

平陆运河青年库区盐水入侵数值模拟研究*

许克勤¹, 吴 澎²,杨胜发³,胡 江³,廖江花¹
(1. 重庆交通大学 河海学院,重庆 400074; 2. 中交水运规划设计院有限公司,北京 100007;
3. 重庆交通大学、国家內河航道整治工程技术研究中心、重庆 400074)

摘要:青年船闸是平陆运河下游的最后一个梯级枢纽。平陆运河建成后,盐水从茅尾海上溯至青年船闸下游引航道。 青年船闸具有盐淡水交汇的水环境特征。随着青年船闸的运行,盐水将入侵至青年库区。青年库区作为钦州市的生活饮用 和农业灌溉水源地,盐水入侵具有不利影响,有必要对青年库区的盐水入侵情况进行研究。通过构建青年库区盐水入侵三 维数值模型,研究淡水流量和青年船闸上游引航道出口控制盐度对盐水入侵距离及垂向盐度分布的影响。结果表明,盐水 入侵距离随上游引航道出口盐度增加而增大,呈正幂次关系,随淡水流量的增加而减小,呈负幂次关系;垂向盐度差随引 航道出口盐度增加而减小,呈负幂次关系,随淡水流量的增加而增大,呈正幂次关系。

关键词:平陆运河;盐水入侵;盐度分层;数值模拟
 中图分类号:U612.33
 文献标志码:A

文章编号: 1002-4972(2025)06-0007-06

Numerical investigation of salt water intrusion in Qingnian reservoir of Pinglu Canal

XU Keqin¹, WU Peng², YANG Shengfa³, HU Jiang³, LIAO Jianghua¹

(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

3. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The Qingnian ship lock is the lowest cascade of the Pinglu Canal. After the construction of Pinglu Canal, the salt water intrudes from the Maowei Sea to the downstream approach channel of the Qingnian ship lock. The Qingnian ship lock is characterized by a salt-fresh water confluence water environment. With the operation of the Qingnian ship lock, salt water will intrude into Qingnian reservoir. Because of the unfavorable impacts of salt water intrusion, it is necessary to study the salt water intrusion at Qingnian reservoir which serves as the source of water for domestic drinking and agricultural irrigation of Qinzhou City. By constructing a three-dimensional numerical model of salt water intrusion of Qingnian reservoir, the effects of fresh water discharge and the salinity of the upstream approach channel of Qingnian ship lock on the distance of salt water intrusion and the vertical salinity distribution are studied. The results show that the salt water intrusion distance increases with the increase of water salinity at the upstream approach channel, showing a positive power relationship, and decreases with the increase with the increase of fresh water discharge, showing a negative power relationship. The vertical salinity gradient decreases with the increase of fresh water discharge, showing a positive power relationship.

Keywords: Pinglu Canal; salt water intrusion; salinity stratification; numerical simulation

收稿日期: 2024-07-27

^{*}基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3208803)

作者简介: 许克勤 (1994—), 男, 博士, 研究方向为水力学、计算流体力学。

盐水入侵是一种特殊的水文现象,通常发生在 河口等2个不同水生生态系统相互作用的区域^[1]。 河口盐水可上溯至河口以上数百公里,带来一系 列的环境和生态问题,对环境条件产生不利影响, 如淡水咸化,土地盐碱化等,因而一直是入海河 口地区研究的重要问题^[2]。在天然河口,由于纵 向盐度差,河口沿岸会出现水位梯度,在密度差 的驱动下形成重力环流,淡水沿河面流入大海, 而盐水则沿河床逆流而上^[3-5]。对于垂向分层型河 口,盐水入侵主要受径流平流输运和重力环流输 运影响;而对于垂向均匀混合型河口,潮汐的混 合扩散作用在盐度输运中有重要作用^[6]。

对于江海连通的人工航道(如平陆运河),人 海河口船闸是保障航运的重要措施,但随着船闸 的通航运行,盐水会随着船闸入侵至上游库区, 污染淡水,影响两岸工农业生产发展与人类生活 用水。一个多世纪以来,船闸盐水入侵都是河口 船闸建设的重要研究课题。许多科学文献都对盐 水入侵过程和盐水楔的演化进行了研究,并对这 一典型的流体力学问题进行了充分论述^[7-10]。每闸 次的盐水入侵量受多种因素影响,如通航水深、 船舶大小、水体盐度差异、闸门开启持续时长等。 在船闸盐、淡水交换过程中,盐水入侵速度随着 水深、密度差和开闸时间的增加而增大^[11]。基于 对船闸盐水入侵的异重流运动的认识,迄今主要 的船闸防咸措施包括集咸坑法、气幕法、置换法、 咸水箱法、省水池法、防咸门槛、径流冲泄法等。

平陆运河作为连接西江流域和北部湾海港的江 海连通运河工程,为内河 I 级航道,包括马道、企 石、青年3个主要梯级枢纽,可通航5000吨级船 舶,是目前航道等级最高的内河航道^[12]。平陆运河 总里程约135 km,总水头为65 m,预计2050年总 运量将达到8000万 t^[13-14]。青年枢纽是平陆运河 最下游的梯级枢纽,位于河口上游约26 km 处, 与茅尾海相连(图1)。由于航道大幅开挖,导致 茅尾海盐水上溯至青年船闸下游,并随着青年船 闸的运行入侵青年库区。青年库区作为钦州市的 生活饮用和农业灌溉水源地,盐水入侵或对软州 市用水造成不利影响,制约经济发展。因此,需 对平陆运河工程实施后青年库区的盐水入侵情况 进行研究。

本文通过数值模拟的研究手段,构建青年库 区盐水入侵三维数学模型,研究不同淡水流量和 青年船闸上游引航道出口控制盐度对盐水入侵距 离及垂向盐度分布的影响。首先介绍模型的数学 控制方程并通过试验数据对模型进行验证;其次 模拟不同淡水流量和青年船闸上游引航道出口控 制盐度条件下的青年库区盐水入侵情况,并分析 不同淡水径流和控制盐度对最大入侵距离和垂向 盐度梯度的影响;最后对本研究进行讨论和 总结。





1 模型原理与验证

1.1 模型原理

本研究采用 MIKE 3 软件构建三维盐水入侵数 学模型。模型基本控制方程包括连续性方程、动 量方程和盐度标量输运方程,笛卡尔坐标系下的 控制方程形式为:

$$\frac{1}{\rho c_s^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = SS_c \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} + 2\Omega_{ij}u_j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} + g_i + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left\{ \nu_{\rm T} \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right\} - \frac{2}{3} \delta_{ij}k \right\} + u_i S_c$$
(2)

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\phi u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi \tag{3}$$

式中: ρ 为流体密度; u_i 为流体在各方向上对应的 速度分量,其中i,j=1,2,3; Ω 为科氏力张量; P为流体压强; g_i 为各方向重力加速度,其中, i=1,2,3; $\nu_{\rm T}$ 为湍流涡黏度; δ 采用 Kronecker 系数;k为湍动能,本模型采用 k- ε 紊流模型求 解; ϕ 为盐度; D_{ϕ} 为盐度扩散系数,可通过紊流 模型按比例求得;t为时间; S_c 为质量源汇项; S_{ϕ} 为盐度源汇项。

三维数值模型在垂直方向通过 σ 变换分层, 以适应地形和水位的变化,将控制坐标系(x,y,z,t) 转换为(x,y,σ,t),坐标 σ 与 z之间的转换可通过 式(4)实现。

$$\sigma = \frac{z - \xi}{H + \xi} \tag{4}$$

式中: z为坐标系下的垂向坐标; H为水深; ξ为 自由水面。模型采用交替方向隐式方法对时域内 质量和动量守恒方程进行积分,并对各方向得到 的控制方程离散矩阵通过双扫描算法求解。 1.2 模型验证

平陆运河工程后,由于青年船闸的阻隔,青 年库区不受潮流的影响,盐水随船闸运行入侵青 年库区,盐水入侵情况主要受淡水径流和船闸引 航道出口控制盐度的共同影响。由于工程前盐水 无法上溯至青年库区、缺乏青年库区盐水入侵相 关实测资料,因此该数值方法通过参考文献[15] 中的水槽试验数据进行验证。矩形试验水槽尺寸 为:长110m、宽0.5m、高0.5m。试验研究了 无潮汐有径流条件下的盐水运动情况,与平陆运 河工程后青年库区盐水入侵条件相似。试验测得 不同径流和盐度条件下的盐水最远运动距离,通 过对比不同工况下的水槽试验与数值模拟结果, 验证数值模型的有效性与准确性。试验共模拟5 个工况,表1为各工况模型的主要参数和盐水最 远运动距离统计结果。由表可知,数值模拟结果 与试验结果相近、误差小于4%。以工况5为例、 提取不同时刻盐水运动距离结果,如图2所示, 盐水运动距离随时间的变化趋势相同,数值模拟 结果与水槽试验实测数据接近。

		1				
工况	<i>H</i> /m	淡水流量	盐水盐度	试验测得最大盐水	数学模型计最大盐水	误差
		$Q/(\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{h}^{-1})$	S ₀ /%o	入侵距离 L _{max1} /m	入侵距离算 L _{max2} /m	E/%
1	0.25	15.0	17.7	75.5	76.3	1.06
2	0. 25	15.0	10. 2	52.0	52. 8	1.54
3	0. 25	12. 4	10. 2	73.0	72.6	0.55
4	0.20	9.0	10.0	68.0	67.8	0. 29
5	0. 22	15.0	10.9	28.0	28.9	3.21

表 1 各工况模型主要参数和盐水最远运动距离 Tab. 1 Main parameters and the farthest movement distances of salt water under each condition



图 2 盐水运动距离随时间的变化趋势 Fig. 2 Trend of the change in salt water movement distance over time

2 青年库区盐水入侵数值模型与结果分析

2.1 模型构建

模型计算域根据平陆运河工程方案设置,包 括青年船闸上游引航道、青年库区、钦江老河道, 模型范围东西 16.7 km、南北 17.1 km(图 3)。计 算采用柔性网格方法,水平方向采用非结构三角 网格,网格水平分辨率为 15~20 m;垂直方向采 用σ分层,等分为 10 层。模型基于 2000 国家大 地坐标系建立,高程基于 1985 国家高程基准。青 年枢纽阻断茅尾海潮汐的影响,在不考虑船舶通 航的影响下,青年库区盐水入侵主要靠密度梯度 力驱动。模型初始水深为 7.4 m,入口为流量边 界,出口为水位边界,其他为干边界。假设青年船 闸上游引航道充满盐水,在上游引航道出口设置盐 度边界,计算域内水体初始盐度为 0。研究共设置 15 组不同淡水流量及引航道出口盐度,见表 2。研 究主要考虑盐度及淡水流量对青年库区盐水入侵 距离的影响,为了简化研究,不考虑水深变化。

表 2 各工况主要参数 Tab. 2 Main parameters of each condition

工况	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	S ₀ /%o
1	10	0.5
2	10	1.0
3	10	2.0
4	10	3.0
5	10	5.0
6	10	7.0
7	10	10.0
8	10	12.0
9	10	15.0
10	13	3.0
11	15	3.0
12	17	3.0
13	20	3.0
14	22	3.0
15	25	3.0



Fig. 3 Numerical model of salt water intrusion in Qingnian reservoir

2.2 结果分析

2.2.1 盐水入侵距离

通过沿航道中心线的水体盐度分布情况可统 计出盐水入侵距离。淡水流量为10 m³/s 时,不同 盐度下(工况1~9)的引航道出口盐水入侵距离见 图 4。由图可知,当淡水流量一定时,引航道出口 盐度增加,造成驱动盐水运动的密度梯度力增大, 从而导致盐水入侵距离增大。当淡水流量为 10 m³/s时,盐水入侵距离和出口盐度可拟合成幂 函数关系:

$$L_{\rm max} = 7.58 S_0^{0.41}$$
 (5)

拟合曲线的 $R^2 = 0.987_{\circ}$



图 4 盐水入侵距离随引航道出口盐度的变化趋势 Fig. 4 Trend of the change in salt water intrusion distance with salinity at upstream approach channel

上游引航道出口盐度恒定为 3‰,不同淡水流 量下(工况 4、10~15)的盐水入侵距离见图 5。由 图可知,淡水径流对盐水入侵距离的抑制效果显 著,淡水流量越大,盐水入侵距离越小。同样, 入侵距离与淡水流量也可通过幂函数进行拟合:

$$L_{\rm max} = 219. \ 4Q^{-1.24} \tag{6}$$

拟合曲线的 $R^2 = 0.989_{\circ}$





(9)

2.2.2 垂向盐度梯度

以距离上游引航道出口 1 km 的垂直断面为 例,分别提取各工况下该断面不同深度(0.1*H*~ 0.9*H*)的水体盐度值,见图 6。由图可知,当不考 虑船舶通航影响时,密度梯度力驱动盐水入侵, 底层水体盐度大于表层水体。计算各工况下表层 (0.9*H*)和底层(0.1*H*)水体的盐度差,并用 *S*₀ 对 其进行无量纲处理:

$$\Delta S = \frac{S_{0.1H} - S_{0.9H}}{S_0} \tag{7}$$

式中: *S*_{0.1H} 和 *S*_{0.9H} 分别为底层和表层水体盐 度,‰; Δ*S* 为无量纲盐度差。淡水流量 10 m³/s 时,不同引航道出口盐度下表层与底层水体的盐 度差见图 7。由图可见,随着 *S*₀的增大 Δ*S* 减小。 可利用幂函数关系对其进行拟合,得到的拟合结 果如下:

$$\Delta S = 0.\ 63S_0^{-0.\ 24} \tag{8}$$

拟合曲线的 R²=0.997。

拟合曲线的 $R^2 = 0.990$ 。

上游引航道出口盐度 3‰时,不同淡水流量表 层与底层水体的盐度差见图 8。ΔS 随着 Q 的增大 而减小。利用幂率关系对其进行拟合,得到的拟 合结果如下:

 $\Delta S = 0.18 Q^{0.43}$





图 6 各工况下距引航道出口 1 km 断面垂向盐度分布 Fig. 6 Vertical salinity distribution at 1 km from outlet of upstream approach channel under each condition









Fig. 8 Trend of the change in vertical salinity gradient distance with fresh water discharge

3 结论

 1) 平陆运河工程后,青年库区盐水入侵主要 由密度梯度力驱动,受淡水径流和青年船闸上游 引航道盐度共同影响。在不考虑船舶扰动等外在 因素影响时,水体盐度垂向分层,底层水体盐度 高于表层水体盐度。

 2) 盐水入侵距离随上游引航道出口盐度增加 而增大,呈正幂次关系;随淡水流量的增加而减 小,呈负幂次关系。

 3) 垂向盐度差随引航道出口盐度增加而减
 小,呈负幂次关系;随淡水流量的增加而增大, 呈正幂次关系。

4)可通过增大淡水流量或在青年船闸采取防 咸措施减小上游引航道水体盐度,以缓解青年库 区盐水入侵。基于工程后青年库区水体盐度分层 特性,可取用盐度较低的表层水体,确保水体盐 度满足灌溉及饮用水相关盐度标准。

参考文献:

 MIKHAILOVA M V. Processes of seawater intrusion into river mouths[J]. Water resources, 2013, 40(5): 483-498.

(下转第54页)