

· 航道及通航建筑物 ·



长江口 12.5 m 深水航道回淤变化 及其影响因素 *

杨春松¹, 左书华², 谢华亮², 杨 华², 韩志远²

(1. 国家发展与改革委员会国家投资项目评审中心, 北京 100037;

2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 港口水工建筑技术国家工程研究中心,
工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

摘要: 基于 2010—2018 年长江口 12.5 m 深水航道回淤、水文、泥沙、地形资料, 对航道回淤变化及影响因素进行分析。结果表明: 1) 长江口 12.5 m 深水航道常态回淤量大, 年际间存在波动, 多年平均年常态回淤量约为 6 500 万 m^3 , 2012 年后总体呈减小趋势, 目前基本稳定在 5 000 万 m^3 , 年回淤强度约 1.3 m/a; 2) 回淤量与回淤强度具有明显的时空分布特征, 即洪枯季分布不均、航道中段回淤集中; 3) 影响航道回淤时空分布的因素主要包括洪枯季泥沙来源和输沙强度、水沙盐结构和泥沙落淤条件、北槽中段水沙盐结构及滩槽泥沙交换能力等。对于北槽中段航道而言, 主要受南导堤越堤泥沙影响较大。4) 年际回淤变化总体呈减小趋势, 其中南港—圆圆沙航道与滩槽高差的缩小和上游底沙输沙量的减少有关; 北槽航道则是由于南坝田挡沙堤加高工程的实施有效改善了北槽内水沙环境, 其实测减淤幅度为 17.6%。

关键词: 长江口深水航道; 北槽; 加高工程; 南坝田拦沙堤; 回淤量

中图分类号: U 611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0077-07

Siltation change and influencing factors of 12.5 m deep-water channel of Yangtze Estuary

YANG Chun-song¹, ZUO Shu-hua², XIE Hua-liang², YANG Hua², HAN Zhi-yuan²

(1. National Investment Project Evaluation Center, National Development and Reform Commission, Beijing 100037, China;

2. Key Laboratory of Engineering Sediment, National Engineering Research Center of Port Hydraulic Construction Technology,

Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering of Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: Based on the data of normal siltation, hydrology, sediment, and topography in the 12.5 m deep-water channel of the Yangtze Estuary from 2010 to 2018, this paper analyzes the siltation changes and influencing factors of the channel. The results show that: 1) The normal siltation volume of the Yangtze Estuary is large and fluctuates every year. The average annual normal siltation volume is about 65 million m^3 . In addition, the volume gradually decreases after 2012 and is currently stable at about 50 million m^3 , with an annual siltation intensity of about 1.3 m/a; 2) Siltation volume and intensity show obvious spatial and temporal distribution characteristics, which are reflected by uneven distribution in flood and dry seasons and massive siltation in the middle of the channel; 3) Factors affecting the spatial and temporal distribution of channel siltation mainly include the sediment source and sediment transport intensity, structures of water, sediment, and salt, and sediment deposition conditions in flood and dry seasons, as well as structures of water, sediment, and salt and sediment exchange capacity of shoal and passage in the middle channel of the North Passage. Furthermore, the middle channel of the North Passage is mainly

收稿日期: 2022-03-17

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB1600605); 交通运输部交通科技建设重点项目

作者简介: 杨春松(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事交通水运工程和水利工程咨询评估与研究工作。

affected by the sediment over the south dike; 4) The inter-annual siltation change generally shows a decreasing trend. Specifically, the south channel to the Yuanyuan shoal section is related to the decrease in altitude difference between the beach and passage and the reduction of upstream sediment transport volume. For the North Passage channel, the project of heightening the sediment barrier in the south dam field has effectively improved its water and sediment environment, and the siltation is reduced by 17.6%.

Keywords: deep-water channel of Yangtze Estuary; North Passage; heightening project; sediment barrier in south dam field; siltation volume

长江河口是中国第一大河口，三级分汊、四口入海，泥沙运动特性复杂，在河口发育着广阔的拦门沙浅滩，是长江黄金水道的咽喉之地。为此，众多学者对长江河口拦门沙、最大浑浊带水沙运动及形成机理、航道回淤等多方面进行了研究^[1-4]。在基本掌握河口航道演变规律的基础上，自1998年起，按照“一次规划、分期建设、分期见效”的原则，分阶段实施了长江口深水航道治理工程。

长江口12.5 m深水航道于2010年正式开通，全长92.2 km，自上而下可分为南港段、圆圆沙段、北槽段及口外段，其中北槽段范围为W2~W4（疏浚单元B~X），长度47 km，见图1。自开通

以来，深水航道取得多项创新成果^[5-6]和良好的经济、社会效益，但航道回淤量大、时空分布高度集中^[7-8]现象突出，且造成航道水深维护压力大、疏浚费用投入高等问题。为实现长江口深水航道的可持续发展，提出减淤工程方案：加高南导堤（或南坝田挡沙堤）中下段堤线高程，减少泥沙来源与北槽中下段横向水流的影响。首期工程位于S4~S9丁坝坝田，在现有南坝田挡沙堤基础上加高S4~S8区段至3.5 m，并延长至S9丁坝。该工程全长约23.8 km，其中S4~S8为加高段，长19.2 km，于2016年7月完工；S8~S9为新建段，长4.6 km，于2016年12月底完工。

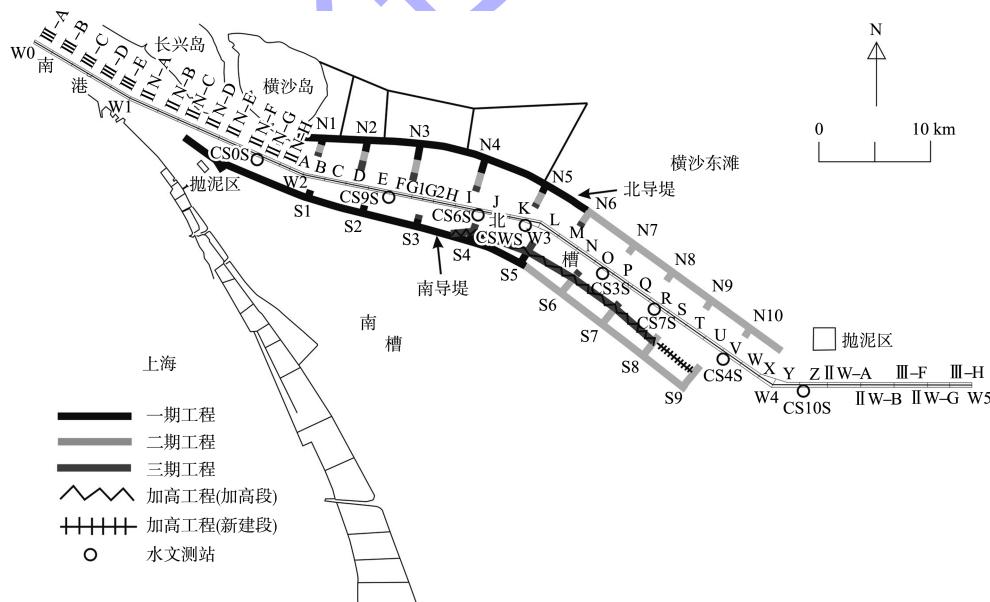


图1 长江口12.5 m深水航道工程及南坝田挡沙堤加高工程布置

本文在系统收集长江口12.5 m深水航道南坝田挡沙堤加高工程（简称“加高工程”）实施前后相关边界条件、地形、水文、航道回淤资料等基础上，分析长江口深水航道回淤变化规律、加高工

程减淤效果及影响因素，旨在进一步加深对长江口河槽演变规律和航道回淤变化规律的认识，为河口航道维护管理与治理开发提供技术参考，并进一步丰富和促进河口海岸学的发展。

1 区域概况

长江口是中等强度的潮汐河口, 主要受东海前进波影响, 口外基本为正规半日潮, 口内为非正规浅海半日潮, 北槽中潮位站多年平均潮差 2.63 m。长江口受流域来水来沙影响明显, 年内具有明显的季节性变化特征, 6—11 月为洪水期, 其径流量约占年径流总量的 72%, 输沙量约占年输沙总量的 85%。

多年来长江口北槽洪季落潮分流比总体保持在 42.0%~43.8%, 分沙比与分流比趋势基本相同, 但波动相对较大, 波动区间在 23.4%~43.0%。

长江口主槽水域往复流明显, 两侧浅滩呈现出一定旋转流特点, 落潮流速大于涨潮流速。北槽河段内涨、落潮流均沿深槽方向呈往复运动, 大潮流速大于小潮流速, 大潮涨落潮平均流速在 1.0 m/s 以上, 小潮一般小于 0.5 m/s。由于洪季径流量大, 北槽洪季落潮流速普遍大于枯季。北槽盐淡水混合为缓混合型, 但在洪季小潮和枯季大潮时分别存在弱混合和强混合现象。北槽内的波浪以风浪为主, 平均波高 1.0 m。大风浪主要出现在冬季北方寒潮来袭和夏季台风入侵时, 最大波高可达 5~6 m。根据近 10 a 来台风资料显示, 2011 年以来有 20 多次台风和寒潮过程影响长江口, 平均每年 2~3 次。

长江口不同河段底质特征差异较大, 以细砂、粉砂质砂、砂质粉砂、粉砂和黏土质粉砂为主; 南港、圆圆沙河段主要以粗颗粒为主, 北槽河段主要以黏土质粉砂和粉砂为主, 中值粒径在 0.03~0.10 mm, 北槽中段颗粒较上下段粗。

2 研究方法

长江口 12.5 m 深水航道沿纵向划分为多个长度 2 km 的疏浚单元, 名称分别为南港段(III-A—IIN-A 单元)、圆圆沙段(IIN-B—A 单元)、北槽段(B—Z 单元)与口外段(IIW-A—III-I 单元)4 个区段, 各区段特征参数见表 1。各疏浚单元按横向位置又划分为槽南、槽北和槽中 3 个分带。根据每月疏浚船的船载量和航道水深变化, 得到航道各

疏浚单元逐月的回淤量。在此基础上, 计算各航道单元年回淤强度 P_i :

$$P_i = \frac{Q_i}{A_i} \quad (1)$$

式中: Q_i 为航道第 i 个疏浚单元的年回淤量(m^3/a); A_i 为第 i 个航道单元的面积(m^2)。

表 1 长江口 12.5 m 深水航道分段特征参数

区段	长度/km	宽度/m	航道单元数量	航道单元编号
南港航道	12.7	350	6	III-A—IIN-A
圆圆沙航道	14.3	350	9	IIN-B—A
北槽航道	52.2	350	27	B—Z
口外航道	13.0	400	5	IIW-A—III-I

长江口 12.5 m 深水航道于 2010 年 3 月贯通以来, 根据河势调整和工程边界等情况, 航道回淤期分为 3 个阶段: 1) 2010—2014 年: 三期工程后北槽河床调整期; 2) 2015—2016 年 6 月: 在河床基本稳定基础上, 航道维护疏浚管理及工艺优化时期; 3) 2016 年 7 月以后: 在前述河床稳定、维护疏浚管理及工艺优化的基础上, 加高工程效果发挥期。

本文采用 2010—2018 年常态回淤量值(剔除各年台风、寒潮、大浪引起的非常态回淤量后的回淤量)进行分析, 从理论上更能反映航道回淤规律。

3 结果分析

3.1 全航道回淤特征及变化

3.1.1 总体特征

图 2 为 2010—2018 年长江口 12.5 m 深水航道每年的常态回淤量。从结果看, 2010—2018 年深水航道平均年常态回淤量约 6 500 万 m^3 。2010—2012 年回淤量呈增大趋势, 2012 年达到峰值, 其后逐年减少, 至 2018 年降至 5 000 万 m^3 以下。总的来说, 长江口 12.5 m 深水航道常态回淤量大, 年际间存在波动变化, 2012 年后总体呈减小趋势, 目前基本稳定在 5 000 万 m^3 左右。同时, 回淤强度和回淤量变化特征基本一致, 总体呈现下降的年际变化特征。其中 2010—2012 年回淤强度略有增大, 2013—2016 年逐年减小, 2017—2018 年相

当。按照回淤3个时期划分,全航道年回淤强度2010—2014年为2.1 m/a,2015—2016年为1.5 m/a,2017—2018年为1.3 m/a。

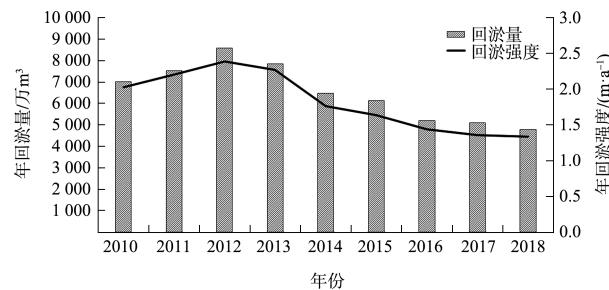


图2 年回淤量与回淤强度年际分布

3.1.2 季节分布

长江口12.5 m深水航道常态回淤量存在明显的季节性变化,洪季(6—11月)一直是航道回淤的主要时期,其中2010—2018年洪季常态回淤量在3 971万~6 227万m³,占全年回淤量的80%;枯季(12—次年5月)常态回淤量在374万~1 792万m³,占比仅为20%。

3.1.3 空间分布

1)纵向分布。长江口12.5 m深水航道回淤量沿程分布极不均匀,其中北槽航道为全航道回淤的主要区段,多年平均常态回淤量为5 261万m³(2010—2018年),占全航道回淤量的80.6%,而南港、圆圆沙和口外段航道回淤占比分别为5.0%、13.9%和0.4%。

回淤强度总体分布规律与回淤量基本一致。航道沿程有2个明显的峰值区(图3),其中上游回淤的峰值区位于A单元以上的南港—圆圆沙航道段,下游回淤的峰值区主要位于H—P疏浚单元之间的北槽中下段航道,年回淤强度均大于2 m/a。然而,南港—圆圆沙航道回淤年际间持续下降,回淤峰值趋于消失。北槽中下段仍是主要的回淤峰值区段,2015—2016年与2010—2014年相比,回淤峰值略有降低,位置基本未变;但2016—2017年较之前回淤峰值有所下降,且回淤部位整体向下游移动。

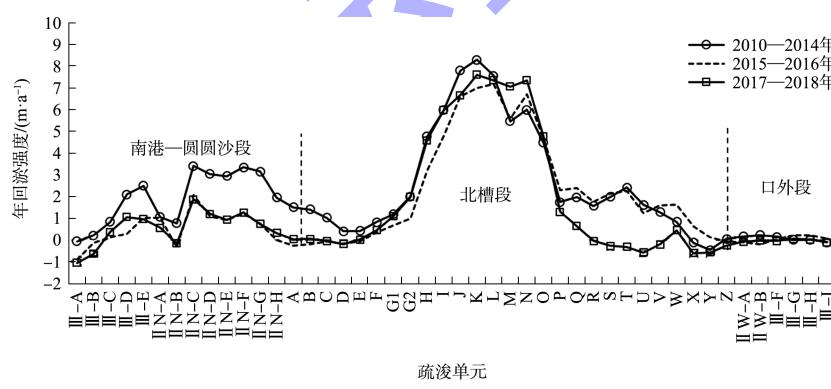


图3 年回淤强度沿程分布

2)横向分布。长江口12.5 m深水航道回淤在横向分布上不尽相同。在南港—圆圆沙段航道北侧回淤总体较南侧大,而北槽段航道南侧回淤总体大于北侧,尤其是北槽中段航道南侧回淤明显大于北侧,其中2016年大于北侧988万m³,2017年大于北侧978万m³。

2010—2013年航道南北回淤差异比一直处于上升趋势,2014—2016年基本稳定,2017年略有上扬。南北侧回淤差异可能与南北边滩的地形调整有关。

3.2 北槽航道回淤特征及变化

北槽航道始于疏浚单元B,终至疏浚单元Z,是长江口12.5 m深水航道历程最长的区段,也是整个航道回淤的主要区段。从统计结果看(图4),北槽航道2010—2012年常态回淤量处于上升趋势,2012年达到峰值6 915万m³,随后有所下降;2014—2015年总体稳定在5 400万m³左右;减淤工程实施后,2016—2018年均在5 000万m³以下。

北槽航道多年平均回淤强度为2.5 m/a,2012年

最大, 为 3.3 m/a, 其后总体呈减小趋势。

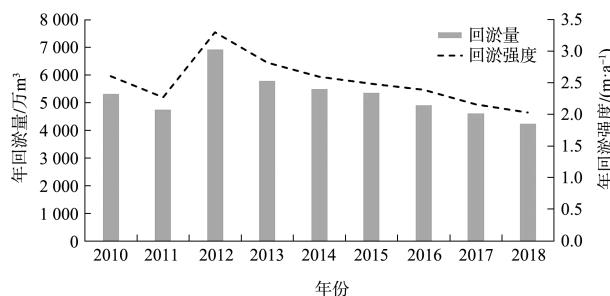


图 4 北槽深水航道回淤量与回淤强度年际分布

3.3 加高工程的减淤效果

常态回淤量是航道回淤的主体, 以此分析对象较为合理。数模研究结果显示^[9]: 加高工程对水沙盐的影响区段主要集中在北槽 B 单元以下至口门附近区段, 对南港—圆圆沙段水沙盐场基本没有影响。因此, 将重点针对北槽 B 单元以下区段 B—III-I 单元(影响段)进行加高工程减淤效果分析。

综合考虑回淤期不同背景和上游流域边界条件等因素, 选择 2015 年为加高工程效果分析的工程前本底。工程后时段分别为 2016 年 7 月—2017 年 6 月、2017 年和 2018 年 3 个完整水文年。

表 2 为工程前后影响区段(B—III-I 单元)年常态回淤量的变化, 结果显示: 与工程前 2015 年回淤量(5 408 万 m³)相比, 工程后 2016 年 7 月—2017 年 6 月减淤量为 872 万 m³, 减淤幅度为 16.1%; 2017 年减淤量为 685 万 m³, 减淤幅度为 12.7%; 2018 年减淤量为 1 303 万 m³, 减淤幅度为 24.1%。总的来说, 工程后与工程前相比, B—III-I 单元年常态回淤量平均值减小了 953 万 m³, 减淤幅度为 17.6%。

表 2 影响区段(B—III-I)年常态回淤量变化幅度

时段	年回淤量/万 m ³	变化量/万 m ³	变化率/%
2016 年 7 月—2017 年 6 月	4 536	-872	-16.1
2017 年 1—12 月	4 723	-685	-12.7
2018 年 1—12 月	4 105	-1 303	-24.1
平均	4 455	-953	-17.6

注: “-”表示减少, “+”表示增加。

4 影响因素分析

4.1 流域来水来沙量

长江口流域来水来沙丰富, 多年来水量变化

不大, 但来沙量呈明显减小趋势, 近 10 a 来沙量总体为 0.72 亿~1.65 亿 t, 仅为以往的 30%。随着来沙量的减少, 南港及圆圆沙河段的含沙量也呈现下降趋势。根据实测资料统计^[10], 南港洪季涨潮和落潮平均含沙量分别减小 32.8% 和 31.0%, 枯季含沙量变不明显。含沙量的减少可以降低悬沙落淤, 也可以提高水流对河槽的冲刷作用, 使得南港—圆圆沙段主槽水深条件得到改善。2010 年以来, 南港主槽整体呈冲刷态势(图 5), 航道的滩槽高差缩小, 维护条件得到改善; 2013 年之后, 南港 12.5 m 主槽基本覆盖航道, 使得该段航道回淤条件得到改善。

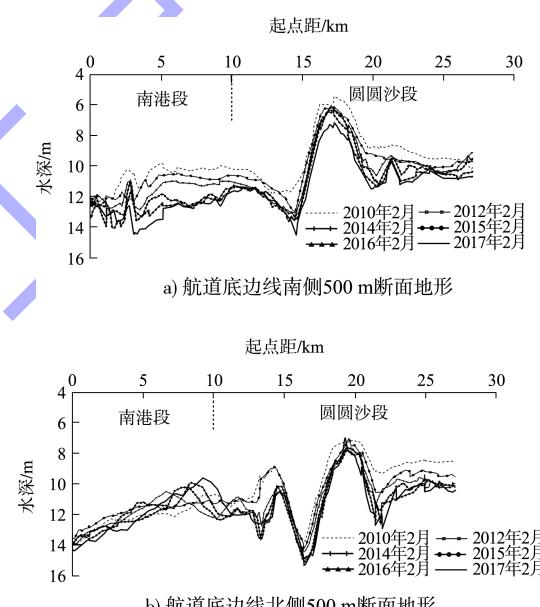


图 5 南港—圆圆沙航道南、北边滩沿程水深变化

流域来沙量减少对最大浑浊带以上的南港河段的航道回淤的有利影响已经初步显现, 但对处于河口最大浑浊带区段的北槽航道, 该因素的影响尚不明显。首先是因为流域来沙减少对拦门沙河段含沙量水平目前基本没有造成趋势性变化, 再者北槽深水航道回淤以悬沙落淤为主。

4.2 回淤量时空分布

由前述内容可知, 长江口 12.5 m 深水航道存在着明显的时空分布特征: 1) 在时间上, 洪季回淤明显大于枯季, 主要在于泥沙来源及输沙强度、水沙结构和泥沙落淤条件的差异; 2) 在纵向上, 北槽中下段回淤占全航道比例 60% 以上, 是由北

槽中段所具有的水沙盐结构(即滞流点、滞沙点与盐水楔等作用)、滩槽泥沙交换强等决定的^[11];3)在横向,北槽航道南侧回淤总体较北侧大。受上下口涨落潮双向输沙的影响,北槽内泥沙富集、环境复杂,同时北堤中下段、南堤在中潮位时可以过水,南北导堤的越堤水沙也可以对北槽内产生影响,其中对南导堤越堤泥沙影响最大。洪季南导堤越堤含沙量是北槽上口和下口含沙量的1.7~2.5倍,越堤输沙量是其2.3~2.6倍。另外,北槽中段具有特殊水流结构,双导堤之间呈弯道形态,弯道段上下游顺直,净输沙和余流基本与航道轴线平行;而在弯段,横向水流和法向余流分量的存在使该段净输沙指向航道,成为航道回淤的直接来源,或者指向滩面,促进坝田回淤。

4.3 涉水工程

近年来,长江口地区水土资源开发利用强度较大,实施了深水航道工程南北导堤工程、通海沙围垦(2007—2010年)、南汇东滩整治工程(2013年至今)、长兴潜堤后方滩涂圈围工程(2015—2017年)等大量涉水工程^[12]。这些人类活动对河口河势及水沙变化等均产生了一定影响,特别是长江口3个分汊口的关键部位相继得到人工控制,徐六泾以下“三级分汊、四口入海”河势格局的稳定性显著增强。南支白茆沙河段治理工程、南北港分汊口河段的新浏河沙护滩、南沙头通道限流潜堤,以及青草沙水源地工程等的实施,稳定了南支和南北港分汊口局部河势。关键涉水工程的建设总体有利于长江口的河势稳定,有利于南港—圆圆沙河段河势稳定及航道维护,但对北槽深水航道的回淤并不产生直接显著影响^[13]。

4.4 加高工程

根据断面实测横向水流结果可知^[14],加高工程实施后,断面上的垂向环流及交换明显减弱,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;加高后的挡沙堤越堤水量呈明显减小趋势,与2011—2013年平均值相比减小

了67%,北槽中下段涨、落潮水流更加归顺,流向与航道夹角减小,特别是涨潮阶段北槽内水体横向运动减弱显著,为加高工程前的46%~73%,见图6a)。

加高工程的实施使挡沙堤越堤沙量平均减少75%,降低了北槽泥沙补给,改善了北槽内泥沙环境,见图6b)。此外,定点实测与坐底观测均表明:工程后北槽中、下段含沙量明显减小,定点实测含沙量平均减小20%;近底层含沙量大幅减小。因此,可以得出,加高工程改善了北槽内水沙环境,对北槽航道减淤起到积极作用。由于不同时期边界条件的差异,不同时期减淤工程的减淤效果有所不同;在工程前后基本相同的边界条件下(即2015年与2017年上游年均流量基本相同,固边界相同,均实施了疏浚工艺和优化管理),年减淤效果在12%左右,可以认为是单纯加高工程的作用。



a) 越堤水量



图6 工程前后南导堤越水越沙量对比

5 结论

1)长江口12.5 m深水航道常态回淤量大,年际间存在波动,多年平均年常态回淤量约为6 500万m³,2012年后总体呈减小趋势,目前基

本稳定在 5 000 万 m^3 。航道年回淤强度和回淤量变化特征基本一致, 总体呈现下降的年际变化特征, 全航道年回淤强度 2010—2014 年为 2.1 m/a , 2015—2016 年为 1.5 m/a , 2017—2018 年为 1.3 m/a 。

2) 回淤量与回淤强度具有明显的时空分布特征, 即洪枯季分布不均、航道中段回淤集中。每年 6—11 月的洪季是航道回淤的主要时期, 占全年回淤量的 80%; 北槽中下航道是全航道主要回淤区域, 占全航道回淤量的 60%以上。

3) 影响航道回淤时空分布的因素主要包括洪枯季泥沙来源和输沙强度、水沙盐结构和泥沙落淤条件、北槽中段水沙盐结构及滩槽泥沙交换能力等。对于北槽中段航道而言, 主要受南导堤越堤泥沙影响较大。

4) 年际回淤变化总体呈减小趋势, 其中南港—圆圆沙航道与滩槽高差的缩小和上游底沙输沙量的减少有关; 北槽航道则是由于南坝田挡沙堤加高工程的实施有效改善了北槽内水沙环境, 其实测减淤幅度为 17.6%。

致谢: 交通运输部长江口航道管理局和上海河口海岸研究中心对本文的数据支持, 在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 沈焕庭, 潘定安. 长江河口最大浑浊带 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 2001.
- [2] 贺松林, 孙介民. 长江河口最大浑浊带的悬沙输移特征 [J]. 海洋与湖沼, 1996, 27(1): 60-66.

- [3] 沈健, 沈焕庭, 潘定安, 等. 长江河口最大浑浊带水沙输运机制分析 [J]. 地理学报, 1995, 50(5): 411-420.
- [4] 刘杰, 徐志杨, 赵德招, 等. 长江口深水航道(一、二期工程)回淤变化 [J]. 泥沙研究, 2009(2): 22-28.
- [5] 范期锦. 长江口深水航道治理工程的创新 [J]. 中国工程科学, 2004, 6(12): 13-26, 100.
- [6] 交通运输部长江口航道管理局. 长江口深水航道治理工程实践与创新 [M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [7] 左书华, 李松喆, 韩志远, 等. 长江口北槽河槽地形变化及深水航道回淤特征分析 [J]. 水道港口, 2015, 36(1): 1-7.
- [8] 应铭, 季岚, 周海. 长江口北槽 12.5 m 深水航道回淤的物理过程 [J]. 水运工程, 2017(11): 77-85.
- [9] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 长江口南港—北槽深水航道常态回淤原因并行研究总报告 [R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2016.
- [10] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 流域来水来沙量变化对长江口航道的影响研究综合分析报告 [R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2012.
- [11] 金镠, 虞志英, 何青. 深水航道的河势控制和航道回淤问题 [J]. 中国港湾建设, 2012(1): 1-8.
- [12] 韩玉芳, 窦希萍. 长江口综合治理历程及思考 [J]. 海洋工程, 2020, 38(4): 11-18.
- [13] 交通运输部长江口航道管理局. 长江口深水航道治理工程项目自我总结评价报告 [R]. 上海: 交通运输部长江口航道管理局, 2011.
- [14] 上海河口海岸研究中心. 长江口北槽中下段及相邻水域水沙输移特征初步分析报告 [R]. 上海: 上海河口海岸研究中心, 2018.

(本文编辑 王传瑜)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。