DOI:10.11705/j. issn. 1672 - 643X. 2021. 03. 17

生物质碳源与非生物质填料组合生态 浮床净化水体效果

高小宝¹,马志远²,陈晓阳³,伏炯³,陈士超³ (1.同济大学海洋与地球科学学院,上海 200092; 2.同济大学物理科学与工程学院, 上海 200092; 3.同济大学生命科学与技术学院,上海 200092)

摘 要: 为提升生态浮床对水体的净化效果,以无碳填料为对照,选用生物质碳源(玉米芯)与沸石制备碳源复合填料,分别添加到菖蒲 + 旱伞草、美人蕉 + 菖蒲 3 种植物组合构建的组合生态浮床中,以研究生物质碳源复合填料生态浮床对氮、磷和有机物的去除效果及浮床植物的生长特性。结果表明:复合碳源填料对促进植物生长和提升生态浮床的净化效果有重要作用。加碳源组合中植物的平均生长速度和生长量整体优于无碳组合。加碳源组合浮床对 NH_4 $^+$ -N $_NNO_3$ $^-$ -N $_NTP$ $_$

关键词:水体净化;生态浮床;生物质碳源;原位水体修复

中图分类号:X52

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)03-0124-06

Water purification effect of ecological floating beds with biomass carbon source and non-biomass fillers

GAO Xiaobao¹, MA Zhiyuan², CHEN Xiaoyang³, FU Jiong³, CHEN Shichao³

(1. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Life Sciences and Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to improve the purification effect of ecological floating beds, the carbon source composite fillers with corncob and zeolite were applied to three plant assemblages, i. e. *Acorus calamus* L. + *Cyperus altenifolius*, *Canna indica* L. + *Cyperus altenifolius*, and *Canna indica* L. + *Acorus calamus* L. With the non-carbon fillers as the control, we investigated the removal effect of nitrogen, phosphorus and organic matter by the biomass carbon source composite fillers, as well as the growth characteristics of the plants. The results showed that the composite carbon source filler played an important role in the purification process of the floating beds and enhanced the plant growth. The average growth rate and quantity of all three plant assemblages with carbon source composite fillers were better than those with non-carbon fillers in general. The average removal rate of ammonia nitrogen (NH_4^+-N), nitrate nitrogen (NO_3^--N), total phosphorous (TP) and chemical oxygen demand (COD) by these three plant assemblages were 73.0%, 88.7%, 54.4% and 58.7%, respectively, which were improved by 6.9%, 5.0%, 18.4% and -22.3% respectively, compared to those of the non-carbon fillers. The assemblage of *Acorus calamus* L. + *Cyperus altenifolius* with a biomass carbon source filler could remove $NH_4^+-N_NO_3^--N_N$ TP by the average rate of 76.6%, 92.6%, and 60.7% respectively, which was evidently better than the removal result of *Canna indica* L. + *Acorus calamus* L. , and *Canna indica* L.

收稿日期:2021-05-15; 修回日期:2021-07-06

基金项目:国家自然科学基金项目(41671283); 同济大学 2018 年校级科创项目(2018.11 - 2019.11)

作者简介:高小宝(1999-),男,河南灵宝人,本科生,海洋地质专业。

通讯作者:陈士超(1970-),男,安徽人,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为植物系统发育与分子进化。

+ Cyperus altenifolius. Therefore, the assemblage of Acorus calamus L. + Cyperus altenifolius with a biomass carbon source filler is recommended for the in-situ water restoration.

Key words: water purification; ecological floating bed; biomass carbon source; *in-situ* water restoration

1 研究背景

人工浮床技术具有可移动、无动力、无维护以及 兼具经济和美观双重功能等优点,被广泛应用于水 体原位修复[1-2]。浮床植物既能吸收水体中的营养 盐,其根部分泌产生的化感物质又能抑制藻类,对美 化环境、净化水体有重要的作用[3-4]。吴英杰等[5]、 Zhang 等^[6]分别用北美海篷子和水雍菜处理养殖废 水,发现 NH₄ +—N、NO, -—N 和 COD 均得到了有 效削减, 去除率在11%~60%之间: 彭蕾[7] 洗取了 湖南常见的14种植物在实验室条件下模拟处理化 粪池生活污水,发现植物处理组对 NH4+-N、TP 和 COD 的去除率显著高于无植物的对照组,填料植物 复合组显著优于单一植物组;王郑等[8]在处理农家 乐生活污水时,发现美人蕉和球形填料相结合的复 合型生态浮床的净化效果优于单一系统。可见,植 物在污染物的净化过程中发挥着重要作用,但简单 的植物浮床由于有机碳源不足而难以发挥反硝化作 用,对水体净化效果相对较差[9-12]。

复合型生态浮床充分利用填料、植物和微生物 的协同作用去除水体中氮、磷、有机物等污染物,以 达到净化富营养化水体的目的[13-14]。郑尧等[15]构 建了"鱼腥草-薄荷-空心菜"三明治模型浮床处 理鱼塘养殖水取得了较好的效果; Winston 等[16] 经 过14个月的现场试验,发现灯心草、米草、梭鱼草等 植物混植搭配的生态浮床对两个池塘的污染物去除 率分别达到了 36% 和 59%; 汤茵琪等[13] 通过挂膜 将异养硝化-好氧反硝化菌与填料结合,提高了浮 床对富营养化水体中氮和有机物的去除效果;王芳 等[17]利用玉米芯、稻草等农业废弃物和水生植物, 构建了新型立体组合式生态浮床系统,NH4+-N、 TN 和 COD 的去除率可分别达到 96.77%、95.51% 和77.75%;姬芬等[18]构建集挺水植物、沉水植物 和微生物于一体的组合型生态浮床系统,并对其技 术工艺周年运行效果进行探究,发现浮床系统中层 介质的降解能力占主导地位;王超等[19]和辛在军 等[20] 在详细回顾生态浮床技术构建方法和净化机 理后指出,对于富营养化的处理,要结合生物共生协 同机制和硝化与反硝化条件,充分发挥微生物除污 的主导作用。

本研究提出了新型生态浮床结构,以期通过构建框架式无基质床体,通过浮床植物的相互组合实现生物协同共生,提升浮床植物对水体污染物的吸收、截留和利用效率;通过浮床植物、生物质碳源与非生物填料的有机组合,创建硝化与反硝化同步反应条件,为厌氧环境供给有机碳源,促进反硝化反应,改善水质,从而完成富营养水体中氮、磷和有机物的自然降解与控制,为水体富营养化控制和水质改善提供依据和支撑。

2 材料与方法

2.1 试验材料

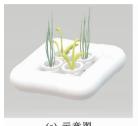
2.1.1 有机和无机填料 该试验所用的生物质碳源填料为玉米芯,无机填料为沸石。玉米芯是一种常见的农业副产品,其主要成分为纤维素和半纤维素,具有较大的比表面积,微生物易于附着生长,反硝化效果理想,且环保经济,是生态浮床系统的理想碳源填料和微生物的理想载体。沸石的吸附和离子交换性能强,对微生物具有良好的富集作用,可用作硝化和反硝化细菌的生长介质。本试验所用沸石粒径为0.4~0.6 cm,孔隙率为40.31%。

2.1.2 试验用水 试验用水采用人工模拟的重度富营养化人工配水。将 40 L 自来水经暴晒后加入水桶中,再加入 0.68 g 氯化铵(NH_4Cl)、1.14 g 硝酸钾(KNO_3)、0.39 g 磷酸二氢钾(KH_2PO_4)以模拟富营养化水中氮和磷元素,也为植物根系提供可吸收的氮源和磷源。另外每桶水中加 1.37 g 葡萄糖($C_6H_{12}O_6$)为微生物提供初始可降解的碳源。水体初始 NH_4 —N 浓度为 5.16 ~ 6.19 mg/L, NO_3 —N 浓度为 16.23 ~ 17.91 mg/L, TP 浓度为 6.8 ~ 7.1 mg/L, TP 浓度为 6.8 ~ 7.1 mg/L, TP 次度为 6.8 mg/L,

2.1.3 试验植物 试验所用植物为水生美人蕉 (Canna indica L.)、菖蒲(Acorus calamus L.)和旱 伞草 (Cyperus alternifolius)。水生美人蕉为多年生 宿根草本,其根系长,泌氧能力好,能为好氧微生物 提供较适宜的环境,该植物喜温暖和充足的阳光,不耐寒;菖蒲为多年生湿生挺水草本,其根状茎粗壮,具有毛发状须根,适应范围广泛,喜冷凉气候,耐寒

性较强;旱伞草为多年生草本,生物量大且根系发达,对氮、磷吸收效果好,喜温暖阴湿通风良好环境,耐阴,耐水湿,忌阳光直射和曝晒。

2.1.4 容器和浮床 本试验采用的自行组装的生态浮床见图1。该浮床床体长、宽各20 cm,由PVC管(直径 d=5 cm)及弯头构成框架结构,用麻绳将定植篮固定于床体中央以便支撑和固定植物根系。本试验所用的水体容器为容积60 L的蓝色聚乙烯材质水桶。





(a) 示意图

(b) 实物图

图 1 试验采用的自行组装生态浮床

2.1.5 供试植物预备与驯化 选美人蕉、旱伞草、菖蒲为供试植物。在浮床组建前,用清水将植物冲洗干净,浸泡于试验水中驯化14d,试验开始时选取长势较好且高度和根长一致的植物放置于浮床上开始试验。

2.1.6 碳源复合填料及制备 碳源复合填料基本构成为玉米芯+沸石,质量构成为2束玉米芯(约13.27 ± 0.75 g) + 0.5 kg 生物填料沸石(粒径0.4~0.6 cm)。试验开始前对玉米芯进行预处理备用。将沸石装入通透性良好的高分子纤维袋中,每袋0.5 kg,共两袋,将玉米芯也装为两袋。将装好的材料间隔坠挂于碳源处理组浮床床体四角的 PVC 弯头下,以形成覆盖面较大的高效生物膜净化区,另将同样重量的沸石装袋悬挂在无碳对照组浮床床体四角的 PVC 弯头下。

2.2 试验设计及测试方法

试验于2019年7月3日开始,8月7日结束,试验场地选择在同济大学废弃开水亭回廊下,回廊上方有遮雨棚,通风透气,光照适宜,有利于植物生长。试验中除温度及湿度外基本可以排除外部条件的影响。回廊横向放置18个60L试验水桶,每桶加40L人工配水,在水体上放置浮床进行静态试验,试验历时为36d。

共设置 6 组处理:处理 I 为"2 株菖蒲 +2 株旱 伞草"+碳源填料,处理 II 为"2 株美人蕉 +2 株旱 伞草"+碳源填料,处理 III 为"2 株美人蕉 +2 株菖 蒲"+碳源填料,处理 IV 为"2 株菖蒲+2 株旱伞草"+沸石填料,处理 V 为"2 株美人蕉+2 株旱伞草"+沸石填料,处理 VI 为"2 株美人蕉+2 株菖蒲"+沸石填料,每组处理设3个重复,试验处理组次详见表1。为减少植物生长周期的影响,试验周期设置为36 d^[21],水温介于23.8~29.5 ℃,平均水温为25.7 ℃,适宜浮床植物的正常生长。

表 1 设计试验处理组次

组次 编号	碳源复 合填料	美人蕉 株数	菖蒲 株数	旱伞草 株数
I	加碳源	0	2	2
II	加碳源	2	0	2
Ш	加碳源	2	2	0
IV	无碳	0	2	2
V	无碳	2	0	2
VI	无碳	2	2	0

试验期间每 7 d 对水质进行采样并定量分析 NH_4^+ — $N_NO_3^-$ — N_N TP 和 COD 含量来计算其浓度。 NH_4^+ — N_N H 架用纳氏比色法测定, NO_3^- — N_N H 黑用紫外分光光度法测定,NH 采用钼酸铵分光光度法测定,NH 采用钼酸铵分光光度法测定,NH 采用银酸铵分光光度法测定,NH 采用银酸铵分光光度法测定,NH 采用银酸铵分光光度法测定,NH 采用银酸铵分光光度法测定,NH 采用银酸铵分光光度法测定。试验数据测定工作在同济大学城市污染控制国家工程研究中心实验室进行。

2.3 数据分析

污染水体中 NH_4 ⁺—N、 NO_3 ⁻—N、TP 和 COD 的去除率计算方法为:

$$W_i = (C_0 - C_i)/C_0 \times 100\%$$
 (1)
式中: W_i 为第 i 天污染物的总去除率; C_0 为初始污染物浓度, mg/L ; C_i 为第 i 天污染物浓度, mg/L .

所有数据均采用 3 次重复的平均值来表示。数据处理和绘图采用 Excel 2010 和 SigmaPlot 12.5 统计分析软件进行。

3 结果与分析

3.1 植物生长状况

36 d 试验期间,浮床植物生长情况良好,存活率 100%。其中,美人蕉在试验期间生长旺盛,试验之初植株高度为 20~22 cm,试验结束时株高平均为 58 cm,最高达 70 cm,其根系生长良好,平均长度为 13.2 cm,最长达 15 cm;菖蒲在试验期间虽然高度变化不大(初始平均株高 20.5 cm,结束时平均株高 24.5 cm,最高 32 cm),但植株粗度较试验之初几

乎增加 1 倍,其根系生长良好,平均长度为8.67 cm,最长达 12.7 cm,同时密度也更繁密;旱伞草生长较慢,高度变化不明显(初始平均株高 10.5 cm,结束时平均株高 12.7 cm,最高 18.5 cm),但平均萌生4~5 支新茎与 15~20 支水生根,根系平均长度 7.7 cm,最长 11.2 cm。

整个试验过程中,加碳源组合的浮床植物生长 状况整体优于无碳组合,表明碳源复合填料吸附的 微生物对浮床植物的生长有明显的促进作用。其机 理可能是:碳源的加入有利于提升植物根际微生物 数量、浓度和活性,故加碳源填料的浮床植物生长状 态和速率优于无碳填料浮床植物;相对于无碳填料, 有碳填料中的玉米芯在作为填料过程中能释放出 Ca²+、Na+、Mg²+等微量元素作为生物酶的激活剂, 有利于促进根际微生物和植物的生长。

3.2 对 NH₄ +—N 的净化效果

铵态氮 (NH_4^+-N) 含量是水体富营养化的一个重要指标 $,NH_4^+-N$ 的去除途径包括生物硝化、

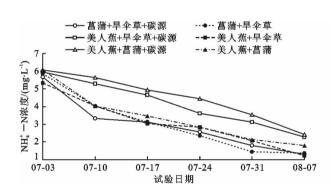


图 2 试验各处理中 NH4 +-N 浓度随时间的变化

3.3 对 NO, --N 的净化效果

硝态氮 (NO_3^--N) 主要是由富营养化水体本身具有的 NO_3^--N 和硝化菌硝化作用生成的 NO_3^--N 组成,主要通过微生物的反硝化作用和植物吸收两种方式去除。图 4为试验各处理中 NO_3^--N 浓度随时间的变化,图 5为试验各处理中 NO_3^--N 去除率随时间的变化。

由图 4、5 可以看出,各处理 NO₃ —N 的浓度随时间推移在逐渐减小,去除率随时间推移而不断增大。加入碳源后浮床对水体 NO₃ —N 的去除效果有所提升,各加碳源组合对 NO₃ —N 的平均去除率为88.7%,总体上优于无碳组合的平均去除率83.7%。试验结束时对各加碳源组合进行比较,"旱伞草+菖蒲"+碳源组合对 NO₃ —N 去除率最高,达到 92.6%,"美人蕉+菖蒲"+碳源组合对

植物吸收及 NH₃的挥发等方式。图 2 为试验各处理中 NH₄⁺—N 浓度随时间的变化,图 3 为试验各处理中 NH₄⁺—N 去除率随时间的变化。

由图 2、3 可知,随着时间的推移,各处理的 NH₄⁺—N浓度持续降低,去除率不断增大。试验结束时,加碳源组合的 NH₄⁺—N 平均去除率为 73.0%,无碳组合平均去除率为 66.1%,加碳源组合较无碳组合的平均去除率高 6.9%,表明加碳源组合去除效果优于无碳组合;比较试验结束时所有植物组合的去除率发现,"菖蒲+旱伞草"+碳源组合对 NH₄⁺—N 的去除率最高(76.6%),"美人蕉+菖蒲"+碳源组合次之(71.9%),"美人蕉+旱伞草"组合最差(60.6%)。在 7 月 10 日的各组合中去除率最高的为无碳的"菖蒲+旱伞草"组合,而 7 月 17 日及以后,加碳源的"菖蒲+旱伞草"组合去除率始终为各组合中最高。上述结果表明,植物浮床通过加入复合碳源填料,使水体中 NH₄⁺—N 得到了较好的去除。

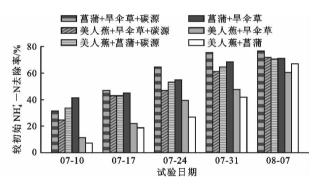


图 3 试验各处理中 NH₄ +—N 去除率随时间的变化

 NO_3 —N 去除率最低,为86.1%;对各无碳组合进行比较,"美人蕉+菖蒲"对 NO_3 —N 去除率最高,为84.5%,"菖蒲+旱伞草"对 NO_3 —N 去除率最低,为83.0%。

3.4 对 TP 的净化效果

磷是水体富营养化的主要控制因素,本试验对TP的去除方式包括植物根系的吸收、植物的同化、填料的吸附以及微生物的固定等,各试验组合对TP的去除效果见图 6、7。

由图 6、7 可知,随着时间的推移,各组合中 TP 浓度逐渐降低,去除率逐渐增大。试验结束时,各加碳源组合的平均去除率为 54.4%,显著优于无碳组合的平均去除率 36.0%。加碳源组合中"菖蒲+旱伞草"+碳源的去除效果最优,达到 60.7%,而无碳组合各处理的去除率相差不大。

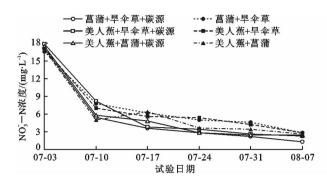


图 4 试验各处理中 NO, --N 浓度随时间的变化

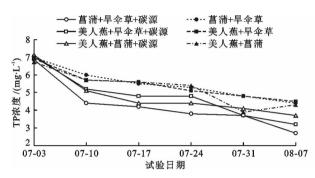


图 6 试验各处理中 TP 浓度随时间的变化

3.5 对 COD 的净化效果

水体中 COD 去除方式包括微生物降解、植物根系截留、填料吸附等,其中微生物降解是最主要的去除方式。试验各处理中 COD 浓度随时间的变化如图 8 所示。

由图 8 可以看出,各加碳源组合的 COD 浓度均呈现出试验开始后第 1~3 周急剧增大,在 7 月 24 日形成峰值,随后第 4~5 周又急剧下降的现象,最终 COD 浓度降低至 8~28 mg/L,平均去除率为58.7%。各无碳组合的 COD 浓度随时间呈缓慢波动减小趋势,最终 COD 浓度降低至 2~12 mg/L,平均去除率达到 81.0%。第 4~5 周各加碳源组合的COD 去除速率明显优于无碳组合,表明加碳源组合对COD 有良好的去除效果,但需要对碳的添加量和预处理方式进行深入研究,以防止碳污染水体。

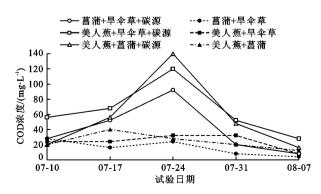


图 8 试验各处理中 COD 浓度随时间的变化

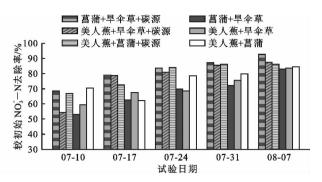


图 5 试验各处理中 NO, --N 去除率随时间的变化

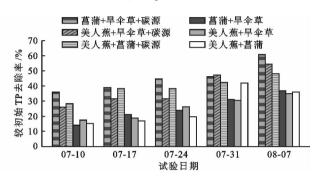


图 7 试验各处理中 TP 去除率随时间的变化

4 讨 论

本试验的目的在于筛选出合适的复合生物碳源填料以及所选植物中最佳的浮床植物组合,在充分发挥有益微生物除污主导作用的同时,结合生物协同共生机制,并利用硝化与反硝化条件对浮床结构提出新构想,以期能大幅度提高生态浮床对水体的生态净化功能。生物质碳源玉米芯所含的大量纤维素、半纤维素和木质素在水体中降解释放出单糖等营养物质,是微生物的有益碳源。在试验结束时,各加碳源组合的COD浓度较无碳组合浓度还高,说明碳源预处理和精确的加碳量非常重要,因此今后应当强化碳源预处理方面的研究,避免因所用碳源不当而影响去污效果甚至再度污染水体。

此外,添加生物质碳源的"菖蒲 + 旱伞草"对 NH_4^+ — $N_NO_3^-$ —N 和 TP 均有最佳的去除效果,碳源对该植物组合去除 NO_3^- —N 和 TP 的效果提升较为明显,对去除 NH_4^+ —N 的效果提升不明显。所选碳源复合填料对"美人蕉 + 菖蒲"组合作为浮床植物的促进效果不大,即使不加入碳源,该组合对 NO_3^- —N 和 TP 的去除效果也很好,这可能是浮床植物"美人蕉 + 菖蒲"对 NO_3^- —N 和 TP 的吸收量较大所致^[7]。加入生物质碳源后,"美人蕉 + 旱伞草"组合对 NH_4^+ — $N_NO_3^-$ —N 和 TP 的去除效果有明显提升,说明浮床植物、生物质碳源与非生物填

料的有机组合创建了硝化与反硝化同步反应条件,加快了植物对氮的转化和利用,从而改善了水质。

5 结 论

- (1)加碳源组合浮床中植物的生长状态和生长 速率明显优于无碳源浮床植物。
- (2)所有生物质碳源与非生物质填料组合生态 浮床的 NH_4^+ — $N_NO_3^-$ —N 及 TP 浓度随时间均逐 渐减小,去除率随时间逐渐增大,加碳源组合的平均 去除率均高于无碳组合。加碳源组合中的"菖蒲+旱伞草"+碳源对 NH_4^+ — $N_NO_3^-$ —N 及 TP 的去除率最高,该组合可作为水体原位修复的理想浮床植物组合。
- (3)各加碳源组合的 COD 浓度在第 1~3 周急 剧上升,4~5 周又急剧下降;各无碳组合 COD 浓度 随时间呈波动减小趋势。外加碳源的释放和生物质 碳源可为微生物提供充足的养分,但同时又使 COD 浓度增大,今后应当强化碳源预处理方面的研究,避 免因所用碳源不当再度污染水体。

参考文献:

- [1] 杨凤娟,杨 扬,潘 鸿,等. 强化生态浮床原位修复技术 对污染河流浮游动物群落结构的影响[J]. 湖泊科学, 2011,23(4):498-504.
- [2] 张择瑞, 张学飞, 郭婧, 等. 生态浮床的改进设计及其性能比较研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(4):533-538.
- [3] 陆东芳, 陈孝云. 水生植物原位修复水体污染应用研究进展[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(21):5137 5142.
- [4] 汪开英,郑水生,郭宗楼,等. 提高生态浮床系统脱氮除 磷效率研究进展[J]. 湿地科学,2012,10(1):116-120.
- [5] 吴英杰,马璐瑶,陈琛,等. 北美海蓬子生态浮床对养殖海水的净化和对虾的增产效果[J]. 环境工程学报,2018,12(12):3351-3361.
- [6] ZHANG Qiuzhuo, ACHAL V, XU Yatong, et al. Aquaculture wastewater quality improvement by water spinach (*Ipomoea aquatica Forsskal*) floating bed and ecological benefit assessment in ecological agriculture district [J].

- Aquacultural Engineering, 2014, 60:48 55.
- [7] 彭 蕾. 生态浮床植物的筛选与植物填料复合模式污水 净化效果研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2020.
- [8] 王 郑, 崔康平, 许为义, 等. 组合型生态浮床处理农家 乐污水[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1):455-460.
- [9] 王 俭, 吴 阳, 王晶彤, 等. 生态浮床技术研究进展[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2016, 43(1):50-55.
- [10] 何培芬, 张立秋, 李淑更, 等. 丝瓜络碳源模拟 PRB 去除地下水中硝酸盐[J]. 环境工程, 2018, 36(10): 53-58.
- [11] 李 斌, 郝瑞霞. 固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选[J]. 环境科学, 2013, 34(4):1428-1434.
- [12] 吉芳英, 白婷婷, 张 千, 等. 固体碳源反硝化滤池脱 氮效果及沿程生化特性[J]. 环境工程学报, 2017, 11 (3):1347-1354.
- [13] 汤茵琪,李阳,常素云,等. 好氧反硝化菌强化生态 浮床对水体氮与有机物净化机理[J]. 生态学杂志, 2017, 36(2):569-576.
- [14] BU Faping, XU Xiaoyi. Planted floating bed performance in treatment of eutrophic river water [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185:9651-9662.
- [15] 郑 尧, 裘丽萍, 胡庚东, 等. 不同比例"鱼腥草-薄荷-空心菜"浮床对吉富罗非鱼养殖池塘环境的影响 [J]. 安徽农业科学, 2019, 47(1):80-82.
- [16] WINSTON R J, HUNT W F, KENNEDY S G, et al. E-valuation of floating treatment wetlands as retrofits to existing stormwater retention ponds [J]. Ecological Engineering, 2013, 54:254-265.
- [17] 王 芳, 张汇文, 吴国华, 等. 生物质碳源组合型生态 浮床系统脱氮效果研究[J]. 环境工程学报, 2014, 8 (8):3099-3106.
- [18] 姬 芬, 张饮江, 王 芳, 等. 组合型生态浮床系统脱氮 效果的周年变化[J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26 (2);235-242.
- [19] 王 超, 王永泉, 王沛芳, 等. 生态浮床净化机理与效果研究进展[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(2):112-116.
- [20] 辛在军,魏国汶,姚忠,等. 国内生态浮床原位修复复合强化技术研究进展[J]. 北方园艺,2019(3):155-161.
- [21] 张晓一. 表面流人工湿地与复合型生态浮床对低污染水体氮磷的去除特性研究[D]. 上海:上海交通大学,2019.