

连云港港旗台作业区及防波堤工程 前后水体交换能力研究*

王金华, 章卫胜, 张金善, 高正荣

(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)

摘要: 随着旗台作业区及南北防波堤工程的建成, 连云港港主港区已经变成南北短、纵深长的半封闭的狭窄港域, 口门的缩窄以及口门至港池末端纵深进一步增加, 势必对港内水体的交换能力带来一定的影响。通过三维数学模型对工程前后的水体交换能力进行模拟, 分析水体交换能力变化的原因, 并通过港内水质点的 Lagrange 运动轨迹进一步认识港内水体的交换过程。模拟结果表明, 港区内受水流动力及港口形态的影响, 旗台作业区及防波堤工程建设后主港区的半交换周期从约 5 d 增加至 22 d。为了保障港内水域的水质环境, 必须严格控制港内水体污染排放。

关键词: 连云港港; 水体交换能力; 旗台作业区; 数学模型

中图分类号: P 731.26

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0017-08

Water exchange capacity before and after construction of Qitai operation area and breakwater project of Lianyungang port

WANG Jin-hua, ZHANG Wei-sheng, ZHANG Jin-shan, GAO Zheng-rong

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: With the completion of the Qitai operation area and the auxiliary breakwater project, Lianyungang port has become a long narrow semi-enclosed harbor region. As the entrance of the port becomes narrow and the distance from the entrance to port ends increases, the exchange capacity of the harbor water will certainly be affected. In this article, the water exchange capacity before and after the engineering is studied using a three-dimensional mathematical model and further understanding of the exchange process in the harbor waters is carried out by Lagrange trajectory method. The simulation results indicates that under the impacts of flow dynamics and the port shape, the half exchange period increases from about 5 days to 22 days after the construction of Qitai operation area and the auxiliary breakwater project. In order to guarantee the water quality in the port, the amounts of wastewater discharged into the port must be controlled strictly.

Keywords: Lianyungang port; water exchange capacity; Qitai operation area; numerical model

1 研究背景

连云港港是全国十大港口之一, 位于江苏省东北部海州湾的南侧。1984 年老港区港口扩建, 通过建造封闭式实体的拦海西大堤将西口门封堵(1994 年合拢), 形成 30 km² 的半封闭港湾。湾内

潮流性质发生改变, 潮波类型由前进波转为驻波, 港内污染物的自净能力也随之大幅削弱^[1-3]。

连云港旗台港区位于连云港港马腰港区(原老港区)东防波堤以东、连云港南岸, 由西部大宗散货作业区、中部液体散货作业区和东部原油作

收稿日期: 2015-11-09

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51309157); 中国博士后基金项目(2012M511244); 国家 863 计划资助项目(2012AA112509)

作者简介: 王金华(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 从事近海水动力、水环境研究。

业区组成。为了减小旗台嘴以东延伸段受外海风浪、涌浪的影响,在北侧海域依托羊窝头建设防波堤工程。随着旗台作业区及旗台作业区南北防波堤工程的建成,连云港主港区已经变成为南北短、纵深长的半封闭的狭窄港域(图1)。港口口门的进一步缩窄和口门至港池末端纵深的进一步

增加,必将对港湾内水体的交换能力产生一定的影响。2008年8月连云港区水质监测报告显示,港池内3个监测点的无机氮含量均已超过第4类水质标准。在港内污染排放量一定的条件下,港内的水体交换能力对港湾内的水环境起着决定性的作用。

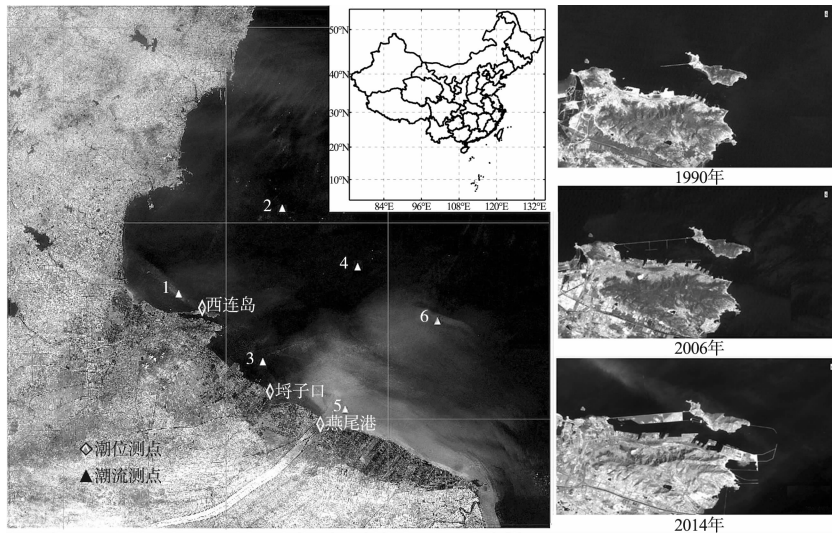


图1 计算范围及验证点位置

针对连云港港周围的水动力及水环境已经相继开展了一些研究^[4-6],然而针对旗台作业区及南北防波堤工程建设后对港湾水体交换能力的影响尚未作深入探讨。本文采用三维非结构数学模型,对工程前后的水体交换能力进行研究。

2 数学模型的建立及验证

2.1 模型简介

数值模型采用三维、自由表面、非结构有限体积波流耦合模型^[7],模型垂向采用 Sigma 坐标系,模型中使用改进后的 Mellor-Yamada 2.5 阶紊流闭合模型^[8]和 Smagorinsky 公式^[9]分别计算垂向与水平涡黏性系数,采用模分离技术求解动量方程。与有限差分和有限元模型不同,它通过对控制方程在每一个非结构的控制体积上进行积分求解,从而得到一组离散方程,通过求解方程得到网格点上的变量。这种方法不仅结合了有限元的网格易曲性与有限差分的计算效率,而且能够保证动量、体积、温盐在整个计算区域的积分守恒。

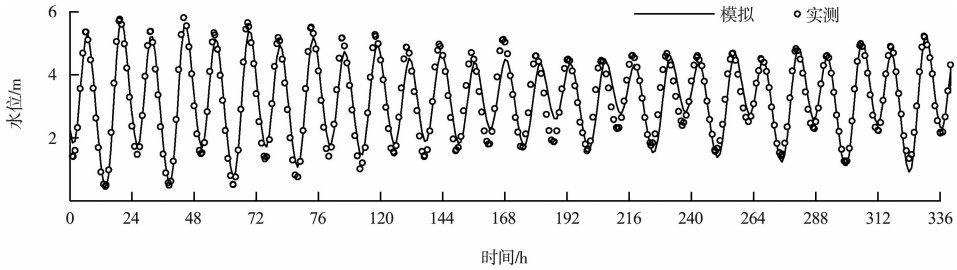
2.2 模型的建立及验证

计算区域如图1所示。为了更好地拟合边界处的地形变化,对岛屿与岸边界附近进行网格加密。水平分辨率在岸线与岛屿周围为 50 m,在开边界附近 1.5 km,平面网格单元数为 51 382,网格节点数为 26 532,垂向均分成 10 个 sigma 层,对应的垂直分辨率在浅于 10 m 的近岸为 0.2~1.0 m。开边界采用潮由东中国海潮波数学模型提供。温盐的开边界条件采用辐射边界条件并采用张弛逼近技术。降雨量、蒸发量、云量、空气温度、风、相对湿度采用 NCEP 每隔 6 h 平均的再分析资料并插值到每个网格点,模型计算采用冷启动,初始水位与流速均为零,初始温度、盐度采用 Levitus 的月平均资料^[10-11]插值到网格节点。

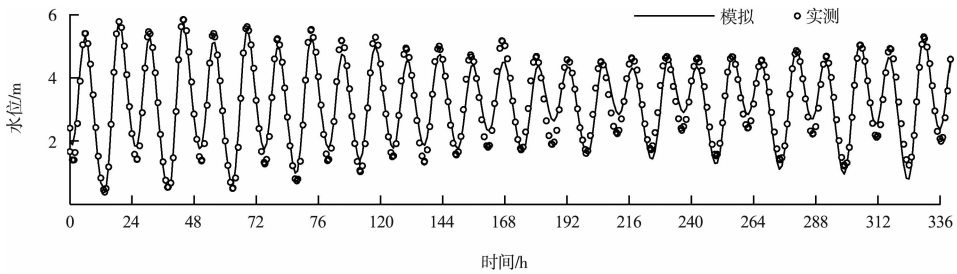
模型验证采用 2012 年 7 月实测潮位、潮流数据,图1给出了验证点位置,从潮位模拟值和实测值验证结果(图2)看,潮位过程线中计算值和实测值基本一致,吻合程度较好,潮位平均误差小于 0.10 m,潮位位相与实测一致。从潮流测点

处的大潮潮流表层、中层、底层的流速以及流向验证看(图3、4), 6个流速测点的流速(向)变化过程也与实测值吻合良好, 涨落急出现时刻及最大值相近, 流速平均误差小于10%; 流向验证除了转流时刻外, 流向与实测一致。几个测点处

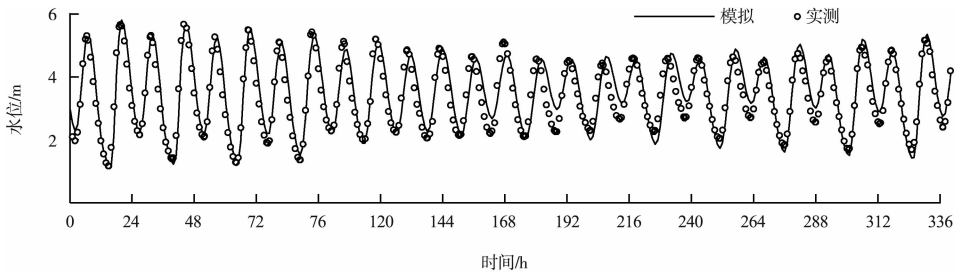
的表、中、底层水流流向均比较一致, 从表层至底层的水流流速均有所减小。验证结果表明建立的潮流数学模型较好地模拟了连云港附近海域的潮波运动和潮流特性, 为进一步研究港池内外的水体交换奠定了基础。



a) 西连岛

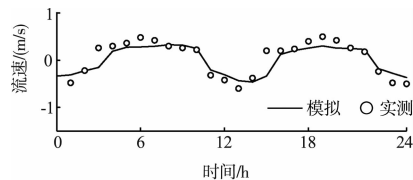


b) 埭子口

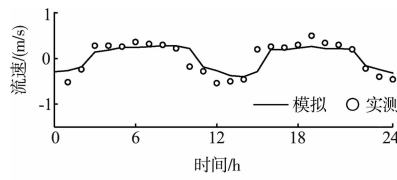


c) 燕尾港

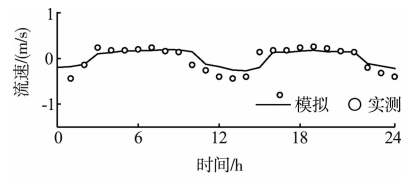
图2 潮位验证



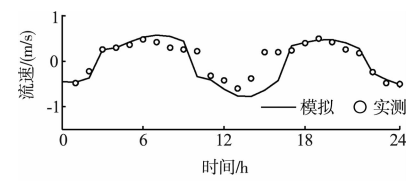
a) 1#表层



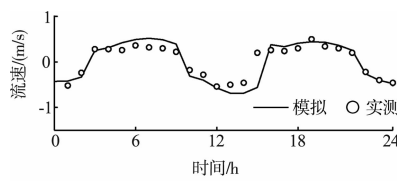
b) 1#中层



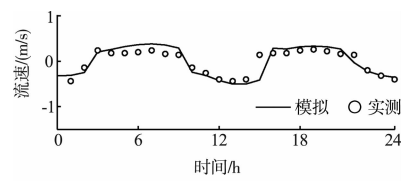
c) 1#底层



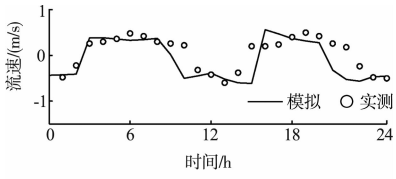
d) 2#表层



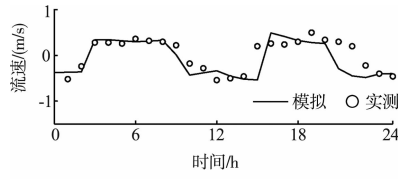
e) 2#中层



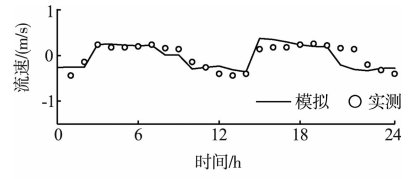
f) 2#底层



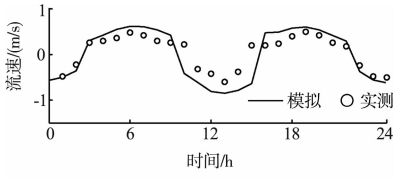
g) 3#表层



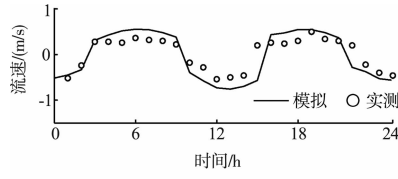
h) 3#中层



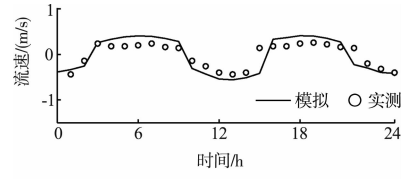
i) 3#底层



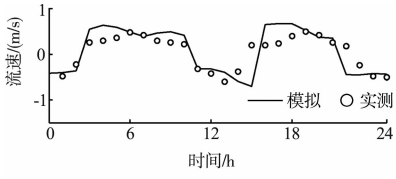
j) 4#表层



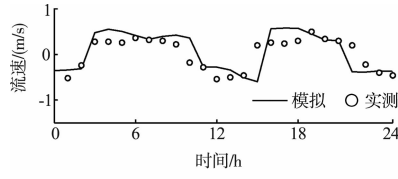
k) 4#中层



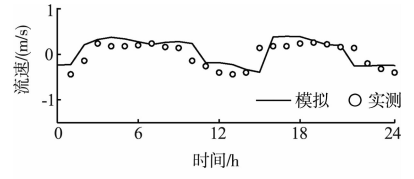
l) 4#底层



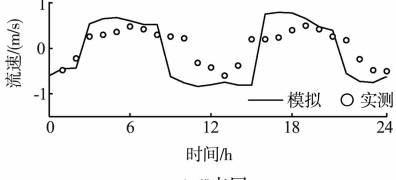
m) 5#表层



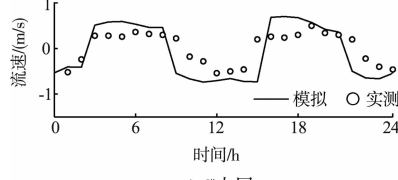
n) 5#中层



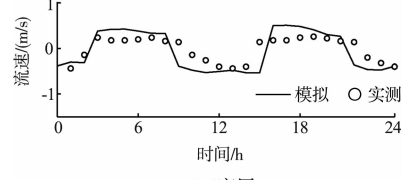
o) 5#底层



p) 6#表层

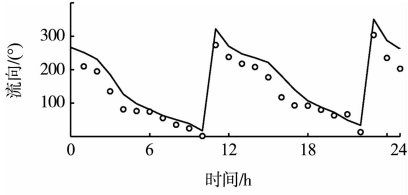


q) 6#中层

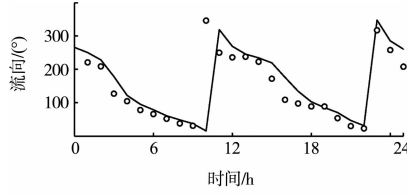


r) 6#底层

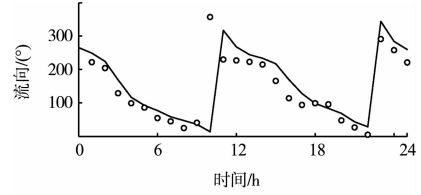
图3 分层流速验证



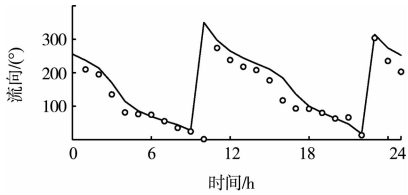
a) 1#表层



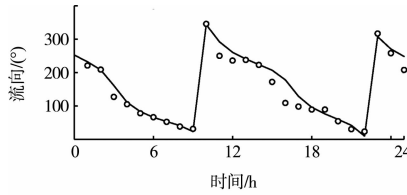
b) 1#中层



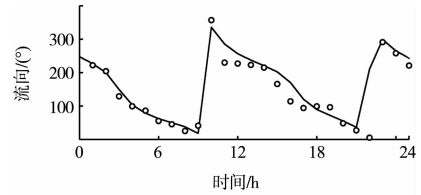
c) 1#底层



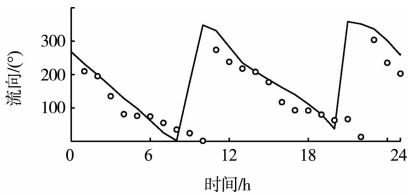
d) 2#表层



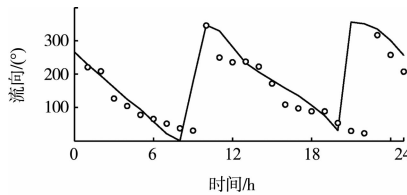
e) 2#中层



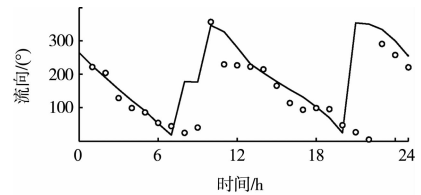
f) 2#底层



g) 3#表层



h) 3#中层



i) 3#底层

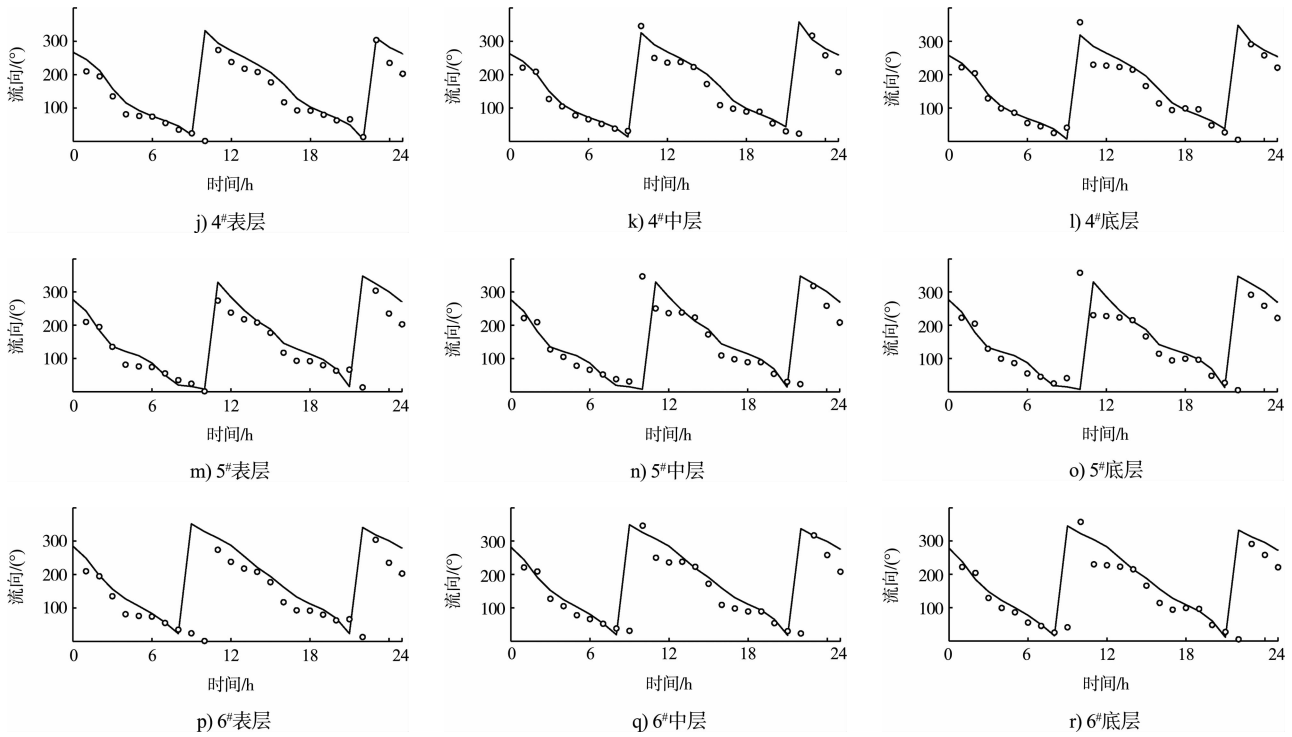
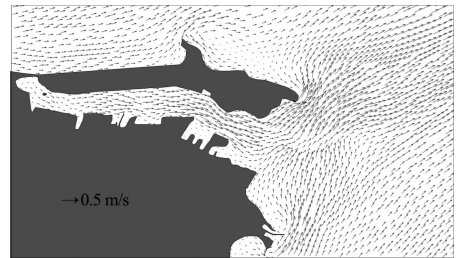


图4 分层流向验证

3 旗台作业区及防波堤工程前后的交换能力

3.1 工程前后港域水流特征及交换能力

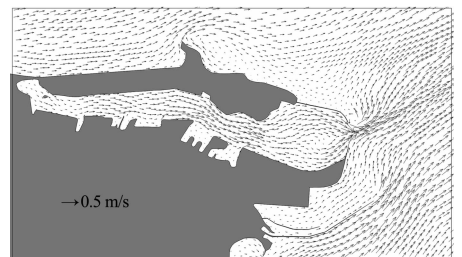
图4给出了旗台作业区及防波堤工程前后(简称工程前、后)大潮涨、落潮期间的流场分布对比,工程前涨急时,外海涨潮流从口门向港内传输,港内局部流速约0.50 m/s,落急时,与涨潮流向相反,水体从口门流向外海;工程后涨急时,受防波堤及旗台作业区建成的影响,在口门附近形成两个回流区,外海涨潮流从口门向港内传输,在口门处局部流速略有增强,落急时,港内水流相对平顺,港内水体在口门处汇集流向外海。对比图5a)、c)及图5b)、d)可知,港湾中部及末端水流形态基本保持不变,港湾前端受工程影响,水流形态有较大改变,港内外水体交换距离有所增加。



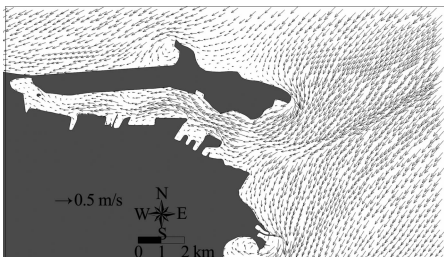
b) 工程前落急流态



c) 工程后涨急流态



d) 工程后落急流态



a) 工程前涨急流态

图5 工程前后大潮涨落急流态

图6给出了工程前表层、中层、底层以及垂向平均后港内污染浓度在不同模拟时间的分布。从表、中、底层的垂向浓度分布来看，表层水体

交换能力较中层、底层略强，但差别不明显。港内水体交换能力相对较强，20 d后仅港池末端有少量水体未完全交换，30 d基本完成港内水体置换。



图6 工程前港池内垂向分层浓度分布

图7给出了工程后表层、中层、底层以及垂向平均后港内污染浓度在不同模拟时间的分布。与工程前模拟结果(图6)相比，虽然港湾中部及末端涨落急流速无明显改变，但是港内

水体的交换能力大为减弱，经过10 d的交换，港域内靠近口门段水体交换较好，其它区域水体交换能力较弱，经过30 d的交换港内平均浓度仍有0.4左右。

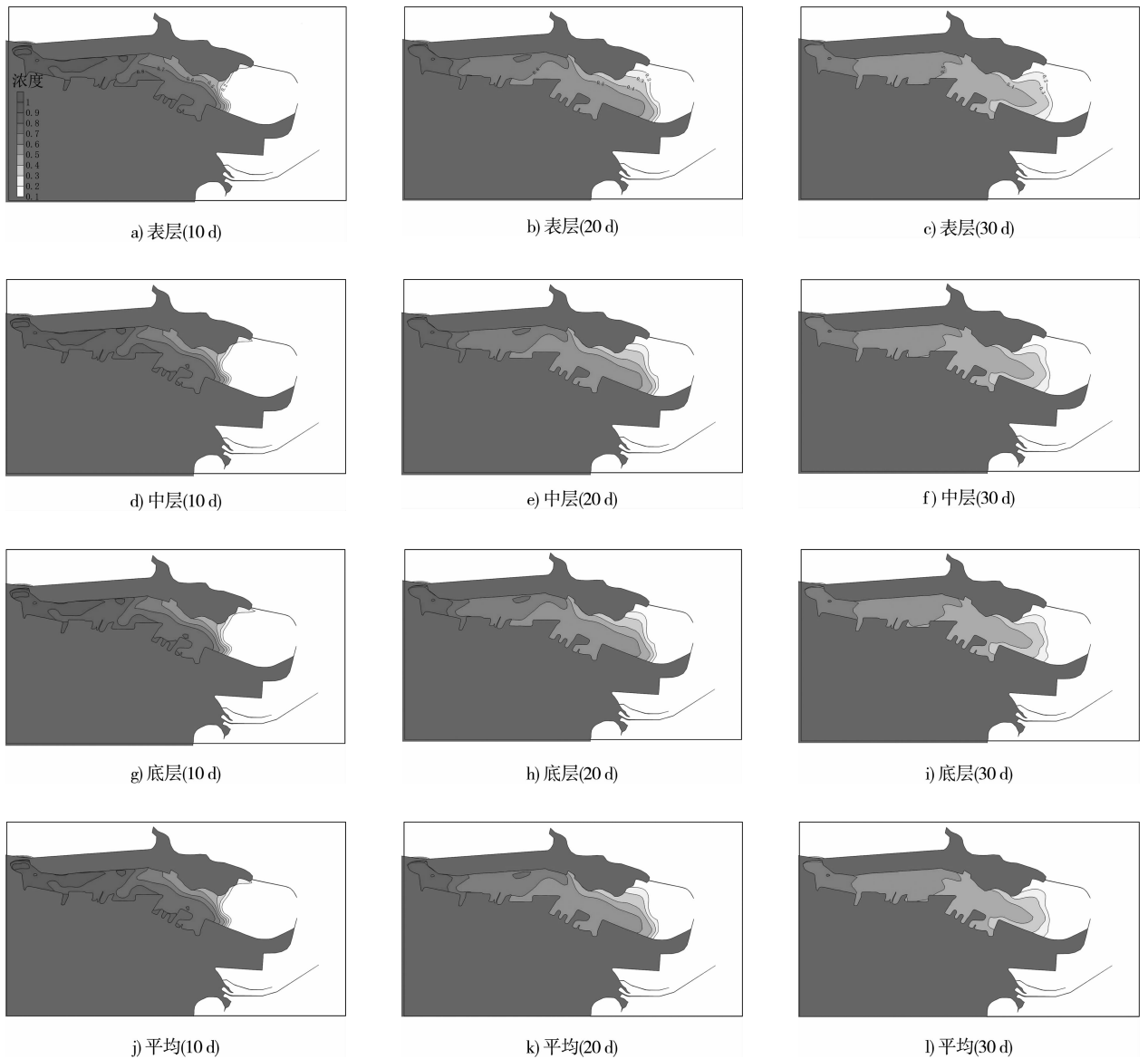


图7 工程后港池内垂向分层浓度分布

为了评价工程前后的港内的水体交换能力, 图8给出了工程前后港内示踪物质平均浓度的变化过程, 工程前港池内水体半交换周期约为5 d, 工程后港池内水体半交换周期约为22 d。

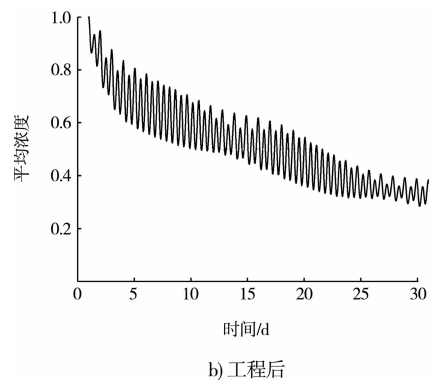
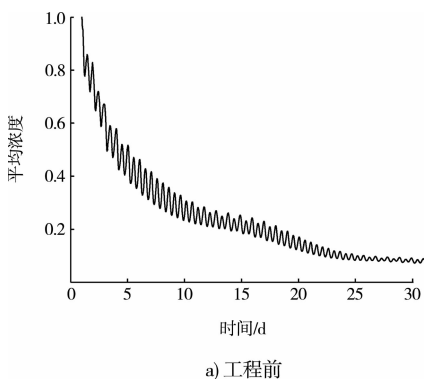


图8 工程前后港池平均浓度变化过程

3.2 工程对水交换能力影响因素

从前述模拟结果看, 工程建设减弱了港内的

水体交换能力。造成这一结果的直接因素为，工程建设后末端港池至口门的距离由 10 km 延长了约 4 km、港域口门缩窄，港内外水体的交换距离增加、交换通道减小。另一方面，从工程前后的大潮余流分布看(图 9)，港口口门缩窄以及口门附近余流存在 2 个回流区，在一定程度上限制了港内水体向港外的输运，增加了港口水体的半交换周期。

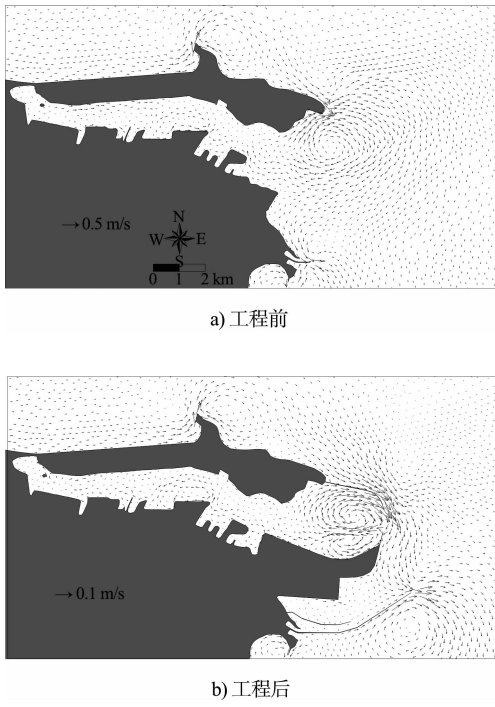


图 9 工程前后大潮余流分布

前面通过水体浓度扩散分析了主港区水体交换能力及旗台、羊窝头等工程对港内水体交换的影响，下面通过靠近港池末端的一个点位的水质点的 Lagrange 运动轨迹来分析工程前后水质点运动路径的差别。

图 10 分别为工程前、后 10 d 内的水质点轨迹，水质点在涨落潮动力的作用下，在港内做往复运动，但是总体净输移方向是向港外运动，在港口形状变化后港内的水流也发生相应改变，旗台作业及防波堤工程后水质点向外的净输移距离

也有所减小，这在一定程度上也反映了工程后港内水体交换时间有所增长。

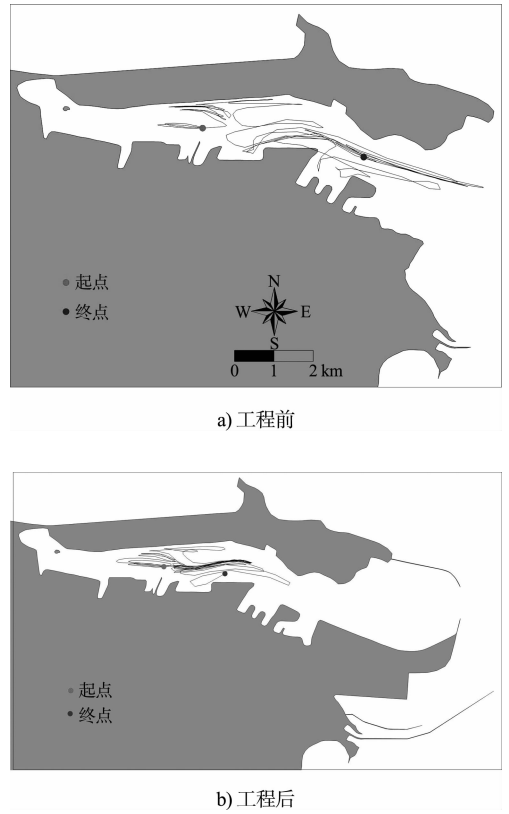


图 10 旗台羊窝头工程前后水质点运动轨迹

4 结语

通过数学模型模拟了旗台作业区及防波堤工程建设前后水体的交换能力，分析导致交换能力变化的原因，通过港内水质点的 Lagrange 运动轨迹进一步认识港内水体的交换过程。

模拟结果表明，港区受水流动力及港口形态的影响，旗台作业及防波堤工程建设后主港区的半交换周期约 5 d，10 d 后港池平均浓度小于 0.2，前期港池内浓度下降较快；工程后港池的半交换周期增加至 22 d，且浓度下降过程较为缓慢，30 d 里港池内的平均浓度仍有 0.35。

在港内水体的交换能力减弱的背景下，为了保障港内的水质环境，需要严格限制港内污染水体的排放。