

生物绳-湿地植物复合人工湿地深度净化微污染水体的试验

邹联沛¹, 陈芳¹, 王欣泽², 孙瑞茹¹, 宋召凤¹

(1.上海大学环境与化学工程学院,上海 200444; 2.上海交通大学环境科学与工程学院,上海 200240)

摘要: 采用新型生物绳填料和凤眼莲组成的复合折流式人工湿地对罗时江微污染河水进行深度净化处理试验,以提高出水水质,并在水力停留时间为24 h的条件下研究该人工湿地对化学需氧量(chemical oxygen demand, COD_{Mn})、总氮(total nitrogen, TN)、NH₄⁺-N和总磷(total phosphorus, TP)的处理效果.结果表明,有生物绳和凤眼莲的装置A和仅有生物绳的装置B的人工湿地系统对COD_{Mn}的平均去除率分别为24.89%和22.02%;对TN的平均去除率分别为40.80%和40.73%;对NH₄⁺-N的平均去除率分别为73.82%和69.42%;对TP的平均去除率分别为47.83%和39.76%.罗时江河水原为V~IV类水质,净化处理后的出水基本能达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) III~II类水质标准.

关键词: 人工湿地;生物绳;凤眼莲;脱氮除磷;微污染水

中图分类号: X 703

文献标志码: A

文章编号: 1007-2861(2013)05-0465-05

High Purification of Micro-polluted Water in Compound Artificial Wetland with Bio-cord and Wetland Plant

ZOU Lian-pei¹, CHEN Fang¹, WANG Xin-ze², SUN Rui-ru¹, SONG Zhao-feng¹

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A compound baffle artificial wetland system consisting of new bio-cord paddings and *Eichhornia crassipes* used hydraulic retention time for 24 hours to highly purify micro-polluted water so that the output of water are improved. The average removal rate of chemical oxygen demand (COD_{Mn}) was 24.89% and 22.02% respectively in device A filled with bio-cord and *Eichhornia crassipes* and in device B only with bio-cord. Besides, the average removal rate of total nitrogen (TN) was 40.80% and 40.73%. For NH₄⁺-N, it was 73.82% and 69.42%, and total phosphorus (TP) was 47.83% and 39.76%. The output water quality in Luoshi River can be raised from the original class V~IV to class III~II of the quality standard for surface water environment (GB 3838—2002) after purification.

Key words: artificial wetland; bio-cord; *Eichhornia crassipes*; denitrification and phosphorus removal; micro-polluted water resource

随着我国农村生活污水的大量排放、化肥施用量的逐渐增加以及肥料流失量的加大,使得水体富营养化状况日益严重^[1-2].据调查,我国湖泊富营养化程度不断恶化,从20世纪80年代后期的41%上升到90年代的77%^[3].同时,随着经济发展和人们生活水平的提高,通过对水体富营养化的有效控制来保障大众的身体健 康已经成为社会各方面关注的焦点^[4].因此,对支流水源进行预处理,降低汇入洱海水质的氮磷含量就势在必行.

微污染水一般指由于受到有机物的污染,部分水质超过《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的III类水质要求的水体.20世纪90年代,国内外学者开始使用微污染水体这一概念.国外研究人员习惯使用“slightly polluted water”来描述微污染水^[5],并很早就开始对微污染水进行研究^[6],而国内学者则较常使用“micro-polluted water”来描述微污染水^[7].本试验使用的生物绳是一种以醛化纤维为基础材料,模拟天然水草形态加工而成的新型生态纤维水处理材料.

收稿日期: 2013-04-03

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2012ZX07105-003)

通信作者: 邹联沛(1965—),男,副教授,博士,研究方向为水污染控制与水生态修复理论与技术. E-mail: zoulianpei@163.com

人工湿地是指以天然湿地为基础,通过模拟其结构和功能,选择合适的地理位置,再根据试验需要人为设计和建造的一种装置^[8].本试验采用人工湿地对洱海支流罗时江微污染水进行脱氮除磷处理,并查看处理效果.

1 材料与方 法

1.1 试验材料

1.1.1 湿地浮水植物

本试验所用的湿地大型浮水植物——凤眼莲采自试验地点附近的自然水域岸边,采回后用自然河水洗净,充分去除根系的藻类和各种附着物,并在自然条件下培养生长 7 d. 试验选取的凤眼莲株高大致相同,生长情况良好.

1.1.2 生物绳填料

本试验所用填料选用上海 TBR 株式会社生产的 PP+K-45 型立体弹性填料,填料性质如表 1 所示.

填料的特点如下:该立体弹性填料使用细纤维加工成环状,可持续保持大量微生物,产品结构具有不易堵塞的特性;99% 以上的空隙率使多种微生物能够同时生存,在得到高标准处理水的同时,通过延长食物链可降低污泥的产生率;由于污泥既容易附着也容易剥

离,可以加速微生物的更新状态;使用合成纤维可使填料具有优异的耐久性.

表 1 填料技术参数

Table 1 Technical parameters of padding

类型	外径/mm	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)	空隙 率/%	成品质量/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$)
PP+K-45	45	1.6	99	29

1.2 试验场地概况及人工湿地系统设计

试验场地以大理沙坪黑泥沟示范工程为依托,该场地试验用水直接引自罗时江水.据调查,近年来由于农村生活污水的肆意排放,该河水受到污染,TN 和 TP 水质指标均超过《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) III 类水体标准,属于微污染河水^[9].为此,本研究采用折流式人工湿地对微污染水进行处理试验,该湿地结构如图 1 所示.装置 A 和装置 B 的尺寸均为 $1.2 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 深),装置 A 内设有 3 个上下折流板,均分为 4 个槽,每个槽中均匀垂直悬挂弹性填料 24 根,每槽有 6 株形态统一的凤眼莲定植其中;装置 B 为对照试验组,内有相同密度的弹性填料,无凤眼莲.

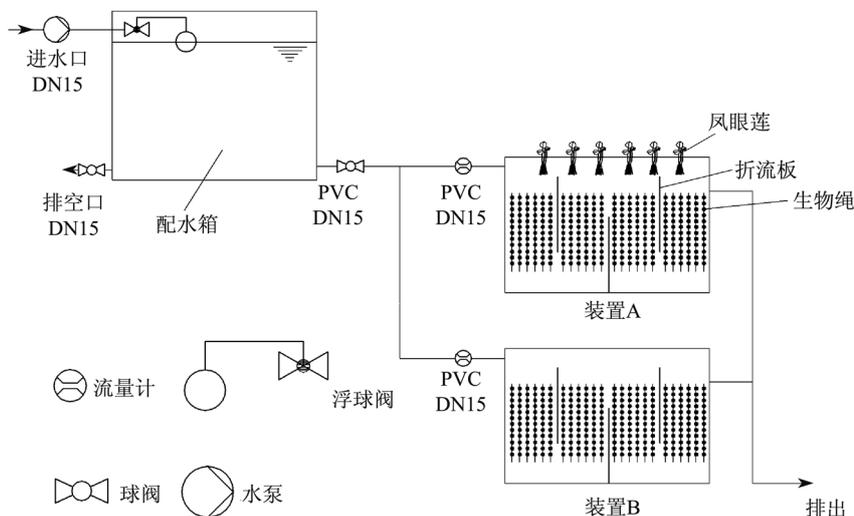


图 1 折流式人工湿地工艺流程

Fig. 1 Technological processes of baffle artificial wetland

1.3 取样与检测

装置完成以及湿地植物种植后,控制人工湿地系统在水力停留时间为 24 h 的条件下运行,待整个系统的处理效果基本趋于稳定后开始试验.在 2012 年 10 至 11 月试验阶段,每 2~3 d 采集湿地的进出水并分析,同时检测水样的化学需氧量(chemical oxygen

demand, COD_{Mn})、TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 TP 的浓度.分析方法参照《水和废水监测分析方法》^[10]: COD_{Mn} 采用重铬酸钾法测定, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 采用水杨酸分光光度法测定,总磷(total phosphorus, TP)采用钼酸盐分光光度法测定,总氮(total nitrogen, TN)采用碱性过硫酸钾消解分光光度法测定.

2 结果与分析

2.1 装置对 COD_{Mn} 的处理效果

装置 A 和装置 B 对 COD_{Mn} 的处理效果如图 2 所示. 可知, 在进水 COD_{Mn} 浓度为 6.80~11.52 mg/L 条件下, 装置 A 和装置 B 对 COD_{Mn} 的去除率分别为 24.89% 和 22.02%, 平均出水 COD_{Mn} 浓度分别为 6.00 和 6.25 mg/L, 这一结果低于于水利等^[11]的研究成果. 由于微污染水的 COD_{Mn} 浓度很低, 同时 24 h 的水力停留时间低于一般的 5~30 d, 并且人工湿地系统会因为植物组织衰败而使 COD_{Mn} 浓度显著升高, 这些都可能对 COD_{Mn} 的去除率比较低.

风眼莲的根系非常发达, 能够为微生物提供良好的附着和繁殖界面, 而其发达的根系与水体接触面积很大, 形成了一道密集的过滤层. 当水流经过人工湿地时, 植物的密集根系使污水中的悬浮物沉淀下来, 而不溶性胶体也为根系所粘附与吸附, 这可能会导致无风眼莲的装置 B 对 COD_{Mn} 的去除率略低于有风眼莲的装置 A.

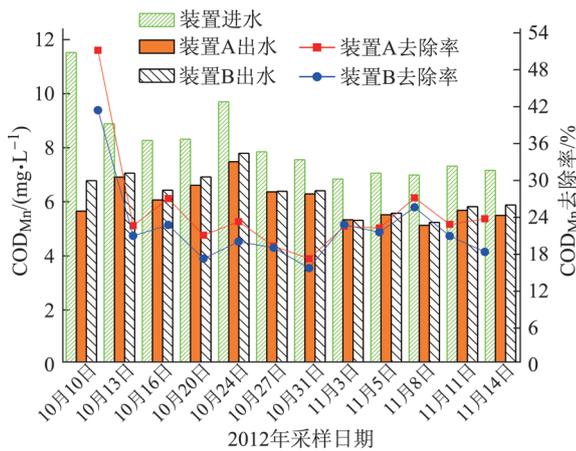


图 2 进出水 COD_{Mn} 的变化趋势和去除率

Fig. 2 Inflow and outflow COD_{Mn} concentrations variation and effect of removal

2.2 装置对 TN 的处理效果

装置 A 和装置 B 对 TN 的处理效果如图 3 所示. 进水中的无机形态氮包括氨氮和硝态氮, 均可以通过人工湿地中的植物吸收合成蛋白质被去除, 还有部分的氨氮转化成氨气挥发到大气中. 但植物吸收与基质吸附都有一定的限度, 从长远来看, 微生物的硝化和反硝化作用是人工湿地净化氮的主要途径. 由图 3 可以看出, 装置 A 和装置 B 对 TN 的去除率分别为 40.80% 和 40.73%, 没有明显的区别. 由此可见植物对污水中氮的吸收作用并不是人工湿地处理污水的最主要去除机理, 但植物通过过滤、截留及强化有机物降解转化作用, 对水体中污染物的去除有一定的协同促进作用,

使水体对 TN 的去除率提高^[12].

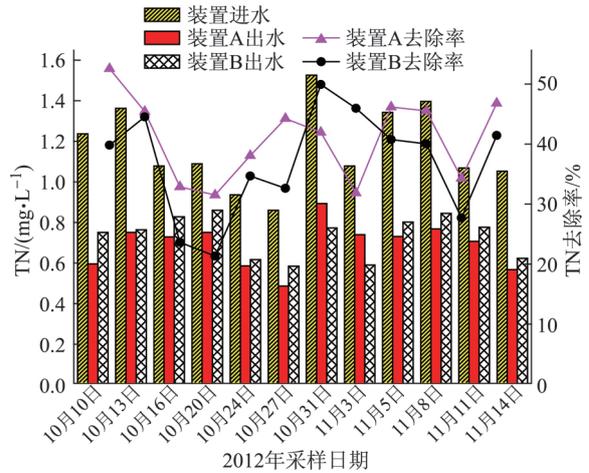


图 3 进出水 TN 的变化趋势和去除率

Fig. 3 Inflow and outflow TN concentrations variation and effect of removal

2.3 装置对 NH₄⁺-N 的处理效果

装置 A 和装置 B 对 NH₄⁺-N 的处理效果如图 4 所示. 污水流经生物绳填料时, 水中的氨氮被附着生长在填料上的微生物吸附进而氧化分解, 达到去除氨氮的目的.

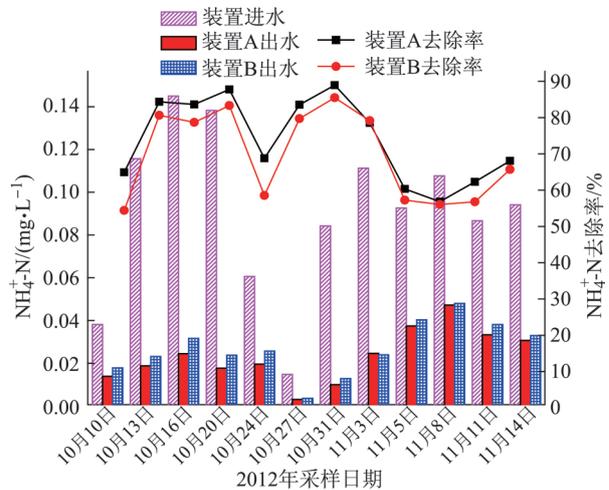


图 4 进出水 NH₄⁺-N 的变化趋势和去除率

Fig. 4 Inflow and outflow NH₄⁺-N concentrations variation and effect of removal

由图 4 可知, 装置 A 和装置 B 对 NH₄⁺-N 的去除率分别为 73.82% 和 69.42%. 溶解氧对系统 NH₄⁺-N 的去除效果有一定的影响, 使前期 NH₄⁺-N 的去除率波动比较大. Akrotos 等^[13]发现低温对任何污染物的去除效果都有一定的影响, 但对氮的影响较大, 并发现 15 °C 是维持系统有效脱氮的最佳温度. 水温下降会出现 NO₂⁻-N 积累的现象, 加强了硝化作用却减弱了

反硝化作用,但是硝化作用只能转变氮的形态,真正实现使氮从水体中去除的是反硝化作用;从微生物的生理特性角度来说,温度降低使微生物的生长和活性均受到抑制,所以使水体对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率降低.

2.4 装置对 TP 的处理效果

装置 A 和装置 B 对 TP 的处理效果如图 5 所示.人工湿地系统对 P 的去除主要通过以下 3 个方面的作用:①微生物正常的同化或植物的吸收作用;②聚磷菌的摄取作用;③基质的物理化学作用,其中最主要的是基质对 P 的吸附作用及其纳 P 容量.

由图 5 可知,装置 A 和装置 B 对 TP 的去除率分别为 47.83% 和 39.76%. 本试验中,填料上的微生物起到了主要作用.另外,植物可以通过对 P 的吸收和对颗粒物拦截作用的改善影响对 TP 的去除效果,使得装置 A 对 TP 的去除率略高于装置 B. 进水水质、水力条件、温度变化等都会不同程度地影响人工湿地的除磷效果^[12]. 填料上微生物对 P 的吸收富集容易达到饱和,使整个系统对 TP 的去除率都不是很稳定.

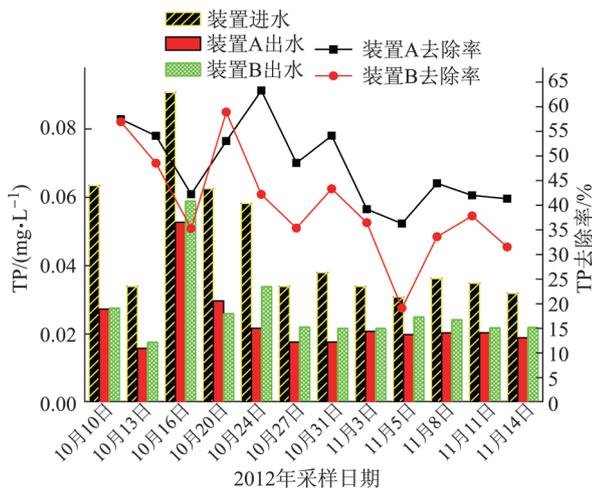


图 5 进出水 TP 的变化趋势和去除率

Fig. 5 Inflow and outflow TP concentrations variation and effect of removal

2.5 装置净化微污染水的总体效果分析

罗时江微污染水的进出水水质情况如表 2 所示.根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),进水 COD_{Mn} 均值、TN 均值、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均值均为 IV 类,TP 均值为劣 V 类. 经过复合人工湿地装置净化处理后,出水 COD_{Mn} 均值、TN 均值达到 III 类,TP 均值达到 II 类, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均值达到 I 类. 这一结果与杨旭等^[14]在水力停留时间为 1.5 d 的条件下处理玉清湖水微污染水的结论基本吻合. 可见此种生物绳填料在生物接触氧化法及人工湿地中脱氮除磷的效果可观,对微污染水具有较好的净化作用. 但是装置 A 和装

置 B 的处理效果没有显著差异,说明植物没有起到很重要的作用,这一结论与文献^[15-16]指出的植物对 TN 和 TP 的吸收只是临时储存,并且储存的这部分会因达到饱和而逐渐释放出来的结论相似.

表 2 罗时江微污染水的进出水水质

Table 2 Inflow and outflow of the water quality of Luoshi River micro-polluted water

参数	进水均值/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水均值/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	
		装置 A	装置 B
COD_{Mn}	8.09	5.995	6.253
TN	1.16	0.682	0.725
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	1.08	0.023	0.027
TP	0.55	0.023	0.026

3 结 论

(1) 采用生物绳人工湿地系统对微污染水进行深度净化是可行的. 装置 A 和装置 B 对微污染水中的 COD_{Mn} 的平均去除率均能达到 22%~25%,对 TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TP 的平均去除率分别能达到 40%, 69%~73%, 39%~47%. 由于微污染水中的各种污染物浓度较低,并且水力停留时间很短,所以去除率并不是很高. 但装置 A 和装置 B 的出水均值并无明显差异,可知秋季的湿地植物在该系统中没有起到很重要的作用,说明水体净化与新型填料生物绳上微生物易生长的作用密不可分.

(2) 由于污水的水力停留时间很短,因此脱氮除磷效果在整个系统中没有充分体现出来. 关于污染物的降解机理有待于进一步研究. 由于微生物受温度限制生长活性差,因此随着条件的改善,可进一步提高净化效果.

参考文献:

- [1] 胡锦涛, 奥岩松, 朱建坤, 等. pH 和曝气对水生植物去除富营养化水体中氮磷等物质的影响 [J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 168-173.
- [2] ZHAO J. Decentralized treatment technique in rural domestic sewage in China [J]. Meteorological and Environmental Research, 2010, 1(8): 88-91, 101.
- [3] 马经安, 李红清. 浅谈国内外江河湖库水体富营养化状况 [J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(6): 575-578.
- [4] 徐晓锋, 史龙新, 许海, 等. 水培经济植物对污水中磷的吸收利用及去除效果 [J]. 生态学杂志, 2006, 25(4): 383-388.
- [5] SØGAARD E G, ARUNA R, ABRAHAM-PESKIR J, et al. Conditions for biological precipitation of iron by

- Gallionella ferruginea* in a slightly polluted ground water [J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16: 1129-1137.
- [6] LIM K H, SHIN H S. Operating characteristics of aerated submerged biofilm reactor for drinking water treatment [J]. *Wat Sci Tech*, 1997, 36(12): 101-108.
- [7] 施锦岳, 张玉先. 生物沸石处理宁波姚江微污染水源水试验研究 [J]. *污染防治技术*, 2007, 20(6): 32-35.
- [8] 夏汉平. 人工湿地处理污水的机理与效率 [J]. *生态学杂志*, 2002, 21(4): 51-59.
- [9] 陈俊宏, 高旭, 谢伟丹, 等. 植物对潜流人工湿地净化微污染水效果的影响研究 [J]. *环境工程学报*, 2012, 6(2): 515-518.
- [10] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997.
- [11] 于水利, 修春梅, 杨月杰. 人工湿地对微污染原水中有机物的去除效果 [J]. *中国给水排水*, 2011, 27(3): 56-58.
- [12] 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.
- [13] AKRATOS C S, TSIHRINTZIS V A. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands [J]. *Ecological Engineering*, 2007, 29(2): 173-191.
- [14] 杨旭, 于水利, 修春海, 等. 微污染水源水人工湿地预处理效能与机理研究 [J]. *工业水处理*, 2009, 29(10): 24-27.
- [15] HOWARD-WILLIAM C. Cycling and retention of nitrogen and phosphorus in wetlands: a theoretical and applied perspective [J]. *Freshwater Biology*, 1985, 15: 393-398.
- [16] BRIX H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? [J]. *Water Sci Technol*, 1997, 35(5): 11-17.