

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019012901

# 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

潘大东<sup>1,2</sup>, 王张华<sup>1,3</sup>

1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241
2. 闽南师范大学历史地理学院, 漳州 363000
3. 华东师范大学城市发展研究院, 上海 200062

**摘要:** 通过整理东亚、南亚典型河口三角洲末次冰消期以来演化历史的研究进展, 对比各河口晚第四纪地层结构、沉积体系演替和三角洲开始建造的时间, 分析其沉积历史的主要控制因素。结果显示, 末次冰消期以来各河口具相似的地层结构和演变过程, 即早全新世下切河谷充填和河口湾发育, 中—晚全新世三角洲建造, 该过程主要受海平面变化的控制。但是各河口地层结构和沉积历史也存在差异, 其中以三角洲开始建造的时间差别最为明显。对比发现这种差异与流域地貌、基岩以及河口沉积盆地的差别有关。流程短、流域基岩易侵蚀的河流, 入海泥沙量大, 其三角洲开始建造的时间显著早于其他河流, 其中以恒河三角洲最为典型。另外, 以珠江三角洲为典型, 其半封闭、基底浅的河口沉积盆地特征, 也有助于中全新世湾顶三角洲的建造。

**关键词:** 沉积体系; 三角洲建造时间; 海平面; 入海泥沙量; 河口沉积盆地

中图分类号: P534.63

文献标识码: A

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

PAN Dadong<sup>1,2</sup>, WANG Zhanghua<sup>1,3</sup>

1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China
2. School of History and Geography, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China
3. Institute of Urban Development, East China Normal University, Shanghai 200062 China

**Abstract:** Based on the researches on the evolution of megadeltas in East and South Asia since last deglaciation, we carried out a comparative study on the Late Quaternary stratigraphic architecture, sedimentary systems and the initiation time of megadeltas at large river mouths of the region. Major control factors on deltaic evolution are revealed and discussed. Our data suggests that all the river mouths in the region seem having experienced similar evolutionary history, including the infilling of incised palaeo-valleys and estuaries in Early Holocene, and deltaic progradation in Middle to Late Holocene, controlled by the sea-level change. However, there are some differences in the stratigraphic architecture and sedimentary history from river to river. The most remarkable difference is the time of delta initiation, which is related to the geomorphology and geology of the drainage basin and the sedimentary basin at river mouths. Those rivers having short flow paths and erosive bedrocks in the drainage basin, such as the Ganges-Brahmaputra, usually produce a huge amount of sediment load. As a result, the time of the delta initiation was obviously earlier than other rivers. The Pearl River delta is another example. It has a semi-closed shallow sedimentary basin which is beneficial to the formation of delta in the Middle Holocene.

**Key words:** sedimentary system; delta initiation; sea level; sediment load; sedimentary basin

河口三角洲是陆海相互作用的关键地带, 是海岸带研究的重点区域。世界三角洲的研究始于 19 世纪末 20 世纪初, 前人将三角洲沉积体划分为顶积层、前积层和底积层<sup>[1]</sup>, 提出三角洲的范围包括

三角洲平原和水下三角洲, 三角洲既有陆相沉积又有海相沉积<sup>[2]</sup>。到 20 世纪 60—90 年代, 大量研究工作集中在三角洲的沉积旋回、三角洲类型以及三角洲初始发育、建造过程和沉积特征等方面深入开展。

资助项目: 闽南师范大学博士科研启动费“末次冰消期以来九龙江三角洲年代地层框架和沉积相演变”(4103L21710)

作者简介: 潘大东(1983—), 男, 博士, 讲师, 主要从事河口-三角洲沉积地貌与第四纪环境研究, E-mail: dadongdedou@163.com

通讯作者: 王张华(1973—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事河口-三角洲古环境研究, E-mail: zhwang@geo.ecnu.edu.cn

收稿日期: 2019-01-29; 改回日期: 2019-03-07. 周立君编辑

研究发现三角洲的沉积体具有旋回性, 即进积建造和退积破坏, 其中进积的三角洲在垂向上表现为向上变粗的沉积序列<sup>[3]</sup>。研究者根据三角洲砂体分布和垂向沉积相变特征及河流、波浪、潮汐动力相对强弱对三角洲进行分类<sup>[4]</sup>, 将世界三角洲划分为河控三角洲、波控三角洲和潮控三角洲<sup>[5]</sup>。20世纪90年代以来, 得益于<sup>14</sup>C测年技术的广泛应用, 以及全球变化科学和层序地层学的发展, 河口区域冰后期的沉积历史和地层结构成为国际研究热点。研究显示, 受海平面变化控制, 世界上现代主要三角洲发育的时间集中于8500~6500年前<sup>[6]</sup>。随后大量研究都将海平面变化作为最主要的控制因子, 分析三角洲地区的晚第四纪地层结构<sup>[7-14]</sup>。

末次冰消期以来, 全球气候逐渐变暖, 除两极和高山以外, 欧洲、北美洲冰盖大部分消融, 导致全球平均海平面上升了 $120\pm 5$  m<sup>[15-21]</sup>(图1)。而且, 冰消期以来的海平面变化较为复杂, 存在数次冰融水事件(MWP- Melt Water Pulse), 期间全球海平面跳跃式上升。如发生在约14.2~13.7 cal.kaBP的MWP-1A事件, 500年时间海平面上升了约19 m, 上升速率达38 mm/a; 发生于11.5~11.0 cal.kaBP的MWP-1B事件, 500年时间海平面上升了约15 m, 平均上升速率达到30 mm/a<sup>[15,22]</sup>(图1)。早全新世海平面继续快速上升, 平均上升速率超过10 mm/a<sup>[8,15]</sup>(图1)。到大约7000年前, 全球海平面趋于稳定。海平面的快速上升导致现今大陆架的广大区域被海水淹没, 河口大幅度后退, 河口的沉积历史和地层结构也因此深受影响<sup>[6,23]</sup>。

气候波动影响河流入海淡水量和泥沙量, 从而影响河口沉积动力和沉积物堆积速率, 因此也是三角洲地区沉积历史和地层结构的重要影响因素<sup>[13,24]</sup>。前人研究显示, 亚洲七大主要河口三角洲的发育规模与流域沉积物入海通量呈显著正相关<sup>[25]</sup>。亚洲特别是东亚、南亚地区受季风作用, 全新世以来降水量波动显著<sup>[26-29]</sup>。其变化历史主要包括在全新世初期迅速增强, 并于约10~6 cal.kaBP处于强盛时期, 约6 cal.kaBP以来开始衰退, 约2 cal.kaBP以来有所复苏<sup>[27-29]</sup>。

由于海平面、季风气候的变化具有全球性或区域性的共同规律, 那么受海平面、季风作用的各河口-三角洲沉积历史和地层结构应该具有相似性。同时, 由于流域和受水盆地的差异性, 每个三角洲的地层结构又具有其独特性。弄清楚这些问题有助于掌握河口-三角洲演变的普遍规律, 也有助于预测其未来变化。亚欧大陆为全球最大的大陆, 数条

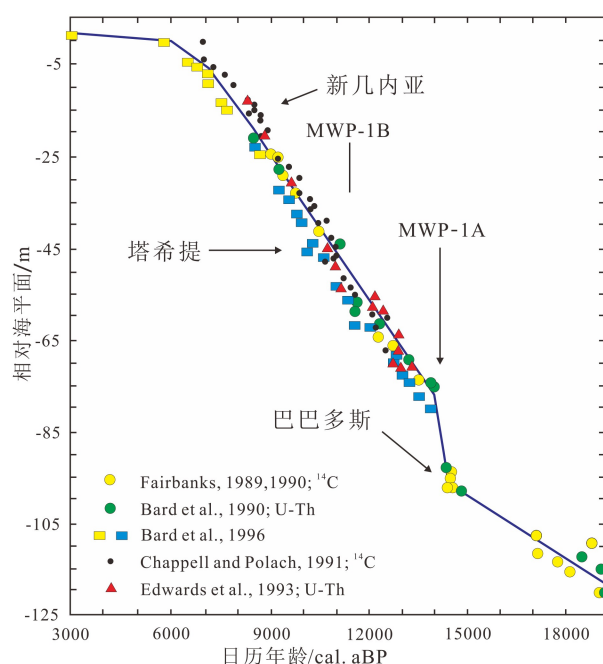


图1 珊瑚礁记录的末次盛冰期以来全球海平面波动<sup>[15]</sup>

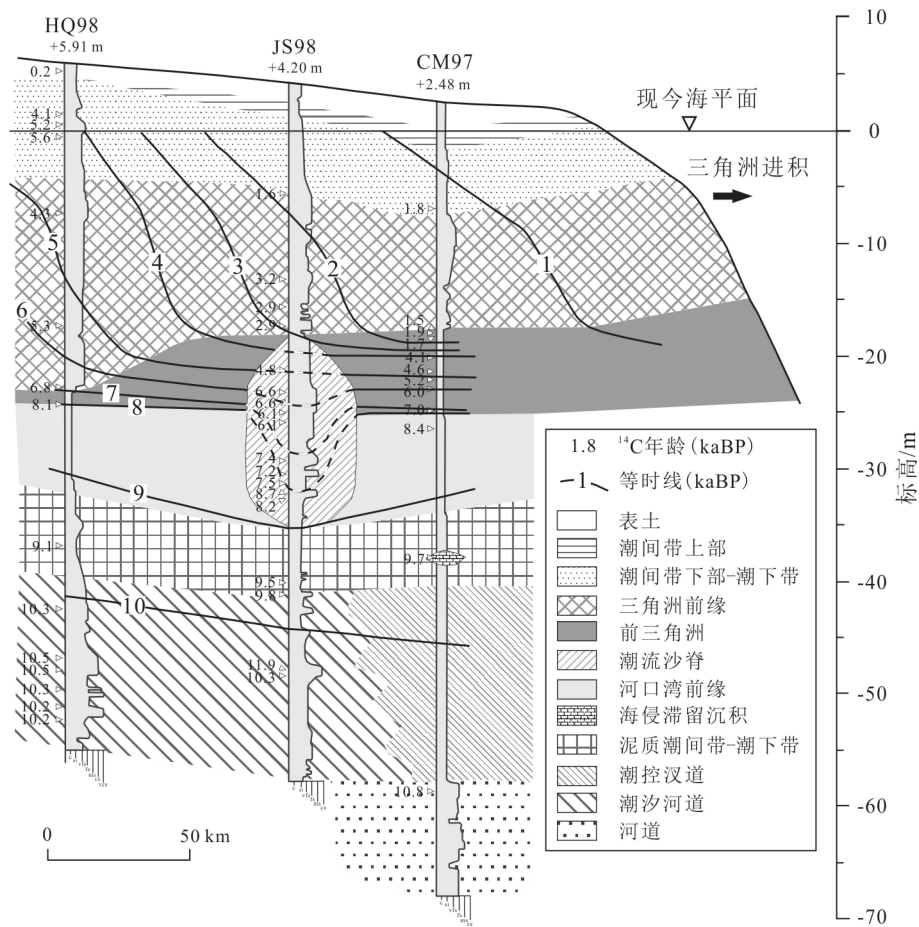
Fig.1 Sea-level fluctuation curve since the Last Glacial Maximum from coral reef<sup>[15]</sup>

世界性大河发源于其内部高原, 如长江、黄河、湄公河、恒河发源于青藏高原, 珠江、红河发源于云贵高原。同时, 这些河流都受东亚和南亚季风气候影响, 降水量丰富, 携带大量泥沙, 入海形成重要的三角洲。其中长江三角洲<sup>[9,30-34]</sup>、珠江三角洲<sup>[13,35]</sup>、红河三角洲<sup>[7,10,36]</sup>、湄公河三角洲<sup>[11-12,37-39]</sup>和恒河-布拉马普特拉河三角洲<sup>[4]</sup>这5个大河三角洲, 目前已经有大量的研究成果出版, 包括沉积相分析、年代地层学和层序地层学等。黄河三角洲虽然也有大量研究成果<sup>[40-44]</sup>, 但是由于其河口有多次长距离迁徙<sup>[45]</sup>, 三角洲地层结构变得特殊。因此, 本文试图通过对比长江、珠江、红河、湄公河、恒河这5个潮汐作用显著的大河三角洲的晚第四纪地层结构和沉积演化历史, 分析其相似性和差异性, 并探讨差异性的主要影响因素。

## 1 东亚、南亚主要大河河口晚第四纪地层结构和沉积演变

### 1.1 长江三角洲

长江三角洲河口堆积主体位于长江下切古河谷之内, 末次冰消期以来的沉积厚约70 m<sup>[30,32]</sup>(图2, 3a)。下切古河谷的晚第四纪地层自下而上依次为: ① 河流沉积体系, 以河床滞留相沉积为主, 为低

图2 长江三角洲纵向地层剖面<sup>[32]</sup>

(图中年龄未经日历校正)

Fig.2 Stratigraphy of a longitudinal cross section of the Yangtze delta<sup>[32]</sup>

(Ages not calibrated.)

水位体系域,多形成于12~13 cal.kaBP之前;②潮控河口湾沉积体系,包括潮汐河道、潮控汉道、淤泥质潮间带-潮下带、河口湾前缘等沉积相,为海侵体系域,多形成于12~8 cal.kaBP;③三角洲沉积体系,形成于8 cal.kaBP以来,并且自大约6 cal.kaBP向海进积,为高水位体系域(图3b)。

长江三角洲的全新世沉积历史,存在几次重要事件<sup>[46]</sup>(图3a)。首先,10~8 cal.kaBP期间,河口沉积体系快速向陆后退,同时伴随普遍的侵蚀现象;第二,约8 cal.kaBP三角洲开始发育,使沉积体重新向海大幅度伸展;第三,约6 cal.kaBP,水下三角洲沉积体再次显著向陆后退;第四,约2 cal.kaBP,三角洲向海进积速率显著增大。

## 1.2 珠江三角洲

珠江三角洲基岩埋深较浅,末次冰期古河谷的下切深度一般不超过50 m<sup>[13]</sup>(图4)。基岩上覆盖的晚第四纪地层自下而上依次为:晚更新世砂砾沉

积,早全新世下切古河谷充填沉积,中晚全新世三角洲沉积。其沉积演化历史主要分为4个阶段<sup>[13]</sup>(图5):末次冰期,河流下切晚更新世地层(图5a);约1万年前MWP-1B结束后,海水开始进入下切古河谷(图5b);早全新世下切古河谷快速充填(图5c);自大约8.5~7 cal.kaBP,海水溢出下切古河谷,淹没宽广的三角洲盆地(图5d),珠江河口因此后退至三角洲盆地顶点,并于大约8 cal.kaBP开始建造三角洲沉积体。

在上述沉积演变过程中,值得注意的是,9 cal.kaBP之前,海水作用仅局限于下切古河谷,而此时季风强盛,河川径流量大,因此下切古河谷内河流作用强盛。到8 cal.kaBP,海水淹没了整个三角洲盆地,入海淡水径流被分散,潮流作用因此加强,珠江口成为潮控型河口。另外,大约6000年前,由于季风径流减弱,三角洲前积速率放缓;但在过去2000年,人类活动加剧,河流入海泥沙明显增加,海岸线再次快速前进<sup>[35]</sup>。

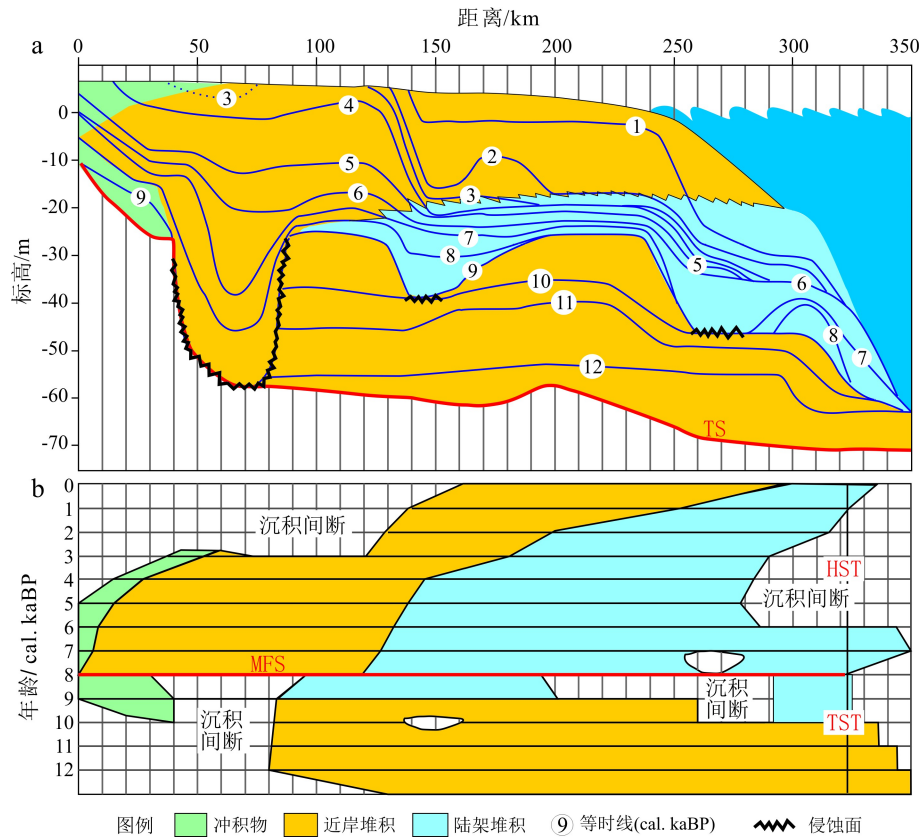


图 3 长江三角洲全新世层序地层结构<sup>[46]</sup>

a. 地层及等时线空间展布; b. 地层 Wheeler 图解。缩写: MFS, 最大海泛面; TS, 海侵面; HST, 高水位体系域; TST, 海侵体系域。

Fig.3 Holocene sequence stratigraphy across the Yangtze River mouth<sup>[46]</sup>

(a) Chronostratigraphic chart. Blue lines represent the chronostratigraphic boundaries. (b) Wheeler diagram. Abbreviation: MFS, Maximum flooding surface; TS, transgressive surface; HST, highstand systems tract; TST, transgressive systems tract.

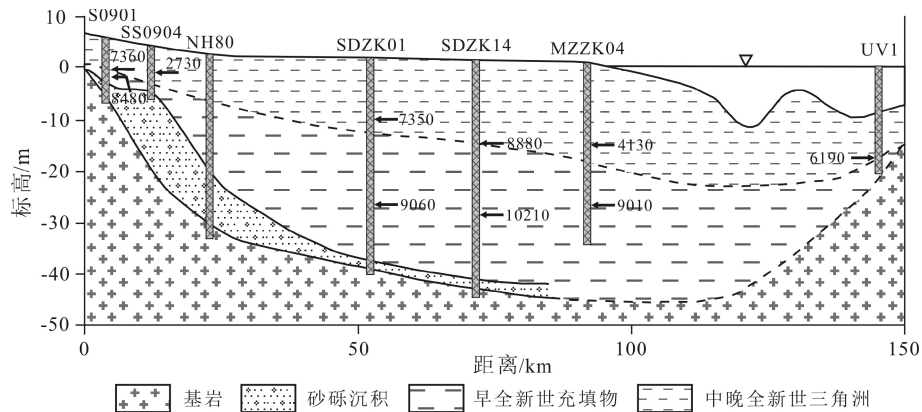


图 4 珠江三角洲典型纵向地层剖面<sup>[13]</sup>

箭头所指年龄均已校正(cal. kaBP)

Fig.4 Longitudinal cross-section with calibrated ages for the Pearl River deltaic complex<sup>[13]</sup>

### 1.3 红河三角洲

末次冰消期以来, 红河三角洲下切河谷自下而上的地层也由河道相、潮控河口湾相和三角洲相组成<sup>[10]</sup>(图 6)。14.5 cal.kaBP 之前为低水位体系域(图 6b),

14.5~9 cal.kaBP 为海侵体系域(图 6b, c), 9 cal.kaBP 以来为高水位体系域(图 6b, c)。其海侵体系域主要由潮汐河道、潟湖、潮滩、盐沼和河口湾前缘等沉积相组成(图 6b)。自 9 cal.kaBP 三角洲开始建造以来, 9~2 cal.kaBP 红河入海泥沙主要沉积于基岩

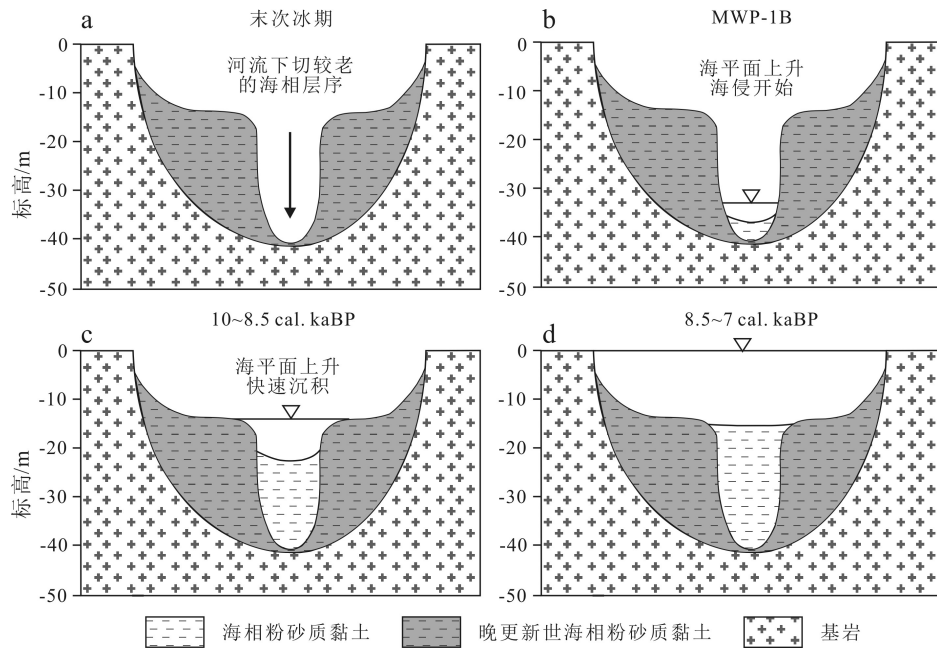


图5 珠江河口晚第四纪—早全新世沉积环境演化的主要阶段<sup>[13]</sup>

Fig.5 Evolutionary stages of the Pearl River mouth during Late Pleistocene to Early Holocene<sup>[13]</sup>

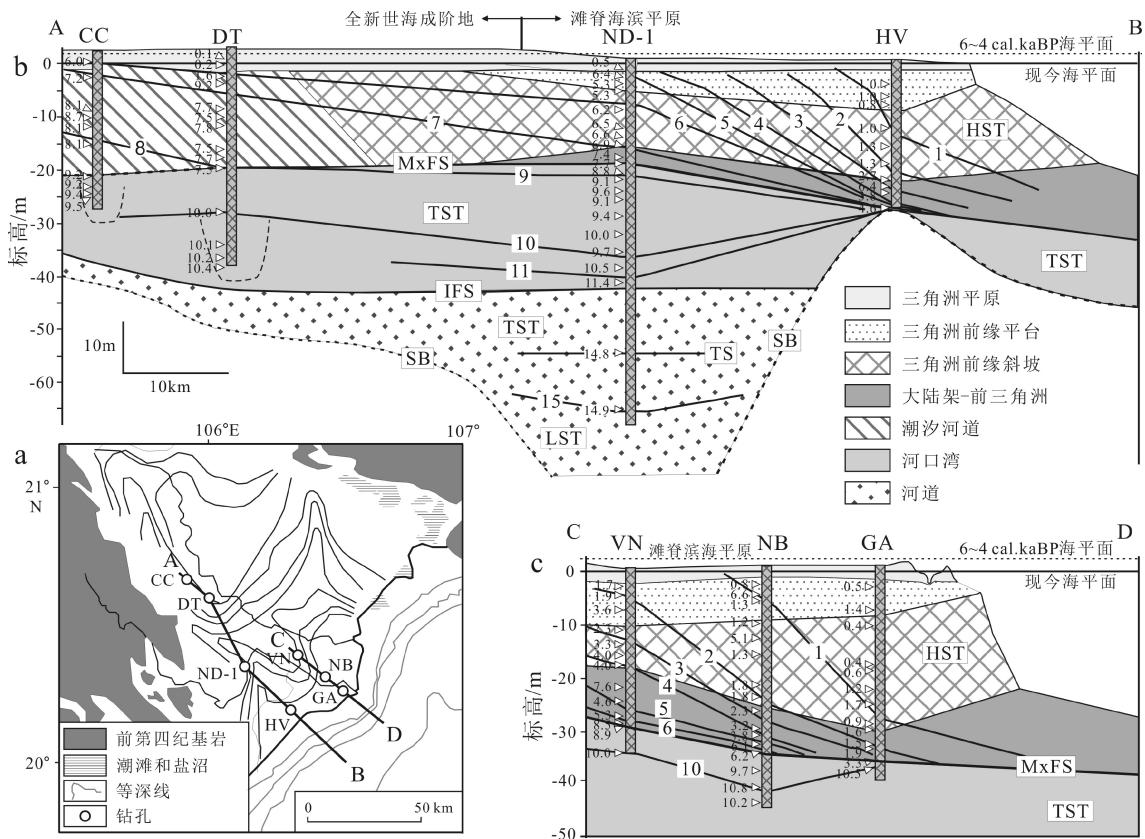


图6 红河三角洲冰后期沉积物 A-B 和 C-D 纵剖面层序地层解释<sup>[10]</sup>

缩写: MxFS, 最大海泛面; TS, 海侵面; HST, 高水位体系域;

TST, 海侵体系域; LST, 低水位体系域; IFS, 初始海泛面; SB, 层序边界。

Fig.6 Sequence stratigraphy of the post-LGM sediments of the longitudinal sections A-B and C-D<sup>[10]</sup>

Abbreviation: MxFS, Maximum flooding surface; TS, transgressive surface; HST, highstand systems tract;

TST, transgressive systems tract; LST, lowstand systems tract; IFS, initial flooding surface; SB, sequence boundary.

控制的漏斗形河口(图 6a)。2 cal.kaBP 之后, 三角洲沉积体向口外进积, 形成向海突出的舌状体(图 6a)。推测此种变化与人类活动导致的输沙量剧增有关, 前人估算红河输沙量 9~2 cal.kaBP 为  $(17\sim 27)\times 10^6$  t/a, 近 2 000 年则达到  $49\times 10^6$  t/a<sup>[10]</sup>。

#### 1.4 湄公河三角洲

湄公河三角洲晚第四纪地层自下而上依次为: 13.0~9.5 cal.kaBP, 河流沉积物充填下切古河谷; 9.5~8.0 cal.kaBP, 河口湾沉积; 8.0 cal.kaBP 以来, 三角洲沉积<sup>[39]</sup>(图 7)。在其沉积演化史中, 特别值得注意的是, 9.5 cal.kaBP 之前, 海侵和沉积作用均被限制在狭长的下切古河谷(图 8a-c); 而 9.5 cal.kaBP 之后, 由于海平面的快速上升, 河口大幅度后退, 今湄公河三角洲所在区域均被海水淹没, 成为喇叭形的大型河口湾(图 8d), 使海洋作用大为增强。大约 8 000 年前三角洲开始建造后, 随着海岸线向海推进, 波浪作用加强, 自大约 3 500 年前开始, 在海岸带形成系列滩脊<sup>[47]</sup>。

#### 1.5 恒河-布拉马普特拉河三角洲

在恒河-布拉马普特拉河河口的锡尔赫特盆地, 全新世地层厚度接近 100 m(图 9), 是区别于其他三角洲的典型特征。其海侵地层厚约 50 m<sup>[14]</sup>(约 11~8 cal.kaBP), 以垂向加积作用为主; 三角洲陆上区域的高水位体系域厚度也达到约 40 m<sup>[14]</sup>(约 8~0 cal.kaBP)。由于海侵地层的加积特征, 前人认为

该河口于 11~10 cal.kaBP 就开始建造河成三角洲<sup>[14]</sup>(图 9)。三角洲的西部主要受恒河泥沙供应, 于 7 cal.kaBP 左右开始向海进积, 河流输入的细颗粒悬沙穿过陆上三角洲在大陆架上形成一个前积的三角洲前缘斜坡, 而在三角洲平原上主要形成河道相砂体。此时三角洲的东部, 布拉马普特拉河的泥沙仍主要沉积在内陆构造盆地, 邻近陆架缺少沉积物供应, 海岸带继续发生海侵。5 cal.kaBP 左右, 恒河与布拉马普特拉河改道并在三角洲东部海岸带汇合入海, 使三角洲东部区域进积到现在的河口位置。

## 2 典型河口全新世沉积历史演变的主要影响因素

### 2.1 海平面变化的控制作用

上述各大三角洲的晚第四纪地层, 大多由低水位体系域河流相沉积、海侵体系域河口湾相沉积以及高水位体系域三角洲相沉积组成, 而且高水位体系域三角洲开始建造的时间, 大多开始于 9~8 cal.kaBP(表 1)。这种相似性受控于全球海平面变化。早全新世<sup>[48]</sup>(11.7~8.2 cal.kaBP)海平面快速上升, 上升速率  $> 10$  mm/a(图 1), 而且各河口下切古河谷和三角洲盆地均被海水快速淹没, 成为宽广的河口湾, 因此河流动力弱于海洋动力, 发育河口湾沉积体系。自大约 8.2 cal.kaBP, 海平面上升速率明显下降<sup>[34]</sup>, 因此海洋作用减弱, 使各河口湾顶开始建造三角

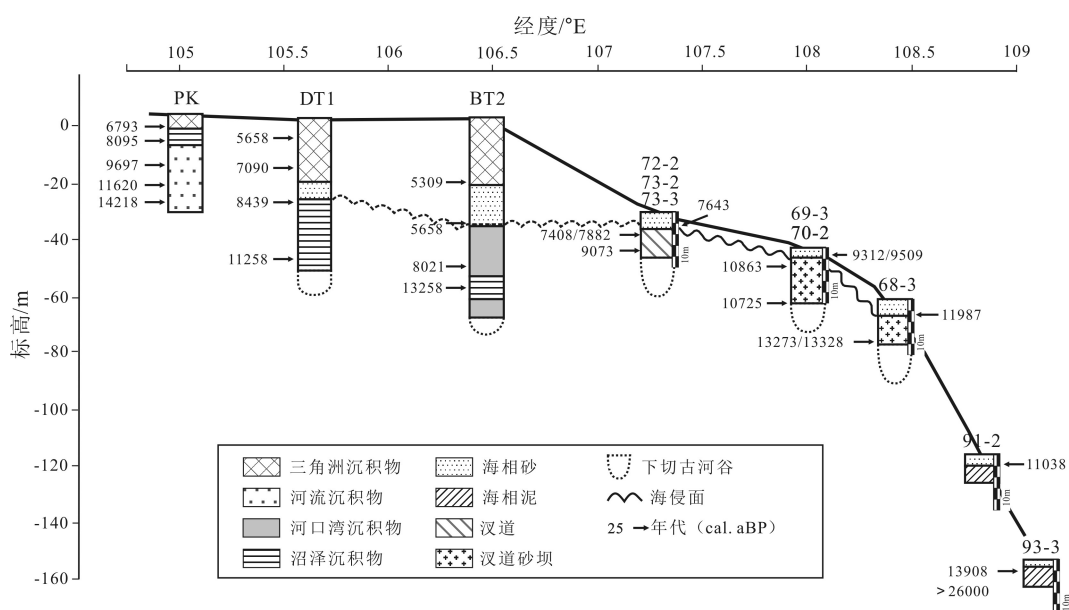


图 7 湄公河三角洲典型纵向地层剖面<sup>[39]</sup>

Fig.7 Longitudinal cross-section for the Mekong incised valley<sup>[39]</sup>

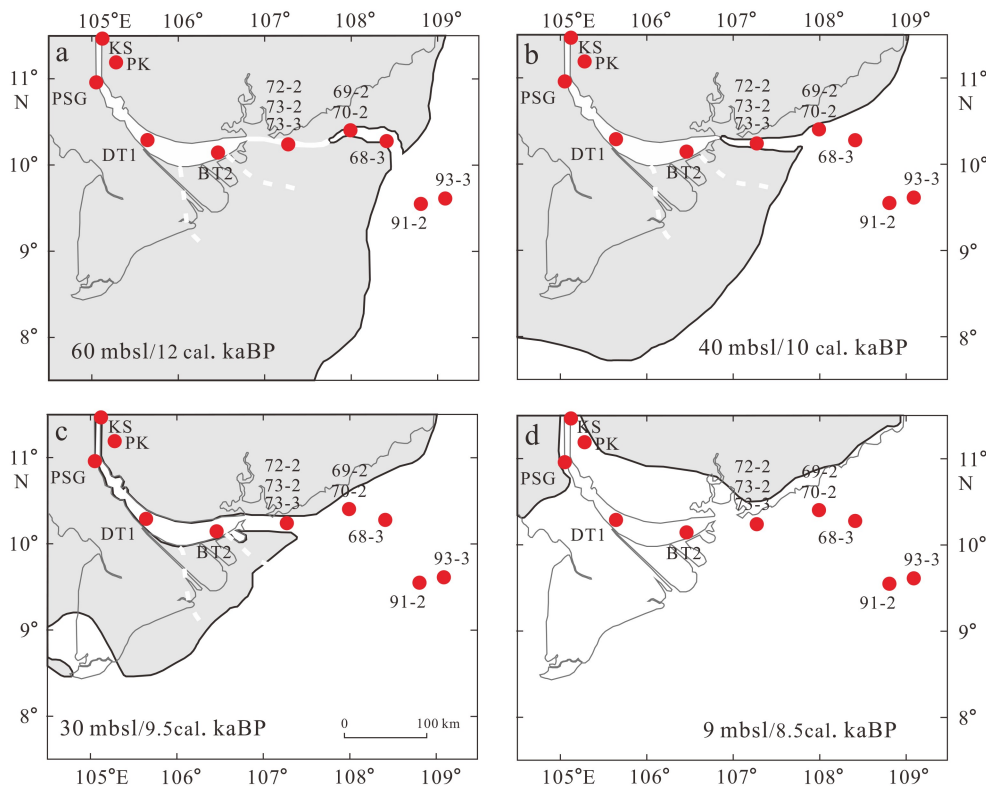


图8 湄公河三角洲和越南东南大陆架在12, 10, 9.5, 8.5 cal.kaBP时的古地理解释<sup>[39]</sup>  
缩写: mbsl, 现今海平面以下米数。

Fig.8 Palaeo-geographical interpretation of the Mekong Delta and southeast Vietnamese shelf at 12, 10, 9.5, and 8.5 cal.kaBP with respect to the present-day coastline<sup>[39]</sup>

Abbreviation: mbsl, meters below modern sea level.

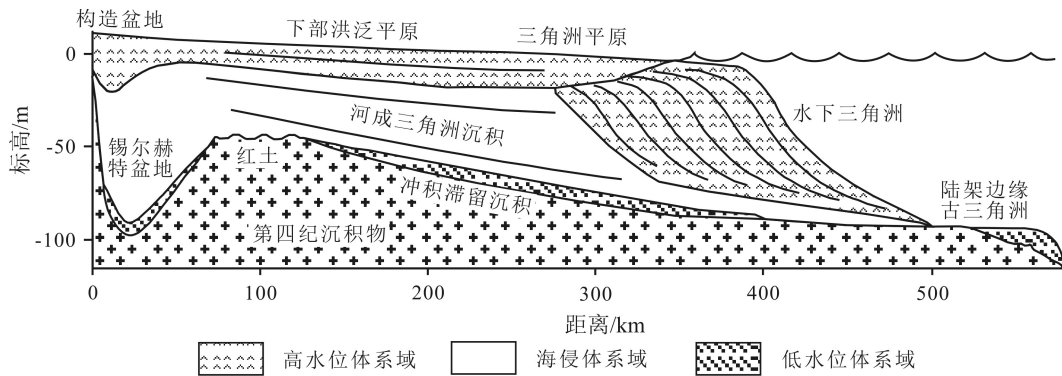


图9 恒河-布拉马普特拉河三角洲晚第四纪层序地层<sup>[14]</sup>

Fig.9 Generalized sequence stratigraphy for the Late Quaternary Ganges-Brahmaputra delta<sup>[14]</sup>

洲。前人对全球36个三角洲年龄进行调查,发现这些三角洲大多自8.5~6.5 cal.kaBP开始建造,与海平面上升速率的下降时间基本一致<sup>[6]</sup>。

海平面上升速率与三角洲建造的关系,从根本上来说,是其与河口沉积速率之间的博弈:当海平面上升速率大于沉积速率,河口的沉积物可容空间发生净增加,海岸线向陆后退,形成河口湾环境;当沉积速率超过海平面上升速率,河口的沉积物可容空间减小,海岸线向海进积,从而有利于三角洲的

发育<sup>[24,49]</sup>。另外,从潮控受水盆地的动力角度来说,海平面上升速率的减小,导致纳潮量增加速率的减小,从而改变河流与潮汐作用的相对强弱,利于沉积物在河口的堆积。

### 2.2 流域对河口演变的影响

前人研究认为恒河三角洲在海侵期间就开始建造,时间为11 cal.kaBP,早于其他三角洲数千年<sup>[14]</sup>;红河三角洲的开始建造时间也略为偏早<sup>[10]</sup>(表1)。

由于河口沉积体系的演变取决于海平面上升速率和泥沙堆积速率之间的平衡关系<sup>[6]</sup>, 因此, 可以推测这两大三角洲的流域泥沙供应充足。对比五条河流的入海年输沙量及悬沙浓度(表 2), 可以看到, 恒河的年输沙量远远大于其他河流, 达到 10 亿 t/a; 恒河与红河的入海悬沙浓度也数倍于其他河流。

这些河流都位于印度洋和太平洋季风区, 气候上具有相似性。因此, 推测导致其输沙量及入海悬沙浓度显著差异的原因, 与流域地貌特征、基岩属性等因素有关。首先, 恒河自青藏高原发源后, 向南快速汇入了孟加拉湾, 河长仅约 2 510 km(表 2)。因此, 恒河具有落差大、流程短的特征, 源区产生的泥沙大多被径流直接输送入海。研究者还估算, 11.5 cal.kaBP 前后由于西南季风比现在更强盛, 恒河的输沙量约为  $2.5 \times 10^9$  t/a, 是现在的 2.5 倍<sup>[14]</sup>。因此, 尽管早全新世海平面快速上升, 恒河巨大的输沙量使沉积物供应和海平面上升相对平衡, 海岸线保持稳定<sup>[14]</sup>, 从而在早全新世就形成巨厚的河控三角洲沉积体(图 8)。相比之下, 同样发源于青藏高原且流域面积相似的长江, 河长超过 6 000 km(表 2); 而且长江入海前要先流经江汉盆地、洞庭湖盆地和鄱阳湖盆地等数个沉积中心<sup>[50]</sup>, 上游产出

的泥沙首先在这些中下游盆地沉积, 导致入海泥沙量显著减少。其次, 流域基岩特征对泥沙产出影响巨大。例如, 发源于云南巍山县的红河, 流域大部分为热带红土, 风化强, 产沙量大。夏季风盛行时, 红河悬沙浓度可达  $12 \text{ kg/m}^3$ <sup>[10]</sup>。而珠江流域内广泛分布碳酸岩, 其风化以溶蚀作用为主, 碎屑泥沙的产出小, 因此入海平均悬沙浓度仅  $0.22 \text{ kg/m}^3$ , 明显低于其他河流(表 2)。

### 2.3 沉积盆地对河口演变的影响

珠江入海泥沙量显著小于其他河流, 但其三角洲也于大约 8 000 年前开始建造, 分析其原因, 可能与其全新世基底地形及海洋动力较弱有关。首先, 其全新世基底地形受基岩限制, 末次冰期下切古河谷的深度均不超过 50 m(图 4, 5), 而其他河口如长江、红河、湄公河等, 下切古河谷的深度均超过 60 m(图 2, 6, 8)。因此, 珠江口在早全新世海水没有溢出下切古河谷之前, 泥沙主要沉积在古河谷之内, 使得下切古河谷得到快速充填。其次, 珠江口为弱潮河口, 平均潮差仅  $0.86 \sim 1.57 \text{ m}$ <sup>[35]</sup>(表 2); 加上河口众多基岩岛屿的限制, 呈现为河口湾的形态, 湾内波浪较弱, 正常天气平均波高  $0.9 \sim 1.9 \text{ m}$ <sup>[35]</sup>。这样的动力条件有利于中全新世海平面上升速率下降之后湾顶三角洲的建造。

## 3 结论

(1) 东亚、南亚五大河口末次冰消期以来的地层多由下切古河谷河流相、河口湾相和三角洲相三个沉积层序组成, 该特征主要受控于海平面变化, 即分别对应低水位体系域、海侵体系域和高水位体系域。

(2) 恒河及红河三角洲的建造时间分别在约 11 000 年前和约 9 000~8 500 年前, 均早于其他大河三角洲在约 8 000 年前开始建造的时间, 这种差

表 1 五大三角洲开始建造时间对比

Table 1 A comparison of delta initiation time in South and East Asian

三角洲	开始建造时间/cal.kaBP	参考文献
长江三角洲	8	[8-9]
红河三角洲	8.5	[7]
	9	[10]
湄公河三角洲	8.0	[11]
	8.2	[12]
珠江三角洲	8.0	[13]
恒河三角洲	11	[14]

表 2 东、南亚五大河流建坝前水文泥沙特征

Table 2 Characteristics of Hydrology and sediment load before dam construction for East and South Asia rivers

河流	流域面积/km <sup>2</sup>	长度/km	年径流量/km <sup>3</sup>	年输沙量/t	数据年份	入海悬沙浓度/kg·m <sup>-3</sup>	河口潮差/m	三角洲面积/km <sup>2</sup>	参考文献
长江	$18 \times 10^5$	6 380	953	$4.8 \times 10^8$	1970	0.54	2.7	40 000	[51]
珠江	$4.3 \times 10^5$	2 214	302	$0.8 \times 10^8$	1987	0.22	0.9~1.6	8 600	[13]
红河	$1.6 \times 10^5$	1 200	120	$1.3 \times 10^8$	1995	1.08	2.0~2.6	10 300	[10]
湄公河	$8 \times 10^5$	4 620	470	$1.6 \times 10^8$	1993	0.34	3.2~4.0	93 781	[39]
恒河	$16 \times 10^5$	2 510	550	$10 \times 10^8$	1992	1.81	3.4~3.8	—	[14]



异性与恒河和红河的流域产沙量大、流程短、源区泥沙多被直接输入海相关。

(3)珠江流域虽然以碳酸盐岩溶蚀为主,产沙量少,但是其古河口湾的湾顶三角洲建造时间不晚于其他三角洲,推测和河口沉积盆地基底地形有关,即受基岩限制,早全新世海水束狭于下切古河谷,使得下切古河谷得到快速充填。加上被基岩包围的古河口湾内海洋动力较弱,因此利于三角洲的建造。

### 参考文献 (References)

- [1] Gilbert G. The topographic features of lake shores [J]. *Nature*, 1886, 34(873): 269-270.
- [2] Barrell J. Criteria for the recognition of ancient delta deposits [J]. *GSA Bulletin*, 1912, 23(1): 377-446.
- [3] Scruton P C. Delta building and the deltaic sequence [M]//Shepard F P, Phleger F B, Van Andel T H. Recent Sediments Northwest Gulf of Mexico. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists Symposium Volume, 1960: 82-102.
- [4] Coleman J M, Wright L D. Modern river delta: variability of processes and sand bodies [M]//Broussard M L. Deltas: Models for Exploration. Houston, TX: Houston Geological Society, 1975: 99-149.
- [5] Galloway W E. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems [M]//Broussard M L. Deltas: Models for Exploration. Houston, TX: Houston Geological Society, 1975: 87-98.
- [6] Stanley D J, Warne A G. Worldwide initiation of Holocene marine deltas by deceleration of sea-level rise [J]. *Science*, 1994, 265(5169): 228-231.
- [7] Hori K, Tanabe S, Saito Y, et al. Delta initiation and Holocene sea-level change: example from the Song Hong (Red River) delta, Vietnam [J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 164(3-4): 237-249.
- [8] 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]. *Journal of Sedimentary Research*, 2002, 72(6): 884-897.
- [9] Song B, Li Z, Saito Y, et al. Initiation of the Changjiang (Yangtze) delta and its response to the mid-Holocene sea level change [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, 388: 81-97.
- [10] Tanabe S, Saito Y, Vu Q L, et al. Holocene evolution of the Song Hong (Red River) delta system, northern Vietnam [J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 187(1-2): 29-61.
- [11] Ta T K O, Nguyen V L, Tateishi M, et al. Holocene delta evolution and depositional models of the Mekong River Delta, southern Vietnam [M]//Giosan L, Bhattacharya J P. River Deltas—Concepts, Models, and Examples. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 2005: 453-466.
- [12] Li Y X, Törnqvist T E, Nevitt J M, et al. Synchronizing a sea-level jump, final Lake Agassiz drainage, and abrupt cooling 8200 years ago [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 315-316: 41-50.
- [13] 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.
- [14] Goodbred Jr S L, Kuehl S A. The significance of large sediment supply, active tectonism, and eustasy on margin sequence development: late Quaternary stratigraphy and evolution of the Ganges-Brahmaputra delta [J]. *Sedimentary Geology*, 2000, 133(3-4): 227-248.
- [15] Bard E, Hamelin B, Arnold M, et al. Deglacial sea-level record from Tahiti corals and the timing of global meltwater discharge [J]. *Nature*, 1996, 382(6588): 241-244.
- [16] Hanebuth T, Stategger K, Grootes P M. Rapid flooding of the sunda shelf: a late-glacial sea-level record [J]. *Science*, 2000, 288(5468): 1033-1035.
- [17] Shackleton N J. The 100, 000-year ice-age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity [J]. *Science*, 2000, 289(5486): 1897-1902.
- [18] Yokoyama Y, Lambeck K, De Deckker P, et al. Timing of the Last Glacial Maximum from observed sea-level minima [J]. *Nature*, 2000, 406(6797): 713-716.
- [19] Siddall M, Rohling E J, Almogi-Labin A, et al. Sea-level fluctuations during the last glacial cycle [J]. *Nature*, 2003, 423(6942): 853-858.
- [20] Bassett S E, Milne G A, Mitrovica J X, et al. Ice sheet and solid earth influences on far-field sea-level histories [J]. *Science*, 2005, 309(5736): 925-928.
- [21] Peltier W R, Fairbanks R G. Global glacial ice volume and Last Glacial Maximum duration from an extended Barbados sea level record [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(23-24): 3322-3337.
- [22] Bard E, Hamelin B, Fairbanks R G. U-Th ages obtained by mass spectrometry in corals from Barbados: sea level during the past 130, 00 years [J]. *Nature*, 1990, 346(6283): 456-458.
- [23] Hori K, Saito Y. An early Holocene sea-level jump and delta initiation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(18): L18401.
- [24] Reed D J. Sea-level rise and coastal marsh sustainability: geological and ecological factors in the Mississippi delta plain [J]. *Geomorphology*, 2002, 48(1-3): 233-243.
- [25] 李高聪, 高抒, 高建华. 全新世以来亚洲七个主要河口三角洲的生长极限 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(1): 11-22. [LI Gaocong, GAO Shu, GAO Jianhua. Modeling the growth limit of seven major Holocene river deltas in Asia [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(1): 11-22.]
- [26] Coleman J M. Brahmaputra River: channel processes and sedimentation [J]. *Sedimentary Geology*, 1969, 3(2-3): 129-239.
- [27] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China [J]. *Science*, 2001, 291(5550): 2345-2348.
- [28] Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, et al. Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite from southern Oman [J]. *Science*, 2003, 300(5626): 1737-1739.

- [29] Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, et al. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon [J]. *Science*, 2004, 304(5670): 575-578.
- [30] Li C X, Chen Q Q, Zhang J Q, et al. Stratigraphy and paleoenvironmental changes in the Yangtze delta during the Late Quaternary [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18(4): 453-469.
- [31] 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 [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152(1-2): 133-158.
- [32] Hori K, Saito Y, Zhao Q H, et al. Sedimentary facies of the tide-dominated paleo-Changjiang (Yangtze) estuary during the last transgression [J]. *Marine Geology*, 2001, 177(3-4): 331-351.
- [33] Wang Z H, Zhuang C C, Saito Y, et al. Early mid-Holocene sea-level change and coastal environmental response on the southern Yangtze delta plain, China: implications for the rise of Neolithic culture [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 35: 51-62.
- [34] Wang Z H, Zhan Q, Long H Y, et al. Early to mid-Holocene rapid sea-level rise and coastal response on the southern Yangtze delta plain, China [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2013, 28(7): 659-672.
- [35] 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.
- [36] Tanabe S, Hori K, Saito Y, et al. Sedimentary facies and radiocarbon dates of the Nam Dinh-1 core from the Song Hong (Red River) delta, Vietnam [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, 21(5): 503-513.
- [37] Nguyen V L, Ta T K O, Saito Y. Early Holocene initiation of the Mekong River delta, Vietnam, and the response to Holocene sea-level changes detected from DT1 core analyses [J]. *Sedimentary Geology*, 2010, 230(3-4): 146-155.
- [38] 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 [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(3-4): 327-344.
- [39] Tjallingii R, Statterger K, Wetzel A, et al. Infilling and flooding of the Mekong River incised valley during deglacial sea-level rise [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(11-12): 1432-1444.
- [40] 李国刚, 胡邦琦, 毕建强, 等. 黄河三角洲ZK1孔晚第四纪以来沉积层序演化及其古环境意义[J]. *沉积学报*, 2013, 31(6): 1050-1058. [LI Guogang, HU Bangqi, BI Jianqiang, et al. Stratigraphic evolution of the Huanghe Delta (Bohai Sea) since the Late Quaternary and its Paleoenvironmental implications: evidence from core ZK1 [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(6): 1050-1058.]
- [41] 成国栋, 薛春汀. 黄河三角洲沉积地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1997. [CHENG Guodong, XUE Chunting. *Sedimentary Geology of the Yellow River Delta*[M]. Beijing: Geology Press, 1997.]
- [42] 庄振业, 许卫东, 刘东生, 等. 渤海南部S3孔晚第四纪海相地层的划分及环境演变[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(2): 27-35. [ZHUANG Zhenye, XU Weidong, LIU Dongsheng, et al. Division and environmental evolution of Late Quaternary marine beds of S3 hole in the Bohai Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(2): 27-35.]
- [43] 阎玉忠, 王宏, 李凤林, 等. 渤海湾西岸BQ1孔揭示的沉积环境与海面波动[J]. *地质通报*, 2006, 25(3): 357-382. [YAN Yuzhong, WANG Hong, LI Fenglin, et al. Sedimentary environment and sea-level fluctuations revealed by borehole BQ1 on the west coast of the Bohai Bay, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(3): 357-382.]
- [44] Liu J, Saito Y, Wang H, et al. Stratigraphic development during the Late Pleistocene and Holocene offshore of the Yellow River delta, Bohai Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 36(4-5): 318-331.
- [45] 庞家珍, 司书亨. 黄河河口演变 I. 近代历史变迁[J]. *海洋与湖沼*, 1979, 10(2): 136-141. [PANG Jiazhen, SI Shuheng. The estuary changes of Huanghe River I. Changes in modern time [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1979, 10(2): 136-141.]
- [46] 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.
- [47] Tamura T, Saito Y, Nguyen V L, et al. Origin and evolution of inter distributary delta plains; insights from Mekong River delta [J]. *Geology*, 2012, 40(4): 303-306.
- [48] Walker M J C, Berkelhammer M, Björck S, et al. Formal subdivision of the Holocene series/epoch: a discussion paper by a working group of intimate (integration of ice-core, marine and terrestrial records) and the subcommission on quaternary stratigraphy (international commission on stratigraphy) [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2012, 27(7): 649-659.
- [49] Bridge J S. Fluvial facies models: recent developments[M]// Posamentier H W, Walker R. *Facies Models Revisited*. Tulsa: SEPM, 2006: 85-170.
- [50] 王张华, Liu J P, 赵宝成. 全新世长江泥沙堆积的时空分布及通量估算[J]. *古地理学报*, 2007, 9(4): 419-429. [WANG Zhanghua, Liu J P, ZHAO Baocheng. Spatial and temporal distribution of Changjiang sediments and estimation of sediment budget during the Holocene [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(4): 419-429.]
- [51] 陈吉余, 沈焕庭, 恽才兴, 等. 长江河口动力过程和地貌演变[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988: 205. [CHEN Jiyu, SHEN Huangting, YUN Caixing, et al. *Process of Dynamics and Geomorphology of the Changjiang Estuary*[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1988: 205.]