

王建富,辛玮光,张超,等.人工湖草型清水态生态系统构建技术研究与实践:以西北某新建人工湖为例[J].环境工程技术学报,2022,12(4):1105-1113.

WANG J F,XIN W G,ZHANG C,et al.Research and practice on the construction technology of macrophytes-dominated clear water ecosystem in the artificial lake: taking a new artificial lake in the northwest as an example[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(4): 1105-1113.

人工湖草型清水态生态系统构建技术研究与实践

——以西北某新建人工湖为例

王建富¹,辛玮光¹,张超¹,刘鸿渐¹,李娜¹,惠介龙²,李颖²

1.北京清华同衡规划设计研究院有限公司

2.西安昆明池投资开发有限公司

摘要 基于湖泊生态修复理论和已有工程案例成果,提出了新建人工湖草型清水态生态系统构建的方法,即通过生境条件优化,水生动物、水生植物、微生物系统构建,同时定期观测调试和维护管理,形成以沉水植物为核心,具有较强抵抗能力和自我恢复能力的草型清水态生态系统。以西北某新建人工湖为例,采用提出的方法构建了水生态系统,该人工湖运行1年后主要水质指标(除TN外)基本达到GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅲ类水质标准;湖内广泛分布有光叶眼子菜、黑藻等5种沉水植物,沉水植物对污染物具有较好的净化效果,形成了较稳定的草型清水态生态系统。

关键词 人工湖;草型清水态生态系统;水生植物;水生动物;治理成效

中图分类号:X524 文章编号:1674-991X(2022)04-1105-09 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20210392

Research and practice on the construction technology of macrophytes-dominated clear water ecosystem in the artificial lake: taking a new artificial lake in the northwest as an example

WANG Jianfu¹, XIN Weiguang¹, ZHANG Chao¹, LIU Hongjian¹, LI Na¹, HUI Jielong², LI ying²

1.Beijing Tsinghua Tongheng Urban Planning and Design Institute

2.Xi'an Kunming Lake Investment and Development Co., Ltd.

Abstract According to the lake ecological restoration theory and engineering practice cases, the construction technology of macrophytes-dominated clear water ecosystem of a new artificial lake was proposed. Through the habitat optimization and the construction of aquatic animals, aquatic plants and microbial systems, as well as regular observation, debugging and maintenance management, a macrophytes-dominated clear water ecosystem was formed with submerged plants as the core, which had strong resistance and self-recovery capabilities. Taking an artificial lake in the northwest as an example, the proposed method was used to construct a water ecosystem. After one year of operation, the main water quality indexes (except TN) reached Class III water quality standard of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002). In the lake, 5 submersed aquatic plants were widely distributed, such as *Potamogeton lucens* Linn and *Hydrilla verticillata*, and had a good reduction effect on pollutants. And a stable macrophytes-dominated clear water ecosystem was realized.

Key words new artificial lake; macrophytes-dominated clear water ecosystem; aquatic plant; aquatic animals; governance effect

随着城市经济社会的发展及城市化进程的不断加快,许多缺少湖泊的城市新建人工湖,并将其作为城市的重要生态节点,以适应城市的发展,满足人们对生态环境改善、人居环境提升的需求。人工湖与自然湖泊相比,除了具有在维护生物多样性、调节局

部小气候、涵养水源、净化水质、防洪减灾等生态方面的功能外,在美化城市、休闲娱乐等人文景观方面的功能也很突出^[1]。但由于城市的特殊环境,人工湖往往存在补水水源单一且水质缺乏保障、生态系统脆弱、自净能力不足、相对封闭、藻华易暴发等问

收稿日期:2021-08-10

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07302002-008)

作者简介:王建富(1989—),男,工程师,硕士,主要从事水环境综合治理、海绵城市、排水防涝研究,964534101@qq.com

题,水体更易受到污染。国内外在人工湖生态修复与治理方面进行了大量的研究和实践^[2-8];国外主要通过截污,强化湖泊流域管理,以自然恢复为主、辅助人工强化的措施治理水体,已有较多成功案例,如美国摩西湖的治理;国内自从设立国家水体污染控制与治理科技重大专项以来,陆续在全国开展了湖泊生态修复方面的研究和示范工程,并在某些湖泊(如武汉月湖和莲花湖、成都锦城湖)取得明显治理效果。湖泊水生态系构建是湖泊水环境系统治理的重要一环,其相关研究也是湖泊治理领域的热点问题之一,对于人工湖来讲,构建完善稳定的水生态系统,对提高水体自净能力、增加生物多样性、改善水质等具有重要作用。目前湖泊水生态系统构建方面理论日渐完善^[1,9-13],但因各地区自然因素、本底情况不同,应用于人工湖的水生态系统的理论分析、优化设计、实施推进、运维管理等仍需进一步深入研究,并在实践中不断优化。

湖泊生态修复理论主要包括多稳态理论、营养盐浓度限制理论和生物操纵理论。水生态系统构建基于湖泊生态修复理论开展^[9,14],将湖内生态系统分为草型清水和藻型浊水 2 种状态^[14],对于水质要求高、本底条件较好的水体,可采用草型清水态生态系统构建方法。草型清水态生态系统以沉水植物为核心,水生动物和微生物为辅助,水中生物共生,形成较完整的食物链^[9],并具有稳定性、可持续性和自然性等特点,其在国内外湖泊生态修复中均有成功案例^[2-8]。笔者探讨新建人工湖草型清水态生态系统的构建方法,并应用于西北某新建人工湖,以期为其他类似湖泊修复提供借鉴与参考。

1 人工湖的特点及修复需求

1.1 人工湖的特点

人工湖是指人类经济活动所造成的湖泊,它是城市重要的水体形态,对城市的发展和建设起着重

要的作用^[15]。根据功能分类,城市湖泊分为汇水蓄洪式、区域水源式、休闲游娱式和生态栖息地式 4 种类型^[16],人工湖从功能上更接近于前 3 种类型,其面积较小,且多分布在城市的郊区及近郊周边。人工湖的区位条件往往使其面临耐污染负荷能力较差、湖体相对封闭、生态系统脆弱等客观问题,且由于城市化进程的加快推进,城市再生水逐步替代天然水成为城市河湖水体的主要补给水源^[17],导致人工湖补水水源单一且水质缺乏保障,同时城市中大量雨水径流和污水处理厂尾水直排入湖,使人工湖水体受到污染^[16]。因此,与远离城区的自然湖泊相比,虽然人工湖的主要修复机理与自然湖泊相似,但具有易污染、污染出现时间早、污染程度重、治理难度大、生物多样性低等特点。

1.2 人工湖的修复需求

人工湖作为城市的重要生态节点,除了具有区域调蓄、水质净化、水源涵养等功能外,更突出生态景观、休憩娱乐的功能。在修复需求上,除了改善湖内水质外,提高湖水的感官度、维持生长状况良好的水生动植物群落等也十分重要。同时,还需将景观设计理念融入到湖泊生态修复中,实现生态措施景观化,提高整体景观效果。

2 人工湖草型清水态生态系统构建方法

针对人工湖特点与生态修复需求,除了控制外源污染排入和补充干净的来水外,重点要构建完善的水生态系统,以增加水体环境容量,提高水体自净能力。基于对本底水质、生境条件、生物多样性和水体景观状况的调查,通过基底改良、增氧推流曝气、提高水体透明度、净化来水等手段优化生境条件,构建水生动物、植物群落,形成良好的食物链,最终建立以沉水植物为核心的草型清水态生态系统,其技术路线如图 1 所示。

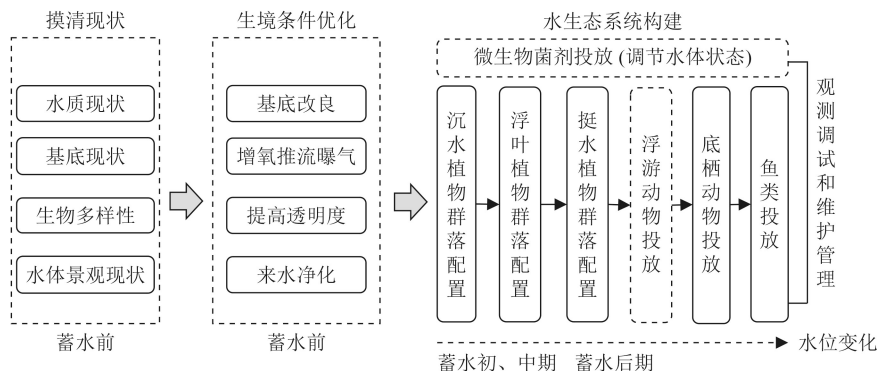


图 1 人工湖水生态系统构建思路

Fig.1 Ideas for water ecosystem construction of artificial lake

2.1 生境条件优化

生境条件优化是水生态系统构建的基础^[18-20]。将生境条件与水生态系统结构结合考虑,使生境条件能满足水生植物生长的要求。由于新建人工湖的基底沉积淤泥较少,属于贫营养底质,可将基底改良、控制来水水质和提高水体透明度作为生境条件优化的重点措施。基底改良需根据现场基底情况,配合泼洒土壤改良剂,合理实施;控制来水水质可通过选择水质较好的水源,若来水水质不满足入湖要求,对其进行处理后再入湖,避免因来水携带较高浓度的TN、TP等营养盐而引起藻类大量繁殖,不利于水生植物生长^[21-22];可通过采用临时性措施提高水体透明度,结合水位调控,短期内降低水体浊度,以满足水生植物对光照强度的需求。

2.2 水生植物群落构建

水生植物群落是水生态系统的核心^[1,9]。根据水生植物的生态特征不同,结合生境条件,合理地组合配置,形成生态位和生态结构的互补共生^[23],构建稳定的水生植物群落。参考本地水生植物名录,在相关研究^[23-26]的基础上,根据人工湖的水深、透明度、水质等生境条件,选择具有与生境条件相匹配的不同生活型、生长型、光照需求、繁殖特性等植物特性的水生植物。如在水深变化较大的情况下,篦齿眼子菜、刺苦草可通过改变生长形态,以更好地适应水深变化;而菹草在夏季温度高时,形成大量非冬眠型石芽,当温度降低时石芽萌发,开始生长。

2.2.1 水生植物选择

水生植物按照生态习性分为挺水、浮叶、漂浮和沉水植物4种生活型^[9]。根据不同湖区的生境条件,选择适宜生长的不同生活型的水生植物。如湖内进水口区域选择耐水流、适应能力强水生植物;湖湾区域选择净化效果好、化感能力强且具有一定景观功能的水生植物;湖心深水区选择适应能力强、分蘖能力强的沉水植物。

2.2.2 水生植物配置

在水生植物群落空间布局上,从垂直结构和水平分布2个维度考虑不同水生植物对生境条件的适应性。垂直结构设计是基于影响垂直分布的基本形态、光照需求、景观效果等植物特性,对上层漂浮植物、下层沉水植物和湖滨挺水植物进行配置,也可将沉水植物按照直立型、底栖型、莲座型、冠层型的生长型进行配置^[23];水平分布设计是基于湖区生境条件、水质要求、景观要求进行区域划分,确定不同水深、不同功能的区域,再根据水生植物的生活型进行配置。同时,结合影响水平空间分布的水流流速、耐污性、生长周期、繁殖特征等主要因素,在湖岸形态

较规则、生境条件相近的湖区,由湖岸浅水区向湖心深水区,按带状分布设计^[27],依次布设挺水植物群落、浮叶植物群落、沉水植物群落。在水生植物群落配置过程中,可根据水生植物对氮、磷净化能力的研究成果和工程案例,结合水质净化目标,对人工湖水生植物去除氮、磷量进行估算,得到合理的水生植物种植密度,并确定水生植物种植的生物量^[9,27]。

2.2.3 种植时间及次序

水生态系统构建初期,将沉水植物作为核心组建适宜量先锋群落,避免因先锋群落过量导致群落结构失衡^[9,26],之后根据生长情况逐渐增加或补种其他沉水植物。随着蓄水水位上升,在沿岸浅水区构建浮叶和挺水植物群落,同时减少或不配置漂浮植物,避免阻挡光照,挤压生态位,影响沉水植物生长。伴随湖内水生植物群落生长演替,生境条件也随之改变,高等水生植物群落逐渐成为优势群落,生态系统逐渐稳定,尤其在湖心区形成以沉水植物为核心的“水下森林”。

2.3 水生动物群落构建

水生动物群落构建是水生态系统良性循环的必要条件。水生动物群落构建方法分为经典操纵理论和非经典操纵理论,前者利用浮游动物控制水体藻类,后者利用鲢、鳙鱼控制蓝藻^[28]。对于水质较好的新建人工湖,构建以鱼类群落为核心的水生动物群落,应结合水生动物群落构建理论,通过合理设计食物链,调控浮游动物与滤食性鱼类,达到控藻的目的。

2.3.1 水生动物种类筛选

根据生物种群间的关系,结合鱼类、大型底栖动物的生活空间和食性的差异性,从本地物种中筛选出合适的鱼类和底栖动物构建合理的食物链,保证水生动物在栖息空间和食性方面的互补,使其能充分利用水体空间。通过整理相关文献^[28-30],总结出几种不同食性和生态位的常见鱼类和大型底栖动物,如表1所示。

2.3.2 水生动物投放

根据湖内水温、水深、水流等本底条件,尤其是因营养结构不同而形成的特有结构,同时考虑鱼类对湖泊生态的影响来调节鱼类放养比例。可参考本底条件相似湖泊的鱼类投放情况,进行调整和投放^[29]。在水生态系统构建过程中,对系统内的水生动物情况进行监测调试,以实现湖泊水生态系统修复的目标。如在水生态系统构建初期,先保证水生植物生长良好,再投放少量滤食性鱼类,以避免扰动基底^[12],影响植物生长;构建后期,根据鱼类生长情况投放肉食性鱼类,达到控制藻类和浮游动物数量的目的。

表 1 几种常见鱼类和大型底栖动物

Table 1 Several common fish and large benthic animals

生态位	滤食性	草食性	杂食性	腐屑食性	底栖食性	肉食性
中上层	鳙鱼 (<i>Hypophthalmichthys nobilis</i>)、鲢鱼 (<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>)					鲃鱼(<i>Anabarrilius</i>)
中下层		草鱼 (<i>Ctenopharyngodon idella</i>)、鳊鱼 (<i>Parabramis pekinensis</i>)				鲶鱼(<i>Silurus asotus</i>)
底层	铜锈环棱螺(<i>Bellamyia aeruginosa</i>)、背角无齿蚌 (<i>Anodonta woodiana</i>)、梨形环棱螺(<i>Bellamyia purificata</i>)		鲤鱼(<i>Cyprinus carpio</i>)、鲫鱼 (<i>Carassius auratus auratus</i>)	黄尾密鲴 (<i>Xenocypris davidi</i> <i>Bleeker</i>)	青鱼 (<i>Mylopharyngodon piceus</i>)	鳊鱼(<i>Siniperca chuatsi</i>)、乌鳢 (<i>Channa argus</i>)
			青虾(<i>Macrobrachium nipponense</i>)、耳萝卜螺(<i>Radix auricularia</i>)、青虾			黄颡鱼(<i>Pelteobagrus fulvidraco</i>)

2.3.3 投放时间次序

在水生态系统构建初期,待水生植物根部稳固后,按照由少及多、少量多次的原则投放水生动物。优先投放养蚌、螺等底栖动物净化水质,然后投放滤食性鱼类,最后根据鱼类数量投放肉食性鱼类,并谨慎投放草食性鱼类。

2.4 微生物群落构建

微生物群落是调节生态系统状态的重要因素。常用的微生物包括芽苞杆菌、光合细菌、多种混合菌(EM菌)等^[31-33],其可作为临时应急手段,用于提高水体溶解氧浓度,降低有机污染物和氮、磷营养盐浓度,抑制有害微生物,维持水生态系统的平衡。在水生态系统构建过程中,根据水质、水生植物生长需要,投放相应的微生物菌剂。如当湖泊水体暴发水华时,在每日 08:00—10:00 投放光合细菌制剂 A、有机矿化芽孢杆菌制剂 B,持续投放 57 d,治理后水质改善良好,感官效果大幅度提高,藻类水华消失,透明度提升,不良气味消失^[34]。

2.5 维护管理

维护管理是水生态系统构建的重要保障。在新建人工湖生态系统初步形成后,需经过一段时间,使水生生物与环境逐渐磨合,生态系统逐渐稳定。在生态系统构建的全过程,应加强管理维护,构建完善的应急处理机制,确保水生态系统的良好状态,尤其要避免因水草或水源携带外来物种而对水生植物的生长产生不利影响。

3 人工湖草型清水态生态系统构建实践

3.1 研究区概况

研究区为西北某公园新建人工湖(图 2),该人工

湖是未来开挖水库的试验段,湖面面积为 707 hm²(未来水库面积的 1/22),平均水深为 3.67 m,岸线总长 3.5 km,总蓄水量为 155 万 m³。该湖有 1 个进水口和出水口,补水水源为上游渠道引河道水,由暗管自流入湖,湖水停留时间为 77.5 d。该人工湖于 2018 年 5—8 月完成蓄水。

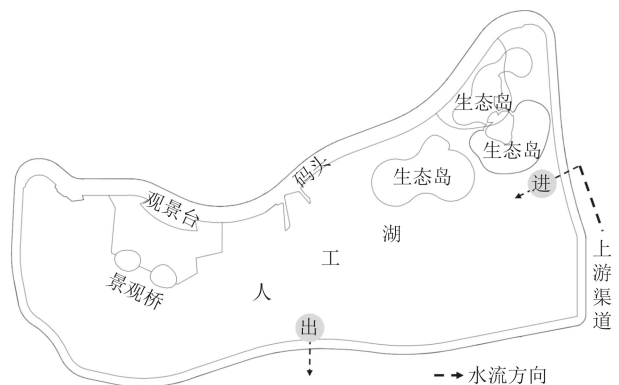


图 2 西北某人工湖现状示意

Fig.2 Schematic diagram of the status of the artificial lake in northwest China

人工湖水生态系统构建之前,研究区存在的主要环境问题:1)蓄水后正处 2018 年春夏季,水体 COD、NH₃-N、TP 指标处于 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅳ类, TN 浓度超过 V 类标准,并有恶化趋势,水体透明度差(低于 1 m), Chla 平均浓度为 49.1 μg/L,处于富营养化状态;2)唯一的补水水源为上游渠道引河道水,其 TN 和 TP 浓度均为劣 V 类,严重超标;3)湖内缺少自然基质,且大部分区域水深超过 3 m,生境条件不佳,水生植物自然生长繁衍难度大;4)高温季节,氮、磷等污染物浓度超标严重,水体流动性不足,水华暴发风险高。

3.2 人工湖水生态系统构建方案

根据生态环境部门考核要求,对该人工湖提出了 2019 年水质稳定在地表水Ⅲ类(TN 除外),水体透明度达 1.2 m, 2020 年水体透明度达 1.5 m 以上的治理目标;且修复后人工湖生态系统具有良好的自净能力,实现生态提升、水质净化、生态景观三大功能相融合。

该人工湖生态系统构建的技术路线如图 3 所

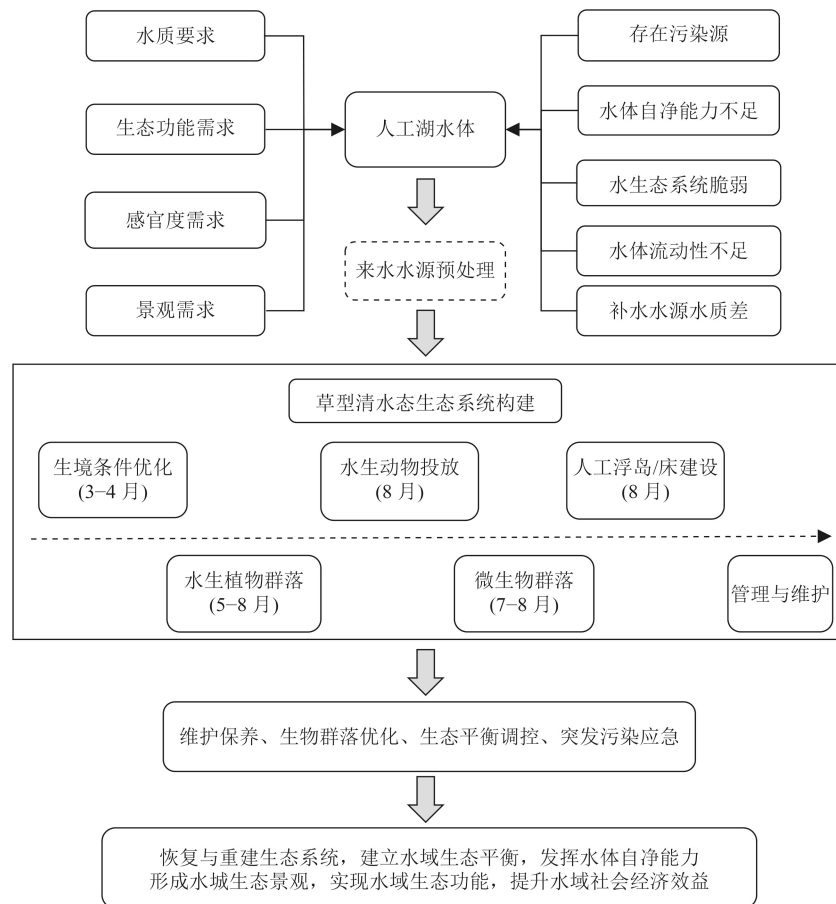


图 3 西北某人工湖水生态系统构建技术路线

Fig.3 Technical route for aquatic ecosystem construction of the artificial lake in northwest China

3.2.1 基底改良与透明度提升

湖底基质现状以砂质土壤为主,采用土壤优化剂,配合基底翻整,以优化种植土壤,提高底质生物活性。基底改良面积共 47 hm²。在蓄水初期,平均水深为 0.5 m,通过对来水进行预处理,提升人工湖水质;同时针对局部区域水体浑浊情况,泼洒少量絮凝剂,提升水体透明度。

3.2.2 湖内水动力提升

在水体流速低的区域增设了 16 套推流曝气设备(图 4),以扩大水体流速大于 0.1 m/s 的湖区面积,并增加水体溶解氧浓度。

3.2.3 水生植物群落配置

根据已有文献^[15-18]中关于水生植物生长特性、

示。首先对人工湖的现状条件进行调查,分析生态环境现状存在的问题;根据水质、生态功能和景观方面的要求,提出对水质差的来水进行预处理;同时通过生境条件优化,科学合理地配置水生植物群落;并投放水生动物,配置微生物群落,增设人工浮岛/床,完善消费者和分解者的水体食物链网,促使形成稳定健康的草型清水态生态系统。

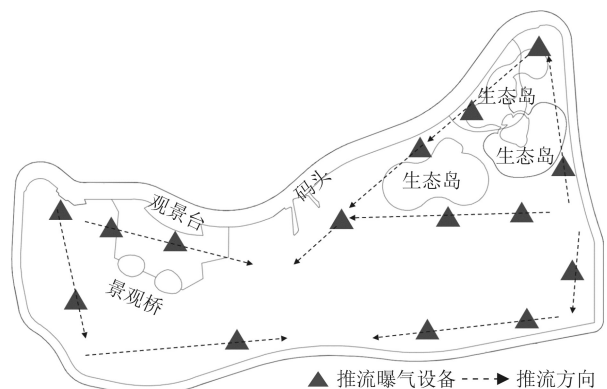


图 4 西北某人工湖推流曝气设备位置示意

Fig.4 Diagram of push flow aeration equipment location of the artificial lake in northwest China

景观性、净化功能等方面的资料,结合对本地河湖水生植物调研的成果,筛选出香蒲、芦苇、花叶芦竹、睡莲、光叶眼子菜、金鱼藻、穗状狐尾藻、苦草、黑藻、伊乐藻、篦齿眼子菜、微齿眼子菜、菹草、马来眼子菜等本土水生植物作为配置主体。根据湖体水位和水流等生境条件,重点在感官效果和景观效果要求高的区域进行配置(图 5)。



图 5 西北某人工湖沉水植物建群种配置示意

Fig.5 Configuration of submerged macrophyte communities of the artificial lake in northwest China

该人工湖种植的水生植物面积为 34.2 hm^2 ,以水深为界限,植物群落配置如下:1)水深小于 0.50 m 的区域,主要配置挺水植物和浮叶植物,种植面积为 0.6 hm^2 。水生植物沿驳岸点缀,按丛配置,高层种植芦苇、花叶芦竹,中层种植鸂尾、再力花、黄菖蒲等。2)水深为 0.50~3.67 m(不含 3.67 m)的区域,主要为沿岸带,包括进水口、湖湾区。该区域东北部为静水的湖湾区,点缀挺水植物荷花以及睡莲、水鳖等浮叶植物,种植面积约 3.6 hm^2 。在沿岸区域配置苦草、黑藻等沉水植物,面积约 6.8 hm^2 。3)水深 3.67 m 及以上水域。该区域为湖心区,种植面积为 23.2 hm^2 ,以光叶眼子菜、苦草、伊乐藻、金鱼藻等沉水植物为主,配置夏秋型和春冬型沉水植物混合的群落,使湖中四季常绿,不配置漂浮植物以避免其过量繁殖遮蔽阳光,影响沉水植物生长。

按照人工湖的蓄水计划,在 5 月初首先采用扦插和抛投的方式在湖心区种植沉水植物,待植物生长稳定时,逐步在沿岸区域种植浮叶、挺水植物。水生植物配置如表 2 所示。

3.2.4 水生动物群落配置

根据人工湖内情况,考虑食物链及物种间营养关系,选取适宜水生动物,构建以鱼类群落为主的水生动物群落。投放的鱼类以滤食性和肉食性鱼类为主,其中白鲢投放量为 80 尾/ hm^2 (50 g/尾),花鲢为

表 2 西北某人工湖主要水生植物群落配置

Table 2 Disposition of aquatic plant communities of the artificial lake in northwest China

水深/m	植物类型	群落组成	种植密度	种植面积/ hm^2
0~0.50	挺水植物	再力花	4丛/ m^2 , 12芽/丛	0.1
		芦苇	20株/ m^2	0.2
		黄菖蒲	16丛/ m^2 , 3芽/丛	0.3
0.50~3.67	浮叶植物	睡莲	0.5头/ m^2	3.6
≥ 3.67	沉水植物	光叶眼子菜	5丛/ m^2 , 3芽/丛	7.2
		苦草	18丛/ m^2 , 2株/丛	6.8
		伊乐藻	8丛/ m^2 , 15芽/丛	7.0
		金鱼藻	2丛/ m^2 , 3芽/丛	9.0

120 尾/ hm^2 (50 g/尾),乌鳢为 10 尾/ hm^2 (40~60 g/尾)。投放的底栖动物以滤食性双壳类和刮食性螺类为主,按照背角无齿蚌 15 kg/hm^2 (50~200 g/只),铜锈环棱螺 10 kg/hm^2 (3~6 只/ m^2)的标准投放。

3.2.5 微生物菌剂投放

投放的微生物以微生态调节菌群和透明度调节菌群为主,其中微生态调节菌群包含芽孢杆菌、微小杆菌、光合细菌、铁细菌、硝化菌等共生菌群,透明度调节菌群包含芽孢杆菌和溶藻菌等。

3.2.6 维护管理

通过水位调控、水面保洁和水生态系统维护,维持水生态系统的稳定。水位调控通过上游来水渠道补水口的启闭实现,暴雨时及时开闸排水,中雨时通过溢流管排水,如来水水质恶化,可采用临时一体化设备进行处理。水面保洁是对水面及水生植物生长区域内的枯枝落叶、动植物残体、垃圾等杂物进行清理,采用常规网捕,1天清理 1~2 次。水生态系统维护是维护管理工作的核心,主要包括水生动物定期调查、水质监测、水生动植物养护、水质保持,其中水生动植物养护工作是重点。水生植物养护主要包括青苔清除、残体清理、水生植物收割和种类调整、病虫害治理,水生动物养护主要包括苗种控制、水生动物生长形态追踪等。

3.3 修复效果

该人工湖于 2018 年 8 月初步完成水生态系统构建,2019 年 8 月开始运行。运行 1 年后,在湖内设置 54 个采样点,调查了沉水植物群落构成与位置分布,结果如图 6 所示。现状沉水植物的种类、分布、密度与构建初期相比差异显著,湖内存在光叶眼子菜、篦齿眼子菜、穗状狐尾藻、伊乐藻等 10 种沉水植物,其中光叶眼子菜、穗状狐尾藻、金鱼藻、黑藻、伊乐藻分布广泛;全湖的苦草、眼子菜属景观效果最佳,尤其是位于东北部湖湾区的微齿眼子菜长势与



(a) 水生植物分布

(b) “水下森林” 实景

图 6 西北某人工湖水生植物分布与生长状况

Fig.6 Distribution and growth of aquatic plants in the artificial lake in northwest China

景观效果最好。

2019 年 8 月—2020 年 8 月的水质监测结果(图 7)显示, 该人工湖生态系统构建后, 水体透明度显著提高, 达到 1.5 m 以上, 水体 COD 及 NH₃-N、TP 浓度基本达到 GB 3838—2002 Ⅲ类水质标准。人工湖出

水 COD 及 NH₃-N、TN、TP 浓度全年平均值分别较进水下下降 14、30、58、63 个百分点, 并计算得到对应的沉水植物削减 COD、NH₃-N、TN、TP 污染物能力分别为 373、7.27、116、1.3 mg/(m²·d)。

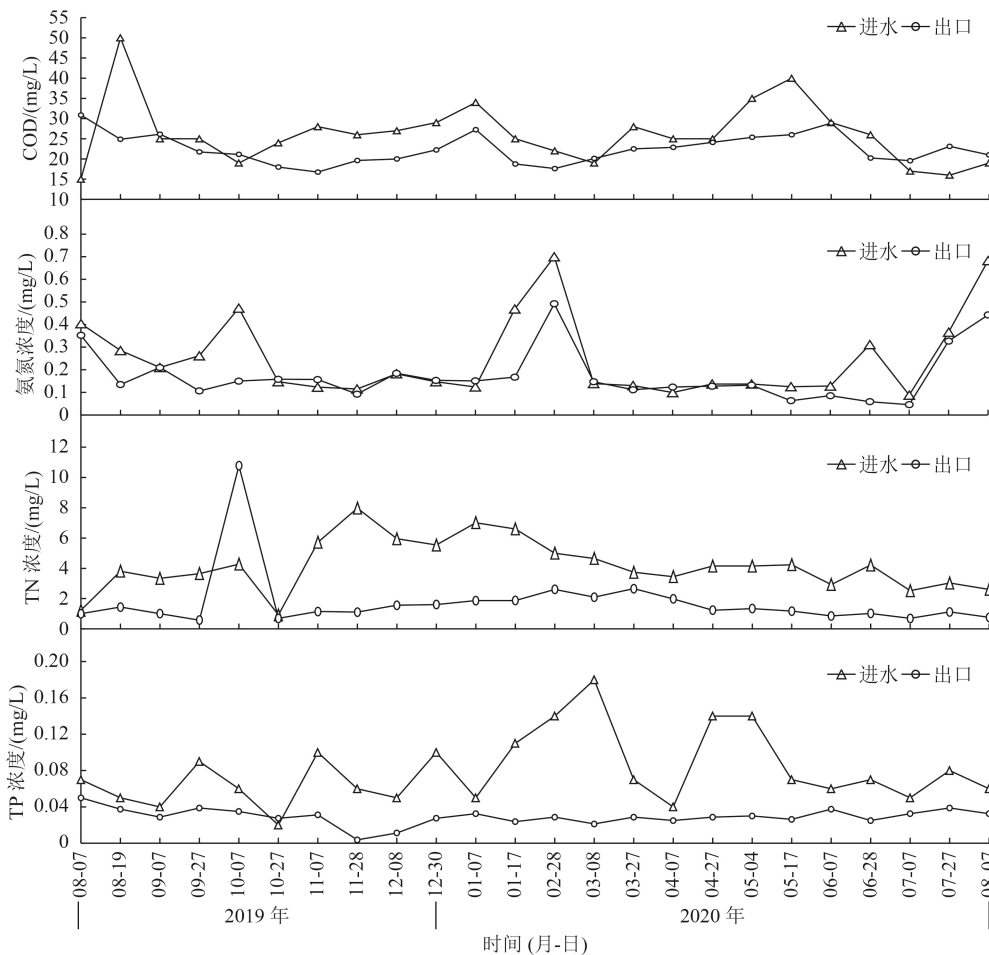


图 7 2019 年 8 月—2020 年 8 月人工湖进出水水质变化

Fig.7 Variation of inflow and outflow water quality of the artificial lake from August 2019 to August 2020

4 结语

(1) 针对人工湖耐污染负荷能力较差、湖体相对

封闭、生态系统脆弱等问题, 提出了摸清现状、生境条件优化、水生植物群落构建、水生动物群落构建

以及维护管理 5 个实施步骤。生境条件优化是基础,包括基底改良和水动条件提升,必要时提升水体透明度,来保证水生植物正常生长;水生植物群落构建是核心,选取适宜的水生植物,按垂直和平面空间进行配置,并根据时序安排种植;水生动物群落构建是良性循环的必要条件,根据种群间营养关系构建合理的食物链,合理投放水生动物;在人工干预和管理维护下,逐步形成稳定的草型清水态生态系统。

(2)以西北某新建人工湖为例,进行了水生态系统构建,具体内容包括基质改良、增设推流曝气设备、配置水生植物、投放水生动物、投加微生物菌剂。水生态系统构建后运行 1 年取得了较好的效果,水体透明度达到了 1.5 m 以上,水质指标(TN 除外)基本达到 GB 3838—2002 III 类水质标准。

参考文献

- [1] 杨程, 马剑敏. 城市湖泊生态修复及水生植物群落构建研究进展[J]. *长江科学院院报*, 2014, 31(7): 13-20.
YANG C, MA J M. Research progress of ecological restoration and aquatic plant community construction for urban lake[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, 31(7): 13-20.
- [2] 宋菲菲, 胡小贞, 金相灿, 等. 国外不同类型湖泊治理思路分析与启示[J]. *环境工程技术学报*, 2013, 3(2): 156-162.
SONG F F, HU X Z, JIN X C, et al. Analysis of lake management strategies of different types of lakes abroad and enlightenments for China[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2013, 3(2): 156-162.
- [3] 姜霞, 王书航, 杨小飞, 等. 蠡湖水环境综合整治工程实施前后水质及水生态差异[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(6): 595-601.
JIANG X, WANG S H, YANG X F, et al. Change in water quality and ecosystem of Lihu Lake before and after comprehensive water environmental improvement measures[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(6): 595-601.
- [4] BLAHLNIK T, DAY J. The effects of varied hydraulic and nutrient loading rates on water quality and hydrologic distributions in a natural forested treatment wetland[J]. *Wetlands*, 2000, 20(1): 48-61.
- [5] 夏朋, 刘蓓. 国外水生态系统保护与修复的经验及启示[J]. *水利发展研究*, 2011, 11(6): 72-78.
- [6] 马剑敏, 成水平, 贺锋, 等. 武汉月湖水生植被重建的实践与启示[J]. *水生生物学报*, 2009, 33(2): 222-229.
MA J M, CHENG S P, HE F, et al. Practice and implication of establishing aquatic vegetation in Lake Yuehu in Wuhan, China[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2009, 33(2): 222-229.
- [7] 马剑敏, 贺锋, 成水平, 等. 武汉莲花湖水生植被重建的实践与启示[J]. *武汉植物学研究*, 2007, 25(5): 473-478.
MA J M, HE F, CHENG S P, et al. Practice of establishing aquatic vegetation in Lake Lianhuahu in Wuhan, China[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2007, 25(5): 473-478.
- [8] 王书航, 郑朔方, 尚晓, 等. 平原河网景观湖泊水质提升关键问题分析与对策研究: 以嘉兴南湖为例[J]. *环境工程技术学报*, 2020, 10(6): 891-896.
WANG S H, ZHENG S F, SHANG X, et al. Key issues of water quality improvement in the landscape lake of plain river network and corresponding countermeasures: a case study of Nanhu Lake in Jiaxing City[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(6): 891-896.
- [9] 高学平, 杨蕊, 张晨. 人工湖水生态系统构建方法研究[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(2): 948-954.
GAO X P, YANG R, ZHANG C. Study on the aquatic ecosystem design method of artificial lakes[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(2): 948-954.
- [10] YE C, LI C H, YU H C, et al. Study on ecological restoration in near-shore zone of a eutrophic lake, Wuli Bay, Taihu Lake[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(9): 1434-1437.
- [11] MOSS B. Engineering and biological approaches to the restoration from eutrophication of shallow lakes in which aquatic plant communities are important components[J]. *Hydrobiologia*, 1990, 200/201(1): 367-377.
- [12] 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 Y K, MENG S L, FAN L M, et al. Ecological restoration technology of lakes: research progress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(26): 84-93.
- [13] 徐恩兵, 严海旭, 王楠, 等. 清水型生态系统应用于马鞍山秀山湖富营养化水体的研究[J]. *环境工程*, 2017, 35(增刊): 310-313.
XU E B, YAN H X, WANG N, et al. Research on application of ecological restoration technique in treatment of eutrophic water in the Xiushan Lake of Ma'an Shan[J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(Suppl): 310-313.
- [14] 赵磊, 刘永, 李玉照, 等. 湖泊生态系统稳态转换理论与驱动因子研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(10): 1697-1707.
ZHAO L, LIU Y, LI Y Z, et al. Survey on theory and driving factors of regime shifts on lake ecosystems[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(10): 1697-1707.
- [15] 郑华敏. 论城市湖泊对城市的作用[J]. *南平师专学报*, 2007, 26(2): 132-135.
ZHENG H M. On function to the city from urban lake[J]. *Journal of Nanping Teachers College*, 2007, 26(2): 132-135.
- [16] 徐后涛, 赵风斌, 张玮, 等. 城市人工湖的生态治理[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(9): 4300-4308.
XU H T, ZHAO F B, ZHANG W, et al. Ecological management of urban artificial lake[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(9): 4300-4308.
- [17] 张瑞, 刘操, 孙德智, 等. 北京地区再生水补给型河湖水质改善工程案例分析与问题诊断[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(12): 1872-1881.
ZHANG R, LIU C, SUN D Z, et al. Water quality improvement engineering for urban rivers and lakes supplied by reclaimed water in Beijing: case analysis and problem diagnosis[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(12): 1872-1881.

- [18] 方馨, 赵凤斌, 柴晓利, 等. 异龙湖沉水植物分布格局与水环境因子相关性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(3): 636-643.
FANG X, ZHAO F B, CHAI X L, et al. Relationship between the distribution of submerged plants and water environment factors in Yilong Lake[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(3): 636-643.
- [19] CHEN X L, PELTIER E, STURM B S M, et al. Nitrogen removal and nitrifying and denitrifying bacteria quantification in a stormwater bioretention system[J]. *Water Research*, 2013, 47(4): 1691-1700.
- [20] 张忠海, 杨桐, 王昊, 等. 洱海四种沉水植物对弱光环境的适应性比较[J]. 湖泊科学, 2021, 33(4): 1196-1208.
ZHANG Z H, YANG T, WANG H, et al. Comparative study on the adaptability of four submerged macrophytes to low light environment in Lake Erhai[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(4): 1196-1208.
- [21] ERVIN G N, WETZEL R G. An ecological perspective of allelochemical interference in land-water interface communities[J]. *Plant and Soil*, 2003, 256(1): 13-28.
- [22] 陈怀艳. 滨岸带微生境特征与水体主要水质指标的相关性分析[D]. 南京: 南京大学, 2016.
- [23] 郝孟曦. 江汉湖群主要湖泊水生植物多样性及群落演替规律研究: 以梁子湖、长湖、斧头湖及涨渡湖为例[D]. 武汉: 湖北大学, 2014.
- [24] 纪海婷, 谢冬, 周恒杰, 等. 沉水植物附植生物群落生态学研究进展[J]. 湖泊科学, 2013, 25(2): 163-170.
JI H T, XIE D, ZHOU H J, et al. Advances in ecological research on epiphytic community of submerged macrophytes[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25(2): 163-170.
- [25] 刘洋, 付文龙, 操瑜, 等. 沉水植物功能性状研究的思考[J]. 植物科学学报, 2017, 35(3): 444-451.
LIU Y, FU W L, CAO Y, et al. Study on the functional traits of submerged macrophytes[J]. *Plant Science Journal*, 2017, 35(3): 444-451.
- [26] 张晓姣, 朱金格, 刘鑫. 浅水湖泊沉水植物调控技术研究进展[J]. 净水技术, 2018, 37(12): 46-51.
ZHANG X J, ZHU J G, LIU X. Research development in controlling technology for submerged aquatic plants in shallow lakes[J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(12): 46-51.
- [27] 王洪铸, 宋春雷, 刘学勤, 等. 巢湖湖滨带概况及环湖岸线和水向湖滨带生态修复方案[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(增刊2): 62-68.
WANG H Z, SONG C L, LIU X Q, et al. Lakeshore overview of lake Chaohu and ecological rehabilitation schemes for shoreline and littoral zones[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(Suppl 2): 62-68.
- [28] 刘敏, 徐敏娟, 许迪亮, 等. 鲢、鳙非经典生物操纵作用的研究进展与应用现状[J]. 水生态学杂志, 2010, 31(3): 99-103.
LIU M, XU M X, XU D L, et al. Status quo and progress in research and application on nonclassical biomanipulation of silver carp and bighead carp[J]. *Journal of Hydroecology*, 2010, 31(3): 99-103.
- [29] 谢松光, 崔奕波, 李钟杰. 湖泊食鱼性鱼类渔业生态学的理论与方法[J]. 水生生物学报, 2000, 24(1): 72-81.
XIE S G, CUI Y B, LI Z J. Ecological studies on lake fisheries on piscivorous fishes: theory and methods[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000, 24(1): 72-81.
- [30] 王晓臣. 汉江(陕西段)鱼类种类与群落结构组成的时空变化研究[D]. 西安: 西北大学, 2013.
- [31] 李典宝, 胡振阳, 许铭宇, 等. 水下微生态系统构建及水体净化模拟研究[J]. 人民珠江, 2018, 39(6): 30-36.
LI D B, HU Z Y, XU M Y, et al. Construction of underwater micro-ecosystem and simulation of water purification[J]. *Pearl River*, 2018, 39(6): 30-36.
- [32] 杜聪, 冯胜, 张毅敏, 等. 微生物菌剂对黑臭水体水质改善及生物多样性修复效果研究[J]. 环境工程, 2018, 36(8): 1-7.
DU C, FENG S, ZHANG Y M, et al. Study on the improvement of water quality and biological diversity of black and odorous water by microbial inoculants[J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(8): 1-7.
- [33] HILT S, GROSS E M. Can allelopathically active submerged macrophytes stabilise clear-water states in shallow lakes[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2008, 9(4): 422-432.
- [34] 吴定心, 杨文静, 柯雪佳, 等. 利用复合微生物菌剂控制水华的治理工程试验[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(7): 150-154.
WU D X, YANG W J, KE X J, et al. Control of water blooms of urban eutrophic lake with compound microorganisms in restoration project[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(7): 150-154. ◇