

长江口横沙通道近岸冲刷地貌形成机制

华 凯¹, 程和琴^{1,2}, 郑树伟^{1,3}

(1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 2. 崇明生态研究院, 上海 202150;
3. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250358)

摘要: 近岸河床的剧烈冲刷是引起岸坡失稳的主要原因之一。通过 SeaBat 7125 多波束测深系统对长江口近岸冲刷最为剧烈的横沙通道北口冲刷坑地貌进行测量, 同时利用双频 ADCP 采集区域水流数据, 结合历史海图资料, 研究该冲刷坑演变过程及形成机制。结果表明: 冲刷坑呈椭圆形, 长约 430 m, 宽约 150 m, 最深处距床面约 38 m; 1984-2017 年期间, 冲刷坑附近河床经历了冲—淤—冲的演变模式, 整体呈冲刷状态, 净冲刷量 $3.45 \times 10^7 \text{ m}^3$, 平均冲深 4.68 m; 2005 年后冲刷坑快速发育, 且持续向南延伸。这主要是因为长兴北沿圈围工程的建设减小该处弯道曲率半径, 导致了侵蚀加剧。其次, 青草沙水库的建设使得北港上中段深泓线发生偏移, 横沙通道北口水动力增强, 这也是快速冲刷的主要原因之一。另外, 长江口深水航道工程、横沙东滩围垦、横沙通道两侧圈围工程及港口码头的建设也一定程度加剧了冲刷之势。由此可见, 人类涉水工程活动是引起该处大型冲刷坑快速发育的主要驱动因素。

关键词: 长江口; 横沙通道; 冲刷地貌; 人类工程活动; 多波束测深系统

DOI: 10.11821/dlxb201907007

1 引言

自 20 世纪以来, 人类活动强烈干扰了河床地貌自然演变过程, 河槽动力地貌对涉水工程的响应受到海洋学者和水利工程师们的广泛关注^[1-8]。如三峡大坝运行截留了上游泥沙, 导致其下游河床地貌发生了剧烈地调整^[9]; 新浏河沙护滩和青草沙水库, 以及横沙东滩围垦和长江大桥等工程的实施, 使得北港中上游河段河道出现缩窄和“S”型河道形态, 造成河槽剧烈冲刷^[10]; 长江深水航道的建设, 改变了附近区域水动力条件, 导致横沙东滩局部侵蚀, 九段沙加速淤积^[11]。上述研究加深了我们对人类活动改变长江河口河槽宏观地貌的认识, 但有关于大型工程导致的河口近岸局部冲刷以及长江口最大可能冲刷深度的研究还很少。

横沙通道位于长江口长兴岛与横沙岛之间, 是北港与北槽水沙交换的重要通道, 也是北港对接深水航道的主要水道。近年来, 由于深水航道工程、长江大桥、青草沙水库以及横沙通道两岸圈围工程等河口工程的建设, 对横沙通道产生了深刻的影响^[12]。许多学者对横沙通道的近期水动力条件与水下地貌变化展开了深入研究。如郭兴杰等根据实测资料指出北港青草沙水库及北槽深水航道工程的建设导致横沙通道持续冲刷^[13]。陈维等通过 Delft3D-FLOW 建立了长江口二维潮流数学模型, 计算得出现阶段横沙通道为明

收稿日期: 2018-06-09; 修订日期: 2019-03-06

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作项目(51761135023); 中国地质调查局南京地质调查中心委托项目(DD20160246) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.51761135023; Nanjing Geological Survey Center, China Geological Survey, No.DD20160246]

作者简介: 华凯(1992-), 男, 安徽省池州人, 硕士生, 从事河口海岸动力地貌研究。E-mail: 51163904026@stu.ecnu.edu.cn

通讯作者: 程和琴(1962-), 女, 博士, 教授, 主要从事河口海岸工程地貌与环境研究。E-mail: hqch@sklec.ecnu.edu.cn

显的落潮优势流^[14]。吴帅虎等发现横沙通道发育大量的冲刷痕等冲刷微地貌^[15]；刘高伟发现横沙通道北口洪季发育沙波，枯季发育麻坑的现象^[16]。尚未有研究回答横沙通道近岸局部强烈冲刷地貌的形成机制与演变趋势。

本文利用多波束测深系统对横沙通道进行全覆盖测量时发现了大型近岸冲刷坑，并对其几何特征进行了量化分析，同步采集了附近水域的流速流向数据，旨在分析长江口大型近岸冲刷地貌的形成机制与发展趋势，以为长江口岸线资源的合理利用与开发及涉水工程灾害防御提供重要依据。

2 研究区域概况与研究方法

长江口是典型分汊型河口，出徐六泾后被崇明岛分为南北支，南支又被长兴岛和横沙岛分为南北港，南港又被九段沙分为南北槽，从而形成“三级分汊，四口入海”格局^[17]。长江每年从流域携带大量泥沙输运至此，这些泥沙的沉积、运移不仅引起河槽的冲淤演变，也塑造规模各异的水下地貌^[18]。横沙通道全长 8 km 左右，是长江口唯一一条南北走向的水道，两岸港口码头众多，岸线资源高度利用。研究区域位于北港中段与横沙通道相接水域（图 1），潮汐属于长江口内非正规半日浅海潮，潮流呈往复流特征。该区域河势变动频繁，北港河槽发育水下沙脊，并向外延伸至拦门沙河段，使北港形成二槽一脊的“W”型河槽形态^[19]，横沙通道基本为“V”型单一河槽形态。

本文收集了海军航保部 1984 年、1992 年横沙通道 1:10000 海图和海事局 2001 年、2005 年、2009 年、2011 年、2014 年、2017 年横沙通道 1:15000 海图（基准面均为理论最低潮位面）。利用 ArcGIS 10.1，对上述海图进行数字化得到水深数据，通过克里金插值法建立数字高程模型，分析河床冲淤量与河槽典型断面形态变化特征。

于 2017 年 8 月、2018 年 5 月利用 Seabat 7125 型高分辨率多波束测深系统对横沙通道水下地貌进行走航观测，多波束工作频率为 400 kHz，最大波束 512 个，分辨率 6 mm，开角 140°，利用天宝差分系统进行定位，定位精度为 dm 级。后期数据经过横摇、纵摇和艏摇的校准，对异常波束点进行剔除，利用 PDS 2000 对数据可视化成图。水动力数据通过双频 ADCP 流速数据采集，采集时间间隔 1 s，在 MatlabR 2013b 中生成三维流场图。

3 研究结果

3.1 冲刷坑几何特征与演变

3.1.1 冲刷坑几何特征 由多波束高分辨率水下地貌图显示，横沙通道东侧近岸存在一个

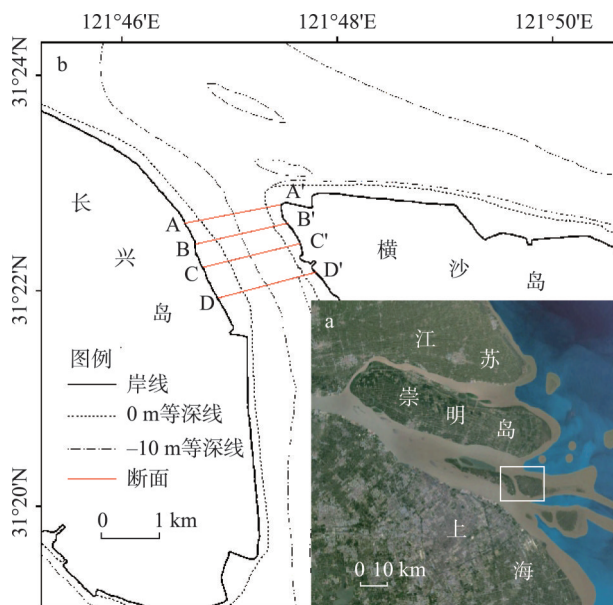


图 1 长江口遥感图(a)与研究区域示意图(b)

Fig. 1 Remote sensing image of Changjiang Estuary (a); division of the study reach (b)

明显深于周围河床的冲刷坑(图2)。冲刷坑平面形态近似椭圆形,长轴南北走向,南端冲刷深度明显大于北端。以冲刷坑附近河床平均高程起算^[17],冲刷坑南北长约432 m,约占整个横沙通道长度的5.4%;东西向宽约150 m,约占横沙通道宽度的11.2%,相对最大深度约38 m,冲刷坑距离堤岸约100 m。实测冲刷坑坡度介于0.12~0.60之间,其中东西两侧坡度明显大于南北侧。

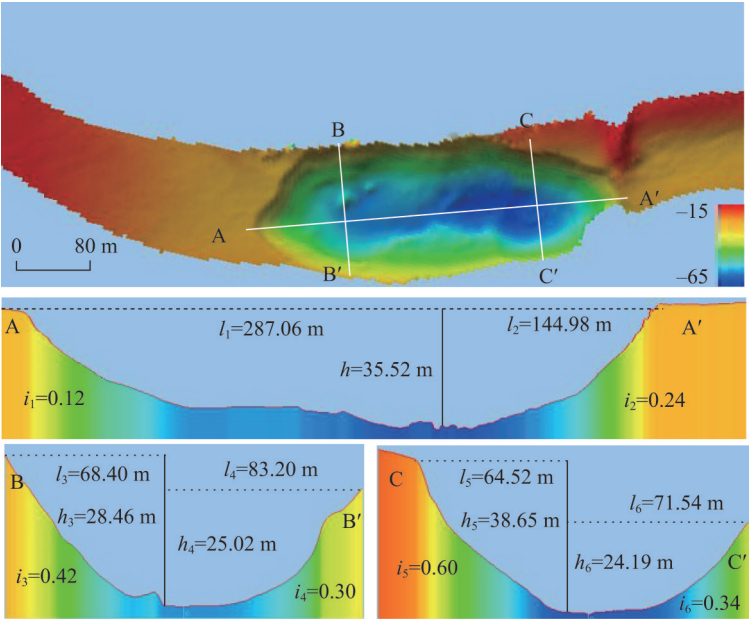


图2 2017年长江口横沙通道冲刷坑地貌图
Fig. 2 Hengsha passage scour pit of Changjiang Estuary in 2017

3.1.2 近期冲刷坑演变过程 以近年来-20 m等深线变化特征作为冲刷坑变化特征的代表指标。利用数字高程模型计算-20 m等深线包络冲刷坑内河槽体积、面积(图3a)。结果显示:1992年前,未出现-20 m等深线,1992-2001年间,冲刷坑-20 m等深线开始出现。2001-2017年,冲刷坑体积、面积持续增大,体积由164.6万m³增加至537.7万m³,面积由7.9万m²增加至19.4万m²,体积、面积年均增长量分别为23.32万m³、0.72万m²;2001-2005年平均深度基本没有变化,2005年以后冲刷坑整体急剧淘深,由2005年的平均深度约20.84 m,增至2017年的平均深度约27.72 m。可以看出近期冲刷坑正快速扩张,特别是2005年后,冲刷坑深度急增(表1)。

对比2001年、2005年、2009年、2017年的-20 m等深线空间位置变化发现:2001-2005年冲刷坑变化不大,仅向南延伸约200 m,北、东、西三侧均未出现较大变化;2005-2009年变动幅度最大,整体呈向东移动(70~100 m),且向南延伸约230 m、向北

表1 冲刷坑-20 m等深线包络河槽体积、面积变化
Tab. 1 The volume and area change of the channel in the scour pit -20 m contour line

年份	2001年	2005年	2009年	2011年	2014年	2017年
体积(万m ³)	164.6	237.6	336.1	390.5	437.4	537.7
面积(万m ²)	7.9	11.4	14.6	15.8	16.5	19.4
平均深度(m)	20.83	20.84	23.02	24.72	26.51	27.72

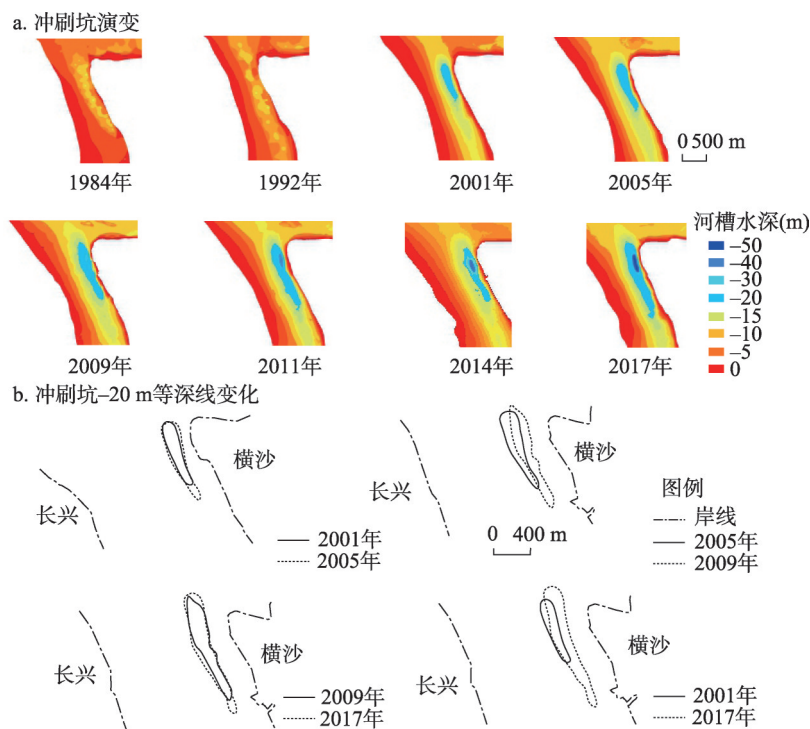


图3 1984-2017年横沙通道北口冲刷坑演变(a)与冲刷坑-20 m等深线变化图(b)

Fig. 3 Evolution of scour pit at the north entrance of Hengsha passage (a); Scour pit -20 m contour line variation diagram (b)

延伸约 100 m; 2009-2017 年进一步向南扩张近 200 m, 东西两侧稍有展宽。综上所述, 2001-2017 年冲刷深坑向北、向南各扩张约 100 m 和 630 m, 东西两侧拓宽约 100 m, 扩张趋势十分明显 (图 3b)。

3.2 冲刷坑及附近河床冲淤演变特征

1984-1992 年横沙通道北口入口河床淤积, 下游河槽冲刷, 总体年均冲刷量 45 万 m^3 , 年均冲刷深度 0.08 m, 冲刷坑所处河床微淤 (图 4a)。1992-2001 年, 冲刷坑附近河槽整体冲刷, 年均冲刷量 188 万 m^3 , 年均冲刷深度 0.23 m, 且冲刷坑处河床开始出现局部强烈冲刷, 致使冲刷坑处 -20 m 等深线出现 (图 4b)。2001-2005 年冲刷坑附近河槽延续整体冲刷之势, 年均冲刷量近 180 万 m^3 , 年均冲刷深度为 0.31 m, 未出现局部强烈冲淤变化 (图 4c)。2005-2009 年, 该区域河槽整体淤积, 年均淤积量 62 万 m^3 , 年均淤积深度为 0.13 m, 但在东侧沿岸河床出现强烈冲刷 (图 4d)。2009-2017 年, 河槽再次呈现冲刷态势, 年均冲刷量 116 万 m^3 , 年均冲刷深度为 0.15 m, 横沙通道北口东侧近岸河床继续呈现局部强烈冲刷的现象 (图 4e)。

1984-2017 年, 横沙通道北口及附近河槽总体处于冲刷态势 (图 4f), 净冲刷量达 3450 万 m^3 , 整体净冲刷深度为 4.68 m (表 2)。冲刷坑的冲淤过程可划分四个阶段: 第一阶段, 1984-1992 年冲刷坑区域未见冲刷; 第二阶段, 1992-2001 年河槽整体冲刷, 冲刷坑开始形成; 第三阶段, 2001-2005 年冲刷坑趋于冲刷平衡。第四阶段, 2005-2017 年冲刷坑快速冲刷, 急剧淘深, 最深处 12 年间冲深 40 m 左右, 形成近岸冲刷深坑。

在横沙通道北口区域设立 AA'、BB'、CC'、DD' 4 个断面 (图 1), 断面均由西至东, A、B、C、D 位于长兴岛一侧, A'、B'、C'、D' 位于横沙岛一侧。分析 33 年间断面

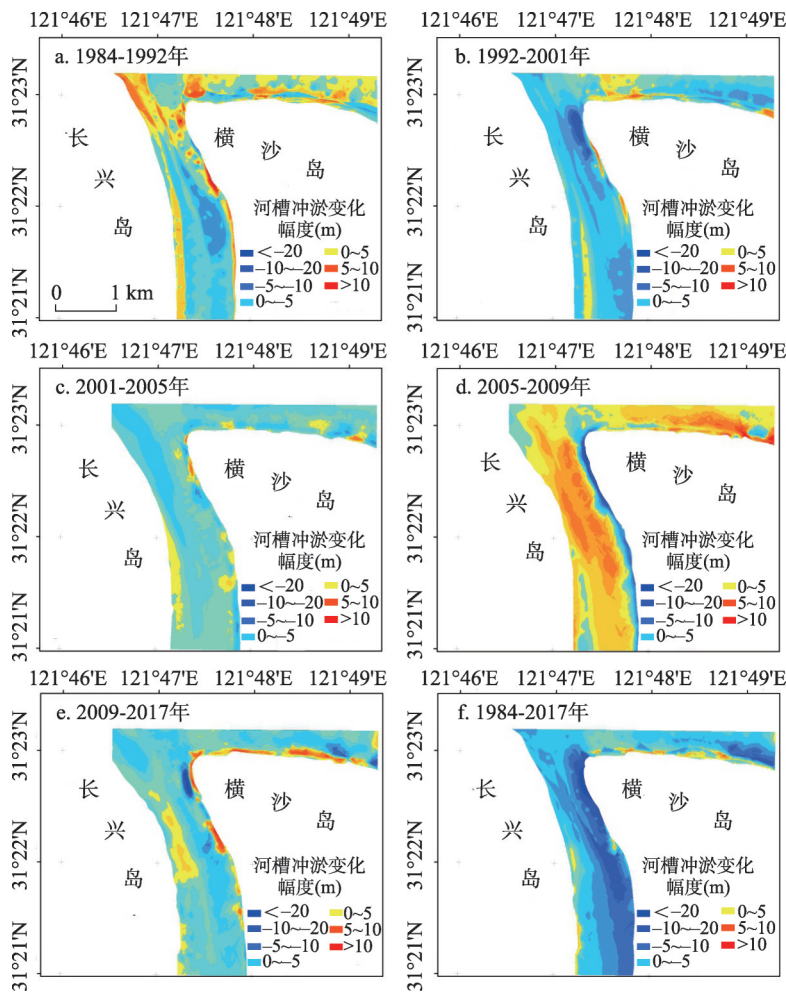


图4 1984-2017年长江口横沙通道北口河槽冲淤图(正淤负冲)
Fig. 4 Erosion/deposition in the Hengsha passage during 1984-2017

表2 横沙通道北口河槽特征

	Tab. 2 Characteristics of channel in the Hengsha passage					
	1984年	1992年	2001年	2005年	2009年	2017年
河槽体积(万 m ³)	3078.12	3438.10	5132.86	5851.68	5602.12	6530.30
河槽平均深度(m)	5.99	6.65	8.73	9.98	9.45	10.67

形态变化(图5)发现,2017年较1984年各断面均存在不同程度的刷深,冲刷最剧烈区域位于AA'断面东侧,冲深约45 m左右;1984-1992年间AA'、BB'断面变化较小,CC'、DD'断面则出现不同程度的冲刷,刷深5~10 m之间;1992-2001年间,各断面普遍冲刷,且冲刷幅度均较大,最大冲刷深度分别约为:15 m、10 m、8 m、8 m。2001-2005年间AA'、BB'断面形态较为稳定,未出现大幅度的变化。CC'、DD'断面略有冲刷,冲刷深度为2~5 m;2005-2017年间四断面大部分区域均持续刷深,东侧近岸河槽出现强烈冲刷,最大冲刷深度分别约为30 m、18 m、13 m、8 m;

总体上,近期横沙通道上段河槽明显冲刷。在2005年以后,东侧近岸河槽开始出现剧烈冲刷,整个区域河道深泓线向横沙岛一侧偏移,且不断加深。

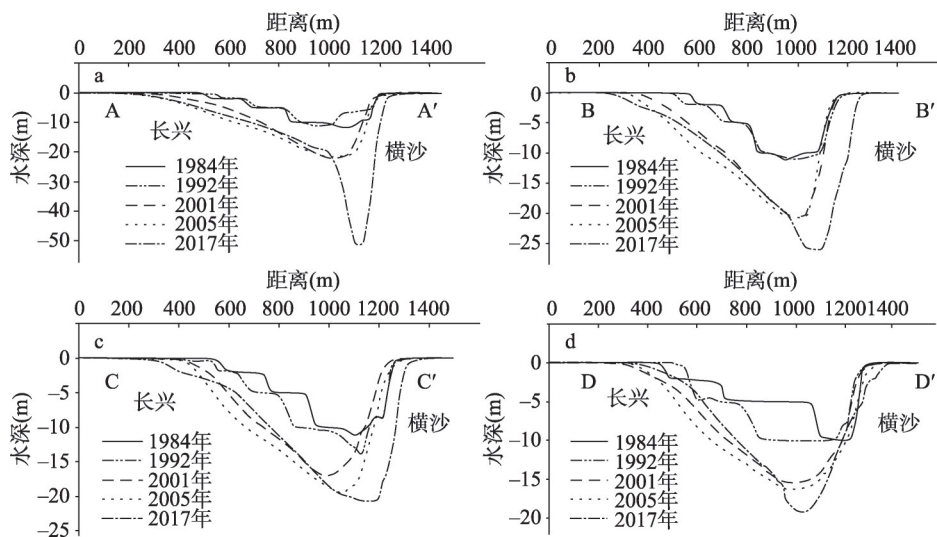


图5 横沙通道典型断面形态变化

Fig. 5 Changes of typical cross-section of Hengsha passage

4 讨论

4.1 近期冲刷坑形成机制

横沙通道南北走向,潮流呈现往复流特征,涨潮流由横沙通道北口进入北港,落潮流由北港经北口进入横沙通道。根据上文所述冲刷坑近期演变过程(图3)及附近河槽冲淤演变特征(图4)显示,1992年前横沙通道北口区域水深均较浅,未出现冲刷坑,1992-2001年间在横沙通道整体冲刷趋势下,北口河床开始出现-20 m等深线,略深于周边河床,但就断面形态变化来看(图5),未出现局部剧烈冲刷,且在2001-2005年间北口冲刷坑区域已经处于近冲淤平衡状态,未出现继续冲刷(图4c)。自2005年来横沙通道北口东侧近岸河床剧烈冲刷,冲刷坑快速发育,最深处冲深35 m,向南延伸630 m,东进约100 m。由此南延与东进的演变趋势可以判断冲刷坑演变主要受落潮流的影响。所以该区域2005年后落潮流水动力的变化是引起近期快速冲刷的关键。

2005-2007年建成的长兴北沿促淤圈围工程,使得横沙通道入口宽从2.5 km左右束窄至1.5 km左右,北港衔接横沙通道所形成的弯道的曲率半径减小。另外,对比2005年、2009年及2017年横沙通道上段深泓线(图6a),发现2005-2009年期间横沙通道上段深泓线向东移动约100 m。2009年以后深泓线基本稳定。横沙通道北口深泓线的东移,导致落潮流主流逐渐逼近东岸。

2007年开始建设,2010年竣工的青草沙水库使长兴岛西北侧岸线大幅北移^[20],北港上中段深泓线发生迁移。对比近期北港上中段深泓线,结果显示:青草沙水库建成前后(2007-2010年),横沙通道附近的北港深泓线向南偏移800 m左右,2010-2017年再次向南偏移300 m左右(图6b)。该区域北港的深泓线大幅度南移,使得横沙通道接受北港的落潮流流量增加,入口处水动力因此增强。

随着横沙通道北口束窄、深泓东移和相邻区域北港的深泓南移,横沙通道北口的落潮流的水动力条件发生自适应调整。2018年5月落潮期间对研究区域进行双频ADCP走航测量,由获得的三维流速流向图(图7a)显示横沙通道北口冲刷坑区域落潮流中上层

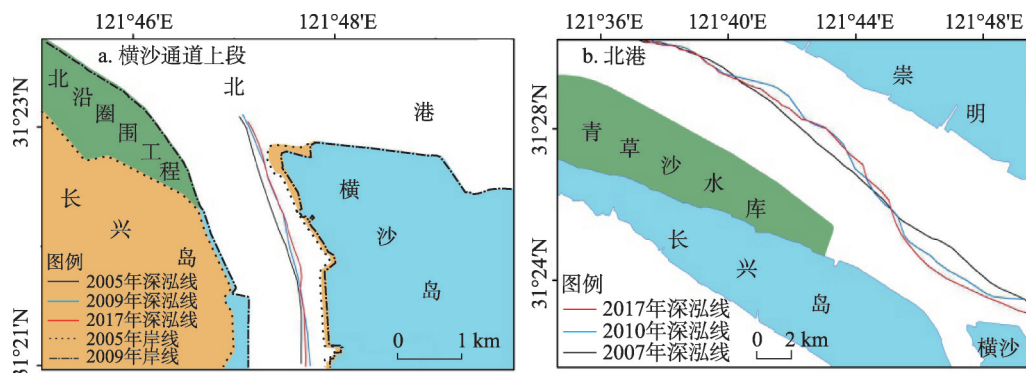


图6 长江河口北港及横沙通道河段深泓线变化

Fig. 6 Changes in the thalweg of Changjiang Estuary (a. the Hengsha passage; b. the North Channel)

(表层、0.2 H、0.4 H、0.6 H) 主要流向与横沙通道走向正交, 近垂直冲向横沙堤岸, 近底层 (0.8 H) 主要流向为由滩向槽, 稍偏向下游。从上至下各层平均流速分别为 0.60 m/s、0.62 m/s、0.56 m/s、0.53 m/s、0.70 m/s、0.35 m/s, 可以看出 0.8 H 平均流速大于其他各层。

对此冲刷坑水动力条件进行进一步分析: 落潮流由北港经横沙通道北口进入横沙通道, 形成弯道水流。入口处中上层水流顶冲横沙通道北口东岸堤岸, 由于受到岸滩及护岸建筑的阻挡, 形成下降流, 引起床面冲刷。底层水流趋向西岸, 将冲刷的泥沙携带至西侧河床。表层水流趋向东岸, 底层水流趋向西岸, 在横沙通道北口处形成横向环流, 冲刷坑正位于顶冲点附近。在冲刷坑内部, 由三维流场图 (图 7a) 中近底层与底层水动力特征可见部分水流流速较大、流向摇摆不定, 并向上弹射, 在坑内形成小尺度环流, 环流的存在会造成冲刷坑不断淘蚀加深。所以横沙通道北口的弯道横向环流以及冲刷坑内部小尺度环流相互作用, 使得冲刷坑得以形成与扩大 (图 7b)。此外, 洪枯季径流量的差异造成顶冲点所处位置的改变, 径流量大, 顶冲点偏向下游, 冲刷中心随之南移。

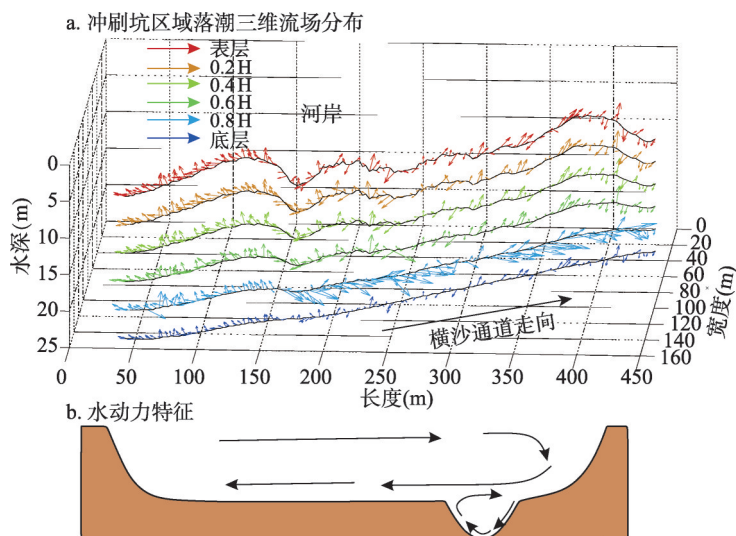


图7 横沙通道北口冲刷坑区域落潮三维流场分布与水动力特征

Fig. 7 Three-dimensional flow structure observed within the study area (a); Corresponding hydrodynamic characteristics (b)

冲刷中心的来回摆动使得冲刷坑在平面上呈椭圆形。另外洪季径流量大,落潮流的顶冲作用较枯季更强,因此冲刷坑南端冲刷深度明显大于北端(图2),这一现象也验证了冲刷坑的形成与弯道横向环流有关。

长兴北沿促淤圈围工程束窄横沙通道北口,北港入横沙通道的弯道曲率半径减小,依据河流动力学理论^[21]:弯道曲率半径越小,冲刷水深越深,可知该工程使得2005年后冲刷坑突然加剧冲刷。其次,落潮流流量的大小也直接控制冲刷坑的发展进程,青草沙水库的修建使得北港深泓大幅度偏向横沙通道北口,横沙通道北口水动力条件增强,环流的冲刷作用加剧。长兴北沿促淤圈围工程与青草沙水库的建设,直接导致横沙通道北口局部水动力条件的改变,从而使得近期北口近岸河床发生剧烈冲刷,造成冲刷坑快速冲深与扩张,因此是冲刷坑近期形成与演变的主要原因。

4.2 其他河口工程的影响

近期横沙通道附近的涉水工程的不断建设,整个河段的河槽边界条件发生了相应的改变^[12, 22-23]。特别是横沙通道两侧圈围工程和港口码头的建设,影响到该区域的河床演变。根据2001-2017年岸线变化图(图8)所示,横沙通道两侧岸线明显向河槽中心靠拢。对比0 m等深线变化,发现变化幅度不大,两侧稍向中心前进。通过数值高程模型计算得到2001年、2009年、2017年河道两侧0 m以上滩地面积分别为1130万 m^2 、516万 m^2 、408万 m^2 。2017年相较于2001年,下降了约63.9%。由此可以看出近期两岸圈围工程和码头港口建设使得整个横沙通道束窄,两侧0 m等深线以上滩地面积锐减。这样的改变减少横沙通道高滩过水断面,正是由于整个横沙通道的高滩过水断面的减少,促使该河段主流归槽,河道水动力增强。

长江口北槽深水航道治理工程与横沙东滩促淤圈围工程的建设对横沙通道的水动力条件的改变产生一定的影响。在地转偏向力的作用下,北港下段落潮流偏向北槽,而北槽涨潮流偏向北港,北港与北槽涨落潮不断进行水量交换。原先北港与北槽之间的水量交换除了通过横沙通道以外,有很大一部分是由北港下段通过横沙东滩上的甬沟进行的。在两大工程实施以来,导堤与围垦工程封堵了这一区域的甬沟,横沙东滩淤积成陆(图8c)。这样北港与北槽之间涨落潮的水量交换受到抑制,从而一部分水量交换增加到横沙通道中去,一定程度上加大了横沙通道的涨落潮量^[23]。相关数值模拟也显示,横沙东滩围垦以后,横沙通道涨落潮量出现明显增加^[23],横沙通道的水动力条件也相应增强。

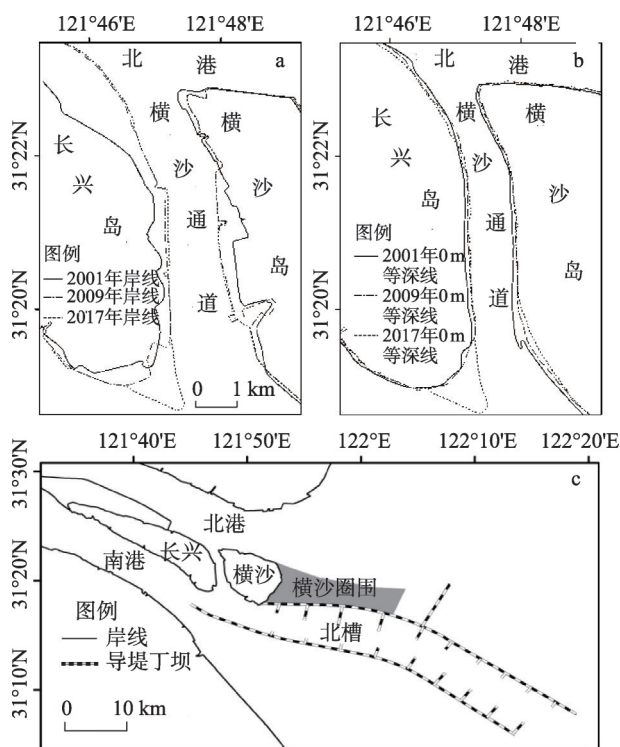


图8 横沙通道岸线变化图(a)、0 m等深线变化图(b)与横沙东滩圈围工程与深水航道工程(c)

Fig. 8 Diagram of shoreline changes in the Hengsha passage (a); 0 m contour line variation diagram (b); Hengsha Dongtan reclamation project and deep-water channel projects (c)

横沙通道两侧围垦工程与码头的建设、长江口北槽深水航道治理工程与横沙东滩促淤圈围工程造成横沙通道水动力增强, 是引起横沙通道整个河槽近期冲刷的原因之一, 使得横沙通道北口处冲刷坑冲刷趋势加剧, 是加速冲刷坑发展的重要因素。

4.3 冲刷地貌演变趋势与风险分析

近岸冲刷坑中心区域南北长约432 m, 东西向宽约150 m, 外围-20 m等深线长宽分别约为1400 m与230 m。根据近期演变过程与其面积、体积、最大冲刷深度变化可以判断, 冲刷坑尚未达到冲刷稳定状态, 实测三维流场数据也显示(图7a)该处落潮流顶冲的存在。因此冲刷坑将继续冲刷和向南延伸, 有由冲刷坑形态向冲刷深槽演变的趋势。冲刷坑位于横沙通道北口, 这里不仅是重要的码头与港口聚集地, 也是横沙岛堤防重点区域。目前已经严重威胁到横沙岛西北角堤防安全以及港口码头生产作业安全, 若进一步冲深与南延, 很有可能造成岸堤崩塌, 同时也将会是整个横沙通道东侧岸线的潜在风险。

另一方面, 由冲刷坑发展趋势, 可以推测长江口最大冲刷深度不小于横沙通道近岸最大深度的38 m(以周围河床平均高程起算)。随着长江口大型水利工程的持续建设、流域来水来沙量与局部水流结构的改变, 会继续对河口各河段动力沉积地貌过程产生影响。与横沙通道相似的近岸剧烈冲刷现象可能在长江口其他河段发生, 需引起重视。

5 结论

本文通过对横沙通道北口高分辨率水下地貌的测量, 结合 ADCP 流速流向数据及历史海图资料, 分析了横沙通道北口近岸冲刷地貌形成与演变机制。主要获得以下认识:

(1) 近期横沙通道北口东侧近岸河床出现持续剧烈冲刷, 最大冲刷深度达到38 m, 形成冲刷深坑, 该冲刷深坑向南快速扩张, 且不断淘深, 存在向冲刷槽演变的趋势。

(2) 长兴北沿促淤圈围工程与青草沙水库, 使得横沙通道北口落潮流水动力发生改变, 落潮流产生的横向环流是横沙通道东岸冲刷坑发育的主要原因。横沙通道两侧岸滩的开发利用以及深水航道建设、横沙东滩的围垦一定程度上加剧了横沙通道河床的整体冲刷, 从而加速冲刷坑的发育。此外, 横沙通道近岸冲刷坑尚未达到冲刷稳定状态, 未来将继续被冲深。长江口最大冲刷深度将不小于目前的38 m(以周围河床平均高程起算)。

致谢: 感谢颜阁博士、张家豪硕士、陈钢硕士在论文写作过程中给予的指导与帮助, 感谢徐韦博士、王淑平硕士、滕立志硕士、袁小婷硕士在野外工作中的帮助。

参考文献(References)

- [1] Meade R H, Moody J A. Causes for the decline of suspended-sediment discharge in the Mississippi River system, 1940-2007. *Hydrological Processes*, 2010, 24(1): 35-49.
- [2] Monge Ganuzas M, Cearreta A, Evans G. Morphodynamic consequences of dredging and dumping activities along the lower Oka estuary (Urdaibai Biosphere Reserve, southeastern Bay of Biscay, Spain). *Ocean & Coastal Management*, 2013, 77(4): 40-49.
- [3] Huo Miao, Fan Daidu, Lu Qi, et al. Decadal variations in the erosion/deposition pattern of Nanhui muddy bank and their mechanism in the Changjiang Delta. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(5): 41-51. [火苗, 范代读, 陆琦, 等. 长江口南汇边滩冲淤变化规律与机制. *海洋学报*, 2010, 32(5): 41-51.]
- [4] 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.]
- [5] Li Bing, Yan Xuexin, He Zhongfa, et al. Impacts of the Three Gorges Dam on the bathymetric evolution of the Yangtze River Estuary. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(18): 1735-1744. [黎兵, 严学新, 何中发, 等. 长江口水下地形演变对

- 三峡水库蓄水的响应. 科学通报, 2015, 60(18): 1735-1744.]
- [6] Lu Xuejun, Cheng Heqin, Zhou Quanping, et al. Features and mechanism of asymmetric double-kidneys scoured geomorphology of pier in tidal estuary. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 38(9): 118-125. [陆雪骏, 程和琴, 周权平, 等. 强潮流作用下桥墩不对称“双肾型”冲刷地貌特征与机理. 海洋学报, 2016, 38(9): 118-125.]
- [7] Gao Shu. Changjiang Delta sedimentation in response to catchment discharge changes: Progress and problem. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(3): 233-241. [高抒. 长江三角洲对流域输沙变化的响应: 进展与问题. 地球科学进展, 2010, 25(3): 233-241.]
- [8] Sumer B M. Mathematical modeling of scour: A review. *Journal of Hydraulic Research*, 2007, 45(6): 723-735.
- [9] Zheng Shuwei, Cheng Heqin, Shi Shengyu, et al. Impact of anthropogenic drivers on subaqueous topographical change in the Datong to Xuliujing reach of the Yangtze River. *Science China Earth Sciences*, 2018, 48(5): 628-638. [郑树伟, 程和琴, 石盛玉, 等. 长江大通至徐六泾水下地形演变的人为驱动效应. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(5): 628-638.]
- [10] Zhang Xiaohe, Li Jiufa, Zhu Wenwu, et al. Study on recent bed changes of erosion and siltation in Yangtze River Estuary. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 37(3): 134-143. [张晓鹤, 李九发, 朱文武, 等. 近期长江河口冲淤演变过程研究. 海洋学报, 2015, 37(3): 134-143.]
- [11] Jiang C, Li J, Swart H E D. Effects of navigational works on morphological changes in the bar area of the Yangtze Estuary. *Geomorphology*, 2012, 139/140(2): 205-219.
- [12] Ji Lan, Gong Hongfeng, Lou Fei. Preliminary study on navigation function orientation of Hengsha Passage at Yangtze Estuary. *Port and Waterway Engineering*, 2010(12): 104-108. [季岚, 龚鸿锋, 楼飞. 长江口横沙通道通航功能定位的初步研究. 水运工程, 2010(12): 104-108.]
- [13] Guo Xingjie, Cheng Heqin, Ji Na, et al. Study on the influences of fluvial processes of Hengsha watercourse to deep water channel. *Journal of Sediment Research*, 2015(3): 21-26. [郭兴杰, 程和琴, 计娜, 等. 长江口横沙通道演变对北槽深水航道上段回淤的影响. 泥沙研究, 2015(3): 21-26.]
- [14] Chen Wei, Gu Jie, Qin Xin, et al. Numerical analysis of the sediment deposition in the upper reach of the deepwater navigation channel in the Changjiang River Estuary. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2012, 27(2): 199-207. [陈维, 顾杰, 秦欣, 等. 数值分析长江口深水航道上段淤积的原因. 水动力学研究与进展, 2012, 27(2): 199-207.]
- [15] Wu Shuaihu, Cheng Heqin, Xu Yijun, et al. Observation and analysis of bedform morphology of the Yangtze River estuary. *The Ocean Engineering*, 2016, 34(6): 65-73. [吴帅虎, 程和琴, 胥毅军, 等. 长江河口主槽地貌形态观测与分析. 海洋工程, 2016, 34(6): 65-73.]
- [16] Liu Gaowei. The variations in hydrodynamic, depositional and geomorphology in the Yangtze Estuary for the recent years [D]. Shanghai: East China Normal University, 2015. [刘高伟. 近期长江河口典型河槽动力沉积地貌过程[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.]
- [17] Zheng Shuwei, Cheng Heqin, Wu Shuaihu, et al. Discovery and implications of the catenary-bead subaqueous dunes. *Science China Earth Sciences*, 2016, 46(1): 18-26. [郑树伟, 程和琴, 吴帅虎, 等. 链珠状沙波的发现及意义. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(1): 18-26.]
- [18] Cheng Heqin, Li Maotian, Zhou Tianyu, et al. High-resolution micro-topography movement in the Changjiang Estuary. *The Ocean Engineering*, 2002, 20(2): 91-95. [程和琴, 李茂田, 周天瑜, 等. 长江口水下高分辨率微地貌及运动特征. 海洋工程, 2002, 20(2): 91-95.]
- [19] Mao Zhichang, Wu Xiaoyong, Zhao Changqing, et al. Evolution of the upper reach of mouth bars in the North Channel of the Changjiang Estuary. *Journal of Sediment Research*, 2008(2): 41-46. [茅志昌, 武小勇, 赵常青, 等. 长江口北港拦门沙河段上段演变分析. 泥沙研究, 2008(2): 41-46.]
- [20] Zhu Jianrong, Bao Daoyang. The effects of river regime changes in the Changjiang Estuary on hydrodynamics and salinity intrusion in the past 60 years: I. River regime changes. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 38(12): 11-22. [朱建荣, 鲍道阳. 近60年来长江河口河势变化及其对水动力和盐水入侵的影响: I. 河势变化. 海洋学报, 2016, 38(12): 11-22.]
- [21] Zhang Ruijing, Xie Jianheng, Chen Wenbiao. *River Dynamics*. Wuhan: Wuhan University Press, 2007: 163-164. [张瑞瑾, 谢鉴衡, 陈文彪. 河流动力学. 武汉: 武汉大学出版社, 2007: 163-164.]
- [22] Xie Huijiao, Shen Wei. Analysis of reclamation of Changxing island in Hengsha passageway//Anthology of the Twelfth National Conference on Hydrodynamics, 2013: 1013-1018. [谢慧姣, 沈薇. 长江口长兴岛东岸圈围对横沙通道影响分析//全国水动力学学术会议, 2013: 1013-1018.]
- [23] Cheng Haifeng, Liu Jie, Zhao Dezha. Analysis of river bed evolution and prediction of its trend for Hengsha Passage. *Journal of Waterway and Harbor*, 2010, 31(5): 365-369. [程海峰, 刘杰, 赵德招. 横沙通道近期河床演变及趋势分析. 水道港口, 2010, 31(5): 365-369.]

Formation mechanism of near-shore erosional topography in the Hengsha passage of the Yangtze Estuary

HUA Kai¹, CHENG Heqin^{1,2}, ZHENG Shuwei^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Institute of Eco-Chongming, Shanghai 202150, China; 3. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China)

Abstract: The intense erosion of a near-shore riverbed is one of the main factors for the slope failure of a bank. During a detailed investigation carried out in August 2017 and May 2018 of underwater topography of the Yangtze Estuary, a large scour pit was recognized near the shore of the Hengsha passage. The morphological and geometrical parameters of the scour pit were measured using the SeaBat7125 multi-beam system. Dual-frequency ADCP was used to collect hydrodynamic data near the scour pit. Further, a historic nautical chart was digitalized to analyze the evolution and formation mechanism of the scour pit. The results indicated that the scour pit is in the shape of an oval, with a length and width of around 430 m and 150 m, respectively; the deepest point is approximately 38 m below the surrounding riverbed. Since the formation of the -20 m isobaths line in 1992, the scour pit area has been expanding continuously, and the average depth has been increasing yearly; in particular, after 2005, the depth increased sharply. From 1984 to 2017, the riverbed around the scour pit underwent the process of erosion-silting-erosion. In the 33 years, the scouring amount is $3.45 \times 10^7 \text{ m}^3$, and the average scouring depth is 4.68 m. The ebb tide from the North Channel flows into the Hengsha passage, forming a circulation flow, thereby eroding the channel near the west bank of the Hengsha island and forming a scour pit. After 2005, the scour pit grew rapidly and expanded southward. This is mainly because the reclamation engineering performed in North Changxing reduced the curvature radius of the bend that resulted in intensified erosion. The reservoir construction engineering performed in Qingcaosha moved the thalweg in the upper and middle sections of the North Channel, and the northward entrance of the Hengsha passage expanded owing to the ebb current, which is also one of the main reasons for rapid erosion. In addition, the construction of reclamation and deep-water channel projects in the vicinity has contributed to the erosion of the channel bed, thereby accelerating the expansion of the scour pit. It can be seen that human engineering activities are the main driving factors for the rapid development of large scour pits in the Changjiang Estuary.

Keywords: the Yangtze Estuary; Hengsha passage; erosional topography; human activity; multi-beam sounding system