

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2024012901

余婷, 曹梦西, 陈路锋, 等. 基于亲水性污泥陶粒开展城市黑臭水体生态修复的应用示范[J]. 环境化学, 2024, 43(6): 1767-1777.

YU Ting, CAO Mengxi, CHEN Lufeng, et al. Remediation of urban black-odorous water based on hydrophilic sludge ceramsite[J]. Environmental Chemistry, 2024, 43 (6): 1767-1777.

基于亲水性污泥陶粒开展城市黑臭水体生态修复的应用示范*

余婷 曹梦西 陈路锋 潘钰 陈博磊 冯畅 熊飞 梁勇**

(持久性有毒污染物环境与健康危害湖北省重点实验室, 环境与健康学院, 江汉大学, 武汉, 430056)

摘要 重建水生植物尤其是沉水植物群落结构, 被广泛认为是水体修复治理的有效途径. 目前城市河、湖、渠的黑臭水体治理主要采用截污、清淤等方式, 生态功能恢复大多围绕生态浮岛开展浮水、挺水植物的种植, 加之城市硬化沟渠等封闭的水系统由于硬化的底质无法种植沉水植物, 造成了城市黑臭水体生态修复收效甚微. 本文以江汉大学清源河作为城市硬化沟渠黑臭水体的典型代表, 利用亲水性污泥陶粒作“新型土壤”种植苦草 (*Vallisneria spiralis* (Lour.) H. Hara), 构建“水下森林”生态系统, 实现城市黑臭水体的生态原位修复. 种植沉水植物后, 沉水植物生物量从 241.20 g 显著增长至 1566.13 g, 清源河中水生微生物的生物多样性显著提升, 蓝藻 (*Cyanobacteria*) 相对丰度显著降低, 总体水质从劣 V 类提升至近 III 类, 且平稳运行两年未返黑臭. 该应用示范体系中, 亲水性污泥陶粒一方面为苦草提供固着基质, 实现了无底泥硬化沟渠中沉水植物的种植和生长, 另一方面可为水生微生物提供栖息地. 清源河示范治理工程应用亲水性污泥陶粒开展城市黑臭水体生态修复, 不仅将城市生态系统中的污泥烧制成陶粒后回用到淡水生态系统的修复, 同时实现污泥的无害化和资源化的循环利用, 为城市黑臭水体的修复及生态重构和国家达成“碳中和”目标提供了新思路.

关键词 亲水性污泥陶粒, 沉水植物, 淡水生态修复, 生态重构, 生物多样性.

中图分类号 X-1; O6 文献标识码 A

Remediation of urban black-odorous water based on hydrophilic sludge ceramsite

YU Ting CAO Mengxi CHEN Lufeng PAN Yu CHEN Bolei
FENG Chang XIONG Fei LIANG Yong**

(Hubei Key Laboratory of Environmental and Health Effects of Persistent Toxic Substances,
School of Environment and Health, Jiangnan University, Wuhan, 430056, China)

Abstract The reconstruction of aquatic plant communities, particularly submerged plant communities, is widely acknowledged as an effective approach for the remediation of water bodies. Recently, the treatment of urban black-odorous water bodies has primarily focused on pollution interception and dredging. Efforts to restore ecological functions have predominantly centered on cultivating floating and emergent plants on ecological floating islands. Moreover, closed water systems such as urban hardened ditches are incapable of supporting submerged plant life due to their hardened bottom material, resulting in minimal ecological restoration effect on in urban black-

2024年1月29日收稿(Received: January 29, 2024).

* 江汉大学学科特色专项项目(2022ZKZX04)和江汉大学一流学科建设重大专项资助计划(2023ZKZ028, 2023ZKZ029)资助.

Supported by the Research Fund of Jiangnan University (2022ZKZX04) and Excellent Discipline Cultivation Project by JHUN (2023ZKZ028, 2023ZKZ029).

** 通信联系人 Corresponding author, E-mail: ly76@263.net

odorous water bodies. The present study takes the Qingyuan River at Jiangnan University as a typical representation of urban hardened ditches with black-odorous water bodies. It employs hydrophilic sludge ceramsite as “new soil” for planting *Vallisneria natans* (Lour.) H. Hara, thereby establishing an “underwater forest” ecosystem to achieve in-situ ecological restoration of urban black-odorous water bodies. After planting submerged plants, the biomass of submerged plants significantly increased from 241.20 g to 1566.13 g. The biodiversity of aquatic microorganisms in the Qingyuan River significantly improved, with a notable decrease in the relative abundance of *Cyanobacteria*. The overall water quality improved from below Class V to nearly Class III, and the system operated stably for two years without returning to a state of black and odorous water. In this system, the sludge ceramsite serves a dual purpose: firstly, it provided a stable rooting medium, enabling submerged plants to thrive in hardened ditches without natural sediment; secondly, it created habitats for plankton and microorganisms. The application in Qingyuan River utilizes hydrophilic sludge ceramsite for the ecological restoration of urban black-odorous water bodies. This approach not only repurposes sludge from the urban ecosystem by converting it into ceramsite for freshwater ecosystem restoration but also achieves the harmless and resourceful recycling of sludge. This innovative approach provides a new direction for the restoration and ecological reconstruction of urban black-odorous water bodies, as well as contributes to the national goal of achieving carbon neutrality.

Keywords hydrophilic sludge ceramsite, submerged plant, freshwater ecological restoration, ecological reconstruction, biodiversity.

黑臭水体是城市化进程中水生系统面临的一个重要的环境问题。2015 年国务院发布的《水污染防治行动计划》(简称“水十条”)中明确要求,采取控源截污、垃圾清理、清淤疏浚、生态修复等措施,加大黑臭水体治理力度^[1]。其中生态修复主要利用微生物、水生动植物等生物的生命活动,对水中污染物进行转移、转化及降解,恢复水体在一定污染负荷下的自净化能力^[2]。在水生态修复工作中,恢复水生植物尤其是恢复沉水植物被广泛认为是水体治理的有效途径^[3]。目前用于恢复河湖生态的沉水植物种植常通过排干上覆水、清淤后将沉水植物种植于水体土壤中,再蓄水使沉水植物生长达到净化水质、防治污染的目的。但该种植方式耗时长、成本高,且河湖清淤后的底质较硬,植物生长必需的营养物质也随清淤过程被移除,导致沉水植物成活率较低。另外,部分城市硬化沟渠因其“三面光”的特点,在发生黑臭后的生态修复主要依靠生态浮岛种植浮水植物,而沉水植物需要沉没于水中完成生活史,其通过光合作用产生的氧气都释放到水中,可以显著增加水体中的溶解氧含量^[4]。因此,开发新型种植技术提高沉水植物的河湖生态修复效果具有重要意义。

针对沉水植物种植困难的问题,目前有基于砾石和滤料构成的生物循环床^[5]、网床或网箱^[6],以及基于苯乙烯和树脂构成的生态浮岛^[7]。而这些基质都存在经济和环境效益问题,例如维护成本高、微塑料释放等。污泥陶粒是污泥稳定化、轻量化及无害化处置的产物,具有比表面积大和多孔结构等特性。据统计,至 2021 年全国已建成 2827 座城市污水处理厂,每年产生的污泥量约 3000—6000 万 t^[8]。我国污水处理产业因处理能力、技术和投入仍存在不足,行业内“重水轻泥”的现状依然没有得到有效改善,导致大量污泥未能得到有效处置^[9]。目前研究报道的污泥陶粒基于其多孔结构的特性已被广泛用作建筑材料^[10]、人工湿地基质^[11-13]、滤池填料^[14-16]和各种水处理设备的滤材^[17]。已报道的污泥陶粒中,吸水率大多在 50% 以下,导致其应用于人工湿地时需补充土壤或砂砾才能满足湿地植物的种植^[12]。而亲水性污泥陶粒保水保墒更利于植物的定植和生根,在提供固着基质的同时,还能避免植物烧根^[17]。同时亲水性污泥陶粒的吸附性能使得其可为植物根系提供营养物质,更利于植物的生长发育。通过污泥陶粒构建的人工湿地用于污水处理后,能值产出和可持续性指数相较其他污泥处置方式更高^[11]。因此,开发利用亲水性污泥陶粒种植水生植物不仅能解决沉水植物种植困难的问题,还能进一步实现污泥资源化利用,具有可观的经济效益,符合可持续性发展的需求。

基于此,本研究提出亲水性污泥陶粒可作为水生植物的栽培基质(“新型土壤”),提高水生植物存

活率. 开发一套运用亲水性污泥陶粒种植沉水植物构建“水下森林”生态系统的新策略, 以恢复淡水生态系统的结构和功能并改善水质. 该策略的实施将为城市淡水生态系统实现固碳增汇, 为“双碳”目标的实现提供新思路.

1 实验部分(Experimental section)

1.1 亲水性污泥陶粒的准备和表征

亲水性污泥陶粒购自武汉铭创新海生态科技有限公司, 公司基于专利“一种高掺量污泥蓄水材料的制备工艺, CN 114920541 A”进行制备, 具体制备流程为将污泥、秸秆和添加剂按比例混合均匀后经过造粒及造粒后在窑炉中 1000 °C 烧结 20 min 制备而成. 亲水性污泥陶粒的形貌结构用 Hitachi SU8000 扫描电子显微镜(SEM)和能谱仪(EDS)进行表征. 吸水率由公式(1)得出:

$$\text{吸水率} = \frac{V_0 - V}{m} \quad (1)$$

其中 V_0 为溶液初始体积, V 为亲水性污泥陶粒吸水后溶液的体积, m 为亲水性污泥陶粒的质量.

1.2 沉水植物的种植及监测分析

“水下森林”的构建由灰色聚丙烯材质的网篮作为固定单元, 装入一定质量的亲水性污泥陶粒, 并将苦草(*Vallisneria natans* (Lour.) H. Hara)埋入亲水性污泥陶粒中 5 cm, 将种植模块整体沉入水中.

每个种植模块种植固定质量的沉水植物, 选取 3 个种植模块进行标记并记录沉水植物的具体质量和叶长. 经过生长两年后, 取出标记模块, 收集模块中所有沉水植物后, 返回实验室对收集到的沉水植物进行清洗, 去除根系附着的土壤等, 自然沥干 1 h 后进行称重和叶长记录.

1.3 示范区域及样品采集

江汉大学校河—清源河呈“C”型, 两端分别联通于三角湖, 有闸口可控制三角湖水的输入与排放, 全长约 1 km, 水深约 1—1.3 m, 河道经水泥硬化处理. 作为校园雨水和生活污水的汇集地, 清源河存在许多外源氮、磷输入, 并且由于清源河的水泥硬化人工河道, 导致水体自净能力不足, 进而水质逐渐恶化. 自 2021 年 7 月分别于 3#和 4#号点位种植了苦草构建淡水生态系统, 并设置 5 个取样点(1#、2#、3#、4#、5#)监测水质变化. 取样点分布如图 1 所示.



图 1 示范区域及样品采集点示意图

Fig.1 Planting area and sampling sites map

为探究种植沉水植物后微生物群落的变化,分别在无草水域、少草水域和多草水域采亲水性污泥陶粒样本,取亲水性污泥陶粒内(距中心点 0.5 cm 半径以内材料)外(距中心点 0.5 cm 半径以外的材料)样本.每个样本准备 3 个重复样品,共 18 个样品进行 16S rRNA 测序分析.

1.4 水体样品检测

本研究测定了清源河 5 个监测点的 6 项水质指标.其中,溶解氧(DO)采用化学探头法(HJ 506-2016)(便携式多参数水质分析仪,YSIproQuatro)测定;高锰酸盐指数(COD_{Mn})采用酸性法(GB/T 11892-1989)(连续数字滴定仪, Titrette)测定;氨氮(NH₄⁺-N)采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535-2009)(紫外可见分光光度计,UV-7504)测定;硝酸盐氮(NO₃⁻-N)采用离子色谱法(HJ 84-2016)(离子色谱, AQ-1100)测定;总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636-2012)(紫外可见分光光度计,UV-1800PC);总磷(TP)采用钼酸铵分光光度法(GB/T 11893-1989)(紫外可见分光光度计,UV-7504)测定.

1.5 微生物群落分析

使用 TGuide S96 Magnetic Soil /Stool DNA Kit (天根生化科技(北京)有限公司),按照说明书,从 18 个样品中提取全基因组 DNA.用引物 338F: 5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3'和 806R: 5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3'扩增细菌 16S rRNA 高变区 V3—V4. PCR 产物在琼脂糖凝胶上检测,并通过 Omega DNA 纯化试剂盒(Omega Inc., Norcross, GA, USA)纯化.收集纯化的 PCR 产物,在 Illumina Novaseq 6000 平台上进行 2 × 250 bp 的配对.使用 USEARCH 将相似阈值大于 97% 的符合条件的序列分配到一个操作分类单元(OTU).数据结果上传到国家生物信息中心 <https://ngdc.cnbc.ac.cn/bioproject/>,项目编号 PRJCA021118, GSA 编号 CRA014420.基于 QIIME2 中的朴素贝斯分类器,使用 SILVA 数据库对 OTUs/ASV 进行分类标注,置信阈值为 70%.利用 QIIME2 软件对各样本物种多样性复杂性进行 Alpha 鉴定.采用主坐标分析方法计算 Beta 多样性,评价样品的物种复杂性.采用单因素方差分析比较细菌丰度和多样性.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 亲水性污泥陶粒结构表征

高温烧制的亲水性污泥陶粒具备了吸水性、多孔结构、比表面积大等特性.其中,亲水性污泥陶粒的球体结构组成的间隙利于沉水植物的生根和固着,能有效提高沉水植物在恶劣环境的存活率,同时避免传统种植方式中营养元素过剩导致的植物烧根现象^[17].本研究采用的亲水性污泥陶粒的吸水率可达 0.522 mL·g⁻¹(图 2 a),这为微生物定殖和物质交换提供了良好的基础.亲水性污泥陶粒的扫描电镜图像显示其具有丰富的孔径,且元素组成与土壤极为相似,主要含有氧、硅、铝等元素(图 2 b).因此,亲水性污泥陶粒的亲水性和多孔结构可以实现吸附营养物质、过滤悬浮物、为微生物和小型浮游动物提供栖息地,固着沉水植物根系并提供营养物质等功能.本研究以网篮作为固定单元,亲水性污泥陶粒作为种植基质种植沉水植物,种植方式见图 2 c.经过两年时间的生长,沉水植物不仅存活率高,且长势良好(图 2 d).虽然高温烧制去除了污泥中原有的大部分氮、磷、有机质等植物生长必需物质,但其特有的亲水性和多孔结构使亲水性污泥陶粒可以从水体中有效吸附氮、磷、有机质、微量元素等维持水生植物的正常生长^[17].水生植物的光合作用可以为微生物和浮游生物提供氧气,微生物和浮游生物呼吸作用产生的二氧化碳和代谢产生的有机物可以被水生植物吸收利用,实现正向的生态循环^[18].

2.2 沉水植物生长

本文将亲水性污泥陶粒作为水生植物的栽培基质(“新型土壤”),用于种植水生植物,恢复淡水生态系统的结构和功能.不同于传统的将沉水植物直接种植在河湖底泥的方式,利用陶粒作为“新型土壤”种植沉水植物仅需在固定装置中装满陶粒,将沉水植物根部栽种至陶粒间隙后即可通过不同的方式将种植模块放置于河湖渠底部,实现沉水植物的高效种植(图 2 c).本研究中,苦草种植前后的分蘖数及生物量显著增多.每框植物的平均重量从种植前的 241.20 g 显著增长至 1566.13 g(图 3 a),植物叶长从 40 cm 增长至 120 cm(图 3 b).且经过两年的定植,植物能分蘖出 2—3 株新植株,新分蘖的植

株最长能到 60 cm (图 3 c 和 d). 上述结果表明亲水性污泥陶粒种植模块利于沉水植物的定植. 亲水性污泥陶粒种植沉水植物的方法相较于传统种植更高效、经济. 这种方式无需排干河湖, 简化了种植过程, 节省了时间和成本. 其模块化设计使得维护更为便捷, 仅需替换长势不良的模块, 而无需大规模更换植物或排干水体.

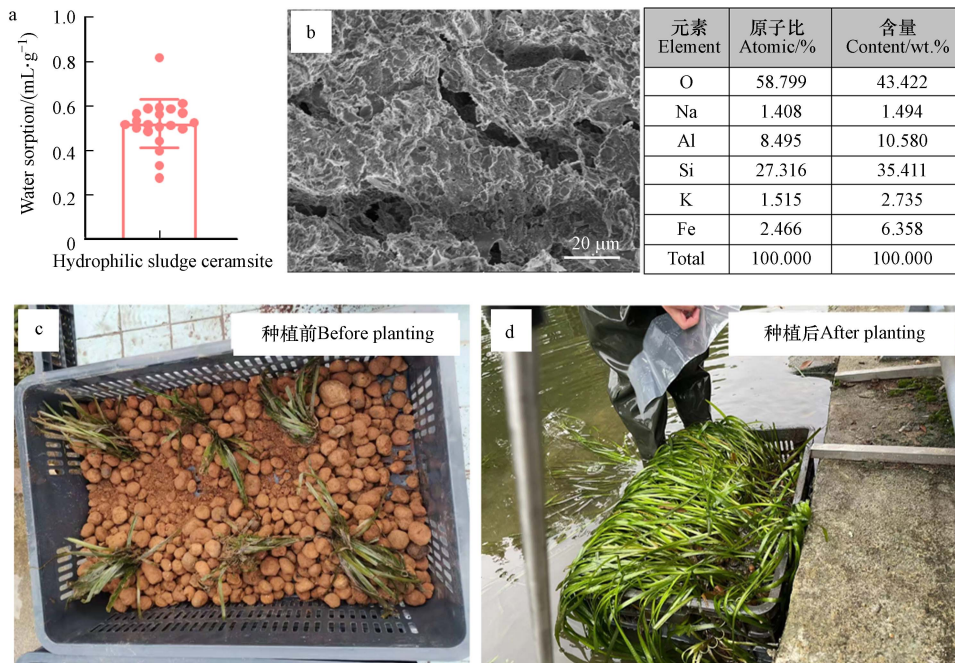


图 2 亲水性污泥陶粒的吸水率(a), 亲水性污泥陶粒的 SEM 和 EDS(b), 亲水性污泥陶粒种植沉水植物前后(c, d)
Fig.2 water sorption of hydrophilic sludge ceramsite(a), SEM and EDS of hydrophilic sludge ceramsite(b), hydrophilic sludge ceramsite before and after planting submerged plants(c, d)

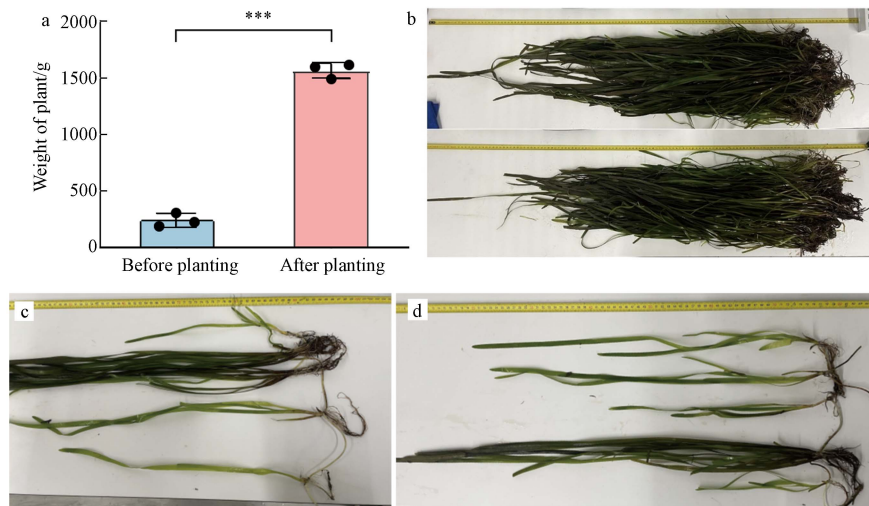


图 3 种植点沉水植物质量(a), 长度(b)和分蘖数(c和d)的变化

Fig.3 Changes in submerged plant quality (a), length (b) and tiller number (c and d) at planting site

2.3 水质变化分析

自 2021 年 7 月于 3#和 4#点位用亲水性污泥陶粒种植模块种植了苦草, 并设置 1#、2#和 5#点位作为对照(图 4 a), 以此探究该种植方式构建新淡水生态系统的潜力. 至 2023 年 5 月沉水植物生长状态良好(图 4 b). 自 2022 年 2 月起对 3#号种植点和 2#号对照点进行了生态系统拍摄(图 4 d-g). 由图 4 b 和 c 可看出, 相较于种植沉水植物之前, 亲水性污泥陶粒种植的沉水植物生长正常, 水体透明度高, 并基本构建了清源河“水下森林”新淡水生态系统. 从 2022 年 2 月至 2023 年 12 月的一年多时间里, 种植区的

沉水植物生长正常, 水体透明度及水质状况呈现持续向好的趋势, 生态系统保持较好(图 4 e, g, 3#号点), 未种植沉水植物的水域始终浑浊(图 4 d, f, 2#号点).



图 4 亲水性污泥陶粒种植沉水植物构建“水下森林”淡水生态系统

种植点和对照点示意图(a), 种植前(b)后(c)水质情况, 2022—2023 年对照点(d, f)和种植点(e, g)的水质变化

Fig.4 Construction of 'underwater forest' freshwater ecosystem by planting submerged plants with hydrophilic sludge ceramicsite

schematic diagram of planting sites and control sites (a), water quality before (b) and after (c) planting, water quality changes at control sites (d, f) and planting sites (e, g) from 2022 to 2023

为评估亲水性污泥陶粒种植沉水植物构建“水下森林”新淡水生态系统用于改善水质的实际效果, 分别于秋季(2022 年 11 月)、冬季(2023 年 2 月)和春季(2023 年 5 月)测定了种植点和对照点水质相关参数. 溶解氧(DO)、总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝酸盐氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)的结果表明, 沉水植物种植点位(3#和 4#点)的 DO 含量为明显高于对照点, 且呈现了随种植时间递增的趋势, 至 2023 年春季水体 DO 含量可达 $11.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 有益于水生生物的生存及污染物的降解; 而 TP、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度低于其它点位, 且呈现了明显的下降趋势(表 1). 污染物浓度上, 基于国家地表水环境质量标准(GB 3838-2002)^[19], 运用亲水性污泥陶粒种植了沉水植物的点位(3#和 4#点)较对照点相比, 总体水质已从劣 V 类提升至近 III 类(表 1). 其中, 水体 TN 从劣 V 类(2022 年 11 月 2#点, $> 8.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)水质恢复至近 III 类(2023 年 5 月 4#点, $< 1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 从 IV 类(2022 年 11 月 2#点, $> 5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)水质恢复至近 I 类(2023 年 5 月 3#和 4#点, $< 0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); TP 从劣 V 类(2022 年 11 月 1#点, $> 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)水质恢复至 III 类/近 II 类(2023 年 5 月 3#和 4#点, $< 0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); 高锰酸钾指数(COD_{Mn})提升至 II 类(2023 年 5 月 4#点, $< 2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)水质; DO 提升至 I 类水质(2023 年 5 月 3#和 4#点, $> 11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)(表 1). 以上结果表明, 亲水性污泥陶粒种植沉水植物构建“水下森林”新淡水生态系统能有效改善河湖水质, 实现了污泥资源化产物的再利用和黑臭水体的生态修复.

表 1 清源河采样点主要污染指标与地表水环境质量的比较

Table 1 Comparison of main pollution index and surface water environmental quality in Qingyuan River sampling sites

点位 Sites	时间 Time	DO/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·L ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/ (mg·L ⁻¹)	COD _{Mn} / (mg·L ⁻¹)
1#(对照点) Control site	2022.11	8.10	0.39	6.92	2.51	1.58	5.60
	2023.02	8.37	0.08	1.93	0.71	0.84	3.28
	2023.05	5.88	0.14	1.80	1.38	0.53	5.30
2#(对照点) Control site	2022.11	5.37	0.56	8.87	5.30	1.34	5.80
	2023.02	10.69	0.05	1.17	0.39	0.55	4.12
	2023.05	7.49	0.12	0.97	0.36	0.33	3.50
3#(种植点) Planting site	2022.11	6.33	0.16	2.91	1.02	1.12	4.30
	2023.02	10.06	0.08	1.28	0.43	0.44	2.96
	2023.05	11.36	0.03	1.09	0.13	0.76	3.50
4#(种植点) Planting site	2022.11	5.59	0.12	1.33	0.43	0.83	3.30
	2023.02	10.36	0.06	1.19	0.22	0.13	3.20
	2023.05	11.47	0.03	0.69	0.12	0.46	2.40
5#(对照点) Control site	2022.11	2.74	0.50	6.79	4.45	0.22	8.00
	2023.02	6.02	0.43	6.94	4.92	1.13	4.08
	2023.05	6.93	0.23	1.80	1.43	0.53	4.10
I类 ^[19]	—	≥ 7.5	≤ 0.01	≤ 0.2	≤ 0.15	—	≤ 2.0
II类 ^[19]	—	≥ 6	≤ 0.025	≤ 0.5	≤ 0.5	—	≤ 4.0
III类 ^[19]	—	≥ 5	≤ 0.05	≤ 1.0	≤ 1.0	—	≤ 6.0
IV类 ^[19]	—	≥ 3	≤ 0.1	≤ 1.5	≤ 1.5	—	≤ 10
V类 ^[19]	—	≥ 2	≤ 0.2	≤ 2.0	≤ 2.0	—	≤ 15

2.4 微生物群落结构及生物多样性

沉水植物可调节水体中溶解氧的动态改变, 水体中溶解氧的升高则是影响生态重构和生物多样性的关键因素^[20]. 考虑到黑臭水体的形成与厌氧菌大量繁殖直接相关^[21], 本文分析了亲水性污泥陶粒内外定殖的微生物群落结构及生物多样性. 分别在无草水域、少草水域和多草水域采污泥陶粒样本, 经过 16S rRNA 测序得到 26731 个分类单元 (operational taxonomic units, OTU). 其中, 无草水域的污泥陶粒外层有 2749 个 OTU, 少于其内层 (4722 个 OTU). 少草水域的污泥陶粒外层有 3843 个 OTU, 少于其内层 (4924 个 OTU). 多草水域的污泥陶粒外层有 3508 个 OTU, 略多于其内层 (3364 个 OTU) (图 5). 结果表明无论是否存在沉水植物, 污泥陶粒内层定殖的微生物种类均多于外层, 这表明亲水性污泥陶粒的球体结构适合微生物的栖息和繁殖. 在物种分布柱状图中, 研究结果得到了污泥陶粒的优势细菌门, 分别为变形菌门 (*Proteobacteria*), 拟杆菌门 (*Bacteroidota*), 厚壁菌门 (*Firmicutes*), 酸杆菌门 (*Acidobacteriota*), 绿弯菌门 (*Chloroflexi*), 放线菌门 (*Actinobacteriota*), 蓝藻门 (*Cyanobacteria*), 螺旋硝化菌门 (*Nitrospirota*) 和芽单胞菌门 (*Gemmatimonadota*) (图 6 a). 其中, 好氧菌属的变形菌门 (*Proteobacteria*) 和硝化螺旋菌门 (*Nitrospirota*) 在污泥陶粒外部相对丰度较高, 且在多草水域的污泥陶粒内外差异显著 (图 6 b 和 c). 专性厌氧的拟杆菌门 (*Bacteroidota*)、梭杆菌门 (*Fusobacteriota*) 和多为厌氧菌的厚壁菌门 (*Firmicutes*) 在污泥陶粒内部的相对丰度较多, 且随着沉水植物的增多, 污泥陶粒内外差异逐渐显著 (图 6 d, e 和 f). 捕食性微生物作为微生物群落中的捕食者, 在维持微生物群落的多样性及生态功能中发挥重要作用^[22-23]. 由图 6 g、h 可知, 在沉水植物种植水域的污泥陶粒中, 黏细菌 (*Myxococcota*) 和蛭弧菌 (*Bdellovibrionota*) 等捕食性微生物更倾向于分布在污泥陶粒的表层, 水体中溶解氧的升高可直接影响污泥陶粒表层和内部微生物群落结构的组成和功能. 但沉水植物过多后, 无论是污泥陶粒外层还是内层, 少草水域的污泥陶粒 OTU 数均多于无草和多草水域的污泥陶粒, 这说明在溶解氧和植物化感作用的共同影响下, 微生物群可能存在定向演替^[4, 24].

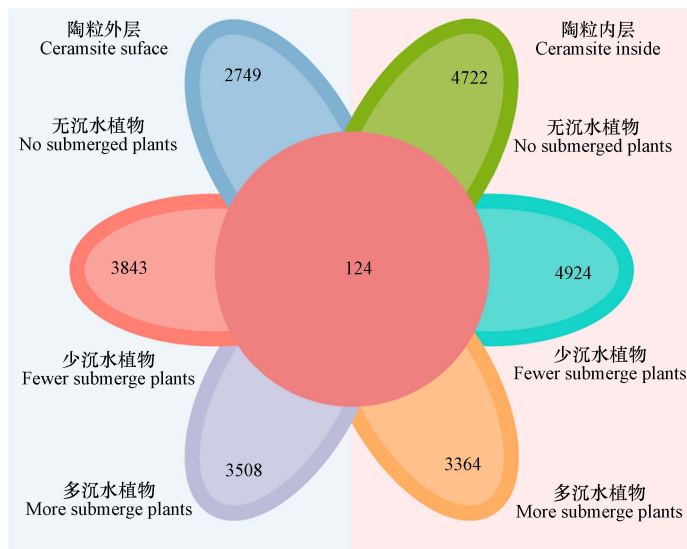


图 5 亲水性污泥陶粒定殖微生物的 Venn 图

Fig.5 Venn diagram of colonizing microorganisms in hydrophilic sludge ceramsite

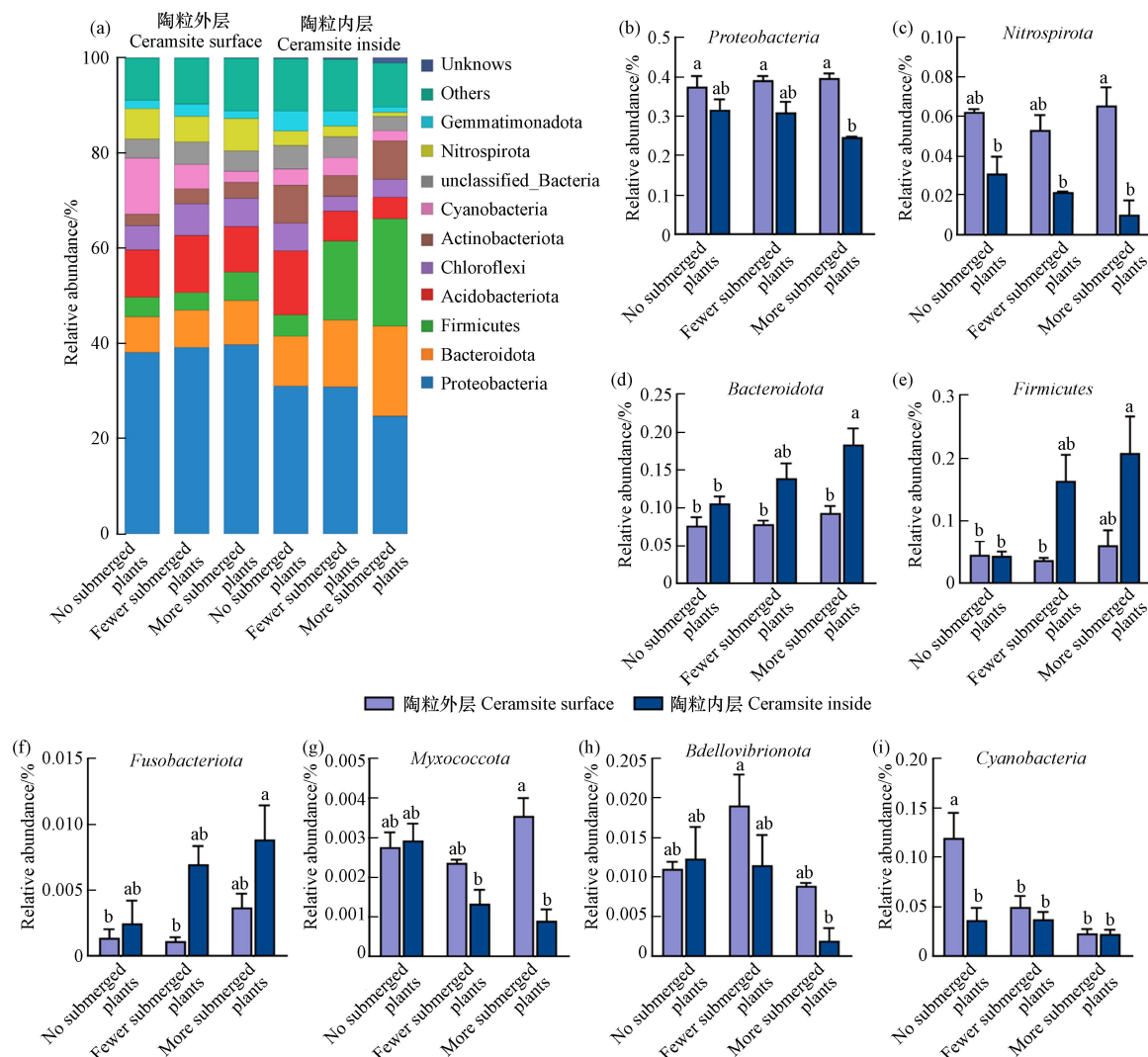


图 6 亲水性污泥陶粒定殖微生物的物种组成分布柱状图(a)和各物种的 ANOVA 差异性分析(b-i)(变形菌(b), 硝化螺旋菌(c), 拟杆菌(d), 梭杆菌门(e), 厚壁菌(f), 粘细菌(g), 蛭弧菌(h)和蓝藻(i))

Fig.6 Histogram of species composition distribution of microorganisms colonized in hydrophilic sludge ceramsite(a) and ANOVA difference analysis for each species (b-i)

除此之外, 蓝藻(*Cyanobacteria*)作为水华的典型生物^[25-26], 在无草水域的陶粒外层定殖较多, 而少草和多草水域污泥陶粒中无论内层还是外层相对丰度显著降低(图6 i), 证实种植沉水植物对蓝藻具有明显的抑制作用, 这可能是由于苦草等对蓝藻的化感作用^[27].

2.5 “水下森林”生态修复作用过程

基于亲水性污泥陶粒开展城市黑臭水体修复及生态重构的应用示范取得了良好的示范效果, 归纳总结了其作用机理如图7所示. 一方面, 亲水性污泥陶粒为沉水植物提供了固着基质, 且沉水植物可有效提升水体溶解氧浓度, 有利于水生微型生物群落的重构和稳定; 另一方面, 亲水性污泥陶粒的引入为厌氧微生物和兼性厌氧微生物提供了适宜的微生境, 陶粒内部捕食性微生物的分布趋势和蓝藻的生长抑制, 均证实溶解氧的升高对水生微型生物的结构和功能具有关键性作用, 示范水体中氮磷的去除及转化规律也进一步证实水体中微型生物的多样性是控制水质的核心指标. 亲水性污泥陶粒用于定植沉水植物的“水下森林”重构策略有利于恢复水体生物多样性, 水体中溶解氧的提升, 促进了轮虫、桡足类、枝角类等浮游动物的生存, 并通过“下行效应”有效抑制水体富营养化—藻华—黑臭水体的演化过程, 最终实现城市黑臭水体的原位生态修复.

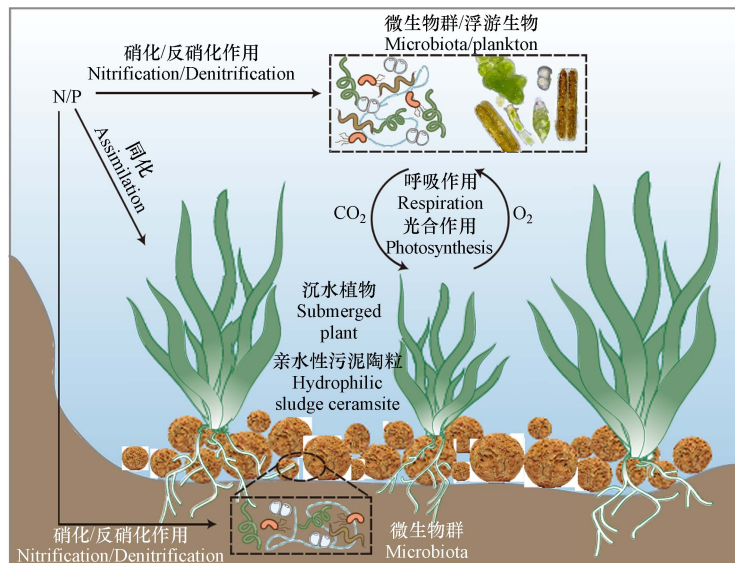


图7 亲水性污泥陶粒重构沉水植物淡水生态系统修复城市黑臭水体示意图

Fig.7 Schematic diagram of reconstruction of submerged plant freshwater ecosystem by hydrophilic sludge ceramsite to restore urban black and odorous water bodies

从淡水生态系统角度出发, 基于亲水性污泥陶粒的沉水植物种植模块可以实现沉水植物的成功种植和后期繁殖, 并为浮游生物和微生物提供栖息地, 从而提高水生态系统的生物多样性. 其中的沉水植物可以吸收水体中的营养盐和二氧化碳, 促进各种元素循环, 同时为定殖的微生物和浮游生物提供氧气. 而定殖的微生物形成的生物膜通过硝化反硝化作用进行氮的转化利用, 浮游生物则通过营养级联效应制衡微生物, 实现水体生物多样性的有效恢复, 预防黑臭水体的发生和生态功能的丧失.

从元素循环角度出发, 碳、氮、磷、硫等元素可以通过沉水植物及定殖的微生物进行转化, 并通过食物链达到平衡. 在底泥/污泥的无害化处置过程中, 烧制陶粒过程会消耗能源排放废气, 属于“增”碳过程, 而构建“水下森林”进行水生态修复为“减”碳过程, 本研究开发的新策略可为国家达成“碳中和”目标提供了新思路和技术支撑.

3 结论(Conclusion)

本文利用污泥烧结成的亲水性污泥陶粒种植沉水植物, 重构了“水下森林”淡水生态系统, 达到了改善水质和恢复生态的目的, 实现了城市生态系统的污泥经烧制成陶粒最终又应用到淡水生态系统修复的无害化、资源化循环利用. 重建水生态系统之后的清源河水水质从劣V类提升至近III类, 各指标提

升明显, 水体透明度显著提高. 亲水性污泥陶粒定殖微生物的结果表明, 亲水性污泥陶粒可以调控微生物的群落分布, 并且沉水植物的化感作用会影响微生物群落的定向演替. 沉水植物光合作用产生的氧气能有效提升水体环境 DO, 抑制了因厌氧微生物过量繁殖导致的水体变黑变臭.

参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发水污染防治行动计划的通知 [EB/OL]. [2015-04-16].
- [2] 王胜利, 张宏耀, 杨青, 等. 本土微生物引导的原位生态修复技术在白洋淀水域污染治理中的应用 [J]. 环境工程, 2023, 41(增刊 2): 62-64.
WANG S L, ZHANG H Y, YANG Q, et al. Application of *in situ* ecological restoration technology guided by indigenous microorganisms in Baiyangdian water pollution control project [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(Sup 2): 62-64 (in Chinese).
- [3] 邢书语, 原璐彬, 刘鑫, 等. 沉水植物体表面附着物重量及碳氮磷元素含量特征分析 [J]. 环境化学, 2021, 40(7): 2092-2104.
XING S Y, YUAN L B, LIU X, et al. Characterization of dry weight and elements contents of biofilms attached on aquatic macrophytes and non-living substrates surface [J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(7): 2092-2104 (in Chinese).
- [4] 龚深, 巢传鑫, 邹冬生, 等. 人工湿地中植物对污染物去除机理研究进展 [J]. 湿地科学, 2023, 21(6): 927-935.
GONG S, CHAO C X, ZOU D S, et al. Research progress on pollutant removal mechanism of plants in constructed wetland [J]. Wetland Science, 2023, 21(6): 927-935 (in Chinese).
- [5] 商放泽, 贾娟华, 李兵, 等. 基于 FBR 生物循环床的小微黑臭水体治理研究 [J]. 环境科学与技术, 2021, 44(增刊 2): 259-265.
SHANG F Z, JIA J H, LI B, et al. Study on treatment of small black and odorous water body based on FBR biological circulating bed [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(Sup 2): 259-265 (in Chinese).
- [6] 吴建勇, 温文科, 吴海龙, 等. 种植方式对沉水植物生态修复效果的影响 [J]. 湿地科学, 2015, 13(5): 602-608.
WU J Y, WEN W K, WU H L, et al. Effects of different planting patterns on the ecological restoration of the submerged plant nets [J]. Wetland Science, 2015, 13(5): 602-608 (in Chinese).
- [7] CHANG Y Y, CUI H, HUANG M S, et al. Artificial floating islands for water quality improvement [J]. Environmental Reviews, 2017, 25(3): 350-357.
- [8] 从“重水轻泥”到“泥水并重”污泥处置产业面临新的使命和机遇 [J]. 中国环保产业, 2023 (1): 16-17.
From “emphasizing water over mud” to “paying equal attention to mud and water”, the sludge disposal industry is facing new missions and opportunities [J]. China Environmental Protection Industry, 2023 (1): 16-17 (in Chinese).
- [9] FENG L Y, LUO J Y, CHEN Y G. Dilemma of sewage sludge treatment and disposal in China [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(8): 4781-4782.
- [10] 王珂乐. 城市污泥处理处置与建材化利用研究 [J]. 河南科技, 2023, 42(4): 59-62.
WANG K L. Research on urban sludge treatment and disposal and utilization of building materials [J]. Henan Science and Technology, 2023, 42(4): 59-62 (in Chinese).
- [11] SHAO Q, ZHANG Y, LIU Z, et al. Phosphorus and nitrogen recovery from wastewater by ceramsite: Adsorption mechanism, plant cultivation and sustainability analysis [J]. The Science of the Total Environment, 2022, 805: 150288.
- [12] WU H M, FAN J L, ZHANG J, et al. Intensified organics and nitrogen removal in the intermittent-aerated constructed wetland using a novel sludge-ceramsite as substrate [J]. Bioresource Technology, 2016, 210: 101-107.
- [13] CHENG G, LI Q H, SU Z, et al. Preparation, optimization, and application of sustainable ceramsite substrate from coal fly ash/waterworks sludge/oyster shell for phosphorus immobilization in constructed wetlands [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 175: 572-581.
- [14] LIU Y S, DU F, YUAN L, et al. Production of lightweight ceramsite from iron ore tailings and its performance investigation in a biological aerated filter (BAF) reactor [J]. Journal of Hazardous materials, 2010, 178(1/2/3): 999-1006.
- [15] 孙康康, 张凌燕, 刘理根, 等. 赤泥强磁尾矿制备水处理陶粒滤料的研究 [J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(7): 2270-2275.
SUN K K, ZHANG L Y, LIU L G, et al. Preparation of ceramsite filter materials for water treatment by tailings with high-intensity magnetic separation from red mud [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(7): 2270-2275 (in Chinese).
- [16] 李倩炜, 周笑绿, 李环, 等. 粉煤灰陶粒填料制备及用作曝气生物滤池填料的性能考察 [J]. 化工进展, 2015, 34(9): 3379-3382.
LI Q W, ZHOU X L, LI H, et al. Research on the preparation of fly ash ceramsite as filler of BAF and its performance in wastewater treatment [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(9): 3379-3382 (in Chinese).
- [17] 叶晶, 怀志文, 黄咏文, 等. 底泥陶粒在水生态修复中的应用 [J]. 中南农业科技, 2023, 44(5): 242-245.
YE J, HUAI Z W, HUANG Y W, et al. Application of sediment ceramsite in water ecological restoration [J]. South-Central Agricultural Science and Technology, 2023, 44(5): 242-245 (in Chinese).
- [18] 郭鹤方, 甄志磊, 赵林婷, 等. 潮汐流-潜流人工湿地对城市污染水体中氮的去除 [J]. 环境化学, 2021, 40(12): 3887-3897.
GUO H F, ZHEN Z L, ZHAO L T, et al. Research on the removal effect of tidal flow-subsurface flow constructed wetland on nitrogen

- in urban polluted water[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(12): 3887-3897 (in Chinese).
- [19] GB 3838, 地表水环境质量标准 [S]. 2002
- [20] 王英哲, 胡海燕, 朱琳, 等. 富营养化对靖海湾浮游植物群落的影响 [J]. 环境化学, 2024, 43(3): 1010-1024.
WANG Y Z, HU H Y, ZHU L, et al. Effects of eutrophication on phytoplankton community in Jinghai Bay[J]. *Environmental Chemistry*, 2024, 43(3): 1010-1024(in Chinese).
- [21] CAO J X, SUN Q, ZHAO D H, et al. A critical review of the appearance of black-odorous waterbodies in China and treatment methods[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 385: 121511.
- [22] 代威, 纠敏, 王文辉, 等. 人工微宇宙下粘细菌捕食对微生物群落结构的影响 [J]. 微生物学报, 2020, 60(3): 452-463.
DAI W, JIU M, WANG W H, et al. Effects of myxobacteria predation on microbial community structure of artificial microcosm[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2020, 60(3): 452-463 (in Chinese).
- [23] BURIAN A, PINN D, PERALTA-Maraver I, et al. Predation increases multiple components of microbial diversity in activated sludge communities[J]. *Multidisciplinary Journal of Microbial Ecology*, 2022, 16(4): 1086-1094.
- [24] 焦岗伟, 赵倩名, 何培民, 等. 基于化感原理的复合抑藻剂研究进展 [J]. 环境污染与防治, 2023, 45(9): 1287-1293.
JIAO G W, ZHAO Q M, HE P M, et al. Progress on the study of compound algaecide based on allelopathy[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2023, 45(9): 1287-1293 (in Chinese).
- [25] 任庆莲, 徐超, 郑瑞文, 等. 多水源水库蓝藻水华风险防范措施成效研究: 以玉清湖水库为例 [J]. 湿地科学, 2023, 21(6): 820-829.
REN Q L, XU C, ZHENG R W, et al. Study on effectiveness of prevention and control measures for cyanobacteria bloom risk in the multi-source reservoir: Take the yuqinghu reservoir as an example[J]. *Wetland Science*, 2023, 21(6): 820-829 (in Chinese).
- [26] 文刚, 白愿楠, 王茹, 等. 淡水硅藻水华成因与控制技术研究进展 [J]. 环境科学研究, 2024, 37(2): 316-325.
WEN G, BAI Y N, WANG R, et al. Review of causes and control technologies of freshwater diatom blooms[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2024, 37(2): 316-325 (in Chinese).
- [27] WANG T T, LIU H C. Aquatic plant allelochemicals inhibit the growth of microalgae and cyanobacteria in aquatic environments[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(48): 105084-105098.