

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.05.025

基于水生态系统平衡的郓城南湖水体生态净化方案

孙子日哈¹, 尚福强², 吴得卿², 唐莉华¹, 王 硕², 蔡 一¹

(1. 清华大学土木水利学院, 北京 100084; 2. 中电建路桥集团有限公司, 北京 100048)

摘要:为提升山东省菏泽市郓城南湖的水质, 根据南湖的现状条件, 定量计算了年入湖污染负荷总量, 并结合文献调研的常见净水植物和动物的去污能力, 以 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中的Ⅳ类水为目标, 设计了基于水生态系统平衡的南湖水体综合净化方案。方案中根据入湖污染负荷量计算了芦苇、荷花、黄菖蒲等水生植物的种植面积, 并基于 MIKE21 模拟得到的南湖氮浓度场分布进行了生态浮岛的平面布置; 提出了适宜的水生动物(鱼类和底栖动物)放养种类和数量。根据设计的水体净化方案, 评估结果表明, 未来湖水水质除 COD 指标外, 其他指标都能够达到Ⅳ类水质标准; COD 主要来源于旅游污染, 因此旅游污染的控制对保证湖区水质十分关键。

关键词:生态净化; 水生态系统平衡; 水生动植物; 净化能力; 污染负荷量; 郓城南湖

中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)05-0169-08

Water ecological purification scheme of Yuncheng Nanhu Lake based on water ecosystem balance// SUN Ziriha¹, SHANG Fuqiang², WU Deqing², TANG Lihua¹, WANG Shuo², CAI Yi¹ (1. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Power China Roadbridge Group Co., Ltd., Beijing 100048, China)

Abstract: In order to improve the water quality of Yuncheng Nanhu Lake in Heze City, Shandong Province, according to the current conditions of Nanhu Lake, the total annual pollution load into the lake was quantitatively calculated. Combined with the decontamination capacity of common water purification plants and animals investigated in the literature, a comprehensive water purification scheme of Nanhu Lake based on water ecosystem balance was designed with the goal of class IV water in the surface water environment quality standard. In the scheme, the planting area of aquatic plants such as reeds, lotus, yellow calamus and so on was calculated based on the pollution load into the lake. The ecological floating islands were laid out based on the distribution of nitrogen concentration field simulated by MIKE21. Suitable stocking species and quantity of aquatic animals (fish and benthic animals) were proposed. According to the designed water purification scheme, the conclusion is estimated that in the future, the water quality of the lake can reach class IV except for COD indicators. COD mainly comes from tourism pollution. Therefore, the control of tourism pollution is very important to ensure the water quality of the lake area.

Key words: ecological purification; water ecosystem balance; aquatic animals and plants; purification ability; pollution load; Yuncheng Nanhu Lake

近年来我国湖泊水体生态环境问题严重, 其中水体富营养化是湖泊生态环境退化的七大问题之一^[1]。富营养化湖泊的修复包括物理、化学、生物等方法, 其中, 水生态修复技术因具有投资小、效率高、无二次污染等特点而受到关注。基于生态平衡的水体生态净化方法是利用适宜的水生动植物, 构建有利于维持湖泊清水态的反馈作用, 形成稳定的河湖水生生态系统并逐渐实现河湖水质净化。这种方

法属于生物修复范畴, 利用生物自身的特性净化水环境, 与自然环境有更大的相容性。其目的不仅是水质的达标, 最终是要通过阶段性治理构建一个处于动态平衡的水生态系统, 使水体恢复自净能力, 实现可持续的水环境保护目标。

国内外关于水体生态净化技术的研究从 20 世纪 80 年代开始, 并不断通过应用实践对其效果进行验证。Ramesh 等^[2]从 1987 年起在芬兰 Zwemlust

作者简介: 孙子日哈(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源。E-mail: 2995251631@qq.com

通信作者: 唐莉华(1975—), 女, 副研究员, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: tanglh@tsinghua.edu.cn

Lake 应用生物技术进行湖泊修复,到 2000 年水质得到明显改善。孙刚等^[3]从 1992 年起运用水生动植物对长春市南湖进行综合治理,1996 年发现水质有明显好转。2001 年、2002 年春巢湖市向巢湖投放了鲢鱼和鳙鱼,到夏季湖水水质得到了较好的改善^[4]。陈开宁等^[5]2004 年起在太湖五里湖开展了大型围隔试验进行生态重建示范工程,在两年的时间里较好地恢复了水生植被,试验区水质得到了明显的改善。沙昊雷等^[6]在常州市白荡浜黑臭水体中运用包含水生动植物、曝气装置等措施在内的生态治理,发现 4 个月河道水质有明显改善。以上研究表明:利用水生动植物系统净化水质的措施成效显著,但需要一定的周期,多种水生动植物组合更易发挥其净水作用。目前,水生植物的耐污能力、最佳种植密度、水生动物的最佳投放比例与规模均有待进一步研究^[7]。刘正文等^[8]的研究表明,浅水湖泊生态修复工程应设法控制沉积物磷释放与再悬浮,加速沉水植物群落的恢复,促进底栖藻类的发展,最终形成底栖初级生产者占主导的浅水湖泊生态系统,即通过影响底栖-敞水生境耦合,重建浅水湖泊清水态。目前以建立浅水湖泊清水态的反馈作用为目的,通过构建复合水生态系统,发挥多种水生生物在时间、空间上的净水效果,实现优势互补的研究还较少,应用实例更少。

山东省郓城南湖是一个新建的人工湖泊,属于典型的城市封闭缓流景观水体,水体自净能力弱,容易受到污染且难以实现自我恢复。本文在分析郓城南湖污染源的前提下,通过调查典型挺水植物、沉水植物、底栖动物和部分鱼类的生态净水功能,并选用适宜的水生动植物构建南湖水生态系统,探究基于水生态系统平衡的南湖水体综合净化方案,以提高湖泊生态系统的自我修复能力,维持良好的湖泊水体环境质量。

1 研究区概况

南湖位于山东省郓城县城区南部的南湖公园,水面面积约 26.7 hm²,平均水深 3.5 m,总水量约为 93.34 万 m³。上游为几乎不向南湖供水的郓城水库,下游因城市建设被截断。南湖边原有 5 个雨水管入湖,承接周边 2.2 km² 范围的雨水径流,现雨水管已接入市政管网,相应的雨水径流不再入湖。湖区水量的输入和输出主要为湖区降水、公园内径流和湖面蒸发。南湖是典型的城市封闭缓流景观水体,水体流动性差,自净能力弱,易受到污染且不易实现自我恢复。湖区现有芦苇种植面积 1.2 hm²、荷花 0.55 hm²、黄菖蒲少量。

2 研究方法

采用基于水生态系统平衡的水体生态净化修复方案,设计前需要先明晰各污染源,调研相关动植物的净水能力,结合南湖主要污染物及典型浓度场进行合理设计。

2.1 污染源分析及计算

南湖湖水的主要来源为湖区降水和公园内径流;大气中的氮、磷通过干、湿沉降的方式进入水体,会对南湖造成一定的污染^[9-10];同时,作为市民休闲娱乐场所,旅游活动也会污染南湖水体。因此,南湖污染源主要考虑大气沉降污染、旅游活动污染和公园内的径流污染。

湖区氮沉降量计算公式为^[11]

$$F_N = D_N A \quad (1)$$

式中: F_N 为全年氮沉降负荷量,kg; A 为水域面积,km²; D_N 为氮沉降通量,山东省属于氮高沉降区,采用山东省氮沉降通量数据,菏泽地区为 3 086 kg/(km²·a)^[10]。计算得到 F_N 约为 1 016 kg。

湖区磷沉降量 F_P 计算公式为

$$F_P = \rho_{\text{降水}} V_{\text{降水}} \quad (2)$$

式中: $\rho_{\text{降水}}$ 为降水中磷的质量浓度,mg/L; $V_{\text{降水}}$ 为湖面承接的年降水量的体积,m³。郓城县的多年平均降水量为 642 mm,大气磷的湿沉降质量浓度约 0.015 mg/L,计算得到 F_P 约为 3.4 kg。

南湖公园内湖区周边还有广场(6.52 hm²)、绿化带(8.31 hm²)、房屋建筑(1.82 hm²)、周边道路(7.34 hm²),在降雨期间会产生地表径流。雨水径流中的氮、磷入湖量计算公式为

$$F = S_{\text{下垫面}} \alpha H \rho_{\text{径流}} \beta \quad (3)$$

式中: $S_{\text{下垫面}}$ 为公园中各类型下垫面的面积,m²; α 为不同下垫面的径流系数(道路和广场取 0.48,绿地取 0.01,建筑屋顶取 0.21)^[12]; H 为年降水深度,mm; $\rho_{\text{径流}}$ 为径流中污染物的质量浓度,由实测雨水径流污染物浓度可知, $\rho(\text{COD}) = 103.73 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{氨氮}) = 3.14 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TP}) = 0.19 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TN}) = 3.14 \text{ mg/L}$; β 为污染物入湖系数,取用农田径流入湖系数 0.15^[13]。

据调查南湖平均每天旅游人数约 2 000 人,旅游带来的污染负荷强度参考其他景区研究取值^[13-18],COD、氨氮、总氮和总磷的人均污染入湖量取 3.45 g/d、0.28 g/d、0.43 g/d 和 0.03 g/d。

根据 2018 年 6 月 28 日取样测得南湖 5 个水质样本分析结果,湖水水质在Ⅳ~Ⅴ类水之间,湖区中央及湖区南部的水质较差。而 2019 年 9 月 27 日现场调研发现南湖水质变差,已接近Ⅴ类或超过Ⅴ

类水。南湖具有景观功能、非直接接触的娱乐用水功能,同时也是南湖水生态系统的重要组成部分,承载着南湖生物群落的生命。一般景观要求水域水质满足 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中的 V 类水水质标准,非直接接触的娱乐用水功能需满足 IV 类水水质标准。南湖水生态系统修复需要鱼类和底栖动物的放养,而 III 类水才能很好地满足鱼类和底栖动物的生存。因此先以 IV 类水为基本目标,最终实现向 III 类水的过渡。目前湖区水质为 V 类水,目标水质设为 IV 类水,因此可计算得到南湖水体中 COD、氨氮、总氮及总磷等指标提高到 IV 类水水质时需处理的负荷量。由于湖区降水及公园内径流入湖水量(约 21 万 m^3)小于湖面蒸发量(41 万 m^3),方案将会有补水措施,因此本文不考虑浓缩、稀释过程,只考虑水生动植物系统对污染负荷的净化能力。

综上,不同来源污染负荷量计算结果及南湖水体质量提升到 IV 类水水质标准需处理的污染负荷量见表 1。

表 1 入湖污染负荷量及需处理负荷量 单位:kg/a

Table 1 Loads of COD, ammonia nitrogen, TN, TP into the lake and to be treated unit:kg/a					
污染指标	大气沉降污染	旅游污染	园区雨水径流污染	水质提升需处理负荷	合计需处理
COD		2521.04	719.34	9333.80	12574.18
氨氮		204.86	12.90	466.69	684.45
总氮	1016.2	310.39	21.78	466.69	1815.06
总磷	3.4	24.23	1.32	93.34	122.29

2.2 水生动植物净化能力

水生植物净化水体主要通过吸收水体中的营养元素,防止营养元素富集,从而抑制藻类生长,改善水质。选择能够削弱浮游植物种群优势的植物,以减少浮游植物的生物量,从而增加水体的透明度,使沉水植物和底栖藻类更易获得光照,进一步发展为优势种群。沉水植物和底栖藻类都可以提高沉积物表层氧化还原电位,从而抑制铁、磷的释放^[19],有沉水植物的湖泊沉积物磷释放速率显著低于无沉水植物的湖泊^[20]。沉水植物是维持清水态,从而维持敞水生境较低磷浓度和较低浮游植物生物量的关键因子^[8]。芦苇 (*Phragmites communis*) 和轮叶黑藻 (*Hydrilla verticillata*) 有较强的耐污和去污能力。荷花 (*Nelumbo nucifera*)、黄菖蒲 (*Iris pseudacorus*) 在水环境下会产生适应性抗逆反应,通过调节自身的脯氨酸、丙二醛含量以适应污水环境。金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum* L) 的 COD 净化率强,但耐污染适应性能相对较弱。通过分析及文献调研的水生植物水体净化效果,结合当地现有水生植物种类,选择轮叶黑藻、芦苇、黄菖蒲、荷花、金鱼藻等作为净

水植物。这 5 种水生植物对有机污染物及营养盐的去除效果较好,且成活率高、易栽培、成本低,对水深条件要求不高。水生植物对 COD、氨氮、总氮和总磷的去除能力从文献中获得。文献[21-25]中研究的地域及实验条件不尽相同,大多数指标的范围较大。综合考虑各种因素,本文计算采用的植物净水能力按调研结果去除最大值和最小值后的平均值取值。芦苇、黄菖蒲、荷花对 COD 的处理能力取值分别为 312.83 $\text{mg}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$ 、1377.39 $\text{mg}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$ 、44.16 $\text{mg}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$;对氨氮的处理能力取值分别为 97.02 $\text{mg}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$ 、227.81 $\text{mg}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$ 、7.74 $\text{mg}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$;对总氮的处理能力取值分别为 87.35 $\text{mg}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$ 、326.77 $\text{mg}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$ 、19.81 $\text{mg}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$;对总磷的处理能力取值分别为 16.09 $\text{mg}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$ 、49.17 $\text{mg}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$ 、1.05 $\text{mg}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$ 。

鱼类对浅水湖泊生态系统的影响之一就是影响水动力条件。底栖生物食性鱼类可能会通过摄食活动促进沉积物的再悬浮,增加磷释放风险;浮游生物食性鱼类虽然能降低蓝藻量,但也可能会提高湖水的总磷浓度^[8]。因此不选择底栖生物食性鱼类,选择低密度的浮游生物食性鱼类,以构建南湖鱼类群落结构。滤食性的鲢鱼和鳙鱼活动于上层水体,摄食浮游植物和浮游动物。在富营养化水体中按 3:1 的比例放养鲢鱼和鳙鱼,对总氮和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率均能达到 60% 以上^[26]。底栖动物田螺摄食单胞藻、原生动物、有机碎屑等;双壳类可以降低敞水生境中的悬浮物浓度,提高透明度,从而有利于底栖植物的生长以及湖泊清水态的维持;河蚌摄食水生植物嫩茎叶、藻类、细菌和有机碎屑等,它们对于富营养化水体中的 COD、总氮、总磷等也有一定的去除效果^[27-28]。草鱼摄食浮水、沉水、挺水植物等,生活在水体中下层,其排泄物可给鲢鱼提供营养,但其对水质要求一般比较高。红鲫鱼摄食底栖动物、有机碎屑等,生活在水体底层,可抑制藻类和底栖动物过量繁殖。草鱼和红鲫鱼可考虑用于构建湖泊中的食物链。

2.3 氮浓度场的模拟

污染物在水体中随着水流迁移,在迁移过程中会受到各种物理、化学因素的影响,发生输移、混合、分解、稀释和降解。水质模型的目的是用数学语言描述污染物在水体中的变化规律以及相互制约因素。为了解南湖水体中污染物分布的空间变异性,采用 MIKE21 软件对南湖流场和浓度场进行模拟。运用 MIKE21 软件中的 HD 水动力学模块和 Ecolab 水质模块,构建南湖二维水动力学和水质模型。根据各水质指标之间的数学关系,在 Ecolab 模块中设

置相应的变量方程,以氮浓度场模拟为例,选择的主要变量为氨氮、亚硝酸氮、硝酸氮,变量方程表达式分别为

$$\frac{dm_{\text{氨氮}}}{dt} = m_{\text{BOD}} - m_{\text{plant}} - m_{\text{bact}} - m_{\text{nitrifl}} \quad (4)$$

$$\frac{dm_{\text{亚硝酸氮}}}{dt} = m_{\text{nitrif2}} - m_{\text{nitril}} \quad (5)$$

$$\frac{dm_{\text{硝酸氮}}}{dt} = m_{\text{nitrif2}} - m_{\text{deni}} \quad (6)$$

式中: m_{BOD} 为单位时间内 BOD 降解过程释放出的氨氮质量; m_{plant} 为单位时间内植物摄取的氨氮质量; m_{bact} 为单位时间内细菌摄取的氨氮质量; m_{nitrifl} 为单位时间内通过硝化作用转化成亚硝酸氮的氨氮质量; m_{nitrif2} 为单位时间内通过硝化作用生成的亚硝酸氮质量; m_{nitril} 为单位时间内通过硝化作用转换成硝酸氮的亚硝酸氮质量; m_{nitrif2} 为单位时间内通过硝化作用生成的硝酸氮质量; m_{deni} 为单位时间内反硝化作用消耗的硝酸氮质量。

结合文献资料设置初始参数,并通过控制点模拟与实测结果对比,不断对参数进行调整,从而进行水质浓度场的计算。图 1 为采用 MIKE21 软件模拟得到的南湖典型日总氮质量浓度分布,可见总氮浓度较高区主要分布在湖区的中部、东部和西南部,与实测结果基本一致。

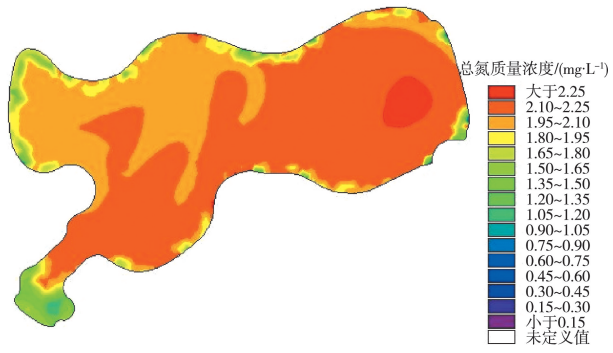


图 1 南湖典型日总氮质量浓度场分布
Fig.1 Distribution of typical daily nitrogen concentration field in Nanhu lake

2.4 生态浮岛设计

若新增的植物均集中布置在岸边或某个区域,则湖中污染物浓度高且水体流动性差的区域水质将难以达到预期效果,可能仍处于富营养状态,而植物集中布置区可能会偏向于贫营养状态,而由此导致的过高或过低营养盐浓度均不利于水生植物生长而发挥净水作用。因此考虑借助生态浮岛技术,根据总氮高浓度区的位置较均匀地布置水生植物。

人工生态浮岛技术是目前国内外常用的湖泊水体净化技术,具有净化水质、美化水面景观、提供动

物栖息空间等功能,并具有易制造、成本低等优点。采用生态浮岛技术处理效率远高于单纯的水生动植物修复技术^[29]。什刹海实施人工生态浮岛工程 1 年后,总氮、总磷浓度分别下降了 4.74 mg/L 和 0.45 mg/L,去除率分别达 79% 和 91%^[30]。

为了方便运输布置,可使用若干生态浮床拼接成生态浮岛。综合考虑净水效果和耐用等因素,可选择长方形的有框湿式浮床、PVC 管浮床框体、聚苯乙烯泡沫板浮床床体、海绵浮床基质。每个浮岛的 4 个顶点均需打桩固定,浮岛内浮床之间通过框体连接,浮岛四周由 PVC 管框体连接。

3 方案设计

水生态修复的核心是建立水生态系统的平衡,需要遵循水生态系统中生物与环境的作用关系、生物与生物之间的食物链特征等规律。因此方案首先要实现研究区域能量和物质收支趋于平衡的目标,如利用生物有效控制环境中过量且不利于维持生态平衡的物质;其次构建有利于促进湖泊自我修复和自我调节的食物链。水生植物种植方案既要削减南湖水体中过剩的营养盐,也要避免南湖水体进入贫营养盐状态;鱼类和底栖动物主要用于构建生物之间的食物链关系,要避免数量过多而不利于水平衡状态的形成。

3.1 植物的种植面积

由植物的净水能力以及需处理的 COD、氨氮、总氮、总磷负荷量,可计算所需各水生植物的种植面积。由于水生植物一般从 3 月初开始萌芽,到 11 月底衰落,因此 3 种水生植物的生长期取 9 个月,即 275 d。南湖现有一定面积的芦苇和荷花,能处理一部分负荷,进而可得处理剩余负荷量所需的各种植物面积(表 2)。

表 2 剩余负荷量及所需补种植物面积

Table 2 Plant area needed to supplement					
污染指标	现有植物处理量/kg	剩余负荷量/kg	补种芦苇/m ²	补种黄菖蒲/m ²	补种荷花/m ²
COD	1 108	11 466	133 285	30 272	944 278
氨氮	335	350	13 116	5 586	164 503
总氮	321	1 494	62 211	16 630	274 260
总磷	55	67	15 184	4 967	231 847

计算结果显示,完成 COD 的削减目标时所需各种植物面积均最大,仅对去除 COD 而言,黄菖蒲所需种植面积最小,约为 30 272 m²,但数值较大。考虑到经济成本以及湖面的整体景观效果,以 COD 量控制芦苇、黄菖蒲、荷花的种植面积不太现实。当以总氮来控制时,3 种植物需补种的面积均大于以总磷和氨氮控制的情况,此时总氮、总磷、氨氮均能达到

净化目标。湖泊生态恢复除了削减水体中的磷外,氮负荷的削减也是关键,水体的总氮质量浓度小于 2 mg/L 时有利于湖泊中沉水植物的发展,否则将可能延缓湖泊生态恢复进程^[31]。因此选择总氮作为控制指标,此时 3 种植物中黄菖蒲的种植面积最小,约需 16 631 m²。为促进底栖植物的覆盖度和优势度,可在 12 月至次年 3 月南湖水位较低时在浅水区及水岸过渡带播种沉水植物轮叶黑藻和金鱼藻。轮叶黑藻和金鱼藻一方面可抑制沉积物中营养盐的静态释放,另一方面可为草鱼等水生动物提供天然饵料。

3.2 鱼类和底栖动物的放养数量

选择鱼类和底栖动物的主要目的是维持水生态系统的平衡。选择能摄食浮游植物的鱼类用于削减南湖浮游植物生物量,协助水生植物削弱浮游植物在富营养化的南湖水生态系统中的优势种群作用。选择适宜的底栖动物构造底栖食物网结构,促进南湖底栖初级生产力,维持清水态的反馈作用。根据水生动物的水质净化作用及生长习性,选择河蚌、田螺去除 COD;选择鲢鱼和鳙鱼去除总氮和氨氮,消耗浮游植物等;选择草鱼构建南湖水体中的食物链。红鲫鱼的摄食活动可能会促进沉积物再悬浮和营养盐扩散^[8],因此不放养红鲫鱼。草鱼对水质要求相对较高,可在方案实施的第二年放养。

结合北海和什刹海投放鲢鱼、鳙鱼、草鱼实现净水的相关经验^[32],选择鲢鱼、鳙鱼、草鱼的放养密度分别为 495 尾/hm²、165 尾/hm²、165 尾/hm²,其中草鱼先试放养 100 尾/hm²,若能较好存活,最终放养密度调整至鳙鱼的放养密度。河蚌、田螺放养密度分别选择为 3 个/m²、10 个/m²。

3.3 生态浮岛布置

目前南湖荷花和芦苇的大致分布见图 2。保留现有的荷花和芦苇,在合理范围内让其自由生长蔓延,使其结合岸边的绿化带形成有屏障作用的湖滨带,在一定程度上阻拦陆域污染物进入南湖,可以对公园内径流污染和人为污染起到缓冲削减作用。

综合考虑芦苇的净水能力、在南湖良好的生长状况以及浮岛的景观效果后,除黄菖蒲外,也选择芦苇作为浮床植物。为便于浮床布置,最终确定黄菖蒲、芦苇种植面积分别为 1.7 万 m²、1 000 m²,将 18 000 m²的植物均分至 5 个浮岛,每个浮岛上尺寸为 60 m×60 m。单个浮岛上的芦苇面积为 20 m×10 m,黄菖蒲面积为 3 400 m²。每个浮岛由 360 个 5 m×2 m 的浮床组成,其中黄菖蒲浮床 340 个,芦苇浮床 20 个。

根据南湖典型日总氮质量浓度分布(图 1),将 5 个浮岛布置在氮浓度高的区域,使浮岛上的黄菖

蒲和芦苇在与浮游植物竞争光照和营养盐等因子中占优势地位,从而抑制浮游植物生物量的过度增加。芦苇和黄菖蒲在浮床上的种植密度分别为 16 株/m²和 25 丛/m²。

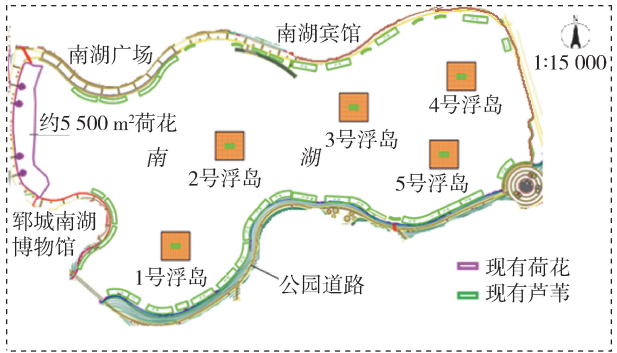


图 2 南湖现有植物分布及浮岛布置

Fig. 2 Distribution of existing plants and layout of floating islands in Nanhu Lake

4 结果与分析

4.1 方案效果预估

根据南湖现有植物和新增的植物面积,估算其对 COD、氨氮、总氮、总磷的去除量,并评估此方案实施后南湖可能达到的水质状况,结果见表 3。可以看出,按方案中设计的芦苇、黄菖蒲及荷花种植面积,通过水生植物的净化效果,可以使湖区水体中的总氮、总磷及氨氮满足Ⅳ类水水质目标,COD 接近净化目标。总氮质量浓度小于 2 mg/L,有利于沉水植物的发展^[31]。

表 3 方案处理效果预估

Table 3 Evaluation of treatment effect for COD、 ammonia nitrogen、 TN and TP

污染指标	总污染负荷/kg	水生植物污染处理量/kg	预估水质质量浓度/(mg·L ⁻¹)	Ⅳ类水水质标准/(mg·L ⁻¹)	预估结果
COD	40 575.59	7 633.06	35.29	30	接近Ⅳ类水
氨氮	2 084.52	1 426.23	0.71	1.5	满足Ⅳ类水
总氮	3 215.13	1 872.31	1.44	1.5	满足Ⅳ类水
总磷	215.63	289.43	0	0.1	满足Ⅳ类水

根据预估结果,COD 由于负荷量较多,单靠芦苇、荷花、黄菖蒲的净化作用不能达到Ⅳ类水水质标准。但是沉水植物对 COD 也有较好的净化效果,金鱼藻和轮叶黑藻的净化效果有时比荷花和黄菖蒲更高^[33-35],因为方案中未定量计算沉水植物、鱼类和底栖动物对 COD 的处理作用,因此 COD 的浓度理论上会比表 3 的计算值要低,更接近目标水质。根据污染源分析,南湖入湖污染物中旅游活动 COD 贡献占 78%,为保证湖区水质,需要通过严格管理措施进行旅游污染输入控制,从污染源头减少 COD 入

湖量。

计算结果显示,湖水中的总磷负荷能完全被处理,但实际上水体中的总磷质量浓度不会下降至0。一方面随着湖中总氮、总磷浓度的降低,浮岛植物的净化能力会受到抑制;另一方面,布置的沉水植物和放养的底栖动物对沉积物营养盐^[36]释放的抑制作用无法定量评估,因此浮岛植物削减了水体中大量的氮、磷等营养盐后,沉积物中的营养盐可能会随着浓度梯度和草鱼等的扰动而释放。沉积物中营养盐的释放又会促进浮岛植物的生长,浮岛植物进一步抑制浮游植物,水体变清澈,沉水植物因获得更多光照而有生长优势,便形成了维持南湖清水态的反馈作用。

4.2 补水方案

因降水进入南湖的水量每年约为 21 万 m³,而南湖年蒸发量约为 41 万 m³,考虑这部分水量变化后,可计算剩余 COD、氨氮、总氮在剩余水体的质量浓度分别为 44.5 mg/L、0.89 mg/L、1.82 mg/L。此时 COD、总氮的浓度均达不到Ⅳ类水水质标准,因此需每年向南湖补水约 20 万 m³,以维持其水深,使南湖的总氮和氨氮浓度满足Ⅳ类水水质标准。由于补水量需具有季节变异性,每月的补水量可根据月降水量和蒸发量进行分配。以 2018 年为典型年,根据降水量、蒸发量数据分析,1~12 月补水量分配见表 4。冰冻时期未能补充的水量可在其他月份进行补充。

表 4 各月补水量分配 单位:万 m³
Table 4 Allocation of water replenishment per month
unit:10⁴ m³

月份	蒸发量	降水量	补水量
1	0.85	0.21	0.64
2	1.12	0.07	1.05
3	2.12	0.79	1.33
4	4.52	1.10	3.42
5	4.73	1.22	3.51
6	6.89	3.02	3.87
7	7.71	2.10	3.61
8	5.04	8.90	0
9	4.35	2.54	0
10	3.37	0.06	1.26
11	1.15	0.78	0.37
12	1.24	0.39	0.85
年总量	41.09	21.19	19.91

4.3 可持续性分析

本方案共布置水生植物 1.8 hm²,约占南湖水面面积的 6.5%。鱼类和底栖动物放养密度也均较小,以实现不投饵不施肥构建食物链,可以削弱维持浑水态的正反馈作用,形成维持清水态的反馈作用。方案中虽未考虑沉积物中污染再释放的影响,但选

用的轮叶黑藻、芦苇具有较强的耐污能力,荷花、黄菖蒲具有较强的适应能力,因此方案也对沉积物氮、磷的释放有较强的适应能力。

由于每年外源污染物入湖量小于方案中植物每年所能处理的污染量,因此方案实施后湖中的各种污染负荷理论上均会减小。而轻度富营养化水中的氮磷是植物生长的限制因子,需控制轻度富营养化水中植物量。当水体中营养盐的浓度有所下降,植物表现出缺乏营养盐的症状时,需将部分浮岛移出南湖。为避免水生植物枯落物成为二次污染源,需在植物衰落后及时收割出湖,避免大量枯落物入湖;定期调查水生动物存活状况,若有大量死亡现象应及时从湖中取出。

5 结 语

本文根据南湖不同污染源入湖量的分析,基于水生植物、鱼类及底栖动物的净化能力设计了南湖水生态净化方案。通过构建水生态平衡系统(包括芦苇、黄菖蒲、荷花、轮叶黑藻、金鱼藻等植物布置方案,鲢鱼、鳙鱼、草鱼、河蚌、田螺放养形式等),削弱浮游植物的生长优势,促进沉水植物的优势度,有效抑制沉积物中的营养盐大量释放,维持清水态的反馈作用,提高水体自净能力。

经过分析计算,南湖 COD、氨氮、总氮、总磷入湖负荷总量约分别为 3 241 kg、218 kg、1 349 kg、29 kg。按不同水生植物的处理能力以及浮岛布置需求,在现有的 1.2 hm²芦苇及 0.55 hm²荷花的基础上,需种植黄菖蒲 1.7 hm²,芦苇 0.1 hm²,并放养鲢鱼、鳙鱼、草鱼、河蚌、田螺等水生动物,以形成良好的水生态平衡系统。初步估算,在该水体生态净化方案下,南湖中总氮、总磷、氨氮的浓度将能到达甚至优于Ⅳ类水;而 COD 由于污染负荷入湖量较大,光靠水生动植物的净化 1 年内可能暂不能达标,需要采取管理手段对旅游污染源进行控制。

由于数据有限,本文只计算了年尺度的污染负荷,并以此为基础进行方案设计,未能考虑年内的水质变化,但方案可在年际间根据实测水质情况进行调整,如营养盐浓度显著降低时可将部分浮岛移出湖区。另外,由于旅游活动产生的入湖 COD 占入湖总量的比例高达 78%,需要相关部门联合加强管理,如通过在公园道路合理布设垃圾桶、控制入园人数等措施减少旅游污染入湖量。同时应加强水质监测,若发生水质恶化现象,可考虑人工绿藻打捞、人工引水冲淤等物理应急手段进行处理,以保证水生生态系统的自我恢复能力。

参考文献:

- [1] 齐延凯,孟顺龙,范立民,等. 湖泊生态修复技术研究进展[J]. 中国农学通报, 2019, 35 (26): 84-93. (QI Yankai, MENG Shunlong, FAN Limin, et al. Ecological restoration technology of lakes: research progress [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35 (26): 84-93. (in Chinese))
- [2] RAMESH D G, VAN DONK E. Lakes in the Netherlands, their origin, eutrophication and restoration; state-of-the-art review[J]. Hydrobiologia, 2002, 478 (1/2/3): 73-106.
- [3] 孙刚,盛连喜. 湖泊富营养化治理的生态工程[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 590-592. (SUN Gang, SHENG Lianxi. Ecological engineering for eutrophication control in lake[J]. The Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4): 590-592. (in Chinese))
- [4] 李如忠. 巢湖水环境生态修复探讨[J]. 合肥工业大学学报(社会科学版), 2002, 16(5): 130-133. (LI Ruzhong. Approach to restoration of water environmental ecosystem in Chaohu Lake[J]. Journal of Hefei University of Technology (Social Sciences), 2002, 16(5): 130-133. (in Chinese))
- [5] 陈开宁,包先明,史龙新,等. 太湖五里湖生态重建示范工程:大型围隔试验[J]. 湖泊科学, 2006, 18(2): 139-149. (CHEN Kaining, BAO Xianming, SHI Longxin, et al. Ecological restoration engineering in Lake Wuli, Lake Taihu; a large enclosure experiment [J]. Journal of Lake Sciences, 2006, 18(2): 139-149. (in Chinese))
- [6] 沙昊雷,章黎笋,陈金媛. 常州市白荡浜黑臭水体生态治理与景观修复[J]. 中国给水排水, 2012, 28(14): 74-78. (SHA Haolei, ZHANG Lisun, CHEN Jinyuan. Ecological treatment and landscape restoration of malodorous water in Changzhou Baidangbang [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28 (14): 74-78. (in Chinese))
- [7] 张海燕,唐迎洲,顾建英. 水生态系统净水效果研究进展评述[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(1): 79-86. (ZHANG Haiyan, TANG Yingzhou, GU Jianying. Progress review on the water purification effect of aquatic ecosystems [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(1): 79-86. (in Chinese))
- [8] 刘正文,张修峰,陈非洲,等. 浅水湖泊底栖-敞水生境耦合对富营养化的响应与稳态转换机理:对湖泊修复的启示[J]. 湖泊科学, 2020, 32(1): 1-10. (LIU Zhengwen, ZHANG Xiufeng, CHEN Feizhou, et al. The responses of the benthic-pelagic coupling to eutrophication and regime shifts in shallow lakes: implication for lake restoration[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(1): 1-10. (in Chinese))
- [9] 张琪,常鸣,王雪梅. 我国氮沉降观测方法进展及其在珠三角的应用[J]. 中国环境科学, 2017, 37(12): 4401-4416. (ZHANG Qi, CHANG Ming, WANG Xuemei. Advances in nitrogen deposition observation in China and its application in the Pearl River Delta [J]. China Environmental Science, 2017, 37 (12): 4401-4416. (in Chinese))
- [10] HAN Yuguo, FAN Yuntao, YANG Peiling, et al. Net anthropogenic nitrogen inputs (NANI) index application in mainland China[J]. Geoderma, 2014, 213: 87-94.
- [11] 彭秋桐,李中强,邓绪伟,等. 城市湖泊氮磷沉降输入量及影响因子:以武汉东湖为例[J]. 环境科学学报, 2019, 39(8): 2635-2643. (PENG Qiutong, LI Zhongqiang, DENG Xuwei, et al. Nitrogen and phosphorus deposition in urban lakes and its impact factors: a case study of East Lake in Wuhan [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(8): 2635-2643. (in Chinese))
- [12] 李家科,李怀恩,董雯,等. 西安市城区非点源污染特性与负荷估算[J]. 水力发电学报, 2012, 31(4): 131-138. (LI Jiake, LI Huaen, DONG Wen, et al. Estimation of non-point source pollution characteristics and loading in Xi'an urban areas [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(4): 131-138. (in Chinese))
- [13] 王圣瑞. 东江湖水环境[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 58-63.
- [14] 张金凤. 旅游活动对普者黑景区水环境的影响分析[J]. 唐山学院学报, 2011, 24(3): 37-39. (ZHANG Jinfeng. Study on the influence of tourist activities on water environment of Puzhehei scenic spot [J]. Journal of Tangshan College, 2011, 24(3): 37-39. (in Chinese))
- [15] 李亮亮,李亚,王辉. 普者黑景区生命周期研究[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2015, 24(3): 72-77. (LI Liangliang, LI Ya, WANG Hui. Research on the life cycle of Puzhehei scenic spot [J]. Journal of Huaihai Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2015, 24(3): 72-77. (in Chinese))
- [16] 王敬斌,邓香平,李艳红. 共产主义水库水源地污染源分析与保护措施[J]. 南昌工程学院学报, 2013, 32(6): 25-29. (WANG Jingbin, DENG Xiangping, LI Yanhong. Analysis of water pollution and protection measures in communist reservoir [J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2013, 32(6): 25-29. (in Chinese))
- [17] 刘建昌,余丽军,严岩,等. 泸沽湖水环境容量条件下的旅游容量和布局计量分析[J]. 资源科学, 2009, 31(6): 1022-1030. (LIU Jianchang, YU Lijun, YAN Yan, et al. Quantitative analysis on tourism carrying capacity in compliance with water environmental capacity of Luguhu Lake [J]. Resources Science, 2009, 31(6): 1022-1030. (in Chinese))
- [18] 郜志云,孙宏亮,刘伟江,等. 西部高原湖泊生态环境保护研究:以邛海为例[M]. 北京: 中国环境出版社, 2018: 69-78.
- [19] JENSEN M, LIU Zhengwen, ZHANG Xiufeng, et al. The

- effect of biomanipulation on phosphorus exchange between sediment and water in shallow, tropical Huizhou West Lake, China[J]. *Limnologia*, 2017, 63: 65-73.
- [20] ZHANG Xiufeng, LIU Zhengwen, LIU E, et al. Effects of benthic-feeding common carp and filter-feeding silver carp on benthic-pelagic coupling: implications for shallow lake management [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 88: 256-264.
- [21] 李兴, 徐效清, 勾芒芒. 内蒙古乌梁素海荷花种植对水环境的影响研究[J]. *环境与健康杂志*, 2018, 35(5): 457-459. (LI Xing, XU Xiaoping, GOU Mangmang. Impact of lotus planting on water environment in Wuliangsu Lake, Inner Mongolia [J]. *Journal of Environment and Health*, 2018, 35(5): 457-459. (in Chinese))
- [22] 张倩妮, 陈永华, 杨皓然, 等. 29 种水生植物对农村生活污水净化能力研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(3): 392-402. (ZHANG Qianni, CHEN Yonghua, YANG Haoran, et al. Study on the purification ability of 29 aquatic plants to rural domestic sewage [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(3): 392-402. (in Chinese))
- [23] 杜红霞, 王丽, 湛景武, 等. 不同湿地植物及其组配对富营养化水体的净化效果[J]. *环境污染与防治*, 2017, 39(6): 616-619. (DU Hongxia, WANG Li, ZHAN Jingwu, et al. Purifying effects on eutrophic water by different wetland plants and their configurations[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2017, 39(6): 616-619. (in Chinese))
- [24] 曾乐媛. 5 种水生植物对富营养水体的净化研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.
- [25] 陈照方, 陈凯, 杨司嘉. 水生植物对淡水生态系统的修复效果[J]. *分子植物育种*, 2019, 17(13): 4501-4506. (CHEN Zhaofang, CHEN Kai, YANG Sijia. Analysis of remediation effect of aquatic plants on freshwater ecosystem[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2019, 17(13): 4501-4506. (in Chinese))
- [26] 陈桐, 张毅敏, 高月香, 等. 鱼类、底栖动物和水生植物的不同组合对水质净化效果的原位围隔实验[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(10): 5511-5520. (CHEN Tong, ZHANG Yimin, GAO Yuexiang, et al. Different combination of fishes, benthic animals and aquatic plants control of eutrophication water bodies by mesocosm experiment [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(10): 5511-5520. (in Chinese))
- [27] 许铭宇, 刘雯, 陈平. 4 种水生动物对富营养化园林水体的净化效果[J]. *水科学与工程学报*, 2017(5): 3-7. (XU Mingyu, LIU Wen, CHEN Ping. The purification effect of four kinds aquatic animals for the eutrophic garden water [J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2017(5): 3-7. (in Chinese))
- [28] 卢晓明, 金承翔, 黄民生, 等. 底栖软体动物净化富营养化河水实验研究[J]. *环境科学与技术*, 2007, 30(7): 7-9. (LU Xiaoming, JIN Chengxiang, HUANG Minsheng, et al. Purification of eutrophic river water with benthic mollusks[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 30(7): 7-9. (in Chinese))
- [29] 李艳枫, 刘凌, 陈宁, 等. 一种新型的复合生态浮床及其对浮游植物群落结构的影响[J]. *水资源保护*, 2014, 30(2): 46-51. (LI Yanfeng, LIU Ling, CHEN Ning, et al. A new type of compound ecological floating bed system and its effect on phytoplankton community structure[J]. *Water Resources Protection*, 2014, 30(2): 46-51. (in Chinese))
- [30] 屠清瑛, 章永泰, 杨贤智. 北京什刹海生态修复试验工程[J]. *湖泊科学*, 2004, 16(1): 62-67. (TU Qingying, ZHANG Yongtai, YANG Xianzhi. Approaches to the ecological recovery engineering in Lake Shishahai, Beijing [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(1): 62-67. (in Chinese))
- [31] MARÍA A, GONZÁLEZ S, JEPPESEN E, et al. Does high nitrogen loading prevent clear water conditions in shallow lakes at moderately high phosphorus concentrations? [J]. *Freshwater Biology*, 2005, 50(1): 27-41.
- [32] 刘学迅, 王增立. 科学保护环境 依法管理资源: 北京市开展“渔业生态净水迎奥运”主题活动[J]. *中国水产*, 2008(6): 26. (LIU Xuexun, WANG Zengli. Scientifically protecting the environment and managing resources in accordance with the law: Beijing launches the theme activity of “fishery ecological water purification to welcome the Olympics” [J]. *China Fisheries*, 2008(6): 26. (in Chinese))
- [33] 朱木兰, 郭燕萍, 黄晓鸣, 等. 3 种水陆两栖植物在 LID 技术措施中的适宜性研究[J]. *水资源保护*, 2016, 32(1): 46-50. (ZHU Mulan, GUO Yanping, HUANG Xiaoming, et al. Study on suitability of three amphibian plants for LID technical measures [J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(1): 46-50. (in Chinese))
- [34] 王琦, 刘高慧, 肖能文, 等. 不同生物联合对滇池草海水质的净化作用[J]. *水资源保护*, 2020, 36(3): 89-97. (WANG Qi, LIU Gaohui, XIAO Nengwen, et al. Purification effect of combination of different organisms on water quality of Caohai of Dianchi Lake [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(3): 89-97. (in Chinese))
- [35] 成豪. 碳纤维草对小型封闭水体水质净化作用[J]. *水资源保护*, 2019, 35(1): 70-72. (CHENG Hao. Purification effect of carbon fiber grass on water quality of small closed water body [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(1): 70-72. (in Chinese))
- [36] 李志清, 吴苏舒, 诸晓华, 等. 石臼湖表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价[J]. *水资源保护*, 2020, 36(2): 73-78. (LI Zhiqing, WU Sushu, ZHU Xiaohua, et al. Distribution of nutrients and heavy metals in surface sediments of Shijiu Lake and its pollution assessment [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(2): 73-78. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-05-29 编辑: 胡新宇)