

碱蓬浮床对海水养殖尾水的修复效果

胡杰, 王晓俊, 王趁义, 丁寅, 赵欣园, 蔡静芳, 杨娜

(浙江万里学院 生物与环境学院, 浙江 宁波 315100)

摘要: [目的] 利用碱蓬浮床对富营养化、高盐碱的海水养殖尾水进行修复, 为治理严重的海洋环境问题提供新的方法。[方法] 通过设计一种兼具物理、化学、生物协同作用的新型组合式碱蓬(*Suaeda salsa*)浮床, 研究其对富营养化海水养殖尾水中总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸钾指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₄⁺-N)的去除效果, 并与传统浮床进行对比。[结果] 组合式浮床对 TN, NH₄⁺-N, TP, COD_{Mn} 的去除率分别为 62.14%, 93.94%, 73.05% 和 60.91%, 较传统浮床去除率分别提高了 27.36%, 21.27%, 19.51%, 12.43%。[结论] 组合式浮床对富营养化、高盐碱的海水养殖尾水具有明显的修复能力。

关键词: 海水养殖尾水; 组合式浮床; 植物修复; 碱蓬; 富营养化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)02-0281-04

中图分类号: X52

文献参数: 胡杰, 王晓俊, 王趁义, 等. 碱蓬浮床对海水养殖尾水的修复效果[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 281-284. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.02.046. Hu Jie, Wang Xiaojun, Wang Chenyi, et al. Restoration effect of combined *Suaeda salsa* floating bed on tail water of marine culture[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2): 281-284.

Restoration Effect of Combined *Suaeda Salsa* Floating Bed on Tail Water of Marine Culture

HU Jie, WANG Xiaojun, WANG Chenyi, DING Yin, ZHAO Xinyuan, CAI Jingfang, YANG Na
(College of Biology and Environment, Zhejiang Wanli University, Ningbo, Zhejiang 315100, China)

Abstract: [Objective] Using the combined floating bed of *Suaeda salsa* to repair the eutrophic and high saline mariculture waste water, to provide a new method for the treatment of serious marine environmental problems. [Methods] This paper designed a new type of combined floating bed of *Suaeda salsa* with physical, chemical and biological synergy. The total nitrogen in eutrophic mariculture tail water(TN), and total phosphorus (TP), potassium permanganate index(COD_{Mn}), ammonia nitrogen(NH₄⁺-N) were measured and its removal effects on them were studied and compared with the ones of traditional floating bed. [Results] The results showed that the removal rates by the combined floating bed of TN, NH₄⁺-N, TP, COD_{Mn} were 62.14%, 93.94%, 73.05%, 60.91%, increased by 27.36%, 21.27%, 19.51%, 12.43% as compared with ones of the traditional floating bed. [Conclusion] The combined floating bed has obvious ability to repair the eutrophic and high saline mariculture waste water.

Keywords: mariculture tail water; combined floating bed; phytoremediation; *Suaeda salsa*; eutrophication

中国是世界上最大的海水养殖生产国,有文献报道^[1],2016年渔业产值中,海洋养殖产值2937.66亿元,海水产品产量 1.88×10^7 t,养殖面积 2.32×10^6 hm²,分别占渔业产值的25.93%、水产品产量的50.89%、养殖总面积的27.38%。在海水养殖中,不

规范的人工投喂方式导致排水中污染物严重超标,虾类养殖过程中投放的饲料有90%的氮、磷等营养元素会进入水体,进而导致近海水域环境严重恶化,引发一系列海域生态环境问题^[2]。同时由于目前海水养殖废水排放标准尚未颁布,许多养殖户为了减少养

收稿日期:2017-09-25

修回日期:2017-10-12

资助项目:浙江省公益性技术应用研究计划项目“二级生物净化系统处理海水池塘养殖尾水关键技术研究”(2015C32035);宁波市科技惠民项目(2017C50010);国家级大学生创新创业训练计划项目(201610876028);浙江省重中之重学科自设课题(ZS2016011);浙江万里学院引进人才重点项目(1741000530)

第一作者:胡杰(1995—),男(汉族),浙江省湖州市人,本科生,研究方向为环境污染生态修复。E-mail: 993607012@qq.com。

通讯作者:王趁义(1964—),男(汉族),江苏省徐州市人,博士,教授,硕士生导师,主要从事环境化学及生态修复研究。E-mail: wcyzx@163.com。

殖成本,直接将含有大量残饵、生物残骸、排泄物、渔用肥料、化学药剂(包括杀虫剂、杀菌剂、除藻剂以及消毒水等)的养殖尾水排入附近海域,导致日益严峻的海湾及近岸海域水质恶化,生态系统失衡、赤潮频发、病害滋生,严重制约了海水养殖业的发展。目前对于富营养化水体的修复手段主要分为 3 类:物理修复、化学复和生物修复。但物理处理技术对可溶性有机物、无机物及总 N、总 P 等的去除效果不佳^[3],化学处理技术易造成二次污染。与物理、化学修复相比,生物修复具有不消耗能源、运行成本低、操作简单、安全性较高等特点,是一项发展潜力较大、环境友好的处理技术,广泛用于富营养化水体的修复。其中,生态浮床作为一种新型的水生态修复技术,在地表水修复和污水净化中得到了越来越多的应用。然而目前国内应用用于海水养殖尾水修复的浮床实例极少。传统的植物生态浮床技术主要是通过植物的根部吸收、吸附作用来实现对污染水体中 N、P 及有机物的去除,来达到净化水质的效果。但受到植物生物量的限制,其净化效果很难进一步提高^[4]。同时因传统浮床处理方式单一、处理范围小,许多水生植物难以满足高盐碱度、污染物种类复杂的海水养殖尾水的处理需求。因此,本文利用盐生植物碱蓬作为浮床植物,设计了一种兼具物理、化学、生物协同作用的组合式浮床,通过对照试验,比较和探究其对海水养殖尾水的修复净化性能。

1 材料与方 法

1.1 试验材料与试验设计

本试验所用碱蓬幼苗采集于象山县涂茨镇滩涂湿地,所选植株初始平均株高 10.4 cm,根系平均长度 5.1 cm,试验前清水洗去泥土并利用浓度为 0.5% 的高锰酸钾溶液消毒备用。试验用海水养殖尾水是通过自来水投加养殖用海水晶并投加分析纯的氯化铵、硝酸钾、磷酸二氢钾及葡萄糖自行配制而成,配制之后的海水养殖尾水各成分浓度分别为:总 N 35~40 mg/L,总 P 5.5~6.2 mg/L, COD_{Mn} 15~18 mg/L,氨氮 1.3~1.7 mg/L, pH 值为 7.5~8.5,水体盐度为 19.5‰~21.8‰。

所设计的组合浮床主体由聚氯乙烯(PVC)管、塑料种植杯(内径为 5.5 cm)、PVC 浮体等组成,浮床尺寸长 45 cm,宽 36 cm,覆盖面积 1 620 cm²;浮床底部挂有长度可自由调节的生物绳,生物绳上每隔一段距离挂有生物填料球以及无机填料陶粒;盐生植物碱蓬利用土壤以及陶粒种植于种植杯中。传统浮床购自淘宝,由 PVC 浮体串联构成,浮体为圆盘式,中间嵌

有圆形种植篮。浮床基质采用常用的海绵或椰子纤维用于固定碱蓬植株,它们具有弹性足、固定力强、吸附水分、养分能力强,不腐烂,不污染水体等特点,能保证植物的直立与正常生长。试验各组中组合式浮床与传统浮床覆盖面积大致相同。本试验共有 3 个处理组,分别为组合式浮床组、传统浮床组和空白组。试验采用 9 个尺寸为 67 cm×47 cm×48 cm 的塑料水箱,在室外防雨塑料棚中进行,每个水箱分别注入约 60 L 模拟的海水养殖尾水,将经消毒处理的碱蓬,按照每组生物量一致、平均种植密度 500 株/m²,种植到组合式浮床和传统浮床中。空白组为模拟的海水养殖尾水,不设置任何浮床,各组平行 3 样。试验过程中 9 个水箱都进行曝气,曝气机出气量为 3 L/min。

1.2 试验方法与数据处理

试验于 2017 年 5 月 3 日至 7 月 2 日进行,共进行 60 d。前期每 7 d 采一次样,每次于采集日的上午 08:00 从塑料水箱中采集 100 ml 水样,并用同样体积的海水养殖尾水补足,迅速在实验室内进行分析,分别测定 TN, TP, NH₄⁺-N, COD_{Mn}。水质指标监测按文献^[5]方法测定。其中,水体中的 TN 采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法; TP 采用过硫酸钾消解—钼锑抗分光光度法; NH₄⁺-N 采用次氯酸钠水杨酸分光光度法; COD_{Mn} 采用高锰酸钾法测定。污染物去除率按照公式(1)计算:

$$\text{污染物去除率} = \frac{c_0 - c_1}{c_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: c_0 ——污染物初始浓度(mg/L); c_1 ——取样测定的污染物浓度(mg/L)。

试验数据和图表利用 Excel 软件绘制和分析。

2 结果与分析

2.1 植物生长情况

植物的生长状态是反映水质改善的一个关键因素,试验过程中碱蓬总死亡株数为 5 株,死亡率 2%,其余植物均生长良好。试验初期,组合式浮床中的碱蓬根部长出新根,植株顶部有新芽长出,植株高度明显增加,试验进行 14 d 左右时,组合浮床中植物的根部有微生物黏膜形成;而传统浮床组的上述现象明显滞后于组合式浮床组。试验进行 60 d 后,组合式浮床组平均株高 58.8 cm,平均根系长度 35.3 cm。传统浮床组平均株高 36.6 cm,平均根系长度 17.5 cm,组合浮床组株高及根系长度显著高于传统浮床组。说明组合式浮床碱蓬半土培半水培的种植方式更利于前期碱蓬的固定以及对环境的适应,使得碱蓬根系发达且生长迅速。

2.2 各处理组对氨氮(NH_4^+-N)的净化效果

从图 1 可以看出,各处理组水体中 NH_4^+-N 浓度变化均呈现下降趋势。试验 60 d 时,各组氨氮去除率由大到小为:组合式浮床组(93.94%)>传统浮床组(72.67%)>空白组(54.09%)。在曝气条件下,各处理组水体溶解氧含量充足,促进了氨氮氧化菌的生长,促使氨氮降解^[6]。传统浮床组主要依靠植物及其根系微生物对水体中铵盐进行吸收和同化作用,在氨

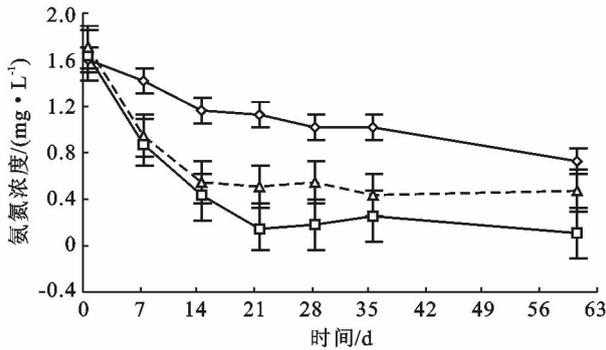
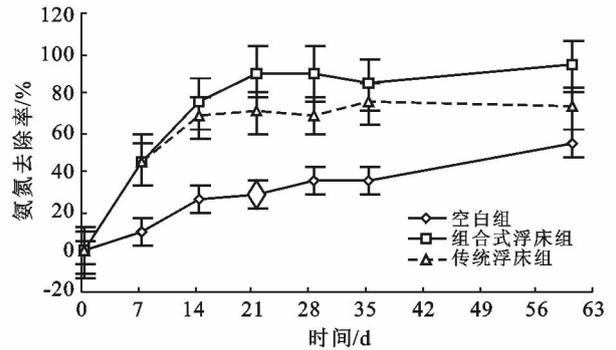


图 1 不同处理组 NH_4^+-N 浓度及其去除率的动态变化

氮浓度水平较低时,部分植物一般优先选择氨氮作为生长所需氮源而吸收利用^[7]。而带有生物绳和陶粒填料的组合式浮床系统不仅增加了根系微生物的富集,还为微生物提供了更多的生长繁殖空间,从而极大地提高了组合式浮床对养殖海水的处理效率。因此植物的吸收、氨氧化细菌和陶粒吸附等的共同作用,使组合式浮床组氨氮去除率明显高于传统浮床氨氮去除率。



2.3 各处理组对总氮(TN)的去除效果

由图 2 可知,各处理组 TN 浓度均下降,试验进行 60 d 时,各组 TN 去除率由大到小顺序为:组合式浮床组(62.14%)>传统浮床组(34.78%)>空白组(11.83%)。

硝化和反硝化作用、植物吸收和挥发是生态浮床系统中氮从水中去除的主要途径^[8]。试验阶段,各处理组均进行曝气处理,因此水层中厌氧反硝化作用较

小,系统中氮的去除主要依靠植物的吸收同化作用及部分好氧反硝化作用。组合式浮床碱蓬的种植方式更利于前期碱蓬的固定以及对环境的适应,使得碱蓬根系发达且生长迅速。同时植物发达的根系和介质中生物膜的共同作用强化了对 TN 的去除^[9],组合式浮床中的生物绳以及陶粒填料,有利于根际及水体微生物的富集。因此,组合式生态浮床对水体 TN 的去除效果明显优于传统浮床。

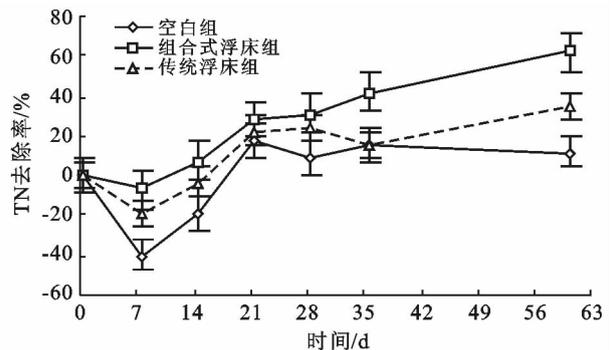
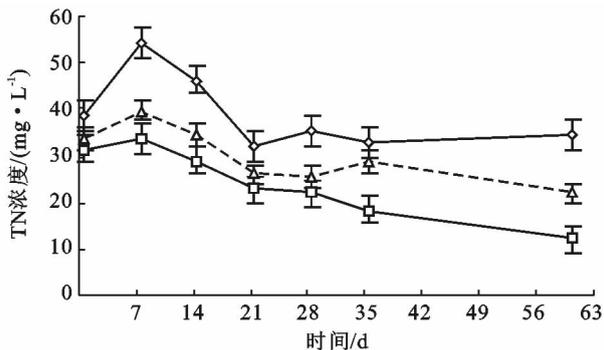


图 2 不同处理组 TN 浓度和 TN 去除率的动态变化

2.4 各处理组对总磷(TP)的处理效果

从图 3 可以看出,各处理组水体中总磷浓度都呈下降趋势,去除率都不断提高,试验进行 60 d 时,总磷去除率由大到小为:组合浮床组(73.05%)>传统浮床组(53.54%)>空白组(34.60%)。TP 的去除途径主要包括:植物的吸收和同化作用、填料的吸附以

及沉降作用。在传统浮床组中,磷的去除主要与碱蓬的同化有关。空白组中,由于缺少植物以及吸收介质,因此该组 TP 下降的原因主要是沉降的作用^[10]。组合式浮床组除了植物的吸收和同化作用,浮床下面生物球中陶粒对水体中磷有一定的吸附作用^[11-12],且两者相互促进对水体中磷的去除:生物陶粒可以通过

离子交换的方式与接触的可溶性磷发生吸附反应,生成微溶的 $\text{Ca}_2\text{-P}$, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是一种最易被水生植物吸收

的磷酸盐种类,因此组合浮床组去除率显著高于其他两个处理组。

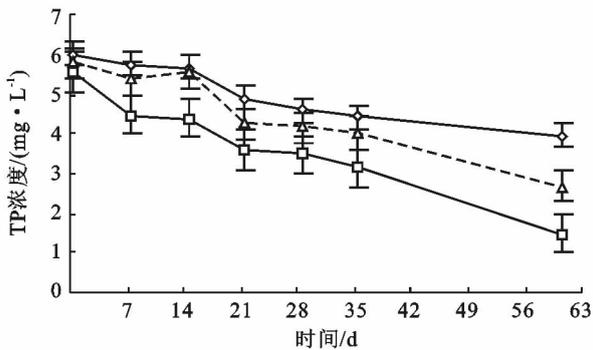
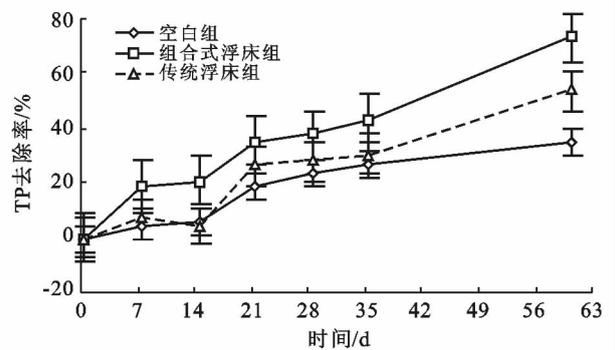


图 3 不同处理组 TP 浓度和 TP 去除率的动态变化



2.5 尾水中高锰酸钾指数(COD_{Mn})的变化状况

从图 4 可以看出,各处理组中的 COD_{Mn} 均下降,试验进行 60 d 时,各处理组 COD_{Mn} 去除率由小到大为:组合浮床组(60.91%)>传统浮床组(48.48%)>空白组(28.13%)。

总体上看,各组 COD_{Mn} 含量呈波动变化,这可能与系统中植物根系生长及介质中微生物膜的生长情况有关,微生物的生长繁殖会利用水体中有机物提供的碳源,前期微生物的生长不稳定导致水体中有机物含量波动较大。各处理组前两周 COD_{Mn} 浓度均先下降后上升,而在第 2~4 周, COD_{Mn} 维持在一定浓度。

李亚峰等^[13]研究了以陶粒作为填料的生物滤池,采用自然挂膜法发现挂膜成熟约需 20 d,因此 3~4 周时生物绳以及生物球中陶粒填料上附着的微生物较少,挂膜不稳定,水体中的 COD_{Mn} 浓度维持在一定水平。第 4 周后,组合式浮床组水体中 COD_{Mn} 浓度开始明显下降,说明组合浮床系统生物膜趋于成熟稳定,在有氧条件下,水中的有机物被膜微生物生物分解利用。同时人工介质也会提高微生物富集,形成微生物强化净化区,高密度的微生物富集是组合式生态浮床中有机物的净化主体,这也是组合式浮床组 COD_{Mn} 去除率高于其他组的原因。

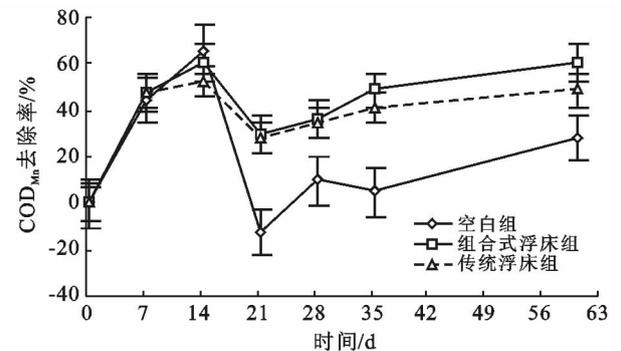
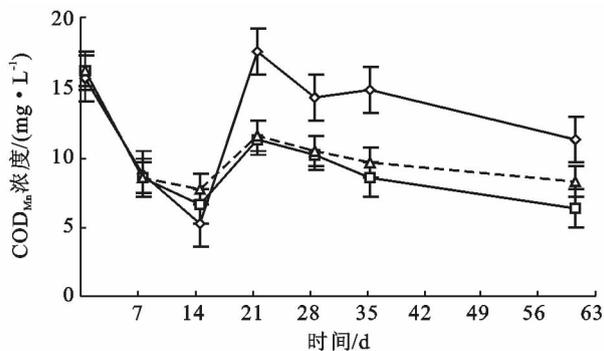


图 4 不同处理组 COD_{Mn} 浓度及其去除率的动态变化

3 结论

(1) 组合式碱蓬浮床中的碱蓬株高和根系长度均远超过传统浮床组,其植物栽培基质以及填料会促进碱蓬的生长。

(2) 组合式浮床对海水养殖尾水中的 TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TP, COD_{Mn} 去除率分别为 62.14%, 93.94%, 73.05% 和 60.91%, 比传统浮床去除率分别提高了 27.36%, 21.27%, 19.51% 和 12.43%, 组合式碱蓬浮床不仅

能利用植物吸收作用去除 N 和 P, 在增加人工介质和填料后会增加浮床根系微生物的富集, 并显著提高对 N, P 的去除效率。

[参 考 文 献]

- [1] 袁晓初, 赵文武. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016: 1-91.
- [2] 张树, 李由明, 王平, 等. 对虾养殖水体的研究现状分析[J]. 畜牧与饲料科学, 2017(3): 55-58.

在时间上的差异,还能体现湖泊(水库)水环境中薄弱的环节,便于将评价指标与结果之间进行时空相关性分析,在湖泊(水库)水质预警等级评价问题中具有一定的应用价值。

[参 考 文 献]

- [1] 杨桂山,马荣华,张路,等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学,2010,22(6):799-810.
- [2] 徐祖信. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2005,33(3):321-325.
- [3] 郭敏,李祚泳,刘智勇,等. 一种改进的集对分析法在湖泊富营养评价中的应用[J]. 水资源保护,2009,25(2):5-9.
- [4] 饶清华,张江山. 熵权物元分析模型在湖泊富营养化评价中的应用[J]. 环境工程,2006,24(6):80-82.
- [5] Shen Jian. Optimal estimation of parameters for a estuarine eutrophication model[J]. Ecological Modelling, 2006,191(3):521-537.
- [6] 孔健健,张江山. 属性识别理论模型在湖泊水质富营养化评价中的应用[J]. 环境工程,2004,22(5):66-68.
- [7] 张晓丹,黄朝君,徐菡,等. 基于 RBF 神经网络的湖库水质富营养化程度评价模型[J]. 环境工程,2007,25(2):80-82.
- [8] Drösler J. An n-dimensional Weber law and the corresponding Fechner law[J]. Journal of Mathematical Psychology, 2000,44(2):330-335.
- [9] 李祚泳,彭荔红. 基于韦伯—费希纳拓广定律的环境空气质量标准[J]. 中国环境监测,2003,19(4):17-19.
- [10] 薛文博,易爱华,张增强. 基于韦伯—费希纳定律的一种新型环境质量评价法[J]. 中国环境监测,2006,22(6):57-58.
- [11] 于露,李凡修. 韦伯—费希纳定律在区域生态环境质量评价中的应用[J]. 油气田环境保护,2011,21(3):8-10,32.
- [12] 李小燕,王菲凤,张江山. 基于韦伯—费希纳定律的湖泊富营养化评价[J]. 水电能源科学,2011,29(3):37-39.
- [13] 巩如英,王飞,刘雅莉,等. 韦伯—费希纳定律评价模型在景观环境质量评价中的应用[J]. 西北林学院学报,2006,21(1):131-135.
- [14] 张宝,刘静玲,陈秋颖,等. 基于韦伯—费希纳定律的海河流域水库水环境预警评价[J]. 环境科学学报,2010,30(2):268-274.
- [15] 钟龙芳,王菲凤,张江山. 基于韦伯—费希纳定律的地下水环境质量评价[J]. 环境科学与管理,2012,12(12):189-192.
- [16] 廖文珍,王菲凤,张江山. 基于韦伯—费希纳定律的海域水质综合评价[J]. 海洋环境科学,2014,33(1):113-117.
- [17] 陈进斌,苗英霞,邱金泉,等. 海水养殖废水处理技术研究进展[J]. 盐业与化工,2016,45(5):1-5.
- [18] 杨凤娟. 不同工艺生态浮床技术对污染水体的净化效果、机制及示范研究[D]. 广东 广州:暨南大学,2011.
- [19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京:中国环境科学出版社,2002:12-13.
- [20] 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.
- [21] Wu Hailu, Xu Kaiqin, He Xiaojuan, et al. Removal of nitrogen by three plant species in hydroponic culture: plant uptake and microbial degradation[J]. Water Air & Soil Pollution, 2016,227(9):324-336.
- [22] Zhao Fengliang, Yang Weidong, Zeng Zheng, et al. Nutrient removal efficiency and biomass production of different bioenergy plants in hypereutrophic water[J]. Biomass & Bioenergy, 2012,42(7):212-218.
- [23] 王国芳,汪祥静,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.
- [24] Zhang Rongshe, Zhou Qi, Shi Yunpeng, et al. Phosphorus Removal of agriculture wastewater through subsurface constructed wetland[J]. Environmental Science, 2003,24(4):105-108.
- [25] Huang Jianhong, Mo Wenrui, Tian Senlin, et al. Ammonium nitrogen and phosphorus adsorption characteristics of three substrates in constructed wetland[J]. Applied Chemical Industry, 2012,41(5):774-770.
- [26] Yu Yang, Chen Nan, Wang Di, et al. Adsorption of phosphorus based on Hangjin clay granular ceramic from aqueous solution And sewage: Fixed-bed column study[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2017,36(1):1-10.
- [27] 李亚峰,张娟,张佩泽,等. 曝气生物滤池的自然挂膜启动分析[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2008,24(6):1035-1038.

(上接第 284 页)