

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.02.001

刘红, 黄志扬, 丁健, 等. 挖槽回淤物粒度变化对航道回淤的影响[J]. 水利水运工程学报, 2015(2): 1-8. (LIU Hong, HUANG Zhi-yang, DING Jian, et al. Effect of waterway siltation by bed-material grain-size variation processes[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(2): 1-8.)

## 挖槽回淤物粒度变化对航道回淤的影响

刘红<sup>1,2</sup>, 黄志扬<sup>1</sup>, 丁健<sup>1</sup>, 林娜<sup>1</sup>

(1. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120; 2. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 根据吕四海域地形、水文、泥沙和浅层柱状样观测资料的分析, 研究航道浚深后回淤物的粒度变化过程及其对航道回淤的影响。研究表明, 航道浚深后, 航槽内底质呈明显粗化现象, 底质中值粒径由浚前的 0.045~0.071 mm 增加至浚后的 0.128~0.135 mm, 0.005~0.062 mm 的细颗粒组分由 36.0% 减小至 8.9%, 0.075~0.250 mm 粗颗粒组分由 37.9% 增加至 78.2%, 疏浚船舶的水力分选是泥沙组分变化的主要因素。吕四海域航道泥沙回淤形式为悬沙沉降和底沙推移共同作用的结果, 夏季 7—8 月试挖槽内回淤强度较大, 回淤泥沙颗粒较细, 冬季 10—12 月回淤强度较小, 回淤泥沙颗粒较粗。根据粒度谱计算结果, 正常天条件下悬沙沉降对航道回淤的贡献率约为 15%, 夏季贡献率高于冬季, 大风天可增至 30%~40%。回淤贡献率的计算方法可为类似工程的回淤研究提供借鉴和参考。

**关键词:** 吕四海域; 试挖槽; 航道回淤; 悬沙沉降; 底质粗化; 粒度谱

**中图分类号:** U657.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2015)02-0001-08

试挖槽回淤观测是航道回淤研究的重要手段之一。国内不少重大航道工程建设前均进行了试挖观测研究, 如长江口深水航道<sup>[1]</sup>、杭州湾东(西)航道<sup>[2]</sup>、连云港 30 万吨级航道<sup>[3]</sup>等, 这些区域的试挖工程均为航道设计提供了基础资料和技术支撑。随着江苏沿海经济社会的发展, 地处辐射沙洲区的大丰、洋口和吕四进港航道均需进行扩建, 现有的航道水深不足, 需疏浚增深以满足港口发展的需要。为减少航道建设的风险, 有必要开展试挖观测研究工作, 为苏北辐射沙洲区航道的开发建设提供技术支撑。

泥沙的粒度特征是研究海岸泥沙输移特性和沉积动力机理的基础, 也是分析航道泥沙回淤的重要手段之一。本文基于吕四试挖槽附近水沙、底质和浅层柱样资料的分析, 探讨航道浚深后的底质粒度变化过程及其对航道回淤的影响, 为辐射沙洲海域航道回淤研究提供重要的科学依据; 采用改进的粒度谱计算方法研究悬沙沉降对航道回淤的贡献率, 丰富了航道工程学和泥沙运动力学的学科内容。

### 1 研究区概况

江苏吕四海域处于辐射状沙洲南翼, 其历史演变受辐射沙洲的发展过程控制, 古长江和古黄河的泥沙是其形成的物质基础。早在全新世初期, 长江曾在现辐射沙洲中部弼港附近入海, 古长江泥沙是早期苏北辐射沙洲形成的物质基础, 吕四岸外逐渐有明沙出露, 岸线向海推进。公元 1128—1855 年间黄河在苏北入海为吕四海岸带来巨量泥沙, 因而, 黄河泥沙成为苏北辐射沙洲形成的主要物质来源, 在此期间吕四岸外沙洲进

收稿日期: 2014-07-20

基金项目: 河口海岸学国家重点实验室开放基金项目(SKLEC-KF201201)

作者简介: 刘红(1978-), 男, 湖北宜昌人, 高级工程师, 博士, 主要从事河口海岸水动力和工程泥沙研究。

E-mail: liuhongshiw@163.com

一步淤高、岸滩淤涨<sup>[4-5]</sup>。1855年黄河北归后,长江口也逐渐南偏,长江大部分入海泥沙向南输运进入浙闽沿海,从而使吕四海岸失去了大量的泥沙来源,海岸整体处于侵蚀环境。

苏北辐射沙洲弼港以北主要受黄海潮波支配,波峰由北向南,沿岸潮流呈 NNW-SSE 向往复流;弼港以南受太平洋潮波控制,波峰由南向北,沿岸潮流为 NW-SE 向往复流,涨潮时潮流向弼港一带辐聚,落潮时由此向外辐散<sup>[6]</sup>。由于沿岸涨潮流速一般大于落潮流速,有利于辐射沙洲外缘泥沙向中部集聚。因此,以弼港为中心,“北沙南移”和“南沙北移”是苏北沿岸泥沙运动的总趋势。小庙洪水道总体呈西北-东南走向,与苏北辐射沙洲中部其他大型潮汐水道不同的是,小庙洪水道尾部并不与相邻的潮汐通道连通,是一个相对独立的潮汐水道。小庙洪水道是苏北辐射沙洲最南缘的一条大型潮汐水道,总长 38 km,口门宽 15 km,水道中段宽约 4.5 km,10 m 等深线基本贯通。

吕四近海潮流主要受东海前进波的控制,为正规半日潮。潮流在潮汐水道内呈往复运动,大致与地形的走向一致,潮流旋转方向大部分为顺时针方向;离岸较远的东部海域,潮流旋转性较强(图 1)。

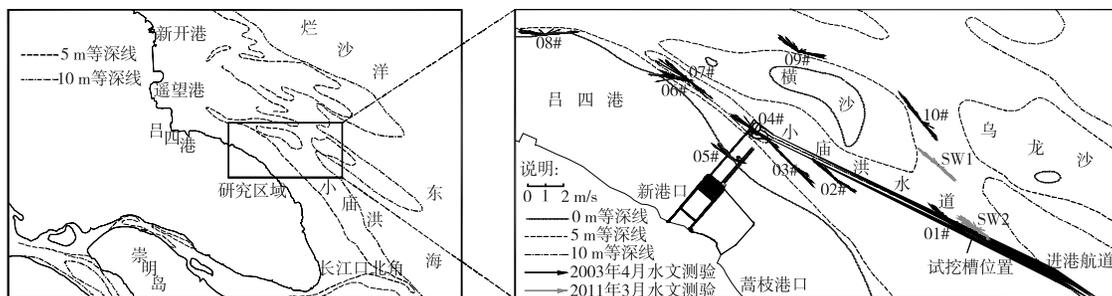


图 1 研究区概况及流速矢量

Fig. 1 Sketch of study area and current velocity vector

试挖槽位于横沙和乌龙沙水道南侧、航道水深最浅区段,试挖槽长 1 500 m,底宽 100 m,浚前水深 8.18 m(水深基面为当地理论最低潮面),浚后水深 10.41 m,平均挖泥厚度 2.23 m,横向设计边坡 1:8,纵向设计边坡 1:25,走向与航道轴线保持一致(图 1)。试挖槽采用耙吸挖泥船进行疏浚施工,工程于 2010 年 11 月 25 日开工,12 月 4 日竣工。试挖槽回淤监测从 2010 年 12 月开始至 2011 年 12 月结束,总历时 1 年,监测内容主要包括水下地形测量、水文泥沙测验、底质取样、回淤物原状土取样以及大风天座底式观测等。

## 2 研究资料及方法

### 2.1 地形监测和底质采样

试挖槽开挖后开展了为期 1 年的回淤地形监测<sup>[7]</sup>,浚后第 1 月观测 2 次,浚后第 2~4 月为每月 1 次,浚后 5~12 月每 2 月 1 次,大风前后加测。

试挖槽回淤观测期间于 2010 年 11 月、2010 年 12 月、2011 年 1 月和 2011 年 7 月共采集底质样品 4 次。监测期间有 3 个时期风浪相对较大:①2010 年 12 月 22 日至 2011 年 1 月 19 日期间经历了 2 次寒潮大风过程;②2011 年 6 月 25—26 日经历了“米雷”台风;③2011 年 8 月 7 日遭遇强台风“梅花”。

### 2.2 水沙观测

吕四海域大范围水沙观测资料由长江口水文水资源勘测局于 2003 年 4 月观测所得;试挖槽附近的 SW1 和 SW2 站由中交上海航道勘察设计研究院有限公司于 2011 年 3 月观测所得;大风天近底三角架水沙观测资料由上海河口海岸科学研究中心于 2011 年 1 月观测所得。

流速流向采用直读式海流计进行施测。悬移质水样采用横式采水器采集,含沙量采用烘干法称重法进行分析,并在涨落急、涨落憩时段采集悬沙样做颗粒分析。底质采用蚌式采样器采集。泥沙样品经过洗盐和分散处理后,采用英国 MASTER SIZER 2000 型激光粒度仪进行泥沙粒度分析。

### 2.3 柱状样采样

2011年12月24日地形观测期间,利用薄壁取样器在试挖槽内中部采集一个浅层柱状样,密封保存后运回实验室做泥沙颗粒分析,分析试挖槽内回淤物的粒度特征。采集的浅层柱状样长约55 cm,沿柱状样纵向剖开观察其沉积层理,按照每5 cm间隔对柱状样进行分割取样,各层取样的泥沙混合均匀后,进行粒度分析。

### 2.4 回淤贡献率计算

2010年提出了粒度谱计算方法的理论框架,并利用该方法分析了长江口及其邻近海域近底层悬沙和表层沉积物的交换过程,取得满意的成果<sup>[8-9]</sup>。因此,本文尝试对粒度谱计算方法进行改进,用于分析悬浮泥沙沉降对航道回淤的贡献率 $p$ :

$$G = pG_s + (1 - p)G_b \quad (1)$$

式中: $G, G_s, G_b$ 分别为试挖槽内淤积物、试挖槽附近悬沙和试挖槽附近滩面底质的粒度分布。

## 3 结果与分析

### 3.1 水沙特征分析

根据2003年4月和2011年3月进行的同步水文测验结果分析,潮流往复流性质比较明显,各测线的涨、落潮流路受水下地形的影响,涨潮时流向西北,落潮时流向东南。从涨、落潮平均流速统计(表1)可知,一般深槽区流速较大,浅滩区(05#和06#垂线)流速较小。小庙洪水道内大潮流速大于小潮流速,大潮期除了04#、08#和09#垂线外,各垂线涨潮平均流速大于落潮平均流速;小潮期均为涨潮平均流速大于落潮平均流速。

表1 涨、落潮平均流速和含沙量

Tab. 1 Mean current velocity and suspended sediment concentration (SSC) during flood and ebb tide

潮型	垂线号	涨潮			落潮		
		流速/(m·s <sup>-1</sup> )	流向/(°)	含沙量/(kg·m <sup>-3</sup> )	流速/(m·s <sup>-1</sup> )	流向/(°)	含沙量/(kg·m <sup>-3</sup> )
大潮	01#	0.93	314	0.30	0.82	122	0.32
	02#	0.91	312	0.54	0.75	123	0.62
	03#	0.94	314	0.49	0.79	131	0.76
	04#	0.91	306	0.52	0.97	124	0.64
	05#	0.77	314	1.13	0.44	103	1.25
	06#	0.59	291	0.88	0.48	95	1.00
	07#	1.03	308	0.72	0.85	127	0.90
	08#	0.79	280	0.51	1.00	81	0.35
	09#	0.87	310	0.32	0.93	98	0.40
	10#	1.19	323	0.33	0.73	135	0.42
	SW1	0.87	310	0.42	0.76	132	0.38
	SW2	0.71	303	0.35	0.56	128	0.32
小潮	01#	0.28	331	0.26	0.20	129	0.19
	02#	0.26	316	0.22	0.18	131	0.22
	03#	0.26	310	0.20	0.17	126	0.20
	04#	0.22	306	0.12	0.18	125	0.13
	05#	0.31	317	0.36	0.20	107	0.33
	06#	0.18	288	0.25	0.15	113	0.20
	07#	0.33	293	0.19	0.23	121	0.15
	08#	0.24	271	0.09	0.22	101	0.09
	09#	0.26	319	0.12	0.21	114	0.08
	10#	0.28	324	0.13	0.2	139	0.14
	SW1	0.37	312	0.36	0.33	133	0.33
	SW2	0.34	307	0.29	0.26	123	0.26

航道水域平均含沙量总体趋势由西到东逐渐减小,深槽区含沙量明显小于浅滩区含沙量。以大潮为例,浅滩区 05#站涨落潮平均含沙量分别为  $1.13$  和  $1.25 \text{ kg/m}^3$ ,深槽区 02#站涨落潮平均含沙量分别为  $0.54$  和  $0.62 \text{ kg/m}^3$ ,深槽区含沙量仅为浅滩含沙量的一半。一般涨、落急后 2~3 h 近底层出现较高含沙量,含沙量垂向梯度较大;其他时段含沙量相对较小,含沙量垂向梯度也小(图 2)。

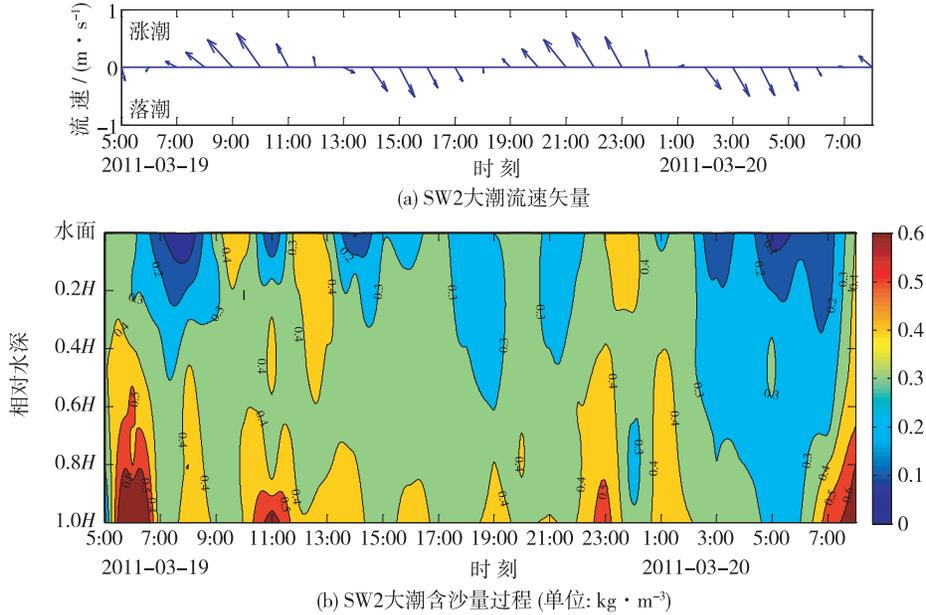


图 2 2011年3月SW2站垂线平均流速矢量和含沙量过程(大潮)

Fig. 2 Processes of vertical averaged current velocity vector and SSC at the station of SW2 in March 2011

夏季有一股从长江口沿苏北海岸北上的近岸水流,岸外深泓的涨潮单宽流量和输沙量均大于落潮,沿岸泥沙净向北移<sup>[6]</sup>。根据 2003 年 4 月和 2011 年 3 月水文测验资料对小庙洪水道 12 条垂线单宽输沙量的分析,大、小潮均以涨潮输沙占优势(图 3),说明小庙洪水道以口外来沙为主。据万新宁等<sup>[10]</sup>的研究,有 9%左右( $0.35 \times 10^8 \text{ t/a}$ )的长江入海泥沙向北进入江苏海域,向辐射沙洲南侧沙体供沙。因此,根据上述分析可知,小庙洪水道的泥沙主要来自于长江口沿苏北海岸的输沙。

### 3.2 回淤观测分析

根据吕四试挖槽回淤研究分析成果<sup>[11]</sup>,从观测期槽内地形冲淤变化来看,试挖槽全年累计淤积厚度约  $1.02 \text{ m}$ ,其中正常天气情况下的年回淤强度为  $0.74 \text{ m/a}$ ,年回淤率约 33.2%;夏季 7—8 月试挖槽内回淤强度较大,冬季 10—12 月试挖槽内回淤强度较小。监测期间工程海域遭遇了 5~10 年一遇的梅花台风,大风期间试挖槽回淤厚度约  $0.28 \text{ m}$ ,比正常天气情况回淤强度大,但未出现明显的“骤淤”现象。

### 3.3 试挖槽及其附近底质粒度变化特征

在正常天气情况下,试挖槽海域悬沙中值粒径约  $0.0081 \sim 0.0087 \text{ mm}$ ,大风天近底悬沙中值粒径可高达  $0.04 \text{ mm}$ 。吕四海域底质中值粒径约  $0.013 \sim 0.258 \text{ mm}$ ,呈现“浅滩粗、深槽细”的分布特征。一般潮流沙脊上底质中值粒径较大,横沙及乌龙沙沙体外缘由于受潮流和风浪淘洗,底质中值粒径较大,横沙 7 m 以浅

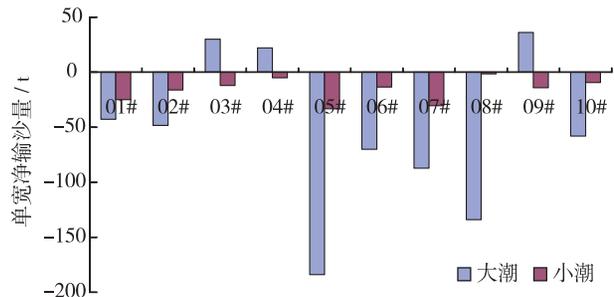


图 3 2003年4月各垂线单宽净泄沙量(正值表示落潮输沙为主,负值表示涨潮输沙为主)

Fig. 3 Net sediment discharge per width in April 2003 (positive values express as sediment discharge during ebb tide, negative values express as sediment discharge during flood tide)

底质中值粒径约 0.161 2~0.209 6 mm,属于细砂。深槽附近底质中值粒径较小,试挖槽周围 7 m 以深水域泥沙中值粒径在 0.012 5~0.087 3 mm 之间,主要为粉质黏土或粉土,含少量粉砂,其中底质中粒径小于 0.031 mm 的黏性组分含量平均为 53.0%,小于 0.075 mm 的含量平均为 73.0%,说明深槽中主要以黏性细颗粒泥沙为主,兼有部分粗颗粒泥沙。

最后一次回淤监测期间,在试挖槽中部取得 1 个浅层柱状样,长约 55 cm。结合槽内淤积厚度的统计(图 4),2011 年 7 月 4 日至 12 月 24 日试挖槽回淤为 58 cm,因此,浅层柱状样基本反映了这段时间回淤物的变化过程。2010 年 11 月至 2011 年 7 月之前进行了 4 次底质采样,上述数据综合起来就构建了包含“浚前-浚后-回淤”过程的试挖槽内淤积物粒度变化系列(2010 年 11 月至 2011 年 12 月),为航道工程前后航槽底质粒度变化的分析提供了重要的基础资料,也为深入分析航道回淤机理打下坚实的基础。

2010 年 11 月试挖槽工程实施前,床面底质中值粒径约 0.045~0.071 mm,泥沙类型为粉土。试挖槽工程结束后槽内底质变粗,2010 年 12 月槽内底质中值粒径约 0.128~0.135 mm,比工程前增加近 1 倍,底质类型由粉土变为细砂。底质中中值粒径 0.005~0.062 mm 的细颗粒组分由浚前的 36.0%减少至浚后的 8.4%;相应地,0.075~0.25 mm 粗颗粒组分明显增加,组分含量由浚前的 37.9%增加至浚后的 78.2%。

经过近 7 个月的自然淤积后,2011 年 7 月槽内底质中值粒径明显变小,与工程前的底质中值粒径较为接近,而且其粒度分布与工前基本一致。因为试挖槽工程实施后,小庙洪水域水沙环境没有发生根本性变化,因此,槽内回淤物质的粒度组成也基本恢复至工前状况。

根据浅层柱样淤积物粒度分析可知,2011 年 7—12 月回淤物质中值粒径垂向上呈现“粗-细-粗”的变化特征:夏季 7—8 月试挖槽内回淤强度较大,回淤泥沙颗粒相对较细,中值粒径约 0.032~0.062 mm;冬季 10—12 月试挖槽内回淤强度较小,回淤泥沙颗粒相对较粗,中值粒径约 0.060~0.066 mm。

试挖槽内回淤物质粒度分布呈明显的双峰结构,其峰值粒度区间分布在 0.005~0.031 mm 和 0.100~0.250 mm 之间,泥沙粒度组分中小于 0.031 mm 的含量平均为 39.3%,小于 0.075 mm 的含量平均为 63.5%,泥沙类型主要为黏质粉土和砂质粉土。

对柱状样沉积层理的观察表明,在回淤观测期间没有发现具有一定厚度的粉砂或砂质沉积层,也没有出现明显的沉积突变现象,说明深槽两侧沙脊上的粉砂和砂质沉积物对试挖槽内回淤物质的贡献有限。

#### 4 底质粗化机理

现有自航耙吸挖泥船一般都使用高压水射流辅助耙头挖掘,以提高挖掘深度和泥浆浓度,合理布置高压水射流还可降低挖掘阻力,高压射流在挖掘过程中起冲刷、液化和悬浮底部泥沙的作用,对提高施工效率非常明显<sup>[12]</sup>。床面泥沙在疏浚过程中往往伴随明显的水力分选现象,因此,疏浚物具有含水率高、黏粒含量高、强度低的特点<sup>[13]</sup>。

疏浚泥沙水力分选是指疏浚泥沙颗粒在水动力作用下,按粒度、密度或矿物成分的差别发生分别富集的现象。根据高含沙水流运动理论<sup>[14]</sup>,以细粉砂及黏土等细颗粒为主的高含沙水流具有非牛顿流体的性质,一般常看成是宾汉体,随着含沙量的增大,泥沙颗粒之间很快形成絮团结构,黏性急剧增加,颗粒在沉降过程中不因粒径的不同而发生分选。施工过程中,床面泥沙中细颗粒组分被水力冲刷,因其沉降较小、黏性强,往往在近底层悬扬形成较高的泥沙浓度,容易被泥泵吸入泥仓,使得细颗粒泥沙组分含量明显减少。因此,疏浚工程实施后,0.005~0.062 mm 的泥沙颗粒组分由工前的 36%减小至工后的 8.9%。

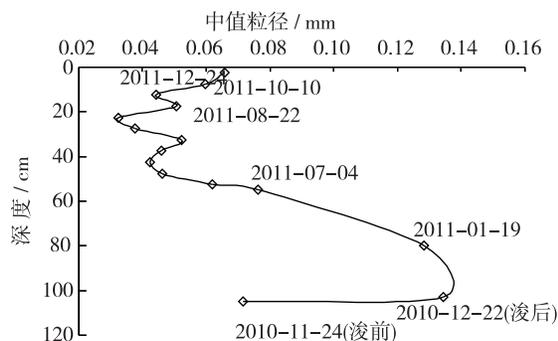


图 4 试挖槽底质中值粒径变化过程

Fig. 4 Variation processes of bed-material median diameter in the trial dredged channel

但是,细砂和中砂等粗颗粒为主的高含沙水流在沉降过程中存在水力分选,其水流属于二相的挟沙水流范畴,泥沙以推移和悬移形式运动<sup>[14]</sup>。床面中 0.075~0.125 mm 粗颗粒组分被水力冲刷后,由于沉速相对较大,该组分泥沙能很快在床面落淤,泥泵吸入量相对较小。以 15℃ 时为例,泥沙粒径分别为 0.01, 0.03, 0.06, 0.08, 0.10, 0.20 和 0.50 mm 时,沉速分别为 0.0055, 0.0495, 0.198, 0.352, 0.54, 1.97 和 6.72 cm/s; 0.1 mm 泥沙沉降速度为 0.03 mm 泥沙的 10 倍左右<sup>[15]</sup>。

在疏浚过程中,航槽内泥沙组分被耙头水力分选而改造,细颗粒泥沙组分一部分被泥泵吸走,一部分在潮流作用下被水流带走;而粗颗粒由于沉速大,易于沉降,在床面相对富集,进而引起航槽内底质“粗化”。这种底质“粗化”现象在虾峙门航道疏浚后也同样存在<sup>[16]</sup>。随着航槽逐步回淤,底质粒度恢复到工前状况。

## 5 悬沙沉降对航道回淤的贡献率

C. Migniot<sup>[17]</sup>指出粒径小于 0.03 mm 的泥沙具有很明显的絮凝作用。长江口泥沙的相关研究<sup>[18]</sup>表明,长江口细颗粒泥沙絮凝的临界粒径约为 0.031 mm。因此,将 0.031 mm 作为划分黏性泥沙和非黏性泥沙的界限,黏性细颗粒泥沙主要以絮团形式在河口输运和沉降,而非黏性泥沙则主要以单颗粒形式运动和沉积。

根据试挖槽附近悬沙粒度分析(图 5),正常天气情况下,近底悬沙中小于 0.031 mm 的黏性组分含量平均为 98.9%,以黏性细颗粒组分为主;大风天气近底悬沙中小于 0.031 mm 的黏性组分含量平均仅为 29.9%,以非黏性泥沙组分为主,悬沙粒径比正常天气情况下的变粗,反映了大风天气条件下潮流沙脊上粗颗粒泥沙在强动力作用下再悬浮进入水体。滩面泥沙中粒径小于 0.031 mm 的黏性组分含量平均为 26.5%,以非黏性泥沙组分为主。根据上述综合分析,工程海域泥沙回淤是悬移质输沙和底沙推移共同作用的结果。

为了解正常天气条件下悬沙沉降对航道回淤的贡献率,采用改进的粒度谱计算方法,以正常天气条件下近底悬沙粒度分布代入式(1)计算悬沙沉降对试挖槽回淤的贡献率(图 6),计算结果表明,正常天气条件下近底悬沙沉降对试挖槽回淤的贡献率约 4%~24.7%,平均为 14.8%,说明航道回淤物中约 15%的组分来自悬沙沉降,且洪季悬沙沉降对回淤的贡献率较大,枯季贡献率较小。上述分析表明,正常天气条件下,水体中泥沙主要随潮流平流输运,悬沙沉降对航道回淤的贡献率较低,悬沙中参与造床的泥沙量较少,因此航道回淤强度也相对较低。

另外,以大风天气条件下近底悬沙粒度分布代入式(1)计算,“米雷”和“梅花”台风期间悬沙沉降对回淤的贡献率分别达 32.4%和 38.9%,说明航道回淤物中约 30%~40%的组分来自悬沙沉降。大风天气条件下滩面上粗颗粒泥沙能在强动力作用下再悬浮进入水体,容易在航道内落淤,悬沙沉降对航道回淤的贡献率增加。由于大风天泥沙颗粒相对较粗,含沙量相对较大,因此,短时间内回淤强度高于正常天气条件下回淤强度。

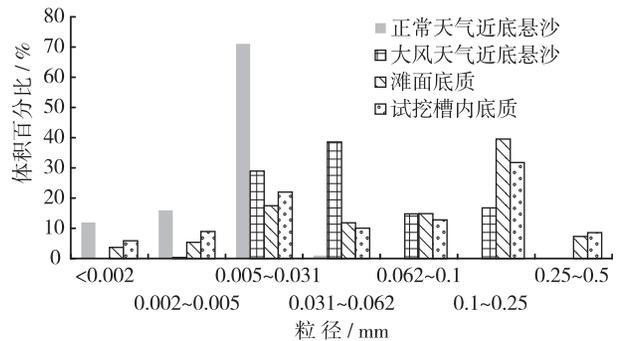


图 5 试挖槽悬沙和底质粒度分布

Fig. 5 Grain size distribution of suspended sediment and bed-materials along the trial dredged channel

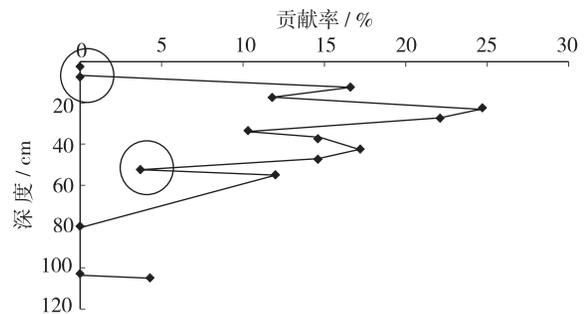


图 6 悬沙沉降对航道回淤的贡献率

Fig. 6 Contribution rate of suspended sediment deposition to the waterway siltation

## 6 结 语

吕四试挖槽浚深后,航槽内底质呈现明显粗化现象,疏浚过程中的水力分选使得床面泥沙组成发生改变,粗颗粒泥沙组分相对富集,引起航槽内底质粗化。随着航槽逐步回淤,底质粒度恢复到工前状况。

吕四海域航道泥沙回淤形式表现为悬移质输沙和底沙推移共同作用,夏季7—8月试挖槽内回淤强度较大,回淤泥沙颗粒较细,冬季10—12月试挖槽内回淤强度较小,回淤泥沙颗粒相对较粗。

根据粒度谱计算成果,正常天气条件下近底悬沙沉降对试挖槽回淤的贡献率约4%~24.7%,平均为14.8%,洪季贡献较大,枯季贡献较小。“米雷”和“梅花”台风期间悬沙沉降对回淤的贡献率分别达32.4%和38.9%,说明大风天气条件下潮流沙脊上粗颗粒泥沙在强动力作用下再悬浮进入水体,悬浮沉降对回淤的贡献增大。

## 参 考 文 献:

- [1] 窦国仁. 长江口深水航道泥沙回淤问题的分析[J]. 水运工程,1999(10):36-39. (DOU Guo-ren. Analysis of sedimentation problems of deep navigation channel in the Yangtze Estuary [J]. Port & Waterway Engineering, 1999(10):36-39. (in Chinese))
- [2] 金鏐,虞志英. 淤泥质海岸挖槽回淤预测的沉积动力学途径——以杭州湾试挖槽为例[J]. 泥沙研究,1999(5):34-43. (JIN Liu, YU Zhi-ying. Sedimentary dynamic approach to predict sedimentation in channels at mud coast —— example of experimental channels in Hangzhou Bay [J]. Journal of Sediment Research, 1999(5):34-43. (in Chinese))
- [3] 应铭,张华,马兴华,等. 连云港港15万吨级航道回淤观测研究[J]. 水运工程,2012(1):143-147. (YING Ming, ZHANG Hua, MA Xing-hua, et al. Observation and analysis of siltation in 150000 DWT channels at Lianyungang port [J]. Port & Waterway Engineering, 2012(1):143-147. (in Chinese))
- [4] 虞志英,陈德昌,金鏐. 江苏北部旧黄河水下三角洲的形成及侵蚀改造[J]. 海洋学报,1986(2):97-106. (YU Zhi-ying, CHEN De-chang, JIN Liu. Formation and erosion transformation of the abandoned Yellow River delta in northern Jiangsu Province [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1986(2):97-106. (in Chinese))
- [5] 叶青超. 试论苏北废黄河三角洲的发育[J]. 地理学报,1986(2):112-122. (YE Qing-chao. On the development of the abandoned Yellow River delta in northern Jiangsu Province [J]. Acta Geographica Sinica, 1986(2):112-122. (in Chinese))
- [6] 沈焕庭. 长江河口物质通量[M]. 北京:海洋出版社,2001:129-130. (SHEN Huan-ting. The material flux in the Yangtze River estuary [M]. Beijing: China Ocean Press, 2001:129-130. (in Chinese))
- [7] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 南通港吕四港区进港航道试验性疏浚工程回淤研究分析[R]. 上海:中交上海航道勘察设计研究院有限公司,2012. (Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd. Silting study on Lvsitrial dredged channel at Nantong port [R]. Shanghai: Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., 2012. (in Chinese))
- [8] LIU H, HE Q, WANG Z B, et al. Dynamics and spatial variability of near-bottom sediment exchange in the Yangtze estuary, China [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, 86(3):322-330.
- [9] 刘红,何青,WELTJE G J,等. 长江入海泥沙的交换和输移过程——兼论泥质区的“泥库”效应[J]. 地理学报,2011(3):291-304. (LIU Hong, HE Qing, WELTJE G J, et al. Sediment exchange and transport processes in the Yangtze River estuary: concurrent discussion on the effects of sediment sink in the muddy area [J]. Acta Geographica Sinica, 2011(3):291-304. (in Chinese))
- [10] 万新宁,李九发,沈焕庭. 长江口外海滨典型断面悬沙通量计算[J]. 泥沙研究,2004(6):64-70. (WAN Xin-ning, LI Jiufa, SHEN Huan-ting. Suspended sediment flux at the typical cross sections in the offshore area of Changjiang estuary [J]. Journal of Sediment Research, 2004(6):64-70. (in Chinese))
- [11] 黄志扬,丁健,刘红,等. 吕四进港航道试挖工程回淤监测研究[J]. 水运工程,2012(12):218-224. (HUANG Zhi-yang, DING Jian, LIU Hong, et al. Observation on siltation in Lvsitrial dredged channel in Nantong port [J]. Port & Waterway Engineering, 2012(12):218-224. (in Chinese))
- [12] 洪国军,王健,林凤. 自航耙吸挖泥船耙头模型试验研究[J]. 中国港湾建设,2008(4):19-22. (HONG Guo-jun, WANG

- Jian, LIN Feng. Model experiments of draghead on training suction hopper dredger [J]. *China Harbour Engineering*, 2008(4): 19-22. (in Chinese))
- [13] 杨瑞敏,徐桂中,丁建文,等. 堆场疏浚泥颗粒分选规律及机理[J]. *东南大学学报:自然科学版*, 2013(3):639-643. (YANG Rui-min, XU Gui-zhong, DING Jian-wen, et al. Grain sorting laws and mechanisms in reclaimed land of dredged slurries[J]. *Journal of Southeast University ( Natural Science Edition)*, 2013(3): 639-643. (in Chinese))
- [14] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社,1983:439-440. (QIAN Ning, WAN Zhao-hui. *Mechanics of sediment transport* [M]. Beijing: Science Press, 1983: 439-440. (in Chinese))
- [15] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 2版. 北京:中国水利水电出版社,1998:51-52. (ZHANG Rui-jin. *River sediment dynamics* [M]. 2nd ed. Beijing: China Water Power Press, 1998: 51-52. (in Chinese))
- [16] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 虾峙门口外30万吨级人工航道回淤分析研究[R]. 上海:中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2012: 34-35. (Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd. *Silting study on the 300000 DWT channels at Xiazhimen*[R]. Shanghai: Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., 2012: 34-35. (in Chinese))
- [17] MIGNIOT C. A study of the physical properties of different very fine sediments and their behavior under hydrodynamic action [J]. *La Houille Blanche*, 1968(7): 591-620.
- [18] 唐建华. 长江口及其邻近海域粘性细颗粒泥沙絮凝特性研究[D]. 上海:华东师范大学,2007: 27-35. (TANG Jian-hua. *Characteristics of fine cohesive sediments flocculation in the Changjiang estuary and its adjacent sea area*[D]. Shanghai: East China Normal University, 2007: 27-35. (in Chinese))

## Effect of waterway siltation by bed-material grain-size variation processes

LIU Hong<sup>1,2</sup>, HUANG Zhi-yang<sup>1</sup>, DING Jian<sup>1</sup>, LIN Na<sup>1</sup>

(1. *Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China*; 2. *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China*)

**Abstract:** Based on topography, hydrology, tidal current, bed sediment and core data collected at the Lvsí sea area, an analysis of the bed-material grain-size variation processes and its effect of the waterway siltation is carried out. The results show that the bed-material armoring is shown at the Lvsí trial dredged channel after the waterway dredging. The median diameter of the bed-material is 0.045~0.071 mm before dredging, which increases to 0.128~0.135 mm after dredging. The sediment component between 0.005 mm and 0.062 mm decreases from 36.0% to 8.9%, and that between 0.075 and 0.250 mm increases from 37.9% to 78.2% by comparison with before and after dredging. The main course of the sediment composition change is the hydraulic sorting by the dredging. The silting forms combining with the suspended sediment deposition and bed load transport is a mechanism of the Lvsí waterway siltation. The siltation intensity of the trial dredged channel is great during the period from July to August in summer, and it is small during the period from November to December in winter. Furthermore, the median diameter of the bed-material has become finer in summer and coarser in winter. The results of grain size spectral calculation show that the contribution rate of the suspended sediment deposition on the waterway siltation is about 15% in the normal condition, and the contribution rate in summer is higher than that in winter. However, this rate can be increased to 30%~40% in the windy condition. The calculation method of the contribution rate provides a reference for the siltation studies of the similar works in the future.

**Key words:** Lvsí sea area; trial dredged channel; waterway siltation; suspended sediment deposition; bed-material armoring; grain size spectral