J. Lake Sci.(湖泊科学),2026,38(6):000-000
DOI 10.18307/2026.0626
©2026 by *Journal of Lake Sciences*

上游水利工程对咸潮河口水环境的影响模拟：以福建泉州白濑水利枢纽为例*

王立武[1**]，陈新林[2]
（1：福建省水利水电勘测设计研究院有限公司，福建省水动力与水工程重点实验室，福州 350001）
（2：中山大学地理科学与规划学院，广州 510006）

摘 要：河口区是陆海相互作用最为活跃的区域之一，其水动力过程与盐度分布受上游径流调控、潮汐作用及人类水利工程影响显著。位于中国东南沿海的晋江流域，其河口区域的水环境安全对支撑泉州市的社会经济发展与维持泉州湾河口湿地生态系统的健康至关重要。泉州白濑水利枢纽工程建成运行后，将通过优化流域水资源配置、提升金鸡拦河闸的供水保障能力，导致坝下河道下泄流量的减少。为分析工程对河口水环境的影响，本文基于 MIKE21 构建了晋江河口平面二维非稳态水环境数学模型，对白濑建库前后的河口潮流场、盐度上溯距离及沿程变化、冲淡水区域进行模拟。结果表明，建库后金鸡闸下泄流量最大减少 53.4%，建库前后晋江河口及近岸海域的涨落潮流场基本形态未发生变化；晋江河口咸潮上溯距离最大增量为 0.66km，变化较为明显的区域主要集中在晋江河口上游 2.6~12.3km，盐度变幅基本在 3.4‰以下；泉州湾河口湿地自然保护区实验区冲淡水面积最大减少 3.4%，而核心区及缓冲区冲淡水面积模拟无变化。本研究成果不仅能够为晋江河口水环境的精准保护与适应性管理提供关键的科学依据和决策支持，也可为我国东南沿海其他受咸潮威胁的河口区域，在协调水资源开发与河口生态环境保护方面提供有价值的案例借鉴和模拟分析范式。
关键词：MIKE21 模型；白濑水利枢纽工程；泉州湾；盐度；潮流场

Impacts Simulation of Upstream Hydraulic Projects on Salt-Tide Estuarine Water Environment: Evidence from Bailai Water Hub, Quanzhou, Fujian

Wang Liwu[1**], Chen Xinlin[2]
（*1: Fujian Provincial Investigation, Design & Research Institute of Water Conservancy & Hydropower Co.,Ltd，Fuzhou,350001,P.R.China；Fujian Provincial Key Laboratory of Hydrodynamics and Water Engineering，Fuzhou,350001,P..R.China;*
2: School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510006，P.R.China）

Abstract: Estuaries are key zones where land and ocean interact intensely. In such systems, hydrodynamic processes and salinity distribution are strongly influenced by upstream runoff regulation, tidal dynamics, and human-made hydraulic structures. The Jinjiang River Basin lies along the southeast coast of China. The water quality and ecological conditions in its estuary are critical to the socioeconomic development of Quanzhou City and the health of the Quanzhou Bay Estuarine Wetland Ecosystem. After the Bailai Water Hub became operational, the optimized water allocation and increased supply capacity of

* 2026-01-27 收稿；2026-04-27 收修改稿。
*通信作者；E-mail：385706440@qq.com

the Jinji Barrage have led to reduced downstream discharges. To assess the resulting effects on the estuarine water environment, we developed a two-dimensional horizontal unsteady numerical model using the MIKE21 platform. We simulated and compared tidal current fields, upstream saltwater intrusion distance, longitudinal salinity patterns, and freshwater dilution areas under pre-project and post-project conditions. Model results indicate that the maximum discharge reduction at the Jinji Barrage reaches 53.4% after impoundment, while the overall flood and ebb tidal current patterns in the estuary and adjacent coastal waters remain largely unchanged. The saltwater intrusion distance increases by up to 0.66 km. Noticeable salinity changes occur in the river reach 2.6–12.3 km upstream of the estuary mouth, with most salinity variations below 3.4‰. In the experimental zone of the Quanzhou Bay Estuarine Wetland National Nature Reserve, the freshwater dilution area decreases by up to 3.4%, whereas no detectable change is observed in the core and buffer zones. This work provides foundational scientific information and decision support for targeted protection and adaptive management of the Jinjiang Estuary. It also offers a transferable modeling framework and a practical case reference for other estuaries in southeast China facing similar challenges in balancing water resource development with estuarine conservation under tidal and saltwater influences.
Key words: MIKE21; Bailai Water Hub; Quanzhou Bay; Numerical simulation; Salinity; Tidal current field

河口区是陆海相互作用最为活跃的区域之一，其水动力过程与盐度分布直接受上游径流调控、潮汐作用及人类水利工程影响[1, 2]。在我国东南沿海地区，从浙江、福建到广东、广西，受季风气候和人口集聚影响，沿海河流普遍面临人均水资源量偏低、枯水期径流不足及咸潮入侵频发等问题[3]。随着流域内水库、水闸等工程的密集建设，上游径流过程发生改变，河口淡咸水动力平衡受到扰动，进而可能对供水安全和河口生态系统稳定性产生影响。因此，定量评估水资源开发背景下河口咸潮响应机制，是当前河口水环境研究与水资源管理中的重要科学问题之一[3-5]。

而采用水环境模型模拟探究水利工程对下游水环境的影响一直是工程建设前所关心的重点问题，也是当前水文学与水资源管理领域的重要研究手段[6]。随着全球水资源开发强度的增加，水利工程（如水库、闸坝等）在防洪、发电、供水等方面发挥重要作用的同时，也显著改变了自然水文过程，导致下游水流情势、泥沙输移、水温分层及污染物扩散等水环境要素发生复杂变化，进而影响生态系统稳定性和水资源可持续利用[7, 8]。水环境模型在过去的数十年间得到了长足的发展，例如：Delft-3D 的二维与三维水动力—水质耦合模拟被广泛应用于河口及库区水动力结构与盐度、污染物扩散过程分析[9]；EFDC 因其较强的三维水动力与水质耦合能力，在风、浪、潮、径流及富营养化过程研究中得到广泛应用[10]；WASP 则常与水动力模型耦合，用于模拟溶解氧、营养盐及有机物转化过程[11]；QUAL 等一维河流水质模型在河道型水利工程影响评价中也具有一定适用性[12]。综合既有研究成果，水利工程对水环境的影响主要体现在改变径流时空分配格局[13]，削弱洪峰、延长枯水期，从而影响下游生态需水过程；影响泥沙与污染物的输移转化过程[14]，改变营养盐滞留时间和扩散路径；并通过调度运行改变水动力条件，影响藻类生长及水体富营养化风险。但上述模型仍面临多物理场耦合能力不足、复杂地形适应性有限等挑战，对水库内多尺度交互过程的整合分析仍有不充分[15]。此外，现有研究多基于水动力模型开展模拟分析，重点关注盐度分布、临界径流及极端咸潮过程的动力机制，但对于中小尺度强潮河口在水资源配置型工程背景下的盐度空间响应特征及生态分区影响，仍缺乏系统量化研究。

MIKE 模型具有机理清晰、耦合性强、适应复杂场景的特点，在水生态环境变化、河口海湾模拟、河道洪水演进、水库调度等领域取得显著进展，弥补了常用模型对多物理场耦合能力不足、复杂地形适应性有限和空间异质性表征能力等不足[16, 17]。MIKE 模型以模块化架构为核心，支持水动力（HD）、泥沙输移（MT）、水质（AD）和生态动力学（ECO Lab）等模块的耦合模拟[6]。该耦合机制能够在保持质量守恒与动量守恒约束条件下，刻画氨氮[18]、COD[19] 等水质指标在非恒定流条件下的时空演化特征，并可拓展至盐度、水温等标量输运过程[20-22]。此外，MIKE21 能支持高分辨率地形网格和分布式参数输入，能够量化水利工程引起的下游河道形态变化[23]、污染物浓度梯度分布等非均质效应[24]，其二维/三维建模能力可有效表征水库垂向分层与水平环流特征[25, 26]，为解析水利工程环境影响机理、优化工程设计提供计算方法支撑[27]。在本研究所涉及的复杂库区地形、多情景调度及水动力—水质同步耦合需求背景

下，模型的一体化计算框架与工程稳定性成为关键选型因素。因此，本研究基于数值稳定性、网格适应能力及多模块协同效率等方法学考虑，选用 MIKE 模型开展后续模拟分析。

泉州市作为福建省重要中心城市及“一带一路”核心区[28]，面临沿海区域人均水资源严重短缺与现有水利设施调控能力不足的双重制约，其水资源供需矛盾在东南沿海地区具有一定代表性。晋江流域承担着泉州市主要供水功能，但受制于山美水库调控能力有限，枯水期来水不足问题突出。拟建的白濑水利枢纽通过东西溪联合调度，可在一定程度上提升区域供水保障能力，但其建成运行后，下游金鸡拦河闸下泄流量及过程可能发生变化，从而影响晋江河口及泉州湾区域的水动力条件与盐度分布格局。晋江河口分布有红树林、滨海湿地等典型河口生态系统，是多种珍稀濒危物种及候鸟的重要栖息地，为中华白海豚、勺嘴鹬等多种珍稀濒危物种提供了栖息、繁衍的核心场所，更是东亚-澳大利西亚候鸟迁徙路线上的关键补给驿站，保护该生态系统对维护区域乃至全球生物多样性、保障珍稀物种种群存续具有不可替代的核心生态价值，而其对盐度变化具有较高敏感性[29]。泉州湾属于强潮河口，潮差大、潮流流速高，强潮流的紊动剪切作用会显著增强垂向混合效应，垂向分布趋于均匀。在此背景下，本文以晋江河口—泉州湾为研究对象，基于 MIKE21 平面二维非稳态水动力—盐度模型，模拟分析白濑水库建成后金鸡闸下泄水量变化对河口水动力结构及盐度分布的影响，重点探讨工程运行条件下咸潮上溯特征及其潜在生态响应。研究结果不仅可为白濑水库工程调度与晋江河口生态保护提供科学依据，也可为我国东南沿海其他受咸潮影响河流的水资源开发与河口环境管理提供借鉴。

1 平面二维非稳态水环境

1.1 控制方程

1.1.1 水动力模型基本方程 平面二维水动力模型是基于三向不可压缩和 Reynolds 值均布的浅水方程，并服从于 Boussinesq 假定和静水压力的假定[30]。

方程中 C_z 谢才系数按曼宁公式计算，取值范围在 0.008~0.02；A_m 水平涡动粘滞系数采用 Smagorinsky 公式，取值 0.1m²/s。

1.1.2 盐度方程 盐度输运方程如下[31]：

$$\frac{\partial h\bar{s}}{\partial t}+\frac{\partial h\bar{u}\bar{s}}{\partial x}+\frac{\partial h\bar{v}\bar{s}}{\partial y}=hF_s+hs_sS \tag{1}$$

式中：$\bar{S}$ 代表垂向平均盐度；S_s 为源盐度；F_s 代表水平扩散项。

1.2 求解方法

水流连续方程及动量方程采用有限体积法进行空间离散，并使用 Roe[31]提出的近似黎曼解法进行求解，对流扩散方程采用一阶迎风格式进行差分；对于时间积分，均采用一阶显式的 Euler 法。限于篇幅，水流、盐度方程的具体求解及扩散系数的计算见文献[31]。

2 模型构建

2.1 研究区域概况

晋江是泉州市“母亲河”，流域面积为 5629km²，干流长 182 km，有两大支流东溪和西溪[32]。流域水资源时空分布不均，汛期在 5-9 月降雨量占全年的 70%[29]。泉州白濑水利枢纽工程位于安溪县西溪上游，工程任务以供水为主，结合防洪，兼顾发电，并为改善下游灌溉和生态用水创造条件。水库总库容 5.44 亿 m³，坝上汇水面积 1035km²。项目建成后，白濑水库和东溪山美水库为调蓄龙头，通过联合调度经天然河道放水至金鸡闸，向金鸡闸补偿供水，金鸡闸为总枢纽、洛阳水闸为分枢纽，实现泉州市水资源配置。工程总投资 142.69 亿元，目前正常建设中，计划于 2026 年完工，建成将惠泽泉州近 800 万人。

晋江河口属于强潮河口，潮波兼有前进波和驻潮波性质，以驻波性质为主，一日内发生两次涨潮及两次落潮，潮流形态以往复流为主，属于正规半日潮流。泉州湾最大潮差超过 6m，湾口多年平均波高 0.9m、最大波高 2~4m，年均波浪作用频率超过 85%[33]。金鸡闸以下河段为感潮河段，即盐水上溯距离约 16km[34]。泉州湾河口湿地省级自然保护区位于白濑水利枢纽下游约 126km、金鸡闸下游约 16.8km，

工程建设本身对该保护区无直接影响，但白濑水利枢纽建成后，金鸡闸水资源利用率提高，金鸡闸下游水资源量有一定减少。

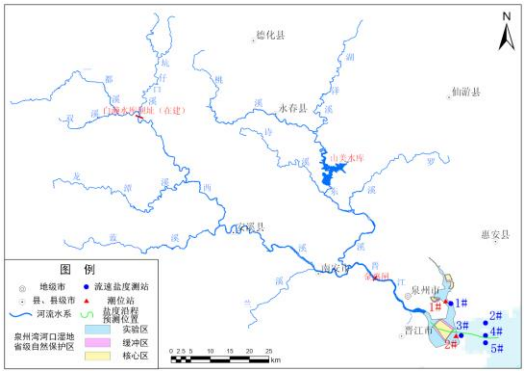

图 1　研究区域概况图

Fig.1 Study Area

2.2 模型计算范围

所构建模型的研究区域水底高程由区域海图数字化得到（见图 2），计算基面采用黄海高程、2000 国家大地坐标系；上边界至金鸡闸处，下边界至外海约 50m 等深线处。模型采用 MIKE 二维模型，计算采用三角形网格，网格最大边长约 1000m，最小约 5m，共划分 86296 个网格和 46533 个节点。计算时间步长为 60s。

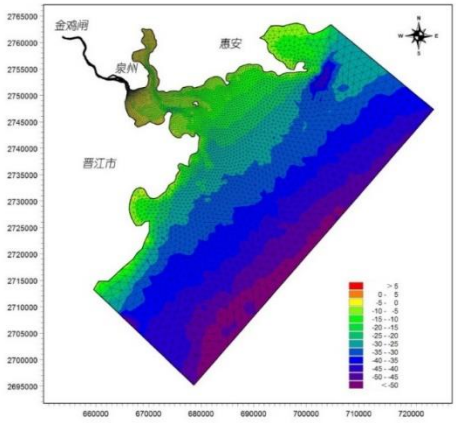

图 2　模型计算范围地形及网格配置示意图

Fig.2 Model calculation range, terrain and grid configuration

2.3 计算边界条件与初始设置

2.3.1 水动力边界条件　白濑水库建成后，由于金鸡闸上游供水量增加，其下泄流量将发生不同程度的下降，计算得不同典型年逐月下泄流量变化结果（表 1）。金鸡闸下泄流量减少最大的时间往往出现在 4~9 月份之间。为分析下泄流量减少对晋江河口的最大影响，选用不同典型年流量变化率最大的月份进行模拟，因此模拟工况设置如下：工况 1：P10%、丰水年 4 月；工况 2：P50%、平水年 9 月；工况 3：P90%、枯水年 8 月。下游潮汐边界均设为实测大潮潮位过程，模拟不同工况下白濑建库前后潮流场、咸潮上溯距离、沿程盐度分布以及河口冲淡水变化。

表 1　白濑水库工程建设前后金鸡闸下泄流量变化

Tab.1 Changes in Discharge Flow of Jinji Sluice before and after the Construction of Bai Bailai Reservoir

枯水年（P=90%）	平水年（P=50%）	丰水年（P=10%）

月份	工程前（m^3/s）	工程后（m^3/s）	变化率（%）	工程前（m^3/s）	工程后（m^3/s）	变化率（%）	工程前（m^3/s）	工程后（m^3/s）	变化率（%）
5	28.7	15.3	-46.7	92.8	69.4	-25.2	365.4	350.9	-4.0
6	113.2	69.7	-38.4	79.0	55.0	-30.4	299.4	299.1	-0.1
7	15.3	15.3	0.0	22.8	15.3	-32.9	81.3	81.0	-0.4
8	32.8	15.3	-53.4	388.1	325.3	-16.2	273.1	272.8	-0.1
9	156.4	104	-33.5	74.7	45.7	-38.8	296.9	269.4	-9.3
10	15.3	15.3	0.0	15.3	15.3	0.0	219.6	233.5	6.3
11	15.3	15.3	0.0	15.3	15.3	0.0	15.3	15.3	0.0
12	15.3	15.3	0.0	15.3	15.3	0.0	15.3	15.3	0.0
1	15.3	15.3	0.0	15.3	15.3	0.0	15.3	15.3	0.0
2	15.3	15.3	0.0	15.3	15.3	0.0	15.3	15.3	0.0
3	15.3	15.3	0.0	15.3	15.3	0.0	15.3	15.3	0.0
4	15.3	15.3	0.0	15.3	15.3	0.0	83.8	53.9	-35.7

2.3.2 盐度边界条件 金鸡闸下泄水体盐度设为 0‰，下游潮汐动力边界水体盐度按实测值设定。

2.3.3 初始条件设置 模型初始水位按率定验证结果文件稳定时对应潮位阶段潮位分布输入，初始时刻的流速设定为 0；盐度取 0.5‰。

2.4 模型验证

2.4.1 水动力验证 模型上边界金鸡闸设为流量边界，根据实测数据输入，外海为潮位边界，由中国海潮波模型给出。研究区域设置 2 个潮位验证站、5 个流速及盐度验证站（图 1）。利用 2005 年 9 月至 10 月连续大潮过程的实测潮位及流速、流向进行水动力模块参数验证。根据模拟结果（图 3 和图 4）可知，计算值与实测值高低潮时间的相位偏差≤±0.5h，最高、最低潮位值偏差≤±0.1m，流速过程线的形态基本一致，测点涨、落潮时段平均流速偏差为≤±10%，平均流向偏差为≤±10°，总体而言潮位、流速、流向模拟结果误差均在可接受范围内，所构建模型可用于后续研究。

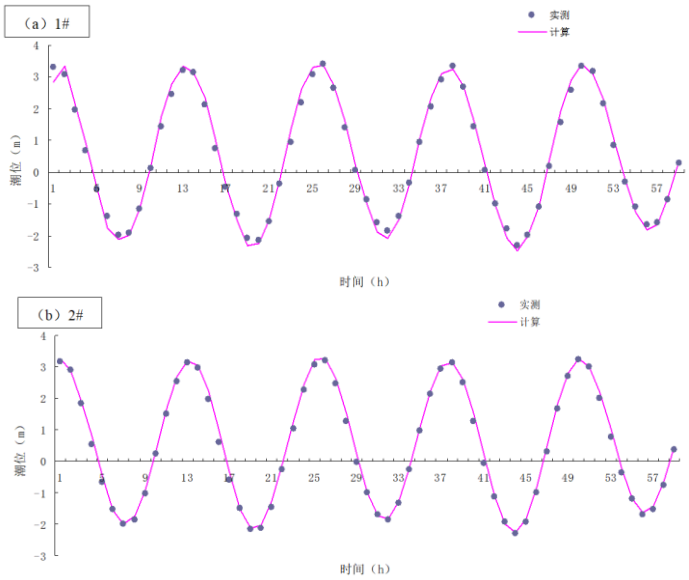

图 3 各测站潮位计算值与实测值对比图

Fig.3 Comparison between calculated and measured tidal levels at each measuring station

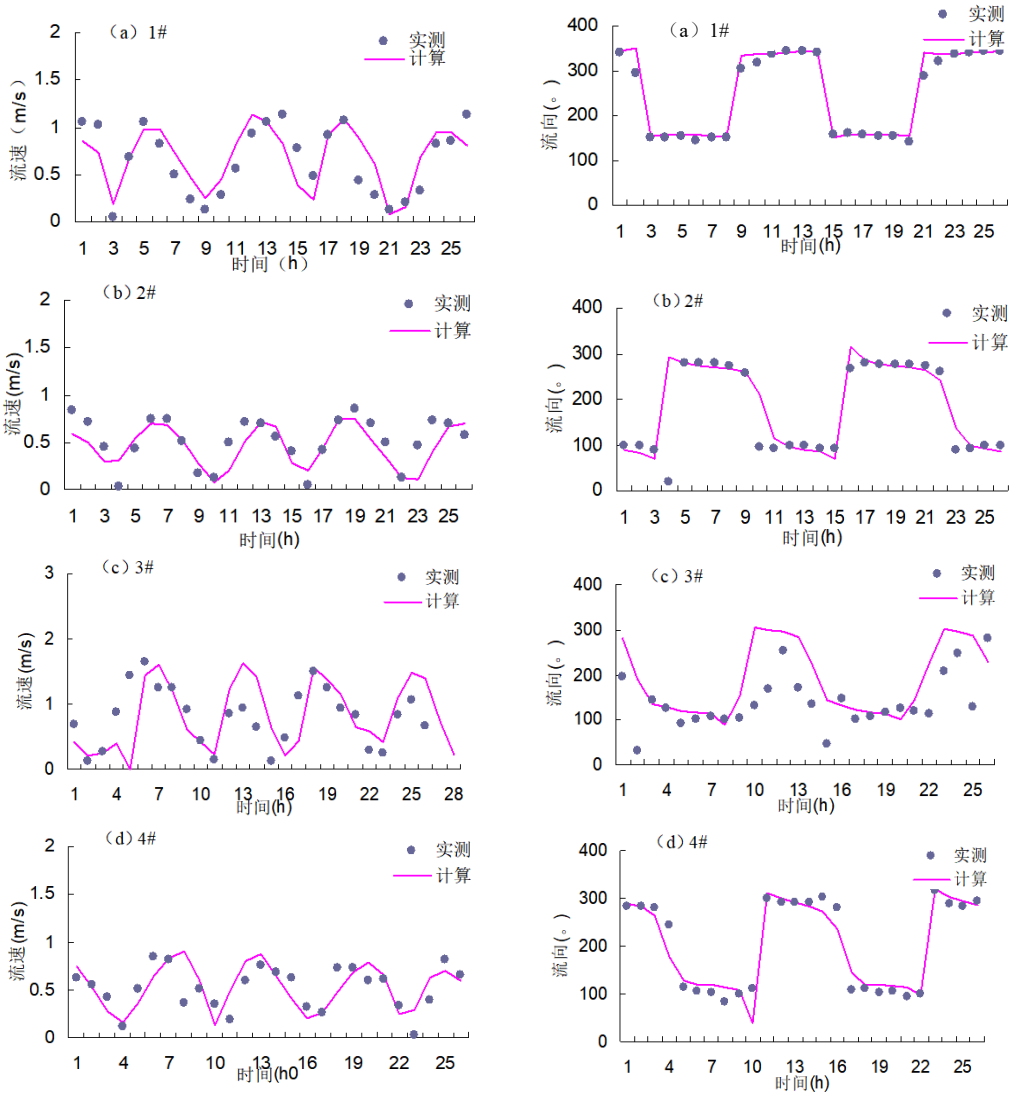

图 4 大潮过程流速、流向计算值与实测值对比图

Fig.4 Calculated and measured values of flow velocity and direction during the spring tide process

（2）盐度验证 大潮期间盐度验证结果（图 5）各测点盐度计算值与实测值整体趋势一致，峰值与谷值时刻基本匹配，模型计算结果误差多控制在 1.0 PSU 以内，盐度模型精度满足后续情景分析与工程影响评估的应用需求。

3 模拟结果与分析

3.1 潮流场变化

选取金鸡闸下泄流量变率最大的枯水年 8 月进行白濑水库建成前后泉州湾的潮流场模拟，受篇幅限值，以泉州湾大潮时涨急、落急流场为例（图 6），泉州湾内潮流运动呈典型的往复流运行形态，涨潮指向湾内，落潮指向湾外，而湾外开敞海区，潮流运动则呈明显的旋转流形态。白濑水库的建设对河口海岸地区的涨落潮流场影响有限，难以明显地改变海区涨潮及落潮流场的基本形态。

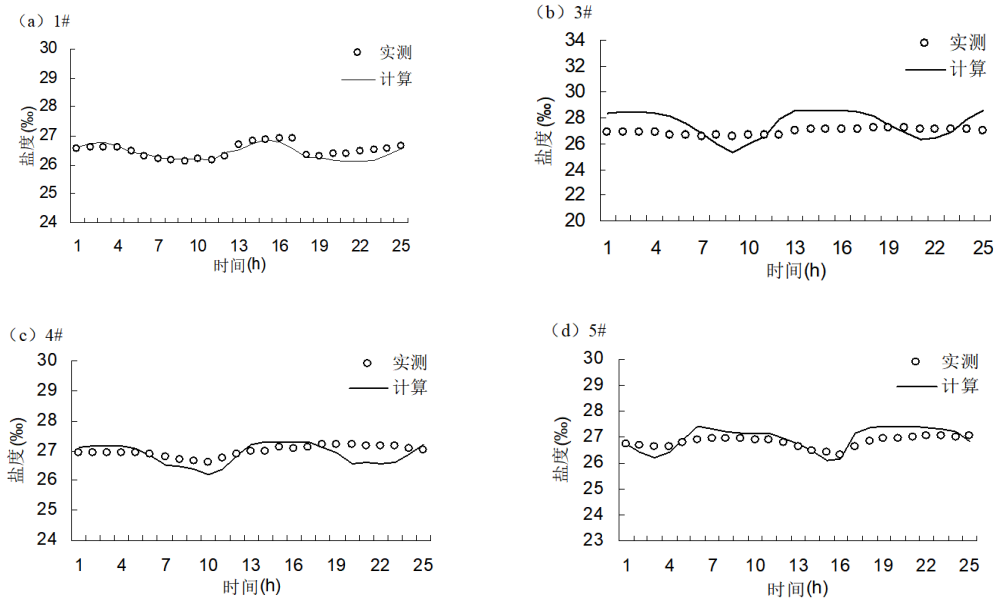

图 5　大潮过程盐度计算值与实测值对比图

Fig.5. Calculated and measured salinity values during the spring tide process

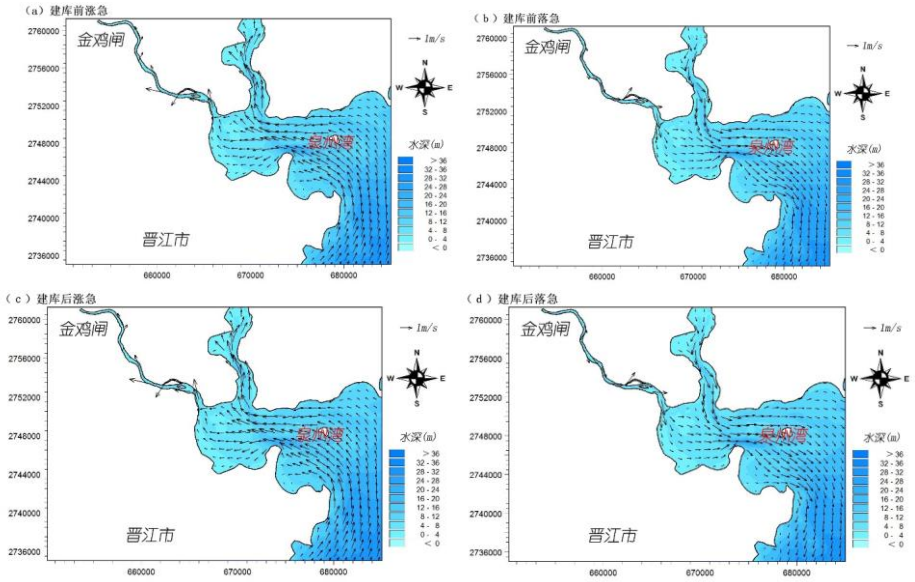

图 6 泉州湾枯水年 8 月大潮时涨急、落急流场

Fig.6 The rapid rise and fall flow field during the spring tide in August of a dry year in Quanzhou Bay

(a) before and rise; (b) before and fall; (c) after and rise; (d) after and fall

3.2 咸潮上溯距离变化

采用大潮最高潮位时，河道内流速接近 0m/s 的位置，即潮流和径流的顶托点作为上溯点，以河口位置为起点，统计不同来水年建库前后月平均来水条件下最大咸潮上溯距离模拟结果（表 2）。由统计结果可知，白濑水库建设后，不同典型年金鸡闸下泄流量均有不同程度的减少，造成咸潮上溯距离有不同程度的增加，丰、平、枯水年最大上溯距离增加量分别为 0.66km、0.66km、0.30km。其中枯水年咸潮上

溯距离变化率相对较小，但由于径流量相对小，其盐度上溯距离实际最大，白濑水库建设后达到 17.62km，但仍处于金鸡闸下游（见图 7）。白濑水库建设前后，金鸡闸下泄流量的变化对于下游晋江河口盐度上溯距离影响有限。

表 2　白濑水库建设前后咸潮上溯变化情况

Tab.2 The Upstream Changes of Saltwater Tide before and after the Construction of Bailai Reservoir

工况	咸潮上溯距离				河口潮平均流量变化			金鸡闸下泄流量变率（%）	金鸡闸下泄流量变幅占河口潮平均流量比例（%）
	建库前（km）	建库后（km）	变幅（km）	变率（%）	建库前（m^3/s）	建库后（m^3/s）	变率（%）		
1	16.44	17.10	0.66	4.0	1777.9	1772.5	-0.3	-35.7	1.7
2	16.57	17.23	0.66	4.0	1775.9	1774.9	-0.1	-38.8	1.6
3	17.32	17.62	0.30	1.7	1766.1	1757.6	-0.5	-53.4	1.0

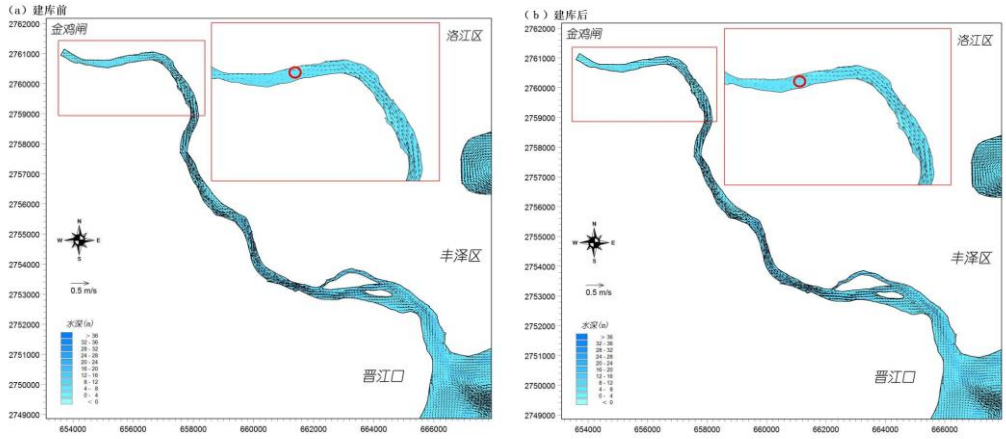

图 7　咸潮上溯距离最远时（枯水年 8 月）上溯位置示意图（红色圆环处为上溯点）

Fig.7 The upstream position of the salt tide when it reaches its farthest upstream distance (in August of a dry year) (the red circle is the upstream point)　(a) before; (b) after

3.3 沿程盐度分布变化

咸潮上溯时，来自外海的高盐水运移至河道内，当遭遇上游下泄的径流时，盐淡水混合，进而引起河口至河道上游盐度沿程变化。以不同典型年金鸡闸下泄流量变率最大的月份为背景，模拟分析大潮高潮时金鸡闸至河口及河口至泉州湾口(图 1)沿程盐度分布规律（图 8）。由模拟结果可知，白濑水库建成前后河道沿程盐度分布规律相近，晋江河口盐度最高，约为 24～26‰之间，向河道上游盐度逐渐递减，丰平枯年典型月分别距河口 10.7km、11.2km、12.3km 以上河道的盐度基本降至 1‰以下。从沿程分布规律来看，丰平枯水年分别为距河口以上 2.6～10.7km、2.8~11.2km、4.9~12.3km 盐度沿程变化相对较为明显，变幅分别在 3.2%、3.4‰、2.9‰以下。此外，晋江河口至泉州湾口之间在白濑水库建设前后盐度沿程变化极小，仅在晋江河口附近约 3.5km 内表现出建库后的盐度略高于建库前。总体而言，水库建成后，对金鸡闸下游盐度沿程变化在可接受范围内。

3.4 冲淡水区域变化

冲淡水影响区域同时受上游径流及河口外潮动力影响，其中径流流量大，则冲淡水面积相应增大。背景盐度设为 32‰，冲淡水盐度以 30‰为界，盐度小于 30‰为冲淡水，盐度大于 30‰为高盐水。分别对各个典型年不同下泄径流量条件下的冲淡水区域变迁进行 1 个月的长时间模拟，统计泉州湾河口湿地自然保护区核心区、缓冲区及实验区冲淡水面积变化情况（见表 3）。结果表明，由于水库建成后金鸡闸下泄流量有所下降，因而泉州湾口附近的盐度 30‰等值线略有向湾内深入的趋势，但内侵的幅度不

大。由于受外海高盐水包围限制，冲淡水区域主要集中在河口海湾内，向外海扩散的程度不明显。丰、平、枯年背景下，由于保护区核心区及缓冲区基本位于海湾的湾顶水域，水库建设对保护区核心区及缓冲区冲淡水面积的影响基本没有。由于保护区实验区位置靠近湾口区域，与冲淡水 30‰较为接近，因而，建库后受上游下泄流量减少作用，冲淡水范围略有下降，丰平枯年冲淡水面积减小率分别为 0.2%、1.1%、3.4%。因此，建库后金鸡闸下泄径流量减少对泉州湾河口湿地自然保护区各个分区冲淡水面积的影响有限，且冲淡水的区域集中在河口湾之内，难以对外海产生明显影响。

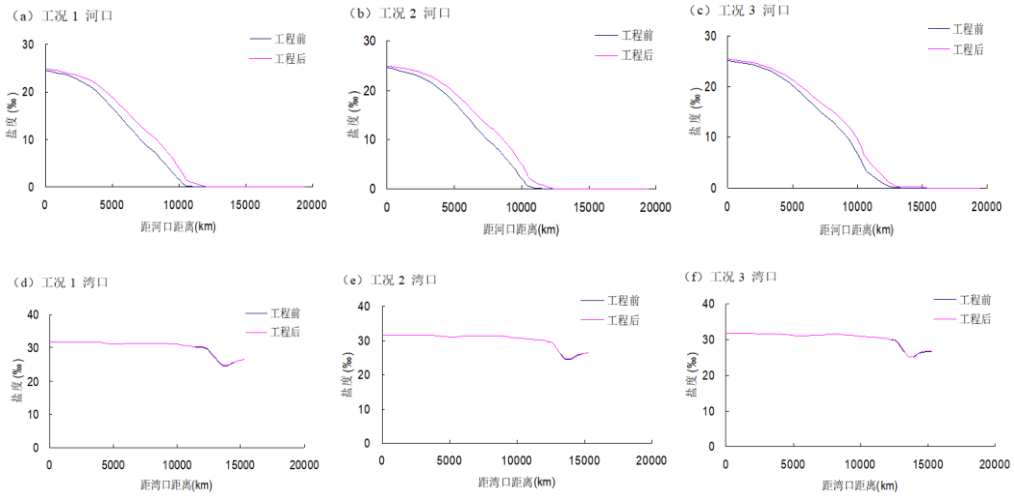

图 8　白濑水库建设前后金鸡闸至泉州湾口盐度沿程变化图

Fig8. Salinity variation along the way from Jinji Sluice to Quanzhou Bay Mouth before and after the construction of Bai Bailai Reservoir

表 3　白濑水库建设前后冲淡水面积变化情况

Tab.3 Changes in the area of freshwater before and after the construction of Bailai Reservoir

工况	保护区核心区			保护区缓冲区			保护区实验区		
	建库前（km²）	建库后（km²）	变率（%）	建库前（km²）	建库后（km²）	变率（%）	建库前（km²）	建库后（km²）	变率（%）
1	13.0	13.0	0.0	6.3	6.3	0.0	51.2	51.1	-0.2
2	13.0	13.0	0.0	6.3	6.3	0.0	51.2	50.6	-1.1
3	13.0	13.0	0.0	6.3	6.3	0.0	49.6	47.9	-3.4

3.5 讨论

咸潮入侵会加剧河口区域盐度上升，威胁供水安全、农业灌溉及湿地生态系统平衡，其动力机制受径流量、潮汐振幅、地形条件及工程调控等多重因素共同控制。国内外大量数值模拟研究表明，上游水库或闸坝运行通过改变径流过程，往往会改变盐水上溯程度。例如，在长江口的数值模拟研究中发现在北支上段建闸后多个取水口盐度大幅下降[35]；对椒江使用了二维数学模型来确定研究区域盐度和养分的变化，发现不同开闸方案对盐度变化有显著影响[36]；有学者以巴西的圣佛朗西斯科河为研究对象，使用三维水动力模型分析水电坝调流对河口盐度入侵变化情况，揭示河口的平均盐度从坝前中期流量增加到坝后最小流量约增加了 20 倍[37]。上述研究多表明，大型流域工程调控对河口盐度结构具有显著影响。

相比之下，本研究发现白濑水库建成后晋江河口盐水上溯最大增量仅为 0.66 km，盐度变幅基本控制在 3.4‰以内，核心湿地保护区冲淡水面积无明显变化。该结果说明，在中小尺度强潮河口中，当潮汐动力占主导且工程调度未形成极端削减情景时，径流变化对整体潮流场形态影响有限，其盐度响应可能表现为“局部敏感、整体稳定”的空间特征。这一结论区别于部分大型河口系统中盐度显著增强的研究结

果，体现了不同尺度河口系统对工程调控响应的差异性。

方法上，本研究结合湿地分区（核心区、缓冲区、实验区）进行空间响应评估，从生态保护视角拓展了传统河口水动力模拟的分析框架。这种将水动力数值模拟结果直接嵌入生态管理分区评价的方法，在国内河口工程影响评估研究中相对较少。相比仅报告盐度最大值或上溯距离，本研究强调空间异质性识别（2.6–12.3 km 敏感河段），有助于为分区调度与生态补偿策略提供更具针对性的依据。总体而言，本研究在东南沿海中等尺度强潮河口背景下，定量揭示了水资源配置工程对盐度结构的影响幅度及空间异质性特征，为类似供水型水库工程的河口环境影响评估提供了可推广的模拟框架。

此外，本研究未考虑长期气候变化（如海平面上升）和极端水文事件对咸潮的叠加效应，未来可融合 CMIP6 气候模式，量化 RCP8.5 情景下咸潮入侵通量增幅及极端风暴潮的协同效应。另外，模型主要关注物理水动力过程，也未量化盐度微小变化对河口生物群落的累积影响，而这种生态功能的代偿性变化可能引发次生风险。

4 结论

本文通过泉州水利枢纽工程对晋江河口水动力、盐度影响的研究，主要得出以下结论：

（1）**白濑水库建设显著削减了金鸡闸下泄流量，但未引起晋江河口潮流动力格局的显著调整：**建库后，金鸡闸下泄丰、平、枯水年每月平均流量减少幅度最大的月份分别为 4 月、9 月、8 月，月均流量对应减少 35.7%、38.8%、53.4%，但径流流量变幅与河口潮平均流量之比却基本在 1.7%以下，且下泄流量变化而导致的河口潮平均流量的变率更是在 0.5%以下。根据模拟结果可知，白濑水库的建设对晋江河口及近岸海域的涨落潮流场影响极小，表明工程运行未改变河口潮流的主导动力控制机制。

（2）**金鸡闸下泄流量减少导致咸潮上溯距离有限增加，盐度变化集中于河口上游局部区域：**金鸡闸下泄流量减少会造成不同典型年下晋江河口咸潮上溯距离有不同程度的增加，丰、平、枯水年最大上溯距离增加量分别为 0.66km、0.66km、0.30km。枯水年 8 月咸潮上溯距离变化率相对较小，但该月径流量较小，咸潮上溯也最远，白濑建库后达到 17.62km，且仍处于金鸡闸下游。在盐度沿程分布上，建库后变化较为明显的区域主要集中在晋江河口上游 2.6~12.3km，盐度变幅基本在 3.4‰以下。

（3）**白濑建库对泉州湾湿地冲淡水面积影响可控：**白濑建库后导致泉州湾河口湿地自然保护区实验区冲淡水面积最大减少3.4%，但对其核心区及缓冲区的影响甚微。由于金鸡闸下泄流量减少幅度与晋江河口纳潮量相比均趋于小量，因而工程运行对冲淡水面积的影响较为有限。本研究所建立的晋江河口平面二维水动力模型经潮位、流速及盐度多点实测资料验证，相关系数和均方根误差均满足工程数值模拟精度要求，能够较好表征区域水动力与盐度时空分布特征，可为工程运行调度及河口生态管理提供定量参考。

5 参考文献

[1] 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. *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定量化研究. 中国防汛抗旱, 2024,34(11):56-61.DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2024354.]

[2] Wang Y Q, Li C, Liu A Q, et al. Dynamic mechanism of saltwater intrusion at Yangtze River estuary in summer, 2022. *Yangtze River*,2023,54(04):7-14.DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.04.002.[王玉琦, 李铖, 刘安琪, 等. 2022年长江口夏季咸潮入侵及影响机制研究. 人民长江, 2023,54(04):7-14.DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.04.002.]

[3] Huang Y L, Sheng S, Hu C Y, et al. Construction of salinity model for tidal reaches during dry seasons and study on influence of saltwater intrusion. *Water Resources Protection*,2025,41(01):150-159.[黄雅丽, 盛晟, 胡朝阳, 等. 感潮河段枯水期盐度模型构建与咸潮上溯影响研究. 水资源保护, 2025,41(01):150-159.]

[4] Yang F, Xu Y, Zhang W, et al. Assessing the Influence of Typhoons on Salt Intrusion in the Modaomen Estuary within the Pearl River Delta, China. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024,12(1},
ARTICLE-NUMBER = {22).DOI:10.3390/jmse12010022.

[5] Li Z P, Zhu J R. Numerical simulation of the North Branch regime change impact on saltwater intrusion in the Yangtze River

Estuary from 2007 to 2016. *Journal of East China Normal University(Natural Science)*,2022(03):109-124.[李志鹏, 朱建荣. 2007—2016年北支河势变化对长江口盐水入侵影响数值研究. 华东师范大学学报(自然科学版), 2022(03):109-124.]

[6] Wang L, Liao G W, Chen C X, et al. Simulation of residence time and eutrophication in a pumped-storage reservoir based on MIKE21 ECOLab. *Journal of Lake Sciences*,2025,37(05):1548-1562.[王磊, 廖国威, 陈纯兴, 等. 基于MIKE21 ECOLab的调水型水库换水周期及富营养化模拟. 湖泊科学, 2025,37(05):1548-1562.]

[7] Wang H, Wang J H, Hu P. New connotation of water resources protection: “quantity-quality-domain-connectivity-biology” coordinated protection and restoration. *Water Resources Protection*,2021,37(02):1-9.[王浩, 王建华, 胡鹏. 水资源保护的新内涵：“量-质-域-流-生”协同保护和修复. 水资源保护, 2021,37(02):1-9.]

[8] Couto T B, Olden J D. Global proliferation of small hydropower plants – science and policy. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2018,16(2):91-100. DOI: https://doi.org/10.1002/fee.1746.

[9] Shen H W. Numerical simulation of Delft3d in hydraulic engineering. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*,2005(07):440-441.[申宏伟. Delft3d软件在水利工程中的数值模拟. 水利科技与经济, 2005(07):440-441.]

[10] Fan H X, Xu L G, Zhu H, et al. Distinguishing the relative impacts of climate change and anthropogenic activities on variation of water age in the Lake Poyang. *Journal of Lake Sciences*,2021,33(04):1175-1187.[范宏翔, 徐力刚, 朱华, 等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖水龄影响的定量区分. 湖泊科学, 2021,33(04):1175-1187.]

[11] K. C. D V, Abdul Rahiman A W, E. A, et al. Water quality simulation using the WASP model for eutrophication control in a South Indian Reservoir. *Water Practice and Technology*, 2023,18(11):2740-2758. DOI:10.2166/wpt.2023.173.

[12] Brown L, Barnwell T. The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: documentation and user manual. *Environmental Protection Agency*, 1987.

[13] Liu Y, Pang Y, Wang Z X, et al. Research on The Water Quality Reaching Standard Scheme of Tangshui River Section Based on Pollution Traceability Analysis. *Sichuan Environment*,2019,38(05):83-88.DOI:10.14034/j.cnki.schj.2019.05.014.[刘媛, 逄勇, 王子轩, 等. 基于污染溯源分析的汤水河考核断面水质达标方案研究. 四川环境, 2019,38(05):83-88.DOI:10.14034/j.cnki.schj.2019.05.014.]

[14] Ren Z H, Zhao C F, Wang Q Q, et al. Characteristics and simulation of nitrogen and phosphorus in complex watersheds: A case study in the Yuntaishan River Basin in Nanjing City, China. *Journal of Agro-Environment Science*,2021,40(01):174-184.[任智慧, 赵春发, 王青青, 等. 复杂流域氮磷污染物输出特征及模拟——以南京市云台山河流域为例. 农业环境科学学报, 2021,40(01):174-184.]

[15] Zeng F. Numerical Simulation and Experimental Study of Hydrodynamic Characteristics Based on Dynamic Programming Algorithm. 2022 IEEE 6th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC): 2022: 2033-2040.10.1109/IAEAC54830.2022.9929947.

[16] Biswal S, Sahoo B, Jha M K, et al. A hybrid machine learning-based multi-DEM ensemble model of river cross-section extraction: Implications on streamflow routing. *Journal of Hydrology*, 2023,625:129951. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129951.

[17] Warren I R, Bach H K. MIKE 21: a modelling system for estuaries, coastal waters and seas. *Environmental Software*, 1992,7(4):229-240.DOI:https://doi.org/10.1016/0266-9838(92)90006-P.

[18] Li D M, Bu S L, Gu L J, et al. Simulated water quality test and examination of Yanghe Reservoir (Hebei) based on the MIKE 21 model. *Journal of Safety and Environment*,2018,18(03):1094-1100.DOI:10.13637/j.issn.1009-6094.2018.03.049.[李大鸣, 卜世龙, 顾利军, 等. 基于MIKE 21模型的洋河水库水质模拟. 安全与环境学报, 2018,18(03):1094-1100.DOI:10.13637/j.issn.1009-6094.2018.03.049.]

[19] Yang H, Wang J, Li J, et al. Modelling impacts of water diversion on water quality in an urban artificial lake. *Environmental Pollution*, 2021,276:116694. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116694.

[20] Ding J, Shao Y, Wu D. Effect of tidal currents on the transport of saline water from the North Branch in the Changjiang River estuary. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018,36(6):2085-2097. DOI:10.1007/s00343-018-7357-5.

[21] Hu K, Zhang W, Wang X. Simulation of the Impact of Breakwaters on Hydrodynamic Environment in Laizhou Bay, China. *Journal of Ocean University of China*, 2022,21(6):1557-1564. DOI:10.1007/s11802-022-5278-6.

[22] Tran Anh D, Hoang L P, Bui M D, et al. Simulating Future Flows and Salinity Intrusion Using Combined One- and Two-Dimensional Hydrodynamic Modelling—The Case of Hau River, Vietnamese Mekong Delta. *Water*, 2018,10(7},
ARTICLE-NUMBER = {897). DOI:10.3390/w10070897.

[23] Geng Y Y, Qian X H, Jin B Q, et al. Numerical Simulation of Water Quality in Tidal Reach of Xiaoqing River Based on MIKE21. *Yellow River*,2024,46(10):96-102.[耿玉莹, 钱秀红, 金炳琪, 等. 基于MIKE21的小清河感潮河段水质数值模拟研究. 人民黄河, 2024,46(10):96-102.]

[24] Patro S, Chatterjee C, Mohanty S, et al. Flood Inundation Modeling using MIKE FLOOD and Remote Sensing Data. *JOURNAL OF THE INDIAN SOCIETY OF REMOTE SENSING*, 2009,37(1):107-118. DOI:10.1007/s12524-009-0002-1.

[25] Tang J Z, Zhou W B, An B J, et al. Research on characteristics of water change capability of Kunming Lake (test section) in Xi'an based on the MIKE 21 Model. *Journal of Water Resources and Water Engineering*,2020,31(01):58-63.[唐继张, 周维博, 安宝军, 等. 基于MIKE21的西安昆明池(试验段)换水能力特征研究. 水资源与水工程学报, 2020,31(01):58-63.]

[26] Qiao H, Zhang M, Jiang H, et al. Numerical study of hydrodynamic and salinity transport processes in the Pink Beach
wetlands of the Liao River estuary, China. *Ocean Science*, 2018,14(3): 437-451.DOI:10.5194/os-14-437-2018.

[27] Yuan X Z, Xu X F, Yu L L, et al. Simulation Analysis of Sewage Discharge in Plain River Network Based on Coupled Hydrodynamic Model. *China Rural Water and Hydropower*,2022(12):39-46.[袁行知, 许雪峰, 俞亮亮, 等. 基于水动力水质模型的平原河网排污模拟分析. 中国农村水利水电, 2022(12):39-46.]

[28] 许晟恒. 泉州城市历史地理研究[学位论文]. 福建师范大学,2023.10.27019/d.cnki. gfjsu.2023.000467.

[29] Ge J J, Zhang W H, Yang Y, 等. STUDY ON THE METHOD TO SOLVE WATER RESOURCE CONFLICTS: A CASE STUDY OF THE JINJIANG RIVER BASIN. *Environmental Engineering*,2020,38(10):47-52.DOI:10.13205/j.hjgc.202010008.[葛金金, 张汶海, 杨勇, 等. 水资源矛盾冲突协调技术研究:以晋江流域为例. 环境工程, 2020,38(10):47-52.DOI:10.13205/j.hjgc.202010008.]

[30] Andersson B, Andersson R, Håkansson L, et al. Computational Fluid Dynamics for Engineers. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.DOI: 10.1017/CBO9781139093590.

[31] Xu D, Sun Z L, Zhu L L, et al. Numerical simulation of salinity at the mouth of Qiantang River. *Oceanologia et Limnologia Sinica*,2013,44(04):829-836.[许丹, 孙志林, 祝丽丽, 等. 钱塘江河口盐度数值模拟. 海洋与湖沼, 2013,44(04):829-836.]

[32] Lu Y, Su B L, Zhang C X. Calculation of Allowable Permitted Assimilative Capacity of Jinjiang River Basin, Quanzhou City. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*,2010,8(02):99-102.[路雨, 苏保林, 张传霞. 泉州市晋江流域纳污能力计算. 南水北调与水利科技, 2010,8(02):99-102.]

[33] Lu F S, Liao K M, Xiao H, et al. Research on Wave Distribution Characteristics in Quanzhou Bay. *Journal of Applied Oceanography*,1998(01):1-8.[陆凤山, 廖康明, 肖晖, 等. 泉州湾波浪分布特征研究. 台湾海峡, 1998(01):1-8.]

[34] Lin Y Y. Distribution characteristics of wetland organisms in Jinjiang River estuary and Quanzhou Bay. *Journal of Applied Oceanography*,2005(02):183-188.[林永源. 晋江河口及泉州湾湿地生物分布特点. 台湾海峡, 2005(02):183-188.]

[35] Zhu J R, Lu P Y, Tang C M, et al. Numerical simulation of saltwater intrusion mitigation by building a sluice inthe North Branch of the Changjiang Estuary. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*,2020,{}(03):13-22.[朱建荣, 鲁佩仪, 唐川敏, 等. 长江河口北支建闸对减轻盐水入侵的数值模拟. 华东师范大学学报(自然科学版), 2020,{}(03):13-22.]

[36] Weng X, Jiang C, Zhang M, et al. Numeric Study on the Influence of Sluice-Gate Operation on Salinity, Nutrients and Organisms in the Jiaojiang River Estuary, China. *Water*, 2020,12(7},
ARTICLE-NUMBER = {2026). DOI:10.3390/w12072026.

[37] Paiva B P, Schettini C A F, Siegle E. Effect of hydropower dam flow regulation on salt-water intrusion: Sao Francisco River, Brazil. *JOURNAL OF MARINE SYSTEMS*, 2024,241. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2023.103904.