



西沙海域甘泉海台层序地层特征及发育演化过程

李学林, 黄磊, 郭旭东, 吴刚, 吴时国, 陈万里, 孙悦, 陈俊锦

Sequence stratigraphic and evolution of the Ganquan platform in Xisha area, South China Sea

LI Xuelin, HUANG Lei, GUO Xudong, WU Gang, WU Shiguo, CHEN Wanli, SUN Yue, and CHEN Junjin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023021404>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

西沙孤立碳酸盐台地的地震层序及演化模式—以永乐环礁为例

Seismic sequence and evolution model of isolated carbonate platform—A case from Yongle Atoll, Xisha Islands

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 87-96

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

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

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(6): 159-171

南海西北深水区中新世碳酸盐台地类型及控制因素

Miocene carbonate platforms in the northwest South China Sea and controlling factors

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(6): 127-135

西沙群岛宣德环礁的地震层序发育特征

Seismic sequence stratigraphy of the Xuande Atoll in the Xisha Islands

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(6): 25-36

南海半封闭边缘海碳酸盐台地兴衰史

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

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(6): 1-17

南海南部北康盆地中新世碳酸盐台地地震响应及分布特征

Seismic responses and distribution characteristics of the Miocene carbonate platforms in the Beikang Basin of southern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(6): 118-126



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李学林, 黄磊, 郭旭东, 等. 西沙海域甘泉海台层序地层特征及发育演化过程 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(6): 122-130.

LI Xuelin, HUANG Lei, GUO Xudong, et al. Sequence stratigraphic and evolution of the Ganquan platform in Xisha area, South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(6): 122-130.

西沙海域甘泉海台层序地层特征及发育演化过程

李学林^{1,2,3}, 黄磊^{1,3}, 郭旭东^{1,3}, 吴刚^{1,3}, 吴时国², 陈万利², 孙悦², 陈俊锦²

1. 广州海洋地质调查局三亚南海地质研究所, 三亚 572025
2. 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
3. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510075

摘要: 甘泉海台作为典型的西沙淹没碳酸盐台地, 为更好地了解其结构演化, 采集了二维多道地震资料, 并对其进行降噪处理, 获取了3条高分辨率多道地震剖面, 利用层序地层学原理, 在地震剖面上识别出10个特殊地震相和4个层序界面, 揭示了甘泉海台自早中新世开始发育了约700 m的碳酸盐台地, 并在上新世被淹没, 其斜坡地层也随水深变化和台地发育演化呈现不同沉积特征。西沙淹没碳酸盐台地自晚渐新世—早中新世在构造高点开始发育, 中中新世相对海平面稳定上升而形成厚层碳酸盐台地, 晚中新世碳酸盐台地演化进入末期, 上新世生物礁碳酸盐台地逐渐死亡直至淹没。

关键词: 层序地层; 发育演化; 相对海平面变化; 西沙淹没碳酸盐台地; 甘泉海台

中图分类号: P736 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023021404

Sequence stratigraphic and evolution of the Ganquan platform in Xisha area, South China Sea

LI Xuelin^{1,2,3}, HUANG Lei^{1,3}, GUO Xudong^{1,3}, WU Gang^{1,3}, WU Shiguo², CHEN Wanli², SUN Yue², CHEN Junjin²

1. Sanya Institute of South China Sea Geology, Guangzhou Marine Geological Survey, Sanya 572025, China
2. Laboratory of Marine Geophysics and Georesources, Institute of Deep-Sea Science and Engineering, CAS, Sanya 57200, China
3. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou, 510075, China

Abstract: The Ganquan Platform is a typical submerged carbonate platform in the Xisha Island, South China Sea. To unravel the architecture and development of the platform, two-dimensional multi-channel seismic data were collected, and the noise reduction was performed to obtain three high-resolution multi-channel seismic profiles. Ten special seismic facies and 4 sequence boundaries were identified on the seismic section, revealing that a 700 m thick carbonate formation was developed in the Ganquan Platform since the early Miocene, and submerged in the Pliocene. Large amounts of gravity flow deposit and contour flow deposit were developed at lower-bottom slope areas. Sedimentary facies in the slope varied with depth, siliceous-carbonate rock clastics were seen in the bottom of the slope, and carbonate rock clastics in the upper slope. The stratigraphic characteristics of the Ganquan platform and the tectonic background of the Xisha region show that the submerged carbonate platform in the Xisha was born at a structural height during the Late Oligocene to the Early Miocene. In the Middle Miocene, the relative sea level rose steadily and thick carbonate platforms were formed. In the Late Miocene, the relative sea level rose rapidly and the northeast monsoon strengthened, announcing the final stage of the carbonate platforms in evolution. In the Pliocene, the relative sea level increased continuously and rapidly. The reef carbonate platform submerged gradually and perished at last.

Key words: sequence stratigraphy; development and evolution; relative sea level change; Xisha submerged carbonate platform; Ganquan platform

生物礁是固着底栖造礁生物原位生长而成的碳酸盐岩建隆^[1], 大型生物礁形成碳酸盐台地。南海自海底扩张以来, 南北共轭大陆边缘沉积了厚度大、面积广的多个碳酸盐台地^[2-3]。近年来生物礁碳

资助项目: 海南省科技计划三亚崖州湾科技城联合项目“西沙海区宣德环礁三维结构与发育演化”(420LH021); 2022年“崖州湾”菁英人才科技专项“基于机器学习系列方法的岛礁地下水淡水资源储量预测研究”(SCKJ-JYRC-2022-36); 中国地质调查局地质调查项目“西沙重点海域自然资源综合调查”(DD20221725)

作者简介: 李学林(1994—), 男, 助理工程师, 主要从事岛礁与地球物理研究, E-mail: geolx1214@163.com

通讯作者: 吴时国(1963—), 男, 研究员, 主要从事海洋地球物理与海底构造研究, E-mail: swu@idsse.ac.cn

收稿日期: 2023-02-14; 改回日期: 2023-03-17. 文凤英编辑

酸盐台地的沉积过程与区域构造运动、相对海平面变化、气候变化、洋流变化等之间联系逐渐被揭示^[2,4-10], 突显了南海碳酸盐台地在南海大陆边缘构造地质演化、古海平面变化和古海洋气候环境研究中的重大科学意义。生物礁碳酸盐岩易形成有效圈闭成藏, 因此碳酸盐台地沉积特征对油气勘探也具有重要意义^[11-13]。

前人先后利用多口钻井资料研究了西沙海域碳酸盐台地的地层特征^[14-20], Wu 等结合钻井资料, 利用高分辨率多道地震建立了西沙碳酸盐台地层序地层框架^[21-22](图 1)。西沙碳酸盐台地开始发育于晚渐新世, 其发育演化过程主要受区域构造沉降和相对海平面变化的控制, 中中新世碳酸盐岩沉积进入繁荣期, 后因海平面快速上升, 大多数台地逐渐被淹没, 称淹没碳酸盐台地, 仅宣德环礁和永乐环礁发育至今, 形成现代岛礁。

对于西沙碳酸盐台地, 近年来关注点主要为现代岛礁的沉积模式、发育演化及其控制因素^[17-18,20,23-24]等方面。相比于现代岛礁, 西沙广泛分布淹没碳酸盐台地, 由于缺乏高分辨率多道地震, 目前尚无西沙淹没台地层序地层相关研究, 对其地层结构和沉积模式了解不足, 也难以探讨台地淹没的机制。碳酸盐台地的生长发育和淹没消亡均与相对海平面变化和气候变化紧密相关, 对比现代岛礁生长机制和淹没台地消亡机制, 对重建西沙相对海平面变化及古气候变化均有积极作用。甘泉海台处于西沙隆起边缘, 受水动力演变影响较深, 本文选取甘泉海台作为研究靶区, 利用最新获取的高分辨率多道

地震, 参考前人在西沙建立的层序地层框架^[21], 结合已有钻井资料和相对海平面变化资料, 对甘泉海台地层开展地震层序和层序地层学研究, 厘定和划分其地层结构特征, 分析甘泉海台发育演化模式。

1 地质背景

甘泉海台是呈 NE-NW 向展布的淹没碳酸盐台地, 多波束测深数据显示甘泉海台平均水深约为 600 m, 坐落于南海北部西沙隆起之上(图 2)。西沙隆起北部毗邻西沙海槽和琼东南盆地, 西南部毗邻中建南盆地, 东部以中沙海槽与中沙台地和西南次海盆相隔。西沙隆起由古新世期间两侧高角度断层界定的过度裂谷演变而来^[25], 在中生代之前暴露于地表, 在渐新世晚期至中新世早期开始沉降, 随后逐渐被海平面淹没, 开始发育生物礁碳酸盐台地。钻探结果表明, 西沙隆起基底由片麻岩、花岗岩和玄武岩等多种岩石组成, 指示了晚中生代时期的区域变质作用和晚侏罗世、古近纪时期的岩浆活动^[26-28]。最近的研究还记录了与晚中新世岩浆活动相关的热液系统^[29]。

西沙海域自早中新世(或晚渐新世)开始盛行东亚季风, 影响其气候和海洋环境^[30]。5—9 月, 来自西南的夏季风占主导地位, 11 月至次年 3 月, 来自东北的冬季季风占主导地位, 4 月和 10 月是夏季和冬季季风之间的过渡期。目前冬季季风强于夏季风, 控制着西沙现代生物礁碳酸盐台地的相带分布^[31]。南海表层流受与东亚季风有关的季风驱动, 夏季为

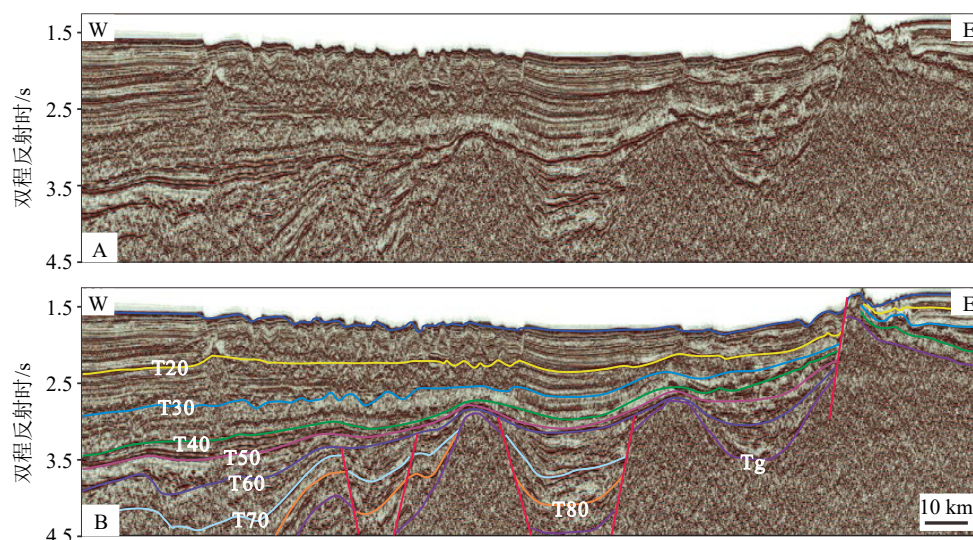


图 1 西沙海域地震剖面 (A) 及层序地层划分^[21] (B)

Fig.1 Seismic profile (A) and sequence stratigraphic division^[21] (B) of the Xisha Islands, South China Sea

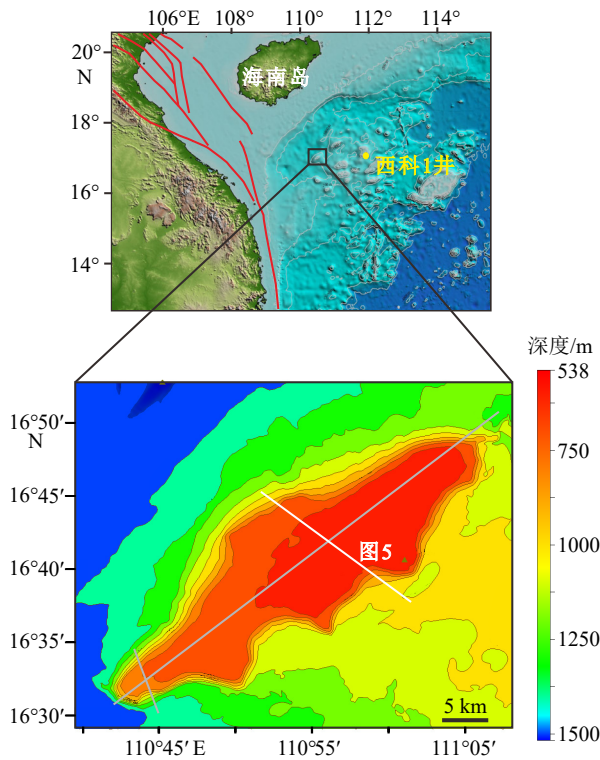


图2 甘泉海台地形地貌位置和地震测线位置图

Fig.2 Topographic map of Ganquan Platform and position of seismic lines in the study area

反气旋性环流, 冬季为气旋性环流^[32]。

2 数据和方法

2.1 数据采集及处理流程

使用数据为广州海洋地质调查局“海洋地质八号”在 2022 年 7 月采集的 100 km 高分辨率二维多道地震, 数据采集采用单边放炮单边接收非零炮检距单缆观测系统进行采集, 震源采用气枪震源, 地震采集主要参数如表 1 所示。

利用地震资料处理系统对原始数据进行处理, 主要包括噪音压制、多次波压制、速度分析、叠前时间偏移和叠后处理。噪声压制主要采用低截滤波压制强涌浪噪声和 AAA 技术衰减异常振幅噪音; 多次波压制采用多步串联多次波压制方法 (SRME+RADON 变换+RES_DEMUL), 该方法压制了大部分的多次波, 极大地提高了剖面信噪比, 有利于后续的偏移处理效果; 处理过程中, 进行 3 次迭代的速度分析, 选取合适的去多次波速度、叠加和偏移速度, 速度场变化符合地质体变化规律, 遵循速度谱能量团拾取准确、道集同向轴拉平、与实际地层相匹配和成像聚焦效果好的原则; 采用克希

表 1 二维地震采集参数	
Table 1 Parameters of seismic acquisition	
采集参数	数值
接收道数/道	720
道间距/m	6.25
电缆长度/m	4500
炮间距/m	25
覆盖次数/次	90
最小偏移距/m	175
记录长度/s	7
采样率/ms	2
震源容量/Cu.in.	4365
震源压力/P.S.I.	2000
震源阵列激发延时/ms	无
气枪沉放深度/m	5
电缆沉放深度/m	6
记录格式	SEG-D 8058
记录介质	IBM 3592磁带

霍夫叠前时间偏移方法实现地层的准确归位; 叠后处理主要内容是对偏移叠加剖面进行适当的处理, 以改善剖面的面貌, 处理以不损害有效波、不破坏剖面的波组特征、保幅处理为原则(图 3)。



图3 二维地震数据处理流程
Fig.3 Flowchart of 2D seismic data processing

2.2 方法

层序地层学通过综合时间和海平面相对变化来跟踪岩相迁移, 进而研究储层发育展布特点, 已被认为是分析碳酸盐台地发育历史的有效方法。碳酸盐岩层序地层学与碎屑岩层序地层学有一定相似性, 层序界面均有整合和不整合的接触关系, 不整合的接触关系通常指示沉积间断, 在剖面上显示超覆、切蚀等特征; 也有一定差异性, 南海碳酸盐台地沉积作用多为化学沉积作用和生物化学沉积作用, 机械沉积作用主要发生在水动力较强区域, 且搬运距离较近, 因此在碳酸盐台地地震剖面中碳酸盐岩建造在地形和地貌上显示出与碎屑岩不同的样式。

本次研究结合前人在西沙地层建立的层序地层格架^[21], 通过确定甘泉海台碳酸盐岩地层各层序界面的地震相特征来建立甘泉海台层序界面的识别标志, 基于识别标志, 对所采集的地震资料进行同相轴追踪和闭合, 建立研究区的层序地层格架。

3 甘泉海台层序地层特征

3.1 甘泉海台地震相及层序地层划分

不同地质体在地震剖面中显示的振幅、连续性、外形和内部特性等反射特征有差异, 对甘泉海台地震剖面分析, 识别出 10 个特殊地震相, 其地震相特征如图 4。台地区地震相主要为中等振幅、平

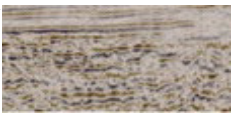


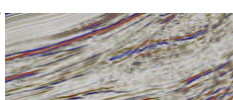
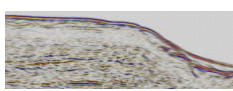
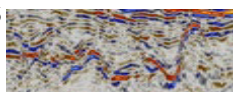


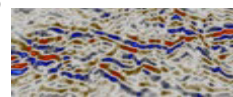
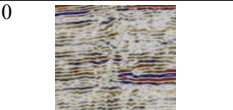
地震相	反射特征	解释
SF1 	较连续, 中等振幅, 波浪—水平亚平行反射	碳酸盐台地
SF2 	中等连续, 弱—中等振幅, 波浪—水平平行反射	潟湖
SF3 	中等连续, 强振幅, 平行反射	喀斯特
SF4 	上超, 中等—强振幅, S型亚平行反射	台地进积边缘
SF5 	陡峭边缘, 退积	台地退积斜坡
SF6 	凸起中等振幅反射, 内部杂乱反射	生物礁
SF7 	中等—强振幅, 中等连续, 平行反射	半深海沉积
SF8 	弱—中等振幅, 连续性强, 平行反射	等深流沉积
SF9 	中等—强振幅, 弱连续, 杂乱反射	硅质—碳酸盐碎 屑混合沉积
SF10 	杂乱反射, 弱连续, 垂向椎状	气烟囱/热液烟囱

图 4 地震相描述和解释

Fig.4 Description and interpretation of seismic facies

行反射(SF1),台地内部主要以潟湖(SF2)沉积为主,也发育喀斯特(SF3),偶见由气体上移或热液上涌腐蚀而产生的烟囱(SF10)。台地深部边缘为进积斜坡(SF4),指示台地面积扩大,顶部台地边缘为退积斜坡(SF5),指示台地收缩。台地周缘沉积可分为3阶段,第一阶段以基底顶界面附近硅质碎屑与碳酸盐碎屑的混合沉积(SF9)及点礁、塔礁等生物礁(SF6)发育为主;第二阶段主要以半深海沉积(SF7)为主,物质来源于台地顶部被剥蚀的碳酸盐岩,以滑坡形式搬运至周缘沉积成岩;第三阶段以等深流沉积(SF8)为主,物质主要来源于台地碳酸盐岩碎屑,随海流搬运至周缘沉积成岩。

结合前人建立的西沙层序地层框架(图1)和海平面变化^[18],对甘泉海台新采集的高分辨率多道地震进行层序地层分析,共识别4个层序界面,参考西沙宣德环礁西科1井资料^[15](图5),认为其分别为下中新统底T60、中中新统底T50、上中新统底T40和上中新统顶面T30(图6)。其中T60界面整

体频率较高,振幅较强,连续性较好。T50界面以中等频率、中弱振幅、连续性较好为主要特征。T40界面振幅较弱、连续性较好。T30界面斜坡区域频率较高、振幅中等、连续性较差,台地区域T30界面即为碳酸盐台地顶面,表现为强振幅且连续性较好。

3.2 甘泉海台地层特征

经过对高分辨率地震剖面层序地层分析,结合西科1井钻井资料,揭示了甘泉海台地区地层和台前斜坡区地层特征。

3.2.1 台地区地层特征

西科1井资料显示,西沙海域自中新世以来沉积了近1300m厚的碳酸盐岩地层,最新取样调查结果显示甘泉海台顶部零星区域有约4m的松散沉积物,大多区域为碳酸盐岩地层裸露。结合甘泉海台地震剖面,认为T60之上地层均为碳酸盐岩地层。地震剖面显示,甘泉海台时间域发育了0.6s碳酸盐岩地层,以2500m/s层速度^[23]对台地区碳酸盐岩地层进行粗略时深转换,认为甘泉海台自中新世以来共生长约700m生物礁碳酸盐岩地层。上新世期间相对海平面快速上升,生物礁逐渐处于透光带以下而死亡,碳酸盐岩停止产出(图7)。

对比西科1井资料和西沙相对海平面变化,剖面显示台地区主要呈潟湖相(SF2),在T40和T50处也发育喀斯特(SF3)。中中新世发育了厚层的碳酸盐岩,与该时期相对海平面稳定上升相关,早中新世和晚中新世碳酸盐岩地层相对较薄。气烟囱(SF10)指示台地内部中中新世以后发育流体上涌侵蚀。中新世之前,部分低洼区域开始沉积硅质碎屑与碳酸盐碎屑的混合沉积(SF9),深部地震相振幅较高,推测硅质碎屑含量高,浅部地震相振幅较低,推测碳酸盐岩碎屑含量较高。

3.2.2 斜坡区地层特征

地震剖面显示,西南部斜坡地势较缓,东北部斜坡地势较陡,两侧斜坡沉积结构差异较小(图8、9)。在早中新世期间斜坡主要以硅质-碳酸盐岩碎屑混合沉积(SF9)为主,台前斜坡也发育塔礁、点礁等生物礁(SF6);中中新世和晚中新世期间,远端斜坡主要以半深海沉积(SF7)为主,台前斜坡重力流沉积较发育,台地边缘生物礁被破坏产生的生物礁碎屑是重力流的主要沉积物来源;上新世以来,台地区已被淹没,生物礁停止生长,台地斜坡发育等深流沉积(SF8)。在西南部斜坡中中新统地层识别台地进积相(SF4),指示台地中中新世规模扩大(图8),

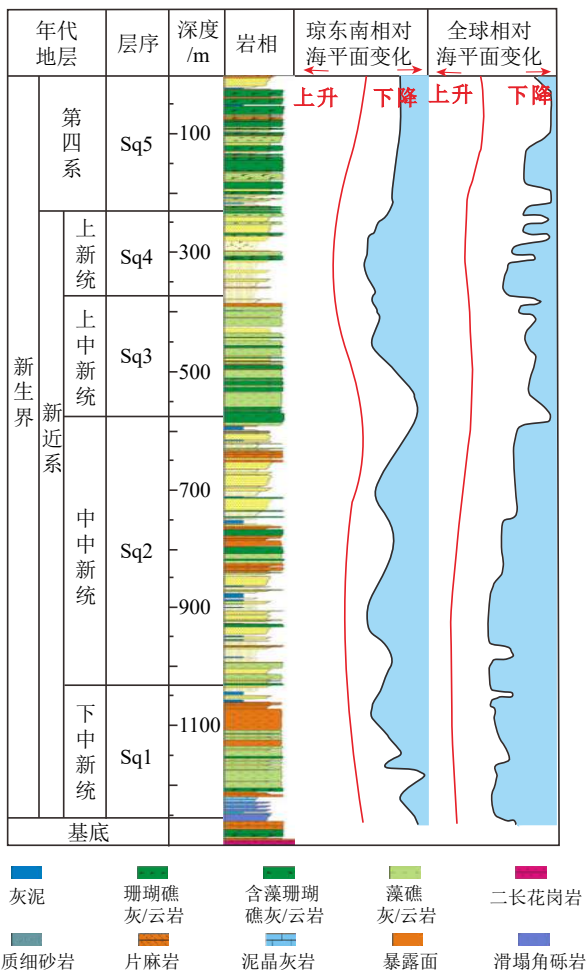


图5 西科1井的岩性柱以及西沙海域海平面变化曲线^[15,18]

Fig.5 Stratigraphic column of Wells XK-1, and the global sea-level curves^[15,18]

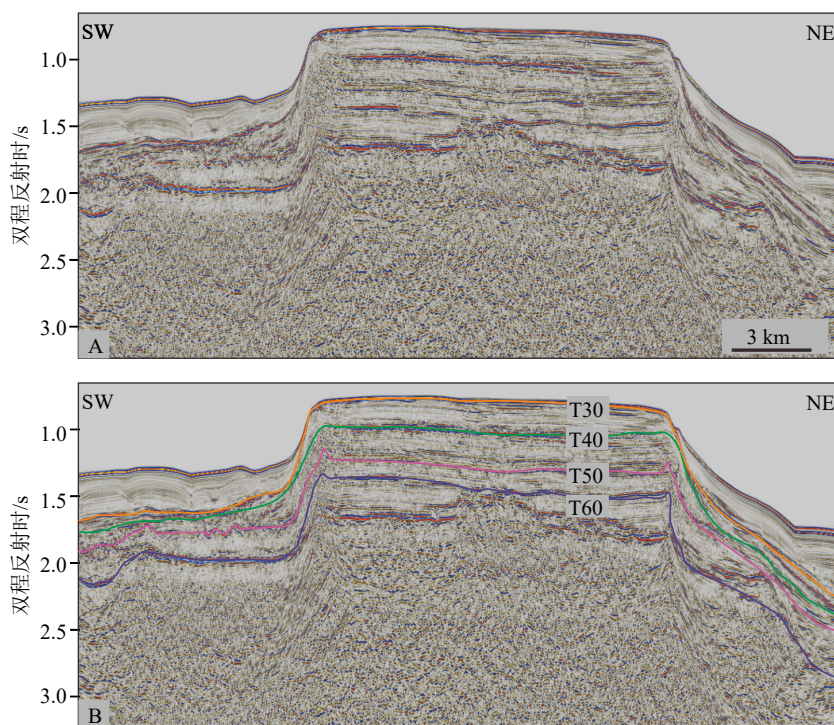


图 6 甘泉海台地震剖面 (A) 及层序地层划分 (B)

Fig.6 A seismic profile of Ganquan Platform (A) and sequence stratigraphy division (B)

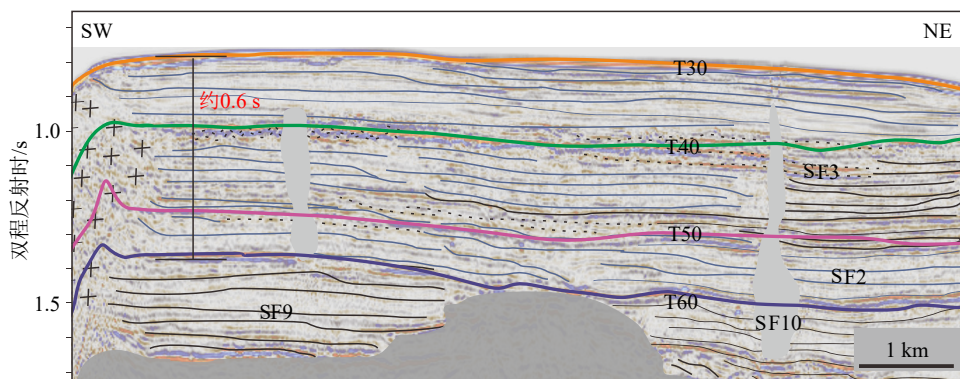


图 7 甘泉海台地区地层解释

Fig.7 Interpretation of stratigraphy in the Ganquan Platform

在东北部斜坡上中新统地层识别台地退积相 (SF5), 指示台地收缩(图 9)。

4 西沙淹没台地发育演化模式

对比甘泉海台地层特征与西沙相对海平面变化, 甘泉海台发育演化过程与相对海平面变化紧密相关。根据甘泉海台地层特征和演化过程, 结合西沙构造背景, 建立西沙淹没台地的发育演化模式, 认为西沙淹没台地演化可分为 4 个时期: 晚渐新世—早中新世碳酸盐岩开始沉积, 逐渐形成台地, 称为萌芽期; 中中新世碳酸盐岩大量沉积, 台地扩大加深, 称为繁盛期; 晚中新世碳酸盐岩减缓沉积, 台

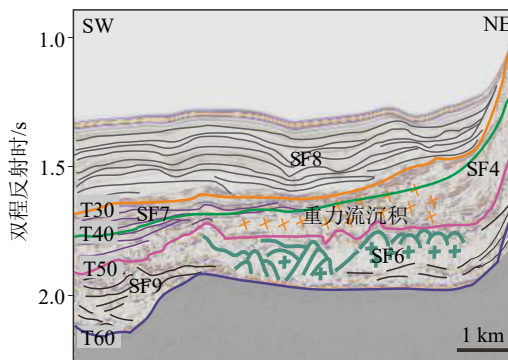


图 8 甘泉海台西南侧斜坡地层解释

Fig.8 Stratigraphic interpretation on the deposits in the southwest slope of the Ganquan Platform

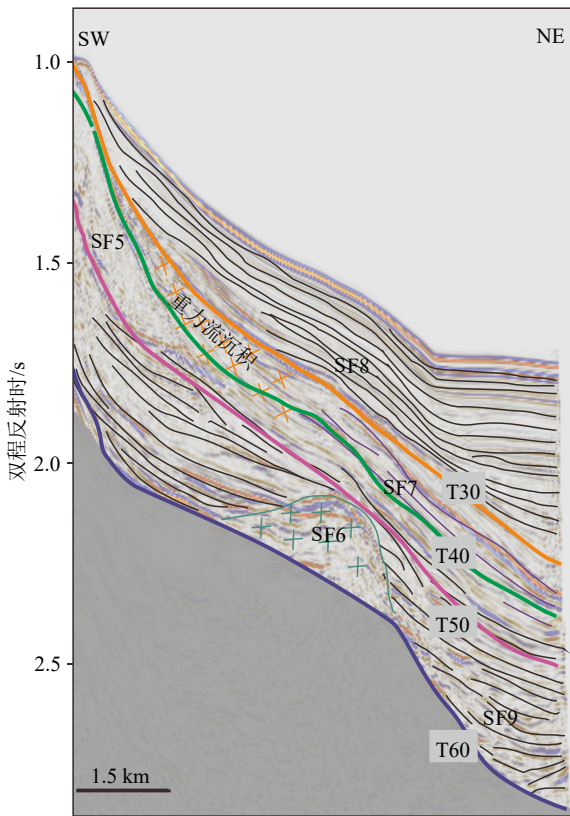


图9 甘泉海台东北侧斜坡地层解释

Fig.9 Stratigraphic interpretation of the northeast slope of the Ganquan Platform

地逐渐收缩,称为衰退期;上新世碳酸盐岩停止沉积,台地淹没消亡,称为淹没期(图10)。

4.1 晚渐新世—早中新世萌芽期

32 Ma 以来随着南海扩张,西沙区域逐渐被海水淹没,远离陆源,开始沉积生物礁碳酸盐岩。随着构造活动趋于稳定,相对海平面逐渐上升,碳酸盐岩持续加积,形成碳酸盐台地。

晚渐新世,部分低洼区处于水下透光带,开始生长生物礁,构造高点的基岩仍暴露于海平面之上。强动力海流对低洼区的生物礁和高点处的基岩破坏侵蚀搬运,此时期以硅质-碳酸盐岩碎屑混合沉积为主。进入早中新世,西沙全区均被淹没,构造高点处于水下透光带,开始大规模生长生物礁,低洼地区处于透光带以下,停止原位生长生物礁,主要沉积由高点搬运而来的碳酸盐碎屑,混杂少量硅质碎屑。随着海平面持续稳定上升,高点处生物礁大量生长堆积,发育为碳酸盐台地,在早中新世末期,碳酸盐台地已初具规模。

4.2 中中新世繁盛期

中中新世时期,南海停止扩张,西沙全区热沉

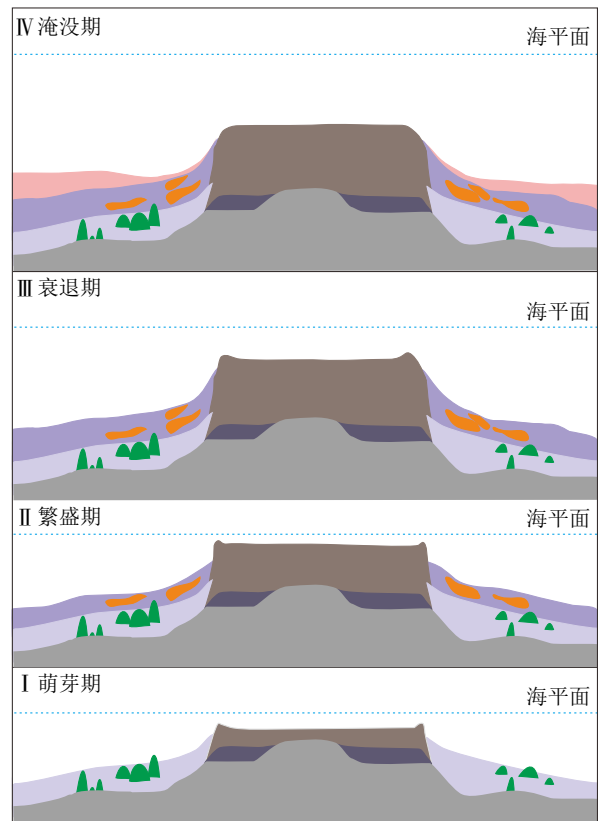


图10 西沙淹没碳酸盐台地发育演化模式

Fig.10 The developmental and evolutionary model of the carbonate platform in the Xisha Islands

降,相对海平面持续稳定上升。早期发育的碳酸盐台地长期具备充足可容纳空间,台地规模发育加大,台地内部形成潟湖。台地周缘的斜坡-盆地逐渐进入半深海环境,开始接受大量以浊流形式搬运而来的重力流沉积,这些重力流沉积物主要来自台地剥蚀。

台地发育与次级相对海平面波动紧密相关,海平面上升时,碳酸盐台地纵向快速生长,且形成潟湖。海平面下降时,碳酸盐台地横向扩大。

4.3 晚中新世衰退期

晚中新世时期,西沙热沉降速率逐渐加剧^[21],相对海平面快速上升,台地纵向生长,且开始收缩,斜坡进入半深海环境,碳酸盐台地发育成了孤立碳酸盐台地,台地顶部受强水动力侵蚀,碳酸盐岩碎屑常以重力流形式快速搬运至斜坡处沉积,因此斜坡沉积物较粗。

晚中新世早期,相对海平面稳定上升,台地纵向加积。随着后期海平面上升速率加快,台地边缘生物礁逐渐处于透光带以下,且东北季风作用加强^[33],

台地出现收缩, 碳酸盐岩沉积效率也随之降低, 台地逐渐显示被淹没趋势。

4.4 上新世至今的淹没期

上新世时期, 相对海平面上升速率加快, 台地全部处于透光带以下, 生物礁死亡, 碳酸盐岩停止沉积, 碳酸盐台地被淹没。台地淹没后, 海流持续侵蚀台地边缘和表面, 台地顶部突出生物礁逐渐被剥蚀, 台地表面趋于平坦。台地斜坡逐渐处于深水区, 且鲜有大量碳酸盐岩碎屑重力流发育, 斜坡处发育等深流, 斜坡主要以较细粒的等深流沉积为主。

5 结论

(1) 在甘泉海台地震剖面中识别出 10 个特殊地震相, 指示台地内部主要以潟湖沉积为主, 台地周缘沉积以硅质碎屑与碳酸盐碎屑的混合沉积、半深海沉积和等深流沉积为主。识别出 4 个层序界面, 其分别为下中新统底 T60、中中新统底 T50、上中新统底 T40 和上新统底 T30。

(2) 甘泉海台早中新世时期开始大规模生长生物礁, 中新世期间发育了约 700 m 的碳酸盐台地, 碳酸盐台地的发育演化主要受构造演化和海平面变化控制。中新世时期, 碳酸盐台地产出高, 大量碳酸盐岩被剥蚀、破坏, 并被重力流搬运至台地周缘, 碳酸盐台地成为周缘地层的主要沉积物来源。

(3) 上新世相对海平面快速上升, 甘泉海台被淹没, 生物礁处于透光带以下而死亡, 碳酸盐岩停止沉积, 自台地搬运而来的碳酸盐岩碎屑减少, 台地周缘斜坡逐渐处于深海区域, 受等深流侵蚀, 开始发育以细粒为主的等深流沉积。

(4) 西沙海域发育了多个淹没碳酸盐台地, 结合西沙构造背景和甘泉海台沉积过程, 揭示了西沙淹没碳酸盐台地演化模式, 可按地质历史时期分为晚渐新世—早中新世萌芽期、中中新世繁盛期, 晚中新世衰退期和上新世至今的淹没期 4 个阶段。

参考文献 (References)

- [1] Riding R. Structure and composition of organic reefs and carbonate mud mounds: concepts and categories [J]. *Earth-Science Reviews*, 2002, 58(1-2): 163-231.
- [2] Wu S G, Zhang X Y, 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, 4(3): 1A-Y1.
- [3] 吴时国, 朱伟林, 马永生. 南海半封闭边缘海碳酸盐台地兴衰史[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(6): 1-17. [WU Shiguo, ZHU Weilin, MA Yongsheng. Vicissitude of Cenozoic carbonate platforms in the South China Sea: sedimentation in semi-closed marginal seas [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(6): 1-17.]
- [4] Zampetti V, Schlager W, Van Konijnenburg J H, et al. Architecture and growth history of a Miocene carbonate platform from 3D seismic reflection data; Luconia province, offshore Sarawak, Malaysia [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 21(5): 517-534.
- [5] Sattler U, Immenhauser A, Schlager W, et al. Drowning history of a Miocene carbonate platform (Zhujiang Formation, South China Sea) [J]. *Sedimentary Geology*, 2009, 219(1-4): 318-331.
- [6] Betzler C, Hübscher C, Lindhorst S, et al. Monsoon-induced partial carbonate platform drowning (Maldives, Indian Ocean) [J]. *Geology*, 2009, 37(10): 867-870.
- [7] 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.
- [8] Betzler C, Eberli G P. Miocene start of modern carbonate platforms [J]. *Geology*, 2019, 47(8): 771-775.
- [9] 鲁毅, 崔宇驰, 刘新宇, 等. 中国南海西沙碳酸盐岩台地形成过程及控制因素: 来自西科1井的地球化学证据[J]. *古地理学报*, 2020, 22(6): 1197-1208. [LU Yi, CUI Yuchi, LIU Xinyu, et al. Formation process and controlling factors of carbonate platform in Xisha area, South China Sea: based on geochemical evidences from Well Xike-1 [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2020, 22(6): 1197-1208.]
- [10] 张新元, 吴时国. 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[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(6): 159-171. [ZHANG Xinyuan, WU Shiguo. Characteristics of Miocene Guangle carbonate platforms in the Xisha area and its evolution [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(6): 159-171.]
- [11] Burchette T P. Carbonate rocks and petroleum reservoirs: a geological perspective from the industry [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2012, 370(1): 17-37.
- [12] 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): 15-22. [ZHANG Gongcheng, MI Lijun, WU Shiguo, et al. Deepwater area: the new prospecting targets of northern continental margin of South China Sea [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(2): 15-22.]
- [13] 朱伟林, 张功成, 钟锴, 等. 中国南海油气资源前景[J]. *中国工程科学*, 2010, 12(5): 46-50. [ZHU Weilin, ZHANG Gongcheng, ZHONG Kai, et al. South China Sea: oil and gas outlook [J]. *Strategic Study of CAE*, 2010, 12(5): 46-50.]
- [14] 许红, 张金川, 蔡峰. 西沙群岛中新世生物礁矿物相研究及其意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1994, 14(4): 15-23. [XU Hong, ZHANG Jinchuan, CAI Feng. Study and significance of Miocene biohermal mineral facies in the Xisha islands [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1994, 14(4): 15-23.]
- [15] 罗威, 张道军, 刘新宇, 等. 西沙地区西科1井综合地层学研究[J]. *地层学杂志*, 2018, 42(4): 485-498. [LUO Wei, ZHANG Daojun, LIU

- Xinyu, et al. A comprehensive stratigraphic study of Well XK-1 in the Xisha area [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2018, 42 (4): 485-498.]
- [16] 许红, 蔡峰, 王玉净, 等. 西沙中新世生物礁演化与藻类的造礁作用[J]. *科学通报*, 1999, 44 (13): 1435-1439. [XU Hong, CAI Feng, WANG Yujing, et al. Miocene reef evolution and algal reef-building in Xisha [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44 (13): 1435-1439.]
- [17] Shao L, Li Q Y, Zhu W L, 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.
- [18] Shao L, Cui Y C, Qiao P J, et al. Sea-level changes and carbonate platform evolution of the Xisha Islands (South China Sea) since the Early Miocene [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 485: 504-516.
- [19] Fan T L, Yu K F, Zhao J X, et al. Strontium isotope stratigraphy and paleomagnetic age constraints on the evolution history of coral reef islands, northern South China Sea [J]. *GSA Bulletin*, 2020, 132 (3-4): 803-816.
- [20] Wang R, Yu K F, Jones B, et al. Evolution and development of Miocene "island dolostones" on Xisha Islands, South China Sea [J]. *Marine Geology*, 2018, 406: 142-158.
- [21] 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.
- [22] 马玉波, 吴时国, 杜晓慧, 等. 西沙碳酸盐岩建隆发育模式及其主控因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31 (4): 59-67. [MA Yubo, WU Shiguo, DU Xiaohui, et al. Evolutionary model and control factors of Xisha carbonate buildup [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31 (4): 59-67.]
- [23] Liu Y, Wu S, Li X, et al. Seismic stratigraphy and development of a modern isolated carbonate platform (Xuande Atoll) in the South China Sea [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 10: 1042371.
- [24] 李学林, 张汉羽, 刘刚, 等. 西沙孤立碳酸盐台地的地震层序及演化模式: 以永乐环礁为例[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40 (5): 87-96. [LI Xuelin, ZHANG Hanyu, LIU Gang, et al. Seismic sequence and evolution model of isolated carbonate platform: a case from Yongle Atoll, Xisha Islands [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40 (5): 87-96.]
- [25] 丘学林, 曾钢平, 胥颐, 等. 南海西沙石岛地震台下的地壳结构研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49 (6): 1720-1729. [QIU Xuelin, ZENG Gangping, XU Yi, et al. The crustal structure beneath the Shidao Station on Xisha Islands of South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49 (6): 1720-1729.]
- [26] 孙嘉诗. 西沙基底形成时代的商榷[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1987, 7 (4): 5-6. [SUN Jiashi. A discussion on the formation ages of the bedrock in the Xisha Islands [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1987, 7 (4): 5-6.]
- [27] 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 Sciences*, 2017, 60 (12): 2214-2222.
- [28] Zhang Y, Yu K F, Fan H D, et al. The basement and volcanic activities of the Xisha Islands: evidence from the kilometre-scale drilling in the northwestern South China Sea [J]. *Geological Journal*, 2020, 55 (1): 571-583.
- [29] Gao J W, Bangs N, Wu S G, et al. Post-seafloor spreading magmatism and associated magmatic hydrothermal systems in the Xisha uplift region, northwestern South China Sea [J]. *Basin Research*, 2019, 31 (4): 688-708.
- [30] Clift P D, Webb A A G. A history of the Asian monsoon and its interactions with solid Earth tectonics in Cenozoic South Asia [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2019, 483 (1): 631-652.
- [31] 王国忠. 南海珊瑚礁区沉积学[M]. 北京: 海洋出版社, 2001: 78-96. [WANG Guozhong. *Coral Reefs and Islands* [M]. Beijing: China Ocean Press, 2001: 78-96.]
- [32] 毛明, 王文质, 黄企洲, 等. 南海环流的三维数值模拟[J]. *热带海洋学报*, 1992, 11 (4): 34-41. [MAO Ming, WANG Wenzhi, HUANG Qizhou, et al. A three-dimensional numerical simulation of the south china sea circulation [J]. *Tropic Oceanology*, 1992, 11 (4): 34-41.]
- [33] Qin Y, Wu S, Betzler C. Backstepping patterns of an isolated carbonate platform in the northern South China Sea and its implication for paleoceanography and paleoclimate [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 146: 105927.