

前山河水力冲淤排污试验及模拟验证^{*}

廖梓瑾, 陈 军, 舒 强, 刘美南
(中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275)

摘 要: 为了研究前山河水力冲淤的可行性, 在前山河水力冲淤排污实验的基础上, 采用破开算子和特征线的方法建立水动力模型, 采用跳点格式建立水质模型, 将水动力模型与水质模型耦合, 模拟前山河的流场及浓度场, 并进行了验证, 提出了水闸的较优运行方案。实验与模拟结果都表明水力冲污可以有效地改善前山河整体的水质状况。

关键词: 前山河; 水力冲污; 模型; 上游来水; 方案

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2004) 03-0095-04

利用水力冲淤排污来改善河流的水质状况是较为简易可行的办法, 国内积累了不少引水冲污的实践经验^[1-5]。其中大部分只对冲污效果进行定性的分析, 极少对冲污过程的流场以及浓度场进行定量计算。本实验利用现有的水利工程以及潮水涨落形成的水位差进行引水冲污, 运行成本低, 管理方便且见效快。本文在前山河水力冲淤排污实验的基础上建立了数学模型进行验证, 并分析了冲污效果。

1 研究背景

1.1 前山河概况

前山河位于广东省珠海市, 上游主要通过马角、联石湾、灯笼山、大冲口等4座水闸引入西江磨刀门水道优质淡水, 设计过闸流量 $2\,250\text{ m}^3/\text{s}$, 其中大冲口水闸 $1\,654\text{ m}^3/\text{s}$; 下游有广昌、洪湾、石角咀3座水闸挡潮、排水, 设计过闸流量 $2\,400\text{ m}^3/\text{s}$, 其中石角咀水闸 $1\,720\text{ m}^3/\text{s}$; 闸门启闭设计水位差为 $0.40\sim 0.50\text{ m}$ 。随着前山河上游及其沿岸社会经济的快速发展, 排入前山河的污染物日益增加, 前山河水质逐年恶化。为了改善前山河的水质现状, 拟利用潮汐的涨落潮并加以水闸调度控制, 创造水力冲淤排污的有利水力条件来对前山河进行冲淤排污。本文对此进行了研究。

本地潮汐属不规则半日潮, 一般一日有两次潮水涨落过程, 月内天文大潮则出现于朔、望之日。前山河地处西江出海口, 属显著潮感水文区, 上、下游外水位直接受潮汐运动的影响, 随潮水涨落过程而变化, 存在时间差和水位落差, 从而为前山河

水力冲淤排污创造了有利水力条件。

本次研究将计算河道取为新码头(吉昌)至石角咀水闸, 由于大冲口水闸与石角咀水闸设计过闸流量所占比重大, 将它们分别作为上、下游的控制闸门。本研究取了5个特征点位作对比分析, 由于篇幅所限, 本文只取其中一个点位进行不同方案下的水流及污染物浓度对比分析。

为提供实测数据, 于2002年11月天文大潮期间在前山河进行了水力冲污实验, 由于潮汐属不规则半日潮, 对该河段的水力、水质情况作了8 h测量记录。

1.2 水闸运行分析

通过上、下游的闸门控制形成上下游的更大的水位落差, 以创造水力冲淤排污的有利水力条件, 因此需对水闸运行情况进行分析, 同时也是为设计方案作准备。

上下游各水闸日常运行时每天开关闸各一次, 此次冲污试验每天开关闸各2次。上、下游控制闸门大冲口、石角咀常规运行时间闸内水位与冲污实验时的闸内水位比较如图1所示。

冲污过程中每日开、关闸各2次, 充分利用了潮汐的涨落潮, 在上、下游形成了比常规水闸运行情况下更大的水位差, 对水力冲淤排污创造了有利的水力条件。

2 河道水量数学模型及率定

2.1 水动力模型

采用破开算子和特征线的方法, 将垂直平均二

^{*} 收稿日期: 2003-06-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49971019)

作者简介: 廖梓瑾(1980年生), 女, 硕士研究生; 通讯联系人: 刘美南; E-mail: lmn@zsu.edu.cn

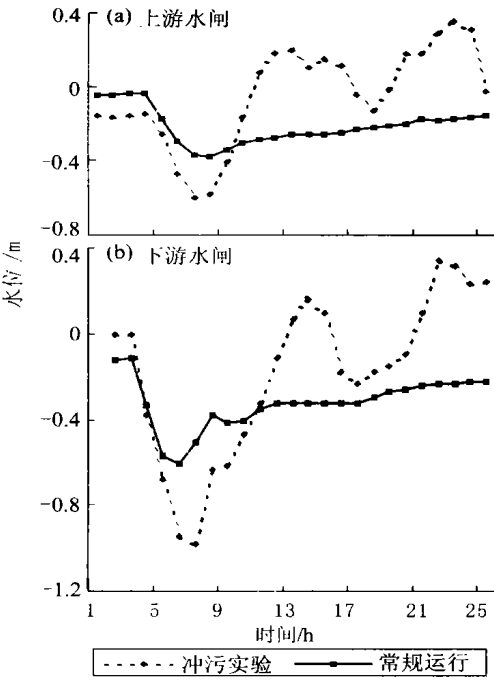


图 1 水闸常规运行与冲污实验闸内水位变化比较图
Fig. 1 Comparison of water level of general running and experiment running

维水流运动方程转化为一系列一维方程式, 从而由特征有限差分法求解^[9]。该模型的基本方程为:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + u \frac{\partial z}{\partial x} + v \frac{\partial z}{\partial y} + H \frac{\partial u}{\partial x} + H \frac{\partial v}{\partial y} = u \frac{\partial z_0}{\partial x} + v \frac{\partial z_0}{\partial y} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} = -g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{C_z H} + Fv \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} = -g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{C_z H} - Fu \quad (3)$$

其中, z 为水位; z_0 为河底高程; $H = z - z_0$ 为水深; u, v 分别为 x 和 y 方向的流速; t 为时间; g 为重力加速度; F 为 Coriolis 参数; C_z 为谢才系数。

采用破开算子和特征有限差分法, 可以推得上述方程的内点计算公式为:

$$u_{i,j}^{n+1} = u_{i,j}^{n+1/2} - \frac{\Delta t}{2\Delta y} \left\{ v_{i,j}^{n+1} (u_{i,j+1}^{n+1/2} - u_{i,j-1}^{n+1/2}) - |v_{i,j}^{n+1}| (u_{i,j+1}^{n+1/2} - 2u_{i,j}^{n+1/2} + u_{i,j-1}^{n+1/2}) \right\} \quad (4)$$

$$v_{i,j}^{n+1} = v_{i,j}^{n+1/2} + \frac{\Delta t}{2\Delta y} (2\Delta y N_{2i,j}^{n+1/2} - g_1^{n+1/2} + \frac{g}{a_{i,j}^{n+1/2}} v_{i,j}^{n+1/2} z_2^{n+1/2} - v_{i,j}^{n+1/2} v_1^{n+1/2} + a_{i,j}^{n+1/2} v_2^{n+1/2}) \quad (5)$$

$$z_{i,j}^{n+1} = z_{i,j}^{n+1/2} + \frac{\Delta t}{2\Delta y} \left\{ v_{i,j}^{n+1/2} z_{0i}^{n+1/2} - |v_{i,j}^{n+1/2}| z_{02}^{n+1/2} - v_{i,j}^{n+1/2} z_1^{n+1/2} + a_{i,j}^{n+1/2} z_2^{n+1/2} - \frac{a_{i,j}^{n+1/2}}{g} (a_{i,j}^{n+1/2} v_1^{n+1/2} - v_{i,j}^{n+1/2} v_2^{n+1/2}) \right\} \quad (6)$$

其中:

$$z_1^{n+1/2} = z_{i,j+1}^{n+1/2} - z_{i,j-1}^{n+1/2}, z_2^{n+1/2} = z_{i,j+1}^{n+1/2} - 2z_{i,j}^{n+1/2} + z_{i,j-1}^{n+1/2}, z_{01}^* = z_{0i,j+1} - z_{0i,j-1}$$
$$z_{02}^* = z_{0i,j+1} - 2z_{0i,j} + z_{0i,j-1}, v_1^{n+1/2} = v_{i,j+1}^{n+1/2} - u_{i,j-1}^{n+1/2}, v_2^{n+1/2} = v_{i,j+1}^{n+1/2} - 2v_{i,j}^{n+1/2} + v_{i,j-1}^{n+1/2}$$

具体计算方法参见文献 [6]。

2.2 模型率定

对前山河冲污试验期潮流实测点流速流向进行模拟验证。利用上述模型得出特征点位的流速及流向值, 与实测流速流向比较如图 2。冲污实验为 8 h, 因此只对前 8 h 进行验证。

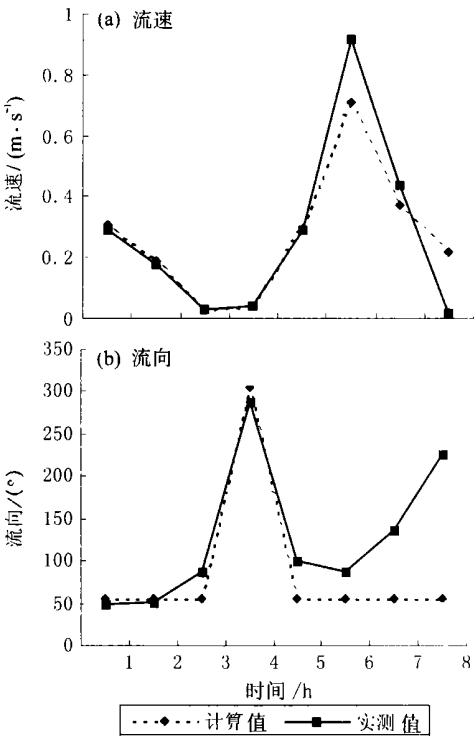


图 2 模拟结果与实测比较图
Fig. 2 The comparison of the flowing result and measurement

由图可知, 用上述模型来模拟前山河的流场, 流速、流向验证点与实测结果拟合较好, 能够反映前山河的流场规律。

3 河道水质数学模型及率定

3.1 水质模型

采用跳点格式对污染物的对流扩散方程进行离散。基本方程为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} (E_x H \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} (E_y H \frac{\partial C}{\partial y}) - kC + C_s \quad (7)$$

式中, C 为垂向平均污染浓度; E_x, E_y 分别为 x, y 方向上的扩散系数; k 为降解系数或沉降系数;

C_s 为源项。

在计算开始时刻 (即 $t=0$ 时), 可令 $C=0$; 在陆、水边界上, 浓度通量为零。

在开边界上, 当水流流出计算区域时, 边界上的浓度值用纯对流方程解出; 当水流流入计算区域时, 边界上的浓度值可处理为零。

采用跳点格式离散式 (7)。引入如下记号:

$$\begin{aligned} \delta_x C_{ij} &= C_{i+1,j} - 2C_{i,j} + C_{i-1,j} \quad (8) \\ \delta_y C_{ij} &= C_{i,j+1} - 2C_{i,j} + C_{i,j-1} \quad (9) \end{aligned}$$

当 $n+1+i+j=$ 偶数时,

$$\begin{aligned} C^{n+1} = C^n &- \frac{\Delta t}{2\Delta x} u^n \Delta C_x^n - \frac{\Delta t}{2\Delta y} v^n \Delta C_y^n + \\ &\frac{E_x \Delta t}{4H^n \Delta x^2} \Delta H_x^n \Delta C_x^n + \frac{E_x \Delta t}{\Delta x^2} \delta_x C^n + \frac{E_y \Delta t}{4H^n \Delta y^2} \Delta H_y^n \Delta C_y^n + \\ &\frac{E_y \Delta t}{\Delta y^2} \delta_y C^n - kC^n \Delta t + C_s \Delta t \quad (10) \end{aligned}$$

所有变量在 (i,j) 处取值。

当 $n+1+i+j=$ 奇数时:

$$\begin{aligned} C^{n+1} = C^n &- \frac{\Delta t}{2\Delta x} u^{n+1} \Delta C_x^{n+1} - \frac{\Delta t}{2\Delta y} v^{n+1} \Delta C_y^{n+1} + \\ &\frac{E_x \Delta t}{4H^{n+1} \Delta x^2} \Delta H_x^{n+1} \Delta C_x^{n+1} + \frac{E_x \Delta t}{\Delta x^2} \delta_x C^{n+1} + \\ &\frac{E_y \Delta t}{4H^{n+1} \Delta y^2} \Delta H_y^{n+1} \Delta C_y^{n+1} + \frac{E_y \Delta t}{\Delta y^2} \delta_y C^{n+1} - \\ &kC^{n+1} \Delta t + C_s \Delta t \quad (11) \end{aligned}$$

所有变量在 (i,j) 处取值。

3.2 上游来水分析

本研究的目的是将水质模型与水动力模型耦合, 模拟在一定的上下游水位边界 (通过水闸控制) 下前山河水质状况, 以确定前山河水质改善的最佳上下游水位条件方案。具体即引用上游优质来水对研究河段的污染进行冲刷, 通过计算得出河段中各特征点的水质变化情况, 从而确定合理的冲污方案。

取上游来水为优质淡水, 以地表水 III 类水计, 则氨氮质量浓度为 1 mg/L 。以之作为计算源强 W

$$W = CQ$$

式中, W 为上游来水中污染物的通量, g/s ; C 为源强中污染物浓度, mg/L ; Q 为上游水闸设计过闸流量, m^3/s 。

采用 21 d 南沙湾断面冲污实验水质监测日最大值作为计算本底浓度, 氨氮质量浓度为 2.87 mg/L 。

3.3 模型率定

采用氨氮作为计算指标。用上述模型计算得到验证点位的冲污实验时的氨氮浓度与实测氨氮浓度值见图 3。

模型计算值能较好地符合冲污实验当天的污染物变化趋势, 说明该模型能反映冲污实验污染物浓度的迁移变化规律。

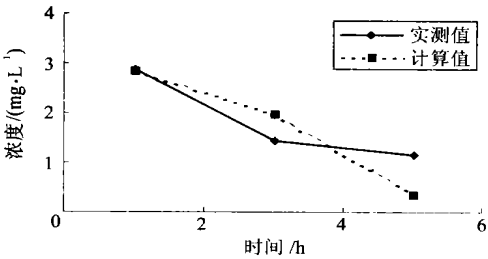


图 3 氨氮实测浓度值与计算浓度值比较

Fig 3 The comparison of measured and calculated concentrations

4 设计方案及冲污效果分析

本研究模拟计算了上下游水闸不同的设计水力边界条件下的研究河段水动力和水质状况, 并从中选出一个较优的方案对水力冲淤排污进行指导。

4.1 方案设计

参考多年间磨刀门水道灯笼山站的潮水位月年统计表显示高潮的较高潮位为 1.56 m , 低潮的较低潮位为 -0.92 m 。以此作为模拟前山河水流水质变化的潮位边界方案参考。

从若干可行的实验方案中, 通过上述模型计算, 择优选出水闸运行方案如下: 涨潮过程中, 上游水闸内外水位差达到 0.5 m 时开闸, 出现平流时, 维持平流状态到涨停关闸; 落潮过程中, 下游水闸内外水位差达到 0.45 m 时开闸, 出现平流时, 维持平流状态到退停关闸。

4.2 冲污效果分析

用上述设计方案模拟特征点位冲污效果 (图 4) 可以看到, 上游污染物浓度随时间迅速减小, 比冲污前变锰酸盐指数 (COD_{Mn}) 浓度减小了 $0.8 \sim 1.8\text{ mg/L}$ 。愈到下游污染物浓度减少速度将愈趋缓慢;

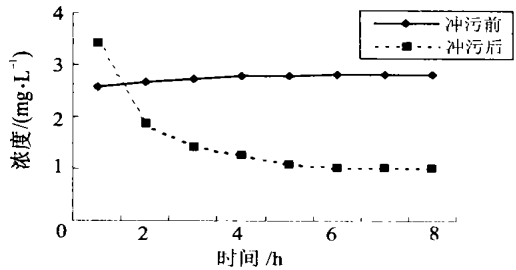


图 4 冲污前后变锰酸盐指数浓度变化图

Fig 4 The concentration trend of COD_{Mn} before and after washing

在河口处的特征点位，污染物浓度会出现增大的情况。这是因为下游距冲污上游边界越远，越易受到上游冲刷下的污染物的叠加影响，造成污染物的积累，但下游靠近出海口，污染物易于扩散。

整体上看，该点附近水质达到地表水Ⅲ类水质标准，同时也改善了整条河段的水质。

5 结 语

(1) 用本研究所采用的流场与水质模型来模拟前山河的流场，能反映前山河的流场与浓度场的变化规律。本文计算了设计方案下前山河的流场、浓度场情况，表明水力冲淤排污对改善前山河的水质状况是简便有效的办法。

(2) 对现有水闸进行控制调度，形成理想的水力冲污条件，所需的运行成本低，管理方便，见效快。

(3) 需要保证有足够干净的上游来水。
(4) 应该说应用水力冲污改善水环境只是权宜之计，它不可能成为长期采用的水污染治理措施，只有注重污染源的削减工作才是治理水环境的根本

方法。但是以目前的经济发展、环境治理技术等水平，要从根本上削减污染源来进行水污染治理，在短时间内很难实现。在今后相当长的时期内，在感潮网河区进行水力冲污将是改善水环境的最直接有效的方法。

参考文献:

[1] 薛朝霞, 汪 , 阮晓红, 等. 引水冲污治理 苏州的水环境 [J] . 中国给水排水, 2002, 18(10): 33— 35.
[2] 熊万永. 福州内河引水冲污工程的实践与认识[J] . 中国给水排水, 2000, 16(7): 26— 28.
[3] 周俊, 李国斌, 梁震, 等. 引水冲污工程治理东湖磷污染 [J] . 环境科学与技术, 2002, 25(4): 27— 29.
[4] 鲁玉龙, 金洽卿. 引水治污工程水质管理模型的应用研究[J] . 环境污染与防治, 1994, 16(6): 11— 14.
[5] 徐贵泉, 褚君达. 上海市引清调水改善水环境探讨[J] . 水资源保护, 2001(3): 26— 30.
[6] 陈小红, 刘美南. 一个垂直平均水流运动的边界通用格式[J] . 中山大学学报(自然科学版) , 1998, 37(6): 97— 101.

Experiment of Hydraulic Washing Silt
in the River Qianshan and the Model Validation

LIAO Zi jin, CHEN Jun, SHU Qiang, LIU Mei nan

(Department of Water Resources and Environment, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The hydraulic washing is a simple and feasible way to improve the water quality situation of rivers. In this paper, a mathematic model is develoned to simulate, calculate and validate the velocity, the orientation and the water quality of the flow in the river. In the model, a split approach and characteristic method is used to model the water flow, and a jumping dot method is used to model the water quality. A better running project is also put forward for the water gates. The experiment and simulation results both indicate that the river's quality can be improved efficiently in this way, except some accumulation of pollution around the outfall.

Key words: Qianshan River; hydraulic washing; model; water from upstream