

长江三角洲蓝图重绘的基础科学问题：进展与未来研究

汪亚平^{1,2}, 贾建军¹, 杨 阳¹, 周 亮¹, 冯 威¹, 高建华², 魏 稳¹, 李占海¹,
史本伟¹, 高 抒¹

(1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室 海洋科学学院, 上海 200241; 2. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 在全球气候变化和人类活动影响加剧的背景下, 作为河口海岸重要子系统的三角洲正在发生快速变化。长江三角洲地处长江入东海交汇处, 是中国最重要的经济核心区之一, 对邻近区域乃至整个长江经济带经济社会发展都起着重要作用。由于全球变暖、海面上升和强烈人类活动引发了三角洲系统状态转换, 因此以往基于恒定系统状态而获得的有关长江三角洲的认识已不能满足未来需求, 迫切需要对未来海面变化、极端事件、流域与河口工程影响下的三角洲物质循环条件、物理过程、地貌冲淤演化、源-汇格局调整等科学问题进行深入研究。在三角洲系统行为、未来演化趋势的预测能力建设中, 应重视从海面到海底的综合立体观测系统的发展, 以获取关键数据; 基于三角洲系统的时、空演化特征, 建立三角洲本征态和衍生态的谱系理论。未来需针对系统状态转换而调整原先的经济社会发展模式, 以便保护自然资源、重建生态系统, 更好地支撑长江经济带发展, 重绘长江三角洲发展蓝图。

关键词: 河口三角洲; 海岸带; 系统状态转换; 沉积物输运; 三角洲谱系; 蓝图重绘; 长江

中图分类号: P731.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2019)10-0002-11

DOI: 10.11759/hyhx20190306002

河口海岸地处海陆交互区域, 是地球系统的重要组成部分。三角洲是重要的河口海岸子系统, 也是人类文明的重要发源地之一; 三角洲城市群是当今社会的人口密集区和经济重地, 对社会、经济发展、生态系统维持具有不可替代的作用, 国际未来地球海岸计划(Future Earth Coasts)更是将“三角洲”作为针对特殊海岸带区域的 5 大“科学热点”之一^[1-2]。

在自然背景下, 河口三角洲形成演化受原始地形、河流入海物质通量、河口沉积动力过程及海面变化等因素的共同影响^[3]。全球范围内全新世三角洲演化具有一定的共性, 主要发育于高海面以来的 6~7 ka 时期, 其系统特征表现为海面相对稳定、陆域和海域沉积物来量数量级基本恒定^[4-5], 同时也具有鲜明的区域特征^[6]。自 20 世纪 50 年代以来, 气候变化和高强度人类活动使得河口地形、入海物质通量、沉积动力过程及海面变化等因素都变得更加复杂^[7-8]; 频发的极端气候事件对三角洲演化进程也有深刻的影响, 进一步降低了三角洲系统特征的可预测性^[5]。

在全球气候、海面变化和人类活动不断增强的背景下, 陆相沉积物输入的减少及海相动力的增强

已导致河口三角洲沉积物源-汇模式转变, 世界范围内的三角洲呈现出转淤为冲、沉降加剧、生态退化加重的情势^[9-10], 表明河口三角洲的系统状态正在发生转换, 海岸带经济、社会的现有发展模式或将难以持续。以地处长江三角洲的上海为例, 交通、城市建筑的拥挤程度逐年增长, 生产用地已接近极限, 围垦也使得海岸带生态系统结构和功能逐步退化^[11], 三角洲物理增长的可持续性及其对经济社会发展支撑力的可持续性都受到了严峻的挑战。另一方面, 在全球气候与海面变化的背景下, 海岸带灾害呈现加剧趋势; IPCC 预测的平均全球海面上升幅度约为 3 mm/a, 其背后隐藏的危机对当代人似乎仍很遥远, 而海面变化是两极冰盖的系统行为, 格陵兰冰盖目前面临着系统崩溃、短时间融化殆尽的风险, 未来海面变化事件对河口三角洲系统将有远程效应。此外,

收稿日期: 2019-03-06; 修回日期: 2019-04-04

基金项目: 上海市教育委员会科研创新计划(2019-01-07-00-05-E00027); 国家自然科学基金项目(41625021)

[Foundation: Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission, No. 2019-01-07-00-05-E00027; National Natural Science Foundation of China, No. 41625021]

作者简介: 汪亚平(1972-), 男, 教授, 博士, 主要从事河口海岸学研究, E-mail: ypwang@nju.edu.cn

流域和河口的大规模人类活动，也将三角洲地区日益集中的财富暴露于自然灾害的威胁之下。因此，针对这种新情况，迫切需要对海岸带、特别是河口三角洲演化过程的相关基础科学问题展开研究，揭示河口三角洲系统状态转换的过程和机理，提出新的理论和应对策略，预测新状态下的三角洲演化趋势，以此为基础构建人与自然高度和谐、资源高效利用并优化配置、生态系统健康稳定、可持续地支撑经济社会文化发展及繁荣的三角洲状态，实现未来“海岸带蓝图重绘”、特别是“三角洲蓝图重绘”。

1 三角洲的基本理论和研究现状

河口三角洲是由河流携带的沉积物在河口交汇处堆积而成，包括陆上三角洲和水上三角洲，以及经过浪、潮、流等海洋动力改造后的有关堆积体的

总和^[12]。传统地貌学家依据陆上三角洲的形态和海洋动力组合，识别出河控、潮控和浪控等三个端元，认为三角洲不外乎上述端元及其过渡类型^[13](图 1)，这是一种静态的认识。Penland 等^[14]首次将相对海面变化纳入到三角洲的分类研究中，标志着强调海面变化动态研究的开始。从现代过程的视角来看，三角洲系统可由一系列边界条件和动力过程的组合所决定的状态函数来刻画，如海面变化、沉积物供给、三角洲生长空间、海岸动力、河口羽状锋特征等^[7, 15]。换言之，早期静态分类方案可视为对三角洲在某一时空尺度的“拍照”行为，而系统的、深刻的理解应包括时间和空间的变化，即三角洲系统状态的改变会使得某种形态的三角洲演变为另外一种形态^[16]。例如，始于潮控环境的三角洲生长壮大之后，可能会直面开敞的陆架环境而演变为浪控型^[17]。

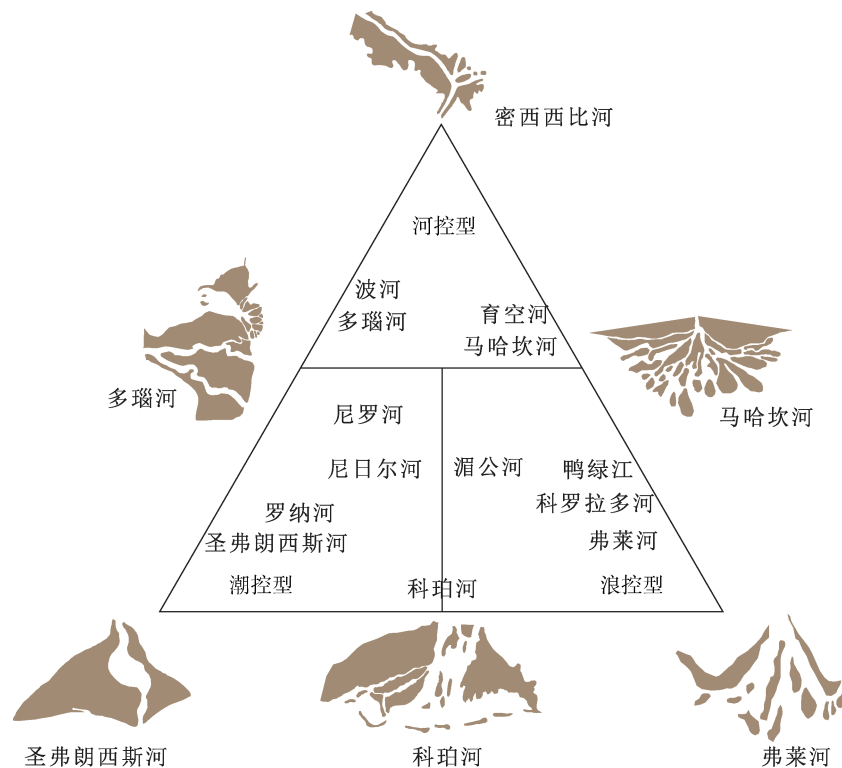


图 1 经典的三角洲分类：河控、潮控和浪控三角洲及其过渡类型^[7, 13]

Fig.1 Typical classification of deltas, including river-controlled, tidal-controlled and wave-controlled deltas and their transition types^[7, 13]

总结起来，近期三角洲研究的进展主要体现在如下几个方面：①基于物质守恒原理和统计资料，建立经验化、半定量模型来刻画三角洲演化，或者发展特定参数化的定量模型，来探索三角洲地貌发育的过程和机理；②采用约简技术，进行千年尺度的三角洲演化模拟；③考虑人类活动和全球变化影响，

提出三角洲状态评估和应对策略。

中国学者对三角洲研究也做出了重要贡献，获得的主要新认识包括：①河口三角洲形成需要有一个沉积物临界入海通量，其值与三角洲演化的阶段有关^[18]；②河流三角洲的范围实际上可以远超过经典河口三角洲区域，其演化是按照河口湾、河口三角

洲、水下三角洲、陆架远端泥的顺序,全新世高海面时期之后,首先入海沉积物充填河口湾,然后堆积河口与水下三角洲,再往后沉积物大规模溢出河口,被陆架环流沿岸输送至较远场所,形成泥质沉积^[19]; ③河流三角洲被定义为特定河流的入海物质在河口和邻近陆架所形成的堆积体,据此认为远端泥是其重要的组成部分,其揭示了河流三角洲演化的阶段性^[20-21]; ④低海面时期的河流三角洲,也可能是由陆上三角洲、水下三角洲和远端泥所组成,因此,有必要建立区分水下三角洲和远端泥的沉积指标^[20]。

2 长江三角洲演化模式

从地貌学角度看,长江三角洲范围由三个部分组成。首先是陆上三角洲,包括百年尺度内处于冲淤演变的区域,如河口沙岛、海岸湿地等。其次是水下三角洲,其范围自口门向外,前端最远可达 50~60 m 等深线附近。第三部分是远端泥沉积,沿浙闽海岸向西南一直延伸到台湾海峡中部。长江三角洲沉积体的形成、演化与海面变化、流域物源供应和气候变化等有着密切的关系^[22]。

长江三角洲体系开始形成于距今 7~8 ka,随着海面的持续上升而生长,但沉积物堆积速率低于海面上升速率,三角洲前缘的梯度逐渐增加;6 ka 年以来海面基本稳定,相对有限的长江入海沉积物主要用于充填长江中下游流域河谷和冲积平原以及河口的沉积盆地,河口-陆架沉积体系的生长速率较低^[3];距今 2 ka 左右,人类活动开始加强、流域水土流失不断加剧,长江入海沉积物显著增加并进入开敞陆架区,使长江三角洲和东海内陆架泥区进入了快速生长阶段。然而,如果人类活动是影响入海沉积物通量的决定因素,理论上在沉积物物源供应充足条件下,长江三角洲的演化模式为向海持续淤长(图 2),即 2 ka 年以来长江三角洲河口向海推进速率应该一直呈现显著增加的态势,但是历史记录研究表明南汇东部岸线在 AD 1172~1733 和崇明东滩在 AD 825~1762 期间却呈现缓慢的推进状态,推进速率只有 2 m/a 左右^[23]。可见长江三角洲长期的岸线变迁具有阶段性,且影响岸线变迁的因素十分复杂,还需要考虑海面升降、气候变化和沉积物来量变化等因素。

目前,国内外学者针对长江三角洲平原海岸特征与演化、沉积动力过程与海岸地貌演变、海面上升造成的海岸浸淹、动力加强导致的海岸侵蚀、水库与调水工程导致河流入海水沙减少,入海输沙量减少引起的沉积-地貌体系变化、风暴潮与盐水入侵

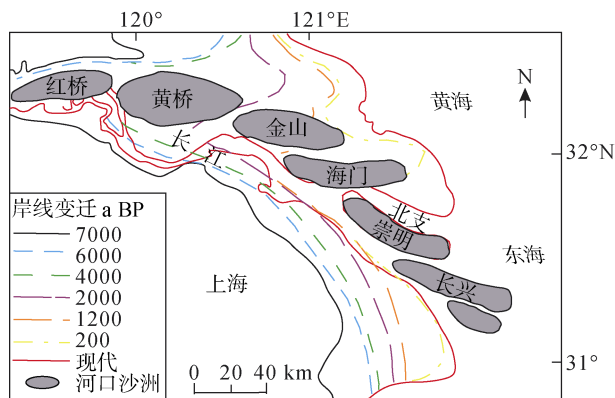


图 2 长江三角洲 7 ka 以来演化模式及岸线变迁^[24-25]
Fig.2 Evolution model and shoreline changes of the Changjiang River Delta since 7 ka

灾害、陆源污染与海岸环境变化等均进行了广泛的研究^[21, 26-28]。但是,上述研究的基本前提是认为整个长江三角洲系统状态保持稳定、或保持淤涨或冲淤平衡的基础之上;至于系统状态失衡乃至冲淤状态发生转换后,长江三角洲及其邻近沉积体系相互关系的调整,沉积动力环境的变化,以及地形、地貌、生态系统的改变尚缺乏深入研究。

我们认为,长江三角洲系统状态转换具体表现在如下四个方面: ①维持长江三角洲整体向海推进的沉积物供应条件已经不复存在,水下三角洲已进入蚀退状态^[29]; ②人类活动对长江河口地形和地貌的改造(如围填海、深水航道治理工程等),深刻地影响了长江口的地貌格局,改变了沉积物分配和河口动力; ③陆上开发活动(地下水开采与城市建设)加剧了地面沉降,使得相对海面上升的危害与风险加剧; ④全球变暖导致海面上升加速,极端事件发生的频率和强度增加,海岸带风险管理的压力日益增大^[30]。

由此可见,基于长江三角洲的系统状态稳定而获得的有关三角洲演化、沉积物输运、沙洲-潮滩淤涨的理论,乃至沿岸围垦规划、海岸防护和生态保护等资源环境策略都已不能适应当前情况,因而需要对三角洲系统状态转变中的三角洲输入条件的变异与响应、长江三角洲系统源汇状态的改变及动力机制、地貌冲淤演化等问题进行深入研究。

3 长江三角洲演化研究的关键科学问题

3.1 三角洲系统的边界条件与响应

3.1.1 海面上升

在全球变暖的背景下,海面正在加速上升,严

重威胁着沿海地区城市的生存发展。尤其是长江三角洲等经济发达、人口密集区域，海面上升所带来的问题更为严重。中国国家海洋局沿海海面监测数据显示^[31]，1980—2017年中国沿海相对海面平均上升速率为3.3 mm/a，高于同期全球水平。而上海沿海海面相比于常年(1993—2011年)上升60 mm，且各月波动较大，其中10月海面更是到达1980年以来同期最高值。如果考虑两极冰盖动态及其远程效应，未来海面上升速率可能会更高。

海面上升将导致沿海地区海岸和潮滩的侵蚀，引发咸水入侵等问题，如果叠加热带风暴的影响，

可能引发更为严重的风暴潮和洪涝灾害，威胁着长江三角洲地区的人口和居住地安全^[32]。数值模拟显示，长江口海面上升10~16 cm后，崇明岛所受影响最大，最高排涝水位将上升3~5 cm，长兴岛次之，横沙岛所受影响最小^[33]。综合分析表明，按照IPCC对海面上升的预测结果，2050年崇明东滩6%~20%的面积将会被淹没，而2100年将达到11%~39%^[34]。长时间尺度来看，海面上升和地面沉降是洪涝灾害的主要影响因素^[35]，因此三角洲演变对海面上升的响应不容忽视，需要有更准确的预测和完备的应对预案。

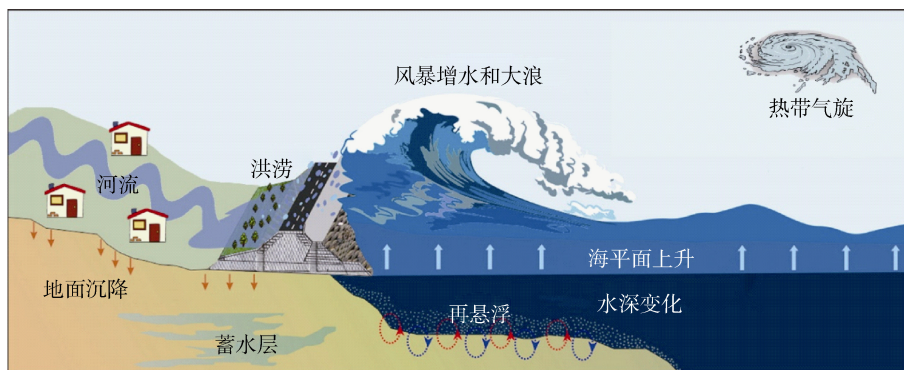


图3 河口海岸对海面上升的响应模式^[30]

Fig.3 Estuarine and coastal response on the sea level rising

3.1.2 人类活动影响下的地形和岸线变化及响应

自1975年以来，长江三角洲的工程建设活动呈明显增加趋势，如北槽深水航道工程，长兴岛青草沙水库工程，横沙东滩、崇明东滩和南汇东滩围垦工程等一系列人类活动，加上长江流域的大坝建设调节入海水沙总量及其年内分配，深刻地影响了长江口的地貌格局^[36]，改变了沉积物分配和河口动力^[37]，影响了潮滩演变^[38]。

20世纪50年代以来，上海已围垦约1 000 km²的潮滩，相当于全市陆地面积的15%^[29]。这一时期长江三角洲潮滩面积整体上呈降低趋势，但存在区域性差异：崇明东滩、横沙浅滩及南汇边滩面积减少，而九段沙潮滩面积几乎翻倍。人类活动对于河口三角洲地形和岸线变化的影响较为复杂，在短时间尺度上是主导因素，在河口三角洲演化模拟中，应将人类活动纳入三角洲模拟的边界条件或驱动因子，才能对长江三角洲系统演化进行更为准确的预测。

3.1.3 水沙入海通量

长江水下三角洲作为长江入海沉积物向浙闽沿岸泥区转运的中转站，即使在达到地貌均衡态(生长

极限)的情况下，仍需要一定数量的流域沉积物供给，以提供给浙闽沿岸泥区和长江河口的潮滩。研究表明，长江三角洲沉积环境保持稳定的临界输沙率为 3.0×10^8 t/a量级^[39]。由于流域开发、南水北调工程、梯级建坝拦截沉积物的影响，长江大通站沉积物通量已经减少到器测记录以来的最低值：三峡大坝截流以来大通站平均年输沙量(1.4×10^8 t/a, 2003—2016年)仅约为60 a平均值(3.9×10^8 t/a, 1951—2010年)的1/3。目前维持长江三角洲整体向海推进的沉积物供应条件已经不复存在^[39-41]，水下三角洲局部区域已进入蚀退状态^[42]，系统状态已经发生了从量变到质变的变化。然而，上述水沙通量数据均是在距离河口600 km以上的大通水文站获得的，这忽略了从大通到河口段受潮汐影响的面积可观的流域。为了更加精确地估算出长江水沙入海通量，今后应该加强在河口区，特别是徐六泾断面的通量观测^[43]。

3.2 水下三角洲冲淤演化

3.2.1 沉积物输运和堆积过程

因研究的时空尺度不同，对河口区沉积物输运

和堆积过程的认识仍存在差异。长江三角洲因河流来沙减少而呈现的侵蚀主要集中在内河口区，河口浅滩区在近几年中始终淤涨^[45]。有研究表明，建坝对河口潮滩冲淤进退的影响不大，河口最大浑浊带稳定

且充足的悬沙足以支撑潮滩淤涨^[37, 46-47]。而有学者主张，入海沉积物的减少将伴随长江河口潮滩的侵蚀^[48]。总而言之，长江河口响应远端人类活动的冲淤过程仍存争议，并以浅滩及水下三角洲区域最为突出。

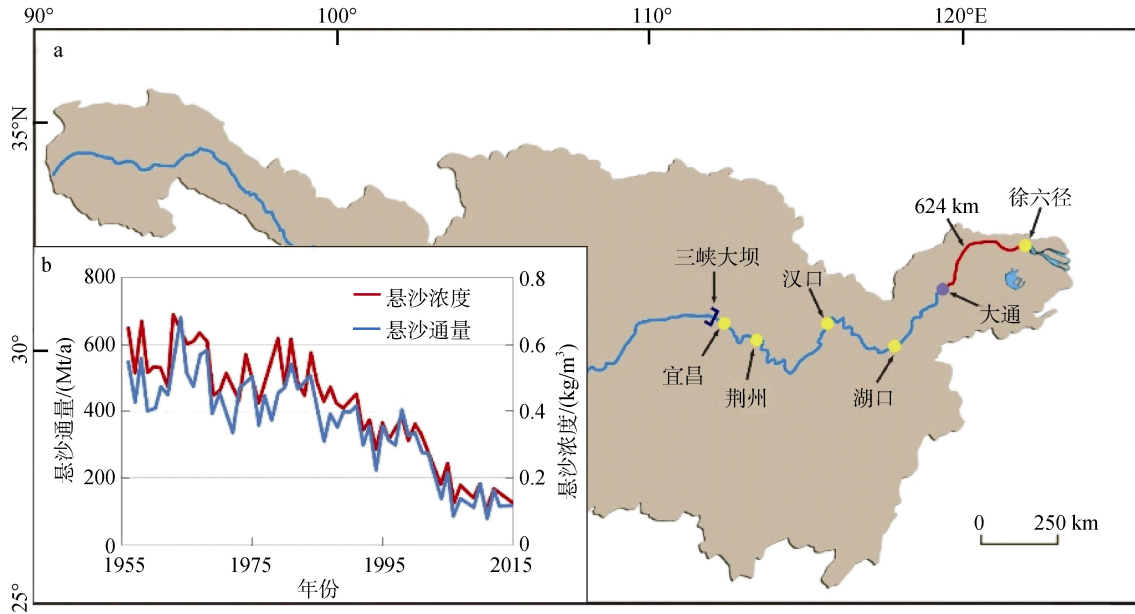


图4 长江流域与站点分布(a)以及大通站 1995~2015 年悬沙浓度、通量曲线(b)^[44]

Fig.4 The Changjiang River basin and gauging stations (a) and the curve of suspended sediment concentration and flux at Datong Station from 1995 to 2015 (b)^[44]

因局地沉积动力条件和工程影响程度的差异，长江三角洲不同区域的地貌响应过程也明显不同：北支内涨潮优势愈发显著，河槽不断充填；北港受工程干扰相对较弱，常态下沙洲发育、河道弯曲，因极端洪水事件而伴有一定时期的沙洲消亡、河道顺直；北槽受深水航道工程影响而经历主泓加深、岸滩淤高的变化；南槽随江亚南沙深入而上段刷深、中-下段淤浅，不断向复式河槽转变^[49-53]。相对而言，目前长江口冲淤演变的模拟研究空间尺度较小^[54-56]，时间尺度较短，中长期的研究工作较少^[57]。为更好地了解长江三角洲整体沉积物搬运和堆积过程，应定量刻画这些物理过程的长期变化趋势，基于构建的物理过程模型，分析由此引发的滩面悬沙-床沙交互及沉积物输运的空间模式转变，最终预测在中长时间周期上滩面地形冲淤格局和河口潮滩的时空分布特性与岸线进退变化。

3.2.2 河口水下三角洲演化和源-汇格局调整

世界上许多大型的河口三角洲，如埃及尼罗河口(Nile)、美国密西西比河口(Mississippi)、越南湄公河口(Mekong)、西班牙埃布罗河口(Ebro)等，因其社会和环境的重要性而受到众多关注和研究。尼罗河

是人类活动控制河流入海沉积物通量最典型的例子，其受人类工程影响之前河流上游年平均输沙量为 1.24 亿吨，其中 93%的沉积物进入三角洲地区和地中海。然而随着 1968 年阿斯旺水坝运行之后，几乎全部(>98%)的沉积物被拦蓄在坝内^[58]。与之类似，长江三角洲也面临着同样的问题。根据 1958—2015 年长江口水下地形实测数据分析，长江口水下三角洲在此期间历经了淤积-平衡-剧烈波动三个阶段，波动的主要原因是流域来沙的持续减少以及极端气候作用，而水下 10 m 以上的区域已进入侵蚀状态^[59]。

河口三角洲是关键“源-汇”区域，其可作为流域物质入海的“汇”，同时三角洲沉积物可再悬浮、搬运、沉积到陆架边缘海成为“源”^[60]。当河流输沙率发生变化时，水下三角洲的沉积速率也随之变化，而这一变化也将影响三角洲生物地球化学循环过程，从而导致三角洲地区某些元素源汇性质的改变^[15]。目前长江三角洲已进入退蚀阶段，其源汇功能将有所调整，在这一背景下，对于长江三角洲地貌格局、河口-海岸-陆架各地貌单元演化、土地、航道、港口的稳定性等均会产生一定程度的影响。因此我们也

应在源汇调整的背景下研究这些过程,以确保更加精确的认识三角洲演化过程。

3.2.3 远端泥沉积体系

泥质沉积是分析环境变化的重要沉积记录^[61],远端泥是在河口可容空间被沉积物充填之后、溢出并输运到较远处形成的泥质沉积,是三角洲的一个重要组成部分,其沉积特征揭示了河流三角洲演化的阶段性^[20-21]。河口近端水下三角洲和相邻的远端泥均具有斜层理的地层特征,这是判断三角洲沉积的重要依据,且两者具有同源性,因此远端泥应被纳入三角洲整体。一般来说,远端泥的沉积物可能有三种归宿:进入远端泥向陆侧的潮滩、通过陆架穿刺锋向外陆架输运、沉积在远端泥前缘形成斜层理。其中,厘定这些沉积物不同归宿路径输出的量级和堆积的时间尺度是关键科学问题^[62-63]。

有学者认为远端泥形成于陆架宽、陆架流活跃、沉积物补给丰富的环境背景下,沉积物输入的时间控制着其演化阶段,并通过对比长江、黄河、珠江远端泥泥层厚度、斜沉积内部构造及斜沉积顶部水深深度、沉积速率/年龄,认为珠江、长江和黄河的远端泥分别处于幼年期、生长期和成熟期^[20]。越来越多的研究表明,远端泥和其相应河口水下三角洲之间具有密切的联系,如浅地层剖面、沉积物柱状样和数值模拟结果均揭示长江三角洲沉积与浙闽沿岸泥质沉积的形态连续性及系统关联性^[64-65]。

3.3 陆上三角洲的系统状态转换

3.3.1 沙岛演化模式

长江三角洲在距今约 7 500 a 开始发育,具有明显的阶段性,每个阶段都形成了完整的三角洲体^[24](如图 2)。长江口沙岛演化模式可总结为“涨落潮路径分歧,河口河道分岔,北翼沙岛并岸,南翼沙岛生长”^[66]。随着岸线向东推进,河口沙坝-沙岛体系从最开始的红桥期逐渐演化为现今崇明期和长兴期。九段沙是长江口第三代新生沙岛,正式形成于 1954 年,是南北槽流水相互作用下南港下段演化的结果。形成半个世纪以来,九段沙的面积、高程、轮廓均发生了巨大的变化,其冲淤频繁且复杂,近年来由于流域来沙的减少以及深水航道工程的建设,九段沙整体上呈现北淤南冲,但沙洲主体位置移动极小^[67]。

以“动态”的眼光来看,不同稳定状态下的长江口沙岛应呈现不同的演化特性,把握三角洲系统状态演化下的沙岛演化模式调整是对当前沙岛演化体

系的重要补充。未来需在明确长江三角洲状态转换节点的基础上,诊断状态转化后沙岛生长、发育、消亡与岛间水道流路转变、刷深、淤浅的联动过程,剖析影响沙岛伸缩及迁移的关键物理过程(径流、潮流、波浪及沉积物供应等)及生物过程(植被等),特别是植被覆盖、极端洪水、人工护岸等的影响,以确定对应三角洲稳定状态下的沙岛空间分布的动态平衡模式,从而全面把握沙岛动态演化过程。其中,沙岛高程生长极限及其主控因素是关键科学问题。

3.3.2 近岸潮滩与潮水沟的演化

潮滩对于潮汐的响应具有尺度效应。从潮周期尺度来看,小潮间的低水位可削弱风暴诱发的滩面侵蚀,因此风暴的地貌效应可被潮汐调制^[68]。而在潮滩演化过程中,波浪也发挥着重要作用^[69-70]。

河口型潮滩由于受到上游径流的显著影响,也具有显著的季节变化。长江口芦潮港附近固定位置的沉积物季节变化过程、及沉积物粒径与高程变化的交互模式,揭示了潮滩的季节性冲淤特性受河流入海沉积物、风浪条件和植被生长的年内变化控制^[23, 71]。也有学者利用小波分析,定量分析了长江径流波动控制下的长江口九段沙海缘进退周期^[72]。

在十年至百年时间尺度上,现阶段的研究仍显不足,诸如河口潮滩演化对大坝的响应强度等重要问题尚未取得广泛共识。有学者认为三峡工程的运行对长江口九段沙演化的影响轻微^[46];而另有学者则认为其影响强烈^[48],流域内大坝建设所致河流入海沉积物锐减是局部区域侵蚀加剧的重要因素^[42, 73]。尽管三峡工程运行后长江向河口输运的沉积物锐减,但总体上口内浅滩区仍保持淤涨态势,今后应定量分离流域人类活动和自然因素的影响^[45, 49]。

4 结语

长江三角洲深受全球气候、海面变化和人类活动的影响,是研究系统状态转换下三角洲演化机理的极佳区域。如上所述,针对长江三角洲演化过程的研究已有丰硕成果,但在诸多领域仍存有争议。为重绘未来长江三角洲蓝图,需深入探讨当今复杂情况下长江三角洲的演化趋势。为此,我们提出以下三点研究展望(图 5)。

首先,按照系统科学的观点来理解三角洲状态转换的过程、机制、动力学含义,提高对三角洲系统行为、未来演化趋势的预测能力。我们认为,应构建出“动态”的三角洲时空演化新理论,即河口三角洲

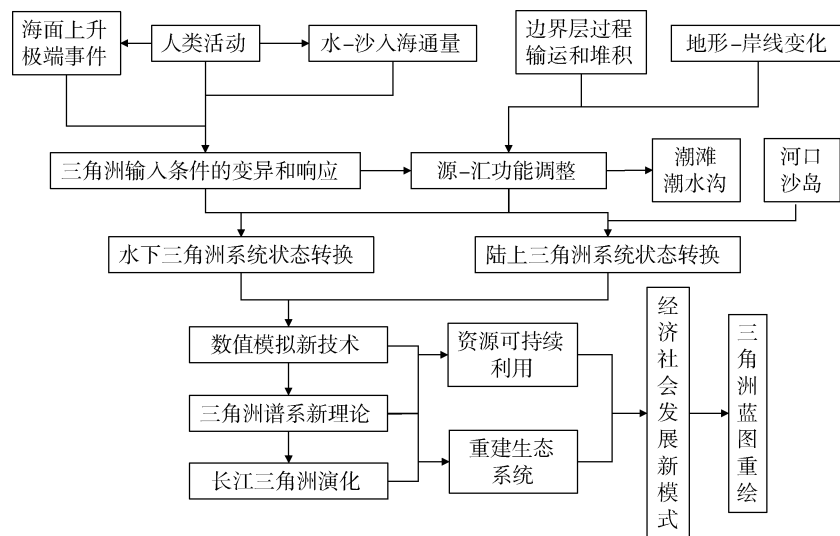


图5 三角洲谱系理论和蓝图重绘的研究框架

Fig.5 The framework of the investigations into delta spectrum and new blueprints

谱系理论。通过“河流沉积物+径流+可容空间”构建河口三角洲的本征态模式，在此基础上，叠加其他因素，如海面变化、人类活动、沉积物特征、潮汐、波浪、植被等形成河口三角洲的“衍生态”模式，从而给出不同系统状态下的三角洲谱系及相关变量的定义域。基于三角洲谱系理论的“系统状态转换”模拟，将给出新状态下三角洲演化的时间和空间系列，突破传统三端元分类、静态描述的三角洲经典理论。

其次，重视浅海现场观测新方法、数值模拟新技术的建立和发展，结合物理海洋、海洋地质、海洋工程、沉积地质、遥感和环境科学等多学科交叉综合运用。建立从海底到海面的综合立体观测系统，在近底部高浊度和浅水湍流特征观测、海底重力流输运和远端三角洲泥质堆积的定量化研究等方面取得突破，实现从“过程”到“产物”贯通的三角洲沉积体系研究。通过物理过程、边界条件和初始条件概化，对三角洲演化进行过程和机制刻画。在此基础上，进行10~100 a的中长期三角洲岸线、沙岛、最大浑浊带演化预测，为长江三角洲未来发展蓝图重绘提供理论依据。

最后，长江三角洲系统状态转换的新理论新方法研究，需要转化为长江三角洲蓝图重绘的科学依据。长江三角洲蓝图重绘的内涵，是针对系统状态转换而调整原先的经济社会发展模式，要点是更加合理地利用自然资源，重建健康生态系统，保障对长江经济带发展支撑力的可持续性。以此为目标，后续仍需加强以下方面的研究：(1)耦合经济社会发展指标和生态环境评估体系，发展三角洲空间资源的高效、可持续利用模式；(2)构建先进的资源管理体系，

扩大可再生资源的比例，实现资源最低消耗发展模式；(3)开发人口高密度区生态系统重建方针，提升三角洲产品与服务价值。除此之外，河口三角洲地处大气圈、水圈、生物圈和岩石圈的交汇地带，其系统行为及其状态转换对于各圈层的细微变化极为敏感。在当前气候变化和人类活动加剧的大背景下，河口三角洲的蓝图重绘更应综合考虑各圈层未来演化趋势及其交互作用过程中某些变化在河口三角洲的潜在放大效应，包括三角洲动态演替及状态演化在内的三角洲蓝图重绘的基本理念也应推及至大气科学、海洋科学和环境科学等多学科。

参考文献:

- [1] 骆永明. 中国海岸带可持续发展中的生态环境问题与海岸科学发展[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(10): 1133-1142.
Luo Yongming. Sustainability associated coastal environmental problems and coastal science development in China[J]. Proceedings of the Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(10): 1133-1142.
- [2] 高抒. 河口海岸状态生变, 重绘蓝图势在必行[J]. 世界科学, 2019, 1: 29-31.
Gao Shu. The changing state of estuaries and coasts makes it imperative to redraw blueprints[J]. World Science, 2019, 1: 29-31.
- [3] 高抒. 中国东部陆架全新世沉积体系: 过程——产物关系研究进展评述[J]. 沉积学报, 2013, 31(5): 845-855.
Gao Shu. Holocene sedimentary systems over the Bohai, Yellow and East China Sea region: recent progress in the study of process-product relationships[J]. Acta Sedi-mentologica Sinica, 2013, 31(5): 845-855.

- [4] Gao S, Collins M B. Holocene sedimentary systems on continental shelves[J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 268-294.
- [5] Day J W, Agboola J, Chen Z, et al. Approaches to defining deltaic sustainability in the 21st century[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 183: 275- 291.
- [6] 杨守业, 韦刚健, 石学法. 地球化学方法示踪东亚大陆边缘源汇沉积过程与环境演变[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34(5): 902-910.
Yang Shouye, Wei Gangjian, Shi Xuefa. Geochemical approaches of tracing source-to-sink sediment processes and environmental changes at the East Asian continental margin[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(5): 902-910.
- [7] 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.
- [8] Wang H, Yang Z, Saito Y, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950–2005): Impacts of climate change and human activities[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 57(3-4): 331-354.
- [9] Syvitski J P M, V R Smartly C J, Kettner A J, et al. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean[J]. *Science*, 2005, 308(5720): 376-380.
- [10] Tessler Z D, Vorosmarty C J, Grossberg M, et al. Profiling risk and sustainability in coastal deltas of the world[J]. *Science*, 2015, 349(6248): 638-643.
- [11] 袁琳, 张利权, 翁骏超, 等. 基于生态系统的上海崇明东滩海岸带生态系统退化诊断[J]. *海洋与湖沼*, 2015, 46(1): 109-117.
Yuan Lin, Zhang Liquan, Weng Junchao, et al. The ecosystem-based degradation diagnosis of coastal ecosystem in the Chongming Dongtan coastal zone, Shanghai[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2015, 46(1): 109-117.
- [12] Wright L D. Sediment transport and deposition at river mouths: A synthesis[J]. *GSA Bulletin*, 1977, 88(6): 857.
- [13] Galloway W E. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems[C]//Broussard M L. *Deltas: Models for exploration*. Houston: Houston Geological Society, 1975: 87-98.
- [14] Penland S, Boyd R, Sut J R. Transgressive depositional systems of the Mississippi Delta plain: a model for barrier shoreline and shelf sand development[J]. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 1988, 58(6): 932- 949.
- [15] 高抒. 长江三角洲对流域输沙变化的响应: 进展与问题[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(3): 233-241.
Gao Shu. Changjiang Delta sedimentation in response to catchment discharge changes: progress and problems[J]. *Advances In Earth Science*, 2010, 25(3): 233-241.
- [16] Correggiari A, Cattaneo A, Trincardi F. Depositional patterns in the late Holocene Po Delta system[C]//Giosan L, Bhattacharya J P. *River Deltas - Concepts, Models, and Examples*. Tulsa: SEPM Special Publication, 2005: 83, 13-30.
- [17] 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): 1807-1819.
- [18] 杨世伦, 朱骏, 赵庆英. 长江供沙量减少对水下三角洲发育影响的初步研究——近期证据分析和未来趋势估计[J]. *海洋学报*, 2003, 5: 83-91.
Yang Shilun, Zhu Jun, Zhao Qingying. A preliminary study on the influence of Changjiang River sediment supply on subaqueous delta——evidences in late 20th century and an expectation for the coming decades[J]. *Acta Oceanologica Sinica (Chinese version)*, 2003, 5: 83-91.
- [19] Liu Y, 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.
- [20] Gao S, Liu Y, 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.
- [21] Jia J, Gao J, Cai T, et al. Sediment accumulation and retention of the Changjiang (Yangtze River) subaqueous delta and its distal muds over the last century[J]. *Marine Geology*, 2018, 401: 2-16.
- [22] 陈吉余, 虞志英, 恽才兴. 长江三角洲的地貌发育[J]. *地理学报*, 1959, 26(3): 201-220.
Chen Jiyu, Yu Zhiying, Yun Caixing. Geomorphic development of the Yangtze River Delta[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1959, 26(3): 201-220.
- [23] Yang S L, Ding P X, Chen S L. Changes in progradation rate of the tidal flats at the mouth of the Changjiang (Yangtze) River, China[J]. *Geomorphology*, 2001, 38(1): 167-180.
- [24] 王靖泰, 郭蓄民, 许世远, 等. 全新世长江三角洲的发育[J]. *地质学报*, 1981, 1: 69-83.
Wang Jingtai, Guo Xumin, Xu Shiyuan, et al. Evolution of the Holocene Changjiang Delta[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1981, 1: 69-83.
- [25] Gao S, Wang D, Yang Y, et al. Holocene sedimentary systems on a broad continental shelf with abundant river input: process-product relationships[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2016, 429(1): 223-259.
- [26] 中国科学院地学部编. 海平面上升对中国三角洲地

- 区的影响及对策[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- Department of Geosciences, Chinese Academy of Sciences. The Impact of Sea Level Rise on China's Delta Region and Its Countermeasures [M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [27] Hori K, Saito Y, Zhao Q, 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.
- [28] Luo X X, Yang S L, Zhang J. The impact of the Three Gorges Dam on the downstream distribution and texture of sediments along the middle and lower Yangtze River (Changjiang) and its estuary, and subsequent sediment dispersal in the East China Sea[J]. *Geomorphology*, 2012, 179(1): 126-140.
- [29] 黎兵. 上海近岸海域近 30 年来的地形演变和机制探讨[J]. *上海地质*, 2010, 31(3): 29-34.
- Li Bing. Underwater topography evolution and its driving mechanisms over the past nearly 30 years in Shanghai offshore area[J]. *Shanghai Geology*, 2010, 31(3): 29-34.
- [30] Wang J, Yi S, Li M, et al. Effects of sea level rise, land subsidence, bathymetric change and typhoon tracks on storm flooding in the coastal areas of Shanghai[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 621: 228-234.
- [31] 国家海洋局. 2017 年中国海平面公报[EB/OL]. [2019-04-04]. http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619_1798298.html.
- The State Oceanic Administration. 2017 China Sea Level Bulletin[EB/OL]. [2019-04-04]. http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619_1798298.html.
- [32] 孙清, 张玉淑. 海平面上升对长江三角洲地区的影响评价研究[J]. *长江流域资源与环境*, 1997, 1: 58-64.
- Sun Qing, Zhang Yushu. Potential impacts of sea level rise on the economy and environment in the Yangtze River Delta and the countermeasures thereof[J]. *Resources And Environment In The Yangtze Valley*, 1997, 1: 58-64.
- [33] 陈祖军, 施晓文, 毛兴华. 长江口海平面上升对崇明三岛除涝安全的影响研究[J]. *气候变化研究进展*, 2015, 11(4): 239-244.
- Chen Zujun, Shi Xiaowen, Mao Xinghua. Study on impacts of sea level rising in the Changjiang Estuary on waterlogging—controlling safety of chongming county[J]. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis*, 2015, 11(4): 239-244.
- [34] Tian B, Zhang L, Wang X, et al. Forecasting the effects of sea-level rise at Chongming Dongtan Nature Reserve in the Yangtze Delta, Shanghai, China[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(10): 1383-1388.
- [35] Wang Q, Pan C, Zhang G. Impact of and adaptation strategies for sea-level rise on Yangtze River Delta[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2018, 9(2): 154-160.
- [36] 杜景龙, 杨世伦, 陈广平. 30 多年来人类活动对长江三角洲前缘滩涂冲淤演变的影响[J]. *海洋通报*, 2013, 32(3): 296-302.
- Du Jinglong, Yang Shilun, Chen Guangping. Influence of human activities on the evolution of the tidal flat of Yangtze River Delta front during the last 30 years[J]. *Marine Science Bulletin*, 2013, 32(3): 296-302.
- [37] Wei W, Dai Z, Mei X, et al. Shoal morphodynamics of the Changjiang (Yangtze) estuary: Influences from river damming, estuarine hydraulic engineering and reclamation projects[J]. *Marine Geology*, 2017, 386: 32-43.
- [38] 仇传银, 李行, 刘淑安, 等. 长江三角洲滩涂信息的遥感提取及时空变化[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(2): 269-278.
- Qiu Chuanyin, Li Xing, Liu Shu'an et al. Monitoring tidal flats in the Yangtze River Delta using landsat images[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2019, 21(2): 269-278.
- [39] Gao S. Modeling the growth limit of the Changjiang Delta[J]. *Geomorphology*, 2007, 85(3-4): 225-236.
- [40] Yang S L, Milliman J D, Xu K H, et al. Downstream sedimentary and geomorphic impacts of the Three Gorges Dam on the Yangtze River[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 138: 469-486.
- [41] Zhu Jianrong, Qiu Cheng. Responses of river discharge and sea level rise to climate change and human activity in the Changjiang River Estuary[J]. *Journal of East China Normal University (Natural science edition)*, 2015, 2015(4): 54-64.
- [42] Yang S L, Milliman J D, Li P, et al. 50, 000 dams later: Erosion of the Yangtze River and its delta[J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 75(1-2): 14-20.
- [43] 汪亚平, 潘少明, WANG H V, 等. 长江口水沙入海通量的观测与分析[J]. *地理学报*, 2006, 61(1): 35-46.
- Wang Yaping, Pan Shaoming, Wang H V, et al. Measurements and analysis of water discharges and suspended sediment fluxes in Changjiang Estuary[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(1): 35-46.
- [44] Yang H F, Yang S L, Xu K H, et al. Human impacts on sediment in the Yangtze River: A review and new perspectives[J]. *Global and Planetary Change*, 2018, 162: 8-17.
- [45] Luan H L, Ding P X, Wang Z B, et al. Decadal morphological evolution of the Yangtze Estuary in response to river input changes and estuarine engineering projects[J]. *Geomorphology*, 2016, 265: 12-23.
- [46] Jiang C, Li J, Swart H E D. Effects of navigational works on morphological changes in the bar area of the Yangtze Estuary[J]. *Geomorphology*, 2012, 139(2): 205-219.

- [47] Wen W, Tang Z, Dai Z, et al. Variations in tidal flats of the Changjiang (Yangtze) estuary during 1950s–2010s: Future crisis and policy implication[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2015, 108: 89-96.
- [48] Zheng J, Peng Y, Chi Z, et al. Recent evolution of Jiuduansha Shoal in Yangtze Estuary and its corresponding to engineering projects[J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 118(3): 1259-1264.
- [49] Dai Z, Liu J T, Wei W, et al. Detection of the Three Gorges Dam influence on the Changjiang (Yangtze River) submerged delta[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 6600.
- [50] Dai Z, Liu J T, Gui F, et al. A thirteen-year record of bathymetric changes in the North Passage, Changjiang (Yangtze) Estuary[J]. *Geomorphology*, 2013, 187(4): 101-107.
- [51] Dai Z, Liu J T, Wei W. Morphological evolution of the South Passage in the Changjiang (Yangtze River) Estuary, China[J]. *Quaternary International*, 2015, 380-381: 314-326.
- [52] Dai Z, Fagherazzi S, Mei X, et al. Linking the infilling of the North Branch in the Changjiang (Yangtze) Estuary to anthropogenic activities from 1958 to 2013[J]. *Marine Geology*, 2016, 379: 1-12.
- [53] Mei X, Dai Z, Wei W, et al. Secular bathymetric variations of the North Channel in the Changjiang (Yangtze) Estuary, China, 1880–2013: Causes and effects[J]. *Geomorphology*, 2018, 303: 30-40.
- [54] Hu K, Ding P, Wang Z, et al. A 2D/3D hydrodynamic and sediment transport model for the Yangtze Estuary, China[J]. *Journal of Marine Systems*, 2009, 77(1): 114-136.
- [55] Dai Z, Liu J T, Wen W. Morphological evolution of the South Passage in the Changjiang (Yangtze River) Estuary, China[J]. *Quaternary International*, 2015, 380-381: 314-326.
- [56] Kuang C, Xu L, Jie G, et al. Numerical prediction of medium-term tidal flat evolution in the Yangtze Estuary: Impacts of the Three Gorges project[J]. *Continental Shelf Research*, 2013, 52(1): 12-26.
- [57] Luan H L, Ding P X, Wang Z B, et al. Process-based morphodynamic modeling of the Yangtze Estuary at a decadal timescale: Controls on estuarine evolution and future trends[J]. *Geomorphology*, 2017, 290: 347-364.
- [58] Shalash S. Effects of sedimentation on the storage capacity of the High Aswan Dam reservoir[J]. *Hydrobiologia*, 1982, 91-92(1): 623-639.
- [59] 陈勇, 王寒梅, 史玉金, 等. 1958—2015 年长江口水下三角洲地形演变特征及趋势[J]. *水科学进展*, 2018, 29(3): 314-321.
- Chen Yong, Wang Hanmei, Shi Yujin, et al. Characteristics and trends of morphological evolution of the Yangtze Subaqueous Delta during 1958—2015[J]. *Advances In Water Science*, 2018, 29(3): 314-321.
- [60] 胡刚, 毕世普, 张勇. 长江水下三角洲沉积环境与演变: 进展与展望[J]. *海洋地质前沿*, 2014, 30(12): 1-8.
- Hu Gang, Bi Shipu, Zhang Yong. A review of studies on sedimentary environment and evolution of the Changjiang Subaqueous Delta[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2014, 30(12): 1-8.
- [61] Lantzsich H, Hanebuth T J J, Bender V B. Holocene evolution of mud depocentres on a high-energy, low-accumulation shelf (NW Iberia)[J]. *Quaternary Research*, 2009, 72(3): 325-336.
- [62] Gao J H, Jia J, Sheng H, et al. Variations in the transport, distribution, and budget of 210Pb in sediment over the estuarine and inner shelf areas of the East China Sea due to Changjiang catchment changes[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2017, 122(1): 235-247.
- [63] Wang J, Baskaran M, Hou X, et al. Historical changes in 239Pu and 240Pu sources in sedimentary records in the East China Sea: Implications for provenance and transportation[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2017, 466: 32-42.
- [64] Liu J P, Xu K H, Li A C, et al. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea[J]. *Geomorphology*, 2007, 85(3): 208-224.
- [65] Yao H Y, Leonardi N, Li J F, et al. Sediment transport in a surface-advected estuarine plume[J]. *Continental Shelf Research*, 2016, 116: 122-135.
- [66] 陈吉余, 恽才兴, 徐海根, 等. 两千年来长江河口发育的模式[J]. *海洋学报: 中文版*, 1979, 1(1): 103-111.
- Chen Jiyu, Yun Caixing, Xu Haigen, et al. The developmental model of the Changjiang River Estuary during last 2000 years[J]. *Acta Oceanologica Sinica (Chinese version)*, 1979, 1(1): 103-111.
- [67] 杨世伦, 贺松林, 谢文辉. 长江口九段沙的形成演变及其与南北槽发育的关系[J]. *海洋工程*, 1998, 4: 56-66.
- Yang Shilun, He Songlin, Xie Wenhui. The formation and evolution of the Jiuduansha tidal island as well as the relation to the development of the north and south passages in the Yangtze River Estuary[J]. *The Ocean Engineering*, 1998, 4: 56-66.
- [68] Fan D, Guo Y, Ping W, et al. Cross-shore variations in morphodynamic processes of an open-coast mudflat in the Changjiang Delta, China: with an emphasis on storm impacts[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(4): 517-538.
- [69] Shi B W, Yang S L, Wang Y P, et al. Relating accretion and erosion at an exposed tidal wetland to the bottom shear stress of combined current–wave action[J]. *Geo-*

- morphology, 2012, 138(1): 380-389.
- [70] Zhu Q, Yang S, Ma Y. Intra-tidal sedimentary processes associated with combined wave-current action on an exposed, erosional mudflat, southeastern Yangtze River Delta, China[J]. *Marine Geology*, 2014, 347(2): 95-106.
- [71] Yang S L, Li H, Ysebaert T, et al. Spatial and temporal variations in sediment grain size in tidal wetlands, Yangtze Delta: On the role of physical and biotic controls[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 77(4): 657-671.
- [72] Wen W, Mei X, Dai Z, et al. Recent morphodynamic evolution of the largest uninhibited island in the Yangtze (Changjiang) Estuary during 1998–2014: Influence of the anthropogenic interference[J]. *Continental Shelf Research*, 2016, 124: 83-94.
- [73] 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.

Fundamental scientific issues for the Changjiang River delta associated with the new blueprint of future development: overview and prospect

WANG Ya-ping^{1, 2}, JIA Jian-jun¹, YANG Yang¹, ZHOU Liang¹, FENG Wei¹, GAO Jian-hua², WEI Wen¹, LI Zhan-hai¹, SHI Ben-wei¹, GAO Shu¹

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, School of Marine Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Received: Mar. 6, 2019

Key words: river delta; coastal zone; system regime shift; sediment transport; delta spectrum; new blueprint; Changjiang River

Abstract: River deltas as an important sub-system of the coastal zone are subjected to a series of rapid changes in response to global changes and human activities. This therefore affects the sustainability of the economy and society. The Changjiang River is one of the largest and most highly-developed economic regions in China. This delta system not only plays a key role in regional development but also supports the entire Changjiang River Economic Belt. Previous knowledge about the delta is generally based on a steady status of the system, which will hardly satisfy future needs because of the system regime shift due to global warming, sea level rise and intensified human activities. Therefore, there is an urgent need to study the relevant fundamental scientific issues in terms of water/sediment cycling, physical processes, geomorphological evolution associated with erosion and accretion, and changes in sediment source and sink patterns. In order to establish new theories and strategies for adapting to the system regime shift, attention should be paid to the development of an integrated *in situ* observation system to improve data collection capabilities. The theory of delta spectrum should be improved, including both elementary and derivative status of the delta, to predict the evolution of river delta at different spatial and temporal scales. These research efforts will be beneficial to generating a new blueprint for the economic and social development of the Changjiang River delta, involving new economic and social development modes, new technologies to protect natural resources and rebuild ecosystems, and sustainable support for the Changjiang River Economic Belt.

(本文编辑: 李晓燕)