

潜流构造湿地去除农田排水中氮的研究

张荣社¹, 周琪¹, 张建², 史云鹏¹ (1. 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, E-mail: zhrs555@sina.com; 2. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 对潜流构造湿地处理农业面源污水的脱氮效果进行了中试研究. 研究证明潜流湿地氮去除效率和水力停留时间呈正相关关系, 芦苇床的脱氮效果明显好于茭草床和空白床, 名义水力停留时间大于 5 d 时, 芦苇、茭草潜流湿地脱氮效率可以达到 60% 以上. 氮的去除满足一级推流反应动力学关系, 空白床、芦苇床和茭草床的一级反应动力学常数 K 分别为 0.14、0.26 和 0.20 d^{-1} . 微生物的反硝化是人工湿地脱氮的主要途径, 植物吸收总氮量仅占入水量的 15% 左右.

关键词: 潜流湿地; 农业面源污染; 脱氮; 反硝化

中图分类号: X712 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)01-04-0113

Study on Nitrogen Removal Treating Agriculture Wastewater in Subsurface Constructed Wetland

Zhang Rongshe¹, Zhou Qi¹, Zhang Jian², Shi Yunpeng¹ (1. Pollution Control and Resource Reuse Lab, School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China E-mail: zhrs555@sina.com; 2. Dept. of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China.)

Abstract: Nitrogen removal in subsurface constructed wetland treating agriculture non-pointed wastewater was studied in pilot-scale. The experimental results showed that the removal rates of TN increases with HRT increasing. The removal rates of TN achieved 60% in macrophyte bed system when the nominal hydraulic retention time was 5 days. Removal of TN followed first-order plug flow kinetics. Rate constant of Non-plant bed, *Phragmites communis* bed and *Zizania caduciflora* bed was 0.14, 0.26 and 0.20 d^{-1} respectively. Denitrification was the main removal mechanism of total nitrogen, the amount of TN that can be removed by harvesting were above 15% compared to the loading into constructed wetland system.

Key words: subsurface constructed wetland; agriculture non-point pollution; nitrogen; denitrification

水污染问题已经严重制约世界经济的发展, 非点源污染是造成水体污染的主要原因之一. 据美国 EPA 估计, 美国非点源污染通过暴雨径流、农业排灌、矿业生产等途径输入地表水体的污染物质占输入总量的 65% 以上, 其中农业非点源污染是最大的一个污染源^[1-3]. 因此, 有效地控制农业非点源污染是改善水体质量的一条重要途径, 尤其是控制农业生产所带来的氮磷污染对于控制水体富营养化具有重要意义.

构造湿地污水处理技术被认为是控制农业非点源污染的一种低费用、实用有效的方法^[4]. 自从 1977 年德国学者 Kickuth R. 提出根区法 (The Root-Zone Method) 奠定湿地废水处理的

理论基础之后, 各国学者对构造湿地展开了广泛的理论和基础研究. 其间取得了不少研究成果, 大大促进了它在世界范围内的应用. 构造湿地最初用来处理城镇和乡村生活污水, 主要研究对 BOD 和 SS 的去除, 随着对 N、P 标准要求的提高, 研究热点逐渐转向除磷脱氮^[2-6]. 我国在构造湿地脱氮效果方面研究报道较少, 本试验对潜流构造湿地脱氮效果进行了系统的研究, 并对潜流湿地的脱氮机理进行了探讨.

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目 (K99-05-35-02)

作者简介: 张荣社 (1971-), 男, 博士研究生, 武汉科技大学讲师.

收稿日期: 2002-03-27; 修订日期: 2002-06-05

1 试验装置与方法

1.1 试验装置和入水水质

中试试验系统建在一片天然湿地中,共3条砾石潜流湿地床,1号为无植物对照床,2号为芦苇床,3号为茭草床,所选芦苇和茭草为天然湿地中的优势植物,床体采用聚乙烯膜作底部防渗处理,长10 m,宽1.5 m,深0.6 m,底部填0.4 cm~5 cm的破碎砾石,上铺0.2 m当地土壤。前后各有0.5 m的进出水区,采用顶部穿孔管进水和底部穿孔管出水,控制水位0.4 m。试验系统建成后,间歇投配污水3个月,进行植物恢复和系统培育,然后进行2个月的连续进水,待系统稳定后,开始进行试验,共考察了水力停留时间(砾石的空隙率0.45)为1 d 3 d 5 d 7 d时潜流湿地对氮的去除效果,试验共进行3个月。试验用水直接取自天然湿地入水渠,主要为农村生活污水和农田回归水的混合污水,入水总氮浓度为 $22 \pm 10 \text{ mg/L}$,其中硝态氮占80%以上,氨氮10%,其它为有机氮。原污水经初沉池沉淀后进入试验系统。

1.2 检测分析方法

总氮采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,植物全氮采用半微量蒸馏滴定法。

2 结果与讨论

2.1 总氮去除效果

通过对床体进出水总氮浓度连续检测,每个工况进行重复试验6次,按不同床体进出水浓度计算总氮去除效率,总氮的去除率与水力停留时间的关系见图1。

从图1可以明显看出,各床体对总氮的去除效率随停留时间的延长而增加,水力停留时间小于5 d时,脱氮效率与水力停留时间呈线性增长,大于5 d以后脱氮效率增长缓慢。湿地系统中总氮的去除机理是多样的,包括挥发、硝化-反硝化、植物摄取和基质吸附。主要去除机理是微生物的硝化与反硝化^[6],因此,水力停留时间越长微生物硝化反硝化进行得越完全,脱氮效果就越好。

同时也可以看出植物床体脱氮效果优于无植物床,芦苇床体优于茭草床,植物对脱氮效果

的改变主要原因归纳为:①植物生长对潜流湿地流态的改变,植物根系的生长有利于均匀布水,延长系统实际水力停留时间。②植物根系巨大表面积会附着大量微生物,根际会创造利于各种微生物生长的微环境,植物根茎下穿使原来的厌氧环境在植物根系附近形成有利硝化作用的好氧微区,同时远离根系周围的厌氧区里富含的枯枝碎屑及底质层,其中含有大量可利用的碳源,这又提供了反硝化条件^[7-10]。③植物对各种形式氮尤其是硝态氮的吸收作用。

2.2 总氮去除动力学分析

许多研究证明湿地中BOD、TN的去除均服从一级推流反应动力学^[7-8],即总氮降解和停留时间满足:

$$c_e = c_i \exp(-Kt) \quad (1)$$

c_e :出水总氮浓度(mg/L); c_i :入水总氮浓度(mg/L); K :一级反应动力学常数(1/d); t :水力停留时间。

总氮的去除效率忽略水量损失后可以表达为:

$$\eta = (c_i - c_e) \times 100 / c_i \quad (2)$$

组合(1)式和(2)式可以得出:

$$-\ln(1 - \eta) = Kt \quad (3)$$

(3)式为一过原点的直线,以 $-\ln(1 - \eta)$ 为纵坐标, t 值为横坐标,斜率为 K 。因此根据反应动力学原理,如果总氮去除率与水力停留时间能够满足(3)式,则可以断定,总氮的去除满足一级推流反应动力学方程,根据不同水力停留时间各床体总氮的去除效率按(3)式作图,结果见图2。

空白床、芦苇床、茭草床的 K 值拟合结果分别为0.14($r^2 = 0.89$)、0.26($r^2 = 0.91$)和0.20($r^2 = 0.92$),说明总氮去除动力学基本满足一级推流反应动力学规律,同时从反应动力学常数计算结果可以看出,芦苇床和茭草床的反应速率明显高于空白床,另一方面 K 值的求得为实际工程的设计提供了参数。

2.3 氮去除途径分析

进入潜流湿地系统中的氮有几种去除途径:随出水流出、微生物反硝化为气态氮排除、

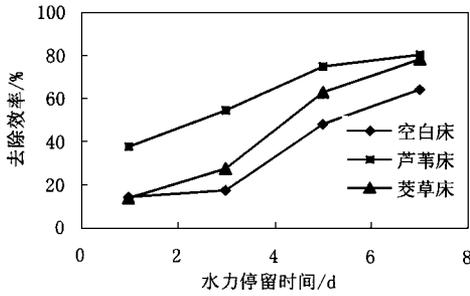


图 1 总氮去除率与水力停留时间关系

Fig.1 Relationship between total nitrogen removal rate and hydraulic retention time

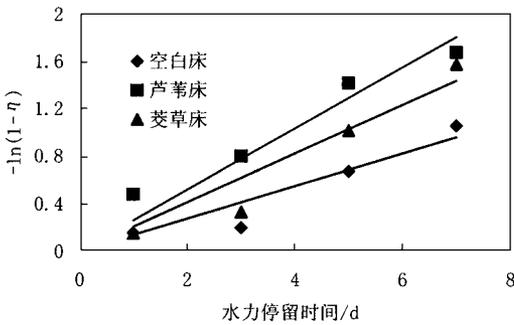


图 2 总氮去除动力学拟合线

Fig.2 TN removal rate dynamics simulation

植物吸收、介质吸附和氨氮挥发。介质吸附主要是对还原态氮而言，还原态氮十分稳定，能够被床体的活性位点所吸附，但是，在基体的阳离子交换位点发生的氮氮阳离子交换不能被认为是氮氮去除中的长期汇，氮氮的吸附被认为是快速可逆的，除此以外，用于潜流构造湿地经常使用的材料（砾石、碎石等）通常是惰性的，并不能提供吸附需要的大量活性位点^[11]，因此介质吸附量在潜流砾石床湿地中是不予考虑的。Reddy 和 Patrick 指出，如果 pH 值小于 7.5，则 NH₃ 从淹没土壤和沉积物中通过挥发损失是不显著的；而 pH 值小于 8.0 时并不严重；在 pH 为 9.3 时，氨和铵离子的比例是 1:1，通过挥发造成的氨氮损失开始变得显著，在潜流式构造湿地中水体在通过填料层过滤时，pH 值变化不是很剧烈，一般不会超过 8.0，因此，潜流构造湿地中通过挥发损失氨氮的作用可以忽略^[12]。本次试验进出水 pH 值均在中性左右，因此氨

态氮的挥发是可以忽略的。

通过分析，可以认为进入潜流湿地中的总氮有 3 种去向，一是随出水排出系统，二是被湿地植物吸收，三是通过微生物作用去除。进水总氮量 M₁ 和出水总氮量 M₂ 通过进出水总氮浓度、流量和连续运行时间可以得到，植物吸收氮量 M₃ 通过测定植物净增长量、含水率、干物质总氮含量计算，微生物反硝化去除总氮量难以直接测量，因此采用 M₁ 减去 M₂ 和 M₃ 计算微生物反硝化去除总氮量 M₄。本试验定期进行了植物样的分析和进出水总氮量的计算，各去除途径所占入水总氮的比例如图 3。

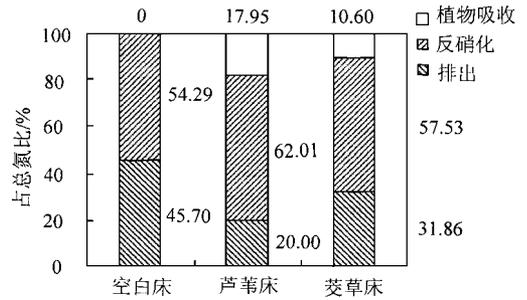


图 3 总氮去除途径分析

Fig.3 Analysis of TN removal path

图 3 显示通过反硝化脱氮是潜流湿地脱氮的主要途径，植物吸收总氮量占投加总量的 10% 以上，也是去除氮的重要途径。芦苇吸收氮能力要大于茭草，通过植物总氮含量和产量计算，依靠植物吸收去除的氮量芦苇和茭草分别为 435.8 kg/(hm²·a) 和 227.1 kg/(hm²·a)。进一步说明芦苇氮吸收效果优于茭草。因此，潜流构造湿地用于脱氮时，应优先选择芦苇，同时植物的吸收量应该予以考虑，保证植物的良好生长对于总氮的去除具有一定意义。

3 结论

(1) 潜流构造能够有效去除农田排水中的氮，在水力停留时间大于 5d，入水总氮浓度为 22 ± 10 mg/L 时，无植物床、芦苇床和茭草床总氮去除率分别可以达到 48.7%、75.6% 和 63.5%。

(2) 潜流构造湿地氮去除效率和水力停留时间呈正相关，氮的去除满足一级推流反应动

力学关系,无植物床、芦苇床和茭草床一级反应动力学常数 K 分别为 0.14、0.26 和 0.20。

(3) 微生物的反硝化是人工湿地脱氮的主要途径,植物在构造湿地中对氮有一定的吸收作用,依靠植物吸收每年带走的总氮量芦苇和茭草分别为 $435.8 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 $227.1 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,人工湿地应该优先选择芦苇。

参考文献:

- 1 高拯民,李宪法等.城市污水土地处理利用设计手册.北京:中国标准出版社,1991.2~30.
- 2 张毅敏等.利用人工湿地治理太湖流域小城镇生活污水可行性探讨.农业环境保护,1998,17(5):232~234.
- 3 Alabama Department of Public Health. Rules of the State Board of Health Bureau of Environmental and Health Service Standards Division of Community. Environmental Protection. 420(3-1).
- 4 M KAO, M J WU. Control of Non-point Source Pollution by a Nature Wetland. Wat. Res., 1999,20(3):47~54.
- 5 Andrew Wood. Constructed wetlands in water pollution control: fundamentals to their understanding. Wat. Sci. Tech., 1995,32(3):21~29.
- 6 Brix H. The applicability of the waste water treatment plant in Othfres as scientific document for the root zone method. Wat. Sci. Tech., 1986,19(10):19~24.
- 7 Cooper P, Green B. Reed bed treatment systems for sewage treatment in the UK—the first 10 years experience. Wat. Sci. Tech., 1995,32(3):317~327.
- 8 Gersberg R M, V Eldkins. Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetland. Wat. Res., 1988,20(3):363~368.
- 9 Brix H. Function of macrophytes in constructed wetlands. Wat. Sci. Tech., 1994,29:71~78.
- 10 Philip A, M Bachhand Alex. Denitrification in constructed free-water surface wetlands: I. very high nitrate removal rate in a macrocosm study. Ecological Engineering, 2000,14:9~15.
- 11 Vymazal J. Nitrogen removal in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow—can we determine the key process: Nutrient Cycling and Retention in Natural and Constructed Wetlands. Leiden: Backhuys Publishers, 1999.1~19.
- 12 Vymazal J, Brix H, Cooper P, Haberl R et al. Removal mechanisms and types of constructed wetlands. in Europe. Leiden: Backhuys Publishers, 1998.17~66.

《环境科学》征稿简则

(1) 来稿报道的成果要有新意,观点明确,数据可靠,层次分明,结构完整,文字精练(一般不超过 8000 字)。

(2) 来稿附中英文摘要,关键词,英译题目,作者姓名的汉语拼音,工作单位英文名称和作者简介。作者简介包括性别,出生年月,籍贯,学位,职称和主要研究方向。

(3) 来稿应达到定稿要求。A4 纸激光打印样,一式 2 份。

(4) 易混淆的外文字母请用铅笔标明文种,大小写,正斜体。文中首次出现的生物名称要给出拉丁学名,首次出现的缩写字母要先给出中文名称,括号内给出英文全名和缩写。

(5) 插图除在文中相应处附上外,还需另附一份,应为激光打印样或绘图纸黑墨精绘样;照片必须黑白反差大,清晰;图的大小要适中(坐标图最好为长方形,半栏图左右不超过 60 mm,通栏图左右不超过 140 mm)。表为三线表。

(6) 文中图表要有中英文对照题目。

(7) 来稿必须使用国务院颁发的《中华人民共和国

法定计量单位》(SI)。论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等。科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文。

(8) 未公开发表的资料不列入参考文献。文献按文中出现的先后次序编排。

期刊:作者(外文也要姓列名前)。论文名.期刊名,年,卷(期):页码(起页~止页)。

书籍:作者.书名.版次(第一版不标注).出版地:出版社(单位),年.页码(起页~止页)。

文集:作者.论文名.见(In):编者.文集名.出版地:出版社(单位),年,页码(起页~止页)。

(9) 来稿文责自负,切勿一稿两投。编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节。对未刊稿件一般不退,请自留底稿。

(10) 来稿请注明是否为国家或省部级科技攻关项目,国家自然科学基金项目和国际合作项目等。

(11) 来稿请附单位业务介绍信及详细地址,邮编,电话号码,挂号寄至北京 2871 信箱《环境科学》编辑部。邮编:100085,电话:010-62941102