

不同基质对黄菖蒲光合特性及净化能力的影响

徐德福, 李映雪, 郑建伟, 方华, 赵晓莉

(南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

摘要:选择 5 种基质, 采用盆栽实验研究了不同基质对黄菖蒲光合速率、蒸腾速率和 SPAD 值的影响及其与污水净化能力之间的相互关系. 结果表明, 不同基质影响了黄菖蒲的净光合速率与蒸腾速率, 其中土壤上黄菖蒲的净光合速率与蒸腾速率最高, 分别为 $11.67 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $9.18 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 而沙子上黄菖蒲的净光合速率与蒸腾速率最低, 分别为 $8.38 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $4.55 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 且黄菖蒲的净光合速率、蒸腾速率与高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除率呈显著正相关 ($p < 0.05$). 不同基质上黄菖蒲的 SPAD 值存在差异, 以土壤上黄菖蒲的 SPAD 值最高 (58.92), 有机质 + 沙 + 土其次, 而沙子上黄菖蒲的 SPAD 值最低 (51.14); 黄菖蒲的 SPAD 值与净光合速率和蒸腾速率呈显著正相关 ($p < 0.05$), 且与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率也呈显著正相关 ($p < 0.05$). 不同基质上黄菖蒲的 SPAD 值存在差异, 可以用 SPAD 仪快速监控人工湿地氮的去除.

关键词: 基质; 黄菖蒲; 光合特性; SPAD 值; 净化能力

中图分类号: X173; X506 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)09-2576-06

Effect of Different Substrates on Photosynthetic Characteristics of *Iris pseudacorus* L. and the Capacity of Purify Wastewater

XU De-fu, LI Ying-xue, ZHENG Jian-wei, FANG Hua, ZHAO Xiao-li

(College of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The effect of the different substrates on the photosynthetic characteristics, transpiration rate and SPAD value, and capacity of purify wastewater was investigated by pot experiment, based on five ordinary substrates (soil, sand, mixture of soil and sand, mixture of sand and organic matter, and mixture sand, soil and organic matter). Results showed that the photosynthetic characteristics and transpiration rate of *Iris pseudacorus* L. were influenced by different substrates. The order of the photosynthetic and transpiration rate of *Iris pseudacorus* L. in soil was high, and that of *Iris pseudacorus* L. in sand was the lowest. The value of photosynthetic characteristics and transpiration rate of *Iris pseudacorus* L. in soil were $11.67 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ and $9.18 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, respectively, and that of *Iris pseudacorus* L. in sand were $8.38 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ and $4.55 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, respectively. The photosynthetic characteristics and transpiration rate of *Iris pseudacorus* L. were significantly correlated with the removal rate of permanganate index, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ($p < 0.05$). The SPAD value of *Iris pseudacorus* L. was also influenced by substrates, and SPAD value of *Iris pseudacorus* L. in soil was high (58.92), followed by mixture soil, sand and organic matter, that of *Iris pseudacorus* L. in sand was the lowest (51.14). The significant correlation between the SPAD value of *Iris pseudacorus* L. and the photosynthetic characteristics, transpiration rate, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ was also found ($p < 0.05$). The SPAD vale of *Iris pseudacorus* L. in different substrates was different, which was used to monitored operation condition of the removal rate of nitrogen in constructed wetland.

Key words: substrate; *Iris pseudacorus* L.; photosynthetic characteristic; SPAD value; purify capacity

基质是人工湿地必不可少的组成部分, 其在人工湿地中有着重要的作用, 如为植物和微生物的生长提供载体, 过滤污水中的悬浮物质, 通过物理化学作用去除氮和磷等. 为此, 很多学者都开展了人工湿地基质净化污水能力的研究. 研究表明, 炉渣对磷的吸附能力比较高, 土壤次之, 而沙子最低^[1]. 不同材料混合而成的基质也影响了人工湿地对污水的净化能力, 如将废陶和废砖块掺混作为人工湿地基质时, 对污水中 COD 和氨氮的去除效果好于分别以废陶和废砖块作为基质的人工湿地^[2]. 将粉煤灰和空心砖粉块配合作为人工湿地基质时, 去除氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 和总磷 (TP) 的效果最好, 分别达到了

89% 和 81%, 而粉煤灰和细煤渣配合作为人工湿地基质时, 则去除 COD 的效果最好, 可达 70%^[3]. 不同基质的净化能力差异与其理化性质有关, 如基质的无定性氧化铁、无定性铝含量, 基质 pH, 基质的溶解性钙等^[4~6]. 另外, 植物在人工湿地中也有着重要的作用, 且植物在人工湿地中的作用及其选择已引起研究者的关注^[7~9].

叶绿素仪可以快速地反映叶片氮素状况, 已被

收稿日期: 2010-10-13; 修订日期: 2011-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40901257); 环保公益性行业科研专项 (201009012)

作者简介: 徐德福 (1975 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为污染水体生态修复, E-mail: defuxu1@163.com

应用于对水稻、棉花、玉米、高粱和大麦等作物进行氮素亏缺及需氮量预测、作物生长评价和水肥管理措施等方面^[10~13]. 植物光合特性和蒸腾速率也被用作施肥效果、水分和污染物胁迫等植物生理响应的有效指标^[14~16]. 王群等^[17]研究了下层土壤容重对玉米生育后期光合特性和产量的影响. 黄绢等^[18]对人工湿地污水处理系统中植物光合作用特性进行了研究. 然而有关不同基质对植物生长及其净化能力的影响鲜见报道,为此,本研究以植物光合特性、蒸腾特性和 SPAD 值为指标,分析了不同基质对植物生长及其净化能力的影响,以期为人工湿地基质的选择提供理论指导并揭示人工湿地的净化机制.

1 材料与方法

1.1 实验材料

本实验采用的材料有沙子、土壤和有机质. 沙子来源于长江下游南京段支流,其主要成分为二氧化硅. 土壤取自南京信息工程大学农业实验站,土壤质地黏重,有机质含量为 12.1 g·kg⁻¹,全氮为 0.99 g·kg⁻¹,碱解氮为 57.9 g·kg⁻¹,速效磷为 70.94 g·kg⁻¹,速效钾为 50.39 g·kg⁻¹,pH 值为 7.26^[19]. 有机质采用腐熟的稻草秸秆.

1.2 实验方法

本实验采用的实验装置见图 1,其设计是将一个塑料桶(上口宽直径 30 cm,下底宽直径 23 cm,高 30 cm)放在一个塑料盆中(上口宽直径 40 cm,下底宽直径 30 cm,高 13 cm),在塑料桶底部有 6 个污水通道,可实现塑料桶与塑料盆之间的污水交换. 在塑料桶底部放一尼龙网(300 目),以防止基质从塑料桶中漏出(图 1). 实验设 5 种处理,分别如下:①土壤(土);②沙子(沙);③沙子+土壤完全混合(体积比 1:1)(沙+土);④3% 有机质与 97% 沙子混合(质量分数)(有机质+沙);⑤沙子与土壤 1:1(体积比)混合后再与 3%(质量分数)的有机质混合(有机质+沙+土). 2010 年 3 月中旬分别将相同体积(7 L)的上述基质放入塑料桶中,并向塑料桶中加入 2 株长势均匀的黄菖蒲(*Iris pseudacorus* L.)幼苗(质量 31.0~36.37 g·盆⁻¹),随后向每个处理加入相同量的污水使整个基质处于湿润状态,每种处理设 3 次重复,共 15 个处理,整个实验在塑料大棚中进行,大棚主要作用是遮雨.

1.3 污水处理实验

2010 年 8 月初将塑料盆取下、洗净并向每个塑料盆中准确加入 4 L 富营养化污水,其水质见表 1.

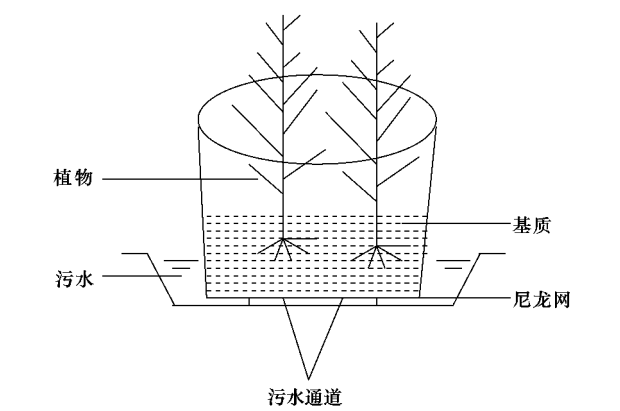


图 1 实验装置示意
Fig.1 Experimental equipment

表 1 实验用水水质/mg·L⁻¹

Table 1 Quality of experimental wastewater/mg·L ⁻¹				
高锰酸盐指数	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN	TP
8.02	1.06	2.74	4.56	0.22

4 d 后,测定塑料盆中的污水的剩余体积,并分析水中总氮(TN)、NH₄⁺-N、硝态氮(NO₃⁻-N)、TP 和高锰酸盐指数.

1.4 指标分析与测定

植物的净光合速率 P_n 和蒸腾速率 T_r 采用 LI-6400 便携式光合作用测定仪测定,测定时间为 12:00~13:00. 叶片的 SPAD 值采用 SPAD-502 测定,为了降低测定误差, P_n 和 T_r 均是选取黄菖蒲相同叶位与不同叶龄的 6 片叶测定,并计算平均值. 污水剩余体积直接采用量筒测定. 污水中总氮、氨氮、总磷和高锰酸盐指数等指标均采用文献[20]中的标准方法测定.

1.5 基质污水蒸发量和污染物去除率计算方法

基质每日污水蒸发量计算公式为:

$$E = (V_0 - V_4) / (4 \times A) \tag{1}$$

式中, E 为基质每日污水蒸发量[mL·(cm²·d)⁻¹]; V_0 为加入污水的初始体积(mL); V_4 为第 4 d 污水的体积(mL); A 为基质的表面积(cm²).

基质对污染物去除率的计算公式为:

$$f = (c_0 \times V_0 - c_4 \times V_4) / (c_0 \times V_0) \tag{2}$$

式中, f 为污染物去除率(%); c_0 为加入污水中污染物的初始浓度(mg·L⁻¹); V_0 为加入污水的初始体积(mL); c_4 为第 4 d 污水中污染物的浓度(mg·L⁻¹); V_4 为第 4 d 污水的体积(mL).

1.6 数据处理与分析

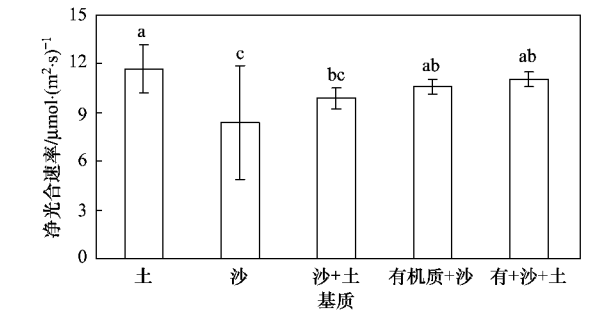
利用 DPS 统计软件进行统计分析,采用邓肯多

重极差对不同处理间差异进行显著性检验,显著性水平为 $p = 0.05$.

2 结果与分析

2.1 不同基质对黄菖蒲光合特性的影响

不同基质对黄菖蒲的光合速率产生影响(图2),从图2可以看出土壤上黄菖蒲的净光合速率最高[$11.67 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$],其次是有机质+沙+土[$11.03 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$],而沙子上黄菖蒲的净光合速率最低 $8.38 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. 土壤、有机质+沙+土和有机质+沙这3种基质上的黄菖蒲净光合速率显著高于沙子上黄菖蒲净光合速率($p < 0.05$). 土壤上黄菖蒲的净光合速率分别是有机质+沙+土、有机质+沙、沙+土和沙子上黄菖蒲净光合速率的1.06、1.1、1.18和1.39倍.



柱上标字母不同表示处理间差异显著($p < 0.05$),下同

图2 不同基质上黄菖蒲的光合速率

Fig.2 Photosynthetic characteristic of *Iris pseudacorus* L. in different substrates

2.2 不同基质对黄菖蒲叶片 SPAD 值的影响

不同基质上黄菖蒲叶片 SPAD 值见图3,以土壤的黄菖蒲的 SPAD 值最高(58.92),沙子上黄菖蒲的 SPAD 值最低(51.14). 5 种基质上黄菖蒲的 SPAD 值的大小顺序为:土壤>有机质+沙+土>有机质+沙>沙+土>沙,其中土壤上黄菖蒲的 SPAD 值显著高于沙子和沙+土上黄菖蒲的 SPAD 值($p < 0.05$),土壤上黄菖蒲的 SPAD 值是沙子上黄菖蒲 SPAD 值1.15倍.

2.3 不同基质对黄菖蒲植物蒸腾速率的影响

不同基质上黄菖蒲的蒸腾速率见图4,以土壤上黄菖蒲的蒸腾速率最高[$9.18 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$],有机质+沙+土其次[$6.78 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$],而沙子上黄菖蒲的蒸腾速率最低[$4.55 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$]. 5 种基质上黄菖蒲的蒸腾速率大小顺序为:土壤>有机质+沙+土>有机质+沙>

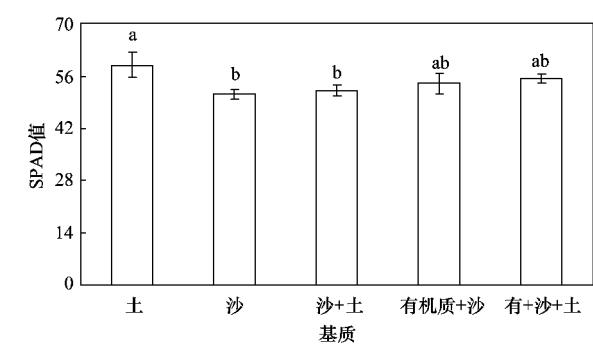


图3 不同基质上黄菖蒲叶片 SPAD 值
Fig.3 SPAD value of leaf of *Iris pseudacorus* L. in different substrates

沙+土>沙子. 土壤上黄菖蒲的蒸腾速率显著高于其他基质上黄菖蒲的蒸腾速率($p < 0.05$),而沙子上黄菖蒲的蒸腾速率则显著低于土壤、有机质+沙+土和有机质+沙这3种基质上黄菖蒲的蒸腾速率($p < 0.05$).

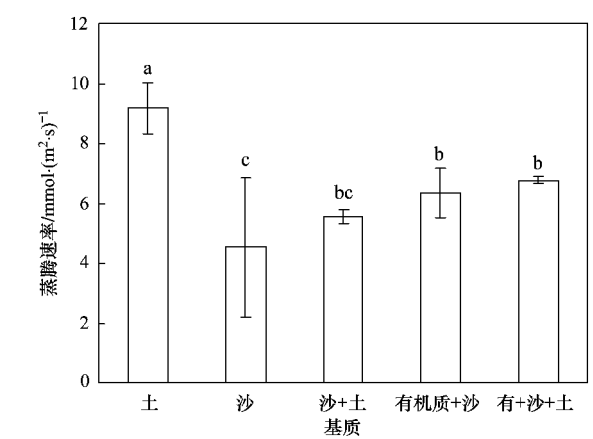


图4 不同基质上黄菖蒲的蒸腾速率
Fig.4 Transpiration rate of *Iris pseudacorus* L. in different substrates

2.4 不同基质的污水蒸发量

从图5可以看出,5种基质的污水蒸发量存在差异,以土壤的蒸发量最高,沙子最低,且土壤的蒸发量显著高于沙子的蒸发量($p < 0.05$). 5种基质污水蒸发量的大小顺序为:土壤>有机质+沙+土>有机质+沙>沙+土>沙. 从图4和图5可以看出,不同基质上黄菖蒲的蒸腾速率与基质的污水蒸发量呈极显著正相关($p < 0.01$),相关系数 $r = 0.9599$. 可见,植物的蒸腾作用对基质中污水的蒸发有着重要的作用.

2.5 不同基质对污水的去除率

不同基质对高锰酸盐指数、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、

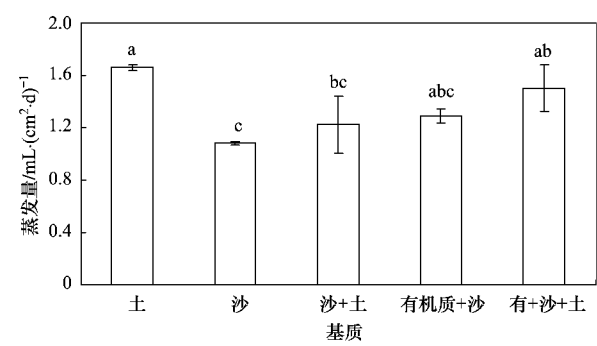


图5 不同基质的蒸发量

Fig.5 Quantity of evaporation water of different substrates

TN 和 TP 的去除率见表 2. 可以看出不同基质对高锰酸盐指数的去除率存在差异,以土壤去除率最高,有机质 + 沙 + 土其次,而沙子对高锰酸盐指数去除

率最低,且土壤与沙子对高锰酸盐指数的去除率存在显著差异($p < 0.05$). 不同基质对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的去除率变化相一致,即以土壤最高,沙子最低,其中土壤和有机质 + 沙 + 土这 2 种基质对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的去除率显著高于沙子对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的去除率($p < 0.05$). 5 种基质对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的去除率大小顺序为:土壤 > 有机质 + 沙 + 土 > 有机质 + 沙 > 沙 + 土 > 沙(见表 2). 不同基质对 TN 的去除率也存在差异,其中以土壤对 TN 的去除率最高,沙子其次,而沙 + 土去除率最低,且土壤对 TN 的去除率显著高于沙 + 土对 TN 的去除率($p < 0.05$). 不同基质对 TP 的去除率见表 2,以土壤对总磷的去除率最高,沙子对总磷的去除率最低,5 种基质对总磷去除率变化范围为 65.32% ~ 77.68%.

表 2 不同基质对污染物的去除率¹⁾

基质	去除率/%				
	高锰酸盐指数	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	TN	TP
土	75.13 ± 7.43^a	90.93 ± 0.52^a	85.84 ± 0.16^a	88.20 ± 2.91^a	77.68 ± 3.53^a
沙	55.31 ± 0.25^c	84.65 ± 0.41^b	66.75 ± 8.51^b	87.70 ± 0.50^{ab}	65.32 ± 3.02^a
沙 + 土	62.47 ± 9.26^{bc}	86.50 ± 1.71^{ab}	77.75 ± 5.10^{ab}	83.83 ± 0.73^b	71.00 ± 4.23^a
有机质 + 沙	64.41 ± 2.58^{abc}	88.81 ± 3.55^{ab}	79.92 ± 0.06^{ab}	85.01 ± 1.94^{ab}	70.06 ± 0.29^a
有机质 + 沙 + 土	68.71 ± 0.28^{ab}	89.74 ± 0.23^a	83.51 ± 4.56^a	86.80 ± 0.62^{ab}	68.63 ± 10.71^a

1) 同一列数据上标的不同字母表示处理间有显著差异($p < 0.05$)

3 讨论

不同基质上黄菖蒲的净光合速率存在差异,以土壤上黄菖蒲的净光合速率最高,有机质 + 沙 + 土上黄菖蒲的净光合速率其次,而沙子上黄菖蒲的净光合速率最低. 王群等^[17]报道土壤容重不同时,玉米的光合速率和产量都存在显著差异,并随着下层土壤容重的增加,叶片光合速率和产量降低,且下层土壤容重越大,降幅越大. 李潮海等^[21]也报道土壤容重影响了玉米根系的正常发育和根系活力,当容重增大到 $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,玉米根在土壤中的下扎受到影响. 另外过高的土壤容重还通过影响作物根系生长,进而影响其对土壤中 N 和 P 的吸收^[22],N 和 P 是叶绿素的组成成分,其中 N 元素与叶绿素含量、叶绿体发育、光合酶活性的关系都比较大,对光合作用的影响也最显著^[23]. 因此,在本实验中,土壤上黄菖蒲的净光合速率比较高,而沙子的净光合速率最低,可能与土壤的容重比较低,而沙子的容重比较高有关. 从图 3 可以看出,沙子上黄菖蒲的 SPAD 值显著低于土壤上黄菖蒲的 SPAD 值($p < 0.05$),这

也可能与沙子的容重比较高,影响了根系对氮的吸收,从而降低了叶片中氮的含量(SPAD 值低),导致其净光合速率降低相关. 该研究结果与马东辉等^[24]研究结果相一致,即增施氮肥,有利于提高小麦生育后期旗叶 Ps II 潜在活性和光化学效率,有利于光合色素把所捕获的光能以更高的速度和效率转化为化学能,从而为碳同化提供更加充足的能量,提高光合速率. 相关分析显示黄菖蒲的净光合速率与蒸腾速率呈显著正相关($p < 0.05$),见表 3,且 5 种基质上黄菖蒲的净光合速率与蒸腾速率大小顺序为:土壤 > 有机质 + 沙 + 土 > 有机质 + 沙 > 沙 + 土 > 沙子(图 2、图 4). 不同基质上黄菖蒲的 SPAD 值也存在差异,其中土壤上黄菖蒲的 SPAD 值显著高于沙子和沙 + 土这 2 种基质上的值($p < 0.05$,图 3). 相关分析也显示黄菖蒲的 SPAD 值与蒸腾速率呈极显著正相关($p < 0.01$),SPAD 值与净光合速率呈显著正相关($p < 0.05$,表 3). 该结果说明黄菖蒲的 SPAD 值与其光合速率和蒸腾速率有很强的相关性. 吴良欢等^[25]研究表明水稻不同生育时期 SPAD 值与叶绿素含量均达到了极显著水平. 因此,黄菖

表 3 不同指标的相关性分析¹⁾

Table 3 Correlation analysis between different index

	P_n	T_r	SPAD	高锰酸盐 去除率	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率	$\text{NO}_3^- \text{-N}$ 去除率	TN 去除率	TP 去除率
P_n	1	0.914 6 *	0.914 1 *	0.971 0 **	0.985 7 **	0.989 9 **	0.103 6	0.787 6
T_r		1	0.992 9 **	0.973 2 **	0.923 3 *	0.869 5 *	0.391 2	0.905 3 *
SPAD			1	0.970 7 **	0.938 8 *	0.863 2	0.458 2	0.848 9
高锰酸盐去除率				1	0.962 1 *	0.952 1 *	0.266 9	0.860 6
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率					1	0.955 6 *	0.234 7	0.739 4
$\text{NO}_3^- \text{-N}$ 去除率						1	-0.000 6	0.768 0
TN 去除率							1	0.142 6
TP 去除率								1

1) * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著

蒲的 SPAD 值越高,光合作用强,可能与其叶绿素含量比较高有关,另外,植物光合作用越强,需水量越多,蒸腾作用也越强.

植物净光合速率与不同污染物去除率相关性分析见表 3,可以看出黄菖蒲的净光合速率与高锰酸盐指数去除率呈极显著正相关($p < 0.01$),其原因是植物净光合作用越高,植物根系泌氧能力越强,根系产生的氧气越高,越有利于水体中有机物的分解,从而提高对高锰酸盐指数的去除率.在人工湿地中,氧气来源有 2 个方面,一是大气复氧,二是根系泌氧.因此,光合作用强的植物,有利于根系泌氧,从而提高有机物的去除率.黄菖蒲的净光合速率与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 去除率呈极显著正相关($p < 0.01$).王娟等^[26]报道棉花叶片的叶绿素含量与 SPAD 值呈线性相关,且 SPAD 值与植株全氮呈较好的线性相关.邬飞波等^[27]也报道棉花不同生育时期功能叶 SPAD 值与叶绿素含量、全氮含量呈极显著线性正相关.可见,黄菖蒲的净光合速率与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 去除率呈极显著正相关,其原因可能与黄菖蒲直接吸收 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 有关.

在本实验中黄菖蒲的净光合速率与 TN 的去除没有明显的相关性,其原因是氮的去除除了植物吸收外,还与硝化与反硝化途径有关.据报道在人工湿地中氮的硝化与反硝化途径去除的氮占了总氮去除的 89% ~ 96%^[28].因此,氮的去除除了黄菖蒲直接吸收 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 外,还与氮的硝化与反硝化途径有关,而黄菖蒲的光合作用,根系泌氧主要与硝化途径有关,但反硝化途径与厌氧环境有关,因此硝化与反硝化脱氮既需要好氧环境又需要厌氧环境.TP 的去除率与净光速率虽未达到明显正相关,但其相关系数($r = 0.787 6$)明显高于净光合速率与 TN 去除率的相关系数($r = 0.103 6$).其原因是磷的去除主要与基质吸附和植物吸收有关,而植物光合作用

越强,需要的磷素越多,因此,黄菖蒲的光合速率越高,吸收的磷越多,对磷的去除率越高,而氮的去除,除了基质吸附、植物吸收外,还与硝化与反硝化脱氮有关,因此,净光合速率与 TN 去除率的相关系数小于净光合速率与 TP 的相关系数与其去除途径有关.

黄菖蒲的蒸腾速率与高锰酸盐指数去除率呈显著正相关($p < 0.05$),其原因是黄菖蒲的蒸腾速率越高,蒸发水量越多(见图 5),更多有机物的积累有利于有机物的去除.黄菖蒲蒸腾速率与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 呈显著正相关($p < 0.05$),主要原因是植物蒸腾速率越高,更多的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 通过质流方式进入黄菖蒲的根系,从而有利于 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的去除.黄菖蒲的 SPAD 值与不同污染物的去除率的相关性分析见表 3.可以看出黄菖蒲的 SPAD 值与高锰酸盐指数去除率的相关系数比较高,主要是因为 SPAD 值与净光合速率呈正相关,SPAD 值越高,光合作用强,根系泌氧能力高,有利于有机物的分解.从表 3 也可以看出,黄菖蒲的 SPAD 值与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率呈显著正相关($p < 0.05$),而与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 去除率未达到显著正相关,即黄菖蒲的 SPAD 值与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率的相关系数($r = 0.938 8$)高于与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的相关系数($r = 0.863 2$),说明黄菖蒲对氮的吸收可能主要以 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 为主.

4 结论

(1)基质影响了黄菖蒲的净光合速率与蒸腾速率,以土壤上黄菖蒲的净光合速率与蒸腾速率最高,有机质 + 沙 + 土其次,而沙子上黄菖蒲的净光合速率与蒸腾速率最低,且黄菖蒲的净光合速率与蒸腾速率呈显著正相关.

(2)基质对黄菖蒲叶片的 SPAD 值产生影响,土

壤上黄菖蒲的 SPAD 值最高,有机质 + 沙 + 土其次,而沙子上黄菖蒲的 SPAD 值最低. 黄菖蒲的 SPAD 值与净光合速率和蒸腾速率呈显著正相关.

(3)黄菖蒲的净光合速率、蒸腾速率与高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除呈显著正相关,且黄菖蒲的 SPAD 值与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率呈正相关. 可以用 SPAD 仪快速监控人工湿地中氮的去除.

参考文献:

- [1] Xu D F, Xu J M, Wu J J, *et al.* Studies on the phosphorus sorption capacity of substrates used in constructed wetland systems [J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(1):344-352.
- [2] 邵文生,张建,何苗,等. 人工湿地系统处理污染河水的填料选配[J]. *中国给水排水*, 2006, **22**(3):65-68.
- [3] 鲁锐,章北平,刘真,等. 人工湿地处理低浓度生活污水的填料优化级配[J]. *武汉理工大学学报*, 2006, **28**(1):81-84.
- [4] 崔理华,朱夕珍,骆世明. 人工湿地基质磷吸附特性与其物理化学性质的关系[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(2):250-254.
- [5] Nwoke O C, Vanlauwe B, Diels J, *et al.* Assessment of labile phosphorus fractions and adsorption characteristics in relation to soil properties of West African savanna soils [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2003, **100**, 285-294.
- [6] Bubba M D, Arias C A, Brix H. Phosphorus adsorption maximum of sands for use medial in subsurface flow constructed reed beds as measured by the Langmuir isotherm [J]. *Water Research*, 2003, **37**:3390-3400.
- [7] 陈永华,吴晓芙,陈明利,等. 人工湿地污水处理系统冬季植物的筛选与评价[J]. *环境科学*, 2010, **31**(8):1789-1794.
- [8] 陈进军,郑翀,郑少奎. 表面流人工湿地中水生植被的净化效应与组合系统净化效果[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(10):2029-2035.
- [9] 王晟,徐祖信,李怀正,等. 植物根系对垂直流人工湿地水力条件的影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2008, **36**(4):519-524.
- [10] 邬飞波,许馥华,金珠群. 利用叶绿素计对短季棉氮素营养诊断的初步研究[J]. *作物学报*, 1999, **25**(4):483-488.
- [11] 黄瑞冬,王进军,许文娟,等. 玉米和高粱叶片叶绿素含量及动态的比较[J]. *杂粮作物*, 2005, **25**(1):30-31.
- [12] 唐延林,王人潮,张金恒,等. 高光谱与叶绿素计快速测定大麦氮素营养状况研究[J]. *麦类作物学报*, 2003, **23**(1):63-66.
- [13] 沈掌泉,王珂,朱君艳,等. 叶绿素计诊断不同水稻品种氮素营养水平的研究初报[J]. *科技通报*, 2002, **18**(3):173-176.
- [14] 魏海燕,张洪程,马群,等. 不同氮肥利用效率水稻基因型剑叶光合特性[J]. *作物学报*, 2009, **35**(12):2243-2251.
- [15] 陈贵,周毅,郭世伟,等. 水分胁迫和不同形态氮素营养对苗期水稻光合特性的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2007, **30**(4):78-81.
- [16] 惠俊爱,党志,叶庆生. 镉胁迫对玉米光合特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(2):205-210.
- [17] 王群,李潮海,郝四平,等. 下层土壤容重对玉米生育后期光合特性和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(4):787-793.
- [18] 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, **13**(2):55-57.
- [19] 郑有飞,石春红,吴芳芳,等. 大气臭氧浓度升高对冬小麦根际土壤酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2009, **29**(8):4386-4391.
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [21] 李潮海,李胜利,王群,等. 下层土壤容重对玉米根系生长及吸收活力的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, **38**(8):1706-1711.
- [22] Garcia F, Cruse R M, Blacker A M. Compaction and nitrogen placement effect on root growth, water depletion, and nitrogen uptake [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, **52**:792-798.
- [23] 武维华. 植物生理学[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [24] 马东辉,赵长星,王月福,等. 施氮量和花后土壤含水量对小麦旗叶光合特性和产量的影响[J]. *生态学报*, 2008, **28**(10):4896-4901.
- [25] 吴良欢,陶勤南. 水稻叶绿素计诊断追氮法研究[J]. *浙江农业大学学报*, 1999, **25**(2):135-138.
- [26] 王娟,韩登武,任岗,等. SPAD 值与棉花叶绿素和含氮量关系的研究[J]. *新疆农业科学*, 2006, **43**(3):167-170.
- [27] 邬飞波,许馥华,金珠群. 利用叶绿素计对短季棉氮素营养诊断的初步研究[J]. *作物学报*, 1999, **25**(4):483-488.
- [28] Lin Y F, Jing S H, Wang T W, *et al.* Effects of macrophytes and external carbon sources on nitrate removal from groundwater in constructed wetlands[J]. *Environmental Pollution*, 2002, **119**:413-420.