

5种湿地植物生理生长特性变化及其对污水净化效果的研究

李龙山^{1,2}, 倪细炉², 李志刚², 李健^{2*}

(1.宁夏大学生命科学学院, 银川 750021; 2.宁夏林业研究所种苗生物工程国家重点实验室, 银川 750004)

摘要:为了研究湿地植物生理生长特性变化及其对生活污水的净化效果,选择芦苇、千屈菜、扁秆藨草、水葱和长苞香蒲5种湿地植物进行污水净化试验。通过测定植物生理生长参数和污水中 COD_Cr 、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果,评价湿地植物对污水的净化效果。结果表明:污水处理5种植物光合生理参数、 F_v/F_m 值、株高和生物量净增长高于清水培养,其中长苞香蒲、水葱和芦苇7月的净光合速率、 F_v/F_m 值及叶绿素含量均高于清水培养,且差异显著($P<0.05$);5种湿地植物对污水中 COD_Cr 、TP和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 都具有良好的去除效果,各试验水体中 COD_Cr 浓度由 $192\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $8\sim 19\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总磷浓度由 $1.46\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $0.04\sim 0.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度由 $1.26\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $0.01\sim 0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。研究得出,污水处理植物的生理生长特性优于清水培养植物,5种湿地植物对污水中 COD_Cr 、TP和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果明显;综合各参数来看,长苞香蒲、水葱和芦苇可作为人工湿地净化污水的优先选择,其次为千屈菜和扁秆藨草。

关键词:湿地植物;光合作用;叶绿素荧光;生物量;污水净化

中图分类号:X173 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2013)08-1625-08 **doi:**10.11654/jaes.2013.08.020

Growth Characteristics and Sewage Cleaning Effect of Five Wetland Plants

LI Long-shan^{1,2}, NI Xi-lu², LI Zhi-gang², LI Jian^{2*}

(1.College of Life Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2.State Key Laboratory of Seeding Bio-engineering, Yinchuan 750004, China)

Abstract: Five species of wetland plants, including *Phragmites australis*, *Lythrum salicaria*, *Scirpus planiculmis*, *Scirpus validus* and *Typha angustata*, were selected to grow in sewage. Their biological characteristics were assessed and their capability to remove nutrients, such as chemical oxygen demand (COD_Cr), total phosphorous (TP) and ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) in constructed wetland systems, was analyzed. During the experimental period, the growth characteristics and sewage cleaning effect of each plant was evaluated by both physiological and chemical methods. The results demonstrated that the plants cultivated in sewage grew better than those in tap water as measured by plant photosynthesis, chlorophyll fluorescence, plant height, and biomass. There were significant differences between the plants growing in tap water and in sewage as measured by net photosynthetic rate, F_v/F_m , Chlorophyll content ($P<0.05$) of *Typha angustata*, *Scirpus validus* and *Phragmites australis* ($P<0.05$). Furthermore, it was shown that all of the five species are highly efficient in removing COD_Cr , TP and $\text{NH}_4^+\text{-N}$, as the concentration of COD_Cr was decreased from $192\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to $8\sim 19\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP from $1.46\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to $0.04\sim 0.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ from $1.26\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to $0.01\sim 0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. We conclude that the five species grow better in the sewage than in the tap water. *Typha angustata*, *Scirpus validus* and *Phragmites australis* are the better ones among the five in remedying eutrophic water and improving water quality, followed by *Lythrum salicaria* and *Scirpus planiculmis*.

Keywords: wetland plants; photosynthesis; chlorophyll fluorescence; biomass; sewage clean

收稿日期:2013-01-17

基金项目:国家国际科技合作专项项目(2011DFG32780);宁夏国际合作项目:黄河流域宁夏段生态功能稳定性维持技术研究

作者简介:李龙山(1988—),男,宁夏隆德人,在读硕士,主要从事湿地植物净化污水和环境微生物方面的研究。E-mail:bbmmw30795@163.com

*通信作者:李健 E-mail:nixilu110@163.com

人工湿地污水处理技术具有建造运营成本低,处理污水能力强,不造成二次污染,既可以改善和恢复生态环境,又可以回收资源和能源等优点,被广泛用于生活污水的处理^[1-3]。人工湿地中,植物不但可以直接吸收利用污水中的营养物质,而且其发达的根系可以将氧气输送到根部,为根际微生物提供生长、繁殖和分解所需的氧气^[4-7]。微生物的大量繁殖可以进一步提高对污染物的去除效率^[8]。目前有关人工湿地植物的研究大多集中在湿地植物种类的筛选、生物量大小、对营养物质的吸收和去除能力等方面^[9-10]。光合作用是植物体最重要的生理代谢过程,光合生理参数、叶绿素荧光、叶绿素含量等可以反应植物生长状况良好与否,而关于人工湿地中污水对植物光合作用及生长特性的影响研究鲜有报道。黄娟等^[11]通过对人工湿地污水处理系统中植物光合作用特性的研究发现,湿地植物净光合速率(P_n)亦可作为人工湿地污水处理系统植物选择的重要依据之一。因此,研究湿地植物生理生长特性对污水的响应及其对污水净化能力的影响有重要意义。

本研究选取芦苇(*Phragmites australis*)、千屈菜(*Lythrum salicaria* Linn)、扁秆藨草(*Scirpus planiculmis* Fr.Schmidt)、水葱(*Scirpus validus* Vahl)和长苞香蒲(*Typha angustata* Bory et Chaub.) 5种宁夏黄河流域分布较广的湿地植物为研究对象。通过对污水处理环境下植物光合特性、叶绿素荧光特性和植物对污水中 COD_{Cr} 、TP、 NH_4^+-N 去除效果进行测定,并借此评价污染物对植物的影响程度和不同植物对污水的去除效果,同时为在宁夏构建人工湿地污水处理系统,设置合理的植物生长条件,维持植物的正常生长以及更好地修复和管理湿地提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与处理方法

供试材料为芦苇(*Phragmites australis*)、千屈菜(*Lythrum salicaria* Linn)、扁秆藨草(*Scirpus planiculmis* Fr.Schmidt)、水葱(*Scirpus validus* Vahl)和长苞香蒲(*Typha angustata* Bory et Chaub.)。试验在宁夏银川市植物园实验大棚内进行,自然光照。模拟人工湿地试验在塑料桶中进行(桶高34 cm,上口直径34 cm,下口直径27 cm)。

将野外采集的5种湿地植物带回实验室,挑选生长健壮,大小基本一致的健康植株,单独种植。每桶种植3株,每种植物种植6桶(3个为生活污水处理,另

外3个为清水培养对照),种植后用自来水浇灌进行适应性生长,待其生长旺盛,于2012年7月5日开始进行试验。污水取自宁夏银川市六盘山高级中学南侧校园的排水沟,为教职工生活区排放的生活污水。污水 COD_{Cr} 192 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、氨氮 1.256 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、总磷 1.46 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。污水浇灌量为每桶10 L,其水深为12 cm,标记每个水桶的液面,以之为标准,试验期间通过加自来水补充蒸发和蒸腾所消耗的水分,以保持桶中水位。污水净化效果试验中另行设置了CK1(污水静置)和CK2(土壤和污水静置)。试验于2012年10月5日结束,为期3个月。

1.2 试验方法

1.2.1 光合参数的测定

使用美国生产的便携式CI-340型光合仪,自植物顶端向下选取新形成的第5片叶,于叶片中心位置,测定净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)等指标。利用公式 $WUE = P_n/T_r$ 计算水分利用效率(WUE)。根据植物的生命周期,试验时间从7月5日到9月30日,在每个月中旬选择晴朗的2~3 d上午9:00—11:00进行。

1.2.2 叶绿素荧光和叶绿素含量相对值的测定

采用美国生产的便携式叶绿素荧光仪和CCM-200便携式叶绿素含量测定仪,自植物顶端向下选取新形成的第5片叶,于叶片中心位置,测定叶绿素荧光参数和叶绿素含量相对值。用叶绿素荧光仪测定已充分暗适应的光合机构潜在的PSII光化学效率(F_v/F_m),重复3~5次。测定前用Walz叶夹进行暗适应20 min的遮光处理。叶绿素含量测定前校正仪器,实验时间在7月5日到9月30日,每个月在中旬时选择晴朗的1~2 d傍晚进行。

1.2.3 植物株高和生物量测定

株高测定:分别在实验前和实验后用钢卷尺测定植物株高,计算植物净增长高度。

生物量的测定:分别在实验前和实验后采集植物全株用自来水冲洗干净,70℃烘干至恒重,称量。

1.2.4 水样的采集和测定

水样的采集分为短期和长期两个阶段,短期为处理后(7月)每隔6 d采集1次样品,长期为8—10月间,每月采集1次样品。试验期间共采集水样7次,采样在早晨8:00—9:00进行,用注射器抽取水面下6 cm处水样80 mL,尽快进行水质分析。采用德国Merck公司生产的光电比色计(Spectroquant NOVA60)测定污水 COD_{Cr} 、TP和 NH_4^+-N 指标。根据 $R = [(D_i - D_0)/D_i] \times$

100%计算污染物去除效率(其中 D_i 和 D_0 分别为初始浓度和取样浓度)。

1.3 统计分析

数据结果采用 Excel 分析作图,SPSS17.0 分析对照与处理间的差异显著性,利用 Tukey HSD 法进行多

重比较。试验结果为平均值+标准误差。

2 结果与分析

2.1 污水对植物叶片光合参数的影响

从图 1 可知,污水处理使 5 种植物叶片的净光合

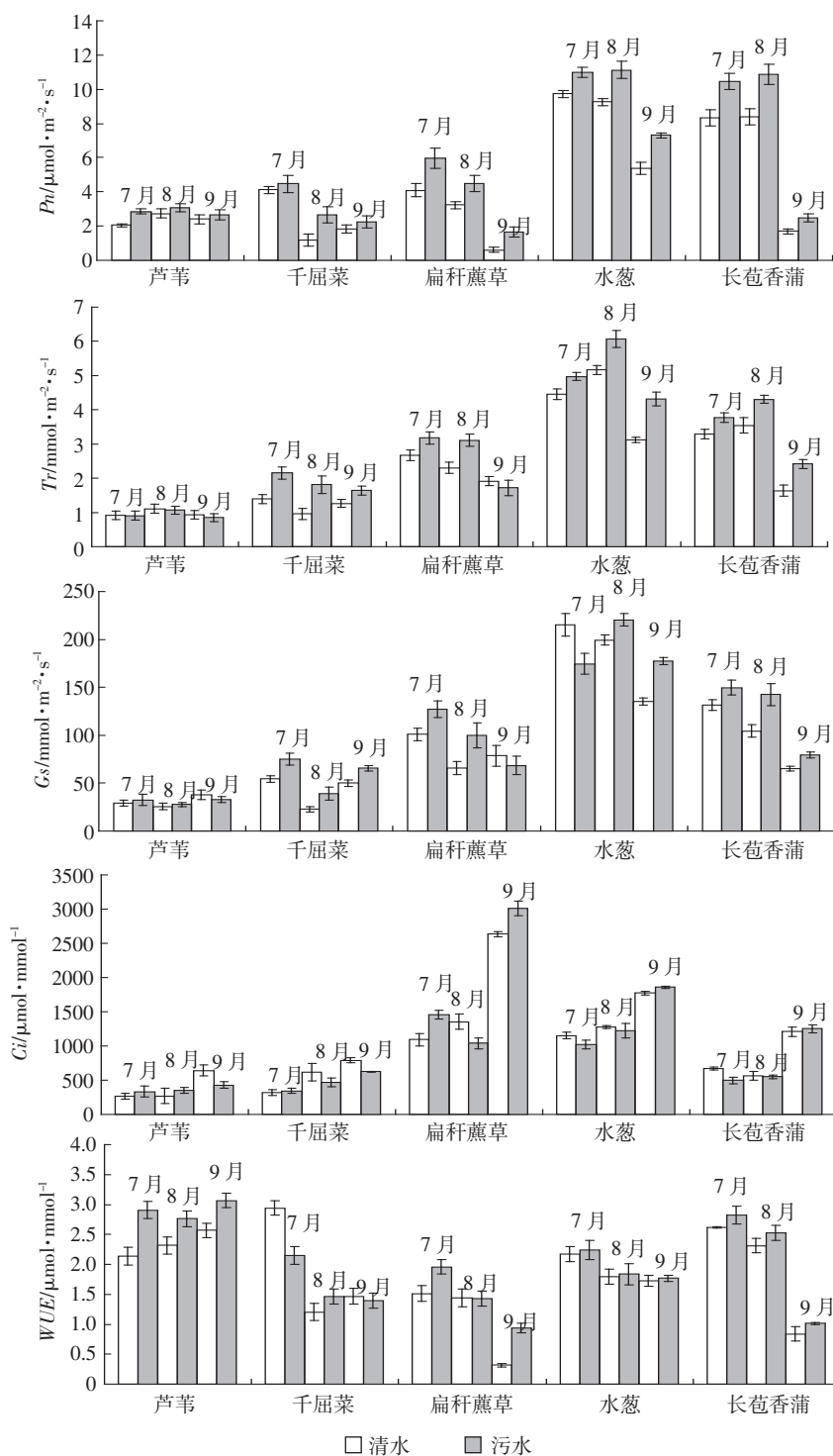


图 1 污水处理对 5 种植物叶片光合参数的影响

Figure 1 Effect of sewage treatment on leaf photosynthetic physiological parameters of five wetland plants

速率(P_n)和蒸腾速率(T_r)均高于清水培养植物。芦苇、扁秆藨草、水葱和长苞香蒲污水处理 P_n 值在7月份分别比清水培养高 39.3%、45.4%、13.1%和 25.3%，差异显著($P<0.05$)，而芦苇的 P_n 和 T_r 值各月份处理与对照之间差异不显著。污水处理下芦苇、千屈菜、扁秆藨草、水葱和长苞香蒲的 P_n 值随月份变化逐渐降低。水葱和长苞香蒲的 T_r 值呈现先高后低趋势，就 P_n 和 T_r 值大小来看有水葱>长苞香蒲>扁秆藨草>千屈菜>芦苇的规律。

污水处理植物气孔导度(G_s)的变化趋势总体上与 P_n 相似，大于清水对照，但是7月份的水葱及9月份的芦苇和扁秆藨草的 G_s 低于对照，差异显著($P<0.05$)。处理期间各植物 G_s 的变化依次为：水葱最大，其次为长苞香蒲、扁秆藨草、千屈菜，芦苇最低。5种植物污水处理与清水培养间的胞间 CO_2 浓度(C_i)变化不定，且随季节的变化呈逐渐升高趋势，这与 P_n 和 G_s 的变化相反。总体来看，在污水处理环境下扁秆藨草的 C_i 值最高，其次为水葱、长苞香蒲和千屈菜，芦苇最低。

污水处理植物的水分利用效率(WUE)总体上比清水培养高，但不同月份之间的变化不一，如芦苇、扁秆藨草和长苞香蒲7—9月污水处理的 WUE 值都高于清水培养，而千屈菜和水葱在7—9月污水处理与清水对照间的 WUE 值基本相同，没有明显差异。

2.2 污水对植物 F_v/F_m 值的影响

从图2可看出，污水处理5种植物的 F_v/F_m 值均高于清水培养，其中污水处理千屈菜、水葱和长苞香蒲在7、8、9月分别比清水培养升高了 10.4%、11.2%、6.6%、10.1%、11.8%、7.4%、10.1%、8.1%、6.0%；且在7

月和8月这3种植物 F_v/F_m 值，与对照间差异显著($P<0.05$)。芦苇除8月份处理与对照差异显著外($P<0.05$)，其他月份的差异不显著。长苞香蒲的 F_v/F_m 值在不同的生长阶段都是最大值，如在7月生长旺盛期，分别比扁秆藨草和水葱大 14.4%和 10.3%。

从图2还可看出，在8—9月芦苇、千屈菜、扁秆藨草、水葱和长苞香蒲的 F_v/F_m 值随月份变化呈现下降趋势，其中千屈菜、扁秆藨草和水葱下降极显著($P<0.01$)，长苞香蒲和芦苇下降显著($P<0.05$)。

2.3 污水对植物叶绿素含量相对值的影响

从图3可看出，清水培养5种植物叶绿素含量相对值大小依次为长苞香蒲>芦苇>千屈菜>水葱>扁秆藨草。污水处理千屈菜、芦苇和长苞香蒲在7、8、9月各生长阶段的叶绿素含量均高于清水培养，且差异显著($P<0.05$)。千屈菜、芦苇和长苞香蒲的叶绿素含量相对值在7、8、9月各阶段分别比清水培养植株升高了 22.8%、25.1%、31.7%、25.4%、25.3%、26.0%、22.5%、27.0%、26.2%，其中芦苇的变化最大，千屈菜的变化较小；随月份的变化3种植物叶绿素相对值呈下降趋势，其中千屈菜的降幅最小，芦苇最大。扁秆藨草和水葱的叶绿素相对值处理与对照之间的差异不显著。

2.4 污水对植物株高的影响

从图4可看出，污水处理的扁秆藨草、长苞香蒲和水葱的高度增长大于清水培养植物，分别比清水培养植物大2倍、1.4倍和3.1倍，且5种植物之间高度变化差异极其显著($P<0.01$)，而千屈菜和芦苇污水处理与清水培养之间差异不显著($P>0.05$)。

2.5 污水处理对植物生物量的影响

从表1可看出，污水处理下5种植物总生物量的

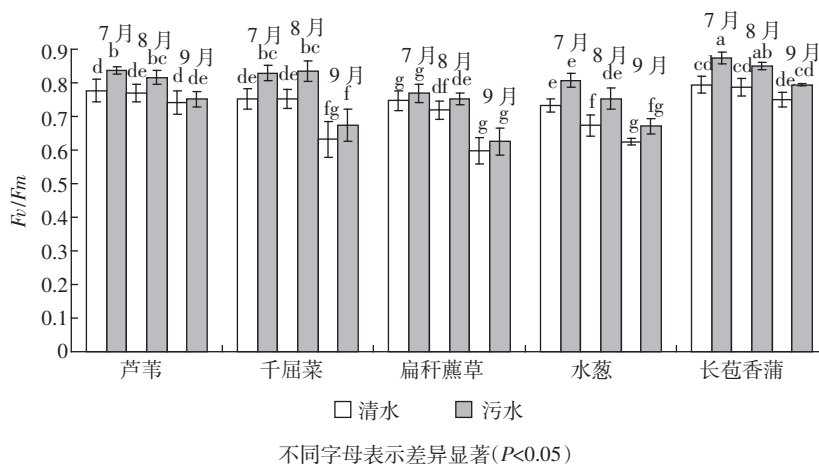


图2 污水处理对5种植物叶片 F_v/F_m 值的影响

Figure 2 Effect of sewage treatment on leaf F_v/F_m values of five wetland plants

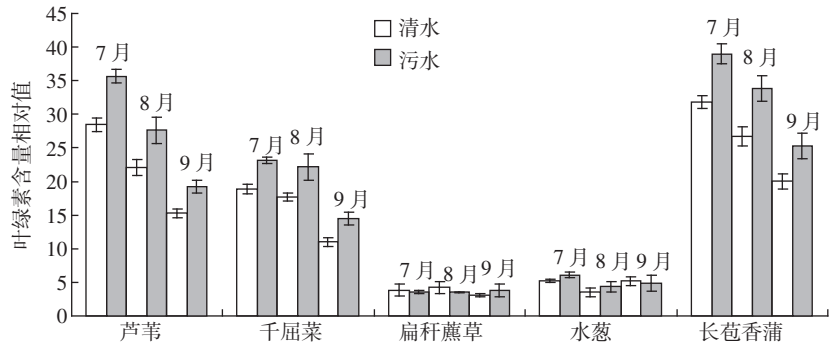
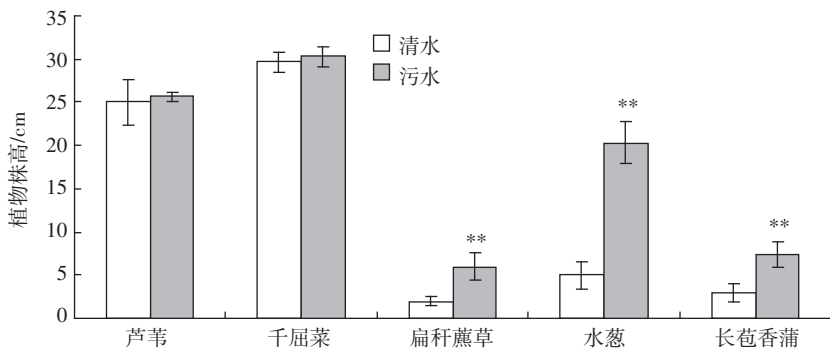


图 3 污水处理对 5 种植物叶绿素含量的影响

Figure 3 Effect of sewage treatment on leaf Chlorophyll contents of five wetland plants



注:**表示差异极显著($P<0.01$)

图 4 污水处理对 5 种植物株高的影响

Figure 4 Effect of sewage treatment on height changed of five wetland plants

表 1 污水处理对 5 种植物生物量变化的影响(干重)

Table 1 Effect of sewage treatment on biomass changed of five wetland plants(dry weight)

物种	处理	茎叶/g	根/g	总生物量/g
芦葭	清水	76.65±4.54 a	115.27±6.67 a	191.92±11.07 a
	污水	79.96±7.19 a	115.35±8.83 a	195.31±1.91 a
千屈菜	清水	17.16±2.46 de	18.01±0.66 e	35.17±2.62 f
	污水	26.06±4.27 cd	39.54±2.61 d	65.60±2.06 d
扁秆藨草	清水	10.36±1.90 de	16.23±0.96 e	26.58±2.85 f
	污水	7.11±0.33 e	34.85±2.03 d	42.96±2.32 ef
水葱	清水	7.24±1.08 e	43.88±1.48 d	51.11±0.84 e
	污水	11.47±1.19 de	56.41±2.58 d	67.89±3.40 d
长苞香蒲	清水	35.36±1.08 c	96.00±2.44 b	131.37±1.93 c
	污水	46.58±2.30 b	100.31±4.47 b	146.89±5.77 b

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

增长量大小依次为芦葭>长苞香蒲>水葱>千屈菜>扁秆藨草。污水处理植物长苞香蒲、千屈菜和水葱的总生物量增长大于清水培养植物,分别比清水培养植物高 11.8%、86.6%、32.8%,且差异显著($P<0.05$)。就根和茎叶生物量增长来看,5 种植物根的增长量大于茎

叶,差异显著($P<0.05$)。污水处理长苞香蒲、千屈菜、芦葭、扁秆藨草和水葱的根生物量与试验前相比分别增长了 4.5、2.3、4.8、4.6 和 5.5 倍。

2.6 植物对污水的净化效果

2.6.1 植物对 COD_{Cr} 的去除效果

从图 5 可以看出,5 种湿地植物都能有效去除水体中的 COD_{Cr},8 月 5 日各试验水体中 COD_{Cr} 浓度由

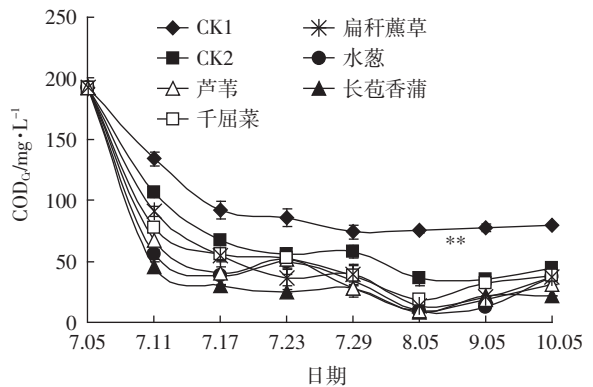


图 5 湿地植物对 COD_{Cr} 的去除效果

Figure 5 Effect of wetland plants on COD_{Cr} removal from sewage

192 mg·L⁻¹ 降至 8~19 mg·L⁻¹, 均达到地表水Ⅲ类水标准(GB 3838—2002)。各湿地植物处理组水体中的 COD_{Cr} 浓度与空白对照差异显著($P<0.05$)。7月11日芦苇、千屈菜、扁秆藎草、水葱和长苞香蒲水体中的 COD_{Cr} 去除率分别为 65.1%、59.9%、52.6%、71.1% 和 76.2%; 8月5日各试验组污水中 COD_{Cr} 浓度降到最低点, 后期自9月5日至10月5日呈现上升趋势。可见5种植物中长苞香蒲和水葱对 COD_{Cr} 的去除率优于其他植物, 且差异显著($P<0.05$), 芦苇和千屈菜次之, 扁秆藎草最低。

2.6.2 植物对总磷的去除效果

从图6可以看出, 各处理组水体中总磷的变化与 COD_{Cr} 的变化不同, 主要呈现下降趋势。总磷浓度由 1.46 mg·L⁻¹ 降至 0.04~0.15 mg·L⁻¹, 在试验后期各水生植物处理组水体中总磷的去除率在 89.9%~97.9% 之间。5种湿地植物对总磷都具有较好的去除能力, 与对照(CK1 和 CK2)相比, 差异显著($P<0.05$), 但就污水中总磷的去除速度来看, 各植物表现不一。7月11日芦苇、千屈菜、扁秆藎草、水葱和长苞香蒲水体中总磷的去除率分别为 66.9%、62.8%、57.1%、68.7% 和 75.8%, 其中长苞香蒲的去除率高于其他植物, 差异显著($P<0.05$), 芦苇、水葱和千屈菜次之, 扁秆藎草最低。

2.6.3 植物对氨氮的去除效果

从图7可以看出, 各处理组水体中氨氮的变化与总磷的变化相同, 呈现逐步下降趋势。自7月5日开始至7月23日各试验组水体中氨氮含量已由 1.26 mg·L⁻¹ 降至 0.01~0.1 mg·L⁻¹。7月11日芦苇、千屈菜、扁秆藎草、水葱和长苞香蒲水体中氨氮的去除率分别为 62.1%、58.7%、46.0%、66.7% 和 69.3%, 其中长苞香蒲、水葱和芦苇对污水中氨氮的去除率快于其他植

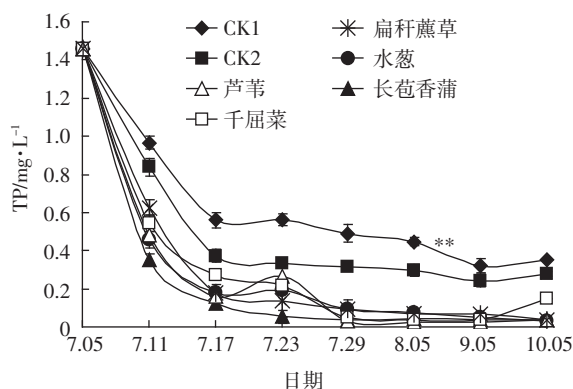


图6 湿地植物对总磷的去除效果

Figure 6 Effect of wetland plants on total phosphorus removal from sewage

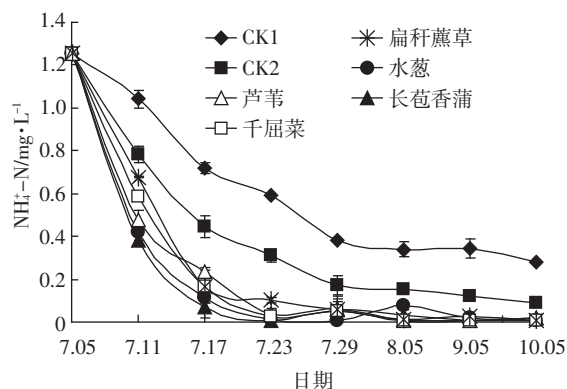


图7 湿地植物对氨氮的去除效果

Figure 7 Effect of wetland plants on ammonia nitrogen removal from sewage

物, 千屈菜次之, 扁秆藎草最低, 且差异显著($P<0.05$)。

3 讨论

光合作用是植物体内极其重要的代谢过程, 其强弱易受到环境中各种因素的影响, 如温度、湿度、水分、光照强度和氮磷营养等^[12]。本试验中, 污水处理5种湿地植物的 P_n 值和 Tr 值均高于清水培养(图1), 其中长苞香蒲和水葱的净光合速率高于其他植物, 其次为扁秆藎草、千屈菜和芦苇, 差异性显著($P<0.05$)。李林峰^[13]测得水葱 P_n 值为 $12.56 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 赵建松等^[14]测得芦苇的 P_n 值为 $5.0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 与本研究中所测得的两种植物的光合速率相近。试验中处理与对照间共处于相同的外界环境因素的影响下, 最大差异在于污水中氮磷浓度较高, 说明是污水中营养元素使湿地植物光合状态优于清水培养。5种水生植物的 P_n 和 G_s 值随月份变化呈现下降趋势, 而 G_i 呈现上升趋势。 P_n 降低的原因可能是叶肉细胞同化能力的降低, 而不是由气孔导度降低而引起的光合速率的下降, 可以认为光合速率的下降是由非气孔因素造成的, 即非气孔因素是光合速率降低的主要因素。无论从植物的光合参数还是从叶绿素荧光 F_v/F_m 值看, 随月份的变化, 5种湿地植物的光合参数和 F_v/F_m 值呈现下降趋势, 说明季节的变化可能是光合速率下降的主要原因。

应用叶绿素荧光动力学技术测定叶片光合作用, 能独特的反映光系统对光能的吸收、传递、耗散、分配等特点^[15]。本研究表明, 除扁秆藎草外, 芦苇、长苞香蒲、千屈菜和水葱4种植物在人工湿地污水处理下7—8月的 F_v/F_m 值均高于清水培养, 且长苞香蒲>芦

苇>千屈菜>水葱>扁秆藨草,差异显著($P<0.05$)。说明污水处理5种植物叶绿体光系统Ⅱ活性比清水培养强,这一点可从植物净光合速率得到印证。叶绿素含量的高低是反映植物光合作用能力的另一个重要指标。党蕊娟等^[16]通过对冬小麦施氮肥发现,施氮可以增加小麦叶片含氮量和叶绿素相对值。本试验测得污水处理下长苞香蒲、芦苇和千屈菜的叶绿素相对值均高于清水培养,差异极显著($P<0.01$)。但扁秆藨草和水葱污水处理与清水对照间叶绿素相对值差异不显著($P>0.05$),其原因尚待进一步研究。就叶绿素含量大小来看长苞香蒲>芦苇>千屈菜>水葱>扁秆藨草,这与所测各种植物 Fv/Fm 值大小相一致。植物的光合生理参数、叶绿素含量和叶绿素荧光参数是反映植物生长状况良好与否的内因,而植物高度与生物量则是植物生长状况良好与否的直接体现。本实验中,污水处理5种植物的净生长高度和生物量的净增长均高于清水培养植物(图4、表1),这与所测得的光合生理参数、叶绿素相对值和叶绿素荧光参数相一致。就生物量的净增长来看,除扁秆藨草和芦苇外,长苞香蒲、水葱和千屈菜的净增长均大于清水培养植物,差异显著($P<0.05$)。

本研究中水质监测时间由7月至10月初,正值供试植物生长旺盛期,各植物对生活污水在短期内有较好的净化效果(图5~图7),对 COD_Cr 、TP 和 NH_4^+-N 的去除分别在第30、24、18 d时已有良好效果。各植物对 NH_4^+-N 的去除速度最快,其次为TP,对 COD_Cr 的去除速度最低。有研究表明香蒲对氮磷具有较高的吸收能力^[19],孙光等^[2]研究发现香蒲对氨氮的去除率为90.0%,与本试验中所测数据相近。到试验后期各植物对 COD_Cr 、TP 和 NH_4^+-N 的去除率最高分别为80.2%~88.5%、89.7%~97.3%和98.6%~99.2%。但就污染物的去除速度来看,长苞香蒲>水葱>芦苇>千屈菜>扁秆藨草,差异显著($P<0.05$)。人工湿地对 COD_Cr 的去除主要是依靠污水中有机物的沉淀、基质吸附和植物根系上的微生物的降解作用^[17]。本试验中,在污水处理第12 d时,CK1和CK2的 COD_Cr 去除率分别为52.1%和65.3%,说明有机物的沉淀和基质的吸附发挥了重要作用(图5)。研究表明^[1],水体中磷一方面是以磷酸盐的形式沉积在水体底部,与基质相结合,成为难以去除的营养物质;另一方面是以可溶性活性磷(SRP)的形式被植物吸收,合成细胞组成物质。图6显示,在试验前期包括对照组在内总磷浓度大幅度降低,表明在试验前期磷酸盐的沉降作用是磷去除的主

要途径。尽管如此,5种湿地植物对总磷仍具有去除效果,且均大于对照,差异显著($P<0.05$)。污水中氨氮去除的途径有植物吸收和硝化反应等。研究表明^[18],氨氮可以通过直接挥发和植物吸收利用等途径从污水中去除,但硝化作用是主要的去除途径。本试验在夏季进行,有利于增强硝化细菌活力,从而提高对氨氮的去除速率。

本研究所选择的5种湿地植物中长苞香蒲、水葱和芦苇的光合生理参数、叶绿素荧光 Fv/Fm 值、叶绿素含量相对值和生物量大于其他植物,生活力强,对生活污水的净化效果表现最佳,而且生长期长,可作为人工湿地首选植物;扁秆藨草在湿地系统中适应性差,对污水的综合去除能力差,不宜应用于污染严重的人工湿地水体景观中;千屈菜在污水净化试验期间,具有较强适应能力,对 COD_Cr 、TP 和 NH_4^+-N 污染物也具有一定的去除能力,但在后期由于其叶片易落造成水面被覆盖,致使水质 COD_Cr 升高,故后期应对千屈菜采取收割措施,以防净化的污水被重新污染,出于人工湿地植物多样性原则和景观配置的需要,亦可在人工湿地中使用。

4 结论

(1)从本研究可以得出,人工湿地污水处理植物的光合生理参数、叶绿素荧光 Fv/Fm 值、叶绿素含量、生物量净增长等高于清水培养植物,这与污水为植物生长提供了氮磷等生长所需的营养物质相关。

(2)5种湿地植物对污水中 COD_Cr 、TP 和 NH_4^+-N 去除效果明显,综合植物生理生长特性和植物对污水中污染物的去除效果来看,长苞香蒲、水葱和芦苇可作为人工湿地净化污水的优先选择,其次为千屈菜和扁秆藨草。

参考文献:

- [1] 耿兵,张燕荣,王妮珊,等.不同水生植物净化污染源水的试验研究[J].农业环境科学学报,2011,30(3):548-553.
GENG Bin, ZHANG Yan-rong, WANG Ni-shan, et al. Effects of hydrophytes on the purification of polluted water[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3):548-553.
- [2] 孙光,马永胜,赵冉.不同植物人工湿地对污水的净化效果[J].生态环境,2008,17(6):2192-2194.
SUN Guang, MA Yong-sheng, ZHAO Ran. Purification efficiency of sewage in constructed wetlands with different plants[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(6):2192-2194.
- [3] 付融冰,杨海真,顾国维,等.潜流人工湿地对农村生活污水氮去除的研究[J].水处理技术,2006,32(1):18-22.

- FU Rong-bing, YANG Hai-zhen, GU Guo-wei, et al. Nitrogen removal from rural sewage by subsurface horizontal-flow in artificial wetlands[J]. *Technology of Water Treatment*, 2006, 32(1):18-22.
- [4] Stottmeister U, Wießner A, Kusch P, et al. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment[J]. *Biotechnology Advances*, 2003, 22(1):93-117.
- [5] Filip Z. International approach to assessing soil quality by ecologically-related biological parameters[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 88(2):169-174.
- [6] Ottová V, Balcarová J, Vymazal J. Microbial characteristics of constructed wetlands[J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35(5):117-123.
- [7] Machate T, Noll H, Behrens H, et al. Degradation of phenanthrene and hydraulic characteristics in a constructed wetland[J]. *Water Research*, 1997, 31(3):554-560.
- [8] 张洪刚, 洪剑明. 人工湿地中植物的作用[J]. *湿地科学*, 2006, 4(2):146-154.
- ZHANG Hong-gang, HONG Jian-ming. Functions of plants of constructed wetlands[J]. *Wetland Science*, 2006, 4(2):146-154.
- [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.
- GE Ying, WANG Xiao-yue, CHANG Jie. Comparative studies on the purification ability of plants in different degree eutrophic water[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 1999, 19(6):690-692.
- [10] 司友斌, 包军杰, 曹德菊, 等. 香根草对富营养化水体净化效果研究[J]. *应用生态学报*, 2003(2):277-279.
- SI You-bin, BAO Jun-jie, CAO De-ju, et al. Purification of eutrophicated water body by vetiveria zizanioids[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003(2):277-279.
- [11] 黄 娟, 王世和, 雒维国, 等. 人工湿地污水处理系统植物光合作用特性的研究[J]. *安全与环境工程*, 2006(2):55-57.
- HUANG Juan, WANG Shi-he, LUO Wei-guo, et al. The influence of photosynthesis on wastewater treatment of several plants in constructed wetlands[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2006(2):55-57.
- [12] 惠红霞, 许 兴, 李前荣. 外源甜菜碱对盐胁迫下枸杞光合功能的改善[J]. *西北植物学报*, 2003, 23(12):2137-2142.
- HUI Hong-xia, XU Xing, LI Qian-rong. Exogenous betaine improves photosynthesis of *Lycium barbarum* under salt stress[J]. *Acta Bot Boreali Occidentalia Sin*, 2003, 23(12):2137-2142.
- [13] 李林锋. 4种湿地植物光合作用特性的比较研究[J]. *西北植物学报*, 2008, 28(10):2094-2102.
- LI Lin-feng. Comparative Study on photosynthetic characteristics of hydrophytes in constructed wetland[J]. *Acta Bot Boreali Occidentalia Sin*, 2008, 28(10):2094-2102.
- [14] 赵建松, 白 梅, 程凤鸣, 等. 两种人工湿地条件下芦苇与芦竹生理生态特性研究[J]. *湿地科学*, 2008, 6(3):398-404.
- ZAO Jian-song, BAI Mei, CHENG Feng-ming, et al. Physio-ecological characteristics of *Phragmites australis* and *Arundo donax* under two types of constructed wetlands[J]. *Wetland Science*, 2008, 6(3):398-404.
- [15] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. *植物学通报*, 1999(4):444-448.
- ZHANG Shou-ren. A Discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999(4):444-448.
- [16] 党蕊娟, 李世清, 穆晓慧, 等. 施氮对半湿润农田冬小麦冠层叶片氮素含量和叶绿素相对值垂直分布的影响[J]. *西北植物学报*, 2008, 28(5):1036-1042.
- DANG Rui-juan, LI Shi-qing, MU Xiao-hui, et al. Effect of nitrogen on nitrogen vertical distribution and chlorophyll relative value of winter wheat canopy in sub-humid areas[J]. *Acta Bot Boreali-Occidentalia Sin*, 2008, 28(5):1036-1042.
- [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.
- LIU Yang, WANG Shi-he, HUANG Juan, et al. Study on constructed wetlands for longtime running[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(6):1156-1159.
- [18] 童昌华, 杨肖娥, 濮培民. 富营养化水体的水生植物净化试验研究[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(8):1447-1450.
- TONG Chang-hua, YANG Xiao-e, PU Pei-min. Purification of eutrophicated water by aquatic plant[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(8):1447-1450.
- [19] 韩潇源, 宋志文, 李培英. 高效净化氮磷污水的湿地水生植物筛选与组合[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(6):741-747.
- HAN Xiao-yuan, SONG Zhi-wen, LI Pei-ying. Selection and assembly of macrophyte species in constructed wetland for purification of N and P in wastewater[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(6):741-747.