

垂直流人工湿地出水口位置与植物种类对 农村生活污水净化效果的影响*

刘芬芬^{1,2} 王德建^{1**}

(1. 中国科学院南京土壤研究所 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要 利用 3 种栽种植物的美人蕉(*Canna indica* Linn)湿地(M)、狼尾草[*Pennisetum alopecuroides* (Linn.) Spreng]湿地(L)、苏丹草[*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf]湿地(S)和未栽种植物的对照湿地(CK), 研究高、中、低出水口及不同植物对垂直流人工湿地污水净化效果的影响。垂直流人工湿地进水来自常熟农业生态试验站生活污水厌氧池, 以间歇式进水方式运行, 进水水力负荷为 $0.15 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。结果表明: 不同出水口位置对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ (铵态氮)、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ (硝态氮)、COD(化学需氧量)的去除率存在显著性差异。随着出水口位置的降低 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的去除率显著增加, 最大去除率达到 98.3%。出水口位置升高 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 与 COD 的去除率则显著增加, 高出水口的去除率分别达到 -47.4% 和 64.5%。与中、低出水口处理相比, 高出水口的 TN(总氮)去除率提高 22.5%~27.6%。而对 TP(总磷)的去除率恰恰相反, 高出水口处理 TP 去除率比中、低出水口低 20.6%~28.9%。3 种植物湿地—美人蕉湿地、狼尾草湿地、苏丹草湿地对 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、TN、TP、COD 去除率显著高于未栽种植物的对照湿地, 分别提高 74.4%~98.6%、11.3%~17.8%、8.60%~16.3%与 14.1%~19.0%。3 种植物湿地之间对 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、TN、TP、COD 去除效果没有显著差异。对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的去除效果, 美人蕉湿地显著低于其他 3 种湿地。以上结果表明, 通过对垂直流人工湿地的出水口位置控制和栽种湿地植物, 可以有效地改变污染物的去除效果。

关键词 垂直流人工湿地 出水口位置 植物种类 生活污水 污染物去除率

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2011)04-0912-06

Effects of outlet positions and plant species on rural domestic sewage purification in engineered vertical flow wetland

LIU Fen-Fen^{1,2}, WANG De-Jian¹

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In this study, four different types of engineered vertical flow constructed wetland (VF-CW) — *Canna indica* Linn wetland (M), *Pennisetum alopecuroides* (Linn.) Spreng wetland (L), *Sorghum sudanense* (Piper) Stapf wetland (S) and control wetland without plant (CK) — were used to determine the effects of outlet positions (high, middle and low position) and plant species on pollutant removal efficiency in rural domestic sewages. Domestic sewages from anaerobic tanks in the Changshu Agro-ecological Experimental Station were intermittently used to irrigate VF-CW at hydraulic loading rate of $0.15 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. Results showed that the outlet position significantly determined the removal efficiency of $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ and COD (chemical oxygen demand) in rural domestic sewages. The removal rate of $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ significantly increased with lowering of the outlet position. The maximum removal rate of $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ was 98.3%. However, the removal rate of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ and COD significantly decreased with lowering of the outlet position. The removal rates of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ and COD of the highest outlet were -47.4% and 64.5%, respectively. The removal rate of total nitrogen (TN) of the high outlet increased by 22.5%~27.6% compared with that of the middle and low outlets. On the contrary, the removal efficiency of total phosphorus (TP) of the high outlet was 20.6%~28.9% lower than that of middle and low outlets. Compared with the control treatment (CK), the removal rates of $\text{NO}_3^- \text{-N}$, TN, TP and COD in VF-CW with *C. indica*, *P. alopecuroides*

* 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-440)和国家科技支撑计划项目(2006BAJ10B06)资助

** 通讯作者: 王德建(1957~), 男, 研究员, 博导, 主要从事农业面源污染与农村环境整治方面的研究。E-mail: djwang@issas.ac.cn
刘芬芬(1984~), 女, 硕士研究生, 主要从事农村生活污水处理方面的研究。E-mail: 08flyingbird@163.com

收稿日期: 2010-10-27 接受日期: 2011-03-03

and *S. sudanense* significantly increased by 74.4%~98.6%, 11.3%~17.8%, 8.60%~16.3% and 14.1%~19.0%, respectively. However, no significant differences were noted among VF-CWs with three plant species regarding the removal of NO_3^- -N, TN, TP and COD. In term of the removal rate of NH_4^+ -N, *C. indica* wetland performed significantly less than the other plant species VF-CWs. These results suggested that pollutant removal efficiency improved by controlling outlet position and growing plants in VF-CW systems.

Key words Engineered vertical flow wetland, Outlet position, Plant species, Domestic sewage, Pollutant removal efficiency (Received Oct. 27, 2010; accepted Mar. 3, 2011)

人工湿地在污水处理、污染物控制和改善环境方面已经得到各国的普遍重视和应用^[1]。与传统的污水处理工艺相比,人工湿地具有基建与运行费用低、易操作、好管理、生态环境效应显著、处理效果好等优点,使得人工湿地在发展中国家有很强的运用潜力,特别是在管网收集系统不发达的中小城镇和乡村地区^[2]。垂直流人工湿地作为人工湿地的类型之一,因其充分利用了湿地的空间,发挥了系统间的协同作用,使污水处理能力得到大幅度提高,且水力负荷更高、硝化能力更强、床体利用更有效,因而在污水处理中已经得到了广泛应用^[3]。

垂直流人工湿地属于工程设计系统,通过植物、基质以及微生物菌落的协同作用以达到处理废水的目的,但人工湿地在发挥这些作用的过程中,更受人为控制^[4]。在应用中,垂直流人工湿地构型、基质类型等筛选完成后,氧环境的影响将会变得明显,通过对出水口位置的优化及植物的筛选能极大地促进污水净化效果的提高。因为不同出水口位置及植物吸收、输氧作用影响到人工湿地内部污染物的运移和氧环境,而氧环境又是微生物活动以及有机物降解和营养盐转化的重要影响因素,直接关系着污水净化效果^[5]。因此,研究出水口位置及植物类型对人工湿地氧环境的影响和净化效果具有实践指导意义,但目前对这方面的研究还比较少。

鉴于此,以分别栽种美人蕉(*Canna indica* Linn.)、狼尾草[*Pennisetum alopecuroides* (Linn.) Spreng]、苏丹草[*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf]的3种植物型垂直流湿地和无植物的对照垂直流湿地(CK)为研究系统,在

一定范围内研究不同出水口位置及植物类型对垂直流人工湿地氨态氮(NH_4^+ -N)、硝态氮(NO_3^- -N)、全氮(TN)、全磷(TP)和化学耗氧量(COD)净化效果的影响,为深入研究湿地的净化机理和湿地的优化设计提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

该垂直流人工湿地建在中国科学院常熟农业生态试验站内,用于处理试验站内工作人员的生活污水。试验设置4个处理,分别为无植物的对照湿地和栽种美人蕉、狼尾草、苏丹草的湿地(分别用CK、M、L、S表示),每个处理3个重复,随机排列。根据该系统较低的污水负荷,设计每块湿地的长×宽×深为1.5 m×1.0 m×0.6 m,填料深为50 cm,从下往上依次为:砾石(0~20 cm、细砂(20~25 cm)、沸石+石灰石填料(25~40 cm)和土壤(40~50 cm),较浅的基质填料层可以有效防止由于水力停留时间过长形成死水及基质填料吸附的污染物再次溶解释放。目前人工湿地常用的基质一般为土壤、河砂和砾石,这类基质净化效率低,容易吸附饱和,且除磷脱氮的能力不高,致使出水中氮、磷浓度较高^[6]。本文选择具有脱氮、脱磷活性较高的沸石+石灰石作为基质填料,期望通过较优的组合,达到理想的污水处理效果。

试验装置构建于2009年3月,于5月开始运行,采用全天间歇式进水,实际流入湿地的平均水量约为 $3 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,水力负荷为 $0.15 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。布水管比基基层面高15 cm,呈“丰”字型布设。试验装置如图1所示。

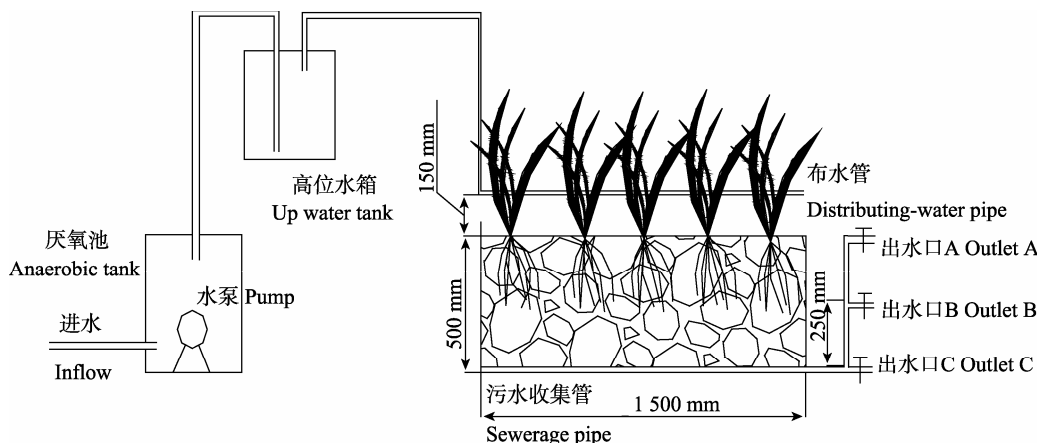


图1 试验用垂直流人工湿地示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vertical flow-constructed wetland (VF-CW)

1.2 试验方法

试验设 A、B、C 3 个出水口高度(图 1), 于 2010 年 7 月至 8 月, 以 20 d 为 1 个周期, 每 3 d 采 1 次水样。第 1 周期采出水口 A 水样: 出水口 A 位于湿地上部, 在运行过程中, 关闭 B、C 出水口, 在 A 出水口采样; 整个基质层为饱和水层。第 2 周期采出水口 B 水样: 出水口位于湿地中部, 在运行过程中, 关闭 A、C 出水口, 在 B 出水口采样; 基质层上层 0.25 m 为不饱和水层, 下层 0.25 m 为饱和水层。第 3 周期采出水口 C 水样: 出水口位于湿地底部, 在运行过程中, 关闭 A、B 出水口, 在 C 出水口采样; 污水从湿地的顶部顺流而下, 整个湿地基质层为不饱和水层。除以上控制之外, A、B、C 运行参数相同。DO(溶解氧)水样采集时, 参照《水和废水检测方法》^[7]现场固定溶解氧, 然后带入实验室立即测定。另外采集水样, 于 4 °C 下保存待测其他指标。

1.3 进水水质

供试污水为经过厌氧池初步处理的试验站工作人员的生活污水, 其 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN、TP、COD、DO(溶解氧)浓度分别为 $15.80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $3.94 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $24.70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.78 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $71.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.58 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.4 测试指标及测定方法^[7]

COD 的测定采用快速密闭催化消解法, TP 的测定采用过硫酸钾消解-钼锑抗比色法, TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 利用流动分析仪(AA3-Bran+luebbe)测定, DO 的测定采用碘量法。

1.5 数据处理

采用 Excel 2003 进行数据处理与作图, 用 SPSS 17.0 软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 出水口位置与植物种类对 DO 浓度的影响

出水口 A、B、C 与不同植物对垂直流人工湿地 DO 含量的影响如图 2 所示。由图 2 可知, 出水口 A、B、C 湿地之间出水 DO 含量存在显著性差异($P<0.05$), 随着出水口位置的降低出水 DO 含量增加, 高(A)、中(B)、低(C)出水口处理的出水 DO 含量分别为 $0.74 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $1.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。此现象说明出水口位置能够有效改变垂直流湿地的 DO 含量^[8]。不同植物湿地之间, M(美人蕉湿地)出水 DO 含量显著低于 CK、L(狼尾草湿地)、S(苏丹草湿地)。其原因可能为: (1)美人蕉的根系为块茎, 呼吸作用大, 消耗了大量氧气; (2)美人蕉叶面宽阔, 郁闭度大, 降低了大气的复氧作用。有研究表明, 一块充氧量为

$5.86 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 的人工湿地, 其中 3.76 g 来自于大气的直接复氧, 2.1 g 来自芦苇光合作用向根区的传递, 但是这 2.1 g 中 2.08 g 用于根的呼吸, 只有 0.02 g 是剩余的^[9]。大气复氧是湿地供氧的主要来源^[10], 植物利用光合作用向根系输送的氧气绝大部分被根系呼吸消耗掉^[11-12]。

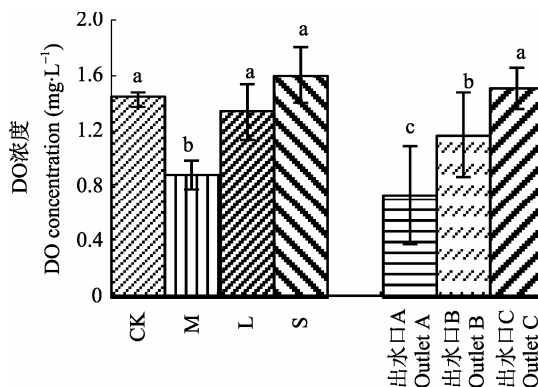


图 2 出水口位置和植物种类对人工湿地出水溶解氧(DO)含量的影响

Fig. 2 Effects of outlet positions and plant species on dissolved oxygen (DO) concentration in constructed wetland systems
CK: 无植物对照 The control of constructed wetland without plant;
M: 美人蕉湿地 The constructed wetland with canna; L: 狼尾草湿地 The constructed wetland with pennisetum; S: 苏丹草湿地 The constructed wetland with sudangrass; 下同 The same below.

2.2 出水口位置与植物种类对不同形态氮去除效果的影响

2.2.1 $\text{NH}_4^+\text{-N}$

出水口 A、B、C 与不同植物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的处理效果如图 3 所示。由图可知, 出水口 A、B、C 处理之间对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率存在显著性差异($P<0.05$), 随着出水口的降低, 各湿地 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率显著提高。各湿地对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率均超过 70%, 其中低出水口的平均 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率达到 98.3%, 高出水口的平均去除率为 83.9%, 低出水口处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率比高出水口提高 4.4%。此结果说明低出水口位置对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除有利。分析原因为: 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除主要依靠硝化菌的硝化作用, 其中影响硝化作用的主要因素是 DO 浓度^[13], 因为进水 DO 浓度较低(平均仅为 $0.58 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右), 而通过降低出水口位置, 人工湿地的饱和水位降低, 这样有助于大气复氧(图 2), 低出水口处理的出水 DO 比高出水口平均提高 $0.78 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 出水 DO 达到 $1.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 这样在人工湿地内部形成更多的好氧微区域, 这些微区域有利于硝化细菌将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化成 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 降低了溶液中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度^[14-15]。崔玉波等^[16]采用酸化、两段间歇流人工湿地处理生活污水, 对第 1

段湿地中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 空间变化的研究表明, 间歇运行所产生大气复氧对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除具有明显的强化作用, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率达到 50%~70%。黄娟等^[17-18]等研究发现利用微曝气强化供氧, 提高 DO 浓度, 也可促使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 硝化率大大提高。

同时由图 3 可知, M(美人蕉湿地)、L(狼尾草湿地)、S(苏丹草湿地)、CK 湿地 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率分别为 84.5%、90.9%、95.7%、93.2%, M 湿地对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果显著低于其他 3 种湿地, M 湿地与 S 湿地对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率差距最大达到 11.2%。这可能与美人蕉湿地中 DO 含量显著低于其他 3 种湿地有关。CK、L、S 湿地之间对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率无显著性差异($P>0.05$)。

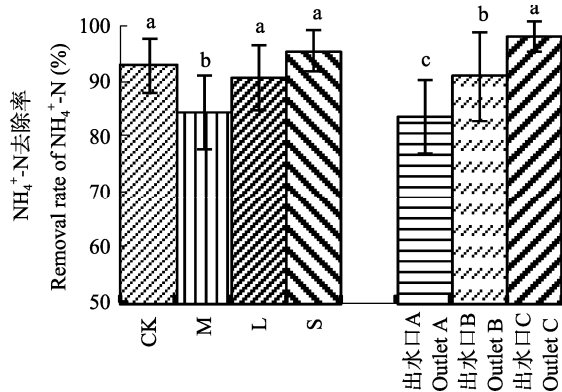


图 3 出水口位置和植物种类对人工湿地 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果的影响

Fig. 3 Effects of outlet positions and plant species on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ remove rate in constructed wetland systems

2.2.2 $\text{NO}_3^-\text{-N}$

出水口 A、B、C 与不同植物对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除效果的影响见图 4。由图 4 可知, 各处理对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除率都出现负值。出水口 A、B、C 处理中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除率存在显著性差异($P<0.05$), 随着出水口的降低, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的累积率增大。出水口 A、B、C 对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的平均累积率分别为 43.4%、117.7%和 197.3%。此现象说明大量 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化成 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在湿地中出现了积累, 表明出水口低不利于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除。已有研究表明, 垂直流人工湿地对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除效果比较差, 去除范围仅为 0.01~2.15 $\text{g(N)}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[18]。王凯军等^[19]针对北方农村家庭生活污水采用微型复合垂直流人工湿地处理农村灰水, 发现由于受垂直流湿地供氧条件的限制, 湿地内的硝化、反硝化作用不充分。有研究表明: 微生物的反硝化作用是一个严格的厌氧过程, 当系统中溶解氧的浓度超过 0.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 反硝化作用难以发生^[20]。

同时由图 4 可知, 不同植物类型湿地均出现了 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 累积, M(美人蕉湿地)、L(狼尾草湿地)、S(苏

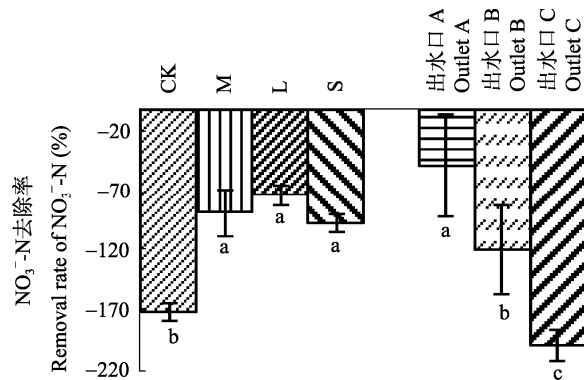


图 4 出水口位置和植物种类对人工湿地 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除效果

Fig. 4 Effects of outlet positions and plant species on $\text{NO}_3^-\text{-N}$ remove rate in constructed wetland systems

丹草湿地)、CK 湿地 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 累积率分别为 86.7%、71.4%、95.6%、170.5%, 可以看出 CK 湿地 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 累积率显著高于其他 3 种植物湿地, 与狼尾草湿地(L)累积率差距最大达到 99.1%, 表明植物的吸收作用有利于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除^[1,21]。

2.2.3 总氮(TN)

出水口 A、B、C 与不同植物对 TN 的处理效果如图 5 所示。由图 5 可见, 出水口 A、B、C 的 TN 去除率分别为 63.8%、41.4%、36.2%, 出水口 A 的 TN 去除率显著高于出水口 B、C。出水口 A 对 TN 的平均去除率分别比出水口 B、C 提高 22.5%、27.6%, 出水口 B 的 TN 去除率比出水口 C 中高 5.2%。秦爱国等^[22]研究也发现出水口位置对垂直流人工湿地 TN 的去除有显著影响, 中部出水的 TN 去除率比底部提高 8.01%, 与本研究结果相近。此现象表明, 出水口位置高时 TN 去除率高, 这可能与水力停留时间、水流速度有关。当湿地处于饱和水状态时, 水力停留时间最长, 更有利于植物和微生物的吸收作用去除 TN^[23]。

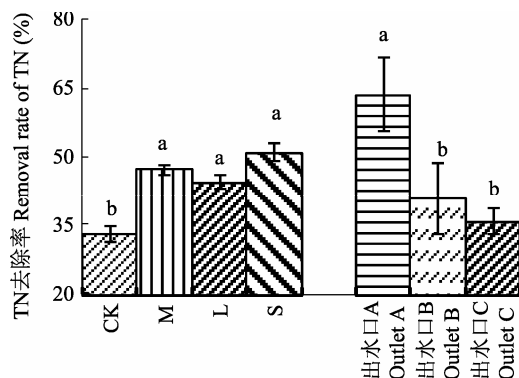


图 5 出水口位置和植物种类对人工湿地总氮(TN)去除效果的影响

Fig. 5 Effects of outlet positions and plant species on total N (TN) remove rate in constructed wetland systems

同时由图5可知, M(美人蕉)、L(狼尾草)、S(苏丹草)湿地对TN的去除率分别为47.6%、44.8%和51.3%, 去除率分别比CK湿地提高14.1%、11.3%和17.8%, 此结果表明植物对TN有很好的去除作用。其原因可能是: (1)湿地植物吸收一部分无机氮作为自身的营养成分, 用于合成植物蛋白等有机氮, 并通过植物的收割而去除。蒋跃平等^[24]研究的17种植物平均氮积累量对去除水中氮的贡献率为46.8%, 且氮积累量主要集中在植物的地上部, 其贡献率为38.5%, 通过对植物地上部分的收割, 就可以去除水中大部分的氮。(2)植物能将地上部的氧气通过茎输送至根部, 从而在根系附近形成一个好氧的环境, 而随着离根系的远近不同, 在湿地中形成缺氧与好氧状态, 这样的条件有利于硝化菌和反硝化菌的生长, 增强了湿地微生物的硝化和反硝化作用, 最终提高污水中氮的净化效率^[23]。

2.3 出水口位置与植物种类对总磷(TP)去除效果的影响

出水口A、B、C与不同植物对TP的处理效果如图6所示。由图6可知, 出水口A、B和C处理对TP的去除率分别为22.7%、43.3%和51.6%, 出水口A对TP的去除率显著低于其余2个处理。此结果表明, 饱和水层对垂直流人工湿地TP的去除不利, 底部和中部出水具有更高的TP去除率。其可能原因是: (1)TP的去除主要靠基质的吸附和沉淀作用^[25]。当垂直流人工湿地处于饱和水状态时, 流经此饱和水层污水的水流速度变缓慢, 并不再只沿着基质表面流动, 从而极大减少了污水与基质的接触, 降低了系统对TP的去除。(2)饱和水层内低DO也可能影响对TP的去除^[22,26]。

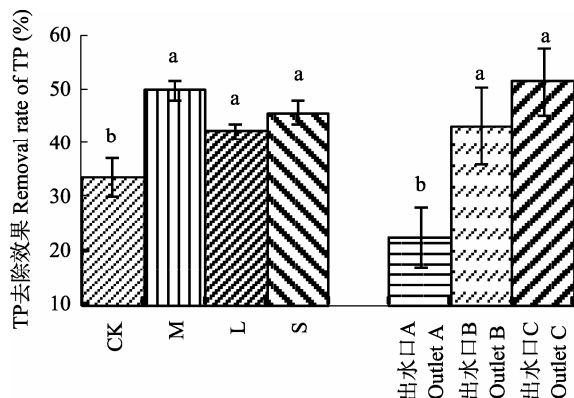


图6 出水口位置和植物种类对人工湿地总磷(TP)去除效果的影响

Fig. 6 Effects of outlet positions and plant species on total P (TP) remove rate in constructed wetland systems

同时由图6还可知, M(美人蕉)、L(狼尾草)、S(苏丹草)湿地的TP去除率显著高于CK湿地, 去除率分别比CK湿地提高16.3%、8.6%、12.2%, 说明植物对TP的去除有利。蒋跃平等^[24]研究的17种植物平均磷吸收量对去除水中磷的贡献率占51.0%。分析其原因为: (1)植物生长吸收湿地中的磷, 通过收割继而从系统中去除。(2)植物根系输氧作用和为各种微生物提供栖息场所的作用, 有利于微生物对磷的正常吸收和过量积累^[21,23,27]。

2.4 出水口位置与植物对化学耗氧量(COD)去除效果的影响

出水口A、B、C与不同植物对COD的处理效果如图7所示。由图7可知, 出水口A、B和C对COD的去除存在显著性差异。随着出水口位置的降低, COD的去除率显著下降。出水口A、B和C处理对COD的去除率分别为64.5%、48.9%和38.0%。说明出水口位置高有利于COD的去除, 这可能与水力停留时间有关。根据饱和水层体积、孔隙率和进水量计算可知, 饱和水层产生的水力停留时间约为36 h。王鹏等^[28]研究发现理论水力停留时间由24 h增长为72 h时, COD的去除率由60%大幅提升至74%。主要原因为水力时间增长, 污染物与微生物膜之间接触更加充分, 使得有机物污染物降解的生化动力学反应进行得更彻底。

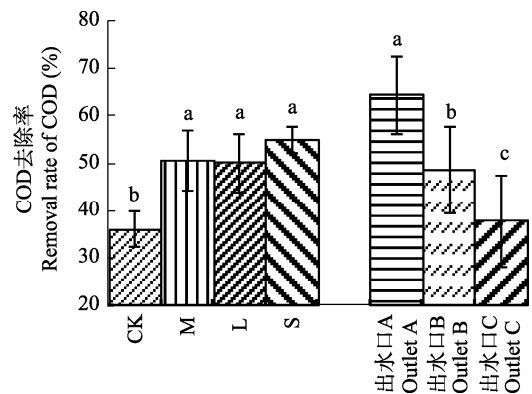


图7 出水口位置和植物种类对人工湿地化学超氧化物(COD)的去除效果

Fig. 7 Effects of outlet positions and plant species on chemical oxygen demand (COD) remove rate in constructed wetland systems

同时由图7可知, M(美人蕉)、L(狼尾草)、S(苏丹草)、CK湿地的COD去除率分别为50.9%、50.4%、55.3%和36.3%, 3种植物湿地对COD的去除率显著高于无植物的CK湿地, 表明植物有利于COD的去除。分析其原因可能为: 植物为微生物的吸附和代谢提供了良好的生化环境, 有利于微生物对多种有

机污染物的吸收、分解和富集;当废水流经湿地体系时,固态悬浮物被根系及填料阻拦截流,有机物通过根际微生态环境吸附,经异化及同化作用而得以去除^[29-30]。另外由图7还可以看出,3种植物湿地之间对COD的去除率无显著差异($P>0.05$),表明此试验中3种植物之间对COD的去除效果影响不大。

3 结论

(1)垂直流人工湿地出水口位置对污水中氮的去除有显著影响。 NH_4^+-N 去除效果显著,去除率随出水口位置的降低而增加,最大去除率达到98.3%; NO_3^--N 去除率随出水口位置的降低而下降,总体去除率为-189.9%;TN去除率表现为高出水口位置显著高于中、低出水口,最大去除率达到63.8%。垂直流人工湿地出水口位置对TP、COD的去除也有显著影响。中、低出水口位置对TP的去除率显著高于高出水口位置,高出水口位置有利于COD的去除。以上结果表明通过控制出水口位置可以有效改变污染物去除效果。

(2)有植物的湿地对 NO_3^--N 、TN、TP、COD的去除率显著高于没有植物的湿地,而美人蕉、狼尾草和苏丹草湿地之间对 NO_3^--N 、TN、TP和COD去除率无显著差异。美人蕉湿地对 NH_4^+-N 的去除率显著低于其他3种湿地。

参考文献

- [1] 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
- [2] Kivaisi A K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: A review[J]. Ecological Engineering, 2001, 16(4): 545-560
- [3] Zurita F, De Anda J, Belmont M A. Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(5): 861-869
- [4] Vymazal J. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment[J]. Ecological Engineering, 2005, 25(5): 478-490
- [5] 关伟, 肖蓓, 周晓铁, 等. 人工湿地脱氮技术研究进展[J]. 环境科学导刊, 2009, 28(4): 13-16
- [6] 王媛媛, 张衍林. 人工湿地的基质及其深度对生活污水中氮磷去除效果的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3): 581-586
- [7] 中国国家环境保护局. 水和废水监测分析方法[M]. 第3版. 北京: 中国环境科学出版社, 1989: 88-284
- [8] 潘明富, 蹇兴超, 秦爱国, 等. 出水口位置对组合潜流人工湿地脱氮效果的影响研究[J]. 广西轻工业, 2009, 25(12): 90-92
- [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

- [10] 杜晓丽, 徐祖信, 王晟. 两种改进型垂直潜流人工湿地脱氮途径分析研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(3): 62-66
- [11] 钟秋爽, 王世和, 黄娟, 等. 人工湿地系统溶解氧的研究[J]. 盐城工学院学报: 自然科学版, 2006, 19(1): 54-56
- [12] 黄娟, 王世和, 雒维国, 等. 植物光合特性及其对湿地DO分布、净化效果的影响[J]. 环境科学学报, 2006, 26(11): 1828-1832
- [13] 陈泽涛, 易皓, 庞志华, 等. 脉冲垂直流人工湿地处理污染河水的试验研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(5): 77-79, 83
- [14] 张政, 付融冰, 顾国维, 等. 人工湿地脱氮途径及其影响因素分析[J]. 生态环境, 2006, 15(6): 1385-1390
- [15] Tanner C C, Kadlec R H, Gibbs M M, et al. Nitrogen processing gradients in subsurface-flow treatment wetlands-influence of wastewater characteristics[J]. Ecological Engineering, 2002, 18(4): 499-520
- [16] 崔玉波, 尹军, 韩相奎, 等. 间歇式潜流人工湿地中COD、 NH_4-N 动态变化特征[J]. 环境工程, 2003, 21(3): 62-64
- [17] 黄娟, 王世和, 郝璐, 等. 三段式潜流湿地污水净化效果[J]. 水处理技术, 2007, 33(3): 65-68
- [18] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. Science of the Total Environment, 2007, 380(1/3): 48-65
- [19] 王凯军, 陈世朋, 董娜, 等. 微型复合垂直流人工湿地处理农村灰水试验研究[J]. 中国给水排水, 2008, 24(17): 40-43
- [20] 赵桂瑜, 杨永兴, 杨长明. 人工湿地污水处理系统脱氮机理研究进展[J]. 四川环境, 2005, 24(5): 64-67
- [21] Tanner C C. Plants for constructed wetland treatment systems—A comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species[J]. Ecological Engineering, 1996, 7(1): 59-83
- [22] 秦爱国, 蹇兴超, 冯庆革, 等. 出水口位置对垂直潜流人工湿地净化的影响[J]. 环境污染与防治, 2010(3): 64-66, 70
- [23] 张太平, 陈韦丽. 人工湿地生态系统提高氮磷去除率的研究进展[J]. 生态环境, 2005, 14(4): 580-584
- [24] 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
- [25] 晏再生, 王世和. 基质对于人工湿地净化磷素潜能的探讨[J]. 生态环境, 2007, 16(2): 661-666
- [26] Maine M A, Sune N, Hadad H, et al. Temporal and spatial variation of phosphate distribution in the sediment of a free water surface constructed wetland[J]. Science of the Total Environment, 2007, 380(1/3): 75-83
- [27] 金卫红, 付融冰, 顾国维. 人工湿地中植物生长特性及其对TN和TP的吸收[J]. 环境科学研究, 2007, 20(3): 75-80
- [28] 王鹏, 董仁杰, 吴树彪, 等. 水力负荷对潜流湿地净化效果和氧环境的影响[J]. 水处理技术, 2009(12): 48-52
- [29] 耿琦鹏, 洪剑明. 人工湿地净化污水机理研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(5): 43-45
- [30] 石雷, 杨璇. 人工湿地植物量及其对净化效果影响的研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1): 28-33