



# 连云港海域围垦工程对水沙环境的影响\*

陈鹏<sup>1</sup>, 李瑞杰<sup>1,2</sup>, 董啸天<sup>1</sup>, 李春辉<sup>1</sup>, 肖千璐<sup>1</sup>, 王少朋<sup>1</sup>

(1. 河海大学 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 环境海洋实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 基于嵌套的平面二维潮流泥沙数学模型, 模拟了海州湾海域滨海示范区围垦工程实施前后的潮流场、悬沙分布, 并采用实测资料对模型进行验证, 分析围垦工程后计算海域潮流场、悬沙场及海床冲淤场的水沙环境的变化情况。结果表明: 围垦后研究海域整体的潮流场和悬沙场变化较小, 但围垦后附近海域纳潮量有所减小引起围区附近流速减小, 围垦工程附近基本呈现淤积的状态, 工程左侧吹填坑淤积强度较大, 临洪河口则出现局部冲刷。

**关键词:** 水沙环境; 围垦工程; 潮流泥沙; 海州湾

中图分类号: P 731.1; P 737.14

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)03-0029-06

## Influence of reclamation project on hydrodynamic and sediment environment of Lianyungang sea area

CHEN Peng<sup>1</sup>, LI Rui-jie<sup>1,2</sup>, DONG Xiao-tian<sup>1</sup>, LI Chun-hui<sup>1</sup>, XIAO Qian-lu<sup>1</sup>, WANG Shao-peng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Laboratory of Ocean Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Based on two dimensional nested gird tidal current and sediment numerical model, we simulate the tidal current field and distribution of suspended sediment in reclamation of Haizhou bay. The simulation fits well with the measured data. Analyzing the impact of the current field on the surrounding sea and the annual change in erosion and deposition after the project, we know that the whole calculated area tidal current and suspended filed change little. But decrease of the current velocity near the project causes reduction of the tidal prism. The deposition is presented near the project sea. The siltation intensity of the filling pit at the left is larger, and erosion is presented in part of Linghong river estuary.

**Keywords:** hydrodynamic sediment environment; reclamation project; current and sediment; Haizhou bay

围垦工程在解决沿海城市人多地少的矛盾以及城市化进程中起到重要作用。围垦工程按地形地貌可分为河口型围垦、港湾型围垦、海岛型围垦和人工岛围垦<sup>[1]</sup>。河口型围垦会对河道岸线、水沙环境及生态环境产生影响, 因此对围垦后进行分析研究很有必要<sup>[2-3]</sup>。陈晓英等<sup>[4]</sup>根据卫星数据研究了海州湾近 40 年来的岸线时空变化, 岸线

以人工类型为主, 2010 年以后围填海成为海州湾地区海岸开发的首要方式。吴慧琴等<sup>[5]</sup>通过建立平面二维潮流泥沙数学模型对舟山钓梁二期围垦工程南堤实施前后的流场及冲淤变化进行了分析研究。杨第昌等<sup>[6]</sup>应用 MIKE21 模型对海州湾及邻近海域的潮流场进行模拟, 并采用根据甯国仁河相关系推导出的分析模式, 认为围垦不会对临

收稿日期: 2015-09-18

\*基金项目: 国家海洋局海洋公益性行业科研专项项目(201205005); 国家自然科学基金项目(41276017); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYZZ15\_0143)

作者简介: 陈鹏 (1989—), 男, 硕士研究生, 从事物理海洋学物质输运方向研究。

洪河产生较大淤积。张玮等<sup>[7]</sup>利用数学模型研究连云港附近海域的泥沙运动,该模型能够同时模拟淤泥质与粉砂质泥沙运动。黄志扬<sup>[8]</sup>在数学模型的基础上,模拟了连云港附近海域潮流、泥沙运动,研究了航道的回淤问题。以数学模型研究围垦工程对水沙环境的影响,方便快捷并且有较高的可靠度,在前人研究的基础上建立二维数学模型,模拟滨海围垦示范工程实施前后对水沙环境产生的影响并进行分析研究。

### 1 研究海域概况

海州湾沿岸河流从北至南有绣针河、龙王河、兴庄河、青口河、临洪河等。海岸类型主要是粉沙淤泥质海岸,其次为基岩和沙质海岸。海州湾属近海正规半日潮,受黄海反时针潮波系统的影响,外海深水区为逆时针的旋转流,海州湾近岸区域,水流基本呈往复流。根据实测资料<sup>[9]</sup>可知,在海州湾内,底质中值粒径分布规律主要表现为秦山岛以北海域较粗、以南较细。根据规划,南侧临洪河口至西墅岸段的围垦面积为 22.66 km<sup>2</sup>,面积较大,且紧邻临洪河口<sup>[10]</sup>,见图 1。

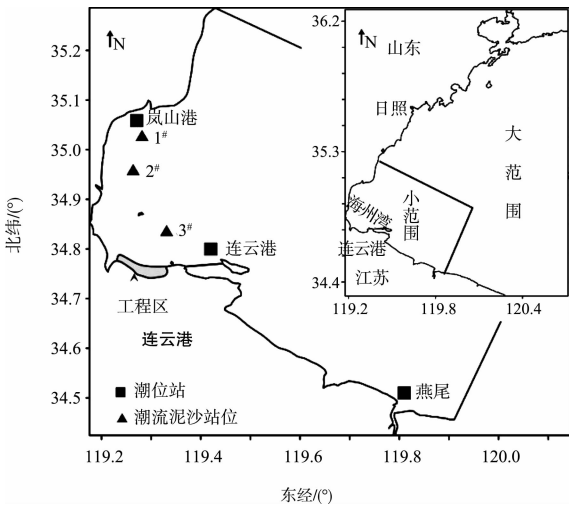


图 1 工程研究区域

## 2 数学模型

### 2.1 基本方程

#### 1) 连续方程。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} - \frac{1}{\rho h} \cdot \quad (2)$$

$$\left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( N_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( N_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{wx}}{\rho h}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} - \frac{1}{\rho h} \cdot \quad (3)$$

$$\left( \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( N_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( N_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{wy}}{\rho h}$$

式中:  $t$  为时间;  $h$  为总水深;  $\xi$  为水位;  $u$ 、 $v$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的垂向平均流速;  $g$  为重力加速度;  $\rho$  为海水密度;  $f$  为柯氏参量 ( $f=2\omega \sin\varphi$ ,  $\omega$  为地球自转的角度,  $\varphi$  为当地的纬度);  $N_x$ 、 $N_y$  为  $x$ 、 $y$  方向水流紊动黏性系数;  $S_{xx}$ 、 $S_{xy}$ 、 $S_{yz}$ 、 $S_{yy}$  为波浪辐射应力张量的 4 个分量;  $\tau_{bx}$ 、 $\tau_{by}$  为波浪、潮流共同作用下的底部切应力;  $\tau_{wx}$ 、 $\tau_{wy}$  为风应力。

#### 2) 悬沙扩散方程。

平面二维悬沙运动方程为:

$$\frac{\partial(hS)}{\partial t} + \frac{\partial(huS)}{\partial x} + \frac{\partial(hvS)}{\partial y} = \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_x h \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_y h \frac{\partial S}{\partial y} \right) + F_s$$

式中:  $S$  为垂向平均含沙量;  $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$  为  $x$ 、 $y$  的泥沙扩散系数;  $F_s$  为床面冲淤函数。

床面冲淤函数  $F_s$  与泥沙特性和底部切应力相关:

$$F_s = \begin{cases} \alpha\omega S(\tau_b/\tau_d - 1) & \tau_b < \tau_d \\ 0 & \tau_d \leq \tau_b \leq \tau_e \\ M(\tau_b/\tau_e - 1) & \tau_b > \tau_e \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\tau_b$  为床面底部切应力;  $\alpha$  为沉降系数;  $\omega$  为泥沙沉降速度;  $M$  为冲刷系数;  $\tau_d$  为临界淤积切应力;  $\tau_e$  为临界冲刷切应力。

#### 3) 海床冲淤计算。

由平衡输沙法计算冲淤量<sup>[11]</sup>, 公式如下:

$$\Delta = \frac{\alpha' \omega S_1 t}{\rho_c} \left[ \left( \frac{u_{12}^2}{u_1} \right)^m - 1 \right] \quad (6)$$

式中:  $\Delta$  为年冲、淤厚度;  $\alpha'$  为冲、淤几率;  $u_{12}$  为工程建成后水深尚未变化时的流速;  $m$  为平衡含沙量中的指数;  $t$  为冲、淤时间。

方程离散及求解: 空间离散采用有限体积法,

时间离散采用二阶 Runge-Kutta 方法。

### 2.2 网格与模型参数

首先建立图 1 所示的包含山东部分海域和江苏连云港、废黄河三角洲海域的大范围模型,采用青岛、黄岛、日照、连云港和燕尾 5 个潮位站对潮位进行验证,潮位验证结果良好可以为小范围模型提供边界条件。其次建立包含工程区的小范围模型(图 1),模型岸线从日照市到盐城市响水县,计算海域包括江苏海州湾海域和部分山东海域,北起日照(35°17'8"N, 119°25'43"E),南至灌河口以北盐城响水(34°27'22.5"N, 119°54'39"E),东至黄海(34°57'6"N, 120°8'46"E)。模型采用三角形网格剖分计算区域(图 2),对工程区域进行局部加密,能较好地贴合自然岸线,网格单元 18 352 个,网格节点 9 434 个。动边界处理采用干湿网格点法,用临界水深 0.05 m 作为干湿的判断标准。曼宁系数根据经验值和参考文献,经调试取值 0.014 ~ 0.034。波浪场采用与计算时段相同时长的经验验证后的波浪场。泥沙干密度取值 760 kg/m<sup>3</sup>。涡黏系数采用 Smagorinsky 公式求解,考虑絮凝的影响,泥沙沉速采用下式计算:

$$\omega = \omega_0 FD \quad (7)$$

式中:  $\omega_0$  为单颗粒泥沙的沉降速度;  $F$  为絮凝因子;  $D$  为衰减系数,取值  $4 \times 10^{-4}$  m/s。临界淤积切应力取 0.06 ~ 0.13 N/m<sup>2</sup>; 临界冲刷切应力 0.2 ~ 0.45 N/m<sup>2</sup>。模型计算时段为 2006-08-13T00:00—2006-09-13T00:00,模型计算步长 60 s。

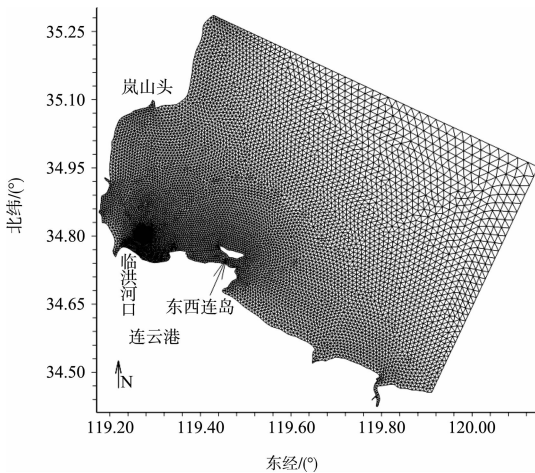
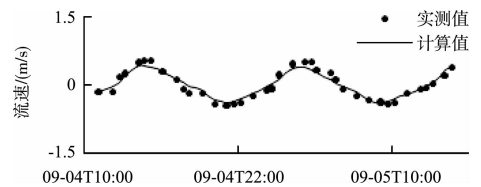


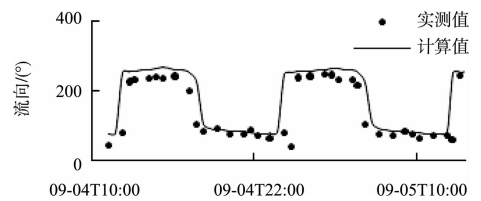
图 2 小范围计算区域网格剖分

### 3 模型验证

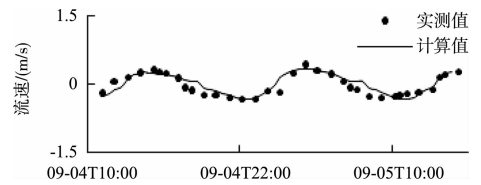
小范围模型潮位采用岚山港、连云港和燕尾 3 个潮位站(图 1)实测进行验证,计算潮位过程线与验潮站位提供值一致,表明所建立的海州湾海域小范围模型能较好地模拟研究区域的潮位变化。模型使用 2006 年夏季大潮和中潮的实测水文泥沙资料,文中给出 3 个潮流泥沙测站的 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>大潮的验证结果(图 3、4)。从泥沙实测站位验证结果可以看出,泥沙模型可以较好地模拟研究区域的潮流泥沙运动情况。同时对工程前泥沙冲淤强度模拟计算,经过地形冲淤验证(图 5),模型验证结果良好。



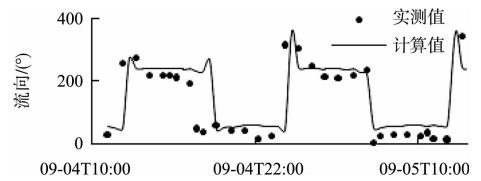
a) 1<sup>#</sup>流速



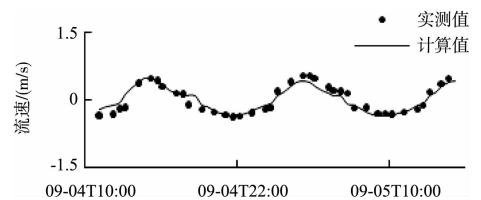
b) 1<sup>#</sup>流向



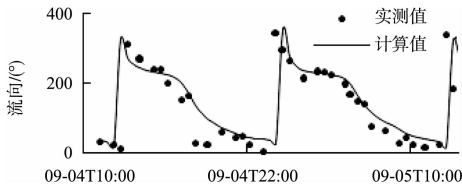
c) 2<sup>#</sup>流速



d) 2<sup>#</sup>流向

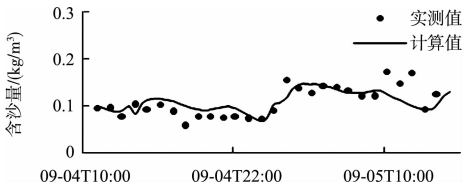


e) 3<sup>#</sup>流速

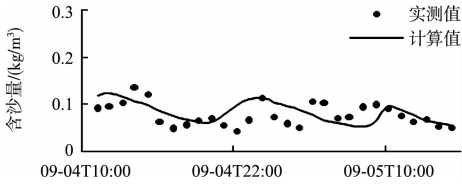


f) 3# 流向

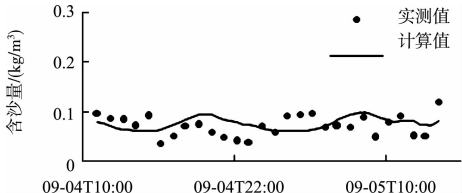
图3 1#、2#和3#大潮流速流向验证



a) 1#

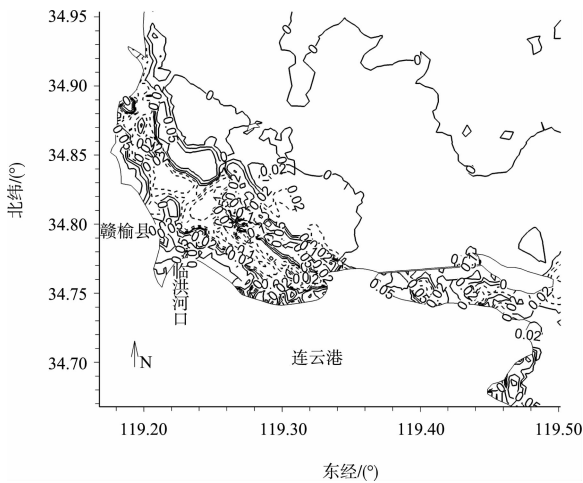


b) 2#

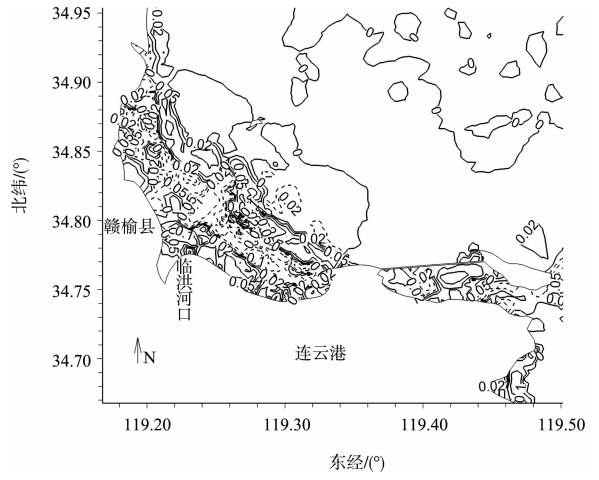


c) 3#

图4 大潮含沙量验证



a) 实测



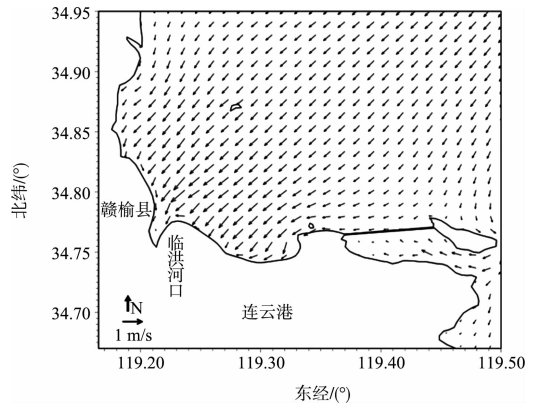
b) 模拟

图5 工程前冲淤强度验证

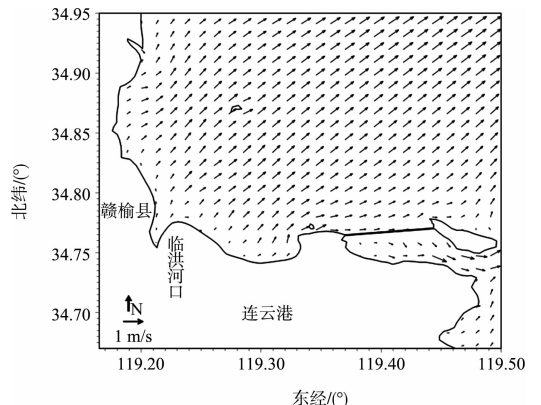
### 4 工程影响分析

#### 4.1 工程前后流场分析

由工程前大潮涨急、落急(图6)的流场可以看出:围垦工程实施前涨潮时,一股潮流沿南黄海



a) 涨急



b) 落急

图6 工程前大潮涨、落急流场

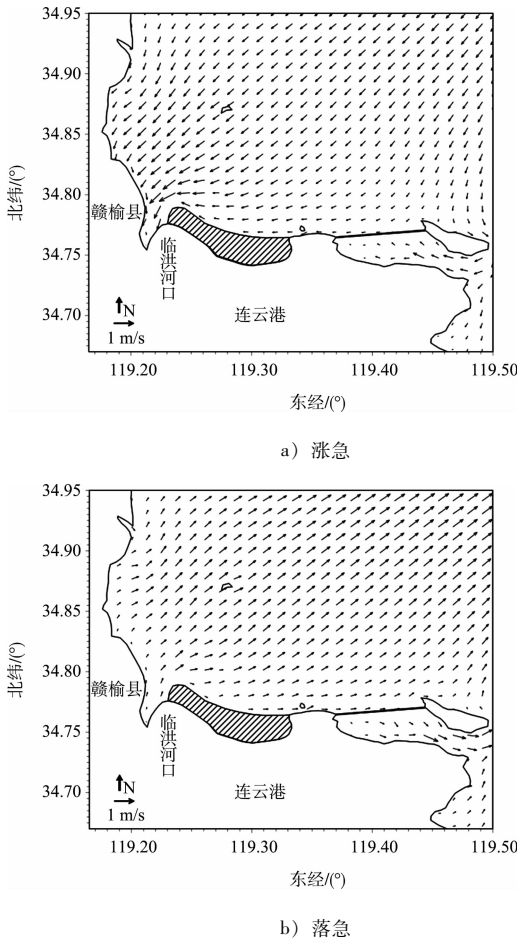


图7 工程后大潮涨、落急流场

前进潮波受到山东半岛的反射转而沿岸线向西南方向流去,经岚山港向海州湾湾顶流去;一股潮流沿东西连岛和西大堤向工程区流去,两股潮流在海州湾湾顶汇合。落潮时近岸区域呈现为往复流,潮流沿原路径流向外海,深海区呈现较明显的逆时针旋转流。由于涨潮历时较落潮历时短,涨潮潮流动力要强于落潮时的潮流动力。海州湾是开敞式海域,属于非正规半日潮性质,海域潮流动力条件较弱,潮流流速整体相对较弱,流速为0.2~0.4 m/s。工程实施后对计算海域大范围流场的流态影响较小,但对工程区域附近有比较明显的影响,围垦工程后由于海州湾海域纳潮量有所减小,工程附近海域除临洪河口因右岸延伸流速稍有增加外,其他区域均有所减小。

4.2 工程前后悬沙变化

由工程前大潮悬沙场(图8a))可知,对于半封闭海域的海州湾,海洋动力条件较弱,海域整体悬

沙浓度较低,悬沙浓度呈现近岸大、外海小的特点,同时还存在南高北低的趋势,海域涨潮、落潮时期的悬沙浓度差异不太明显,一般涨潮浓度略大于落潮,此情况可以由涨潮历时较落潮短,潮流速度较大而引起悬沙浓度增大来解释。在潮流的作用下,悬沙从辐射沙脊经过废黄河口流入海州湾海域,同时波浪传播到近岸海域时,水深变浅发生波浪破碎,破碎波具有较强的掀沙能力,即潮流输沙、波浪掀沙,由此海州湾湾顶临洪河口海域形成相对的悬沙高浓度区。对比工程后大潮悬沙场(图8b))悬沙浓度分布规律基本不变,围区附近海域悬沙含量减小,临洪河口前仍是悬沙浓度高值区,但是临洪河口悬沙浓度高值区范围有所减小。在工程附近海域,工程前(图8a))悬沙浓度高值区的右侧含沙量0.15 kg/m<sup>3</sup>的等值线在工程后(图8b))则是0.06 kg/m<sup>3</sup>,说明工程附近海域在围垦工程后悬沙浓度有较大幅度的减小。

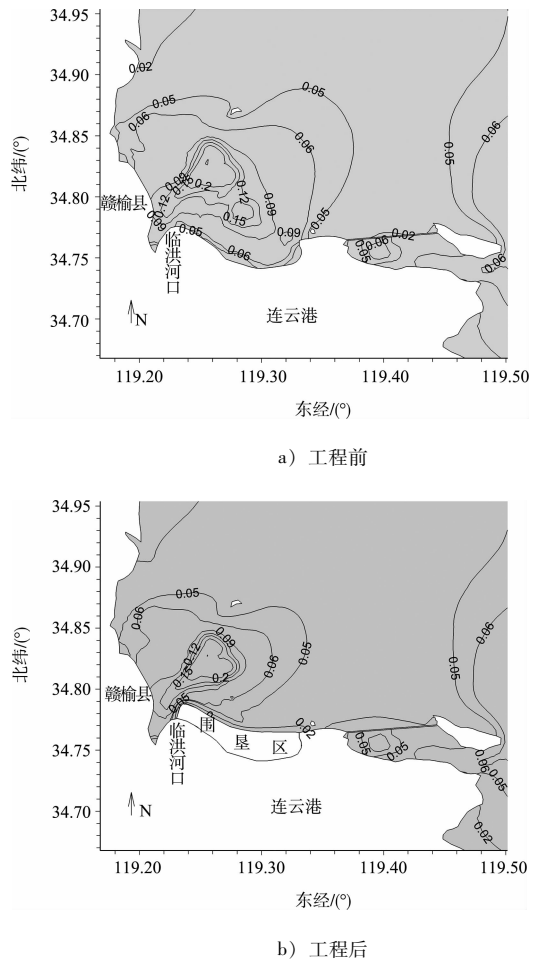


图8 工程前后大潮悬沙场(单位: kg/m<sup>3</sup>)

### 4.3 工程前后冲淤分析

围垦工程实施前,整体海域保持冲淤平衡,局部出现微冲和微淤,外海处于微冲,近岸基本处于微淤状态。工程实施后由前述的流场分析可知,流场流态及流向基本未发生改变,但在工程附近流速因纳潮量的减小,潮流流速总体减小,又知挟沙力与水流流速息息相关,由冲淤场(图9,实线表淤积,虚线表冲刷)看出:围垦工程附近局部海域因流速的减小,整体基本呈淤积的状态,尤其在围垦区的东北向区域淤积状态较为明显,淤积强度在0.2~0.7 m/a。同时在场图中有一处较明显的淤积区,淤积强度最高可达5.5 m/a,该区域淤积异常高是因为该区域在吹填坑处,该吹填坑工程前水深范围在2.2~3 m,工程后水深可达10 m,由于此处地形变化较大,潮流经过此处深水区时,流速减小很明显,所以吹填坑处出现了淤积高值区。相对于整体的淤积,临洪河口因流速小幅增加,出现冲刷的情况,冲刷强度0.3~0.5 m/a。为了更好地分析工程前后冲淤变化情况,在工程附近海域,临洪河右岸到连岛西侧,布设如图10所示的5列共20个特征站位,从工程后特征站位冲淤强度(表1)可以看出:沿围垦区岸线由西向东冲淤强度依次增强,从A3~E4冲淤强度为0.006~0.651 m/a,在C、D、E组特征站位表现为随着离围垦区距离增大淤积强度逐渐减弱,由于特征站位B3不设在吹填坑,所以出现淤积强度较大值。从现场观测及模型计算结果来看,吹填坑的回淤强度十分可观,使吹填坑能够较快淤积起来,使吹填坑附近的水沙环境较快恢复,同时也说明在工程附近取土吹填是合适的。

表1 特征站位年淤积强度

特征站位	淤积强度/(m/a)	特征站位	淤积强度/(m/a)
A1	0.113	C3	0.384
A2	0.107	C4	0.401
A3	0.006	D1	0.400
A4	-0.417	D2	0.442
B1	0.228	D3	0.495
B2	0.215	D4	0.586
B3	4.647	E1	0.371
B4	0.152	E2	0.405
C1	0.345	E3	0.449
C2	0.366	E4	0.651

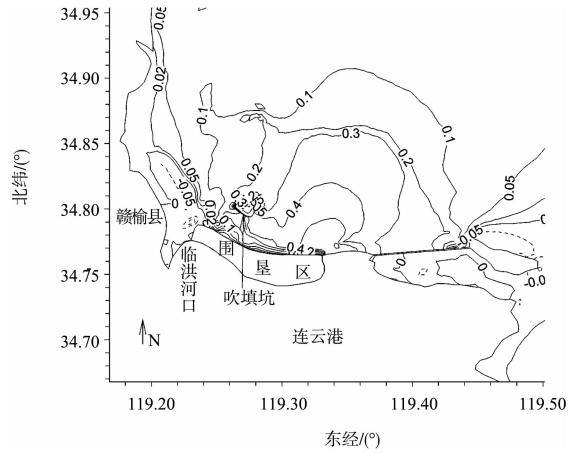


图9 工程后冲淤强度分布(单位:m/a)

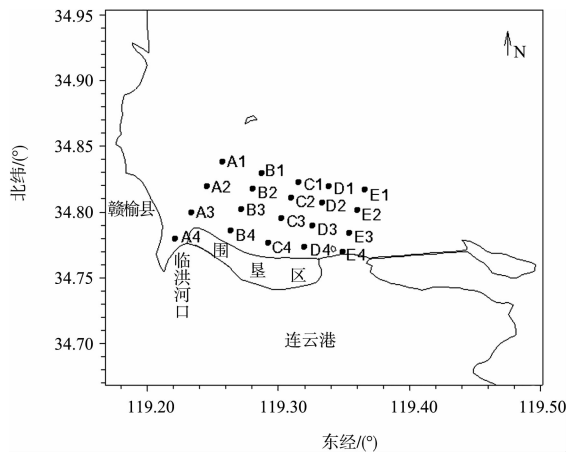


图10 特征站位布置

### 5 结论

1) 围垦工程后潮流场的流态未发生改变,近岸往复流,外海逆时针旋转流,工程附近流速较工程前降低;2) 围垦工程后工程附近海域由于潮流流速的减小,悬沙浓度整体有所降低,特别在工程区前表现较为明显;3) 围垦工程后,研究海域海床冲淤状态与工程前基本一致,外海处于冲淤平衡的状态,近岸有微弱的冲刷和淤积,在工程附近围区的右侧至西大堤呈现淤积状态,淤积强度在0.2~0.7 m/a,临洪河口由于围垦造成入海口的束窄出现局部冲刷,冲刷强度约为0.4 m/a;围区左侧吹填坑由于地形较附近区域发生较大变形,吹填坑淤积较为明显,淤积强度为5.5 m/a,由吹填坑淤积较快可知在工程附近海域取土吹填是合理的。