



环抱式港池水体交换与改善措施研究*

张 玮, 王国超, 刘 燃, 陈 祯, 唐 磊
(河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 环抱式港池既有防浪挡沙的优势, 也有港区内外水体交换不畅的不足。以规划中的连云港港徐圩港区为例, 利用对流扩散模型, 模拟计算潮流作用下环抱式港池水体半交换周期, 研究探讨改善港池水质的工程措施及其效果。研究结果表明: 水动力条件是影响港池水体半交换周期的主要因素, 包括作用的潮型和港池位置; 工程措施的效果取决于其对水动力条件的改善程度和水体交换量的大小。

关键词: 环抱式港池; 港池水质; 半交换周期; 对流扩散模型; 工程措施

中图分类号: U 653.3*3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)04-0037-05

Water exchange and improvement measures for encircled basin

ZHANG Wei, WANG Guo-chao, LIU Ran, CHEN Zhen, TANG Lei

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The encircled basin can break waves and reduce sands, but it is disadvantageous for the water exchange flux for the harbor. Based on the project of Xuwei harbor in Lianyungang, the semi-exchange period of the water body is simulated and calculated with a convection-diffusion model under the wave-current interaction. The improving measures and their effect for the water quality are also investigated. Results indicate that the hydrodynamic condition is the key factor influencing the semi-exchange period of the water body, including the effect of tidal type and the position of harbor basin. The effect of measures depends on the improvement degree of the hydrodynamic condition in the encircled harbor and the size of the water exchange capacity.

Key words: encircled basin; water quality in harbor; semi-exchange period; convection-diffusion model; engineering measure

环抱式港池可有效增加码头岸线、提供船舶靠泊作业条件^[1]。规划中的连云港港徐圩港区位于淤泥质浅滩开敞水域, 水浅坡缓, 波浪作用明显, 水沙运动复杂。为在徐圩港区建设30万吨级航道、达到“浅水深用”的目的, 需要布置环抱式防波堤, 达到防浪挡沙、减少泥沙回淤的目的。如果港池内存在污染源, 则被污染水体较难被稀释、输移, 导致港池内水质下降。因此, 开展环抱式港池水质水体交换能力及改善措施研究

是十分必要的。

近年来, 越来越多的国内外学者开始关注港湾的水体交换能力研究, 提出了多种评价指标和数学模型^[2-11]。水体交换能力评价指标主要有海水交换率、滞留时间、生命值和半交换周期等; 常见的数学模型有箱式模型、拉格朗日质点模型和对流扩散模型等。何杰等^[1]以浙江台州温岭港为例, 通过模拟规划方案下港池内外水质点运动轨迹变化及计算口门通过潮量的变化来探讨环抱式

收稿日期: 2012-10-09

*基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2012AA112509); 江苏省交通科学研究计划项目(20100714-30HDKY001-2); 2011年度江苏省研究生培养创新工程(CXZZ11_0449)

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

港池对污染物输移及水体交换方面的特点。姜海峰等^[8]通过模拟对流-扩散过程来研究象山港狭湾内、外水体交换问题,认为象山湾湾顶的水动力条件最弱,其水体半交换周期时间为30 d左右。吕新刚等^[9]利用对流扩散水质模块研究了胶州湾的水体交换过程,研究表明胶州湾水体交换能力在空间分布上有很大差异,整个胶州湾平均半交换时间为25 d,湾东北部的半交换时间多在40 d以上,湾西局部甚至超过100 d。以上研究对港湾的水体交换均进行了较为详细的分析,但对水体交换的改善措施研究略显不足。

本文拟采用平面二维对流扩散数学模型,计算连云港港徐圩港区的水体交换能力,分析影响水体交换的主要因素,在此基础上,探讨改善港区水体交换能力的工程措施,研究各工程措施对徐圩港区水质改善的效果。

1 研究对象概况

连云港海域潮汐运动受南黄海驻波系统控制,潮汐指标类型为0.30,属正规半日潮。多年平均潮差3.39 m,平均涨潮历时5 h 38 min,平均落潮历时6 h 48 min。海区波浪以风浪为主,常浪向为偏东北向,NE向多年出现频率为26.41%,E向出现频率次之,为18.40%;强浪向为偏北向,1.5 m以上的波高NNE向出现频率2.13%,NE向出现频率次之,为1.79%。根据大西山海洋站1962—2003年的波浪统计资料,累年 $H_{1/3}$ 波高0.4~0.6 m,秋冬季波高略大于春夏季,连云港6—7月是全年波浪最小的季节^[12]。

根据规划,连云港港徐圩港区采用环抱式单口门防波堤,口门位于-5 m(理论基面,下同)水深处,港区航道采用30万吨级标准建设,航道底高程-22.5 m,航道疏浚边坡1:7,港区防波堤环抱面积75.8 km²,港内水域面积为31.4 km²,口门宽度为1 200 m,终期方案布置见图1。

2 平面二维数学模型

2.1 基本方程

1) 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) 运动方程。

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

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

式中: x, y 为直角坐标系坐标; t 为时间变量; h 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 为波流共同作用下床面剪切应力在 x, y 方向的分量。

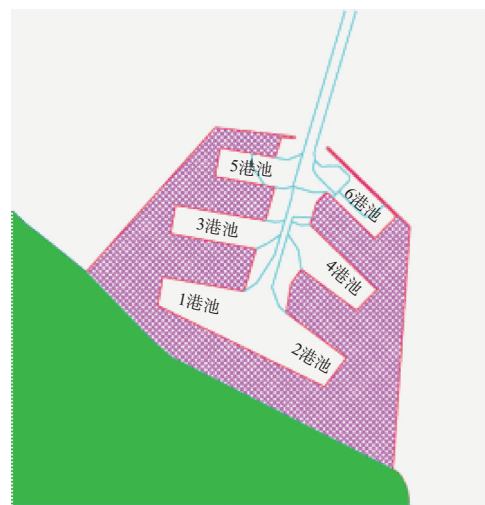


图1 徐圩港区终期规划布置

3) 对流扩散方程。

$$\frac{\partial HC}{\partial t} + \frac{\partial HU_x C}{\partial x} + \frac{\partial HU_y C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{yy} H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \Phi_c \quad (4)$$

式中: C 为污染物浓度; H 为总水深; Φ_c 为单位时间排入单位体积海水的污染物质量; D_{xx}, D_{yy} 分别为 x, y 方向的综合扩散系数。

2.2 模型的建立和求解条件

计算范围:根据研究内容的要求,数学模型西自现有岸线,北起日照(35°22'30"N, 119°33'E),东至(35°22'30"N, 120°17'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, 见图2。

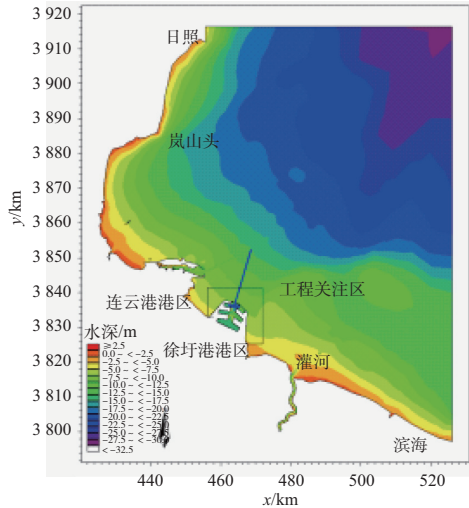


图2 数学模型范围

采用有限体积法 (Finite Volume Method) 求解数学模型。模型计算区域的离散采用三角网格, 工程区域最小网格尺度为16 m, 可以满足计算精度要求。数学模型中的外海边界条件由东中国海潮波模型提供; 灌河边界位于响水大桥附近, 由灌河长河段模型提供。

2.3 模型验证

潮流数学模型验证选择2005年9月水文测验资料, 验证表明^[12]: 计算值与实测值吻合较好, 能够反映连云港大范围海域潮流运动情况, 所建立的连云港大范围海域潮流数学模型合理可信, 可用于工程问题研究。

3 水体半交换周期研究

3.1 计算情况介绍

根据徐圩港区规划方案, 在已建立并经过验证的连云港海域大范围潮流数学模型的基础上, 增加对流扩散模块, 分别采用2005年9月的大、中、小潮潮位过程作为计算潮型, 进行港池的水体交换计算。

计算时假定水体浓度为均匀分布, 并给定初始港区污染物浓度为 $G_0=1$, 港区外水体浓度为 $G_1=0$, 在潮流作用下, 港湾内外水体产生交换, 在交换过程中, 湾内水质不断更新, 浓度逐渐减

小, 湾内平均浓度变为 $0 < G < 1$, 当湾内的平均浓度降低到0.5时所用的时间即为水体的半交换周期。半交换周期短, 表明水体交换能力强; 半交换周期长, 则表明水体交换能力弱^[13]。以下将根据计算结果, 提取不同时间点时各港池水体交换平均浓度结果, 并作港池水体交换效果图和平均浓度过程线, 研究水体交换的特征及其影响因素。

3.2 无工程方案水体半交换研究

所谓无工程方案是指仅仅依靠涨落潮来改善徐圩港区港池内的水质, 不采取任何其他工程措施。计算结果表明: 不同起始潮型 (大、中、小潮), 港区不同水域的水体交换能力是不同的。以下将分别以大、中、小潮作为起始潮型, 模拟计算1个月的水体交换情况, 分别提取5 d, 10 d, 15 d, 20 d, 25 d, 30 d各港池水体的平均浓度 (表1), 并绘制不同计算起始潮型时徐圩港区和1,2两港池水体平均浓度过程线 (图3, 4), 以大潮起算各港池水体平均浓度过程线 (图5)。

表1 无工程方案不同起始潮型水体交换平均浓度

| 计算时间 | 港池 | 0 d | 5 d | 10 d | 15 d | 20 d | 25 d | 30 d |
|------|----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 大潮开始 | 1 | 1 | 0.887 | 0.753 | 0.649 | 0.408 | 0.328 | 0.285 |
| | 2 | 1 | 0.934 | 0.804 | 0.641 | 0.383 | 0.337 | 0.322 |
| | 3 | 1 | 0.443 | 0.259 | 0.162 | 0.146 | 0.142 | 0.126 |
| | 4 | 1 | 0.599 | 0.612 | 0.357 | 0.254 | 0.297 | 0.254 |
| | 5 | 1 | 0.097 | 0.076 | 0.095 | 0.103 | 0.097 | 0.094 |
| | 6 | 1 | 0.248 | 0.194 | 0.162 | 0.134 | 0.126 | 0.113 |
| 中潮开始 | 1 | 1 | 0.920 | 0.874 | 0.529 | 0.415 | 0.345 | 0.295 |
| | 2 | 1 | 0.993 | 0.921 | 0.534 | 0.437 | 0.396 | 0.351 |
| | 3 | 1 | 0.472 | 0.256 | 0.163 | 0.162 | 0.144 | 0.135 |
| | 4 | 1 | 0.735 | 0.574 | 0.298 | 0.351 | 0.352 | 0.208 |
| | 5 | 1 | 0.109 | 0.096 | 0.105 | 0.103 | 0.084 | 0.107 |
| | 6 | 1 | 0.321 | 0.234 | 0.137 | 0.120 | 0.108 | 0.143 |
| 小潮开始 | 1 | 1 | 0.993 | 0.702 | 0.506 | 0.427 | 0.372 | 0.307 |
| | 2 | 1 | 1.000 | 0.715 | 0.525 | 0.482 | 0.449 | 0.351 |
| | 3 | 1 | 0.674 | 0.269 | 0.191 | 0.152 | 0.144 | 0.143 |
| | 4 | 1 | 0.820 | 0.427 | 0.376 | 0.425 | 0.273 | 0.229 |
| | 5 | 1 | 0.180 | 0.153 | 0.105 | 0.087 | 0.105 | 0.118 |
| | 6 | 1 | 0.482 | 0.195 | 0.136 | 0.144 | 0.143 | 0.154 |

根据以上计算结果可以看出, 水动力条件是影响水体交换能力的主要因素, 包括作用的潮型和港池的位置。具体表现为:

1) 起始潮型不同, 对于徐圩港区整体水域的水体交换能力影响也不同。大潮起始时, 徐圩港

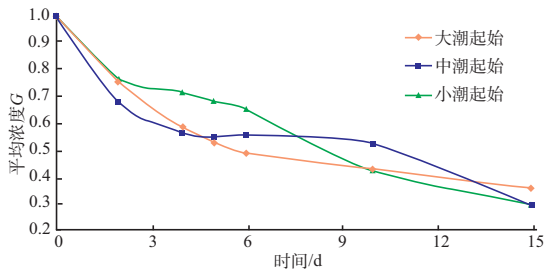


图3 无工程徐圩港区水体平均浓度过程线

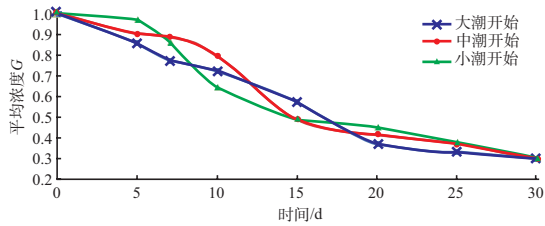


图4 无工程1,2两港池水体平均浓度过程线

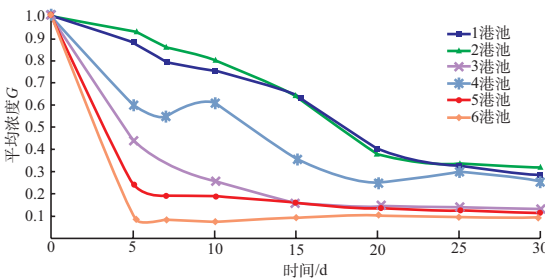


图5 无工程大潮起始各港池水体平均浓度过程线

区水体的半交换周期为5.4 d；中潮起始时，港区水体半交换周期为10.5 d；小潮起始时，港区水体半交换周期为8.3 d，见图3。

2) 各港池的水体半交换周期差异较大(图5)，主要与水动力强弱有关，其中，5,6港池靠近口门，水动力条件最好，港池水体交换效果好，半交换周期仅3 d左右；3,4港池水动力条件次之，半交换周期相对要长一些，3港池需要4~5 d，4港池需要13 d左右；位于港区末端的1,2港池离开口门最远，水动力较弱，水体半交换周期较长，1港池和2港池都需要18 d左右。

3) 就徐圩港区末端的港池来说，不同起始潮型对于港池水体半交换周期也有一定的影响(图4)。对于1,2两个港池，大潮起始时水体半交换周期为16.8 d；中小潮起始时缩短至14.7 d。

3.3 工程措施研究

根据大潮起始时无工程方案的水体交换计算结果及主要影响因素分析可知，位于港区末端的1,2港池水体交换效果最差，水体半交换周期

约为18 d。为了缩短1,2港池的水体半交换周期，需要采取工程措施，改善其水动力条件，具体包括：开通水体交换通道；抽(灌)水；利用河道排涝等，工程布置见图6，其中：1) 开通水体交换通道：在1,2港区防波堤设置水体交换通道，增加港区进出潮量，根据地形等条件，通道过水断面采用200 m×2 m(宽×高)；或2) 抽水(或灌水)：在1,2港池的4个角点上布设抽水(或灌水)站，抽水(或灌水)流量采用4×20 m³/s；或3) 利用河道排涝：利用港区涉水涵闸，将涝水排入1,2港池，从而改善港池的水质条件，排涝时，分别给定排涝河流为常水位6 m。

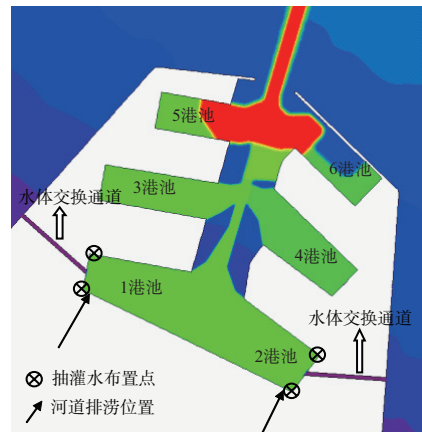


图6 各工程方案布置

由各方案1,2两港池水体平均浓度过程线(图7)可知：与无工程方案相比，开通水体交换通道的水体交换效果并不明显，1,2两港池水体15 d后浓度仍未降低到0.5以下，甚至不如无工程工况；抽(灌)水方案的水体交换效果较好，1,2两港池的水体半交换周期不足12 d；排涝方案与抽灌水方案效果相近，1,2港池的水体半交换周期也是12 d左右。

进一步分析得知，各工程方案对港池水体交换能力的提高取决于水动力条件的改善程度和交换水量的大小(表2)。对于开通水体交换通道方案，由于港区内潮差较小、水流较弱，水体交换效果并不明显；对于抽灌水方案，水体交换效果显著，尤其是将抽水(或灌水)点布置在1,2港池水动力较弱的港池底端角点，便于港池的水体交换；对于排涝方案，水体交换能力的提高与排涝量有关，排涝流量越大，水体交换效果越好。

当然, 工程措施中水体交换通道过水断面的大小、抽灌水流量的多少、排涝流量及持续时间等都会对水体交换能力的提高有着较大影响。

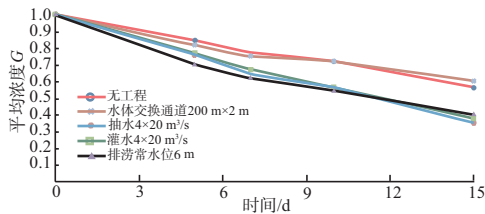


图7 各方案1, 2两港池水体平均浓度过程线

表2 各方案1, 2两港池水体交换平均浓度

| 工程措施 | 0 d | 5 d | 7 d | 10 d | 15 d |
|----------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|
| 无工程 | 1 | 0.851 | 0.777 | 0.722 | 0.566 |
| 水体交换通道200 m × 2 m | 1 | 0.821 | 0.754 | 0.724 | 0.606 |
| 抽水4 × 20 m ³ /s | 1 | 0.762 | 0.651 | 0.562 | 0.354 |
| 灌水4 × 20 m ³ /s | 1 | 0.773 | 0.674 | 0.569 | 0.382 |
| 排涝常水位6 m | 1 | 0.710 | 0.627 | 0.550 | 0.405 |

就工程方案实施的可行性和经济性方面考虑: 开通水体交换通道方案, 一次性投入较大, 水体交换能力提高并不明显; 抽水(或灌水)方案, 不仅需要一次性投入, 还需要进行后期管理维护; 利用排涝方案, 只要水量充分, 且持续时间较长, 则可有效改善港池内水质, 经济合理, 但在无雨季节, 港池水体交换的问题仍需考虑。

4 结语

1) 港池水动力条件是决定水体交换能力的主要因素, 包括作用的潮型和港池位置。根据计算结果, 无工程措施情况下, 大潮起始时徐圩港区总体的半交换周期为5.4 d, 但各港池的水体交换能力差异较大, 主要与水动力强弱有关, 其中5,6港池靠近口门, 水动力条件最好, 港池水体交换效果好; 3,4港池水动力条件次之, 半交换周期相对长些; 位于港区末端的1,2港池离口门最远, 水动力较弱, 水体半交换周期较长, 均需要18 d左右。

2) 不同计算起始潮型对于各港池内水体半交换周期也有一定的影响, 对位于徐圩港区末端的1,2两个港池来说, 大潮起始时水体半交换周期为16.8 d; 中小潮起始时缩短至14.7 d。

3) 为改善徐圩港区内末端1,2港池的水动力条件, 提高其水体交换能力, 可采取以下工程措施: 抽水(或灌水)、利用河道排涝等。

4) 就各工程方案实施的可行性和经济性方面考虑: 利用排涝方案, 只要水量充分, 且持续时间较长, 则可有效改善港池内水质, 经济合理, 但在无雨季节, 港池水体交换的问题仍需考虑。

5) 建议管理部门加大管理力度, 有效控制减少港区污染, 做到“控源减排”, 同时应及时清除港区已有污染, 减轻水体自净负担, 做到“减负修复”, 最后应从可持续发展的角度, 对水环境进行综合调控, 营造良好的港区水环境。

参考文献:

- [1] 何杰, 叶小强, 辛文杰. 环抱式单口门港池水体交换能力研究[J]. 水运工程, 2009(2): 87-91.
- [2] 张玮, 耿聪. 徐圩港区环抱式港池最大流速研究[G]//丁军华. 连云港淤泥质海岸深水航道建设理论与实践(前期基础篇). 北京: 人民交通出版社, 2012: 230-235.
- [3] Parker D S, Norris D P, Nelson A W. Tidal exchange at golden gate[J]. Journal of Sanit. Engineering Division: ASCE, 1972, 98(2): 305-323.
- [4] Luff R, Pohlmann T. Calculation of water exchange times in the ICES-boxes with a eulerian dispersion model using a half-life time approach[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 47(4): 287-299.
- [5] 潘伟然. 湄江湾海水交换率和半更换期的计算[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1992, 31(1): 64-68.
- [6] 孙英兰, 陈时俊, 俞光耀. 海湾物理自净能力分析和水质预测-胶州湾[J]. 山东海洋学院学报, 1988, 18(2): 60-65.
- [7] Liu Z, Wei H, Liu G S. Simulation of water exchange in Jiaozhou Bay by average residence time approach [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 61: 25-35.
- [8] 姜海峰, 黄世昌, 谢亚力. 象山港内水体交换数值研究[J]. 浙江水利科技, 2005(4): 8-12.
- [9] 吕新刚, 赵昌, 夏长水, 等. 胶州湾水交换及湾口潮余流特征的数值研究[J]. 海洋学报, 2010, 32(2): 20-30.
- [10] 李佳. 乐清湾环境水力特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010
- [11] 陈少峰. 天津港港池水交换与生态堤岸设计研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [12] 安翔. 连云港大范围复杂条件下泥沙运动模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2011.
- [13] 徐军. 连云港西大堤工程建设影响作用评价[J]. 海洋通报, 2005, 24(5): 67-73.

(本文编辑 武亚庆)