

刘伟, 臧吴琪, 周驰誉, 等. 提高生态浮岛对受污染水体净化效率的研究进展[J]. 净水技术, 2022, 41(8):16-22,186.

LIU W, ZANG W Q, ZHOU C Y, et al. Research advances in improvement of purification efficiency of ecological floating island for polluted water body[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(8):16-22,186.



扫我试试?

## 提高生态浮岛对受污染水体净化效率的研究进展

刘伟<sup>1</sup>, 臧吴琪<sup>2</sup>, 周驰誉<sup>1</sup>, 周晓林<sup>1</sup>, 邵莉<sup>1</sup>, 杨林军<sup>2,\*</sup>

(1. 江苏省水利科教中心, 江苏南京 210096; 2. 东南大学能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 江苏南京 210096)

**摘要** 生态浮岛适用于治理景观水体及河湖受污水体, 但传统生态浮岛的净化效率受多种因素制约。在详述生态浮岛组成结构基础上, 综述了提高其净水效果的强化措施, 并指出目前理论研究和实际应用间存在的差异以及各自的缺点和发展前景。生态浮岛结合物理、化学和生物法, 优化浮岛组成、结构及布置均起到强化净水效果的作用。提高生态浮岛净水效果的理论研究丰富, 但实际工程运行效果与理论研究成果差距明显。未来研究应着重于提高实际工程运行效果、探索生态浮岛其他应用功能(提供能源、缓解用地紧张)。

**关键词** 生态浮岛 受污水体 水质净化 功能强化 应用建议

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2022)08-0016-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.08.003

## Research Advances in Improvement of Purification Efficiency of Ecological Floating Island for Polluted Water Body

LIU Wei<sup>1</sup>, ZANG Wuqi<sup>2</sup>, ZHOU Chiyu<sup>1</sup>, ZHOU Xiaolin<sup>1</sup>, SHAO Li<sup>1</sup>, YANG Linjun<sup>2,\*</sup>

(1. Jiangsu Province Water Resources Scientific Education Center, Nanjing 210096, China;

2. Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract** Ecological floating island (EFI) is suitable for the treatment of polluted landscape water, river and lake body, but the purification efficiency of traditional EFI is restricted by many factors. Based on the detailed description of its composition and structure, this paper systematically summarizes the enhanced measures of the improvement of the purification efficiency. And it points out the differences between current research and practical applications, also their own shortcomings and development prospects are showed. Combining physical, chemical and biological methods with EFI, optimizing the components, structure and arrangement of EFI both play a role in the enhancement of the purification efficiency. There is a significant gap between the operation effect of actual project and the theoretical research results of EFI, though the theoretical research on the improvement of the water purification effect of EFI is plentiful. The future research should focus on improving the operation effect of actual project and exploring other application functions of EFI (providing energy and alleviating land tension).

**Keywords** ecological floating island (EFI) polluted water body water purification performance enhancement application suggestion

各行业污水直排现象仍然存在, 造成水体中氮、

磷、无机盐<sup>[1]</sup>等污染物含量超标, 加重水体毒性<sup>[2]</sup>, 严重影响水生生态系统。人为污染无疑进一步减少了可用淡水资源, 造成水质型缺水<sup>[3]</sup>。因此, 地表水治理刻不容缓, 而利用生态治理技术处理受污水体是现研究热点。

生态治理技术总体上分为迁地治理与原位治理

[收稿日期] 2021-04-23

[基金项目] 江苏省水利科技项目(2019044)

[作者简介] 刘伟(1981—), 男, 硕士, 主要从事水利工程管理及运行, E-mail: 17831860@qq.com。

[通信作者] 杨林军, 男, 教授, 主要从事大气污染治理和水污染治理, E-mail: ylj@seu.edu.cn。

法<sup>[1]</sup>。生态浮岛是原位治理法的一种,也是传统人工湿地的变体,称为生态浮床或人工浮岛<sup>[4]</sup>。19世纪70年代末,德国最早开发生态浮岛<sup>[5]</sup>,20世纪80年代后,发达国家开始利用植物浮床技术进行河湖水质处理<sup>[6-7]</sup>,生态浮岛对非点源营养物的去除效果要明显优于固定的人工湿地。相较于迁地治理法,生态浮岛具备不额外占用土地、管理方便、投资小、景观性强<sup>[1]</sup>等优点。然而,传统生态浮岛对外界条件敏感、实际工程设计缺乏定量依据,故虽然生态浮岛广泛应用于地表水处理,但未能充分发挥其净化能力。基于此,本文主要内容包括:(1)介绍生态浮岛基本结构;(2)讨论生态浮岛与多种技术联合强化净水效果措施;(3)讨论生态浮岛组成、结构及布置的优化研究;(4)分析理论研究与实际应用间差异。旨在通过分析前人研究,为生态浮岛未来研究方向提供思路、为工程实践的优化及管理提供参考。

### 1 生态浮岛基本组成

不同于传统人工湿地,生态浮岛的植物种植于浮在水面的床体上(图1)。床体、植物、基质是生态

浮岛的基础组成部分<sup>[1]</sup>,床体的材料选择及结构设计、植物与基质的种类选取对生态浮岛处理效果有很大的影响。不同组成的生态浮岛净化效果如表1所示。

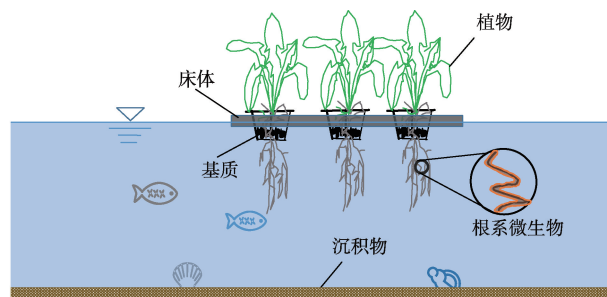


图1 生态浮岛示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of EFI

#### 1.1 床体

床体是生态浮岛的主要结构,为植物提供栽植和生长空间<sup>[16]</sup>。从床体结构设计划分,主要分为干式和湿式生态浮岛,干式生态浮岛植物根系与水不直接接触,植物吸收作用受限<sup>[17]</sup>;湿式生态浮岛的应用较为广泛。从床体的功能及长期运行效果考

表1 生态浮岛的组成及净化效果

Tab. 1 Composition and Purification Efficiency of EFI

生态浮岛组成			污染物去除效果	水体类别	参考文献
植物	浮垫材料	基质			
菖蒲 ( <i>Acorus calamus</i> )、美人蕉 ( <i>Canna indica</i> )	聚甲基丙烯酸甲酯	稻草	TN:93.8%	自配水	[8]
大花美人蕉 ( <i>Canna generalis</i> )	泡沫板	球形填料	TP:74.3%;COD:67.5%	河水	[9]
紫露草 ( <i>Tradescantia reflexa</i> )	铁网	铝基饮用水处理残余物	TN:85%;TP:90.2%;COD:88%	自配水	[10]
美人蕉、黄菖蒲 ( <i>Iris pseudacorus</i> )、香菇草 ( <i>Hydrocotyle vulgaris</i> )	聚乙烯泡沫板	富含铁基质	TP:98.5%;叶绿素-a:82.1%	湖水	[11]
菖蒲、鸢尾 ( <i>Iris</i> )、千屈菜 ( <i>Lythrum salicaria</i> )、香菇草	泡沫、钢板	沸石、海绵铁	TN:46.85%;氨氮:53.97%;TP:44.45%; PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P:54.55%;叶绿素-a:29.79%	景观湖水(现场)	[12]
水葱 ( <i>Scirpus validus</i> )	PET材料	/	TSS:41%;Cu:39%;Zn:40%	雨水(现场)	[13]
长苞香蒲 ( <i>Typha domingensis</i> )	塑料定植框	/	COD:55%;BOD <sub>5</sub> :56%;TSS:78%;TKN:41%;TP:37%	污水处理厂原水(现场)	[14]
纸莎草 ( <i>Cyperus papyrus</i> )、箭叶雨久花 ( <i>Monochoria hastata</i> )	硬质塑料	火山性砾石	大肠杆菌:86%;NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N:76%	湖水(现场)	[2]
灯芯草 ( <i>Juncus effusus</i> )、金钱蒲 ( <i>Acorus gramineus</i> )、大须芒草 ( <i>Andropogon yunnanensis</i> )、芙蓉葵 ( <i>Hibiscus moscheutos</i> )	挤塑塑料、PVC管、闭孔泡沫	/	/	蓄水池水(现场)	[15]

虑,应注重材料的稳定性、环保性、多孔透气性、浮力效果和疏水性等<sup>[18]</sup>。目前常用的床体材料有聚苯乙烯、PVC、PP 等人工材料,以及椰子纤维、毛竹等天然材料<sup>[19-20]</sup>。

## 1.2 植物

植物在生态浮岛净化水体过程中起到重要的作用<sup>[1]</sup>。随着根系愈加旺盛,根部在水下形成茂密的根系网络,通过根系拦截、吸收、转化等作用去除污染物<sup>[5]</sup>。植物茎叶经过光合作用,通过通气组织向根系传递氧气,在根部周围形成“有氧-缺氧-厌氧”模式<sup>[18]</sup>,为各种好氧、厌氧微生物提供生长繁殖条件。

目前已有大量关于生态浮岛植物筛选的研究,植物类型涉及农作物、蔬菜、景观植物等<sup>[21]</sup>。一般植物生长趋势越好、存活率越高,对水体中污染物的吸收效果越好。Keizer 等<sup>[22]</sup>研究显示试验期间狭叶香蒲(*Typha angustifolia*)生物量增速不如黄菖蒲,而黄菖蒲对 TN、TP 的吸附量也远高于狭叶香蒲。这也表明了植物生物量与其吸收污染物能力正相关。从增加系统净化能力、景观性、季节性角度考虑,很多学者研究异类植物组合处理效果<sup>[2]</sup>。但不可忽视植物之间的化感作用<sup>[5]</sup>,仅增加植物多样性在净化效果上有一定限制性。

## 1.3 基质

基于基质本身的性质,可通过离子交换、吸附或共沉淀<sup>[5]</sup>等作用去除水体中的污染物。而且,添加基质能够提高植物的抗伏倒性,也能为微生物提供附着点<sup>[12]</sup>。Wang 等<sup>[12]</sup>在生态浮岛中加入沸石和海绵铁后植物伏倒率降低;氮、磷、浑浊度和叶绿素 a 的去除效率显著增加。可能是因为沸石、海绵铁中含有 Ca、K、Fe 等微量元素,一方面可与磷共沉淀,另一方面微量元素也利于植物生长。而两者大的比表面积既利于吸附污染物又可附着微生物。

常用基质有沸石、蛭石、陶粒、稻草及人工改性材料等。基质的选择需考虑其物理(比表面积、孔隙率、保水率)和化学(pH、肥力、降解性)性质<sup>[5]</sup>。如稻草中富含纤维素和木质素,具有较高生物亲和力、低毒理性、较大比表面积。在以稻草为基质的生态浮岛系统中硝化细菌、反硝化细菌数量明显增多;细菌也将稻草分解为供微生物生长消耗的可溶性物质。故 TN、硝态氮的去除效率分别提高了 40%、

60%左右<sup>[8]</sup>。基质的种类研究众多,但多数吸附试验所设初始浓度比较高,与实际应用水质存在差异,且对基质吸附饱和、污染物解析情况的研究不够充分。

## 2 强化生态浮岛净化效果措施

### 2.1 生态-物理法强化

人工曝气旨在提高水体溶解氧含量和氧化还原电位,为好氧反应过程提供充分条件。张玲玲等<sup>[23]</sup>对不同曝气增氧条件下填料生态浮岛对养殖水体的净化效果进行研究,发现与不曝气相比,不同增氧条件下出水中 TN、TP、COD 浓度均有所减少。目前鼓风、机械曝气实际使用较多但效果一般;微孔、微纳曝气具备气泡体积小、对水体扰动小等优点<sup>[24]</sup>,但设施结构复杂不易推广。湿地联合电解技术组成的电解强化湿地系统也可以显著提高氮、磷的去除效果,陈慧萍等<sup>[25]</sup>构建的电解人工湿地系统实现了在低碳氮比(C/N)水体中高效去除氮、磷,通过高通量测序技术发现在电解条件下反硝化菌得到富集,故而脱氮效果显著。闫诚等<sup>[26]</sup>为提高生态浮床的净化效果,将曝气、电解与浮床结合构建了曝气-电解生态浮岛系统。试验发现电解可以提高系统反硝化细菌的数量、增强磷元素的絮凝沉淀作用,而曝气又可以减弱电解对植物理化性质的影响,进一步提高生态浮岛的净化能力。

定量确定曝气量与电解强度是研究重点。水体溶解氧含量低不利于植物和好氧细菌的生长,但溶解氧浓度过高使得硝化反应强烈,氨氮含量大减、硝酸盐氮累积,影响了植物正常生长,也会影响磷的吸收去除。另一方面,虽然可根据污染物耗氧量计算出所需曝气量,但曝气机产生的气量并不能完全溶于水中,对实际气水比的确定有一定难度。

### 2.2 生态-化学法强化

植物特性是决定植物的吸收作用强弱的因素之一,有研究者通过离子注入技术来改良植物。注入 N<sup>+</sup>离子束的空心菜(*Ipomoea aquatica*)无论是在高氮还是低氮的人工配水中,其生长速率远远高于普通空心菜,对氨氮、硝酸盐氮的去除效率也大大提升,达到 80% 以上,并在后续实际水体应用中空心菜生态浮岛对氮、磷的去除率也维持在 51%~68%、54%~71%<sup>[27-28]</sup>。而对于改良后作物的经济效益问题还需做进一步研究。

有机碳含量低,则供异养微生物、植物生长繁殖的有机物少。自然河道水、污水处理厂尾水等水体均存在 C/N 较低情况,人工添加碳源成为提高系统 C/N 的一种方式。段婧婧等<sup>[29]</sup>对生态浮岛处理生活污水的研究表明,C/N 由 4 提升至 6 时植物生态浮岛对 TN、TP 的去除效率分别增加 10%、60% 左右,植物吸收作用占比也大大增加。利用固态碳源作为缓释碳源,是目前碳源研究应用的重点。在高效固态缓释碳源的研究中,以人工材料(聚己内酯、聚乙烯醇、海藻酸钠)为载体及骨架、以天然材料(果壳、玉米芯)为碳源制成的缓释碳源,具备良好的释碳能力及稳定性等优势。于鲁冀等<sup>[30]</sup>以聚乙烯醇-海藻酸钠为骨架、玉米芯为碳源,制备了缓释碳源(PVA-SA-Y),与纯人工合成材料制成的碳源相比,该碳源的缓释能力最好,在短时间内对硝酸盐氮的去除率就达到 100%,对 TN 去除效率提升 20% 以上。高通量测序结果显示,试验后的 PVA-SA-Y 上硝化细菌和反硝化细菌生长量也有所增加,这与 Xiong 等<sup>[31]</sup>的研究结果相似。

针对碳源不足的情况,添加其他外源电子供体(硫代硫酸盐、纳米零价铁、氧化亚铁)提高自养反硝化能力是另一强化思路<sup>[32]</sup>。Gao 等<sup>[33]</sup>构造了硫代硫酸盐驱动的自养强化生态浮岛,试验显示系统中反硝化细菌数量、植物生物量和对氮、碳的吸收量显著增加,且系统受温度的影响明显减小。然而,添加硫代硫酸盐促进自养反硝化的同时也导致硫酸盐等副产物的生成。Sun 等<sup>[34]</sup>利用硫代硫酸盐和醋酸钠协同作用促进系统内自养、异养反硝化同时进行,增强反硝化作用的同时减少了  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  的产量。此外 Sun 等<sup>[35]</sup>在生态浮岛中添加铁屑,以零价铁为电子供体促进自养反硝化过程。该系统对 TN 的去除效率提高了 23%、 $\text{N}_2\text{O}$  的产量减少了 27% 以上。但无论是硫代硫酸盐还是铁屑,发生的化学反应均是氧化反应,故对好氧硝化反应具有抑制作用,在系统溶解氧浓度不高的情况下可能会不利于硝化进程。

### 2.3 生态-生物法强化

向生态浮岛中添加比表面积大的材料作为微生物载体,有利于微生物的附着繁殖进而在载体表面形成生物膜,达到与生物膜技术复合、增强微生物作用的目的<sup>[36]</sup>。生物绳、立体弹性填料的比表面积大、舒展性好,既易附着微生物也容易脱膜,可以高

效、持续地发挥微生物作用;而一系列矿物类的填料,由于材料结构中含有羟基基团或金属离子,在可以附着微生物同时更易发生离子交换、沉淀等化学反应<sup>[1]</sup>。邹联沛等<sup>[37]</sup>构建的生物绳填料-水葱生态浮岛对低污染水体的氮、磷净化效率提高 10% 左右。Song 等<sup>[38]</sup>在植物生态浮岛中整合了立体弹性填料,系统中共生菌、共生杆菌等利于反硝化过程的细菌数量显著提升,反硝化速率比陶粒基质中提高 5 倍左右,TN 的去除效率提高 10.9%。但植物吸收作用受到限制,这与 Wu 等<sup>[39]</sup>试验结论相反。这可能是因为植物和填料种类不同、两者之间距离远近等问题,悬挂填料的同时需考虑其对植物生长的影响。

微生物作用是除氮的主要作用,通过反硝化作用最终将氮以气体形式排出水体。故反硝化菌的存在对生态浮岛净化效果起重要作用。但反硝化细菌在天然水体中的生长繁殖速度较慢,以致前期除氮效果较差<sup>[1]</sup>。Sun 等<sup>[40]</sup>制备了固定反硝化菌小球并投加于美人蕉生态浮岛中,5 d 后对 TN、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮的去除效率分别提高了 12.9%、38.3%、28%,提升效果显著。与细菌固定技术的结合,有望改善污染物去除效果。传统植物生态浮岛对含盐废水的处理效果一般,原因在于植物生长受盐离子抑制,无法有效发挥植物吸收作用<sup>[41]</sup>。窦文清等<sup>[42]</sup>构造的丛枝菌根强化生态浮岛对无机盐离子的去除率提高了 11.4%~37.1%。主要机理是在生态浮岛中形成真菌-植物共生体,提高植物的耐盐能力以及对钙、镁等离子的吸收效率。

### 2.4 组成及结构优化

除与各种技术联合,也可通过优化生态浮岛组成及结构(优势水生植物的筛选、床体结构及布置优化)提高净化效率。植物初步筛选研究主要有实验室静态水培方法,一般是将植物植于水培容器中,并置于人工光照培养箱或者温室中。以定期的水质参数检测结果为依据,对比得到净化效果最佳的水生植物。此外还可拟合植物吸收动力学方程<sup>[43]</sup>比较各植物的最大吸收速率( $I_{\max}$ )与米氏常数( $K_m$ ),优选  $I_{\max}$  较大、 $K_m$  较小的植物。Zhang 等<sup>[44]</sup>在人工温室中进行美人蕉和水葱的水培净化试验比较,动力学参数计算结果表明水葱对氨氮的吸收效果更好,对磷酸盐有较好的亲和力,美人蕉对硝酸盐氮的

亲和力更大。应用冷型水生植物对保证低温时生态浮岛处理能力有积极作用。Tharp 等<sup>[45]</sup> 比较了灯芯草、水葱、苔草 (*Carex comosa*) 和梭鱼草 (*Pontederia cordata*) 在 -12.1 ~ 27.2 °C 下的净水情况,从存活率、生物量和磷吸收量方面看,苔草的抗寒性最佳。10 °C 下大聚藻 (*Myriophyllum aquaticum*)、香菇草分别对 TN、TP 的去除效率仍高于 63%、59%,远优于黑藻 (*Hydrilla verticillata*)、金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*)<sup>[46]</sup>。浮岛所用植物的确定应从其可用性、毒理耐受性、生物积累性、入侵机制等多方面考虑。虽然目前对植物的筛选研究众多,但从以上多方面进行全面且具体研究的较少。此外植物在水面大量覆盖生长带来的诸如蚊虫密集、代谢凋零、有害物质由动物食用绿植进入食物链<sup>[47]</sup> 等问题也是需要考虑的。

王文怀等<sup>[48]</sup> 将水绵 (*Spirogyra*) 置于浮床的沉水植物区,与菖蒲形成水上-水下处理区。该系统对氮、磷污染物的去除效率均在 80% 以上,且水绵有力地抑制了有害藻类的生长。Guo 等<sup>[49]</sup> 设计的三层式生态浮岛增加了系统的处理净化单元,大大提高了氮、磷去除效率并保证了低污染负荷下的良好净化效果。传统的板式床体透气性一般,易阻碍大气复氧等氧气交换过程。张择瑞等<sup>[17]</sup> 优化的浮床以 PVC 管为框架、围绕的绳索为主体,得到简化

的床体,较以泡沫板为床体的生态浮岛,其对氮、磷去除率及去除速率均明显提升。

考虑到复杂的影响因素,有学者借鉴人工湿地的吸收动力学,建立了生态浮岛的一级动力学拓展式,以期用通用的计算公式揭示污染物去除机制、用定量参数来优化工程设计。Wang 等<sup>[50]</sup> 引入生态浮岛表观吸收速率( $v_f$ )概念,考虑浮岛覆盖率( $A_f$ )、水体积( $V$ )等因素,用水体自身反应速率常数( $K_w$ )和生态浮岛速率常数 [ $v_f(A_f/V)$ ] 表示反应速率常数  $K$ ,以此建立一级动力学拓展式,可由进出水水质要求来定量生态浮岛的各设计参数。同时生态浮岛的引入也影响水体流场<sup>[51]</sup>。唐漪<sup>[52]</sup> 利用 Visual MODFLOW 建立了三层结构的生态浮岛模型并对系统内水流状态进行模拟,结果表明水力负荷分别增大 10、48 倍时,浮岛规模只需增加 4、21 倍,这对实际工程浮岛规模的确定具有指导意义。Machado 等<sup>[53]</sup> 建立不同布置方式下生态浮岛的数学模型,探究通过根系的流量与净化效果的关系,结果表明根系区域流量的大小与去除率呈正相关、并联排列的浮岛净化效果优于整体和串联布置。

综合来看,生态浮岛功能强化方式主要分为技术联合和结构优化,而多种技术联合净化水体的效果可能会更好。生态浮岛功能强化措施分类及研究方向总结如表 2 所示。

表 2 生态浮岛强化措施研究进展  
Tab. 2 Research Progress of Enhanced Measures for EFI

名称	研究内容	未来方向
生态-物理强化	添加曝气、电解设施	曝气电解生态浮岛参数优化、提高设备高效性
生态-化学强化	缓释碳源、外源电子供体、离子注入	高效固体缓释碳源、副产物的控制
生态-生物强化	悬挂填料、投加微生物	生物膜载体优选、优势菌种培养
组成及结构优化	床体材料优选、动植物组合	耐寒植物筛选应用、床体新型材料应用、建立应用模型

### 3 结论与建议

生态浮岛作为一项结构简单、绿色经济的生态治理技术,有着很好的应用前景。作为一项工程应用,实现生态浮岛工程实践效果十分重要。出于其净化能力受限,与曝气电解、添加缓释碳源、细菌固定等技术联合强化的研究具有实际意义。浮岛组成、结构及布置的优化均会影响其净化能力。数学模型的研究可为生态浮岛实际工程中的设计优化和运行管理提供依据。而理论研究与实际应用仍存在

如下多方面差异:(1) 基质研究过于理论化;(2) 出于景观性考虑,实际工程多数种植物混搭,而植物之间化感作用亦不可忽略;(3) 生态浮岛放置最佳水深在 0.6 ~ 1.1 m,而实际水体的水深不易控制;(4) 数学模型的建立很好地优化了生态浮岛的布置设计,但实际工程的浮岛搭建更多考虑通航、美观、管理维护难易等因素;(5) 投入实际水域使用的生态浮岛多数仍由最基础的成分组成,技术联合手段更多是增加曝气机、效果更好的纳米曝气,但因技

术、投资等因素实际工程应用少。其他手段如外加碳源在实际工程中应用也很少。

未来对生态浮岛的研究可以重点考虑以下几个方面。

(1)景观水体表现性的改善仍是难点,应加强对悬浮物、藻类等污染物的处理研究。并且目前对这一方向的已有研究多从水质参数检测、宏观水质评价方向出发,缺乏微观机理的研究。

(2)高效实现实际工程应用是未来生态浮岛研究的重点。目前,有关生态浮岛覆盖率、植被密度等理论设计研究侧重追求理论最佳去除效率,脱离实际的浮岛搭建可能性。建立数学模型有利于解决实际工程问题,对生态浮岛的实际应用意义很大。而目前针对生态浮岛的数学模型研究还不够充分,建立联系实际可为工程设计提供计算指导的数学模型,这是未来的研究重点。

(3)由于生态浮岛自身性质,低温对其处理效果影响显著,未来应着重于生态浮岛在低温下处理效果的稳定及增强研究。

(4)生态浮岛所能发挥的作用不仅是净化水体,未来可加强对生态浮岛功能的发掘和利用,发展环境友好型经济。如可利用其获取太阳能,供电于太阳能设备(太阳能曝气机、太阳能LED灯等);种植农作物以缓解农业用地紧张问题。

### 参考文献

- [ 1 ] KUMWIMBA M N, BATOOL A, LI X. How to enhance the purification performance of traditional floating treatment wetlands (FTWs) at low temperatures: strengthening strategies [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 766: 142608. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142608.
- [ 2 ] OLGUÍN E J, SÁNCHEZ-GALVÁN G, MELO F J, et al. Long-term assessment at field scale of floating treatment wetlands for improvement of water quality and provision of ecosystem services in a eutrophic urban pond[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 584/585: 561–571. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.072.
- [ 3 ] MISHRAI S, MAITI A. The efficiency of *Eichhornia crassipes* in the removal of organic and inorganic pollutants from wastewater: A review [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(9): 7921–7937.
- [ 4 ] YE H N, YE H P, CHANG Y. Artificial floating islands for environmental improvement [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 47: 616–622. DOI: 10.1016/j.rser.2015.03.090.
- [ 5 ] WANG W H, WANG Y, SUN L Q, et al. Research and application status of ecological floating bed in eutrophic landscape water restoration[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 704: 135434. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135434.
- [ 6 ] COLARES G S, DELL'OSBEL N, WIESEL P G, et al. Floating treatment wetlands: A review and bibliometric analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136776. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136776.
- [ 7 ] KARSTENS S, NAZZARI C, BÂLON C, et al. Floating wetlands for nutrient removal in eutrophicated coastal lagoons: Decision support for site selection and permit process[J]. *Marine Policy*, 2018, 97: 51–60. DOI: 10.1016/j.marpol.2018.08.030.
- [ 8 ] CAO W P, ZHANG Y Q. Removal of nitrogen (N) from hypereutrophic waters by ecological floating beds (EFBs) with various substrates[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 62: 148–152. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.10.018.
- [ 9 ] 虞中杰, 王东启, 陈振楼, 等. 人工浮床加挂填料对富营养化河水的净化效果[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(17): 31–35.
- [ 10 ] SHEN C, ZHAO Y Q, LIU R B, et al. Enhancing wastewater remediation by drinking water treatment residual-augmented floating treatment wetlands [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 673: 230–236. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.035.
- [ 11 ] HU Z F, LI D S, GUAN D T. Water quality retrieval and algae inhibition from eutrophic freshwaters with iron-rich substrate based ecological floating beds treatment[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 712: 135584. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135584.
- [ 12 ] WANG W H, WANG Y, WEI H S, et al. Stability and purification efficiency of composite ecological floating bed with suspended inorganic functional filler in a field study[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 37: 101482. DOI: 10.1016/j.jpwe.2020.101482.
- [ 13 ] BORNE K E. Floating treatment wetland influences on the fate and removal performance of phosphorus in stormwater retention ponds[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 69: 76–82. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.03.062.
- [ 14 ] BENVENUTI T, HAMERSKI F, GIACOBBO A, et al. Constructed floating wetland for the treatment of domestic sewage: A real-scale study [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, 6(5): 5706–5711.
- [ 15 ] WINSTON R J, HUNT W F, KENNEDY S G, et al. Evaluation of floating treatment wetlands as retrofits to existing stormwater retention ponds[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 54: 254–265. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.01.023.
- [ 16 ] URAKAWA H, DETTMAR D L, THOMAS S. The uniqueness and biogeochemical cycling of plant root microbial communities in

- a floating treatment wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 108: 573–580. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.06.066.
- [17] 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.
- [18] SAMAL K, KAR S, TRIVEDI S. Ecological floating bed (EFB) for decontamination of polluted water bodies: Design, mechanism and performance [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 251: 109550. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109550.
- [19] LUCA G A D, MUFARREGE M M, HADAD H R, et al. Nitrogen and phosphorus removal and *Typha domingensis* tolerance in a floating treatment wetland[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650(1): 233–240. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.042.
- [20] PAVLINERI N, SKOULIKIDIS T, TSIHRINTZIS V A. Constructed floating wetlands: A review of research, design, operation and management aspects, and data meta-analysis[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 308: 1120–1132. DOI: 10.1016/j.cej.2016.09.140.
- [21] 檀香逸. 经济型花卉人工湿地对农村生活污水氮磷去除特性的研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [22] KEIZER H E, VERDONSCHOT P F M, VERDONSCHOT R C M, et al. The contribution of plant uptake to nutrient removal by floating treatment wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 73: 684–690. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.09.081.
- [23] 张玲玲, 刘立早, 张玉平, 等. 不同增氧条件下强化生态浮床净化养殖水体的效果[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(17): 69–74.
- [24] SUN Y M, WANG S W, NIU J F. Microbial community evolution of black and stinking rivers during *in situ* remediation through micro-nano bubble and submerged resin floating bed technology[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 258: 187–194. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.03.008.
- [25] 陈慧萍, 路俊玲, 肖琳. 电解强化人工湿地处理城市污水处理厂尾水中微生物群落分析[J]. *中国园林*, 2018, 34(6): 49–53.
- [26] 闫诚, 马汤鸣, 杨顺清, 等. 曝气-电解生态浮床的净化效果与机理分析[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(11): 3885–3894.
- [27] LI M, WU Y, YU Z, et al. Nitrogen removal from eutrophic water by floating-bed-grown Water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.) with ion implantation[J]. *Water Research*, 2007, 41(14): 3152–3158.
- [28] LI M, WU Y, YU Z, et al. Enhanced nitrogen and phosphorus removal from eutrophic lake water by *Ipomoea aquatica* with low-energy ion implantation[J]. *Water Research*, 2009, 43(5): 1247–1256.
- [29] 段婧婧, 薛利红, 冯彦房, 等. 碳氮比对水芹浮床系统去除低污染水氮磷效果的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016(3): 384–391.
- [30] 于鲁冀, 程璐璐, 彭赵旭, 等. 缓释碳源净水基质吸附-生物协同脱氮的机理研究[J]. *环境污染与防治*, 2019, 41(10): 1151–1155, 1159.
- [31] XIONG R, YU X X, YU L J, et al. Biological denitrification using polycaprolactone-peanut shell as slow-release carbon source treating drainage of municipal WWTP[J]. *Chemosphere*, 2019, 235: 434–439. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.06.198.
- [32] SUN S S, GU X S, ZHANG M P, et al. Response mechanism of different electron donors for treating secondary effluent in ecological floating bed[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 332: 125083. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125083.
- [33] GAO L, ZHOU W L, WU S Q, et al. Nitrogen removal by thiosulfate-driven denitrification and plant uptake in enhanced floating treatment wetland[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 621: 1550–1558. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.073.
- [34] SUN S S, LIU J, ZHANG M P, et al. Thiosulfate-driven autotrophic and mixotrophic denitrification processes for secondary effluent treatment: Reducing sulfate production and nitrous oxide emission [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 300: 122651. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122651.
- [35] SUN S S, GU X S, ZHANG M P, et al. Biological iron nitrogen cycle in ecological floating bed: Nitrogen removal improvement and nitrous oxide emission reduction [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 268: 115842. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115842.
- [36] SONG J, LI Q, WANG X C. Superposition effect of floating and fixed beds in series for enhancing nitrogen and phosphorus removal in a multistage pond system [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 695: 133678. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133678.
- [37] 邹联沛, 温从汉, 孙瑞茹, 等. 生物绳填料-湿地植物联合净化低污染废水[J]. *工业水处理*, 2012, 32(12): 34–37.
- [38] SONG J, LI Q, DZAKPASU M, et al. Integrating stereo-elastic packing into ecological floating bed for enhanced denitrification in landscape water [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 299: 122601. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122601.
- [39] WU Q, HU Y, LI S Q, et al. Microbial mechanisms of using enhanced ecological floating beds for eutrophic water improvement [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 211: 451–456. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.03.113.
- [40] SUN L P, LIU Y, HUI J. Nitrogen removal from polluted river by enhanced floating bed grown *Canna* [J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(1): 135–140.
- [41] DU J, LI Q, ZHAO R, et al. Effect of influent salinity on the selection of macrophyte species in floating constructed wetlands [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 282: 111947. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.111947.

(下转第 186 页)

的运行周期由 24 h 提高至 52 h,滤池反冲洗频率下降,极大地降低了电耗、水耗。

(4)本文依据原水浑浊度的变化提出了沉淀池出水内控标准,而原水的藻类、杂质、碱度及水处理工艺的水力条件等均有一定影响。因此,需进一步研究其他因素对沉淀池出水内控标准的影响,以达到节能降耗的目的。

### 参考文献

- [ 1 ] 张捷. 现代化水厂模式下的运河水厂运行管理[J]. 中国给水排水, 2018, 34(12): 118-122.
- [ 2 ] 洪觉民. 现代化净水厂技术手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [ 3 ] 李圭白, 张杰. 水质工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,

社, 2013.

- [ 4 ] 赵瑾, 王文华, 姜天翔, 等. 水处理中滤料应用的研究进展[J]. 净水技术, 2018, 37(4): 41-46.
- [ 5 ] 郑全兴, 张建. 基于水厂运行管理经验反馈气水反冲洗滤池设计注意细节的探讨[J]. 净水技术, 2020, 39(5): 171-174.
- [ 6 ] 王智, 郗燕秋, 董蕾茜, 等. 水厂滤池改造方法及应用案例[J]. 净水技术, 2017, 36(9): 78-85, 90.
- [ 7 ] 王彩娟, 王晓芳. V 型滤池过滤机理的探讨[J]. 青岛建筑工程学院学报, 2004, 25(3): 56-58.
- [ 8 ] 雷云霞, 楼继峰. V 型滤池工艺参数的测定分析[C]. 南京: 华东地区给水排水技术情报网第十六届年会论文集, 2008.
- [ 9 ] 张秋勉, 方卫国. 千岛湖优质原水对萧山水厂水处理工艺的影响[J]. 净水技术, 2020, 39(7): 114-120.
- [ 10 ] 林国峰. 《江苏省城市自来水厂关键水质指标控制标准》解读[J]. 净水技术, 2020, 39(4): 1-5.

**【编辑推荐】**精准的工艺内控管理,一方面有助于水厂出厂水水质的稳定达标,另一方面有利于能耗与药耗的精准控制,达到低碳减排的绿色目标。文章以浙江省某常规工艺水厂的内控标准探索为案例进行论述,提出不同原水浑浊度条件下的沉淀池出水浑浊度控制标准,并且通过验证,进一步对药耗和滤池运行周期提出了优化建议,相关经验对于相似原水条件的常规工艺水厂具有借鉴价值。

(上接第 22 页)

- [ 42 ] 窦文清, 何皓, 宋文萍, 等. 丛枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 761-767.
- [ 43 ] CLAASSEN N, BARBER S A. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and flux into roots of intact plants[J]. Plant Physiology (Bethesda), 1974, 54(4): 564-568.
- [ 44 ] ZHANG Z, RENGEL Z, MENEY K. Kinetics of ammonium, nitrate and phosphorus uptake by *Canna indica* and *Schoenoplectus validus*[J]. Aquatic Botany, 2009, 91(2): 71-74.
- [ 45 ] THARP R, WESTHELLE K, HURLEY S. Macrophyte performance in floating treatment wetlands on a suburban stormwater pond: Implications for cold climate conditions[J]. Ecological Engineering, 2019, 136: 152-159. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.06.011.
- [ 46 ] 周金波, 金树权, 姚水如, 等. 冬季低温条件下 6 种水生植物水质氮、磷净化能力比较[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(2): 369-372.
- [ 47 ] MUSTAFA H M, HAYDER G. Recent studies on applications of aquatic weed plants in phytoremediation of wastewater: A review article[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2021, 12(1):

355-365.

- [ 48 ] 王文杯, 王怡, 韦存智, 等. 水绵强化浮床净化再生水补给的景观水体效果[J]. 中国给水排水, 2018, 34(21): 59-63.
- [ 49 ] GUO Y M, LIU Y G, ZENG G M, et al. A restoration-promoting integrated floating bed and its experimental performance in eutrophication remediation [J]. Journal of Environmental Sciences(China), 2014, 26(5): 1090-1098.
- [ 50 ] WANG C Y, SAMPLE D J. Assessing floating treatment wetlands nutrient removal performance through a first order kinetics model and statistical inference[J]. Ecological Engineering, 2013, 61: 292-302. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.09.019.
- [ 51 ] 高翼天, 祝求, 黄宇云, 等. 不同布设方式的生态浮床对水流结构影响研究[J]. 水利学报, 2020, 51(11): 1423-1431.
- [ 52 ] 唐漪. 基于三维流场数值模拟的生态浮床的设计和应用[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [ 53 ] MACHADO M L M, JANZEN J G, NEPF H. Numerical modeling study to compare the nutrient removal potential of different floating treatment island configurations in a stormwater pond[J]. Ecological Engineering, 2018, 111: 78-84. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.11.022.