

不同基质和不同植物对人工湿地净化效率的影响

魏 成, 刘 平*, 秦 晶

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 实验通过建立不同模式的小型湿地系统研究了不同基质和不同的植物组合对人工湿地净化效率和效率稳定性的影响。结果表明, 种植植物的湿地系统比没有植物的湿地系统净化效率高, 沙土混合基质比卵石基质净化效率高; 旱伞草和美人蕉组合以及旱伞草、美人蕉和芦苇 3 种植物的组合湿地系统比单一旱伞草湿地系统的净化效率更高; 小粒径基质和混合种植湿地系统能够保持较稳定的净化效率。

关键词: 人工湿地; 净化效率; 混合种植; 基质

文章编号: 1000-0933(2008)08-3691-07 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Effects of substrates and plants on purification efficiency of constructed wetland

WEI Cheng, LIU Ping*, QIN Jing

Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3691 ~ 3697.

Abstract: By constructed different modes of wetland systems, this paper investigated their purification efficiencies and persistence influenced, singly and in combination, by substrates made up and plant grown on. The results showed that the purification efficiency of wetland be increased by growing plant, and were higher in substrate mixed by sand and soil than substrate made of scree. The purification efficiencies of wetlands grown mixture of *Cyperus alternifolius* and *Canna indica*, and mixture of *Cyperus alternifolius*, *Canna indica* and *Phragmites communis* are higher than that of wetland grown *Cyperus alternifolius* singly. Small size substrate and mixture of plants are able to stable the purification efficiencies of wetlands.

Key Words: constructed wetland; purification efficiency; mixed plant; substrate

人工湿地具有净化污染物效果好、运行费用低、易维护的特点, 作为污水处理技术已被广泛应用^[1]。人工湿地是自适应系统, 在构成人工湿地污水处理系统的四大基本要素(水体、基质、水生植物和微生物)中, 基质、水生植物和微生物或三者相互之间通过一系列物理的、化学的以及生物的途径, 可以完成对污染物的高效去除^[2,3]。其中植物和基质是两个相对容易用工程手段来调节的要素。

水生植物不仅本身能吸收同化污水中 N、P 等污染物, 还能提高整个湿地生态系统微生物的数量, 调整其组成类型, 促进湿地生态系统的硝化和反硝化作用进行, 强化其净化能力^[4,5]。基质在为植物和微生物提供生长介质的同时, 也能够通过沉淀、过滤和吸附等作用直接去除污染物。自由表面流湿地多以自然土壤为基质, 水平潜流和垂直潜流湿地基质的选择因特征污染物的不同而不同, 同时也会考虑便于取材、经济适用等因

基金项目: 中国科学院生态环境研究中心科技创新资助项目

收稿日期: 2007-05-10; 修订日期: 2008-04-06

作者简介: 魏成(1981~), 男, 浙江杭州人, 硕士生, 主要从事生态工程和城市生态学研究. E-mail: wilsonweicheng@hotmail.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuping@rcees.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by Technology Innovation Programme

Received date: 2007-05-10; Accepted date: 2008-04-06

Biography: WEI Cheng, Master candidate, mainly engaged in ecological engineering. E-mail: wilsonweicheng@hotmail.com

素^[6]。研究结果表明人工湿地在去除有机污染物方面有显著的效果,但是不同的湿地系统之间净化效率有明显的差别^[7]。

国内外大量的研究从基质和植物种类的筛选、种植条件即湿地槽的大小和长宽比例、水利运行条件、还有温度的控制等方面来探讨人工湿地的净化效率^[8~10]。而本试验是通过研究不同类型基质和植物组合的人工湿地系统在相同条件下对污染物的去除效率,来探讨人工湿地的净化机理,找到一种科学而高效的人工湿地构建模式。

1 材料和方法

1.1 材料

栽培桶:高 430mm,直径 160mm 的塑料栽培器皿(PVC 管)。

植物:芦苇(reed)(*Phragmites australis*)禾本科芦苇属,多年生水生或湿生的高大禾草,地下具有粗壮的匍匐根状茎,秆高 1~3m,节下有白粉。旱伞草(umbrella grass)(*Cyperus alternifolius*)莎草科莎草属,别名风车草、伞草、水竹,多年生常绿草本,茎直立、丛生、无分支、三棱形,高可达 50~160cm。美人蕉(canna)(*India canna*)美人蕉科美人蕉属,别名昙花,多年生草本,具肉质根状茎,高 50~100cm,叶矩圆形,绿色。以上 3 种植物小苗都购于北京水利科学研究院,3 种幼苗材料株高均为 10~15cm。

基质:细沙(经过 2mm 筛子筛选);卵石(粒径 1~2cm);细沙和土壤 1:1 混合(土壤采于通州北京水利科学研究院)。

1.2 实验运行

进水设备是容量为 8L 的塑料栽培皿,放置于高 60cm 的桌子上。在实验器皿底部设置内径 4mm 的进水孔,用乳胶管将进水设备和实验器皿连接,通过开关控制实验运行,使污水缓慢的从基质底层向上渗滤过整个床体。在距器皿顶部 3cm 处设置内径 4mm 的出水检测管。

实验分为两个阶段,第 1 阶段测试 3 种植物在相同条件下的净化效果,第 2 阶段是测试不同的基质以及不同的植物搭配的净化效果,实验运行时间均为 10 周。

第 1 阶段:将 3 种不同的植物分别种植在相同的细沙基质中,每种植物种 3 盆,共 9 盆。(相关实验参数:实际处理区的体积 6.4L;水力负荷 $0.13\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$;水力停留时间 8h;孔隙度 42.1%;处理区有效体积 2.7L)。为了排除干扰因素,实验污水采用了人工配制的方法(添加葡萄糖、尿素、 K_2HPO_4 、 KH_2PO_4 配成近似于城市混合污水的人工污水)。将植物移栽到实验装置中,待植物生长 2 周后进行实验。(人工污水指标: $\text{COD}_{\text{Cr}} = 255.8\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{BOD}_5 = 128.1\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{TN} = 12.6\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{TP} = 2.7\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

实验开始前用蒸馏水浇灌实验桶,落干后再注入人工污水正式开始运行。先向进水装置中加入相同浓度的人工污水,打开控制开关,水在重力的作用下缓慢均匀流过实验装置的基质床。8:00 开高位水箱运行系统,16:00 关阀开始放水落干,控制水力停留时间为 8h,系统运行和落干时间比为 1:2。

第 2 阶段:测试不同基质和植物组合系统的净化效率。不同的基质类型:①细沙和土壤的 1:1 混合②细沙③卵石,选择旱伞草为湿地植物,同时设置相应的空白对比系统。不同的植物组合:①旱伞草②旱伞草和芦苇组合③旱伞草、芦苇和美人蕉组合,以细沙为基质。污水的配置和实验运行方式与第一阶段相同。

1.3 取样和测试方法

在出水检测管管端套一根乳胶管,取样时把乳胶管伸入容器的底部,直至水样充满容器至溢流,然后将容器密闭。水样检测指标包括 TN、TP、 BOD_5 、 COD_{Cr} ,测定方法参照《水和废水检测分析方法》^[11]。 COD_{Cr} 采用 CTL-12 型化学需氧量测定仪; BOD_5 采用 OXITOP-12 型生化需氧量测定仪;TN 用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法;TP 用钼铵酸分光光度法。

1.4 计算分析方法

用独立样本的 T 检验, T -TEST 和相关性分析对数据进行变异度、差异性和相关性分析。使用 EXCEL 和 SPSS13.0 在计算机上完成。

2 实验结果与分析

2.1 3种植物对 TN、TP、COD_{Cr}、BOD₅ 的净化效率

由图 1~图 4 可知,3 种植物在实验运行的过程中湿地系统对有机污染物都有较好的去除效果。污染物的去除效率随着温度的升高和植物的生长有显著的提高,温度的变化与各项污染物质的去除效率成正相关 ($P < 0.01$)。可见这 3 种植物在这个实验系统中的生长和工作效率都可以得到充分的发挥。

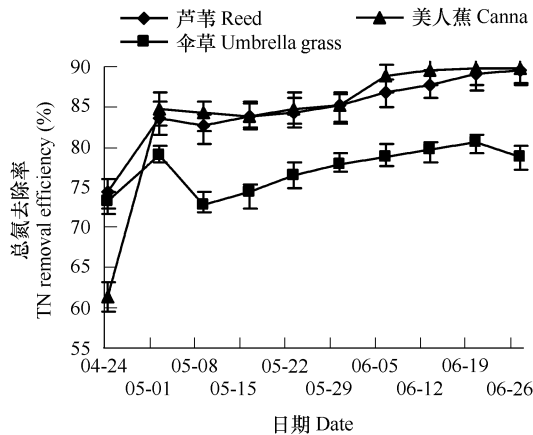


图 1 3 种植物总氮的去除率

Fig. 1 TN removal efficiency of 3 plants

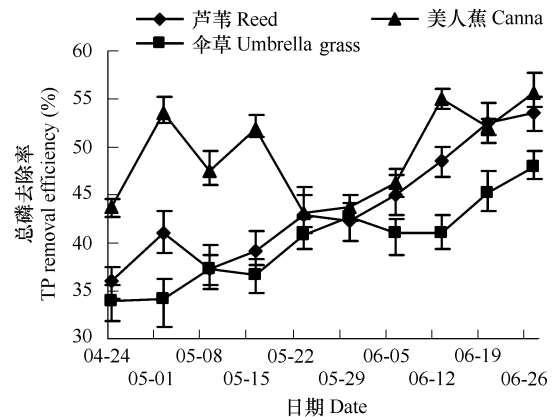


图 2 3 种植物总磷去除率

Fig. 2 TP removal efficiency of 3 plants

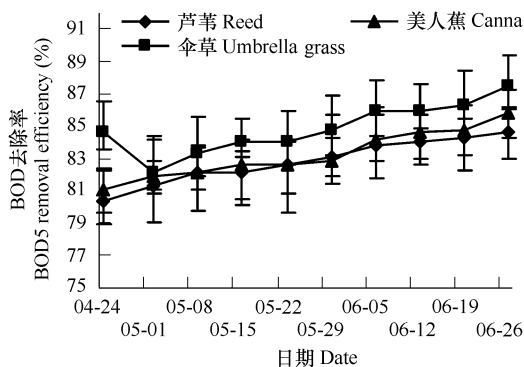


图 3 3 种植物 BOD₅ 去除率

Fig. 3 BOD₅ removal efficiency of 3 plants

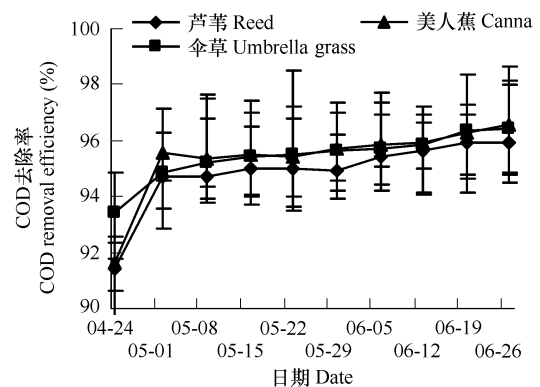


图 4 3 种植物 COD_{Cr} 去除率

Fig. 4 COD_{Cr} removal efficiency of 3 plants

芦苇和美人蕉系统 TN 去除率高于旱伞草 ($p < 0.05$); 美人蕉系统 TP 的去除率高于芦苇和旱伞草系统 ($p < 0.05$); COD 的去除率三者没有明显的差别 ($p > 0.05$)。美人蕉系统 BOD 的去除率也要高于芦苇和旱伞草系统。

2.2 不同基质 TN、TP、COD_{Cr}、BOD₅ 去除率

这个实验阶段中加入了空白对比系统,沙土混合基质对有机污染物去除效率最好,其次是沙基质,最后是砾石的基质。而种植植物的湿地系统净化效率明显要比空白系统的净化效率高很多。沙土混合基质在整个 10 周实验期间出现 4 次堵塞。

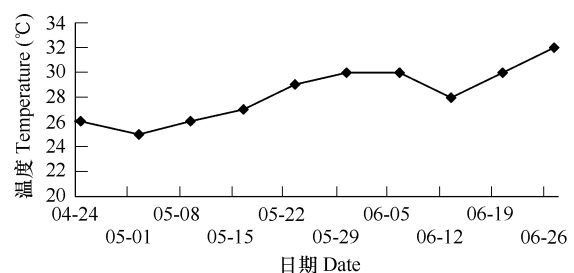


图 5 温室每天最高温度

Fig. 5 The highest temperature in greenhouse

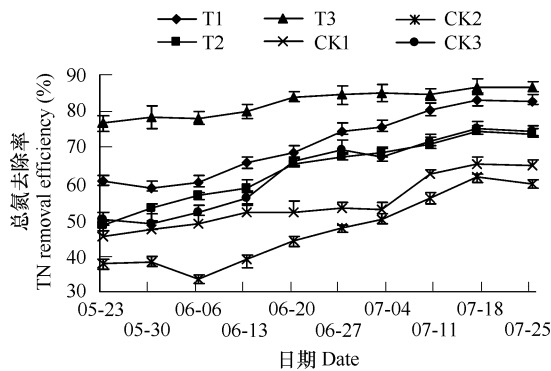


图6 不同基质总氮的去除效率

Fig. 6 TN removal efficiency of different substrates

T1: 植物系统(沙) Plant system (sand); T2: 植物系统(砾石) Plant system (gravel); T3: 植物系统(沙土) Plant system (sand and soil); CK1: 对照系统(沙) Control system (sand); CK2: 对照系统(砾石) Control system (gravel); CK3: 对照系统(沙土) Control system (sand and soil)

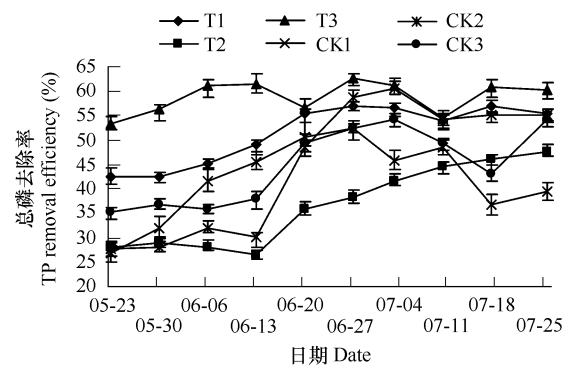
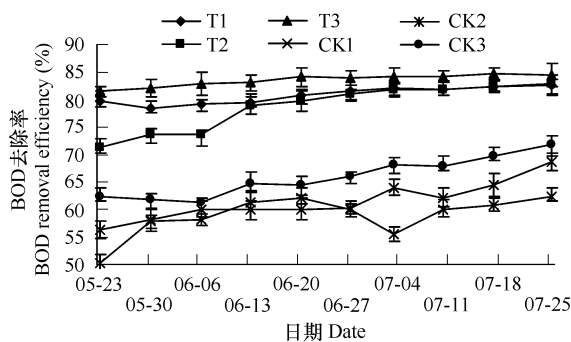


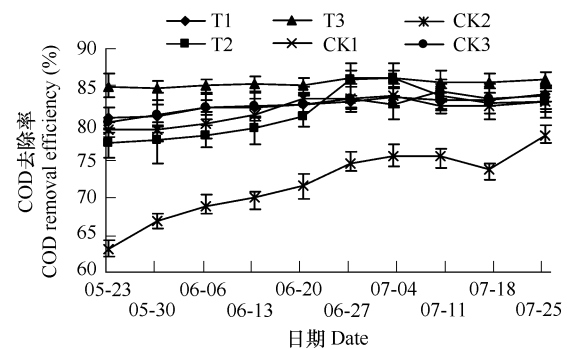
图7 不同基质总磷的去除效率

Fig. 7 TP removal efficiency of different substrates

T1, T2, T3, CK1, CK2, CK3 见图6 T1, T2, T3, CK1, CK2, CK3 see Fig. 6

图8 不同基质 BOD₅ 的去除效率Fig. 8 BOD₅ removal efficiency of different substrates

T1, T2, T3, CK1, CK2, CK3 见图6 T1, T2, T3, CK1, CK2, CK3 see Fig. 6

图9 不同基质 COD_{Cr} 的去除效率Fig. 9 COD_{Cr} removal efficiency of different substrates

T1, T2, T3, CK1, CK2, CK3 见图6 T1, T2, T3, CK1, CK2, CK3 see Fig. 6

TN 去除效率:沙土混合基质 > 沙基质 > 沙土混合基质(空白) > 砾石基质 > 空白沙基质(空白) > 砾石基质(空白) ($p < 0.05$); TP 去除效率:沙土混合基质 > 沙基质 > 沙土混合基质(空白) > 沙基质(空白) > 砾石基质 > 砾石基质(空白) ($p < 0.05$); COD_{Cr} 去除效率:沙土混合基质 > 沙基质 > 沙土混合基质(空白) > 沙基质(空白) > 砾石基质 > 砾石基质(空白) ($p < 0.05$); BOD₅ 的去除效率:沙土混合基质 > 沙基质 > 沙土混合基质(空白) > 砾石基质 > 沙基质(空白) > 砾石基质 > 砾石基质(空白) ($p < 0.05$)。

2.3 不同植物系统对 TN、TP、COD_{Cr}、BOD₅ 的去除

由图9~12可知不同的植物组合有不同的净化效率。TN的净化效率:3种植物 > 两种植物 > 单种植物 > 空白系统 ($p < 0.05$); TP的净化效率:3种植物 > 两种植物 > 单种植物 > 空白系统 ($p < 0.05$); COD_{Cr}的净化效率:两种植物 > 3种植物 > 单种植物 > 空白系统 ($p < 0.05$); BOD₅的净化效率:两种植物 > 3种植物 > 单种植物 > 空白系统 ($p < 0.05$)。从植物组合的角度,不论是两种植物还是3种植物相对单一植物系统其净化效率更高。

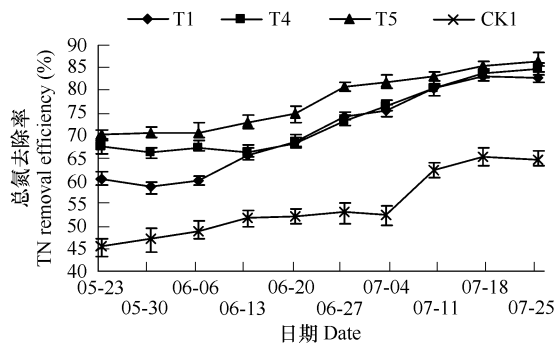


图 10 不同植物系统总氮去除率

Fig. 10 TN removal efficiency of different plant systems

T1: 旱伞草植物系统 umbrella grass system; T4: 旱伞草美人蕉植物系统 Umbrella grass and canna system; T5: 旱伞草美人蕉和芦苇植物系统 Umbrella grass canna and reed planted system; CK1: 对照系统 Control system

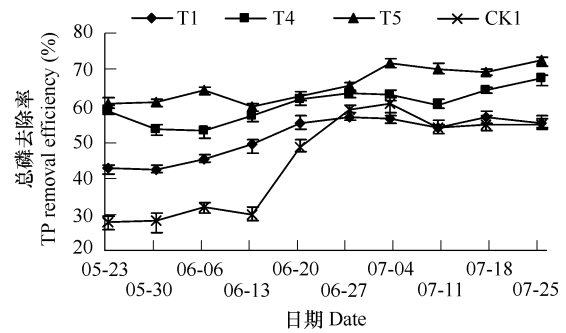
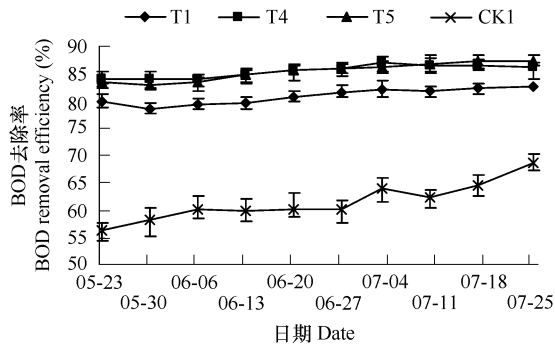


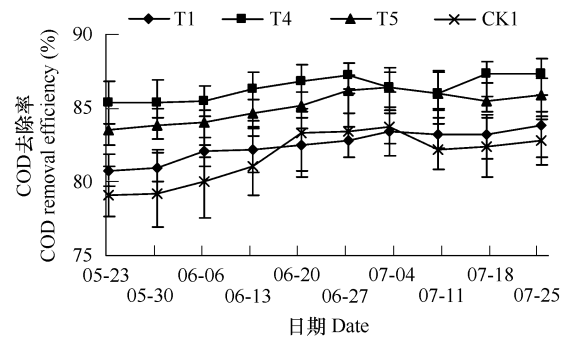
图 11 不同植物系统总磷去除率

Fig. 11 TP removal efficiency of different plant systems

T1, T4, T5, CK1 见图 10 T1, T4, T5, CK1 see Fig 10.

图 12 不同植物系统 BOD₅ 的去除率Fig. 12 BOD₅ removal efficiency of different Planted systems

T1, T4, T5, CK1 见图 10 T1, T4, T5, CK1 see Fig 10.

图 13 不同植物系统 COD_{Cr} 去除率Fig. 13 COD_{Cr} removal efficiency of different Planted systems

T1, T4, T5, CK1 见图 10 T1, T4, T5, CK1 see Fig 10.

3 讨论

3.1 人工湿地中植物对污染物去除效率的影响

在第 1 阶段的植物实验中, 芦苇、旱伞草和美人蕉 3 种植物对人工污水中的有机污染物都有很好的去除效果, 各个污染指标也显示出不同的植物对有机污染物的有效去除部分也不同。分析不同植物的物种之间的差异, 可以知道由于不同的植物生长速度不同, 植物个体生物量大小不同, 自身 N、P 含量不同而造成的。

在第 2 阶段的组合植物实验中, 3 种湿地系统对有机污染物的去除效率明显不同。组合植物湿地系统的净化效率明显高于单一植物系统。用独立样本 T 检验分析不同植物湿地系统净化效率的变异性。

由表 1 可知旱伞草 TN 的去除效率最稳定, 其次是芦苇, 然后是美人蕉; 美人蕉 TP 去除效率最稳定, 其次是芦苇, 最后是旱伞草; 芦苇 BOD₅ 去除效率最稳定, 然后是美人蕉和旱伞草; 旱伞草 COD_{Cr} 的去除效率最稳定, 其次是芦苇和美人蕉。而横向比较来看, TP 的去除效率较其他 3 种污染指标波动更大。由表 2 可知种植植物的湿地系统的净化效率比空白系统的净化效率更加稳定, 两种植物和 3 种植物组合系统净化效率更稳定。其中 3 种植物的组合系统 TN 和 TP 的去除效率比较稳定, 而两种植物的组合 COD_{Cr} 和 BOD₅ 的净化效率比较稳定。

不同的植物根系有不同的特性。在本实验中所采取的 3 种湿地植物,美人蕉根系肥大,须根发达;旱伞草的主根不明显,须根也同样比较发达;而芦苇根系是匍匐根茎的形式,其主根较发达,而须根较少;不同的植物根系组合可能对根际整体的微生物群落有一定的影响。同时不同的植物对有机污染物有不同的去除效果,有的可以高效的吸收氮,有的能更好的富集磷,当多种植物组合使用时就会有植物之间取长补短,提高湿地系统的污水净化效率。这与陈章和^[12]、夏汉平^[13]的研究结论相似。

3.2 人工湿地中基质对污染去除效率的影响

计算不同基质湿地系统净化效率的变异系数来分析净化效率的稳定性。

表 2 不同植物组合条件下污染物质去除效率的变异系数

Table 2 Coefficient variation of removal efficiency with mixture planted systems

湿地系统 Wetland system	TN	TP	BOD ₅	COD _{Cr}
T1	0.134	0.116	0.018	0.012
T4	0.101	0.078	0.014	0.009
T5	0.083	0.074	0.019	0.012
CK1	0.133	0.305	0.058	0.022

T1: 旱伞草植物系统 umbrella grass system; T4: 旱伞草美人蕉植物系统 Umbrella grass and canna system; T5: 旱伞草美人蕉和芦苇植物系统 Umbrella grass canna and reed planted system; CK1: 对照系统 Control system

表 1 3 种湿地植物净化效率的变异系数

Table 1 Coefficient variation of removal efficiency with three constructed wetland plants

植物 Plant	TN	TP	BOD ₅	COD _{Cr}
芦苇 Reed	0.051	0.638	0.017	0.014
旱伞草 Umbrella grass	0.036	0.144	0.019	0.008
美人蕉 Canna	0.099	0.100	0.018	0.014

表 3 不同基质条件下污染物净化效率的变异系数

Table 3 Coefficient variation of removal efficiency with different substrates

湿地系统 Wetland system	TN	TP	BOD	COD
T3	0.134	0.116	0.018	0.012
T1	0.141	0.225	0.054	0.040
T2	0.046	0.056	0.013	0.006
CK1	0.133	0.305	0.058	0.021
CK2	0.213	0.196	0.062	0.064
CK3	0.164	0.176	0.054	0.014

T1: 植物系统(沙) Plant system (sand); T2: 植物系统(砾石) Plant system (gravel); T3: 植物系统(沙土) Plant system (sand and soil); CK1: 对照系统(沙) Control system (sand); CK2: 对照系统(砾石) Control system (gravel); CK3: 对照系统(沙土) Control system (sand and soil)

在第 2 阶段不同基质的实验测试中,小粒径基质去除效率明显高于大粒径基质。由表 3 可以看到植物系统的净化效率明显要比空白系统的净化效率更为稳定,沙土混合基质在所有四项指标上变异度最小。其次是沙基质,最不稳定的是砾石基质,这和崔理华的研究结果相似^[15]。

小粒径基质能够为湿地系统提供更多适合微生物生长的表面积,微生物群落生物量更大群落结构更稳定,因此净化效率能保持高效而稳定。但是也因该看到,沙土混合的基质在运行的过程中多次出现堵塞的现象,同时渗滤的速度也很慢,严重影响湿地的整体运行效果,不适合工程应用。选用粒径大小适合的基质对湿地高效运行有重要的意义。

国内外实验研究显示植物对污染物质的吸收作用只占 10% ~ 15%,基质对有机污染物的去除主要体现在对磷的吸附上^[15],而微生物在整个湿地的生物化学循环中占核心地位^[13]。

闻岳的研究指出不同类型湿地系统中水生植物和填料种类及空间位置对微生物群落结构具有显著的影响^[14]。本实验结果则显示混合种植模式或是小粒径基质构成的湿地系统可能为微生物提供更适宜的环境,提高微生物生物量以及活性从而提高湿地的净化效率和稳定性。

4 结论

实验通过建立不同模式的小型湿地系统研究了不同基质和不同的植物组合对人工湿地净化效率和效率稳定性的影响。结果表明,种植植物的湿地系统比没有植物的湿地系统净化效率高,沙土混合基质比卵石基质净化效率高;旱伞草和美人蕉组合以及旱伞草、美人蕉和芦苇 3 种植物的组合湿地系统比单一旱伞草湿地

系统的净化效率更高;小粒径基质和混合种植湿地系统能够保持较稳定的净化效率。

在人工湿地系统的建造过程中,应选用组合植物构建多样性植物群落,同时在避免阻塞的情况下选用小粒径基质来创造稳定而高效的湿地系统。

5 研究展望

(1)本实验研究的是上行垂直流人工湿地系统,今后的实验可对水平流湿地的运行方式以及合理的污染负荷做进一步的试验探讨。

(2)不同的基质和不同的植物种植方式对污染物去除效率的影响很大程度上有可能和微生物群落有关^[5],对植物根际微生物的研究将有助于更加深入的了解这个问题。

(3)开展实验室研究与实际工程湿地处理系统相结合的工作,实验的研究在理论上提供了一些提高人工湿地处理效率的模式,将这些模式在实际的生产中做进一步的测试和应用。

References:

- [1] Huang J, Reneau J R B, Hagedorn C. Nitrogen removal in constructed wetlands employed to treat domestic wastewater. *Water Res*, 2000, 34 (9): 2582—2588.
- [2] Li X D, Sun T H, Li H B. Current researches and prospects of phosphorus removal in constructed wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 3 (27): 1226—1232.
- [3] Knight R L. Constructed Wetlands for Livestock wastewater management. *Ecological Engineering*, 2000, (15): 41—55.
- [4] Lund L J, Home A J, Williams A E. Estimating denitrification in a large constructed wetland using stable nitrogen isotope ratios. *Ecol Eng*, 2000, 14(2): 67—76.
- [5] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands. *Water Sci Technol*, 1997, 35(5): 11—17.
- [6] Drizo A. Physico-chemical screening of phosphate removing substrates for use in constructed wetland systems. *Water Research*, 1999, 33(7): 3595—3602.
- [7] Mbulgwe S E. Comparative treatment of dye-rich wastewater in engineered wetland systems(EWSS) vegetated with different plants. *Water Res*. 2005, 39(3): 271—280.
- [8] Gearheart R A. Use of constructed wetland to treat domestic wastewater, city of Arcat, California. *Science*, 1992, 26(7): 1625—1637.
- [9] Zhang H C. Study progress in constructed wetland ecosystems for sewage purification. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2004, 5(2): 11—4.
- [10] Kong L Y, Ni J R. Characteristics of the generalized structure of pollutant removal models for constructed wetlands. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4): 1428—1433.
- [11] State Environmental Protection Administration of China. *Water and Wastewater examination analysis method*. Beijing: Chinese Environmental Press, 1989. 232—239.
- [12] Chen Z H, Chen F, Liu X C, *et al.* A new method for root biomass measurement in subsurface flow gravel-bed constructed wetlands. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2): 668—673.
- [13] Xia H P, The wastewater treatment efficiency and mechanism of constructed wetland. *Chinese Journal of Ecology*, 2002, 21(4): 51—59.
- [14] Wen Y, Zhou Q, Jiang L Y, *et al.* Degradation characteristics of organic substances in polluted surface waters treatment with horizontal subsurface flow constructed wetlands. *China Environmental Science*, 2007, 27(4): 508—512.
- [15] Chui L Y, Zhu X Z, Luo S M, *et al.* The Characteristic of Phosphorous Adsorption on Different Substrates Used in Constructed Wetland. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3): 894—898.

参考文献:

- [2] 李晓东,孙铁珩,李海波. 人工湿地除磷研究进展. *生态学报*, 2007, 3(27): 1226~1232.
- [9] 张虎成. 人工湿地生态系统污水净化研究进展. *环境污染治理技术与设备*, 2004, 5(2): 11~14.
- [10] 孔令裕,倪晋仁. 人工湿地去污模型的统一结构特征. *生态学报*, 2007, 27(4): 1428~1433.
- [11] 国家环境保护局. *水和废水检测分析方法*. 北京: 中国环境科学出版社, 1989. 232~239.
- [12] 陈章和,陈芳,刘甬诚,等. 测定潜流人工湿地根系生物量的新方法. *生态学报*, 2007, 27(2): 668~673.
- [13] 夏汉平. 人工湿地处理污水的机理与效率. *生态学杂志*, 2002, 21(4): 51~59.
- [14] 闻岳,周琪,蒋玲燕,等. 水平潜流人工湿地对污水中有机物的降解特性. *中国环境科学*, 2007, 27(4): 508~512.
- [15] 崔理华,朱夕珍,骆世明,等. 几种人工湿地基质磷的吸附特性研究. *农业环境科学学报*, 2007, 26(3): 894~898.