

3种新型浮床植物净化富营养化水体的试验研究

张择瑞¹, 张学飞¹, 郭婧¹, 汪家权²

(1.合肥工业大学机械工程学院,安徽合肥 230009;2.合肥工业大学资源与环境工程学院,安徽合肥 230009)

摘要:为探索高效净化富营养化水体的新型浮床植物,在室外条件下,选取有药用价值和绿化作用的3种陆生植物酸模、沿阶草、麦冬作为浮床植物,以自行设计组装的生态浮床作为植物载体,对由湖水加一定量的营养元素配制的富营养化污水进行为期40d的处理,比较植物生长情况和净化效果.结果显示,3种植物都能全部存活,酸模长得较快,生物量增加较多,但生命周期短,而沿阶草和麦冬是常青植物.实验结束时,酸模对TP(总磷)的去除率为90%,而其他两种植物为40%左右;酸模对 NH_4^+-N 的净化速率比沿阶草和麦冬大,随着时间的增加,3种植物对 NH_4^+-N 的去除率都能达到90%左右;酸模对TOC(总有机碳)的去除率达80%,而麦冬和沿阶草为60%~70%.研究表明,酸模、沿阶草和麦冬都可以作为浮床植物,可根据不同生态条件和水体污染程度针对性选择使用.这对新的浮床植物品种的开发具有重要的现实意义.

关键词:生态浮床;植物选择;富营养化;水体污染;污水治理

中图分类号: X524

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2018.03.006

引用格式: 张择瑞,张学飞,郭婧,等. 3种新型浮床植物净化富营养化水体的试验研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2018, 48(3): 221-228.

ZHANG Zerui, ZHANG Xuefei, GUO Jing, et al. Experimental study on three new floating bed plants for purifying eutrophic water[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2018, 48(3): 221-228.

Experimental study on three new floating bed plants for purifying eutrophic water

ZHANG Zerui¹, ZHANG Xuefei¹, GUO Jing¹, WANG Jiaquan²

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To seek for new floating bed plants which can efficiently purify eutrophic water, three kinds of terrestrial plant with medicinal value and greening effect, *Rumex acetosa*, *Ophiopogon bodinieri* and *Ophiopogon japonicus* were selected as the floating-bed plants for outdoor experiments. The self-designed ecological floating-bed was used as the plants carrier. The eutrophic waste water which consisted of lake water and a certain amount of nutrients was put under treatment for 40 d. The growth of the plants and the purification effect were compared. The results show that all three plants can survive, and that *Rumex acetosa* grows faster and its biomass increases more, but its growth period is short, while *Ophiopogon bodinieri* and *Ophiopogon japonicus* are the evergreen plants. At the end of the experiment, the removal

收稿日期: 2017-05-18; 修回日期: 2017-12-08

基金项目: 国家重大科技专项水体污染治理专项(2012ZX07103-004)资助.

作者简介: 张择瑞,男,1985年生,博士生.研究方向:环保装备及工程.E-mail: zrsq2020@163.com

通讯作者: 汪家权,博士/教授.E-mail: jiaquan.wang@163.com

rate of total phosphorus by *Rumex acetosa* is 90%, while that of the other two plants is about 40%. The purification rate of ammonia nitrogen by *Rumex acetosa* is higher than that of *Ophiopogon bodinieri* and *Ophiopogon japonicus*. As time goes by, the ammonia nitrogen removal rate by the three plants can reach about 90%; the removal rate of total organic carbon by *Rumex acetosa* is 80%, while the removal rate by *Ophiopogon bodinieri* and *Ophiopogon japonicus* is 60%~70%. It has been shown in this paper that *Rumex acetosa*, *Ophiopogon bodinieri* and *Ophiopogon japonicus* can be used as floating bed plants, and that they can be selected according to different ecological conditions and the degree of water pollution. This has important practical significance for the development of new varieties of floating bed plants.

Key words: ecological floating bed; plant selection; eutrophication; water pollution; waste water treatment

0 引言

富营养化是导致水体污染的主要原因之一。采取引水冲淤、疏挖底泥等物理方法治理富营养化水体费用较高,且治标不治本;投加药剂等化学方法容易造成二次污染^[1]。除运用物理、化学方法外,当前治理和修复水体富营养化的其他手段还有构建人工湿地和稳定塘,利用生态浮床技术等^[2-4]。生态浮床技术是综合了物理、化学、生物方法的富营养化水体原位生态修复技术,它具有无环境风险和二次污染、植物无需施肥、病虫害少、生物生产量高,有经济效益和美化功能,造价较低、材料广泛、容易拼装、结构牢固、不怕风吹浪打等优点^[5],得到了越来越广泛的应用,取得了一系列让人满意的效果^[6-8]。这几年,生态浮床技术在我国的研究和应用突飞猛进。张志勇^[9]等研究表明黑麦草、水芹和香根草对生活污水中 TP(总磷),TN(总氮)和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的净化效果良好。周楠楠等^[10]用菹菜和美人蕉浮床系统净化富营养化水体,通过 31 d 的实验,菹菜系统对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 的去除率为 89% 和 85%,美人蕉系统为 39% 和 36%。章文贤等^[11]和薛彦君等^[12]利用美人蕉作为浮床植物治理富营养化水体,经过植物吸收、自然沉积、微生物分解和动物利用、曝气等过程和手段,水体中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,TN,TP 和 COD 有较高的去除率,水质可达到国家景观用水标准。

一个完整的生态浮床主要由载体、固定装置和浮床植物三部分组成^[13]。生态浮床通过以下几种主要方式净化水质:植物吸收水中的营养盐供自身生长需要;利用植物根系巨大的表面积,微生物与其形成共生关系,加强接触氧化反应的进行;植物根系产生大量的酶,加快污染物的分解;某些植物能够产生克藻物质,控制水华的暴发^[14]。范洁群等^[15]研究发现植物吸收和植物共生的微生物脱氮是去氮的两种

主要形式,在某些条件下后者占主导地位,所以某些生物量大、根系发达的植物较适合作为浮床植物。

浮床植物是浮床系统最重要的组成部分。选择的植物是否合理是影响浮床技术效果至关重要的一个环节。当前浮床植物大体上可分为美人蕉等花卉类、菹菜等蔬菜类、香根草等饲料类和香蒲等水生植物类^[14]。作为浮床技术的核心,浮床植物应具有无害性、易驯化性、耐水性、本土性和易维护性^[16-18]。这就要求用于浮床技术的植物能够在本地生长,还要能适应水环境,最好是本土植物。某些情况下,一些本来生长在泥土里的陆生植物用作浮床植物时,需要对其进行驯化^[19]。

采用生态浮床技术治理富营养化水体有一些不足之处。效率不高和很多浮床植物生命周期较短,或者不耐寒、凋亡后不能继续净化污水是较为突出的问题。目前,浮床植物品种不是很多,寻找高效、有价值的浮床植物是重要的研究方向之一。

本试验选取了在我国分布广泛、具有药用和绿化价值、以前鲜有选用和报道的 3 种多年生草本植物酸模、沿阶草和麦冬用于浮床技术。此 3 种植物生长旺盛、根系发达,具有本土性、无害性和易维护性。本文大胆尝试利用具有相应价值的本土植物作为浮床植物,旨在通过各植物对富营养化水体治理效果的比较,结合植物的生长特性和对污水的净化规律进行探讨,以期对浮床植物的选择和对相关污水的处理提供科学依据和实践经验,力求寻找和发现适用于高效治理富营养化水体的浮床植物新品种。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

(I) 浮床

载体是浮床植物的承载物,是生态浮床的重要组成部分,应尽可能符合稳定性、耐久性、经济性、环

境的协调性和结构的简易性等条件^[18,20,21]。本试验使用的是自行改进设计、组装的生态浮床,如图1所示。该浮床框架为长方形,长60 cm、宽40 cm,所用材料为PVC管(管径3 cm)、方形格渔网和尼龙线等。将截断的PVC管用弯头和PVC胶连接,形成框架。由于该框架中空,所用PVC材质较轻,该框架具有传统浮床框架和浮体的双重功能,使浮床结构得到了简化。用线将渔网固定在框架上,并将两层框架垂直固定在一起形成浮床。浮床植物被种植在两层网的网格中。各种生物填料均可挂在浮床下。该浮床材料环保,不会引起二次污染;对阳光遮蔽较少,不会影响大气复氧和水下植物的光合作用,有利于提高浮床处理效率。另外,该浮床设计灵活、价格便宜、经久耐用。



图1 试验所用浮床实物图

Fig.1 Picture of the floating bed used for the experiment

(II) 水箱

本试验所用4个同一规格水箱为白色聚乙烯材料制成的长方体结构,无臭无毒,稳定性好,可盛载180 L的试验用水。

(III) 供试植物

本试验选取酸模、沿阶草和麦冬3种本地常见、价值广泛的植物用于试验研究。酸模为蓼科多年生草本植物,长于山坡、路旁、荒地或山谷,全国各地随处可见。酸模用途很多:根或全草可入药,具有凉血、解毒、通便、杀虫等功能;鲜嫩的茎和叶可作为蔬菜食用或用作动物饲料;叶能提取染料;根的提取物可制烤胶。沿阶草是百合科多年生草本地被植物,根细长,接近根的末端有时会有纺锤形的小块根。沿阶草耐湿又耐旱,耐热也耐寒,耐阴还耐瘠,对环境适应性强。沿阶草长势旺盛,有发达的根系,覆盖效果良好,可做绿化植物,广泛种植于水边湖畔等阴湿空地。沿阶草叶色四季常绿,花亭挺立,色泽淡雅,清香怡人,是优良的盆栽植物。沿阶草全株入药,味甘,可以治疗烦躁不安、胃口不好、咳嗽出血等多种疾病。

麦冬是百合科多年生常绿草本植物,产于我国,南方等地均有栽培,喜欢潮湿的气候环境。麦冬既是中医药用植物,以块根入药,主治热病伤津、口燥咽干、肺热咳嗽等症;也是园林绿化的首选种类,近年来需求量不断增加,市场供不应求。

1.2 试验用水

本试验用水是按照《地表水环境质量标准》^[22]中的第V类水体的各富营养化浓度指标,将 $\rho_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$ 为0.24 mg/L, ρ_{TP} 为0.11 mg/L,并含有一定量的营养物质、微量元素和微生物等的斛兵塘湖水与自来水按一定比例混合,用硝酸钾、磷酸铵、葡萄糖等配制重富营养化水。该水体中, $\rho_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$ 为3.3 mg/L, ρ_{TP} 为2.9~3.3 mg/L, ρ_{TOC} 为46~48 mg/L。

1.3 试验方法

本静态试验地点位于试验南楼四楼的阳台上。此处通风透气,光照充足,适于植物生长。水箱内既不易落入灰尘,也不会溅入雨水,外部条件对试验结果影响很小。为方便观察和取样,在试验地点依次并列放置4个同一规格的白色长方体水箱(其中1个水箱内不种植植物,做对照),将添加各营养元素、混合均匀的污水120L分别加入4个水箱内,将质量均为500g的3种植物均匀种植在各水箱内尺寸一样的浮床上。为确保专瓶专用,防止样品混淆,对水箱和取样瓶进行编号,贴上相对应的标签。根据污染物降解情况定期(前28 d每2 d 1次、此后每3 d 1次)、定时(中午12:00)、定量(200 mL)取样,对水中各指标进行监测。

本试验需要测定 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 、TP、TOC(总有机碳)等参数。所用到的仪器有分光光度计、TOC分析仪等检测仪器,各种称量和干燥仪器,以及常规玻璃仪器等。各参数采用《水和废水监测分析方法》^[23]中的方法测定。

2 结果与分析

2.1 植物生长状况

在整个试验阶段,3种供试植物存活率都为100%,对水面的覆盖率都有显著增加。酸模生长迅速,植株最高达60 cm,体量增加较多,根系发达,根须旺盛(最长达30 cm);而麦冬和沿阶草同属百合科,长势相近,根部长出新的分支,生长速度相对缓慢,植株高度与根系长度变化不大。在试验后期,酸模所在水箱水体清澈,而酸模出现开花、叶子变黄、生长停滞等衰败现象,这是由酸模生长期的限制和

营养物质降解殆尽引起的;沿阶草和麦冬所在水箱内有绿色藻类生长,自身长势却十分旺盛,这是因为沿阶草和麦冬是常青植物,所在水箱内营养物质降解速度略小,营养相对充足.试验结束,对植物称量,酸模质量增加较大,达 986 g,根系发达;而沿阶草、麦冬增重较小,分别为 628 g 和 632 g.

2.2 对总磷的净化效果

4 个水箱内总磷的最初浓度为 3.3 mg/L 左右.经过约 40 d 的处理,酸模所在水箱内总磷最低浓度为 0.3 mg/L,最大去除率为 90%;总磷在麦冬和沿阶草所在水箱内的降解规律相似,最低浓度在 1.8 mg/L 左右,去除率只有 40%左右;对照水箱内磷素的下降较少(图 2).浮床系统对磷主要通过植物吸收和截留以及沉淀的方式去除.曹蓉等^[24]研究发现,磷主要通过沉淀去除,植物吸收贡献率为 36%.蒋跃平等^[25]研究发现,在轻度污染水体中,植物对磷的去除作用占 51%.3 种植物所在水箱 TP 去除趋势相似.在整个试验阶段,酸模生长迅速,需要吸收大量的磷以合成 ATP 等自身成分,以满足自身日益增长的营养需要.试验前期,酸模根系发达,生长较快,从而为各种细菌提供了很好的繁殖场地,有益于多种微生物如对磷有重要吸收、富集能力的聚磷菌的生长,从而加快总磷的去除速率;随着酸模生长的限制,TP 浓度的降低,去除速率逐渐减小,最后维持在一定水平(图 3).在这个过程中,沿阶草和麦冬生长相对缓慢,生物增长量不大,对磷的吸收能力相对较小.虽然其根系也比较发达,但没有酸模根系密集,对磷的截留能力有限.3 种植物所在水箱中磷通过形成不溶性磷酸盐沉淀数量相当.总的来说,酸模生物量增加较多,对磷吸收较多,根系发达,对磷截留较多,所以其对磷的净化效果明显好于其他两种植物.这与温奋翔等^[26]的研究结果一致.其用千屈菜、黄菖蒲和鸢尾处理景观水体,结果表明:根细长、植株高、生长快的千屈菜对水中氮、磷净化效果最好.3 种浮床植物对磷的净化作用各有优缺点.虽然酸模生长较快,但生命周期短,不能长期发挥处理功能.酸模枯死后要及时采收,否则体内的磷会再次回到水中.沿阶草和麦冬虽短期去除磷的能力有限,但其都是多年生植物,可长期去除污染物.

2.3 对 NH_4^+-N 的净化效果

如图 4 所示,试验初始阶段,麦冬和沿阶草对 NH_4^+-N 的降解速率比酸模略小,经过 12 d 的处理,后者所在水箱 NH_4^+-N 浓度由 3.3 mg/L 降为

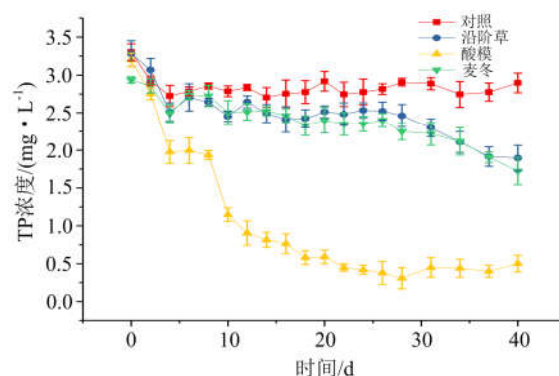


图 2 不同植物对总磷的去除效果

Fig.2 Removal effects of total phosphorus by different plants

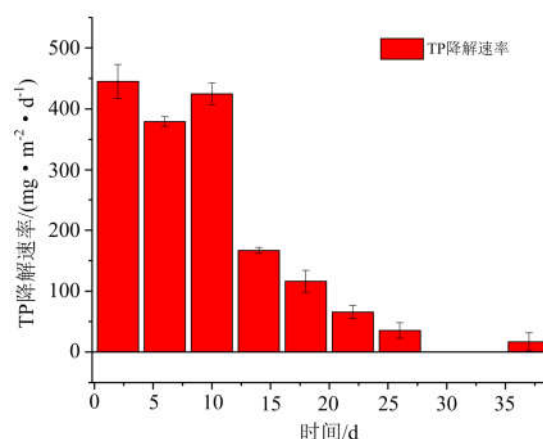


图 3 酸模所在水箱 TP 去除速率

Fig.3 TP removal rate of the water tank where *Rumex acetosa* was located

0.3 mg/L,降解效率为 93%.在后续的处理中, NH_4^+-N 浓度基本维持在这一水平.在整个过程中,麦冬和沿阶草对 NH_4^+-N 的净化效果也不错,最大净化效率为 90%.对照试验组 NH_4^+-N 浓度下降缓慢. NH_4^+-N 主要通过挥发作用、植物吸收和硝化反应去除.氨挥发主要在碱性条件下进行,此反应水体为中性,不发生氨挥发作用^[27].曹蓉等^[24]和 Peterson 等^[28]研究表明硝化-反硝化是 NH_4^+-N 去除的主要途径,植物吸收对去除总量的占比不到 20%.酸模所在水箱 NH_4^+-N 去除速率与 TP 一致.试验开始,酸模很快适应水环境,生长迅速,它会吸收 NH_4^+-N 等氮素以满足自身生长的需求,逐渐降解 NH_4^+-N ;随着 NH_4^+-N 浓度的降低,最终维持在一定水平(图 5).3 种供试植物都有发达的根系,为水箱中各种微生物的生长提供了适宜的场所.植物通过光合作用由根系向水体释放大量氧气,在水体内部和根系周围形成大量好氧-厌氧的微环境,以利于微生物的生长^[29-30].大量繁殖的微生物进行着强

烈的生化反应,致使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度下降明显.由于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的降解主要是微生物的作用,3 种植物都能通过呼吸作用,经由发达的根系,形成好氧-厌氧的微环境快速降解 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,植物的吸收作用对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 净化贡献较少,所以酸模虽然生长旺盛,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效率好于麦冬和沿阶草,但没有对磷处理效果明显.在后期试验中,由于水体中多种营养素的缺乏,限制了微生物的生长繁殖,各水箱内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度趋于稳定.

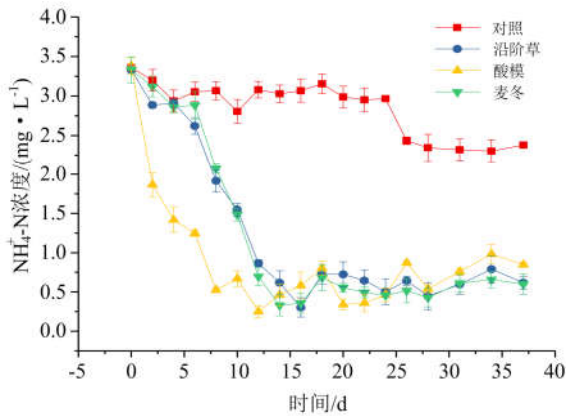


图 4 不同植物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果

Fig.4 Removal effects of ammonium by different plants

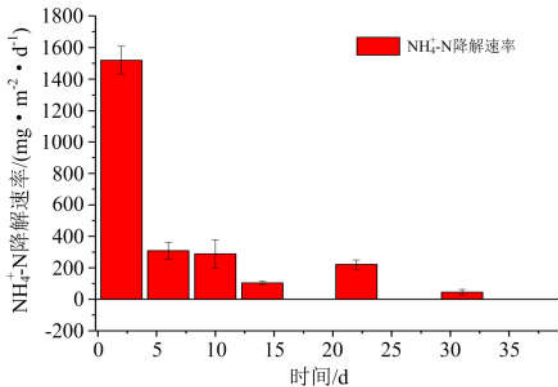


图 5 酸模所在水箱 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除速率

Fig.5 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal rate of the water tank where *Rumex acetosa* was located

2.4 亚硝酸盐氮和硝酸盐氮的变化

试验过程中,硝化和反硝化反应是同时进行的.反硝化细菌通过有氧环境促使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与溶解氧发生反应生成亚硝酸盐,这就是亚硝酸盐浓度增加的原因.硝化细菌继而将亚硝酸盐转化为硝酸盐.水箱里同时具有大量的好氧/厌氧微环境.在硝化反应进行的同时,厌氧条件下,反硝化菌先将硝酸盐转化为亚硝酸盐,最后转化为氮气从水中释放到空气中.浮床植物在生长过程中发达的根系为硝化/反硝化作

用的进行提供了有利的条件.同一时间,为满足自身生长需要,浮床植物会同时吸收各种形态的氮素,导致其浓度的降低.由图 6、图 7 可知,试验前中期,麦冬所在水箱亚硝酸盐浓度较高,其转化为硝酸盐的量也较大.整个试验过程中酸模生长较快,对氮素吸收较多,其根系发达,发生硝化/反硝化作用较强,所以其水箱内硝态氮和亚硝态氮浓度一直都较低.这与李涛等^[31]研究结果相同,其研究表明:植株大小和根系与水体接触面积对植物吸收去除 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 有重要作用.

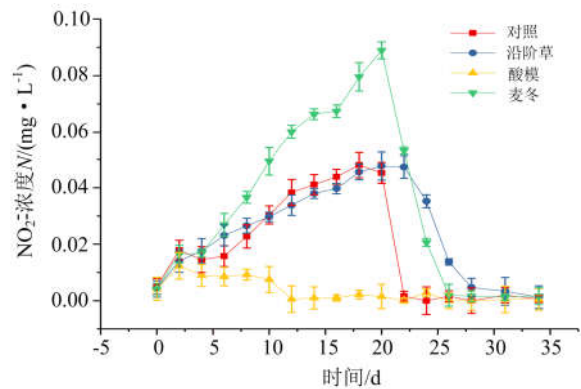


图 6 各水箱中亚硝酸盐氮的变化

Fig.6 Changes of nitrite nitrogen in each water tank

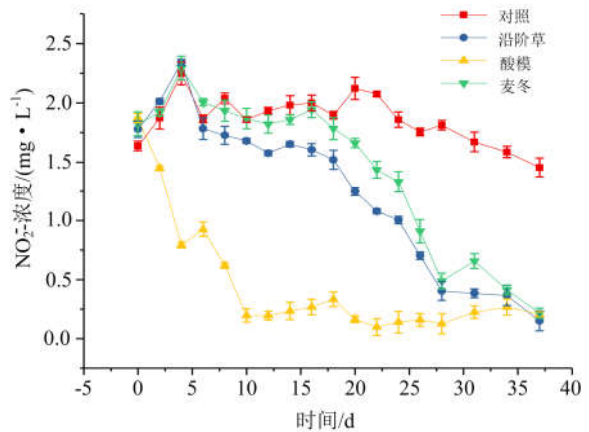


图 7 各水箱中硝酸盐氮的变化

Fig.7 Changes of nitrate nitrogen in each water tank

2.5 对 TOC 的净化效果

小分子有机物被植物直接吸收利用和微生物对有机物的好氧分解,及其植物根系截留是浮床技术降解 TOC 的几种主要途径^[32-33].测量结果显示:在试验的整个过程中,酸模所在水箱 TOC 降解速率普遍高于其他两个水箱,但三者都明显比对照组的降解速率大.酸模所在水箱 TOC 最小浓度为 10 mg/L 左右,此时去除率为 80% 左右;而沿阶草和麦冬所在水箱 TOC 维持在 15 mg/L 左右,降解效率不足

70%(图 8)。王郑等^[34]研究表明,植株强大、根系发达的植物泌氧能力较强,有利于好氧微生物的繁殖和有机物的消耗。由于酸模生长较快,生物量增加较多,生长时对小分子有机物的吸收较多,且酸模根系发达,给微生物提供了良好的生长环境,加速微生物的生长及对有机物的降解,酸模所在水箱 TOC 去除速率与 TP, NH_4^+-N 一致;而沿阶草和麦冬根系相近,生物增长量差不多,所以对 TOC 吸收和降解得差不多,降解速率比酸模小。

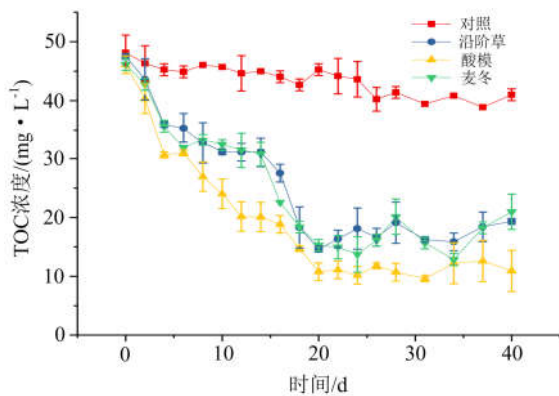


图 8 各水箱内 TOC 的变化

Fig.8 Changes of the TOC in each water tank

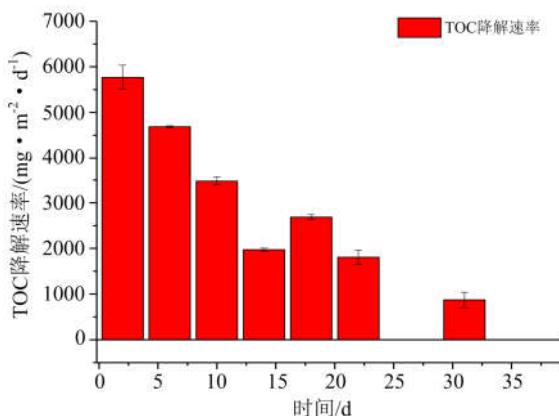


图 9 酸模所在水箱 TOC 去除速率

Fig.9 TOC removal rate of the water tank where *Rumex acetosa* was located

3 结论

本文以自制生态浮床为载体,创造性地用有绿化功能兼具药用价值的 3 种多年生草本植物酸模、麦冬和沿阶草作为浮床植物,净化由湖水和人为添加的营养素配制的富营养化水体。在整个试验周期内,与空白组相比,3 种植物对 TP, NH_4^+-N , TOC 降解效果良好。酸模生长迅速,生物量大,根系发达,对 TP, NH_4^+-N 和 TOC 的去除率分别达到 90%,

93%和 80%,但其生长周期短,可用于污染程度大的废水的短期治理。麦冬和沿阶草是常青植物,具有很强的生命力和适应性。两种植物生物量相当,长势相近,对富营养化水体的净化能力相似,可用于长期处理污染程度中等或较轻的污水。总体来讲,酸模、麦冬和沿阶草都可以作为浮床植物治理污水,这对新型浮床植物的开发具有重要的现实意义。生态浮床技术是一种可行的富营养化水体的净化技术,该技术可与其他污水处理技术和工艺相结合,更好地服务于污水治理。

参考文献(References)

- [1] 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.
WANG Jian, WU Yang, WANG Jingtong, et al. A review of ecological floating bed technology[J]. Journal of Liaoning University: Natural Science Edition, 2016, 43(1): 50-55.
- [2] KIVAISI A K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: A review[J]. Ecological Engineering, 2001, 16(4):545-560.
- [3] BORIN M, VIANELLO M, MORARI F, et al. Effectiveness of buffer strips in removing pollutants in runoff from a cultivated field in North-East Italy[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, 105(1/2):101-114.
- [4] SOOKNAH R D, WILKIE A C. Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater [J]. Ecological Engineering, 2004, 22(1):27-42.
- [5] 金相灿.湖泊富营养化控制和管理技术[M].北京:化学工业出版社,2001:45-110.
- [6] STEWART F M, MULHOLLAND T, CUNNINGHAM A B, et al. Floating islands as an alternative to constructed wetlands for treatment of excess nutrients from agricultural and municipal wastes-results of laboratory: Scale tests[J]. Land Contamination & Reclamation, 2008, 16(1):25-33.
- [7] NAKAI S, ZOU G, OKUCA T, et al. Anti-cyanobacterial allelopathic effects of plants used for artificial floating islands [J]. Allelopathy Journal, 2010, 26(1):113-122.
- [8] KORBOULEWSKY N, WANG R, BALDY V. Purification processes involved in sludge treatment by a vertical flow wetland system: Focus on the role of the substrate and plants on N and P removal [J]. Bioresource Technology, 2012, 105(4):9-14.
- [9] 张志勇,冯明雷,杨林章.浮床植物净化生活污水中 N、

- P的效果及 N_2O 的排放[J].生态学报,2007,27(10):4333-4341.
- ZHANG Zhiyong, FENG Minglei, YANG Linzhang. Nitrogen and phosphorus removal and N_2O emission from domestic sewage in floating-bed plant systems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (10) : 4333-4341.
- [10] 周楠楠,高芮,张择瑞.浮床植物系统对富营养化水体的净化效果[J].江苏农业科学,2013,41(3):337-339.
- ZHOU Nannan, GAO Rui, ZHANG Zerui. Effect of floating bed plant system on eutrophic water purification[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41 (3): 337 -339.
- [11] 章文贤,韩永和,卢文显,等.植物生态浮床的制备及其对富营养化水体的净化效果[J].环境工程学报,2014,8(8):3253-3258.
- ZHANG Wenxian, HAN Yonghe, LU Wenxian, et al. Preparation of plants-combined ecological floating bed and its purifying effects for eutrophic water [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8 (8): 3253-3258.
- [12] 薛彦君,许秋瑾,冯胜,等.曝气时间对美人蕉生态浮床去除水体中营养盐的影响[J].环境科学研究,2015,28(11):1749-1754.
- XUE Yanjun, XU Qiujin, FENG Sheng, et al. Impact of aeration time on nutrient removal by ecological floating bed of canna indica in polluted water [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28 (11) : 1749-1754.
- [13] 陈荷生.太湖生态修复治理工程[J].长江流域资源与环境,2001,10(2):173-178.
- CHEN Hesheng. Restoration project of the ecosystem in Tai lake [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2001, 10 (2): 173-178.
- [14] 唐林森,陈进,黄苗.人工生物浮床在富营养化水体治理中的应用[J].长江科学院院报,2008,25(1):21-24.
- TANG Linshen, CHEN Jin, HUANG Zhuo. The development of artificial floating-Island[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25 (1): 21-24.
- [15] 范洁群,邹国燕,宋祥甫.不同类型生态浮床对富营养河水脱氮效果及微生物菌群的影响[J].环境科学研究,2011,24(8):850-856.
- FAN Jiequn, ZOU Guoyan, SONG Xiangfu. Effects of FCEFB and TFB on the nitrogen removal and nitrogen cycling microbial community in a eutrophic river [J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24 (8): 850-856.
- [16] 吴伟明,宋祥甫,金千瑜,等.鱼塘水面无土栽培美人蕉研究[J].应用与环境生物学报,2000,6(3):206-210.
- WU Weiming, SONG Xiangfu, JIN Qianyu, et al. Study on soilless culture of canna on fish pond [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2000, 6 (3): 206-210.
- [17] 丁则平.日本湿地净化技术:人工浮岛介绍[J].海河水利,2007,(2):63-65.
- DING Zeping. Introduction of Japanese wetland purification technology: Artificial floating island [J]. Haihe Water Resources, 2007, (2):63-65.
- [18] 陈荷生,宋祥甫,邹国燕.利用生态浮床技术治理污染水体[J].中国水利,2005,15(8):50-53.
- CHEN Hesheng, SONG Xiangfu, ZOU Guoyan. Treatment in water bodies pollution by ecological floating bed technology [J]. China Water Resources, 2005, 15 (8): 50-53.
- [19] SRIVASTAV R K, GUPTA S K, NIGAM K D P, et al. Treatment of chromium and nickel in wastewater by using aquatic plants [J]. Water Research, 1994, 28(7): 1631-1638.
- [20] 宋祥甫,邹国燕,吴伟明,等.浮床水稻对富营养化水体中氮、磷的去除效果及规律研究[J].环境科学学报,1998,18(5):489-493.
- SONG Xiangfu, ZOU Guoyan, WU Mingwei, et al. Study on the removal effect and regulation of rice plants on floating-bed to main nutrients and P in eutrophicated water bodies [J]. Journal of Environmental Science, 1998, 18 (5): 489-493.
- [21] 赵祥华,田军.人工浮岛技术在云南湖泊治理中的意义及技术研究[J].云南环境科学,2005,24(增刊1):130-132.
- ZHAO Xianghua, TIAN Jun. Reseach on man-made floating island technology applied in lake water treatment [J]. Journal of Yunnan Environmental Science, 2005, 24 (Suppl 1): 130-132.
- [22] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局.地表水环境质量标准:GB 3838-2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002:1-3.
- [23] 国家环境保护总局.水和废水检测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002:256-270.
- [24] 曹蓉,王宝贞,彭剑锋.东营生态塘氮磷去除机理[J].中国环境科学,2005,25(1):88-91.
- CAO Rong, WANG Baozhen, PENG Jianfeng. The mechanism of nitrogen and phosphorus removal in Dongying eco-ponds [J]. China Environmental Science, 2005, 25(1): 88-91.
- [25] 蒋跃平,葛滢,岳春雷,等.人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献[J].生态学报,2004,24(8):1720-1725.
- JIANG Yueping, GE Ying, YUE Chunlei, et al. Nutrient removal role of plants in constructed wetland on sightseeing water [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24 (8): 1720-1725.
- [26] 温奋翔,王兵,肖波,等.北方景观水体中生态浮床的植物筛选与水质净化效果[J].环境工程学报,2015,9

- (12):5881-5886.
- WEN Fenxiang, WANG Bing, XIAO Bo, et al. Plants screening of ecological floating bed and its effects on water quality purification in an artificial lake in Northern China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(12):5881-5886.
- [27] 丛海兵, 吴黎明. 2 种耐寒生态浮床植物的水质改善性能研究[J]. 环境工程学报, 2012, 6(1):51-56.
- CONG Haibing, WU Liming. Study on water quality improvement capacity of two cold-resistant floating bed plants [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(1):51-56.
- [28] PETERSON S B, TEAL J M. The role of plants in ecologically engineered wastewater treatment systems [J]. Ecological Engineering, 1996, 6: 137-148.
- [29] COMIN F A, ROMERO J A, ASTORGA V, et al. Nitrogen removal and cycling in restored wetlands used as filters of nutrients for agricultural runoff[J]. Water Science and Technology, 1997, 35(5): 255-261.
- [30] STOTTMEISTER U, WIEBNER A, KUSCHK P, et al. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment[J]. Biotechnology Advances, 2003, 22(1/2): 93-117.
- [31] 李涛, 周律. 湿地植物对污水中氮、磷去除效果的试验研究[J]. 环境工程, 2009, 27(4):25-28.
- LI Tao, Zhou Lù. Characteristics of several plants for removing nitrogen and phosphorus from wastewater in constructed wetland [J]. Environmental Engineering, 2009, 27(4):25-28.
- [32] 曾爱平, 刘洪见, 徐晓薇, 等. 2 种挺水植物治理生活污水的研究[J]. 浙江农业科学, 2009, 4:806-808.
- ZENG Aiping, LIU Hongchen, XU Xiaowei, et al. Study on the treatment of domestic sewage by two kinds of water plants [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2009, 4: 806-808.
- [33] 王国芳, 汪洋静, 吴磊, 等. 组合型生态浮床中各生物单元对污染物去除的贡献及净化机理[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(4):136-141.
- WANG Guofang, WANG Xiangjing, WU Lei, et al. Contribution and purification mechanism of bio-components to pollutants removal in an integrated ecological floating bed[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(4):136-141.
- [34] 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.
- WANG Zheng, CUI Kangping, XU Weiyi. Combined ecological floating bed for farmhouse wastewater treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(1):455-460.

(上接第 209 页)

- [17] VIJAYA KUMAR T S V, KRISHNAMURTI T N, FIORINO M, et al. Multimodel superensemble forecasting of tropical cyclones in the Pacific [J]. Monthly Weather Review, 2003, 131(3): 574-583.
- [18] ROSS R S, KRISHNAMURTI T N. Reduction of forecast error for global numerical weather prediction by the Florida State University (FSU) Superensemble [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2005, 88 (3/4): 215-235.
- [19] KRISHNAMURTI T N, MISHRA A K, CHAKRABORTY A, et al. Improving global model precipitation forecasts over India using downscaling and the FSU superensemble. Part I: 1-5-day forecasts[J]. Monthly Weather Review, 2009, 137(9): 2713-2735.
- [20] 刘长征, 杜良敏, 柯宗建, 等. 国家气候中心多模式解释应用集成预测[J]. 应用气象学报, 2013, 24(6): 677-685.
- LIU Changzheng, DU Liangmin, KE Zongjian, et al. Multi-model downscaling ensemble prediction in National Climate Center [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2013, 24(6): 677-685.
- [21] 智协飞, 林春泽, 白永清, 等. 北半球中纬度地区地面气温的超级集合预报[J]. 气象科学, 2009, 29(5): 569-574.
- ZHI Xiefei, LIN Chunze, BAI Yongqing, et al. Superensemble forecasts of the surface temperature in Northern Hemisphere middle latitudes [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2009, 29(5): 569-574.
- [22] 周天军, 邹立维. IPCC 第五次评估报告全球和区域气候预估图集评述[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10 (2):149-152.
- ZHOU Tianjun, ZOU Liwei. Atlas of global and regional climate projections [J]. Advances in Climate Change Research, 2014, 10(2):149-152.
- [23] 胡琴, 姜大膀, 范广洲. CMIP5 全球气候模式对青藏高原地区气候模拟能力评估[J]. 大气科学, 2014, 38 (5):924-938.
- HU Qin, JIANG Dabang, FAN Guangzhou. Evaluation of CMIP5 Models over the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2014, 38 (5):924-938.
- [24] 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告[M]. 北京市:科学出版社, 2011.
- [25] MOSS R H, EDMONDS J A, HIBBARD K A, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment [J]. Nature, 2010, 463 (7282): 747-756
- [26] 陈晓晨. CMIP5 全球气候模式对中国降水模拟能力的评估[D]. 北京:中国气象科学研究院, 2014.