



排浦中心渔港换水通道布置对水交换的影响*

李 醒¹, 丁 磊², 曾起召³, 熊玉章¹, 王 刚¹

(1. 中国水产科学研究院渔业工程研究所, 北京 100141; 2. 天津科技大学 海洋与环境学院, 天津 300457;
3. 中海(广州)工程勘察设计有限公司, 广东 广州 510000)

摘要: 以排浦中心渔港建设项目为例, 利用平面二维水动力和水交换数学模型, 通过 2 种基本换水通道的不同组合, 探究换水通道平面布置形式对水交换的影响。结果表明, 仅布置通道 1 有利于加快 1 000 t 渔船泊位前的水交换, 但会迟滞其左侧泊位前沿特别是防波堤堤根附近水体的半交换周期; 仅布置通道 2 有利于提高防波堤堤根附近的水交换效率; 2 种换水通道同时布置有利于增强中型渔船停泊区及各泊位前沿整体的水交换能力, 同时提高防波堤堤根附近水交换效率。

关键词: 换水通道; 水交换; 半交换周期; 数值模拟; 排浦中心渔港

中图分类号: U652

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0082-07

Impact of water exchange channel layout on water exchange in Paipu Central Fishing Port

LI Xing¹, DING Lei², ZENG Qizhao³, XIONG Yuzhang¹, WANG Gang³

(1. Fishery Engineering Research Institute of Chinese Academy of Fishery Sciences, Beijing 100141, China;

2. College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;

3. China Ocean (Guangzhou) Engineering Consultants Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: Taking the construction project of Paipu Central Fishing Port as an example, this paper explores the influence of the planar layout of water exchange channels on water exchange through different combinations of two basic water exchange channels by using a two-dimensional hydrodynamic model and water exchange mathematical model. The results show that the arrangement of only channel 1 is beneficial for speeding up the water exchange in front of the 1 000 t fishing vessel berth, but it slows down the half-exchange period of the water in front of the berth on its left side, especially near the breakwater root. The arrangement of only channel 2 is beneficial for improving the water exchange efficiency near the breakwater root. The arrangement of both the two channels is beneficial for not only enhancing the overall water exchange capability of the medium-sized fishing vessel berthing area and the front of each berth around it, but also improving the water exchange efficiency near the breakwater root.

Keywords: water exchange channel; water exchange; half-exchange period; numerical simulation; Paipu Central Fishing Port

现代经济社会发展对渔港建设提出了绿色低碳、生态环保和可持续发展的要求, 而在传统渔港建设中, 常常由于更重视安全避风和锚泊泊稳

的要求而采取近乎封闭式的掩护措施, 从而导致港内局部水交换不畅, 水质环境持续恶化, 因此需要在工程设计中考虑提高水交换能力。关于水

收稿日期: 2023-09-08

*基金项目: 中国水产科学研究院渔业工程研究所基本科研项目 (2023HY-ZC001)

作者简介: 李醒 (1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事现代渔港工程设计工作。

通讯作者: 王刚 (1984—), 男, 硕士, 研究员, 从事现代渔港工程建设技术与渔港避风减灾技术研究。

E-mail: wanggang51429@163.com

交换的研究, Monsen 等^[1]将换水时间、水龄和驻留时间应用于浅水潮汐湖,探究造成理想化模型与实际水体之间差异的原因; Viero 和 Defina^[2]通过局部驻留时间概念和修改的水龄概念研究半闭合潮汐水域的水交换,得出水交换特性主要由水体交换率、半交换周期和水体更新时间来体现; 黄宗伟等^[3]以闸坡渔港防波堤改造工程为例,评估工程前后港内水体半交换周期和水体交换率; 何杰等^[4]以台州温岭港为例,发现港池水交换能力与港池平面布局方式有直接关系。张玮等^[5]以连云港徐圩港区为例,计算潮流作用下环抱式港池的水体半交换周期,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。李蕊等^[6]研究了大连港太平湾港区港池底部通道不同开口宽度和底高程对水交换能力的影响; 肖天葆等^[7]对博贺渔港改扩建前后水交换能力开展研究,评估工程前后港内水体半交换周期; 高飞等^[8]以通州湾港区为例,通过提升港池水交换能力的技术比较,提出适合该港区提升水交换能力的技术方案。

本文以排浦中心渔港建设项目为例,利用平面二维水动力和水交换数学模型,探究换水通道平面布置形式对水交换的影响。

1 项目概况

排浦中心渔港建设项目位于海南省儋州市西部沿海排浦江出海口处,西临北部湾,毗邻海花岛,掩护条件较好,规划后可用的渔港码头岸线、港池水域及陆域用地均可满足中心渔港建港条件要求,为建设多功能现代渔港、打造儋州渔港经济区打下坚实的基础。总体规划布置 2 种基本方案,两方案的不同之处在于换水通道的位置不同。如图 1a) 所示,方案 1 将换水通道布置在 3 000 t 渔船泊位和 600 hp (1 hp = 746 W) 渔船泊位之间(换水通道 1),宽 27 m; 如图 1b) 所示,方案 2 将其变更为顺着旅游公路绿化带开挖 1 条水系连通港池(换水通道 2),最宽与最窄处的宽度分别为 30 和 15 m,2 条换水通道的底高程均为 -5 m (1985 国家高程基准)。在方案 1、2 基础上,根

据换水通道的不同组合,衍生出方案 3(同时布置换水通道 1、2)和方案 4(未布置换水通道)。



图 1 不同方案平面布置

2 模型计算方法

2.1 水动力模型

二维潮流数学模型控制方程组可分别表示为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = f\bar{h}\bar{v} - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + \frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial y} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{v}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = -f\bar{h}\bar{u} - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{yy})}{\partial y} \quad (3)$$

式中: t 为时间, x 、 y 为笛卡尔坐标系坐标, η 为水面高程(水面到平均海平面的距离), d 为水

深, h 为总水深且 $h = \eta + d$, \bar{u} 、 \bar{v} 为垂向平均流速在 x 、 y 方向上的分量, f 为科氏力系数, g 为重力加速度, ρ 为水体密度, ρ_0 为水体参考密度, p_a 为表面大气压强, T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yy} 分别为水体内部切应力在 x 、 y 方向上的分量, (τ_{sx}, τ_{sy}) 和 (τ_{bx}, τ_{by}) 分别为水面和底床切应力在 x 、 y 方向上的分量。

2.2 水交换模型

水交换采用示踪剂扩散模拟方法进行研究, 在潮流数学模型基础上, 采用对流扩散数学模型进行模拟计算, 其控制方程为:

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}hC)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}hC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - FhC + S \quad (4)$$

式中: C 为示踪剂浓度, D_x 、 D_y 分别为 x 、 y 方向上的扩散系数, F 为衰减系数, S 为源项函数。

2.3 模型验证

潮流模型采用大、小两重模型嵌套计算, 大模型为小模型提供开边界条件。大模型包括整个海南岛和部分南海海域 ($105.66^\circ \text{E} \sim 118.99^\circ \text{E}$, $12.00^\circ \text{N} \sim 24.88^\circ \text{N}$), 小模型东西方向长约 32 km, 南北方向长约 55 km, 采用工程海域加密的非结构三角形网格对计算域进行划分, 其网格见图 2, 工程海域附近现状水深分布见图 3。模型验证采用 T 测站 (109.19°E , 19.70°N) 2021-07-10T10:00:00—2021-07-11T11:00:00 实测大潮数据, 结果表明计算值与实测值整体上吻合较好, 能够反映工程海域潮流场的时空分布。

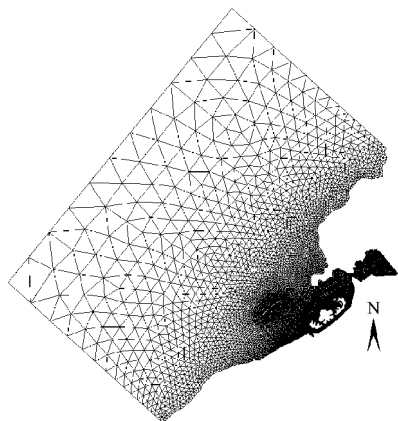


图2 小模型网格

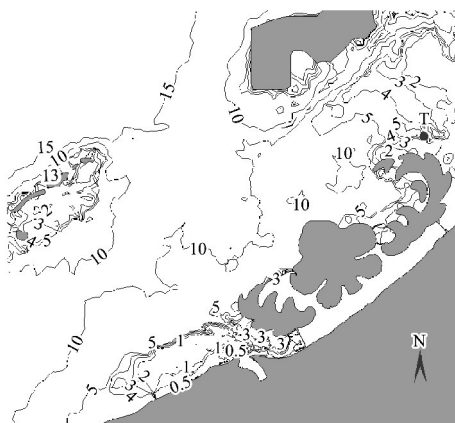
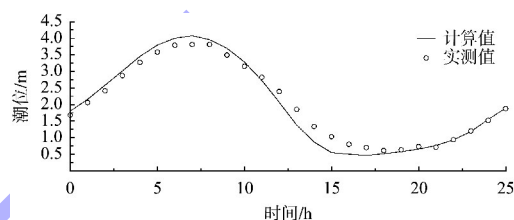
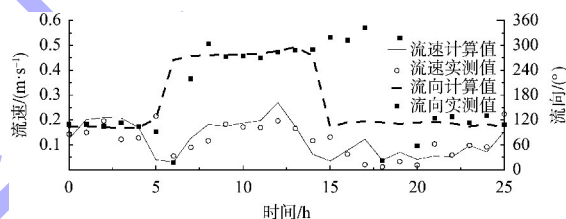


图3 工程海域附近现状水深



a) 潮位



b) 流速和流向

图4 模型验证结果

3 水交换结果

水交换计算潮位过程采用大潮的全潮周期^[9]重复进行。选取各方案港内不同位置特征点 (图 5), 对应的水交换结果如图 6 所示。各方案以 J_1 为特征点的大型渔船停泊区示踪剂浓度迅速衰减, 水域平均半交换周期均在 0.5 个潮周期之内; 以 J_2 为特征点的中型渔船停泊区水域, 平均半交换周期则均在 1.5 个潮周期之内。各方案水交换能力较弱的区域均分布在中型渔船停泊区东侧 (J_3) 和西侧防波堤堤根附近 (J_6) 水域, 其中方案 1 中 J_3 位置水域平均半交换周期在 4.5 个潮周期之内, J_6 位置水域则超过 10 个潮周期; 方案 2 中两位置水域平均半交换周期均在 4.5 个潮周期之内; 方案 3 中两位置水域平均半交换周期分别在 3.0 和 3.5 个潮周期之内; 方案 4 中两位置水域

平均半交换周期则分别在 3.0 和 5.5 个潮周期之内。综合比较来看, 方案 3 的水交换能力最好。

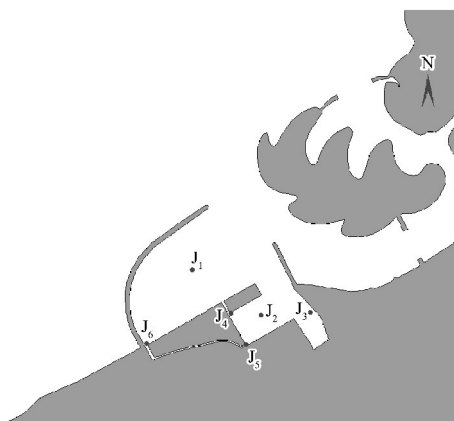


图 5 各方案港内不同位置特征点

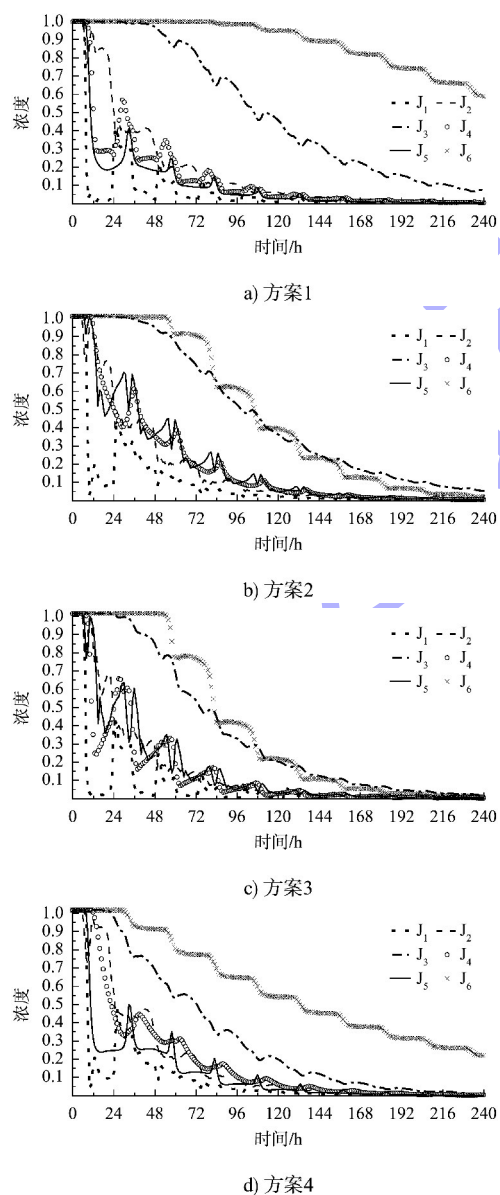
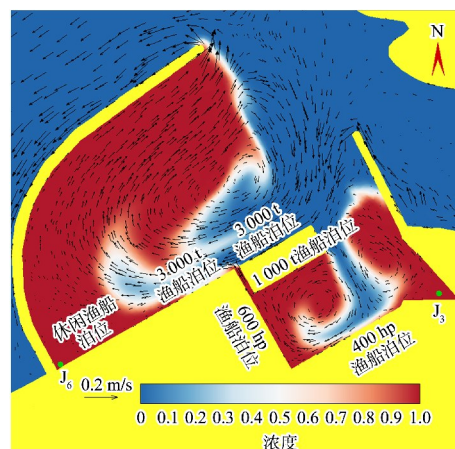


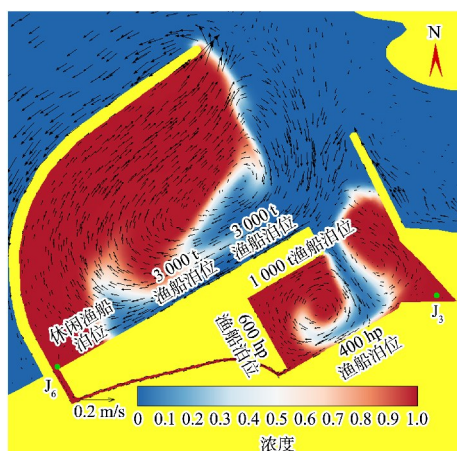
图 6 各方案港内不同位置水交换结果

为了探究换水通道布置对水交换的影响, 特别是在水交换能力较弱的区域引起的半交换周期的差异, 选择计算的第 1 个全潮周期进行分析。图 7~9 分别显示了各特征时刻示踪剂浓度和潮流流速矢量图。

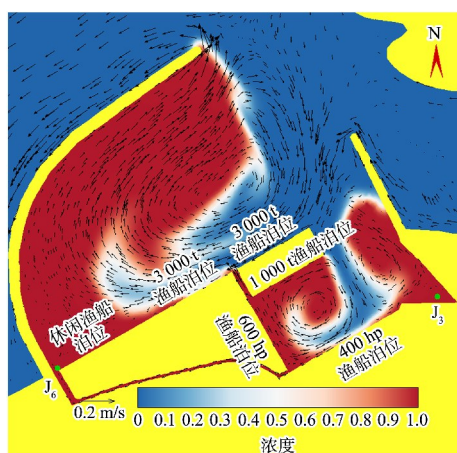
如图 7 所示, 计算开始 5 h 后, 港内已接近高潮位, 4 种方案的示踪剂浓度分布和潮流场在 3 000 t 渔船泊位西侧和大型渔船停泊区产生较为明显的差异。其中方案 1、3 相似, 方案 2、4 相似。这主要是由于方案 1、3 布置有换水通道 1, 水流携带高浓度示踪剂经换水通道 1 进入 3 000 t 渔船泊位前, 由于流速较小, 使得高浓度示踪剂仅局限在换水通道 1 出口附近的很小范围内。同时, 出流也使得原有沿泊位前沿的西南向水流顺时针偏转了一定角度, 这种“挑流”作用导致外海涌入的新鲜海水在短时间内不能进入到外港更深处(即不能更接近 J_6 点)。而方案 2、4 中泊位前沿西南向水流已抵至港池南侧休闲渔船泊位处, 并使途经处的示踪剂浓度显著降低。同时, 由于方案 2 中换水通道 2 的进、出水口处的示踪剂浓度均较高, 使得换水通道 2 还不具备向以 J_6 为代表的区域输送低浓度水体的能力, 这也成为方案 2、4 示踪剂浓度分布相似的原因。进入中型渔船停泊区水域的另一股水流在靠近 400 hp 渔船东部泊位时再次分成 2 股, 一股向西南形成中型渔船停泊区内的顺时针环流, 一股向东北在系泊岸线附近形成逆时针环流。4 个方案中进入中型停泊区水域的水流流场和沿途的示踪剂浓度分布相近, J_3 和 J_6 点处的示踪剂浓度与流场也相近。



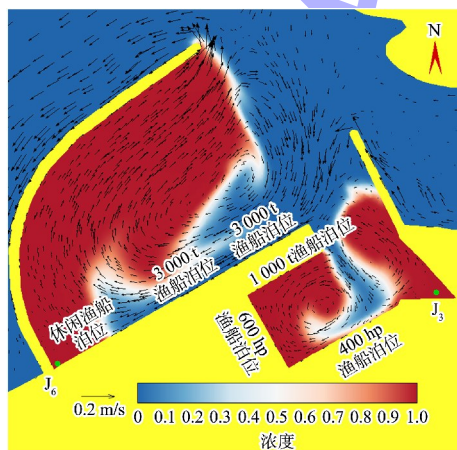
a) 方案1



b) 方案2



c) 方案3

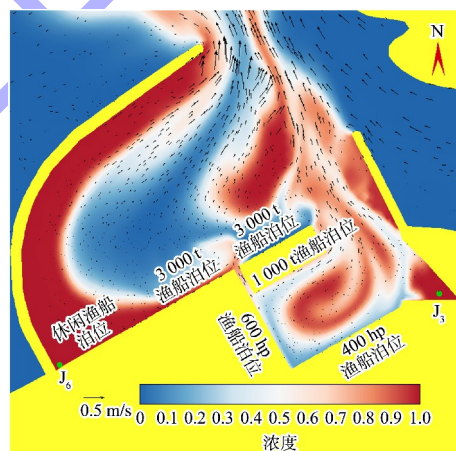


d) 方案4

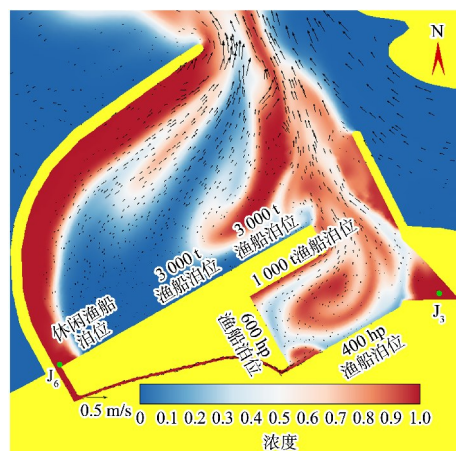
图7 各方案5 h 示踪剂浓度及潮流流速矢量图

如图8所示,12 h后4种方案自大型渔船停泊区至邻近西侧防波堤口门附近均形成一条流动结构相近的落潮流主流并使沿途的示踪剂浓度显著降低,主要区别在于方案1、3中沿3 000 t 渔船

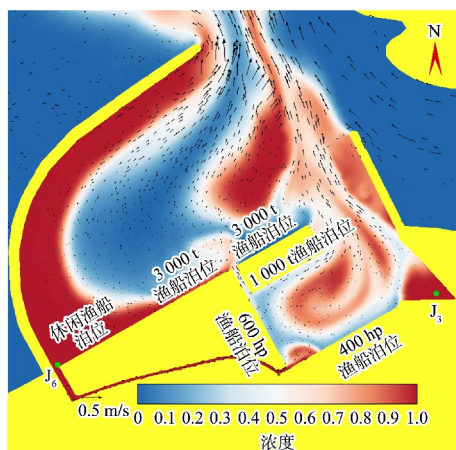
泊位前沿的东北向水流在换水通道1 出口处转向汇入落潮流主流,其携带的高浓度示踪剂也随之向远离泊位处扩散。在中型渔船停泊区水域,4个方案的落潮流均汇入航道形成另一条落潮流主流,此时换水通道1 的存在使得方案1、3中1 000 t 渔船泊位前示踪剂浓度显著降低,而方案2、4对应位置的高浓度示踪剂仍然存在。同时,换水通道2 处有水流携高浓度示踪剂进入400 hp 渔船泊位区,但影响范围局限在出口附近。此时,尽管4个方案中 J_3 和 J_6 点处的示踪剂浓度与流场仍相近,但4个方案中以 J_3 为代表的高浓度区外缘部分均已呈现随落潮流动向外移动的趋势,其中尤以方案4的趋势最为明显,其空出部分被低浓度水体补充,从而使得方案4中 J_3 西北原高浓度区部分位置的浓度相较于其他3个方案明显降低。



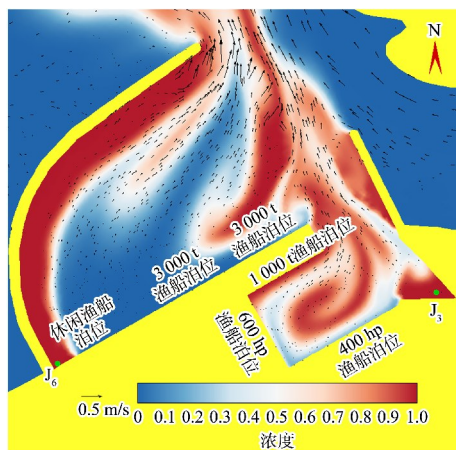
a) 方案1



b) 方案2



c) 方案3

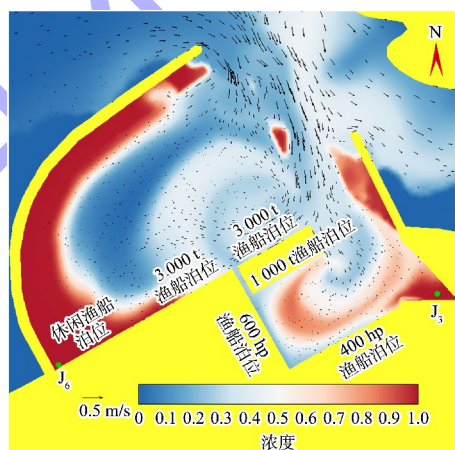


d) 方案4

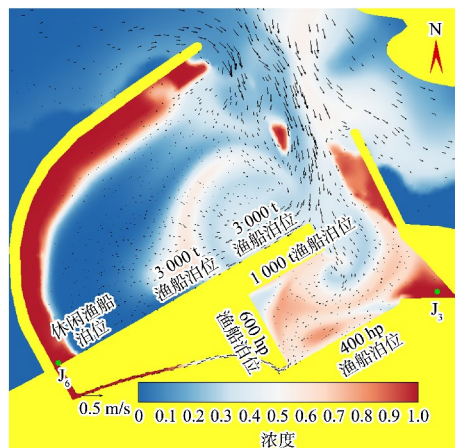
图8 各方案12 h 示踪剂浓度及潮流流速矢量图

如图9所示, 24 h后, 港内进入涨潮阶段, 此时大型渔船停泊区及各泊位前沿区域示踪剂浓度已明显降低, 由于此时换水通道1中的水流已转向, 从而对沿泊位前沿西南向水流的影响消失, 使得换水通道1左侧泊位前沿浓度再次降低。就中型渔船停泊区及各泊位前沿示踪剂浓度整体分布而言, 方案3的水体混合最为均匀, 大部分区域的示踪剂浓度相较于其他3个方案均较低, 其次为方案2。方案3中以 J_3 为代表的高浓度区外缘部分被涨潮流水体带入到其西部水域以及400 hp 渔船东部泊位附近, 使得这些区域的示踪剂浓度相较于其他3个方案有短暂的增大, 但也使 J_3 北部示踪剂浓度显著降低的区域面积超过其他3个方案,

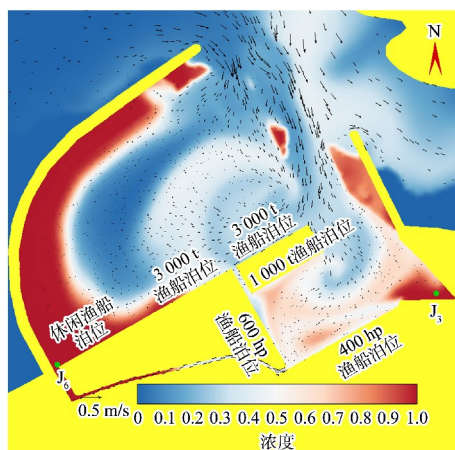
J_3 点已临近低浓度区边缘。同时, 方案1~3中以 J_3 为代表的高浓度区外缘部分也呈现随涨潮流移动的现象, 其中方案3中距 J_3 点较近的北部位置的浓度降低程度较方案1、2明显。4个方案中的 J_6 点仍处于高浓度区。对于换水通道2, 此时水流也已转向, 自中型渔船停泊区流向 J_6 位置, 其入口处的流速大于出口处, 且对入口附近区域的流速分布产生影响。同时, 自入口沿流动方向一定距离内水体所含示踪剂浓度已明显降低, 说明在第1个潮周期结束时换水通道2已具备向以 J_6 为代表的高浓度区输送低浓度水体的能力, 并在水流再次转向时将高浓度水体携带至中型渔船停泊区域, 从而提高防波堤堤根附近的水交换效率。



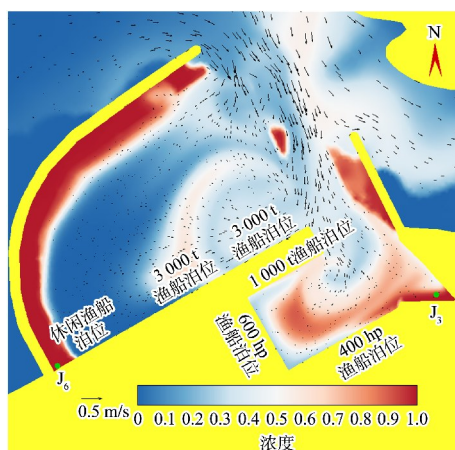
a) 方案1



b) 方案2



c) 方案3



d) 方案4

图9 各方案24 h示踪剂浓度及潮流流速矢量图

综上所述,不同方案对于水交换效率的影响不同。如方案1(仅布置换水通道1)堤根附近水域的平均半交换周期已超过10个潮周期;而换水通道2的布置使得方案2、3堤根附近的水域平均半交换周期分别在4.5和3.5个潮周期之内;未布置换水通道的方案4则在5.5个潮周期之内。对于以 J_3 为代表的中型渔船停泊区东侧附近水交换主要受到来自口门涨、落潮时段水流的影响,在未布置换水通道情况下,其外缘向外移动有利于该位置的水交换,从而获得了与方案3相当的半交换周期。

4 结论

1) 4个方案的大、中型渔船停泊区水域的平均半交换周期均相同。各方案水交换能力较弱的区域均分布在中型停泊区东侧和西侧防波堤堤根

附近水域,但各方案在该水域的平均半交换周期差异较大。综合比较来看,同时布置换水通道1、2的方案3的水交换能力最好。

2) 仅布置换水通道1有利于加快1000 t渔船泊位前的水交换,但会迟滞其左侧泊位前沿特别是防波堤堤根附近水体的半交换周期;仅布置换水通道2有利于提高防波堤堤根附近的水交换效率;2种换水通道同时布置有利于增强中型渔船停泊区及各泊位前沿整体的水交换能力,同时提高防波堤堤根附近的水交换效率。

3) 在今后渔港工程设计中,需要充分比较换水通道的布置形式以选择最优方案,提高港内的水交换能力。

参考文献:

- [1] MONSEN N E, CLOERN J E, LUCAS L V, et al. A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales [J]. Limnology and oceanography, 2002, 47(5): 1545-1553.
- [2] VIERO D P, DEFINA A. Water age, exposure time, and local flushing time in semi-enclosed, tidal basins with negligible freshwater inflow [J]. Journal of marine systems, 2016, 156: 16-29.
- [3] 黄宗伟,邓斌,蒋昌波,等.环抱式港区水体交换能力数值研究:以闸坡渔港为例[J].海洋学研究,2018,36(1):66-74.
- [4] 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.
- [5] 张伟,王国超,刘燃,等.环抱式港池水体交换与改善措施研究[J].水运工程,2013(4):37-41.
- [6] 李蕊,姚姗姗,丁文涛,等.基于改善水体交换能力的环抱式长港池布置优化[J].水运工程,2021(2):38-43.
- [7] 肖天葆,刘年飞,王金华,等.改扩建工程对博贺渔港水体交换能力影响研究[J].中国水运(下半月),2021,21(11):78-80.
- [8] 高飞,施逸辰,张长宽.通州湾港区水交换能力提升技术研究[J].水道港口,2021,42(6):746-752.
- [9] 孙龙,丁伟,路川藤,等.澳门机场填海对九澳湾潮流动力及水体交换的影响[J].水运工程,2022(5):1-8.

(本文编辑 王传瑜)