

多级表面流人工湿地在鄱阳湖区 农村面源污染控制中的应用

万金保¹, 兰新怡¹, 汤爱萍^{1,2}

(1. 南昌大学 环境与化学工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 南昌航空大学 环境与化学工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要: 通过构建多级表面流人工湿地探讨了鄱阳湖区农村面源污染的控制机制, 并对湿地系统污水处理工艺进行了研究。研究表明, 系统污染物 COD, TP, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 负荷年消减量为 608.46, 3.22, 8.14 和 0.62 kg/a, 单位面积年消减量分别为 3976.83, 21.04, 53.21 和 4.05 kg/(hm²·a)。系统对污染物 COD, TP, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的去除率分别为 48.9%, 73.5%, 58.7% 和 54.7%, 且污染物 COD 和 TP 去除主要集中在第一级芦苇湿地。表面流人工湿地因具有较强的复氧功能, 但限制 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 反硝化作用。为提高 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除率, 对湿地系统硝化与反硝化机理进行了探讨, 并提出引流部分污水直接进入第 3 级湿地与改第 3 级湿地为潜流型湿地相结合的有效措施。该系统不仅对鄱阳湖区农村面源污染控制提供了技术依据而且为其它湖滨提供了示范。

关键词: 鄱阳湖; 多级表面流人工湿地; 兼性塘; 农村面源污染

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)05-0118-04

中图分类号: X703.1

Application of Multi-Surface Flow Constructed Wetland to Rural Non-point Source Pollution Control in Poyang Lake Region

WAN Jin-bao¹, LAN Xin-yi¹, TAN Ai-ping^{1,2}

(1. School of Environment and Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China;

2. School of Environment and Chemical Engineering, Nanchang University of Aeronautics, Nanchang Jiangxi 330031, China)

Abstract: By constructing multi-surface flow wetland, the effects of wetland system were examined and the control of rural non-point source pollution around Poyang Lake was discussed. Results showed that the total reductions of COD, TP, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, and $\text{NO}_2^- - \text{N}$ in the wetland system were 608.46, 3.22, 8.14, and 0.62 kg/a and the reductions of COD, TP, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, and $\text{NO}_2^- - \text{N}$ per hectare were 3976.83, 21.04, 53.21, and 4.05 kg/(hm²·a), respectively. The removal rates of COD, TP, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, and $\text{NO}_2^- - \text{N}$ in the wetland system were 48.9%, 73.5%, 58.7%, and 54.7%, respectively, and the COD and TP removal mainly occurred in the first reed wetland. Because the constructed wetland had a strong function of recovering oxygen, denitrification of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ was limited. In order to enhance $\text{NO}_3^- - \text{N}$ removal rate, we discussed the mechanisms of nitrification and denitrification in wetland system and put forward the effective measure that part of the wastewater drained directly into the end of three wetlands and the end of three wetlands changed into subsurface flow wetland. In short, the wetland system not only provided a technical foundation for the control of rural non-point source pollution around Poyang Lake, but also afforded a demonstration for other lakefronts.

Keywords: Poyang Lake; multi-surface flow constructed wetland; vertical wetland; rural non-point source pollution

鄱阳湖是中国最大的淡水湖, 它承纳赣江、抚河、信江、饶河、修河 5 大河, 具有工农业用水、调蓄、防洪

等功能。由于湖区农业、水产养殖业、畜牧业等迅速发展, 湖区农村面源污染来源广泛, 大量污染物质进

收稿日期: 2010-03-21

修回日期: 2010-04-13

资助项目: “十一五” 国家科技支撑计划重点项目“鄱阳湖生态保护与资源利用研究”, “水污染控制及水质保护技术与示范”(2007BAB23C02)

作者简介: 万金保(1952—), 男(汉族), 江西省南昌市人, 教授, 博士生导师, 主要从事水污染控制与水资源保护研究。E-mail: www.lxy2004@163.com.

入鄱阳湖导致鄱阳湖水体正缓慢向富营养化发展,环境质量不断恶化,严重制约了区域经济的可持续发展^[1],控制湖区农村面源污染迫在眉睫。

人工湿地(constructed wetland)是人为创造的一个适宜于水生植物或湿生植物生长的,根据自然湿地模拟的人工生态系统^[2]。表面流湿地与自然湿地最为接近,因其造价低,人工投入少,操作简单等特点而在面源污染治理中广泛应用^[3]。但表面流人工湿地应用于湖滨面源污染控制上的报道较少。本文从构建多级表面流人工湿地探讨对鄱阳湖区农村面源污染的控制,并对湿地系统进行试验研究。研究成果不仅对鄱阳湖区农村面源污染控制提供技术依据,而且可为其它湖滨提供示范。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

桥下李村地处江西北部,位于庐山和鄱阳湖之间,距星子县城约1 km,东经 $115^{\circ}48'$,北纬 $29^{\circ}8'$,年平均降水量1 437.1 mm,年平均气温 $15^{\circ}\text{C}\sim 18^{\circ}\text{C}$,1月份平均气温 4.5°C ,7月份平均气温 29.2°C 。区域内人口较少,农田面积约为 2 hm^2 ,鱼塘养殖面积为 $1\ 392\text{ m}^2$ 。农村生活污水、农业生产废水、鱼塘养殖废水、地表径流和补充水经沟渠或管道收集后进入多级表面流人工湿地,经兼性塘处理后进入小清河最后排入鄱阳湖。鄱阳湖为其污染负荷的最终受纳水体。

1.2 水质水量

研究区域废水设计水量为 $100\text{ m}^3/\text{d}$,水质具体情况如下:COD $26.5\sim 49.7\text{ mg/L}$,TP $0.08\sim 0.16\text{ mg/L}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ $0.13\sim 0.73\text{ mg/L}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ $0.02\sim 0.04\text{ mg/L}$ 。废水由农村生活污水、农业生产废水、鱼塘养殖废水和地表径流构成,因农业生产和鱼塘养殖受气候和季节影响,水质具有一定的波动性。

1.3 人工湿地构建

为了节省能耗,充分使用水流势能,根据水流方向,人工湿地按东西方向建设。为了保证污染物去除率,设计3级表面流人工湿地,并且3级表面流人工湿地的出水设置为跌水形式。由于研究区域在夏季雨水较少,农业生产活动在9月和10月废水量少,为了避免湿地系统缺水,故从小清河里引流部分地表水。

3级表面流人工湿地植物按顺序依次种植芦苇、菖蒲、茭白(芦苇、茭白、菖蒲 $20\text{ 株}/\text{m}^2$),兼性塘种植沉水植物菱角($4\text{ 株}/\text{m}^2$)。湿地系统设计参数见表1。

表1 湿地系统主要设计参数

构筑物	面积/ m^2	有效水深/ m	水力负荷/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$
第1级人工湿地	230		0.43
第2级人工湿地	266	0.4	0.38
第3级人工湿地	484		0.21
兼性塘	550	1.2	0.18

注:麻体为当地的土壤。

经过废水收集、引水、布水、水生植物种植、人工湿地构建等一套工程措施,建成3级表面流人工湿地和兼性塘。总体工艺流程见图1。

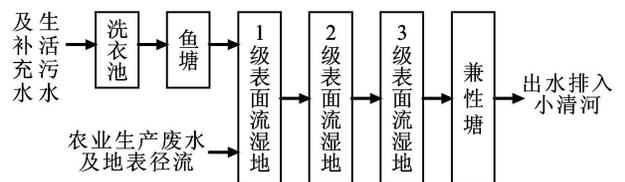


图1 人工湿地构建总体工艺流程图

1.4 分析方法

水样采集后立即进行实验分析。采用的分析方法如下:COD为重铬酸钾法;TP为钼酸铵分光光度法;硝酸盐氮为酚二磺酸分光光度法;亚硝酸盐氮为分光光度法。分析数据精度COD为 0.1 mg/L ,其它指标为 0.01 mg/L 。

2 结果与分析

人工湿地构建工程于2009年5月竣工,运行2个月稳定后,于2009年7—11月对湿地系统进行了5个月的监测分析。

2.1 污染物浓度变化

连续5个月对湿地系统的监测分析结果见图2。如图所示,系统总进水波动比较大。因废水由农村生活污水、养殖废水、农业生产废水以及地表径流组成,各部分水量波动随时间、气候波动较大,故系统总进水水质波动较大。除COD进水在10月低于7月,其它3个指标TP, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的系统进水在10—11月2个月进水浓度均高于前3个月。由于湿地系统所处地在10—11月2个月雨水较前3个月少,导致补充水量减少,故浓度明显大于前3个月。

系统出水随进水波动而出现类似的波动。由于湿地植物生长需要的周期比较长。茭白、芦苇、菖蒲等植物到9月份才成长茂盛。但是,从图2可以看出,湿地系统对污染物的去除效果还是很显著。

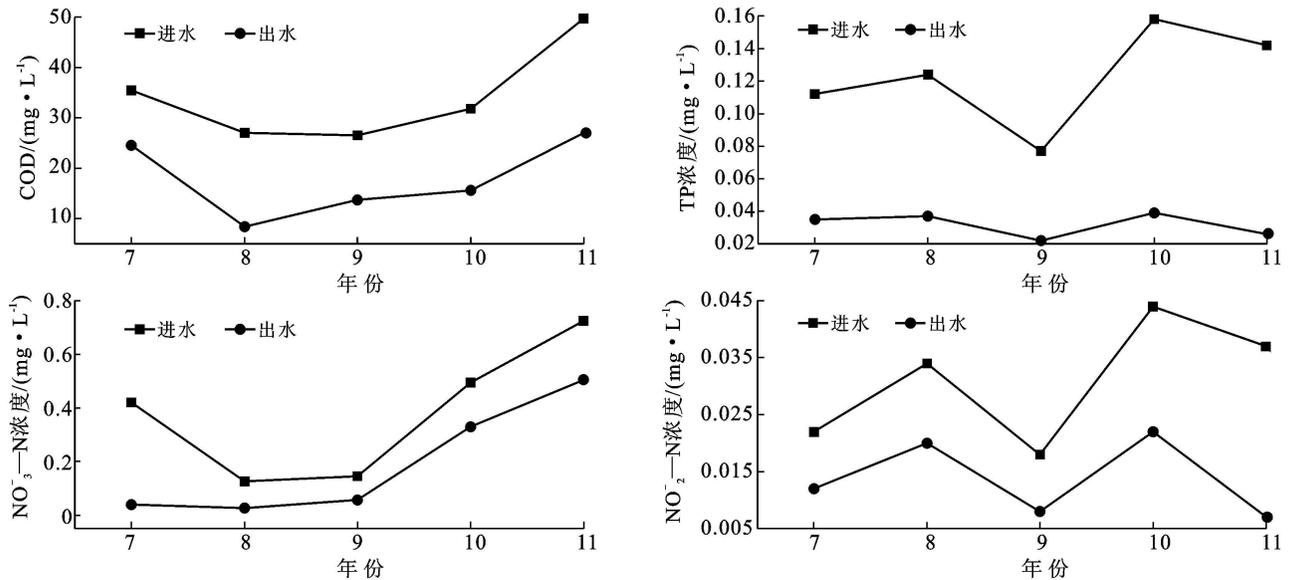


图 2 多级表面流人工湿地系统污染物进出水浓度变化

2.2 污染物去除率

湿地系统对 COD 和 TP 的平均去除率分别为 48.9% 和 73.5%，与卢少勇等^[4]的研究结论 (COD 去除率为 52.4%，TP 去除率为 68.8%) 相类似。湿地系统对 NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 的平均去除率分别为 58.7% 和 54.7%，与帖靖玺等^[5]的研究结论相类似。污染物在 1 级表面流人工湿地、2 级表面流人工湿地、3 级表面流人工湿地以及兼性塘沿程去除率见图 3。

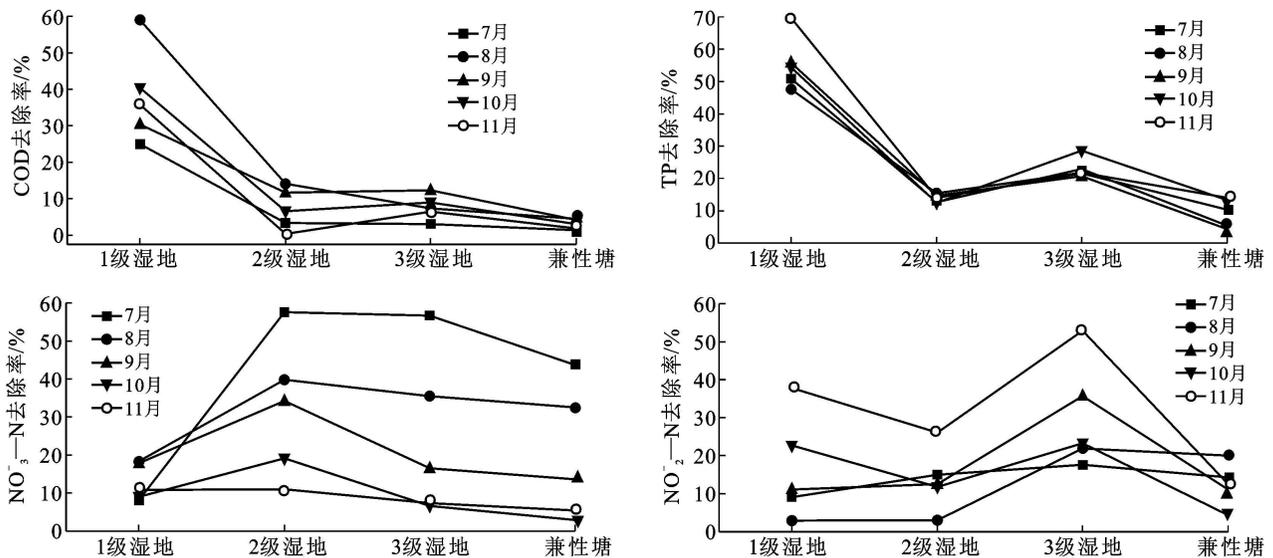


图 3 多级表面流人工湿地系统沿程去除率

人工湿地除磷的净化机理主要有:基质的吸附沉淀作用、植物的吸收作用以及微生物的转化吸收作用。基质的吸附沉淀作用是主要除磷途径。同时湿地水生植物是人工湿地重要组成部分,其可以通过影响湿地的其它条件间接影响湿地除磷效果。徐和胜

兼性塘对污染物去除率小于各级表面流湿地。由于兼性塘水生生物长势不如表面流湿地植物,故吸纳污染物能力低。

研究^[9]认为,人工湿地对污水中有机污染物质净化机理主要是基质的过滤作用和微生物分解作用。湿地在第 1 级湿地去除率高,后面湿地系统处理较低。可能因为第 1 级湿地基质土壤首先对不溶性 COD 进行截留,快速提高 COD 去除率。

等^[7]研究表明,总磷去除速率随总磷负荷的增加而提高。因第 1 级湿地进水 TP 负荷最大,较高的总磷负荷利于植物的迅速生长,而植物生长过程中对磷的摄取又是潜流湿地除磷的主要途径之一,所以植物的迅速生长也提高了总磷的去除效率。第 3 级湿地茭白

对 TP 也有较好的去除率,与王全金等^[8]的研究相似。

研究表明,氮的去除是靠湿地微生物的硝化与反硝化途径^[9]。图 3 中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 这 2 者沿程去除率从第 2 级湿地向第 3 级湿地的变化刚好相反。因为湿地系统的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 是通过微生物在厌氧状态下经反硝化作用,转化为 N_2 或者 N_2O 。第 3 级湿地因跌水复氧和水面复氧,水中 DO 值比较高,导致反硝化作用受到一定抑制。 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 在水体兼氧条件下通过硝化细菌氧化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。故导致 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 出现了积累,进而在第 2 级湿地和第 3 级湿地之间出现 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除率下降和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 去除率上升的现象。

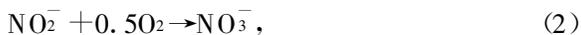
2.3 污染物消减量和工程处理成本

2.3.1 污染物消减量 湿地系统污染物负荷年消减量为 COD 608.46, TP 3.22, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 8.14, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 0.62 kg/a, 单位面积年消减量为 COD 3 976.83, TP 21.04, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 53.21, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 4.05 kg/(hm²·a), 可取得较好的环境效益。

2.3.2 工程处理成本 系统总投资 9.27 万元(包括表面流人工湿地、兼性塘、水生植物以及引水沟渠和管道),单位污水建设投资 927 元/m³。工程运行只需一般性管理,年运行费用(按 10 元/d, 1 兼职人员算)3 650 元,单位污水处理费用为 0.1 元/m³。投资额和运行费用远均低于常规污水处理工艺。

3 讨论

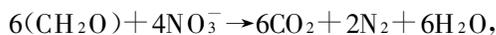
湿地系统 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 形态转化如图 4 所示。湿地系统 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 是由有机氮氨化(矿化)作用后形成的无机氮形态。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 是 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 经 2 组自养好氧型微生物 2 个过程(方程 1 和 2)硝化形成。 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 是中间体。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 只有少部分被植物吸收,大部分是靠反硝化去除^[9-13]。Santee 等研究^[10]表明,硝化反硝化去氮量占氮去除总量的 60%~86%。



以上反应通常发生在溶解氧浓度高于 2 mg/L。由于硝化反应第一步的产能为第二步产能的数倍,欲获相同能量,所氧化的 NO_2^- 的量须为所氧化 NH_4^+ 量的 4~5 倍,因此稳态条件下,人工湿地系统中不会积累 NO_2^- ^[9, 11-13]。本湿地系统不会有 NO_2^- 积累,正好得到验证。

反硝化是指氧气耗尽后最先发生的缺氧反应,即由异养微生物将硝酸根还原为分子氮。反硝化以氮

氧化物(离子和气体形式)为最终电子受体。反硝化过程如下:



以上过程只在有机物基质存在于厌氧或缺氧条件(Eh= -350~100 mV)下发生^[9, 11-13]。

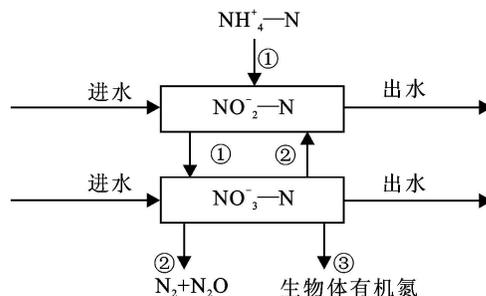


图 4 湿地系统 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 形态转化图

注:① 硝化作用;② 反硝化作用;③ 植物、动物和微生物吸收作用

本湿地系统通过 5 个月的监测,第 2 级湿地和第 3 级湿地的氧化还原电位均介于 84~279 mV,溶氧均介于 3.6~8.6 mg/L。可见在第 2 级湿地和第 3 级湿地易发生硝化,而反硝化在一定程度上受到限制。又因为在前端湿地有机物大量被降解,后端反硝化过程因碳源不足而受限制。

为了避免 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 积累并提高反硝化效率,其一,引流部分污水直接进入第 3 级湿地。第 3 级湿地进水有机物浓度增加,保证反硝化过程有充足的碳源。其二,第 3 级湿地改成潜流型湿地。潜流型人工湿地因植物根系的输氧及对氧的释放,使得床体内部存在许多好氧、缺氧和厌氧区,有很好的反硝化效果。

4 结论

(1) 农村面源具有不稳定性,废水随时间、气候等变化而波动,但多级人工湿地能够适应该变化,工程对污染物去除率为 COD 48.9%, TP 73.5%, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 58.7%和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 54.7%,取得了较好的处理效果。

(2) 表面流人工湿地具有较强的基质吸附和截留作用,污染物 COD 和 TP 去除主要集中在第 1 级芦苇湿地。为了提高 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除率,建议引流部分污水直接进入第 3 级湿地并改第 3 级湿地为潜流型湿地。

(3) 表面流人工湿地系统具有投资少、效益好、抗面源负荷冲击强、运行管理简单,在消减湖滨农村面源污染负荷入湖上有很好的应用前景。

(下转第 146 页)

根长 8~15.6 cm, 株高 8.3~14.3 cm, 根冠比 0.3~1.1, 各项数据综合表明腐熟污泥处理优于白糖和空白处理, 可以显著提高黑麦草的生长速度, 白糖处理和对照间无显著性差异; 在所有的处理中, 出苗率高于 60% 时, 苗后 30 d 的草坪即可成卷, 草坪草色深绿, 草根密实地将基质盘结在一起, 草坪苗壮整齐成地毯状。

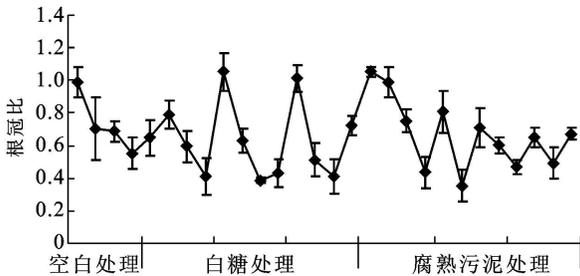


图 3 不同麦糠腐熟方式和不同施肥水平对根冠比的影响

(3) 本试验得出麦糠作为草坪无土栽培基质完全可行, 试验结果可以为麦糠基质草坪广泛应用于水土保持和边坡防护奠定部分数据基础。

[参 考 文 献]

- [1] 李建强, 叶汶祥, 康翠珍, 等. 丙纶非织造布基质人工草坪的开发研究 [J]. 武汉科技学院学报, 2002, 15(3): 19-22.
- [2] 李小科, 向佐湘, 杨知建. 无土草毯生产技术研究进展

- [J]. 作物研究, 2007, 21(5): 758-761.
- [3] Hensler K. L Kenef-based fiber mat as a substrate for establishing soilless sod [J]. Hort Technology, 1998, 8(2): 171-175.
- [4] Shbata M, Hayakawa I. Artificial soil and construction of bed soil for putting green using artificial soil [J]. United States Patent, 1989, 3(4): 812, 339.
- [5] 武良, 边秀举, 徐秋明, 等. 草坪无土栽培基质的研究进展及发展趋势 [J]. 中国农学通报, 2008, 24(8): 295-299.
- [6] 余纪柱. 无土栽培基质选择 [J]. 上海蔬菜, 1996, 5(3): 24-25.
- [7] 王运琦, 张燕. 地毯式草皮无土栽培基质的筛选试验 [J]. 中国农学通报, 2005, 21(10): 269-271.
- [8] Shannen Ferry, Ron Adams, Dan Jacques, et al. Soilless media: Practices make profit [J]. Greenhouse Grower, 1998(9): 78-81.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 264-271.
- [10] 荆建德, 张志国. 栽培基质常用理化性质“一条龙”测定法 [S]. 北方园艺, 2002(3): 18-19.
- [11] 俞建勇, 余燕平, 万玉芹, 等. 秸秆纤维非织造布用作无土栽培基质的研究 [J]. 纺织学报, 2002, 23(3): 65-66.
- [12] 胡林, 边秀举, 阳新玲. 草坪科学与管理 [M]. 中国农业大学出版社, 2001: 118-121.
- [13] 连兆煌. 无土栽培技术与原理 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 60-73.

(上接第 121 页)

[参 考 文 献]

- [1] 向速林. 鄱阳湖区域非点源污染控制技术 [J]. 安徽农业科学, 2009, 37(3): 1292-1293.
- [2] Scholz M, Xu J. Performance comparison of experimental constructed wetlands with different filter media and macrophytes treating industrial wastewater contaminated with lead and copper [J]. Bioresource Technology, 2002, 83: 71-79.
- [3] Srinivasan N, Weaver R W, Lesikar B J, et al. Improvement of domestic wastewater quality by subsurface flow constructed wetlands [J]. Bioresource Technology, 2000, 75(1): 19-25.
- [4] 卢少勇, 张彭义, 余刚, 等. 农田排灌排水湖滨带湿地处理系统的设计与运行 [J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 998-1002.
- [5] 帖靖玺, 郑正, 钟云, 等. 潜流—上行垂直流复合人工湿地对氮磷去除效果 [J]. 生态学杂志, 2006, 25(3): 265-269.
- [6] 袁东海, 任全进, 高士祥, 等. 几种湿地植物净化生活污水 COD、总氮效果比较 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2337-2341.

- [7] 徐和胜, 付融冰, 褚衍洋. 芦苇人工湿地对农村生活污水磷素的去除及途径 [J]. 生态环境, 2007, 16(5): 1372-1375.
- [8] 王全金, 李丽, 李忠卫. 四种植物潜流人工湿地脱氮除磷的研究 [J]. 环境污染与防治, 2008, 30(2): 33-36.
- [9] 卢少勇, 金相灿, 余刚. 人工湿地的氮去除机理 [J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2670-2677.
- [10] US EPA. Design manual of constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment [S]. 1988, EPA 625/1-88/022: 23-25.
- [11] 高拯民, 李宪法. 城市污水土地处理利用设计手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1991.
- [12] Horne A J. Nitrogen removal from waste treatment pond or activated sludge plant effluents with free-surface wetlands [J]. Water Science Technology, 1995, 31(12): 341-351.
- [13] Fleming-Singer M S, Horne A J. Enhanced nitrate removal efficiency in wetland microcosms using an episediment layer for denitrification [J]. Environment Science Technology, 2002, 36: 1231-1237.