

斧头湖流域治理工程水动力模拟与分析

赵津京, 王天祥

(中交(天津)生态环保设计研究院有限公司, 天津 300202)

摘要: 流域综合治理对于湿地水环境改善、生态恢复具有重要意义, 水动力数值模拟是预测修复效果的重要手段。基于斧头湖湖泊形态、水文条件、地形地貌特征与流域治理工程方案, 通过 MIKE 3 建立湖泊流场并进行水动力模拟, 对比分析圩垸拆除前后水动力特性及变化情况, 预估圩垸拆除对湖泊流场产生的影响, 验证工艺流程的合理性, 并为全湖水质变化分析提供借鉴。数值模拟方法在流域治理与生态修复工程中的有效应用, 可从整体上优化湖泊生态恢复方案。

关键词: 环境工程; 流域治理; 数值模拟; MIKE

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S2-0064-05

Hydrodynamic simulation and analysis of Futou Lake watershed management project

ZHAO Jin-jing, WANG Tian-xiang

(CCCC(Tianjin) Eco-Environmental Protection Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300202, China)

Abstract: Comprehensive watershed management is of great significance for wetland water environment improvement and ecological restoration, and hydrodynamic numerical simulation is an important means to predict the restoration effect. Based on the lake morphology, hydrological conditions, landform characteristics and watershed management project of Futou Lake, this paper analyzes the water quality of Futou Lake by Mike 3, establishes the flow field of the lake and carries out the hydrodynamic simulation, compares and analyzes the hydrodynamic characteristics and changes before and after the removal of polders, estimates the impact of the removal of polders on the flow field of the lake, verifies the rationality of the process, and provides reference for the analysis of water quality changes of the whole lake. The effective application of numerical simulation in watershed management and ecological restoration project can optimize the lake ecological restoration scheme as a whole.

Keywords: environmental engineering; watershed management; numerical simulation; MIKE

1 工程概况

斧头湖流域治理工程项目即斧头湖生态保护带建设项目, 位于湖北省咸宁市, 南起斧头湖东湖排水闸南侧, 北达大堰湖排水闸。沿斧头湖堤迎水侧建设保护带, 斧头湖岸线全长约 6.4 km, 湿地纵深 150~700 m。主要建设内容包含退垸工程、生态保护带工程。退垸工程主要为生态保护带内圩垸拆除、鱼塘土方开挖, 其中生态保护带内圩垸贯通整治面积 221.9 万 m², 共清除圩垸 23.7 km, 挖方量总计 61.68 万 m³; 生态保护带工

程包括生态基底构建及植被恢复工程, 构建生态湿地总面积 286.56 万 m², 工程平面布置见图 1。

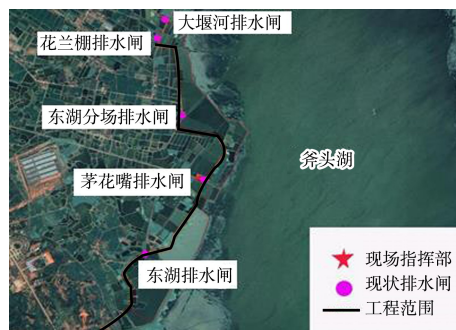


图 1 项目位置及范围

收稿日期: 2022-07-11

作者简介: 赵津京(1984—), 女, 高级工程师, 从事水运、水利、水环境类数值模拟等科学技术工作。

通过拆除斧头湖畔现有圩垸, 利用工程区现有土方, 构建生态保护带湿地基底, 结合植物种植工程, 恢复斧头湖西岸植物群落, 构建斧头湖西岸湖滨缓冲带, 从而提升入湖水质、增强湖泊蓄洪能力、恢复斧头湖西岸生态系统。

2 水动力模型搭建

2.1 搭建目的与意义

流域治理工程中的工艺流程为: 施工准备→清表→排水→圩垸拆除→土方运输→湿地基底构建→湖堤加宽, 其中的关键步骤是湖面圩垸拆除。圩垸是沿江、滨湖低地四周建立的较为低矮的围埝, 围护水域将农田与外水隔开, 通过灌排渠系及操纵堤上的水闸以调节内水和外水的进出。该项目生态恢复方案中拟清除圩垸全长超过 20 km, 势必对湖泊局部乃至全湖水动力环境产生一定影响, 研判圩垸拆除引起的局部水动力变化情况与后续产生的各类生态环境影响尤为重要。

2.2 搭建途径与求解方法

MIKE 软件已广泛应用于模拟河流、湖泊、河口、海湾、海岸及海洋的水流、波浪、泥沙及水环境^[1]。本项目应用 MIKE 3 软件进行水动力模型搭建, 采用浅水控制方程、湍流方程与水平涡黏模型结合的算法, 依据现场的地形数据、水文资料及圩垸拆除方案, 分别模拟拆除前后影响范围内的局部水动力分布情况。分析圩垸对局部流场的影响, 模拟斧头湖湿地拆除圩垸前后湖泊局部水流变化情况, 研判拆除施工对后续生态修复工艺产生的影响, 进而分析工后水质环境等变化情况, 以达到优化设计方案、保障生态修复效果的目的^[2]。

2.2.1 控制方程

MIKE 3 模型建立在基于 Boussinesq 和流体静压假定的三维不可压雷诺平均 N-S 方程的解决方案的基础之上。连续方程:

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

式中: t 为时间; x 、 y 和 z 为笛卡尔坐标系中各方向水平动量; $h = \eta + d$ 为总水深, 其中, η 为水面高度, d 为静水深; u 、 v 和 w 为 x 、 y 和 z 方向上的速度分量; S 为点源流量。

2.2.2 湍流模型

湍流建模采用大涡模拟方法中的 Smagorinsky 亚网格尺度模型, 该模型用一个与特征长度尺度相关的有效涡黏值来描述亚网格尺度输移。亚网格尺度涡黏值 A 由下式计算:

$$A = c_s^2 l^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (2)$$

式中: c_s 为定值; l 为特征长度; 形变率 S_{ij} 由下式计算:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = 1, 2) \quad (3)$$

湍流建模采用涡黏理论, 涡黏在垂向和水平方向上分开考虑, 垂向涡黏在 $k-\varepsilon$ 模型中, 涡黏值 ν_t 由湍流参数 k 和 ε 得到:

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

式中: k 为单位质量的湍动能 (TKE); ε 为湍动耗散率; c_μ 为经验常数。

2.2.3 水平涡黏模型

在多数情况下, 水平涡黏可取定值。相应地, Smagorinsky 提出用一个与特征长度尺度相关的有效涡黏值来描述亚网格尺度输移。亚网格尺度涡黏值同式(2)。

3 模拟过程与结论分析

3.1 水动力模型计算边界条件

3.1.1 区域划分

依据斧头湖岸线、生态保护带范围以及区域水动力影响特性划定数值模拟计算边界^[3], 范围内使用三角网格进行划分, 最小网格边长为 10 m, 数值模拟计算范围见图 2。

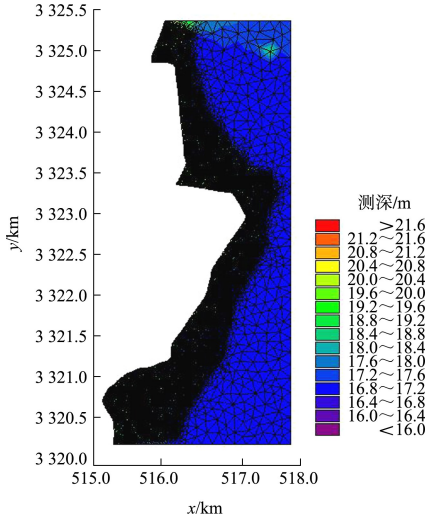
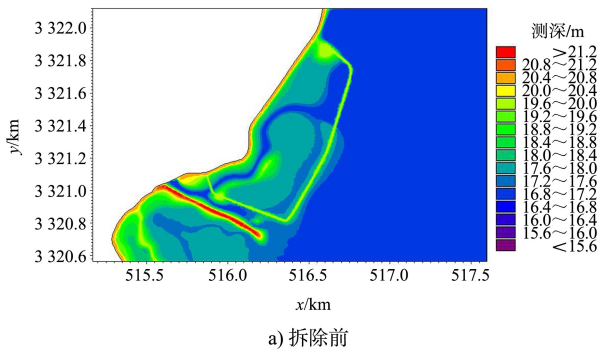


图2 模拟计算范围及计算网格划分

3.1.2 地形条件

场区地形趋势为西南略高、东北稍低，海拔高度 20~120 m。根据场区情况大致可以分为：湖积阶地区、岗地区、低山丘陵区。本次模拟中，施工内容为拆除工程区内鱼塘、藕田边界的中型圩垸，圩垸顶高程 20.5~21.3 m，顶宽 2.0~4.0 m，边坡约 1:1.7~1:1，两侧塘底高程 17.6~19.8 m，总拆除长度 8.2 km。

依据拆除方案，圩垸拆除完成后原位置高程应与周边水底面高程相同，内部鱼塘与湖区水底面地形无变化，圩垸拆除前后的局部地形见图 3。



a) 拆除前

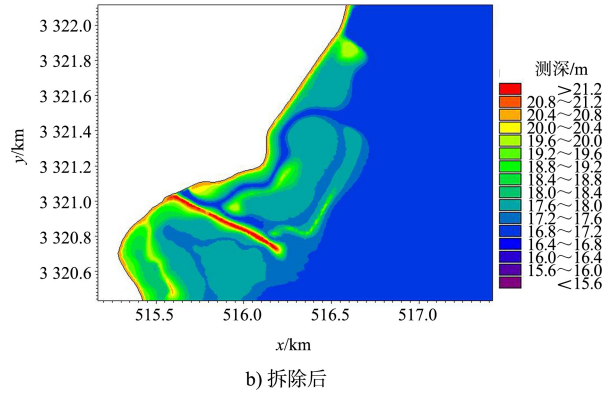


图3 圩垸拆除前后局部地形

3.1.3 水文条件

水文数据采用了流域内 3 个水文站(金口、余码头、十好桥)、6 个雨量站(柏墩、贺胜桥、法泗洲、埠头、黄沙、土地堂)、1 个气象站(嘉鱼)，3 个水位站(三洲、南阳、王家庄)等共 13 个站点的基础水文资料。多数测站资料系列长达 40 a 以上，能满足本次水文分析计算要求。

本次模拟范围内共有入湖河口点源 5 个，自北向南分别为：南港闸、大雁湖闸、东湖分场闸、茅花嘴闸和东湖闸，具体位置见图 4，各点源流量见表 1。

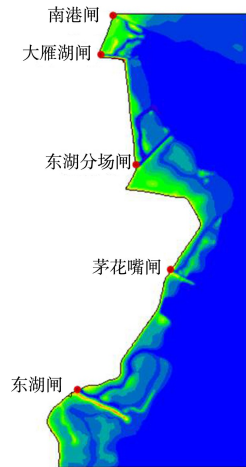


图4 湖泊模拟范围内入湖点源分布

表1 入湖点源信息

点源位置	南港闸	大雁湖闸	东湖分场闸	茅花嘴闸	东湖闸	合计
流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	15.0	9.0	9.0	24.0	13.5	70.5

由于圩垸本身具有挡水防浪特性，在湖区日常平均水位条件下，其围成的小型鱼塘内部为封

闭的静水环境，与外围湖区不发生水动力交换。仅当湖区出现极端高水位，即湖面漫过圩垸顶面

时, 内部鱼塘才会与湖区形成流场。故本次模拟计算采用的水位为该湖区的警戒水位 20.85 m, 略高于圩垸顶面高程。

3.1.4 风场条件

依据环境监测数据, 该区域夏季多为东南风、秋季多为西南风, 年平均风速 2.6 m/s, 实测最大风速 18.7 m/s。模型计算采用风向为东南向, 分别模拟平均风速和实测最大风速下湖区流场。

3.2 数值模拟结果分析

在入湖点源影响条件不变的情况下, 模拟拆除前后的水流场变化情况, 对比分析平均风速条

件下与最大风速条件下的湖区局部水动力变化特征^[4]。

3.2.1 平均风速下流场对比

数值模拟结果显示, 在平均风速条件下, 东湖闸入湖点源附近流速与湖区周边局部流速差异较大, 说明拟拆除圩垸附近流场受该入湖点源影响较大。由于圩垸顶部比警戒水位低 0.3~0.8 m, 拆除前水流流经圩垸处时, 水流通道横向截面变窄、流速骤然增大。拆除圩垸后, 水流通道垂向截面增大, 平面流速均匀, 整体水流流速减缓。平均风速下圩垸拆除前后的水流场对比见图 5。

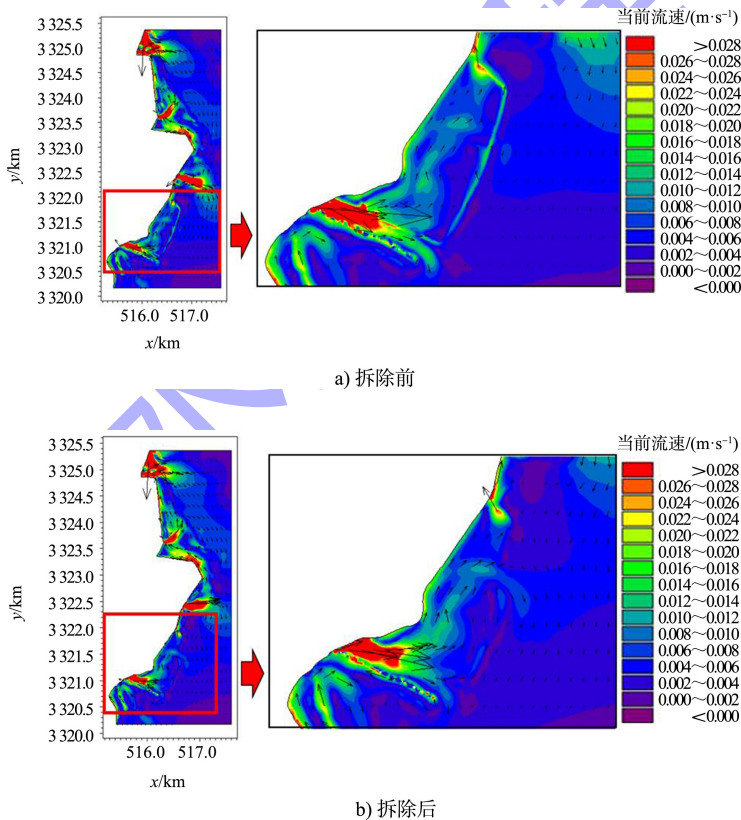


图 5 平均风速下圩垸拆除前后水流场

3.2.2 最大风速下流场对比

对比平均风速条件下, 风速增大的情况下湖区水流平均流速明显加快, 入湖点源处流速较平均风速条件下, 流速差异变小, 对湖区流场影响

减弱。圩垸拆除前后湖区流速差异分布基本一致, 原圩垸位置水流通道垂向截面增大, 整体水流流速减缓。最大风速下圩垸拆除前后的水流场对比见图 6。

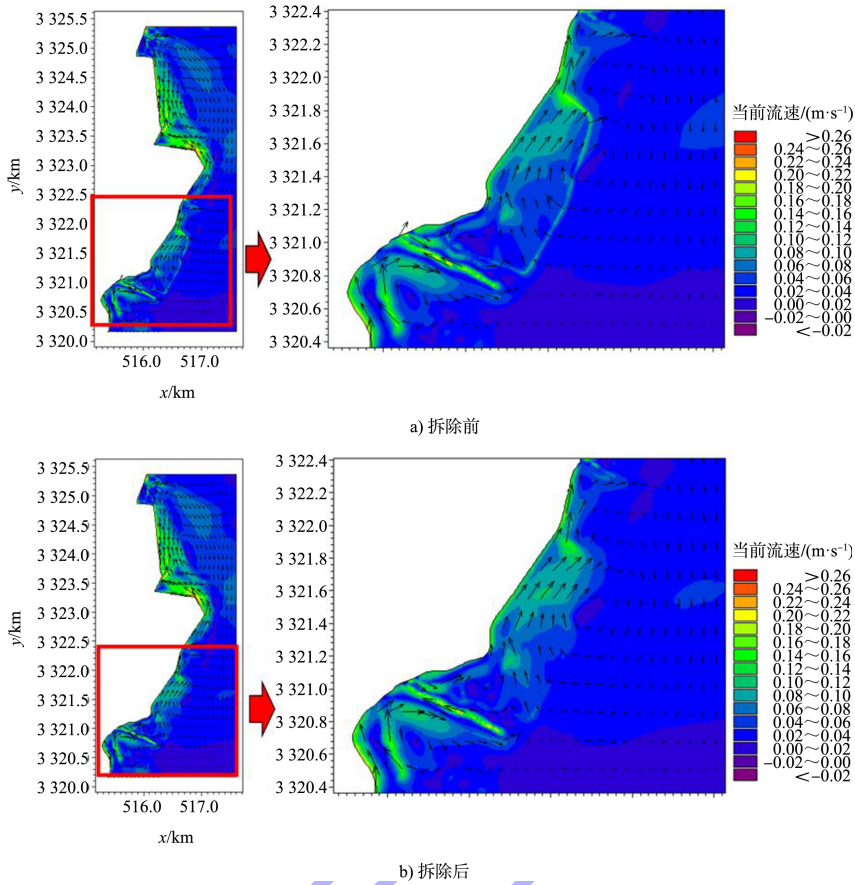


图 6 最大风速下圩垸拆除前水流场

4 结语

1) 通过对斧头湖流域治理工程范围内的湖区水动力数值模拟, 对比分析了平均风速与最大风速条件下湖区局部流场在圩垸拆除前后的变化情况, 结果显示, 待拆圩垸对湖区水流流场有明显的阻滞作用, 容易导致污染物聚集^[5], 不容易稀释、扩散, 造成湖泊的水质变差, 增加了富营养化的生态风险, 不利于构建湿地水生态系统。

2) 修复工艺中的拆除方案拓宽了湖区局部水流通渠道, 加速了湖区内整体水体循环。尤其在有风的条件下, 对增加湖区流速的影响效果更为显著。该流域治理方案科学合理、生态效益显著, 有助于改善湖区水体交换能力, 加速生态环境恢复。

3) 模拟结果显示, 入湖点源对湖泊水环境影响较大, 为保障和维持生态治理效果, 亟需加强对入湖点源的水质管控, 严控外源污染输入。

4) 通过 MIKE 3 水动力模型可以模拟生态治理方案带来的湖区局部水动力变化情况, 为评价湖

泊生态治理后的各类环境影响起到了借鉴作用, 同时也可以为建立湖泊的水质模型, 进一步分析水体的流动与混合、营养盐在水体和沉积物中的循环、颗粒物的沉积和再悬浮、浮游动植物及食物网的相互关系提供基础。

参考文献:

[1] 衣秀勇, 关春曼, 果有娜, 等. DHI MIKE FLOOD 洪水模拟技术应用与研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.

[2] 王欢, 陈江海, 陈翔, 等. 基于 MIKE2IFM 模型的厦门筼筮湖水水质提升方案[J]. 水电能源科学, 2019, 37(2): 43-46.

[3] 常露, 柳莹, 周敏, 等. 基于 MIKE 模型的梁溪河水水质水量分析与应用[J]. 江苏水利, 2021(2): 59-62, 82.

[4] 甘建军, 李灿. 基于 MIKE21 的人工湖生态调水的水动力数值模拟[J]. 珠江水运, 2019(19): 28-29.

[5] 宫雪亮, 孙蓉, 芦昌兴, 等. 基于 MIKE21 的南四湖上级湖水量水质响应模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(1): 70-76, 82.

(本文编辑 王传瑜)