

周文宗,吴华莉,涂尾龙,等. 不同类型生态浮床对水质的净化效果[J]. 江苏农业科学,2020,48(3):262-266.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.03.047

# 不同类型生态浮床对水质的净化效果

周文宗, 吴华莉, 涂尾龙, 王洪洋, 张莺莺, 曹建国, 刘娅琴, 黄伟伟, 谈永松  
(上海市农业科学院,上海 201403)

**摘要:**为探究不同类型生态浮床对污染水体的净化效果,以动植物、浮毯、填料、单一漂浮植物(中华天胡荽)、美人蕉等 5 种生态浮床为试验组,通过检测水质净化的重要指标,确定不同类型生态浮床对水质净化指标的优势组合。结果表明,浮毯组和美人蕉组对总氮(TN)去除效果较好;美人蕉组、填料组和浮毯组对总磷(TP)去除效果较好。氨氮对 TN 降解贡献不大;硝氮对 TN 降解贡献较大。试验结果表明,5 种生态浮床在净化水质方面效果各有优势。

**关键词:**生态浮床;水质净化;总氮含量;总磷含量;化学耗氧量;溶解氧含量

**中图分类号:** X52      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1002-1302(2020)03-0262-04

自生态浮床技术<sup>[1]</sup>发明以来,国内外关于生态浮床方面的研究日益增多,生态浮床技术取得了长足的发展,从 2000 年开始,生态浮床技术在我国杭州、北京、上海、南京、无锡、宁波、温州、福州、广州、昆明等地都有了一定规模的应用。但是,传统的生态浮床技术过分依赖于单一的植物净化能力,存在处理能力有限、受季节影响大和收获产品不易处理等弊端<sup>[2]</sup>。本试验在传统浮床技术的基础上,尝试加入不同的填料,补充水生动物,构建人工食物链,研究不同类型的生物组合浮床对水质的净化效果,旨在为水体污染负荷削减提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验在上海市农业科学院庄行试验站温室内的 人工模拟池(水泥池)中进行。模拟池规格为 150 cm×120 cm×100 cm,总容积为 1.8 m<sup>3</sup>,试验用水体积为 1.44 m<sup>3</sup>。

### 1.2 试验用水

试验用水取自上海市农业科学院庄行试验站温室外面池塘,根据一般水体污染的情况,在蓄水池内加入一定量的尿素和磷酸二氢钾(化学纯)配制人工污水,然后将人工污水抽到人工模拟池开始正式试验。人工污水主要水质指标见表 1。

### 1.3 试验方法

试验根据生态浮床的类型设置为 6 个组别,即动植物组合组、浮毯式浮床组、填料组合组、单一漂浮植物(中华天胡荽)组、美人蕉组(传统浮床)和空白对照,每个组别 3 个平行,共 18 个处理单元。每个处理单元水深 80 cm,除空白对照外,水面植物覆盖率为 30%,美人蕉组用 90 cm×60 cm×5 cm 泡沫板控制植物水面覆盖率,每块泡沫板上等距离栽种美人蕉 4 株,每株生物量 0.80 kg(鲜质量);其余各组用聚氯乙烯(PVC)管做成规格为 90 cm×60 cm×50 cm 的框架控制植物水面覆盖率,PVC 管上沿打洞灌水使框架漂浮于水面,其表层管高出水面

表 1 试验人工污水主要水质指标

总氮含量 (mg/L)	总磷含量 (g/L)	氨氮含量 (mg/L)	硝氮含量 (mg/L)	化学耗氧量 (mg/L)	pH 值	溶解氧含量 (mg/L)	电导率 (μS/cm)
10.050	1.120	1.058	0.054	6.40	7.26	7.87	666.50

收稿日期:2018-11-26  
基金项目:上海市科委项目(编号:15391912200、16391900500);上海市水稻产业技术体系建设[编号:沪农科产字(2017)第 3 号]。  
作者简介:周文宗(1969—),男,湖北黄石人,博士,研究员,从事养殖生态工程和水体生态修复研究。E-mail:zhouwz001@163.com。  
通信作者:谈永松,博士,研究员,主要从事健康养殖和环境监测研究。E-mail:typine@163.com。

5 cm,每个处理单元表面放中华天胡荽 2 kg,含水量为 91.37%。另外,动植物组合组每个处理单元投放黄鳝 5 尾(总计 120 g),泥鳅 5 尾(总计 90 g),中华圆田螺 25 个(总计 50 g);浮毯式浮床组每个处理单元框架内置椰丝 7 kg(将椰丝用水冲洗干净并且放在清水中浸泡 15 d 后备用),并用大孔网袋将椰丝包捆,形成 90 cm×60 cm×30 cm 大小的方块;

填料组合组每个处理单元内置塑料空心球 6 kg,空心球规格为 520 个/500 g,并用大孔网袋将空心球包捆,形成 90 cm×60 cm×30 cm 大小的方块;单一漂浮植物组每个处理单元框架内仅放中华天胡荽;空白对照组仅有人工污水。试验时间为 42 d,试验期间水温为 23~32 ℃。

1.4 取样和测定方法

每 7 d 从每个模拟池固定位置采 1 次水样,采样时间为 13:00—16:00。水温、pH 值、溶解氧(DO)含量、电导率(EC)等采用意大利 HANNA 水质分析仪现场测定,其他水质指标将水样送回实验室后进行测定。总氮(TN)含量采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法(A)测定,总磷(TP)含量采用钼锑抗比色法测定,氨氮(NH<sub>3</sub>-N)含量采用纳氏比色法测定,硝氮(NO<sub>3</sub>-N)含量采用流动分析仪(AA<sub>3</sub>)测定,化学耗氧量(COD)采用高锰酸钾酸化法测定。

1.5 数据处理

水体污染物的去除率 =  $(T_1 - T_2) / T_1 \times 100\%$ ,其中, $T_1$  为初始水体某污染物的总量, $T_2$  为末期水体某污染物的总量。

所得数据在 Excel 和 SPSS 19.0 软件上进行统计分析,百分数数据用反正弦转换后进行方差分析,用 Duncan's 新复极差法对不同处理的平均数进行多重比较。数据写成平均值±标准差的形式。

2 结果与分析

2.1 总氮的变化情况

各组水体总氮的变化情况见表 2。试验结束后,总氮降解的效果表现为浮毯式浮床组>美人蕉组>动植物组合组>填料组合组>单一漂浮植物组>空白对照,其去除率依次为(93.00±0.91)%、(68.22±1.08)%、(50.80±3.89)%、(50.70±8.20)%、(42.90±8.23)%、(30.10±5.42)%。

表 2 总氮变化情况

处理	总氮含量(mg/L)					
	7 d	14 d	21 d	28 d	35 d	42 d
动植物组合组	9.32±0.40	7.29±0.26	6.59±0.52	6.15±0.63	5.12±0.28	4.94±0.39
浮毯式浮床组	8.15±0.26	6.62±0.57	3.89±0.72	2.32±0.67	0.77±0.12	0.71±0.09
填料组合组	9.12±0.34	7.39±0.82	6.77±0.92	6.12±0.93	5.94±0.89	4.96±0.82
单一漂浮植物组	9.22±0.38	7.69±0.46	7.18±0.29	6.97±0.31	6.74±0.49	5.74±0.83
美人蕉组	9.41±0.29	8.16±0.37	7.13±0.30	6.71±0.48	6.08±0.76	3.19±0.81
空白对照	9.69±0.24	8.68±0.48	9.00±0.50	8.48±0.43	8.14±0.53	7.03±0.54

2.2 总磷的变化情况

如表 3 所示,试验结束后,总磷降解的效果表现为美人蕉组>填料组合组>浮毯式浮床组>动植物组合组>单一漂浮植物组>空白对照,其去除率依次为(88.39±2.60)%、(86.10±1.71)%、(84.60±3.05)%、(79.50±4.17)%、(76.10±6.47)%、(47.20±2.43)%。浮毯式浮床组总磷出现先升后降的现象,可能与椰丝初期淋溶物较多有关系。

2.3 氨氮的变化情况

如表 4 可知,各处理组氨氮含量都是 7 d 后达到峰值,然后急剧下降,到 21 d 后趋于相对稳定的状态,而对照组氨氮则是 14 d 后达到峰值再急剧下降。美人蕉组的氨氮含量从 7~35 d 一直下降,42 d 略微上升,动植物组合组、浮毯式浮床组和填料组合组的氨氮含量表现为 7~28 d 一直降低,35~42 d 略微升高的趋势,单一漂浮植物组的氨氮含量表现为 7~21 d 一直降低,35~42 d 略微升高的趋势,这可能与后期枝角类增多有关系。试验结束后,仅美人蕉组明显好于空白对照,其他各组氨

表 3 总磷变化情况

处理	总磷含量(mg/L)					
	7 d	14 d	21 d	28 d	35 d	42 d
动植物组合组	1.01±0.06	0.78±0.12	0.47±0.07	0.35±0.09	0.26±0.06	0.23±0.05
浮毯式浮床组	1.25±0.02	1.06±0.13	0.52±0.08	0.33±0.07	0.27±0.03	0.17±0.03
填料组合组	1.02±0.09	0.79±0.04	0.46±0.04	0.29±0.01	0.20±0.06	0.16±0.02
单一漂浮植物组	1.01±0.05	0.89±0.02	0.53±0.01	0.37±0.02	0.32±0.02	0.27±0.07
美人蕉组	1.06±0.03	0.93±0.09	0.66±0.06	0.44±0.02	0.32±0.04	0.13±0.03
空白对照	1.02±0.03	0.99±0.03	0.95±0.02	0.89±0.02	0.83±0.05	0.59±0.03

表 4 氨氮含量变化情况

处理	氨氮含量(mg/L)					
	7 d	14 d	21 d	28 d	35 d	42 d
动植物组合组	3.64 ± 0.25	2.29 ± 0.27	0.48 ± 0.11	0.22 ± 0.06	0.40 ± 0.01	0.46 ± 0.02
浮毯式浮床组	5.75 ± 0.58	3.30 ± 0.49	1.03 ± 0.43	0.29 ± 0.02	0.42 ± 0.01	0.48 ± 0.06
填料组合组	4.02 ± 0.23	3.16 ± 0.59	0.58 ± 0.28	0.36 ± 0.04	0.40 ± 0.08	0.51 ± 0.03
单一漂浮植物组	2.76 ± 0.16	2.14 ± 0.27	0.31 ± 0.08	0.42 ± 0.08	0.42 ± 0.03	0.45 ± 0.02
美人蕉组	3.52 ± 0.49	2.90 ± 0.28	0.50 ± 0.11	0.45 ± 0.08	0.41 ± 0.04	0.42 ± 0.01
空白对照	1.80 ± 0.11	1.97 ± 0.45	0.77 ± 0.24	0.45 ± 0.15	0.44 ± 0.06	0.53 ± 0.05

氮降解的效果差异不明显,说明氨氮降解作用对于总氮降解的贡献不大。

2.4 硝氮的变化情况

各组水体硝氮的变化情况见表 5。各组硝氮含量都表现出先升后降的趋势,试验结束后,其降解的效果表现为浮毯式浮床组 > 美人蕉组 > 填料组合组 > 单一漂浮植物组 > 动植物组合组 > 空白对

照,结合表 2 可以看出,硝氮降解作用对于总氮降解的贡献较大。

2.5 COD 的变化情况

由表 6 可知,各组 COD 都表现出先升后降的趋势,原因有待研究。试验结束后,各组 COD 降解的效果表现为动植物组合组 > 填料组合组 > 单一漂浮植物组 > 美人蕉组 > 浮毯式浮床组 > 空白对照。

表 5 硝氮变化情况

处理	硝氮含量(mg/L)					
	7 d	14 d	21 d	28 d	35 d	42 d
动植物组合组	0.80 ± 0.19	2.18 ± 0.38	5.49 ± 0.47	5.09 ± 0.21	4.72 ± 0.44	4.33 ± 0.49
浮毯式浮床组	0.31 ± 0.24	0.77 ± 0.20	2.59 ± 0.02	0.92 ± 0.40	0.13 ± 0.08	0.05 ± 0.04
填料组合组	0.75 ± 0.46	2.32 ± 0.68	4.90 ± 0.25	5.70 ± 0.37	5.34 ± 0.28	4.21 ± 0.39
单一漂浮植物组	1.13 ± 0.23	3.88 ± 0.31	5.82 ± 0.36	5.35 ± 0.09	4.84 ± 0.37	4.30 ± 0.36
美人蕉组	1.71 ± 0.55	3.56 ± 0.24	5.13 ± 0.40	6.04 ± 0.40	4.17 ± 0.57	2.34 ± 0.41
空白对照	2.11 ± 0.55	4.53 ± 0.49	5.33 ± 0.40	7.81 ± 0.31	6.24 ± 0.47	5.73 ± 0.55

表 6 COD 变化情况

处理	COD(mg/L)					
	7 d	14 d	21 d	28 d	35 d	42 d
动植物组合组	6.67 ± 0.21	8.64 ± 0.33	7.89 ± 0.34	6.50 ± 0.23	5.76 ± 0.43	5.29 ± 0.34
浮毯式浮床组	7.62 ± 0.44	9.66 ± 0.50	8.76 ± 0.29	8.23 ± 0.43	7.25 ± 0.24	6.72 ± 0.20
填料组合组	6.69 ± 0.16	7.97 ± 0.24	7.13 ± 0.42	6.68 ± 0.28	6.27 ± 0.24	5.83 ± 0.24
单一漂浮植物组	7.11 ± 0.43	9.34 ± 0.41	7.58 ± 0.47	6.50 ± 0.44	6.07 ± 0.32	5.67 ± 0.37
美人蕉组	7.70 ± 0.50	8.73 ± 0.42	7.83 ± 0.25	6.78 ± 0.42	6.45 ± 0.24	5.92 ± 0.17
空白对照	9.71 ± 0.48	13.46 ± 0.74	17.72 ± 0.77	13.77 ± 0.68	9.45 ± 0.75	8.29 ± 0.46

2.6 pH 值的变化情况

如表 7 所示,各处理组 pH 值都表现出先降然后略微上升的趋势,并且小于对照组,这与对照组浮游植物较多,溶解氧较高有关系。

2.7 溶解氧的变化情况

如表 8 所示,各处理组溶解氧含量都是先急剧下降,于 7 d 后达到谷底,然后逐步上升。但是,对照组溶解氧含量比处理组高,其变化没有明显的规律。

表 7 pH 值变化情况

处理	pH 值					
	7 d	14 d	21 d	28 d	35 d	42 d
动植物组合组	7.14 ± 0.02	6.81 ± 0.07	6.98 ± 0.11	6.99 ± 0.06	7.06 ± 0.08	7.20 ± 0.09
浮毯式浮床组	7.13 ± 0.01	6.71 ± 0.08	6.82 ± 0.02	6.95 ± 0.07	6.94 ± 0.09	6.95 ± 0.04
填料组合组	7.11 ± 0.01	6.71 ± 0.04	6.93 ± 0.04	7.05 ± 0.03	7.16 ± 0.04	7.28 ± 0.05
单一漂浮植物组	7.09 ± 0.01	6.67 ± 0.07	7.04 ± 0.04	7.13 ± 0.09	7.26 ± 0.12	7.51 ± 0.08
美人蕉组	7.07 ± 0.01	6.85 ± 0.01	7.03 ± 0.09	7.16 ± 0.08	6.99 ± 0.03	7.11 ± 0.09
空白对照	7.12 ± 0.02	7.51 ± 0.18	7.49 ± 0.19	8.06 ± 0.38	8.59 ± 0.16	8.75 ± 0.40

表 8 溶解氧变化情况

处理	溶解氧含量(mg/L)					
	7 d	14 d	21 d	28 d	35 d	42 d
动植物组合组	3.84 ± 0.30	4.70 ± 0.22	4.63 ± 0.21	4.60 ± 0.27	5.16 ± 0.37	5.97 ± 0.39
浮毯式浮床组	3.19 ± 0.05	4.58 ± 0.24	4.56 ± 0.16	4.02 ± 0.30	4.21 ± 0.28	4.95 ± 0.24
填料组合组	3.69 ± 0.10	4.46 ± 0.33	4.63 ± 0.33	4.88 ± 0.36	5.35 ± 0.20	6.06 ± 0.17
单一漂浮植物组	4.04 ± 0.18	4.73 ± 0.24	4.83 ± 0.05	5.15 ± 0.18	5.81 ± 0.14	6.69 ± 0.28
美人蕉组	3.97 ± 0.17	4.03 ± 0.06	4.33 ± 0.62	4.87 ± 0.28	5.11 ± 0.17	5.66 ± 0.31
空白对照	6.87 ± 0.19	8.32 ± 0.69	6.48 ± 0.47	6.43 ± 0.24	10.51 ± 0.38	9.23 ± 0.40

2.8 电导率的变化情况

如表 9 所示,各组电导率都表现出逐渐略微上升的趋势。试验结束后,各组电导率表现为动植物

组合组 = 填料组合组 > 浮毯式浮床组 > 单一漂浮植物组、美人蕉组 > 空白对照。

表 9 电导率变化情况

处理	电导率(μS/cm)					
	7 d	14 d	21 d	28 d	35 d	42 d
动植物组合组	798 ± 11	824 ± 1	838 ± 2	858 ± 4	864 ± 3	874 ± 2
浮毯式浮床组	807 ± 3	813 ± 8	818 ± 12	840 ± 14	848 ± 9	869 ± 8
填料组合组	798 ± 11	824 ± 1	838 ± 2	858 ± 4	864 ± 3	874 ± 2
单一漂浮植物组	768 ± 4	807 ± 13	817 ± 13	832 ± 16	845 ± 17	856 ± 14
美人蕉组	754 ± 7	773 ± 8	774 ± 8	782 ± 6	791 ± 4	808 ± 6
空白对照	727 ± 1	751 ± 8	762 ± 3	767 ± 6	763 ± 9	763 ± 25

3 讨论

生态浮床技术对污染水体净化起到重要作用<sup>[3-4]</sup>。单一植物的净化能力有限。组合式生态浮床对氮磷、藻类的毒素有着较高的去除率,对污水净化有较好的处理效果。组合式生态浮床将人工填料和水生动物引入到传统浮床,植物可以通过吸收、吸附作用净化水质,水生动物可以利用植物无法处理的较大有机物颗粒<sup>[5-6]</sup>。

目前在生态浮床填料方面,从传统填料向新型悬浮生物载体转变,出现了竹子、稻草和陶粒等<sup>[7-8]</sup>。椰丝中纤维素含量达 46.2%<sup>[9]</sup>。椰丝作为植物纤维毯在改良土壤,减少水土流失等方面发挥着重要作用<sup>[10]</sup>。有研究表明,我国水体污染是因为氮、磷含量过高而引起的富营养化造成的,所以氮、磷的去除对水体净化起到关键作用。农业面源污染影响我国水生生态环境安全,尤其养殖业污水是高度富营养化的污水,有的植物在净化水体中不能存活,从而影响净化效果<sup>[11]</sup>。本试验采用椰丝为填料去除 TN 和 TP 效果较好,这一结果可为畜牧业污水处理提供多种可行的净化方案。

动植物组合浮床中水生动物污染物去除途径主要是黄鳝、泥鳅和中华圆田螺对颗粒性有机物的滤食。动植物组合浮床在水质净化中未表现出明

显优势,TN 和 TP 去除率分别为 50.80%、79.50%。由于泥鳅有忍耐低溶氧,摄取水底腐植质或泥渣等生活特性,可将其作为河流或底泥污染程度的敏感指示动物,通过分析泥鳅体内的重金属浓度,监测污染程度<sup>[12]</sup>。中华圆田螺对于干燥及寒冷有较大的抗御力。因此,作为水质净化的这 2 种水生动物仍有开发潜力,进一步研究可在投放数量和组合方面加以改进。传统美人蕉试验组 TN 和 TP 去除率分别为 68.22%、88.39%,对污水净化效果较好;这与范子红等研究表明美人蕉浮床适用于处理氮污染较严重的畜禽废水和养殖废水的结果<sup>[13]</sup>一致。

不同类型组合生态浮床研究目的在于如何优化植物组合、动植物组合以及浮床载体等,发挥各自生态功能优势,进一步提高水质净化效能。

4 结论

本试验研究不同类型生态浮床组合对水质的净化效果,结果显示,浮毯组和美人蕉对 TN 去除效果较好;美人蕉、填料和浮毯组对 TP 去除效果较好。浮毯组采用椰丝为填料净化水质效果较好。

参考文献:

[1] 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):489-494.

李栋梁,舒月力,韩琳洁,等. 表面活性剂对汽爆小麦秸秆高固体含量酶解的影响[J]. 江苏农业科学,2020,48(3):266-272.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.03.048

# 表面活性剂对汽爆小麦秸秆高固体含量酶解的影响

李栋梁,舒月力,韩琳洁,田亚东,刘 正,贾士儒,钟 成

(天津科技大学生物工程学院/工业发酵微生物教育部重点实验室,天津 300457)

**摘要:**以蒸汽爆破预处理(2.2 MPa,6 min)的小麦秸秆(SEPW)作为原料,对其进行高固体含量酶解。经过一系列的单因素试验及双因素正交试验,发现添加表面活性剂聚乙二醇 6000(PEG6000)使 SEPW 的酶解效率在低纤维素酶添加量下有明显提高。在反应体系为 30 g、葡聚糖添加量为 10%、纤维素酶添加量为 10 FPU/g 葡聚糖时,SEPW 的葡聚糖及木聚糖转化率分别达到 54.43%、52.63%,相比于对照组的 45.79%、22.75%,分别提高 18.87%、131.34%。

**关键词:**小麦秸秆;蒸汽爆破预处理;酶解;表面活性剂;高固体含量

**中图分类号:** S188<sup>+</sup>.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)03-0266-07

小麦秸秆产量丰富,但是利用效率极低,现阶段主要通过粉碎还田、喂养牲畜及堆肥发酵进行处理<sup>[1-14]</sup>。随着科技进步,新型的物理、化学及生物预处理技术给高效利用这种高产量的生物质能源提供了便利。如微波粉碎预处理、热水预处理、蒸汽爆破(汽爆)预处理、碱处理、酸处理、生物预处理及综合预处理等<sup>[2]</sup>。蒸汽爆破预处理被广泛应用于生物质预处理,其具有不产生废弃物、无需额外添加化学试剂、预处理成本低、环境友好等特点。

收稿日期:2018-12-28

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(编号:201503135-15)。

作者简介:李栋梁(1994—),男,河南漯河人,硕士研究生,主要从事木质纤维素预处理及糖化发酵研究。E-mail: lidongliangA@163.com。

通信作者:钟 成,博士,教授,博士生导师,主要从事纤维素的生物合成代谢与降解机理研究。E-mail: czhong@tust.edu.cn。

经过汽爆预处理后小麦秸秆的表面结构被破坏,极大提高了纤维素酶与纤维素的结合效率<sup>[4]</sup>。研究如何减少纤维素酶用量及提高纤维素酶利用率,从而降低酶解过程的成本,一直以来受到极大关注<sup>[5]</sup>。

目前大多数研究表明,表面活性剂主要通过降低木质素对纤维素酶的无效吸附,提高纤维素酶的酶解效果<sup>[6]</sup>。本试验通过研究表面活性剂聚乙二醇 6000(PEG6000)对汽爆小麦秸秆酶解的影响<sup>[13-16]</sup>,并通过一系列的单因素试验及正交试验优化摇瓶酶解的条件<sup>[17-21]</sup>,从而提高高固体含量汽爆小麦秸秆的酶解效率<sup>[15]</sup>,以为高固体含量下生物质糖化发酵成本的降低做出贡献<sup>[7-9]</sup>。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料、主要仪器及试剂

小麦秸秆采自河北省沧州市沧县。纤维素酶

[2]项学敏,宋 晨,周集体,等. 人工湿地水处理技术研究进展存在问题与改进[J]. 环境科学与技术,2006,29(10):101-102,114.

[3]陈进树. 国内生态浮床研究进展[J]. 安徽农学通报,2017,23(1):21-23.

[4]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.

[5]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.

[6]李 伟,李先宁,曹大伟,等. 组合生态浮床技术对富营养化水源水质的改善效果[J]. 中国给水排水,2008,24(3):34-38.

[7]曹文平,王冰冰. 生态浮床的应用及进展[J]. 工业水处理,2013,33(2):5-9.

[8]汪银梅,殷红桂,唐子夏,等. 不同基质的浮床对浮床植物及废水脱氮效果的影响[J]. 工业安全与环保,2017,43(3):88-91,98.

[9]梁 冬. 椰棕丝中纤维素及木质素含量的测定方法[J]. 轻纺工业与技术,2014,169(4):127-128.

[10]李宏钧,孔亚平,张 岩,等. 植物纤维毯对道路边坡微生境的影响[J]. 公路交通科技,2016,33(6):146-151.

[11]陈敏娇. 畜禽养殖污水植物净化与资源化利用研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.

[12]丁冬梅. 利用泥鳅对重金属富集的现象来指示河流污染变化程度的研究[J]. 江苏环境科技,2007,20(2):31-32.

[13]范子红,刘超翔,于 鑫,等. 溶氧状况对美人蕉根系特征和畜禽废水处理效果的影响[J]. 土木建筑与环境工程,2011,33(1):124-128.