

DOI:10. 3969/j. issn. 1004 - 6933. 2013. 04. 012

基于多目标的小流域污染控制方案及效果

——以苏州胥江小流域为例

王健健¹, 逢 勇^{1,2}, 朱心悦², 徐心彤²

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学 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:在太湖流域大网模型基础上,根据设计水文条件、边界水质以及控制断面水质与其上游概化排污口污染源的响应关系,建立胥江小流域污染物限排总量 3 级串级模型。计算基于多个控制断面在不同水质目标下的流域污染物限排总量。根据流域污染现状及污染物限排总量,提出包括总量控制措施及末端河道微污染水治理措施在内的污染综合控制方案,对综合控制方案水质改善效果进行评估。结果表明:①现状 COD 排放量超出限排总量 153%、NH₃-N 超出 73%、TP 超出 236%;②胥江小流域污染综合控制方案实施后,各控制断面水质均能达到目标要求。

关键词:小流域;多目标;综合污染控制;水质评估;平原河网

中图分类号:X321 文献标志码:A 文章编号:1004 - 6933 (2013) 04 - 0056 - 06

Multi-objective based pollution control plan for small basins and effect assessment: A case study of Xujiang small basin in Suzhou City

WANG Jianjian², PANG Yong^{1,2}, ZHU Xinyue², XU Xintong²

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development of Shallow Lakes,
Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the designed hydrological conditions, boundary water quality, and response relationship between the water quality of the control section and the generalized drain outlet upstream, a model used for calculating the discharge limit of pollutants of the Xujiang small basin was established based on a large-grid model of the Taihu Basin. The discharge limits of pollutants based on multiple control sections with different water quality goals were calculated. On the basis of the pollution status and the discharge limits of pollutants of the basin, an integrated pollution control plan including the measures for controlling the total discharge of the pollutants and treating the rivers that are micro-polluted has been proposed. The effect of this plan in improving the water quality was assessed. The results show (a) that the total discharge amount of COD was 153% more than the discharge limit, and the discharge amounts of NH₃-N and TP were, respectively, 73% and 236% more than the discharge limit, and (b) that the water quality of all control sections met the requirements after the plan was carried out.

Key words: small basin; multi-objective; integrated pollution control; water quality assessment; plain river network

胥江小流域位于苏州市吴中区,属太湖流域平原河网区。涉及苏州太湖国家旅游度假区的光福镇,吴中区胥口镇、木渎镇,高新区狮山街道和横塘街道(竹园路以南的部分地区);东接京杭运河,北

基金项目: 国家自然科学基金(51179053)

作者简介:王健健(1988—),男,博士研究生,研究方向为水资源规划与保护研究。E-mail: hhuwangjianjian@126.com

接浒光运河,西至太湖。区域内工业集中,人口密度大,平均人口密度为 3 578 人/km²(木渎镇为 9 797 人/km²),是太湖流域平均人口密度的 3.6 倍(木渎镇为 10 倍)。主要河流干流为木光河、胥江及浒光河出太湖段。木光运河全线总长 18 km,河口宽度平均 30 m,是区域西部主要的航运、引水和排水通道,往来船只较多。胥江东接京杭运河,与太湖相接,全线总长 13 km,平均宽度 20~40 m。太湖水体富营养化明显,N、P 营养过剩,属于敏感区,胥江小流域的水环境将直接影响到太湖水质。京杭大运河是主要的排污通道,运河水一旦倒流入胥江将严重影响胥江小流域的整体水环境。目前,木光河及胥江水体质量基本为 V 类水,木渎镇内河水体为劣 V 类,主要超标因子为 NH₃-N、COD、TP。2010 年 4 月和 2011 年 5 月连续两年,胥江木渎镇段发生黑臭现象,严重影响当地社会经济的发展及周围居民的日常生活^[1]。

目前国内对于小流域河道整治研究包括环境容量总量控制技术、引清调水技术、生态护坡工程技术、河道景观工程技术等^[2-4]。环境容量总量控制目标^[5-7]主要是由污水处理厂及污水管网建设为主的截污纳管工程实现;引清调水^[8-12]主要是指以水系沟通、河道清淤拓宽及泵站建设为主的引调水工程;生态护坡及河道景观技术^[8-12]主要是指人工湿地、植被护岸、水生植物修复等的生态修复工程。截污纳管工程是解决污染问题的根本措施,但是此类工程投资大、周期长、见效慢;引调水工程实现了污染转移,治标不治本;生态修复工程治污效果不如前两者,并且应用时有一定的条件限制,对黑臭河道治理效果不佳。随着河道污染的加剧,近年来物理强化、化学强化等一级处理技术在污染河水处理方面也有一定的研究,但仍然处于起步阶段^[13-14]。

胥江小流域内部污染物排放量大,外部污染严重,又有太湖敏感保护目标,其地理位置的特殊性以及水环境的敏感性,决定了其治理任务的艰巨性。要使小流域水环境在近、远期均能整体达标,除采取环境容量总量控制外,还必须采取引调水、生态修复以及强化净化在内的综合治理措施。

1 治理目标及总体思路

1.1 治理目标

近期(2011—2013 年):改善整治范围内水体水质,胥江及木光河由目前的 V 类及劣 V 类水基本提升到 IV 类水;城镇内河由劣 V 类基本提升到 V 类水。具体为:①胥江及木光河上 5 个流域控制断面水质达到 IV 类水;②木渎镇 3 个内河控制断面水质

达到 V 类水。

远期(2014—2015 年):整治范围内的水体达到相应的水质功能区划水质要求,胥江及木光河水质基本达到 III 类水;城镇内河水质基本达到 IV 类水。具体为:①胥江及木光河上 5 个流域控制断面水质达到 III 类水;②木渎镇 3 个内河控制断面水质达到 IV 类水。

1.2 总体思路

胥江小流域水质超标的主要原因有 3 个:①京杭运河本底水质较差;②内部污染物排放量大,超出限排总量 2.3 倍,其中生活污染占 80% 以上;③城镇内河水流不畅,河道护坡硬质化现象严重。因此污染控制方案应从污染源头、污染物入河过程及末端河道水体三方面进行综合治理。通过污水处理厂及配套管网、农村污水处理设施等的建设进行污染物总量控制,减少区域内部污染物的排放量;通过生态护坡、生态拦截沟渠等工程对污染物入河过程进行治理,减少污染物入河量;通过河道清淤及泵站建设沟通城镇内河水体,增加河道清洁水补给;通过河道微污染水治理工程对超标水体进行强化净化措施,增强水体自净功能,全面确保胥江小流域水环境整体达标,详见图 1。

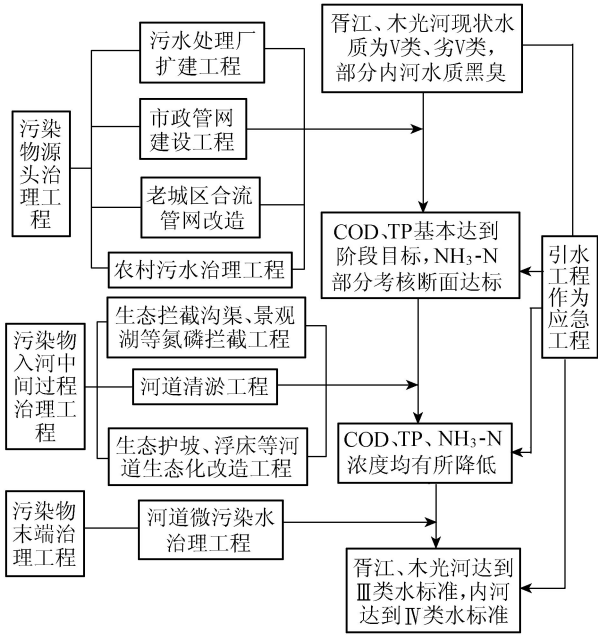


图 1 胥江小流域污染治理整体技术路线

2 基于多目标的环境总量控制计算

多目标是指为确保胥江小流域水环境整体达标,对流域划分多个水质控制断面,针对不同控制断面制定不同水质目标。环境总量控制计算是以 2010 年各类污染源调查资料为基础,概化排污口,取各概化排污口污染物到达控制断面水质达标为限制条件,计算得到的各类污染源的排污量即为研究

区域污染物限排总量。

2.1 计算方法

笔者建立了太湖大网模型-胥江模型-稳态水质模型 3 级串级模型。太湖大网模型引用了罗缙^[15]的研究成果,胥江模型为非稳态水量水质模型,其一维水质模型和零维水质模型为稳态模型。选取太湖大网模型 $P=90\%$ 水文保证率下的典型年计算结果,为胥江模型提供边界水文条件;胥江小流域的水文条件比较稳定,滞留时流量变化不大,因此选取胥江模型计算结果中枯水期水量值作为一维水质模型及零维水质模型的水文条件。

由于总量控制的复杂性,必须建立比较清晰的污染源与水质响应关系。而胥江模型采用非稳态水量水质模型,模型比较复杂,随机性及波动性较大,其水质与上游概化排污口污染源响应关系难以建立,所以应首先建立稳态模型。

2.1.1 胥江非稳态河网水量水质模型

水量计算的微分方程是建立在质量和动量守恒定律基础上,考虑了漫滩和旁侧入流,其完全形式的圣维南方程组为

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_0}{\partial x} + B_1 \frac{\partial Z}{\partial t} &= q \\ \frac{\partial Q_0}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_0^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gA \frac{Q_0 |Q_0|}{K^2} + \frac{Q_0}{A} q &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

式中: Q_0 为流量, m^3/s ; B_1 为调蓄宽度(包括滩地在内的全部河宽), m ; Z 为水位, m ; q 为单位河长旁侧入流量, m^3/s ; K 为流量模数, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$; A 为主槽过水断面面积, m^2 ; x 为沿水流方向距离, m ; t 为时间, s 。

采用 Preissman 四点隐式差分格式离散方程组。水质计算微分方程是河网对流传输方程:

$$\begin{aligned} \sum_{l=1}^n (Q_{0l} \rho)_{l,j} &= (\rho \Omega)_j \left(\frac{dZ}{dt} \right)_j \\ \frac{\partial(A\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(Q_{0l}\rho)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(AE_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + S_c - S &= 0 \end{aligned} \tag{2}$$

式中: E_x 为纵向扩散系数, m^2/s ; ρ 为水流输送的污染物质量浓度, mg/L ; Ω 为河道叉点至节点的水面面积, m^2 ; j 为节点编号; l 为与节点 j 相连的河道编号; S_c 为与输送物质浓度有关的衰减项, $1/\text{d}$; S 为外部的源或汇项。

对时间项采用向前差分,流项采用上风格式,扩散项采用中心差分格式。

2.1.2 稳态水质模型

一维模型考虑自净作用和扩散作用,计算公式如下:

$$\rho = \frac{W + Q_0 \rho_0}{Q_0} \exp \left(-k \frac{x}{86400u} \cdot \frac{2}{\sqrt{1 + \frac{4E_x k}{86400u^2} + 1}} \right) \tag{3}$$

式中: ρ 为计算断面污染物质量浓度, mg/L ; W 为概化排污口排污量, g/s ; k 为降解系数, $1/\text{d}$; u 为流速, m/s ; x 为污染源与计算断面纵向距离, m ; ρ_0 为边界水质质量浓度, mg/L 。

木渎镇内河水流不畅,因此采用零维完全混合模型计算污染物质量浓度,计算公式如下:

$$\rho = \frac{W + Q_0 \rho'_0}{Q_0 + q + kV} \tag{4}$$

式中: W 为污染物排放量, g/s ; ρ'_0 为上游来水的质量浓度背景值, mg/L ; V 为水体容积, m^3 。

2.2 模型计算条件及参数确定

2.2.1 模型计算条件

a. 控制断面选取及水质目标:5 个流域控制断面水质近期目标达Ⅳ类水,远期目标达Ⅲ类水;3 个内河控制断面水质近期目标达到Ⅴ类水,远期目标达Ⅳ类水。

b. 水文条件:选取太湖大网模型 $P=90\%$ 水文保证率下的典型年计算结果为胥江模型提供边界水文条件。具体控制断面及概化排污口位置见图 2。当胥江流向为自西向东出太湖时, B_1 、 B_2 太湖边界流量分别为 $5.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $8.1 \text{ m}^3/\text{s}$; B_3 、 B_4 运河边界流量分别为 $4.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $13 \text{ m}^3/\text{s}$, B_5 、 B_6 、 B_7 边界流量分别为 $2.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$;当胥江流向为自东向西出入太湖时, B_1 、 B_2 太湖边界两个闸会关闭,胥江发生滞留,此时流量约为 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (图 2)。

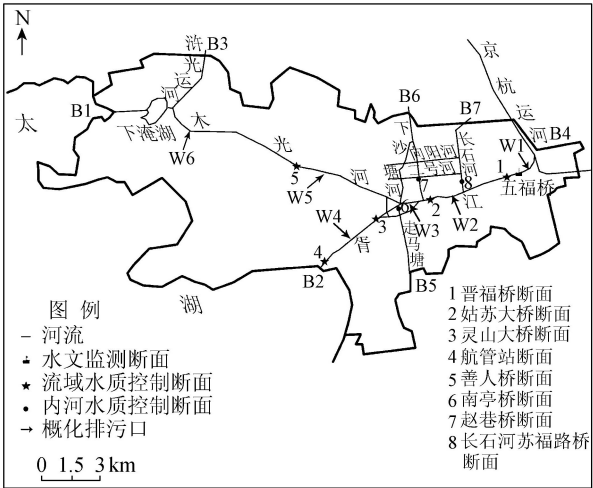


图 2 胥江小流域控制断面及概化排污口位置分布

c. 边界水质质量浓度:边界水质质量浓度取实测值,具体为太湖边界 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})=1 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{COD})=20 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TP})=0.2 \text{ mg/L}$;京杭运河边界 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})=1.8 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{COD})=30 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TP})=0.3 \text{ mg/L}$ 。

2.2.2 排污口概化

根据污染源现有排污量大小及削减潜力分析结果确定排污口概化及削减方案。

概化排污口的入河污染源包括工业点源、生活点源和农业面源。原则上,在大型污水处理厂、工业企业密集区及城市人口密集区附近的河流都需要概化排污口。本次计算将胥江小流域污染源概化成6个排污口。由于除污染物总量控制措施外,还采取了末端强化治理措施,污染物在进入河道后到达控制断面前仍有逐步削减,因此针对强化治理措施在各控制断面附近另外再概化一排污口。各概化排污口各类污染物入河量之和等于胥江小流域各类污染物入河量,具体见图3。

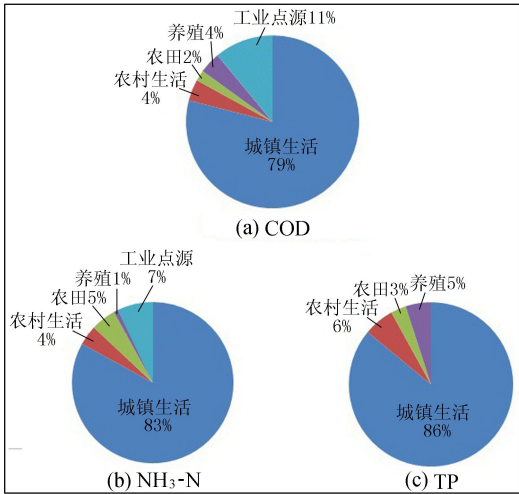


图3 胥江小流域各类污染源COD、NH₃-N、TP入河量示意图

2.2.3 模型参数率定

5个流域控制断面采用一维水质模型;3个内河控制断面采用零维水质模型。模型率定结果见图4和图5。

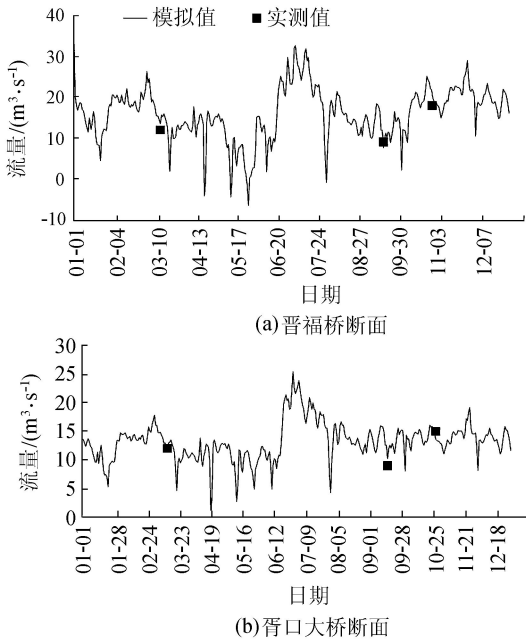


图4 胥江模型水量率定结果

率定得到 $k_{\text{COD}}=0.08 \sim 0.15 \text{ d}^{-1}$, $k_{\text{NH}_3\text{-N}}=0.06 \sim 0.12 \text{ d}^{-1}$, $k_{\text{TP}}=0.06 \sim 0.12 \text{ d}^{-1}$ 。

2.3 限排总量及削减量计算

根据达标要求及水文、水质实测资料,利用一维和零维稳态模型计算控制断面水质达标时的污染物限排总量,计算结果见表1。

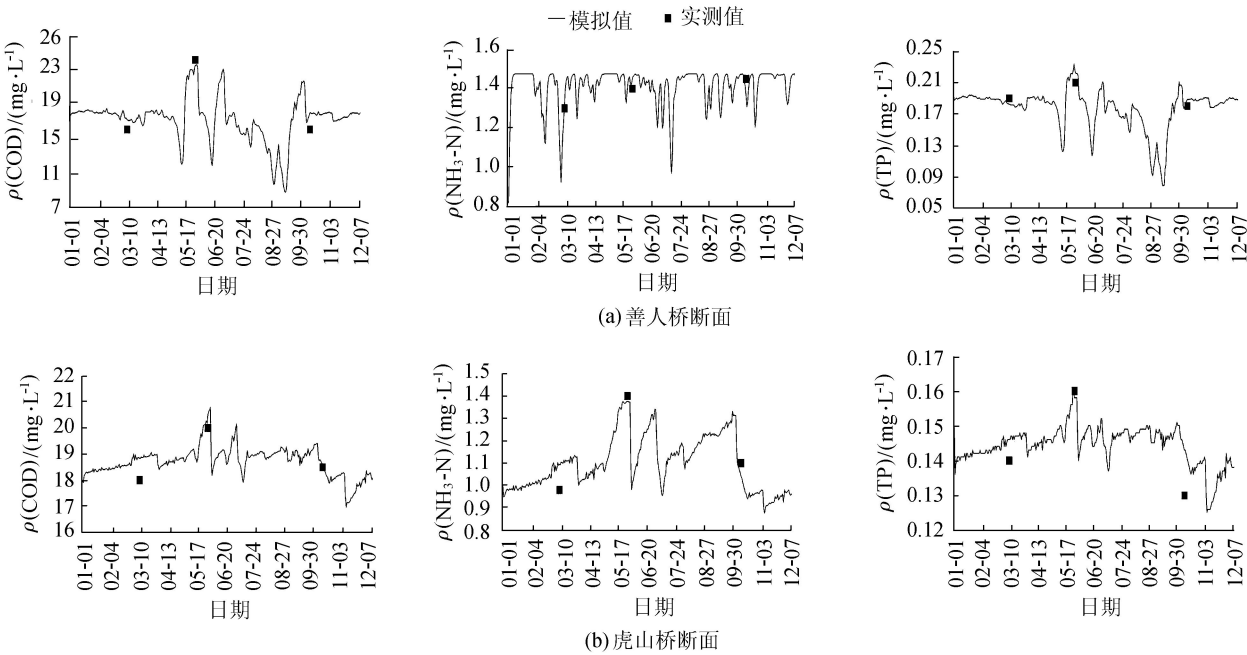


图5 胥江模型水质率定结果

表 1 控制单元污染物限排总量计算结果

目标	COD			NH ₃ -N			TP		
	限排值/ (t·a ⁻¹)	现状超出量/ (t·a ⁻¹)	现状超出量与 限排值之比/%	限排值/ (t·a ⁻¹)	现状超出量/ (t·a ⁻¹)	现状超出量与 限排值之比/%	限排值/ (t·a ⁻¹)	现状超出量/ (t·a ⁻¹)	现状超出量与 限排值之比/%
近期	1948	615	32	240	79.3	33	20.1	13.5	67
远期	1013	1550	153	185	134.3	73	10.0	23.6	236

注:现状超出量为现状污染物排放量减去污染物限排总量.

3 总体治理方案及效果评估

3.1 总体治理方案

本项目包含四大类工程:生活污水及配套管网工程,河道微污染水治理工程,引水及清淤工程,河道生态化改造及氮磷拦截工程。

3.1.1 生活污水及配套管网工程

①污水厂扩建工程:木淩污水处理厂 4 期(4 万 t/d);光福污水处理厂二期(2 万 t/d);②市政污水管网建设:铺设污水管网 124 km,其中木淩镇(包括藏北片)50 km、胥口镇 24 km、光福镇 50 km;

3.1.2 农村生活污水处理及配套管网建设

①木淩镇(包括藏北片区)农村污水治理:建设独立污水处理设施 39 座,铺设管网 90 km;②胥口镇农村污水治理:建设独立污水处理设施 52 座,铺设管网 95 km;③光福镇农村污水治理:建设独立污水处理设施 15 座,铺设管网 35 km;④老城区截流式合流制管网改造:在木淩镇、光福镇、胥口镇建设污水截留井 3 座,铺设截留干管 4 km。

工程实施后:城镇污水接管率近期能由 78% 提升到 92%,远期能提升至 98%;农村污水接管率近期能由 53% 提升至 80%,远期能提升至 90%。计算得到城镇生活污染物削减量:NH₃-N 为 128.5 t、COD 为 1414 t、TP 为 21.05 t;农村生活污染物削减量:NH₃-N 为 2.6 t、COD 为 49 t、TP 为 0.95 t。

3.1.3 河道微污染水治理工程

① 8 个控制断面安置点提供 3 相 4 线 380 V/240 kW 总电力负荷;② 8 个安置点安装 24 套纳米气泡机。

工程实施后:COD 和 TP 水质改善率约为 10%,NH₃-N 水质改善率约为 30%。根据 $W=kV(\rho_0-\rho_s)$ 可初步核算:COD 近期削减量为 7 t,远期削减量为 7 t;NH₃-N 近期削减量为 1.8 t,远期削减量为 1.8 t;TP 近期削减量为 0.1 t,远期削减量为 0.07 t。

3.1.4 引水及清淤工程

①在下淹湖出口建设 5 m³/s 的泵站 1 座;②在木光河藏书段进行清淤工程,需清淤的河道有两段总长度为 2.5 km。③引水工程作为应急措施。

3.1.5 河道生态化改造及氮磷拦截工程

①对木光河 8 km、胥江 4 km 长的河道护坡进行绿色植物种植及生态净水箱改造;②在内河建设生态拦截沟渠 45 km,景观湖生态拦截工程 10 万 m²。

工程实施后,预测农田面源污染能削减 10%;养殖污染近期能削减 20%,远期能削减 50%。经初步核算,农田面源污染物削减量:NH₃-N=1 t、COD=5 t、TP=0.1 t;畜禽养殖污染物削减量:NH₃-N=2 t、COD=72 t、TP=1.45 t;水产养殖污染物削减量为:NH₃-N=0.2 t、COD=4 t、TP=0.07 t。

3.2 效果评估

3.2.1 总量评估

根据各项工程污染物削减量,计算得到工程实施后各类污染物排放量计算结果见表 2。

3.2.2 水质评估

根据工程实施后各类污染物排放量,利用一维和零维稳态水质模型计算得到总量控制工程实施后控制断面水质浓度计算结果见表 3,所有工程实施后控制断面水质计算结果见表 4。

从表 3 可见,仅总量控制工程实施后,COD、TP

表 2 工程实施后各类污染物排放量与限排总量计算结果

指 标	COD		NH ₃ -N		TP		备注
	近期	远期	近期	远期	近期	远期	
现状排放	2563		319.3		33.6		引水作 应急 措施
限排总量	1948	1013	240.0	185.0	20.10	10.00	
规划排放量	1650	1012	238.3	183.2	19.66	9.91	
富余量	298	1	1.7	1.8	0.44	0.09	
生活及工业	871	1463	77.3	131.1	13.13	22.00	
生态拦截	35	81	1.9	3.2	0.71	1.62	
纳米气泡	7	7	1.8	1.8	0.10	0.07	
合 计	913	1551	81.0	136.1	13.94	23.69	

注:富余量为限排总量减去规划排放量。

表 3 仅总量控制工程实施后控制断面水体质量浓度计算值 mg/L

控制断面		COD			NH ₃ -N			TP		
		现状	近期	远期	现状	近期	远期	现状	近期	远期
流域	目标值	—	30. 0	20. 0	—	1. 50	1. 00	—	0. 30	0. 20
	晋福桥	22	20. 0	19. 7	1. 80	1. 58	1. 47	0. 25	0. 22	0. 20
	姑苏大桥	21	20. 0	19. 6	1. 80	1. 60	1. 50	0. 12	—	—
	灵山桥	28	25. 5	22. 5	1. 70	1. 58	1. 47	0. 38	0. 30	0. 22
	航管站	20	—	—	1. 70	1. 50	1. 36	0. 15	—	—
	善人桥	18	—	—	1. 90	1. 69	1. 56	0. 15	—	—
内河	目标值	—	40. 0	30. 0	—	2. 00	1. 50	—	0. 40	0. 30
	南亭桥	29	—	—	1. 97	1. 45	1. 22	0. 27	—	—
	赵巷桥	23	—	—	2. 85	2. 10	1. 76	0. 23	—	—
	长石河苏福路桥	29	—	—	2. 67	1. 97	1. 65	0. 31	0. 25	0. 22

表 4 所有工程实施后控制断面水体质量浓度计算值 mg/L

控制断面		COD			NH ₃ -N			TP		
		现状	近期	远期	现状	近期	远期	现状	近期	远期
流域	目标值	—	30	20. 0	—	1. 50	1. 00	—	0. 30	0. 20
	晋福桥	22	18	17. 7	1. 80	1. 10	1. 00	0. 25	0. 20	0. 18
	姑苏大桥	21	18	17. 6	1. 80	1. 10	1. 00	0. 12	—	—
	灵山桥	28	23	20. 0	1. 70	1. 10	1. 00	0. 38	0. 27	0. 20
	航管站	20	—	—	1. 70	1. 00	0. 95	0. 15	—	—
	善人桥	18	—	—	1. 90	1. 20	1. 00	0. 15	—	—
内河	目标值	—	40	30. 0	—	2. 00	1. 50	—	0. 40	0. 30
	南亭桥	29	—	—	1. 97	1. 00	0. 85	0. 27	—	—
	赵巷桥	23	—	—	2. 85	1. 50	1. 20	0. 23	—	—
	长石河苏福路桥	29	—	—	2. 67	1. 40	1. 20	0. 31	0. 23	0. 20

除灵山桥断面远期不能达标外基本能达标;NH₃-N 基本都不达标。

从表 4 可见:所有工程实施后 COD、TP 均能达标,且有较大富余量;NH₃-N 基本能达标,流域 5 个控制断面中 4 个断面的质量浓度计算值为 1 mg/L。

4 结 语

a. 建立太湖大网模型-胥江模型-稳态水质模型 3 级串联模型,并计算水质达标情况下污染物限排总量,计算结果表明,COD 现状排放量超出限排总量 153%、NH₃-N 超出 73%、TP 超出 236% ;

b. 制定污染源头控制—污染物入河过程截污—末端河道治理的综合污染控制方案,方案包含生活污水及配套管网工程,河道微污染水治理工程,引水及清淤工程,河道生态化改造及氮磷拦截工程四大类工程措施;

c. 综合控制方案实施效果评估表明,方案实施后胥江小流域水环境能达到目标要求。

参考文献:

[1] 裴俊文. 全镇黑臭河流专项整治推进会[N]. 木渎通讯,2010-07-31(02).

[2] 左良栋,那贵平,周世良. 三峡库区小流域水环境综合整治规划研究[J]. 水科学与工程 技术,2010(1):6-8.

(ZUO Liangdong, NA Guiping,ZHOU Shiliang. Study on the plan of the comprehensive improvement of water environment of small watershed in the Three Gorges Reservoir [J]. Water Science and Engineering Technology,2010(1):6-8. (in Chinese))

[3] 张雅卓. 城市河道综合整治研究及思考[J]. 水利发展研究,2009(6):32-37. (ZHANG Yazhuo. Research and thinking of the urban river improvement [J]. Water Conservancy Development Research,2009(6):32-37. (in Chinese))

[4] 陈松,闭祖良,国洪梅,等. 城镇河道综合整治的几种措施[J]. 中国农村水利水电,2010(8):34-37. (CHEN Song, BI Zhuliang, GUO Hongmei,et al. Some measures of the urban river improvement [J]. China Rural Water Conservancy and Hydroelectric Power,2010(8): 34-37. (in Chinese))

[5] 孟伟. 流域水污染物总量控制技术与示范[M]. 北京: 中国环境科学出版社,2008:20-25.

[6] 孟伟,张远,郑丙辉. 水环境质量基准、标准与流域水污染总量控制策略[J]. 环境科学研究,2006,19 (3): 1-6. (MENG Wei, ZHANG Yuan, ZHENG Binghui. The quality criteria, standards of water environment and the water pollutant control strategy on watershed[J]. Research of Environmental Sciences, 2006, 19 (3): 1-6. (in Chinese))

(下转第 67 页)

2006.

[3] 邬建国. 景观生态学:格局、过程、尺度与等级[M]. 北京:高等教育出版社,2004:126-128.

[4] 夏朋,刘蓓. 国外水生态系统保护与修复的经验及启示[J]. 水利发展研究,2011,11(6): 72-78. (XIA Peng, LIU Qian. Experience and enlightenment of the foreign protection and restoration of aquatic ecosystems [J]. Water Resources Development Research, 2011, 11(6): 72-78. (in Chinese))

[5] 陈敏建,丰华丽,王立群,等. 生态标准河流和调度管理研究[J]. 水科学进展,2006,17(5):631-636. (CHEN Minjian, FENG Huali, WANG Liqun, et al. Scientific regulation and management based on ecological flow regime[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(5): 631-636. (in Chinese))

[6] 李振基,陈小麟,郑海雷. 生态学[M]. 北京:科学出版社,2009:106.

[7] 夏自强,李琼芳,姜翠玲. 河流自然功能的利用及保护研究[C]//水利部国际合作与科技司. 河流生态修复技术研讨会论文集. 北京:中国水利水电出版社,2005: 52-59.

[8] 曹凑贵. 生态学概论[M]. 北京:高等教育出版社, 2002:5-6.

[9] 钱正英,陈家琦,冯杰. 人与河流和谐发展[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2006, 34(1): 1-5. (QIAN Zhengying, CHEN Jiaqi, FENG Jie. Harmonious development of humanity and rivers[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(1): 1-5. (in Chinese)).

[10] 张道军. 流域生态环境可持续发展论[M]. 郑州:黄河水利出版社,2001:168.

(收稿日期:2012-12-17 编辑:彭桃英)

+++++

(上接第 61 页)

[7] 孟伟,张楠,张远,等. 流域水质目标管理技术研究(I):控制单元的总量控制技术[J]. 环境科学研究, 2007,20(4):1-8. (MENG Wei, ZHANG Nan, ZHANG Yuan. The study on technique of basin water quality target management (I): pollutant total amount control technique in control unit[J]. Research of Environmental Sciences,2007,20(4):1-8. (in Chinese))

[8] 徐士凌,张晓霞. 河道城区段治理综合分析探讨[J]. 中国水运, 2007, 5(6): 25-26. (XU Shiling, ZHANG Xiaoxia. River course city sector government generalized analysis discussion[J]. China Water Transport, 2007, 5(6):25-26. (in Chinese))

[9] 张晟,熊友才,徐圃青,等. 常州市城区河道综合整治的实践与思考[J]. 环境工程,2010(增刊1),28:43-45. (ZHANG Sheng, XIONG Youcai, Xu Puqing, et al. Practice and thinking of river synthetic regulation in Changzhou urban area[J]. Environmental Engineering, 2010(S1),28:43-45. (in Chinese))

[10] 邓耀明. 污染河道治理技术的研究进展[J]. 环境科技, 2009,22(增刊1):90-93. (DENG Yaoming. Research and development of techniques for polluted river[J]. Environmental Science and Technology, 2009, 22(S1): 90-93. (in Chinese))

[11] 何志忠. 兰州市城市河道综合整治规划探析:以兰州市南河道综合整治规划为例[J]. 甘肃科技,2006,22(8):1-3. (HE Zhizhong. Analysis of the plan of river synthetic regulation in Lanzhou urban area: take South River in Lanzhou City as an example[J]. Gansu Science and Technology,2006,22(8):1-3. (in Chinese))

[12] 武涛,刘彬彬. 上海市黑臭河道治理技术应用研究[J]. 工业安全与环保,2010,36(3):27-29. (WU Tao, LIU Binbin. Application and research of Shanghai black-odor river treatment technologies [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2010, 36(3): 27-29. (in Chinese))

[13] 潘碌亭,吴蕾,屠晓青. 化学氧化絮凝技术在强化处理受污染河水中的应用[J]. 环境工程学报,2007(9): 54-57. (PAN Luting, WU Lei, TU Xiaoqing. Chemical oxidation-flocculation technology applied for enhanced treatment of polluted river water[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2007(9): 54-57. (in Chinese))

[14] 汪红军,胡菊香,吴生. 生物复合酶污水净化剂处理黑臭水体的研究[J]. 水利渔业,2007,27(1): 68-70. (WANG Hongjun, HU Juxiang, WU Sheng. Research of biological compound enzyme technology applied for enhanced treatment of black-odor water [J]. Water Conservancy Fishery,2007,27(1):68-70. (in Chinese))

[15] 罗缙. 平原河网区水环境时空变化模拟技术及应用研究:以太湖流域为例[D]. 南京:河海大学,2009.

(收稿日期:2012-09-27 编辑:高渭文)

• 67 •