

城市浅水湖泊雨水溢流总磷运输的数值模拟

龚春生, 毛献忠*, 张锡辉

(清华大学深圳研究生院环境工程与管理研究中心, 深圳 518055)

摘要: 从三维对流-扩散-反应方程出发, 根据雨水箱涵溢流入湖总磷形态特性, 推导雨水溢流进入城市浅水湖泊后二维总磷的运输方程, 并与浅水流动方程结合, 建立城市浅水湖泊平面二维水流-水质总磷的数学模型. 模型通过深圳荔枝湖实测资料验证, 计算结果较好. 用此模型计算设计降雨强度 28 mm/h 历时 1 h 情况下, 雨水径流通过箱涵溢流进入荔枝湖和湖水混合后总磷运输情况, 分析了入湖雨水总磷归趋. 结果表明, 溢流入湖 TP 通量为 15.385 kg, 其中 62.3% 掺混在水体中, 28.1% 沉积到表层底泥; 污染后的湖水通过水污染治理工程连续运行 3.0 d 可将荔枝湖 TP 恢复到雨前初始浓度水平.

关键词: 城市浅水湖泊; TP 运输模型; 数值模拟; 非点源污染

中图分类号: X131.2; X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)04-1016-07

Numerical Simulation of TP Transport After Overflow of Rainwater into Urban Lake

GONG Chun-sheng, MAO Xian-zhong, ZHANG Xi-hui

(Research Center for Environmental Engineering and Management, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Based on the three-dimensional advection-diffusion-reflection equation, a two-dimensional TP transport equation was deduced to simulate TP distribution and transport after overflow rainwater into urban lake from storm sewer system during rainstorm. The model has a good agreement with a group of monitor data at Lake Lichee in Shenzhen, China. The model was applied to compute the scenario in Lake Lichee under the design rainstorm, and analyse the fate of TP. It shows that TP flux into lake is 15.385kg under city storm intensity of 28 mm/h, in which 62.3% of flux goes into water in lake and 28.1% TP flux settles surface sediment. It would take 3.0 days for the integrated treatment project operation to recover TP to the level before the rain.

Key words: urban shallow lake; TP transport equation; numerical simulation; nonpoint source pollutant

随着城市雨水径流污染的加剧, 导致城市受纳水体污染越来越严重. 国外雨水径流带来的非点源污染已成为城市水体污染的主要因素^[1,2], 国内雨水污染也造成受纳城市水体水质严重下降, 研究表明雨水径流污染是城市湖泊主要污染源^[3]. 由于雨水径流污染具有污染发生时间的随机性、作用方式的间歇性、污染机制过程的复杂性、排放途径及排放量的不确定性、污染负荷的时空变异性等特点, 往往造成污染负荷短时段内成倍升高, 对城市水体造成冲击性影响, 因此雨水径流污染成为目前研究非点源污染的难点. 磷是影响湖泊富营养化的关键因子, 超过 50% 的淡水水体中的磷负荷来自非点源污染^[4,5], 研究雨水径流中的磷在湖泊内的迁移转化规律及其归趋行为已成为湖泊富营养化治理和水环境修复基础性的工作. 近年来, 国内外不少学者对非点源污染进行了降雨-产流模拟^[6~8], 但模拟降雨过程中污染物在受纳水体中的随流输移尚不多见. 本研究选取深圳荔枝湖为对象, 以限制性营养元素磷为目标, 建立雨水溢流进入城市浅水湖泊后总磷的输

运方程, 通过 28 mm/h 降雨强度下箱涵溢流入湖雨水 TP 动态时空分布的数值模拟, 追踪 TP 迁移的全过程, 分析降雨条件下 TP 随流输移特性和入湖雨水总磷归趋, 并且通过对湖水水处理循环系统对雨后总磷治理效果的模拟, 确定恢复雨前初始 TP 浓度湖水循环所需的时间, 从而为城市浅水湖泊雨水径流污染的治理提供重要的基础数据.

1 降雨过程中城市浅水湖泊水流-水质模型建立及求解

1.1 模型的建立及求解

由于溢流入湖雨水中含有大量的悬浮颗粒物, 根据紊动扩散理论, 表征磷沉降的三维对流-扩散-反应总磷方程为^[9]:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{c} \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{c} \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial (\bar{c} \cdot w)}{\partial z} + \frac{\partial (\bar{c}_s \cdot w)}{\partial z}$$

收稿日期: 2008-05-28; 修订日期: 2008-10-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U0773002)

作者简介: 龚春生 (1974 ~), 男, 博士后, 主要研究方向为环境水力学.

* 通讯联系人, E-mail: maoxz@sz.tsinghua.edu.cn

$$\begin{aligned} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) - k \cdot \bar{c} + s \end{aligned} \quad (1)$$

式中, u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向的流速分量; $\bar{c}$ 为 TP 浓度; $\bar{c}_s$ 为吸附在悬浮颗粒上的 TP 浓度; ω 为悬浮颗粒物沉降速度; D_x 、 D_y 、 D_z 分别为 TP 在 x 、 y 、 z 方向扩散系数; k 为 TP 在湖水中的生物降解系数; s 为源、汇项. 城市湖泊在水深方向的尺度和规模较水平方向小, 对方程(1)沿水深 h 进行积分:

$$\begin{aligned} &\int_0^h \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} dz + \int_0^h \frac{\partial}{\partial x} (\bar{c}u) dz + \int_0^h \frac{\partial}{\partial y} (\bar{c}v) dz \\ &\quad + \int_0^h \frac{\partial}{\partial z} (\bar{c}w) dz + \int_0^h \frac{\partial}{\partial z} (\bar{c}_s \omega) dz \\ &= \int_0^h \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) dz + \int_0^h \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) dz \\ &\quad + \int_0^h \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) dz - \int_0^h k \bar{c} dz + \int_0^h s dz \end{aligned} \quad (2)$$

由于湖泊的水流和水质在垂直方向混合比较充分, 可假设: ①水力变量及污染物浓度沿水深不变, 垂向流速为 0; ②颗粒处于自由沉淀状态, 沉降过程中颗粒之间互不干扰, 颗粒大小、形状、密度、沉降速度不变; ③颗粒沉到湖底便不再返回水中; ④吸附在悬浮物上的 TP 动态变化过程按线性变化, 即: $c_s = k_s \cdot c$, 其中 k_s 为吸附系数, 可由吸附在悬浮物上的 TP 浓度与测点水体磷的总浓度(吸附在悬浮物上的 TP 浓度与水相中溶解态的 TP 浓度之和)的比值确定. 因此(2)式积分后表达式为:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(hc)}{\partial t} + \frac{\partial(huc)}{\partial x} + \frac{\partial(hvc)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD'_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD'_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) - k_s c \omega \Big|_0^h - hkc + hs \end{aligned} \quad (3)$$

式中, c 为垂向平均的 TP 浓度, D'_x 、 D'_y 为 x 、 y 方向综合扩散系数. $k_s c \omega \Big|_0^h = k_s c \cdot (\omega \Big|_h - \omega \Big|_0)$, 取湖面为 z 轴坐标原点, 向下为正, 由于湖表面悬浮物沉速为 0, 即: $\omega \Big|_0 = 0$. 根据②的假设, $k_s c \omega \Big|_0^h = k_s c \cdot \bar{\omega}$. 悬浮颗粒物沉降速度 $\bar{\omega}$ 采用适用性较好的文献[10]泥沙沉速计算公式, 即:

$$\bar{\omega} = \sqrt{13.95 \left(\frac{\nu}{d} \right)^2 + 1.09 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d} - 13.95 \frac{\nu}{d}$$

式中, ρ_s 、 ρ 分别为泥沙和水的密度; d 为悬浮颗粒的中值粒径(m); ν 为运动黏滞系数 m^2/s . $k_s c \cdot \bar{\omega}$ 表示沉降引起的吸附在悬浮物上的 TP 向湖底的迁移通量. 考虑到大气降水过程中携带的总磷直接进入

湖体, $h \cdot s = q_w \cdot c_r + h \cdot s_0$. 式中, q_w 为降雨强度, c_r 为雨水中总磷浓度, s_0 为其他源、汇项, 对于环湖截污、不考虑内源污染的湖体 s_0 为 0.

守恒型二维浅水方程与方程(3)联立的矢量表达式为:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial f(q)}{\partial x} + \frac{\partial g(q)}{\partial y} = b(q) \quad (4)$$

式中, $q = [h, hu, hv, hc]^T$ 为守恒物理向量, $f(q) = [hu, hu^2 + gh^2/2, huv, huc]^T$ 为 x 向的通量向量, $g(q) = [hv, huv, hv^2 + gh^2/2, hvc]^T$ 为 y 向的通量向量. 源汇项 $b(q)$ 为:

$$\begin{aligned} b(q) = &[q_w; gh(s_x - s_{fx}) + q_w \cdot u; gh(s_y - s_{fy}) \\ &+ q_w \cdot v; \nabla(hD'_x \nabla c - k_s c \bar{\omega} - khc + q_w c_r)]^T \end{aligned}$$

式中, g 为重力加速度. s_x 和 s_{fx} 分别为 x 方向的湖底坡度及摩阻坡度; s_y 和 s_{fy} 分别为 y 方向的湖底坡度及摩阻坡度. 摩阻由曼宁公式估算. ∇ 为梯度算子. 方程(4)积分离散后的有限体积表达式为:

$$A \frac{\Delta q}{\Delta t} = - \sum_{j=1}^m T(\Phi)^{-1} f(\bar{q}) L^j + A \cdot b(q) \quad (5)$$

式中, A 为单元 Ω 的面积, m 为单元边总数, L^j 为第 j 单元边的长度, $\bar{q} = T(\Phi) \cdot q$, $T(\Phi)$ 和 $T(\Phi)^{-1}$ 为坐标变换矩阵及逆矩阵. 方程(5)采用显格式, $f(\bar{q})$ 可通过 Osher 格式求解局部一维黎曼初值问题的外法向数值通量(记为 f_{IR})而得到. 并且采用具有全变差缩小(TVD)特性的二阶 Roe's Superbee 限制函数将一阶精度的黎曼近似解提高到二阶精度. 有关格式的详细求解过程、以及二阶无振荡格式和格式的稳定性, 详见文献[9, 11, 12].

1.2 网格剖分

根据实测的地形图, 荔枝湖有效面积约为 8.7 万 m^2 , 考虑湖盆地形, 水流流向以及水利设施走向, 对计算域进行网格划分, 并确定各单元的平均湖底高程. 计算域内划分为 2 520 个无结构网格, 其中四边形网格 2 467 个, 三角形网格 53 个, 空间步长 Δx 为 2.0~50 m、 Δy 为 1.2~50 m, 荔枝湖概况和计算网格剖分见图 1.

1.3 模型的定解条件

初始条件: 假定初始湖水是静止的, 湖面是水平的, 即: $h = h_0$, $u(x, y) = 0$, $v(x, y) = 0$, 初始浓度为实测浓度.

边界条件:

(1)动边界 对于计算域内的水工构筑物如堰、桥下拦水坝等, 模型设定某一水深限值 HTOL, 以此来判断单元的干湿情况, 同时运用相应的水力公式

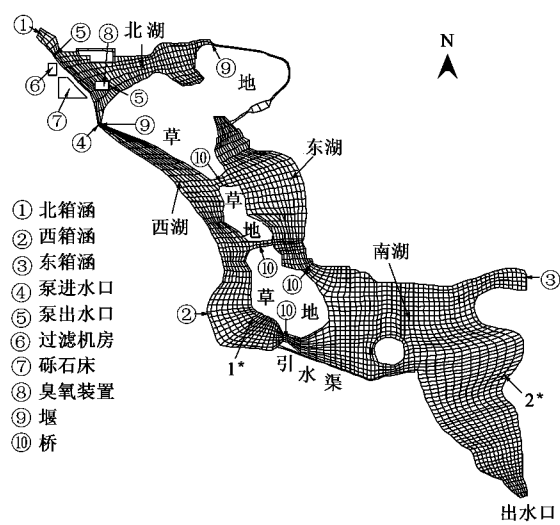


图 1 荔枝湖概况和计算网格
Fig. 1 Sketch of Lake Lichee and mesh

计算跨界面的法向通量。

(2)内边界 当单元边界与计算域内的水工构筑物相重合时,单元边上的法向通量的数值计算就属于内边界问题.模型中内边界的水流、水质计算仍处于 FVM 框架之下,但是法向通量的计算采用与水利设施相应的出流公式.其通量公式概括为:

$$f(\vec{q}) = \begin{bmatrix} Q_m \\ Q_m u_n + \frac{gh^2}{2} \\ Q_m v_\tau \\ Q_m C_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, Q_m 是水工建筑物出流量, u_n 、 v_τ 分别为法向及切向流速,满足 $u_n = u \cos \Phi + v \sin \Phi$ 和 $v_\tau = v \cos \Phi - u \sin \Phi$, Φ 为法向向量 $\vec{n}$ 与 x 轴的夹角.

(3)边界条件 固边界采用无滑动边界条件,即 $\vec{v} \cdot \vec{n}|_L = 0$. 式中, $\vec{n}$ 为固壁边界法向向量, L 为湖岸线. 对于流入水边界水动力条件可由实测流量来控制,即: $Q_{\text{水边界流入}} = Q_i$ (Q_i 为已知实测流量); 对于流出水边界采用自由堰边界,即当计算水位未超过出水口水位则流量为 0,当计算水位超过出水口水位时,流出水边界条件采用宽顶堰溢流公式.

1.4 参数的选取

由荔枝湖的实测资料,并参考国内其他城市浅水湖泊水动力参数,确定荔枝湖曼宁糙率系数 n 值为 0.018,泥沙密度 ρ_s 取 $2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 悬浮颗粒的中值粒径 (D_{50}) 为 0.043 mm, 运动黏滞系数 ν 为 $0.010 \text{ cm}^2/\text{s}$, 扩散系数 $D'_x = D'_y = 0.1 \text{ m}^2/\text{s}$, TP 生物

降解系数 k 为 0.05/d. 降雨期间,荔枝湖不同测点吸附在悬浮物上总磷浓度占测点水体磷的总浓度的 70.5%^[13],即吸附系数 k_s 为 0.705. 同期大气降雨 TP 的实测平均浓度 c_r 为 0.113 mg/L ^[13].

1.5 模型的验证

荔枝湖以收集流域内雨水作为主要水源,雨水分别经位于北湖、西湖和南湖的 3 条雨水箱涵汇入湖内,然后由南湖南侧出水口排入下游雨水/污水管网(图 1). 其中,北面箱涵汇水面积 84 hm^2 ,设计过流量为 $10.5 \text{ m}^3/\text{s}$; 西面箱涵汇水面积 82.4 hm^2 ,设计过流量为 $7.9 \text{ m}^3/\text{s}$; 东面箱涵汇水面积 58.3 hm^2 ,设计过流量为 $8.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[14]. 根据实测降雨强度(q_w)、各箱涵的汇水面积(F_a)以及径流系数(φ)由 $Q = \varphi \times q_w \times F_a$ 计算流入箱涵的流量,箱涵溢流入湖流量为流入箱涵的流量与箱涵过流量的差. 2007-04-17 在 8 min 共降雨 12.2 mm ^[15],雨水溢流入湖流量计算结果如图 2 所示,溢流入湖雨水总磷浓度由实测浓度确定^[13](见图 3). 初始水位根据实测资料北湖取 5.00 m ,西湖、东湖、南湖取 3.195 m ,总磷本底浓度为 0.094 mg/L ^[13]. 降雨 18 min 时测点(图 1)水位、TP 浓度计算值与实测值的比较见表 1. 可以看出,水位、浓度测点计算值与实测值较吻合,说明该模型较好模拟了荔枝湖降雨过程中随箱涵溢流进入湖中 TP 的负荷以及 TP 在湖中的分布.

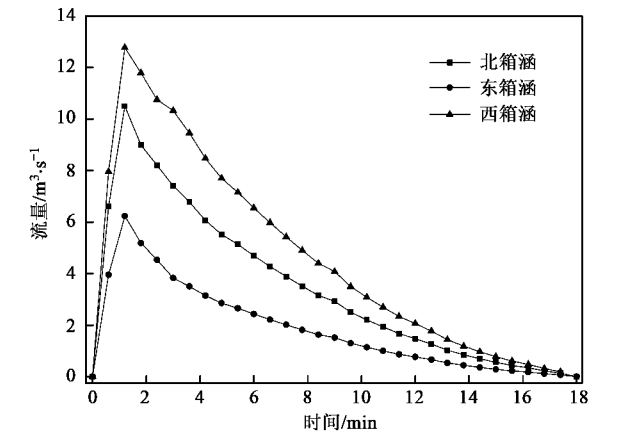


图 2 入湖流量过程线
Fig. 2 Flow history from overflow into Lake Lichee

表 1 测点水位、TP 浓度计算值与实测值的比较

项目	水位/m		浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	
	测点 1*	测点 2*	测点 1*	测点 2*
计算值	3.289	3.287	0.809	0.094
实测值	3.28	3.29	0.796	0.093

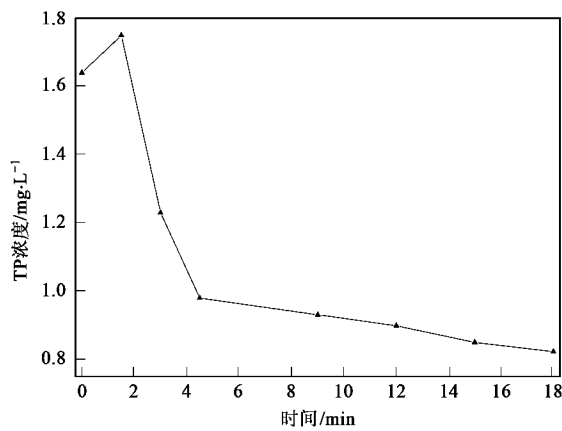


图 3 溢流入湖雨水总磷浓度过程线
Fig. 3 TP history of overflow rainwater

2 溢流入湖雨水 TP 运输的数值模拟

文献[3]分析了荔枝湖在不同降雨强度下雨水管网溢流进入湖内总磷负荷,在文献[3]的基础上采用验证的模型计算特定降雨强度下入湖总磷的随流输移过程、以及在湖中的分布情况和归趋.2006 年监测资料显示^[3]:4~9 月雨季共有 28 d 为大雨或以上,大雨过程管网溢流进入湖内总磷负荷最多,因而设计降雨强度选为大雨过程.

2.1 溢流入湖流场和浓度场

假定设计降雨强度为 28 mm/h,历时 1 h.西箱涵、北箱涵和东箱涵入湖流量分别是 3.85、3.92 和 2.72 m³/s.参考雨期入箱涵雨/污水管^[15]及溢流入湖口附近测点实测浓度^[13]变化规律,确定各箱涵溢流入湖雨水 TP 设计浓度变化过程线见图 4.初始水位北湖取 5.355 m,西湖、东湖、南湖取 3.550 m,本底浓度为 0.074 mg/L^[13].对总磷雨水径流输运进行数值模拟,由此得到不同时刻的流场、浓度场见图 5 和图 6.

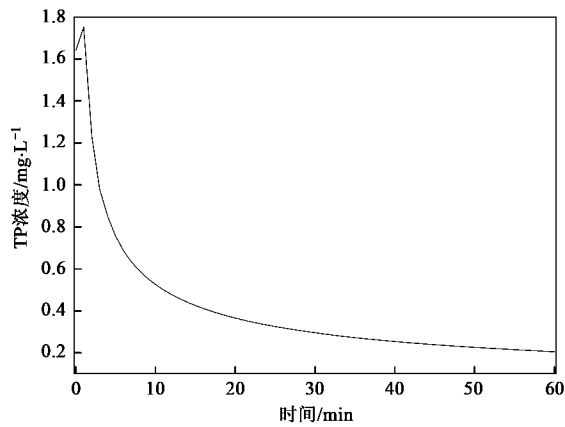


图 4 箱涵溢流入湖雨水 TP 设计变化过程
Fig. 4 Design TP graph of overflow rainwater

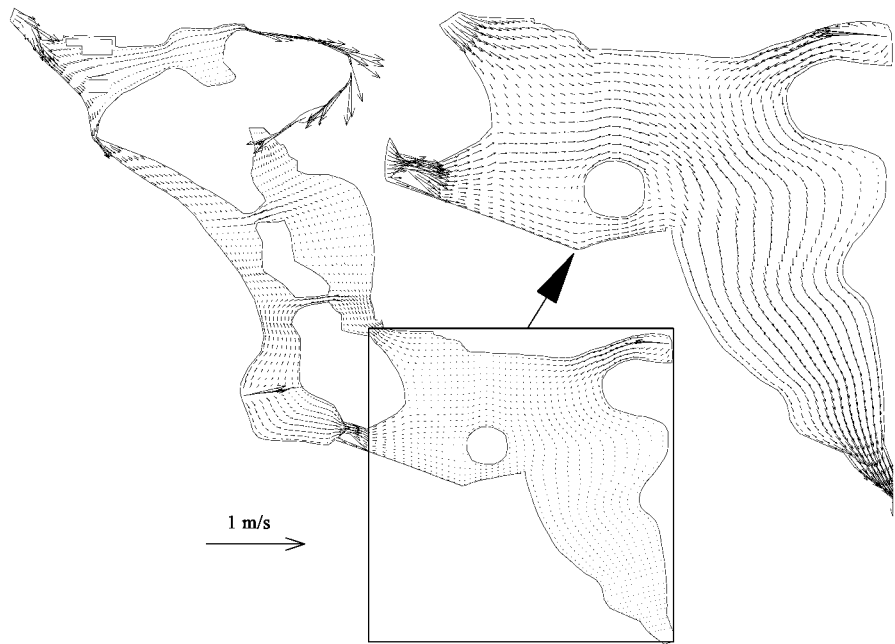


图 5 荔枝湖计算流场示意
Fig. 5 Computed flow field of Lake Lichee



图 6 降雨后的 TP 分布
Fig. 6 TP distribution after rain

从流场图可看出,除箱涵溢流口附近及连接北湖、西湖的河道速度较高外,绝大部分湖区流速 < 1.0 m/s.箱涵溢流雨水的入湖,使湖区水位不同程度的抬升,大约在 14 min 时北湖一部分水流通过堰流向西湖,此外水流还通过河道流向东湖,流场相对比较简单.东湖承接北湖来水,同时又受西湖水位影响,各股水流互为顶托干扰,流向南湖.西湖在西箱涵作用下,一部分水流流向南湖,一部分向北顶托,与北湖来水混合,共同抬升水位,达到坝顶水位后,流向东湖.南湖除东箱涵进水外,还收纳东湖、西湖

的来水,水流掺混、顶托,共同抬升南湖水位,达到堰顶水位(3.65 m)后,大约在 20 min 时通过堰流出出水口,流态比较单一.

从溢流入湖雨水 TP 过程看,由于雨水的“淋洗效应”,降雨初期溢流入湖雨水 TP 浓度较大,在箱涵入湖口处 TP 浓度急剧升高,形成清浊分明的污染带[图 6(a)];随着时间的推延,溢流入湖雨水 TP 浓度递减,以及对流和扩散作用,入湖雨水一方面同湖水混合,一方面“驱赶”浓度较高的初期的污染带[图 6(b)],并在浓度较低的雨水驱使下形成“污染团”,一方面随水流输运,一方面进一步与周围环境水体掺混、卷吸、稀释,“污染团”浓度被进一步降低[图 6(b)].据此可以推测,后期入湖雨水对先期入湖雨水水质有一定的改善作用.

2.2 入湖雨水总磷归趋分析

2.2.1 入湖雨水总磷通量

入湖雨水总磷通量(F)包括模拟时段内箱涵溢流入湖雨水总磷通量和大气降雨入湖总磷通量两部分.其中箱涵溢流入湖雨水总磷通量(F_x)可由 3 个箱涵入湖流量(Q_i)与入湖浓度(c_i)的乘积对时间的积分求和得到:

$$F_x = \sum_{i=1}^3 \int_0^{60} Q_i c_i dt = 15.110 \text{ kg}$$

大气降雨入湖总磷通量(F_r)可由降雨强度(q_w)、降雨历时(q_t)、湖面面积(A)与降雨中 TP 浓度(c_r)的乘积求得: $F_r = q_w \cdot q_t \cdot A \cdot c_r = 0.275 \text{ kg}$. 故入湖雨水总磷通量 $F = F_x + F_r = 15.385 \text{ kg}$.

2.2.2 入湖雨水总磷通量归趋分析

入湖雨水总磷归趋主要由吸附在颗粒上磷的沉积、掺混在水体中、水体中 TP 的降解以及随流排出湖体等部分组成.其中吸附在颗粒上磷的沉积通量(F_s)可考虑颗粒的沉积与不考虑颗粒的沉积 2 次模拟最后时段单元磷浓度差(Δc_n)与单元体积(V_n)乘积的求和来表示,即:

$$F_s = \sum_{n=1}^{2520} \Delta c_n \cdot V_n = 4.317 \text{ kg}$$

占磷入湖 TP 总通量的 28.1%; 水体中 TP 的降解通量(F_d)可由考虑水体中 TP 的降解与不考虑水体中 TP 的降解 2 次模拟最后时段单元浓度差(Δc_{nd})与单元体积(V_n)乘积的加和来表示,即:

$$F_d = \sum_{n=1}^{2520} \Delta c_{nd} \cdot V_n = 0.315 \text{ kg}$$

占磷入湖 TP 总通量的 2.0%; 掺混在水体中雨水总

磷通量(F_w)可由计算时段末的单元 TP 通量(F_t)与初始单元 TP 通量(F_0)的差值求和得到,即:

$$F_w = \sum_{n=1}^{2520} (F_t - F_0)_n = 9.587 \text{ kg}$$

占到磷入湖雨水总通量的 62.3%. 流出湖体的通量(F_c)按照不同时段出水口处 4 个单元出湖流量(Q_c)与浓度(c_c)的乘积的总和求得,即:

$$F_c = \sum_{i=1}^4 \left[\int_0^{60} (Q_c \cdot c_c) dt \right]_i = 1.158 \text{ kg}$$

占到磷入湖雨水总通量的 7.5%. 从以上分析可知,在设计降雨条件下,入湖雨水中的 TP 主要分布在水体和底泥中,两者之和占到磷入湖总通量的 90.4%,其中沉积到表层底泥中的磷在一定条件下可能再次释放进入水体,这也说明在点源污染得到控制后,包括降雨在内的面源污染将成为影响城市浅水湖泊水质的重要因素.

2.3 水污染治理工程循环系统对雨后总磷的处理效果分析

为了治理暴雨溢流入湖水质突然恶化情况,2005 年深圳荔枝湖建立湖水循环处理系统治理湖水.即在西湖北侧布设提升泵站,将湖水引入过滤处理设备(规模为 43 200 m³/d),过滤出水一半(21 600 m³/d)流入砾石床处理,另一半(21 600 m³/d)直接排入北湖区^[3].所有处理水进入北湖混合后流入东湖,再到南湖;通过引水渠将南湖与西湖联通,湖水以明渠流方式流入西湖^[14],最终形成荔枝湖水体大循环(图 1).采用上述模型并忽略与降雨和悬浮颗粒沉降有关的项,各处理单元 TP 处理效率见文献[16],其他参数同上.进行湖水循环对雨后总磷污染治理的数值模拟,荔枝湖四分湖的 TP 平均浓度变化过程见图 7.

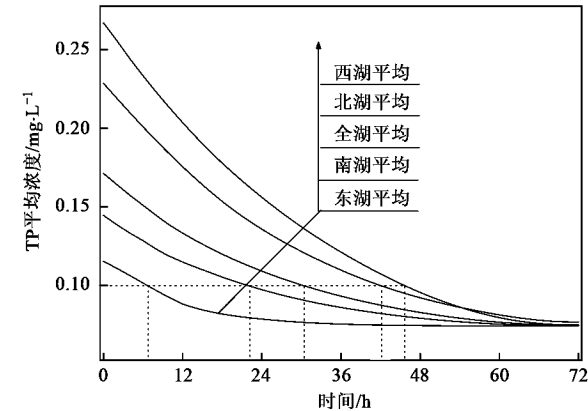


图 7 荔枝湖的四分湖 TP 平均浓度变化过程

Fig. 7 TP average concentration of 4 sub-lakes change with time

从图 7 可知,随着时间的推延,TP 平均浓度近似指数下降,湖水循环约 7、22、30、41、44 h 时东湖、南湖、全湖、北湖、西湖平均浓度达到 0.10 mg/L 以下,随着湖水循环的进行,各湖区浓度不同程度的减小,湖水循环约 72 h 时,湖区平均浓度达到未降雨时的初始浓度 0.074 mg/L.

3 结论

(1)从三维对流-扩散-反应方程出发,推导溢流入湖雨水总磷的输运方程,并结合浅水流动方程,建立城市浅水湖泊降雨期间平面二维水流-水质的数学模型,模型验证结果基本合理.

(2)通过对设计降雨强度 28 mm/h,历时 1 h 条件下,箱涵溢流雨水总磷运输的数值模拟表明,入湖总磷通量为 15.385 kg,其中 62.3% 掺混在水体中,28.1% 沉积到表层底泥.

(3)通过湖水处理循环系统对雨后总磷污染治理的模拟表明,荔枝湖平均 TP 恢复到 0.10 mg/L 所需的时间约为 30 h,恢复到雨前初始浓度的水平(0.074 mg/L)约为 3.0 d.

参考文献:

[1] Zhang H P, Yamada K. Simulation of nonpoint source pollutant loadings from urban area during rainfall: an application of a physically-based distributed model [J]. Water Science and Technology, 1998, 38(10): 199-206.

[2] Kim L H, Ko S O, Jeong S, et al. Characteristics of washed-off pollutants and dynamic EMCs in parking lots and bridges during a storm [J]. Science of the Total Environment, 2007, 376(1-3): 178-184.

[3] 桂安,毛献忠,陶益,等.深圳荔枝湖富营养化成因和总磷模型分析[J]. 环境科学, 2008, 29(4): 874-878.

[4] Andrew N S, Robinson J S, Smith S J. Bioavailable phosphorus dynamics in agricultural soils and effects on water quality [J]. Geoderma, 1995, 67(1-2): 1-15.

[5] Bechmann M E, Berge D, Eggstad H O, et al. Phosphorus transfer from agricultural areas and its impact on the eutrophication of lakes—two long-term integrated studies from Norway [J]. Journal of Hydrology, 2005, 304(1-4): 238-250.

[6] Shan B Q, Yin C Q, Li G B. Transport and retention of phosphorus pollutants in the landscape with a traditional, multipond system [J]. Water, Air and Soil Pollution, 2002, 139(1-4): 15-34.

[7] Wang X J, Zhang W, Huang Y N, et al. Modeling and simulation of point-non-point source effluent trading in Taihu Lake area: perspective of non-point sources control in China [J]. Science of the Total Environment, 2004, 325(1-3): 39-50.

[8] McGechan M B, Lewis D R, Hooda P S. Modelling through-soil transport of phosphorus to surface waters from livestock agriculture at the field and catchment scale [J]. Science of the Total Environment,

- 2005, **344**(1-3): 185-199.
- [9] 龚春生,姚琪,范成新,等.含内源污染平面二维水流-水质耦合模型[J].水利学报,2006, **37**(2):205-209.
- [10] 张瑞瑾,谢鉴衡,陈文彪.河流动力学[M].武汉:武汉大学出版社,2007.
- [11] Zhao D H, Shen H W, Tabios III G Q, *et al.* Finite-volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1994, **120**(7): 863-883.
- [12] Zhao D H, Shen H W, Lai J S, *et al.* Approximate Riemann solvers in FVM for 2D hydraulic shock wave modeling [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1996, **122**(12):692-702.
- [13] 桂安.深圳荔枝湖富营养化治理分析和总磷模型应用[D].北京:清华大学,2007.
- [14] 深圳市环境科学研究所,中国市政工程东北设计研究院.深圳市荔枝湖水污染综合治理工程初步设计[R].深圳:2005.
- [15] 王昊阳.有错接的城市分流制排水管网中水质水量的变化特征[D].北京:清华大学,2007.
- [16] 毛献忠,桂安,陶益,等.城市湖泊水环境修复组合工艺效果研究——以深圳市荔枝湖治理工程为例[J].湖泊科学,2008, **20**(4): 456-462.