

持续污染条件下的小微水体生态治理研究 ——以浙江大学华家池校区无名塘为例

陈奋飞¹, 马骏超^{1*}, 李华斌¹, 成 静¹, 盛 晟¹, 周 锋², 周隽逸¹

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 2. 杭州沁霖生态科技有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要:城区内景观类型的小微水体数量众多,但多数因其面积小、流动性差等特点,自净能力弱,易受外源污染影响,水质及感官指标较差,易于爆发藻类,常为黑臭水体。研究以浙江大学华家池校区无名塘为例,运用生态治理措施,构建仿自然生态系统,实现在外源污染物持续汇入条件下的小微水体治理。仿自然生态系统以生物滤床循环系统辅以曝气、底泥改良等措施构建生境,经典与非经典生物操纵重构生物群落。经过6个月的运行,面对暴雨、雨污混流排口渗漏等不利环境因素,无名塘的仿自然生态系统相较于传统生态治理措施的对照组(泥孔塘),透明度提升逾45 cm, COD_{Mn} , $\text{NH}_3\text{-N}$, TN , TP 和 Chl-a 分别削减23%, 82%, 66%, 61%和36%,水体整体感官度保持清澈见底状态,水质维持动态平衡,高等水生植物为主的水生态系统得以恢复。其治理效果良好,该试点工程可为后续城区景观小微水体治理提供示范和借鉴作用。

关键词:持续污染;小微水体;生态治理;仿自然生态系统;生物操纵

中图分类号:Q948.116;X522;X832 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-7380.2022.03.005

Study on ecological remediation of micro-water body with constant pollution inflow——taking Wumingtang of Huajiachi Campus of Zhejiang University as an example

Chen Fenfei¹, Ma Junchao^{1*}, Li Huabin¹, Cheng Jing¹, Sheng Sheng¹, Zhou Feng², Zhou Junyi¹

(1. Powerchina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China;

2. Ecoasis Ecosystem Corporation Limited, Hangzhou 310000, China)

Abstract: There were many landscape types of micro-water bodies in city, which are dirty and odorous because of their small area, poor mobility, and weak self-purification ability. These micro-water bodies were vulnerable to external pollution, resulting in poor water quality and algae outbreak. Taking Wumingtang of Huajiachi Campus of Zhejiang University as an example, we used ecological remediation methods to build a simulated natural ecosystem and tended to achieve micro-water bodies treatment under constant and external pollution condition. The enhanced ecological purification project included ecological cycle system of biofilter supplemented by aeration, sediment improvement to ensure habitat, and both classical and non-classical bio-manipulation to reconstruct the biological community. After half a year operation, though adverse environmental factors such as continuous rainstorm or leakage of rain sewage mixed flow were presented, the transparency of Wumingtang with simulated natural ecosystem still improved over 45 cm, the contents of COD_{Mn} , $\text{NH}_3\text{-N}$, TN , TP

收稿日期:2022-03-09;修回日期:2022-04-25

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项——淮河流域重污染河流深度治理和差异化水质目标管理关键技术验证及推广应用项目“沙颍河多闸坝重污染河流生态治理与水质改善关键技术集成验证及推广应用”(2017ZX07602-002);中电建华东院重大科技计划(201计划)“基于生态城市建设的水环境综合治理技术研究”(KY2019-ZD-03)

作者简介:陈奋飞(1983-),男,江苏连云港人,高级工程师,硕士。主要研究方向为水污染防治、水生态治理、环境保护咨询和设计。Tel: 13819149349;E-mail: chen_ff@hdec.com

* **通信作者:**马骏超(1992-),女,浙江东阳人,高级工程师,博士。主要研究方向为水污染防治、水生态治理、环境保护咨询和设计。Tel: 18768114352;E-mail: ma_jc@hdec.com

and Chl-*a* were reduced by 23%, 82%, 66%, 61% and 36% respectively, comparing with the traditional ecological treatment of Nikongtang. The overall sensory achieved crystal clear and water quality maintained dynamic balance, and the aquatic ecosystem dominated by higher aquatic plants was restored. Because of its perfect performance, the pilot project of Wumingtang could be applied as a demonstration and reference for future urban landscape micro-water treatment.

Key words: Constant pollution; Micro-water body; Ecological remediation; Simulated natural ecosystem; Bio-manipulation

小微水体通常为景观封闭水体,水域面积小、水体流动性差^[1],水环境容量小,水体自净能力弱,极易受外源污染影响^[2],造成污染物累积,产生水体富营养化现象,从而导致水体黑臭,感官效果极差^[3]。由于城市生态景观建设需要,小微水体虽然面积小,但是数量众多,分布广泛,并常位于集中居住区附近^[4],其水质和感官效果备受大众关注。目前,小微水体常用的综合治理技术手段包括控源截污、生态清淤、调水换水、护岸生态化改造、曝气复氧、水生动植物恢复^[5-6]等,经过一系列综合治理措施,小微水体基本可实现水质提升和生态改善。但受实际情况影响,小微水体周边的生活污水治理很难一步到位,即使排口已全部排查改造或封堵,也存在一定的渗漏、溢流等问题,造成小微水体“反复治,治反复”的现象^[4],一旦重新污染,频繁的调水换水又难以实现,小微水体将会重新陷入富营养化甚至黑臭的局面。因此,在小微水体治理实践中,应借鉴并融合常用的综合治理技术手段,制定一套对小微水体长期稳定有效的综合治理方案,即使外部环境条件发生变化,譬如有持续污染的情况下,也能实现小微水体水质维持和感官优化的效果。

浙江大学华家池校区是全国干部培训教育基地,是浙江对外展示的重要窗口。校区内拥有4个相对独立封闭的景观水体,与外界缺乏交换,造成点源和面源污染常年累积,水体富营养化现象严重,属于典型的有持续污染物汇入的城区景观小微水体案例。本研究以华家池校区内景观水体为研究对象,综合运用生境营造、生物滤床循环系统、水生动植物群落构建的生态强化净化措施,构建仿自然生态系统,旨在通过试点工程,取得长效稳定的生态治理效果,既能改善学校环境,提供良好游憩空间,又能提升对外形象,是浙江省“五水共治”“小微水体整治”的重要组成部分^[7],为后续此类工程提供示范和借鉴作用。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究案例位于浙江大学华家池校区(如图1),4

个景观水体总水域面积约74 320 m²,平均深度为1—2 m,是杭州市区内第2大天然淡水水域。各水体间通过管涵相连,与外部水系基本无任何交换,补水来源基本靠雨水和地下水,汛期涝水主要通过东侧无名塘泵站强排,西侧大池泵站为备用泵站。内部水体间相对独立,连通管涵两端设溢流堰,非汛期基本无水体交换。本研究选取无名塘作为研究对象,水域面积约2 550 m²,约占整个华家池总水域面积的1/30,治理前平均水深约1 m。

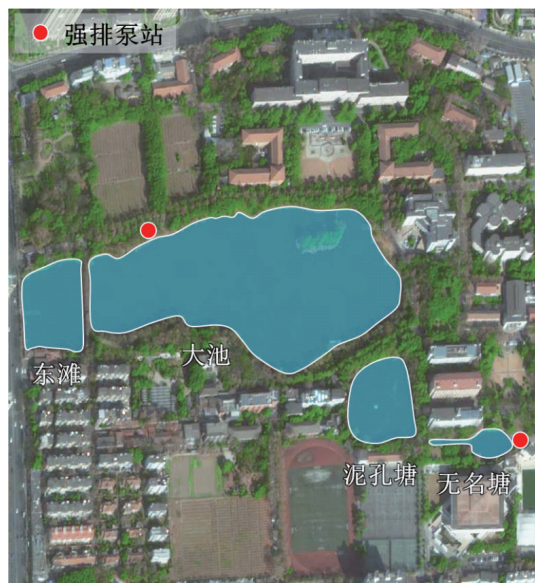


图1 浙江大学华家池校区内部水系

1.2 试验方案

无名塘治理主要以构建仿自然生态系统的生态强化净化治理措施为主(见图2)。利用生物滤床循环系统改善水动力条件、净化水质。同时辅助采用底质改良与曝气措施,种植具有天然抗污纳污能力的水生植物,构建水下森林,修复小微水体水生态,提高自净能力。试验对照组选择无名塘西侧一路之隔环境条件一致的泥孔塘,塘内现状为种植大藻和设置喷泉曝气。

治理后开展无名塘和泥孔塘的水质检测工作,取样点位分别位于无名塘西北角和泥孔塘东南角(见图2)。结合新生水生态系统构建及稳定发展所需时间^[8],监测周期为6个月,平均每7 d取水样1次。

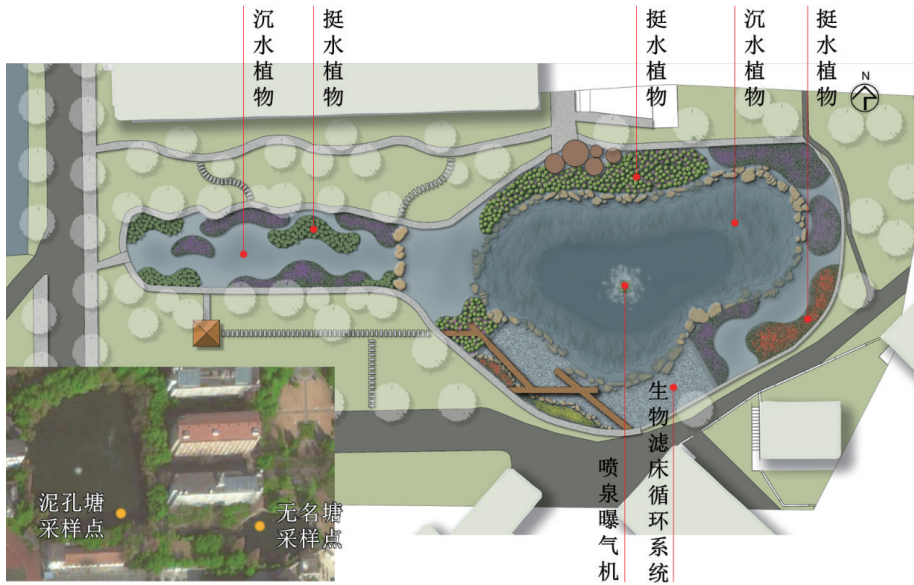


图 2 无名塘生态治理方案平面布置及采样点位

1.3 水质检测方案与方法

检测指标主要包括透明度(Secchi Depth, SD)、氨氮(NH₃-N)、总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、叶绿素 *a* (Chl-*a*)。检测方法依据《水和废水监测分析方法》(第四版)^[9]。降雨数据来源于浙江省实时水雨情监测预警系统和西湖一公园雨量站数据。

1.4 统计与分析

试验数据采用 Excel2016, Origin2021, SPSS 19.0, Canoco5 进行处理、统计检验、绘图和冗余分析(RDA)、回归分析(MRA)。相关分析采用皮尔逊(Pearson)相关系数法。

2 结果与分析

2.1 水体主要污染物分析

通过对无名塘、泥孔塘为期半年的水质监测和降雨量统计(如图 3)发现,不同天气条件下水体污染物指标变化趋势及含量变化幅度不同。

以传统生态治理措施为主的泥孔塘,在长期和短期高强度大雨量的暴雨期内,SD, NH₃-N, TN 均呈先上升后下降的趋势, COD_{Mn} 和 Chl-*a* 则呈反向趋势, 仅 TP 含量变化趋势与降雨强度、降雨时期关系不显著。Pearson 相关性分析(见表 1)显示,除 TP 外,SD, COD_{Mn}, NH₃-N, TN, Chl-*a* 与降雨量相关系数较高,表明污染物含量与降雨量相关度较强,与图 3 检测结果一致,推测泥孔塘中 COD_{Mn} 和部分含 N 营养盐主要来源为降雨引起的地表径流污染。对比

晴天和降雨期内污染物含量变化幅度发现,SD, COD_{Mn} 和 Chl-*a* 波动频率和幅度较大, NH₃-N, TN, TP 含量变化较小。

在仿自然生态系统构建实施后的无名塘内,SD 随着系统的稳定运行,总体维持较高水平,除短期高强度大雨量的暴雨影响外,基本不受降雨影响。NH₃-N, TN, TP 在长期和短期高强度大雨量的暴雨期内均呈先增后降趋势,而 COD_{Mn} 和 Chl-*a* 同样呈反向趋势。无名塘内水质污染指标变化幅度均显著强于对照组泥孔塘,普遍为 1 倍以上,最高可达 23 倍。此外,无名塘晴天内有明显的 NH₃-N, TN, TP 含量激增现象,由于底泥已进行底质改良,表明在底泥内源污染控制^[10]的条件下,无名塘除降雨引起的地表径流面源污染之外,西侧雨污混流排口还存在持续的点源污染影响。

表 1 降雨量与主要水质指标的 Pearson 相关系数

研究对象	SD	COD _{Mn}	NH ₃ -N	TN	TP	Chl- <i>a</i>
无名塘	-0.091	-0.157	0.118	-0.072	-0.035	-0.226
泥孔塘	-0.282	-0.310	0.179	0.359	0.056	-0.285

2.2 仿自然生态系统治理效果分析

无名塘与泥孔塘水体监测结果如图 4。在无名塘点源污染持续汇入的情况下,经仿自然生态系统治理的无名塘在多数指标上均优于传统生态治理的泥孔塘,其中 SD 提升超过 45 cm,达到 120 cm,基本实现清澈见底的状态, COD_{Mn} 降低 23%, Chl-*a* 降低 36%,表明在持续的面源污染和点源污染汇入条

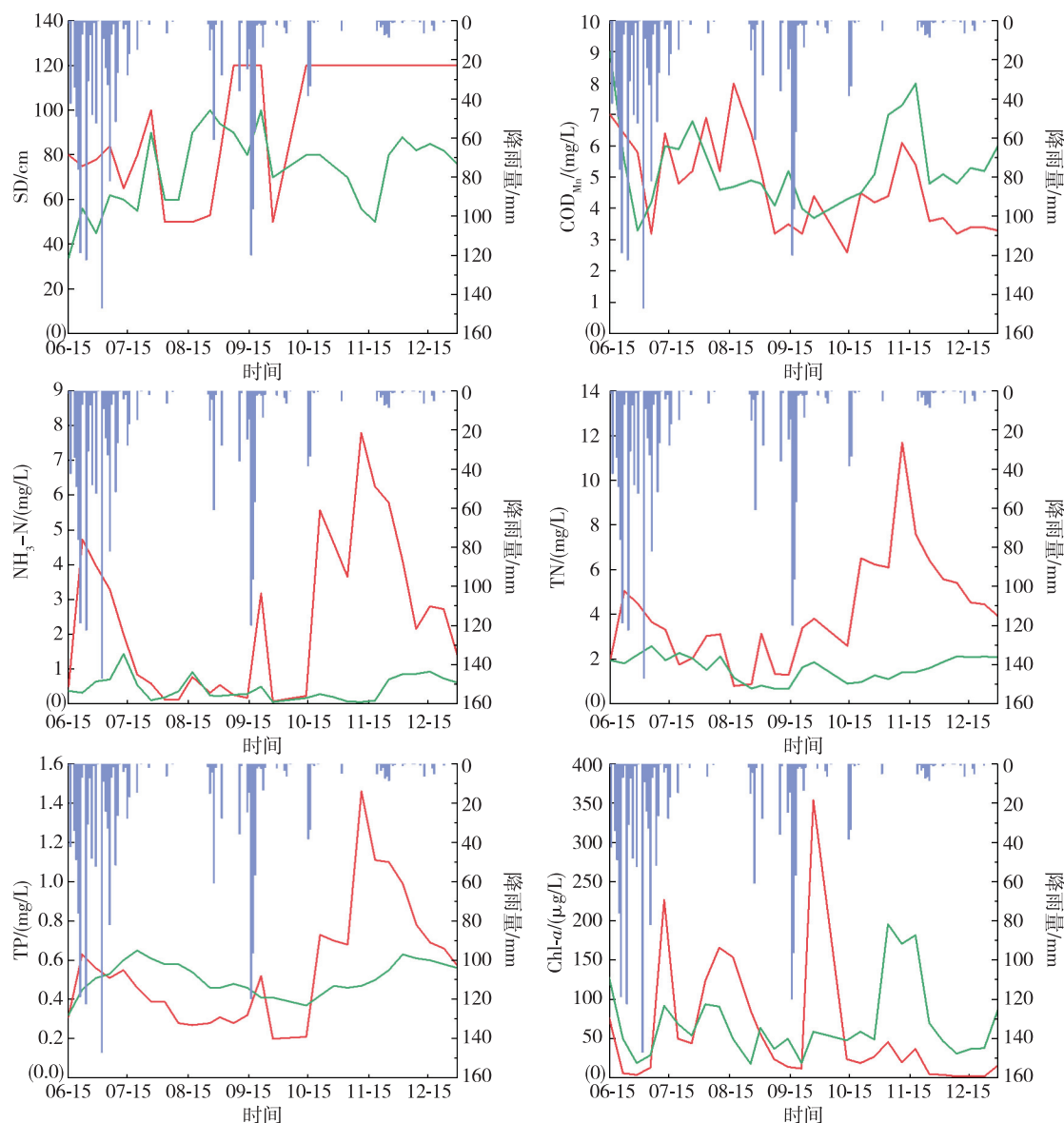


图3 降雨量与主要水质指标检测结果(—降水量;—无名塘;—泥孔塘)

件下,无名塘内构建的仿自然生态系统相较于传统生态治理措施具有良好的治理效果。

汛期面临高强度持续性城市面源污染和雨污混流渗漏点源污染,无名塘仍保持较高的SD(80 cm左右)、较低的 COD_{Mn} 和TP及Chl-*a*含量,仅 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN含量较泥孔塘水体高。因仿自然生态系统构建初期,生物滤床循环系统内微生物群落尚在扩大繁殖期,难以大量降解含氮污染物质,但系统内填料仍对悬浮物、藻类有较好的过滤作用,对TP有良好的吸附作用。

修整期内无名塘降低水位补植沉水植物,生物滤床循环系统暂停运行。池体边持续汇入的点源污染致使无名塘水体SD显著降低, COD_{Mn} ,TN,Chl-

*a*含量均显著超过对照组泥孔塘水体中的含量。修整期水质监测结果表明,面对城市排水管网渗漏等原因造成的持续点源污染影响,城区内小微水体若仅依靠常规的生态治理措施,即底泥改良、曝气和水生植物恢复,难以维持长效稳定的治理效果,容易出现复恶化的现象。

稳定运行期内,无名塘N,P营养盐含量显著高于对照组泥孔塘,主要原因为期内突降的2周暴雨和持续大量渗漏的生活污水点源污染。但依靠仿自然生态系统的强化净化作用,无名塘水体始终保持清澈见底状态(SD始终保持120 cm), COD_{Mn} 和Chl-*a*含量均明显低于泥孔塘。同时,无名塘水体超标的N,P营养盐在生物滤床循环系统和沉水植物群落共同的

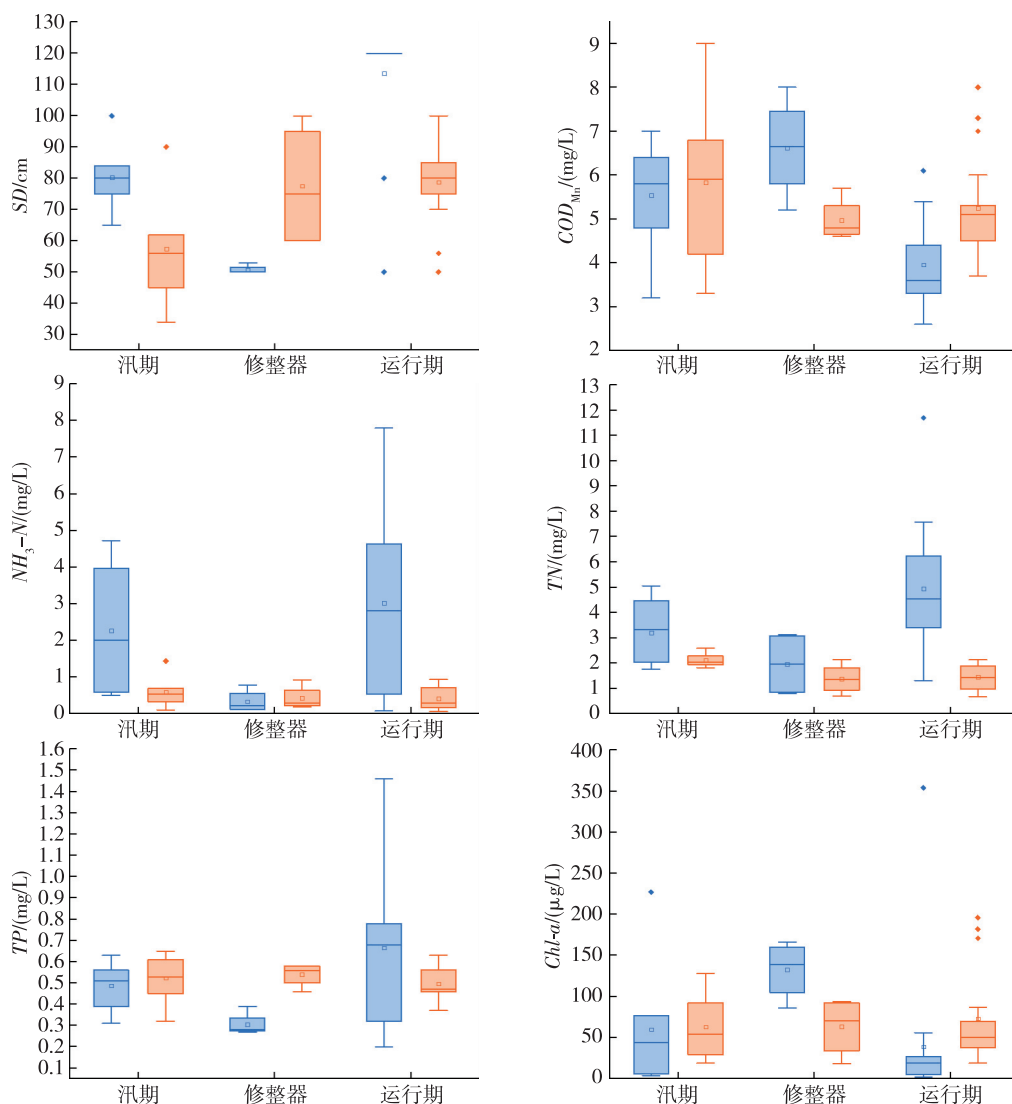


图4 无名塘与泥孔塘不同试验阶段主要水质指标检测结果(■无名塘;■泥孔塘)

吸附、吸收和降解作用下,经1个月已大幅降低,分别削减82%,66%和61%,并逐步恢复至地表V类水水平,其中TP含量已降至与对照组泥孔塘一致的浓度(见图3)。稳定运行期内水质指标先升后降的趋势表明,仿自然生态系统对于有持续污染的小微水体仍具有较好的N,P调节和削减功能。后续点源污染若无继续渗漏现象,无名塘水质指标有望继续提升,恢复至地表Ⅲ—Ⅳ类水并保持动态平衡。

3 讨论

3.1 水质指标对透明度的影响

水体透明度是评估小微水体感官和污染程度的重要参数,也是评估水生态健康和富营养化水平的重要指标^[11]。研究表明,不同水质指标对小微水

体SD的影响各不相同,各指标之间存在不同程度的相关性,为了防止多重共线性,采用RDA和MRA分析^[12-13],筛选出对SD相对重要的水质指标,找出影响SD的密切环境因子,建立水质指标对SD的逐步回归方程。

将稳定运行期内的无名塘和泥孔塘水质指标作为环境因子,2塘水体SD为样本因子,进行RDA分析。分析结果(如图5)显示,经过筛选,Chl-a对无名塘水体SD起最主要的环境影响作用,共解释了91.2%的SD变化信息;而对于泥孔塘水体而言,Chl-a,TN,TP均有一定的影响率,分别解释了45.2%,38.3%,16.5%的SD变化信息。其中无名塘SD与Chl-a极显著负相关($P=0.002$),而泥孔塘SD与Chl-a显著负相关($P=0.012$),与TN极显著

负相关($P=0.004$),与 TP 显著正相关($P=0.022$)。根据无名塘和泥孔塘筛选出的对 SD 影响密切的环境因子,利用 MRA 分析计算得出 SD 和与之相关的

环境因子之间的相关关系,无名塘: $SD = 121.650 - 0.208Chl-a$ ($R^2 = 0.81$); 泥孔塘: $SD = 81.419 - 20.107TN - 0.187Chl-a + 73.316TP$ ($R^2=0.574$)。

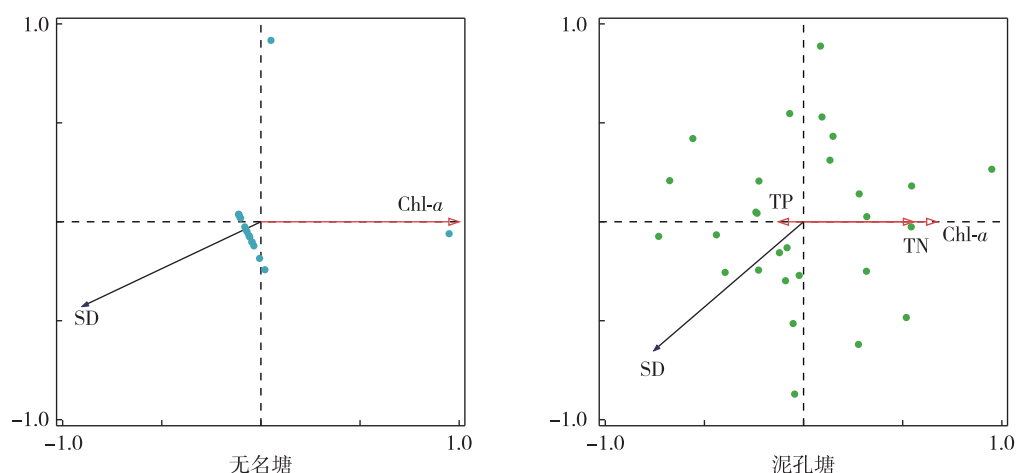


图5 无名塘与泥孔塘水体 SD 与环境因子 RDA

分析 RDA 和 MRA 结果得出,SD 主要受外源汇入污染的负向影响和仿自然生态系统的正向影响。无名塘在仿自然生态系统的持续稳定净化作用下,水体 SD 主要与 Chl-*a* 含量相关,基本不受外源汇入污染影响。而在纯自然状态下的泥孔塘中,虽有常规的生态治理措施,但 SD 仍受 TN,TP 和 Chl-*a* 共同影响。有研究表明,TN,TP 提供了浮游植物生长的营养盐,浮游植物增加导致 SD 下降^[14]。

3.2 仿自然生态系统构建对持续污染的小微水体治理启示

有研究认为,沉水植物为主的高等水生植物恢复是富营养化景观水体治理的重要手段和有效途径^[15]。沉水植物的出现与浮游植物竞争营养盐和光能,其旺盛生长可进一步抑制浮游藻类的繁殖,促进水体水生系统的良性循环^[16]。但若水体由于外源污染导致营养盐含量持续升高,适宜的气温将促进浮游

植物繁殖速率显著提升,SD 明显下降,致使水下光照深度降低,河底沉水植物因为光合作用缺失而枯萎死亡,形成“水下荒漠”,一旦转变后再自然恢复到高等水生植物主导的清澈状态往往极为不易^[17]。

基于浅水湖泊生态稳态转换理论与驱动因子研究^[18-19],无名塘试点治理工程中采用的仿自然生态系统利用物种间的竞争、捕食关系,辅以少量外界能量输入,实现由富营养化导致的藻型浊水稳态向草型清水稳态的转变(见图6)。生物滤床循环系统作为水质强化净化保障措施,将浮游植物等悬浮物过滤,优先保证水体 SD 提升,为沉水植物生长提供先决条件,保障沉水植物生长繁衍所需光照条件。同时,循环系统内设置有多孔滤料层,可为食藻虫等浮游动物提供天然的避难场所,实现在同一水体内的经典生物操纵和非经典生物操纵完美共存。

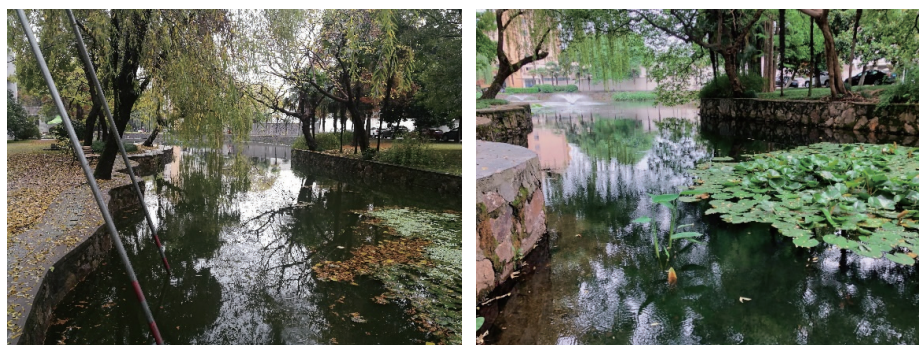


图6 无名塘生态治理前后实景对比

待沉水植物旺盛扩增形成稳定的“水下森林”后,继续吸收水体营养盐含量,减缓营养物质循环速度,可进一步遏制藻类繁殖,稳定水质和感官效果,带动生态系统演变,向清水草型稳态生态系统转变。而对照组泥孔塘由于采用传统的生态治理措施,对于营养盐的削减效果有限,致使水体藻类含量难以轻易降低,SD 显著提高,不利于沉水植物为主的水下生态系统恢复,景观水体自净能力提升。

结合无名塘仿自然生态系统构建实施后不同时期内的治理效果,以及对西湖综合整治工程效果研究^[20]发现,在有持续污染汇入的城市水体治理中,需采用强化净化工程措施,抑制浮游植物过度繁殖,重新构建以高等水生植物为主的水生生态系统,促进良性循环,才能实现显著和持久的治理效果。

此外,针对实际运行过程中周边环境突发变化,如雨季汛期持续大规模降雨以及周边管网持续渗漏对小微水体仿自然生态系统的冲击和沉水植物群落影响,在加强汛期排涝泵站外排强度的基础上,适当延长生物滤床循环系统运行时间。利用仿自然生态系统的填料吸附作用、微生物降解作用、植物吸收和动物吞食作用,缩短水体浑浊和营养盐累积时间,避免出现植物死亡、藻类爆发、生态系统退化的现象。

4 结 论

华家池无名塘长序列的水质监测结果表明,即使面对暴雨冲击和持续生活污水汇入影响,人工构建的仿自然生态系统仍具有较好的治理效果。治理后无名塘水质指标 SD 提升逾 45 cm, COD_{Mn} , $\text{NH}_3\text{-N}$, TN, TP 和 Chl-*a* 分别削减 23%, 82%, 66%, 61% 和 36%, 水体整体感官度保持清澈见底状态,水质维持动态平衡。在生物滤床循环系统的辅助支持下,塘内沉水植物等高等水生植物逐步恢复,水生生态系统实现良性发展。通过对比对照组传统生态治理措施的治理效果,试验构建的仿自然生态系统可作为持续污染汇入条件下小微水体的整治模板,为后续类似工程提供示范作用。

参考文献:

[1] 赵 晖,陈佳秋,陈 鑫,等.小微湿地的保护与管理[J].湿地

科学与管理,2018,14(4):22-25.

- [2] 吴金龙.关于封闭独立小微水体水质改善的设计探讨——以闵行区华漕镇北杜巷宅河为例[J].城市道桥与防洪,2019,12(12):112-114.
- [3] 夏邦天,郑广宏,徐杭军,等.城市景观水体治理技术研究进展[J].环境科学与技术,2008,31(6):73-78.
- [4] 刘 祺,方 芳,余 凯,等.城区小微水体治理的实践与思考[J].江苏水利,2019(S2):15-17.
- [5] 陈家伟,赵振业,吴属连,等.国内外小微黑臭水体治理技术现状综述[J].广东化工,2021,48(1):80-81.
- [6] 潘志坤.小微水体生态恢复的实践[J].智能城市,2019,23(5):5-9.
- [7] 黄 博,王方园,陶 晨,等.农村门口塘小微水体治理对策研究[J].环境保护与循环经济,2018,275(7):37-40.
- [8] 陈宗永,马海霞,韦兰英,等.草型生态系统构建技术在南湖富营养化防治中的应用[J].水生态学杂志,2019,40(2):35-40.
- [9] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [10] 薄 涛,季 民.内源污染控制技术研究进展[J].生态环境学报,2017,26(3):514-521.
- [11] 陈俊伊,王书航,郑朔方,等.南湖水系水体透明度时空分布,影响因素及控制对策[J].环境工程技术学报,2020,10(6):897-904.
- [12] 李飞鹏,张海平,陈 玲.小型封闭水体环境因子与叶绿素 *a* 的时空分布及相关性研究[J].环境科学,2013,34(10):3854-3861.
- [13] 彭 梦,吴嘉伟,李罗新,等.澜沧江小湾库区 2017—2019 夏季浮游植物功能群特征及其环境驱动因子[J].生态学杂志,2022,41(1):50-57.
- [14] 杨志岩,李畅游,张 生,等.乌梁素海氮磷浓度与叶绿素 *a* 时空分布关系研究[J].干旱环境监测,2009,23(1):16-19.
- [15] 吴 洁,虞左明.西湖浮游植物的演替及富营养化治理措施的生态效应[J].中国环境科学,2001,21(6):540-544.
- [16] 张运林,秦伯强,朱广伟,等.杭州西湖水体光学状况及影响因素分析[J].长江流域资源与环境,2005,14(6):744-749.
- [17] 谷孝鸿,张圣照,白秀玲,等.东太湖水生植物群落结构的演变及其沼泽化[J].生态学报,2005,25(7):1541-1548.
- [18] 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.
- [19] 徐德瑞,周 杰,吴时强,等.夏季东太湖光合有效辐射衰减特征及其对沉水植物恢复的指示[J].湖泊科学,2021,33(1):111-122.
- [20] 尤爱菊,吴芝瑛,韩曾萃,等.引水等综合整治后杭州西湖氮、磷营养盐时空变化(1985~2013年)[J].湖泊科学,2015,27(3):371-377.