

太湖流域主要入湖河道污染物通量研究

罗 缙¹ 逢 勇¹ 林 颖² 罗 升³ 叶晓盈⁴

(1. 河海大学环境科学与工程学院 江苏 南京 210098 ; 2. 河海大学土木工程学院 江苏 南京 210098 ;
3. 深圳市深供供电服务有限公司 广东 深圳 518001 ; 4. 南京市鼓楼区环境监理大队 江苏 南京 210009)

摘要 利用经率定验证的太湖流域平原河网地区河道水量、水质计算模型以及太湖流域废水负荷模型 , 根据 1995 年(丰水年) 、1988 年(平水年) 、1971 年(枯水年) 的水文资料 , 以及 1995 年太湖流域各主要河道纳污量资料 , 计算了各典型年不同季节入太湖河道的入湖水量和水质浓度 , 由此计算出太湖流域河网区各主要入湖河道污染物入湖量 , 并结合河网中水的流向 , 得出入湖河道污染物通量的综合影响结果 : 直湖港最大 , 主要输送无锡地区的污染物。
关键词 太湖流域 ; 河网水流水质模型 ; 入湖通量
中图分类号 : X830.2 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-1980(2005) 02-0131-05

太湖流域地跨江、浙、皖、沪 , 拥有大小城市 38 座 , 人口 3 350 万 , 占全国总人口的 4% ; 流域面积 36 500 km² , 占全国总面积的 0.3% . 太湖流域的 GDP 已占全国的 10% , 财政收入占全国的 16% , 是我国城市化程度最高、经济最发达地区之一 . 然而 , 随着经济的发展和城市化进程的推进 , 太湖流域苏南地区水污染问题日益严重 , 生活污水和工业废水排放量激增 , 如何做到既发展经济又保护环境已成为该地区经济发展中迫切需要解决的问题之一 .

太湖流域平原河网是苏南地区废污水的主要排放区域 , 废污水排放量约占江苏省的 47% . 太湖流域河网区感潮 , 潮水和径流之间的相互关系年内变化复杂 , 与一般水流相比 , 其携带污染物的水流不是简单向下运动 , 而是往复运动 , 在回落过程中污染物质逐渐向下游扩散 . 本文对如何准确计算出陆源污染物的入湖通量进行了研究和计算 .

1 太湖流域河网水流数学模型及率定

1.1 河网水流运动的模拟^[1]

1.1.1 水量模型

a. 非恒定流基本方程 . 描述明渠一维非恒定流的基本方程为一维 Saint-Venant 方程组

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

(1)

b. 河道控制方程的离散 . 采用四点隐式差分格式离散方程组

$$\begin{cases} \xi(M) = \frac{\xi_i^j + \xi_{i+1}^j}{2} \\ \frac{\partial \xi(M)}{\partial x} = \frac{\theta(\xi_{i+1}^{j+1} - \xi_i^{j+1}) + (1 - \theta)(\xi_{i+1}^j - \xi_i^j)}{\Delta x} \\ \frac{\partial \xi(M)}{\partial t} = \frac{\xi_i^{j+1} + \xi_{i+1}^{j+1} - \xi_i^j - \xi_{i+1}^j}{2\Delta t} \end{cases}$$

(2)

采用式(3)进行阻力项的线性化：

$$g \frac{n^2 Q |u|}{R^{4/3}} = 0.5 g \left[\left(\frac{n^2 |u|}{R^{4/3}} \right)_i^j Q_i^{j+1} + \left(\frac{n^2 |u|}{R^{4/3}} \right)_{i+1}^j Q_{i+1}^{j+1} \right]$$

(3)

将式(2)代入连续方程得差分方程：

$$\begin{cases} \rho_i Z_i + \rho_i Z_{i+1} - Q_i + Q_{i+1} = D_i \\ \rho_i = B_{W(i+\frac{1}{2})} \frac{\Delta x_i}{2 \theta \Delta t} \\ D_i = \frac{1-\theta}{\theta} (Q_i^j - Q_{i+1}^j) + \rho_i (Z_i^j + Z_{i+1}^j) + q_i \frac{\Delta x}{\theta} \end{cases}$$

(4)

按照同样的方法,可得动量方程的差分方程

$$E_i Q_i + G_i Q_{i+1} - F_i Z_i + F_i Z_{i+1} = H_i$$

(5)

1.1.2 河网节点连接条件

a. 质量守恒条件

$$\sum_{i=1}^m Q_i = \frac{\Omega_K^{j+1} - \Omega_K^j}{\Delta t}$$

(6)

对于无调蓄节点,方程(6)可简化为

$$\sum_{i=1}^m Q_i = 0$$

(7)

b. 能量守恒条件. 汇集于节点的各河道相邻断面的水位相同. 对于 m 个相邻河道,可近似为

$$Z_i = Z_j \quad (i, j = 1, 2, \dots, m)$$

(8)

1.1.3 方程的求解

用三级联合解法^[2]求解平原河网水力特性的基本思路可概括为“单一河道—连接节点—单一河道”,即先将各单一河道划分为若干计算断面,在计算断面上对 Saint-Venant 方程组进行有限差分运算,得单一河道方程组——即以各断面水位及流量为自变量的差分方程组,然后根据节点连接条件辅以边界条件,形成封闭的各节点水位方程组,求解此方程组得各节点水位,再将各节点水位回代至单一河道方程,最终求得各单一河道各断面水位及流量.

1.2 河网水量模型率定和验证

模型率定和验证主要是确定模型中的一些参数,如降雨径流模拟的汇流曲线、河网水流运动模拟的河道糙率和河网概化的合理性等. 选取太湖流域江苏区域部分代表水位站和部分代表性断面 1995 年的实测资料用于率定;1996 年实测水位资料和 14 个流量站资料作为模型验证的依据. 经过率定和验证可知,所建立的太湖流域河网水量模型能较准确地模拟该流域水流流态. 代表断面率定和验证结果见图 1.

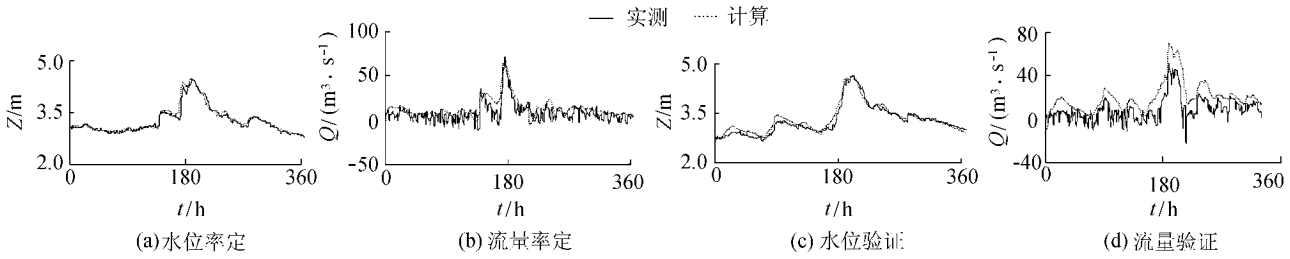


图 1 宜兴断面水位、流量率定验证

Fig.1 Calibration and verification of water level and discharge for Yixing section

2 太湖流域废水负荷模型

a. 废水负荷模型的建立^[3]. 水质模型输入条件有边界条件、污染源源强. 对边界条件,可由监测资料分析得到;对污染源源强,必须建立污染负荷模型进行分析计算.

b. 废水负荷模型参数的率定与验证. 率定验证了废水负荷模型所需要的各项参数,从下面水质模型验

证结果可知,废水负荷模型参数基本适合太湖流域.

3 太湖流域河网水质模型建立

3.1 通用控制方程

描述河网中单一河道污染物质运动及浓度变化规律的控制方程为

$$\frac{\partial(A\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(AU\rho)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(AE_x \frac{\partial \rho}{\partial x}\right) - K_A\rho + S$$

3.2 各种污染因子的控制方程

3.2.1 BOD₅ 控制方程

BOD₅ 是衡量水体中有机物含量的重要指标,其降解主要是通过生化反应进行的,控制方程为

$$\frac{\partial(A\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(Q\rho)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(AE_x \frac{\partial \rho}{\partial x}\right) - K_B A\rho + W_B$$

式中:K_B——BOD₅ 的衰减系数;W_B——BOD₅ 的污染源强.

3.2.2 NH₃-N(硝化过程)控制方程

NH₃-N 水质过程符合一阶动力学,控制方程为

$$\frac{\partial(A\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(Q\rho)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(AE_x \frac{\partial \rho}{\partial x}\right) - K_N A\rho + W_N$$

式中:K_N——NH₃-N 的衰减系数;W_N——NH₃-N 的污染源强.

3.2.3 COD 的控制方程

COD 水质变化符合一阶动力学,其控制方程为

$$\frac{\partial(A\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(Q\rho)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(AE_x \frac{\partial \rho}{\partial x}\right) - K_C A\rho + W_C$$

式中:K_C——COD 的衰减系数;W_C——COD 的污染源强.

3.3 模型求解方法^[4]

根据顺流向(由首断面流向末断面)和逆流向(由末断面流向首断面)对水质方程(9)进行离散(a)求得河网中各断面的三对角矩阵系数值(b)根据河网节点方程,利用求得的各断面三对角矩阵系数值,求得河网中各节点的水质浓度值(c)利用矩阵回代公式,求得河网中各断面的水质浓度值.

3.4 模型参数的率定与验证

根据河流污染状况和重点研究区域,将太湖流域分成重点区、一般区和非重点区,在 3 个区域内选择 11 条河流、17 个断面进行野外实测、室内模拟试验与现场试验相结合的典型研究.将典型研究得到的结果作为模型参数的初值,进行水质模型的率定和验证,并验证模型在太湖流域的适用性,从而确定太湖流域各主要河段的参数值.

采用 1995 年太湖流域的实测水质资料进行水质模型率定,经过多次模拟调试,得到最终确定的参数值^[5],见表 1.采用表 1 的参数和 1996 年太湖流域的实测水质资料进行水质模型验证,率定和验证相对误差情况的统计见表 2.

表 1 太湖流域水质降解参数

Table 1 Water quality degradation parameter for Taihu Lake Basin d⁻¹

流域片	K _B	K _N	K _C
湖西片、锡澄虞片、阳澄片、淀泖片	0.05~0.20	0.05~0.15	0.07~0.10
苏南运河、太浦河、望虞河	0.20	0.15	0.10

表 2 1995 年资料率定和 1996 年资料验证的相对误差统计

Table 2 Relative error statistics for data calibration of 1995 and data verification of 1996 %

水质指标	1995 年资料		1996 年资料	
	率定误差 < 20% 者所占百分比	率定误差 < 35% 者所占百分比	验证误差 < 20% 者所占百分比	验证误差 < 35% 者所占百分比
α(BOD ₅)	28.3	57.2	27.2	60.3
α(NH ₃ -N)	19.9	50.5	22.6	55.0
α(COD _{Mn})	34.2	62.5	32.0	69.2

由表 1、表 2 知,用于率定和验证的计算结果与大部分实测值符合较好,可用于太湖流域水质的预测

计算.

4 入湖污染物通量计算研究

4.1 计算方法^[6]

首先,根据 1995 年(丰水年)、1988 年(平水年)、1971 年(枯水年)的水文资料,以及 1995 年太湖流域各主要河道纳污量资料,将经率定验证的河网水量、水质模型以及废水负荷模型计算出的主要入湖河道 3 个典型水文年丰、平、枯 3 期逐日平均流量值乘以相应的水质浓度,得出各入湖河道的入湖通量值.考虑平原河网地区往复性河流的特性,往复性河流河段入湖通量按逐日正向流入湖通量减去负向流出湖通量计算.

4.2 入湖通量计算结果分析

由入湖通量计算结果可知,枯水年直湖港和太尉运河入湖通量最大,其次为殷村港、太浦港、武进港和骂蠡港,再次为官渎港、雅浦港、漕桥河、湛渎港—社渎港和蠡河,梁溪河无入湖通量,见图 2;平水年为直湖港和太尉运河入湖通量最大,其次为殷村港、太浦港、武进港和骂蠡港,再次为官渎港、雅浦港、漕桥河、湛渎港—社渎港和蠡河,梁溪河仍无入湖通量,见图 3;丰水年枯水期为直湖港和太尉运河入湖通量最大,而平水期和丰水期太浦河和殷村港入湖通量较大,骂蠡港和蠡河仅枯水期有入湖通量,平水期和丰水期骂蠡港、蠡河和梁溪河无入湖通量,见图 4.典型年内一般丰水期入湖通量最大,其次是平水期,枯水期最小,但丰水年平水期入湖通量最小.总的来说,枯水年入湖通量最大,平水年次之,丰水年最小.

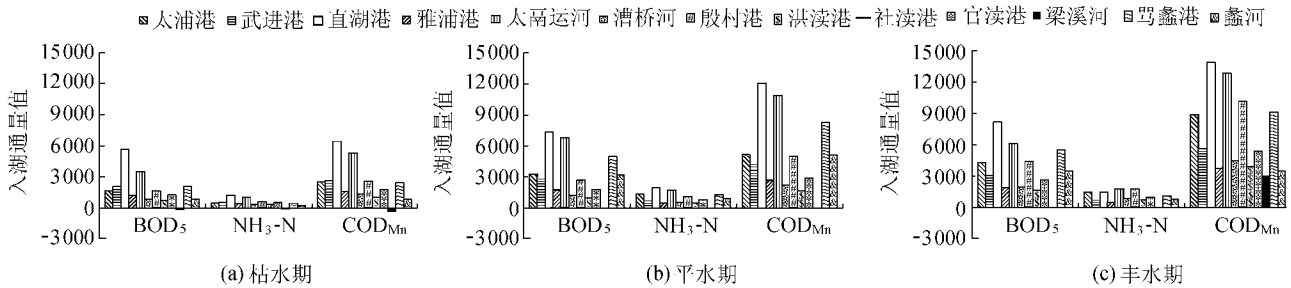


图 2 枯水年各入湖河道污染物通量值

Fig.2 Pollutants discharged into Taihu Lake through different inflow river channels in dry year

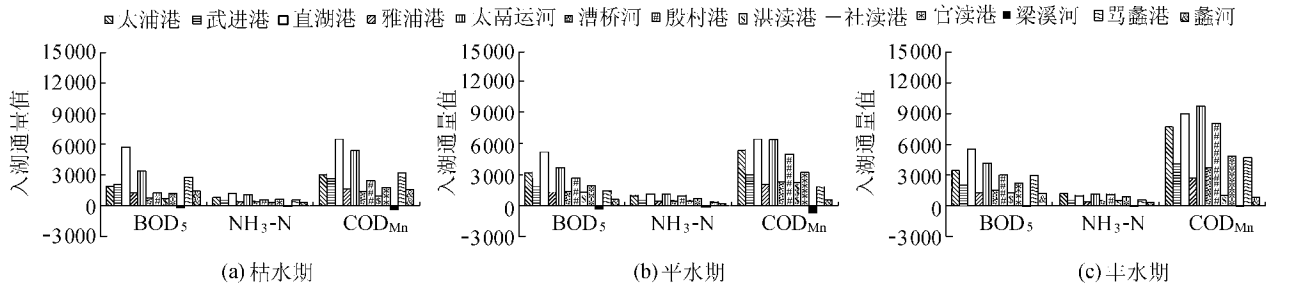


图 3 平水年各入湖河道污染物通量值

Fig.3 Pollutants discharged into Taihu Lake through different inflow river channels in normal year

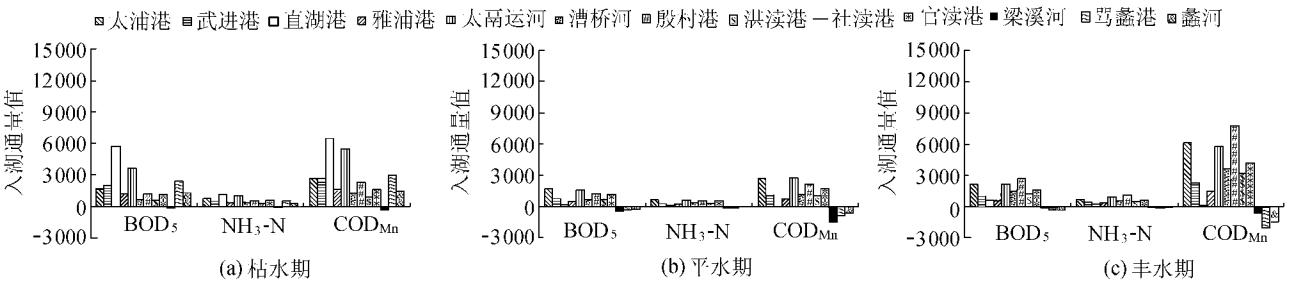


图 4 丰水年各入湖河道污染物通量值

Fig.4 Pollutants discharged into Taihu Lake through different inflow river channels in wet year

从河网中水的流向来看,江南运河以南区域,溧阳、宜兴河道的污染物主要由太浦港、殷村港流入太湖;常州、武进河道的污染物主要由太扁运河、武进港流入太湖;无锡市河道的污染物主要由直湖港流入太湖.入湖河道污染物通量的综合影响结果是:(a)直湖港的污染物通量值最大,主要输送无锡地区的大量污染物入太湖;(b)太扁运河、武进港的污染物通量值次于直湖港,主要输送了常州武进地区的大量污染物;(c)再其次为太浦港、殷村港,主要输送溧阳和宜兴的大量污染物;(d)其他入湖河道污染物通量值相对较小,但也输送了一定通量的污染物.

5 结 论

太湖流域苏南片主要入湖河道为太浦港、官渎港、湛渎港—社渎港、殷村港、漕桥河、太扁运河、武进港、雅浦港、直湖港、梁溪河、骂蠡港和蠡河等.入湖河道污染物通量的综合影响结果是:直湖港的污染物通量值最大,主要输送无锡地区的大量污染物入太湖;太扁运河、武进港的污染物通量值次于直湖港,主要输送常州武进地区的大量污染物;再其次为太浦港、殷村港,主要输送溧阳和宜兴的大量污染物;其他入湖河道污染物通量值相对较小,但也输送了一定通量的污染物.另外典型年内一般丰水期入湖通量值最大,其次是平水期,枯水期最小,但丰水年平水期入湖通量值最小.总的来说,枯水年入湖通量值最大,平水年次之,丰水年最小.

参考文献:

[1] 韩龙喜,陆冬.平原河网水流水质数值模拟研究展望[J].河海大学学报(自然科学版),2004,32(2):127—130.
[2] 张二俊,张东升,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.
[3] 丁训静,姚琪,阮晓红.太湖流域污染负荷模型研究[J].水科学进展,2003,14(2):189—192.
[4] 逢勇,姚琪,濮培民.太湖地区大气—水环境的综合数值研究[M].北京:气象出版社,1998.92—107.
[5] 罗缙,逢勇,罗青吉,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.
[6] 袁宏任,魏开湄,吴国平.水资源保护管理基础[M].北京:中国水利水电出版社,1996.104—106.

Study on flux of pollutants discharged into
Taihu Lake through main inflow river channels

LUO Jin¹, PANG Yong¹, LIN Ying², LUO Sheng³, YE Xiao-ying⁴

- (1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;
- 2. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;
- 3. Shenzhen Shen-Gong Power Service Co., Ltd., Shenzhen 518001, China;
- 4. Environment Bureau of Gulou District of Nanjing City, Nanjing 210009, China)

Abstract According to the hydrological data for a wet year(1995), a normal year(1988), and a dry year(1971) and the data of pollutant receiving capacity of main river channels in the Taihu Lake Basin, the water quantity and quality model for river channels in the plain river network area of the Taihu Lake Basin and the wastewater load model for the river basin, which had been calibrated and verified, were employed for calculation of the lake inflows through different river channels and their pollutant concentrations for different seasons of each typical year. Based on the calculated results, the flux of pollutants through main inflow river channels of the Taihu Lake was calculated. In combination with the flow direction in the river network, it is concluded that the flux of pollutants through the Zhihu Harbor is of the greatest influences, which mainly transfers pollutants from Wuxi City.

Key words Taihu Lake Basin; water quality model for river network; flux of lake inflow