

苏州河环境综合整治一期工程水质模型分析

廖振良,徐祖信,高廷耀

(同济大学 环境科学与工程学院,上海 200092)

摘要: 先用 WASP 模型软件开发了苏州河水质模型,使用数据来自 1999 年苏州河第 3 次调水试验的同步监测资料、全市污染源调查资料,以及其他有关资料.应用此模型,对苏州河环境综合整治一期工程中有关工程和方案进行了模拟计算,根据计算结果,对一期工程进行了调整.通过苏州河一期工程的实施,苏州河干流在 2000 年底基本消除了黑臭现象,干流水质主要指标年均值基本达到国家景观水标准,河道生态系统逐步改善.

关键词: 水质; 数学模型; 河流污染控制; 上海; 苏州河

中图分类号: X 522

文献标识码: A

文章编号: 0253 - 374X(2004)04 - 0499 - 04

Analysis on the First Stage of Suzhou Creek Rehabilitation Project Based on Water Quality Model

LIAO Zhen-liang, XU Zu-xin, GAO Ting-yao

(School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The Suzhou Creek is a seriously polluted tidal river in Shanghai City, China. With the development of Shanghai, there are more and more concerns over the "black and stink" phenomenon of the Suzhou Creek. Suzhou Creek Rehabilitation Project was launched in 1998, and the planned investment of the first stage of the project was 8.65 billion yuan (about 1.05 billion US dollars). It is important to make a reasonable plan. In this study, the USEPA's WASP model is employed to establish the Suzhou Creek water quality model by using data of the third low flow augmentation test on the Suzhou Creek in 1999 and other monitoring results. Based on the model, the first stage of Suzhou Creek Rehabilitation Project is optimized and adjusted, so the actual investment of the first stage of the project is 6.998 billion yuan. By executing the first stage of the project, the "black and stink" phenomenon of the main stream had been eliminated by the end of 2000, and the water ecological system has been restored step by step.

Key words: water quality; mathematical model; river pollution control; Shanghai; Suzhou Creek

苏州河是黄浦江的一条主要支流.在 1999 年之前,苏州河的水质很差,低于国家Ⅲ类水标准.水体经常处于厌氧状态,呈现严重的黑臭现象.导致这种

现象的主要原因是:水系内大量污水未经处理,直接排入苏州河及其支流;沿岸数十座市政泵站在降雨期间不得不经常放江,将合流污水排入河中;

收稿日期: 2003 - 06 - 30

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划资助项目(2003AA601020); 中国博士后科学基金资助项目(2003034272)

作者简介: 廖振良(1970 -),男,江西抚州人,博士后. E-mail: ZL_liao@tongji.edu.cn

由于潮汐作用,大量污水不能及时下泄,在苏州河中下游回荡;支流的闸门除防汛的需要外,均关闭,使得河流的流动性更差。

随着上海社会经济的发展,人们越来越关注苏州河的污染问题。苏州河环境综合整治工程于1998年正式启动,它是市政府水环境治理的龙头工程,包含了许多工程项目。上海市科委于1999年启动了一项名为“苏州河水环境改善关键技术研究”的攻关课题。此项研究选用美国国家环保局的开放的模型体系WASP(water quality analysis simulation program,水质分析模拟程序)来开发苏州河水质模型,并将它集成一个GIS(地理信息系统)中。通过使用模型进行分析研究,苏州河环境综合整治一期工程得到了相应调整。

1 水质模型开发

1.1 模型体系的选择及其求解方法

通过比较,选择WASP作为模型开发软件^[1,2],主要基于以下原因:WASP是一个开放的软件,它的程序源代码能修改并重新编译以满足研究的需要;能被集成到GIS系统中(此项研究以GIS为平台);可通过链接外部水动力模型以模拟感潮河流的流动;WASP能模拟广泛的水质要素,包括所要研究的内容。

污染物质在河流中运动变化的基本方程——对流扩散方程,用下式表达:

$$\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} = E \frac{\partial^2}{\partial x^2} - K \quad (1)$$

式中:为整个断面平均质量浓度; t 为时间; u 为流速; x 为距离; E 为离散系数; K 为反应动力系数。

WASP模型采用一种改进的欧拉差分格式求解。针对式(1),取

$$x_i = i \Delta x, \quad t_j = j \Delta t, \quad (x_i, t_j) = i, j$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{j^{+1} - j}{\Delta t}, \quad \frac{\partial}{\partial x} = \frac{j - j_{-1}}{\Delta x},$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} = \frac{j - 2j_{-1} + j_{-2}}{\Delta x^2}$$

代入式(1)得

$$\frac{j^{+1} - j}{\Delta t} + u \frac{j - j_{-1}}{\Delta x} = E \frac{j - 2j_{-1} + j_{-2}}{\Delta x^2} - K j_{-1}$$

$$j^{+1} = j_{-2} \Delta t \frac{E}{\Delta x^2} + j_{-1} \left[\frac{u \Delta t}{\Delta x} - 2 \frac{E \Delta t}{\Delta x^2} - K \Delta t \right] + j_{-1} \left[1 - \frac{u \Delta t}{\Delta x} + \frac{E \Delta t}{\Delta x^2} \right]$$

令 $\alpha = E \Delta t / \Delta x^2$, $\beta = u \Delta t / \Delta x - 2E \Delta t / \Delta x^2 - K \Delta t$, $\gamma = 1 - u \Delta t / \Delta x + E \Delta t / \Delta x^2$ 。对于一个均匀河段, u, E, K 是常数,则 α, β, γ 也是常数。于是,对于 $i=1$,令 $j_{-1} = j_0$ (j_0 为边界条件),则 $j_1^{+1} = j_{-1} + j_0 + j_1$;对于 $i=2$, $j_2^{+1} = j_0 + j_1 + j_2$;对于 $i=3, \dots, j, \dots, n$, $j_i^{+1} = j_{i-2} + j_{i-1} + j_i$, $j_n^{+1} = j_{n-2} + j_{n-1} + j_n$ 。式中: j_0 为初始条件, j_0, j_{n+1} 为边界条件,均已知,所以可依次求解 j_i 。

1.2 WASP模型的二次开发

根据计算需要,对WASP进行二次开发^[3]。包括修改一些数组的大小,如河段、边界个数及污染负荷数等;重新定义某些参数;修改输入输出格式;改变文件调用方式;利用先进的编译工具重新编译;开发水质模型与水动力模型及GIS的接口等。

1.3 河道概况

对于干流,从黄渡到外白渡,共分为38个河段,全长35 km。河网范围北至蕴藻浜,东至黄浦江,南至淀浦河,西至西大盈,共369个河段。

1.4 模型的输入数据

(1) 确定需要率定的参数:包括纵向离散系数 E_x ,COD降解率 K_C ,氨氮降解率 K_N ,BOD降解率 K_1 ,底泥耗氧率 S ,以及大气复氧系数 K_2 。先在上海市环科院的实验室对这些参数进行测定和研究,再利用一些理论或经验公式确定其范围,最后通过模型率定得出率定值。

(2) 监测数据系列:主要采用1999年苏州河第3次调水试验的资料。

(3) 时间步长:3 600 s。

(4) 流量:由外部水动力模型提供。

(5) 污染负荷:对于干流,污染负荷通过各直排干流的点源的排污量和浓度计算得到实时动态变化值;对于河网,按照污染源的位置、去向,将它们整理合并为88个点源负荷。

1.5 模型率定验证结果

主要参数率定值与实验值的比较见表1。率定值经过验证,误差较小。这说明,模型结构合理,能满足水质模拟的需要。图1为华漕断面验证结果(时间为1998年8月12日至8月21日)。

表 1 模型率定值与实验室研究值的比较
 Tab.1 Comparison of the lab values and the calibrated values of parameters

对比项	$E_c / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	K_C / d^{-1}	K_N / d^{-1}	K_1 / d^{-1}	K_2 / d^{-1}	$S / (\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$
实验值	5 ~ 35		0.11 ~ 1.49	0.05 ~ 1.48		0.5 ~ 7.5
率定值	13	0 ~ 0.25	0.03	0.1	0.20	0.3 ~ 10.0

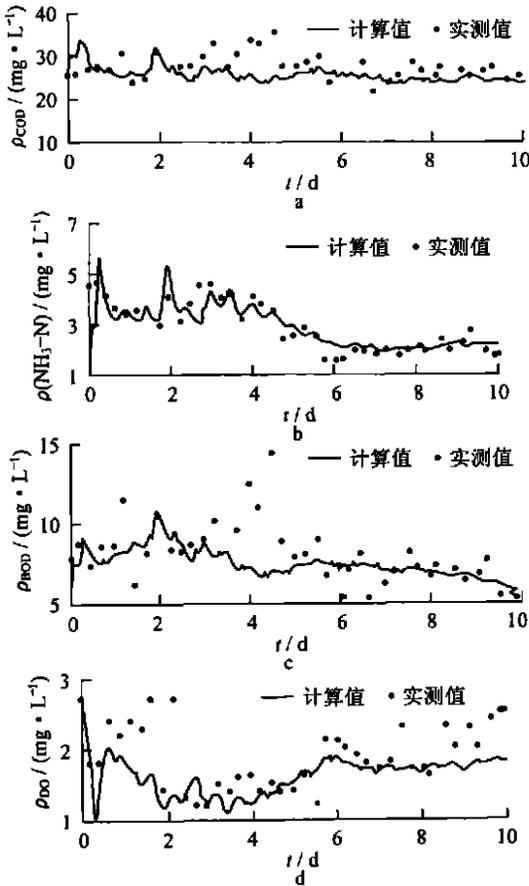


图 1 水质模型验证图
 Fig.1 Verification results

2 苏州河环境综合整治一期工程水质模型分析

苏州河环境综合整治于 1998 年正式开始.按时间顺序,整个工程可以分为若干期:一期工程从 1998 年至 2002 年,二期工程从 2003 年至 2005 年.通过使用水质模型进行计算分析,对苏州河环境综合整治一期工程进行了调整.

2.1 截污工程的计算及相应的方案调整

设计的截污计算方案,其水动力条件为枯水年西引东排^[4].

通过污染源调查,发现苏州河中游地区规划的

截污量(820 个污染源)只占总污染负荷量的 22 % (总共有 3 518 个污染源).采用模型进行计算,得到的结果是如仍按规划方案截污,则该地区的污染仍然十分严重.所以截污方案必须调整.通过调整,将截污量提高到 85 %,再利用模型计算,可以发现预测水质将大大改善,一期工程的目标可以达到.而调整后的截污方案已经得到实施.有关截污方案的计算结果见图 2.

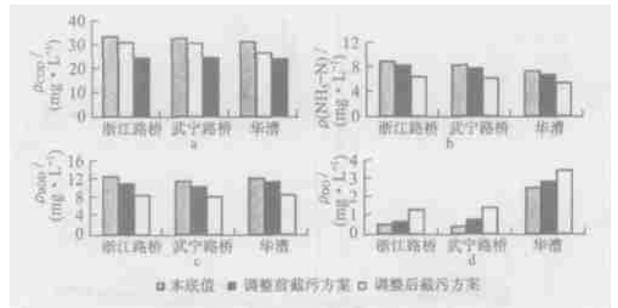


图 2 截污方案计算结果

Fig.2 Calculated results of interception

利用模型计算,发现采用西引东排调水方式,加上截污,就能够达到一期工程目标.据此,对有关工程方案进行了进一步确定,增加了截污量,调整了一些效果不明显或暂时无实施必要的工程.方案调整包括:增加截污量,中游地区截污量从 22 % 提高到 85 %; 搁置河口地区泵闸工程的建设; 搁置底泥疏浚.按照模型计算结果,底泥疏浚也能被搁置,底泥疏浚必须配合防汛墙改造和河口闸门建设,一期工程中仅对上游河段进行了部分疏浚; 其他搁置工程包括东大盈泵站、木渎港泵站、东菱泾泵站及太浦河泵站等的建设.

2.2 曝气复氧的计算

在某些受严重污染的河段设置曝气复氧装置是提高这些河段溶解氧水平的有效方式.而随着溶解氧的提高,其他污染指标也会相应有所改善.模型计算的结果也证明了这一点.图 3 为历年来受污染最严重的断面之一——武宁路桥断面——曝气复氧前后 DO 的比较情况.

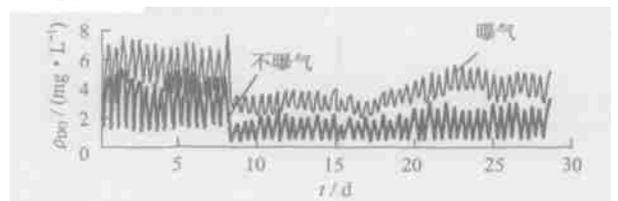


图 3 武宁路桥断面曝气与不曝气的 DO 比较

Fig.3 DO at the section of Wuning Road Bridge between aeration and no aeration

一期工程中,建造了一艘曝气船进行工程试验.

2.3 泵站放江的计算

苏州河沿线共有 37 座市政泵站,其中 34 座为合流泵站.在降雨期间,这些泵站会直接向苏州河排放污水.通过模型模拟泵站放江,发现这是影响苏州河水质的因素,计算结果见图 4.所以建议对市政泵站进行改造.

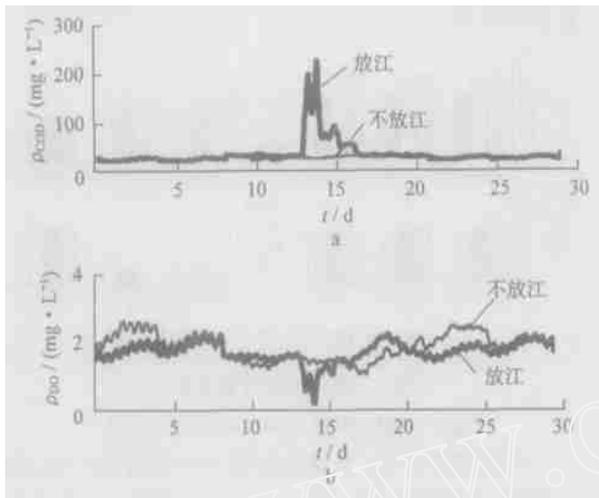


图 4 武宁路桥断面放江与不放江的水质比较

Fig. 4 Water quality at the section of Wuning Road Bridge between overfall and no overfall

3 一期工程的效果

(1) 干流主要水质指标年均值基本达到国家景观水标准.至 2000 年底,苏州河干流基本消除了黑臭.武宁路桥断面的监测值显示苏州河干流水质这些年来正逐年改善,见表 2.

(2) 苏州河生态系统逐步改善.随着水质的好转,生态系统同步改善.水生生物种类和底栖动物生物量不断增加,水体的生物毒性下降,水中开始有鱼.

(3) 投资减少.经优化和调整,一期工程实际总投资为 69.88 亿元,比原计划减少 16.62 亿元^[5].

表 2 武宁路桥断面水质年平均值

Tab. 2 Annual average values of water quality at the section of Wuning Road

年份	Bridge on Suzhou Creek			
	DO	COD _{Cr}	BOD ₅	(NH ₃ -N)
1998	1.56	61.93	15.09	13.74
1999	2.24	48.96	15.98	9.72
2000	2.18	41.84	12.11	9.11
2001	3.12	26.03	4.57	5.48
2002	3.06	22.42	5.06	5.35

注:2002 年水质为 1~9 月平均值.

4 结论

(1) 运用开放的水质模型软件 WASP,采用苏州河第 3 次调水试验监测数据等最新资料,开发了苏州河水质模型,并进行了模型验证.

(2) 通过水质模型计算分析,对苏州河环境综合整治一期工程进行调整,使实际总投资比计划的减少.计算的方案包括截污、曝气复氧、泵站放江等.

(3) 通过苏州河一期工程的实施,苏州河干流在 2000 年底基本消除了长达半个多世纪的黑臭现象,干流水质主要指标年均值基本达到国家景观水标准,河道生态系统逐步改善.

参考文献:

- [1] 廖振良,林卫青,徐祖信. WASP5 系统述评[J]. 上海环境科学, 2001, 20(1): 3 - 6.
- [2] Lung W S, Larson C E. Water quality modeling of upper Mississippi River and lake Pepin[J]. Journal of Environmental Engineering, 1995, 121(10): 691 - 699.
- [3] XU Zu-xin, LIAO Zhen-liang, LIU Dong-sheng. Water quality modeling of Suzhou Creek[J]. Journal of Hydrodynamics, 2002, 14(2): 83 - 90.
- [4] 徐祖信,卢士强. 苏州河综合调水的流量计算分析[J]. 上海环境科学, 2003, 22(增刊): 36 - 38.
- [5] 徐祖信,张效国,匡桂云. 苏州河环境综合整治一期工程效益分析[J]. 上海环境科学, 2003, 22(增刊): 1 - 4.