

杜文波, 蔡观强, 黄文凯, 等. 西沙海区新近纪碳酸盐岩台地地震响应特征和控制因素[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(1): 20-30.

西沙海区新近纪碳酸盐岩台地地震 响应特征和控制因素

杜文波^{1,2}, 蔡观强^{1*}, 黄文凯¹, 陈家乐¹, 聂鑫¹, 万晓明¹

(1 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510075;

2 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458)

摘要:利用西沙海域最新采集的高分辨率二维地震资料及钻井资料, 结合前人研究成果, 建立了西沙海区高精度层序地层格架; 并在西沙海区新近纪识别出点礁、塔礁、台地边缘礁和环礁这 4 种不同类型生物礁, 总结了不同生物礁的地震反射特征。早中新世时, 西沙碳酸盐岩台地开始发育, 台地数量较少且规模有限; 中中新世, 随着海平面的持续上升, 海平面上升速率和碳酸盐岩的生长速率接近, 此时碳酸盐岩台地发育规模达到最大; 晚中新世以后, 海平面继续上升, 海平面上升速率远大于碳酸盐岩的生长速率, 随着水深的快速增加, 台地进入淹没阶段, 不适合碳酸盐岩台地及生物礁发育, 仅在部分构造高部位继续发育, 生物礁主要为大型的环礁。控制西沙碳酸盐岩台地发育的影响因素为构造作用和相对海平面变化。

关键词:碳酸盐岩台地; 生物礁; 构造作用; 相对海平面变化; 西沙海区

中图分类号: P736; P539.1

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.173

0 引言

南海是西太平洋最大的边缘海, 由于其独特的地理位置, 已被证实是中中新世以来碳酸盐岩台地开发最重要的区域之一^[1]。西沙群岛位于南海西北部的西沙隆起上, 是南海陆地面积最大的群岛。前人的研究表明, 西沙海域的碳酸盐岩台地及生物礁自晚渐新世开始发育, 中新世时期发育规模达到顶峰^[2-4]。由于前期受技术水平的限制, 南海北部深水区的钻井相对较少, 针对生物礁碳酸盐岩的钻井更是缺乏, 因而无法清楚认识该区碳酸盐岩台地和生物礁的发育特征, 对碳酸盐岩台地的结构、发

育演化和分布规律及控制因素等还没有较深入的研究。本文通过广州海洋地质调查局最新采集的高分辨率二维地震资料, 结合区域地质资料, 详细分析了西沙海区新近纪生物礁及碳酸盐岩台地的发育特征, 以及碳酸盐岩台地发育的控制因素。此研究对我国油气资源勘探和开发具有非常重要的意义。

1 区域地质概况

南海是西太平洋最大的边缘海, 总面积为 $3.5 \times 10^6 \text{ km}^2$, 自新生代以来经历了多期次的海底扩张, 其所处的地理位置和适宜的海水温度具备了有利于碳酸盐岩发育的地质条件^[5-6]。研究区位于南海西北部陆缘, 由 40 多个岛屿和暗礁组成, 西邻海南岛和越南陆架, 北邻西沙海槽, 东邻中沙隆起(图 1)。西沙碳酸盐岩台地形成于西沙隆起之上, 属于大陆地壳向大洋地壳的过渡带^[7]。自中新世开始, 在 2 次区域性沉降作用下, 西沙隆起逐渐被淹没, 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地质条件^[8-9]。

收稿日期: 2020-05-19

资助项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0207); 自然资源部海底矿产资源重点实验室开放基金(KLMMR-2015-A-15); 中国地质调查局项目(DD20190627, DD20190378, DD20191002, DD20160140, GZH201400210, DD20190209, DD20190216, GZH201300502, DD20160138)

作者简介: 杜文波(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地震沉积、层序地层和海洋地质等方面的研究工作。E-mail: superdwb@outlook.com

* 通讯作者: 蔡观强(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事海洋地质、沉积地球化学等方面的研究工作。E-mail: caiguanqiang@sina.com

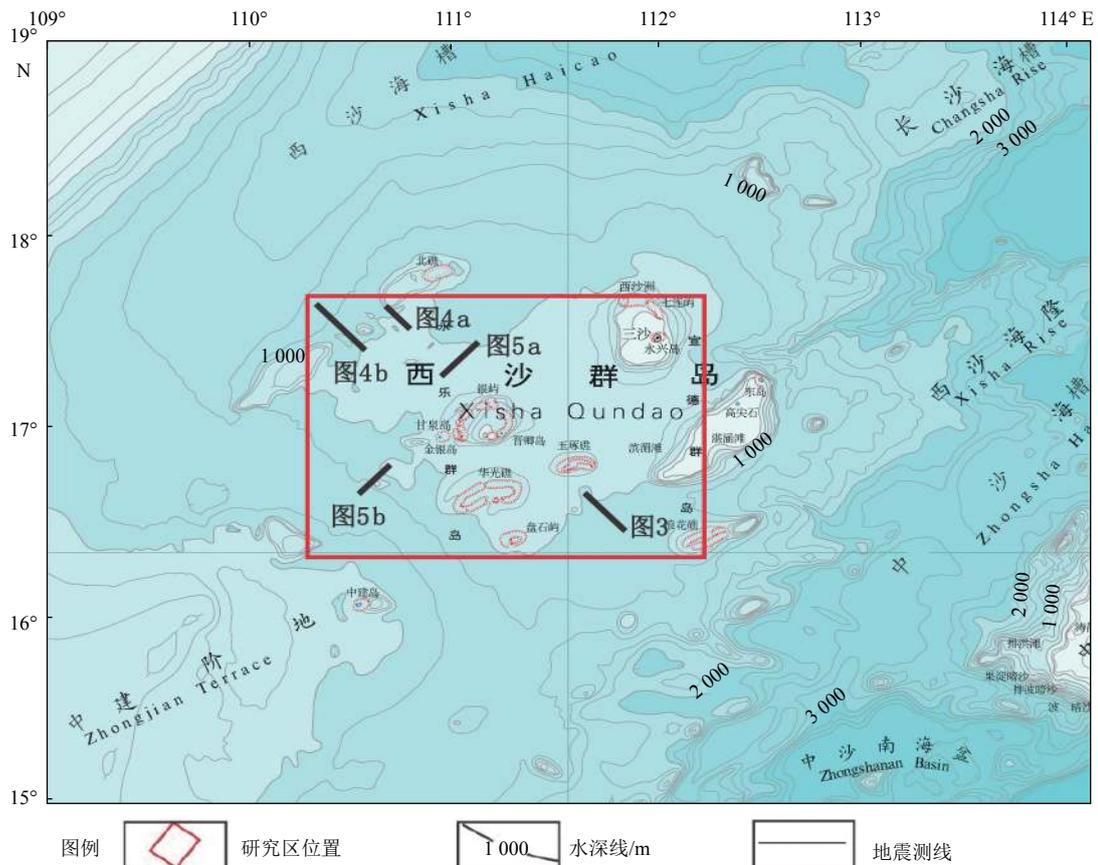


图 1 研究区地理位置图

Fig.1 Location map of the study area

2 西沙碳酸盐岩台地层序地层格架

西永 1 井、西科 1 井分别钻遇了厚约 1 200 m 的生物礁地层, 并揭示了前寒武纪变质基岩或中生代火成岩基底^[10-11], 这进一步证实了西沙海区新近系生物礁是发育在大陆边缘伸展的古隆起之上的碳酸盐岩台地^[12]。笔者在前人研究基础上, 结合新采集的高分辨率二维地震资料, 利用地震反射特征对层序进行划分, 建立了高精度等时地层格架, 共识别出 7 个主要反射界面, 从上到下分别为 T20、T30、T40、T50、T60、T70 和 Tg(图 2)。其中 T60(23.8 Ma)为全区的不整合界面, 界面以下以裂陷期为主, 界面以上以热沉降为主^[13]。凹陷区的地层发育比较完整, 而西沙隆起区则缺失裂陷期发育的地层^[14]。

2.1 早渐新世 (Tg—T70)

层序 G 的顶界面为 T70, 底界面为 Tg。该层序主要发育于西沙隆起内部洼陷内, 整体呈楔形, 早渐新世层序常常上超于变质岩基底的下降盘和

隆起处的火山上。该层序地震相的特征以席状—楔状、弱—中振幅、杂乱—亚平行为主(图 3)。该层序厚度变化范围较大, 主要发育湖相沉积, 由于缺乏钻井资料, 该层序的岩性目前不能确定。

2.2 晚渐新世 (T70—T60)

层序 F 的顶界面为 T60, 底界面为 T70, 其中 T60 是区域性的断拗转换面, 上下地层的反射特征存在明显差异。该层序地震相表现为席状、发散—平行、弱—中振幅、低—中频率、较连续的特征(图 3), 层序 F 厚度在研究区西部较厚, 到中部逐渐变薄甚至尖灭。由于晚渐新世时期, 随着水深快速增加, 西沙群岛处于滨浅海沉积环境, 不适合台地和生物礁的生长, 碳酸盐岩台地局限发育于岛礁周缘。

2.3 早中新世 (T60—T50)

层序 E 的顶界面为 T50, 底界面为 T60。该层序地震相表现为席状、平行—亚平行、弱—中振幅、弱连续、中高频(图 3)。该层序普遍发育且厚度变

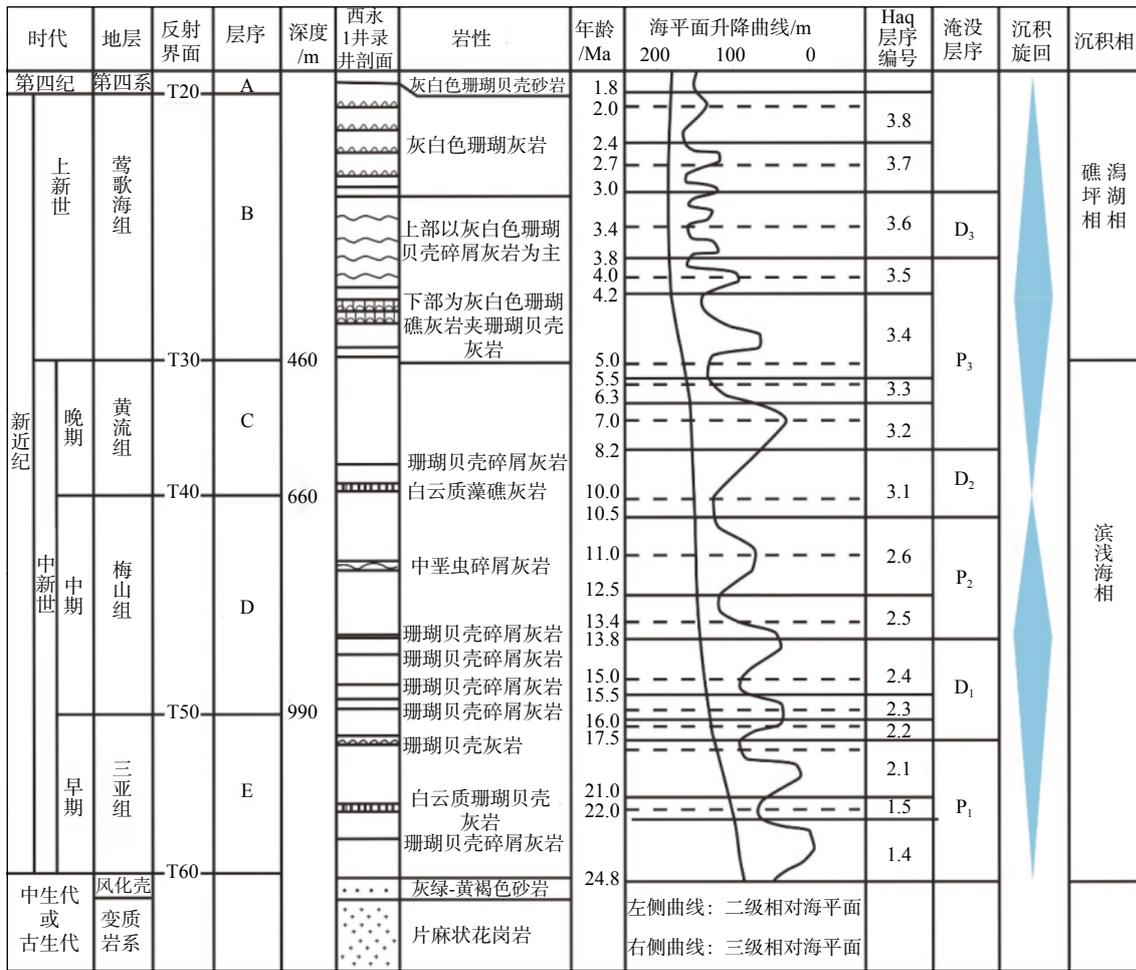


图2 西沙台地西永1井地层柱状图^[15]

Fig.2 The stratigraphic column of Xiyong-1 well in the Xisha Islands, northern South China Sea^[15]

化不大。早期广乐隆起开始发育碳酸盐岩台地时，西沙隆起还处于暴露剥蚀阶段。随着相对海平面上升，构造高部位也开始发育碳酸盐岩台地和生物礁。

2.4 中中新世 (T50—T40)

层序 D 的顶界面为 T40, 底界面为 T50。该层序地震相主要为席状—丘形、平行—亚平行、中振幅、中连续—弱连续、中高频率(图 3)。该时期层序 D 的发育主要受古地形的控制, 表现为该层序在斜坡部位较厚, 隆起之上厚度逐渐减少。隆起边缘凹陷水体加深, 生物礁主要迁移至西沙隆起的周缘, 发育点礁和台地边缘礁; 隆起之上的台内洼地逐渐被碳酸盐岩碎屑填平, 仅有规模较小的洼地存于西沙隆起之上。

2.5 晚中新世 (T40—T30)

层序 C 的顶界面为 T30, 底界面为 T40。地震

相主要为席状—丘形、亚平行—乱岗状、弱—中振幅、弱连续、中高频率(图 3)。该时期层序 C 由于相对海平面下降导致的台地暴露剥蚀使得碳酸盐岩重力流广泛发育; 随着海平面快速上升, 碳酸盐岩台地迅速向构造高部位迁移, 造成分布范围缩小。现今该区处于深水—半深水环境, 不适合台地的发育。大型的环礁局限于西沙群岛台地周边, 环礁的顶部发育潟湖。

2.6 上新世 (T30—T20)

层序 B 的顶界面为 T20, 底界面为 T30。上新世层序 B 主要发育 2 种类型的地震相: ①平行—亚平行、中振幅、高连续性的地震相, 代表了海相沉积; ②小规模、强振幅、不连续的地震相, 代表了碳酸盐建隆, 主要发育在西沙隆起中部。地震相特征主要表现为席状—丘形、弱—强振幅、平行—乱岗状、高连续、中高频率(图 3)。

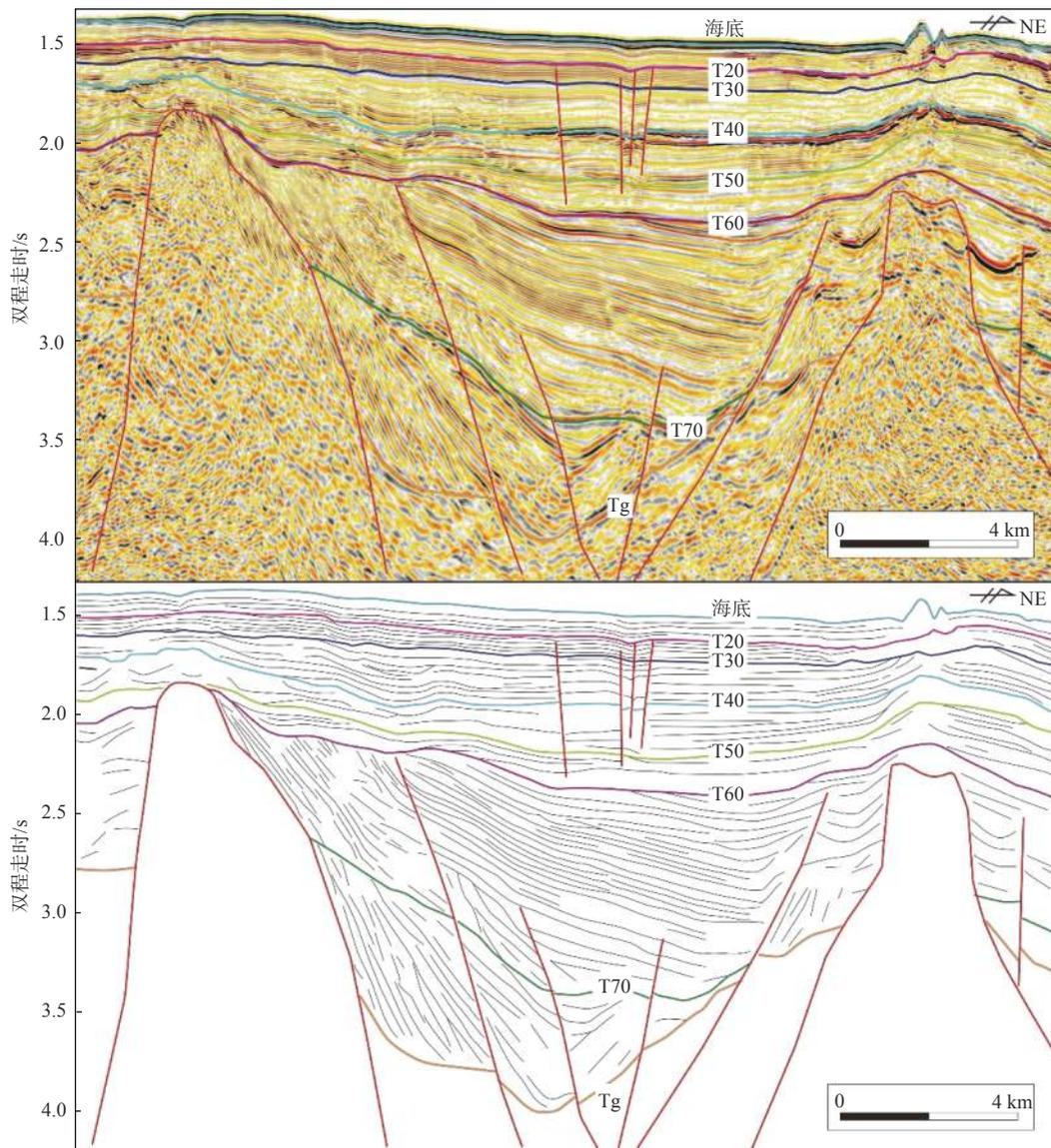


图 3 西沙隆起层序界面地震反射特征

Fig.3 Seismic reflection characteristics of sequence boundaries on the Xisha Uplift

2.7 第四系 (T20—T0)

层序 A 的顶界面为 T0, 底界面为 T20。地震相主要表现为中振幅、平行、高连续性(图 3)。第四系层序全区发育, 主要发育半深海沉积, 个别隆起部位发育小型孤立碳酸盐岩台地。第四系表现为典型的环礁沉积模式, 在台地边缘发育的生物礁以环礁为主, 顶部发育多种类型的潟湖。

3 碳酸盐岩和生物礁地震响应特征

3.1 地震反射特征

通过典型地震反射特征(外部形态、内部反射

结构、边界关系等)来识别海底生物礁及碳酸盐岩台地, 并总结生物礁及碳酸盐岩台地的地震识别标志^[15-16]。研究表明, 西沙海域中新世主要发育点礁、塔礁、台地边缘礁及环礁。

(1) 点礁

点礁在地震剖面上表现顶界面为强振幅的丘形反射, 内部为杂乱反射, 底界面反射特征不明显(图 4)。通常点礁呈分散状, 规模较小, 纵向上具有向高位逐渐迁移的特征, 横向上叠置为规模相对较大的点礁群。

(2) 环礁

环礁的地震反射特征为顶部强振幅、高连续反射, 内部为杂乱或空白反射(图 4a), 纵向上呈现出不均一性。其形成主要是由于相对海平面快速上

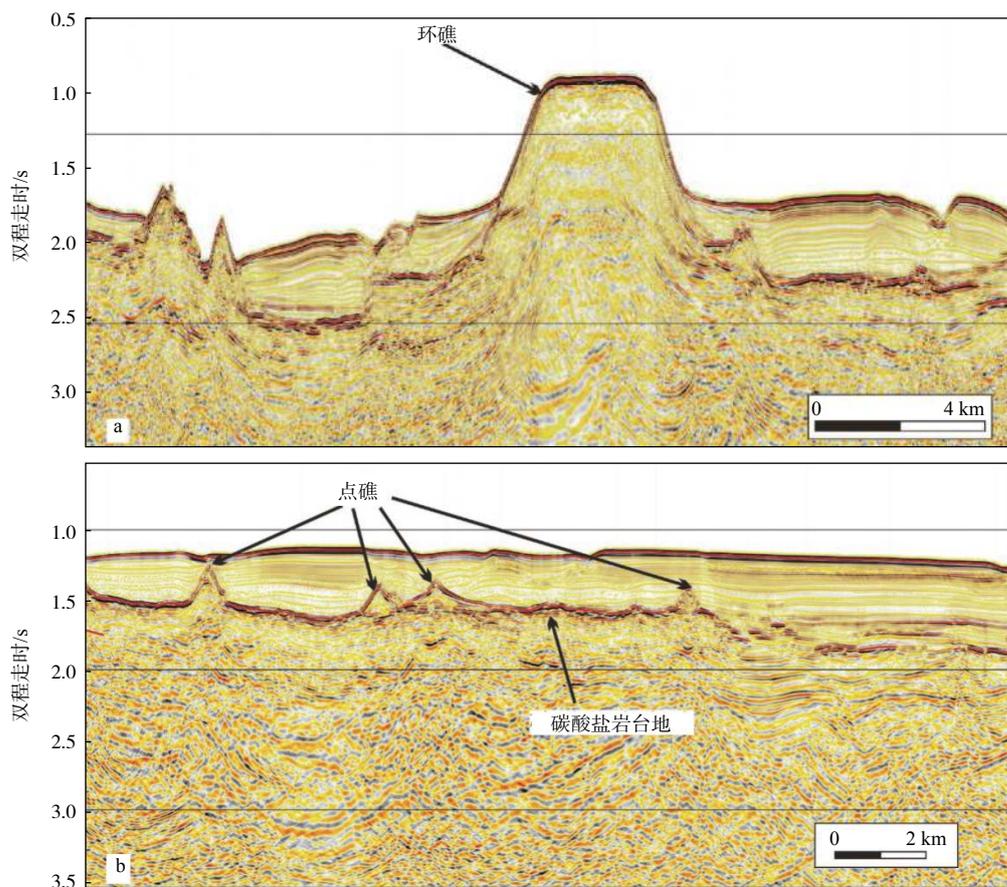


图4 西沙海区点礁、环礁和碳酸盐岩台地地震反射特征

Fig.4 Seismic characteristics of pinnacle reefs, atoll reefs and carbonate buildups at the marginal rim of the Xisha islands

升,大多数的生物礁和碳酸盐岩台地被水淹没,只有发育于构造高点处的生物礁继续生长。大型环礁发育于台地边缘,现今存在的环礁顶部生物礁还在发育。

(3) 塔礁

塔礁的地震反射特征为强振幅,形态为尖状或丘状,且顶部面积不大(图5a)。多发育于台地边缘,其形成主要与基底的持续下降有关^[17-18],但仍处于海平面以下,纵向上出现多期次叠置的形态,并且晚期的形态范围大于早期的形态范围^[19]。

(4) 台地边缘礁

台地边缘礁地震反射特征是顶部为双相位强振幅、高连续、丘状反射,而底部为弱振幅(图5b),位于台地边缘斜坡上方,深度位于正常浪基面以下。

(5) 碳酸盐岩台地

该地震反射特征是顶界面为较连续的强振幅,内部表现为强弱相间的断续反射或杂乱反射,底界面不明显(图4a、5a)。碳酸盐岩台地的边界特征明显,以同沉积断层和岩性界面为主。总体

来说,碳酸盐岩台地在研究区主要发育于西沙群岛及其周缘,并为后期形成的生物礁提供了有利条件。

4 碳酸盐岩发育控制因素

水温、波浪、底流、陆源碎屑物源供给状况、光照、相对海平面、区域构造活动等诸多因素影响生物礁和碳酸盐岩台地的发育演化^[19]。任一因素的变化都可能改变生物礁的类型或生长形态,当条件不适合生物礁生长时,生物礁就会淹没、死亡^[20-21]。自中新世以来,由于西沙海槽和琼东南盆地中央拗陷带的阻隔作用,使西沙海域免受来自华南大陆和中南半岛的陆源碎屑物质的影响^[22-23]。从西永1井揭示了厚达1250m的碳酸盐岩和生物礁地层以及西科1井揭示了1257.52m的碳酸盐岩地层来看,也说明陆源碎屑岩对碳酸盐岩的发育影响不大^[24]。本文认为西沙海区新近纪生物礁的形成和发育是受构造沉降和海平面波动的共同影响。

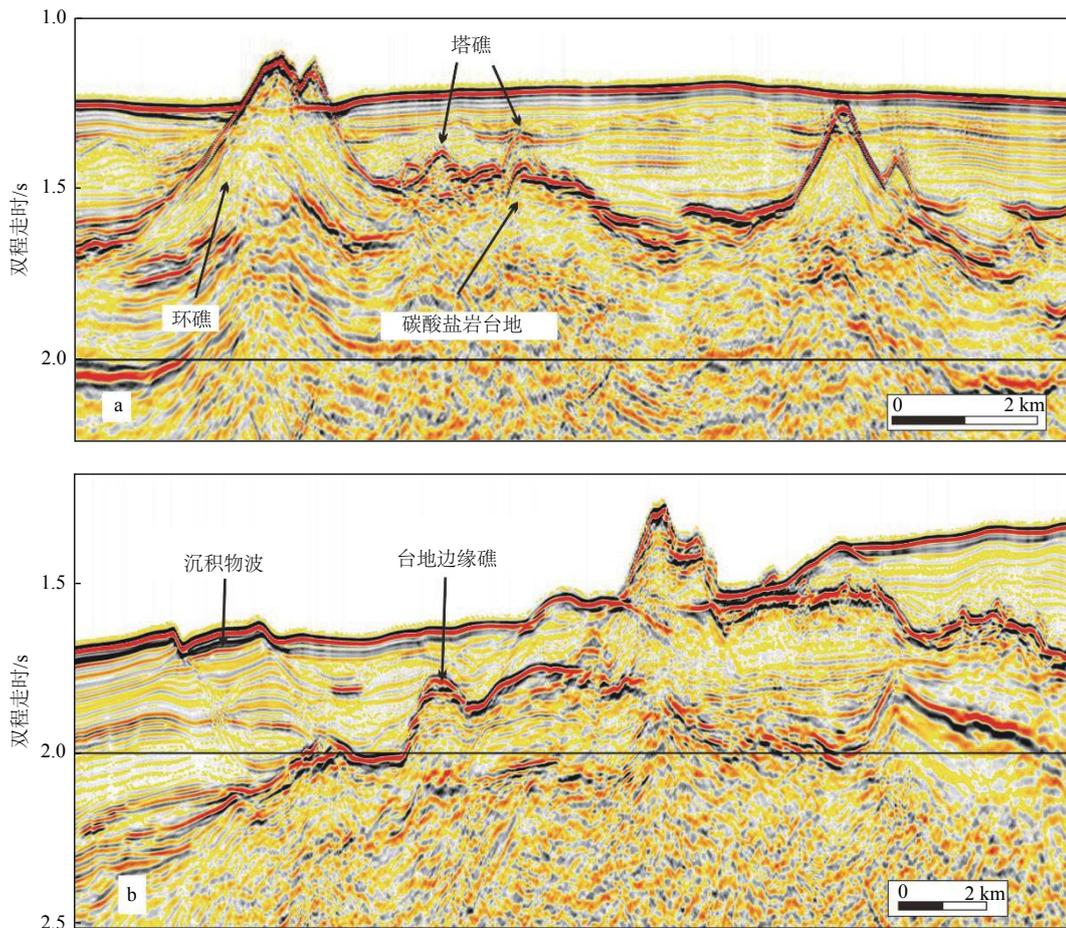


图 5 西沙海区塔礁和台地边缘礁的地震反射特征

Fig.5 Seismic characteristics of pinnacle reefs and platform-edge reefs along the margin of the Xisha islands

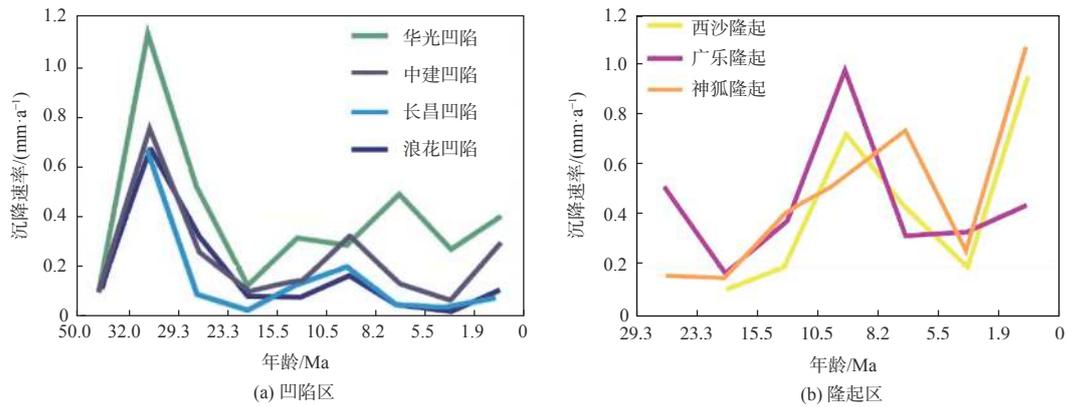
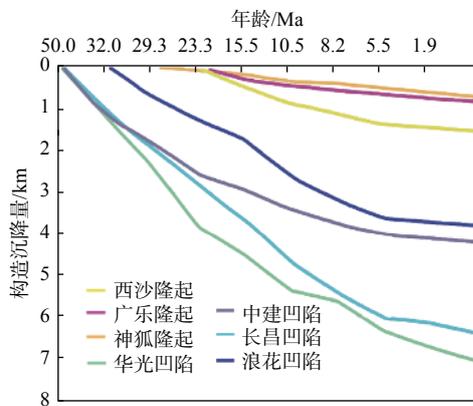
4.1 构造作用

西沙群岛位于南海北部的陆坡区域, 这个地区发生了几次关于南海北部隆升和海底扩张的重大构造事件。西沙海区以 T60 界面(23 Ma)为界线, 将该地层划分为裂陷期和裂后期 2 个构造演化阶段^[25-26]。

根据 30 Ma(T70)的沉积速率分析, 表明西沙海域的华光凹陷、中建凹陷、长昌凹陷和浪花凹陷从渐新世以来的沉积速率很低(图 6), 只是其沉积环境从浅水转为深水, 并且物源较少。西沙群岛的主要凹陷在 23 Ma(T60)之前是半地堑, 断裂活动较强烈, 形成了断块和隆起等构造高部位。此时, 碳酸盐岩台地刚刚开始发育, 并且仅发育在断层上升盘的构造高部位^[27]。在 23 Ma 之后, 研究区由裂陷期向裂后期转换的过渡阶段, 基底加速下沉, 构造沉降量较大, 而西沙隆起区的水体较浅, 沉积速率较小(图 6), 故西沙隆起区有利于碳酸盐

岩台地发育。15.5~10.5 Ma 时期, 构造沉降的速率较低(图 7), 海水相对稳定, 适合碳酸盐岩台地和生物礁的生长。10.5~5.5 Ma 时期, 随着基底的沉降速率加快, 碳酸盐岩台地不断向构造高点迁移, 其分布范围逐渐减小, 最后导致碳酸盐岩台地被淹没。但在 5.5~1.9 Ma 时期, 构造沉降速率剧减, 这是因为在西沙群岛的南部区域发育局部的岩浆活动。从 1.9 Ma 至今, 由于构造沉降速率上升, 碳酸盐岩台地发育范围不断变小, 生物礁以垂向生长的环礁发育为主^[28]。

从图 7 可以看出, 凹陷的构造沉降量明显大于隆起的。华光凹陷中心构造沉降量约为 7 km, 长昌凹陷约为 6.4 km, 中建凹陷约为 4.4 km, 而神狐隆起约为 0.7 km, 广乐隆起约为 0.8 km, 西沙隆起约为 1.6 km。另外, 在 29.3~15.5 Ma, 西沙隆起和神狐隆起的构造沉降量接近一致; 但是 15.5 Ma 以来, 西沙隆起的构造沉降量比神狐隆起要高出 0.7 km, 这可能是造成西沙隆起后期逐渐被淹没的一个因素。

图6 西沙海区凹陷和隆起区沉积速率^[17]Fig.6 Sedimentation rates in the depressions and on the uplifts of the Xisha area^[17]图7 西沙海域各构造单元构造沉降曲线^[17]Fig.7 Tectonic subsidence curves in the Xisha Uplift^[17]

4.2 相对海平面变化

构造活动稳定阶段,相对海平面变化与生物礁碳酸盐岩台地的发育密切相关。相对海平面下降过快会使碳酸盐岩台地暴露,并遭受剥蚀,因而停止发育;而相对海平面的快速上升,使其处于深水环境,也会导致碳酸盐岩台地被淹没而死亡^[29]。

自中新世以来,西沙海区新近系的三级相对海平面和二级相对海平面的变化趋势相同,均处于海平面整体上升趋势,而三级海平面变化表现出多期旋回的特点^[30-31](图2)。

早中新世时期,随着相对海平面的上升,西沙海区的碳酸盐岩台地开始发育于受基底断裂控制的断层上盘的斜坡部位。虽然三级海平面表现出3个旋回,但海平面的下降导致碳酸盐岩台地侧向加积,发育面积增大(图2)。

中中新世早期,从二级海平面升降曲线上可以看出海平面持续上升,但趋势减缓。层序呈现出明显的垂向加积的特征,说明此时海平面上升速率

(R_s)和碳酸盐岩的生长速率(R_r-c)接近^[32],而且生物礁类型众多,此阶段为碳酸盐岩台地发育的繁盛阶段(图8)。

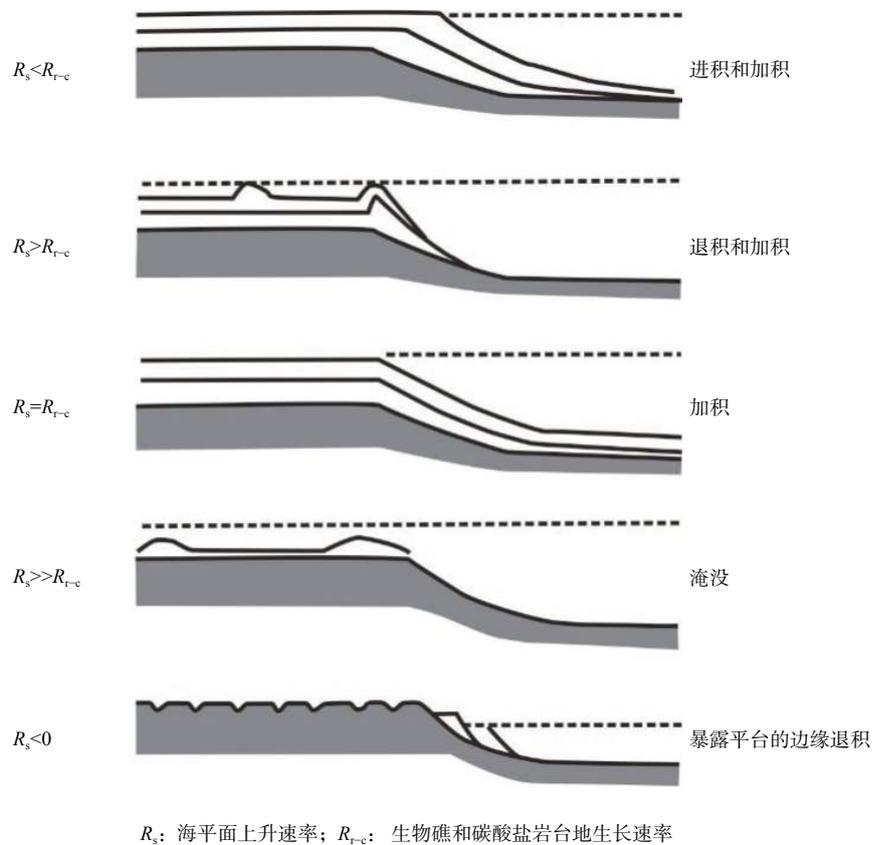
中中新世晚期,碳酸盐岩台地已经退至隆起之上,二级海平面上升速率加快,斜坡区的水体较深,已不适合碳酸盐岩台地和生物礁的生长,而且台地表现出向构造高部位退积的特征。在此阶段中后期, $R_s < R_r-c$,早期发育的生物礁多以垂向生长的环礁为主(图8)。

晚中新世时期发生一起大规模的海平面下降事件,碳酸盐岩台地顶部暴露而白云石化,通过图2中新统发育的白云岩可以证实。早期形成的碳酸盐岩台地和生物礁由于海平面下降(地震剖面发育“U”形沟谷),台地暴露并遭受剥蚀。随后,相对海平面缓慢上升,生物礁迁移至碳酸盐岩台地的边缘。

上新世时期,二级海平面继续上升, R_s 远大于 R_r-c ,台地开始进入淹没阶段。碳酸盐岩台地范围已经退至永兴岛、宣德群岛等岛屿周边,此时主要发育垂向生长的大型环礁(图8)。

4.3 岩浆活动与西沙生物礁的淹没过程

裂隙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碳酸盐岩台地的影响很大。早中新世以来,西沙隆起及其周边拗陷都经历了异常裂隙后的热沉降事件。西沙隆起快速沉降的第1阶段主要发生在10.5~8.2 Ma时期。5.5 Ma之后,西沙隆起经历了另一次快速沉降事件。影响异常热沉降事件的因素很多,如地幔对流引起地貌的变化、深度导致不均匀张力、地壳流动较慢与岩浆作用等。在这些机制中,岩浆作用被认为



R_s : 海平面上升速率; R_{r-c} : 生物礁和碳酸盐岩台地生长速率

图 8 海平面变化引起的几种常见碳酸盐岩台地地层几何形状^[9]

Fig.8 Common stratal geometries of carbonate platforms corresponding to changes in sea level^[9]

是导致南海北部大陆边缘构造沉降的最重要的因素之一^[33]。岩浆作用释放出深层热量, 导致岩浆加速冷却, 使深部物质变得更重(图 9)。构造沉降分析表明, 西沙隆起在 5.5 Ma 后, 其沉降速率快速下降, 这被认为是与西沙隆起在上新世早期的岩浆作用有关^[34]。

西沙隆起在中新世晚期、上新世早期和第四纪早期分别发生了 3 次构造沉降事件, 这与裂陷期的岩浆活动后的 3 次热沉降过程密切相关。

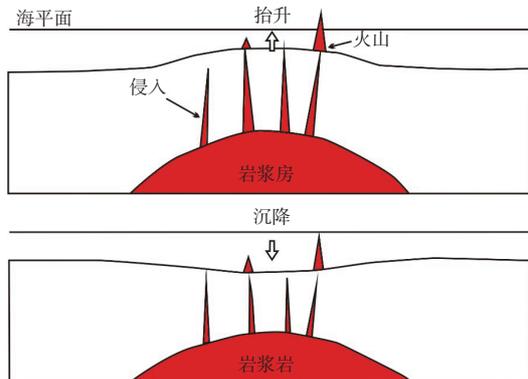


图 9 岩浆活动加速构造沉降^[26]

Fig.9 Magmatic activity accelerates tectonic subsidence^[26]

早中新世时期, 西沙隆起及其周边区域进入裂后热沉降期, 西沙隆起逐渐被海水淹没, 生物礁开始在构造高点发育; 中中新世期间, 西沙隆起发生了岩浆活动, 深部岩浆的侵入减缓了西沙隆起的沉降速率, 碳酸盐岩台地和生物礁开始大规模发育。此期间火山数量较少, 但单个火山的规模很大^[31]。岩浆活动结束后, 根据西科 1 井中中新世地层的平均沉降率为 $0.091 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 是早中新世($0.027 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$)和晚中新世($0.039 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$)的 3 倍, 西沙隆起进入了快速构造沉降阶段, 一直持续到晚中新世早期, 西沙隆起西北部的生物礁在中中新世晚期开始被淹没^[35-36]。上新世早期, 西沙隆起也发生了强烈的岩浆活动, 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。岩浆活动结束后, 西沙隆起发生了第 2 次快速热沉降, 造成中新世火山被淹没, 生物礁在火山顶部发育。在第四纪早期, 西沙隆起发生第 3 次岩浆活动, 其最强烈的区域位于西沙隆起的南部。随后的热沉降导致快速构造沉降, 导致了生物礁被淹没^[37]。

通过以上分析, 说明南海构造运动诱发火山活动, 导致周边的地层明显的抬升, 新构造岩浆活动

造成的浅部岩浆岩体分布范围较广(图10)。研究区内浅部岩浆岩主要沿浅部断裂发育,平面上,浅

部岩浆岩体主要分布在研究区西部,又以西北部成群分布最为突出,东部仅零星分布。

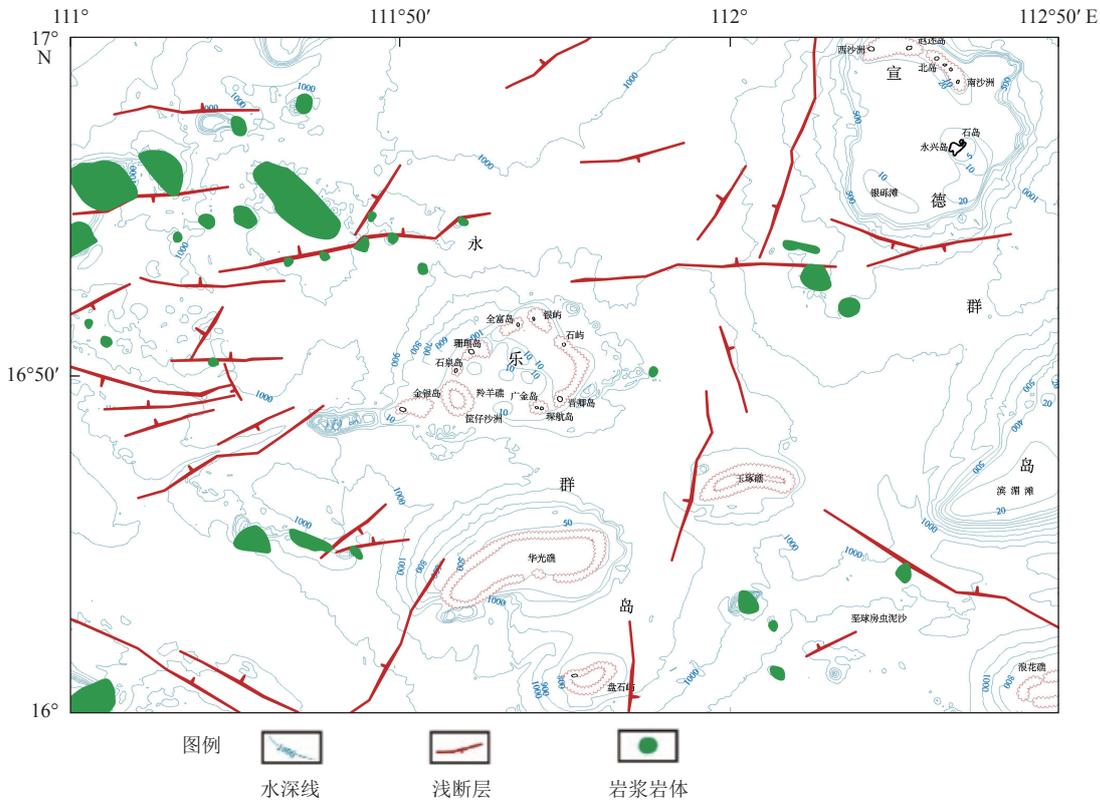


图10 研究区新构造岩浆活动分布图

Fig.10 Distribution of neotectonics and magmatic rocks in the study area

5 结论

(1) 通过典型地震反射特征(外部形态、内部反射结构、接触关系等)识别出西沙海域新近系发育多种类型的生物礁类型,分别为点礁、环礁、塔礁和台地边缘礁。

(2) 西沙海区从早中新世时期海平面开始上升,碳酸盐岩台地和生物礁开始发育;中中新世时期,海平面相对稳定,生物礁的发育规模达到最高峰;晚中新世以后,南海停止扩张后整体沉降明显加快,导致大量生物礁逐渐溺亡,只在局部构造高部位继续发育。在此期间,西沙海区新近系碳酸盐岩的控制因素为构造作用和相对海平面变化。

(3) 西沙隆起在中新世晚期、上新世早期和第四纪早期分别发生的3次构造沉降事件,这与裂隙期的岩浆活动后的3次热沉降过程密切相关。深部岩浆活动导致西沙隆起的沉降速率变小,待岩浆活动停止后,西沙隆起发生快速热沉降事件,导致台地和生物礁被淹没。

参考文献:

- [1] 吴时国,张新元.南海共轭陆缘新生代碳酸盐岩台地对海盆构造演化的响应[J].地球科学:中国地质大学学报,2015,40(2):234-248.
- [2] 吴时国,朱伟林,马永生.南海半封闭边缘海碳酸盐岩台地兴衰史[J].海洋地质与第四纪地质,2018,38(6):4-20.
- [3] 张志杰,于兴河.南海西沙海槽典型地震相识别与分析[J].海洋地质动态,2005,21(1):40-44.
- [4] 赵忠泉,钟广见,冯常茂,等.南海北部西沙海槽盆地新生代层序地层及地震相[J].海洋地质与第四纪地质,2016,36(1):15-26.
- [5] 唐武,王英民,黄志超,等.琼东南盆地南部深水区中新统层序地层地震相与沉积演化特征[J].海相油气地质,2012,17(2):20-25.
- [6] 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):1-10.
- [7] 杨朝云,韩孝辉,罗昆,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.
- [8] 许红,陆永潮,施和生,等.南沙群岛海域北康盆地生物礁高精度层序地层学及其新近纪生物礁层序演化模式[J].热带海洋学报,2009,28(2):48-54.

- [9] MA Y B, WU S G, LV F L, et al. Seismic characteristics and development of the Xisha carbonate platforms, northern margin of the South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 40(3): 770-783.
- [10] 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.
- [11] 陈亦寒, 刘大锰, 魏喜, 等. 西沙群岛晚新生代生物礁储层特征及控制因素: 基于西探1井钻探资料[J]. *石油天然气学报 (江汉石油学院学报)*, 2007, 29(3): 360-363, 518.
- [12] 朱伟林. 珠江口盆地中新世碳酸盐岩及生物礁相研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1987, 7(2): 11-20.
- [13] 杨涛涛, 吕福亮, 王彬, 等. 西沙海域生物礁地球物理特征及油气勘探前景[J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(5): 1771-1778.
- [14] 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): 136-135.
- [15] 马玉波, 吴时国, 谷明峰, 等. 西沙海区碳酸盐岩台地地震反射特征及沉积模式[J]. *海洋学报(中文版)*, 2010, 32(4): 118-128.
- [16] 鄢伟, 张光学, 张莉, 等. 南海南部北康盆地中新世碳酸盐岩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): 118-126.
- [17] WU S G, YANG Z, WANG D W, et al. Architecture, development and geological control of the Xisha carbonate platforms, northwestern South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2014, 350: 71-83.
- [18] WANG D W, WU S G, QIN Z L, et al. Seismic characteristics of the Huaguang mass transport deposits in the Qiongdongnan Basin, South China Sea: implications for regional tectonic activity[J]. *Marine Geology*, 2013, 346: 165-182.
- [19] 杨振, 吴时国, 吕福亮, 等. 西沙海区晚新生代碳酸盐岩台地的发育模式及控制因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(5): 47-55.
- [20] 邱燕, 王英民. 南海第三纪生物礁分布与古构造和古环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(1): 65-73.
- [21] 杨振, 张光学, 张莉, 等. 西沙海域中新世碳酸盐岩台地的时空分布及其油气成藏模式[J]. *地质学报*, 2017, 91(6): 1360-1373.
- [22] 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勘探潜力分析[J]. *地质前缘*, 2005, 12(3): 245-252.
- [23] 范嘉松. 中国生物礁与油气[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 329.
- [24] 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 Oecologica*, 2016, 72: 129-143.
- [25] 匡增桂, 郭依群, 王嘹亮, 等. 西沙海域晚中新世环礁体系的发现及演化[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(12): 2675-2688.
- [26] 杨振, 张光学, 张莉, 等. 西沙海域新近纪生物礁的发育演化及控制因素[J]. *石油实验地质*, 2016, 38(6): 787-795.
- [27] 熊斌辉. 构造控制下的西沙海槽沉积模式[J]. *海洋石油*, 2013, 33(1): 1-6.
- [28] 杨楚鹏, 姚永坚, 李学杰, 等. 南海南部曾母盆地中新世碳酸盐岩的层序地层[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2014, 39(1): 91-98.
- [29] 杨振, 张光学, 张莉. 万安盆地生物礁机碳酸盐岩台地的发育演化及控制因素[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2016, 41(8): 1349-1360.
- [30] WANG H L, ZHAO Q, WU S G, et al. Post-rifting magmatism and the drowned reefs in the Xisha archipelago domain[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2018, 17(1): 195-208.
- [31] 张新元, 吴时国. 西沙海区中新世广乐碳酸盐岩台地的发育演化及其控制因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(6): 159-171.
- [32] 徐国强, 吕炳全, 王红罡. 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(自然科学版)*, 2002, 30(1): 35-40.
- [33] 吴时国, 袁圣强, 董冬冬, 等. 南海北部深水区中新世生物礁发育特征[J]. *海洋与湖沼*, 2009, 40(2): 117-121.
- [34] 张明书, 何起祥, 业治铮, 等. 西沙生物礁碳酸盐沉积地质学研究[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [35] BELOPOLSKY A V, DROXLER A W. Imaging Tertiary carbonate systems - the Maldives, Indian Ocean: insights into carbonate sequence interpretation[J]. *The Leading Edge*, 2003, 22: 646-652.
- [36] QIU X L, YE S Y, WU S M, et al. Crustal structure across the Xisha Trough, northwestern South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 2001, 341: 179-193.
- [37] 何宇, 胡鑫, 黄鑫. 碳酸盐岩台地构造控制因素及源储组合模式[J]. *四川地质学报*, 2018, 38(2): 239-244.

SEISMIC REFLECTION CHARACTERISTICS OF NEOGENE CARBONATE PLATFORMS IN THE XISHA SEA AREA AND THEIR CONTROLLING FACTORS

DU Wenbo^{1,2}, CAI Guanqiang^{1*}, HUANG Wenkai¹, CHEN Jiale¹, NIE Xin¹, WAN Xiaoming¹

(1 Key Laboratory of Marine Mineral Resources of Ministry of Natural Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, China Geology Survey, Guangzhou 510075, China; 2 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Guangzhou 511458, China)

Abstract: Based on the latest acquired high resolution 2D seismic data, drilling data, and combined with previous research results in the Xisha area of northern South China Sea, the sequence stratigraphic framework is established by this paper, and four different types of reef, i.e. the point reef, tower reef, platform edge reef and atolls reef, are identified. Upon the basis, seismic reflection characteristics of different kinds of reefs are summarized. It is revealed that carbonate platforms began to develop from Early Miocene, when the platforms were few and limited in scale. During Middle Miocene, the sea level continuously kept rising. When the sea level rise rate was closed to the growth rate of carbonate platforms, carbonate platforms reached their maximum in both number and scale. The sea level continued to rise after Late Miocene, and the sea level rise rate was much greater than the growth rate of carbonate platform. With the rapid increase in water depth, the platform was then submerged. It was no longer suitable for the development of carbonate platform excluding some local highlands, and atolls surrounding them. Facts demonstrate that tectonic movement and relative sea-level changes are the main factors predominating the development of carbonate platforms in the Xisha area.

Key words: carbonate platform; reef; tectonic movement; relative sea-level; Xisha sea area