

海南岛三亚湾全新世以来沉积特征与古环境演变^{*}

孙倩文¹, 黄康有^{1,2}, 谢德豪¹, 周斯¹, 王萌¹, 郑卓¹

(1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 广州 510275;

2. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广东 广州 510275)

摘 要: 根据海南岛三亚湾 SY01 钻孔 AMS¹⁴C 测年建立沉积物年代框架, 结合粒度、烧失量、色度和有孔虫等分析研究了三亚湾地区的海平面变化、沉积相和古环境演变过程。结果表明, SY01 钻孔的沉积物呈现 5 个变化阶段: 含砾粉砂层-含粗砂粉砂层-含中砂粉砂层-含细砂粉砂层-粉砂层; 有孔虫和介形虫的分析结果显示其主要出现在 8.1 ~ 3.7 cal ka BP 期间, 且含量最丰富的层位在 5.2 ~ 4.7 cal ka BP; 烧失量的分析结果表明有机质和碳酸盐在 5.2 ~ 4.7 cal ka BP 期间的含量相对较高, 揭示该时期陆地或海洋生物较为繁盛; 色度值的结果也反映该阶段处于还原状态的沉积环境。因此, 综合各个环境代用指标, 研究区域的沉积过程划分为 5 个阶段: 洪积相内侧-洪积相远端-滨岸相-海湾相-潟湖相; 三亚湾地区从 ~ 9 cal ka BP 开始沉积, 全新世海侵高海平面期为 ~ 5 cal ka BP, 之后进入晚全新世海退阶段, 河流泥沙输送形成了三亚湾砂质海岸。

关键词: 三亚湾; 全新世; 沉积相; 海平面变化

中图分类号: P534.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2019) 03-0013-09

On the sedimentary environment change since Holocene in the Sanya Bay, Hainan Island

SUN Qianwen¹, Huang Kangyou^{1,2}, XIE Dehao¹, ZHOU Si¹, WANG Meng¹, ZHENG Zhuo¹

(1. School of Earth Science and Geological Engineering, Sun Yat-sen University,
Guangzhou 510275, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Resources & Geological Processes,
Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: In order to study the sedimentary evolution and paleoenvironments change during the early Holocene, a 15.6 m core (SY01) was obtained from the Sanya basin. The age frame of core SY01 was established based on four AMS¹⁴C dating results. The paleoenvironmental analysis methods of grain size, loss on ignition (LOI), grayscale and foraminifera were used to reconstruct the sea level change, sedimentary facies and paleoenvironment evolution in this area. The results show that the SY01 sediments can be divided into five layers: gravel-silty fine sand layer, coarse-silty sand layer, medium-silty sand layer, fine-silty sand layer, and silty sand layer. The foraminifera mainly occurred in the period of 8.1 ~ 3.7 cal ka BP, with the highest abundance during 5.2 ~ 4.7 cal ka BP. The LOI analysis shows that the contents of organic matter and carbonate were relatively high during 5.2 ~ 4.7 cal ka BP, and the grayscale values also reflect the sedimentary environment with a reduction condition. Therefore, the depositional process of

* 收稿日期: 2018-06-21

基金项目: 国家自然科学基金 (41472142, 41661144003)

作者简介: 孙倩文 (1993 年生), 女; 研究方向: 全球变化与环境演变; E-mail: sunqianwencv@163.com

通信作者: 黄康有 (1979 年生), 男; 研究方向: 全球变化与环境演变; E-mail: hkangy@mail.sysu.edu.cn

the study area can be divided into 5 stages: Inner pluvial facies-Lateral pluvial facies-Littoral facies-Estuarine facies-Lagoon facies. The deposition started from ~ 9 cal ka BP, and the highest sea level occurred at ~ 5 cal ka BP, and then the Sanya basin became the fresh water environment in the late Holocene.

Key words: Sanya basin; Holocene; sedimentary facies; sea level change

海平面变化是地球响应气候变化的重要参数之一,第四纪期冰期-间冰期交替变化所引起的全球海平面升降和沿海地区的海侵和海退事件历来是古环境研究关注的热点,尤其末次冰消期以来海平面上升给海岸带环境带来严重的威胁。因此,了解清楚华南三角洲地区地质历史时期海平面变化历程,为预测该研究区域未来气候条件下海平面变化和减灾防灾提供科学依据。

珠江三角洲地区海平面从全新世早期开始迅速上升,在中全新世达到最高海平面 ($6 \sim 5$ ka BP),而且海水入侵北至广花平原一带^[1];韩江三角洲地区全新世阶段海平面在 $6.8 \sim 2.5$ ka BP 持续上升^[2];福建沿海地区海平面早全新世阶段上升始于 $12 \sim 10$ ka BP,大约在 $7 \sim 6.5$ ka BP 为最高海平面时期^[3]。有关海南岛地区全新世阶段海平面变化,黄德银等^[4]通过对海南岛鹿回头的珊瑚礁测年,指出全新世以来南海北部至少存在过 4 次高海平面阶段, $7.3 \sim 6$ ka BP 是最高海平面时期;时小军等^[5]采用精确的高程测量和高精度 TIMS 铀系定年方法对海南岛东部琼海青葛附近的珊瑚进行研究,认为南海中全新世存在比现在高出有 $2 \sim 3$ m 的高海平面 ($7.1 \sim 5.15$ ka BP),而此后海平面呈振荡波动至目前的海平面位置。

三亚湾位于海南岛南部,濒临南海北部,其滨海沉积受海平面变化控制,是研究海平面变化历史的理想场所。前人对海南岛地区的古环境研究主要集中在海南岛西北和东海岸等地,在三亚湾的古环境重建工作开展研究相对较少,尤其在三亚湾盆地沉积学、地球化学和微体古生物记录等方面仍然不足,对揭示该地区晚全新世以来海进海退确切的时间点仍然需要更多的证据。本文选择海南岛三亚湾岩芯 (SY01) 开展研究,根据¹⁴C 测年建立钻孔沉积年代框架,通过粒度、有孔虫、烧失量和色度等分析进行地层划分,探讨三亚湾地区的古气候环境以及海平面变化演变过程,为华南沿海全新世以来的海侵历史和古气候的重建提供新依据。

1 研究区概况

三亚湾处于海南岛南部,东起鹿回头半岛南

端,西至马岭-天涯海角基岩岬角,为近东西向的沙质海岸,长约 18 km,海湾呈对数螺旋形^[6]。三亚湾海岸地貌类型丰富,基本为开阔港湾型海岸,形成于宽广而较平整的三亚沙坝之上,属连岛坝湾,是全新世以来的海侵及后期改造作用形成,海岸附近分布不同密度的珊瑚礁,三亚湾两侧及湾内随水深的增加,沉积粒度逐渐变细,沉积物由含珊瑚和贝壳碎屑的砾石、粗砂向粉砂、黏土过渡^[7]。

三亚湾是热带季风气候区,年均温约 25°C ,年均降水量约 1 300 mm。土壤属于砖红壤土或红褐土,含砂量大,原始植被以热带雨林为主^[8]。三亚河是流入三亚湾最主要的河流,干流总长度 28.8 km,总落差 845 m,平均河床比降 0.65%,多年平均径流量 $2.11 \times 10^8 \text{ m}^3$,由河口进入三亚湾的输沙量较少^[9]。

SY01 钻孔位于三亚市三亚湾羊栏村以东 500 m 处,离岸距离 1.7 km,钻孔所在区域为农耕荒废地,钻孔的地理坐标为 $18^{\circ}17'48''\text{N}$ 、 $109^{\circ}27'42''\text{E}$,孔口高程 2 m (图 1)。

2 研究材料与方法

2.1 岩芯描述

本研究通过地质勘探 100 型钻机钻取岩芯,采用套管式取芯,岩芯平均取芯率达到 95% 以上,岩芯总长 15.95 m,岩芯材料在中山大学第四纪古环境岩芯库冷藏保存。SY01 钻孔顶部 $0 \sim 15$ cm 为扰动层,根据岩性变化可以划分为 8 段 (图 2): ① $15 \sim 182$ cm: 灰褐色粉砂; ② $182 \sim 223$ cm: 棕黄色中砂; ③ $223 \sim 811$ cm: 青灰色黏土,富含贝壳; ④ $811 \sim 962$ cm: 由青灰色黏土逐渐变为浅灰色中砂; ⑤ $962 \sim 1\,090$ cm: 暗黄色-灰黑色粗砂; ⑥ $1\,090 \sim 1\,249$ cm: 灰白色中-粗砂,含砾石; ⑦ $1\,249 \sim 1\,483$ cm: 黄色粗砂,含砾石; ⑧ $1\,483 \sim 1\,595$ cm: 红褐色残积土。

2.2 研究方法

在本文采用古环境研究常用的方法,主要包括烧失量、粒度、有孔虫和色度等分析方法。烧失量值是反映沉积物有机质和碳酸盐含量的变化情况,通过烧失量的变化能够揭示沉积相与沉积环境的演

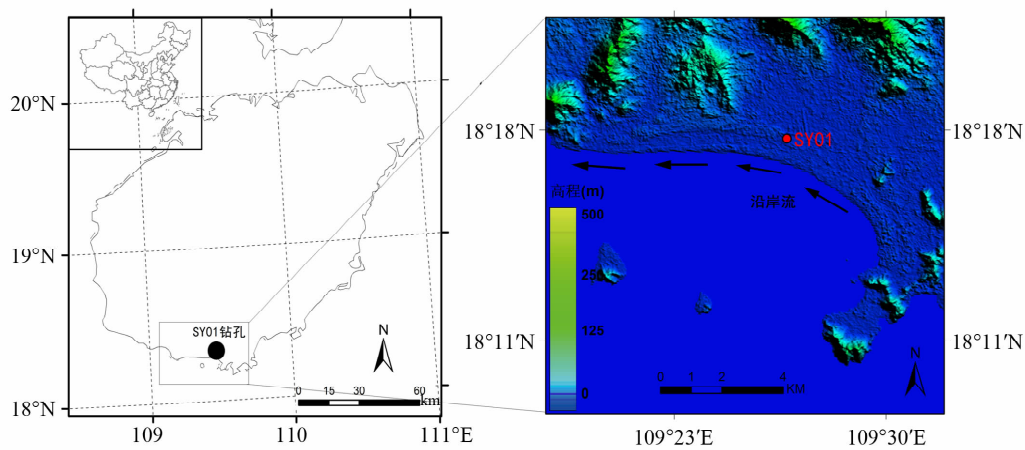


图 1 SY01 钻孔地理位置和三亚湾地区地形图

Fig. 1 Geomorphological map of the Sanya bay area and core SY01 location

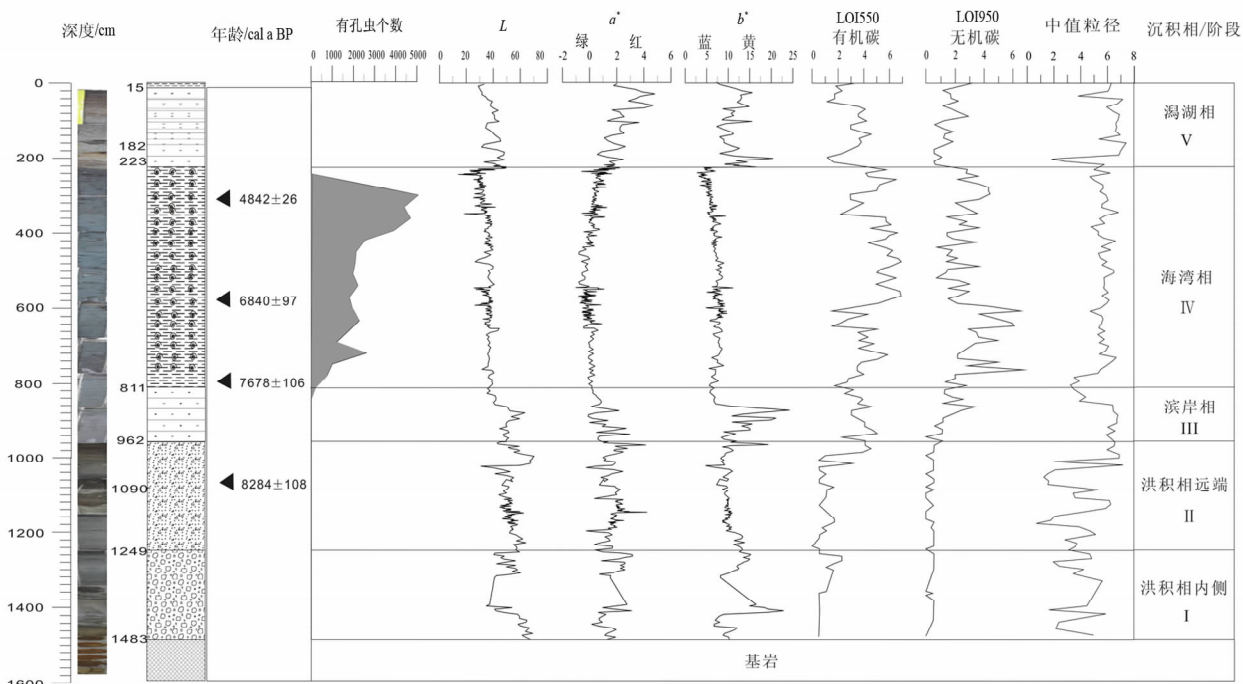


图 2 SY01 钻孔岩芯特征及古环境代用指标分析结果

Fig. 2 Core features and results of Lithology, foraminifera, color indexes and TOC of core SY01

变特征；该指标已被广泛运用于海洋、湖泊和黄土沉积物等的研究中^[10]。粒度分析是一种常规的沉积学研究方法，被广泛应用于沉积环境和沉积过程的研究，根据沉积物的粒度组成、粒度参数及各种图解可以解释沉积物输送过程和沉积环境特征^[11]。有孔虫和介形虫在滨浅海区域分布广泛，对环境变化非常敏感，且易于在沉积物中保存，具有海相沉积环境的重要指示意义。色度分析值可以反映出沉积物的保存环境，间接指示当时的气候条件^[12]。

各种分析方法的实验步骤详细介绍如下。

粒度分析：先进行常规的预处理，然后在中山大学地理学院使用英国 Malvern 公司的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪进行粒度分析。为了保证测量结果的准确性，每个样品重复测试 3 次取平均值，对测量结果出现较大误差的样品进行重新测试。粒度划分采用尤登 - 温德华氏等比制 Φ 值粒级标准，粒度大于等于 1 mm 的沉积物用传统筛析法，最后作频率曲线图和概率累积曲线图，并计算各种粒度

参数^[11]。

烧失量（Loss on Ignition, LOI）是指沉积物中有机质和碳酸盐在一定温度下分解导致沉积物在不同温度下的质量差^[15]，LOI550 和 LOI950 分别代表有机碳和无机碳的含量^[10]。样品的色度分析则使用了日本 CHROMA METER CR-400 色度测试仪，分别用 L 、 a^* 、 b^* 指示亮度、风化指数和氧化指数。

有孔虫分析：样品经前处理后在体视显微镜下进行微体古生物的鉴定和统计，计算每 100g 样品中有孔虫和介形虫的个数，统计有孔虫或介形虫超过 50 枚的样品数。

本研究中除了钻孔顶部人工扰动层（0 ~ 15 cm）和底部红褐色风化壳土层（1 483 ~ 1 595 cm）不进行取样分析；其余样品从钻孔顶部 15 ~

1 483 cm 处以间隔 10 cm 取样，总共获取 135 个样品进行粒度分析和烧失量分析；从 15 ~ 1 249 cm 之间以间隔 25 cm 取样进行有孔虫分析，总共分析了 50 个样品。色度分析以间隔 3 cm 进行测试，测试了 526 个样品。

3 结果与讨论

3.1 测年结果及钻孔年代框架

本研究分别在岩芯 310、579、796 和 1 065 cm 处选取螺壳、双壳类和黏土等 4 个样品送美国迈阿密 Beta 放射性碳测年实验室进行 AMS¹⁴C 定年，测年结果见表 1；日历年龄数据用 IntCal 13 数据进行校正^[13]，钻孔的年龄 - 深度模型用 R-clam 绘制（图 3）。

表 1 SY01 钻孔 AMS¹⁴C 年代测试结果
Table 1 AMS ¹⁴C dating results of core SY01

送样编号	测年材料	采样深度/cm	测年结果/a BP	校正年龄/ cal a BP
SY01-1	螺壳（碳酸盐）	310	4 260 ± 30	4 842 ± 26
SY01-2	双壳类（碳酸盐）	579	6 040 ± 30	6 840 ± 97
SY01-3	黏土（有机质）	796	7 210 ± 50	7 678 ± 106
SY01-4	黏土（有机质）	1 065	7 650 ± 60	8 284 ± 108

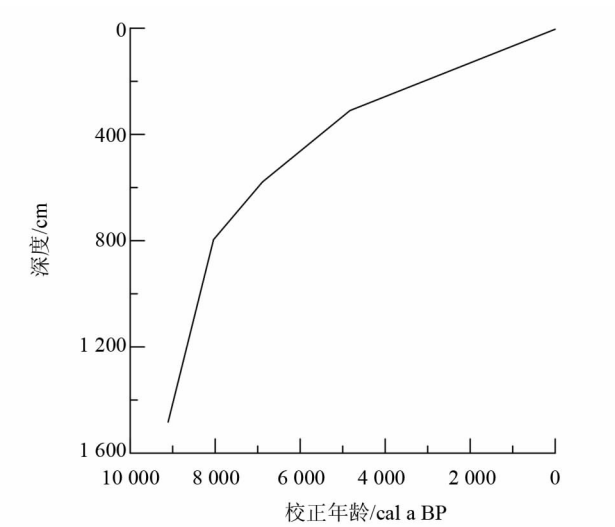


图 3 SY01 钻孔年代 - 深度模型
Fig. 3 Age-depth model of core SY01

3.2 有孔虫和介形虫分析结果

根据 50 个样品有孔虫和介形虫的统计结果，有孔虫数量超过 50 枚的有 20 个样品，集中在 240 ~ 820 cm 深度之间，且有孔虫数量较多，在此深度范围内有孔虫的数量随深度变浅而增加，其中在 298 cm 处有孔虫数量最多，总共有 4 612 个。

有孔虫主要出现在岩芯的 811 ~ 223 cm 层位，且含量最丰富的层位在 400 ~ 223 cm 之间，尤其是在 300 cm 左右有孔虫丰度出现最大值，随即丰度急剧下降。主要的有孔虫种类有热带五块虫（*Quinqueloculina tropicalis*）、阿卡尼五块虫圆形亚种（*Quinqueloculina akneriana rotunda*）、毕克卷轮虫（*Ammonia beccari*）、压扁卷轮虫（*Ammonia compressiuscula*）、异地希望虫（*Elphidiun advenum*）、艾比里厄花室虫清晰亚种（*Celallanthus ibericum*）；介形虫有鲁斯曼戳花介（*Stigmatocythere rosemani*）和雷州双角花介（*Bicorncythere leizhouensis*）。

3.3 岩性特征和沉积相

SY01 钻孔沉积物色度、烧失量变化如图 2 所示，粒度变化曲线如图 5 和 6 所示。根据岩性特征和曲线，钻孔剖面从老到新分为 5 个带：I - V，各带特征简述如下：

I 带（1 483 ~ 1 249 cm）： L 持续降低， a^* 在 1 410 cm 处迅速升高至峰值再缓慢降低，颜色偏红； b^* 波动范围大，颜色偏黄。LOI550 变化幅度逐步增大，LOI950 变化幅度很小。

表 2 SY01 孔所见主要有孔虫和介形虫及其生态^[12-13]
Table 2 Main mollusca species and their living environment of core SY01

序号	种名	中文名	现代种生态分布
01	<i>Ammonia beccarii</i> var	毕克卷轮虫变种	内、中陆架，海陆过渡
02	<i>Celllanthus ibericum</i>	艾比里厄花室虫	浅水温暖环境
03	<i>Elphidiun advenum</i>	异地希望虫	内陆架
04	<i>Ammonia compressiuscula</i>	压扁卷轮虫	内、中陆架
05	<i>Quinqueloculina tropicalis</i>	热带五块虫	半咸水浅水种
06	<i>Quinqueloculina akneriana</i> rotunda	阿卡尼五块虫圆形亚种	半咸水浅水种
07	<i>Bicorncythere leizhouensis</i>	雷州双角花介	滨海广盐带
08	<i>Sinocytheridea impressa</i>	典型中华美花介	滨海广盐带

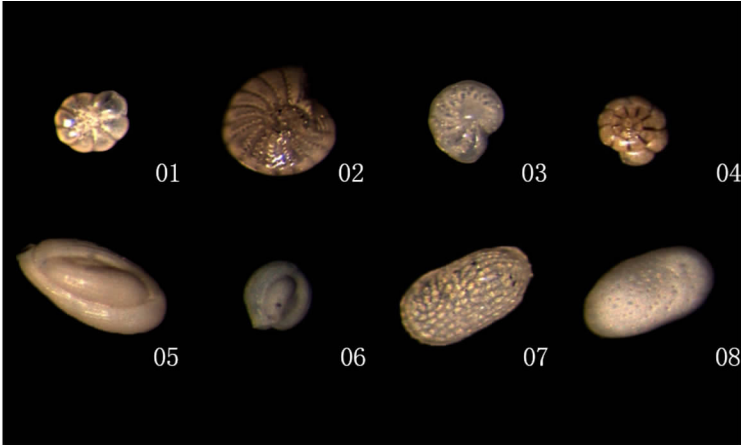


图 4 SY01 钻孔海相层中的主要有孔虫和介形虫

Fig. 4 Main species of foraminifera and ostracodes collected from marine strata in core SY01

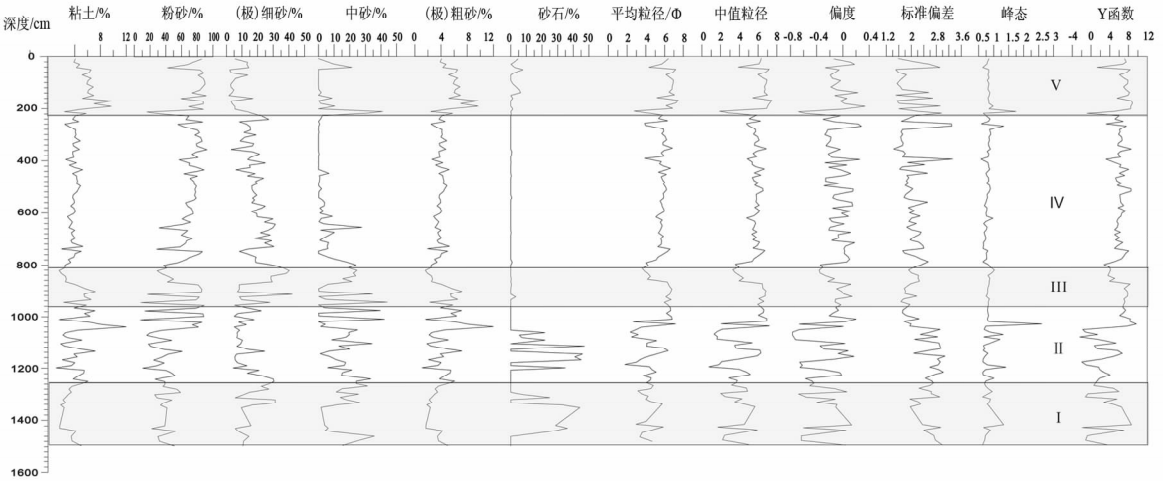


图 5 SY01 钻孔粒度参数和组分含量 ($w_B/\%$)

Fig. 5 Results of grain size and parameters of sediments in core SY01

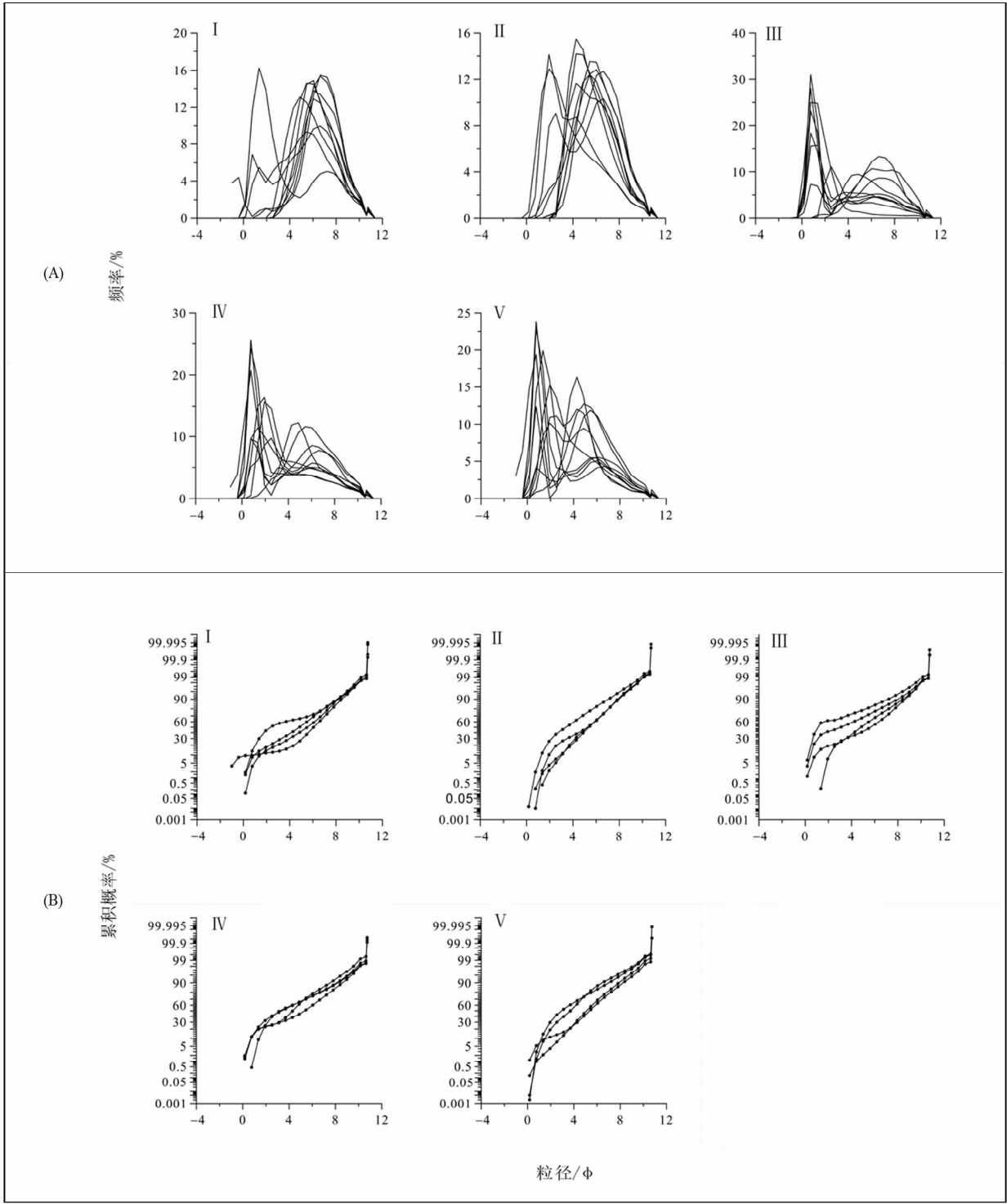


图 6 SY01 钻孔粒度频率曲线 (A) 和概率累积曲线 (B)

Fig. 6 Frequency distribution curves (A) and probability accumulative curves (B) of core SY01

沉积物组分以粉砂和砾石为主，细砂和中砂的含量较多，粗砂和黏土含量较少；多数极负偏态偶有近对称偏态，峰态宽平。频率曲线图多为双峰，大部分峰值差别较大，主峰尖锐，峰值在 0 ~ 1 Φ 之间，次峰在 6 Φ 附近；小部分双峰的主次峰距离

近且差别很小，峰值在 1 Φ 和 5 Φ，揭示沉积物来源途径多，但分选差。概率累计曲线图为 4 段式，滚动组分约 10%，跳跃组分占 5% ~ 40%，悬浮组分较多，约占 40% ~ 90%，但悬浮总体斜率较低，表明分选较差。

此外,由于砾石与泥质组分同时出现,大粒径砾石含量较多,且风化氧化指数高,推测为洪积相内侧沉积。

Ⅱ带(1249 ~ 962 cm): L 先缓慢向左降低,迅速升高至最大值后再波动性降低; a^* 波动性升降明显,颜色偏红; b^* 变幅较小颜色偏黄。LOI550 稍小幅度波动; LOI950 几乎与上阶段保持不变。

该带沉积物仍以含砾的粉砂层为主(11% ~ 59%),砾石含量波动较大;平均粒径 4.3 Φ ;标准偏差 2.7,分选差,但是较上阶段好;偏态多为很负偏到负偏态,偶有近对称;峰态多数为宽平很少有尖窄。频率曲线图双峰,偏度较大,主峰峰值在 0 ~ 2 Φ 之间,峰态较尖锐,次峰峰值在 4 ~ 6 Φ 之间,峰态平缓。粗组分较上阶段增多,细组分较上阶段减少。概率累计曲线图为 3 段式,滚动组分小于 5%,含量较上阶段减少,但分选较上阶段好;跳跃组分占 5% ~ 30%,较上阶段稍低;悬浮组分占主要,约 50% ~ 90%。

根据砾石含量较 I 带稍低,且亮度较上阶段增大,氧化和风化指数较上阶段降低,推测为洪积相远端沉积。

Ⅲ带(962 ~ 811 cm): L 和 b^* 均呈向右波动性升高, a^* 先降低再升高,三者都在 899 cm 处升至最大值,之后缓慢降低。 b^* 比上阶段明显升高,氧化作用增强。LOI550 较上阶段增加,表明有机质含量增加; LOI950 走势明显升高,碳酸盐含量较上阶段明显增加。亮度和风化指数较上阶段稍低,氧化指数较上阶段稍高,有机碳和碳酸盐含量较上阶段增加。

沉积物以含中砂粉砂层为特征,几乎不含砾石;该层细砂含量明显增多,以细砂粉砂为主;平均粒径 5.8 Φ ;标准偏差 1.9,表示分选较差;偏态多为负偏,少数为近对称;峰态宽屏。频率曲线图为单峰,部分曲线峰值在 1 ~ 3 Φ 之间,部分在 6 Φ 左右,偏度呈现负偏、近对称,峰态较平缓,粗组分含量较上阶段减小,细组分增加。概率累计曲线为 4 段式,滚动组分约 10% ~ 50%,跳跃组分约 10% ~ 30%,悬浮组分约 40% ~ 80%,曲线斜率较小,表明分选差,推测为滨岸相沉积。

Ⅳ带(811 ~ 223 cm): 此带中 L 、 a^* 、 b^* 均较上阶段小幅度减小。 L 变化范围主要集中在 30 ~ 40; a^* 主要集中在 0 ~ 2,颜色由红到绿再到红; b^* 变化范围为 3 ~ 8,颜色由蓝到红。LOI550 与 LOI950 变化幅度大且趋势相反, LOI550 和

LOI950 变化均较大,前者范围在 1.47% ~ 6.94% 之间;而后者范围在 0.71% ~ 6.94% 之间。有机碳含量从低到高逐渐增多,但碳酸盐含量逐渐减少,两者呈现此消彼长的变化趋势。

沉积物以含细砂粉砂层为主;而且粉砂含量逐渐增多的趋势,平均含量达到 71%;平均粒径为 5.7 Φ ;标准偏差为 2,表示分选差,但较上阶段稍好;偏态多为负偏,沉积物集中在较细的区域;峰态宽平。频率曲线图多数为单峰,峰值在 4 ~ 5 Φ 附近,峰态较宽平;少数为双峰,主峰在 2 Φ 左右,次峰峰值在 6 ~ 7 Φ 之间,主次峰差值较小。概率累计曲线图均为典型 3 段式,滚动组分小于 10%,跳跃组分 10% ~ 20%,悬浮组分为主,占比高达 80%,分选较上阶段好。

根据该段沉积物粒度变小,风化和氧化指数较低,结合该阶段富含雷州双角花介、异地希望虫等浅海介形虫和有孔虫化石,推测沉积相为海湾相。

V带(223 ~ 15 cm): 此带中 L 、 a^* 、 b^* 的变化幅度较Ⅱ带大,无明显规律。亮度、风化指数和氧化指数均较上阶段增加。 L 为 30 ~ 50; a^* = 1 ~ 5,颜色偏红; b^* 为 8 ~ 20,颜色偏黄。LOI 550 和 LOI 950 都明显降低,有机质含量和碳酸盐含量都减少。

虽然在此带早期阶段,中砂和粗砂的含量突然增多,但整个阶段的岩芯仍然以粉砂为主,细砂和黏土的含量减少,含有少量的砾石。平均粒径 6.2 Φ ,沉积物颗粒较细;标准偏差为 2,分选差;偏态多为负偏、近对称,沉积物集中在较细的区域;峰态宽屏。频率曲线图多数为单峰,峰值众数在 5 ~ 7 Φ 附近,单峰频率曲线展开度较宽,峰值高,表示分选较差;数量较少的双峰的主峰也在 6 ~ 7 Φ 附近,次峰在 1 Φ 附近,且两峰相距远,峰值低,说明是混合成因且分选较差。细组分较上阶段增加。概率累计曲线图为典型 3 段式,滚动组分小于 5%,跳跃组分约 5% ~ 50%,悬浮组分依然以 50% ~ 95% 占主要,推测为潟湖相沉积。

3.4 三亚湾地区海平面升降及沉积环境演变过程

由于海平面记录受海平面变化、构造运动及标志物沉积地貌部位等多种因素影响,珠江三角洲地区、粤东及福建等地区存在多次海侵记录,跟该地区发育具下沉趋势的断陷盆地,为海平面的沉积记录打开空间有关^[14]。然而,海南岛南部沿海地区缺少发育大型的河流,仅存在小型的河流沉积盆地,并且为非断陷盆地,在一定程度上缺少沉积空间,因此该地区在末次盛冰期以来的沉积层相对较

薄或者缺少晚全新世阶段的沉积物。末次冰消期以来,随着海平面快速上升,华南沿海地区在中全新世达到最高海平面的时间也存在空间上的差异性^[15-19];其中原因之一是三角洲地区存在多个构造断块,且各个断块的垂直差异运动强度不尽相同,导致不同断块接受海侵沉积的时间不同^[20]。

前人在珠江三角洲地区已经开展了大量的研究工作,在早全新世阶段的沉积物主要以含砾黏土质粗砂、泥质粗砂或粉砂质细砂、黏土质细砂为主,反映出当时以河床相及河湖相为主要沉积特征^[21]。三亚湾 SY01 钻孔沉积物分析结果表明:三亚湾地区在全新世早期 (9.1 ~ 8 cal ka BP) 开始堆积,该时期沉积物主要为含砾粉砂,沉积相为洪积相沉积,表明该地区已打开可容空间;与珠江三角洲地区的沉积环境不同的是:珠江三角洲地区的沉积环境呈现出从河流相逐渐过渡到海陆交互相的变化,沉积物厚度可达 20 多 m;然而,三亚湾地区从洪积相快速演变为滨岸相,沉积物厚度较薄,仅有 7 m,可能跟该地区在早全新世阶段构造相对稳定,同时也表明海平面在早全新世阶段呈现出快速上升趋势。

三亚湾地区全新世中期 (8.1 ~ 3.5 cal ka BP) 的沉积记录表明,开始由滨岸演化为海湾相沉积环境;有孔虫的分析结果也显示出其主要出现 8.1 ~ 3.7 cal ka BP,且含量最丰富的层位在 5.2 ~ 4.7 cal ka BP (高程 1.1 m 附近),推测到 5 cal ka BP 左右达到海平面最高值。而对比现代三亚湾水下沉积物,与该层位相似粒径的沉积物在至少 4 ~ 5 m 水深处,所以推测当时海平面比现在高。此外,珠江三角洲地区和韩江三角洲的沉积记录亦表明距今 6 ka 左右出现第一次高海平面^[22-23],而

三水盆地高海平面时间较早是由于珠江三角洲是一个断块三角洲,各构造块全新世存在明显升降差异。实际上,国内外众多学者认为:全球高海平面发生在 5 ~ 6 cal ka 的大西洋期,与三亚湾钻孔高海平面的时间记录相吻合。

在晚全新世阶段,随着海平面下降,华南地区发育了湿地沼泽;例如珠江三角洲地区的研究结果表明:在晚全新世阶段海水逐渐退出珠江三角洲地区,并且在整个珠三角盆地广泛发育草地和湿地沼泽^[24];三亚湾盆地也表现相类似的演化过程,也即海水逐渐退出三亚湾盆地,人类活动逐渐增强。

4 结 论

本研究在 AMS¹⁴C 测年结果建立年代框架的基础上,综合了粒度分析、烧失量、色度分析和有孔虫等分析结果,揭示了海南岛三亚湾 SY01 钻孔从早全新世阶段以来的古环境演变过程。主要获得以下几方面的认识:

1) 海南岛三亚湾 SY01 钻孔全新世厚度大概为 12 m 左右,全新世基底沉积物为残积土。三亚湾早全新世阶段的沉积物为含砾石的粉砂,岩性逐渐过渡为含粗砂-中砂-细砂的粉砂;沉积相从洪积相过渡到滨岸相,再演变到海湾相,最后为潟湖相沉积。

2) 海南岛三亚湾地区的沉积物始于 ~9 cal ka BP,随着海平面迅速上升,该地区高海平面时期在 ~5 cal ka BP,有孔虫和介形虫大量聚集,有孔虫鉴定特征显示为海湾相沉积;随着进入海退阶段,水动力作用增强,潟湖逐渐形成,并逐渐演变形成现代的三角洲地貌。

参考文献:

- [1] 黄镇国,李平日,张仲英,等. 珠江三角洲的形成发育演变[M]. 广州:科学普及出版社广州分社,1982.
- [2] ZONG Yongqiang. Mid-Holocene sea-level highstand along the southeast coast of China[J]. Quaternary International, 2004,117: 55-67.
- [3] 马明明,刘秀铭,周国华,等. 福建沿海地区晚第四纪海侵研究进展及存在的问题[J]. 亚热带资源与环境学报, 2016, 11(3): 9-19.
MA M M, LIU X M, ZHOU G H, et al. Research progress and problems of late quaternary transgression in coastal areas of Fujian province[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2016, 11(3): 9-19.
- [4] 黄德银,施祺,张叶春. 海南岛鹿回头珊瑚礁与全新世高海平面[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005 (4): 5-11.
- [5] HUANG D Y, SHI Q, ZHANG Y C. Coral reef and high sea level at Luhuitou, Hainan island during the Holocene [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2005 (4): 5-11.
- [5] 时小军,余克服,陈特固. 南海周边中全新世以来的海平面变化研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007(5): 121-132.
- [5] SHI X J, YU K F, CHEN T G. Progress in researches on sea-level changes in South China Sea since mid-holocene [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2007(5): 121-132.
- [6] 毛龙江,张永战,魏灵,等. 海南岛三亚湾海滩研究[J]. 第四纪研究, 2006 (3): 477-484.

- MAO L J, ZHANG Y Z, WEI L, et al. Study on beach characteristics in Sanya area of Hainan island[J]. *Quaternary Sciences*, 2006 (3): 477–484.
- [7] 邱立国, 陈海洲, 陈春华. 海南岛海湾的特征分析和开发利用探讨[J]. *海洋开发与管理*, 2013 (5): 38–42.
- QIU L G, CHEN H Z, CHEN C H. The characteristic analysis and exploitation and utilization of hainan island bay [J]. *Ocean Development and Management*, 2013 (5): 38–42.
- [8] 陶列平, 黄世满. 海南三亚市鹿回头公园封山育林后的植被调查[J]. *海南大学学报(自然科学版)*, 2003 (4): 348–350.
- TAO L P, HUANG S M. Investigation on the vegetation of Sanya Luhuitou Park of Hainan province after closing hill-sides to facilitate afforestation[J]. *Natural Science Journal of Hainan University*, 2003 (4): 348–350.
- [9] 吴小根, 金波, 朱大奎, 等. 三亚港近期淤积变化及其原因分析[J]. *海洋通报*, 1998(5): 51–57.
- WU X G, JIN B, ZHU D K, et al. Study on the siltation rates of Sanya harbour [J]. *Marine Science Bulletin*, 1998(5): 51–57.
- [10] SANTISTEBAN J I, MEDIIVILLA R, LOPEZ-PAMO E, et al. Loss Onignition: a qualitative or quantitative method for organic matter and carbonate mineral content in sediments? [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2004, 32 (3): 287–299.
- [11] 石学法, 陈春峰, 刘焱光, 等. 南黄海中部沉积物粒度趋势分析及搬运作用[J]. *科学通报*, 2002, 47 (6): 452–456.
- SHI X F, CHEN C F, LIU Y G, et al. Grain size trend analysis and transport in the middle south of the yellow sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47 (6): 452–456.
- [12] 陈一萌. 土壤颜色一个可靠的气候变化代用指标[J]. *干旱区地理*, 2006, 17(6): 309–313.
- CHEN Y M. Soil color-a new sensitive indicator for climatic change[J]. *Arid Land Geography*, 2006, 17(6): 309–313.
- [13] REIMER PJ, BARD E, BAYLISS A, et al. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves, 0–50,000 years cal BP[J]. *Radiocarbon*, 2013, 55: 1869–1887.
- [14] 宗永强, 黄光庆, 熊海仙, 等. 珠江三角洲晚第四纪地层、海平面变化与构造运动的关系[J]. *热带地理*, 2016, 36(3): 326–333.
- ZONG Y Q, HUANG G Q, XIONG H X, et al. Relationship between late Quaternary lithostratigraphy, sea-level change and tectonics in the Pearl River Delta[J]. *Tropical Geography*, 2016, 36(3): 326–333.
- [15] 蓝先洪. 珠江三角洲晚第四纪沉积特征[J]. *沉积学报*, 1996, 14(2): 155–162.
- LAN X H. Sedimentary characteristics of late Quaternary in the Zhujiang river delta [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1996, 14(2): 155–162.
- [16] 李平日, 黄镇国, 张仲英, 等. 广东东部晚更新世以来的海平面变化[J]. *海洋学报*, 1987, 9(2): 216–222.
- LI P R, HUANG Z G, ZHANG Z Y, et al. Sea level changes since late Pleistocene in eastern Guangdong[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1987, 9(2): 216–222.
- [17] 姚庆元, 何昭星, 庄进耀. 厦门岛晚第四纪沉积层的划分与海平面变化的关系[J]. *华南地震*, 1988, 8(4): 25–32.
- YAO Q Y, HE S X, ZHUANG J Y. Subdivision of the late Quaternary sedimentary layer in Xiamen island and its relationship with the variation of sea level[J]. *South China Seismological Journal*, 1988, 8(4): 25–32.
- [18] 方国祥, 李平日, 郑建生. 广州地区第四纪沉积的年代学研究[J]. *地理科学*, 1991, 11(4): 361–369.
- FANG G X, LI P R, ZHENG J S. Chronology of Quaternary sediments in Guangzhou area [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1991, 11(4): 361–369.
- [19] 郑荣章, 陈桂华, 徐锡伟, 等. 福州盆地埋藏晚第四纪沉积地层划分[J]. *地震地质*, 2006, 27(4): 556–565.
- ZHENG Y Z, CHEN G H, XU X W, et al. Strata division of buried late quaternary of Fuzhou basin[J]. *Seismology and Geology*, 2006, 27(4): 556–565.
- [20] 陈伟光, 赵红梅, 常郁, 等. 珠江三角洲晚第四纪垂直构造运动速率[J]. *地震地质*, 2001(4): 527–536.
- CHEN W G, ZHAO H M, CHANG Y, et al. The rate of late Quaternary vertical motion of the Zhujiang delta[J]. *Seismology and Geology*, 2001(4): 527–536.
- [21] 王建华, 王晓静, 曹玲珑, 等. 珠江三角洲 GZ-2 孔全新统孢粉特征及古环境意义[J]. *古地纪学报*, 2009, 11(6): 661–669.
- WANG J H, WANG X J, CAO L L, et al. The Holocene sporopollen characteristics and their paleoenvironmental significance of core GZ-2 in Pearl River delta [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11(6): 661–669.
- [22] 宗永强. 韩江三角洲第四系沉积旋回[J]. *热带地理*, 1987(2): 117–127.
- ZONG Y Q. Depositional cycles of the Quaternary in the Hanjiang delta[J]. *Tropical Geography*, 1987(2): 117–127.
- [23] 方国祥, 李平日, 黄光庆. 珠江三角洲 8000 年来海平面变化[J]. *地理研究*, 1991(4): 1–11.
- FANG G X, LI P R, HUANG G Q. Sea level changes in Zhujiang Delta during the past 8000 years[J]. *Geographical Research*, 1991(4): 1–11.
- [24] 黄康有, 何嘉卉, 宗永强, 等. 珠江三角洲三水盆地早全新世以来孢粉分析与古环境重建[J]. *热带地理*, 2016, 36(3): 364–373.
- HUANG K Y, HE J H, ZONG Y Q, et al. Holocene paleoenvironment reconstruction based on pollen data in the Sanshui Basin, Northern Pearl River Delta[J]. *Tropical Geography*, 2016, 36(3): 364–373.