doi:10.11988/ckyyb.20181145 2019,36(9):18-22

不同填料强化生态浮床对淡水养殖水体的净化效果

张玲玲,刘立早,张玉平
(上海市水产研究所 上海市水产技术推广站,上海 200433)

摘 要:人工填料强化生态浮床是近年来发展起来的一种新兴生态工程修复技术。选取3种不同类型的人工填料与挺水植物组合,分析其对高磷浓度养殖水体和上海市养殖池塘水体的净化效果。结果表明,在高磷浓度(2.36~3.42 mg/L)养殖水体中,人工填料强化生态浮床对TN、TP、COD的平均去除率分别为34.9%,12.2%,26.1%,且3组系统之间差异不明显。在上海市养殖水体平均浓度条件下,3组系统对TN和TP的去除能力为:立体弹性填料强化生态浮床>组合填料强化生态浮床>生物绳填料强化生态浮床,立体弹性填料强化生态浮床对TN和TP的去除率分别为83.9%和69.3%;3组系统对COD和NH_4^+-N的去除率均在70%以上。因此,立体弹性填料强化生态浮床可以考虑应用于上海市淡水养殖池塘水体的生态修复工程。

关键词:淡水养殖水体;强化生态浮床;人工填料;立体弹性填料;生物绳填料;生态修复
中图分类号:X52 **文献标志码**:A
文章编号:1001-5485(2019)09-0018-05 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Purification Effect of Floating Treatment Wetlands Enhanced with Different Biofilm Carriers on Aquaculture Water

ZHANG Ling-ling, LIU Li-zao, ZHANG Yu-ping
(Shanghai Fisheries Technical Promotion Station, Shanghai Fisheries Research Institute, Shanghai 200433, China)

Abstract: Enhanced floating treatment wetland (EFTW) with biofilm carriers is a new ecological restoration technology developed in recent years. In this study, three kinds of biofilm carriers were added into traditional floating treatment wetland (FTW). Their purifying effects on high phosphorus-concentration aquaculture water and aquaculture pond water in Shanghai were examined. Results elucidated that in high phosphorus-concentration (2.36-3.42 mg/L) aquaculture water, the average removal rates of TN, TP and COD were 34.9%, 12.2% and 26.1%, respectively, with no significant difference among the three treatment groups; in aquaculture pond water in Shanghai with average polluted level, EFTW with elastic packing had the best ability of purifying TN and TP with the removal rate reaching 83.9% and 69.3%, respectively, followed by EFTW with combined packing and EFTW with bio-cord packing. The removal rates of COD and NH_4^+-N by the three treatment systems all exceeded 70%. In conclusion, EFTW with elastic packing can be applied to the ecological restoration project in freshwater aquaculture ponds in Shanghai.

Key words: aquaculture water; enhanced ecological floating bed; artificial packing; stereo-elastic packing; bio-cord packing; ecological restoration

1 研究背景

我国是世界上最大的水产养殖国家,为了提高鱼类产量,水产养殖业朝着集约化和高密度化方向发展。养殖户以人工饲养为主,而投入池塘的人工饲料仅有20%~30%被鱼类利用,其余的大部分都残留在池塘水体和底泥中,导致水体和底泥中氮、磷

收稿日期:2018-10-25;**修回日期**:2019-04-04
基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51709172);上海市青年人才成长计划项目(沪农青字(2017)第3-8号);上海市科技兴农推广项目(沪农科推字(2017)第1-12号)
作者简介:张玲玲(1985-),女,湖北襄阳人,助理研究员,博士,主要从事水体生态修复研究。E-mail:13818353541@163.com

和有机物等浓度不断升高[1]。目前,养殖户多采用定期换水的方式防止鱼类减产和死亡。而频繁换水不仅消耗了大量清洁水,还向周边环境排放了大量养殖废水,成为养殖区重要的面源污染来源,不利于我国水产养殖业的可持续发展。因此,开发一套适合水产养殖池塘的生态修复技术具有重要应用价值。

生态浮床技术作为一种不占用土地、成本低、操作简便的原位生态修复技术,被广泛应用于湖泊、河道、水产养殖等富营养化水体的治理中[2]。生态浮床技术通过截留沉降、植物吸收及附着微生物的分解转化等作用去除水体中的有机物、氮和磷等营养物质[3]。然而,生态浮床中的微生物主要来源于植物根系,微生物的数量少,对水质的净化效果有待提高[4]。为了强化生态浮床系统中微生物的作用,在传统生态浮床植物下方放置人工填料,使人工填料和水生植物均匀交替分布,除了植物根系,人工填料巨大的比表面积也为微生物提供附着载体,形成生物膜,有利于一些生长缓慢的微生物如硝化细菌等自养菌的不断积累,从而促进水体中有机污染物的分解和氮的转化[5]。另外,人工填料强化生态浮床系统中植物根系与人工填料交错生长,植物根系分泌的小分子有机物和氧气等可以为微生物生长提供养分和适宜的生长环境,增强系统对污染物的去除能力。汪松美等[6]的研究表明,人工填料与水生植物的组合显著提高了生态浮床对水体的净化能力。该技术结合了传统生态浮床和生物接触氧化技术的优势,是近年来发展起来的一种新兴生态工程原位修复技术。

现有研究使用的人工填料主要有立体弹性填料、组合填料、纤维填料、生物绳、陶粒和稻草等。张毅敏等[7]和马强等[8]的研究表明,立体弹性填料强化生态浮床对微污染水体中 COD、TN、TP 的去除效果明显高于传统生态浮床。徐功娣等[9]发现纤维填料强化生态浮床对水体中 COD、NH_4^+-N、TN、TP 及 SS(悬浮固体)的去除效果明显优于传统生态浮床。魏瑞霞等[10]用强化生态浮床技术对唐山市南公园富营养化水体进行修复,结果表明,传统生态浮床对水体中 COD 的最大去除率只有 33%左右,而强化生态浮床对 COD 的去除率最高可达62.7%。人工填料强化生态浮床不仅提高了水体中营养物质的去除率,且具有较稳定的去除效果;在夏秋季节,优势尤其明显[11-12]。

目前,人工填料强化生态浮床系统在淡水养殖池塘修复方面的研究较少,应用参数缺乏。因此,本研究将不同类型人工填料强化生态浮床应用于水产养殖水体的修复中,分析其水质净化效果,筛选出一种适合处理上海市淡水养殖池塘水体的人工填料,并优化其运行条件,为该技术的实际应用提供技术支撑。

2　材料与方法

2.1　试验设计与材料

试验在 8 个尺寸为 40 cm×80 cm×60 cm 的 PVC 水箱中进行,水箱一侧底部进水,另一侧高度 30 cm 和 50 cm 处分别设置取样阀门和出水口。试验共设置 3 个处理组:组合填料组、生物绳填料组、立体弹性填料组,每个处理组 2 个平行。每组悬挂 9 串人工填料(每串长度 50 cm),种植 4 株挺水植物,植物和人工填料均匀交错分布。

试验选用黄花美人蕉(*Canna indica*)和黄菖蒲(*Iris pseudacorus*)为受试植物,选取大小一致的黄花美人蕉幼苗(单株平均质量为(27.3±2.36)g,株高为(39.7±5.49)cm)和黄菖蒲幼苗(单株平均质量为(10.4±1.39)g,株高为(52.8±5.56)cm),每个水箱随机种植美人蕉和黄菖蒲各 2 株。浮床载体选用尺寸为 60 cm×40 cm×4 cm 的聚苯乙烯发泡塑料板。

2018 年 5—7 月,试验进水为高磷浓度养殖水体,取自上海市水产研究所内养鱼池塘,进水中 TN、COD、TP 的浓度范围分别为1.80~2.81,32.1~58.0,2.36~3.42 mg/L,水力停留时间为 3 d。2018 年 8—10 月,进水调整为人工配水,3 组水体均使用分析纯葡萄糖、KH_2PO_4、NH_4Cl、KNO_3配置,根据上海市淡水养殖池塘水体中平均污染物质水平,设置人工配水中 TN、COD、TP 浓度分别为 2~5,30~50,0.3~0.5 mg/L,水力停留时间调整为 7 d。

2.2　分析方法

试验正式运行后,每周固定时间原位检测水箱中水体的 pH 值和溶解氧(DO),并采集水箱的进水和出水样品,测定总氮(TN)、总磷(TP)、COD、氨氮(NH_4^+-N)、硝酸盐氮(NO_3^--N)和亚硝酸盐氮(NO_2^--N)等常规水质指标。检测方法如下:pH 值和 DO 使用 WTW 多参数水质分析仪检测;TN 使用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法分析;TP 使用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法测定;COD 使用 HACH 消解器(DRB200)和分光光度计(DR2800)检测;NH_4^+-N 使用纳氏试剂分光光度法检测;NO_3^--N和 NO_2^--N 均采用分光光度法测定。试验数据处理和作图使用 Microsoft Excel 完成。

3 结果与讨论

3.1 强化生态浮床对高磷浓度养殖水体的净化效果

不同填料强化生态浮床对高磷浓度水体中 TP、TN、COD、NH_4^+-N、NO_3^--N、NO_2^--N 的去除效果如图 1 所示。

试验进水中 TP 浓度范围为2.36~3.42 mg/L,系统稳定后(30 d 后),3 组强化生态浮床处理系统的出水浓度范围为2.08~3.20 mg/L,TP 去除率分别为11.1%,11.2%,12.4%(图 1(a))。人工填料强化生态浮床系统中,P 的去除主要依靠植物的吸收作用和自然沉降,植物的吸收作用能占到 90%左右[13]。本研究中 TP 的去除率较低,分析原因,可能是进水中的 TP 浓度太高(2.36~3.42 mg/L),不利于植物的生长。

进水中 TN 浓度范围为1.80~2.81 mg/L,系统稳定后(30 d 后),3 组强化生态浮床系统的出水浓度范围为 1.10 ~ 1.94 mg/L,TN 去除率分别为34.9%,34.0%,35.4%,且3 组间差异不显著(图 1(b))。人工填料强化生态浮床系统中,N 的去除主要依靠微生物转化及植物的吸收作用[13]。Cao 等[14]的研究表明,强化生态浮床的净化效果随水力停留时间延长而增强。因此,考虑本系统水力停留时间短,后期将降低进水流速至 17 mL/min,以延长水力停留时间至 7 d。

进水中 COD 的浓度范围为32.1~58.0 mg/L,系统稳定后(30 d 后),3 组强化生态浮床处理系统的出水浓度范围为24.9~34.0 mg/L,COD 去除率分别为27.3%,27.4%,24.5%,且 3 组之间差异不显著(图 1(c))。强化生态浮床系统中,COD 的去除主要依靠微生物的转化和有机物的降解作用[15],延长水力停留时间有可能提高其去除率。

系统稳定后,进水中的 NH_4^+-N 浓度为0.23~0.52 mg/L,出水浓度为0.19~0.66 mg/L(图 1(d))。

进水中的 NO_3^--N 浓度范围为0.08~0.55 mg/L,出水浓度为0.015~0.60 mg/L (图 1(e))。有机态氮的降解及硝化作用可能是导致出水中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的浓度高于进水中浓度的原因。

进水中的 NO_2^--N 浓度范围为0.005~0.15 mg/L,

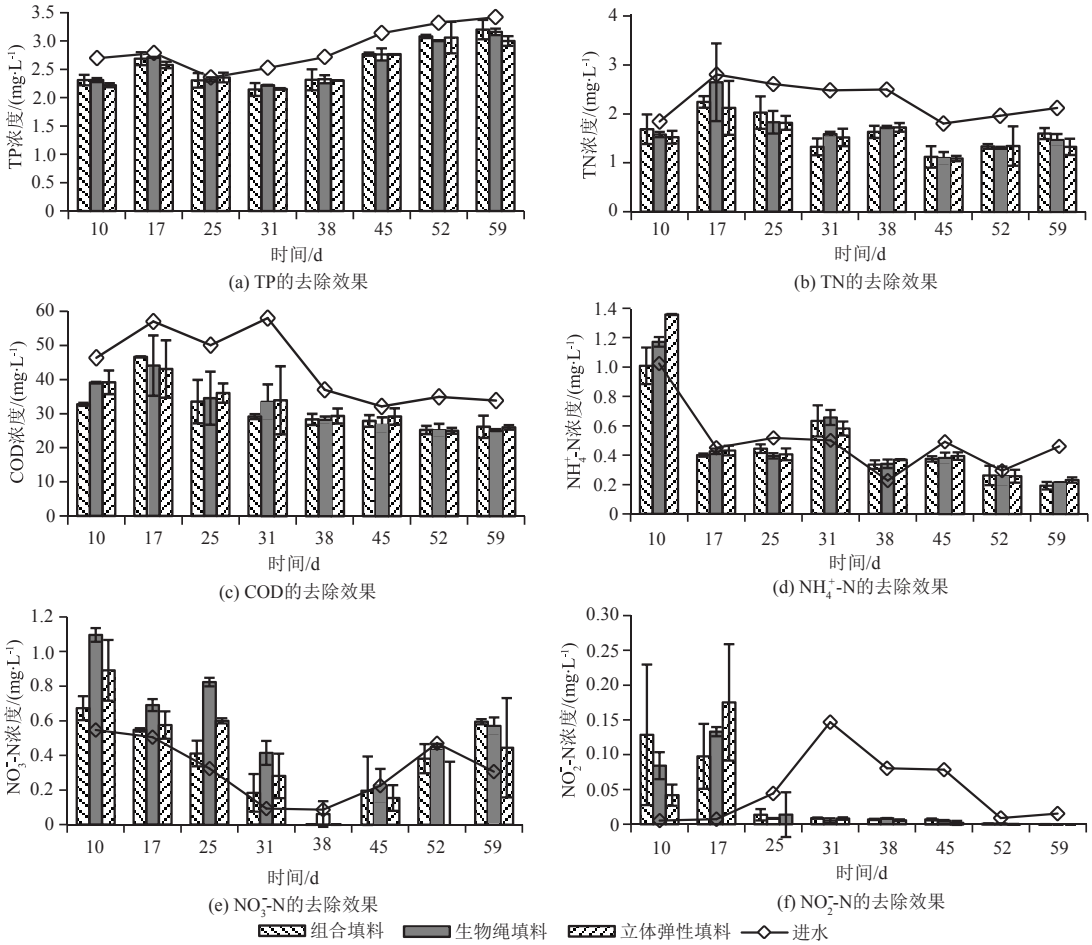


图 1 不同填料强化生态浮床对高磷浓度水体中 TP、TN、COD、NH_4^+-N、NO_3^--N、NO_2^--N 的去除效果

Fig.1 Efficiencies of enhanced floating treatment wetlands with different biofilm carriers in removing TP, TN, COD, NH_4^+-N, NO_3^--N and NO_2^--N in water with high phosphorus concentration

出水浓度为 0～0.008 mg/L，去除率达 90%以上(图 1(f))。

综上所述，人工填料强化生态浮床对高磷浓度养殖水体中的 TN、TP、COD、NO_2^--N 均有一定净化效果。但进水中 TP 浓度太高不利于植物生长，且远高于上海市养殖池塘水体中污染水平(0.3～0.5 mg/L)，因此，后期研究将调整进水中的 TP 浓度，并延长水力停留时间，以提高系统对 TN 和 COD 去除效果。

3.2　强化生态浮床对上海市养殖池塘水体的净化效果

不同填料强化生态浮床对上海市养殖池塘水体中 TP、TN、COD、NH_4^+-N 的去除效果如图 2 所示。

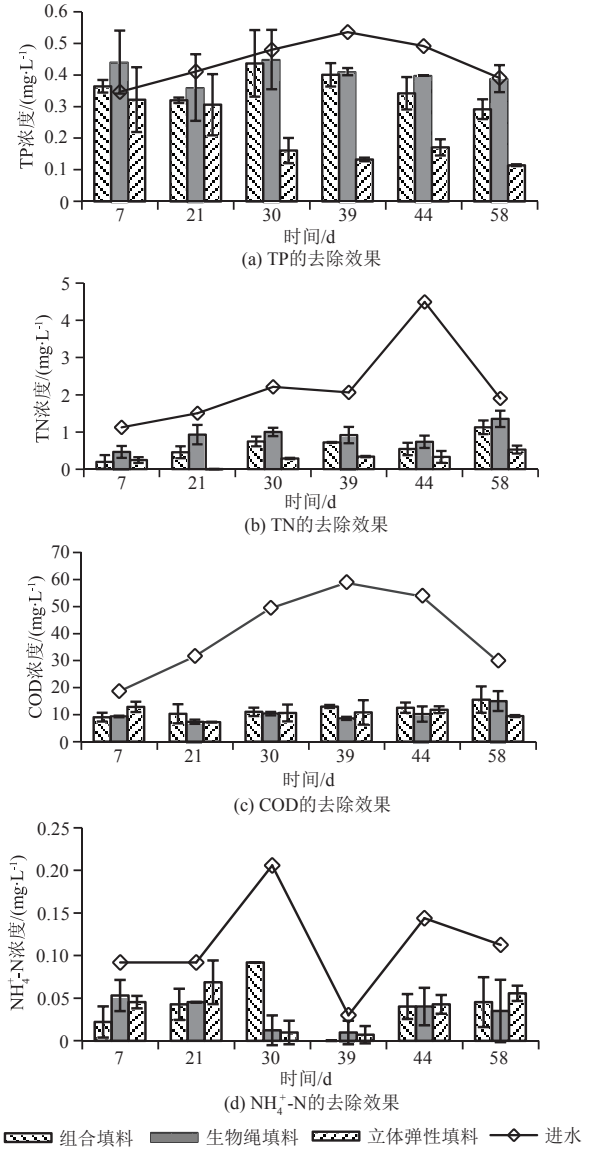


图 2　不同填料强化生态浮床对上海市养殖池塘水体中 TP、TN、COD、NH_4^+-N 的去除效果

Fig.2　Efficiencies of enhanced floating treatment wetlands with different biofilm carriers in removing TP, TN, COD and NH_4^+-N in aquaculture pond water in Shanghai

进水中的 TP 浓度范围为0.39～0.54 mg/L，系统稳定后(30 d 后)，3 种人工填料强化生态浮床系统的出水中 TP 的平均浓度分别为0.37，0.41，0.14 mg/L，平均去除率分别为22.4%，12.2%，69.3%(图 2(a))。可见，3 种人工填料强化生态浮床对 TP 的去除能力差异较大，立体弹性填料强化生态浮床对 TP 的去除率最高(69.3%)。

试验调整为人工配水后，进水中的 TN 浓度范围为1.90～4.49 mg/L，系统稳定后(30 d 后)，3 种人工填料强化生态浮床系统的出水中 TN 的平均浓度分别为0.78，1.00，0.37 mg/L，平均去除率分别为65.1%，55.7%，83.9%(图 2(b))。可见，3 种人工填料强化生态浮床对 TN 的去除效果为：立体弹性填料>组合填料>生物绳填料。3 种人工填料强化生态浮床对 TP 的去除能力与 TN 一致。

试验调整为人工配水后，进水中的 COD 浓度范围为 30～59 mg/L，系统稳定后(30 d 后)，3 种人工填料强化生态浮床系统的出水中 COD 的平均浓度分别为13.0，11.0，10.7 mg/L，平均去除率分别为70.2%，73.9%，76.7%(图 2(c))。可见，3 种人工填料强化生态浮床对 COD 的去除能力差别不大。

进水中的 NH_4^+-N 浓度范围为 0.03～0.21 mg/L，出水浓度范围为 0～0.09 mg/L，系统稳定后，3 种人工填料强化生态浮床对 NH_4^+-N 的平均去除率分别为 71.8%，75.6%，73.0%，差异不显著(图 2(d))。可能是配水桶较大，进水中的 NH_4^+-N 在水桶中已经被微生物利用或转化，导致进水中的 NH_4^+-N 浓度低于设计值1.0 mg/L。后续试验将调整配水频率和方式，以提高进水中 NH_4^+-N 浓度。

综上所述，系统运行稳定后，3 种人工填料强化生态浮床系统对上海市淡水养殖池塘水体中 TN 和 TP 的去除能力为：立体弹性填料强化生态浮床>组合填料强化生态浮床>生物绳填料强化生态浮床，且差异较大；3 种人工填料强化生态浮床对水体中 COD 和 NH_4^+-N 的去除率均在 70%以上，且差异不显著。陈亚男[16]对比了组合填料、立体弹性填料和竹填料的静态挂膜效果，结果表明：系统稳定时，立体弹性填料反应器中细菌总数最多，因此具有较好的水质净化效果。杨凤娟[17]的研究表明，植物+组合填料浮床对 N 和 P 的去除效果要优于植物+弹性填料浮床的去除效果，笔者认为可能是由于组合填料生物量大、生物活性高，且容易挂膜导致的。出现这 2 种不一致的研究结果，可能是使用的植物及受试水体不同。本研究中美人蕉和黄菖蒲 2 种植物混合种植，不同于该文献中美人蕉和风车草单独种植；另一方面，本研究模拟

上海市淡水养殖池塘水体,该文献使用的是学校教职工生活区下水管道排出的生活污水,TN 浓度(10.6~21.5 mg/L)、TP 浓度(0.86~1.98 mg/L)和 COD 浓度(56.0~106.7 mg/L)远高于本研究模拟的上海市淡水养殖池塘水体,因此水质净化效果差异较大。本研究使用的立体弹性填料纤维丝较硬,且分布均匀舒展,具有较大的比表面积;组合填料上纤维丝数量较少,且纤维丝柔软,容易粘结在一起;生物绳填料虽然纤维多,但纤维丝分布密集,填料内部多呈厌氧状态,不利于好氧微生物的生长和繁殖。

4 结 论

人工填料强化生态浮床对高磷浓度养殖水体中的 TN、TP、COD、NO_2^--N 均有一定净化效果,但进水中 TP 浓度太高不利于植物生长,导致去除率不高。在上海市淡水养殖池塘水体平均浓度条件下,3 种人工填料强化生态浮床对 TN 和 TP 的去除能力为:立体弹性填料强化生态浮床>组合填料强化生态浮床>生物绳填料强化生态浮床,立体弹性填料强化生态浮床对 TN 和 TP 的去除率分别为83.9%和69.3%;3 组系统对 COD 和 NH_4^+-N 的去除率均在 70%以上。因此,立体弹性填料强化生态浮床可以考虑应用于上海市淡水养殖池塘水体的生态修复工程中。

参考文献:

[1] 赵琳君.复合式生物滤池和人工湿地对淡水鱼类养殖废水处理效果的研究[D].杭州: 浙江大学,2017.

[2] 张 劲,黄 薇,桑连海.浮床植物水质净化能力及其影响因素研究[J].长江科学院院报, 2011, 28(12): 39-42.

[3] 黄 薇,张 劲,桑连海.生物浮岛技术的研发历程及在水体生态修复中的应用[J].长江科学院院报,2011, 28(10): 37-42.

[4] 聂玉华.微曝气强化生态浮床对污水中氮元素的去除效果研究[D].成都:西南交通大学,2015.

[5] 戴栋超,黄廷林,王 震,等.生态组合技术净化景观水体实验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2006,38(6):786-789.

[6] 汪松美,周晓红,储金宇,等.空心菜浮床+仿生植物系统对污染物去除效果[J].环境科学与技术,2013, 36(3):78-82.

[7] 张毅敏,高月香,吴小敏,等.复合立体生物浮床技术对微污染水体氮磷的去除效果[J].生态与农村环境学报,2010, 26(增刊 1):24-29.

[8] 马 强,高明瑜,谭 伟,等.新型生态浮岛在改善水质中的作用及生物膜载体微生物特征研究[J].环境科学,2011,32(6): 1596-1601.

[9] 徐功娣,张增胜,韩丽媛,等.强化生态浮床与普通浮床对污染物净化效果对比研究[J].水处理技术,2010, 36(4): 93-96.

[10] 魏瑞霞,武会强,张锦瑞,等.植物浮床-微生物对污染水体的修复作用[J].生态环境学报,2009,18(1):68-74.

[11] ZHAO Feng-liang, XI Shu, YANG Xiao-e, *et al*. Purifying Eutrophic River Waters with Integrated Floating Island Systems[J]. Ecological Engineering, 2012, 40: 53-60.

[12] CHEN Chong-jun, ZHANG Rui, CHEN Liang-wang, *et al*. Removal of Nitrogen from Wastewater with Perennial Ryegrass/Artificial Aquatic Mats Biofilm Combined System [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(4): 670-676.

[13] ZHANG Ling-ling, ZHAO Jing, CUI Na-xin, *et al*. Enhancing the Water Purification Efficiency of a Floating Treatment Wetland Using a Biofilm Carrier[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(8): 7437-7443.

[14] CAO Wen-ping, ZHANG Yan-qiu. Removal of Nitrogen (N) from Hypereutrophic Waters by Ecological Floating Beds (EFBs) with Various Substrates[J]. Ecological Engineering, 2014, 62: 148-152.

[15] IJAZ A, SHABIR G, KHAN Q M, *et al*. Enhanced Remediation of Sewage Effluent by Endophyte-assisted Floating Treatment Wetlands [J]. Ecological Engineering, 2015, 84: 58-66.

[16] 陈亚男.几种填料生物膜特性与挂膜参数优化研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012.

[17] 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].广州:暨南大学, 2011.

(编辑:罗 娟)

(上接第 11 页)

[21] 李 哲,郭劲松,方 芳,等.三峡水库小江回水区不同 TN/TP 水平下氮素形态分布和循环特点[J].湖泊科学,2009,21(4):509-517.

[22] 卢素锦,石红霄,李 鹏,等.三江源长江地表水水环境现状评价[J].环境与健康杂志,2009,26(7):604-605.

[23] 秦保平,房玉梅,高 翔,等.天津市地表水环境氮污染特征及来源解析[J].城市环境与城市生态,2009, 22(4):41-44.

[24] 叶玉适,梁新强,金 熠,等.节水灌溉与控释肥施用对稻田田面水氮素变化及径流流失的影响[J].水土保持学报,2014,28(5):105-112.

[25] 宋玉芝,秦伯强,高 光.氮及氮磷比对附着藻类及浮游藻类的影响[J].湖泊科学,2007,19(2): 125-130.

[26] 朱旭宇,黄 伟,曾江宁,等.氮磷比对冬季浮游植物群落结构的影响[J].应用与环境生物学报,2013,19(2): 293-299.

[27] 王晓燕,王静怡,欧 洋,等.坡面小区土壤-径流-泥沙中磷素流失特征分析[J].水土保持学报,2008, 22(2):1-5.

[28] 叶玉适,梁新强,李 亮,等.不同水肥管理对太湖流域稻田磷素径流和渗漏损失的影响[J]. 环境科学学报, 2015,35(4):1125-1135.

(编辑:罗 娟)