

长江老海坝段近期河道演变及其影响因素分析*

王茂枚¹, 姜 果¹, 朱 昊¹, 蔡 军¹, 周亚娟²

(1. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017; 2. 南京齐源建设工程有限公司, 江苏 南京 210008)

摘要:近年来受三峡蓄水及河道整治工程影响, 长江下游部分河道边界及水沙条件发生了显著变化, 特别是老海坝河段年内冲淤演变剧烈, 对河道防洪、航运及岸线利用产生影响。本文采用近 15 年的地形实测资料, 探讨老海坝险工段河床演变特征, 并对其影响因素开展研究。结果表明: 1) 老海坝河段平面变化较小, 南岸附近-10、-30 m 等深线基本稳定, -50 m 深槽范围有所扩大; 2) 河道横断面形态横向变化小, 纵向变化大, 呈现向窄深方向发展的趋势; 3) 老海坝抛石护岸工程的实施, 改变不同等深线区间内河床的冲淤变化幅度, 加剧了深槽冲淤幅度, 其中岸坡附近冲淤变化相对较小, 深槽冲淤幅度较大, 九龙港—十一圩港段冲淤演变最为剧烈; 4) 老海坝段-30 m 以下深槽冲淤量与上游大通站造床流量呈负相关, 同时受河道地质边界条件影响, 在弯道水流离心力作用下, 河床仍将长期处于被冲刷状态。研究成果可为河势急剧变化区的河道演变及岸坡防护提供参考依据。

关键词:老海坝; 河床冲淤; 河势演变; 造床流量

中图分类号: TV 147

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)01-0088-09

Recent river channel evolution and its influencing factors in Laohaiba reach of the Yangtze River

WANG Mao-mei¹, JIANG Guo¹, ZHU Hao¹, CAI Jun¹, ZHOU Ya-juan²

(1. Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, China;

2. Nanjing Qiyuan Construction Engineering Co., Ltd., Nanjing 210008, China)

Abstract: In recent years, affected by the Three Gorges reservoir and river regulation project, the river boundaries and water and sediment conditions in the lower reaches of the Yangtze River have changed significantly. In particular, the erosion and deposition of Laohaiba reach have changed dramatically in the year, which has an impact on river flood control, shipping and shoreline utilization. In this paper, the characteristics of riverbed evolution in Laohaiba danger section are discussed based on the topographic measured data of nearly 15 years, and the influencing factors are studied. The results show that: 1) the plane variation of Laohaiba reach is small, the isobaths of -10 m and -30 m near the south bank are basically stable, and the depth range of -50 m is expanded. 2) The transverse variation of river cross-section morphology is small, and the longitudinal variation is large, showing a trend of narrow and deep development. 3) The implementation of the rubble-throwing revetment project of Laohaiba has changed the range of erosion and deposition of the riverbed in different isobaths, and intensified the range of erosion and deposition of the deep trough. The variation of erosion and deposition near the bank slope is relatively small, while the range of erosion and deposition of the deep trough is large. The evolution of erosion and deposition from the Jiulong Port to Shiyiwei Port is the most intense. 4) There is a negative correlation between the erosion and

收稿日期: 2022-04-29

***基金项目:** 国家自然科学基金重点国际合作项目(51520105014); 江苏省水利科技项目(2019001); 江苏省水利科技项目(2018005); 江苏省水利科技项目(2020007)

作者简介: 王茂枚(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 从事河湖治理与保护方面研究。

deposition of the deep channel below -30 m of Laohaiba section and the flow of the upstream Datong station. At the same time, affected by the geological boundary conditions of the river channel, the river bed will still be in a state of erosion for a long time under the action of the centrifugal force of the bend flow. The research results can provide reference for the study of river channel evolution and bank slope protection in the rapidly changing river regime area.

Keywords: Laohaiba reach; riverbed scouring and silting; river regime evolution; bedding flow

长江下游河道总体趋于稳定^[1-3], 但局部地区的河段依然处于急剧动荡的状态, 崩岸在部分河段仍时有发生, 严重危害两岸的堤防和航道安全^[4-6]。三峡水库工程蓄水以来, 清水下泄对长江中下游河道的影响较大, 使河床形态变化明显^[7-8], 一些险工险段出现新的变化特点^[9-10]。20 世纪 90 年代以来, 长江中下游河道已发生崩岸数百起, 甚至在一年内连续发生数十次。为掌握河床的调整特点, 国内外众多学者进行了有益探索。秦蓓蕾等^[11]根据实测河道地形资料, 定量分析北江近十年河道演变规律, 发现其主要影响因素为人类活动。许清文等^[12]根据历史实测资料分析郁江多个典型断面的变化特征及河床演变趋势, 结果表明, 上游来水来沙对河势演变影响最大。Nistoran 等^[13]通过建立一维水动力和泥沙输运模型, 评估多瑙河河段的河床演变情况。Islam 等^[14]基于卫星遥感图像, 在印度孟加拉河上的 Farakka 大坝实施前后, 对其引起的河道弯曲处的曲率变化进行研究, 工程后期该成果得到验证。沙红良等^[15]通过比较三峡蓄水前后大通水沙的变化, 利用 2018 及 2019 年汛前和汛后的地形监测数据, 分析长江下游扬中河段的冲淤变化, 划分崩岸预警等级并提出解决措施。董耀华^[16]根据 2016—2019 年长江防汛与河道实测资料, 提出河道防洪问题的原驱动力是河势变化及洪水的特性, 河流工程需借助定床与动床模型试验开展机理研究。因此密切关注长江中下游河段河势的变化, 对于保障长江河道防洪及涉水工程安全具有重要意义。

老海坝河段是长江下游澄通河段重要的河势控制节点, 也是重要的深水航道码头集中区。近几十年来, 受如皋中汊和浏海沙水道汇流顶冲影响, 坍岸严重。近期老海坝河段虽未发生崩坍,

但是该段深槽不断被冲深, 南岸岸坡日趋陡峭, 威胁沿江堤防及后方企业的安全。张伟等^[17]依据一、二维潮流数学模型, 分析在不同水文条件下以及双涧沙护滩工程实施后老海坝河段近岸水动力特性变化对河床冲刷的影响。王茂枚等^[18-19]依据二维、三维数值模拟结果, 分析老海坝抛石护岸工程对老海坝河段河势的影响。因基于实测河道地形对近期老海坝河段河床冲淤变化情况进行定量分析的研究相对较少。本文根据 2005—2019 年实测河道地形资料, 分析老海坝河段近期的变化特征, 研究该河段不同区域、不同深度河床的冲淤变化情况, 并结合上游来水来沙条件, 对影响河床冲淤变化的因素进行分析, 研究成果可为长江下游河势急剧变化区的河道演变及岸坡防护提供参考依据。

1 河道概况

长江感潮河段自安徽大通至长江口, 全长 700 km, 流经安徽、江苏、上海三地, 具有丰水、多沙、中潮、规律分汊的特点。长江潮流界位于江阴附近, 江阴以下径流与潮流相互作用, 水动力条件极为复杂, 河槽分汊多变。澄通河段属于长江下游感潮河段, 由福姜沙汊道段、如皋沙群汊道段和通州沙汊道段组成。

老海坝河段位于澄通河段, 见图 1。浏海沙水道南岸隶属于如皋沙群汊道段, 上接如皋沙汊道汇流处, 下与南通河段相连, 全长约 7.9 km。河道进口相对较宽, 约 3.1 km, 出口处九龙港—十一圩逐渐缩窄, 宽约 1.7 km。老海坝河岸主要由颗粒较细的砂性土组成, 抗冲性差。受如皋中汊发展的影响, 南岸主流顶冲点从老海坝一带下移到九龙港一带, 水下岸坡冲刷严重。自 1970 年以

来,老海坝河段大量实施河道整治工程,如修建丁坝、水下抛石防护、混凝土灌注桩加固等,目前河势总体稳定。

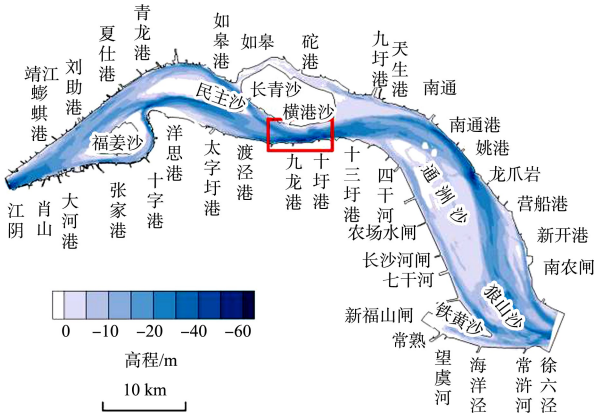


图 1 澄通河段河势

2 来水来沙条件

2.1 径流与潮流

大通水文站是长江下游干流最后一个水文控制站,集水面积为 170 万 km²,占长江流域的 94.7%。大通以下支流汇入水量较少,因此分析澄通河段的来水来沙条件常采用大通站资料。据 1950—2020 年实测资料统计,大通站年内水量分配不均,汛期水量集中,约是全年总水量的 70%,三峡蓄水前后大通站径流量及其年内分布变化不大,见图 2。

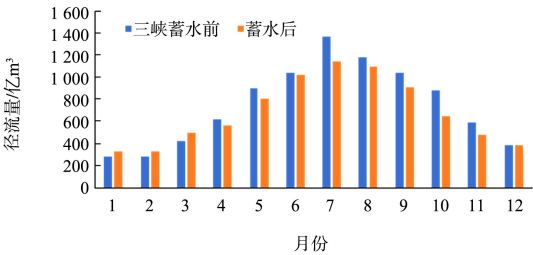


图 2 三峡蓄水前后大通站月均径流量变化

长江下游潮流界和潮区界的位置受到径流和潮流的相互影响,潮流界一般位于江阴附近,随着大通流量的加大,潮流界相应下移,到芦泾港至西界港一带(大通流量约 6 万 m³/s 时)。张家港老海坝节点基本处于长江口潮流界范围内,距上游江阴潮位站直线距离约 30 km。观测资料统计分析表明,江阴站最高潮位通常出现风、暴、潮、

洪三碰头或四碰头时,历时最高水位约 7.2 m。

2.2 河段床沙特征

老海坝河段底质粒径差异较大,近年对研究河段的河床床面底质采样,采砂点位置见图 3。结果显示,粒径范围从 0.01 mm 以下的粉质黏土变化到 0.50 mm 以上的中砂,局部地方床面以碎石为主。一般深槽底砂中值粒径大于洲滩,主槽底砂中值粒径平均为 0.15~0.30 mm,以中细砂尤其是细砂为主,而边滩以及洲滩中值粒径一般在 0.10 mm 以内,以细砂和粉质黏土为主。以 2017 年 8 月洪季采砂点的底质中值粒径为例,见表 1,测点床砂级配大小潮期间差异不大,中值粒径一般以 0.20 mm 左右的中细砂为主。



图 3 采砂点位置

表 1 洪、枯季各测点底质中值粒径

采砂点	季节	中值粒径/mm	
		大潮	小潮
A	洪季	0.156	0.155
	枯季	0.218	0.153
B	洪季	0.178	0.182
	枯季	0.226	0.224
C	洪季	0.153	0.198
	枯季	0.171	0.178

3 河道演变特征

3.1 河床平面变化

根据 2011、2014、2016 和 2018 年河段实测水下地形资料,绘制河段-10、-30、-50 m 等深线分布,见图 4。老海坝河段南岸一千河—十二圩港附近-10 和-30 m 等深线紧贴南岸,水下岸坡较陡,在九龙港—十一圩港之间形成了-50 m 的冲刷坑。2011 和 2014 年-50 m 冲刷坑上下不贯通,面积相对较小,2016 年冲刷坑上下贯通,面积扩

大, 形成一个长约 3 150 m、宽约 200 m 的-50 m 深槽, 这可能与 2016 年长江大水有关。-30 m 深槽主要分布在一干河—十二圩港附近, 2014—2018 年向上、下游均有所延伸。其中南岸近岸-30 m 等深线沿岸线平顺分布, 变化幅度较小, 表明南岸一侧-30 m 深槽位置稳定。北侧-30 m 等深线局部向南小幅移动, 深槽具有向窄深方向发展的趋势。2011—2018 年-10 m 等深线南岸一侧变化微小, 北岸局部有所后退, 但总体变化相对较小。综上, 老海坝河段近年来平面变化总体不大, 岸线基本稳定, 深槽有所发展。

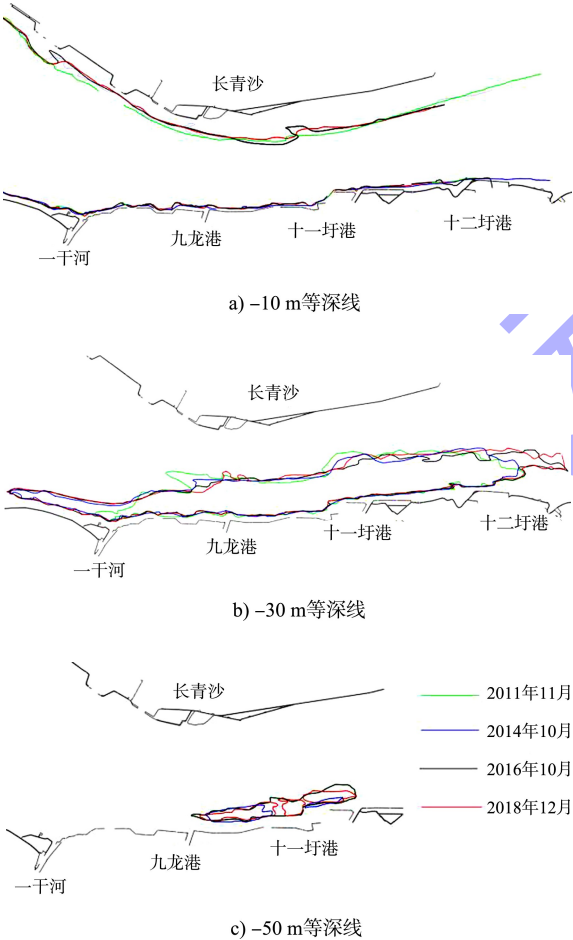


图 4 河段等深线变化

3.2 断面形态变化

河道横断面变化能够较好地反映河槽的演变特点, 在老海坝河段自上游至下游共布置了多条监测断面, 断面起点位于南岸, 终点位于江心沙体长青沙附近, 监测断面位置见图 5。

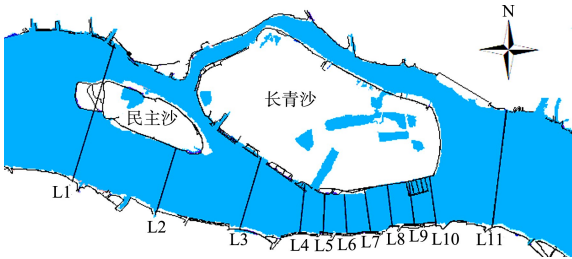
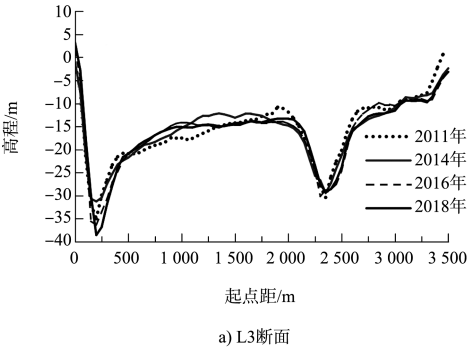
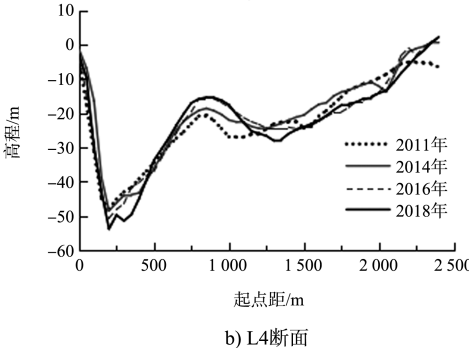


图 5 老海坝附近河段监测断面布置

根据 2011—2018 年河段实测水下地形资料, 得出河段横断面的高程变化, 见图 6。自上游至下游, 断面形态从双深槽的“W”形逐渐过渡到单一深槽的“V”形。深槽窄深, 南岸岸坡陡峭, 最大坡比接近 1:3。近年来 L6 断面相对稳定, 岸坡变化不大, 深槽呈小幅回淤趋势。其余断面深槽均有一定程度的刷深, 其中断面 L8 处的深槽冲淤调整最为明显, 2016 年 L8 断面深槽最深处水深约 65.2 m, 与 2014 年相比, 冲深超过 20 m, 2018 年此处深槽出现回淤, 最深处已不足 60 m。可见 L8 断面处河槽抗冲刷能力较差, 深槽及深槽北侧河床易冲易淤, 深槽冲则北侧岸滩淤, 深槽淤则北侧岸滩冲, 南岸岸坡则相对稳定。L3、L4、L10 断面河床有冲有淤, 深槽以微冲为主, 北侧岸坡以微淤为主, 冲淤变化幅度在 5 m 左右。综上所述, 河道断面横向调整不明显, 但纵向冲淤变化相对较大。



a) L3断面



b) L4断面

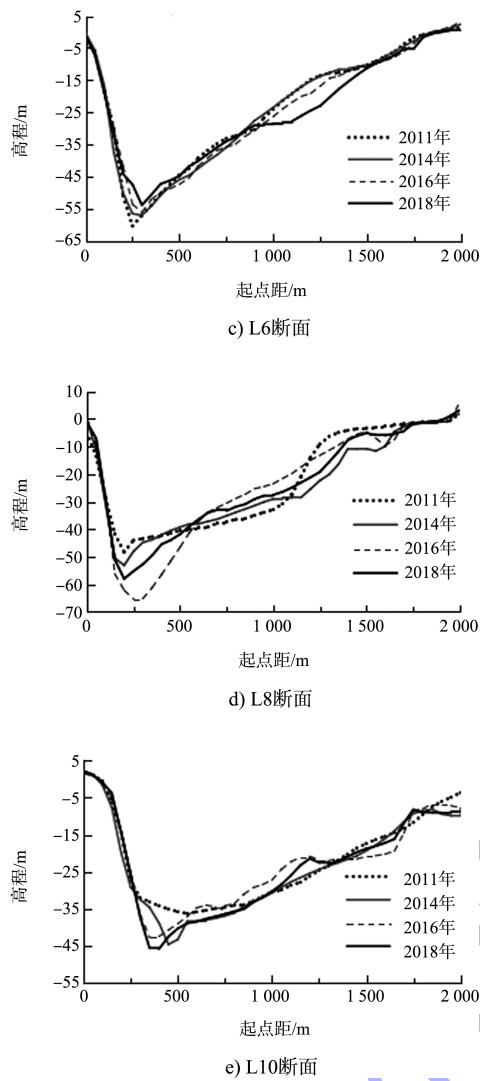


图 6 监测断面高程变化

李明等^[20]等指出，在河道侵蚀受到明显限制的情况下，相对宽深比指标，形心相对深度更能定量反映断面几何特征的变化。因此本文采用断面形心相对深度指标定量分析河段的断面变化特征，将 0 m 以下过水断面按 50 m 间距进行分割，各条块的面积近似等于条块平均高度乘以条块宽度，单个条块的形心深度近似等于 0.5 倍的条块平均高度，整个过水断面的形心深度按式 (1) 计算：

$$H_c = \frac{\sum h_i A_i}{\sum A_i} \tag{1}$$

式中， H_c 为过水断面形心深度； h_i 为单个条块的平均高度； A_i 为个矩形条的面积。

断面形心相对深度 H_c/H 增大，形心下沉，表明深槽下切，断面形态锐化； H_c/H 减小，形心上浮，表明深槽淤积，断面形态坦化。断面 L3~L10 的形心相对深度变化见图 7。研究河段断面形心相对深度变化，表明河段上下游深槽的冲淤变化趋势不同，上游 L3、L4 断面形心相对深度各年变化很小，结合断面图可知，该段冲淤变化相对较小，河床相对稳定。L6~L10 断面形心相对深度变化明显，2016、2018 年 L6 断面形心相对深度明显减小，深槽有所淤积，断面呈坦化趋势。L8、L10 均出现先减小后增大再减小的往复变化趋势，但 L8 断面形心相对深度的变化幅度明显大于 L10。可见近年河槽冲淤变化最剧烈的位置是在九龙港—十一圩港段，一干河—九龙港段河槽相对稳定，略有淤积，十一圩港以下虽有冲淤变化，但深槽总体变化幅度相对不大。

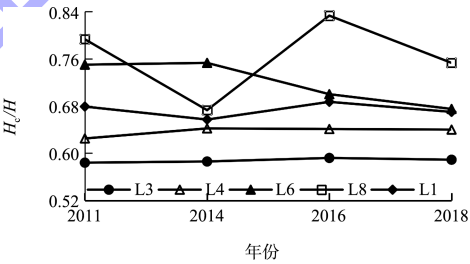
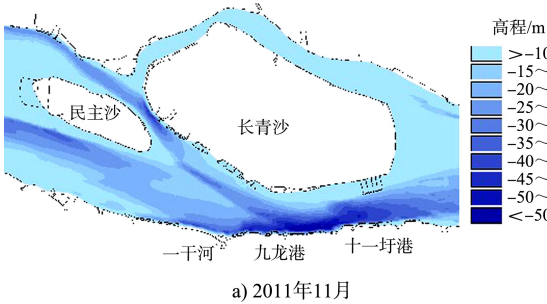


图 7 各断面形心相对深度变化

3.3 河床冲淤变化

老海坝河段位于浏海沙水道凹岸侧，受如皋中汊和浏海沙水道的汇流顶冲影响，深泓逼岸，2011—2018 年的河势见图 8，一干河—十一圩港段水深普遍在 50 m 左右，最深处接近 70 m。2011—2018 年河段深泓基本稳定，河床形态平面变化不大。



a) 2011年11月

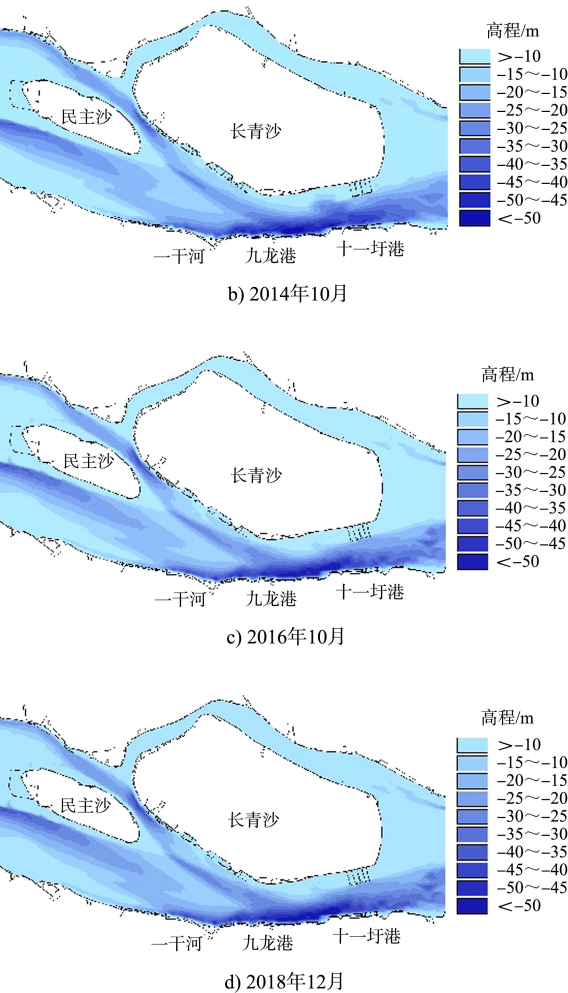


图 8 不同年份老海坝河段河势变化

河床冲淤变化情况见图 9, 2014—2018 年, 研究区域附近河段有冲有淤, 整体冲淤变化幅度不大, 冲淤变化范围主要为-4~4 m, 局部存在较大的冲淤变幅。其中浏海沙水道民主沙头部附近, 2014 年以来深槽紧靠民主沙一侧持续冲刷, 且深槽不断向下游发展, 河床冲深较大, 水下岸坡变陡, 冲刷由民主沙头部向尾部发展。一千河—十一圩港近岸区域 2014—2016 年局部冲淤变化幅度

相对较大, 最大冲淤变幅均在 12 m 左右, 2016—2018 年冲淤变化幅度相对较小, 主要集中在-4~4 m。综合来看, 浏海沙水道民主沙附近深槽持续冲刷, 其他区域冲淤往复, 河势总体稳定。

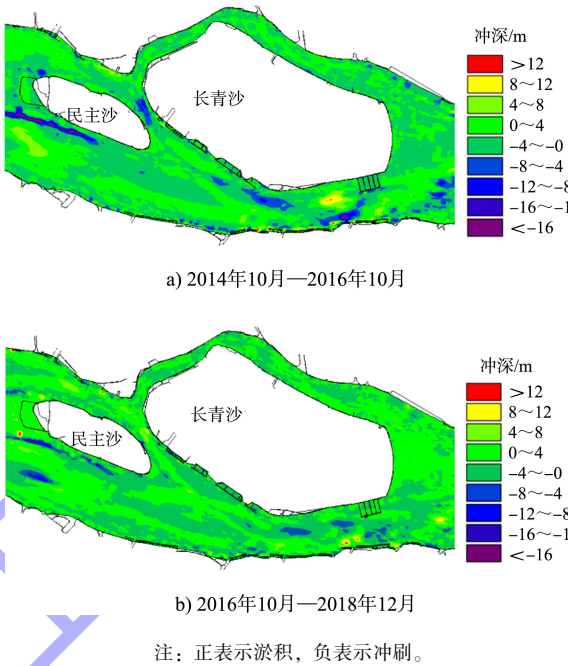
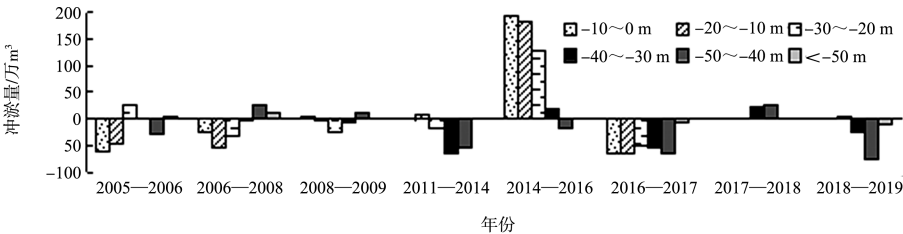


图 9 河床冲淤变化

4 河床演变影响因素分析

为分析老海坝河段南岸岸坡至深槽的河床冲淤变化, 根据主流顶冲区域, 将研究河段分为一千河—九龙港、九龙港—十一圩港、十一圩港—十二圩港三段, 一千河—九龙港河段冲淤计算区域长约 2.76 km, 平均宽约 600 m; 九龙港—十一圩港段河床冲淤计算区域长度约为 2.8 km, 平均宽度约为 580 m; 十一圩港—十二圩港以下计算区域长度约为 3.08 km, 平均宽度约为 460 m, 各段不同等深线范围内河床冲淤量变化见图 10。



a) 一千河—九龙港段

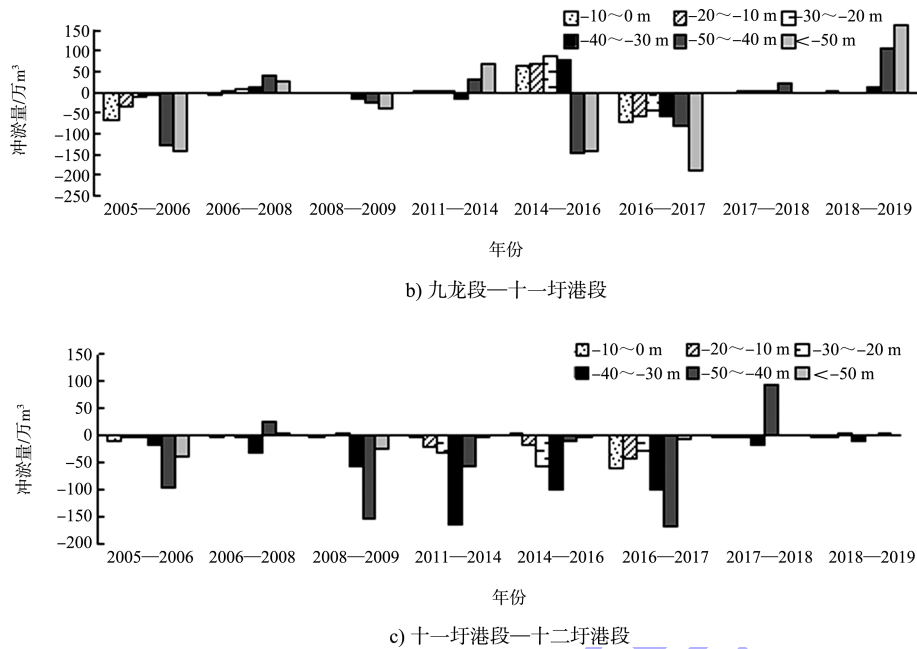
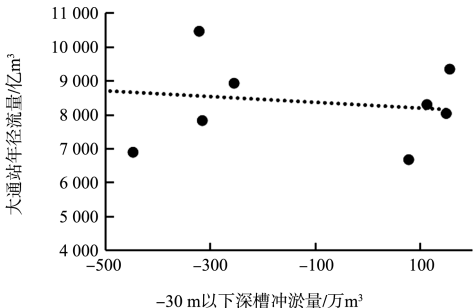


图 10 分区域不同高程区间河床冲淤量

2005—2014 年，一干河—九龙港段处于小幅微冲状态，平均年冲刷量约 76 万 m³，2014—2016 年 -30~0 m 等深线范围内河床淤积明显，总计淤积量达 525 万 m³，可能与老海坝节点综合整治工程水下抛石有关，水下抛石不仅直接造成河床容积的减小，而且会使岸坡附近的河床糙率明显增加，更容易引起泥沙落淤。2016—2019 年 -30 m 以下深槽的冲淤幅度有所增大。从各等深线范围内河床冲淤量可以看出，一干河—九龙港段河床由以近岸岸坡冲淤变化为主逐渐转为以深槽冲淤变化为主，可见岸坡抗冲刷能力提高后，由于深槽抗冲刷能力相对较弱，该段河槽向窄深型发展。九龙港—十一圩港段除在 2014—2016 年和 2016—2017 年岸坡冲淤变化较明显以外，其他年份主要以深槽冲淤变化为主，岸滩冲淤变化总体较小。2016 和 2017 年深槽连续大幅冲刷，2017 年仅 -50 m 以下深槽冲刷量即接近 200 万 m³。2017—2018 年河床较为稳定，2019 年 -40 m 以下深槽均明显淤积，淤积量约 270 万 m³。可见九龙港—十一圩港段深槽易冲易淤，深槽较不稳定。十一圩港—十二圩港段 2005—2017 年以 -50~-30 m 深槽的持续剧烈冲淤变化为主，2018—2019 年河床冲淤态势发生显著变化，冲刷幅度明显减小，-40 m 以下深槽出现明显回淤。综上所述，老海坝河段

近年来以深槽冲淤变化为主，岸坡冲淤变化幅度相对较小，其中一干河—九龙港深槽冲刷幅度相对较小，九龙港以下深槽冲刷较为明显，九龙港—十一圩港段深槽不稳、冲淤变化幅度最大。根据以上分析结果可知，老海坝抛石护岸工程的实施，改变了不同等深线区间河床的冲淤变化幅度，可能引起河床冲淤态势的改变，因此应持续关注人类活动对河段演变的影响。

综上分析，老海坝河段河床年际间冲淤变化幅度较大，一方面与河道整治等人类活动有关，另一方面也会受到上游来水来沙条件变化的影响。老海坝河段 -30 m 以下深槽冲淤量与大通站的年径流量、年输沙量和最大月输沙量相关系数分别为 -0.22、-0.18 和 -0.27，见图 11。深槽冲淤量与上游来水来沙的单一相关性较弱，因此需要综合分析来水来沙对河床冲淤的共同影响。



a) 深槽冲淤与年径流量关系

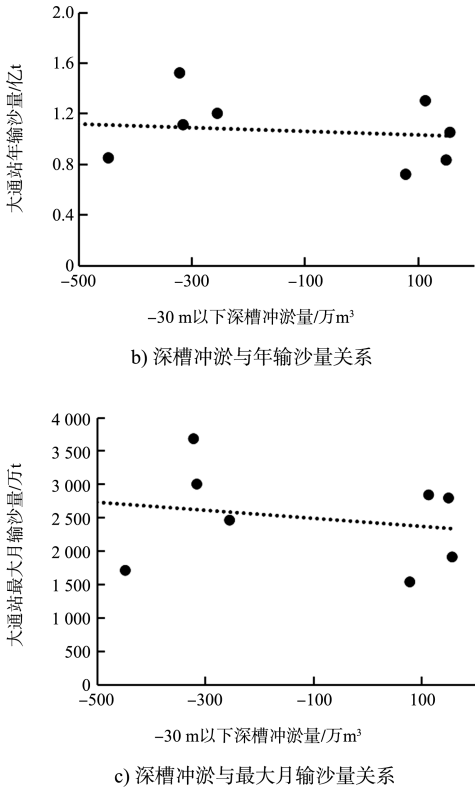


图 11 深槽冲淤与上游来水来沙关系

在河床演变分析中,常根据实测资料拟合河槽冲淤与上游来水来沙条件之间的经验关系^[21-22]。但由于涉及的水沙特征参数较多,进行冲淤预测难度较大。张为等^[23]指出马卡维耶夫法计算的造床流量同时考虑了流量的输沙能力以及持续时间对河床塑造作用的影响,因此本次研究考虑将上游来水来沙条件的综合影响简化为造床流量指标,分析 2005—2019 年老海坝河段深槽冲淤与上游大通站造床流量的关系见图 12。老海坝河段-30 m 以下深槽冲淤与大通站造床流量呈负相关关系,线性相关系数为-0.8。表明老海坝河段深槽冲淤与大通站造床流量相关性较大,随着大通站造床流量的增大,老海坝河段深槽冲刷量也呈现增大趋势。并且老海坝河段处于浏海沙水道凹岸,河岸抗冲刷能力较差,河段断面主要为偏向南岸的“V”形断面,在弯道水流离心力作用下,河床仍将在较长时间内处于被冲刷状态。应持续关注该段的河床冲淤变化,加强河势监测。

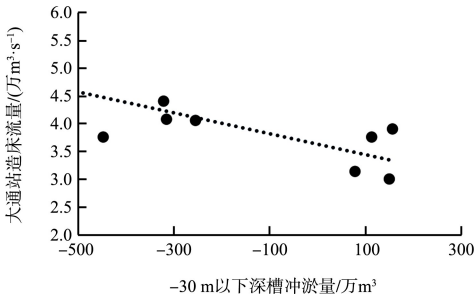


图 12 深槽冲淤与大通站造床流量关系

5 结语

- 1) 基于实测水下地形资料,通过对不同年份河道平面形态变化进行分析,结果表明,老海坝北侧-30 m 等深线局部向南侧小幅移动,北岸局部有所后退,深槽具有进一步向窄深方向发展的趋势。
- 2) 采用断面形心相对深度指标定量分析河段的断面变化特征,九龙港—十一圩港段河槽冲淤变化最剧烈,一干河—九龙港段河槽相对稳定,十一圩港以下虽有冲淤变化,但幅度不大。
- 3) 老海坝抛石护岸工程的实施,改变了不同等深线区间内河床的冲淤变化幅度,加剧了深槽冲淤幅度,其中九龙港—十一圩港段深槽不稳定、冲淤变化幅度最大,应持续关注人类活动对河段演变的影响。
- 4) 老海坝河段深槽冲刷幅度随着上游造床流量的增大呈现增大趋势,加之老海坝河段处于浏海沙水道凹岸,且河岸抗冲刷能力较差,在弯道水流离心力作用下,河床仍将在较长时间内处于被冲刷状态。

参考文献:

[1] 杜德军,王晓俊,夏云峰,等.靖江边滩演变水动力特性分析[J].水运工程,2021(4):75-80.

[2] 许慧,张健,张伟露.三峡工程运用后水沙变化对世业洲汉道河床演变的影响[J].水运工程,2021(7):94-99.

[3] ALCAYAGA H, PALMA S, CAAMANO D, et al. Detecting and quantifying hydromorphology changes in a chilean river after 50 years of dam operation[J]. Journal of south american earth sciences, 2019, 93(C): 253-266.

[4] 林芬芬,夏军强,周美蓉,等.下荆江河槽形态及过流能力调整对上下游边界条件的响应[J].水利学报,2019,50(5):641-649.

[5] CHEN F, CHEN L, ZHANG W, et al. Responses of channel morphology to flow-sediment variations after dam construction: a case study of the Shashi Reach, middle Yangtze River[J]. Hydrology research, 2019, 50(5): 1359-1375.

[6] ZHENG S W, CHENG H Q, SHI S Y, et al. Impact of anthropogenic drivers on subaqueous topographical change in the Datong to Xuliujing reach of the Yangtze River[J]. Science China(Earth sciences), 2018, 61(7): 940-950.

[7] 张为,吴美琴,李思璇,等.三峡水库蓄水后城陵矶至九江段河道冲淤调整机理[J].水科学进展,2020,31(2):162-171.

[8] 叶志伟.新水沙条件下长江下游东北水道航道演变趋势分析[J].水运工程,2019(10):141-147.

[9] 赵占超,姚仕明,唐峰,等.冲刷条件下熊城河段河床演变规律及趋势[J].水运工程,2019(8):134-140.

[10] LI Z W, YANG H Y, XIA J Q, et al. Channel morphologic processes of a highly sinuous bend approaching neck cutoff by bank erosion in the middle Yangtze River[J]. International Journal of sediment research, 2021, 36(4): 457-467.

[11] 秦蓓蕾,田甜,程香菊,等.北江干流近十年河道演变及原因分析[J].水运工程,2022(1):131-135.

[12] 许清文,史本宁.郁江贵港城区河段河道演变分析[J].水运工程,2020(S1):150-153,190.

[13] NISTORAN D G, IONESCU C, PĂTRU G, et al. One dimensional sediment transport model to assess channel changes along Oltenița-Călărași reach of Danube River, Romania[J]. Energy Procedia, 2017, 112: 67-74.

[14] ISLAM A, GUCHHAIT S K. Analysing the influence of Farakka Barrage Project on channel dynamics and meander geometry of Bhagirathi river of West Bengal, India[J]. Arabian journal of geosciences, 2017, 10(11): 1-18.

[15] 沙红良,詹新焕,叶爱玲.扬中市太平洲左缘段河势变化及崩岸预警分析[J].江苏水利,2021(2):26-31.

[16] 董耀华.2016洪水-长江中下游防洪与治河问题再探[J].长江科学院院报,2020,37(1):1-6,12.

[17] 张玮,杨松,许才广,等.长江张家港老海坝段水动力及冲刷分析研究[J].水道港口,2016,37(2):147-153.

[18] 王茂枚,高云云,曾瑞,等.老海坝河段抛石护岸工程对河道演变的影响评价[J].江苏水利,2020(2):42-47.

[19] 姜果,鲁程鹏,王茂枚,等.长江老海坝抛石护岸工程对河势的影响研究[J].泥沙研究,2018,43(5):27-32.

[20] 李明,胡春宏,方春明.三峡水库坝下游河道断面形态调整模式与机理研究[J].水利学报,2018,49(12):1439-1450.

[21] 许炯心.长江宜昌—武汉河段泥沙年冲淤量对水沙变化的响应[J].地理学报,2005,60(2):337-348.

[22] 胡腾飞,施勇,栾震宇,等.长江宜昌—监利段河床冲淤对宜昌站水沙变化的响应[J].水利水运工程学报,2020(4):48-56.

[23] 张为,高宇,许全喜,等.三峡水库运用后长江中下游造床流量变化及其影响因素[J].水科学进展,2018,29(3):331-338.

(本文编辑 赵娟)

(上接第41页)

[8] 刘明维,郭庆,刘耕,等.内河库水位变动下码头桩基混凝土碳化深度预测模型[J].水运工程,2021(4):49-55.

[9] ANDRADE C, ALONSO C, SARRA J. Corrosion rate evolution in concrete structures exposed to the atmosphere[J]. Cement & concrete composites, 2002, 24(1): 55-64.

[10] 任军.考虑弯曲应力效应的钢筋混凝土碳化效应性能研究[D].保定:河北农业大学,2019.

[11] 郭庆.内河环境相对湿度周期性变化下受荷混凝土碳化规律研究[D].重庆:重庆交通大学,2021.

[12] 赵尚传,赵国藩.混凝土结构碳化寿命的概率模型研究[J].四川建筑科学研究,2002,28(1):24-26.

[13] 徐善华,牛荻涛,王庆霖.钢筋混凝土结构碳化耐久性分析[J].建筑技术开发,2002,29(8):8-10.

[14] 西安建筑科技大学.混凝土结构耐久性评定标准:CN-CECS220:2007[S].北京:中国建筑工业出版社,2007.

[15] 孙艺.海洋环境下高桩码头耐久性分析方法研究[D].天津:天津大学,2006.

[16] 沈德建,吴胜兴.海水浪溅下混凝土中锈蚀钢筋性能试验研究及仿真分析[J].工业建筑,2005,35(3):58-62.

[17] 中交水运规划设计院有限公司.水运工程混凝土结构设计规范:JTS 151—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.

[18] 陈清眉.组合荷载作用下高桩码头横向排架时变可靠度分析[D].天津:天津大学,2018.

(本文编辑 武亚庆)