



8种乡土湿地植物对珠三角地区城市生活污水的净化效果

张润芝, 袁晓初, 徐蕾, 庄萍, 王发国

引用本文:

张润芝, 袁晓初, 徐蕾, 等. 8种乡土湿地植物对珠三角地区城市生活污水的净化效果[J]. 热带亚热带植物学报, 2026, 34(4): 418–426.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.5038>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

乡土水生植物对富营养化水体的净化效果研究

Purification of Eutrophic Water by Native Aquatic Plants

热带亚热带植物学报. 2019, 27(6): 642–648 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4047>

岩溶与非岩溶区典型植物最适光合模型和光合特征研究

Studies on Optimal Photosynthetic Biochemical Model and Photosynthetic Characteristics of Typical Plants in Karst and Non-karst Regions

热带亚热带植物学报. 2021, 29(2): 187–194 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4269>

海南不同生活型植物叶片和根系C、N、P化学计量特征

C, N, and P Concentrations and Their Stoichiometry of Leaves and Roots with Different Life Forms in Hainan Province

热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 131–135 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4115>

亚热带磷限制水库中浮游植物群落对氮磷比变化的响应

Responses of Phytoplankton Communities to N/P Ratio Changes in Phosphorus-limited Subtropical Reservoir in Southern China

热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 20–30 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4250>

地被植物对广东常绿阔叶林土壤养分的指示作用

Indicative Effect of Ground Vegetation on Soil Nutrient Status in Evergreen Broad-leaved Forest of Guangdong

热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 115–123 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4105>

向下翻页，浏览PDF全文

8 种乡土湿地植物对珠三角地区城市生活污水的净化效果

张润芝^{1,2}, 袁晓初^{1,2}, 徐蕾^{1,2}, 庄萍¹, 王发国^{1,2*}

(1. 中国科学院华南植物园, 广东省应用植物学重点实验室, 广州 510650; 2. 中国科学院大学, 北京 10140)

摘要: 为考察乡土湿地植物对当地城市污水的净化效果, 以期明晰乡土植物替代外来引种植物用于水体修复的可能性, 本研究选取 8 种广东省乡土植物: 石龙芮(*Ranunculus sceleratus*)、节节草(*Commelina diffusa*)、肾蕨(*Nephrolepis cordifolia*)、鸭舌草(*Monochoria vaginalis*)、海芋(*Alocasia macrorrhiza*)、短叶水蜈蚣(*Kyllinga brevifolia*)、水龙(*Ludwigia adscendens*)、石菖蒲(*Acorus tatarinowii*), 通过模拟水培试验, 探讨这些植物对化学需氧量(COD)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和总磷(TP)的去除效果及污水适应能力。结果表明, 湿地植物具有明显的去除水体氮磷的能力, 其去除效果随着植物种类和处理时间而改变。石龙芮、水龙和石菖蒲对磷去除效果较好, 在高浓度污水中最佳去除率分别为 92.40%、95.33%和 96.20%; 8 种供试植物对氨氮均具有较好去除效果, 需要依照植物种类和污水浓度对处理时间进行选择以获得较好的去除率。8 种乡土湿地植物均可用于修复浓度较低的生活污水, 污水浓度较高时宜选择石龙芮、水龙和石菖蒲作为修复材料, 这为珠三角地区生活污水修复的植物材料选择提供了参考。

关键词: 植物修复技术; 生活污水; 乡土湿地植物

doi: 10.11926/jtsb.5038 CSTR:32235.14.jtsb.5038

Purification Effect of 8 Native Wetland Plants on Urban Domestic Sewage in the Pearl River Delta Region

ZHANG Runzhi^{1,2}, YUAN Xiaochu^{1,2}, XU Lei^{1,2}, ZHUANG Ping¹, WANG Faguo^{1,2*}

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Applied Botany, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China)

Abstract: To investigate the purification effect of native wetland plants on local urban sewage and clarify the possibility of using native plants instead of exotic introduced plants for water body restoration, eight native plants in Guangdong Province were selected: *Ranunculus sceleratus*, *Commelina diffusa*, *Nephrolepis cordifolia*, *Monochoria vaginalis*, *Alocasia macrorrhiza*, *Kyllinga brevifolia*, *Ludwigia adscendens*, and *Acorus tatarinowii*. Through a simulated hydroponic experiment, the removal effects of these plants on chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), and total phosphorus (TP), as well as their sewage adaptation capabilities, were explored. The results showed that wetland plants had a significant ability to remove nitrogen and phosphorus from water, and their removal effects varied with plant species and treatment time. *Ranunculus sceleratus*, *Ludwigia adscendens*, and *Acorus tatarinowii* could effectively remove phosphorus, achieving optimal removal rates of 92.40%, 95.33%, and 96.20% in high-concentration sewage, respectively. All eight tested plants had good ammonia nitrogen removal effects, and the treatment time should be selected based on plant species and sewage

收稿日期: 2025-06-19 接受日期: 2025-08-30

基金项目: 广东省自然科学基金项目(2015A030308015)资助

This work was supported by the Project for Natural Science in Guangdong (Grant No. 2015A030308015).

作者简介: 张润芝(2002 年生), 女, 硕士研究生, 研究方向为植物资源。E-mail: zhangrunzhi23@mailsucas.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangfg@scbg.ac.cn

concentration to achieve better removal rates. Therefore, all eight native wetland plants could be used to restore low-concentration domestic sewage, and when the sewage concentration is high, *Ranunculus sceleratus*, *Ludwigia adscendens*, and *Acorus tatarinowii* are recommended as restoration materials. These would provide a reference for the selection of plant materials for domestic sewage restoration in the Pearl River Delta region.

Key words: Phytoremediation technology; Domestic sewage; Native wetland plant

近年来,珠江三角洲河网区域的河涌已成为城市生活污水、工业废水和上游农业污水的主要排放通道^[1-3],带来严重的生态环境问题,河涌污水并已成为全球性的污染挑战^[4]。全球约60%的城市生活污水未经处理直接排放,极易引起自然水体富营养化。即便经过处理,污水中仍常含有较高浓度的总氮和总磷,可引发水华、赤潮等现象^[5],导致水生生态系统退化及相关水源损害^[6]。现有污水处理技术中,化学法与物理法存在投资高、运维复杂等局限,而生物-生态修复技术因净化效率高、管理简便,显示出更好的应用前景。

目前,可用于污水修复的植物主要有花黑麦草(*Lolium multiflorum*)、狐尾草(*Alopecurus pratensis*)、蜈蚣草(*Pteris vittata*)、菖蒲(*Acorus calamus*)、喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)和凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)等,这些植物对生活污水中的污染物去除能力较好^[7-9]。其中,花黑麦草、喜旱莲子草等属外来植物,陈瑜等^[10]报道,花黑麦草入侵对陕西、河南、江苏、四川等地的农业生产造成了严重危害,而南方地区属于稳定入侵区。喜旱莲子草对入侵地的生态系统严重危害且具有广泛的入侵范围^[11]。张晓芝等^[12]研究表明,在极端高温环境下,黄菖蒲的生长罹受胁迫,相应的净化能力降低。可见,上述植物的修复效果受生物入侵、气候等因素的影响,在实际应用的效果方面较为薄弱。

而乡土植物适应本地环境,具有较强繁殖与生长能力^[13-14]。故从乡土湿地植物中筛选适应能力强、净化能力强的植物进行治理,能较大程度上减轻此负面效果^[15]。本研究选取广东省8种典型乡土

湿地植物,通过化学试剂配制模拟生活污水,以化学需氧量(COD)、总磷(TP)和氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)为水质指标,评估这些植物在不同浓度生活污水中的净化能力,以期为华南地区生活污水治理中的植物筛选与生态修复提供理论依据和技术参考。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试植物石龙芮(*Ranunculus sceleratus*)、节节草(*Commelina diffusa*)、肾蕨(*Nephrolepis cordifolia*)、鸭舌草(*Monochoria vaginalis*)、海芋(*Alocasia macrorrhiza*)和短叶水蜈蚣(*Kyllinga brevifolia*)采于广州市华南植物园,水龙(*Ludwigia adscendens*)采于肇庆市九坑河水库,石菖蒲(*Acorus tatarinowii*)采于肇庆市鼎湖山。

1.2 实验设计与处理

污水的污染物浓度参考广东省环境保护厅公众网公布的2016年1月至2017年3月广东省重点河流水质状况进行人工配置,取最高污染作为本试验的高浓度,反映珠三角地区河涌最差水质;取中位数为中浓度,反映珠三角地区大部分河涌水质;取中华人民共和国国家标准《地面水环境质量标准》(GB3838—2002)中的III类水作为低浓度,各污染指标实际浓度见表1。

采用静态水培实验方法,共设置1个空白对照(无植物)与3个污染浓度的处理组,即低污染(L)、中污染(M)和高污染(H)。选取8种长势良好且生长基本一致的乡土湿地植物,洗净后,于实验基地水沟中进行数天适应性培养。随后,使用水培定植篮

表1 试验用水水质特性

Table 1 Characteristics of the Tested Water

指标 Index	高浓度 (mg/L) High concentration	中浓度 (mg/L) Medium concentration	低浓度 (mg/L) Low concentration
氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)	15	2.5	1
总磷(TP)	2.5	0.5	0.2
化学需氧量(COD)	70	30	20

将植株固定于 40 cm×25 cm×30 cm 的塑料箱中,并按植物鲜重与污水体积比为 10 g:1 L 的比例投加模拟生活污水。

每个处理组均设置 3 个重复,每箱投放处于营养生长期、生物量介于 60~150 g 的植株。试验持续 30 d,每 5 d 观测 1 次植物生长状况,包括根系形态、茎叶状态、萎蔫及倒伏程度,同时测定植株鲜重与污水中的 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 浓度。试验过程中依蒸发情况补充去离子水以维持水量恒定。试验在华南植物园水生植物实验大棚内进行,塑料箱随机排列,棚内温度、湿度等环境条件均尽量保持与自然环境一致。

1.3 方法

水样的 COD 的测定采用重铬酸钾法; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的测定采用纳氏试剂光度法;TP 的测定采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法^[16]。

在测定污水的污染物浓度的同时,进行水体污染物的去除率(η)计算, $\eta=(C1Q1-C2Q2)/C1Q1\times 100\%$,式中, η 为污染水体中污染物的去除率; $C1$ 、 $C2$ 分别为水体的起始、终止浓度(mg/L); $Q1$ 、 $Q2$ 分别为水体的起始、终止水量。

每 5 d 测定 1 次植物的鲜重,控干根部水分,称量整株植物的重量,每种植物的 3 个重复即每盆植物的重量取平均值,并计算每个观察周期植物鲜重改变的比例。

1.4 数据的统计分析

采用 SPSS 22.0 进行数据处理和统计分析,显著性水平设置为 $P<0.05$,采用 Excel 2019、Origin 2021 进行图表制作。

2 结果和分析

2.1 8 种湿地植物对污水中 COD 的去除效果

在高浓度污水中,对照在 10 d 时第 1 次将污水中的 COD 含量降至地表水环境质量标准(GB3838—2002) III 类水标准(COD 含量 ≤ 20 mg/L)之下,而随后 COD 含量又急剧上升,到 25 d 时重新将污水中的 COD 降至 III 类水标准之下。在中浓度污水中,对照在 20 d 时将污水中的 COD 含量降至 III 类水标准之下。结果表明,废水中大部分有机物的最终归宿是被异养微生物转化为微生物体及 CO_2 和 H_2O ^[19-20],因此,本研究对照 COD 含量的降低可能是由于菌藻微生物的侵入和繁殖而产生

的作用。

由图 1 可见,在高浓度生活污水,肾蕨经 10 d 和 20 d、石龙芮在 10~15 d、石菖蒲 10~30 d、节节草 20 d 将 COD 降至 III 类水标准以下。在中浓度污水中,肾蕨在 10~15 d、石龙芮 10~25 d、水龙 15 和 25 d、石菖蒲 10~30 d、节节草 20 d、海芋 25 d、短叶水蜈蚣 20 d 将污水中 COD 含量降至 III 类水标准以下。

在空白对照污水 COD 含量稳定降至 III 类水标准时间之前,即高浓度污水 25 d、中浓度污水 20 d,对植物处理和对照的去除率进行比较。在高浓度污水处理中,植物处理与对照的差异不显著($P>0.05$)。中浓度污水中,处理 5 d 时,海芋、鸭舌草、短叶水蜈蚣处理与对照有显著差异($P<0.05$),其中海芋达极显著差异($P<0.01$),对 COD 的去除率分别为 49.05%、37.67%和 36.84% (表 2)。除短叶水蜈蚣处理 15 d 时,与对照间有极显著差异($P<0.01$)外,其对 COD 的去除率为 87.59%,植物处理 10、15 d 时均与对照的差异不显著($P>0.05$)。因此,中浓度污水中,海芋、鸭舌草、短叶水蜈蚣处理 5 d 对 COD 的去除效果较好,去除率分别为 49.05%、37.67%、36.84%,但这 3 种植物处理 5 d 的污水中 COD 含量并没有降至 III 类水标准之下。从各处理对高、中浓度污水 COD 的最佳去除率来看,植物处理和对照间的差异不显著($P>0.05$),说明植物在本实验条件下对污水中 COD 的最佳去除率没有表现出显著效果。因此,本实验中选取的 8 种植物并没有对 COD 的显著去除能力。

2.2 8 种湿地植物对污水中氮的去除效果

对照组分别在 30 d 和 15~30 d 将高、中浓度污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量降至地表水环境质量标准(GB3838—2002) III 类水标准($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量 ≤ 1.0 mg/L)之下。本实验在室外条件下开展,且人工模拟污水是以自来水配制,因此在实验过程中可能存在环境中菌藻等微生物的侵入与繁殖。推测微生物所驱动的反硝化作用成为该体系中氨氮去除的主要途径,这可能是导致对照中氨氮浓度出现变化的原因。

在高浓度污水中,肾蕨、石菖蒲在 10 d 和 20~30 d,石龙芮、水龙、节节草在 10~30 d,鸭舌草在 5 d 将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量降至 1 mg/L 之下。中浓度污水中,除肾蕨在 10 d 后,其余植物均在 5 d 后即将其含量降至 1 mg/L 之下(图 2)。

在对照组将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量降至 III 类水标准时间

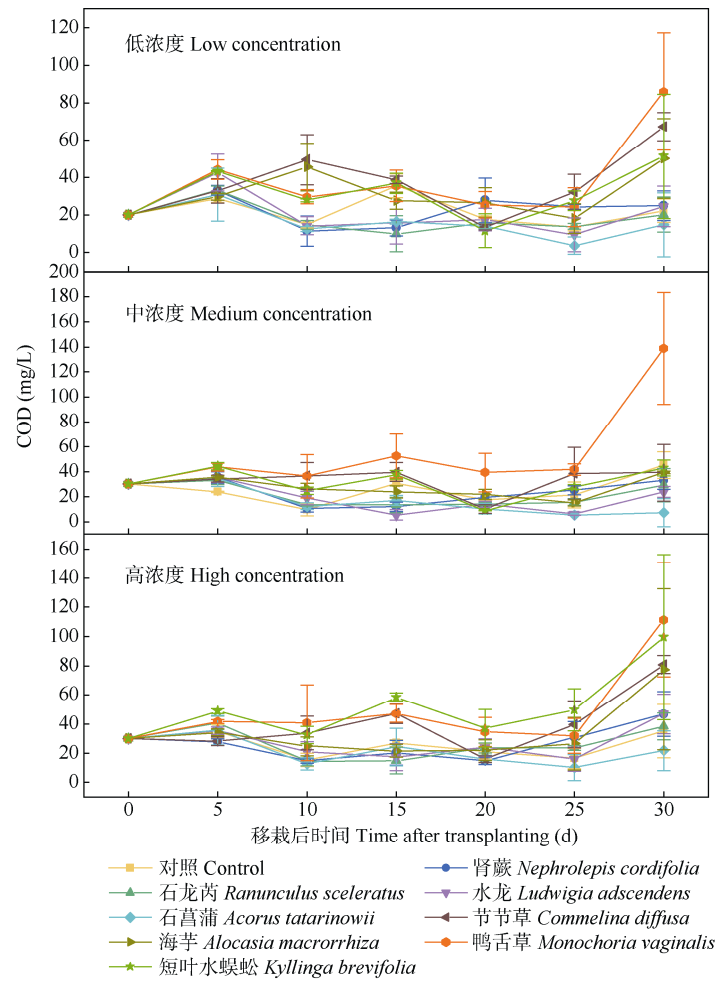


图 1 乡土湿地植物对污水中化学需氧量(COD)的影响

Fig. 1 Effect of native wetland plants on chemical oxygen demand (COD) in domestic sewage

表 2 植物对中浓度污水中 COD 的去除率和降解系数

Table 2 Removal rate and degradation coefficient of COD in sewage with medium concentration by plants

植物	5 d			10 d			15 d			20 d		
	去除率 /%	降解 系数	<i>P</i>	去除率 /%	降解 系数	<i>P</i>	去除率 /%	降解 系数	<i>P</i>	去除率 /%	降解 系数	<i>P</i>
对照	66.12	0.22		86.62	0.21		55.98	0.05		75.14	0.07	
肾蕨	49.50	0.14	0.423	85.05	0.19	1.000	82.98	0.12	0.526	72.62	0.07	1.000
石龙芮	52.67	0.15	0.166	80.54	0.16	0.951	80.81	0.11	0.363	79.70	0.08	0.256
水龙	48.95	0.14	0.183	72.87	0.13	0.816	92.31	0.18	0.551	79.73	0.08	0.736
石菖蒲	50.70	0.14	0.404	82.76	0.18	0.996	75.86	0.10	0.212	85.33	0.10	0.598
节节草	51.05	0.14	0.087	47.78	0.07	0.462	43.32	0.04	0.738	85.94	0.10	0.478
海芋	49.05	0.13	0.001	62.65	0.10	0.595	65.78	0.07	0.748	68.78	0.06	0.702
鸭舌草	37.67	0.09	0.026	47.95	0.07	0.491	24.92	0.02	0.550	43.90	0.03	0.500
短叶水蜈蚣	36.84	0.09	0.018	64.78	0.10	0.619	46.44	0.04	0.560	87.59	0.10	0.001

之前, 即高浓度污水中 30 d、中浓度污水 15 d 前, 对植物处理和对照组的去除率进行比较(表 3)。可以看出, 供试植物对不同浓度梯度的污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率表现显著差异。在高浓度污水中, 肾蕨处理 15 d 时的去除率最高, 为 99.80%, 而在中浓度污水中, 石菖蒲处理 10 d 时的去除率最高, 为 99.47%。对各处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 最佳去除率进行分析, 植物处理和对照间的差异不显著($P>0.05$), 说明植物在本实验条件下对污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的最佳去除率没有表现出显著效果。

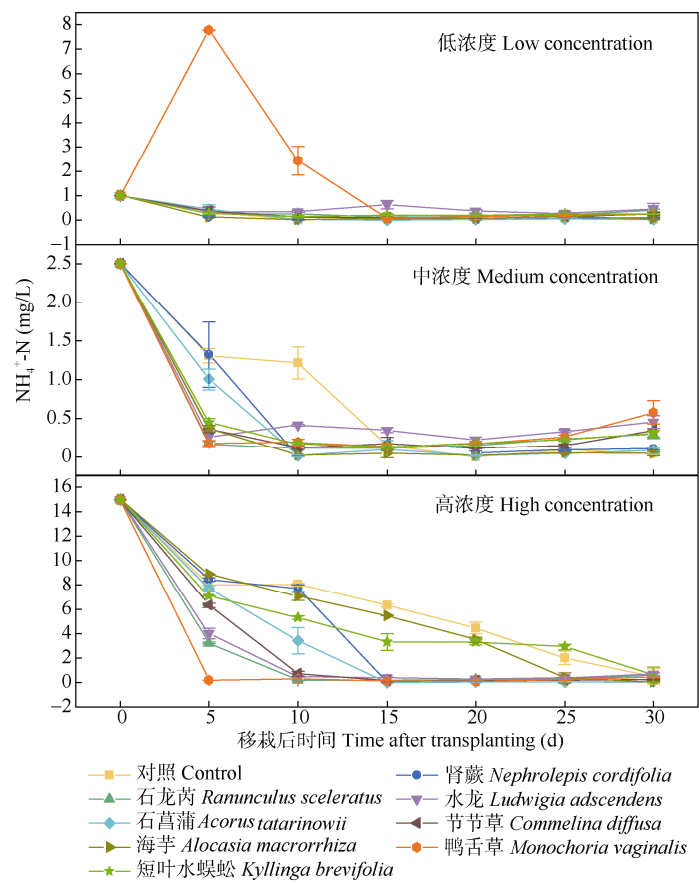


图 2 乡土湿地植物对污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的影响

Fig. 2 Effect of native wetland plants on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content in domestic sewage

表 3 植物对污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的最佳去除率

Table 3 Best removal rate of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in sewage by plants							
污水浓度 Sewage concentration	植物 Species	最佳去除率 /% Best removal rate	<i>P</i>	污水浓度 Sewage concentration	植物 Species	最佳去除率 /% Best removal rate	<i>P</i>
高	对照	96.73		中	对照	99.60	
	肾蕨	99.80	0.970		肾蕨	98.00	0.555
	石龙芮	98.76	0.998		石龙芮	95.60	0.087
	水龙	98.11	1.000		水龙	91.07	0.060
	石菖蒲	99.78	0.971		石菖蒲	99.47	0.986
	节节草	99.02	0.995		节节草	95.33	0.072
	海芋	99.51	0.982		海芋	99.47	0.986
	鸭舌草	98.73	0.998		鸭舌草	94.93	0.185
	短叶水蜈蚣	90.09	0.993		短叶水蜈蚣	94.80	0.225

2.3 8 种湿地植物对污水中磷的去除效果

高浓度和中浓度污水中，对照在 30 d 内都没将污水的 TP 含量降至地表水环境质量标准(GB3838—2002) III 类水标准(TP 含量 $\leq 0.2\text{mg/L}$)之下。

而在高浓度污水中，石龙芮在 20~30 d，石菖蒲、水龙 25~30 d 将 TP 含量降至 0.2 mg/L 之下；中浓度污水中，除海芋在 15~30 d 将 TP 含量降至

0.2 mg/L 之下外，肾蕨、石龙芮、水龙、节节草、石菖蒲在 20 d、鸭舌草在 25 d、短叶水蜈蚣在 25~30 d 降至 0.2 mg/L 之下(图 3)。

植物处理对 TP 的去除速率略快于对照，说明植物吸收与吸附对 TP 的去除有一定的作用。在对照将 TP 含量降至 III 类水标准时间之前，即高、中浓度 30 d 前，比较植物处理和对照的去除率(表 4)。

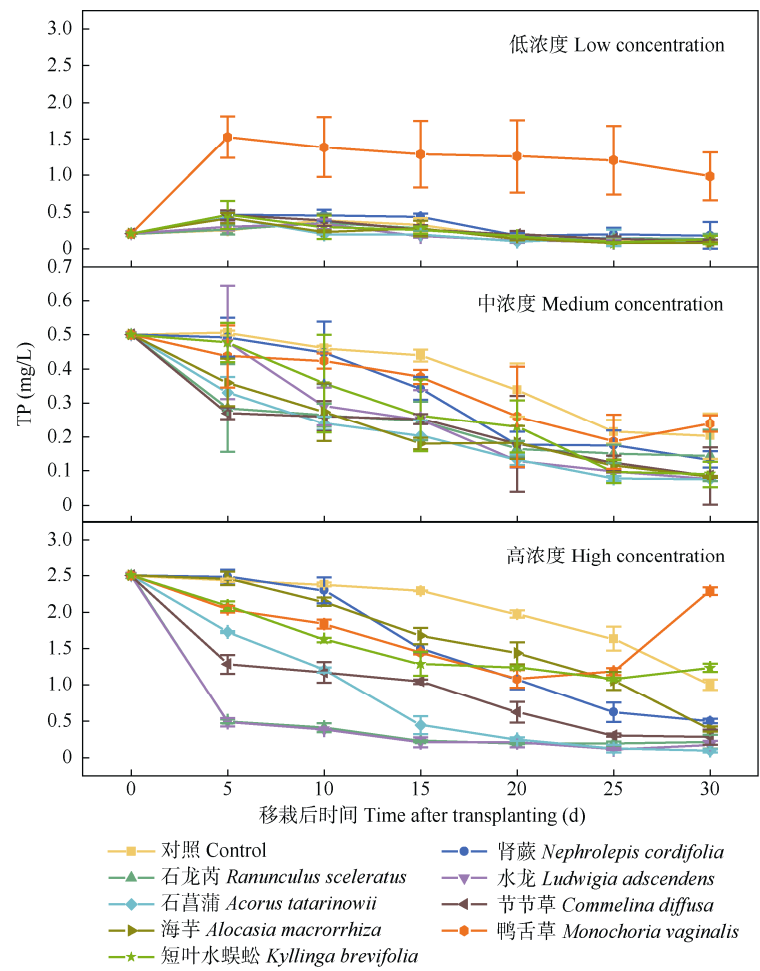


图 3 乡土湿地植物对污水中总磷(TP)含量的影响

Fig. 3 Effect of native wetland plants on total phosphorus (TP) content in domestic sewage

表 4 植物对污水中 TP 的去除率(%)

污水浓度 Sewage concentration		植物 Species	5 d	10 d	15 d	20 d	25 d	30 d
高		对照	-1.40	-8.40	8.20	21.00	34.60	60.00
		肾蕨	0.67	-12.13	87.47	57.13	75.13	57.73
		石龙芮	73.47	75.60	90.93	92.20	92.40	91.40
		水龙	90.27	84.67	91.60	91.60	95.33	93.20
		石菖蒲	30.93	51.73	82.27	89.93	95.13	96.20
		节节草	48.67	61.87	58.27	78.60	83.53	88.80
		海芋	-2.53	-1.73	32.93	42.60	57.73	77.40
		鸭舌草	18.27	18.53	42.27	56.80	63.33	20.73
		短叶水蜈蚣	16.67	35.20	48.40	50.33	56.67	50.53
中		对照	-1.00	-17.00	12.00	65.00	57.00	59.50
		肾蕨	-18.67	-69.33	-268.67	64.67	65.00	73.33
		石龙芮	28.00	19.33	50.67	67.00	70.00	71.00
		水龙	4.67	42.00	50.00	74.33	80.33	85.00
		石菖蒲	54.00	52.00	59.33	73.33	84.67	85.00
		节节草	46.00	15.33	49.33	25.67	75.33	73.33
		海芋	28.00	25.33	64.00	63.33	77.00	83.33
		鸭舌草	12.67	15.33	4.67	31.33	62.67	-68.00
		短叶水蜈蚣	4.67	28.67	47.33	54.00	80.67	77.00

高浓度污水中,水龙处理 5~25 d 对 TP 的去除率最高;石菖蒲处理 30 d 时对 TP 的去除率最高,植物对 TP 的去除率与对照具显著差异;在中浓度污水中,石菖蒲处理 5、10 d 与对照间有显著差异,对 TP 的去除率分别为 54% 和 52%;肾蕨处理 15 d 时对 TP 的去除率为 268.67%,显著低于对照。植物处理 20~30 d 与对照间的差异不显著 ($P>0.05$)。从各处理的 TP 的最佳去除率来看,植物处理和对照间的差异不显著 ($P>0.05$),说明植物在本实验条件下对污水中 TP 的最佳去除率没有表现出显著效果。

2.4 植物生长状况

试验过程中每 5 d 观测植物生长状况,包括根系、茎叶、萎蔫程度和倒伏状况。8 种植物在不同污染浓度污水中的生长状况差异不大,其中水龙、石菖蒲、节节草、石龙芮表现优秀,植株生长良好且有新根生长,肾蕨在后期略有枯萎且根系发黑腐烂;海芋在后期略有枯萎但有少量新根生长;鸭舌草、短叶水蜈蚣在初期有枯萎但后期生长状况好转并有新根生长。

从图 4 可见,石龙芮在高浓度污水中重量随时间延长差异显著 ($P<0.05$),其鲜重在 10~25 d 达到峰值,此后由于植株中下部枯萎而重量减少。

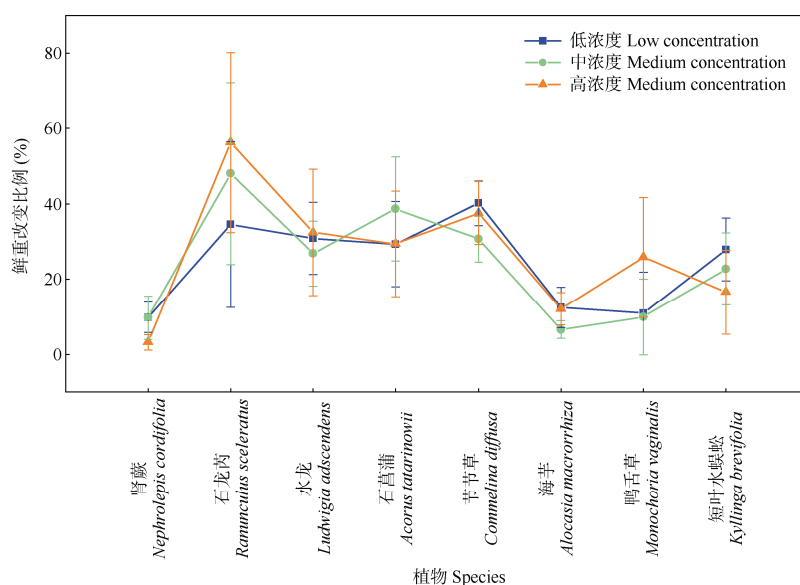


图 4 植物在不同浓度污水中鲜重的变化

Fig. 4 Changes in plant fresh weight grown in sewage with different concentration

3 讨论和结论

湿地植物的生长状况直接影响到污水中污染物的去除效率,湿地植物的良好生长状态,保证了对氮、磷和有机物的处理效果^[17]。植株生长越旺盛,根系越发达,其净化污水的能力、输氧和穿透作用越大。本研究中的 8 种湿地植物在 3 个浓度污水中均可生长,存活率为 100%,其中,水龙、石菖蒲、节节草、石龙芮在试验条件下植株生长状况良好,适应能力较强。

本研究中 8 种湿地植物对 COD 的去除率并无显著性差异,对有机物的去除没有明显的效果,这与胡勇等有^[18]的研究结果相同,中浓度下海芋、鸭舌草、短叶水蜈蚣在处理 5 d 时与对照相比有显著差

异,但此时处理后污水的 COD 含量并未达到 III 类水标准之下。Yang 等^[21]认为植物的存在显著地促进了 COD 的去除,但不同湿地植物对 COD 的去除并无显著性差异。废水中大部分有机物的最终归宿是被异养微生物转化为微生物体及 CO₂ 和 H₂O^[19-20]。但湿地植物对微生物群落结构具有显著影响,能够影响有机物的降解^[19]。因此推测本试验中对照组 COD 含量降低来源于菌藻微生物的侵入和繁殖的影响。

污水中氮的去除主要通过植物的吸收及微生物的硝化和反硝化作用^[22-24]。试验期间用水的 pH 值维持在 6.8~7.8,基本可不计需在体系 pH>8.0 下通过挥发损失的 NH₄⁺-N^[25]。氮素浓度对植物光合作用具有一定影响^[26]。有植物处理对 NH₄⁺-N 的去除速率略快于对照,说明污水中的 NH₄⁺-N 作为植

物生长过程中不可缺少的物质可以直接被植物吸收,合成蛋白质与有机氮。本试验中,在高浓度污水中,去除效果较好的植物和处理时间为:肾蕨 25 d、石龙芮 15~20 d、水龙 10~20 d、石菖蒲 20 d、节节草 15~20 d、鸭舌草 5~15 d;在中浓度污水中,去除效果较好的植物和处理时间为:石龙芮 5~10 d、石菖蒲 10 d、节节草 5~10 d、海芋 5~10 d、鸭舌草 10 d、短叶水蜈蚣 5 d。较高生物量有利于植物从污水中提取更多的氮^[27],石龙芮在高浓度污水中重量随时间变化差异显著,在鲜重达到峰值时对 TP 的去除效果较好;水龙、石菖蒲、节节草、石龙芮在试验期间表现优秀,植株生长良好且生新根,因此具有较好的脱氮效果。

植物对于污水中的 TP 的去除主要依靠自然沉淀、植物的吸收和根际微生物的降解^[28]。本研究为静态水培试验,不存在基质层,因此推测 P 的去除主要通过植物根系吸附及微生物,且 P 是植物必需的营养元素之一,是植物合成核酸、磷脂、磷酸腺苷等化合物的重要组成成分。在 TP 的去除中,高浓度污水中对 TP 去除效果较好的植物与处理时间是:石龙芮 20~30 d、水龙 25~30 d、石菖蒲 25~30 d。在中浓度和高浓度污水处理下,肾蕨对污水中 TP 去除率较低,可能是由于肾蕨在污水中生长状况较差,植物鲜重变化不显著,试验后期根系略微发黑腐烂,摄取磷的能力减弱;而石龙芮、水龙、石菖蒲在污水中生长状况良好,对磷的吸收能力较好。

在高、中浓度污水环境中,将各处理组水中氨氮、总磷去除效果较好的植物及处理时间汇总。在选取植物的最佳处理时间时,如果对氨氮与总磷的最佳处理时间有交集,即选取交集;如果没有交集,考虑到水中氨氮在被净化至目标水质后无反弹现象,就选择总磷的最佳处理时间作为植物的最佳处理时间。据此原则,在高浓度污水中选取石龙芮 20 d、水龙 25 d、石菖蒲 25 d 的净化效果较好。中浓度污水中选取石龙芮 5~10 d、石菖蒲 10 d、节节草 5~10 d、海芋 5~10 d、鸭舌草 10 d、短叶水蜈蚣 5 d 对污水中氨氮、总磷的去除效果较好。

综上,不同植物处理不同时间下对污水中污染物的去除效果不一样。乡土湿地植物对污水中污染物的去除效果优于对照,不同乡土湿地植物对污水中污染物的去除能力有差异。在低浓度污水中,即在 III 类水体中,8 种供试植物均可正常生长。在中浓度污水中,即在珠三角地区大部分地块中,可选用对氨氮去

除效果较好的石龙芮、石菖蒲、节节草、海芋、鸭舌草、短叶水蜈蚣 6 种植物,并分别在 5~10、10、5~10、5~10、10 和 5 d 收割以获得最快的去除效果。在高浓度污水中,即在珠三角地区污染较严重地块中,可选用对氨氮、总磷都有良好去除效果,且生长状况优秀的石龙芮、水龙、石菖蒲 3 种植物,并分别在 20、25 和 25 d 收割可获得最佳的去除效果。

参考文献

- [1] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Bulletin on the State of the National Environment in 2015 [R]. Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, 2015. [中华人民共和国环境保护部. 2015 年全国环境状况公报 [R]. 中华人民共和国环境保护部, 2015. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201606/t20160602_353138.htm]
- [2] LIU X. Development and practice of water body restoration technology for urban water environment remediation [J]. Water Wastewater Eng, 2015, 51(5): 1-5. [刘翔. 城市水环境整治工作修复技术的发展与实践 [J]. 给水排水, 2015, 51(5): 1-5. doi: 10.3969/j.issn.1002-8471.2015.05.001.]
- [3] WANG Y J, XIAO Y T, ZENG C W. Study on the repaired method of Black-Odor River and its application [J]. J Water Resour Res, 2015, 4(5): 464-469. [王艳杰, 肖羽堂, 曾楚雯. 黑臭河涌的修复方法及应用研究 [J]. 水资源研究, 2015, 4(5): 464-469. doi: 10.12677/JWRR.2015.45057.]
- [4] WANG C, ZHENG S S, WANG P F, et al. Effects of vegetations on the removal of contaminants in aquatic environments: A review [J]. J Hydrodyn, 2014, 26(4): 497-511. doi: 10.1016/S1001-6058(14)60057-3.
- [5] XU L, CHEN S Y, ZHUANG P, et al. Purification efficiency of three combinations of native aquatic macrophytes in artificial wastewater in autumn [J]. Int J Environ Res Public Health, 2021, 18(11): 6162. doi: 10.3390/ijerph18116162.
- [6] XU L, CHENG S Y, ZHUANG P, et al. Assessment of the nutrient removal potential of floating native and exotic aquatic macrophytes cultured in swine manure wastewater [J]. Int J Environ Res Public Health, 2020, 17(3): 1103. doi: 10.3390/ijerph17031103.
- [7] PAN X, YE S F, ZHENG X C, et al. Purification effect of four plant combinations on combined water pollution of eutrophication and heavy metals [J]. Environ Eng, 2023, 41(7): 69-75. [潘霞, 叶舒帆, 郑晓茶, 等. 4 种植物组合对富营养化和重金属复合污染水体的净化效果 [J]. 环境工程, 2023, 41(7): 69-75. doi: 10.13205/j.hjgc.202307010.]
- [8] YING H. Research on phytoremediation treatment for nitrogen, phosphorus and COD in domestic wastewater [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019. [英河. 生活污水中氮、磷、COD 污染的植物修复研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2019. doi: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2019.001096.]

- [9] LAI W L, HU J F, CHEN Z H. Eco-physiological characteristics and decontamination efficiency of four emergent macrophytes [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2010, 18(4): 421–427. [赖闻玲, 胡菊芳, 陈章和. 四种挺水植物生理生态特性和污水净化效果研究 [J]. 热带亚热带植物学报, 2010, 18(4): 421–427. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2010.04.016.]
- [10] CHEN Y, YANG Y Z, CHEN L L, et al. Analysis of the invasion risk for *Lolium multiflorum* Lam. based on niche model [J]. *J Shaanxi Norm Univ (Nat Sci)*, 2024, 52(1): 70–78. [陈瑜, 杨毅哲, 陈丽丽, 等. 基于生态位模型的多花黑麦草入侵风险分析 [J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 70–78. doi: 10.15983/j.cnki.jnsu.2024207.]
- [11] HOU Q C, FENG Y L, ZHOU Y J, et al. Main hypotheses on mechanisms underlying plant invasion: A review [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2022, 33(11): 3105–3115. [侯清晨, 冯燕楼, 周玉洁, 等. 植物入侵机制的主要假说 [J]. 应用生态学报, 2022, 33(11): 3105–3115. doi: 10.13287/j.1001-9332.202211.005.]
- [12] ZHANG X Z, LIU M, WANG X W, et al. Effects of high temperature on purification of aquatic ornamental plant combination treating eutrophic water [J]. *J Nanjing Agric Univ*, 2025, 48(3): 528–537. [张晓芝, 刘敏, 王小文, 等. 高温对水生观赏植物组合修复富营养化水体效果的影响 [J]. 南京农业大学学报, 2025, 48(3): 528–537. doi: 10.7685/jnau.202402012.]
- [13] MA J X. Application and landscape analysis of native plants in urban greening [J]. *Mol Plant Breed*, 2023, 21(24): 8290–8294. [马金鑫. 乡土植物在城市绿化中的应用与景观分析 [J]. 分子植物育种, 2023, 21(24): 8290–8294. doi: 10.13271/j.mpb.021.008290.]
- [14] JANSSEN A B G, TEURLINCX S, AN S Q, et al. Alternative stable states in large shallow lakes? [J]. *J Great Lakes Res*, 2014, 40(4): 813–826. doi: 10.1016/j.jglr.2014.09.019.
- [15] NAHLIK A M, MITSCH W J. Tropical treatment wetlands dominated by free-floating macrophytes for water quality improvement in Costa Rica [J]. *Ecol Eng*, 2006, 28(3): 246–257. doi: 10.1016/j.ecoleng.2006.07.006.
- [16] State Environmental Protection Administration, Editorial Committee of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods. Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 701–705. [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]. 第 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 701–705.]
- [17] WU Z B, CHEN H R, HE F, et al. Primary studies on the purification efficiency of phosphorus by means of constructed wetland system [J]. *Chin J Hydrobiol*, 2001, 25(1): 28–35. [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. doi: 10.3321/j.issn:1000-3207.2001.01.004.]
- [18] HU Y Y, WANG X, ZHANG T P, et al. Screening of plants in constructed wetland with low-concentration domestic wastewater in south China [J]. *J S China Univ Technol (Nat Sci)*, 2006, 34(9): 111–116. [胡勇有, 王鑫, 张太平, 等. 用低浓度生活污水筛选适于华南人工湿地的植物 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2006, 34(9): 111–116. doi: 10.3321/j.issn:1000-565X.2006.09.023.]
- [19] LU J, YANG Y, YIN Z J, et al. Treatment of small town mixed sewage by the combined process of biological methods and constructed wetlands [J]. *Chin J Environ Eng*, 2010, 4(6): 1262–1266. [卢建, 杨扬, 尹振娟, 等. 生物法-人工湿地组合工艺处理小城镇混合污水研究 [J]. 环境工程学报, 2010, 4(6): 1262–1266.]
- [20] WEN Y, ZHOU Q, JIANG L Y, et al. Degradation characteristics of organic substances in polluted surface waters treatment with horizontal subsurface flow constructed wetlands [J]. *China Environ Sci*, 2007, 27(4): 508–512. [闻岳, 周琪, 蒋玲燕, 等. 水平潜流人工湿地对污水中有机物的降解特性 [J]. 中国环境科学, 2007, 27(4): 508–512. doi: 10.3321/j.issn:1000-6923.2007.04.016.]
- [21] YANG Q, CHEN Z H, ZHAO J G, et al. Contaminant removal of domestic wastewater by constructed wetlands: Effects of plant species [J]. *J Int Plant Biol*, 2007, 49(4): 437–446. doi: 10.1111/j.1744-7909.2007.00389.x.
- [22] VYMAZAL J. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience [J]. *Ecol Eng*, 2002, 18(5): 633–646. doi: 10.1016/S0925-8574(02)00025-3.
- [23] CAO W P, ZHANG Y Q. Removal of nitrogen (N) from hypereutrophic waters by ecological floating beds (EFBs) with various substrates [J]. *Ecol Eng*, 2014, 62: 148–152. doi: 10.1016/j.ecoleng.2013.10.018.
- [24] LI X, LI Y Y, LI Y, et al. The phytoremediation of water with high concentrations of nitrogen and phosphorus contamination by three selected wetland plants [J]. *J Water Process Eng*, 2021, 40: 101828. doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101828.
- [25] LU S Y, JIN X C, YU G. Nitrogen removal mechanism of constructed wetland [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, 26(8): 2670–2677. [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. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2006.08.033.]
- [26] BAI J S, TANG H R, LOU Y J. Effects of water depth and nitrogen addition on functional traits of wetland plants: A review [J]. *Chin J Ecol*, 2021, 40(9): 2987–2995. [白江珊, 唐浩然, 娄彦景. 水深和氮添加对湿地植物功能性状的影响研究进展 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(9): 2987–2995. doi: 10.13292/j.1000-4890.202109.002.]
- [27] 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. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.10.070.
- [28] KUMARS, DESWAL S. Phytoremediation capabilities of *Salvinia molesta*, water hyacinth, water lettuce, and duckweed to reduce phosphorus in rice mill wastewater [J]. *Int J Phytorem*, 2020, 22(11): 1097–1109. doi: 10.1080/15226514.2020.1731729.