



连云港港区环抱式防波堤 对航道回淤的影响*

张 玮¹, 肖天葆¹, 庞 亮²

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 连云港港口集团有限公司, 江苏 连云港 222042)

摘要: 针对连云港港区 25 万吨级进港航道回淤总量小于 15 万吨级的现象, 从航道回淤实测资料、工程前后水动力环境等入手, 借助于潮流数学模型, 研究了该现象产生的原因。研究结果表明: 疏浚工程和环抱式防波堤工程均会对进港航道的回淤产生一定的影响, 但防波堤的影响起主要作用。疏浚工程导致航道流速以减弱为主, 因而使得航道回淤略有增加; 而环抱式防波堤工程, 将使口门附近流速显著增加, 从而导致进港航道回淤大幅减小。此外, 环抱式防波堤的掩护作用, 在很大程度上阻挡了泥沙进入港区, 从而使口内航道段回淤也大幅降低。

关键词: 航道回淤; 环抱式防波堤; 进港航道; 防淤减淤

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0093-07

Effect of encircled breakwater on waterway siltation in Lianyungang area

ZHANG Wei¹, XIAO Tian-bao¹, PANG Liang²

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Lianyungang Port Group Co., Ltd., Lianyungang 222042, China)

Abstract: To counter the phenomenon that the total siltation in 250 000 DWT approach channel at Lianyungang area is less than 150 000 DWT, we probe into the cause for it based on the analysis of the actual measured data about channel siltation and dynamic environment of water and sediment before and after engineering by the flow mathematical model. The result indicates that both dredging engineering and encircle breakwater engineering will have impacts on silting of the approach channel, but the breakwater is more essential. Dredging engineering mainly makes the flow rate of the channel slow down and hence it slightly increases the channel siltation; encircle breakwater engineering makes the flow rate near the entrance increase significantly so that the approach channel siltation reduces sharply. In addition, the protective effect of the encircle breakwater prevents the sediment from entering the port and then the siltation of inner fairway section also decreases in a large scale.

Keywords: channel siltation; encircled breakwater; approach channel; silting reduction

在淤泥质海岸建设深水航道, 一般认为航道回淤总量将随着航道等级的提升而有所增加。但连云港进港航道回淤实测资料却表明, 随着航道由 15 万吨级提高到 25 万吨级, 泥沙回淤总量不仅没有增加, 反而有所减少^[1-2]。这与人们的一般

认识有所矛盾, 因此, 深入分析上述现象, 探讨其产生的原因是非常必要的。

目前, 在淤泥质海岸建设深水港区, 多采用环抱式防波堤, 对于工程所引起的周边水域水沙环境变化研究较多^[3-8], 且大多采用数学模型。研

收稿日期: 2014-09-19

*基金项目: 国家高技术研究发展计划 (2012AA112509)

作者简介: 张玮 (1958—), 男, 博士, 教授, 从事港口航道工程研究。

究方法一般有两种：一种是直接应用泥沙数学模型来计算水沙运动和冲淤变化，此为直接方法。如解鸣晓等^[3]通过二维水流泥沙模型，研究连云港环抱式防波堤对周围含沙量场的影响；丁军华等^[4]通过二维水流泥沙模型，进行徐圩港区环抱式口门布置方案研究，计算不同方案下的航道回淤情况。另一种是根据水流与泥沙的密切相关性，通过计算水流变化来分析对于泥沙运动的影响，属于间接方法。如白立华^[8]通过二维潮流数学模型，研究天津港防波堤延伸和北港区建设对港区水流和潮汐特征值的影响，并分析预测了新条件下港区泥沙淤积趋势。不过，上述研究主要偏重于工程实施后的效果预测，较少结合工程后的实测资料进一步分析水流特征和泥沙回淤内在联系。

本文拟根据连云港进港航道的回淤实测资料，分析对比航道由 15 万吨级提高到 25 万吨级后的泥沙回淤总量及其分布特征，初步探讨产生的原因；同时，利用潮流数学模型，研究疏浚工程和环抱式防波堤工程对于进港航道水流条件的影响，分析工程后水流条件变化与泥沙回淤的内在联系，为类似工程的研究提供参考。

1 自然条件与航道回淤资料

连云港地处江苏省北部黄海海州湾西南岸，潮汐运动受制于南黄海驻波系统，为非正规半日潮型，由于受近岸地形影响，潮流从外海向岸边逐渐由逆时针旋转流向往复流过渡。

连云港海域以风浪为主，常浪为偏东北向，多年出现频率 26.41%；强浪为偏北向，多年出现频率 18.40%。据 1962—2003 年实测波浪资料统计，累年有效波高 $H_{1/3}$ 为 0.4 ~ 0.6 m，累年平均波高 $H_{1/10}$ 为 0.5 m。

连云港海域地处淤泥质海岸，水浅坡缓，海床泥沙中值粒径为 0.002 ~ 0.004 mm，近岸多年平均含沙量一般在 0.2 ~ 0.25 kg/m³。在进行港口航道建设时，泥沙回淤是需要考虑的主要问题。

近年来，随着港口发展需要，连云港进港航道不断加深拓宽。15 万吨级航道（图 1a）于 2008 年 8 月完工，航道设计有效宽度 230 m，外

航道全线底高程 - 16.5 m（理论基面，下同）。25 万吨级航道（图 1b）于 2012 年 6 月完工，航道设计有效宽度 270 ~ 290 m，外航道内段（A-W-Y）底高程 - 20 m，外航道外段底高程 - 20.5 m。设计边坡均为 1:5 ~ 1:10，航道走向不变。

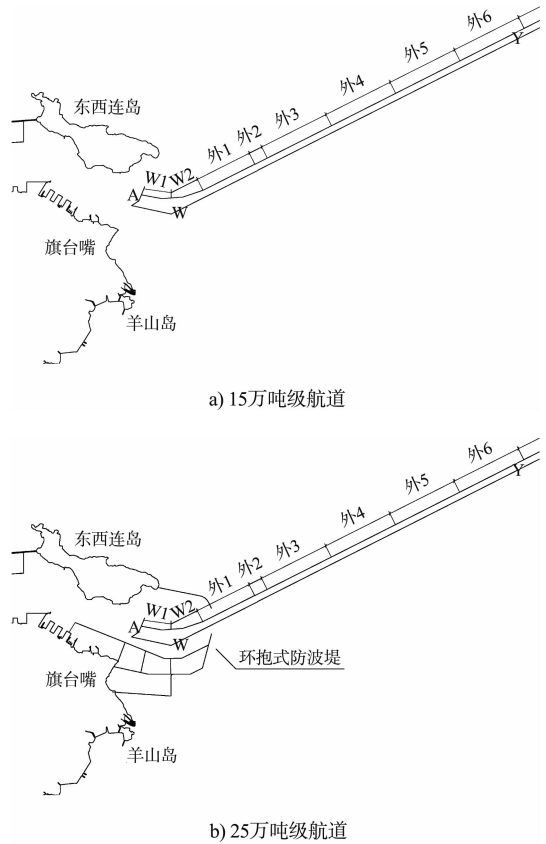


图 1 连云港航道

对比连云港 15 万吨级和 25 万吨级进港航道的年回淤实测资料（表 1、图 2），可以看出：1）25 万吨级航道年回淤量约 531 万 m³/a，15 万吨级为 561 万 m³/a，前者较后者减小约 5%；2）与 15 万吨级航道相比，25 万吨级航道 W1 ~ 外 2 段航道年淤强显著减少，外 3 ~ 外 9 段航道年淤强略有增加；3）口门附近外 1 段的年淤强由 15 万吨级时的最大值 1.86 m 变为 25 万吨级时的局部最小值 0.42 m，减幅约 -77%。

连云港进港航道从 15 万吨级提高到 25 万吨级的变化，主要是进行了疏浚工程和环抱式防波堤工程。其中，疏浚工程通常会加重航道淤积。由此可以推断，环抱式防波堤可能是连云港进港航道等级提升、回淤量减少的主要原因。

表1 15万吨级和25万吨级航道实测回淤结果

航道	回淤强度/(m·a ⁻¹)											年回淤量/ (万m ³ ·a ⁻¹)
	W1	W2	外1	外2	外3	外4	外5	外6	外7	外8	外9	
15万吨级	1.71	1.60	1.86	1.73	1.29	0.80	0.58	0.39	0.28	0.20	0.15	561
25万吨级	1.01	0.91	0.42	1.36	1.39	0.87	0.68	0.48	0.40	0.35	0.25	531

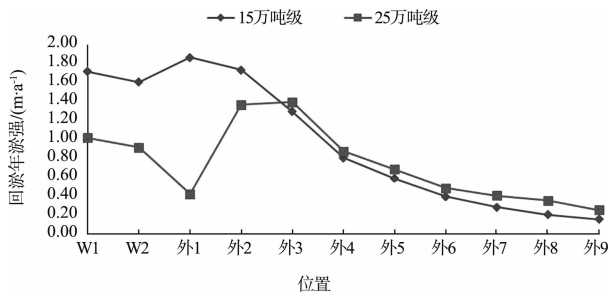


图2 15万及25万吨级航道实测航道回淤年淤强

2 潮流数学模型的建立

2.1 基本方程

1) 水流连续方程。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [(h + \zeta)U_x]}{\partial x} + \frac{\partial [(h + \zeta)U_y]}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

2) 水流动量方程。

$$\frac{\partial U_x}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} = fU_y - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho(h + \zeta)} + N_x \left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial U_y}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial y} = -fU_x - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho(h + \zeta)} + N_y \left(\frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

式中: x 、 y 为直角坐标系坐标; t 为时间变量; Y 为平均水深; ζ 为相对于平均海平面的潮位; U_x 、 U_y 为 x 、 y 方向上的垂线平均速度; ρ 为水流密度; g 为重力加速度; N_x 、 N_y 为 x 、 y 方向的水平紊动黏性系数; f 为科氏参数 ($f = 2\omega \sin\phi$, ω 为地球旋转角速度, ϕ 为纬度); τ_x 、 τ_y 为床面剪切应力在 x 、 y 方向的分量。

2.2 网格划分、边界条件及求解方法

数学模型北起日照 (35°22'30"N, 119°33'E)、南至废黄河口附近 (34°17'00"N, 120°17'E), 东西宽约 99.7 km, 南北长约 119.3 km, 模型范围

内水域面积约 8 648 km²。采用矩形网格进行离散, 将计算范围划分为 3 个区域, 变步长逐级加密, 网格尺度分别为 405 m × 405 m、135 m × 135 m、45 m × 45 m。

连云港海域数学模型的西边界、南边界为陆边界, 北边界、东边界为水边界。在进行数值计算时, 对于开边界, 由东中国海潮波数学模型提供; 对于闭边界, 根据不可入原理取法向流速为 0。此外, 还采用了干湿判别技术进行动边界处理。

在对控制方程的求解中, 采用有限差分的 ADI 法, 时间步长 $\Delta t = 20$ s。

2.3 潮流数学模型的率定及验证

采用 2005 年 9 月大潮实测潮位、流速和流向, 对数学模型进行率定和验证, 验证结果^[9]符合规范要求^[10]。

3 潮流计算分析

3.1 方案及计算工况

连云港进港航道从 15 万吨级到 25 万吨级的主要变化是进行了疏浚工程和环抱式防波堤工程。为了研究这两者对航道回淤的影响, 计算中考虑了 4 种方案: 15 万吨级航道分为有 (15Y) 和没有 (15M) 环抱式防波堤, 25 万吨级航道也分为有 (25Y) 和没有 (25M) 环抱式防波堤, 见图 3。重点分析不同方案之间潮流场的变化和流速差值, 主要分析 15Y-15M, 25Y-25M 和 25Y-15M 这 3 种, 其中 25Y-15M 的工况为实际情况。

从偏于安全考虑出发, 采用 2005 年 9 月的实测大潮作为计算潮型, 计算出大范围海域各方案的航道流矢图、大潮流矢图 (图 4), 并根据不同方案的潮流变化绘制不同计算工况下的大潮涨、落急流速差值图 (图 5)。

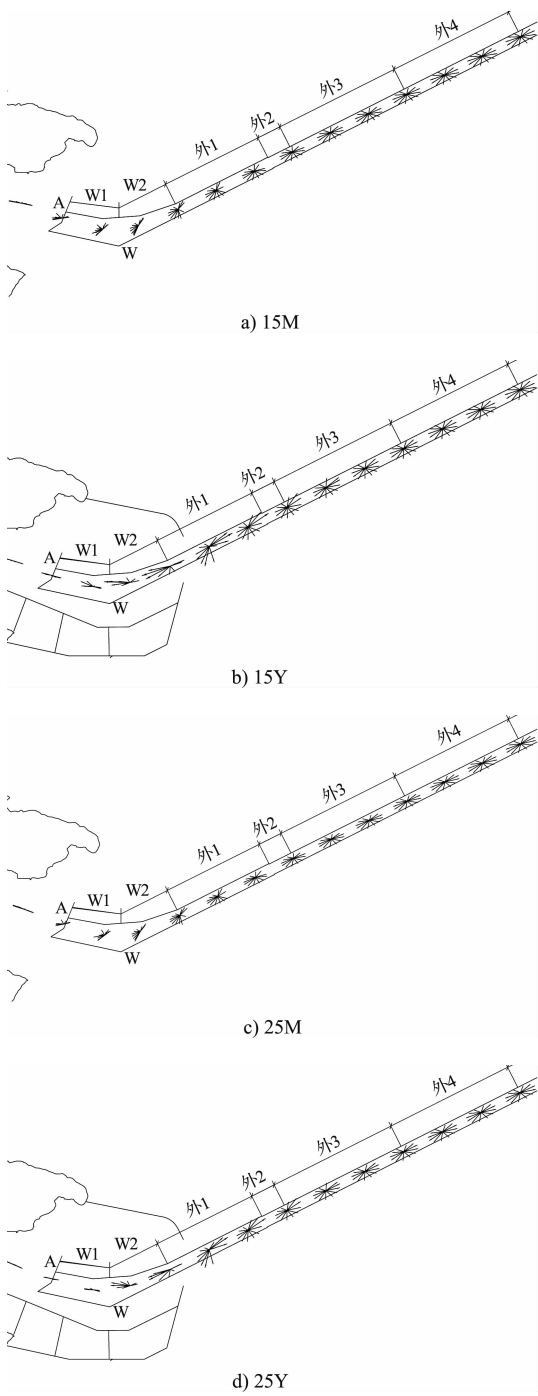


图3 航道流矢图

3.2 潮流场特性分析

对比连云港 15 万吨级和 25 万吨级航道的大范围海域流矢图 (图 4), 可以看出: 疏浚工程和环抱式防波堤工程实施后, 外海的潮流流矢基本没有变化, 变化区域主要集中在环抱式防波堤工程周围水域。加环抱后, 防波堤周围水域的潮流基本为沿防波堤的往复流, 而未加之前主要为旋转向往复流的过渡阶段。

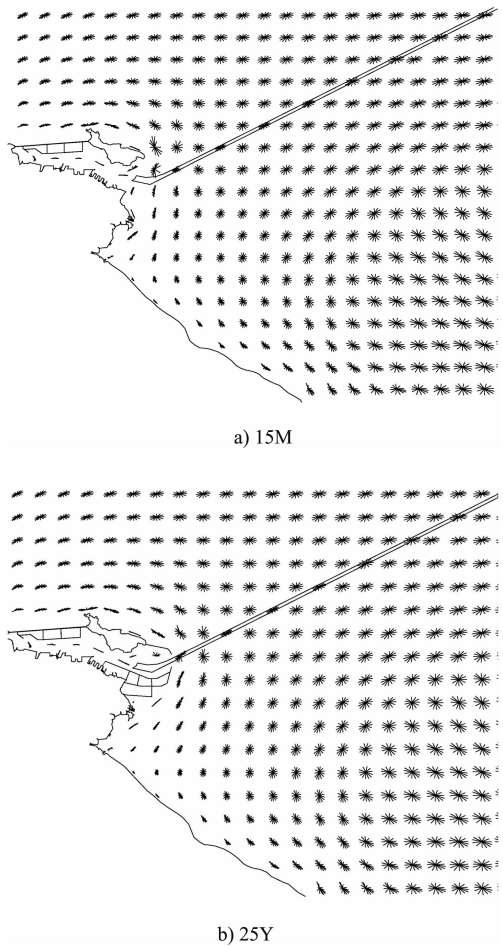


图4 大潮大范围海域流矢图

3.3 航道内流矢特性分析

对比各方案连云港区航道内的流矢图 (图 3), 可以看出: 1) 环抱式防波堤工程实施后, 连云港区进港航道外 2 段以外的潮流流矢基本没有变化, 变化区域主要集中在环抱式防波堤口门附近。工程后, 环抱式防波堤口门附近航槽内的潮流流矢主要为沿航道的往复流, 而工程前此处仍表现为旋转流特征。2) 疏浚工程有助于促进水体沿航槽的流动, 随着航道等级的提升, 其沿航道的流矢有向航槽方向束窄的现象, 即航道水流归槽作用加强。

3.4 流速变化定量分析

对比各计算工况的涨急、落急流速差值 (图 5), 可以看出: 1) 疏浚工程和环抱式防波堤工程实施后, 防波堤区域以外的大范围海域, 包括海洲湾北部海域、连云港进港航道外 4 段以外的海域、以及徐圩海域等, 潮流流速没有改变, 变化主要

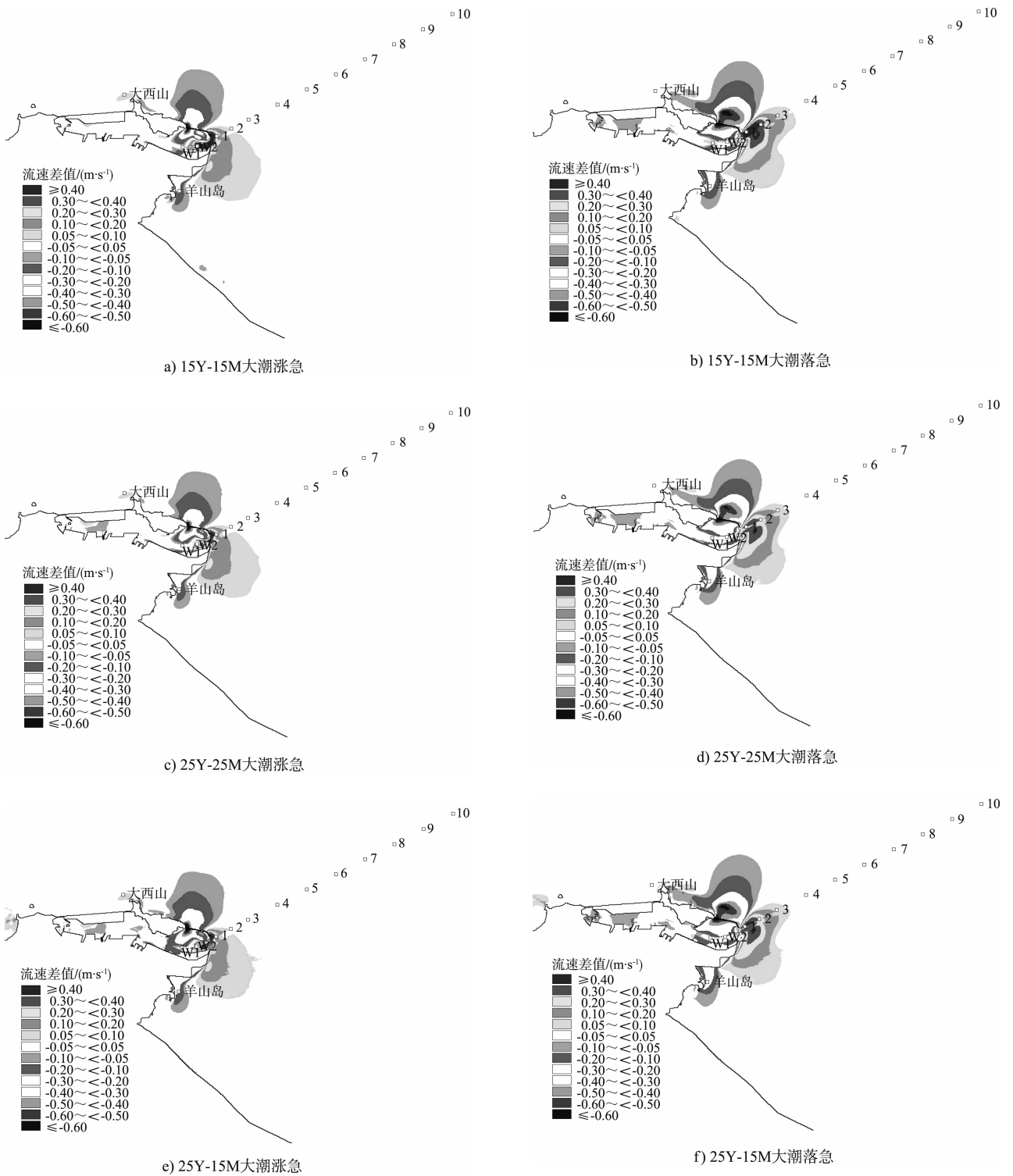


图 5 大潮涨急、落急流速差值

集中在连云港港区环抱式防波堤附近。2) 加环抱后, 由于防波堤的阻水作用, 连云港港区北防波堤两侧水域及南防波堤内侧水域的水动力显著减弱。就涨、落急流速差值来说, 在北防波堤堤根区域, 流速减小值最大, 均超过 -0.6 m/s 。

3) 南防波堤外侧, 不管是涨急还是落急, 都是流速增大区域, 即此处将受到水流冲刷。4) 由于防波堤的束水作用, 无论是涨急还是落急, 口门附近水流流速均增大。涨急时, 流速增大区域主要在口门内侧附近水域 (W2-外 1 段), 局部增加超

过 0.4 m/s；落急时，流速增大区域主要在口门外侧附近水域（外 1 段-外 3 段），外 1 段流速增加最大，超过 0.4 m/s。

4 环抱式防波堤对航道回淤的影响分析

通过上面的分析可知：疏浚工程和环抱式防波堤工程均会对进港航道的回淤产生一定的影响。为此，1) 通过工况 25M-15M 及工况 25Y-15Y 的航道流速变化率，来分析疏浚工程对航道回淤的影响；2) 通过工况 25Y-25M 及工况 15Y-15M 的航道流速变化率，来分析防波堤工程对航道回淤的影响；3) 通过实际工况 25Y-15M 的水动力与

航道回淤有密切相关性这一特性，来分析疏浚工程和环抱式防波堤工程对航道回淤的综合影响。

在研究中，水动力的改变用流速变化率来表示，航道回淤的改变用航道年淤强变化率来表示。以实际工况为例，实际工况的流速变化率被定义为：25Y-15M 的航道流速差值与 15M 的航道流速的比值，结果为正代表流速增大、为负代表流速减小。同理，实际工况的航道年淤强变化率被定义为：25Y-15M 的航道年淤强差值与 15M 的航道年淤强的比值，结果为正代表回淤增大、为负代表回淤减小。计算结果见表 2、3 和图 6。

表 2 航道内涨、落急流速变化率

航道区段	仅考虑疏浚工程时				仅考虑防波堤工程时			
	25M-15M 流速变化率		25Y-15Y 流速变化率		25Y-25M 流速变化率		15Y-15M 流速变化率	
	涨急	落急	涨急	落急	涨急	落急	涨急	落急
W1	-6	-9	-24	-20	-2	3	21	18
W2	-2	-2	-23	-13	76	11	122	25
外 1	-1	8	-10	-17	65	99	85	160
外 2	-1	4	-4	-15	1	101	4	145
外 3	0	1	-1	-6	-2	28	-1	39
外 4	1	1	1	0	-2	-2	4	5
外 5	1	1	1	1	-1	-1	1	2
外 6	-2	0	2	0	-1	-1	0	0
外 7	-3	-3	-3	-3	-1	-1	0	0
外 8	-1	-2	-1	-2	-1	-1	0	0
外 9	0	0	0	0	-1	-1	0	0

表 3 实际工况 25Y-15M 航道年淤强变化率与涨、落急流速变化率

航道区段	年淤强变化率	涨急流速变化率	落急流速变化率
W1	-41	-8	-6
W2	-43	72	9
外 1	-77	63	116
外 2	-21	0	108
外 3	8	-2	30
外 4	9	-1	5
外 5	17	-1	2
外 6	23	-3	0
外 7	43	-4	-3
外 8	75	-2	-2
外 9	67	0	0

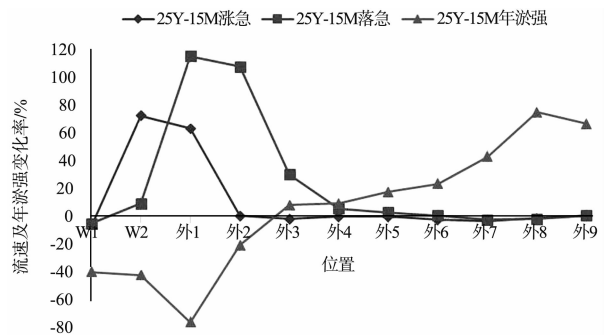


图 6 疏浚工程及防波堤工程共同作用时的航道流速及年淤强变化率

1) 仅考虑疏浚工程时，随着航道等级的提升，航槽内水流流速以减弱为主。即航道浚深加宽会在一定程度上降低航槽内水流流速，可能导致泥沙回淤增加。

2) 仅考虑防波堤工程时,口门附近航道流速将显著增加,涨急时,流速增加主要出现在口门以内,落急时,流速增加主要出现在口门以外;而对于外3段以外基本上没有影响。

3) 从实测航道年淤强及其变化率(表1、3和图6),可以看出:25万吨级航道口门处(外1段)回淤最小(0.42 m),减幅最大(-77%);外3段以外,年淤强有所增强,且增幅较为明显,经过调查,可能与附近存在抛泥区有关。

4) 结合工程后涨、落急流速变化率可以看出:因环抱式口门束水作用,造成口门段航道(W2-外2段)水流流速大幅增强,可能是导致该处航道少淤,甚至冲刷的原因。外3段以外,水流流速以减弱为主,说明此区域主要受航道浚深加宽的影响,而防波堤对此区域的影响微弱。

5) 对于W1段,虽然水流流速相比工程前略有减弱,但防波堤的掩护作用,在很大程度上阻挡了泥沙进入港区,二者的综合作用可能是造成该段航道回淤减少的主要原因。

综上所述:疏浚工程和环抱式防波堤工程均会对进港航道的回淤产生一定的影响,但防波堤的影响起主要作用。环抱式防波堤实施后,束水作用使得口门段航道水动力增强,航道有少淤甚至冲刷趋势;航道疏浚工程使得航槽内的水动力减弱,航道淤积有加重的趋势。

5 结论

1) 实测资料分析表明:连云港进港航道由15万吨级提高到25万吨级后,航道回淤总量略有减少(减少5%),沿程分布变化较大,主要表现在口门附近(W1~外2段)年淤强显著减少,口门以外航道(外3~外9段)年淤强略有增加。初步分析认为,环抱式防波堤是造成泥沙回淤总量减少、淤强分布变化的主要原因。

2) 水流数值模拟表明:疏浚工程和环抱式防波堤工程对连云港大范围海域的潮流动力基本没有影响。但对防波堤工程周围水域会产生一定程度的改变,主要表现为:北防波堤两侧及南防波

堤内侧水域流速减小,南防波堤外侧及口门附近航道流速增大。

3) 分析表明:疏浚工程和环抱式防波堤工程均会对进港航道的回淤产生一定的影响,但防波堤的影响起主要作用。疏浚工程使航道流速以减弱为主,从而使航道回淤略有增加,如外3~外9段;环抱式防波堤工程,使口门附近流速显著增加,从而使航道回淤大幅减小,如W2~外2段;对于W1段,虽然水流流速相比工程前有所减弱,但防波堤的掩护作用,在很大程度上阻挡了泥沙进入港区,其综合作用可能是造成该段淤积减少的主要原因。

4) 总之,对于淤泥质海岸,环抱式防波堤可以起到很好的防淤减淤效果,应该给予充分肯定。此外,只要措施得当,航道回淤量并不一定随着等级的提高必然增加,也有可能有所减少。当然,这样的结论和认识还需更多的实测资料加以验证和证实。

参考文献:

- [1] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 连云港港15万吨级航道回淤观测研究报告[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2009.
- [2] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 连云港港30万吨级航道一期工程回淤观测研究汇报材料[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2013.
- [3] 解鸣晓, 张玮. 连云港口门防波堤建设对航道回淤影响数值研究[J]. 泥沙研究, 2008(5): 15-21.
- [4] 丁军华, 张金善, 高正荣, 等. 淤泥质海岸环抱式港池口门布置方案研究[J]. 水利水运工程学报, 2014(1): 17-23.
- [5] 张玮, 耿聪. 徐圩港区环抱式港池最大流速研究[J]. 水运工程, 2012(9): 35-39.
- [6] 阮程, 张玮, 毕忠飞, 等. 徐圩港区防波堤口门布置对航道横流影响研究[J]. 水运工程, 2013(6): 70-74.
- [7] 张婧. 连云港30万吨级航道二期工程潮流泥沙数模研究[D]. 南京: 河海大学, 2013.
- [8] 白立华. 天津港防波堤延伸对港内水流及潮汐特征值影响的研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [9] 张玮, 张庭荣, 谢鸣晓, 等. 30万吨级航道工程潮流泥沙数模研究报告[R]. 南京: 河海大学, 2007.
- [10] JTJ/T 231-2—2010 海岸与河口潮流泥沙模拟技术规范[S]. (本文编辑 武亚庆)