

闽江上游水库泄流调控对极端咸潮入侵事件的影响*

黄雅丽¹, 胡朝阳^{2,3}, 刘阳¹, 葛建忠⁴, 付开雄², 林斌², 陈华^{1*}

(1. 武汉大学 水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072)

(2. 福建省水利水电勘测设计研究院有限公司, 福州 350001)

(3. 河海大学 水利水电学院, 南京 210013)

(4. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241)

摘要: 受全球气候变化和人类活动等因素影响, 我国感潮河段的咸潮入侵程度逐年加剧, 对河口地区用水安全及生态稳定造成严重危害, 咸潮入侵的治理需求日益迫切。基于有限体积海洋数值模式, 以闽江下游为研究区域构建河口水动力-盐度数值模型, 模拟极端干旱情景下的咸潮入侵事件并探究上游水库泄流调控对咸潮入侵的影响规律。结果表明: 增大上游水库的泄流量能够显著减缓咸潮入侵程度, 在 2022 年枯水期极端干旱流量情景下, 水库泄流量增加 240% 能够使咸潮入侵界退至南北港汇流处。上游水库增加不同泄流量时, 闽江南港与北港因河道形态差异导致来水量分配不均, 从而影响两港的咸潮入侵消退效果: 在上游水库泄流量增幅为 80% 时, 北港入侵界的消退幅度最大, 随后入侵消退幅度随泄流量增加而递减; 南港的入侵界消退幅度随着上游水库泄流量成倍增加而成倍增加。此外, 上游水库泄流量呈梯度增加时, 下游纵向沿程盐度显著降低, 且在流量增幅 80% 时沿程盐度降幅最大, 而后降幅递减。本研究对于感潮河段咸潮入侵事件的防治方案制定和实施提供了指导作用和科学依据。

关键词: 咸潮入侵; 泄流调控; 干旱事件; 气候变化; FVCOM; 闽江

On the impact of upstream reservoir discharge regulation on extreme saltwater intrusion events in the Minjiang River*

Huang Yali¹, Hu Zhaoyang^{2,3}, Liu Yang¹, Ge Jianzhong⁴, Fu Kaixiong², Lin Bin² & Chen Hua^{1**}

(1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, P.R.China)

(2. Fujian Provincial Investigation, Design & Research Institute of Water Conservancy & Hydropower Co., Ltd, Fuzhou 350001, P.R.China)

(3. College of Water Conservancy & Hydropower engineering, Hohai University, Nanjing 210013, P.R.China)

(4. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, P.R.China)

Abstract: Saltwater intrusion in tidal estuaries, intensified by global climate change and anthropogenic activities, increasingly threatens water security and ecological stability. Utilizing a hydrodynamic salinity model based on the Finite Volume Community Ocean Model (FVCOM), this study investigates saltwater intrusion and its response to reservoir regulation in the Minjiang River estuary during extreme drought conditions. The results indicate that increasing upstream reservoir discharge significantly mitigates saltwater intrusion. Under the extreme drought of the 2022 dry season, a 240% increase in discharge effectively pushed the saltwater intrusion boundary back to the confluence of the North and South Channels. However, the morphological differences between these channels caused an uneven flow distribution, leading to a differential response to increased discharge. In the North

* 2025-03-01 收稿; 2025-09-01 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2023YFC3209101)资助。

** 通信作者; E-mail: chua@whu.edu.cn。

Channel, the retreat of the saltwater intrusion front peaked at an 80% discharge increase, with diminishing returns thereafter. Conversely, the South Channel exhibited a linear response, with the intrusion front retreating proportionally with each incremental discharge doubling. Furthermore, gradient increases in upstream flow led to a significant reduction in longitudinal salinity across the estuary; the maximum reduction occurred at an 80% flow increase, with smaller decreases observed at higher increments. This study provides a critical scientific basis for formulating effective strategies to control saltwater intrusion in tidal rivers.

Keywords: saltwater intrusion; discharge regulation; drought event; climate change; FVCOM; Minjiang River

咸潮入侵是指高盐度海水因涨潮流等外因驱动入侵河口区域及内陆河流,导致局部水体盐度显著升高的现象。咸潮入侵不仅是一种水文动态过程,更是河口区域生态与经济系统脆弱性的体现,对河口地区的淡水资源供给、生态系统、农业用水以及工业活动造成巨大危害^[1]。

咸潮入侵受到潮汐涨落^[2]、风暴潮^[3]、上游来水^[4]、气候变化与人类活动^[5]等因素的多重影响,是一种复合型灾害事件,于我国乃至全球范围内均已造成过严重的生态、社会与经济后果,特别是在全球气候变化和人类活动导致干旱频率和强度不断上升的背景下^[6],咸潮入侵的强度和影响范围显著扩大。在我国,长江口于2014年发生了一次极为严重的咸潮入侵极端事件,三峡水库的建设运行与强风场的综合作用显著改变了河川径流过程^[7],咸潮入侵威胁饮用水安全,被认为是长江口历史上影响最为严重的咸潮入侵之一^[8];珠江口因干旱和台风联合作用频繁经历咸潮入侵事件,对农业灌溉和水生态系统造成冲击,导致当地居民饮水安全受到影响^[9]。2022年特大干旱事件使我国东南沿海各流域面临水资源安全、生态环境、工农业用水和社会经济等各方面复合影响^[10],闽江流域出现了自1961年有气象记录以来最严重的气象干旱,地表水资源量相较多年平均水平减少23.5%^[11],造成下游咸潮入侵强度显著增强,福州主城区供水安全受到严重威胁,沿岸众多饮用水源地被迫间歇性关闭。在世界范围内,美国特拉华湾^[12]、葡萄牙塔霍河口^[13]等地区在干旱或风暴潮条件下导致咸潮深入内陆,欧洲多个河口因气候变暖和海平面上升引发咸潮入侵^[14]。这些事件表明,干旱、高温热浪等复合性极端事件已经呈现多发频发的基本态势^[10],对下游沿海城市用水安全带来严重影响,而咸潮入侵在全球气候变化和人类活动的共同驱动影响下日益严重,成为当前河口地区可持续发展面临的重要挑战之一。因此,对咸潮入侵的治理,尤其是在气候变化引发极端入侵事件背景下的研究与治理日益迫切,对缓解其危害、保护生态系统和保障人类福祉至关重要。

当前治理方法主要分为工程措施和非工程措施两大类。工程措施包括修建水幕、蓄淡水库^[15]等,可短期内有效阻止咸潮入侵,但通常需要高昂的建设和维护成本,并可能对原有的通航方式和水生态系统造成干扰^[16],其广泛应用受限,故非工程措施逐渐进入了研究与实践范畴。水库调度作为一种代表性非工程措施,通过调节下泄流量、增加河口地区的淡水通量来抑制咸潮上溯,不仅能够降低成本,而且能够减少对自然水环境的破坏。已有研究表明,合理的泄流调控不仅能有效缓解咸潮入侵,还能兼顾水资源综合利用和生态保护^[17-18]。我国学者在近年来开展了大量的水动力压咸调度研究分析。邹华志等^[19]采用三维斜压数值模型研究了珠江口地形变化对咸潮上溯的影响,并提出了一系列有效的压咸调度策略。仇威等^[20]结合三峡水库补水措施,定量评估了其对于长江口盐水入侵的抑制效果,并验证了小潮期调度对控制咸潮的重要性。可见,深入研究并因地制宜优化上游水库调度策略,对于提升咸潮治理能力、维持河口生态系统健康具有重要意义,不仅为揭示咸潮上溯的驱动机制提供了量化依据,还为相关政策制定和调控策略优化提供了技术支撑。然而,当前我国研究主要集中在监测数据较为丰富、地形资料相对完善的长江、珠江等大型河口,当极端气候引发咸潮入侵事件时,闽江等中小型河口受限于数据资料,其灾害分析与应对策略尤为不足,对此类河口在极端气候条件下引发的咸潮入侵机理分析、数值模拟与咸潮治理研究仍然较少。

本研究基于高分辨率三维水动力-盐度耦合数值模式,结合气候变化引发的极端气候条件与受限的实测数据资料,构建河口感潮河段咸潮数值模型,模拟和重现以闽江为例的中小型河口在极端干旱条件下的咸潮入侵灾害事件,并首次探究闽江上游水库泄流调控对该流域极端咸潮入侵事件的影响规律,论证其初步效果、可行性和制约因素,为推动流域枯水期压咸措施的制定和实施提供科学依据,同时为其他感潮河段的咸潮防治提供研究借鉴,具有广泛的实际价值。

1 研究区域概况

闽江位于我国东南沿海地区，流域总面积 60992km²，是福建省最大的河流，也是我国重要的感潮河流。干流全长 541km，对沿岸地区水资源供应、航道运输、防洪排涝、生态保护等多方面发挥着重要作用。闽江流域水系发达，多年平均年径流量 580 亿 m³，受亚热带季风气候控制，水资源量虽丰富却表现出明显的季节变化，10 月至次年 3 月枯水期径流量仅占全年总量的 30% 以下，最小月降水量一般出现在 11 月或 12 月，其月降水量约占年降水量的 2%~3%，极易发生咸潮入侵。此外，闽江下游及河口地区受东海潮汐显著影响，此区域属半日潮强潮河口，潮差大、潮流强。河口的平均潮差达 4.1m，100 年一遇高潮位 3-4m，南海远海区域则略大 1m；100 年一遇低潮位约 -3m^[21]，枯水期的潮汐作用占主导地位。闽江下游河道分布着多座重要水库，主要包括位于闽江干流的水口水库和支流大樟溪的界竹口水库等。水口水库是闽江干流上规模最大的控制性水利枢纽，坐落于南平市闽清县境内，是一座以防洪、发电、航运、供水为主的大型综合性水库，正常蓄水位 65m，死水位 55m，总库容达 26 亿 m³，不仅为福建电网提供稳定电力，还通过调节闽江干流流量保障下游防洪安全、改善航运条件并抑制咸潮入侵。界竹口水库则位于福州市永泰县境内的大樟溪中游，是一座以发电为主的中型水库，装机容量 60MW，兼顾生态补水功能。这些水库通过联合调度有效调控闽江下游水资源，在保障区域供水安全、支撑经济社会发展、维护河流生态健康等方面发挥着关键作用。然而，上游水库的建成运行加之下游河道采砂严重，致使河道水沙条件变化剧烈，河道侵蚀显著，加剧了枯水时期咸潮入侵的发展。当地水厂采用氯离子浓度 250mg/L 作为浓度阈值，但自 20 世纪末以来，已多次监测到氯离子浓度超标事件。如 2003 年枯水期监测到福州城门水厂的氯离子浓度已达 296.5mg/L，而 2009 年时监测值已高达 443mg/L，不宜取水时间长达 7h^[22]。

近年来，随着全球气候变化影响加剧，热带气旋、海平面上升、降水时空分布变化等极端天气事件增多，闽江流域的咸潮入侵事件更为频繁、强度更大。2007—2017 年，北港鳌峰洲监测到 3 次咸潮入侵的影响^[23-24]。2018 年冬季，受上游来水减少、东海天文大潮及台风影响，闽江口咸潮入侵范围扩大，导致福州市部分水厂取水受限，自来水含盐度显著上升。2022 年，我国因夏季降雨径流量的急剧减少而遭遇了百年一遇的严重干旱事件，持续时间长、影响范围广，还导致极端高温和“汛期反枯”的罕见现象，使得闽江下游自 7 月起便进入枯水期并长达半年之久，咸潮入侵较往年提早 3-4 个月，马尾、炎山等取水水源地附近多次实地监测到氯离子浓度超标，严重影响到当地的生产生活。在此次事件中，水口水库仅在 11 月底至 12 月初进行了一次泄流压咸调度，最大压咸流量为 2291m³/s，期间平均压咸流量为 1397m³/s，但仅能短时间内缓解盐度升高，无法完全抑制咸潮入侵。上述现象表明，在日益频繁的极端气候事件下，闽江河口咸潮入侵亦日益严峻，对生活取水、农业灌溉、工业生产及生态环境产生的危害亟待缓解，然而当前尚未有对闽江口极端咸潮入侵事件机理及其水动力演变进行系统分析的研究，亦缺乏在此情景下的咸潮应对策略及其效果。故本文针对闽江极端咸潮入侵事件及其机理的分析，探讨上游水库泄流调控对咸潮入侵的有效性，为当地及相似感潮河段咸潮防治提供参考支撑。

2 研究方法

2.1 模型选择

本文采用基于有限体积的三维海洋数值模式（Finite-Volume Community Ocean Model, FVCOM）构建感潮河段三维数值模型。此数值模式由 Chen 提出^{替读:未找到引用源。}，经众多学者的广泛验证、开发与完善，对模拟潮汐往复流、岸线干湿交替变化、泥沙与污染物输运等方面体现出较好的模拟效果。FVCOM 模式采用有限体积法，通过计算非重叠水平三角控制单元间的通量，以积分形式求解控制方程。该方法融合了有限元法（FEM）的几何灵活性与有限差分法（FDM）的简洁离散结构及计算效率优势，能够精确刻画沿海和河口区域的质量、动量、盐度及热量守恒过程。得益于其灵活的网格拓扑结构和简洁的代码架构，FVCOM 在沿海区域的计算应用中展现出显著优势，至今已在全球多个河口与海岸中得到广泛的模拟应用。

2.2 模型构建

模型构建范围为闽江干流水口大坝至出海口向外海扩展至 100km 左右的区域,具体范围为 24.8° N~27° N、118.6° E~120.8° E,核心区域见图 1,包含闽江下游干流、大樟溪支流、南港、北港、入海口南北支。其中,南台岛将干流分为南北两港,穿过福州主城区的北港较为窄深,而中部有大樟溪支流汇入的南港较为宽浅,两港于马尾汇合,并由东南流向转向东北,在河口处被琅岐岛南北两支分别入海。

在建模初期,首先采用粗分辨率网格进行模型的运行与调试工作,其河道分辨率最大 300m,网格数量为 36313;待模型调试至合理状态后,转而采用加密的细分辨率网格进行更为精细的调整,细网格河道分辨率最大 100m,网格数量为 152383;对于模型中的关键断面及重要位置,则进一步将网格分辨率细化为 20m 至 50m 左右以精确捕捉水动力与盐度变化的细致过程。

模型开边界设置于河口东部外海区域,采用辐射状布置,其分潮调和常数通过 TPXO 数据集与东中国海大区域模型的插值计算得到。外海开边界最大潮差为 6.6m,最小潮差为 3.5m,一个大潮周期内的高潮位为 3.6m,低潮位为-2.8m。模型上游的流量边界共有两项,闽江干流以水口水库下游站实测流量为输入,大樟溪支流以界竹口水库下游的永泰站实测流量为输入。水深地形处理受限于实测资料的完整性,研究区域采用三个部分资料:水口至马尾段采用 2020 年实测数据,马尾至入海口段使用 2022 年实测数据,外海区域则基于海图资料,通过数据融合将三者整合为完整的水深地形数据集。气象强迫场采用欧洲中期天气预报中心提供的历史风场数据,该数据集具有 3 小时时间分辨率和 0.25° × 0.25° 的空间分辨率。

考虑到水位和流速的快速响应,模型初始场采用冷启动方式,流速和水位设为零值,温度场和盐度场则来源于《渤海、黄海、东海海洋图集》的月平均数字化资料。在数值计算方面,模型模拟时间为 2022 年 9 月至 12 月,并设置一个月的预热期;计算时间步长为 1 小时。针对变化起伏较大的河口地形,采用基于地形追随的 σ 坐标变换方法对垂向水深进行分层,将实际总水深设置为 10 个计算层以更好地适应复杂的水下地形突变。模型水平扩散系数设为常数 0.1,水平和垂向 Prandtl 数^{错误:未找到引用源。}分别设为 1.0、0.1。

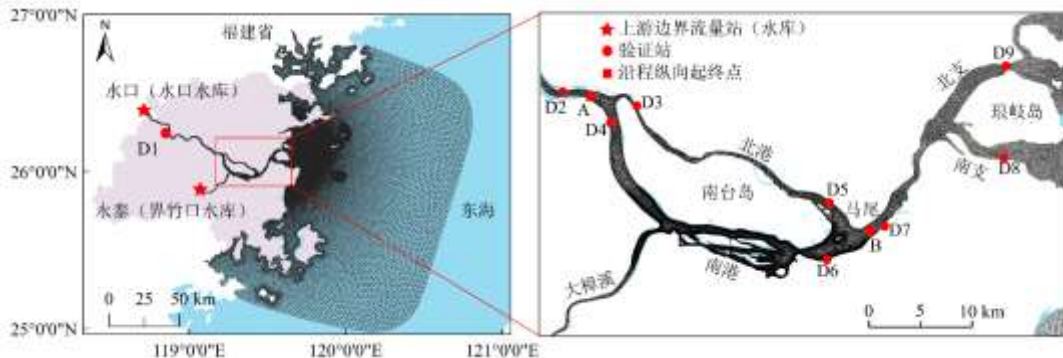


图 1 闽江流域模型构建范围
Fig.1 The construction range of Minjiang River basin model

3 模型验证

采用模型区域内的主导分潮 M_2 调和常数场完成率定后,基于实测数据进行模型验证,主要包含潮位验证及盐度验证。

3.1 潮位验证

选取 2022 年冬季的一个大潮和一个小潮周期潮位数据开展潮位验证,其中大潮分布时间为 2022 年 12 月 24 日~12 月 25 日,小潮分布时间为 2022 年 12 月 17 日~12 月 18 日。验证站点使用 D1~D9 共 9 个站点,站点位置如图 1 所示,所选取的站点覆盖闽江主河道、河道分汉口、南港、北港、南北港汇合口及出海口,具有全面性与代表性。潮位验证误差指标采用平均绝对误差 MAE 及均方根误差 $RMSE$ 来评估,

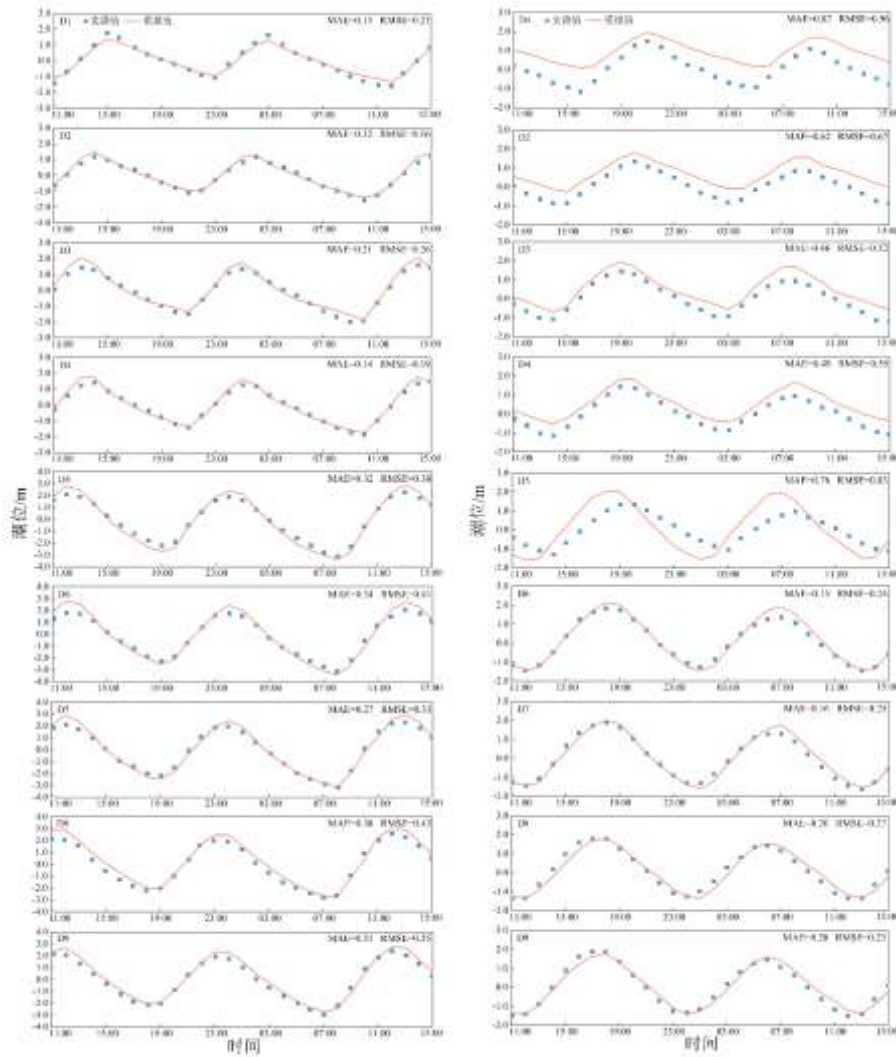
MAE可反映模型的平均偏差, RMSE可对误差波动性进行评价, 其计算式分别为:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i - O_i| \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \quad (2)$$

式中, S_i 是模拟值, O_i 是实测值。

潮位验证结果及其误差见图 2, 由图中潮位趋势及验证误差指标可知, 模型能够准确模拟出潮位的变化规律, 各站点的模拟值与实测值拟合度较好, 表明模型具有良好的精度。



(a) 大潮验证结果

(b) 小潮验证结果

图 2 潮位验证结果

Fig.2 The results of tidal level verification

3.2 盐度分层验证

结合不同深度的盐度实测数据对模型进行分层验证, 以表明垂向分层模拟的准确性。偏上游的 D1 至 D4 站点不受咸潮入侵的影响, 故此处不予展示; 下游 D5 至 D9 站点频繁受咸潮入侵影响, 选作此次验证

的重要站点。盐度分层依据基于地形跟随的 σ 坐标系原理，将实际总水深 H 垂向分为 10 层，即 $\sigma = [0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1]$ ，令海表面 $\sigma = 0$ ，海底部地形处 $\sigma = 1$ ，本文所述表层为 $\sigma = 0.1H$ 处，中层为 $\sigma = 0.5H$ 处，底层为 $\sigma = 0.9H$ 处，分层验证时间同 3.1 小节的潮位验证。验证结果及其误差如图 3 所示。靠近上游站点的盐度值变化幅度较小，靠近下游的站点受咸潮入侵影响较大故盐度变化幅度较大。不论是表层、中层或底层，模拟盐度在变化趋势上与实测数据均较为吻合。

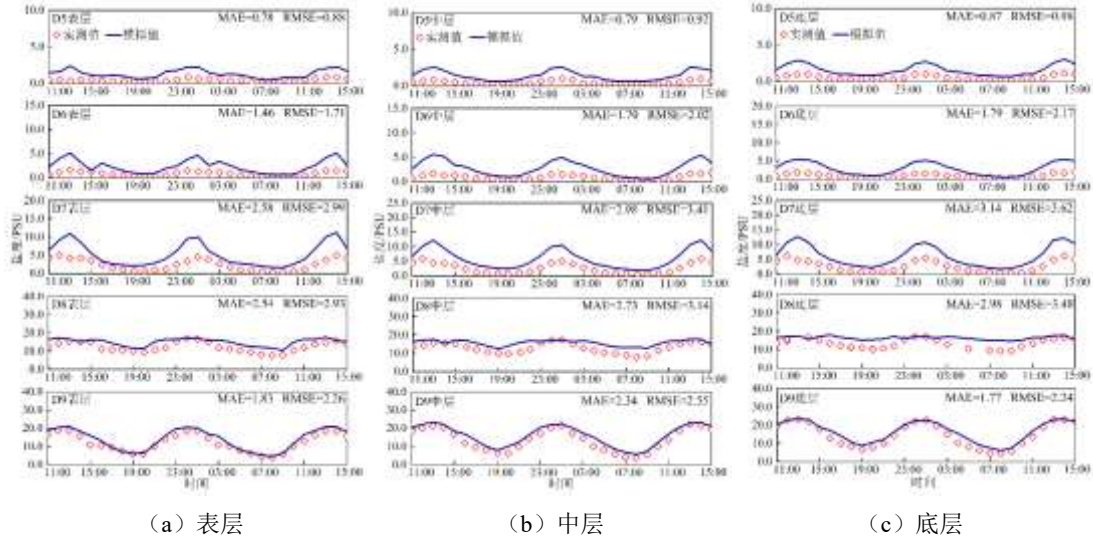


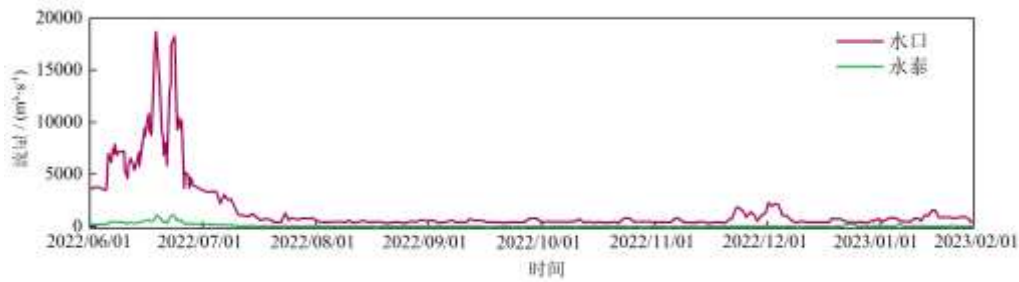
图 3 盐度分层验证结果
Fig.3 The results of salinity stratification verification

4 水库压咸调度研究

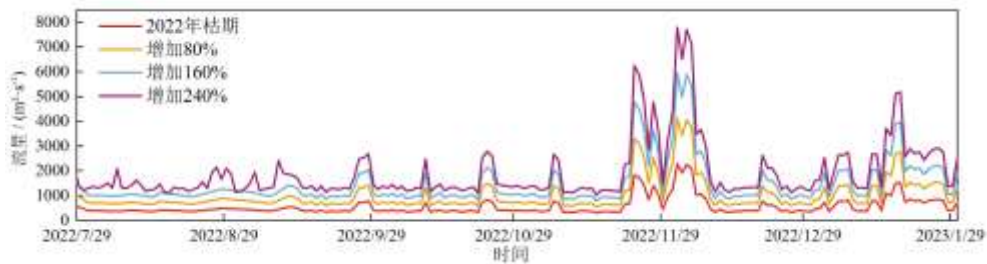
由于气候变化及河床下切的双重影响，闽江流域的水文特征发生了显著变化，导致河道纳潮量急剧增加，水体交换时间显著延长。在此背景下，闽江下游枯水期的压咸流量不再仅仅是一个短时段内的流量均值概念，而必须是一个稳定的、持续数天的大流量过程。这种持续的流量过程对于抑制咸潮入侵、维持咸淡水界面的动态平衡至关重要。为深入探究闽江干流水口水库泄流调控规律及其对下游水环境的影响，本研究以 2022 年枯水期极端干旱条件下发生的严重咸潮入侵事件为背景，系统模拟和分析了水口水库泄流调控对咸潮入侵的影响范围及规律，揭示在不同泄流条件下闽江咸潮入侵的响应机制，为流域未来水资源管理和咸潮防控提供科学依据。考虑到初始、边界条件数据情况以及研究区域咸潮入侵事件发生时段，本文所采用模型的模拟时间为 2022 年 9 月至 12 月，结果分析选取咸潮入侵最严重时期——11 月中下旬的一个大潮和一个小潮期间。

4.1 气候条件

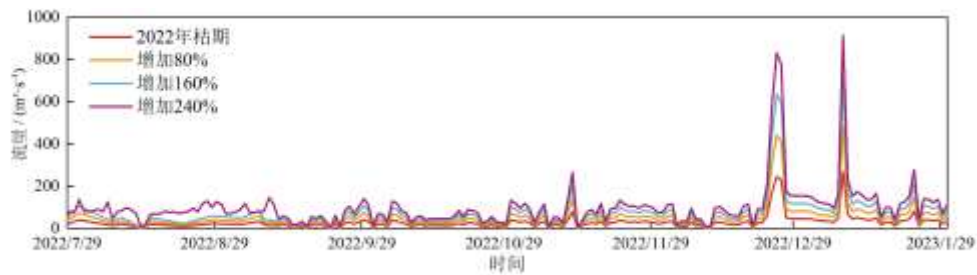
4.1.1 流量 2022 年下半年，闽江流域经历了显著的降水量锐减，导致流域来水量急剧下降。依据图 4(a)中水口站、永泰站的监测流量过程可知，自 7 月开始，河道持续处于低流量状态并延续了半年之久。干流水口水库下游 7-11 月的月平均流量分别为 1089 m³/s、428 m³/s、465 m³/s、438 m³/s、619 m³/s，年流量最小值为 11 月 16 日的 302 m³/s，枯水期相较于往年提早了 3-4 个月，流量过程整体偏小于枯水期代表年月平均流量。长期的低流量状态严重影响了闽江下游咸淡水界面的动态平衡，导致咸潮入侵界限不断向上游推进，对下游城市的生活、生产用水造成验证威胁。本文本研究以 2022 年枯水期流量为基准，在上述初始条件和边界条件下设计干旱时期水口水库（水口站）、界竹口水库（永泰站）的不同流量工况，分别在两站上游边界增加了 80%、160%和 240%的梯度流量作为模型上游流量，如图 4(b)、图 4(c)所示，探究水库放流对咸潮入侵的分布规律。



(a)2022 年枯水期来水



(b)水口站梯度流量边界条件



(c)永泰站梯度流量边界条件

图4 闽江水口站及永泰站流量

Fig.4 The flow sequence of Shuikou station and Yongtai station

4.1.2 风场 2022 年风场数据采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的 ERA5 再分析数据, 时间分辨率为 3h, 空间分辨率为 0.25°。根据河道内 2022 年枯季时期风矢量的时间序列图(图 5)可知, 6 月至 8 月期间, 闽江河口主要以南风为主, 8 月下旬起由南风转变成冬季盛行的东北风并持续整个枯水期, 风速也逐渐增大, 在 10 月份时日平均风速达到最大值 12.05m/s, 瞬时最大风速达到 21.63m/s, 均大于历史同期, 但尚未达到百年一遇的 24m/s 平均风速水平。由于闽江河口呈东向入海的地理特征, 在低流量条件下, 潮汐沿西向进入河口。东北风与潮汐侵入方向存在一定的重合, 风向与潮汐的共同作用加剧了潮汐入侵效应, 进一步推动了河口的咸潮上溯。这一现象在枯水期尤为显著, 对河口区域的咸淡水界面动态平衡产生了重要影响。

4.2 不同流量下的盐度平面分布

本研究选取了大潮、小潮期间咸潮入侵最严重时刻, 闽江南港、北港至南北支汇流口的表层盐度分布, 以评估闽江下游在极端干旱事件下咸潮入侵程度及其防控治理效果。以日常生活取用水盐度阈值(0.45PSU)作为咸潮入侵控制线, 用橙线表示。

大潮期间咸潮入侵最严重时刻的盐度分布规律如图 6 所示, 在上游持续低流量及旺盛的东北风加持

下，入侵最严重时刻出现在 11 月中旬。在原枯水期流量情景时（图 6(a)），咸潮入侵界深入至南北港，南港已超义序水厂及大樟溪支流口并向上延伸，影响了南港沿线大部分城区取水；而北港的咸潮入侵界已向上入侵至文山里下游，整个北港均已受到咸水的污染。2022 年枯水期的严重干旱事件使得闽江下游各水厂盐度均有不同程度的超标，且超标范围大、影响深，恶化了闽江下游城区的日常生产、生活取水水质。在此基础上，将上游来水流量过程增加 80%，由图 6(b)可知，咸潮入侵界得到大幅消退，北港退至魁岐附近，南港退至义序水厂附近，验证了上游来水增大对咸潮入侵的阻碍和调节作用。进一步将上游流量过程增加 160%（图 6(c)），咸潮入侵界继续消退，但消退幅度有所减缓；而将流量增加 240%时（图 6(d)），咸潮入侵界已能退至南北港汇流处，能够保证下游各水厂的取水水质正常，有效缓解下游城区的取水困境。

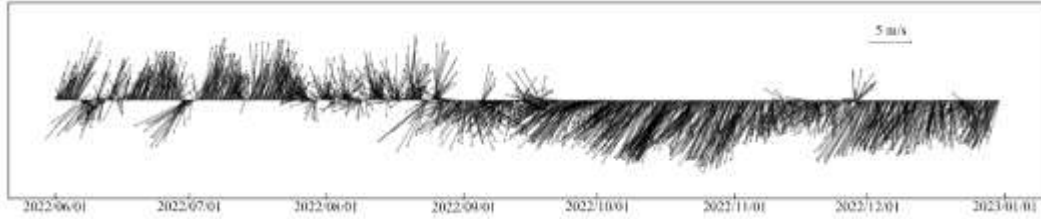


图 5 闽江河口 2022 年枯水期风速矢量图

Fig.5 The wind speed vector diagram of Minjiang River estuary in the dry season of 2022

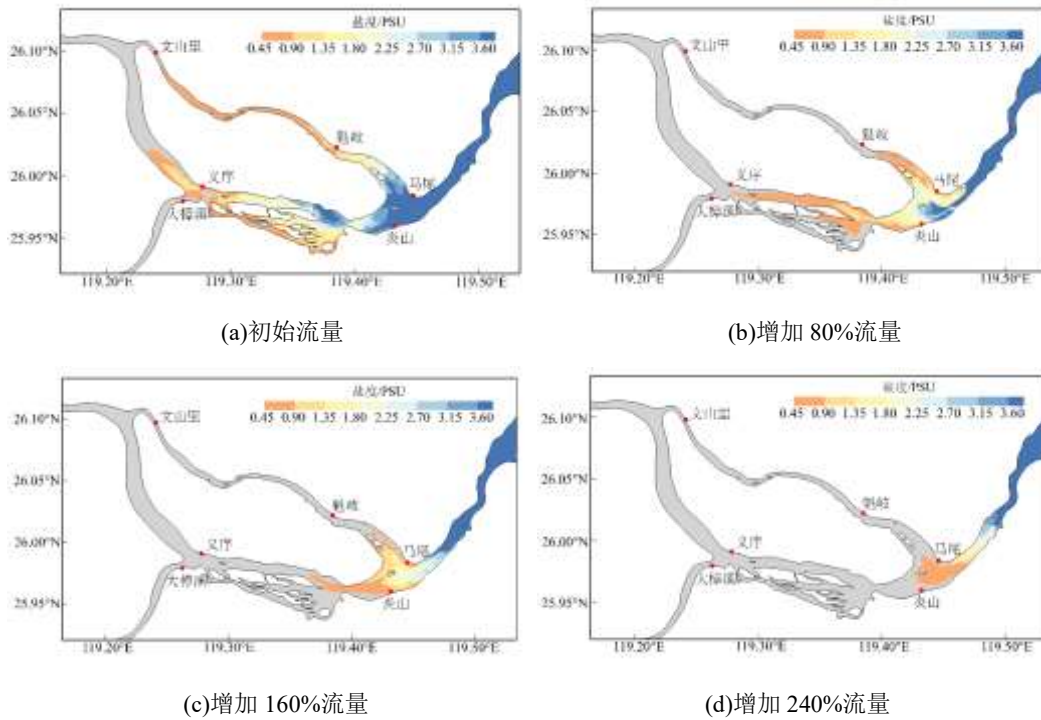


图 6 咸潮入侵最严重时刻的大潮表层盐度分布

Fig.6 Distribution of surface salinity during the most severe stage of spring tidal intrusion

小潮期间咸潮入侵最严重时刻的盐度分布规律如图 7 所示，入侵最严重时刻出现在 11 月下旬，入侵强度上整体显著低于大潮期。在图 7(a)原枯水期流量情景时，小潮涨潮入侵距离远不及大潮，其北港入侵范围低于大潮约 15km，南港入侵范围低于大潮约 6.5km，但仍然影响着闽江下游大部分主要取水水源地；魁岐处盐度降低，而马尾、炎山处盐度仍然较高。此外，小潮期间对南港的入侵范围要大于北港，北港表层盐度梯度更密集表明了小潮期间盐度在其空间上的变化更为剧烈，与弱潮动力下北港更为窄深的地形有

关。将上游来水增加 80%后，咸潮界退至魁岐与义序下游，马尾、炎山水源地的盐度随之降低。而继续增加来水幅度至 160%后，咸潮界虽继续消退，但幅度有所减缓。来水增加至 240%后，咸潮界与大潮相比位于南北港汇流处更偏上游的位置，且汇流处盐度等值线比大潮更为密集，水体混合更为剧烈，在一定程度上影响了上游来水的消退效果。

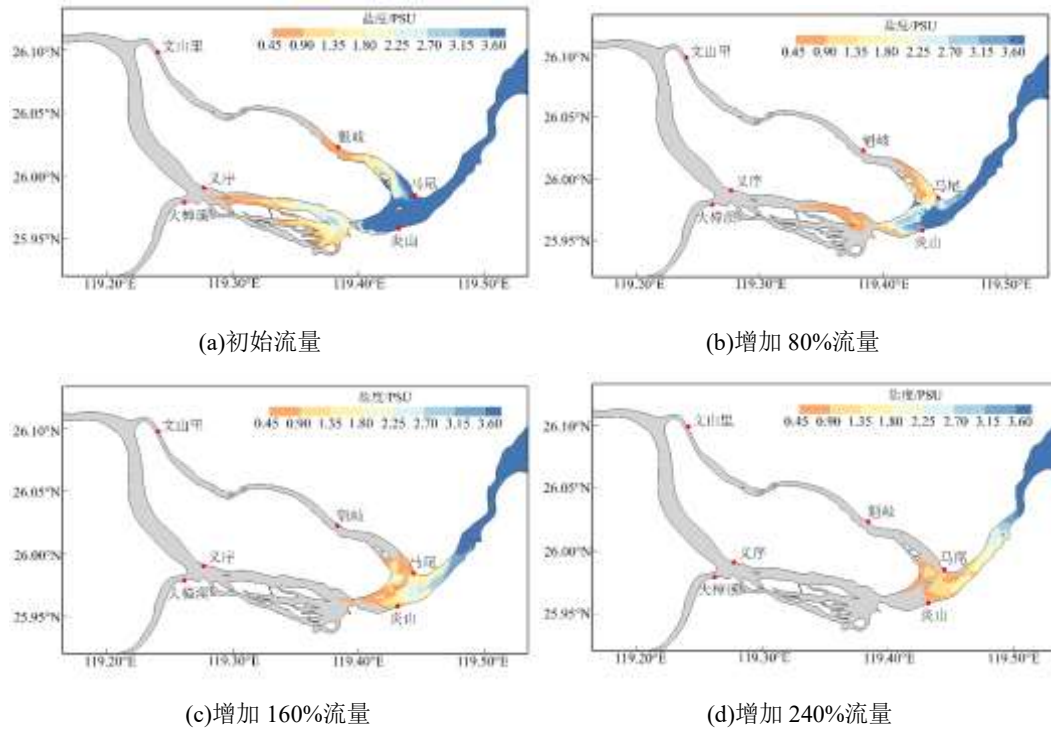


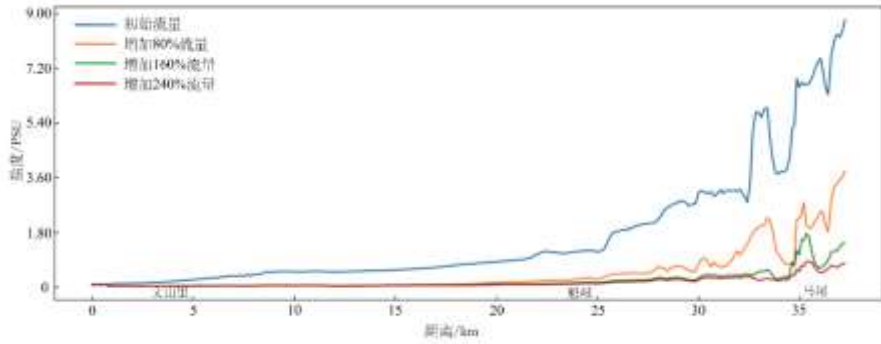
图 7 咸潮入侵最严重时刻的小潮表层盐度分布

Fig.6 Distribution of surface salinity during the most severe stage of neap tidal intrusion

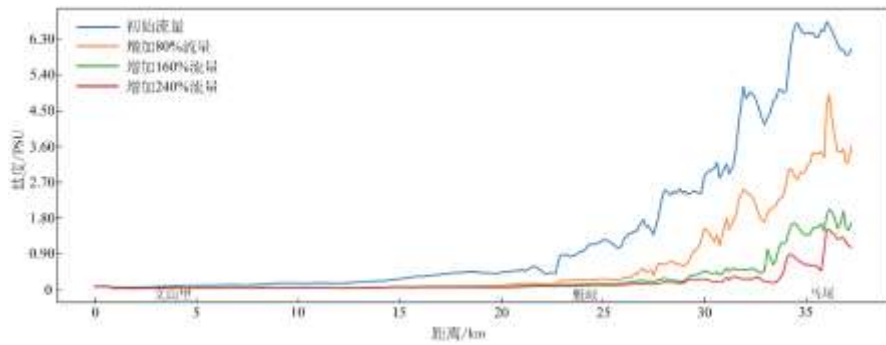
4.3 不同流量下的盐度沿程分布

为进一步分析上游来流增加对闽江咸潮入侵的沿程影响，本节针对咸潮入侵最为严重的大潮期，绘制从南北港分流口至南北港汇合口的表层沿程纵剖面，北港与南港的沿程纵剖面均以图 1 所示的 A 为起点、B 为终点。盐度沿程分布结果如图 8、图 9 所示。

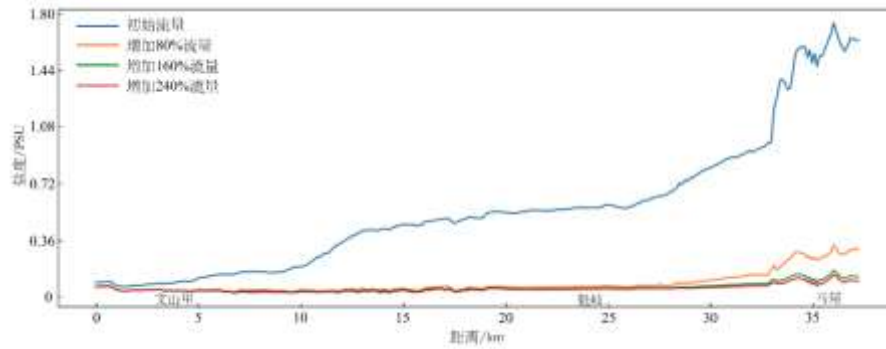
对于北港，不论是大潮涨憩、落憩还是入侵最严重时刻，初始流量在偏上游（0-20km）范围内的盐度值仍处于较低水平，故增加不同的梯度流量都能对此范围内的盐度进行快速抑制以趋近于 0。随着距离的增加即越靠近下游，初始流量下的各时刻盐度开始显著上升，马尾、魁岐盐度远超日常用水安全阈值。增加上游水库泄流调控流量带来了更多的淡水输入，使沿程盐度随之显著降低，且越靠近下游则各梯度流量对应降低的幅度越大，表明上游泄流对下游河道的压咸作用受到沿程距离的影响不显著，咸潮入侵程度得以逐渐大幅度缓解。此外，随着上游水库压咸调度流量增加，盐度的降低幅度在流量增幅 80%时最大，当流量增幅为 240%时，相比增幅 160%的流量而言已显现出较小的减缓效果，表明上游来水并非越大越好，需要结合考虑下游水源地压咸要求、上游水库储水和放流经济效益等综合因素来确定最经济有效的压咸流量。



(a)北港大潮涨憩时刻



(b) 北港大潮入侵最严重时刻

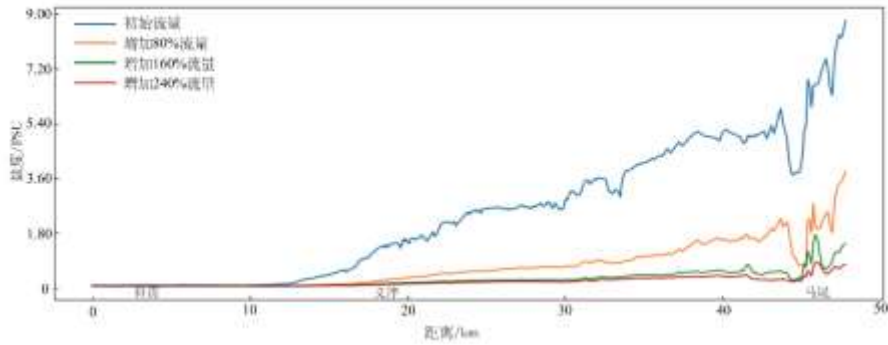


(c) 北港大潮落憩时刻

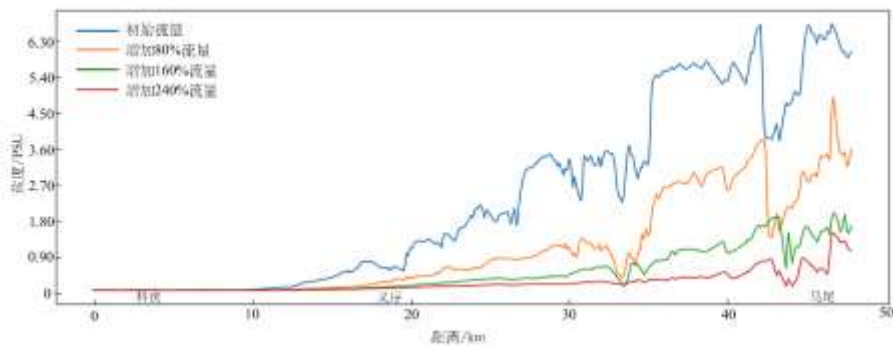
图 8 不同流量梯度下的北港大潮表层盐度沿程分布

Fig.8 Distribution of surface salinity along the North Channel under different flow gradients in spring tide

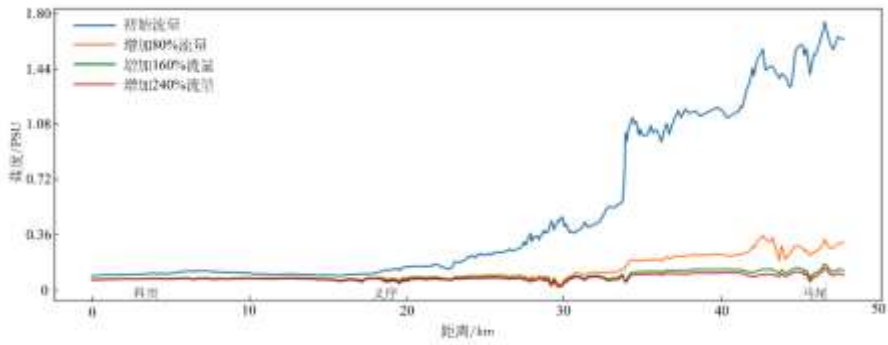
南港的沿程距离多于北港约 12km，因其相对宽浅的河道更有利于表层潮汐的入侵和发展，可以看到 10km 后初始流量下的盐度呈波动式快速增长，涨憩与入侵最严重时刻，义序上游盐度已超阈值。增加上游来水流量后，咸潮入侵得到明显改善，沿程盐度得到降低，这一现象与北港沿程规律一致。但随着流量梯度的增加，盐度降低的幅度有所减缓，盐度的降低幅度在流量增幅 80%时最大，且对大潮涨憩时刻效果最为明显。由于汇流口处南北港的盐度不同，在汇合流向马尾时发生混合，故存在盐度的波动变化现象。



(a)南港大潮涨憩时刻



(b) 南港大潮入侵最严重时刻



(c) 南港大潮落憩时刻

图9 不同流量梯度下的南港大潮表层盐度沿程分布

Fig.9 Distribution of surface salinity along the South Channel under different flow gradients in spring tide

4.4 咸潮界消退距离分析

本节基于河道纵向沿程分布，以日常生活取用水盐度阈值 0.45PSU 作为咸潮入侵控制界，计算和分析不同流量梯度工况下，咸潮入侵最严重时刻的表层咸潮入侵界变化，具体量化不同梯度的上游来流对下游可取水范围产生的影响，结果见表 1 和表 2。整体而言，上游流量对于咸潮入侵控制界有着关键性影响，流量越大，对入侵控制界的压咸作用越显著。但相同增幅的流量过程影响的咸潮入侵界消退距离却各不相同。

对于北港大潮，流量增幅为 80%、160%和 240%的工况中咸潮入侵界分别消退 6.1km、9.0km 和 12.8km，

而小潮消退 5.5km、7.4km 和 8.4km。虽然多次增加流量可以使入侵界进一步消退，但消退效果不如在流量增幅 80%时明显。对于南港而言，随着流量成倍增加，其咸潮入侵界消退距离也成倍增加；流量增幅为 80%、160%和 240%的工况对应大潮消退距离为 5.9km、14.4km 和 28.9km，对应小潮消退距离为 4.7km、10.4km 和 15.5km。

表 1 大潮期间不同流量梯度下的咸潮入侵界消退距离

Tab.1 Regression distances of saltwater intrusion under different flow gradients in the spring tide

流量梯度	水口站流量 增幅(m ³ /s)	永泰站流量 增幅(m ³ /s)	北港咸潮消 退距离(km)	南港咸潮消 退距离(km)
初始流量	0	0	0.0	0.0
增加 80%流量	479	24	6.1	5.9
增加 160%流量	958	48	9.0	14.4
增加 240%流量	1437	72	12.8	28.9

表 2 小潮期间不同流量梯度下的咸潮入侵界消退距离

Tab.2 Regression distances of saltwater intrusion under different flow gradients in the neap tide

流量梯度	水口站流量 增幅(m ³ /s)	永泰站流量 增幅(m ³ /s)	北港咸潮消 退距离(km)	南港咸潮消 退距离(km)
初始流量	0	0	0.0	0.0
增加 80%流量	479	24	5.5	4.7
增加 160%流量	958	48	7.4	10.4
增加 240%流量	1437	72	8.4	15.5

4.5 讨论

为实现闽江极端咸潮入侵事件的机理分析与上游水库泄流调控治理探究，本文基于高分辨率三维水动力-盐度耦合数值模式构建了闽江河口感潮河段咸潮数值模型。在模型构建、率定与验证过程中，虽已基于现有数据尽可能地减小误差，但误差仍然无法完全避免。在潮位验证过程中，小潮期间的 D1~D5 站点拟合误差相对明显，原因是此段河道存在多处急弯和剧烈摆动部位，导致小潮退潮时水流受阻，低潮位偏高；加之潮汐传播距离远、小潮动力相对大潮更显不足，易受底摩擦和河道阻力影响，致使低潮位的抬升比高潮位更明显；此外，D5 站点处的地形束窄与桥墩阻水对此站点潮周期产生了小范围扰动。在盐度验证过程中，由于盐度随潮汐向上游的传递受地形影响敏感性较大，尤其是小潮期间，受限於本研究地形资料为 2020 年实测、2022 年实测及海图资料数据补充而成影响，盐度模拟值与实测值存在一定的误差，该误差可通过后期对地形的实测校正而减小。

在结果部分，综合南、北港在不同梯度流量下的盐度沿程分布可知，在涨潮与涨憩时刻增加上游来水，可以明显抑制下游咸潮入侵的向上发展程度，达到压咸目的；在退潮时期持续增加上游流量，可以加速推动沿程盐度的消退，使压咸效果更为突出。然而，不同梯度流量对应的盐度降幅并非也呈梯度，表明上游水库泄流的影响有限，上游来水流量并非越大越好，需要结合考虑下游水源地压咸要求、上游水库储水和放流经济效益等综合因素来确定最经济有效的压咸流量。此外，由咸潮界消退距离分析可知，南北港之间也存在明显的消退距离规律差异，当南港的梯度流量更大时，消退效果更为明显，与北港的规律明显不同。这是由于北港窄深、南港宽浅，导致上游来水对南北港的分配水量不均。南港分配了更多水量，且宽浅地形有利于水量的推进和冲刷，从而对南港咸潮入侵展现出更强的阻碍作用；而北港分配水量相对较少，窄深地形更不利于水量的持续交换，因此效果不如南港显著。

本文基于 2022 年流量过程设置了不同梯度流量，虽能显示出较好的压咸效果，但应考虑水库枯水期储水量有限、用电调度等实际问题。结合福建省水利勘测设计研究院提供的水口水库技术参数及调度方案

可知, 枯水时期库水位要求不低于 58m, 最小下泄生态流量为 308 m³/s, 遇到干旱年份时调整大潮期间的持续下泄水量至 600 m³/s~800 m³/s, 其他时段按 350 m³/s~450 m³/s 运行。本文原始枯水期工况下的下泄流量均值为 598 m³/s, 设置水库梯度流量增量 80%时的平均下泄流量为 1077 m³/s, 增量为 160%时平均下泄流量为 1538 m³/s, 增量为 240%时平均下泄流量为 1938 m³/s。在水库日常储水调度情境下, 虽无法满足大增量的持续下泄流量条件, 但本研究为水库在偏早年份提前蓄水、流域水库联合压咸流量调度提供了参考流量方案。受限于当前研究区域存在多个漕滩、沙洲的地形复杂性以及压咸调度直观性、实时性需求, 压咸调度的耗水量及其有效用水量难以准确估计, 限制了水口水库的中长期储水与调度用水精度, 未来可通过更精确的地形测量与分析, 进一步量化闽江下游压咸调度水量消耗和水量分布, 这将为未来的水资源调度和咸潮控制提供更加精确的支持。

此外, 仅靠水库调度作为压咸措施仍存在的明显局限性。持续大流量下泄会快速消耗库容, 从而影响后续供水与发电效能, 且水库调度对短周期潮波动的响应存在滞后性。因此, 未来需要考虑构建多措施协同防控体系, 包括优化水库群联合调度、建设河口挡潮闸、河道泥沙治理、河道监测预警、推广节水措施等, 多种工程、非工程措施的组合来开展咸潮上溯综合治理, 才可全面提升咸潮防控效能。

5 结论

本研究构建了闽江下游感潮河段三维水动力-盐度数值模型, 模拟与重现了研究区域 2022 年极端干旱条件下的咸潮入侵灾害事件, 探究了上游水库调度不同梯度流量下咸潮入侵的分布特性, 并分析了不同梯度流量对咸潮入侵控制界的影响规律, 得到以下主要结论:

- (1) 上游水库泄流对闽江下游咸潮入侵程度有显著影响, 增大上游来水流量能有效阻碍咸潮入侵, 保障下游取水水质。在 2022 年枯水期流量情景下, 闽江下游各水厂盐度超标情况严重, 而当上游来水流量分别增加 80%、160%和 240%时, 咸潮入侵界逐渐后退, 其中流量增加 240%时, 咸潮入侵界能退至南北港汇流处, 确保下游各水厂取水水质正常。
- (2) 不同流量梯度下, 咸潮入侵界消退距离存在差异, 且南港与北港受上游流量影响的特征不同。对于北港, 水库泄流增幅相同时, 咸潮入侵界消退距离随流量增加而增大, 但效果不如流量增幅 80%时明显; 南港则随着流量成倍增加, 咸潮入侵界消退距离也成倍增加, 其梯度越大时, 消退效果越明显, 这主要与南北港的河道形态导致上游来水分配水量不均有关。
- (3) 上游水库泄流量并非越大越好。从盐度沿程分布来看, 随着水库泄流量增加, 北港和南港沿程盐度均显著降低, 且在流量增幅 80%时盐度降低幅度最大, 当流量增幅进一步增大到 240%时, 相比增幅 160%的流量, 盐度降幅变小。

基于上游水库压咸调度的咸潮入侵分析, 是在当前日益加剧的咸潮入侵现状下对非工程阻咸措施效果的试验, 对闽江极端咸潮入侵事件的防治方案制定和实施提供了科学依据。当前仅靠单一措施难以做到在兼顾通航、过沙、过鱼等河道重要功能的同时很好地完成压咸目标, 未来仍需进一步探索压咸调度时间、水量、多水库联合调度及多种措施组合等影响。

6 参考文献

- [1] Zhang ZH, Wei XY, Zhang W. Response of three-dimensional ideal estuarine salt intrusion to changes in river and tidal forcing. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2024, **52**(3): 96-102. DOI: 10.3786/j.issn.1000-1980.2024.03.013. [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. 河海大学学报(自然科学版), 2024, **52**(3): 96-102.]
- [2] Li RH, Ma JX, Zhang SY *et al.* Saltwater intrusion mechanism in the Qiantang River estuary under strong tide. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, **42**(5): 37-44. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2022.05.006. [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. 水利水电科技进展, 2022, **42**(5): 37-44.]
- [3] Pan MJ, Yang F, Jing L *et al.* Dynamic mechanism of salinity intrusion in Modaomen Waterway during typhoon "Nesat" transit. *Water Resources Protection*, 2019, **35**(4): 42-48. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2019.04.007. [潘明婕, 杨芳, 荆立等. 台风“纳”

- 沙”过境期间磨刀门水道咸潮上溯的动力机制. 水资源保护, 2019, **35**(4): 42-48.]
- [4] Zheng H, Liu YY, Zhao JS *et al.* Response to runoff variations of saltwater intrusion in an estuary (I): characteristics and regularities. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, **53**(10): 121-131. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.10.009. [郑航, 刘悦忆, 赵建世等. 极端干旱下河口咸潮上溯对径流过程的响应(I): 特征与规律. 水利水电技术(中英文), 2022, **53**(10): 121-131.]
- [5] Zuo CS, Wang H, Li WS *et al.* Characteristics and changes of salt-tide intrusion in three estuaries under the background of sea level change. *Marine Science Bulletin*, 2021, **40**(01): 37-43. Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2021.01.005. [左常圣, 王慧, 李文善等. 海平面变化背景下三大河口咸潮入侵特征及变化浅析. 海洋通报, 2021, **40**(01): 37-43.]
- [6] Wang Q, Yu T, Chen YF *et al.* Characteristics of compound drought based on coupling coordination model—a case study of the middle and lower reaches of Hanjiang River. *Journal of Lake Sciences*, 2024, **36**(5): 1588-1598. DOI:10.18307/2024.0547. [王晴, 喻婷, 陈燕飞等. 基于耦合协调模型的复合干旱研究——以汉江中下游流域为例. 湖泊科学, 2024, **36**(5): 1588-1598.]
- [7] TU XJ, DU XX, DU YL *et al.* Multivariate joint design of hydrological drought and impact of water reservoirs. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(2): 509-518. DOI:10.18307/2018.0222. [涂新军, 杜晓霞, 杜奕良等. 水文干旱多变量联合设计及水库影响评估. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 509-518.]
- [8] Zhu JR, Cheng XY, Li LJ *et al.* Dynamic mechanism of an extremely severe saltwater intrusion in the changjiang estuary in february 2014. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020; **24**(10): 5043-5056. DOI: 10.5194/hess-24-5043-2020.
- [9] Li D, Liu BJ, Lu Y *et al.* Assessment of changes in severity of compound drought and saltwater intrusion events based on a multi-index approach in pearl river estuary. *Hydrological Processes*, 2023, **37**(9): e14986. DOI: 10.1002/hyp.14986.
- [10] XIA J, CHEN J, SHE DX. Impacts and countermeasures of extreme drought in the Yangtze River Basin in 2022. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, **53**(10):1143-1153. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20220730. [夏军, 陈进, 余敦先. 2022 年长江流域极端干旱事件及其影响与对策. 水利学报, 2022, **53**(10): 1143-1153.]
- [11] 福州市水利局. 福州市水资源公报. 福州: 福州市人民政府, 2022.
- [12] Liu JL, Hetland R, Yang ZQ, *et al.* Response of salt intrusion in a tidal estuary to regional climatic forcing. *Environmental Research Letters*, 2024; **19**(7): 074019. DOI: 10.1088/1748-9326/ad4fa1.
- [13] Rodrigues M, Fortunato AB, Freire P. Saltwater intrusion in the upper tagus estuary during droughts. *Geosciences*, 2019; **9**(9): 400. DOI: 10.3390/geosciences9090400.
- [14] Lee J, Biemond B, de Swart H *et al.* Increasing risks of extreme salt intrusion events across European estuaries in a warming climate. *Communications Earth & Environment*, 2024, **5**(1): 1-7.
- [15] Wang Q, Lv ZZ, Sun J *et al.* Study on measures of saline water intrusion control to Pearl River Estuary based on water curtain method. *Water Resources Protection*, 2018, **34**(5): 50-56. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933. [王青, 吕紫君, 孙杰等. 基于水幕方法的珠江河口抑咸对策. 水资源保护, 2018, **34**(5): 50-56.]
- [16] Yang F, Chen WL, Lu C *et al.* Research on comprehensive prevention and control system of saltwater intrusion in the Guangdong-Hong Kong Macao Greater Bay Area. *Water Resources Protection*, 2023, **39**(1): 32-41. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.005. [杨芳, 陈文龙, 卢陈等. 粤港澳大湾区咸潮综合防控体系研究. 水资源保护, 2023, **39**(1): 32-41.]
- [17] Xu QX, Dong BJ, Yuan J *et al.* Scouring effect of the middle and lower reaches of the Yangtze River and its impact after the impoundment of the Three Gorges Project. *Journal of Lake Sciences*, 2023, **35**(2): 650-661. DOI:10.18307/2023.0221. [许全喜, 董炳江, 袁晶等. 三峡工程运用后长江中下游河道冲刷特征及其影响. 湖泊科学, 2023, **35**(2): 650-661.]
- [18] Wei XY, Zhu YL, Zhang W *et al.* Numerical Simulation of Salt Flux in Dry Season in the Pearl River Delta. *Tropical Geography*, 2012, **32**(2): 216-222. DOI:10.13284/j.cnki.rddl.001601. [危小艳, 褚裕良, 张蔚等. 珠江口枯季盐通量数值模拟研究. 热带地理, 2012, **32**(2): 216-222.]
- [19] Zou HZ, Tang Q, Zhang YY *et al.* Quantitative study on the effect of topographic changes on the saltwater intrusion in the Pearl River Estuary. *China Flood & Drought Management*, 2024, **34**(11): 56-61. DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2024354. [邹华志, 唐琦, 张艳艳等. 珠江河口地形变化对咸潮上溯影响的量化研究. 中国防汛抗旱, 2024, **34**(11): 56-61.]
- [20] Qiu W, Luan HL, Qu G *et al.* Impact of Emergent Water Supply of the Three Gorges Reservoir on Saltwater Intrusion in the

- Changjiang River Estuary in 2022. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2024, **41**(10): 30-39. DOI: 10.11988/ckyyb.20240616. [仇威, 栾华龙, 渠庚等. 三峡水库应急补水对 2022 年洪季长江口盐水入侵的影响. 长江科学院院报, 2024, **41**(10): 30-39.]
- [21] Zhao JC, Zhao SX, Zhao CZ et al. Database construction and extreme value analysis of tide level and tidal current in the coastal waters of China in the last 31 years. *Coastal Engineering*, 2021, **40**(3): 165-177. DOI:10.3969/j.issn.1002-3682.2021.03.001. [赵建春, 赵生校, 赵朝志等. 近 31 年中国近海潮位潮流数据库的建立及极值分析. 海岸工程, 2021, **40**(03): 165-177.]
- [22] Pan HC, Pang Y, Luo J et al. Influence of saltwater intrusion on water source land in downstream of Minjiang River based on EFDC. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2015, **26**(06): 71-76. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2015.06.13. [潘红澈, 逢勇, 罗缙等. 基于 EFDC 的咸潮上溯对闽江下游水源地的影响. 水资源与水工程学报, 2015, **26**(06): 71-76.]
- [23] Chen BY. The present situation and consideration of the comprehensive measures to trace the upstream going of the salt tide on the Min River and ensure the safety of water supply. *Hydraulic Science and Technology*, 2020, (1): 5-10. [陈奔月. 闽江咸潮上溯与保障供水安全综合措施的现状与思考. 水利科技, 2020(1): 5-10.]
- [24] LUO YH. Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of chloride concentration in the lower reaches of the Min River and its indicating significance. *Hydraulic Science and Technology*, 2020, (1): 11-14. [罗毅桦. 闽江下游河道含氯度时空分布特征分析及指示意义. 水利科技, 2020, (1): 11-14.]
- [25] Chen CS, Liu HD, Beardsley R C. An Unstructured Grid, Finite-Volume, Three-Dimensional, Primitive Equations Ocean Model: Application to Coastal Ocean and Estuaries. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, **20**(1): 159-186.