

论文

全新世以来珠江三角洲的地层层序和演变过程

韦惺^{①②}, 吴超羽^{②*}

① 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境国家重点实验室, 广州 510301;

② 中山大学近岸海洋科学与技术研究中心, 广州 510275

* 联系人, E-mail: eewcy@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2010-10-30; 接受日期: 2011-02-25

摘要 本文基于对 90 个拥有全新世 ^{14}C 年代数据的钻孔进行详细的沉积物特征和年代地层分析, 讨论了全新世珠江三角洲的地层特征及全新世以来的充填过程. 全新世珠江三角洲沉积物覆盖在末次冰期冰盛期形成的风化侵蚀面与底砾层之上. 最大海侵面位于松软海相淤泥层位. 在受潮汐冲刷区域, 最大海侵面表现为侵蚀面. 全新世沉积层序自下向上在古河谷为河流相、河漫滩-河口湾相、河口湾-三角洲相, 在古河间地为滨海相、河口湾相和三角洲相. 全新世沉积层垂向堆积序列绝大部分表现为下粗上细的正向序列, 且不具有典型 Gilbert 三角洲的前积层、顶积层等沉积层序. 受控于独特而复杂的地貌边界, 古珠江河口湾在高水位体系域的演变模式不同于世界其他大型三角洲, 而是一个多源复合、不同尺度河流沉积体独立并行发展, 最后复合成的三角洲. 全新世以来珠江三角洲的演变可以分为 5 个阶段: 第一阶段 12~8 ka BP, 全新世海侵未达三角洲中部地区, 直至约 9 ka BP 以后, 南部一些地势较低的地区才开始受海进影响, 出现一些海陆交互相沉积; 第二阶段 8~6 ka BP, 海面快速上升, 珠江三角洲大部分地区接受海进沉积; 第三阶段 6~4 ka BP, 全新世海侵达到盛期, 古珠江三角洲地区大面积为河口湾, 且受系列岛屿的阻隔分为两部分, 上部是与河流相接的半封闭的内古海湾; 下部是与海洋相接的外古海湾, 两部分仅由若干峡口相通, 河流沉积物主要在内古海湾中堆积充填; 第四阶段 4~2 ka BP, 在复杂边界对河流与海洋动力的重塑和改造作用下, 内古海湾各区域的沉积同时进行, 独自发展; 第五阶段 2 ka BP 至今, 该阶段三角洲的演变已不再是单纯的自然过程, 而是自然和人类共同塑造的过程.

关键词珠江三角洲
全新世
地层层序
三角洲演变

三角洲是河流入湖或入海时, 由于沉积动力学条件发生剧烈变化而形成的巨型河口沉积物堆积体. 控制三角洲发育演变的主要条件包括: 气候、区域构造、河流与海洋之间的动力平衡、相对海平面的波动、沉积物的供给速率、受水盆地的地貌形态等. 这些因素的变化和它们之间的相互耦合作用, 使得三角洲

的演变过程变得更为复杂. 现代科学意义上的三角洲的调查研究, 特别是早期对 Mississippi 三角洲的研究具有示范性质^[1-3], 因此, 有一段时期这个三角洲被当成三角洲的模式. 然而, Van Andel 和 Curray 认为有必要对现代三角洲作批判性的对比研究^[4]; 他们强调指出, 在注意三角洲之间的基本相似的同时, 不

应低估三角洲之间在构造和岩性方面的差异. 近来, 三角洲充填过程和沉积模式在世界范围内得到广泛研究. 如非洲的 Nile 三角洲^[5]和 Niger 三角洲^[6], 欧洲 Rhone 三角洲^[7,8]和 Po 三角洲^[9], 南美的 Amazon 三角洲^[10,11], 东亚的黄河三角洲^[12-14]和长江三角洲^[15-17], 南亚的 Ganges-Brahmaputra 三角洲^[18], 东南亚的 Red 三角洲^[19,20]、Mekong 三角洲^[21,22]和 Mahakam 三角洲^[23,24], 等等. 与此同时, 在对三角洲的研究过程中发展出了一些用于认识河口系统沉积相分布的概念模型^[25-29]. 这些模型主要强调在河流过程和海洋过程的相互作用下河口沉积层序的特征. 同时也产生了一些三角洲的经典分类. 如基于河流沉积物供给与波浪和潮汐的对沉积物的再造过程引起的三角洲形态变化的分类^[30-32]; 基于三角洲不同时期沉积物搬运的粒径变化特征的分类^[33]和基于河口口的羽流动力特征的分类^[34]等. 当河流与海洋相汇共同塑造三角洲, 尤其是当河流流经海岸平原直接注入开阔的浅海陆架时, 海洋和河流的动力性质是影响三角洲演变和分类的非常重要的因素, 因此这些分类得到广泛应用. 然而河口过程虽有一定的共同特点, 但是河口及其水下沉积过程从平面形态到内部结构有很大的不同, 反映了河口扩散的机理和类型的差异^[35]. 当河流不是流入开阔的浅海而是流入构造和地貌复杂的半封闭海盆且包括侧向和底边的边界对动力条件有重大的重塑改造作用时, 问题变得更加复杂. 受水盆地边界本身的作用和变化就可能成为研究三角洲演变时需要考虑的重要因素. 珠江三角洲就是一个独特的例子. 正是由于它独特的地质地貌条件, 早期的研究者甚至对于它是否是三角洲曾有过多年的争论^[36-39].

现代的珠江河口是网河区 and 河口湾区两部分组成, 两者通过基岩峡口(“门”)相互连接. 河口湾区和网河区的地貌形态、沉积历史、水文特性及动力特性极不相同, 然而无论在形成历史与现代过程都密切联系、相互作用^[40]. 早在 20 世纪初期, 就已有中外学者对珠江三角洲的地质地貌作了研究探讨^[36-38]. 后来, 许多学者从沉积学、地貌学、河口学等不同的角度, 对珠江三角洲的形成发育演变^[41-44]和珠江河口的特性^[45]进行了大量的研究工作. 对于海进盛期以来三角洲发育的重要问题, 如海进的范围、三角洲的沉积速率、三角洲的演进模式、三角洲的发育史和等沉积年代线等均进行了探讨. 但由于缺乏沉积物 ^{14}C

测年数据, 加上各家所依据的资料和研究程度不同, 因而在很多问题上各家的认识很不一致.

本文基于对 90 个拥有全新世 ^{14}C 年代数据钻孔资料(其中 72 个来自各类出版物, 另外 18 个为课题组在珠江三角洲关键部位钻取, 并对这 18 个钻孔沉积物做了较高分辨的 ^{14}C 测年、古生物鉴定、沉积物粒度分析及颜色反射率等测定)的分析, 讨论全新世珠江三角洲的地层特征, 及其在全新世以来的演变, 以此进一步认识具有复杂地形边界三角洲的沉积模式和演变特征.

1 区域背景

1.1 珠江三角洲的地貌和构造升降特征

珠江三角洲位于广东省中部沿海, 面积为 8033 km^2 , 是继长江三角洲之后的中国第二大河口三角洲. 珠江三角洲是一个三面环山、一面向海半封闭盆地, 且向海一面有众多岛屿屏蔽. 现今的珠江三角洲平原上有许多与北东向构造线一致的丘陵台地, 平原的面积占 80.6%, 其余的丘陵和山地占 13.3%, 台地和残丘占 6.1%. 珠江三角洲接纳了珠江流域的西江、绥江、北江、流溪河、增江、东江、潭江等主要河流的水沙输入, 各江河汇合后不断分叉, 形成复杂的珠江三角洲河网. 现今三角洲河网共有 300 多个河段, 总长度约为 1600 km, 河网密度高达 0.81 km km^{-2} ^[41], 河网总体上表现出复杂分级的一维特征. 珠江流域来水来沙进入三角洲后经由八个主要口门(东四口门虎门、焦门、洪奇门、横门, 西四口门磨刀门、鸡啼门、虎跳门和崖门)注入河口湾(伶仃洋和黄茅海), 河网区和河口湾都受到潮汐上溯和河流淡水稀释的影响, 形成一个独特的“河网-口门-河口湾”构成的河口三角洲系统(见图 1).

珠江三角洲平原边缘地区的构造上升速率为 $1.03\sim 1.8 \text{ mm a}^{-1}$, 大部分平原地区的沉降速率为 $-0.59\sim -0.88 \text{ mm a}^{-1}$, 局部濒海地区(灯笼沙和万顷沙地区)为 $-3.44\sim -3.6 \text{ mm a}^{-1}$ ^[41,42]; 构造隆起区在全新世的平均抬升速率为 0.5 mm a^{-1} , 在构造沉降区为 -0.5 mm a^{-1} , 在强烈沉降区为 -3.6 mm a^{-1} , 构造稳定区升降速率为 0 mm a^{-1} .

1.2 珠江三角洲第四纪地层

珠江三角洲地区第四纪沉积地层形成年代比较

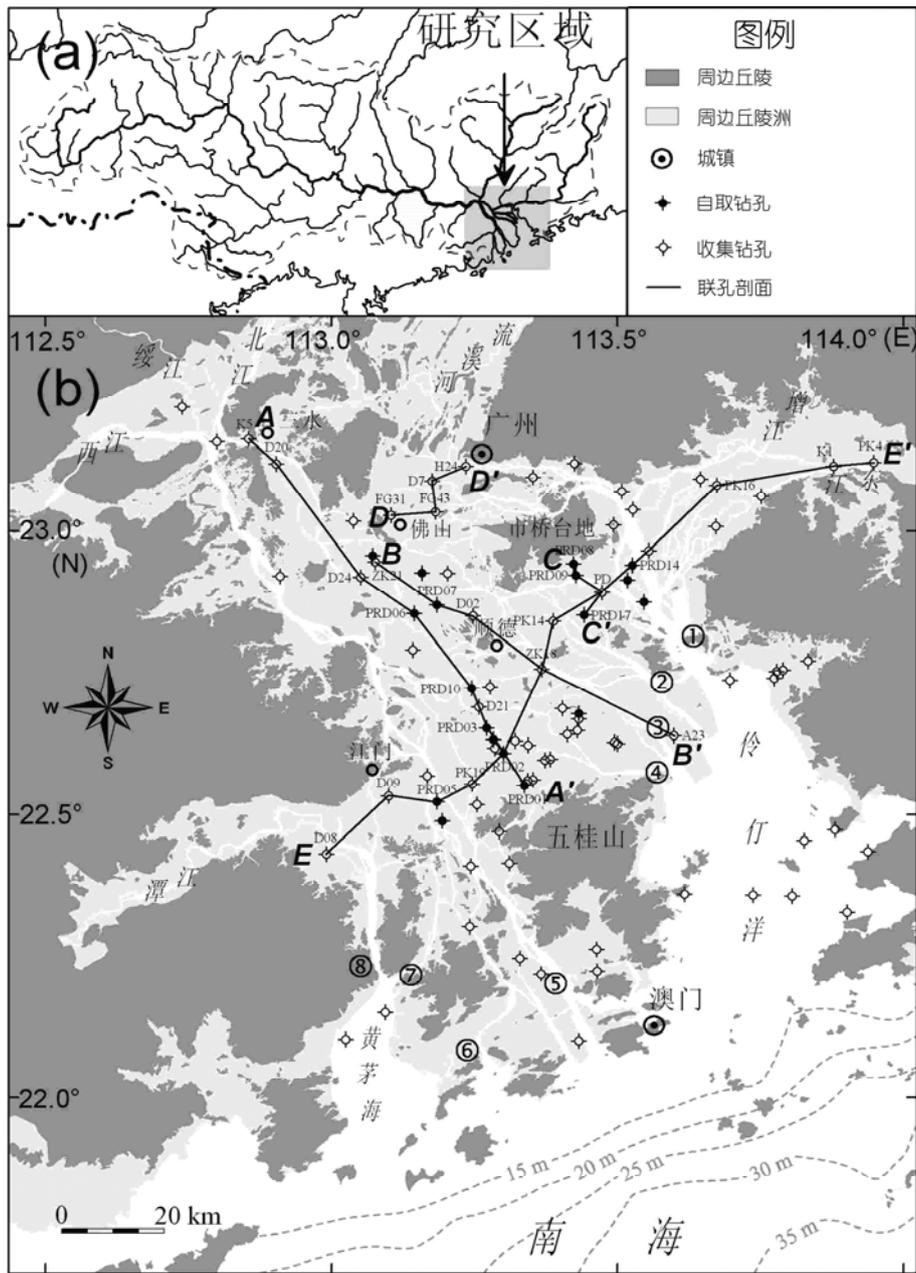


图1 珠江流域(a)和珠江三角洲地区(b)研究钻孔分布及联孔剖面线图
 ① 虎门; ② 蕉门; ③ 洪奇门; ④ 横门; ⑤ 磨刀门; ⑥ 鸡啼门; ⑦ 虎跳门; ⑧ 崖门

年轻, 迄今不过 40 ka^[44]. 第四纪沉积自下而上包括两套沉积层序: 更新世沉积层和全新世沉积层^[41,44,45]. 第四纪沉积层厚度平均为 25 m 左右, 一般不超过 30 m. 在磨刀门口附近的沉积厚度可达 64 m. 在二期沉积旋回中存在一个曾经暴露的侵蚀和风化面, 厚度一般为 0.5~5 m, 形成于距今 22~13 ka 的末次冰期.

1.3 珠江三角洲水文特征

珠江流域是我国最重要的河流系统之一, 流域面积为 45.37×10⁴ km²(图 1(a)). 珠江干流西江, 发源于云南省曲靖市马雄山, 至广东省珠海市磨刀门注入南海, 全长 2214 km, 天然落差 2136 m. 珠江三角洲接纳了流域的西江、北江、东江、流溪河、增江、

潭江等主要河流的水沙输入. 年均径流量为 $3.029 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 平均流量为 $9584.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. 年均悬移质输沙量为 88.72 Mt , 平均悬沙浓度为 0.284 kg m^{-3} . 悬沙主要由粉砂和黏粒构成. 受亚热带海洋季风气候影响, 珠江三角洲的径流量和输沙量在年内变化很大, 汛期(4~9月)径流量占全年径流量的 74%~84%, 输沙量占全年输沙量的 91%~95%. 珠江三角洲各支流多年平均径流和输沙基本特征见表 1.

1.4 珠江三角洲海洋学特性

珠江河口区的潮型为不正规半日潮. 潮差小, 且具有明显的空间差异. 八个口门的平均潮差呈东(虎门, 1.63 m)、西(崖门, 1.24 m)两侧大, 中间(磨刀门, 0.86 m)小的马鞍形分布. 由于珠江口地区岸线曲折, 岛屿分布不均匀, 各不同地段的波浪特征和波能强度相差较大. 具体表现为湾内小, 湾外大; 岛屿屏蔽区小, 岛屿面海一侧大. 湾外及岛屿面海一侧的波浪频率高, 以涌浪为主, 风浪率次之, 无浪率小. 波浪

平均波高在 1.2 m, 平均周期 5.1 s, 波浪方向以 SE 向浪为主(包括风浪和涌浪). 河口湾内波浪强度较为微弱, 以风浪为主, 涌浪和混合浪的频率小, 年平均波高仅为 0.2 m, 浪向多为 S 及 SSE 向.

1.5 珠江三角洲的历史相对海平面

珠江三角洲距今 8 ka 以来的相对海平面变化如图 2 所示. 三条曲线变差在 6 ka 以前较大, 5 ka 以后大体雷同, 且变化幅度在 3 m 以内. 这些差异可能是由于珠江三角洲复杂多变的地质地貌和大家所依据的资料不同所导致的. 其中, 李平日等^[42]根据对 9 类古海面标志物和 107 个样品年代数据进行沉积深度校正、构造升降幅度校正后绘出了 8 ka 以来珠江三角洲海平面大体的变化曲线. 依据此曲线, 大约 8 ka 前珠江三角洲海平面低于现今海平面约 25 m, 在 6~5 ka BP 达到海侵盛期, 海平面接近现今海平面, 此后海平面相对稳定, 波动幅度在 $\pm 2 \text{ m}$ 范围内.

表 1 珠江流域径流量和输沙量组成^{a)}

河流(水文站)	径流量			悬移质输沙		
	年径流量(10^8 m^3)	平均流量($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	占流域百分比(%)	含沙量(kg m^{-3})	年输沙量(10^4 t)	占流域百分比(%)
西江(高要)	2220	7020	73.29	0.32	7100	80.03
北江(石角)	413	1310	13.63	0.13	647	7.29
东江(博罗)	233	737	7.69	0.13	296	3.34
绥江(石狗)	68.4	217	2.26	0.16	109	1.23
增江(麒麟咀)	38.2	121	1.26	0.14	56.1	0.63
流溪河(牛心岭)	18.7	59.4	0.62	0.06	10.2	0.11
潭江(潢步头)	20.7	65.5	0.68	0.11	23.0	0.26
其他小河流	17.1		0.56		630.7	7.11
总计	3029.1	9584.3	1		8872	1

a) 表中数据为 1954~2000 年统计结果

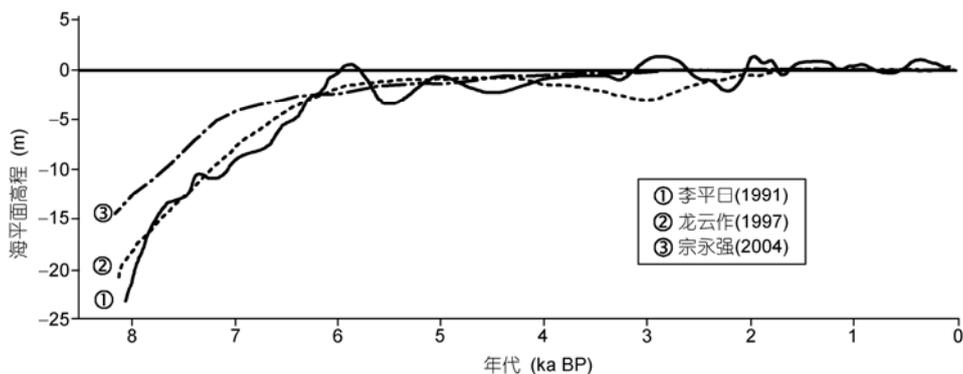


图 2 珠江三角洲 8 ka 以来海平面变化曲线

修改自文献[42, 44, 46]

2 材料和方法

本文分析钻孔共有 90 个(图 1(b)). 其中 72 个钻孔来自各类出版物(各钻孔的详细资料统计及来源参见文献[47]); 另外 18 个钻孔(编号 PRD)由课题组钻取, 钻孔取芯率在 80%~95%之间.

实验室中将钻孔岩芯剖成两半, 一半放置冰柜中储藏. 对另一半岩心进行拍照、沉积物描述、颜色反射率测定(测定仪器为 CR-400/410 手持色差计, 测点间距为 2 cm), 之后分别按间距 10 cm 取样做古生物、粒度以及地球化学分析; 约按 1.0 m 间距取 ^{14}C 测年样品.

沉积物粒度采用 LS 13320 激光粒度分析仪测量, 该仪器测量范围为 0.2~2000 μm , 相对误差小于 3%. 粒度测量的前期处理参照《海洋调查规范》(国家海洋局, 1992). 取湿样约 50 g, 分别用 H_2O_2 和 HCl 去除沉积物中的有机质和碳酸化合物, 之后反复冲洗、烘干, 制成干样. 对于有粒径大于 2000 μm 的样品, 用传统筛分法分析.

18 个钻孔测年数据共 210 个. 其中, 185 个常规 ^{14}C 测年, 由中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室测定完成; 25 个加速器质谱测年, 由波兰西里西亚工业大学物理学院格利维策绝对定年中心测定完成. 为了与从文献中收集到的钻孔进行比较分析, 本文并未对测年数据进行日历年校正, 而直接采用 ^{14}C 年代.

3 结果

3.1 全新世珠江三角洲沉积单元和沉积相

依据钻孔资料所反映的沉积物岩性、颜色、沉积结构、纹理、接触特征、演替特征、生物化石组成、泥砂含量和 ^{14}C 测年等, 珠江三角洲全新世以来的垂向沉积序列从底部向上可以划分为 6 个主要沉积相, 分别为河流相、河漫滩相、滨海沼泽相、河口湾-浅海相、潮坪相和泛滥平原相沉积(代表性钻孔剖面见图 3~5). 这些沉积单元和它们所对应沉积相的详细特征描述如下.

河流相由中砂到细砂的交错层理组成. 底部为块状砂砾层, 含部分角砾和岩块, 具块状构造, 分选磨圆差. 一些钻孔中出现泥质砂砾层. 发育平行层理、斜层理、交错层理. 沉积物向上变细, 与上

覆呈渐变接触. 沉积物中无生物扰动, 且包含大量的有机质, 没有海相化石或是潮汐沉积构造出现. 该沉积相厚度 2~6 m. ^{14}C 该测年一般大于 8 ka BP.

河漫滩相主要由灰色的砂质黏土组成. 发育水平、波状、透镜状和小型交错层理. 常见植物碎屑及含有少量铁质结核和菱铁矿. 极少发现海相化石.

滨海沼泽相主要由灰色粉砂质黏土和黄褐色黏土质粉砂构成. 底部包含大量的植物根系和碎屑. 出现剧烈生物扰动.

河口湾-浅海相主要由青灰色的粉砂质细砂和粉砂质黏土组成. 具双向交错层理、波状层理、水平层理的粉砂质黏土. 含丰富的有孔虫和介形类壳体. 有孔虫主要为广义的 *Ammonia beccarii* var. 及 *Protelphidium granosum*. 介形类主要为 *Sinocytheridea impressa*, *Neomonoceratina iniqua* 和 *Bicornocythere leizhouensis*. 硅藻主要为 *Cyclotella striata*, *Cyclotella meneghiniana* 和 *Cymbella affinis*.

潮坪相多为青灰色或黑褐色粉砂质黏土, 夹少量青灰色泥质细砂. 沉积物具有向上变细的韵律构造. 该相的顶部常发现铁、锰结核和植物碎屑. 沉积结构表现为底部具有交错层理和压扁层理, 中部具有透镜层理和波状层理, 向上变为水平层理具水平纹层, 间或有双向交错层理及变形层理.

泛滥平原相主要由黄灰色粉砂质黏土组成, 含黄色泥质团块、铁质结核及植物根茎. 具块状层理和水平层理. 该相沉积厚度一般为 2~5 m, 广泛分布于三角洲中. ^{14}C 测年范围大都小于 3 ka BP.

3.2 联孔剖面

为了揭示珠江三角洲沉积沿水平的变化规律, 在珠江三角洲平原区选取了 33 口钻孔资料, 建立了 6 个联孔剖面(剖面线分布见图 1(b)), 4 个纵向, 2 个横向. 各剖面特征叙述如下.

(1) 剖面 A-A'. 从三水至五桂山北麓, 纵切珠江三角洲中部平原, 分布方向为 NW-SE 向, 由 8 口钻孔组成(图 6). 在北部, 下段一般保留一层厚薄不均的河床滞留沉积, 上段是颗粒偏细的粉砂质黏土沉积, 从下而上先后转换为河口湾相沉积和泛滥平原相沉积. 在五桂山北麓, 全新世沉积物覆盖在冰后期形成的风化花斑黏土之上, 沉积组合为滨海沼泽相-河口湾相-泛滥平原相. 该联孔剖面显示, 全新世古珠江河

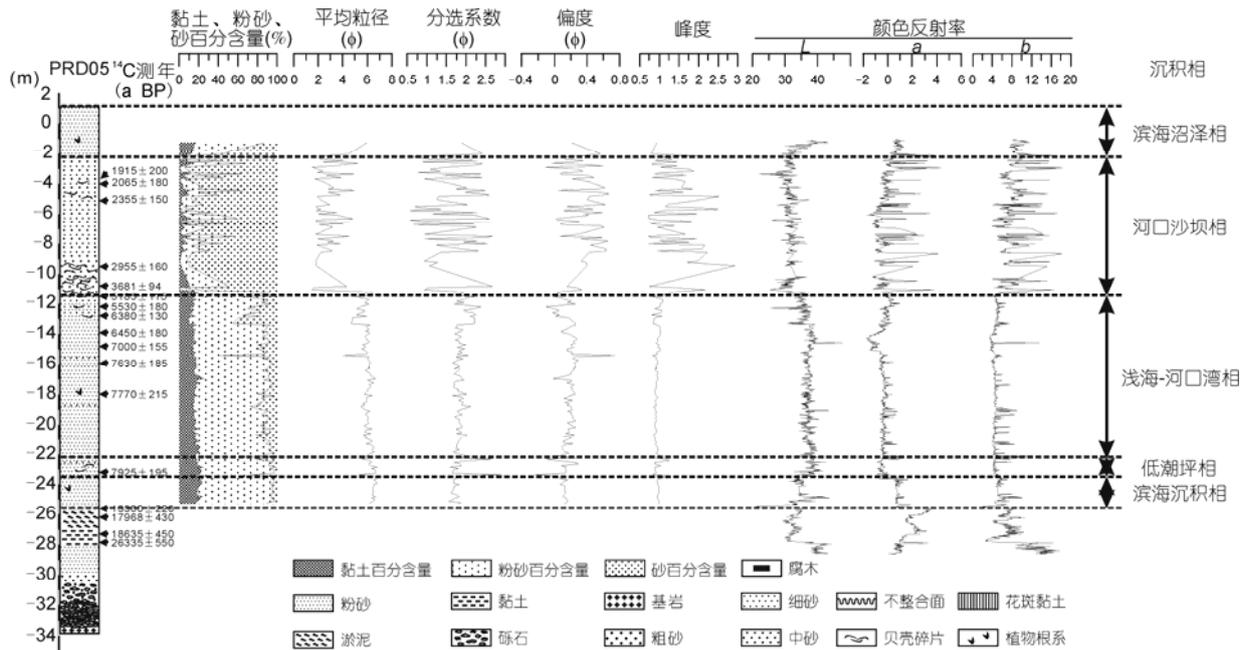


图3 PRD05 钻孔综合柱状图

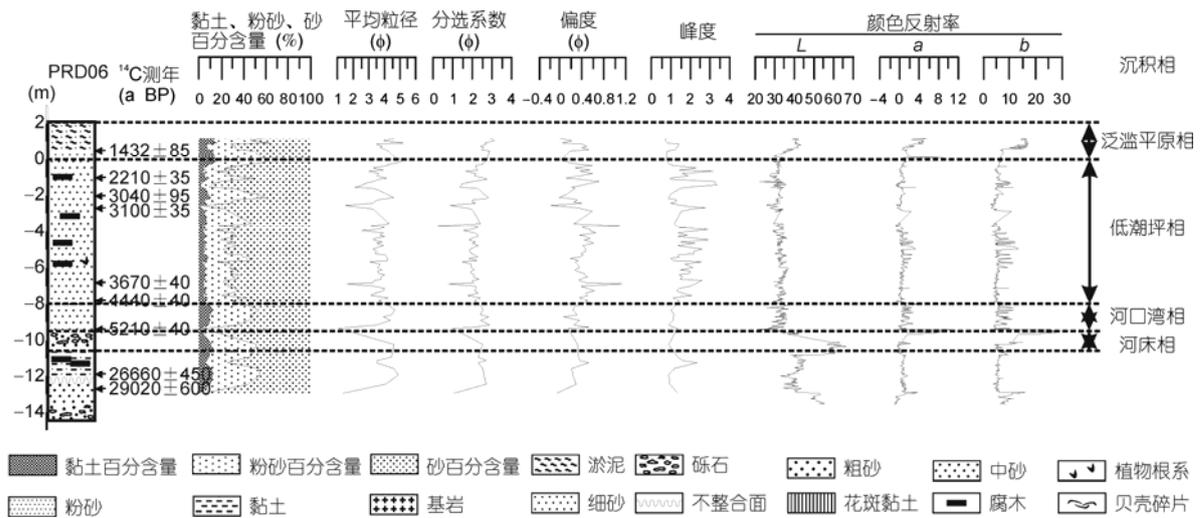


图4 PRD06 钻孔综合柱状图

谷湾沉积物在北部河口区为自北向南堆积, 在五桂山北侧则为自南向北加积。

(2) 剖面 B-B'。由顺德中部平原至南沙的 5 个钻孔组成(图 7)。海侵形成的河流-河口湾沉积在大多钻孔中可以找到。在最大泛海面(Maximum flooding surface)之上, 海退层序的组成为河口湾-三角洲相(主要为滨海沼泽相、河口湾-浅海相、潮坪相和泛滥平原相的沉积组合)。充填厚度向海增加。沉积发育

特征表现为在顺德中部地区以基岩岛屿为核心沉积, 南部向伶仃洋河口湾进积。

(3) 剖面 C-C'。由 4 个钻孔组成, 纵切市桥台地南部平原(图 8)。该剖面靠近市桥台地一侧的 PRD08 孔全新世基底较深且拥有海侵层序, 海侵层序组成为河道相-河口湾相。而另外 3 个钻孔全新世沉积直接上覆于侵蚀面上, ¹⁴C 测年大多小于 4 ka BP。最大泛海面之上, 4 孔的海退层序组成从下到上为河口湾相-三角

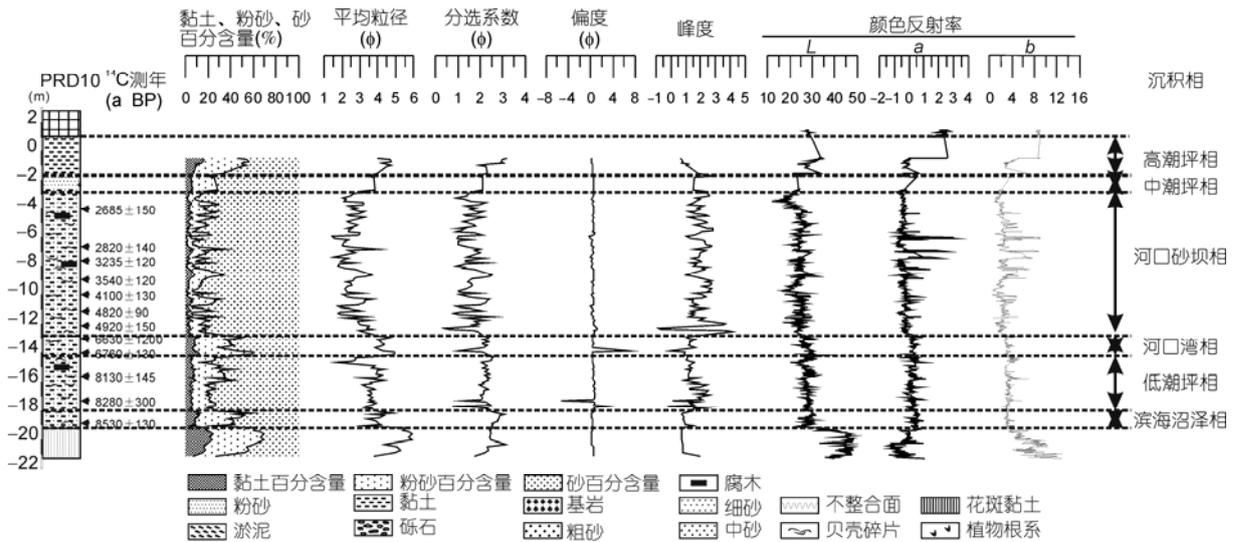


图5 PRD10 钻孔综合柱状图

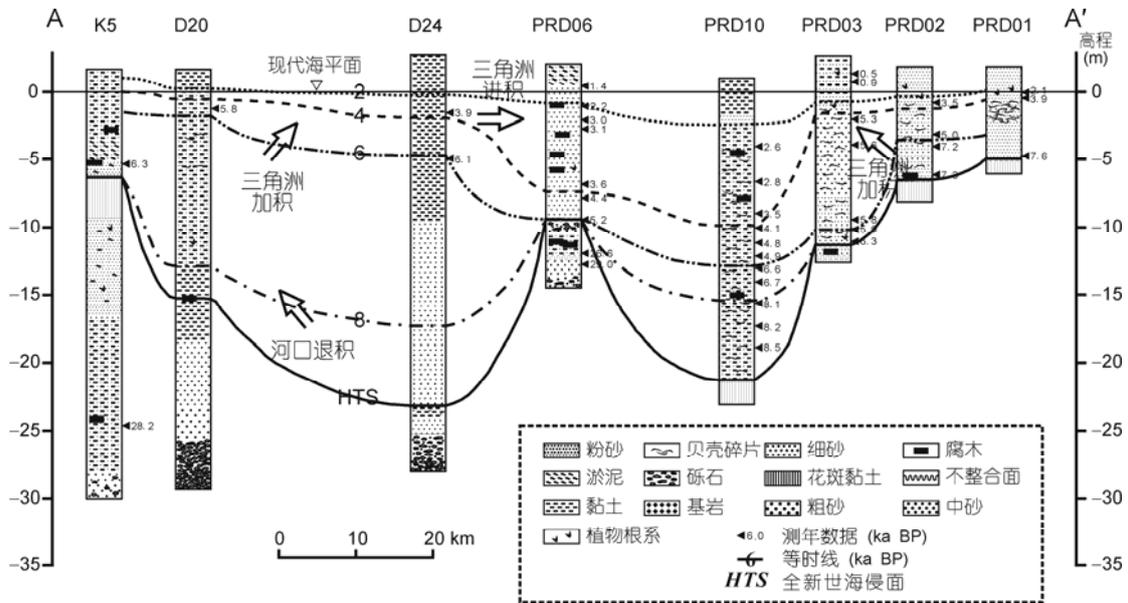


图6 A-A'联孔剖面

洲泛滥平原相. 该联孔剖面特征表明, 该区域在全新世靠近市桥台地一侧为古河谷, 往南为古间地. 全新世海侵古河谷退积充填, 最大海侵后, 该区域长期处于潮汐侵蚀状态, 直至 4 ka BP 后潮汐作用才相对减弱, 区域内开始接受沉积. 沉积发育特征为南北向中间加积.

(4) 剖面 D-D'. 由大鳌岛北侧至磨刀门交杯沙的 6 个钻孔组成(图 9), 纵贯珠江三角洲西南部. 全新世沉积厚度由北向南增大. 磨刀门口的全新世沉积

厚度达 60 多米. 联孔剖面显示, 磨刀门口地区在 8~6 ka BP 的沉积发育特征为向海进积, 6~4 ka BP 则表现为向上加积, 在距今 4 ka 以来又表现为向海进积. 这主要与相对海平面变化和内陆海湾的沉积空间变化有关. 由于地势较低, 磨刀门口区域最早受海侵影响, 形成河口湾. 至海侵盛期(大约距今 6 ka), 河口向陆后退, 该区域主要受海洋动力支配. 随着河流沉积物的充填, 内陆海湾沉积空间逐渐变小, 发生海退, 使得磨刀门口区域再次成为河口, 沉积物向海进积. 南

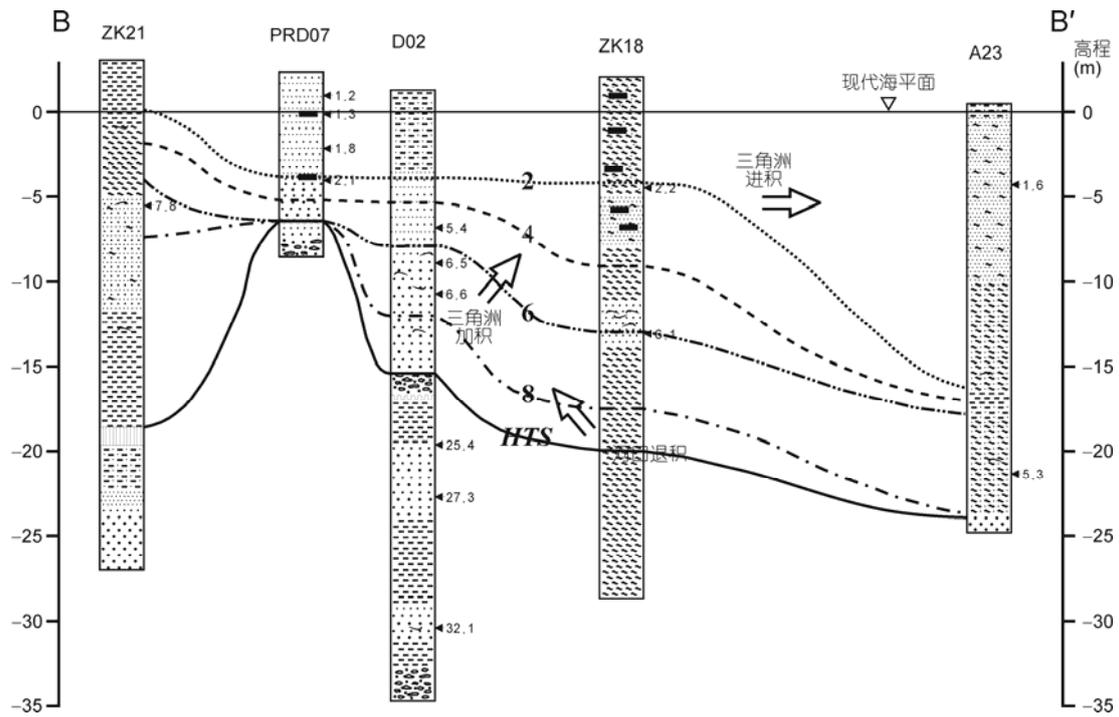


图7 B-B'联孔剖面
图例同图6

部几口钻孔的主要沉积层序组合表现为河口湾相-浅海相-河口湾相。

(5) 剖面 E-E'。由佛山至广州的 4 个钻孔组成 (图 10), 横切珠江三角洲北部平原。该区域全新世沉积组合为河漫滩相-滨海沼泽相-河口湾相-泛滥平原相。沉积层序东部较西部薄。东部沉积层序较小, 范围为 1~2 m。联孔剖面显示, 该区域沉积发育特征为由西向东进积。

(6) 剖面 F-F'。分布方向为 NE 向, 从新会县双水镇开始, 终止于东莞市石排镇, 由 12 个钻孔组成 (图 11)。剖面揭示全新世海侵沉积厚度变化范围大, 有些区域厚达 10 m 以上, 有的则缺失, 这主要取决于末次冰期侵蚀残留后的古地形, 低洼谷地保留有沉积层, 并多为含腐木碎屑粉砂泥质堆积物, 而相对较高的台地面上在全新世早期则无沉积。纵切东江三角洲的东部剖面显示, 全新世沉积层序组合表现为海侵期的河流相-河口湾相和海退期的河口湾-三角洲相。总的联孔剖面显示, 全新世东江三角洲平原由东向西进积, 而在五桂山北部地区平原则向东西两边加积, 江门南部地区亦出现类似情况。

4 讨论

4.1 全新世珠江三角洲的层序地层

在珠江三角洲晚第四系地层中, 普遍存在着一个明显的不整合面(钻孔剖面中表现为杂色花斑黏土层或底砾层), 将地层分为上下两大套(图 6~11 联孔剖面)。根据上下层位的 ^{14}C 测年资料, 其形成年代相当末次冰期冰盛期, 表明在距今 22~12 ka 期间, 区内曾经历过一个约 10 ka 的风化过程, 因而是划分晚更新统和全新统的重要依据。该界面亦成为珠江三角洲末次海侵的海侵面(Transgressive surface), 将珠江三角洲晚第四纪的低位体系域(Lowstand systems tract)和海侵体系域(Transgressive systems tract)分开。

约距今 6 ka, 全新世海侵达到盛期, 海平面与现今海平面相当。此时海水深入内陆, 珠江河口湾的湾头处于肇庆、三水县芦苞和花县炭步区鸭湖以北、花县向西庄、惠阳县潼湖一带^[45]。珠江三角洲的最大海侵面亦出现在该时期。在诸多钻孔中最大海侵面一般位于松软海相淤泥层位。但由于潮汐冲刷作用,

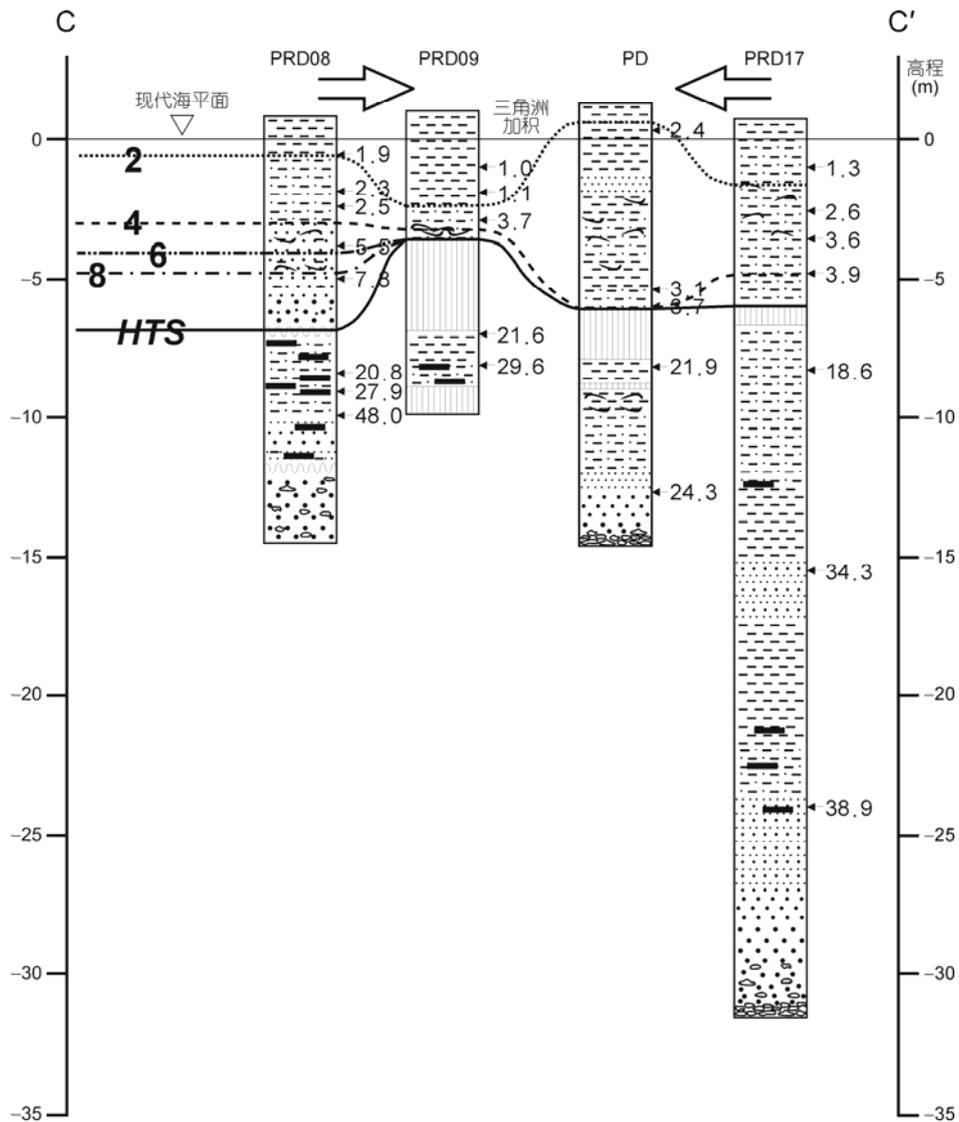


图8 C-C'联孔剖面
图例同图6

在一些钻孔中最大海侵面表现为侵蚀面。最大海侵面是珠江三角洲全新世沉积层中的唯一等时面。此时珠江三角洲海侵沉积体系由向陆退积转换为高水位沉积体系的盆地充填。沉积层序自下向上在古河谷为河流相、河漫滩-河口湾相、河口湾-三角洲相，在古河间地层序为滨海相、河口湾浅海相和三角洲泛滥平原相。

根据对珠江三角洲钻孔研究发现，沉积层垂向堆积序列绝大部分表现为下粗上细的正向序列，而不是下细上粗的反向序列，后者被认为是进积型三角洲的经典模式序列。同时，从联孔剖面(图 6~11)看出，与 Dalrymple 等^[26]所总结的在河流、波浪和潮汐

营力下河口湾向三角洲的转换模式不同，古珠江河口湾在高水位体系域(Highstand systems tract)的发育模式并不是单向的河流由湾头向海进积，也不具有典型 Gilbert^[48]三角洲的斜积层、顶积层等沉积层序，而是各区域的沉积同时多向进行，并独自发展。这些特征主要是由独特而复杂的边界(包括岸线边界和多源的河流输入边界)造成的。

4.2 全新世珠江三角洲的演变

基于对珠江三角洲地区钻孔沉积相、沉积层序、测年数据、联孔剖面的层序等时线(图 6~11)等的分析，

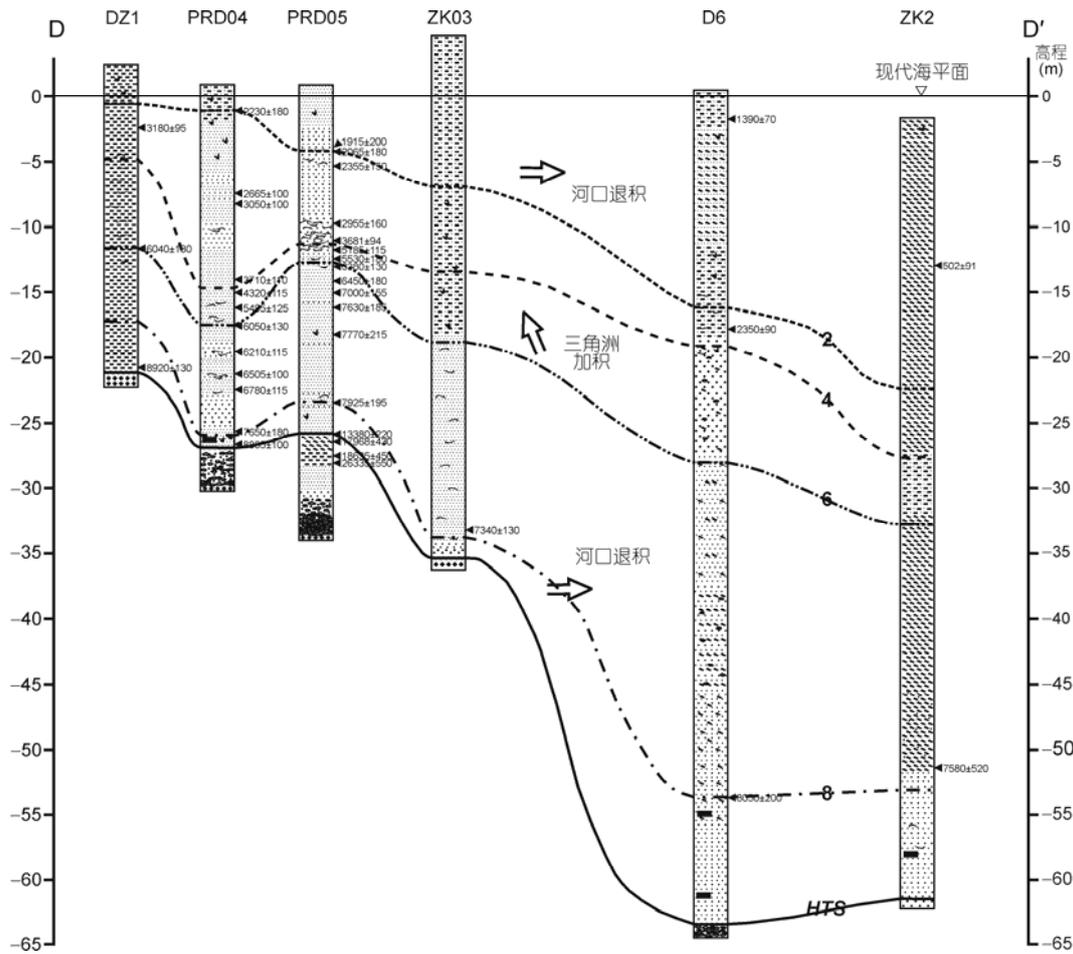


图9 D-D'联孔剖面
图例同图6

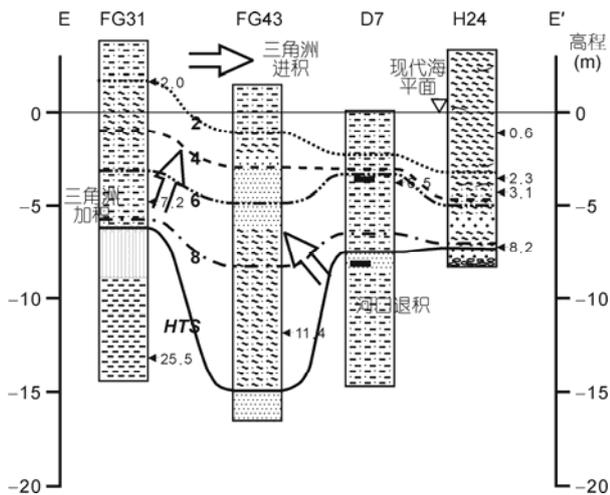


图10 E-E'联孔剖面
图例同图6

全新世以来珠江三角洲的演变可以分为5个沉积阶段(图12). 5个阶段的地形特征和沉积物沉积过程分别描述如下.

4.2.1 第一阶段(12~8 ka BP)

距今1.3万年左右, 珠江口外陆架最低海平面比现今海平面低131 m^[49]. 此时的本地区大部分区域为风化花斑黏土^[44,45], 河流深切河谷. 沉积物主要为河床相砂砾层. 随着海平面上升, 距今9 ka左右三角洲南部一些地势较低的地区开始受海进影响, 出现一些海陆交互沉积. 主要沉积相型转为河流冲积相和海进河床充填沉积相.

4.2.2 第二阶段(8~6 ka BP)

此阶段, 珠江三角洲地区海平面以约11 mm a⁻¹

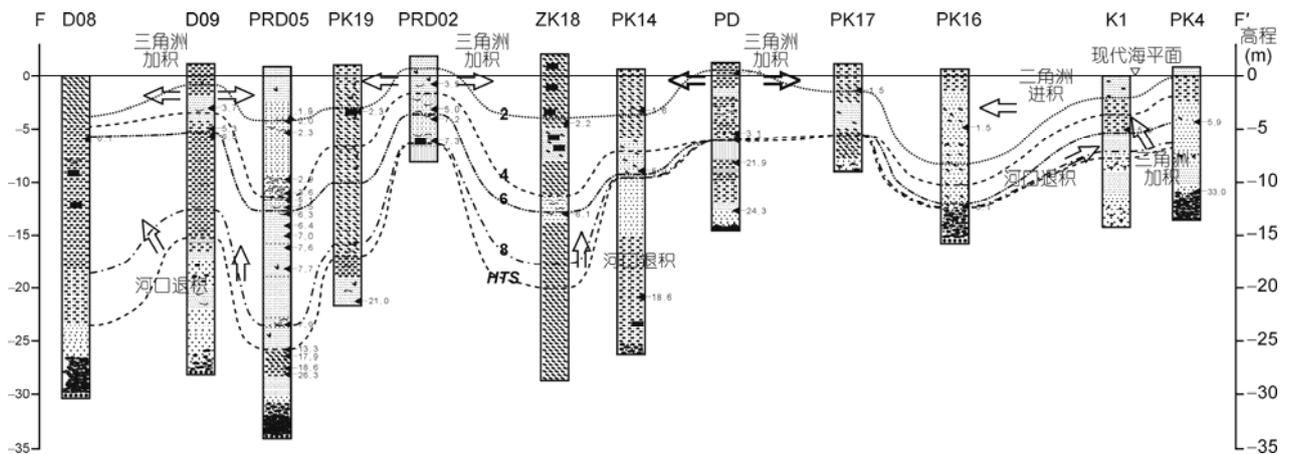


图 11 F-F'联孔剖面
图例同图 6

的速度迅速上升, 大部分地区接受海进沉积. 此时在三角洲南部主要为河口湾相沉积, 在地势相对较高区域为滨海沼泽相沉积, 而在三角洲顶部地区仍以河流作用为主. 特别的, 对于径流较弱的河流(如增江、潭江等), 海潮影响较深入; 径流作用强劲的河流(如西江、北江等), 海潮作用初期影响有限.

4.2.3 第三阶段(6~4 ka BP)

距今约 6000 年, 全新世海侵达到盛期, 海平面与现今海平面相当. 海水深入内陆. 该时期的珠江三角洲地区除了周围边缘地区为堆积阶地外, 大面积为河口湾, 湾内星罗棋布 160 多个大大小小的基岩岛丘和台地, 如五桂山、西樵山、市桥台地等. 谓之“珠江古河口湾”. 古河口湾可以分为内外两部分. 内河口湾主要是现在的珠江三角洲平原, 北部分别与西江、北江和东江相接. 内河口湾通过虎门、蕉门、古横门、虎跳门和崖门等狭窄峡口和外河口湾相通. 外河口湾就是现在的伶仃洋、黄茅海等河口湾. 海潮从外河口湾通过众“门”传入内河口湾. 河流带来的沉积物大部分在内古河湾堆积下来. 而散布在内古河湾的诸多岛屿往往成为河流来沙的沉积核心. 这个时期, 沉积物首先在内古河口湾沉积. 该时期主要为河口湾-浅海相沉积, 河流相沉积只有在湾头出现.

4.2.4 第四阶段(4~2 ka BP)

该时期的古珠江河口湾不断接受河流沉积物的充填. 但由于复杂边界对河流与海洋动力的重塑和

改造, 沉积物的运输、沉积分布受到很大影响. 三角洲的沉积发育在不同区域表现不同特征, 且各区域的沉积同时进行, 独自发展. 如在五桂山北麓沉积物向北淤积发育(剖面 A-A')同时向东、西面扩张(剖面 F-F'). 在市桥台地南面水域, 由于受到市桥台地和虎门区岛屿的影响, 在约 4 ka BP 才开始接受沉积, 之后的沉积发育模式为南北向中间收窄(剖面 C-C'). 在佛山区域, 沉积物由西向东淤积(剖面 E-E'). 相对开阔平坦的东江三角洲地区, 沉积物由东江河口向西进积(剖面 F-F'). 在顺德中部, 沉积物以基岩岛屿为中心堆积, 并不断扩大. 顺德西南部区域, 三角洲向伶仃洋进积(剖面 B-B'). 而由基岩岛屿构成的各口门是珠江河流系统和海洋相通的仅有通道. 水流湍急, 所以过去 6 ka 以来一直保持通畅而没有淤积. 此时的珠江三角洲沉积类型主要为河口湾沉积相和潮坪相.

4.2.5 第五阶段(2 ka BP 至今)

随着佛山、西樵山一带进一步淤浅成陆, 珠江北岸、海珠岛南岸的淤浅和中部各子平原的继续发育, 昔日开阔的水面收窄成河道. 珠江河网基本框架逐渐呈现. 然而, 该阶段的珠江三角洲演变在人类活动的参与下, 已不再是纯粹的自然过程, 而是自然和人类活动共同塑造的过程. 珠江流域及其三角洲早在秦汉以前就有农业经济, 农业的发展必然破坏大片的天然植被, 而植被的破坏又必然引起水土流失, 从而加速三角洲河道的淤积, 加速平原的洪泛. 同时人们开始有意识地引导环境演变, 珠江三角洲自公元

10世纪(北宋至道二年,即公元996年)开始有修筑堤围的记载,堤围的不断修筑,加速了珠江三角洲河网水系的形成,加速了泥砂在河床和河口的沉积,促使陆地迅速扩展.修筑堤围使河道固定和简化,河道的固定和简化使三角洲加速外伸.该阶段三角洲盆地内的主要沉积相类型为三角洲平原相.然而控制不同环境的沉积作用是十分复杂的,在三角洲平原地区,有径流作用为主的冲积平原,也有海洋作用明显的三角洲平原相;在三角洲前缘地区,有河控三角洲前缘浅滩,也有潮流作用占优势的潮汐河口湾;而前三角洲地区则受控于径流、潮流、沿岸流及陆架水团的综合作用^[42].

4.3 珠江三角洲演变与其他三角洲的比较

现代的近岸三角洲大都形成于早全新世海平面

上升趋于缓和后的河流进积.但由于所处的地貌背景和沉积物供应之间的差异,各三角洲的发育和演变千差万别.珠江三角洲的全新世演变也有自己的特点.在东亚季风影响下,珠江三角洲地区温润多雨,流域植被覆盖度高,上游江河径流充沛,因而三角洲的水文特征是水丰沙少,沉积物颗粒较细.气温变差小,在整个全新世,气温变幅仅 6°C ^[42].珠江三角洲的地质构造是相对稳定的,全新世以来的升降速率多数地区不足 $\pm 1\text{ mm a}^{-1}$,对流域来水来沙、沉积物性质、颗粒粗细,以至海平面相对升降,均有重要影响.这与同纬度的印度河三角洲和恒河三角洲上游位于强烈隆升的喜马拉雅山脉完全不同,也与上游明显抬升,下游长期大幅度沉降、发育数百米厚第四纪沉积的黄河、长江三角洲等的构造情况有较大差别.另

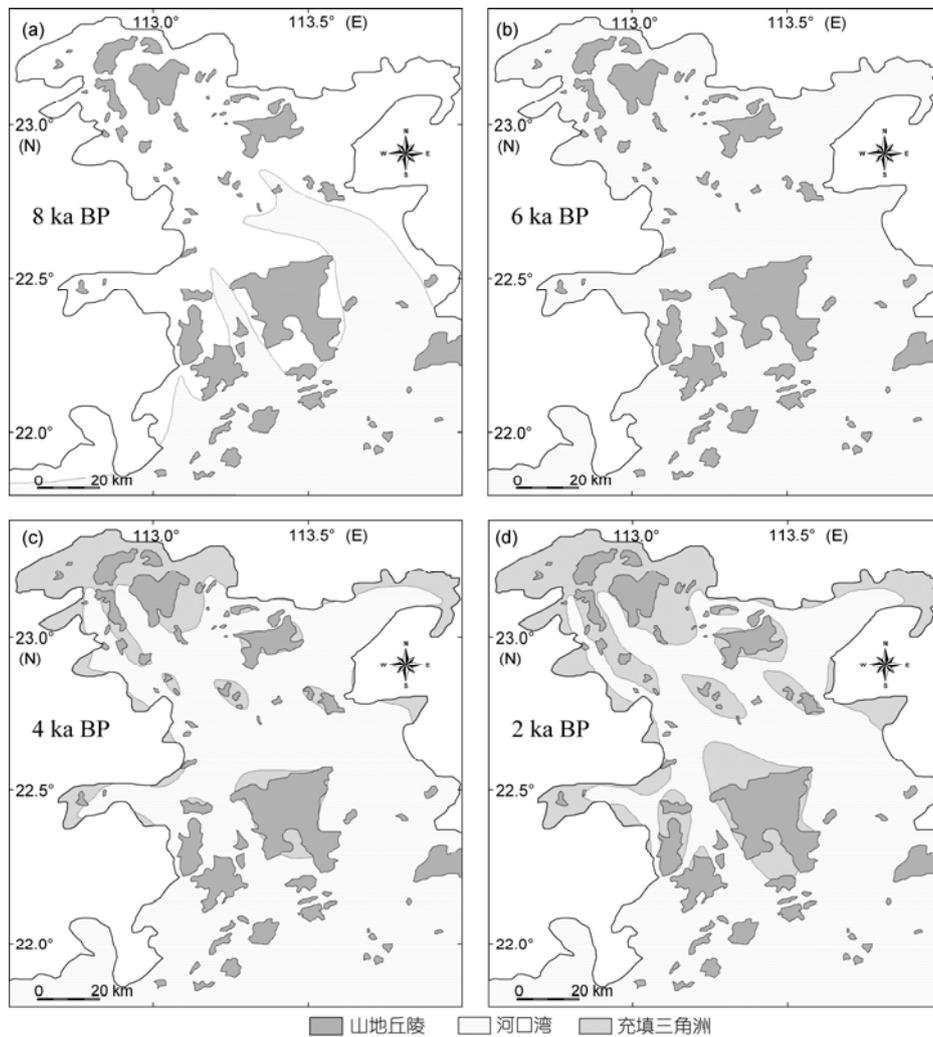


图 12 全新世古珠江河口湾不同时期的沉积分布

外, 珠江三角洲在一个相对封闭的海湾环境内发育, 口门外系列的岛屿将海进盛期的古珠江河口湾分为两部分, 上部是与河流相接的半封闭的内古海湾; 下部是与海洋相接的外古海湾. 两部分仅由若干峡口相通^[50]. 内古海湾内残丘林立, 台地广布. 受构造格局所围限, 珠江三角洲只能在盆地内发育, 而不同于黄河、密西西比河三角洲等可以大范围改道、废弃. 岛屿的阻隔作用, 也使得波浪、风等对珠江三角洲的影响相对较弱. 这不同于三角洲发育受波浪强烈作用的圣弗兰西斯科三角洲、格里加尔瓦三角洲和塞内加尔河三角洲. 多数三角洲是独流入海的, 它们的发育和演变仅受一条河流的作用. 珠江三角洲则是多河汇集, 较大的河流有西江、北江、东江、潭江、流溪河等, 此外还有许多较小河流注入珠江三角洲, 使得三角洲环境演变更具复杂性.

当河流与海洋相汇共同塑造三角洲尤其是当河流流经海岸平原直接注入开阔的浅海陆架时, 海洋和河流的动力性质是影响三角洲演变和分类的非常重要的因素. 据此 Galloway^[31]将入海三角洲分为河控, 浪控和潮控三角洲. 然而, 当河流经过复杂的构造地貌与海洋相通, 受水盆地的边界对动力条件有重大重塑改造作用时, 受水盆地边界本身的作用和变化就可能成为研究三角洲演变时需要考虑的重要因素. 珠江三角洲就是其中一个例子. 受基岩岛屿的阻隔, 珠江三角洲迄今尚在半封闭的海湾内堆积. 而世界上的大多数三角洲, 如 Mississippiss 三角洲、Nile 三角洲、Niger 三角洲、Sao Francisco 三角洲、Fly 三角洲、Mekong 三角洲、Mahakam 三角洲以及我国的黄河三角洲、长江三角洲等, 都形成于开放性海湾或直接堆积在大陆架上. 珠江三角洲也不象 Shaolhaven 三角洲和早期的多瑙河三角洲形成于湾口沙坝型的封闭和半封闭的海湾内. 珠江三角洲无湾口沙坝. 全新世高水位体系域以来珠江三角洲的发育模式既不像 Mississippiss 三角洲的发育, 可以明显的分为堆积前展、冲决、改道废弃和侵蚀破坏等阶段. 也不同于印度尼西亚的 Mahakam 三角洲的发育. Mahakam 三角洲为河流堆积前展和潮流侵蚀改造同时进行, 形成多瓣状扇体. 也不像巴西的 Sao Francisco 三角洲, 在全新世为河流输送沉积物而波浪和风进行再堆积, 形成大量的海滩砂体和砂丘. 也不同于非洲的 Niger 三角洲, Niger 三角洲的发育为河流、波浪、潮流和风同时进行, 三角洲边缘发育滨外

坝-泻湖体系. 与我国著名的长江三角洲全新世环境演变的特点也很不相同. 长江三角洲在全新世以 6 期砂体(6 个亚三角洲)逐渐向东堆积、发展为特征, 这些河口沙坝迫使河流分叉, 而且南汉发展、北汉淤塞, 江口向南偏移. 更与为径流游荡型圆弧状的黄河三角洲不同. 全新世古珠江河口湾中大大小小的基岩岛屿对珠江三角洲的发育演变有着深刻的影响和重要作用^[40,50]. 一方面成为沉积核心, 另一方面也导致网河分叉, 更具特色是构成了峡口地形. 海洋动力和河流动力受到原始地形重大的重塑, 泥沙运动和沉积受到深刻影响. 三角洲的发育不再是简单的自北向南, 而是在盆地中不同区域形成若干相对独立的充填过程. 不同区域的沉积体独立并行发展. 在演变过程中的沉积模型既有河口拦门沙体沉积、岛屿周边沉积、平行水道出口沉积, 还有独特的“门”的双向射流沉积^[50]. 总体上说珠江三角洲是一个多源复合, 盆地地貌控制的三角洲, 不同尺度河流沉积体独立并行发展, 复合而成的三角洲. 这反映了海洋与河流动力在复杂地形边界的河口湾中在高水位体系域以来的一个极其复杂的‘动力-沉积-地形’过程. 这一发现对于今后珠江三角洲的研究有重要的认识意义. 增加了三角洲研究的新的内容和提出一种新的三角洲发育模式. 最近已提出几种类型的三角洲模式和分类^[31,32,51], 如 Fisher^[51]定义的高建设性和高破坏性三角洲模式, Coleman 和 Wright^[32]所提出的 6 个独立三角洲模式, Galloway^[31]的潮控、浪控、河控三角洲模式, 各具特色. 不过它们也具有共同的特点: (1) 模式都是建立在河流经海岸平原直接注入开阔浅海陆架而形成的三角洲堆积基础上的; (2) 都强调不同优势动力性质下(河流优势、潮汐优势、波浪优势)的三角洲沉积形态特征, 并以此进行分类. 当三角洲的堆积是在开阔的陆架时, 他们的模式都可以起到作为对比的标准、水动力解释的基础和新的地质环境的“预测者”的作用. 但是, 当河流不是流入开阔的浅海而是流入构造和地貌复杂的半封闭海盆且包括侧向和底边的边界对动力条件有重大的重塑改造作用时, 问题变得更加复杂. 受水盆地边界本身的作用和变化就可能成为研究三角洲演变时需要考虑的重要因素. 建立一种适用于复杂边界控制下三角洲的发育演变模式或是以现代的有代表性三角洲建立一个事实模式(actual models), 并以此提出更为全面的三角洲分类模式, 就成为一个需要解决的问题.

此外,世界许多三角洲的演变基本是纯自然力的,人类的作用甚微或只在近百年才有一定作用.珠江三角洲则不同,近两千年来,由于人工修筑堤围和不断围垦,人类对三角洲的环境演变有较大作用.三角洲的演变进入了一个有自然力和人类活动共同作用的发展阶段.

5 结论

珠江三角洲全新世沉积物覆盖在末次冰期冰盛期形成的风化侵蚀面与底砾层之上.最大海侵面位于松软海相淤泥层位.但在受潮汐冲刷区域,最大海侵面表现为侵蚀面.全新世沉积层序自下向上在古河谷为河流相、河漫滩-河口湾相、河口湾-三角洲相,在古河间地为滨海相、河口湾相和三角洲相.全新世沉积层垂向堆积序列绝大部分表现为下粗上细的正向序列,而不是下细上粗的反向序列,后者被认为是进积型三角洲的经典模式序列.也不具有典型Gilbert三角洲的斜积层、顶积层等沉积层序.受控于

独特而复杂的地貌边界,古珠江河口湾在高水位体系域的演变模式与世界其他大型三角洲不同,而是多源复合,不同尺度河流沉积体独立并行发展,最后复合成现代珠江三角洲.

受全新世海平面变化的影响,全新世以来珠江三角洲的演变可以分为5个阶段:第一阶段12~8 ka BP,全新世海侵未达三角洲中部地区,直至约9 ka BP以后,南部一些地势较低的地区才开始受海进影响,出现一些海陆交互相沉积;第二阶段8~6 ka BP,海面快速上升,珠江三角洲大部分地区接受海进沉积;第三阶段6~4 ka BP,全新世海侵达到盛期,古珠江三角洲地区大面积为河口湾,且受系列岛屿的阻隔分为两部分,上部是与河流相接的半封闭的内古海湾;下部是与海洋相接的外古海湾,两部分仅由若干峡口相通,河流沉积物主要在内古河湾中堆积充填;第四阶段4~2 ka BP,在复杂边界对河流与海洋动力的重塑和改造作用下,内古海湾各区域的沉积同时进行,独自发展;第五阶段2 ka BP至今,该阶段三角洲的演变已不再是单纯的自然过程,而是自然和人类共同塑造过程.

致谢 本文在写作过程中承蒙中国科学院南海海洋研究所赵焕庭研究员、高雄中山大学海洋地质暨化学研究所刘祖乾教授和广州中山大学科学系刘春莲教授以及审稿人提出宝贵意见,在此表示衷心感谢.

参考文献

- 1 Fisk H N. Sand facies of recent Mississippi Delta deposit. In: Fourth World Petroleum Congress. Rome: Proceedings Section 1/C, 1955. 377-398
- 2 Coleman J M, Galinano S M. Cyclic sedimentation in the Mississippi River deltaic plain, Gulf. Coast Assoc Geol Soc Trans, 1964, 14: 67-80
- 3 Frazier D E. Recent deltaic deposits of the Mississippi River: Their development and chronology, Gulf. Coast Assoc Geol Soc Trans, 1967, 17: 287-315
- 4 Van Andel T H, Curray J R. Regional aspects of modern sedimentation in northern Gulf of Mexico and similar basins, and paleogeographic significance. In: Shepard F P, Pheger F B, Van Andel T H, eds. Recent Sediments, Northwest Gulf of Mexico. Tulsa: American Association Petroleum Geologists, 1960. 345-364
- 5 Zalat A A. Diatoms from the Quaternary sediments of the Nile Delta, Egypt, and their palaeoecological significance. J Afr Earth Sci, 1995, 20: 133-150
- 6 Allen J R L. Late Quaternary Niger delta and adjacent areas: Sedimentary environments and lithofacies. AAPG Bull, 1965, 49: 547-600
- 7 Oomkens E. Depositional sequences and sand distribution in the postglacial Rhone delta complex. In: Morgan J P, ed. Deltaic Sedimentation Modern and Ancient. SEPM Spec Pub, 1970, 15: 198-212
- 8 Boyer J, Duvail C, Strat P L, et al. High resolution stratigraphy and evolution of the Rhone delta plain during Postglacial time, from subsurface drilling data bank. Mar Geo, 2005, 222: 267-298
- 9 Bondesan M, Favero V, Cinali M J. New evidence on the evolution of the Po-delta coastal plain during the Holocene. Quat Int, 1995, 29: 105-110
- 10 Nittrouer C A, Kuehl S A. Geological significance of sediment transport and accumulation on the Amazon continental shelf. Mar Geol, 1995, 125: 175-399

- 11 Milliman J D, Summerhayes C P, Barreto H T. Quaternary sedimentation on the Amazon continental margin: A model. *Geol Soc Am Bull*, 1975, 86: 610–614
- 12 高善明. 黄河三角洲形成和沉积环境. 北京: 科学出版社, 1989. 1–246
- 13 蔡明理, 王颖. 黄河三角洲发育演变及对渤、黄海的影响. 南京: 河海大学出版社, 1999. 1–228
- 14 Saito Y, Wei H, Zhou Y, et al. Delta progradation and chenier formation in the Huanghe (Yellow River) delta, China. *J Asian Earth Sci*, 2000, 18: 489–497
- 15 Chen J. Topographical evolution of the Yangtze Estuary. In: Chen J, Shen H, Yu C, eds. *Hydrodynamics and Geomorphological Evolution of the Yangtze Estuary*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1989. 38–47
- 16 Li C X, Wang P, Sun H P, et al. Late Quaternary incised-valley fill of the Yangtze delta (China): Its stratigraphic framework and evolution. *Sediment Geol*, 2002, 152: 133–158
- 17 Hori K, Saito Y, Zhao Q H, et al. Evolution of the coastal depositional systems of the Changjiang (Yangtze) river in response to late Pleistocene-Holocene sea-level changes. *J Sediment Res*, 2002, 72: 884–897
- 18 Goodbred S L, Kuehl S A. Late Quaternary evolution of the Ganges-Brahmaputra River delta: Significance of high sediment discharge and tectonic processes on margin sequence development. *Sediment Geol*, 2000, 133: 227–248
- 19 Tanabe S, Hori K, Saito Y, et al. Song Hong (Red River) delta evolution related to millenium-scale Holocene sea-level changes. *Quat Sci Rev*, 2003, 22: 2345–2361
- 20 Funabiki A, Haruyama S, Quy N V, et al. Holocene delta plain development in the Song Hong (Red River) delta, Vietnam. *J Asian Earth Sci*, 2007, 30: 518–529
- 21 Ta T K O, Nguyen V L, Tateishi M, et al. Holocene delta evolution and sediment discharge of the Mekong river, southern Vietnam. *Quat Sci Rev*, 2002, 21: 1807–1819
- 22 Tamura T, Saito Y, Sieng S, et al. Initiation of the Mekong River delta at 8 ka: Evidence from the sedimentary succession in the Cambodian lowland. *Quat Sci Rev*, 2009, 28: 327–344
- 23 Carbonel P, Moyes J. Late Quaternary paleoenvironments of the Mahakam delta, Kalimantan, Indonesia. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeocl*, 1987, 61: 265–284
- 24 Storms J E A, Hoogendoorn R M, Dam R A C, et al. Late-Holocene evolution of the Mahakam delta, East Kalimantan, Indonesia. *Sediment Geol*, 2005, 180: 149–166
- 25 Roy P S. New South Wales Estuaries: Their Origin and Evolution. In: Thom B G, ed. *Coastal Geomorphology in Australia*. Sdney: Academic Press, 1984. 99–121
- 26 Dalrymple R W, Zaitlin B A, Boyd R. Estuarine facies models, conceptual basis and stratigraphic implications. *J Sediment Petrol*, 1992, 62: 1130–1146
- 27 Allen G P, Posamentier H W. Sequence stratigraphy and facies model of an incised valley fill: The Gironde Estuary, France. *J Sediment Petrol*, 1993, 63: 378–391
- 28 Heap A D, Bryce S, Ryan D A. Facies evolution of Holocene estuaries and deltas: A large-sample statistical study from Australia. *Sediment Geol*, 2004, 168: 1–17
- 29 Wilson K, Berryman K, Cochran U, et al. A Holocene incised valley infill sequence developed on a tectonically active coast: Pakarae River, New Zealand. *Sediment Geol*, 2007, 197: 333–354
- 30 Wright L D, Coleman J M. Variations in morphology of major river deltas as a functions of ocean wave and river discharge regimes. *AAPG Bull*, 1973, 57: 370–398
- 31 Galloway W E. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems. In: Broussard M L, ed. *Deltas: Models for Exploration*. Houston: Houston Geological Society, 1975. 87–98
- 32 Coleman J M, Wright L D. Modern river deltas: Variability of process and sand bodies. In: Broussard M L, ed. *Deltas: Models for Exploration*. Houston: Houston Geological Society, 1975. 99–149
- 33 Orton G J, Reading H G. Variability of deltaic processes in terms of sediment supply, with particular emphasis on grain size. *Sedimentology*, 1993, 40: 475–512
- 34 Wright L D. Sediment transport and deposition at river mouths: A synthesis. *Geol Soc Am Bull*, 1977, 88: 857–868
- 35 Wright L D, Coleman J M. Mississippi River mouth processes: Effluent dynamics and morphologic development. *J Geol*, 1974, 82: 751–778
- 36 Hubbard G D. The Pearl River delta. *Lingnan Sci J*, 1929, 7: 23–34
- 37 Heim A. Fragmentary observations in the region of Hong Kong, compared with Canton, *Ann Rept Geol Surv*, 1929, 2: 1–32

- 38 陈国达. 广州三角洲问题. 科学, 1934, 18: 356-364
- 39 吴尚时, 曾昭璇. 珠江三角洲. 岭南学报, 1947, 8: 105-122
- 40 吴超羽, 包芸, 任杰, 等. 珠江三角洲及河网形成演变的数值模拟和地貌动力学分析: 距今 6000~2500 a. 海洋学报, 2006, 28: 64-80
- 41 黄镇国, 李平日, 张仲英, 等. 珠江三角洲形成发育演变. 广州: 科学普及出版社广州分社, 1982. 1-274
- 42 李平日, 乔彭年, 郑洪汉, 等. 珠江三角洲一万年来环境演变. 北京: 海洋出版社, 1991. 1-154
- 43 曾昭璇, 黄少敏. 珠江三角洲历史地貌学研究. 广州: 广东高等教育出版社, 1987. 1-201
- 44 龙云作. 珠江三角洲沉积地质学. 北京: 地质出版社, 1997. 1-165
- 45 赵焕庭. 珠江河口演变. 北京: 海洋出版社, 1990. 1-357
- 46 Zong Y Q. Mid-Holocene sea-level highstand along the Southeast Coast of China. Quatern Int, 2004, 117: 55-67
- 47 韦惺. 全新世以来珠江三角洲的沉积演变模式研究. 博士学位论文. 广州: 中山大学, 2010. 1-210
- 48 Gilbert G K. Lake Bonneville. U.S. Geological Survey Monograph, 1890. 1-438
- 49 陈欣树, 包砺彦, 陈俊仁, 等. 珠江口外陆架晚第四纪最低海面的发现. 热带海洋, 1990, 9: 73-77
- 50 吴超羽, 任杰, 包芸, 等. 珠江河口“门”的地貌动力学初探. 地理学报, 2006, 61: 537-548
- 51 Fisher W L. Facies characterization of Gulf Coast Basin delta systems with some Holocene analogues. Trans Gulf-Cst Ass Geol Socs, 1969, 19: 239-261