

张爱娣, 郑仰雄, 黄东兵. 5 种湿地植物对含盐生活污水的净化效果及其生理响应[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(2): 384-390.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2020.02.018

5 种湿地植物对含盐生活污水的净化效果及其生理响应

张爱娣¹, 郑仰雄², 黄东兵¹

(1. 广东生态工程职业学院风景园林系, 广东 广州 510520; 2. 广东生态工程职业学院继续教育部, 广东 广州 510520)

摘要: 为了明确湿地植物对含盐生活污水的净化效果及其生理响应, 本研究以芦苇 (*Phragmites australis*)、千屈菜 (*Lythrum salicaria*)、水莎草 (*Juncellus serotinus*)、石菖蒲 (*Acorus gramineus* Soland) 和灯心草 (*Juncus effusus* L.) 为试验材料, 探究含盐生活污水对这 5 种湿地植物生长、光合作用及抗氧化系统的影响, 并对其净化效果进行评价。结果表明, 含盐生活污水抑制了 5 种湿地植物的生长和光合作用, 其中, 芦苇受抑制程度最轻, 与对照相比, 其株高、根长、干质量、净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间二氧化碳浓度 (C_i) 和蒸腾速率 (T_r) 分别降低 30.84%、16.96%、23.41%、23.73%、26.72%、27.86% 和 25.51%。含盐生活污水提高了 5 种湿地植物的丙二醛 (MDA) 含量和抗氧化酶活性, 其中, 芦苇的 MDA 含量、超氧化物歧化酶 (SOD) 活性、过氧化物酶 (POD) 活性、过氧化氢酶 (CAT) 活性及抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性分别较对照提高了 65.03%、38.51%、44.76%、58.90% 和 60.79%。5 种湿地植物均可显著提高含盐生活污水中化学需氧量 (COD) 降低率以及铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、总氮和总磷的去除率。其中, 芦苇和千屈菜净化效果最佳, 灯心草次之, 水莎草和石菖蒲净化效果最差。将芦苇、千屈菜和灯心草随机组合成 4 种组合, 芦苇-千屈菜-灯心草组合对含盐生活污水的净化效果最佳, COD 降低率、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率、总氮去除率和总磷去除率分别达到 80.96%、84.95%、82.65% 和 84.18%。本研究结果可以为湿地植物在含盐生活污水净化中的应用提供了理论依据。

关键词: 湿地植物; 含盐生活污水; 净化效果; 生理响应

中图分类号: Q948.116 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)02-0384-07

Purifying effects and physiological response of five wetland plants to saline domestic sewage

ZHANG Ai-di¹, ZHENG Yang-xiong², HUANG Dong-bing¹

(1. Department of Landscape Gardening, Guangdong Eco-engineering Polytechnic, Guangzhou 510520, China; 2. Ministry of Continuing Education, Guangdong Eco-engineering Polytechnic, Guangzhou 510520, China)

Abstract: To study the purifying effects and physiological response of five wetland plants to saline domestic sewage, *Phragmites australis*, *Lythrum salicaria*, *Juncellus serotinus*, *Acorus gramineus* Soland and *Juncus effusus* L. were selected as experimental material. In addition, effects of saline domestic sewage on the growth, photosynthesis and antioxidant system of wetland plants were investigated, and the purifying effects were evaluated. The results showed that the growth and

收稿日期: 2019-06-19

作者简介: 张爱娣 (1974-), 女, 广东河源人, 本科, 讲师, 主要从事园林植物栽培研究。 (Tel) 18312663396; (E-mail) zhangai-di0604@163.com

通讯作者: 黄东兵, (E-mail) huangdongbing@163.com

photosynthesis of five wetland plants were inhibited under saline domestic sewage stress, and the inhibitory degree of reed was the least. Compared with control, the plant height, root length, dry weight, net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), intercellular carbon

dioxide concentration (C_i) and transpiration rate (T_i) of reed were decreased by 30.84%, 16.96%, 23.41%, 23.73%, 26.72%, 27.86% and 25.51%, respectively. The content of malondialdehyde (MDA) and the activities of antioxidant enzymes in five wetland plants were increased under saline domestic sewage stress. Compared with control, the MDA content and the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT), ascorbate peroxidase (APX) of reed were increased by 65.03%, 38.51%, 44.76%, 58.90% and 60.79%, respectively. The reduction rate of chemical oxygen demand (COD), removal rates of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, total nitrogen and total phosphorus in saline domestic sewage were significantly increased by five wetland plants. The purifying effects of wetland plants followed the order of *Phragmites australis* and *Lythrum salicaria* > *Juncus effusus* L. > *Juncellus serotinus* and *Acorus gramineus* Soland. Four combinations were randomly composed by *Phragmites australis*, *Lythrum salicaria* and *Juncus effusus* L.. The *Phragmites australis* - *Lythrum salicaria* - *Juncus effusus* L. had the best purifying effect on saline domestic sewage, and the reduction rate of COD, removal rates of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, total nitrogen and total phosphorus were 80.96%, 84.95%, 82.65% and 84.18%, respectively. The results of this study can provide theoretical basis for the application of wetland plants in the purification of saline domestic sewage.

Key words: wetland plant; saline domestic sewage; purifying effects; physiological response

近年来,随着中国工业化和城市化的飞速发展,工业污水和生活污水排放量日益增多,导致水资源污染现象愈发严重,水资源短缺问题频发,净化污水已成为当前亟待解决的问题之一^[1]。利用人工湿地处理污水是新兴的一种污水处理技术,不仅具有成本低,无二次污染,净化效果好等优点,还兼备恢复和美化生态环境的功能,在污水处理中得到广泛应用^[2-4]。湿地植物是湿地系统的核心,不仅可以吸收污水中的氮、磷以及重金属等污染物,还可以通过根系向底部传输氧气来促进根际微生物的生长,提高去污率,同时还可以起到美化环境的作用^[5-7]。其中,湿地植物的选择和组配对污水的净化效果具有至关重要的影响^[8]。

2013年中国湿地资源调查结果表明,中国自然湿地面积减少了 $3.376 \times 10^6 \text{ hm}^2$,其主要原因是湿地土壤的盐碱化^[9]。大量研究结果表明,盐胁迫常引起植物体内积累大量的活性氧,造成细胞膜氧化损伤,从而破坏植物光合和呼吸等生命活动,对植物生长造成严重影响甚至导致其死亡,从而加速了盐碱湿地的退化^[10-11]。然而,目前关于湿地植物筛选和组配对污水净化效果的研究,主要集中在非盐碱湿地方面,关于耐盐湿地植物筛选的研究尚不多见,关于湿地植物的耐盐机理及组配方法对污水净化效果的研究更少^[12-13]。

因此,本研究拟以芦苇、千屈菜、水莎草、石菖蒲和灯心草5种常见湿地植物为研究对象,分析这5种湿地植物对含盐生活污水的生理响应及净化效果,选出适宜的耐盐湿地植物并进行随机组配,以期

为湿地植物在含盐生活污水净化中的应用提供理论

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选用芦苇 (*Phragmites australis*)、千屈菜 (*Lythrum salicaria*)、水莎草 (*Juncellus serotinus*)、石菖蒲 (*Acorus gramineus* Soland) 和灯心草 (*Juncus effusus* L.) 5种湿地植物,均取自广州市天河区大观湿地公园。试验采用桶栽方式,为了确保试验结果的准确性,人工模拟合成的生活污水采用葡萄糖、硫酸铵、磷酸二氢钾及蛋白胨等进行配制。水质为:化学需氧量 (COD) $200.05 \pm 20.28 \text{ mg/L}$ 、铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) $32.52 \pm 2.25 \text{ mg/L}$ 、总氮 $48.66 \pm 5.65 \text{ mg/L}$ 和总磷 $4.83 \pm 1.78 \text{ mg/L}$ 。用分析纯 NaCl 将模拟生活污水配置成盐含量为 1% 的含盐生活污水。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 试验于 2018 年 5 月 10 日开始,选取大小、长势一致的植株进行栽培,试验用桶的体积为 4 L (长、宽、高分别为 2 m、2 m 和 1 m),每桶种植 6 株,用塑料泡沫板和海绵固定植株。含盐生活污水对湿地植物生长及生理影响试验(试验一):将芦苇、千屈菜、水莎草、石菖蒲和灯心草分别栽培在含盐生活污水中,并分别以清水栽培为各自对照,每个处理重复 3 次。5 种湿地植物净化效果比较试验(试验二):共设有 5 个处理,即分别在含盐生活污水中种植芦苇、千屈菜、水莎草、石菖蒲和灯心草,以不栽培植物为对照,每个处理重复 3 次。不同湿地植物组配的净化效果比较试验(试验三),选取对含盐生活污水抗性强,净

化效果最佳的 3 种湿地植物(假设为 A、B、C,具体根据试验一和试验二的结果确定)进行随机组配,组成 A-B、A-C、B-C 和 A-B-C 共 4 个处理,并以单一净化效果最佳的植株为对照,每个处理重复 3 次。整个试验持续 40 d,在试验末取样测定生长指标和生理指标,水质指标分别于试验初和试验末取水样进行测定,试验期间通过添加自来水保持桶中的水位。

1.2.2 测定指标及方法 湿地植物的株高、根长采用直尺进行测定,干质量采用烘干法进行测定。净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间二氧化碳浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)采用 Li-6400 便携式光合作用仪进行测定,光照度为 $900 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,流速为 500 ml/s 。参照吴雪霞等^[14]的方法测定植物叶片丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性及抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性。植物总氮和总磷含量分别采用凯氏消化法和钼蓝比色法进行测定,水体化学需氧量、总氮含量、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量和总磷含量测定分别采用重铬酸钾法、碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法、纳氏试剂分光光度法和钼酸铵分光光度法测定。植物氮积累量=(试验末氮含量-试验初氮含量)×生物量;植物磷积累量=(试验末磷含量-试验初磷含量)×生物量;污水污染物去除率=(试

验初污水污染物浓度-试验末污水污染物浓度)/试验初污水污染物浓度×100%。

1.3 数据处理与分析

采用 Excel 2010 进行数据处理并作图,采用 SPSS18.0 进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 含盐生活污水对 5 种湿地植物生长、氮积累量及磷积累量的影响

表 1 显示,含盐生活污水对 5 种湿地植物的生长具有明显的抑制作用,并且 5 种湿地植物受抑制的程度具有明显差异。与对照相比,含盐生活污水处理中芦苇、千屈菜、水莎草、石菖蒲和灯心草的株高分别降低 30.84%、31.11%、43.64%、42.69% 和 31.33%,根长分别降低 16.96%、17.86%、20.02%、29.16% 和 18.67%,干质量分别降低 23.41%、28.60%、42.20%、35.39% 和 27.60%,根冠比分别提升 8.89%、6.82%、18.60%、13.46% 和 9.76%,氮积累量分别提升 89.20%、72.07%、65.20%、61.99% 和 80.55%,磷积累量分别提升 82.42%、80.57%、62.50%、54.55% 和 71.10%。表明含盐生活污水对 5 种湿地植物生长的抑制程度不同,这可能是由 5 种湿地植物的耐盐性不同所致。

表 1 含盐生活污水对 5 种湿地植物生长、氮积累量及磷积累量的影响

Table 1 Effects of saline domestic sewage on growth, nitrogen accumulation and phosphorus accumulation of five wetland plants

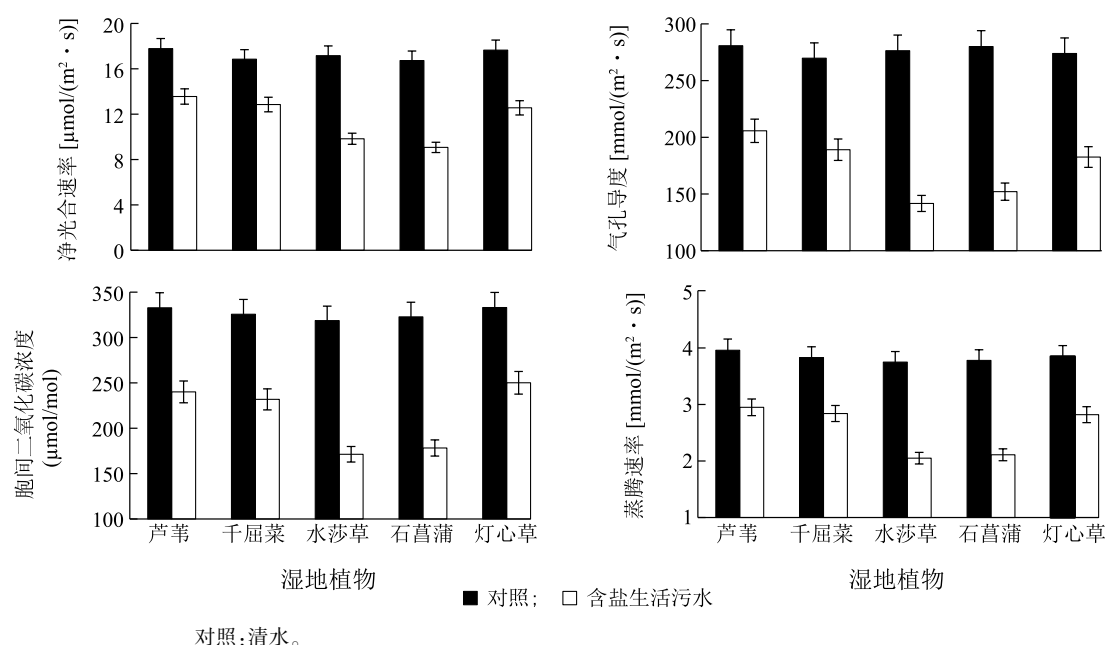
湿地植物	处理	株高 (cm)	根长 (cm)	干质量 (g, 1 株)	根冠比	氮积累量 (mg, 1 株)	磷积累量 (mg, 1 株)
芦苇	对照	138.65	84.56	80.02	0.45	50.54	1.82
	含盐生活污水	95.89	70.22	61.29	0.49	95.62	3.32
千屈菜	对照	105.36	80.95	67.59	0.44	48.02	1.75
	含盐生活污水	72.58	66.49	48.26	0.47	82.63	3.16
水莎草	对照	90.86	75.34	48.89	0.43	40.66	1.68
	含盐生活污水	51.21	60.26	28.26	0.51	67.17	2.73
石菖蒲	对照	49.08	56.55	30.26	0.52	40.02	1.65
	含盐生活污水	28.13	40.06	19.55	0.59	64.83	2.55
灯心草	对照	66.35	62.25	38.88	0.41	43.65	1.73
	含盐生活污水	45.56	50.63	28.15	0.45	78.81	2.96

对照:清水。

2.2 含盐生活污水对5种湿地植物光合作用的影响

图1显示,含盐生活污水抑制了5种湿地植物的光合作用,并且对5种湿地植物的抑制程度存在明显差异。与对照相比,含盐生活污水处理中芦苇的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间二氧化碳浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)分别降低23.73%、26.72%、27.86%和25.51%,千屈菜的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 分别降低23.74%、29.92%、28.81%和25.85%,水莎草的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 分别降低42.72%、48.74%、

46.23%和45.33%,石菖蒲的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 分别降低45.79%、45.70%、44.77%和44.18%,灯心草的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 分别降低28.84%、33.34%、24.91%和26.75%。表明,含盐生活污水对芦苇和千屈菜净光合速率的抑制程度较轻,其次为灯心草,而对水莎草和石菖蒲的抑制程度较重,其原因可能是芦苇和千屈菜耐盐性较强,光合器官盐害损伤较轻,因而净光合速率强于水莎草和石菖蒲。



对照:清水。

图1 含盐生活污水对5种湿地植物光合作用的影响

Fig.1 Effects of saline domestic sewage on photosynthesis of five wetland plants

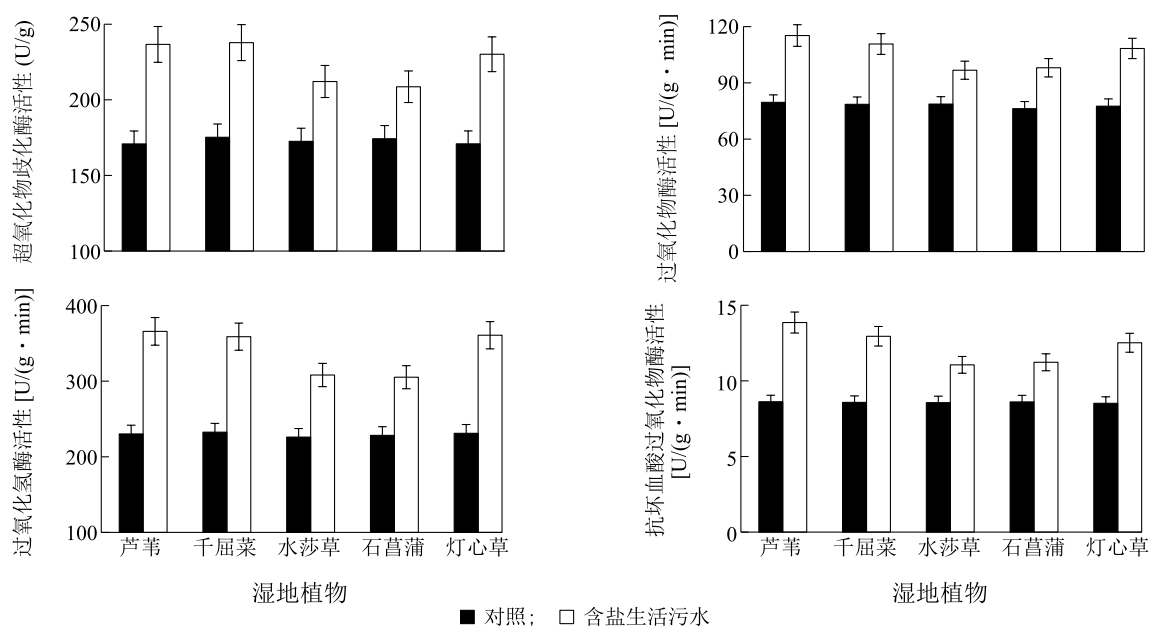
2.3 含盐生活污水对5种湿地植物抗氧化酶活性的影响

图2显示,含盐生活污水提升了5种湿地植物的抗氧化酶活性,并且5种湿地植物的提升幅度存在差异。与对照相比,含盐生活污水处理中芦苇、千屈菜、水莎草、石菖蒲及灯心草的SOD活性分别提升38.51%、35.72%、22.93%、19.74%和34.66%,POD活性分别提升44.76%、40.95%、22.95%、28.64%和39.66%,CAT活性分别提升58.90%、54.28%、36.31%、33.68%和56.10%,APX活性分别提升60.79%、50.93%、29.21%、30.43%和46.95%。说明,5种湿地植物通过提高自身的抗氧化酶活性来清除体内过量的活性氧,从而减轻含盐生活污水对自身造成的伤害,其中,

芦苇提升幅度最大,千屈菜和灯心草次之,水莎草和石菖蒲提升幅度最小。

2.4 含盐生活污水对5种湿地植物MDA含量的影响

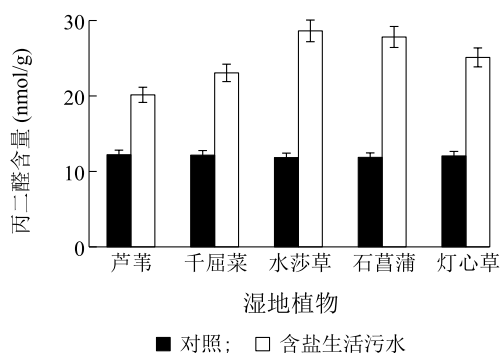
MDA是衡量细胞膜脂过氧化程度的重要指标。图3显示,与对照相比,含盐生活污水处理提升了5种湿地植物的MDA含量,且提升幅度因湿地植物种类不同而存在差异。与对照相比,含盐生活污水处理中芦苇、千屈菜、水莎草、石菖蒲及灯心草的MDA含量分别提升65.03%、89.64%、142.01%、134.57%和108.38%。说明,含盐生活污水会对5种湿地植物的细胞膜造成氧化损伤,且损伤程度存在差异,其原因可能是5种湿地植物的抗氧化酶活性不同,导致体内活性氧清除能力产生差异。



对照:清水。

图 2 含盐生活污水对 5 种湿地植物抗氧化酶活性的影响

Fig.2 Effects of saline domestic sewage on antioxidant enzyme activity of five wetland plants



对照:清水。

图 3 含盐生活污水对 5 种湿地植物丙二醛含量的影响

Fig.3 Effects of saline domestic sewage on malondialdehyde content of five wetland plants

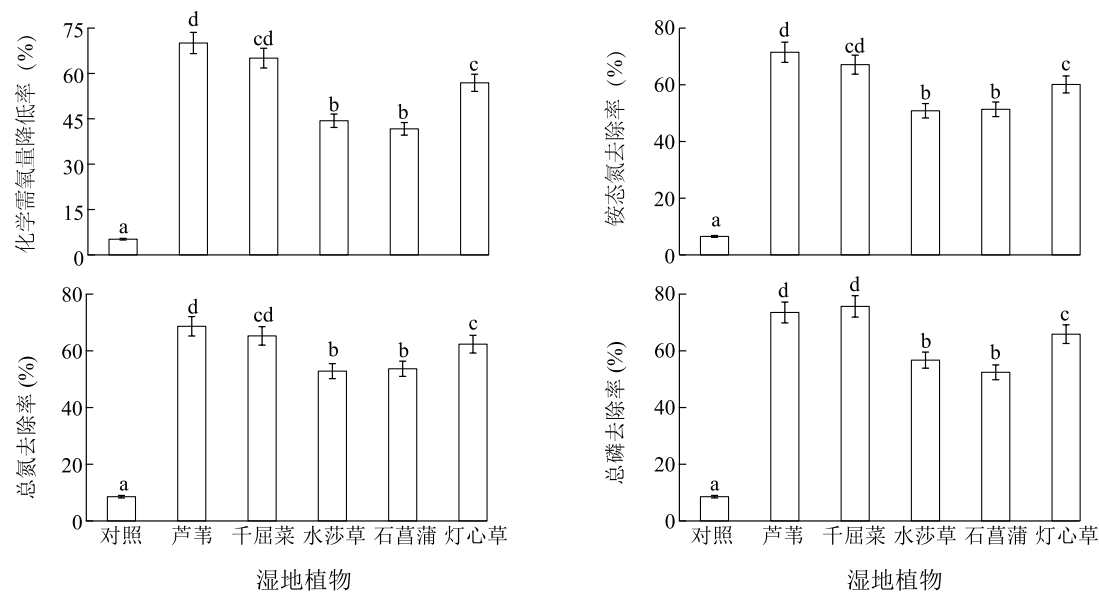
2.5 5 种湿地植物对含盐生活污水的净化效果

图 4 显示,5 种湿地植物均可对含盐生活污水起到一定的净化作用,且彼此间净化效果存在差异。与对照相比,种植芦葭、千屈菜、水莎草、石菖蒲及灯心草处理的 COD 降低率分别提升 64.86 个百分点、59.86 个百分点、39.15 个百分点、36.48 个百分点和 51.70 个百分点, NH_4^+-N 去除率分别提升 64.93 个百分点、60.56 个百分点、44.30 个百分点、44.82 个百分点和 53.59 个百分点,总氮去除率分别提升 60.09 个百分点、56.70 个百分点、44.27 个百分点、

45.10 个百分点和 53.79 个百分点,总磷去除率分别提升 64.96 个百分点、67.10 个百分点、48.15 个百分点、43.86 个百分点和 57.31 个百分点,均与对照达到显著差异水平 ($P < 0.05$)。说明 5 种湿地植物均可对含盐生活污水起到一定的净化效果,其中,芦葭和千屈菜净化效果最佳,灯心草次之,水莎草和石菖蒲净化效果最差。

2.6 不同植物组配对含盐生活污水的净化效果

表 2 显示,与芦葭(最佳湿地植物)处理相比,芦葭-千屈菜、芦葭-灯心草、千屈菜-灯心草和芦葭-千屈菜-灯心草 4 种组配处理对含盐生活污水的 COD 降低率分别提升 6.63 个百分点、4.10 个百分点、3.10 个百分点和 10.90 个百分点, NH_4^+-N 去除率分别提升 7.86 个百分点、6.19 个百分点、2.72 个百分点和 13.49 个百分点,总氮去除率分别提升 10.00 个百分点、6.57 个百分点、3.61 个百分点和 14.00 个百分点,总磷去除率分别提升 6.81 个百分点、5.13 个百分点、2.74 个百分点和 10.66 个百分点。说明合理选择并组配湿地植物可进一步提升其对含盐生活污水的净化效果。其中,以芦葭-千屈菜-灯心草的净化效果最佳, COD 降低率以及 NH_4^+-N 、总氮和总磷的去除率分别达到 80.96%、84.95%、82.65%和 84.18%。



对照:不栽培植物。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图4 5种湿地植物对含盐生活污水的净化效果

Fig.4 Purifying effects of five wetland plants on saline domestic sewage

表2 不同植物组配对含盐生活污水的净化效果

Table 2 Purifying effects of different wetland plants configurations on saline domestic sewage

处 理	化学需氧量降低率 (%)	铵态氮去除率 (%)	总氮去除率 (%)	总磷去除率 (%)
芦苇	70.06a	71.46a	68.65a	73.52a
芦苇-千屈菜	76.69c	79.32c	78.65d	80.33c
芦苇-灯心草	74.16bc	77.65c	75.22c	78.65bc
千屈菜-灯心草	73.16b	74.18b	72.26b	76.26b
芦苇-千屈菜-灯心草	80.96d	84.95d	82.65e	84.18d

同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

3 讨论

生活污水中含有大量植物生长所必须的氮、磷等营养物质,对耐污湿地植物的生长具有明显的促进作用^[12-13]。本研究结果表明,含盐生活污水对5种湿地植物的生长均有明显的抑制作用,且5种湿地植物受抑制的程度具有明显差异,这与王巧芳等^[15]的研究结果一致。产生这种现象的原因可能是:一方面,盐胁迫会对植物造成一定的渗透胁迫,导致植物对水分和养分的吸收能力下降,进而抑制植物生长;另一方面,盐胁迫对植物光合器官造成一定破坏,导致光合作用受抑,光合产物合成减少,从而抑制植物生长,而且不同植物的耐盐性不同。

光合作用是植物进行生长发育所需能量的主要来源^[14]。李龙山等^[13]研究发现,污水处理可明显提高湿地植物的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度。本研究结果表明,含盐生活污水抑制了5种湿地植物的光合作用,净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度和蒸腾速率均明显下降。这说明,盐胁迫引起的湿地植物气孔限制是造成光合抑制的主要因素之一。另外,灯心草的胞间二氧化碳浓度下降幅度最小,但是光合受抑制程度仍高于芦苇和千屈菜,说明盐胁迫导致灯心草光合受抑制的原因除了气孔限制因素外,还包括一定的非气孔限制因素,如叶肉细胞光合作用下降等。本结果与王巧芳等^[15]研究结果较为一致,而与李龙山等^[13]的研究结果存在出入,这可能与植物自身的光合组织结构特性以及耐盐性有关。

抗氧化系统是植物抗逆境伤害的主要机制之一,MDA含量是衡量膜脂过氧化程度的重要指标^[16]。本研究结果表明,含盐生活污水会对湿地植物造成一定程度的伤害,MDA含量增加,5种湿地植物可通过提高自身的抗氧化酶(SOD、POD、CAT和APX)活性来清除体内过量的活性氧,从而减轻胁迫伤害,与孙瑞莲等^[17]研究结果一致。其中,与对照相比,含盐生活污水处理下芦苇MDA含量提升幅度最小,千屈菜和灯心草次之,水莎草和石菖蒲提升幅度较大,表明芦苇对含盐生

活污水具有较强耐盐性,而水莎草和石菖蒲的耐盐性则较弱。

湿地植物在湿地系统污水净化中发挥着关键作用,不仅可以直接吸收和利用污水中的氮、磷等营养物质,而且还可通过其发达的通气组织将氧气输送至根区,促进根区微生物的生长、繁殖,从而进一步提高湿地系统对污水的清除能力^[13,18]。本研究结果表明,与未种植湿地植物的对照相比,5种湿地植物均可对含盐生活污水起到一定的净化效果,其中,芦苇净化效果最佳,COD降低率提升64.86个百分点, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、总氮和总磷的去除率分别提升64.93个百分点、60.09个百分点和64.96个百分点,均达到显著水平($P<0.05$),本结果与刘文杰等^[4]、李龙山等^[13]、刘冉等^[19]研究结果基本一致。湿地植物对污水的净化机理主要包括:首先,湿地植物可以直接吸收和积累污水中的氮、磷等营养物质,虽然盐分会对生物量有一定影响,但仍对含盐生活污水具有一定的净化效果。其次,湿地植物发达的通气组织将氧气输送至植物根区,促进微生物生长繁殖,促进微生物的硝化和反硝化作用,加速有机物分解,从而净化水质^[13,18]。不同植物间去污能力差异与其自身生长特性(如生物量、通气组织等)及耐盐性强弱密切相关。杜甫义等^[12]发现,与单一湿地植物系统相比,水葱、黑三棱和芦苇组配可明显提升其对污水的净化能力。本研究选取了对含盐生活污水净化效果较好的芦苇、千屈菜和灯心草3种湿地植物进行随机组配,结果表明,与芦苇相比,3种不同湿地植物的4种组配均可进一步提升对含盐生活污水的净化效果,其中,以芦苇-千屈菜-灯心草的净化效果最佳,COD降低率达到80.96%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、总氮及总磷去除率分别达到84.95%、82.65%和84.18%。

综上所述,含盐生活污水对5种湿地植物的细胞膜造成不同程度的损伤,导致光合效率降低,生长受到抑制,湿地植物通过提高自身抗氧化酶活性来抵御胁迫损伤。其中,芦苇受损伤程度最轻,其次为千屈菜和灯心草,芦苇-千屈菜-灯心草处理对含盐生活污水的净化效果最佳。本研究结果可以为湿地植物在含盐生活污水净化中的应用提供一定的理论依据。

参考文献:

[1] CALHEIROS C S C, RANGEL A O S S, CASTRO P M L. Con-

structed wetland systems vegetated with different plants applied to the treatment of tannery wastewater[J]. Water Research, 2007, 41(8): 1790-1798.

- [2] 尚克春,刘宪斌,陈晓英. 高盐废水人工湿地处理中耐盐植物的筛选[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(1): 74-78.
- [3] 周桑扬,杨凯,吴晓英,等. 人工湿地植物去除废水中重金属的作用机制研究进展[J]. 湿地科学, 2016, 14(5): 717-724.
- [4] 刘文杰,许兴原,何欢,等. 4种湿地植物对人工湿地净化生活污水的影响比较[J]. 环境工程学报, 2016, 10(11): 6313-6319.
- [5] 陈金发,赵磊,宋大刚,等. 人工湿地植物对畜禽废水的净化效果及生理特性变化[J]. 水处理技术, 2015, 41(2): 20-26.
- [6] 万涛,李绍峰,谢良生. 龙岗河不同湿地植物重金属富集能力的比较研究[J]. 水生态学杂志, 2014, 35(5): 96-100.
- [7] 李龙山,倪细炉,李昌晓,等. 生活污水对土壤及湿地植物根际细菌群落的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(11): 2163-2170.
- [8] 杜红霞,王丽,湛景武,等. 不同湿地植物及其组配对富营养化水体的净化效果[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(6): 616-619.
- [9] 耿国彪. 我国湿地保护形势不容乐观——第二次全国湿地资源调查公布[J]. 绿色中国, 2014(3): 8-11.
- [10] 刘奕熾,于洋,方军. 盐碱胁迫及植物耐盐碱分子机制研究[J]. 土壤与作物, 2018, 7(2): 201-211.
- [11] 熊雪,罗建川,魏雨其,等. 不均匀盐胁迫对紫花苜蓿生长特性的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(11): 2072-2083.
- [12] 杜甫义,阿琼,董凡超,等. 西藏地区不同湿地植物配置对污水的净化效果[J]. 环境工程, 2017, 35(1): 26-30, 40.
- [13] 李龙山,倪细炉,李志刚,等. 5种湿地植物对生活污水净化效果研究[J]. 西北植物学报, 2013, 33(11): 2292-2300.
- [14] 吴雪霞,张圣美,张爱冬,等. 外源褪黑素对高温胁迫下茄子幼苗光合和生理特性的影响[J]. 植物生理学报, 2019, 55(1): 49-60.
- [15] 王巧芳,陈年来,褚润. 污水含盐率对3种湿地植物生长及光合特性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2018, 53(2): 120-126.
- [16] 李本峰,杜红梅. 褪黑素预处理对多年生黑麦草抗旱性的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2018, 36(3): 21-26.
- [17] 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.
- [18] 刘文杰,许兴原,何欢,等. 4种湿地植物对人工湿地净化生活污水的影响比较[J]. 环境工程学报, 2016, 10(11): 6313-6319.
- [19] 刘冉,甘淳丹,赵海燕,等. 四种大型湿地植物对水产养殖废水中矿质元素和重金属富集特征的影响[J]. 南京农业大学学报, 2017, 40(5): 859-866.

(责任编辑:王妮)