

# 珠江三角洲晚第四纪环境演化的沉积响应

陈双喜<sup>1</sup>, 赵信文<sup>1</sup>, 黄长生<sup>1</sup>, 孙荣涛<sup>2</sup>, 曾敏<sup>1</sup>, 刘凤梅<sup>1</sup>, 陈雯<sup>1</sup>  
CHEN Shuangxi<sup>1</sup>, ZHAO Xinwen<sup>1</sup>, HUANG Changsheng<sup>1</sup>, SUN Rongtao<sup>2</sup>,  
ZENG Min<sup>1</sup>, LIU Fengmei<sup>1</sup>, CHEN Wen<sup>1</sup>

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205;

2. 山东理工大学资源与环境工程学院, 山东 淄博 255049

1. Wuhan Center, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China;

2. School of Resource & Environment Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, Shandong, China

**摘要:**珠江三角洲是一个复杂的网状河三角洲沉积体系, 目前对其第四纪环境演化的历史仍存在多种认识。为进一步查清珠江三角洲地区第四纪环境演化的过程, 对位于珠江口西岸的QZK6孔, 在沉积结构、构造等研究的基础上, 利用AMS <sup>14</sup>C和光释光(OSL)测年、有机碳同位素、粒度等对第四纪地层的形成年代和沉积特征进行了详细分析。结果显示, 该孔39.40~27.38m发育晚更新世风化层、河流等陆相沉积体系, 27.38~2.00m发育全新世三角洲沉积体系。其中全新世三角洲沉积又可分为27.38~5.30m由三角洲平原、三角洲前缘和前三三角洲组成的退积式三角洲沉积体系, 以及5.30~2.00m的河口湾-三角洲前缘进积式三角洲沉积体系。该孔第四纪沉积特征揭示的环境变化, 是对末次冰期低海面、早中全新世海面升高及晚全新世下降的响应。

**关键词:**珠江三角洲; 晚第四纪; 沉积特征; 粒度; 有机碳同位素

**中图分类号:** P534.63      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-2552(2016)10-1734-11

**Chen S X, Zhao X W, Huang C S, Sun R T, Zeng M, Liu F M, Chen W. Sedimentary response to the Late Quaternary environmental evolution in Pearl River Delta. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(10): 1734-1744**

**Abstract:** Pearl River Delta is a complex anastomosed delta system, and a number of debatable views concerning the environmental evolution during Quaternary period have existed since the 1970s-1980s. For a better understanding of the process, multidisciplinary approaches to the Core QZK6, drilled recently in the west bank of Pearl River estuary, have been carried out for exploring the environmental changes superimposed upon the depositional characteristics, including depositional structure and texture, grain size and organic carbon isotope analyses, AMS <sup>14</sup>C and OSL (optically stimulated luminescence) dating. It is indicated that the terrestrial sedimentation of weathered layers and fluvial deposits at the depth of 39.40~27.38m formed in the Late Pleistocene, the retrograde delta sedimentation of delta plain, delta front and prodelta at the depth of 27.38~5.30m developed during the 10.982~2.087ka cal BP, and the prograding delta sedimentation of estuary to delta front at the depth of 5.30~2.00m deposited during the 2.087~0.203ka cal BP, were responses to the sedimentary environments with a low stand sea level during the last glacial period, a growing sea level during the Early to Middle Holocene, and a falling sea level during the Late Holocene respectively.

**Key words:** Pearl River Delta; Late Quaternary; depositional characteristics; grain size; organic carbon isotope

收稿日期: 2016-05-19; 修订日期: 2016-08-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 41306058)、中国地质调查局项目(编号: 1212011120174、1212011220012、12120115044501)和中国科学院海洋地质与环境重点实验室开放基金项目(编号: MGE2012KG03)

作者简介: 陈双喜(1982-), 男, 博士, 高级工程师, 从事第四纪地质与环境地质调查研究。E-mail: sxchen128@126.com

珠江三角洲位于中国广东省中南部、南中国海北岸,是由西江、北江、东江等多条河流在珠江河口湾内堆积形成的复合三角洲<sup>[1]</sup>,三角洲平原上河流汇聚交织成网状,最后经虎门、蕉门、洪奇沥、横门、磨刀门、鸡啼门、虎跳门及崖门八大口门流入南中国海(图 1)。现代珠江网状河三角洲沉积体系,直到 1915 年才作为三角洲被提出,至 20 世纪七、八十年代,随着第四纪研究的深入,才得到普遍认可<sup>[2]</sup>。然而,其复杂的沉积体系记录的第四纪演化过程,目前仍未形成统一的认识。陈培红<sup>[3-4]</sup>在珠江三角洲地区西江、北江和东江三角洲的研究认为,自晚更新世以来,珠江三角洲曾经发生过 4 次海侵。而黄镇国等<sup>[5-6]</sup>发现,珠江三角洲是近 40ka BP 以来的沉积,其沉积环境经历了以陆相为主到滨海相为主的 3 次转变。李平日等<sup>[7]</sup>的研究却发现,位于珠江三角洲的广州地区在中更新世已经历过 1 次海侵,还有 2 次分别发生于晚更新世和全新世,3 次海侵期间海面还存在多次波动。此外,龙云作等<sup>[2,8]</sup>、徐明广等<sup>[9]</sup>、蓝先洪<sup>[10-11]</sup>、赵焕庭等<sup>[12]</sup>及袁家义等<sup>[13]</sup>也认可珠江三角洲是约 40ka BP 以来形成的,但发现该地区只经历了晚更新世和全新世 2 次海侵海退,形成新、老 2 套三角洲沉积体系。近年来,珠江三角洲中部一些钻孔记录发现,珠江三角洲地区经历了晚更新世河

流到全新世海侵和海退的一个沉积旋回<sup>[14-15]</sup>。鉴于上述不同认识,对位于珠江口西岸珠江三角洲平原 QZK6 孔揭露的第四纪地层,在沉积结构、构造等详细描述记录的基础上,进行了精确的 AMS <sup>14</sup>C 和光释光(OSL)测年、沉积物有机碳同位素和粒度等测试分析,以期通过该孔的沉积特征揭示现代珠江三角洲地区晚第四纪环境的演化过程。

## 1 研究材料和方法

### 1.1 研究材料

QZK6(北纬 22°41'53.88"、东经 113°32'08.65")钻孔岩心由中国地质调查局武汉地质调查中心于 2012 年 2 月采自现代珠江三角洲西岸的万顷沙镇(图 1)。岩心现场剖开,进行详细分层描述编录后取样分析。QZK6 孔孔口高程+0.123m,其中 39.40~1.95m 段为第四纪自然沉积层,厚 37.45m,下粗上细;39.40~27.38m 为灰白色、灰绿色细-粗砂,底部见次棱角-次圆状砾石,与下伏基岩呈不整合接触;27.38~23.00m 为深灰色、灰褐色含泥炭粘土质粉砂,细-粗砂,底部含细砾,见炭屑和植物根系、种子等植物碎片,与下伏地层呈不整合接触;23.00~1.95m 为灰色、灰褐色粘土质粉砂,局部夹薄层粘土质粉细砂(图 2)。为避免人为因素对自然沉积层的干扰,本次仅对 39.40~2.00m 段岩心进行分析研究。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 年龄测试

地层年代是第四纪环境变化认识的基础,然而在海陆交互的三角洲地区,其复杂的沉积环境给地层年龄的获取带来了很大的困难<sup>[16]</sup>。尽管 <sup>14</sup>C 测年方法在珠江三角洲第四纪研究中已得到普遍应用,但其仅限于约 50ka cal BP 以来的含碳样品。最新的研究认为,珠江三角洲第四系底界的年龄已超出 <sup>14</sup>C 测年方法的测年范围<sup>[17-18]</sup>。近年发展起来的 OSL 测年以碎屑石英、长石等为材料,在 350ka 以来的地层中得到很好的应用<sup>[19-20]</sup>,不仅弥补了 <sup>14</sup>C 测年范围的不足,还降低了测年材料获取的难度。因此,为了确定 QZK6 孔第四纪地层的年代,不仅挑选了沉积物中的孢粉、植物根、种子、沉积有机质、底栖有孔虫壳体等以原位沉积为主的材料进行 AMS <sup>14</sup>C 测年,还对下部岩心中的碎屑石英进行了 OSL 测年。

AMS <sup>14</sup>C 测年分别在北京大学第四纪年代实验室和美国贝塔实验室完成,并利用 CALIB 7.1 程序

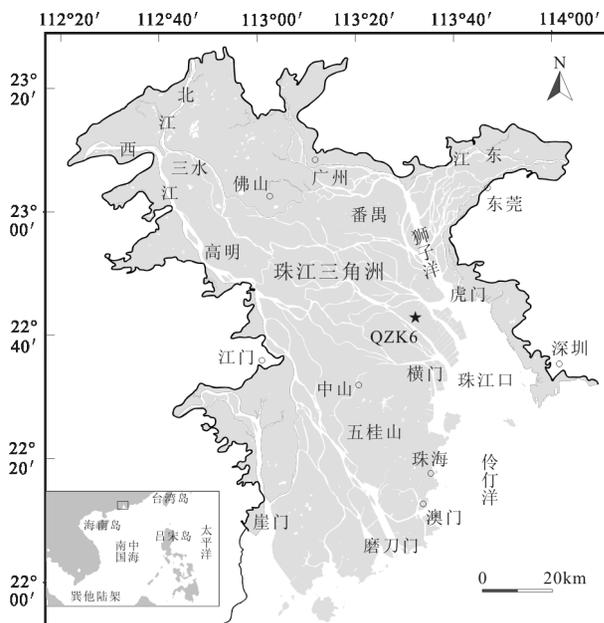


图 1 现代珠江三角洲地理位置及 QZK6 孔位置

Fig. 1 Location of the modern Pearl River Delta and Borehole QZK6

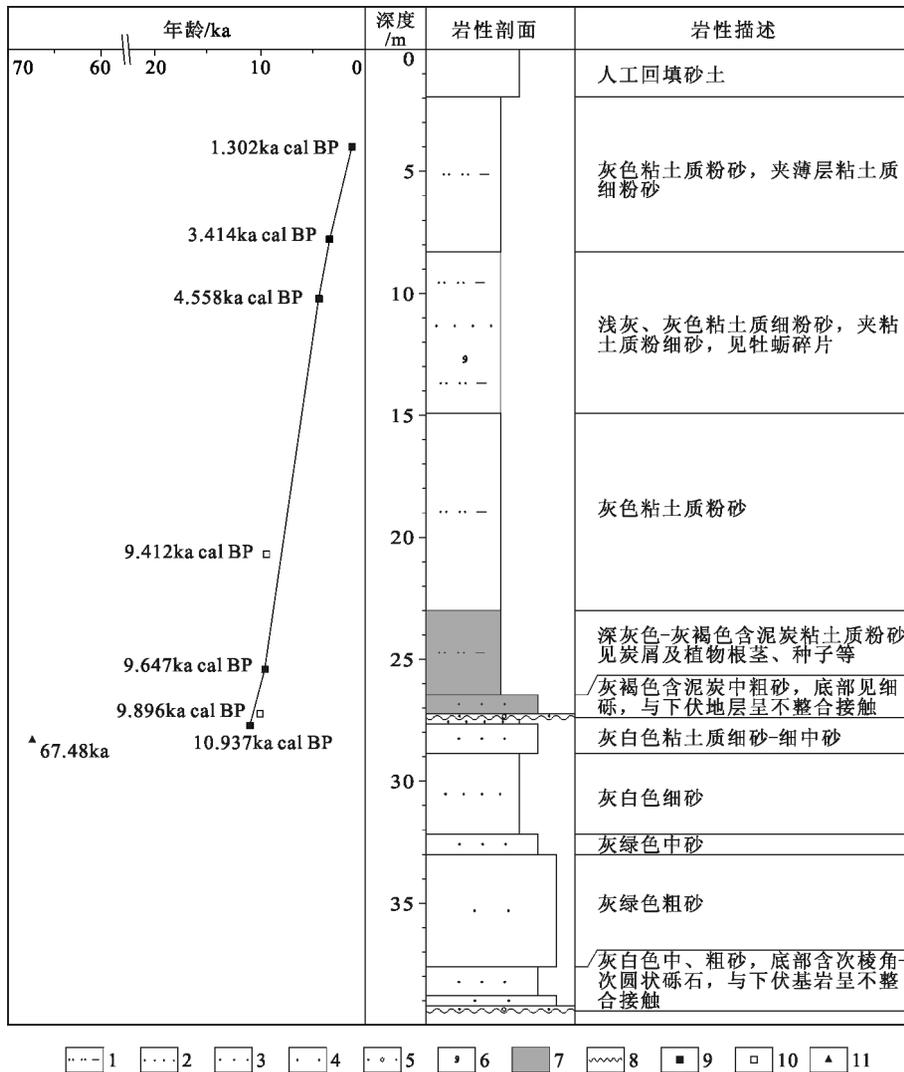


图2 QZK6孔岩心柱状图和测年数据

Fig. 2 Profile and sedimentation age points of Core QZK6  
 1—粘土质粉砂; 2—细砂; 3—中砂; 4—粗砂; 5—含砾砂; 6—生物  
 碎片; 7—含泥炭层; 8—不整合面; 9—用于建立地层年代框架的  
 AMS <sup>14</sup>C数据; 10—未采用的AMS <sup>14</sup>C数据; 11—OSL数据

对<sup>14</sup>C年龄数据进行了校正<sup>[21]</sup>。在校正曲线的选择上,有孔虫、牡蛎等海洋无机碳样品选用Marine13校正曲线;孢粉、植物根、种子等陆生有机碳样品选用IntCal13校正曲线;而对淤泥中的沉积有机质,鉴于样品来自海陆交互的珠江三角洲地区,故选用海洋和北半球大气混合曲线。区域海洋碳储库效应参考Southon等<sup>[22]</sup>对南中国海的研究,由于唯一来自南中国海北部香港地区的数据可能受到核试验的污染,因此选用南中国海南部和中部的平均值 $\Delta R = -25 \pm 63a$ 进行校正。

OSL测年在中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室完成。首先在实验暗室中提纯碎屑颗粒石英进行制片,然后用单片再生剂量法测量样品的等效剂量,最后根据样品所在地的年剂量计算出光释光年龄。等效剂量测量在热释光/光释光测量仪(Riso-TL/OSL-15)上进行,附带放射性β源为<sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y。

1.2.2 粒度分析

粒度是沉积物颗粒大小的表征,其组成和分布能反映沉积作用、沉积环境,特别对沉积动力条件有很

好的指示,是第四纪沉积环境研究的常用手段<sup>[23-24]</sup>。根据岩心粒度分布的整体情况,利用英国 Malvern 2000 型激光粒度仪对 2.00~27.00m 段岩心进行了粒度分析。按 10cm 间距取样,共分析样品 245 个。取 2~3g 样品放入离心管,依次加入过量的双氧水和稀盐酸,以去除沉积物中的有机质、生物成因碳酸盐等组分。反应完全后经离心,倒出上层液体,加入蒸馏水清洗去酸,最后上机测试。仪器测量范围为 0.02~2000mm,重复测量的相对误差优于 3%。

### 1.2.3 有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值测试

有机质碳同位素主要反映了光合作用、碳同化作用及碳源的同位素组成<sup>[25-26]</sup>。海洋藻类植物,其光合作用产生的有机质碳同位素值通常在 $-20\%$ 左右<sup>[27-29]</sup>。陆地植物根据光合途径的不同可分为  $\text{C}_3$  植物、 $\text{C}_4$  植物和 CAM 植物 3 种类型<sup>[26,30]</sup>。 $\text{C}_3$  植物占现生陆地植物的大多数,通过  $\text{C}_3$  Calvin 途径合成的有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值约为 $-28\%$ ;  $\text{C}_4$  植物主要通过  $\text{C}_4$  Hatch-Slack 途径合成有机质,形成的有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值约为 $-14\%$ ;而 CAM 植物多生长于干旱地区,以仙人掌类的肉质植物为主<sup>[26,30-31]</sup>。珠江三角洲地区以  $\text{C}_3$  植物和  $\text{C}_4$  植物为主,CAM 植物较少,因此可用有机碳的同位素特征指示沉积物中的有机质来源<sup>[32]</sup>。由于底部岩心以砂粒级的粗碎屑为主,沉积物的粒度、沉积结构等特征已充分反映了沉积环境,且该段有机碳含量低,因此主要对岩心上部细颗粒沉积物进行有机碳同位素分析。由于样品的原因,27.38~2.00m 段获得不等间距有机质  $\delta^{13}\text{C}$  数据 33 个,39.40~27.38m 段仅于 27.50m 处测得有机质  $\delta^{13}\text{C}$  数据 1 个,共测得有机质  $\delta^{13}\text{C}$  数据 34 个。实验测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。取 5~10g 样品放入离心管,加过量稀盐酸充分反应,去除沉积物中的生物成因碳酸盐等组分;反应完全后经离心,倒出上层液体,反复加入去离子水离心清洗去酸至上层液体为中性;然后取经冷冻干燥的混合均匀样品,用 MAT253 同位素质谱仪与 Flash2000 元素分析仪联机测试。

## 2 结 果

### 2.1 地层年代

QZK6 孔共获取 AMS  $^{14}\text{C}$  年龄数据

7 个,OSL 年龄数据 1 个(表 1、表 2;图 2)。7 个 AMS  $^{14}\text{C}$  年龄全部来自 27.38~2.00m 段,随埋藏深度的增大而变老,顶部 3.925m 淤泥中沉积有机质测得的年龄最小,为 1.302ka cal BP;27.30m 处植物种子和 26.80m 处植物根测得的年龄分别为 10.937ka cal BP 和 10.032ka cal BP,揭示本段岩心为全新世以来的连续沉积(表 1;图 2)。根据测年数据,该段地层平均沉积速率约 2.4mm/a,与珠江口钻孔记录的沉积速率相当<sup>[32]</sup>。然而,20.35~25.025m 段 2 个测年点间的沉积速率高达 19.9mm/a;26.80~27.30m 段 2 个测年点间的沉积速率仅为 0.6mm/a,与该段平均速率相差较大。20.35~25.025m 段的高沉积速率可能是由于 20.35m 处底栖有孔虫壳体的异地再沉积,较老的壳体混入使得测年结果偏老所致。根据镜下观察,该段有孔虫壳体中出现磨损、浸染等明显再沉积特征。而 26.80~27.30m 段的低沉积速率,除沉积物压实作用导致地层较原始沉积地层厚度减小外,26.80m 处的植物根垂向向下生长,使得测年结果较地层实际年龄偏小,可能是最主要的原因。因此,20.35m 和 26.80m 处的年龄数据仅作为该段地层年代框架的参考,该段未测年层位年代由其他 5 个年龄数据插值得到。最后得到 27.30~25.025m、25.025~10.025m、10.025~7.625m 和 7.625~3.925m 之间的沉积速率分别为 1.76mm/a、2.95mm/a、2.10mm/a 和 1.75mm/a,根据临近地层沉积速率外推,底部 27.38m 处的年龄为 10.982ka cal BP,顶部 2.00m 处的年龄为 0.203ka cal BP。

39.40~27.38m 段粗碎屑沉积,仅于 27.80m 处获取 OSL 年龄数据 1 个,OSL 年龄为  $67.48 \pm 3.81\text{ka}$ ,显示该段沉积形成于末次冰期早期,与上覆 27.38~

表 1 QZK6 孔 AMS  $^{14}\text{C}$  年龄数据

Table 1 AMS  $^{14}\text{C}$  dating ages of Core QZK6

平均深度/m	测试材料	$^{14}\text{C}$ 年龄 /ka BP	校正年龄/ka cal BP		实验室编号
			概率中值	$2\sigma$	
3.925	淤泥	$1.555 \pm 0.025$	1.302	1.237~1.378	BA120546
7.625	孢粉	$3.190 \pm 0.030$	3.414	3.361~3.459	Beta-388257
10.025	孢粉	$4.070 \pm 0.030$	4.558	4.440~4.800	Beta-388258
20.35	底栖有孔虫	$8.720 \pm 0.030$	9.412	9.251~9.529	Beta-402037
25.025	孢粉	$8.710 \pm 0.030$	9.647	9.551~9.761	Beta-388259
26.80	植物根	$8.880 \pm 0.030$	10.032	9.896~10.172	Beta-402038
27.30	植物种子	$9.570 \pm 0.030$	10.937	10.746~11.089	Beta-402039

注:BA 代表北京大学第四纪年代实验室;Beta 代表美国贝塔实验室

表2 QZK6孔OSL测年数据  
Table 2 OSL dating age of Core QZK6

采样深度/m	U/10 <sup>-6</sup>	Th/10 <sup>-6</sup>	K/%	含水率/%	等效剂量/Gy	年剂量/(Gy·ka <sup>-1</sup> )	年龄/ka
27.80	1.80±0.11	6.42±0.22	0.90±0.03	5.64	113.27±5.74	1.68±0.04	67.48±3.81

2.00m段地层之间在时间上存在明显的不连续(表2;图2)。

2.2 27.00~2.00m沉积物粒度

27.00~2.00m段岩心以粉砂和粘土为主,整体呈下粗上细的特征,粗颗粒主要出现在27.00~26.40m段,另外15.20~8.30m段和4.40~3.10m段砂含量也较高(图3)。而16.00~15.20m段和8.30~5.30m段沉积物不仅粗组分含量低,其粒度频率曲线还呈现明

显的单峰模式(图4-e、g)。因此,结合岩性特征,将QZK6孔27.00~2.00m段沉积物划分为9层(图3)。

1层:27.00~26.40m,沉积物粒度以较粗的砂为主,平均含量为64.94%,最高可达79.20%,最低为41.68%;粉砂和粘土平均含量分别为24.40%和10.66%,最高为41.62%和16.70%,最低为14.71%和6.10%(图3)。从下至上,频率曲线由窄的砂粒级单峰过渡到砂和粉砂粒级的双峰(图4-a、b)。

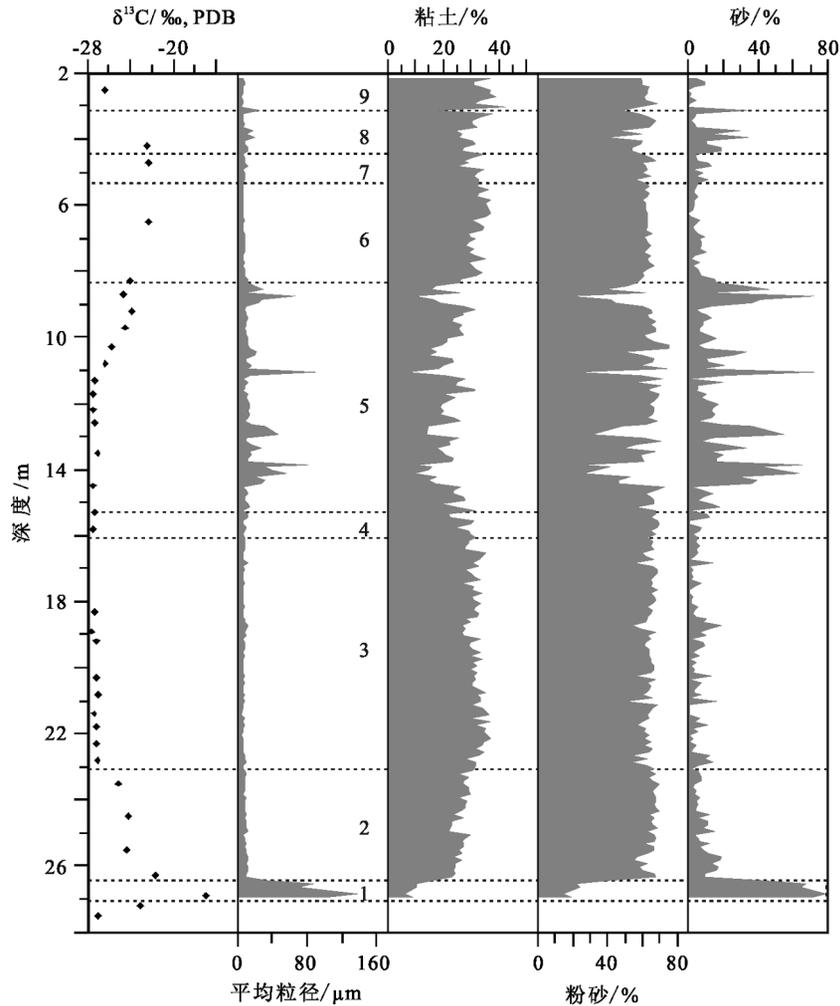


图3 QZK6孔岩心上部沉积物粒度和有机质 δ<sup>13</sup>C 特征  
Fig. 3 Characteristics of grain size and organic δ<sup>13</sup>C in the upper layers of Core QZK6

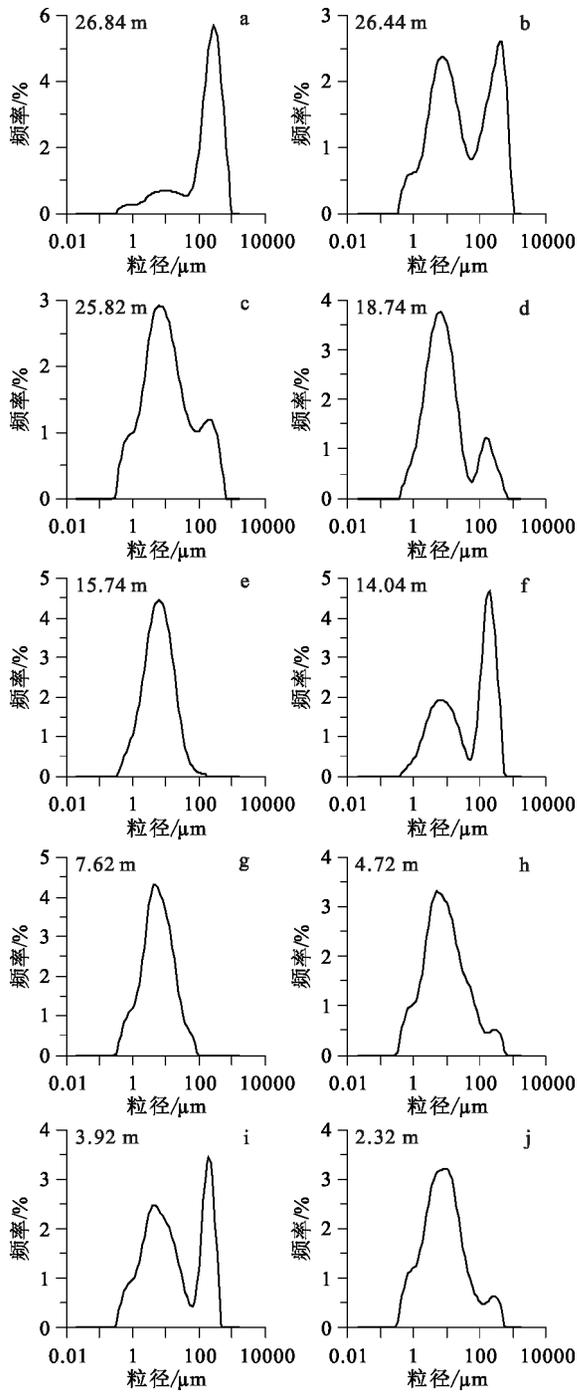


图4 QZK6 钻孔 27.00~2.00m 段沉积物粒度典型频率曲线  
 Fig. 4 Typical frequency curves of grain size in the section between 27.00~2.00m layer of Core QZK6

2层:26.40~23.00m,沉积物较1层明显变细,粒度组成以粉砂和粘土为主,二者含量的变化幅度不大,平均含量为65.06%和26.43%,最高为69.21%和31.22%,最低为54.82%和21.77%;但砂的含量从下

向上呈明显减少的趋势,其平均含量为8.51%,最高为18.93%,最低仅为1.70%(图3)。频率曲线以粉砂-粘土粒级的单峰为主,出现砂粒级的次峰(图4-c)。

3层:23.00~16.00m,沉积物粒度组成以粉砂和粘土为主,二者含量的变化幅度不大,与2层相比,粘土含量略有上升,砂含量变化幅度较大,整体无明显变化(图3)。该段粉砂和粘土的平均含量为63.27%和31.61%,最高为68.87%和36.99%,最低为50.64%和26.53%;砂的平均含量为5.12%,最高为19.37%,最低仅为0.38%。频率曲线以粉砂-粘土粒级的单峰为主,出现砂粒级的次峰,偶见粉砂-粘土粒级与砂粒级的双主峰(图4-d)。

4层:16.00~15.20m,沉积物粒度组成中粉砂和粘土占绝对优势,与3层相比,粉砂和粘土含量更稳定(图3)。该段粉砂和粘土的平均含量为67.26%和27.56%,最高为69.30%和31.92%,最低为64.59%和21.70%;砂的平均含量为5.19%,最高为12.63%,最低仅为0.68%。频率曲线仅出现粉砂-粘土粒级的单峰,无明显次峰(图4-e)。

5层:15.20~8.30m,该段沉积物粒度仍以粘土质粉砂为主,但较4层明显变粗,粘土质粉砂中夹薄的砂层,各粒级变化均较大(图3)。砂的平均含量为20.31%,最高可达72.03%,最低为0.78%;粉砂和粘土平均含量分别为58.39%和21.30%,最高为75.23%和31.59%,最低为18.48%和6.94%。频率曲线以出现明显的粉砂-粘土粒级和砂粒级的双主峰为特征(图4-f)。

6层:8.30~5.30m,沉积物粒度组成以粉砂和粘土为主,较5层明显变细,与4层相似,粉砂和粘土含量较稳定(图3)。该段粉砂和粘土的平均含量为62.43%和32.39%,最高为66.63%和37.17%,最低为58.75%和26.46%;砂的平均含量为5.18%,最高为14.79%,最低仅为0.02%。频率曲线仅出现粉砂-粘土粒级的单峰,无明显次峰(图4-g)。

7层:5.30~4.40m,沉积物粒度组成仍以粉砂和粘土为主,砂含量较6层略有增加(图3)。粉砂和粘土的平均含量分别为61.91%和30.87%,最高为67.27%和34.83%,最低为55.90%和24.83%;砂的平均含量为7.22%,最高为12.88%,最低为2.46%。频

率曲线以粉砂-粘土粒级的单峰为主,出现砂粒级的次峰(图4-h)。

8层:4.40~3.10m,该段沉积物粒度较7层明显变粗,砂含量明显增加,各粒级变化也均较大(图3)。砂平均含量为14.29%,最高达34.58%,最低为1.92%;粉砂和粘土平均含量分别为56.87%和28.85%,最高为67.92%和37.47%,最低为40.05%和18.52%。频率曲线以明显的粉砂-粘土粒级和砂粒级的双主峰为特征(图4-i)。

9层:3.10~2.00m,沉积物粒度开始变细,以粉砂和粘土为主,砂含量较8层明显下降(图3)。粉砂和粘土的平均含量分别为61.58%和35.15%,最高为68.30%和42.45%,最低为57.52%和30.98%;砂的平均含量为3.27%,最高为9.35%,最低为0。频率曲线以粉砂-粘土粒级的单峰为主,出现弱的砂粒级次峰(图4-j)。

### 2.3 沉积有机质 $\delta^{13}\text{C}$

27.38~2.00m段岩心有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值显示出非常明显的变化趋势(图3)。有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值在27.30~23.00m与10.50~3.00m两段出现2个明显正偏的层位。其余层位有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值相差不大,平均值为-27.19‰,最大值为-26.30‰,最小值为-27.58‰。27.30~23.00m段有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值变化较大,最大值达-16.91‰,最小值为-25.15‰,平均为-22.52‰;10.50~3.00m段有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值变化较小,最大值为-22.29‰,最小值为-25.75‰,平均为-23.71‰。

39.40~27.38m段27.50m处有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值为-27.02‰,与27.38~2.00m段2个正偏层位外的其他层位的值相当。

## 3 讨论

根据年代框架和岩心整体沉积特征(图2),可将QZK6孔39.40~2.00m段第四纪岩心分为39.40~27.38m段晚更新世沉积和27.38~2.00m段全新世沉积两部分。

### 3.1 晚更新世沉积

QZK6孔39.40~27.38m段岩心以粗颗粒的砂砾为主,未见海相贝壳等化石,底部为次棱角-次圆状砾石,顶部发育风化层,为河床滞留沉积、河流沙坝等河流沉积,以及风化暴露层(图5)。该段仅于27.50m处测得有机质  $\delta^{13}\text{C}$  数据1个,其值为-27.02‰,显示了以陆生  $\text{C}_3$  植物为来源的有机

质,与粒度特征指示的陆相沉积环境一致。尽管底部无测年数据,然而其沉积特征与临近的GZ-2孔<sup>[33]</sup>、QZK4孔<sup>[34]</sup>及大鳌平原的PRD05孔<sup>[14]</sup>第四系下部发育于末次冰期的陆相沉积层相似,且27.80m处测得的OSL年龄为67.48±3.81ka BP,也显示该段地层形成于低海面的末次冰期。

珠江三角洲晚更新世地层是20世纪七、八十年代,引入 $^{14}\text{C}$ 、热释光等年代测试方法后,对珠江三角洲第四纪进行系统研究时发现的一个老三角洲沉积,认为该套沉积由约40ka cal BP至全新世期间的一个海侵海退的旋回所建造,文献报道的海侵时间主要集中于30~20ka cal BP<sup>[1-2,4,7,9]</sup>。然而,近年来的研究显示,珠江三角洲末次冰期地层中仅发现河流等陆相沉积<sup>[14-15,34]</sup>。尽管前人报道的晚更新世海侵沉积有在被后期侵蚀而未保存下来的可能,但建造这套老三角洲的海侵却发生于南中国海末次冰期低海面时期。该时间段内南中国海海面由-50~-60m下降至-100m之下,其中末次冰盛期(Last Glacial Maximum, LGM),18~22ka cal BP时海平面更是低于-120m<sup>[35-38]</sup>。报道中晚更新世海侵层下限的海拔高程约-40m<sup>[7,11,39]</sup>,高出海侵发生时南中国海的海平面。然而,根据区域构造背景,珠江三角洲区域地壳垂直运动以沉降为主<sup>[40]</sup>,并不支持末次冰期时形成海侵层的出露位置高于当时海平面的高度。因此,最近的研究推测,现代珠江三角洲晚更新世海侵可能发生于全球海平面较高的MIS 5<sup>[17-18,41]</sup>。QZK6孔岩心记录的晚更新世地层不连续,尚无法证实是否存在海侵沉积遭受后期剥蚀的可能,然而其发育的陆相河流沉积、风化层等,是对珠江三角洲晚更新世低海面的响应。

### 3.2 全新世沉积

QZK6孔发育了较全的全新世沉积,根据沉积特征可以分为27.38~5.30m段的退积式三角洲沉积和5.30~2.00m段的进积式三角洲沉积2个沉积体系。其中,27.38~5.30m段的退积式三角洲沉积体系可以细分出三角洲平原、三角洲前缘和前三角洲3个沉积单元(图5)。

#### 3.2.1 退积式三角洲沉积体系

27.38~5.30m段,对应地层年龄为10.982~2.087ka cal BP。该段沉积物粒度整体呈现下粗上细的特征(图5),沉积环境由下至上依次为27.38~23.00m段的三角洲平原,23.00~16.00m段的三角洲前缘,以

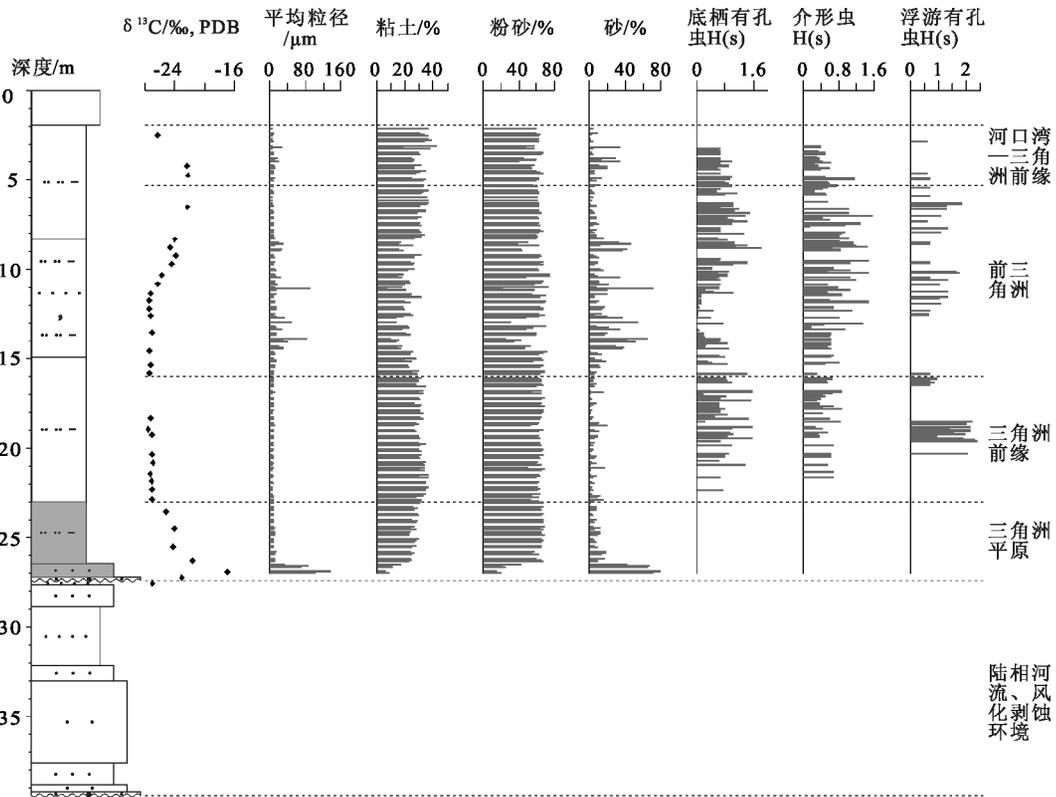


图5 QZK6 钻孔第四纪沉积特征及沉积环境变化  
(底栖有孔虫、介形虫和浮游有孔虫数据未发表资料,图例同图2)

Fig. 5 Depositional characteristics and environmental change of the Quaternary sediments in Core QZK6

及 16.00~5.30m 段的前三角洲, 指示了沉积可容空间的逐渐增大、相对海平面的上升。

三角洲平原沉积: 27.38~23.00m 段, 地层年龄为 10.982~8.960ka cal BP。整体呈下粗上细的特征, 具明显的河流二元结构: 下部为粗颗粒的粗-细砂, 底部含砾石, 向上逐渐变细; 上部为粘土质粉砂, 含泥炭, 见炭屑及植物根茎、种子等, 呈深灰色、灰褐色(图 5)。27.00~23.00m 段在粒度频率曲线上也有清晰的反映, 由下至上从以砂级的单主峰过渡到砂和粉砂的双峰, 再到以粉砂-粘土级的主峰和砂级次峰(图 4-a~c)。上部的细粒沉积物有机碳含量较高, 呈深灰色、灰褐色, 见炭屑和植物根系、种子等化石, 有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值呈正偏(图 5), 在  $-25.15\text{‰} \sim -16.91\text{‰}$  范围内, 明显不同于陆源  $\text{C}_3$  植物和海洋藻类植物产生的有机质, 表现为以含  $\text{C}_4$  植物的混合自生有机碳为主的特征, 与沉积物粒度指示的沉积环境一致。粒度和有机碳同位素特

征显示, 该段为分流河道-河漫沼泽沉积, 与珠江三角洲 PRD05 孔中富含有机质的 26.81~24.78m 段相当<sup>[14-15]</sup>。根据长江口和渤海湾的研究, 该段发育的河漫沼泽泥炭沉积, 向上直接被后期海相沉积层覆盖, 反映了高潮的上限<sup>[42]</sup>。南中国海的海平面变化记录也显示, 该时间段内南中国海海平面已由末次冰期的低海平面上升至与该段沉积形成高度相当的位置<sup>[35-36]</sup>, 为三角洲平原的形成提供了条件。

三角洲前缘沉积: 23.00~16.00m 段, 地层年龄为 8.960~6.585ka cal BP。自该段起, 沉积物颜色明显变浅, 呈灰色, 沉积物以粘土质粉砂为主, 偶见薄的砂层。频率曲线也以粉砂-粘土粒级的单峰为主, 出现砂粒级的次峰, 偶见粉砂-粘土粒级与砂粒级的双主峰, 反映了动荡的水动力条件(图 4-d)。其双主峰出现在砂含量较高的层位, 推测为风暴等强水动力条件下形成的沉积层。据未发表的微体古生物记录显示, 该段见浸染、表面磨损等明显再沉

积微体化石,且主要生活于深海远洋的浮游有孔虫化石在该段出现全孔最高的丰度和分异度(图5),种群中还见生活于深层水的浮游有孔虫属种 *Globorotalia truncatulinoides*。沉积物有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值在  $-27.58\text{‰}$ ~ $-26.99\text{‰}$  范围内,明显不同于 27.00~23.00m 段自生有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值,反映了以陆生  $\text{C}_3$  植物有机质为主的陆源河流输入,与粒度、微体古生物特征指示的沉积环境变迁一致,指示动荡的三角洲前缘潮滩,或水下分流河道间湾等水深较浅的沉积环境,沉积物以珠江径流带来的陆源碎屑为主,是对早一中全新世海面进一步上升的响应。

前三角洲沉积: 16.00~5.30m, 地层年龄为 6.585~2.087ka cal BP。该段沉积物仍以粘土质粉砂为主,整体表现上下细、中间粗的特征。16.00~15.20m 段与 8.30~5.30m 段沉积物组分相似,粉砂和粘土组分占绝对优势,且频率曲线上仅出现粉砂粘土级的单峰,无明显次峰,反映水体动力减弱,代表了钻孔所在处水深进一步增加(图4-e、g)。微体古生物也显示出较高的丰度和分异度(图5)。中间 15.20~8.30m 段沉积物砂粒含量呈脉冲式的增加,反映了水体动力的变化。由于该段未见明显的风暴等异常沉积特征,而根据珠江口近 2ka cal BP 以来的研究表明,沉积物中粗组分砂的含量与陆源输入有强烈的正相关性<sup>[32]</sup>,因此,推测该段砂粒含量的增加是对珠江径流增强的响应。频率曲线上出现明显的粉砂-粘土粒级和砂粒级的双主峰特征(图4-f),也显示除潮流外,还存在较强的河流作用。珠江径流的作用从有机质  $\delta^{13}\text{C}$  记录也可以看出,尽管粒度上已经反映出水深较 23.00~16.00m 段增加,然而 16.00~11.00m 段沉积物中有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值与 23.00~16.00m 段相比并无太大变化,仍然表现出以陆生  $\text{C}_3$  植物为主的有机质来源(图5),反映珠江径流的增强抵消了水深增加的影响,仍能将陆源有机质输送至钻孔所在处。这一点与珠江口钻孔中有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值的变化规律一致<sup>[32]</sup>。直至约 11.00m 处,沉积物中有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值才开始变大,表明海洋藻类有机质的比例开始增加,钻孔所在处沉积物中的陆源有机质比例开始减小,珠江径流的影响减弱。6.50m 处沉积物有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-22.30\text{‰}$ ,接近海洋藻类有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值,反映沉积物中的有机质来源已由以陆源有机质为主转变为以海洋藻类为主,珠江径流作用的影响进一步降低。由此可见,16.00~5.30m 段

岩心反映了一个较 23.00~16.00m 段水深更深的前三角洲沉积环境,是对中晚全新世高海面的响应。20 世纪七八十年代以来,报道的珠江三角洲全新世海侵也大都发生在这个时期<sup>[7,33,43-44]</sup>。此外,珠江三角洲顶部四会等地的“地下古森林”也发育于该时段,高海面可能为其提供了发育条件<sup>[45]</sup>。不仅如此,该时期的高海面在雷州半岛<sup>[46-48]</sup>、海南岛<sup>[49]</sup>、台湾海峡澎湖列岛<sup>[50]</sup>及南中国海周边地区<sup>[51]</sup>也都有记录。

### 3.2.2 进积式三角洲沉积体系

5.30~2.00m, 年龄为 2.087~0.203ka cal BP。该段沉积物仍以粉砂和粘土为主,但整体较 8.30~5.30m 段变粗,砂粒含量增加。5.30~4.40m 段开始出现砂粒级的次峰,4.40~3.10m 段出现明显的粉砂-粘土粒级和砂粒级的双主峰特征,表明水体动力进一步增强(图4-h、i)。而 3.10~2.00m 段出现粒度的变细(图4-j),可能是受人类蓄水拦坝等活动的影响<sup>[32]</sup>。尽管该段获得的沉积物有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值不多,但其有机质来源由下部的以海洋藻类为主至上部的以陆生  $\text{C}_3$  植物为主的变化明显,指示了陆源物质的增加(图5)。其粒度和沉积有机质碳同位素特征指示水深逐渐减小的河口湾-三角洲前缘沉积环境,表明了沉积可容空间的逐渐减小,是进积式三角洲的演化过程。由于该段厚度较小,获取的沉积信息不多,未对其沉积环境进行细分。该段环境演化过程与珠江三角洲的 GZ-2 孔<sup>[33]</sup>,以及陈培红<sup>[3]</sup>、龙云作等<sup>[2]</sup>、李平日等<sup>[43]</sup>报道的晚全新世海面下降、三角洲进入进积式发育阶段的认识一致。

QZK6 孔 27.38~2.00m 段全新世连续沉积,由下至上依次为 27.38~23.00m 段的三角洲平原、23.00~16.00m 段的三角洲前缘、16.00~5.30m 段的前三角洲及 5.30~2.00m 段的河口-三角洲前缘沉积,完整地记录了珠江三角洲全新世以来的沉积环境变迁。27.38~5.30m 段的退积式三角洲沉积体系和 5.30~2.00m 段的进积式三角洲沉积体系,是对早一中全新世海平面上升,以及晚全新世海面下降的响应。

## 4 结论

在地层沉积结构和构造分析的基础上,利用 AMS  $^{14}\text{C}$  和 OSL 测年确定地层的年代,通过对沉积物粒度、有机碳同位素等沉积特征的研究,并结合

其他钻孔沉积记录和南中国海海面变化记录,取得如下认识。

(1) QZK6 孔 39.40~2.00m 段岩心:①发育了 39.40~27.38m 段的晚更新世风化层、河流等陆相沉积体系,以及 27.38~2.00m 段全新世的三角洲沉积体系;②27.38~2.00m 段全新世三角洲沉积体系可分为 27.38~5.30m 段的早中全新世退积式三角洲沉积体系和 5.30~2.00m 段的晚全新世进积式三角洲沉积体系;③27.38~5.30m 段的早—中全新世退积式三角洲沉积体系又可细分为 27.38~23.00m 段的三角洲平原、23.00~16.00m 段的三角洲前缘和 16.00~5.30m 段的前三角洲沉积。

(2) QZK6 孔 39.40~2.00m 段沉积是对末次冰期的低海面、早—中全新世海面升高及晚全新世海面下降沉积环境的响应。

**致谢:**中国地质调查局南京地质调查中心魏乃颐教授级高工、中国地质大学(武汉)江涛和王新君教授分别在岩心编录、样品采集和实验测试中给予指导和帮助,在此一并致谢。

## 参考文献

- [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.
- [2] 龙云作, 霍春兰. 珠江三角洲晚第四纪沉积特征[J]. 海洋科学, 1990, 4: 7-14.
- [3] 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.
- [4] 陈培红. 珠江三角洲第四纪地层划分的认识[J]. 人民珠江, 1987, 6: 16-24.
- [5] 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.
- [6] 黄镇国, 李平日, 张仲英, 等. 珠江三角洲第四纪沉积特征[J]. 地质评论, 1985, 31(2): 159-164.
- [7] 李平日, 郑建生, 方国祥. 广州地区第四纪地质[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1989: 11-52.
- [8] 龙云作, 霍春兰, 司桂贤, 等. 对珠江三角洲沉积特征和沉积模式的一些认识[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1985, 5(4): 49-57.
- [9] 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, 6(3): 93-102.
- [10] 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.
- [11] 蓝先洪. 珠江三角洲  $\Delta 22$  孔的沉积特征及地层划分[J]. 海洋与湖泊, 1991, 22(2): 148-154.
- [12] 赵焕庭, 陈木宏, 余家桢, 等. 珠江三角洲海进层微体古生物初步研究[J]. 热带海洋, 1987, 6(1): 28-36.
- [13] 袁家义, 陈木宏, 余家桢, 等. 珠江三角洲北部晚更新世以来的沉积特征[J]. 海洋通报, 1988, 7(2): 49-61.
- [14] 刘春莲, Fursich F T, 董艺辛, 等. 珠江三角洲 PRD05 孔的高分辨率介形类记录与晚第四纪古环境重建[J]. 古地理学报, 2008, 10(3): 313-322.
- [15] 董艺辛, 刘春莲, 陈木宏, 等. 珠江三角洲中部大鳌平原晚第四纪古生物记录及环境演化[J]. 第四纪研究, 2012, 32(6): 1183-1198.
- [16] 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.
- [17] 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): 35-45.
- [18] 郭良田, 王萍, 张珂, 等. 珠江三角洲晚第四纪沉积的 OSL 和  $^{14}\text{C}$  年龄探讨[J]. 中国地质, 2013, 40(6): 1842-1849.
- [19] 陈淑娥, 李虎侯, 庞奖励. 释光测年的研究简史及研究现状[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2003, 33(2): 209-212.
- [20] Murray A S, Olley J M. Precision and accuracy in the optically stimulated luminescence dating of sedimentary quartz: A Status review[J]. Geochronometria, 2002, 21: 1-16.
- [21] Stuiver M, Reimer P J. Extended  $^{14}\text{C}$  database and revised CALIB radiocarbon age calibration program[J]. Radiocarbon, 1993, 35: 215-230.
- [22] Southon J, Kashgarian M, Fontugne M, et al. Marine reservoir corrections for the Indian Ocean and Southeast Asia[J]. Radiocarbon, 2006, 44(1): 167-180.
- [23] 郑洪波, 陈国成, 谢昕, 等. 南海晚第四纪陆源沉积: 粒度组成、动力控制及反映的东亚季风演化[J]. 第四纪研究, 2008, 28(3): 414-424.
- [24] 孙有斌, 高抒, 李军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析[J]. 科学通报, 2003, 48(1): 83-86.
- [25] Hayes J. Factors controlling  $^{13}\text{C}$  contents of sedimentary organic compounds: Principles and evidence[J]. Marine Geology, 1993, 113(1/2): 111-125.
- [26] Cerling T E, Wang Y, Quade J. Expansion of C4 ecosystems as an indicator of global ecological change in the late Miocene[J]. Nature, 1993, 361: 344-345.
- [27] Gearing P, Plucker F E, Parker P L. Organic carbon stable isotope ratios of continental margin sediments[J]. Marine Chemistry, 1977, 5(3): 251-266.
- [28] Meyers P A, Teranes J L. Sediment organic matter[J]. Developments in Paleoenvironmental Research, 2002, 2: 239-269.
- [29] Meyers P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes[J]. Organic Geochemistry, 1997, 27(5/6): 213-250.
- [30] O'Leary M H. Carbon isotopes in photosynthesis[J]. Bioscience, 1988, 38(5): 328-336.
- [31] Bender M M. Variations in the  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios of plants in relation to the pathway of photosynthetic carbon dioxide fixation[J]. Phytochemistry, 1971, 10(6): 1239-1244.
- [32] Nan Q, Li T, Chen J, et al. Late Holocene (~2ka) East Asian Mon-

- soon variations inferred from river discharge and climate interrelationships in the Pearl River Estuary[J]. *Quaternary Research*, 2014, 81(2): 240–250.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Hanebuth T, Statterger K, Grootes P M. Rapid Flooding of the Sunda Shelf: A Late-Glacial Sea-Level Record[J]. *Science*, 2000, 288: 1033–1035.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Yim W W S, Huang G, Fontugne M R, et al. Postglacial sea-level changes in the northern South China Sea continental shelf: Evidence for a post-8200 calendar yr BP meltwater pulse[J]. *Quaternary International*, 2006, 145/146: 55–67.
- [39] 董艺辛, 刘春莲, 阴家润, 等. 珠江三角洲晚第四纪环境演变的微体生物记录[J]. *古脊椎动物学报*, 2007, 45(2): 161–172.
- [40] 姚衍桃, 詹文欢, 刘再峰, 等. 珠江三角洲的新构造运动及其与三角洲演化的关系[J]. *华南地震*, 2008, 28(1): 29–40.
- [41] 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): S3–S16.
- [42] 李建芬, 商志文, 王福, 等. 渤海湾西岸全新世海面变化[J]. *第四纪研究*, 2015, 35(2): 243–264.
- [43] 李平日, 方国祥, 黄光庆. 珠江三角洲全新世环境演变[J]. *第四纪研究*, 1991, 2: 130–139.
- [44] 康长生, 杨胜明, 廖志良. 广东红海湾、珠江口及电白-阳江近海第四纪沉积[J]. *热带海洋*, 1997, 16(1): 39–48.
- [45] 丁平, 沈承德, 王宁, 等. 广东四会古森林地下生态系统碳同位素组成及其古气候意义[J]. *中国科学(D辑)*, 2009, 39(1): 70–78.
- [46] 聂宝符, 陈特固, 梁美桃, 等. 雷州半岛珊瑚礁与全新世高海面[J]. *科学通报*, 1997, 42(5): 511–514.
- [47] 余克服. 南海珊瑚礁及其对全新世环境变化的记录与响应[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(8): 1160–1172.
- [48] Yu K F, Zhao J X, Done T, et al. Microatoll record for large century-scale sea-level fluctuations in the mid-Holocene[J]. *Quaternary Research*, 2009, 71(3): 354–360.
- [49] 赵希涛, 张景文, 李桂英. 海南岛南岸全新世珊瑚礁的发育[J]. *地质科学*, 1983, 2: 150–159.
- [50] Chen Y G, Liu T K. Sea level changes in the last several thousand years, Penghu Islands, Taiwan Strait[J]. *Quaternary Research*, 1996, 45(3): 254–262.
- [51] 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, 27(5): 121–132.