

近30年来长江口水下三角洲地形演变与 受控因素分析

宋城城^{1,2}, 王 军^{1,2}

(1. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241;

2. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241)

摘要: 利用长江口1982-2010年间4个年份的高精度实测地形数据、大通站输沙量数据以及河口工程建设信息等, 分3个阶段研究了长江口整体冲淤规律、不同分区冲淤变化时空差异、重点断面垂向冲淤特征、水下三角洲重要区域(崇明东滩、横沙浅滩、九段沙以及南汇东滩)的演变趋势与受控因素。结果表明: (1) 近30年长江口整体上表现为略微冲刷, 冲刷面积占51.83%, 在3个阶段中呈现出“冲刷—淤积—再冲刷”的冲淤演化态势, 且冲淤变化时空差异显著, 仅长江北港区为持续冲刷。(2) 崇明东滩和横沙浅滩东侧和北侧、九段沙北侧以及南汇东滩的5 m以浅区域以垂向淤积为主, 而崇明东滩和横沙浅滩南侧、九段沙东侧和南侧的5 m以浅区域则以垂向冲刷为主。(3) 长江口重要区域2 m和5 m等深线包络面积整体上是不断增加的, 1982-2010年时段内年均增加量分别为10.42 km²/a和7.99 km²/a, 但各分区则表现不一致; 10 m等深线包络面积在整体上及各个分区内均表现为明显减小; 15 m等深线包络面积变幅较小, 基本保持稳定状态;(4) 受河口工程建设影响, 仅崇明东滩水下三角洲等深线包络面积减小的趋势与大通站输沙量减少趋势相同。主要结论: 从长江口水下三角洲等深线包络面积和分布形态的变化看, 基于目前上游输沙量持续减少的宏观自然背景下, 大规模的河口工程建设对近年来长江口水下三角洲演变的控制作用日益明显。

关键词: 长江口; 水下三角洲; 冲淤变化; 输沙量; 受控因素

DOI: 10.11821/dlxb201411009

1 引言

随着长江三峡蓄水、南水北调工程等实施, 以及长江中上游生态环境保护的有效开展, 长江口输沙量不断减少, 水下三角洲已出现淤涨减慢, 局部蚀退现象^[1-3]; 另外, 长江口深水航道工程、近岸促淤圈围工程等的实施, 也成为影响水下三角洲地形演变的重要因素^[4-5]。近年来, 部分学者基于历史海图数据开展了有关长江口水下三角洲冲淤演变的研究, 如: 李鹏等(2007)利用1995-2005年间4个年份的海图数据, 对长江入海泥沙量和河口冲淤进行对比分析, 探讨水下三角洲冲淤对长江口入海泥沙锐减以及三峡工程运行的响应^[6]; 杜景龙等(2012)利用1994-2008年间4个年份的海图数据, 分析了长江三峡蓄水前后十余年入海泥沙通量与河口口门区冲淤关系, 初步探讨了三峡工程对长江口三角洲地貌演化的影响^[5]; 计娜等(2013)基于近30年尺度的多幅历史海图资料, 以及2011-2012年长

收稿日期: 2014-05-25; 修订日期: 2014-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(71373084); 全球变化研究重大科学研究计划项目(2010CB951204); 上海市教育委员会科研创新重点项目(13ZZ035) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.71373084; Global Change Scientific Research Program of China, No.2010CB951204; Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission, No.13ZZ035]

作者简介: 宋城城(1991-), 女, 浙江人, 硕士研究生, 沿海灾害风险研究。E-mail: songchengcheng@ecnu.cn

通讯作者: 王军(1975-), 男, 陕西人, 博士, 教授, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110007090M), 主要从事城市自然地理、沿海灾害风险研究等。E-mail: jwang@geo.ecnu.edu.cn

江口潮间带至水下岸滩沉积物和地貌形态实测数据，分析了长江口岸滩沉积物和地貌形态变化特征，并探讨了岸滩演变的影响因素^[7]。这些研究对于宏观认识长江口水下三角洲地形演化特征、演化趋势、受控因素等发挥了重要作用。但相关研究受海图数据精度的限制，对长江口局部区域冲淤特征、近年来演变趋势以及受控因素的认识仍需深入研究。

在前人研究基础上，本文依托专业测绘部门完成的1982、1997、2002和2010年长江口实测高精度地形数据，对1982-2010年近30年间长江口水下三角洲的冲淤变化特征、时空分异、受控因素等进行分析。本文将1982-2010年划分为3个时段：① 1982-1997年（长江三峡一期工程大江截流前）；② 1997-2002年（大江截流至三峡水库蓄水前）；③ 2002-2010年（三峡水库蓄水运行后^①）。研究内容包括：（1）分3个时段、分8个区域计算长江口水下三角洲的冲淤量与冲淤速率；（2）在水下三角洲的四个重要分区上设定13个重点断面，对比断面垂向和沿程冲淤以及等深线进退变化特征；（3）依据大通站输沙量数据和长江口工程建设信息，分4个区域探讨长江口水下三角洲不同区域演变趋势与受控因素。

2 研究区概况

长江口为径流与潮流相互消长非常明显的多级分汊沙岛型中等潮汐河口^[1]。自徐六泾以下，河槽呈现三级分汊、四口入海、拦门沙浅滩发育的地貌格局。根据大通站1953-2012年统计资料分析，大通站年均输沙量1989年后明显减少，1951-1989年平均为 4.71×10^8 t，1990年以后逐渐降低，1990-2012年平均为 2.46×10^8 t，目前基本维持在 $1.0 \times 10^8 \sim 1.5 \times 10^8$ t左右。河口潮差变化较大，最大潮差达5.05 m。河口盛行波浪方向与盛行风较一致，平均波高在1.0 m左右。在季风沿岸流、潮流和波浪综合作用下，仅有30%~50%的长江入海泥沙沉积在水下三角洲^[8]。近60年来，上海在沿海滩涂采用促淤围垦等方式新增土地面积高达1200余km²，使上海市的陆域面积扩大了17.5%^[9]。

本研究空间范围为30°45'07"~31°53'09"N和121°00'07"~122°36'11"E，面积约7465.14 km²。为研究水下三角洲冲淤变化的空间差异性，根据长江口三级分汊特征和5 m等深线位置，将研究区分为8个子区域（图1），分别为：① 长江北支；② 长江南支上段；③ 长

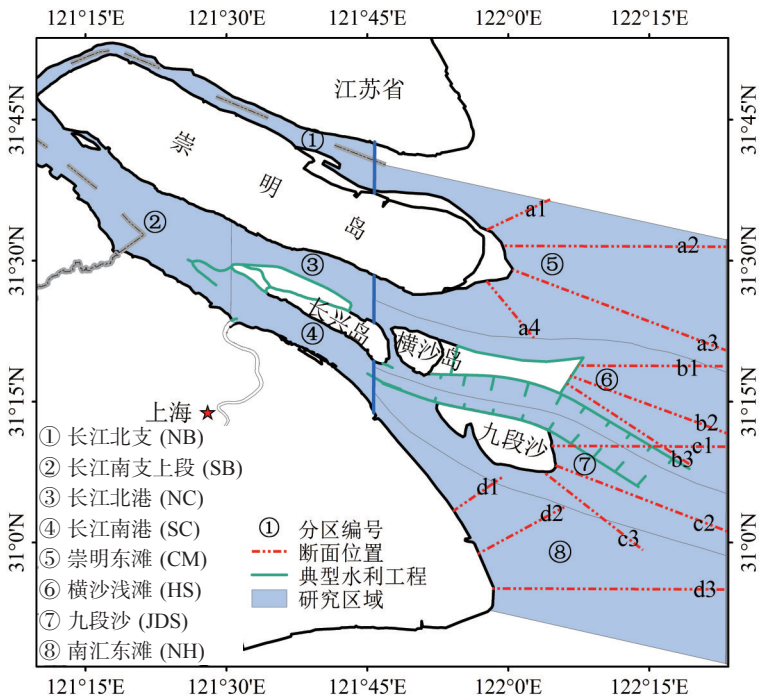


图1 长江口形势图与子区域划分
Fig. 1 Map of the Yangtze Estuary and the 8 study sub-regions

① 由于长江口2003年无高精度实测数据，故本研究采用2002年数据进行分析。

江北港;④ 长江南港;⑤ 崇明东滩;⑥ 横沙浅滩;⑦ 九段沙;⑧ 南汇东滩。图中蓝色粗线以东区域为本研究重点分析的长江口水下三角洲区域,由北向南分别包括了崇明东滩、横沙浅滩、九段沙和南汇东滩4个区域。

3 数据与方法

本研究所使用的1982年水下地形数据由上海测绘处1986年出版的《1982年上海市海岸带和海涂资源综合调查地形图》提取获得,测点数为49000,比例尺为1:2.5万;1997、2002和2010年水下地形测点数据由长江口水文水资源勘测局实测获得,测点数分别为27500、42000和118700,比例尺为1:5万。数据统一采用墨卡托投影和1954年北京坐标系,基准面为理论最低潮面。由于1982年测量数据仅覆盖到5 m等深线处(图1最右侧边界以内),因此本文对1982年5 m等深线以深的区域未做分析。长江口1953-2012年泥沙通量数据从中华人民共和国水利部发布的《中国河流泥沙公报》中获得。

研究中采用ArcGIS10.0地理信息系统软件为支撑,空间插值采用Kriging方法,利用3D Analyst和Spatial Analyst模块对地形数据等进行分析,具体包括冲淤量、冲淤速率、等深线和典型岸滩剖面变化等的分析,以及计算结果图形的制作与输出。利用Origin8.1软件绘制典型岸滩剖面变化曲线等。为消除近十余年间由于岸线变化导致的无法比较的问题,研究中统一采用2010年的岸线为陆地边界(崇明东滩及崇明东北侧由于靠岸线的部分区域未进行测量,故以测量数据覆盖范围边线为边界)。

4 研究结果

4.1 长江口冲淤量和冲淤速率变化统计

在对长江口1982、1997、2002和2010年水下地形数字高程模型(DEM)构建基础上,对长江口1982-1997年、1997-2002年、2002-2010年和1982-2010年4个时段的水下地形变化特征进行了分析,计算了泥沙冲淤量、年均体积变化量和年均冲淤厚度等信息(表1),并制作了4个时段冲淤分布图(图2)。泥沙干容重统一按照1.4 t/m³计算^[1]。

1982-2010年间,整个长江口区冲刷面积略大于淤积面积,二者之比为1:0.92,年均净冲刷量为0.54×10⁸ m³,年均泥沙冲刷量为0.76×10⁸ t(表1)。虽然1982-2010年长江口整体上表现为冲淤相当,但长江口局部区域冲淤变化十分剧烈(图2a)。

1982-1997年,长江口以冲刷为主,冲刷区面积(25.80×10⁸ m²)略大于淤积区面积(23.32×10⁸ m²),年均净冲刷量为1.26×10⁸ m³,年均冲刷速率为2.56 cm(表1)。冲刷区主要位于长江南支河道南岸主槽及北港北沙的东侧;崇明东滩东北向海域的侵蚀呈面状演化;横沙浅滩的侵蚀主要发生在东滩串沟以东的横沙浅滩,而串沟西侧的滩面几乎没有发生变化,可能由于横沙浅滩的地形坡度较西面横沙浅滩大、且风浪更强的缘故(图2b)。

1997-2002年,长江口以淤积为主,冲刷区面积为22.92×10⁸ m²,淤积区面积为26.21×10⁸ m²,年均净淤积量为0.74×10⁸ m³,年均净淤积速率为0.35 cm,年均

表1 长江口水下三角洲整体冲淤特征统计

Tab. 1 Analysis of erosion-accretion for different study periods

统计指标 / 时段		1982-2010	1982-1997	1997-2002	2002-2010
淤积区面积/冲刷区面积		0.92	0.90	1.14	1.05
年均净冲淤量 (10 ⁸ m ³ /a)		-0.54	-1.26	0.74	-0.01
年均净冲淤速率 (cm/a)		-1.11	-2.56	1.50	-0.02
淤积区域	淤积区面积 (10 ⁸ m ²)	23.66	23.32	26.21	25.18
	淤积体积 (10 ⁸ m ³)	41.98	31.02	28.01	30.96
冲刷区域	冲刷区面积 (10 ⁸ m ²)	25.46	25.80	22.92	23.96
	冲刷体积 (10 ⁸ m ³)	57.25	49.93	24.32	31.02

注:负值表示冲刷,正值表示淤积

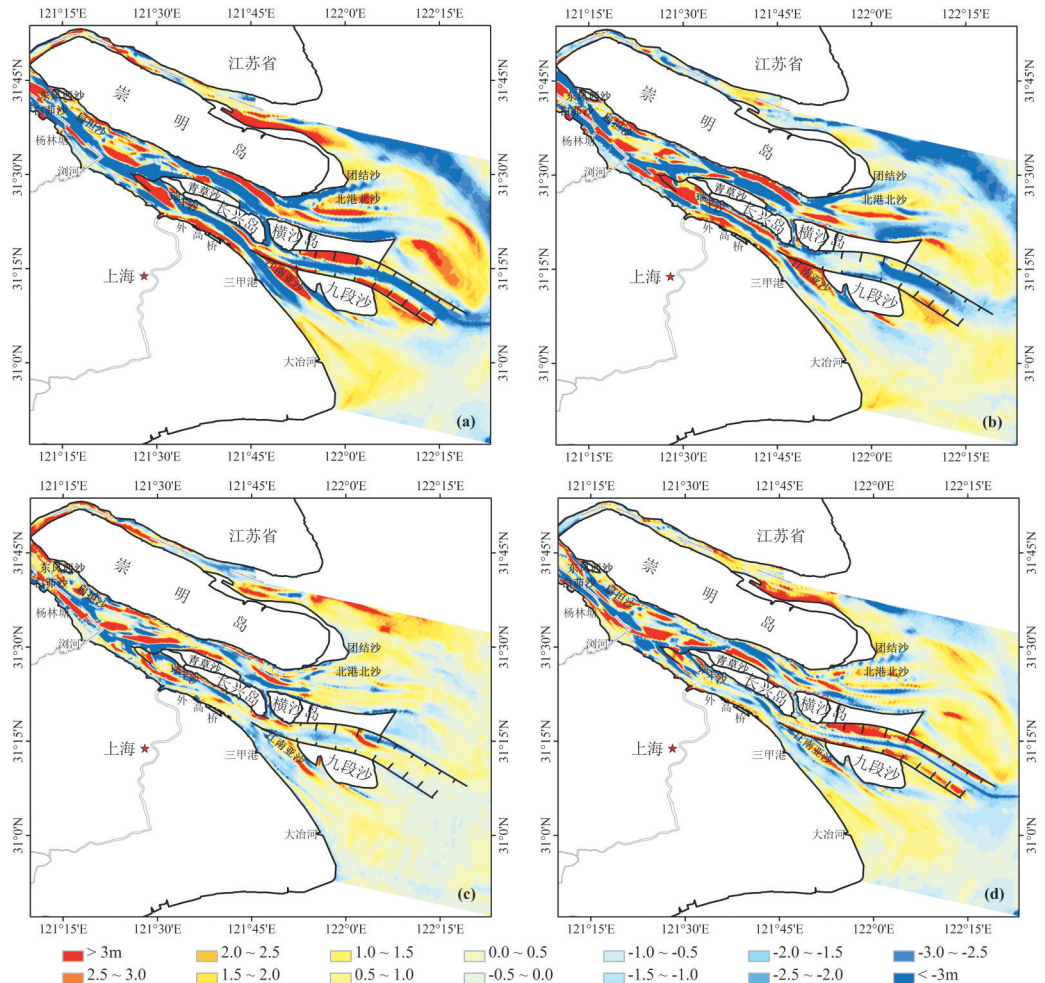


图2 长江口不同时段冲淤演变分布 (a. 1982-2010; b. 1982-1997; c. 1997-2002; d. 2002-2010)
(注: 负值表示冲刷, 正值表示淤积)

Fig. 2 Accretion and erosion in the Yangtze Estuary (a. 1982-2010; b. 1982-1997; c. 1997-2002; d. 2002-2010)
(Note: Negative values indicate erosion and positive values accretion. Elevation in meters)

泥沙淤积量为 1.04×10^8 t (表1)。其中, 北支入海口区域淤积成片发展, 南支河道中心的成形沙体周围、北港口和横沙浅滩的东南侧以及沿深水航道导堤的两侧淤积比较明显 (图2c)。

2002-2010年, 长江口则由1997-2002年的淤积为主转为冲刷状态, 年均净冲刷量为 0.01×10^8 m³, 年均冲刷速率为0.02 cm (表1)。冲刷区主要位于南支河道南岸主槽、北港河道北岸、深水航道, 北港北沙滩道的侵蚀也较为显著; 北港河道北岸的冲蚀主要是由于2006年中央沙圈围工程、青草沙水库工程的建成, 使得北港上段落潮流主流北偏; 北槽及其邻近拦门沙水域发生了重大冲淤调整则是受深水航道工程的影响, 北槽入口段发生严重淤积, 丁坝坝田区域发生普遍淤积 (图2d)。

4.2 长江口冲淤变化时空差异性分析

在上游来水和潮流的相互作用下, 长江河口滩涂地形最主要的特征是三级分汊, 在三级分汊特征的制约下滩涂地形分隔为相应的8个区域^[10]。本文分别对长江口8个分区 (图1) 在3个时段内的淤涨和蚀退特征进行分析, 发现长江口水下三角洲的冲淤存在明显的时空分异特征 (表2, 图3)。

表2 长江口不同分区不同阶段冲淤变化统计

Tab. 2 Districts statistics of erosion-deposition change in the Yangtze Estuary in different periods

统计指标	冲淤变化量 (10 ⁸ m ³)				冲淤速率 (cm/a)			
	1982-2010	1982-1997	1997-2002	2002-2010	1982-2010	1982-1997	1997-2002	2002-2010
① 长江北支	1.91	-0.76	1.35	1.32	3.11	-2.32	12.31	7.52
② 长江南支上段	-6.40	-4.87	0.65	-2.18	-4.63	-6.57	2.60	-5.46
③ 长江北港	-4.70	-2.99	-0.76	-0.94	-10.57	-12.57	-9.41	-7.27
④ 长江南港	-1.36	0.79	-0.83	-1.32	-2.52	2.72	-8.47	-8.42
⑤ 崇明东滩	-4.53	-11.28	5.85	0.89	-1.31	-6.07	9.45	0.90
⑥ 横沙浅滩	-0.52	-2.91	-1.71	4.10	-0.22	-2.36	-4.13	6.19
⑦ 九段沙	-0.18	1.90	-0.35	-1.73	-0.09	1.86	-1.02	-3.14
⑧ 南汇东滩	0.83	1.41	-0.56	-0.02	0.27	0.86	-1.03	-0.03

注：负值表示冲刷，正值表示淤积

根据表2和图3中不同分区的冲淤变化量可以看出，1982-2010年间，长江口8个分区中只有第1和8分区处于淤积状态，年均淤积速率分别为3.11 cm和0.27 cm。其他6个分区均处于冲刷状态，年均冲刷速率依次为第3分区(10.57 cm) > 第2分区(4.63 cm) > 第4分区(2.52 cm) > 第5分区(1.31 cm)，第6和第7分区基本处在冲淤稳定状态。

(1) 1982-1997年间，第4、7和8分区处于淤积状态，年均淤积速率分别为2.72 cm、1.86 cm和0.86 cm。其他5个分区则为冲刷：第3分区的年均冲刷速率最大，达到12.57 cm，表明长江口北港河道不断冲蚀加深；第2和5分区年均冲刷速率也较大，分别为6.57 cm和6.07 cm；第1和6分区年均冲刷速率较小，分别为2.32 cm和2.36 cm。

(2) 1997-2002年间，第1、2和5分区处于淤积状态，且第1和5分区的年均淤积速率分别达到12.31 cm和9.45 cm，表明长江口北支的北部和崇明东滩区域淤涨明显。其他分区均发生冲刷，第3和4分区的冲刷较为明显，年均冲刷深度分别为9.41 cm和8.47 cm。这主要是由于1998年以来南支分流比持续保持在95%以上^[1]，径流量的增大使得北港和南港冲刷态势增强。

(3) 2002-2010年间，第1和5分区仍处于淤积状态，但淤积速率减慢，仅为1997-2002时段的20.69%。第6分区由1997-2002年时段内的冲刷转为淤积；第2分区则由上一时段的淤积转为冲刷，年均冲刷速率达到5.46 cm，这主要是由南支上段主流线南偏，白茆沙头受冲，沙体下移并缩小，南水道冲蚀加剧造成的^[12]。第3和4分区仍处于高强度冲刷态势，年均冲刷量基本稳定。

综合分析，由于受各分区内地形、水动力条件变化以及人为工程影响的差异，不同分

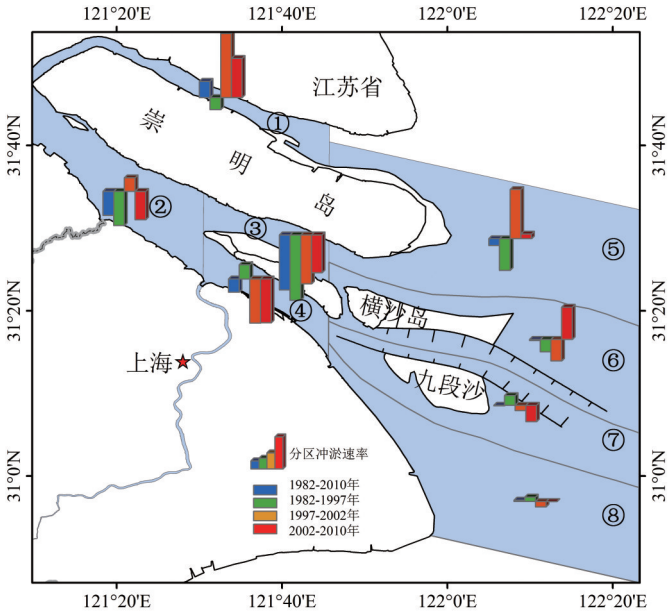


图3 长江口不同分区不同时段平均冲淤深度对比

Fig. 3 Average depth of erosion-deposition change in the 8 sub-regions in the Yangtze Estuary in different periods

第1和6分区年均冲刷速率较小，分别为2.32 cm和2.36 cm。

(2) 1997-2002年间，第1、2和5分区处于淤积状态，且第1和5分区的年均淤积速率分别达到12.31 cm和9.45 cm，表明长江口北支的北部和崇明东滩区域淤涨明显。其他分区均发生冲刷，第3和4分区的冲刷较为明显，年均冲刷深度分别为9.41 cm和8.47 cm。这主要是由于1998年以来南支分流比持续保持在95%以上^[1]，径流量的增大使得北港和南港冲刷态势增强。

(3) 2002-2010年间，第1和5分区仍处于淤积状态，但淤积速率减慢，仅为1997-2002时段的20.69%。第6分区由1997-2002年时段内的冲刷转为淤积；第2分区则由上一时段的淤积转为冲刷，年均冲刷速率达到5.46 cm，这主要是由南支上段主流线南偏，白茆沙头受冲，沙体下移并缩小，南水道冲蚀加剧造成的^[12]。第3和4分区仍处于高强度冲刷态势，年均冲刷量基本稳定。

综合分析，由于受各分区内地形、水动力条件变化以及人为工程影响的差异，不同分

区冲淤变化的时空分异较为显著。长江口 1982-2010 年以来,不同阶段 8 个分区冲淤变化较为复杂,只有第 3 分区 (长江北港) 为持续冲刷。重点对 1997-2010 年间的 2 个阶段进行比较看,第 1 和第 5 分区为持续淤积,第 3、4、7、8 为持续冲刷,第 2 分区则由 1997-2002 年的淤积转为 2002-2010 年的冲刷,第 6 分区则由 1997-2002 年的冲刷转为 2002-2010 年的淤积。

4.3 长江口代表性断面垂向冲淤变化分析

为深入研究长江口主要水下三角洲地形的垂向冲淤变化特征,本文在长江口第 5-8 分区内由北向南共布设了 13 个断面 (图 1) 以分析各断面处地形在垂向上的冲淤特征。由北向南依次为崇明东滩断面 (a1、a2、a3、a4),横沙浅滩断面 (b1、b2、b3),九段沙断面 (c1、c2、c3) 和南汇东滩断面 (d1、d2、d3),其中崇明东滩 a2 断面、横沙浅滩 b1 断面、九段沙 c1 断面和南汇东滩 d3 断面为正东方向。

(1) 崇明东滩 从崇明东滩 4 个断面处地形的沿程变化看,1982-2010 年崇明东滩水下三角洲在断面 a1、a2 和 a3 处靠近边界线一侧约 8~10 km 范围内总体以淤积为主,在断面 a4 处则以冲刷为主,冲刷深度为 15.96 cm (图 4)。断面 a1 在水深 4 m 处发生冲淤转折,近岸一侧为淤积;断面 a2 在水深大于 1 m 普遍出现冲刷;断面 a3 在近岸一侧出现冲沟,但离岸一侧到 10 m 等深线均为淤积,10 m 等深线以深则出现冲刷;断面 a4 的冲淤变化较为复杂多变,在 5 m 以浅区域以淤积为主,5 m 以深则出现冲刷,另外因该区域水动力条件变化复杂,导致北港北沙与崇明东滩间形成冲沟,且冲沟不断加深 (图 4)。综合分析,除了崇明东滩与北港北沙之间冲沟不断加深外,其余 5 m 以浅区域以淤积为主,而水下三角洲前缘 5~10 m 则以冲刷为主。

(2) 横沙浅滩 从横沙浅滩 3 个断面处地形的垂向冲淤变化看,除了断面 b3 主要表现为冲刷外,b1 和 b2 断面处总体表现为以淤积为主 (图 5)。1982-1997 年,沿断面 b1 和 b2 垂向上平均淤涨了 0.97 m 和 3.03 m,沿断面线 b3 垂向上平均冲蚀了 0.63 m。1997-2002 年,

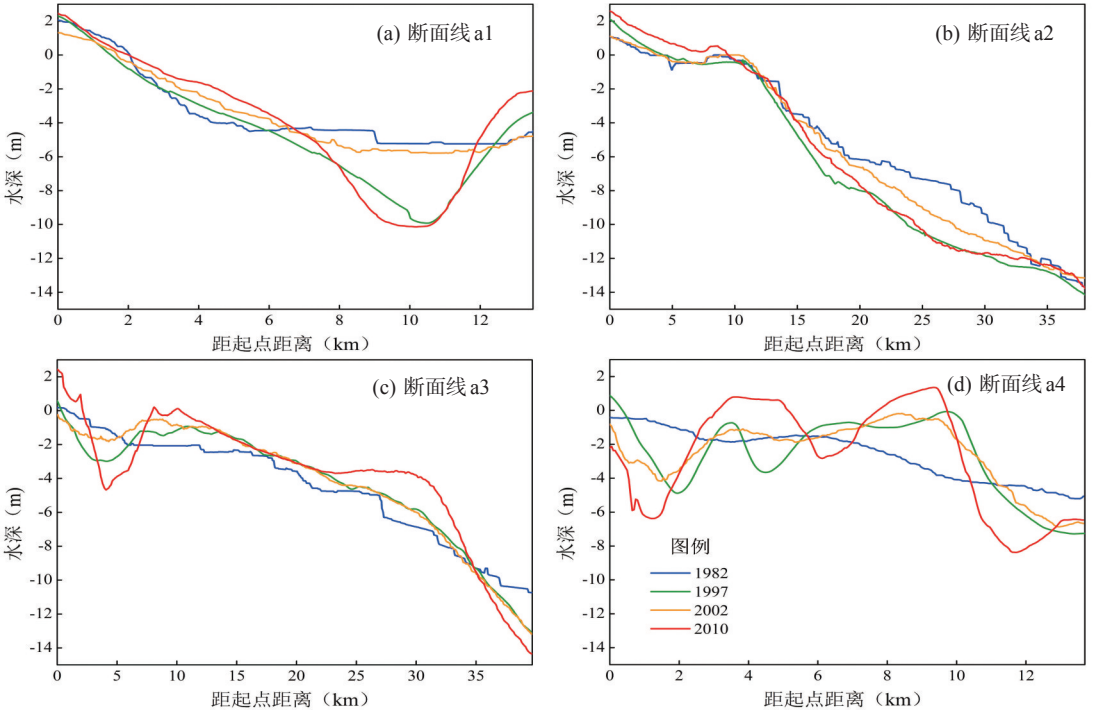


图 4 崇明东滩不同断面垂向冲淤变化

Fig. 4 Cross-sectional variation for Chongming eastern wetland (CM)

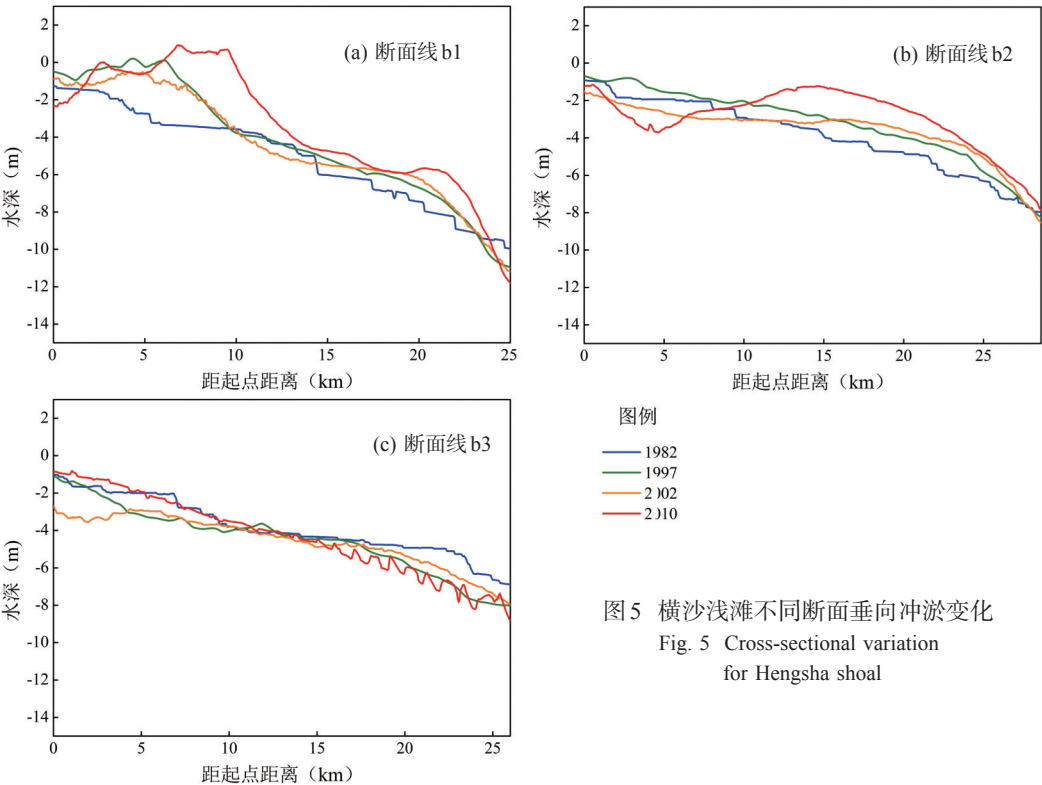


图5 横沙浅滩不同断面垂向冲淤变化
Fig. 5 Cross-sectional variation
for Hengsha shoal

断面b1和b2变化较为稳定, -5 m线范围以内浅水区以轻微冲刷为主, 这主要受上游来水来沙和多次台风风暴潮的影响^[13]。该时段内由北到南3个断面的冲淤平衡水深点分别为5.5 m、3 m和3 m, 以b2断面的蚀积平衡点最低。2002-2010年, 断面b1和b2发展为上凸形, 在离岸5 km的范围内出现明显冲刷; 断面b3处表现为冲刷为主, 且2010年地形出现锯齿状分布, 这种分布不是自然演化为主导形成的结果, 这主要与北槽深水航道工程建设和北导堤的影响有关。

(3) 九段沙 从九段沙3个断面处地形的垂向冲淤变化看, 除c1断面外, c2和c3断面沿程地形线比较稳定, 基本体现了自然演变为主导的特点(图6)。九段沙东侧c1断面穿过长江北槽下段, 因北槽下段河槽形态宽浅, 故断面均呈光滑的弧状。1997年以后河槽持续出现冲刷主要是长江口深水航道整治工程依次实现通航水深8.5 m、10.0 m和12.5 m建设目标的结果。c2和c3断面处表现为以较为稳定的冲刷为主, 主要受上游来水来沙的影响, 在1982-2010年间平均冲刷厚度分别为0.86 m和0.24 m。九段沙东南侧c3断面在1982-2010年间出现的微弱冲刷主要是由于1964-1983年间北槽的分水分沙比明显高于南槽, 约占68%, 而1983年以后二者的分水分沙比逐步接近所导致的^[14-15]。

(4) 南汇东滩 从南汇东滩3个断面处地形的沿程变化看, 3个断面在5 m等深线以内淤积普遍较强(图7), 尤其在d1和d2断面处表现最为明显, 且多年变化较为稳定。d1断面的冲淤平衡点大致位于水深4 m处, 且2002-2010年时段较1997-2002年时段淤积速率快, 垂向上的淤积速率达到0.13 m/a。d2断面除了1997-2002年在水深2 m以上部分出现轻微冲刷外, 总体呈现淤积状态。d3断面冲淤平衡点在水深6 m处, 6 m以深则表现为冲刷为主, 但冲刷强度不大。对比南汇东滩3个断面可知, 离岸10 km以内平均高程以南侧断面c3为最高, 为1.53 m。

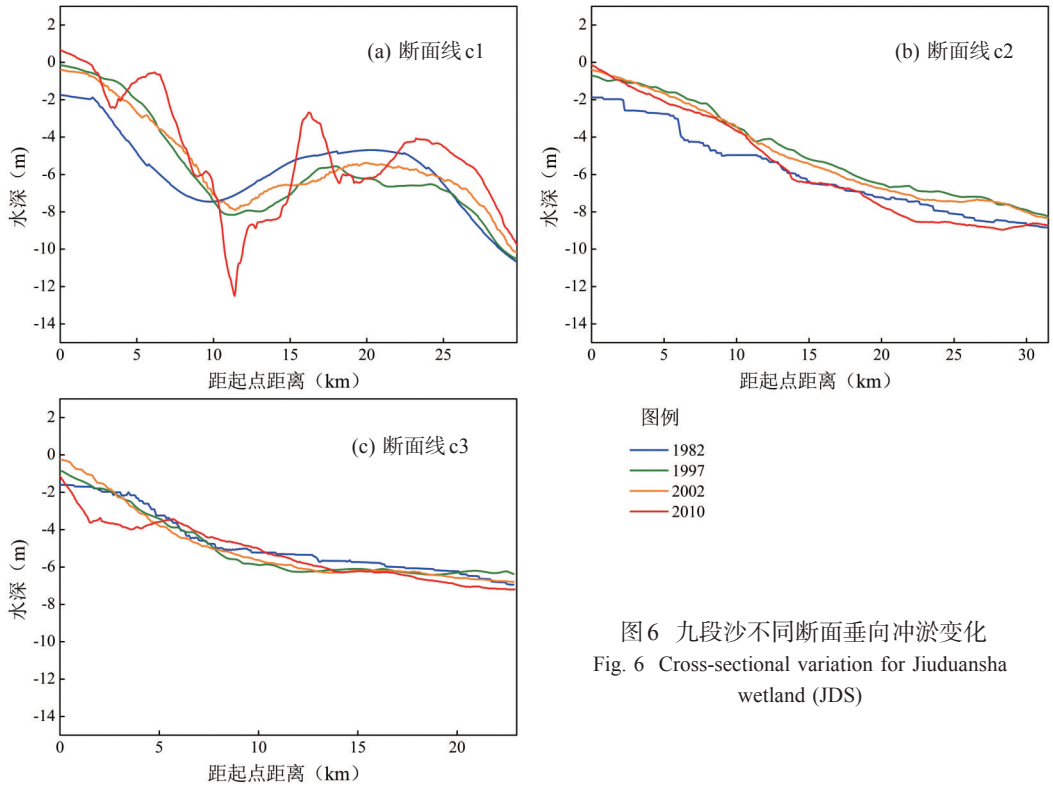


图 6 九段沙不同断面垂向冲淤变化
Fig. 6 Cross-sectional variation for Jiuduansha wetland (JDS)

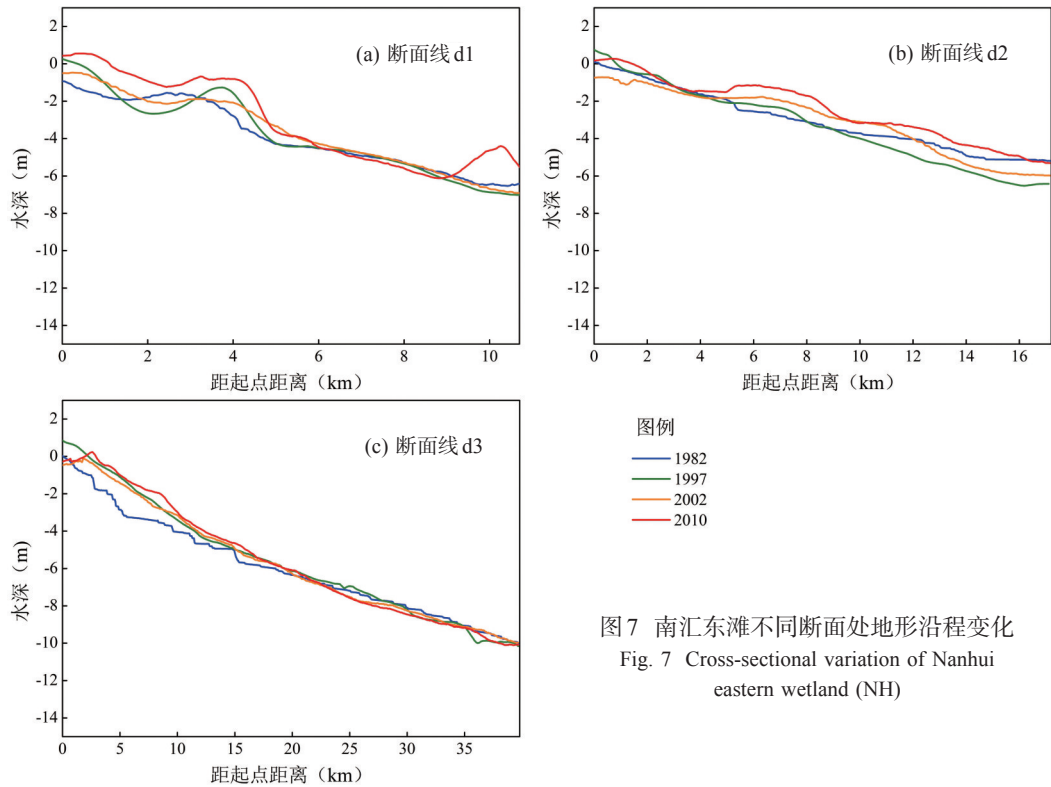


图 7 南汇东滩不同断面处地形沿程变化
Fig. 7 Cross-sectional variation of Nanhui eastern wetland (NH)

5 讨论

5.1 长江口水下三角洲冲淤演变整体趋势

根据大通站输沙量数据统计得:1982-1997年大通站多年平均输沙量为 3.779×10^8 t/a,1997-2002年减少为 2.997×10^8 t/a,2002-2010年则进一步减少为 1.592×10^8 t/a。上游输沙量的锐减直接导致长江口沉积物供给不足,前人的研究多认为长江口水下三角洲出现淤积减缓和侵蚀后退现象。为了全面分析长江口水下三角洲主要分布区冲淤演变趋势,我们对4个年份长江口区(图1中蓝色粗线以东区域作为一个整体)2 m、5 m、10 m和15 m等深线包络面积的变化进行了统计和对比分析(表3和图8)。由表3可看出,长江口水下三角洲2 m、5 m和15 m等深线包络的面积在1982-2010年间整体上是不断增加的,其中以15 m等深线包络面积的增速最小,10 m等深线在2002-2010年有所减少。由于1982年5 m等深线以深区域数据不全,故接下来重点对1997-2010年间等深线包络面积的变化做深入分析。

从1997-2010年间2 m、5 m、10 m和15 m等深线包络面积的年均变化速率看:1997-2002年间,2 m、5 m、10 m和15 m等深线包络面积年均增加速率分别为 0.39 km^2 、 6.29 km^2 、 3.74 km^2 和 -8.92 km^2 ;2002-2010年间,2 m、5 m、10 m和15 m等深线包络面积年均增加速率分别为 26.03 km^2 、 14.88 km^2 、 -22.40 km^2 和 1.04 km^2 。这表明,长江口水下三角洲2 m和5 m等深线包络的面积在1997-2010年间整体上是不断向外扩张的,且扩张速度增加迅速。10 m等深线则由1997-2002年的向外扩张转变为2002-2010年的迅速向内收缩。15 m等深线则由1997-2002年的向内收缩,转变为2002-2010年的略微向外扩张。

综上所述,在1982-2010年上游年均来沙量为 3.02×10^8 t/a的前提下,长江口重要区域2 m、5 m和15 m等深线包络面积在3个阶段整体上是不断增加的,而10 m等深线包络面积在整体上表现为明显减小。故可以初判,基于目前上游输沙量维持在 $1.0\times 10^8\sim 1.5\times 10^8$ t的宏观自然背景下,长江口水下三角洲2 m和5 m等深线包络面积仍将会增加,但淤涨速率减缓;10 m等深线包络面积将继续减少;15 m等深线包络面积变幅小,将基本保持稳定状态。

5.2 长江口水下三角洲冲淤演变趋势空间差异性与受控因素

5.2.1 水下三角洲四个重要分区等深线演变特征 为探讨长江口不同水下三角洲分布区的规律,本文对长江口水下三角洲4个重要分区(崇明东滩、横沙浅滩、九段沙以及南汇东滩)的2 m、5 m、10 m和15 m等深线包络面积的年均变化量进行了统计分析(图9),

表3 长江口水下三角洲不同等深线包络面积统计 (km²)

Tab. 3 The envelope areas of different isobaths in the Yangtze Estuary (km²)

年份/面积	2 m以浅区域	5 m以浅区域	10 m以浅区域	15 m以浅区域
1982	526.28	1548.4	/	/
1997	607.93	1657.71	3722.37	4605.72
2002	609.87	1689.17	3741.09	4561.14
2010	818.12	1808.21	3561.92	4569.43

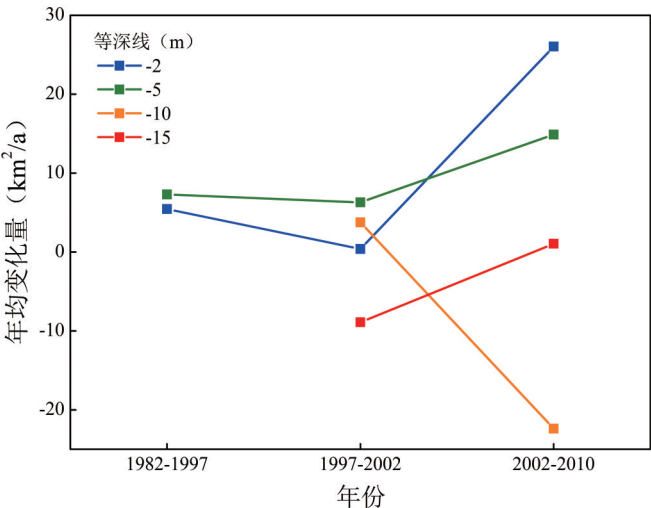


图8 等深线包络面积的年均变化量

Fig. 8 The annual variation of envelope areas within isobaths

并与大通站输沙量关系进行对比分析(图10)。

(1) 2 m 等深线包络面积年均变化
2 m等深线包络面积年均变化崇明东滩和南汇东滩趋势一致,为倒V型(图10a),表现出1997-2010年淤积减缓的趋势,分别从1997-2002年的年均7.48 km²和4.73 km²减少到2002-2010年的年均4.69 km²和4.05 km²;而横沙浅滩和九段沙趋势一致,则为正V型,2 m以浅等深线包络的滩涂面积在1997-2002年间不断减少,减少速率分别为年均9.46 km²和2.35 km²,然而2002-2010年间面积却迅速增加,增加速率分别为年均13.12 km²和4.18 km²,这主要是因为深水航道工程建设使得南北导堤阻挡了两侧泥沙向北槽输送,从而在滩地上淤积。

(2) 5 m 等深线包络面积年均变化
崇明东滩、九段沙和南汇东滩的5 m等深线包络面积年均变化趋势一致,为平缓倒V型(图10b),淤积速率在不断降低,

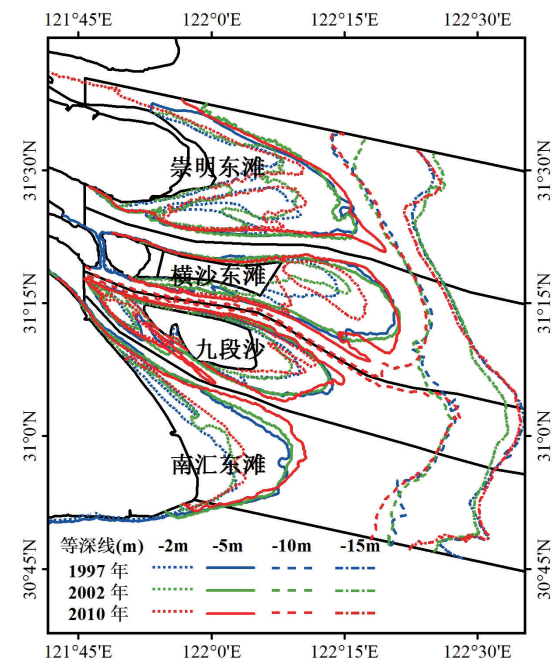


图9 长江口等深线及水下三角洲四个重要分区示意图
Fig. 9 Zoning sketch of isobaths and the four important regions in the submerged delta

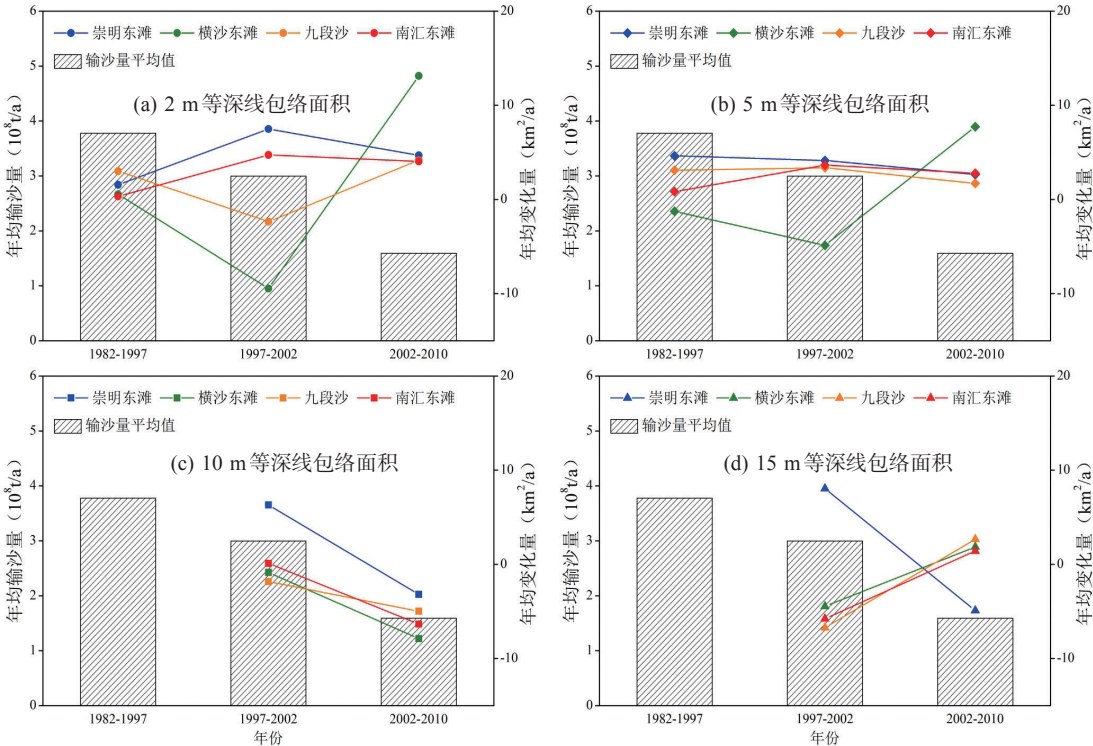


图10 不同等深线包络面积年均变化量与大通站输沙量变化关系

Fig. 10 The relationship charts between annual area variation within different isobaths and annual sediment load for the Yangtze River as measured at Datong

分别从1997-2002年的年均 4.14 km^2 、 3.37 km^2 和 3.66 km^2 减少至2002-2010年的 2.66 km^2 、 1.71 km^2 和 2.78 km^2 ;而横沙浅滩5 m以浅等深线包络面积年均变化则为正V型,由1997-2002年年均减少 4.88 km^2 转变为2002-2010年期间年均增加 7.73 km^2 。

(3) 10 m等深线包络面积年均变化 1997-2010年,10 m等深线包络面积年均变化趋势4个区域相一致(图10c),且在2002-2010年间年均冲淤变化量均为负值;崇明东滩由1997-2002年的向外扩张转变为2002-2010年向内冲刷,而其他3个区域由1997-2002年的低速向内冲刷转变为2002-2010年的高速向内冲刷。

(4) 15 m等深线包络面积年均变化 1997-2010年,15 m等深线包络面积年均变化崇明东滩表现为2002-2010年向内冲刷的趋势(图10d);而横沙浅滩、九段沙和南汇东滩趋势一致,都表现为由1997-2002年的向内冲刷转变为2002-2010年向外淤积的趋势。

综上所述,长江口水下三角洲4个重要分区2 m、5 m、10 m和15 m等深线包络的面积在3个演化阶段变化十分复杂。2 m等深线包络的面积仍保持着不断增加,只是横沙浅滩和九段沙为增速扩张,而崇明东滩和南汇东滩则扩张速度有所放缓;5 m等深线包络的面积仍维持不断增加,横沙浅滩为增速扩张,而崇明东滩、九段沙、南汇东滩则为减速扩张(增速趋近于0);4个区域的10 m等深线包络面积均已停止向外扩张,并出现了不同程度的向内冲刷;从15 m等深线包络的面积变化看,崇明东滩仍处在向内冲刷状态,而其他3个区域则保持低速向外扩展。从与大通站输沙量减少趋势的相关性看,崇明东滩2 m、5 m、10 m和15 m等深线包络的面积变化趋势与之相同;南汇东滩和九段沙2 m、5 m和10 m等深线包络的面积变化趋势与之相同,但15 m等深线包络的面积与之相反;横沙浅滩只有10 m等深线包络的面积变化趋势与之相同,而2 m、5 m和15 m等深线包络的面积与之相反。因此,长江口水下三角洲4个重要分区中只有崇明东滩能与大通站输沙量建立起密切关系,这说明该区域是大通站泥沙减少明显响应的区域;而横沙浅滩、九段沙和南汇东滩,尤其是横沙浅滩面积的变化与大通站输沙量的减少无法建立起必然联系。

5.2.2 长江口水下三角洲受控因素分析 近年来,越来越多的学者开始关注长江口水下三角洲演化主导受控因素的分析。长江口由于受围海工程、海港工程、海上疏浚工程和海岸防护工程等一系列第三趋动力的作用,已经削弱了长久以来自然驱动力在长江河口塑造中的主导作用。对于本研究所涉及的区域,其中包括:(1)长江北支因受徐六泾河段北岸围垦工程、东风西沙水库工程的影响,来水来沙比出现变化,在1997-2010年间淤积强度达 8.11 cm/a ;(2)南北港分流口的河势受2007年开工建设的新浏河沙护滩和南沙头通道阻流潜堤工程的影响,不再遵循其历史的自然演变趋势,冲刷态势得到控制^[16]。(3)北槽入口段因深水航道的丁坝工程引起了河道阻水效应,使南港分流北槽水量明显减少,导致向海输沙减弱,发生淤积,在1997-2010年间垂向淤积最大达 7.87 m ;北槽中段拦门沙滩顶也发生持续淤积;丁坝坝田区域因流态呈涡流结构而发生大幅淤积。(4)九段沙北缘的局部水动力条件因深水航道的修筑而出现变化,与北槽的水沙交换减弱,涨潮流受南导堤的阻挡,泥沙沿堤坝南缘向西北方向淤积,同时九段沙东部的-5 m等深线北移。(5)横沙浅滩的冲淤形势也因北导堤的建设发生了较大变化,白条子沙及其以东浅水区域淤积加剧,原先南北走向的串沟扭曲、萎缩,并沿着北导堤自东向西形成带状淤积体;促淤工程的实施使横沙浅滩淤涨速度显著增强,2 m和5 m等深线包络的面积在2002-2010年间分别增加了 104.96 km^2 和 61.8 km^2 。(6)由于大范围0~2 m浅滩的促淤圈围造地工程和东海大桥等对长江下泄泥沙的大量拦截,南汇东滩2 m和5 m等深线向外扩张明显。因此,在长江口区,崇明东滩由于近年来未有大型工程上马,基本维持了自然演化的格局,能够体现出上游输沙量减少对水下三角洲演化带来的潜在影响;而横沙浅滩、九段沙以及南汇东滩由于深水航道工程、促淤工程、东海大桥工程等人为工程影响,冲淤变化异常复杂。

随着三峡水库2010年实现175 m正常蓄水位,世界第三大水电站溪洛渡水电站(位于

金沙江下游段的溪洛渡峡谷)于2013年开始下闸蓄水,加上“南水北调”重大战略工程的实施和长江流域生态环境保护的重视,今后较长一段时间长江入海泥沙量还会进一步下降。同时,为落实《上海市总体规划(1999-2020)》关于“到2020年基本建成国际航运中心”的要求,适应船舶大型化趋势、缓解上海港口压力、加大上海航运中心建设步伐,部分学者提出了“谋划第二个‘浦东’,上海横沙新陆域规划”^[17]和“长江口横沙浅滩挖入式港池、人工岛的规划方案”^[18]。如若这些工程得以顺利实施,除了会出现港池和进港航道泥沙回淤问题,也必然会对长江口门附近的北港、北槽、南槽的水动力场产生影响,势必会进一步提升人为工程对长江口水下三角洲的影响,而自然演化所占的比重将进一步被削弱。长江口水下三角洲演变趋势将进入更为复杂的阶段,仍需密切关注。

6 结论

(1) 长江口水下三角洲1982-2010年间整体上表现为冲刷区面积略大于淤积区面积,比值为1:0.92。3个阶段长江口水下三角洲整体冲淤呈现出“冲刷—淤积—再冲刷”的演化态势,但与2002年相比,2010年并未出现强烈冲刷。长江口水下三角洲的8个分区在3个不同阶段中的冲淤变化时空分异明显,只有长江北港区为持续冲刷;1997-2010年间,长江北支和崇明东滩分区为持续淤积,长江北港和南港、九段沙、南汇东滩为持续冲刷,长江南支上段区则由淤积转为冲刷,横沙浅滩则由冲刷转为淤积。

(2) 长江口水下三角洲4个重要分区在垂向上的冲淤特征表现为:崇明东滩除了与北港北沙之间的冲沟垂向冲刷不断加剧外,其余5 m以浅区域垂向以淤积为主,而5~10 m则以冲刷为主;横沙浅滩正东和北北东向断面以垂向淤积为主,而靠近深水航道北导堤方向则为明显垂向冲刷;九段沙靠深水航道南导堤处垂向冲淤波动很大,而东南侧断面处表现为较为稳定的冲刷为主;南汇东滩在3个断面处垂向淤积均较强。

(3) 长江口水下三角洲2 m和5 m等深线包络面积在3个阶段整体上是不断增加的,1982-2010年时段内年均增加量分别为10.42 km²/a和7.99 km²/a;10 m等深线则在2002-2010年有所减少,年均变化速率为-22.40 km²;15 m等深线包络面积变幅较小,基本保持稳定状态。水下三角洲4个重要区域的2 m和5 m等深线包络面积持续增长,横沙浅滩和九段沙为加速扩张,而崇明东滩和南汇东滩扩张速度放缓;水下三角洲4个重要区域的10 m等深线包络面积已停止增加,并出现了不同程度向内收缩;横沙浅滩、九段沙和南汇东滩的15 m等深线包络面积保持低速增加,而崇明东滩则为向内收缩。

(4) 长江口水下三角洲4个重要区域在3个不同阶段面积变化与大通站输沙量变化关系看,崇明东滩的演化与大通输沙量减少明显相关,而横沙浅滩、九段沙和南汇东滩与输沙量减少趋势不一致,究其原因这些区域河口工程建设对水下三角洲演变存在明显的控制作用。在上游来沙量减少的宏观自然背景下,长江口工程建设的影响将成为控制长江口水下三角洲等深线包络面积和分布形态变化的重要因素。

致谢: 本文在选题和写作过程中得到了华东师范大学地理科学学院许世远教授、河口海岸学国家重点实验室虞志英教授的悉心指导,在此致以诚挚和衷心的感谢!

参考文献 (References)

- [1] Yun Caixing. Recent Developments of the Changjiang Estuary. Beijing: China Ocean Press, 2004: 1-20. [恽才兴. 长江河口近期演变基本规律. 北京: 海洋出版社, 2004: 1-20.]
- [2] Yang S L, Zhang J, Zhu J et al. Impact of dams on Yangtze River sediment supply to the sea and delta wetland response. Journal of Geophysical Research, 2005, 110. doi: 10.1029/2004JF000271.
- [3] Lou Fei. The sedimentary & accretion-erosion environment of the outer navigation channel in Changjiang Estuary [D].

- Shanghai: East China Normal University, 2005. [楼飞. 长江口深水外航道海域沉积和冲淤环境研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2005.]
- [4] Liu Jie, Chen Jiyu, Le Jiahai et al. Erosion-deposition analyses on the north passage after implementing the first stage project of the Yangtze estuary deepwater channel regulation. *Journal of Sediment Research*, 2004, (5): 15-22. [刘杰, 陈吉余, 乐嘉海 等. 长江口深水航道治理一期工程实施后北槽冲淤分析. *泥沙研究*, 2004, (5): 15-22.]
- [5] Du Jinglong. Study on erosion and accretion evolvement in the front delta of Yangtze River over the past decade with the exploration into the projects influences. *Geography and Geo-Information Science*, 2012, 28(5): 81-84. [杜景龙. 长江三角洲前缘近十余年的冲淤演变及工程影响研究. *地理与地理信息科学*, 2012, 28(5): 81-84.]
- [6] Li Peng, Yang Shilun, Dai Shibao et al. Accretion/erosion of the subaqueous delta at the Yangtze Estuary in recent 10 years. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(7): 708-714. [李鹏, 杨士伦, 戴仕宝 等. 近 10 年来长江口水下三角洲的冲淤变化: 兼论三峡工程蓄水的影响. *地理学报*, 2007, 62(7): 708-714.]
- [7] Ji Na, Cheng Heqin, Yang Zhongyong et al. Sedimentary and morphological evolution of nearshore coast of Yangtze Estuary in the last 30 years. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 945-954. [计娜, 程和琴, 杨忠勇 等. 近 30 年来长江口岸滩沉积物与地貌演变特征. *地理学报*, 2013, 68(7): 945-954.]
- [8] Yang S L, Belkin I M, Belkina A I et al. Delta response to decline in sediment supply from Yangtze River: Evidence of the recent four decades and expectations for the next half-century. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 57: 689-699.
- [9] Fan Daidu, Kuang Cuiping, Liu Shuguang et al. Impacts of mega-engineers in Changjiang River catchment on coastal land reclamation and wetland conservation. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2013, 41(3): 458-464. [范代读, 匡翠萍, 徐双全 等. 长江流域重大工程对河口滩涂资源利用与保护的影响. *同济大学学报: 自然科学版*, 2013, 41(3): 458-464.]
- [10] Liu Yangyang, Zhang Xingnan, Xu Shuangquan et al. Analysis on erosion-deposition of foreshore landforms of the Yangtze River Estuary. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(11): 1314-1321. [刘扬扬, 张行南, 徐双全 等. 长江口滩涂地形冲淤分析研究. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(11): 1314-1321.]
- [11] Gao Min, Fan Qijin, Tan Zewei et al. Research on bifurcation ratio in the North Passage of Yangtze Estuary. *Port & Waterway Engineering*, 2009, (5): 82-86. [高敏, 范期锦, 谈泽炜 等. 对长江口北槽分流比的分析研究. *水运工程*, 2009, (5): 82-86.]
- [12] Fu Gui. Study of Topography evolution process in Nanhuizui tideland and adjacent seabed [D]. Shanghai: East China Normal University, 2007. [付桂. 南汇嘴岸滩及邻近海床冲淤演变过程研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.]
- [13] Yu Zhiying, Zhang Zhilin, Jin Liu et al. Morphological stability analysis of the planned excavated-in harbor and its channel in the Hengsha Shoal of the Yangtze Estuary. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 2013, (4): 55-71. [虞志英, 张志林, 金鏐 等. 长江口横沙浅滩挖入式港池与入海航道区域海床稳定性分析. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2013, (4): 55-71.]
- [14] Yun Caixing. Scouring and siltation processes of tidal flats of the Yangtze River Estuary and sediment exchange between flats and channels. *Journal of Sediment Research*, 1983, (4): 43-45. [恽才兴. 长江河口潮滩冲淤和滩槽泥沙交换. *泥沙研究*, 1983, (4): 43-52.]
- [15] Yan Yigao, Gao Jin, Zhu Yuliang et al. Mechanism of excellent regime of North Channel in the Yangtze Estuary. *Hydro-Science and Engineering*, 2001, (3): 8-12. [严以新, 高进, 褚裕良 等. 长江北槽优良河势机制. *水利水运工程学报*, 2001, (3): 8-12.]
- [16] Zhang Zhilin, Hu Guodong, Zhu Peihua et al. Current evolution of the South Channel of the Yangtze Estuary and its impacts on major projects. *Resource and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(12): 1433-1441. [张志林, 胡国栋, 朱培华 等. 长江口南港近期的演变及其与重大工程之间的关系. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(12): 1433-1441.]
- [17] Bao Qifan, Ren Guohua. Strategy research on urban new space development and new deepwater port in Hengsha. *Engineering Science*, 2013, 15(6): 14-19. [包起帆, 任国华. 关于上海城市发展新空间和深水新港战略研究的思考. *中国工程科学*, 2013, 15(6): 14-19.]
- [18] Ding Pingxing, Li Shuguo. Planning ideas and key technology for building excavated-in harbor basin in the Hengsha Shoal of the Yangtze Estuary. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 2013, (4): 1-9. [丁平兴, 李树国. 长江口横沙浅滩挖入式港区的规划思路和关键技术. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2013, (4): 1-9.]

Erosion-accretion changes and controlled factors of the submerged delta in the Yangtze Estuary in 1982-2010

SONG Chengcheng^{1,2}, WANG Jun^{1,2}

(1. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China;

2. Key Laboratory of Geographic Information Science of Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: This research analyzed the general erosion-deposition characteristics of submerged delta front, the spatio-temporal changing pattern in different sub-regions, the geomorphological changes in the typical cross-sections, and the geomorphological evolution and corresponding controlled factors of the four important sub-regions (i.e., the eastern tidal wetland of Chongming-CM, the Hengsha shoal-HS, the Jiuduansha wetland-JDS, and the eastern tidal wetland of Nanhui-NH). Data sources include high-resolution DEM, sediment load data at Datong Station, and corresponding estuary construction information. Major findings are: (1) in general, the study area was slightly eroded (51.83% vs. 48.17%) in the past 30 years; specifically, it experienced an "erosion-deposition-erosion" pattern in the three periods; the geomorphological change was significant both spatially and temporally in the eight sub-regions, with an exception of the North Channel staying eroded; (2) the eastern and northern parts of CM and HS, the northern part of JDS, and the region within the 5m-isobath of NH were mainly dominated by the vertical deposition, while an opposite trend in southern CM and HS, and the region within the 5m-isobath of eastern and southern JDS; (3) on the whole, the envelop areas of 2 m and 5 m isobaths of the four important sub-regions kept increasing, and the average annual growth rates reached 10.42 km²/a and 7.99 km²/a respectively in the period of 1982-2010 (however, four sub-regions exhibited disagreements); the envelop area of 10m-isobath decreased in the whole region as well as sub-regions; the envelop area of 15m-isobath changed slightly during the period and remained stable; (4) influenced by the estuarine engineering, CM was the only station whose isobaths envelop area decreased, in accordance with the decline of the sediment load at Datong Station. Major conclusions are that estuarine engineering plays an increasingly important role in affecting the geomorphological change in the submerged delta under the macro-background of the reduction of sediment load, in terms of change in the envelop areas and the distribution of isobaths in the Submerged Delta. Along with the accelerating construction of Shanghai International Shipping Centre and reclamation engineering, the geomorphological evolution of submerged delta will become more complex and thus deserves frequent monitoring in the future.

Key words: Yangtze Estuary; submerged delta; erosion-accretion changes; sediment load; controlled factors