



河流三角洲沉积体系再析

高 抒

Revisiting the concept of river delta sedimentary systems

GAO Shu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023042301>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

白云凹陷北坡珠江组下段陆架边缘三角洲特征及其主控因素

Characteristics and main controlling factors of the shelf-edge delta of the lower member of Zhujiang Formation in the northern Baiyun Depression

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(3): 28

黄河口水下三角洲刁口叶瓣的核素分布与沉积特征

Nuclides distribution and sedimentary characteristics of the Diaokou course in Yellow River subaqueous delta

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 43

珠江三角洲全新世海-陆沉积模式转换及其年代

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

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 107

长江远端三角洲表层沉积物中底栖有孔虫分布及其对环境的指示

Distribution of benthic foraminifera in the surficial sediments of Changjiang distal delta and its environmental implications

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(4): 127

现代长江水下三角洲浅地层地震相特征

Shallow seismic facies characteristics of the modern underwater delta of the Yangtze River

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(2): 114

基于原位观测的黄河水下三角洲悬浮物浓度叠加锯齿模型

The superposed sawtooth model of suspended sediment concentration in the Yellow River subaqueous delta based on in-situ observation

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(1): 195



关注微信公众号，获得更多资讯信息

高抒. 河流三角洲沉积体系再析 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(3): 1-13.

GAO Shu. Revisiting the concept of river delta sedimentary systems[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(3): 1-13.

河流三角洲沉积体系再析

高抒

海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

摘要: 本文试从沉积动力学视角重新剖析河流三角洲沉积体系特征。根据“河流三角洲是同一河流入海物质所形成的集中堆积体”的定义, 传统上根据径流、潮汐和波浪而构建的三端元分类图似乎不能概括三角洲的所有类型, 河口湾形态、陆架环流和海面变化也有同等的重要性, 可形成海湾充填三角洲、远端泥、陆架边缘三角洲这样的端元形态。沉积物重力流也是不可忽视的因素。融合以上各个因素所形成的河流三角洲形态谱系, 有助于过程-产物关系的建立。需进一步开展的相关研究包括: ① 地层层序中三角洲沉积类型的识别标志, 以区分水下三角洲、远端泥, 确定陆架边缘三角洲的归属; ② 三角洲体系的时空分布及其与沉积记录完整性之间的关系; ③ 三角洲演化的终极形态、规模与沉积物收支过程的关系。

关键词: 沉积物入海通量; 端元分类图; 水下三角洲; 远端泥; 陆架边缘三角洲; 海面变化; 沉积记录

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023042301

Revisiting the concept of river delta sedimentary systems

GAO Shu

Key Laboratory for Coast and Island Development of the Ministry of Education, School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: This paper attempts to re-analyze the depositional system of river deltas from the perspective of sediment dynamics. According to the definition that "river deltas are concentrated deposits associated with the same river flowing into the sea", the traditional three-end-member classification diagram based on runoff, tides and waves does not seem to have covered all types of deltas. Coastal embayment morphology, shelf circulation and sea level changes are also important; they are related to the end-member forms of embayment filling delta, distal mud and shelf edge delta, respectively. Sediment gravity flow is also a factor that cannot be neglected for some stages of delta evolution. Hence, the above factors may be combined by an integrated modeling system to define a delta morphological spectrum, which is beneficial to the study on the process-product relationships. The relevant scientific issues that are worth exploring include: (1) any criteria to differentiate between the clinofolds of subaqueous delta and the distal mud, to be used in the analysis of deltaic deposits within the stratigraphic sequence, e.g., the classification of shelf edge deltas; (2) the completeness of the sedimentary record, in relation to the spatial and temporal distribution patterns of the various components of a delta system; and (3) the relationship between delta evolution (and its ultimate magnitude in particular) and sediment budgeting processes.

Key words: fluvial sediment discharge; end member classification; subaqueous delta; distal mud; shelf edge delta; sea level change; sedimentary record

河流三角洲沉积体系在资源、环境、生态、气候变化研究中占有重要地位^[1]。全球海岸线长度约为 3×10^5 km, 陆架宽度全球平均约为 75 km, 陆架外缘处平均水深约为 132 m^[2], 沿岸堆积的沉积物数量巨大, 主要来源于河流搬运^[3-4]。每年河流搬运入海的沉积物为 2.4×10^{10} t^[5], 大陆面积约为 1.5×10^8 km², 陆地剥蚀率的量级为 $10^1 \sim 10^3$ t·km⁻²·a⁻¹^[6], 可与沉积

物入海通量相对照。

河流入海物质的去向主要是深海盆地, 如孟加拉湾深海扇^[7]、西非大陆边缘的滑坡体堆积^[8]。大陆坡沉积物重力流既有事件性的, 也有常态性的, 一些大的事件, 每次可以形成 $10^1 \sim 10^2$ km³ 的堆积体, 最大者可达 10^3 km³, 相当于一条大河多年的入海物质总量^[9]。海底扇体积与河流入海沉积物通量

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“海岸风暴频率-强度关系的沉积记录分析”(41530962)

作者简介: 高抒 (1956—), 男, 教授, 主要从事海洋沉积地质学研究, E-mail: shugao@nju.edu.cn

收稿日期: 2023-04-23; 改回日期: 2023-05-22. 周立君编辑

密切相关,在恒河入海处,海底重力流堆积体的规模超过 10^7 km^3 之巨^[10];海底扇形成的起始时间相差也很大,印度河、恒河、亚马孙河的海底扇年龄超过 20 Ma,而密西西比河的海底扇只有 2.4 Ma^[11]。

截留在陆架区域的沉积物所形成的单个全新世沉积体系,其规模为 10^3 km^3 及以下,如恒河三角洲在全新世时期圈闭的沉积物为 10^3 km^3 量级^[12-14],而长江河口三角洲陆地部分的全新世沉积约为 400 km^3 ^[15]。陆架区域截留的沉积物,有相当大的部分是以河流三角洲的形式出现的。全球流域面积达到 $10^5 \sim 10^7 \text{ km}^2$ 量级的入海河流有 20 多条,其流域面积加起来约为全球陆地面积的三分之一,入海沉积物通量占全球总量的 40%^[16]。所搬运的沉积物都要经过河口,但这并不意味着必然导致三角洲的形成,沉积物供给是一个必要条件,却非充分条件。在一些较小的河流,到达河口的物质被海洋水动力如波浪和陆架环流带离,扩散到外地,因此不能在河口附近堆积。即便是较大的河流,如果其沉积物通量远小于所在河口湾的可容空间,也不能形成三角洲,例如澳大利亚的墨累-达令河,其流域面积超过 10^6 km^2 ,但因沉积物输入过少,至今尚未发育明显的三角洲形态。

河流三角洲沉积速率通常为 $10^{-1} \sim 10^{-3} \text{ m/a}$ 量级,因此其沉积记录极具研究价值^[17]。全新世、更新世河流三角洲记录被广泛应用于气候与海面变化、地理环境变化和生态系统演化研究^[18-20],而构造活跃区大陆边缘的沉积记录,可应用于造山运动区的热演化、构造演化、大陆变形机理分析^[21]。

现代河流三角洲因其空间资源的重要性而备受关注,相关科学问题包括三角洲发育的起始时间^[22-24]、沉积地貌特征^[25-27]、形成演化过程^[28-29]、沉积记录完整性^[17,30]、对气候-海面变化响应^[31-32]、岸线侵蚀^[33-34]、人类活动影响^[35-37]等。初期的研究试图建立三角洲的一般模式^[38-39],如密西西比河鸟足状三角洲^[40]。但很快人们从三角洲对比研究中意识到,三角洲受到入海通量、河口湾形态、河流径流、波浪、潮汐、陆架环流、风暴事件等多个因素影响,任何一个三角洲都有其独特的控制机制和演化路径,因此,需要从系统分析入手,确定其在形态连续谱中的位置。

此外,地质历史上也有大量的三角洲地层记录,20世纪30年代开始,由于三角洲沉积的煤炭、油气资源开发而迅速得到深入研究,其方法从地层学分析转到沉积学分析^[41],研究的主要问题有三角洲地层的识别标志、三角洲沉积体形态、三角洲古

环境恢复方法、古今三角洲对比、煤炭油气资源潜力^[26,42-45]等。

本文的目的是:(1)回顾近年来河流三角洲概念的变化,重新阐述三角洲沉积时空分布的主控因素;(2)基于物质收支控制方程,阐述三角洲演化的生长极限假设,并进行古今三角洲规模的对比;(3)从三角洲形态谱系的视角,提出需进一步研究的有关过程-产物关系、物质循环、沉积记录形成演化、资源动态等方面的科学问题。

1 河流三角洲概念的历史发展

在历史文献中,三角洲的概念曾有过一些变化。古希腊人之所以使用“Delta”这一术语来表示尼罗河三角洲,是因为其平面形态与大写希腊字母“ Δ ”相像。19世纪后期,美国工程师 Gilbert 提出了注入湖泊的河口三角洲沉积模式^[38],但这代表无潮、淡水的环境,与海洋不同。他发现入湖水流的流速控制了沉积物堆积格局,最细的颗粒随水流飘散到较深处堆积,砂质沉积物在河口停止运动,而洪水时的浑浊水体造成砂层之上的垂向加积。因此,三角洲沉积相由底积、前积和顶积三套物质组成,分别为泥质、砂质和泥质沉积。这一特征对于油气资源开发很重要,因为砂层可作为油气储层,而上下两边的泥层可将储层圈闭起来。Barrell^[42]根据该理论寻找美国中西部沉积岩中的三角洲沉积相,不过他也提醒海洋环境的三角洲可能有其他的特征。

Bates^[39]考虑入海河流的沉积物,试图根据河流入海径流及其携带的悬沙与海水之间的密度差异来刻画悬沙入海后的去向。河水可以轻于或重于周边海水,分别形成漂浮于表面的冲淡水羽状流和运动于底部的密度流。

对于地质学家而言,地层中的三角洲沉积如何识别是一个重要问题,必须要找到简明的判别标志,用以判断地层记录,否则就会失去可操作性^[46]。此后的一段时间,人们对河口三角洲的地貌演化、沉积相和动力过程进行了深入研究^[25,47-50],其基本概念仍然是暗指“河口三角洲”。

较近的定义是,河流三角洲是来自流域的物质在河口附近的堆积体^[27],这一定义极为简练。然而,如果我们在更广的时空尺度上来看“同一河流的入海沉积物堆积体”,就会看到河流三角洲的范围并不局限于当前或某一地点的河流,“河流三角洲是同一河流入海物质所形成的集中堆积体”的表

述似乎更为准确。首先, 河口的位置可能发生迁移, 有的是自然因素造成的, 有的是人为活动的结果。黄河三角洲目前在渤海入海, 但在 1128—1855 年间却是注入黄海, 在江苏海岸带形成了巨大的三角洲体系, 而且在历史上这样的迁移已多次发生。其次, 河流沉积物的堆积地点不一定是在河口。在地中海的波河, 人们发现其悬沙入海后可被陆架流系长距离搬运, 沿着内陆架形成长条带状堆积, 全新世沉积的厚度可超过 40 m, 且其沉积构造以斜坡沉积(或称为楔形体, Cliniform)为特征^[51]。此后, 远离河口的陆架泥质沉积被广泛发现, 我国三大河流(长江、黄河和珠江)都有各自的远端泥沉积。因此, 人们提出这是一种独特的“远端泥三角洲”^[52-53]。最后, 海面变化可使河流沉积的位置发生变化, 第四纪气候变化引发的海面变化有 20 个周期, 其幅度达到 10^2 m 量级, 在 10^5 a 周期之下, 还有次级的变化。因此, 海面变化必然使河口位置发生迁移, 河口三角洲和远端泥三角洲的位置也不会是固定的。陆架浅层地球物理探测资料表明, 在陆架外缘往往有斜坡沉积, 被认为是陆架边缘三角洲, 即与过去海面较低时期的河流堆积相联系^[54-56]。在陆架中部, 也有过去留下的河流沉积, 如黄海陆架上发现的历史时期的斜坡层理堆积体^[57]。

综上所述, 河流三角洲的范围并不局限于当前的河口区域。在陆架也有沉积物扩散形成的堆积体, 其内部构造类似于河口三角洲, 并且随着海面变化河流堆积体频繁发生位置变化。可以说, 同一条河流的三角洲堆积体必然构成一个复杂的沉积体系。

2 河流三角洲构成的重新思考

2.1 河口陆上与水下三角洲

与经典的尼罗河三角洲相比, 河口三角洲的形态各异, 每一个河口都有自己的独特性。为了刻画河口三角洲的特性, 研究者们提出了一个分类方案^[26,48,58], 即按照水动力条件划分出三种端元类型, 即浪控、潮控、河控三角洲, 其主要的动力过程分别与波浪、潮汐和河流径流相联系。河控三角洲受到淡水径流的明显影响, 形成鸟足状瓣状体、天然堤、河漫滩等堆积体。潮控三角洲有潮汐特征的沉积, 如潮滩和潮流脊。浪控三角洲以波浪作用下形成的地貌为特征, 如河口沙嘴、砂砾质海滩、滩脊平原、水下沙坝、风成沙丘等。

在三端元三角洲分类图中, 河控、潮控、浪控三角洲被置于三个端元位置, 三角图的中部有各种过渡类型, 即受到不同程度的波浪、潮流、径流影响的三角洲类型。当然, 也可以用平面坐标法进行分类, 例如以波能(波高)为横坐标, 潮能(潮差)为纵坐标, 可区分“潮汐为主”、“波浪为主”的类型, 而潮差和波高均趋于很小的区域, 属于“径流为主”类型。

在世界大河三角洲中, 密西西比河、黄河、多瑙河三角洲是河控的, 长江、恒河-布拉马普特拉河三角洲是潮控的, 尼罗河、湄公河、红河、尼日尔河三角洲属于过渡类型。由于波浪作用通常只作用于较小范围, 因此典型大河三角洲很少是浪控的, 只有较小的三角洲, 如非洲塞内加尔河三角洲^[26]、巴西多西河三角洲^[59]、海南岛昌化江三角洲^[60]等, 其岸线动态是波浪作用控制的。图 1 定性地显示我国部分三角洲在分类图中的位置。

上述三端元分类是一个简明的体系, 但在具体应用时还需考虑其他因素的影响。首先是沉积物供给的影响, 沉积物来自流域, 因此流域自然条件决定了沉积物入海通量的大小和物质组成, 而这两个因素深刻地影响着动力过程的宏观效应。例如, 在源近流短、粗粒沉积物为主的河口, 即便潮差较大也不能形成潮滩, 潮间带地貌将以海滩为主, 从

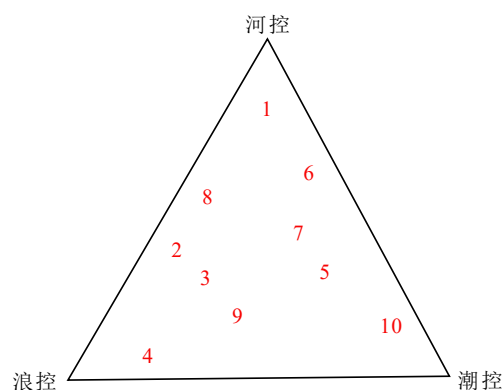


图 1 我国部分河流三角洲在分类三角图中的位置
1-黄河, 2-辽河, 3-滦河, 4-废黄河, 5-长江, 6-瓯江, 7-闽江, 8-南渡江, 9-昌化江, 10-珠江(珠江三角洲是海湾充填形成的, 但就物质运输而言, 潮流作用最为重要, 因此暂归入潮控类型, 详见下述)。

Fig.1 The positions of some river deltas in China within the three end-member classification scheme

1-the Yellow, 2-Liaohe, 3-Luanhe, 4-Old Yellow, 5-Yangtze, 6-Oujiang, 7-Minjiang, 8-Nandu, 9-Changhua, and 10-Pearl rivers (Note: the Pearl Delta is formed by sediment infilling in a large embayment, but in terms of material transport, tidal current plays the most important role, so it is temporarily classified here as tide control type, see text for explanation).

而形成“浪控”特征。而如果入海物质粗、细颗粒都具备,则潮滩易于形成,从而表现为“潮控”特征,即便是波浪较大也不能改变。在无潮河口,丰富的细颗粒物供给将导致“河控”,因为此时波浪能量被耗散,典型的波成地貌难以发育。

其次,沉积物供应还对应于一个临界值,小于该值时河口环境将长期存在,三角洲发育不良。从沉积物收支的角度看,河口沉积物输入量大于输出量时堆积体才能形成,否则所有的物质都向海扩散,就不会有三角洲堆积了^[61-63]。沉积物的输出量决定于河口区域的潮流、波浪、陆架环流条件,也就是说,决定于水动力能量级别和陆架原始地形。一些较小的河流,由于入海通量过低,因此河口三角洲长期停留在初始阶段,如鸭绿江和钱塘江河口。有些山溪性的清水小河,则根本没有三角洲。临界值也可以用“沉积物滞留指数”来表达^[28,62]:

$$R = Q_R / Q_S \quad (1)$$

式中, Q_R 为堆积于河口的部分, Q_S 为入海物质总量。

值得指出,临界入海通量和滞留指数均非常数,而是时间的函数,例如随着三角洲前缘向海推进,面临的水深增大,波浪潮流作用也发生变化,滞留指数就下降了。数值实验结果表明,在每年 5×10^8 t/a 的输沙条件下,长江三角洲还能继续向海推进,但最终受到水深、海面变化和地面沉降条件的制约,将进入不再继续生长的阶段,这时的河口三角洲达到其生长极限。

最后,时空尺度和三角洲演化的阶段性也很重要。在尺度方面,处于端元状态的河控三角洲通常仅限于中小规模的体系,而河控三角洲一般与大型河流相联系,如密西西比河三角洲。这里有各种机理的作用,大型河流输入的物质多,对地貌的影响大,大面积浅滩和低坡度区域的形成使波浪作用得到遏制。此外,文献中描述的三角洲瓣体往往是河控三角洲、多口门三角洲的产物,其中河控三角洲可能有多个瓣体,如密西西比河三角洲就已被识别出6个瓣体,它们与河道的迁移相关,每次迁移并在一处稳定一段时间就可形成一个瓣体^[64]。通常将多瓣体的三角洲称为“三角洲复合体”,这一概念与本文所指的“三角洲体系”不同。

在演化阶段性方面,河口三角洲形成初期和后期的主控因素可能会发生很大变化。以湄公河三角洲为例^[65],其顶端是海面上升之后淹没的区域,那时陆架宽阔,水深较小,波浪作用相对微弱,因而表现为河控三角洲,沿岸有红树林分布,河道两侧

形成天然堤和沼泽湿地。三角洲岸线向海推进近200 km之后,前缘水深加大,陆架宽度降至10~30 km,因而波浪作用增强,沙丘、砂质海滩、滩脊等地貌广为分布。

值得指出,即使考虑了这些因素,仍有一些三角洲难归入这个分类体系,珠江三角洲就是如此。其独特在于全新世高海面之后,东、西、北江三条河流注入了一个岛屿密布的大型海湾。在区域性潮汐、波浪作用下,沉积物倾向于在岛屿岸线附近堆积,并非只在口门附近堆积。经过数千年的演化,这些堆积体逐渐连成一体,而三条河流的河道则在堆积体上延伸,形成一个独特的水网^[66-67]。这样的格局显然不符合“河口附近堆积、向海推进、三角洲平原逐渐扩大”的模式。

此外,三角洲除被关注的陆上部分外,还有水下三角洲部分。亚马孙河是世界著名大河,但其陆上三角洲规模较小,而水下三角洲规模很大,并且输入海洋的细颗粒物被沿岸长距离搬运,形成沿岸延伸的泥质沉积带,最远处离开河口达1000 km^[68]。输运的水动力,既非冲淡水流,也不是波浪和潮流,而是陆架环流^[69-70]。亚马孙河的情形,应该是属于“陆架环流控”的三角洲。长江三角洲的水下部分覆盖面积约 10^4 km²,其前缘水深达50 m^[71]。由于细颗粒沉积速率的沿程差异,水下地形逐渐发生变化。在目前演化阶段,沉积速率最大的地点是口门外水深5~10 m处,这里也是水下三角洲坡度最大的地方,从沉积物收支的角度来看也是垂向通量最大的地方。Rich^[72]认为海洋环境中按照水深的不同,细颗粒沉积物堆积体应有不同的内部构造,其中斜坡层理被用来刻画水下三角洲前缘坡度较大处形成的层理,在浅地层剖面上表现为向海倾斜的一系列叠复沉积层,代表了三角洲前缘沉积中心的位置和向海迁移的趋势。

沉积中心所在的地方,水下三角洲的斜坡层理有两种可能的形式,第一种是细颗粒物质的沉积中心位置不变而形成的。河口水下三角洲斜坡的范围是坡折点到细颗粒沉积下限,坡折点处的床面高程受到水动力的限制,通常情况下是由于波浪作用的结果,这里水深变浅导致波浪底部切应力快速增大,再悬浮加强,从而阻碍沉积物向上加积。假定水下三角洲沉积中心始终位于斜坡中点,则随着堆积的进行,该点以上坡度逐渐减小,而该点以下坡度逐渐变陡,前缘形成向海尖灭的斜坡层理(图2)。此种堆积方式只能在一定时期发生,当沉积速率最大的地点淤长到顶部时终止。

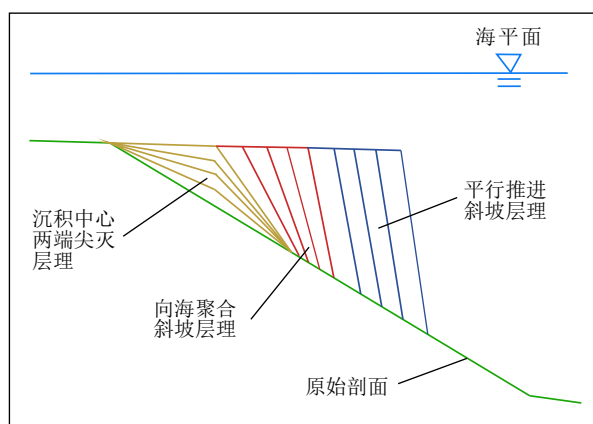


图 2 河口水下三角洲向海尖灭、向海聚合、平行推进斜坡层理的形成演化图示

Fig.2 Diagram showing the occurrences of wedge shaped, seaward convergence and parallel beddings of the subaqueous delta, formed at different stages of morphological evolution

第二种形式对应于沉积中心的动态变化。沉积中心位于斜坡上部,因此必然随着堆积的进行而向海迁移。由于斜坡上的沉积速率上高下低,因此上部的向海推进速率将高于下部,斜坡层理呈逐渐变陡的形态,可称之为“向海聚合型”或“准平行推进型”;如果整个坡面的沉积速率处处相等,此时将形成向海平行推进的斜坡层理,此时的坡度不随时间而变化(图 2)。

从悬沙沉降的角度看,沉积速率处处相同的情形不太可能发生。前述的沉积中心是与最大沉降通量相对应的,沉降通量可表示为:

$$F_s = Cw_s(1 - \tau/\tau_{cr})(\tau \leq \tau_{cr}) \quad (2)$$

式中, F_s 为沉降通量, C 为近底部悬沙浓度, w_s 为颗粒沉降速率, τ 为近底部切应力, τ_{cr} 为临界切应力。由此可见,沉降通量是悬沙浓度和切应力的空间分布格局所控制的。在输运方向上这些变量的综合效应恰好使得沉积速率成为一个定值,与空间位置无关,这种现象即使可能发生,也应该是属于小概率事件。

然而文献中确实报道了平行推进形式的斜坡层理,这不是水层中悬沙沉降的产物,而是沉积物重力流产物。三角洲前缘的剖面形态在最初重力流作用下是微弱的,但随着堆积的进行,坡度逐渐加大(图 2),悬沙沉降的堆积模式难以持续,而重力流越来越频繁,从而改造水下三角洲的层理结构。床面蠕动、沉积物液化、水下滑坡作用可造成剖面变形^[73-76],高悬沙浓度的密度流可沿着底床运动^[77],甚至形成浊流^[78]。因此,斜坡层理的形成有初期的悬沙沉降和后期的重力流两种机制。

2.2 远端泥

远端泥的研究始于地中海(亚得里亚海)沿岸的波河^[79-81],其陆上和水下三角洲规模均较小,宽度小于 50 km,入海沉积物大多被沿岸向东输运,即沉积物滞留指数很低。其结果是在岸线之外的 50~100 km 范围内形成了一条细粒沉积物堆积带,其最大厚度超过 40 m,沉积中心在近岸的 20~30 km 处,离开河口有 300~500 km 远。这些特征可从悬沙输运的动力过程得到解释,细颗粒物质的沉速为 $10^{-5} \sim 10^{-7} \text{ m/s}$ 量级,而陆架环流的流速为 10^{-1} m/s 量级,因此在水深为 10^1 m 的环境中,颗粒沉降到海底所需的时间为 10^{-1} a ,水平方向可以运动 10^2 km 的距离。如果考虑波浪引发的再悬浮,输运到更远处也是可能的。经过多年研究,人们认识到远端泥的发生具有相当大的普遍性^[82]。

黄东海和南海以宽广陆架为特征,黄河、长江、珠江的入海通量巨大,因此具有形成远端泥的良好条件。浙闽沿岸泥质沉积是来自长江沉积物的输运^[83]。长江物质入海之后被沿岸流(本区域陆架环流特征之一)向南输运,堆积于内陆架,最大厚度可达数十米^[84-86]。此后,又对三大河流的泥质沉积进行了系统性研究,进一步了解了其远端泥三角洲的性质^[57,87-90]。

黄河的细颗粒物通过渤海海峡向东输运,在远离河口约 600 km 处的山东半岛东部近岸区发生堆积,其堆积形式有两种。第一种以山东半岛东北端的泥质沉积为代表,其最大厚度超过 40 m,内部的斜坡沉积可分为两个阶段,早期形成向下方聚合的斜坡层理,而后形成平行推进的斜坡层理^[87-88]。第二种以山东半岛东南部的泥质沉积为代表,其形成年龄晚于第一种类型,最大厚度也达到了相近量级,而沉积形态却表现为中心部位的向上加积和边缘部位的斜坡沉积。

斜坡层理的两种不同形态被认为是与不同的堆积过程有关^[29]。在泥质沉积形成的初期,悬沙沉降是泥质沉积生长的方式。在同样的流速条件下,悬沙浓度最大之处沉降通量也就最大;在沿岸流输运的主轴上悬沙浓度最高,其下方就对应于加积最快的区域,离开主轴位置,悬沙浓度降低,垂向通量也下降,因而形成向海聚合式的斜坡沉积。随着加积的进行,受到波浪基面的制约,近岸沉积物只有较粗的颗粒能够堆积,而细颗粒物则被向海输运,堆积于波浪基面之外的地方。在大多数海岸区域,波浪基面的深度为 20~30 m,这是陆架泥质沉

积可能到达的高程。对于黄河远端泥而言,情况正是如此,近岸泥质沉积的顶面约在水深30 m处。向上的加积受到遏制,泥质沉积的进一步发展是向侧翼方向,这就是泥质沉积发展的后期阶段,以平行推进式的斜坡沉积为代表。这是陆架环境中的沉积物重力流的一种常见形式,其机制与水下三角洲前缘斜坡沉积相近。

在早期的沉积物重力流研究中,陆坡浊流事件受到特别的关注,而陆架的坡度较小,被认为不能形成事件式的沉积物重力流,但沉积物重力流也是存在的,只不过是其他形式出现罢了。按照Bates^[39]的理论,悬沙浓度高的河流是最可能产生密度流的地方,这在黄河口得到了证实^[77]。然而高悬沙浓度的环境并不常见,在海岸和陆架环境,更为普遍的重力流是由海底再悬浮造成的^[91]。近底部悬沙浓度的提高,进而使深浊水体的密度高于周边海水,于是在斜压效应下这一浑浊水体便可作下坡运动。在陆架环境,浪流共同作用下的再悬浮可经常发生,而且台风等极端事件也常造成规模较大的近底浑浊层。

以黄河远端泥的模式来看待长江、珠江的远端泥,可以清晰地看到它们远端泥三角洲的基本特征。长江远端泥远离河口,最远可到达800 km以远,泥质沉积的厚度可达40 m。其垂向结构显示出与黄河远端泥略有不同的特征^[84-86],年龄为7~2 kaBP的一段厚度较大,斜坡沉积的形式局部也有聚合式和并行推式两种;最近2 kaBP内形成的一段厚度较小,且只有聚合式的斜坡层理。这种两段式的沉积应与物源和堆积过程不同有关。2 kaBP之前的沉积似乎应与陆架沉积的改造(即长江留在陆架上的早期沉积在海面上升过程中的改造)有关。数值模拟结果表明^[92],东海陆架在海面上升过程中出现了适应于潮流脊形成的流场环境。这表明早期泥质沉积受到改造,较粗沉积物形成潮流脊,而淘洗出来的物质可被长距离向岸搬运,并在杭州湾、浙闽沿岸等处发生堆积,浙闽沿岸泥的下段很可能就是这一过程的产物,其斜坡沉积的顶部水深较大,位于波浪基面之下,由此可以推论是由海向岸运输物质的渐次堆积体。

珠江泥质沉积分布于珠江口两侧的广大内陆架区域^[89],面积达8000 km²。物源分析结果显示该区的泥质物质更应与珠江有关,近岸陆架环流使得珠江悬沙入海后向西运动^[93-94]。根据²¹⁰Pb分析结果,泥区的沉积速率为5 mm/a量级,但泥质沉积的厚度普遍较薄,不足1 m,可见这一大面积泥质沉积

的形成只是近10² a尺度上的过程^[53,89]。靠近珠江河口处有局部泥质沉积较厚之处也有斜坡沉积,但远端泥三角洲的主体部分显然还尚未形成斜坡沉积。

依照地貌演化的阶段性原理,具有不同沉积特征的黄河、长江、珠江远端泥可解释为不同演化阶段的产物^[53](图3)。珠江远端泥处于幼年期,泥层薄,尚未形成斜坡层;长江泥处于壮年期,顶面高程接近于波浪基面,辐聚式斜坡层发育良好;黄河远端泥在渤海海峡东南侧的部分已进入老年期,顶面高程完全受波浪基面控制,斜坡层不仅有辐聚式的,也有平行推进式的。三大河流的远端泥演化为何处于不同阶段?这被认为是与河口湾填充过程有关^[53,88]。珠江从全新世早期起注入现今河口三角

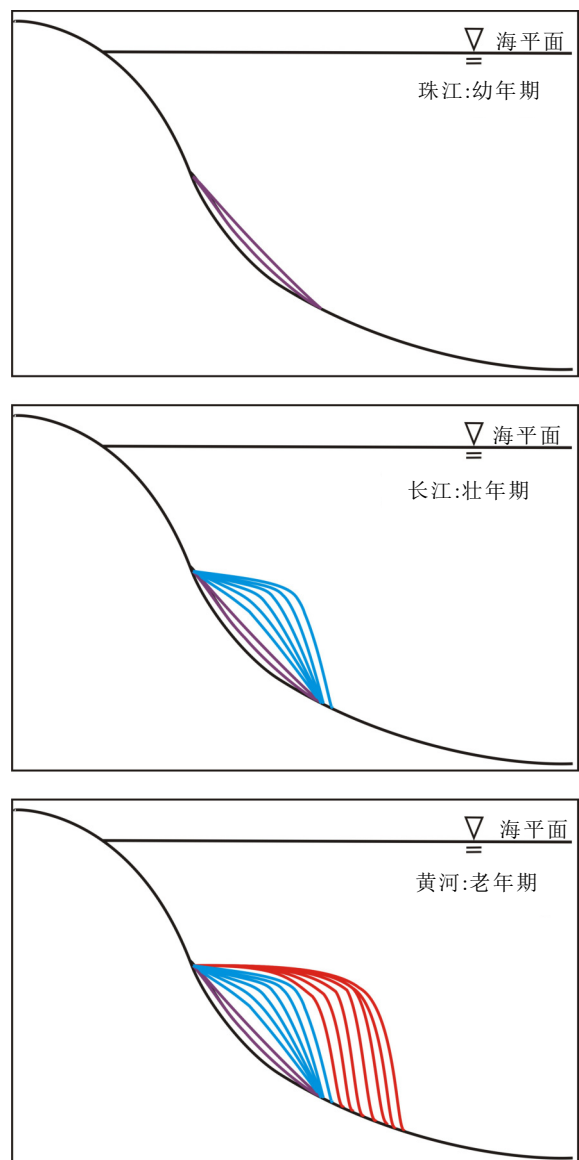


图3 珠江、长江、黄河远端泥所处的不同演化阶段^[53]
Fig.3 The distal mud deposits associated with the Pearl, Yangtze and Yellow rivers, at different stages of development^[53]

洲所在的大海湾, 此后持续充填这个海湾, 直到近期珠江沉积物才较多地溢出河口湾, 进入邻近陆架和远端泥沉积区。

在高海面时期, 长江口也曾是一个巨大的河口湾, 且长江中、下游地区还有大量的湖泊。长江携带的沉积物数量较大, 但也需较长时间才能充填这些湖泊和河口湾区域。长江河口的充填过程大致到 2 kaBP 才算完成^[23], 此后长江悬沙能够大量地越过河口进入陆架区, 直接供给远端泥区域; 同时, 浙闽沿岸河流输入物质也成为远端泥的物源^[95]。

黄河的情况很不相同, 它缺乏一个大型河口湾, 沉积物从高海面时期起就开始补给至远端泥区域。在全新世早期, 远端泥的物质供给与陆架物质改造有关, 而到了 6.5 kaBP, 来自河口的物质经由渤海海峡搬运至此堆积, 因此床面迅速淤高, 形成完整的斜坡沉积序列。

2.3 陆架边缘三角洲

第四纪海面变化的幅度与全球陆地的边缘平均水深几乎相同, 二者之间是否存在因果关系尚待进一步探讨, 但可以肯定的是, 海面变化对河流三角洲的时空分布变化产生极大的影响。若海面位于大陆架边缘以下, 则沉积物将直接进入陆坡区, 陆架上不会有三角洲沉积。东海大陆架边缘水深较浅, 因此低海面时长江、黄河等区域性大河可能直接注入冲绳海槽, 如此陆架边缘便不能形成三角洲沉积体。另一方面, 若陆架边缘水深较大, 则低海面时河流入海地点就会仅处于陆架范围, 就有可能形成三角洲沉积。此类沉积被定义为“陆架边缘三角洲”。

根据浅地层探测和钻孔分析, 陆架边缘三角洲在世界各地多有发现^[22-24]。由于河流三角洲以斜坡沉积为特征, 因此人们着重于陆架边缘沉积中的斜坡沉积探测, 果然在水深较大的陆架边缘发现了许多此类沉积构造^[96-98]。

在南海北部陆架, 浅层地球物理探测揭示了多个斜坡沉积体, 属于末次低海面时期的三角洲沉积, 它们相互叠置或者分布于不同的空间位置。根据层序地层学原理可以确定不同斜坡层形成的时间序列, 进而分析其形成时代和对应的海面高程(相对海面)。每个斜坡体系的规模与沉积物供给条件、垂向构造运动等信息相结合, 可以重建区域海面变化的历史, 识别每次海面相对稳定时期的产物^[99-100]。从三角洲的演化看, 形成一个三角洲至少需要 10^3 a, 因此海面稳定时段达到这一时间长度的

情况就是寻找相应堆积体所需的信息。可以进一步推论的是, 第四纪时期海面上升是快速的, 然而海面下降却是缓慢的、波动式的, 既然如此, 在下降的波动过程中, 也必然会有海面稳定一段时间的情形, 那么陆架不同部位形成三角洲也是可能的。

与陆架边缘三角洲一样, 陆架中部三角洲也含有大量环境变化信息。在以往对陆架上的斜坡沉积的解译中, 暗含的一个前提是, 这些斜坡沉积都是代表了河口三角洲或其水下三角洲部分, 而忽视了远端泥三角洲的可能性。如前所述, 远端泥三角洲的顶面高程代表波浪基面, 因此其位于海面之下的 20~30 m 处; 河口三角洲的顶面则更接近于海面。如果不能正确识别两种类型, 则所给出的斜坡沉积时间序列可能是错误的, 后续的分析也就因此而出错。

区别陆架斜坡沉积的类型不能仅仅依靠浅地层剖面上的形态特征, 还应结合其他证据, 如古河道的位置、斜坡沉积物质组成等。远端泥沉积通常远离河口, 因此与古河道不应相联; 古河道的口门位置信息也很重要。在北半球陆架远端泥沉积倾向于分布在河口的右侧, 似乎与科氏力有关, 但也有反例, 如韩国汉江等注入黄海后所形成的远端泥位于河口左侧, 说明是受陆架环流控制的。

海面变化给出了河流三角洲的时间维度, 前述代表空间维度的 5 种类型的三角洲代表现状, 而与海面变化历史相联系的一系列三角洲体系使得三角洲沉积更加复杂化了^[99-100]。以珠江为例, 现代的情况较为简单, 只有一个河口三角洲和一个远端泥三角洲, 然而在末次冰期-间冰期, 南海北部陆架上可能有数次海面变化事件足以形成类似的沉积, 其数量可能要以 10^1 量级来计; 第四纪期间有过 20 次这样的周期, 因而可能形成过 200~300 个三角洲堆积体。长江虽然可能缺失陆架边缘三角洲, 但高海面和陆架中部三角洲沉积绝不会缺少。

3 三角洲沉积体系演化

3.1 全新世三角洲的起始时间与演化周期

三角洲的起始时间可以从不同的时间尺度来考虑, 甚至理解为其最初的历史^[101]。但海面变化使得三角洲演化出现中断, 这里所指的起始时间是与冰后期海面相对上升相联系的。从全球范围来看, 根据 36 个三角洲底部沉积的年龄测定结果, 末次冰期以来三角洲沉积的起始时间有约 2 ka 的差异^[22]。密

西西比河三角洲沉积始于 8 kaBP^[22], 湄公河^[102]、红河^[103]、勒拿河^[104] 和尼罗河三角洲也是如此, 起始于 7 kaBP 的有长江^[23]、恒河、湄公河^[22] 等, 起始于 6 kaBP 左右的有多瑙河三角洲^[105]、韩国洛东江^[106] 以及地中海沿岸一些较小的三角洲^[22,107]。

什么是起始时间不一致的机制? 最初, 相对海面变化^[22] 是最早被提出的。由于不同地点地面升降的差异, 以及海面变化固有的区域性差异(如大地水准面变化造成的水位变化差异), 同一高程的淹没时间是不一致的。另一方面, 沉积物供给因素也不可忽视^[107], 而物源与海湾原始地形相结合, 也可造成明显的差异, 如前述黄河、长江和珠江三角洲的对比所示。此处起始指标的定义有待于进一步讨论, 有些论文将海面上升后最早的沉积物的年龄为标志, 而另一些研究者则提出了三角洲沉积的底界的定义。

推而广之, 远端泥沉积也有起始时间问题^[108]。远端泥沉积特征的分析表明, 起始时间差异可以非常大, 如前述黄河、长江和珠江三角洲的对比所示。此外, 河口三角洲与远端泥起始时间的关系也有很大不同, 两者之间具有相对独立性, 但也可能有一定的关联性。

三角洲的生长导致其陆地部分面积逐渐扩大, 但如前所述, 其生长是有极限的^[28]。由于沉积物供给和水动力条件的差异, 达到生长极限的时间很不相同。在瓣体尺度上, 密西西比河三角洲全新世时期有过多个, 每个的生长周期为 600 a。全球范围, 伊洛瓦底江三角洲可能已接近于极限, 而某些大型三角洲可能还处于初期阶段, 如亚马孙河三角洲的水下和岸外部分规模大, 但陆上部分多为沼泽和热带雨林, 成陆面积较小; 黑龙江注入鄂霍次克海, 河口区为沼泽湿地, 沉积物入海通量小, 三角洲规模远未充分发育。在亚洲区域, 达到极限状态时, 较大河口三角洲的陆上部分面积为 $10^3 \sim 10^4 \text{ km}^2$ 量级, 体积为 $10^1 \sim 10^3 \text{ km}^3$ 量级; 在河流入海泥沙显著减少的情形下, 有些三角洲目前已停止生长, 甚至进入蚀退阶段^[109]。

3.2 地层中的河流三角洲沉积

由于石油、天然气、煤炭开采的需求, 20 世纪中期的一段时期里人们深入研究了地质历史上的三角洲沉积^[44]。文献记载的古老三角洲沉积以泥盆纪、古近纪—新近纪居多^[110], 其他时期也有不少, 如奥陶纪和石炭纪。可通过与现代三角洲的对比, 建立地层中三角洲的基本样式^[44], 例如用三角

洲平原相、前缘相、废弃相(代表瓣体之间的转换)来判定古代三角洲的堆积体^[26]。在美国中西部地层中大量发现的三角洲沉积, 其分布面积规模大多是 10^3 km^2 量级的, 在相关文献^[43,45,111-117] 中超过 $30 \times 10^3 \text{ km}^2$ 的有 5 个, 其中石炭纪 3 个、白垩纪 1 个、古近纪—新近纪 1 个, 后者覆盖面积最大, 达 $61 \times 10^3 \text{ km}^2$, 超过现代三角洲中陆上部分的最大者。值得注意, 由于沉积记录可能包括一些水下部分, 同时, 沉积体系形成之后有可能遭受剥蚀, 因此三角洲规模的古今对比不确定性很大。

4 讨论

根据以上分析, 河流三角洲是由河口陆上三角洲、水下三角洲、远端泥三个部分所组成的, 当海面位置固定时, 三个堆积体依次发育, 可见海面变化是三角洲沉积体系形成的首要控制因素。在任何海面位置下, 波浪、潮汐、径流、陆架环流、海湾过程均可形成三角洲的端元形态, 并有多种可能的过渡状态。水下三角洲、远端泥发展到一定阶段, 沉积物重力流成为不可忽视的因素。三角洲体系何时开始发育、生长速率如何、演化的最终产物决定于陆架原始地形、水动力条件的河流沉积物供给。因此, 可将三角洲体系的特征表述为以上因素的函数, 每个因素对应于若干个变量, 而每个变量都有各自的定义域。对应于一组变量及其定义域的每一种组合, 都有一个特征性的沉积体系, 这些沉积体系构成河流三角洲的形态谱系。这就是说, 现实环境中观察到的任何三角洲, 均为该形态谱系所包含。在人工智能时代, 在不同的时空分辨率上刻画这个谱系, 并非遥不可及。一旦构建完成, 就可根据三角洲沉积体系的实测数据确定其在谱系中的位置, 相关因素和演化过程的信息就可一并获取。三角洲过程-产物关系非常复杂, 然而形态谱系方法具有化繁为简的潜力。

尽管如此, 古老地层中的三角洲沉积的“实测数据”相对较少, 如何将现代三角洲的信息用于古代三角洲的分析, 例如, 水下三角洲、远端泥的斜坡层理的区分问题, 仍然需要发展新的方法, 建立新的判别指标。现代沉积中, 这两类斜坡层理发生的地点、水深条件、物质组成不同, 较易识别, 但对于古老沉积, 需要寻找周边古河道充填沉积、顶面水深、物质来源等信息, 建立相应的定量指标。这个问题对于陆架边缘三角洲研究具有重要性, 海面位置较低时, 河流入海地点与各种条件相配时, 其沉

积产物有多种可能性,既有河口三角洲向外生长直达陆架边缘的情形,也有远端泥三角洲形成的可能。斜坡层理只是陆架边缘三角洲的识别标志,它属于水下三角洲或远端泥,似乎尚无区分指标的报道。

河流三角洲沉积速率高,其产物是环境演化的重要信息来源。然而,由于三角洲所处环境的高度动态性,垂向上间断往往远大于堆积,沉积间断是其基本特征^[18],因此任何单个地点的沉积记录时间分辨率可能较好,但连续性、完整性欠佳。换一个角度来看,陆上三角洲、水下三角洲、远端泥,对于一定的时段,总有某个地点的堆积与其相关,除非后期受到剧烈的侵蚀,该时段的沉积记录很可能是存在的。因此,就三角洲沉积的整体而言,沉积记录可能是完备的。将事件性的片断按时间序列排列,可望恢复完整的演化历史^[17]。同期的三角洲是陆上三角洲、水下三角洲、远端泥的复合体,不同期的三角洲沉积则包含一系列类似的复合体,构成一个更大、更复杂的高层次复合体。如果在年代-高程框架下确定该高层次复合体的分布(图4),将有助于提高沉积记录完整性。

河流三角洲存在着生长极限,这是由沉积物收支所决定的。在晚第四纪到全新世,海面位置的变幅为 10^2 m量级,决定可容空间大小的陆架宽度为 $10^0 \sim 10^2$ 量级,大型河流的沉积物入海通量为 $10^7 \sim 10^9$ t/a量级,水动力条件以潮流、波浪、陆架环流、淡水径流为特征。在这些条件约束下,达到生长极限时的陆上三角洲面积为 10^4 km²量级^[28,109]。现有的信息似乎只能说明现代(全新世)三角洲的最大规模,在地球历史上,由于沉积物收支条件的

不同^[118],三角洲可能有不同的生长极限,例如,前寒武纪的三角洲规模可能受制于较少的物质供给,古生代、中生代的海面变化和海陆分布格局与现在差异很大,会影响三角洲的生长,而古近纪—新近纪的三角洲规模可能更加受到沉积物供给量增大的影响。如前所述,目前关于地质历史上的三角洲沉积记录的信息比较贫乏,应更多地加以挖掘。同时,为了回答“最大的三角洲曾经有多大”的问题,还需要获取当时的收支条件信息,进行更为深入的沉积物收支模拟研究。

5 结论

本文回顾了河流三角洲概念的变化,阐述了不同时空尺度下的三角洲沉积体特征,并提出需进一步研究的科学问题,兹总结如下:

(1)河流三角洲是同一河流的入海物质所形成的集中堆积体,根据这一定义,由径流、潮汐和波浪构建的三端元分类图似乎是不完备的,河口湾形态、陆架环流和海面变化也有同等的重要性,形成海湾充填三角洲、远端泥、陆架边缘三角洲等端元形态。沉积物重力流也很重要。按照较多的维度来建立河流三角洲的连续谱系,有助于推进过程-产物关系研究。

(2)远端泥是溢出河口的物质在陆架上的堆积体,陆架边缘三角洲是海面位置较低且相对稳定时期的产物。在斜坡沉积形态上,远端泥顶面接近于波浪基面,而河口水下三角洲顶面接近于海面,因此可以加以区分。但地层中陆架边缘三角洲的归属仅凭斜坡沉积形态难以确定,需要建立远端泥和 underwater 三角洲的判别指标。

(3)三角洲复合体不仅是同一海面位置下不同瓣体的叠加,而且要包含不同的相对稳定海面时期的高海面、陆架中部和陆架边缘三角洲堆积体。按照第四纪全球海面变化曲线,潜在的三角洲形成时期对应着数以百计的稳定海面时期,而每个时期又可有多个瓣体,构成复杂的沉积记录的时空分布格局。因此,沉积记录的完整性应在此框架下重新考虑。

(4)河流三角洲存在着生长极限,在目前海面位置、陆架地形、沉积物供给和水动力条件下,达到生长极限的时间尺度为 $10^3 \sim 10^4$ a,三角洲面积可达 10^4 km²量级。但地质历史上上述条件有很大不同,现有地层记录中的最大面积为 6×10^4 km²,但三角洲的最大可能规模仍是一个悬而未决的问题。

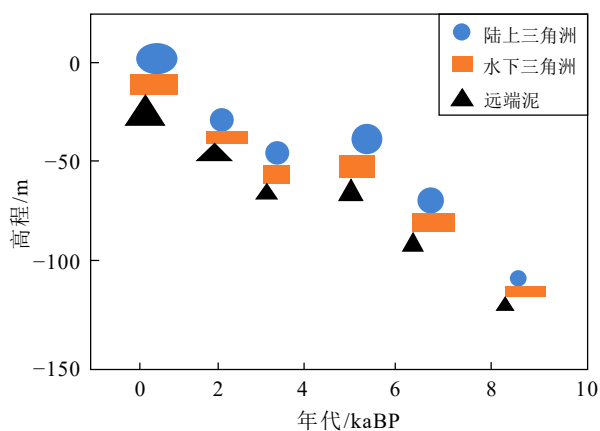


图4 年代-高程框架下的陆上三角洲、水下三角洲和远端泥复合体分布示意图

Fig.4 Schematic diagram showing the spatial and temporal distribution of river mouth delta, subaqueous delta and distal mud systems

致谢: 感谢青岛海洋地质研究所何起祥先生对海岸沉积体系研究给予的鼓励和支持, 谨以本文纪念何起祥先生。期刊编辑部和审稿专家对本文提出修改建议并提供图件编辑帮助, 谨此致谢。

参考文献 (References)

- [1] 何起祥. 中国海洋沉积地质学[M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 1-503. [HE Qixiang. Marine Sedimentary Geology of China[M]. Beijing: China Ocean Press, 2006: 1-503.]
- [2] Shepard F P. Criteria in modern sediments useful in recognizing ancient sedimentary environments[M]//Van Straaten L M J U. Deltaic and Shallow Marine Deposits: Proceedings of the 6th International Sedimentological Congress the Netherlands and Belgium. Amsterdam: Elsevier, 1964: 1-25.
- [3] Kuenen P H. Marine Geology[M]. New York: John Wiley and Sons, 1950: 1-568.
- [4] Laughton A S, Roberts D G. Morphology of the continental margin [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1978, 290 (1366): 75-85.
- [5] Milliman J D, Farnsworth K L. River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 1-384.
- [6] Mitchell J K, Soga K. Fundamentals of Soil Behavior[M]. 3rd ed. New York: John Wiley, 2005: 1-577.
- [7] Curray J R. Sediment volume and mass beneath the Bay of Bengal [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 125 (1-4): 371-383.
- [8] Jacobi R D. Sediment slides on the northwestern continental margin of Africa [J]. *Marine Geology*, 1976, 22 (3): 157-173.
- [9] Petley D N. The continental shelf and continental slope[M]//Burt T P, Allison M A. Sediment Cascades: An Integrated Approach. Chichester: Wiley-Blackwell, 2010: 433-448.
- [10] Curray J R, Emmel F J, Moore D G. The Bengal Fan: morphology, geometry, stratigraphy, history and processes [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19 (10): 1191-1223.
- [11] Wetzel A. The transfer of river load to deep-sea fans: a quantitative approach [J]. *AAPG Bulletin*, 1993, 77 (10): 1679-1692.
- [12] Allison M A. Geologic framework and environmental status of the Ganges-Brahmaputra delta [J]. *Journal of Coastal Research*, 1998, 14 (3): 826-836.
- [13] Goodbred S L Jr, 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.
- [14] Allison M A, Khan S R, Goodbred S L Jr, et al. Stratigraphic evolution of the late Holocene Ganges-Brahmaputra lower delta plain [J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 155 (3-4): 317-342.
- [15] 李保华, 李从先, 沈焕庭. 冰后期长江三角洲沉积通量的初步研究 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 2002, 32 (9): 776-782. [LI Baohua, LI Congxian, SHEN Huanting. Preliminary study on sediment fluxes for the Yangtze River Delta during the late glacial period [J]. *Science in China (Series D)*, 2002, 32 (9): 776-782.]
- [16] Corbett D R, McKee B, Allison M. Nature of decadal-scale sediment accumulation on the western shelf of the Mississippi River delta [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26 (17-18): 2125-2140.
- [17] Gao S, Wang D D, Yang Y, et al. Holocene sedimentary systems on a broad continental shelf with abundant river input: process-product relationships[M]//Clift P D, Harff J, Wu J, et al. River-Dominated Shelf Sediments of East Asian Seas. London: Geological Society of London, 2016: 231-268.
- [18] Ager D V. The Nature of the Stratigraphical Record[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1981: 122.
- [19] Allison M A, Nittrouer C A, Ogston A S, et al. Sedimentation and survival of the Mekong Delta: a case study of decreased sediment supply and accelerating rates of relative sea level rise [J]. *Oceanography*, 2017, 30 (3): 98-109.
- [20] 高抒. 沉积记录研究的现代过程视角[J]. *沉积学报*, 2017, 35 (5): 918-925. [GAO Shu. Discover more information from sedimentary records: views based on contemporary earth surface dynamic processes [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35 (5): 918-925.]
- [21] Najman Y. The detrital record of orogenesis: a review of approaches and techniques used in the Himalayan sedimentary basins [J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, 74 (1-2): 1-72.
- [22] 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.
- [23] Hori K, Saito Y, Zhao Q H, et al. Architecture and evolution of the tide-dominated Changjiang (Yangtze) River delta, China [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 146 (3-4): 249-264.
- [24] Hori K, Saito Y. An early Holocene sea-level jump and delta initiation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34 (18): L18401.
- [25] Wright L D. River deltas[M]//Davis R A Jr. Coastal Sedimentary Environments. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1985: 1-76.
- [26] Elliott T. Clastic shorelines[M]//Reading H G. Sedimentary Environments and Facies. Oxford: Blackwell, 1986: 113-154.
- [27] Woodroffe C D. Coasts: Form, Process and Evolution[M]. New York: Cambridge University Press, 2002: 1-623.
- [28] Gao S. Modeling the growth limit of the Changjiang Delta [J]. *Geomorphology*, 2007, 85 (3-4): 225-236.
- [29] Gao S, Collins M B. Holocene sedimentary systems on continental shelves [J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 268-294.
- [30] Sommerfeld C K. On sediment accumulation rates and stratigraphic completeness: lessons from Holocene ocean margins [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26 (17-18): 2225-2240.
- [31] Blum M D, Törnqvist T E. Fluvial responses to climate and sea-level change: a review and look forward [J]. *Sedimentology*, 2000, 41 (S1): 2-48.
- [32] Blum M D, Roberts H H. Drowning of the Mississippi Delta due to insufficient sediment supply and global sea-level rise [J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2 (7): 488-491.
- [33] Duc D M, Nhuan M T, Van Ngoi C. An analysis of coastal erosion in

- the tropical rapid accretion delta of the Red River, Vietnam [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 43 (1): 98-109.
- [34] Yang S L, Luo X X, Temmerman S, et al. Role of delta - front erosion in sustaining salt marshes under sea - level rise and fluvial sediment decline [J]. *Limnology and Oceanography*, 2020, 65 (9): 1990-2009.
- [35] Syvitski J P M, Saito Y. Morphodynamics of deltas under the influence of humans [J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 57 (3-4): 261-282.
- [36] Syvitski J P M, Kettner A J, Overeem I, et al. Sinking deltas due to human activities [J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2 (10): 681-686.
- [37] Restrepo J C, Schrottke K, Traini C, et al. Sediment transport and geomorphological change in a high-discharge tropical delta (Magdalena River, Colombia): insights from a period of intense change and human intervention (1990-2010) [J]. *Journal of Coastal Research*, 2016, 32 (3): 575-589.
- [38] Gilbert G K. The topographic features of lake shores [R]. Reston, Virginia: U. S. Geological Survey, 1885: 75-123.
- [39] Bates C C. Rational theory of delta formation [J]. *AAPG Bulletin*, 1953, 37 (9): 2119-2162.
- [40] Coleman J M. Dynamic changes and processes in the Mississippi River delta [J]. *GSA Bulletin*, 1988, 100 (7): 999-1015.
- [41] Reading H G. Sedimentary Environments and Facies [M]. 2nd ed. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1991: 1-615.
- [42] Barrell J. Criteria for the recognition of ancient delta deposits [J]. *GSA Bulletin*, 1912, 23 (1): 377-446.
- [43] Fisher W L, McGowen J H. Depositional systems in Wilcox Group (Eocene) of Texas and their relation to occurrence of oil and gas [J]. *AAPG Bulletin*, 1969, 53 (1): 30-54.
- [44] Shelton J W. Models of Sand and Sandstone Deposits: A Methodology for Determining Sand Genesis and Trend [M]. Norman: University of Oklahoma, 1973: 122.
- [45] Ethridge F G, Gopinath T R, Davies D K. Recognition of deltaic environments from small samples [M]//Broussard M L. Deltas: Models for Exploration. Texas: Houston Geological Society, 1975: 151-164.
- [46] Moore D. Deltaic sedimentation [J]. *Earth-Science Reviews*, 1966, 1 (2-3): 87-104.
- [47] Wright L D, Coleman J M. Variations in morphology of major river deltas as functions of ocean wave and river discharge regimes [J]. *AAPG Bulletin*, 1973, 57 (2): 370-398.
- [48] Galloway W E. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems [C]//Broussard M L. Deltas: Models for Exploration. Texas: Houston Geological Society, 1975: 87-98.
- [49] Coleman J M, Roberts H H, Stone G W. Mississippi River delta: an overview [J]. *Journal of Coastal Research*, 1998, 14 (3): 699-716.
- [50] Evans G. Deltas: the fertile dustbins of the continents [J]. *Proceedings of the Geologists' Association*, 2012, 123 (3): 397-418.
- [51] Palinkas C M, Nittrouer C A. Modern sediment accumulation on the Po shelf, Adriatic Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2007, 27 (3-4): 489-505.
- [52] Yang Z S, Liu J P. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2007, 240 (1-4): 169-176.
- [53] Gao S, Liu Y L, Yang Y, et al. Evolution status of the distal mud deposit associated with the Pearl River, northern South China Sea continental shelf [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 114: 562-573.
- [54] Mayall M J, Yeilding C A, Oldroyd J D, et al. Facies in a shelf-edge delta-An example from the subsurface of the Gulf of Mexico, middle Pliocene, Mississippi Canyon, Block 109 [J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76 (4): 435-448.
- [55] Dixon J F, Steel R J, Olariu C. River-dominated, shelf-edge deltas: delivery of sand across the shelf break in the absence of slope incision [J]. *Sedimentology*, 2012, 59 (4): 1133-1157.
- [56] Bourget J, Ainsworth R B, Thompson S. Seismic stratigraphy and geomorphology of a tide or wave dominated shelf-edge delta (NW Australia): process-based classification from 3D seismic attributes and implications for the prediction of deep-water sands [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 57: 359-384.
- [57] Liu J, Kong X H, Saito Y, et al. Subaqueous deltaic formation of the Old Yellow River (AD 1128-1855) on the western South Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2013, 344: 19-33.
- [58] Goodbred S L Jr, Saito Y. Tide-dominated deltas [M]//Davis R A Jr, Dalrymple R W. Principles of Tidal Sedimentology. Dordrecht: Springer, 2012: 129-149.
- [59] de Fátima Rossetti D, Polizel S P, Cohen M C L, et al. Late Pleistocene-Holocene evolution of the Doce River delta, southeastern Brazil: implications for the understanding of wave-influenced deltas [J]. *Marine Geology*, 2015, 367: 171-190.
- [60] Qi Y L, Yu Q, Gao S, et al. Morphological evolution of river mouth spits: wave effects and self-organization patterns [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2021, 262: 107567.
- [61] Yang S L, Belkin I M, Belkina A I, et al. Delta response to decline in sediment supply from the Yangtze River: evidence of the recent four decades and expectations for the next half-century [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 57 (4): 689-699.
- [62] Gao S, Wang Y P, Gao J H. Sediment retention at the Changjiang sub-aqueous delta over a 57 year period, in response to catchment changes [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 95 (1): 29-38.
- [63] Li G C, Zhou L, Qi Y L, et al. Threshold sediment flux for the formation of river deltas in Hainan Island, southern China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29 (1): 146-160.
- [64] Day J W Jr, Boesch D F, Clairain E J, et al. Restoration of the Mississippi Delta: lessons from hurricanes Katrina and Rita [J]. *Science*, 2007, 315 (5819): 1679-1684.
- [65] Ta T K O, Nguyen V L, Tateishi M, et al. Holocene delta evolution and sediment discharge of the Mekong River, southern Vietnam [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21 (16-17): 1807-1819.
- [66] 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6000~2 500a [J]. *海洋学报*, 2006, 28 (4): 64-80. [WU Chaoyu, BAO Yun, REN Jie, et al. A numerical simulation and morphodynamic analysis on the evolution of the Zhujiang

- River Delta in China: 6000-2500 aBP [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(4): 64-80.]
- [67] 吴超羽, 韦惺. 从溺谷湾到三角洲: 现代珠江三角洲形成演变研究辨析[J]. *海洋学报*, 2021, 43(1): 1-26. [WU Chaoyu, WEI Xing. From drowned valley to delta: discrimination and analysis on issues of the formation and evolution of the Zhujiang River Delta [J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(1): 1-26.]
- [68] Nittrouer C A, Kuehl S A, DeMaster D J, et al. The deltaic nature of Amazon shelf sedimentation [J]. *GSA Bulletin*, 1986, 97(4): 444-458.
- [69] Milliman J D, Summerhayes C P, Barretto H T. Quaternary sedimentation on the Amazon continental margin: a model [J]. *GSA Bulletin*, 1975, 86(5): 610-614.
- [70] Nittrouer C A, Kuehl S A. Geological significance of sediment transport and accumulation on the Amazon continental shelf [J]. *Marine Geology*, 1995, 125(3-4): 175-176.
- [71] Chen J Y, Li D J, Chen B L, et al. The processes of dynamic sedimentation in the Changjiang Estuary [J]. *Journal of Sea Research*, 1999, 41(1-2): 129-140.
- [72] Rich J L. Three critical environments of deposition, and criteria for recognition of rocks deposited in each of them [J]. *GSA Bulletin*, 1951, 62(1): 1-20.
- [73] Mathews W H, Shepard F P. Sedimentation of Fraser river delta, British Columbia [J]. *AAPG Bulletin*, 1962, 46(8): 1416-1438.
- [74] Kenyon P M, Turcotte D L. Morphology of a delta prograding by bulk sediment transport [J]. *GSA Bulletin*, 1985, 96(11): 1457-1465.
- [75] Chillarige A V, Morgenstern N R, Robertson P K, et al. Seabed instability due to flow liquefaction in the Fraser River delta [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, 34(4): 520-533.
- [76] Maloney J M, Bentley S J, Xu K H, et al. Mass wasting on the Mississippi River subaqueous delta [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 200: 103001.
- [77] Wright L D, Wiseman W J Jr, Yang Z S, et al. Processes of marine dispersal and deposition of suspended silts off the modern mouth of the Huanghe (Yellow River) [J]. *Continental Shelf Research*, 1990, 10(1): 1-40.
- [78] Hill P R, Lintern D G. Turbidity currents on the open slope of the Fraser Delta [J]. *Marine Geology*, 2022, 445: 106738.
- [79] Friedrichs C T, Scully M E. Modeling deposition by wave-supported gravity flows on the Po River prodelta: from seasonal floods to prograding clinoforms [J]. *Continental Shelf Research*, 2007, 27(3-4): 322-337.
- [80] Cattaneo A, Correggiari A, Langone L, et al. The late-Holocene Gargano subaqueous delta, Adriatic shelf: sediment pathways and supply fluctuations [J]. *Marine Geology*, 2003, 193(1-2): 61-91.
- [81] Niedoroda A W, Reed C W, Das H, et al. Analyses of a large-scale depositional clinoform wedge along the Italian Adriatic coast [J]. *Marine Geology*, 2005, 222-223: 179-192.
- [82] Liu J P, Kuehl S A, Pierce A C, et al. Fate of ayeyarwady and thanlwin rivers sediments in the Andaman sea and bay of bengal [J]. *Marine Geology*, 2020, 423: 106137.
- [83] 金翔龙. 东海海洋地质[M]. 北京: 海洋出版社, 1992: 1-524. [JIN Xianglong. *Marine Geology of the East China Sea*[M]. Beijing: China Ocean Press, 1992: 1-524.]
- [84] Liu J P, Li A C, Xu K H, et al. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(17-18): 2141-2156.
- [85] 李安春, 张凯棣. 东海内陆架泥质沉积体研究进展[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(4): 705-727. [LI Anchun, ZHANG Kaidi. Research progress of mud wedge in the inner continental shelf of the East China Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(4): 705-727.]
- [86] Liu J, Qiu J D, Saito Y, et al. Late Pleistocene to Holocene facies architecture and sedimentary evolution of the Zhejiang coast, East China Sea [J]. *Marine Geology*, 2023, 459: 107027.
- [87] Liu J P, Milliman J D, Gao S, et al. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2004, 209(1-4): 45-67.
- [88] Liu J, Saito Y, Wang H, et al. Sedimentary evolution of the Holocene subaqueous clinoform off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2007, 236(3-4): 165-187.
- [89] Liu Y L, Gao S, Wang Y P, et al. Distal mud deposits associated with the Pearl River over the northwestern continental shelf of the South China Sea [J]. *Marine Geology*, 2014, 347: 43-57.
- [90] Lee H J, Jeon C K, Lim H S. Dynamical analysis of the mud-belt formation in the Bohai, Yellow and East China seas [J]. *Marine Geology*, 2020, 423: 106140.
- [91] Sternberg R W, Cacchione D A, Paulso B, et al. Observations of sediment transport on the Amazon subaqueous delta [J]. *Continental Shelf Research*, 1996, 16(5-6): 697-715.
- [92] Uehara K, Saito Y. Late Quaternary evolution of the Yellow/East China Sea tidal regime and its impacts on sediments dispersal and seafloor morphology [J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 162(1-2): 25-38.
- [93] 任美鏖. 珠江河口动力地貌特征及海滩利用问题[J]. *南京大学学报:自然科学版*, 1964, 8(1): 135-147. [REN Meie. Dynamic geomorphology and beach utilization of the Pearl River Estuary [J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 1964, 8(1): 135-147.]
- [94] Owen R B. Modern fine-grained sedimentation - spatial variability and environmental controls on an inner pericontinental shelf, Hong Kong [J]. *Marine Geology*, 2005, 214(1-3): 1-26.
- [95] 薛成凤, 贾建军, 高抒, 等. 中小河流对长江水下三角洲远端泥沉积的贡献: 以椒江和甌江为例[J]. *海洋学报*, 2018, 40(5): 75-89. [XUE Chengfeng, JIA Jianjun, GAO Shu, et al. The contribution of middle and small rivers to the distal mud of subaqueous Changjiang Delta: results from Jiaojiang River and Oujiang River [J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(5): 75-89.]
- [96] Suter J R, Berryhill H L Jr. Late Quaternary shelf-margin deltas, northwest Gulf of Mexico [J]. *AAPG Bulletin*, 1985, 69(1): 77-91.
- [97] Sydow J, Roberts H H. Stratigraphic framework of a late Pleistocene shelf-edge delta, northeast Gulf of Mexico [J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78(8): 1276-1312.

- [98] Porebski S J, Steel R J. Shelf-margin deltas: their stratigraphic significance and relation to deepwater sands [J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 62 (3-4): 283-326.
- [99] Muto T, Steel R J. In defense of shelf - edge delta development during falling and lowstand of relative sea level [J]. *The Journal of Geology*, 2002, 110 (4): 421-436.
- [100] Patruno S, Helland-Hansen W. Clinoforms and clinoform systems: review and dynamic classification scheme for shorelines, subaqueous deltas, shelf edges and continental margins [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 185: 202-233.
- [101] Fielding L, Najman Y, Millar I, et al. The initiation and evolution of the River Nile [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 489: 166-178.
- [102] 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.
- [103] 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.
- [104] Bolshiyarov D, Makarov A, Savelieva L. Lena River delta formation during the Holocene [J]. *Biogeosciences*, 2015, 12 (2): 579-593.
- [105] Vespremeanu-Stroie A, Zăinescu F, Preoteasa L, et al. Holocene evolution of the Danube delta: an integral reconstruction and a revised chronology [J]. *Marine Geology*, 2017, 388: 38-61.
- [106] Cho A, Cheong D, Kim J C, et al. Delta formation in the Nakdong River, Korea, during the Holocene as Inferred from the diatom assemblage [J]. *Journal of Coastal Research*, 2017, 33 (1): 67-77.
- [107] Anthony E J, Marriner N, Morhange C. Human influence and the changing geomorphology of Mediterranean deltas and coasts over the last 6000 years: from progradation to destruction phase?[J] *Earth-Science Reviews*, 2014, 139: 336-361.
- [108] Hanebuth T J J, Lantzsch H, Nizou J. Mud depocenters on continental shelves-appearance, initiation times, and growth dynamics [J]. *Geo-Marine Letters*, 2015, 35 (6): 487-503.
- [109] Li G C, Xia Q, Wang Y P, et al. Geometric modeling of Holocene large-river delta growth patterns, as constrained by environmental settings [J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64 (2): 318-328.
- [110] Davis R A Jr. *Depositional Systems: A Genetic Approach to Sedimentary Geology* [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1983: 1-669.
- [111] Skolnick H. Stratigraphy of some Lower Cretaceous rocks of Black Hills area [J]. *AAPG Bulletin*, 1958, 42 (4): 787-815.
- [112] Ferm J C, Williams E G. Characteristics of a carboniferous marine invasion in western pennsylvania [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1965, 35 (2): 319-330.
- [113] Ferm J C, Cavaroc V V Jr. A nonmarine sedimentary model for the Allegheny rocks of West Virginia [M]//de Vries Klein G. *Late Paleozoic and Mesozoic Continental Sedimentation, Northeastern North America*. Boulder, Colorado: Geological Society of America Special, 1968: 1-19.
- [114] Brown L F Jr. Geometry and distribution of fluvial and deltaic sandstones (Pennsylvanian and Permian), north-central Texas [J]. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 1969, 19: 23-47.
- [115] Ferm J C. Allegheny deltaic deposits [C]//Morgan J P, Shaver R H. *Deltaic Sedimentation, Modern and Ancient*. Tulsa: SEPM Special Publication, 1970: 246-255.
- [116] Visher G S, Sandro S B, Phares R S. Pennsylvanian delta patterns and petroleum occurrences in eastern Oklahoma [J]. *AAPG Bulletin*, 1971, 55 (8): 1206-1230.
- [117] Ferm J C. Carboniferous environmental models in eastern United States and their significance [M]//Briggs G. *Carboniferous of the Southeastern United States*. Geological Society of America, 1974: 79-95.
- [118] Bose P K, Eriksson P G, Sarkar S, et al. Sedimentation patterns during the Precambrian: a unique record? [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 33 (1): 34-68.