

刘培霖, 易晶晶, 邵檀, 等. 拦门沙历史演变对磨刀门咸潮上溯的影响[J]. 人民珠江, 2026, 47(3): 12-20.

拦门沙历史演变对磨刀门咸潮上溯的影响

刘培霖¹, 易晶晶², 邵檀², 刘丙军^{1,3*}

(1. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519085; 2. 广东省水文局佛山水文分局, 广东 佛山 528000; 3. 中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275)

摘要: 拦门沙是磨刀门河口的重要地貌单元, 其形态演变对咸潮上溯过程具有显著影响。基于 1990—2020 年的典型地形数据, 采用 FVCOM (Finite Volume Community Ocean Model) 模型定量评估拦门沙变化对盐水入侵过程的影响。结果表明: 在 1990 年地形条件下, 最大咸潮上溯距离为 46.77 km, 而至 2020 年, 随着拦门沙沙体的显著退化, 该距离增加至 57.79 km, 导致平岗供水厂水源点盐度超标持续时间由 38 h 延长至 99 h。拦门沙萎缩亦改变了底层盐水滞留时间的空间分布特征, 深槽区域平均延长 158 min, 而浅滩区域则平均减少至 261 min。沙体退化还显著影响河口内盐度水平, 尤其对平均盐度的响应更为敏感, 最大变化幅度达到 81%; 相比之下, 最高盐度主要受上游径流影响, 变化幅度相对较小。

关键词: 咸潮上溯; 拦门沙演变; FVCOM 模型; 磨刀门

中图分类号: TV21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-9235(2026)03-0012-09

珠江口是中国南方重要的河口系统, 兼具防洪、航运与取水水源地等多重功能^[1-3]。磨刀门是珠江水系的重要入海通道, 承接了大量淡水径流的排泄任务, 同时区域内取水口众多, 承担着中山、珠海和澳门等多个重要城市的供水任务。近年来, 该区域的水动力格局与泥沙输运过程发生显著改变, 诱发了河口地貌的持续演变, 尤以拦门沙形态调整最为显著^[4-5]。拦门沙是分布于河口或海湾口门处的重要水下沙洲, 通常由海洋动力或潮汐作用沉积形成。作为磨刀门河口外侧的典型地貌单元, 其形态演变对咸潮上溯过程、水动力结构及盐度分布格局具有重要调节作用^[6]。咸潮上溯是珠江口, 尤其是磨刀门口区, 面临的典型水环境问题, 常在枯水期表现最为剧烈^[7-8]。随着拦门沙的淤积与冲刷演变, 河口水动力结构随之发生重构, 可能导致咸潮入侵路径延伸与强度增强, 进而对沿岸城市供水安全、

水生态系统稳定性及河口管理工作带来严峻挑战^[9-10]。因此, 厘清拦门沙形态变化与咸潮上溯之间的响应关系, 对于科学制定咸潮防控策略、优化水资源调度机制与提升河口整治工程科学性具有重要意义。

目前相关研究多聚焦于咸潮上溯的水动力控制机制、气象水文因子的影响及三维盐度输运模拟等方面, 但对底床地貌特别是拦门沙在咸潮过程中的调控机制仍缺乏系统探讨^[11-12]。拦门沙因其特殊的地理位置与高程形态, 在削弱潮波能量、改变盐水上溯路径及调节潮-盐耦合机制中扮演关键角色, 其动态变化对咸潮传播过程的具体响应机制尚有待深入揭示。基于此, 以磨刀门河口为研究区域, 选取 1990、2010 与 2020 年 3 个典型时期的实测拦门沙地形数据, 结合三维数值模型 (Finite Volume Community Ocean Model, FVCOM) 开展咸潮上溯过

基金项目: 广东省水利科技创新项目 (2023-01); 国家重点研发计划项目 (2024YFC3212000)

收稿日期: 2025-07-24 修回日期: 2025-09-17 网络首发日期: 2025-10-31

作者简介: 刘培霖 (2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源分析。

通信作者: 刘丙军 (1976—), 男, 博士, 教授, 研究方向为水资源系统分析。

联系作者: 致信 rmzj@pearlwater.gov.cn, 由期刊转接。

程模拟分析,系统评估拦门沙形态演变对河口盐水入侵的响应机制。研究旨在揭示拦门沙地貌变化与咸潮过程之间的耦合关系,为河口地貌演化背景下的咸潮管理、水资源安全调度及河口整治工程设计提供科学依据与理论支撑。

1 研究方法

1.1 水动力盐度耦合模型构建与数据来源

本研究采用FVCOM对珠江河口的水动力与盐度过程进行三维数值模拟。FVCOM由美国麻省大学达特茅斯分校海洋科学与技术学院陈长胜团队

开发,是一种基于有限体积法、适用于自由表面的三维海洋数值模型,采用非结构三角形网格构建,具有灵活的网格分辨率调控能力,尤其适合岸线复杂、地形变化剧烈的河口及近岸区域的水动力模拟。该模型通过有限体积分形式离散控制方程,能够保持动量、盐度、质量、温度和热量等物理量的守恒,具备良好的边界拟合能力和通量计算精度,广泛应用于海湾与河口区域的水动力过程模拟研究^[13-15]。模型上游边界设于马口水文站,下游涵盖西江入海的4个口门(图1)。

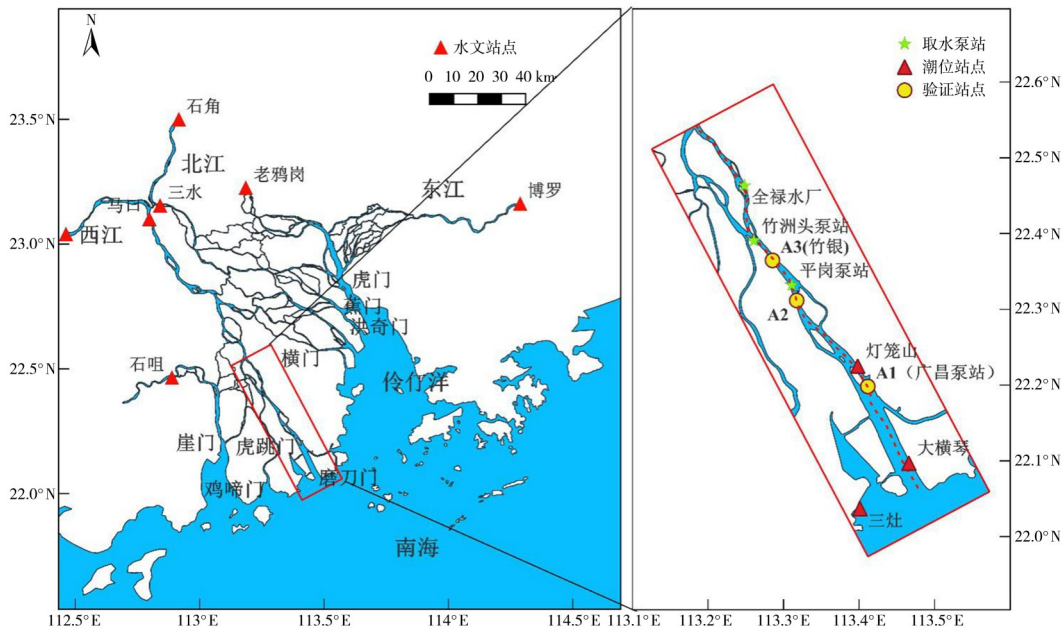


图1 珠江河口水文站点及取水泵站分布示意

Fig. 1 Schematic distribution of hydrological stations and intake pumping stations in the Pearl River Estuary

外海区域的水深数据来源于美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)提供的ETOPO1全球海底地形数据,网格分辨率从外海边界的约10 km逐步过渡至河网区域的约30 m(图2),以兼顾计算效率与近岸精度。河网水深则依据水文年鉴进行获取,并统一转换至相同的基准面。外海边界的潮汐强迫采用FES2014潮汐模型(该模型由法国空间测量研究中心和CLS公司联合开发,分辨率约为 $1/16^\circ$,可从AVISO数据门户下载)中34个调和常数进行叠加合成;风场强迫采用欧洲中期天气预报中心

(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的ERA5再分析数据,提取10 m高度、1 h分辨率的风速场,并插值至FVCOM网格节点;研究区的海洋初始盐度与温度场来自哥白尼海洋环境监测服务(Copernicus Marine Environment Monitoring Service, CMEMS)的观测与再分析数据,河道区域初始盐度根据珠江河口盐度分布特征进行经验设定,同时根据许陈澄、邹华志等^[16-17]的研究,模型在哥白尼观测资料设定的温盐场下运行2个月,河道内盐度达到充分混合状态,并将该状态作为模型的最终温盐场,底部摩擦层厚

度设置为 0.001 m,最小拖曳系数设定为 0.002 5。模型的水平涡动黏性系数设为 0.2,水平热扩散系数为 1.1;垂向涡动黏性系数设为 1.0×10^{-6} ,垂向热扩散系数为 1.0。计算时间步长为 3 s,计算时间从 2009 年 12 月 1—25 日。本次模型验证选取 2009 年

12 月 10—25 日为典型时段,根据《2009 年珠海市水资源公报》可知 2009 年后西江流域遭遇 70 年一遇的严重干旱,上游来水锐减,咸潮持续时间长,时段覆盖约一个完整的朔望潮周期(含大/小潮),该场咸潮事件具有代表性。

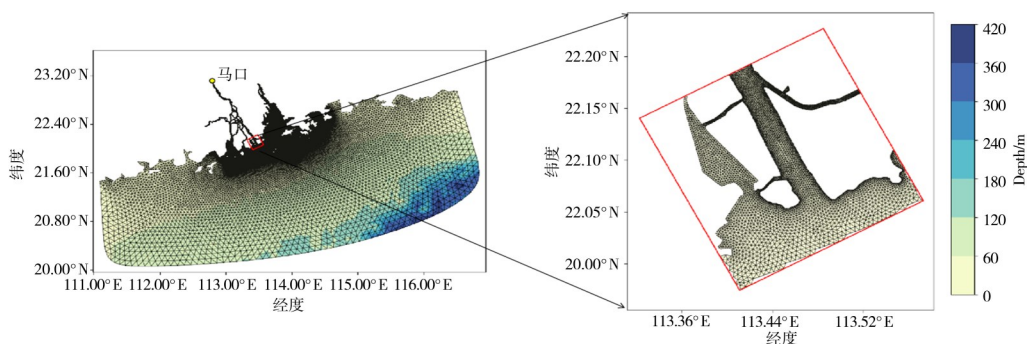


图2 珠江河口区 FVCOM 模型网格及地形

Fig. 2 Mesh and terrain of FVCOM in the Pearl River Estuary

1.2 模型验证

a)潮位验证。选取了大横琴站、灯笼山站、三灶站、竹银站的 2009 年 12 月 10—25 日逐时的实测潮位数据进行验证,这 4 个站点自口外至口内沿程分布,覆盖了磨刀门河口“外海—下游—中游”的典型水动力梯度,能够系统表征潮波由外海向内河传播过程中振幅逐级衰减与相位逐渐滞后的规律。

对于这几个潮位站点,模型模拟的潮位和实测潮位都表现了较好的一致性,在相位和振幅方面,模拟潮位和实测潮位都十分接近(图 3)。此外, RMSE (Root Mean Square Error)均小于 0.2,纳什系数均大于 0.85, Skill 值均大于 0.95,表明模拟潮位和实测潮位相符,说明模型较好地反映了磨刀门的潮汐变化过程,具有较高的模拟精度。

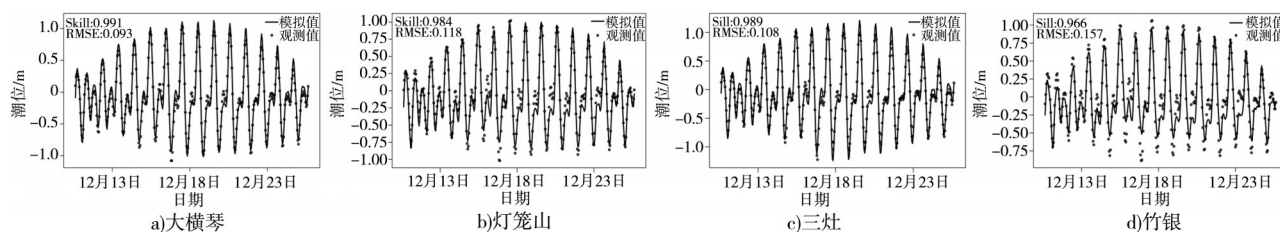


图3 磨刀门水道观测站点潮位过程验证

Fig. 3 Tide level verification of monitoring stations in the Modaomen Waterway

b)流速验证。将模型盐度结果与实测资料中 A1 和 A3 站点(图 1)的逐小时流速进行比较, A1 位于口门下游近口段,受外海潮汐与盐度边界信号控制显著; A3 位于中游取水口附近,是咸潮上溯影响最敏感的控制断面之一。两站沿主输运通道构成“口外边界—内河响应”的一对代表性监测点,结果表明流速流向的实测值和模拟值之间拟合较好, Skill 值均大于 0.75,符合研究需要(图 4)。

c)模型盐度验证。将模型盐度结果与实测资料中 A1 和 A3 站点的逐小时盐度进行比较。这两站均紧邻磨刀门区域的取水泵站,验证结果可直接反映工程管理关切(如超标时段与峰值)的模拟可靠性,结果见图 5,实测盐度与模拟盐度呈现出较为一致的变化趋势,表明模型成功地捕捉了盐度随潮位变化的过程,2 个站点的 Skill 值满足了 0.75 以上要求。

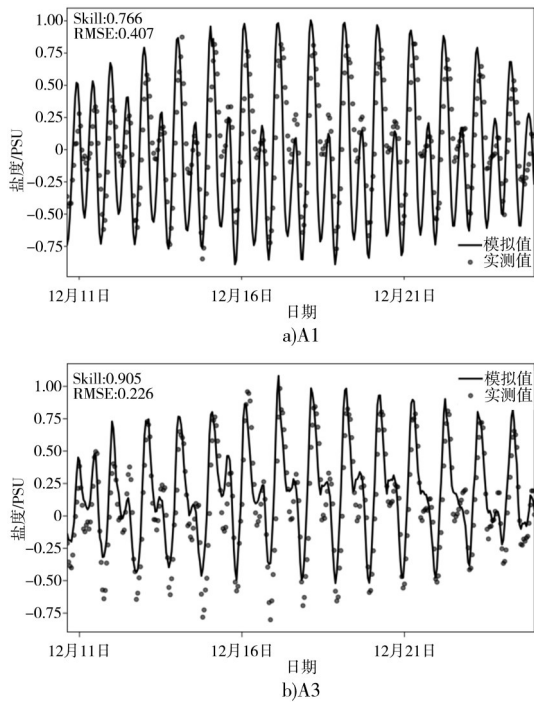


图 4 磨刀门水道观测站点流速过程验证

Fig. 4 Velocity verification of monitoring stations in the Modaomen Waterway

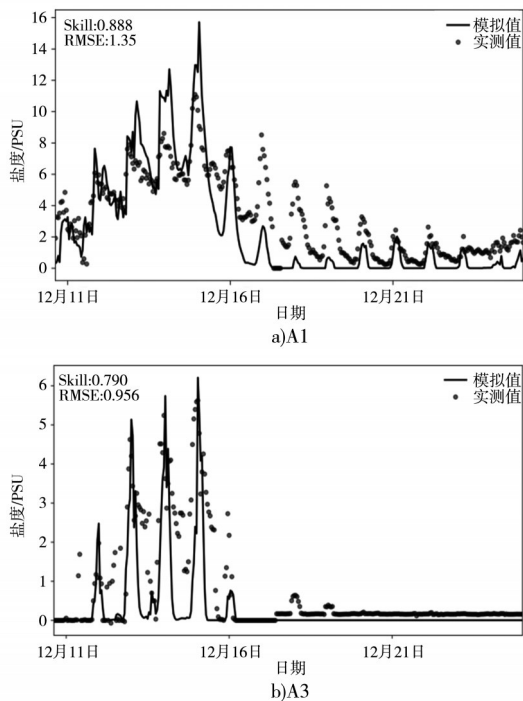


图 5 磨刀门水道观测站点盐度过程验证

Fig. 5 Salinity validation of monitoring stations in the Modaomen Waterway

2 结果分析

2.1 拦门沙演变特征

拦门沙是河口动力作用下泥沙堆积形成的重要地貌单元,其形态与规模的演变对河口水动力结构及盐水入侵路径具有显著调控作用。1990年,磨刀门入海口区域主要由零散分布的浅沙坝组成,整体地形相对较高,尚未发育出明显的通道结构。该阶段拦门沙区域的平均水深为 3.62 m,最大水深为 6.36 m,水深超过 5 m 的区域面积占比仅为 5.21%。至 2010 年,受潮汐能增强及上游大洪水^[18]等因素影响,该区域逐步演化为具有明显东西向分汊特征的通道系统,平均水深增至 4.15 m,最大水深达 9.46 m,水深大于 5 m 的面积显著增加至 23.45%。分汊通道的形成使得潮流能在通道内部增强,导致局部冲刷加剧,总体向西南方向发育^[19]。进入 2020 年,伴随水动力条件与泥沙输运格局的进一步调整,分汊通道趋于收敛,中部区域发生显著淤积,最终演变为以主通道为主的单一入海通道格局。尽管区域平均水深进一步上升至 4.25 m,但最大水深略有下降至 6.75 m,水深超过 5 m 的区域比例亦回落至 18.54%。上述变化反映出河口区域在长期动力调节下呈现出通道趋于集中的演化趋势,该过程有利于提升水体交换通畅性,但也可能加剧单一通道路径的盐水上溯。基于此,在保持径流、潮汐和风场等驱动要素条件不变的情况下,选取 1990、2010 和 2020 年地形数据,作为磨刀门拦门沙演变过程的典型代表情景,用于后续模拟分析(图 6)。

2.2 拦门沙对咸潮上溯距离的影响

研究表明,在 1990 年地貌条件下,拦门沙发挥了显著的屏障作用,最大咸潮入侵距离为 46.77 km,2010 年为 56.26 km,增加了 9.49 km,增幅达 20%(表 1)。该结果说明拦门沙在有效抑制盐水上溯、降低海水倒灌风险方面具有重要功能,从而在一定程度上保护了上游水源安全及农业灌溉系统。然而,随着拦门沙形态的逐步退化,其屏障功能明显减弱。2020 年最大咸潮入侵距离上升至 57.79 km,较 1990 年增加 10.94 km,增幅为 23%,反

映出地貌阻隔能力呈持续衰退趋势。平均咸潮入侵距离的变化进一步印证了该趋势:2010年的平均入侵距离较1990年增加6.98 km(增幅20%),而2020年较2010年增加2.78 km(增幅约7%)。这一变化表明,拦门沙退化不仅扩大了咸潮的影响范

围,也增强了其空间变异性。入侵过程中的盐度梯度趋于平缓,给传统防咸工程带来更大挑战。因此,需结合河口演变特征,构建更具适应性的动态化防咸管理策略。

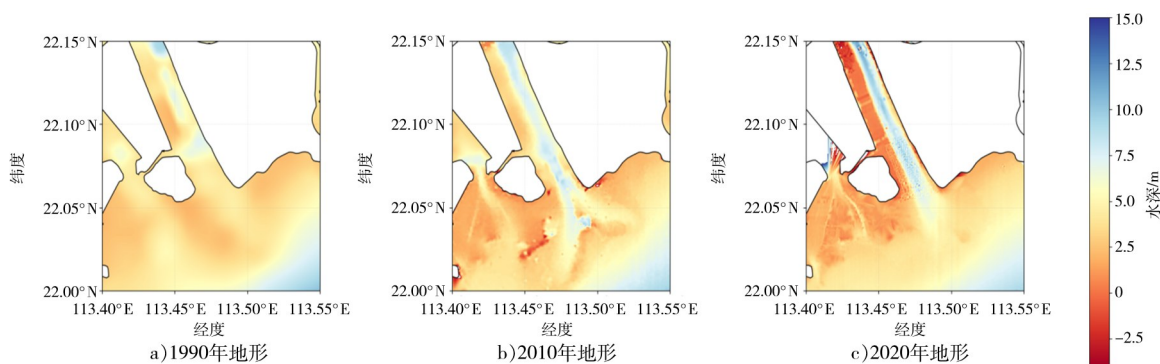


图6 拦门沙自然演变下河床水深分布

Fig. 6 Distribution of riverbed bathymetry under natural evolution of mouth bar

表1 磨刀门水道不同拦门沙地形下咸潮上溯距离情况

Tab. 1 Saltwater intrusion distance under different mouth bar terrains in the Modaomen Waterway

单位: km

地形条件对应年份	平均咸潮上溯距离	最远咸潮上溯距离
1990	33.98	46.77
2010	40.95	56.26
2020	43.73	57.79

2.3 拦门沙对取水泵站不可取水时间的影响

咸潮入侵对河口水质的影响不仅体现在空间分布范围的扩大,更表现为高盐浓度状态持续时间的延长,从而对区域水资源保障构成长期压力。依据GB 5749—2022《生活饮用水卫生标准》,当水体盐度超过0.5 PSU时,即不再符合饮用水水质要求,需通过调水等工程手段予以干预。数值模拟结果表明,拦门沙地貌演变对咸潮入侵过程具有关键性调控作用。1990年,拦门沙高程相对较高,具有明显的水力屏障功能,显著缩短了各取水泵站盐度超标的持续时间。然而,随着拦门沙退化,其阻潮能力显著减弱。尤其在2010年和2020年期间,拦门沙地形发生显著变化,入侵通道由受限格局逐渐演

化为半开放甚至开放状态。至2020年,拦门沙区域出现约4 m深的冲刷沟,形成“快速通道”,显著增强了咸潮上溯的强度。对比分析发现,2020年相较于1990年,多处取水泵站的盐度超标持续时间分别延长了61、36和20 h(表2),特别值得注意的是全禄水厂在拦门沙逐渐萎缩后出现了超标情况并且随着萎缩加剧而加剧,在初步萎缩后还受到了咸潮影响。上述变化表明,拦门沙退化削弱了对高盐水团的削峰与滞后能力,并加强了盐水在河口区域的空间扩散路径和梯度传播效应。

表2 磨刀门水道取水泵站不可取水时间变化情况

Tab. 2 Variations in unpumpable periods at intake pumping stations in the Modaomen Waterway

单位: h

地形条件对应年份	平岗泵站	竹洲头泵站	全禄水厂
1990	38	12	0
2010	71	30	12
2020	99	48	20

2.4 拦门沙对河口底部高盐水滞留时间影响

为评估拦门沙地貌变化对咸潮上溯过程及底

层高盐水时空分布特征的影响,本文选取拦门沙至大横琴水域作为重点分析区段。该区域显著受拦门沙地形控制,特别是在底层高盐水的输运与滞留过程中,表现出明显的水动力与盐动力耦合特征。模拟结果显示,在1990年拦门沙高程较高的地形条件下,落潮期间底层盐水的排泄路径和速度受到显著阻滞,导致盐水滞留时间延长。自拦门沙区域至主航道深槽底部,咸水整体滞留时间增加,1990年相较于2010年平均滞留时间延长约121 min(图7a),相较于2020年平均滞留时间增加158 min;1990年相较于2010年最大增幅为257 min,相较于2020年最大增幅达331 min(图7b),尤其在深槽中后段的增幅更为显著。该现象主要归因于拦门沙高程升高后,口内高密度底层水在穿越拦门沙内坡—顶梁时,受到由盐度分层引起的密度驱动压强差以及拦门沙地形导致的水流收缩与紊动效应的共同作用^[20-22]。在这种机制下,底层高盐水在落潮

过程中难以顺利外排,在落潮期于底层形成明显的“盐水滞留带”,即高盐水受地形阻挡难以有效排出而产生滞留现象。

在空间分布特征方面,底层盐水滞留时间沿主航道深槽呈现逐渐增强趋势,表现出明显的轴向延伸特征,说明拦门沙通过水动力与盐度梯度的耦合机制,其影响可向中上游传递。同时,深槽内存在的局部沙坑与冲刷洼地由于水动力交换能力弱,成为高盐水易于积聚的区域,进一步加剧了盐水滞留效应,相较于2020年局部滞留时间在300 min以上,见图7b的深红色区域。相对而言,右岸浅滩区域在拦门沙高程抬升后,由于盐水入侵路径的调整,底层高盐水主要沿深槽轴线输运,横向向浅滩扩散的能力减弱,从而显著缩短了浅滩区域的盐水滞留时间。其中,平均滞留时间减少约261 min,局部区域滞留时间减少幅度超过400 min。

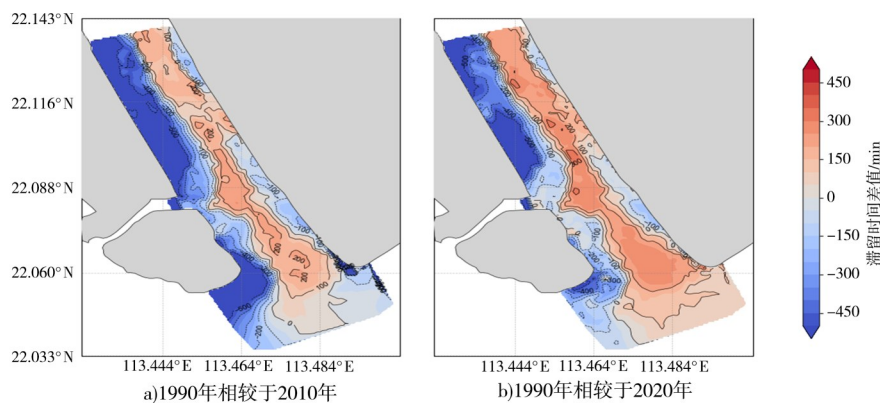


图7 拦门沙抬高后底部高盐水滞留时间差值分布

Fig. 7 Distribution of difference in retention time of high saline water at bottom after elevation of mouth bar

2.5 拦门沙对河口盐度变化的影响

表3中,在拦门沙高程较高的条件下(1990年),各典型断面盐度显著下降:A1点平均盐度较对比情形降低52%,最高盐度下降39%;A2点平均盐度降低76%,最高盐度降低71%;A3点平均盐度下降56%,最高盐度下降幅度达81%。反之,在拦门沙明显退化的条件下,断面盐度普遍升高:A1点平均盐度增加16%,最高盐度上升14%;A2点平均盐度上升37%,最高盐度上升18%;A3点平均盐度上升

57%,最高盐度上升6%。这一结果表明,拦门沙高程的抬升能够有效削弱高盐水团的上溯过程,从而降低河道内盐度水平。盐度减幅沿河道从下游至上游逐渐增加,直至上游受径流主导的区域,盐度变化受控于地表径流的稀释作用,减幅趋缓。相应地,在拦门沙发生萎缩的情形下,河口区域对高盐水入侵的屏障作用显著减弱,导致整体盐度上升,且增幅沿河道向上游逐渐增强。从响应程度来看,拦门沙形态变化对平均盐度的影响尤为显著,且不

同断面对地貌变化的响应存在差异。相比之下,对最高盐度的影响则表现出一定区域性特征:拦门沙抬升可有效降低咸潮过程中的极值盐度,最高降幅可达81%;而拦门沙萎缩对极值盐度的增幅相对有限,在径流控制较强的上游区域,最高盐度变化幅度仅为18%。

表3 磨刀门水道沿线站点盐度变化

Tab. 3 Salinity variations of monitoring stations along the Modaomen Waterway

单位:PSU

站点	分布值	1990拦门沙	2010拦门沙	2020拦门沙
A1	平均盐度	5.01	9.80	11.39
	最高盐度	11.02	17.44	19.92
A2	平均盐度	0.79	3.01	4.13
	最高盐度	3.28	10.49	12.35
A3	平均盐度	0.65	1.10	1.73
	最高盐度	1.62	7.57	7.99

3 讨论

拦门沙由“浅滩—分汊—单槽”的三阶段演化,重塑了盐度输运的主通道与交换效率。综合既有研究与本文结果可知:在拦门沙萎缩后,外海高盐水沿深槽向陆推进更顺畅,进入盐通量增加,从而造成咸潮上溯加剧^[20,23]。这与口门拦门沙抬升能抑制咸潮入侵、加深会强化咸潮入侵的结论相一致。观测与数值结果亦表明:涨潮阶段口门外盐水楔更易受拦门沙“门槛”限制,而落潮阶段上游近底高盐水团可滞留于拦门沙内坡一侧,体现了地形对近底盐层的滞留效应^[10]。此外,Gong、Simpson等^[6,24]的研究也表明拦门沙存在与“深槽—浅滩”几何耦合会加剧横向环流并强化深槽侧近底向陆流,促使底层高盐水滞留。

4 结论

本研究基于FVCOM数值模型,结合1990—2020年不同时期的实测河道地形数据,系统评估了磨刀门河口拦门沙地貌演变对珠江三角洲区域盐

水入侵过程的影响。通过高精度的模型率定与验证,结果表明该模型能够较准确地模拟枯水期河口盐度分布及其时空演变特征,主要研究结论如下。

a)1990—2020年,拦门沙形态经历由零散浅沙坝向分汊通道再向单一主通道的演变过程,平均水深总体增加,最终达4.25 m。

b)1990—2020年,拦门沙屏障作用持续减弱,最大咸潮入侵距离由46.77 km增至57.79 km,平均入侵距离由1990年的33.98 km增加至2020年的43.73 km。

c)拦门沙退化导致入侵通道由受限向开放转变,形成约4 m深“快速通道”,显著延长主要取水泵站盐度超标持续时间,2020年相较于1990年,3个主要取水泵站不可取水时间分别增加了61、36、20 h。

d)拦门沙高程变化对底层盐水滞留格局具有非均质响应。在拦门沙抬升条件下,主航道深槽区域高盐水滞留增强,1990年地形条件相较于2020年平均滞留时间延长约158 min;而浅滩区域水体交换增强,1990年地形条件相较于2020年滞留时间平均减少约261 min,形成显著的空间分异特征。这种变化进一步影响河口混合—分层结构及盐度调节机制。

e)不同地貌条件下,河口各断面盐度响应存在显著差异。拦门沙高程抬升可显著降低河道盐度,平均降幅52%~76%,最高降幅达81%;退化则使平均盐度上升16%~57%,最高增幅达18%。综上,在不影响通航与行洪安全的前提下,保持或适度恢复拦门沙的地貌完整性有助于减轻枯季咸潮上溯。

参考文献:

- [1] 张建新,龙启柏. 非凡十年,看珠江黄金水道建设巨变[J]. 珠江水运,2022(20): 4-7.
ZHANG J L, LONG Q B. Extraordinary decade: great changes in the construction of the Pearl River Golden Waterway [J]. Pearl River Water Transport, 2022(20): 4-7. (in Chinese)
- [2] 蒋翼. 新阶段珠江流域防洪安全体系构建的思考与认识[J]. 中国水利,2025(1): 21-26.
JIANG Y. Thoughts and insights on constructing the flood control

- system for the Pearl River basin in the new stage [J]. *China Water Resources*, 2025(1): 21–26. (in Chinese)
- [3] 靳高阳,朱三华,曹一豪. 西北江三角洲河床变化对咸潮上溯影响的数值模拟研究[J]. *人民珠江*, 2024, 45(3): 89–98.
JIN G Y, ZHU S H, CAO Y H. Numerical simulation study on influence of riverbed changes on saltwater intrusion in northwest river delta [J]. *Pearl River*, 2024, 45(3): 89–98. (in Chinese)
- [4] LIU C J, YU M H, JIA L W, et al. Impacts of physical alterations on salt transport during the dry season in the Modaomen Estuary, Pearl River Delta, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 227. DOI: 10.1016/j.ecss.2019.106345.
- [5] CHEN C P, TIAN B, SCHWARZ C, et al. Quantifying delta channel network changes with Landsat time-series data [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 600. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126688.
- [6] GONG W P, ZHANG G, ZHANG H, et al. The effects of mouth bar on salt intrusion in a partially mixed estuary [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 612. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128261.
- [7] HOITINK A J F, JAY D A. Tidal river dynamics: Implications for deltas [J]. *Reviews of Geophysics*, 2016, 54(1): 240–272.
- [8] 许景锋,谭超,秦民,等. 粤港澳大湾区供水安全保障的思考[J]. *水利规划与设计*, 2025(5): 18–22.
XU J F, TAN C, QIN M, et al. Reflections on ensuring water supply security in the Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2025(5): 18–22. (in Chinese)
- [9] 朱泽文,刘丙军. 珠江河口拦门沙演变对咸潮上溯的影响[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(11): 48–51, 101.
ZHU Z W, LIU B J. Research on the Influence of Evolution of Sand Bar in the Pearl River Estuary on Saltwater Intrusion [J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(11): 48–51, 101. (in Chinese)
- [10] 陈文龙,邹华志,董延军. 磨刀门水道咸潮上溯动力特性分析[J]. *水科学进展*, 2014, 25(5): 713–723.
CHEN W L, ZOU H Z, DONG Y J. Hydrodynamic of saltwater intrusion in the Modaomen waterway [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(5): 713–723. (in Chinese)
- [11] YANG H, ZHANG X Y, CAI H Y, et al. Seasonal changes in river–tide dynamics in a highly human–modified estuary: Modaomen Estuary case study [J]. *Marine Geology*, 2020, 427. DOI: 10.1016/j.margeo.2020.106273.
- [12] HE W, ZHOU H X, ZHANG J, et al. Combined effects of runoff increase and sea level rise on the water exchange and saltwater intrusion for an estuary bay in non-flood season [J]. *Hydrological Processes*, 2022, 36(12). DOI: 10.1002/hyp.14727.
- [13] WANG N, GE J Z. Predictions of saltwater intrusion in the Changjiang estuary: Integrating machine learning methods with FVCOM [J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 653. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2025.132739.
- [14] TIAN R. Factors controlling saltwater intrusion across multi–time scales in estuaries, chester river, chesapeake bay [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 223: 61–73.
- [15] 林中原,唐琦,王凤恩,等. 特枯水年珠江流域东江三角洲压咸调度预演与策略[J]. *人民珠江*, 2024, 45(7): 58–66.
LIN Z Y, TANG Q, WANG F E, et al. Simulation and strategy for salinity control scheduling in Dongjiang delta of Pearl River Basin in severe drought year [J]. *Pearl River*, 2024, 45(7): 58–66. (in Chinese)
- [16] 许陈澄,诸裕良,齐庆辉. 磨刀门航道整治工程对咸潮上溯的影响[J]. *水运工程*, 2013(2): 99–106.
XU C C, ZHU Y L, QI Q H. Impact of waterway regulation engineering on saltwater intrusion in Modaomen estuary [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2013(2): 99–106. (in Chinese)
- [17] 邹华志. 河网、河口及海岸整体联解数值模式及其在珠江口咸潮上溯研究的应用[D]. 青岛:中国海洋大学, 2010.
ZOU H Z. A river network–estuary coupled numerical modeling system and its application on Pearl River Estuary [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010. (in Chinese)
- [18] 谭超,黄广灵,黄本胜,等. 典型大洪水下珠江磨刀门河口拦门沙演变模式研究[J]. *水电能源科学*, 2024, 42(5): 92–95.
TAN C, HUANG G L, HUANG B S, et al. Pattern analysis of the sand bar evolution during the typical flood at the Modaomen estuary of the Pearl River [J]. *Water Resources and Power*, 2024, 42(5): 92–95. (in Chinese)
- [19] 袁菲,胡晓张,卢陈,等. 磨刀门河口演变趋势与治理保护对策研究[J]. *泥沙研究*, 2025, 50(3): 50–57.
YUAN F, HU X Z, LU C, et al. Study on evolution trends and the management and protection strategies for the Modaomen Estuary [J]. *Journal of Sediment Research*, 2025, 50(3): 50–57. (in Chinese)
- [20] RALSTON D K, GEYER W R. Response to channel deepening of the salinity intrusion, estuarine circulation, and stratification in an urbanized estuary [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(7): 4784–4802.
- [21] BO T, RALSTON D K, GARCIA A M P, et al. Tidal intrusion fronts, surface convergence, and mixing in an estuary with complex topography [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2024, 54(3): 653–677.

- [22] GEYER W R. Estuarine salinity structure and circulation [M]// Contemporary Issues in Estuarine Physics, Cambridge: Cambridge University Press, 2010: 12–26.
- [23] 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[J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(11): 56–61.
- ZOU H Z, TANG Q, ZHANG Y Y, et al. Quantitative study on the effect of topographic changes on the saltwater intrusion in the Pearl River Estuary [J]. China Flood & Drought Management, 2024, 34(11): 56–61. (in Chinese)
- [24] SIMPSON J H, WILLIAMS E, BRASSEUR L H, et al. The impact of tidal straining on the cycle of turbulence in a partially stratified estuary [J]. Continental Shelf Research, 2005, 25(1): 51–64.

Impact of Historical Evolution of Mouth Bar on Saltwater Intrusion in the Modaomen Estuary

LIU Peilin¹, YI Jingjing², SHAO Tan², LIU Bingjun^{1,3*}

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519085, China; 2. Guangdong Provincial Hydrological Bureau, Foshan Hydrological Sub-bureau, Foshan 528000, China; 3. Research Center for Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The mouth bar is a critical geomorphic unit in the Modaomen Estuary, playing a significant role in modulating saltwater intrusion and influencing both estuarine dynamics and regional water security. With the continuous changes in river discharge, tidal dynamics, and human interventions, the evolution of the mouth bar has become a central issue in understanding salinity processes in the Pearl River Estuary. Despite its importance, limited quantitative research has been conducted to evaluate the long-term impacts of mouth bar evolution on saltwater intrusion. Based on representative bathymetric data spanning from 1990 to 2020, this study employed the finite-volume community ocean model (FVCOM), which is well known for its unstructured grid and high-resolution simulation capabilities, to quantitatively assess how morphological changes in the mouth bar affect the intensity, distance, and duration of saltwater intrusion. The model was carefully calibrated and validated using observed hydrological and salinity data, ensuring reliability in capturing the complex interactions between hydrodynamics, sediment dynamics, and salinity transport. Results indicate that in 1990, when the mouth bar remained relatively elevated and intact, the maximum intrusion distance was restricted to 46.77 km. By contrast, in 2020, bar degradation and shrinkage led to a significant increase in intrusion distance, reaching 57.79 km. This morphological decline also extended the duration during which surface salinity exceeded the drinking water standard (0.5 PSU) at the Pinggang water intake site, rising from 38 to 99 hours. Such an increase represents a substantial threat to the reliability and safety of regional water supply systems. Furthermore, the shrinkage of the mouth bar altered the spatial and temporal distribution of salinity retention. Specifically, the average duration of bottom-salinity retention in the deep channel increased by approximately 158 minutes, while that in the adjacent shoal areas decreased by about 261 minutes. These contrasting patterns highlight how morphological degradation intensifies saltwater intrusion and redistributes salinity stress across different estuarine sub-regions. The degradation of the sand body further exerted a strong influence on the salinity regime within the estuary, particularly in terms of mean salinity, which exhibited a maximum variation of up to 81%. In comparison, peak salinity levels were shown to be primarily controlled by upstream river discharge, and their variability remained relatively limited. This distinction emphasizes the dual controls of morphology and hydrology on estuarine salinity processes. Overall, this research demonstrates that the long-term evolution of the mouth bar has profound implications for saltwater intrusion dynamics in the Modaomen Estuary. The findings enrich the scientific understanding of estuarine geomorphic-hydrodynamic interactions and provide critical insights for water resources management, salinity control dispatching, and ecological protection in the Pearl River Delta. These results highlight the necessity of incorporating morphological evolution into future estuarine management strategies, particularly under the combined pressures of climate change and human development.

Keywords: saltwater intrusion; mouth bar evolution; FVCOM; Modaomen Estuary

(责任编辑:李燕珊)