



珠江三角洲晚第四纪沉积序列及其对海侵过程的响应

陆虹宇, 姜守俊, 黄孔文, 陈 聪, 汤永杰, 李宏卫, 黄 屏, 黄康有

Sedimentary sequences in response to marine transgression during the late Quaternary, Pearl River delta

LU Hongyu, JIANG Shoujun, HUANG Kongwen, CHEN Cong, TANG Yongjie, LI Hongwei, HUANG Ping, and HUANG Kangyou

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022072102>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

南黄海中部隆起晚新近纪—第四纪沉积序列的地层划分与沉积演化

Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the late Neogene to Quaternary sequence on the Central Uplift of the South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 25

珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202

江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义

Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 210

渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价

Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 194

珠江口盆地阳江东凹始新统的源汇过程：碎屑锆石定年及物源示踪

Tracing source-to-sink process of the Eocene in the Eastern Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin: Evidence from detrital zircon spectrum

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 124



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陆虹宇, 姜守俊, 黄孔文, 等. 珠江三角洲晚第四纪沉积序列及其对海侵过程的响应 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(2): 18-30.
LU Hongyu, JIANG Shoujun, HUANG Kongwen, et al. Sedimentary sequences in response to marine transgression during the late Quaternary, Pearl River delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(2): 18-30.

珠江三角洲晚第四纪沉积序列及其对海侵过程的响应

陆虹宇¹, 姜守俊², 黄孔文², 陈聪¹, 汤永杰¹, 李宏卫², 黄屏⁴, 黄康有^{1,3}

1. 中山大学地球科学与工程学院, 珠海 519082
2. 广东省地质调查院, 广州 510110
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519082
4. 广东中大深地科学研究院, 广州 510275

摘要: 地处南海北部的珠江三角洲在晚第四纪以来经历了数次海面升降过程, 沉积了多套海相、陆相及海陆交互相地层, 为研究河口海岸带地区的沉积模式及古环境演变过程提供了良好的研究材料。以江门 GC088 孔岩芯为主要研究材料, 通过岩相分析、粒度分析、磁化率、微体古生物学及年代测试分析等手段, 结合区域内其他第四系钻孔剖面资料, 综合揭示了珠江三角洲江门新会地区晚更新世以来地层沉积序列及沉积环境演变过程, 主要得出如下结论: ① 新会地区第四系存在河床相、潮控河流相、河口湾相、三角洲前缘相、潮坪相、三角洲平原相 6 种沉积相及风化形成的花斑黏土层; ② 通过本文新获取的 ¹⁴C 和 OSL 年代测试结果并综合对比区域内其他钻孔的测年结果建立了新会地区晚第四纪以来的年代框架, 认为珠江三角洲普遍存在 2 次海侵-海退旋回过程, 且下海侵旋回的年代应归属于 MIS 5; ③ GC088 孔多指标分析结果呈现出较好的周期性, 与海平面变化曲线变化较一致; 结合区域内部分钻孔沉积相变化及其他各类指标结果 (如元素比值、孢粉、有孔虫等), 揭示了珠江三角洲 MIS 5 阶段可能存在次一级海平面波动。本研究结果表明珠江三角洲晚更新世的沉积环境演化过程主要受到全球海平面变化及冰期-间冰期旋回时岸线移动的影响。

关键词: 海侵-海退旋回; MIS 5; 粒度分析; 沉积环境; 珠江三角洲

中图分类号: P736.21 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022072102

Sedimentary sequences in response to marine transgression during the late Quaternary, Pearl River delta

LU Hongyu¹, JIANG Shoujun², HUANG Kongwen², CHEN Cong¹, TANG Yongjie¹, LI Hongwei², HUANG Ping⁴, HUANG Kangyou^{1,3}

1. School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. Guangdong Geological Survey Institute, Guangzhou 510110, China
3. Guangdong Laboratory of Marine Science and Engineering (Zhuhai), Zhuhai 519082, China
4. GDZD Institute on Deep-Earth Sciences, Guangzhou 510275, China

Abstract: The Pearl River Delta, located in the northern South China Sea, has experienced several sea level changes, and deposited several marine-terrestrial strata since the late Quaternary, which provides good research materials for studying the sedimentary model and palaeo-environmental evolution of estuarine and coastal zones. In this study, detailed investigation of lithofacies, grain-size distribution, magnetic susceptibility, microfossils, and chronological analysis were conducted for core GC088. The results were combined with other regional cores and revealed the stratigraphic sequence and the evolution of sedimentary environment in Jiangmen Xinhui area, Pearl River Delta. The Quaternary strata in Xinhui area include six sedimentary facies, namely, river channel, tide-dominated river, estuarine, delta front, tidal flat, and delta plain. Weathered clay layers also present in the Quaternary strata in Xinhui area. Based on the ¹⁴C and OSL dating results obtained in this study and in other cores in the study area, the chronological framework of Xinhui area since the late Quaternary was established. Two transgression-regression cycles in the Pearl River Delta were recognized, and the age of the lower transgression cycle should be attributed to MIS 5.3. The multi-index analysis results of core GC088 illustrate clear periodicity in relation to the sea level change. Combined with the changes of sedimentary facies and the results of other proxies (e.g. geochemical elements, pollen, foraminifera, etc.) of regional cores, it is believed that sea level fluctuated in the MIS 5 stage of the Pearl River Delta. This study indicates that the evolution of sedimentary environment

资助项目: 广东省引进人才创新创业团队项目 (2016ZT06N331); 江门市新会区财政项目“新会区城市地质调查”(440705-201911-121000-0002); 广东省国土资源保护与治理专项资金 (2017201)

作者简介: 陆虹宇 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事第四纪沉积与古环境变化研究, E-mail: luh25@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者: 汤永杰 (1993—), 男, 博士, 从事海岸带沉积与古环境、古气候研究, E-mail: tangyj55@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2022-07-21; 改回日期: 2022-10-24. 张现荣编辑

in the Pearl River Delta was mainly controlled by global sea level change and shoreline movement during last glacial-interglacial cycles.

Key words: transgression-regression cycle; MIS 5; grain-size distribution; sedimentary environment; Pearl River Delta

以珠江三角洲为核心区域的粤港澳大湾区是我国经济最为活跃、人口最为密集的城市群之一,在国家发展大局中占有重要的战略地位^[1]。然而,全球变暖导致海面上升^[2]以及人类活动导致三角洲地形地貌加速侵蚀^[3],海岸带可持续发展面临严峻挑战。位于南海北部陆架边缘的珠江三角洲是海-陆相互作用的敏感区域,在海侵过程与河流沉积物供给间的相互作用及新构造运动的共同影响下,其沉积地层记录了晚第四纪以来丰富的古环境、古气候及海陆相互作用等信息^[4]。因此,研究珠江三角洲晚第四纪以来沉积地层形成与演变过程,不仅对于了解全球变化的区域响应具有重要的科学意义,而且可以为粤港澳大湾区的战略发展建设、土地规划、防灾减灾及各类适应性措施提供理论支撑和科学引导。

第四纪期间,包括珠江三角洲在内的东南沿海地区一般仅记录到晚更新世和全新世两次海侵,两个海侵沉积旋回的底部为河流沉积、上覆海相或海岸带沉积;两个海相层之间常发育红色或杂色的花斑黏土^[5-11]。其中,晚更新世的海侵地层由于测年材料缺乏和技术手段限制,其年代一直存在争议,尽管该层的¹⁴C 年龄属于 MIS 3 阶段,但许多学者认为其真实年龄可能更老^[4,12-14]。近年来,苏北平原^[8]、福建^[9-10]、练江平原^[15]及海南岛^[11]等地的研究结果也表明自盆地初始形成以来的首次海侵过程应发生在 MIS 5 阶段。

在珠江三角洲地区,前人对全新世海侵过程及相关的古环境演变过程了解相对较详细^[16],但晚更新世海侵的年代归属问题至今仍有争议,不同年代框架下对于珠三角地层与全球海平面的对比及衡量区域稳定性的认识大相径庭^[4,17-20]。近年来,珠江三角洲中部地区的研究表明老海相层的年代属于 MIS 5^[20-23]。而珠江三角洲西南部的江门新会地区晚更新世年代研究则很少,测年数据仅有少量传统¹⁴C 测年^[5-6,24],年代控制仍然十分不精确,基于年代研究的其他古环境代用指标结果也较为匮乏。此外,研究表明,远场海平面无论在 MIS 3 还是 MIS 5 都经历了多次明显的波动^[25],但在珠江三角洲相关的地质记录却少有报道^[21-22,26]。因此,晚更新世以来沉积地层与海平面变化之间的关系仍然不够了解,需开展更多的研究工作。本文针对江门新会地区 GC088 钻孔进行粒度、磁化率、色度、有孔虫等多

指标分析结合年代学测试结果,对研究区的第四纪沉积特征、沉积相进行划分,综合对比区域内钻孔的沉积单元及层序地层框架,为深入揭示研究区晚更新世以来的海陆相互作用及古环境演变过程提供新的依据。

1 研究区概况

珠江三角洲是由西江、北江、东江及潭江形成的复合三角洲。本研究区域覆盖珠江三角洲中-西部第四纪沉积区,以潭江和西江流域下游为主,包含江门新会、中山等地(图 1)。江门新会地区位于珠江三角洲西南部,东与中山相邻,属潭江、西江流域,潭江经崖门流入黄茅海,西江经磨刀门入南海(图 1)。受东亚季风的影响,夏季高温多雨,冬季温凉干燥,年均温 21.7°C,降雨量 1 741.9 mm^[27]。构造上属于新会红盆的一部分,南、北两面为花岗岩及寒武系石英砂岩,近东西向的五桂山北麓断裂控制着基底地形^[28]。形成于白垩纪—古近纪的新会红盆至渐新世末结束沉积,盆地转为风化剥蚀状态^[28],上覆的松散沉积物为晚第四纪以来形成的海-陆交互沉积,意味着渐新世与第四纪之间存在沉积中断。第四系厚度 20~25 m,沉积中心 30~35 m,等厚线沿近 EW 向展布^[5]。

对珠江三角洲第四纪地层层序过去多沿用岩石地层单位进行划分,如黄镇国等^[5]、李平日等^[29]将珠江三角洲第四纪地层划分为石排组、西南组、三角组、杏坛组、横栏组、万顷沙组、灯笼沙组等单元;Yim^[30]则提出了独特方案,将珠江河口地区第四纪地层划分为多个海相-陆相层,包含了 5 套海相地层;宗永强等^[4]在综合了构造沉降与海平面变化等因素后,将珠江三角洲平原划分为 5 个环境演化阶段(表 1)。这些地层单元对认识珠江三角洲的形成阶段具有重要意义。

2 材料与方法

2.1 研究材料

本研究于 2021 年在江门市新会地区进行岩芯钻探,主要分析的钻孔 GC088 其经纬度为 22°29'20"N、113°03'17"E,高程 1.64 m。钻孔岩芯

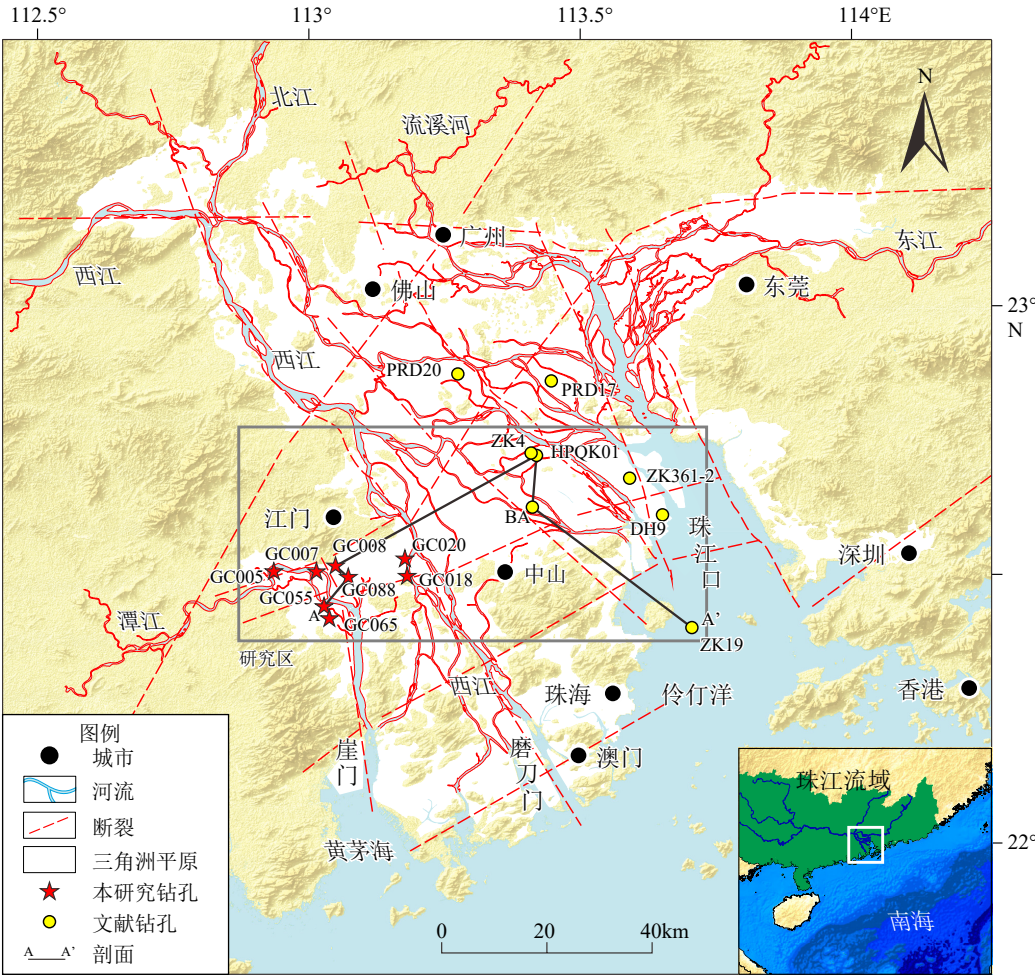


图 1 研究区及钻孔位置
Fig.1 Location of the study area and cores

表 1 珠江三角洲晚第四纪地层划分方案
Table 1 The late Quaternary lithostratigraphy of the Pearl River Delta

黄镇国等 ^[5] ; 李平日等 ^[29]	Yim ^[30]	宗永强等 ^[4]	沉积相及岩性	估算年龄/kaBP	氧同位素阶段
灯笼沙组			河海混合相粉砂、粉砂质黏土		
万顷沙组	M1 [*]	M1b [*]	河海混合相中细砂、粉砂	8~0	MIS 1
横栏组			浅海相粉砂		
杏坛组		M1a [*]	河流相、河口通道相砂、粉砂	10.5~8	
三角组	T1 [*]	T1 [*]	花斑黏土（广泛分布）、河流相砂砾	79~10.5	MIS 2—4
西南组	M2 [*]	M2 [*]	浅海相粉砂质黏土	126~79	MIS 5
石排组	T2 [*]	T2 [*]	河流相砂砾或中粗砂、花斑黏土（零星分布）	>126	MIS 6

注：*M1代表第一海相层，T1代表第一陆相层，M2代表第二海相层，T2代表第二陆相层。

运回中山大学第四纪古环境研究室保存,后续进行详细的岩性描述、分样及拍照等,并进行粒度、磁化率、色度和有孔虫等多指标分析工作。另外,本研究搜集前人文献中已发表的 8 个年代较为连续的钻孔进行年代、层序地层对比和古环境重建(图 1、表 2)。

2.2 测试方法

2.2.1 年代学分析

本研究选取钻孔 GC088、GC005、GC055 岩芯中较完整的贝壳、泥炭或有机质等 9 个测年材料送往美国 BETA 实验室进行 AMS¹⁴C (Accelerator Mass

表 2 本研究相关的珠江三角洲钻孔信息
Table 2 Information of relevant cores from the Pearl River Delta in this work

钻孔编号	地点	经纬度	来源
GC005	江门市新会区	22°30'02"N、112°55'01"E	本研究
GC007	江门市新会区	22°29'54"N、112°59'43"E	本研究
GC008	江门市新会区	22°29'58"N、113°02'03"E	本研究
GC018	江门市新会区	22°29'12"N、112°09'55"E	本研究
GC020	江门市新会区	22°30'57"N、112°09'44"E	本研究
GC055	江门市新会区	22°26'04"N、113°00'29"E	本研究
GC065	江门市新会区	22°25'03"N、113°00'53"E	本研究
GC083	江门市新会区	22°20'22"N、113°10'35"E	本研究
GC088	江门市新会区	22°29'20"N、113°03'17"E	本研究
BA	中山市石岐街道	22°36'46"N、113°23'36"E	文献[20]
ZK4	中山市黄圃镇	22°43'14"N、113°23'45"E	文献[22]
HPQK01	中山市黄圃镇	22°43'04"N、113°24'10"E	文献[23]
ZK316-2	广州市南沙区	22°40'52"N、113°35'06"E	文献[21]
DH9	广州市南沙区	22°36'24"N、113°38'07"E	文献[31]
PRD17	广州市南沙区	22°51'07"N、113°25'30"E	文献[26]
PRD20	佛山市顺德区	22°51'54"N、113°15'23"E	文献[26]
ZK19	伶仃洋西滩	22°22'56"N、113°41'55"E	文献[32]

Spectrometry, AMS) 测试。所有测试结果使用 BetaCal3.21 数据库校正为日历年龄, 以 cal.aBP 表示。对于植物碎屑、炭屑、有机质和淡水贝壳等样品, 使用 IntCal13 曲线校正; 对于海洋贝壳样品, 使用 Marine13 曲线校正^[33]。测年结果均采用 2sigma 年龄分布确定样品的年代范围和概率中值^[34]。采集 GC088、GC005、GC055 钻孔的共 4 个样品进行石英颗粒 (4~11 μm) 的光释光 (Optical Simulated Luminescence, OSL) 测年, 测试过程在中山大学地球科学与工程学院光释光实验室完成。

2.2.2 粒度分析

采用英国 Malvern 公司的 Mastersizer 3000 激光粒度仪对 GC088 钻孔岩芯样品进行粒度分析, 采样间隔 20 cm, 共测试样品 79 个。粒度样品经预处理后进行上机测试, 预处理过程如下: 取样品约 1 g, 用 10% 的 H₂O₂ 溶液去除有机质, 用 20% 的 HCl 溶液去除自生碳酸盐和部分次生黏土矿物; 用直径 1 000 μm 的筛网筛出粒径 > 1 000 μm 的粗颗粒并烘干称重, 在 ≤ 1 000 μm 的样品中加入 5 mL 0.05 mol/L 的六偏磷酸钠溶液, 搅拌、超声波震荡使样品充分分散, 准备上机测试。每个样品重复测量 3 组数据

并取平均值, 对测量结果出现较大误差的样品进行重新测量。

2.2.3 其他测试分析

色度是反映沉积物颜色特征的指标, 具有良好的古环境指示意义^[35-36]; 亮度 *L** 值主要反映沉积物中碳酸盐和有机质的含量, 红-绿彩度 *a** 值主要反映沉积物的风化、氧化程度, 黄-蓝彩度 *b** 值主要反映沉积时的氧化还原环境。磁化率主要由沉积物中磁性矿物的种类、粒度和含量所决定, 能够反映物源、沉积动力条件及次生变化的影响^[37]。本文采用日本 Konica Minolta 公司生产的 CM-700d 分光测色计对 GC088 钻孔岩芯进行色度分析, 采用英国 Bartington 公司生产的 MS2 磁化率仪和 MS2E 探头对 GC088 钻孔岩芯进行磁化率分析, 磁化率及色度测试间隔均为 10 cm, 共计获得 174 个色度与磁化率结果。

此外, 对 GC088 钻孔岩芯中取 80 个有孔虫样品, 送往青岛毕克分析测试有限公司进行鉴定统计。测试过程如下: 取约 100 g 样品, 经 50℃ 恒温烘干后称重, 加清水浸泡 24 h 使沉积物颗粒分散。随后用孔径 0.154 mm 的标准铜筛冲洗, 收集筛上粗

组分,再经 50℃ 恒温烘干以备镜下鉴定。使用 Olympus SZ-X61 双目实体显微镜进行鉴定与统计分析^[38];全部有孔虫均鉴定到种,共发现 20 属 27 种,其中包含底栖有孔虫 15 属 21 种(含未定种),浮游有孔虫 5 属 6 种。

3 结果

3.1 沉积相特征

根据研究区钻孔岩芯的岩性、沉积构造等特征,结合 GC088 钻孔粒度、色度、磁化率以及有孔

虫指标的综合分析结果,本文将研究区晚更新世以来的沉积地层综合划分为以下 6 种沉积环境:

河床沉积:发育在上更新统底部(图 2a)或顶部(图 2b),对应 GC005 钻孔 21.6~17.0 m、GC007 钻孔 28.2~24.0 m、GC008 钻孔 31.0~24.0 m、GC020 钻孔 32.4~28.0 m、GC083 钻孔 20.4~17.5 m。沉积物一般为灰黄—黄褐色砂,受打钻影响一般不见沉积构造,无生物碎屑,几乎不含有机质。这些特征表明沉积环境为陆相的河流环境,是低海平面时期深切河谷的河床沉积。

潮控河流沉积:发育在上更新统和全新统底部,对应 GC018 钻孔 28.9~27.0 m、GC088 钻孔 24.4~23.0 m。沉积物一般为灰色—灰褐色粉砂质中粗砂、粉砂质中细砂,未见生物遗迹;底部常含砾石,中上部粉砂含量增加,呈现下粗上细的粒序(图 2c、d)。平均粒径为 $2.97 \sim 6.26 \Phi$,频率曲线呈现出正偏态的窄峰或砂-粉砂的宽双峰形态(图 3a),分选性差。色度 b^* 值偏高,表明存在一定的氧化程度; L^* 值较低,颜色较深,说明有机质含量相对于河床沉积更多;磁化率值保持在 150×10^{-6} SI 以下的水平(图 4)。这些特征指示受海侵影响的河口环境,反映河流搬运力受海水顶托作用而快速减弱,使粗颗粒碎屑堆积的过程^[39-40]。

河口湾湾心沉积:在上更新统和全新统地层中都有发育,对应 GC007 钻孔 16.0~14.0 m、GC008 钻孔 23.4~21.6 m、GC018 钻孔 21.4~18.0 m、GC020 钻孔 20.7~19.0 m、GC055 钻孔 31.0~26.0 m、GC083 钻孔 25.4~22.9 m、GC088 钻孔 23.00~20.50 m、18.70~16.40 m 及 12.00~10.00 m。沉积物为灰黑色黏土质粉砂,不发育沉积构造,含咸水和半咸水贝壳(图 2e、f)。平均粒径为 7.24Φ ,频率曲线呈现细粉砂-黏土粒级的宽峰(图 3b),代表了潮汐主导的河口泥质沉积环境。色度 L^* 、 a^* 、 b^* 值均较低,磁化率值约为 152×10^{-6} SI,受到生物扰动影响可能出现波动以及峰值(图 4)。上更新统河口湾湾心沉积含贝壳碎屑,指示海相环境,但基本不含有孔虫,原因可能是末次冰期时下伏地层出露地表,遭受长时间的风化、淋溶等作用导致钙质化石被溶解^[30]。全新统河口湾湾心沉积生物扰动强烈,含蚝壳、有孔虫等海相钙质化石。有孔虫平均丰度为 183 枚/100g,以 *Quinqueloculina subungerina*、*Ammonia beccarii* var. *tepida* 和 *Elphidium hispidulum* 为优势种,其平均丰度分别达到 82 枚/100g、51 枚/100g 和 20 枚/100g,指示受河流影响较大的半咸水环境^[41];有孔虫丰度呈上升趋势(图 4),反映河口湾环

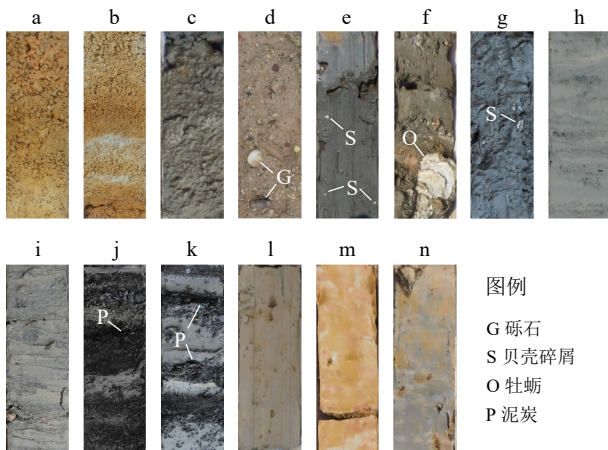


图2 新会地区钻孔岩芯典型沉积物照片

a. 河床沉积(GC007 钻孔 24.0~24.3 m), b. 河床沉积(GC083 钻孔 19.5~19.8 m), c. 潮控河流沉积(上更新统, GC088 钻孔 23.3~23.6 m), d. 潮控河流沉积(全新统, GC018 钻孔 28.2~28.5 m), e. 河口湾湾心沉积(上更新统, GC020 钻孔 19.1~10.4 m), f. 河口湾湾心沉积(全新统, GC088 钻孔 11.0~11.3 m), g. 三角洲前缘沉积(GC088 钻孔 6.4~6.7 m), h. 泥质潮坪沉积(上更新统, GC007 钻孔 23.4~23.7 m), i. 泥质潮坪沉积(全新统, GC005 钻孔 6.2~6.5 m), j. 沿岸沼泽沉积(上更新统, GC065 钻孔 15.2~16.5 m), k. 沿岸沼泽沉积(全新统, GC005 钻孔 11.5~11.8 m), l. 三角洲平原沉积(GC018 钻孔 2.7~3.0 m), m-n. 花斑黏土(GC088 钻孔 13.0~13.3、19.0~19.3、14.0~14.3 及 20.0~20.3 m)。

Fig.2 Photos of typical sediments cored in Xinhui area

a: River channel (24.0~24.3 m in core GC007), b: river channel (19.5~19.8 m in core GC083), c: tide-dominated river (Qp, 23.3~23.6 m in core GC088), d: tide-dominated river (Qh, 28.2~28.5 m in core GC018), e: central estuarine bay (Qp, 19.1~10.4 m in core GC020), f: central estuarine bay (Qh, 11.0~11.3 m in core GC088), g: delta front (6.4~6.7 m in core GC088), h: muddy tidal flat (Qp, 23.4~23.7 m in core GC007), i: muddy tidal flat (Qh, 6.2~6.5 m in core GC005), j: salt marsh (Qp, 15.2~16.5 m in core GC065), k: salt marsh (Qh, 11.5~11.8 m in core GC005), l: delta plain (2.7~3.0 m in core GC018), m-n: weathering clay (13.0~13.3 m, 19.0~19.3 m, 14.0~14.3 m and 20.0~20.3 m in core GC088).

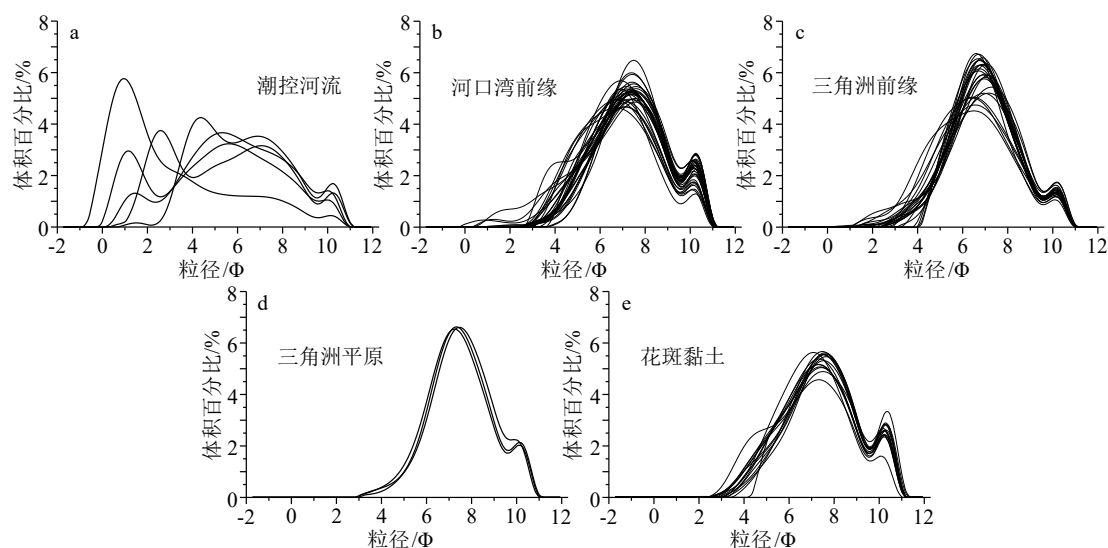


图 3 GC088 钻孔主要沉积相及花斑黏土的粒度频率分布曲线

a. 孔深 24.40~23.00 m, b. 孔深 23.00~20.50、18.70~16.4 及 12.00~10.00 m, c. 孔深 10.00~2.50 m, d. 孔深 2.50~1.55 m, e. 孔深 14.20~12.00 m。

Fig.3 Grain-size frequency distribution curves of different sediment facies and weathered clay in core GC088

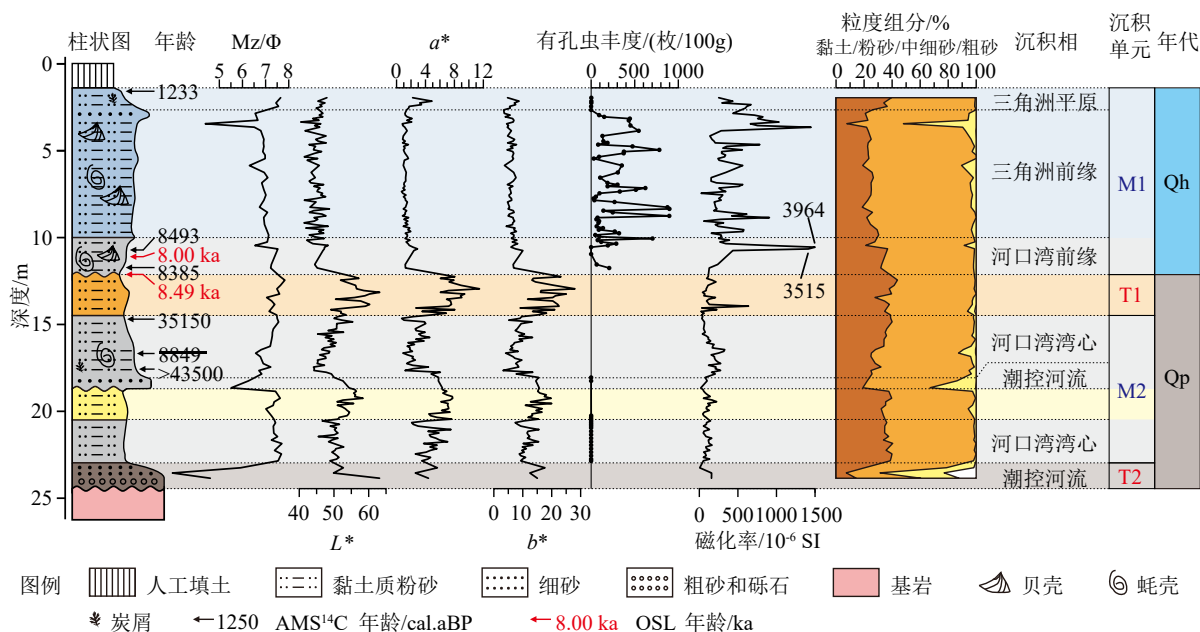


图 4 GC088 钻孔综合古环境指标及沉积环境

Fig.4 Comprehensive diagram of environmental proxies and reconstructed sedimentary environments of core GC088

境中海洋作用逐渐加强的趋势。

三角洲前缘沉积: 发育在全新统中, 对应 GC007 钻孔 9.1~3.0 m、GC008 钻孔 6.8~2.5 m、GC018 钻孔 21.5~8.3 m、GC020 钻孔 15.2~5.0 m、GC055 钻孔 9.5~1.5 m、GC065 钻孔 10.6~1.0 m、GC083 钻孔 12.0~2.2 m、GC088 钻孔 10.0~2.5 m。沉积物为灰黑色粉砂和黏土, 含大量贝壳碎屑和微体化石 (图 2g)。平均粒径为 6.74 Φ, 呈现下细上粗的粒序。频率曲线呈现中粉砂粒级的宽峰 (图 3c); 粒度相比河口湾相更粗, 黏土含量更少且粉砂含量

更多, 且分选性更差, 表明水动力条件较强的三角洲前缘环境。色度 L^* 、 a^* 、 b^* 值均较低, 磁化率值较高, 约为 406×10^{-6} SI, 且呈逐步上升趋势 (图 4)。含大量贝壳碎屑和微体化石。有孔虫平均丰度达 267 枚/100 g, 以 *E. hispidulum* 和 *A. beccarii* var. *tepida* 为优势种, 其平均丰度分别为 123 枚/g 和 100 枚/g, 代表水深较大、盐度较高的远岸环境^[41]。在部分深度, 有孔虫以 *A. beccarii* var. *tepida* 为优势种, *E. hispidulum* 丰度相对较低, 指示水深较浅、受河流影响较大的半咸水环境^[41], 可能反映全新世海

平面波动。

潮坪沉积: 在上更新统和全新统中都有发育, 对应 GC005 钻孔 13.0~2.5 m、GC007 钻孔 23.7~21.0 m、GC018 钻孔 25.0~22.0 m 和 8.3~4.0 m、GC020 钻孔 25.0~21.5 m、GC065 钻孔 19.9~15.4 m, 主要有泥质潮坪和沿岸沼泽沉积。泥质潮坪为灰黑色粉砂—细砂, 常见砂-泥互层的水平层理, 单层的砂、泥之间有截然的界限关系(图 2h、i)。潮汐纹层的厚度变化代表了潮间带至潮下带的沉积序列: 高潮坪以泥质及粉砂沉积为主, 含少量砂层; 中潮坪砂层的厚度和出现频率增加; 低潮坪及潮下带则以砂质沉积为主, 含少量泥层^[42]。沿岸沼泽为灰黑色粉砂和砂, 含黑色泥炭层(图 2j、k), 反映潮上带的咸水湿地环境。

三角洲平原沉积: 发育在全新统顶部, 对应 GC007 钻孔 2.8~0.7 m、GC008 钻孔 2.5~0.5 m、GC018 钻孔 3.0~0 m、GC020 钻孔 3.0~1.0 m、GC055 钻孔 1.5~0 m、GC065 钻孔 1.0~0 m、GC083 钻孔 2.2~1.5 m。沉积物一般为灰褐色—黄褐色粉砂和黏土, 含少量泥炭碎屑, 一般无贝壳碎屑(图 2l); 有孔虫稀少, 仅含个别底栖有孔虫及浮游有孔虫, 表明海水已经基本退出珠江三角洲。平均粒径为 7.55 Φ , 频率曲线呈现细粉砂-黏土粒级的宽峰(图 3 d), 分选较差。色度 L^* 值低, a^* 、 b^* 值稍

微偏高(图 4), 表明沉积物中有机质含量多, 但具有一定程度的风化和氧化。

3.2 年代测试结果

研究钻孔的 AMS¹⁴C 和 OSL 测年结果如表 3 所示。GC088 钻孔全新世的 AMS¹⁴C 和 OSL 年龄吻合, 表明全新世的 OSL 年龄较为可信。16.60 m 深处的贝壳位于花斑黏土层下方的上更新统地层中, 年代应为晚更新世, 但 AMS¹⁴C 测得的校正年龄为 8 993~8 704 cal.aBP; 而 14.70 和 17.80 m 深处的测年结果分别为 35 543~34 756 cal. aBP 和 >43 500 aBP (超出测年上限)。因此, 16.60 m 深处的实际年龄可能已经接近¹⁴C 测年上限, 测得的年龄极有可能来自污染物质。GC008 及 GC055 钻孔上更新统的 AMS¹⁴C 年龄分别为 33 318~32 034 cal.aBP 和 >43 500 aBP, 而 OSL 测年结果则更老, 分别为 79.64±2.98 ka 和 111.39±4.06 ka。

4 讨论

4.1 新会地区第四系沉积年代框架及地层划分

珠江三角洲地区研究成果表明, 第四系上更新统顶部往往发育特征明显“花斑黏土”层, 其沉积物

表 3 新会地区 GC088、GC005 和 GC055 钻孔的测年结果
Table 3 Dating result of cores GC088, GC005, and GC055

钻孔	测年方法	深度/m	测年材料	测试年龄/aBP	校正年龄/cal.aBP	年龄中值/cal.aBP
GC088	AMS ¹⁴ C	1.75	泥炭	1 290±30	1 286~1 180	1 233
GC088	AMS ¹⁴ C	10.65	贝壳	7 720±30	8 561~8 425	8 493
GC088	AMS ¹⁴ C	11.90	贝壳	7 580±30	8 420~8 350	8 385
GC088	AMS ¹⁴ C	14.70	黏土	31 260±160	35 543~34 756	35 150
GC088	AMS ¹⁴ C	16.60	贝壳	7 970±30	8 993~8 704	8 849
GC088	AMS ¹⁴ C	17.80	泥炭	>43 500	—	—
GC008	AMS ¹⁴ C	12.45	泥炭	28 650±160	33 318~32 034	32 676
GC055	AMS ¹⁴ C	8.90	贝壳	6 620±30	7 570~7 441	7 506
GC055	AMS ¹⁴ C	18.45	泥炭	>43 500	—	—
GC088	OSL	10.80	粗颗粒石英	8.00±0.23 ka	—	—
GC088	OSL	12.00	粗颗粒石英	8.49±0.24 ka	—	—
GC008	OSL	24.20	粗颗粒石英	79.64±2.98 ka	—	—
GC005	OSL	12.90	粗颗粒石英	6.09±0.36 ka	—	—
GC055	OSL	30.20	粗颗粒石英	111.39±4.06 ka	—	—

“—”表示此测试年龄或测年方法无该项数据。

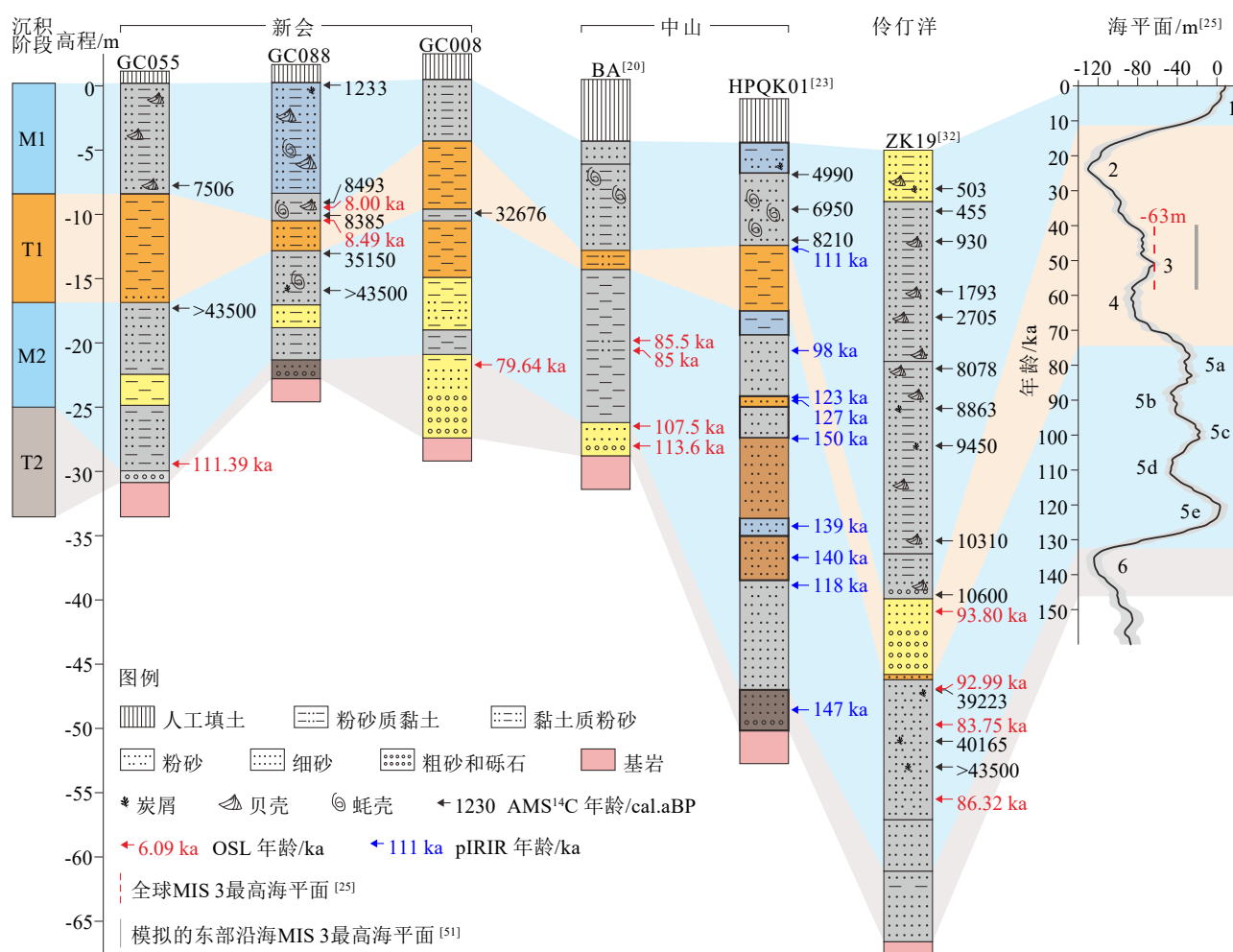


图 5 珠江三角洲新会-中山-伶仃洋联孔剖面与年代框架

Fig.5 Correlation of the cores from Xinhui to Lingdingyang Bay and the chronological framework

为土黄色-橘红色等杂色粉砂和黏土(图 2m), 是划分上更新统和全新统的标志^[5]。根据钻孔岩芯的岩性特征可将新会地区钻孔沉积地层划分为上更新统和全新统两个沉积旋回, “花斑黏土”层以上为全新统, 以下为上更新统。新会地区钻孔综合指标及沉积相特征表明, 晚第四纪以来该区的沉积地层存在 4 个主要沉积单元(图 4、5)。

T2: 该沉积单元以河床相及潮控河流相砂砾为主, 石英光释光(OSL)和长石光释光(post-IR IRSL, pIRIR)结果为 80~150 ka(图 5)。前人将这套发育在珠江三角洲第四系沉积物底部、不整合于基岩风化壳之上、常沿着古河道呈条带状分布^[31]的砂砾层划分为石排组, 认为是低海面时期河谷冲刷的产物^[5]。本研究发现, 除了低海平面时期的河床沉积外, 新会地区在该阶段还发育明显受海侵影响的潮控河流相沉积。晚更新世海侵早期, 随着全球海平面快速上升, 海水从古珠江口入侵并沿古珠江水系向内陆推进, 在原深切河谷中形成狭窄的溺谷型河

口湾, 河流搬运力受海水顶托作用而快速减弱, 使粗颗粒碎屑快速堆积, 形成下粗上细的粒序。

M2: 该沉积单元开始出现海相化石, 沉积物以河口湾前缘相块状黏土质粉砂和潮坪相砂-泥互层为主。这套在末次间冰期发育的海相沉积地层的¹⁴C 测年结果为 30~40 ka, 显示其年代为 MIS 3 阶段; 而 OSL 和 pIRIR 测年结果则主要在 80~150 ka(图 5), 即 MIS 5 阶段。由于末次冰期时地层出露地表, 遭受长时间的风化、淋溶等作用导致钙质化石被溶解^[30], 该沉积单元基本不含有孔虫, 在珠江三角洲仅顺德、南沙个别钻孔发现有孔虫^[26], 但河口湾前缘相的咸水贝壳碎屑及典型的潮坪相层理证明该单元为海相沉积。本研究发现新会-中山地区在该阶段还发育了具明显风化、氧化特征的土黄色-红色地层^[22,23,31], 可能指示短暂海退事件, 使之前沉积的海相地层出露地表遭受风化。

T1: 该单元主要为末次冰期期间形成的花斑黏土与河床相沉积。对于花斑黏土的成因, 目前主要

有两种看法:一是晚更新世海侵时期形成的海、陆相沉积在末次冰期的低海面时期暴露,地层顶部遭受风化所致^[5,43]。二是王晶等^[44]发现珠三角周边台地上同期发育了一套风成堆积的类黄土沉积,直接覆盖在基岩风化壳之上,与下伏地层间为不整合接触。在本研究中,花斑黏土层岩性与下伏地层间无明显间断,为过渡接触关系(图 2n),粒度特征与下伏河口湾相地层相似(图 3c)。色度 L^* 、 a^* 、 b^* 曲线从下往上整体呈波动上升趋势(图 4),没有明显突变,表明沉积物的风化程度逐渐加强。上述特征与前人风化成因的观点相吻合,因此本文认为研究区花斑黏土的成因以风化作用为主。末次冰期时全球海平面下降,海水彻底退出珠江三角洲乃至更远的陆架^[18-19],河流下切,整个珠江三角洲处于陆相风化剥蚀环境。在河间高地,晚更新世海相沉积出露地表,遭受强烈的风化作用并形成橘红色的花斑黏土;而在深切河谷处,则形成河床相沉积。

M1: 该沉积单元即全新世海相层,主要包括潮控河流、河口湾前缘、潮坪、三角洲前缘、三角洲平原 5 种沉积环境。早全新世三角洲沉积环境表现出在海侵过程中的时空差异性。研究区测年结果表明,海水在 9~8 kaBP 时才广泛侵入到新会地区,形成河口湾环境,晚于伶仃洋地区^[32];而在一些冰期低海面深切河谷地段,则在早于 9 kaBP 时形成了潮控河流沉积^[41,45]。中—晚全新世(8~0 kaBP)为三角洲发育阶段,沉积环境从三角洲前缘过渡为三角洲平原相,粒度先逐渐变粗,后迅速变细。有孔虫丰度总体呈先增加、后减小的趋势,反映海侵-海退进程。

4.2 珠江三角洲中—西部地区晚更新世地层年代探讨

珠江三角洲沉积序列仅记录了第四纪以来数次海面变化的最后两次沉积记录,即晚更新世和全新世两次海侵-海退过程^[5-6],而晚更新世地层年代归属则直接决定了珠三角海侵历史及其形成演化过程等一系列重要科学问题的解释。受限于测年手段及精度,珠三角晚更新世海相层的年代有两种不同看法,即 MIS 3 阶段^[5,17] 和 MIS 5 阶段^[4,20,23,30]。早期珠三角晚更新世海侵层研究主要依靠 ^{14}C 和热释光年代数据,且结果大多数落在 25~40 kaBP 左右^[5,17],即 MIS 3。然而,由于 ^{14}C 测年方法的限制,这些测年结果可能存在问题^[4,6,13-14]。近年来通过其他测年方法获得的珠江三角洲下海相层的年龄主要集中在 MIS 5 阶段,如石英光释光(OSL)测年法^[20,32]

和铀系列测年法^[13-14];但也有相当一部分的石英 OSL 年龄落在 MIS 3 阶段^[46-47]。石英 OSL 的信号饱和是限制其测年上限的主要问题,对于超过约 70 ka 的沉积物,石英 OSL 年龄可能存在争议^[48]。Yim 等^[49]指出,对于珠三角沉积地层而言,石英 OSL 测年能够为 T1 沉积单元(花斑黏土层)提供有效年龄,但对于老于 T1 的沉积单元只能提供最低年龄。而长石释光信号的饱和剂量远远高于石英,利用长石 pIRIR 可以对超过 100 ka 的样品进行测年,能更好地确立年代框架^[50]。如 Xu 等^[23]在珠江三角洲中部中山黄圃 HPQK01 钻孔的石英 OSL 年龄因信号饱和而存在低估,而长石 pIRIR 年龄显示下海相层的年龄为 MIS 5 阶段(图 5)。根据远场海平面变化曲线^[25],全球海平面在 MIS 3 阶段下降到 -60~-80 m(图 5),而珠江三角洲的下海相层普遍埋深仅为 -15~-20 m。尽管近年有模拟研究表明我国东部沿海地区 MIS 3 海平面可以达到 -20~-30 m^[51](图 5),但珠江三角洲及南海北部的地震测线和钻孔资料表明, MIS 3 阶段海侵仅局限于珠江口外,并未进入珠江三角洲地区,因此珠江三角洲下海相层不可能为 MIS 3 阶段的产物^[18-19]。

考虑到新会地区下海相层的 ^{14}C 测年数据可能受到“新碳”的污染,本文认为其 40 kaBP 左右年龄可能只是反映 ^{14}C 的测年上限^[4,20,23,30],而 OSL 年龄则更为可靠。新会地区下海相层顶部高层普遍仅约 -10~-15 m,与 MIS 3 阶段的海平面高度相差较大,不可能由仅到珠江口外的 MIS 3 海侵形成。因此,根据本研究在新会地区及前人在珠江三角洲的测年结果,结合前人对东南沿海其他地区晚更新世海侵层年代的研究,本文认为珠江三角洲晚更新世海侵的时间更可能在 MIS 5 而非 MIS 3。上更新统顶部的花斑黏土或河床沉积(T1)应形成于 MIS 4—2 阶段,而第四系底部的河流沉积(T2)则应形成于 MIS 6 阶段。

4.3 珠江三角洲晚更新世地层对 MIS 5 阶段海平面波动的响应

三角洲是河流和海洋共同作用的产物,相对海平面的高度是影响三角洲形成和发育的关键因素之一。研究表明,远场海平面在 MIS 5 经历了多次明显的波动^[25],但在珠江三角洲相关的地质记录却少有报道^[21-22,26],晚更新世沉积环境变化与海平面变化的关联仍不清楚。以往的钻孔中大部分仅记录了晚更新世和全新世两个大的沉积旋回^[5-6],而本研究在新会地区钻取的系列钻孔中,晚更新世普遍存

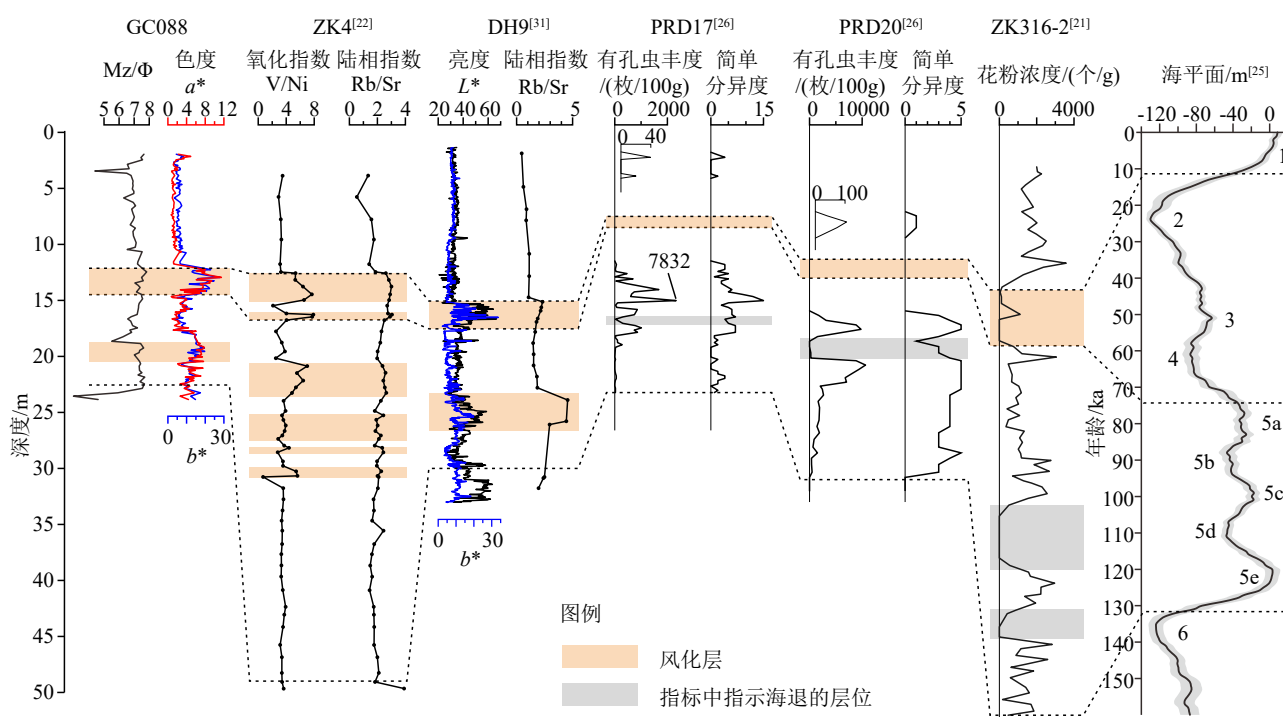


图 6 珠江三角洲 MIS 5 海平面波动的钻孔指标记录与全球海平面变化曲线

Fig.6 Proxies of MIS 5 sea level fluctuation in the Pearl River Delta and the curve of global sea level change

在两层海相沉积及其之间的土黄色—橘红色风化层。GC088 钻孔的粒度、色度的垂向变化指示该地区晚更新世期间经历了两次从陆到海的次一级沉积旋回(图 4)。

近年来,珠三角平原也陆续出现关于晚更新世的次级海平面波动的报道,包括晚更新世海相层中夹有一层至多层具明显风化、氧化特征的土黄色—红色地层^[22,31],以及有孔虫^[26]、花粉^[21]、地球化学^[22,31]等指标的垂直变化(图 6)。上述报道及本研究钻孔均记录了珠江三角洲地区 MIS 5 期间的次级海平面波动,表明珠江三角洲晚更新世的沉积环境演化受到了全球海平面变化及冰期-间冰期旋回时岸线移动的影响。结合 MIS 5 时期全球海平面高度^[25]及区域钻孔年代数据^[20,23],研究区最早的海相沉积最可能为 MIS 5e 的产物,而记录的次级海平面波动可能对应 MIS 5d。

本研究及上述报道的色度及地球化学指标显示^[22,31], MIS 4—2 形成的花斑黏土与 MIS 5 相对低海面时期形成的风化层相比,风化程度更为强烈(图 6),表明 MIS 5 阶段的低海面时期,地层出露较少且遭受风化的时间较短,明显短于末次冰期。这与珠江三角洲大量钻孔在此时期未能形成风化层,仅少量钻孔的有孔虫、花粉变化记录到海面波动情况相吻合: MIS 5 海平面下降可能仅使新会、中山等部分地区出露地表,海水并未完全退出

珠江三角洲全域;而末次冰期海平面下降幅度更大^[25](图 6),使珠江三角洲广泛发育上更新统顶部强烈风化的花斑黏土风化层(T1)。

5 结论

本文通过岩性、粒度分析、色度、磁化率、有孔虫多指标综合分析,将新会地区第四系地层划分为 4 个主要沉积单元,并划分出河床、潮控河流、河口湾前缘、三角洲前缘、潮坪、三角洲平原 6 种沉积相及风化形成的花斑黏土层。结合本研究及区域内其他钻孔 AMS¹⁴C 及 OSL 建立的年代框架,认为珠江三角洲普遍存在 2 次海侵-海退旋回过程,其中下海侵旋回属于 MIS 5 阶段。本研究 GC088 钻孔粒度、色度等指标变化呈现出较好的周期性,与海平面变化曲线^[25]变化较一致;研究区多指标综合分析结果及区域内其他钻孔数据(图 6)表明,珠江三角洲晚更新世地层记录了 MIS 5 阶段的次一级海平面波动变化,在新会地区表现为晚更新世海相层中出现风化层。上述结果表明珠江三角洲晚更新世的沉积环境演化主要受到全球海平面变化及冰期-间冰期旋回时岸线移动的影响。因此,新会地区晚第四纪以来的沉积环境演化过程如下:在 MIS 6 时期,珠江三角洲处于盆地下沉和剥蚀环境,此时海面较低,盆地内形成了一系列深切于基岩风化壳之

下的深切河谷,并发育河流沉积。随后在 MIS 5 海侵期,海平面快速上升,在新会地区主要形成河口湾环境;受 MIS 5 阶段海平面波动的影响,地层出露地表接受风化,在晚更新世海相层中部形成风化层。末次冰期(MIS 4—2),全球海平面下降到-120 m 以下^[25],整个珠三角处于陆相风化剥蚀环境,使晚更新世沉积的海相地层暴露,形成强烈风化的花斑黏土层;或沿断裂形成深切河谷^[28],发育河床沉积。全新世以来,在海平面上升与三角洲加积的相互作用下,先后经历早全新世(约 8.5 kaBP)的河口湾环境,中—晚全新世(8.0~2.0 ka BP)的三角洲前缘、潮坪及晚全新世(2.0~0 ka BP)的三角洲平原。

致谢: 感谢两位评审专家的认真审阅和提出的许多建设性意见。感谢全晓文、龙香月在实验分析中给予的帮助。

参考文献 (References)

- [1] 蔡赤萌. 粤港澳大湾区城市群建设的战略意义和现实挑战[J]. 广东社会科学, 2017(4): 5-14. [CAI Chimeng. The building of a world-class city cluster in Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area: strategic meanings and challenges [J]. Social Sciences in Guangdong, 2017(4): 5-14.]
- [2] Kopp R E, Kemp A C, Bittermann K, et al. Temperature-driven global sea-level variability in the common era [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(11): E1434-E1441.
- [3] Wang Z H, Saito Y, Zhan Q, et al. Three-dimensional evolution of the Yangtze River mouth, China during the Holocene: impacts of sea level, climate and human activity [J]. Earth-Science Reviews, 2018, 185: 938-955.
- [4] 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.]
- [5] 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. [HUANG Zhenguo, LI Pingri, ZHANG Zhongying, et al. Evolution of the Pearl River Delta[M]. Guangzhou: Science Popularization Press Guangzhou Branch, 1982.]
- [6] 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.
- [7] Zong Y Q. Postglacial stratigraphy and sea-level changes in the Han River Delta, China [J]. Journal of Coastal Research, 1992, 8(1): 1-28.
- [8] Gao L, Long H, Tamura T, et al. A ~130 ka terrestrial-marine interaction sedimentary history of the northern Jiangsu coastal plain in China [J]. Marine Geology, 2021, 435: 106455.
- [9] 陈聪, 万秋池, 郑卓, 等. 福建平潭岛晚第四纪沉积序列及MIS 5海侵旋回特征[J]. 热带地理, 2016, 36(3): 406-416. [CHEN Cong, WAN Qiuchi, ZHENG Zhuo, et al. Late Quaternary sediment stratigraphy and marine cycles in the Pingtan Island, Fujian Province [J]. Tropical Geography, 2016, 36(3): 406-416.]
- [10] Li X Y, Zong Y Q, Zheng Z, et al. Marine deposition and sea surface temperature changes during the last and present interglacials in the west coast of Taiwan Strait [J]. Quaternary International, 2017, 440: 91-101.
- [11] Wang M Y, Zheng Z, Huang K Y, et al. U^{K}_{37} temperature estimates from Eemian marine sediments in the southern coast of Hainan Island, tropical China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 127: 91-99.
- [12] Hanebuth T J J, Saito Y, Tanabe S, et al. Sea levels during late marine isotope stage 3 (or older?) reported from the Red River Delta (northern Vietnam) and adjacent regions [J]. Quaternary International, 2006, 145-146: 119-134.
- [13] 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.
- [14] Yim W W S. Radiocarbon dating and the reconstruction of Late Quaternary sea-level changes in Hong Kong [J]. Quaternary International, 1999, 55(1): 77-91.
- [15] Tang Y J, Zheng Z, Chen C, et al. Evolution of the Lian River coastal basin in response to Quaternary marine transgressions in Southeast China [J]. Sedimentary Geology, 2018, 366: 1-13.
- [16] Zong Y, Huang G, Switzer A D, et al. An evolutionary model for the Holocene formation of the Pearl River Delta, China [J]. The Holocene, 2009, 19(1): 129-142.
- [17] 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, 14(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, 14(1): 67-74.]
- [18] 韦成龙, 张珂, 余章馨, 等. 珠江口外海域与珠江三角洲晚更新世以来的地层层序对比[J]. 沉积学报, 2015, 33(4): 713-723. [WEI Chenglong, ZHANG Ke, YU Zhangxin, et al. Correlation of stratigraphic sequences between the Pearl River Delta and its offshore continental shelf since the Late Pleistocene [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(4): 713-723.]
- [19] 黄屏, 张珂, 余章馨, 等. 晚更新世以来珠江三角洲地层层序再分析及新构造运动新认识[J]. 华南地震, 2021, 41(4): 10-20. [HUANG Ping, ZHANG Ke, YU Zhangxin, et al. Reanalysis of the stratigraphic sequence and new understanding of Neotectonic movement of the Pearl River Delta since the Late Pleistocene [J]. South China Journal of Seismology, 2021, 41(4): 10-20.]
- [20] 余章馨. 珠江三角洲下海侵旋回年代学研究及其海平面变化和新构造运动意义[D]. 中山大学博士学位论文, 2016. [YU Zhangxin. The age of the lower transgression cycle in the Pearl River Delta and its implication of sea level changes and neotectonic movements[D]. Doctor

- Dissertation of Sun Yat-sen University, 2016.]
- [21] 余少华, 陈芳, 谢叶彩, 等. 珠江口万顷沙晚第四纪沉积及古环境重建[J]. 热带地理, 2016, 36(3): 374-387. [YU Shaohua, CHEN Fang, XIE Yecai, et al. Paleoenvironment reconstruction and sedimentary record in the Wanqingsha area of the Pearl River Estuary [J]. Tropical Geography, 2016, 36(3): 374-387.]
- [22] 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.]
- [23] 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.
- [24] 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.]
- [25] Spratt R M, Lisiecki L E. A Late Pleistocene sea level stack [J]. *Climate of the Past*, 2016, 12(4): 1079-1092.
- [26] 殷鉴, 刘春莲, 吴洁, 等. 珠江三角洲中部晚更新世以来的有孔虫记录与古环境演化[J]. 古地理学报, 2016, 18(4): 677-690. [YIN Jian, LIU Chunlian, WU Jie, et al. Foraminiferal records and palaeoenvironmental changes since the Late Pleistocene in central Pearl River Delta [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2016, 18(4): 677-690.]
- [27] 刘尚仁. 广东新会市的地质地貌与地下水[J]. 中山大学学报论丛, 1993(2): 84-94. [LIU Shangren. Geology, landform and groundwater in Xinhui City, Guangdong [J]. Supplement to the Journal of Sun Yatsen University, 1993(2): 84-94.]
- [28] Chen G N, Zhang K, Li L F, et al. Development of the Pearl River Delta in SE China and its relations to reactivation of basement faults [J]. *Journal of Geosciences of China*, 2002, 4(1): 17-24.
- [29] 李平日, 黄镇国, 张仲英, 等. 广东东部沿海全新世地层[J]. 海洋学报, 1986, 8(3): 331-339. [LI Pingri, HUANG Zhenguo, ZHANG Zhongying, et al. Holocene stratigraphy along the eastern coast of Guangdong province [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1986, 8(3): 331-339.]
- [30] Yim W W S. Offshore Quaternary sediments and their engineering significance in Hong Kong [J]. *Engineering Geology*, 1994, 37(1): 31-50.
- [31] 汤永杰. 珠江三角洲晚第四纪沉积序列及环境演变[D]. 中山大学博士学位论文, 2020. [TANG Yongjie. Sedimentary sequence and paleo-environmental changes of Pearl River delta during the late Quaternary[D]. Doctor Dissertation of Sun Yat-sen University, 2020.]
- [32] 瓦西拉里, 王建华, 陈慧娴, 等. 伶仃洋ZK19孔晚第四纪沉积地球化学特征及其古环境意义[J]. 热带地理, 2016, 36(3): 343-354. [WAXI Lali, WANG Jianhua, CHEN Huixian, et al. Major and trace elements geochemistry and paleoenvironmental implications of borehole ZK19 in the Lingdingyang Bay of the Pearl River Estuary [J]. Tropical Geography, 2016, 36(3): 343-354.]
- [33] Reimer P J, Bard E, Bayliss A, et al. IntCal13 and marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50, 000 years cal BP [J]. *Radiocarbon*, 2013, 55(4): 1869-1887.
- [34] Törnqvist T E, Rosenheim B E, Hu P, et al. Radiocarbon dating and calibration[M]//Shennan I, Long A J, Horton B P. Handbook of Sea-Level Research. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd, 2015.
- [35] 吴艳宏, 李世杰. 湖泊沉积物色度在短尺度古气候研究中的应用[J]. 地球科学进展, 2004, 19(5): 789-792. [WU Yanhong, LI Shijie. Significance of lake sediment color for short time scale climate variation [J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(5): 789-792.]
- [36] 莫东坡, 朱丽东, 李凤全, 等. 浙江曹娥江下游XYC孔色度特征及其全新世环境记录[J]. 古地理学报, 2018, 20(1): 163-174. [MO Dongpo, ZHU Lidong, LI Fengquan, et al. Chroma characteristics and its Holocene environmental record of Borehole XYC in the downstream area of Cao'e River, Zhejiang Province [J]. *Journal of Palaeogeography: Chinese Edition*, 2018, 20(1): 163-174.]
- [37] 王建, 刘泽纯, 姜文英, 等. 磁化率与粒度、矿物的关系及其古环境意义[J]. 地理学报, 1996, 51(2): 155-163. [WANG Jian, LIU Zechun, JIANG Wenying, et al. A relationship between susceptibility and grain-size and minerals, and their paleo-environmental implications [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(2): 155-163.]
- [38] Murray J W. Ecology and Applications of Benthic Foraminifera[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [39] 贾良文, 何志刚, 莫文渊, 等. 全新世以来珠江三角洲快速沉积体的初步研究[J]. 海洋学报, 2010, 32(2): 87-95. [JIA Liangwen, HE Zhigang, MO Wenyan, et al. A preliminary study on rapid deposition bodies in the Zhujiang Delta since Holocene [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(2): 87-95.]
- [40] 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 Kangyou, HE Jiahui, ZONG Yongqiang, 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.]
- [41] 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.
- [42] Davis Jr R A, Dalrymple R W. Principles of Tidal Sedimentology[M]. Dordrecht: Springer, 2012.
- [43] 刘春莲, 杨婷婷, 吴洁, 等. 珠江三角洲晚第四纪风化层稀土元素地球化学特征[J]. 古地理学报, 2012, 14(1): 125-132. [LIU Chunlian, YANG Tingting, WU Jie, et al. REE geochemical characteristics of mottled clays of the Late Quaternary in the Pearl River Delta [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(1): 125-132.]
- [44] Wang J, Chen G N, Peng Z L, et al. Loess-like deposits in the Pearl River Delta area, Southeast China [J]. *Aeolian Research*, 2015, 19: 113-122.
- [45] 张绍轩, 汤永杰, 郑翠美, 等. 珠江三角洲全新世海-陆沉积模式转换及其年代[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(5): 107-117. [ZHANG Shaoxuan, TANG Yongjie, ZHENG Cuimei, et al. Holocene sedimentary environment transform and onset time of Pearl River Delta progradation [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020,

- 40(5): 107-117.]
- [46] 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.]
- [47] 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.]
- [48] Lai Z P. Chronology and the upper dating limit for loess samples from Luochuan section in the Chinese Loess Plateau using quartz OSL SAR protocol [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 37(2): 176-185.
- [49] 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.
- [50] Buylaert J P, Vandenberghe D, Murray A S, et al. Luminescence dating of old (> 70 ka) Chinese loess: a comparison of single-aliquot OSL and IRSL techniques [J]. *Quaternary Geochronology*, 2007, 2(1-4): 9-14.
- [51] 于革, 叶良涛, 廖梦娜, 等. 我国沿海平原晚更新世海侵的定量重建、模拟与机制研究[J]. *第四纪研究*, 2016, 36(3): 711-721. [YU Ge, YE Liangtao, LIAO Mengna, et al. Quantitative reconstruction, simulation and mechanism study on the Late Pleistocene marine transgressions in the coastal plains of China [J]. *Quaternary Sciences*, 2016, 36(3): 711-721.]