



# 新型河海快通闸海水入侵数值模拟研究

周树高<sup>1</sup>, 陈潇逸<sup>1</sup>, 杨行<sup>2</sup>

(1. 上海中交水运设计研究有限公司, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 为了研究新型河海快通闸作为金汇港航道出海通航建筑物时的海水入侵影响, 基于盐水对流扩散理论建立三维数值模型, 采用验证后的模型模拟海水以异重流形式通过新型河海快通闸入侵内河的过程, 基于平均盐度、盐水入侵距离、盐水交换率等参数对新型河海快通闸进行防咸效果分析。模拟与分析结果表明, 海水在与淡水掺混、被淡水稀释的过程中逐渐向闸室和内河入侵, 海水平均盐度随着入侵距离的增加而逐渐降低; 随着盐量在集咸区的沉积, 海水的上溯速度逐渐降低; 在设施运行一段时间后海水入侵距离基本稳定不变, 盐水交换率也逐渐趋于动态平衡。新型河海快通闸采用集咸区和径流冲泄的双重防咸措施, 可进一步增强新型河海快通闸的防咸效果。研究结论可为新型河海快通闸在河海直达航道中的设计和应用提供科学依据。

**关键词:** 通航建筑物; 数值模拟; 海水入侵; 防咸措施; 河海直达

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0124-08

## Numerical simulation of seawater intrusion of new type of navigable lock in seaward waterway

ZHOU Shugao<sup>1</sup>, CHEN Xiaoyi<sup>1</sup>, YANG Hang<sup>2</sup>

(1. Shanghai Communications Water Transportation Design and Research Co., Ltd., Shanghai 200092, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To research the influence of seawater intrusion when the new navigable lock is used in Jinhui-gang waterway, a three-dimensional numerical model is established based on the saltwater convective diffusion theory, and the verified model is used to simulate the process of seawater intrusion into the inland river in the form of heavy flow through the new navigable lock. Based on the average salinity, salt water intrusion distance, salt water exchange rate, the anti-salt effect of the new navigable lock is analyzed. The results of simulation and analysis show that seawater intrusion gradually invades the lock chamber and inland river during the process of dilution and mixing with freshwater, and the average salinity of seawater decreases with the increase of intrusion distance. With the salt deposition in the salt-collecting area, the seawater upstream velocity gradually decreases. The seawater intrusion distance is basically stable after a period of operation of the facility, and the salt exchange rate gradually tends to be dynamic equilibrium. The new navigable lock adopts the anti-salinity measures of salt collecting area and runoff flushing, which can further enhance the anti-salinity effect of the new navigable lock. The research results can provide scientific basis for the design and application of the new navigable lock in the direct waterway of river and sea.

**Keywords:** navigation structure; numerical simulation; seawater intrusion; anti-salinity measure; direct transport between river and sea

为实现内河航道的河海直达运输功能, 需在  
内河航道的出海口建设出海通航建筑物, 以满足

河海两用船舶的通航需求。在船舶过闸过程中,  
海水中的盐分在异重流作用下将向淡水水域入侵,

收稿日期: 2024-02-29

作者简介: 周树高 (1978—), 男, 高级工程师, 从事港口航道设计与咨询。

若水体盐浓度超标, 将会对内河水域的水质及生物的生存环境、沿河的工农业生产和人民的生活等产生不利影响。

船舶通过船闸时海水的入侵方式主要包括因水位差调平引起的灌泄水过程、盐水楔异重流入侵、船闸的闸阀门漏水以及船舶进出闸室时水量的补给和扰动, 其中, 由灌泄水及异重流方式的入侵盐量占据了入侵总盐量的绝大部分<sup>[1]</sup>。为尽量减轻海水入侵的影响, 国内外的出海通航建筑物中常用的防咸措施有气幕法、完全置换法、集咸坑法、盐水厢法、径流冲泄法、泵抽措施等<sup>[2-4]</sup>。

金汇港航道作为上海市“一环十射”高等级航道中的重要干线, 航道顺直、通江达海、地理位置优越, 具备建设成为上海内河直达海洋通道的可能性<sup>[5]</sup>。为实现金汇港河海直达通航功能, 需在金汇港南闸处建设船舶出海通航建筑物。为兼顾通航效率和防咸效果等工程需求, 提出一种配备升降筒式系统模块的新型河海快通闸方案, 以驱动升降筒的形式进行闸室水位调平, 无需灌泄水。分析研究新型河海快通闸运行过程中的海水入侵规律及影响程度, 对工程的设计及运行调度有着重要的意义。

国内外关于海水入侵的研究方法主要有数值模拟、物理模型试验、经验公式估算法等。Oldeman 等<sup>[6]</sup>扩展了简单的盐平衡和浓度-密度耦合, 在欧拉拉格朗日计算流体动力学 (computational fluid dynamic, CFD) 方法的基础上建立数值模型进行咸淡水混合模拟, 揭示了气泡屏的分离和混合特性的深层机制。Zou 等<sup>[7]</sup>建立基于一维河网模型和三维非结构网格有限体积海岸海洋模型 (finite volume coastal ocean model, FVCOM) 的数值模拟系统, 考虑河口海水入侵动态过程的三维分层结构及河流流量和潮汐力之间的双向和时间依赖的耦合效应, 准确模拟了盐水入侵的动态变化情况。姜治兵等<sup>[8]</sup>建立三维两相混合流数值模型, 能较好地模拟出海水入侵淡水水域的异重流段、过渡段和扩散段分布情况。常聪聪等<sup>[9]</sup>建立基于 OpenFOAM 的气幕防咸三维数值模型, 准确对气泡羽流、盐水入侵

以及气幕防咸过程进行数值模拟。吴门伍等<sup>[10]</sup>采用咸潮水槽物理模型试验, 得出盐水楔形状在径流量、潮汐强度及平均水深作用下的变化规律。周华兴等<sup>[11-12]</sup>结合船闸防咸试验研究, 总结灌泄水、异重流过程中入侵闸室或河侧的盐水水体及盐量的经验公式, 并在新港海船闸的咸水入侵计算中得到验证。以上相关研究基本是针对传统船闸型式进行的海水入侵研究, 本文针对新型河海快通闸建立三维离散模型, 对新型河海快通闸的海水入侵规律及防咸特性进行数值模拟研究, 旨在为新型河海快通闸的设计及应用提供技术参考。

## 1 工程概况

金汇港航道由黄浦江至杭州湾, 总里程 22.83 km, 航道整治范围见图 1。金汇港整治工程实施后为河海直达船通道, 黄浦江—金汇港南闸为内河航段, 金汇港南闸—洋山港区为沿海航段, 金汇港南闸成为河海直达航道的关键“咽喉”。



图 1 金汇港航道整治范围

根据金汇港出海通航建筑物的船舶通航及防咸需求, 在传统升船机结构基础上进行优化, 提出通航效率高、运行能耗小、防咸效果较优的新型河海快通闸方案<sup>[13]</sup>。新型河海快通闸主要由闸室段、内外闸首及内外海引航道 3 部分组成。将内河引航道挖深兼做集咸区, 重度较大的盐水沉积在集咸区底部。为了使集咸区底部的盐水能在重力作用下顺利下泄, 位于上引航道的集咸区底高程应高于下引航道底高程, 拟将集咸区底高程设计为-2.5 m, 长 275 m, 宽 175 m。新型河海快通闸方案的平面布置见图 2。

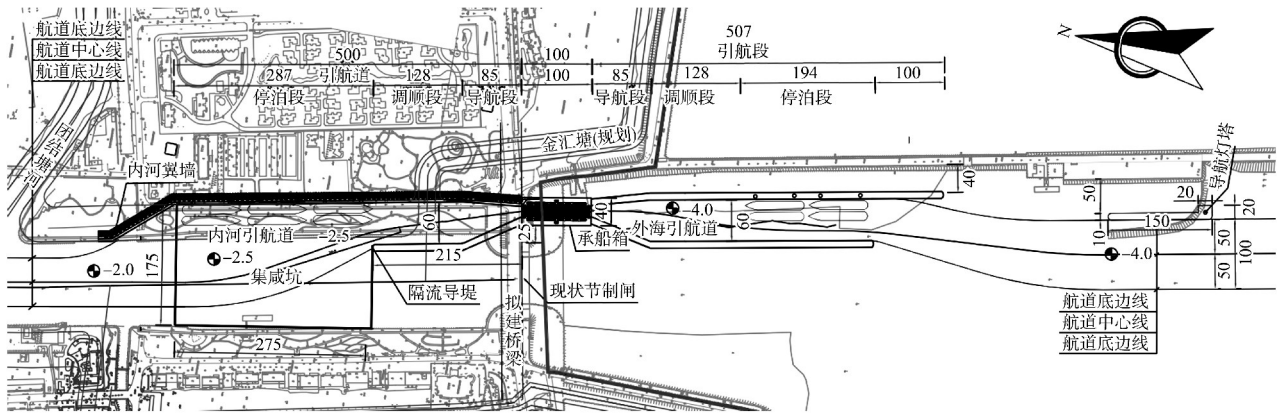


图 2 新型河海快通闸平面布置 (单位: m)

新型河海快通闸由两边侧墙、内河闸门及外海闸门围成闸室，闸室为矩形结构，8 个升降筒布置于闸室底部的筒槽内，可在安装于闸室侧壁牛腿上的提升油缸的驱动下沿筒槽上下升降，以此

来抬高或者降低闸室水位，使闸室水位与内河或外海水位齐平，通过打开相应闸门，使闸室水位和内河或外海水体连通，达到过船通航的目的。新型河海快通闸结构见图 3。

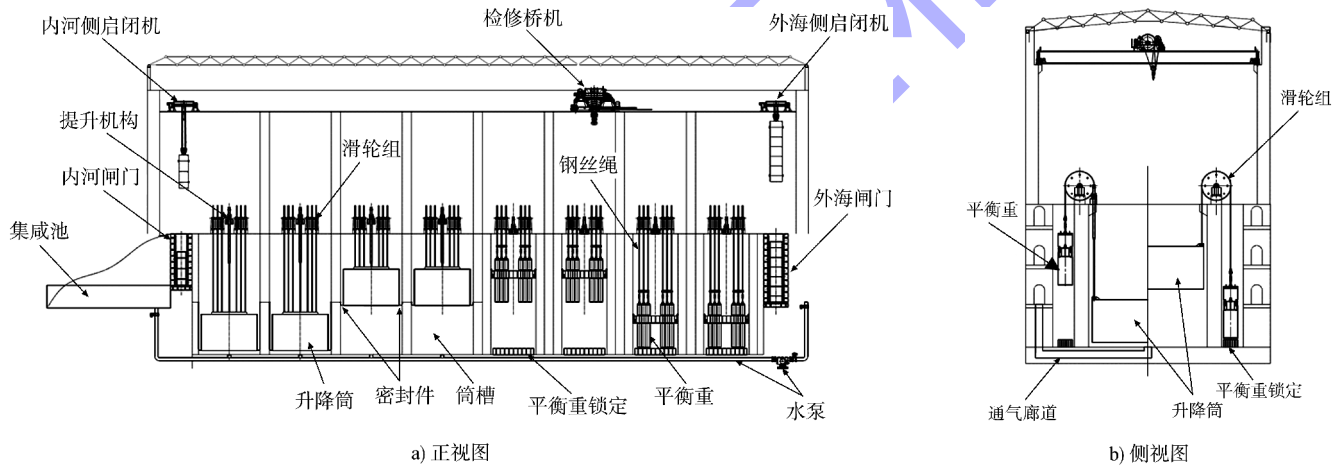


图 3 新型河海快通闸结构

从结构特点上看，新型河海快通闸方案配备升降筒式系统模块，驱动升降筒以控制闸室水位升降，无需灌泄水过程，相比传统船闸减少了因水位差调平而产生的海水入侵，无需灌泄水过程，而主要入侵形式为盐水楔异重流。因此，本文着重对海水以异重流形式通过新型河海快通闸而入侵内河的过程进行数值模拟与分析。

## 2 数值模型建立及验证

### 2.1 盐水对流扩散方程

液体中盐分的运动采用对流扩散模型进行控制：

$$\frac{\partial(\alpha_1 \rho_1 c)}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_1 \rho_1 u_1 c - \nabla \cdot (D_{\text{eff}} \alpha_1 \rho_1 \nabla c) = 0 \quad (1)$$

式中： $\rho_1$ 、 $\alpha_1$ 、 $u_1$  分别为水体的密度、相分数、速度， $c$  为盐质量百分浓度，扩散系数  $D_{\text{eff}}$  由分子扩散系数  $D_M$  和紊动扩散系数  $D_T$  组成，其中：

$$D_T = \frac{\mu_{T,1}}{\rho_1 S_{\text{ct}}} \quad (2)$$

式中： $\mu_{T,1}$  为紊动黏滞系数， $S_{\text{ct}}$  为紊动 Schmidt 数，取 0.7。

由于盐水与淡水的密度差一般不大，因此总液体密度简化为淡水密度和盐度  $c^*$  之和：

$$\rho_1 = \rho_w + c^* = \rho_w + c \rho_1 \quad (3)$$

式中： $\rho_w$  为淡水密度，忽略淡水中含有低浓度盐时的体积变化。

### 2.2 数值模拟方法

ANSYS FLUENT 软件是一款基于有限体积法的商业 CFD 软件, 用来模拟从不可压缩到高度可压缩范围内二维和三维流体物质的复杂流动<sup>[14-16]</sup>。

对新型河海快通闸海水入侵过程的数值模拟包含三维建模、网格划分、数值计算和后处理 4 个步骤, 研究技术路线见图 4。

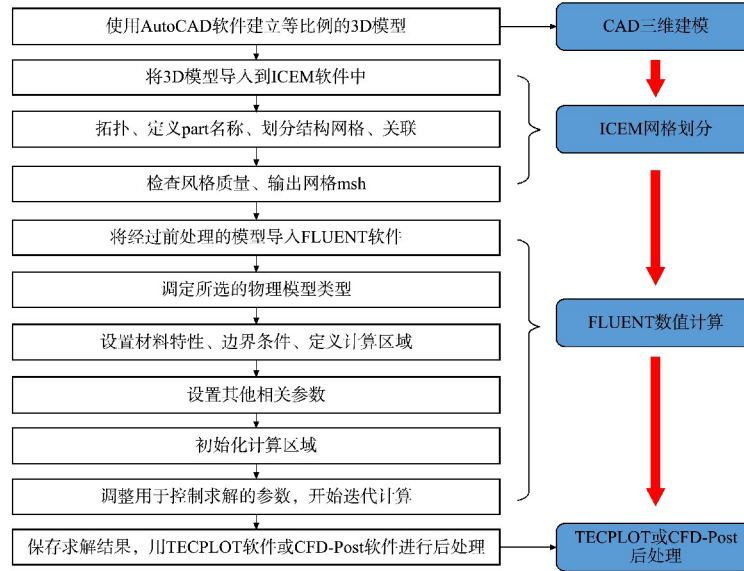


图 4 数值模拟技术路线

### 2.3 模型验证

为了验证三维数值模型的准确性及适用性, 建立尺寸为 2.4 m×0.5 m×0.36 m (长×宽×高) 水槽的三维模型。左半部分设置为淡水, 右半部分设置为盐水。初始时盐水密度为 1 021 kg/m<sup>3</sup>, 淡水密度为 998.2 kg/m<sup>3</sup>, 温度和压强分别为恒定值 17.5 °C 和 101.325 kPa。模型网格采用正交结构性网络, 尺寸为 0.01 m, 数量约 49 万个, 模拟步长 0.01 s, 共模拟 110 s。水槽模型见图 5。

随之进入右侧, 此后盐淡水在水槽内晃动与混合。

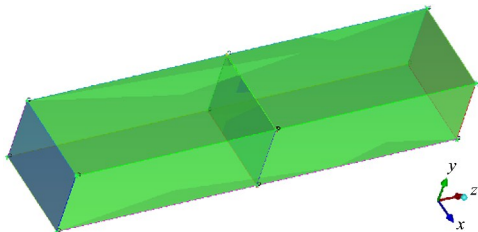
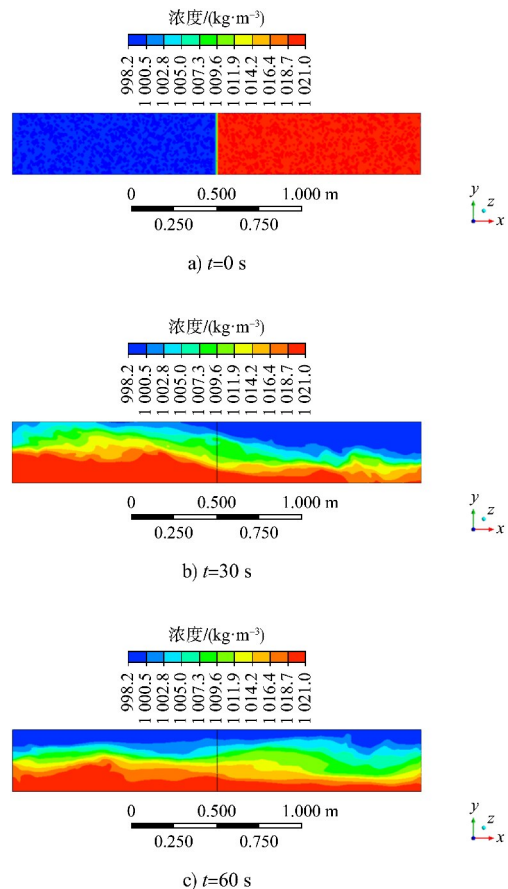


图 5 水槽验证模型

在组分模型的基础上采用大涡模拟 (large eddy simulation, LES), 数值模拟验证结果见图 6。右侧盐水因密度较大, 盐水下楔向左侧淡水底部入侵, 淡水





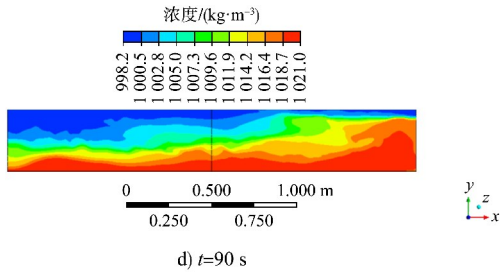


图6 模型数值模拟验证结果

选取数值模拟得到的水槽左侧水体平均浓度作为主要参数，以 Oldeman 等的水槽染色试验结果进行验证。如图 7 所示，数值模拟结果和水槽染色试验数据较为接近，拟合情况较好。因此，LES 模拟能较好地反映盐水运动规律，可以作为主要计算模型对本工程出海通航建筑物的海水入侵开展后续研究。

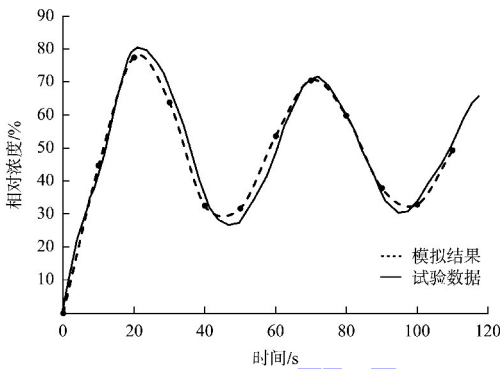


图7 模型数值模拟与试验结果对比

### 3 数值模拟研究

#### 3.1 初始条件

##### 3.1.1 模拟区域及网格划分

在 AutoCAD 软件中建立起与河海快通闸有效水域面积等比例的三维模型，见图 8。闸室长 92.5 m、宽 16.5 m，外海引航道长 507 m、宽 60 m，内河引航道长 500 m，其中集咸区长 275 m。全模型采用六面体结构网格划分，全局网格尺寸 2 m，共 18.772 万个网格。为便于区域的区分，将内河引航道的调顺段、导航段标记为集咸区 1、内河引航道的停泊段区域标记为集咸区 2。

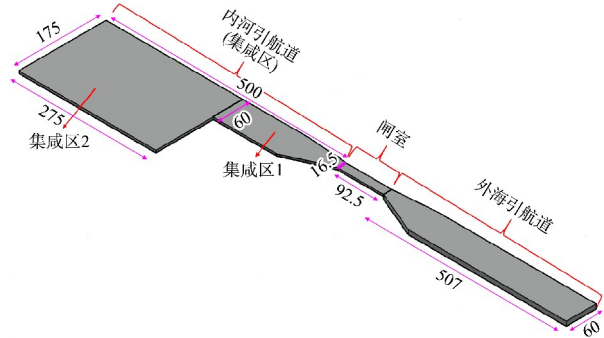


图8 新型河海快通闸三维数值模型 (单位: m)

##### 3.1.2 模拟工况设置

模拟考虑海水入侵最不利的工况，取内河引航道水位为内河最低通航水位 2.0 m，外海引航道水位为外海最高通航水位 4.61 m，闸室有效水深 3.5 m。模拟总时长取 12 h，模拟时间步长取 0.5 s。根据金汇港闸内外水域含盐度测量资料，闸内外盐度差平均值为 8‰，初始条件设置为外海侧盐度 8‰、内河侧 0‰，以外海侧闸门为界限。在模拟中，闸门启闭按动边界处理，通过改变闸室上下游闸门的边界条件模拟闸门运营过程中的启闭变化。

#### 3.2 数值模拟结果分析

##### 3.2.1 盐水入侵过程

模型初始状态如图 9 所示， $x=0$  m 处为外海引航道与闸室外海侧闸门的交汇面，在模型中作为计算距离的原点。初始时刻闸室及内河引航道为淡水，初始盐度为 0‰；外海引航道为盐水，初始盐度为 8‰。

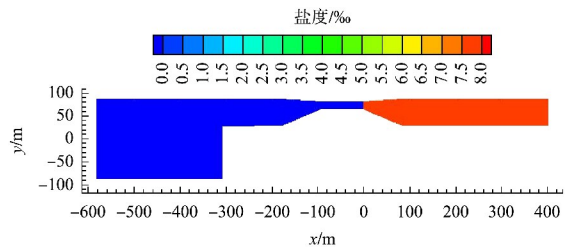


图9 初始时刻的模型状态

根据模拟结果，盐水入侵的过程分为盐水由外海引航道向闸室入侵和盐水由闸室向内河引航道入侵 2 个阶段。

第 1 阶段为外海引航道向闸室入侵过程, 模拟结果见图 10。外海侧闸门开启后, 盐水不断向闸室内上溯并与淡水发生掺混, 在闸室内形成盐度范围 0‰~3.5‰ 的梯度分布。60 min 时, 盐水基本入侵整个闸室。

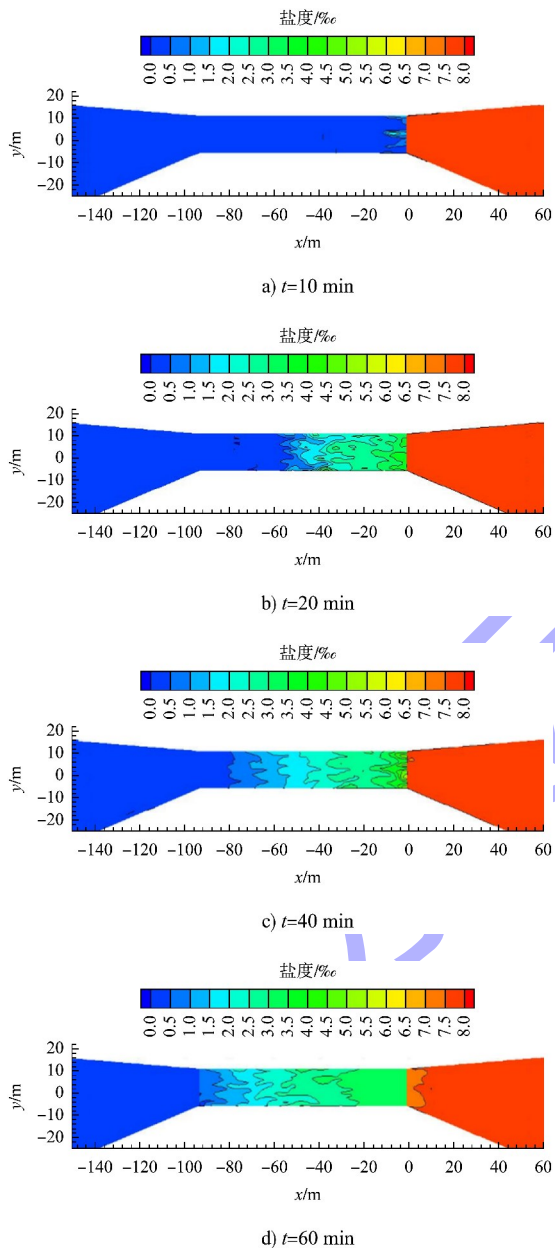


图 10 第 1 阶段盐水入侵过程模拟结果

第 2 阶段为盐水由闸室向内河引航道入侵, 模拟结果见图 11。根据模拟结果, 2 h 时, 闸室内淡水基本被混掺为盐度 3‰~5‰ 的盐水。随着内河侧闸门的开启, 盐水一边被稀释一边逐渐向内河引航道入侵。12 h 时, 入侵至内河引航道的盐度均低于 0.5‰。

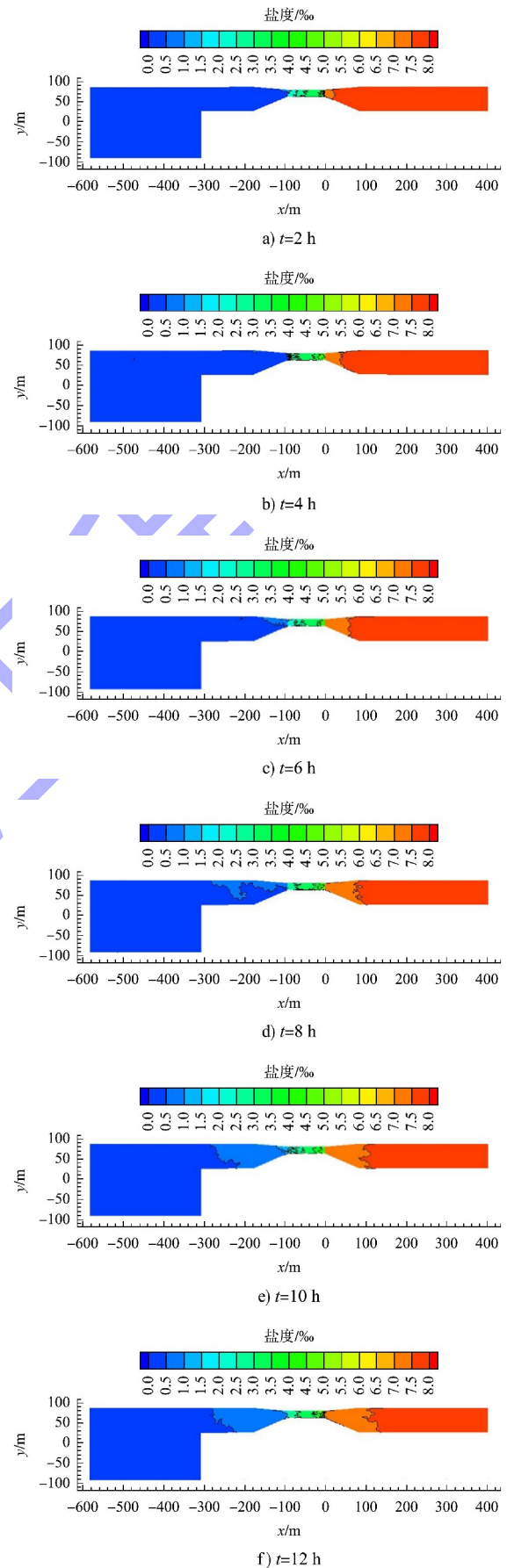


图 11 第 2 阶段盐水入侵过程模拟结果

### 3.2.2 盐度变化历程

0~12 h时段内闸室、内河引航道(集咸区1、2)内水体的平均盐度变化过程见图12。

1) 闸室内水体的平均盐度变化。闸室内水体平均盐度变化包括增长期、过渡期及动态平衡期3个阶段。闸室内水体一边在外海侧闸门开启时被外海引航道的盐水入侵,一边在内河侧闸门开启时被内河引航道的淡水稀释,直至两者对闸室内水体平均盐度的影响相当,使闸室内水体平均盐度基本在3.2‰~3.6‰范围内波动,处于动态平衡状态。

2) 集咸区内水体的平均盐度变化。集咸区1的平均盐度随时间呈缓慢增长态势,集咸区2的平均盐度以极微小的增量缓慢增加。由此可见,闸室的盐水初始入侵状态为盐水楔梯度入侵,存在快速增长阶段,但集咸区利用盐水密度大的特点,使得入侵至内河的盐水不断下沉,呈现出缓慢扩散的特点,有利于减缓盐水的进一步上溯。

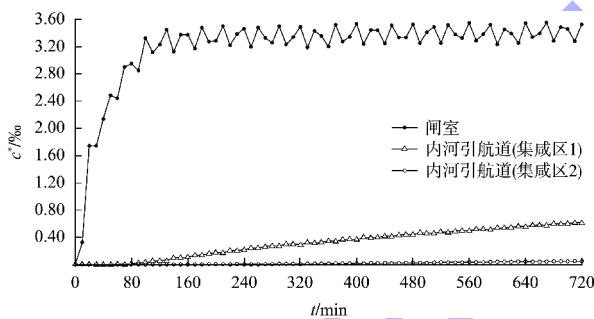


图12 闸室和内河引航道内水体平均盐度变化过程

### 3.2.3 盐水入侵距离

金汇港南枢纽内河水域水质控制标准为IV类,根据GB 3838—2002《地表水环境质量标准》,其主要适用于一般工业用水区及人体非直接接触的娱乐用水区。参照工业水水质指标,工业水中的氯化物不应超过250 mg/L,氯离子换算盐度约为0.45‰。因此,本文以盐度0.45‰为临界值对新型河海快通闸的盐水入侵距离进行分析。

通过CFD-POST软件分别计算出头部盐度为0.05‰和0.45‰的盐水入侵距离随时间的变化曲线,见图13。由图可知,随着盐水由外海逐渐向内河侧入侵,盐水入侵距离总体上呈现增长趋势,但入侵速度逐渐减小。头部盐度为

0.45‰的盐水入侵速度呈现出波动增长后趋于平缓的状态,400 min后盐水入侵速度逐渐趋近于0,盐水入侵最大距离基本稳定在300 m左右。头部盐度为0.05‰的盐水入侵速度也呈现出逐渐减缓的趋势。

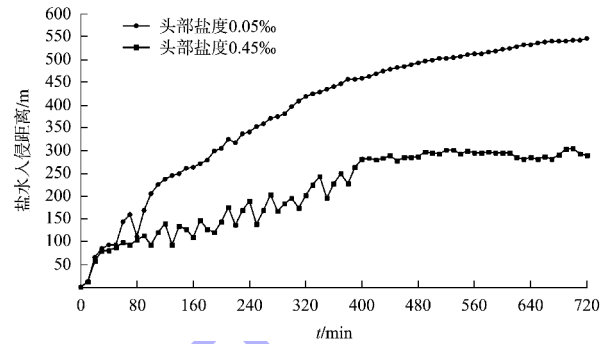


图13 盐水入侵距离变化过程

### 3.2.4 盐水交换率

为了了解盐水入侵闸室与内河引航道的总量,定义闸室与内河引航道内盐度 $\geq 0.45‰$ 的水体体积 $V_{\text{盐}}$ 与闸室、内河引航道的水体总体积 $V_{\text{总}}$ 之比为盐水交换率 $R$ :

$$R = \frac{V_{\text{盐}}}{V_{\text{总}}} \quad (4)$$

$R$ 的变化过程见图14。总体上, $R$ 随着新型河海快通闸的运行而增大,呈现快速增长与缓慢增长交替进行的特征,约580 min后趋于平稳, $R$ 基本维持在15%~16%的动态平衡状态。

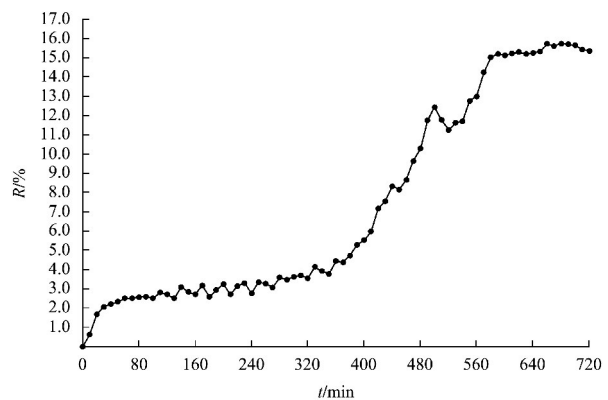


图14 R变化过程

## 4 防咸效果分析

根据金汇港南闸节制闸的现状运行资料,为了调控内河水位,水闸每月基本有22 d开闸进行排水,日均累计开闸时间2 h,过闸流量最小值为308 m<sup>3</sup>/s,则金汇港南闸日均最小排水量为221.76万m<sup>3</sup>。在

内河水位高于外海水位时, 通过金汇港南闸的开闸排水, 足以将入侵至内河的盐水排出。同时, 由于较高盐度的盐水主要沉积在内河引航道的集咸区 1, 即距离内河侧闸门较近位置, 在新型河海快通闸底部考虑设置带蝶阀的排水管道, 排水口位于内河闸门上游处。当内河水位高于外海水位时, 开启排水管蝶阀, 内河引航道的盐水通过排水管道自行排入外海。

相比传统船闸, 新型河海快通闸无需灌泄水过程实现水位调平, 而是通过驱动升降筒进行闸室水位的调节, 从而较大程度地减少了水体交换引起的盐水入侵, 防咸性能更佳。同时, 本工程设置了集咸区和径流冲泄的双重防咸措施, 从而进一步增强防咸效果。盐度高的海水在集咸区内被淡水稀释且向下沉积, 集咸区的设置延缓了海水的进一步上溯。同时, 利用金汇港南闸和排水管道, 可对积聚在集咸区的盐水进行有效冲咸。

## 5 结论

1) 根据新型河海快通闸盐水入侵过程模拟结果, 盐水入侵的过程分为盐水由外海引航道向闸室入侵和盐水由闸室向内河引航道入侵 2 阶段, 盐水在被淡水稀释、掺混的过程中逐渐向内河引航道入侵。

2) 盐水盐度随着入侵距离的增加而逐渐降低, 盐水的上溯速度随着盐水在集咸区的沉积而逐渐降低。在 12 h 后盐度 0.45‰ 的盐水入侵距离基本稳定在 300 m 左右, 盐水在集咸区向下沉积, 未超出集咸区的边界; 内河引航道的盐水交换率趋于维持在 15%~16% 的动态平衡状态, 盐水逐渐停止向上游入侵。

3) 针对金汇港出海通航建筑物的特点及需求, 新型河海快通闸采用集咸区和径流冲泄的双重防咸措施, 将内河引航道加深作为集咸区可使盐水沉积、延缓盐水的进一步上溯; 同时利用排水管道及金汇港南闸的日常定期排水, 可将沉积于集咸区的盐水排出, 进一步减小入侵内河的盐水总量。

## 参考文献:

- [1] 周华兴, 孙玉萍. 船舶过“海船闸”时盐水入侵量的分析与计算[J]. 海岸工程, 1987(2): 48-57.
- [2] 陈祎, 褚明生. 浅析潮汐区船闸的防咸措施[J]. 中国水运(学术版), 2007(1): 6-8.
- [3] 李永振. 海船闸的盐水楔异重流入侵和新港船闸的气幕防咸[J]. 水运工程, 1982(5): 23-28.
- [4] 张彦清. 荷兰新建两座防咸省水海船闸[J]. 水运工程, 1986(11): 18.
- [5] 周树高, 陈潇逸. 升船机在金汇港航道整治工程中的可行性应用分析[J]. 港口科技, 2022(9): 25-30, 46.
- [6] OLDEMAN A M, KAMATH S, MASTEROV M V, et al. Numerical study of bubble screens for mitigating salt intrusion in sea locks [J]. International journal of multiphase flow, 2020, 129(1): 103321.
- [7] ZOU H Z, LI H J. Numerical simulation of seawater intrusion from estuary into river using a coupled modeling system[J]. Journal of Ocean University of China, 2010, 9(3): 219-229.
- [8] 姜治兵, 陆虹, 杨青远. 海水经船闸入侵淡水运河的三维数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(2): 52-56.
- [9] 常聪聪, 翟建国, 黄筱云, 等. 海船闸气幕防咸数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2022, 37(1): 101-107.
- [10] 吴门伍, 卢陈, 高时友, 等. 盐水楔运动水槽试验研究[J]. 人民珠江, 2012, 33(S1): 49-51.
- [11] 周华兴. 海水以异重流方式入侵船闸时盐量计算公式的初步探讨[J]. 海岸工程, 1986(2): 24-31.
- [12] 周华兴, 孙玉萍, 白志敏. 海水以异重流方式入侵船闸的试验研究[J]. 水道港口, 1986(3): 13-19, 27.
- [13] 周树高, 屈斌, 陈潇逸, 等. 新型通航设施运行原理及应用特性分析[C]//中国土木工程学会港口工程分会. 工程排水与加固技术及港口工程理论与实践: 第十二届全国工程排水与加固技术研讨会暨港口工程技术交流大会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2023: 340-348.
- [14] 童朝锋, 魏芷阳, 孟艳秋. 基于 FLUENT 的垂向二维数值波浪水槽的造波效果[J]. 水运工程, 2020(3): 13-20.
- [15] 谭柱林, 彭杨. 明渠弯道水流三维数值模拟[J]. 水运工程, 2012(3): 46-49.
- [16] 孙永春, 孙美玲. 基于 FLUENT 软件的拦河闸水力特性数值模拟[J]. 水利水电快报, 2018, 39(12): 49-52, 57.

(本文编辑 王传瑜)