

浮床技术组合工艺净化人工废水中氮素的试验研究

张择瑞^a, 田 创^b, 方 超^b, 汪家权^b

(合肥工业大学 a. 机械工程学院; b. 资源与环境工程学院, 安徽合肥 230009)

摘要:为研究浮床技术组合工艺对人工废水中氮素的净化效果,在室外条件下,以自行设计组装的浮床作为载体,对由湖水和自来水1:1(体积比)混合并添加一定量营养元素配制的人工废水进行为期54 d的处理,且对其进行曝气、投加活性污泥、增设人工水草等辅助工艺的组合搭配,分析不同工艺条件下人工废水中氮素的降解效果。结果表明:曝气+污泥+人工水草组合工艺条件下的人工废水在试验进行至第6 d NH_4^+-N 降解率为89.9%,39 d时 NH_4^+-N 质量浓度为0.71 mg/L,降解率为97.4%,水质达到地表水Ⅱ类标准;试验结束时,曝气的水箱内 NH_4^+-N 降解率均达97.6%,曝气对人工废水中氮素的去除具有良好的促进作用,可与浮床技术结合用于湖泊、池塘等水体治理。

关键词:组合工艺;曝气;活性污泥;人工水草;人工废水;氮素

中图分类号:X 524 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-7872.2018.01.015

An Experimental Study of Purification of Nitrogen in Artificial Water by Floating Bed Combined Process

ZHANG Zerui^a, TIAN Chuang^b, FANG Chao^b, WANG Jiaquan^b

(a.School of Mechanical Engineering; b. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to study the purification effect of nitrogen in artificial wastewater treated by combined process of floating bed, under the outdoor condition, by using a self-designed and assembled floating bed as a carrier, the artificial wastewater prepared from mixing lake water with tap water in a volume ratio of 1:1 and added with a certain amount of nutrient elements of different combinations was treated for 54 d, and auxiliary process combined with aeration, adding sludge and artificial grass were employed, the effect of degradation of nitrogen in artificial wastewater under different process conditions was analyzed. The results show that the removal rate of NH_4^+-N in the artificial wastewater under the combined process conditions of aeration, sludge and artificial grass was 89.9% on the 6th day, the mass concentration of NH_4^+-N is 0.71 mg/L on the 39th day, the removal rate is 97.4%, and the water quality reaches Class II standard of surface water. At the end of the experiment, the removal rate of NH_4^+-N reaches 97.6% in the tanks with aeration. Aeration has a good effect on promoting nitrogen removal in artificial wastewater and combination of it with floating bed process can be used to treat water bodies such as lakes and ponds.

Key words: combined process; aeration; activated sludge; artificial grass; artificial wastewater; nitrogen

随着水环境污染以及生态环境的日趋恶化,污染水域的生态净化技术受到普遍关注。其中生态浮床作为一种水体生态修复和水环境治理兼顾的技术是比较有效的方法之一^[1],该技术具有无环境风险和二次污染,材料来源广,且可产生经济效益和营造水面景观等优点^[2]。生态浮床技术在国外研究较早,并取得了一系

收稿时间:2018-01-21

基金项目:国家水体污染控制与治理重大科技专项(2012ZX07103-004)

作者简介:张择瑞(1985—),男,安徽利辛人,博士生,主要研究方向为环保装备及工程。

通信作者:汪家权(1957—),男,安徽太湖人,教授,主要研究方向为水环境系统模拟与水污染控制。

列研究成果^[3-5]。国内宋祥甫等^[6]1998年利用水稻作为浮床植物治理富营养化水体,在收获作物的同时对水体中氮、磷的去除率分别达58.7%和49.1%。目前,我国生态浮床技术研发及应用处于快速发展时期,并对各种污染水体取得了较好的治理效果^[7-10]。

氮素是水体污染的主要指标之一,对氮素降解相关技术的处理效果研究具有重要意义。普通水生植物浮床仅种植水生植物,其生物要素单一,构成完整生态系统的水生动物及微生物等的构建环节较为薄弱,限制了生态功能的发挥,也制约了其水质净化效能的进一步提高^[11-12]。为提高生态浮床对污染水体的处理效率,本课题组设计了新型的生态浮床^[13]并发掘了高效新型浮床植物。曝气复氧是目前国内外常用的修复污染水体的方法之一,根据水体污染后缺氧的特点,人工向水体充入空气或氧气,加速水体复氧过程,以提高水体DO(溶解氧)含量^[14]。薛彦君等^[15]研究曝气对水中营养盐的影响,发现曝气量 $2.4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,曝气4 h/d时水体中营养盐的去除效果最佳;罗固源等^[16]在污染河水脱氮试验中发现风车草、香根草和菖蒲浮床对TN(总氮)的平均去除率分别达到45.6%,38.9%和36.1%;吴慧群等^[17]比较阿克曼生态基和人工水草(绿色纤维地毯)对有机废水的处理效果,发现两者效果相当。

目前,常采用曝气、投加污泥、增设人工水草等工艺来处理氮素,采用浮床技术与曝气、添加污泥、增设人工水草等工艺相结合处理污水并比较其处理效果方面的研究较少。基于此,笔者以自行配制的人工废水为研究对象,采用浮床技术与曝气、污泥、人工水草等辅助工艺相组合,比较分析不同条件下对人工废水处理的效果,以期强化浮床技术,使其能进一步提高相关水体的处理效率。

1 试验

1.1 人工废水的配制

试验用水为校园斛兵塘湖水与自来水按体积比1:1混合,湖水中 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})=0.54 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TP})=0.11 \text{ mg/L}$,且根据植物营养液配方^[18],配制人工废水。其中, $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})=26.60 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TP})=1.08 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TOC})=22.0\sim 23.6 \text{ mg/L}$,达《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的劣V类水浓度标准^[19]。

1.2 试验设备与材料

1) 浮床

使用自行设计、组装的生态浮床,如图1。浮床框架为长方形,长60 cm、宽40 cm,材质为PVC管(管径3 cm)、方形格渔网和尼龙线等。将截断的PVC管用弯头和PVC胶连接,形成框架。该浮床框架中空,所用PVC材质较轻,故框架具有传统浮床框架和浮体的双重功能。用尼龙线将渔网固定在框架上,并将两层框架垂直固定在一起形成浮床。若在浮床中种植植物,可将植物种植在两层网的网格中,生物填料挂在浮床下。



图1 试验所用浮床实物图

Fig. 1 Photo of the floating bed used for the experiment

2) 水箱

4个,为白色聚乙烯材料制成的长方体结构,无臭无毒,稳定性好,体积180 L(60 cm×60 cm×50 cm)。

3) 其他设备

曝气设备为增氧泵,在增氧泵上连接气管和气石,气石为高温烧结的硅酸盐材料,可使气泡均匀分散在水箱中,以提高氧气的溶解量和利用率。试验曝气量为 $2.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,采用连续曝气的方式。另外,还有为接通曝气增氧泵所用的电线和插板等器材。

4) 人工水草

为市场上销售的普通化纤地毯^[17],地毯正面为竖形条纹、有绒毛,反面编织精密,具有一定的孔隙度、易吸水,表现质地与阿科蔓生态基相似,且价格便宜。地毯颜色为绿色,与水草颜色相近。

5) 活性污泥

取自合肥王小郢污水处理厂曝气池中泥水混合液,为好氧活性污泥,质量浓度约为3 000 mg/L。所取活

性污泥是絮状颗粒物,呈黄褐色,有土腥味,且具黏性;菌胶团结构致密,形状不规则,细菌种类繁多;含水率大于99%,pH为7.0左右;污泥表面凹凸不平,粒径较小,粒径小则比表面积大,吸附量也就大。

1.3 试验过程

试验于2017年6月1日—2017年7月25日进行,试验周期为54 d,气温在18~35℃之间。试验场地通风透气,光照充足。并列放置4个同一规格容积为180 L的白色长方体水箱(1~4号),水箱内既不易落入灰尘,也不会溅入雨水,可避免外部条件对试验结果的影响。浮床置于水箱内,人工水草悬挂在浮床下,为微生物生长提供场所。为避免不同组合条件下植物生长状况对试验结果造成的干扰,水箱内均不种植植物。

往每个水箱里加入120 L浓度相同的自配人工废水,接通曝气装置。其中,1号水箱内的试验工艺为曝气+污泥+人工水草,2号水箱为曝气+污泥(无人工水草),3号水箱为曝气+人工水草(无污泥),4号水箱为污泥+人工水草(不曝气),4个水箱内污泥投加量均为10 L。对各水箱定期(前期两天一次、后期三天一次)、定时(中午12:00)、定量(200 mL)取样,采用《水和废水监测分析方法》^[20]中的方法测定 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 的含量,其中氨氮和亚硝酸盐氮采用气相分子吸收光谱法,硝酸盐氮采用紫外分光光度法。为避免水分蒸发和植物蒸腾消耗水分导致的水面降低引起的水体三氮浓度升高(每次从水箱中取出用于检测的人工废水体积比整箱水的体积小得多,故每次取水导致水箱中污染物浓度的变化可忽略),在水箱上画上水位线,当水箱水位下降时,向水箱中加入去离子水保持水位不变,但不会影响水箱内各污染指标总量。

2 试验结果与分析

2.1 氨氮净化效果的比较

4个水箱内氨氮的变化趋势如图2。由图2可知:4个水箱内氨氮的初始质量浓度相同,约为27 mg/L;曝气的3个水箱试验结束时,氨氮的降解率均达97.6%。生态浮床去除 NH_4^+-N 的主要途径有植物吸收、硝化反应和氨挥发等^[21],且大部分依赖于微生物的硝化过程^[22-23],合适的曝气可提高了水体中DO的含量,为好氧微生物的生长提供良好环境,同时增强硝化细菌对氨氮的转化作用;曝气能够提高植物浮床根系硝化细菌的数量和活性,增强氨氮的去除效果^[24],而人工水草具有与植物根系相似的作用,故曝气对人工废水中氨氮的去除具有良好的促进作用。试验初期,曝气+污泥+人工水草的1号水箱在试验进行第6 d时氨氮降解率为89.9%,第39 d时氨氮质量浓度为0.71 mg/L,降解率为97.4%,水质达到Ⅱ类;曝气+污泥(无人工水草)的2号水箱氨氮降解速率略低于有人工水草的1号水箱,试验进行12 d氨氮降解率为88.3%。活性污泥处理过程中氮素的转化包括有机氮的矿化和氨态氮的硝化^[25]。有机氮在微生物的作用下转化为 NH_4^+-N ,部分 NH_4^+-N 转化为 NO_3^--N 和有机氮,部分以气态挥发^[26]。活性污泥中含多种好氧和厌氧生物,这些生物在好氧条件下会大量繁殖并利用氨氮将其分解转化为自身机体的一部分;与此同时,活性污泥将大量氨氮等营养物质吸附在其表面。所以在曝气条件下,在投加活性污泥的1、2号水箱里,氨氮浓度迅速下降,而加入人工水草的1号水箱内氨氮浓度的下降比无人工水草的快,这是因为人工水草有巨大的比表面积和粗糙的表面,微生物易于在其上附着,为微生物的生长提供了更多的生长空间,有利于微生物的生长繁殖,而无人工水草的水箱内微生物大多附着、沉淀在水箱四周内侧和底部,限制了氨氮的降解。

由图2还可看出:投加污泥不曝气的4号水箱和曝气无污泥的3号水箱在试验进行20 d前氨氮浓度变化较小;试验进行20 d后,3号曝气无污泥的水箱氨氮浓度出现较为明显的下降,50 d左右降至最低,而加污泥不曝气的4号水箱内氨氮浓度稍有下降,但不明显。无污泥的3号水箱微生物含量少,在曝气条件下,微生物

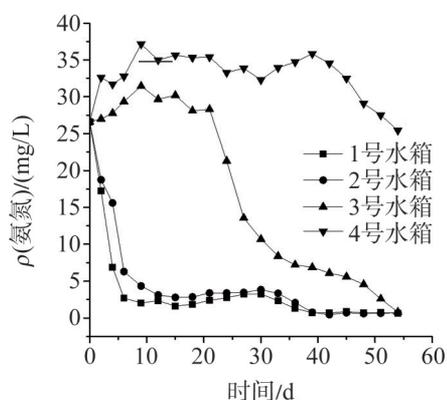


图2 各水箱内 NH_4^+-N 量的变化趋势

Fig. 2 Change trend of the content of NH_4^+-N in each water tank

形成较大的群落需一定时间,所以在试验进行20 d前氨氮浓度下降不明显;当微生物数量达到一定值时,可加快氨氮的降解速率,直至将其耗尽,所以20 d后氨氮浓度降低明显,至50 d时降至最低。投加污泥但不曝气的4号水箱内虽有大量微生物,但水箱内氧气不够充分,大量微生物在厌氧条件下死亡,故氨氮降解不明显。

2.2 亚硝酸盐氮和硝酸盐氮变化情况

4个水箱内亚硝酸盐氮变化趋势如图3。由图3可看出:曝气但未投加污泥的3号水箱内,亚硝酸盐氮浓度呈先增加后降低的趋势,试验进行16 d后,浓度逐渐增加,最大质量浓度达9.27 mg/L;30 d后亚硝酸盐氮浓度逐渐降低,直至为0。这是因为没有投加活性污泥的3号水箱内初始硝化细菌较少,试验进行16 d后,在曝气的条件下,好氧的硝化细菌逐渐增多,氨氮在硝化细菌的作用下逐渐转化为亚硝酸盐氮,由于曝气,水箱中溶解氧含量充足,随即将亚硝酸盐氮氧化成硝酸盐氮。随着试验的进行,氨氮几乎全部被转化为亚硝酸盐氮,继而转化为硝酸盐氮,水箱内亚硝酸盐氮浓度降低,而硝酸盐氮浓度随亚硝酸盐氮转化的积累而增加。在好氧条件下,3号水箱缺少活性污泥絮凝体提供的微环境,致使厌氧的反硝化细菌生长繁殖受到限制,反硝化反应速率很低,大量硝酸盐氮不能通过反硝化作用除去。图4为图3的局部放大,由图4可知,1,2,4号水箱内亚硝酸盐氮浓度变化趋势也是先增加后降低,但在整个试验过程中均较低,最高质量浓度为0.20 mg/L。

图5为4个水箱内硝酸盐氮变化趋势。从图5可看出:在曝气和投加活性污泥的,2号水箱内硝酸盐氮浓度呈先高后低的变化趋势;有人工水草的1号水箱内硝酸盐氮浓度比无人工水草的水箱高;曝气但未投加活性污泥的3号水箱内硝酸盐氮浓度逐渐升高;投加活性污泥并未曝气的4号水箱内硝酸盐氮浓度一直很低,试验后期浓度有所升高。这是由于曝气并投加活性污泥的1,2号水箱内存在大量硝化细菌和反硝化细菌,在曝气条件下,由氨氮硝化作用转化的亚硝酸盐氮迅速转化为硝酸盐氮,在这两个水箱内没有亚硝酸盐氮的积累。有人工水草的水箱内,氨氮降解速率大于无人工水草的水箱,水箱内氨氮浓度低,说明有更多的氨氮转化为硝酸盐氮。由于活性污泥的存在,硝化作用进行的同时进行着反硝化作用,在大量反硝化细菌的作用下,硝酸盐氮转化为亚硝酸盐氮并迅速转化为一氧化氮,最终转化为氮气溢出水体,致使氮素从水中去除。投加活性污泥但不曝气的4号水箱,因好氧的硝化细菌生长受到限制,氨氮转化为亚硝酸盐氮的量很少,硝酸盐氮浓度也就较低,在厌氧条件下,反硝化细菌的生长并未受到限制,故亚硝酸盐氮和硝酸盐氮浓度都处于较低水平。

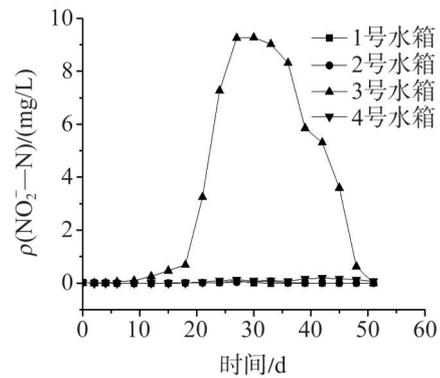


图3 各水箱 NO_2^- -N含量变化趋势

Fig. 3 Change trend of the content of NO_2^- -N in each water tank

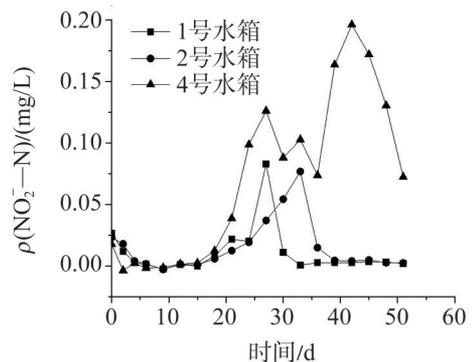


图4 各部水箱 NO_2^- -N含量变化趋势

Fig. 4 Change trend of the content of NO_2^- -N in some water tanks

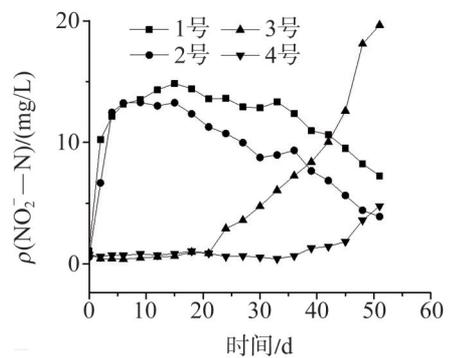


图5 各水箱 NO_3^- -N含量变化趋势

Fig. 5 Change trend of the content of NO_3^- -N in each water tank

2.3 三氮之间的转化规律

以1号水箱内 NH_4^+-N , NO_3^--N , NO_2^--N 的浓度变化为例分析三氮之间的转化规律。1号水箱内 NH_4^+-N , NO_3^--N , NO_2^--N 之间的转化情况如图6。由图6可看出:在好氧条件下,氨氮发生硝化作用,浓度迅速降低,同时硝酸盐氮浓度迅速升高,最高达14.84 mg/L。整个试验过程中,氨氮在好氧条件下发生硝化作用转化为亚硝酸盐氮,亚硝酸盐氮在硝化细菌的作用下转化为硝酸盐;氨氮直接转化为亚硝酸盐,所以氨氮浓度的降低伴随着亚硝酸盐的生成,两者是同时进行的。曝气时水箱内形成了好氧的环境,致使亚硝酸盐氮难以积累,很快转化为硝酸盐氮,在硝化作用进行的同时,进行着反硝化作用。水体是一个好氧与厌氧交替的微环境,在厌氧条件下,硝酸盐在反硝化细菌的作用下,先转化为亚硝酸盐,再转化为一氧化氮,继而转化为一氧化二氮,最后转化为氮气从水体中排出。因此,随着试验的进行,在硝化和反硝化的共同作用下,三氮的含量逐渐减少,水箱内氮素得以最终去除。

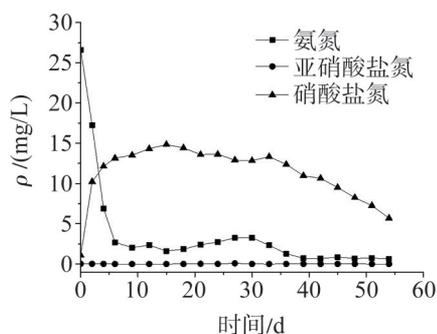


图6 1号水箱内三氮之间含量的转化
Fig. 6 Conversion of the content among the three kinds of nitrogen in tank 1

3 结 论

采用浮床曝气、投加活性污泥、添加人工水草等不同组合搭配的工艺处理人工废水,研究各工艺对人工废水中氮素降解效果的影响,主要结论如下。

1) 曝气并投加活性污泥的2号水箱内氨氮下降迅速,试验进行12 d氨氮降解率为88.3%,曝气、投加活性污泥且添加人工水草的1号水箱内氨氮降解更快,试验进行第6 d氨氮降解率为89.9%;曝气、添加人工水草、无活性污泥的3号水箱内试验进行20 d后氨氮浓度下降明显,但水箱内硝酸盐氮不断积累,整体氮素去除效果不明显。

2) 曝气并投加活性污泥的水箱内进行着强烈的硝化和反硝化作用,在硝化与反硝化的共同作用下,三氮含量均减小,致使氮素的最终去除。

3) 曝气的水箱内氨氮降解率均达97.6%,不曝气水箱内氨氮降解不明显,而无活性污泥的水箱内硝酸盐氮积累很多,曝气与污泥的结合可有效降解污水中的氮素。故在池塘、湖泊等有污泥存在的条件下,可通过曝气与浮床技术结合来净化含氮污水。

参考文献:

- [1] 刘福兴,宋祥甫,付子轼,等. 不同覆盖度生态浮床净化污染水体的效果[J]. 上海农业学报,2014,30(5):66-69.
- [2] 金柏灿. 湖泊富营养化控制和管理技术[M]. 北京:化学工业出版社,2001:130.
- [3] HOEGER S. Schwimmkampen—Germany's artificial floating islands[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1988, 43(4):304-306.
- [4] SRIVASTAVA A, CHUN S J, KO S R. Floating rice-culture system for nutrient remediation and feed production in a eutrophic lake[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 203:342-348.
- [5] XAVIER 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.
- [6] 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):489-491.
- [7] 章文贤,韩永和,卢文显,等. 植物生态浮床的制备及其对富营养化水体的净化效果[J]. 环境工程学报, 2014, 8(8):3253-3258.
- [8] 黄鹏,张丹丹,秦松岩. 挺水植物浮床对再生水补水景观水体的修复[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(12):140-144.
- [9] 陈志远,种云霄,程冰冰,等. 香蒲浮床有机物去除能力及根表微生物群落结构[J]. 环境科学研究, 2017, 30(6):943-952.
- [10] 史鸿乐,付永胜,陈智,等. 微曝气强化生态浮床去除水中 Cu^{2+} 效果研究[J]. 环境工程, 2017, 35(9):40-43.
- [11] LI W, FRIEDRICH R. Insitu removal of dissolved phosphorus in irrigation drainage water by planted floats: preliminary results from growth chamber experiment[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 90(1):9-15.

- [12] KIVAISI A K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review[J]. *Ecological Engineering*, 2001, 16(4):545-560.
- [13] 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.
- [14] 张保君. 微纳米曝气浮床处理太湖支浜的试验研究[D]. 石家庄:河北工程大学, 2012:7-8.
- [15] 薛彦君,许秋瑾,冯胜,等. 曝气时间对美人蕉生态浮床去除水体中营养盐的影响[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(11): 1749-1754.
- [16] 罗固源,郑剑锋,许晓毅,等. 4种浮床栽培植物生长特性及吸收氮磷能力的比较[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(2):285-290.
- [17] 吴慧群,许建. 人工水草改善人工废水水质的效果初探[J]. *绿色视野*, 2010, 68(8):42-44.
- [18] 马宗琪,邱念伟. 植物营养液的配制与应用[J]. *生物学教学*, 2012, 37(2):57-58.
- [19] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准:GB 3838—2002[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2002:1-8.
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水检测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社, 2002:256-270.
- [21] ZIMMO O R, VANDER S N P, GJZEN H J. Nitrogen mass balance across pilot-scale algae and duckweed-based wastewater stabilisation ponds[J]. *Water Research*, 2004, 38(4):913-940.
- [22] YU X M, LI Z H, ZHAO S, et al. Biomass accumulation and water purification of water spinach planted on water surface by floating beds for treating biogas slurry[J]. *Journal of Environment Protection*, 2013, 4:1230-235.
- [23] 栾晓丽,王晓,时应征,等. 两种挺水植物的脱氮除磷效果及其影响因素研究[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(4):1576-577.
- [24] 孙从军,张明旭. 河道曝气技术在河流污染治理中的应用[J]. *环境保护*, 2001(4):12-20.
- [25] 单德鑫,李淑芹,许景钢. 固体有机废物堆肥过程中氮的转化[J]. *东北农业大学学报*, 2007, 38(2):265-269.
- [26] 赵京音,姚政. 微生物制EM控制鸡粪堆制过程恶臭的研究[J]. *农村生态环境*, 1995, 11(4):54-56.

责任编辑:何莉