

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.03.013

长江口北槽丁坝坝田区潮流及污染物迁移扩散特征

路川藤¹, 黄华聪², 钱明霞¹

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 上海河口海岸科学研究中心, 上海 201201)

摘要: 为研究长江口深水航道北槽坝田水流结构, 基于非结构网格 FVM 法, 建立了长江口大范围二维潮流水质耦合数学模型, 在数学模型验证良好的基础上, 对北槽涨落潮流结构及坝田污染物扩散进行了研究。结果表明, 北槽中上段北坝田高潮位明显高于主槽, 北槽下段, 高潮位与主槽相近; 南坝田高潮位大都高于主槽, 南北坝田低潮位与主槽相近; 坝田污染物落潮时释放扩散速度较快, 南侧坝田污染物扩散速度比北坝田快, 大潮坝田污染物扩散速度比小潮快, 坝田外部污染物扩散速度比坝田内部快; 坝田释放污染源后, 污染物随涨落潮流在坝田与主槽内运动, 短时间内污染物进入航道的量较少。

关键词: 长江口; 北槽; CJK3D-WEM; 丁坝坝田; FVM; 污染物; 扩散

中图分类号: TV131

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2016)03-0265-07

Tidal current and pollutant diffusion characteristics in spur dike field of North Passage in Yangtze Estuary

LU Chuanteng¹, HUANG Huacong², QIAN Mingxia¹

(1. State Key Lab of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China)

Abstract: In order to study the flow structure in a spur dike field of the North Passage in the Yangtze Estuary, a two-dimensional large-scale coupling model for tidal current and water quality was established using the finite volume method (FVM) and unstructured grids. Based on model verification, the flow structure and pollutant diffusion in the spur dike field of the North Passage during flood tides and ebb tides were studied. The following conclusions are drawn: the high tide level in the north spur dike field in the middle-upper reach of the North Passage is significantly higher than that in the main channel, while the high tide level in the lower reach of the North Passage is close to that in the main channel; the high tide level in the south spur dike field is mostly higher than that in the main channel, and the low tide levels in the north and south spur dike fields are close to that in the main channel; the rate of pollutant diffusion in the south spur dike field is higher than that in the north spur dike field, with a relatively high rate of diffusion during ebb tides; the rate of pollutant diffusion in the spur dike field is higher during spring tides than during neap tides, with a relatively high rate of pollutant diffusion outside the spur dike field in contrast to that inside the spur dike field; after release of pollutants in the spur dike field, the pollutants are transported within the spur dike field and the main channel following flood tides and ebb tides, and lesser amounts enter into the waterway in a short period.

Key words: Yangtze Estuary; North Passage; CJK3D-WEM; spur dike field; FVM; pollutant; diffusion

长江口深水航道治理工程完成后, 北槽主槽形成了一条具有一定宽度和深度的水道, 相应的北槽丁坝群

收稿日期: 2015-06-02

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51509161); 水利部公益性行业科研专项(201201070)

作者简介: 路川藤(1983—), 男, 山东烟台人, 工程师, 博士, 主要从事河口动力学研究。E-mail: lct000abc@163.com

坝田普遍淤积,丁坝坝田与主槽河床形态的变化密切相关,相互影响。本文通过数学模型研究北槽坝田污染物迁移扩散规律,进而揭示坝田与主槽水流运动的关系。

多年来,国内外学者对丁坝坝田水流的研究成果颇丰富。长江口北槽丁坝群属于淹没丁坝,淹没丁坝坝头、坝顶均存在水流分离现象,其强弱随淹没程度的不同而变化^[1]。由于坝顶的过水作用,丁坝的阻水作用相对降低,丁坝上游的雍水及下游的主回流长度会有所减弱。水流越过坝顶后,存在明显的水头损失^[2-3],同时部分水流下潜,增加了淹没丁坝流态的复杂性。泥沙多通过余平流进入淹没丁坝坝田形成淤积^[4]。关于坝田水流结构机理研究,多数学者的研究方式是将染色水体注入水槽试验的坝田中,观察染色水体的变化,如 Uijtewaai 等^[5]通过丁坝坝田内染色水体研究了坝田与主水道的通量交换,认为主通道与坝田的通量交换主要通过剪切层与坝田内主回流区完成,Weitbrecht 等^[6]通过水槽物理模型试验研究不同坝长、坝间距的丁坝间的流态及坝田悬浮物质与主流的交换情况,确定了坝田与主流的悬浮物交换系数范围为 0.014~0.051。坝田水流结构还受外界因素的影响,如船行波^[7]、波浪等。

本文在前人研究的基础上,深入研究长江口北槽现状条件下,丁坝群坝田水流结构及坝田污染物迁移扩散情况,为长江口北槽深水航道治理提供技术支持。

1 数学模型

CJK3D-WEM^[8-9]于2014年取得国家软件著作权登记,适用于江河湖泊、河口海岸等涉水工程中的水动力、泥沙、水质、温排、溢油模拟预测研究。

1.1 控制方程

水流、水质运动方程可写为

$$\begin{cases} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} - fu + g \frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{C^2H} = N_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + fv + g \frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{C^2H} = N_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \\ \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = A_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + S - HkC \end{cases} \quad (1)$$

式中: H ——总水深; z ——水位; u 、 v ——流速矢量沿 x 、 y 方向的速度分量; t ——时间; f ——科氏系数; g ——重力加速度; N_x 、 N_y —— x 、 y 向水流紊动黏性系数; C ——水质浓度; A_x 、 A_y —— x 、 y 向水质扩散系数; S ——水质源汇项; k ——水质衰减系数。

采用三角形网格对计算区域进行离散,并将单一的网格单元作为控制单元,水深布置在网格顶点,其他物理变量配置在每个单元的中心,采用有限体积法对式(1)进行离散求解,具体求解过程见文献[10-12]。

1.2 长江口深水航道治理工程

长江口深水航道治理工程(图1)按照“一次规划,分期治理”的原则,分三期实施^[13]。一期工程于1998年1月开工,2001年3月竣工,航道水深由7 m增加到8.5 m(理论深度基准面,下同)。二期工程于2002年4月开工,2005年3月底竣工,航道水深由8.5 m增加到10 m。三期工程于2006年9月底开工,2010年3月通过国家验收,航道全长92.2 km,350~400 m的航道实现了12.5 m水深的全线贯通。目前,长江口深水航道治理工程,共有2条导堤,19座丁坝(图1中N1~N10,S1~S9),且丁坝均为淹没丁坝。

1.3 数学模型范围

数学模型上边界至大通,外边界至-50 m等深线,模型东西向总长约700 km。模型北至江苏盐城港附近,南至浙江宁波,南北向接近600 km。

模型长江口江阴至口外-20 m等深线范围内地形采用2011年实测地形,江阴以上至大通地形采用2005年实测地形,其余地形采用最新海图拼接。数学模型网格数149 901个,网格最小边长10 m,时间步长5 s,紊动黏性系数取0.1,动边界控制水深为0.02 m,上游边界采用流量控制,外海边界采用潮位过程控制。

1.4 数学模型验证

采用2011年8月14—18日共计5 d的长江口实测同步水文资料对模型进行验证,潮位验证结果见图2,潮流验证见图3。具体潮位站点及水文测验垂线位置见图1。从验证结果看,各潮位站高低潮位偏差基本在0.10 m之内,潮流测站流速偏差基本在10%以内,验证良好。

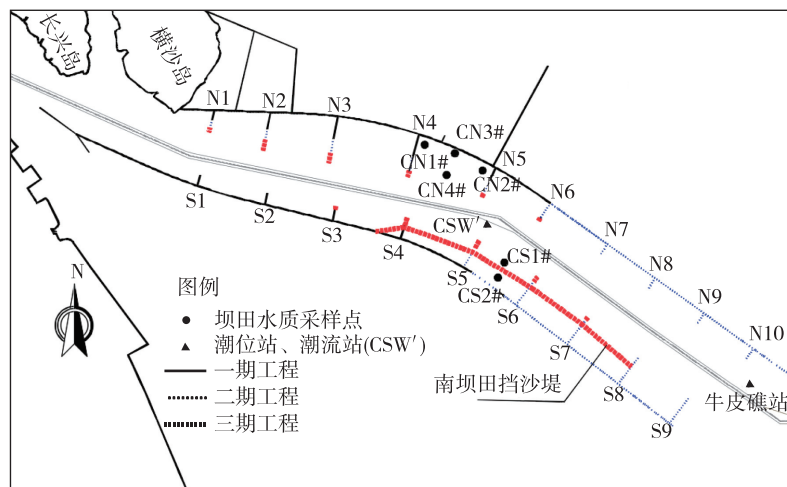


图1 长江口深水航道治理工程

Fig. 1 Deep-water channel regulation project in Yangtze Estuary

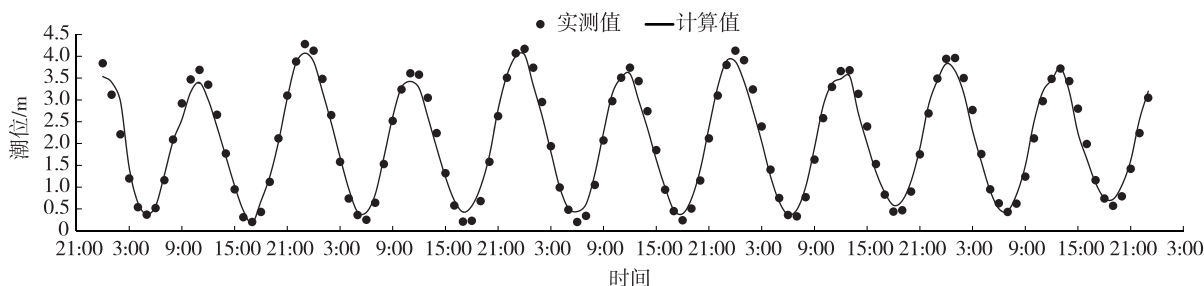


图2 牛皮礁站潮位验证

Fig. 2 Tidal level verification at Niupijiao Station

2 北槽水动力特征

2.1 主槽与丁坝坝田潮位特征

长江口深水航道治理工程三期工程完成后,北槽治导线放宽率由上而下先减小后增大,即自S1丁坝至S4丁坝附近,北槽放宽率为负值。受此影响,潮波自北槽下游向上游传播过程中,高潮位先增大后减小。坝田高潮位与主槽相比,北槽上段的坝田高潮位高于主槽,北槽下段的坝田与主槽高潮位相近,主要因为北槽下段坝田与主槽高程差小,北槽上段高程差大。低潮位时,自下游至上游,低潮位逐渐升高,主槽与坝田低潮位基本相近,差别相对较小。小潮时,坝田与主槽潮位变化特征与大潮类似。

2.2 北槽主槽与丁坝坝田潮流特征

北槽丁坝群坝田水深远远小于主槽水深,坝田潮流较主槽具有先涨先落的特点。长江口潮波通过2种方式进入北槽,一种方式为潮波通过北槽下口进入北槽主槽,主槽内潮流在整治建筑物的作用下,流向与治导线方向基本一致;另一种方式为潮波越过南导堤进入北槽,潮波越过南导堤后,南坝田涨潮流方向为西北向,涨潮流越过南坝田进入北槽主槽后,潮流方向与治导线方向基本一致。因此,涨潮时,南坝田与主槽潮流方向具有明显的差别,北坝田涨潮流方向与主槽相对较一致。由于涨潮时水位高,北槽丁坝群大部分时刻均为淹没丁坝,坝田回流现象相对不明显。落潮时,北槽主槽潮流方向与治导线方向一致,南、北丁坝群坝田均

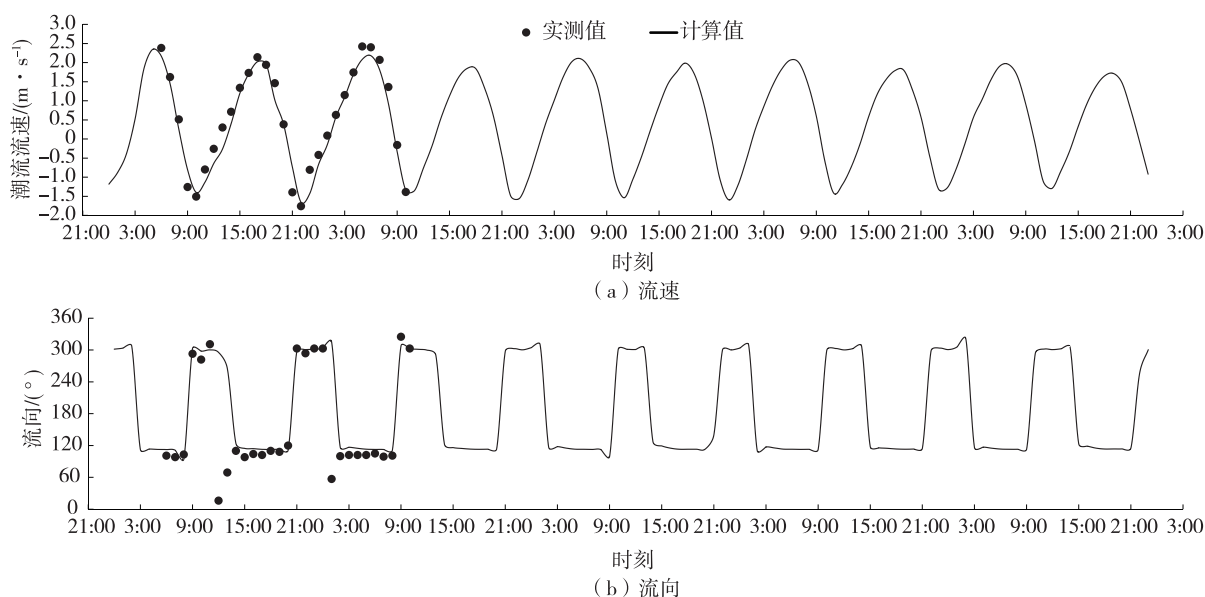


图3 潮流站 CSW'潮流验证

Fig. 3 Tidal current verification at CSW' Station

形成明显的回流,南坝田挡沙堤内潮流微弱。

3 北槽坝田污染物扩散特征

在北槽航道北侧 N4~N5 丁坝之间,航道南侧 S5~S6 丁坝之间放置浓度为 1 (相对浓度) 的保守污染物。N4~N5 丁坝坝田面积约为 $1.57 \times 10^7 \text{ m}^2$, 平均水深约为 1.85 m (吴淞基面,下同), S5~S6 丁坝之间的坝田面积约为 $1.13 \times 10^7 \text{ m}^2$ (其中南坝田挡沙堤内面积约为 $0.66 \times 10^7 \text{ m}^2$, 新坝田面积约为 $0.47 \times 10^7 \text{ m}^2$), 平均水深约为 1.92 m。

坝田释放污染物分为落潮初期释放和涨潮初期释放 2 种情况,潮型分大潮和小潮 2 种。

3.1 落潮初期释放污染物及其扩散特征

图 4 为大潮落潮过程中污染物的运移分布。由图 4 可知,坝田污染物随落潮流向北槽口外输移,北侧 N4~N5 丁坝坝田之间的污染物基本分布在航道北侧,南侧 S5~S6 丁坝坝田之间的污染物基本分布在航道南侧。

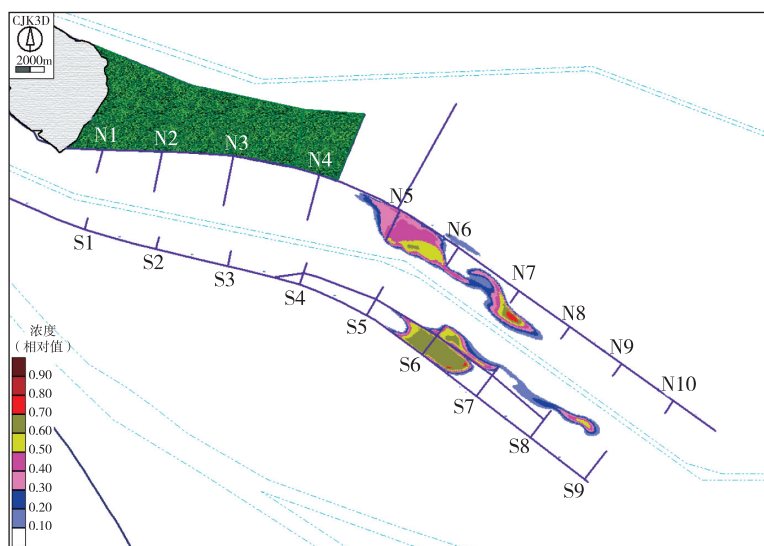


图4 大潮落潮时坝田污染物分布

Fig. 4 Pollutant distribution in spur dike field during ebb of spring tides

图5为大潮落潮初期释放污染物时,北坝田和南坝田污染物变化情况,采样点位置如图1所示。南坝田与北坝田污染物随落潮流向下游运动,对于北坝田,污染物扩散速度自坝田上游至下游逐渐减慢,坝田东北角CN2#点,污染物扩散速度最慢。落憩时,CN1#及坝田中部污染物浓度值接近0,CN2#浓度约为0.33。涨潮后,坝田污染物浓度逐渐升高,北坝田浓度最高约为0.59。坝田污染物浓度随落潮流和涨潮流更替变化,且浓度值呈降低趋势,2d后,污染物基本消失。对于南坝田,由于南坝田挡沙堤的作用,挡沙堤内部CS2#污染物浓度扩散快,约0.5d后,挡沙堤内污染物基本消失,坝田内CS1#污染物浓度衰减速度稍慢,与北坝田类似,坝田内污染物浓度随涨落潮流更替变化,约1.5d后,坝田内污染物基本消失。

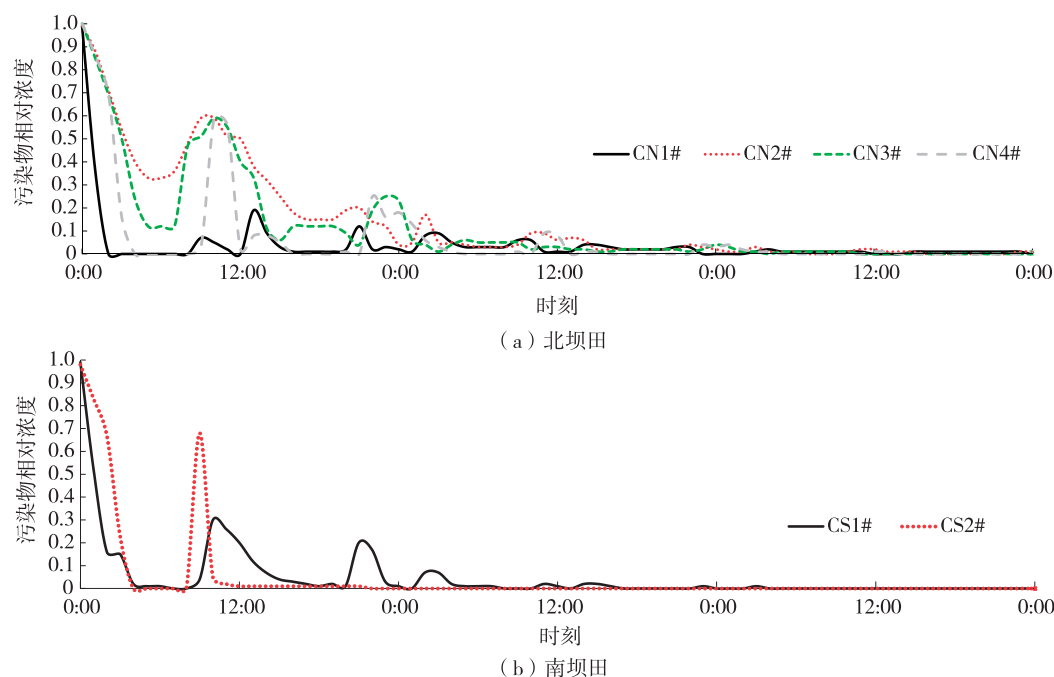


图5 大潮落潮初期坝田污染物扩散

Fig. 5 Pollutant diffusion in spur dike field in initial stage of ebb of spring tides

小潮时水动力弱,坝田污染物扩散速度慢。对于北坝田,靠近北导堤CN2#、CN3#坝田污染物扩散速度较慢,坝田中部CN4#污染物扩散速度最快。对于南坝田,坝田内CS1#点污染物扩散速度明显快于挡沙堤内CS2#点,与大潮有所差异。南北坝田约2.5d后,坝田内污染物浓度小于0.05。

3.2 涨潮初期释放污染物及其扩散特征

图6为大潮涨潮过程中污染物的运移分布。由图6可知,坝田污染物随涨潮流向北槽上游输移,北侧N4~N5丁坝坝田之间的污染物基本分布在航道北侧,南侧S5~S6丁坝坝田之间的污染物基本分布在航道南侧。

图7为大潮涨潮初期坝田释放污染物时,污染物浓度变化情况。对于北坝田,污染物扩散速度自坝田下游至上游、外部至内部逐渐减慢,坝田东北角CN2#点及坝田中心CN4#点,污染物扩散速度较快,西北角CN1#点污染物扩散最慢。涨憩时,CN2#及坝田中部CN4#污染物浓度值接近0,CN1#、CN3#污染物浓度仍较高,接近1.0,涨转落后,CN2#与CN4#污染物浓度迅速回升,之后坝田污染物浓度随落潮流下降较快,坝田污染物浓度随落潮流和涨潮流更替变化,且浓度值呈逐渐降低趋势,2d后,污染物基本消失。对于南坝田,由于大潮水动力强,且坝田涨潮流流向为西北向,因此,南坝田污染物浓度随涨潮流迅速降低,涨憩时,坝田污染物浓度基本接近0,污染物进入北槽主槽后,只有少量污染物随落潮流再进入南坝田。

小潮时,对于北坝田中部CN4#点,污染物扩散较快,与大潮类似,CN2#与CN3#坝田污染物扩散较慢。坝田中部CN4#点,约1.5d后,污染物浓度基本小于0.1,坝田内部CN1#、CN3#在3d后,污染物浓度小于0.1。对于南坝田内CS1#点污染物扩散速率明显快于挡沙堤内CS2#点,南坝田约2.5d后,坝田内污染物浓度本小于0.1。

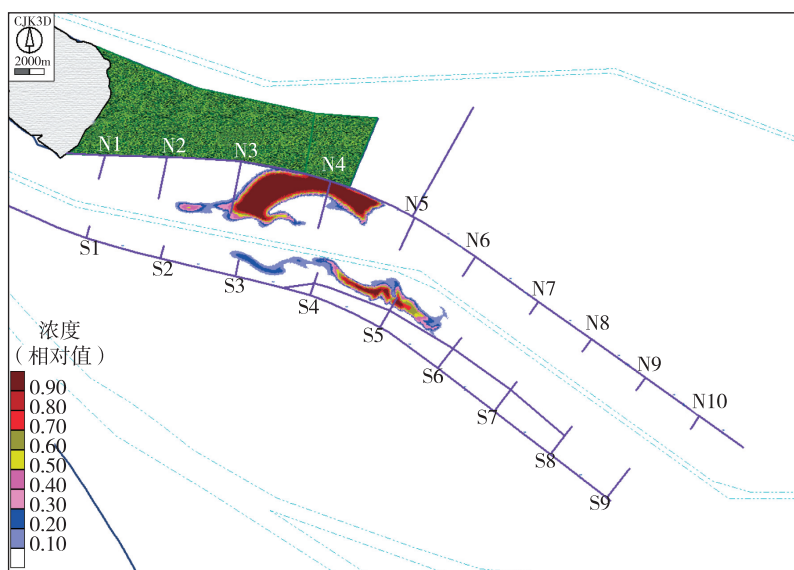


图6 涨潮坝田污染物分布

Fig. 6 Pollutant distribution in spur dike field during flood tides

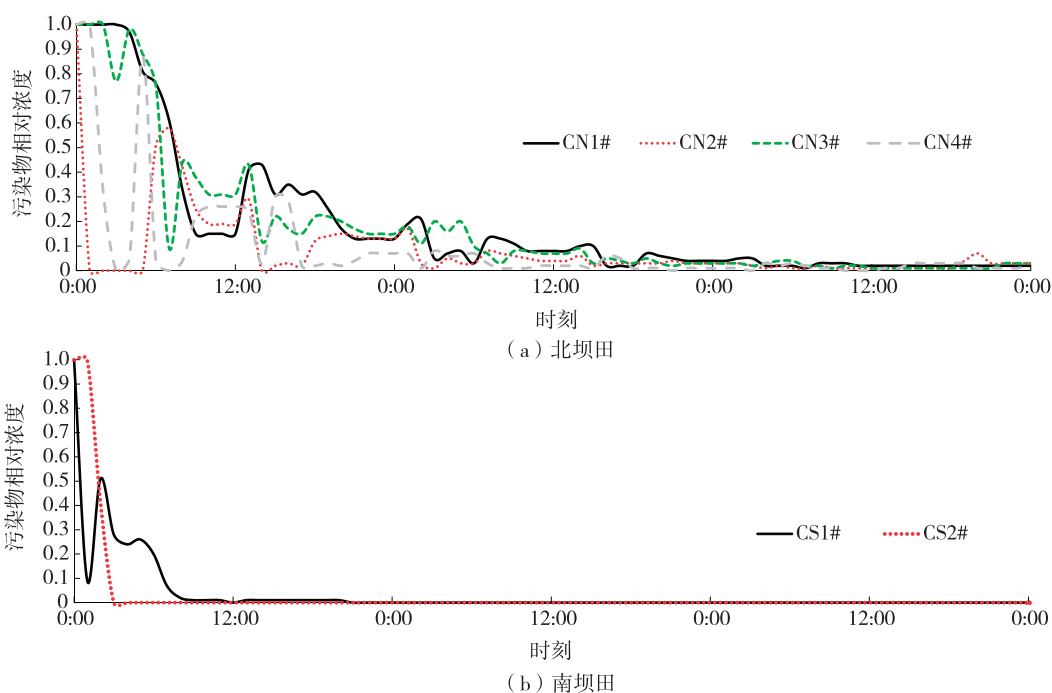


图7 大潮涨潮初期坝田污染物扩散

Fig. 7 Pollutant diffusion in spur dike field in initial stage of flood of spring tides

总体来说,坝田污染物落潮时释放扩散速度较快,南侧坝田污染物扩散速度比北坝田快,大潮坝田污染物扩散速度比小潮快。坝田外部污染物扩散速度比坝田内部快。

3.3 航道污染物浓度特征

落潮时,污染物随落潮流向北槽口外运动;涨潮时,污染物随涨潮流向上游运动。北槽落转涨、涨转落转流时刻,平面水流结构相对杂乱,部分污染物进入航道。大潮落潮初期坝田释放污染物时,22 h 后,航道局部出现瞬时浓度值约 0.2 的污染物水体,但出现时间较短,小于 1 h,主要来自北坝田污染源,其余时段航道内污染物浓度较低,大部分时刻小于 0.02。大潮涨潮初期,坝田释放污染源时,污染物基本不进入航道。

小潮时,落潮初期坝田释放污染源,污染物基本不进入航道,涨潮初期坝田释放污染源,航道内污染物浓

度相对较高,但基本小于 0.05。

总体来说,由于北槽主槽水流以往复流为主,坝田释放污染源后,污染物随涨落潮流在坝田与主槽内运动,污染物进入航道的量较少。

4 结 论

a. 基于非结构网格 FVM 法,建立了长江口大范围二维潮流水质耦合数学模型,数学模型验证良好,说明模型具有模拟长江口水流运动的能力。

b. 北槽中上段北坝田高潮位明显高于主槽,北槽下段,高潮位与主槽相近;南坝田高潮位大都高于主槽,南北坝田低潮位与主槽相近。

c. 污染物落潮时释放扩散速度较快,南侧坝田污染物扩散速度比北坝田快,大潮坝田污染物扩散速度比小潮快,坝田外部污染物扩散速度比坝田内部快。

d. 坝田释放污染源后,污染物随涨落潮流在坝田与主槽内运动,污染物进入航道的量相对较少。

参考文献:

- [1] 于守兵. 淹没丁坝对水流结构的调整作用研究[D]. 南京:南京水利科学研究院,2010.
- [2] 陈国祥, 张锦琦, 陈耀庭. 淹没丁坝雍水规律试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1991, 19(5): 88-93.(CHEN Guoxiang, ZHANG Jinqi, CHEN Yaoting. Experimental study on superelevation for submerged spur dikes[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 1991, 19(5): 88-93.(in Chinese))
- [3] 应强, 孔祥柏. 淹没丁坝群雍水试验研究[J]. 水利水运科学研究, 1995, 3(1): 13-21.(YING Qiang, KONG Xiangbai. Experimental study on superelevation for submerged spur dikes [J]. Hydro Science and Engineering, 1995, 3(1): 13-21.(in Chinese))
- [4] MOHAMED Y, HUI B de V. Sediment exchange between a river and its groyne fields: mobile-bed experiment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 136(9): 610-625.
- [5] UIJTTEWAAL W S J, LEHMANN D, VAN M A. Exchange processes between a river and its groyne fields: model experiments [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(11): 928-936.
- [6] WEITBRECHT V, SOCOLOFSKY S A. Experiments on mass exchange between groin fields and main stream in rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134(2): 173-183.
- [7] ALEXANDER S, CHRISTOF E. Case study: turbulent flow and sediment distributions in a groyne field [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(1): 1-9.
- [8] 罗小峰, 王登婷. 河口海岸数值模拟可视化编程[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
- [9] 汤任, 宋双, 葛天明, 等. 长江口局部河段三维潮流数值模拟研究[J]. 人民长江, 2015, 46(7): 80-83.(TANG Ren, SONG Shuang, GE Tianming, et al. 3D numerical simulation for tidal flow in local sections of Yangtze estuary[J]. Yangtze River, 2015, 46(7): 80-83. (in Chinese))
- [10] 路川藤, 罗小峰. 基于非结构网格的高分辨率隐式算法研究及应用[J]. 海洋通报, 2015, 34(1): 59-64.(LU Chuanteng, LUO Xiaofeng. Study of the unstructured grid implicit algorithm and its application[J]. Marine Science Bulletin, 2015, 34(1): 59-64. (in Chinese))
- [11] 路川藤. 长江口潮波传播模拟研究及主要影响因素分析[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2013.
- [12] 何杰. 半封闭港池水交换的数值模拟及其应用[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2009.
- [13] 陈志昌, 罗小峰. 长江口深水航道治理工程物理模型试验研究成果综述[J]. 水运工程, 2006(12): 134-140.(CHEN Zhichang, LUO Xiaofeng. Physical model research result of Yangtze estuary deepwater channel regulation project[J]. Port & Waterway Engineering, 2006(12): 134-140. (in Chinese))