

人工湿地技术处理金华市孝顺镇污水研究

陈敏芝, 虞佳莉, 陈余晨, 陈超, 朱旭轩, 王志颖* (浙江师范大学化学与生命科学学院, 浙江金华 321004)

摘要 [目的] 研究一种适合我国国情的低耗、高效、绿色的人工湿地生态修复技术, 以更好地处理中小城镇污水, 拓展人工湿地的绿色生态功能。[方法] 采用模拟人工湿地系统, 取浙江省金华市孝顺镇生活污水, 在每轮湿地系统中水力停留 7 d, 考察进水水质及出水水质中总磷(TP)、总氮(TN)和化学需氧量(COD)的变化情况, 进行湿地基质和植物的筛选。同时, 对这三种基质和植物进行搭配组合, 筛选出适合处理金华市孝顺镇污水的最佳组合, 并进行景观设计研究。[结果] 融合景观设计后的湿地系统 TP 去除率为 71.23%, TN 去除率为 78.08%, COD 去除率为 71.70%, 处理效果较好。[结论] 结果表明, 从上到下依次为碎石、石灰石、煤渣的基质搭配组合加上美人蕉+茭白的植物搭配组合, 进行景观设计后, 去污能力最优。

关键词 污水处理; 人工湿地; 总磷; 总氮; 化学需氧量; 去除率

中图分类号 S181.3; X522 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)19-057-04

Treatment of Domestic Sewage in Xiaoshun Township of Jinhua City by Artificial Wetland Technology

CHEN Min-zhi, YU Jia-li, CHEN Yu-chen, WANG Zhi-ying* et al (College of Chemistry & Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004)

Abstract [Objective] To study a kind of green low-consumption and high-efficiency artificial wetland ecological restoration technology suitable for China's national conditions to better deal with small and medium-sized urban sewage and extend green ecological function of artificial wetlands. [Method] By using simulated artificial wetland system, domestic sewage from Xiaoshun Township, Jinhua City, Zhejiang Province was treated for 7 d in each turn of wetland system, and the changes of total phosphorus (TP), total nitrogen (TN) and chemical oxygen demand (COD) in the influent and effluent water were analyzed. Meanwhile, wetland matrices and plants were selected and then matched to select the optimal combination suitable for processing domestic sewage from Xiaoshun Township in Jinhua City, and then landscape design was researched. [Result] The wetland system had a better processing efficiency, and the removal rate of TP, TN, and COD from the domestic sewage was 71.23%, 78.08%, and 71.70% respectively. [Conclusion] The matrix combination of macadam, limestone and coal cinder from top to bottom as well as the plant allocation of canna and *Zizania aquatica* has the best capacity to remove pollutants from the sewage after landscape design.

Key words Sewage disposal; Artificial wetland; TP; TN; COD; Removal rate

目前, 中小城镇水污染日益严重, 根据《全国环境统计公报》报道, 2013 年我国城镇生活污水排放量达 485.1 亿 t, COD889.8 万 t, 氨氮 141.4 万 t^[1]。约 90% 的小城镇生活污水直接排入河流和沟渠, 对中小城镇环境带来了极大的压力^[2]。因此, 亟需寻找一种适合中小城镇污水处理的高效、经济的新型污水处理技术。人工湿地是由人工建造和控制运行的综合生态系统, 利用土壤-微生物-植物系统的自我调控机制和综合自净能力, 完成对污水的深度处理, 具有基建投资省、运行费用低、净化效果好等特点, 特别适合处理一些中小城镇的污水。

该项目根据实验要求选取了浙江省金华市常见的 3 种基质和 3 种挺水植物, 通过基质筛选、植物筛选、基质搭配组合、植物搭配组合、景观设计这几轮实验, 考察不同基质、植物对 TP、TN 和 COD 的净化效果, 旨在研究一种适合我国国情的低耗、高效、绿色的人工湿地生态修复技术, 以更好地处理中小城镇污水。

1 材料与方

1.1 试验用污水 调查浙江省金华市孝顺镇的污水水体环境状况, 选择孝顺镇孝顺溪上的几个生活污水排污口污水作为试验用污水。

1.2 基质选取 基质是污水处理的主要场所, 也是微生物的主要载体, 同时又可以作为水生植物提供支持载体和生长所需的营养物质^[3-4]。根据具体原污水的水质, 并结合经济分析, 最终选取了煤渣、碎石和石灰石这 3 种基质。

1.3 植物选取 植物对于改善湿地基质土壤微环境, 进而驯化有利于污染物去除的微生物有着重要影响^[5]。水生植物的选择主要考虑植物的净化能力、耐污能力和抗病虫害能力、易管理、季节性等方面^[6]。因此, 结合各方面因素, 从金华市农科院选择了茭白、美人蕉和慈姑 3 种植物。

1.4 人工湿地的构建 采用市售 8 L(33.5 cm × 23.5 cm × 18.5 cm) 规格的塑料桶, 统一加入基质 10 cm(不同基质搭配组合时各加入 3.33 cm)。按照桶的规格, 涉及植物的实验部分, 每桶种植两株植物。

1.5 试验设计 共设计基质筛选、植物筛选、基质搭配组合、植物搭配组合、景观设计这 5 轮实验(表 1)。每轮实验水力停留 7 d, 检测进、出水水样中 TP、TN、COD 这 3 个指标, 分析变化情况, 筛选出最佳的湿地系统。其中植物筛选在基质筛选的基础上, 选用了最优基质; 植物搭配组合是在基质搭配组合的基础上, 选用最优的基质搭配组合; 景观设计又是在植物搭配组合上, 加入了浮萍、田字萍、水鳖这 3 种小植物, 设计出效果较好的模拟人工湿地系统。

1.6 分析方法 TN 采用 HJ 636—2012 测定^[7]; TP 采用 GB 11893—89 测定^[8]; COD 采用 COD 消解仪消解, AQ400 便携式比色计测定。

1.7 数据统计 各实验重复 3 次, 根据 3 次独立试验所得

基金项目 金华市科学技术研究计划项目(2013-3-032)。
作者简介 陈敏芝(1994-), 女, 浙江宁波人, 本科生, 专业: 科学教育。
* 通讯作者, 实验师, 硕士, 从事生理生态学、环境生态学研究。

收稿日期 2016-06-12

数据计算平均值和标准偏差(STDEV),实验数据用Origin8.0和Excel处理。

表1 各轮实验基质和植物的组成情况

Table 1 Composition of experimental matrix and plants in each round

实验内容 Experimental content	组 Group	基质(从上到下) Matrix (from top to bottom)	植物 Plant
基质筛选 Matrix selection	1-1	煤渣	
	1-2	碎石	
	1-3	石灰石	
植物筛选 Plant selection	2-1	煤渣	茭白
	2-2	煤渣	美人蕉
	2-3	煤渣	慈姑
基质搭配组合 Matrix combination	3-1	碎石+石灰石+煤渣	
	3-2	石灰石+碎石+煤渣	
	3-3	石灰石+煤渣+碎石	
植物搭配组合 Plant combination	4-1	碎石+石灰石+煤渣	慈姑+美人蕉
	4-2	碎石+石灰石+煤渣	美人蕉+茭白
	4-3	碎石+石灰石+煤渣	茭白+慈姑
景观设计 Landscape design		碎石+石灰石+煤渣	美人蕉+茭白 浮萍+田字萍 +水鳖

2 结果与讨论

2.1 人工湿地处理后 TP 的变化情况 人工湿地对磷素污染物的去除主要依靠基质的吸附作用^[9]。由图1可知,在基质筛选中,煤渣的除P率最高,为69.34%。煤渣具有多孔结构、巨大的比表面积,残炭也具有一定的吸附活性,具有很好的过滤作用^[10]。Zhang J等证明煤渣中的Ca、Fe、Al能沉淀污水中的可溶性磷^[11]。国外也有学者研究认为,富含钙、铁和铝质的基质净化污水中磷素的能力较强^[12-13]。

在植物筛选实验中,选用了除P效果最好的煤渣作为基质,分别种植茭白、美人蕉、慈姑3种植物,除P率明显高于单一基质组,其中美人蕉的除P率最高,达90.60%。研究表明,在高磷废水中,植株根际圈存在着对P有较强去除能力的施氏假单胞菌和产碱杆菌^[14],美人蕉的根际圈也存在较多除P能力较强的微生物,能较好地除P。此外,美人蕉的根系为浅根散生须根型,发达的根系与基质相互交错,为微生物提供了巨大的附着面积,易于形成生物膜,促进污染物的降解和利用^[15]。植物根系及附近微生物的降解吸收作用大大增强湿地介质的拦截吸收功能,整体上提高了TP的去除率^[16]。

在基质搭配组合中,3种基质按照不同的叠放层次进行组合搭配,相较于单一的基质,除P率也显著增加。其中从上到下基质依次为碎石+石灰石+煤渣的除P率最高,达85.87%。研究表明,湿地表面与空气有充分的接触,湿地系统上部获得良好的复氧条件后,上层基质中的好氧微生物活性增强,有利于磷细菌的代谢活动,使出水中TP浓度降低^[17]。不同的搭配组合能更好地发挥各个基质的优势。

在植物搭配组合中,选用了碎石+石灰石+煤渣基质搭配组合,两两植物搭配构成湿地系统。其中美人蕉+茭白的除P率最高,达72.24%。植物筛选中,在基质相同的情况

下,美人蕉的TP去除率最高,而从植物搭配的结果也可以看出,有美人蕉的植物搭配组合,TP的去除率也相应较高,但与基质搭配组合相比,TP去除率有所下降,有可能是植物分泌出一些有机酸阴离子,能与Fe、Ca等元素形成螯合物,将基质中难溶磷释放出来,使TP含量有所上升。

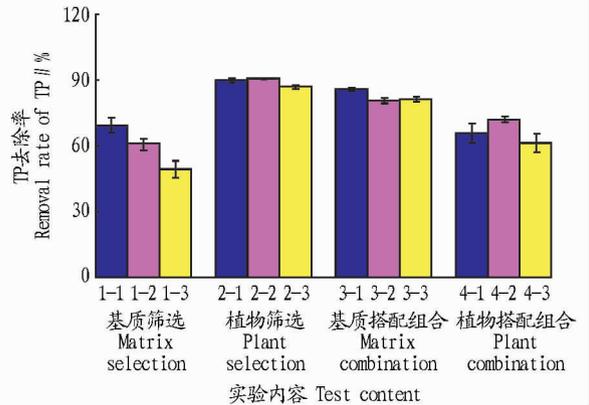


图1 各轮人工湿地系统处理后 TP 的去除率

Fig. 1 Removal rate of TP from sewage after being processed by each turn of artificial wetland system

2.2 人工湿地处理后 TN 的变化情况 由图2可知,在基质筛选中,煤渣和石灰石的TN去除率都很高,分别为69.74%和68.54%。这是因为煤渣和石灰石结构疏松,表面和内部均有大量孔隙,常被用作良好的吸附剂来处理废水^[18]。而碎石的除N率为负数(由于不方便作图,未标出),有可能是实验过程中所获取的碎石含有硝酸盐等含N化合物,从而导致N的溶出^[19]。

研究发现,植物为微生物提供了良好的生存环境,使其在污水净化过程中发挥主要作用^[20],这与图2中植物筛选实验组的TN去除率总体高于基质筛选实验组相吻合。由图可知,美人蕉与慈姑的除N率均较高,分别达78.67%、84.31%。美人蕉具有非常发达的根部,其吸收N的能力会随着根系的深入和硝化细菌的大量繁殖持续增加,直至平稳^[21]。慈姑也具有较好的净化污水的作用。研究表明,环境中的N是限制慈姑生长的主要因子^[22],但因慈姑生物量较美人蕉低,因此除N率也较美人蕉低^[23]。茭白作为一种多年生挺水型水生草本植物,对于污水中N的去除也有显著效果^[24],其除N效率之所以最低,是因为本身需N量少,因此,从污水中吸收的也少^[23]。

在基质搭配组合实验中,相较于单一基质煤渣或者石灰石,除N率有所下降,可能与所获取的碎石含有含N化合物等有关。基质搭配组合可以弥补碎石这一缺陷,有效去除TN含量。组合3(从上到下基质依次为石灰石+煤渣+碎石)的除N率最大,为39.92%,远高于其他两组。可知,湿地填料颗粒尺寸的对湿地中的空隙体积和水流模式有决定性作用。研究表明,选择比表面积较大的填料有利于生物膜的生长,更利于N的去除^[25]。

在植物搭配组合实验中,茭白+慈姑和美人蕉+茭白的除N率均较大。美人蕉对污水TN的去除率要高于茭白,茭

白比美人蕉具有更强的硝化能力,有利于硝化-反硝化反应的进行,因此在以后的试验中,将两者套种可能会取得较好的脱 N 效果^[23]。慈姑发达的根系又对氨氮的吸收有重要影响^[26]。在相同基质的条件下,慈姑和美人蕉的除 N 率较高,但慈姑+美人蕉的除 N 率最低,这是因为实验过程中组合 3 的慈姑腐敗分解导致水中 N 含量增加^[27]。有可能也是因为两种植物竞争性吸收,导致其中一种植物吸收 N 的能力有所下降。

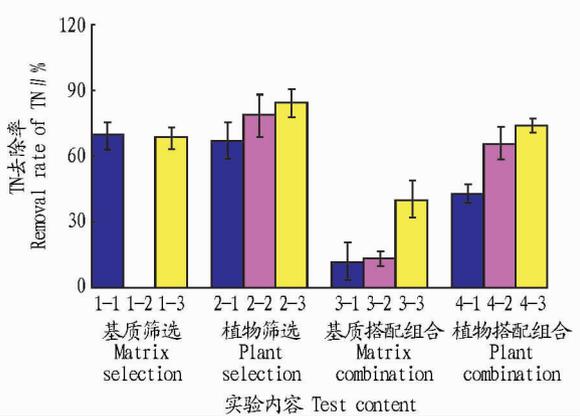


图2 各轮人工湿地系统处理后 TN 的去除率

Fig. 2 Removal rate of TN from sewage after being processed by each turn of artificial wetland system

2.3 人工湿地处理后 COD 的变化情况 由图 3 可知,在基质筛选实验中,石灰石的去除率最高,为 81.77%。在无植物的情况下,COD 的去除主要靠填料吸附和填料表面微生物的同化吸收^[28],石灰石吸附有机物的能力较强,其 COD 去除率也相应较高。

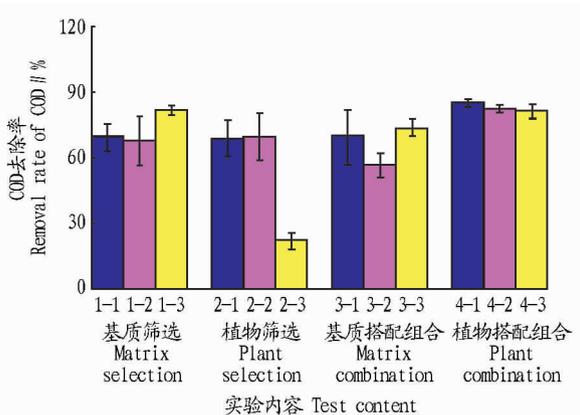


图3 各轮人工湿地系统处理后 COD 的去除率

Fig. 3 Removal rate of COD from sewage after being processed by each turn of artificial wetland system

在植物筛选实验中,经过茭白或美人蕉处理的污水 COD 值有明显下降,其去除率分别为 68.66% 和 69.62%。慈姑的 COD 去除率仅为 22.47%。人工湿地床体中 COD 的去除主要依赖于根区附近的好氧微生物的作用,而这种作用又决定于水生植物向根部传送 O₂ 能力的大小^[29]。美人蕉发达的根系能把空气中的氧通过叶片输送到植物的根区,为基质和根区微生物群落大量生长繁殖提供适宜的微生态环境,从而

增强对有机物的去除效果^[21]。而茭白的根系发达且深浅交错、输氧能力强,同样为好氧微生物分解 COD 提供了良好环境。研究结果也与上述一致,即经过茭白或美人蕉处理的污水的 COD 值明显下降。

在基质搭配组合实验中,组合 1 和组合 3 的 COD 去除效果较好,COD 去除率分别达 70.23% 和 73.46%,说明基质搭配组合对 COD 的去除有很好的作用。混合填料不同的性质不仅为人工湿地基质系统中微生物提供了更加多样的生长环境,且不同填料对不同污染物去除的优势互补可以提高污染物总体的去除效果^[30]。然而与基质筛选处理组相比,选用单一的石灰石基质 COD 去除率更高。这可能是基质搭配组合污水在获取之前连续下雨导致污水中的 COD 浓度下降,进而影响了基质对 COD 的去除效果。

在植物搭配组合实验中,污水中 COD 的去除率均明显超过了植物筛选处理组。这表明混合栽种植物的人工湿地较单一栽种植物的人工湿地而言,植物生长更快,对污染物的净化效果更好。不同植物的 COD 去除能力有所差别,这可能是因为不同湿地植物的根系泌氧能力和 N、P 吸收性能不同而造成的^[31]。同时,含有美人蕉的两组 COD 去除率值均高于无美人蕉的一组。该结果与单一植物时美人蕉的 COD 去除率最高相同,表明美人蕉确实有极好的 COD 去除能力,在今后处理 COD 含量较高的污水时可以应用。

2.4 景观设计处理后污水中各指标的变化情况 从表 2 可以看出,经过景观设计处理后,污水的除 P 率为 71.23%,与单纯的美人蕉+茭白的植物搭配组合相比,两者的除 P 率几乎相同。这是因为湿地系统除 P 的主要途径是填料对 P 的吸附与沉淀,植物和微生物对 P 的吸收只是一种短期效应^[32]。由于 3 种小植物的生物量都较小,对除 P 率的影响也较小,因此景观设计不仅能够保证除 P 效果,还能增强景观功能。

表 2 景观设计处理后污水中各指标的变化情况

Table 2 Variations of each indicator in sewage after the landscape design

项目 (Item)	进水水质 (Influent water // mg/L)	出水水质 (Effluent water // mg/L)	去除率 (Removal rate // %)
TP	0.80 ± 0.01	0.23 ± 0.01	71.23 ± 0.92
TN	2.68 ± 0.16	0.59 ± 0.02	78.08 ± 0.80
COD	75.73 ± 0.01	21.43 ± 1.26	71.70 ± 1.67

景观设计后,除 N 率达到 78.08%,比美人蕉+茭白组合的除 N 率提高 12.68%,除 N 率明显提高。这可能是由于 N 的浓度对小植物生物量的影响最大。浓度越高则小植物生物量增长越多^[33]。当 N 营养物充足时,小植物生物量会随光照时间的增长而增加,继而提高对 N 的去除率。可见加入 3 种小植物的景观设计还能在一定程度上增强除 N 效果。

与植物搭配组合中美人蕉+茭白的 COD 去除率 82.39% 相比,景观设计的 COD 去除率为 71.70%,略有下降。可能是加入的 3 种小植物与其发生竞争性吸收,也可能是因为高 COD 对加入的小植物生长有一定的抑制作用,

COD 浓度越高则抑制作用越明显^[33]。人工湿地系统对 COD 的去除效果受温度的影响较大,因为水体中 COD 的去除是在微生物对有机物的分解、矿化和植物吸附、吸收共同作用下而得以实现的^[32]。上轮植物搭配组合实验是在高温天气进行的,而景观设计处理时温度降低,导致植物、微生物的生理活性下降,从而影响污染物的去除效果。但景观设计的 COD 去除率也不是很低,说明景观设计在增强人工湿地的景观性的同时能保证人工湿地的 COD 去除率。

本轮实验在前面实验的基础上,选择适合城镇生活污水处理的基质搭配(从上到下依次为碎石、石灰石、煤渣)和植物搭配(美人蕉+茭白)的最佳组合,加入一些小植物进行合理布局,使其具有观赏价值,融合景观设计,拓展人工湿地的绿色生态职能。

3 结论

实验研究了以煤渣、碎石、石灰石作为湿地基质,美人蕉、茭白、慈姑作为湿地植物,不同搭配组合下的人工湿地模拟系统对金华市孝顺镇污水中 TP、TN、COD 净化的影响。

(1)不同基质对不同污染物的去除具有优势互补和协同作用,可以提高污染物的总体去除效果。煤渣具有最佳的除 P 效果,较好的除 N 效果。石灰石具有最佳的除 N、除 COD 效果。综合实际 TN、TP、COD 等的去除率,最终得出最优的基质搭配组合由上到下依次为石灰石、碎石、煤渣。

(2)混合种植植物的人工湿地较单一栽种植物的人工湿地而言,植物生长更快,对污染物的净化效果更好。茭白、美人蕉、慈姑都具有较好的除 P 效果且相差不大。慈姑、美人蕉具有较好的除 N 效果。美人蕉、茭白具有较好的 COD 去除效果。美人蕉+茭白的植物组合具有最佳的除 P 效果,较好的除 N、除 COD 效果。茭白+慈姑具有最佳的除 N 效果。慈姑+美人蕉的组合具有最佳的 COD 去除效果。综合实际 TN、TP、COD 等的去除率,最终得出最佳植物搭配组合为美人蕉+茭白。

(3)合适的人工湿地基质体系以及适宜生长的湿地植物组合融合了景观设计,适合处理金华市中小城镇的生活污水,能够兼具生态修复性和景观性,对今后人工湿地的绿色生态职能开发有借鉴意义。

参考文献

[1] 中华人民共和国环境保护部. 全国环境统计公报(2013) [EB/OL]. (2015-03-16) [2016-04-01]. http://s.mep.gov.cn/hjtj/qghjijgb/201503/t20150316_297266.htm.

[2] 施昌平,陈媛媛,肖磊,等. 厌氧预处理+潜流式人工湿地处理农村生活污水[J]. 环境工程,2011,29(3):27-29.

[3] 孙桂琴,董瑞斌,潘乐英,等. 人工湿地污水处理技术及其在我国的应用[J]. 环境科学与技术,2006,29(21):144-146.

[4] GIRAUD F. Biodegradation of anthracene and fluoranthene by fungi isolated from an experimental constructed wetland for wastewater treatment[J]. Water research,2001,35(17):4126-4136.

[5] 刘树元,阎百兴,王莉霞. 潜流人工湿地中植物对氮磷净化的影响[J]. 生态学报,2011,31(6):1538-1546.

[6] 张家洋,陈丽丽,李慧. 水生植物对富营养化水体除磷去氮的研究概述[J]. 西北师范大学学报,2013,49(1):115-120.

[7] 中华人民共和国环境保护部. 水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636—2012) [EB/OL]. http://kjs.mep.gov.cn/hjbhzb/bzwb/shjbh/sjcgffbz/201203/t20120307_224383.shtml, 2012-02-29.

[8] 中华人民共和国环境保护部. 水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法(GB 11893—89) [EB/OL]. http://kjs.mep.gov.cn/hjbhzb/bzwb/shjbh/sjcgffbz/199007/t19900701_67131.shtml, 1989-12-15.

[9] 籍国东,倪晋仁. 人工湿地废水生态处理系统的作用机制[J]. 环境污染防治技术与设备,2004,5(6):71-75.

[10] 张强,唐娜,梁帮强,等. 潜流人工湿地填料除磷性能模拟研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2009,34(3):67-70.

[11] ZHANG J, HUANG X, LIU C, et al. Nitrogen removal enhanced by intermittent operation in a subsurface wastewater infiltration system[J]. Ecol Eng,2005,25(4):419-428.

[12] DRIZO A, FROST C A, GRACE J, et al. Physico-chemical screening of phosphorus-removing substrates for use in constructed wetland systems[J]. Water research,1996,33(17B):3595-3602.

[13] YUAN G, LAKULICH L M. Phosphate adsorption in relationship to extractable iron and aluminum in spodosols[J]. Soil Sci, Soc Am J,1994,58:343-346.

[14] 韩永和. 脱氮除磷微生物的分离鉴定及与植物联合处理含氮磷废水的研究[D]. 福州:福建师范大学,2010.

[15] 熊国祥. 人工湿地中磷的行为与去除机理的研究[D]. 广州:广东工业大学,2007.

[16] 雒维国,王世和,钱卫一,等. 潜流型人工湿地除磷效果研究[J]. 安全与环境工程,2004,11(4):21-25.

[17] 李慧君. 人工湿地除磷过程中关键因素的影响研究[D]. 广州:广东工业大学,2008.

[18] 杨金辉,陈思光,魏清伟,等. 煤渣对水中氨氮和总磷吸附的试验研究[J]. 铀矿冶,2011,30(4):221-224.

[19] BORIN M, TOCCHETTO D. Five year water and nitrogen balance for a constructed surface flow wetland treating agricultural drainage waters[J]. The science of the total environment,2007,380(1/2/3):38-47.

[20] SUN G Z, ZHAO Y Q, ALLEN S. Enhanced removal of organic matter and ammoniacal-nitrogen in a column experiment of tidal flow constructed wetland system[J]. Journal of biotechnology,2005,115(2):189-197.

[21] 黄娟,王世和,钟秋爽,等. 植物生理生态特性对人工湿地脱氮效果的影响[J]. 生态环境学报,2009,18(2):471-475.

[22] 赵慧娟. 慈姑对水体中氮、磷的吸收作用及其生长和生理生态响应[D]. 上海:华东理工大学,2012.

[23] 刘雯,丘锦荣,卫泽斌,等. 植物及其根系分泌物对污水净化效果的影响[J]. 环境工程学报,2009,3(6):971-976.

[24] 吴建强,黄沈发,阮晓红,等. 江苏新沂河河漫滩表面流人工湿地对污染河水的净化试验[J]. 湖泊科学,2006,18(3):238-242.

[25] 王瑾. 填料的优化组合和低温下脱氮除磷试验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2005.

[26] 刘碧云. 湿地公园植物配置框架探讨[J]. 林业勘察设计,2010(1):126-129.

[27] 朱莹. 慈姑对磷、氮污染物的去除规律研究[D]. 南京:河海大学,2005.

[28] 汤显强,李金中,李学菊,等. 人工湿地不同填料去污性能比较[J]. 水处理技术,2007,33(5):45-48.

[29] 段志勇,刘超翔,施汉昌,等. 复合植物床式人工湿地研究[J]. 环境工程学报,2002,3(8):4-7.

[30] 盛辛辛,曹谨玲,赵凤岐,等. 芦苇和美人蕉及薄荷用作人工湿地植物对中水的净化效果[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2013,39(4):423-428.

[31] 徐伟伟,章北平,肖波,等. 植物在人工湿地净化污水过程中的作用[J]. 安全与环境工程,2005,12(2):41-44.

[32] 丁雷. 人工湿地的设计及净化养殖污水功能的研究[D]. 泰安:山东农业大学,2007.

[33] 王春英,田佳壁,刘丽,等. 小浮萍生物量影响因素研究[J]. 江苏农业科学,2010(4):384-386.