

海南岛东部近浅海单道地震层序特征分析

黄仕锐^{1,2,3*}, 王子雯^{2,3#}, 宋家伟^{2,3}, 张匡华^{2,3}

¹中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东 青岛

²海南省海洋地质资源与环境重点实验室, 海南 海口

³海南省海洋地质调查院, 海南 海口

收稿日期: 2025年7月15日; 录用日期: 2025年9月1日; 发布日期: 2025年9月9日

摘要

单道地震是研究近浅海海域地层结构的主要手段, 本文主要对海南岛东部文昌 - 琼海近浅海海域1419 km单道地震剖面进行精细解释, 解释了8个特征明显的区域性不整合地震反射界面, 由上至下依次命名为H0、H10、H11、H20、H21、H30、H40和H50, 再根据各反射层的地震波组、振幅、频率、地层的连续性、地层之间的接触关系等反射特征, 划分出与之相对应的层序为A1 (H0~H10)、A2 (H10~H11)、A3 (H11~H20)、A4 (H20~H21)、A5 (H21~H30)、A6 (H30~H40)、A7 (H40~H50)等7个地震反射亚层。通过对各地震反射亚层厚度空间展布特征的分析发现, 研究区地层的沉积中心主要位于研究区南部, 整体呈南厚北薄的格局。需要指出的是, 由于研究区缺乏直接的钻孔资料控制, 文中涉及的地质时代划分(如全新统、更新统等)是基于区域地质对比的推断结果, 存在一定的不确定性。

关键词

海南岛东部, 近浅海, 单道地震, 地震层序, 地震反射界面, 地层展布

Analysis of Single-Channel Seismic Sub-Layer Characteristics in the Nearshore and Shallow Sea Areas of Eastern Hainan Island

Shirui Huang^{1,2,3*}, Ziwen Wang^{2,3#}, Jiawei Song^{2,3}, Kuanghua Zhang^{2,3}

¹College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong

²Hainan Key Laboratory of Marine Geological Resources and Environment, Haikou Hainan

³Marine Geological Survey of Hainan Province, Haikou Hainan

Received: Jul. 15th, 2025; accepted: Sep. 1st, 2025; published: Sep. 9th, 2025

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 黄仕锐, 王子雯, 宋家伟, 张匡华. 海南岛东部近浅海单道地震层序特征分析[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(9): 1289-1302. DOI: 10.12677/ag.2025.159120

Abstract

Single-channel seismic survey is a primary method for studying the stratigraphic structure of near-shore and shallow sea areas. This paper focuses on the detailed interpretation of 1419 km of single-channel seismic profiles in the nearshore and shallow sea areas of Wenchang-Qionghai in eastern Hainan Island. A total of 8 regionally significant unconformable seismic reflection interfaces with distinct characteristics are identified, named H0, H10, H11, H20, H21, H30, H40, and H50 from top to bottom. Based on reflection characteristics, such as seismic wave groups, amplitude, frequency, stratigraphic continuity, and contact relationships between strata of each reflection layer, the corresponding sequences are defined as seven seismic reflection sub-layers (units): A1 (H0~H10), A2 (H10~H11), A3 (H11~H20), A4 (H20~H21), A5 (H21~H30), A6 (H30~H40), and A7 (H40~H50). Analysis of the spatial distribution characteristics of each seismic reflection sublayer thickness reveals that the depocenter of the study area's strata is mainly located in the southern part of the study area, showing an overall pattern of thicker strata in the south and thinner strata in the north. It is important to note that the assignment of geological ages (e.g., Holocene, Pleistocene) mentioned in this paper is inferred from regional geological correlation due to the lack of direct borehole control within the study area, and thus carries inherent uncertainties.

Keywords

Eastern Hainan Island, Nearshore and Shallow Seas, Seismic Sub-Layer, Seismic Reflection Interface, Stratigraphic Distribution

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,许多学者基于单道地震手段,围绕海南岛周边第四纪层序地层做了多项研究。陈泓君等(2017)结合海南岛西南部过 HDQ22 孔高分辨率单道地震剖面,通过井震标定和钻孔岩性对比,识别出 7 个区域不整合界面,建立了晚更新世 11 万年以来的地层框架[1];张匡华等(2018)根据单道地震及海上钻孔资料研究沉积演化,建立了三亚海棠湾晚更新世以来的地层特征,识别出六个层序地层单元[2]。整体而言,海南岛西南部和东南部海域第四纪层序地层研究程度相对较高,东部海域研究相对薄弱。

本文通过单道地震剖面综合解释,开展各地震层序(亚层)空间展布特征分析,研究结果丰富了海南岛东部晚第四纪以来滨浅海地震地层格架的认识。需要强调的是,本研究对地震层序赋予的地质时代(如更新世)是基于区域对比的推断,研究区本身缺乏直接的钻孔年代学证据。

2. 研究区概况

新生代期间,在太平洋板块和印度-澳大利亚板块的俯冲作用下,东南亚大陆边缘地壳发生减薄、裂解、漂移、聚敛和碰撞等过程[3][4]。在这种板块活动背景及演化中,南海形成了离散、聚敛、转换和俯冲四种不同类型的大陆边缘。南海北部陆缘为离散边缘,形成了包括莺歌海盆地、琼东南盆地、珠江口盆地、西沙海槽盆地在内的一系列盆地的雏形[5][6]。晚渐新世一早中新世,南海东部沿东西方向再次扩张,珠江口-琼东南盆地逐渐进入裂谷沉降阶段,并形成了陆相和海陆过渡相沉积层序[7]-[9]。

研究区在地壳演化过程中经历了几次主要的构造事件:前震旦纪的开宁运动,古生代的加里东运动、

海西 - 印支运动，中生代的燕山运动，新生代的神狐运动、南海运动和东沙运动[10][11]。对于研究区来说，新生代构造运动对本区的影响较大，本区目前的构造格局和地层结构在此后基本定型[12]。

3. 资料和方法

本次拟对前期外业采集的 13 条测线约 1419 km 的二维单道地震数据开展研究区地震解释及层序地层研究，位置见图 1。

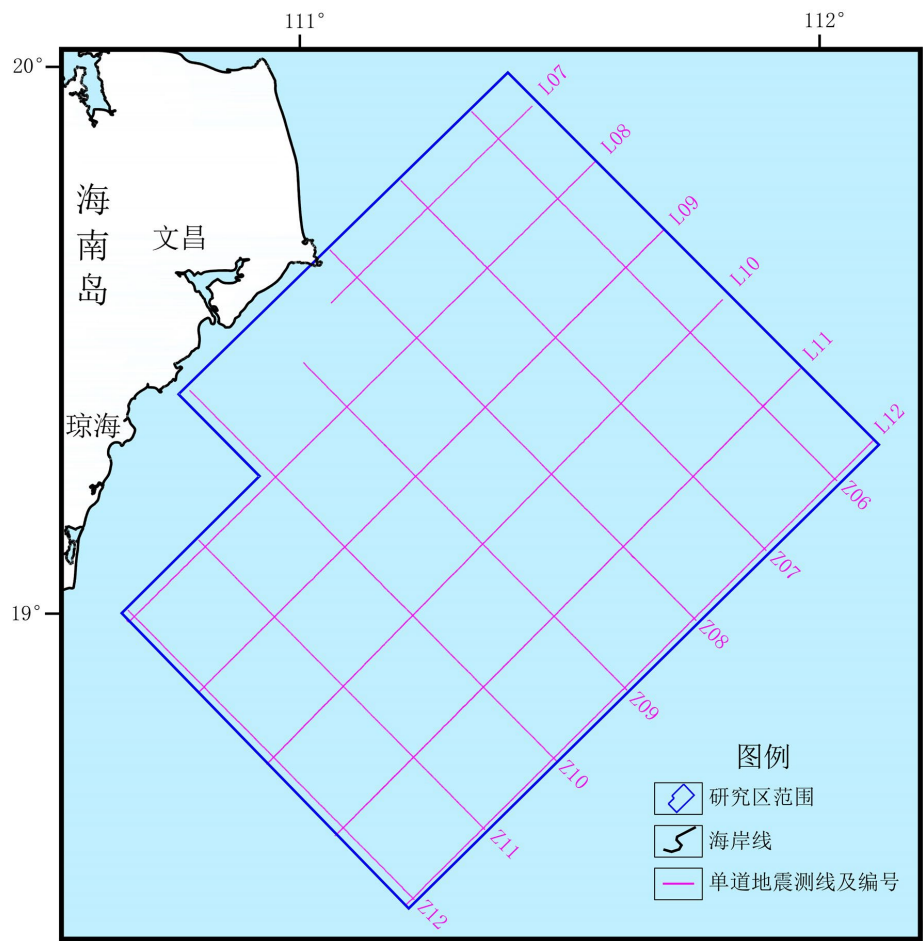


Figure 1. Schematic diagram of location of the research area and distribution of single-channel seismic survey lines
图 1. 研究区位置及单道地震测线分布示意图

本次单道地震采集的系统型号为 Geo-2000 J 电火花单道地震系统，震源控制为 Geo-Spark 2000X-7KJ Spread，震源为 Geo-Source 200 Light Weight，水听器为 Geo-Sense Mini-streamers 24 单元单道水听器，数据处理软件为 GeoSuite，记录器为 Mini-Trace II，垂向分辨率优于 0.3 m，见表 1。

Table 1. Primary parameters for single-channel seismic acquisition
表 1. 单道地震采集主要参数

激震方式	震源能量(J)	激发间隔(s)	记录长度(ms)	船速(kn)	水下单元与船尾距离(m)
电火花	1400~2000	1.5~2	500~1000	4~5	38

本次采集的单道地震资料信噪比较低,经过处理后,剖面上波组特征得到相应改善,同相轴连续性较好,海底的真实形态得到体现,浅部地层的有效反射同相轴得到加强,波组特征清晰可辨,多次波得到有效压制,深部能量也得到增强,能够分辨出研究区晚第四纪以来的沉积地层。

在地震地质学、层序地层学理论指导下,本次研究根据单道地震资料的反射波特征(振幅、频率、相位、连续性、波组合)以及反射终止关系(上超、下超、顶超、削截)所反映的地层接触关系,遵循“点”→“线”→“面”及追踪连续稳定反射界面的原则,对13条地震测线进行系统解释。在此基础上确立了研究区地层垂向划分方案,建立了地震层序垂向格架。

由于研究区内及邻近海域缺乏直接的钻井资料进行精确标定,本次研究的地震层序地质时代归属主要依据区域地质对比进行推断。参考中国地质调查局1:100万海南岛幅海洋区域地质调查成果,特别是海南岛北部及周边海域已发表的钻孔资料(如海口、文昌等地的钻孔)和测年数据,以及区域地层划分方案(烟墩组、八所组、北海组、秀英组、海口组)。对比的依据主要包括:1)识别出的区域性不整合面(如H10、H20、H30、H40、H50)与区域上已知时代的不整合面(如对应于全球海平面下降事件或区域构造事件)的特征相似性;2)层序的组合关系、厚度趋势与区域沉积演化模式的吻合度;3)层序内部反射结构(如平行、前积)反映的沉积环境与区域古地理变迁的一致性。需要明确指出,这种远距离对比存在显著的不确定性,尤其是在沉积相变明显或构造活动复杂的区域。因此,文中涉及的地质时代(如全新世、更新世)应视为初步推断结果,未来需通过研究区内的直接钻探取样和测年予以验证和修正。

在地震层序格架分析的基础上,根据时深转换关系(海水声速1530 m/s,沉积层平均速度1600 m/s),计算出调查区各地震层序(亚层)的厚度,编制等厚度图,分析其空间分布规律。

4. 地震反射界面特征

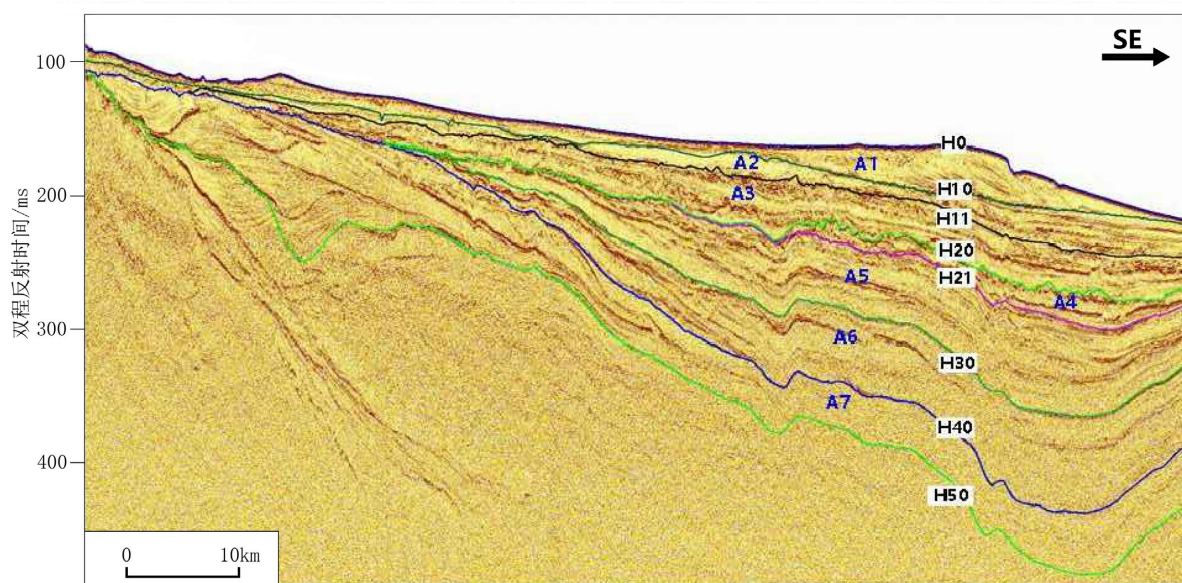


Figure 2. Seismic sub-layer interpretation of the study area (southeast of survey line Z07)

图2. 研究区地震层序解释(Z07测线东南侧)

地震层序是沉积层序在地震剖面上的反映,地震层序的划分是以地震剖面为基础,它是由一套互相整合的、成因上有关联的地层所组成,这套地层的顶界和底界都是不整合面以及和它相连接的整合面[13]。

而层序之间以不整合或与之可以对比的整合面为界，划分地震层序的关键是识别层序边界不整合面或与之对应的整合面。本次研究通过对单道地震资料的反复对比、追踪，全区解释了 8 个特征明显的区域性不整合地震反射界面(图 2)，由上至下依次命名为 H0、H10、H11、H20、H21、H30、H40 和 H50。结合调查区浅层高分辨率单道地震剖面特征，根据各反射层的地震波组、振幅、频率、地层的连续性、地层之间的接触关系等反射特征，划分出与之相对应的层序为 A1 (H0~H10)、A2 (H10~H11)、A3 (H11~H20)、A4 (H20~H21)、A5 (H21~H30)、A6 (H30~H40)、A7 (H40~H50)等 7 个地震反射亚层。

本次划分方案，特别是将 H10/H11 和 H20/H21 作为独立界面并据此划分 A2、A3、A4、A5 层序，主要基于以下关键观测：1) H10 与 H11、H20 与 H21 在全区大部分测线上反射特征(振幅、频率、连续性)存在显著差异，易于区分；2) H11 界面上下可见广泛的上超和削截现象(图 3、图 4)，H21 界面在北部可见明显削蚀及下切谷特征(图 6)，表明它们是重要的侵蚀不整合面或沉积间断面，代表了重要的沉积旋回转换；3) 将 H10/H11、H20/H21 分开，能够更精细地刻画研究区晚第四纪可能存在的次级海平面波动或局部构造活动影响下的沉积响应，反映了比传统四分组(Qh、Qp3、Qp2、Qp1)更详细的地层记录。

各层反射界面的特征如下：

H0: 海底，基本呈双相位连续强反射，高频率、强振幅、连续性好，其起伏变化反映了海底地形的变化。

H10: 全区分布，呈中低频、中振幅、中连续反射特征，在研究区北部靠近海岸线该界面可见明显的上超现象，地层缺失，界面上、下可见明显的上超和削截现象，研究区东南部可见明显的下超特征，分析认为界面之上为海底斜坡(见图 3)。

H11: 呈高频、强振幅、中 - 高连续反射特征，该界面上、下两套地层反射特征具有明显的差异，呈不整合接触，界面上、下可见明显的上超和削截现象(图 3、图 4)，局部地区由于河流下切谷导致下凹，可见明显的下切河谷特征，全区除了 L07 线外大部分测线均能追踪到。

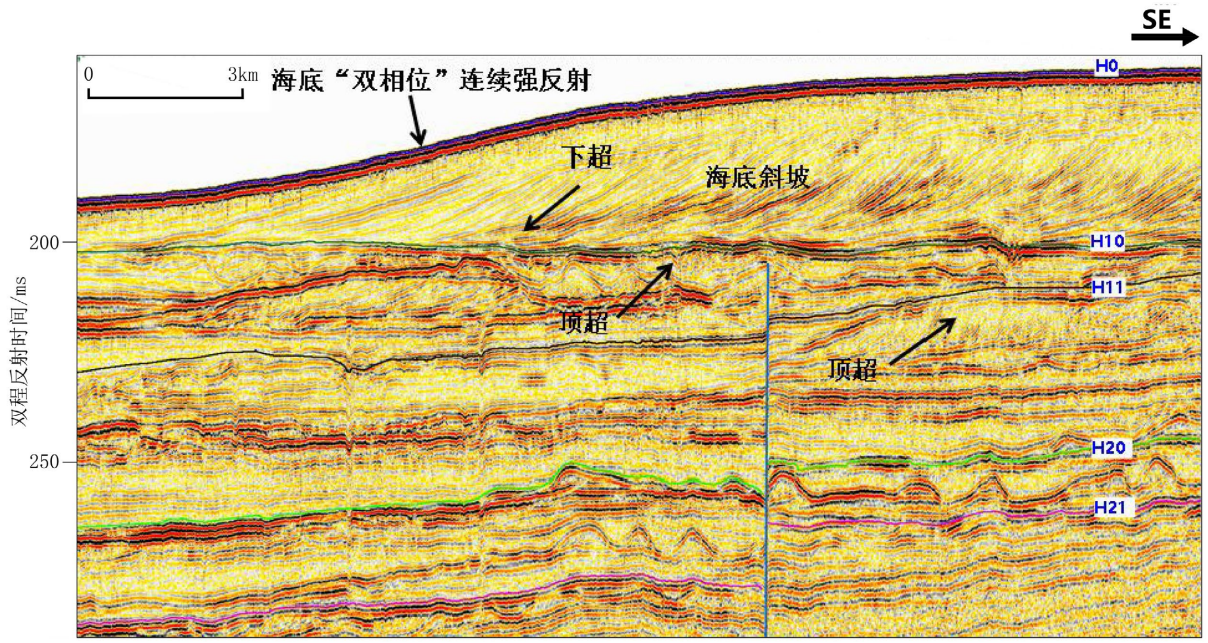


Figure 3. Characteristics of the single-channel seismic profile from the northeastern segment of line L11
图 3. L11 测线东北侧单道地震剖面特征

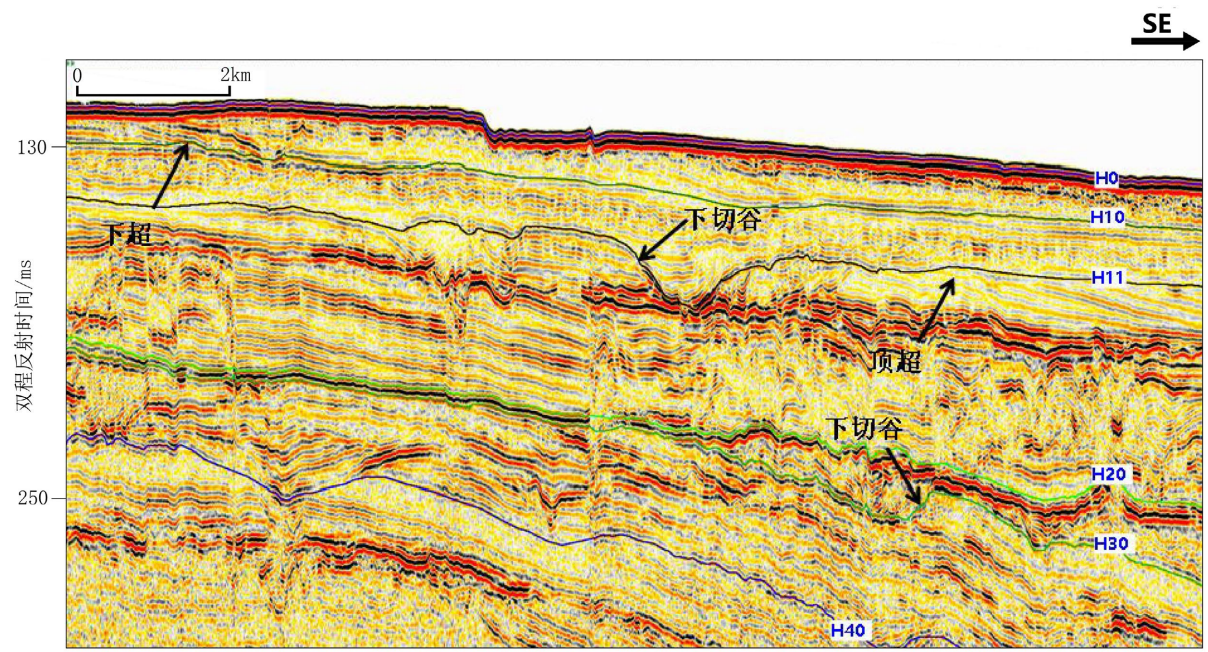


Figure 4. Characteristics of single-channel seismic profile of survey line Z06
图 4. Z06 测线单道地震剖面特征

H20: 为中频、强振幅、中 - 高连续反射特征, 分布于研究区东南部, 但在研究区南部, 呈高连续强反射, 为一套强振幅, 中高连续波组的顶面, 研究区北部由于靠近海岸线该界面可见明显的上超现象, 地层缺失, 界面上、下可见明显的上超和削截现象, 局部地区由于河流下切谷导致下凹, 可见明显的下切河谷特征, 且全区多处可见明显的沉积物波现象(图 5), 这些沉积物波在地貌上表现为一系列波状床型单元, 地震上呈叠瓦状或对称状, 多数向上坡迁移, 少数向下坡迁移, 无侧向迁移。全区大部分区域可追踪, 在近岸地段逐渐尖灭。

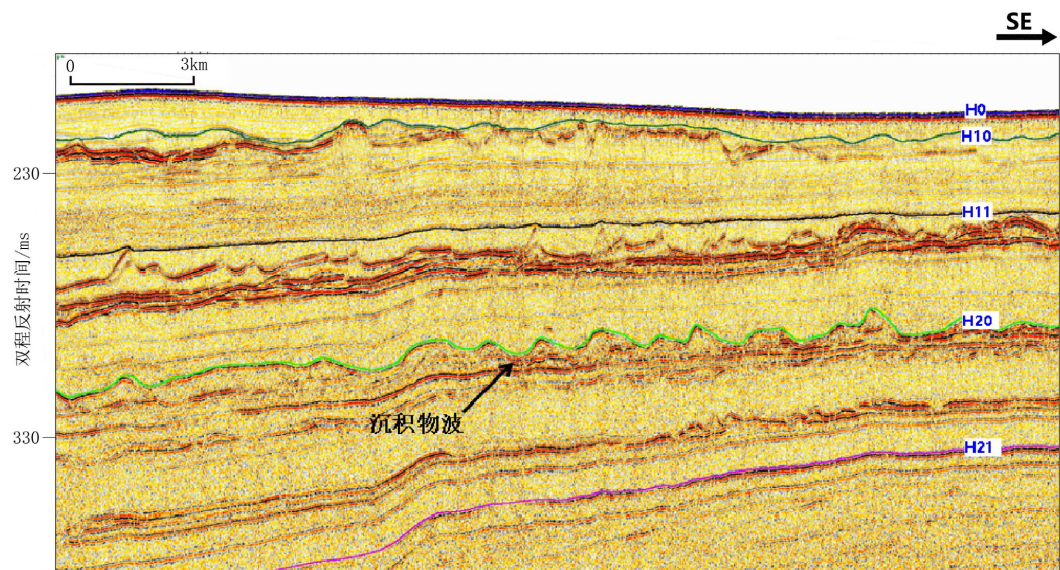


Figure 5. Characteristics of the single-channel seismic profile from the southwestern segment of Line L11
图 5. L11 测线西南侧单道地震剖面特征

H21: 反射能量较强, 为中频、强振幅、较连续反射特征, 分布于研究区西南部, 在研究区南部, 呈高连续强反射, 其上为平行一亚平行反射层组, 其下为平行连续反射层组, 易于识别, 在北部可见明显的削蚀现象, 且局部地区由于河流下切导致下凹, 可见明显的下切河谷特征(图 6)。

H30: 以中 - 高频、中 - 强振幅、中 - 高连续反射为主, 全区可对比追踪, 但在研究区北部, 由于靠近海岸线该界面可见明显的上超现象, 地层缺失, 界面上、下可见明显的上超和削截现象, 具有在浅水部位反射能量较强, 在深水部位反射能量较弱的点, 在研究区南部, 以中 - 低频、中振幅、中连续反射为主, 其上为平行一亚平行反射层组, 其下为平行反射层组, 易于识别。

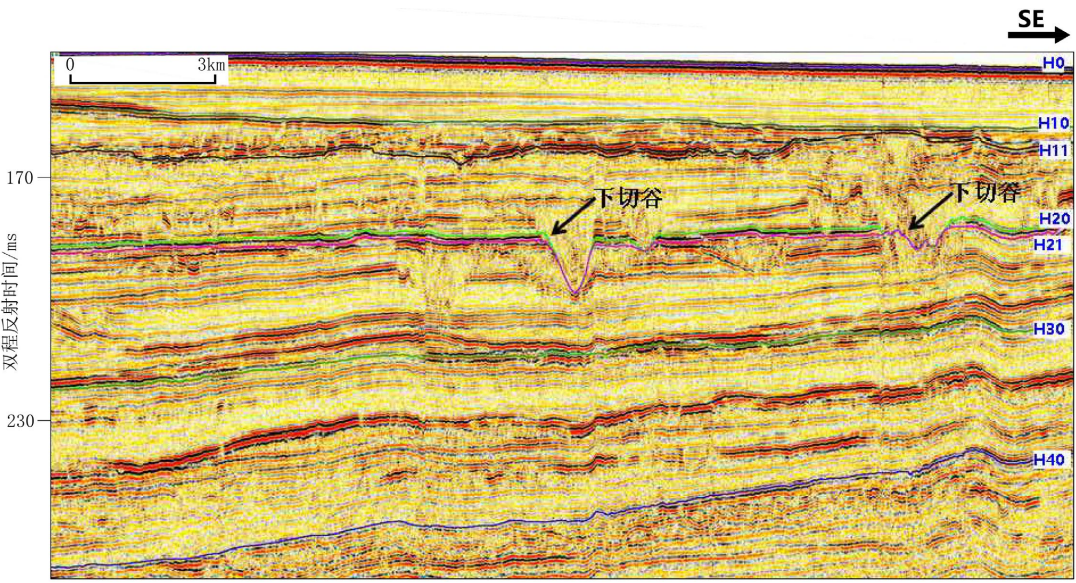


Figure 6. Characteristics of single-channel seismic profile of survey line L09
图 6. L09 测线单道地震剖面特征

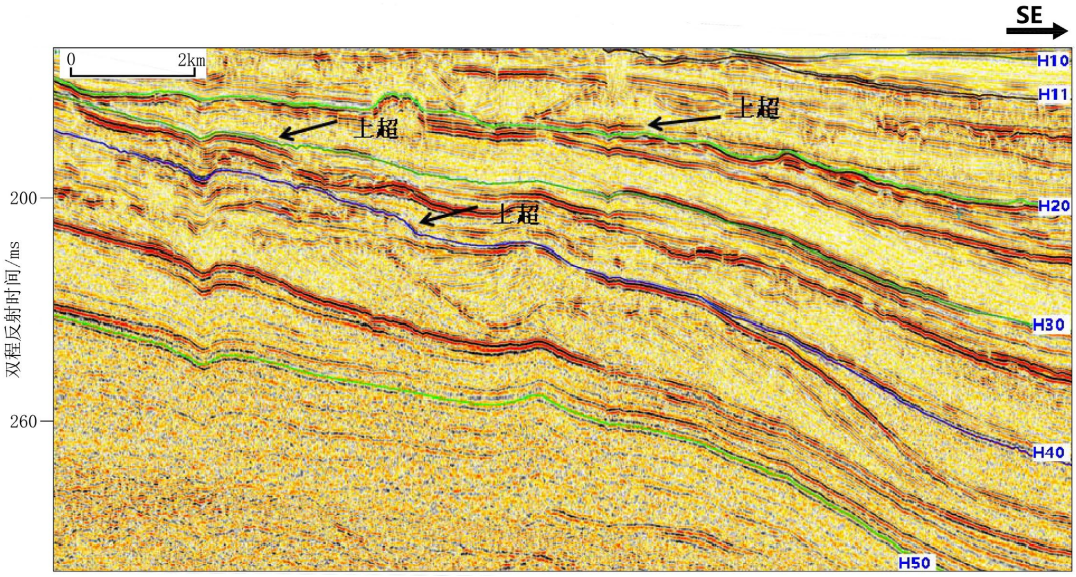


Figure 7. Characteristics of single-channel seismic profile of survey line Z07
图 7. Z07 测线单道地震剖面特征

H40: 以中 - 低频、中 - 强振幅、中连续反射为主, 全区可对比追踪, 在研究区东部, 呈强振幅、高连续反射, 易于识别, 而西南部由于地震资料信噪比低, 整体呈杂乱弱反射, 且地震资料不全, 地层界面难以识别。界面上、下两套反射层波组特征差异较大, 界面之上为中振幅、中连续反射, 之下杂乱、弱振幅反射, 界面之上可见明显的上超现象, 界面之下为平行不整合接触关系(图 7), 但在靠近海岸线可见明显的削蚀现象, 与界面之下地层呈明显的角度不整合关系。

H50: 全区分布, 总体上以中 - 低频、中 - 强振幅、中 - 低连续反射为主, 具有在浅水部位反射能量较强, 在深水部位反射能量较弱的特点, 在研究区北部呈连续、强振幅反射, 界面上、下可见明显的上超和削截现象, 界面之上为中振幅、中连续反射, 之下杂乱、弱振幅反射(图 7), 易于识别, 而南部由于地震资料信噪比低, 整体呈杂乱弱反射, 且地震资料不全, 地层界面难以识别, 界面上下均为弱振幅、弱连续反射, 且整体为平行不整合接触关系。

5. 主要地震层序(亚层)展布特征分析

基于第 3 节所述的时深转换参数(平均速度 1600 m/s), 计算了各地震反射亚层(A1~A7)的厚度, 并编制了等厚度图(图 8~12)。分析主要关注层序本身的厚度空间变化及其反映的沉积格局。

中中新世以后南海停止扩张, 盆地的冷却和上覆沉积的负载作用使盆地进一步下沉, 海侵范围扩大, 海南东部与南海连为一体, 形成开阔的陆架海盆[14]。新近系及第四系地层是在南海中央海盆扩张停止后热沉降过程中形成的一套相对稳定的沉积地层, 覆盖南海海域全区, 由陆架区的滨浅海相至陆坡区为浅海 - 半深海相[15]。研究区位于海南岛东部陆架区, 推测其地层总厚度在 600 米以内(基于地震双程旅行时估算)。

地震层序 A1 (H0~H10, 推测对应全新统烟墩组): 研究区内全区分布, 沉积厚度最厚的地区位于研究区东北部, 其最大残余厚度超过 45 米。该套地层沉积的厚度整体较薄, 只在局部地方由于存在海底斜坡(可能是古地貌或现代地形), 其地层沉积厚度较大, 其他地区的地层厚度均在 10 米以内。该层序整体反映了大规模海侵过程。根据区域对比[16]-[18], 区域内推测的全新统烟墩组岩性主要为灰黄色、黄白色粉细砂、细砂、含砾中粗砂, 含金红石及独居石等砂矿的富矿层位。研究区残余地层的厚度约 5~45 米(图 8)。

通过 Z07 线剖面可以看出: 研究区 A1 之下的层序地层界面的构造特征相似, 为 H10 层序界面为顶界, 整体较为平缓, 无明显的隆凹界线, 地层整体呈现出南低北高的特点, 并且该时期的地层往北超覆, 构造形态表现为典型的断块升降期的构造形态。凹陷的中心位于研究区南部, 相对于下伏地层, 凹陷中心范围有所变大, 且略往东偏离。该时期断裂不发育, 仅在研究区东北部发育一条北北东向断层, 断层为北北东掉向, 断距不大, 并且不具有控沉积作用。地层较平缓, 为缓坡的特征。地层埋深在 60~180 米左右, 地层埋深最深的地方位于研究区南部, 埋深超过了 150 米, 而埋藏最浅的位于研究区北部, 地层埋深约 60 米左右。

地震层序 A2~A3 (H10~H20, 推测对应上更新统八所组): 研究区内基本全区分布, 沉积中心位于研究区南部, 整体呈南厚北薄的格局, 最大残余厚度超过 120 米(A2 + A3)。根据区域对比[16]-[18], 区域内推测的上更新统八所组地层岩性以中细粒砂为特征, 砂粒分选性好, 普遍含有少 - 微量钛铁矿。研究区残余地层(A2 + A3)的厚度约 0~120 米(图 9)。

地震层序 A4~A5 (H20~H30, 推测对应中更新统北海组): 分布于研究区南部, 北部靠近海岸线该套地层上超于下覆地层之上, 研究区北部无该套地层(尖灭或缺失)。同样沉积中心位于研究区南部, 最大残余厚度超过 150 米(A4 + A5)。根据区域对比[16]-[18], 区域内推测的中新统北海组地层岩性比较稳定, 主要分为两个岩性段, 上部为橘黄色、棕红色、褐红色亚黏土、亚砂土, 含铁质结核, 下部为黏质砂、砂砾、砾石层。研究区残余地层(A4 + A5)的厚度约 0~160 米(图 10)。

地震层序 A6 (H30~H40, 推测对应下更新统秀英组): 分布于研究区南部, 北部靠近海岸线该套地层

上超于下覆地层之上，研究区北部无该套地层(尖灭或缺失)。同样沉积中心位于研究区南部，最大残余厚度超过 90 米。根据区域对比[16]-[18]，区域内推测的下更新统秀英组地层岩性中上部以灰色、青灰色页状黏土层或亚黏土层为主，夹浅灰色砂和砾石层，下部为浅灰色砾石层、砂砾层和砂层。局部含双壳类、腹足类及孢粉化石。研究区残余地层(A6)的厚度约 10~150 米(图 11)。

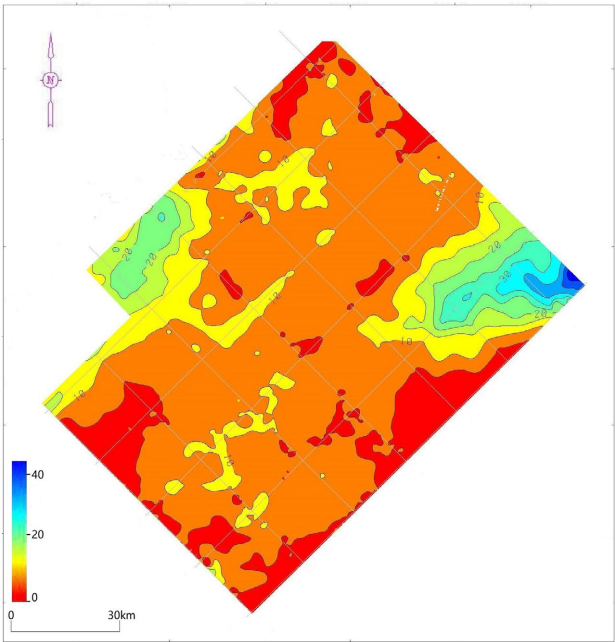


Figure 8. Isopach map of seismic sub-layer A1 (H0~H10) of the study area
图 8. 研究区地震层序 A1 (H10~H0)厚度图

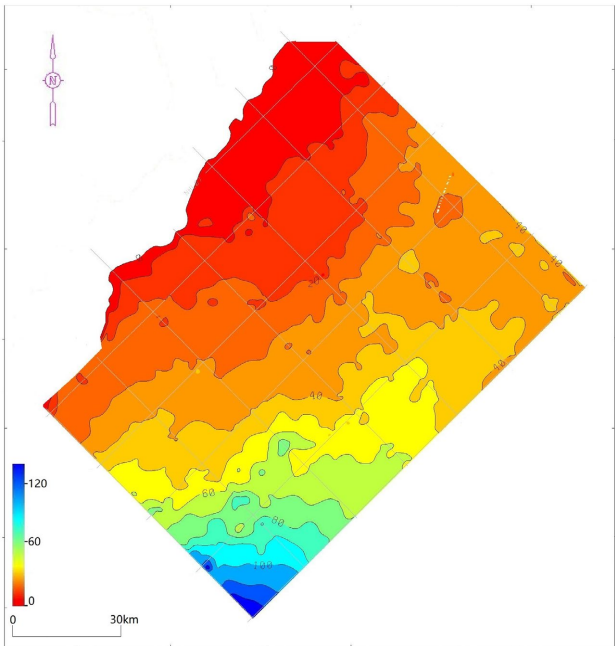


Figure 9. Isopach map of seismic sub-layers A2~A3 (H10~H20) of the study area
图 9. 研究区地震层序 A2~A3 (H20~H10)厚度图

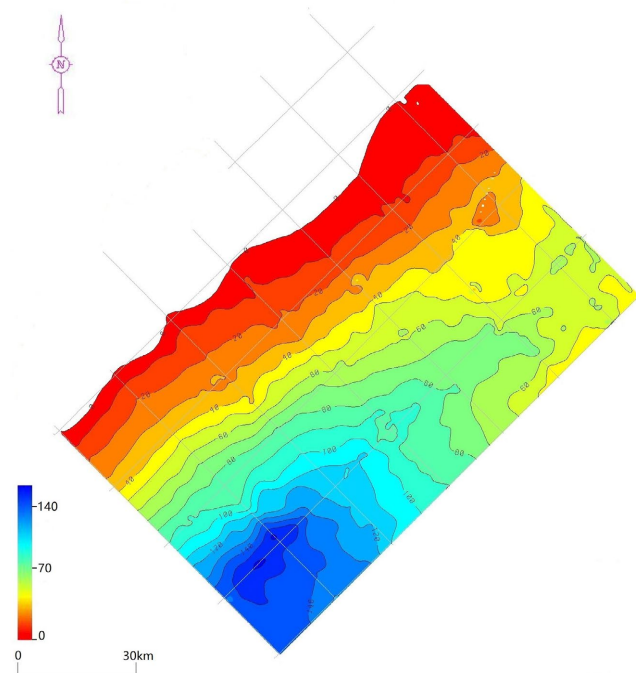


Figure 10. Isopach map of seismic sub-layers A4~A5 (H20~H30) of the study area
图 10. 研究区地震层序 A4~A5 (H30~H20)等厚度图

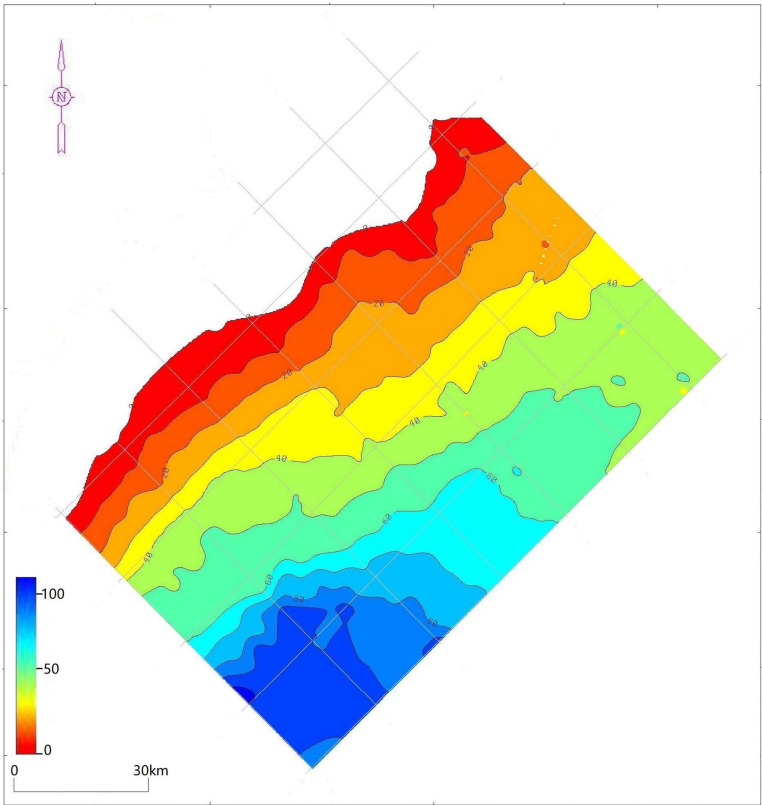


Figure 11. Isopach map of seismic sub-layer A6 (H30~H40) of the study area
图 11. 研究区地震层序 A6 (H30~H40)等厚度图

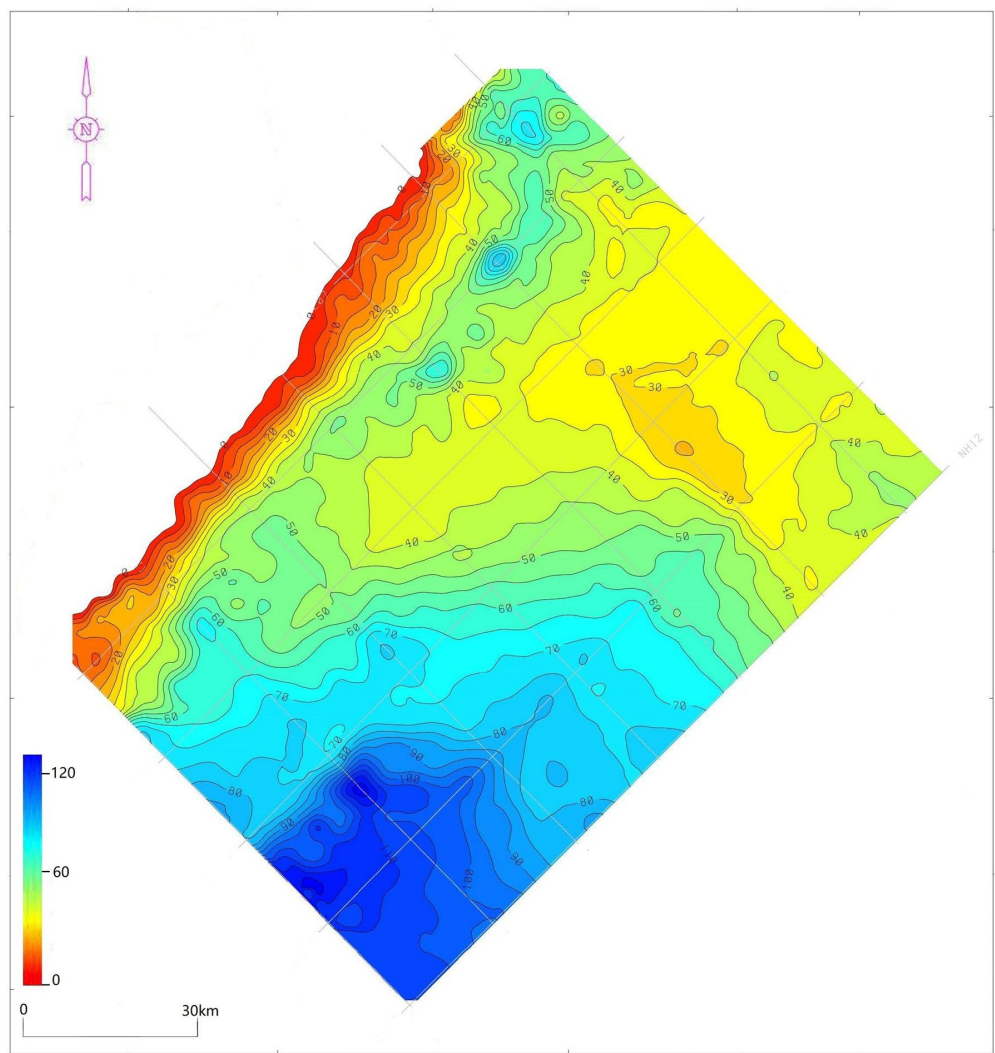


Figure 12. Isopach map of seismic sub-layer A7 (H40~H50) of the study area
图 12. 研究区地震层序 A7 (H50~H40)等厚度图

地震层序 A7 (H40~H50, 推测对应上新统海口组): 研究区内全区分布, 沉积中心位于研究区南部, 最大残余厚度超过 150 米。根据区域对比[16]-[18], 区域内上新统海口组一般划分为四个岩性段, 海南岛东部主要分布一、二段。一段岩性为黄褐色贝壳砂砾岩与砾岩互层, 偶夹粉砂或粉砂质泥层, 局部含海绿石及夹玄武质凝灰岩; 二段岩性以黏土或泥层为主, 普遍夹贝壳碎屑、凝灰岩、沉凝灰岩、橄榄玄武岩。研究区残余地层(A7)的厚度约 10~150 米(图 12)。

6. 讨论

基于前述地震层序划分和厚度展布特征, 结合区域地质背景, 本节对研究区晚新生代沉积演化的关键问题进行探讨。

6.1. 主要不整合面的地质意义

识别出的 8 个区域性不整合面(H0、H10、H11、H20、H21、H30、H40、H50)是构建研究区层序地层格架的核心。这些界面代表了重要的沉积间断或侵蚀事件, 可能受控于全球海平面变化和/或区域构

造活动:

H0 (海底): 代表现代沉积间断/侵蚀面。

H10 与 H11: 这两个密切相关的界面在全区广泛分布, 界面上下可见显著的上超、削截现象(图 3、图 4), H11 界面局部发育下切谷。它们很可能共同记录了晚更新世末期(如对应于 MIS 2/LGM)至全新世初期大规模的海平面下降(暴露侵蚀、河流下切)及其后的海侵过程(上超充填)。H10 可能代表更靠近现代的一次次级海退或稳定期。

H20 与 H21: 同样具有明显的区域不整合特征, 界面上下地层接触关系复杂(上超、削截), H20 界面多处识别出沉积物波(图 5), H21 界面可见下切谷(图 6)。它们可能对应于中更新世晚期(如 MIS 6)或更早的重要海平面低位期。沉积物波的存在指示了活跃的底流或重力流环境, 可能与海平面下降导致陆架暴露、物源区接近和斜坡不稳定有关。将 H20 与 H21 分开, 有助于识别该时期可能存在的次级海平面波动。

H30: 作为中 - 下更新统的分界(推测), 其分布广泛, 在北部靠近海岸线处表现为上超不整合(地层缺失)。该界面可能对应于早更新世一次显著的海平面下降或区域性的构造调整(如东沙运动的局部影响)。

H40 与 H50: 作为新近系 - 第四系边界(H40 推测)及上新统内部界面(H50), 其反射特征表明它们是很重要的构造或沉积转换面。H40 界面上下波组特征差异显著(图 7), H50 界面在浅水区反射强、深水区弱。它们可能主要受控于新近纪末期南海热沉降过程中的重要幕次或区域构造事件(如南海运动晚期幕次), 同时也可能叠加了全球性海平面变化的影响。

6.2. “南厚北薄” 沉积格局的主导因素

各地震层序(A1~A7)等厚图(图 8~12)一致揭示研究区沉积中心位于南部, 呈现“南厚北薄”的格局。这种格局的形成可能受以下因素共同控制:

1) 差异沉降: 研究区南部可能处于琼东南盆地北缘相对沉降更快的区域。新生代以来, 尤其是南海扩张停止后的热沉降阶段, 南部基底沉降速率可能高于北部, 为沉积物堆积提供了更大的可容空间。这与区域上琼东南盆地沉降中心位于南部的认识[5] [6] [14]相符。

2) 物源供给与古地理: 研究区北部紧邻海南岛陆地, 是主要的陆源碎屑供给区。在低海平面时期, 北部近岸区域可能处于侵蚀或过路环境(如河流、海岸带), 沉积物被搬运至更远(南部)的盆地或陆架低洼处堆积, 导致北部地层薄甚至缺失(如 A4~A5、A6 在北部缺失)。在高海平面时期, 虽然海南岛物源持续供应, 但南部更开阔的陆架环境可能更有利于细粒沉积物的悬浮沉降和保存。

3) 古地貌控制: 早期(如 A7 沉积时期)形成的南倾古地貌格局可能被继承和强化, 使得后期沉积物更容易在南部洼陷区堆积。

全新统(A1)在东北部存在一个局部厚度高值区(>45 米), 这与其南厚北薄的总体格局不同。将其归因于“海底斜坡”略显简单。该异常更可能与特定的古地貌有关, 如晚更新世末期低海平面时形成的古河谷侧翼或阶地洼地, 在全新世海侵过程中成为局部沉积物(可能包括来自海南岛东北部河流的输入或沿岸流搬运)的堆积中心。另一种可能是与局部的底流汇聚或沉积物波堆积体有关, 需结合更精细的地貌和沉积相分析确认。

6.3. 特殊地质体的成因与环境意义

下切谷(H11、H20、H21 界面附近): 这些深切古河谷(图 4、图 6)是海平面相对下降时期(低位期), 河流回春、下切陆架形成的。它们清晰地指示了陆架曾暴露于海平面之上, 经历了陆上河流作用。其规模、形态和充填特征记录了古河流系统的性质和海平面下降的幅度。例如, H11 界面的下切谷可能与末次盛冰期(LGM)海平面大幅下降相关。

沉积物波(主要在 H20 界面下): 识别出的沉积物波(图 5)在地震剖面上表现为叠瓦状或对称状反射,

多数具有向上坡迁移的特征。这种迁移模式通常指示等深流(Contourites)或内波/内潮汐驱动的底流活动。其发育在 H20 (推测中更新世)界面之下,表明该时期研究区(特别是南部)可能存在较强的深水环流或内波作用,影响了陆架/陆坡边缘的沉积过程,反映了特定的古海洋环流条件。少数向下坡迁移的沉积物波可能与重力流(如浊流)或碎屑流有关。

6.4. 沉积演化模式探讨

综合地震层序展布、不整合面特征及特殊地质体,可以初步勾勒研究区晚新生代以来的沉积演化轮廓:

1) 上新世(A7): 在南海热沉降背景下,研究区接受以滨浅海相(海口组)为主的沉积。A7 层全区分布且南部较厚,表明当时已存在南倾的沉积基底,海侵范围广泛。

2) 早更新世(A6): 沉积范围开始向北收缩(A6 仅分布于南部),北部出现上超尖灭。这反映了: ① 可容空间增长速率可能减慢或北部抬升; ② 海平面波动幅度增大,低海平面期北部暴露遭受侵蚀或过度冲刷,沉积物主要堆积在南部持续沉降区。下切谷的出现(可能部分与 A6 相关)指示了显著的海平面下降事件。

3) 中更新世(A4~A5): 沉积格局继承性明显,沉积中心稳定在南部,北部地层缺失范围可能比 A6 更大(图 10 vs 图 11),表明差异沉降和/或低海平面暴露效应持续或加强。H20 界面下沉积物波的发育指示了活跃的底流环境。

4) 晚更新世(A2~A3): 沉积范围再次扩大至全区(北部变薄)。H21、H20 界面的广泛不整合及下切谷(图 6)记录了该时期(特别是中晚期)强烈的海平面波动(如 MIS 6、MIS 4、MIS 2 等)。南厚北薄的格局依然显著。

5) 全新世(A1): 大规模海侵覆盖全区。北部薄、南部相对较厚,但在东北部出现局部异常厚值区,可能与古地貌(古河谷/洼地充填)和局域物源/水动力条件有关。整体反映现代海平面高位期的陆架沉积过程。

这一演化模式反映了在南海北部陆架背景下,区域构造沉降(南快北慢)与全球冰期-间冰期海平面旋回共同控制沉积物分布和地层保存的核心作用。未来需结合精确的年代学数据和古环境指标进行验证和细化。

7. 结论

1) 研究区内海底(H0)较为平缓,整体呈现出南低西北高的特点。通过本次研究识别出 8 个特征明显的区域性不整合地震反射界面(H0、H10、H11、H20、H21、H30、H40、H50),划分出 7 个地震反射亚层(A1~A7)。其中, H10/H11、H20/H21 作为独立界面划分层序(A2、A3、A4、A5),是基于其显著的地震反射特征差异、界面上下复杂的地层接触关系(上超、削截、下切谷)以及对识别更精细沉积旋回的意义。

2) 根据各地震反射亚层(A1~A7)的厚度分析,其沉积中心主要位于研究区南部,整体呈南厚北薄的格局。这一格局主要受控于研究区南部基底沉降速率相对较快以及北部靠近物源区(海南岛)可能导致的沉积物“过路”效应和低海平面期暴露剥蚀的综合影响。全新统(A1)在东北部存在局部厚度异常(>45 米),可能与特定的古地貌洼地或局域沉积作用有关。

3) 从各地震层序的分布范围来看: A7 (推测上新统)、A2~A3 (推测上更新统)、A1 (推测全新统)地层全区分布; A4~A5 (推测中更新统)和 A6 (推测下更新统)仅分布于研究区南部,在其北部靠近海岸线处尖灭缺失。这种分布特征反映了中-早更新世时期,研究区北部可能处于相对较高的位置或遭受更强烈的暴露剥蚀,导致地层未能沉积或未被保存。需要再次强调,上述地质时代是基于区域对比的推断。

4) 识别出的下切谷(主要与 H11、H20、H21 界面相关)是低海平面时期陆架暴露和河流下切的直接证据;沉积物波(主要与 H20 界面相关)则指示了特定时期(推测中更新世)活跃的等深流或底流环境,为研究古海洋环流提供了线索。

基金项目

海南省海洋地质资源与环境重点实验室开放课题“琼海海岸带海域浅地层结构及沉积层序研究”(22-HNHYDZZYHJKF026); 海南省财政厅“南海固体矿产资源潜力调查评价”专项(T100732)联合资助。

参考文献

- [1] 陈泓君, 黄文凯, 邱燕. 海南岛西南海域晚第四纪古水深反演[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(6): 128-139.
- [2] 张匡华, 傅人康, 张从伟, 等. 海南岛南部海棠湾晚更新世以来单道地震剖面特征[J]. 物探化探计算技术, 2018, 40(6): 718-723.
- [3] 姚伯初. 南海新生代的构造演化与沉积盆地[J]. 南海地质研究, 1998(10): 1-17.
- [4] 李学杰, 王哲, 姚永坚, 等. 南海成因及其演化模式探讨[J]. 中国地质, 2020, 47(5): 1310-1322.
- [5] 栾锡武, 张亮. 南海构造演化模式: 综合作用下的被动扩张[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(6): 59-74.
- [6] 李家彪. 南海大陆边缘动力学: 科学实验与研究进展[J]. 地球物理学, 2011, 54(12): 2993-3003.
- [7] 杨天一. 南海西南次海盆陆缘演化与幕式扩张的岩浆-构造-地层记录[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2024.
- [8] 何家雄, 陈胜红, 马文宏, 等. 南海东北部珠江口盆地生成演化与油气运聚成藏规律[J]. 中国地质, 2012, 39(1): 106-118.
- [9] 马文宏, 何家雄, 姚永坚, 等. 南海北部边缘盆地第三系沉积及主要烃源岩发育特征[J]. 天然气地球科学, 2008(1): 41-48.
- [10] 林长松, 初凤友, 高金耀, 等. 论南海新生代的构造运动[J]. 海洋学报(中文), 2007(4): 87-96.
- [11] 宫贺晏. 珠江口盆地珠三坳陷构造演化及其对煤系烃源岩的控制[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2014.
- [12] 陈飞, 曾维特, 全长亮, 等. 琼州海峡第四纪层序格架及其沉积演化[J]. 地学前缘, 2024, 31(3): 100-112.
- [13] 胡铎波, 张海霞, 余得振, 等. 苏丹 Melut 盆地 Gasab 区块的地震层序分析[J]. 勘探地球物理进展, 2006, 29(4): 273-278.
- [14] 陈梅, 施小斌, 任自强, 等. 南海西北部沉积盆地晚新生代沉降、沉积特征: 对深部异常过程的响应[J]. 地球物理学报, 2019, 62(2): 587-603.
- [15] 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(2): 15-21.
- [16] 海南省地质调查院. 中国区域地质志·海南志[M]. 北京: 地质出版社, 2017.
- [17] 黄仕锐, 龙根元, 吴时国, 等. 南海油气地质概况与资源基础[M]. 北京: 地质出版社, 2017.
- [18] 朱伟林, 米立军. 中国海域含油气盆地图集[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.