



浮式防污帘阻隔水下模袋水泥浆液 污染扩散效果研究*

陈玉梅¹, 韩后运², 吴贞平², 高伊峰², 陈传科², 陈志全³, 李卓峰³

(1. 广西平陆运河建设有限公司, 广西南宁 535000; 2. 中国建筑港集团有限公司, 山东青岛 266032;

3. 广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004)

摘要: 平陆运河工程中大量使用水下模袋混凝土进行施工, 水泥浆液的渗出会对环境和生态造成严重影响。工程中常用防污帘进行阻隔污染物扩散, 然而, 关于此类屏障的扩散动力学和有效性的研究较少。基于此, 采用Fluent软件建立三维计算模型, 模拟浮式防污帘对水泥浆液污染物的阻隔效果, 分析不同防污帘布置方式和参数对防污效果的影响, 并确定影响范围。结果表明: 水下倾斜角度 30° , 与河道纵断面夹角 20° , 防污帘与污染源距离为2 m, 防污帘水下深度应在4 m可取得最佳防治效果。研究可为水下模袋施工防污帘具体布置提供优化方案, 以实现水泥浆液污染扩散控制效果最佳。

关键词: 平陆运河; 防污帘; 水下模袋; 污染物阻隔; Fluent

中图分类号: U615.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)07-0010-08

Effect of floating anti-fouling curtains in blocking diffusion of cement slurry pollution from underwater mold bags

CHEN Yumei¹, HAN Houyun², WU Zhenping², GAO Yifeng², CHEN Chuanke², CHEN Zhiquan³, LI Zhuofeng³

(1. Guangxi Pinglu Canal Construction Co., Ltd., Nanning 535000, China;

2 China State Construction Port Group Co., Ltd., Qingdao 266032, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The utilization of underwater mold bag concrete is prevalent in the construction of the Pinglu Canal project. The leakage of cement slurry will have serious impacts on the environment and ecology. Anti-fouling curtains are commonly used in engineering to block the diffusion of pollutants. However, there is relatively little research on the diffusion dynamics and effectiveness of such barriers. Therefore, this study employs Fluent software to establish a three-dimensional computation model to simulate the barrier effect of floating anti-fouling curtains on cement slurry pollutants, analyze the influence of different anti-fouling curtain arrangements and parameters on the anti-fouling effect, and determine the range of influence. The research results indicate that optimal pollutant control effect is achieved when the underwater inclination angle is 30° , the angle with the longitudinal section of the river is 20° , the distance between the anti fouling curtain and the pollution source is 2 m, and the underwater depth of the anti-fouling curtain is 4 m. The research can provide an optimized scheme for the specific layout of anti-fouling curtains in underwater mold bag construction, so as to achieve the best control of cement slurry pollution diffusion.

Keywords: Pinglu Canal; anti-fouling curtain; underwater mold bag; pollutant barrier; fluent

平陆运河工程是西部陆海新通道规划建设的重大标志性工程^[1-4], 优质运河、绿色运河是平陆

运河工程的重要建设目标。水下模袋混凝土^[5-7]护坡是平陆运河工程航道护岸最主要的工程形式。

收稿日期: 2024-10-14

*基金项目: 广西科技重大专项(桂科 AA23023016)

作者简介: 陈玉梅(1993—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为土木工程。

在水下模袋混凝土施工过程中, 由于模袋破损或浆液压力作用, 使得模袋水泥浆液渗出并进入水下河流^[8]。水泥浆液进入河道后, 势必对水生植物^[9]、动物造成影响^[10-12]。工程中常用防污帘进行阻隔污染物扩散。因此, 如何设置防污帘实现高效防控水下模袋混凝土施工造成污染是建设优质运河、绿色运河的关键技术之一。

防污帘是一种常用的不透水装置, 以控制碎屑、淤泥和悬浮物的扩散范围^[13-15]。目前, 对防污帘研究主要集中于阻隔机理、水动力效应 2 个方面。在阻隔机理研究方面, Oliveira 等^[16]进行室内试验, 对防污帘的性能进行评估, 发现采用防污帘后, 悬浮物可以在防污帘拦挡区内滞留和沉淀, 从而减少污水中的悬浮物。Vu 等^[17-18]进一步发现, 防污帘在水动力作用下将流域分成阻滞区和射流区, 揭示了防污帘阻隔机理。王苗苗等^[19]则从防污帘材料方面进一步改进, 以提高防污效率。在水动力效应研究方面, Liu 等^[20]通过建立二维模型数值模拟防污帘的水下动力响应, 发现防污帘完全淹没在水下后, 防污帘的张力会减小。Li 等^[21]则通过数值计算的方法, 推导了在单流和波流组合条件下, 防污帘受力的计算公式。提出在稳定水流条件下, 水幕内的张力与水深和水幕两侧的水位差成正比。Cheng 等^[22]、李章超等^[23]和张文吉等^[24]利用计算流体力学分析方法, 在水下污染物扩散行为方面做出有益研究。然而, 现有研究建立在二维分析基础上, 缺乏对真实三维护岸条件下防污帘阻隔效应的研究, 具体阻隔规律依然不清。

为此, 本文采用 Fluent 软件建立三维模型, 对水下模袋混凝土施工泄露污染物的运移过程和分布特征进行分析, 从防污帘倾斜角度 α 、防污帘与河道断面夹角 β 、污染源距离 D 、防污帘水下深度 H 和防污帘空间位置等方面, 讨论施工造成的污染物在水下的扩散影响。通过研究可以为水下模袋施工防污帘具体布置提供优化方案, 以实现水泥浆液污染扩散的最佳控制。

1 数值模型

1.1 模型建立

模型建立依据平陆运河某标段断面, 断面设计见图 1。航道两侧对称, 单侧航道底宽 40 m, 设计航道底高程为 1.7 m, 正常蓄水位为 8.7 m, 施工期水位为 8.0~8.7 m。航道护坡采用模袋混凝土, 坡比为 1:2.5。该标段存在重要饮用水源, 需要进行严格的污染物防控。

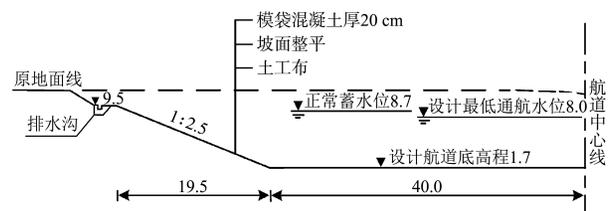


图 1 河道护岸典型断面 (单位: m)

Fig. 1 Typical cross-section of river revetment (unit: m)

数值模型依据该断面进行建模, 考虑对称性, 以河道中线为界, 模型仅建立一侧, 见图 2。模型长度为 150 m, 左侧和右侧分别设置为河流入流面和出流面。根据施工河流实际平均流速, 在河流入流面设置入口水流速度为 0.52 m/s, 出流面的出口压力为 0 kPa。在距离流入面 30 m 位置设置污染物泄露口, 泄露口中心点距离水面的高度为 4 m。防污帘沿岸边设置, 防污帘长度为 30 m。为实现污染物泄露渗出模拟, 假设污染物为稳定渗流的液体, 从泄露口流出。泄露口处污染物入口流速为 0.32 m/s。模拟的污染物密度为 1 030 kg/m³, 扩散系数为 1×10⁻⁹ m²/s。模拟的水位取该标段工程施工期高水位。

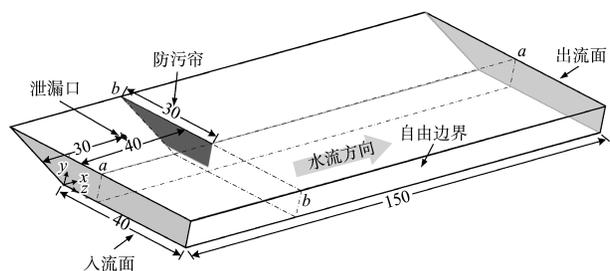


图 2 防污帘阻隔水泥浆液污染扩散模型 (单位: m)

Fig. 2 Model of anti-fouling curtain for blocking pollution diffusion of cement slurry (unit: m)

1.2 模型控制方程

模型采用计算流体力学方法进行求解，满足连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程，具体控制方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right] = -\nabla P + \rho f + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

$$\frac{De}{Dt} = -\frac{P}{\rho} \nabla \cdot u + \varphi + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

式中： ρ 为流体密度， kg/m^3 ； u 为速度矢量， m/s ； f 为体积力， N ； P 为压力， Pa ； e 为流体总能量密度， J/m^3 ； φ 为耗散系数， $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ； T 为温度， K ； x_i 为坐标分量； λ 为流体导热率， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ 。

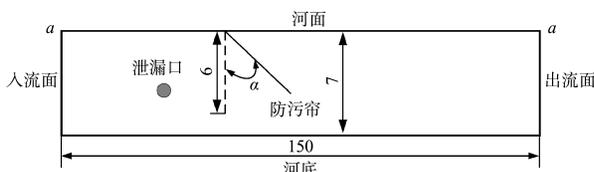
在考虑水和污染物两种组分的扩散和对流运动方面，采用组分运输模型，即假设污染物与河水之间不发生化学反应，只存在相互流动，具体控制方程为：

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}_i Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i + S_i \quad (4)$$

式中： \bar{J}_i 为组分 i 的扩散通量； \bar{v}_i 为平均速度， m/s ； Y_i 为组分 i 的体积分数； R_i 为组分 i 的化学反应净源项，由于假设污染物扩散过程中没有化学反应，则 $R_i = 0$ ； S_i 为离散项和用户定义源项的生产率。

1.3 模拟工况

为探究不同防污帘布设方式对污染扩散的防控效果，开展防污帘水下倾斜角度(T_1 工况)、防污帘与河道纵断面夹角(T_2 工况)、防污帘与污染源距离(T_3 工况)和防污帘水下深度(T_4 工况)和防污帘上下游位置(T_5 工况)等5种不同布置方式研究，见图3，具体模拟工况见表1。其中，倾斜角度 α 模拟水流作用下防污帘沿深度方向的旋转情况， α 越大，表示水流越大。如将防污帘设置在泄露口上游，将迫使施工船位于防污帘下方，施工船作业容易破坏防污帘形成的流场，导致防污失效。因此，本研究模拟的主要工况考虑防污帘布置于污染物下游。



a) T_1 工况(a-a截面)

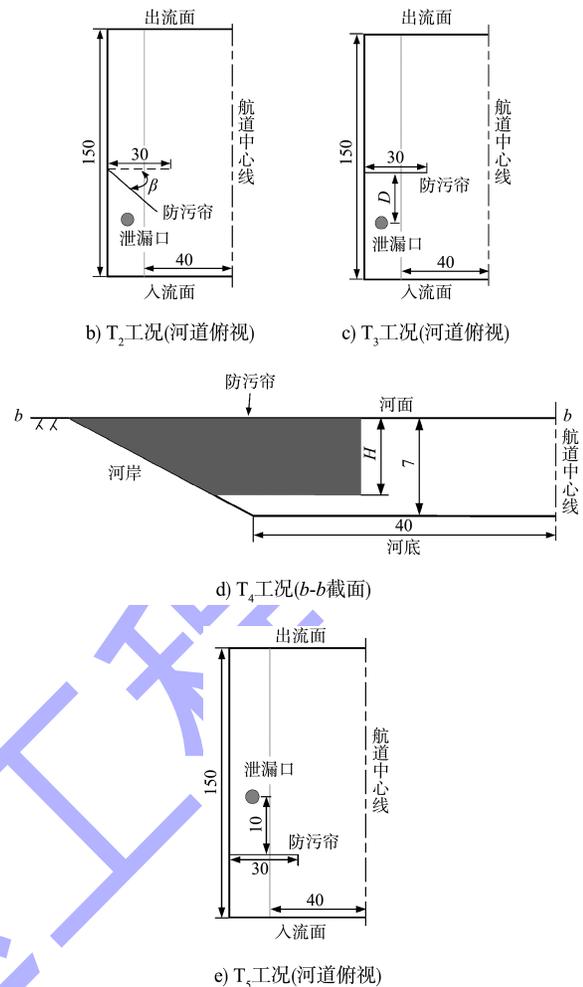


图3 防污帘模拟布置形式 (单位: m)
Fig. 3 Simulation layout of anti-fouling curtain (unit: m)

表1 模拟工况
Tab. 1 Simulated working conditions

工况	编号	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	D/m	H/m	防污帘位置	
T_0	T_0	不设置防污帘					
T_1	T_0-X	0					
	$T_1-\alpha-10$	10					
	$T_1-\alpha-20$	20					
	$T_1-\alpha-30$	30					
	$T_1-\alpha-40$	40	0	10	6.0		
	$T_1-\alpha-50$	50					
	$T_1-\alpha-60$	60					
T_2	$T_1-\alpha-70$	70					
	T_0-X		0			下游	
	$T_2-\beta-5$		5				
	$T_2-\beta-10$		10				
	$T_2-\beta-15$		15				
	$T_2-\beta-20$	0	20	10	6.0		
	$T_2-\beta-25$		25				
$T_2-\beta-30$		30					
$T_2-\beta-35$		35					

续表1

工况	编号	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	D/m	H/m	防污帘位置
T ₃	T ₃ -D-2	0	0	10	6.0	下游
	T ₃ -D-4					
	T ₃ -D-6					
	T ₃ -D-8					
	T ₃ -D-12					
	T ₃ -D-14					
	T ₃ -D-16					
	T ₃ -D-18					
T ₄	T ₄ -H-2	0	0	10	6.0	上游
	T ₄ -H-2.5					
	T ₄ -H-3					
	T ₄ -H-3.5					
	T ₄ -H-4					
	T ₄ -H-4.5					
	T ₄ -H-5					
	T ₄ -H-5.5					
T ₄ -X						
T ₅	T ₀ -S	0	0	10	6.0	上游

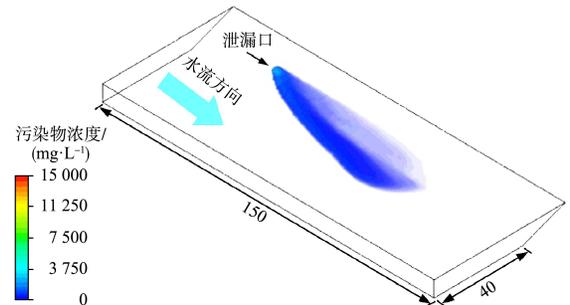
2 防污帘防污阻隔特性

2.1 污染物扩散范围

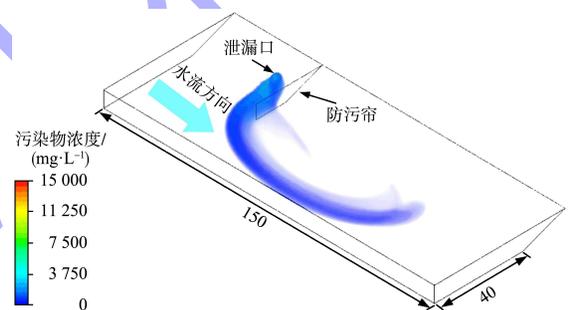
在没有防污帘时, 由于受到河流水动力的作用, 被河水裹挟沿河道扩散; 由于污染物中还有水泥浆液等杂质, 其密度大于河水, 在扩散过程中, 持续下沉至河道底部, 见图 4a)、d)。当设置防污帘后, 水流在防污帘前形成了横向绕流, 更多的污染悬浮物被阻挡在防污帘内, 且污染物原本的扩散路径被阻隔, 设置防污帘后污染物扩散范围见图 4b)。将防污帘设置在污染源的上游, 利用水流漩涡将污染物滞留在一定范围内, 见图 4c)。

图 4e) 和 f) 为防污帘布置在污染源前后 2 种不同布置方式下 (T₀-S 工况、T₀-X 工况), 污染物扩散的数值模拟结果, 越靠近泄漏口, 污染物浓度越高。当防污帘设置在泄漏口的下游时, 污染物在防污帘的阻挡作用下, 沿水流方向扩散明显受到限制, 污染主要集中在防污帘的上游区域, 污染扩散宽度、长度分别为 45.1、93.7 m。当防污帘设置在泄漏口的上游时, 污染物被直接限制在

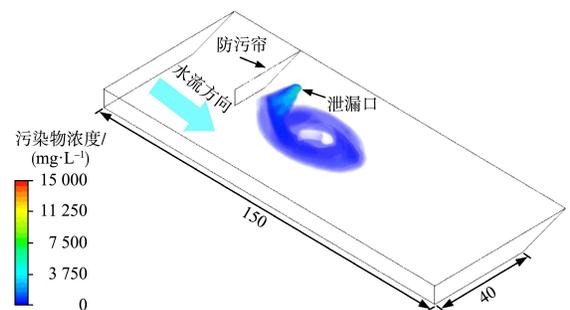
靠近污染源的区域, 扩散范围显著减小, 污染扩散宽度、长度分别为 31.6、56.7 m。主要因为将防污帘设置在污染源的上游时, 在水流的作用下, 防污帘后会生成漩涡, 将污染物汇集并形成明显的阻滞区。污染物汇集在阻滞区后沉积至河道底部, 从而达到减少河道污染的目的。



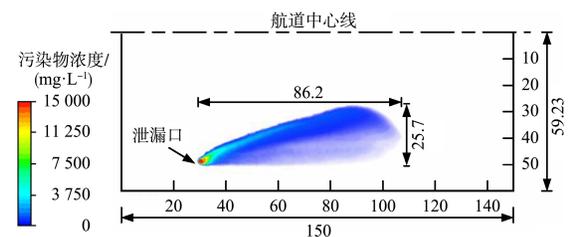
a) T₀工况45°视图(不设置防污帘)



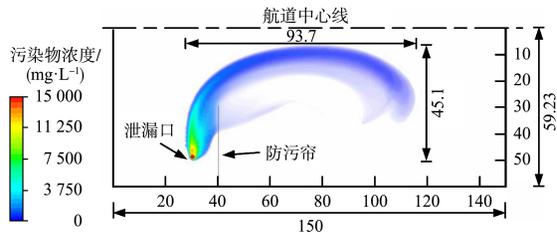
b) T₀-X工况45°视图(防污帘设在污染源下游)



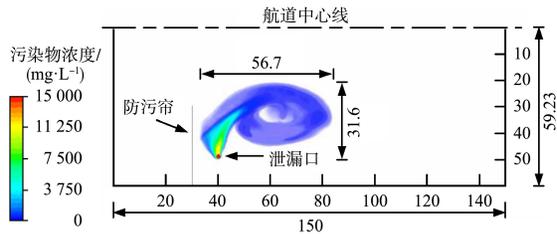
c) T₀-S工况45°视图(防污帘设在污染源上游)



d) T₀工况底视图(不设置防污帘)



e) T_0 -X工况底视图(防污帘设在污染源下游)



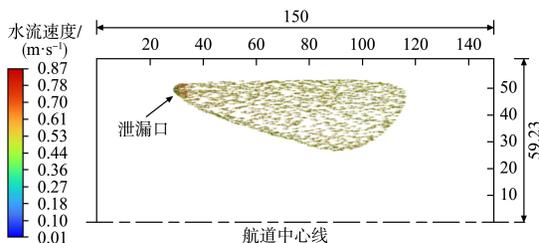
f) T_0 -S工况底视图(防污帘设在污染源上游)

图4 污染物流动扩散范围 (单位: m)

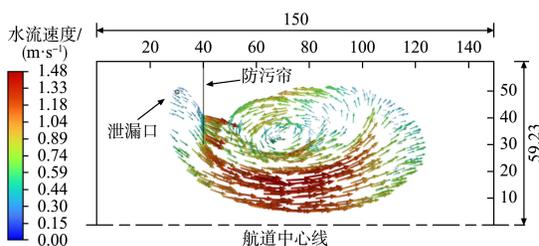
Fig. 4 Flow diffusion range of pollutants (unit: m)

2.2 污染物扩散流场

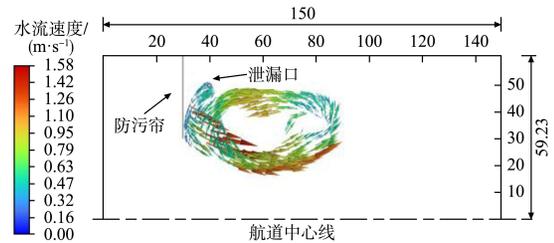
污染物流动扩散的速度矢量见图5。由于防污帘的阻挡, 污染物无法按照原来的路径扩散, 发生绕流, 并在防污帘后形成漩涡。在漩涡区域形成阻滞区, 即污染物被水流涡流迁移到漩涡区内, 并受到重力作用沉淀。这与Vu等室内模型试验所揭示的防污帘阻隔机理一致。此外, 防污帘下游面形成阻滞区, 防污帘下层流速较快形成射流。峰值流动速度从0.87 m/s上升至1.48 m/s。经过研究发现, 将防污帘设置在泄露口上游可以减少污染物的绕流路径, 进一步提高污染物的阻隔效果。



a) T_0 工况俯视



b) T_0 -X工况俯视



c) T_0 -S工况俯视

图5 污染物扩散流场 (单位: m)

Fig. 5 Diffusion flow field of pollutant (unit: m)

3 防污帘布置方式对污染扩散范围影响

3.1 防污帘倾斜角度 α 对污染范围的影响

根据GB 8978—1996《污水综合排放标准》^[25]中悬浮物三级排污规定, 河水中污染物不得超过400 mg/L。以此标准值为限制, 形成污染物扩散长度(L)和扩散宽度(W)的扩散区域, 并进行对比分析。 T_1 工况下防污帘与河道水下倾斜角度变化后的污染范围, 见图6。由图可知随着防污帘横断面夹角的增大, 污染范围宽度逐渐下降, 从夹角 0° 时的42.3 m减至 70° 时的27.2 m, 减少幅度达35.7%。污染范围长度总体呈上升趋势, 增幅为3.8%。

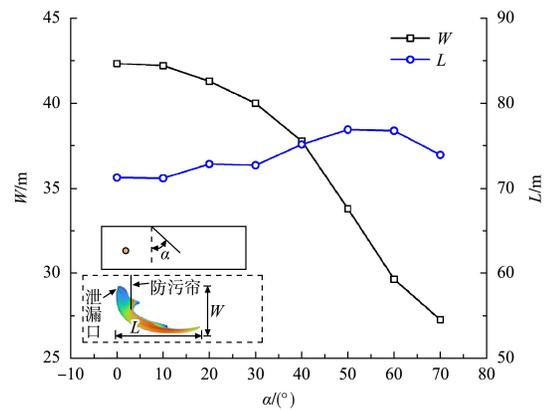


图6 α 对污染范围的影响

Fig. 6 Impact of α on pollution range

3.2 防污帘与河道断面夹角 β 对污染范围的影响

T_2 工况下防污帘与河道纵断面夹角变化后的污染范围见图7。与横断面夹角一样, 纵断面夹角的变化呈现出污染范围宽度总体下降的趋势, 随着河道断面夹角 β 的增加, 污染宽度总体呈缓慢下降趋势, 在 β 接近 30° 时略微回升。污染长度整

体呈先快速下降后再回升的趋势, 在 β 约为 20° 附近达到最小值。

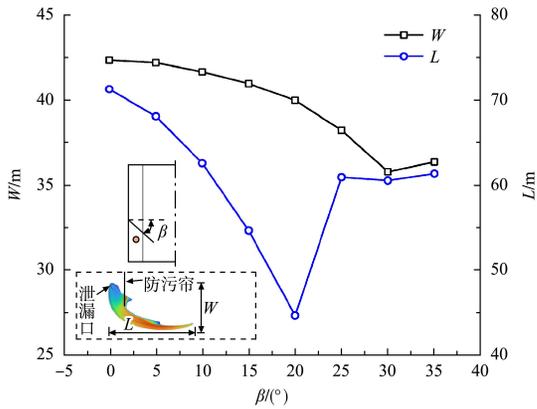


图 7 β 对污染范围的影响
Fig. 7 Impact of β on pollution range

3.3 防污屏与污染源距离 D 对污染范围的影响

防污帘与污染物释放点之间距离的增加所带来的变化, 见图 8。随着防污帘与污染源之间距离的增加, 污染物的污染宽度和长度均持续增加。随着 D 的增加, 污染宽度逐渐增加, 增长趋势较为平缓, 在 $D=12$ m 以后趋于稳定, 最终接近 43 m。然而, 当 D 达到一定距离 (如 $D>12$ m) 后, 防污帘的阻隔效果降低, 宽度变化趋于平稳。因此, 当防污帘与污染源释放点间距越短, 防污帘的防污效率越高。

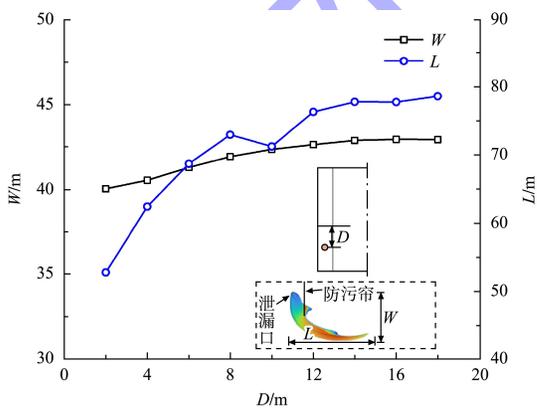


图 8 D 对污染范围的影响
Fig. 8 Impact of D on pollution range

3.4 防污帘水下深度 H 对污染范围的影响

防污帘水下深度变化导致污染范围变化的结果见图 9。由图可知随着防污帘水下深度的增加, 污染范围宽度增加。当防污帘的水下深度为 4 m,

即占据深度的 57.1% 时, 对于污染范围长度的控制最好。不同深度的防污帘对污染物分布的影响不同。总体来看, 随着深度的增加, 污染物分布面积在防污帘后的峰值逐渐降低。这说明深度较大的防污帘对污染物的阻挡效果更好。

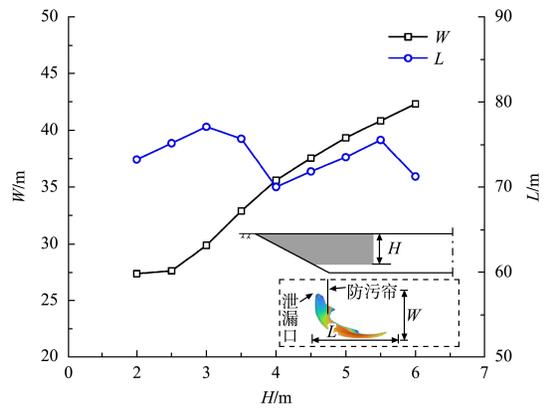


图 9 H 对污染范围的影响
Fig. 9 Impact of H on pollution range

3.5 前后布置效果对比

将模型沿河道纵向切分 26 个横断面, 并统计所有横断面上污染物所占的面积 (表征截面污染的水域范围), 见图 10, 以此分析不同防污帘布置形式下污染物的分布情况和扩散趋势。 T_0-X 工况泄露口在 30 m, 防污帘布置在 40 m 处, 即防污帘布置在泄露口下游; T_0-S 泄露口在 40 m, 防污帘布置在 30 m 处, 即防污帘在泄露口上游。可以看出, T_0-X 工况防污帘的设置阻隔了污染物的水下扩散路径, 使得污染物在防污帘前聚集, 并减少了防污帘后的扩散面积。而 T_0-S 工况利用水流在防污帘形成的漩涡, 将污染物聚集以减少对流域的污染, 使得横断面上污染物所占的面积小于防污帘布置在下游, 即截面污染的水域范围较小。

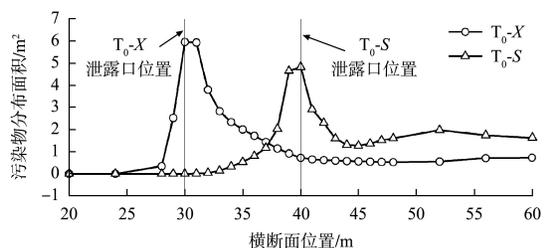


图 10 不同工况下横断面污染面积
Fig. 10 Cross sectional pollution area under different working conditions

4 结论

1) 防污帘应与河道横断面呈 30°左右的夹角, 该角度的阻挡效果较好。与纵断面夹角则应在 20°, 此角度下防污效率最高。

2) 应尽量减少防污帘与污染源之间的间距。在防污帘与污染源距离为 2 m 时, 污染范围的宽度和长度最小。

3) 当防污帘的水下深度为 4 m, 即占据深度的 57.1%时, 对于污染范围长度的控制最好。

4) 从污染范围控制效果来看, 建议在实际工程中优先采用上游布置防污帘, 尤其是在污染扩散范围敏感的情况下。若污染扩散范围较大且需要一定的引导性扩散, 可以选择下游布置以兼顾污染引导和阻挡作用。

参考文献:

- [1] 刘宁. 平陆运河工程建设关键问题研究与思考[J]. 水运工程, 2024(6): 1-11.
LIU N. Research and contemplation on key issues in construction of Pinglu Canal Project[J]. Port & waterway engineering, 2024(6): 1-11.
- [2] 刘晓玲, 王桃, 吴晓磊. 平陆运河建设对西南部地区货运出海格局的影响[J]. 水运工程, 2023 (11): 15-22.
LIU X L, WANG T, WU X L. Influence of Pinglu Canal construction on transportation pattern of access to sea in southwest China [J]. Port & waterway engineering, 2023 (11): 15-22.
- [3] 喻涛, 李娅, 何俊辉, 等. 平陆运河与沙坪河交汇河段通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2024 (4): 93-100, 156.
YU T, LI Y, HE J H, et al. Experimental research on navigable flow conditions in intersection of Pinglu Canal and Shaping River [J]. Port & waterway engineering, 2024(4): 93-100, 156.
- [4] 刘晓斌, 吴晓磊, 吴澎. 新时代运河经济带的运行逻辑和规划框架研究[J]. 水运工程, 2025(2): 1-8.
LIU X B, WU X L, WU P. Operational logic and planning framework of Canal Economic Zone in new era[J]. Port & waterway engineering, 2025(2): 1-8.
- [5] 夏国光, 尤乐. 水下现浇模袋混凝土施工质量控制[J]. 水运工程, 2011(3): 173-176.
XIA G G, YOU L. Quality control of underwater construction of bagged cast-in-place concrete [J]. Port & waterway engineering, 2011(3): 173-176.
- [6] 杨金智, 许桂森. 海上护岸工程模袋混凝土的施工[J]. 水运工程, 2000(4): 43-46.
YANG J Z, XU G S. Construction of mold-bagged concrete for maritime revetment works [J]. Port & waterway engineering, 2000(4): 43-46.
- [7] 邓宇, 刘长海, 李春波, 黄骅港潜堤工程水下模袋混凝土施工技术[J]. 水运工程, 2017(8): 104-106.
DENG Y, LIU C H, LI C B. Construction technology of underwater mold bag concrete in submerged breakwater of Huanghua Port [J]. Port & waterway engineering, 2017(8): 104-106.
- [8] 李志伟. 模袋混凝土护坡破损修复施工技术[J]. 水运工程, 2017(S2): 55-58.
LI Z W. Construction technology for restoration of damaged bagged concrete revetment in waterway project[J]. Port & waterway engineering, 2017(S2): 55-58.
- [9] 刘春萍, 丁少鹏. 珠海港高栏港区 10 万吨级干散货码头环保设计[J]. 水运工程, 2009(5): 56-61.
LIU C P, DING S P. Environmental protection design for the 100 000 t bulk terminal in Gaolan port area of Zhuhai port[J]. Port & waterway engineering, 2009(5): 56-61.
- [10] 高东东, 张涵, 任兴念, 等. 长江上游典型季节性河流富营养化评价及污染成因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(3): 584-595.
GAO D D, ZHANG H, REN X N, et al. Evaluation of eutrophication and analysis of pollution factors in eutrophication and pollution factors in typical seasonal rivers of upper Yangtze River [J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2024, 33 (3): 584-595.
- [11] 路豪, 刘埔, 王靖怡, 等. 闭坑矿井水影响下喀斯特河

- 流污染特征演化及水质评价[J]. 人民黄河, 2024, 46(6): 90-95, 102.
- LU H, LIU P, WANG J Y, et al. Spatial-temporal evolution of Karst River pollution characteristics and water quality evaluation under the influence of closed pit mine water [J]. Yellow River, 2024, 46(6): 90-95, 102.
- [12] 李艳, 秦泽, 杨光, 等. 河流突发水污染事件峰值模拟及预警研究[J]. 环境保护与循环经济, 2024, 44(2): 65-69.
- LI Y, QIN Z, YANG G, et al. Study on peak simulation and early warning of sudden water pollution events in rivers [J]. Environmental protection and circular economy, 2024, 44(2): 65-69.
- [13] YOUN S, JUNG B, LEE S. Limited installation ranges of silt curtain in ocean and river hydrodynamic environment [J]. Journal of coastal research, 2021, 114(sp1): 106-110.
- [14] 计煥, 曹文斌, 林宝臻, 等. 气泡幕拦浑技术在港池疏浚中的应用[J]. 水运工程, 2024(7): 252-256.
- JI H, CAO W B, LIN B Z, et al. Application of air bubble curtain technology in harbor basin dredging [J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 252-256.
- [15] 李松涛, 王平, 谭元译. 马来西亚关丹新深水港6#陆域无围堰吹填技术 [J]. 水运工程, 2020(11): 166-169, 198.
- LI S T, WANG P, TAN Y Y. Non-cofferdam reclamation method in zone 6 of Kuantan Newdeep Water Port, Malaysia [J]. Port & waterway engineering, 2020(11): 166-169, 198.
- [16] OLIVEIRA E P, DE MOURA R B, CAVALIERI C P, et al. Evaluation of silt curtain in the reduction of suspended solids [J]. Geotextiles and geomembranes, 2020, 48(6): 983-988.
- [17] VU T T, TAN S K. Laboratory investigation of hydraulic performance of silt screens [J]. Journal of hydrodynamics (ser B), 2010, 22(5): 312-317.
- [18] VU T T, TAN S K. Velocity and turbulence characteristics around a silt screen [J]. Proceedings of the institution of civil engineers-maritime engineering, 2013, 166(2): 89-97.
- [19] 王苗苗, 范文雪, 王琦. 疏浚施工悬浮物防扩散材料的研发及应用[J]. 水运工程, 2020(S1): 110-113, 118.
- WANG M M, FAN W X, WANG Q. Research and application of anti-diffusion materials for suspended substance in dredging construction [J]. Port & waterway engineering, 2020(S1): 110-113, 118.
- [20] LIU X D, LI S W, JI Z Z, et al. SPH simulation of hydrodynamic responses for two novel types of silt curtain under combined wave-current conditions [J]. Applied ocean research, 2021, 117: 102906.
- [21] LI S W, JI Z Z, WU Q W, et al. Estimation of dynamical forces on turbidity curtain in combined wave-current flow [J]. Journal of coastal research, 2018, 85: 1181-1185.
- [22] CHENG Y X, ZHAO N, ZHANG K D, et al. Research on the plume stability of air bubble curtains under low transverse flow velocity environment in dredging engineering [J]. Ocean engineering, 2021, 232: 109133.
- [23] 李章超, 杨正军, 王立强. 日照港吹填施工中污染物扩散数值分析 [J]. 水运工程, 2018(S1): 141-144.
- LI Z C, YANG Z J, WANG L Q. Numerical analysis of pollutant diffusion in Rizhao Port dredger filling engineering [J]. Port & waterway engineering, 2018(S1): 141-144.
- [24] 张文吉, 叶清荣. 防污屏在翔安大桥中的应用 [J]. 公路, 2022, 67(11): 252-254.
- ZHANG W J, YE Q R. Application of anti-fouling screen in Xiang'an Bridge [J]. Highway, 2022, 67(11): 252-254.
- [25] 污水综合排放标准: GB 8978—1996[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- Integrated wastewater discharge standard: GB 8978-1996[S]. Beijing: Standards Press of China, 1996.