

潜流水平湿地对农业灌溉径流氮磷的去除

付融冰,杨海真*,顾国维,张 政 (同济大学环境科学与工程学院,污染控制与资源化研究国家重点实验室,上海 200092)

摘要: 构建了潜流水平芦苇湿地,对农业灌溉径流(TN 约为 7mg/L,TP 约为 0.5mg/L)中氮磷进行了为期 1 年的去除研究.在水力停留时间(HRT)为 2,4,6d 时,TP 和 TN 的去除率均大于 87%和 68%.湿地对 TN 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 的去除受 HRT 的影响较大($P<0.05$),对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除受 HRT 的影响较小.在不同 HRT 情况下, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率均高于 93%,出水浓度一般均小于 0.04mg/L.且出水中的 TP 和 TN 主要为有机态,存在一个 TP 和 TN 背景浓度.TN 去除率与负荷之间具有很好的相关性($R^2=0.9968$),但是 TP 去除率与负荷之间相关性较差($R^2=0.5987$).以 HRT 为 2d 计算,1m² 的芦苇床处理该农业灌溉径流的能力为 0.1m³/d,出水 TN 和 TP 浓度可控制在 0.50mg/L 和 0.154mg/L 以下.

关键词: 潜流水平湿地; 农业灌溉径流; 氮; 磷; 水力停留时间; 背景浓度

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2005)06-0669-05

Removal of nitrogen and phosphorus from agricultural irrigation runoff in subsurface horizontal-flow wetland. FU Rong-bing, YANG Hai-zhen*, GU Guo-wei, ZHANG Zheng (State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China). *China Environmental Science*, 2005, 25 (6): 669~673

Abstract: The subsurface horizontal-flow wetland planted *Phragmites communis* was constructed to study the long-term performance nitrogen and phosphorus removal from agricultural irrigation runoff (TN was about 7mg/L, TP was about 0.5mg/L). TP and TN removal rates were above 87% and 68% at the hydraulic residence time (HRT) of 2, 4, 6d. The influence of HRT on the removal of TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP by wetland was relatively great ($P<0.05$) and less for $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ removal. Under all HRT conditions the removal rates of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ were all higher than 93%, with their concentrations generally below 0.04mg/L. The TP and TN in the wetland effluent were mainly of organic from, due to the release of organic nitrogen and organic phosphorus induced by internal circulation of nitrogen and phosphorus in wetland system. There existed TP and TN background levels in the wetland effluent. Wetland possessed very good relativity with TN removal rate and load ($R^2=0.9968$); but relatively poor with TP ($R^2=0.5987$). Based on 2d HRT, the *Phragmites communis* bed with surface area 1m² had 0.1m³/d ability of treating the agriculture irrigation runoff and the effluent TN and TP concentration could be controlled below 0.50mg/L and 0.154mg/L.

Key words: subsurface horizontal-flow wetland; agricultural irrigation runoff; nitrogen; phosphorus; hydraulic residence time; background level

由于化肥、农药的大量使用,农田土壤中氮、磷等营养物质随着农业灌溉径流进入湖泊河流,引起了严重的农业面源污染问题^[1].农业灌溉径流造成的污染涉及范围广,发生机制复杂,治理难度大,至今还没有经济有效的治理技术.近年来,湿地成为控制面源污染的研究热点之一. Baker 等^[2]认为,营养物质以面源的形式进入水体的问题,不可能单独依靠农业化学品的管理得到解

决. Van der alk 等^[3]在种植玉米的田地中利用湿地恢复的方法去除污染物质,认为湿地处理是控制农业地表水水质最具前景的方法之一. Kao M^[4]认为自然湿地处理技术是控制面源污染的有效方法.

目前,国内外对人工湿地处理农业灌溉径流

收稿日期: 2005-03-24

* 责任作者, 教授, haizhen@mail.tongji.edu.cn

的研究和工程实践很少,传统上的人工湿地主要用来处理高浓度的化粪池出水以及中高浓度的生活污水和城市污水,因此大部分的研究主要考察的是营养负荷较高时的去除效果.本试验构建了芦苇床人工湿地,根据农业灌溉径流的水质特点,采用实际灌溉废水,在低浓度负荷情况下,从2003年3月~2004年2月对芦苇床去除氮磷的效果进行了研究.

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置由PVC板制成,长×宽×深为2.0m×0.5m×0.6m.床体底部填充40cm厚的方解石,粒径约10mm,上部是20cm厚的砾石和土壤混合层(比例为4:1),床体空隙率为0.4.运行时污水在介质表面以下流动,水深为0.50m.2002年11月在系统中培植芦苇(*Phragmites communis*)根茎,并在床体中加注污水,进行系统的培育和建立,2003年3月芦苇开始生长,植株初始密度为30株/m²,到5月芦苇具有相当长势和高度时开始进行试验.

1.2 农业灌溉径流水质

农业灌溉径流水质根据不同地区和旱季、雨季以及灌溉频率不同,有一定的差别,一般TN为2.0~18.0mg/L,TP为0.05~2.00mg/L.农田灌溉废水的特点是NO₃⁻-N一般占TN的70%以上,PO₄³⁻-P一般占TP的50%以上,有机物(BOD<10mg/L, DOC<20mg/L)和SS含量很少.本试验采用花圃灌溉废水作为水源,TN约为7.0mg/L,TP约为0.5mg/L,试验尽量维持进水水质的稳定.

1.3 运行方法

在上海地区的自然环境中(亚热带季风气候),采用实际灌溉废水进行试验.废水首先进入人工湿地前端的预处理池中进行预处理,然后用计量泵注入到人工湿地中,每天分5次间歇进水.停留时间(HRT)2003年5~7月为2d,8~10月为4d,2003年11月~2004年2月为6d.每3d测定进出水水质1次.HRT为2d和4d时测定进出水各30次,HRT为6d时测定40次.

1.4 水质监测方法

TN的测定采用过硫酸钾-紫外分光光度法,NH₄⁺-N的测定采用纳氏试剂比色法,NO₂⁻-N的测定采用1-萘基-乙二胺光度法,NO₃⁻-N的测定采用紫外分光光度法;TP的测定采用过硫酸钾消解-钼酸铵分光光度法,PO₄³⁻-P的测定采用钼酸铵分光光度法.

2 结果与讨论

2.1 氮磷去除效果

在HRT为2,4,6d时,人工湿地进出水氮磷的平均浓度和去除率见表1.

表1 进出水氮磷的平均浓度和去除率
Table 1 Mean concentrations and removal rate of nitrogen and phosphorus in inlet and outlet

项 目	停留时间(d)			
	2	4	6	
TN	进水(mg/L)	6.56(0.49)	5.40(0.50)	5.94(0.47)
	出水(mg/L)	0.50(0.04)	0.36(0.03)	0.48(0.04)
	去除率(%)	87.3(1.91)	92.5(1.10)	89.8(0.62)
NH ₄ ⁺ -N	进水(mg/L)	0.802(0.08)	0.725(0.07)	0.662(0.09)
	出水(mg/L)	0.021(0.002)	0.007(0.0009)	0.007(0.002)
	去除率(%)	97.4(0.36)	98.1(0.24)	94.2(1.42)
NO ₂ ⁻ -N	进水(mg/L)	0.262(0.05)	0.293(0.06)	0.278(0.05)
	出水(mg/L)	0.005(0.0004)	0.001(0.0004)	0.001(0.0006)
	去除率(%)	93.5(2.6)	95.4(1.43)	94.5(1.53)
NO ₃ ⁻ -N	进水(mg/L)	4.742(0.5)	3.850(0.4)	4.32(0.32)
	出水(mg/L)	0.002(0.0003)	0.001(0.0002)	0.04 (0.02)
	去除率(%)	98.3(0.64)	97.2(0.56)	97.4(0.48)
TP	进水(mg/L)	0.485(0.02)	0.513(0.02)	0.462(0.01)
	出水(mg/L)	0.154(0.03)	0.124(0.02)	0.028(0.002)
	去除率(%)	68.2(4.1)	75.8(4.6)	92.8(0.54)
PO ₄ ³⁻ -P	进水(mg/L)	0.362(0.03)	0.294(0.02)	0.357(0.02)
	出水(mg/L)	0.007(0.0008)	0.006(0.002)	0.008(0.0008)
	去除率(%)	98.1(0.58)	98.0(0.34)	97.8(0.22)

注:表中每个HRT对应的数据为该水力停留时间下所有数据的平均值,括号中数据为标准误差

由表1可知,在HRT为2d时,芦苇床对TN、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N和PO₄³⁻-P的去除率均大于87%,对TP的去除率为68.2%,相对较差.HRT为4d和6d时,除了TP在HRT为4d时的去除率为75.8%之外,TN、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N和PO₄³⁻-P的去除率均大于89%.在3种HRT情况下,出水中的NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N

和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的浓度都非常小,小于 0.04mg/L .对于比较关注的氮的形态 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,在整个试验周期内去除率大于 97%.

2003 年 8~9 月,进水 TN 浓度降低较大(图 1),主要是由于温度升高导致预处理池中微生物的活性增强,微生物转化部分氮引起的.TP 的变化相对较小(图 2).尽管 TN 进水浓度有波动,但是出水浓度仍保持相对稳定,基本上低于 0.50mg/L ,说明该人工湿地系统具有一定的抗冲击负荷能力.

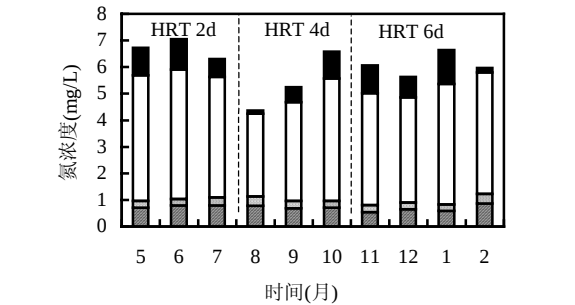


图 1 每月进水中各种形态氮的平均浓度
Fig.1 Mean monthly inlet nitrogen species concentration
■ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ■ $\text{NO}_2^-\text{-N}$ □ $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ■ 有机氮
图中每月对应数据为全月数据的平均值

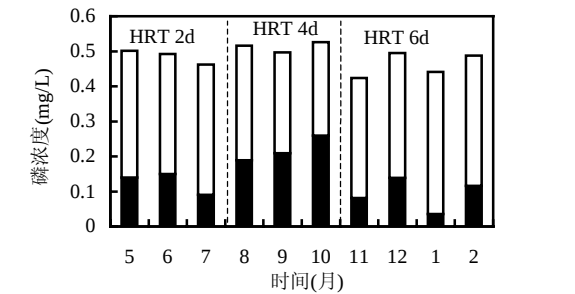


图 2 每月进水中各种形态的磷的平均浓度
Fig.2 Mean monthly inlet phosphorus species concentration
□ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ■ 有机磷
注同图 1

在 3 种 HRT 情况下,人工湿地对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除率没有明显的差别 ($P>0.05$),均大于 93%,这表明,在出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度有明显的降低之前,可以将 HRT 缩短至少于 2d,以提高人工湿地的进水

负荷.另一方面 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、和 TP 浓度的降低受 HRT 的影响较大($P<0.05$).HRT 为 4d 时 TN 的去除效果(92.5%)好于 2d 时的效果(87.3%).在 HRT 为 6d 时湿地对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率(94.2%)低于 HRT 为 4d 时的去除率(98.1%)($P<0.05$),同时 2d 的 HRT 获得的去除率(97.4%)与 4d 的 HRT 获得的去除率没有显著差异($P>0.05$).可以推断,在更长的 6d 的 HRT 时,较低的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率可能是由于有机氮在较长的时间内转化成了 NH_4^+ 所引起的,因此出水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度应该升高,然而出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在 HRT 为 4d 和 6d 时几乎一致(0.007mg/L),可能是由有机氮转化的 NH_4^+ 又被硝化掉,这与湿地系统随着运行期的延长变得更加稳定有关.因为硝化作用需要氧,在以缺氧为主的水平潜流湿地中,氧的扩散率低,硝化作用成为除氮的限制过程^[5-7],成熟的湿地植物根系输氧能力更强,促使 NH_4^+ 更好地硝化成 NO_3^- .

在 3 种 HRT 情况下,人工湿地对 TP 的去除效果有很大差别($P<0.01$),HRT 为 2,4,6d 时,平均 TP 去除率分别为 68.2%、75.8%和 92.8%,可见 TP 的去除效果受 HRT 影响较大.湿地对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率受 HRT 影响较小,分别为 98.1%、98.0%和 97.8%,这与湿地去除 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的机理有关.一般认为 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 主要是通过湿地介质的吸附沉淀得以去除的^[8-10],这个过程发生相对较快.在 HRT 较短的情况下,人工湿地对 TP 的去除率低,是由于进水中原有的以及系统释放的有机磷引起的,小于 4d 的 HRT 还不足以使进水中有机磷转化成非有机态而被植物吸收和砾石吸附固定.

2.2 人工湿地系统氮磷的释放

在整个试验周期中,出水 TN 和 TP 浓度分别大于 0.36mg/L 和 0.028mg/L .出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 3 种形态占 TN 的比例不超过 3.54%, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 占 TP 的比例不超过 28.6%(图 3, 图 4),出水中氮和磷主要是以有机形态出现的.8 月份进出水的有机氮的平均浓度分别为 0.12, 0.435mg/L ;11 月份进出水有机磷浓度分别为 0.036, 0.038mg/L ,出水中的有机氮和有机磷高于进水中的有机氮和有机磷,说明人工湿地系

统中存在着氮磷的释放问题.

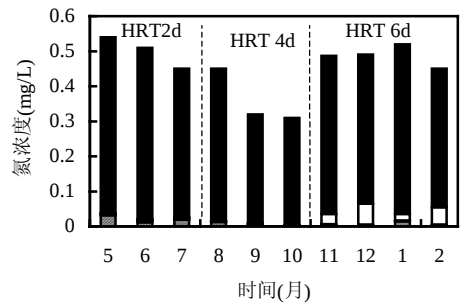


图3 每月出水中各种形态氮的平均浓度

Fig.3 Mean monthly outlet nitrogen species concentration

■ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ■ $\text{NO}_2^-\text{-N}$ □ $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ■ 有机氮
注同图1

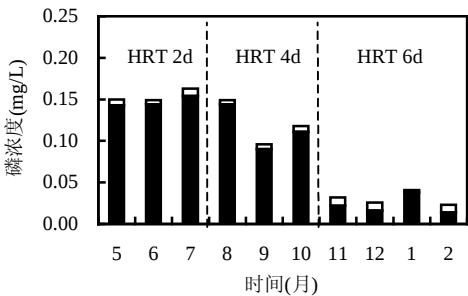


图4 每月出水中各种形态磷的平均浓度

Fig.4 Mean monthly outlet phosphorus species concentration

□ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ■ 有机磷
注同图1

芦苇床出水中的有机氮和有机磷是由植物根系、根上附着生长的微生物体、浮游植物以及地上部分芦苇枝叶枯败跌落后腐烂释放出来的.这说明,即使在极低的进水负荷下,湿地床出水中总会存在一定量的有机氮和有机磷,也证明了Kadlec等^[5]的结论,不管HRT是多少,出水中一个很小浓度的有机氮总是存在的.芦苇床出水中的有机磷,部分来源于床体内的微生物和植物组织的生长和死亡,这种途径提供的有机磷是由磷的内循环引起的.其中前期被微生物吸收去除掉的部分 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$,随后又以有机态形式返回到系统^[11].有机磷可以作为一个长期的磷源在其后的几年中逐渐释放出来^[12],因此,人工湿地对磷的去

除机制非常复杂,同时存在着由于临时沉淀而导致的短期去除和更持续的长期去除之间的关系,需要更深入的研究.

2.3 负荷与去除率的关系

HRT 为 6,4,2d 的情况下,每个工况选取了 10 对数据,考察 TN 和 TP 负荷与去除率之间的关系,如图 5 和图 6.

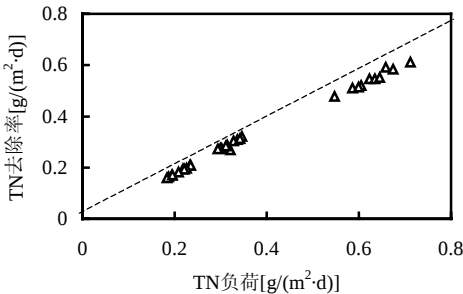


图5 总氮负荷与去除率之间关系

Fig.5 TN loading rate versus removal rate

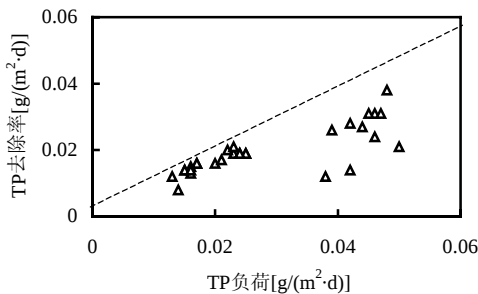


图6 总磷负荷与去除率之间关系

Fig.6 TP loading rate versus removal rate

在图 5,图 6 中,虚线表明 100% 的去除.在试验负荷范围内,TN 负荷与去除率之间表现了很强的线性关系 ($R^2=0.9968$),在 TN 负荷小于 $0.4\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 时,图中各点非常靠近虚线,表明去除率很高,接近 100%. TP 负荷与去除率之间的相关性较低 ($R^2=0.5987$),特别是在负荷大于 $0.03\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 时,波动较大,此时 HRT 较短,湿地对 TP 的去除效果变差,而且不稳定.当 $\text{HRT}>4\text{d}$, TP 负荷为 $0.01\sim 0.03\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 时,相关性较好,去除率接近 100%.

2.4 湿地处理农业径流的设计

根据以上的试验研究,在农业灌溉径流 TN 浓度为 7.0mg/L,TP 浓度为 0.5mg/L 的水质情况下,以 HRT 为 2d 设计,床表面积为 1m² 的该芦苇床(砾石粒径为 10mm,水深 0.5m,空隙率为 0.4)可以处理该农业灌溉径流 0.1m³/d,湿地出水氮磷浓度可控制在 TN 为 0.50mg/L,TP 为 0.154mg/L 以下。

3 结论

3.1 在本试验条件下芦苇床获得了稳定的氮磷去除效果,出水 TN 稳定在 0.50mg/L,TP 为 0.154mg/L, NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻-P 去除率大于 97%,平均出水浓度小于 0.04,0.008mg/L.湿地出水中的氮磷主要是有机形态.由于人工湿地系统中氮磷的内循环,导致系统氮磷的释放,出水中一定浓度的有机氮和有机磷可能总是存在的。

3.2 该人工湿地对 NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻-P 的去除受 HRT 的影响很小;对 TN、NH₄⁺-N 和 TP 去除受 HRT 的影响较大.TN 和 TP 在 HRT 为 2d 时最差,NH₄⁺-N 去除在 HRT 为 6d 时最差,在 3 种 HRT 下出水 NH₄⁺-N 浓度都非常低(小于 0.021mg/L)。

3.3 人工湿地处理农业灌溉废水, TN 负荷与去除率之间表现了很强的线性关系(R²=0.9968). TP 负荷与去除率之间的相关性较低(R²=0.5987), TP 负荷大于 0.03g/(m²·d),HRT<4d 时,出水 TP 浓度波动较大,去除效果变差。

3.4 以 HRT 为 2d 设计,床表面积为 1m² 的该芦苇床可以处理该农业灌溉径流(TN 浓度为 7.0mg/L,TP 浓度为 0.5mg/L)0.1m³/d,湿地出水氮磷浓度可控制在 TN 为 0.50mg/L,TP 为 0.154mg/L 以下。

参考文献:

[1] Marc O Ribaudo, Ralph Heimlich, Roger Claassen, *et al.* Least-cost management of nonpoint source pollution: source reduction versus interception strategies for controlling nitrogen loss in the Mississippi Basin [J]. Ecological Economics, 2001,37:183-197.

[2] Baker J L, Mickelson S K, Crumpton W G. Integrated crop

management and off-site movement of nutrient and pesticides [A]. Weed biology, soil management, and weed management; advances in soil science [C]. Boca Raton: CRC press, 1997. 135-160.

[3] Van der Valk A G, Jolly R W. Recommendations for research to develop guidelines for the use of wetlands to control rural NPS pollution [J]. Ecological Engineering, 1992,1(1):115-134.

[4] KAO M, WU M J. Control of non-point source pollution by a nature wetland [J]. Wat. Res., 1999,20(3):47-54.

[5] Kadlec R H, Knight R L. Treatment wetlands [M]. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1996.5-20.

[6] Davies T H, Cottingham P D, Hart B T. Application of constructed wetlands to treat wastewater in Australia [A]. Constructed wetlands for water quality improvement [C]. Florida: Lewis Publishers, 1993.577-584.

[7] Johnston C A. Mechanisms of wetland-water quality interaction [A]. Constructed wetlands for water quality improvement [C]. Florida: Lewis Publishers, 1993.293-299.

[8] Netter R. The purification efficiency of planted soil filters for wastewater treatment [J]. Wat. Sci. Tech., 1992,26(10-12):2317-2320.

[9] Parfitt R L. Anion adsorption by soils and soils material [J]. Adv. Agron., 1978,30:1-50.

[10] Gal P M, Reddy K R, Graetz D A. Phosphorus retention by wetland soils used for treated wastewater disposal. [J] J. Environ. Qual., 1994,23:370-377.

[11] Horne A J, Goldman C R. Limnology [M]. 2nd ed. Singapore: McGraw-Hill, 1994.

[12] Faulkner S P, Richardson C J. Physical and chemical characteristics of freshwater wetland soils [A]. Constructed wetlands for wastewater treatment-municipal, industrial and agricultural [C]. Chelsea MI: Lewis Publishers, 1989.41-47.

作者简介: 付融冰(1973-),男,山东日照人,同济大学环境科学与工程学院博士研究生,研究方向为水污染控制和生态修复技术.发表论文 3 篇。