



文章栏目: 水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201811074

中图分类号 X703.1

文献标识码 A

谢东升, 朱文逸, 陈劲鹏, 等. 5 种华南地区水生植物对城市生活污水的净化效果[J]. 环境工程学报, 2019, 13(8): 1903-1908.
XIE Dongsheng, ZHU Wenyi, CHEN Jinpeng, et al. Effects of five aquatic plants in South China on purification of municipal wastewater[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(8): 1903-1908.

5 种华南地区水生植物对城市生活污水的净化效果

谢东升^{1,2}, 朱文逸³, 陈劲鹏³, 袁晓初^{1,4}, 徐蕾^{1,4}, 王发国^{1,*}

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. 仲恺农业工程学院园艺园林学院, 广州 510225

3. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642

4. 中国科学院大学, 北京 100049

第一作者: 谢东升(1994—), 男, 硕士研究生。研究方向: 园林植物与观赏园艺。E-mail: xiedongsheng@scbg.ac.cn

*通信作者: 王发国(1978—), 男, 博士, 副研究员。研究方向: 植物分类与资源探究。E-mail: wangfg@scbg.ac.cn

摘要 为考察乡土植物对当地生活污水的净化效果, 探究乡土植物替代外来引种植物应用于水体修复的可能性, 选取聚花草 (*Floscopa scandens*)、疏穗莎草 (*Cyperus distans*)、线叶水芹 (*Oenanthe linearis*)、石龙芮 (*Ranunculus sceleratus*) 和鱼腥草 (*Houttuynia cordata*) 5 种广东省乡土植物, 以不同浓度梯度的自配溶液模拟生活污水, 分析几种植物对化学需氧量 (COD)、总氮 (TN)、氨氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 和总磷 (TP) 的去除效果。结果表明, 5 种乡土植物对生活污水均具有明显的净化效果, 且各植物之间净化效果差异显著。疏穗莎草处理生活污水的效果最好, 高浓度污水处理下, 对 COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 的去除率分别为 89.56%、82.66%、88.89% 和 83.32%(20 d); 鱼腥草对 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果明显, 各浓度污水处理下, 其对 TN 的去除率为 83.52%~85.50%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率为 77.40%~89.33%, 但对磷元素的净化效果较差, 适合治理高氮低磷污染类型; 聚花草对 TP 的去除效果明显, 不同浓度梯度污水处理下, 其去除率最高可达 91.43%, 建议应用于低氮高磷的生活污水治理。

关键词 植物修复技术; 生活污水净化; 水体修复

人类生活过程中产生的污水, 是水体的主要污染源之一, 其特点是含有大量的氮、磷等元素, 易造成江河湖海的富营养化。现今水华、赤潮等水体污染灾害频发, 使得从源头治理生活污水成为亟待解决的问题^[1]。目前, 已有不少学者利用植物修复技术治理生活污水, 利用绿色植物来转移、容纳或转化污染物使其对环境无害化, 并取得了不错的效果。用于植物修复的大部分水生植物集中在水葫芦 (*Eichhornia crassipes*)、粉绿狐尾藻 (*Myriophyllum aquaticum*)、大藻 (*Pistia stratiotes*) 等常见种, 他们净化效果突出, 却也是外来引种植物, 如人为管控不足或缺乏清理, 在富营养化水体中极易引起种群大爆发, 挤占当地植物生态位, 对水体造成二次危害。因此, 越来越多的学者尝试向本地乡土植物方向开展研究, 寻求以乡土植物改善或取代外来种修复污水的长久之计。杨立红等^[2]对紫萼 (*Hosta ventricosa*)、鸭舌草 (*Monochoria vaginalis*)、泽泻 (*Alisma orientale*) 等 5 种乡土植物进行植物修复研究, 发现 5 种植物对富营养化水体均有明显的净化作用, 在水体中生长

收稿日期: 2018-11-12; 录用日期: 2019-03-20

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (2015A030308015); 中国科学院大学生创新实践训练计划; 广东省省级科技计划项目 (2015A020220011); 中科院 A 类战略性先导科技专项 (XDA13020500)

5 d时总氮去除率均在80%以上,总磷去除率(10 d)也达到70%以上。吕建国等^[3]以灯心草(*Juncus effusus*)、菖蒲(*Acorus calamus*)、金针菜(*Heremacallis fulva*)、香茶菜(*Isodon inflexus*)4种乡土植物为实验材料,研究其对洱海水体中氮、磷的净化效果,发现4种植物对洱海水体总氮的去除率均在65%以上,总磷的去除率超过72.88%。高吉喜等^[4]研究认为,慈菇(*Sagittaria sagittifolia*)、茭白(*Zizania latifolia*)、菹草(*Potamogeton crispus*)、水花生(*Alternanthera philoxeroides*)对滇池水体氮的净化能力显著,茭白与满江红(*Azolla imbricata*)对磷具有明显的净化能力。由此可见,乡土植物在污水净化方面具有更大的开发潜力。

笔者选择广东省的聚花草(*Floscopa scandens*)、疏穗莎草(*Cyperus distans*)、鱼腥草(*Houttuynia cordata*)、线叶水芹(*Oenanthe linearis*)、石龙芮(*Ranunculus sceleratus*)5种乡土植物,用化学试剂配制模拟生活污水,测定实验水体中化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)及氨氮(NH₄⁺-N)并以此为水生植物净污能力的评价指标,探究其对不同浓度生活污水的净化效果,为华南地区植物筛选和治理生活污水提供参考依据和可行方案。

1 材料与方法

1.1 实验原料

供试植物聚花草、疏穗莎草、线叶水芹、石龙芮和鱼腥草采自广州龙洞宵箕窝、华南植物园观赏区沼泽湿地,选取生长健壮、大小基本一致的植株洗净后在自来水中进行数天的适应性培养。

供试污水以葡萄糖(C₆H₁₂O₆)、(NH₄)₂SO₄、可溶性蛋白、磷酸二氢钾(KH₂PO₄)、碳酸钠(Na₂CO₃)和碳酸氢钠(NaHCO₃)按不同比例配制(见表1)。

1.2 实验方法

实验设置1个空白对照(不种植物)和3个浓度处理:低污染处理(L);中污染处理(M);高污染处理(H)。5种植物分别按以上3个浓度梯度的生活污水分别进行处理,每个处理设置3个重复。所有植物均种植在2 L的塑料桶中,每桶的加入1.4 L自来水或配好的生活污水,并在1.4 L的位置做好水位标记。每个处理组分别放入生物量为200 g且处在营养期的长势相同的植株,实验周期为4 d,每1周期观察1次植物长势和水质变化、测定污水中的COD、TN、NH₄⁺-N、TP的情况,并根据其蒸发量及时补充去离子水。实验持续时间为20 d。实验地选为华南植物园水生植物实验大棚,实验环境基本与自然环境保持一致。

1.3 分析方法

水样的COD采用高锰酸钾法(GB 11914-1989)^[5]测定;TN通过碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894-1989)^[6]测定;NH₄⁺-N采用纳氏试剂光度法(GB 7479-1987)^[7]测定;TP通过磷钼酸铵分光光度法(GB 11893-1989)^[8]测定。为明确5种水生植物的水质净化能力以及水生植物氮、磷吸收在水质净化过程中的作用,本研究在测定水质COD、TN、NH₄⁺-N、TP浓度的基础上进行水体COD、氮、磷的去除率^[9]计算,计算方法见式(1)。

$$\eta = (C_1 Q_1 - C_2 Q_2) / C_1 Q_1 \times 100\% \quad (1)$$

式中: η 为污染水体中COD、氮、磷的去除率; C_1 、 C_2 为水质的起始、终止浓度,mg·L⁻¹; Q_1 、 Q_2 为水质的起始、终止水量,g。采用SPSS数据处理系统和Excel软件^[10]对实验结果进行方差分析。

表1 不同污染程度生活污水评价指标

Table 1 Evaluation indexes of domestic sewage with different pollution levels

| 污染程度 | 评价指标/(mg·L ⁻¹) | | | |
|--------|----------------------------|------|---------------------------------|-----|
| | COD | TN | NH ₄ ⁺ -N | TP |
| 低污染(L) | 102 | 24.4 | 8.6 | 2.5 |
| 中污染(M) | 338 | 43.8 | 14.8 | 4.2 |
| 高污染(H) | 624 | 68.5 | 22.4 | 8.3 |

2 结果与讨论

2.1 5种水生植物对 COD 的去除效果

不同浓度梯度的生活污水处理下, 5种乡土植物对 COD 的净化效果明显(表 2)。5种乡土植物对 COD 的去除效果均表现为实验前期污水中的 COD 迅速降低; 8 d 后, 各处理中的 COD 含量趋于稳定。植物之间对 COD 的去除效果差异性显著 ($P < 0.05$), 净化效果强弱顺序依次为疏穗莎草 > 聚花草 > 鱼腥草 > 线叶水芹 > 石龙芮。其中, 疏穗莎草在低、中、高浓度污水处理下, 对 COD 的去除效果均表现最好, 去除率分别达 58.59%、84.05%、89.56%(表 2); 石龙芮净化效果明显低于其他几种水生植物的净化效果。有研究^[11]表明, 植物对于 COD 的去除都与根系的吸收以及根际微生物的作用密切相关, 疏穗莎草和聚花草光合能力强, 进行光合作用产生的氧气向下通过根状茎和茎节上的不定根输送到根际, 使水体中溶解氧增加, 为根区微生物的活动创造了有利的条件, 促进了有机物的好氧分解, 从而提高 COD 去除率^[12]。

表 2 不同浓度下 5 种植物对 COD 的去除率
Table 2 COD removal rate of five plants at different concentrations %

| 污染程度 | 对照 | 疏穗莎草 | 聚花草 | 鱼腥草 | 线叶水芹 | 石龙芮 |
|--------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 低污染(L) | 7.84±0.22 | 58.59±1.74 | 51.32±1.71 | 35.87±0.52 | 30.55±1.59 | 19.9±1.52 |
| 中污染(M) | 8.28±0.12 | 84.05±0.50 | 81.46±0.47 | 68.07±0.56 | 64.02±0.14 | 31.7±0.18 |
| 高污染(H) | 7.37±0.03 | 89.56±0.26 | 84.04±0.15 | 69.21±0.19 | 67.64±0.09 | 52.49±0.14 |

2.2 5种水生植物对氮素的去除效果

5种植物在不同程度污染下, 对 TN 的去除效果也表现出了差异(表 3 和表 4)。疏穗莎草和鱼腥草对 TN 的净化效果明显高于其他 3 种植物 ($P < 0.05$), 对 TN 的去除率仍能达到 82.66%~91.75% 和 83.52%~85.50%(20 d); 聚花草和线叶水芹净化效果次之; 石龙芮最差。5种植物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果基本与 TN 的去除效果基本表现一致。实验设置的 3 种浓度梯度的污水下, 供试植物未出现明显的抑制作用, 净化效果强弱顺序依次为疏穗莎草 > 鱼腥草 > 聚花草 > 线叶水芹 > 石龙芮。在 12 d 左右, 各处理污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量基本保持不变。实验中, 各植物对 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果呈正相关关系, 这与陈双等^[13]的结果一致, 有研究者认为, TN 的去除得益于微生物的硝化作用^[14]。疏穗莎草强大的光合作用能迅速积累生物量, 刺激根系的发育; 鱼腥草为水生藤本植物, 在茎的各个节上都能长出发达的不定根, 发达的根系有利于附着其上的硝化和反硝化细菌创造良好的生长繁殖环境, 能高效分解水体中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 促进植物对氮素的吸收。

表 3 不同浓度下 5 种植物对 TN 的去除率
Table 3 TN removal rate of five plants at different concentrations %

| 污染程度 | 对照 | 疏穗莎草 | 聚花草 | 鱼腥草 | 线叶水芹 | 石龙芮 |
|--------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 低污染(L) | 14.75±0.07 | 91.75±0.57 | 62.16±0.19 | 85.5±1.04 | 57.59±0.86 | 38.52±0.46 |
| 中污染(M) | 7.92±0.34 | 85.55±0.08 | 72.97±0.25 | 83.52±0.51 | 64.5±0.65 | 54.27±1.01 |
| 高污染(H) | 4.67±0.40 | 82.66±0.37 | 60.76±0.86 | 85.08±0.32 | 48.1±0.70 | 37.26±0.65 |

2.3 5种水生植物对 TP 的去除效果

5种植物对 TP 的去除效果明显(表 5), 且在低磷的污水中去除效果明显强于在中度污染和高度污染水体。疏穗莎草的净化效果最强, 在低、中、和高浓度下对 TP 的去除率分别为 88.80%、

表4 不同浓度下5种植物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率Table 4 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal rate of five plants at different concentrations

| 污染程度 | 对照 | 疏穗莎草 | 聚花草 | 鱼腥草 | 线叶水芹 | 石龙芮 |
|--------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 低污染(L) | 10.39±0.21 | 77.17±0.09 | 68.84±0.30 | 77.4±0.24 | 68.72±0.08 | 44.06±0.04 |
| 中污染(M) | 18.72±0.12 | 84.32±0.05 | 65.91±0.18 | 84.12±0.14 | 64.65±0.05 | 45.7±0.02 |
| 高污染(H) | 11.2±0.04 | 88.89±1.38 | 63.96±0.03 | 89.33±0.05 | 62.49±0.11 | 45.6±0.11 |

表5 不同浓度下5种植物对TP的去除率

Table 5 TP removal rate of five plants at different concentrations

| 污染程度 | 对照 | 疏穗莎草 | 聚花草 | 鱼腥草 | 线叶水芹 | 石龙芮 |
|--------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 低污染(L) | 23.6±0.36 | 88.8±0.07 | 80±0.28 | 66.4±0.85 | 70.8±0.4 | 54.62±0.44 |
| 中污染(M) | 11.43±0.66 | 93.57±0.04 | 91.43±0.17 | 53.62±0.51 | 68.33±0.24 | 65±0.02 |
| 高污染(H) | 10.24±0.38 | 83.32±0.88 | 80.48±0.14 | 35.87±0.92 | 64.82±0.32 | 52.3±0.13 |

93.57%和83.32%(20 d);聚花草的净化效果次之,去除率分别为80.00%、91.43%和80.84%。上述两者去除效果相当,且明显优于其他3种植物。有研究^[15]表明,植物对总磷的去除作用主要包括自然沉淀、微生物固定和植物吸收等作用,植物吸收在磷元素的去除上,只占据很小的一部分^[16]。而本研究不存在基质层,通过沉淀去除P的比例不高,可以猜测P的最终去除途径归根到底仍然是植物根系的吸附和微生物的固定^[17],不同植物根系的微生物量和微生物群落类型直接影响植物对TP的去除效果。

2.4 供试植物与常见外来种的净化效果对比

有研究发现,水葫芦在不同浓度污水处理下,对COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率分别为37.84%~81.8%和61.80%~98.03%^[18-19];粉绿狐尾藻在轻度和重度污染水体中,对TN的去除率在76.5%~100%之间^[13,20]。上述两者在不同程度污染水体或不同比例污染物处理下,都优于本次实验的5种供试植物。疏穗莎草对各污染指标的控制同样表现出色,尤其在低浓度污水中,对有机污染物的去除率甚至高于水葫芦,这为乡土植物替代外来种治理城市污水提供了有力依据。美人蕉(*Canna indica*)、空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)适宜于低污染的水体修复,对污水中TN、TP的去除率维持在41.27%~62.42%和74.73%~89.68%范围内^[21-22],略逊于本次实验的疏穗莎草和聚花草。此外,本研究的鱼腥草和线叶水芹对TN、TP的去除率都能达到48.1%~85.5%和35.87%~70.8%,对低、中、低污染浓度的生活污水也有不错的净化效果。

3 结论

1)5种植物相比于没有植物处理的对照组,对生活污水的净化效果明显,对COD、TN、TP和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率范围分别在19.9%~89.56%、37.26%~91.75%、44.06%~88.89%和52.3%~93.57%。各处理污染物在实验初期都呈现降低的趋势,在12~15 d后,随处理时间的推移,COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP的含量不再发生明显变化。

2)5种乡土植物对生活污水的净化效果存在差异。疏穗莎草具有优良的污水净化能力,20 d内各不同污染程度的生活污水的各项评价指标净化率都超过80%,且其有较强的胁迫耐受性,可在高污染水体下存活并完成水体净化过程;而石龙芮则净化污水能力相对最低,但在20 d内,也会将各浓度污水净化致一级水质排放标准。

3)不同植物在3种污染梯度间存在差异。疏穗莎草更适于中、高浓度的污水净化,而石龙芮和线叶水芹则偏向于较低浓度的污水治理。鱼腥草较适于高氮低磷条件下的污水治理,在各种污

染程度的污水中, 其对 TN 的去除率皆可达到 83% 以上, 却不耐受磷素污染; 聚花草对磷的降解作用明显, 适合于高磷低氮的水体修复。

参 考 文 献

- [1] 宋国君, 韩冬梅. 中国城市生活污水管理绩效评估研究[J]. *中国软科学*, 2012, 25(8): 75-83.
- [2] 杨立红, 卓丽环. 水生植物对富营养化水体净化能力的研究[J]. *吉林农业大学学报*, 2006, 28(6): 663-666.
- [3] 吕建国, 刘周权, 杨晓霞, 等. 乡土植物对洱海水体的净化效果研究[J]. *大理学院学报*, 2012, 11(3): 45-48.
- [4] 高吉喜, 叶春, 杜娟, 等. 水生植物对面源污水净化效率研究[J]. *中国环境科学*, 1997, 4(3): 56-60.
- [5] 吴晓梅, 叶美锋, 吴飞龙, 等. 狐尾藻对生猪养殖场沼液 Cu、Zn 的富集与净化效果[J]. *福建农业学报*, 2018, 33(11): 1195-1200.
- [6] 徐杰, 何萍, 王钦, 等. 夏季白洋淀沉水植物分布与水环境因子的关系[J]. *湿地科学*, 2013, 11(4): 488-494.
- [7] 席磊, 王永芬, 赵芙蓉, 等. 五种水培蔬菜对鸭场污水净化效果的研究[J]. *中国家禽*, 2015, 37(4): 27-31.
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [9] 葛滢, 王晓月, 常杰. 不同程度富营养化水中植物净化能力比较研究[J]. *环境科学学报*, 1999, 19(6): 690-692.
- [10] 金树权, 周金波, 朱晓丽, 等. 10种水生植物的氮磷吸收和水质净化能力比较研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(8): 1571-1575.
- [11] 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.
- [12] RIEMER D, POS W, MILNE P, et al. Observations of nonmethane hydrocarbons and oxygenated volatile organic compounds at a rural site in the south eastern United States[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(D21): 28111-28128.
- [13] 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.
- [14] ROMERO J A, COMIN F A, GARCIA C. Restored wetlands as filters to remove nitrogen[J]. *Chemosphere*, 1999, 39(2): 323-332.
- [15] 卢少勇, 金相灿, 余刚. 人工湿地的磷去除机理[J]. *生态环境学报*, 2006, 15(2): 391-392.
- [16] 敖子强, 张杰, 彭桂群, 等. 生态浮床处理农村生活污水的植物功能及筛选[J]. *北方园艺*, 2017, 41(11): 195-198.
- [17] 张芳. 不同水生植物对富营养化水体净化效果和机理的比较[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [18] 高运强, 王荣富. 水葫芦净化富营养化水体有机物的研究[J]. *安徽农学通报*, 2008, 14(11): 74-75.
- [19] 黄晓辉, 罗五魁, 茹晶晶, 等. 水葫芦对宁德市东湖塘污水的净化研究[J]. *化学工程与装备*, 2015, 40(5): 224-226.
- [20] 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.
- [21] 吴诗杰, 陈慧娟, 许小桃, 等. 美人蕉、鸢尾、黄菖蒲和千屈菜对富营养化水体净化效果研究[J]. *安徽大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(1): 98-108.
- [22] 蒯圣龙, 尹程, 张祥霖, 等. 9种植物对模拟污水中氮、磷的净化能力比较研究[J]. *淮北师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(3): 63-68.

(本文编辑: 金曙光, 曲娜, 郑晓梅)

Effects of five aquatic plants in South China on purification of municipal wastewater

XIE Dongsheng^{1,2}, ZHU Wenyi³, CHEN Jinpeng³, YUAN Xiaochu^{1,4}, XU Lei^{1,4}, WANG Faguo^{1,*}

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

2. College of Horticulture and Landscape Architecture, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China

3. College of Natural Resource and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

*Corresponding author, E-mail: wangfg@scbg.ac.cn

Abstract In order to determine the purification effect of domestic wastewater by indigenous plants and investigate the possibility of substituting indigenous plants for exotic species in water remediation, in this study, five indigenous plants, including *Floscopa scandens*, *Cyperus distans*, *Oenanthe linearis*, *Ranunculus sceleratus* and *Houttuynia cordata*, were selected to investigate the removal effects of chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) and total phosphorus (TP) in synthetic municipal wastewater. The results showed that all the selected five indigenous plants had an obvious performance on COD, TN, TP, and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal from synthetic municipal wastewater, and significant differences occurred in their purification efficiencies. *Cyperus distans* showed the best treatment results for high concentration wastewater, and the removal rates of COD, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP were 89.56%, 82.66%, 88.89% and 83.32% after 20 d treatment. *Houttuynia cordata* presented the remarkable removal rates of TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$, which were 83.52%~85.50% and 77.40%~89.33% for wastewater with different concentration gradients, respectively. However, *Houttuynia cordata* had poor purification effect on phosphorus, and might be suitable for polluted water treatment with high nitrogen and low phosphorus. *Floscopa scandens* had good TP removal effect with the highest removal rate of 91.43% in three kinds of wastewater. The result suggests that *Floscopa scandens* may be suitable for treatment of municipal wastewater with low nitrogen and high phosphorus concentrations.

Keywords phytoremediation technology; municipal wastewater purification; water remediation