

# 生态浮岛净化性能的强化策略研究

张丽娜<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

<sup>2</sup>深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 安徽 淮南

收稿日期: 2024年11月18日; 录用日期: 2024年12月19日; 发布日期: 2024年12月31日

## 摘要

生态浮岛是在人工湿地基础上发展起来的一种环境友好型水体修复技术, 在湖泊、河流、水库等水域得到了广泛应用与研究。然而, 由于季节、水深等因素的影响, 该技术的净化效能受到限制。近年来, 多种物理、化学和生物的方法已被使用, 以提升传统生态浮岛的净化性能。本文介绍了传统生态浮岛的基本组成结构, 分析了提升生态浮岛水质净化效能的策略, 并结合生态浮岛的结构设计、机理研究、实际应用等方面, 探讨了该技术面临的挑战和机遇。

## 关键词

生态浮岛, 组成结构, 水质修复, 净化效能, 强化策略

# Strategies for Enhancing the Purification Performance of Ecological Floating Islands

Lina Zhang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

<sup>2</sup>State Key Laboratory for Safe Mining of Deep Coal Resources and Environment Protection, Huainan Anhui

Received: Nov. 18<sup>th</sup>, 2024; accepted: Dec. 19<sup>th</sup>, 2024; published: Dec. 31<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

Ecological floating islands are an environmental-friendly water remediation technology that has evolved on the basis of constructed wetlands, which have been widely applied and studied in lakes, rivers, and reservoirs. However, the purification efficiency of this technology is limited due to seasonal variations, water depth and other factors. In recent years, various physical, chemical and biological methods have been used to improve the purification performance of traditional ecological floating islands. Based on the structural analysis of ecological floating island, this study summarized

文章引用: 张丽娜. 生态浮岛净化性能的强化策略研究[J]. 环境保护前沿, 2024, 14(6): 1365-1371.

DOI: 10.12677/aep.2024.146171

its strategies in enhancing water purification performance. In addition, the challenges and opportunities of this technology are discussed in terms of the structural design, mechanism research, and practical application of ecological floating islands.

## Keywords

Ecological Floating Island, Compositional Structure, Water Quality Restoration, Purification Performance, Enhancement Strategy

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

水环境对自然生态、人类健康和经济发展等至关重要，然而氮(N)和磷(P)等污染物从各种来源排放，给河流和湖泊带来了潜在的环境风险，水环境保护与修复已成为全球可持续发展目标中的关键内容之一[1]。近年来，不同的物理、化学和生物方法被用于提升水质，其中生态浮岛作为一项生物-生态修复技术，因其具有高能效、低成本、环境友好等优点而被广泛应用[2]。

生态浮岛，亦称为生物浮岛、人工浮岛和生态浮床，主要由植物、基质、浮床与固定结构组成，如图1所示[3]。浮岛上生长旺盛的大型植物可以吸收、富集营养物，其发达的植物根系直接生长在水中，不仅为生物膜生长提供较大的表面积，还能吸附和过滤悬浮固体[4]。然而，在封闭、流动性较差的水域，传统生态浮岛的净化区域有限，且浮岛植物的根系通常分布在水体表层，仅能对根系附近的水体发挥作用。同时，该技术还受限于季节性变化，因为大多数植物在低温环境中的生长速率、光合作用速率会减缓，生长发育会受到抑制，污染物的还原效率相对较低[5]。这些缺陷限制了生态浮岛的推广和长期的处理效果。当前，通过对传统浮岛的组成结构及运行条件进行优化，以及使用物理、化学和生物等方法对其功能进行强化，正在逐步克服以上所述问题。本文旨在对强化生态浮岛水质净化效能的策略进行系统的总结，从机理角度分析浮岛水质净化效能提升的原因，并探讨该技术在未来可能面临的挑战和机遇，可为生态浮岛技术的发展，以及工程应用的优化与管理提供有益的参考，对水质改善、生态修复和社会经济发展具有重要的意义和作用。

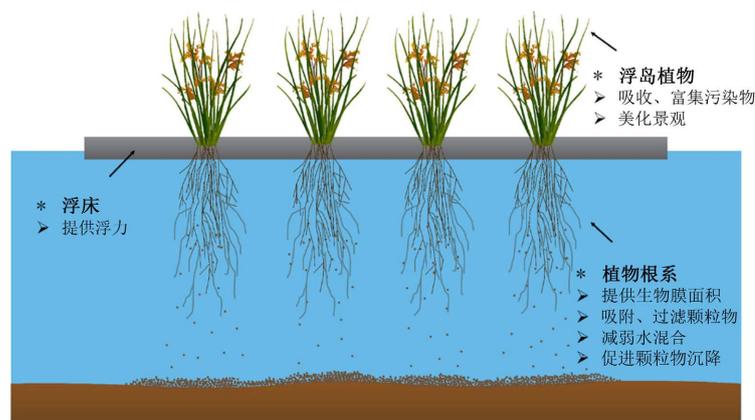


Figure 1. Schematic diagram of the structure and function of the ecological floating island  
图 1. 生态浮岛结构与功能示意图

## 2. 生态浮岛的组成结构

### 2.1. 植物

植物是浮岛的主要组成结构，植物的选择应考量其水质净化能力、环境适应性以及是否为入侵物种[1]。常用的浮岛植物主要为水生植物或喜水的陆生植物，其中鸢尾、美人蕉、花叶芦竹等由于水质净化效果较好而得到了广泛应用。

### 2.2. 基质

基质主要用于固定植物，还能通过吸附、过滤作用去除水中的污染物，部分基质还能能为植物提供养分促进植物生长。目前，主要使用的基质主要有陶粒、稻草、沸石、明矾污泥、火山岩、牡蛎壳、砾石，选择时应考虑其粒度、孔隙率、比表面积等[6]。

### 2.3. 浮床

浮床的主要作用是承载基质和植物，维持浮岛在水面上的稳定运行。目前常用的浮床材料按照来源可以分为天然材料和人工材料两种类型。天然材料环境友好，但存在耐久性差、易腐烂等缺点，人工材料使用寿命长、制作简单且成本低，但存在二次污染的风险[7]。选择浮床时，需考虑其材质、耐久性、浮力，并且需定期对水质进行监测，避免浮床材料污染水体。

### 2.4. 固定结构

固定结构主要有重物型、锚固型和桩基型。重物型是将生态浮岛与重物相连使其稳定，操作简单，但浮岛系统可能会随水位变化产生小幅度移动。锚固型是通过锚钩来固定浮岛的位置，该方法稳定性较好。桩基型是通过打桩机或手动工具将桩打入水体底泥中，将桩与浮岛相连接进行固定[8]。固定方式的选择应考虑水体类型和水深，通常在水位变化较大、波动性强的水体选择锚固型，封闭和较浅的水域选择重物型和桩基型。

## 3. 强化策略

### 3.1. 物理法

常用的物理强化策略有曝气增氧法。水体溶解氧不足会抑制好氧微生物的活性，从而降低有机物降解的效率。因此，针对溶解氧水平较低的水体，可在生态浮岛上引入曝气装置，通过增加溶解氧和氧化还原电位来促进好氧过程(如硝化反应、BOD好氧降解)的进行，使净化效能得到提升。另一方面，曝气还能促进水体混合，使水中颗粒物更易被吸附拦截，从而使水质得到进一步改善[1][9]。Zhang等[10]研究了人工曝气湿地系统对生活污水净化效能的影响。结果表明，曝气湿地系统的氨氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )转化效率比未曝气湿地高20.8%，总氮(TN)去除率比未曝气系统高13.1%。然而，由于过多的氧气供应可能会导致水中有机物的快速分解，使一些微生物的代谢活动失衡，反而降低了水体的生态稳定性。因此，水体增氧时，可以通过控制曝气强度和曝气时间，使净化效率最大化。

### 3.2. 化学法

#### 3.2.1. 化学药剂

若水中氮磷含量较高或存在一些难降解的污染物，化学药剂的添加是一种强化思路。水质修复过程中，化学药剂的选择通常取决于水质问题的类型和处理目标，需根据不同的污染物类型选择合适的药剂[11][12]。例如，硫驱动的自养反硝化是一种新兴的脱氮技术，该技术主要是利用还原性硫化化合物作为电

子供体, 实现氮的去除[13]。例如, Gao 等[14]构建了三种漂浮湿地, 分别由 $S_2O_3^{2-}$  + 基质 + 植物、基质 + 植物、植物构成。结果表明, 三种漂浮湿地 TN 平均去除效率分别为 79.2%、32.9%和 30.8%。添加 $S_2O_3^{2-}$ 的漂浮湿地表现出最高的 TN 去除效率, 且植物的总生物量增加了 97.7%。

为提高生态浮岛的除磷效率, 富铁基质的使用为水质修复提供了新的途径。富铁基质载体的使用能够提高脱氮除磷的效率, 该材料由铁、活性炭和金属催化剂、粘合剂和发泡剂组成[1]。当铁附着在活性炭上时会发生铁-碳微电解反应, 其中铁用作阳极, 活性炭用作阴极。铁-碳微电解反应能够提供足够的 $Fe^{2+}$ 和 $Fe^{3+}$ , 电子在阳极产生并转移到阴极。碳表面的 H 或 $H_2O$ 分子接受电子, 然后迅速将硝态氮( $NO_3^-$ -N)还原为氮气( $N_2$ )和 $NH_4^+$ -N, 并生成 $OH^-$ 。碱性环境下, 磷可以与 $Fe^{2+}$ 和 $Fe^{3+}$ 结合形成沉淀去除[15][16]。

对于有机碳含量较低的水体, 供微生物、植物生长的有机物较少, 水体的净化性能通常较差。研究表明, 向有机碳含量较低的水体中添加碳源, 调控水体的 C/N, 能够提升污染物去除效率。目前, 常使用的碳源有淀粉、甲醇、甘油和葡萄糖[17][18]。此外, 需要注意不同 C/N 对不同污染物的去除效果存在差异, 如 Zhao 等[17]研究了垂直流人工湿地在不同 C/N 下处理模拟废水的净化效能。结果表明, C:N 为 5:1 时, 人工湿地对化学需氧量(COD)和总磷(TP)的去除效率最高; C:N 为 10:1 时, 对总有机碳(TOC)的去除效率较高; C:N 范围为 2.5~5 时, 对 TN 的去除效率较高。应用中可根据水质特征控制碳源添加量来调节 C/N, 使净化效率最大化。

### 3.2.2. 电解技术

电解强化型生态浮岛是在传统生态浮岛上添加两种电负性不同的导体, 使其连接在一起, 并浸没在具有一定电导率的水体中。利用导体周围形成的电场效应, 使水中的带电离子向相反电荷的电极移动并发生反应, 生成的产物可以与水中的污染物发生化学反应, 从而有效去除污染物[19]。使用电解技术脱氮, 主要通过电化学脱氮和电极引起的化学氧化来实现。电化学脱氮是通过阳极上的氨氧化和阴极上的反硝化降低氮水平, 化学氧化是将 $NH_4^+$ -N 氧化为 $N_2$ 实现氮的去除[20]。电化学除磷主要通过铁、铝等阳极材料电解产生的金属阳离子或其水合离子, 与磷酸盐发生絮凝沉淀反应来实现[21]。另一方面, 电解产生的金属阳离子会与水中的 $OH^-$ 结合形成絮凝剂, 也能够增强磷酸盐的去除。

## 3.3. 生物法

### 3.3.1. 生物载体

传统生态浮岛主要通过植物吸收作用及植物根系上附着微生物的降解作用净化水质[22]。然而, 植物生长受季节限制, 且对于污染负荷较大的水体, 植物的净化能力有限。载体材料的使用可以增加生物膜面积, 为微生物提供更多附着位点, 提高生态浮岛的净化性能[5][23]。例如, Shen 等[2]使用铝基饮用水处理残渣作为基质处理高污染河水。结果表明, 有基质和无基质湿地对 TN 的去除率分别为 28.7%、31.7%。载体填料应具备较大的比表面积、耐腐蚀、抗老化、环境友好且易于微生物附着的特性。目前, 主要使用的填料有立体弹性填料、碳纤维绳、陶粒、沸石、海绵铁、铝基饮用水处理残渣、玉米芯和丝瓜络等。应用中, 可以根据水域范围选择合适的载体数量, 根据水深调整载体长度, 从而最大化提升水质。

### 3.3.2. 植物改良

植物特性是决定植物的吸收作用强弱的因素之一。植物改良主要是通过转基因技术或改变育种方式提高植物的生产性能、抗逆性和抗病虫害等能力, 从而提高植物吸收污染物的效率。例如, 注入了氮离子束的空心菜, 其干重和生长速率远远高于普通空心菜, 对 $NH_4^+$ -N、 $NO_3^-$ -N 的去除效率达到 80%以上。此外, 在 TN 浓度为 4.62 和 1.59 mg/L 的水域, 改良后的空心菜中 TN 含量分别比普通空心菜高 6.6%~11.2%

和 5.0%~9.0%，这也证明了氮离子束的注入增强了空心菜脱氮能力的可行性[24]。

### 3.3.3. 接种微生物

当水体污染负荷较大或水中存在难降解的污染物时，可通过接种微生物提升生态浮岛的净化性能。工程应用中，可以对微生物进行固定化处理，然后将固定化的微生物装载到相应设备中，进行水质修复[25]。例如，利用反硝化菌与溶血不动杆菌按 1:1 的比例进行优化复合培养，形成多菌种共存的原位优势复合菌。以生态基质为膜载体，结合芦苇人工浮岛、原位优势菌形成的耦合修复体系对纳污上覆水体 TN 和 TP 平均去除率可达到 84.05% 和 79.76% [26]。另一项研究中，窦文清等[27]为强化传统生态浮岛处理含盐废水的性能，利用丛枝菌根真菌能够增强植物抗盐胁迫能力，构建了丛枝菌根强化型生态浮岛。经过 21 d 的试验表明，含盐废水中总溶解性固体的去除率达到 36.1%，与传统生态浮岛相比，提高了 79.2%。

## 3.4. 组成结构及运行条件优化

### 3.4.1. 植物组合

植物组合的浮岛系统对水中污染物的去除效果通常优于单一植物的浮岛系统，因为不同植物所需的养分不同，搭配使用可以通过协同作用有效去除污染物。张泽西等[28]研究了单一或组合植物浮岛的水质净化效果。结果表明，单一植物组中，黄花鸢尾的 TN、TP 的去除率分别为 33.36% 和 81.36%，小香蒲的 TN、TP 的去除率分别为 31.85% 和 60.10%。而黄花鸢尾和小香蒲组合的浮岛系统，TN、TP 去除率分别为 62.73%、78.76%。因此，构建生态浮岛时，可针对水质污染特征，先筛选出对目标污染物去除效率高的优势植物，再对水生植物进行组合，这样不仅可以提升水质净化效果，还有利于美化景观。

### 3.4.2. 覆盖率

覆盖率也是影响水质净化效果的重要因素，覆盖率增大通常能够提升净化效率。例如，漂浮处理湿地覆盖率分别为 9% 和 18% 的池塘，TN 去除率分别 48% 和 88% [29]。然而，高覆盖率可能会导致水体缺氧，因为浮岛载体遮蔽了水面，阻碍了水体与大气之间的氧气交换，并且削弱了水生植物和藻类的光合作用，减少了氧气的产生[30]。应用中可根据水域面积、水质污染特征和污染程度考虑浮岛的覆盖率。

### 3.4.3. 水力停留时间

生态浮岛的净化能力还受水力停留时间的影响，针对不同污染特征和污染程度的水域，最佳水力停留时间存在差异。例如，王小娟等[31]使用大藻、浮萍、凤眼莲构建的生态浮岛去除 TP 的最佳水力停留时间为 10 d，去除  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的最佳水力停留时间为 8 d、12 d、14 d。水力停留时间过短会导致反应不充分，停留时间过长可能会导致厌氧区域扩大和生态失衡。因此，需要针对浮岛设计及水体类型，选择合适的水力停留时间。

## 4. 问题与展望

传统生态浮岛可通过优化组成结构及运行条件，结合物理、化学和生物等方法提升净化效率，但该技术仍面临一些缺陷。未来研究中应重点关注以下方面：(1) 二次污染风险。目前应用较为广泛的浮床与载体材料通常为聚乙烯，该材料存在着“白色污染”的风险，而人工材料又存在着耐久性差、加工获取困难的缺点。因此，未来仍需研发环境友好、耐久性好、易加工、负载力强的新型环保材料。(2) 净化效能不稳定。由于环境条件、水体类型等因素的影响，生态浮岛的净化效能不稳定，尤其在低温环境下的可持续性仍较低。未来应关注耐寒植物的培育，以提高生态浮岛技术的可持续性与稳定性。(3) 静态运行模式。生态浮岛多以静态模式运行，存在区域性净化的缺陷。研发调控浮岛位置的智能系统，实现浮岛位置的调控是未来值得探索的方向。

## 5. 结论

生态浮岛在水质净化和生态修复方面取得了一定的成功,但受季节、根系长度等因素的影响,该技术的推广应用和长期的处理效果受限。应用中,可根据水域状况设置最佳覆盖率及水力停留时间,优化植物组合,并结合物理(曝气增氧)、化学(化学药剂、电解技术)和生物(生物载体、植物改良、接种微生物)强化策略提升生态浮岛的净化性能。未来研究中可重点关注新型环保材料的研发、耐寒植物的培育、智能化运行与监测,实现生态浮岛净化效率的进一步提升。

## 基金项目

本文由平安煤炭开采工程技术研究院有限责任公司资助项目(HNKY-PG-JS-2023-228)资助完成。

## 参考文献

- [1] Nsenga Kumwimba, M., Batool, A. and Li, X. (2021) How to Enhance the Purification Performance of Traditional Floating Treatment Wetlands (FTWS) at Low Temperatures: Strengthening Strategies. *Science of the Total Environment*, **766**, Article ID: 142608. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142608>
- [2] Shen, C., Zhao, Y.Q., Liu, R.B., Morgan, D. and Wei, T. (2019) Enhancing Wastewater Remediation by Drinking Water Treatment Residual-Augmented Floating Treatment Wetlands. *Science of the Total Environment*, **673**, 230-236. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.035>
- [3] 王珏, 李玲宇, 刘金涛, 等. 水体生态浮岛修复技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(20): 10-13.
- [4] Schwammberger, P.F., Lucke, T., Walker, C. and Trueman, S.J. (2019) Nutrient Uptake by Constructed Floating Wetland Plants during the Construction Phase of an Urban Residential Development. *Science of the Total Environment*, **677**, 390-403. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.341>
- [5] Hu, M., Yuan, J., Yang, X. and He, Z. (2010) Effects of Temperature on Purification of Eutrophic Water by Floating Eco-Island System. *Acta Ecologica Sinica*, **30**, 310-318. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2010.06.009>
- [6] Yang, Y., Zhao, Y., Liu, R. and Morgan, D. (2018) Global Development of Various Emerged Substrates Utilized in Constructed Wetlands. *Bioresource Technology*, **261**, 441-452. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.085>
- [7] 肖安明, 刘盛, 刘奕明, 等. 人工浮岛技术在水体修复中的应用[J]. 净水技术, 2022, 41(10): 120-129.
- [8] 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.
- [9] Garcia Chance, L.M. and White, S.A. (2018) Aeration and Plant Coverage Influence Floating Treatment Wetland Remediation Efficacy. *Ecological Engineering*, **122**, 62-68. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.07.011>
- [10] Zhang, L., Zhang, L., Liu, Y., Shen, Y., Liu, H. and Xiong, Y. (2010) Effect of Limited Artificial Aeration on Constructed Wetland Treatment of Domestic Wastewater. *Desalination*, **250**, 915-920. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.04.062>
- [11] 周帅峰, 刘源, 张圣昊, 等. 不同化学药剂对人工湿地基质堵塞的缓解效果与机理[J]. 中国环境科学, 2024, 44(7): 3707-3718.
- [12] 肖军. 油田化学驱采出水处理药剂研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(17): 127-129.
- [13] Yang, W., Lu, H., Khanal, S.K., Zhao, Q., Meng, L. and Chen, G. (2016) Granulation of Sulfur-Oxidizing Bacteria for Autotrophic Denitrification. *Water Research*, **104**, 507-519. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.049>
- [14] Gao, L., Zhou, W., Wu, S., He, S., Huang, J. and Zhang, X. (2018) Nitrogen Removal by Thiosulfate-Driven Denitrification and Plant Uptake in Enhanced Floating Treatment Wetland. *Science of the Total Environment*, **621**, 1550-1558. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.073>
- [15] Hu, Z., Li, D. and Guan, D. (2020) Water Quality Retrieval and Algae Inhibition from Eutrophic Freshwaters with Iron-Rich Substrate Based Ecological Floating Beds Treatment. *Science of the Total Environment*, **712**, Article ID: 135584. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135584>
- [16] Hu, Z., Li, D., Deng, S., Liu, Y., Ma, C. and Zhang, C. (2019) Combination with Catalyzed Fe(0)-Carbon Microelectrolysis and Activated Carbon Adsorption for Advanced Reclaimed Water Treatment: Simultaneous Nitrate and Biorefractory Organics Removal. *Environmental Science and Pollution Research*, **26**, 5693-5703. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3919-5>
- [17] Zhao, Y.J., Liu, B., Zhang, W.G., Ouyang, Y. and An, S.Q. (2010) Performance of Pilot-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands in Responding to Variation in Influent C/N Ratios of Simulated Urban Sewage. *Bioresource Technology*, **101**, 1693-1700. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.002>

- [18] 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, 24(3): 384-391.
- [19] 董锐锋, 李夏, 伍阳雪, 等. 微电解技术对调相机站循环冷却水降垢杀菌作用的试验研究[J]. 工业用水与废水, 2024, 55(2): 56-60.
- [20] 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.
- [21] 高燕. 电解强化人工湿地脱氮除磷过程与机理研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京大学, 2017.
- [22] Stanley, M., Palace, V., Grosshans, R. and Levin, D.B. (2022) Floating Treatment Wetlands for the Bioremediation of Oil Spills: A Review. *Journal of Environmental Management*, **317**, Article ID: 115416. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115416>
- [23] Vohla, C., Pöldvere, E., Noorvee, A., Kuusemets, V. and Mander, Ü. (2005) Alternative Filter Media for Phosphorous Removal in a Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, **40**, 1251-1264. <https://doi.org/10.1081/ese-200055677>
- [24] Li, M., Wu, Y., Yu, Z., Sheng, G. and Yu, H. (2007) Nitrogen Removal from Eutrophic Water by Floating-Bed-Grown Water Spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.) with Ion Implantation. *Water Research*, **41**, 3152-3158. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.04.010>
- [25] 齐世鹏. 复合生物技术在黑臭水体治理中的应用[J]. 工程建设与设计, 2021(2): 127-129.
- [26] 苏俊涛, 张潇元, 韩松, 等. 原位优势菌人工浮岛耦合生态基处理炼化黑臭水体中试研究[J]. 环境科学与管理, 2024, 49(8): 163-168.
- [27] 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.
- [28] 张泽西, 刘佳凯, 张振明, 等. 种植不同植物及其组合的人工浮岛对水中氮、磷的去除效果比较[J]. 湿地科学, 2018, 16(2): 273-278.
- [29] Winston, R.J., Hunt, W.F., Kennedy, S.G., Merriman, L.S., Chandler, J. and Brown, D. (2013) Evaluation of Floating Treatment Wetlands as Retrofits to Existing Stormwater Retention Ponds. *Ecological Engineering*, **54**, 254-265. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.01.023>
- [30] Pavlineri, N., Skoulikidis, N.T. and Tsihrintzis, V.A. (2017) Constructed Floating Wetlands: A Review of Research, Design, Operation and Management Aspects, and Data Meta-Analysis. *Chemical Engineering Journal*, **308**, 1120-1132. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.09.140>
- [31] 王小娟, 陈年来, 褚润. 进水浓度和水力停留时间对浮水植物净化效果的影响[J]. 环境监测管理与技术, 2016, 28(5): 29-33.