

杨光耀,胡越,姜姗姗等. 极端洪水下万泉河口地貌演变规律与机理分析[J]. 人民珠江, DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.XXXX.XX.001.

极端洪水下万泉河口地貌演变规律与机理分析

杨光耀¹,胡越¹,姜姗姗¹,崔策轩¹,黄睿²

(1. 中水北方勘测设计研究有限责任公司,天津300222;2. 河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏南京210098)

摘要:为明晰极端洪水作用下万泉河口拦门沙的地貌演变规律及动力机制,探索万泉河流域防洪和玉带滩保护治理方案,构建了万泉河口二维高精度水沙耦合模型,采用2024年台风“潭美”期间的实测洪痕与口门宽度数据完成模型验证。以50年一遇洪水为典型情景,模拟分析河口行洪过程中的水动力特征与地貌演变特征;在此基础上,进一步探究5~50年一遇洪水条件下入海口的冲淤响应规律,并开展口门初始宽度和洪量对行洪水位的影响分析。研究表明,万泉河口演变呈现“洪水冲刷拓宽—潮波回淤束窄”的循环演变模式,随着上游输沙减少,口门或将呈缓慢展宽趋势;口门宽度与洪峰流量呈近似线性相关关系,玉带滩的冲刷深度主要受洪水漫顶历时调控;口门初始宽度对近口段水位影响显著,而对上游河道水位的影响有限,洪量对河道水位影响不大。研究成果已应用于万泉河流域防洪规划。

关键词:极端洪水;地貌演变;水沙耦合模拟;冲刷规律;万泉河口

中图分类号: 文献标识码: 文章编号:1001-9235(XXXX)XX-0001-11

博鳌亚洲论坛与乐城国际医疗旅游先行区的建设,对万泉河流域防洪保安、玉带滩生态保护提出了更高要求。玉带滩作为万泉河口标志性滨海景观,既有得天独厚的观赏与旅游价值,也是调控河口行洪的关键地貌单元,其形态演变直接关系区域防洪安全及生态可持续发展,因此深入探究洪水下万泉河口的水动力与地貌演变规律至关重要。

万泉河口属于典型的沙坝—泻湖—潮汐汉道系统,其地形演变同时受洪水^[1]、潮汐^[2-3]、波浪^[4]、台风^[5-6]及人类活动^[7-8]的影响。在潮汐汉道冲淤演变的数值模拟研究方面,已有诸多学者采用不同模型开展相关工作,例如Velasquez-Montoya等^[9]基于Delft3D模型并结合实测数据,指出北卡罗莱纳州Oregon潮汐汉道处于动态平衡状态,其稳定性依赖于自然动力与人为干扰的共同调控;屠佳雨^[10]利用ROMS模型模拟了不同风况下海南新村泻湖的沉积

物再分配过程,为识别风暴沉积优势区域提供了依据;匡翠萍等^[11]则基于MIKE21构建了理想化单通道泻湖模型,提出了用于判断潮汐通道稳定性的经验表达式。此外,在万泉河口数值模拟方面,以往学者也开展了较多的研究,例如刘臣等^[12]和宛琳等^[13]分别建立了二维水动力模型,为万泉河航道整治与乐城先行区规划提供了支撑;海来以波等^[14]模拟万泉河盐度分布,发现河道条件为影响盐度分布的关键因素;李松喆^[15]、杨光耀等^[16]模拟了台风期间万泉河口的泥沙运输与岸线演变,指出洪水是玉带滩溃破的主要原因。

现有研究虽已对万泉河口的演变过程开展了有益探索,但多聚焦于形态学分析^[3,17]、定床假设^[12-13]或常规水文条件^[15-16],缺乏对极端洪水事件下地貌演变过程的系统模拟与机制揭示。为此,本文在文献^[16]的基础上,建立了万泉河口高精度水

基金项目:国家自然科学基金青年基金(42206165)

收稿日期:2026-01-14 修回日期:2026-02-04

作者简介:杨光耀(1997—),男,硕士,研究方向为流域防洪规划,水动力数值模拟。

通信作者:黄睿(1989—),男,博士,副教授,研究方向为河口海岸水动力与泥沙运动。

联系作者:致信rmzj@pearlwater.gov.cn,由期刊转接。

沙模型,使用台风“潭美”的实测数据进行了验证。以50年一遇洪水为典型情景,分析了极端洪水期间万泉河口的水动力及地貌演变特征,并结合前人研究成果总结了万泉河口的地貌演变机理,预估了未来的演变趋势。进一步定量计算了不同重现期洪水下万泉河入海口的冲淤规律,并开展了口门初始宽度和来水洪量对水位的影响分析。结合研究成果提出了流域防洪治理和玉带滩生态保护建议。相关成果已应用于万泉河流域防洪规划。

1 研究区域概况

万泉河流域见图1,万泉河发源于海南省琼中

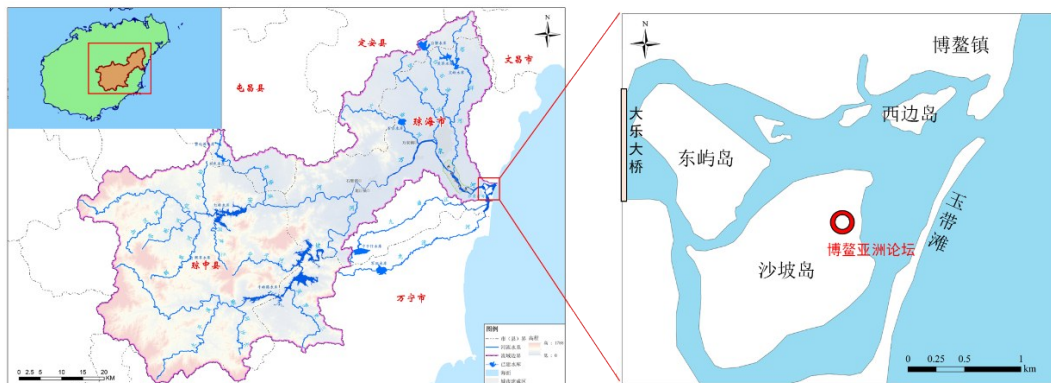


图1 万泉河流域示意图

Fig. 1 Schematic map of the Wanquan River Basin

万泉河流域洪水主要出现在8—11月,以9、10月最为集中;流域为山区性河流,河道比降大、产流集中,洪水呈峰高历时短的尖瘦型。流域属少沙河流,多年平均含沙量 0.074 kg/m^3 ,含沙量季节性差异显著,枯水期可忽略不计,洪水期显著升高,最大含沙量出现在9—10月,与最大径流量月份基本一致。万泉河口外为混合潮,据《万泉河流域防洪规划(2025—2035年)》,其多年平均最高潮位 2.00 m ,多年平均最低潮位 -0.42 m 。

博鳌亚洲论坛永久会址坐落于万泉河口沙坡岛,根据《万泉河流域防洪规划》,其防洪标准为50年一遇。

黎族苗族自治县五指山,分为南、北两源,南源为乘坡河,北源为定安河,两源于合口咀汇合后始称万泉河干流。干流呈“几”字形,自合口咀向东北流经石壁、龙江、万泉及嘉积四镇,随后转向东南,经乐城先行区后最终于博鳌港注入南海。万泉河自大乐大桥以下为河口段,该段河道汊流发育、流态复杂,河底高程约 $-1.0 \sim -7.0 \text{ m}$,常年泥沙淤积形成东屿岛、沙坡岛两大岛屿,南侧有九曲江、龙滚河通过沙美内海汇入,入海口位置有玉带滩动态变化,万泉河大乐大桥—入海口直线距离约 3.5 km 。

2 研究方法

2.1 模型介绍

相关研究^[15-16]表明,万泉河口洪水期间的冲淤演变主要受洪水控制,因此本文模型仅考虑水动力与泥沙模拟,不进行波浪计算。模型采用Mike21的水动力(HD)及泥沙输运(SAND TRANSPORT)模块^[17]。

水动力HD模块的原理为描述水流运动的二维非恒定流方程组,包括水流连续性方程和动量方程^[15]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial\eta}{\partial x} - fhw + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial(\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{xx}}{\rho_0} - \frac{\partial(hS_{xx})}{\partial x} - \frac{\partial(hS_{xy})}{\partial y} + huS \quad (2)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial\eta}{\partial y} + fhu + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{yy}}{\rho_0} - \frac{\partial(hS_{xy})}{\partial x} - \frac{\partial(hS_{yy})}{\partial y} + hvS \quad (3)$$

式中: h 为总水深,m; t 为时间,s; u 、 v 分别为 x 、 y 方向的水深平均流速,m/s; S 为源汇项,1/s; x 、 y 为笛卡尔坐标系水平坐标,m; g 为重力加速度,m/s²; f 为科氏力系数,1/s; ρ_0 为水的参考密度,kg/m³,常温下取1000 kg/m³; τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{yy} 为水平黏性应力分量,Pa; τ_{xx} 、 τ_{xy} 分别为风应力在 x 、 y 方向的分量,Pa,由风对水面的作用产生; S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yy} 分别为波浪辐射应力分量,Pa,当考虑波浪与水流耦合时需计入,无波浪作用时取0。

泥沙输运ST模块采用二维水深平均泥沙输运方程,描述泥沙浓度的时空变化,遵循泥沙质量守恒,考虑泥沙的对流、扩散及沉降、冲刷作用,表达

式如下:

$$\frac{\partial(hc)}{\partial t} + \frac{\partial(huc)}{\partial x} + \frac{\partial(hvc)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + E - D \quad (4)$$

式中: c 为水深平均悬移质含沙量,kg/m³; D_x 、 D_y 分别为 x 、 y 方向的泥沙扩散系数,m²/s; E 为泥沙冲刷率,kg/(m²·s); D 为泥沙沉降率,kg/(m²·s)。

泥沙输运导致河床高程发生变化,ST模块通过河床变形方程计算河床高程的时空变化,表达式如下:

$$\rho_s(1-\lambda) \frac{\partial z_b}{\partial t} = D - E - \frac{\partial q_{bx}}{\partial x} - \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \quad (5)$$

式中: z_b 为河床高程,m,相对于基准面; λ 为河床孔隙率; q_{bx} 、 q_{by} 分别为 x 、 y 方向的推移质输沙率,kg/(m·s)。

2.2 模型设置

2.2.1 计算范围及网格划分

本次计算范围上起大乐大桥,下至玉带滩外海5 km处。对玉带滩及河道网络进行局部加密,其中河道主流区网格尺度为30 m,玉带滩周边区域加密至10 m,外海网格尺度200 m,各区域之间通过光滑过渡实现网格尺度渐变。基于2023年实测1:10000地形图及河道断面对网格进行插值,模型网格划分及插值后高程见图2。

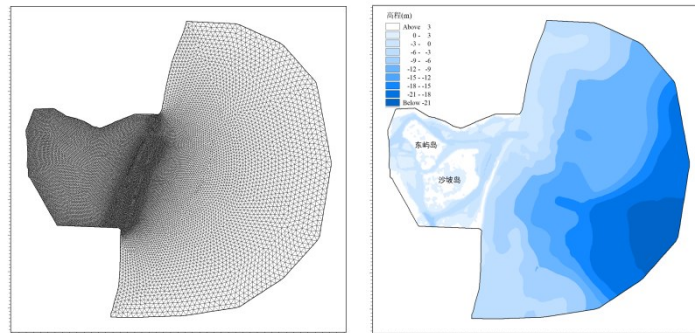


图2 计算模型网格剖分及高程分布

Fig. 2 Computational model grid partitioning and elevation distribution

2.2.2 参数选取

糙率根据河床植被覆盖情况、河(海)床质的组成情况,河道内构筑物的分布情况等确定。整体而

言,外海糙率取0.010~0.025,河道糙率取0.025~0.040,岛屿根据建筑物分布糙率取0.08~0.10。

模型范围内的泥沙粒径基于实测资料和文献

[16, 19]设置,其中玉带滩泥沙实测中值粒径1.2 mm,玉带滩河道侧泥沙粒径取0.1~0.8 mm,玉带滩外海侧泥沙粒径取0.2~0.6 mm;泥沙密度均设置为 $2\ 650\text{ kg/m}^3$,孔隙率均设置为0.4。

2.2.3 边界条件

根据《万泉河流域防洪规划》,万泉河口博鳌亚洲论坛防洪标准为50年一遇,为此本文选取5~50年一遇洪水进行计算。相关研究^[11]表明,万泉河口属于感潮河段,洪潮基本不遭遇,因此本文计算时外海潮位标准统一采用5年一遇。

模型具体边界条件设置如下:上边界为入流边界,输入5至50年一遇的万泉河设计洪水过程,洪水过程线依据《万泉河流域防洪规划》及高诚等^[20]的研究成果确定,并在模型中同步考虑沙美内海的汇水,来水泥沙浓度参照加积水文站2024年台风“潭美”期间实测最大日平均含沙量,取 0.411 kg/m^3 ;下边界为潮位边界,采用5年一遇设计潮位过程。万泉河口5~50年一遇设计洪峰流量及5年一遇设计潮位见表1。

表1 万泉河口不同重现期设计洪峰流量及设计潮位

Tab. 1 Design flood peak discharge and design tide level at Wanquan River Estuary for different return periods

重现期/a	洪峰流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	设计潮位/m
5	6 700	2.29
10	8 400	—
20	9 700	—
50	11 600	—

2.3 模型验证

模型的糙率、泥沙等参数在文献[16]中已得到初步验证,本文使用2024年台风“潭美”的实测数据对模型进一步验证。202420号台风“潭美”于2024年10月22日凌晨在菲律宾以东洋面生成,随后向西北方向移动,最大风速超过30 m/s。2024年10月26日至30日,受“潭美”残余环流与冷空气共同影响,海南省发生了影响范围广、强降雨落区重叠、累计雨量极大的极端暴雨过程,导致万泉河流域爆发

大洪水。经水文还原分析,本次洪水在万泉河干流的洪峰流量超过20年一遇,最大3天洪量超过50年一遇。

通过水文比拟法,将加积水文站实测洪水过程折算至大乐大桥,作为模型上边界入流条件,来水泥沙浓度取洪水期间加积水文站实测最大日平均含沙量 0.411 kg/m^3 ,外海开边界采用博鳌潮位站实测潮位过程。利用洪水后的实测洪痕及入海口门宽度对模型进行验证。模型计算最高水位与现场实测洪痕对比见表2,计算与实测水位的误差基本可以控制在0.1 m以内。洪水后实测万泉河口门的宽度为620 m,模型模拟结果为642 m,两者较为接近,误差可能源于本文采用的初始地形条件为2023年实测,在2023年至台风“潭美”发生期间万泉河入海口门发生了进一步淤积束窄。整体而言,可以认为本文模型合理地复现了“潭美”台风期间万泉河口水动力和地貌演变特征。

表2 台风“潭美”期间计算水位与实测水位对比

Tab. 2 Comparison between calculated and measured water levels during Typhoon “Tanmei”

测点位置	实测水位/m	模拟水位/m	模拟-实测/m
大乐大桥	5.90	5.82	-0.08
朝烈村	5.46	5.42	-0.04
南强	4.57	4.49	-0.08
博鳌水城旅游景区	3.49	3.58	0.09

3 结果分析

3.1 水动力特征分析

以50年一遇洪水为典型情景分析万泉河口极端洪水期间的水动力特征。在洪水初期,万泉河口流场分布见图3a。此时上游来水流量较小,河口水位较低,洪水未漫越玉带滩,水流主要集中于河口主槽,导致主槽冲刷加深,而对河槽的拓宽作用不明显。至洪峰时刻,河口流场见图3b。受上游大流量来水影响,河口水位显著上涨,东屿岛与沙坡岛被淹没,洪水漫越玉带滩行洪,对玉带滩造成冲刷,入海口门拓宽。

为定量分析水动力过程,于行洪主流区布设4个测点(位置见图3b):测点1位于口门以内,测点2位于口门中心,测点3位于口门以外,测点4位于外海。各测点水位变化过程见图4。同时,为探究水位变化成因,绘制万泉河入流与口门入海流量过程见图5。分析可知,在40时刻以前,受洪水影响,口门内测点1水位较高,而口门外测点3水位与外海测点4的潮位接近。测点1至测点3最大水面比降达3.5‰,测点2至测点3最大比降为3.0‰,表明该阶段玉带滩尚未完全冲开,且外海潮位较高,导致

河道泄洪受阻,口门内出现明显的水位壅高。40至60时刻期间,万泉河干流超6 000 m³/s的大流量过程已基本结束,河口迎来沙美内海洪峰,外海处于低潮位。此阶段测点2与3水位较为接近,最大水面比降仅为0.6‰,且均明显高于外海测点4水位。其原因在于玉带滩已被冲开,口门宽度增大,同时外海潮位较低,泄洪条件改善,水对口门外水位产生一定影响。60时刻以后,洪水过程基本结束,口门内外水位与外海水位差异不大,整体水位变化主要受潮汐控制。

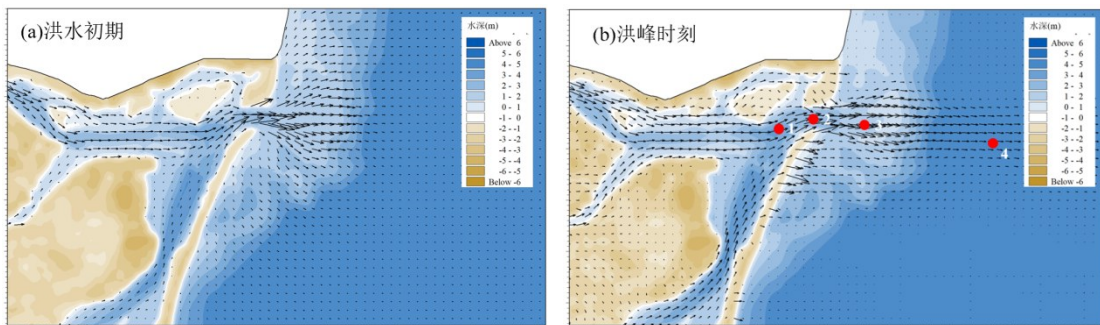


图3 万泉河口行洪流场

Fig. 3 Flow field of flood in Wanquan River estuary

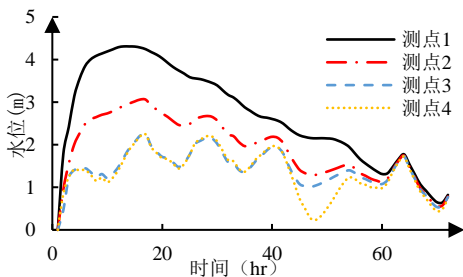


图4 各测点水位过程

Fig. 4 Water level process at each monitoring point

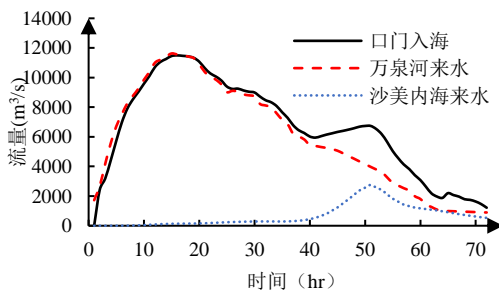


图5 万泉河来水及入海流量

Fig. 5 Inflow and outflow of the Wanquan River

3.2 地貌演变分析

3.2.1 演变过程分析

50年一遇洪水过后,玉带滩附近冲淤分布情况见图6。洪水导致玉带滩发生明显冲刷,冲刷深度普遍达2~3 m,冲刷泥沙主要向外海输运,并在玉带滩及口门外侧发生淤积。

为分析冲淤动态,沿主流区及关键地貌部位布设5个测点(图6,测点1—4与3.2节位置一致,测点5位于玉带滩上),各测点高程的历时变化见图7。测点1位于口门以内,洪水过程中表现为持续冲刷,但幅度较小,并于洪水后期逐渐趋于稳定;测点2处于口门中心,由于水流集中、流速较大,在整个洪水过程中持续冲刷,最终冲刷深度近3 m;测点3位于口门外侧,因行洪通道展宽及外海潮位顶托,流速下降,泥沙落淤,整个洪水期间淤积厚度约1.5 m;测点4处于外海区域,受洪水影响极小,冲淤变化可忽略不计;测点5位于玉带滩上,自洪水漫滩后开始

冲刷,直至洪水后期水位下降,流速减小,冲刷逐渐停止,最终冲刷深度约2.3 m。

3.2.2 演变机理分析

综合本文模拟结果及已有研究^[3,17,21-22],可总结出万泉河口门冲宽与再束窄的机理如下:洪水期间,万泉河泥沙自口门内向外海输运,玉带滩被冲溃,洪水入海后因行洪通道拓宽和潮位顶托作用,流速降低、挟沙能力减弱,导致大量泥沙在口门外近岸海床淤积;洪水结束后,在潮汐和波浪共同作用下,淤积泥沙逐渐向口门内回流输运,促使口门重新淤浅束窄,玉带滩再次成型;这一过程随洪水事件循环发生。

万泉河加积站1980—2021年实测年平均含沙量见图8,可见2015年红岭水库主体完工后,河流含沙量显著降低。李兆楠等^[17]对比2009与2019年万泉河口外海等深线变化,发现河口水下三角洲已出现明显侵蚀,这与2015年以来河流输沙率下降引发的河口泥沙补给不足效应相吻合。未来随着上游输沙持续偏少,叠加外海水下三角洲的持续侵蚀,河口泥沙总量大概率呈逐步减少趋势,或将推动口门呈现长期缓慢展宽的演化特征。

3.3 口门演变规律

为进一步研究不同量级洪水对万泉河入海口演变的影响规律,对5~50年一遇洪水条件下万泉河口口门及玉带滩冲淤变化进行了模拟。各重现期洪水作用后的口门宽度统计结果见表3。可以看出,

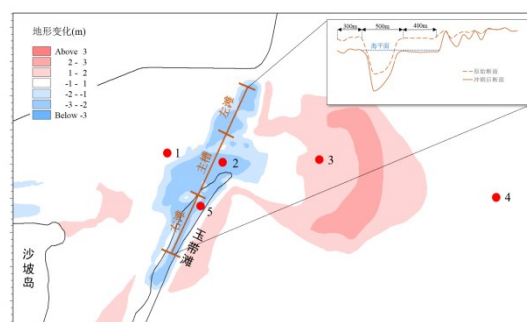


图6 万泉河口冲淤变化及测点布置

Fig. 6 Sedimentation changes at the Wanquan River Estuary and survey point layout

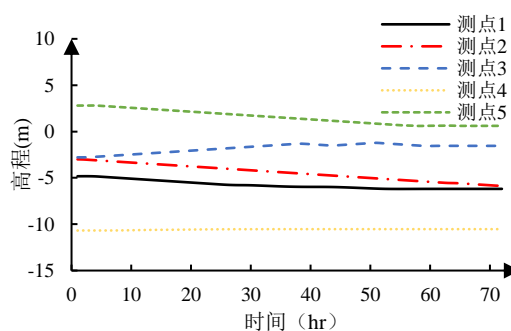


图7 洪水期间各测点高程变化

Fig. 7 Elevation changes at various monitoring points during flooding

随着洪峰流量的增大,口门宽度总体呈增加趋势,且口门宽度与洪峰流量之间大致呈线性关系。

选取图6所示的典型断面,将万泉河口口门划分为3段进行冲淤变化分析:第1段为左岸滩地,长约

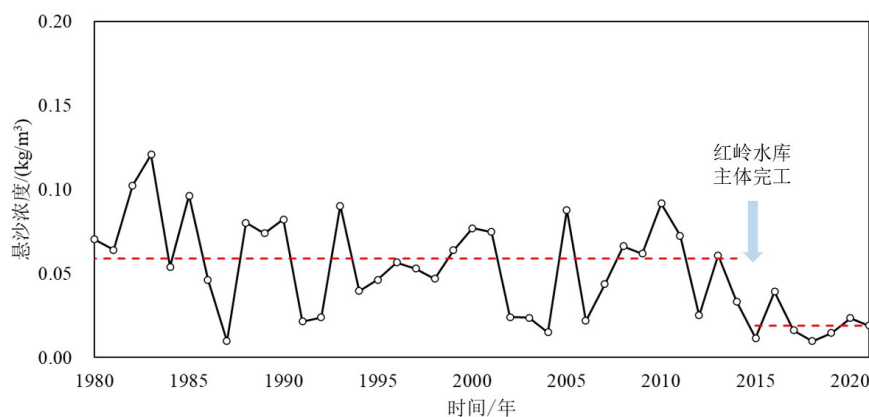


图8 万泉河加积站1980—2021年实测年平均含沙量

Fig. 8 Measured annual average sediment concentration at Jiaji Station of Wanquan River from 1980 to 2021

300 m;第2段为主槽,长约500 m;第3段为右岸滩地(即玉带滩),长约400 m。各重现期洪水对不同区段的冲刷深度见表4。模拟结果表明,不同重现期洪水对主槽的冲刷深度差异不大,均为2.0 m左右;左岸滩地的冲刷深度随洪峰流量增大而增加,且基本呈线性增长趋势。对于右岸玉带滩,在5年一遇洪水下冲刷深度为1.20 m,10年一遇洪水时显

著增大至2.01 m,但随着洪水重现期的继续提高(如50年一遇和100年一遇),冲刷深度增幅趋缓,分别达到2.18、2.30 m。这一现象说明,玉带滩的冲刷与漫顶水流的持续时间密切相关:即使洪峰流量不大,但若漫顶时间较长,仍可能造成显著冲刷。可以认为相较于洪峰流量,漫顶洪水历时是影响玉带滩冲淤演变的更关键因素。

表3 不同情景下万泉河口门宽度

Tab. 3 Width of Wanquan River Estuary gates under different scenarios

设计频率	万泉河干流洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹)	口门宽度/m
2023年实测(模型初始值)	—	240
5年一遇	6 700	261
10年一遇	8 400	552
20年一遇	9 700	663
50年一遇	11 600	993

表4 不同情景下万泉河口门冲深

Tab. 4 Surge depth at Wanquan River Estuary gates under different scenarios

设计频率	万泉河干流洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹)	平均冲深/m		
		左滩	主槽	右滩(玉带滩)
5年一遇	6 700	0.28	1.84	1.20
10年一遇	8 400	0.94	1.88	2.01
20年一遇	9 700	1.39	2.01	2.18
50年一遇	11 600	2.05	2.08	2.30

3.4 关键因素对水位的影响分析

为明确防洪设计中的关键影响因素,支撑防洪治理方案制定,本节重点分析口门初始宽度与洪量对水位的影响规律。

3.4.1 口门初始宽度

万泉河入海口形态年际变化显著^[9],其初始地形条件对行洪水位具有重要影响。为此,本文设置4种计算工况,将入海口门的初始宽度分别设定为50、100、200、240 m(2023年实测值),洪水过程均采用50年一遇,以定量分析口门初始宽度对水位的影响。

在50年一遇洪水条件下,4种工况下口门内及大乐大桥断面最高水位对比结果见表5。当初始口门宽度为50 m时,口门内最高水位达4.71 m,相较于初始宽度240 m的情形壅高0.31 m;大乐大桥处最高水位为6.75 m,仅壅高0.05 m。这表明口门初始宽度对近入海口段水位影响较为显著,而对大乐大桥以上河段水位影响较小。因此可以认为,口门初始形态对河口区域防洪具有一定影响,但对乐城先行区及琼海主城区等上游区域的防洪安全影响有限。

表5 不同初始口门宽度下水位计算成果对比

Tab. 5 Comparison of water level calculation results at different initial gate widths

初始口门宽度	水位	
	口门内	大乐大桥
50	4.71	6.75
100	4.59	6.73
200	4.46	6.70
240	4.40	6.70

3.4.2 洪量

洪量通过影响漫顶水流历时影响玉带滩冲刷,进而影响河道行洪水位。本节开展洪量对口门冲淤及关键节点水位的敏感性分析,共设3种工况,均采用50年一遇洪峰流量 $11\ 600\ \text{m}^3/\text{s}$ 、口门初始宽度 $240\ \text{m}$,仅将3日洪量分别设为 $11.6\ \text{亿}\ \text{m}^3$ (偏少)、 $15.5\ \text{亿}\ \text{m}^3$ (正常)、 $17.3\ \text{亿}\ \text{m}^3$ (偏多)。模型计算的洪水后口门宽度及关键节点水位见表6,结果显示,洪量对口门内及上游河道水位影响较小(波动幅度小于等于 $0.11\ \text{m}$),仅在洪量偏少时因口门冲刷不足导致洪峰期壅水效应略显著,但整体对防洪安全影响有限。

表6 不同洪量下计算水位对比

Tab. 6 Comparison of calculated water levels at different flood discharges

方案	水量/ $\text{亿}\ \text{m}^3$	洪峰流量/ $(\text{m}^3\ \text{s}^{-1})$	水位/ m	
			口门内	大乐大桥
1	11.6	11 600	4.51	6.73
2	15.5	11 600	4.40	6.70
3	17.3	11 600	4.48	6.69

4 治理建议

基于本次研究成果,结合万泉河流域防洪保安实际需求及玉带滩生态系统保护核心目标,提出针对性治理建议。

4.1 流域防洪保安

万泉河流域的防洪治理可分为两段:一是大乐大桥以上干流两岸,主要保护对象为乐城先行区和琼海市主城区;二是大乐大桥以下的河口区,主要保护对象为博鳌亚洲论坛。两大区域防洪重点不同、影响因素各异,需差异化施策推进防洪治理工作。

针对大乐大桥以上区域,口门初始宽度对该区域的水位扰动较小,因此在开展该区域防洪治理研究时,应将核心重点聚焦于干流疏浚、堤防加固等直接提升行洪能力的工程措施,无需考虑在玉带滩周边实施清淤、拓宽等工程。

针对大乐大桥以下的河口区域,入海口门束窄引发的阻水效应会抬升沙坡岛周边区域洪水位;沙坡岛在洪水期为行洪区,片区内仅博鳌亚洲论坛主体建筑因地势高程较高未参与行洪过程,其余区域均需承担行洪功能且面临洪水淹没威胁。基于此,建议博鳌亚洲论坛片区采用防洪“自保”模式,通过抬高建筑地基这一工程治理措施,确保片区防洪能力达到对应等级防洪标准,有效降低洪水灾害造成的各类损失。

4.2 玉带滩保护治理

为进一步维系玉带滩地貌形态稳定,应对河口三角洲整体侵蚀背景下的岸线退缩隐患,需强化玉带滩岸线防护工程建设,通过多措并举维系区域泥沙冲淤动态平衡。具体而言,可通过改建上游嘉积坝工程,疏通流域泥沙输运通道,保障流域内泥沙顺利向下游河口区域输运;同时严格落实河道采砂管控措施,严控流域泥沙流失量,最大限度增加玉带滩泥沙补给总量;必要时采取人工补沙等辅助修复措施,全方位维系河口区域泥沙冲淤平衡,推动玉带滩生态系统实现长效保护与良性发展。

5 结论

本文基于二维水动力-泥沙耦合模型,模拟分析了50年一遇洪水条件下万泉河口的水动力与地貌演变特征,揭示了入海口门冲宽与再束窄的机理;定量分析了不同重现期洪水对口门冲刷的影响;并探讨了口门初始宽度和洪量对行洪水位的影响。

a)50年一遇洪水初期,玉带滩冲刷尚不显著,口门内水位壅高明显,泄洪受阻,口门内外水面比降较大;随后玉带滩持续冲刷、口门逐渐拓宽,行洪能力增强,水位壅高缓解,口门内外比降显著减小。行洪期间,泥沙主要自口门向外海输运,并于玉带滩外侧近岸海床淤积。

b)洪水期间万泉河入海口门冲刷拓宽,洪水结束后,在潮汐和波浪共同作用下,泥沙向内回输导致口门重新淤浅束窄,形成“洪水拓宽—潮波回淤”的循环演变模式。未来随着上游输沙持续偏少,叠

加外海水下三角洲的持续侵蚀,河口泥沙总量大概率呈逐步减少趋势,口门或呈现长期缓慢展宽的演化特征。

c)遇不同重现期洪水时,口门宽度随洪峰流量增大而增大,两者近似呈线性关系。玉带滩冲刷主要受漫顶历时控制,即使洪峰流量不大,但若漫顶时间较长,仍可造成显著冲刷。

d)口门初始宽度对入海口段水位影响显著,但对上游河段水位影响有限;洪峰相同时,洪量对河道内水位影响较小。

e)结合流域防洪分区特征及玉带滩生态保护需求,建议博鳌亚洲论坛片区采取抬高建筑地基的防洪“自保”策略,确保达到50年一遇防洪标准;同时通过疏通泥沙通道、严控采砂、必要时人工补沙等措施,维系玉带滩形态稳定与生态功能。

f)受资料获取及模型精度所限,本文在万泉河口冲淤计算中,未对波浪-潮汐耦合作用下玉带滩的回淤过程开展模拟,也未对河口区域的海相侵蚀趋势进行定量分析与计算,相关内容可作为后续研究方向进一步探讨。

参考文献:

- [1] Bond J, Green A N, Cooper J A G, et al. Seasonal and episodic variability in the morphodynamics of an ephemeral inlet, Zinkwazi Estuary, South Africa[J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 65(1): 446-451.
- [2] Bosboom J, Stive M. Coastal Dynamics I: Lectures Notes[M]. Delft: Delft University of Technology, 2012: 387-438.
- [3] 黄宝霞,龚文平,温晶. 海南岛万泉河口博鳌潮汐水道演变及沿岸输沙率的计算[J]. *海洋学研究*, 2012, 30(3): 63-73.
Huang Baoxia, Gong Wenping, Wen Jing. Evolution of the Boao tidal inlet, Hainan Province and calculation of the longshore sediment transport [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2012, 30(3): 63-73. (in Chinese)
- [4] Bradbury A P, Powell K A. The short term profile response of shingle spits to storm wave action [C]//Proceedings of the 23rd International Conference on Coastal Engineering, Venice, Italy: ASCE, 1992: 2694-2707.
- [5] 李谷祺,彭俊,蔡锋,等. 沙坝-泻湖岸型砂质海滩地貌对台风的响应特征[J]. *海洋地质动态*, 2007(8): 14-18.
Li Guqi, Peng Jun, Cai Feng, et al. Response Characteristics of Sandy Beach Geomorphology with Bar-lagoon Coastline to Typhoons [J]. *Marine Geology Letters*, 2007(8): 14-18. (in Chinese)
- [6] Morton R A, Sallenger A H. Morphological impacts of extreme storms on sandy beaches and barriers [J]. *Journal of Coastal Research*, 2003, 19(3): 560-573.
- [7] 王世俊,李春初,田向平. 海南岛小海沙坝-泻湖-潮汐通道体系自动调整及恶化[J]. *应用海洋学报*, 2003(2): 248-253.
Wang Shijun, Li Chunchu, Tian Xiangping. Self-adjustment and deterioration of Xiaohai barrier-lagoon-tidal inlet system in Hainan Island [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2003(2): 248-253. (in Chinese)
- [8] 王洁,张登荣,杨世伦,等. 海南岛小海沙坝-泻湖-潮汐水道体系的演变分析研究[J]. *遥感信息*, 2013, 28(2): 88-92.
Wang Jie, Zhang Dengrong, Yang Shilun, et al. The Study on Barrier-lagoon-tidal Inlet System Evolution of Xiaohai in Hainan Island [J]. *Remote Sensing Information*, 2013, 28(2): 88-92. (in Chinese)
- [9] Velasquez-Montoya L, Overton M F, Sciaudone E J. Natural and anthropogenic-induced changes in a tidal inlet: Morphological evolution of Oregon Inlet [J]. *Geomorphology*, 2020, 350. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.106871.
- [10] 屠佳雨. 海南岛东南部海湾泻湖环境现代台风的沉积记录 [D]. 南京: 南京大学, 2017.
Tu Jiayu. Modern typhoon-induced sediment record in the lagoon of southeast Hainan coast [D]. Nanjing: Nanjing University, 2017. (in Chinese)
- [11] 匡翠萍,范家栋,董智超,等. 双导堤工程下潮汐水道与海岸泻湖地貌稳定性[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(10): 1584-1594.
Kuang Cuiping, Fan Jiadong, Dong Zhichao, et al. Geomorphological Stabilities of Tidal Inlet and Coastal Lagoon Under Influence of a Double-guide-dike Project [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2023, 51(10): 1584-1594. (in Chinese)
- [12] 刘臣,莫鸿侨,马殿光,等. 万泉河嘉积至博鳌河段河道水力特性分析[J]. *水运工程*, 2012(8): 113-118.
Liu Chen, Mo Hongqiao, Ma Dianguang, et al. Hydrodynamic characteristics of reach from Jiaji to Bo'ao in W anquan river [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2012(8): 113-118. (in Chinese)
- [13] 和宛琳,王振. 基于MIKE21模型的河口地区洪水风险分析 [J]. *水利技术监督*, 2022(7): 138-141.
He Wanlin, Wang Zhen. Flood Risk Analysis of Estuarine Areas

- Based on the MIKE21 Model[J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2022(7): 138–141. (in Chinese)
- [14] 海来以波,施浩然,刘晓庆,等. 变化环境下万泉河河口区盐分扩散的模拟分析[J]. *人民珠江*,2022,43(2):112–117.
- Hai Laiyibo, Shi Haoran, Liu Xiaoqing, et al. Simulation Analysis of Salt Diffusion at Wanquan River Estuary under Changing Environment[J]. *Pearl River*, 2022, 43(2): 112–117. (in Chinese)
- [15] 李松喆. 潮汐通道地形演变数值模拟研究[D]. 天津:天津大学,2022.
- Li Songzhe. Numerical Simulation of Morphological Evolution of Tidal Inlet[D]. Tianjin: Tianjin University,2022. (in Chinese)
- [16] 杨光耀,陈姿帆,吴浩南. 风暴潮-洪水共同驱动下万泉河口冲淤演变模拟研究[J]. *水利水电工程设计*,2026(1):76–80.
- Yang Guangyao, Chen Zifan, Wu Haonan. Numerical modeling of sediment scour and deposition in Wanquan Estuary under combined storm surge-flood forcing [J]. *Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering*, 2026 (1) : 76–80. (in Chinese)
- [17] 李兆楠,王子强,陈小齐,等. 海南万泉河口入海水沙变化对岸线特征的影响[J]. *中国农村水利水电*,2025(3):108–112.
- Li Zhaonan, Wang Ziqiang, Chen Xiaoqi, et al. The Impacts of Water-sediment Variation on Coastline Characteristics in theWanquan River Estuary of Hainan Island [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2025(3):108–112. (in Chinese)
- [18] DHI Water & Environment. MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM Sand Transport Module Scientific Documentation [R]. Denmark, 2013.
- [19] 张亮,贾建军,高建华,等. 海南博鳌海域的沉积物输运趋势与沉积速率[J]. *热带海洋学报*,2011,30(2):123–130.
- Zhang Liang, Jia Jianjun, Gao Jianhua, et al. Sediment transport and deposition rate along the Boao coast, Hainan Island [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2011, 30(2): 123–130. (in Chinese)
- [20] 高诚,车敏娜. 万泉河流域设计洪水分析[J]. *海河水利*,2024(5):57–60,70.
- Gao Cheng, Che Minna. Wanquan River Basin Design Flood Analysis[J]. *Haihe Water Resources*, 2024(5): 57–60, 70. (in Chinese)
- [21] 陈国强,高建华,朱大奎. 海南岛万泉河口海岸动态及其整治对策[J]. *海洋通报*,2004(4):38–43.
- Chen Guoqiang, Gao Jianhua, Zhu Dakun. Preliminary Study on the Dynamic Evolution of the Coast AlongWanquan River Estuary and Its Regulating Proposals [J]. *Marine Science Bulletin*, 2004 (4): 38–43. (in Chinese)
- [22] MARTINI I. Geomorphology of the Boao coastal system and potential effects of human activities—Hainan Island, South China [J]. *Journal of Geographical Sciences*,2005(2):187–198.

Analysis of Evolution Patterns and Mechanisms of Wanquan River Estuary Landforms under Extreme Flood Conditions

YANG Guangyao¹, HU Yue¹, JIANG Shanshan¹, CUI Cexuan¹, HUANG Rui²

(1. China Water Resources Beifang Investigation, Design, and Research Co.,Ltd., TianJin 300222, China; 2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To elucidate the geomorphological evolution patterns and dynamic mechanisms of the sandbar at the Wanquan River Estuary under extreme flood conditions, and to explore scientifically sound and feasible flood control measures as well as protection and management strategies for the Yudai Shoal in the Wanquan River Basin, this study establishes a two-dimensional, high-precision hydrodynamic-sediment coupling model for the estuary. The model parameters and boundary conditions are calibrated based on the actual topographical and hydrological characteristics of the study area. Model validation is conducted using measured flood marks and estuarine mouth width data obtained from field surveys during Typhoon "Tanmei" in 2024. The results demonstrate that the model possesses high simulation accuracy and can effectively reproduce the hydrodynamic processes and geomorphological evolution of the Wanquan River Estuary under flood conditions. Focusing on a 50-year return period flood—a typical extreme hydrological scenario in the basin—the study simulates and analyzes the spatiotemporal variations in hydrodynamic factors such as flow velocity and water level, as well as the dynamic evolution of geomorphic features including erosion, deposition, and terrain elevation changes during flood discharge. Furthermore, the research scope is extended to floods with return periods ranging from 5 to 50 years, systematically

examining the erosion and deposition response patterns of the estuary entrance under different flood magnitudes. Quantitative analysis is also conducted to assess the impacts of two key factors—initial mouth width and total flood volume—on flood water levels in the river channel. The results indicate that the geomorphological evolution of the Wanquan River Estuary exhibits a typical cyclic pattern characterized by "flood scouring and widening—tidal wave siltation and narrowing," driven by the combined action of fluvial and marine dynamics. Against the backdrop of a continuous reduction in upstream sediment transport, the estuary mouth may lose the necessary sediment supply for siltation and narrowing, potentially leading to a long-term, gradual widening trend. Additionally, the width of the estuary mouth shows an approximately linear positive correlation with flood peak discharge. The scouring depth of the Yudai Shoal, a key geomorphic unit of the estuary, is primarily regulated by the duration of flood overtopping, with scouring intensity increasing as overtopping time extends. The initial mouth width significantly influences water levels in the near-estuary reach, with the narrowest initial width leading to a pronounced rise in water levels in this section. However, its impact on the upper river channel is limited and gradually diminishes along the course. Under the conditions considered in this study, total flood volume has a negligible effect on water level changes throughout the river channel. These findings provide important theoretical support and technical references for regional flood control planning, optimization of estuary regulation measures, and ecological protection of the Yudai Shoal in the Wanquan River Basin. They have been successfully applied to the revision and enhancement of the basin's flood control plans, demonstrating substantial engineering application value and practical significance.

Keywords: extreme flood; geomorphological evolution; hydrodynamic-sediment coupled simulation; scour pattern; Wanquan River estuary

(责任编辑:向 飞)