

徐韦,程和琴,郑树伟,等.长江南京段近20年来河槽演变及其对人类活动的响应[J].地理科学,2019,39(4):663-670.[Xu Wei, Cheng Heqin, Zheng Shuwei et al. Evolution of Nanjing Channel in the Yangtze River and Its Response to Human Activities During the Last 20 Years. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(4): 663-670.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2019.04.016

长江南京段近20年来河槽演变及其对人类活动的响应

徐韦¹,程和琴¹,郑树伟²,王淑平¹,陈钢¹,袁小婷¹

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

摘要:利用1998年和2013年历史水下地形数据,结合2015年和2016年多波束测深、流速与河床沉积物数据,探讨了南京段河槽演变对人类活动的响应规律。结果表明:① 1998~2013年南京河段整体呈现冲刷状态,净冲刷量为0.56亿 m³。② 南京段主河槽发育有平床和沙波等微地貌,两侧发育有水下陡坡。其中,平床和小尺度沙波区域平均流速为0.79 m/s,而巨型沙波区域平均流速为1.41 m/s。③ 人类活动对该河段的水下微地貌演变与河势演变起到至关重要的作用。由于三峡大坝等人类活动的影响,上游来沙量仍将持续低于多年平均值,南京段河槽会进一步冲刷并极可能给涉水工程安全带来威胁。

关键词:水下地形;人类活动;多波束测深;长江下游

中图分类号:TV148+3

文献标识码:A

文章编号:1000-0690(2019)04-0663-08

由于人类活动的强干扰,长江中下游干流来沙量显著减少,这将导致该河段河槽演变长期处于适应性调整过程中^[1-4]。因此,对于长江中下游水文泥沙与河势演变研究一直受到高度关注^[5-7],如研究表明三峡工程运行之后,长江中下游原有的河势演变规律被打破,全程冲刷已经发展至大通河段^[2];部分河段深泓摆动频繁,河势演变更趋复杂^[8]。

长江南京河段位于长江下游,1985年左右由淤积转变为冲刷状态,之后由于河道整治与护岸工程的实施,大部分河段的岸线崩退、深泓频繁摆动基本被控制^[9-12]。然而,因强烈的人类干扰,长江南京河段的来沙量、河道冲淤、岸线变化、水位和防洪形势均发生了变化^[13,14],亟待重新评估该河段近期的河势演变规律。因此,本文利用历史水下地形和高分辨率多波束测深等数据,对该地区长江南京河段河槽冲淤变化和演变趋势展开研究,以期对航道整治工程建设和维护提供科学依据。

1 研究区概况和方法

1.1 研究区域概况

研究区位于长江南京河段,上起草鞋峡捷水

道,下至龙潭水道,全长约45 km,由于八卦洲的发育,其平面形态整体呈典型的鹅头型分汊河道,下游段的龙潭水道呈现反“S”型^[12,15]。其中八卦洲河段在1984年修建洲头鱼咀工程和左右缘护岸工程之后,河势的频繁演变得到了一定抑制^[12]。龙潭水道形成与水流切割边滩有关,是由典型弯曲型河道发展而成,1984年开始实施的堵汊工程建成之后,使其成为单一的河槽^[15]。于2015年8月和2016年9月利用多波束测深系统对南京河段主航道进行走航测量,测线全程长约100 km(图1)。

1.2 研究方法与数据采集

收集了由长江航道局编制的1998年和2013年南京河段的1:40 000水下地形资料(航行基准面),利用ArcGIS 10.2对其进行数字化处理,通过克里金法构建数字高程模型,进行冲淤演变分析。

利用高分辨率多波束测深系统(丹麦REASON, Seabat 7125型)对长江南京河段水下地貌进行了调查。该系统在400 kHz的作业频率下(200 kHz/400 kHz),最大频率为50 Hz(±1 Hz),测深分辨率可达6 mm,单次扫描床面宽度约为水深的5~6倍。野外工作时,换能器利用定制钢架加缆绳兜

收稿日期:2018-01-09;修订日期:2018-04-12

基金项目:国家自然科学基金项目(41476075)、长三角环境地质调查项目(DD20160246)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (41476075), Environment Geology Investigation Project in the Yangtze River Delta (DD20160246).]

作者简介:徐韦(1993-),男,安徽马鞍山人,博士研究生,主要从事河口海岸沉积动力地貌研究。E-mail: xuwei930608@163.com

通讯作者:程和琴,教授。E-mail: hqch@sklec.ecnu.edu.cn

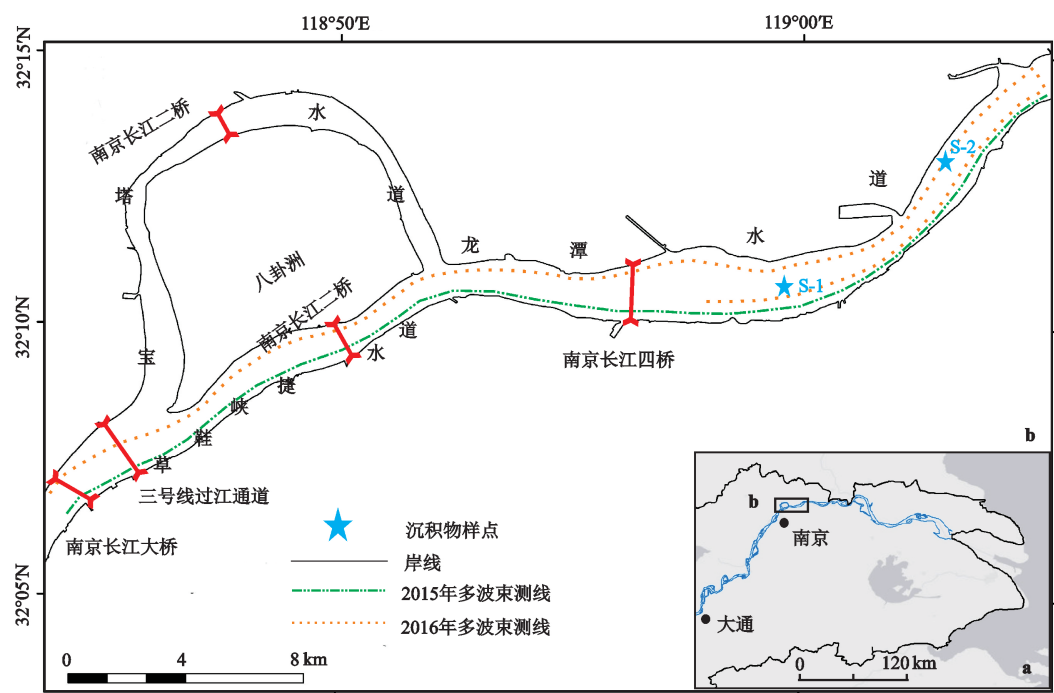


图1 南京河段区域
Fig.1 Location of the Nanjing Reach of the Yangtze River

底固定安装在船体前侧,采集模式选择等距模式,开角 140°,船速控制在 2.5 m/s 以内,以保证网格的水平分辨率能够达到 1 m。调查期间,天气状况良好,定位系统采用 Trimble 差分系统,其定位精度达到分米级。多波束数据在测量时进行了吃水改正和声速改正,在后处理过程中,利用 PDS 2000 软件,对其进行姿态校正和异常波束剔除,其中姿态校正包括:横摇,纵摇以及艏摇校正。

流速数据利用双频声学多普勒流速剖面仪 (Acoustic Doppler Current Profilers, ADCP) 测量获取,工作频率为 300 kHz/600 kHz,理论流速量程 ± 5 m/s。野外测量时,该仪器利用配套钢架固定于船体左侧并用缆绳兜底加固,探头入水深度为 0.8 m,设置船速参考为 GPS, GPS 连接 ADCP 的波特率为 9 600,磁偏角设置根据测区位置而定,南京设置为 4°,环境水温为 15℃,盐度 35 g/L,声速 1 500 m/s,采样时间间隔为 1 s。

随船利用帽式抓斗同步采集河床表层沉积物样品,采集的河槽沉积物厚度约在 3~10 cm。采样后,利用密封袋保存,然后在室内利用 BECKMAN 公司生产的 LS13320 激光粒度仪测定分析。

2 结果

2.1 底质类型

共采集了两个河床表层样品(图 1),结果显示,研究区域内河床表层沉积物粒径较粗,中值粒径分别为 159.8 和 252.9 μm,属于细砂-中砂质地(表 1)。其中,粘土含量为 2.1%和 4.2%,粉砂(2~63 μm)含量为 8.6%和 14.7%,极细砂(63~125 μm)含量为 2.7%和 12.3%,细砂(125~250 μm)含量为 35.3%和 58.9%,中砂及粗砂(>250 μm)含量为 51.3%和 9.9%(表 1)。

表1 南京河段河床表层沉积物粒度参数

Table 1 Grain size parameters of surficial sediment samples in the Nanjing Reach of the Yangtze River

样品 编号	中值粒 径 (μm)	沉积物粒度(μm)						水深 (m)
		<2	2~16	16~63	63~125	125~250	>250	
		沉积物体积分数(%)						
S-1	252.9	2.1	6.2	2.4	2.7	35.3	51.3	14.4
S-2	159.8	4.2	10.5	4.2	12.3	58.9	9.9	30.3

2.2 河槽冲淤变化特征

1998~2013年南京河段河槽冲刷与淤积情况复杂,其中草鞋峡捷水道上游和龙潭水稻中部地区冲刷最为明显,冲刷深度分别为16和8 m,冲刷速率约为1.07和0.53 m/a;淤积最严重区域位于八卦洲南水道右岸,最大淤积厚度约为20 m,淤积速率约为1.33 m/s(图2)。

对整个河槽进行冲淤量统计,发现其整体呈冲刷趋势,净冲刷量达0.56亿 m^3 ,年均冲刷量约0.04亿 m^3 (表2)。

0 m等深线包络面积呈减少趋势,而-2、-5及-10 m等深线包络面积呈增加趋势。其中0 m等深线包络面积减少了0.05亿 m^2 , -2、-5及-10 m等深线包络面积分别增加了0.03、0.01和0.09亿 m^2 (表3)。

2.3 河槽微地貌类型及分布特征

多波束数据显示研究区河槽河床微地貌类型和其几何特征如下:

1) 平床:研究河段右岸主要在龙潭水道中段发育有平床地形,约占2.91%;左岸主要分布在长江四桥下游和龙潭水道下段,约占16.93%。

2) 深槽:统计龙潭水道和八卦洲南水道深槽几何参数,发现龙潭水道深槽最大冲深约45 m(图3a);而八卦洲南水道的深槽最大冲深仅22 m(图3b)。

3) 水下陡坡:统计八卦洲南水道、龙潭水道发育的水下陡坡,发现八卦洲洲尾汇流段右岸冲刷区发育有狭长的冲沟、侵蚀岸坡和沙波微地貌。2015年,该河段水下岸坡最大坡度约为0.33,最大冲深约18 m(图3c);2016年该河段水下陡坡最大坡度约0.34,最大冲深约30 m(图3f)。

4) 沙波:研究河段右岸以中、小型弯曲状沙波为主,约占统计河段97.09%。巨型沙波主要分布在龙潭水道右岸,位于水下陡坡坡脚处,水深在40~45 m之间,波长约210 m,波高约7 m,并且在巨型沙波上发育次级沙波,次级沙波波长约8 m,波高约0.5 m(图3c)。而左岸虽然同样以中、大型弯曲状为主,但其仅占统计河段的52.09%。其中,八卦洲南水道主要为中型沙波,而龙潭水道近岸处主要为大型沙波,沙波波长约40 m,波高约3 m(图3d)。巨型沙波主要位于龙潭水道深槽,呈现舌状,波长约332 m,波高约10 m;同样巨型沙波上观测到次级

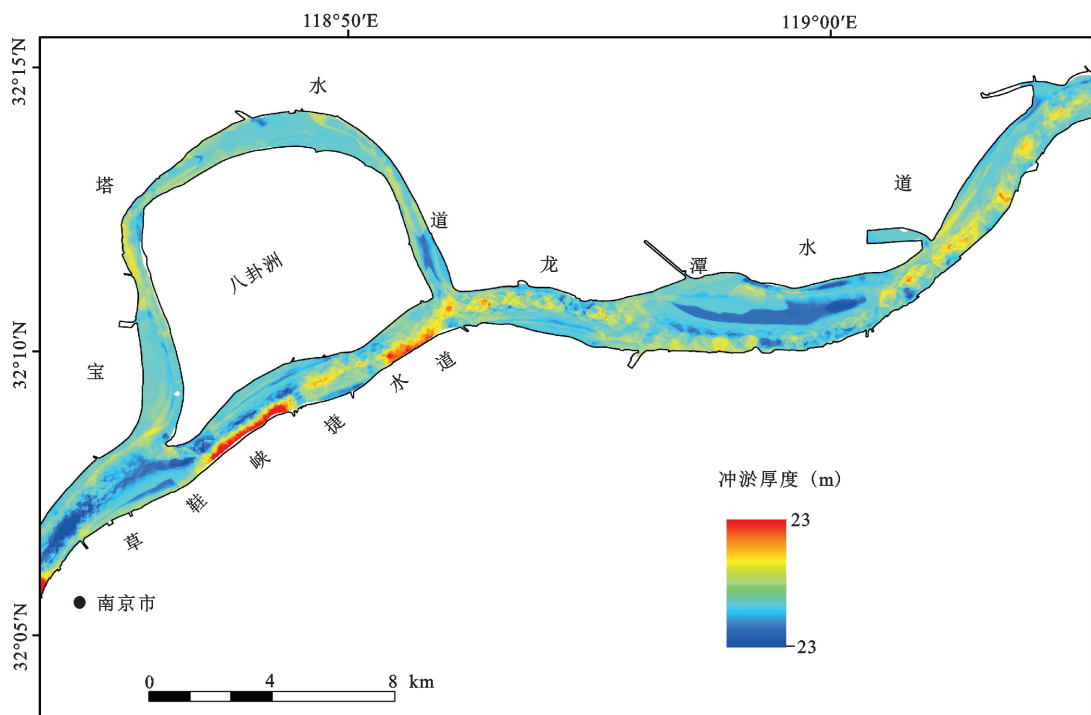


图2 1998~2013年南京河段河槽冲淤变化

Fig.2 The erosion/siltation change in the Nanjing Reach of the Yangtze River in 1998-2013

表2 1998~2013年南京河段冲淤量计算统计(亿m³)
Table 2 Statistics of channel erosion and deposition in Nanjing Reach of the Yangtze River in 1998-2013 (10⁸m³)

区域	时段	冲刷量	淤积量	净冲淤量	年均冲淤量
南京河段	1998~2013	1.25	0.69	-0.56	-0.04

注:冲淤变化量负值表示冲刷。

表3 1998~2013年南京河段等深线包络面积变化
Table 3 Change of the isobaths envelope area in Nanjing Reach of the Yangtze River during 1998-2013

	1998年 (亿 m²)	2013年 (亿 m²)	变化量 (亿 m²)	增幅 (%)
0 m 等深线	1.91	1.86	-0.05	-2.62
-2 m 等深线	1.62	1.65	0.03	1.82
-5 m 等深线	1.35	1.36	0.01	0.74
-10 m 等深线	0.67	0.76	0.09	11.84

沙波发育,其波长约23 m,波高约2 m(图3e)。

3 讨论

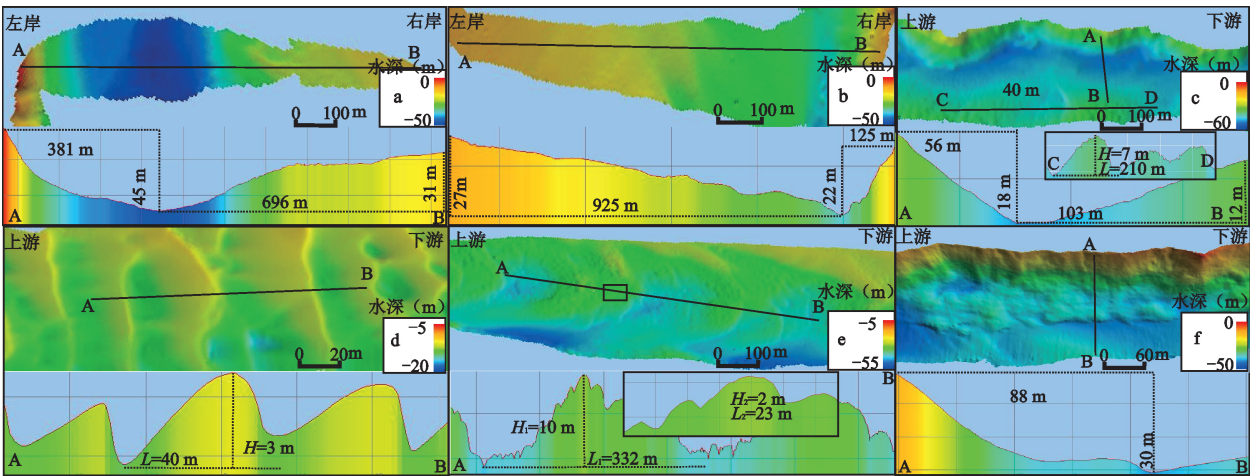
3.1 河槽冲淤变化的影响因素

1) 流域来水来沙的变化对河槽冲淤变化的影响。在长江年均径流量无明显变化,而来沙量持续减少的情况下,整个长江中下游的河槽及长江河口三角洲的冲淤规律和河流地貌过程已发生明显变化^[16,17]。本文利用大通站实测资料代表研究

区域水文与泥沙情况^[15]。三峡工程蓄水之后大通站径流量(2001~2016年)在多年平均值上下波动(图4),因此,三峡工程并未对该河段的径流量产生较大影响。但输沙量呈持续减少趋势,主要表现为1954~2002年多年平均输沙量为4.19亿t,而2003~2016年平均输沙量为1.40亿t,下降约66.59%(图4)。历史水下地形数据结果显示,该河段近15 a来整体处于冲刷状态,年均冲刷速率为0.037亿 m³,因此,来沙量锐减是造成研究河段河槽冲刷的重要因素之一。

2) 航道整治工程建设对河槽冲淤变化的影响。1985年之前,八卦洲洲头由于水流顶冲,左汉萎缩速率较快;而龙潭水道中发育有兴隆洲,严重影响航道安全和河势稳定^[11,12]。但1985年该河段实施了河道整治工程以及对岸线的合理开发利用,河势频繁演变的趋势得到了控制^[12,15]。而在1998~2013年间,该河段0 m等深线包络面积有所减少,说明该河段河道有所束窄;而-2、-5和-10 m等深线包络面积呈现增加的趋势(表3),说明-2 m水深以下区域明显发生冲刷,航道条件有所改善。因此,航道整治工程有效的稳定了长江南京河段的河势演变。

3) 长江南京段河槽冲刷趋势分析。床面剪应力与理论临界河床剪应力可以指示河槽冲刷趋势^[18]。通过床面剪应力和理论临界河槽剪应力计算公式^[19]可得,龙潭水道中游(S-1)和下游



A、C为断面起点; B、D为断面终点; H为沙波波高; H₁为巨型沙波波高; H₂为次级沙波波高; L为沙波波长; L₁为巨型沙波长; L₂为次级沙波波长

a. 龙潭水道下游冲刷深槽; b. 八卦洲南水道冲刷深槽; c. 右岸复合型水下岸坡; d. 复合型沙波; e. 左岸水下岸坡; f. 弯曲状沙波

图3 南京河段水下微地貌几何特征

Fig.3 The geometric characteristics of dunes in the Nanjing Reach of the Yangtze River

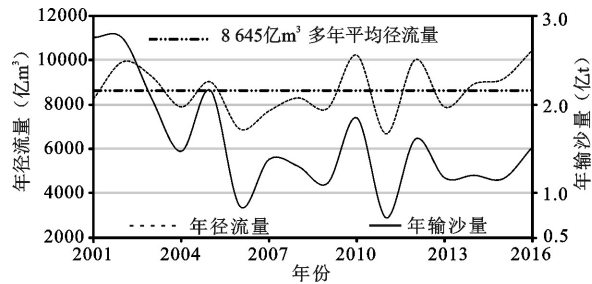


图4 2001~2016年大通站年均径流量和输沙量变化

Fig.4 Runoff and sediment discharge at Datong Station during 2001-2016

(S-2)处床面床面剪切力分别为0.42、0.38 N/m²,明显大于理论临界河槽剪切力(0.09、0.05 N/m²)。这表明床面泥沙处于频繁运输状态,河槽整体处于冲刷环境。

3.2 河槽微地貌发育的影响因素

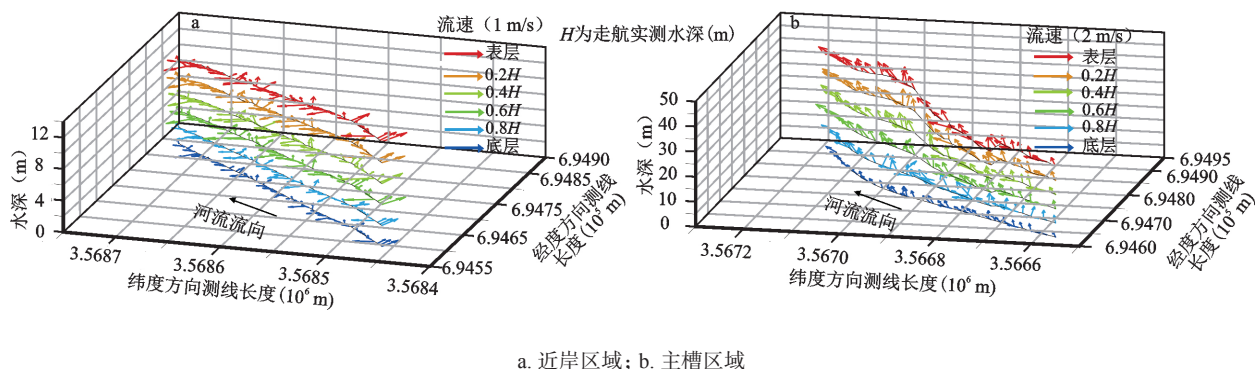
1) 水沙环境对河槽微地貌发育的影响。河床微地貌的发育演变与底质类型息息相关,沙波一般发育在粗颗粒沉积区^[20-22]。2015年南京河段实测河床沉积物的均值粒径分别为152.8和246.4 μm(表1),满足沙波发育的底质要求^[23]。对比徐晓君等^[1]2008年在南京河段河床沉积物(均值粒径为145 μm)的研究发现,2008年以来,南京河段河床沉积物均值粒径有粗化的趋势。

前人研究发现,沙波的形成、运动和消失与流速存在密切联系^[23-25]。2016年龙潭水道近岸段大、中沙波和平床区域,平均流速为0.79 m/s,底平均流速约0.57 m/s(图5a);河道深槽巨型复合沙波区域,平均流速为1.41 m/s,底平均流速约0.95 m/s(图5b),由于ADCP存在测量盲区,近底层流速使用距离河床表面约1.0 m处流速数据^[21]。大尺度沙

波发育区域的水动力明显大于中、小尺度沙波和平床地区的水动力,这表明水动力强弱是研究河段沙波发育的关键因素之一,这也与前人的研究相符^[25]。而该区域位于潮区界,以径流作用为主,所以在丰水年份,该区域水动力较强,将会促进巨型沙波底形进一步发展,而在枯水年份,巨型沙波将会有所消退。总体上,该区域动力沉积环境有利于沙波地形的进一步发育^[26, 27]。

2) 桥墩对河槽微地貌发育的影响。涉水桥墩会改变周围水流结构,并引起桥墩周围泥沙输移,进而导致床面发生局部冲刷^[28-30]。如研究表明南京长江二桥北桥墩,局部冲刷主要发生在桥墩周围,整体形态呈现“C”形,最大冲深达到18.82 m,而桥墩上游为平床,其周围和下游发育有波长在97.3~101.2 m,波高在2.45~4.21 m的巨型沙波(图6)。由于来沙量的锐减,研究河段的大桥桥墩将会面临更加严重的冲刷,从而给桥梁安全带来严重威胁。

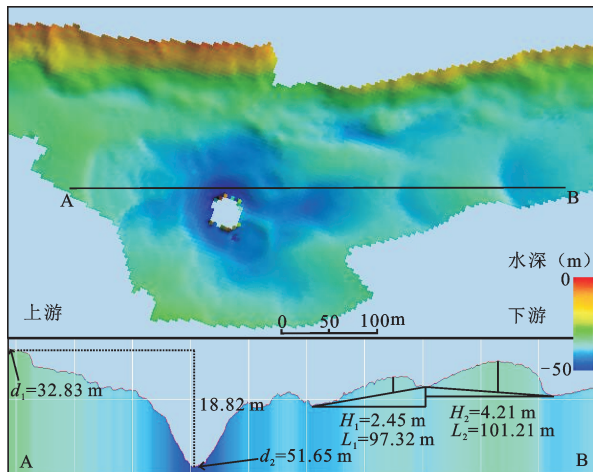
3) 护岸工程对河槽微地貌发育的影响。1985年以来,南京河段河道整治工程不断的建成与完善,其河道河势趋于稳定,通航条件得到明显改善^[9,12,15]。然而工程实施之后,对于护岸工程而言,随着沿岸水流不断的侵蚀冲深,其所带来的问题亦日趋严重,如护岸坡脚侵蚀而形成冲刷沟,其对工程本身带来的安全威胁不可忽视^[31]。2015年利用多波束测深系统在龙潭水道下游段的坡脚发现了冲刷沟地貌(图3c),近岸坡脚最大水深达到18 m,而坡脚离岸区域水深大约在12 m,形成了冲刷深度约6 m冲刷沟,这表明在护岸坡脚处发生明显不同程度的冲刷,而在该河段整体冲刷环境下,在将来极易造成护岸失稳,影响其安全。



a. 近岸区域; b. 主槽区域

图5 龙潭水道三维流场分布

Fig.5 The 3-D flow structure observed at Longtan waterway of the Yangtze River



A. 断面起点; B. 断面下游; H_1 为巨型沙波波高; H_2 为次级沙波波高; L_1 为巨型沙波长; L_2 为次级沙波长;
 d_1 为桥墩上游水深; d_2 为桥墩冲刷最深处水深

图6 2016年长江二桥北桥墩局部冲刷形态

Fig. 6 The characteristics of micro-geomorphology around the north pier of Second Changjiang River Bridge in 2016

4 结论

利用多波束测深系统、多普勒声速剖面仪等先进的野外测量仪器,结合历史水下水地形数据对长江南京段河槽的演变规律进行了深入调查,主要得到以下几点认识:

1) 1998~2013 年之间,长江南京河段河槽净冲刷量达 0.56 亿 m^3 ,年均冲刷速率为 0.037 亿 m^3 。相较于 1998 年而言,0 m 水深以下的水域面积减少了 0.05 亿 m^2 ,而 -10 m 水深以下的水域面积增加 0.09 亿 m^2 ,增幅达到 11.84%。

2) 长江南京段河槽发育有沙波、平床、水下岸坡等微地貌。由于河流主流贴岸冲刷,水下陡坡最大坡度达到 0.34。在河床表层沉积物较粗的情况下,水动力条件是研究河段水下微地貌发育的关键因素之一。

3) 流域来沙量的减少是长江南京河段河床冲刷的主要原因。随着流域来沙量的持续减少,及其该河段河床剪切力整体比理论河槽剪切力大一个数量级,故河床有可能进一步冲刷。目前,整治工程对该河段河势演变具有控制作用,如南京河段的整治工程稳定了频繁演变的河势并改善了通航条件。

致谢:感谢中国地质调查局南京地质调查中

心的专家对野外工作的支持与帮助。感谢滕立志博士、张家豪硕士、华凯硕士等对数据采集和处理的帮助。

参考文献(References):

- [1] 徐晓君,杨世伦,张珍. 三峡水库蓄水以来长江中下游干流河床沉积物粒度变化的初步研究[J]. 地理科学, 2010, 30(1): 103-107. [Xu Xiaojun, Yang Shilun, Zhang Zhen. Variation in grain size of sediment in middle and lower Changjiang River since impoundment of three gorges reservoir. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(1):103-107.]
- [2] 许全喜. 三峡工程蓄水运用前后长江中下游干流河道冲淤规律研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(2): 146-154. [Xu Quanyi. Study of sediment deposition and erosion patterns in the middle and downstream Changjiang mainstream after impoundment of TGR. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(2): 146-154.]
- [3] 戴仕宝,杨世伦,赵华云,等. 三峡水库蓄水运用初期长江中下游河道冲淤响应[J]. 泥沙研究, 2005(5): 35-39. [Dai Shibao, Yang Shilun, Zhao Huayun et al. Response of middle and lower reaches of Yangtze River to the initial operation stage of the Three Gorges Project. Journal of Sediment Research, 2005 (5):35-39.]
- [4] 王延贵,史红玲,刘茜. 水库拦沙对长江水沙态势变化的影响[J]. 水科学进展, 2014,25(4): 467-476. [Wang Yangui, Shi Hongling, Liu Xi. Influence of sediment trapping in reservoirs on runoff and sediment discharge variations in Yangtze River. Advances in Water Science, 2014, 25(4):467-476.]
- [5] 齐述华,熊梦雅,廖富强,等. 人类活动对鄱阳湖泥沙收支平衡的影响[J]. 地理科学, 2016, 36(6):888-894. [Qi Shuhua, Xiong Mengya, Liao Fuqiang et al. Impacts of human activities on sediments budget in Poyang Lake. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(6):888-894.]
- [6] 施少华,林承坤,杨桂山. 长江中下游河道与岸线演变特点[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(1):69-73. [Shi Shaohua, Lin Chengkun, Yang Guishan. Channel evolution of the middle and lower reaches of the Yangtze River. Resources & Environment in the Yangtze Basin, 2002, 11(1):69-73.]
- [7] 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.
- [8] 胡春宏,方春明. 三峡工程泥沙问题解决途径与运行效果研究[J]. 中国科学:技术科学, 2017(8): 832-844. [Hu Chunhong, Fang Chunming. Research on sediment problem solutions for the Three Gorges Project and its operational effects. Scientia Sinica, 2017(8):832-844.]
- [9] 屈贵贤,王建,高正荣,等. 基于GIS的长江梅子洲头护岸工程对河势演变的影响分析[J]. 长江流域资源与环境, 2008(6): 927-931. [Qu Guixian, Wang Jian, Gao Zhengrong et al. Effect of shoal head revetment on fluvial process of the Meizhou

- reach of the Yangtze River based on GIS. *Resources & Environment in the Yangtze Basin*, 2008(6):927-931.]
- [10] 段学军, 邹辉. 长江岸线的空间功能、开发问题及管理对策[J]. *地理科学*, 2016, 36(12):1822-1833. [Duan Xuejun, Zou Hui. Space functions, development problems and management countermeasures of waterfront resources along the Changjiang River. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(12):1822-1833.]
- [11] 王建, 刘平, 高正荣, 等. 长江干流江苏段44年来河道冲淤变化的时空特征[J]. *地理学报*, 2007, 62(11): 1185-1193. [Wang Jian, Liu Ping, Gao Zhengrong et al. Temporal-spatial variation of the channel in Jiangsu reach of the Yangtze River during the last 44 years. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(11):1185-1193.]
- [12] 侯卫国, 胡春燕, 谢作涛. 长江南京八卦洲河段演变分析及治理对策探讨[J]. *人民长江*, 2011, 42(7): 39-42. [Hou Weiguo, Hu Chunyan, Xie Zuotao. Study on river regime evolution of Baguazhou Reach of Yangtze River and regulation countermeasures in Nanjing City. *Yangtze River*, 2011, 42(7):39-42.]
- [13] 黄家柱. 遥感与地理信息系统技术在长江下游江岸稳定性评价中的应用[J]. *地理科学*, 1999, 19(6): 521-524. [Huang Jia-zhu. The application of remote sensing and GIS to the assessment of bank stability in the lower Yangtze River. *Scientia Geographica Sinica*, 1999, 19(6): 521-524.]
- [14] 石国钰, 许全喜, 陈泽方. 长江中下游河道冲淤与河床自动调整作用分析[J]. *山地学报*, 2002, 20(3): 257-265. [Shi Guoyu, Xu Quanxi, Chen Zefang. Analysis on channel scouring and silting and self-adjusting in midstream and downstream reaches of Changjiang River. *Journal of Mountain Research*, 2002, 20(3):257-265.]
- [15] 李振青, 陈凤玉. 南京栖霞龙潭水道河床演变与开发治理[J]. *人民长江*, 1999, 30(5): 25-27. [Li Zhenqing, Chen Fengyu. Evolution of river bed and harnessing of Nanjing Xixia-Longtan waterway. *Yangtze River*, 1999, 30(5): 25-27]
- [16] 杨云平, 李义天, 樊咏阳. 长江口前缘沙洲演变与流域泥沙要素关系[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(5): 652-658. [Yang Yunping, Li Yitian, Fan Yongyang. Relationship between sediment elements of river basin and front sand islands evolution in Yangtze estuary. *Resources & Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(5): 652-658.]
- [17] 石盛玉, 程和琴, 郑树伟, 等. 三峡截流以来长江洪季潮区界变动河段冲刷地貌[J]. *海洋学报*, 2017, 39(3): 85-95. [Shi Shengyu, Cheng Heqin, Zheng Shuwei et al. Erosional topography of the tidal limit in the Yangtze River in flood seasons after the river closure at Three Gorges. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(3): 85-95.]
- [18] 王张娇. 三峡封坝前长江中下游河床沉积物分布及河床稳定性模拟研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2006. [Wang Zhangjiao. Sediment distribution and before-dam study in Middle and Lower Yangtze River Stability. Shanghai: East China Normal University, 2006.]
- [19] Rijn L C V. Sediment transport, part iii: Bed forms and alluvial roughness[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1984, 110(12): 1733-1754.
- [20] 詹义正, 余明辉, 邓金运, 等. 沙波波高随水流强度变化规律的探讨[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2006, 39(6): 10-13. [Zhan Yinzhen, Yu Minghui, Deng Jinyun et al. Research on variation law of wave height based on current in tension. *Eng. J. Wuhan Univ*, 2006, 39(6): 10-13]
- [21] 郑树伟, 程和琴, 吴帅虎, 等. 链珠状沙波的发现及意义[J]. *中国科学:地球科学*, 2016, 46(1):18-26. [Zheng Shuwei, Cheng Heqin, Wu Shuaihu et al. Discovery and implications of catenary-bead subaqueous dunes. *Sci. China Earth Sci.*, 2016, 46(1): 18-26.]
- [22] Wu J, Wang Y, Cheng H. Bedforms and bed material transport pathways in the Changjiang (Yangtze) Estuary[J]. *Geomorphology*, 2009, 104(3): 175-184.
- [23] 张晓鹤, 李九发, 朱文武, 等. 近期长江河口冲淤演变过程研究[J]. *海洋学报*, 2015, 37(3): 134-143. [Zhang Xiaohu, Li Jiufa, Zhu Wenwu et al. Study on recent bed changes of erosion and siltation in Yangtze River Estuary. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(3): 134-143]
- [24] Zheng Shuwei, Xu Yijun, Cheng Heqin et al. Assessment of bridge scour in the lower, middle, and upper Yangtze River estuary with riverbed sonar profiling techniques[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(1):15-28.
- [25] Zheng Shuwei, Cheng Heqin, Shi Shengyu et al. Morphology and mechanism of the very large dunes in the tidal reach of the Yangtze River, China[J]. *Continental Shelf Research*, 2016, 139: 54-61.
- [26] 程和琴, 宋波, 薛元忠, 等. 长江口粗粉砂和极细砂输移特性研究——幕式再悬浮和底形运动[J]. *泥沙研究*, 2000(1): 20-27. [Cheng Heqin, Song Bo, Xue Yuanzhong et al. Mechanics on transport of coarser silt and very fine sand in the Changjiang Estuary—Episodic re-suspension and large-scale bedform movement. *Journal of Sediment Research*, 2000(1): 20-27]
- [27] 钱宁, 万兆慧. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 145-189. [Qian Ning, Wan Zhaohui. *Mechanics of sediment movement (in Chinese)*. Beijing: Science Press, 2003: 145-189]
- [28] Baker C J. The laminar horseshoe vortex[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1979, 95(2): 347-367.
- [29] Akib S, Jahangirzadeh A, Basser H. Local scour around complex pier groups and combined piles at semi-integral bridge[J]. *Journal of Hydrology & Hydromechanics*, 2014, 62(2):108-116.
- [30] 郭兴杰, 程和琴, 莫若瑜, 等. 长江口沙波统计特征及输移规律[J]. *海洋学报*, 2015, 37(5): 148-158. [Guo Xingjie, Cheng Heqin, Mo Ruoyu et al. Statistical characteristics and transport law of sand waves in the Yangtze Estuary. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(5):148-158]
- [31] 张芳枝, 陈晓平. 河流冲刷作用下堤岸稳定性研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2009, 29(4):84-88. [Zhang Fangzhi, Chen Xiaoping. Research progress on stability analysis of embankment under effects of river scouring. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2009, 29(4):84-88.]

Evolution of Nanjing Channel in the Yangtze River and Its Response to Human Activities During the Last 20 Years

Xu Wei¹, Cheng Heqin¹, Zheng Shuwei², Wang Shuping¹, Chen Gang¹, Yuan Xiaoting¹

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

Abstract: The high-resolution morphological data of riverbed were observed by RESON 7125 multi-beam system during August 2015 and September 2016. Before that, few scholars used high resolution multi-beam data to study the subaqueous topography in Nanjing segment. The data of flow velocity and sediment samples were synchronously collected by an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) and a sediment sampler. Bathymetric data of the Nanjing reach of the Yangtze River in 1998 and 2013 were used to analyze the change of erosion/deposition in this area. The results show that: 1) The net erosion volume of riverbed was $5.6 \times 10^7 \text{ m}^3$ between 1998 and 2013. In this period, the envelope area of 0 m has reduced $5.0 \times 10^6 \text{ m}^2$, and that of -2 m, -5 m and -10 m increased $1.0 \times 10^6 \text{ m}^2$, $3.0 \times 10^6 \text{ m}^2$ and $9.0 \times 10^6 \text{ m}^2$ respectively. The width of the river channel was narrowed, but the riverbed erosion occurred. Thus the navigation condition has been improved. 2) Dunes generated over approximately 97.09% of the downlink navigation channel, while only was 52.09% of the uplink navigation channel existed dunes. According to the standard classification of subaqueous dunes proposed by Ashley, the very large dunes, large dunes, medium dunes and small dunes were observed in the Nanjing reach. The mean flow velocity over small dunes and smooth bed floor was 0.79 m/s, while over very large dunes reached 1.41 m/s. The subaqueous steep slope was observed in both two sides of the river bank and the maximum slope (Slope height/length) of the subaqueous steep slope was up to 0.34. 3) Human activities have an important influence on the evolution of riverbed micro-morphology and river regime in the Nanjing reach: the Channel Renovation Projects leads to the more stable bank lines and the deeper channel; the construction of bridge engineering results in the local scour surrounding the bridge foundations. However, smooth bed floor existed in the upstream of the bridge foundation, while the downstream developed very large dunes. 4) Due to construction of the Three Gorges Dam and the other human activities, the sediment load is increasingly decreasing according to the real-time monitoring data of Datong hydrological station. At the same time, the calculation results of field measured data in the study area show that the bed shear stress are 0.42 N/m^2 and 0.38 N/m^2 , however, the critical shear stress of channel is one magnitude less than the bed shear stress, they are 0.09 N/m^2 and 0.05 N/m^2 . It means that the riverbed sediment will be in a state of frequent transport for some time to come, and it also investigates that the channel depositional environment will be in erosion in the future. The analysis of grain size of riverbed sediment which were collected in the field show that the median grain size of sediment in 2015 was coarser than it in 2008. All of the results show that the Nanjing segment would experience significant riverbed erosion in the future, and it would be a serious threat to the safety of the wading project.

Key words: subaqueous topography; human activities; multi-beam bathymetry; lower reach of the Yangtze River