

桥梁壅水对太湖竺山湾水环境影响模拟

王健健^a, 逢勇^{a,b}, 潘红澈^a

(河海大学 a. 环境学院; b. 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 曾经规划的宜马大桥横跨太湖竺山湾, 桥墩的阻水作用势必会减少竺山湾交换水量, 从而影响其水质。本文采用套网格的二维非稳态数值模型, 模拟大桥建设后竺山湾水动力及水质变化, 量化大桥建设对竺山湾水环境造成的影响。模拟结果表明: 在 5.0 m/s 的持续东南风作用下: ①竺山湾水动力条件受到削弱, 内湾与太湖湖体的交换水量减少约 30% ~ 40%; ②湾内水质恶化, 西北沿岸水质浓度升高迅速, COD 平均增量为 0.9 mg/L, 总磷平均增量为 0.001 mg/L, 总氮平均增量为 0.1 mg/L, 氨氮浓度变化不大。

关键词: 桥梁壅水; 水动力模型; 水质模型; 水质分析; 水环境; 竺山湾

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)04-0056-04

Simulation of effect of bridge backwater on water environment in Zhushan Bay

WANG Jianjian^a, PANG Yong^{a,b}, PAN Hongche^a

(a. Environmental College; b. Key Laboratory for Integrated Regulation and Resources

Exploitation on Shallow Lake of MOE, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The proposed Yima Bridge acrosses the Zhushan Bay of Lake Taihu, the water blocking effect of the bridge piers can reduce the exchanged water flow and affected water quality. This paper adopted a two-dimensional unsteady numerical model of nested grids to simulate the change of hydrodynamic and water quality after bridge construction and to quantify it. The simulation results show that under the effect of continuing 5.0 m/s southeast wind: ① the hydrodynamic conditions of Zhushan Bay is weakened, and the exchanged water flow decrease about 30% ~ 40%; ② The water quality deteriorates especially in north-western shore, and the concentrations of COD, TP, TN increase average about 0.9, 0.001, 0.1 mg/L.

Key words: bridge backwater; hydrodynamic model; water quality model; water quality analysis; water environment; Zhushan bay

竺山湾位于太湖西北部, 东临无锡马山, 南濒太湖, 西接宜兴分水, 是太湖上游来水主要湖区, 也是太湖西北角唯一的河港。由河口湾和平原河网组成, 属于浅水湖泊, 平均水深在 1.9m 左右。河口湾南北长约 13 km, 东西最长处约 9.7 km、最窄处 4.5 km 左右, 以最窄处(沙塘港)为界分内湾和外湾。竺山湾是太湖北部污染最严重的湖湾之一, 水体富营养化严重^[1]。根据环太湖出入湖河流的污染负荷分析, 通过河流进入竺山湾、梅梁湖和贡湖的污染物总量占全湖入湖总量的 2/3 以上^[2]。湾内“湖泛”灾害频发, 2008 年 5 月和 2009 年 5 月连续两年在太湖宜兴近岸水域发生大面积“黑水团”, 面积分别达到 4 km² 和 2 km²^[3-4]。竺山湾湖面开阔, 湖流受风场影响较大主要为风生流, 不同的风场形成流

场差异性较大。湖流是水中营养物质输送的动力, 对湾内污染物迁移扩散以及底泥营养物质释放都起着重要的作用^[5]。早在 20 世纪 90 年代范成新等人就对太湖进行了湖流、波浪、沉积物再悬浮和风浪的关系等研究^[6], 近年来众多学者运用多种水环境数学模型对太湖风浪场进行了数值模拟^[7-9]。

无锡市政府曾经规划建设宜兴至马山跨太湖桥梁(简称宜马大桥), 大桥跨越竺山湾沙塘港(图 1)。水域部分桥梁长度约 5.2 km, 采用 130 座跨径为 40 m 的 T 型桥墩, 桥墩尺寸为 3 m × 1.5 m。由于桥墩的阻水作用, 宜马大桥的建设会对竺山湾水域的水动力条件产生影响, 减少内湾与太湖湖体水体交换量。我国桥梁壅水的调查与试验研究开始于 20 世纪 50 年代后期, 通过野外调查和模型试验提

收稿日期: 2014-03-14; 修回日期: 2014-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179053)

作者简介: 王健健(1988-), 男, 江苏启东人, 博士研究生, 主要从事水资源规划与保护研究。

出大量适应不同条件的壅水计算公式^[10]。随着计算机技术的迅猛发展,数学模型广泛地应用于工程问题的研究。由于竺山湾水深较浅,本文通过对桥墩进行概化,采用二维非稳态水环境数学模型模拟工程前后桥墩附近流场、浓度场以及竺山湾与太湖湖体交换水量的变化。为评价宜马大桥建设对竺山湾水环境照成的影响提供依据。

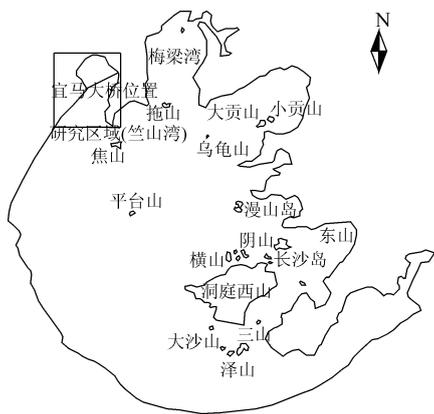


图1 研究区域相对位置图

1 平面二维水环境数学模型

太湖属于大型浅水湖泊,湖流运动受风生流及环湖进出河道影响较多。为了更好地反映太湖局部地区(竺山湾)详细的湖流场和浓度场,本文采用套网格的数值模拟方法。所谓套网格方法^[11],即竺山湾模型采用大太湖模型^[12]的解法和参数,但是对模型的空间步长 Δx 和网格进行局部加密,模型的开边界条件由大太湖模型的模拟结果给出。

1.1 水动力模型

1.1.1 基本方程 水动力模型采用二维质量和动量守恒控制方程组。其连续性方程、 X 和 Y 方向动量方程,可分别表示为:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 H^2} -$$

$$\frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{xy}) \right] - fq - f_w |W| W_x = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 H^2} -$$

$$\frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xy}) \right] - fq - f_w |W| W_x = 0 \quad (3)$$

式中: H 为水深,m, $H = h + \zeta$,其中 ζ 、 h 分别为水位和水深; p 、 q 为 x 、 y 方向上的流通通量, m^3/s ; C 为谢才系数, \sqrt{m}/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; f 为科氏力系数,无量纲; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; W 、 W_x 、 W_y 为风速及在 x 、 y 方向上的分量, m/s ; f_w 为风阻力系数,无量纲; τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{yy} 为有效剪切力分量, N/m^2 。

1.1.2 地形概化 在模型网格划分时,对桥墩进行路化处理(即将桥墩概化成陆地),对竺山湾水域部分划分非结构三角形网格。网格边长300~500m,在桥墩中心线左右各400m范围内对网格进行了局部加密,加密网格边长10~20m,共划分了约13500个网格。模型计算时间步长为 $\Delta t = 360s$ 。竺山湾湖底地形高程见图2。

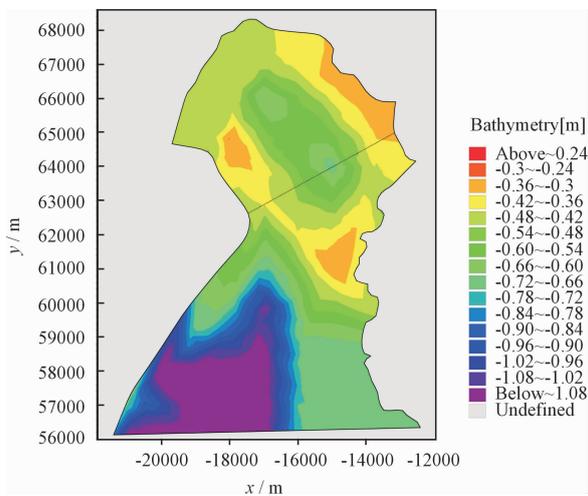


图2 竺山湾湖底地形高程图

1.1.3 参数率定 太湖实测流场^[12]根据1990-2008年太湖各测点不同风向风速下实测流向流速资料按权重统计得出。计算结果表明^[12]:模拟计算所得太湖流场与实测结果在态势及流速量级上基本一致,模型基本参数率定成果为:曼宁系数(湖底糙率)为0.025;风阻力系数为0.036。

1.2 水质模型

1.2.1 基本方程 水质方程是以质量平衡方程为基础,二维水质输移方程为:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + u \frac{\partial C_i}{\partial x} + v \frac{\partial C_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (E_x \frac{\partial C_i}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (E_y \frac{\partial C_i}{\partial y}) + K_i C_i + S_i \quad (4)$$

式中: C_i 为污染物浓度, mg/L ; u 、 v 为 x 、 y 方向上的流速分量, m/s ; E_x 、 E_y 为 x 、 y 向上的扩散系数, m^2/s ; K_i 为污染物降解系数, d^{-1} ; S_i 为污染物底泥释放项, mg/L 。

方程包括3大项:物理输移扩散项、生化项及源

汇项。物理输移扩散项是指水体中物质的迁移扩散过程,主要由水流流动过程所引起的,其中流速项由前述的水动力学模型解决;生化项是模型的核心部分,也是水质模型建立的难点;源汇项是指周围外环境输入水体中的污染物质。

1.2.2 参数率定 利用2009年6月15日-16日监测的竺山湾及太湖西岸湖区水质浓度值进行参数率定^[12]。计算结果表明^[12]:水质模拟结果与实测值吻合较好,COD、氨氮、总磷和总氮的平均误差分别为8.7%、10.5%、9.1%、和7.6%。

表1 太湖水质模型参数率定成果表^[12] $\text{m}^2/\text{s}, \text{d}^{-1}$

参数名称	数值
x, y 方向扩散系数	2.0, 2.0
COD 污染物降解系数	0.06
氨氮污染物降解系数	0.04
总磷污染物降解系数	0.02
总氮污染物降解系数	0.04

2 水动力影响预测

东南风、西南风为太湖夏季主导风向,代表太湖在夏季的水动力学状况。同时考虑竺山湾的地理位置,东南风不利竺山湾与太湖湖体的水量交换。所以选取东南(SE)这个盛行方向的定常风进行数值模拟,风速为5.0 m/s。输出结果为定常风作用72小时后,模型达到完全稳定状态时的流场。

宜马大桥建设前后流场模拟结果(图3)表明:①宜马大桥建设会对竺山湾流场产生影响;②外湾环流结构变化不大,流速略有减小;③内湾受影响程度明显大于外湾,内湾流场整体被削弱。在桥墩中心线位置设置断面,统计断面处竺山湾内湾与太湖

水体交换量,结果显示:桥墩建设后竺山湾与太湖的水量交换减少约30%~40%,严重影响竺山湾内湾的水动力状况。

3 水质影响预测

在宜马大桥运营期,由于竺山湾与太湖湖体交换水量的减少,使得湾内污染物滞留时间加长,水质污染物浓度升高。本次模拟在5.0 m/s的东南(SE)定常风向下,宜马大桥建设前后湖体COD、氨氮、总磷和总氮的浓度场分布,模型污染源条件和开边界条件由大太湖模型提供^[12]。

根据水质模拟结果(图4,表2):宜马大桥建设后:①竺山湾内水体水质受到影响,主要水质浓度均有不同程度的增高;②在东南风条件下,湾内水域污染集中在西北沿岸得不到扩散,沿岸水质浓度明显高于其他水域;③水域COD、总磷和总氮的平均浓度均略有增高,氨氮浓度变化不大,COD浓度增量为0.9 g/L,总磷浓度增量为0.001 mg/L,总氮浓度增量为0.1 mg/L。

表2 竺山湾水质浓度对比结果 mg/L

指标	COD	TP	TN	氨氮
无桥墩	19.7	0.154	3.0	1.1
有桥墩	20.6	0.155	3.1	1.1

4 结 语

竺山湾是太湖北部污染最严重的湖湾之一,宜马大桥建设后由于桥墩的阻水作用会对竺山湾的水动力条件产生影响,进而影响竺山湾整体水质状况。本文建立二维非稳态水环境数学模型,对大桥建设前后竺山湾水动力及水质状况进行模拟,主要结论如下:

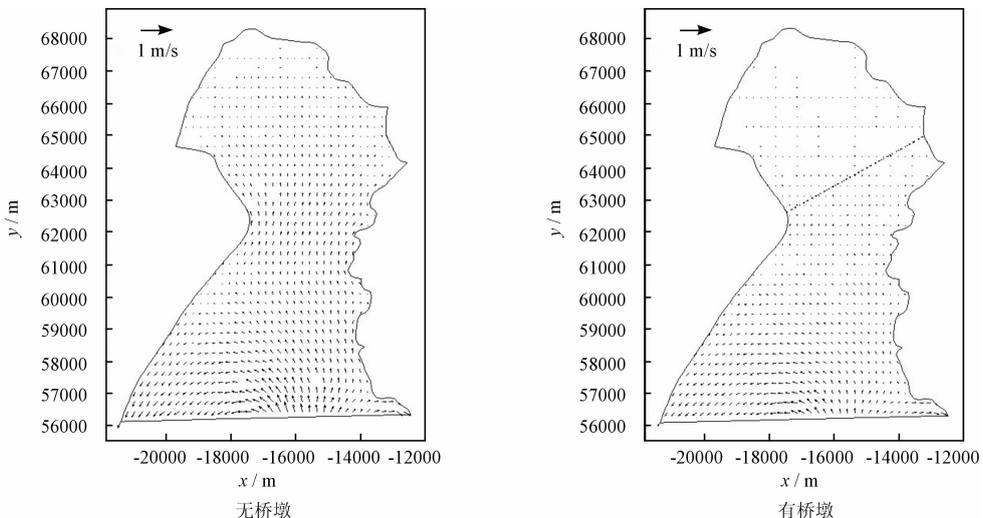


图3 流场模拟结果

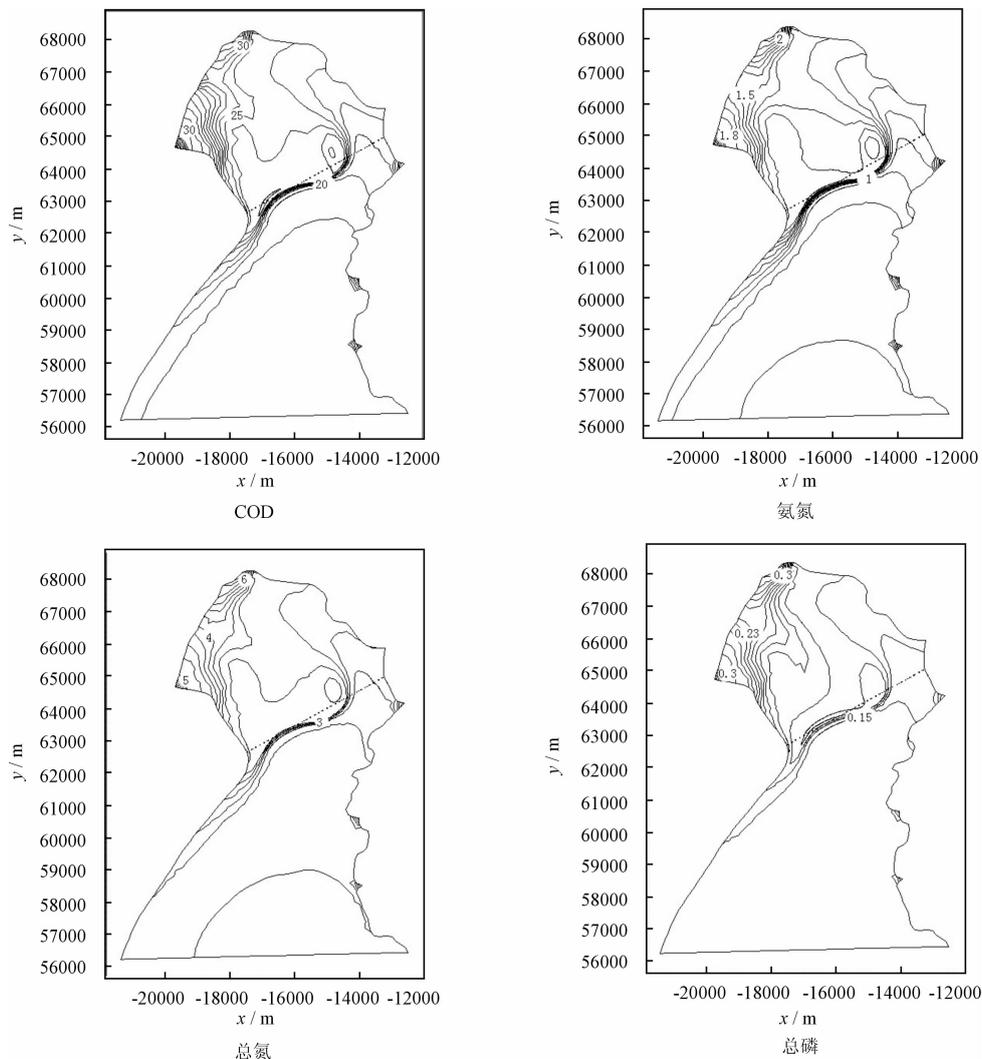


图4 主要水质浓度场模拟图(mg/L)

①竺山湾水域水动力条件受到影响,外湾环流结构变化不大,但是流速略有减小;内湾流场整体被削弱,与太湖湖体的交换水量减少约30%~40%;
②竺山湾内主要水质浓度均有不同程度的增高,COD浓度增量为0.9 mg/L,总磷浓度增量为0.001 mg/L,总氮浓度增量为0.1 mg/L;在东南风条件下,湾内水域污染集中在西北沿岸得不到扩散,沿岸水质浓度明显高于其他水域。

参考文献:

[1] 孙卫红,张利民,刘伟京,等. 漕桥河区域水环境质量现状分析[J]. 环境科学与管理,2009,34(1):48-51.
[2] 唐兆民,贾海峰. 太湖竺山湾水沉积物界面污染物释放规律的研究[C]//. 中国环境科学学会学术年会论文集,北京:中国环境科学出版社,2012.
[3] 陆桂华,马倩. 2009年太湖水域“湖泛”监测与分析[J]. 湖泊科学,2010,22(4):481-487.
[4] 陈荷生. 太湖宜兴近岸水域“湖泛”现象初析[J]. 水利

水电科技进展,2011,31(4):33-37.

[5] 秦伯强,胡维平,陈伟民,等. 太湖梅梁湾水动力及相关过程的研究[J]. 湖泊科学,2000,12(4):327-334.
[6] 范成新,陈荷生. 太湖富营养化问题及其综合控制对策[J]. 湖泊科学,1998,10(增刊):95-100.
[7] 李一平,逢勇,刘兴平,等. 太湖波浪数值模拟[J]. 湖泊科学,2008,20(1):117-122.
[8] Bottema M, Vledder G P. A ten-year data set for fetch-and-limited wave growth [J]. Coastal Engineering,2009,56(7):703-725.
[9] 张洪生,戴甦,张怡. 太湖风浪场的计算与比较[J]. 海洋工程,2012,30(4):68-81.
[10] 张细兵,余新明,金琨. 桥渡壅水对河道水位流场影响二维数值模拟[J]. 人民长江,2003,34(4):23-24+40.
[11] 李一平,逢勇,张志毅,等. 太湖梅梁湾、贡湖套网格风生流数值模拟[J]. 水资源保护,2004,20(2):19-21.
[12] 胡开明. 基于太湖水质达标及溯源方法的入湖污染物减排分配技术研究[D]. 南京:河海大学,2012.