

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

李 鹏^{1,2}, 杨世伦¹, 戴仕宝³, 张文祥¹

(1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062;

2. 国家海洋局东海预报中心, 上海 200081;

3. 滁州学院地理系, 安徽 滁州 239012)

摘要: 根据对近 10 年来长江入海泥沙量和河口冲淤的对比分析, 探讨水下三角洲冲淤对长江入海泥沙锐减以及三峡工程运行的响应。结果表明: (1) 三峡水库蓄水导致长江入海泥沙减少 1×10^8 t/a 量级; (2) 1995-2000 年、2000-2004 年和 2004-2005 年研究区淤积 (冲刷) 面积分别占 75.5% (24.5%)、30.5% (69.5%) 和 14% (86%), 垂向冲淤速率 (负为冲刷) 分别为 6.4 cm/a、-3.8 cm/a 和 -21 cm/a。 (3) 由于地形和水动力的变化以及工程的影响, 研究区内冲淤对河流来沙减少的响应存在显著空间差异。结论包括: 三峡水库蓄水加剧了长江入海泥沙的减少; 入海泥沙的锐减是水下三角洲从淤积为主向侵蚀为主转变的主要原因。随着水库拦沙能力的增强等流域人类活动的影响, 长江入海泥沙将进一步下降, 河口口门区的冲刷可能加剧, 值得有关部门重视。

关键词: 长江; 三峡工程; 水下三角洲; 冲淤演变

1 引言

在三角洲演变过程中, 河流与海洋这一对矛盾, 往往以河流居主导地位^[1]。河流入海泥沙量的变化不仅会引起三角洲淤涨速率的改变, 还可能导致冲淤性质的转换^[2]。20 世纪 70-80 年代以来长江入海泥沙出现减少趋势^[3], 特别是 2003 年三峡工程蓄水以后入海泥沙量急剧下降, 2004 年降到有记录以来的最低水平 1.47×10^8 t/a^[4,5]。水下三角洲对长江入海泥沙锐减的冲淤响应直接关系到河口资源的利用和岸滩保护, 也是国际陆海相互作用研究的重要内容之一。

三峡工程是世界上最大的河流水利枢纽工程^[6], 它对中下游及河口和近海环境的影响成为国内外关注的焦点。在该工程对三角洲冲淤影响的程度方面一直存在不小的争议^[7-9]。尽管针对或涉及该问题的研究已取得一些认识^[7-12], 但它们大都是定性和预测性的 (即基于三峡水库蓄水前的资料), 对三峡水库蓄水以来水下三角洲实际发生的冲淤变化目前知之甚少。本文根据专业测绘部门 1995-2005 年的地形测量资料, 利用 ArcGIS 软件, 对近 10 年来长江口门区水下三角洲的冲淤变化进行定量分析, 并结合同期的大通站输沙量资料, 探讨近 10 年长江入海泥沙减少对水下三角洲冲淤的影响, 为更深入、全面地认识入海泥沙锐减以及三峡工程的影响积累经验, 并及时为三角洲的侵蚀灾害管理提供预警。

收稿日期: 2006-11-03; 修订日期: 2007-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(40576043); 教育部创新团队发展计划项目 (PCSIRT0427); 上海市科委重大项目 (04DZ19305); 国家重大基础研究发展规划(973)项目课题 (2002CB412407) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40576043; Program for Innovative Research Team in University, Ministry of Education, No.PCSIRT0427; Shanghai Science and Technology Committee, No.04DZ19305; National 973 Project, No.2002CB412407]

作者简介: 李鹏 (1978-), 男, 山东菏泽人, 博士生, 主要从事河口海岸环境研究。E-mail: lipeng827@126.com

通讯作者: 杨世伦, 教授, E-mail: slyang@sklec.cnu.edu.cn

2 研究区概况

长江是世界级大河之一,其年径流量^[13]和输沙量^[14]居世界第四位。长江口呈三级分汊、四口入海格局:它首先被崇明岛分为南支和北支,南支又被长兴岛分为南港和北港,最后南港被九段沙分为南槽和北槽。由于北支逐渐淤塞,近几十年来95%以上的长江来水来沙经由南支系统入海^[15]。长江口门附近多年平均潮差2.91 m,最大潮差5.05 m^[16];多年平均波高1 m,最大波高6.2 m^[17]。在季风沿岸流、潮流和波浪的综合作用下,长江入海泥沙有相当一部分向南北和外海扩散,只有30%~50%沉积在北港、北槽和南槽三个主要水沙输出通道口外的水下三角洲^[7,18]。根据所选时段地形测量的范围,本文研究区位于上述三个主要水沙输出通道口外,即30°58'2"~31°25'32"N和122°10'~122°32'30"E之间,面积约1820 km²(图1)。

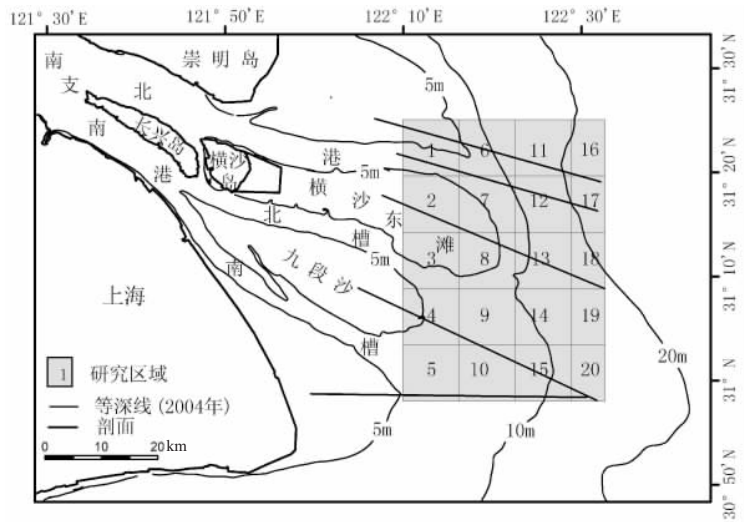


图1 长江口形势图及研究区域

Fig. 1 A sketch map of the Yangtze Estuary showing the study area

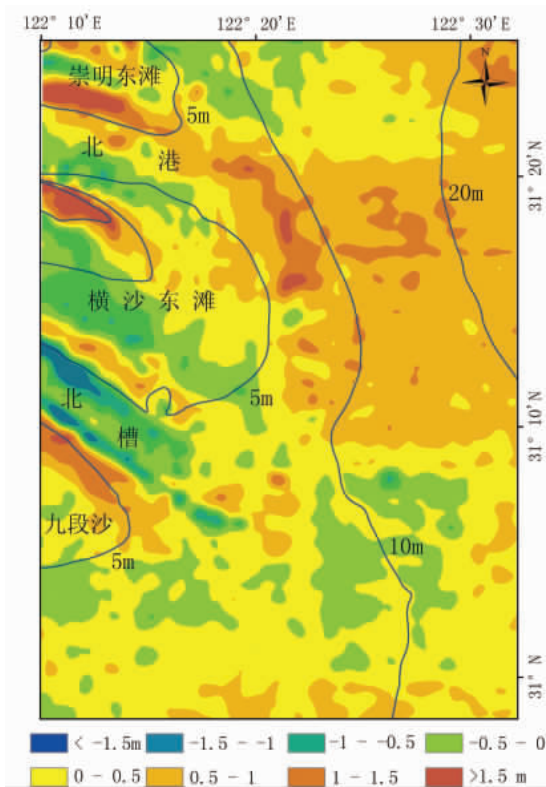
3 资料与方法

本文主要利用中华人民共和国海事局、交通部安全监督局测绘的长江口1995-2005年地形图(1995、2000年比例尺为1:7.5万,2004年为1:12万,2005年为1:2.5万),均为墨卡托投影和1954年北京坐标系,基准面均为理论最低潮面,数据精度均为0.1 m。采用地理信息系统软件ArcGIS9.0配准,然后进行海图资料的数字化和水深数据的录入、编辑、订正,在空间分析模块(3D Analyst)中采用Kriging方式进行插值,在统一基准面的情况下,根据插值结果,在3D Analyst和Spatial Analyst中进行冲淤分析计算,包括冲淤量(体积)、冲淤厚度、冲淤速率、剖面 and 等深线的变化等,建立等深线DEM模型,以

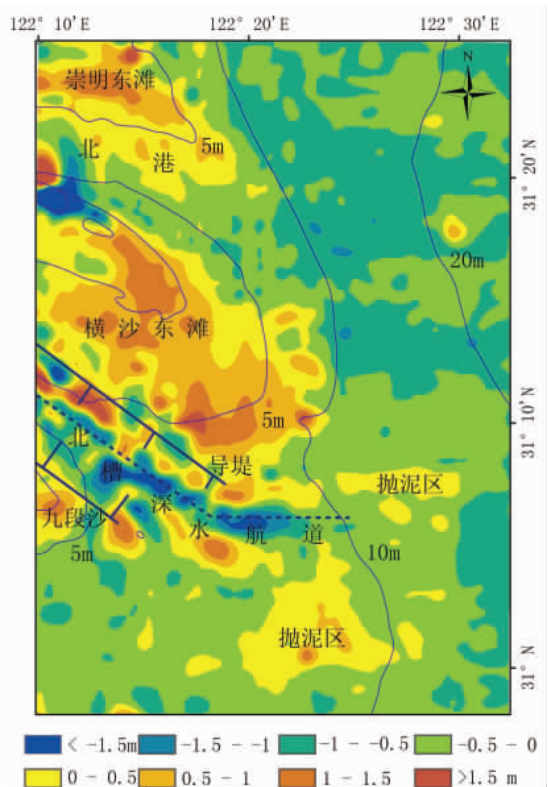
表1 研究区域冲淤分析表 (“-”代表冲刷)

Tab. 1 The analysis of accretion/erosion in the study area

整个研究区域				
时段	淤积区面积/冲刷区面积	净冲淤体积 (10 ⁸ m ³)	净冲淤厚度 (m)	净冲淤速率 (cm/a)
1995-2000	3.3	5.82	0.32	6.4
2000-2004	0.44	-2.78	-0.15	-3.8
淤积区域				
时段	淤积区面积 (km ²)	淤积体积 (10 ⁸ m ³)	淤积区淤积厚度 (m)	淤积区淤积平均速率 (cm/a)
1995-2000	1375	7.22	0.53	10.5
2000-2004	556	2.86	0.51	12.9
冲刷区域				
时段	冲刷区面积 (km ²)	冲刷体积 (10 ⁸ m ³)	冲刷区冲刷厚度 (m)	冲刷区冲刷平均速率 (cm/a)
1995-2000	416	1.40	0.34	6.7
2000-2004	1258	5.64	0.45	11.2



注：“-”为冲刷；等深线为2000年
图2 长江口1995-2000年冲淤图



注：“-”为冲刷；等深线为2004年
图3 长江口2000-2004年冲淤图

Fig. 2 The accretion/erosion of the Yangtze Estuary from 1995 to 2000

Fig. 3 The accretion/erosion of the Yangtze Estuary from 2000 to 2004

及计算结果图形的制作和输出。为研究冲淤变化的空间差异性，本文把以上研究区分成若干分区(图1)，分别对它们的冲淤变化进行统计。由于海图测量范围的限制，1~15分区计算面积为100 km²，16~20分区计算面积为60 km²；由于2005年长江口只测量了部分区域，所以2004-2005年的冲淤对比只限于5、9、10、14、15分区。大通站输沙量资料来自水利部长江水利委员会。

4 结果

4.1 冲淤量和垂向冲淤速率

1995-2000年研究区以淤积为主(图2)，淤积面积是冲刷面积的3.3倍，净淤积 5.82×10^8 m³，平均净淤积厚度0.32 m，净淤积速率6.4 cm/a(表1)。按干容重1.4 t/m³计算，这期间净淤积量 8.15×10^8 t，平均每年淤积量 1.63×10^8 t，占同期大通站入海泥沙量(3.39×10^8 t/a)的48%。淤积主要发生在北港口和横沙东滩的向海一侧(5 m以深区域)，该区域淤积厚度为0.5~1 m。其中北港口外最为明显，有些地方淤积厚度大于1 m。南、北槽口外和崇明东滩东南部则基本上为冲淤平衡区(冲淤相间，冲淤幅度<0.5 m)。研究区西部滩、槽相间，冲淤呈条带状分布，长轴与河槽方向一致(图2)，反映这种冲淤可能与河槽的侧向摆动有关^[7]，而与河流来沙量的变化关系不大。

2000-2004年研究区转变为冲刷为主(图3)，淤积面积仅为冲刷面积的0.44倍，净冲刷 2.78×10^8 m³，平均净冲刷厚度0.15 m，净冲刷速率3.8 cm/a(表1)，年均冲刷泥沙

0.97×10⁸ t。淤积仅发生在崇明东滩、横沙东滩、深水航道两侧导堤—丁坝体系掩护区和深水航道口外两侧的航道疏浚抛泥区，其余占研究区总面积 70% 的区域处于冲刷状态 (图 3)。值得指出：深水航道沿线的“冲刷”主要是疏浚的结果，但疏浚影响的面积和疏浚量在研究区冲刷中所占的比例很小。因此，研究区的冲刷主要是归因于长江入海泥沙的减少 (大通站 2000-2004 年平均输沙量为 2.49×10⁸ t，较之 1995-2000 年时段下降 27%)。

表 2 长江口 5 m 线包围的面积 (km²)

Tab. 2 Area surrounded by the 5m isobaths

区域	1995	2000	2004
崇明东滩	42.6	58.1	66.6
横沙东滩	223.6	228.9	249.5
九段沙东部	39.5	48.5	28.6
合计	305.7	335.5	344.7

4.2 等深线的水平进退变化

长江口 5m 线包围的面积变化较大 (表 2)，崇明东滩 1995-2004 年持续淤涨，但 2000-2004 年的淤涨速率明显较 1995-2000 年小。2000-2004 年时段横沙东滩面积明显增大，与深水航道北导堤的掩护作用有关^[9]。九段沙东部面积在 1995-2000 年增加 23%，但在 2000-2004 年却减少 41%。尽管受到工程的影响，上述三滩总面积的增长仍呈下降趋势：后一时段 (2.3 km²/a) 较之前一时段 (5.96 km²/a) 下降 61%。10 m 以外的等深线 1995-2000 年都均匀向海淤进 (图 4)，但 2000-2004 年转为蚀退 (图 5)。

4.3 典型剖面的冲淤变化

从 5 个典型剖面 (图 1) (从北到南依次为崇明东滩、北港、横沙东滩、九段沙东、南汇东) 的冲淤变化 (图 6) 可知：1995-2000 年剖面淤积均向海推进，2000-2004 年剖面的变化分两部分：上部淤积下部冲刷，但不同地区冲蚀转化的深度却不同，从北到南 5 个剖面的冲淤平衡水深点分别为 7 m、7 m、9 m、4 m 和 5.5 m，以横沙东滩以东的蚀积平衡点最低 (9 m 水深)，九段沙东的蚀积平衡点最高 (4 m 水深)。

4.4 冲淤的空间差异

在 1995-2000 年时段，20 个分区中只有第 3 和第 14 分区处于冲刷 (表 3)，且第 14 区的冲刷速率小于 1 cm/a (在测量误差之内，可看作冲淤平衡区)。31°10' N 以北的第 7、12、13、16、17、18 分区的年淤积速率均大于 10 cm/a，13、16、17 分区的年淤积速率

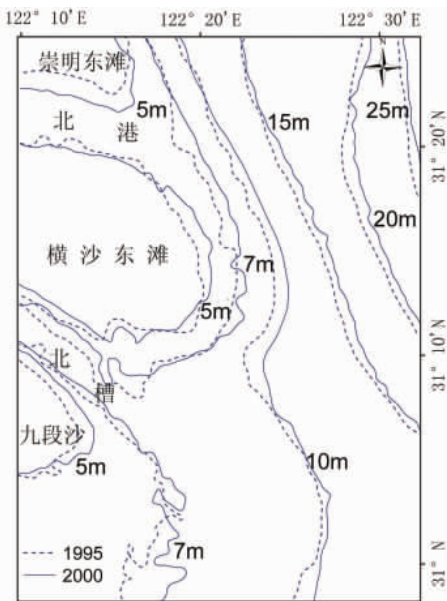


图 4 长江口 1995-2000 年等深线变化图
Fig. 4 The isobaths changes of the Yangtze Estuary from 1995 to 2000

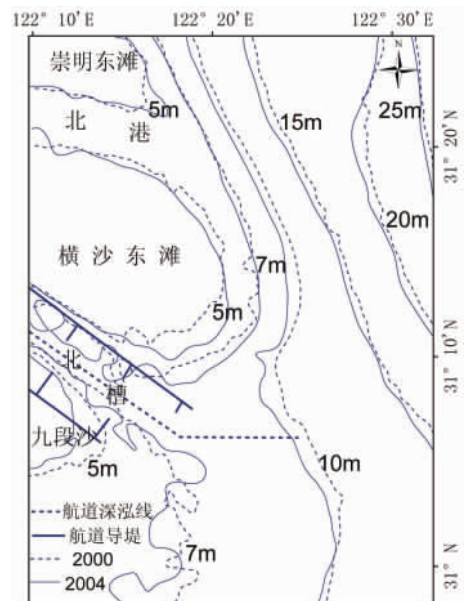


图 5 长江口 2000-2004 年等深线变化图
Fig. 5 The isobaths changes of the Yangtze Estuary from 2000 to 2004

表 3 研究区分区冲淤速率 (cm/a)

Tab. 3 The accretion-erosion rates of the subregions (cm/a)

分区	1995-2000	2000-2004	2004-2005
1	7.4	7.2	
2	2.8	6.1	
3	-5.9	9.1	
4	5.3	-9.5	
5	2.2	-7.5	-26.4
6	5.7	-6.1	
7	11.7	-3.8	
8	3.1	16.0	
9	3.6	-2.9	-7.1
10	5.2	-2.5	-34.9
11	8.2	-13.2	
12	11.3	-15.1	
13	14.4	-10.2	
14	-0.8	-4.2	1.8
15	4.0	-1.4	-15.9
16	14.7	-12.3	
17	14.9	-11.7	
18	12.4	-12.5	
19	6.1	-12.8	
20	6.1	-12.2	

达到近 15 cm/a; 31°10'N 以南的各分区也都处于淤积状态, 但淤积的厚度明显小于北部 (这三个分区最大的淤积速率也只有 6 cm/a 左右)。2000-2004 年时段, 仅第 1、2、3、8 分区仍处于淤积状态, 但其他分区均发生冲刷。在 2005 年有测量资料的 5、9、10、14、15 五个分区中, 2004-2005 年除了分区 5 受深水航道疏浚抛泥区的影响出现“淤积”外, 其他四个分区的冲刷速率都明显大于 2000-2004 年时段。2004-2005 年这四个分区的平均冲刷速率达到 21 cm/a, 是 2000-2004 年时段的 5.9 倍。有理由推断, 整个研究区 2004-2005 年的冲刷较之 2000-2004 年时段更加强烈。上述几个典型剖面冲淤转换点的不同也反映冲淤的空间差异。

5 讨论

5.1 近 10 年大通输沙量变化及三峡工程的影响

近 10 年来大通站输沙率呈下降趋势, 特别是 2003 年三峡水库蓄水以来, 大通输沙率降至 1.90×10^8 t/a (2003-2005 年), 比蓄水前三年 (2000-2002 年) 减少 1.07×10^8 t/a, 比 1995-1999 年减少 1.50×10^8 t/a (图 7)。研究表明, 近几十年长江入海泥沙减少的最主要原因是水库的拦沙作用^[4, 5, 20, 21], 同时水土保持措施也有一定的

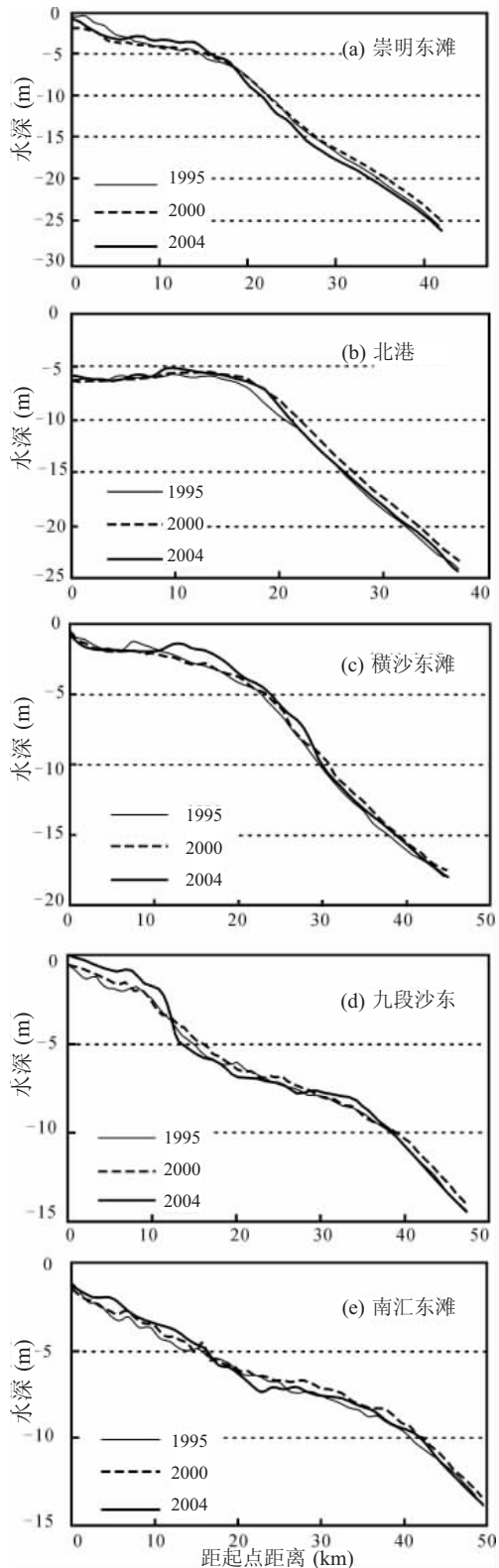


图 6 横剖面的冲淤对比

Fig. 6 Temporal changes in cross-shore profile

贡献^[20]。三峡工程对入海泥沙的影响问题一直受到广泛关注。由于三峡大坝距大通站约1200 km,其间有洞庭湖、鄱阳湖及汉江等支流水系注入,加上坝下游河道的冲淤调节作用,“三峡工程对大通站输沙率的影响”既不是简单的有多少泥沙被拦在水库里的问题,也不是简单的在大通站观测到蓄水后有多少泥沙减少的问题。有必要对三峡水库蓄水以来库区淤积、流域来沙以及中下游河道和湖泊的冲淤变化等对大通站输沙率的影响作综合分析。长江水利委员会的监测资料表明,2003-2005年从上游进入三峡库区(清溪场镇水文站)的泥沙较蓄水前三年

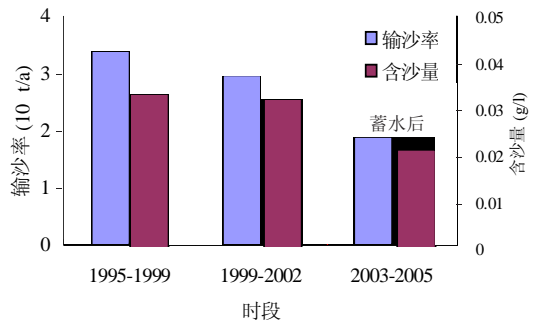


图7 近10年大通输沙量的变化

Fig. 7 Changes of sediment discharge at Datong in recent 10 years

(2000-2002年)减少 0.89×10^8 t/a,比1995-1999年减少 2.2×10^8 t/a。因此上游来沙的减少是造成2003-2005年大通站输沙率进一步降低的原因之一。泥沙平衡法计算结果显示,2003-2005年三峡水库淤积泥沙为 1.51×10^8 t/a,扣除宜昌一大通间河道的补偿冲刷,水库蓄沙导致大通站输沙率减少 0.85×10^8 t/a^[22],占同期大通站输沙率实际减少值的79%。三峡水库蓄水以后洞庭湖的泥沙淤积明显减弱^[23],它相当于增大了长江中下游河道的输沙率。2003-2005年,中下游主要支流汉江、洞庭4水和鄱阳5河的合计输沙率为 0.28×10^8 t/a,比蓄水前的2000-2002年增加13%。显然,这一增加对三峡水库蓄水导致的下游输沙量的减少具有一定的缓减作用。由此可见,2003年以来大通站输沙率下降的首要原因是三峡水库蓄水,其次是上游(水库以上区域)来沙的减少。

5.2 冲淤转换的原因

近10年长江口进行了大量工程建设,如北槽深水航道工程、南汇东滩人工半岛的围垦等工程。但这些变化对本文研究区的水动力场总体上影响不大。如南汇东滩围垦工程实施对长江口与杭州湾水流的分流点和汇流点位置基本没有影响,南汇东滩水动力条件变化不大,不会影响到滩地的冲淤变化规律^[24]。北槽深水航道双导堤工程的束流致冲刷作用仅限于北槽本身,对口外几乎没有影响^[25,26]。所以,本文研究区近期淤涨减慢和冲刷加强与河口工程关系不大。

流域来沙是三角洲1~100年尺度冲淤演变的控制性因子^[27]。近几十年来长江入海泥沙呈明显减少趋势^[21]。20世纪90年代的输沙量相对60年代下降了1/3,而近几年下降速率明显加快,1995-2000时段大通站的平均输沙量为 3.39×10^8 t,由于三峡水库蓄水的影响,2000-2004年间大通平均输沙量和2005年输沙量分别为 2.48×10^8 t和 2.16×10^8 t。在此背景下,长江口门外水下三角洲(面积约6000 km²)淤积速率从1958-1978年时段的5.5 cm/a下降为1978-1998年时段的1.1 cm/a^[10],本文计算的1995-2000和2000-2004两个时段的冲淤速率分别为6.4 cm/a和-3.8 cm/a,1995-2000年冲淤速率较1978-1998时段大,可能是因为计算的区域范围不同,加上1995-2000年长江输沙仍处较高水平(3.39×10^8 t),本文的计算区域位于长江三个主要水沙输出口外(水深0~30 m),是水下三角洲对入海水沙响应最敏感的区域。随后2000-2004时段则由于长江入海泥沙锐减转为冲刷。可以推断,长江口水下三角洲由1995-2000年的淤积转为2000-2004年的冲刷以及2004-2005年的冲刷加强,其主要原因是长江入海泥沙量的减少。

在2000-2004年间长江经历了2003年的三峡水库蓄水这一重大事件。楼飞^[25]对2000-2002年长江口外水下三角洲的冲淤研究表明,2000-2002年水下三角洲部分区域已出现侵蚀迹象,但仅7~15 m水深区域大部分出现微量冲刷,等深线出现部分蚀退,水深

超过 20 m 的区域则保持淤涨。但从本文 2000-2004 年等深线的变化可知, 水深超过 7 m 的区域均处于蚀退。由此可推断, 研究区出现大面积侵蚀发生在 2003 年三峡水库蓄水之后。相同区域(图 1 中 5、9、10、14、15 分区) 2004-2005 年的冲刷速率较 2000-2004 年大也说明这一点。如前所述, 大通站三年平均输沙量从蓄水前(2000-2002 年)的 2.97×10^8 t 降至蓄水后(2003-2005 年)的 1.90×10^8 t (下降 36%)。无疑, 三峡水库蓄水加速了长江来沙的减少, 从而导致研究区从淤积转为冲刷并出现侵蚀加强的趋势。

5.3 冲淤变化空间差异的原因

长江口外水下三角洲的冲淤存在纵向差异和横向差异。

纵向差异指河口向海延伸方向上的差异, 在本文即东西差异。如前所述, 研究区西部为滩槽相间的地形格局, 总体水深较小。河槽主要发挥输沙通道的作用, 而浅滩则是泥沙堆积的场所。河槽的自然冲淤通常与深泓线的横向摆动有关; 而在图 3 中, 北槽沿线的“冲刷”又主要是深水航道疏浚的结果。尽管浅滩对河流来沙减少的响应不及其向海一侧的“深水区”那么强烈, 但仍有一定规律可循。例如崇明东滩后一时段较前一时段淤涨速率明显降低, 九段沙后一时段转淤为冲(表 2), 都可能反映了河流来沙减少的影响; 而横沙东滩后一时段较前一时段淤涨速率增大则是由于深水航道北导堤工程的干扰^[9]。总体上, 研究区东部(特别是 10 m 以深区域)的水下三角洲前缘斜坡较之西部的滩槽相间区域冲淤强度较大, 冲淤对长江来沙减少的响应也更敏感(图 2、3)。这可能与该区域沿岸流较强有关。长江口外在冬季偏北风盛行条件下存在向南的沿岸流; 夏季相反, 在东南风盛行条件下存在向北的沿岸流^[28]。沿岸流从长江口外带走泥沙的能力主要取决于口外风场和流场所制约的其流速的大小, 因而在年—年代尺度上较稳定, 当河流来沙急剧减少后, 河流供沙不能满足沿岸流带走泥沙的能力, 从而导致底床的冲刷^[7]。总之, 研究区冲淤的纵向差异受地貌和动力条件控制, 同时也与工程有一定关系。

横向差异指与河口延伸方向相垂直或高角度相交方向上的差异, 在本文主要表现为研究区东部的南北差异。大致以 $31^{\circ}10' N$ (北槽口北沿) 为界, 以北区域冲淤变化明显大于以南区域。这种南北差异可能与各汉道的分水分沙比变化有关。历史上, 当水沙入海主汊为北港时, 北港口外的水下三角洲发育; 若南港分流分沙比增加, 则南港口外的水下三角洲就迅速向海伸展^[15]。1995-2000 年北港的分流分沙比明显大于南港^[24], 故北港口外的淤积明显大于南北槽口外; 2000-2004 年南港的分流分沙比转为大于北港, 尽管长江入海泥沙明显减少, 三角洲转化为整体侵蚀, 但由于南港的分流分沙比较大, 以至于南北槽口外的水下三角洲的侵蚀速度小于北槽口外(研究区西南角位于南槽口外, 图 1)。

5.4 与国内外三角洲的对比

近几十年受人类活动的影响, 世界上许多河流的入海泥沙量急剧减少, 使这些河流的三角洲(特别是口门附近)遭受不同程度的侵蚀。例如 20 世纪初尼罗河的入海泥沙量曾达 $1.2 \times 10^8 \sim 1.4 \times 10^8$ t/a, 但流域修建了一系列大坝(特别是 1964 年修建的阿斯旺大坝)后, 90%以上的河流来沙被拦截在水库里, 导致三角洲强烈蚀退^[28]; 西班牙的埃布罗河在 Ribarroja-Mequinenza 大坝修建以后, 约 96%的河流泥沙被拦截, 先河口区出现侵蚀, 随后整个三角洲淤积停止并出现侵蚀^[30]; 黄河曾经是世界上最输沙量最大的河流, 20 世纪 50-60 年代入海泥沙量(利津站)接近 13×10^8 t/a, 由于流域建坝和其他人类活动的影响, 到了 90 年代已降至 3.9×10^8 t/a, 2002 年仅 0.5×10^8 t/a, 入海泥沙锐减使迅速淤涨的三角洲出现严重侵蚀^[31]; 类似的还有密西西比河三角洲^[32]、我国的滦河^[33]等。与其他三角洲相比, 长江水下三角洲冲淤演变有它独特的特点。首先长江是中强潮河口, 长江口附近多年平均潮差 2.91 m^[16], 而尼罗河、埃布罗河、密西西比河、黄河等河口都是弱潮河口, 潮差通常小于 0.5 m^[34], 长江河口三角洲潮流对泥沙的疏运能力远大于其他河口。其次, 长江入海泥沙量锐减但入海径流量几乎没变^[21], 而尼罗河、埃布罗河、黄河等都是入海

水、沙同时减少的。由于长江入海径流没有减少,对泥沙的搬运能力就没有降低,入海泥沙逐渐减少时三角洲淤积逐渐减慢,当入海泥沙量小于长江径流、潮流和口外沿岸流对泥沙的扩散能力时,就通过水下三角洲底床泥沙的冲刷进行补偿,三角洲出现冲刷。

5.5 今后水下三角洲的冲淤趋势

三峡水库蓄水位将于2008年提升至175 m,届时库容将比目前增加近两倍;修建中的世界第三大水电站溪洛渡水库(位于金沙江尾间)将于2013年运行,建成后约70%的上游来沙将被拦截;溪洛渡之上正在建设向家坝等梯级水库。这将使未来进入三峡水库的泥沙大大减少,出库泥沙也将随之减少。加之作为重大国策的南水北调正在逐步实施,流域生态环境的恢复也越来越被重视,尽管在上游来沙减少的情况下中下游河道会通过冲刷进行补充,但要达到冲淤平衡还需要一个相当长的过程^[3],今后一段时期长江入海泥沙量无疑还会在目前的基础上进一步下降。鉴于目前水下三角洲已经出现冲大于淤的态势,今后的冲刷很可能继续加强,对三角洲滩涂资源的可持续利用和海岸防护将构成严重威胁,值得有关方面重视。

6 结语

近10年来长江口门外水下三角洲由淤积为主(1995-2000年)转变为冲刷为主(2003-2005年),主要与流域人类活动所导致的流域来沙减少特别是三峡工程蓄水引起的来沙锐减有关。换言之,三峡工程的蓄水对长江口水下三角洲地形演变产生了深刻的影响。未来几十年在流域人类活动的综合影响下,长江入海泥沙将进一步减少。尽管由于地形和工程的影响,5 m以浅的浅滩近年总体上还处于淤涨,但淤涨速率已明显下降。若不采取进一步的工程措施,在河流来沙继续减少的背景下浅滩仍可能出现冲刷。今后有必要加强流域入海泥沙和三角洲冲淤的跟踪监测和理论研究,为三角洲的侵蚀管理和防护提供及时的预警。

参考文献 (References)

- [1] Ren Me'i'e. Man's impact on the coastal zone of the Mississippi River Delta. *Acta Geographica Sinica*, 1989, 44(2): 221-229. [任美镛. 人类活动对密西西比河三角洲最近演变的影响. *地理学报*, 1989, 44(2): 221-229.]
- [2] Syvitski J P M, Vorosmarty C J, Kettner A J et al. Impact of humans on flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*, 2005, 308: 376-380.
- [3] Yang S L, Zhao Q Y, Belkin I M. Temporal variation in the sediment load of the Yangtze River and the influences of the human activities. *Journal of Hydrology*, 2002, 263: 56-71.
- [4] Yang S L, Li M, Dai S B et al. Drastic decrease in sediment supply from the Yangtze River and its challenge to coastal wetland management. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33. doi:10.1029/2005GL025507.
- [5] Yang Z, Wang H, Saito Y, Milliman J D et al. Dam impacts on the Changjiang (Yangtze) River sediment discharge to the sea: The past 55 years and after the Three Gorges Dam. *Water Resources Research*, 2006, 42. doi: 10.1029/2005WR003970.
- [6] Wang Rushu. The environment and resettlement of TGP (Three Gorges Project). *Resources Environment in the Yangtze Basin*, 2000, 9(1): 1-13. [王儒述. 三峡工程的环境与移民问题. *长江流域资源与环境*, 2000, 9(1): 1-13.]
- [7] 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. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 57: 689-699.
- [8] Li Congxian, Yang Shouye, Fan Daidu et al. The change in Changjiang suspended load and its impact on the delta after completion of Three Gorges Dam. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(5): 495-500. [李从先, 杨守业, 范代读等. 三峡大坝建成后长江输沙量的减少及其对长江三角洲的影响. *第四纪研究*, 2004, 24(5): 495-500.]
- [9] NCTGP (The National Council of Three Gorges Project). 63 What's impact of the impoundment of the Three Gorges Reservoir on the tidflat in the Changjiang estuary? In: 100 Questions on the Three Gorges Project. Beijing: China Hydroelectricity Press, 2002. [国务院三峡工程委员会. 63 三峡水库运行后对长江入海口的滩涂冲淤演变有什么影

- 响? 见: 三峡百问. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.]
- [10] Yang Shilun, Zhu Jun, Zhao Qingying. A preliminary study on the influence of Changjiang River sediment supply on subaqueous delta. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(5): 83-91. [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. *海洋学报*, 2003, 25(5): 83-91.]
- [11] Yu Zhiying, Lou Fei. The evolvement characteristics of Nanhuizui foreland in the Changjiang Estuary, China. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 26(3): 47-53. [虞志英, 楼飞. 长江口南汇嘴近岸海床近期演变分析 - 兼论长江流域来沙量变化的影响. *海洋学报*, 2004, 26(3): 47-53.]
- [12] 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.
- [13] Zhao Chunhou, Zhu Zhenhong, Zhou Duanzhuang. *Worldwide Rivers and Dams*. Beijing: China Water Conservancy & Hydroelectricity Press, 2000. 1059. [赵纯厚, 朱振宏, 周端庄. *世界江河与大坝*. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. 1059.]
- [14] Eisma D. *Intertidal Deposits: River Mouths, Tidal Flats and Coastal Lagoons*. Boca Radon, Florida: CRC Press, 1998, 459.
- [15] 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.]
- [16] Hu Hui. *Marine hydrology*. In: Chen Jiyu. *The Investigation Report on Coastal and Tidal Resource of Shanghai*. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1988. 15-40. [胡辉. *海洋水文*. 1988. 见: 陈吉余. *上海市海岸带和海涂资源综合调查报告*. 上海: 上海市科学技术出版社, 1988. 15-40.]
- [17] Zhu Huiyang, Yun Caixing, Mao Zhichang et al. Characteristics and empiric relationships of wind generation wave in the Changjiang estuary. In: *Processes of Dynamics and Geomorphology of the Changjiang Estuary*. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1988. 166-177. [朱慧芳, 恽才兴, 茅志昌 等. 长江河口的风浪特性和风浪经验关系. 见: *长江河口动力过程和地貌演变*. 上海: 上海科学技术出版社, 1988. 166-177.]
- [18] Shen Huanting. *Material Flux of the Changjiang Estuary*. Beijing: China Ocean Press, 2001, 119-153. [沈焕庭. *长江河口物质通量*. 北京: 海洋出版社, 2001. 119-153.]
- [19] Du Jinglong. *A study of complexity of erosional/accretionary evolution in large estuary based on GIS: A case of the Yangtze Estuary, China--With the emphasis on Yangtze River*. Dissertation of East China Normal University, 2006. [杜景龙. *基于 GIS 的大河口冲淤复杂性研究: 以长江口为例*. 华东师范大学博士论文, 2006.]
- [20] Dai Shibao. *Impacts of natural processes and human activities on the river sediment flux into the sea and its environmental significance, China*. Dissertation of East China Normal University, 2006. [戴仕宝. *中国流域自然作用和人类活动对 (河流) 入海泥沙的影响*. 华东师范大学博士论文, 2006.]
- [21] Li Ming, Yang Shilun, Li Peng et al. Drastic decrease in sediment supply from Yangtze River and coastal crisis. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(3): 282-288. [李明, 杨世伦, 李鹏等. 长江来沙锐减与海岸滩涂资源的危机. *地理学报*, 2006, 61(3): 282-288.]
- [22] Yang S L, Zhang J, Xu X J. Influence of the Three Gorges Dam on downstream delivery of sediment and its environmental implications, Yangtze River, *Geophys. Res. Lett.*, 2007, 34, LXXXXX, doi:10.1029/2007GL029472
- [23] Yang S L, Zhang J, Dai S B et al. Effect of deposition and erosion within the main river channel and large lakes on sediment delivery to the estuary of the Yangtze River. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112, F02005, doi: 10.1029/2006JF000484.
- [24] Cao Ying, Zhu Junzheng. Numerical prediction of hydrodynamic condition change at Nanhui east shore of the Yangtze estuary. *Advances in Water Science*, 2005, 16(4): 581-585. [曹颖, 朱军政. 长江口南汇东滩水动力条件变化的数值预测. *水科学进展*, 2005, 16(4): 581-585.]
- [25] Lou Fei. *The Sedimentary & Accretion-Erosion Environment of the outer navigation channel in Changjiang Estuary*. Thesis of 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*. 华东师范大学硕士论文, 2005.]
- [26] Zhou Hai, Zhang Hua, Ruan Wei. Distribution of maximum turbidity and its influence on the sedimentation of North Passage before and after the construction of the first stage of Yangtze Estuary Deepwater Channel Regulation Project. *Journal of Sediment Research*, 2005, 5: 58-65. [周海, 张华, 阮伟. 长江口深水航道治理一期工程实施前后北槽最大浑浊带分布及对北槽淤积的影响. *泥沙研究*, 2005, 5: 58-65.]
- [27] Woodroffe C D. *Coasts: Form, Process and Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 618.
- [28] Su Jilan. A review of circulation dynamics of the coastal oceans near China. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(3): 1-16. [苏纪兰. *中国近海的环流动力机制研究*. *海洋学报*, 2001, 23(3): 1-16.]
- [29] Fanos A M. The impacts of human activities on the erosion and accretion of the Nile Delta coast, *Journal of Coastal Research*, 1995, 11(3): 821-833.

- [30] Sánchez-Arcilla A, Jiménez J A, Valdemoro H I. The Ebro Delta: Morphodynamics and vulnerability. *Journal of Coastal Research*, 1998, 14(3): 754-772.
- [31] Yang Z S, Wang H J, Saito Y et al. Phase change of the modern Huanghe delta evolution since its last end channel shift in 1976 (and its phase change). In: Thanawat Jarupongsakul, Yoshiki Saito (eds.), 5th International Conference on Asian Marine Geology, AGCP-475 DeltaMAP and APN Mega-Delta, January 13-18, 2004, Bangkok, Thailand. 256.
- [32] Coleman J M, Roberts H H, Stone G W. Mississippi River delta: An overview. *Journal of Coastal Research*. 1998, 14 (3): 698-716.
- [33] Qian Chunlin. Effects of the water conservancy projects in the Luanhe River Basin on Luanhe River Delta, Hebei province. *Acta Geographica Sinica*, 1994, 49(2): 158-166. [钱春林. 引滦工程对滦河三角洲的影响. *地理学报*, 1994, 49(2): 158-166.]
- [34] Stanley D J, Warne A G. Nile Delta: Recent geological evolution and human impact. *Science*, 1993, 260(5108): 628-634.

Accretion/erosion of the Subaqueous Delta at the Yangtze Estuary in Recent 10 Years

LI Peng^{1,2}, YANG Shilun¹, DAI Shibao³, ZHANG Wenxiang¹

(1. State Key Lab of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

2. East China Sea Forecast Centre, SOA, Shanghai 200081, China;

3. Geography Department, Chuzhou University, Chuzhou 239012, Anhui, China)

Abstract: Based on the sediment supply from the Yangtze River and the analysis of the accretion/erosion of the subaqueous delta at the Yangtze Estuary in recent ten years, the accretion/erosion response of the subaqueous delta to the sharp decline of the sediment supply from the Yangtze River to the sea and the impoundment of the Three Gorges Reservoir was preliminarily discussed. The results show that (1) because of the impoundment of the Three Gorges Reservoir, the sediment supply from the Yangtze River to the sea decreased at an order of magnitude 1×10^8 t/a; (2) the proportion of accretion area to the total area is 75.5%, 30.5% and 14% in the three periods. The accretion/erosion rates of the three periods (1995-2000, 2000-2004, 2004-2005) are 6.4 cm/a, -3.8 cm/a and -21 cm/a respectively in the study area; and (3) the accretion/erosion response to the decrease of the sediment discharge from the Yangtze River in the study area has significant spacial different results in the influence of topography, the change of hydrodynamics and the engineering projects. The conclusions are that the impoundment of the Three Gorges Reservoir accelerated the decrease of the sediment from the Yangtze River which is the main cause for the change from accretion to erosion of the subaqueous delta. Attentions should be paid to the future evolution processes of the Yangtze River Delta in view of the further decrease of sediment supply of the Yangtze River, which is due to the more dam construction and land conservation in the future, and the consequent further erosion in the subaqueous delta.

Key words: the Yangtze River; the Three Gorges Reservoir; subaqueous delta; the analysis of accretion/erosion