

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0855

尹雷, 陈荣, 王晓昌. 2015. 基于污染物平衡分析的污水厂尾水补水城市内湖的优化运行研究——以昆明翠湖为例[J]. 环境科学学报, 35(2): 449-455

Yin L, Chen R, Wang X C. 2015. Optimized strategies of pollution control for landscape lakes replenished with WWTP effluent based on pollutants balance analysis: A case study in Cuihu Lake in Kunming, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(2): 449-455

基于污染物平衡分析的污水厂尾水补水城市内湖的 优化运行研究 ——以昆明翠湖为例

尹雷, 陈荣*, 王晓昌

西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055

收稿日期: 2014-03-10 修回日期: 2014-07-15 录用日期: 2014-08-02

摘要: 针对污水厂尾水补水的城市内湖污染调控问题, 提出了基于水量和污染物收支平衡分析的污染物净积累 (NPA) 模型, 建立了污染物输入和输出量化计算方法. 最后, 以昆明翠湖为案例, 在调查水体污染物输入和输出途径及水体自净量计算的基础上, 选择 COD、TN 和 TP 为代表性污染物, 开展了模型和计算方法的应用. 结果表明, 尾水补水是污染物输入的最主要途径, 排水和渗漏是污染物输出的两个主要途径, COD 在水体中的净积累程度较低, TN 和 TP 的净积累比例分别达到 42.9% 和 39.0%. 以此为基础, 本文提出了以调整补水和用水途径为主要手段的水体优化运行方案, 并对方案实施后的预期效果进行了分析验证. 本研究可为城市景观水体的污染物积累分析提供新方法和典型案例.

关键词: 城市内湖; 尾水补水; 污染物平衡; 污染物净积累; 优化措施

文章编号: 0253-2468(2015)02-449-07 中图分类号: X524 文献标识码: A

Optimized strategies of pollution control for landscape lakes replenished with WWTP effluent based on pollutants balance analysis: A case study in Cuihu Lake in Kunming, China

YIN Lei, CHEN Rong*, WANG Xiaochang

School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055

Received 10 March 2014; received in revised form 15 July 2014; accepted 2 August 2014

Abstract: Towards pollution control of landscape lakes replenished with WWTP effluent, a Net Pollutants Accumulation (NPA) model was proposed for water and pollutants in-output balance analysis, and quantitative calculation method was established. This paper presented the case study of Cuihu Lake in Kunming, China and chose COD, TN and TP as representative pollutants for analysis. The NPA was calculated based on the pollutants in-output purposes analysis and self-purification calculation. The results showed that the pollutants input was mainly attributed to effluent replenishment, meanwhile, water drainage and bottom leakage were the main purposes of pollutants output. Besides, it also showed that the NPA of COD was low in the lake, while the NPA of TN and TP amounted to 42.9% and 39.0%. Based on these, this paper introduced the optimized strategies for pollution control by adjusting the water in-output purposes, and also verified its remarkable effect on pollutants reduction. This paper provided a new approach and typical case for pollutants accumulation analysis in landscape lakes.

Keywords: landscape lakes; WWTP effluent replenishment; pollutants balance; net pollutants accumulation; optimized strategies

1 引言 (Introduction)

景观水体是城市水环境的重要组成部分, 目前

我国城市景观水体普遍面临污染负荷高、水体自净能力差的问题, 水体富营养化和黑臭现象严重 (杜文华等, 2006), 而补水来源不足是造成这一问题的

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项子课题 (No.2012ZX07313001-002); 陕西省青年科技新星项目 (No.2013KJXX-55)

Supported by the National Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Remediation (No. 2012ZX07313001-002) and the Shaanxi Provincial Program for Science and Technology Development (No.2013KJXX-55)

作者简介: 尹雷 (1989—), 男, E-mail: 415022743@qq.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: chenrong@xauat.edu.cn

Biography: YIN Lei (1989—), male, E-mail: 415022743@qq.com; * **Corresponding author**, E-mail: chenrong@xauat.edu.cn

主要原因之一(李海燕等,2006).采用城市污水厂处理出水(尾水)作为水体补水水源成为不少城市解决景观水体补水不足问题的重要举措,尤其在干旱缺水地区,污水厂尾水成为一些景观水体的唯一补水来源(Hirich *et al.*, 2013).然而,从水质的角度来看,尾水的污染强度对水体水质变化具有重要的影响,尾水水质能达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》中的一级 A 或一级 B 标准(北京市环境保护科学研究所和中国环境科学研究院,2002),但作为水体的补水,这一水质标准与《地表水环境质量标准》(国家环境保护总局,2002)之间存在很大差异,以污水一级 A 排放标准与地表水 V 类水体标准相比,前者的 TN 和 TP 浓度分别是后者的 7.5 倍和 2.5 倍,也就是说,尾水补水很可能导致水体中营养物的富集,造成水体藻类的过度繁殖和富营养化(黄伟伟,2008).因此,针对以尾水为补水的城市景观水体,开展污染物的收支平衡分析,有利于理清水体污染物的输入输出关系和迁移转化规律,对开展水体水质预测和富营养化控制具有重要的意义.

翠湖位于昆明市中心(图 1),是昆明市重要的景观水体,该湖历史上曾是滇池的连通水体,后因水位下降成为独立水面.翠湖水面面积为 150000 m²,经现场测定,平均水深约 1.2 m,蓄水量约为 170000 m³.目前,翠湖补水来源包括尾水、降雨和公园地表径流 3 个方面,其中,尾水补水量占总补水量的 90%以上,该尾水来自于昆明市第四污水厂出水.

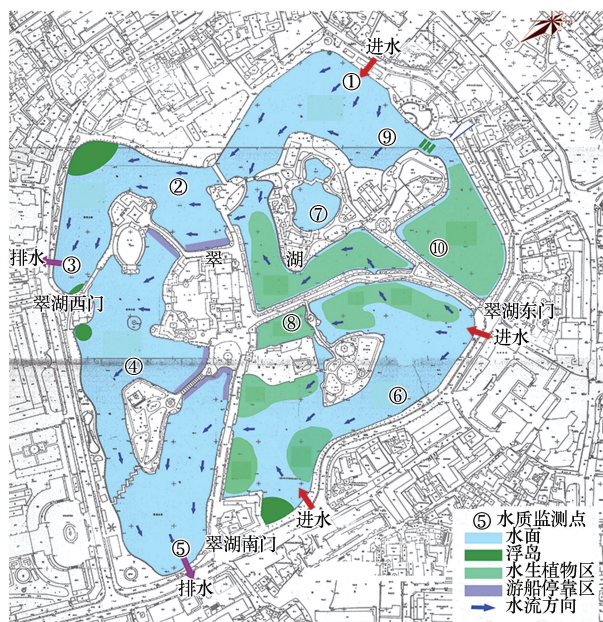


图 1 昆明翠湖及采样点示意图

Fig.1 Sampling point in Cuihu, Kunming

现阶段,翠湖呈现严重富营养化状态(于秀芳等,2008),初步分析,水中污染物来源于尾水补水、地表径流和底泥释放;另外,每年冬天到来年春天,都有大量的西伯利亚海鸥飞抵昆明过冬,主要栖息在翠湖公园内,因此,海鸥的排泄物也是翠湖污染物的一个重要来源.本研究从物料平衡的角度,提出城市水体污染物净积累(NPA)模型并应用于昆明翠湖的污染解析,在对污染物输入输出途径进行清单分析的基础上,揭示不同途径对水体污染的贡献率及主要污染物的净积累特性,以此为基础,提出翠湖水体污染控制的优化策略,以期为城市景观水体的富营养化控制提供新的分析方法和典型案例.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 NPA 模型的提出

为研究水体污染物的输入输出关系,提出如式(1)所示的污染物净积累(Net Pollutants Accumulation, NPA)评价指标.

$$NPA = \sum M_i - \sum N_j - \sum S_k \quad (1)$$

式中, $\sum M_i$ 为输入污染物总量(kg·a⁻¹), $\sum N_j$ 为输出污染物总量(kg·a⁻¹), $\sum S_k$ 为自净能力对污染物的降解总量(kg·a⁻¹),所有指标的计算均以年为单位.对于某个水体,如果计算得到 NPA > 0,说明该水体正处于污染物不断富集的过程, NPA 越大,污染物的富集程度越高;如果计算得到 NPA ≤ 0,说明污染物在该水体内不存在富集现象,水体自净能力发挥了重要的污染物降解作用.

翠湖的污染物输入途径包括 4 个方面,其中,通过补水输入污染物的途径有:尾水补水(M_1)、降雨补水(M_2)和降雨在翠湖公园形成的径流补水(M_3),与此同时,每年大量的海鸥排泄物也给翠湖贡献了一定量的污染物(M_4).污染物输出途径也包括 4 个方面,都是通过水量的输出途径实现的,分别为水体排水(N_1)、水面蒸发(N_2)、灌溉用水(N_3)、湖底渗漏(N_4).水体自净包括 3 个方面,分别为物理自净作用(S_1)、化学(物化)自净作用(S_2)和生物化学自净作用(S_3).

2.2 水量平衡

水量平衡是湖泊保持稳定库容的基本原则,除海鸥的排泄物输入(M_4)外,污染物的输入和输出都是通过水量的进入和排出来实现的.因此,进行污染物的输入和输出量计算之前,首先需要确定水量的输入和输出量.依据水量平衡原则,湖泊的输入总水

量和输出总水量之间应该满足式(2)的计算关系。

$$\sum Q_i - \sum E_i \rightarrow 0 \quad (2)$$

式中, $\sum Q_i$ 为输入总水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$), $\sum E_i$ 为输出总水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)。其中, $\sum Q_i$ 可以通过式(3)进行计算, $\sum E_i$ 可以通过式(4)进行计算。

$$\sum Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 = qT_1 + hW_1 + \lambda hW_2 \quad (3)$$

式中, Q_1 为尾水补水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$), Q_2 为降雨补水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$), Q_3 为径流补水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$), q 为尾水日补水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$), T_1 为一年内补水的的天数 (d), h 为当地年降雨深度 ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$), W_1 为水面面积 (m^2); λ 为公园的径流系数, W_2 为形成径流的面积 (即公园面积) (m^2)。

$$\sum E_i = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 = pT_2 + kW_1 + \delta W_2 T_3 + 365\omega W_1 \quad (4)$$

式中, E_1 为水体排水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$), E_2 为水面蒸发量 ($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$), E_3 灌溉用水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$), E_4 湖底渗漏水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$), p 为日排水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$), T_2 为一年内排水的天数 (d), k 为当地年蒸发系数 ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), δ 为公园浇灌定额 ($\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), T_3 为一年内浇灌的天数 (d), ω 为渗漏系数 ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)。

2.3 污染物输入输出量计算

在水量平衡的基础上, 本文提出了如式(5)和式(6)所示的污染物输入总量和输出总量计算模型。

$$\sum M_i = c_1 Q_1 + c_2 Q_1 + c_3 Q_3 + cmt = c_1 qT_1 + c_2 hW_1 + c_3 \lambda hW_2 + cmt \quad (5)$$

式中, c_1 为尾水中污染物浓度 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), c_2 为降雨中污染物浓度 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), c_3 为降雨径流中污染物浓度 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), c 为红嘴鸥排泄物中相关污染物的含量 ($\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$), m 为红嘴鸥数量 (只), t 为每年红嘴鸥的滞留时长 (d)。

$$\sum N_i = d_1 E_1 + d_2 E_2 + d_3 E_3 + d_4 E_4 = d_1 pT_2 + d_2 kW_1 + d_3 \delta W_2 T_3 + 365d_4 \omega W_1 \quad (6)$$

式中, d_1 为排水中污染物浓度 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), d_2 为蒸发水中污染物浓度 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), d_3 为灌溉用水中污染物浓度 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), d_4 为渗漏水中污染物浓度 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。

2.4 水体自净能力计算

通常来讲, 水体的自净主要是由物理作用、化学作用和生物作用 3 种作用来实现的。本文研究的是翠湖整体, 边界是翠湖的物理边界, 因此, 水体稀释、沉淀等物理净化属于研究对象的内部转化。通过

对水体中 pH、DO、氧化还原电位的 24 h 连续监测, 未发现这些指标值有明显变化, 因此, 对于以氧化还原为主的化学净化和要求厌氧条件的氮、磷微生物转化作用可以认为反应速率很低。综上, 翠湖的自净过程将主要通过水生动、植物的吸收转化来实现。

经过现场调研, 翠湖的水生植物主要为荷花, 且每年冬天会定期对凋谢的荷花进行打捞。而对于藻类而言, 由于缺乏人工打捞, 因此, 藻类无法有效地去除, 会继续停留在湖体中; 对于浮游动物, 由于数量很少 (周永兴等, 2009), 因此, 净化效果可忽略。翠湖的主要动物为景观鲤鱼, 而不是通常对水体净化有明显改善作用的鲢鱼和鳙鱼等滤食性鱼类, 且数量稀少, 因此, 鱼类的净化作用也很微小。所以本研究主要考虑水生植物对水体的自净能力, 式(7)为自净能力的计算模型。

$$\sum_{i=1}^n S_i = 1/12 \sum_{i=1}^n (\gamma_i \delta_i H_i) / W_1 \sum M_i \quad (7)$$

式中, $\sum S_i$ 为通过生物自净的污染物量 ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$), γ_i 为第 i 种水生植物对水中污染物的净化率, δ_i 为第 i 种水生植物的种植面积 (m^2), H_i 为第 i 种植物的生长周期 (d), $\sum M_i$ 为污染物年入湖总量 ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$)。

2.5 污染物浓度分析检测

选取 COD、TN、TP 作为 3 个代表性污染物, 其中, 水样中的 COD 采用重铬酸钾消解法检测, TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法检测, TP 采用钼锑抗分光光度法检测 (魏复盛等, 2002)。针对海鸥排泄物中污染物浓度 c 的检测, 在现场采集具有代表性的海鸥粪便, 将样品混匀后置于烘箱内干燥 24 h, 取适量样品于研钵中进行研磨, 称取一定量样品, 进行 COD、TN、TP 的检测 (鲁如坤, 2000)。

按照每月 1 次的采样频率, 在湖面选择 10 个监测点 (图 1) 进行代表性污染物的连续监测, 包括进水点 1 个 (1#)、排水点 2 个 (3# 和 5#)、湖心点 3 个 (2#、4# 和 9#)、湖岸点 2 个 (6# 和 7#)、水生植物区 2 个 (8# 和 10#)。由于翠湖属于浅水湖泊, 因此, 每个采样点均只采集水面 (0 m) 及水面下 0.5 m 处水样, 取二者平均值作为这一监测点的污染物浓度。

式(5)和式(6)中的 c_1 采用进水点连续监测结果的年平均值, d_1 采用 2 个排水点连续监测结果的年平均值; 由于公园灌溉取水的分散性和水体下渗分布的均匀性, d_3 和 d_4 采用湖水污染物年平均浓度, 即水面其他 7 个监测点连续监测结果的年平均值。此外, 降雨中污染物浓度 c_2 的测定, 选择不同场次降

雨初期、中期和末期 3 个时间节点,对代表性降水过程进行采样分析,取平均值作为降雨污染物浓度值.针对 c_3 的确定,在雨季连续采集地表径流水样进行主要污染物的检测.最后,自净能力计算中, H_1 、 δ_1 通过现场调研得出, γ_i 则参照已有的关于荷花对污染物去除的相关文献中的结果(何连生等,2013).

3 结果及分析(Results and analysis)

3.1 水量平衡结果

如前所述,污染物的输入和输出主要是通过水量的输入和输出来实现的,且输入总量和输出总量应该满足水量平衡关系,因此,首先需要利用式(3)和式(4)进行输入和输出总水量的分析和计算.表 1 为计算依据和计算结果,可以看出,在水量输入中,

尾水补水是翠湖水量输入的主要途径,占输入总量的 92%,径流补水对水量输入的贡献率最小,仅为 1.7%;在水量输出中,水体排水和湖底渗漏是水量输出的主要途径,分别占输出总水量的 49% 和 41%,灌溉用水比例较小,仅占 3%.另一方面,从水量平衡的结果看,输入总水量和输出总水量的差值为 $2857 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,仅相当于输入和输出总水量的 0.2%,满足了式(2)的平衡关系,也就是说,在全年时间范围内,水量的输入总量与输出总量基本接近,这与翠湖水体库容和水位多年保持不变的实际情况相符.同时也表明,水量计算中各变量的取值都是合理的,这为污染物的输入和输出总量的分析和计算奠定了基础.

表 1 输入和输出水量计算与平衡分析结果

Table 1 Input/output quantity calculation and balance analysis results

| 输入输出途径 | 水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$ | 计算依据 |
|--------------------------------|--|---|
| 水量输入 ΣQ_i | 1730277 | |
| 尾水补水 Q_1 | 1590000 | $q = 6000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}, T_1 = 265 \text{ d}$, 雨季 100 d 不补水 |
| 降雨补水 Q_2 | 110745 | $h = 738.3 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (王志良等,2011), $W_1 = 150000 \text{ m}^2$ |
| 径流补水 Q_3 | 29532 | $\lambda = 0.8$ (董欣等,2008), $W_2 = 50000 \text{ m}^2$ |
| 水量输出 ΣE_i | 1727420 | |
| 水体排水 E_1 | 839500 | $p = 2300 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}, T_2 = 365 \text{ d}$ |
| 水面蒸发 E_2 | 129795 | $k = 856.3 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ (裴步祥,1985) |
| 灌溉用水 E_3 | 46375 | $\delta = 3.5 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (上海市建设和交通委员会,2006), $T_3 = 265 \text{ d}$, 雨季 100 d 不浇灌 |
| 湖底渗漏 E_4 | 711750 | $\omega = 0.013 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ (李光斗等,2007) |
| 水量平衡 $\Sigma Q_i - \Sigma N_i$ | 2857 | 占水量输入和输出的 0.2% |

3.2 污染物收支计算结果

在水量平衡计算的基础上,结合在现场实验监测的不同污染源中 3 种代表性污染物的浓度和含量

数据,利用式(5)和式(6)开展污染物输入和输出总量的计算,利用式(7)进行水体污染物自净量的计算,计算结果见表 2.

表 2 污染物输入和输出计算及自净量与积累分析结果

Table 2 Input/output Pollutants calculation, self-purification calculation and accumulation analysis results

| 输入输出途径 | 污染物浓度/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ | 水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$ | 污染物收支量/ $(\text{kg} \cdot \text{a}^{-1})$ |
|--------------------|---|---|---|
| 污染物输入 ΣM_i | | 1730277 | 84190, 19253, 528 |
| 尾水补水输入 M_1 | 50.0, 11.42, 0.13 | 1590000 | 79500, 18158, 207 |
| 降雨补水输入 M_2 | 13.05, 0, 0.06 | 110745 | 1445, 0, 7 |
| 径流补水输入 M_3 | 69.3, 26.97, 3.85 | 29532 | 2047, 796, 114 |
| 红嘴鸥排泄输入 M_4 | 1.02, 0.255, 0.170 ($\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{只}^{-1}$) | $m = 7830 \text{ 只}, T = 150 \text{ d}$ | 1198, 299, 200 |
| 污染物输出 ΣN_i | | 1727420 | 80163, 10540, 311 |
| 水体排水输出 N_1 | 54.4, 6.55, 0.19 | 839500 | 45669, 5499, 160 |
| 水面蒸发输出 N_2 | 0, 0, 0 | 129795 | 0, 0, 0 |
| 灌溉用水输出 N_3 | 45.5, 6.65, 0.20 | 46375 | 2110, 308, 9 |
| 湖底渗漏输出 N_4 | 45.5, 6.65, 0.20 | 711750 | 32384, 4733, 142 |
| 水体自净 ΣS_i | $\gamma_{\text{ITN}} = 40.69\%, \gamma_{\text{ITP}} = 35.71\%$ | $H_1 = 4 \text{ 月}, \delta_1 = 26668 \text{ m}^2$ | 0, 446, 11 |
| 污染物净积累 NPA | | 2853 | 4027, 8267, 206 |

注:污染物浓度和收支量数据依次为 COD、TN、TP 值.

从结果可以看出,不同输入途径对水体污染物输入的贡献率不同,与此相对应,不同输出途径对水体污染物输出的贡献率也不同.如图 2 所示,对于 COD,在 3 种输入途径中,尾水补水的贡献率最大,输入 COD 量占输入总量的 96.1%,径流补水和海鸥排泄的贡献率相比很小;在 4 种输出途径中,水体排水和湖底渗漏的贡献率较高,输出 COD 量分别占输出总量的 57.0%和 40.4%,灌溉用水的贡献率相比很小.对于 TN,在 3 种输入途径中,尾水补水的贡献率最大,输入 TN 量占输入总量的 94.3%,径流补水

和海鸥排泄的贡献率相比很小;在 4 种输出途径中,水体排水和湖底渗漏的贡献率较高,输出 TN 量分别占输出总量的 52.2%和 44.9%,灌溉用水的贡献率相比很小.对于 TP,在 3 种输入途径中,尾水补水并不是 TP 的唯一主要来源,尾水补水、径流补水和海鸥排泄输入 TP 量分别占输入总量的 39.7%、21.9%、38.4%;在 4 种输出途径中,水体排水和湖底渗漏的贡献率较高,输出 TP 量分别占输出总量的 51.4%和 45.7%,灌溉用水的贡献率相比很小.

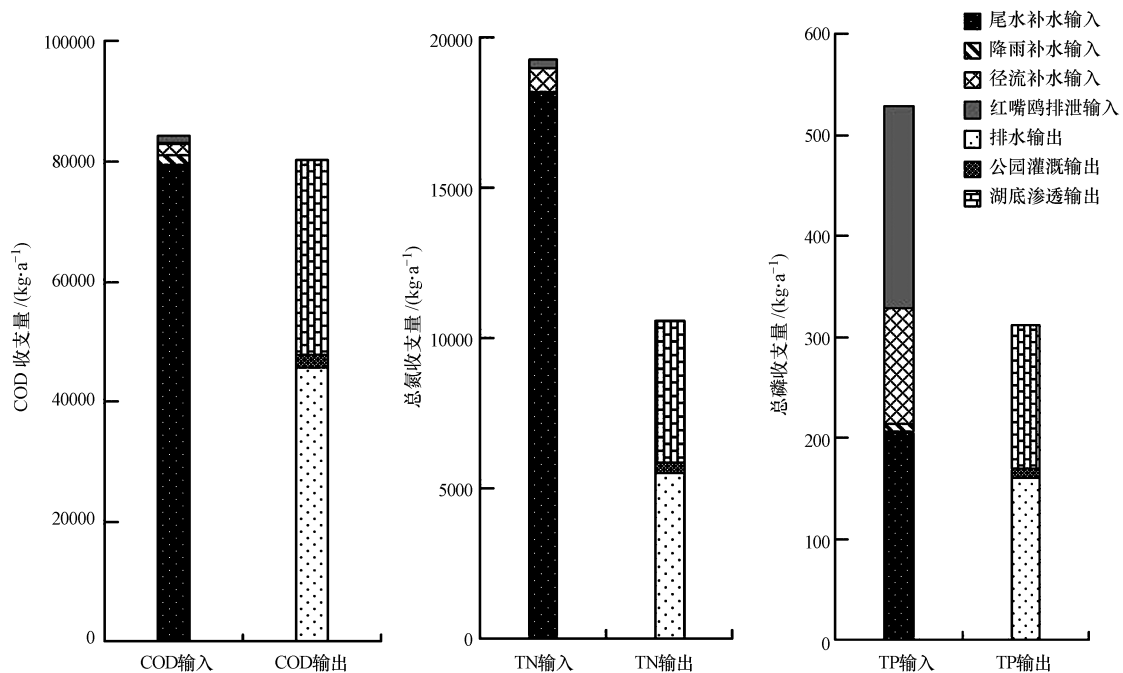


图 2 不同输入输出途径对水中代表性污染物的贡献

Fig.2 Different input/output contribution of representative pollutants in water

3.3 NPA 计算结果

从表 2 中污染物净积累(NPA)的计算结果可以看出,COD 在水体内的积累程度不严重,积累量为 $4027 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$,仅占 COD 输入总量的 4.8%;TN 在水体内的积累程度最严重,积累量为 $8267 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$,占 TN 输入总量的 42.9%,与输出总量基本相当;TP 在水体内的积累程度也很严重,积累量为 $206 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$,占 TP 输入总量的 39.0%(图 3).NPA 的计算结果表明,翠湖水体中 TN 和 TP 的积累程度很高,这为水体中营养物的富集和藻类的过度繁殖提供了条件,对水体富营养化的控制非常不利.

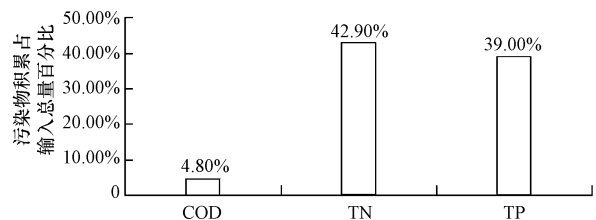


图 3 代表性污染物积累程度

Fig.3 Representative pollutant accumulation

3.4 优化管理策略

基于以上分析结果,研究认为,通过改变部分输入输出水量的方式来优化湖泊的管理,从而减少污染物在水体中的积累,尤其是 TN、TP 的积累.从污染物的输入和输出途径来看,海鸥排泄(M_4)和湖底渗漏(N_4)是难以通过人为方式改变的途径,尾水

补水(M_1)、径流补水(M_3)、水体排水(N_1)和灌溉用水(N_3)是可以人为调整的,但水量的调整需要满足水量的平衡关系,而且为了保证水体的良好循环条件,不应该大幅度改变水体现有的换水周期.从输入和输出途径中污染浓度对 NPA 的贡献分析, COD 值在所有途径中基本相同,在海鸥排泄物中的总量很小,因此,只要输入总水量和输出总水量保持平衡关系, COD 的积累就能有效控制;尾水补水和径流补水中的 TN 浓度远远高于其他途径,且由于尾

水补水总量大,导致了 TN 的大量积累;径流补水中的 TP 浓度和海鸥排泄物 TP 含量远远高于其他途径,导致了 TP 的大量积累.

基于以上分析,本研究提出可通过 3 个方面的调整来进行管理的优化:①截流雨季径流直接用于公园灌溉浇洒,径流雨水不再进入水体;②旱季公园灌溉改由尾水直接供应,不再从湖中取水;③适当调整尾水补水量.经过优化后, NPA 计算结果见表 3.

表 3 优化管理后污染物的积累计算结果

Table 3 Accumulation calculation results of pollutants after optimized management

| 输入输出途径 | 污染物浓度/($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) | 水量/($\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$) | 污染物收支量/($\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$) |
|--------------------|--|---|--|
| 污染物输入 ΣM_i | | 1647745 | 79493、17852、407 |
| 尾水补水输入 M_1 | 50.0、11.42、0.13 | 1537000($q=5800\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$) ^a | 76850、17553、200 |
| 降雨补水输入 M_2 | 13.05、0、0.06 | 110745 | 1445、0、7 |
| 径流补水输入 M_3 | 69.3、26.97、3.85 | 0 ^b | 0、0、0 |
| 红嘴鸥排泄输入 M_4 | 1.020、0.255、0.170 ($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{只}^{-1}$) | $m=7830, t=150\text{ d}$ | 1198、299、200 |
| 污染物输出 ΣN_i | | 1681045 | 78053、10232、302 |
| 水体排水输出 N_1 | 54.4、6.55、0.19 | 839500 | 45669、5499、160 |
| 水面蒸发输出 N_2 | 0、0、0 | 129795 | 0、0、0 |
| 灌溉用水输出 N_3 | 45.5、6.65、0.20 | 0 ^c | 0、0、0 |
| 湖底渗漏输出 N_4 | 45.5、6.65、0.20 | 711750 | 32384、4733、142 |
| 水体自净 ΣS_i | $\gamma_{\text{TN}}=40.69\%, \gamma_{\text{TP}}=35.71\%$ | $H_1=4\text{ 月}, \delta_1=26668\text{ m}^3$ | 0、446、11 |
| 污染物净积累 NPA | | -33300 | 1440、7174、94 |

注:a.尾水补水量调整为 $5800\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,余出的 $200\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 水量直接用于灌溉浇洒;b.雨季的径流补水采用截留措施直接用于公园灌溉浇洒,不再进入水体;c.不再从水体中取水进行灌溉,改为由尾水直接供应;污染物浓度和收支量数据依次为 COD、TN、TP 值.

从结果可以看出,采用优化管理模式后,湖泊的换水周期经过计算为 38 d,与原有的 36 d 没有明显的变化,输入和输出总水量的平衡差值仅占输入总水量的 2%,基本符合水量平衡要求.与此相比,污染物的削减却有显著变化, COD 减少了 $2587\text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$,减少 64.2%,积累量占输入量的 1.8%;TN 的 NPA 值减少了 $1093\text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$,且与输入总量相比的积累比例降低到 40.2%;TP 积累现象得到明显改善, NPA 值减少了 $112\text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$,减少 54.4%,与输入总量相比的积累比例也大幅下降到 23.1%.由此可见,通过优化管理,能够有效地缓解营养物在水体的富集,减缓水体富营养化发展趋势.

4 结论(Conclusions)

本研究选取具有代表性的昆明翠湖为研究对象,针对该湖泊尾水补水量大的典型特点,提出了以污染物净积累(NPA)为评价指标的污染物收支平衡分析方法,该方法将水量平衡作为基本原则,

建立了污染物输入和输出总量的计算模型.计算结果表明,不同输入和输出途径对水中污染物输入和输出的贡献权重,显示了代表性污染物在湖泊中的净积累量和积累程度,揭示了 TN 和 TP 在翠湖水体严重积累的现象.基于计算结果,研究提出了翠湖水体的优化管理策略,包括截流污染负荷高的降雨径流、尾水直接用于公园灌溉和适度调整尾水补水总量,经验证,该优化策略能够实现代表性污染物 NPA 的大幅度削减,有效缓解水体的富营养化趋势.本研究为城市景观水体的污染物积累分析提供了可操作性强的方法,为缺水城市景观水体以污水厂尾水为补水条件下的污染物积累控制和优化调控提供了典型案例.

责任作者简介:陈荣(1980—),男,副教授,博士,主要研究方向:城市污水再生利用.E-mail: chenrong@axuat.edu.cn.

参考文献(References):

北京市环境保护科学研究院,中国环境科学研究院. 2002.

- GB18918—2002 城镇污水处理厂污染物排放标准 [S]. 北京: 中国环境科学出版社
- 董欣, 杜鹏飞, 李志一, 等. 2008. 城市降雨屋面、路面径流水文水质特征研究[J]. 环境科学, 29(3): 607-612
- 杜文华, 芮旻, 徐斌. 2006. 城市景观水污染现状及处理技术[J]. 环境保护科学, 32(2): 11-14
- 国家环境保护总局. 2002. GB3838—2002 中华人民共和国地表水环境质量标准 [S]. 北京: 中国环境科学出版社
- 何连生, 孟繁丽, 孟睿, 等. 2013. 利用荷花治理白洋淀水体富营养化的原位围隔研究[J]. 湿地科学, 11(2): 282-285
- Hirich A, Choukr-Allah R. 2013. Wastewater reuse in the Mediterranean region; Case of Morocco [Z]// 13th edition of the World Wide Workshop for Young Environmental Scientists (WWW-YES-2013)-Urban waters: resource or risks (No. 16). Arcueil, France: HAL-ENPC
- 黄伟伟. 2008. 城市再生水补充景观水体的富营养化特征研究[D]. 唐山: 河北理工大学
- 李光斗, 孔登锋. 2007. 运用经验公式法对渠道渗漏的计算[J]. 黑龙江水利科技, 35(4): 64-65
- 李海燕, 黄延, 吴根. 2006. 城市住区景观水体补水方案设计及水质保障[J]. 环境, (z1): 14-15; 19
- 鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社. 108-109; 147-149; 168-169
- 裴步祥. 1985. 蒸发和蒸散的测定与计算方法的现状及发展. 气象科技, 2(1): 69-74
- 上海市建设和交通委员会. 2006. GB50013—2006 室外给水设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社
- 王志良, 张永山. 2011. 昆明年降雨量时间序列的混沌分析[J]. 华北水利水电学院学报, 32(2): 8-10
- 魏复盛, 毕彤, 齐文启. 2002. 水和废水检测分析方法(第4版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社. 211-213; 243-248; 255-257
- 于秀芳, 张乃明. 2008. 昆明翠湖水质变化特征及影响因素研究[J]. 云南地理环境研究, 20(3): 38-41
- 周永兴, 李伟. 2009. 滇池水系不同水体冬季浮游生物群落组成与水质的关系[J]. 内蒙古林业调查设计, 32(4): 6-11