

文章编号:1002-3682(2016)03-0001-11

# 西沙西科 1 井三亚组生物礁沉积的磁性地层及其环境意义\*

易 亮<sup>1,2</sup>, 王振峰<sup>3\*</sup>, 张道军<sup>3</sup>, 刘新宇<sup>3</sup>, 尤 丽<sup>3</sup>, 罗 威<sup>3</sup>, 祝幼华<sup>4</sup>,  
秦华峰<sup>2</sup>, 邓成龙<sup>2,5</sup>

(1. 同济大学海洋与地球科学学院 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;

3. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057;

4. 中国科学院南京地质与古生物研究所 资源地层学与古地理学重点实验室, 江苏 南京 210008;

5. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**生物礁沉积是南海乃至西北太平洋重要的沉积类型之一。本文利用新近钻进取芯的南海西沙西科 1 井生物礁沉积, 开展了详细的磁性地层学研究。结果显示, 早中新世三亚组记录了跨度为 C5Dn~C6An 正极性时的生物礁沉积。在综合全孔年代学结果的基础上, 划分出新近纪西沙地区生物礁生长、发育的 3 个阶段: >约 16.5 Ma 和 <约 13.5 Ma 两个稳定堆积时期, 以及 16.5~13.5 Ma 快速堆积的“中中新世跃迁事件”。此外, 本文推测西沙地区生物礁初始发育的时间显著早于过去认为的约 20 Ma, 同时三阶段的演化模式可能与南海扩张-结束的构造环境密切相关。

**关键词:**磁性地层; <sup>230</sup>Th 定年; 生物礁; 南海; 更新世

**中图分类号:** P31

**文献标识码:** A

**doi:**10.3969/j.issn.1002-3682.2016.03.001

南海是西北太平洋地区最大的边缘海。由于其特殊的地理位置, 南海地区的新生代演化在过去数十年中吸引了国内外大量学者的关注<sup>[1]</sup>。作为其中最为热门的话题之一, 南海各次海盆演化的时间序列主要依靠地球物理(大洋磁条带等)的方法<sup>[2-10]</sup>或依据区域不整合面的粗略推断<sup>[2-3, 11]</sup>。伴随着全球大洋发现计划 (IODP) 的不断推进, Li 等<sup>[12]</sup>通过地球物理勘测与 IODP 钻孔的磁性地层学研究, 确定了南海东部次海盆于 15 Ma 结束扩张, 而西南次海盆则在略早的 16 Ma 结束扩张。这些研究, 为深入了解南海的演化历史、

\* 收稿日期: 2016-07-31

**资助项目:** 国家科技重大专项项目——南海北部深水区潜在富生烃凹陷评价(2011ZX05025-002); 中国海洋石油总公司项目——西沙生物礁古地磁学、古环境磁学与白云岩化形成机制研究(CNOOC-2013-ZJ-01); 国家自然科学基金项目——莱州湾南部晚新生代海-陆相沉积的磁性地层学研究(41402153); 国家自然科学基金项目——南海北部深水区晚渐新世-中新世海相微体古生物地层及古环境(41272014)

**作者简介:** 易亮(1982-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事海洋沉积与年代学方面研究. E-mail: yiliang@tongji.edu.cn

\* 通讯作者: 王振峰(1956-), 博士, 教授级高级工程师, 主要从事石油地质方面研究. E-mail: wangzhf@cnooc.com.cn

(李 燕 编辑)

探讨大区域的构造关系提供了很好的视角。然而,由于南海地区具有较好的年代学控制的钻孔仅位于 ODP Leg 184 站位<sup>[1,11,13-14]</sup>和 IODP Leg 349 站位<sup>[12,15]</sup>,其他地区年代学工作的匮乏,直接影响了我们对南海演化历史、区域环境过程、生物过程对全球变化响应机制等重大科学问题更为精确的认识。

生物礁是由珊瑚虫、藻类、苔藓虫等造礁生物组成的、具有抗浪结构的海相碳酸盐沉积体。作为碎屑沉积之外的另一大类沉积体,西北太平洋暖池控制下的南海地区也是全球生物礁生长、发育的主要区域,在全球碳循环等热点研究中有着突出的价值<sup>[1,16-19]</sup>。南海地区生物礁主要发育在中-西沙和南沙台地之上,地理上被西北次海盆和西南次海盆所隔离。

前人研究显示,中-西沙地区的生物礁于断块之上发育<sup>[20-21]</sup>,岩石地层特征与南沙地区永曙岛的基本一致<sup>[22]</sup>。地层学研究显示,虽然年龄上南沙地区的生物礁发育可能早于南海北部<sup>[23-24]</sup>,但两地的生物礁地层是可以对比的<sup>[22,25-26]</sup>。前人研究主要从沉积学、构造和生态过程等角度予以展开,作为反演长时间序列的生物礁发育过程的年代学研究则十分匮乏。因此,本研究针对这一现状,通过磁性地层学研究,构建西沙地区早中新世的三亚组生物礁沉积的年代学框架。在区域对比的基础上,讨论新近纪生物礁发育的可能过程。

### 1 区域地质状况与研究材料

西沙群岛大小共包括 29 个岛屿,总面积可达 1 836 km<sup>2</sup>,其中以永兴岛最大(图 1)。岛上生物繁盛,已发现 38 属 127 种造礁生物<sup>[27-28]</sup>。主要的构造背景是曾经与中生代暴露、晚古近纪沉入海底的西沙古隆起<sup>[29-30]</sup>;此后热带生物礁广泛发育,形成岛礁体系(图 1)。

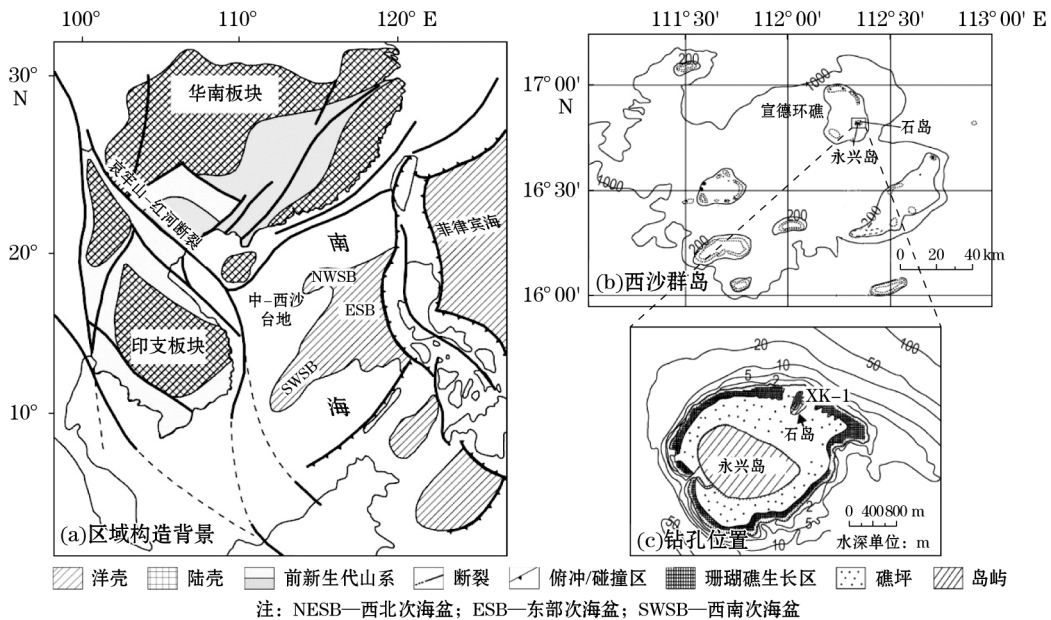
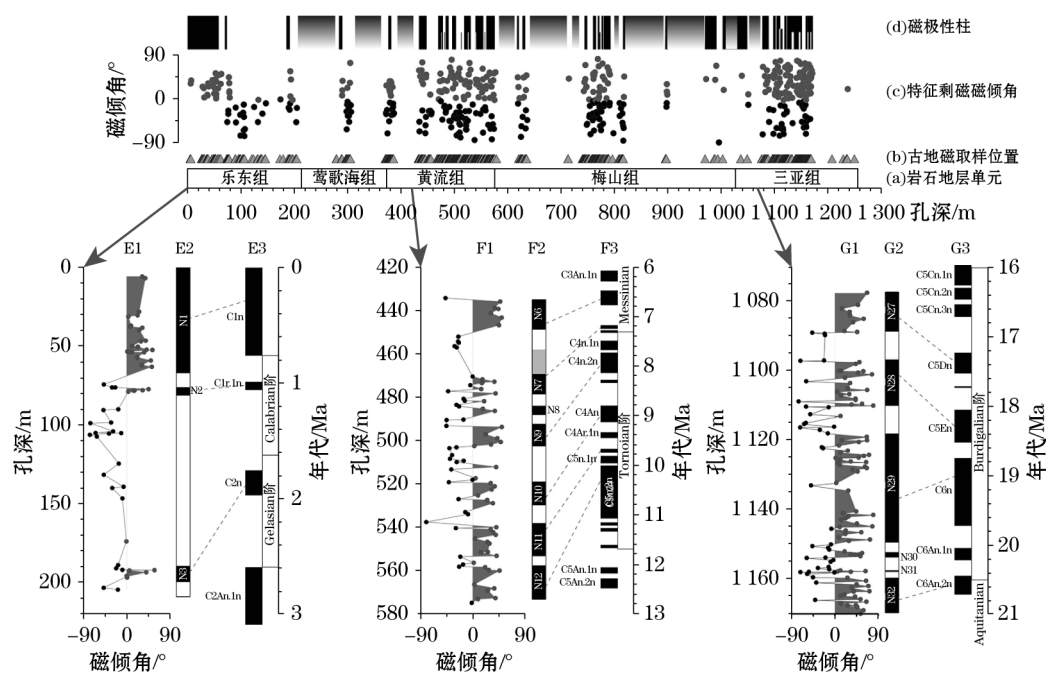


图 1 南海区域构造背景<sup>[1]</sup>、西沙群岛和钻孔位置

Fig.1 Regional tectonic background of the SCS<sup>[1]</sup>, the locations of the Xisha Islands and the borehole XK-1  
西科 1 井(XK-1)位于西沙群岛的东北缘的石岛上,由中海石油(中国)有限公司负责钻

探,2013 年完成钻进取芯(图 2)。全孔进尺 1 268 m,平均取芯率 80%。从下而上,依钻孔岩性变化,可划分为 5 个组<sup>[31]</sup>,具体包括:1)三亚组(1 258~1 032 m),该组上部为云灰岩和少量生物碎屑灰岩,中部以礁灰岩和碎屑灰岩互层为主,底部为棕色角砾岩和珊瑚礁。2)梅山组(1 032~577 m),该组顶部为生物碎屑灰岩,上部是生物泥灰岩夹云灰岩和碎屑灰岩,中部为珊瑚礁和云灰岩,底部为碎屑灰岩和碎屑泥灰岩。3)黄流组(577~375 m),该组上部为云灰岩,中下部为云灰岩和云质碎屑灰岩互层。4)莺歌海组(375~215 m),该组上部为生物碎屑灰岩,中部为黄色云灰岩,顶部为碎屑灰岩。5)乐东组(215~0 m),该组上部为礁灰岩叫碎屑灰岩,中、下部为礁灰岩与碎屑灰岩互层。



注: E1~E3, F1~F3, G1~G3 分别为乐东组<sup>①</sup>、黄流组<sup>②</sup>和三亚组(本文)的磁极性序列对比;  
E3、F3、G3 引自 Hilgen 等<sup>[34]</sup>, D 和 F2 中的灰色柱为数据空白区间

图 2 岩石地层单元、古地磁取样位置、特征剩磁磁倾角和磁极性柱

Fig. 2 Lithostratigraphic units, paleomagnetic sampling position, inclinations of the characteristic remanent magnetization and the magnetic polarity column of Borehole XK-1

## 2 研究方法 with 结果

由于西沙地区生物礁沉积的氧同位素变化与全球特征并不一致,不能从中提取出有效的年代学信息<sup>[32]</sup>,本研究采用磁性地层学方法构建钻孔的年代地层框架。全孔共获得 718 块古地磁研究样品。其中,王振峰等<sup>①②</sup>已对西科 1 井上部地层进行了详细的岩石磁

① 王振峰,张道军,刘新宇,等. 西沙西科 1 井乐东组生物礁沉积的磁性地层与<sup>230</sup>Th 定年[J]. 地球物理学报, 2016, 59. (排版中)

② 王振峰,张道军,刘新宇,等. 西沙西科 1 井中新世-上新世生物礁沉积的磁性地层学初步结果[J]. 地球物理学报, 2016, 59. (排版中)

学和古地磁学研究,本文着重介绍下部三亚组的结果。

首先利用台钻从岩性光滑表面定向钻取 2.0 cm(直径) $\times$ 2.5 cm(高)的圆柱体,共获得 319 块定向样品。剩磁测量在中国科学院地质与地球物理研究所古地磁与年代学实验室的低温超导磁力仪(2G Enterprises, USA)上完成。为去除黏滞剩磁影响,并获得特征剩磁方向,采用交变退磁方法,最高外加场强为 80 mT,间距为 2.5~10.0 mT,共 14 步(图 3)。测量数据,采用 Randolph J. Enkin 开发的 PGMSC(V4.2)数据处理软件,利用主成分分析法进行特征剩磁方向的计算。特征剩磁方向经过原点的线性拟合方式<sup>[33]</sup>获得,每次拟合利用不少于 5 个连续数据点进行,且最大角偏差小于 15°。利用退磁矢量投影图(亦称 Z-氏图)对退磁数据进行评价、分析,同时利用主成分分析方法<sup>[33]</sup>对退磁数据中不同磁成分进行有效分离。大部分样品表现为两种磁组分,通过 20 mT 交变磁步骤,可以基本消除次生磁成分的影响(图 3)。因此,我们选用 20~60 mT 的区间剩磁分量,利用“最小二乘法拟合”方法<sup>[33]</sup>进行直线段拟合,最终获得了具有稳定特征剩磁的 137 块样品(约占总样品数的 43%)。

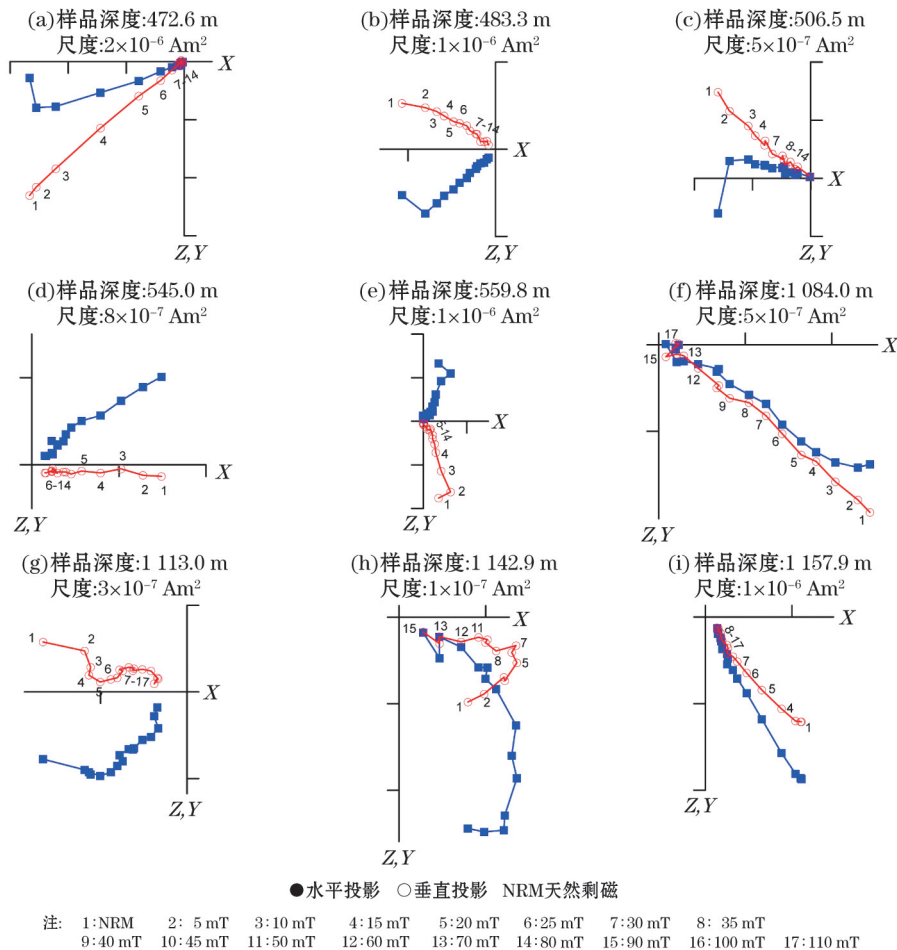


图 3 代表性样品的系统退磁曲线

Fig. 3 The systematical demagnetization curves of the representative samples

为与此前研究一致,本文采用从上而下的编号方式,全孔共 63 个磁极性区间,其中三亚组内,正极性区间编号为 N27~N32,负极性区间为 R27~R31(图 2)。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 磁极性序列的对比

在未发现明显的火山灰层的情况下,虽然受到样品保存与取芯条件的制约,在现阶段的研究中,古地磁学研究是能为西沙群岛的生物礁相沉积提供更多独立的年龄控制点的有效方法。由于受到取样的限制,西科 1 井很多层位未能获得古地磁结果(图 2b),这给磁极性序列的对比带来了很大的不确定性。为了更好地与地磁极性年表<sup>[36]</sup>(ATNTS2012)进行对比,本文参考了古生物鉴定的一些结果(祝幼华,未发表数据)。该结果显示,黄流组属于晚中新世 Messinian-Tortonian 阶(5.33~11.63 Ma)、三亚组属于早中新世 Burdigalian-Aquitania 阶(15.97~23.03 Ma)。在这一基础上,西科 1 井三个具有完整古地磁结果的特征时段的对比方案汇总如下(图 2):

1) 乐东组<sup>①</sup>: 正极性区间 N1~N3 分别对应于正极性时 C1n(布容正极性时,0~0.78 Ma)、C1r.1n(加拉米洛,0.99~1.07 Ma)、C2n(Olduvai, 1.78~1.95 Ma)。

2) 黄流组<sup>②</sup>: 正极性区间 N6~N12 可对应正极性时 C3An.2n~C5n.2n。具体的,正极性区间 N6 对应于 C3An.2n(6.44~6.73 Ma)、N7~N9 至 C3Bn~C4n.2n(7.14~8.11Ma)、N10 至 C4An(8.77~9.11 Ma)正极性时,以及 N11~N12 至 C4Ar.2n~C5n.2n(9.65~11.06 Ma)。

3) 三亚组(本文): 正极性区间 N27~N32 可对应正极性时 C5Dn~C6An。具体的,正极性区间 N27 对应于 C5Dn(17.24~17.53 Ma)、N28 至 C5En(18.06~18.52 Ma)、N29 至 C6n(18.75~19.72 Ma),以及 N32 至 C6An.2n(20.44~20.71 Ma)。

#### 3.2 新近纪生物礁堆积过程

在上述年龄框架下,本文尝试给出西科 1 井新近纪以来生物礁堆积的可能过程。根据现有的年代学控制点(图 2),三亚组的沉积速率变化区间为(10.34~40.27) m/Ma,平均值为(31.07±4.62) m/Ma;黄流组的沉积速率略高于三亚组,为(14.38~60.98) m/Ma,平均值为(34.18±5.87) m/Ma;乐东组的沉积速率进一步升高,为(35.7~158.6) m/Ma,平均值为(76.7±21.9) m/Ma。由此可见,新近纪以来,西沙地区生物礁的沉积速率是逐步增加的。这一现象与此前碳酸盐台地的堆积速率估计<sup>[1,22]</sup>、西沙隆起周边盆地的沉降速率变化<sup>[21]</sup>基本一致,可能均与南海扩张后期的热沉降机制有关<sup>[1]</sup>。

为进一步解析沉积速率的变化规律、恢复新近纪生物礁发育的详细历史,需要更详细的时-深关系分析。通过一元二次函数拟合,本文对西科 1 井乐东组(0~200 m)、黄流组(470~575 m)和三亚组(1 081~1 170 m)三段时-深数据进行回归。其中乐东组和黄流组可用同一方程予以表达( $r=0.997, n=12, p<0.01$ ),表明生物礁的沉积速率自中中新世以来保持稳定,南海扩张后的构造运动也较平静。同时,基于乐东组和黄流组获得的时-深关系方程向钻孔底部外推后,发现三亚组的数据也具有 consistency,但与钻孔上部趋势存在~320 m 的显著“位移”。因此,本文将三亚组的这一“位移”量剔除后,重新再做回归分析,结果显示了全孔新近纪以来更为一致的模式( $r=0.999, n=19, p<0.01$ )(图 4),从

而由统计学的角度证实了这一“位移”的存在。

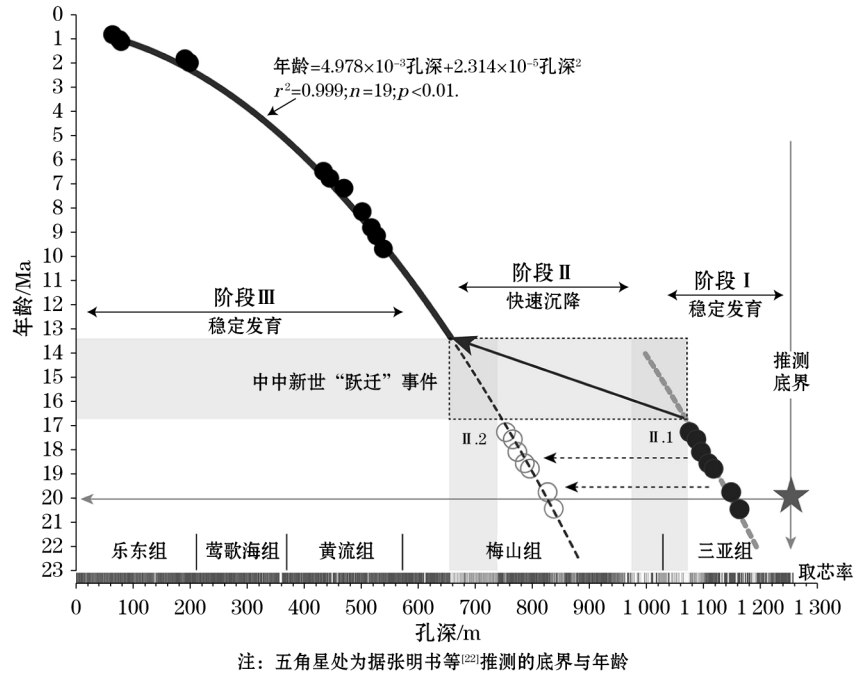


图4 西科1井时-深关系分析

Fig. 4 Age-depth relationship in Borehole XK-1

前人研究已经指出,生物礁的生长、发育受控于五大要素:生产率、构造活动、海平面变化、陆源物质输入和海流状况<sup>[18,21,35-36]</sup>。由于不同要素自身具有不同表征的周期特性,本文所观察到的过去两千余万年以来的生物礁沉积过程可由一回归方程予以表达,指示了在构造时间尺度上,构造活动是西沙地区新近纪生物礁发育的主控因素。此外,这一回归结果还指出了另一重要发现——生物礁发育在中中新世较短时间内,发生了一次极为快速的“堆积”过程,本文将之命名为生物礁发育的中中新世“跃迁”事件。此外,检查西科1井现场钻探记录发现,这一事件对应为溶洞广泛发育,是钻孔施工过程中的极低岩心获取区间(图4)。由此本文将新近纪以来生物礁发育的历史划分为3个特征阶段(图4):约16.5 Ma之前与约13.5 Ma之后的稳定沉积阶段,16.5~13.5 Ma的中中新世“跃迁”事件。

此外,西沙生物礁沉积的初始年龄,不同的研究存在不同的估计。例如,基于地球物理的研究<sup>[21]</sup>直接将三亚组的底部对比至新近纪初期(23 Ma),而沉积学研究<sup>[1,22]</sup>则限定于新近纪的早期(20 Ma)。根据本文已经获得的西科1井时-深函数进行外推,大约1220 m处的年龄已超过23 Ma,钻孔底部1258 m则老于25 Ma。由于目前尚未获得更多其他年代学证据,如果生物礁发育的初始年龄限定于23 Ma,则三亚组下部可能仍存在大约40 m的快速“堆积”过程,但无论何种情况,均不宜继续采用20 Ma这一年龄估计。

关于南海的形成机制,目前国内外存在两个主流观点:海底扩张说与碰撞-逃逸模式。

1)海底扩张说认为,在太平洋板块俯冲的背景下<sup>[37-39]</sup>,新的洋壳在南海三大次海盆内产生<sup>[5,40]</sup>,直至南海板块与周边板块发生碰撞而停止(图 1)。根据这一理论,本文推测,西沙新近纪生物礁发育的两个稳定时期(阶段 I 和阶段 III,图 4)可能对应于南海扩张前后两个时期。具体的,南海扩张时,由于中-西沙台地受洋壳扩张的挤压,其下沉速率有限;南海扩张结束后,区域整体构造趋缓,下沉速率仍然较为稳定。另一方面,伴随着洋壳的扩张,大量岩浆参与了次海盆内洋壳的形成,而扩张结束后,岩浆活动逐渐平静;两种情况下,中-西沙台地受到岩浆活动的影响均较小。因此,南海扩张时与扩张结束后,西沙生物礁发育呈现稳定状态。

中中新世时期,情况则发生了改变。首先,三大次海盆的扩张结束并非同步,东部次海盆 15 Ma 结束扩张,而西南次海盆则在略早的 16 Ma 结束扩张<sup>[4,12]</sup>。当某一次海盆先行结束扩张,扩张时对中-西沙台地产生的双向挤压,变更为单向受力,可能造成了中-西沙台地在中中新世(16.5~13.5 Ma)的快速下沉;当所有洋壳扩张结束后,中-西沙台地受到的挤压重新达到平衡,从而恢复了较为稳定的堆积状态。另一方面,由于南海的洋壳扩张属于“被动”结束,而非内部岩浆活动的“主动”停止。当洋壳扩张停止时,大量的岩浆活动无法从洋中脊溢出形成新洋壳,从而对海盆周边台地的下沉过程产生了显著的促进作用。由于洋壳的扩张结束在三大次海盆内是并非同步,两次扩张结束事件可能诱发了西沙生物礁发育的“中中新世跃迁事件”。在此基础上,可进一步将这一事件划分为两个次级阶段(阶段 II.1 和阶段 II.2,图 4)。

2)碰撞-逃逸模式认为,印-亚板块的碰撞及其所诱发的哀牢山-红河断裂一线的构造逃逸是诱发南海扩张的主导因素<sup>[4,41]</sup>(图 1)。中中新世是作为印-亚板块碰撞的重要时期<sup>[42-43]</sup>,有可能促使壳-幔物质向南海盆地的运移<sup>[4,44]</sup>,从而引发了中中新世西沙生物礁的快速“堆积”过程。

然而,由于南海地区的具有良好年代学控制的深孔研究仍然缺乏,本文的上述推测仅基于西科 1 井单孔结果所获得,验证这些推测需要在今后的研究中在更大空间尺度上积累更多的证据。

## 4 结论

生物礁堆积是西北太平洋地区重要的沉积类型之一。由于过去研究中年代学结果的匮乏,极大的限制了长时间尺度上对生物礁发育过程的认识。本文在古地磁学的基础上,初步给出了西沙地区三亚组的年代学结果。在综合上部古地磁学结果的基础上,本文提出,新近纪以来西沙地区生物礁生长、发育在构造时间尺度上可划分为 3 个阶段,具体包括:约 16.5 Ma 之前的稳定堆积阶段、16.5~13.5 Ma 快速堆积时期和 13.5 Ma 以来再次进入稳定堆积阶段。这一“三阶段”的发育模式,与南海洋壳扩张的结果过程密切联系,可能反映了南海整体构造演化对生物礁发育的控制作用。

### 参考文献:

- [1] WANG P, LI Q. The South China Sea: paleoceanography and sedimentology[M]. Dordrecht:

- Springer, 2009.
- [2] TAYLOR B, HAYES D E. The tectonic evolution of the South China Basin[M]// HAYES D E. The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands, Washington: AGU, 1980: 89-104.
- [3] TAYLOR B, HAYES D E. Origin and history of the South China Sea[M]// HAYES D E. The Tectonics and Geological Evolution of Southeast Asia Seas and Islands, Washington: AGU, 1983: 89-104.
- [4] BRIAIS 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: Solid Earth*, 1993, 98(B4): 6299-6328.
- [5] 姚伯初, 曾维军, HAYES D E, 等. 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: 204.
- [6] BARCKHAUSEN U, ROESER H A. Seafloor spreading anomalies in the South China Sea revisited[M]// CLIFT P. *Continent-Ocean Interactions Within East Asian Marginal Seas*, Washington: AGU, 2004: 121-125.
- [7] HSU S K, YEY 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.
- [8] BARCKHAUSEN U, ENGELS M, FRANKE D, et al. Evolution of the South China Sea: Revised ages for breakup and seafloor spreading[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 59: 679-681.
- [9] LI C F, 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(3): 1377-1399.
- [10] LI C, SONG T. Magnetic recording of the Cenozoic oceanic crustal accretion and evolution of the South China Sea basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(24): 3165-3181.
- [11] WANG P, PRELL W L, BLUM P, et al. Initial Reports Volume 184[R]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program*, 2000.
- [12] 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.
- [13] TIAN J, ZHAO Q, WANG P, et al. Astronomically modulated Neogene sediment records from the South China Sea[J]. *Paleoceanography*, 2008, 23(3): 137-149.
- [14] WU H, ZHAO X, SHI M, et al. A 23 Myr magnetostratigraphic time framework for Site 1148, ODP Leg 184 in South China Sea and its geological implications[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 58(Part B): 749-759.
- [15] Expedition 349 Scientists. South China Sea tectonics: Opening of the South China Sea and its implications for southeast Asian tectonics, climates, and deep mantle processes since the late Mesozoic[R]. *International Ocean Discovery Program Preliminary Report*, 2014.
- [16] FULTHORPE C S, SCHLANGER S O. Paleo-oceanographic and tectonic setting of Early Miocene reefs and associated carbonates offshore Southeast Asia[J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(6): 729-756.
- [17] SUN S Q, ESTEBAN M. Paleoclimatic controls on sedimentation diagenesis and reservoir quali-



- ty: lessons from Miocene carbonates[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(4): 519-543.
- [18] WILSON M E J. Cenozoic carbonates in Southeast Asia: implications for equatorial carbonate development[J]. Sedimentary Geology, 2002, 147(3-4): 295-428.
- [19] BACHTEL S L, KISSLING R D, MARTONO D, et al. Seismic stratigraphic evolution of the Miocene-Pliocene Segitiga Platform, East Natuna Sea, Indonesia: the origin, growth and demise of an isolated carbonate platform[M]//EBERLI G P, MASSAFERRO J L, SARG J F. Seismic Imaging of Carbonate Reservoir and Systems. Tulsa: AAPG Memoir, 2003: 309-328.
- [20] MA Y, WU S, LV F, et al. Seismic characteristics and development of the Xisha carbonate platforms, northern margin of the South China Sea[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40(3): 770-783.
- [21] WU S, YANG Z, WANG D, et al. Architecture, development and geological control of the Xisha carbonate platforms, northwestern South China Sea[J]. Marine Geology, 2014, 350(2):71-83.
- [22] 张明书, 何起祥, 业治铮. 西沙生物礁碳酸盐沉积地质学研究[J]. 北京: 科学出版社, 1989: 1-30.
- [23] 丘燕, 王英民. 南海第三纪生物礁分布于古构造和古环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(1): 65-73.
- [24] 魏喜, 邓晋福, 谢文彦, 等. 南海盆地演化对生物礁的控制及礁油气藏潜力分析[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 245-252.
- [25] 朱袁智, 沙庆安, 郭丽芬, 等. 南沙群岛永暑礁新生代珊瑚礁地质[J]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [26] 赵焕庭, 沙庆安, 朱袁智. 南沙群岛永暑礁第四纪珊瑚礁地质[J]. 北京: 中国海洋出版社, 1992.
- [27] 邹仁林, 蒙致民, 关锡廉. 南海北部大陆架深水石珊瑚的生态分析[J]. 热带海洋学报, 1983, 2(3): 1-26.
- [28] NIE B F, CHEN T G, LIANG M T, et al. Relationship between coral growth rate and sea surface temperature in the northern part of South China Sea during the past 100 a[J]. Science in China: Series D, 1997, 40(2): 173-182.
- [29] 徐国强, 吕炳全, 王红昱. 新生代南海北部碳酸盐岩台地的淹没事件研究[J]. 同济大学学报, 2002, 30(1): 35-40.
- [30] FYHN M B W, BOLDREEL L O, NIELSEN L H, et al. Carbonate platform growth and demise offshore Central Vietnam: Effects of Early Miocene transgression and subsequent onshore uplift [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 76(20): 152-168.
- [31] 朱伟林, 王振峰, 米立军, 等. 南海西沙西科 1 井层序地层格架与礁生长单元特征[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2015, 40(4): 677-687.
- [32] 乔培军, 朱伟林, 邵磊, 等. 西沙群岛西科 1 井碳酸盐岩稳定同位素地层学[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2015, 40(4): 725-732.
- [33] KIRSCHVINK J L. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1980, 62(3): 699-718.
- [34] HILGEN F J, LOURENS L J, VAN DAM J A. The Neogene Period[M]//FELIX M, GRADSTEIN J, OGG G, et al. The Geological Time Scale 2012. Elsevier BV, 2012: 923-978.
- [35] EPTING M. The Miocene carbonate buildups of central Luconia, offshore Sarawak[M]//BALLY A W. Atlas of Seismic Stratigraphy. Tulsa: AAPG, 1989: 168-173.
- [36] BELOPOLSKY A, DROXLER A W. Imaging Tertiary carbonate systems, the Maldives, Indian Ocean: insights into carbonate sequence interpretation[J]. The Leading Edge, 2003, 22: 646-652.
- [37] HAWKINS J W, LONSDALE P F, MACDOUGALL J D, et al. Petrology of the axial ridge of

- 
- the Mariana Trough backarc spreading center[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 100(1-3): 226-250.
- [38] HALL R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20(4): 353-431.
- [39] STERN R J, LIN P N, MORRIS J D, et al. Enriched back-arc basin basalts from the northern Mariana Trough: implications for the magmatic evolution of back-arc basins[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 100(1-3): 210-225.
- [40] BEN-AVRAHAM Z, UYEDA S. The evolution of the China Basin and the mesozoic paleogeography of Borneo[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, 18(2): 365-376.
- [41] 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(12): 611-616.
- [42] YIN A. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis[J]. *Tectonophysics*, 2010, 488(1-2): 293-325.
- [43] WANG C, DAI J, ZHAO X, et al. Outward-growth of the Tibetan Plateau during the Cenozoic: A review[J]. *Tectonophysics*, 2014, 621: 1-43.
- [44] 谢建华, 夏斌, 张宴华, 等. 印度-欧亚板块碰撞对南海形成的影响研究: 一种数值模拟方法[J]. *海洋通报*, 2005, 24(5): 47-53.

## Magnetostratigraphy of Biogenic Reef in the Sanya Formation of Borehole XK-1 From Xisha Islands and Its Environmental Significance

YI Liang<sup>1,2</sup>, WANG Zhen-feng<sup>3</sup>, ZHANG Dao-jun<sup>3</sup>, LIU Xin-yu<sup>3</sup>, YOU Li<sup>3</sup>,  
LUO Wei<sup>3</sup>, ZHU You-hua<sup>4</sup>, QIN Hua-feng<sup>2</sup>, DENG Cheng-long<sup>2,5</sup>

(1. *State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China*; 2. *State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*; 3. *Zhanjiang Branch, China National Offshore Oil Corporation, Zhanjiang 524057, China*; 4. *Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 5. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Biogenic reef is one of the important sediment types not only in the South China Sea (SCS), but also in the Western Pacific Ocean, and plays an important role in modulating global climate and carbon cycle through biological processes. In this paper, a detailed study of paleomagnetic chronostratigraphy is carried out for a Neogene biogenic reef sequence of the Sanya Formation in Borehole XK-1 drilled recently in the Xisha Islands in the northern SCS. The main results are as follows: (1) The Early-Miocene Sanya Formation recorded C5Dn-C6An normal chrons. (2) Based on the age constraints of the whole borehole, the Neogene biogenic reefs in the Xisha region have three stages: two regular stages prior to about 16.5 Ma and after about 13.5 Ma, respectively and one rapid developing stage from 16.5 Ma to 13.5 Ma. The latter one is named 'Mid-Miocene Shift Event' herein. By comparing the new findings with the results obtained previously, it is speculated that the origin of the biogenic reefs in the Xisha region would be notably earlier than ~20 Ma which was considered in the past, and that the three-stage evolutionary model for the biogenic reefs was possibly related to the tectonic environment during the termination of seafloor spreading of the SCS.

**Key words:** magnetostratigraphy; <sup>230</sup>Th dating; biogenic reefs; South China Sea; neogene