

南海生物礁碳酸盐台地演化

吴时国¹, 余克服², 李学林¹, 张汉羽¹, 陈万利¹

1. 中国科学院深海科学与工程研究所, 海南省海底资源与探测技术重点实验室, 三亚 572000

2. 广西大学海洋学院, 南宁 530004

摘要 南海碳酸盐台地分布自早中新世开始发育, 至中中新世达到鼎盛, 再到晚中新世大量台地被淹没而逐渐消亡。从分布看, 南海碳酸盐台地具有南早北晚、东早西晚的发育规律; 从堆积速率看, 中中新世速率最大。控制这些台地的诞生、发育演化和消亡的因素十分复杂, 可能包括构造活动、相对海平面的变化、陆源碎屑物质输入变化、古海洋环境变化。

关键词 碳酸盐台地; 生物礁; 海平面; 陆源碎屑; 南海

1 生物礁碳酸盐台地概念与类型

碳酸盐台地是指碳酸盐岩堆积而成的丘状建隆。生物礁指由造礁生物组成的抗风浪的生物骨架岩。这些大规模的碳酸盐岩复合体, 主要生长在南北纬 30°C 以内的热带-亚热带海域。从文献检索引擎“谷歌学术”中搜索“碳酸盐台地”关键词, 可找出近 844000 条结果。碳酸盐台地与生物礁为什么会拥有科学界如此高的关注度呢? 因为对其的研究与解决全球性的气候危机和能源危机息息相关。自工业革命以来温室效应不断积累, 导致全球气候变暖、全球海平面持续上升等一系列重大环境问题, 从而碳循环研究成为了问题的症结, 而碳酸盐台地作为重要的碳储库, 对其的研究又是碳循环研究中重要的一环。当然, 碳酸盐台地研究的重要

驱动力是石油工业的需要。生物礁油气藏因其物性好、产能高、采收率高及勘探开发成本低而倍受人们重视, 现已知全球几个主要的生物礁型大油田总储量已达 40×10^8 t 以上, 世界碳酸盐岩储层的油气产量约占世界油气总量的 60% 以上。而中国南海大陆边缘发育了大量的碳酸盐台地和生物礁, 是寻找大油田的重要目标。因此, 由于碳酸盐台地既是深水油气勘探的重要储层, 又是全球碳循环的重要碳储库, 碳酸盐台地与生物礁就引起了地球科学家们极大的兴趣^[1-2]。

碳酸盐台地根据其轮廓、规模、是否与陆地毗邻划分为陆架缓坡台地、陆架边缘镶边台地和孤立台地 3 种类型。国内有些学者将碳酸盐台地的概念范围缩小, 把缓坡碳酸盐相模式和台地模式区分开, 碳酸盐台地仅仅指具有水平的顶部和陡峻陆棚

收稿日期: 2020-04-15; 修回日期: 2020-06-18

基金项目: 国家自然科学基金南海重大计划项目(91228208, 91428203)

作者简介: 吴时国, 研究员, 研究方向为生物礁碳酸盐台地, 电子信箱: swu@idsse.ac.cn

引用格式: 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; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.18.011

边缘的碳酸盐沉积海域,其中不考虑是否与陆地毗邻,孤立碳酸盐台地也被视为具有镶边的陆棚。生物礁类型大多采用达尔文分类,考虑与海岸的关系将其划分为岸礁、堡礁和环礁。另外,利用宏观的地形和地震地层数据,根据生物礁的形态把生物礁分为点礁、宝塔礁、马蹄形礁、环礁、丘礁和层状礁。

2 南海碳酸盐台地兴盛与衰亡历史

中国南海分布有众多的珊瑚礁群岛(图 1(a)),面积约 8000 km²,主要分布在南沙、西沙、中沙和东沙等群岛上^[3]。随着南海重大计划研究的

深入和深水油气勘探兴起,对南海碳酸盐台地分布的认识也越来越清晰。在南海的历史上,中新世的碳酸盐台地更为广泛(图 1(b))。学者们在南海南部发现了玛拉帕雅台地、南康台地、瑟巴吉他台地、北康台地、南微台地、礼乐台地、万安台地等大型碳酸盐台地,在北部发现了流花、西沙、广乐、宝岛等碳酸盐台地;在南部的曾母盆地、万安盆地、北巴拉望盆地、礼乐盆地和北部的珠江口盆地都发现大量的生物礁油气田^[2]。在早中新世末面积达到了顶峰,随后面积开始逐渐减少,现今仅在部分高点处发育生物礁(图 1)。

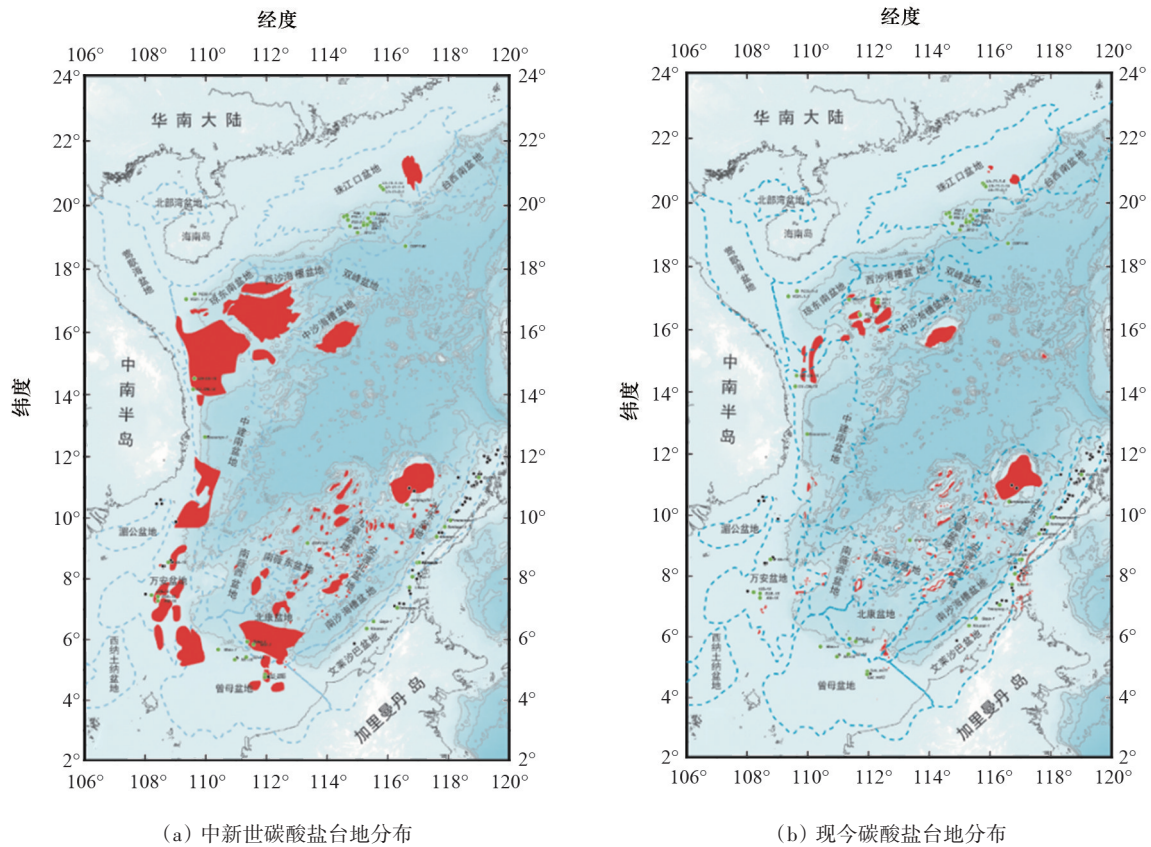


图1 南海碳酸盐台地分布

南海碳酸盐台地的时空分布呈现一定的规律性,其形成时间具有南早北晚、东早西晚的发育规律。南海东南部的巴拉望盆地在晚始新世就有生物礁生成,而北部的珠江口-琼东南盆地直到晚渐新世-中新世以后才开始形成生物礁。经过对其地质历史时期中的发育特征的研究,发现其规律性

和南海的构造活动密切相关。在晚渐新世-中新世时期,南海碳酸盐台地规模较大,发育范围较广,自晚中新世开始,大量台地被淹没而逐渐消亡(图 2),未消亡的台地也发育为孤立碳酸盐台地,其中西沙台地是南海极为典型的孤立碳酸盐台地。南海碳酸盐台地的分布因其构造位置的不同

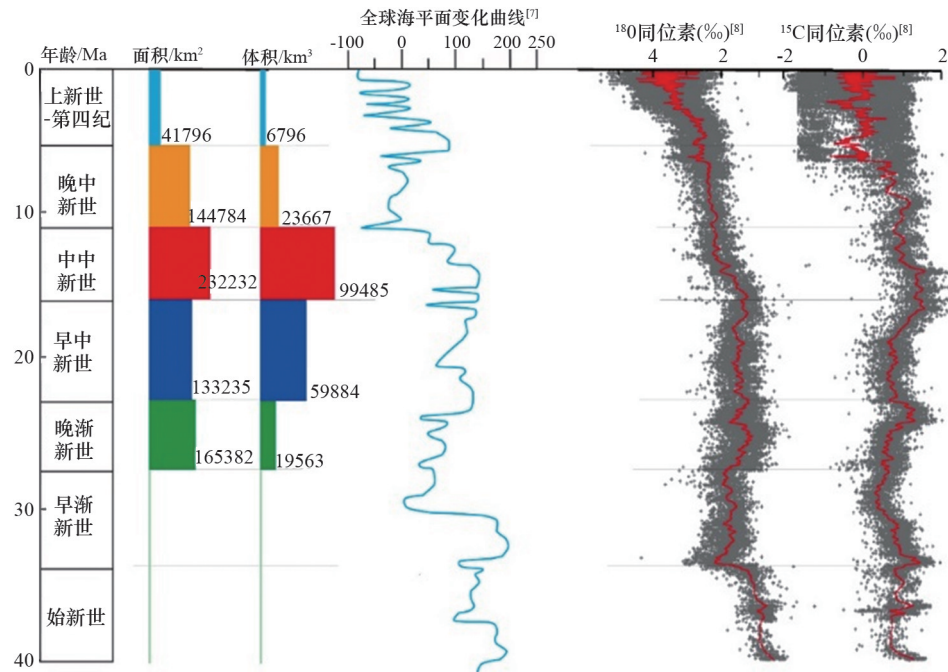


图2 南海新生代碳酸盐台地堆积量

而具有一定的差异性。流花碳酸盐台地和宝岛碳酸盐台地均处于南海北部距离大陆较近的大陆架边缘环境,因此其生物礁分布受大陆架形态和大陆物源区影响明显,导致该地区形成相应的生物礁,如台地边缘礁(莺琼盆地北缘的生物礁和珠江口盆地东沙隆起流花4-1生物礁)、块礁(珠江口盆地东沙隆起流花11-1生物礁)和塔礁(珠江口盆地惠州33-1生物礁)^[2]。而在距离较远的大陆边缘地区,则更多是形成孤立碳酸盐台地,如西沙碳酸盐台地。西沙碳酸盐台地形成于西沙隆起之上,周围被盆地和凹陷所包围,即东部的双峰盆地、北部的琼东南盆地、西南的莺歌海盆地和东南的中沙海槽。大约60 Ma年以前,西沙隆起逐渐从南海北部裂离而出,直到距约今23 Ma时期,西沙地块停止迁移而开始垂向沉降,西沙隆起逐渐被海水淹没,其周围的盆地和凹陷将其与大陆物源区隔开而形成适合碳酸盐岩和生物礁生长的清水环境,形成了巨厚层的碳酸盐岩和生物礁地层,科学家们通过钻井发现西沙部分环礁地区在约20 Ma万年的时间里沉积了近1200 m厚的碳酸盐岩^[4]。余克服^[5]等在永乐环礁上钻穿了873.55 m的生物礁地层。利用地震探测,在西沙、中沙和南沙均发现有超过1000 m的

生物礁地层^[2, 6]。

3 碳酸盐台地的生命周期与宿命

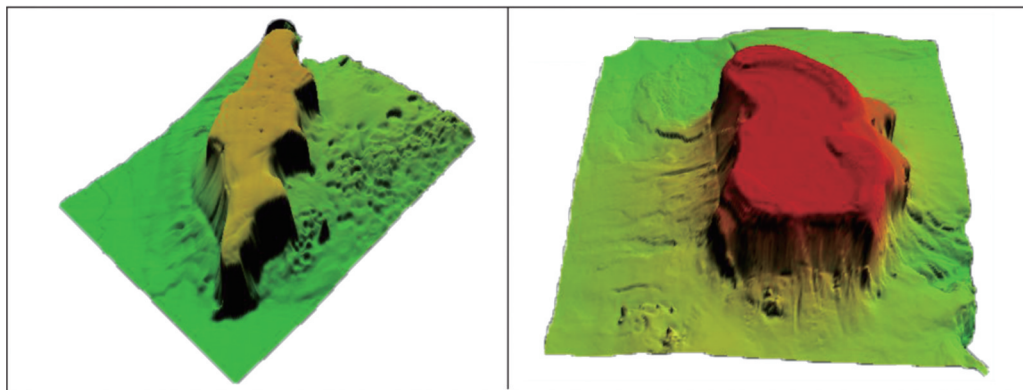
南海的碳酸盐台地分布位置不同,寿命也各不相同,发育演化上持续时间各不相同,从1 Ma到20 Ma,因此也分为短命台地和长命台地。许多沉没台地都是短命台地,而西沙碳酸盐台地是一个长命的碳酸盐台地,持续2000万年,其发育演化划分为4个阶段:早中新世萌芽阶段、中中新世爆发阶段、晚中新世后退阶段、上新世淹没阶段。整体发育趋势与中新世以来西沙海域相对海平面波动保持一致^[7]。

萌芽阶段:自早中新世开始,西沙区域构造活动趋于稳定,全区进入热沉降时期。随着相对海平面逐渐上升,西沙大多数区域开始处于适宜碳酸盐岩发育的环境,并且在构造高点处形成碳酸盐台地。随着相对海平面加速上升,早中新世前期沉积的碳酸盐台地被淹没,早中新世晚期相对海平面下降,碳酸盐台地整体面积扩大。繁盛阶段:中中新世时期,随着前期相对海平面缓慢上升,碳酸盐台地在横向和纵向均有扩大,但主要是边缘的生物礁

生长;后期相对海平面下降然后趋于稳定,可容纳空间稳定持续充足,碳酸盐台地快速发育,并且向外围扩张,沉积了巨厚层的碳酸盐岩地层,形成了大面积的碳酸盐平台。衰退阶段:晚中新世时期,相对海平面再次快速上升,台地主要纵向生长,台地整体沉积了较厚层的碳酸盐岩地层。由于该时期西沙群岛受到的东北季风作用加强,导致台地面积缩小。由于相对海平面的持续上升,台地周缘均进入半深海环境,这些碳酸盐台地发育成孤立碳酸盐台地。淹没阶段:上新世时期,相对海平面持续快速上升,西沙海域碳酸盐工厂产出速率减缓,碳酸盐台地被淹没而停止沉积碳酸盐岩,仅有宣德等几个地区继续沉积碳酸盐岩,但沉积速率远小于之前几个时期。上新世东北季风的作用再次明显加强,这导致了台地顺着季风方向再次发生缩小事件,由于季风增幅大于晚中新世,因此缩小规模也

更明显^[7-8]。

生物礁台地发育在 50 m 以浅的海域,如果海平面上升太快,则台地发生淹没。自上新世以来,西沙孤立碳酸盐台地逐渐被淹没,仅有部分高点处继续沉积碳酸盐岩。晚中新世期间,相对海平面快速上升,先前大多数高点上的生物礁停止发育,逐渐被淹没而消亡。如甘泉海台(图 3(a)),甘泉海台淹没台地的现今水深范围大约为 550~600 m,从西沙岛礁钻井数据发现 550~600 m 处大约为晚中新统底界(表 1)。有少数高点上的生物礁边缘地区仍然随海平面的上升而垂直生长碳酸盐岩,在第四纪时期相对海平面开始下降,边缘地区的碳酸盐岩露出海面形成岛屿,岛屿将台地顶部包围形成潟湖,潟湖内部重新开始沉积碳酸盐岩而形成环礁,如宣德环礁(图 3(b))。



(a) 甘泉海台(沉没台地)

(b) 宣德环礁(现生台地)

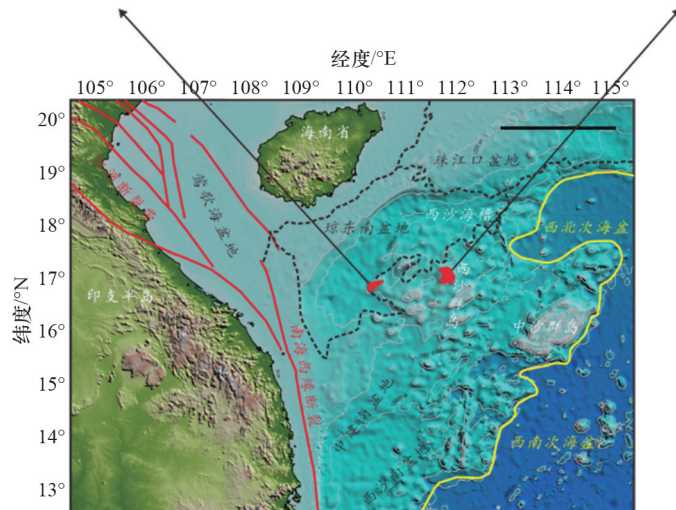


图3 西沙孤立台地

表1 西科1井和琛科2井年代划分

地质年代	底界深度/m	
	西科1井	琛科2井
第四纪底	214.89	235
上新世底	374.95	350
晚中新世底	576.50	525
中中新世底	1032.46	609
早中新世底	1257.52	878.21

根据对宣德环礁上钻穿碳酸盐岩地层的西科1井的研究表明,因不同类型造礁生物对水深的适应能力不同,伴随着海平面的上升,造礁生物有从珊瑚逐渐向钙藻及苔藓虫演变的趋势;而伴随着海平面的下降,造礁生物又有从钙藻和苔藓虫逐渐向珊瑚演变的趋势^[9]。根据西科1井主要造礁生物的纵向演化规律明确了西沙地区中新世以来主要发育3个主要造礁期和2个次要造礁期,其中主要造礁期为早中新世三亚组一段沉积时期、晚中新世黄流组沉积时期、上新世莺歌海组晚期至第四纪乐东组沉积时期;次要造礁期为早中新世三亚组二段沉积早期和中中新世梅山组沉积中期。

4 控制碳酸盐台地发育和死亡的因素

控制台地演化的因素十分复杂,推测4个因素控制了台地的发育演化和死亡,即:1)构造活动;2)相对海平面的变化;3)陆源碎屑物质输入变化;4)古海洋环境的变化。

张裂构造作用形成的隆升断块是碳酸盐台地发育的必要条件;晚期构造沉降速度和全球海平面变化波动控制着相对海平面处于上升状态或者下降状态。稳定的构造热沉降或全球海平面平稳上升均会导致区域海水稳定加深,这会为碳酸盐岩的沉积形成充足的容纳空间,使水下透光带沉积碳酸盐岩。

陆源碎屑的输入会抑制珊瑚礁的生长,进而影响碳酸盐岩的沉积和台地的发育。南海北部西沙地区和广乐地区构造背景相似,但在晚中新世以后碳酸盐台地的发育大相径庭,其中西沙碳酸盐台地在上新世-第四纪仍然沉积碳酸盐岩,而广乐地区

自晚中新世开始碳酸盐沉积停止,台地消亡。其主要原因是晚新近纪中南半岛东南部广泛发育火山活动,导致中南半岛隆升,火山作用及后期的隆升导致大量源于中南半岛越南陆架的陆源碎屑随河流汇入广乐隆起,环境恶化,水体环境不再适合生物礁和碳酸盐台地的生长,最终导致了广乐地区碳酸盐台地在晚中新世淹没死亡,而西沙地区由于西沙海槽和北部琼东南盆地中央拗陷带的阻隔作用,使西沙海域免受陆源碎屑物质的影响(图4)。

随着吕宋岛弧的形成和台湾造山作用,南海半封闭海逐渐形成。这一事件极大地改变了南海环流结构,对生物礁的生长、碳酸盐台地的发育以及台地斜坡的沉积均有影响。季风会牵引表层海水流动,当碳酸盐台地所在区域季风增强时,表层流的流速也会加快。表层流速加快会导致两个结果:其一,表层流速加快使台地顶部海水的侵蚀能力增强,先前生长的生物礁和沉积的碳酸盐岩会被更大程度的破坏而形成碳酸盐碎屑,然后在潮汐作用和重力作用的影响下,被搬运至台地的背风坡,这样会使背风坡的坡度比迎风坡的坡度缓,也会使背风坡沉积厚度大于迎风坡沉积厚度;其二,表层流速加快会使表层海水压强减小,深部海水因为流速慢于表层海水而向上迁移产生上升流和湍流,这些上升流和湍流会将深水区丰富的营养盐等牵引至台地顶部,而这些营养盐会抑制生物礁的生长,进而促进碳酸盐台地的淹没,这些上升流和湍流也会侵蚀台地边缘,使台地边缘更加陡峭(图4)。

5 结论

南海的碳酸盐台地在晚渐新世-中中新世时期规模较大,发育面积较广,而自晚中新世以来,大量碳酸盐台地被淹没而逐渐消亡,其发育特征与海平面变化和南海的构造地质活动密切相关。西沙碳酸盐台地是一个长期发育的台地,其发育演化分为4个阶段:早中新世萌芽阶段、中中新世爆发阶段、晚中新世后退阶段和上新世淹没阶段。晚新世期间,相对海平面快速上升引起大部分生物礁被淹没而消亡,甘泉海台可能是在这个时期走向消亡,但

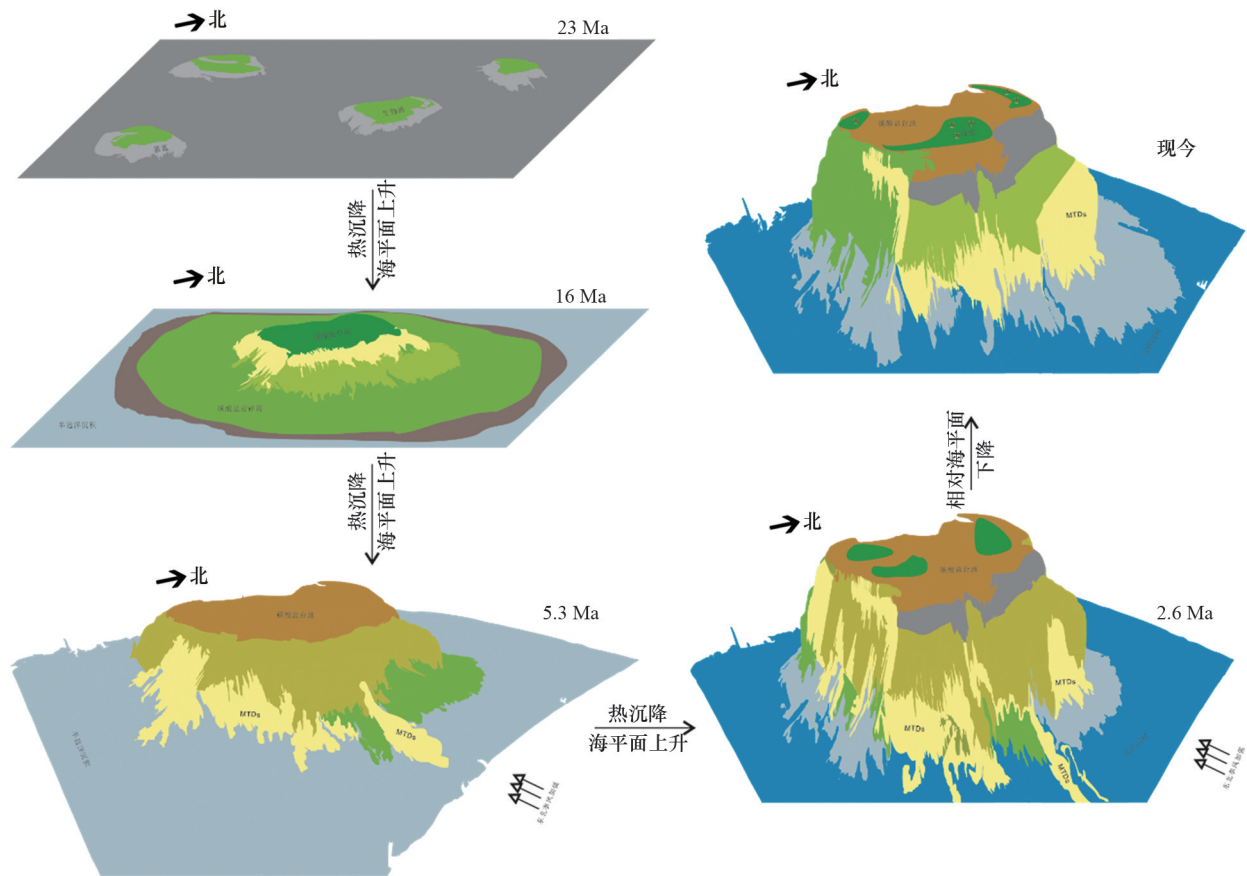


图4 宣德环礁孤立碳酸盐台地发育演化

仍然有一些生物礁发育至今,为形成岛屿提供重要基础。碳酸盐台地的发育和消亡的因素较多,包括构造活动、相对海平面变化、陆源碎屑物质输入与古海洋环境,任何一个因素变得不利于生物礁生存都会导致台地的消亡。

参考文献(References)

- [1] Wang P, Li Q, 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.
- [2] Wu S, Zhang X, Yang Z, et al. Spatial and temporal evolution of Cenozoic carbonate platforms on the continental margins of the South China Sea: Response to opening of the ocean basin[J]. Interpretation, 2016(3): 1-19.
- [3] Yu K. Coral reefs in the South China Sea: Their response to and records on past environmental changes[J]. Science China Earth Sciences, 2012(55): 1217-1229.
- [4] Zhu W, Xie X, Wang Z, et al. New insights on the origin of the basement of the Xisha Uplift, south China Sea[J]. Science China-Earth Sciences, 2017(60): 2214-2222.
- [5] Fan T, Yu K, Zhao J, et al. Strontium isotope stratigraphy and paleomagnetic age constraints on the evolution history of coral reef islands, northern South China Sea[J]. The Geological Society of America, 2019(132): 803-816.
- [6] Huang X, Betzler C, Wu S, et al. First documentation of seismic stratigraphy and depositional signatures of Zhongsha atoll (Macclesfield Bank), South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020(117): 104349.
- [7] Haq B U, Hardenbol J A N, Vail P R. Chronology of Fluctuating Sea Levels Since the Triassic[J]. Science, 1987(235): 1156.
- [8] Zachos J C, Dickens G R, Zeebe R E. An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics[J]. Nature, 2008(451): 279-283.
- [9] Wu S, Chen W, Huang X, et al. Facies model on the modern isolated carbonate platform in the Xisha Archipelago, South China Sea[J]. Marine Geology, 2020(425): 106203.

The evolution of the carbonate platforms in the South China Sea

WU Shiguo¹, YU Kefu², LI Xuelin¹, ZHANG Hanyu¹, CHEN Wanli¹

1. Laboratory of Marine Geophysics and Georesources, Institute of Deep-sea Science and Engineering, CAS, Sanya 572000, China

2. Ocean School, Guangxi University, Nanning 530004, China

Abstract The evolution of the Cenozoic reefs-carbonate platform is considered a part of the South China Sea opening, and plays an important role in the deepwater hydrocarbon reservoirs, the global carbon circulation, and the South China Sea tectonic history. The platforms were formed during the early Miocene, and flourished during the early Middle Miocene. However, they became drowned since the Middle Miocene, and many platforms disappeared during the Quaternary. It is found that the carbonate platform of the South China Sea sees a developmental pattern from south to north and from east to west. The highest accumulation rate of the platform was reached during the Middle Miocene. The control of the platform life history is very complex. But the most important four factors are the tectonic activities, the changes in the relative sea level, the changes in the input of the terrestrial detrital materials, and the changes in the paleo-ocean environment, and they are considered to control the development and the death of the reefs-carbonate platform.

Keywords carbonate platform, coral reef, sea level, terrigenous clast, South China Sea ●



(责任编辑 祝叶华)