

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019111901

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

李学林^{1,2}, 张汉羽², 刘刚³, 韩孝辉³, 秦永鹏², 吴时国²

1. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510075
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. 海南省海洋地质调查研究院, 海口 570206

摘要: 永乐环礁作为典型的现代孤立碳酸盐台地, 记录了西沙海域生物礁以及碳酸盐台地的整个兴衰历史。根据新采集的高分辨率多道地震数据, 结合永乐环礁探科2井以及永乐环礁东部西科1井的研究结果, 对永乐环礁内部进行层序地层学研究, 讨论了永乐环礁的演化过程, 建立了西沙孤立碳酸盐台地的发育模式。根据地震反射同相轴特征变化, 自下而上划分出Sq1(下中新统)、Sq2(中中新统)、Sq3(上中新统)、Sq4(上新统)、Sq5(第四系)5个层序, 建立了永乐环礁的年代地层格架。重建了永乐碳酸盐台地自中新世以来的演化历史: 台地顶部自中新世以来沉积环境相对稳定, 以潟湖为主; 而台地斜坡早中新世为滨浅海环境, 发育生物礁, 中中新世至今为半深海沉积环境, 斜坡区有水道侵蚀, 发育源于台地顶部的重力流沉积, 在台地西部的斜坡区还发现了第四纪等深流沉积。综上, 将西沙孤立碳酸盐台地发育演化划分为早中新世萌芽期、中中新世繁盛期、晚中新世—上新世淹没期、第四纪现代环礁4个阶段。本次研究弥补了以往对西沙孤立碳酸盐台地发育演化研究的不足。

关键词: 层序地层; 地震相识别; 孤立碳酸盐台地; 发育模式; 永乐环礁

中图分类号: P736.3 **文献标识码:** A

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

LI Xuelin^{1,2}, ZHANG Hanyu², LIU Gang³, HAN Xiaohui³, QIN Yongpeng², WU Shiguo²

1. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou, 510075, China
2. Laboratory of Marine Geophysics and Georesources, Institute of Deep-Sea Science and Engineering, CAS, Sanya 572000, China
3. Institute of Marine Geology Survey and Research, Hainan Province, Haikou 570206, China

Abstract: The Yongle Atoll is a typical modern isolated carbonate platform, which has recorded a complete evolutionary history of biological reefs and carbonate platforms in the Xisha Area. Based on the newly acquired high-resolution multi-channel seismic data, combined with the research results of Well CK-2 in the Yongle Atoll and Well XK-1 in the east of Yongle Atoll, the sequence stratigraphy of the Yongle Atoll is studied, the evolution of the Atoll discussed, and the evolutionary model for the Xisha isolated carbonate platform established. Based on the change in seismic reflection isophase characteristics, five sequences, i.e. Sq1 (Lower Miocene), Sq2 (Middle Miocene), Sq3 (Upper Miocene), Sq4 (Pliocene), and Sq5 (Quaternary) were divided from the bottom up. And the chronostratigraphic framework of the Yongle Atoll was established upon the basis. The depositional environment of the platform dominated by lagoons has been relatively stable since Miocene. The platform slope used to be a neritic environment in Early Miocene where biological reefs well developed. It has been a bathyal sedimentary environment since Miocene up to the present. Gravity flow deposits originated from the top of the platform, as Quaternary contour current deposits are also observed on the western slope of the platform. The development and evolution of the isolated carbonate platform in the Xisha may be divided into four stages: initiation in Early Miocene, large-scale carbonate platform growth in Middle Miocene, drowning period in Late Miocene-Pleistocene, and an atoll at present. This study makes up the shortcomings of previous studies on the development and evolution of isolated carbonate platforms in the Xisha Islands.

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); 国家科技重大专项课题“南海中建海域深水油气地质条件及目标评价”(2017ZX05026-006); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190209; DD20190216)

作者简介: 李学林(1994—), 男, 助理工程师, 主要从事海洋地质、海洋地球物理方向的研究, E-mail: lixl@idsse.ac.cn

通讯作者: 吴时国(1963—), 男, 研究员, 主要从事海底构造、海洋地质和天然气水合物研究, E-mail: swu@idsse.ac.cn

收稿日期: 2019-11-19; **改回日期:** 2020-01-19. 文凤英编辑

Key words: sequence stratigraphy; seismic facies identification; isolated carbonate platform; development model; Yongle Atoll

层序地层学通常用于由构造、相对海平面变化等因素控制可容纳空间的大陆架沉积学研究。在地质背景较稳定的区域,前人已经从滨海到深水盆地对层序界面和体系域做了很好的研究和解释,建立了经典的层序地层学模型^[1-2]。然而在地质活动较复杂的区域,尤其是构造活动较强烈的海相碳酸盐台地,层序地层学研究较少。实际上,碳酸盐台地的层序地层和沉积结构受多种因素控制,例如构造,相对海平面变化,碳酸盐岩生产力,陆源碎屑物质输入和古海洋学等^[3-7]。热带低纬度碳酸盐岩沉积层序的结构还取决于生物礁的生长速度、侵蚀速度、可容纳空间等因素^[5-8]。

在巴布亚新几内亚湾,澳大利亚东部和大巴哈马滩地区,对淹没的孤立碳酸盐台地进行了地震成像^[9-11]。然而在大多数现代台地的浅潟湖和礁滩中,很少进行高质量的地震成像调查,这限制了我们对现代孤立碳酸盐台地演化的研究。永乐环礁的碳酸盐岩自早中新世开始发育,一直延续至今,演变为西沙海域典型的孤立碳酸盐台地。它记录了西沙海域碳酸盐台地生物礁的整个兴衰历史,为西沙碳酸盐台地层序地层发育演化及其沉积模式研究提供了良好的场所。本文利用层序地层理论基础和井震联合的方法,对新获取的过永乐环礁(图1)高分辨率多道地震资料进行解释。详细描述了地震反射同相轴的终止特征,并结合琛科2井^[12-16]和西科1井^[17]钻井(图2)资料,建立起环礁及其斜坡区的层序地层格架。在层序地层格架的约束下,

根据各个时期的地质背景结合特殊的地震相特征,对不同地震相进行解释,最后讨论了西沙孤立碳酸盐台地自发育以来的演化模式。

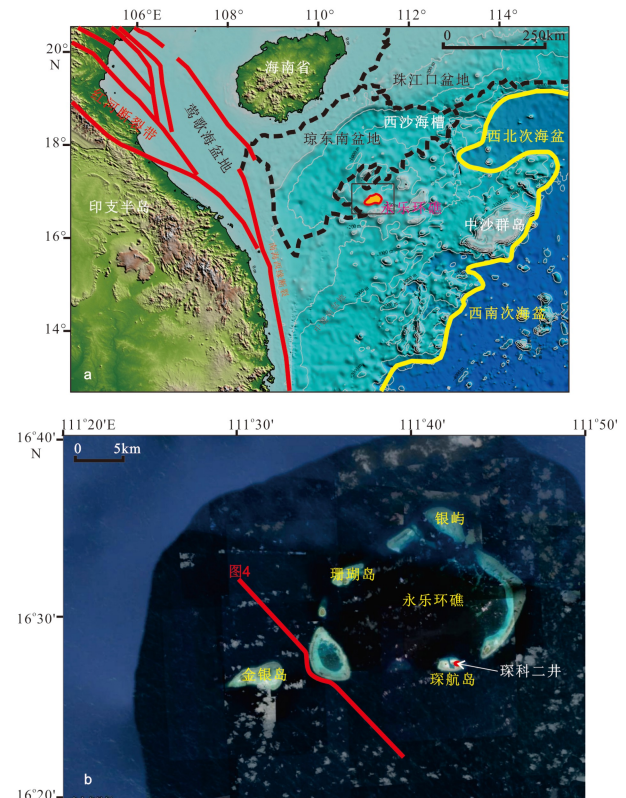


图1 研究区地形地貌位置和地震测线位置图
Fig.1 Topographic map and position of seismic tracks in the study area

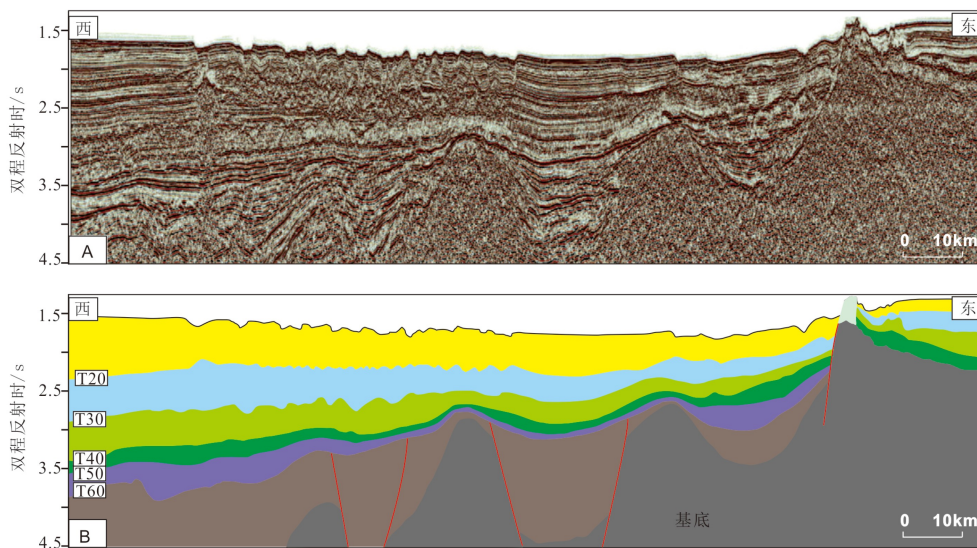


图2 西沙碳酸盐台地地震层序划分^[10]
Fig.2 Seismic stratigraphy on the Xisha carbonate platform^[10]

1 区域地质背景

西沙群岛位于西沙海槽南部、中沙群岛西北部,坐落于中建拗陷与西北次海盆之间(图1a)。西沙群岛所处的南海北部大陆坡自新生代以来依次经历了裂谷期、区域热沉降期以及新构造活动期^[18]。从构造上看,西沙群岛属于西沙隆起,新生代裂谷时期,断层活动强烈,两侧高角度大规模的断层活动形成了大区域的地垒,这个地垒就是早期的西沙隆起^[19-21]。自中新世以来,由于海平面变化和两次区域性的构造沉降作用,西沙隆起逐渐被海水淹没,中建海槽和西沙海槽阻挡了南海西部和北部的陆源碎屑物质使之无法运输至西沙海域,从而使西沙隆起区域转变为适于碳酸盐岩沉积和生物礁生长的清水环境^[22-23]。基于对南海北部陆缘采集的大量地震资料和钻井资料,前人认为自中新世开始,西沙海域前期沉积了大规模的碳酸盐岩,形成了厚层的碳酸盐台地,后期台地逐渐被淹没,现今仅在部分岛礁区域继续沉积碳酸盐岩^[24-25]。前人结合大范围的地震资料和钻井资料,揭示了西沙海域碳酸盐台地的演化历史。根据其各个时期的分布情况,将西沙碳酸盐台地演化分为4个阶段:初始阶段(早中新世早期)、繁盛阶段(早中新世晚期—中中新世)、衰退阶段(晚中新世)和淹没阶段(上新世—现今)^[24, 26-27]。

永乐环礁位于中国西沙群岛中部,其主要由潟湖和礁环两大部分组成。潟湖水深0~50 m,其通过多个水道与外海相连,这些水道将礁环分割为多个礁盘^[28-29]。永乐环礁沉积物主要为生物碎屑碳酸盐岩,沉积物来源主要为生物成因,外界物质输入占极少量^[29]。永乐碳酸盐台地现今表现为晚新生代孤立碳酸盐台地,由最新钻探的琛科2井指示永乐环礁碳酸盐台地厚度为878.21 m^[16]。本文根据前人对西沙海域层序地层和地震层序地层划分方案^[24](图2),结合琛科2井和西科1井(图3)资料^[12-16, 30]对永乐环礁晚新生代地层进行了划分和厘定并得出该区的沉积模式。

2 数据和方法

本文研究主要基于2017年度海南省海洋地质调查研究院组织、中国科学院深海科学与工程研究所参与的西沙永乐环礁地震探测航次所采集的高分辨率多道地震数据。此航次采用方法为船载小

道间距多道地震勘探,针对密度较高且地震波传播速度较快的碳酸盐台地进行岛礁地震探测。本航次震源为主频100~120 Hz的520in3Mini-GI组合枪阵,震源深度3 m,震源炮间距为12.5 m,偏移距69.7~466.575 m。采集系统为道间距3.125 m的128道的高分辨率地震拖缆采深2~3 m。本航次采用拖曳式连续作业的方式在西沙永乐海域台地顶部-斜坡-深水盆地的整个区域进行了413 km的高分辨率地震数据采集。表1对比本航次和近年来国际上针对岛礁地震探测航次的采集参数,其相比于

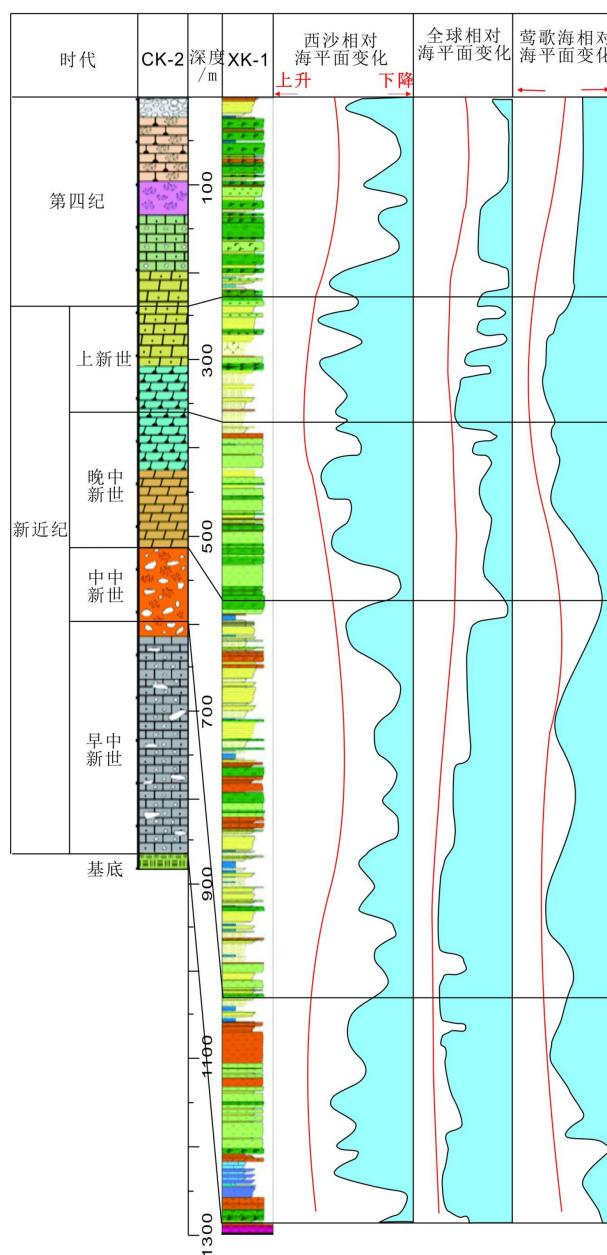


图3 琛科2井和西科1井的岩心柱以及西沙海域海平面变化曲线^[12,30]

Fig.3 Stratigraphic column from wells CK-2 and XK-1, Global sea-level curve is from Shao^[12,30]

表 1 岛礁地震探测航次采集参数对比
Table 1 Comparison of seismic acquisition parameters for reef island

采集参数	2010年巴哈马Caranar航次	2007年马尔代夫M74/4航次	2017年永乐环礁高分辨率地震探测航次
接受道数/道	96	144	128
测线间距/km	斜坡区2.5	不详	主测线2.5~5
道间距/m	6.25	6.25	3.125
最小偏移距/m	不详	不详	69.7
炮间距/m	不详	25	12.5
震源容量	Mini-GI 24in ³	组合Mini-GI 105in ³	组合Mini-GI 520in ³
信号频道/Hz	40~350	主频100~120	主频100~120

国际上 2007 年的马尔代夫 M74/4^[31] 和 2010 年的巴哈马 Carambar^[11] 的岛礁地震探测航次,在多方面均体现出高分辨率的优势。地震资料处理与解释均使用 geocast 软件^[32]。

3 结果

对新获得的高分辨率地震数据进行层序地层解释是基于对地震反射同相轴特征的分析,包括反

射终端、几何关系、反射形状、反射连续性以及振幅极性和强度^[33-36]。根据前人对西沙海区层序地层的划分方案^[24](图 3),我们在新采集的多道地震剖面上识别出了 5 个层序(Sq1、Sq2、Sq3、Sq4、Sq5,图 4)。这些层序分别被 T60、T50、T40、T30、T20 所限定,Tg 在研究区不发育。再根据地震同相轴的内部反射结构和外部形态差异,识别出了不同地震相(图 5)。

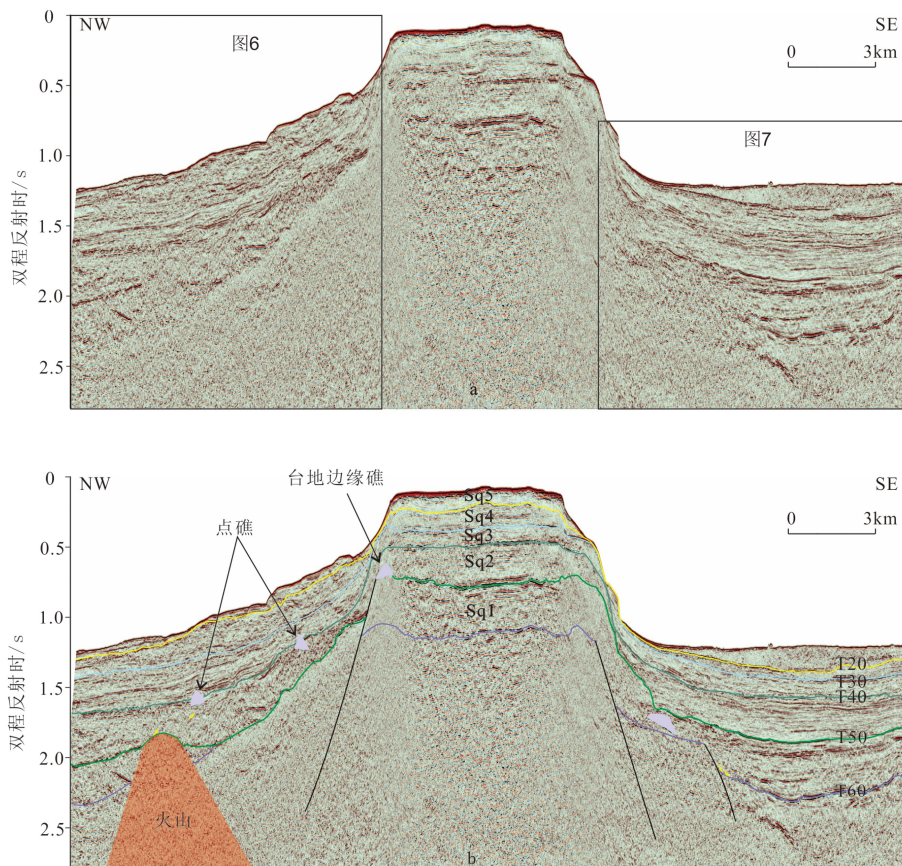


图 4 永乐环礁地震层序划分
Fig.4 Seismic sequence of Yongle atoll

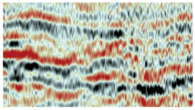
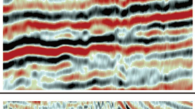
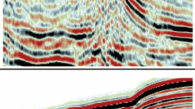
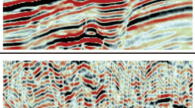
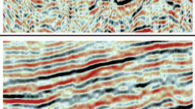
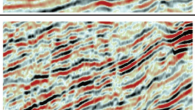
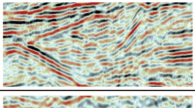
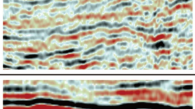
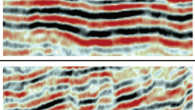
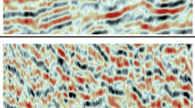
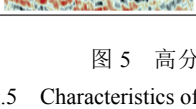

地震相	反射特征	解释
a 	较连续, 中等振幅, 波浪-水平亚平行反射	潟湖; 喀斯特; 晚期台地内部
b 	连续, 中等-强振幅, 波浪-水平平行反射	潟湖; 早期台地内部
c 	不连续, 中等振幅, 弱平行杂乱反射	礁
d 	较连续, 强振幅, 平行反射	等深流沉积
e 	不连续, 中等-强振幅, 杂乱反射	块体搬运体系
f 	连续-弱连续, 中等振幅, 平行-亚平行反射	浊流沉积
g 	不连续, 中等-强振幅, 杂乱反射	浊流沉积
h 	不连续, 中等振幅, 弱平行-杂乱反射	水道沉积
i 	较连续, 中等振幅, 较水平平行反射	浅海沉积
j 	连续, 强振幅, 平行反射	半远洋沉积
k 	较连续, 中等-强振幅, 平行反射	硅质-碳酸盐 岩碎屑沉积
l 	不连续, 中等-强振幅, 杂乱反射	基底

图 5 高分辨率地震数据中识别出的特殊地震相

Fig.5 Characteristics of seismic facies defined from the high-resolution data set

3.1 层序地层划分

3.1.1 Sq1 早中新世层序

早中新世层序(Sq1)台地斜坡区的地震相整体以亚平行、弱—中振幅、较连续—弱连续、中—较高频率为特征。台地顶部的地震相主要以平行—亚平行、弱—中振幅、较连续为主要特征。T60 界面为下中新统的底界, 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。上覆地层沿 T60 界面上超终止, T50 界面为中中新统与下中新统的分界, 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(图 4)。

3.1.2 Sq2 中中新世层序

中中新世层序(Sq2)台地斜坡区西部以一组中等振幅、丘状反射为特征, 有明显上超反射; 东部地震相整体以席状—丘形、平行—亚平行、弱—中振幅、较连续—弱连续、中—较高频率为特征。台地顶部的地震相主要呈现平行—亚平行、弱—中振幅、较连续的特征。T40 界面为上中新统与中中新统的分界, 界面表现为强振幅、连续性好的平行、亚平行结构, 表明该时期是大规模海泛时期(图 4)。

3.1.3 Sq3 晚中新世层序

晚中新世层序(Sq3)台地斜坡区西部下半部分以一组弱—中振幅、平行—亚平行、较连续反射为特征,上半部分地震特征表现为弱—中等振幅,弱连续杂乱反射;东部地震相整体以平行—亚平行、弱振幅、较连续—弱连续为特征。台地顶部的地震相主要呈现平行—亚平行、弱—中振幅、较连续的特征。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(图4)。

3.1.4 Sq4 上新世层序

上新世层序(Sq4)台地斜坡区包括两组地震相:一组为中振幅、平行、连续性好的地震相;另一组为规模小、强振幅、不连续的地震反射。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。台地顶部的地震相主要呈现平行—亚平行、弱—中振幅、较连续的特征。T20界面为上新统与第四纪的分界,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(图4)。

3.1.5 Sq5 第四纪层序

第四纪层序(Sq5)斜坡区包括两组地震相:一组为中—高振幅、平行、连续性好的地震相;另一组为中等振幅、不连续的杂乱地震反射,代表了重力流碳酸盐岩碎屑。台地顶部地震相主要呈现平行—亚平行、弱振幅、较连续的特征(图4)。

3.2 地震相类型

根据内部反射构造和外部几何形状,共识别了12个地震相。台地区地震相为中—高振幅、平行反射。晚期台地顶表面表现为高振幅反射,覆盖在具有几种抛物线形状的不规则和半连续反射之上(图5a)。这种模式很可能是由于台地在晚期发育过程中其顶部发生强烈的岩溶作用而形成的喀斯特地貌。早期台地特征是具有强连续性和平行关系的中高振幅反射(图5b)。反射振幅的变动被解释为潟湖到滨海环境的交替变化。这些反射同相轴常常具有低角度的倾斜。在台地边缘区,反射同相轴通常由横向发展成丘状或凹面状,这些丘状反射通常具有较强的顶部反射和较弱的内部杂乱反射(图5c)。这种地震相被解释为台地边缘礁或障壁礁。

台地斜坡区呈现了9种不同的地震相。其中西部斜坡区表层主要为图5d地震相,其主要为较连续较强振幅的平行反射,被解释为等深流沉积。东

部斜坡区表层主要为较大规模的杂乱反射呈楔状展布,其内部表现不连续、中等振幅的特征(图5e),该地震相被认为是块体搬运沉积体系。在斜坡区较深地层区域,其地震相主要表现为较连续中等振幅的平行反射地震相(图5f),并且其中穿插了不连续中等—强振幅的杂乱反射(图5g)和不连续中等振幅的弱平行—杂乱反射(图5h),被解释为斜坡区先发育浊流沉积,后期局部被水道侵蚀。在斜坡少数区域发育连续强振幅的平行反射(图5j),这些地震相被认为是斜坡上缓慢沉降的半远洋沉积。在斜坡区深部区域发育大规模较连续中等振幅的平行反射(图5i)和较小规模较连续中等—强振幅的平行反射(图5k),被认为斜坡早期沉积了浅海沉积和硅质—碳酸盐岩碎屑沉积。其发育基底地震相表现为不连续、中等—强振幅的杂乱反射(图5l)。

4 永乐碳酸盐台地的演化过程

根据永乐碳酸盐台地各个层序的地震反射特征,结合琛科2井以及西科1井的沉积相研究成果,我们进一步讨论了永乐碳酸盐台地的演化。

在早中新世期间,随着相对海平面升高,永乐区域逐渐处于水面之下,开始生长生物礁,沉积碳酸盐岩。由于相对海平面上升较快(图3),仅地势较高区域碳酸盐岩产出速率跟得上相对海平面上升速率,因此地势较高的区域逐渐演变为碳酸盐台地,台地顶部形成潟湖。随着相对海平面上升,地势相对较低的凹陷区率先进入滨浅海环境,地势相对较高的陡坡区域在强水动力作用下,不仅很难沉积碳酸盐岩,而且部分暴露基岩还会被破坏剥蚀;与此同时,台地顶部已形成的碳酸盐岩也会由于潮汐或风暴潮作用被剥蚀。这些被剥蚀的基岩碎屑和碳酸盐碎屑会被水流搬运至水动力作用相对较弱的凹陷区而沉积(图6,7)。永乐环礁东部的斜坡坡度较小,整个斜坡区几乎同步进入滨浅海环境,碳酸盐碎屑沉积上覆于早期斜坡处生长的生物礁(图6)。

在中中新世,相对海平面较高(图3),碳酸盐岩的可容纳空间较大,碳酸盐台地纵向生长并且横向扩张。台地西部斜坡区地势变化较大。近端斜坡随着海平面上升开始进入浅水环境,开始生长生物礁并且沉积来自台地顶部的碳酸盐岩碎屑;斜坡远端随着海平面快速上升而处于半深海环境,主要发育浊流沉积,沉积物来源于台地顶部和近端斜坡的碳酸盐岩碎屑。此外,西部斜坡在中中新世末期发

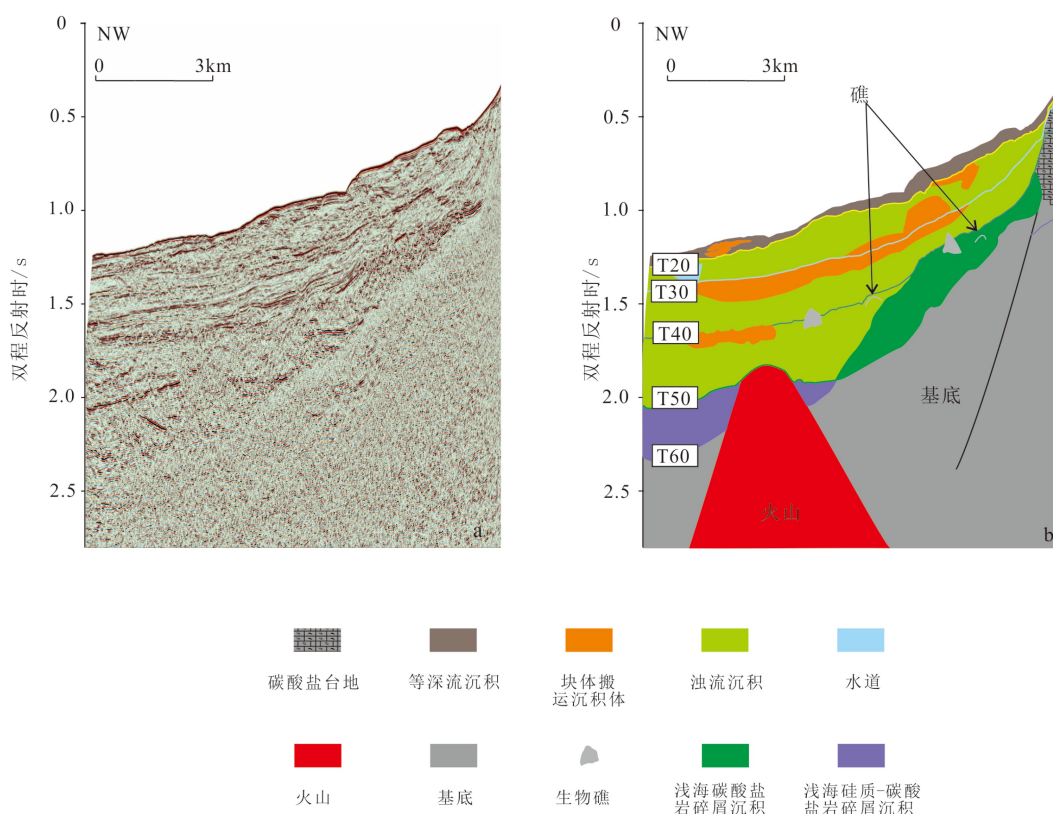


图 6 永乐环礁西部斜坡解释剖面

Fig.6 An interpretation of the western slope of Yongle Atoll

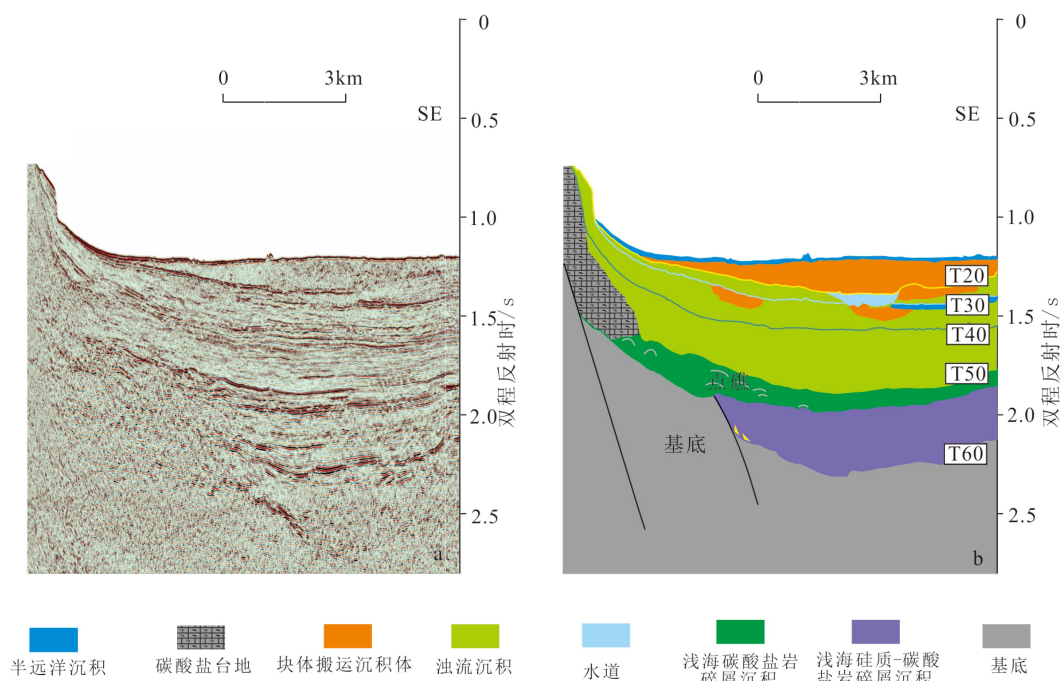


图 7 永乐环礁东部斜坡解释剖面

Fig.7 An interpretation of the Eastern slope of Yongle Atoll

育块体搬运沉积体, 来源于斜坡的滑坡。这些浊流沉积和块体搬运沉积体统称为重力流沉积。重力流在搬运过程中, 可能会侵蚀下伏地层, 形成不整

合面。浊流沉积的地震反射与块体搬运沉积相比, 相对连续, 块体搬运沉积的地震反射杂乱且不规则。东部斜坡区自中中新世早期便处于半深海环

境,发育重力流,沉积来自台地顶部搬运而来的碳酸盐岩碎屑(图7)。

晚中新世和上新世期间,相对海平面快速上升(图3),台地顶部的环礁区被逐渐淹没,潟湖增大,随着相对海平面持续快速上升,台地生长速度可能减缓最后逐渐被淹没,其斜坡区沉积主要为重力流沉积。晚中新世早期主要以浊流为主,后期大规模发育块体搬运沉积体(图6,7)。上新世浊流沉积和块体搬运沉积体互层发育且伴有水道侵蚀。沉积物皆为自台地顶部搬运下来的碳酸盐岩碎屑(图6,7)。

第四纪相对海平面开始下降(图3),已淹没的台地顶部再次生产碳酸盐岩。其西部斜坡区主要发育等深流沉积和小规模的重力流沉积(图6)。东部斜坡区,早期发育了半深海沉积,但均被后期大规模的重力流破坏,沉积了一大套杂乱的碳酸盐岩碎屑,之后又沉积了薄层的半深海沉积,覆盖在重力流沉积之上(图7)。

5 西沙孤立碳酸盐台地的发育模式

永乐碳酸盐台地记录了西沙海域碳酸盐台地生物礁的整个兴衰历史,是西沙海域孤立台地的典型代表。在前人对西沙海域碳酸盐台地演化历史研究^[24]的基础上,本文根据对永乐环礁地层结构特征研究,结合了琛科2井和西科1井^[12-17],进一步建立了西沙孤立碳酸盐台地的发育演化模式,其被分为早中新世萌芽期、中中新世繁盛期、晚中新世—上新世淹没期、第四纪现代环礁4个阶段(图8)。

5.1 早中新世萌芽期

早中新世期间,西沙隆起周围存在琼东南盆地和中建南盆地的半深海海槽,这些海槽将陆源碎屑物质阻挡在广乐隆起而无法到达西沙区域^[24]。因此随着相对海平面上升,西沙隆起转变成适宜碳酸盐岩和生物礁生长的环境。早中新世初期,造礁生物开始在一些高地繁殖生长,形成规模不大、成熟度低的礁体,如补丁礁或灰泥丘。随后生物礁大量发育,碳酸盐岩侧向和垂向沉积,形成了大规模的碳酸盐台地,台地顶部出现潟湖沉积(图8a)。

5.2 中中新世繁盛期

随着相对海平面的持续上升,碳酸盐岩的生产也形成了追赶型模式,层序上呈现出明显的向上加积的形态,表明此时海平面的上升速度和碳酸盐岩

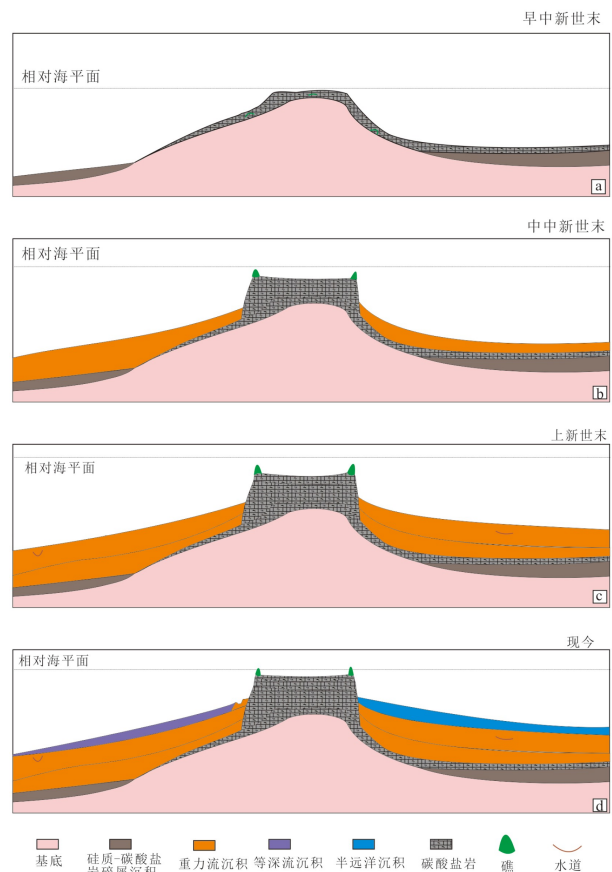


图8 永乐环礁发育演化模式

Fig.8 An evolutionary model of the Yongle Atoll

的生长速率接近。台地内部形成了潟湖,在地震剖面上,潟湖沉积物的特征是中等振幅和低振幅的平行反射,表明沉积环境稳定。由于潟湖提供了稳定且不含硅质碎屑的沉积环境,因此斑块礁能够在潟湖中生长。随着海平面上升速度的加快,碳酸盐岩的沉积逐渐向台地边缘地势高部位迁移,形成向上的台地边缘礁(图8b)。

5.3 晚中新世—上新世淹没期

晚中新世—上新世期间,相对海平面的继续快速上升导致台地逐渐被淹没,台地周缘已进入半深海环境,碳酸盐台地也演变为孤立碳酸盐台地。生物礁集中向台地边缘地势高点收缩而形成障壁礁,障壁礁围起的潟湖内部不再生长生物礁,其沉积物主要为生物碎屑(图8c)。

5.4 第四纪现代环礁

第四纪期间,相对海平面缓慢下降,台地边缘先前形成的障壁礁逐渐露出水面,形成了现今的岛礁。内部潟湖少数区域重新开始生长生物礁,但沉积物依然主要由生物碎屑组成(图8d)。

6 结论

(1) 利用新获取的高分辨率岛礁地层地震剖面,在岛礁地层识别出 T60(早中新世底)、T50(中中新世底)、T40(晚中新世底)、T30(上新世底)、T20(第四纪底)5个地震层序界面,将岛礁地层划分为5个地震层序,分别是 Sq1(下中新统)、Sq2(中中新统)、Sq3(上中新统)、Sq4(上新统)、Sq5(第四系)。

(2) 永乐碳酸盐台地顶部自晚新生代以来持续生长生物礁,沉积碳酸盐岩。早中新世早期在构造高点处开始生长生物礁,随后逐渐演变成潟湖环境;早中新世至中中新世,碳酸盐岩纵向生长并且横向扩张,形成了相当规模的碳酸盐台地;自晚中新世开始,碳酸盐台地逐渐被淹没,其生物礁向台地边缘的构造高点处迁移;第四纪,相对海平面逐渐下降,台地顶部再次零星生长生物礁。其斜坡区早中新世期间发育浅海沉积,其沉积物来源早期为硅质碎屑和碳酸盐岩碎屑混合,后期主要为碳酸盐岩碎屑;中中新世开始斜坡沉积环境逐渐演变为半深海,开始发育重力流沉积,其沉积物主要为自台地及其周缘搬运而来的碳酸盐岩碎屑;斜坡区在上新世期间还发育水道侵蚀,其西部斜坡第四纪还发育等深流沉积。

(3) 西沙孤立碳酸盐台地自新近纪发育以来分为4个阶段,分别为早中新世萌芽期、中中新世繁盛期、晚中新世—上新世淹没期、第四纪现代环礁。

参考文献 (References)

- [1] Vail P R, Colin J P, Duchene R J, et al. Sequence stratigraphy and its application to the chronostratigraphic correlation of the Paris basin Jurassic [J]. Bulletin Societe Geologique France, 1987, 3(7): 1301-1330.
- [2] Posamentier H W, Vail P R. Eustatic controls on clastic deposition II-Sequence and systems tract models [M]//Sea-Level Changes: An Integrated Approach. Tulsa, Okla: SEPM, 1988: 125-154.
- [3] Betzler C, Hübscher C, Lindhorst S, et al. Monsoon-induced partial carbonate platform drowning (Maldives, Indian Ocean) [J]. Geology, 2009, 37(10): 867-870.
- [4] Eberli G P, Ginsburg R N. Comment and reply on "Segmentation and coalescence of Cenozoic carbonate platforms, northwestern Great Bahama Bank": Reply [J]. Geology, 1987, 15(11): 1082.
- [5] Schlager W, Warrlich G. Record of sea-level fall in tropical carbonates [J]. Basin Research, 2009, 21(2): 209-224.
- [6] Wilson M E J. Cenozoic carbonates in Southeast Asia: implications for equatorial carbonate development [J]. Sedimentary Geology, 2002, 147(3-4): 295-428.
- [7] Wilson M E J. Global and regional influences on equatorial shallow-marine carbonates during the Cenozoic [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2008, 265(3-4): 262-274.
- [8] Fournier F, Montaggioni L, Borgomano J. Paleoenvironments and high-frequency cyclicity from Cenozoic South-East Asian shallow-water carbonates: a case study from the Oligo-Miocene buildups of Malampaya (Offshore Palawan, Philippines) [J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21(1): 1-21.
- [9] Webster J M, Wallace L, Silver E, et al. Drowned carbonate platforms in the Huon Gulf, Papua New Guinea [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2004, 5(11): Q11008.
- [10] Rankey E C. Seismic architecture and seismic geomorphology of heterozoan carbonates: Eocene-Oligocene, Browse Basin, Northwest Shelf, Australia [J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 82: 424-443.
- [11] Principaud M, Ponte J P, Mulder T, et al. Slope-to-basin stratigraphic evolution of the northwestern Great Bahama Bank (Bahamas) during the Neogene to Quaternary: interactions between downslope and bottom currents deposits [J]. Basin Research, 2017, 29(6): 699-724.
- [12] 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.
- [13] Jiang W, Yu K F, Fan T L, et al. Coral reef carbonate record of the Pliocene-Pleistocene climate transition from an atoll in the South China Sea [J]. Marine Geology, 2019, 411: 88-97.
- [14] Wang R, Jones B, Yu K F. Island dolostones: Genesis by time-transgressive or event dolomitization [J]. Sedimentary Geology, 2019, 390: 15-30.
- [15] 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.
- [16] Zhang Y, Yu K F, Qian 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: 571-583.
- [17] 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.]
- [18] 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, 541. [ZHANG Gongcheng. Tectonic evolution of deepwater area of northern continental margin in South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 528-533, 541.]
- [19] 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(1-4): 179-193.
- [20] 朱伟林, 谢习农, 王振峰, 等. 南海西沙隆起基底成因新认识 [J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(12): 1460-1468. [ZHU Weilin, XIE Xinong, WANG Zhenfeng, et al. New insights on the origin of the basement of the Xisha uplift, South China Sea [J]. Scientia Sinica

- Terrae*, 2017, 47(12): 1460-1468.]
- [21] Li C F, Li J B, Ding W W, et al. Seismic stratigraphy of the central South China Sea basin and implications for neotectonics [J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2015, 120(3): 1377-1399.
- [22] 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.]
- [23] 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.]
- [24] 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.
- [25] 杨振, 张光学, 张莉, 等. 西沙海域中新世碳酸盐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. [YANG Zhen, ZHANG Guangxue, ZHANG Li, et al. The spatial-temporal distribution of miocene carbonate platform in the Xisha sea area and its model of hydrocarbon accumulation [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(6): 1360-1373.]
- [26] 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.
- [27] 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*, 2011, 40(3): 770-783.
- [28] 张汉羽, 吴时国, 韩孝辉, 等. 岛礁地震资料特征分析及处理流程——以西沙永乐环礁为例[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(6): 172-184. [ZHANG Hanyu, WU Shiguo, HAN Xiaohui, et al. Characteristics of seismic data and its processing procedures in the areas of Reef Islands—a case from Yongle Atoll of Xisha Islands [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(6): 172-184.]
- [29] 刘刚, 何其江, 李亮, 等. 西沙群岛永乐环礁潟湖沉积速率及地球化学特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(6): 69-77. [LIU Gang, HE Qijiang, LI Liang, et al. Sedimentation rate and geochemical characters of the lagoonal deposits in the Yongle Atoll, Xisha Islands [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(6): 69-77.]
- [30] 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.
- [31] Betzler C, Fürstenau J, Lüdmann T, et al. Sea-level and ocean-current control on carbonate-platform growth, Maldives, Indian Ocean [J]. *Basin Research*, 2013, 25(2): 172-196.
- [32] 王子兰, 王仕俭, 李素闪, 等. GeoEast处理解释一体化应用[J]. *天然气工业*, 2007, 27(S1): 222-224. [WANG Zilan, WANG Shijian, LI Sushan, et al. GeoEast processing and interpretation of integrated applications [J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(S1): 222-224.]
- [33] Fontaine J M, Cussey R, Lacaze J, et al. Seismic interpretation of carbonate depositional environments [J]. *AAPG Bulletin*, 1987, 71(3): 281-297.
- [34] Paumard V, Zuckmeyer E, Boichard R, et al. Evolution of Late Oligocene-Early Miocene attached and isolated carbonate platforms in a volcanic ridge context (Maldives type), Yadana field, offshore Myanmar [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 81: 361-387.
- [35] Shahzad K, Betzker C, Ahmed N, et al. Growth and demise of a Paleogene isolated carbonate platform of the Offshore Indus Basin, Pakistan: effects of regional and local controlling factors [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2018, 107(2): 481-504.
- [36] Shahzad K, Betzker C, Qayyum F. Controls on the Paleogene carbonate platform growth under greenhouse climate conditions (Offshore Indus Basin) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 101: 519-539.