

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.04.008

基于重污染区入湖断面水质(总氮)达标的 污染控制方案

付 浩¹, 孙 瀚², 逢 勇^{3,4}

(1. 江苏省住房和城乡建设厅城市规划技术咨询中心, 江苏 南京 210013;
2. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225009; 3. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098;
4. 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:基于 2009 年 10 月 26—28 日太湖重污染区野外水文、水质同步监测数据, 分析水量水质现状, 建立一维水环境数学模型, 并计算不同污染控制方案下水质(总氮)的改善效果。计算结果表明:现状污染物排放方案及污染物总量达标控制方案不能完全控制入湖断面总氮, 鉴于河流水质总氮因子没有明确的地表水环境质量标准, 必须在污染物总量达标控制方案基础上制定更严格的入湖控制断面水质功能区达标方案。水质功能区达标方案的实施可以有效地改善入太湖控制断面总氮状况, 基本实现河网水质达到功能区水质目标。

关键词:总氮; 水环境; 数学模型; 污染控制方案; 太湖流域

中图分类号: X26 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2014)04-0036-07

A pollution control scheme based on discharge of sections with standard-reaching water quality (TN) into Taihu Lake in heavily polluted lake area

FU Hao¹, SUN Han², PANG Yong^{3,4}

(1. Urban Planning Technology Consulting Center of Jiangsu Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development, Nanjing 210013, China;
2. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225009, China;
3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
4. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development of Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on hydrological and water quality monitoring data of a heavily polluted area in Taihu Lake from October 26 to 28, 2009, the water quantity and water quality in the heavily polluted area were analyzed, and a one-dimensional water environmental mathematical model was established to simulate total nitrogen (TN) with different pollution control schemes. The results show that the current pollutant discharge scheme cannot meet the standard for TN discharge into the lake. In view of the lack of surface water quality standards for TN in rivers, we must work out a standard-reaching scheme that is stricter for water quality in water function zones based on the total pollutant standard-reaching scheme. This scheme can effectively improve the water quality (TN) of water discharged into Tiahu Lake and enable the water quality of the river network to reach the standards of water function zones.

Key words: water environmental mathematical model; heavily polluted area; total nitrogen; pollution control scheme; Taihu Basin

太湖流域重污染区^[1]位于太湖西北部地区, 主要包括常州市区、武进区、无锡惠山区、滨湖区西部和宜兴北部, 总面积 5 272 km², 占太湖流域面积的 14 %, 基本涵盖了太湖流域上游主要入湖河流, 重污染区污染物入湖通量占入太湖污染物总通量的 80 % 左右, 水质达标率仅为 17 %^[2]。

基金项目: 国家自然科学基金(51179053); 国家重大科技专项(2012ZX07506-002)
作者简介: 付浩(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为环境系统规划与综合评价。E-mail: yyhyyc@163.com

20 世纪 60 年代,日本和美国在水污染控制方案制定时执行污染物浓度控制方案,但随着排入水体污染物的增多,浓度控制已很难控制水环境污染,于是人们提出了总量控制的方法来达到改善水质、满足水环境质量标准的目的^[3],如今总量控制方法也更加完善和灵活,如美国环保局提出 TMDL (total maximum daily loads)、TMYL (total maximum year loads) 技术等^[4]。近年来我国在总量控制方面展开研究,逐步形成了以污染物目标总量控制技术为主,容量总量控制和行业总量控制为辅的水质管理体系^[5],但仍没有达到控制污染源、改善水质的效果,尤其是太湖入湖污染负荷居高不下,总量控制与水质改善脱节,难以满足太湖流域水环境管理的迫切需求^[6-7]。2011 年边博等^[1]在太湖流域重污染区总量控制研究中,计算了重污染区的环境容量,提出具体至 97 个镇的污染物削减方案,确定重污染区以镇(街道)级为基本单位的分阶段总量控制目标,得出区域河网水质改善的平均达标率。但由于河流水质总氮因子没有明确的水质功能区标准,重污染区总量控制的指标仅为 COD、NH₃-N、TP,随着太湖富营养化日益严重,如何控制重污染区主要入湖断面 TN 浓度,成为降低太湖湖体 TN 浓度的主要问题^[8]。

本文通过建立重污染区水环境数学模型,分析重污染区在不同水污染控制方案下入湖断面水质 TN 的改善效果,为保证入湖断面 TN 能够满足《江苏省太湖流域水环境综合治理实施方案的通知》^[9]

中太湖湖体 TN 指标(近期 $\rho(\text{TN})=2.0\text{ mg/L}$,远期 $\rho(\text{TN})=1.2\text{ mg/L}$)要求,在重污染区染控物总量达标方案的基础上,制定更严格的污染控制方案——河流水质功能区达标方案,此方案基本实现了控制断面 TN 可以达到太湖湖体 TN 指标,对实现太湖流域污染源控制与污染物减排、水质改善起着极其重要的作用。

1 研究区域水文水质同步监测

1.1 监测方案

2009 年 10 月 26—10 月 28 日对重污染区进行 3 d 的水量水质同步监测,监测区域位于太湖西岸,北至京杭大运河常州段,南至宜兴市红滕河,西至溧湖,东到太湖的平原河网区。这次水量水质同步监测掌握重污染区河网各河道水量分流比及主要河流重点河段的水质现状,以此为目标进行点位布置,监测断面位置见图 1。

监测期间,水文监测断面每天监测 1 次,水质监测断面及水文水质同步监测断面每天上午和下午各监测 1 次。每天 8:00 开始监测,13:00 开始监测。水文监测因子为:流量、流速、水深;水质监测因子为:pH、水温、COD、COD_{Mn}、NH₃-N、TN、TP,部分断面加测 BOD₅。

1.2 监测数据分析

a. 水量监测数据分析。重污染区主要监测断面 3 天水量监测结果示意图见图 2。由图 2 可见:

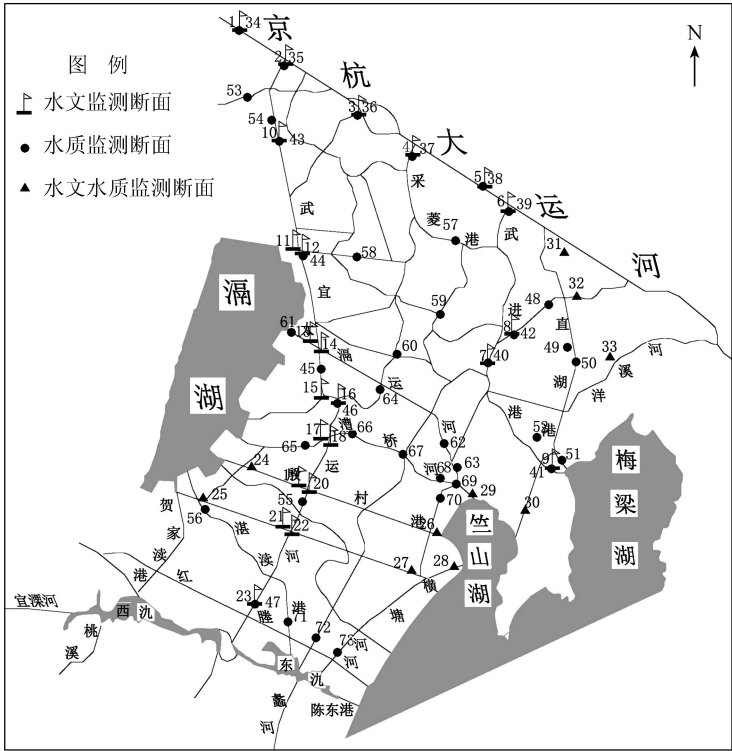


图 1 重污染区水量水质同步监测点位示意图

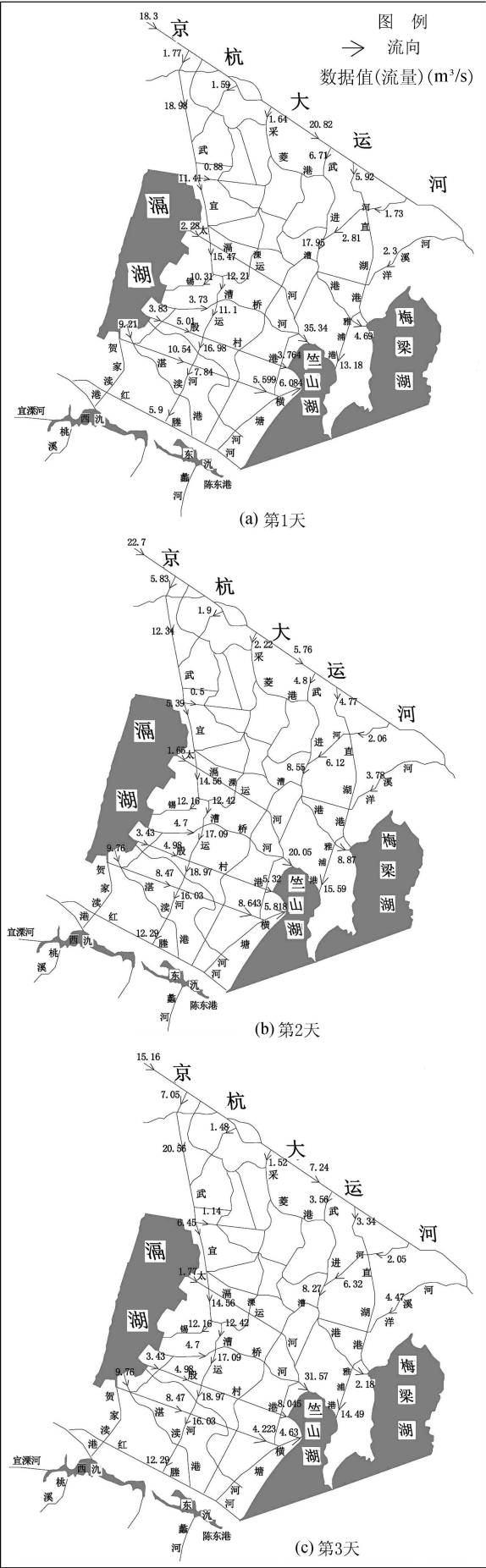


图2 重污染区河流流向及水量监测示意图

①重污染区内水系总体流向为由北向南,由西向东。武宜运河、武进港和直湖港流向由北向南,而锡漂漕河流向为由东向西,贯通前3条南北方向主要河流。北部来水主要为京杭大运河,西部来水主要为太湖;②重污染区内主要河流通道为武宜运河、武进港、直湖港和锡漂漕河4条,武宜运河为重污染区内水系水量最大的河流,武进港、锡漂漕河次之。京杭运河在与武宜运河的交汇处,大部分流入武宜运河,武宜运河的分流比在45%~55%之间,太湖运河在武宜运河与太湖运河交汇处的分流比在15%~20%之间。③重污染区内主要入太湖河流为太湖运河、漕桥河、殷村港、横塘河、雅浦港、武进港和直湖港,其中武进港和直湖港进入梅梁湖,其余河流进入竺山湖。

b. 水质监测数据分析。重污染区主要监测断面3天水质监测结果平均值及主要区域点源分布见图3。由图3可见:①区内污染物迁移速度缓慢,河网水体自净能力不足,水体主要超标因子为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 及TP。 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP的超标断面分别占总监测断面的10%、54%、34%。②河流污染物质量浓度范围较大: $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 为1.77~12.9 mg/L, $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为0.272~4.95 mg/L, $\rho(\text{TP})$ 为0.099~1.81 mg/L, $\rho(\text{TN})$ 为6.7~35.3 mg/L。③重污染区内工业点源和污水处理厂位置相对集中,主要集中在京杭大运河沿线,采菱港至武进港沿线,直湖港沿线,太湖运河和漕桥河沿线。污染源下游水体中的污染物受河流量影响,丰水期水质扩散速度较快,水质情况较好,平、枯水期情况较差,污染严重,水质指标严重超标。④北部京杭大运河和西部太湖各来水河流水质情况较好,各项污染物指标浓度较低,而入太湖河流断面水质较差,各项污染物指标浓度较大,说明重污染区内部入河污染负荷对区内水质影响较大^[10],直接影响入湖河流水质情况。

2 研究方法

2.1 一维河网水环境数学模型构建

2.1.1 模型建立

河道控制方程:描述明渠一维非恒定流的基本方程为一维 Saint-Venant 方程组^[11],见式(1):

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + B_w \frac{\partial Z}{\partial t} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + 2u \frac{\partial Q}{\partial x} + (gA - Bu^2) \frac{\partial A}{\partial x} + g \frac{n^2 |u| Q}{R^{4/3}} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; x 为沿水流方向空间坐标, m ; B_w 为调蓄宽度,指包括滩地在内的全部河宽, m ; Z 为水位, m ; t 为时间坐标, s ; q 为旁侧入流流量,入流为正,出流为负, m^3/s ; u 为断面平均流速, m/s ; A

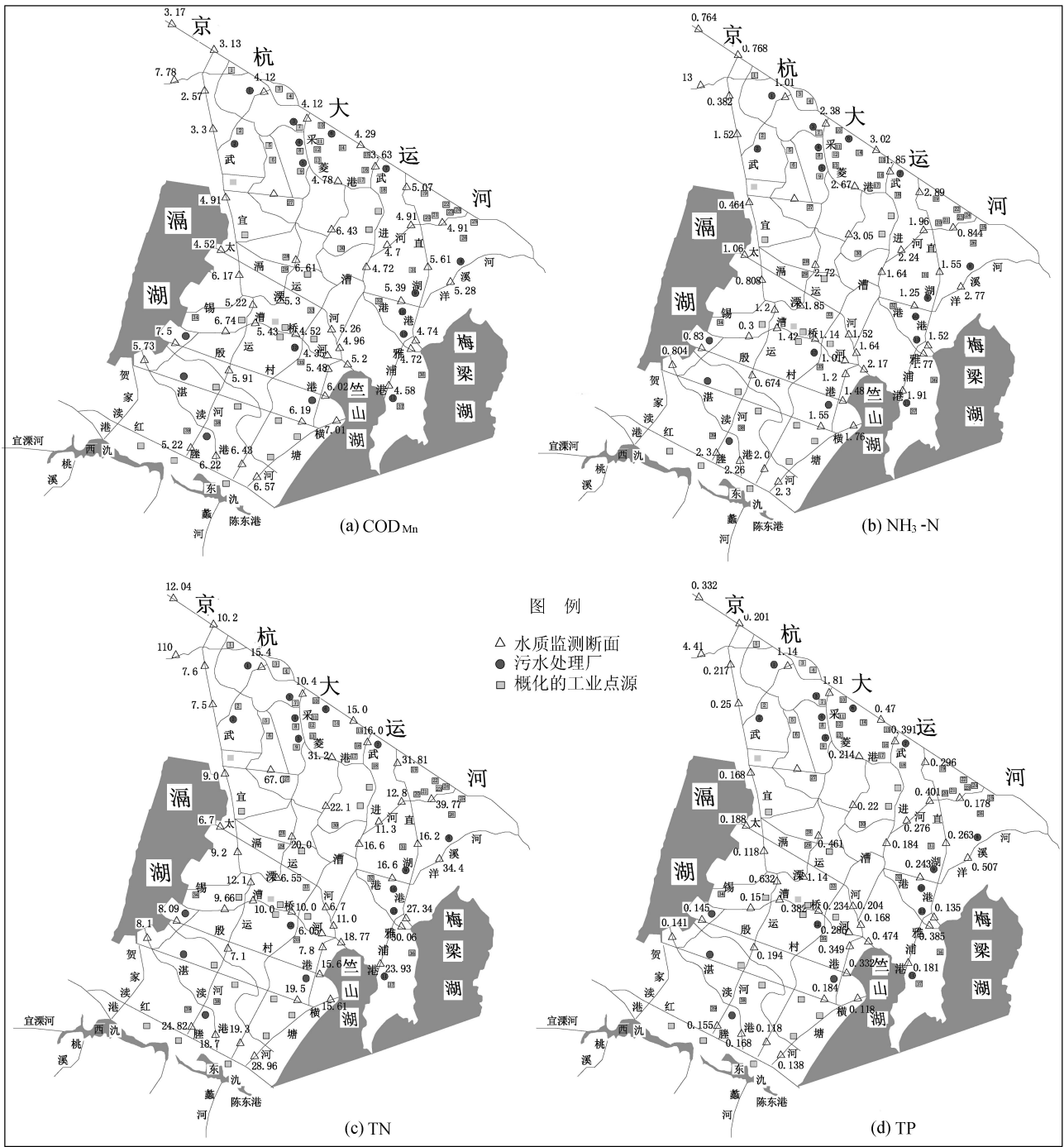


图3 重污染区河流水质监测示意图

为主槽过水断面面积, m^2 ; B 为主流断面宽度, m ; n 为河床糙率; R 为水力半径, m ; g 为重力加速度, m/s^2 。

上述微分方程组采用四点隐式差分格式数值求解, 对上述方程组以 Preissmann 四点线性隐式差分格式将其离散, 辅以连接条件, 形成河道方程, 以微段、河段、汉点三级联解的方法^[12] 求解, 另外采用 Muler 法^[13] 给出的嵌套迭代法提高计算精度。

将平原河网区的河道概化为一维模型要素, 一维河流水质模型^[14] 控制微分方程是建立在质量守恒基础上的对流扩散方程(式(2)):

$$\frac{\partial(A\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(Q\rho)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AE_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) - S_p + S \quad (2)$$

式中: ρ 为水流输送物质的断面平均质量浓度, mg/L ; E_x 为纵向扩散系数; S_p 为与输送物质有关的衰减项, 其中, $S_p = K_d A \rho$, K_d 为衰减因子; S 为外部的源或汇项。

方程求解空间采用隐式迎风格式, 时间项采用前差分对每一单一河道进行离散^[15], 将整个河网水质浓度离散成节点和断面水质浓度进行数值求解。

2.1.2 模型率定及验证

利用野外水文水质同步监测成果, 在模型计算稳

定后采用试错法对水动力模型进行率定,即根据部分断面实测的水位或流量,调试各河道的糙率,使得计算水位或流量过程与实测水位或流量过程相吻合。率定得出河道糙率值为 0.018~0.025,水动力验证点位计算平均值和实测值的相对误差在 20% 左右,部分验证点位流量计算值与实测值的对比见图 4。

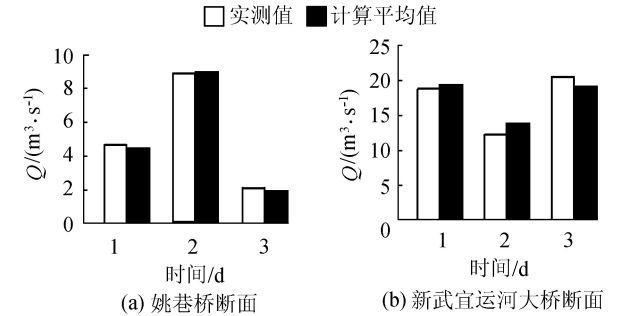


图 4 姚巷断面和武宣运河大桥断面水量模型计算值和实测值对比

选择 COD、NH₃-N 和 TP 作为水质模拟的对象,对水质模型进行率定。调整各参数,使各监测点的水量水质模型计算值与实测值达到基本吻合。率定得出 $K_{COD}=0.08 \sim 0.12 \text{ d}^{-1}$; $K_{NH_3-N}=0.07 \sim 0.1 \text{ d}^{-1}$, $K_{TP}=0.07 \sim 0.1 \text{ d}^{-1}$,水质验证点位 COD、NH₃-N 和 TP 质量浓度的计算值和实测值的相对误差均在 20% 以内,部分验证点位水质计算值与实测值的对比见图 5。

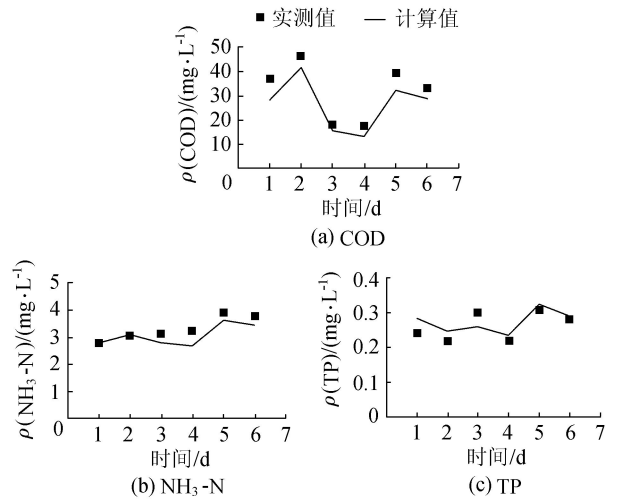


图 5 礼嘉大桥河西断面

模型水动力及水质因子的计算值和实测值的相对误差都在 20% 之内,说明建立的一维河网水环境数学模型可应用于实际数据计算。

2.2 水环境容量计算方法

利用一维河网水环境数学模型,计算出研究区域最小空间单元和最小时间单元的水环境容量值^[16],再根据公式汇总出研究区域的水环境容量值:

$$W = \alpha_{ij} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Q_{ij}(\rho_{s,ij} - \rho_{ij}) + KV_{ij}\rho_{s,ij} \quad (3)$$

式中: W 为水环境容量, t/a ; i 为最小空间计算单元,为计算节点之间的河道; j 为最小时间计算单元, d ; ρ_s 为功能区目标水质值, mg/L ; ρ_0 为初始水质值, mg/L ; K 为降解系数, $1/d$; V 为水体容积, m^3 ; α_{ij} 为不均匀系数, $0 < \alpha_{ij} \leq 1$,河道越宽、水面越大,则 α_{ij} 越小。

设计水文条件:根据长序列降雨量资料推求不同水文保证率的典型年,考虑太湖流域丹阳、茅东、赵村、溧阳、宜兴、常州、陈墅等 40 多个雨量站近 50 多年的长序列降水量资料进行频率分析,90% 保证率的典型年为 1971 年。

2.3 入湖控制断面总氮功能区达标方法

对重污染区一维河网水环境数学模型范围内主要入湖河流进行控制单元划分^[6],以 2007 年污染源普查资料中排放量为基础,计算工业、城镇生活、农村生活、农业面源的污染物入河量,利用河流一维稳态模型建立控制单元内总氮因子与污染源的响应关系,计算控制单元内控制断面 TN 达标情况下入河污染源条件,确定 TN 达标时污染物削减量, K_{TN} 参考太湖流域水量水质大网模型率定后的参数为 ($K_{TN}=0.05 \sim 0.1 d^{-1}$)^[17],入湖河流的设计水文条件由构建的一维河网水环境数学模型提供。

由于控制断面 TN 达标情况下污染物入河量是基于河道控制单元下一维稳态数学模型计算的,为保证河网区入湖断面 TN 达标,必须通过已建立的重污染区河网水环境数学模型在此污染物入河量条件下进行重新模拟计算,进行入湖控制断面 TN 达标的不确定性分析。

3 结果与讨论

3.1 入湖控制断面总氮计算结果

3.1.1 现状污染物排放量情况下

控制断面 TN 水质指标值采用《江苏省人民政府关于印发江苏省太湖流域水环境综合治理实施方案的通知》^[9]中太湖湖体 TN 指标,即近期 $\rho(TN)=2.0 \text{ mg/L}$,远期 $\rho(TN)=1.2 \text{ mg/L}$ 。在不考虑重污染区外污染源情况下,当边界水质取太湖湖体近期目标水质 ($\rho(TN)=2.0 \text{ mg/L}$) 及湖体 TN 为 III 类水质时 ($\rho(TN)=1.0 \text{ mg/L}$),利用一维稳态模型计算现状污染物排放下 13 个入湖控制断面水质达标情况。

表 1 表明:当边界水质均取 $\rho(TN)=2.0 \text{ mg/L}$ 时,近期 13 个入湖控制断面水质均不能达标;当边界水质取 $\rho(TN)=1.0 \text{ mg/L}$ 时,有 5 个入湖控制断面仍然无法达标,说明重污染区内大量 TN 污染物入河是造成入湖控制断面 TN 超标的主要原因,要

保证入湖断面 TN 达标,必须对其进行削减。

表 1 入湖控制断面现状排污下 TN 达标情况

断面 序号	断面 名称	边界水质 $\rho(\text{TN})=2\text{ mg/L}$		边界水质 $\rho(\text{TN})=1\text{ mg/L}$	
		断面水质/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	是否达标	断面水质/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	是否达标
1	小溪港桥	2.42	否	1.53	是
2	鸿 桥	2.87	否	1.93	是
3	湖山桥	2.96	否	2.23	否
4	姚巷桥	2.84	否	2.18	否
5	百渎港	2.42	否	1.69	是
6	殷村港	2.17	否	1.40	是
7	社渎港	2.51	否	1.62	是
8	官渎港	2.38	否	1.63	是
9	洪巷港	2.90	否	2.10	否
10	陈东港	2.91	否	2.11	否
11	大浦港	2.90	否	2.10	否
12	乌溪港	2.70	否	1.76	是
13	大港河	2.38	否	1.47	是

3.1.2 总量达标控制方案情况下

统一采用《江苏省人民政府关于印发江苏省太湖流域水环境综合治理实施方案的通知》^[9]中太湖水体 TN 指标($\rho_s=2\text{ mg/L}$),利用 2.2 节水环境容量计算方法进行重污染区 TN 总量计算,计算结果见表 2。

表 2 总量达标方案下 TN 削减量

年份	TN 环境容量/ ($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)	削减量/ ($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)	削减率/%
2012(近期)	6805.4	7571.3	52.7
2015(远期)	3916.1	10664.2	72.8

利用一维河网水环境数学模型计算当边界水质取不同浓度时,TN 总量达标控制方案下 13 个入太湖控制断面总氮达标情况。表 3 表明:当边界水质均取 $\rho(\text{TN})=2.0\text{ mg/L}$ 时,有 8 个控制断面 TN 不能达标;当边界水质取 $\rho(\text{TN})=1.0\text{ mg/L}$ 时,13 个控制断面均可达到近期 TN 水质标准,这说明总量

表 3 入湖控制断面总量达标方案下 TN 达标情况

断面 序号	断面 名称	边界水质 $\rho(\text{TN})=2\text{ mg/L}$		边界水质 $\rho(\text{TN})=1\text{ mg/L}$	
		断面水质/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	是否达标	断面水质/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	是否达标
1	小溪港桥	2.37	否	1.49	是
2	鸿 桥	2.45	否	1.52	是
3	湖山桥	2.26	否	1.53	是
4	姚巷桥	2.56	否	1.89	是
5	百渎港	1.88	是	1.16	是
6	殷村港	1.92	是	1.15	是
7	社渎港	2.38	否	1.49	是
8	官渎港	2.26	否	1.52	是
9	洪巷港	1.99	是	1.19	是
10	陈东港	1.99	是	1.19	是
11	大浦港	1.99	是	1.19	是
12	乌溪港	2.11	否	1.16	是
13	大港河	2.29	否	1.38	是

达标污染控制方案对入湖控制断面 TN 不能起到完全的控制作用,因为在水环境容量 TN 计算过程中, ρ_s 采用近期 TN 目标值而造成水环境容量 TN 计算值较大,从而造成 TN 削减量相对偏小。

要满足入湖断面 TN 达标,必须在总量控制方案基础上实行更严格的 TN 削减方案。

3.1.3 入湖断面 TN 水质达标情况下

污染物总量达标控制方案不能完全保证入湖控制断面 TN 达标,需在总量达标污染控制方案的基础上进行污染源的进一步削减,再将允许排污量分配到影响入湖断面水质的每个镇。若上游概化排污口影响到不同的控制断面水质,则选择相对更为严格的削减量进行污染物削减计算。

表 4 表明:当边界水质 $\rho(\text{TN})$ 均取 1.0 mg/L 时,远期 TN 削减量为 $10\,748.32\text{ t/a}$,当边界水质 $\rho(\text{TN})$ 均取 2.0 mg/L 时,TN 削减量为 $11\,221.22\text{ t/a}$,在此污染物削减量方案下,可以保证入湖控制断面 TN 达标。

表 4 入湖断面 TN 达标情况下的 TN 削减量

年份	TN 环境 容量/ ($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)	TN 削减量/($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)		削减率/%	
		边界水质 $\rho=1.0\text{ mg/L}$	边界水质 $\rho=2\text{ mg/L}$	边界水质 $\rho=1.0\text{ mg/L}$	边界水质 $\rho=2.0\text{ mg/L}$
2012 (近期)	6 805.4	7 655.42	8 128.32	53.25	56.54
2015 (远期)	3 916.1	10 748.32	11 221.22	74.76	78.05

3.1.4 入湖断面 TN 水质达标不确定性分析

由于水质功能区达标方案 TN 削减量是基于一维稳态数学模型计算的,必须利用此方案下的污染物削减结果,通过已构建的重污染区一维河网水环境数学模型进行重新模拟计算,至模型稳定后分析入湖控制断面 TN 达标的确定性。

本次计算主要选取了 4 条入太湖典型河流直湖港、武进港、漕桥河、太滪南运河的入湖控制断面,分别计算得出湖山桥断面,姚巷断面,百渎港断面,殷村港断面的相关水质的日变化趋势,见图 6。计算结果表明:13 个主要入湖控制断面 TN 质量浓度计算值在变化趋势中平均值均低于 2 mg/L 的近期 TN 水质要求,水质计算值的超标率在 20% 以内,说明此入湖控制断面水质功能区达标方案的制定合理且成效显著,水质功能区达标方案的削减计算结果合理,能对重污染区中的主要入湖断面的水质起到控制作用。

3.2 讨 论

根据现状制定重污染区两个污染控制实施方案的目标,一个侧重于总量控制,一个侧重于入湖河流

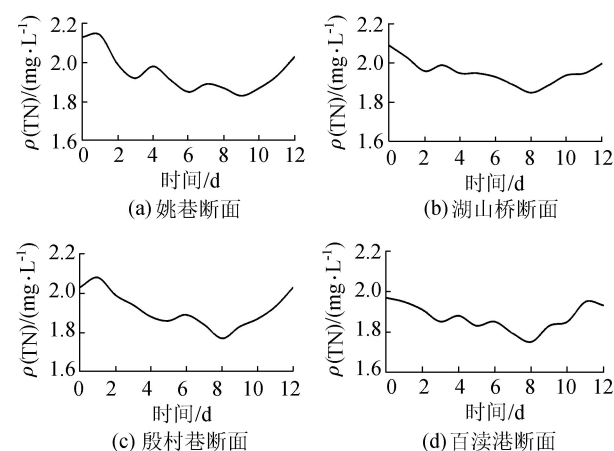


图6 入湖控制断面水质计算模拟变化趋势

控制断面水质达标,其中总量达标控制方案的污染物削减可以满足重污染区内部河网的环境容量的控制要求,但不能完全控制入太湖断面水质,该方案可以作为近期实施方案制定;在远期可进一步实施入湖控制断面水质功能区达标方案,在总量控制基础上,实现河网水质达到功能区水质目标。但由于重污染区内河流绝大部分属非恒定流,其水动力条件相对较为复杂,且太湖流域闸坝较多,水文条件会随着这些闸坝的开启和关闭而改变,还需进一步研究出适合重污染区的污染物总量分配机制,从根本上来解决重污染区乃至整个太湖流域的水环境问题。

4 结 论

a. 监测数据表明,太湖重污染区内河流总氮浓度较高,入太湖监测断面总氮监测值位于 15.6 ~ 23.93mg/L 之间,如此高浓度的总氮进入太湖,势必造成太湖水体总氮因子超标,需尽早制定入湖河流总氮污染控制方案。

b. 总量达标控制方案计算表明,总量达标污染控制方案对入湖控制断面总氮不能起到完全的控制作用,部分断面总氮仍不达标,此方案可作为近期实施方案制定,在短时间内通过相应措施达到入湖控制断面的近期水质达标要求。

c. 在总量控制的基础上,入湖控制断面水质功能区达标方案能较好的对 13 个主要入太湖断面的水质进行严格控制,基本实现河网水质达到功能区水质目标,本方案可作为远期实施方案。

参考文献:

[1] 边博,夏明芳,王志良,等.太湖流域重污染区主要水污染物总量控制[J].湖泊科学,2012,24(3): 327-333. (BIAN Bo, XIA Mingfang, WANG Zhiliang, et al. Total amount control of main water pollutants in seriously

polluted area of Taihu Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(3): 327-333. (in Chinese))

[2] 马倩,刘俊杰,高明远.江苏省入太湖污染量分析(1998-2007年)[J].湖泊科学,2010,22(1): 29-34. (MA Qian, LIU Junjie, GAO Mingyuan. Amount of pollutants discharged into Lake Taihu from Jiangsu Province (1998-2007) [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(1): 29-34. (in Chinese))

[3] 叶旭.温瑞塘河流域污染物总量控制研究[D].杭州:浙江大学,2002.

[4] Committee to Review the New York City Watershed Management Strategy Water Science and Technology Board. Watershed management for potable water supply [M]. Washington D C: National Academy Press, 2000.

[5] 孟伟,张楠,张远,等.流域水质目标管理技术研究:控制单元的总量控制技术[J].环境科学研究,2008,21(2): 35-39. (MENG Wei, ZHANG Nan, ZHANG Yuan, et al. The study on technique of basin water quality target management: pollutant total amount control technique in control unit [J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(2): 35-39. (in Chinese))

[6] 鲍琨,逢勇,孙瀚.基于控制断面水质达标的水环境容量计算方法研究:以殷村港为例[J].资源科学,2011,33(2): 249-252. (BAO Kun, PANG Yong, SUN Han. A water environment capacity calculation method based on water quality standards at the control sections: a case study of the Yincun Port [J]. Resources Science, 2011, 33(2): 249-252. (in Chinese))

[7] 胡开明,逢勇,谢飞,等.直湖港、武进港关闸对太湖竺山水环境的影响[J].湖泊科学,2010,22(6): 923-929. (HU Kaiming, PANG Yong, XIE Fei, et al. Effects of Zhihugang and Wujingang closing sluices on water environment of Lake Zhushan, Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(6): 923-929. (in Chinese))

[8] 陆桂华,马倩.太湖水域“湖泛”及其成因研究[J].水科学进展,2009,20(3): 438-442. (LU Guihua, MA Qian. Analysis on the causes of forming black water cluster in Taihu Lake [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 438-442. (in Chinese))

[9] 江苏省人民政府.关于印发江苏省太湖流域水环境综合治理实施方案的通知(苏政发[2009]36号)[R].南京:江苏省人民政府,2009.

[10] 颜润润,程炜,逢勇,等.苏南运河水质影响区污染负荷研究[J].水土保持研究,2009,22(6): 135-140. (YAN Runrun, CHENG Wei, PANG Yong, et al. Study on water quality of Sunan Canal and pollution load of corresponding affecting region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 22(6): 135-140. (in Chinese))

(下转第 52 页)

countermeasures in Shanghai [J]. Urban Roads Bridge & Flood Control, 2007,4(4):86-87. (in Chinese))

[9] ZHANG J,LIN Z. Climate of China[M]. New York: John Willey Sons,1992:376.

[10] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999:43-47.

[11] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学,1992,16(4):482-493. (FU Congbin, WANG Qiang. The definition and detection of the abrupt climatic change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1992,16 (4):482-493. (in Chinese))

[12] 邵晓梅,许月卿,严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报:自然科学版,2006,42(4): 503-509. (SHAO Xiaomei, XU Yueqing, YAN Changrong. Wavelet analysis of rainfall variation in the Yellow River basin [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2006, 42 (4): 503-509. (in Chinese))

[13] 徐家良,柯晓新,周伟东. 长江三角洲城市地区气候变化及其影响[C]//首届长三角科技论坛:气象科技发展论坛论文集. 杭州:浙江省科学技术协会,2004.

[14] 邵玲玲,黄炎. 上海“8.5”特大暴雨的成因和特点[J]. 气象,2002,28(8):47-50. (SHAO Lingling, HUANG Yan. Mechanism and characteristics of the severe heavy rainfall in Shanghai on 5 August 2001 [J]. Meteorological Monthly, 2002,28(8):47-50. (in Chinese))

(收稿日期:2013 - 12 - 16 编辑:彭桃英)

(上接第 42 页)

[11] 韩龙喜,张书农,金忠青. 复杂河网非恒定流计算模型:单元划分法[J]. 水利学报,1994 (2):52-56. (HAN Longxi, ZHANG Shunong, JIN Zhongqing. Cell-dividing method in the calculation of unsteady flow for river network in plain area [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1994 (2): 52-56. (in Chinese))

[12] 张二骏,张东生,李挺. 河网非恒定流的三级联合解法[J]. 华东水利学院学报,1982,10(1):1-13. (ZHANG Erjun ZHANG Dongsheng,LI Ting. “Three Steps Method” to compute unsteady flow for river networks [J]. Journal of East China Technical University of Water Resources, 1982,10 (1): 1-13. (in Chinese))

[13] 溪梅成. 数值分析方法[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1995:60-100.

[14] 卢士强,徐祖信. 平原河网水动力模型及求解方法探讨[J]. 水资源保护,2003,19(3):5-9. (LU Shiqiang, XU Zuxin. Hydrodynamic model for plain river networks and its solution [J]. Water Resources Protection, 2003, 19 (3): 5-9. (in Chinese))

[15] DEWEY R J. Application of stochastic dissolved oxygen model[J]. Journal of Environmental Engineering, 1984, 110(2): 412-429.

[16] HU K M,PANG Y,WANG H,et al. Simulation study on water quality based on sediment release flume experiment in Taihu Lake, China[J]. Ecological Engineering,2011, 37(4): 607-615.

[17] 罗缙,逢勇,罗清吉,等. 太湖流域平原河网区往复流河道水环境容量研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2004,32(2):144-146. (LUO Jin, PANG Yong, LUO Qingji, et al. Study on water environment capacity for reversing current channels in plain river network region in Taihu Lake Basin [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2004,32 (2): 144-146. (in Chinese))

(收稿日期:2013 - 10 - 16 编辑:高渭文)

(上接第 46 页)

[20] 许海,朱广伟,秦伯强,等. 氮磷比对水华蓝藻优势形成的影响[J]. 中国环境科学,2011,31(10):1676-1683. (XU Hai,ZHU Guangwei,QIN Boqiang,et al. Influence of nitrogen-phosphorus ratio on dominance of bloom-forming cyanobacteria (Microcystis aeruginosa) [J]. China Environmental Science, 2011, 31 (10): 1676-1683. (in Chinese))

[21] 孟顺龙,裘丽萍,胡庚东,等. 氮磷比对两种蓝藻生长及竞争的影响[J]. 农业环境科学学报,2012,31(7):1438-1444. (MENG Shunlong, QIU Liping, HU Gengdong,et al. Effect of nitrogen and phosphorus ratios on growth and competition of two blue-green algae [J]. Journal of Agro-Environment Science,2012,31(7): 1438-1444. (in Chinese))

[22] HAVENS K E, JAMES R T, EAST T L, et al. N : P ratios, light limitation, and cyanobacterial dominance in a subtropical lake impacted by non-point source nutrient pollution [J]. Environmental Pollution, 2003, 122 (3): 379-390.

[23] 高振美,张波,商景阁,等. 太湖流域小型水源性湖泊氮、磷时空分布及营养状态评价[J]. 环境污染与防治, 2012,34(1):9-14. (GAO Zhenmei,ZHANG Bo,SHANG Jingge,et al. Temporal and spatial distribution of nitrogen and phosphorus and evaluation of trophic status of a water supply lake in Taihu Basin [J]. Environmental Pollution and Control,2012,34(1): 9-14. (in Chinese))

[24] 许秋瑾,郑丙辉,朱延忠,等. 三峡水库支流营养状态评价方法[J]. 中国环境科学,2010,30(4):453-457. (XU Qiujin,ZHENG Binghui, ZHU Yanzhong, et al. Nutrient status evaluation for tributary of Three Gorges Reservoir [J]. China Environmental Science,30(4): 453-457. (in Chinese))

(收稿日期:2013 - 11 - 09 编辑:徐 娟)