

多介质人工湿地对生活污水中 氮和磷的去除效率研究

于君宝¹, 侯小凯^{1,2}, 韩广轩¹, 管博¹, 郑垒^{1,2}

(1. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东省海岸带环境过程重点实验室,
中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 分别以芦苇(*Phragmites australis*)、东方香蒲(*Typha orientalis*)、碗莲(*Nelumbo nucifera*)、水生美人蕉(*Canna glauca*)、睡莲(*Nymphaea alba*)—金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)—金鱼藻为人工湿地净化植物, 以沸石和无烟煤作为基质, 构建6种多介质人工湿地单元, 分别对3种浓度生活污水中的总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)和总磷(TP)的净化效果进行研究。结果表明, 污水停留时间为5 d时, 4种有沸石和无烟煤作为基质的人工湿地单元, 对TN、NH₄⁺-N和TP的去除效率显著高于无基质的两种湿地单元($p < 0.05$), 其中香蒲、碗莲和美人蕉湿地单元对3种浓度污水的TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和TP的净化效率都达到90%以上, 以美人蕉湿地单元的净化效率为最高。睡莲—金鱼藻湿地单元对氮和磷的净化效率总体上优于凤眼莲—金鱼藻湿地单元; 但是, 在凤眼莲—金鱼藻湿地单元处理后的污水中, 溶解氧(DO)含量较高, 出水清澈、透明。为此, 在构建多级人工湿地时, 美人蕉宜作为先锋种首先承载高浓度污水, 香蒲、碗莲和芦苇次之, 凤眼莲—金鱼藻适宜多级人工湿地的最后一级。

关键词: 多介质人工湿地; 生活污水; 氮; 磷; 去除效率

中图分类号: X142; X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-5948(2013)02-233-07

随着经济的快速发展和人民生活水平的提高, 工农业所排放的污染物造成的水体污染问题日益严重, 大量富含氮、磷等营养物质的污水被直接排入河流、湖泊, 甚至海洋, 导致水体的富营养化^[1], 因此水污染治理问题一直是环境和生态研究的热点问题。在现有的污水处理技术中, 人工湿地污水处理技术具有出水水质稳定、对氮和磷等营养物质去除能力强、基建和运行费用低以及具有美学价值等优点受到了国内外的关注^[2-6]。人工湿地一般是由植物、基质和微生物组成, 主要通过物理、化学和生物协同作用净化污染物^[7]。植物和基质是影响人工湿地净化效率的两个重要介质, 植物不仅自身能够直接吸收污水中氮和磷等营养物质, 而且其生理活动有助于系统溶解氧的增加, 利于土壤微生物的生长, 促进湿地生态系统的硝化和反硝化作用, 强化湿地净化能力^[8,9]。基质可

为水生植物生长提供载体和营养物质, 为微生物的生长提供稳定的依附表面, 同时为植物、微生物生长及氧气的传输提供了必备条件。当污水流经人工湿地时, 基质及其微生物会与污水发生一些物理或化学的反应, 如吸收、吸附、过滤、离子交换、络合反应等将水体中的污染物有效去除^[10]。

多年来, 对选择何种湿地植物和基质才能提高人工湿地净化效率, 进行了广泛的研究, 并取得了一定的成果, 选择芦苇(*Phragmites australis*)、东方香蒲(*Typha orientalis*)等生物量大的挺水植物, 并突出生物多样性特色, 对污染物去除有良好的效果^[11,12]; 不同基质对污染物的净化效率存在差异, 沸石和陶瓷对总氮和氨氮的去除效果良好, 高炉钢渣、无烟煤、矿渣、粉煤灰具有较好的除磷能力^[13-17]。但如今污水中的污染物复杂多样, 浓度波动大, 仅靠单一介质的人工湿地往往无法满足去

收稿日期: 2012-08-21; 修订日期: 2013-01-12

基金项目: 山东省自然科学基金杰出青年基金项目(JQ201114)、中国科学院百人计划项目和“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAC02B01)资助。

作者简介: 于君宝(1970-), 男, 吉林省长春人, 博士, 研究员, 主要研究方向为元素生物地球化学与生态修复。E-mail: jbyu@yic.ac.cn

污要求,于是多级湿地应运而生,通过搭配不同植物和基质或者建立复合湿地来有效去除各种污染物质^[18-22]。然而各级湿地使用何种介质、如何搭配尚没有统一的方法和手段,本实验在多级复合湿地的基础上,将每一级湿地分解成独立的湿地单元,通过人工配制不同浓度的生活污水,研究各湿地单元对污水的净化效率,以为多级人工湿地的理论研究和工程设计、湿地植物和基质的选择与搭配提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

综合考虑植物的抗污性、经济性和美观性,并依据生物多样性原则,选取多年生草本挺水植物芦苇、东方香蒲、碗莲(*Nelumbo nucifera*)和水生美人蕉(*Canna glauca*),浮水植物睡莲(*Nymphaea alba*)和凤眼莲(*Eichhornia crassipes*),沉水植物金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)作为供试植物。实验以沸石、无烟煤和卵石为基质,其中沸石粒径为

2~8 mm,孔隙率为48.33%;无烟煤粒径为1~2 mm,孔隙率为51.33%;卵石粒径为4~8 mm。

1.2 方 法

1.2.1 实验设计

本实验装置为6个关联的实验容器。实验容器上部直径为50 cm,内径为47 cm;下部直径为40 cm,内径为37 cm,高55 cm。6个实验容器的编号分别为A~F。各容器都设有可控制的进水和出水阀门。在距离容器底部25 cm处安装进水管,在其对侧安装出水管,水管端口处用约10目的塑料窗纱包裹,防止基质和土壤颗粒堵塞水管,并在其周围填充少量大粒径卵石以紊乱水流(图1)。其中,A容器~D容器,在25~55 cm深度层以1:1的体积比分别填充沸石和无烟煤,在10~25 cm深度层铺垫供植物生长的土壤;直接在E容器和F容器底部铺垫15 cm厚的土壤。在A容器~D容器中分别种植芦苇、东方香蒲、碗莲和水生美人蕉株苗,在E容器种植睡莲—金鱼藻,在F容器种植凤眼莲—金鱼藻。在每个容器中,种植每种植物4株。

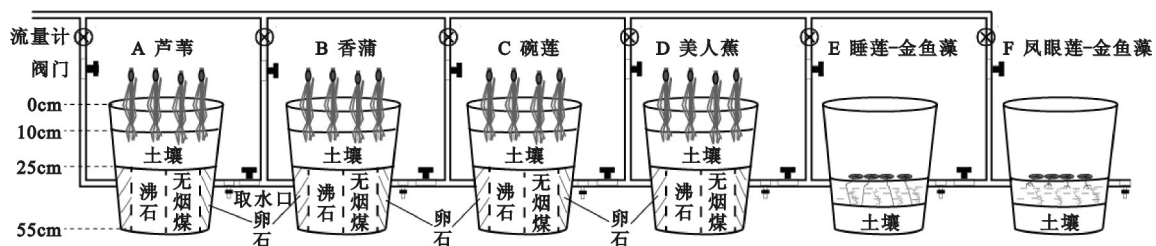


图1 多介质人工湿地设计示意图

Fig.1 The chart of the multi-medium constructed wetlands

湿地植物种植后,先加入自来水试运行,检验其完好性,并确定湿地污水处理量。随后养护两个月,其目的是:一方面,使植物适应桶内环境,成长至有一定的抗污性;另一方面,给出微生物充分生长的时间,使湿地系统具有更高的净化效率。养护期结束后,用葡萄糖、硫酸铵、硝酸钠和磷酸二氢钾人工配置出低氮和低磷、中氮和中磷、高氮和高磷3种不同浓度水平的生活污水。其中,在低氮和低磷污水中,总氮(TN)含量为10 mg/L,氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)含量为5 mg/L,硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)含量为5 mg/L,总磷(TP)含量为1 mg/L;在中氮和中磷污水中,TN含量为25 mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量为12.5 mg/L, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量为12.5 mg/L,TP含量为3 mg/L;在高氮和高磷污水中,TN含量为40

mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量为20 mg/L, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量为20 mg/L,TP含量为6 mg/L。

在3种浓度的污水中,加入等量的葡萄糖以提供碳源。打开6个连接流量计的阀门,关闭下方5个连接桶与桶的阀门,打开对应的取水口,使6个湿地单元形成6个独立的湿地处理系统,并且保持进水浓度和流速的一致。每个湿地单元污水滞留时间设计为5 d,根据设定的污水滞留时间和实验设施的处理能力,确定以10 L/d的进水速度按照先低浓度后高浓度的顺序投加污水,每批污水连续运行5 d,在出水口取样,测定污染物的含量。

1.2.2 污染物测定

利用连续流动分析仪(Skalar Scan⁺)测定TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和TP含量。用FE20型pH计测

定水体pH。用SG6-FK10溶解氧测定仪测定溶解氧(DO)含量。

1.2.3 污水净化效率的计算方法

污水净化效率的计算公式如下:

$$\eta = (C_0 - C') / C_0 \times 100\% \quad (1)$$

在公式(1)中, $\eta(\%)$ 为净化效率; $C_0(\text{mg/L})$ 为进水污染物含量; $C'(\text{mg/L})$ 为出水污染物含量。

1.2.4 数据处理

采用SPSS13.0软件处理和分析数据。

2 结果与讨论

2.1 不同介质组合的人工湿地净化生活污水中含氮污染物的效果

根据污水处理前的污染物含量及处理后的含量,分别计算TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的净化率。由图2可以看出,6种湿地处理单元对污水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有不同程度的净化作用,A容器~D容器湿地单元的净化率显著高于E容器和F容器湿地单元($p < 0.05$),其净化率几乎都达到90%以上,说明沸石、无烟煤的混合基质和植物组合的湿地单元对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 具有极强的去除效果。另外,污水浓度会影响人工湿地对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的净化率,当污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 初始含量较低时,A容器~D容器湿地单元对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率无显著差异($p > 0.05$),都为92%左右;E容器和F容器湿地单元的去除率分别为55.92%和58.74%,二者也无显著差异($p > 0.05$)。但当投加中浓度和高浓度污水时,水生美人蕉湿地单元(D容器)对高浓度污水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 净化率高达98.43%,显著高于芦苇、香蒲

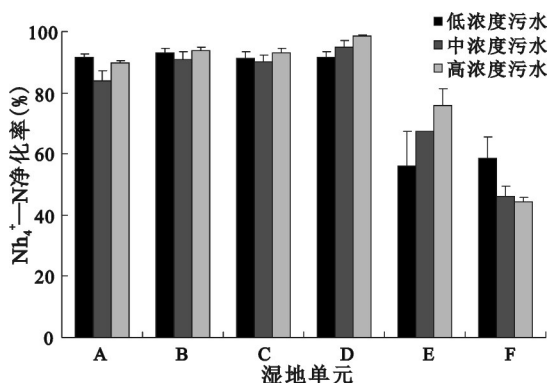


图2 不同介质组合人工湿地对不同浓度污水氨氮的净化率

Fig.2 The removal efficiency of ammonia nitrogen in the polluted water with various concentrations treated by constructed wetlands with different medium combination

和碗莲湿地单元($p > 0.05$),显示了水生美人蕉在高污染浓度下较强的根际输氧能力,睡莲—金鱼藻植物组合湿地单元(E容器)对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的净化能力优于凤眼莲—金鱼藻组合湿地单元(F容器)。

由图3可以看出,A容器~F容器6种湿地单元对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的净化效率都比较高,除了芦苇(A容器)和睡莲—金鱼藻(E容器)湿地单元,在处理高浓度污水时对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的净化率为86.07%和88.37%以外,其他湿地单元对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的净化效率都达到了94%以上,有沸石和无烟煤混合基质的A容器~D容器湿地单元相较于无基质的E容器和F容器湿地单元净化 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的优势并不突出,说明湿地净化 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的能力并不取决于基质吸附作用的强弱,植物的吸收作用和反硝化作用是去除 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的关键。

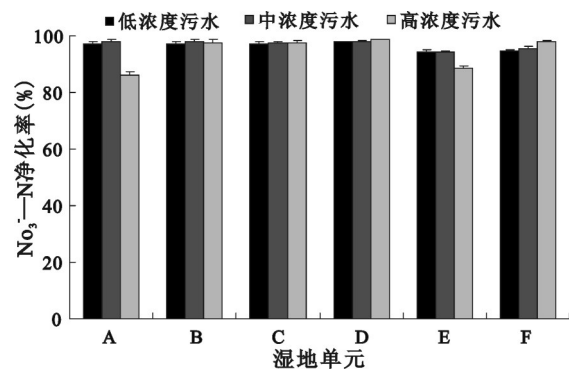


图3 不同介质组合人工湿地对不同浓度污水硝态氮的净化率

Fig.3 The removal efficiency of nitrate nitrogen in the polluted water with various concentrations treated by constructed wetlands with different medium combination

由图4可以看出,A容器~F容器6种湿地单元对各浓度污水中的TN都有很强的净化效率,都在74.44%~97.27%范围内,但是A容器~D容器湿地单元对TN的净化率显著高于E容器和F容器湿地单元,另外当污水浓度变化时,各容器的净化率变化存在差异。处理低浓度和中浓度污水时,A容器~D容器湿地单元去除TN的能力无显著差异,处理高浓度污水时,芦苇湿地单元对TN的净化效率为85.61%,显著低于香蒲、碗莲、美人蕉湿地单元($p < 0.05$)。F容器湿地单元对低浓度污水的TN净化率显著高于E容器湿地单元,但是处理中、高浓度的污水时,其结果却恰恰相反,说明睡莲—金鱼藻的植物组合对TN的去除能力更为稳定,同时凤眼莲—金鱼藻对低浓度污水有较好的

处理效果。综合对比分析,沸石和无烟煤混合基质的湿地单元对TN去除效率相对较高;在高浓度污水条件下,芦苇湿地单元对TN的去除效率明显下降。

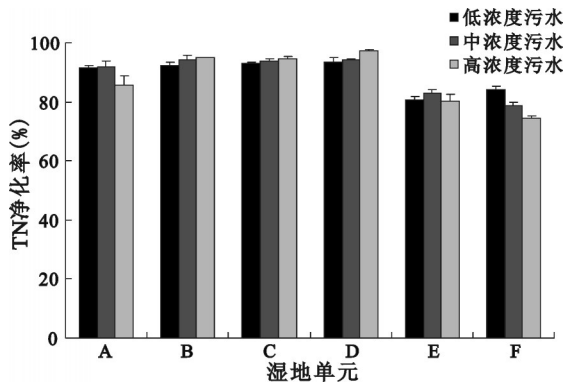


图4 不同介质组合人工湿地
对不同浓度污水总氮的净化率

Fig.4 The removal efficiency of total nitrogen in the polluted water with various concentrations treated by constructed wetlands with different medium combination

以沸石和无烟煤为混合基质的湿地单元对含氮污染物具有很高的去除能力,其主要原因是沸石具有长期保持吸附 NH_4^+-N 能力,因此能够高效地去除 NH_4^+-N ,且具有可生物再生的特性^[15]。同时硝化作用也对 NH_4^+-N 的去除有重要影响^[23],种植美人蕉的D容器湿地单元处理中、高浓度污水时,显现出对 NH_4^+-N 更高的去除效率,这是因为它具有较强的根际输氧能力,创造出更适于硝化作用发生的好氧环境,使D容器湿地单元的硝化作用强于其他湿地单元。本实验A容器~D容器湿地单元与E容器和F容器湿地单元对 NO_3^--N 的净化率相比无显著优势,表明人工湿地植物吸收和反硝化作用是 NO_3^--N 去除的主要途径,与基质的吸附能力关系不大,此结果和Kusch P等^[24]的研究结果一致,同时亦可表明,沸石和无烟煤对硝酸盐的吸附能力不强^[25]。由于配制的污水没有添加有机氮物质,所以湿地单元对TN的去除受 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的综合影响,其净化途径主要为植物的吸收作用、基质的吸附作用和反硝化作用。综合来看,无论是低浓度还是高浓度污水,沸石和无烟煤基质的人工湿地对氮的净化能力强于直接使用土壤的人工湿地,因此在运用多级人工湿地处理氮污染物超标的污水时,填充沸石会达到较为理想的处理效果。从植物选择来看,芦苇、

香蒲、碗莲和美人蕉对于低、中浓度污水的TN都有着高效而且稳定的去除效果,但是在处理高浓度污水时,美人蕉湿地单元的净化优势明显,而芦苇湿地单元的净化能力有所下降,所以在多级湿地中,美人蕉应该作为先锋种首先承载高浓度污水,香蒲、碗莲、芦苇次之;睡莲—金鱼藻与凤眼莲—金鱼藻湿地单元相比,睡莲—金鱼藻湿地单元的净化能力更为稳定,对中、高浓度污水的处理优于凤眼莲—金鱼藻湿地单元;另外,凤眼莲—金鱼藻湿地单元对低浓度污水净化效率更高,且净化后的出水十分清澈,因此凤眼莲—金鱼藻的植物组合适于用作人工湿地的最后一级,既具有进一步净化水质的功能,又美化了湿地景观。

2.2 不同介质组合人工湿地净化生活污水中磷污染物的效果

根据污水处理前后的污染物浓度,计算出总磷的净化率。由图5可以看出,6种人工湿地单元对TP有着不同程度的净化效果。其中,A容器~D容器湿地单元的平均净化率达到95%以上,E容器和F容器湿地单元的平均净化率分别为87.29%和56.95%,有基质的湿地单元对TP的净化率显著优于无基质的湿地单元($p < 0.05$),表明沸石和无烟煤混合基质对磷有很强的吸附作用,这种吸附作用在除磷过程中占主导地位,植物对磷的吸收作用有限。有实验研究发现,无烟煤对磷有极强的去除作用,而沸石对磷的去除效果不好^[26]。由此可见,本实验的混合基质对磷的高效净化能力起主要作用的是无烟煤。同时,无填充的基质的E容器和F容器湿地单元对磷也有一定的吸收作用,且睡莲—金鱼藻植物组合的湿地单元对磷的净化能力优于凤眼莲—金鱼藻组合的湿地单元。

填充基质的4种湿地单元对3种浓度污水的TP都有极强的净化能力,是植物、微生物和填料共同作用的结果。其中,美人蕉湿地单元的净化率达到了100%。无填充基质的睡莲—金鱼藻湿地单元对TP的净化效率最高达到96.32%,一方面,该湿地单元的植物为浮水植物睡莲与沉水植物金鱼藻相结合,充分利用了湿地空间,并吸收营养物质;另一方面,睡莲本身对磷具有较强的吸收能力^[27]。因此,在运用多级湿地处理磷污染物超标污水时,应该将有无烟煤填料的湿地单元前置,并选择美人蕉为湿地植物的先锋种,首先承载浓度最高的污水,其次选择碗莲、香蒲、芦苇,在湿地

末端,先种植睡莲—金鱼藻,再种植凤眼莲—金鱼藻,实现湿地整体净化效率的最大化。

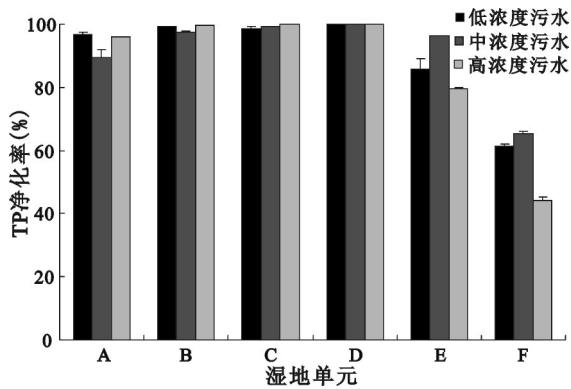


图5 不同介质组合人工湿地对不同浓度污水总磷的净化率

Fig.5 The removal efficiency of total phosphorus in the polluted water with various concentrations treated by constructed wetlands with different medium combination

2.3 不同介质组合湿地对生活污水中溶解氧含量的影响

由图6可以看出,E容器和F容器湿地单元的平均DO含量分别为5.59 mg/L和4.67 mg/L,显著高于A容器~D容器湿地单元($p < 0.05$),E容器和F容器湿地单元之间无显著差异。这是因为A容器~D容器湿地单元在湿地类型上属于潜流湿地,污水从湿地内部流过,湿地内部微生物的生命活动以及污染物的分解需要吸收水中的溶解氧,而由于其无法直接从空气中获取氧气,只能通过植物的光合作用缓慢输送,所以DO含量偏低;E容器和F容器湿地单元在湿地类型上属于表流湿地,污水从湿地表面流过,消耗溶解氧的同时,可以通过大气不断补充氧气,因此其DO含量维持在一个较高的水平上。处理低浓度污水时,各湿地单元的DO含量总体上大于处理中、高浓度污水时,这主要是由于低浓度污水的污染物较少,只消耗了部分溶解氧,植物的光合作用亦补偿了部分溶解氧,而中、高浓度污水的污染物浓度大,微生物活动更加旺盛,硝化作用更剧烈,加上葡萄糖的分解和其他还原性物质的耗氧过程,消耗了更多的溶解氧,因此表现出DO含量偏低。Golterman H L^[28]研究发现,湿地水体中的DO含量会改变水中的氧化还原环境,从而影响对氮、磷的净化效果。DO含量分别与TN净化率($r = -0.692, p < 0.01$)、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 净化率($r = -0.585, p < 0.05$)、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 净化率

($r = -0.529, p < 0.05$)和TP净化率($r = -0.496, p < 0.05$)呈负相关关系,说明人工湿地对氮、磷的净化率与水体DO含量有密不可分的联系,污水流经湿地后的DO含量越低,说明湿地去除污染物所消耗的溶解氧越多,硝化细菌等好氧微生物的活动越频繁,其消耗氧气的速度超过了植物光合作用所供给的氧气量,在结果上表现为净化率增强^[29]。

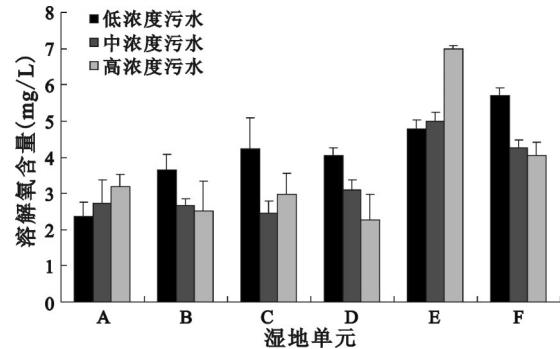


图6 经过不同介质组合人工湿地净化的不同浓度污水的溶解氧含量

Fig.6 Dissolved oxygen contents in the polluted water with various concentrations treated by constructed wetlands with different medium combination

3 结论

4种以沸石和无烟煤作为基质的人工湿地对TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TP的净化效率显著高于无基质的两种湿地单元,说明在去除以上污染物时,基质起着主要净化作用,植物起辅助净化作用。有基质的人工湿地对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的净化效率与无基质人工湿地无显著差异,说明基质对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除的作用不强,其净化途径主要依靠反硝化作用和植物的吸收作用。

种植水生美人蕉的湿地对3种浓度生活污水的TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和TP净化效率都最高,显示出水生美人蕉强大的根系输氧能力和吸收氮、磷的能力。在运用多级湿地处理污水时,应根据污水的水质情况决定各级湿地的选择;有基质的湿地适合置于湿地前端,凤眼莲—金鱼藻相比于其他湿地单元出水更加透明、清澈,适于置于湿地末端。

致谢:本研究得到“中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站”各部门人员的大力支持,在此表示衷心感谢!

参考文献

- [1]陆印. 农业种植对水体富营养化的影响研究[J]. 吉林农业, 2011, (10): 143.
- [2]Stottmeister U, Wie Ner 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.
- [3]籍国东, 孙铁珩, 李顺. 人工湿地及其在工业废水处理中的应用[J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(2): 224-228.
- [4]李娟, 张龙庄, 段亮, 等. 人工湿地废水处理技术的研究现状及展望[J]. *南方农业学报*, 2011, **42**(1): 69-73.
- [5]张清. 人工湿地的构建与应用[J]. *湿地科学*, 2011, **9**(4): 373-379.
- [6]傅长锋, 李大鸣, 白玲. 东北屯人工湿地污水处理系统的设计与应用[J]. *湿地科学*, 2012, **10**(2): 149-155.
- [7]宋志文, 毕学军, 曹军. 人工湿地及其在我国小城市污水处理中的应用[J]. *生态学杂志*, 2003, **22**(3): 74-78.
- [8]Kantawanichkul S, Pilaila S, Tanapiyanich W, *et al.* Wastewater treatment by tropical plants in vertical-flow constructed wetlands[J]. *Water science and technology*, 1999, **40**(3): 173-178.
- [9]Lund L, Horne A, Williams A. Estimating denitrification in a large constructed wetland using stable nitrogen isotope ratios[J]. *Ecological Engineering*, 1999, **14**(1-2): 67-76.
- [10]Reddy K. Fate of nitrogen and phosphorus in a waste-water retention reservoir containing aquatic macrophytes [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1983, **12**(1): 137-141.
- [11]Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?[J]. *Water science and technology*, 1997, **35**(5): 11-18.
- [12]Gopal B. Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: Potentials and problems[J]. *Water science and technology*, 1999, **40**(3): 27-35.
- [13]袁东海, 任全进, 高士祥, 等. 几种湿地植物净化生活污水COD、总氮效果比较[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(12): 2337-2341.
- [14]张翔凌, 张晟, 贺锋, 等. 不同填料在高负荷垂直流人工湿地系统中净化能力的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(5): 1905-1910.
- [15]武俊梅, 张翔凌, 王荣, 等. 垂直流人工湿地系统基质优化级配研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(5): 1227-1232.
- [16]薛玉, 张旭, 李旭东, 等. 复合沸石吸氮系统控制暴雨径流污染[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2003, **43**(6): 854-857.
- [17]张燕, 庞南柱, 蹇兴超, 等. 3种人工湿地基质吸附污水中氨氮的性能与基质筛选研究[J]. *湿地科学*, 2012, **10**(1): 87-91.
- [18]崔玉波, 余丹, 朱宝英. 两级逆向垂直潜流人工湿地去除营养物的性能研究[J]. *中国给水排水*, 2007, **23**(15): 8-12.
- [19]海热提, 范立维, 谢涛, 等. 两级潜流人工湿地在中国东北高寒地区的应用研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(11): 2442-2447.
- [20]王金保, 兰新怡, 汤爱萍. 多级表面流人工湿地在鄱阳湖区农村面源污染控制中的应用[J]. *水土保持通报*, 2010, **30**(5): 118-121, 146.
- [21]严立, 刘志明, 陈建刚, 等. 潜流式人工湿地净化富营养化景观水体[J]. *中国给水排水*, 2005, **12**(2): 11-13.
- [22]李静, 姜冰冰, 王飞宇, 等. 北京市杨镇一中人工湿地设计及污水处理效果[J]. *湿地科学*, 2012, **10**(1): 102-108.
- [23]Sun G, Zhao Y, Allen S. Enhanced removal of organic matter and ammoniacal-nitrogen in a column experiment of tidal flow constructed wetland system[J]. *Journal of biotechnology*, 2005, **115**(2): 189-197.
- [24]Kusch P, Wie Ner A, Kappelmeyer U, *et al.* Annual cycle of nitrogen removal by a pilot-scale subsurface horizontal flow in a constructed wetland under moderate climate[J]. *Water Research*, 2003, **37**(17): 4236-4242.
- [25]Li Z. Use of surfactant-modified zeolite as fertilizer carriers to control nitrate release[J]. *Microporous and mesoporous materials*, 2003, **61**(1-3): 181-188.
- [26]张翔凌. 不同基质对垂直流人工湿地处理效果及堵塞影响研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007.
- [27]彭婉婷, 邹琳, 段维波, 等. 多种湿地植物组合对污水中氮和磷的去除效果[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(3): 612-617.
- [28]Golterman H L. The chemistry of phosphate and nitrogen compounds in sediments[M]. Dordrecht/Boston/London: Kluwer academic publishers, 2004.
- [29]鄢璐, 王世和, 刘洋, 等. 人工湿地氧状态影响因素研究[J]. *水处理技术*, 2007, **33**(1): 31-34.

Removal Efficiency of Multi-medium Constructed Wetlands on Nitrogen and Phosphorus in Domestic Sewage

YU Jun-bao¹, HOU Xiao-kai^{1,2}, HAN Guang-xuan¹, GUAN Bo¹, ZHENG Lei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences; Key Laboratory of Coastal Environmental Processes of Shandong Province, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, P.R.China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

Abstract: Using multi-medium constructed wetlands which planted 6 different plants, i.e. *Phragmites australis*, *Typha orientalis*, *Nelumbo nucifera*, *Canna glauca*, *Nymphaea alba-Ceratophyllum demersum* and *Eichhornia crassipes-Ceratophyllum demersum*, the removal efficiency of three level total nitrogen (TN), ammonia nitrogen (NH_4^+-N), nitrate nitrogen (NO_3^--N) and total phosphorus (TP) in domestic sewage were investigated. The zeolite and anthracite were selected to be as multi-medium in four constructed wetland units. The results showed that the removal efficiency of TN, NH_4^+-N and TP by constructed wetlands with multi-medium of zeolite and anthracite were significantly higher than that in constructed wetlands without multi-medium ($p < 0.05$) after 5 days remaining. The removal efficiency of three multi-medium constructed wetlands which planted *Typha orientalis*, *Nelumbo nucifera* and *Canna glauca* were more than 90% ($p < 0.05$) for 3 levels of domestic sewage, and the highest removal efficiency appeared in constructed wetland of *Canna glauca*. In general, the removal efficiency in *Nymphaea alba-Ceratophyllum demersum* wetland unit was higher than that in *Eichhornia crassipes-Ceratophyllum demersum* wetland. The water flowed from *Eichhornia crassipes-Ceratophyllum demersum* wetland unit was clear and bright, Therefore, we suggested that the *Canna glauca* place in first stage to remove the high pollutant sewage, then follow with *Typha orientalis*, *Nelumbo nucifera* and *Phragmites australis*, the *Eichhornia crassipes-Ceratophyllum demersum* is suitable to be as the last stage in the multi-stage constructed wetlands.

Keywords: multi-medium constructed wetlands; domestic sewage; nitrogen; phosphorus; removal efficiency