

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.06.001

南海半封闭边缘海碳酸盐台地兴衰史

吴时国¹, 朱伟林², 马永生³

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

2. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092

3. 中国石油化工集团, 北京 100728

摘要:南海发育了广泛的碳酸盐台地, 具有分布面积广和时空变化大的特点。南海碳酸盐台地的生命演化史总体上经历了萌生期、扩展期、繁盛期、淹没期和残留期等演化阶段。根据近年来国内外关于南海地质地球物理研究进展, 发现南海碳酸盐台地是伴随着华南陆缘张裂、陆海巨变而萌生, 台地基底往往发育在两个共轭陆缘伸展地块的伸展断块构造高地。随着大陆岩石圈进一步伸展、减薄和地幔剥露等过程, 台地经历了晚渐新世末至早中新世初的萌生, 到中中新世的勃发。此外, 张裂和扩张期的岩浆构造也成为台地发育的重要控制因素, 比如构造沉降提供了台地生长的可容纳空间, 构造掀斜作用、断裂作用和前陆盆地前沿挤压褶皱的迁移控制了台地各单元厚度、沉积相和地震反射终止特征在横向上的变化, 构造控制的相对海平面控制了不同级序生物礁碳酸盐台地的沉积旋回, 而晚中新世构造作用导致半封闭边缘海的形成和大量碳酸盐台地淹没。最后, 10.5Ma 半封闭边缘海的形成, 造成南海海盆古海洋环境的巨大变化, 限制了台地的广泛发育, 仅残留了数量少、面积小的现代孤立碳酸盐台地。

关键词:碳酸盐台地; 共轭陆缘; 海盆演化; 边缘海; 南海

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

Vicissitude of Cenozoic carbonate platforms in the South China Sea: Sedimentation in semi-closed marginal seas

WU Shiguo¹, ZHU Weilin², MA Yongsheng³

1. Laboratory of Marine Geophysics and Georesource, Institute of Deep-sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China

2. University of Tongji, Shanghai 200092, China

3. Sinopec Group, Beijing 100728, China

Abstract: Cenozoic carbonate platforms are widely distributed in the South China Sea. They are characterized by large thickness and strong spatio-temporal variations. This study summarized most of the recently published findings on the geological and geophysical features of the South China Sea. It is found that all these carbonate platforms have experienced a progressive evolution from initiation, extension, flourishing, drowning and relict stages. Most of them are drowned in Late Cenozoic, and often called drowned carbonate platforms by some researchers. The carbonate platforms are unique in the South China Sea and contain rich information on tectonic evolution. The development of carbonate platforms follows the rifting process. They are usually initiated on the high shoulders of a faulted block at the conjugated rifting margin in Eocene and Early Oligocene. By rifting, thinning, and mantle exhumation of the South China Sea margin, the carbonate platforms has kept growing as NE-SW direction ridges, and flourished till Late Early Miocene. Tectonic subsidence provided accommodation space for platform growth. Tectonic tilt, faulting and migration of compressive folds in the front of foreland basins controlled the distribution of thickness and lateral variation in seismic reflection features. Tectonic induced relative sea level change controlled the sedimentary cycles of carbonate platforms in different orders. Furthermore, the rapid subsidence in Late Miocene and the formation of the semi-closed marginal sea caused the drowning of most carbonate platforms. Only a few carbonate platforms might leave behind as isolated platforms with limited distribution and small scale up to present.

Key words: carbonate platform; conjugated margin; tectonic evolution; marginal sea; South China Sea

资助项目: NSFC-广东联合基金重点基金项目“南沙海区减薄陆壳裂陷盆地构造演化及特色深水油气系统”(U1701245); 中国科学院深海科学与工程研究所资助项目“南海新生代碳酸盐台地结构与发育演化及油气意义”(SIDSSE-201403)

作者简介: 吴时国(1963—), 男, 研究员, 主要从事海底构造、深水油气和天然气水合物研究, E-mail: swu@idsse.ac.cn

收稿日期: 2018-07-28; **改回日期:** 2018-10-17. 文凤英编辑

南海现今有约 128 个环礁为现今碳酸盐台地沉积环境,总面积约 8000km², 占全球珊瑚礁总面积约 3% [1,2]。然而,在南北共轭大陆边缘更多发育了一系列的中新世碳酸盐台地,成为南海海盆的一大特色 [3]。南海新生代的碳酸盐台地发育演化经历了萌生期、扩展期、繁盛期、衰退期和残留期。南海中新世台地分布面积巨大,后来大部分发生死亡而淹没,本文称之为淹没碳酸盐台地(图 1)。据 Sampagueta-1 井钻井揭示,礼乐碳酸盐台地自渐新世开始发育,厚逾 800m,面积 20000km² [4,5]; 据西永 1 井、西科 1 井揭示西沙碳酸盐台地自中新世开始发育,至今有 1200m 厚的碳酸盐岩层序,历史时期的西沙台地面积可能更大,地震资料揭示其分布面积为 30000km² [3,5-9]。流花碳酸盐台地厚逾 300m,分布面积可达 42000km² [10,11]。

碳酸盐台地是最重要的碳储库之一,如何评价碳酸盐台地在全球碳循环中的重要作用,一直是一个十分重要的议题 [12]。更好地评价新生代浅水碳酸盐台地的堆积速率的变化,并与长时间序列的深海碳酸盐沉积结合起来,结合已经形成和正在形成的科学假说,将有助于更好地回答热带海区碳循环在全球气候变化中的作用等科学问题。

南海现代岛礁研究也是当前国家战略需求。岛礁开发利用是国家南海战略的重中之重,为此成立了三沙市政府,负责管理南海岛礁及其海域利用和环境保护。然而,由于海洋条件和地质灾害影响,岛礁生态环境十分脆弱,岛礁斜坡陡峻等因素导致岛礁海底具有不稳定性。

碳酸盐台地研究的重要驱动力是石油工业的需要 [13-15]。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重视 [15,16]。世界碳酸盐岩储层的油气产量约占世界油气总产量的 60%, 现已知全球大约有 43.4 × 10⁸t 原油储藏在生物礁大型油气田中,据统计约占世界油气探明储量的 10% [15]。生物礁及其复合体极易形成有效圈闭而成藏,碳酸盐岩发育的区域,大部分存在由礁灰岩控制的油气田 [17,18]。因此,对南海碳酸盐台地的研究对我国油气资源勘探与开发具有十分重要的意义。

国际上,有关现代碳酸盐台地的重要研究集中在巴哈马滩、马尔代夫、澳大利亚西北陆架、大堡礁和东南亚等海域。20 世纪 50 年代以来,大巴哈马滩研究已成为全球碳酸盐台地研究楷模。1985 年 ODP101 航次和 1996 年 ODP166 航次两度造访大巴哈马滩 [19],使之成为碳酸盐台地研究的圣地,现代的许多碳酸盐台地沉积理论均来源于此。碳酸盐

台地侧向生长和周期性进积作用的发育模式也是基于巴哈马台地的地层学和沉积学研究,巨大的碳酸盐台地通过高位期间沿孤立台地背风边缘的进积作用,将原先孤立的台地逐渐拼合,形成大巴哈马滩 [20]。台地地层的生长和成岩作用与海平面变化密切相关,具有旋回沉积,频谱分析显示这些变化均受控于行星的轨道运动。台地边缘礁和砂体形成初期,台地表面的早期地形受台地边缘迎风或背风方向的严格控制。与此类似,在近端斜坡的环境里,沉积相的构成受到台地边缘迎风/背风方向的控制。最新发表的文献是有关巴哈马利用载人潜水器观察和采样分析,来评价台地边缘斜坡的沉积和成岩过程 [21]。台缘斜坡沉积作用是由多期小规模间歇性重力流构成的复合沉积体,其沉积产物是海侵和高位早期阶段形成的相对较粗的、倾斜的透镜体。单个透镜状地层的厚度仅几十厘米,顺斜坡方向延伸不过数十米。在海平面上升期间,多幕的沉积导致这些透镜体的合并,在台地边缘陡坡环境形成一个规模很大的粗碎屑裙,该裙体沿走向方向延伸可达几十千米,但也会在走向或倾向上出现米级或数十米级的快速变化的侧向和垂向非均质性。然而,目前仍无完整的巴哈马滩的三维结构。因此,最近又有不少研究者提出了重上巴哈马,提出了碳酸盐台地沉积的新认识,并开始用高分辨地震研究巴哈马滩的三维结构 [22,23]。

国内对南海碳酸盐台地的地质研究要追溯到 20 世纪 80 年代的南海油气勘探,完成了西沙群岛宣德环礁上的西永 1 井钻探 [24]。长期的岛礁考察主要为数轮“南沙群岛及其邻近海区综合科学考察”,期间完成对南永 1 井和 2 井钻探,钻穿了第四纪珊瑚礁,加深了我们对第四纪珊瑚礁地质演化的认识。尽管近年在西沙有西科 1 井、琛科 2 井 [7,25,26],然而对南海岛礁的演化过程研究仍停留在浅表层和“一孔之见”。地震探测主要集中于淹没碳酸盐台地,目前根据流花碳酸盐台地钻井和测井资料,发现了大型油田,并对中新世的碳酸盐台地的地震识别和分布规律有一些基本的认识。

南海拥有世界上最广泛的新生代低纬度碳酸盐岩沉积,但除了对单个岛礁开展研究外,有关深水区淹没碳酸盐台地的结构、沉积模式、发育演化和分布规律及其控制因素等方面的系统研究十分薄弱。从未建立淹没碳酸盐台地和台缘盆地相的精细结构和年代地层格架。由于南海的海盆扩张和裂后异常沉降作用,产生了独特的相对海平面变化,因此,提供了碳酸盐台地的形成空间。构造控台提出较早,但

南海海盆共轭边缘的差异演化张裂模式仍存在争议,缺乏构造沉降和构造复原的定量分析,对台地发育过程的古地理、物源条件和古海洋环流认识不深,对碳酸盐台地的结构和发育过程了解太少,难以对碳酸盐台地的成因机理研究进行深入探讨。本文根据近年来工业界和科学界在南海获取的探测资料,深入探讨南海碳酸盐台地的发育特征和分布规律及其对构造演化的响应,以期对国家油气资源勘探开发、海洋环境保护有所启示。

1 区域地质背景

南海是西北太平洋边缘海中面积最大的海盆,约为 $3.5 \times 10^6 \text{ km}^2$,平均水深 1212m,其北为华南地块,东以马尼拉海沟与菲律宾海板块相接,西与印支半岛为邻,南隔印度尼西亚群岛与澳大利亚板块相接(图 1)。南海海盆发育经历了晚白垩世到古近纪的多期伸展构造及随之发生的海底扩张^[27-33]。南海

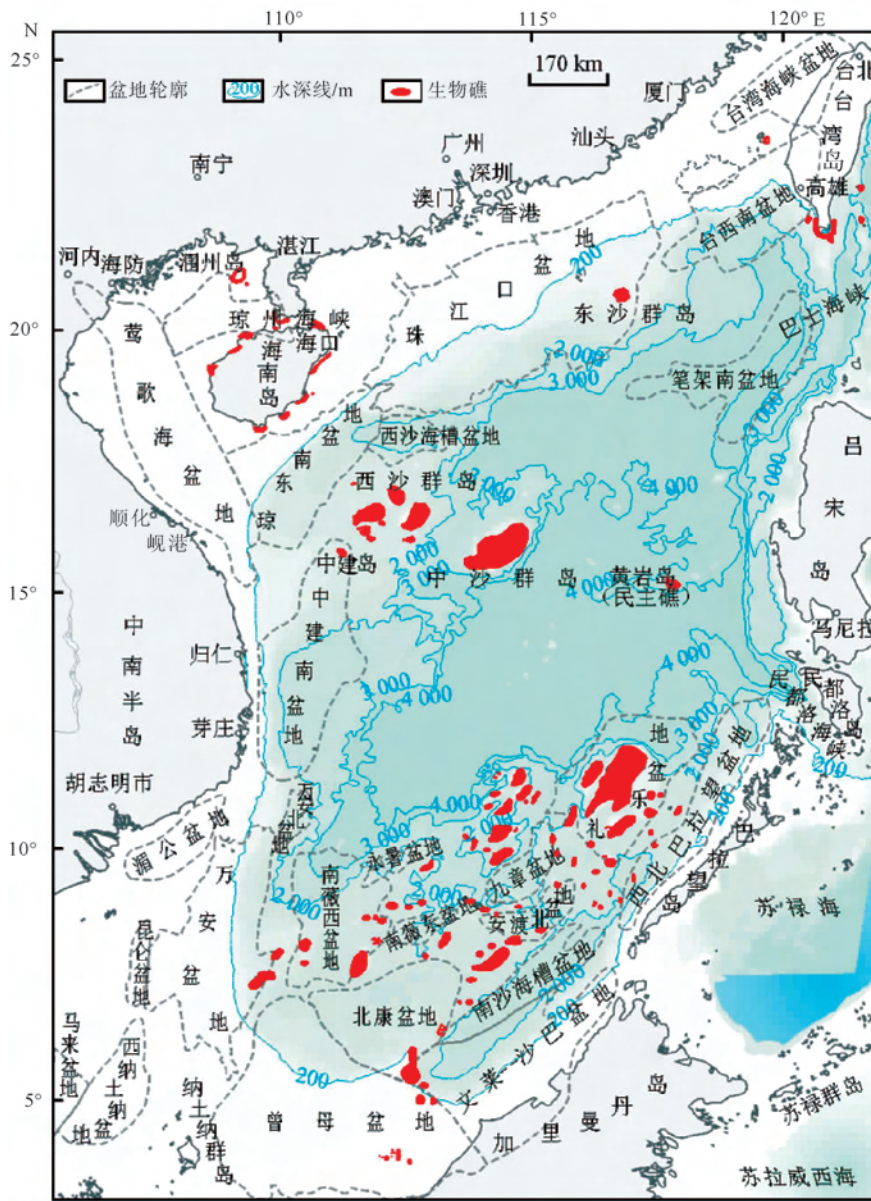


图 1 南海水深和现今碳酸盐台地(珊瑚礁)(红色)分布图

Fig.1 The bathymetric map of the South China Sea and distribution of modern reefs

张裂形成位于扩张洋盆的两侧宽达 1000km 的裂谷系统,并构成了共轭的大陆边缘^[34-36]。

南海的形成起源于大陆边缘的张裂,是一个非火山型大陆边缘^[35-38],经历了大陆边缘伸展、岩石圈减薄和地幔剥露等过程^[39]。最早的扩张期为晚白垩世末到早古新世,然而,南海的早期张裂作用并不清楚,最早在南海北部发生了第一期 NW—SE 向的神狐运动,在地表产生了一系列古新世的 NE 向构造,并形成了开裂不整合面(rift-onset unconformity)。随后,经过始新世到早渐新世的第二期 NE—SW 向扩张,形成了破裂不整合面(breakup unconformity)。南海岩石圈发生拉断,地幔剥露,随之发生了晚渐新世至早中新世的海底扩张,形成中央海盆。原位于北部边缘的南沙-北巴拉望地块与北部边缘分离,向南运动,直到早中新世末与西北婆罗-苏禄地块碰撞。南沙-北巴拉望地块构成了南侧的共轭陆缘。

尽管对南海形成演化的破裂方式和动力学机制尚存在上述诸多不同认识,但是对南海磁条带的年代推断为 32~17MaBP^[32]。之后, Briais^[27] 等重新计算了南海磁异常条带,认为南海的扩张年龄为 32~15.5Ma。IODP349 航次证实南海的扩张结束年龄为 15Ma^[31],并指出它具有不稳定性、分段性和不对称性的特点^[36,40]。

海底扩张在 15Ma 后停止,南海盆地进入热沉降期。早中新世末存在一个重要的不整合,尤其是在南沙地块^[41]、西沙隆起^[8]和中建南盆地^[42]表现十分明显,早中新世以前地层发育大量拉张断层,而之后少有断层,对应于西南次海盆的破裂,应为破裂不整合,但时间短、强度小。在南沙存在一个淹没不整合,实际上是破裂不整合和碰撞造山作用的综合效应^[43]。

根据比较容易接受的重建方案(图 2)^[3],南海东缘,台湾造山带大约在 10.5Ma 就已经存在(图 2)^[3,44]。我们在研究马尼拉俯冲带时,根据俯冲的年代推断俯冲可能发生在 16Ma^[45]。而吕宋岛弧大约在 10.5Ma 也已形成,从而形成一个半封闭的边缘海。根据重力资料,采用全板块吻合重建方案结果表明,上述结果是可信的,南海半封闭边缘海的形成是一个重要的构造事件^[44]。

2 碳酸盐台地的时空分布

随着海洋油气勘探的进展和南海科学研究的深

入,对南海新生代碳酸盐台地的分布有了比较清楚的认识。碳酸盐台地大多分布在大陆边缘拉张断块的构造高地上。在南部的曾母盆地、万安盆地、北巴拉望盆地和礼乐盆地,北部的珠江口盆地都发现大量的生物礁油气田。在南部发现玛拉帕雅台地、南康台地、瑟巴吉他台地、北康台地、南微台地、礼乐台地和万安台地等大型碳酸盐台地^[47-58]。在北部发现流花、西沙、广乐、宝岛等碳酸盐台地,并在流花台地上发现了我国最大的深水油田^[51,52]。由此看来,共轭陆缘新近纪碳酸盐台地分布面积广、厚度巨大,根据地震和钻井资料圈定出 14 个大型碳酸盐台地(图 3)。

从时间上看,南海碳酸盐岩形成具有南早北晚,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。整体上看,南海盆地中新世以后为碳酸盐岩发育繁盛期(图 3、4),其分布受南海构造演化控制。

南北共轭陆缘不同构造位置碳酸盐台地分布有一定差别。流花和宝岛碳酸盐台地处于南海北部陆架边缘环境,生物礁分布受陆架形态和物源区影响明显,形成相应类型的生物礁,如台地边缘礁(莺琼盆地北缘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)等,而在远端陆缘,则更多形成孤立碳酸盐台地。西沙碳酸盐台地位于南海北部西沙群岛及其邻近海域,东接双峰盆地,南邻中沙群岛,西南部毗邻莺歌海盆地,北邻琼东南盆地南部凹陷带,面积约 49800km²^[8]。西沙碳酸盐台地形成于西沙隆起之上,属于陆壳向洋壳过渡带。古近纪,西沙隆起是从南海北部裂离的地块;中新世以来,在南海两次区域性沉降作用下,西沙隆起逐渐被海水淹没,并且南海西部和北部拗陷带将西沙隆起和陆源区隔开,形成了适合碳酸盐岩和生物礁发育的清水环境,沉积了厚层碳酸盐岩和生物礁地层,西永 1 井钻探揭示了厚达 1250m 碳酸盐岩和生物礁地层,西科 1 井揭示了 1257.52m 的碳酸盐岩地层。早—中中新世,海平面上升速度匀速,可容纳空间增大,碳酸盐台地以加积为主;晚中新世以来,海平面快速上升,大部分碳酸盐台地被淹没,仅在西沙隆起高部位发育生物礁碳酸盐台地(图 5)。

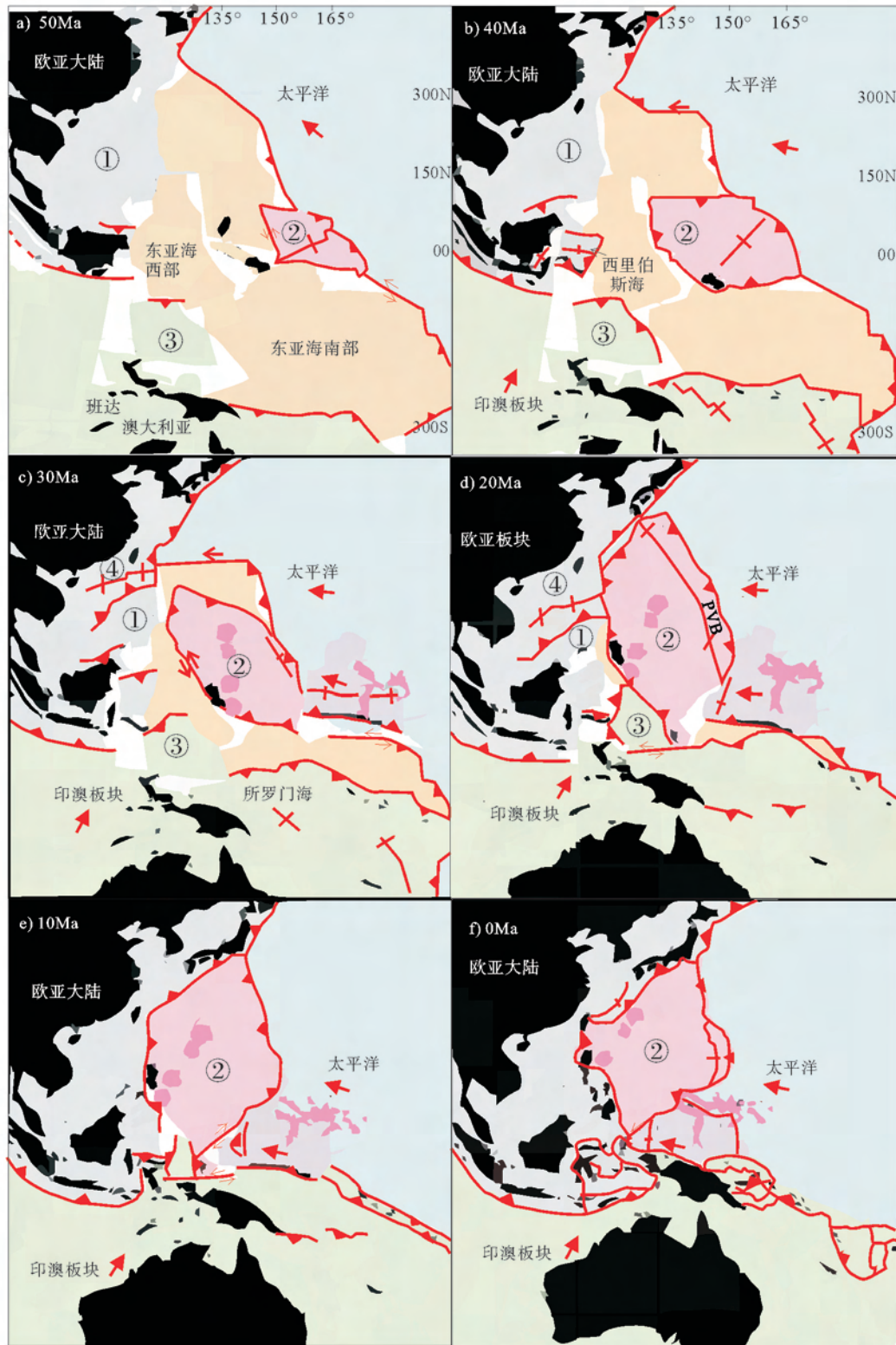


图 2 南海东部边界的重建方案^[44,46]

①古南海;②菲律宾海板块;③摩鹿加海;④中国南海

Fig.2 Reconstruction model for the eastern boundary of the South China Sea ^[44, 46]

① Proto-South China Sea; ② Philippine Sea Plate; ③ Molucca Sea; ④ South China Sea

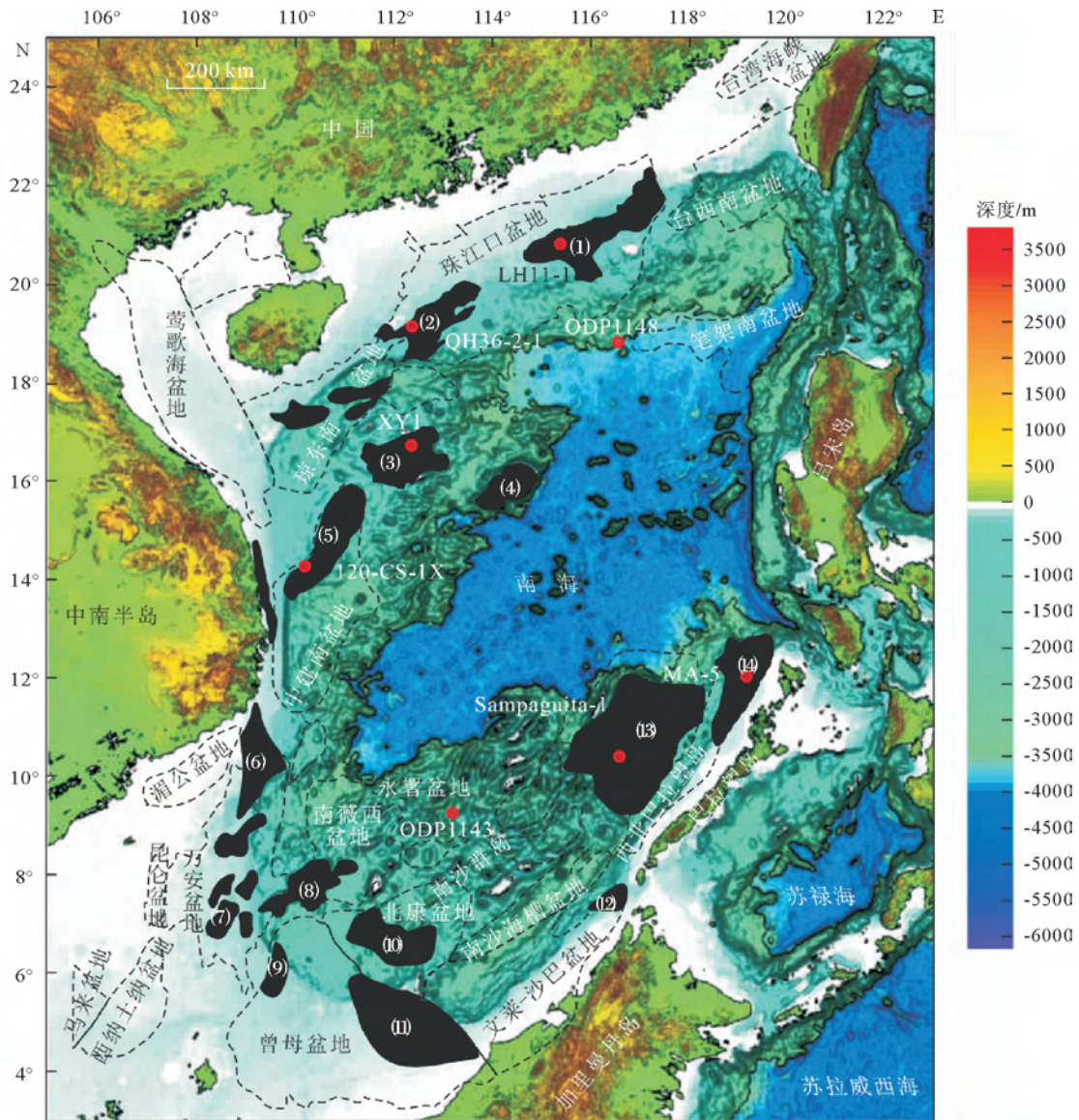


图3 南海早中新世碳酸盐台地分布^[3]

图中碳酸盐台地依次为:(1)流花,(2)宝岛,(3)西沙,(4)中沙,(5)广乐,(6)潘壤,(7)万安,(8)南微,(9)东纳土纳,(10)北康,(11)科尼亚,(12)婆罗,(13)礼乐,(14)巴拉望

Fig.3 Distribution of Early Miocene carbonate platforms in the South China Sea

The name of carbonate platform read: (1)Liuhua, (2)Baodao, (3)Xisha, (4)Zhongsha, (5)Guangle, (6)Phanh Rang, (7)Wan'an, (8)Nanwei, (9)East Natuna, (10)Beikang, (11)Luconia, (12)Borneo, (13)Liyue, and (14)Palawan

早中新世,碳酸盐台地初始发育期,西沙海域整体上为海进环境,但也出现多次小规模海退事件。此时,西沙群岛整体上还处于海平面之上,因此生物礁及碳酸盐台地的发育还处于初级阶段,仅在西沙群岛西部边缘及中建坳陷东侧有小规模的碳酸盐台地发育,且由于受到后期火山作用的影响,碳酸盐岩的发育受到了破坏,因此碳酸盐台地的规模相对较小且在横向上延续性不好(图 5A)。由于广乐隆起的位置相对西沙群岛要低一些,因此此时在广乐隆起已经有碳酸盐台地开始发育,由于广乐隆起之上

受火山运动的影响相对较小,碳酸盐的沉积横向上连续较好,表现为强弱相间的连续反射,在碳酸盐台地边缘有斜坡沉积发育,表现为似“S”形前积反射。

中中新世早期,碳酸盐台地繁盛期。海平面快速上升,随后开始缓慢地下降,这就为生物礁及碳酸盐岩的发育提供了有利环境,该时期碳酸盐台地的发育范围明显增大,台地发育规模也比较大,且碳酸盐台地的发育和相带发育都较为完整(图 5B)。在西沙群岛东部岛礁区和西部盆地区均有碳酸盐台地的发育,西部斜坡部位的碳酸盐台地在中中新世晚

期开始淹没并停止生长,东部岛礁区的碳酸盐台地则持续发育,直到现今在大型环礁的顶部(如永乐环礁、宣德环礁顶部)仍有现代生物礁的发育(图 5C)。该时期东部碳酸盐台地主要发育于大型环礁周围。

晚中新世—上新世,碳酸盐台地淹没期。随着海平面的整体上升,碳酸盐台地的发育面积越来越小,只在构造高点处形成碳酸盐台地,如北礁、永兴岛、宣德群岛等,其他大部分地区则被海水淹没。第四纪台地最终仅在永乐环礁、宣德环礁等岛礁附近发育碳酸盐台地(图 5D)。此时生物礁的发育面积也随着海平面的持续上升和碳酸盐台地发育面积的减小而逐渐减小,此时主要发育大型环礁,环礁内部发育泻湖。大型环礁在剖面上表现为地形的明显突起,顶部强振幅反射,内部主要是弱反射并在横向上有小范围的连续性,纵向上呈现出均一性,显示出在生物礁发育过程中经受了高级别的海平面变化旋回。

现今碳酸盐台地,发育完好的中新世以来的地层层序,西沙海区现代岛礁为我们研究南海碳酸盐台地提供了重要资料。根据永乐环礁的地震探测,中新世以来的碳酸盐台地 5 个三级层序(图 6),自下而上分别是 SQ5(下中新统)、SQ4(中中新统)、SQ3(上中新统)、SQ2(上新统)和 SQ1(第四系):

SQ5(下中新统):中新世初台地开始在西沙隆起上发育,基底包括中生代的变质岩和花岗岩^[26]。台地周缘发育浅海相沉积,西北部和南部隆起区发育碳酸盐台地层序,现今的永乐环礁位置仍处于暴露阶段(图 6)。地震相整体以席状、平行—亚平行、弱—中振幅、较连续—弱连续、中—较高频率为特征,推测该时期的沉积以硅质碎屑与碳酸盐碎屑的混合沉积为主。

SQ4(中中新统):中中新世层序以一组强振幅、丘状反射为特征,平顶碳酸盐台地边缘有明显上超反射。由于生物礁和碳酸盐台地的发育,该层序的厚度变化很大。碳酸盐台地边缘及内部生长了碳酸盐建隆及生物礁,在永乐环礁岛礁区的层序发育最厚(图 6),西北部、西部和南部均有生物礁发育。整体地震相为席状—丘形,平行—亚平行,弱—中振幅、较连续—弱连续、中—较高频率。根据钻井资料显示,该时期主要为以珊瑚藻为主要造礁生物的礁相地层^[7]。

SQ3(上中新统):表现为中振幅、平行、连续性好的地震反射特征,由于晚中新世出现明显的下切作用,在周缘深海沉积体系出现下切水道;在碳酸盐台地内部,出现了小规模、强振幅,不连续的反射特

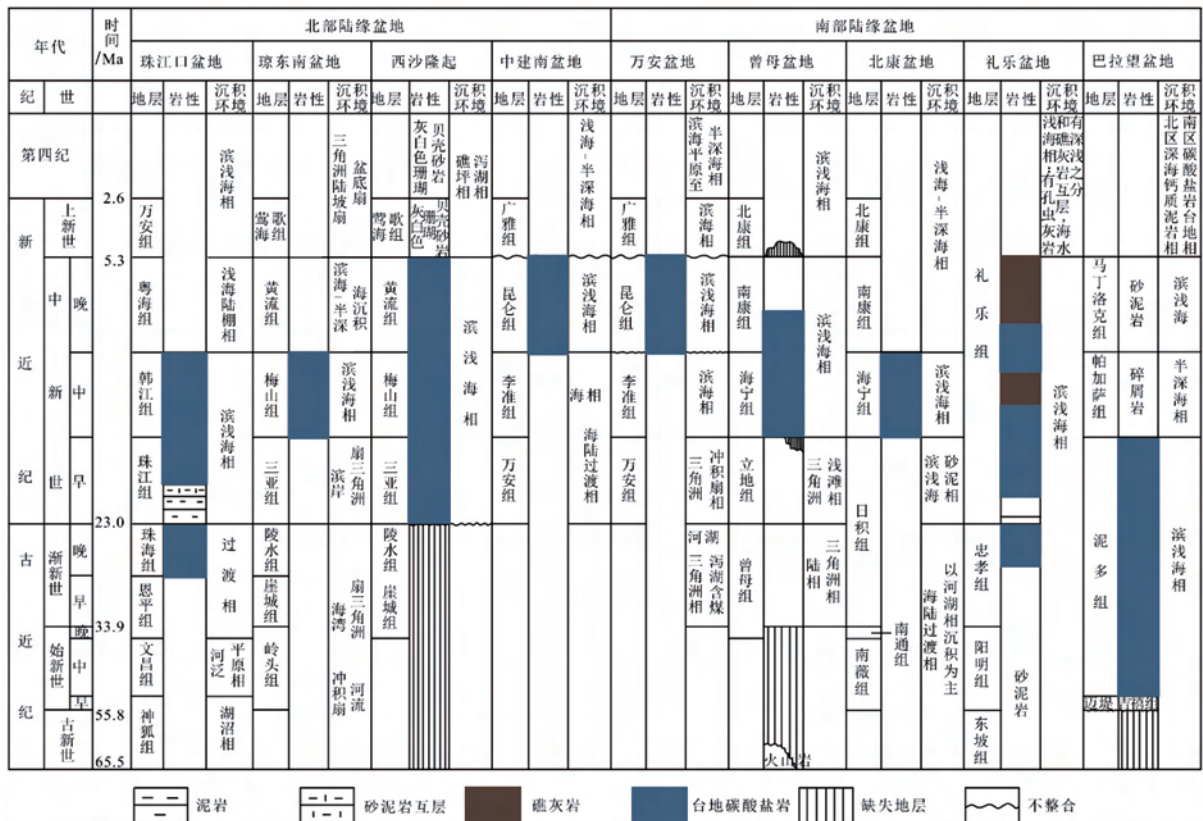


图 4 南海典型碳酸盐台地的发育演化阶段^[13]

Fig.4 The evolutionary stages of typical carbonate platforms in the South China Sea ^[13]

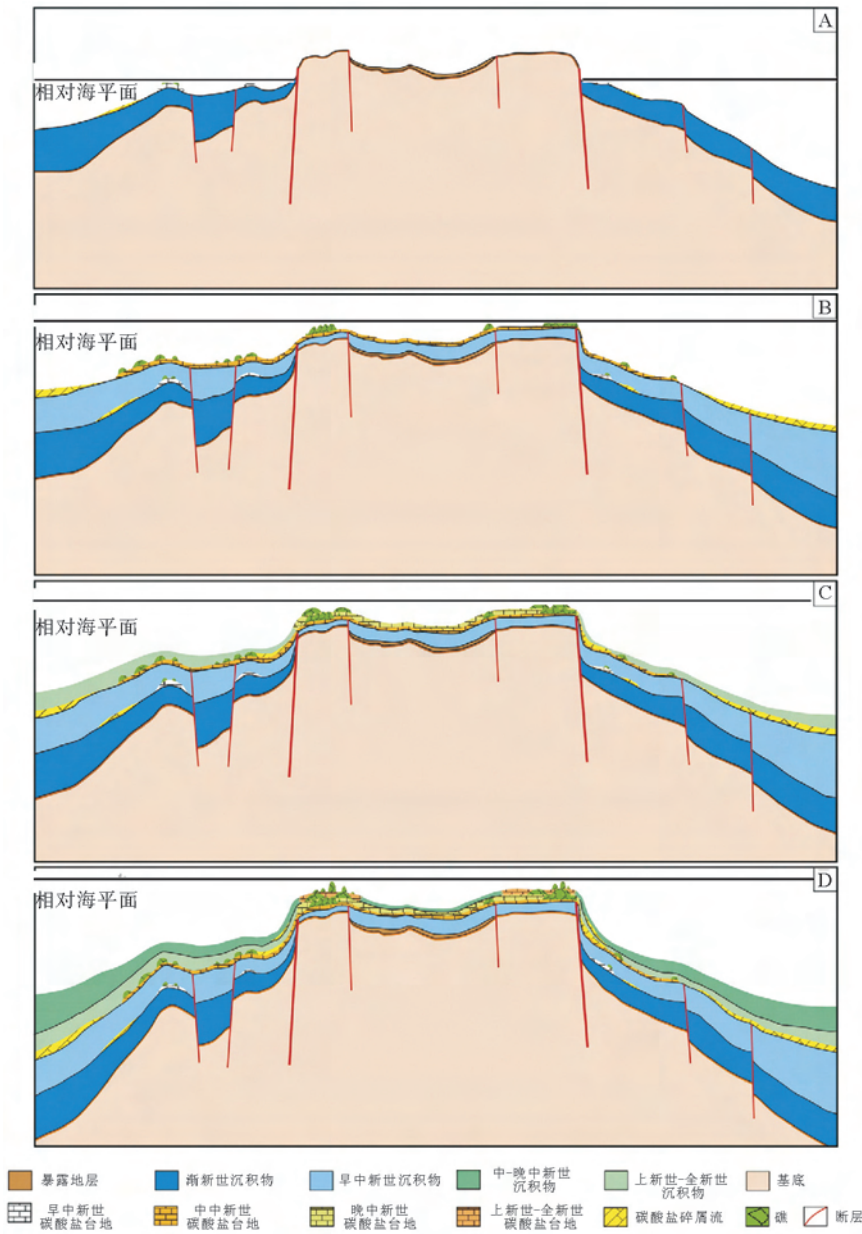


图5 西沙碳酸盐台地演化模式^[8]

A: 萌生阶段, 西沙隆起早期一直为陆地, 受到强烈的剥蚀; 早中新世开始随着中央海盆的裂张被海水淹没并接受沉积, 此时在构造高部位前期剥蚀的基底之上, 孤立的碳酸盐台地开始接受沉积; B: 繁盛阶段, 构造沉降速率相对较低, 随着海平面的继续上升, 碳酸盐岩由早期形成的孤立台地开始向周围推进, 至中中新世早期西沙隆起碳酸盐台地繁盛发育, 覆盖于整个隆起之上; C: 衰退阶段, 中中新世晚期, 相对海平面上升缓慢, 碳酸盐台地面积缩小, 台地边缘后退至构造高部位, 大量碳酸盐碎屑覆盖于早期形成的台地之上; D: 淹没阶段, 晚中新世开始, 基底加速沉降, 相对海平面加速上升, 促使了碳酸盐台地向构造高部位迁移, 面积迅速减小, 仅在构造高点形成多个孤立的小规模台地。上新世至今, 台地沉积退却至岛屿周围, 以垂向生长的环礁为主

Fig.5 Development model of Xisha carbonate platform and its relation to sea-level change

A. Initiation stage, carbonate platform occurred at early Miocene over the Xisha uplift which was a erosion land; B. flourish stage, carbonate platforms have laterally, and have become a large united carbonate deposits when sea-level rose and thermal tectonic subsidence was stable; C. decay stage, carbonate platforms were decay and developed upward in the basement high when sea-level was slow rise at end of Middle Miocene; D. drown stage, isolated carbonate platforms were developed at peak of geomorphology and become small

征, 代表了碳酸盐台地暴露沉积或沉积间断。

SQ2(上新统): 台地周缘是中振幅、平行、连续性好的地震反射特征, 代表了海相沉积; 台地内部是小规模、强振幅、不连续的反射特征, 代表了碳酸盐

建隆。层序整体以席状—丘形、平行—乱岗状, 弱—强振幅、强连续弱连续、中—高频率为反射特征。SQ4 在岛礁斜坡附近消失, 体现出现代孤立碳酸盐岩台地是在该时期基础上的范围逐渐缩减, 可以看

出该区相对海平面在不断上升(图 6)。

SQ1(第四系):第四系层序表现为典型的环礁沉积模式,在台地边缘发育生物礁为主的碳酸盐岩堆积,形成抗风浪的环礁,环礁内部发育泻湖沉积,整体地震相以中振幅、平行、连续性好为特征。该时期最主要特征为环礁周缘斜坡沉积物聚积量较少,体现出台地在该时期主要以垂向生长为主,侧向进积作用表

现较弱,在迎风坡表现为退积,台地面积缩小。

3 碳酸盐台地的控制因素

由上所述,尽管南海台地的数量和体积估算还是存在很大差异,台地分布规律总体上分为 5 个阶段(图 7)。研究发现碳酸盐台地发育期对应中新世

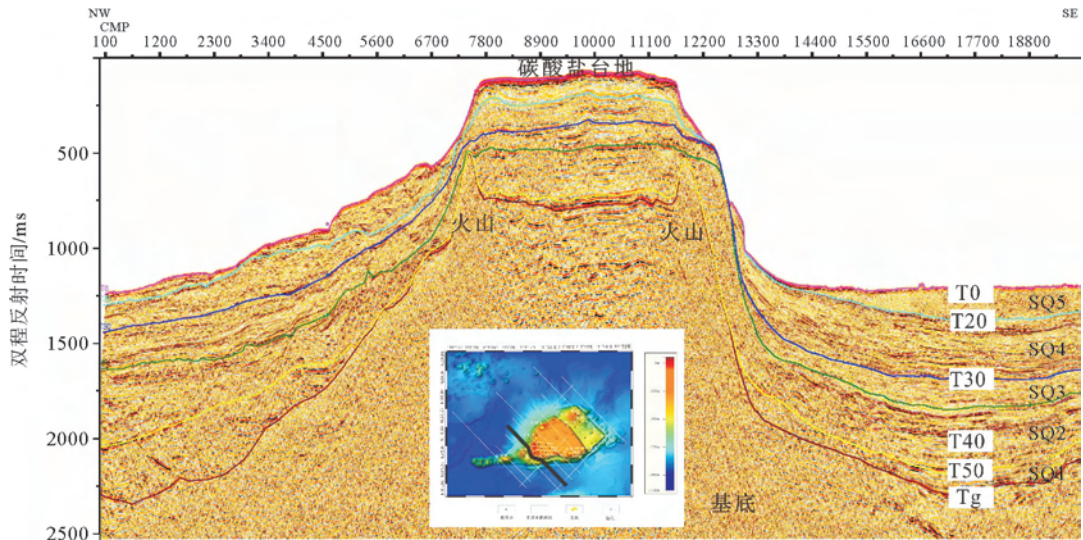


图 6 永乐环礁碳酸盐岩地层层序模式

Fig.6 Sequence stratigraphic model of carbonate deposits of the Yongle atoll

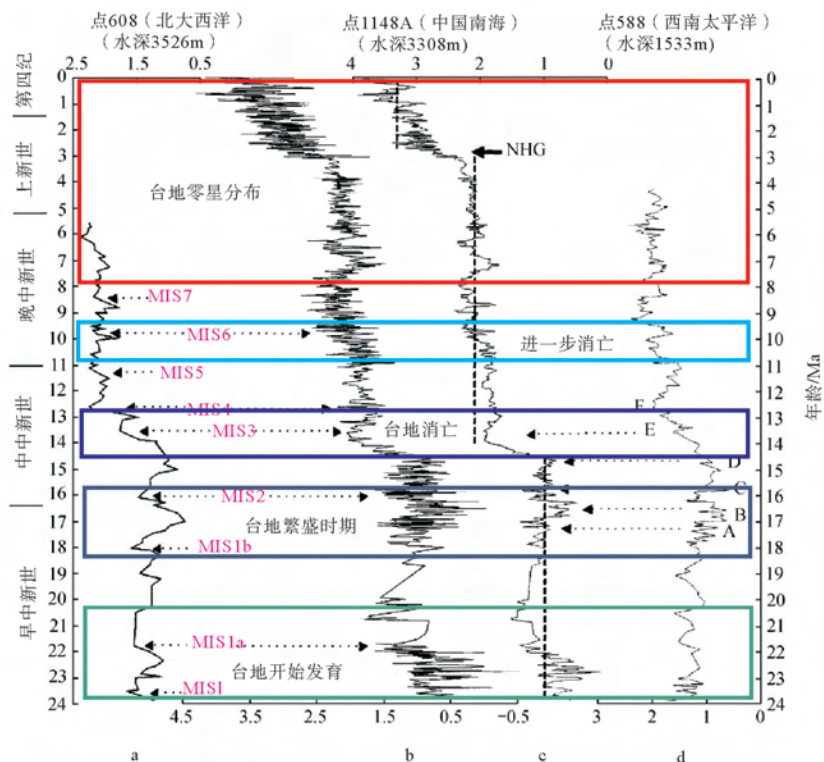


图 7 南海碳酸盐台地演化阶段^[61]

Fig.7 The evolutionary stages of carbonate platforms in the South China Sea

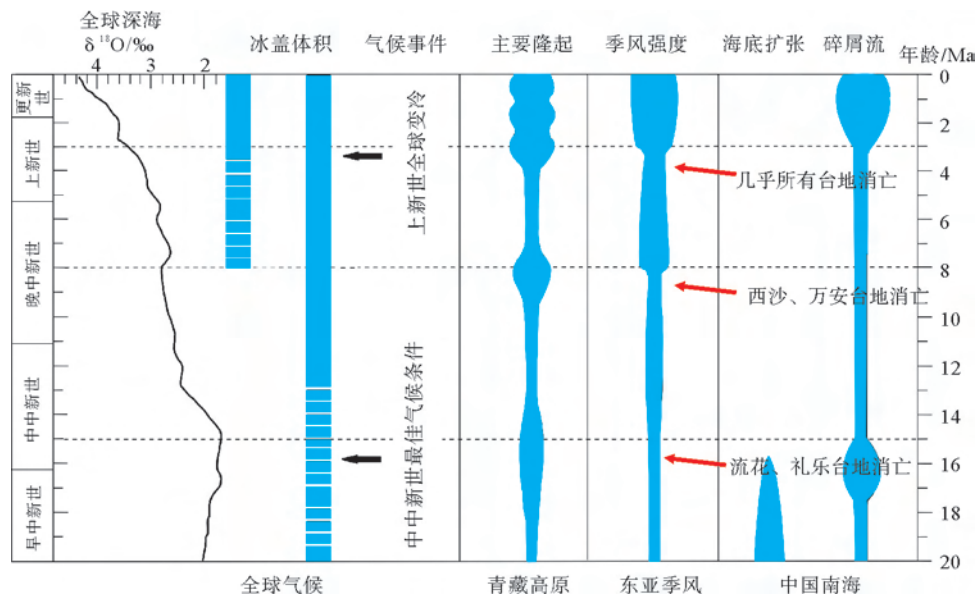
图8 南海碳酸盐台地淹没的主要事件^[62]

Fig.8 Main drowning events of carbonate platform in the South China Sea

高海平面温暖时期,台地消亡对应于全球海平面下降,但区域相对海平面迅速增大,造成台地的淹没,而且南海构造演化与台地演化耦合(图8):张裂期的构造高点成为台地形成基础;海盆扩张期相对稳定的构造背景促进台地繁盛;加速构造沉降导致台地的骤减与消亡。气候事件与台地消亡的耦合:在构造控台基础上,暖期可以促进台地繁盛,冷期可以加速台地消亡;台地淹没与东亚季风加强的耦合:3次季风加强时期,都对应着台地的集中消亡事件;季风驱动的海流可以改变富营养化,进一步影响台地消亡^[59,60]。

3.1 碳酸盐台地的基底

碳酸盐台地发育,需要一个较抗风浪的基底。张裂边缘的伸展构造对碳酸盐台地发育具有十分明显的控制作用,南海张裂边缘宽达1000km^[29]。张裂作用在碳酸盐台地的基底构造、层序结构、时空分布和淹没事件中扮演重要角色,控制了生物礁的分布及演化。我们对南海共轭边缘众多碳酸盐台地的研究表明,“构造控台”作用十分明显。碳酸盐台地初始发育在NEE向的伸展构造脊部。自南到北,台地的时代变新。南部的玛拉帕雅台地,从巴拉望一直延伸至南沙海槽,分布十分广泛,由于处于古南海陆缘,很早就进入深水环境,初始发育时间是35Ma,早于破裂不整合,但也发育在古新世至始新世的伸展断块上^[43]。向北进入远端裂陷边缘,主要是礼乐台地,发育于30Ma^[43],该区一直处于深水

区,仅在张裂断块的肩部发育生物礁台地。南海北部的西沙碳酸盐台地和流花碳酸盐台地均发育在早中新世^[8,50]。在碳酸盐台地的构造分类中,认为构造对碳酸盐台地发育演化具有决定性的控制作用,苏伊士湾和红海许多碳酸盐台地均发育于拉张断块^[63,64]。由此可见,张裂断块是抗风浪的基底,是大型台地发育的重要条件。

印度-澳大利亚板块与欧亚板块碰撞产生的走滑断裂构造,也可以产生基底隆起,在南海西缘尤为强烈。万安碳酸盐台地发育受越东走滑断裂控制,仍在基底走滑伸展断块上。台地初始发育于早中新世,中中新世时达最繁盛时期,受走滑断裂控制,呈南北向展布,主要分布在盆地中部走滑断块构造高部位及盆地南部边缘^[59]。东西两带台地具有不同的构造沉积背景,西带为被断层复杂化的东倾斜坡,离物源较近,为碳酸盐岩与碎屑岩互层沉积;东带濒临南海海盆,离物源较远,碳酸盐岩厚度大、岩性较纯。

3.2 半封闭边缘海加速沉降与古海洋环境形成导致台地的淹没

南海共轭陆缘在晚中新世发生大量碳酸盐台地淹没,此时,全球海平面持续缓慢下降,显然,南海的碳酸盐台地淹没不可能是全球海平面变化所致。因此,更有可能是裂后加速沉降导致台地的淹没^[65-68]。以西沙海区为例,裂陷期大量的断裂活动造成基底的高低起伏,这些高低起伏的地形为碳酸盐台地的

初始发育提供了条件,而裂后期基底沉降过程对碳酸盐台地的发育演化有重要的控制作用。利用回剥法计算了西沙海区主要构造单元的构造沉降量(图 9、10)。

西沙海区的各构造单元,在 32~23.3Ma 时期,构造沉降量较大,南海扩张过程中发育的北东向断裂促使基底加速下沉,导致隆起周缘的琼东南盆地、中建南盆地以及西沙海槽等构造单元的水体加深,这些水体较深的构造单元阻止了来自华南大陆以及中南半岛的陆源碎屑沉积于隆起及其周缘斜坡区。而 15.5~10.5Ma 阶段,构造沉降的速率相对较低,海水相对稳定,为碳酸盐台地的初始发育以及繁盛提供了必要条件。10.5~5.5Ma 时期,基底的沉降加快,促使碳酸盐台地不断向构造高点迁移,其分布逐渐减小,导致台地淹没。另外一个值得关注的现象是 5.5~1.9Ma 期间,构造沉降速率剧减,可能与这一时期研究区的火山活动有关,而 1.9Ma 至今,构造沉降速率上升,沉降加速,促使台地退却至岛屿周围,而且以垂向生长的环礁发育为主^[1,69]。

半封闭海的形成引起边缘海陆源物质的输入和海水富营养化。碳酸盐台地和生物礁的发育对环境要求高,因此温度、盐度及海水清洁度的变化都可以影响其生长发育。陆源物质的输入造成海水浑浊,海水环境发生变化;同时陆源物质携带的氮、磷等营养物质使得藻类及其他浮游生物迅速繁殖,水体溶氧量下降,透光性变差,造成台地的淹没死亡。海水

富营养化导致的碳酸盐台地淹没事件比较常见,南海碳酸盐台地在晚中新世经历了一次台地淹没事件,钻井显示该地区层位由下到上依次从生物碎屑粒状灰岩到含苔藓虫、红藻和底栖大有孔虫的砾屑碳酸岩岩性的变化暗示了水体的加深。南海永乐台地、鲁科尼亚等台地都是因为陆源碎屑物质的大量供应和地中海海域营养物质的增加。海水富营养化对流花和玛拉帕雅碳酸盐台地的淹没有很大的影响,但是加速沉降和相对海平面变化的快速上升可能是这些碳酸盐台地淹没的最根本原因^[3,50]。

碳酸盐台地在南海共轭陆缘的广泛发育是一个区域性事件,在浅水碳酸盐台地之上普遍出现深水沉积。尼多灰岩之上为深水相 Pagasa 碎屑岩,底部年龄为 15.1~13.7Ma^[4];在鲁科尼亚台地直接被中新世的半深海相泥岩所覆盖;流花台地被半深水的页岩沉积物所覆盖^[51,70]。从整个南沙群岛来看,既没有陆缘物质输入,也不存在海平面的快速变化,一个最重要的原因就是加速构造沉降。

3.3 晚渐新世—中新世岩石圈减薄和剥露地壳增热加速台地的发展

自海底停止扩张后 15Ma 内,海底地表热流基本维持在 60~150mW/m² 之间^[71],推测莫霍面温度基本维持在 680~1150℃ 之间。海底扩张期后,西南海盆呈现“地壳增温-地幔降温”热演化模式^[72]。7Ma 之前,地壳温度逐渐增高,主要是地壳、

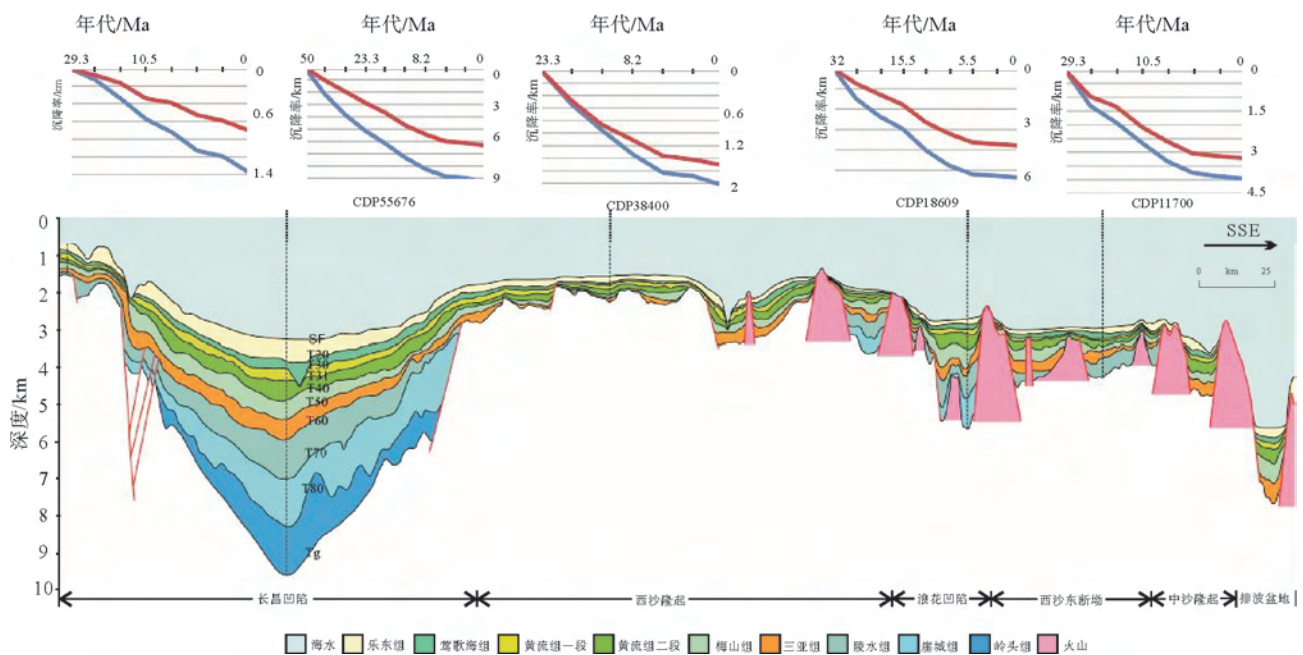


图 9 西沙海区构造沉降分析图

Fig.9 Tectonic subsidence of the Xisha Uplift

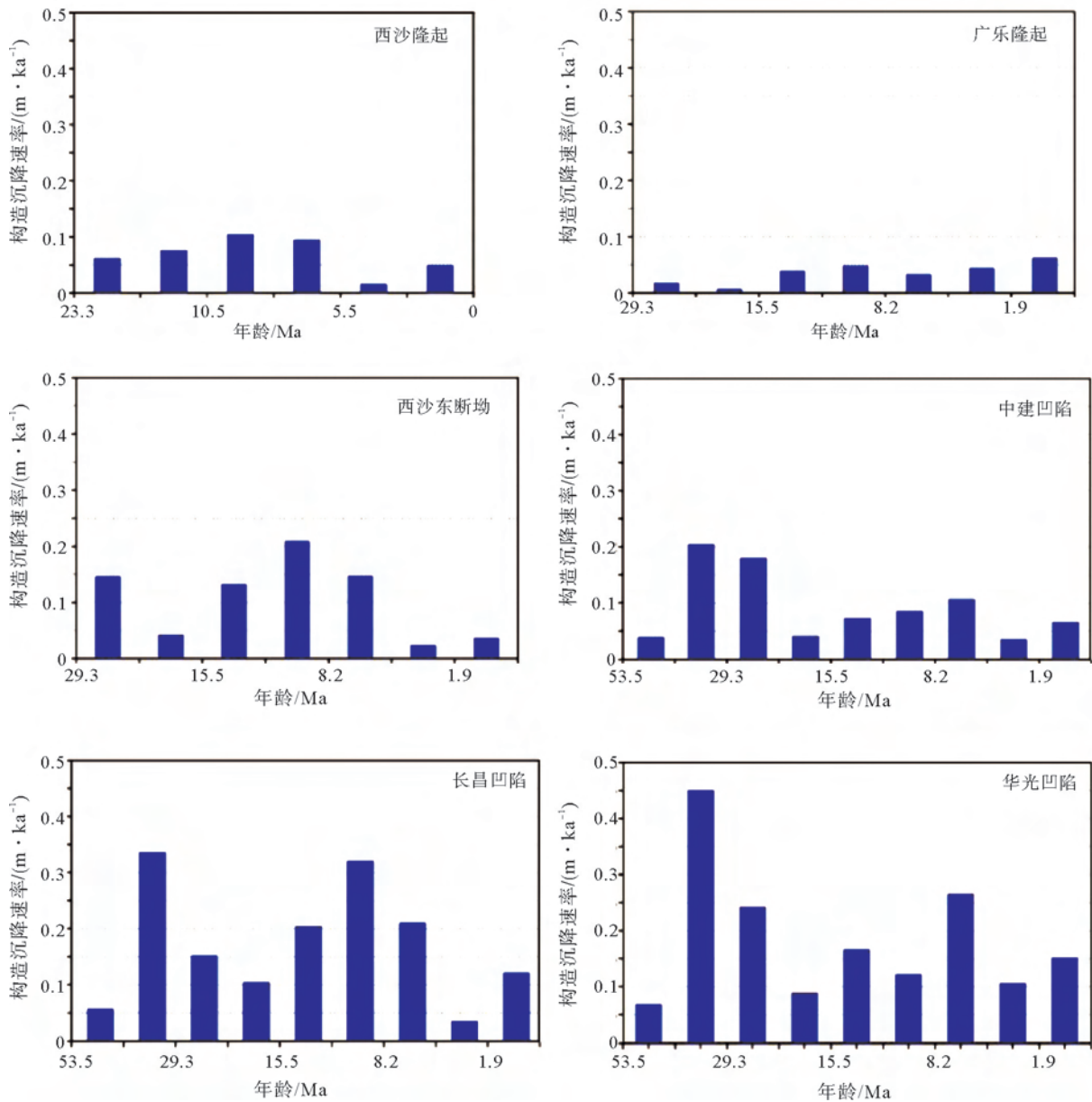


图 10 西沙海区新生代各构造单元的构造沉降速率图

Fig.10 Cenozoic tectonic subsidence rate for main depressions of the Xisha Uplift

地幔存在热导率差异,地壳热导率高,吸热,地幔放热所致。7Ma之后,地壳才开始与地幔同步降温。地壳存在一个持续高温区,出现时间大致在9.6~4.6Ma之间,与拖网取样得到的海山拉斑玄武岩和碱性玄武岩11~3.5Ma的年龄相当。高温区在海盆不同地点出现的深度不同,在海盆北侧7Ma大致出现在8km深度处,最高温度可达1100℃以上,与包裹体测温资料给出的西南海盆东北侧几个海底海山岩浆形成温度区间960~1280℃吻合。

西南海盆在NW—SE向海底扩张过程中,经历了15Ma的扩张活动。在不同底边界热流条件下,地幔上涌导致岩浆熔融点(1000℃)上升的速度在

0.4~1.2cm/a之间,且随扩张活动的延续熔融岩浆上涌速度减缓。岩浆熔融上涌期间,其上相应的软弱区域变形,且比非软弱强度区加速变薄^[72]。中央海盆沉积基底面上的温度一般在400~600℃之间,个别地段高达700℃以上。高温区向西南方向展布,并沿中轴向两侧呈梯级带状急剧降低。莫霍面温度800~1000℃以上,这与中央海盆拉张将高温的地幔物质带上来有关。中央海盆区地壳热流在地表热流中的比例小于20%,地幔热流与地表热流之比大于80%,表明海盆的高热流背景主要受地幔深部的热源作用^[73-76]。

这一扩张加热事件在沉积记录中得到证实,Li

等^[77]根据 ODP1148 孔发现南海扩张期(28.5~23 Ma)存在白垩沉积,推断 27~23 Ma 是南海的一个温暖期,海水变暖,适合碳酸盐台地的发育。

3.4 季风加强与陆源物质输入

陆源物质输入是影响碳酸盐台地发育演化的重要控制因素。新近纪晚期,婆罗洲造山、印支半岛火山活动及快速隆升,大大加强了南海南部和中南半岛的陆源碎屑输入,造成台地发育,海域陆源物质增加、富营养盐含量增加,环境恶化,水体环境不再适合生物礁和碳酸盐台地的生长,最终导致了研究区内碳酸盐台地的淹没死亡。

季风增强也会使陆源物质增加,台地淹没与东亚季风加强十分耦合,三次季风加强时期都对应着台地的集中消亡事件;季风驱动的海流可以改变富营养化,进一步影响台地消亡^[59,60]。同时,陆源物质输入增加,影响碳酸盐台地发育。

西南季风比东北季风弱,因此东北风、浪和海流强于西南风、浪和海流。东北季风增强对南海北部陆缘造礁生物作用明显。造礁生物的生长速度、碳酸盐沉积的堆积速度均依赖于以风、浪、流决定的沉积环境。由于东北、西南季风的交替,因此,在大陆坡先成台地的东北和西南边缘,造礁生物具有最大的生长速度,而在南、北等其他方向的生长速度较慢,其结果导致在东北和西南边缘首先形成新月形珊瑚礁,礁缘碎屑沉积最丰富,并向台地中央堆积,从而可以形成大陆坡环礁基本对称的形态,如南沙群岛的双子环礁。但在西沙海域,由于东北季风的风期和强度更高,因此大陆坡的东北边缘发育得比西南边缘更好,东北礁冠的宽度比西南部更宽,如永乐环礁、华光环礁、盘石屿环礁等都是基本对称,但又不完全相等的形态。宣德环礁的地震剖面显示,上新世、更新世交界时,季风加强,导致东北部背地后退,而东南部则保持垂向加积^[58]。

3.5 裂陷期与裂后期岩浆活动与生物礁的淹没过程

裂陷期岩浆构造可以成为台地发育的基底,而裂后期的岩浆作用对台地的影响则鲜有讨论^[78]。早中新世以来,西沙隆起及其周边坳陷进入裂后热沉降期。西沙隆起逐渐被淹没,许多礁体开始在构造高点发育。中中新世期间,西沙隆起和琼东南盆地发生了岩浆活动,深部岩浆的侵入减缓了西沙隆

起的沉降速率,导致中中新世生物礁和碳酸盐台地大规模发育。此期间火山数量少,但单个火山的规模很大。其中,许多火山成为后期生物礁和碳酸盐台地发育的基底(如图 11 中 C1, D1, D2)。岩浆活动结束后,西沙隆起和相邻的琼东南盆地进入了快速热沉降期,一直持续到晚中新世早期。当时沉降中心位于西沙隆起西北部的琼东南盆地。因此,西沙隆起西北部的生物礁首先受到影响,在中中新世晚期开始被淹没(图 11)。

上新世早期,西沙隆起、西沙东凹陷及西北次海盆都发生了强烈的岩浆侵入和火山喷发活动,且火山的数量远高于中新世。这次岩浆活动从晚中新世末期一直持续到上新世早期,并减缓了西沙隆起上新世的沉降速率。岩浆活动造成该区发生大规模的热液活动,导致西沙中新统顶部礁相地层发生强烈的白云岩化。这次岩浆活动之后,西沙隆起发生了第二次快速热沉降,造成中新世火山沉入水下,并开始在其上发育生物礁。这次构造沉降开启了 B 区和 C 区的礁体的淹没过程。在第四纪早期,西沙隆起又发生了一次强烈的岩浆侵入和火山喷发活动。岩浆活动后的快速热沉降导致了 B、C、D、E 区生物礁的淹没(图 11)。

4 结论

(1)南海碳酸盐台地分布面积广,时空变化巨大,随着大陆岩石圈进一步伸展、减薄和地幔剥露等过程,基本都经历了萌生期、扩展期、繁盛期、淹没期和残留期 5 个阶段。早中新世时期,海侵开始,在共轭陆缘开始发育生物礁,主要表现为丘状反射的台地边缘礁,生物礁发育范围小并且发育规模也很小。早中中新世晚期,海平面变化相对稳定,生物礁的范围和规模明显增大。中中新世晚期,西沙及广乐隆起整体已经被海水覆盖,台地开始向构造高部位迁移,这个时期的生物礁主要为台地礁和台地边缘礁。晚中新世时期,在经历了一期海平面变化旋回之后,海平面继续升高,大部分海域已经不适合大范围碳酸盐台地及生物礁发育,仅在局部的高地上继续发育。上新世以后,海平面上升,南海发生大面积台地淹没事件,生物礁发育数量明显减少,只在隆起区域继续发育,早期的台地边缘发育环礁,如西沙、中沙和南沙等大型环礁。而空间上,总体是南早北晚,东早西晚。

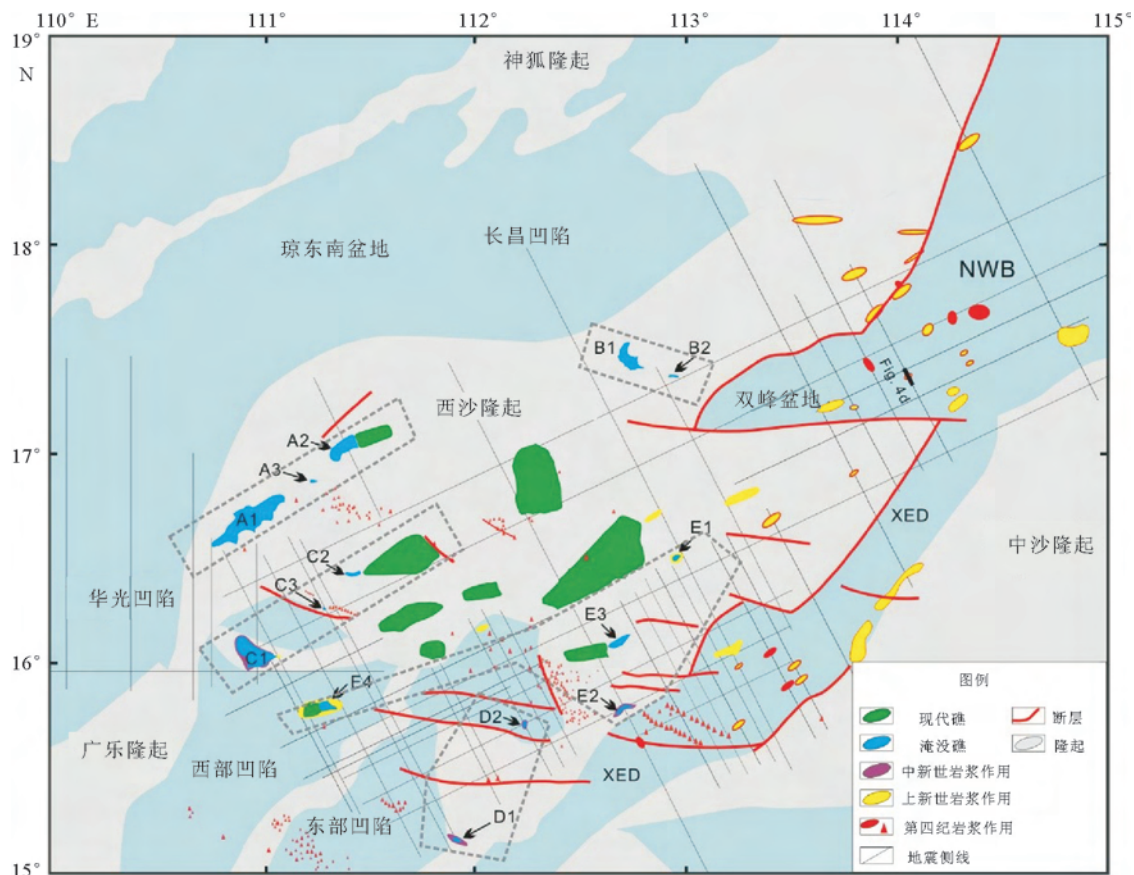


图 11 西沙隆起区淹没礁及裂后期岩浆的分布

NWB: 西北次海盆, XED: 西沙东凹陷

Fig.11 Drowning reef at Xisha Uplift and distribution of magma in post-rift stage

(NWB, Northern west basin; XED, Xisha east depression)

(2)南海张裂和扩张期的岩浆构造也成为台地发育的重要控制因素:构造沉降提供了台地生长的可容纳空间,构造掀斜作用、断裂作用和前陆盆地前沿挤压褶皱的迁移控制了台地各单元厚度、沉积相和地震反射终止特征在横向上的变化,构造控制的相对海平面控制了不同级序生物礁碳酸盐台地的沉积旋回,而晚中新世构造作用导致半封闭边缘海的形成和大量碳酸盐台地淹没。10.5Ma 半封闭边缘海的形成,造成南海海盆古海洋环境的巨大变化,限制了台地的广泛发育。季风增强和陆源物质输入对台地淹没有直接的影响。

参考文献 (References)

- [1] Zhang Qiaomin, Coral reefs conservation and management in China[C]//In: Ahmed M, Chong C K, Cesar H (eds). Economic Valuation and Policy Priorities for Sustainable Management of Coral Reefs. WorldFish Center Conference Proceedings 70. Penang Malaysia; WorldFish Center, 2004: 198-202.
- [2] 张乔民,余克服,施祺,等.全球珊瑚礁监测与管理保护[J].热

带海洋学报,2006,25(2):71-78. [ZHANG Qiaomin, YU Ke-fu, SHI Qi, et al. A review of monitoring conservation and management of global coral reefs[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2006, 25(2):71-78.

- [3] 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-A Journal of Subsurface Characterization, 2016, 4(3): 1-19.
- [4] Fournier F, Borgomano J, Montaggioni L F. Development patterns and controlling factor of Tertiary carbonate buildups: Insights from high resolution seismic data and well data in Malampaya gas field (offshore Palawan, Philippines)[J]. Sedimentary Geology, 2005, 175(1-4): 189-215.
- [5] Steuer S, Frane D, Meresse F, et al. Oligocene-Miocene carbonates and their role for constraining the rifting and collision history of the Dangerous Grounds, South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 58: 1-14.
- [6] Fyhn M, Nielsen L, Boldreel L, et al. Geological evolution, regional perspectives and hydrocarbon potential of the north-west Phu Khanh Basin, offshore Central Vietnam[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26: 1-24.

- [7] Shao L, Li Q, Zhu W, et al. Neogene carbonate platform development in the NW South China Sea: Litho-, bio- and chemo-stratigraphic evidence[J]. *Marine Geology*, 2017, 385: 233-243.
- [8] Wu S, Yang Z, Wang D, et al. Architecture, development and geological control of the Xisha carbonate platforms, north-western South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2014, 350: 71-83.
- [9] Zhao Q, Wu S, Xu H, et al. Sedimentary facies and evolution of aeolianites on Shidao Island, Xisha Islands [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2011, 29(2):398-413.
- [10] 周小康,汪瑞良,曾驿,等.珠江口盆地东沙隆起珠江组碳酸盐岩层序地层及沉积模式[J]. *石油天然气学报*, 2011, 33(9): 1-6. [ZHOU Xiaokang, WANG Ruiliang, ZENG Yi, et al. Carbonate sequence stratigraphy and sedimentary modes of Dongsha Massif in Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2011, 33(9): 1-6.]
- [11] Chen D, Wu S, Dong D, et al. Focused fluid flow in the Baiyun Sag, northern South China Sea: implications for the source of gas in hydrate reservoirs[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, 31(1):178-189.
- [12] Swart P, Carling P. Editorial: Citations and other musings [J]. *Sedimentology*, 2008, 55(5): 1115-1116.
- [13] 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. [WEI Xi, DENG Jinfu, XIE Wenyan et al. Constraints on biogenetic reef formation during evolution of the South China Sea and exploration potential analysis[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 245-252.]
- [14] 张功成,赵志刚,柳永杰.北部湾盆地伸展构造对油气聚集的控制作用[C]. *中国石油地质年会*, 2009. [ZHANG Gongcheng, ZHAO Zhigang, LIU Yongjie. Characteristics of fault structure and its control on hydrocarbons in the Beibuwang Basin[C]. CAPG annual meeting, 2009.]
- [15] 朱伟林,张功成,钟镔,等.中国南海油气资源前景[J]. *中国工程科学*, 2013, 12(5): 46-50. [ZHU Werlin, ZHANG Gongcheng, ZHONG Kai, et al. South China Sea: Oil and gas outlook[J]. *Engineering Sciences*, 2013, 12(5): 46-50.]
- [16] 范嘉松. *中国生物礁与油气*[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 329. [FAN Jiasong. *China Reefs, Oil and Gas*[M]. Beijing: Science Press, 1996: 329.]
- [17] Story C, Peng P, Heubeck C, et al. An integrated geoscience and reservoir simulation study of the Lihua 11-1 Field: South China Sea[C]//In 32nd Annual Offshore Technology Conference Transactions, Houston, 2000: 1-11.
- [18] Wilson M E J. Cenozoic carbonates in Southeast Asia: Implications for equatorial carbonate development[J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 147: 295-428.
- [19] Betzler C, Lindhorst S, Eberli G P, et al. Periplatform drift: The combined result of contour current and off-bank transport along carbonate platforms[J]. *Geology*, 2014, 42: 871-874.
- [20] Willams T D, Kroon S, Spezzaferri. Middle-upper-Miocene cyclostratigraphy of downhole logs and short to long term astronomical cycles in carbonate production of Great Bahama Bank[J]. *Marine Geology*, 2002, 185:75-93
- [21] Harris P M, Purkis S J, Ellis J, et al. Mapping bathymetry and depositional facies on Great Bahama Bank[J]. *Sedimentology*, 2015, 62(2): 566-589.
- [22] Jorry S J, Camoin G F, Jouet G, et al. Modern sediments and Pleistocene reefs from isolated carbonate platforms (Iles Eparses, SW Indian Ocean): A preliminary study[J]. *Acta Oecol*, 2016, 72: 129-143.
- [23] Saqab M M, Bourget J. Seismic geomorphology and evolution of early-mid Miocene isolated carbonate build-ups in the Timor Sea, North West Shelf of Australia[J]. *Marine Geology*, 2016, 379: 224-245.
- [24] 何起祥,张明书,业治铮,等.西沙群岛石岛晚更新世碳酸盐沉积物的稳定同位素地层学[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1986, 3(3): 3-10. [HE Qixiang, ZHANG Mingshu, YE Zhizheng, et al. Carbon and oxygen stable isotope stratigraphy of late Pleistocene carbonate deposits at Shidao island, Xisha island, China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1986, 3(3): 3-10.]
- [25] Yi L, Jian Z, Liu X, et al. Astronomical tuning and magnetostratigraphy of Neogene biogenic reefs in the Xisha Islands, South China Sea[J]. *Science Bulletin*, 2018, 63: 564-573.
- [26] Zhu W L, Xie X N, Wang Z F, et al. New insights on the origin of the basement of the Xisha Uplift, South China Sea[J]. *Science China Earth Science*, 2017, 60: 2214-2222.
- [27] 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.
- [28] Cullen A, Reemst P, Henstra G, et al. Rifting of the South China Sea: new perspectives [J]. *Petroleum Geoscience*, 2010, 16(3): 273-282.
- [29] Franke D, Savva D, Pubellier M, et al. The final rifting evolution in the South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 43: 63-87.
- [30] Hayes D E, Nissen S S. The South China sea margins: Implications for rifting contrasts[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2005, 237(3): 601-616.
- [31] Li C, 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*, 2015, 15(12): 4958-4983.
- [32] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Sea[C]//In Hayes D E (Ed.). *The tectonics and geological evolution of Southeast Asia Seas and islands, Part 2. American Geophysical Union Monograph*, 1983, 27: 23-56.
- [33] Morley R. Correlation across the South China Sea Using VIM Transgressive-Regressive Cycles[C]// *American Association of Petroleum Geologists Workshop on South China Sea Kota Kinabalu May*, 2015.

- [34] Clift P, Lin J. Preferential mantle lithospheric extension under the South China margin[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2001, 18(8): 929-945.
- [35] 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.
- [36] 李家彪. 南海大陆边缘动力学: 科学实验与研究进展[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(12): 2993-3003. [LI Jiabiao. Dynamics of the continental margins of South China Sea: scientific experiments and research progress[J]. *Chinese J. Geophysics*, 2011, 54(12): 2993-3003.]
- [37] Ding W, Li J, Clift P D. Spreading dynamics and sedimentary process of the Southwest Sub-basin, South China Sea: Constraints from multi-channel seismic data and IODP Expedition 349[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 115: 97-113.
- [38] Gao J, Wu S, Mcintosh K, et al. Crustal structure and extension mode in the northwestern margin of the South China Sea[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2016, 17(6): 2143-2167.
- [39] Reston. The extension discrepancy at North Atlantic non-volcanic rifted margins: depth dependent stretching or unrecognized fault? [J]. *Geology*, 2007, 35: 367-370.
- [40] Sun Z, Zhong Z, Keep M, et al. 3D analogue modeling of the South China Sea: A discussion on breakup pattern[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(4): 544-556.
- [41] Hutchison C S. Marginal basin evolution: the south Southern China Sea [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2004, 21: 1129-1148.
- [42] Savva D, Pubellier M, Franke D, et al. Different expressions of rifting on the South China Sea margins[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2014, 58: 579-598.
- [43] Steuer S, Franke D, Meresse F, et al. Using Oligocene to Pliocene limestone formations to constrain the collision history of Palawan Island and the Dangerous Grounds at the southeastern margin of the South China Sea[C]// *Petroleum Geology and Exploration of Palawan and Surrounding areas*. 2014.
- [44] Bai Y, Wu S, Liu Z, et al. Full-fit reconstruction of the South China Sea conjugate margins [J]. *Tectonophysics*, 2015, 661: 121-135.
- [45] Fan J K, Wu S G. P-wave seismic tomography of the Manila subduction zone[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(7): 2127-2137.
- [46] Wu J, Suppe J. Proto-South China Sea plate tectonics using subducted slab constraints from tomography[J]. *Journal of Earth Science*, 2017(B4):1-15.
- [47] Rudolph K W, Lehmann P J. Platform evolution and sequence stratigraphy of the Natuna Platform, South China Sea [M]// *Controls on Carbonate Platforms and Basin Development*. 1987: 353-361.
- [48] Williams, Harold H. Play concepts-northwest Palawan, Philippines[J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1997, 15(2-3): 251-273.
- [49] 姚永坚,姜玉坤,曾祥辉. 南沙海域新生代构造运动特征[J]. *中国海上油气*, 2002, 16(2): 113-117. [YAO Yongjian, JIANG Yukun, ZENG Xianghui. Cenozoic tectonic movements in Nansha area, South China Sea[J], *China Offshore Oil and Gas(Geology)*, 2002, 16(2): 113-117.]
- [50] Zampetti V, Schlager W. Architecture and growth history of a Miocene carbonate platform from 3D seismic reflection data, Luconia province, off shore Sarawak, Malaysia[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 21: 517-534.
- [51] Sattler U, Zampetti V, Schlager W, et al. Late Leaching under deep burial conditions: a case study from the Miocene Zhujiang Carbonate Reservoir, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 21(8): 977-992.
- [52] 朱伟林,张功成,杨少坤,等. 南海北部大陆边缘盆地天然气地质[M]. 北京:石油工业出版社,2007: 391. [ZHU Weilin, ZHANG Gongcheng, YANG Shaokun, et al. Gas geology of continental margin basins in Northern South China Sea[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007:391.]
- [53] 杜学斌,陆永潮,裴建祥,等. 南海南部礼乐盆地上渐新统-下中新统生物礁生长模式及分布规律[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(6):85-94. [DU Xuebin, LU Yongchao, PEI Jianxiang, et al. The characteristics and distribution of Upper Oligocene to Lower Miocene reefs in Liyue Basin, South China Sea[J]. *Marine Geology& Quaternary Geology*, 2018, 38(6):85-94]
- [55] 鄢伟,张光学,张莉,等. 南海北康盆地碳酸盐台地的地震响应及分布特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(6): 105-113. [YAN Wei, ZHANG Guangxue, ZHANG Li, et al. The seismic response and distribution characteristics of the Middle Miocene carbonate platform in Beikang Basin of the southern South China Sea[J]. *Marine Geology& Quaternary Geology*, 2018, 38(6):105-113.]
- [56] 王彬,吴时国,吕福亮,等. 南海中建岛礁的地震反射特征及其沉积演化研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(6): 18-24. [WANG Bin, WU Shiguo, LV Fuliang, et al. Seismic Reflect Characteristics and Evolution of Sedimentary at Zhongjian Ree, South China Sea[J], *Marine Geology& Quaternary Geology*, 2018, 38(6):18-24.]
- [57] 周小康,卫哲,傅恒,等. 南海北部珠江口盆地深水碳酸盐岩发育特征及地震识别[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(6):123-135. [ZHOU Xiaokang, WEI Zhe, FU heng, et al. Development characteristics and seismic identification of carbonate rocks in the deep-water area of the Pearl River Mouth Basin in the northern South China Sea[J]. *Marine Geology& Quaternary Geology*, 2018, 38(6):123-135.]
- [58] 杨朝云,韩孝辉,冯亚坤,等. 西沙海区宣德环礁的地震层序发育特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(6):25-36. [YANG Chaoyun, HAN Xiaohui, FENG Yakun, et al. Seismic Sequence Development Characteristics of Xuande Atoll, Xisha Area [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018,38(6):25-36.]
- [59] Betzler C, Fürstenau J, Lüdmann T, et al. Sea-level and ocean-current control on carbonate-platform growth, Mal-

- dives, Indian Ocean[J]. *Basin Research*, 2013, 25(2):172-196.
- [60] Christian B, Eberli G P, Dick K, et al. The abrupt onset of the modern South Asian Monsoon winds[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:29838.
- [61] Wan S, Li A, Clift P D, et al. Development of the East Asian monsoon: Mineralogical and sedimentologic records in the northern South China Sea since 20Ma[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2007, 254(3):561-582.
- [62] Zhao Quanhong, Jian Zhimin, Wang Jiliang, et al. Neogene oxygen isotopic stratigraphy, ODP Site 1148, northern South China Sea[J]. *Science China Earth Sciences*, 2001, 44(10): 934-942.
- [63] Bosence D. A genetic classification of carbonate platforms based on their basinal and tectonic settings in the Cenozoic[J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 175: 49-72.
- [64] Purser B H. Syn-rift diagenesis of Middle Miocene carbonate platforms on the north-western Red Sea coast, Egypt[J]. 1998.
- [65] Lü C L, Wu S G, Yao Y, et al. Development and controlling factors of Miocene carbonate platform in the Nam Con Son Basin, Southwestern South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 45: 55-68.
- [66] 吕炳全,徐国强,王红罡,等. 南海新生代碳酸盐台地淹没事件纪录的海底扩张[J]. *地质科学*, 2002, 37(4): 405-414. [LV Binquan, XU Guoqiang, WANG Hongzheng, et al. Sea floor spreading recorded by drowning events of Cenozoic carbonate platforms in the South China Sea[J]. *Chinese journal of geology*, 2002, 37(4): 405-414.]
- [67] 徐国强,吕炳全,王红罡. 新生代南海北部碳酸盐台地的淹没事件研究[J],*同济大学学报*, 2002, 30(1): 35-40. [XU Guoqiang, LV Bingquan, WANG Hongzheng. Drowning events research; insights from Cenozoic carbonate platforms in Northern South China Sea[J]. *Journal of Tongji University*, 2002, 30(1): 35-40.]
- [68] Wu S, Gao J, Zhao S, et al. Post-rift uplift and focused fluid flow in the passive margin of northern South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 2014, 615: 27-39.
- [69] 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.
- [70] Moldovanyi E P, Wall F M, Zhang J Y. Regional exposure events and platform evolution of Zhujiang Formation carbonates, Pearl River Mouth Basin: Evidence from primary and diagenetic seismic facies[J]. *AAPG Memoir*, 1995, 63: 125-140.
- [71] 施小斌,丘学林,夏戡原,等. 南海热流特征及其构造意义[J]. *热带海洋学报*, 2003, 22(2):63-73. [SHI Xiaobin, QIU Xuelin, XIA Kanyuan, et al. Heat flow characteristics and its tectonic significance of South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2003, 22(2): 63-73.]
- [72] 徐行,罗贤虎,许鹤华,等. 南海地热流探测、研究与展望[J]. *南海地质研究*, 2015:1-18. [XU Dai, LUO Xianhu, XU Heshua, et al. Heat flow's detection, research and prospects in South China Sea[J]. *Research of Ecological South China Sea*, 2015:1-18]
- [73] Lin M, Zhang J. Thermal structure about southwest sub-basin of South China Sea[J]. *Earthquake Science*, 2011, 24(5):427-436
- [74] 施小斌,于传海,陈梅,等. 南海北部陆缘热流变化特征及其影响因素分析[J]. *地学前缘*, 2017, 24(3):56-64. [SHI Xiaobin, YU Chuanhai, CHEN Mei, et al. Analyses of variation features and influential factors of heat flow in the northern margin of the South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(3): 56-64.]
- [75] 陈爱华,徐行,罗贤虎,等. 南海北康盆地热流分布特征及其构造控制因素探讨[J]. *地质学报*, 2017, 91(8):1720-1728. [CHEN Aihua, XU Xing, LUO Xianhu, et al. Heat flow characteristics and controlling factors of Beikang Basin in South China Sea[J], *Acta Geological Sinica*, 2017, 91(8): 1720-1728.]
- [76] 徐行,姚永坚,彭登,等. 南海西南次海盆的地热流特征与分析[J]. *地球物理学报*, 2018(7): 2915-2925. [XU Hang, YAO Yongjian, PEN Deng, et al. The Characteristics and analysis of heat flow in the Southwest sub-basin of South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysic*, 2018(7): 2915-2925.]
- [77] Li Q, Wang P, Zhao Q, et al. A 33 Ma lithostratigraphic record of tectonic and paleoceanographic evolution of the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2006, 230(3): 217-235.
- [78] Ma B, Wu S, Betzler C, et al. Geometry, internal architecture, and evolution of buried volcanic mounds in the northern South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 97: 540-555.