

水培番茄滤床-折流板式潜流湿地 深度净化农村生活污水

李洁^{1,2} 吕锡武^{1,*} 谢静^{1,2}

(1. 东南大学能源与环境学院, 南京 210096; 2. 无锡太湖水环境工程研究中心, 无锡 214135)

摘要 研究开发了一种水培番茄滤床-折流板式潜流人工湿地组合式生态系统,用以接纳经厌氧生物滤池-跌水充氧生物接触氧化装置处理后的农村生活污水,验证该组合式生态系统无土栽培番茄同时深度净化生活污水的可行性。近5个月新建中试系统运行结果表明:番茄对生活污水尾水有良好的适应性,在进水 COD、 NH_4^+ 、TN、TP 分别为 54.4、10.8、26.9 和 $2.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下,组合生态系统出水达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级 B 标准,收获番茄 $12.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,番茄果实中未出现重金属超标现象。折流板式潜流湿地种植的3种景观植物美人蕉、再力花和常绿鸢尾均长势良好,平均株高分别达到了 235.2、242.6 和 68.1 cm。通过实验结果认为,番茄对农村生活污水有较强的适应力和较好的净化效果,可与潜流人工湿地组合有效深度处理农村生活污水尾水,同时产生一定经济效益。

关键词 水培番茄;潜流人工湿地;生活污水;净化效果

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)08-4018-07 DOI 10.12030/j.cjee.201503064

Characteristics of hydroponic tomato filter bed-baffled subsurface flow constructed wetland for treating domestic wastewater

LI Jie^{1,2} LYU Xiwu^{1,*} XIE Jing^{1,2}

(1. School of Energy & Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. Engineering Research Center Taihu Lake Water Environment, Wuxi 214135, China)

Abstract A combined ecosystem consisting of a tomato filter bed and subsurface flow constructed wetland was designed during this research, where the effluent from an anaerobic biological filter, water-dropping aeration biological contact oxidation devices was fed, and the feasibility of simultaneous soilless culture of tomato and deep purification of sewage was evaluated. Nearly 5 months of operating results from the newly-built system showed that the tomatoes had good adaptability to the treated sewage, and the effluent from the ecosystem met the class B emission standard of China's Urban Sewage Treatment Plant Pollutant Discharge Standard (GB 18918-2002), with concentrations of influent COD, NH_4^+ , TN, and TP of 54.4, 10.8, 26.9 and $2.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. Tomato production was $12.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ with no heavy metal concentration exceeding its standard. Three kinds of landscape plants *Canna*, *Thalia dealbata*, and *Iris hexagonus* grew well in the baffled subsurface flow constructed wetlands, with average plant heights of 235.2, 242.6, and 68.1 cm, respectively. The results indicate that the tomatoes strongly adapted to and highly purified the rural domestic wastewater, which was added to the subsurface flow constructed wetland. Economic benefit was produced from this combined system.

Key words hydroponic culture of tomato; subsurface flow constructed wetlands; domestic sewage; purification effect

水培蔬菜的概念已有几百年的历史,美国于 1699 年用水培法种菜^[1-2],番茄作为水培菜园的优选品种,其水生适应性、产量和品质都是值得肯定的。营养液是无土栽培技术的核心,国内已有不少学者^[3-5]开展了沼液栽培番茄的研究,沼液适当稀释后可作为无土栽培的营养液。也有学者^[6-7]尝试

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-005)

收稿日期:2015-03-08;修订日期:2015-03-23

作者简介:李洁(1990—),女,硕士研究生,研究方向:小型分散式生活污水处理。E-mail:liwanxuelijie@163.com

* 通讯联系人,E-mail:xiwulu@seu.edu.cn

用水产养殖废水作为番茄水培的营养源。这些研究成果为番茄水培所用营养液提供了相对更为经济的选择,变废为宝,具有一定的经济和实用价值。生活污水中的氮、磷营养盐作为污水达标排放的控制性指标,同时也是植物生长的主要营养元素,加之生活污水中含各种微量元素,是蔬菜生长良好的营养液。目前用二级处理后的农村生活污水尾水无土栽培番茄还鲜有报道。

大深径比厌氧生物滤池-跌水充氧生物接触氧化装置-人工湿地新型生物生态组合工艺是东南大学^[8-9]针对目前农村分散式污水处理技术的发展特点及应用水平,以农村生活污水处理过程中的节能减排和资源化利用为出发点所提出的高效低成本技术。该工艺中生物单元主要去除有机物,跌水充氧生物接触氧化装置出水中氮的形态以硝酸盐为主,后续的人工湿地种植经济型作物完成氮磷营养盐的深度脱除。研究^[10]表明,水培蔬菜营养液中硝态氮和铵态氮的比例适宜时($\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+=70:30$),才能既不影响蔬菜产量,又保证蔬菜硝态氮含量下降。该工艺中跌水充氧生物接触氧化单元出水的硝态氮与氨氮比例在 $(1.5:1)\sim(4:1)$ 之间,氮素组成接近该适宜比例。同时,后续的潜流人工湿地可为多余的硝酸盐提供良好的反硝化环境,磷素则以物理性沉积和基质的化学性吸附沉淀为主要作用得以去除。研究拟通过构建水培番茄滤床-折流板式潜流人工湿地串联系统,接纳经厌氧生物滤池-生物接触氧化装置处理后的农村生活污水,首次验证该系统水培番茄同时深度净化生活污水的可行性,以期为番茄水培技术和生活污水处理技术有机结合提供一定的理论依据。

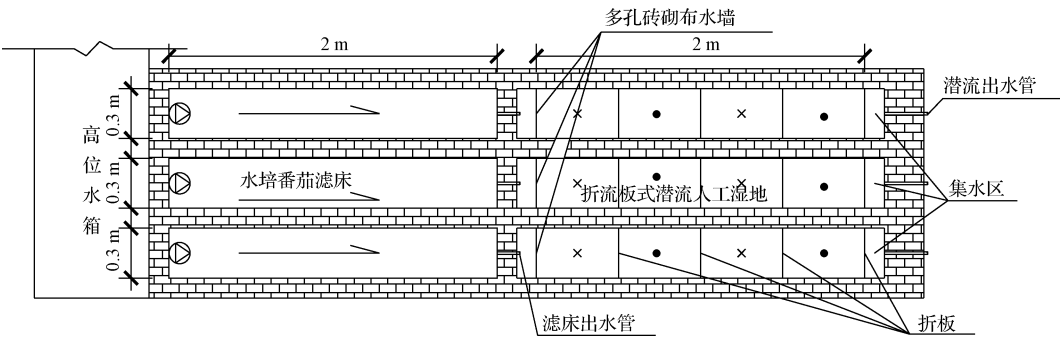
1 材料与方法

1.1 系统组成和工艺流程

水培番茄滤床-折流板式潜流人工湿地中试系统(见图 1)建于东南大学无锡分校,系统为砖砌混凝土结构,表面做防渗处理。经跌水充氧生物接触氧化装置处理后的出水首先进入高位水箱,从高位水箱底部引管自流进入 3 组平行的水培番茄滤床-折流板式潜流人工湿地两级串联系统,每组串联系统进水处用球阀开启大小控制流量。3 组水培番茄滤床平面尺寸均为 $2\text{ m}\times0.3\text{ m}$ (见图 1),坡度 3‰ 。各槽内置穿孔泡沫板,2014 年 6 月下旬用定植海棉将 10 cm 小苗均匀插入泡沫板小孔,番茄苗品种为浙粉 702,每槽 15 株,平均株高 10 cm ,栽种密度 $25\text{ 株}\cdot\text{m}^{-2}$,并用 DN15 UPVC 管做成框架放置于水培槽内用以固定番茄苗。位于二级的 3 条折流板式潜流人工湿地单槽平面尺寸亦为 $2\text{ m}\times0.3\text{ m}$,有效深度 0.6 m ,坡度 5‰ ,沿长度方向分成 4 格,每格 0.5 m ,污水以上下折流方式在湿地中推流穿行。水流下行格板距离池底 15 cm ,水流上行格板距离基质表面 15 cm 。潜流湿地床体内填料级配从下至上依次为:粒径 $30\sim50\text{ mm}$ 粗砾石高度 10 cm ,作为湿地垫层,粒径 $10\sim15\text{ mm}$ 陶粒高度 25 cm ,作为主要的吸附介质和微生物载体,粒径 $10\sim20\text{ mm}$ 细砾石高度 10 cm ,防止轻质陶粒漂浮。3 条折流板式潜流湿地分别种植美人蕉、再力花和常绿鸢尾,每槽 16 株,平均株高 30 cm ,种植密度 $26.7\text{ 株}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

1.2 实验材料和原水水质

实验原水是东南大学无锡分校食堂及 5 栋宿舍



(箭头代表水流方向,•为垂直上向流,×为垂直下向流)

图 1 水培番茄滤床-折流板式潜流人工湿地组合生态系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of tomato filter bed combined with baffled subsurface flow constructed wetland

楼的生活污水,经厌氧生物滤池-生物接触氧化装置处理后引入水培番茄-折流板式潜流湿地组合生态系统,实验期间组合生态系统进水水质指标如表 1 所示。

表 1 实验期间生态系统进水水质

Table 1 Influent sewage quality of the ecosystem during test period		
项目	进水浓度范围	平均值
COD	45.4 ~ 78.1	54.4
NH ₄ ⁺ -N	8.1 ~ 16.5	10.8
NO ₃ ⁻ -N	12.0 ~ 21.2	15.4
TN	20.3 ~ 36.3	26.9
TP	1.1 ~ 3.9	2.24

1.3 测试分析方法

水培滤床及潜流湿地植物植入水槽后进行了一段时间的缓苗,同时湿地通水试运行,待系统稳定运行后开展水质净化效果及植物生理学指标的实验研究,起讫时间为 2014 年 7 月下旬至 2014 年 11 月上旬。实验期间,3 组组合系统进水流量均为 300 L · d⁻¹,组合系统平均负荷为 0.25 m³ · (m² · d)⁻¹,非雨天每隔 2 ~ 3 d 取样检测。

水质的常规检测项目的测定方法参照《水和废水监测分析方法(第 4 版)》,NH₄⁺-N 测定采用水杨酸-可见分光光度法,TN 测定采用过硫酸钾-紫外分光光度法,TP 测定采用过硫酸钾消解-钼酸铵分光光度法,COD 的测定采用重铬酸钾消解-硫酸亚铁铵滴定法。

植物氮磷含量及农产品品质检测参照《土壤农

业化学分析方法》,植物全氮含量测定采用 H₂SO₄-H₂O₂-蒸馏法,植物全磷含量测定采用 H₂SO₄-H₂O₂-钼锑抗比色法,该部分实验在苏州市农科院完成。植物重金属含量委托江苏省疾病预防控制中心检测,所测重金属指标 Pb、As、Cr、Cu、Cd 分别按照 GB/T 5009. 12-2010, GB/T 5009. 11-2003, GB/T 5009. 123-2003,GB/T 5009. 13-2003,GB/T 5009. 15-2003 执行。

2 结果与分析

2.1 组合生态系统对氮磷的深度净化效果

2.1.1 NH₄⁺ 的去除

图 2 为组合生态系统 NH₄⁺ 进出水浓度月平均值及其变化趋势,进水 NH₄⁺ 的平均浓度为 10.8 mg · L⁻¹,经 3 条相互独立的水培番茄滤床后,氨氮浓度平均值分别变为 7.23、7.16 和 7.34 mg · L⁻¹,平行条件下无明显差异。与 3 条水培番茄滤床串联的潜流湿地分别种植 3 种污染物净化效果较好的大型水生植物美人蕉、再力花和常绿鸢尾,3 组组合系统氨氮的总体去除率平均值分别为 56.1%、59.1% 和 52.9%,对应的潜流出水中氨氮浓度平均值依次为 4.6、4.3 和 5.0 mg · L⁻¹,均达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级 A 标准,3 个组合系统对氨氮面积去除量平均值分别为 1.86、1.95 和 1.74 g · (m² · d)⁻¹。

另外,氨氮去除率逐月平均值与温度有较大关系,在 8 月份去除率达到峰值,这是由于氨氮的去除

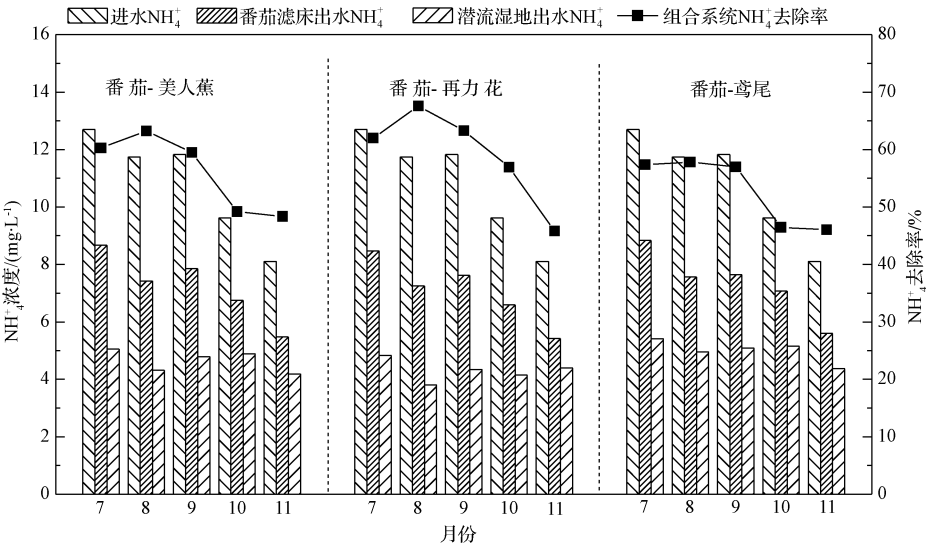


图 2 组合生态系统对 NH₄⁺ 的去除效果

Fig. 2 Removal efficiency of NH₄⁺ by the combined eco-system

主要依靠植物吸收及微生物吸收和转化作用,随着气温的逐渐升高,微生物生长繁殖速率快,对污染物的转化率高,同时充足的光照和高温促进了植物的光合作用和蒸腾作用,生长快速,加速了对营养盐的吸收,同时改善了根系周边的氧环境^[11],系统的净化效能得到提高。

2.1.2 TN 的去除

图 3 为 3 个系统 TN 含量及其去除率月平均值随时间的变化图,实验期间 TN 进水平均浓度为 $26.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。番茄滤床出水总氮浓度范围为 $17.5\sim 24.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值 $21.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,美人蕉湿地、再力花湿地与常绿鸢尾湿地出水 TN 平均浓度分别为 12.0 、 10.9 和 $12.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。均达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级 A 标准,TN 去除效果:再力花 > 美人蕉 > 常绿鸢尾,实验后期 3 个系统都趋于稳定。

氮素组成和有机碳源是提高人工湿地脱氮效果的关键^[12],在进水 COD 浓度较低的条件下,湿地植物的根系分泌物可为系统提供部分碳源,同时提高硝氮比例有利于 TN 去除效率的提高。实验采用的工艺前段,跌水充氧生物接触氧化装置完成了氨氮的硝化作用,使得组合生态系统进水氮素组成中氨氮比例下降,相应的硝氮比例升高,因此实验所得 TN 去除率较高。同时,3 种大型植物根系都比较发达,可在基质内形成良好的微好氧-缺氧环境,加之湿地结构内设折板,改善了水力条件,使得水体在好氧-缺氧-厌氧的环境中交替,有利于 TN 的去除。另

外,虽然 10、11 月份气温有所下降,但番茄滤床的 TN 去除效果并无明显下降,这与番茄进入果期,果实膨胀对营养物质吸收速率加快有关。

2.1.3 TP 的去除

图 4 为组合生态系统 TP 进出水浓度的监测结果月平均值及其变化趋势,实验期间 TP 进水浓度波动较大,平均值为 $2.24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,番茄滤床出水 TP 浓度范围为 $0.95\sim 2.12\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $1.71\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而经美人蕉湿地、再力花湿地与常绿鸢尾湿地处理后出水 TP 平均浓度分别为 0.62 、 0.61 和 $0.76\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均去除率 70.8% ,均达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级 B 标准。

很多研究^[13-14]证明,植物的吸收和微生物的活动对污水中磷的去除贡献不大,磷去除的主要过程是基质的吸附与沉降。二级的折流板式潜流湿地内置隔板,使得水流路径延长,各层的基质可以更充分地接触污水水体,从而为吸附、固定更多的磷创造条件。另外,系统在初期 7—9 月份对 TP 有着较高的去除率,随着运行时间的延长,基质的吸附位点逐渐饱和,TP 的去除率相应下降并趋于稳定。TP 去除率的进一步提高需考虑投加石膏^[15]等强化处理措施。

2.2 番茄品质及食用安全性评价

番茄滤床的幼苗于 6 月下旬植入,番茄的结果时间和果实的成熟期都相应延后,从 10 月下旬开始采收,到 11 月份中旬全部采收完毕,3 条水培番茄

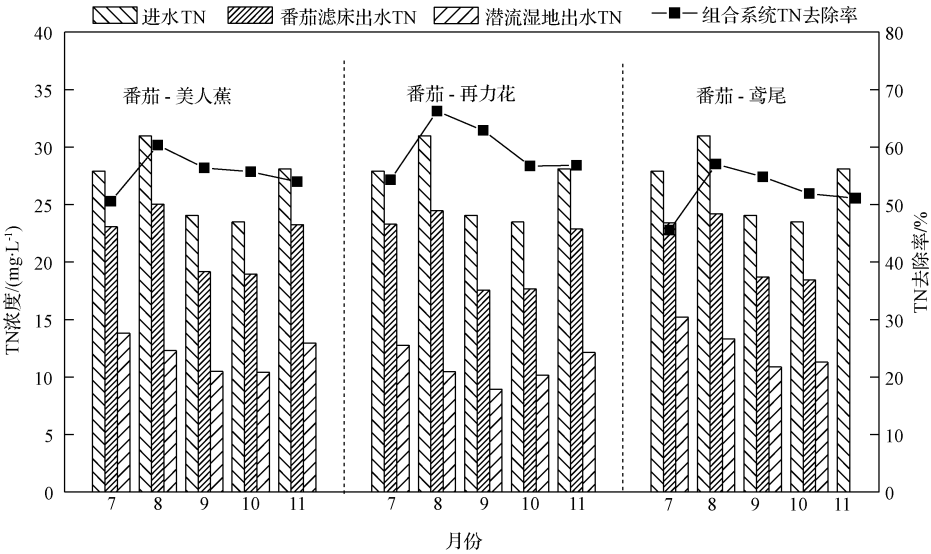


图 3 组合生态系统对 TN 的去除效果

Fig.3 Removal efficiency of TN by the combined eco-system

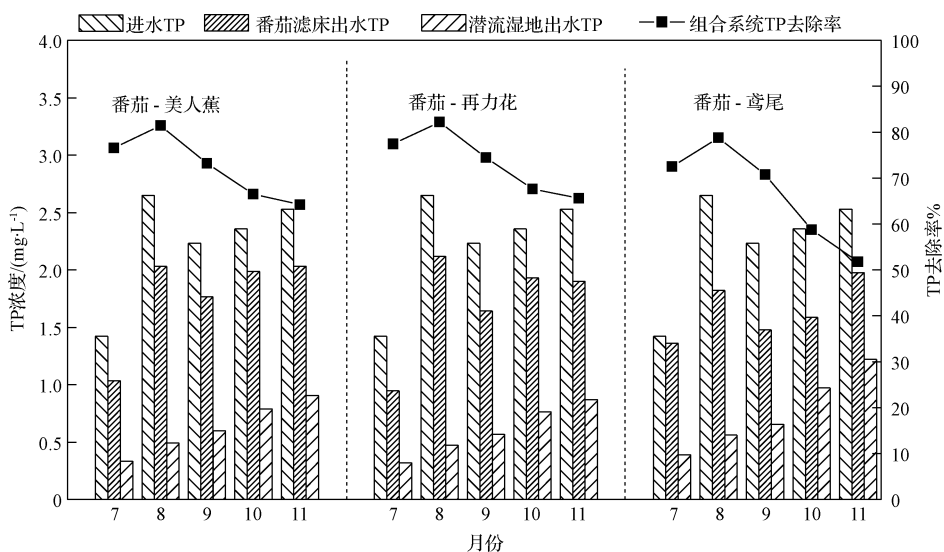


图 4 组合生态系统对 TP 的去除效果

Fig. 4 Removal efficiency of TP by the combined eco-system

滤床共收获果实 22.8 kg,面积产量 12.7 kg · m⁻²,折合 8 460 kg · (667 m²)⁻¹。果实颜色鲜红,光滑,单果重 80 ~ 150 g,平均单果重 120 g,单果重不高,这与实验栽种密度大有关,疏果可以增大果实体积^[16]。相较于传统的土壤栽培番茄的生产方式,实验收获的番茄产量较为可观,占用的土地依然有农产品和经济回报,同时兼有污水处理功能。

人体所需的维生素 C 大多来自果实,维生素 C 含量也是评价果蔬营养价值的重要指标,同时含糖量的多少决定着果蔬风味的好坏^[17]。实验测定了番茄果实的主还原性糖和维生素 C 分别为 2.8% 和 11.2 mg · (100 g)⁻¹,与其他水培番茄品质相比^[3,18]生活污水作为水培营养液并无显著的不良影响。

生活污水中重金属含量相对较低,但是污水、再生水浇灌番茄产生果实中重金属含量增高的现象在过去的研究^[19-20]中也有出现。因此,实验对于采集的番茄果实样品进行了重金属含量测定,测定结果见表 2,系统收获的番茄 Cr、Pb、Cu、As 和 Cd 的含量

表 2 收获番茄重金属含量与标准限值对照					
Table 2 Comparison table of heavy metal contents in harvest tomatoes and standard limit values					
mg · kg ⁻¹					
重金属	Cr	Pb	Cu	As	Cd
番茄果实	0.147 1	0.002 9	0.050 6	未检出	未检出
标准 ¹⁾ 限值	0.5	0.1	—	0.5	0.05

注: ¹⁾ 食品安全国家标准《食品中污染物限量》(GB 2762-2012)。

均未超标,说明生活污水尾水水培番茄没有造成重金属累积现象,这种水培方式是安全的。

2.3 番茄对氮磷资源的回收

通常蔬菜水培营养液需均衡地含有植物生长所需的 N、P、K、Ca、Mg、S、Fe、Mn、Cu、Zn、B 和 Mo 等离子螯合态营养元素,氮磷钾为大量元素,同时氮磷又是生活污水达标排放的控制性指标。从表 3 可见,通过生活污水尾水水培番茄,番茄生长所需营养均从生活污水中汲取,可将污水中的污染控制性指标氮、磷作为资源回收,从而省去专门的肥料购置和施用,更为经济且管理简单。以所试番茄作核算,单位面积的番茄植株可从污水中回收氮磷量分别为 31.79 和 4.56 g · m⁻²,比较各部位氮磷含量可知,氮含量最高的部位是叶,其次是茎和果实,根部最低,磷含量高低顺序依次是:叶 > 果实 > 茎 > 根。

表 3 单位面积收获番茄中各营养器官氮磷含量

Table 3 Nitrogen and phosphorus contents of vegetative organ in harvest tomatoes

部位	鲜重/ (kg · m ⁻²)	干重/ (kg · m ⁻²)	氮/ (g · m ⁻²)	磷/ (g · m ⁻²)
茎	5.33	0.78	9.32	0.79
叶	4.21	0.40	11.82	1.80
果	12.68	0.53	9.04	1.35
根	1.72	0.16	1.61	0.62
合计	23.94	1.87	31.79	4.56

2.4 潜流湿地植株生长情况

从表 4 可以看出,潜流湿地美人蕉、再力花和常

表 4 潜流湿地植株生长情况

Table 4 Growth situation of plants in subsurface constructed wetlands

植物	平均株高/ cm	根系长度/ cm	地上部分生干重/ (kg·m ⁻²)	地下部分生物量干重/ (kg·m ⁻²)	总生物量干重/ (kg·m ⁻²)	分蘖数
美人蕉	235.20	35.00	5.38	2.12	7.50	5.00
再力花	242.60	30.00	3.93	3.77	7.70	6.40
常绿鸢尾	68.10	10.00	3.10	1.70	4.80	3.10

绿鸢尾的植株高度从实验开始时的 30 cm,分别生长到 235.2、242.6 和 68.1 cm,再力花和美人蕉的株高增长了 7 倍左右,分蘖数也较高,已基本达到株高和生长密度的上限。同时,美人蕉、再力花和常绿鸢尾收获时的根系长度分别为 35、30 和 10 cm。其中再力花的地下部分生物量最高,从现场也可以看出,由于其发达的根系向下扩展生长,基质高度被抬高 5 cm 左右,相应的氮磷去除效果也是最优的,见 2.1 节。常绿鸢尾在生物量和根系生长情况下都相对较差,相应的氮磷去除效果与其他两种植物相比较差。

3 结 论

1) 番茄在营养生长期具有较强的耐污能力和水质净化能力,可有效降低后续潜流人工湿地的处理负担。实验构建的水培番茄滤床-折板式潜流人工湿地组合生态系统在平均负荷为 0.25 m³·(m²·d)⁻¹的条件下,接纳二级处理后生活污水,其中 COD、NH₄⁺、TN 和 TP 分别为 54.4、10.8、26.9 和 2.24 mg·L⁻¹,经组合生态系统处理后出水达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级 B 标准。

2) 水培番茄滤床采收所得番茄重金属含量符合食品安全国家标准《食品中污染物限量》(GB 2762-2012),安全可食用。同时,系统采收所得番茄面积产量折算合 8 460 kg·(666.7 m²)⁻¹,较为可观。相较于传统的土壤栽培方式,生活污水尾水水培番茄省却了肥料和灌溉用水,经济性更高,管理更简单。

3) 以所试番茄为例,单位面积的番茄植株可从污水中回收氮、磷量分别为 31.79 g·m⁻²和 4.56 g·m⁻²。水培番茄系统作为一种农业生产活动,同时也是一种有效的污水营养盐预处理单元。实验构建的水培番茄滤床-折流板式潜流湿地在深度净化农村生活污水的同时有效回收污水中的氮磷资源,将农业生产与污水处理有机结合,是符合可持续发展战略的。

参 考 文 献

[1] 沈连静. 水培蔬菜的特点与栽培管理. 吉林蔬菜, **2012** (10): 52-53
SHEN Lianjing. Characteristics and cultivation management of hydroponic vegetables. Jilin Vegetables, **2012**(10): 52-53 (in Chinese)

[2] 曹晨书, 曾春霞. 蔬菜水培技术的研究进展. 上海蔬菜, **2012**(6): 3-4
CAO Chenshu, ZENG Chunxia. Research progress of hydroponic vegetables technical. Shanghai Vegetables, **2012** (6): 3-4 (in Chinese)

[3] 李轶, 张振. 沼液对番茄果实品质的影响. 中国沼气, **2001**, 19(1): 37-39
LI Yi, ZHANG Zhen. Effect of biogas slurry on tomato quality. China Biogas, **2001**, 19(1): 37-39 (in Chinese)

[4] 沈祥军, 孙周平, 张露, 等. 沼液番茄营养液配方的研制及应用效果研究. 沈阳农业大学学报, **2013**, 44(5): 599-603
SHEN Xiangjun, SUN Zhouping, ZHANG Lu, et al. Study on biogas slurry nutrient solution and cultivation effect of tomato. Journal of Shenyang Agricultural University, **2013**, 44(5): 599-603 (in Chinese)

[5] 陆家贤, 刘博野, 徐虹. 沼液在番茄无土栽培中的应用. 中国沼气, **2008**, 26(6): 42-44
LU Jiaxian, LIU Boye, XU Hong. Application of biogas slurry to tomato soilless cultivation. China Biogas, **2008**, 26(6): 42-44 (in Chinese)

[6] MIAO Xin, CUI Shaorong, MIAO Xiangwen. Utilization of aquacultural waste water in vegetable hydroponic production system. Transactions of the CSAE, **2002**, 18(5): 131-133

[7] 张士良, 刘鹰. 水培番茄对甲鱼养殖废水的净化和滤清. 农业环境保护, **2002**, 21(2): 171-172
ZHANG Shiliang, LIU Ying. Purification and clarification of aquicultural vegetable on turtle-pond effluent. Agro-Environmental Protection, **2002**, 21(2): 171-172 (in Chinese)

[8] 唐晶, 吕锡武, 吴琦平, 等. 生物、生态组合技术处理农村生活污水研究. 中国给水排水, **2008**, 24(17): 1-4

- TANG Jing, LYU Xiwu, WU Qiping, et al. Study on bio-ecological combined process for treatment of rural domestic sewage. *China Water & Wastewater*, **2008**, 24(17): 1-4 (in Chinese)
- [9] WU Yifeng, ZHU Wenbo, LU Xiwu. Identifying key parameters in a novel multistep bio-ecological wastewater treatment process for rural areas. *Ecological Engineering*, **2013**, 61: 166-173
- [10] 李娟, 周健民. 水培条件下 CO_2 与 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 配比对番茄幼苗生育的影响. *农业工程学报*, **2006**, 22(7): 138-142
- LI Juan, ZHOU Jianmin. Effects of interactions between different $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratios and CO_2 enrichment on growth and development of tomato seedlings under hydroponic culture conditions. *Transactions of the CSAE*, **2006**, 22(7): 138-142 (in Chinese)
- [11] CALHEIROS C. S. C., DUQUE A. F., MOURA A., et al. Substrate effect on bacterial communities from constructed wetlands planted with *Typha latifolia* treating industrial wastewater. *Ecological Engineering*, **2009**, 35(5): 744-753
- [12] BACHAND P. A. M., HOME A. J. Denitrification in constructed free-water surface wetlands: I. Very high nitrate removal rates in a macrocosm study. *Ecological Engineering*, **1999**, 14(1/2): 9-15
- [13] VERHOEVEN J. T. A., MEULEMAN A. F. M. Wetlands for wastewater treatment: Opportunities and limitations. *Ecological Engineering*, **1999**, 12(1-2): 5-12
- [14] 卢少勇, 金相灿, 余刚. 人工湿地的磷去除机理. *生态环境*, **2006**, 15(2): 391-396
- LU Shaoyong, JIN Xiangcan, YU Gang. Phosphorus removal mechanism of constructed wetland. *Ecology and Environment*, **2006**, 15(2): 391-396 (in Chinese)
- [15] 杨子萱. 小型分散式污水生物生态工艺强化除磷研究与应用. 南京: 东南大学硕士学位论文, **2012**
- YANG Zixuan. Study and application on phosphorus removal strengthening of bio-ecological combined process for small decentralized sewage. Nanjing: Master Dissertation of Southeast University, **2012** (in Chinese)
- [16] 滕林. 番茄果实品质形成特征及其与环境关系的模拟研究. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, **2010**
- TENG Lin. Study on the characteristics of tomato fruit quality and simulation of its relations with environment. Yangling: Master Dissertation of Northwest A&F University, **2010** (in Chinese)
- [17] 齐红岩, 李天来, 张洁, 等. 番茄果实发育过程中糖的变化与相关酶活性的关系. *园艺学报*, **2006**, 33(2): 294-299
- QI Hongyan, LI Tianlai, ZHANG Jie, et al. Relationship between carbohydrate change and related enzymes activities during tomato fruit development. *Acta horticulturae Sinica*, **2006**, 33(2): 294-299 (in Chinese)
- [18] 王凤霞, 黄玉琴, 谢天柱. 测定果蔬中维生素 C 含量的方法比较. *落叶果树*, **2013**, 45(2): 8-11
- WANG Fengxia, HUANG Yuqin, XIE Tianzhu. Comparison of methods for determination of the content of vitamin C in fruits and vegetables. *Deciduous Fruits*, **2013**, 45(2): 8-11 (in Chinese)
- [19] 王树谦, 李秀丽. 污水灌溉对水土及农作物的影响研究. *人民黄河*, **2008**, 30(11): 74-76
- WANG Shuqian, LI Xiuli. The study of effects on soil and crops with sewage irrigation. *Yellow River*, **2008**, 30(11): 74-76 (in Chinese)
- [20] 李波, 任树梅, 张旭, 等. 再生水灌溉对番茄品质、重金属含量以及土壤的影响研究. *水土保持学报*, **2007**, 21(2): 163-165
- LI Bo, REN Shumei, ZHANG Xu, et al. Study on quality of tomato and heavy metal in soil and fruit contribution with irrigation of rejuvenated water. *Journal of Soil and Water Conservation*, **2007**, 21(2): 163-165 (in Chinese)