



淤泥质浅滩航道疏浚过程中 水流输运能力变化分析

孟江山

(中交广州航道局有限公司, 广东 广州 510289)

摘要: 射阳港位于苏北淤泥质浅滩, 水深条件相对较差, 航道回淤强度大。构建了二维潮流数学模型, 研究航道自现状疏浚至设计底高程的水流输运能力的过程变化。结果表明, 随着航道的浚深, 航道内水流流速整体呈减小趋势, 航道流速减少程度与航道浚深幅度呈正比, 涨急流速最大减少 43.4%~61.7%, 落急流速最大减少 39.8%~58.5%。航道浚深至 6.5 m 时, 航道落潮水流输运能力减小幅度达 40%~80%; 航道浚深至 10.5 m 时, 航道落潮水流输运能力减少 80%~95%, 航道涨潮水流输运能力强于落潮的范围相比现状增大 80%, 当周边泥沙进入航道后, 不利于泥沙的向外输运。

关键词: 射阳港; 航道疏浚; 数值模拟; 水流输运; 挟沙能力

中图分类号: U616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0069-06

Changes of water transport capacity during dredging in silty shoal waterway

MENG Jiangshan

(China Communications Guangzhou Navigation Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510289, China)

Abstract: Sheyang Port is located in the silty shoal in northern Jiangsu, with relatively poor water depth condition and strong silting intensity. In this paper, a two-dimensional tidal flow mathematical model is constructed to study the process of water transport capacity from the current situation to dredging to the design of the bottom elevation. The results show that with the waterway dredging deepen, the overall water velocity in the waterway shows a decreasing trend. The degree of decrease of water velocity is proportional to the dredging depth of the waterway. The maximum decrease of the rising jet is 43.4%~61.7%, and the maximum decrease of the falling jet is 39.8%~58.5%. When the dredging depth of the waterway is 6.5 m, the transport capacity of the waterway falling tide decreases by 40%~80%. When the dredging depth of the waterway is 10.5 m, the transport capacity of the waterway falling tide decreases by 80%~95%. The transport capacity of the waterway rising tide is stronger than that of the falling tide, which increases by about 80% compared with the current situation. When the surrounding sediment entered the waterway, it is not conducive to the outward transport of sediment.

Keywords: Sheyang Port; waterway dredging; numerical simulation; water transport; sediment carrying capacity

苏北沿海为淤泥质海岸, 近岸地形坡度缓, 潮间带宽, 建港后大都存在着一定的泥沙问题^[1]。近年来, 随着科技的发展和基建能力的提升, 苏北沿海港口(滨海港、射阳港、大丰港等)发展迅速。

射阳港位于近岸区域, 通过双导堤将航道引伸至深水区, 受海域水沙环境影响, 港口与航道

回淤较严重^[2-3]。射阳港航道目前为 3.5 万吨级, 2016 年 4 月开始航道疏浚, 2016 年 8 月底完工, 2023 年前航道未疏浚维护, 航道水深由 10.0~11.0 m 淤积至 4.0~5.5 m。2024 年初航道维护疏浚工程通过交工验收, 后期计划升级至 5 万吨级航道^[4], 航道等级的改变直接影响航道水深, 改

收稿日期: 2024-01-09

作者简介: 孟江山 (1983—), 硕士, 高级工程师, 从事港口航道与海岸工程研究。

变航道的水动力条件。在以往的航道疏浚研究中,大多数学者关注的是航道疏浚工艺、疏浚效率等,如冯书科^[5]、魏汉辉等^[6]讨论了耙吸式挖泥船在浅水区航道疏浚工艺,朱逸峰^[7]基于大数据研究了挖泥船的疏浚性能,张世谦等^[8]研究了疏浚工艺的信息化等问题。航道疏浚是一个时间过程,关于航道疏浚过程中的航道水动力及水流输运能力变化的研究成果相对较少。

本文通过研究射阳港航道疏浚过程中的航道水域水动力及其输运能力的变化,一方面为航道疏浚作业提供水文参考,另一方面通过水流输运能力的变化分析航道及港区的泥沙淤积趋势,为射阳港建设提供技术支撑和借鉴。

1 研究方法

1.1 基础资料

射阳沿海潮汐受南黄海旋转潮波系统控制,近岸水域受苏北沿岸流的影响,为不规则半日潮,潮汐强度中等,平均潮差 2.15 m。为研究航道疏浚过程的水动力变化,收集了射阳海域的 2019 年海图地形(CN201306, 1:350 000; CN202307, 1:350 000; CN542111, 1:12 000)和 2023 年航道疏浚前的扫测地形(比例尺 1:200),基面为当地理论基面。射阳附近海域的地形分布见图 1,近岸海域 0 m 至 10 m 等深线的距离基本约 5 km,坡度约为 2‰。射阳港在双导堤的作用下,导堤南北侧滩地范围较广,淤积较为明显。

收集了航道附近水域 2021 年大潮同步水文测验资料,测验时间为 2021-12-03T00:00:00—2021-12-05T01:00:00,水文测验布置 6 条垂线(图 1),并收集了大丰站和滨海站的同步潮位数据(当地理论基面),为数学模型验证提供基础资料。



图 1 射阳附近海域地形分布及 2021 年水文测验测点布置

1.2 数学模型

采用 CJK3D 数值模拟软件构建数学模型^[9],计算范围如图 2 所示,东西方向长约 120 km,南北方向长约 200 km。计算域大范围水深由海军航保部海图给出,射阳港附近海域水深参考 2023 年实测数据修正。为了提高计算效率,同时保证核心水域有足够的分辨率,采用局部加密的非结构三角形网格对计算域进行剖分,外海区域空间步长较大,最大约 7 000 m;射阳港及其航道附近水域空间步长较小,约 15 m。计算域共计生成计算节点 3.063 5 万个,网格 5.900 5 万个。数学模型时间步长取值 0.5 s;糙率随水深的变化而变化,取值为 $0.012+0.013/H$ (H 为水深);糙率 n 取值范围为 0.012~0.025;紊动黏性系数取 KHU^* ,其中 $K=0.1$, U^* 为摩阻流速;判断单元干湿的动边界临界水深取 0.01 m。

数学模型边界采用流量与潮位组合的控制方式,其中射阳河与黄沙港采用多年平均流量控制,海域边界采用潮位控制。图 3 为数学模型的潮位验证,表 1、2 为潮位和流速的验证误差统计,验证点位置见图 1、2。可以看出,数学模型计算所得潮位和流速大小、流向均与实测值吻合较好,满足相关规范的要求。

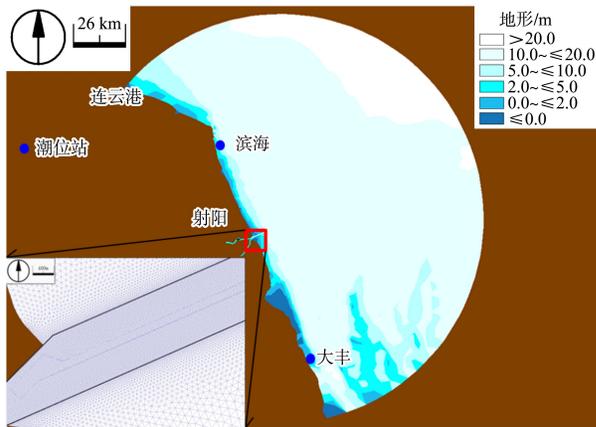
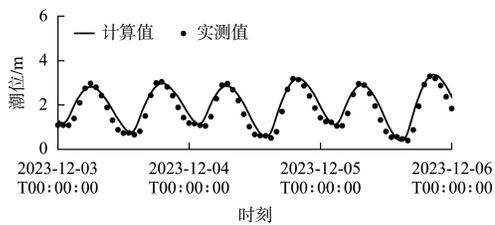
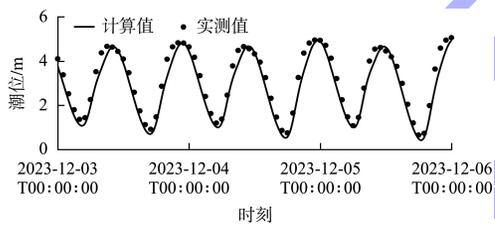


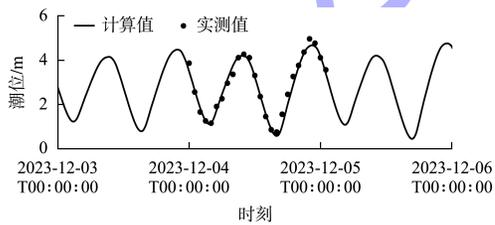
图 2 数学模型计算范围及网格



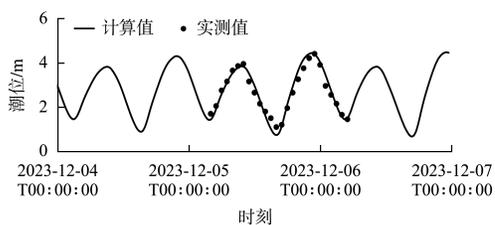
a) 滨海



b) 大丰



c) S₃



d) N₃

图 3 潮位验证

表 1 潮位计算误差统计

点位	高潮位/m			低潮位/m		
	实测值	计算值	偏差	实测值	计算值	偏差
滨海	3.31	3.39	0.08	0.34	0.29	-0.05
大丰	5.05	4.98	-0.07	0.53	0.43	-0.10
S ₃	4.95	4.84	-0.11	0.75	0.61	-0.14
N ₃	4.40	4.47	0.07	1.10	1.01	-0.09

表 2 流速计算误差统计

点位	涨潮平均流速/(m·s ⁻¹)			落潮平均流速/(m·s ⁻¹)		
	实测值	计算值	偏差/%	实测值	计算值	偏差/%
S ₁	0.56	0.53	-5.36	-0.62	-0.57	-8.06
S ₂	0.6	0.64	6.67	-0.65	-0.70	7.69
S ₃	0.94	0.84	-10.64	-0.86	-0.88	2.33
N ₁	0.63	0.58	-7.94	-0.69	-0.63	-8.70
N ₂	1.05	0.96	-8.57	-0.99	-0.90	-9.09
N ₃	0.73	0.82	12.33	-0.80	-0.90	12.50

1.3 模拟方案

射阳港 5 万吨级航道设计水深约为 10.5 m (理论最低潮面)，现状航道水深 4.0~5.5 m，见图 4。为研究 5 万吨级航道疏浚不同阶段的航道水动力情况，设置 6 组计算方案，航道水深分别为现状、6.5、7.5、8.5、9.5、10.5 m。数学模型计算时，考虑射阳河和黄沙港的多年平均径流条件，外海潮位采用 2021 年验证时期的大中小潮组合的半月潮型。

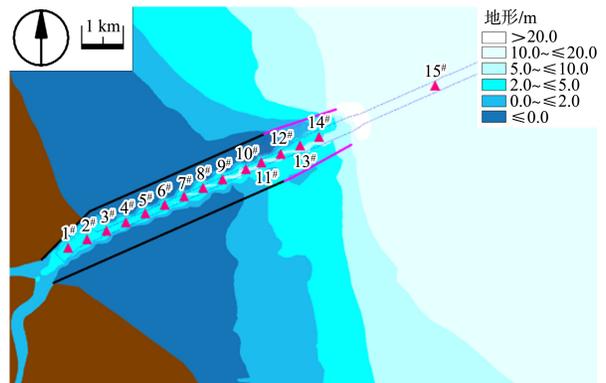


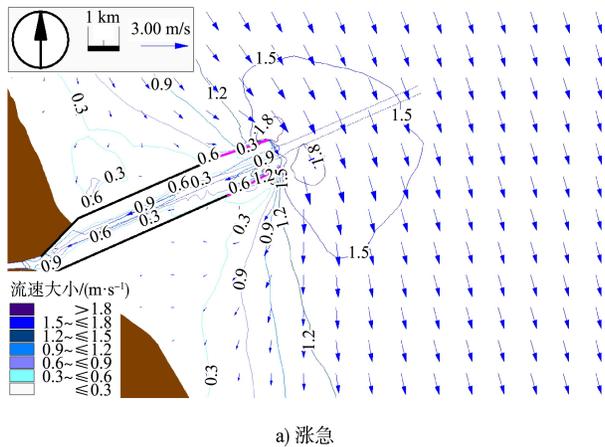
图 4 现状航道水深分布

2 射阳港附近海域水动力特征

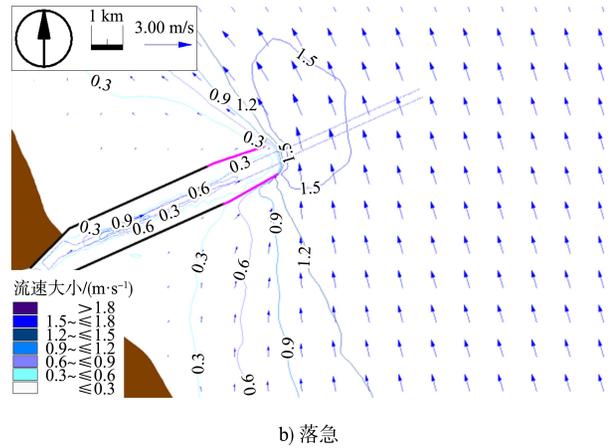
射阳港双导堤高程为 2.8 m，头部 1.8 km 坡至 10 m 水深，港区附近海域涨落流速分布如图 5 所示，涨潮时水流自北向南运动，落潮时流

向相反。涨落急基本发生在中潮位附近，如图 6a) 所示，此时双导堤不过水。从涨落急流速分布看，双导堤在广阔的近岸海域起到了坝的作用，因此双导堤头部流速强度明显高于其他水域，涨急流速可达 1.8~2.0 m/s，落急流速可达 1.6 m/s，双导堤南北侧的近岸水流流速小于 0.3 m/s。从涨落急流速对比看，港区附近水域涨急流速明显大于落急流速，航道内流速相对较小，大部分区域涨落急流速小于 1.5 m/s。

当潮位超过 2.8 m 时，水流可越过双导堤进入航道，大潮期水流越堤时间 5~7 h/d，小潮期 1~3 h/d，双导堤内部水流大部分时间通过口门与外海交换。航道内外的潮位关系如图 6a) 所示，外海 15# 点与双导堤内 5# 点的潮位相位基本一致，高低潮位差异不大，但涨潮过程潮位差异较大，外海涨潮水位明显高于航道，最大水位差发生在中潮位附近，大潮期为 0.25~0.35 m，小潮期为 0.15~0.20 m，落潮期航道内外水位差异相对较小。由于航道内外水位的差异，航道内外潮流存在明显不同，如图 6b) 所示，航道外侧海域最大流速发生在高低潮位前 2~3 h，潮波具有一定的驻波特征，航道内最大流速发生时间与外海存在相位差，表现在涨急流速提前约 1 h，落急流速则滞后约 1 h，潮波仍具有一定的驻波特性。

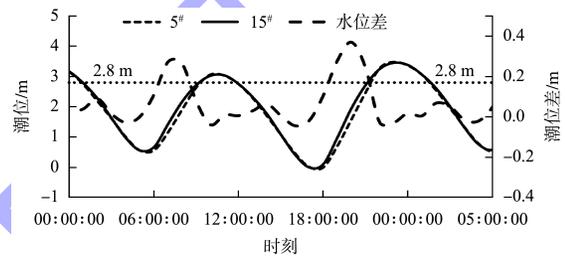


a) 涨急

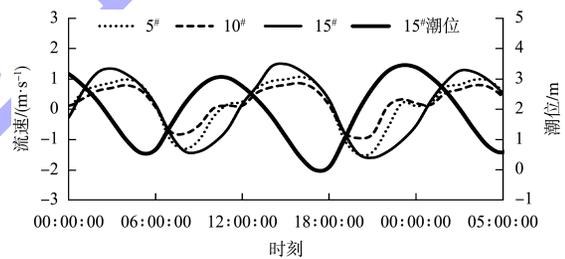


b) 落急

图 5 大潮期涨落急流速分布



a) 潮位过程



b) 潮流过程

图 6 航道内外潮位与潮流过程

3 航道疏浚过程水流输运变化分析

3.1 水动力变化过程

射阳港航道现状水深 4.0~5.5 m，航道内涨急流速大于落急流域，与航道外侧水域流速分布趋势一致。自航道西侧 1# 点至航道口门处的 15# 点，涨落急流速分布总体呈现先增大后减小的趋势，其中 4# 点涨急流速最大，大潮期可达 1.6 m/s，小潮期 1.2 m/s；5# 点落急流速最大，大潮期约为 1.1 m/s，小潮期约为 0.7 m/s。航道不同区域水流流速差异的主要原因在于航道周边地形分布的差异。

航道疏浚至设计底高程后，航道水深可达 10.5 m，相比现状航道水深增大 5~6 m，造成水动力的改变，航道疏浚不同阶段的航道内流速变化，见图 7 和表 3。统计可知，随着航道的浚深，双导堤内的水流过水断面面积增大，涨落急流速整体呈减小趋势，航道浚深越大，流速减小幅度越大。受航道周边地形的影响，不同区域流速变化幅度差异较大，从航道西侧 3# 点到口门处的 15# 点，流速减小比例与流速分布趋势基本一致；4# 点涨急流速最大，各方案的流速减小幅度亦最大，为 43.4%~61.7%，5# 落急流速最大，方案后流速减小幅度达 39.8%~58.5%，航道口门附近的涨落急流速较小，流速减小幅度基本在 30% 以内。

根据各方案航道挖深依次增加 1 m 的设置，从航道采样点的流速变化看，航道水深的变化与流速变化总体呈正比，小潮期各方案流速变化趋

势与大潮基本一致，小潮期由于涨落急流速小，因此各采样点的流速变化比例相比大潮略小。

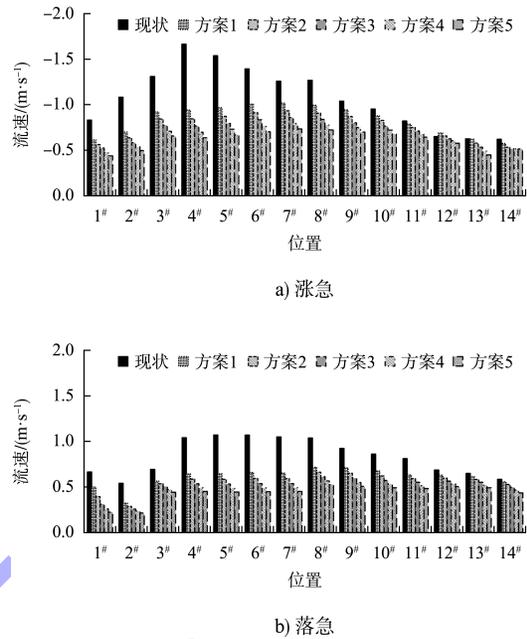


图 7 航道疏浚过程的流速变化

表 3 航道采样点流速变化比例

类型	点位	涨急流速变化比例/%					落急流速变化比例/%				
		方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
大潮	1#	-26.1	-32.3	-37.0	-42.4	-47.1	-25.1	-40.9	-53.1	-61.1	-66.5
	2#	-35.3	-41.2	-46.1	-50.4	-54.1	-40.0	-46.9	-52.2	-56.4	-60.2
	3#	-29.7	-35.5	-40.9	-45.9	-49.8	-18.5	-22.7	-27.3	-31.9	-36.4
	4#	-43.4	-49.2	-53.9	-58.0	-61.7	-38.2	-43.7	-48.6	-52.9	-56.8
	5#	-37.0	-43.2	-48.3	-52.4	-56.5	-39.8	-45.4	-50.4	-54.8	-58.5
	6#	-27.7	-34.6	-40.1	-44.9	-49.5	-38.4	-44.6	-49.8	-54.2	-58.2
	7#	-19.1	-25.9	-31.5	-36.9	-41.6	-37.9	-43.8	-48.9	-53.3	-57.0
	8#	-21.6	-28.5	-33.9	-38.7	-43.0	-31.0	-36.2	-41.0	-45.4	-49.4
	9#	-9.3	-16.3	-22.9	-27.9	-32.8	-23.2	-29.6	-35.4	-40.6	-45.1
	10#	-7.9	-13.1	-19.6	-24.3	-28.8	-21.7	-27.9	-33.6	-38.6	-43.1
	11#	-4.2	-8.7	-13.3	-17.6	-21.6	-22.1	-27.2	-32.0	-36.4	-40.6
	12#	6.2	1.1	-3.6	-6.8	-11.3	-8.0	-12.8	-17.6	-22.1	-26.5
	13#	-0.9	-7.7	-14.7	-21.9	-28.4	-5.3	-10.0	-14.9	-19.6	-24.3
	14#	-7.5	-14.2	-17.0	-17.1	-17.3	-4.8	-9.8	-15.0	-20.3	-25.4
小潮	1#	-24.0	-30.8	-36.8	-42.3	-47.4	-28.5	-39.6	-49.1	-56.5	-62.2
	2#	-27.6	-33.9	-39.8	-44.8	-49.5	-37.6	-44.9	-50.2	-54.7	-58.4
	3#	-28.6	-34.4	-39.8	-44.6	-48.6	-7.1	-11.3	-16.1	-21.0	-25.8
	4#	-42.2	-48.3	-53.2	-57.7	-61.3	-28.9	-35.0	-40.6	-45.5	-49.7
	5#	-36.0	-42.9	-48.1	-52.9	-56.8	-31.8	-38.1	-43.6	-48.5	-52.7
	6#	-26.5	-34.1	-40.2	-45.3	-49.8	-30.4	-37.2	-43.1	-48.0	-52.2
	7#	-19.5	-26.2	-32.1	-37.7	-42.4	-30.6	-37.2	-42.9	-47.6	-51.6
	8#	-22.6	-29.2	-34.5	-39.6	-43.7	-25.5	-30.7	-35.6	-40.1	-43.9
	9#	-9.2	-16.4	-22.4	-28.1	-33.2	-20.7	-26.9	-32.4	-37.3	-41.6
	10#	-8.1	-12.8	-17.6	-22.5	-26.9	-15.9	-22.2	-27.9	-32.9	-37.2
	11#	-4.6	-8.2	-11.3	-15.3	-19.0	-16.6	-22.0	-26.8	-31.1	-35.1
	12#	2.9	0.3	-2.6	-5.8	-9.4	-6.4	-11.0	-15.4	-19.2	-22.9
	13#	-3.6	-7.6	-11.3	-14.8	-18.3	-6.7	-10.9	-15.0	-19.2	-23.2
	14#	-4.1	-9.1	-11.4	-12.5	-13.1	-7.0	-12.4	-17.7	-22.8	-27.3

3.2 水流输运能力变化

射阳港悬沙中值粒径平均值约为 0.009 mm, 采用宾国仁挟沙力公式计算大潮和小潮期涨落潮过程的输沙能力:

$$S_{\text{sum}} = \sum_{t_1}^{t_2} S_*(t) \quad (1)$$

式中: S_{sum} 为涨潮或落潮期总输沙能力; t_1 、 t_2 为涨潮或落潮的始末时间; $S_*(t)$ 为某时刻的挟沙力, 可表示为:

$$S_*(t) = 0.023 \frac{\rho_0 \rho_s g n^2 v^3}{(\rho_s - \rho_0) H^{4/3} w} \quad (2)$$

式中: ρ_0 、 ρ_s 分别为水体及泥沙的密度, 取 1.013 和 1.780 t/m³; w 为泥沙沉降速度, 取 0.5 mm/s; v 为流速; g 为重力加速度。

图 8a) 为航道疏浚过程的采样点大潮单宽落潮水流输运能力的变化, 当航道从现状水深开挖至 6.5 m 时, 由于水深的增大, 航道处流速减小明显, 由宾国仁挟沙力公式计算可知, 落潮流的挟沙力大幅度减小, 航道西侧 1#~8# 采样点水流输运能力减小幅度达 80% 以上, 航道东侧 9#~14# 采样点落潮水流输运能力减小 40%~60%。随着航道的挖深, 各采样点的水流输运能力进一步减弱, 当航道开挖至 10.5 m 水深时, 航道各采样点落潮水流输运能力减少 80%~95%, 小潮期落潮水流输运能力的变化趋势与幅度与大潮期总体接近, 航道西侧减小幅度大于东侧, 当涨潮流携带的泥沙自口门进入航道后, 落潮水流输运能力的减弱不利于泥沙的向外输运。

图 8b) 为大潮落潮与涨潮的水流输运能力的比值, 当比值小于 1 时, 说明涨潮水流输运能力强, 反之, 落潮水流输运能力强。现状大潮期条件下, 航道西侧 1#~6# 点均为涨潮水流输运能力强于落潮, 7#~14# 点落潮水流输运能力强于涨潮; 航道浚深至 6.5 m 后, 落潮与涨潮水流输运能力的比值有所变化, 航道 1#~10# 点涨潮水流输运能力均强于落潮, 说明航道浚深后, 涨潮水流输运能力相对更强, 不利于航道泥沙的向外输运; 当浚深至 10.5 m 后, 1#~11# 采样点均为涨潮水流输

运能力强于落潮, 范围增大约 80%, 说明随着航道的浚深, 航道的涨潮水流输运能力相比落潮更强, 小潮时的涨落潮水流输运能力变化与大潮基本类似。

航道疏浚过程中水流输运能力减弱的主要原因是水深增大、流速减小, 当泥沙进入航道后, 不利于泥沙的向外输运, 因此航道疏浚过程中应对周边的沙源控制足够重视, 尽量减少进入航道的泥沙来源。

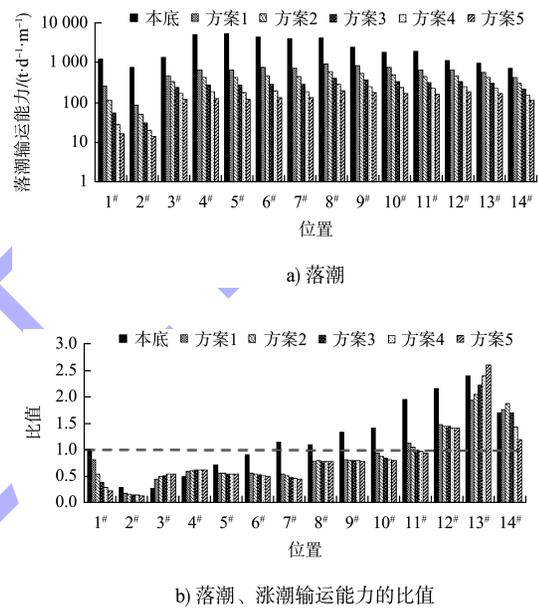


图 8 航道采样点水流输运能力变化

4 结语

1) 射阳港进港航道涨急流速大于落急, 涨落急流速自港区向口门先增大后减小, 涨急流速最大约 1.6 m/s, 落急流速最大约 1.1 m/s。大潮期水流越堤时间 5~7 h/d, 小潮期 1~3 h/d。

2) 外海涨潮水位明显高于航道, 最大水位差发生在中潮位附近, 大潮期约为 0.25~0.35 m, 小潮期约为 0.15~0.20 m, 落潮期航道内外水位差异相对较小。航道内最大流速发生时间与外海存在相位差, 涨急流速提前约 1 h, 落急流速则滞后约 1 h。

3) 随着航道的浚深, 航道内水流流速整体呈减小趋势, 减少程度与航道浚深幅度呈正比, 涨急流速最大减少 43.4%~61.7%, 落急流速最大减少 39.8%~58.5%。

(下转第 143 页)