



珠江三角洲第四纪沉积物初始沉积年龄及沉积演化

郑思琦, 林振文, 李出安, 李冠华, 庄文明, 李诗颖, 罗俊超, 阳峰, 李雨龙

Discussion on the Quaternary initial sedimentary age and sedimentary evolution in the Pearl River Delta

ZHENG Siqi, LIN Zhenwen, LI Chu'an, LI Guanhua, ZHUANG Wenming, LI Shiyong, LUO Junchao, YANG Feng, and LI Yulong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023033001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

珠江三角洲全新世海-陆沉积模式转换及其年代

Holocene sedimentary environment transform and onset time of Pearl River Delta progradation

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 107-117

珠江三角洲中部全新世以来的微体动物群记录与古环境重建

Holocene microfaunal records in the central Pearl River Delta and implications for palaeoenvironmental changes

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(2): 31-43

东亚和南亚典型大河三角洲晚第四纪地层结构及成因对比

A comparative study on the Late Quaternary stratigraphic architecture and formation of megadeltas in East and South Asia

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 12-21

长江三角洲北翼后缘晚第四纪以来的沉积粒度特征及环境演化

Sediment grain size distribution patterns of the late Quaternary on the back side of northern Yangtze River Delta and their environmental implications

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(4): 34-45

珠江口盆地白云凹陷北坡第四纪层序地层和沉积体系演化及其控制因素

Quaternary sequence stratigraphic evolution of the Pearl River Mouth Basin and controlling factors over depositional systems

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(1): 25-37

全新世中国大河三角洲沉积演化模式转化及其对人类活动的响应

Changes of evolution models of China's large river deltas since Holocene and their responses to anthropogenic activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 77-89



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郑思琦, 林振文, 李出安, 等. 珠江三角洲第四纪沉积物初始沉积年龄及沉积演化 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(6): 145-156.

ZHENG Siqi, LIN Zhenwen, LI Chu'an, et al. Discussion on the Quaternary initial sedimentary age and sedimentary evolution in the Pearl River Delta [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(6): 145-156.

珠江三角洲第四纪沉积物初始沉积年龄及沉积演化

郑思琦¹, 林振文¹, 李出安¹, 李冠华², 庄文明¹, 李诗颖¹, 罗俊超¹, 阳峰¹, 李雨龙¹

1. 广东省海洋地质调查院, 广州 510062

2. 汕头大学海洋灾害与防护广东省重点实验室, 汕头 515063

摘要: 第四纪沉积物特征及年龄对研究河流三角洲沉积演化历史、古海平面变化及古地理环境演变具有重要意义。珠江三角洲是研究华南地区第四纪环境与气候演化的重要区域, 通过对珠江三角洲河口地区的钻孔沉积物进行光释光 (OSL) 年龄测定, 珠江三角洲底部沉积物年龄为 102.52 ± 6.14 ka, 表明珠江三角洲第四纪沉积始于晚更新世。通过系统的 AMS ¹⁴C 和 OSL 测定, 结合前人研究认为, 珠江三角洲第四纪以来至少经历了晚更新世和全新世两次主要的海侵和一次海退事件。三角洲初次海侵开始于晚更新世早期 (MIS5 阶段), 于晚更新世晚期 (MIS2 阶段晚期) 发生大规模海退, 之后在全新世早期 (约 11 kaBP, MIS1 阶段) 再次海侵, 形成了至少 3 层风化黏土层。晚更新世海侵过程中海平面显著波动, 其中在约 40 kaBP (MIS3 阶段) 海平面显著降低, 形成下风化黏土层; 至约 30 kaBP 海平面上升, 三角洲重新接受沉积至 MIS2 晚期, 之后海平面大幅降低形成中、上风化黏土层。

关键词: 第四纪沉积物; AMS ¹⁴C; 光释光测年 (OSL); 海平面变化; 珠江三角洲

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023033001

Discussion on the Quaternary initial sedimentary age and sedimentary evolution in the Pearl River Delta

ZHENG Siqi¹, LIN Zhenwen¹, LI Chu'an¹, LI Guanhua², ZHUANG Wenming¹, LI Shiyong¹, LUO Junchao¹, YANG Feng¹, LI Yulong¹

1. Guangdong Marine Geological Survey, Guangzhou 510062, China

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Marine Disaster Prediction and Prevention, Shantou University, Shantou 515063, China

Abstract: The characteristics and the age of the Quaternary sediments of the Pearl River Delta are important to understand the evolution in fluvial-delta sedimentation, fluctuations in sea level change, climate, and geography of the area as well as the South China. The optical stimulated luminescence (OSL) of the bottom sediment from the estuaries of the Pearl River Delta was studied and the age was determined to be 102.52 ± 6.14 ka, indicating that the Quaternary deposition started in the late Pleistocene. In addition, AMS ¹⁴C dating was conducted. Combining the OSL results and previous studies, we believe that the Pearl River Delta experienced at least two major transgressions and one regression since the late Pleistocene to Holocene. The first large-scale transgression began in the early Late Pleistocene (MIS5 stage), followed by regression in the late MIS2 stage, and transgressed again in the early Holocene (about 11 kaBP, MIS1 stage), forming at least three layers of weathered clay. During the late Pleistocene transgression, sea level fluctuated significantly. Sea level dropped notably at about 40 kaBP (MIS3 stage), forming the lower weathered clay layer; rose at about 30 kaBP, during which the delta received sediments until the late MIS2; and then the sea level went down again apparently, forming the middle and upper weathered clay layers.

Key words: Quaternary sediments; AMS ¹⁴C; optical stimulated luminescence (OSL); sea-level change; the Pearl River Delta

珠江三角洲地处中国广东省中部、南中国海北部陆缘。该区域为西江、北江和东江的入海口, 河海作用强烈, 第四纪沉积发育。自 20 世纪 70—80 年代以来, 前人对珠江三角洲第四系开展了大量的沉积学和放射性碳同位素 (¹⁴C)、光释光 (OSL) 及

热释光 (TL) 等测年研究, 对三角洲第四纪以来的沉积过程形成了较为统一的认识, 但在初次海侵和沉积时间上存在较大的争议, 对于更新世海平面波动与沉积演化缺少精细的刻画^[1-7]。多数学者认为珠江三角洲的沉积开始于 4 万年前, 初次海侵发生于

资助项目: 广东省地质勘查与城市专项“广东省海岸带综合地质调查——横琴新区调查示范”(2020-13)

作者简介: 郑思琦 (1994—), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事第四纪地质研究, E-mail: 184804244@qq.com

通讯作者: 林振文 (1986—), 男, 博士, 高级工程师, 从事区域地质与矿产勘查研究, E-mail: linzhenwen9704@163.com

收稿日期: 2023-03-30; 改回日期: 2023-05-14. 文凤英编辑

距今 3.5~2 万年^[3,8-11], 沉积了上更新统礼乐组 and 全新统桂洲组两个沉积单元^[1]。珠江三角洲普遍发育的花斑黏土或氧化色砂层(三角层)被认为是晚更新世晚期 MIS2(Marine Isotope Stages)盛冰期的风化层^[1,10,12-15], 这与长江三角洲第一硬黏土层相一致^[15-16], 其顶界被普遍认为是全新统与上更新统的分界线^[1,17]。

近年来, 随着调查研究的持续深入, 前人在三角层之下发现了一层花斑黏土或氧化色砂层^[18], 被认为是形成于 MIS4 低海面期的沉积^[19], 定名为光明村层, 其下伏的大套灰色沉积物被定名为南沙段, 形成于 MIS5。最新的沉积物 OSL 年龄也显示, 三角洲初次海侵时间始于约 10 万年前^[20-24]。Xu 等^[24]在三角洲中部中山地区 HPQK01 孔底部获取了最新的沉积物 post-IR IRSL 年龄为 147±17 ka, 认为珠江三角洲的沉积始于约 15 万年前。

本次研究区位于西江磨刀门水道与伶仃洋交界处海岸带(图 1a), 是研究珠江三角洲第四系沉积演化历史的关键地区。本文利用多个第四系钻孔,

在详尽的地层学研究基础上, 对各沉积单元和风化黏土层开展 AMS ¹⁴C、OSL 等年代学研究, 旨在进一步界定珠江三角洲初始沉积与初次海侵等时间, 精细刻画三角洲的沉积演化过程, 为构建珠江三角洲乃至华南第四系沉积演化提供参考。

1 区域地形地貌

珠江三角洲主要由珠江水系的西江、北江、东江带来的沉积物在河口湾堆积而形成的复合型三角洲(图 1a)^[1], 其基底的形成时间为白垩纪初期—新近纪^[1]。三角洲内部遍布丘陵、台地和残丘, 珠江流域各江河在内部汇合分汊, 形成复杂河网后经 8 个口门注入河口湾(伶仃洋和黄茅海), 形成了独特的“河网-口门-河口湾”三角洲系统。珠江三角洲西部、北部和东部被丘陵山地环绕, 南濒南海, 形成三面环山、一面向海的马蹄形的海湾地势, 且向海一面有众多岛屿屏蔽(图 1a)。三角洲第四系的平

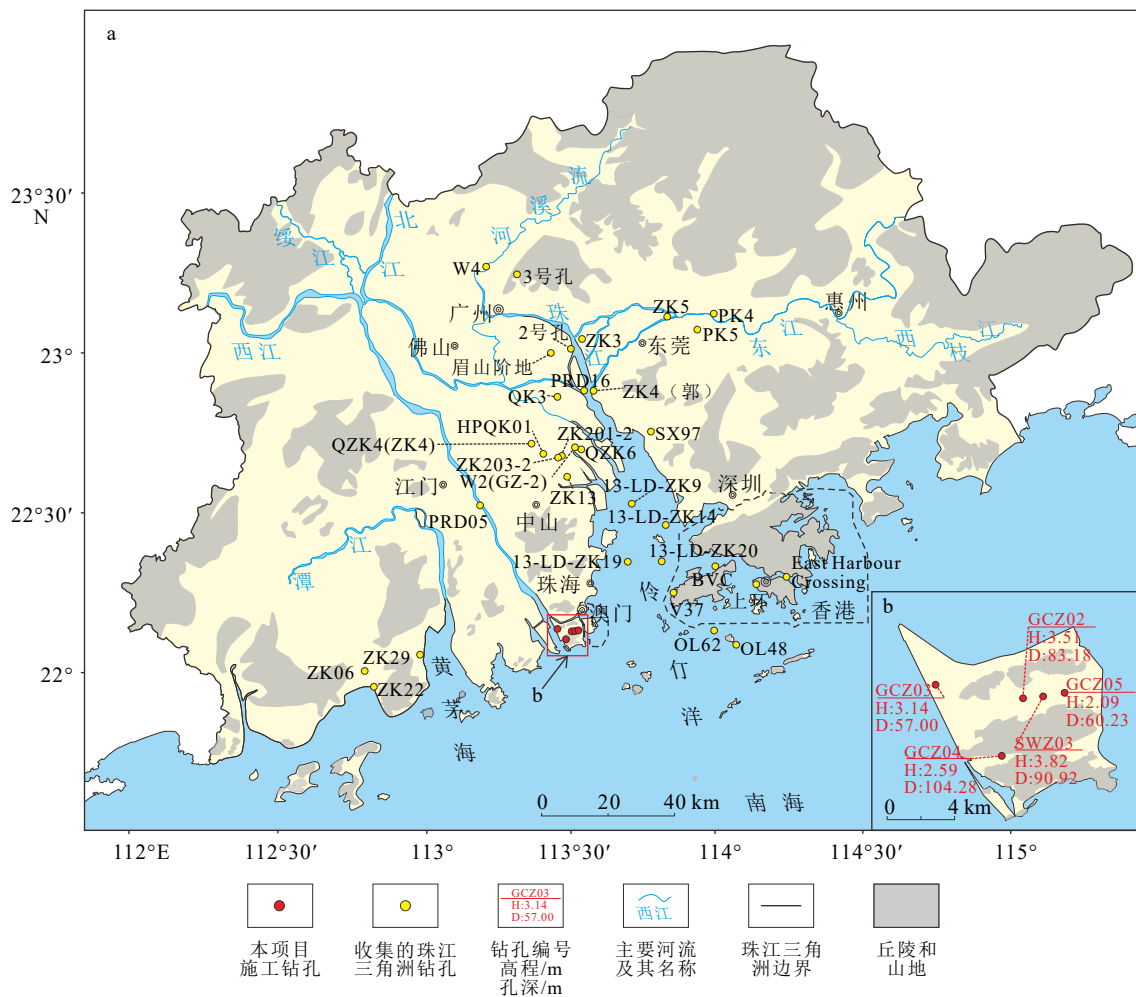


图 1 珠江三角洲区域 (a) 与横琴地区 (b) 第四系及钻孔分布简图

Fig.1 Distribution of the Quaternary sediments and the locations of borehole in the Pearl River Delta (a) and the Hengqin area (b)

均厚度约为 25 m^[1,14], 在磨刀门口附近的沉积厚度较大, 最厚达 63~64 m^[14,25]。

2 钻孔位置及样品特征

2.1 钻孔特征与地层划分

本次研究区位于西江入海口磨刀门水道东侧, 横琴中心沟处(图 1)。自西往东共布设了 5 个钻孔(包括 GCZ02—05 和 SWZ03), 钻孔均打穿第四系至基岩(图 1b)。在综合分析沉积物特征、结构构造的基础上, 选取了以上钻孔开展年代学研究, 并对 GCZ05 及 SWZ03 孔开展粒度、微体古生物、磁化率等研究, 在综合前人研究的基础上对第四系进行地层划分, 结果如下(粒度与微体古生物另著文发表)。

第四纪沉积物自下而上分为上更新统礼乐组 and 全新统桂洲组。上更新统礼乐组自下而上分为

南沙段、光明村层、石排段、西南镇段和三角层; 全新统桂洲组自下而上分为杏坛段、横栏段和灯笼沙段(图 2 和图 3)。

(1)南沙段: 河流相砂砾层。SWZ03 孔的层底埋深为 47.10 m, 厚 2.10 m(图 3)。

该层仅在 SWZ03 孔揭露, 其直接覆盖于基岩之上, 未见有孔虫、介形类等微体古生物, 岩性为含砾粗中砂, 砾石约占 10%, 砾径为 2~6 mm, 粗砂的含量约 30%, 中砂的含量约 55%。该层存在自下而上粒度变细的特征。

(2)石排段: 三角洲前缘汉道沉积。GCZ05 孔的层底埋深为 44.00 m, 厚 6.05 m; GCZ02 孔的层底埋深为 49.00 m, 厚 11.00 m; SWZ03 孔推测层底埋深为 45.00 m, 厚 5.59 m; GCZ03 和 GCZ04 孔未发育。

该层直接覆盖于侏罗系花岗岩风化壳之上, 为黏土质粉砂与粉砂质砂互层(图 3), 未见有孔虫和介形类, 含有硅藻。硅藻主要为半咸水种 *Cyclotella striata*, 零星含海水种。

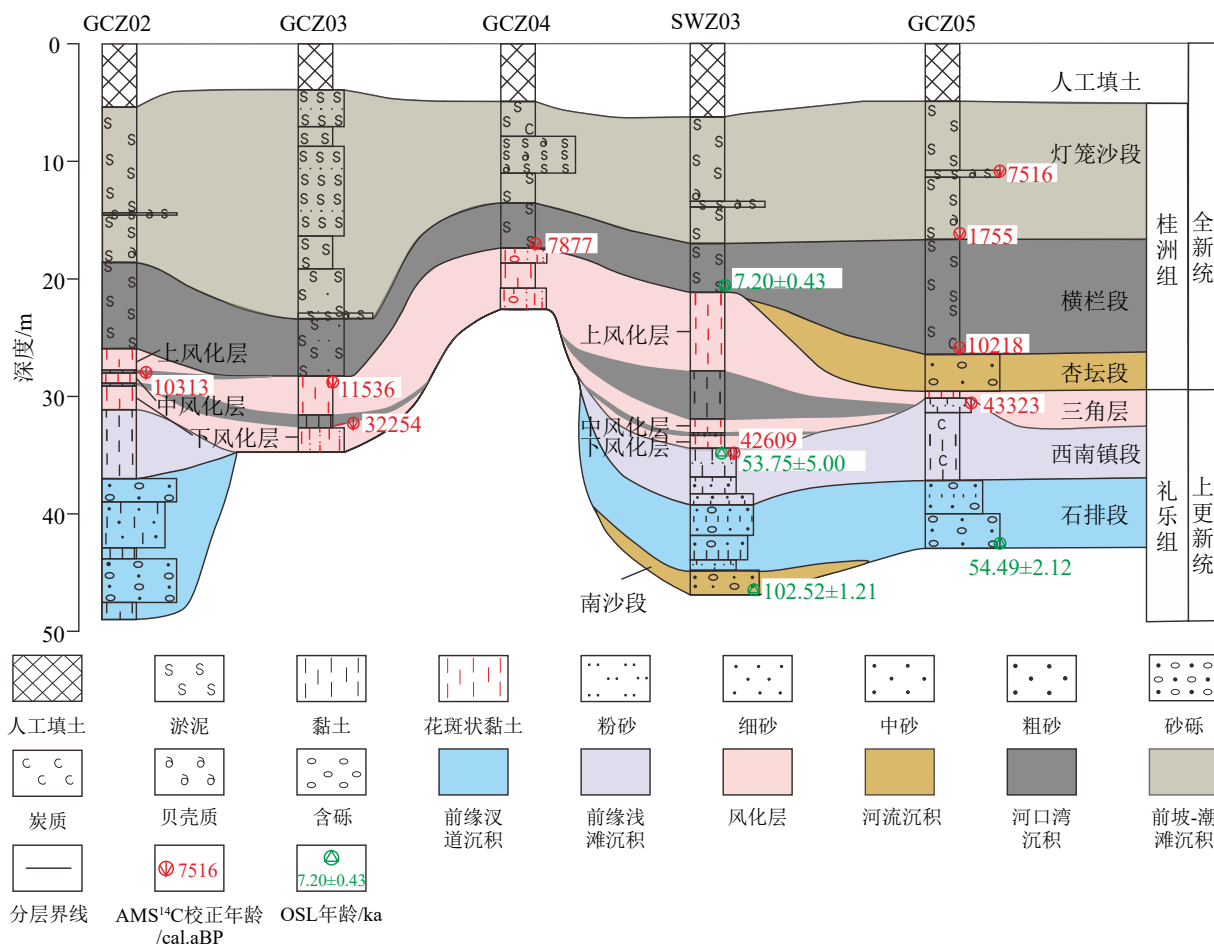


图 2 横琴地区第四系钻孔柱状图及测年结果

Fig.2 Quaternary stratigraphic correlation and dating results in the Hengqin area

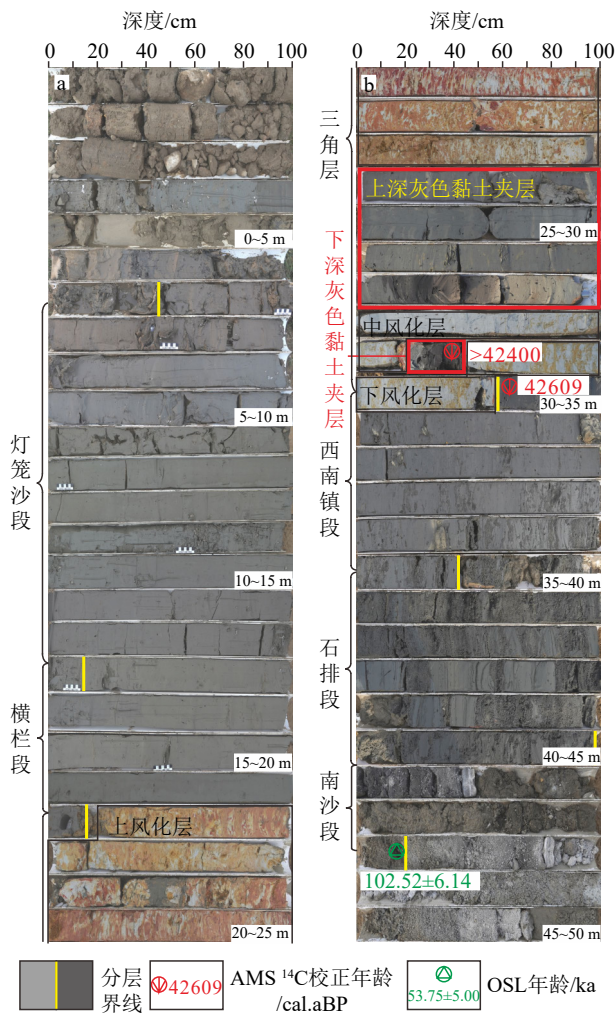


图3 横琴地区SWZ03孔岩芯照片

Fig.3 Photographs of SWZ03 cores in the Hengqin area

(3)西南镇段:三角洲前缘浅滩沉积。GCZ05孔的层底埋深为37.95 m,厚7.15 m;GCZ02孔的层底埋深为38.00 m,厚6.00 m;SWZ03孔的层底埋深为39.41 m,厚4.83 m;GCZ03和GCZ04孔未发育。

该层为深灰—灰黑色黏土质粉砂夹含砂黏土质粉砂层,未见有孔虫及海相介形类,硅藻的丰度低,以半咸水种 *Cyclotella striata* 为主,含有少量的淡水种 *Aulacoseira ambigua*、半咸水种 *Coscinodiscus divisus* 和海水种 *Coscinodiscus ocellatus*。

(4)三角层:陆相花斑状黏土、潜育化黏土层(图3)。不同钻孔中厚度差别较大,GCZ05孔的层底埋深为30.80 m,厚0.60 m;GCZ02孔的层底埋深为32.00 m,厚5.50 m;GCZ03孔的层底埋深为35.64 m,厚6.64 m;GCZ04孔的层底埋深为23.04 m,厚5.34 m;SWZ03孔的层底埋深为34.58 m,厚13.43 m。

该层的花斑状黏土是低海面时期沉积层出露地表遭受风化形成的。GCZ05孔为潜育化黏土层,即在长期积水环境中,地层被水覆盖,未遭受风化

剥蚀,沉积物处于还原环境,形成非氧化色的灰色、青灰色黏土。该层有孔虫的丰度低,属种少,仅见玻璃质壳 *Rotalidium annectens*,未见海相介形类,硅藻仅见 *Cyclotella striata*。

在GCZ02、GCZ03和SWZ03孔的花斑黏土层中见深灰色—灰色黏土夹层(图2、图3),其中GCZ02和SWZ03孔见2层深灰色黏土夹层,下黏土夹层的层底埋深分别为29.76 m(GCZ02)和33.45 m(SWZ03),厚0.26 m(GCZ02)和0.22 m(SWZ03);上黏土夹层的层底埋深分别为28.61 m(GCZ02)和32.00 m(SWZ03),厚0.25 m(GCZ02)和4.03 m(SWZ03);GCZ03孔见1层深灰色黏土夹层,层底埋深为33.55 m,厚0.42 m。夹层中见有孔虫、介形类和硅藻,有孔虫全部为反映高盐环境的瓷质壳类有孔虫;介形类的丰度和分异度较低,为反映河口环境的 *Bicorncythere bisanensis*、*Neomonoceratina delicate* 和 *Pistocythereis bradyformis*;硅藻以半咸水种 *Cyclotella striata* 为绝对优势种,含有少量的海水种,不含淡水种。微体古生物特征反映沉积环境为水深较深的河口湾环境。

(5)杏坛段:河流相砂砾层,偶含腐木块体。GCZ05孔的层底埋深为30.20 m,厚3.63 m。

该层仅在GCZ05孔中揭露,岩性为灰黄色砂砾,偶夹腐木、腐败植物种子等。该层上部夹深灰色黏土,夹层的微古生物指示水动力条件较强,可能为潮汐水道环境。

(6)横栏段:海相河口湾沉积。GCZ05孔的层底埋深为26.57 m,厚9.57 m;GCZ02孔的层底埋深为26.50 m,厚7.50 m;GCZ03孔的层底埋深为29.00 m,厚5.00 m;GCZ04孔的层底埋深为17.70 m,厚3.90 m;SWZ03孔的层底埋深为21.15 m,厚4.00 m。

该层为深灰色含砂黏土质粉砂,偶含有机质和贝壳碎屑。微古生物以反映较深水的属种为主,有孔虫以 *Ammonia beccarii* vars. 和 *Elphidium hispidulum* 为优势种,介形类以 *S. impressa*、*N. delicate* 和 *B. bisanensis* 为相对优势种;硅藻在垂向上种群分布略有不同,中上部以半咸水种和海水种为主,顶部以海水种为主。

(7)灯笼沙段:海陆交互相的前坡-潮滩沉积。GCZ05孔的层底埋深为17.00 m,厚12.00 m;GCZ02孔的层底埋深为19.00 m,厚13.50 m;GCZ03孔的层底埋深为24.00 m,厚20.00 m;GCZ04孔的层底埋深为13.80 m,厚8.80 m;SWZ03孔的层底埋深为17.15 m,厚10.75 m。

该层为褐灰色—深灰色黏土质粉砂,富含蚝壳、双壳类、瓣腮类等贝壳碎屑。研究区普遍存在

一层贝壳黏土质粉砂夹层, 贝壳碎屑的含量达 35%, 直径为 0.1~2.5 cm, 厚 0.06~0.60 m, 贝壳破碎程度较高。灯笼沙段有孔虫以 *A. beccarii vars.*、*Quinqueloculina seminula*、*Elphidium hispidulum* 为相对优势种, 介形类以 *S. impressa* 为绝对优势种, 硅藻以半咸水种 *Cyclotella striata* 为绝对优势种。

2.2 样品特征

根据钻孔的分层特征, 选取各个钻孔的典型位置进行采样测试。AMS ¹⁴C 测年选择 GCZ02—05 和 SWZ03 孔重要层组顶底位置进行采样(表 1), 共计 11 件, 样品以木屑和叶子为主(9 件), 部分为蚝壳、藤壶等贝壳碎屑(2 件)。OSL 测年选择 GCZ05 和 SWZ03 孔岩芯中下部黏土质粉砂、含砾粗中砂

及粉砂质砂进行采样(表 2), 共计 5 件。

3 测试方法

3.1 AMS ¹⁴C 测年

在理想样品的前提下, AMS ¹⁴C 的测年上限为 55 kaBP^[26], 优选年龄范围不超过 25~35 kaBP^[24,27-31]。本次样品的前处理和 AMS ¹⁴C 测试在中国科学院广州地球化学研究所¹⁴C 专用加速器质谱实验室进行。炭质、腐木及植物根系样品化学采用酸碱酸前处理方法, 制作石墨靶, 后装入样品盘进行测试。加速器质谱仪型号为美国国家静电公司(NEC)CAMS 500, 加速器型号为 1.5 SDH, 端电压 0.5 MV。测试

表 1 AMS ¹⁴C 样品特征及测年结果
Table 1 AMS ¹⁴C sample characteristics and the dating results

钻孔号	样品号	深度/m	采样位置	样品类型	年龄/aBP	校正年龄/cal.aBP	
						中值	2σ
GCZ02	C-4	28.50	三角层中上黏土夹层	炭屑	9155±40	10313	10233~10419
	C-1	29.05	三角层顶部	腐木	10030±60	11536	11279~11753
GCZ03	C-2	33.13	三角层中黏土夹层顶部	腐木	>42.70		
	C-3	33.55	三角层中黏土夹层底部	腐木	28060±540	32254	31149~33620
GCZ04	C-5	17.67	横栏段底部	炭屑	7045±45	7877	7780~7967
GCZ05	C-6	11.05	灯笼沙段贝壳质淤泥夹层	贝壳碎屑	7200±25	7516	7393~7653
	C-7	15.60	灯笼沙段底部	蚝壳和藤壶	2290±20	1755	1601~1909
	C-9	26.50	横栏段底部	腐叶	9050±45	10218	10152~10289
	C-10	30.80	西南镇段顶部	植物根系	39760±1380	43323	41758~45219
SWZ03	C-8	33.45	三角层中下黏土夹层	腐木	>42.40		
	C-11	34.58	西南镇段顶部	腐木	38690±1210	42609	41180~44347

注: “>42.40”表示超出检出限。

表 2 OSL 样品特征及测年数据
Table 2 OSL sample characteristics and the dating results

钻孔号	样品号	深度/m	采样位置	岩性特征	U/(mg/kg)	Th/(mg/kg)	K/%	年龄/ka
GCZ05	OSL-1	21.10	横栏段底部	含砂黏土质粉砂	5.68±0.28	21.54±1.17	2.42	7.20±0.43
	OSL-3	43.90	石排段底部	黏土质粉砂与含黏土粉砂质砂互层	4.04±0.20	12.86±0.64	0.74	54.49±2.12
	OSL-4	34.58	西南镇段顶部	黏土质粉砂夹砂黏土质粉砂	4.41±0.22	23.13±1.15	2.65	53.75±5.00
SWZ03	OSL-5	47.10	南沙段底部	含砾粗中砂	2.45±0.12	6.69±0.33	0.32	102.52±6.14
	OSL-6	39.41	西南镇段底部	黏土质粉砂与含黏土粉砂质砂互层	2.86±0.14	13.38±0.67	1.59	Nx

注: “Nx”表示低于检出限。

采用 OX2 (NIST SRM 4990C) 作为主标准, IAEA-C7 作为次级标准验证测试的准确性。笔者利用 CALIB 8.20 程序 (<http://calib.org/calib/calib.html>) 将惯用年龄校正为日历年龄。校正曲线的选择方面, 贝壳等选用 Marine 20 校正曲线, 腐木、炭屑等采用 Intcal 20 校正曲线。区域海洋碳储库效应参考 Yu 等^[32] 关于现代南海的平均值 $\Delta R = -25 \pm 20$ a 进行校正。

3.2 光释光测年 (OSL)

本次光释光样品的前处理和测试在广州大学地理科学与遥感学院的光释光实验室完成。测试过程如下: 首先, 制备细颗粒石英样品 (4~11 μm), 并取少量样品进行红外信号检测, 确定样品中是否有长石残留。细颗粒样品在 Daybreak 2200 (美国) 光释光仪上测定。该系统蓝光光源波长为 470 nm, 半宽 5 nm, 最大功率为 60 mW/cm²; 红外光源波长为 880 nm, 半宽 10 nm, 最大功率为 80 mW/cm²。测片的辐照在 801E 辐照仪中进行, 其 90 Sr—Y β 放射源的照射剂量率约为 0.05 Gy/s。样品采用简单多片再生法获得等效剂量值, 用饱和指数方法进行拟合。

4 测试结果

AMS ¹⁴C 测试结果除 2 个超过检出限外, 其余均在检出限以内 (表 1、图 2)。沉积物年龄结果整体随深度增加而增大, 仅存在一处年龄倒置现象, 即 GCZ05 孔 11.05 m 处的 7516 cal.aBP 大于 15.60 m 处的 1755 cal.aBP (图 2)。

OSL 结果除 1 个样品低于检出限, 其余样品均得出具体年龄值 (表 2、图 2)。其中测得的最老年龄为 SWZ03 孔埋深 47.10 m (光释光样品厚度为 5 cm) 处的含砾粗中砂年龄, 为 102.52 \pm 6.14 ka, 最新年龄为 SWZ03 孔埋深 21.10 m 处的含砂黏土质粉砂年龄, 为 7.20 \pm 0.43 ka。年龄数值随着深度的增大而增加, 无年龄倒置现象 (图 2)。

OSL 测试样品中 OSL-3 和 OSL-5 位于第四系底部, 沉积物的颗粒较粗, 为较单纯的河流和三角洲前缘河道沉积, 且年龄值与 AMS ¹⁴C 测年结果呈现较好的线性关系。OSL 测得横栏段底部的年龄与相应位置的 AMS ¹⁴C 年龄值相一致; 测得西南镇段顶部年龄为 53.75 \pm 5.00 ka, 与同位置的 AMS ¹⁴C 测年结果相比偏大 (表 2、图 2), 结合多个测年结果认为该位置取 AMS ¹⁴C 测年结果较合适, 即 42.61~43.32 kaBP。综合分析, 全部 AMS ¹⁴C 和部

分 OSL 年龄值较为准确, 舍弃 53.75 \pm 5.00 ka 这一数据, 取西南镇段顶部年龄为 42.61~43.32 kaBP。

5 讨论

5.1 珠江三角洲底界年龄和初次海侵时间

关于珠江三角洲初始沉积和初次海侵年代, 有两种主流观点, 一种通过大量的 ¹⁴C 测年和部分光释光测年, 测得的第四系样品最大年龄范围为 57~32 kaBP, 认为珠江三角洲沉积开始于末次冰期间冰阶 (MIS3), 约 35~30 kaBP 发生晚更新世的海侵^[1,3,5-6,11,33-37]; 另一种是 Yim 等^[20] 通过对香港地区样品进行 U 系测年, 结果为 130.5 \pm 50.3 和 142 \pm 20 kaBP, 因此认为珠江三角洲初次海侵发生于末次间冰期 MIS5e 时期, Zong 等^[21-22] 和 Tang 等^[23] 的研究也支持这一观点。近年来随着第四系测年方法的发展, 郭良田等^[38] 通过 OSL 测年得出下部地层的最大年龄为 135.6 \pm 3.6 ka, 认为珠江三角洲晚更新世海侵可能发生于距今 4~10 万年期间; Yu 等^[39] 采用石英光释光测年和长石 post-IR IRSL 测年, 得到第四系底部年龄为 88.5 \pm 6.1、98.2 \pm 8.3 和 113.6 \pm 13.8 ka, 认为晚更新世海侵开始于 MIS5 阶段; Xu 等^[24] 通过对沉积物中的长石进行 post-IR IRSL 测年, 得到的最老年龄为 147 \pm 17 ka, 故而认为珠江三角洲的初始沉积开始于 MIS6 阶段, 晚更新世海侵开始于 MIS5 阶段, MIS4—MIS2 经历了长时间的沉积间断, 至中全新世发生全新世的海侵。

本次研究得到 SWZ03 孔南沙段底部含砾粗中砂的最老年龄为 102.52 \pm 6.14 ka, 为晚更新世早期, 属于 MIS5c 阶段。受 OSL 测年方法的限制, 年龄值可能被低估, 其结果代表该位置年龄的最小值^[24,40-41], 因此, 横琴地区第四纪初始沉积可能早于 MIS5c 阶段。

之后发生晚更新世海侵, 研究区进入三角洲前缘沉积环境。依据石排段底部年龄 54.49 \pm 2.12 ka (GCZ05 孔) 和西南镇段顶部年龄 42609 cal.aBP (SWZ03)、43323 cal.aBP (GCZ05) 推断, 初次海侵开始的时间应早于 42 kaBP, 早于前人普遍认为的 35~30 kaBP^[1,3,5-6,11,33-37]。结合南中国海海平面变化记录^[20,39,42-43], MIS5 海平面与现代海平面相当, MIS4—MIS2 海平面波动下降, 由 MIS4 阶段的 -40 m 下降至 MIS2 的 -120 m。研究区石排段的层底埋深约为 -45 m, 西南镇段的层顶埋深约为 -32 m。海平面需大于 -32 m 才可沉积出三角洲前缘相砂泥互层和黏土层, 故推断初次海侵开始时间早于 MIS4。

结合本次年龄数据、珠江三角洲其他钻孔年龄(表 3)和海平面变化记录,推断珠江三角洲晚更新世海侵开始于 MIS5 阶段,海侵前的河流相沉积可能早于 MIS5c 阶段。

5.2 珠江三角洲全新世海侵时间

近年来,多名学者对珠江三角洲全新世海侵时间、最大海侵范围和ación等进行了研究(表 4),Liu 等^[15]分析了三角洲中部大鳌平原 PRD05 孔,认为全新世海侵开始于约 16.7 ka,约 10.1 ka 海水侵入到大鳌平原并在 PRD05 孔沉积河口湾环境沉积物;时翠等^[47]通过对珠江口钻孔的年代学研究,认为

12 kaBP 珠江口低洼谷地开始受到海侵影响,并在 6~5 kaBP 期间海平面达到最高值;谢叶彩等^[19]对珠江三角洲中部区域钻孔进行分析,得出末次盛冰期发育古河谷和河间地两种地貌单元,中部地区下切河谷自 9 kaBP 开始接受泥质沉积;最大海侵于大约 7 ka 出现,导致在古河间地风化层之上发生海侵超覆;周良等^[48]对珠江三角洲西缘的钻孔沉积物进行测年分析,得出约 11 kaBP 开始发生全新世的海侵,至 6~5 kaBP 海平面上升至最高。

横琴地区测得的三角层花斑状黏土顶部的年龄为 11 536 cal.aBP(GCZ02),与之相接近的年龄分别为采自 GCZ05 孔的 10 218 cal.aBP、GCZ04 孔的 7 877

表 3 珠江三角洲晚更新世初始沉积和初次海侵的测年数据

Table 3 Dating results of initial deposition and the first transgression during late Pleistocene in the Pearl River Delta

沉积类型	地理位置	钻孔号	样品埋深/m	测试结果/ka/kaBP	测试方法	数据来源
初始沉积	东莞石排	PK5	15.9	37±1.48	¹⁴ C	文献[1]
	南沙万顷沙	W2	37.08 (37.25)	39.4±0.6 (42.81±0.33)	OSL (AMS ¹⁴ C)	文献[36]
	佛山容桂	QZK4	53.10	43.41±2.35	OSL	文献[1]
	番禺化龙	2号孔	22.9	43.75±2.39	OSL	文献[44]
	广州江高	W4	30.99	52.2±0.6	OSL	文献[36]
	化龙眉山	Q3a05	3	57.63±3.41	OSL	文献[6]
	广州东平	3号孔	25.9	85.5±0.731	OSL	文献[44]
	中山民众	ZK13	43.7	91.50±11.00	OSL	文献[45]
	中山民众	HPQK01	47.56	92±10	OSL	文献[24]
				147±17	PIR-IRSL	
	番禺眉山	-	-	74.3±2.7	OSL	文献[39]
				88.5±6.1	OSL	
	东莞麻涌	ZK3	28.8	98.2±8.3	PIR-IRSL	文献[37]
135.6±3.6				OSL		
初次海侵	南沙万顷沙	W2	~31	~33	古地磁	文献[36]
	博罗园洲	PK4	10.9	33±3	¹⁴ C	文献[1]
	广州番禺	PRD16	19.22	~34.6	¹⁴ C	文献[37]
	香港	East Harbour Crossing	21	39.46±2.32	放射性碳	文献[20]
	香港	East Harbour Crossing	21	39.91±2.46	放射性碳	文献[20]
	广州番禺	QK3	24.30	40.48±0.18	AMS ¹⁴ C	文献[46]
	香港	上环	22	45.7±2	放射性碳	文献[20]
	中山民众	ZK13	28.2	59.46±3.02	OSL	文献[45]
	香港	上环	22	130.5±5.3	U系	文献[20]
	香港	East Harbour Crossing	21	142±20	U系	文献[20]

注:“-”为未收集到该数据。

cal.aBP 和 SWZ03 孔的 7.20 ± 0.43 ka, 这些样品均位于横栏段底部, 横栏段的沉积环境为海相的河口湾环境, 是全新世海侵时形成的。横琴地处珠江口磨刀门水道与伶仃洋交界处, 位于珠江三角洲向海一侧, 故接受全新世海侵沉积的时间应早于三角洲内部。因此推断全新世海侵珠江三角洲重新接受沉积的时间应该为 11.5~10.2 kaBP。

收集前人钻孔及全新世底部年龄数据, 并将其校正为日历年龄(表 4), 结合以上年龄数据和海平面变化记录, 推断珠江三角洲于约 11 kaBP 开始接受全新世海侵沉积, 三角洲向海一侧先接受沉积, 海水沿河谷上溯, 河谷中充填泥质沉积物。随着海平面的上升, 河间地及三角洲内部开始发生海侵超覆。

GCZ05 孔测年结果显示出一处年龄倒置现象, 其相应的沉积物特征也存在一定的变化。11.05 m 处沉积物为贝壳黏土质粉砂夹层, 贝壳碎屑的含量显著高于灯笼沙段, 发生了贝壳的聚集。珠江三角

洲是受台风暴潮影响较为严重的地区, 推测这一年龄倒置现象可能的原因是沉积环境受到如风暴潮等强大外力作用, 使得已经死亡沉积的贝壳发生再次搬运, 聚集沉积, 故其测年数值大于下层原地埋藏的贝壳样品。

5.3 珠江三角洲时间框架及环境演化过程

钻孔显示, 花斑状黏土中普遍出现 1—2 层深灰色黏土夹层, 厚度不一, 且在不同钻孔中差别较大(图 3、图 4), 夹层将花斑黏土分为下、中、上三层(图 3)。深灰色黏土夹层年龄为 32254 和 10313 cal.aBP(表 1、图 2、图 4), 西南镇段顶部年龄为 42609 cal.aBP, 与花斑状黏土同时期形成的潜育化黏土层底部年龄为 43323 cal.aBP。以上年龄可以分为两组, 一组为约 43~32 kaBP, 一组为 10~7 kaBP, 表明不同层位花斑黏土的形成时间不同, 下花斑黏土的形成时间为 43~32 kaBP, 属于末次冰期间冰阶 MIS3 阶段, 中、上花斑黏土形成时间早于 10 kaBP,

表 4 珠江三角洲全新统底部的测年数据

Table 4 Dating results of the lowest Holocene in the Pearl River Delta

地理位置	钻孔号	测试样品	样品埋深/m	测试结果/aBP	校正年龄/cal.aBP	测试方法	数据来源
东莞石龙	ZK5	-	12.05	6270±35	-	AMS ¹⁴ C	文献[38]
佛山顺德	QZK4	有孔虫和介形虫	11.78	6010±40	6457	AMS ¹⁴ C	文献[7]
深圳新民	SX97	-	10.77	7080±120	-	¹⁴ C	文献[49]
中山三角	ZK203-2	植物叶、屑	9.9~9.95	7120±30	7953	AMS ¹⁴ C	文献[50]
东莞石龙	ZK4	-	18.2	7200±300	-	OSL	文献[38]
东莞石龙	ZK3	-	10.6	7800±300	-	OSL	文献[38]
珠江口	V37	有孔虫	9.7	7970±40	8600~8500	AMS ¹⁴ C	文献[21]
	BVC	有孔虫	8.8	8071±34	8800~8600	AMS ¹⁴ C	文献[21]
中山三角	ZK201-2	植物碎屑	34.77	8170±30	9108	AMS ¹⁴ C	文献[50]
中山三角	QZK6	植物种子	27.30	9570±30	10937	AMS ¹⁴ C	文献[51]
中山黄圃	ZK4	泥炭	12.46	9020±45	10203*	AMS ¹⁴ C	文献[52]
中山民众	ZK13	炭屑	23.3	8375±40	9189	AMS ¹⁴ C	文献[45]
珠江口	OL62	-	6.37	9400±210	-	OSL	文献[33]
珠江口	13-LD-ZK9	-	-	-	9510	¹⁴ C	文献[47]
珠江口	13-LD-ZK14	贝壳	-	-	8600	¹⁴ C	文献[47]
珠江口	13-LD-ZK19	-	-	-	9470	¹⁴ C	文献[47]
珠江口	13-LD-ZK20	贝壳	-	-	8800	¹⁴ C	文献[47]
江门台山	ZK06	淤泥	15.40	9725±40	11178	AMS ¹⁴ C	文献[48]
江门台山	ZK22	腹足类	15.35	7310±30	8112	AMS ¹⁴ C	文献[48]

注: “*”表示通过CALIB 8.20程序校正; “-”表示未收集到该数据。

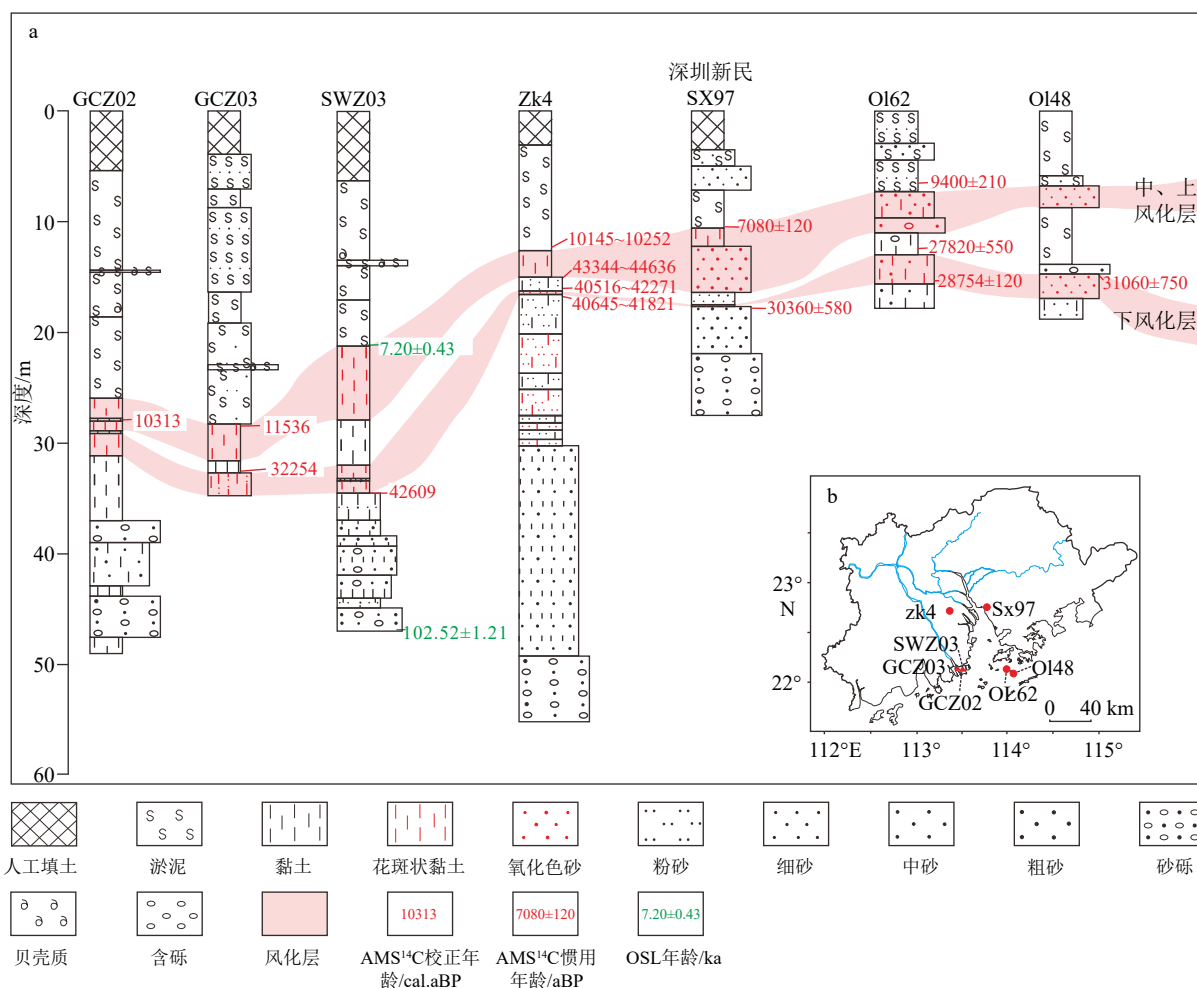


图 4 珠江三角洲钻孔中多层花斑黏土分布对比 (a) 及钻孔分布图 (b)

ZK4 据付淑清等^[52]; 深圳新民 SX97 据余素华等^[49]; OI62 和 OI48 据黄镇国等^[33] 修改。

Fig.4 Distributions of the mottled clay layers in the Pearl River Delta boreholes (a) and of boreholes (b)

Data of ZK4 was modified from Fu et al.^[52]; SX97 in Xinmin, Shenzhen was modified from Yu et al.^[49]; those of OI62 and OI48 were modified from Huang et al^[33].

属于末次冰期晚期 MIS2 阶段, 中、上花斑黏土所夹深灰色黏土为小范围短暂性海水入侵的结果。

珠江三角洲内多个钻孔显示出两层至多层风化层的现象(图 4), 黄镇国等^[33] 对珠江口外伶仃岛海域 2 个钻孔的上下两层风化层进行 AMS 测年, 结果显示下风化层的年龄早于 31.06~28.75 kaBP, 上风化层的年龄早于 9.4 kaBP; 深圳新民的第四系剖面也显示出上下两个风化层, 下风化层的年龄为 30.36±0.58 kaBP, 上风化层的年龄早于 7.08±0.12 kaBP^[49]; 武汉地质调查中心在中山黄圃施工的钻孔 ZK4 自上而下显示有 6 个风化层, 其中第二层风化层的年龄为 41 kaBP, 第一层风化层的年龄早于 10 kaBP^[52], 其余风化层年龄未知。以上结果表明, 整个珠江三角洲是一个连续的沉积体系, MIS3—MIS2 期间存在多次的海平面变化, 具体为

约 40 kaBP 海平面降低, 珠江三角洲处于风化剥蚀环境而形成下风化层; 约 30 kaBP 海平面上升, 三角洲区域接受沉积直至 MIS2 晚期, MIS2 晚期海退形成中、上风化层, 尔后约 11 kaBP 发生全新世海侵。

目前关于珠江三角洲沉积旋回存在着四旋回^[35]、三旋回^[1,33,45]、两旋回^[5,21,34,36,46,53] 等多种划分方案。综合珠江三角洲的钻孔岩性认为, 珠江三角洲沉积物主要为两套沉积旋回, 经历了两次大范围的海侵和一次海退事件, 分别为始于晚更新世早期(MIS5 阶段)的海侵、始于全新世早期(MIS1 阶段)的海侵及 MIS2 阶段晚期的海退。在晚更新世海侵期间, 相对海平面发生多次波动, 导致沉积物花斑色与深灰色交替出现, 被大部分珠江三角洲钻孔记录的为 MIS3 阶段相对海平面波动。

6 结论

(1) 珠江三角洲第四纪初始沉积早于 102.52 ± 6.14 ka, 即开始于 MIS5c 阶段, 初次海侵开始于 MIS5 阶段。全新世海侵的时间约为 11 kaBP (MIS1 阶段)。

(2) 珠江三角洲第四纪以来经历了至少 2 次规模较大的海侵和 1 次海退。三角洲初次海侵开始于晚更新世早期 (MIS5 阶段), 于晚更新世晚期 (MIS2 阶段晚期) 发生大规模海退, 之后在全新世早期 (MIS1 阶段) 再次海侵, 形成了至少三层风化黏土层。晚更新世海侵过程中海平面显著波动, 其中在约 40 kaBP (MIS3 阶段) 海平面显著降低, 形成下风化黏土层; 约 30 kaBP 海平面上升, 三角洲重新接受沉积至 MIS2 晚期, 之后海平面大幅降低形成中、上风化黏土层。

参考文献 (References)

- [1] 黄镇国, 李平日, 张仲英, 等. 珠江三角洲形成发育演变[M]. 广州: 科学普及出版社广州分社, 1982: 56-117. [HUANG Zhenguo, LI Pingri, ZHANG Zhongying, et al. Formation, Development and Evolution of the Pearl River Delta[M]. Guangzhou: Guangzhou Bureau of Popular Science Press, 1982: 56-117.]
- [2] 李平日, 黄镇国, 张仲英, 等. 珠江三角洲的形成年代[J]. 热带地理, 1982, 2(4): 21-29, 65. [LI Pingri, HUANG Zhenguo, ZHANG Zhongying, et al. The formation age of the Pearl River Delta [J]. Tropical Geography, 1982, 2(4): 21-29, 65.]
- [3] 冯炎基, 李平日, 谭惠忠, 等. 珠江三角洲第四纪沉积年代学研究[J]. 热带地理, 1990, 10(3): 247-255. [FENG Yanji, LI Pingri, TAN Huizhong, et al. On quaternary sedimentary chronology of the Zhujiang delta [J]. Tropical Geography, 1990, 10(3): 247-255.]
- [4] 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 Guoxiang, LI Pingri, ZHENG Jiansheng. Chronology of quaternary sediments in Guangzhou area [J]. Scientia Geographica Sinica, 1991, 11(4): 361-369.]
- [5] 王建华, 曹玲珑, 王晓静, 等. 珠江三角洲万顷沙地区晚第四纪沉积相与古环境演变[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(6): 35-41. [WANG Jianhua, CAO Linglong, WANG Xiaojing, et al. Evolution of sedimentary facies and paleoenvironment during the late Quaternary in Wanqingsha area of the Pearl River Delta [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(6): 35-41.]
- [6] 胡文焯. 珠江三角洲中北部地区晚更新世以来沉积物光释光测年及沉积旋回划分[D]. 中山大学硕士学位论文, 2010. [HU Wenye. Sediment dating and division of the depositional cycle in North Central Region of Pearl River Delta since the late Pleistocene[D]. Master Dissertation of Sun YAT-SEN University, 2010.]
- [7] 陈双喜, 赵信文, 黄长生, 等. 现代珠江三角洲地区QZK4孔第四纪沉积年代[J]. 地质通报, 2014, 33(10): 1629-1634. [CHEN Shuangxi, ZHAO Xinwen, HUANG Changsheng, et al. Chronology of Quaternary sediments from drill hole QZK4 in modern Pearl River Delta region [J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(10): 1629-1634.]
- [8] 黄镇国, 李平日, 张仲英, 等. 珠江三角洲地貌发育的新认识[J]. 台湾海峡, 1984, 3(2): 189-198. [HUANG Zhenguo, LI Pingri, ZHANG Zhongying, et al. A new approach to the geomorphological evolution of the Zhujiang delta [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1984, 3(2): 189-198.]
- [9] 黄镇国, 李平日, 张仲英, 等. 珠江三角洲第四纪沉积特征[J]. 地质论评, 1985, 31(2): 159-164. [HUANG Zhenguo, LI Pingri, ZHANG Zhongying, et al. Characteristics of the Quaternary deposits in the Zhujiang (Pearl) Delta [J]. Geological Review, 1985, 31(2): 159-164.]
- [10] 杨小强, Grapes R, 周厚云, 等. 珠江三角洲沉积物的岩石磁学性质及其环境意义[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 51(1): 56-66. [YANG Xiaoqiang, Grapes R, ZHOU Houyun, et al. Magnetic properties of sediments from the Pearl River Delta, South China: paleoenvironmental implications [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 51(1): 56-66.]
- [11] 瓦西拉里. 华南沿海MIS5-MIS3阶段海侵层年代学研究现状[J]. 中山大学研究生学刊: 自然科学、医学版, 2014, 35(2): 15-21. [Waxilali. The chronology of the transgressive sediments from South China Coast during Marine Isotope Stage 5-3 [J]. Journal of the Graduates Sun YAT-SEN University: Natural Sciences, Medicine, 2014, 35(2): 15-21.]
- [12] 赵焕庭. 珠江河口湾伶仃洋的地形[J]. 海洋学报, 1981, 3(2): 255-274. [ZHAO Huanting. Bottom relief of ling ding yang of the Zhujiang river estuary [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1981, 3(2): 255-274.]
- [13] 徐起浩, 冯炎基. 广东中山晚更新世最早海侵层与水动型海平面变化[J]. 地震地质, 1997, 19(1): 91-95. [XU Qihao, FENG Yanji. The earliest transgression layer since late Pleistocene in Zhongshan city of Guangdong province and "eustatic" sea level changes [J]. Seismology and Geology, 1997, 19(1): 91-95.]
- [14] 韦惺, 吴超羽. 全新世以来珠江三角洲的地层层序和演变过程[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 54(10): 1523-1541. [WEI Xing, WU Chaoyu. Holocene delta evolution and sequence stratigraphy of the Pearl River Delta in South China [J]. Science China Earth Science, 2011, 54(10): 1523-1541.]
- [15] Liu C L, Fürsich F T, Wu J, et al. Late Quaternary palaeoenvironmental changes documented by microfaunas and shell stable isotopes in the southern Pearl River Delta plain, South China [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 2(4): 344-361.
- [16] 王强, 张玉发, 袁桂邦, 等. MIS3阶段以来河北黄骅北部地区海侵与气候期对比[J]. 第四纪研究, 2008, 28(1): 79-95. [WANG Qiang, ZHANG Yufa, YUAN Guibang, et al. Since MIS3 stage the correlation between transgression and climatic changes in the north Huanghua area, Hebei [J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(1): 79-95.]
- [17] 龙云作. 珠江三角洲沉积地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 1-157. [LONG Yunzuo. Sedimentary Geology of the Pearl River

- Delta[M]. Beijing: Geology Press, 1997: 1-157.]
- [18] 广东省地质调查院. 广东1: 5万厚街圩、小榄镇、容奇镇、太平镇幅区域地质调查报告[R]. 2015. [Guangdong Geological Survey Institute. 1: 50 000 regional geological survey of Houjiexu, Xiaolanzhen, Rongqizhen, Taipingzhen regions, Guangdong province[R]. 2015.]
- [19] 谢叶彩, 庄文明, 何翔, 等. 广东1: 5万厚街圩、小榄镇、容奇镇、太平镇幅区域地质调查项目进展及主要成果[J]. 中国地质调查, 2015, 2(7): 1-7. [XIE Yecai, ZHUANG Wenming, HE Xiang, et al. Main progress and achievements in 1: 50 000 regional geological survey of Houjiexu, Xiaolanzhen, Rongqizhen, Taipingzhen regions, Guangdong province [J]. Geological Survey of China, 2015, 2(7): 1-7.]
- [20] Yim W W S, Ivanovich M, Yu K F. Young age bias of radiocarbon dates in pre-Holocene marine deposits of Hong Kong and implications for Pleistocene stratigraphy [J]. *Geo-Marine Letters*, 1990, 10(3): 165-172.
- [21] Zong Y, Yim W W S, Yu F, et al. Late Quaternary environmental changes in the Pearl River mouth region, China [J]. *Quaternary International*, 2009, 206(1-2): 35-45.
- [22] Zong Y Q, Huang K Y, Yu F L, et al. The role of sea-level rise, monsoonal discharge and the palaeo-landscape in the early Holocene evolution of the Pearl River delta, southern China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 54: 77-88.
- [23] Tang C, Zhou D, Endler R, et al. Sedimentary development of the Pearl River Estuary based on seismic stratigraphy[J]. *Journal of Marine Systems*, 2010, 82 Supplement 1: S3-S16.
- [24] Xu X L, Zhong J M, Huang X M, et al. Age comparison by luminescence using quartz and feldspar on core HPQK01 from the Pearl River delta in China [J]. *Quaternary Geochronology*, 2022, 71: 101320.
- [25] 徐明广, 马道修, 周青伟, 等. 珠江三角洲地区第四纪海平面变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1986(3): 93-102. [XU Mingguang, MA Daoxiu, ZHOU Qingwei, et al. Quaternary sea-level fluctuation in Zhujiang river delta area [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1986(3): 93-102.]
- [26] Hajdas I, Ascough P, Garnett M H, et al. Radiocarbon dating [J]. *Nature Reviews Methods Primers*, 2021, 1(1): 62.
- [27] Song Y G, Li C X, Zhao J D, et al. A combined luminescence and radiocarbon dating study of the Ili loess, Central Asia [J]. *Quaternary Geochronology*, 2012, 10: 2-7.
- [28] Song Y G, Lai Z P, Li Y, et al. Comparison between luminescence and radiocarbon dating of late quaternary loess from the Ili basin in central Asia [J]. *Quaternary Geochronology*, 2015, 30: 405-410.
- [29] Lai Z P, Mischke S, Madsen D. Paleoenvironmental implications of new OSL dates on the formation of the "shell bar" in the Qaidam basin, northeastern Qinghai-Tibetan plateau [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2014, 51(2): 197-210.
- [30] Al-Saqarant B S, Abbas M, Lai Z P, et al. A wetland oasis at Wadi Gharandal spanning 125-70 ka on the human migration trail in southern Jordan [J]. *Quaternary Research*, 2021, 100: 154-169.
- [31] Huang C, Lai Z P, Liu X J, et al. Lake-level history of Qinghai Lake on the NE Tibetan Plateau and its implications for Asian monsoon pattern-A review [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2021, 273: 107258.
- [32] Yu K F, Hua Q, Zhao J X, et al. Holocene marine ^{14}C reservoir age variability: evidence from ^{230}Th -dated corals in the South China Sea [J]. *Paleoceanography*, 2010, 25(3): PA3205.
- [33] 黄镇国, 蔡福祥. 珠江口晚第四纪埋藏风化层及其环境意义[J]. 第四纪研究, 2007, 27(5): 828-833. [HUANG Zhenguo, CAI Fuxiang. Buried weathering layers of the Late Quaternary and their environmental significance in the Zhujiang river estuary [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(5): 828-833.]
- [34] 陈国能, 张珂, 贺细坤, 等. 珠江三角洲晚更新世以来的沉积: 古地理 [J]. 第四纪研究, 1994(1): 67-74. [CHEN Guoneng, ZHANG Ke, HE Xikun, et al. Paleo-geographic evolution of the pearl river delta since the late Pleistocene [J]. *Quaternary Sciences*, 1994(1): 67-74.]
- [35] 陈培红. 晚更新世以来珠江三角洲海进海退[J]. 人民珠江, 1995(1): 14-17. [CHEN Peihong. Transgression and regression in the Pearl River Delta since late Pleistocene [J]. *Pearl River*, 1995(1): 14-17.]
- [36] 曹玲珑. 广州地区晚第四纪若干沉积记录与古环境演变研究[D]. 中山大学硕士学位论文, 2009. [CAO Linglong. Research on the late-Quaternary sedimentary record and environmental evolution in Guangzhou[D]. Master Dissertation of Sun Yat-Sen University, 2009.]
- [37] 庄畅, 刘春莲, 吴洁, 等. 珠江三角洲PRD16孔微体生物记录与晚更新世以来的古环境重建[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2013, 52(3): 128-132, 138. [ZHUANG Chang, LIU Chunlian, WU Jie, et al. Microfossil records of borehole PRD16 and palaeoenvironment since the Late Pleistocene in the Pearl River Delta [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2013, 52(3): 128-132, 138.]
- [38] 郭良田, 王萍, 张珂, 等. 珠江三角洲晚第四纪沉积的OSL和 ^{14}C 年龄探讨[J]. 中国地质, 2013, 40(6): 1842-1849. [GUO Liangtian, WANG Ping, ZHANG Ke, et al. OSL and ^{14}C ages of the Late Quaternary sediments in the east Pearl River Delta [J]. *Geology in China*, 2013, 40(6): 1842-1849.]
- [39] Yu Z X, Zhang K, Li X Y, et al. The age of the old transgression sequence in the Pearl River Delta, China [J]. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2017, 91(4): 1515-1516.
- [40] Yim W W S, Hilgers A, Huang G, et al. Stratigraphy and optically stimulated luminescence dating of subaerially exposed Quaternary deposits from two shallow bays in Hong Kong, China [J]. *Quaternary International*, 2008, 183(1): 23-39.
- [41] Liu J, Qiu J D, Saito Y, et al. Formation of the Yangtze Shoal in response to the post-glacial transgression of the paleo-Yangtze (Changjiang) estuary, China [J]. *Marine Geology*, 2020, 423: 106080.
- [42] Hanebuth T J J, Statterger K, Bojanowski A. Termination of the Last Glacial Maximum sea-level lowstand: the Sunda-Shelf data revisited [J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 66(1-2): 76-84.
- [43] Hanebuth T J J, Voris H K, Yokoyama Y, et al. Formation and fate of sedimentary depocentres on Southeast Asia's Sunda Shelf over the past sea-level cycle and biogeographic implications [J]. *Earth-Science Reviews*, 2011, 104(1-3): 92-110.
- [44] 梁干, 吴业彪. 广州市活动断层探测与地震危险性评价[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 85-110. [LIANG Gan, WU Yebiao. Exploration and Seismic Risk Assessment of Active Fault in Guangzhou[M]. Beijing: Science Press, 2013: 85-110.]
- [45] 赵信文, 罗传秀, 陈双喜, 等. 基于珠江三角洲ZK13孔年代和微体古生物重建的晚第四纪环境演化历史[J]. 地质通报, 2016, 35(10):

- 1724-1733. [ZHAO Xinwen, LUO Chuanxiu, CHEN Shuangxi, et al. Late Quaternary evolution history shown by Borehole ZK13 in Pearl River Delta, based on chronology and micropaleontology [J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35 (10): 1724-1733.]
- [46] 龙桂, 谢叶彩, 林小明, 等. 珠江口QK3钻孔第四纪介形类、有孔虫特征及古环境意义[J]. *地质评论*, 2013, 59 (S1): 70-71. [LONG Gui, XIE Yecai, LIN Xiaoming, et al. Characteristics of Quaternary ostracods and foraminifera from QK3 borehole in Pearl River Estuary and paleo-environmental significance [J]. *Geological Review*, 2013, 59 (S1): 70-71.]
- [47] 时翠, 甘华阳, 马胜中, 等. 晚更新世以来内伶仃洋河口湾的地层层序和沉积演化[J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31 (10): 8-18. [SHI Cui, GAN Huayang, MA Shengzhong, et al. Late quaternary evolution and sequence stratigraphy of the Lingdingyang eatuary in South China [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31 (10): 8-18.]
- [48] 周良, 王洋, 杜学斌, 等. 珠江三角洲西缘晚第四纪沉积演化和最大海侵古岸线的重建[J]. *沉积学报*, 2022, 40 (1): 119-135. [ZHOU Liang, WANG Yang, DU Xuebin, et al. Sedimentary evolution and reconstruction of maximum coastline transgression during the late Quaternary at the western margin of the Pearl River Delta [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40 (1): 119-135.]
- [49] 余素华, 张玉兰, 杨晓强, 等. 深圳湾北岸新民孔岩心晚更新世以来的环境记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23 (2): 9-18. [YU Suhua, ZHANG Yulan, YANG Xiaoqiang, et al. Environmental records in the Xinmin core since the late Pleistocene in the northern coast of the Shenzhen bay [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23 (2): 9-18.]
- [50] 谢叶彩, 王强, 龙桂, 等. 珠江口小榄镇: 万顷沙地区晚更新世以来的海侵层序[J]. *古地理学报*, 2014, 16 (6): 835-852. [XIE Yecai, WANG Qiang, LONG Gui, et al. Transgressive sequence since the Late Pleistocene in Xiaolan Town-Wanqingsha area, Zhujiang River estuary [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16 (6): 835-852.]
- [51] 陈双喜, 赵信文, 黄长生, 等. 珠江三角洲晚第四纪环境演化的沉积响应[J]. *地质通报*, 2016, 35 (10): 1734-1744. [CHEN Shuangxi, ZHAO Xinwen, HUANG Changsheng, et al. Sedimentary response to the Late Quaternary environmental evolution in Pearl River Delta [J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35 (10): 1734-1744.]
- [52] 付淑清, 宗永强, 熊海仙, 等. 珠江三角洲MIS 5间冰期海平面波动新证据[J]. *第四纪研究*, 2020, 40 (5): 1095-1104. [FU Shuqing, ZONG Yongqiang, XIONG Haixian, et al. New evidence for sea level changes during the Marine Isotope Stage 5 in the Pearl River Delta [J]. *Quaternary Sciences*, 2020, 40 (5): 1095-1104.]
- [53] 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 Yongqiang, HUANG Guangqing, XIONG Haixian, 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.]