

人工湿地在植物生长停滞期处理农田排灌余水的中试研究

向长生, 祝万鹏, 张彭义, 卢少勇

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 采用中试研究的方法, 研究了不同结构的人工湿地系统在滇池流域旱季植物生长停滞期对农田排灌余水中氮、磷污染物的去除效果。实验发现, 在植物生长停滞期, 植物种类对氮、磷的去除没有明显的影响; 在实验的初期磷存在明显的释放现象; 潜流型人工湿地对氮、磷的去除效果明显好于其他表面流系统, 各种类型湿地系统在这期间对氮、磷的去除效果存在较大的波动性, 但对氮的去除效率在 40% 以上, 有着比较满意的去除效果, 对磷的去除效果在此期间不理想。

关键词: 人工湿地; 农田排灌余水; 氮; 磷

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2003)06-0681-04

A Pilot – Scale Test of Constructed Wetland for Treating Irrigation Drainage Water in Period of Growth Stagnancy of Vegetation

XIANG Chang-sheng, ZHU Wan-peng, ZHANG Peng-yi, LU Shao-yong

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Removal rates of nitrogen and phosphorus by different types of constructed wetland treating irrigation drainage water in the period of growth stagnancy of vegetation were studied. The results showed that difference of vegetation had no apparent influence on the removal rates of both N and P in the period. And there was a remarkable P release at the primary stage of the experiment. In this period subflow wetland had a better removal effect than did surface – flow wetland, although there was an effective fluctuation for every type of constructed wetland, exhibiting over 40 percent removal rate for N, but little removal rate for P for each constructed wetland at this period.

Keywords: constructed wetland; irrigation drainage water; nitrogen; phosphorus

滇池流域的农田排灌余水是造成滇池富营养化污染的污染物质的重要组成部分。由于当地大力发展蔬菜花卉等经济型种植农业而过量地施用化肥、人畜粪便等肥料, 氮磷养分部分被作物、土壤吸收、吸附, 有相当大的过量营养物质随灌溉余水进入滇池, 加大滇池营养物含量, 加重了水体富营养化污染。

人工湿地由于其良好的处理效果以及低投入、低能耗、易于管理等诸多优点, 从 20 世纪 70 年代开始, 在欧美等国得到了蓬勃的发展, 我国于 20 世纪 80 年代开始对人工湿地的研究和应用, 经过 20 年来的发

展, 人工湿地已经广泛地应用到工业废水、城镇生活污水、养殖业废水、采矿废水等诸多的环境治理、生态恢复工程中。特别是人工湿地在成都市活水公园的成功应用, 使得人工湿地在具有治理环境污染功能的同时, 又取得了良好的生态景观效益, 以及经济和社会教育的功效。将人工湿地治理技术引入处理农田排灌余水的处理, 国内对这方面的研究报道还比较少, 针对现场实际的水力条件, 利用构建的中试系统对农田排灌余水进行了污染物去除效果试验。

1 试验系统简介

整个中试系统的平面图如图 1 所示。

整个系统包括 6 条不同构建的沸石—植物床体、配水池、泵房及控制系统、高位水箱四个主要部分。

收稿日期: 2002-12-08

作者简介: 向长生(1977—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污染水体的生态修复技术。E-mail: xcs01@mails.tsinghua.edu.cn

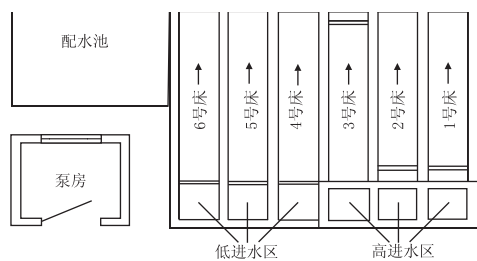


图 1 中试系统平面图

Figure 1 The plane diagram for the pilot - plant

1.1 沸石 - 植物床体部分

建造 6 条小型植物床以模拟人工湿地:1 号、2 号床是表面流人工湿地床,沸石单独前置,分别栽种茭草和芦苇;3 号床是潜流型人工湿地床,沸石置于土层以下,栽种芦苇;4 号、5 号床是表面流人工湿地床,无沸石,分别栽种茭草和芦苇;6 号床自然生长沉水型水草 - 革命草。各床的净空尺寸(长×宽×深)都是 $5.0\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 1.1\text{ m}$,除 3 号床外,其余 5 条床内均填入 0.8 m 厚的土壤,留出 0.3 m 的水深,3 号床底部先铺设 0.4 m 厚的沸石层,其上再填入 0.6 m 厚的土层,只留出 0.1 m 净空。试验考虑到不同结构的床体头损失的差异,对水头损失较大的 1、2、3 号床体采用较高的进水水位,而对 4、5、6 号床采用较低的进水水位。

1.2 配水池、泵房高位水箱及控制系统部分

配水池用来控制和调配进水浓度,给高位水箱供水以及维持高位水箱水位的恒定。泵房主要安装整个系统运行所需的水泵和进水自动控制系统。

2 试验研究方法

2.1 试验方案的确定

本试验针对的是 8 个月的旱季期间农田排灌余水,旱季期间基本是由抽水泵站从滇池取水,灌溉农田后剩余水排入滇池。抽水周期基本为一周两次。灌溉余水初期有较高 N(总氮含量 $8 \sim 15\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、P(总磷含量 $1\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右)含量,随后氮磷含量降低。试验依据上述水力情况设计了如下试验方案:模拟实际水力负荷,采取中试系统第 1 d 进配药的水(试验采用磷酸一氨、尿素、葡萄糖作为 N、P 以及有机物的来源),以提高进水氮磷含量,接下来的 2~3 d 只进水而不加药的水力负荷以维持系统连续运转,试验用水部分取自自备水井,部分取自紧靠滇池的排涝沟。整个试验考察了不同类型的湿地在旱季期间分别在 $4\text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $10\text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $15\text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $20\text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 4

个工况下对氮磷的去除效果。

2.2 试验分析方法

对于试验的每个工况取进出水样,每天取两次进出水水样,分别分析其中总氮、氨氮、总磷的含量,得出进水浓度曲线和出水浓度曲线,将进水和出水浓度曲线对进出水时间积分,得出进出各床体的氮磷总量,计算各床体对氮磷的去除率。

$$E = \frac{\text{进入床体污染物总量} - \text{流出床体污染物总量}}{\text{进入床体污染物总量}} \times 100\%$$

图 2、图 3 分别为 3 号床在 $10\text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $15\text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $20\text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 负荷的氨氮、总氮进出水浓度曲线,进水浓度曲线对时间积分乘以进水流量得出进入床体氨氮、总氮总量,从而可得知 3 号床对氨氮在 $10\text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $15\text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $20\text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 负荷时去除率分别为 79.92%、95.32%、83.71%,对总氮的去除率分别为 86.44%、81.4%、89.21%。

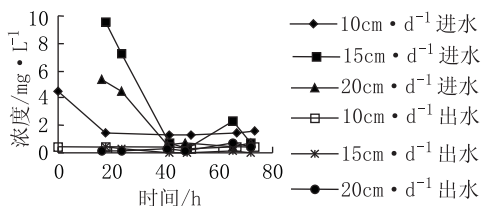


图 2 3 号床氨氮进出水浓度曲线

Figure 2 Concentration curve of ammonia - N of inlet and exit for number 3 bed

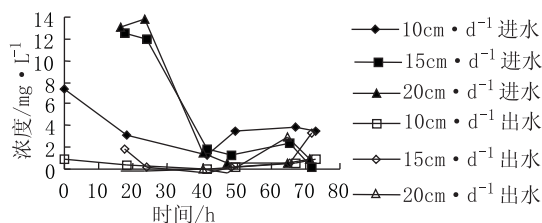


图 3 3 号床总氮进出水浓度曲线

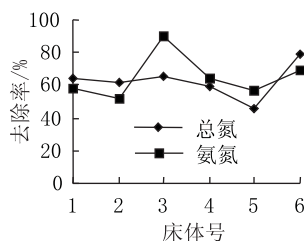
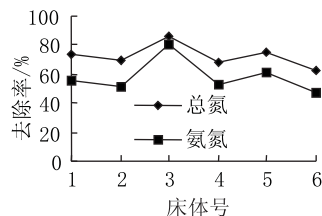
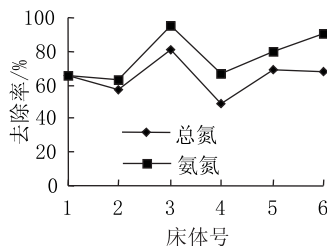
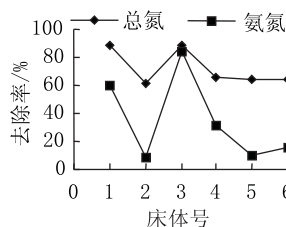
Figure 3 Concentration curve of total nitrogen of inlet and exit for number 3 bed

对 6 条不同类型的床体在不同负荷时对氮的去除率做相同的处理,可以得出各床体在不同负荷条件下对氮的去除率 and 对比曲线(如图 4、图 5、图 6、图 7 所示),同理可以得出各床体不同负荷时对总磷的去除率 and 对比曲线(如图 8 所示)。

2.3 结果与讨论

2.3.1 氮的去除规律

人工湿地床系统对氮的去除是一个十分复杂的生物、物理、化学的综合作用结果,有的研究者将湿地系统比喻为生态滤池,污染物通过滤池的过滤而得以

图 4 $4 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 负荷时各床体对氮的去除率对比曲线Figure 4 Comparison of N removal rates for each beds at $4 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 图 5 $10 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 负荷时各床体对氮的去除率对比曲线Figure 5 Comparison of N removal rates for each beds at $10 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 图 6 $15 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 负荷时各床体对氮的去除率对比曲线Figure 6 Comparison of N removal rates for each beds at $15 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 图 7 $20 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 负荷时各床体对氮的去除率对比曲线Figure 7 Comparison of N removal rates for each beds at $20 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$

去除。一般情况下,废水中氮的去除途径主要有以下两条:

(1) 氮元素作为植物生长的必需营养物质存在于植物床系统中,植物的生长过程需要摄取氮元素合成植物细胞中的有机氮。通过植物的收割,可以将氮元素从废水和湿地床系统中去除,达到除氮的目的。

(2) 湿地系统中存在大量的硝化反硝化细菌,硝化细菌在好氧或兼氧的条件下能够将氮元素转化为硝态氮,而反硝化菌在厌氧或兼氧条件下能将硝态氮转化为 N_2 或 N_2O ,从而将氮元素由废水和湿地床系

统中去除。而湿地床系统由于生长着大量的植物,植物通过光合作用能够对离植物根系较近的土壤或填料环境充氧而产生好氧或兼氧条件,而离根系较远的环境由于没有充分的氧而形成厌氧或兼氧环境,从而在湿地系统存在着符合硝化、反硝化菌生存的条件和环境。大多数研究者认为,湿地床系统的硝化、反硝化过程是氮去除的主要途径。

2.3.2 不同构造结构床体对氮去除率比较

从图 4、5、6、7 的曲线可以得出 3 号床系统对氨氮和总氮的去除率比其他系统的要高。这一方面是由于大量沸石有很好的吸附能力,另一方面是由于潜流模式使得废水和介质接触面积增多,从而使得硝化、反硝化的作用加强。而其他床体对总氮的去除率相差不多,在 45.8% ~ 89.2% 之间波动。其他不同床体对氨氮的去除率在 $5 \sim 15 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 负荷条件下相差仍不大,在 47% ~ 95% 之间波动,没有明显的规律性;在 $20 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 负荷条件下,各床体对氨氮的去除率显现出很强的波动,在 8.7% ~ 83.7% 之间变动,这可能是不同构造的系统对高负荷的抗冲击能力不同有关。

综合各图可以得出,人工湿地床系统在 $5 \sim 20 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 负荷的条件下对总氮都有很好的去除能力;在 $5 \sim 15 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 负荷条件下对氨氮也有很好的去除能力;在 $20 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 负荷下表现出较强的不稳定性。同一类型的湿地床体,种植茭草和种植芦苇在不同负荷条件下,呈现出去除率高低交错现象,由此可以推断植物种类对污染物去除率在此期间没有明显的影响。

2.3.3 磷的去除规律

湿地床系统对磷的去除途径相应也是通过植物吸收、微生物转化、物化吸附沉淀等三方面共同作用而实现的。与氮元素一样,磷元素也是植物生长所必需的营养物质,废水中的磷元素通过植物的吸收转化成为植物细胞组织的一部分,通过植物的收割而达到磷元素去除的作用。微生物对磷的去除主要是通过对磷元素的过量积累来完成的,过量积累磷的微生物会转化成污泥沉积在湿地床底。磷的另一去除途径是通过湿地床系统对磷元素的吸附阻滞作用以及磷元素与废水或湿地系统的 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 等离子形成沉淀而沉积在床底形成污泥。

2.3.4 不同构造结构床体对磷去除率比较

从图 8 可以看出,各床体在整个试验初期都存在磷的释放现象,这一方面可能由于整个试验在 10 月

份进行, 植物基本上处于生长停滞期, 植物光合作用减弱, 从而对床体的充氧能力减弱, 进而使得床底沉积污泥在厌氧条件下降解而使得磷释出; 另一方面可能由于植物释磷而造成。此外, 10 月份较低的气温可能使得湿地系统各种生物活性减弱。磷的释出现象在国内和外也有报道。随着试验的进行, 磷的释放和吸收逐渐达到平衡进而吸收大于释放, 显现出磷的去除作用。从图 8 可以看出, 3 号床对磷的释放现象比其他床体要弱, 这可能与沸石对磷的吸附力较强以及沸石表面的 Ca^{2+} 和 PO_4^{3-} 结合沉淀效果好有关。从图 8 可以看出, 当植物床系统在释放磷达到稳定后, 能够对进入湿地床系统的磷有较好的去除效果, 去除率在 22.9% ~ 64.56% 之间。综上可以得出, 湿地床系统在植物生长停滞期对沉积在系统中的磷有明显的析出现象, 当析出达到稳定后, 湿地床系统对废水中的磷还是有较好的去除效果。但是如何从根本上达到磷的去除依然是湿地系统脱氮除磷功能尚需进一步研究的问题。

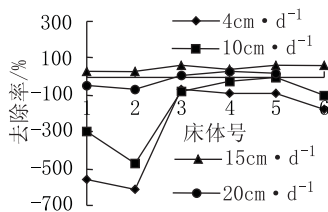


图 8 不同负荷时各床体对磷的去除率曲线

Figure 8 Comparison of P removal rates for each beds at various loads

3 结论

(1) 在植物生长停滞期, 植物种类对污染物的去除没有明显的影响。

(2) 在此期间, 潜流式湿地床系统比表面流湿地床系统对氮有着更好的去除效果; 各种类型的湿地床系统对氮都有较好的去除效果; 对氨氮、总氮的去除率都在 40% 以上。

(3) 各种类型的湿地床系统在植物生长停滞期对磷都有释出现象, 但稳定后, 仍能收到较好的去除效果。对磷从根本上从湿地床系统去除问题, 仍需要做进一步的研究。

(4) 通过中试试验考察了湿地床系统在滇池流域这样的自然环境条件下去除农田排灌余水中氮磷营养物质的能力, 发现即使在植物生长停滞的情况下, 湿地床系统对氨氮、总氮依然有较好的去除效果, 湿地系统对于处理农田排灌水中氮的设想是可行的。

参考文献:

- [1] 梁 威, 吴振斌. 人工湿地对污水中氮磷的去除机制研究进展[J]. 环境科学动态, 2000, (3).
- [2] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学, 1991, 12(2): 39.
- [3] Gersberg R M, Elkins B V, Lynon S R, et al. Role of Aquatic Plants in Wastewater Treatment by Artificial Wetlands[J]. *Wat Res*, 1986, 20(3): 363 - 368.
- [4] Cooper P F. The use of reed bed treatment systems in the UK[J]. *Water Sci Technol*, 1990, 22(3 - 4): 57 - 64.
- [5] James N Carleton, et al. Performance of a constructed wetlands in treating urban stormwater runoff[J]. *Water Environment Research*. 2000, 72(3): 295 - 304.
- [6] Tanner C C, Clayton J S, Upsdell M P. Effect of loading rate and planting in constructed wetland - II. Removal of nitrogen and phosphorus[J]. *Wat Res*, 1993, 29(1): 27 - 34.
- [7] Factors B C. Affecting phosphorus retention in small constructed wetlands treating agricultural non - point source pollution[J]. *Ecological Engineering*, 2002, 19: 41 - 61.
- [8] Andrea S Brooks, et al. Phosphorus Removal by Wollastonite: a Constructed Wetland Substrate[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 15, 121 - 132.
- [9] Tanner C C, Sukias J P S and Upsdell P. Sustratum phosphorus accumulation of gravel - bed constructed wetlands[J]. *Wat Sci Tech*, 1999, 40(3): 147 - 154.
- [10] Shutes R B E, et al. The design of vegetative constructed wetlands for the treatment of highway runoff[J]. *The Science of the Total Environment*, 1999, 235: 189 - 197.