

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.06.016

西沙海区中新世广乐碳酸盐台地的发育演化及其控制因素

张新元^{1,2}, 吴时国³

1. 中国科学院海洋研究所, 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 中国科学院深海科学与工程研究所, 三亚 572000

摘要:南海自海底扩张以来,在南北共轭大陆边缘发育了一系列的新生代碳酸盐台地,且碳酸盐台地分布面积广、厚度巨大。中新世时期,南海西北部陆缘发育有大量的生物礁碳酸盐台地,形成了重要的油气储层。在前期对南海西北部陆缘中新世碳酸盐台地与生物礁识别研究的基础上,结合对西沙海区地震资料与区域地质资料的分析,对广乐碳酸盐台地进行了深入研究。广乐碳酸盐台地位于西沙海区广乐隆起之上,地震反射特征具有分段性特点,自早中新世开始广泛发育,在构造作用控制下,一直持续发育至晚中新世,发育过程中表现出自西向东迁移的特点,最终由于构造沉降加速和西部中南半岛的陆缘碎屑物质注入导致水体环境改变,广乐碳酸盐台地在晚中新世被淹没。

关键词:碳酸盐台地;台地演化;构造作用;陆源碎屑物质;西沙海区

中图分类号:P736.21

文献标识码:A

Characteristics of Miocene Guangle carbonate platforms in the Xisha area and its evolution

ZHANG Xinyuan^{1,2}, WU Shiguo³

1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Sanya Institute of Deep Sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China

Abstract: Cenozoic carbonate platforms of huge thickness are widely distributed on the conjugate continental margins of the South China Sea. A large number of Miocene reefs and carbonate platforms, which are potential reservoirs for hydrocarbon accumulation, have been found on the northwestern margin. The Guangle carbonate platforms are located on the Guangle Uplift of the Xisha region. Based on previous studies, the latest seismic data acquired are used by this paper for study of the seismic characteristics of the carbonate platforms. An evolutionary model is then proposed to reveal the history of the Guangle carbonate platforms. The platforms started growing in Early Miocene, built up and expanded towards east in early and middle Miocene, shrank by the end of Middle Miocene, and finally submerged under sea water due to tectonic subsidence and the environmental changes caused by the input of detrital sediments since late Miocene.

Key words: carbonate platform; platform evolution; tectonics; terrigenous detrital input; Xisha Islands

我国南海位于欧亚板块东南大陆边缘,总面积约 $3.5 \times 10^6 \text{ km}^2$, 是西太平洋边缘海中面积最大的海盆。自新生代以来,南海海盆经历了多期的构造伸展和海底扩张,并在构造演化过程中形成了深海盆、大陆坡和大陆架等高低悬殊的典型海底地貌单元。构造高部位常常是碳酸盐台地发育的有利场所,加之南海优越的地理位置($0^\circ \sim 25^\circ \text{N}$)及适宜的

海水温度($17 \sim 28^\circ \text{C}$),使南海具备了有利于碳酸盐发育的地质条件^[1-9]。

调查研究表明,南海自海底扩张以来,在南北共轭大陆边缘发育了一系列的新生代碳酸盐台地,且碳酸盐台地分布面积广、厚度巨大(图1)。礼乐碳酸盐台地自渐新世开始发育,厚逾800m,面积约 $2.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[3,10];西沙碳酸盐台地自中新

资助项目:中国地质调查局海洋地质调查项目(GZH201400210);NSFC-广东联合基金重点项目“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”(U170120019)

作者简介:张新元(1986—),女,博士,主要从事海底构造、深水油气研究,E-mail: nancy2710@163.com

收稿日期:2018-06-29;**改回日期:**2018-11-22. 蔡秋蓉编辑

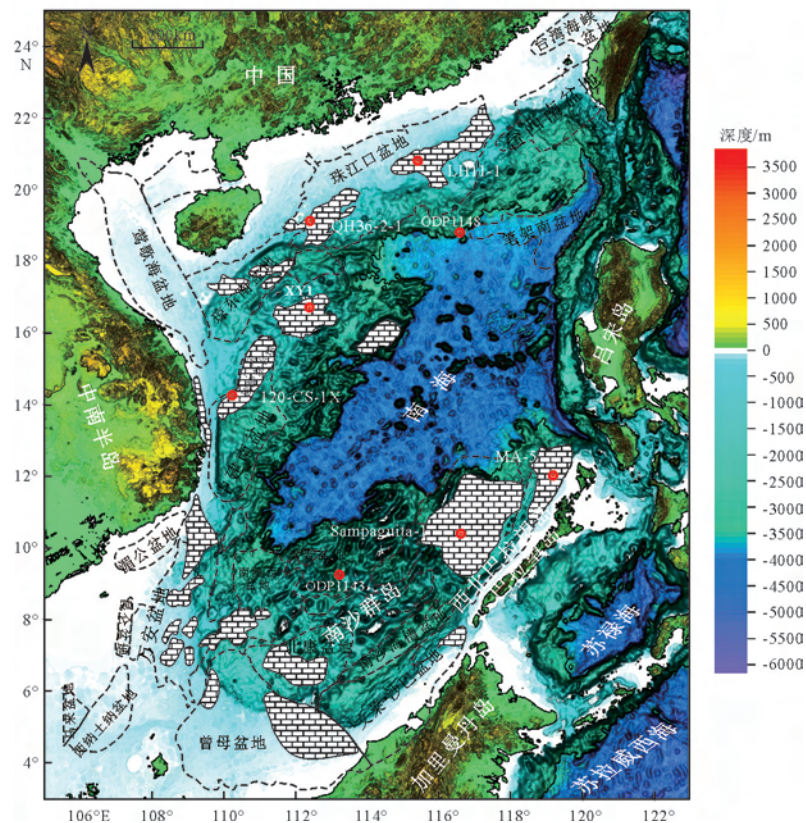


图1 南海中新世碳酸盐台地分布(据文献[1])

Fig.1 The distribution of Miocene carbonate platforms in the South China Sea

世开始发育了近 1200m 厚的碳酸盐层序,地震资料揭示其分布面积约 $3.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[11]。流花碳酸盐台地厚逾 300m,分布面积约 $4.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[12]。碳酸盐台地成为南海海盆的一大特色。这些新生代碳酸盐台地既是全球碳循环中重要碳储库,又是深水油气的良好储层,它孕育着南海海盆演变的重要信息^[13]。

1 地质构造背景

南海西北部($13^\circ \sim 18^\circ \text{N}$ 、 $108^\circ \sim 117^\circ \text{E}$,面积约 $15 \times 10^4 \text{ km}^2$)属于陆壳和洋壳的过渡区,包括琼东南盆地深水区、珠江口盆地的西南部,广乐隆起、西沙隆起和南海西北海盆等构造单元(图 2),经历了裂谷期、后裂谷热沉降期和新生代构造活动期 3 个阶段的构造演化过程。姚伯初等^[14]通过对大南海地区新生代板块构造活动的研究认为,西沙—中沙地块位于南海西部边缘,其西部以南海西缘—万安断裂与印支地块为界,北部通过西沙海槽断裂与华南地块为邻,南部经过南海西南海盆中部残留扩张脊及其向西延伸的断裂与南沙地块相接,东部以中南—礼乐断裂与礼乐—东北巴拉望地块相连。在印支

运动后期,和华南地块缝合在一起。在新生代神狐运动中,它沿南海西缘断裂(越东断裂)向东南运动,地壳被拉薄并和印支地块发生分裂。

红河断裂和南海西缘断裂是南海西北部主要的断裂系统。红河断裂是印支地块与华南地块之间的分隔带,北起青藏高原,穿越云南和越南北部,向东南一直延伸至莺歌海盆地进入南海。红河断裂陆上部分研究程度较高,但是由于资料限制,红河断裂穿过莺歌海盆地之后的走向尚不能得到清晰的辨识,不同学者说法不一。南海西缘断裂,又称为越东断裂,呈近 SN 相延伸,北端始于海南岛南部海域,向南延伸至万安盆地东部与万安东断裂相接,是分隔中南半岛和南海的重要剪切带。晚白垩世至早始新世时期,印澳板块与欧亚板块碰撞,太平洋板块沿 NNW 向俯冲于欧亚板块之下,南海西缘断裂表现为左行走滑特征;中晚始新世开始至中中新世,印澳板块持续向欧亚板块楔入,印支地块向东南挤出,南海海盆打开,太平洋板块转为 NWW 向俯冲,此时南海处于右行拉张的应力环境,南海西缘断裂表现为右行走滑特征;中中新世末期,受万安运动影响,早期张性断层发生不同程度的构造反转,表现为压扭性活动,南海西缘断裂进入左行走滑阶段^[15]。

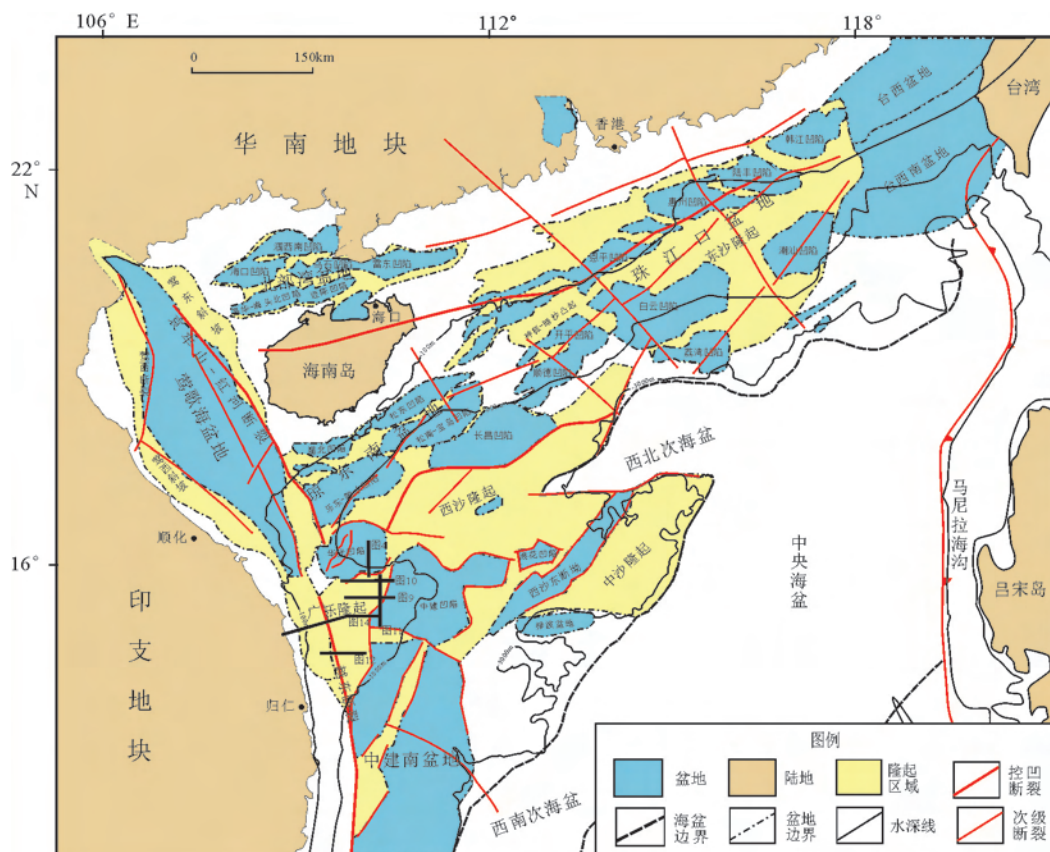


图 2 南海西北部构造区划图(据文献[2])

Fig.2 Tectonic map of the northwestern South China Sea

2 层序地层分析

南海北部陆缘盆地的演化经历了 3 个阶段:裂谷期、热沉降期和新构造运动期^[14],在裂谷期晚期发育有 T60 界面,此界面可以作为裂谷期与热沉降期的分界,据此将琼东南盆地及西沙海域的地层划分为下构造层断陷期沉积和上构造层拗陷期沉积,如图 3 所示,断陷期巨层序可以进一步分为岭头组、崖城组和陵水组,拗陷期可以分为三亚组、梅山组、黄流组、莺歌海组和乐东组。

通过对西沙海区内地震二维测线进行研究分析,并参考琼东南盆地深水新近系各级层序界面在地震、测井、岩相、古生物等方面的特征,建立了西沙海区层序界面的识别标志。各层序界面特征如下(图 4):

T_g 界面为新生代沉积基底,形成于白垩纪晚期—古新世早期,属神狐运动的产物。界面以低频、中强振幅、中低连续的双相位或单相位反射同相轴为主要特征。T_g 界面受断裂控制明显,连续性较差,但其上覆地层成层性较好,并可见上覆地层沿 T_g 界面上超终止现象。

T80 界面是南海运动的产物。界面表现为低频、中强振幅、中低连续的单相位或双相位反射同相轴。受断裂影响明显,局部可见下伏地层削截和上覆地层上超现象。T80 在凹陷内较发育,而在构造隆起带基本缺失。

T70 界面在研究区内表现为典型的削蚀特征,可见同相轴在 T70 界面处被削截,南海扩张表明此时期构造运动较活跃。

T60 界面在陆坡区其地质属性为新近系与古近系的分界,属南海运动的产物,而在海盆区, T60 界面是海盆扩张的产物,为洋壳地震反射的顶面;界面以中高频、中强振幅、高连续的单相位或双相位反射同相轴为主要特征。该界面可见明显的地层上超和削截现象;界面上下地层反射特征差异较大,上覆地层成层性好、振幅较强、频率较低,下伏地层反射特征局部横向上变化较大,表现为振幅变弱、频率降低和连续性变好。

T50 界面为中中新统与下中新统的分界,主要是由相对海平面下降引起的,且可与全球海平面变化曲线的同期层序界面进行对比;界面以中频、中弱振幅、中高连续的单相位反射同相轴为主要特征,不同区域上下地层反射特征有所差异。

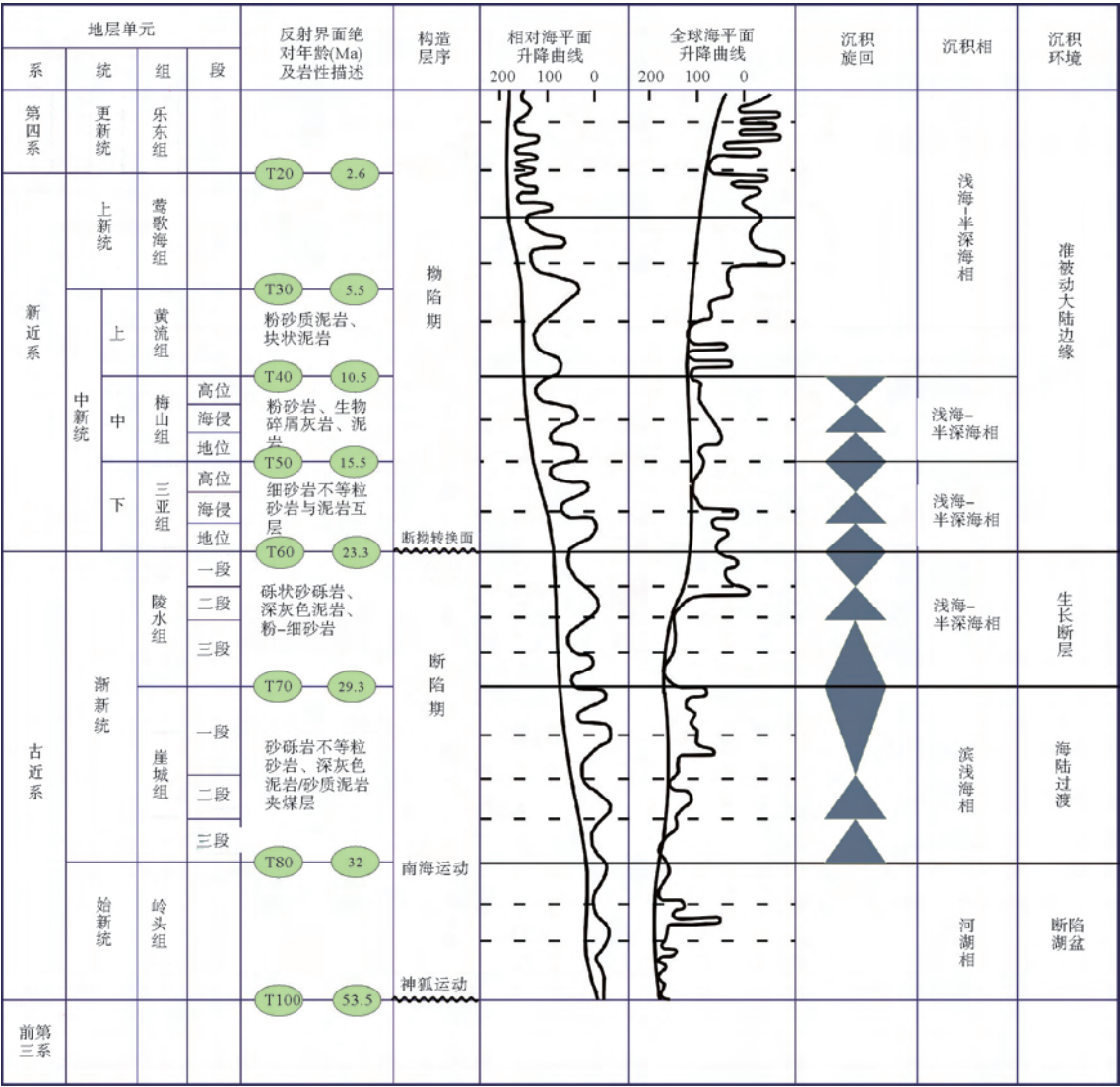


图 3 琼东南盆地及西沙海区地层层序发育综合柱状图(据文献[2])

Fig.3 The Integrated stratigraphic column of the Qiongdongnan Basin and Xisha Area

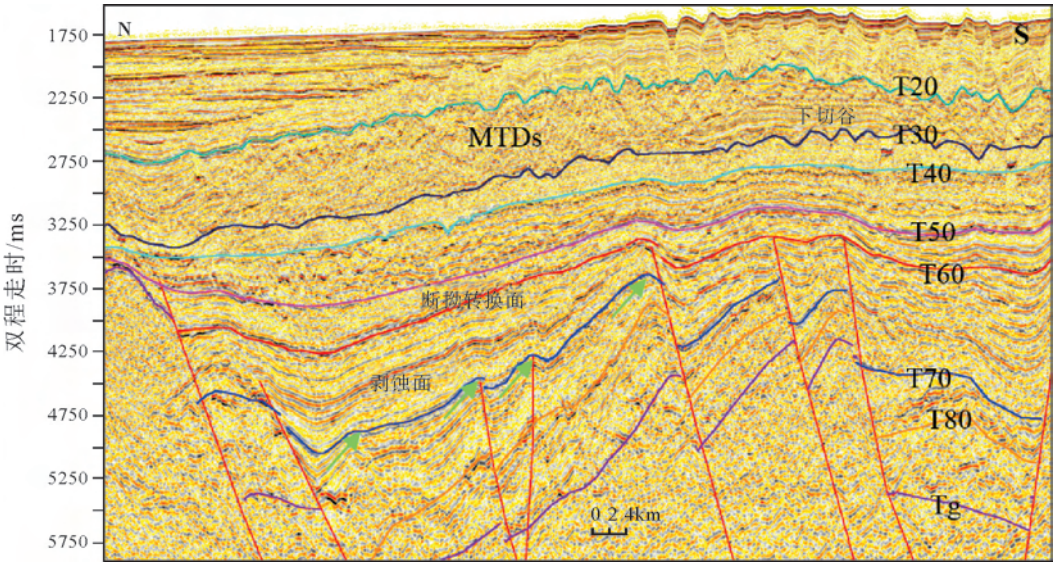


图 4 西沙海区层序界面反射特征

Fig.4 Reflection characteristics of sequence boundaries in Xisha Area

T40 界面为上中新统与中中新统的分界,是中中新世末—晚中新世早期东沙运动的产物;陆坡区域振幅变弱、连续性较好,且上覆地层逐渐变为中频、弱振幅、中低连续的亚平行反射特征;下伏地层成层性较好。

T30 界面为上新统与中新统的分界;界面以中高频、中振幅、中低连续的单相位反射同相轴为特征。界面上下地层反射特征有所差异,下伏地层纵向反射特征变化较大,上部为连续性较好的中弱振幅反射,下部为一套中强振幅的杂乱反射;上覆地层成层性较好,沿斜坡厚度呈逐渐减薄的趋势。

T20 界面为上新统与第四系的分界,主要为中高频、中弱振幅、中低连续的单相位或双相位反射同相轴。研究区内普遍发育。

3 广乐碳酸盐台地发育特征

3.1 地震响应特征

一般而言,碳酸盐台地的顶界面和底界面在地震剖面上均表现为强振幅、连续性好、波形稳定的地震反射特征^[16]。在研究的过程中根据碳酸盐台地在地震剖面上所呈现出的外部几何形态、内部反射结构和接触过渡关系等特征,对研究区内的碳酸盐台地进行了地震识别。

(1) 台地顶界面反射特征

由于在速度和密度特征方面,碳酸盐与后期沉积的浅海砂泥岩具有较大差异性。碳酸盐具有高密度和高速度的特点,与上覆围岩表现出较明显的阻抗差,顶界面呈现出明显的强振幅反射(正相位,波峰显示),一般连续性较好,可进行大范围的连续追踪识别。通过地震识别发现,研究区内广乐碳酸盐台地的顶界面反射同相轴主体相对平整、光滑度好,反映了碳酸盐发育期较稳定的生长环境(图5)。

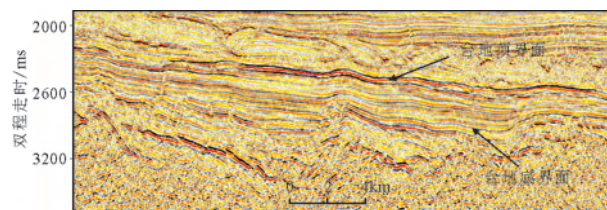


图5 广乐碳酸盐台地顶、底界面

Fig.5 Top and bottom boundaries of Guangle carbonate platform

(2) 台地底界面反射特征

广乐碳酸盐台地发育在中生代的花岗岩基底之上,台地底界面表现为中—弱振幅,中—低连续性的地震反射特征,反射能量较弱(图5)。

(3) 台地边界反射特征

碳酸盐台地的边缘斜坡逐渐过渡进入半深水沉积的陆坡区,侧向上发生碳酸盐与碎屑岩的相变,地震响应特征呈现出由明显的强振幅到进入中等—弱振幅的渐变特征(图6)。

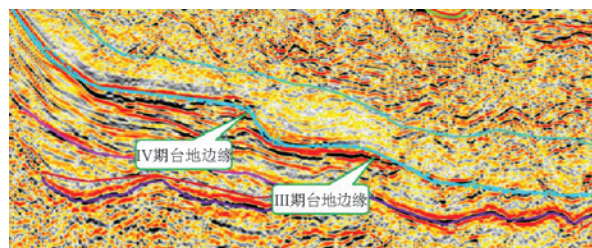


图6 广乐碳酸盐台地侧向边界识别标志

Fig.6 Characteristics of lateral boundaries of a Guangle carbonate platform

在碳酸盐台地陡坡区多发育断层、陡崖,可见地层的不整合接触现象,同时台地边缘陡坡规模较大的断层可造成明显的上超现象(图7)。

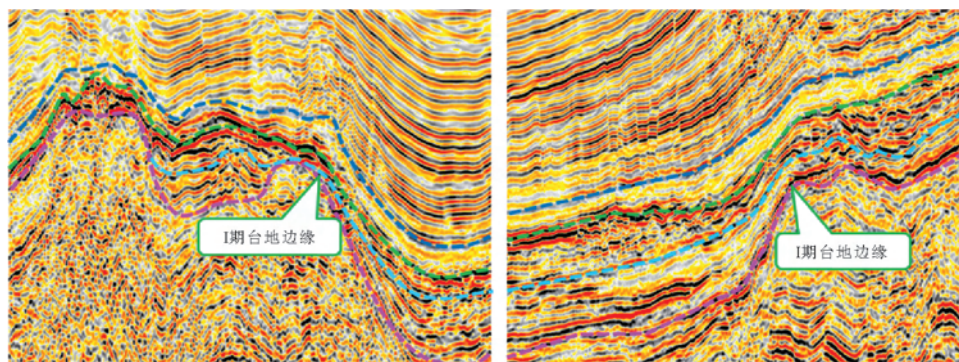


图7 广乐碳酸盐台地侧向边界识别标志

Fig.7 Characteristics of lateral boundaries of a Guangle carbonate platform

广乐碳酸盐台地的北部区域缓坡处冲沟特征明显,海水沿着水道进出台地,在台地边缘形成与台地斜坡下降方向一致的水道,随着台地范围的变化,水道的范围发生向陆或者向海的变化,形成多期水道的垂向叠加(图8)。

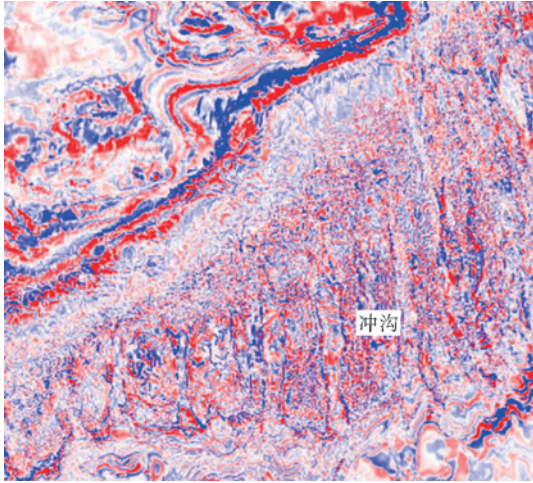


图8 广乐碳酸盐台地侧向边界识别标志
Fig.8 Characteristics of lateral boundaries of a Guangle carbonate platform

自早中新世开始,在持续海侵的背景之下,广乐隆起之上持续发育了几百米厚的碳酸盐台地沉积,并且随着海平面的频繁波动表现出多期叠置的特点。进入中新世晚期,随着水体的不断加深,台地发育表现出自西向东迁移的趋势。

碳酸盐台地发育层位为中新统,即三亚组(T60—T50)、梅山组(T50—T40)和黄流组(T40—T30)。从地震剖面上可以看出,碳酸盐台地直接发

育于中生代的花岗岩基底之上^[15],顶部边界表现为连续性较好的强振幅反射,底界面相对连续性稍差。三亚组(T60—T50)碳酸盐沉积整体表现为波形稳定、平行较连续的强振幅反射,向上至梅山组(T50—T40)振幅能量相对减弱,表现为连续性较好的弱振幅反射特征,黄流组(T40—T30)碳酸盐沉积经后期溶蚀作用改造较强烈,表现为强弱相间的杂乱发射,连续性差。碳酸盐台地沉积厚度稳定,整体表现为强弱相间的平行连续反射,横向上地震相特征变化不大(图9)。台地东部以断层为边界,坡度较陡,台地边缘的碳酸盐碎屑沿斜坡下滑,与硅质碎屑沉积呈指状交错,形成混合沉积,在地震剖面上表现为强弱相间的杂乱断续反射特征。台地西部坡度较平缓,表现为岩性边界,由强振幅反射的台地碳酸盐沉积逐渐过渡为平行弱振幅反射的硅质碎屑沉积。

自早中新世开始,碳酸盐沉积覆盖于广乐隆起之上,广乐碳酸盐台地开始发育,一直持续至中新世晚期,被第四纪沉积覆盖,台地被淹没而停止发育。地震剖面上,三亚组(T60—T50)、梅山组(T50—T40)和黄流组(T40—T30)的碳酸盐沉积顶底界面均表现为连续的强振幅反射,内部充填特征表现为频率较低的近平行的强弱相间反射(图10)。由于广乐隆起上的地形差异,下中新统三亚组(T60—T50)碳酸盐台地底界面起伏较大,台地继续发育,表现出由两侧逐渐向隆起中心迁移的特征,面积急剧缩小。随着台地边缘的迁移,台地发育演化期次的界线趋于明显,共识别出4个演化期次。中新世早期,1、2期台地发育较稳定,随着海平面上

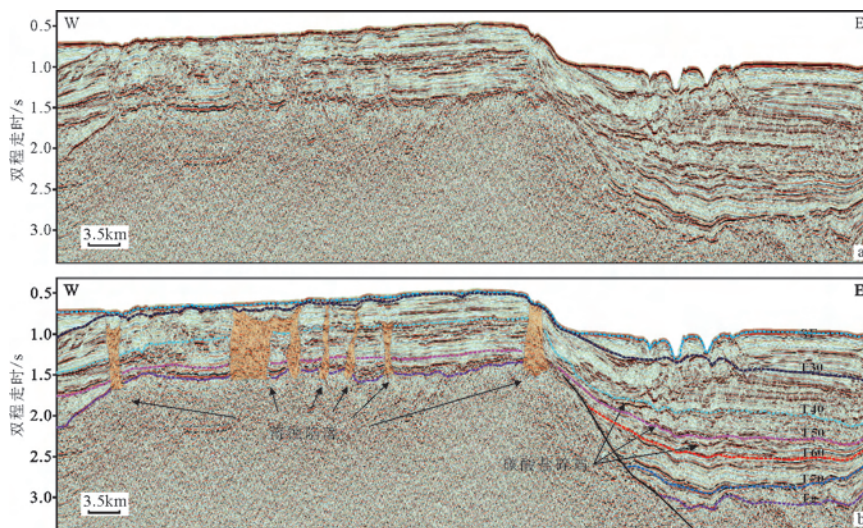


图9 广乐碳酸盐台地东西向剖面地震响应特征

Fig.9 Seismic responses along an east-west section through Guangle carbonate platforms

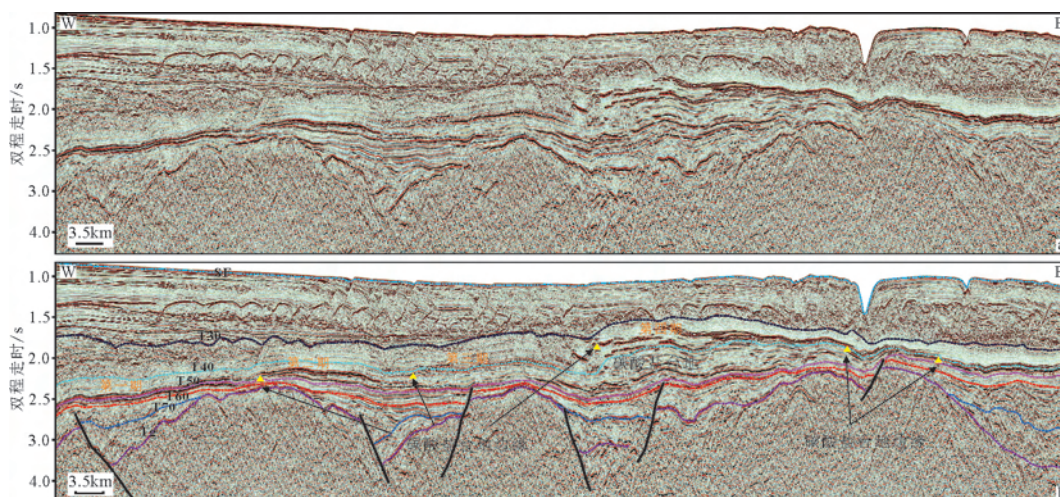


图 10 广乐碳酸盐台地东西向剖面地震响应特征

Fig.10 Seismic responses along an east-west section through Guangle carbonate platforms

升,台地边缘从东西两侧逐渐收缩。中中新世至晚中新世时期,第3期和第4期碳酸盐台地在早期台地发育区基础之上继续生长,但是台地两侧边缘表现出明显的后退特征,在台地西侧表现尤为突出。

广乐碳酸盐台地持续发育,垂向加积特征明显,表明在中新世时期,碳酸盐的生产率与相对海平面的上升速率趋于平衡。碳酸盐台地在垂向生长的过程中,面积缩小,台地两侧边缘变化的差异性则表明在中新世晚期,台地西侧可能受来自于广乐隆起东部的中南半岛陆源物质输入影响,沉积水体环境发生改变,台地向东侧迁移。

从地震剖面上可以看出,研究区碳酸盐台地的地震相特征明显区别于周围地层,整体表现为一套

平行连续的强振幅反射,被弱振幅、断续反射的第四纪硅质碎屑沉积所覆盖。台地边缘主要为岩性边界,强振幅反射特征的碳酸盐沉积与弱振幅反射特征的硅质沉积之间具有明显的相变。

碳酸盐台地顶界面表现为较连续的强振幅地震反射特征,底界面不明显,内部表现为强弱相间的断续反射或杂乱反射(图11)。台地边界发育较明显的同沉积断层,第四纪硅质碎屑沉积超覆于碳酸盐台地边缘斜坡之上,与台地斜坡碳酸盐碎屑沉积呈指状交错。

广乐碳酸盐台地北部与华光凹陷相邻,台地斜坡坡度较陡,台地碳酸盐碎屑沿斜坡搬运形成大量与斜坡走向一致的斜坡水道(图8)。南部相对

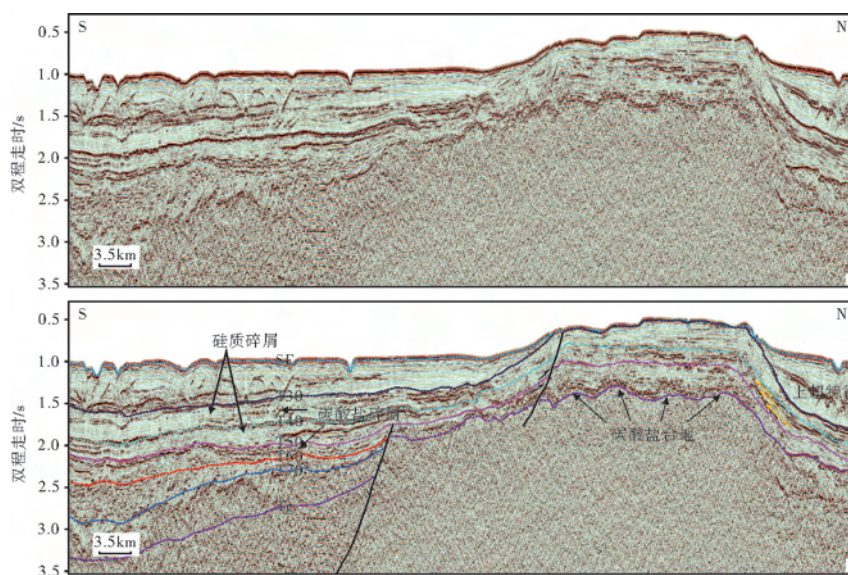


图 11 广乐碳酸盐台地南北向剖面地震响应特征

Fig.11 Seismic responses along a south-north section through Guangle carbonate platforms

坡度较缓,碳酸盐碎屑与硅质碎屑在斜坡区域交错形成混合沉积,表现为强弱相间的杂乱反射特征,向南进入中建南盆地,逐渐过渡为弱振幅平行连续反射的盆地沉积。

3.2 结构特征

广乐碳酸盐台地的发育表明在早中新世时期,广乐隆起区域遭受局部的海侵作用形成浅海环境,随后相对海平面频繁的波动,广乐碳酸盐台地继续生长,在不同时期,台地发育表现出不同的特征。

广乐碳酸盐台地的生长表现出阶段性特征(图12)。早中新世时期(T60—T50)的碳酸盐台地沉积在地震剖面上呈现为断续的强振幅反射,内部地层近平行发育,在台地边缘具有明显的加积特征。上覆的中—晚中新世(T50—T30)碳酸盐台地沉积地震反射特征则表现为平行的中—弱振幅反射,连续性较好。

上、下两套碳酸盐沉积地震反射特征的差异性表明:中新世中期开始,研究区相对海平面变化较频繁,沉积环境发生改变,早期形成的碳酸盐台地经历

了多期的暴露-淹没过程,被岩溶作用改造,纯净均质的碳酸盐地层被扰乱,在地震剖面上呈现出断续杂乱的地震反射特征,在南海其他地区包括珠江口盆地、中建南盆地和曾母盆地等发育的中新世碳酸盐台地也表现出相似的沉积特征^[18-22]。中—晚中新世,碳酸盐台地的横向生长发生分化,内部形成凹陷和水道,台地被分割成多个小规模建隆继续发育。从地震剖面上可以看出,广乐碳酸盐台地顶部发育了呈弱反射地震响应特征的近百米厚的第四纪半深海沉积,且地层厚度由西向东逐渐减薄,台地东部边缘直接出露于现代海平面之上,说明广乐碳酸盐台地的淹没过程自西向东进行,台地东部区域经历了较长的沉积过程。

4 广乐碳酸盐台地发育控制因素

4.1 构造作用

构造作用对碳酸盐台地发育演化的影响表现为2个方面:(1)古地貌控制了碳酸盐台地的初始发育。古隆起、古潜山等构造高地由于早期远离陆

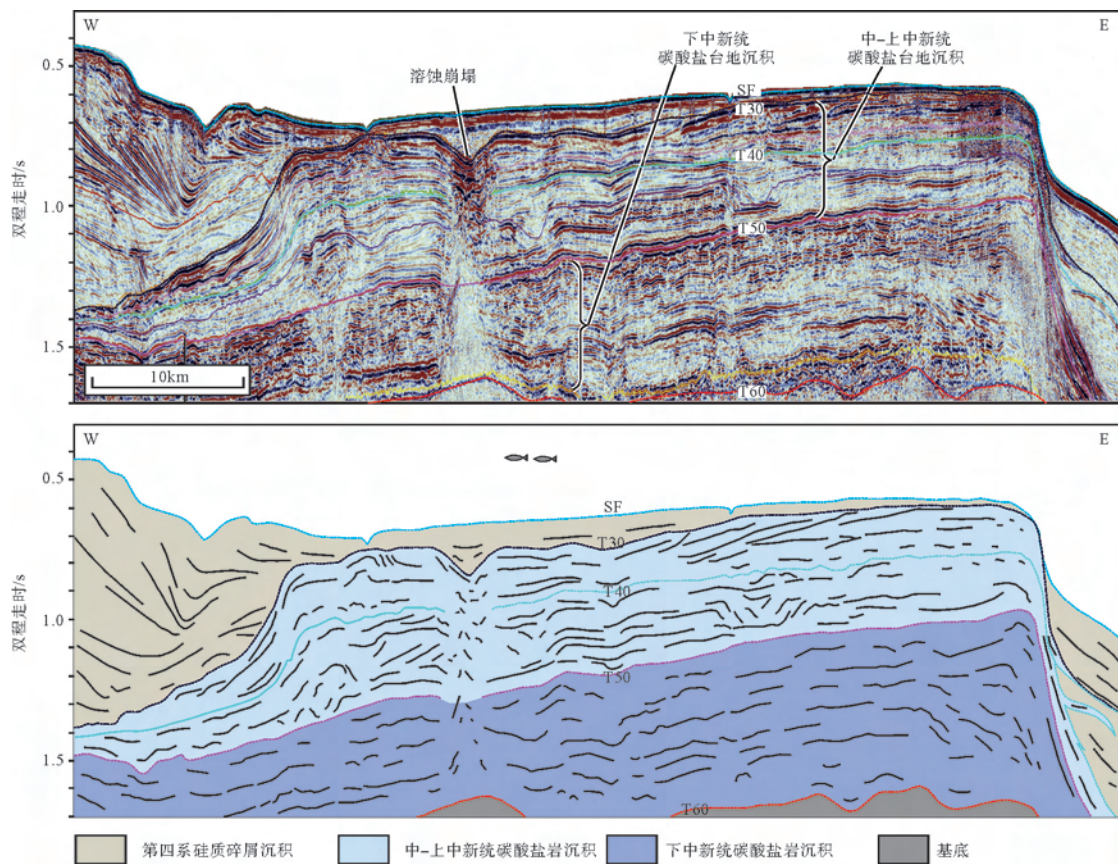


图12 广乐碳酸盐台地结构(据文献[17])

Fig.12 The internal texture of Guangle carbonate platform

源碎屑物质而成为碳酸盐台地发育的优选地形;(2) 相对稳定的构造环境促进碳酸盐台地的持续生长。相对海平面的上升速率与碳酸盐的生成率保持平衡是碳酸盐台地生长的必要条件,构造活动剧烈,构造沉降加速会导致台地被淹没。

对西沙海区的构造演化分析结果表明:在始新世—渐新世时期,西沙海域处于裂陷期,断裂活动较剧烈,地貌特征表现出以广乐隆起和西沙隆起为中心,顶部平坦,周缘凹陷的特点,形成了断块和隆起等构造高部位,为碳酸盐台地的形成发育提供了较好的基础。中新世早期(23.3~15.5Ma),研究区处于裂陷期向拗陷期转换的过渡阶段,凹陷区基底加速下沉,构造沉降量较大,导致了广乐隆起周缘的华光凹陷、中建凹陷及西沙隆起北部的西沙海槽等构造单元内水体加深,对陆源的沉积碎屑起到了阻挡作用,使隆起区域形成有利于碳酸盐台地生长的沉积环境。中中新世时期(15.5~10.5Ma),研究区进入裂后热沉降期,构造活动稳定,构造沉降速率较低,为碳酸盐台地的持续生长创造了必要条件。晚中新世(10.5Ma)之后,研究区内火山活动开始发育,导致构造沉降加快,隆起之上的水体不断加深,促使了碳酸盐台地分布范围逐渐减小,最终被淹没。

4.2 相对海平面变化

相对海平面升降对碳酸盐台地的成长与消亡至关重要,相对海平面的下降会使碳酸盐台地因暴露而停止发育,相对海平面的快速上升也会使碳酸盐台地被淹没而死亡。

中新世以来,西沙海区的二级相对海平面和三级相对海平面变化趋势相同,均处于整体上升的趋势,同时三级相对海平面变化又表现出多期旋回的特点,表明研究区的相对海平面在整体上升的同时存在短期的高频上下波动(图 13)。进入中新世以后,构造运动对西沙海域的影响主要是整体性的沉降影响,从而导致了相对海平面的上升。

早中新世时期,随着相对海平面上升,碳酸盐台地首先在广乐隆起之上开始发育,此时期的三级海平面变化显示在早中新世时期发育了 3 个短期的海平面下降和 2 个短期的海平面上升事件,海平面的下降导致碳酸盐台地侧向加积,发育面积增大,之后海平面上升促使碳酸盐台地垂向加积,在原有基础之上继续发育。中中新世时期,从二级海平面升降曲线上可以看出这一时期海平面的上升趋势减缓,三级海平面同样表现出具有多期升降旋回的特征,整体上该时期水体环境相对稳定,适合碳酸盐台地

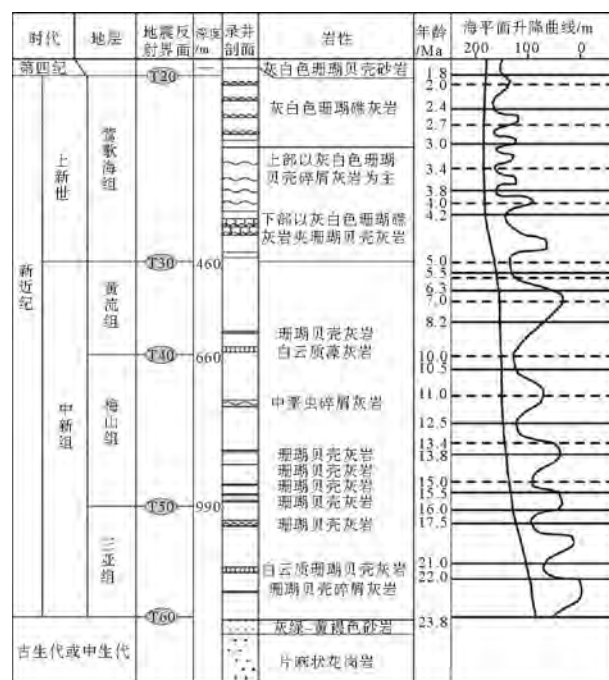


图 13 西沙海区相对海平面变化(据文献[2])

Fig.13 Relative sea level change in Xisha area

的发育,广乐碳酸盐台地在早期发育的基础之上继续生长,以垂向加积为主,西沙隆起之上也开始广泛发育碳酸盐台地和生物礁,并且生物礁的发育表现出多期叠置的特点。晚中新世时期海平面上升速率加快,从而引起台地呈现出向构造高部位退积的特征,早期发育的生物礁也开始淹没而停止发育,在晚中新世末期发育一期快速的海平面上升事件,使得台地整体被海水淹没,上部被正常浅海相沉积覆盖。上新世初期发生一起大规模的海平面下降事件,在地震剖面上可以识别出这一时期海平面下降引起的“U”形冲蚀谷。随后,南海三级海平面升降曲线在整体上升的趋势下显示出高频率的升降旋回,此时广乐隆起和西沙隆起之上的碳酸盐台地已被淹没死亡,仅在西沙群岛之上有零星的大规模环礁继续发育。综上所述,相对海平面变化对碳酸盐台地的控制作用可以概括为:在研究区整体沉降的构造背景下,二级相对海平面的上升控制了碳酸盐台地的初始发育和淹没,频繁波动的三级相对海平面变化则影响了碳酸盐台地的发育期次和演化。

4.3 陆缘物质输入

进入中新世以后,伴随着南海海盆的海底扩张,相对海平面的上升,西沙隆起西部斜坡部位和广乐隆起开始海侵,此时由于西沙海槽和北部琼东南盆地中央拗陷带的阻隔作用,使西沙海域免受来自中沙隆起和红河流域及海南岛的陆源碎屑物质影响,

而广乐隆起西部由于越东断裂的发育也使得来自越南陆架的陆源物质无法进入广乐隆起区域。因此,研究区内水体较清洁,加上温暖潮湿的气候和适宜的温度,使得广乐隆起和西沙隆起在中新世广泛发育生物礁与碳酸盐台地。

晚新近纪,印支半岛东南部广泛发育火山活动,导致了中南半岛的隆升,越南陆架发生向南海方向的倾斜,剥蚀作用加强^[22]。越南中北部剥蚀速率发生了重大改变,从 -34m/Ma 迅速增加至 $390\sim 500\text{m/Ma}$ ^[23,24]。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研究区,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在晚中新世时期的淹没死亡。从穿过广乐隆起的地震剖面(图14)上也可以看出,大量陆缘物质自西向东进积发育,广乐碳酸盐台地规模自中中新世开始逐渐缩小,台地发育出现向东迁移的趋势,并于晚中新世停止发育,被陆源硅质碎屑覆盖。

5 广乐碳酸盐台地发育演化模式

广乐碳酸盐台地位于广乐隆起之上,西邻越南陆架,表现为一个被断层控制的东倾斜坡,东侧以中建水道为分界与西沙碳酸盐台地分割开来,碳酸盐台地的发育演化受构造作用、相对海平面变化和西侧越南陆架陆源物质输入的共同影响,属于镶嵌陆架型台地。在综合分析碳酸盐台地沉积演化过程的基础上,结合相对海平面变化,重建了广乐碳酸盐台地的发育演化史,主要包括4个阶段:早中新世早期开始阶段、早中新世晚期—中中新世早期繁盛阶段、中中新世晚期衰退阶段、晚中新世淹没阶段^[25](图15)。这4个阶段的具体特征分别详述如下:

(1) 早中新世早期开始阶段

早中新世早期是广乐隆起初始发育碳酸盐沉积的时期,随着海底扩张,海水侵入,碳酸盐沉积在中新世以前形成的上升断块等构造高点之上。生产碳酸盐的生物种群在初始阶段尚未发育完全,碳酸盐的生产速率非常小,碳酸盐沉积的厚度和范围都十分有限,此时的碳酸盐台地以垂向生长为主要特征;

(2) 早中新世晚期—中中新世早期繁盛阶段

早中新世晚期,随着相对海平面上升,碳酸盐沉积速率明显增加,大规模的碳酸盐沉积覆盖在早期较小的碳酸盐台地之上,表现为垂向加积和侧向进积的特征,一直持续到中中新世早期,形成了规模更大的碳酸盐台地。台地边缘受基底断裂的控制,形成较陡的台地斜坡,在斜坡之上发育有大量的碳酸盐碎屑组成的滑塌体;

(3) 中中新世晚期衰退阶段

中中新世晚期,相对海平面停止上升,碳酸盐台地边缘明显后退,面积减小,台地只在构造高部位继续垂向加积生长,台地中间较低洼地区沉积了从周围台地滑塌的碳酸盐碎屑和硅质碎屑。同时,西侧越南陆架受早—中中新世火山作用影响^[22],发生了广泛的隆升和剥蚀,形成大量陆源碎屑和火山碎屑,注入广义地堑,限制了广乐西侧台地的发育,碳酸盐沉积表现出向东迁移的趋势;

(4) 晚中新世淹没阶段

晚中新世,相对海平面快速上升,加上西侧越南陆地隆升和火山作用的增强,影响局部气候和海水环境,可能导致了整体水体环境不再适合碳酸盐生产,碳酸盐沉积速率明显减小,几乎所有碳酸盐台地被淹没,台地之上形成了相当厚度的晚新近纪硅质碎屑沉积。

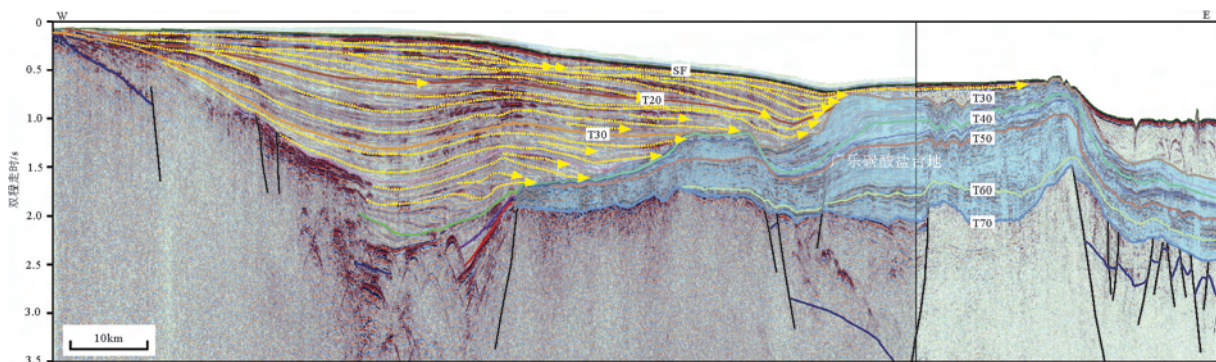


图14 广乐碳酸盐台地发育特征剖面

Fig.14 A section across Guangle carbonate platform

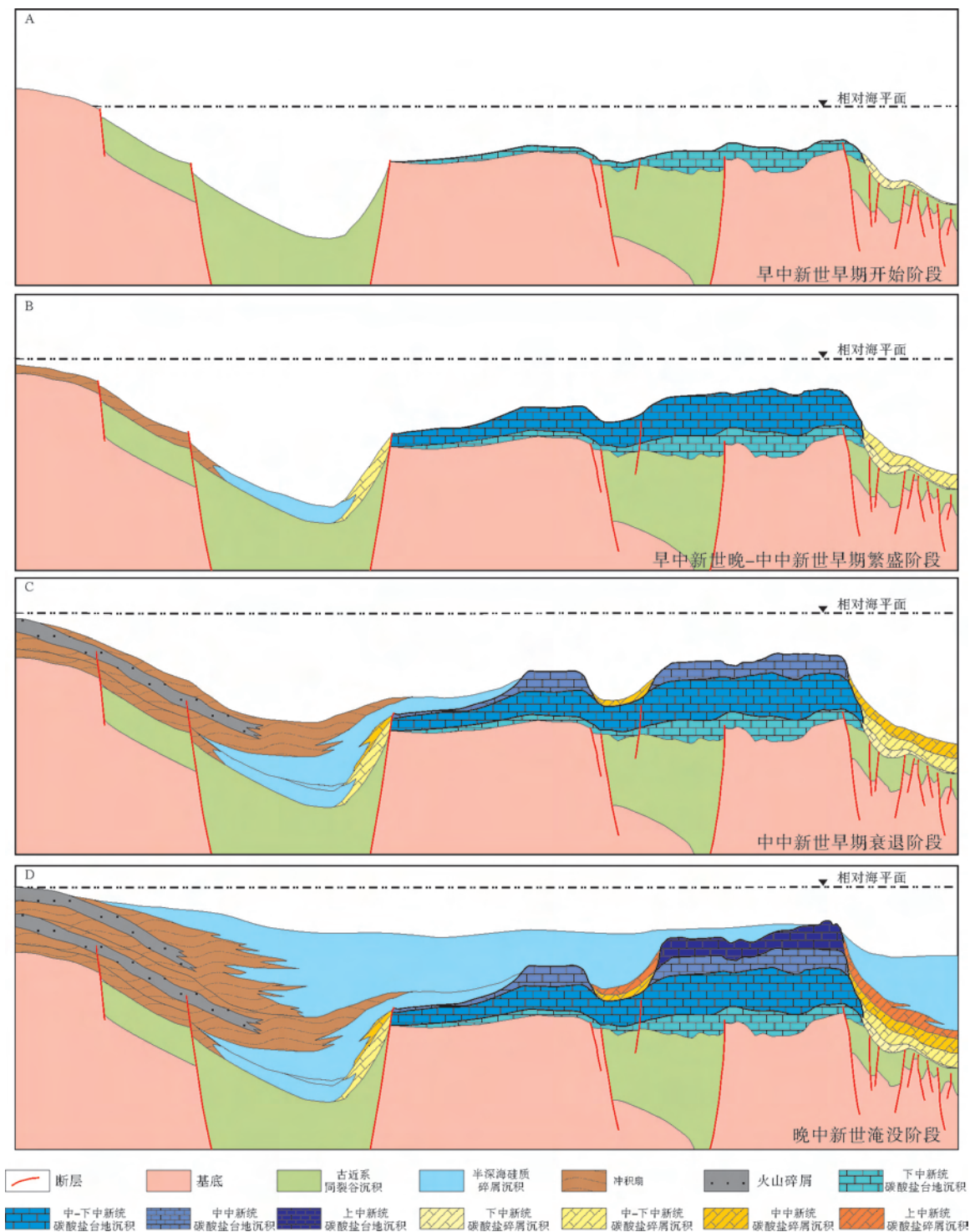


Fig.15 The development and evolution model of Guangle carbonate platforms

6 结论

(1)广乐碳酸盐台地的地震反射特征表现出分段性特点:早中新世时期(T60—T50)的碳酸盐台地沉积在地震剖面上呈现为断续的强振幅反射,内部地层近平行发育,在台地边缘具有明显的加积特征。

上覆的中—晚中新世碳酸盐台地沉积地震反射特征则表现为平行的中—弱振幅反射,连续性较好。台地顶部普遍发育溶蚀塌陷特征,表现为大小不一的凹陷,深度一般为几十米至几百米,直径可达近千米。

(2)广乐碳酸盐台地的控制影响因素包括构造作用、相对海平面变化和陆源物质输入 3 个方面。

(3)广乐碳酸盐台地的发育演化史,主要包括4个阶段:早中新世早期开始阶段、早中新世晚期—中新世早期繁盛阶段、中中新世晚期衰退阶段、晚中新世淹没阶段。

参考文献 (References)

- [1] 吴时国,张新元. 南海共轭陆缘新生代碳酸盐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. [WU Shiguo, ZHANG Xinyuan. Response of Cenozoic carbonate platform on tectonic evolution in the conjugated margin of South China Sea [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(2): 234-248.]
- [2] 马玉波,吴时国,谷明峰,等. 西沙海区碳酸盐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. [MA Yubo, WU Shiguo, GU Mingfeng, et al. Seismic reflection characteristics and sedimentary model of carbonate platform in Xisha sea area [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(4): 118-128.]
- [3] Fournier F, Borgomano J, Montaggioni L F. Development patterns and controlling factors of Tertiary carbonate build-ups: Insights from high-resolution 3D seismic and well data in the Malampaya gas field (Offshore Palawan, Philippines) [J]. Sedimentary Geology, 2005, 175(1-4): 189-215.
- [4] 龚再升,李思田. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 510-515. [GONG Zaisheng, LI Sitian. Basin Analysis and Hydrocarbon Accumulation in the Northern Margin of the South China Sea [M]. Beijing: Science Press, 1997: 510-515.]
- [5] 龚再升. 生物礁是南海北部深水重要勘探领域[J]. 中国海上油气, 2009, 21(5): 289-295. [GONG Zaisheng. Reef is an important exploration area in the northern deepwater area of the South China Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2009, 21(5): 289-295.]
- [6] 吴时国,袁圣强. 世界深水油气勘探进展与我国南海深水油气前景[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(6): 693-699. [WU Shiguo, YUAN Shengqiang. Progress of deepwater oil and gas exploration in the world and prospects for deepwater oil and gas in South China Sea [J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(6): 693-699.]
- [7] 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. [WU Shiguo, YUAN Shengqiang, DONG Dongdong, et al. Development characteristics of Miocene reefs in the northern deepwater area of the South China Sea [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2009, 40(2): 117-121.]
- [8] 张功成,米立军,吴时国,等. 深水区-南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域[J]. 石油学报, 2007, 28(2): 15-21. [ZHANG Gongcheng, MI Lijun, WU Shiguo, et al. Deep water area- new field of oil and gas exploration in the continental margin basin of northern South China Sea [J]. Journal of Petroleum, 2007, 28(2): 15-21.]
- [9] 张功成. 南海北部陆坡深水区构造演化及其特征[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 528-533. [ZHANG Gongcheng. Ectonic evolution and characteristics of northern slope deep water area in the South China Sea [J]. Journal of Petroleum, 2010, 31(4): 528-533.]
- [10] Steuer S, Franke 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, 2014, 58: 644-657.
- [11] 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: 71-83.
- [12] 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. Sequence stratigraphy and sedimentary model of carbonate rocks in the Zhujiang Formation, Dongsha uplift, Pearl River Mouth Basin [J]. Journal of Petroleum and Natural Gas, 2011, 33(9): 1-6.]
- [13] Yu K, Zhao J. Coral Reefs[M]// In Wang P, Li Q eds. The South China Sea: Paleooceanography and Sedimentology. Springer, 2009: 229-255.
- [14] 姚伯初,万玲,刘振湖. 南海海域新生代沉积盆地构造演化的动力学特征及其油气资源[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2004, 29(5): 543-549. [YAO Bochu, WANG Ling, LIU Zhenghu. Dynamic characteristics of tectonic evolution and hydrocarbon resources of Cenozoic sedimentary basins in the South China Sea [J]. Geoscience Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(5): 543-549.]
- [15] 高红芳. 南海西缘断裂带走滑特征及其形成机理初步研究[J]. 中国地质, 2011, 3: 537-543. [GAO Hongfang. A preliminary study on the characteristics of the strike slip and its formation mechanism in the western margin fault of the South China Sea [J]. Geology of China, 2011, 3: 537-543.]
- [16] 马玉波,吴时国,张功成,等. 南海北部陆缘深水区礁相碳酸盐岩的地球物理特征[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009, 33(4): 33-39. [MA Yubo, WU Shiguo, ZHANG Gongcheng, et al. Geophysical characteristics of reef facies carbonate rocks in the deep continental margin of the northern South China Sea [J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2009, 33(4): 33-39.]
- [17] 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: 152-168.
- [18] Moldovanyi E P, Waal F M, Yan Z J. Regional Exposure Events and Platform Evolution of Zhujiang Formation Carbonates, Pearl River Mouth Basin: Evidence for Primary and Diagenetic Seismic Facies [M]. Unconformities and Porosity in Carbonate Strata, AAPG Memoir 63, 1995: 133-145.
- [19] Bachtel S T, Kissling R D, Martono D, et al. Seismic Strati-

- graphic Evolution of the Miocene-Pliocene Segitiga Platform, East Natuna Sea, Indonesia: the Origin Growth and Demise of an Isolated Carbonate Platform [M]. *Seismic Imaging of Carbonate Reservoirs and Systems*, AAPG Memoir 81, 2004: 309-328.
- [20] Heubeck C, Story K, Peng P, et al. An Integrated Reservoir Study of the Liuhua 11-1 Field Using a High-Resolution Three-Dimensional Seismic Data Set [M]. *Seismic Imaging of Carbonate Reservoirs and Systems*, AAPG Memoir 81, 2004: 149-168.
- [21] Vahrenkamp V C, David F, Duijndam P, et al. Growth Architecture, Faulting and Karstification of a Middle Miocene Carbonate Platform, Luconia Province, Offshore Sarawak, Malaysia [M]. *Seismic Imaging of Carbonate Reservoirs and Systems*, AAPG Memoir 81, 2004: 329-350.
- [22] Fyhn M B W, Boldreel L O, Nielsen L H. Tectonic and climatic control on growth and demise of the Phan Rang Carbonate Platform offshore south Vietnam [J]. *Basin Research*, 2009, 21(2):225-251.
- [23] Carter A, Roques D, Bristow C. Denudation history of on-shore central Vietnam: constraints on the Cenozoic evolution of the western margin of the South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 2000, 322(3):265-277.
- [24] Wang D, Wu S, Qin Z, 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.
- [25] 张新元. 南海西北部陆缘中新世碳酸盐台地发育演化与生物礁识别研究[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2016. [ZHANG Xinyuan. The evolution and characteristics of Miocene carbonate platforms and reefs in the Xisha area, north-western continental margin of the South China Sea [D]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanography), 2016.]