review*, 2019, 6(5), doi.org/10.1093/nsr/nwz116.
- [19] Fan C, Xia S, Zhao F, et al. New insights into the magmatism in the northern margin of the South China Sea: Spatial features and volume of intraplate seamounts[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18(6): 2216–2239.
- [20] Wang P X, Huang C Y, Lin J, et al. The South China Sea is not a mini-Atlantic—Plate-edge rifting vs intraplate rifting[J]. *National Science Review*, 2019, doi: 10.1093/nsr/nwz135.
- [21] 林间, 孙珍, 李家彪, 等. 南海成因: 岩石圈破裂与俯冲带相互作用新认识[J]. *科技导报*, 2020, 38(18).
- [22] Komiya T, Maruyama S. A very hydrous mantle under the western Pacific region: Implications for formation of marginal basins and style of Archean plate tectonics[J]. *Gondwana Research*, 2007, 11: 132–147.
- [23] Tamaki K, Honza E. Global tectonics and formation of marginal basins: Role of the western Pacific[J]. *Episodes*, 1991, 14: 224–230.
- [24] Wu J, Suppe J, Lu R, et al. Philippine Sea and East Asian plate tectonics since 52 Ma constrained by new subducted slab reconstruction methods[J]. *Journal of Geophysical Research—Solid Earth*, 2016, 121: 4670–4741.
- [25] Wang P X, Prell W, Blum P, et al. Proceeding, Ocean Drilling Program, Initial Reports[M]. ODP, Texas A&M, College Station, USA, 2000
- [26] Collins D S, Avdis A, Allison P A, et al. Tidal dynamics and mangrove carbon sequestration during the Oligo - Miocene in the South China Sea[J]. *Nature Communications*, 2016, 8: 15698.
- [27] 黄奇瑜. 台湾岛的年龄[J]. *中国科学·地球科学*, 2017, 47: 394–405.
- [28] Wang P X. The South China Sea. *Paleoceanography and Sedimentology*[M]. Berlin: Springer, 2009: 506.
- [29] 翦知湔, 田军, 黄维, 等. 南海海盆演变与深部海流[J]. *科技导报*, 2020, 38(18): 52–56.
- [30] 吴时国, 余克服, 李学林, 等. 南海生物礁碳酸盐台地演化[J]. *科技导报*, 2020, 38(18): 68–74.
- [31] 解习农, 朱伟林, 李学杰, 等. 南海深海盆的沉积充填[J]. *科技导报*, 2020, 38(18): 62–67.
- [32] 邵磊, 乔培军, 崔宇驰, 等. 新生代早期南海北部水系演变[J]. *科技导报*, 2020, 38(18): 57–61.
- [33] Wang P X, Li Q, Tian J, et al. Monsoon influence on planktic $\delta^{18}O$ records from the South China Sea[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 142: 26–39.
- [34] Cheng H, Edwards L, Sinha A, et al. The Asian monsoon over the past 640,000 years and ice age terminations[J]. *Nature*, 2016, 534: 640–646.
- [35] Wang P X, Wang B, Cheng H, et al. The global monsoon across time scales: Coherent variability of regional monsoons[J]. *Climate of the Past*, 2014, 10: 1–46.
- [36] Pälike H, Norris R D, Herrle J O, et al. The heartbeat of the Oligocene climate system[J]. *Science*, 2006, 314 (5807): 1894–1898.
- [37] Wang P X, Li Q Y, Tian J, et al. Long-term cycles in the carbon reservoir of the Quaternary ocean: A perspective from the South China Sea[J]. *National Science Review*, 2014, 1: 119–143.
- [38] Jiao N, Herndl G J, Hansell D A, et al. Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: Long-

- term carbon storage in the global ocean[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, 8: 593–599.
- [39] 汪品先. 低纬过程的轨道驱动[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(5): 694–701.
- [40] Franke D, Savva D, Pubellier M, et al. The final rifting evolution in the South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 58: 704–720.
- [41] Savva D, Meresse F, Pubellier M, et al. Seismic evidence of hyper-stretched crust and mantle exhumation offshore Vietnam[J]. *Tectonophysics*, 2013, 608: 72–83.
- [42] Bühring C, Sarnthein M, Erlenkeuser H. Toward a high-resolution isotope stratigraphy of the last 1.1 million years: Site 1144, South China Sea[C]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 2004: 1–29 (online).
- [43] 汪品先. 巽他陆架——淹没的亚马逊河盆地? [J]. *地球科学进展*, 2017, 32(11): 8–15.
- [44] Li J R, Wang P X. Discovery of deep-water bamboo coral forest in the South China Sea[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 15453.
- [45] 周怀阳, 朱启宽, 季福武, 等. 南海深水海山上的新发现[J]. *科技导报*, 2020, 38(18): 83–88.

Exploring the deep sea processes in the South China Sea

WANG Pinxian

School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract The major research program “Deep Sea Processes and Evolution of the South China Sea (2011–2018)” supported by the National Natural Science Foundation of China, was completed with some major achievements. Together with the implementation of three and a half ocean drilling expeditions (IODP 349, 367, 368, 368X), rapid developments of deep-sea researches have promoted the South China Sea into the international deep-sea frontier. Substantial progress was made in three fields: the ocean-continent interactions in deep sea, the plate-edge rifting of marginal basin, and the low-latitude forcing of climate changes, all with innovative discoveries challenging the conventional wisdom originated from the West Europe and North Atlantic. The research progress in recent years have shown the leading role of the Chinese community in the South China Sea. With the further enhancement of research activities, the South China Sea is expected to become a natural laboratory for the global ocean science.

Keywords South China Sea; marginal sea; ocean-continent interactions; genesis of deep sea basin; long-term climate change ●



(责任编辑 祝叶华)