

崔浩楠, 吴能友, 谈明轩, 等. 三亚崖州湾海域上新世以来地震层序地层研究[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(8): 65-75.

CUI Haonan, WU Nengyou, TAN Mingxuan, et al. On seismic sequence stratigraphy since the Pliocene in Yazhou Bay, Sanya, Hainan Island[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(8): 65-75.

## 三亚崖州湾海域上新世以来地震层序地层研究

崔浩楠<sup>1,2,3</sup>, 吴能友<sup>1,3\*</sup>, 谈明轩<sup>1\*</sup>, 黄诚<sup>2</sup>, 龙军桥<sup>2</sup>, 颜历<sup>2</sup>, 胡旋<sup>2</sup>, 邢子浩<sup>2</sup>, 邢景峰<sup>2</sup>, 郭泽俊<sup>2</sup>, 李央<sup>2</sup>

(1 河海大学海洋学院, 南京 210098; 2 中国地质调查局海口海洋地质调查中心, 海口 5571127;

3 崂山实验室, 青岛 266236)

**摘要:**地质环境的稳定是支持人类社会生存和发展的基础条件之一,对三亚崖州湾海域地层地震相和沉积相进行研究,对该地区的演化过程及未来演化趋势具有科学意义。根据二维地震资料,以层序地层学为理论指导将崖州湾海域地层划分出3个三级层序,自下而上依次命名为SQA、SQB、SQC。在SQA和SQB层序内部以最大海侵面为界划分了海侵体系域和高位体系域,SQC层序还未发育完全,只存在海侵体系域。在研究区的层序地层格架内识别出平行-亚平行反射地震相、下凹状地震相和前积反射地震相3种地震相类型。根据地震相展布特征,认为崖州湾海域沉积地层主要发育三角洲、滨海及浅海3种沉积相类型。上新世以来随着海平面的升降、气候变化及受其影响的物源供给水平变化,研究区由浅海相过渡到三角洲相,最后到现在的滨海相。

**关键词:**崖州湾; 上新世; 地震层序; 地震相; 沉积演化

中图分类号: P736; P631.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.047

### 0 引言

崖州湾位于海南岛南部,毗邻南海北部,地处海陆交汇地带,其地质环境复杂多变,对周边环境变化表现出高度敏感性。沉积物的搬运和沉积受多种因素的影响,包括气候变化、海平面波动以及地质构造活动。该区域对气候变化和海平面上升的响应较为敏感,是研究气候变暖和海平面上升背景下环境演化的理想地点。同时,深入研究崖州湾海域自上新世以来的沉积演化及其控制因素,可以对该区域的开发利用和保护提供重要的基础资料 and 理论支持。

收稿日期: 2024-02-28

资助项目: 中国地质调查局项目“海南海棠湾-崖州湾海岛(礁)综合地质调查”(DD20220992)

第一作者: 崔浩楠(1998—),男,在读硕士,主要从事海洋地质方面的研究工作。E-mail: 1037415527@qq.com

\* 通讯作者: 吴能友(1965—),男,博士,研究员,主要从事海洋地质与天然气水合物方面的研究工作。E-mail: wuny@ms.giec.ac.cn

谈明轩(1990—),男,博士,副教授,主要从事沉积学、层序地层学方面的研究工作。E-mail: mxtan@hhu.edu.cn

海南岛上新世以来的层序地层学研究主要集中在海南岛北部<sup>[1-4]</sup>,南部三亚地区利用地震开展层序研究和工作的较少,相关研究多集中在海南岛陆架以下的琼东南盆地及莺歌海盆地,且层序级别较大,陆架之上缺少更细致的划分方案。三亚地区沉积环境的研究多集中在晚更新世以来,针对上新世和早更新世的研究还很薄弱,前人多利用岩性、古生物和有机地球化学等方法对三亚市南部海域进行沉积学研究<sup>[5-9]</sup>,由于缺少地震层序地层的研究,本研究区上新世以来的沉积演化过程研究尚不明确。

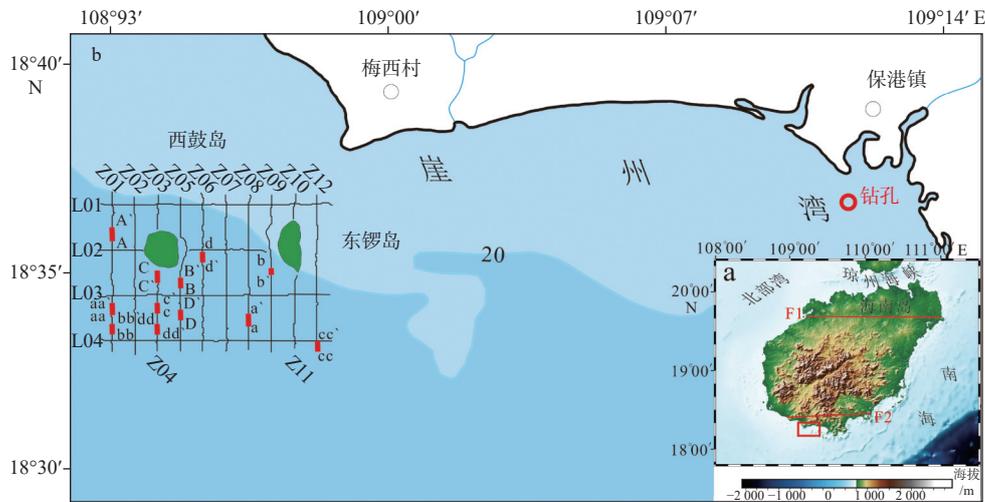
本文以三亚周边海岛附近海域上新世以来的沉积地层为研究对象,基于最新采集的二维地震数据建立区域地震层序格架,识别地震相类型与沉积相演化规律,明确沉积体系演化的控制因素,可为研究区的环境地质及工程建设提供可靠的地质资料,对崖州湾的开发利用及环境保护具有指导意义。

### 1 研究区地质概况

海南岛位于中国大陆的南端,地处欧亚板块、太平洋板块、印度板块的交汇位置,被北部湾-雷琼

盆地、莺歌海-琼东南盆地和珠江口盆地所环绕(图1a)<sup>[10-11]</sup>。前人以王五文教断裂带和九所陵水断裂带将海南岛分为琼北断陷区、琼中隆起区和琼南断陷区<sup>[12]</sup>。崖州湾位于三亚市西南部,海湾面积约61 km<sup>2</sup>。崖州湾位于琼南断陷区。新生代以来构造活动处于相对稳定时期,构造运动以间歇性的升降运动为主<sup>[13-15]</sup>。研究区基底为三叠系花岗岩,上覆地层自下而上依次为:上新统望楼港组,岩性以砂岩和粉砂质黏土为主;下更新统秀英组到中更新统北海组,岩性为砂岩、粗砂-粉质黏土;

全新统烟墩组岩性主要为粉砂;缺失上更新统地层<sup>[7,13,15-16]</sup>。海底表层沉积物类型主要有粗砂、中砂、细砂3种,沉积物在平面上呈带状沿海岸线分布,宁远河入海方向沉积物为条带状细砂,细砂两侧对称沉积,依次为中砂和粗砂<sup>[17]</sup>。此前有学者通过全岩地球化学分析方法开展研究,结果表明,上新世以来研究区沉积物以海南岛陆源碎屑的输入<sup>[18-20]</sup>。根据研究区地理位置及表层沉积物研究判断,宁远河从研究区东北侧输送沉积物,对物源贡献较大<sup>[5]</sup>,因此,沉积体系整体呈NE—SW向发育。



(a)海南岛及周边地质构造图; (b) 三亚构造分区崖州湾研究区位置(F1-王五-文教断裂, F2-九所-陵水断裂<sup>[21]</sup>)

图1 三亚崖州湾研究区概况

Fig.1 Overview of Yazhou Bay, Sanya, Hainan Island

## 2 数据和方法

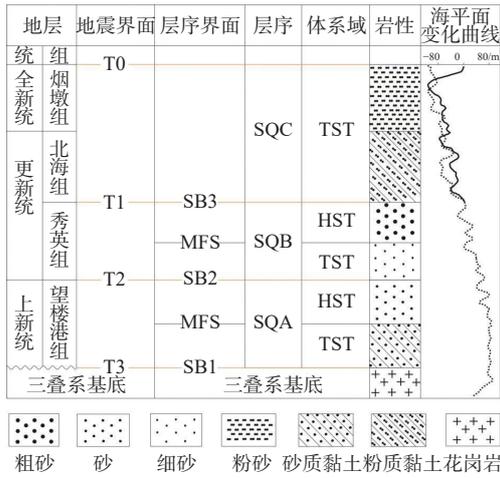
依托中国地质调查局海口海洋地质调查中心在三亚海域组织开展的海岛(礁)综合地质调查项目,利用单道地震设备采集地球物理数据。本次工作单道地震测线基础网度为0.75 km×1.5 km,二维地震测线总长55.47 km(测线位置见图1b),震源方式为GI气枪,因探测的地层剖面较浅,所以地震波主频率为25 Hz。导航定位系统采用广域差分GPS,定位精度在±2 m。选取2022年7月在研究区获取的单道地震数据,根据地震剖面的反射波结构特征和反射终止关系对地震层序进行识别和划分,从而确定主要反射界面和沉积层序。在建立层序地层格架后,选择地震信息中较为完整的内部结构和外部形态,并结合振幅、连续性等地震参数进行具体的划分和命名,以确定地震相类型及其空间分布规律。随后将地震相转化为沉积相,并结合沉积相

演化特征探讨其受控因素。

## 3 层序地层格架

层序界面特征的准确识别是建立层序地层格架的关键和基础<sup>[22]</sup>。根据此次研究区地震反射终止关系及地震反射差异特征的分析表明,崖州湾上新世以来的3个主要地震层序自下而上分别为望楼港组(SQA)、秀英组(SQB)和北海组烟墩组(SQC)。其中,SQA和SQB层序各自包含2个单元:海侵体系域(TST)和高位体系域(HST);SQC层序发育不完整,只存在一个海侵体系域(TST)单元。通过追踪闭合各地震层序界面,参考研究区的岩性资料<sup>[15]</sup>,建立起崖州湾层序地层格架(图2)。

层序界面可以表现为多种形式,通常在地震剖面上表现为强反射层,地层终止方式具有上超、下超、顶超及削蚀特征<sup>[24]</sup>。三亚崖州湾地震层序界面的识别主要根据这4种地震反射终止特征来确



据文献 [7,15,23] 修改

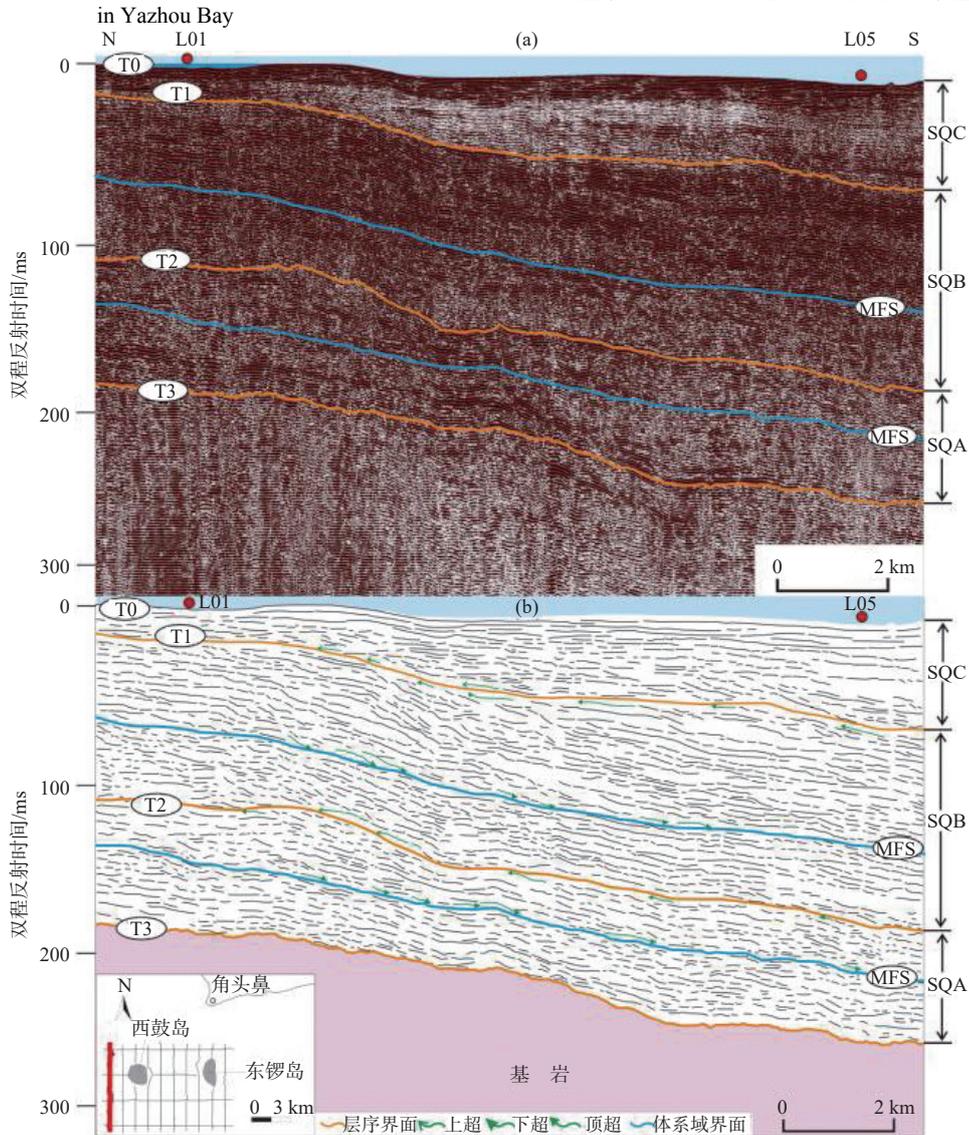
图 2 崖州湾海域层序地层划分方案

Fig.2 The division scheme of sequence stratigraphy

定。此次在研究区内识别出 1 个海底反射界面 (T0), 3 个地震界面 (T1、T2、T3) 和 2 个最大海侵面 (图 3)。由于研究区沉积物深度较浅, 取平均传播速度 1 600 m/s 进行时深转换。

### 3.1 层序界面

T1 界面深度范围在海平面以下 20~68 m, 横向上, 在近岸区域表现为反射振幅中等—强的反射界面, 为局部连续, 频率较为稳定。在离岸区域反射振幅逐渐变为强反射界面, 连续性好, 频率稳定, 主要呈波状反射和亚平行状反射特征 (图 3)。该界面之上反射终止关系主要表现为上超现象, 该界面之下反射终止关系主要表现为顶超 (图 4)。在平面上, 该界面东北部深度较浅, 主要集中在



(a)Z01 测线剖面; (b)Z01 测线剖面地震层序格架解释图

图 3 三亚崖州湾 Z01 测线上新世—第四系地震层序解释

Fig.3 The interpreted seismic stratigraphy from the Pliocene to the Quaternary of Line Z01 in Yazhou Bay, Sanya

20~35 m, 该界面深度由东北向西南逐渐延伸至 68 m(图 5a)。

T2 界面深度范围为海平面以下 56~156 m, 横

向上, 该界面同相轴整体表现为反射振幅中等一弱的反射界面, 局部反射振幅较大, 整体连续性一般。中部坡折区域同相轴较为连续, 频率中一低频, 整

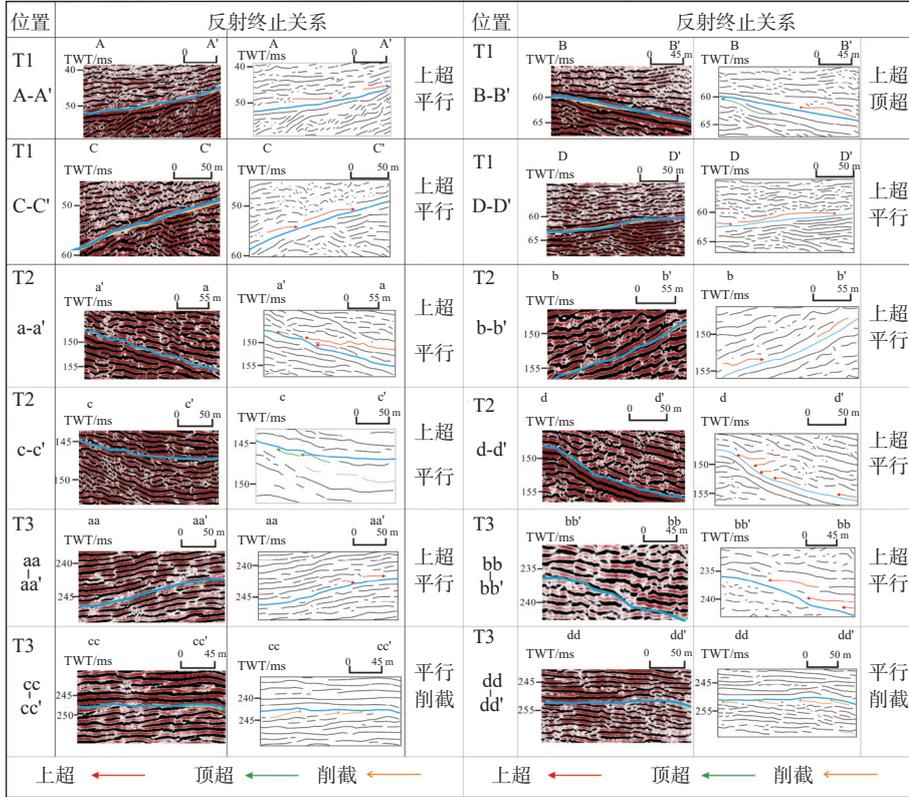
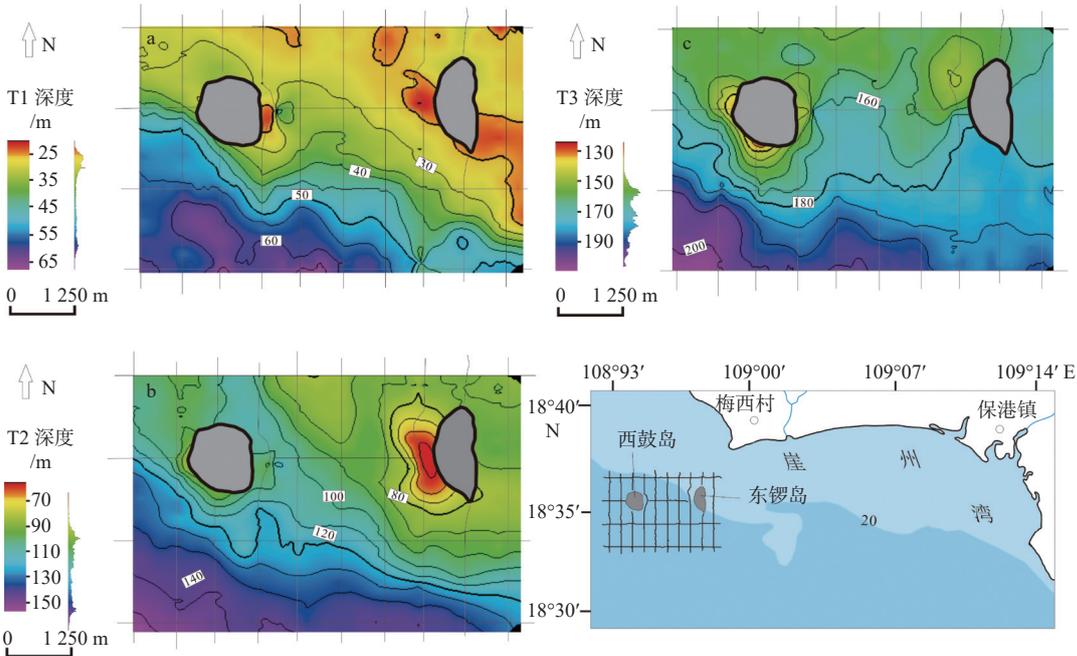


图 4 三亚崖州湾研究区上新统一第四系层序界面附近典型地震反射终止关系

Fig.4 Seismic reflection characteristics from the Pliocene to the Quaternary in Yazhou Bay, Sanya



(a)下更新统与中更新统分界面; (b)下更新统与上新统分界面; (c)上新统与基岩分界面

图 5 崖州湾地区关键层序界面古构造格局

Fig.5 Paleogeographic pattern of sequence interface in the Yazhou Bay

体较稳定(图 3)。该界面之上反射终止关系主要表现为上超和下超, 该界面之下反射终止关系主要表现为顶超(图 4)。深度上, 该界面东北部和西部西鼓岛区域深度较浅, 主要集中在 80~110 m, 东北部和西鼓岛区域之间 T2 界面深度较深, 达到 120 m, 西南方向界面较深, 介于 120~140 m(图 5b)。

T3 界面深度范围在海平面以下 128~208 m, 横向上, 同相轴反射振幅弱, 连续性差, 局部连续, 频率较为稳定; 反射界面主要随下伏基岩呈波状反射和亚平形状反射(图 3)。该界面是全区分布的一个不整合界面, 界面之上存在多处上超反射终止关系, 界面之下反射终止关系主要表现为削截现象(图 4)。该界面以下以杂乱反射为主, 没有连续的反射界面, 振幅弱。深度上, 界面西北部深度较浅, 主要集中在 150 m 以内, 界面深度由北向南逐渐延伸至 190 m 以上(图 5c)。

### 3.2 体系域界面特征

研究区位于大陆坡折带以上的大陆架地区, 地势平缓。该区域地层的发育受到海进和海退过程的控制, 这两个过程分别反映了岸线向陆地、向海洋方向迁移时形成的地层。基于经典层序地层学理论, 低位体系域通常发育于陆架坡折带之下。然而研究区整体位于大陆架之上, 故无法划分低位体系域。本研究识别出 2 套完整的海侵体系域(TST)和高位体系域(HST), 以最大海泛面(MFS)为分界面(图 3)。

SQA 层序内部以 MFS1 为界识别出第 1 套海侵体系域和高位体系域。MFS1 界面连续性较好, 中等反射强度, 该体系域界面之上存在明显下超现象, 体系域界面之下零星存在顶超现象。整体表现出较为明显的向海倾斜趋势, MFS1 界面较 MFS2 界面波动稍大, 只有略微地貌起伏。

第 2 套海侵体系域和高位体系域位于 SQB 层序内, 以最大海泛面 MFS2 为界。MFS2 界面连续性较好, 反射振幅较高, 该体系域界面之上存在下超现象(图 3), 体系域界面之下存在顶超现象(图 3)。从研究区域整体来看, 该界面呈向海倾斜的趋势, 只有略微的地貌起伏, 研究区南部界面较为平缓。目前, SQC 层序并未完成海侵过程, 仅发育海侵体系域, 其顶界为海底界面。

### 3.3 地层层序厚度分布格局

研究区平均地层厚度从上新世的 50 m 增加至

更新世的 80 m, 再减小至全新世的 20 m。上新世地层呈现出东北部厚、西南部薄的特征; 更新世地层层序厚度较为平均; 全新世地层层序整体发育平缓, 在南部呈条带状分布较厚。

上新世 SQA 厚度介于 40~110 m(图 6a、b)。SQA 层序高位体系域时期沉积厚度介于 15~45 m, 东北部沉积厚度 > 30 m, 西南部沉积厚度 < 30 m。SQA 层序海侵体系域时期沉积厚度整体有所减小, 介于 12.5~39.5 m。此时研究区东部为沉积中心, 沉积厚度 > 30 m; 西部沉积厚度较薄, 沉积厚度 < 20 m。

更新世时期 SQB 层序厚度快速增加, 沉积物厚度达到 35~100 m(图 6c、d), 整体上看, 研究区从近岸到离岸方向厚度逐渐加深, 沉积中心位于研究区 L05 与 Z11 测线交汇处西侧约 500 m 处, 最厚处 > 95 m。研究区中部存在一小型沉积中心, 位于 Z05 和 L04 测线交汇处 NE 向约 1 km 处, 该中心沉积厚度达 70~90 m。SQB 层序高位体系域时期沉积厚度与 SQA 层序海侵体系域时期较为一致, 介于 12~40 m, 研究区整体厚度平均 30 m, 沉积中心移动到东北角。SQB 层序海侵体系域时期研究区平均沉积厚度明显增加, 从 20 m 增加至 40 m。

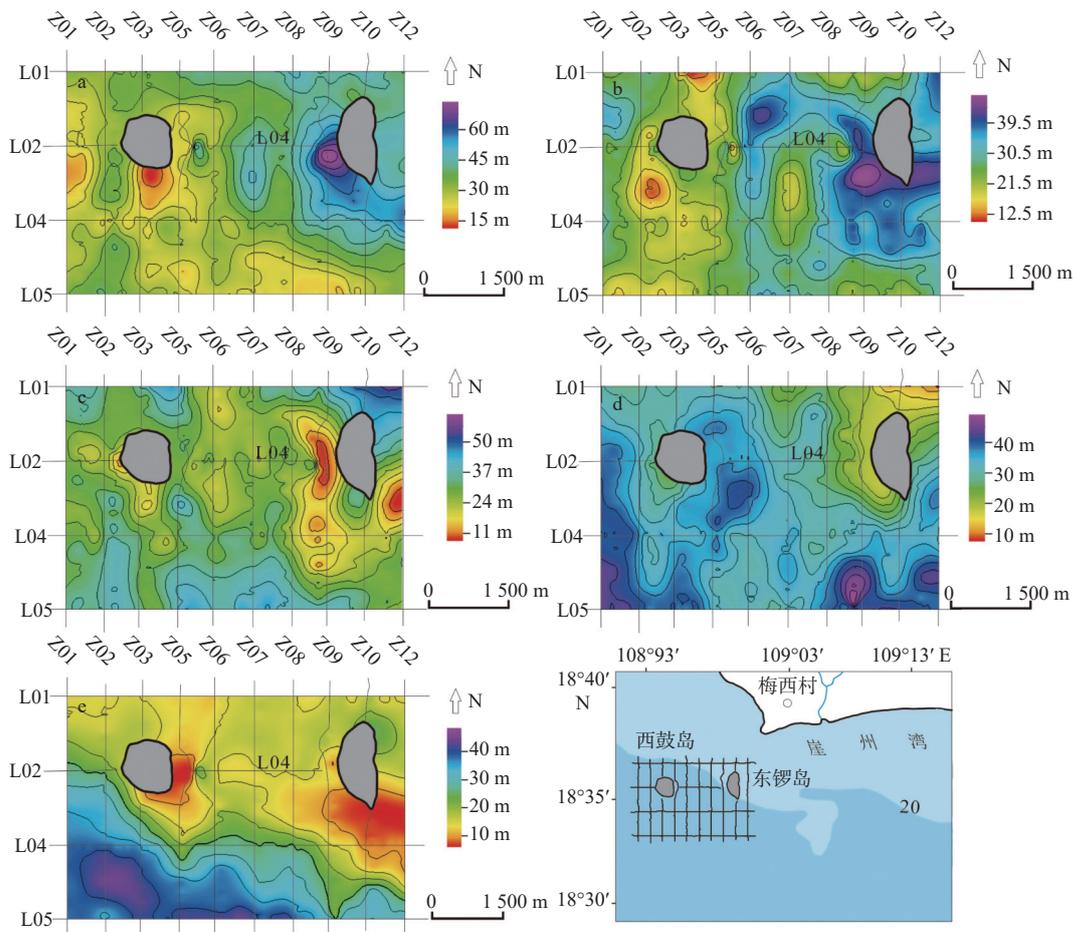
SQC 厚度介于 10~50 m(图 6e), 整体上看, 研究区从 NE 至 SW 向厚度逐渐加深。沉积中心位于研究区 L05、L04、Z02 和 Z04 测线闭合区域内, 该区域沉积厚度 > 45 m, 较 SQB 层序沉积中心来看, 沉积中心向西侧转移, 并且沉积中心的面积扩大。东锣鼓岛和西鼓岛区域沉积厚度很薄, 并且 2 个海岛之间沉积厚度较小(< 20 m)。东北厚、西北薄的沉积厚度分布指示物源主要来自东部和北部。

## 4 地震相类型与沉积相发育特征

### 4.1 地震相类型

地震相是沉积相的地震响应, 是具有一定分布范围的地震反射单元。该单元地震属性参数与相邻单元并不相同, 反映了本区沉积物的岩性组合、层理特征和沉积特征<sup>[25]</sup>。基于外部反射形态和内部反射结构, 综合分析地震属性特征可知, 研究区主要发育的地震相有平行-亚平行反射地震相、下凹状地震相和前积反射地震相(图 7)。

平行、亚平行是常见的地震相, 反射层呈平直或波状, 整体反映水体稳定环境下的沉积作用<sup>[24]</sup>。平行席状反射地震相在研究区 SQC 层位北部发育,



(a)SQA 层序海侵体系域; (b)SQA 层序高位体系域; (c)SQB 海侵体系域; (d)SQB 层序高位体系域; (e)SQC 层序

图 6 层序厚度平面展布图

Fig.6 The thickness distribution of the strata since the Pliocene

亚平行波状反射地震相在 SQA—SQC 层位均有分布。

亚平行波状地震相反射层呈波状。横向上看,分布在北部近岸区域以及南部区域,但两者在地震参数上存在差异:北部近岸区域振幅强,频率中等,连续性一般;离岸区域为中振幅,连续性较差。纵向上看,SQA—SQC 层序均发育亚平行波状地震相,沉积背景为滨海相、浅海相。

平行席状地震相反射层呈平直状,物理参数上振幅强,频率高,连续性好。横向上,主要分布在研究区 SQC 层序近岸一侧;纵向上,表层广泛发育,反映研究区一种水体匀速沉积作用,其沉积背景属于滨海相。

前积反射地震相作为重要的地震相,通常前积反射结构反映某种携带沉积物的水流在向盆地推进过程中由前积作用产生的反射特征<sup>[26]</sup>。前积反射地震相在研究区各层位中部均广泛发育,在研究区内识别出 3 种亚相:“S”型前积地震相、叠瓦型

前积地震相及切线斜交型前积地震相。

“S”型前积地震相外部轮廓呈“S”型地震反射构型,在剖面中表现为振幅中等,频率高,连续性一般(图 7)。横向上看,分布于研究区中部,在 SQA 早期和 SQB 早期向岸方向发育。切线斜交型前积地震相上部为切线型,下部与“S”型前积地震相较为一致,其地震参数表现为振幅中等,频率低,连续性差,仅存在 SQC 层序海侵体系域层位,无顶积层,有底积层,指示在 SQC 层序海侵体系域时期发生过快速堆积的沉积作用。叠瓦型前积地震相在研究区表现为振幅强,频率中等,连续性一般,存在于 SQC 层序的中部靠岸一侧,指示在 SQC 层序可能存在浅水环境下的强弱水流周期性变化。

下凹填充地震相是大陆边缘一种重要的地震相,研究区内仅存在于 SQB 高位体系域时期的东南部,下凹状反射层由东向西逐渐平缓直至消失。振幅中等,频率低,连续性差,解释为水下河道,是向陆坡提供沉积物的通道。

地震相类型		典型地震反射剖面	地震反射特征	地震参数特征	沉积环境
下凹状地震相		TWT/ms -155 -165 -175 	TWT/ms -155 -165 -175 	连续性差 振幅较强 中等频率	水下河道相
平行 亚平行 反射地震相	亚平行 波状地 震相	TWT/ms -35 -40 -45 	TWT/ms -35 -40 -45 	连续性一般 振幅较强 中等频率	滨海相
	平行 席状 地震相	TWT/ms -25 -30 -35 	TWT/ms -25 -30 -35 	连续性好 中振幅 低频率	浅海相
前积 反射 地震相	“S”型 前积 地震相	TWT/ms -195 -205 -215 	TWT/ms -195 -205 -215 	连续性较差 中振幅 中等频率	三角洲低能 沉积环境
	叠瓦型 前积 地震相	TWT/ms -40 -45 -50 	TWT/ms -40 -45 -50 	连续性较差 强振幅 中等频率	三角洲沉积 浅水地区
	切线 斜交型 前积 地震相	TWT/ms -90 -100 -110 	TWT/ms -90 -100 -110 	连续性差 中振幅 高频率	三角洲高能 沉积环境

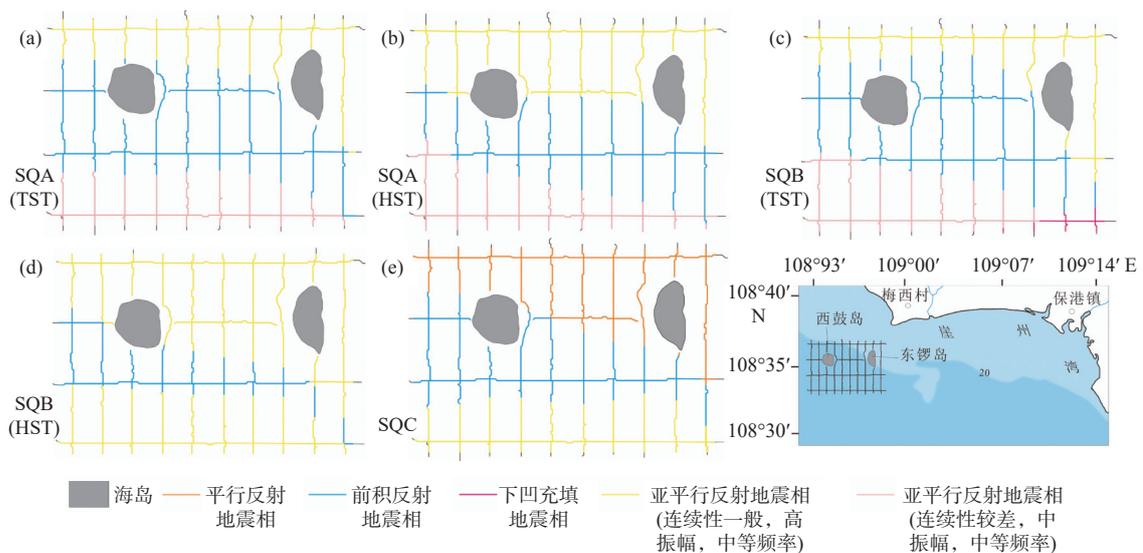
图 7 三亚崖州湾研究区上新统一第四系典型地震相

Fig.7 The typical regional seismic facies from the Pliocene to the Quaternary in Yazhou Bay, Sanya

### 4.2 地震相演化特征

SQA 层序时期, 研究区南北两侧发育亚平行波状反射地震相, 中部发育前积反射地震相(图 8a、b)。南北两侧发育的亚平行波状反射地震相在地震属

性上存在明显差异, 南部地震参数上连续性较差, 中振幅, 频率中等; 北部地震参数上连续性一般, 高振幅, 频率中等。SQB 层序发育时期(图 8c、d), 北部和中部继承性发育亚平行波状反射地震相和前积反射地震相, 南部亚平行波状反射地震相连续性



(a)SQA 层序海侵体系域; (b)SQA 层序高位体系域; (c)SQB 层序海侵体系域;

(d)SQB 层序高位体系域; (e)SQC 层序

图 8 三亚崖州湾研究区上新统一第四系地震相平面展布

Fig.8 Horizontal distribution of seismic facies from the Pliocene to the Quaternary in Yazhou Bay, Sanya

由较差过渡到一般,振幅从中振幅变为高振幅。与SQB层序相比,SQC层序发育时期其主要变化存在于北部近岸地区,由亚平行波状反射地震相转变为平行反射地震相(图8e)。

SQA层序海侵体系域主要发育亚平行波状地震相和三角洲前缘沉积的“S”型前积反射地震相。SQA层序高位体系域时期,亚平行反射地震相分布面积扩大,从北部近岸地区向南延伸,前积反射地震相面积减小。SQB层序海侵体系域时期,代表三角洲沉积的前积反射广泛发育,前积反射地震相向研究区北部延伸,下凹充填地震相出现在研究区东南侧。SQB层序高位体系域时期,前积

反射地震相面积快速减小,在“S”型前积反射地震相区域中局部出现切线斜交型反射地震相。SQC层序时期,研究区北部继承性发育平行-亚平行波状地震反射,前积反射地震相面积减小,局部出现小型叠瓦状前积地震相。

### 4.3 沉积相演化特征

地震相转沉积相有沉积体系匹配准则、能量匹配准则和沉积演化准则3大准则。基于前人对研究区岩性、古生物和有机质等沉积背景的认识<sup>[7,15,27]</sup>,遵循地震相转沉积相准则对三亚崖州湾地区的地震相进行标定,将地震相转换成沉积相(图9)。

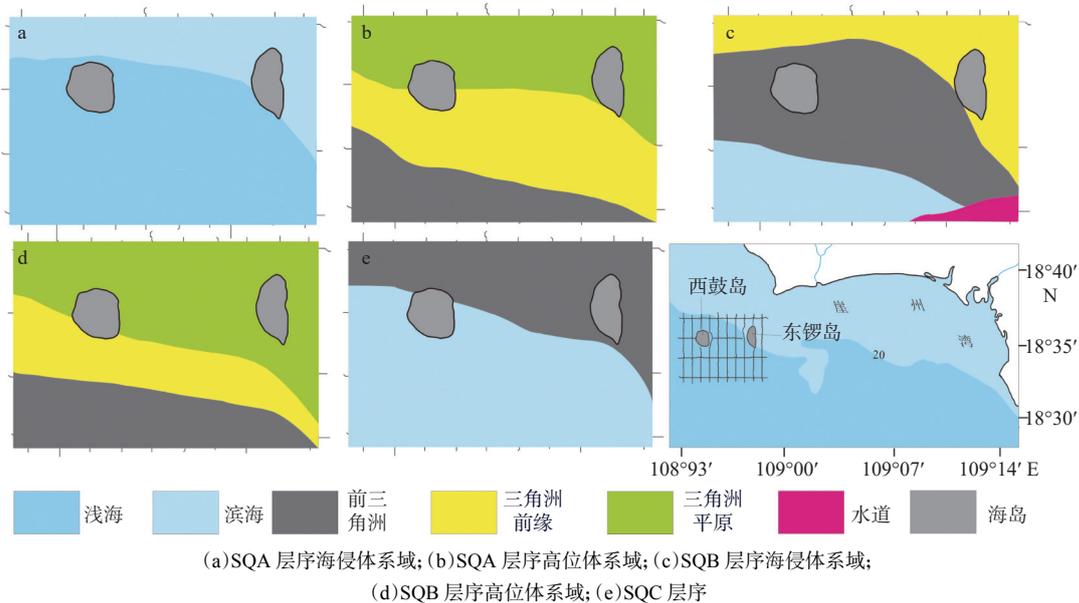


图9 三亚崖州湾研究区上新统一第四系沉积相平面展布

Fig.9 Horizontal distribution of sedimentary facies from the Pliocene to the Quaternary in Yazhou Bay, Sanya, and evolution of the sedimentary system

SQA层序海侵体系域时期,研究区沉积环境稳定,整体处于海平面以下,为浅海相沉积(图9a);高位体系域时期,近岸地区发育陆上三角洲平原沉积,向海方向发育三角洲前缘沉积和前三三角洲,此时研究区整体为三角洲沉积(图9b)。SQB层序海侵体系域时期,三角洲沉积向岸方向发生迁移,南部再次出现海相沉积(图9c);高位体系域时期,三角洲沉积向南迁移,海相沉积消失。同时,三角洲水下面积有所缩小,以陆上三角洲平原沉积为主,此时研究区仍以三角洲沉积为主(图9d)。SQC层序时期,三角洲面积大幅减退,近岸浅水地区为水下前三三角洲沉积,海岛南部为海相沉积,研究区整体呈滨海相沉积(图9e)。

## 5 控制因素分析

沉积相在空间上的展布特征在一定程度上反映了沉积体系的演化特征。不同层序的沉积体系分布有很强的继承性。根据研究区沉积相演化特征,研究区主要发育三角洲沉积体系。沉积体系通常受到构造活动、海平面升降和气候变化等因素控制<sup>[22,28-31]</sup>。第四纪以来,随着中央山地区域性的上升运动,研究区有轻微的抬升<sup>[32-33]</sup>,但与源区构造隆升相比,研究区沉降变形非常弱<sup>[19,34]</sup>。因此,上新世以来研究区构造作用对于沉积体系的演化影响不大。研究区沉积演化主要受海平面升降及气

候变化的影响。

### 5.1 海平面升降

基于全球海平面变化及前人对研究区的相对海平面变化研究, 上新世以来南海西北部的海平面经历了 2 次高一低的波动变化<sup>[16,19,23]</sup>(图 10)。上新世 SQA 层序海侵体系域时期, 海平面持续上升至最高点, 更高海平面的存在和较长的持续时间, 为研究区沉积物沉积作用提供了充足的容纳空间。SQA 层序高位期, 海平面下降导致近岸地区发育陆上三角洲平原沉积。SQB 层序海侵体系域时期, 海平面再次上升, 但这次上升幅度并没有 SQA 层序海侵时期高。这一对比在沉积相上有很好的体现, 此时研究区海相发育。SQB 层序高位期, 随着相对海平面的下降海相沉积消失, 研究区整体发育三角洲体系。SQC 层序时期, 海侵体系域正在发育, 这与全新世海平面变化整体呈现上升趋势具有一致性。SQB 层序高位期与 SQC 层序时期, 研究区三角洲沉积面积的缩小和海相沉积的发育与 2 次相对海平面上升具有较好的吻合性。

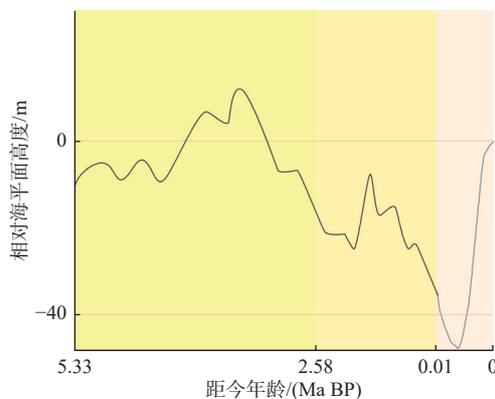


图 10 上新世以来的全球海平面变化曲线<sup>[35]</sup>

Fig.10 The global sea-level change curve since the Pliocene<sup>[35]</sup>

### 5.2 气候变化

气候变化也是影响沉积环境变化的重要因素。南海及其周缘区域在上新世(5.3~2.58 Ma)、中更新世—至今(1.8 Ma~至今)盛行夏季风<sup>[36-38]</sup>。SQA 层序时期夏季风强度大, 海南岛陆源沉积物受到风化和搬运作用, 为三角洲的发育提供了条件, 此时沉积物厚度达到 40 m。在 SQB 层序海侵体系域时期, 研究区温度相对平稳, 研究区主要受海平面变化的影响, 此时平均沉积厚度为 25 m。在 SQB 层序高位期与 SQC 层序时期, 研究区夏季季风强度

再次占据主导, 海南岛地区气候温暖湿润、降雨量增大, 导致海南岛陆内河流的径流量增大、搬运能力加强, 运送到陆坡的陆源碎屑物质增加, 沉积物平均厚度分别达到 50 m 和 30 m。因此, 在更新世期间, 气候和海平面的变化是沉积通量变化的主要控制因素。

## 6 结论

(1) 崖州湾上新统及第四系共识别出 3 个层序界面, 自下而上依次命名为 SB1、SB2 和 SB3, 以及 2 个体系域界面 MFS。依据层序划分为 3 个层序和 5 个体系域单元, 自下而上命名为 SQA 层序(HST、TST)、SQB 层序(HST、TST)和 SQC 层序。

(2) 崖州湾上新统-第四系层序主要发育席状平行-亚平行反射地震相、下凹状地震相、前积反射地震相等 3 种类型。其中, 席状平行-亚平行地震相主要分布在研究区北部近岸区域和南部向海一带, 处于相对稳定的浅海-滨海沉积环境; 前积地震相出现在各层序当中, 主要分布在研究区中部, 是三角洲的地震响应; 下凹充填地震相主要分布在研究区 SQB 层序(TST)的东南区域, 反映了在该时期存在水下河道。

(3) 崖州湾上新世-第四纪沉积演化受沉积物来源与海平面变化的影响。从层序内部来看, 研究区主要经历了浅海相沉积(SQA 层序早期)、三角洲沉积(SQA 层序晚期)、三角洲沉积(SQB 层序早期)、河流-三角洲沉积(SQB 晚期)、滨海相沉积(SQC 层序)的演化序列, 与区域海平面变化序列具有较好的耦合性。

### 参考文献:

- [1] 陈泓君, 姜涛, 李顺, 等. 南海西北部莺歌海盆地陆架晚更新世三角洲及其控制因素 [J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(9): 1-15.
- [2] 林义华, 梁定勇, 魏昌欣, 等. 海南岛西北部晚更新世海滩岩地球化学特征及其古环境意义 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(10): 4079-4090.
- [3] XIE L C, HE X N, CHEN Y L, et al. Multiple sediment sources and topographic changes controlled the depositional architecture of a palaeoslope-parallel canyon in the Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 113: 104-161.
- [4] 邹振宇, 刘豪, 周小龙, 等. 琼东南盆地新近纪以来的层序地层划分及地震相分析 [J]. 内蒙古石油化工, 2016, 42(Z2): 49-53.
- [5] 瞿洪宝, 苟鹏飞, 孙龙飞, 等. 海南岛崖州湾表层沉积物空间

- 分布特征及其受控机制[J]. 海洋学报, 2021, 43(12): 70-81.
- [6] 梁定勇, 许国强, 肖瑶, 等. 海南岛北部新近纪—第四纪地层结构与沉积演化模式[J]. 地层学杂志, 2021, 45(4): 554-566.
- [7] 孙倩文, 黄康有, 谢德豪, 等. 海南岛三亚湾全新世以来沉积特征与古环境演变[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2019, 58(3): 13-21.
- [8] 张亮, 刘文涛, 贾磊, 等. 海南三亚海域沉积物分布特征及其沉积环境指示[J]. 地质通报, 2021, 40(Z1): 341-349.
- [9] 林文华, 吕昭英, 魏昌欣, 等. 海南三亚地区全新世海滩岩地球化学特征及沉积古地理环境意义[J]. 矿产与地质, 2023, 37(1): 86-94.
- [10] 马杏垣, 王豪. 中国新生代地壳裂谷系的演化[J]. 地质科学译丛, 1990, 7(2): 91.
- [11] 魏昌欣, 李孙雄, 云平, 等. 海南吊罗山一带1:5万区调主要成果与进展[J]. 华南地质与矿产, 2011, 27(4): 335-341.
- [12] 海南省地质调查院. 中国区域地质志: 海南志[R]. 北京: 地质出版社, 2017.
- [13] 刘瑞华, 张仲英. 海南岛的新构造运动特征[J]. 热带地理, 1989, 9(2): 174-182.
- [14] 张虎男, 赵希涛. 雷琼地区新构造运动的特征[J]. 地质科学, 1984, 19(3): 276-287.
- [15] 涂兵. 三亚重点地区自然资源综合地质调查二级项目成果报告[R]. 武汉: 中国地质调查局武汉地质调查中心, 2021.
- [16] CHEN H, HARFF J, QIU Y, et al. Last glacial cycle and seismic stratigraphic sequences offshore western Hainan Island, NW South China Sea[J]. *Geological Society*, 2016, 429(1): 99-121.
- [17] 肖玉仲, 张丰收, 张永华. 海南岛崖州湾西部近海沉积环境特征[J]. 黄渤海海洋, 1996, 14(4): 42-48.
- [18] CUI Y C, CAO L C, QIAO P J, et al. Provenance evolution of Paleogene sequence (northern South China Sea) based on detrital zircon U-Pb dating analysis[J]. *Earth Science*, 2018, 43(11): 4169-4179.
- [19] 熊萍. 南海西北部陆缘晚更新世以来古地貌重建及沉积响应研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2019.
- [20] 刘松峰, 李顺, 聂鑫, 等. 海南岛东南海域碎屑锆石年代学物源示踪及构造指示意义[J]. 地球科学, 2021, 46(11): 4084-4096.
- [21] 吴时国, 鲁向阳, 李刚, 等. 海南岛周邻新生代沉积盆地构造与差异性演化特征[J]. 地质学报, 2024, 98(1): 16-30.
- [22] 朱晓敏. 层序地层学原理及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
- [23] WAELBROECK C, LABEYRIE L, MICHL E, et al. Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(1/3): 295-305.
- [24] 赵东娜, 朱筱敏, 董艳蕾, 等. 准噶尔盆地车排子地区下白垩统层序地层格架及主控因素分析[J]. 沉积学报, 2013, 31(6): 1070-1080.
- [25] 周川, 王英民, 黄志超, 等. 澳大利亚北波拿巴盆地北部地区中生界层序地层及地震相研究[J]. 海洋地质动态, 2009, 25(5): 19-24.
- [26] LAMBIASE J L. A model for tectonic control of lacustrine stratigraphic sequences in continental rift basins[J]. *AAPG Memoir*, 1990, 50: 265-276.
- [27] HUANG D, DU J, DENG B, et al. Distribution patterns of particle-reactive radionuclides in sediments off eastern Hainan Island, China: implications for source and transport pathways[J]. *Continental Shelf Research*, 2013, 57: 10-17.
- [28] SANGREE J B, VAIL P R, MITCHUM R M. A summary of exploration applications of sequence stratigraphy[J]. *SEPM Society for Sedimentary Geology*, 1991, 11: 321-328.
- [29] SHANLEY K W, MCCABE P J. Perspectives on the sequence stratigraphy of continental strata[J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78(4): 544-568.
- [30] VAIL P R, MITCHUM JR R M, THOMPSON III S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 3. relative changes of sea level from coastal onlap: section 2: application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation[J]. *AAPG Memoir*, 1977, 26: 63-81.
- [31] VAIL P R. The stratigraphic signatures of tectonics, ecstacy and sedimentation-an overview[J]. *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology*, 1991, 71(1): 11-20.
- [32] 王颖. 海南岛海岸环境特征[J]. 海洋地质动态, 2002, 18(3): 1-9.
- [33] HU Y X, HAO M, JI L Y, et al. Three-dimensional crustal movement and the activities of earthquakes, volcanoes and faults in Hainan Island, China[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2016, 7(4): 284-294.
- [34] 孙伟. 三亚新机场及邻区活动断裂与稳定性研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2021.
- [35] MILLER K G, BROWNING J V, SCHMELZ W J, et al. Cenozoic sea-level and cryospheric evolution from deep-sea geochemical and continental margin records[J]. *Science Advances*, 2020, 6(20): 13-46.
- [36] JIANG H, WAN S, MA X, et al. End-member modeling of the grain-size record of Sikouzi fine sediments in Ningxia (China) and implications for temperature control of Neogene evolution of East Asian winter monsoon[J]. *PLoS One*, 2017, 12(10): E0186153.
- [37] LIU Z, ZHAO Y, COLIN C, et al. Source-to-sink transport processes of fluvial sediments in the South China Sea[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 238-273.
- [38] MA X, TIAN J. East Asian monsoon evolution and aridification of Northwest China viewed from land and sea on the tectonic-orbital time scale since 15 Ma[J]. *Quaternary Sciences*, 2015, 35(6): 1320-1330.

## On seismic sequence stratigraphy since the Pliocene in Yazhou Bay, Sanya, Hainan Island

CUI Haonan<sup>1,2,3</sup>, WU Nengyou<sup>1,3\*</sup>, TAN Mingxuan<sup>1\*</sup>, HUANG Cheng<sup>2</sup>, LONG Junqiao<sup>2</sup>, YAN Li<sup>2</sup>, HU Xuan<sup>2</sup>,  
XING Zihao<sup>2</sup>, XING Jingfeng<sup>2</sup>, GUO Zejun<sup>2</sup>, LI Yang<sup>2</sup>

(1 College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2 Haikou Marine Geological Survey Center, China Geological Survey, Haikou 571127, China; 3 Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China)

**Abstract:** The stability of the geological environment is an important prerequisite for the development of the marine economy in China. It is of scientific significance to this region's environmental evolution and future trend. In sequence stratigraphy, based on the 2D seismic data, the strata in the marine area of Yazhou Bay could be divided into three third-level sequences, namely, SQA, SQB, and SQC from the bottom to top. In the SQA and SQB sequences, transgressive and highstand systems tracts are divided by the maximum transgressive surface, and the SQC sequence is not fully developed except for the transgressive system tract. In the sequence stratigraphic framework of the study area, three types of seismic facies, i.e., parallel sub-parallel reflection facies, depressed reflection facies, and progradational reflection facies, were recognized from the sequence. The pattern of seismic facies distribution shows that the sedimentary strata in Yazhou Bay developed mainly coastal, shore, and shallow marine types. Since the Pliocene, the sedimentation evolved landward from shallow sea to delta, and finally to the coastal facies. The controlled factors in the study area are mainly climate change and sea level fluctuation.

**Key words:** Yazhou Bay; Pliocene; seismic sequence; seismic facies; sedimentary evolution