



河口船闸气幕防咸效果研究*

宋宏宇¹, 高成岩², 胡江¹, 李瑶¹

(1. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;
2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 为了分析在低浓度盐水条件下的河口船闸在不同进气压强和闸室盐度条件下的气幕防咸效果, 基于 CFD 软件的 VOF 多相流模型和 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型建立船闸气幕防咸二维模型, 对河口船闸不同进气压强和盐度下的气幕防咸过程进行了三相流模拟。模拟结果表明: 船闸气幕防咸效果与气泡帷幕的进气压强有关, 当水位为 8 m, 闸室盐度为 2.5‰ 时, 存在最佳进气压强使得船闸气幕防咸效果达到最优; 当进气压强越接近最佳进气压强时, 盐淡水交换率越低, 气幕防咸系数越大, 气幕防咸效果越好; 最佳进气压强的大小与闸室盐度有关, 闸室盐度越大, 气幕最佳进气压强越大。当闸室盐度增加时, 应及时提高进气压强以达到合理的阻咸效果。

关键词: 河口船闸; 防咸效果; 气泡帷幕; 数值模拟

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0135-10

Saltwater prevention effect of air curtain in estuarine ship lock

SONG Hongyu¹, GAO Chengyan², HU Jiang¹, LI Yao¹

(1. National Inland Waterway Rehabilitation Engineering and Technology Research Center,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: To analyze the effect of mitigating salt intrusion of the air curtain of the estuarine ship lock under low concentration salt water conditions under different inlet pressures and the salinity of the lock chamber, a two-dimensional model of the air curtain for mitigating salt intrusion of the ship lock is established based on the VOF multiphase flow model and the Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model of CFD software. The three-phase flow simulation of the air curtain for mitigating salt intrusion process under different inlet pressures and salinity of the estuarine lock is carried out. The simulation results show that the effect of mitigating salt intrusion of the ship lock air curtain is related to the inlet pressure of the bubble curtain. When the water level is 8 m and the salinity of the lock chamber is 2.5 ‰, there is an optimal inlet pressure that maximizes the effect of mitigating salt intrusion of the ship lock air curtain; When the inlet pressure is closer to the optimal inlet pressure, the exchange rate of saltwater and freshwater is lower, the mitigating salt intrusion coefficient of the air curtain is larger, and the effect of mitigating salt intrusion of the air curtain is better. The optimal inlet pressure is related to the salinity of the chamber, and the higher the salinity of the chamber, the greater the optimal inlet pressure of the air curtain. When the salinity of the lock chamber increases, the inlet pressure should be increased in time to achieve a reasonable effect of mitigating salt intrusion.

Keywords: estuarine ship lock; effect of mitigating salt intrusion; air curtain; numerical simulation

盐水入侵会导致原有的淡水系统造成破坏, 严重影响, 而在河口船闸, 盐水入侵的现象经常对周围生态环境, 饮用水取水, 工农业用水造成影响发生^[1]。此时, 需要采取有效防咸措施抑制盐水

收稿日期: 2025-02-24

*基金项目: 大型运河工程水生态安全保障技术与示范项目(2023YFC3208800)

作者简介: 宋宏宇(2000—), 男, 硕士, 从事水利工程、生态航道研究工作。

上溯。Kerstma 等将船闸防咸措施分为三类：1) 常规船闸的优化操作措施，如多级船闸法、减少开闸次数等^[2]；2) 抑制盐-淡水交换的措施，如气泡帷幕、淡水帷幕等^[3]；3) 盐淡水分离与提取措施，如集咸坑法、冲洗法等。其中气幕法对防止海水入侵效果显著，若与其他措施相配合效果更好，其优点包括设备简单、施工方便等。

荷兰为了减少盐水的入侵，是最早开展气幕防咸研究的国家，Laren 建议在开阔的水道和海闸入口处使用气泡幕，其在 1960 年通过理论分析和物理试验揭示了入海河口气幕防咸原理。Abraham 等在 1973 年在海闸中使用气泡筛进行了多次试验，以非常粗糙的空间分辨率测量密度剖面，作为防止盐入侵的措施。李永振^[4]在 1982 年通过新港船闸试验检验了气幕防咸效果。Keetels 等^[5]在 2011 年进行了试验，研究调查气泡筛管的性能并评估其参数空间，以用于设计。最近，Mahoney 等^[6]在利用 PIV 和染料测量技术进行了实验室试验，用于研究盐水入侵。一系列试验研究表明气幕防咸效果与气泡羽流强度、盐淡水密度差有关^[7]。

船闸盐水入侵大都发生在船舶过闸期间，进出船闸时的水平环流和闸门打开时的密度交换流将导致盐水经过船闸入侵至内河。由于交换流通常是引起盐水入侵的主导因素，大部分防咸措施都集中于限制交换流的发展，利用气幕破坏限制交换流的形成可以有效减少盐水入侵，而这些措施目前主要针对高浓度盐水，例如新港船闸和荷兰特纽曾船闸的闸下盐度均为 20‰ 以上。

但青年船闸距海洋较远，一般情况下闸下盐度约为 2.5‰，极端情况下最多达到 10‰~15‰，该类河口船闸面临低浓度盐水入侵问题，低浓度盐水会经过船闸向淡水内河入侵。但是目前对气幕防咸在低浓度盐水条件河口船闸中的影响规律研究尚不充分，关于进气压强和盐水盐度变化对河口船闸气幕防咸效果的影响规律存在空白。

而随着科技的进步和发展，人们对计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 的运用

更加广泛，用其进行数值模拟可以更好的捕捉气液的运动轨迹。然而，气泡帷幕的数值模拟应用相对较少。目前，模拟气泡帷幕的方法包括：欧拉-拉格朗日和欧拉-欧拉方法^[8-9]。为节约计算成本，本文采用欧拉-欧拉法，分别模拟气相和液相运动，采用界面追踪或捕捉方法 (如 volume of fluid, VOF 方法) 确定交界面位置；构建了水槽防咸二维数值模型，并通过 Deltares 研究院的物理试验数据对其进行验证，探究在低浓度盐水条件下，不同进气压强和盐度变化时对气幕防咸效果的影响，并对青年船闸气幕防咸进行优化。

1 盐水入侵数值模型的建立与验证

1.1 模型建立

本文通过 CFD 软件构建了水槽防咸试验的二维数值模型，模型采用荷兰 Deltares 研究院的 2.4 m 水槽气幕防咸试验结果^[10]对模拟结果进行验证。

根据荷兰 Deltares 研究院的试验布置建立 2.4 m×0.7 m (长×高) 的水槽剖面，见图 1，水深为 0.4 m，其中盐水的盐度为 20‰，对应密度为 1 021 kg/m³，气泡帷幕通过布置在水槽底部中央两排曝气管产生，曝气管直径 4 cm，气孔宽度为 0.2 mm，单缝中心间距为 7.5 cm。基于结构化正交网格划分方式对模型进行网格剖分，见图 2，为了降低整体的网格数量提升计算速度，并保证气幕处的精确求解，对气幕处网格进行局部加密，最小网格尺寸为 0.2 mm，最小网格面积为 0.67 mm²，加密处网格逐步扩大到未加密的网格尺寸，最大网格面积为 2.4 cm²，设置模型底部和侧面为无滑移边界，顶部为自由出流边界。

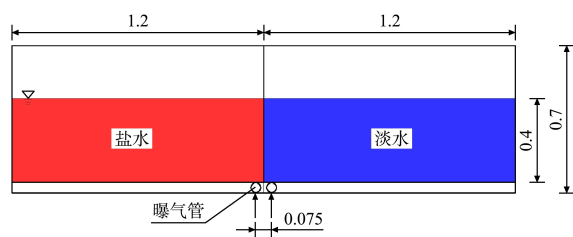


图 1 试验水槽 (单位: m)

Fig. 1 Experimental tank (unit: m)

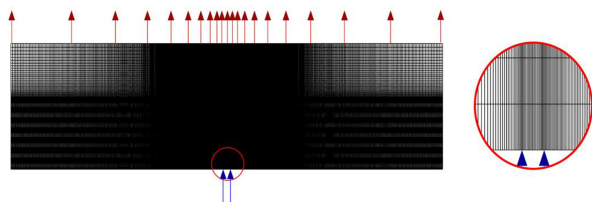


图 2 气幕处网格局部加密

Fig. 2 Local refinement of grid at the air curtain

1.1.1 控制方程

模拟通过分别模拟气相和液相运动, 采用界面追踪或捕捉方法 (VOF 方法) 确定交界面位置, 由于模型不研究流动系统的热交换, 所以采用连续方程和动量方程作为控制方程。

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = F_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial(\rho u'_i u'_j)}{\partial x_j} + \mu \nabla^2 u_i \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; u'_i 、 u'_j 为 i 、 j 方向上的脉动流速; u_i 、 u_j 为 i 、 j 方向上的平均流速; p 为压力; F_i 为单位体积力; μ 为动力黏度; 由于气幕防咸模拟暂不考虑流体的压缩性, 所以体积力只有重力。

1.1.2 多相流模型

VOF 模型通过求解一组动量方程并跟踪每一相在计算区域内的体积分, 可以模拟两个或多个不混溶流体。相界面的跟踪是通过求解一个(或多个)包含相的体积分数的连续性方程来完成的。对于第 q 相, 方程具有以下形式:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (3)$$

式中: α_q 为体积分; ρ_q 为 q 相密度; $\dot{m}_{qp}$ 、 $\dot{m}_{pq}$ 为从 q 、 p 相到 q 、 p 相的传质量; $\vec{v}_q$ 为 q 相的速度矢量。

体积分方程:

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q^{n+1} U_f^{n+1} \alpha_{q,f}^{n+1}) = \left[\sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right] V \quad (4)$$

式中: $n+1$ 为当前时间步索引; n 为前一个时间步索引; α_q^{n+1} 为时间步 $n+1$ 时网格内的体积分; α_q^n 为时间步 n 的网格内的体积分; $\alpha_{q,f}^{n+1}$ 为时间步 $n+1$ 网格面上第 q 相的体积分; U_f^{n+1} 为时间步 $n+1$ 是通过网格面的体积通量; V 为网格体积。

1.1.3 湍流模型

本文选用的湍流模型为 Realizable k - ε 模型, 其中湍动能 k 的输运方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (5)$$

耗散率 ε 的输运方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (6)$$

式中: σ_ε 、 σ_k 分别为 ε 和 k 的紊流普朗特数; μ_t 为湍动黏度, $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$; $C_1 = \max [0.43 + \eta / (\eta + 5)]$, $\eta = S k / \varepsilon$, $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$; $C_2 = 1.9$ 为经验常数。 C_μ 与应变率相关联, 表达式如下:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s U^* k / \varepsilon} \quad (7)$$

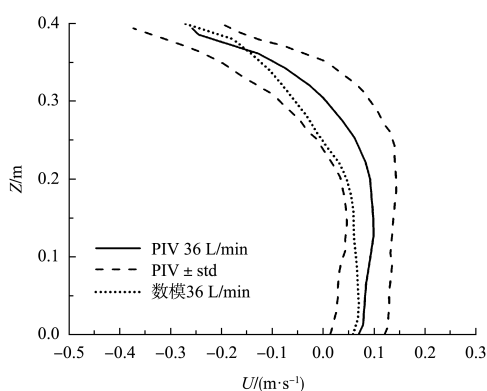
式中: $A_0 = 4.04$ 为经验常数; $A_s = \sqrt{6} \cos \varphi$, $\varphi = 1/3 \cos^{-1}(\sqrt{6} W)$, $W = S_{ij} S_{jk} S_{ki} / \tilde{S}^3$, $\tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}$, $U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \Omega_{ij} \Omega_{ij}}$, $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$, 其中 U^* 与平均旋转速率 Ω_{ij} 为专门表示旋转的影响项, 是 Realizable k - ε 模型的重要特点之一^[11]。

Realizable k - ε 模型被有效应用于各种不同类型的流动模拟, 包括包含有射流和混合流的自由流动, 边界层流动等, 通过求解 2 个独立的输运方程, 能够确定湍流的长度和时间尺度, 在本文的气液三相流模拟中可以满足模型要求。

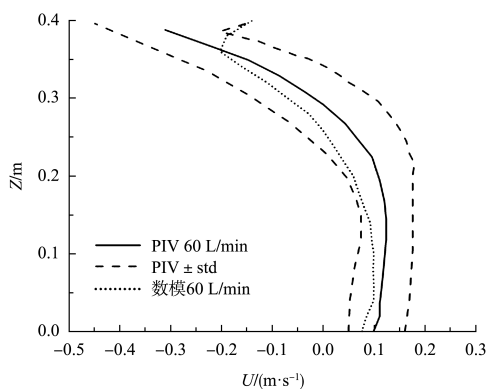
1.2 模型验证

1.2.1 气幕防咸流场验证

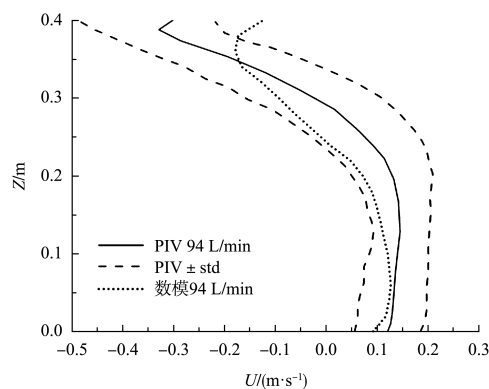
盐水侧距离闸门 0.4 m 处断面的水平速度时均值的实测和模拟结果见图 3, 其中速度的正负值只代表水平速度的方向。由图可知, 随着供气量的增加, 水槽右侧环流的速度加快, 断面处的水平速度增加, 当进气量为 36 L/min 时, 断面平均水平速度最大值为 0.07 m/s; 当进气量为 60 L/min 时, 断面平均水平速度最大值为 0.09 m/s; 当进气量为 94 L/min 时, 断面平均水平速度最大值为 0.13 m/s, 结果显示进气量与水槽断面平均水平速度呈正相关, 气幕进气量越大, 水槽内断面平均水平速度越快。由于模型气幕是在二维平面进行模拟, 进气口进气速度略小于试验进气速度, 所以模拟结果略小于实测数据, 但误差小于平方差, 变化趋势较为一致, 模拟结果与文献结果基本吻合。



a) 进气量 36 L/min 时平均水平速度



b) 进气量 60 L/min 时平均水平速度



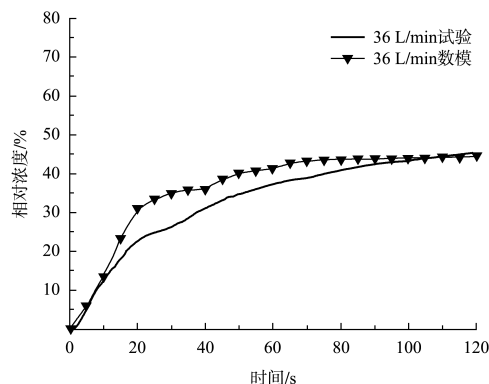
c) 进气量 94 L/min 时平均水平速度

图 3 指定断面水平速度试验与模拟结果比较

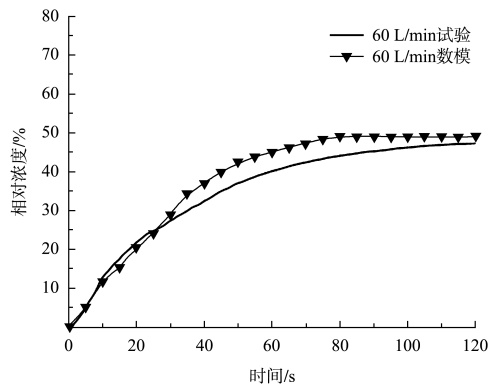
Fig. 3 Comparison of horizontal velocity experiment at specified section and simulation results

1.2.2 盐水浓度验证

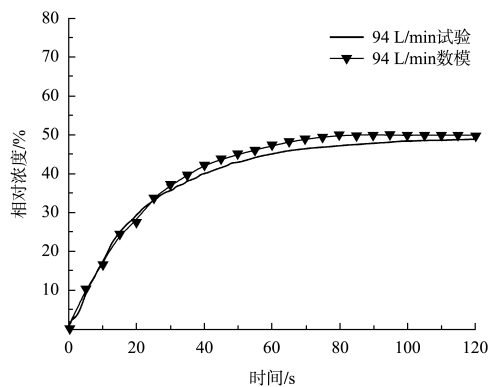
当进气量为 34 L/min 时, 进气量较小, 在该盐水浓度下对盐水楔行进速度造成的阻碍影响有限, 因此淡水侧的盐水浓度较高。当时均进气量增加到 60 L/min 时, 前 20 s 内的阻咸效果得到显著提升, 盐水入侵速度减慢, 此时盐水浓度较低, 但当时均进气量进一步增加到 94 L/min 时, 由于气幕反而加剧了水体的混掺, 导致此时盐水浓度再次偏高。不同进气条件下淡水侧的盐浓度模拟和实验结果对比见图 4, 模拟结果显示, 在前 20 s 内, 盐水还未运动到边壁, 存在最佳进气量 60 L/min, 此时盐水楔的形成被气幕破坏, 淡水侧盐水浓度最低, 气幕防咸效果最好。在当试验进气条件下, 由于模型气幕是在二维平面进行模拟, 气幕进气速度偏小, 模拟结果略大于实测数据, 但变化趋势一致, 并且模拟时段内计算结果与试验数据的最大误差不超过 5%, 两者基本吻合。



a) 进气量 36 L/min 时相对浓度



b) 进气量60 L/min时相对浓度



c) 进气量94 L/min时相对浓度

图 4 不同进气量条件下淡水侧相对浓度模拟结果
Fig. 4 Simulation results of relative concentrations on freshwater side under different air intake conditions

2 船闸气幕防咸效果研究

2.1 青年船闸气幕防咸二维数值模型计算条件

根据平陆运河盐度监测资料^[12], 建立了闸室及上游引航道的二维数值模型, 对闸室及上引航道的盐水入侵进行三相流模拟。青年船闸位于钦州龙湾水库, 是平陆运河规划 3 座梯级中的最下游梯级, 距离出海口大约超过 10 km。青年船闸原型布置见图 5, 闸室长 281.0 m、高 23.6 m; 闸首长 66.5 m、高 13.9 m; 上引航道长 502.0 m、高 13.9 m, 青年船闸计算水深为 8.0 m, 闸室盐度为 2.5‰, 其中闸首和闸室为盐水, 上引航道为淡水。气幕位于上闸门上游 3.5 m 处, 分别由 3 个曝气管组成, 气孔宽度为 2 mm。模型整体采用结

构性正交网格, 并针对盐水入侵的主要作用的上游导航段和气幕段的网格进行加密, 网格节点最小间距为 2 mm, 最小面积为 1.38 cm², 为其他未加密区域网格节点间距 0.6 m, 设置模型四周及底部为无滑移边界, 气孔为压力入口, 顶部为压力出口; 当进气压强达到无气幕时的静水压强 80 kPa 后, 气幕入口可以稳定进气, 当进气压强达到 150 kPa 时, 会对船舶通行造成较大扰动, 所以针对气幕运行条件下盐水的运动特性, 采用二维数值模拟的方法开展了不同进气压强条件下气幕的防咸效果对比研究, 分析在上游最低水深 8.0 m、和青年船闸闸室盐度 ($S = 2.5‰$) 条件下, 进气压强为 80~150 kPa 范围的气幕防咸效果。具体模拟工况见表 1, 设置上闸门和气幕同时开启。

表 1 青年船闸气幕进气压强计算工况
Tab. 1 Calculation conditions of air curtain inlet pressure in Youth Ship Lock

工况	盐度/‰	压强/kPa	水深/m	计算时间/s
1	2.5	0	8.0	3 000
2	2.5	80		
3	2.5	85		
4	2.5	90		
5	2.5	95		
6	2.5	100		
7	2.5	150		
8	5.0	0		
9	5.0	80		
10	5.0	85		
11	5.0	90		
12	5.0	100		
13	7.5	0		
14	7.5	80		
15	7.5	85		
16	7.5	90		
17	7.5	100		
18	10.0	0		
19	10.0	80		
20	10.0	85		
21	10.0	90		
22	10.0	100		

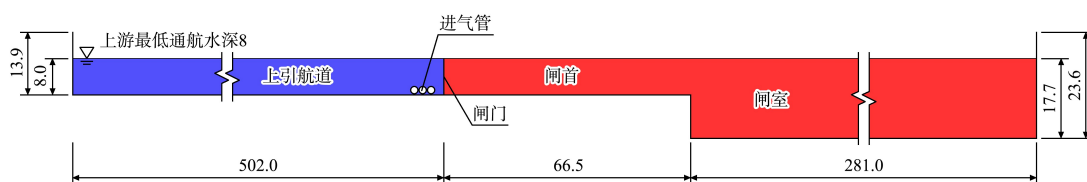
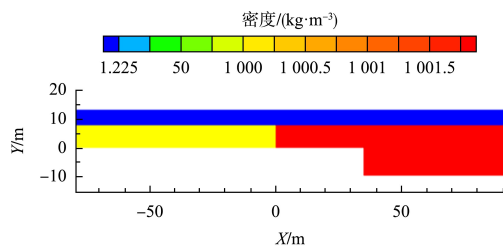


图5 青年船闸原型布置 (单位: m)

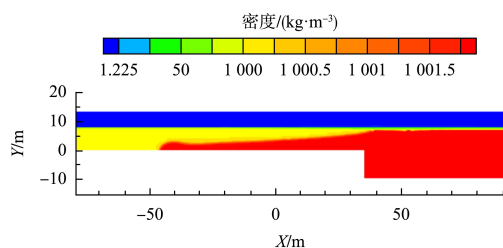
Fig. 5 Prototype layout of Youth Ship Lock (unit: m)

2.2 气幕进气压强对气幕防咸效果的影响

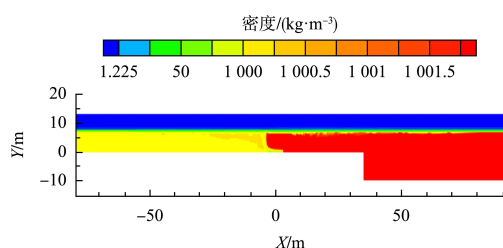
船闸在 8.0 m 水位条件下, 布置气幕前后的盐水入侵过程见图 6。计算结果显示, 当无气幕时, 盐水以异重流形式从底部向上引航道淡水侧入侵, 且随着盐水入侵距离的增加, 盐水入侵速度逐渐下降; 当增设合适气幕后, 盐水楔被气泡羽流破坏, 有效阻止了盐水从底部向右侧输移, 但在紊动扩散作用下, 部分盐水和气液混合物从表层向淡水侧扩散; 当气幕进气压强较大时, 气泡羽流造成的紊动扩散加剧, 大量盐水随气泡从表面向淡水侧扩散, 气幕反而加剧了盐淡水的掺混。



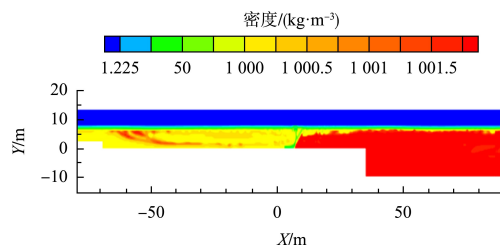
a) 闸门未开启时



b) 0 kPa时闸门开启300 s



c) 80 kPa时闸门开启300 s



d) 150 kPa时闸门开启300 s

图6 不同进气压强条件下的盐水上溯过程

Fig. 6 Upstream process of saltwater under different inlet pressure conditions

参照船闸设计资料提出船闸盐淡水交换率 Z 的计算方程^[13-14], 即闸室内盐度变化与闸室外部两侧盐度差之间的比值, 见式(8), 盐淡水交换率 Z 在本文中的意义为进入河侧的海水水体占闸室水体的百分数。从船闸防咸效果来看, 当船闸防咸效果越好, 闸室进入河侧的盐水就越少, 盐淡水交换率 Z 值越小^[15]。

$$Z = \frac{\Delta S_i}{\Delta S_o} \quad (8)$$

式中: ΔS_i 、 ΔS_o 分别为闸门启闭后闸室内盐度差和闸室外的盐度差, kg/m^3 。

气幕进气压强与盐淡水交换率的关系见图 7。在工况范围内, 盐淡水交换率与开闸时间成正比, 并在过闸完成时达到最大值, 在 $t = 3\,000\text{ s}$ 时, 各工况下的盐淡水交换率分别为 8.49%、2.59%、4.93%、6.02%、8.97%、10.51%, 结果表明, 当气幕运行稳定后, 存在最佳进气压强使得盐淡水交换率最低, 当气幕进气压强越接近最佳进气压强, 盐淡水交换率最低, 气幕防咸效果最好; 计算结果显示, 工况范围内, 当气幕进气压强 $P < 95\text{ kPa}$ 时, 由于盐水楔被气泡帷幕破坏, 盐水无法正常从底部进行输移, 气幕防咸效果较好; 当气幕进气压强达到最佳进气压强约 80 kPa 时, 过闸完成

时盐淡水交换率最低, 船闸气幕防咸效果最好, 此时船闸盐淡水交换率相较于无气幕时的船闸盐淡水交换率下降了约 69%。

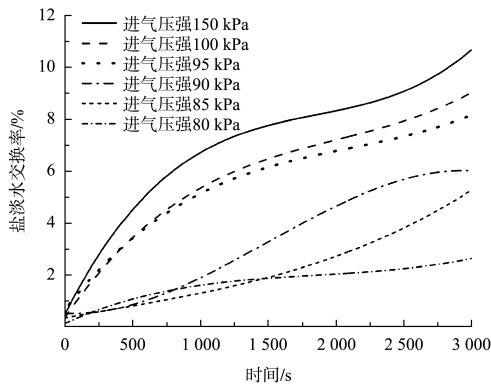


图 7 不同进气压强条件下盐淡水交换率时程变化

Fig. 7 Time history variation of saltwater and freshwater exchange rate under different inlet pressure conditions

Abraham 等为评价气幕防咸效果, 将有无气幕时盐水入侵量之比作为指标, 称之为盐传递系数 η 。这里定义气幕防咸系数为 $1-\eta$, 当气幕防咸系数 $1-\eta$ 越大, 气幕防咸效果越好。由于计算时间限制, 本文取 3 000 s 时上引航道盐含量作为标准, 比较在闸室盐度为 2.5‰, 不同气幕进气压强时上引航道的盐含量。在相同时间时, 船闸气幕进气压强与防咸系数 $1-\eta$ 之间的关系见图 8。从数值模拟结果可以看出, 在工况范围内, 气幕进气压强与气幕防咸效果成负相关。分析本文的数值模拟结果, 为达到较好气幕防咸效果, 气幕进气压强应控制在最佳进气压强约 80 kPa, 越接近最佳进气压强, 气幕防咸系数 $1-\eta$ 越大, 气幕防咸效果越优。

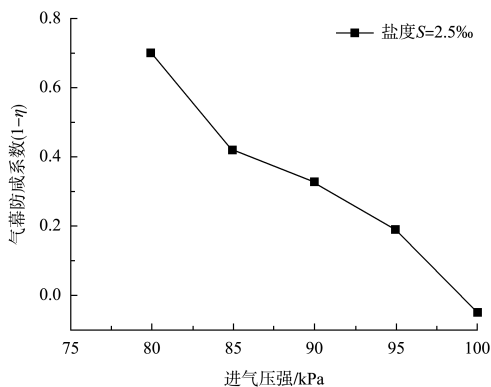


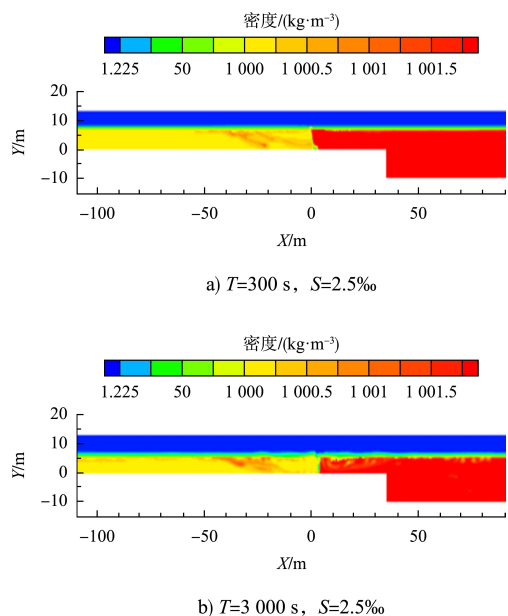
图 8 进气压强与气幕防咸系数的关系

Fig. 8 Relationship between inlet pressure and mitigating salt intrusion coefficient of air curtain

2.3 盐度变化对船闸气幕防咸效果的影响

通过模拟气幕进气压强变化对 2.5‰盐水的入侵过程的影响, 明确了气幕的进气压强与防咸效果的关系, 研究结果显示并不是进气压强越大, 阻咸的效果就越好, 反而会由于加剧了扰动导致盐水向淡水侧的扩散, 降低气幕防咸效果。由于受到径流、潮量和气候等条件的影响, 青年船闸下游水体的盐度不断变化, 入侵强度和闸室盐度也随之改变, 但青年船闸距海洋较远, 一般情况下闸下盐度为 2.5‰, 极端情况下最多达到 10.0‰左右, 该船闸面临低浓度盐水入侵问题, 因此针对这一情况, 需要开展不同盐度条件下气幕防咸效果的研究。

船闸在 8.0 m 水深条件下, 气幕进气压强为 80 kPa 时盐度发生变化时的盐水入侵过程见图 9。计算结果显示, 在闸室盐度较小为 2.5‰时, 盐水楔被气泡羽流破坏, 气幕可以有效阻止盐水以异重流的形式向右侧输移, 但在紊动扩散和对流共同作用下, 盐水主要从表面向淡水侧扩散; 当盐度升高到 5.0‰时, 大部分盐水还是从表面向淡水侧扩散, 但有小部分盐水冲破气幕, 以异重流形式向淡水侧侵移; 当盐度继续增加到 10.0‰时, 气幕无法阻挡盐水楔的侵入, 大部分盐水以异重流形式在淡水侧发生盐水上溯, 少部分盐水被气幕冲到表面向淡水侧扩散, 此时气幕防咸效果最差。



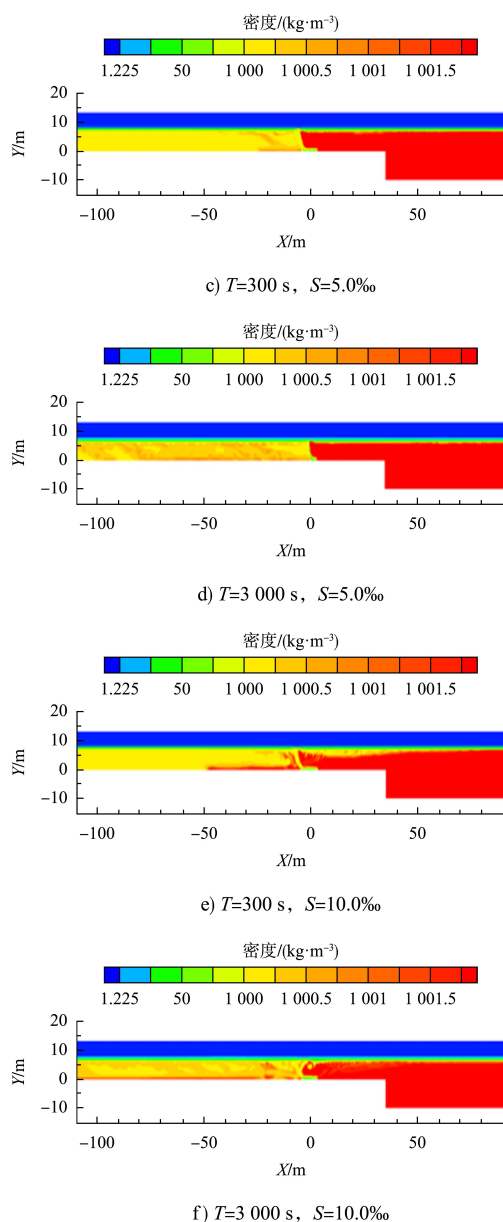


图9 盐度对气幕防咸效果的影响 (80 kPa)

Fig. 9 Influence of salinity on mitigating salt intrusion effect of air curtain (80 kPa)

气幕进气压强为 80 kPa 时, 闸室盐度与盐淡水交换率的关系见图 10。计算结果显示, 盐淡水交换率与开闸时间成正比, 并在过闸完成时达到最大值, 当闸室盐度发生变化时, 由于盐水楔形态被气泡帷幕破坏, 气幕可以有效阻止盐水从底部进行入侵, 闸室盐度与盐水交换率成正相关, 闸室盐度越大, 盐水交换速度越快。从数值模拟结果来看, 当进气压强为 80 kPa 时, 存在对应的最适盐度条件 $S=2.5\text{‰}$, 越接近此盐度条件, 气幕防咸效果越好。

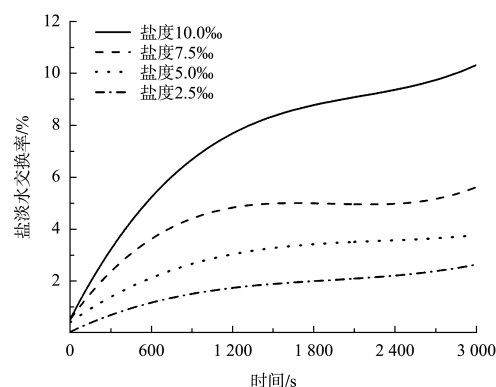
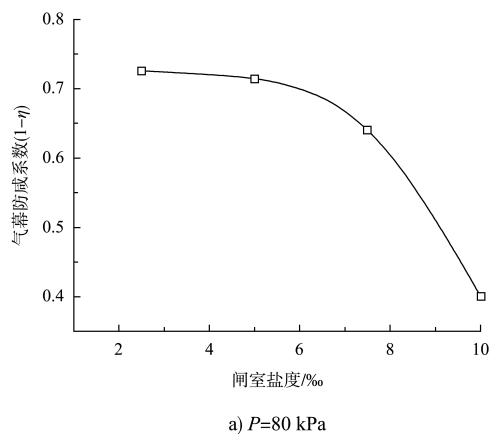
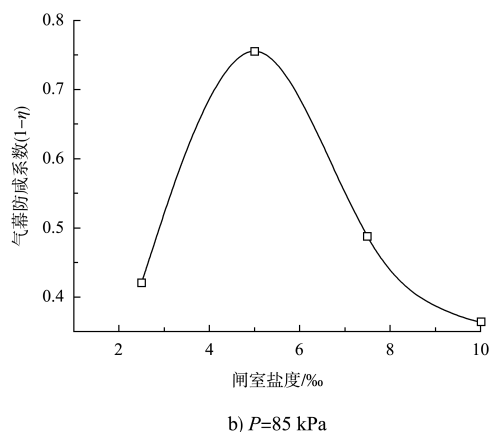


图10 不同盐度条件下盐淡水交换率时程变化 (80 kPa)

Fig. 10 Time course variation of saltwater and freshwater exchange rates under different salinity conditions (80 kPa)

在不同气幕进气压强时, 船闸闸室盐度与气幕防咸系数在相同时刻的关系见图 11。由图可知, 当闸室盐度发生变化时, 同一进气压强条件下的气幕防咸效果也会发生变化, 此时存在最佳进气压强以使船闸气幕防咸效果达到最佳; 当闸室盐度分别为 2.5‰ 、 5.0‰ 、 7.5‰ 、 10.0‰ 时, 气幕进气压强分别达到 80、85、90、100 kPa 左右时, 气幕防咸系数最高, 防咸效果最佳。

a) $P=80\text{ kPa}$ b) $P=85\text{ kPa}$

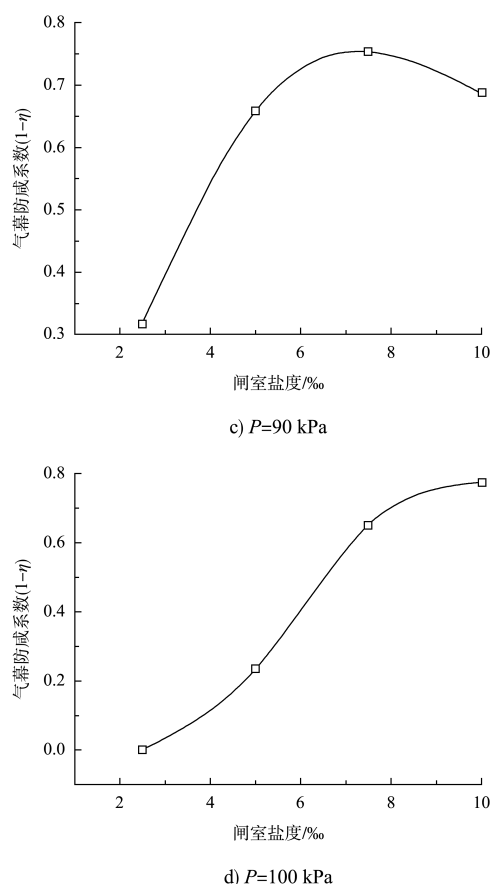


图 11 不同进气压强条件下闸室盐度与气幕防咸系数的关系
Fig. 11 Relationship between salinity of lock chamber and mitigating salt intrusion coefficient of air curtain under different inlet pressure conditions

闸室盐度与最佳进气压强的关系见图 12。由图可知, 在工况范围内, 气幕最佳进气压强与闸室盐度呈正比, 当闸室盐度增加时, 应及时提高气幕进气压强以提升气幕防咸效果; 因此在实际运行中需要根据气幕两侧盐度差及时调整气幕运行, 从而达到合理的阻咸效果。

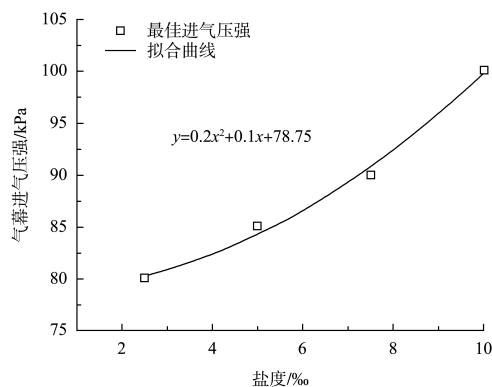


图 12 闸室盐度与最佳进气压强的关系
Fig. 12 Relationship between salinity of lock chamber and optimal inlet pressure

3 结论

1) 本文采用多相流 VOF 模型和湍流 Realizable $k-\varepsilon$ 模型耦合方法, 建立的二维气幕防咸数值模型可准确模拟船闸盐水异重流输移及气幕防咸过程。

2) 在面临低浓度盐水入侵问题的河口船闸, 气幕防咸效果会随进气压强改变, 当水位和盐度一定时, 存在最佳进气压强使得船闸气幕防咸效果最优, 当进气压强越接近最佳进气压强, 盐淡水交换率越低, 气幕防咸系数越大, 气幕防咸效果越好; 此时, 能够保障周边生态环境和取水用水安全, 减少河口船闸运营成本。

3) 最佳进气压强的大小与闸室盐度有关, 闸室盐度越大, 气幕的最佳进气压强越大。当闸室盐度增加时, 应及时提高气幕进气压强以达到合理的阻咸效果。

参考文献:

- [1] 郑华, 刘洁, 张文武, 等. 径流与潮差对钦江河口盐水入侵距离的影响机制[J]. 海洋预报, 2025, 42(1): 56-63.
ZHENG H, LIU J, ZHANG W W, et al. Mechanisms of the runoff and tidal impacting on the distance of saltwater intrusion in the Qinjiang River Estuary [J]. Marine forecasts, 2025, 42(1): 56-63.
- [2] 伍贤熙, 刘家成, 黄筱云. 海船闸防咸入侵措施综述[J]. 湖南水利水电, 2024(6): 67-70.
WU X X, LIU J C, HUANG X Y. Summary of salt intrusion control measures for sea lock[J]. Hunan hydro & power, 2024(6): 67-70.
- [3] INCOM W G. Ship behaviour in locks and lock approaches[R]. Brussels: the World Association for Waterborne Transport Infrastructure, 2015.
- [4] 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.
LI Y Z. Intrusion of salt water wedge density current in sea lock and air curtain salt prevention in Xingang ship lock[J].

- Port & waterway engineering, 1982(5): 23-28.
- [5] KEETELS G, UITTENBOGAARD R, CORNELISSE J, et al. Field study and supporting analysis of air curtains and other measures to reduce salinity transport through shipping locks[J]. Irrigation and drainage, 2011, 60(S1): 42-50.
- [6] MAHONEY T S, OLDENZIEL G, VAN DE V P. Laboratory measurements of lock-exchange density currents through a bubble screen[J]. Hydraulic engineering, 2019.
- [7] 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: 103321.
- [8] KAMATH S, PADDING J T, BUIST K A, et al. Stochastic DSMC method for dense bubbly flows: methodology[J]. Chemical engineering science, 2018, 176: 454-475.
- [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.
- CHANG C C, ZHAI J G, HUANG X Y, et al. Numerical investigation of bubble curtain for mitigating salt intrusion through sea locks[J]. Chinese journal of hydrodynamics, 2022, 37(1): 101-107.
- [10] FENG K. Numerical simulation of bubble screens for mitigating salt intrusion through sea locks [D]. Delft: Delft University of Technology, 2019.
- [11] 朱颖儒, 何军龄, 丁新潮, 等. 茨哈峡水电站泄洪洞旋流竖井段体型水力特性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2024, 22(4): 1-8.
- ZHU Y R, HE J L, DING X C, et al. Hydraulic characteristics of vertical vortex shaft spillway of cihaxia hydropower station [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2024, 22(4): 1-8.
- [12] 李达宏. 平陆运河盐水上溯机制及减盐措施研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- LI D H. Study on the mechanism of saltwater intrusion and mitigation measures in the Pinglu Canal [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [13] INCOM W G, DE MAERSCHALCK B. Saltwater intrusion mitigation in inland waterways [R]. Brussels: the World Association for Waterborne Transport Infrastructure, 2021.
- [14] 叶海鹏, 胡江, 许媛媛, 等. 河口船闸集咸坑深度对防咸效果的影响[J]. 水运工程, 2024(9): 105-112, 116.
- YE H P, HU J, XU Y Y, et al. Influence of salt collecting pit depth of estuarine ship lock on effect of mitigation salt intrusion [J]. Port & waterway engineering, 2024 (9): 105-112, 116.
- [15] 周树高, 陈潇逸, 杨行. 新型河海快通闸海水入侵数值模拟研究[J]. 水运工程, 2024(12): 124-131.
- ZHOU S G, CHEN X Y, YANG H. Numerical simulation of seawater intrusion of new type of navigable lock in seaward waterway [J]. Port & waterway engineering, 2024(12): 124-131.

(本文编辑 赵娟)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司等以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费,所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部