

5 种水生植物对煤矿废水的适应性及净化效果

程丽芬, 张 欣

(山西省林业科学研究院, 山西 太原 030012)

摘要: 为了研究不同水生植物对煤矿废水的适应性和净化情况, 以水麦冬 *Triglochin palustre*, 三棱水葱 *Scirpus triqueter*, 石菖蒲 *Acorus tatarinowii*, 香蒲 *Typha orientalis*, 芦苇 *Phragmites communis* 5 种水生植物为材料, 用塑料水培箱模拟人工湿地, 通过测定净光合速率和蒸腾速率, 比较分析煤矿废水和清水对照 2 个处理下植物的光合特性和生长情况。并设置煤矿废水处理组、废水静置(ck₁)和河沙+废水静置(ck₂), 每月测定其水质, 研究 5 种水生植物对煤矿废水中化学需氧量、总磷和总氮的去除效果。结果表明: 煤矿废水处理下水麦冬、石菖蒲、三棱水葱的叶片净光合速率和蒸腾速率均显著大于清水对照($P<0.05$), 香蒲、芦苇的则小于清水对照; 煤矿废水处理下水麦冬、三棱水葱的叶绿素相对含量、株高、生物量增加量均显著大于清水对照($P<0.05$), 香蒲、石菖蒲、芦苇的则小于清水对照, 说明水麦冬和三棱水葱对煤矿废水的适应性较强。5 种植物对煤矿废水的净化效果明显, 化学需氧量质量浓度从 363 mg·L⁻¹ 降低到 8~18 mg·L⁻¹, 总磷质量浓度从 2.07 mg·L⁻¹ 降低到 0.06~0.17 mg·L⁻¹, 总氮质量浓度从 20.00 mg·L⁻¹ 降低到 0.23~0.87 mg·L⁻¹。综合考虑去除效果和去除速率, 香蒲、芦苇和三棱水葱好于水麦冬和石菖蒲。图 10 表 3 参 13

关键词: 水生植物; 煤矿废水; 光合参数; 株高; 生物量; 去除效果

中图分类号: S718.3; X502

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2019)04-0801-09

Adaptability and purification effect on coal mine wastewater with five aquatic plants

CHENG Lifan, ZHANG Xin

(Shanxi Academy of Forest Sciences, Taiyuan 030012, Shanxi, China)

Abstract: In order to study the adaptability and purification effect on coal mine waste water with different aquatic plants in this paper, using plastic cartons as simulated wetlands, physiological and growth characteristics of five aquatic plants (*Triglochin palustre*, *Scirpus triqueter*, *Acorus tatarinowii*, *Typha orientalis*, and *Phragmites communis*) treated with coal mine wastewater and clean water were compared and analyzed by measuring net photosynthetic rate (P_n) and transpiration rate (T_r). The water quality of coal mine wastewater treatment, ck₁(static wastewater) and ck₂(river sand + static wastewater) were measured monthly to understand the removal effect of the five aquatic plants for chemical oxygen demand (COD_{Cr}), total phosphorus (TP), and total nitrogen (TN) in coal mine wastewater. Results showed that net P_n and T_r of *T. palustre*, *A. tatarinowii*, and *S. triqueter* with coal mine wastewater were significantly higher than that of clear water($P<0.05$); whereas, P_n and T_r of *T. orientalis* and *P. communis* were not. The relative content of chlorophyll, plant height, and biomass increase of *Triglochin palustre* and *S. triqueter* with coal mine wastewater were significantly higher than with clear water ($P<0.05$), but *T. orientalis*, *A. tatarinowii*, and *P. communis* were not. Furthermore, results showed that all five species were highly efficient with decreasing concentrations of COD_{Cr} from 363 mg·L⁻¹ to 8-18 mg·L⁻¹, TP from 2.07 mg·L⁻¹ to 0.06-0.17 mg·L⁻¹, and TN from 20.00 mg·L⁻¹ to 0.23-0.87 mg·L⁻¹. Thus, adaptability of *T. palustr* and *S. triqueter* to coal mine wastewater was stronger, and by comprehensive

收稿日期: 2018-08-02; 修回日期: 2018-11-22

基金项目: 国家林业局引进国际先进林业科学技术项目(2015-4-25)

作者简介: 程丽芬, 高级工程师, 从事森林培育及植物组织培养研究。E-mail: clf1125@sohu.com

consideration of removal efficiency and removal rate, *T. orientalis*, *P. communis*, and *S. triqueter* were better than *T. palustre* and *A. tatarinowii*. [Ch, 10 fig. 3 tab. 13 ref.]

Key words: aquatic plants; coal mine wastewater; photosynthetic parameters; plant height; biomass; removal effect

随着经济的快速发展,产煤量增加,煤矿废水排放成为矿区的主要污染之一^[1]。煤矿废水中的主要污染物为悬浮物、石油类和重金属^[2],具体成分因所处地区不同而存在差异^[3]。人工湿地以其自然、低耗能、低投资、处理效果稳定等特点^[4-5],被广泛应用于城市生活污水处理^[6]。国内利用人工湿地处理城镇和农村生活污水、化粪池尾水、养猪场废水的研究较多,而针对煤矿废水的研究较少^[7]。人工湿地由水生植物、基质和微生物组成^[8],植物可以通过吸收利用氮、磷等营养成分、富集吸附重金属和有害物质来净化污水,植物的根系为微生物提供氧气,微生物的大量繁殖可以进一步提高人工湿地对污染物的去除率^[9]。在实际建设中,最常用的湿地植物是挺水植物,国内外研究中效果较好的挺水植物有芦苇 *Phragmites communis*, 香蒲 *Typha orientalis*, 三棱水葱 *Scirpus triqueter*, 菖蒲 *Acorus calamus* 和灯心草 *Juncus effusus* 等^[10-11]。本研究以芦苇、香蒲、三棱水葱、石菖蒲 *Acorus tatarinowii* 和水麦冬 *Triglochin palustre* 为研究对象,利用塑料水培箱模拟人工湿地单元,比较分析了煤矿废水和清水对照 2 个处理下植物的光合特性和生长情况,并测定其对煤矿废水中化学需氧量(COD_G)、总磷(TP)和总氮(TN)的去除效果,以期为构建煤矿废水人工湿地植物的选择提供科学依据。

1 试验地概况

试验地(111°29'N, 37°26'E)位于山西省太原市,该区属北温带大陆性气候,年平均降水量为 468.4 mm,季节分布不均匀。年平均气温为 9.5 ℃,1 月平均气温为-6.4 ℃,7 月平均气温为 23 ℃,年无霜期平均为 149~175 d,全年日照时数为 2 501.7 h。

2 材料与方法

2.1 试验材料

2.1.1 供试植物 根据山西省的气候条件及湿地处理煤矿废水的需要,选择抗污力强、较耐寒、易繁殖、病虫害少、地下部分及地上部分生物量大的多年生水生或湿生植物进行试验。通过查阅文献和实地考察,2017 年 6 月从江苏省宿迁市购置了 5 种水生植物(表 1)的根苗进行试验,购回植物后栽植于河沙中,用清水(清水为自来水)浇灌,使植物保持正常生长,定期对枯死植株进行补栽。

2.1.2 模拟人工湿地 用长×宽×高=60 cm×40 cm×35 cm

的塑料水培箱模拟人工湿地,在箱子底部铺设 15 cm 厚的河沙作为基质,种植水生植物。每种植物 6 箱,共 30 箱,植物的株行距为 8 cm×6 cm,每箱 50 株。

2.1.3 煤矿废水 设煤矿废水和清水 2 个处理,各处理 3 次重复。煤矿废水取自山西省大同市左云县小京庄乡鹊山高家窑煤矿,煤矿废水和清水的基本理化性质见表 2。

本研究所取废水为矿井废水,由于在煤矿内部已经过曝气中和池(曝气、加碱)、初沉调节池和高效

表 1 供试植物

Table 1 Tested plants

水生植物	苗龄/a	株高/cm	试验前处理方法
水麦冬	1	18.5	栽于河沙中,清水培养
三棱水葱	1	22.8	栽于河沙中,清水培养
石菖蒲	1	39.4	栽于河沙中,清水培养
香蒲	1	55.7	栽于河沙中,清水培养
芦苇	1	50.1	栽于河沙中,清水培养

表 2 煤矿废水和清水的理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of coal mine wastewater and clean water

试验用水	pH	质量浓度/(mg·L ⁻¹)						
		BOD ₅	COD _G	硫化物	总磷	总氮	挥发酚	砷
地表水Ⅲ类标准	6.0~8.0	4.00	20.0	0.200	0.20	1.00	0.005 0	0.050 0
煤矿废水	6.3~6.5	2.10	363.0	0.231	2.07	20.00	0.000 5	0.000 6
清水	6.8~8.5	0.74	24.2	—	0.06	0.06	—	—

说明: “—”表示未检出; BOD₅ 为五日生化需氧量

絮凝沉淀池(加入聚合氯化铝 PAC 和聚丙烯酰胺 PAM)的预处理, 所以部分指标(包括铁、锰等其他重金属元素含量)已满足 GB 3838-2002《地表水环境质量标准》的Ⅲ类标准。硫化物超标量不大, 与土壤基质中的钙离子、镁离子结合沉淀后即可满足地表水环境Ⅲ类标准, 因此本次试验不予考虑。本研究仅测定没有达到标准要求的 COD_{Cr} , TP, TN 这 3 个指标。

2.2 试验设计

2017 年 7 月, 待供试植物生长情况稳定后, 开始进行试验。试验过程中各个箱子的基质表面保持 2~3 cm 恒定水头, 尽量保障所有水培箱都处于相同的温度、湿度和光照条件下, 设置遮雨棚(避免雨水的影响), 通过加自来水补充水面蒸发和植物蒸腾消耗的水分。试验为期 4 个月, 每月中旬测定 1 次植物的光合参数和叶绿素相对含量, 并在试验前后分别测定各种植物的株高和生物量, 每月 1 日, 11 日和 21 日采集煤矿废水处理组、废水静置(ck_1)和河沙+废水静置(ck_2)的水样测定水质, 共测 12 次。

2.3 数据测定及计算

2.3.1 光合参数测定 测定时间为 9:00-11:00。采用 LI-6200 便携式光合系统测定植物的光合参数, 包括净光合速率(P_n), 蒸腾速率(T_r), 气孔导度(C_s), 胞间二氧化碳浓度(C_i)4 个指标, 并根据式(1)计算植物的水分利用效率(W_{UE})。

$$W_{\text{UE}}=P_n/T_r \quad (1)$$

式(1)中: P_n 为光合速率($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); T_r 为蒸腾速率($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); W_{UE} 为水分利用效率($\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$)。

2.3.2 叶绿素相对含量测定 采用 SPAD-502 便携式叶绿素仪测量植物的叶绿素相对含量。测定时间为 17:00-18:00。

2.3.3 株高测定 试验前后分别在各个箱子中随机选取 3 株植物, 用钢卷尺测定其株高求平均值。

2.3.4 生物量增加量测定 试验前后分别在各个箱子中随机选取 3 株植物, 采集植物全株。用清水洗净, 分为地上部分和地下部分, 分别在 85 °C 烘箱中烘至恒量, 称其干质量, 计算地上部分、地下部分和总生物量的增加量。地上(地下)部分生物量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)=[地上(地下)部分干质量/取样株数×每个水培箱中的植株数]/水培箱的基质面积; 总(地上或地下)生物量增加量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)=试验后总(地上或地下)生物量-试验前总(地上或地下)生物量。本试验中, 取样株数为 3 株, 各个水培箱中的植株数为 50 株, 水培箱基质面积为 $0.4\text{ m}\times 0.6\text{ m}=0.24\text{ m}^2$ 。

2.3.5 水样水质测定 BOD_5 的测定采用稀释与接种法; COD_{Cr} 的测定采用重铬酸盐法; 硫化物的测定采用亚甲基蓝分光光度法; TP 的测定采用钼酸铵分光光度法; TN 的测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法; 砷的测定采用原子荧光光度法; 挥发酚的测定采用连续流动 4-氨基安替比林分光光度法。污染物的去除率根据式(2)计算。

$$R=[(D_i-D_0)/D_i]\times 100\% \quad (2)$$

式(2)中: R 为去除率(%); D_i 为污染物的初始质量浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); D_0 为污染物的取样质量浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

2.4 统计分析

利用 Excel 整理数据并作图, 利用 SPSS 18.0 对 2 个处理间光合参数、叶绿素相对含量和株高之间的差异显著性进行分析(独立样本 t 检验), 并对生物量增加量进行多重比较(LSD 法)。

3 结果与分析

3.1 煤矿废水对水生植物叶片光合参数的影响

3.1.1 净光合速率 由图 1 可知: 煤矿废水处理下水麦冬、石菖蒲、三棱水葱的叶片净光合速率(P_n)大于清水对照。其中, 煤矿废水下水麦冬叶片 7, 8, 9 和 10 月的 P_n 比清水对照高 13.32%, 27.84%, 12.76% 和 85.78%, 差异显著($P<0.05$); 煤矿废水下水石菖蒲叶片 7, 8, 9 和 10 月的 P_n 比清水对照高 16.68%, 39.87%, 46.76% 和 11.67%, 差异显著($P<0.05$); 煤矿废水下水三棱水葱叶片 7, 8, 9 和 10 月的 P_n 比清水对照高 21.20%, 35.85%, 76.46% 和 197.26%, 差异极显著($P<0.01$)。而清水对照香蒲、芦苇的叶片 P_n 大于煤矿废水处理。其中, 清水对照香蒲叶片 7, 8, 9 和 10 月的 P_n 比煤矿废水处理高 45.34%, 0.75%, 20.96% 和 16.96%, 差异显著($P<0.05$); 清水对照下芦苇叶片 7, 8, 9 和 10 月的 P_n 比煤矿废水处理高 6.15%, 4.21%, 14.77% 和 18.59%, 差异显著($P<0.05$)。总体来看, P_n 随月份的增

大呈下降趋势,从大到小依次为芦苇、水麦冬、香蒲、石菖蒲、三棱水葱。

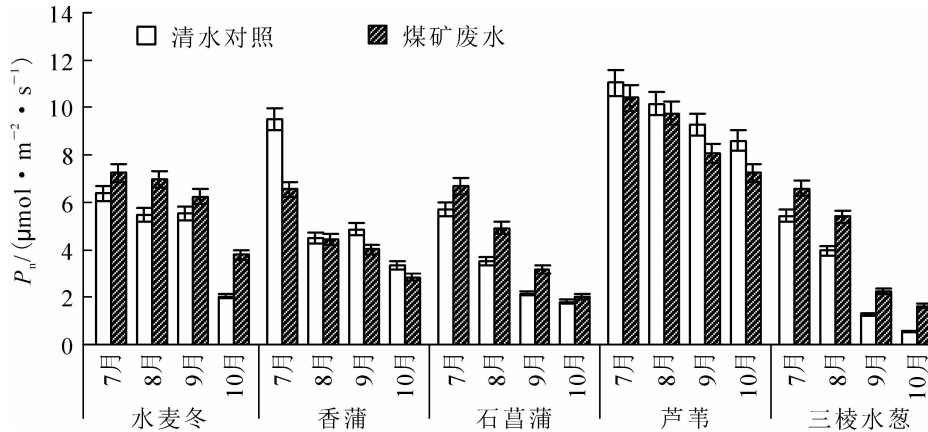


图1 不同处理下5种水生植物叶片净光合速率(P_n)的变化

Figure 1 Changes of net photosynthetic rate (P_n) of 5 aquatic plants under different treatments

3.1.2 蒸腾速率 由图2可知:煤矿废水处理下水麦冬、石菖蒲、三棱水葱的叶片蒸腾速率(T_r)大于清水对照。其中,煤矿废水处理下水麦冬叶片7,8,9和10月的 T_r 比清水对照高13.27%,25.60%,11.99%和77.34%,差异显著($P<0.05$);煤矿废水处理下石菖蒲叶片7,8,9和10月的 T_r 比清水对照高17.60%,0.54%,34.69%和21.63%,差异极显著($P<0.01$);煤矿废水处理下三棱水葱叶片7,8,9和10月的 T_r 比清水对照高14.69%,19.11%,25.72%和62.80%,差异不显著($P>0.05$)。而清水对照下香蒲叶片7,8,9和10月的 T_r 比煤矿废水处理高64.64%,1.35%,13.25%和30.88%,差异不显著($P>0.05$);清水对照芦苇叶片的 T_r 除10月略低于煤矿废水处理外,7,8和9月的 T_r 比煤矿废水处理高11.69%,33.51%和15.13%,差异不显著($P>0.05$)。总体来看,5种植物叶片 T_r 随月份的增大呈先升高后降低的趋势, T_r 从大到小依次为芦苇、三棱水葱、香蒲、水麦冬、石菖蒲。

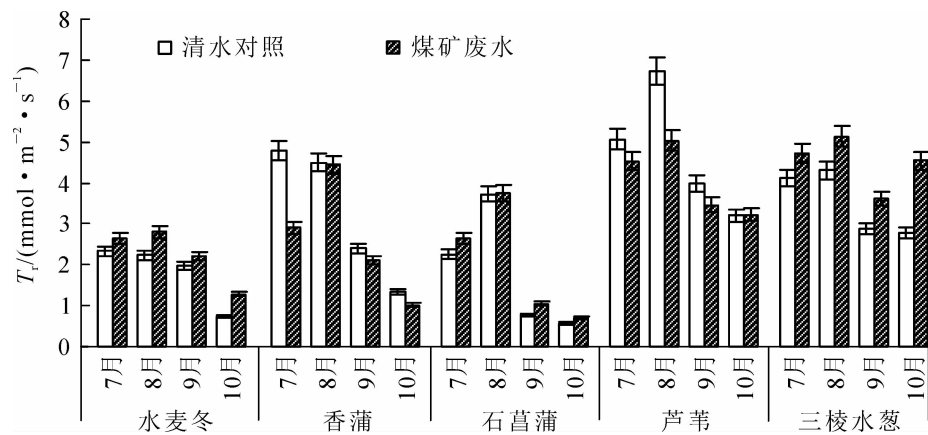


图2 不同处理下5种水生植物叶片蒸腾速率(T_r)的变化

Figure 2 Changes of transpiration rate (T_r) of 5 aquatic plants under different treatments

3.1.3 气孔导度 由图3可知:煤矿废水处理下水麦冬叶片7,8,9和10月的气孔导度(C_s)比清水对照高24.99%,21.23%,2.79%和80.17%,差异显著($P<0.05$);煤矿废水处理下石菖蒲叶片的 C_s 除8月略低于清水对照外,7,9和10月的 C_s 比清水对照高74.34%,39.40%和22.98%,差异显著($P<0.05$)。而清水对照下香蒲、芦苇、三棱水葱的叶片 C_s 大于煤矿废水处理。其中,清水对照下香蒲叶片7,8,9和10月的 C_s 比煤矿废水处理高83.31%,3.26%,14.97%和67.12%,差异不显著($P>0.05$);清水对照芦苇叶片7,8,9和10月的 C_s 比煤矿废水处理高33.94%,8.70%,69.37%和26.32%,差异不显著($P>0.05$);清水对照三棱水葱叶片7,8,9和10月的 C_s 比煤矿废水处理高82.48%,40.01%,3.64%和49.66%,差异不显著($P>0.05$)。总体来看,5种植物 C_s 随月份的增加呈下降趋势,从大到小依次为三棱水葱、芦苇、香蒲、水麦冬、石菖蒲。

煤矿废水处理下水麦冬、石菖蒲、三棱水葱的叶片 P_n 和 T_r 均大于清水对照, 仅说明水麦冬、石菖蒲、三棱水葱对煤矿废水的适应性较强。从整体变化趋势上来看, 芦苇和香蒲的叶片 P_n , T_r 和 C_s 均较大, 说明芦苇和香蒲光合作用较其他3种植物更显著。

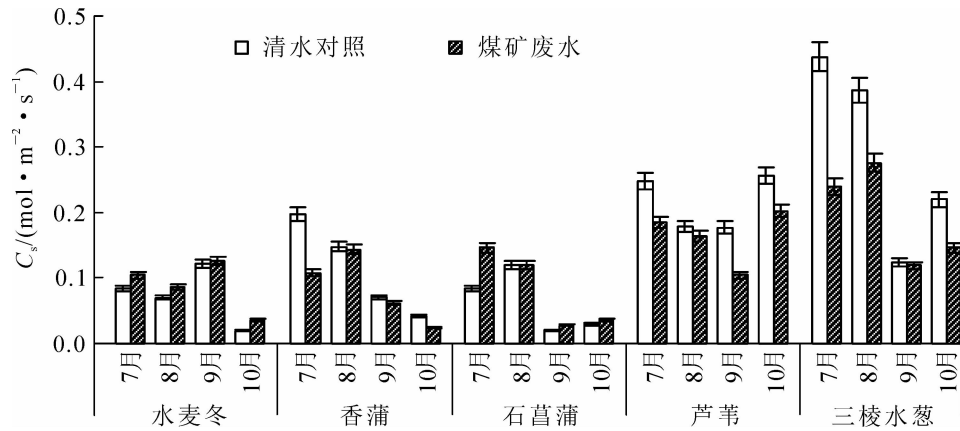


图3 不同处理下5种水生植物叶片气孔导度(C_s)的变化

Figure 3 Changes of stomatal conductance(C_s) of 5 aquatic plants under different treatments

3.1.4 胞间二氧化碳浓度 由图4可以看出: 5种水生植物煤矿废水处理和清水对照的叶片胞间二氧化碳浓度(C_i)的差别不定, 变化趋势不明显。但从总体来看, 5种植物的叶片 C_i 随月份增大呈上升趋势。植物的 P_n 和 C_s 随月份的增加呈下降趋势, 而 C_i 随月份的增加而增加, 所以 C_s 的下降并不是引起植物 P_n 下降的主要原因, 植物光合速率下降的主要原因可能是季节变化, 这与李龙山等^[12]的研究结果一致。5种植物 C_i 从大到小依次为三棱水葱、芦苇、石菖蒲、香蒲、水麦冬。

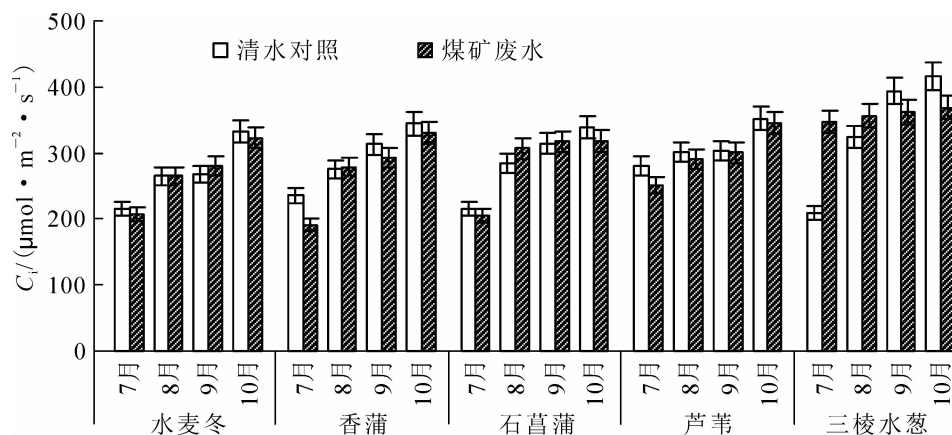


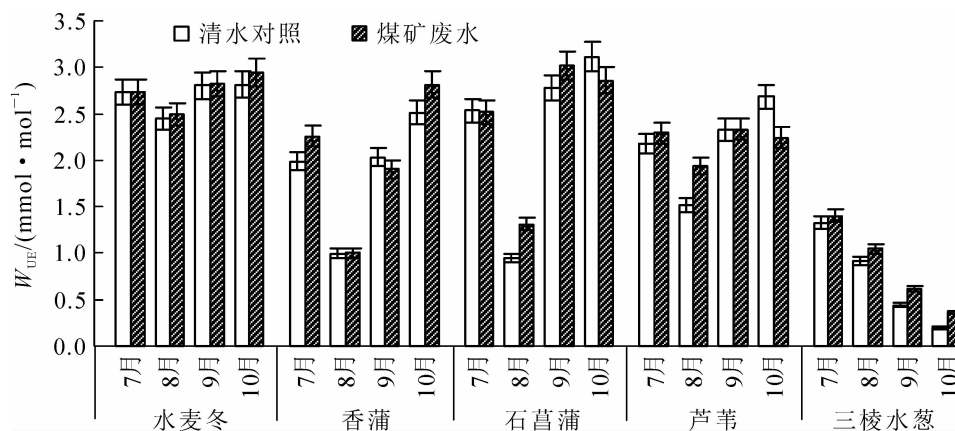
图4 不同处理下5种水生植物叶片胞间二氧化碳浓度(C_i)的变化

Figure 4 Changes of intercellular carbon dioxide concentration(C_i) of 5 aquatic plants under different treatments

3.1.5 水分利用效率 由图5可以看出: 煤矿废水处理下5种植物叶片的水分利用效率(W_{UE})总体上比清水对照高(香蒲9月, 石菖蒲7和10月, 芦苇10月除外)。其中, 水麦冬、香蒲、石菖蒲、芦苇的 W_{UE} 随月份的增加先降低后升高, 而三棱水葱的水分利用效率随月份的增加而降低。5种植物 W_{UE} 的从大到小依次为水麦冬、石菖蒲、芦苇、香蒲、三棱水葱。

3.2 煤矿废水对水生植物叶绿素相对含量的影响

由图6可知: 煤矿废水处理下水麦冬、三棱水葱的叶绿素相对含量大于清水对照。其中, 煤矿废水处理下水麦冬叶片7, 8, 9和10月的叶绿素相对含量比清水对照高5.70%, 9.94%, 7.69%和14.19%, 差异显著($P < 0.05$); 煤矿废水处理下三棱水葱叶片7, 8, 9和10月的叶绿素相对含量比清水对照高9.09%, 2.41%, 6.49%和6.76%, 差异不显著($P > 0.05$)。而除香蒲9月外, 清水对照香蒲、石菖蒲、芦苇的叶绿素相对含量大于煤矿废水处理。其中, 清水对照香蒲叶片7, 8和10月的叶绿素相对含量比煤矿废水处理高5.02%, 1.98%和9.65%, 差异显著($P < 0.05$); 清水对照石菖蒲叶片7, 8, 9和10月的叶

图5 不同处理下5种水生植物叶片水分利用效率(W_{UE})的变化Figure 5 Changes of water use efficiency(W_{UE}) of 5 aquatic plants under different treatments

绿素相对含量比煤矿废水处理高 12.54%, 7.69%, 5.53%和 11.59%, 差异极显著($P<0.01$); 清水对照芦苇叶片 7, 8, 9 和 10 月的叶绿素相对含量比煤矿废水处理高 16.73%, 10.04%, 12.68%和 18.99%, 差异显著($P<0.05$)。总体来看, 5 种植物叶片的叶绿素相对含量随月份的增大呈先升高后降低的趋势, 也从另一方面表明导致植物光合速率下降的主要原因是季节变化。5 种植物叶绿素相对含量的变化从高到低依次为石菖蒲、芦苇、香蒲、水麦冬、三棱水葱。

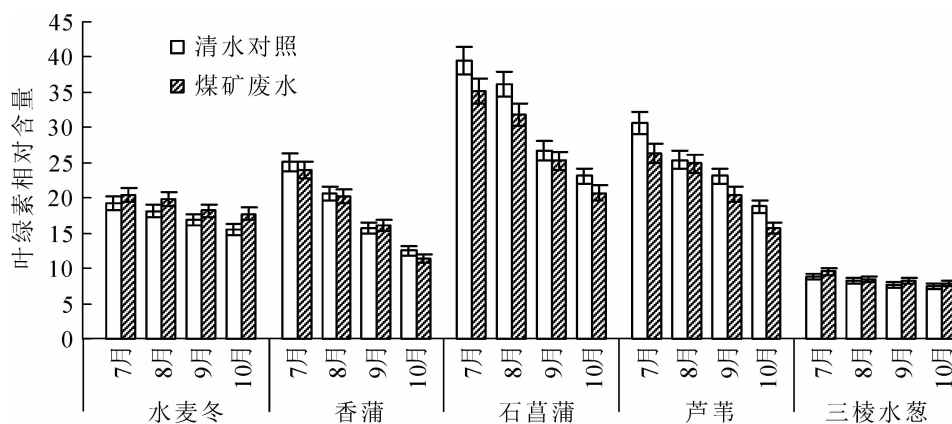
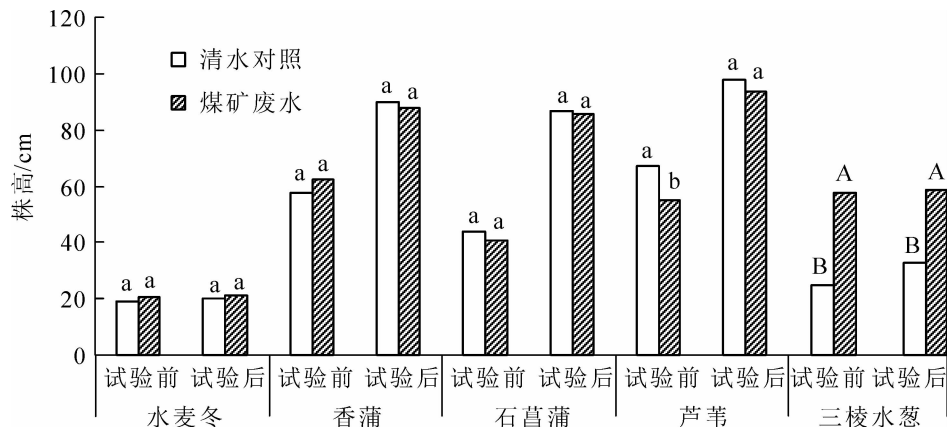


图6 不同处理下5种水生植物叶片叶绿素相对含量的变化

Figure 6 Changes of chlorophyll relative content of 5 aquatic plants under different treatments

3.3 煤矿废水对水生植物株高的影响

清水对照和煤矿废水条件下, 5 种植物均能健康正常地生长, 因此均能适应煤矿废水环境。从图 7



不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), 不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)

图7 5种水生植物试验前和试验后的株高对比

Figure 7 Plant height of 5 aquatic plants before and after experiment

可以看出：5 种植物的株高大小为芦苇>香蒲>石菖蒲>三棱水葱>水麦冬。经过 4 个月的生长，5 种植物试验后的株高均大于试验前。其中，香蒲、石菖蒲、芦苇的株高增长量较大，平均增加量分别为 28.88、44.15 和 34.60 cm；水麦冬、三棱水葱的株高增长量较小，平均增加量分别为 1.08 和 4.71 cm。除香蒲试验前外，清水对照香蒲、石菖蒲、芦苇的株高均大于煤矿废水处理，其中芦苇试验前 2 个处理间差异显著($P<0.05$)，其他无显著差异；但煤矿废水处理下水麦冬、三棱水葱的株高大于清水对照，其中三棱水葱煤矿废水和清水对照间差异极显著($P<0.01$)，水麦冬无显著差异。

3.4 煤矿废水对水生植物生物量的影响

由表 3 可以看出：5 种植物地上部分、地下部分和总生物量的增长量大小均为石菖蒲>芦苇>香蒲>三棱水葱>水麦冬，差异显著。其中，香蒲、石菖蒲、芦苇的株高增长量较大，水麦冬、三棱水葱的株高增长量较小，与株高表现一致。生物量增长量总体表现为地下部分生物量增长量大于地上部分生物量的增长量。但清水对照香蒲、石菖蒲、芦苇的生物量增长量均大于煤矿废水处理($P<0.05$)，煤矿废水处理下水麦冬、三棱水葱的生物量增长量大于清水对照($P<0.05$)。

表 3 5 种水生植物的生物量增加量

Table 3 Biomass increase of 5 aquatic plants

植物	处理	地上部分增加量/(g·m ⁻²)	地下部分增加量/(g·m ⁻²)	总生物量增加量/(g·m ⁻²)
石菖蒲	清水对照	47.77 a	50.72 a	98.49 a
	煤矿废水	40.23 b	46.35 b	86.58 b
芦苇	清水对照	28.54 c	34.47 c	63.01 c
	煤矿废水	23.40 d	30.77 d	54.17 d
香蒲	清水对照	22.75 d	27.59 e	50.34 e
	煤矿废水	18.63 e	23.83 f	42.46 f
三棱水葱	清水对照	6.11 g	7.13 h	13.24 h
	煤矿废水	8.83 f	10.94 g	19.77 g
水麦冬	清水对照	3.96 h	5.74 i	9.70 i
	煤矿废水	6.06 g	7.88 h	13.94 h

说明：同列不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)

3.5 5 种水生植物对煤矿废水的净化效果

3.5.1 对化学需氧量(COD_{Cr})的去除效果

由图 8 可以看出：5 种水生植物均能有效去除煤矿废水中 COD_{Cr}。7 月 11 日第 1 次取样时，水麦冬、香蒲、石菖蒲、芦苇、三棱水葱对煤矿废水中 COD_{Cr} 的去

除率分别为 47.66%，65.84%，57.58%，62.26%，69.70%。8 月 11 日之前，煤矿废水中的 COD_{Cr} 下降速度较快，之后变化趋于平缓。到 9 月 21 日时，各水生植物处理组的 COD_{Cr} 达最低值，为 8~18 mg·L⁻¹，去除率均为 95%以上，达到 GB 3838-2002《地表水环境质量标准》的Ⅲ类标准。之后，水麦冬和石菖蒲组的 COD_{Cr} 浓度又有小幅度升高，这种变化趋势与李龙山等^[12]的研究结果相似。各水生植物处理组煤矿废水中的 COD_{Cr} 与对照(ck₁ 和 ck₂)差异显著($P<0.01$)。ck₁ 和 ck₂ 处理下，煤矿废水中 COD_{Cr} 质量浓度于 9 月 1 日前呈下降趋势，9 月 1 日后基本保持不变，最终分别降至 132 和 81 mg·L⁻¹，去除率达 63.64%和 77.69%，可能是因为有机质的沉淀和基质的吸附发挥了重要作用。总体来看，5 种植物对煤矿废水中 COD_{Cr} 的去除效果从高到低依次为香蒲、三棱水葱、芦苇、石菖蒲、水麦冬。

3.5.2 对总磷(TP)的去除效果

由图 9 可以看出：5 种水生植物对煤矿废水中 TP 的去除效果较好。7 月 11 日第 1 次取样时，水麦冬、香蒲、石菖蒲、芦苇、三棱水葱对煤矿废水中 TP 的去除率分别为 46.38%，60.87%，40.10%，65.22%，53.62%。8 月 1 日之前，煤矿废水中的 TP 质量浓度下降速度较快，之后变化趋于平缓。这可能是由于 7-8 月为植物的生长旺期，所以较多地吸收利用煤矿废水中的磷元素用于自身生长，而 9-10 月植物生长趋缓，所以对磷的吸收较少。到 10 月 21 日试验结束时，各煤矿废水处理组的 TP 质量浓度达最低值，为 0.06~0.17 mg·L⁻¹，去除率均为 92%以上，达到 GB 3838-2002《地表水环境质量标准》的Ⅲ类标准。各水生植物处理组煤矿废水中的 TP 浓度与与对照(ck₁ 和 ck₂)差异显著($P<0.01$)。ck₁ 处理煤矿废水中 TP 质量浓度于 7 月 21 日之前下降速度较快，之后继续下降但速度趋缓；ck₂ 处理煤矿废水中 TP 质量浓度的于 8 月 1 日前迅速下降，之后又稍有回升，8 月 21 日后又缓慢下降。这种前期的快速下降趋势说明磷酸盐的沉降作用是去除煤矿废水中磷的主要途径，最终 ck₁ 和 ck₂ 的 TP 质量浓度分别降至 0.86 和 0.64 mg·L⁻¹，去除率达 58.45%和 69.08%，这可能是由于一部分磷以磷酸盐的形式沉积在水体底部，一部分磷与基质相结合形成难溶物质。总体来看，5 种植物对煤矿废水中 TP 的去除效果从高到低依次为香蒲、芦苇、三棱水葱、水麦冬、石菖蒲。香蒲和芦苇对 TP 的去除效果较好，可能是因为香蒲和芦苇吸收了更多磷营养元素用于自身生长。

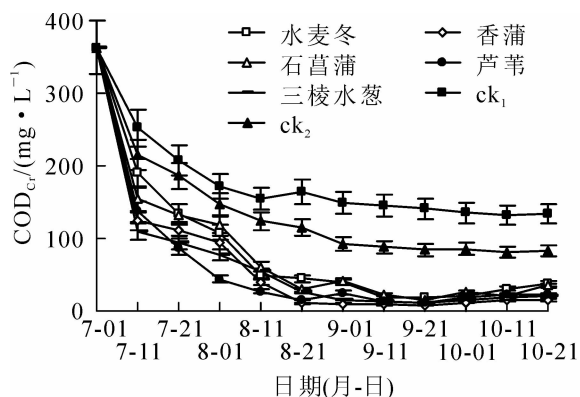
图8 水生植物对COD_{Cr}的去除效果

Figure 8 Effect of aquatic plants on COD_{Cr} removal from wastewater

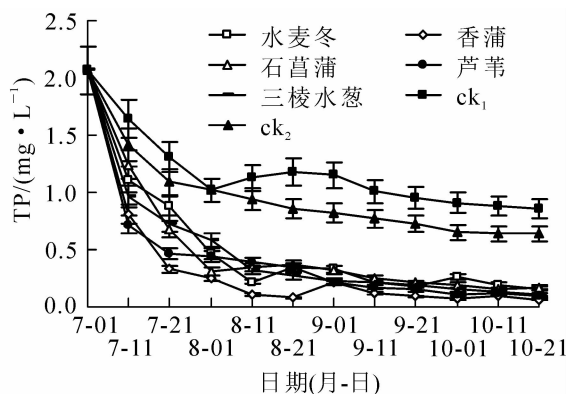


图9 水生植物对总磷(TP)的去除效果

Figure 9 Effect of aquatic plants on total phosphorus (TP) removal from wastewater

3.5.3 对总氮(TN)的去除效果 由图10可以看出:5种水生植物对煤矿废水中TN的去除效果也较好,煤矿废水中的TN随时间变化总体呈下降趋势。7月11日第1次取样时,水麦冬、香蒲、石菖蒲、芦苇、三棱水葱对煤矿废水中TN的去除率分别为37.80%,51.30%,34.60%,55.75%,45.75%。8月21日之前,煤矿废水中的TN浓度下降速度较快,之后变化趋于平缓。其原因可能和TP一样,7-8月为植物的生长旺期,所以吸收利用了较多的氮元素用于自身生长,而9-10月植物生长趋缓,所以对氮的吸收较少。到10月21日试验结束时,各煤矿废水处理组的TN浓度达最低值,为0.23~0.87 mg·L⁻¹,去除率均为93%以上,也达到GB 3838-2002《地表水环境质量标准》的Ⅲ类标准。各水生植物处理组煤矿废水中的TN质量浓度与对照(ck₁和ck₂)差异显著($P<0.01$)。ck₁和ck₂处理煤矿废水中TN浓度于8月1日前下降速度较快,8月1日后下降速度趋缓,之后最终分别降至6.84和4.58 mg·L⁻¹,去除率达65.80%和77.10%,可能是因为氨态氮的挥发及基质的吸附沉降作用,其中ck₂,随着试验时间的延长,会在基质表面生长微生物群,微生物的硝化、反硝化左右使其对TN的去除率较高。总体来看,5种植物对煤矿废水中TN的去除效果从高到低依次为芦苇、香蒲、三棱水葱、水麦冬、石菖蒲。香蒲和芦苇对TN的去除效果较好,可能是因为香蒲和芦苇的生长过程中也吸收利用了较多的氮元素。本研究显示:5种水生植物对煤矿废水中TN的去除率高,可能是由于本试验时间为7-10月,正值供试植物的生长旺盛期,其生长过程中需要吸收大量的氮、磷等营养元素。此外,在静水条件下且试验时间较长,有利于水生植物根系的发展,在根系周围形成稳定的好氧、缺氧或厌氧微环境,有利于硝化细菌和反硝化菌的生长,从而增强微生物的硝化和反硝化作用,提高对煤矿废水中TN的去除率^[13]。

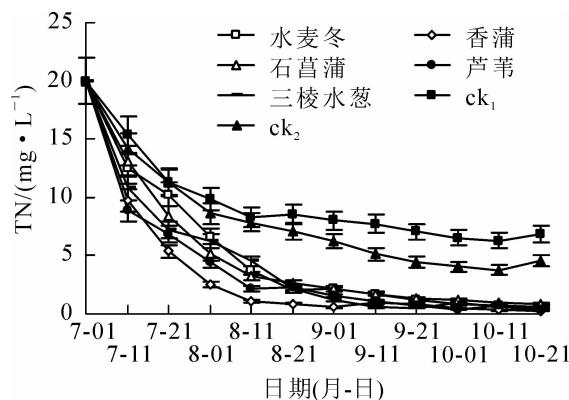


图10 水生植物对总氮(TN)的去除效果

Figure 10 Effect of aquatic plants on total nitrogen (TN) removal from wastewater

4 结论

煤矿废水处理下水麦冬、石菖蒲、三棱水葱的叶片净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r)均大于清水对照,香蒲、芦苇的则小于清水对照;煤矿废水处理下水麦冬、三棱水葱的叶绿素相对含量、株高、生物量增加量均大于清水对照,香蒲、石菖蒲、芦苇的则小于清水对照。说明煤矿废水中的有害物质可能影响了香蒲、石菖蒲、芦苇的正常生长,而煤矿废水中的氮磷等营养物质促进了水麦冬、三棱水葱株高和生物量的增长。因此,5种植物中水麦冬和三棱水葱对煤矿废水的适应性较强。

5种水生植物处理下,煤矿废水中的COD_{Cr}, TP, TN质量浓度均能降至GB 3838-2002《地表水环境质量标准》Ⅲ类标准的要求。综合去除效果和去除率,应优先选择香蒲、芦苇和三棱水葱作为构建煤矿

废水人工湿地的植物材料, 其次为水麦冬和石菖蒲。

5 参考文献

- [1] 牛望. 煤矿山废水的湿地净化研究: 以河南大峪沟煤矿为例[D]. 北京: 中国地质大学, 2009.
NIU Wang. *Wetland Purification of Coal Mine Wastewater: A Case Study of Dayugou Mine in Henan, China* [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009.
- [2] 国家环境保护总局. 煤炭工业污染物排放标准: GB 20426-2006[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006: 1-6.
- [3] 刘沛友, 石越辉, 支嘉健, 等. 毕节市煤矿废水重金属成分研究[J]. 能源环境保护, 2015, 29(6): 53-56.
LIU Peiyou, SHI Yuehui, ZHI Jiajian, *et al.* Heavy metal component research in coal mine waste water of Bijie City [J]. *Energy Environ Prot*, 2015, 29(6): 53-56.
- [4] 赵发敏, 海热提, 韩晓丽. 人工湿地填料去除氨氮优化配比及影响因素研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(9): 26-30.
ZHAO Famin, HAI Reti, HAN Xiaoli. Optimizing substrate gradation and effect factors for constructed wetland removal of ammonia nitrogen [J]. *Environ Sci Technol*, 2011, 34(9): 26-30.
- [5] 廖新伟, 汪植三, 李其谦, 等. 人工湿地在猪场污水净化中的应用[J]. 农业工程学报, 1995, 11(4): 96-100.
LIAO Xindi, WANG Zhisun, LI Qiqian, *et al.* The application of effluent purification on constructed wetlands in pig farm [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 1995, 11(4): 96-100.
- [6] 狄军贞, 江富, 马龙, 等. PRB 强化垂直流人工湿地系统处理煤矿废水[J]. 环境工程学报, 2013, 7(6): 2033-2037.
DI Junzhen, JIANG Fu, MA Long, *et al.* Treatment of coal mine wastewater with vertical flow constructed wetland system strengthened by PRB [J]. *Chin J Environ Eng*, 2013, 7(6): 2033-2037.
- [7] 廖新伟, 骆世明, 吴银宝, 等. 人工湿地植物筛选的研究[J]. 草业学报, 2004, 13(5): 39-45.
LIAO Xindi, LUO Shiming, WU Yinbao, *et al.* Plant selection for constructed wetlands [J]. *Acta Prataculturae Sin*, 2004, 13(5): 39-45.
- [8] 赖闻玲, 王玉彬, 彭长连, 等. 四种湿地植物在人工湿地的生长特性研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2010, 18(3): 238-244.
LAI Wenling, WANG Yubin, PENG Changlian, *et al.* Growth characteristics of four species in surface-flow constructed wetlands [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2010, 18(3): 238-244.
- [9] 王圣瑞, 年跃刚, 侯文华, 等. 人工湿地植物的选择[J]. 湖泊科学, 2004, 16(1): 91-96.
WANG Shengrui, NIAN Yuegang, HOU Wenhua, *et al.* Macrophyte selection in artificial wetlands [J]. *J Lake Sci*, 2004, 16(1): 91-96.
- [10] 周凤霞. 水生维管束植物对污水的净化效应及其应用前景[J]. 污染防治技术, 1998, 11(3): 160-162.
ZHOU Fengxia. Purification of wastewater by aquatic vascular plants and its application in wastewater treatment [J]. *Pollut Control Technol*, 1998, 11(3): 160-162.
- [11] 陈毓华, 汪俊三, 梁明易, 等. 华南地区 11 种高等水生维管植物净化城镇污水效益评价[J]. 农村生态环境, 1995, 11(1): 26-29, 33.
CHEN Yuhua, WANG Junsan, LIANG Mingyi, *et al.* The benefits analysis on utilizing 11 species of higher aquatic vascular plants in South China for treating municipal sewage [J]. *Rural Eco-Environ*, 1995, 11(1): 26-29, 33.
- [12] 李龙山, 倪细炉, 李志刚, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1625-1632.
LI Longshan, NI Xilu, LI Zhigang, *et al.* Growth characteristics and sewage cleaning effect of five wetland plants [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2013, 32(8): 1625-1632.
- [13] 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.
JIN Shuquan, ZHOU Jinbo, ZHU Xiaoli, *et al.* Comparison of nitrogen and phosphorus uptake and water purification ability of ten aquatic macrophytes [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2010, 29(8): 1571-1575.