



灌河口水动力条件对口门整治工程响应分析*

董佳^{1,2}, 刘勇^{1,2}, 熊伟^{1,2}

(1. 江苏省交通规划设计院股份有限公司 江苏 南京 210000; 2. 江苏省水运工程技术研究中心, 江苏 南京 210005)

摘要: 为研究灌河口各整治工程实施后对河口纳潮量、潮位、流速的影响并提出最优的灌河口整治方案, 首先分析了灌河口的自然条件; 然后构建二维水流数学模型, 根据实测资料对模型进行验证; 最后利用数学模型对各整治方案实施前后的水力特性变化进行分析。口门整治工程实施后结果表明: 仅导堤工程的实施对河口纳潮量影响较大, 应配合航道疏浚工程来缓解其带来的影响; 导堤工程和航道工程同时实施后, 双导堤内水流进一步归顺, 流速有所增大, 对维持航道水深较有利。

关键词: 导堤工程; 航道工程; 纳潮量; 潮位; 潮流

中图分类号: P 751

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)10-0125-07

Influence of estuary regulation project on hydrodynamic conditions in Guanhe estuary

DONG Jia^{1,2}, LIU Yong^{1,2}, XIONG Wei^{1,2}

(1. Jiangsu Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210000, China;

2. Jiangsu Provincial Technology Research Center for Water Transport Engineering, Nanjing 210005, China)

Abstract: To predict the impact of regulation project on the tidal prism, tidal level and velocity at the Guanhe estuary and provide the optimal regulation plan of the Guanhe estuary, we analyze the natural conditions of the estuary firstly, then build a two-dimensional mathematical model, which is verified by measured filed data, and finally analyze the changes of hydraulic characteristics after the project by the mathematical model. The result shows that waterway dredging project should be carried out with the regulation project because leading jetties can decrease the tidal prism significantly; After implementation of the leading jetty engineering and waterway engineering, the velocity of the flow between the double jetties increases.

Keywords: leading jetty engineering; waterway engineering; tidal prism; tidal level; tidal current

灌河口(图1)位于废黄河口冲积三角洲北侧的海州湾南端^[1], 属于典型的粉沙淤泥质海岸, 是江苏北部唯一没有建闸的河口。多年来河槽稳定, 陈家港至燕尾港河道平均潮位下水面宽 800 ~ 900 m, 水深 8 ~ 12 m, 是天然的优良深水航道。但口外拦门沙的发育^[2], 成为灌河通航的重大障碍, 为开发灌河的航运资源, 必须对河口的拦门沙进行治理^[3]。截止 2012 年 8 月, 灌河口西堤已建约 7.4 km、东堤已建约 10.1 km、导堤间距

1 km、堤顶高程为 0.368 m; 进港航道从陈家港电厂至东西导堤堤头处为 2 万吨级, 航道底高程为 -10.8 m, 航道底宽 140 m (均采用 85 高程系)。

1 自然条件

1.1 潮汐

灌河口外海域属非正规半日潮型^[4], 受南黄海驻波系统控制, 潮波运动方向涨潮为 NW ~ SE 向, 落潮为 SE ~ NW 向; 灌河口内段, 因受边界约

收稿日期: 2015-03-19

*基金项目: 江苏省交通运输科技项目 (2011Y01)

作者简介: 董佳 (1987—), 女, 硕士, 工程师, 从事水动力及泥沙运移研究。

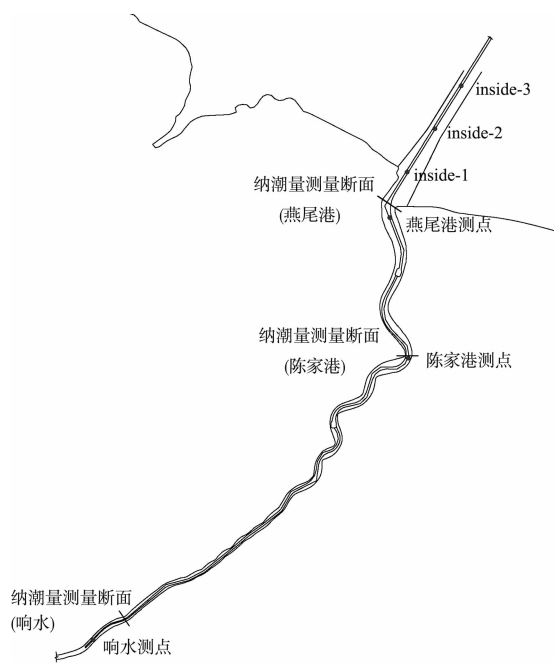


图1 灌河口概位及特征位置

束潮波变形,形成前进驻波混合型潮波,表现为前坡陡、后坡缓,即从口外—口门—口内河道,落潮历时均大于涨潮历时,且涨落潮历时的差别逐渐增大,涨落潮方向基本与岸线走向一致。燕尾港处的平均涨潮历时 5 h 1 min,平均落潮历时 7 h 24 min,平均高潮间隙 6 h 37 min,平均低潮间隙 13 h 55 min。

1.2 潮流

灌河口外海域流场为逆时针方向的旋转流,岸边及口门处近似为往复流。涨潮最大流速出现在高潮位之前 1~2 h,落潮最大流速出现在中潮位附近,且落潮流流速大于涨潮流流速。灌河口外海域潮流流速明显小于灌河内流速,口外涨潮垂线平均流速最大为 1.79 m/s,口外落潮垂线平均流速最大为 1.05 m/s,口内涨潮垂线平均流速最大为 1.99 m/s,口内落潮垂线平均流速最大为 1.67 m/s。

1.3 波浪

根据灌河口外 9 km 左右开山岛观测资料可知,常浪向为 NE,强浪向为 ENE,最大实测波高为 3.0 m。按出现频率依次为 N、NE、ENE、ESE 等,开山岛地区的风浪以有效浪高 $H_{1/3}$ 小于 1.0 m 的浪为主,出现频率约占 90%,大于 2.0 m 的波浪频率仅为 0.3%。NNE 向和 ENE 向两组波在

10 m 水深处波高 1.5 m 的波浪,在传播到 5 m 左右水深处时,波高增到 2.0 m 以上。

1.4 泥沙

灌河口外泥沙主要来自废黄河口,自东向西输移。口外存在大片浅滩,波浪掀沙作用明显,在掀起的泥沙中,较细颗粒作为悬移质漂浮,一部分进入灌河,另一部分随着潮流逐渐向连云港海域输移。口外无风天含沙量相对于河道内要小,涨潮时含沙量明显大于落潮时的含沙量,最大含沙量一般出现在涨急时刻,平均含沙量一般为 0.8 kg/m^3 。

灌河口的泥沙粒径介于淤泥质和沙质之间,属于典型的粉砂淤泥质海岸。粉砂的基本水力特性是,起动流速小、沉降速度大、沉积密实快,在波浪、潮流作用下,泥沙活跃,易悬易沉,大浪作用下在底层会产生浓度很高的含沙水体层。底质测量结果表明,双导堤东侧海域底质中值粒径较粗,约为 0.075 mm,基本属于沙质海岸;西侧海域底质中值粒径较细,约为 0.03 mm,属于淤泥质海岸。

2 潮流数学模型验证

2.1 控制方程

基于三维不可压缩雷诺 (Reynolds) 平均 Navier-Stokes 浅水方程建立水动力模型,对连续方程和动量方程在 $h = \eta + d$ 范围内进行积分后可得到下列二维深度平均浅水方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = & f\bar{v}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \cdot \frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ & \frac{gh^2}{2\rho_0} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \\ & \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}^2)}{\partial y} = & -f\bar{u}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \cdot \\ & \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \quad (3)$$

式中: t 为时间; η 为潮面高程; d 为静水深度; $h = \eta + d$ 为总水深; $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 为深度平均流速 x 、 y 方

向的分量, $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 可按 $h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz$ 和 $h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz$ 计算; S 为源汇项; f 为科氏力系数 ($f = 2\Omega \sin\phi$, Ω 为地球自转角速度, ϕ 为地理纬度); g 为重力加速度; ρ 为水密度; ρ_0 为基准水密度; s_{xx} 、 s_{xy} 、 s_{yx} 、 s_{yy} 为辐射应力张量分量; T_{ij} 为水质点侧向应力。

2.2 定解条件及边界条件

1) 初始条件。采用冷启动方式, 初始条件的水位为常数, 流速场为零。

$$\eta(x,y,t)|_{t=0} = \eta_0(x,y) \tag{4}$$

$$u(x,y,t)|_{t=0} = u_0(x,y) \tag{5}$$

$$v(x,y,t)|_{t=0} = v_0(x,y) \tag{6}$$

2) 边界条件。

岸边界: $v_n = 0$; 水边界: $h = h(t)$ 。

2.3 模型求解

采用有限体积法^[5]对方程进行离散, 采用三角形网格^[6]剖分计算区域, 可准确地模拟曲折多变的岸线, 重点研究区域进行加密, 以提高计算精度和效率。为准确模拟工程区域的水动力情况, 避免外海开边界对工程区域模拟结果的影响, 此次模型海域边界北至日照港附近, 南至滨海港附近, 外海边界至 -30 m 等深线外, 灌河上游边界取至盐东控制四闸。数学模型范围东西长约 104 km, 南北宽约 140 km, 见图 2。三角形网格节点数为 28 648 个, 三角单元个数为 54 651 个, 相邻网格节点外海最大间距为 3 000 m, 河道最小间距为 10 m。

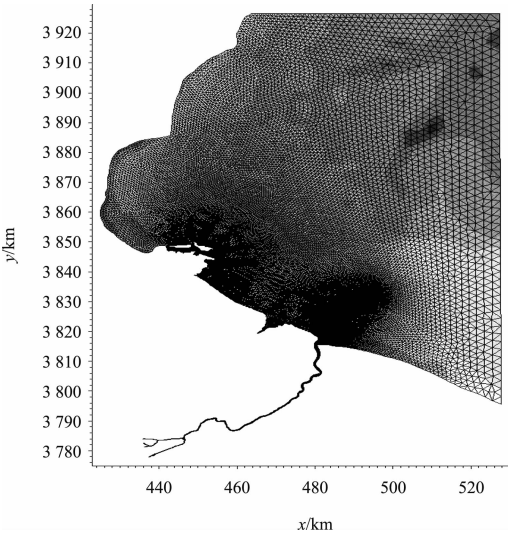


图 2 数学模型网格剖分

2.4 模型验证

采用 2012 年 5—6 月大、小潮实测水文泥沙资料验证资料 (本文只给出大潮的验证结果), 各计算潮型的水文测验日期和主要测点布置见表 1, 测站位置见图 1。

表 1 水文测验站点位置

日期	类别	测点名称	位置(北京 54 坐标)/m	
			X	Y
2012-06-04T12:00 —06-05T18:00	潮位、潮流	燕尾港	3 816 564.0	480 300.0
		陈家港	3 806 387.0	481 641.0
		响水	3 786 841.0	459 938.0

2012 年 6 月各潮位站的潮位过程及各潮流测点的流速过程验证结果见图 3~5, 潮流流向角度以北向为度量起点, 顺时针方向为正。经分析统计可知, 计算潮位过程与实际过程基本吻合, 整个潮汐过程相位符合较好, 满足规程的相关要求。

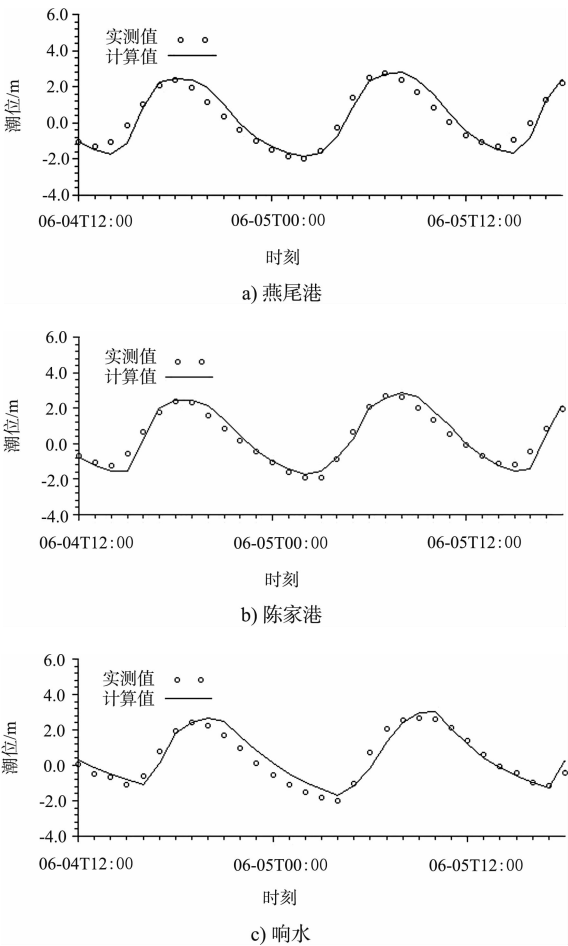
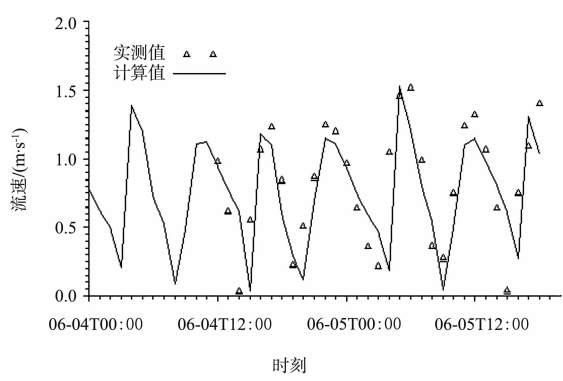
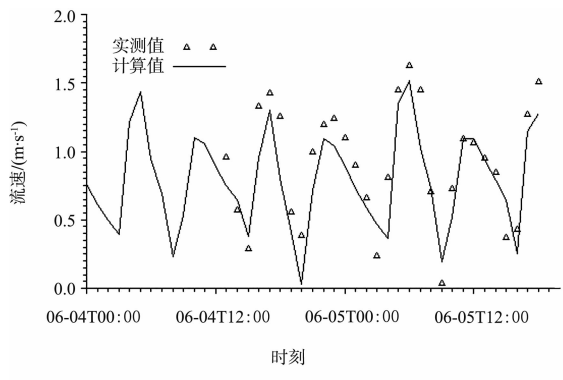


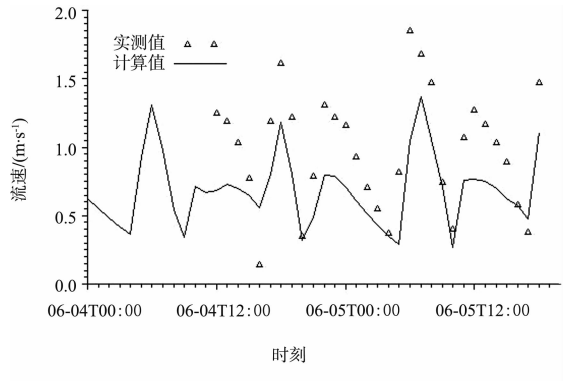
图 3 2012-06-04—06-05 大潮潮位验证



a) 燕尾港

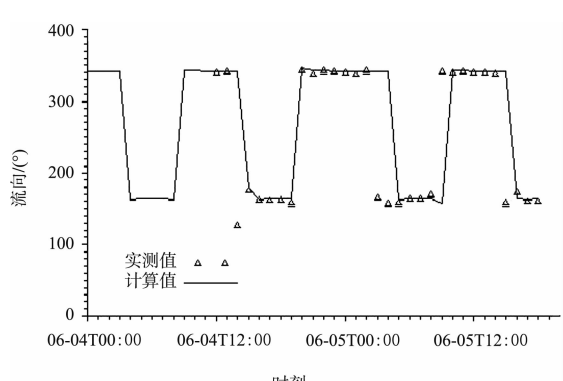


b) 陈家港

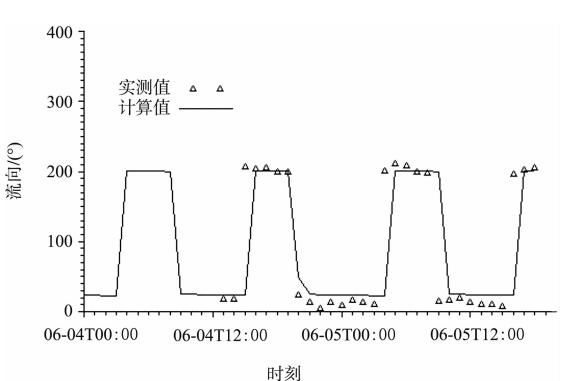


c) 响水

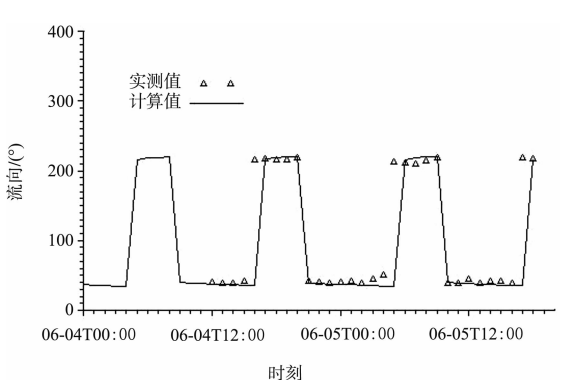
图 4 2012-06-04—06-05 大潮流速验证



a) 燕尾港



b) 陈家港



c) 响水

图 5 2012-06-04—06-05 大潮流向验证

3 灌河河口整治措施对水动力环境的影响

应用验证好的二维水流数学模型，采用 2012-06-04—06-05 大潮作为计算潮型对灌河港区各方案进行模拟计算，见表 2。其中导堤高程基面为 85 高程系。

表 2 灌河整治工程方案

方案	状态	整治措施
1	原始	整治工程前
2		仅现有导堤工程
3		仅现有(2 万吨级)航道工程
4	整治	现有导堤工程(高程为 0.368 m) + 现有(2 万吨级)航道工程
5		导堤工程(高程为 1.93 m) + 现有(2 万吨级)航道工程

3.1 灌河河口整治工程对纳潮量的影响

纳潮量是维持灌河河道水深的主要因素，若纳潮量降低，河道会逐渐淤浅并萎缩。因此，在河口地区修建导堤工程必须要兼顾入海河流的稳

定性, 尤其不能影响以潮汐动力为主“潮汐水道”的纳潮量。为研究口门整治工程对纳潮量的影响, 以河口处的燕尾港、陈家港及上游的响水(图 1)作为研究对象, 一次涨潮流(或落潮流)过程中通过断面的潮量可近似认为等于灌河的纳潮量, 可根据下述公式计算纳潮量:

$$\Omega = \sum_{i=1}^n Q_i \Delta t_i$$

(7)

式中: Ω 为纳潮量; Δt_i 为时间间隔, 且 $\Delta t_1 + \Delta t_2 + \cdots + \Delta t_i$ 即等于一次涨潮流(或落潮流)历时; Q_i 为通过河口断面的时段平均流量。

现有口门整治工程前后燕尾港、陈家港、响水断面的纳潮量变化对比见表 3, 分析计算结果如下:

1) 仅现有导堤工程(方案 2) 方案计算结果表明: 由于双导堤的修建。减小了口门处过水断面, 水量减少, 使得方案 2 的纳潮量降低。燕尾港纳潮量比口门整治前(方案 1)减小 0.106 亿 m^3 , 陈

家港减小了 0.079 亿 m^3 , 响水减小了 0.046 亿 m^3 , 分别减小了 10%、9.4%、8.8%。

2) 仅现有航道工程(方案 3) 方案计算结果表明: 燕尾港纳潮量比口门整治前(方案 1)有所增加, 纳潮量增大 0.012 亿 m^3 , 陈家港增加 0.008 亿 m^3 , 响水增加了 0.004 亿 m^3 , 分别增加了 1.1%、0.9%、0.7%。

3) 现有导堤工程 + 现有航道工程(方案 4) 方案计算结果表明: 燕尾港纳潮量相对于口门整治前(方案 1)减小了 0.022 亿 m^3 , 陈家港减小了 0.016 亿 m^3 , 响水减小了 0.009 亿 m^3 , 分别减小了 2.1%、1.9%、1.7%。

4) 导堤工程(1.93 m) + 现有航道工程(方案 5) 方案计算结果表明: 燕尾港纳潮量相对于口门整治前(方案 1)减小了 0.052 亿 m^3 , 陈家港减小了 0.039 亿 m^3 , 响水减小了 0.022 亿 m^3 , 分别减小了 4.8%、4.6%、4.2%。

表 3 口门整治工程前后纳潮量及大潮高低潮位变化

方案	纳潮量/亿 m^3			潮位类型	潮位/m		
	燕尾港	陈家港	响水		燕尾港	陈家港	响水
口门整治工程前 (方案 1)	1.070	0.838	0.523	高潮位	2.423	2.455	2.725
				低潮位	-1.795	-1.793	-1.852
				潮差	4.218	4.248	4.577
仅现有导堤工程 (方案 2)	0.964	0.759	0.477	高潮位	2.418	2.444	2.709
				变幅	-0.005	-0.010	-0.016
				低潮位	-0.888	-0.937	-1.070
				变幅	0.907	0.856	0.782
				潮差变化	-0.912	-0.867	-0.798
仅现有航道工程 (方案 3)	1.082	0.846	0.528	高潮位	2.427	2.460	2.735
				变幅	0.004	0.005	0.010
				低潮位	-1.916	-1.894	-1.893
				变幅	-0.121	-0.101	-0.041
				潮差变化	0.125	0.106	0.051
现有导堤工程 + 现有航道工程 (方案 4)	1.048	0.822	0.514	高潮位	2.420	2.451	2.720
				变幅	-0.003	-0.004	-0.005
				低潮位	-1.521	-1.555	-1.658
				变幅	0.274	0.238	0.194
				潮差变化	-0.277	-0.242	-0.199
现有导堤工程 (1.93m) + 现有航道工程 (方案 5)	1.018	0.799	0.501	高潮位	2.396	2.419	2.662
				变幅	-0.027	-0.035	-0.063
				低潮位	-1.429	-1.464	-1.566
				变幅	0.366	0.329	0.286
				潮差变化	-0.393	-0.365	-0.349

现有口门整治工程（方案 4）实施后纳潮量减小的量值大大小于仅导堤工程（方案 2）实施后纳潮量的减少值，这是由于航道疏浚工程可减小导堤工程带来的影响，使得外海进入灌河的水体量相对于口门整治前略有减小。

3.2 灌河口口门整治工程对潮位的影响

从表 3 可知，口门整治工程前后导堤沿程各点高低潮位的变化幅度并不一致，研究结果表明：

1) 仅现有导堤工程（方案 2）实施后，高潮位变化不大，由于双导堤的束水作用，落潮不顺畅，使得低潮位在口门处抬高近 1 m，因此导堤工程对于口门处潮位的影响较大。

2) 仅现有航道工程（方案 3）实施后，沿程的高潮位变化不大，由于航道挖深，落潮流更为顺畅，使得沿程低潮位有所降低。同时越往上游变化幅度越小，口门燕尾港低潮位降低约 12 cm。

3) 现有导堤工程 + 现有航道工程（方案 4）实施后，高潮位变化不大，低潮位相对于整治工程前（方案 1）平均抬高约 20 cm，因此导堤工程应配合航道疏浚工程来维持潮差，进一步维持纳潮量。

4) 导堤工程（1.93 m）+ 现有航道工程（方案 5）实施后，由于导堤在高潮位时过水时间大大缩短，纳潮量减小，因此高潮位相对于整治工程前（方案 1）有所降低，口门燕尾港低潮位抬高约 36 cm。

3.3 灌河口口门整治工程对流速的影响

灌河口口门整治前，潮流受连云港海域潮波系统的控制为逆时针方向旋转潮流，从图 6 可知，在导堤工程和航道工程实施以后，口门燕尾港处的流态变化不大，导堤内呈现出顺着导堤的往复流，流速也进一步增大，而口外流态较工程前改变不大，依然为旋转流。说明导堤起到了归顺水流的作用，对于维持航道而言是有利的。

从流速变化来看（图 7），口门整治工程实施后即方案 4，导堤内特征点（inside-2 和 inside-3）

由于航道工程实施后水流归顺使得落潮流速变大；口门燕尾港往上游的特征点在工程实施后涨潮流速变化不大，落潮流速稍有减小。即口门整治工程的实施对于导堤内的特征点影响较大，对口门往上的流速影响较小。

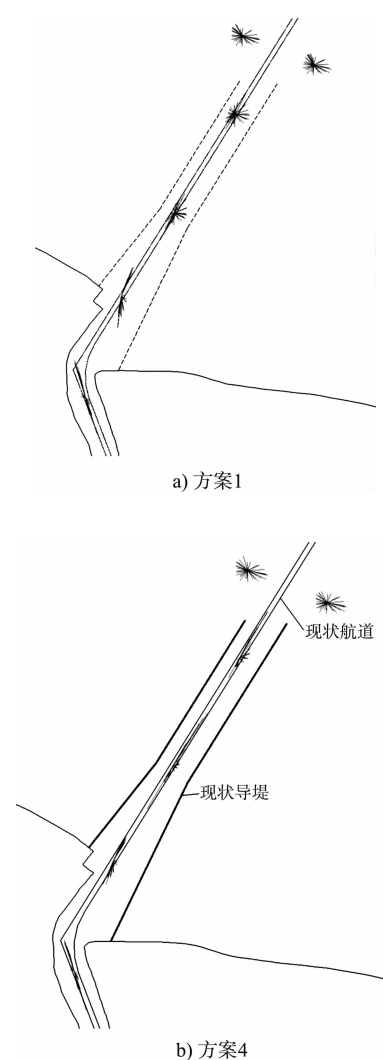
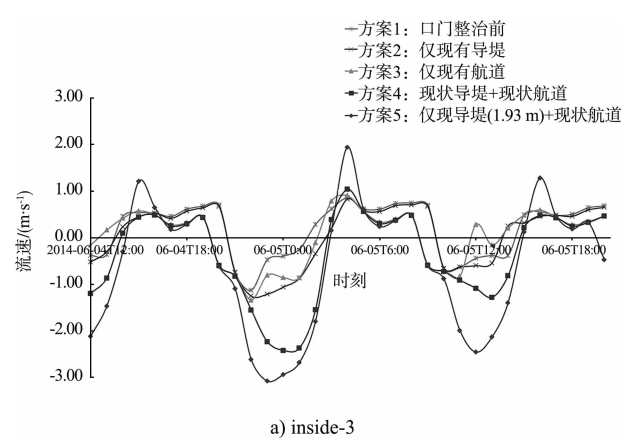


图 6 灌河口口门整治工程前后流矢图对比



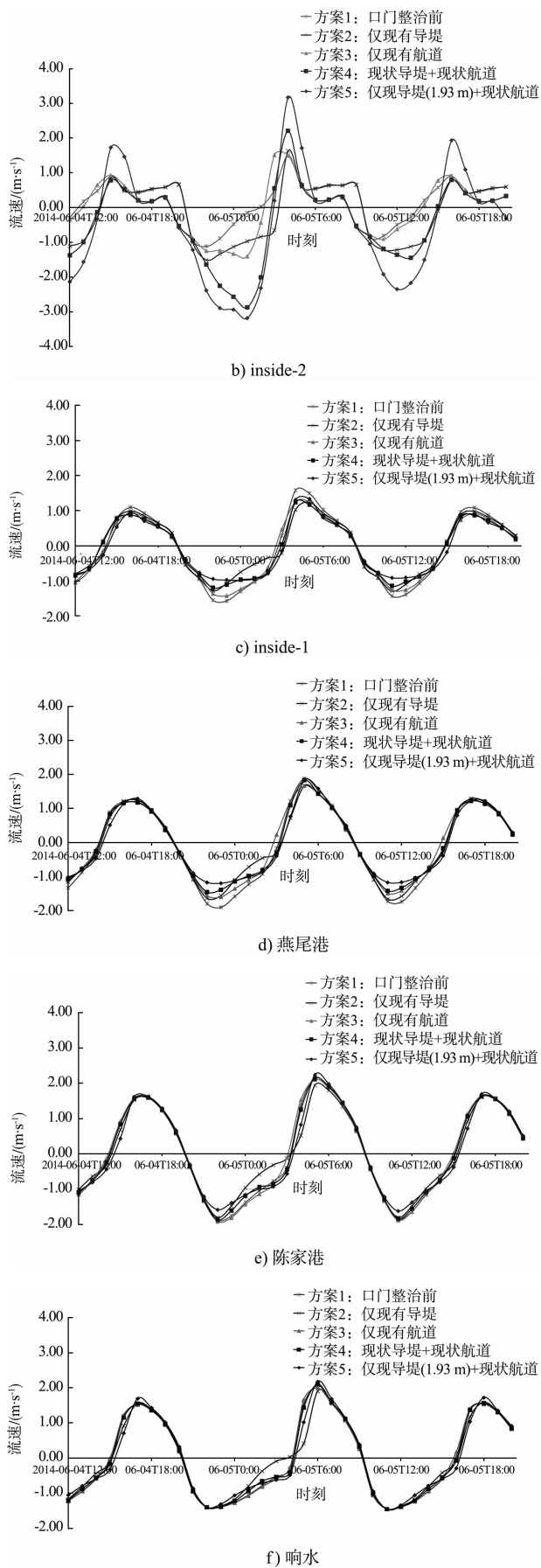


图 7 灌河整治工程前后特征点流速对比

4 结论

灌河口口门处存在拦门沙, 需通过整治工程改善口门环境。采用了双导堤工程并配合航道工程解决拦门沙问题, 导堤堤顶高程约在当地平均中潮位附近, 双导堤间距约 1 km, 整治工程对灌河口水动力环境影响如下:

- 1) 纳潮量是维持灌河河道水深的重要因素, 仅实施双导堤工程 (方案 2) 对纳潮量影响较大, 若配合航道疏浚工程 (方案 4) 能有效改善导堤等工程对纳潮量的影响。
- 2) 仅口门导堤工程 (方案 2) 对低潮位影响相对较大, 使得河道内低潮位有所抬高, 越往河道上游低潮位抬高越小, 而配合口门航道疏浚工程 (方案 4) 实施后影响减小。
- 3) 口门导堤工程和航道工程同时实施后 (方案 4), 双导堤内水流进一步归顺, 流速有所增大, 对维持航道水深是有利的。

根据上述分析, 灌河口口门整治工程在实施双导堤工程的同时应对其航道进行疏浚 (方案 4), 以维持河口纳潮量, 进一步维持灌河口河道水深。

参考文献:

[1] 刘玮玮, 楼飞, 虞志英. 灌河口河道冲淤演变及航道自然条件分析[J]. 海岸工程, 2006 (25): 14-20.

[2] 丁贤荣, 张鹰, 张东生. 灌河口沙嘴沉积特征与河口演变[J]. 河海大学学报, 1993, 21 (3): 85-92.

[3] 张伟, 周凯. 灌河口双导堤整治工程对岸滩演变的影响分析[J]. 水运工程, 2009 (10): 42-46.

[4] 高祥宇, 赵晓冬. 灌河口航道工程和陈家港电厂码头二维潮流数学模型及泥沙淤积分析[C]//中国海洋工程学会. 第十二届中国海岸工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2005: 232-238.

[5] 丘兆山. 有限体积法及其在近岸潮流计算中的应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003.

[6] 李孟国. 三角形网格在水动力水环境数学模型中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2001 (3): 59-64.

(本文编辑 武亚庆)