

石菖蒲对不同浓度模拟生活污水净化效果研究

黄学奇, 李 婷, 张 震*

(安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

摘 要: 为研究湿地植物在不同浓度污水条件下的净化效果, 通过模拟生活污水实验分析了石菖蒲 (*Acorus tatarinowii*) 的污水净化能力。实验设置自来水对照组 (CK) 以及 4 个污水梯度 (分别为模拟生活污水试剂用量的 25%、50%、100% 和 150%, 标记为 T1、T2、T3 和 T4), 通过分析石菖蒲生物量变化以及对污水中 TP、TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率, 研究石菖蒲对不同浓度模拟生活污水的净化效果。结果表明: (1) 石菖蒲在 5 组处理条件下都能正常生长, 生物量差异显著 ($P < 0.05$), 其中 T4 下效果最佳。石菖蒲的根长增加 CK (9.87 ± 0.16) cm > T3 (8.74 ± 0.27) cm > T1 (7.91 ± 0.45) cm > T4 (7.26 ± 0.11) cm > T2 (7.11 ± 0.07) cm; (2) 石菖蒲在模拟生活污水 TP 的去除率, 随着种植时间的增长而增加, 为 T1 (99.20%) > T2 (98.39%) > T3 (91.36%) > T4 (87.26%); TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 具有较高一致性, TN 去除率为 T1 (99.13%) > T2 (98.76%) > T3 (95.97%) > T4 (95.67%); (3) 实验期间有少量 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的产生, 总体是随时间呈先增加后减少的趋势。研究结果可为利用石菖蒲治理生活污水提供重要依据。

关键词: 石菖蒲; 模拟生活污水; 生物量; 去除率

中图分类号: X173

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2021)05-0801-06

Study on purification effect of *Acorus tatarinowii* on simulated domestic sewage with different concentrations

HUANG Xueqi, LI Ting, ZHANG Zhen

(School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: In order to study the purification effect of wetland plants under different concentrations of sewage. The sewage purification ability of *Acorus tatarinowii* was analyzed by simulating domestic sewage experiment. The experiment set up a tap water as control group (CK) and 4 sewage gradients (respectively 25%, 50%, 100%, 150% of the reagent dosage of the simulated domestic sewage, marked as T1, T2, T3, T4). By analyzing the biomass change of *Acorus tatarinowii* and the removal rate of TP, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in sewage, the purification effect of *Acorus tatarinowii* on simulated domestic sewage with different concentrations was studied. The results showed that: (1) *Acorus tatarinowii* can grow normally under the five treatment conditions, and the difference in biomass is significant ($P < 0.05$). Among which T4 had the best effect. The root length of *Acorus tatarinowii* increased CK (9.87 ± 0.16 cm) > T3 (8.74 ± 0.27 cm) > T1 (7.91 ± 0.45 cm) > T4 (7.26 ± 0.11 cm) > T2 (7.11 ± 0.07 cm); (2) The removal rate of *Acorus tatarinowii* in the simulated domestic sewage to TP increases with the increase of planting time, as T1 (99.20%) > T2 (98.39%) > T3 (91.36%) > T4 (87.26%); TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ had high consistency, the removal rate of TN was T1 (99.13%) > T2 (98.76%) > T3 (95.97%) > T4 (95.67%); (3) During the experiment, a small amount of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{NO}_2^-\text{-N}$ will be produced, and the overall trend will increase first and then decrease with time. The research results can provide an important basis for the use of *Acorus tatarinowii* to treat domestic sewage.

Key words: *Acorus tatarinowii*; simulated domestic sewage; biomass; removal rate

近年来大量未达标污水排入河道, 导致水体中氮、磷不断积累, 造成水体富营养化程度不断加深,

从而使水体原有生态平衡遭受破坏, 鱼类死亡以及水体发黑发臭^[1-2], 严重影响水体水质和景观, 导致

收稿日期: 2021-03-04

基金项目: 安徽农业大学 2020 年度研究生创新基金 (2020ysj-65) 资助。

作者简介: 黄学奇, 硕士研究生。E-mail: 1524125004@qq.com

* 通信作者: 张 震, 教授。E-mail: xjzhangzhen@163.com

其生态功能日益退化^[3]。如何有效控制生活污水导致的水体富营养化,以及如何恢复受损水质成为如今水生生态研究的重要方向。

目前物理、化学和生物等措施是控制和修复水体富营养化的重要方法^[4-5]。物理方法主要通过借助工程技术,清除污染底泥的一种方法。主要有底泥疏浚、稀释冲刷、填沙和底层曝气等措施,其优点在于见效快,但费用高,治标不治本,同时可能会破坏水体生态平衡和产生二次污染问题^[6]。化学方法是通过加入石灰来控制水体中的氮素过剩等方法来控制水体中主要营养盐类浓度^[7],或者通过添加化学药剂等控制浮游藻类密度,该类方法简单,但往往会产生水体二次污染^[8]。生物方法包括动物法、微生物法和植物法,其中动物法主要是通过鱼类和蚌类等,具有净化效果的动物来滤食浮游藻类等^[8-9]。微生物法主要是通过微生物来降解水体中氮和磷的含量^[10-11],这两种方法均具有较大的使用范围,但是其处理对象较为固定,且对于水体环境具有一定要求;植物法主要是利用生态系统的完整性补充水生植物,达到吸收物质、抑制藻类和净化污水的目的^[12],同时其通入成本与管理成本低,操作简单,对环境扰动小,已经成为水体污染防治的主要措施。

目前已经筛选紫背浮萍(*Spirodela polyrrhiza*)、美人蕉(*Canna indica* L.)和黑藻(*Hydrilla verticillata*)等^[13-15]多种不同生活型植物对于水质改善具有明显的效果,但能够净化水质,同时能够耐低温的湿地植物相关研究较少。石菖蒲(*Acorus tatarinowii*)为天南星科(*Araceae*)、菖蒲属(*Acorus* L.)的多年生草本植物,具有较强的耐寒性,地下茎能潜入泥中越冬,具有化痰开窍、化湿和胃的功效^[16],且具有良好的抑制微囊藻的作用^[17]。

本研究以石菖蒲为研究材料,采用实验室模拟生活污水的方法,研究其对不同浓度生活污水中氮、磷等净化效果,以期对石菖蒲用于生活污水的净化与修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

供试材料石菖蒲采自安徽省六安市金寨县燕子河镇张岷村(31°18'32.60"N, 115°51'39.91"E),将新鲜植株在温室内进行30 d适应性水培,去除枯枝烂根,选取生长旺盛和大小相似的植株进行污水净化实验。

实验依据贾文林^[18]采用自来水配置模拟生活污水,试剂用量如表1所示。污水中pH为7.90,

总磷浓度为5 mg·L⁻¹,总氮浓度为50 mg·L⁻¹,NH₄⁺-N浓度为50 mg·L⁻¹。参照《国家地表水环境质量标准》(GB3838—2002)^[19],除pH外,其他指标均超出地表V类水标准。

表1 模拟生活污水组成

Table 1 Composition of simulated domestic sewage

试剂	质量浓度/(g·L ⁻¹)
C ₆ H ₁₂ O ₆	0.260 2
CH ₃ COONa·3H ₂ O	0.260 2
NH ₄ Cl	0.191 0
NaHCO ₃	0.200 0
KH ₂ PO ₄	0.011 0
K ₂ HPO ₄ ·3H ₂ O	0.018 0
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.010 0
FeSO ₄ ·7H ₂ O	0.010 0
CaCl ₂ ·2H ₂ O	0.010 0

1.2 实验方法

用自来水作为对照组(CK),分别配置含模拟生活污水试剂用量的25%、50%、100%和150%生活污水,形成4组不同浓度污水实验组,记为T1、T2、T3和T4,每组处理5个重复。选取总鲜重(30.0±0.3)g的石菖蒲植株,放入装有2 L对应浓度污水的PVC桶(直径为18 cm,高为18.5 cm),置于培养箱(D12 h, 18 °C,湿度75%),培养30 d进行污水净化效果分析,每隔5 d用自来水补充蒸发水量。

1.3 测定指标及方法

实验第30天将石菖蒲从PVC桶取出,放于75 °C烘箱烘至恒重,测定生物量。在实验第0、5、10、15、20、25和30 d采集水样,测定pH、总磷(TP)、总碳(TN)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)和亚硝态氮(NO₂⁻-N)等,上述指标均参照《水与废水水质测定方法》^[20]。各项指标去除率的公式计算^[21]:

$$\text{去除率} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\%$$

式中: C₀为实验开始时实验水体中的污染物浓度含量(mg·L⁻¹); C_t为第t天时水体中的污染物浓度含量(mg·L⁻¹)。

1.4 数据统计分析

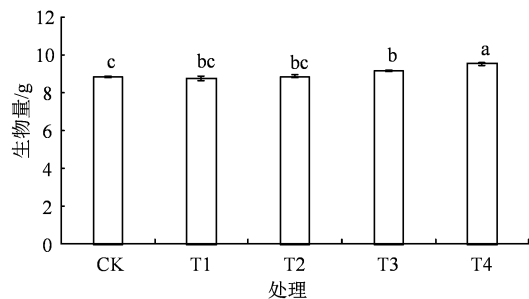
实验数据采用SPSS 26.0进行单因素ANOVA分析,使用Excel 2010作图。

2 结果与分析

2.1 不同浓度处理条件下石菖蒲生物量的变化

石菖蒲生物量随污水浓度升高总体呈上升趋势(图1)。实验期间,石菖蒲在各浓度条件下均能正

常生长,表明石菖蒲具有很强的适应能力和耐受性。T1 和 T2 组石菖蒲生物量与 CK 差异不显著 ($P>0.05$), 在短时间内 T1 和 T2 污水对石菖蒲生物量影响较小, 而 T3 和 T4 组石菖蒲生物量与 CK 差异显著 ($P<0.05$), 分别增加 3.86% 和 8.52%, 其中 T4 生物量达到 (9.50 ± 0.09) g, 表明石菖蒲在高浓度污水条件下, 能利用污水中的氮、磷, 作为营养元素供植物生长, 提高自身生物量。



图中不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同。

图 1 石菖蒲生物量

Figure 1 Biomass of *Acorus tatarinowii*

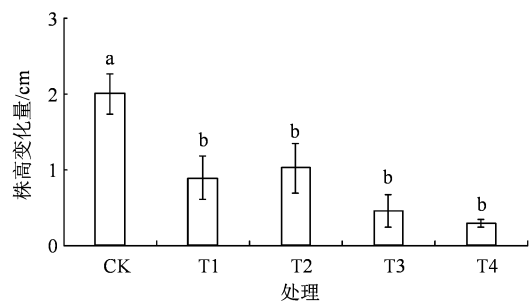


图 2 石菖蒲株高变化量

Figure 2 Variations of plant height of *Acorus tatarinowii*

表 2 不同浓度生活污水条件下 pH 变化

Table 2 Changes of pH in different concentrations of domestic sewage

实验处理	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d	25 d	30 d
CK	7.81±0.00 ^b	7.20±0.00 ^c	7.15±0.02 ^c	7.16±0.01 ^c	7.09±0.01 ^c	7.08±0.02 ^b	7.09±0.01 ^a
T1	7.77±0.00 ^b	7.16±0.00 ^c	7.59±0.07 ^b	7.38±0.04 ^c	7.21±0.02 ^{cd}	7.08±0.01 ^b	7.11±0.02 ^a
T2	7.80±0.03 ^b	7.17±0.02 ^c	8.28±0.08 ^a	8.32±0.22 ^{ab}	7.29±0.05 ^c	7.13±0.02 ^b	7.06±0.02 ^a
T3	7.90±0.01 ^a	7.34±0.02 ^b	7.45±0.02 ^b	8.54±0.20 ^a	7.84±0.08 ^b	7.21±0.02 ^a	7.08±0.02 ^a
T4	7.93±0.00 ^a	7.44±0.00 ^a	7.46±0.01 ^b	8.09±0.06 ^b	9.01±0.15 ^a	7.25±0.04 ^a	7.11±0.01 ^a

注: 同列数据 (平均值±标准误) 后不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。下同。

2.3 不同浓度处理条件下石菖蒲净化效果

2.3.1 不同浓度处理条件下石菖蒲对 pH 的影响

石菖蒲对不同实验处理水体 pH 影响较为显著 (表 2)。污水起始浓度不同, 0 d 时水体 pH 随着污水浓度的增加而增大。在石菖蒲和自然沉降的作用下, CK 中水体 pH 随着实验时间增长呈下降趋势, 实验组水体 pH 呈先下降后上升又下降的总体趋势, 最终 pH 与 CK 组接近, 原因是由于污水浓度过高,

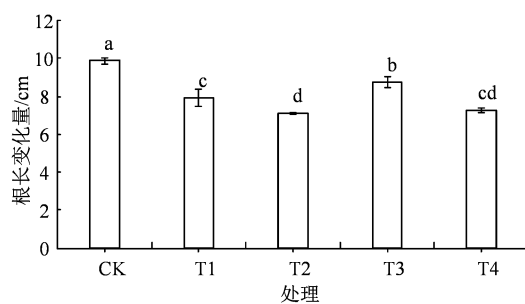


图 3 石菖蒲根长变化量

Figure 3 Variations of root length of *Acorus tatarinowii*

2.2 不同浓度处理条件下石菖蒲株高、根长变化

2.2.1 不同浓度处理条件下石菖蒲株高变化 石菖蒲株高的变化, 随着污水浓度的增加逐渐减小 (图 2), 其中 CK 株高增长达 (2.01 ± 0.26) cm, 说明短时间内, 石菖蒲在高浓度污水中需要适应时间, 短期内污水会对石菖蒲的株高有影响。实验组株高变化量与对照植株差异显著 ($P<0.05$), 实验组之间差异不显著 ($P>0.05$)。

2.2.2 不同浓度处理条件下石菖蒲根长变化 不同浓度处理对于石菖蒲根的影响较为显著 (图 3), 随着污水浓度的增加根的数量逐渐增多, 表明污水中会促进石菖蒲生根, 用于吸收水体中氮、磷。石菖蒲根长变化量在自来水中最大达 (9.87 ± 16) cm, 但根的数量相对于实验组的较少, 表明污水会一定程度限制根长的生长, 但可作为营养元素促进根的生长, 所以根长呈现先降低后上升又下降的趋势, 处理组的根长变化量与 CK 差异显著 ($P<0.05$)。

会有藻类的产生, 产生一定量的碱性物质使水体 pH 升高, 随着石菖蒲的生长对水体中氮、磷的吸收以及藻类的死亡使得 pH 下降。水体 pH 上升的最大值与污水浓度有关, 浓度越高 pH 增长的最大值越高, 表明污水浓度会对水体 pH 产生很大影响, 污水浓度越高影响越严重。对 30 d 时 pH 进行方差分析, 处理组之间差异不显著 ($P>0.05$), 表明石菖蒲可有效地改善水体 pH, 使水体 pH 达到正常水平。

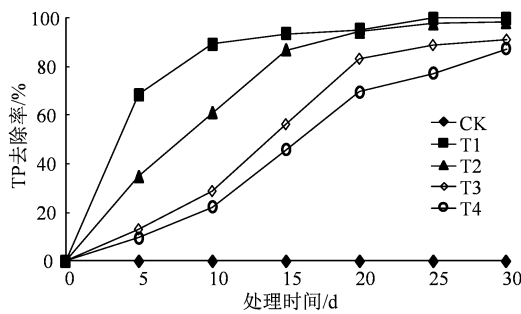


图 4 石菖蒲对模拟生活污水中 TP 去除率

Figure 4 The removal rate of TP from simulated domestic sewage by *Acorus tatarinowii*

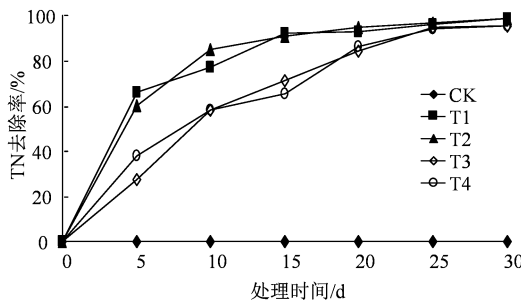


图 5 石菖蒲对模拟生活污水中 TN 去除率

Figure 5 The removal rate of TN from simulated domestic sewage by *Acorus tatarinowii*

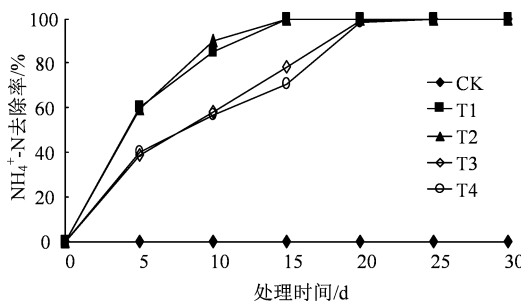


图 6 石菖蒲对模拟生活污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率

Figure 6 The removal rate of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ from simulated domestic sewage by *Acorus tatarinowii*

2.3.2 不同浓度处理条件下石菖蒲对 TP 的影响
实验初期 T1、T2 组中 TP 的去除率较高 (图 4), 15 d 后趋于缓慢, 主要原因是 T1 和 T2 组相对于 T3 和 T4 组本底值较低, 在短期内石菖蒲对 T1 和 T2 组中 TP 去除效率更好。T3 和 T4 组前期去除率

较低, 随着时间的增长, 石菖蒲适应后则变快, 后因 TP 被吸收利用水体中含量减少, 去除率趋于缓慢。实验组植物对模拟生活污水 TP 的去除均在 87.23% 以上, 其中 T1 和 T2 组的处理效果最好。对 30 d 时水体中 TP 含量进行方差分析, T3 和 T4 组与其他组差异显著 ($P < 0.05$), 表明石菖蒲在 30 d 内对 T1 和 T2 中 TP 处理效果更好。

2.3.3 不同浓度处理条件下石菖蒲对 TN 的影响

石菖蒲对实验组中 TN 的去除率稳定增加 (图 5), 分别为 95.67%、95.97%、98.76% 和 99.13%。实验初期 T1 和 T2 组中 TN 的去除率较高, 15 d 后趋于缓慢, 主要是因 T1 和 T2 组相对于 T3 和 T4 组污水浓度低, 石菖蒲单位时间内对氮的利用有限, 因而在实验初期去除率比 T3 和 T4 组高。对 30 d 生活污水中 TN 进行方差分析, T3、T4 组与其他组差异显著 ($P < 0.05$), 说明石菖蒲在 30 d 内对 T1、T2 组中 TN 处理效果更好。

2.3.4 不同浓度处理条件下石菖蒲对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的影响

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是污水中唯一氮源, 因而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率与 TN 具有较高一致性, 随着时间的逐渐增加 (图 6), 污水浓度越低, 越早达到最大累计去除率。实验中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的挥发可忽略不计, 实验中未加基质层, 因此植物的吸收以及硝化作用和反硝化作用是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除的主要方式。石菖蒲对 T1、T2 和 T3 组中 TN 的去除率较高, T4 组有少量 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 剩余, 去除率为 99.81%, 对 30 d 模拟生活污水中 TN 进行方差分析, T4 组与其他组差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3.5 不同浓度处理条件下石菖蒲对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的影响

本实验是以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 作为氮源, 随着时间的增加, 硝化细菌在好氧的条件下, 将部分 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (表 3), 后被植物吸收利用, 呈现先增加后减少的趋势。由于植物部分根系的腐败, 会使 CK 中产生少量的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 对 30 d 模拟生活污水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 进行方差分析, CK 与 T3、T4 组之间差异显著 ($P < 0.05$)。

表 3 不同浓度生活污水条件下 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 变化

Table 3 Variation of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ under different concentrations of domestic sewage

实验处理	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d	25 d	30 d
CK	0.000±0.00 ^a	0.000±0.00 ^c	0.000±0.00 ^d	0.012±0.00 ^a	0.012±0.00 ^b	0.006±0.00 ^a	0.004±0.00 ^a
T1	0.000±0.00 ^a	0.008±0.00 ^a	0.009±0.00 ^c	0.011±0.00 ^a	0.020±0.00 ^a	0.004±0.00 ^{ab}	0.002±0.00 ^{ab}
T2	0.000±0.00 ^a	0.003±0.00 ^{bc}	0.010±0.00 ^{bc}	0.011±0.00 ^a	0.018±0.00 ^a	0.003±0.00 ^b	0.002±0.00 ^{ab}
T3	0.000±0.00 ^a	0.006±0.00 ^{ab}	0.016±0.00 ^a	0.012±0.00 ^a	0.010±0.00 ^b	0.002±0.00 ^b	0.000±0.00 ^b
T4	0.000±0.00 ^a	0.008±0.00 ^a	0.011±0.00 ^b	0.012±0.00 ^a	0.018±0.00 ^a	0.002±0.00 ^b	0.000±0.00 ^b

表 4 不同浓度生活污水条件下 $\text{NO}_2\text{-N}$ 变化
Table 4 Variation of $\text{NO}_2\text{-N}$ under different concentrations of domestic sewage

实验处理	0 d	5 d	10 d	15 d	20 d	25 d	30 d
CK	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ^c	0.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ^c
T1	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ^c	0.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ^c
T2	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ^b	0.01±0.00 ^b	0.00±0.00 ^c	0.00±0.00 ^b	0.02±0.00 ^b
T3	0.00±0.00 ^a	0.02±0.01 ^a	0.02±0.01 ^a	0.03±0.01 ^a	0.04±0.00 ^b	0.01±0.00 ^b	0.03±0.00 ^a
T4	0.00±0.00 ^a	0.02±0.00 ^a	0.02±0.00 ^a	0.02±0.00 ^a	0.07±0.01 ^a	0.03±0.01 ^a	0.04±0.01 ^a

2.3.6 不同浓度处理条件下石菖蒲对 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的影响
本实验是以 $\text{NH}_4\text{-N}$ 作为氮源, 随着时间的增加, 硝化细菌在好氧条件下, 将 $\text{NH}_4\text{-N}$ 氧化为 $\text{NO}_2\text{-N}$ (表 4), 后被植物吸收利用, 呈现先增加后减少的趋势, 对 30 天模拟生活污水中 $\text{NO}_2\text{-N}$ 进行方差分析, CK 组与 T3、T4 组差异显著 ($P<0.05$)。

3 讨论与结论

植物的生长状况直接影响湿地系统的处理效率, 植物的良好生长状态, 保证了对氮、磷和有机物的处理效果^[21]。本研究在 5 组处理中石菖蒲均能正常生长, 存活率 100%, 表明石菖蒲可以适应的污水浓度范围较广, 适合用于人工湿地系统。植物的吸收、吸附、富集作用与植物的生长状况和根系发达程度成正相关^[23], 石菖蒲在实验中根系生长状况较好, 根系密度较高, 最低生长长度达(7.11±0.07) cm, 因此, 可优先考虑作为人工湿地构建的水生植物。整个实验期间, 空白组的 pH 整体呈下降的趋势, 主要是石菖蒲对水质的净化和自然的沉降, 使 pH 趋近弱碱性。实验组水体 pH 整体呈现先下降后升高又下降的趋势, 其下降原因可能是实验前期植物向水体释放酸性物质^[24], 使 pH 下降, 实验中期 pH 出现上升的趋势, 由于污水浓度过高, 藻类大量繁殖, 藻类在光照强烈的时候, 通过光合作用向水体中释放 OH^- , 使水体 pH 增加^[25]。实验后期由于石菖蒲对氮、磷的吸收以及藻类的死亡, pH 出现下降的趋势, 最终稳定在弱碱性, 说明石菖蒲能有效地调解水体 pH。

石菖蒲对 TP 的去除效果 (30 d) 受污水浓度的影响, 但 TP 的去除率都大于 87.26%, 表明石菖蒲对污水中 TP 有较好的去除效果。实验前期, TP 去除率与污水浓度呈现负相关, T1 和 T2 组去除率较快, 主要原因是 T1 和 T2 组中 TP 含量较低, 中期 T3 和 T4 组去除效率增快, 主要原因是石菖蒲根系的增多增长, 能够更好地利用水中的磷元素, 从而加快削减 TP 的含量。实验中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 是主要氮源, $\text{NH}_4\text{-N}$ 的变化与 TN 的变化具有很强的一致性, 实

验前期, 水体中 TN 去除率与污水浓度呈现负相关, 主要是因为 T3 和 T4 污水浓度过高, 水体中 TN 含量较高, 石菖蒲单位时间内的吸收量有限, 污水浓度越高, 去除率反而降低。植物对营养盐氮素的吸收和微生物的硝化-反硝化作用, 以及基质的吸附沉淀作用是 TN 去除的主要途径^[26]。随着实验的进行, TN 的去除率逐渐的增高, 主要是植物根系的生长与其的表面积的增加, 对氮的吸收及利用逐渐增强。在整个实验过程中有少量 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的产生, 主要原因是氨氮在好氧环境下可以迅速转化为低价态的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ ^[27], 其中 $\text{NO}_2\text{-N}$ 是硝化反硝化的中间产物^[28]。在整个实验过程, 石菖蒲对水体中氮和磷的去除率逐渐的增加, 说明石菖蒲可以改善水体环境, 有效去除水体中氮和磷。

综上所述, 石菖蒲在所供实验浓度条件下均能够较好的生长, 有效地改善水体中 pH 和削减水体中氮和磷的含量。石菖蒲在我国具有广泛分布, 生物量大, 且易于管理。因此, 石菖蒲可作为水体净化和水体修复工程的良好材料。关于石菖蒲净化污水的相关研究较少, 且用于实际生活污水处理较少, 今后还需多加以实践, 以便石菖蒲的实际应用及推广。

本实验结果表明, 石菖蒲在各实验污水浓度下生长状况良好, 根系发达, 叶片饱满而鲜绿, 生物量增加明显。对不同浓度模拟生活污水的 TP 和 TN 等具有显著的净化效果, 其中在 25%和 50%模拟生活污水处理效果相对 100%和 150%较好。石菖蒲不仅可以去除水体中污染物, 还具有一定的药用价值。如能将石菖蒲因地制宜, 用于湿地净化污水系统中, 利用石菖蒲将污水资源转化为生物资源和能源, 将有利于污水处理的研究。

参考文献:

- [1] 王旭,王永刚,孙长虹,等.城市黑臭水体形成机理与评价方法研究进展[J].应用生态学报,2016,27(4): 1331-1340.
- [2] 王浩,孟现勇,林晨.黑臭河道治理关键技术及其应用[J].人民长江,2020,51(11):1-9.

- [3] 杨桂山,马荣华,张路,等.中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J].湖泊科学,2010,22(6): 799-810.
- [4] 郭楠楠,齐延凯,孟顺龙,等.富营养化湖泊修复技术研究进展[J].中国农学通报,2019,35(36):72-79.
- [5] 江和龙,王昌辉,白雷雷,等.湖泊环境科学与工程技术研究进展探讨[J].湖泊科学,2020,32(5):1278-1296.
- [6] 黎明,刘德启,沈颂东,等.国内富营养化湖泊生态修复技术研究进展[J].水土保持研究,2007,14(5):374-376.
- [7] 马井泉,周怀东,董哲仁.我国应用生态技术修复富营养化湖泊的研究进展[J].中国水利水电科学研究院学报,2005,3(3):209-215.
- [8] 谢绍河,王钦贵,林伟财,等.河蚌养殖对水域环境的影响及养殖模式的优化[J].广东海洋大学学报, 2014, 34(6): 98-102.
- [9] 詹新生,王乐平.滤食性鱼类对大水面水体的净化作用分析[J].河南水产,2019(4):37-39.
- [10] 李子富,云玉攀,曾灏,等.城市污水处理厂化学强化生物除磷的试验研究[J].中国环境科学, 2014, 34(12): 3070-3077.
- [11] 李琳,岳春雷,张华,等.不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性[J].环境科学, 2019, 40(11): 4962-4970.
- [12] 刘建伟,周晓,吕臣,等.三种挺水植物对富营养化景观水体的净化效果[J].湿地科学,2015,13(1):7-12.
- [13] 于振海,陈有光,卢红,等.3种植物对养殖水体中氮磷净化作用研究[J].中国农学通报,2020,36(5):131-137.
- [14] 张雪琪,吴晖,黄发明,等.不同植物人工湿地对生活污水净化效果试验研究[J].安全与环境学报, 2012, 12(3): 19-22.
- [15] 刘淼,陈开宁.植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响[J].环境科学,2018,39(6):2706-2714.
- [16] 胡鹏跃,李国文,谢燕.熟地黄、石菖蒲防治阿尔茨海默病作用机制研究进展[J].上海中医药大学学报, 2020, 34(6): 99-104.
- [17] 张维昊,周连凤,吴小刚,等.菖蒲对铜绿微囊藻的化感作用[J].中国环境科学,2006,26(3):355-358.
- [18] 贾文林.同步硝化反硝化过程中N₂O释放特征及其机理研究[D].济南:山东大学,2013.
- [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:中国标准出版社,2002.
- [20] 魏复盛,国家环境保护总局,水和废水监测分析方法编委会.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002:701-705.
- [21] 宋红,王孔海,陈玮,等.典型水生植物对水库环境污染物去除能力的实验室模拟[J].生态学杂志, 2014, 33(1): 119-124.
- [22] 吴振斌,陈辉蓉,贺锋,等.人工湿地系统对污水磷的净化效果[J].水生生物学报,2001,25(1):28-35.
- [23] 李峰平,魏红阳,马喆,等.人工湿地植物的选择及植物净化污水作用研究进展[J].湿地科学,2017,15(6):849-854.
- [24] 马永飞,杨小珍,赵小虎,等.污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响[J].环境科学,2017,38(3):1093-1101.
- [25] 张澎浪,孙承军.地表水体中藻类的生长对pH值及溶解氧含量的影响[J].中国环境监测,2004,20(4):49-50.
- [26] 陈双,王国祥,许晓光,等.水生植物类型及生物量对污水处理厂尾水净化效果的影响[J].环境工程学报, 2018, 12(5): 1424-1433.
- [27] 张世羊,张胜花,张翔凌,等.组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析[J].环境科学, 2017, 38(6): 2419-2428.
- [28] 赵志瑞,侯彦林.半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺微生物特征研究进展[J].环境科学, 2014, 35(7): 2834-2842.