

The Impact of Hydraulic Loading on the Decontamination Effect of Integrated Vertical-Flow Constructed Wetland

Jiku ZHANG¹, Yan LIU¹, Lin ZOU¹

¹ School of Municipal & Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China

Email: liuyanmonday@yahoo.com.cn

Abstract: By the design of the six kinds of hydraulic loading, the decontamination effect of NH₄-N、TN、TP、COD in eutrophic water by integrated vertical-flow constructed wetland was studied under different hydraulic loading conditions. The results showed that: The removal rate of TN, COD increased and then decreased with the increasing of hydraulic loading. The maximum removal rates reached 83.1% and 87.8%, when the hydraulic loading is about 0.6 m³/(m²·d); the removal rate of TP, NH₄-N decreased with the hydraulic loading increasing. When the hydraulic loading is more than 2.5 m³/(m²·d), the trend becomes smoother.

Keywords: integrated vertical-flow constructed wetland; hydraulic loading; removal effect; eutrophic water

水力负荷对复合垂直流人工湿地去污效果的影响

张吉库¹, 刘 艳¹, 邹 琳¹

¹ 沈阳建筑大学, 沈阳, 中国, 110168

Email: liuyanmonday@yahoo.com.cn

摘 要: 设计了6种水力负荷, 研究在不同水力负荷下复合垂直流人工湿地对富营养化水体中 NH₄-N、TN、TP、COD 的去污效果。结果表明: TN、COD 去除率随着水力负荷的增加出现了先升高后降低的趋势, 最高去除率分别达到 83.1%和 87.8%, 最高去除率都出现在水力负荷为 0.6 m³/(m²·d)左右; TP、NH₄-N 的去除率随着水力负荷的增加一直呈现降低的趋势, 当水力负荷大于 2.5 m³/(m²·d)的时候, 趋势变得平缓, 最高去除率和最低去除率分别相差。

关键词: 复合垂直流人工湿地; 水力负荷; 去污效果; 富营养化水体

1 引言

人工湿地污水处理技术是 20 世纪 70 年代末发展起来的一种污水处理新技术, 它具有投资省、运行费用低、出水水质好、运行维护管理方便和管理水平要求不高等优点^[1~3]。在我国北方, 由于气候和地理位置的影响, 对人工湿地的设计、运行、管理经验不多, 缺乏具有一定操作管理经验和专业技术水平的人员, 因此¹人工湿地处理工艺在我国北方有广阔的研究空间^[4]。

影响人工湿地污水处理效果的因素很多, 如季节更替、水力负荷、填料层高度(流程)、基质、植物、碳源、温度、溶解氧、pH 值等^[5~7]。水力负荷是指每

平方米填料, 每天处理的废水量, 单位是 m³/(m²·d)。水力负荷过大, 导致停留时间过短, 生化反应不充分; 水力负荷过小, 导致停留时间过长, 易引起污水滞留和厌氧区扩大, 影响处理效果。本文针对富营养化水体, 讨论水力负荷对富营养化水体中 NH₄-N、TN、TP、COD 去除效果的影响。

2 材料与方法

2.1 试验用水

试验采用沈阳建筑大学校园水系的湖水, 湖水水质达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中Ⅳ类水质的标准, 通过人工加药, 使其为劣Ⅴ类水质, 如表 1 所示。

Table 1. Quality of raw water
表 1. 原水水质

基金来源: 辽宁省教育厅科学研究计划资助 (LS2010132)

项目	浊度	pH	COD _{Cr} / (mg · L ⁻¹)	TN/ (mg · L ⁻¹)	TP/ (mg · L ⁻¹)
范围	28.8—37.6	6.5—7.2	50—80	1.8—2.5	0.5—0.8

2.2 试验装置

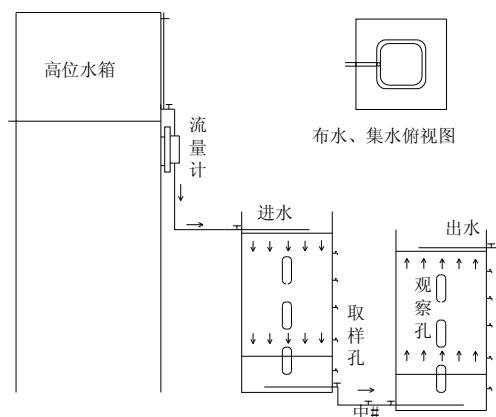


Figure 1. Schematic diagram of experiment

图 1. 试验装置

试验装置如图 1 所示，高位水箱由铁板制成，外观尺寸为 $0.8\text{m} \times 0.8\text{m} \times 0.6\text{m}$ 。人工湿地由下行流池和上行流池串联而成，底端由 25mm 的 PVC 管相连，池体由 PVC 塑料板制成，外观尺寸为 $0.25\text{m} \times 0.25\text{m} \times 1\text{m}$ 。本试验由两套模拟人工湿地装置构成，其中一套是卵石+沸石床，另一套是卵石+沸石+钢渣床。两池内均铺设填料，底层均为 20cm 厚的卵石（粒径为 30—60mm），最上层均为 15cm 的沙土，中层分别是不同粒径的沸石和沸石+钢渣（沸石钢渣比例约为 3:1），其中下行池比上行池的地势高 10cm。上行池和下行池的表面种植芦苇。

为保证湿地水流的稳定性，防止“断流”和“短流”，在湿地下行池和上行池表面均采用管身均匀开孔的 PVC 管布水和收集，两池底也采用均匀布置的穿孔管收集和布水。下行池和上行池分别设计了五个取样口。

2.3 试验方法

试验采用连续流运行方式，但在运行初期，为了诱导植物的根系更好的向下生长，采用间歇进水。试验设计了 6 个水力负荷，分别为 $0.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $0.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $1.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $1.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $2.7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $3.1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，人工湿地在每个水力负荷下至少稳定运行一天后采集水样并测试。

3 结果与讨论

3.1 不同水力负荷下 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除效果

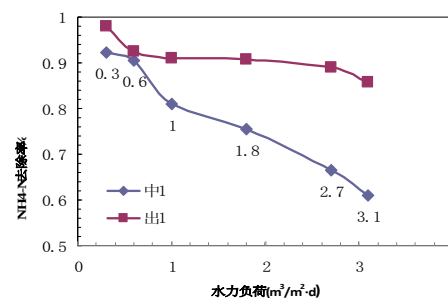


Figure 2. the influence of Hydraulic loading on the removal rate of $\text{NH}_4\text{-N}$ by zeolite

图 2. 水力负荷对沸石床 $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除率的影响

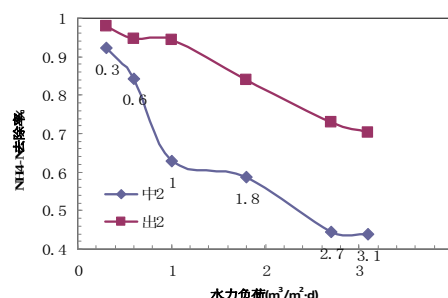


Figure 3. the influence of Hydraulic loading on the removal rate of $\text{NH}_4\text{-N}$ by zeolite and steel slag

图 3. 水力负荷对沸石+钢渣床 $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除率的影响

图 2 是卵石+沸石床人工湿地在不同水力负荷下 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除率，图 3 是卵石+沸石+钢渣床人工湿地在不同水力负荷下 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除率。其中“中 1、中 2”表示试验装置中间取样口，“出 1、出 2”表示试验装置出水取样口。

从图 2、图 3 中可以看出 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除率随着水力负荷的增大而降低，这是因为水力负荷增大，水力停留时间就减小，没有达到硝化菌的世代时间，另外，水力负荷过大，容易冲走附着在填料和植物根系表面的微生物，从而导致出水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 升高。当水力负荷从 0.3 到 3.1 变化时，卵石+沸石床出水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除率变化不大，98%降低到 85.7%，卵石+沸石+钢渣床出水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除率变化较大，从 98%降低到 70.3%。在水力负荷小于 1.0 的时候，两个湿地床 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除率均大于 90%，中间取样口的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除率与出水去除率相差不大，这说明大部分的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除率是由下行流池贡献的。

比较两个湿地床可以看出，卵石+沸石床的去除效

果要好于卵石+沸石+钢渣床,这是由于沸石对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 有较强的吸附作用^[8],所以沸石床人工湿地对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 有较高的去除率。

3.2 不同水力负荷下 COD 的去除效果

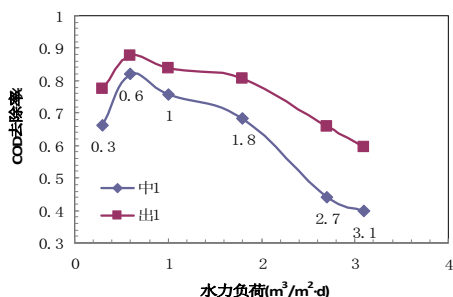


Figure 4. the influence of Hydraulic loading on the removal rate of COD by zeolite

图 4. 水力负荷对沸石床 COD 去除率的影响

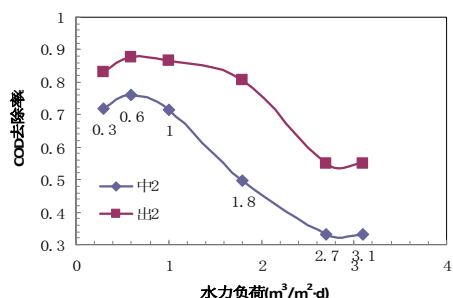


Figure 5. the influence of Hydraulic loading on the removal rate of COD by zeolite and steel slag

图 5. 水力负荷对沸石+钢渣床 COD 去除率的影响

由图 4、图 5 可见,当水力负荷小于 0.6 的时候,COD 的去除率随着水力负荷的增加而增加,当水力负荷大于 0.6 的时候,COD 又逐渐降低,这主要是因为当水力负荷过小时,系统内水流速较慢,整个系统厌氧状态加重,导致 COD 去除率下降,当水力负荷过大时,有机物还没来得及降解就随水流流出系统,还有一部分被拦截在填料表面和植物根系的有机物,也被水流带出系统,导致去 COD 除率降低。有研究表明,SS 的去除与 COD 的去除有关,主要是因为自然水体中相当一部分有机物都是难降解有机物,这部分有机物被吸附、拦截在 SS 上^[9],随 SS 流出系统。

COD 去除率的变化趋势与 TN 相似,在水力负荷为 $0.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时有最高去除率,最高去除率可达到 87.8%,并且中间取样口的去除率接近出水去除率,这说明 COD 的去除主要是在下行流池中完成,上行流池起到稳定出水的作用。

3.3 不同水力负荷下 TN 的去除效果

从图 6、图 7、可以看出,TN 开始时去除率随着水力负荷的增高而迅速升高,达到最大值后又逐渐下降。这是因为水力负荷过小时,污水在系统内的停留时间较长,易使系统处于厌氧状态,从而抑制了硝化作用,导致 TN 去除率不高。而水力负荷过大时,水力停留时间较短,无法达到硝化菌的世代时间,部分硝化菌易随水流带出系统,从而抑制了硝化作用,使 TN 去除率下降。另外水力负荷过大,溶解在水中的硝酸盐、铵盐等不能被吸附、截留就流出系统,也降低了 TN 的去除率。

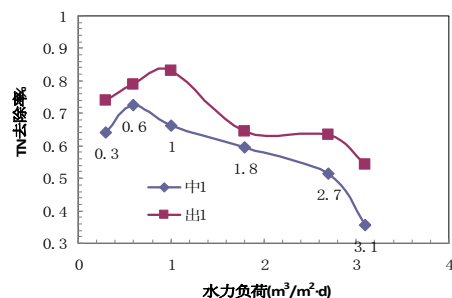


Figure 6. the influence of Hydraulic loading on the removal rate of TN by zeolite

图 6. 水力负荷对沸石床 TN 去除率的影响

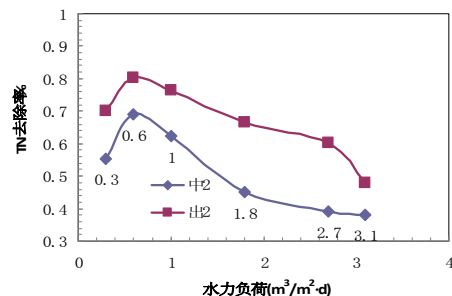


Figure 7. the influence of Hydraulic loading on the removal rate of TN by zeolite and steel slag

图 7. 水力负荷对沸石+钢渣床 TN 去除率的影响

比较图 2、图 6 中间取样口的去除率,TN 中间取样口去除率对出水去除率的贡献高于 $\text{NH}_4\text{-N}$,这说明 TN 主要靠下行流池去除。在六个水力负荷下,TN 中间取样口去除率和出水去除率最大相差 18.7%,最小相差 4.8%,而 $\text{NH}_4\text{-N}$ 中间取样口去除率和出水去除率最大相差 24.8%,这说明在上行池中,硝化反应速率大于反硝化反应速率,TN 去除受阻是因为反硝化不能进行,阻碍反硝化反应进行的原因是上行池碳源的减少,如图,COD 的去除主要在下行池中进行,在上行池中有有机物含量较少。

3.4 不同水力负荷下 TP 的去除效果

如图 8、图 9 所示,随着水力负荷的增加,人工湿地对 TP 的去除率逐渐减小,在人工湿地污水处理系统中,首先经过拦截过滤作用将悬浮态的磷去除,然后在微生物的作用下将有机磷转化为无机磷,通过植物的吸收和基质的吸附沉淀将磷去除。较长的水力停留时间有利于湿地对悬浮态磷的拦截过滤、微生物对 TP 的矿化分解以及基质对无机磷的吸附沉淀反应,所以 TP 去除率较高。而水力停留时间较短时,景观水在湿地中的停留时间还不足以使进水中的有机磷转化为非有机态,从而难以被植物吸收和基质固定,而且此时水力负荷较大,水流对基质的冲击可能使原先被吸附在基质或植物根茎表面的磷冲出系统,造成 TP 去除率下降^[10]。

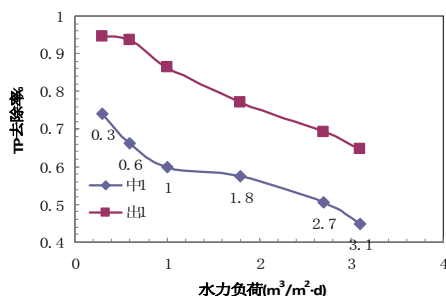


Figure 8. the influence of Hydraulic loading on the removal rate of TP by zeolite

图 8. 水力负荷对沸石床 TP 去除率的影响

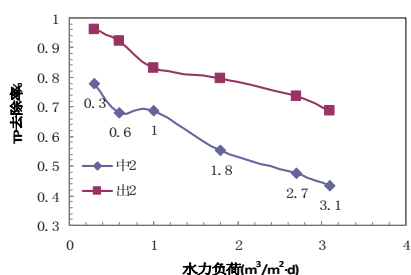


Figure 9. the influence of Hydraulic loading on the removal rate of TP by zeolite and steel slag

图 9. 水力负荷对沸石+钢渣床 TP 去除率的影响

比较中间取样口去除率和出水去除率,发现中间取样口去除率接近 TP 出水去除率的一半,复合垂直流人工湿地给微生物提供了一个好氧—缺氧—好氧的环境,因此下行流池和上行流池微生物在吸磷上具有同样的效果

4 结论

(1)水力负荷在人工湿地污水处理工艺中存在最

佳值,大于或者小于最佳值都会使整体去除效果下降。TN、COD 的去除率在水力负荷为 $0.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时达到峰值,这和 TN、COD 的去除机制有关;

(2) $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN、COD 主要是在下行流池中去,上行流池起到稳定水质的作用,TP 在上行池和下行池中都有较大的去除;

(3)当水力负荷小于 $1.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除率的波动很小,水力负荷在 0.3 到 3.1 变化时, $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除率只降低了 12.3%;

(4)卵石+沸石+钢渣床对 TP 的去除有利,但对 N 的去处理不利,对 COD 的去除无影响。

References (参考文献)

- [1] Geerlw ay M. Suitability of macrophyte for nutrient removal from surface flow constructed wetlands receiving secondary treated sewage effluent in Queensland,Australia.Water Science and Technology,2003,48(2):121-128.
- [2] Zhu tong. Constructed Wetland Wastewater Treatment Research [J]. *Research of Environmental Seienes*, 1991,4(5): 17-22. 朱彤.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.
- [3] Bhamidimarri R. Consreucted wetlands for wastewater treatment;The New Zealand experience. Water Science and Technology,1991,24(5):247-253.
- [4] Kimberley C, Chandra M, Anna C, et al. Pollutant removal from municipal sewage lagoon effluent with a free-surface wetland[J]. *Water Research*,2003,37:2803-2812.
- [5] Tie Jingxi,Zheng Zheng,Zhong yun,Removal of nitrogen and phosphorus by integrated subsurface flow-upward vertical flow constructed wetland process[J]. *Chinese Journal of Ecology*,2006, 25(3):265-269. 帖靖玺,郑正,钟云等.潜流—上行垂直流复合人工湿地对氮磷去除效果[J].生态学杂志, 2006, 25(3):265-269.
- [6] Zhao Lianfang,Zhu Wei,Zhao Jian.Nitrogen removal mechanism in constructed wetland used for treating polluted river water with lower ratio of carbon to nitrogen [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(11):1821-1827. 赵联芳,朱伟,赵建.人工湿地处理低碳氮比污染河水时的脱氮机理[J].环境科学学报, 2006, 26(11):1821-1827.
- [7] Wu Zhenbin. Vertical-flow Constructed Wetland [M].*Bei Jing: Science Press*,2008 吴振斌等.复合垂直流人工湿地[M].北京:科学出版社,2008.
- [8] Chen Shipeng.Analysis on the mechanism of nitrogen removal in zeolite integrated vertical-flow constructed wetlands[J]. *Water&Wasterwater Engineering*, 2008, 34(5):170-171. 陈士鹏等.沸石床复合垂直流人工湿地脱氮机理分析[J].给水排水, 2008, 34(5):170-171.
- [9] Wang Shihe,Wang Wei,Yu Yan.Influence of hydraulic condition on treatment effect of constructed wetland[J]. *Journal of South-east University*,2003,33 (3) : 359-362. 王世和,王薇,俞燕.水利条件对人工湿地处理效果的影响[J].东南大学学报(自然科学版), 2003,33 (3) : 359-362.
- [10] Huang Defeng.Study on Purification Of Eutrophic Scenic Water and the Mechanisms With Constructed Wetlands [D]. *Shang-hai :Tongji University*,2007. 黄德峰.人工湿地净化富营养化景观水的效果及机理研究[D].上海:同济大学,2007