

钱塘江河口径流压咸效果及作用时间研究

李若华¹,葛路¹,胡立芳²

(1. 浙江同济科技职业学院,浙江 杭州 311231; 2. 中国计量大学能源环境与安全工程学院,浙江 杭州 310018)

摘要:针对钱塘江河口径流压咸强烈影响河口水资源利用的问题,构建了可模拟涌潮作用的咸潮入侵数学模型,结合两次实测数据进行模型率定与验证,分析了上游径流变化对河口盐度影响的时空特征。结果表明:在枯水期,尽管强大的潮汐动力使径流变化难以显著改变河口水动力条件,但持续下泄的淡水可通过累积稀释作用有效降低盐度,其降盐效应自上游向下游递减;径流调节对河口盐度的影响具有速度快、持续期长的特点,径流增大 1~2 d 后即出现明显降盐效果,对盐度影响的持续时间显著超过径流变化的时间。为提高压咸效果、节省淡水资源,可在大潮期来临前 1~2 d 加大压咸流量,后期逐渐减少压咸流量。

关键词:盐度;咸潮入侵;径流;数学模型;钱塘江河口

中图分类号:TV213.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2025)04-0054-06

Study on effect and operational duration of runoff in suppressing saltwater intrusion at the Qiantang River Estuary//LI Ruohua¹, GE Lu¹, HU Lifang²(1. Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology, Hangzhou 311231, China; 2. College of Energy Environment and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To address the issue of saltwater intrusion in the Qiantang River Estuary significantly affecting water resources utilization, a numerical model for saltwater intrusion capable of simulating tidal bores was constructed. The model was calibrated and validated using two sets of field measurements. The temporal and spatial characteristics of salinity variation in the estuary under changing upstream runoff were analyzed. The results show that during dry seasons, although strong tidal dynamics make it difficult for runoff variations to significantly alter estuarine hydrodynamics, sustained freshwater discharge effectively reduces salinity through cumulative dilution, with the desalination effect decreasing from upstream to downstream. Runoff regulation exerts a rapid and prolonged influence on estuarine salinity, with significant responses emerging within one to two days and persisting far longer than the period of runoff variation. To enhance saltwater suppression efficiency and conserve freshwater resources, it is recommended to increase the suppressing discharge one to two days prior to spring tides and gradually reduce it afterward.

Key words: salinity; saltwater intrusion; runoff; mathematical model; the Qiantang River Estuary

河口是河流到海洋、淡水到海水的过渡地段。在河口区域,咸潮入侵普遍存在,不仅显著影响河口的理化特征、水生环境^[1-2],还严重威胁淡水供给,是河口地区淡水资源开发利用的主要制约因素之一^[3-4]。上游径流和外海潮汐是河口咸潮入侵的主要影响因素,在径流和潮汐此消彼长的双重作用下,咸潮像活塞一样随潮汐在河口内潮涨潮落。因咸水淡化难度大、成本高,为满足河口水资源利用对水质的要求,一般通过调度上游水库的下泄流量压制咸潮^[5],因此了解河口盐度对径流变化的响应机制,对于压咸流量的调控具有重要指导意义。

河口咸潮入侵强度主要取决于径流和潮汐的抗衡力量。韩曾萃等^[6]基于钱塘江河口盐度变化特征及一维数学模型计算结果,提出了径流“大潮多泄,小潮少泄”的应潮调度策略。卢祥兴^[7]建立了钱塘江河口咸潮入侵物理模型,经过多组试验研究,也指出上游径流量“大潮多放、小潮少放”是顶潮拒咸的较好措施。罗小峰等^[8]利用二维数学模型计算了长江口不同水文条件下的盐度变化,表明径流越小、潮汐越强,咸潮入侵越严重。Liu 等^[9]采用一、三维耦合模型研究了径流和潮汐对珠江口磨刀门水道咸潮入侵长度的影响。潘存鸿等^[10]建立了

考虑涌潮作用的数学模型,研究了不同径流量对钱塘江河口咸潮入侵的影响。径流抗咸实践也表明,径流变化对河口的盐度具有显著影响^[11]。

钱塘江河口是典型的强涌潮河口,咸潮入侵剧烈,多年来主要通过上游的新安江水库调度下泄流量来压咸^[5]。随着经济的发展,河口水资源供需矛盾日益加剧,上游水库下泄的压咸流量作为宝贵的淡水资源也愈加珍贵,因此如何精细化利用上游水库的淡水资源,实现压咸的精准调度显得愈加重要。本文借助数学模型,设置不同的径流调度工况,在现有研究成果的基础上,进一步研究径流的压咸效果及作用时间,以期指导钱塘江河口的压咸调度。

1 研究区概况

钱塘江是浙江省第一大河,全长 668 km,流域面积 55 558 km²,富春江电站以下至杭州湾湾口 291 km 为感潮河段,称为钱塘江河口。根据各段水动力条件和河床演变特性的差异,可将钱塘江河口分为 3 段^[12]:富春江电站至闻家堰 77 km 为河流段,水动力以径流作用为主,河床较稳定,极少受咸潮影响;闻家堰至澉浦 116 km 为河口段,受径流、潮汐共同作用,河床冲淤频繁,盐度变化剧烈,是本研究的重点;澉浦至杭州湾湾口 98 km 为潮流段,主要受外海潮汐影响,河床相对稳定,盐度高但变化小。

钱塘江河口潮汐为非正规半日潮,一天两涨两落。澉浦站多年平均潮差 5.66 m,实测最大潮差达 9 m 以上,为我国潮汐河口之最^[13]。澉浦断面宽 16.5 km,河宽向上游逐渐缩窄,潮差逐渐减小,盐官、仓前、七堡断面河宽分别约 2.5、2.0、1.6 km,多年平均潮差分别为 3.20、1.52、0.79 m。潮汐上溯过程中潮波发生变形,涨潮时间逐渐缩短,落潮时间逐渐延长,澉浦站、盐官站、仓前站和七堡站的平均涨潮时间分别为 5.5、2.4、1.8、1.4 h。钱塘江河口因强涌潮而闻名于世,涌潮在澉浦河段形成,至曹娥江口一带达到最大,之后强度逐渐减弱,强潮时涌潮潮头可上溯至闻家堰以上。

钱塘江河口的径流由富春江电站控制,多年平均流量约 952 m³/s,每年的 4—7 月(或 3—6 月)为丰水期,径流量占全年的 70%,其他月份为枯水期。1960 年新安江水库建成后,洪期蓄水、枯期泄水,起到了显著的削峰填谷作用。受径流、潮汐及河床冲淤的影响,咸潮呈显著的季节变化,丰水期径流量大,咸潮入侵较弱;8—11 月径流量较小,同时因丰水期江道刷深,潮流上溯能力强,咸潮入侵严重;12 月至次年 2 月径流量虽小,但由于 8—11 月的江道淤积导致潮流上溯能力已大幅减弱,咸潮入侵较弱^[14]。

2 模型构建及验证

2.1 模型描述

钱塘江河口潮强流急,水体掺混强烈,盐度垂向分布均匀,一般可建立垂向平均的平面二维数学模型研究咸潮入侵问题,本文采用潘存鸿等^[15]开发的模拟涌潮作用的数学模型构建钱塘江河口咸潮入侵模型。非恒定流平面二维连续方程、动量方程和盐度对流扩散方程见文献^[15]。

钱塘江河口存在强涌潮,涌潮前后水位、流速、盐度存在突变,非线性效应很强,给方程的数值求解带来极大困难。水流法向数值通量采用能模拟涌潮间断流动的 KFVS 格式求解,可解决钱塘江河口间断流模拟的关键问题;盐度法向数值通量采用基于准确 Riemann 解的 Godunov 格式求解,能模拟浓度的强间断问题^[10]。

2.2 模型构建与网格划分

综合考虑计算效率和开边界处的流量、潮位、盐度等资料情况,模型上边界定为富春江电站,电站大坝阻隔了上下游水体的连通,水电站每天记录下泄流量,资料丰富。模型下边界为澉浦—西三断面,该断面北岸设有澉浦长期水文站,观测潮位和盐度,且位于河口段和潮流段的交界处,受外海潮汐的影响直接、迅速。沿程主要有支流浦阳江汇入(曹娥江口建有大闸与钱塘江阻隔),且位于杭州取水口河段,故计算区域包括了浦阳江,并将浦阳江上边界设置在不受潮汐影响的湄池。富春江电站—澉浦长达 193 km,上边界富春江电站给定流量边界,下边界澉浦—西三断面给定潮位边界,支流浦阳江上游给定流量边界。

计算区域采用非结构三角形网格划分,可高度拟合钱塘江复杂的岸边界,并在较窄的河段和地形变化较大的河段适当加密,以准确概化河床地貌。计算网格共布置三角形单元 11 710 个,节点 6 973 个,最小三角形单元边长约 80 m,计算时间步长 3 s。模型范围及网格划分如图 1 所示。

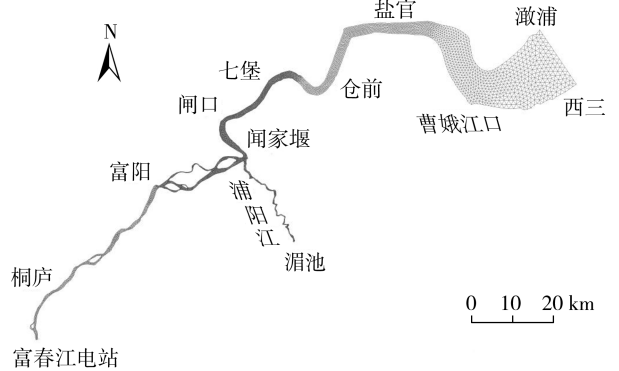


图 1 数学模型计算范围及网格布置

2.3 模型率定与验证

模型应用前首先需进行参数率定和验证。2007 年 10 月、2011 年 9 月在模型计算范围进行了 2 次大范围的水流、含氯度监测(河口多监测含氯度表征盐度大小),因此采用 2007 年 10 月实测资料对模型中的曼宁系数、扩散系数等参数进行率定,采用 2011 年 9 月实测资料对模型进行验证。大范围的数学模型较难率定,尤其是含氯度变化快、波动大,不仅受潮流影响,还受到扩散系数的制约,潮流误差则会放大含氯度验证的误差。因模型范围较大,水动力及河床底质等差异显著,曼宁系数、扩散系数等参数分 3 段设定,其中富春江电站—闻家堰段曼宁系数为 0.015~0.025,扩散系数为 50~100 m²/s,闻家堰—盐官段曼宁系数为 0.008~0.015,扩散系数为 100~200 m²/s,盐官—澈浦段曼宁系数为 0.006~0.008,扩散系数为 200~400 m²/s。经过大量的调试,得到了较理想的率定和验证结果,以七堡站为例,率定和验证结果分别见图 2 和图 3。

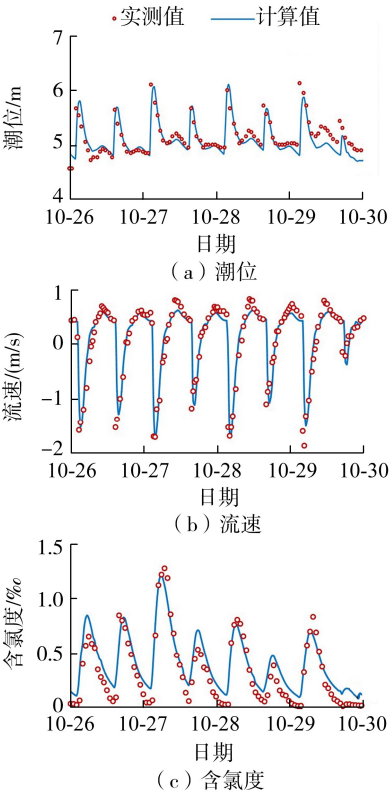


图 2 2007 年 10 月七堡站潮位、流速、含氯度率定结果

由图 2 和图 3 可见,潮位过程、高低潮位、涨落潮流速及含氯度过程的计算值与实测值均吻合良好。模型能较为准确地复演了涌潮期间潮位快速升高、流速由落潮转向涨潮并急剧增大、涨潮后含氯度快速抬高的过程,表明模型能够模拟涌潮期间的水动力及咸潮上溯过程。经统计,高、低潮位验证误差基本在 20 cm 以内,涨、落急流速验证误差基本在

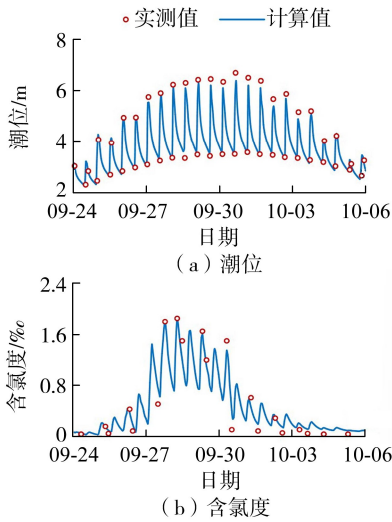


图 3 2011 年 9 月七堡站潮位、含氯度验证结果

20% 以内,最大含氯度验证误差也基本在 20% 以内。

2.4 计算方案

钱塘江河口的咸潮入侵主要发生在下半年的 8—11 月,这段时间径流量较小,一般为 300~500 m³/s,这也是上游水库有能力长期调控的径流范围。为定量分析径流对咸潮入侵的影响和作用,固定下游潮汐和盐度边界,下边界采用恒定潮差 6.69 m(澈浦站大潮潮差)的潮位过程循环,盐度采用恒定含氯度 4.9‰(8—11 月澈浦站日最大含氯度的多年平均值^[10]),仅改变上游径流条件以分析盐度对径流变化的响应机制,为方便统计分析,将径流量改变的时间定为第 1 天,方案 2 径流量仅增大 1 d,方案 3 径流量增大 5 d。在模型达到稳定的前提下,采用热启动模式进行方案计算。方案设置见表 1。

表 1 数学模型计算方案

方案编号	方案描述	上游径流
1	背景方案	恒定径流量 300 m ³ /s
2	增大 1 d 径流量	第 1 天的径流量由 300 m ³ /s 增加至 500 m ³ /s
3	增大 5 d 径流量	第 1~5 天的径流量由 300 m ³ /s 增加至 500 m ³ /s

3 结果与分析

3.1 径流对水动力的影响

水动力是咸潮入侵的主要驱动力,首先分析小径流期间径流变化对水动力的影响,图 4、图 5 分别为七堡站、盐官站的潮位、流速及断面流量变化。由图 4 和图 5 可知,径流量改变前后七堡站、盐官站的潮位、流速均没有明显变化。分析断面流量可知,断面涨潮流量自上游至下游逐渐增大,同时 2 个断面的最大涨潮流量均远大于最大落潮流量,以七堡站断面为例,涨潮最大流量为 18 000 m³/s,而落潮最

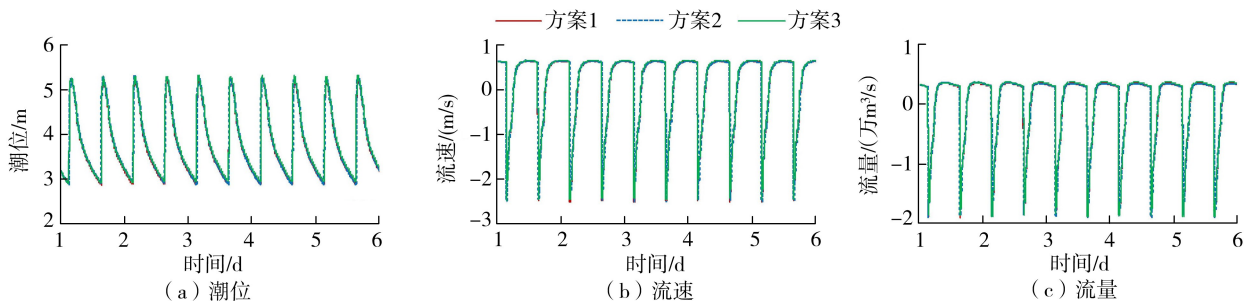


图4 七堡站潮位、流速、断面流量变化

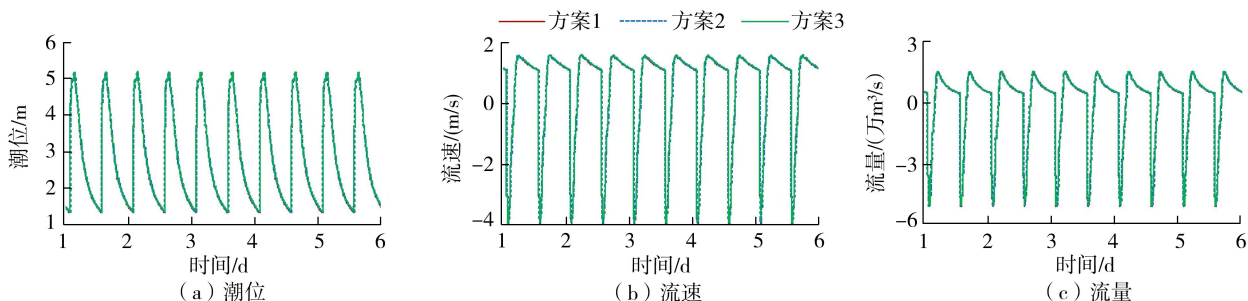


图5 盐官站潮位、流速、断面流量变化

大流量仅为 $3500\text{ m}^3/\text{s}$ 。由此可见,当上游径流量较小时,因径流量变化远小于河口的断面流量,对于河口这个大水体来说,径流量的改变不足以对河口的水量产生较明显的影响,因而径流量改变后河口的水动力不会发生明显变化。

3.2 径流对盐度的影响

图6展示了径流改变前后七堡、仓前、盐官3个水文站的瞬时含氯度变化,表2统计了3个水文站日最大含氯度的变化率。由图6和表2可见,径流量变化对七堡站的含氯度影响最显著,仓前站次之,盐官站最小;增大1d径流量对下游的含氯度影响幅度相对较小,持续时间相对较短,而增大5d径流量可显著降低下游含氯度,持续时间也较长。总体来说,增大径流量对降低下游含氯度有明显作用,且影响持续的时间明显长于径流量增大的时间。

根据方案2,上游径流量仅在第1天由 $300\text{ m}^3/\text{s}$ 增大至 $500\text{ m}^3/\text{s}$,当天径流量增幅为67%,共增加水量 1728 万 m^3 。径流量增大后,七堡站的含氯度半

天后就有所降低,在第2天明显降低,日最大含氯度降幅达7.8%,第3天降幅最大,达11.4%,之后降幅逐渐减小,但变化较缓,第12天后才降至5%以下。该方案下,七堡、仓前、盐官站的日最大含氯度降幅分别为11.4%、7.1%、1.7%,均出现在第3天。

根据方案3,上游径流量在第1~5天由 $300\text{ m}^3/\text{s}$ 增大至 $500\text{ m}^3/\text{s}$,共增加水量 8640 万 m^3 。径流量增大后,除盐官站外其余2个站的含氯度降幅均非常明显,在第6天时各站的含氯度降幅达到最大,七堡、仓前、盐官3个站的日最大含氯度降幅分别为43.2%、28.5%、7.7%。该方案对含氯度影响的持续时间也较长,七堡、仓前2个站的日最大含氯度降幅超过10%的时间分别达到19、10d。同时也可以看到,方案3因径流增加量大、持续时间长,对河口含氯度的降幅及持续时间较方案2也大幅增加。以七堡站为例,在前5天内,方案3中含氯度降幅与方案2中含氯度降幅的比值逐渐增大,第6天后,该比值基本在5左右,一直持续到第28天。

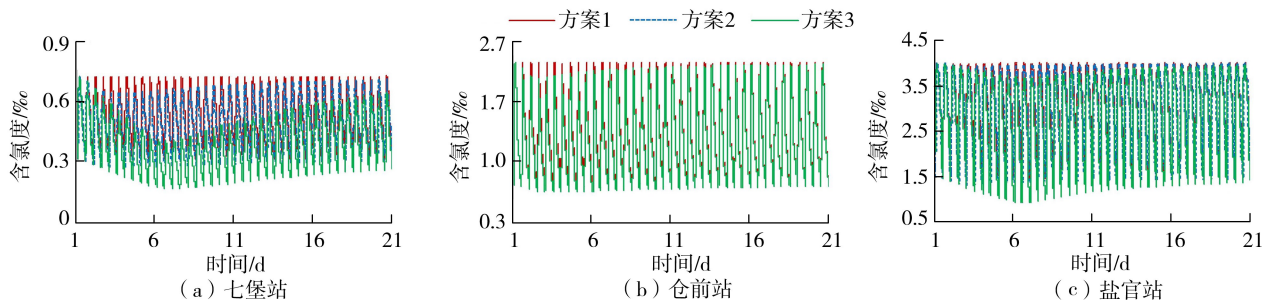


图6 改变径流量后不同水文站含氯度变化

表 2 径流改变后日最大含氯度变化率 单位: %						
时间/d	七堡站		仓前站		盐官站	
	方案 2	方案 3	方案 2	方案 3	方案 2	方案 3
1	-3.0	-3.0	-2.5	-2.5	-0.2	-0.2
2	-7.8	-8.0	-6.9	-7.1	-0.8	-0.8
3	-11.4	-18.8	-7.1	-14.8	-1.7	-2.7
4	-11.0	-28.4	-5.6	-20.8	-1.6	-4.5
5	-10.1	-36.6	-4.8	-25.5	-1.4	-6.2
6	-8.9	-43.2	-3.9	-28.5	-1.2	-7.7
10	-6.0	-32.1	-2.3	-14.1	-0.6	-4.5
15	-3.6	-19.0	-1.3	-7.4	-0.3	-2.1
20	-2.3	-11.6	-0.9	-4.3	-0.2	-1.1
25	-1.4	-7.0	-0.4	-2.4	-0.1	-0.6
30	-1.0	-4.2	-0.4	-1.1	-0.1	-0.3

注:表中数据为径流改变后日最大含氯度相对于背景方案的变化率。

4 讨 论

由数值模型计算结果可知,径流量较小时上游径流的变化基本不会对河口水动力条件产生影响,究其原因主要是河口段河槽宽、潮流强,断面瞬时流量远大于上游瞬时径流量,径流量的少量改变不足以引起河口水动力发生明显扰动。但径流改变却会对河口的含氯度产生明显影响,以七堡站为例,断面 1 天 2 次涨潮期间的涨潮流量累计约 17215 万 m³,方案 2 上游径流量增大 1 d,共增加淡水 1 728 万 m³,约为 1 天涨潮流量的 10%,七堡站日最大含氯度降低率最大为 11.4%。由此可见,径流量较小时,径流对河口含氯度的影响不是通过改变水动力进而促使含氯度变化,而是淡水稀释所致,即径流压咸并不是压制涨潮流速,而是通过咸淡水混合达到降低含氯度的效果,同时也表明径流量增加对下游含氯度的影响有累积作用。

径流对含氯度的影响速度快且作用时间长,方案 2 条件下,七堡站含氯度第 2 天即明显降低,降低幅度在第 3 天最大,为 11.4%,降低幅度在 5% 以上的时间有 10 d;方案 3 条件下,七堡站含氯度降低幅度在第 6 天最大,为 43.2%,降低幅度在 5% 以上的时间有 27 d。可见上游径流短期变化对下游含氯度的影响可持续多日,径流增加量越大、时间越长,对下游的高盐水稀释作用越强,持续时间较长,因此为达到较好的压咸效果,可在压咸期间持续加大压咸流量。

杭州市 85% 的生活用水取自钱塘江七堡上游河段,实测资料^[16]表明,咸潮入侵主要在大潮期影响七堡上游河段,故常将七堡站的盐度大小作为杭州取水口是否受咸潮影响的重要指标^[5]。Li 等^[17]通过研究大潮期盐度的输运机制指出,七堡站的盐度及潮差基本成正比,上游压咸流量可根据七堡站

的潮差大小进行调度,根据本文研究成果,为达到较好的压咸效果,在大潮期来临时可提前 1~2 d 加大富春江电站下泄流量,并在大潮期间保持一定的流量下泄,在大潮后期则可减小压咸流量。

5 结 论

a. 枯水期河口段的潮流量远大于径流量,径流量的改变不足以导致河口水动力发生明显变化,但可对盐度产生明显影响,影响程度自上游至下游逐渐减小,表明径流压咸并非通过压制涨潮流速,而是通过咸淡水混合、淡水稀释盐水实现盐度的降低。

b. 上游径流量变化对河口盐度的影响速度较快,1~2 d 后即可达到较好的压咸效果。上游径流增大后淡水与盐水的混合可持续多日,径流变化对盐度影响的持续时间显著长于径流变化的时间。

c. 因富春江电站距离河口段达 100 km 以上,要降低河口段的盐度,在大潮期来临前,富春江电站需提前 1~2 d 加大压咸流量,并在压咸期间保持一定的流量下泄,在压咸后期则可减小压咸流量。

参考文献:

[1] 徐志,戴会超,高希超,等. 长江口盐水入侵对径流变异和海平面变化的响应[J]. 水利水电科技进展,2023,43(3):15-21. (XU Zhi, DAI Huichao, GAO Xichao, et al. Response of saltwater intrusion to runoff variability and sea level change in Yangtze River Estuary[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3):15-21. (in Chinese))

[2] 张钊汇,危小艳,张蔚. 三维理想河口盐水入侵对径潮驱动变化的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):96-102. (ZHANG Zhaohui, WEI Xiaoyan, ZHANG Wei. Response of three-dimensional ideal estuarine salt intrusion to changes in river and tidal forcing[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024,52(3):96-102. (in Chinese))

[3] 陈祖军,阮仁良,韩昌来,等. 长江口水源地咸潮入侵应对预案体系[J]. 水资源保护,2019,35(5):52-58. (CHEN Zujun, RUAN Renliang, HAN Changlai, et al. Pre-plan system for saltwater intrusion into water sources area of Yangtze Estuary[J]. Water Resources Protection, 2019,35(5):52-58. (in Chinese))

[4] 王彪,朱建荣,吕爱琴. 珠江河口磨刀门枯水期盐度统计模型[J]. 水资源保护,2023,39(1):42-48. (WANG Biao, ZHU Jianrong, LYU Aiqin. Salinity statistical model for Modaomen of Pearl River Estuary during dry season[J]. Water Resources Protection, 2023,39(1):42-48. (in Chinese))

[5] 李若华,史英标,张舒羽. 钱塘江河口抗咸流量预报模

式及其检验[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(5): 75-79. (LI Ruohua, SHI Yingbiao, ZHANG Shuyu. Prediction model of salinity-resisting discharge in Qiantang Estuary and its validation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(5): 75-80. (in Chinese))

[6] 韩曾萃, 程杭平. 钱塘江江水含盐度计算的研究[J]. 水利学报, 1981(6): 46-50. (HAN Zengcui, CHENG Hangping. Study on calculation of salinity in Qiantang River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1981(6): 46-50. (in Chinese))

[7] 卢祥兴. 钱塘江河口盐水入侵的模型试验[J]. 水利水运科学研究, 1991(4): 403-410. (LU Xiangxing. Model experiment on saltwater intrusion of the Qiantang River estuary[J]. Research on Water Conservancy and Water Transport Science, 1991(4): 403-410. (in Chinese))

[8] 罗小峰, 陈志昌. 径流和潮汐对长江口盐水入侵影响数值模拟研究[J]. 海岸工程, 2005, 24(3): 1-6. (LUO Xiaofeng, CHEN Zhichang. Numerical simulation study of effect of runoff and tide on the Changjiang River mouth saltwater intrusion[J]. Coastal Engineering, 2005, 24(3): 1-6. (in Chinese))

[9] LIU Bingjun, LIAO Yeying, YAN Shulan, et al. Dynamic characteristics of saltwater intrusion in the Pearl River Estuary, China[J]. Natural Hazards, 2017, 89(3): 1097-1117.

[10] 潘存鸿, 张舒羽, 史英标, 等. 钱塘江河口盐水入侵影响因素及数值预报[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(6): 13-19. (PAN Cunhong, ZHANG Shuyu, SHI Yingbiao, et al. Factors and numerical forecast of saltwater intrusion in Qiantang River Estuary [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(6): 13-19. (in Chinese))

[11] 韩曾萃, 程杭平, 史英标, 等. 钱塘江河口咸水入侵长历时预测和对策[J]. 水利学报, 2012, 43(2): 232-240. (HAN Zengcui, CHENG Hangping, SHI Yingbiao, et al. Long-term predictions and countermeasures of saltwater intrusion in the Qiantang Estuary[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(2): 232-240. (in Chinese))

[12] 李若华, 黄士稳. 钱塘江河口水质时段离散程度及对污染物通量估算的影响[J]. 水电能源科学, 2024, 42(1): 36-39. (LI Ruohua, HUANG Shiwen. Dispersion degree of water quality and its influence on the estimation for pollutant fluxes in Qiantang Estuary [J]. Water Resources and Power, 2024, 42(1): 36-39. (in Chinese))

[13] 潘存鸿, 韩曾萃, 等. 钱塘江河口保护与治理研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017: 1-2.

[14] 李若华, 马继侠, 张舒羽, 等. 强潮作用下钱塘江河口盐水入侵机制[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(5): 37-44. (LI Ruohua, MA Jixia, ZHANG Shuyu, et al. Saltwater intrusion mechanism in the Qiantang River estuary under strong tide [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5): 37-44. (in Chinese))

[15] 潘存鸿, 张舒羽, 史英标, 等. 涌潮对钱塘江河口盐水入侵影响研究[J]. 水利学报, 2014, 45(11): 1301-1309. (PAN Cunhong, ZHANG Shuyu, SHI Yingbiao, et al. Study on saltwater intrusion in Qiantang Estuary affected by tidal bore[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(11): 1301-1309. (in Chinese))

[16] 李若华, 夏冬梅, 姚凯华. 钱塘江河口七堡段氯度时空变化及与水文的关系[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2): 21-25. (LI Ruohua, XIA Dongmei, YAO Kaihua. Temporal and spatial variation of chlorinity and its relationship with hydrology in Qibao Section of Qiantang Estuary[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2): 21-25. (in Chinese))

[17] LI Ruohua, GAO Liang, PAN Cunhong, et al. Detecting the mechanisms of longitudinal salt transport during spring tides in Qiantang Estuary [J]. Journal of Integrative Environmental Sciences, 2019, 16(1): 123-140.

(收稿日期: 2024-07-26 编辑: 俞云利)

(上接第 44 页)

[17] ZHANG Taotao, XIAO Yang, LIANG Dongfang, et al. Rainfall runoff and dissolved pollutant transport processes over idealized urban catchments [J]. Frontiers in Earth Science, 2020, 8: 305.

[18] ZHANG Taotao, XIAO Yang, LIANG Dongfang, et al. A physically-based model for dissolved pollutant transport over impervious surfaces[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125478.

[19] ZHANG Taotao, XIAO Yang, LIANG Dongfang, et al. A two-layer model for studying 2D dissolved pollutant runoff over impermeable surfaces [J]. Hydrological Processes, 2021, 35(5): e14152.

[20] 肖洋, 冯雯, 张涛涛, 等. 建筑物密度及排列方式对小区地表径流的影响[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(4): 1-6. (XIAO Yang, FENG Wen, ZHANG Taotao, et al. Effects of building density and arrangement on surface runoff process in urban resident [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(4): 1-6. (in Chinese))

[21] LIANG Dongfang, WANG Xiaolin, FALCONER R A, et al. Solving the depth-integrated solute transport equation with a TVD-MacCormack scheme [J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25(12): 1619-1629.

(收稿日期: 2024-08-04 编辑: 熊水斌)