



长江口深水航道减淤工程实施效果评价

付桂^{1,2}, 应铭³, 左书华⁴, 李为华⁵

- (1. 上海航鸿工程管理有限公司, 上海 200137; 2. 交通运输部长江口航道管理局, 上海 200003;
3. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120; 4. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456;
5. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241)

摘要: 为降低长江口深水航道常态回淤量, 分先期工程和完善工程两阶段实施长江口深水航道减淤工程南坝田挡沙堤加高工程。利用北槽深水航道减淤工程实施前后的实测数据, 综合分析了工程实施前后水沙通量、含沙量、流场、周边河势、航道减淤等方面的变化情况。结果表明: 1) 先期工程实施后, 南导堤涨潮越堤水沙显著减少, 北槽含沙量明显降低, 航道南侧横向水沙输移得到有效抑制, 工程实际减少常态回淤量约 17.4%; 2) 完善工程实施后, 南导堤涨潮越堤水沙基本阻断, 北槽中下段含沙量也有所减小, 北槽潮流方向更加归顺, 常态回淤量降幅约 5.6%; 3) 工程达到了预期的航道减淤目标, 工程治理方案合理, 航道减淤效果符合预期。

关键词: 长江口深水航道; 减淤工程; 南坝田挡沙堤加高工程; 常态回淤量; 先期工程; 完善工程

中图分类号: U 611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0134-06

Evaluation on effect of siltation reduction project in deep-water channel of Yangtze Estuary

FU Gui^{1,2}, YING Ming³, ZUO Shu-hua⁴, LI Wei-hua⁵

(1. Shanghai Hanghong Engineering Management Co., Ltd., Shanghai 200137, China;

2. Yangtze Estuary Waterway Administration Bureau, Shanghai 200003, China;

3. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China;

4. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China;

5. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: To reduce the normal siltation amount of the Yangtze Estuary deep-water channel, the jetty heightening project in the southern groin field of the siltation reduction project of the Yangtze Estuary deep-water channel is carried out in two stages: the previous project and the perfect project. Based on the measured data before and after the siltation reduction project in the deep-water channel, the changes of water and sediment flux, sediment concentration, flow field, surrounding river regime and siltation reduction in the channel are comprehensively analyzed. The results show that: 1) after the previous project of the siltation reduction project, the water and sediment flow over the southern groin field decreased significantly, the sediment concentration in the north channel decreased significantly, the lateral water and sediment transport in the south side of the channel was effectively suppressed, and the actual normal siltation amount decreased by about 17.4%. 2) After the perfect project of the siltation reduction project, the water and sediment flow over the southern groin field are basically blocked, the sediment concentration in the middle and lower parts of the north channel also decreases, the tidal current direction of the north channel

收稿日期: 2022-04-06

作者简介: 付桂(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事航道工程科研规划及工程管理工作。

becomes more smoother, and the normal siltation amount decreases by about 5.6%. 3) The project achieves the expected channel siltation reduction target, the engineering treatment scheme is reasonable, and the channel siltation reduction effect meets the expectation.

Keywords: Yangtze Estuary deep-water channel; siltation reduction project; jetty heightening project in the southern groin field; normal siltation amount; previous project; perfect project

长江口 12.5 m 深水航道 2011—2015 年期间平均常态年回淤量 7 318 万 m^3 , 最大年常态回淤量为 2012 年的 8 582 万 m^3 , 深水航道北槽段常态回淤量约 5 655 万 m^3 , 且时空分布高度集中, 6—11 月占比超 80%, 北槽中段占比超 80%。在此背景下, 长江口深水航道回淤原因和可行的减淤工程方案成为长江口工程泥沙研究的热点问题之一。国内众多学者基于现场观测研究^[1-3]、河床演变分析^[4-5]、潮流泥沙数值模拟和物理模型研究^[6-8]等技术手段, 系统分析了长江河口航道回淤的内在机理, 揭示了南导堤越堤泥沙是洪季北槽的主要泥沙来源, 并在此基础上论证提出采取挡沙措施减少北槽南导堤涨潮越堤泥沙、改进中下段流态的减淤工程——长江口深水航道减淤工程南坝田挡沙堤加高工程。

该工程在实施过程中采取两期施工, 先实施加高先期工程(NBJG+3.5), 从 2.0 m 加高至 3.5 m; 后根据实施效果及影响情况实施加高完善工程(NBJG+4.5), 从 3.5 m 加高至 4.5 m。工程初步设计阶段数学模型和物理模型预测结果表明, 以先期工程前 2012 年北槽深水航道常态回淤量为基数, 先期工程后预期取得 10% 的减淤效果, 加高完善工程后预期减淤幅度为 15.6% 左右。但工程实施后北槽水沙输移规律的变异性和工程的现实减淤效果尚未见诸报道。

本文基于长江口北槽深水航道减淤工程实施前后的现场观测数据资料, 综合分析工程实施前后水沙通量变化、含沙量变化、流场变化、周边河势变化、航道减淤量变化等情况, 对实施效果进行评价。

1 工程概况

长江口深水航道减淤工程南坝田挡沙堤加高工程分先期工程和完善工程 2 期实施。其中, 先期工程于 2015 年 11 月开工建设, 2016 年 7 月主体工程完工, 2018 年 8 月竣工^[9], 主要包括: 将 S4~S8 丁坝间已建南坝田拦沙堤加高至 3.5 m, 并向东南延伸, 在 S8~S9 丁坝间建新的挡沙堤, 新建堤设计高程 3.5 m, 工程总长度约为 23.8 km; 完善工程在先期工程基础上将堤身加高至 4.5 m, 于 2019 年 12 月底开工建设, 2020 年 12 月主体工程完工^[10]。

2 资料来源及评价方法

利用北槽水沙通量实测数据(2012 年 8 月、2013 年 9 月、2016 年 9 月、2017 年 8 月)对比分析工程实施前后水沙通量变化; 利用南导堤越堤坐底观测资料、北槽转角南侧边滩 CS3S 水文点 2014—2017 年每年 7 月实测涨落潮平均含沙量、底层最大含沙量和北槽转弯段南北两侧近航道边坡位置 TR1、TR2 近底水沙观测资料(2012 年 8 月、2016 年 9 月、2017 年 8 月、2018 年 7 月)分析北槽含沙量变化; 利用北槽水沙通量实测资料分析南导堤越堤潮量和下口涨潮潮量、利用长江口北槽沿程水文点(以 CS3 为例)的流向分析北槽流态变化、利用北槽 S1 断面横断面水流观测资料(2012 年 8 月、2016 年 10 月、2017 年 8 月)分析加高前后航槽内南向北横向水流的变化情况; 利用 2010—2021 年北槽常态回淤量数据对比分析工程前后航道减淤变化。观测站点及断面位置见图 1。其中长江流域大通站径流量、输沙量数据来源于中华人民共和国水利部网站中国河流泥沙公报(2000—2020 年)^[11]。

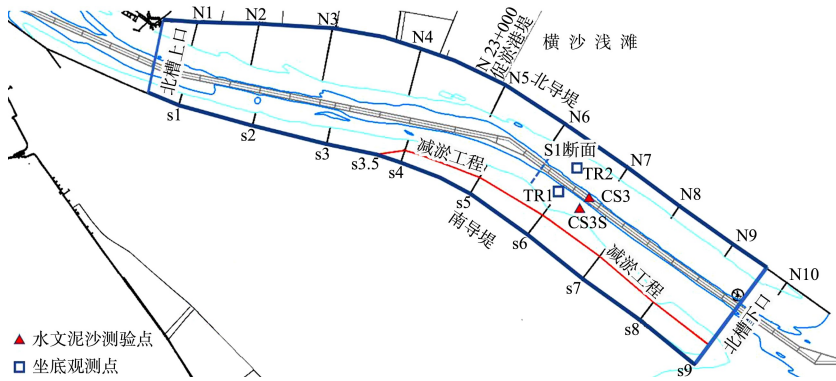


图1 减淤工程平面及数据观测位置

分析采用的工程前后各时间段的定义如下：2015年11月及以前年份为先期工程实施前；2015年11月—2016年7月为先期工程实施阶段；2016年7月—2019年12月为先期工程后、加高完善工程前时段；2020年为加高完善工程实施阶段；2021年及以后年份为加高完善工程后时段。长江口动力条件差异较大，潮差反映了潮汐作用的强弱，同潮差条件下潮汐和潮流动力基本相同^[12]，采用同等潮差条件下的实测资料对比分析减淤工程建设前后水沙通量、含沙量、流态变化。

3 先期工程实施效果

3.1 南导堤越堤水沙量变化

长江口北槽水沙通量观测方法：将长江口北槽视为上口、下口、南导堤和北导堤这四口“封闭盒子”进行观测，在长江口北槽上、下口水域采用 ADCP 动船取水取沙方式，同时进行断面流速和动船取沙（悬沙）观测，以获得断面水流和含沙量分布；在南、北导堤堤顶关键位置布置多套坐底越堤水沙观测系统（图2），以得到连续的涨落潮越堤输水及输沙过程数据。以2012—2013年洪季北槽四边界水沙通量观测成果代表先期工程前情况，将2016—2017年洪季北槽四边界水沙通量观测成果代表先期工程后情况，各次观测的水文条件见表1。通过对越堤站点和断面观测资料的计算分析，绘制图3、4，从中可以得出如下结论：1) 四边界输入北槽潮量：北槽下口>北槽上口>南导堤>北导堤，其中南导堤越堤进入北槽的潮量大幅度减小；2) 四边界输出北槽潮量：

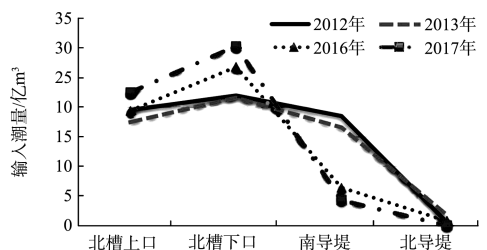
基本保持为北槽下口>北槽上口>北导堤>南导堤，但北导堤输出潮量略有减小；3) 四边界输入北槽沙量：工程后南导堤输入北槽的沙量大幅减小，排序变化为北槽下口>北槽上口>南导堤>北导堤；4) 四边界输出北槽沙量：依然基本保持为北槽下口>北导堤>北槽上口>南导堤。

表1 先期工程前后不同年份洪季通量观测上下边界条件

测次	北槽中站 大潮 潮差/m	北槽中站 大中小潮平 均潮差/m	大通站流量/ (万 m ³ ·s ⁻¹)	工况
2012年8月	4.15	3.13	3.80	先期工程前
2013年9月	3.71	2.73	2.96	
2016年9月	3.68	2.96	1.98	先期工程后
2017年8月	3.91	2.75	3.92	



图2 南导堤坐底越堤水沙观测布置



a) 输入潮量

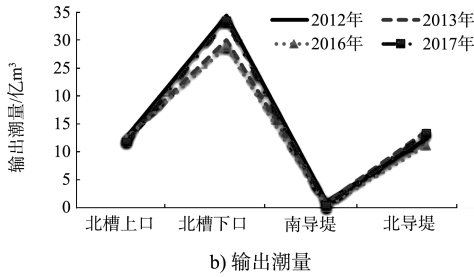
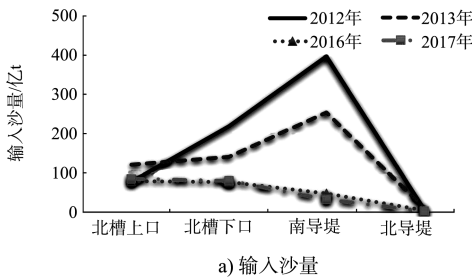
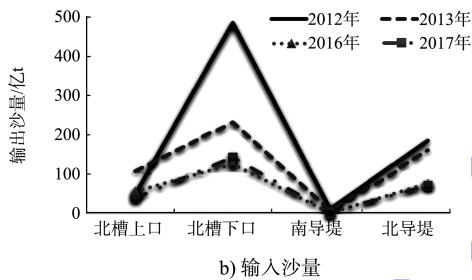


图 3 大潮期北槽四边界输入、输出潮量



a) 输入沙量



b) 输出沙量

图 4 大潮期北槽四边界输入、输出沙量

3.2 北槽含沙量变化

在南坝田挡沙堤加高先期工程发挥作用、以及自然变化和人类活动综合影响下, 南北槽水域含沙量明显降低, 大潮期南导堤越堤平均含沙量 2016、2017 与 2013 年实测数据相比, 降低约 54% (表 2)。涨潮过程越过南导堤进入北槽的潮量、沙量显著减少; 在北槽下口涨潮流有所增强的条件下, 由于含沙量水平降低, 进入北槽的沙量明显减少; 从北导堤和北槽上口涨潮输出北槽的潮量变化不大, 沙量同样明显减小。北槽四边界通量变化与预测情况基本一致。

表 2 先期工程前后南导堤大潮期越堤平均含沙量

时间	平均含沙量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	工况
2012 年 8 月	2.28	先期工程前
2013 年 9 月	1.17	
2016 年 9 月	0.75	先期工程后
2017 年 8 月	0.76	

经统计对比, 北槽拦门沙段各垂线历次潮平均含沙量、底层最大含沙量、涨落潮平均含沙量最大值均出现在 CS3S 垂线处; 2016 年 7 月和 2017 年 7 月涨、落潮平均含沙量与 2014 年 7 月和 2015 年 7 月相比, 平均含沙量及底层最大含沙量均减小, 特别是近底层最大含沙量减小明显, 2014 年 7 月和 2015 年 7 月洪季涨潮近底层最大含沙量达到 20 kg/m^3 , 而先期工程后的 2016 年 7 月、2017 年 7 月仅为 6 kg/m^3 , 与加高工程前同期含沙量对比, 减小明显。

根据先期工程前 2012 年 8 月、先期工程后 2016 年 9 月、2017 年 8 月和 2018 年 7 月航道两侧坐底观测资料: 2012 年夏秋季(8 月 12—17 日)观测期间, TR1、TR2 两站底层上 0.5 m 层含沙量最高值普遍达到 28 kg/m^3 ; 2016 年夏秋季(9 月 13 日—10 月 2 日)期间, T6 站底层上 0.5 m 层含沙量最高值为 9.5 kg/m^3 ; 2017 年夏秋季(8 月 1—29 日)期间, TR1、TR2 站底层上 0.5 m 层含沙量最高值为 7.0 kg/m^3 ; 2018 年夏秋季(7 月 1—6 日)期间, TR1 站底层上 0.5 m 层含沙量最高值为 8.36 kg/m^3 。从 4 个不同时期坐底含沙量观测结果可以看出, 先期工程后 2016—2018 年夏秋季航道两侧坐底最高含沙量均小于先期工程前 2012 年 8 月近底层最大含沙量, 减小约 60%~70%。

总体上, 南坝田挡沙堤加高先期工程大大减少了九段沙越过南导堤的泥沙, 降低了北槽泥沙供给, 北槽内平均含沙量和近底层含沙量大幅减小, 改善了北槽内泥沙环境。

3.3 北槽中下段水流环境变化

1) 南坝田挡沙堤加高先期工程减少了南导堤越堤潮量, 减小了北槽航道南侧由南向北的横向运动, 改善了北槽内水流环境。

通过统计北槽下口大、中、小潮涨潮潮量平均值变化, 结果表明: 先期工程前 2013 年 9 月, 北槽下口平均涨潮进潮量为 14.25 亿 m^3 ; 先期工程后 2016 年 9 月为 21.34 亿 m^3 , 2017 年 8 月为 20.06 亿 m^3 , 下口涨潮潮量呈增长趋势, 潮量分别增长 49% 和 30%。

通过统计南导堤越堤大、中、小潮涨潮潮量平均值变化,结果表明:先期工程前2013年9月南堤越堤水量约15.88亿 m^3 ;工程后2016年9月为4.86亿 m^3 ,2017年8月仅为2.18亿 m^3 ,与2013年值相比分别减小了69%和86%,先期工程后越过南导堤的水量减少明显。

2)实测涨落潮流方向更加归顺,与航道方向夹角趋于减小。

通过分析北槽沿程夏秋季大潮表层涨落流速、流向和垂线平均涨落流速、流向及其与航道的夹角变化,并将2016年夏秋季与2015年夏秋季表层、垂线平均流速矢量和航道夹角进行对比,可以看出,南坝田挡沙堤加高先期工程以后,表层、垂线平均涨、落潮方向更加归顺,与航道方向夹角趋于减小,特别是中下段测点更加明显,以CS3为例,表层涨落潮流向与航道夹角由工程前的 13° 减小为 4° 。

3)由南向北的横向水流明显减弱,改善了航道回淤条件。

根据2017年8月(平均潮差2.75 m)、2016年10月(平均潮差2.88 m)、2012年8月(平均潮差2.96 m)在N疏浚单元附近设置的S1断面(图1)水流观测资料,分析了加高先期工程前后航槽内南向北横向水流的变化情况。横断面上均存在南向北或北向南的横向流速分量,先期工程后(2016、2017年)的横向分量比先期工程前(2012年)有所减小,尤其是南向北的流速横向分量大幅度降低,而且先期工程后在断面上的垂向环流及交换明显减弱(图5)。统计表明,先期工程前大、中、小潮期间整个断面上的最大横向流速分量的平均值分别为0.58、0.52和0.48 m/s,先期工程后分别为0.46、0.47和0.27 m/s;仅对南向北的横向分量统计,先期工程前大中小潮期间整个断面的最大南向北流速分量平均值分别为0.56、0.49和0.46 m/s,先期工程后分别为0.37、0.36和0.21 m/s,为工程前的46%~73%。

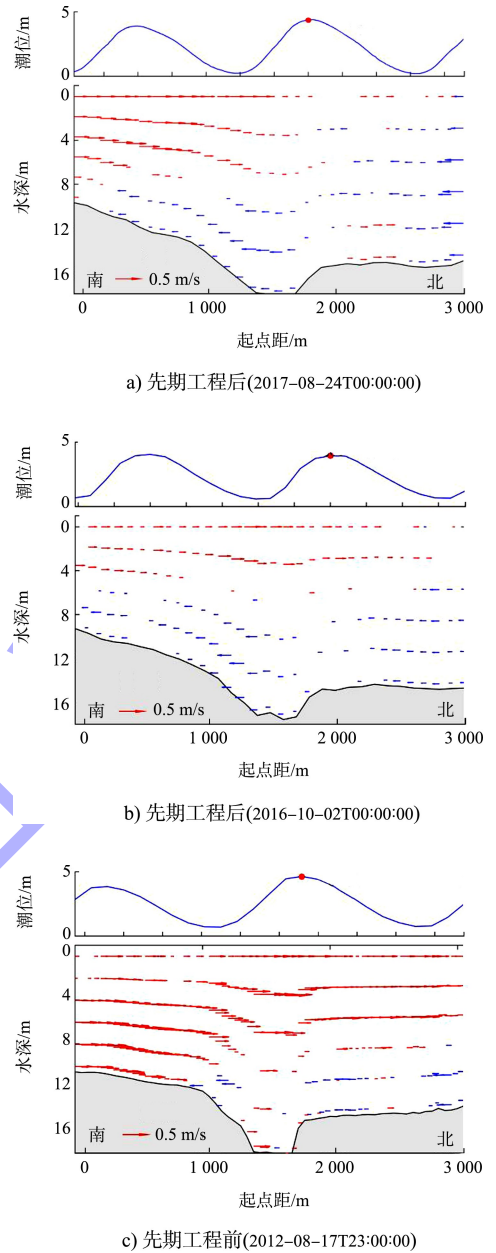


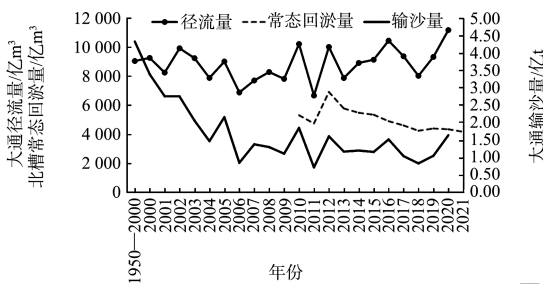
图5 大潮期高潮时刻S1断面流速南向北横向分量分布

3.4 对周边地形的影响

先期工程后,南槽上段河槽水深增深,河槽微弱变窄,南槽中段河槽变宽,水深加大及主泓刷深,拦门沙滩顶位置略有下移;九段沙下沙体5 m等深线处于冲刷萎缩趋势,S9丁坝下侧的5 m沙嘴工程后略有外扩;北导堤北侧横沙沙滩串沟冲刷发展,5 m等深线略有外扩,靠近北导堤的10 m等深线略有萎缩;北港口外10 m等深线基本没有变化。周边河槽总体仍保持着原有的冲淤格局,减淤工程对其影响不明显。

3.5 先期加高工程实施减淤效果评价

对长江口深水航道北槽段来说, 长江流域(大通站)来水来沙量的变化与拦门沙河段航道回淤变化非线性相关关系(图 6), 未对以悬沙落淤为主的北槽深水航道回淤产生较为明显的影响。北槽深水航道回淤分布呈现出长江流域来水量越大回淤集中分布区段越偏下游的特征, 来水量变化幅度较小, 对深水航道回淤影响不明显。值得注意的是, 12.5 m 航道维护期(2011—2021 年)流域来沙量虽已处于减小状态, 而回淤总量仍旧相对较高。



注: 1950—2000 年大通站数据取所有年份来水、来沙量的平均值。

图 6 长江流域大通站来水来沙量及北槽常态回淤量逐年变化

北槽深水航道实施减淤先期工程后南导堤涨潮越堤水沙减少, 大中小潮累计拦截了先期工程前 2 m 以上南导堤越堤潮量的 71%, 累计拦截南导堤越堤沙量的 63%。降低了南导堤越堤泥沙对北槽的泥沙补给, 北槽含沙量水平降低, 工程也改善了北槽内水流环境, 减小了北槽航道南侧由南向北的横向运动, 改善了北槽内水流环境; 实测涨落潮流方向更加归顺, 与航道方向夹角趋于减小, 由北向南的横向水流明显减弱, 改善了航道回淤条件, 降低了航道回淤量。

从表 3 可以看出: 先期工程后 2017—2019 年北槽航道(B—Z 区段)常态回淤量平均为 4 419 万 m^3 , 与先期工程前(本底取 2015 年回淤量 5 348 万 m^3)相比, 年均常态回淤量降低约 929 万 m^3 , 降幅约 17.4%, 每年可减少航道养护费用约 1.6 亿元。与初步设计阶段数学模型和物理模型预测相比, 先期工程减淤幅度超过了预期减淤 10% 目标。

表 3 北槽深水航道影响区段(B—Z)年常态回淤量变化

	工程后 年回淤量/万 m^3	工程前本底 年回淤量/万 m^3	减淤效果	
			变化量/万 m^3	变化幅度/%
2017 年	4 611		737	-13.8
2018 年	4 245	先期工程前 (2015 年)	-1 103	-20.6
2019 年	4 400	5348	-948	-17.7
平均	4 419		-929	-17.4
完善工程前				
2021 年	4 171	(2017—2019 年) 4 419	-248	-5.6

注: “-”表示减少, “+”表示增加。

4 加高完善工程实施效果评价

为进一步发挥南坝田挡沙堤加高工程的减淤功能, 实施南坝田挡沙堤加高完善工程, 在先期工程的基础上进一步从 3.5 m 加高至 4.5 m, 加高完善工程于 2019 年 12 月底开工, 于 2020 年 12 月主体工程完工。

加高完善工程实施后, 南导堤涨潮越堤水沙大幅减少, 大中小潮累计进一步拦截了工程前 3.5 m 以上南导堤越堤潮量的 93%, 累计拦截南导堤越堤沙量的 92%。基本完全阻断了越过南导堤段的泥沙补给, 北槽中下段含沙量也有所减小, 北槽涨落潮流方向更加归顺, 进一步改善了航道回淤条件, 降低了航道回淤量; 北槽航道(B—Z 单元)加高完善工程工后 2021 年常态回淤量为 4 171 万 m^3 , 与先期工程完工后、加高完善工程开工前 2017—2019 年常态回淤量平均 4 419 万 m^3 相比, 年均常态回淤量降低约 248 万 m^3 , 降幅约 5.6%, 叠加先期工程原减淤幅度 17.4%, 加高完善工程后的减淤幅度超过了预期 15.6% 的目标。

5 结论

1) 南坝田挡沙堤加高先期工程实施后, 南导堤涨潮越堤水沙显著减少, 降低了北槽深水航道的泥沙补给, 北槽含沙量水平明显降低; 工程改进了北槽内水沙环境, 减小航道南侧由南向北的横向水沙运动; 改善北槽内水流环境, 归顺了涨落潮流方向; 改善航道回淤条件, 降低了航道回淤量; 航道减淤幅度超过预期的 10% 目标。

(下转第 203 页)