

改进型和传统型复合垂直流人工湿地的净化效果研究

张超兰¹, 陈秀娟², 韦必帽¹, 李志刚¹, 刘 帅¹, 李勤峰¹

(1.广西大学生态环境退化与修复工程技术研究中心, 广西 南宁 530005; 2.安徽南风环境工程技术有限公司, 安徽 合肥 230001)

摘 要 通过构建传统型复合垂直流人工湿地系统(Integrated Vertical Flow Constructed Wetlands System :IVFCWS)和改进型复合垂直流人工湿地系统(Improved Integrated Vertical Flow Constructed Wetlands System :IIVFCWS),并在其中分别种植彩叶草-太阳草(*Coleus blumei*-*Tonina fluviatilis* :CT)和美人蕉-大水剑(*Canna indica*-*Acorus calamus* :CA),以无植物人工湿地系统为对照,比较研究不同植物组合下两种构型的人工湿地系统对生活污水的净化效果。结果表明,IIVFCWS对 COD_Cr 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN的净化效果显著优于IVFCWS,而对TP的去除效果则是IVFCWS较IIVFCWS强。有植物的人工湿地系统去除污染物的效果较无植物的对照系统好,其中彩叶草-太阳草组合湿地系统的去除效果较美人蕉-大水剑组合的强,分别为 COD_Cr 的平均去除率在80.8%~52.8%之间, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率在93.6%~52.3%之间,TN的去除率在96.4%~67.6%之间,TP的平均去除率均达93.6%以上。

关键词 复合垂直流人工湿地; 生活污水; 净化效果

中图分类号:X703.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2009)10-2161-06

Comparison of Purification Efficiency of Traditional and Improved Integrated Vertical Flow Constructed Wetlands System with Different Plants on Sewage

ZHANG Chao-lan¹, CHEN Xiu-juan², WEI Bi-mao¹, LI Zhi-gang¹, LIU Shuai¹, LI Qin-feng¹

(1. Research Center for Eco-environmental Degradation and Restoration Engineering Technology, Guangxi University, Nanning 530005, China; 2. Anhui Nanfeng Environmental Engineering Technology Company, Anhui 230001, China)

Abstract Integrated Vertical Flow Constructed Wetlands System (IVFCWS) and Improved Integrated Vertical Flow Constructed Wetlands System (IIVFCWS) combined with *Coleus blumei*-*Tonina fluviatilis* (CT) and *Canna indica*-*Acorus calamus* (CA) were constructed, with non-plants IVFCWS and IIVFCWS as control. Their purification efficiencies on sewage were studied. The results indicated that the removal efficiencies of chemical oxygen demand (COD_Cr), ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) and total nitrogen (TN) of IIVCWS were higher, but total phosphorus (TP) was lower than that of IVCWS. Purification efficiency of the constructed wetlands system (CWS) with plants was higher than that of CWS with non-plants. And purification capacities of COD_Cr , $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN and TP of CWS with CT were higher than that of CWS with CA. The average removal ratios of COD_Cr , $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN and TP of different CWS were from 80.8% to 52.8%, 93.6% to 52.3%, 96.4% to 67.6% and above 93.6%, respectively.

Keywords integrated vertical flow constructed wetlands; sewage; purification efficiency

人工湿地系统(Constructed Wetlands System :CWS)是一种新型废水处理工艺,具有处理效果好、氮磷去除能力强、管理方便、费用低及对负荷变化适应性强等优点^[1-3],正逐渐被应用于广大中小城镇和乡村地区的生活污水处理中^[1,4]。复合人工湿地可以使人工湿地

优势互补,从而增强污水的净化效果。有学者构建了不同复合人工湿地并研究各湿地净化污水的效果^[5-9]。复合垂直流人工湿地系统(IVFCWS)是中科院水生所与德国科隆大学、奥地利维也纳农业大学等在“九五”期间提出的^[10]。复合垂直流人工湿地因地表无积水,大部分面积接近中生环境,适合更多植物种类的生长,从而有更好的处理效果和景观功能,已经得到了广泛的应用^[11]。但是,由于传统的垂直流人工湿地系统是由下行池-上行池组成,污水经过下行池后水中溶解氧明显降低,影响了好氧有机物的分解、还原性

收稿日期:2009-03-08

基金项目:广西攻关项目(桂科攻0816002-6);国家大学生创新性实验计划项目(T1601103)

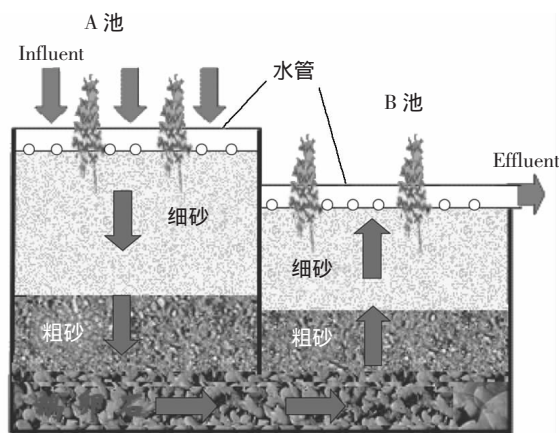
作者简介:张超兰(1971—),女,博士,副教授,主要研究方向为污染环境的生物修复。E-mail: zhangcl@gxu.edu.cn

物质的氧化和硝化脱氮作用等。本文将下行池-上行池改进为下行池-下行池,使污水从第一个下行池进入下一下行池前多了一个与空气接触充氧的过程,比较研究了不同植物配置下两种构型的湿地系统对生活污水的净化效果,为复合垂直流人工湿地构型设计和植物的配置提供理论依据和实践经验。

1 试验材料与方法

1.1 人工湿地构建与运行

在广西大学教学实习基地上构建小型模拟人工湿地系统。各单元池容积均为 120 cm (长)×83 cm (宽)×70 cm (深),底部铺黏土并将其夯实,四周以水泥墙封闭防渗,2 个(A/B)单元池组成一套人工湿地小试系统,分别构建传统型垂直流人工湿地系统(IVFCWS)(图 1)和改进型垂直流人工湿地系统(I-IVFCWS)(图 2)各 3 套。基质上层为砂,其中细砂(粒径 0~4 mm)厚 20 cm,粗砂(粒径 0~6 mm)厚 15 cm,



注:箭头为水流方向,下同。

图 1 IVFCWS结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of IVFCWS

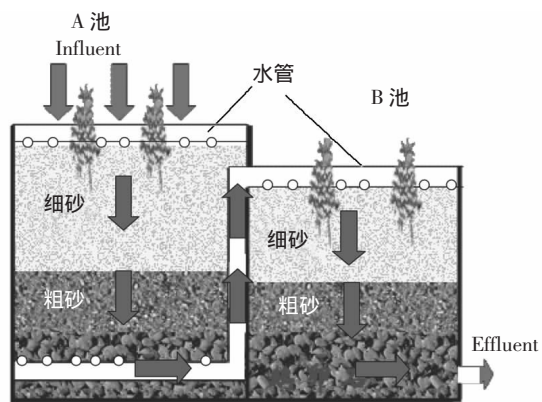


图 2 IIVFCWS结构示意图

Figure 2 Schematic diagram of IIVFCWS

中层为豆石(粒径 8~16 mm,厚 15 cm),下层为砾石(粒径 16~32 mm,厚 15 cm)。间歇式进水,水力负荷为 600 mm·d⁻¹。

1.2 人工湿地系统的植物配置和种植

供试植物为美人蕉、彩叶草、太阳草和大水剑,购自南宁市花鸟市场,植物配置如表 1。种植密度为彩叶草 24 株·m⁻²,太阳草 60 株·m⁻²,美人蕉 16 株·m⁻²,大水剑 68 株·m⁻²。

表 1 复合垂直流人工湿地系统植物配置

Table 1 Plants in integrated vertical flow constructed wetlands system

人工湿地系统构型	人工湿地系统名称	植物种类	
		A 单元池	B 单元池
IVFCWS	ICT	彩叶草	太阳草
	ICA	美人蕉	大水剑
	ICK	无植物	
IIVFCWS	HCT	彩叶草	太阳草
	HCA	美人蕉	大水剑
	HCK	无植物	

1.3 供试污水的水质

供试污水是在氧化塘的生活污水中投加一定数量的尿素、葡萄糖、磷酸二氢钾配制而成。进水的 TN 为 40.7~57.3 mg·L⁻¹,COD_{Cr} 为 30.3~56.1 mg·L⁻¹,TP 为 1.12~1.55 mg·L⁻¹,NH₄⁺-N 为 6.42~9.90 mg·L⁻¹,NO₃⁻-N 为 0.13~0.19 mg·L⁻¹,pH 值 7.77~8.11,电导率 296~494 μS·cm⁻¹。

1.4 水样采集及水质分析方法

人工湿地运行试 3 个月,系统基本稳定后,每运行周期至少分别采集进、出水水样 3 次,进行测定。水质 COD_{Cr} 用重铬酸钾氧化法,TN 用碱性过硫酸钾消解,紫外分光光度法,TP 用过硫酸钾消解,钼锑抗比色法,NH₄⁺-N 用纳氏试剂比色法,NO₃⁻-N 用酚二磺酸分光光度法,pH 用酸度计测定;电导率用电导率测定^[12]。

2 结果

2.1 COD_{Cr}、NH₄⁺-N、TN、TP 的去除效果

从图 3 可以看出,各人工湿地系统对 COD_{Cr}、NH₄⁺-N、TN、TP 均有不同程度的去除效果。IIVFCWS 对 COD_{Cr}、NH₄⁺-N、TN 的净化效果显著优于 IVFCWS。与无植物的湿地系统相比,有植物的湿地系统净化效果明显提高,其中种植彩叶草-太阳草的湿地系统去除 COD_{Cr}、NH₄⁺-N、TN 的能力较种植美人蕉-大水剑的

强。综合湿地植物配置和构型来看,对 COD_Cr 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 TN 的去除能力强弱的顺序为 $\text{IICT}>\text{IIICA}>\text{ICT}>\text{ICA}>\text{IICK}>\text{ICK}$ 。 IICT 、 IIICA 、 ICT 、 ICA 、 IICK 、 ICK 系统 COD_Cr 的去除率分别为 80.8%、75.4%、65.7%、63%、61.6%、52.8%； $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率分别为 93.6%、85.3%、72.2%、68.8%、66.0%、52.3%； TN 的去除率分别为 96.4%、85.4%、79.5%、78.8%、71.4%、67.6%。即改进型的彩叶草-太阳草组合的人工湿地处理系统(IICT)去除 COD_Cr 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 TN 的能力最强。

对 TP 的去除效果而言,则是 IVFCWS 构型的除磷效果较 IIVFCWS 构型强,有植物系统对 TP 的净化效果优于无植物的对照系统,其中彩叶草-太阳草的组合除磷效果较美人蕉-大水剑组合好。各湿地系统除磷能力大小顺序为 $\text{ICT}>\text{ICA}>\text{ICK}>\text{IICT}>\text{IIICA}>\text{I-IICK}$, TP 去除率分别为 95.4%、95.1%、94.8%、94.3%、94.1%、93.6%,即传统型的彩叶草-太阳草组合的人工湿地处理系统(ICT)去除 TP 的效果最佳。

2.2 NO_3^- -N、pH、电导率的变化

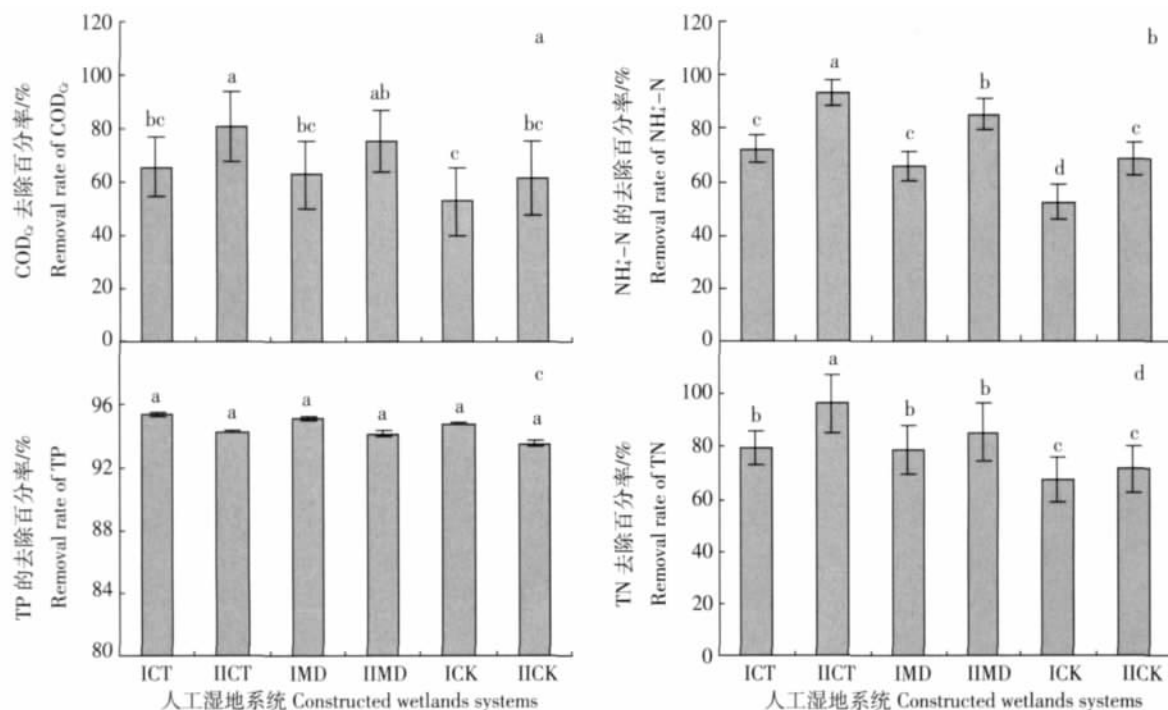
生活污水经过人工湿地系统处理后,出水的 NO_3^- -N 的浓度远大于进水的浓度,并且有植物的湿地系统出水中 NO_3^- -N 浓度显著低于没有植物的空

白对照,但是不同植物配置的湿地系统出水 NO_3^- -N 浓度无显著差异; IIVFCWS 构型的人工湿地出水中 NO_3^- -N 浓度略高于 IVFCWS 构型的(图 4a)。在运行期间经人工湿地处理后出水的 NO_3^- -N 平均浓度高低顺序为 $\text{IICK}>\text{ICK}$ $\text{IIICA}>\text{IICT}>\text{ICT}>\text{ICA}$,分别为 1.62、1.60、0.55、0.48、0.37、0.30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。即经人工湿地系统处理后,出水的电导率也有所增加,运行期间平均增加幅度在 74.8~139.6 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (图 4c)。其中,有植物的湿地系统电导率增加较无植物系统的明显,不同构型、不同植物组合之间的差别则无明显的规律。而出水 pH 值的变化则与 NO_3^- -N 和电导率的相反,经各湿地系统处理后出水的 pH 值均有不同程度的下降,运行期间平均下降的幅度在 0.14~0.77 之间,其中经 IIVFCWS 处理的出水 pH 下降幅度显著大于经 IVFCWS 处理的;与无植物的系统相比,有植物的湿地系统出水的 pH 值降低的较多,并且经彩叶草-太阳草组合的系统处理后出水的 pH 值下降较多。

3 讨论

3.1 COD_Cr 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 TN 、 TP 的去除效果

研究表明, IIVFCWS 对 COD_Cr 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 TN 的去

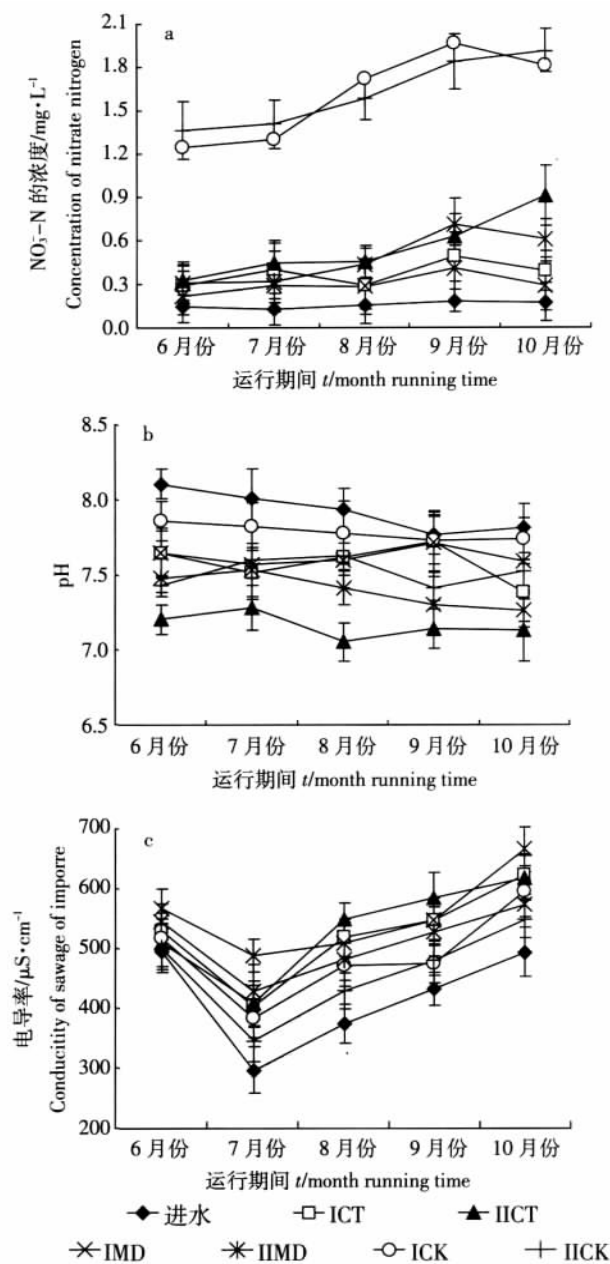


注:图中各污染物的去除率为6—10月的平均值;不同小写字母表示Duncan's新复极差检验5%显著水平。

Note: The removal rate of pollutants was the average from June to October; Different small letters indicate significant difference at $\alpha=0.05$ by Duncan's test.

图3 人工湿地系统对 COD_Cr 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 TN 、 TP 的去除率

Figure 3 Removal rate of COD_Cr 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 TN 、 TP in the constructed wetland systems

图 4 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度、pH 值、电导率的变化Figure 4 Chang of $\text{NO}_3\text{-N}$ 、pH and conductivity

除能力较 IVFCWS 强。这可能是因为在 IIVFCWS 中, 污水依次经过好氧区、兼氧区、厌氧区、好氧区、兼氧区、厌氧区, 多了一次充氧的过程, 从而缓解了湿地氧气不足的问题, 促进了好氧有机物的降解和硝化作用。有植物系统的去除效果优于无植物系统, 这是因为一方面植物、微生物本身吸收部分污染物质, 另一方面植物根际微生物能促进污染物质的分解。在相同构型的情况下彩叶草-太阳草组合对 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN 的净化能力较美人蕉-大水剑组合强的原因可能与植物的不同根系有关, 美人蕉和大水剑的根为块

根, 而彩叶草、太阳草的根是须根, 须根系植物更易于向根部输送氧气, 或者也可能是因为植物根系分泌物的不同, 产生微生物种类和数量的差异, 导致水质、基质的 pH 等发生局部的变化不一致, 从而影响污染物分解速度。这与已往的研究结果相一致, 人工湿地处理污水时有机物的降解和转化主要是由植物根区微生物活动来完成的, 微生物的多寡程度和活性直接影响水处理的效率^[13-17]。叶建锋等^[17]研究表明, 垂直潜流人工湿地中有机物的去除主要集中在布水管至管下 10 cm 的基质层内。氨化反应的最佳 pH 范围为 6.5~8.0, 当 pH 低于 8.5 时, 通过气化而损失的铵态氮比较少, 可以忽略^[18]。本试验供试污水为生活污水, pH 在 7.8~8.2 之间, 气化的部分可以忽略, 铵态氮的转化主要是硝化作用。硝化反应通常发生在湿地氧化层中比较薄的一层, 这一氧化层主要受水体中溶解性氧短距离扩散和植物根际输送氧气的影响^[19-23]。

人工湿地系统对磷的去除一方面可以通过植物和微生物吸收来储存磷, 另外死亡的植物也能吸附磷, 但是微生物和植物吸收的磷是比较少的。因此, 仅仅生物学过程不能有效地去除磷^[20-21]。另一方面污水中的颗粒态磷可以通过基质、根系过滤和沉淀而去除^[19-22]。本实验结果表明, 两种构型的湿地系统对 TP 都有较高的去除率, 运行期间各系统对 TP 去除率平均达 93.5% 以上, 但是不同湿地系统包括无植物的对照系统之间的除磷效果没有显著差异, 并且与 6 月份相比, 10 月份各系统的除磷效果有所降低, 尽管降低趋势并不是十分明显, 这也说明人工湿地系统对总磷的去除则与湿地的过滤功能关系密切, 其主要是通过基质及微生物、植物根系的过滤沉淀的作用去除污水中的磷, 运行初期, 由于进水中存在大量的颗粒物形态的磷素, 通过湿地填料所组成的“筛网”, 部分被截留下来, 被物理吸附的磷可以通过扩散进入基质内部结构而形成化学吸附, 进而增加物理吸附点, 但随着时间的延长, 基质的吸附点将达到饱和, 基质不再吸附磷, 且可能输出磷。所以, 运行一段时间后, 各系统去除污水中总磷的速率有所下降。

3.2 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度、pH 值和电导率的变化

硝化和反硝化作用是人工湿地除氮的主要途径。污水进入人工湿地下行流池后先通过硝化作用将氨氮转化为硝态氮, 此后在水流行进的路线上硝化作用减弱, 反硝化作用占主导地位, 最终氮素转化成气态形式释放。硝化作用和反硝化作用强度变化沿水流方向呈显著负相关^[23]。当污水经过人工湿地时, 有机氮

通过氨化作用、硝化作用变成 NO_3^- -N, 如果水力滞留时间不足以使 NO_3^- -N 完全进行反硝化作用, 使得出水的 NO_3^- -N 浓度均大于进水的, 这可能是本试验中出水的 NO_3^- -N 高于进水的主要原因之一。预测随着水力滞留时间的延长, 硝态氮含量会逐渐降低。pH 值是人工湿地中重要的环境因子之一。硝化反应对 pH 值较为敏感, 硝化细菌进行硝化反应最适宜的 pH 值为 7.0~9.0, pH<6.0 时硝化反应明显降低, pH>10.0 时, 过高的 OH^- 浓度对硝化菌有毒害作用, 从而阻止硝化反应的发生。

从试验可以看出, 有湿地植物生长的系统中, pH 值都在 7.0~8.5, 有利于微生物的硝化反应, 从而导致出水的 NO_3^- -N 浓度增加。另外, 由于 IIVFCWS 比 IVFCWS 多了一次充氧的过程, 所以 IIVFCWS 的硝化反应比 IVFCWS 的进行得更充分, 使经 IIVFCWS 处理后出水 NO_3^- -N 的浓度大于经 IVFCWS 处理的。这说明 IIVFCWS 比 IVFCWS 更有利于硝化作用, 促进硝化作用进行是湿地脱氮的关键步骤。有植物系统出水 NO_3^- -N 浓度均小于无植物系统是因为一方面植物可以直接吸收、利用 NO_3^- -N, 同时植物的根系也会产生大量反硝化细菌和许多促进反硝化的酶等, 促进反硝化的进行, NO_3^- -N 浓度较无植物浓度低, 相反无植物系统由于没有及时脱氮而造成 NO_3^- -N 的积累。出水 pH 下降一方面可能是因为系统内部的硝化作用、有机物在分解过程中不断产酸以及植物根系分泌有机酸的缘故; 另一方面可能是因为不同的植物、不同的水流方向所产生的微生物、酶均不同, 影响了硝化作用和有机物的分解过程, 使 pH 的变化也出现了不同。水的电导率的变化反映了水中离子态物质的变化, 在一定温度下, 水的电导率取决于它的离子组成、离子含量及离子强度, 离子含量及离子强度越大, 水质的电导率也越高。经人工湿地处理后出水的电导率增加, 这可能是因为水中有机质分解转化为无机物质, 而由于水力滞留不足以湿地植物充分吸收利用水体中无机营养物质, 从而使水质的电导率增加。

4 结论

(1) 两种不同构型的人工湿地对污水净化都具有较好的效果。对于同一植物组合系统, 在去除有机物 (COD_{Cr})、脱氮 (NH_4^+ -N、TN) 方面均是 IIVFCWS 构型的效果优于 IVFCWS; 在 TP 的去除方面是 IVFCWS 构型的效果优于 IIVFCWS 构型。

(2) 与不种植物的湿地系统相比, 种植植物的湿

地系统净化效果较不种植物的湿地系统好, 其中彩叶草-太阳草组合的湿地系统净化效果优于美人蕉-大水剑组合的湿地系统净化效果。

(3) IIVFCWS 和 IVFCWS 进出水中 pH 和电导率的变化, 在连续 6 个月的监测中表现出相似的规律, 与进水相比, 出水的 NO_3^- -N 浓度、电导率有所增加, 而 pH 值有所降低。

综上所述, 可以根据污水中污染物的成分和浓度来确定采用的湿地构型, 对于处理有机物和氮含量较高、而磷含量较低的污水可以采用彩叶草-太阳草组合的 IIVFCWS 构型的人工湿地; 反之, 则可以采用彩叶草-太阳草组合的 IVFCWS 构型的人工湿地; 而对于含磷、有机物、氮都比较高污水, 可以考虑将 I-IVFCWS、IVFCWS 两种构型的湿地串联起来使用。

参考文献:

- [1] 朱 彤, 许振成, 胡康萍, 等. 人工湿地污水处理系统应用研究[J]. 环境科学研究, 1991, 4(5): 17-22.
ZHU Tong, XU Zhen-cheng, HU Kang-ping, et al. Study on application of constructed wetland wastewater treatment system[J]. *Research of Environmental Sciences*, 1991, 4(5): 17-22.
- [2] 籍国东, 倪晋仁. 人工湿地废水生态处理系统的作用机制 [J]. 环境污染治理技术和设备, 2004, 5(6): 71-75.
JI Guo-dong, NI Jin-ren. Mechanisms of constructed wetland wastewater ecological treatment systems[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2004, 5(6): 71-75.
- [3] Drizo A, Frost C A, Grace J, et al. Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems[J]. *Water Research*, 1996b, 33(17): 3595-3602.
- [4] 丁廷华. 芦苇湿地处理系统示范工程的研究[J]. 环境科学, 1992, 13(2): 8-13.
DING Ting-hua. Research of demonstration engineering wetland system with *Phragmites communis* [J]. *Environmental Science*, 1992, 13(2): 8-13.
- [5] Gómez Cerezo R, Suárez M L, Vidal-Abarca M R. The performance of a multi-stage system of constructed wetlands for urban wastewater treatment in a semiarid region of SE Spain[J]. *Ecological Engineering*, 2001, 16(4): 501-517.
- [6] Cooper P. A review of the design and performance of vertical-flow and hybrid reed bed treatment systems[J]. *Water Science and Technology*, 1999, 40(3): 1-9.
- [7] 陈德强, 吴振斌, 成水平, 等. 不同湿地组合工艺净化污水效果的比较[J]. 中国给水排水, 2003, 19(9): 12-15.
CHEN De-qiang, WU Zhen-bin, CHENG Shui-ping, et al. Comparison on the combination system of different constructed wetland processes for wastewater treatment[J]. *China Water & Wastewater*, 2003, 19(9): 12-15.
- [8] 刘 雯, 崔理华, 朱夕珍, 等. 水平流-垂直流复合人工湿地系统对

- 污水的净化效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(3): 604-606.
- LIU Wen, CUI Li-hua, ZHU Xi-zhen, et al. Purification efficiency of wastewater by constructed wetland treatment systems based on the combination of horizontal-flow and vertical-flow[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(3): 604-606.
- [9] 王宝贞, 王琳. 水污染治理新技术-新工艺、新概念、新理论[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- WANG Bao-zheng, WANG Lin. Water pollution control technology - new technology, new concept, new theory[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [10] 吴振斌, 詹德昊, 张晟, 等. 复合垂直流构建湿地的设计方法及净化效果[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003, 36(1): 12-16.
- WU Zhen-bin, ZHAN De-hao, ZHANG Sheng, et al. Design method and purification efficiency of integrated vertical flow constructed wetland[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2003, 36(1): 12-16.
- [11] 蒋跃平, 葛滢, 岳春雷, 等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献[J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1718-1723.
- JIANG Yue-ping, GE Ying, YU Chun-lei, et al. Nutrient removal role of plants in constructed wetland on sightseeing water[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1718-1723.
- [12] 中国国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第4版). 北京: 环境科学出版社, 2002.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Monitoring analysis method of water and wastewater[M]. (4th Edition) Beijing: Environmental Science Press, 2002.
- [13] Srinivasan N, Weaver R W, Lesikar B J, et al. Improvement of domestic wastewater quality by subsurface flow constructed wetlands[J]. *Biore-source Technology*, 2000, 75(1): 19-25.
- [14] Stottmeister U, Wiener A, Kusch P, et al. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment[J]. *Biotechnology Advances*, 2003, 22(1-2): 93-117.
- [15] 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.
- CHEN Jin-jun, ZHENG Chong, ZHENG Shao-kui. Pollutant purification performance of a surface flow constructed wetland planted with different aquatic macrophytes and their combination[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(10): 2029-2035.
- [16] 吴振斌, 周巧红, 贺锋, 等. 构建湿地中试系统基质剖面微生物活性的研究[J]. 中国环境科学, 2003, 23(4): 422-426.
- WU Zhen-bin, ZHOU Qiao-hong, HE Feng, et al. Studies on microbial activities of substrate in plot scale plot of constructed wetland[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(4): 422-426.
- [17] 叶建锋, 徐祖信, 李怀正. 垂直潜流人工湿地中有机物去除动态规律研究[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2166-2171.
- YE Jian-feng, XU Zu-xin, LI Huai-zheng. Dynamic rule of organic matter removal in vertical-flow constructed wetland[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(8): 2166-2171.
- [18] Reddy K R, D'Angelo E M. Biogeochemical indicators to evaluate pollutant removal efficiency in constructed wetlands[J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35(5): 1-10.
- [19] Oostrom A J. Nitrogen removal in constructed wetlands treating nitrified meat processing effluents[J]. *Water Science and Technology*, 1995, 32(3): 137-147.
- [20] Schreijer M, Kampf R, Toet S, et al. The use of constructed wetlands to upgrade treated sewage effluents before discharge to natural surface water in Texel Island, the Netherlands-pilot study[J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35(5): 231-237.
- [21] Joseph K, Frank K, Lena G, et al. A comparative study of cyperus papyrus and miscanthidium violaceum-based constructed wetlands for wastewater treatment in a tropical climate[J]. *Water Research*, 2004, 38(2): 475-485.
- [22] Johansson L. The use of leca(light expanded clay aggregate)for the removal of phosphorus from wastewater[J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35(5): 87-93.
- [23] 贺锋, 吴振斌, 陶菁, 等. 复合垂直流人工湿地污水处理系统硝化与反硝化作用[J]. 环境科学, 2005, 26(1): 47-50.
- HE Feng, WU Zhen-bin, TAO Jing, et al. Nitrification and denitrification in the integrated vertical flow constructed wetlands[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(1): 47-50.