

茭白-水稻人工湿地对不同处理梯度生活污水的净化研究

吴晓斐, 何 源, 黄治平*, 张丹丹
(农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘 要: 为明确利用农田人工湿地对农村生活污水进行资源化利用的可行性, 选用茭白-水稻轮作种植模式下的人工湿地系统, 通过室内盆栽试验开展了生活污水原水、厌氧出水、接触氧化出水和尾水等 4 种处理梯度污水灌溉茭白和水稻的研究, 分析两种植物对化学需氧量、氨氮和总磷的净化效果以及植物丙二醛含量的变化。结果表明: 茭白和水稻对生活污水原水的处理效果最好, 对接触氧化出水的总磷去除效果较差; 水稻对化学需氧量、氨氮和总磷的整体去除效果优于茭白; 随着污水处理程度的提高, 植物对氮磷的消纳量逐渐增加; 污水灌溉在不同程度上促进了茭白、水稻的生长发育。研究表明茭白-水稻轮作在高浓度污水处理中可发挥巨大优势, 且有利于茭白、水稻生长发育。

关键词: 茭白-水稻人工湿地; 生活污水; 去除效果; 产量

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2021)05-0834-08

Study on purification of different treatment gradient domestic sewage by zizania-rice constructed wetland

WU Xiaofei, HE Yuan, HUANG Zhiping, ZHANG Dandan

(Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191)

Abstract: In order to find a sewage treatment gradient suitable for the resource utilization of rural domestic sewage, indoor pot experiment was used to design four sewage treatment gradients including domestic sewage raw water, anaerobic effluent, contact oxidized effluent and tail water to irrigate zizania latifolia and rice. Purification effect of rice on different treatment gradient domestic sewage. This article passed the pot experiment, Adopting the planting mode of zizania-rice rotation, analyze the purification effect of the two plants on chemical oxygen demand, ammonia nitrogen and total phosphorus and the change of plant malondialdehyde content. The results showed that water zizania latifolia and rice had the best treatment effect on raw water of domestic sewage, but had poor removal effect on total phosphorus from oxidized water. The removal efficiency of chemical oxygen demand, ammonia nitrogen and total phosphorus of rice was better than that of water bamboo. With the improvement of the degree of sewage treatment, the absorption of nitrogen and phosphorus by plants gradually increases; sewage irrigation promotes the growth and development of water chestnut and rice to varying degrees. Studies have shown that zizania-rice rotation can play a huge advantage in the treatment of high-concentration sewage, and is beneficial to the growth and development of zizania and rice.

Key words: zizania-rice constructed wetland; domestic sewage; removal effect; yield

随着我国农村生活更加丰富、农村生活用水量日益增加, 生活污水的排放量越来越大。我国农村数量居多, 地点较为分散, 农村污水收集处理管道等基础设施的建设不完善, 而且农民的环保节水意识淡薄, 导致农村生活污水随意排放的现象频发, 对周围环境造成一定污染, 因此亟需寻找适合当地

的污水处理技术以降低环境污染风险。国内对分散式污水处理技术的研究始于 20 世纪 80 年代, 人工湿地、生物滤池、稳定塘、厌氧好氧组合工艺在农村地区得到了研究和应用^[1]。其中人工湿地是具有 50 多年应用历史的生物处理技术, 主要通过水生植物的吸收利用、微生物的转化降解作用以及基质的

收稿日期: 2020-08-31

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项课题(2017ZX07603002)资助。

作者简介: 吴晓斐, 硕士研究生。E-mail: 971954108@qq.com

* 通信作者: 黄治平, 博士, 副研究员。E-mail: bjhuangzp@126.com

过滤等作用来去除污染物质^[2-3]。

现多数研究利用浮水植物和挺水植物去除不同类型废水中的营养物质和重金属^[4-5]。Sudiarto^[6]研究发现水生植物水芙蓉可去除猪场废水中 63.15% 的总氮。Lu 等^[7]通过静态试验,发现水葫芦可去除污水中 89.40% 的总氮和 99.00% 的氨氮,而水浮莲可去除污水中 93.6% 的总磷。目前人工湿地中的植物研究多集中于芦苇、水葫芦、大藻和香蒲等植物,这些植物虽对污水具有良好的去除效果,且生态效益较好,但经济效益较差,二次利用率低^[8]。而茭白是我国南部地区种植的蔬菜,其地下嫩茎部分可食用,同时茭白是人工湿地处理系统中应用的挺水植物之一,根系发达、耐污能力较强且对氮、磷具有良好的去除效果^[9-10]。水稻是我国重要的粮食作物,同时稻田系统也可被用于处理污水,且相对于传统人工湿地处理系统,稻田湿地被称为人工湿地生态系统,其对环境更加友好。李莹等^[11]发现当再生水总氮浓度为 15 mg·L⁻¹ 时,使用再生污水进行灌溉可减少清洁水用量 65% 以上,污水中的总氮利用率 95% 以上,减少氮肥施用比 15%。张悦^[12]通过配比不同浓度尾水对稻田不同时期进行灌溉,结果表明水稻对污水中的氮素有很强的固持能力,当有 200 户的居民时需要配备 1.5 亩的稻田用来利用尾水,且稻田排水的总氮浓度优于《地表水环境质量标准》(3838—2002)^[13]中的 V 类水标准,处理效果优于生物技术和组合技术。与清水灌溉相比,污水中含有大量植物生长所需要的营养元素,植物通

过生长发育吸收利用生活污水中的氮、磷等营养物质,在降低污水污染物浓度的基础上还可减少化肥使用量、降低农业生产成本。美国加州的案例显示,使用再生水进行农田灌溉,基本满足一季作物的生长需求,无需额外施加肥料^[14]。

由于人工湿地易受季节影响,且处理能力较差,因此在实际污水处理中,常常采用厌氧、好氧或 A²O 工艺与人工湿地相组合的处理方式。但这种处理方式具有处理成本高、工程投资大等问题^[15],因此为降低污水的处理成本并获得更大效益、提高污水资源化利用率,选择合适的污水处理工艺,寻求茭白-水稻轮作对生活污水净化效果较佳的污水处理梯度显得尤为重要。本研究通过小型污水处理装置获取生活污水原水、厌氧出水、接触氧化出水和尾水等不同处理梯度的污水对茭白和水稻进行灌溉,探究茭白和水稻对不同处理梯度下污水的净化效果,为降低生活污水治理成本、提高污水资源化利用率提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 供试土壤和试验用水

试验土壤取自合肥市肥西县紫蓬镇新农村水稻田内,土壤类型为水稻土,除去地面上杂草,收集 0~25 cm 层土壤,土壤采取后自然风干,去除草根、石粒等杂物,过 20 目筛备用。供试土壤理化性质见表 1。生活污水原水取自安徽省合肥市蜀山区安徽中棉种业长江有限责任公司污水池内。

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Basic physico-chemical characteristics of the soil used in the experiment

项目	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	pH
含量	12.77	0.91	0.46	110.44	12.34	121.36	6.35

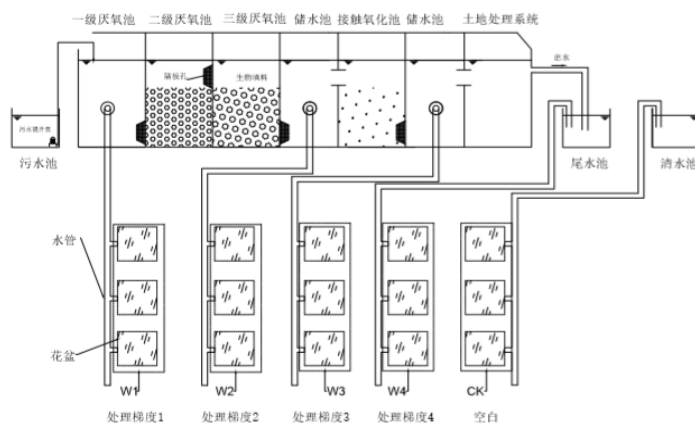


图 1 生活污水处理小型试验装置示意图

Figure 1 Schematic diagram of a small test facility for domestic sewage treatment

1.2 试验设计方案

污水处理试验装置如图 1 所示, (1) 污水池: 1 台, 配置试验污水, PVC 材质, 有效容积为 50 L。 (2) 厌氧装置: 三台串联, 有机玻璃材质, 高为 400 mm, 长为 300 mm, 宽为 200 mm, 二级厌氧池和三级厌氧池顶部加盖玻璃板, 玻璃板上设有活塞, 内装条状立体弹性填料进行悬挂式填装, 悬挂方式为 2 行 2 列, 共 4 组。 (3) 储水池: 2 台, 有机玻璃材质, 尺寸同厌氧池。 (4) 接触氧化池: 1 台, 有机玻璃材质, 尺寸同厌氧池, 内装炉渣粒状填料 (粒径为 20~50 mm), 填料高度为 250 mm, 距池底 50 mm 高处有隔层 (可拆卸) 进行阻挡, 底部设有曝气装置, 由小型曝气机进行曝气。 (5) 土地处理系统: 1 台, 有机玻璃材质, 长 500 mm、宽 200 mm、高 300 mm, 装置中间设有 15 mm 逆止阀。试验装置为双层, 内层有机玻璃厚度为 10 mm, 外层有机玻璃厚度为 5 mm, 中间隔层宽 10 mm, 中间设有保温层, 以防冬季室外温度太低对污水处理效

果造成影响, 保温层使用保温棉, 厚度 10 mm。

采用盆栽试验, 试验盆长 40 cm、宽 40 cm、高 50 cm, 由 PVC 板做成, 盆内底部为 15 cm 高的陶粒, 上层为 25 cm 的土层, 盆底安装带有孔的水管, 以便试验过程中采集土壤渗漏水。在试验盆内填土种植水稻和茭白。每个试验盆中填土 30.0 kg, 每个盆中使用清水浇透, 采用茭白-水稻的轮作模式, 进行盆栽试验。其中污水灌溉设 5 个处理: 其中污水处理梯度 (1) 为未经处理设施处理, 取自污水池的生活污水, 用 W1 表示; 污水处理梯度 (2) 为经厌氧工艺的出水, 取自三级厌氧池后的储水池, 用 W2 表示; 污水处理梯度 (3) 为经厌氧+接触氧化工艺的出水, 取自接触氧化池后的储水池内的出水, 用 W3 表示; 污水处理梯度 (4) 为经厌氧+接触氧化+土地处理系统工艺的出水, 取自污水处理装置的最终出水即尾水, 用 W4 表示, 清水 (5) 作为空白对照, 用 CK 表示。该研究共 5 个处理, 每个处理设 3 个重复。各处理具体信息如下表。

表 2 试验用水水质

Table 2 Water quality of test water

处理组	污水来源	COD/ (mg·L ⁻¹)	总氮/ (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	总磷/ (mg·L ⁻¹)	pH
W1	生活污水原水	285.8±30.40	74.26±2.34	55.74±1.67	1.89±0.21	7.89±0.14
W2	厌氧出水	87.5±8.45	59.37±3.61	42.50±3.04	1.79±0.17	7.56±0.25
W3	接触氧化出水	62.6±10.30	36.42±3.13	27.70±4.25	0.50±0.08	7.50±0.31
W4	尾水	65.4±7.86	21.67±0.45	18.40±4.31	0.32±0.06	7.36±0.14
CK	自来水	4.96±2.11	1.47±0.26	0.27±0.12	0.12±0.07	7.61±0.24



图 2 定时喷灌系统

Figure 2 Timing irrigation system

本研究采用滴灌系统, 如图 3-4 所示, 安装定时装置, 定时从生活污水处理小型试验装置中不同处理梯度的出水口抽取污水灌溉作物。

茭白选取长势和大小一致的茭白无性繁殖体, 置于试验盆中培养 15 d, 期间发现死亡的个体随时替换, 最后确保每个试验盆中存活的茭白植株均为 2 株。待所有植物地上部分均正常开始生长后, 开始加入一定体积的污水, 茭白在孕茭期保持水层 90 mm 左右, 其他时期保持平均水层 40 mm 左右。水

稻选用的是籼稻深两优 5814, 播种后 30 d 移栽插秧, 每穴插 2 株, 每盆 4 穴, 在分蘖期保持水层 15 mm 左右, 分蘖末期保持水层 30 mm 左右, 其他时期保持平均水层 25 mm 左右。整个试验期间各处理灌溉时间和灌水定额相同, 污水的加入频次均为每天一次, 每次加入量均为 1.00 L。

1.3 样品采集

在种植之前和茭白的分蘖期、拔高期和分蘖期以及水稻的分蘖期、抽穗期、结实期后取花盆底部

渗漏水 100 mL, 进行水质检测。在茭白和水稻成熟期, 统计采收的茭白和水稻产量。

1.4 测定方法

化学需氧量采用重铬酸钾法测定, 氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定, 总磷采用钼酸铵分光光度法测定。

1.5 数据分析

COD 去除率的计算公式如下:

$$E_{\text{COD}} = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

其中, E_{COD} —COD 的去除率 (%); C_0 —未灌溉前污水中 COD 浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); C_1 —渗漏水中 COD 浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$);

氨氮去除率的计算公式如下:

$$E_{\text{NH}_4^+} = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

其中, $E_{\text{NH}_4^+}$ —氨氮的去除率 (%); C_0 —未灌溉前污水中氨氮浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); C_1 —渗漏水中氨氮浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$);

总磷去除率的计算公式如下:

$$E_{\text{TP}} = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\% \quad (3)$$

其中, E_{TP} —总磷的去除率 (%); C_0 —未灌溉前污水中总磷浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); C_1 —渗漏水中总磷浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$);

采用 Microsoft office 2003 软件进行处理, Origin 软件进行作图, IBM SPSS21.0 软件进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 植物-土壤系统对不同处理梯度污水处理效果

2.1.1 化学需氧量的浓度变化趋势 茭白-土壤系统对不同处理梯度污水中 COD 处理效果的变化如图 3 所示。在前 3 次取样中 W1 处理中 COD 浓度与 W2、W4 和 CK 组均具有显著差异 ($P < 0.05$), 而 W2、W3 和 W4 处理中 COD 浓度只在第 3 次采样过程中与 CK 产生显著差异, 其他时期并未有明显差异变化。随着时间的推移, 各处理中的 COD 浓度总体呈下降趋势, 其中在试验开始 14 d 时, W1、W2 和 W4 处理中 COD 含量高于其他时间出水中 COD 含量, 到后期各处理间的 COD 浓度无显著差异。

水稻-土壤系统对不同处理梯度污水中 COD 处理效果的变化如图 3 右侧所示。W1 渗漏水中化学需氧量浓度最大值为 $55.23 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最小值为 $16.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $36.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 浓度变化较大, 平均去除率为 87.87%; W2 渗漏水中化学需氧量浓度最大值为 $53.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最小值为 $16.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 $34.49 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均去除率为 60.58%; W3 渗漏水中化学需氧量最大值为 $44.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最小值为 $10.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 $19.73 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均去除率为 68.47%; W4 渗漏水中化学需氧量浓度最大值为 $65.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最小值为 $9.43 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 $26.82 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均去除率为 59.00%。水稻-土壤系统出水中 COD 浓度变化呈现先降低后增大再降低再增大的变化趋势, 分别在水稻试验开始后 18 d 和 77 d 出现 2 个高峰。

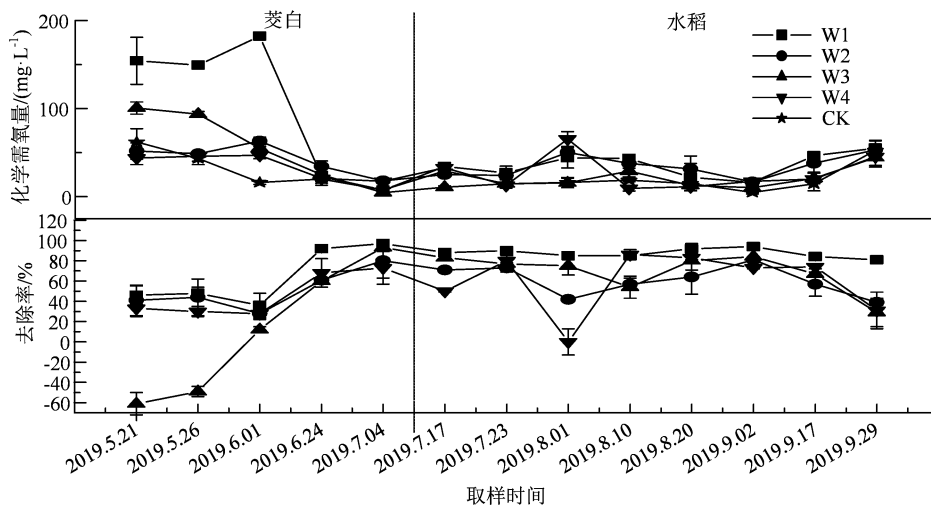


图 3 茭白-水稻系统出水中 COD 浓度和去除率变化

Figure 3 Changes of COD concentration and removal rate in water from water zizania latif and rice

两种不同植物对不同处理梯度下污水中化学需氧量的去除效果如图 3 下部分所示。在不同的处理

条件下, 植物-土壤系统对污水的处理效果不尽相同。茭白对不同处理梯度的处理效果表现为 $W1 >$

W4>W2>W3, 水稻的处理效果表现为 W1>W3>W2>W4; 其中两种植物对 W1 中的化学需氧量处理效果最好, 茭白对 W2、W3 和 W4 中化学需氧量的平均去除率接近, 分别为 55.99%、55.15%和 56.59%; 水稻对尾水的处理效果则低于其他污水处理梯度, 平均去除率为 59.00%。

2.1.2 氨氮的浓度变化趋势 茭白-土壤系统对不同处理梯度污水中氨氮处理效果的变化如图 4 左例所示。污水灌溉后, 各处理中的氨氮浓度迅速下降, 下降率可达 68.42%、81.34%、45.49%和 30.87%, 各处理间无显著差异。茭白试验开始后 7 d, 各处理间的氨氮浓度相对于试验开始后 3 d 时有所回升, 随后 W1、W3 和 W4 处理中的氨氮浓度随着时间推移逐渐降低; 而 W2 处理中的氨氮浓度在试验开始后 14 d 依旧呈现上升趋势, 随后开始逐渐降低。随着时间推移, 各处理中的氨氮浓度均呈现出下降趋势。试验开始后 47 d, 各处理中渗漏水的氨氮分别为 7.02 mg·L⁻¹、4.52 mg·L⁻¹、0.88 mg·L⁻¹ 和 0.18 mg·L⁻¹, 各处理间均无显著差异 ($P<0.05$), 且氨氮浓度均低于对照处理的 12.31 mg·L⁻¹。

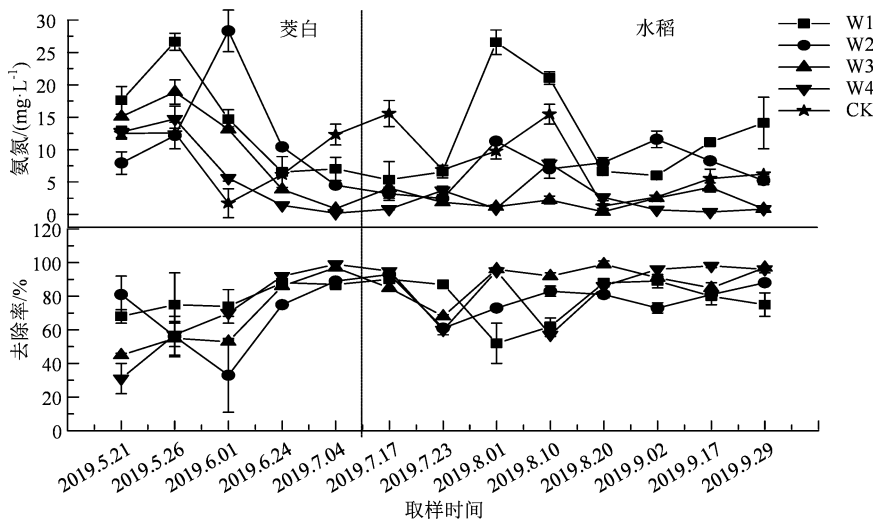


图 4 茭白-水稻系统出水中氨氮浓度和去除率变化

Figure 4 Changes of ammonia nitrogen concentration and removal rate in water from water zizania latif and rice

2.1.3 总磷的浓度变化趋势 如图 5 所示, 污水加入后, 茭白-土壤系统中各处理中的总磷含量迅速增加, 在茭白试验开始后 7 d 时 W1、W3 和 W4 处理中的总磷含量达到最大值, 分别为 4.87 mg·L⁻¹、2.67 mg·L⁻¹ 和 1.36 mg·L⁻¹, 相比较于加入的污水中总磷浓度, 分别增加 157.50%、433.33%和 323.96%, W2 处理则在试验开始后 14 d 总磷达到最大值 3.54 mg·L⁻¹, 增加 97.95%, 随后总磷浓度随着植物的吸收、微生物的固定和自然沉淀作用开始逐渐降低, 最终各处理渗漏水中的总磷浓度稳定低于 0.5

水稻-土壤系统对氨氮净化的规律性较差。其中, W1 渗漏水中氨氮浓度最大值为 26.57 mg·L⁻¹, 最小值为 5.33 mg·L⁻¹, 平均值为 12.18 mg·L⁻¹, 浓度变化较大, 平均去除率为 78.15%; W2 渗漏水中氨氮浓度最大值为 11.60 mg·L⁻¹, 最小值为 2.45 mg·L⁻¹, 平均为 7.13 mg·L⁻¹, 在该污水浓度下水稻—土壤系统对氨氮的平均去除率为 83.23%; W3 渗漏水中氨氮浓度变化较小, 最大值为 4.17 mg·L⁻¹, 最小值为 0.40 mg·L⁻¹, 平均为 2.16 mg·L⁻¹, 对氨氮的平均去除率为 92.20%; W4 渗漏水中氨氮浓度最大值为 7.85 mg·L⁻¹, 最小值为 0.37 mg·L⁻¹, 平均为 2.22 mg·L⁻¹, 在该污水浓度下水稻-土壤系统对氨氮的平均去除率为 87.91%。

不同处理间比较发现, 茭白-土壤系统对氨氮处理效果表现为 W4>W3>W1>W2, 水稻-土壤系统则表现为 W3>W4>W2>W1, 不同污水处理梯度下氨氮去除效果相差较小。在同一处理梯度下, 水稻-土壤系统对污水中氨氮的去除率高于茭白-土壤系统; 茭白对尾水中的氨氮处理效果最好, 水稻对接触氧化出水中的氨氮处理效果最好。

mg·L⁻¹, 与对照相比均无显著性差异 ($P<0.05$)。

前期水稻-土壤系统对总磷的去除效果较好。在水稻试验开始 50 d 后渗漏水中总磷浓度开始升高、总磷的去除率降低。在水稻试验期, 各处理渗漏水中的总磷平均浓度分别是 0.26 mg·L⁻¹、0.35 mg·L⁻¹、0.24 mg·L⁻¹ 和 0.10 mg·L⁻¹, 对照组总磷平均浓度为 0.11 mg·L⁻¹, W2 处理与对照相比差异显著, 其他处理与对照相比无显著性差异 ($P<0.05$);

两种不同植物-土壤系统对不同处理梯度下污水中总磷的去除效果如图下半部分所示。在不同的

处理条件下,植物-土壤系统对污水的处理效果不尽相同。茭白对不同处理梯度污水中总磷的处理效果表现为 $W1 > W4 > W2 > W3$, 水稻对不同处理梯度污水中的总磷的处理效果表现为 $W1 > W2 > W4 > W3$; 两种植物对生活污水原水中的总磷处理效果最好, 平均去除率分别为 87.07%和 86.31%。茭白和

水稻对 W1、W2 和 W4 中的总磷平均去除率较高, 对 W3 渗漏液中总磷的去除效果较差, 平均去除率分别为 37.11%和 29.08%。茭白和水稻对总磷的去除效果随着污水处理强度的加强和污水浓度的降低而减弱 (W3 处理除外)。

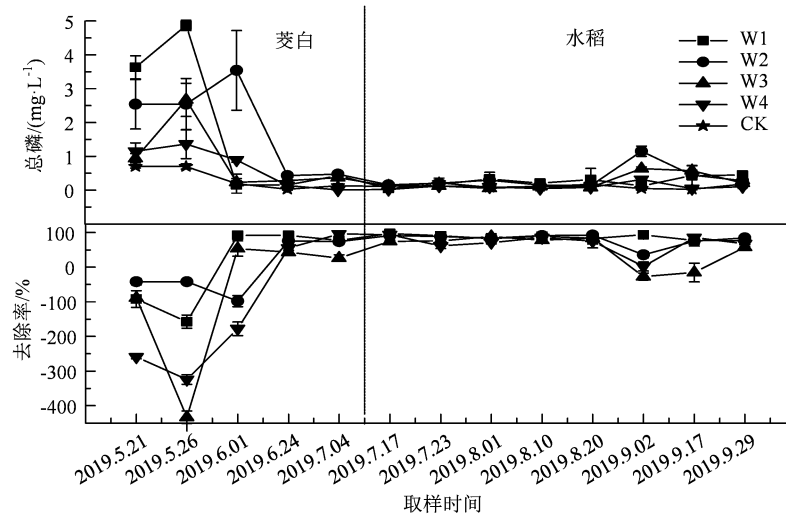


图 5 茭白-水稻系统出水中总磷浓度和去除率变化

Figure 5 Changes of total phosphorus concentration and removal rate in water from water zizania latif and rice

表 2 不同处理梯度污水对茭白和水稻产量的影响

Table 2 Effect of different treatment gradient sewage on the yield of zizania chinensis and rice

处理组	茭白单茭重/(g·个 ⁻¹)	茭白总产量/(t·hm ⁻²)	水稻产量/g
W1	184.36±7.24 ^b	15.64 ^b	145.65±12.74 ^a
W2	198.31±4.33 ^a	20.58 ^a	115.91±2.88 ^{ab}
W3	176.52±2.64 ^{bc}	12.13 ^c	96.19±2.20 ^b
W4	194.34±3.57 ^a	18.39 ^{ab}	95.40±10.57 ^b
CK	165.83±6.09 ^c	11.67 ^c	93.56±12.76 ^b

注: 同列数据后不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 对植物产量影响

如表 2 所示, 污水处理显著提高了茭白的单茭重和总产量, 其中 W1、W2 和 W4 处理显著高于对照, 单茭重分别提高了 11.17%、19.59%和 17.19%, 总产量分别提高了 34.00%、76.34%和 57.51%, W3 处理的单茭重和总产量相对于对照无明显差异。这表明不同处理梯度污水对茭白均具有一定的促进作用, 其中 W2 处理对茭白的生长发育促进作用更强, W4 和 W1 处理次之, W3 处理与对照相差较小。与对照相比, W1 处理显著增加了水稻产量, 增产 55.67%, 其他处理与对照没有显著差异, 但 W2、W3 和 W4 处理的产量均略高于对照, 分别增产 23.89%、2.81%和 1.96%。研究^[16]认为污水中的氮、磷等养分与水稻产量具有正相关性, 因此不同处理梯度的污水对水稻产量有所增加, 但增幅各不相同。

3 讨论与结论

人工湿地对化学需氧量的去除主要依赖于基质和植物根系上附着的微生物的降解作用, 且植物根系越发达越有利于提高植物对污水去除效果^[17-18]。在本研究中发现与茭白相比, 水稻对不同污水中的化学需氧量的去除效果均优于茭白, 这是因为虽然茭白和水稻同属须根系, 但是在实际生长过程中, 茭白的须根较少, 以主根为主, 但水稻的根系发达, 可为微生物提供更大的附着面积, 提高了植物对污水的去除率。同时本研究发现随着污水处理梯度的增加和污水浓度的降低, 茭白和水稻对 COD 的去除效果有所下降, 与刘超等^[19]和闻岳^[20]的研究结果一致, 这是因为细菌的生长繁殖依赖于营养物质的丰富程度, 高浓度污水中含有的细菌数量高于低污

染污水, 微生物活跃度高, 而化学需氧量主要依赖于微生物的降解作用, 从而导致高浓度污水中植物对 COD 的去除效果较好^[19,21]。同时本研究发现 W2 处理中细菌的多样性指数低于其他处理组^[22], 导致 W2 处理中茭白和水稻对 COD 的去除效果低于 W3 处理。

污水中氨氮主要通过植物的吸收及植物根系微生物的硝化和反硝化作用去除^[23-24]。植物通过自身组织运输氧气至根际部位, 形成好氧环境为微生物提供了条件, 有利于增强其硝化和反硝化作用, 从而提高了对氨氮的去除率, 且有研究证明温度对氨氮的去除率具有一定影响^[24-25]。在本研究中, 水稻对氨氮的去除率大于茭白对氨氮的去除率, 可能是因为种植茭白且采样时间集中在 4 月至 7 月初, 水稻于 7 月中旬至 9 月底种植并采样, 气温升高从而提高了微生物的作用强度, 使得水稻对氨氮的去除率高于茭白。

目前研究认为人工湿地主要通过基质的吸附作用、微生物的降解作用和植物的吸收作用, 其中基质的吸附能力具有局限性, 当基质吸附饱和后吸附能力逐渐减弱, 而磷元素是植物和微生物必需的营养元素之一, 磷元素是生物合成核酸、磷脂、磷酸腺苷等化合物的重要组成成分, 因此污水中的磷可通过植物的收割、换茬等形式而得以去除^[27-29], 但微生物中的磷元素会随着微生物的死亡而重新释放至水体, 因此微生物对水体中总磷的去除效果并不明显^[30]。试验开始后茭白-土壤系统出水中总磷的含量高于进水, 这可能是因为试验初期土壤孔隙较大, 水流较快导致土壤磷元素向下流失^[31], 叠加污水中自带的总磷量导致试验初期茭白-土壤系统中总磷去除率为负值, 之后随着茭白生长和基质的吸附作用, 总磷去除率逐渐提高。

通过氮磷的平均去除率计算不同处理组消纳的污染物质, 其中试验期每盆茭白灌溉 50 L 污水, 因此茭白系统消纳氮量分别为 2 190.19 mg、1 425.75 mg、931.30 mg 和 641.09 mg, 因试验初期出水中总磷含量高于进水, 因此茭白-土壤系统消纳总磷量以后两次总磷平均去除率计算, 不同处理中一盆土壤-茭白系统消纳总磷量分别为 80.00 mg、67.08 mg、8.75 mg 和 12.08 mg。水稻每盆灌溉 77 L 污水, 以平均去除率计算消纳的污染物质, 水稻系统消纳氮量分别为 W2、W3 和 W4 处理 3 354.18 mg(W1)、2 723.70 mg、1 966.53 mg 和 1 245.51 mg, 消纳总磷量分别为 125.61 mg、110.65 mg、20.05 mg 和 16.68 mg。试验结果表明, W2 和 W4 处理对茭白的增产较好, 其中

茭白对 W2 处理氮磷的吸收效果较好; W1 处理对水稻的增产效果最好, 且消纳氮磷量最高。杨茜通过不同处理程度的生活污水灌溉空心菜室内试验发现原水对空心菜增产最大, 且对氨氮、总氮和总磷的去除率高于其他处理, 与本试验结果相似^[31]。

从去除率来看, 茭白-水稻轮作对生活污水原水的消纳效果优于其他处理, 厌氧处理出水和尾水次之, 茭白-水稻轮作对接触氧化出水的去除率最差, 其中茭白对接触氧化出水中的化学需氧量和总磷的处理效果较差, 水稻对接触氧化出水中的总磷去除效果较差。在相同处理条件下, 水稻对化学需氧量、氨氮和总磷的整体去除效果优于茭白; 茭白-水稻轮作系统对污水中氮磷的消纳量随着污水处理梯度的增强呈递减趋势。

污水灌溉促进了茭白的生长发育, 其中生活污水原水、厌氧出水和尾水灌溉分别增产 34.00%、76.34%和 57.51%, 相对比其他污水处理组来说, 厌氧出水茭白产量最高; 污水灌溉提高了水稻产量, 各处理分别增产 55.67%、23.89%、2.81%和 1.96%。

综合考虑产量和污染物去除效果, 茭白-水稻轮作比较适用于处理生活污水原水及厌氧出水。

参考文献:

- [1] 钱海燕, 陈葵, 戴星照, 等. 农村生活污水分散式处理研究现状及技术探讨[J]. 中国农学通报, 2014, 30(33): 176-180.
- [2] VYMAZAL J. Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: a review[J]. Ecol Eng, 2013, 61: 582-592.
- [3] VYMAZAL J, BŘEZINOVÁ T. Accumulation of heavy metals in aboveground biomass of *Phragmites australis* in horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment: a review[J]. Chem Eng J, 2016, 290: 232-242.
- [4] MURADOV N, TAHA M, MIRANDA A F, et al. Dual application of duckweed and Azolla plants for wastewater treatment and renewable fuels and petrochemicals production[J]. Biotechnol Biofuels, 2014, 7(1): 30.
- [5] TEL-OR E, FORNI C. Phytoremediation of hazardous toxic metals and organics by photosynthetic aquatic systems[J]. Plant Biosyst-Int J Deal Aspects Plant Biol, 2011, 145(1): 224-235.
- [6] SUDIARTO S I A, RENGAMAN A, CHOI H L. Floating aquatic plants for total nitrogen and phosphorus removal from treated swine wastewater and their biomass characteristics[J]. J Environ Manage, 2019, 231: 763-769.
- [7] LU B, XU Z S, LI J G, et al. Removal of water nutrients by different aquatic plant species: an alternative way to remediate polluted rural rivers[J]. Ecol Eng, 2018, 110: 18-26.
- [8] 杨雁, 李永梅, 张怀志, 等. 不同水稻品种对滇池富营养化水体中氮磷去除效果研究[J]. 西南农业学报, 2010,

- 23(6): 1923-1929.
- [9] 解纯芬. 人工湿地不同植被净化水质效果与生理特性[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(6): 299-304.
- [10] 孙瑞莲, 刘健. 3 种挺水植物对污水的净化效果及生理响应[J]. 生态环境学报, 2018, 27(5): 926-932.
- [11] 李莹, 高蓉, 黄英, 等. 洱海流域水稻再生水灌溉节水减污能力浅析[J]. 中国农村水利水电, 2017(12): 13-16.
- [12] 张悦. 江苏省农村生活污水处理设施运行及尾水稻田利用的安全性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [13] 国家环境保护总局科技标准司. 地表水环境质量标准: GB3838—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [14] 陈卫平, 吕斯丹, 张炜铃, 等. 再生(污)水灌溉生态风险与可持续利用[J]. 生态学报, 2014, 34(1): 163-172.
- [15] 秦宏, 郑传祯. 污水灌溉国内外研究综述及基于中国问题的展望[J]. 世界农业, 2018(1): 24-29, 47, 219.
- [16] JANG T, JUNG M, LEE E, et al. Assessing environmental impacts of reclaimed wastewater irrigation in paddy fields using bioindicator[J]. *Irrigation Sci*, 2013, 31(5): 1225-1236.
- [17] 刘洋, 王世和, 黄娟, 等. 两种人工湿地长期运行效果研究[J]. 生态环境, 2006, 15(6): 1156-1159.
- [18] 魏晓慧. 六种水生植物对汾河水体中氨氮、COD、总氮和总磷的净化作用研究[D]. 太原: 山西大学, 2012.
- [19] 刘超, 宁国辉, 律琳琳, 等. 芦苇湿地系统对鸭粪废水中 COD 的模拟去除及纳污量核算[J]. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2119-2125.
- [20] 闻岳. 水平潜流人工湿地净化受污染水体研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [21] 张政, 付融冰, 杨海真, 等. 水量衡算条件下人工湿地对有机物的去除[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(3): 363-367.
- [22] 吴晓斐, 何源, 黄治平, 等. 不同处理梯度污水对细菌群落和酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 2026-2035.
- [23] CHEN X L, PELTIER E, STURM B S M, et al. Nitrogen removal and nitrifying and denitrifying bacteria quantification in a stormwater bioretention system[J]. *Water Res*, 2013, 47(4): 1691-1700.
- [24] TANNER C C, KADLEC R H, GIBBS M M, et al. Nitrogen processing gradients in subsurface-flow treatment wetlands-influence of wastewater characteristics[J]. *Ecol Eng*, 2002, 18(4): 499-520.
- [25] VYMAZAL J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. *Sci Total Environ*, 2007, 380(1/2/3): 48-65.
- [26] 张太平, 陈韦丽. 人工湿地生态系统提高氮磷去除率的研究进展[J]. 生态环境, 2005, 14(4): 580-584.
- [27] GOTTSCHALL N, BOUTIN C, CROLLA A, et al. The role of plants in the removal of nutrients at a constructed wetland treating agricultural (dairy) wastewater, Ontario, Canada[J]. *Ecol Eng*, 2007, 29(2): 154-163.
- [28] 郭海瑞, 赵立纯, 窦超银. 稻田人工湿地氮磷去除机制及其研究进展[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(6): 23-26.
- [29] 吴义福, 吕锡武, 杨子萱. 浸润线可控型人工湿地的生活污水脱氮除磷性能研究[J]. 水处理技术, 2017, 43(12): 89-94.
- [30] 吴振斌, 梁威, 成水平, 等. 人工湿地植物根区土壤酶活性与污水净化效果及其相关分析[J]. 环境科学学报, 2001, 21(5): 622-624.
- [31] 杨茜. 不同处理程度农村生活污水农田消纳可行性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.