



赣江尾闾主支枢纽下游电排站排涝对通航水流条件的影响*

吴承景¹, 肖 洋^{1,2,3,4,5}, 张涛涛², 王梓璇¹, 刘子涵⁶,
顾 娟¹, 徐林万¹, 袁 康¹, 田 帅⁷

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210024; 2. 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009;
3. 河海大学, 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210024; 4. 河海大学, 水利部重点实验室, 江苏 南京 210024;
5. 河海大学, 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210024; 6. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210024;
7. 扬州市勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225007)

摘要: 赣江尾闾主支枢纽工程是改善赣江水运的核心工程。为评估枢纽下游电排站排涝对通航水流条件的影响, 建立二维水动力数学模型, 选取枯季($500 \sim 5\,000 \text{ m}^3/\text{s}$)、洪季($5\,500 \text{ m}^3/\text{s}$)不同上游来流工况, 模拟分析排涝前后的流场演变特征。结果表明: 丰产电排站排涝对引航道流场的影响较大, 导致回流区个数增加、单区尺寸减小; 联圩电排站排涝的影响主要局限于排涝通道沿岸, 对引航道流场影响较小; 电排站排涝引起的流速变化较小, 最大变幅约 0.10 m/s , 影响范围约 $200 \sim 350 \text{ m}$, 且随外洲流量的增大影响范围减小; 水流漫滩后, 排涝对河道水动力的影响明显减弱; 排涝对航道通航水流条件影响有限, 不会产生明显不利影响。研究结果可为赣江尾闾主支枢纽下游航道通航安全提供支撑。

关键词: 赣江; 电排站; 排涝; 通航水流条件; 数值模拟

中图分类号: U617; TV135.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)10-0110-12

Impact of drainage pumping stations downstream of main tributary hub in Ganjiang estuary on navigable water flow conditions

WU Chengjing¹, XIAO Yang^{1,2,3,4,5}, ZHANG Taotao², WANG Zixuan¹, LIU Zihan⁶, GU Ran¹, XU Linwan¹, YUAN Kang¹, TIAN Shuai⁷

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;
2. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;
3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210024, China;
4. Key Laboratory of Ministry of Water Resources, Hohai University, Nanjing 210024, China;
5. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210024, China;
6. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;
7. Yangzhou Survey Design Research Institute Co., Ltd., Yangzhou 225007, China)

Abstract: The Ganjiang Estuary Main Tributary Hub project is a core initiative aimed at improving waterway transportation along the Ganjiang River. To evaluate the impact of downstream drainage pumping stations on navigation water flow conditions, a two-dimensional hydrodynamic model is established. Different upstream inflow conditions are selected during the dry season($500 \sim 5\,000 \text{ m}^3/\text{s}$) and flood season($5\,500 \text{ m}^3/\text{s}$) to simulate and analyze

收稿日期: 2025-01-15

*基金项目: 国家自然科学基金长江联合基金项目(U2240209); 国家自然科学基金项目(52309102); 赣江下游尾闾综合整治工程科研课题研究项目(JXTC2023020257C1)

作者简介: 吴承景(2001—), 男, 硕士研究生, 从事水力学及河流动力学研究。

通信作者: 张涛涛(1992—), 男, 副教授, 从事水力学及河流动力学研究。E-mail: Ztt714521@163.com

the flow field evolution characteristics before and after drainage. The results show that the drainage operations at the Fengchan drainage pumping station have a significant impact on the flow field, leading to an increase in the number of recirculation zones and a reduction in the size of individual recirculation areas. The impact of drainage operations at the Lianwei drainage pumping station is mainly confined to the drainage channels and riverbanks, with relatively minor effects on the navigation channel flow field. The flow velocity changes caused by the drainage of the drainage pumping station are relatively small, with a maximum amplitude of about 0.10 m/s and an impact range of about 200–350 m, and the impact range decreases with the increase of the outer flow rate. After the water spreads onto the floodplain, the impact of drainage operations on the hydrodynamics of the river channel is significantly reduced. The impact of drainage on navigation water flow conditions is limited and will not have significant adverse effects. The results of this study can provide valuable support for ensuring the navigational safety of the downstream channel of the main tributary hub in Ganjiang estuary.

Keywords: Ganjiang River; drainage pumping station; drainage; navigational flow condition; numerical simulation

赣江作为江西省第一大江,是江西省最大的通航水道,赣江下游尾闾地区是江西水运枢纽的核心地带。近年来,赣江尾闾河道受自然和人类活动双重作用,加上缺乏控制性工程,面临着枯水位降低,枯水期延长等问题^[1-4]。为此,江西省建设了赣江尾闾四支水利枢纽工程,旨在系统治理区域水安全问题,恢复水生态环境,促进水运经济发展^[5-11]。赣江尾闾主支枢纽位于赣江南昌—吴城航段,枢纽河段规划为 I 级航道^[12],是连接赣江干流与长江—鄱阳湖水系的关键通道。为防止两岸联圩发生积水、内涝,主支河道沿河建有多处排涝站。排涝站在运行过程中水流直冲航道,可能会对航道水流条件产生影响,进而影响通航。因此,需要探究排涝对航道通航水流条件影响,为保障通航安全提供支撑。

目前关于排涝站运行及支流排涝入汇对航道通航水流条件影响的研究,主要采用物理模型试验和数值模拟的方法进行分析。陈忠军^[13]针对电排站排涝时通航河道中横向流速过大的问题,提出在出水口外侧布置导流墩调节水流方向,并通过水工模型试验进行合理化论证;傅建彬等^[14]基于水工模型试验,分析外环西河泵闸工程排涝对苏州河通航的影响,并提出调整海漫段结构、优化消力池翼墙形式等整流措施,保障通航安全;黄凌超等^[15]以珠江三角洲某排涝站为例,采用物

理模型的方法,分析排涝站运行对感潮河段通航的影响;张艳艳等^[16]以中顺大围白花头水利枢纽为例,采用物理模型试验模拟闸泵联调的情况下内江排涝对外江通航的影响,并提出了适用于涨潮、落潮及转潮不同工况下的整治措施。甘全等^[17]通过建立二维水动力数学模型,分析冯铁营引河分洪闸对淮河航道水流条件的影响;徐建昌^[18]通过数值模拟计算,分析污水处理厂排水对航道通航条件的影响。赣江主支枢纽右侧布置二线 I 级船闸,船闸下游引航道右岸建有 2 座电排站。已有研究通过数值模拟对主支枢纽一期围堰施工期航道通航水流条件进行了分析^[19],但下游引航道区域电排站的运行是否会对通航产生影响还有待进一步研究。

本文建立赣江尾闾整体二维水动力数学模型,通过模拟典型工况下工程河段水动力过程,研究电排站排涝对河道水动力的影响,分析对航道内通航水流条件的影响。研究成果旨在为主支枢纽通航安全和运行调度提供支撑。

1 工程概况

1.1 主支枢纽平面布置

赣江主支枢纽位于赣江下游尾闾西河下游,新建区象山镇鸭洲村附近,距象山镇 6 km,距南昌市约 35 km。赣江主支枢纽主体建筑物由泄水

闸、船闸、鱼道和连接挡水建筑物组成，上闸线轴线总长 1 346.7 m，从左至右依次布置有：左岸连接段(包括鱼道,长 124.6 m)、泄水闸段(分 I、II、III 区,长 752.8 m)、中间连接段(长 218.5 m)、船闸段(长 142.8 m)、右岸连接段(长 108.0 m)；右岸堤防改线长 1 480 m。平面布置见图 1。

船闸主体段由上闸首、闸室、下闸首及输水系统组成。船闸最大允许工作水头 7.62 m，闸室

有效尺寸为 320.0 m×34 m×6.9 m(长×宽×最小槛上水深)。枢纽船闸设计最高通航水位标准为 20 a 一遇洪水，设计最低通航水位保证率为 98%。主支闸上、下游设计最高通航水位为 20 a 一遇设计洪水位，分别为 20.80 和 20.79 m。主支枢纽闸上设计最低通航水位为 11.88 m，闸下设计最低通航水位为 7.88 m，运营期利用船闸通航。

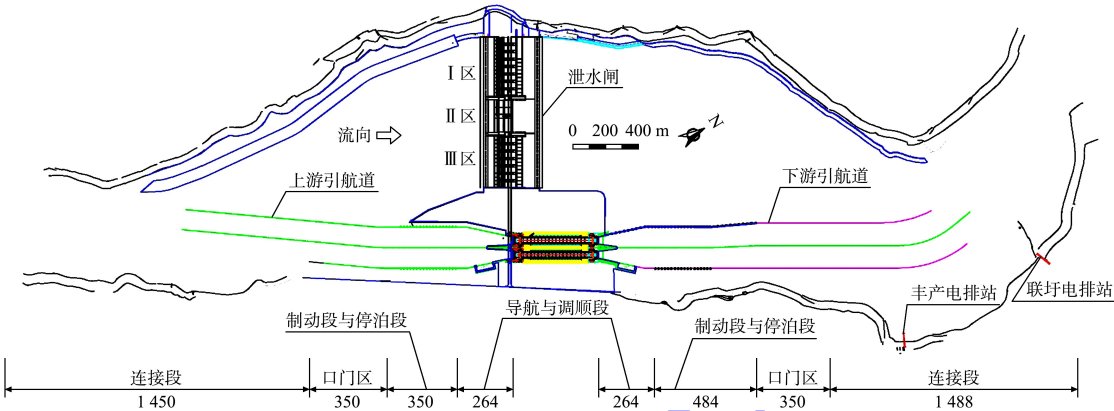


图 1 主支枢纽工程布置 (单位: m)

Fig. 1 Layout of main tributary hub project (unit: m)

1.2 电排站布置

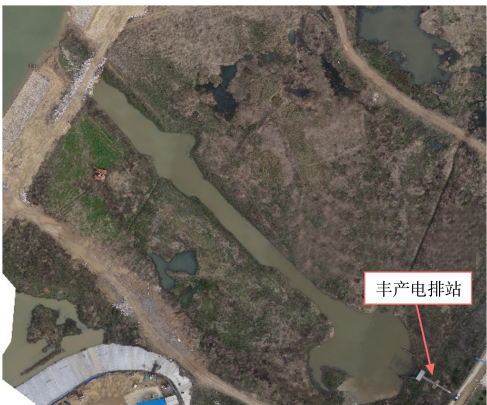
丰产电排站、联圩电排站位于主支船闸下游引航道连接段附近的河道右岸侧，距离船闸下游

引航道口门区末端分别约 0.7、1.2 km。丰产、联圩电排站相关结构设计参数见表 1，临河侧卫星影像见图 2。

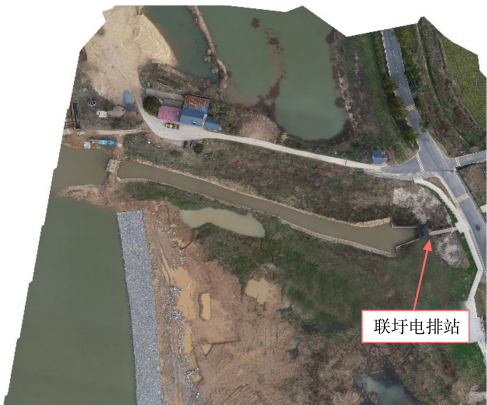
表 1 丰产、联圩电排站设计结构

Tab. 1 Design structure of Fengchan and Lianwei drainage pumping stations

建筑物名称	涵管孔径/(m×m)	壁厚/m	涵管底板高程/m	泵房前池底板高程/m	闸室闸门口尺寸/(m×m×m)	设计流量/(m ³ ·s ⁻¹)
丰产电排站	2.2×2	0.4	14.5	14.5	2×2.2×2	18.8
联圩电排站	2.0×2	0.4	12.4	12.4	2×2.0×2	9.6



a) 丰产电排站



b) 联圩电排站

图 2 电排站临水侧卫星图

Fig. 2 Satellite image of the waterside of drainage pumping stations

1.3 通航标准

主支枢纽施工期采用临时航道通航, 当前内河航道水流条件我国尚无标准; 赣江属鄱阳湖水系, 该流域通常采用“表面流速不超过 2.00 m/s”作为控制指标。根据 GB 50139—2014《内河通航标准》^[20], 运营期采用船闸通航时, 通航水流条件标准为: 引航道口门区水面最大纵向流速 ≤ 2.00 m/s, 横向流速 ≤ 0.30 m/s, 回流流速 ≤ 0.40 m/s; 引航道与主航道的水流应平稳过渡; 制动和停泊段水面最大纵向流速 ≤ 0.50 m/s, 横向流速 ≤ 0.15 m/s, 导航与调顺段宜为静水区。

2 数学模型的建立与验证

2.1 控制方程

在天然河道内的明渠流动中, 水平尺度远大于垂向尺度, 水流相关参数沿水平方向的变化幅度远大于沿垂直方向的变化幅度, 因此水流参数在垂直方向上的变化可忽略不计。假设动水压强沿水深方向上的分布符合静水压强分布规律, 可得出沿水深方向平均的平面二维水流运动基本方程如下。

连续方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(h) + h \operatorname{div}(\mathbf{u}) = S_h \quad (1)$$

x 方向动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(u) = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h \nu_t \nabla u) \quad (2)$$

y 方向动量方程:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(v) = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h \nu_t \nabla v) \quad (3)$$

式中: h 为水深; t 为时间; u 、 v 为 x 、 y 方向上的速度分量; g 为重力加速度; ν_t 为动量扩散系数; Z 为自由水面高程; S_h 为流体的源或汇; S_x 、 S_y 为 x 、 y 方向流体的源或汇。

2.2 模型的建立

赣江自南昌以下进入尾间地区, 并在此分东西两河, 共四汉注入鄱阳湖, 该区域水动力条件复杂。目前赣江尾间四支枢纽工程大部分已建成, 该工程将对尾间水动力过程产生影响, 模型范围需涵盖四支枢纽工程, 因此将模型上游边界设在外洲断面, 北支、中支和南支下游边界均设置在对应枢纽工程闸址, 主支枢纽重点分析下游引航道通航水流条件, 下游边界设置在枢纽下游约 8 km 处。本研究使用 TELEMAC 软件建立鄱阳湖的二维水动力学模型。TELEMAC 是一个基于有限元法的开源数值模拟软件, 可以实现高性能的并行计算, 并已广泛应用于河道水流条件模拟^[21-22]。本文建立了无枢纽模型、有枢纽模型 2 个二维水流数学模型, 其中无枢纽模型用于模型验证和参数率定, 有枢纽模型用于研究主支枢纽引航道通航水流条件。模型上游给定外洲流量边界, 下游四支给定水位边界。有枢纽模型在枢纽区域和电排站进行局部网格加密, 采用三角形网格, 尺寸为 0.5 ~ 20.0 m, 共 14.416 4 万个网格, 模型范围及网格划分见图 3。



图 3 主支枢纽模型

Fig. 3 Main tributary hub model

2.3 模型的验证

在赣江四支沿线布设 8 个测验断面, XS-1 用于监测主支与北支分流前的水位; XS-2 用于监测主支与北支分流后的水位 (XS-4 为高水位选取断面), XS-3 用于监测主支枢纽处流速和水位, XS-5 用于监测水文站昌邑站处水位, BZ-1 用于监测北支枢纽处流速和水位, ZZ-1 用于监测中支与南支分流后的流速和水位, NZ-1 用于监测水文站滁槎站处流速和水位, 位置见图 4。于 2019 年 7 月以及 2020 年 9、10 月进行现场测验, 分别对应高水、中水和低水情况, 模型地形采用 2018 和 2020 年的赣

江主支河道地形数据。给定 3 次水文测验对应上下游边界条件, 将模拟计算的水位、流速与水文测验结果进行对比, 结果见表 2、图 4。由表 2 可知, 计算的水位值与实测值较为接近, 误差不大于 8 cm; 由图 4 可知, 4 支测验断面模拟的流速分布与原型基本一致, 个别测点的模拟值与实测值相差较大, 可能是由于河道地形变化和水流非恒定导致, 验证结果符合 JTS/T231—2021《水运工程模拟试验技术规范》^[23] 要求。经率定, 模型采用的曼宁系数为 0.024, 涡黏系数为 0.5。

表 2 各水位测站拟合情况
Tab. 2 Conditions of water level monitoring stations

断面名称	低水(2020 年 10 月)外洲流量 $Q=470\text{ m}^3/\text{s}$			中水(2020 年 9 月)外洲流量 $Q=2\,800\text{ m}^3/\text{s}$			高水(2019 年 7 月)外洲流量 $Q=3\,780\text{ m}^3/\text{s}$		
	实测水位/m	计算水位/m	水位差值/m	实测水位/m	计算水位/m	水位差值/m	实测水位/m	计算水位/m	水位差值/m
XS-1	14.33	14.35	0.02	16.26	16.30	0.04	—	—	—
XS-2	14.21	14.27	0.06	16.12	16.15	0.03	—	—	—
XS-3	14.03	14.05	0.02	15.95	16.00	0.05	—	—	—
XS-4	—	—	—	—	—	—	16.55	16.57	0.02
XS-5	—	—	—	—	—	—	16.32	16.25	-0.07
BZ-1	14.35	14.40	0.05	16.17	16.23	0.06	16.61	16.53	-0.08
ZZ-1	14.50	14.42	-0.08	16.35	16.33	-0.02	16.72	16.75	0.03
NZ-1	14.55	14.48	-0.07	16.41	16.45	0.04	16.63	16.60	-0.03

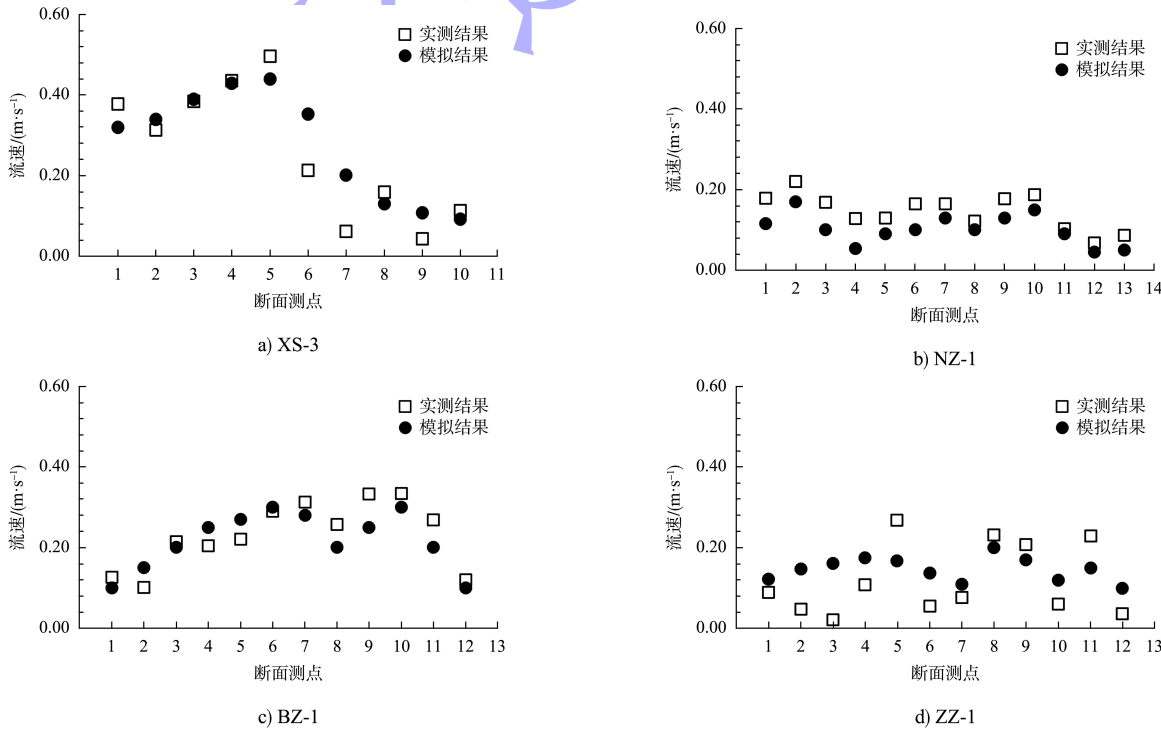


图 4 中水情况下各断面测点流速验证

Fig. 4 Verification of flow velocity at each cross-section measurement points under medium water conditions

2.4 工况设置

2 个电排站涵管的底板高程分别为 14.5 和 12.4 m, 电排站至引航道区间的边滩高程约 15 m, 均低于洪季最低水位(15.5 m), 即排涝口在洪季工况中始终处于淹没状态, 排涝对航道表面流场的影响较小。因此, 重点分析枯季排涝对通航水流条件的影响, 并考虑 1 个洪季最低水位工况。根据枢纽运营期水流条件, 共设计 6 种不同的外洲来流工况, 模拟电排站排涝常见情况, 其中枯

季低水位工况 YK1、YK2 ($Q=500、1\,000\text{ m}^3/\text{s}$); 枯季中水位工况 YK3、YK4 ($Q=2\,000、3\,000\text{ m}^3/\text{s}$); 枯季高水位工况 YK5 ($Q=5\,000\text{ m}^3/\text{s}$) 和洪季低水位工况 YC1 ($Q=5\,500\text{ m}^3/\text{s}$), 并设置 6 种无电排站排涝 (YKD1~YKD5、YCD1) 作为对照工况, 用以对比电排站排涝对航道的影响。根据枢纽闸门调度准则, 枯季主支闸门主要通过Ⅲ区泄水闸下泄上游来水, 洪季 4 支闸门敞泄, 恢复天然河道, 工况设计见表 3。

表 3 模型计算工况
Tab.3 Model calculation conditions

洪枯季	工况号	外洲流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	主支枢纽工程		电排站流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	
			主支下泄流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	闸址下游水位/m	丰产	联圩
枯季(调控)	YK1	500(Ⅲ区下泄)	325	8.03	18.8	9.6
	YKD1	500(Ⅲ区下泄)	325	8.03	—	—
	YK2	1 000(Ⅲ区下泄)	575	9.09	18.8	9.6
	YKD2	1 000(Ⅲ区下泄)	575	9.09	—	—
	YK3	2 000(Ⅲ区下泄)	950	10.29	18.8	9.6
	YKD3	2 000(Ⅲ区下泄)	950	10.29	—	—
	YK4	3 000(Ⅲ区下泄)	1 290	11.22	18.8	9.6
	YKD4	3 000(Ⅲ区下泄)	1 290	11.22	—	—
	YK5	5 000(Ⅲ区下泄)	2 822	14.45	18.8	9.6
	YKD5	5 000(Ⅲ区下泄)	2 822	14.45	—	—
洪季(敞泄)	YC1	5 500	—	15.57	18.8	9.6
	YCD1	5 500	—	15.57	—	—

注: 采用黄海高程, 工况为运营期通航水流条件。

2.5 断面测点布置

为分析下游引航道受电排站排涝影响情况, 在枢纽下游引航道区域布置 18 个监测断面 DMX-1~DMX-18, 用于提取测点流速, 分析航道通航水流条件。断面间距为 250 m, 每个断面均匀布置 5 个

测点, 共 90 个流速测点, 航道流速测点布置见图 5, 流速测点从左岸至右岸依次编号(1 号~5 号监测点)。数据提取中, 纵向流速为正表示顺水流方向, 为负则表示逆水流方向; 横向流速为正表示垂直水流向右岸, 为负表示向左岸。

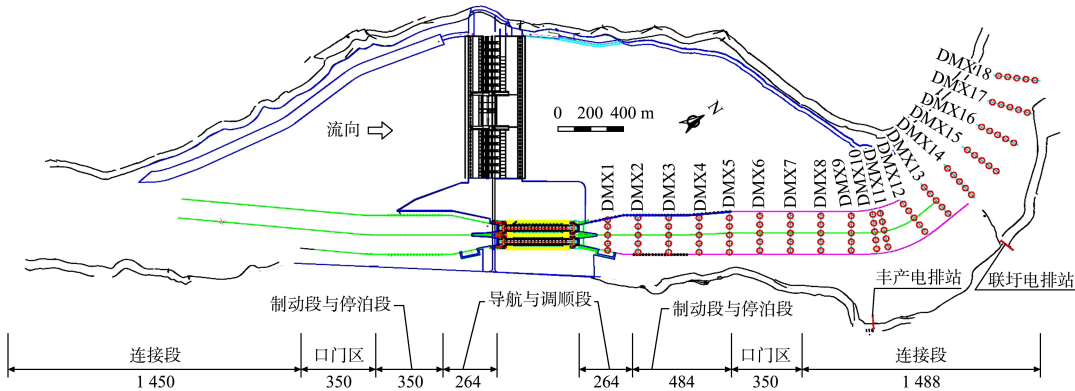


图 5 主支枢纽工程航道流速测点布置 (单位: m)
Fig.5 Layout of channel flow velocity measurement points for main tributary hub project (unit: m)

3 结果分析

3.1 排涝前后流场变化情况

丰产电排站与联圩电排站均在主枢纽下游引航道右侧岸边,运行时对枢纽上游水动力过程影响甚微,因此主要分析排涝对下游河道影响。YK4 工况下排涝前后枢纽下游河道流场对比见图 6,可以看出,丰产、联圩电排站排涝对河道水流的影响范围主要集中在排涝口附近,排涝使排涝口出现局部高流速区域(流速达到 0.30 m/s)。

各工况下丰产、联圩电排站排涝前后局部流场分别见图 7、8。由图 7 可知,受泄水闸泄水主流剪切的影响,丰产电排站所对应的引航道区域会出现一个明显顺时针回流区,且随着流量越大,回流区范围越大、流速越大,在 YK5 工况下回流区宽约 150 m 、长约 400 m ,回流流速最高可达 0.10 m/s ;丰产电排站排涝后,该区域回流区个数增加,由原先的大范围回流变为多个局部小范围回流,单个回流区尺寸减小,这主要由于该区域流速较小(流速普遍小于 0.10 m/s),易受排涝水流冲击影响;当水流漫滩后(YC1 工况),排涝通道处于淹没状态,排涝对引航道区域水动力和回流区影响明显减弱。由图 8 可知,联圩电排站排涝对河道流场影响较小,主要在排涝通道上有明显变化,这是由于联圩电排站排涝口位于河道弯道束窄段,流速较大(流速普遍大于 0.60 m/s),排涝对河道流场影响有限。

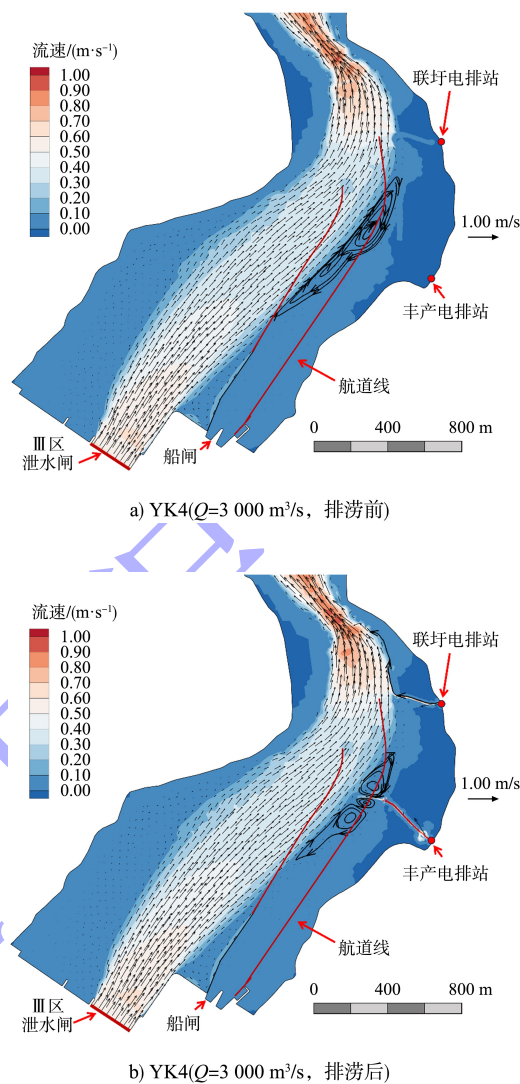
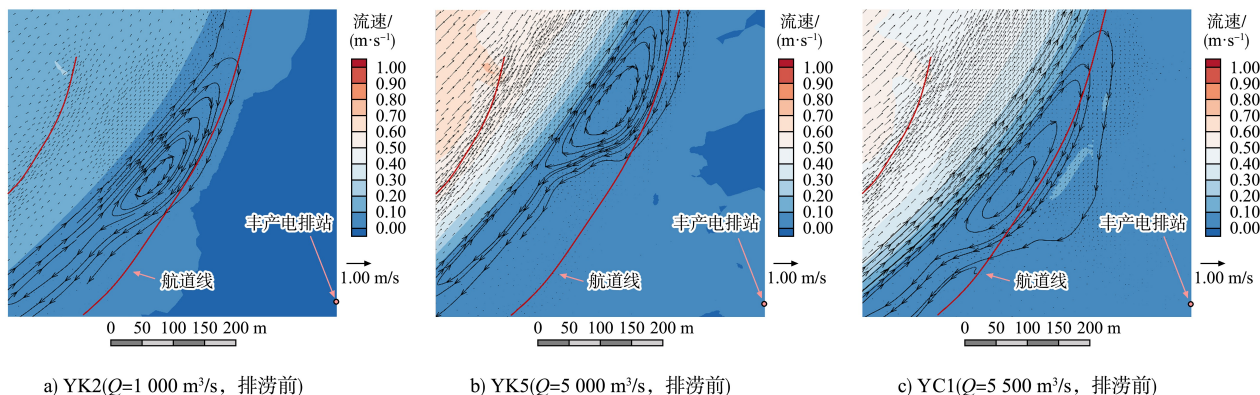


图 6 电排站排涝前后流场对比

Fig. 6 Comparison of flow field before and after drainage at drainage pumping stations



a) YK2($Q=1\ 000\text{ m}^3/\text{s}$, 排涝前)

b) YK5($Q=5\ 000\text{ m}^3/\text{s}$, 排涝前)

c) YC1($Q=5\ 500\text{ m}^3/\text{s}$, 排涝前)

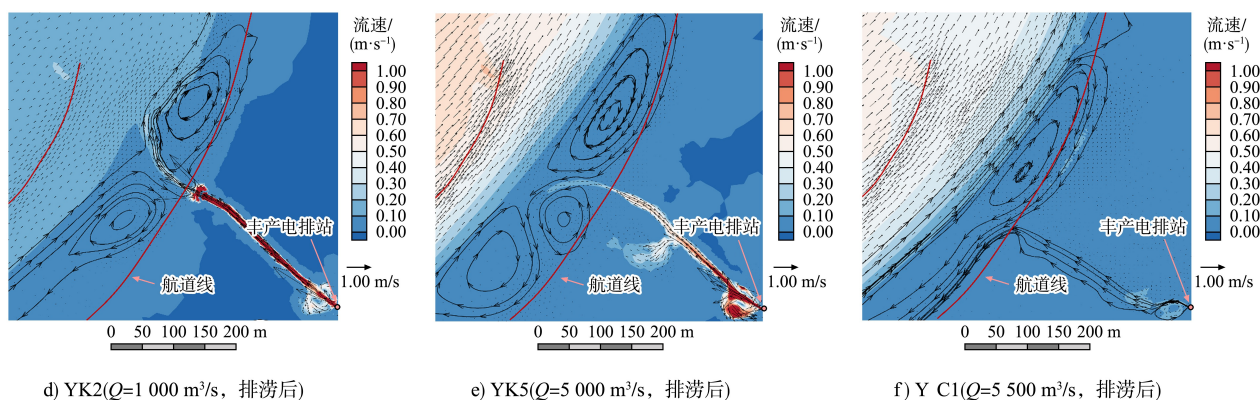


图 7 丰产电排站排涝前后流场对比

Fig. 7 Comparison of flow field before and after drainage at Fengchan drainage pumping station

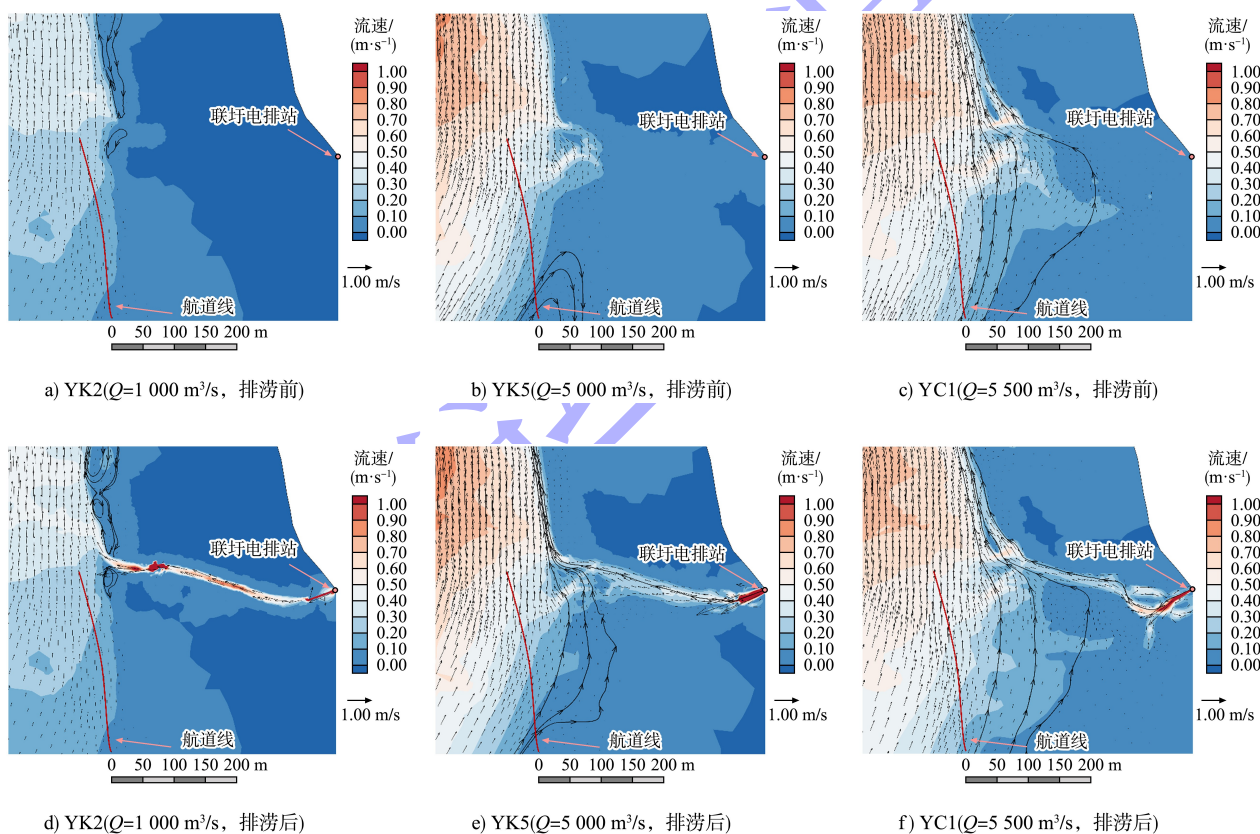


图 8 联圩电排站排涝前后流场对比

Fig. 8 Comparison of flow field before and after drainage at Lianwei drainage pumping station

3.2 排涝前后流速变化情况

排涝前后河道流速差值分布见图 9。由图可知, 排涝导致的流速变化主要集中在排涝通道以及排涝水流汇入主流的局部区域, 流速差的绝对值最大可达 0.10 m/s 以上。在各工况下, 丰产电排站排涝对航道的流速影响相对较大, 联圩电排

站排涝的影响区域主要在岸边, 不在航道范围内。计算结果表明, 丰产电排站的排涝会使航道右侧部分区域的流速增加、左侧部分区域的流速降低, 流速差约 $-0.04 \sim 0.10$ m/s, 影响范围约为 250 ~ 350 m。联圩电排站的排涝会使排涝通道口区域的流速增加, 其下游岸边区域的流速则降低, 流速

差约 $-0.10\sim 0.09$ m/s, 影响范围约为 $200\sim 300$ m, 主要是由于排涝水流汇入顶冲河道主流, 对下游岸边水流起到一定防护作用, 致使流速降低。随着外洲流量的增加, 排涝站对流速的影响范围呈减小的

趋势, 同时在回流作用下, 影响范围由偏向下游转为偏向上游。当外洲来流量大于 $5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 水流漫滩, 电排站排涝流速变化区域主要集中在排涝通道。

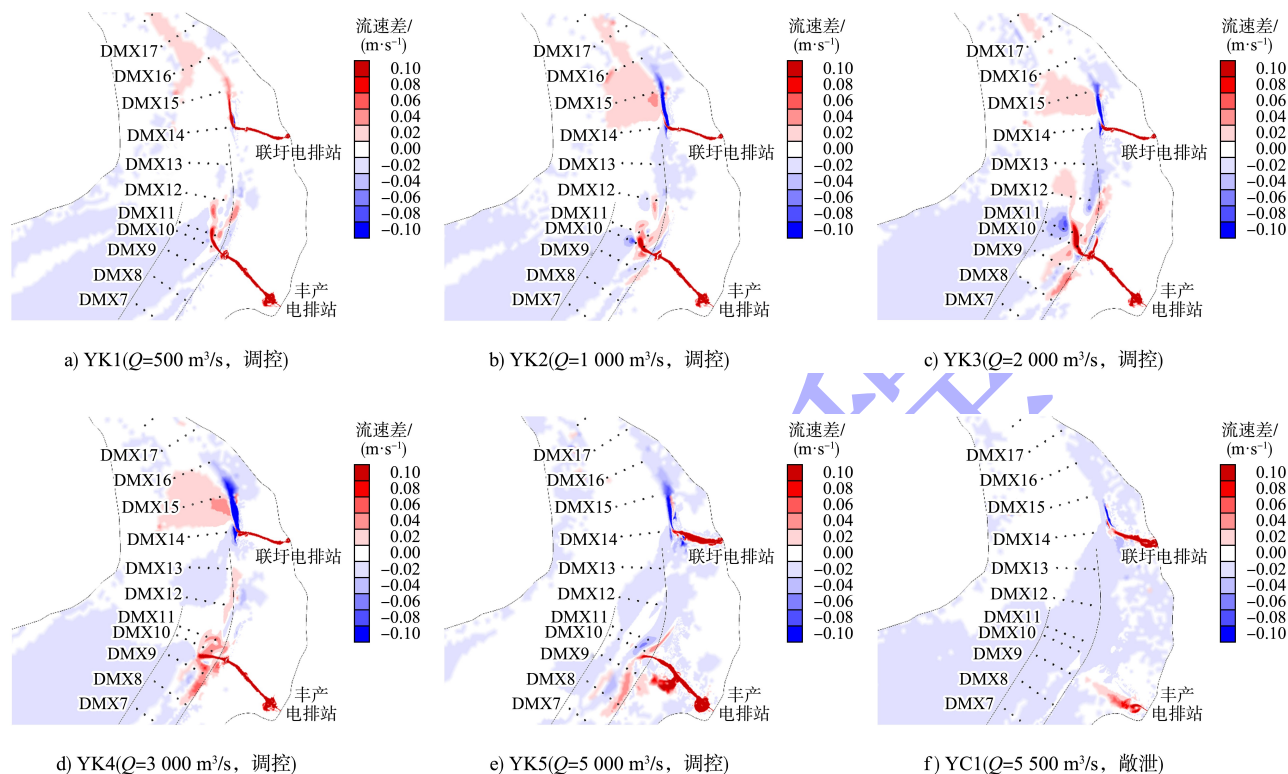


图9 不同工况电排站附近排涝前后流速差云图(排涝后合流速-排涝前合流速)

Fig. 9 Contour map of flow velocity difference before and after drainage near drainage pumping stations under different working conditions (combined flow velocity after drainage-combined flow velocity before drainage)

3.3 排涝对下游引航道通航影响

为反映各工况测点流速是否超过通航流速限值, 对测点流速极值情况进行统计, 见表3。各工况下监测点排涝前后纵向流速最大值分别为 1.51 、 1.53 m/s, 与电排站排涝前相比, 纵向流速变幅较小, 纵向流速差不超过 0.05 m/s。排涝前后横向流速最大值分别为 0.39 、 0.41 m/s, 与电排站排涝前相比, 横向流速变幅较小, 横向流速差不超过 0.04 m/s。由此可见, 排涝后各监测点纵向、横向流速变化较小。由3.1、3.2分析可知, 排涝对航道的影响主要集中在2个电排站之间(即断面DMX9~DMX17)。各工况下断面DMX9~DMX17测

点排涝前后最大横向流速变化情况见图10, 可以看出, 各工况下电排站排涝后航道各断面的横向流速基本低于 0.30 m/s, 仅断面DMX14、DMX16在排涝后存在测点横向流速超过 0.30 m/s情况, 总体排涝后横向流速略有增加, 但增幅不大。

综上, 2个电排站排涝后, 枢纽下游引航道纵向流速小于 2.00 m/s, 横向流速超过 0.30 m/s的断面没有显著变化, 虽然对航道内回流流态产生明显影响, 但回流流速低于规范规定的限值(0.40 m/s), 且未导致其他不良流态产生。因此, 可认为电排站排涝后对航道水流条件影响有限, 不会产生明显不利影响。

表 3 现状方案下排涝前后流速极值

Tab. 3 Flow velocity extremes before and after drainage under the current plan

外洲流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	极值 统计项	合流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)			纵向流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)			横向流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		
		无电排站	有电排站	流速差	无电排站	有电排站	流速差	无电排站	有电排站	流速差
500	max	0.36	0.39	0.03	0.34	0.37	0.03	0.12	0.13	0.02
	min	0	0	0	0	0	0	-0.15	-0.16	-0.01
1 000	max	0.57	0.60	0.05	0.55	0.58	0.05	0.16	0.17	0.03
	min	0	0	-0.02	-0.02	-0.01	-0.01	-0.21	-0.21	-0.02
2 000	max	0.81	0.83	0.03	0.79	0.81	0.03	0.32	0.33	0.02
	min	0	0	-0.03	0	0	-0.04	-0.26	-0.26	-0.02
3 000	max	1.09	1.12	0.05	1.07	1.09	0.05	0.39	0.41	0.02
	min	0.02	0.02	-0.02	-0.01	-0.01	-0.02	-0.31	-0.31	-0.04
5 000	max	1.54	1.56	0.03	1.51	1.53	0.02	0.35	0.36	0.01
	min	0.06	0.05	-0.01	0	0.01	-0.01	-0.35	-0.35	-0.01
5 500	max	1.47	1.46	0.03	1.43	1.43	0.03	0.28	0.29	0.10
	min	0.26	0.15	-0.21	0.25	0.15	-0.19	-0.31	-0.32	-0.04

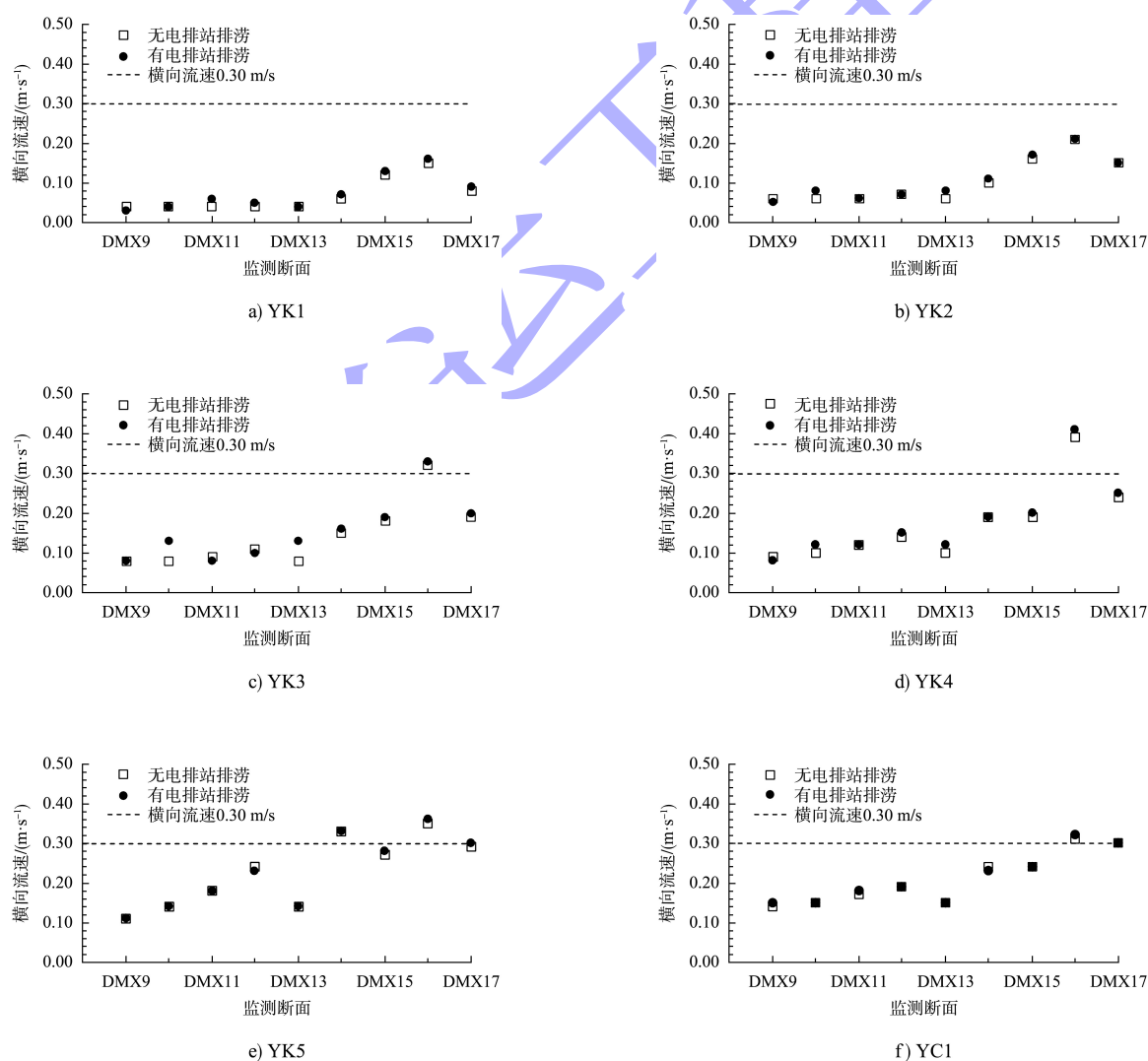


图 10 各断面测点最大横向流速

Fig. 10 Maximum lateral flow velocity of each cross-section measurement point

4 结论

1) 丰产电排站排涝后, 枢纽下游引航道区域易受排涝水流冲击影响, 回流区个数增加, 单个回流区尺寸减小; 联圩电排站排涝对河道流场影响较小, 主要集中在排涝通道; 水流漫滩后, 排涝对河道水动力影响明显减弱。

2) 排涝导致的流速变化主要集中在排涝通道以及排涝水流汇入主流的局部区域, 流速变幅最大约 0.10 m/s, 影响范围约 200~350 m; 随着外洲流量的增加, 2 个排涝站对流速的影响范围呈减小的趋势; 丰产电排站排涝对航道流速影响相对较大, 联圩电排站排涝的影响区域主要在岸边。

3) 电排站排涝后, 枢纽下游引航道纵向、横向流速变化较小, 对航道内回流流态产生明显影响, 但流速低于 0.40 m/s, 未导致其他不良流态产生。电排站排涝后对航道水流条件影响有限, 不会产生明显不利影响。

4) 排涝口在洪季工况中始终处于淹没状态, 排涝对航道表面流场的影响较小。由于本次采用平面二维数模计算研究, 只能反映垂线平均流速影响。后续可结合物理模型和三维数学模型, 深入论证排涝对不同分层流速的影响。

参考文献:

- [1] 乔时雨, 李国芳, 李国文, 等. 变化环境下赣江流域水文情势演变及归因分析[J]. 人民长江, 2024, 55(5): 99-106.
- QIAO S Y, LI G F, LI G W, et al. Analysis of hydrologic regime evolution and attribution in Ganjiang River Basin under changing environment[J]. Yangtze River, 2024, 55(5): 99-106.
- [2] 刘立平, 黄建宇. 浅谈赣江丰城龙头山枢纽以下航段碍航成因、整治措施及成效[J]. 中国水运, 2023(13): 92-97.
- LIU L P, HUANG J Y. Discussion on the causes, regulation measures and effects of navigation obstruction below Longtoushan junction in Fengcheng, Ganjiang River[J]. China water transport, 2023(13): 92-97.
- [3] 刘同宦, 安智伟, 柴朝晖, 等. 鄱阳湖五河入湖水沙通量及典型断面形态变化特性分析[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(11): 8-13, 39.
- LIU T H, AN Z W, CHAI Z H, et al. Changes of water and sediment flux and typical sectional shape of five rivers flowing into the Poyang Lake[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(11): 8-13, 39.
- [4] 史明涓, 史小平. 赣江下游枯水期水位持续降低影响与分析[J]. 中国防汛抗旱, 2016, 26(4): 55-58, 96.
- SHI M J, SHI X P. Influence and analysis of continuous reduction of water level during dry season in the lower reaches of Ganjiang River[J]. China flood & drought management, 2016, 26(4): 55-58, 96.
- [5] WANG Z C, XU X F, HUANG Z W, et al. Siltation characteristics of the tail reach of Ganjiang River under the regulation of estuary gates[J]. Water science & technology water supply, 2020, 20(8): 3707-3714.
- [6] 许新发, 黄志文, 周苏芬, 等. 不同整治工程条件下赣江尾闾河网水流特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(7): 7-13.
- XU X F, HUANG Z W, ZHOU S F, et al. Effects of regulation projects on flow characteristics in tail channels of Ganjiang River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(7): 7-13.
- [7] 刘质伟, 连栗楷, 尹超裕. 赣江下游尾闾综合整治工程船闸通过能力与耗水量设计分析[J]. 中国水运, 2024(7): 107-109.
- LIU Z W, LIAN L K, YIN C Y. Design analysis of ship lock passing capacity and water consumption for the comprehensive improvement project of the Ganjiang River downstream estuary[J]. China water transport, 2024(7): 107-109.
- [8] 周苏芬, 邹年华, 唐立模, 等. 河道整治工程对赣江尾闾防洪影响研究[J]. 江西水利科技, 2018, 44(5): 317-323.
- ZHOU S F, WU N H, TANG L M, et al. Experimental study on the flood model of Ganjiang River under changing conditions[J]. Jiangxi hydraulic science & technology, 2018, 44(5): 317-323.
- [9] 罗恒, 白玉川, 徐海珏. 赣江尾闾河段洲头控导工程的整治效果分析[J]. 港工技术, 2017, 54(3): 1-6.
- LUO H, BAI Y C, XU H J. Analysis on regulation effect of deltaic control project at the lower reaches of Ganjiang River[J]. Port engineering technology, 2017, 54(3): 1-6.

- [10] 白玉川, 罗恒, 徐海珏, 等. 赣江尾闾主支河道整治效果分析[J]. 水运工程, 2017(4): 117-123, 130.
BAI Y C, LUO H, XU H J, et al. Regulation effect analysis of main branch of Ganjiang River sink[J]. Port & waterway engineering, 2017(4): 117-123, 130.
- [11] 罗恒. 基于数学模型的赣江尾闾河段整治前后的对比分析[D]. 天津: 天津大学, 2017.
LUO H. Comparative analysis of Ganjiang River sink before and after regulations based on mathematical models[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [12] 江西省人民政府. 江西省内河航道与港口布局规划(2021—2050年)[R]. 南昌: 江西省人民政府, 2022.
Jiangxi Provincial People's Government. Plan for the layout of inland waterways and ports in Jiangxi Province (2021-2050) [R]. Nanchang: Jiangxi Provincial People's Government, 2022.
- [13] 陈忠军. 瓜步汛电排站对通航影响的解决措施[J]. 人民珠江, 2009(1): 42-43.
CHEN Z J. Design of measures for eliminating negative impact of Guabuxun Electric Pumping Station on navigation channel[J]. Pearl River, 2009(1): 42-43.
- [14] 傅建彬, 孙龙. 外环西河泵闸排涝对苏州河通航的影响[J]. 浙江水利科技, 2021, 49(5): 21-24.
FU J B, SUN L. Influence of outer ring west river pump gate drainage on Suzhou River navigation[J]. Zhejiang hydrotechnics, 2021, 49(5): 21-24.
- [15] 黄凌超, 穆守胜. 排涝站运行对感潮河段通航的影响分析[J]. 广东水利水电, 2021(9): 52-55, 66.
HUANG L C, MU S S. Influential analysis of drainage hub regulation on the navigation condition in a tidal river[J]. Guangdong water resources and hydropower, 2021(9): 52-55, 66.
- [16] 张艳艳, 张康, 王建平, 等. 支流入汇对潮汐河段通航的影响及整治措施研究[J]. 人民长江, 2022, 53(1): 13-17, 24.
ZHANG Y Y, ZHANG K, WANG J P, et al. Study on influence of tributary inflow on tidal river navigation and flow adjustment measures [J]. Yangtze River, 2022, 53(1): 13-17, 24.
- [17] 甘全, 原贺军. 二维水动力模型在水利工程航道通航条件影响评价中的应用[J]. 水运管理, 2024, 46(10): 20-23.
GAN Q, YUAN H J. Application of two-dimensional hydrodynamic model in the evaluation of navigation conditions in waterway engineering[J]. Waterway management, 2024, 46(10): 20-23.
- [18] 徐建昌. 排水口工程对京杭运河通航条件的影响研究[J]. 中国水运, 2019(7): 71-74.
XU J C. Influence of drainage outlet project on navigation conditions of Beijing-Hangzhou Canal[J]. China water transport, 2019(7): 71-74.
- [19] 胡雨涵, 王志超, 郝嘉凌, 等. 赣江象山枢纽一期临时航道通航水流数值模拟应用研究[J]. 江西水利科技, 2022, 48(2): 87-92.
HU Y H, WANG Z C, HAO J L, et al. Application research on numerical simulation of navigable flow in the temporary channel of the first-stage Xiangshan Junction of Ganjiang River [J]. Jiangxi hydraulic science & technology, 2022, 48(2): 87-92.
- [20] 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
Navigation standard of inland waterway: GB 50139-2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [21] XIAO Y, LIU J M, GUALTIERI C, et al. The effect of natural and engineered hydraulic conditions on river-floodplain connectivity using hydrodynamic modeling and particle tracking analysis[J]. Journal of hydrology, 2022, 615: 128578.
- [22] YAN X H, MOHAMMADIAN A, KHELIFA A. Modeling spatial distribution of flow depth in fluvial systems using a hybrid two-dimensional hydraulic-multigene genetic programming approach [J]. Journal of hydrology, 2021, 600: 126517.
- [23] 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
Technical code of modelling test for port and waterway engineering: JTS/T 231-2021[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.

(本文编辑 赵娟)