

潜流人工湿地负荷变化对脱氮效果的影响研究

张荣社¹, 李广贺¹, 周琪², 张旭¹

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 通过 15 个月的现场监测试验, 研究了约 40 种入水负荷下人工湿地的脱氮效果, 总结了芦苇、茭草、混合种植以及无植物潜流湿地在不同水力负荷和污染负荷下的单位面积出水氮负荷和去除率的变化规律. 4 种潜流系统入水负荷从 $400 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 变化到 $8\,000 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 出水负荷小于 $7\,000 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 研究表明, 潜流湿地出水负荷随着入水负荷的升高而升高, 具有明显的线性相关关系. 单位面积总氮的去除率在低负荷条件下随入水负荷的升高而升高, 但在高负荷时单位面积去除率基本维持在一定的水平, 不受入水负荷的影响, 去除率变化波动较大. 各系统的最佳运行范围在 $2\,000 \sim 4\,000 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间, 平均去除率在 $1\,062 \sim 2\,007 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间. 床体间比较认为, 植物床脱氮效果明显好于空白床, 芦苇床、茭草床单位面积脱氮效率高出空白床 63% 和 27%; 同时考察的植物吸收量证明, 植物吸收氮的量非常有限, 不到去除量的 5%, 证明植物主要通过吸收以外的其它因素如改善水力条件和根系微环境来提高系统的氮去除效率. 研究结果为潜流湿地脱氮机理的理解和设计提供参考.

关键词: 潜流湿地; 氮; 芦苇; 茭草; 滇池; 面源污染

中图分类号: X171.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)02-0253-04

Relationships Between Loading Rates and Nitrogen Removal Effectiveness in Subsurface Constructed Wetlands

ZHANG Rong-she¹, LI Guang-he¹, ZHOU Qi², ZHANG Xu¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. College of Environmental science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: About forty kinds of nitrogen loading removal rate were studied in field in 15 months, inflow and outflow loading rules of reeds/ *Zizania caduciflora*/ mixing and no-plant bed were discussed in different inflow loading. The four kinds SFS inflow loading changed from $400 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ to $8\,000 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, while outflow loading is less than $7\,000 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. Results show that outflow loading increase with the increase of inflow loading, linear relation is obvious. Total nitrogen removal rate has the same trend at low inflow loading. But in high inflow loading TN removal rate has much variation. The system had better run between $2\,000 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ and $4\,000 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ inflow loading. Average removal rate in between $1\,062 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ and $2\,007 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. Plant SFS removal rate is better than no-plant SFS. TN removal rate of reed and *zizania caduciflora* bed is 63% and 27% higher than no-plant bed. Plant harvesting is unimportant and contributes less than 5% of TN removal loading, plant can improve system micro-environment and hydrology condition which could increase TN removal rate. The results provided deep insight to SFS nitrogen removal and reference to SFS design.

Key words: subsurface constructed wetland; nitrogen; reeds; *Zizania caduciflora*; Dianchi Lake; non-point pollution

人工湿地被越来越多的应用于各种污水的处理, 潜流湿地由于其技术简单、运行可靠并且能够同时硝化和反硝化脱氮而广受欢迎. 微生物过程被认为是潜流湿地脱氮尤其是去除氨氮的原动力, 硝化产生的硝氮和亚硝氮很快通过反硝化作用去除^[1~3]. 通常潜流湿地脱氮效率约为 30%~40%^[4], 欧洲 268 个湿地系统的平均氨氮去除率 30%, 总氮去除率 39.6%^[5], 但是单个潜流系统的长期氮去除率监测结果差别较大. Mander 等监测氮去除效率从 12%~85% 变化, 并且在冬季没有下降^[6], Maehlum 等也发现冬夏季脱氮效率差别不到 10%^[5]. 其它研究描述氮去除率高达 40%~96%, 并且没有季节变化的规律^[7]. 但是, 一些报道也证

明季节的影响, 主要是温度的影响^[3,8,9]. 其它的去除过程是次要的, Thable 等估计仅仅有 5%~10% 的氮负荷被植物吸收, 这也是为什么植物不收割的原因^[10]. 氮被土壤物质(腐殖质, 黏土颗粒等)的吸附也是不重要的, 不到 10%^[11]. 通常潜流湿地氮去除效率应该受大量参数下的年循环模式的影响, 如水/土温度, 空气温度, 太阳辐射(年或季节)、湿度、降雨、污染浓度以及植物等. 这些参数引起化学、微生物和植物的营养物供应、吸收或释放的变

收稿日期: 2005-01-17; 修订日期: 2005-03-16

基金项目: 科技部“十五”科技专项项目(k99-05-35-02)

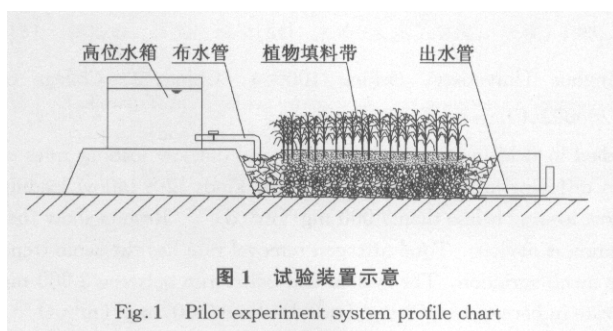
作者简介: 张荣社(1971~), 男, 博士, 主要从事环境工程人工湿地方向的研究.

化^[8]. Kadlec 也证明湿地水温不是影响去除率的唯一因素,然而,不均一的去除率变化数据常常使人们忽略了年循环变化,进而对系统进行不充分的评估.因此,对系统的长期稳态运行并缩小取样时间间隔监测脱氮效果是十分必要的,收集大量的数据总结氮的去除规律对湿地的稳定运行将具有指导意义.

1 材料与方法

1.1 试验装置

中试试验系统建在云南省呈贡县大渔乡一片天然湿地中,于 2001-03 月建成,共 4 条砾石床潜流湿地,分别为无植物空白对照床、芦苇床、茭草床以及芦苇茭草混种床,所选芦苇和茭草为当地天然湿地优势植物.床体采用加厚聚乙烯膜作底部防渗处理,10m × 1.5m × 0.6m,底部填 0.4m 直径为 3~5cm 的破碎砾石,上铺 0.2m 当地土壤.前后各有 0.5m 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 0.4m.系统剖面示意图 1.



1.2 试验方法

潜流湿地建成并运行后 3 个月开始本次试验,试验自 2001-06~2002-09 连续进行 15 个月,主要研究了潜流空白床(无植物)、芦苇床、茭草床以及混种床 4 种床体的脱氮效果,湿地结构和填料完全相同,其中茭草床因为植物生长原因于 2001-07 月进行了补种,其它床除收获植物外没有进行过任何人为干扰.通过调整湿地的入水水力负荷和入水总氮浓度来改变湿地的污染负荷,同一水力负荷下运行至少 12d 以上,浓度仅略微波动,隔天测试其进水量和浓度的变化,4 种潜流系统入水负荷从 400 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 变化到 8 000 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,入水总氮浓度 5.3~44.8 mg/L ,平均 22.9 mg/L ,其中约 20% 氨氮,70% 硝氮,其它形式氮 10%.根据进出水总氮浓度、流量计算进出水水力负荷.

1.3 测试分析方法

文中指标均按照标准测试方法进行.

2 结果与讨论

2.1 总氮进出水负荷变化

共考察了约 40 种不同负荷下总氮的进出水负荷变化,根据进出水总氮浓度、流量及湿地面积计算的进出水水力负荷关系见图 2.

图 2 中可以看出,4 种潜流湿地总氮的出水负荷和进水负荷线性拟合关系较好,有较强的线性相关性,相关系数除芦苇床外均大于 0.8.但不同床的相关关系有一定的差别,斜率的差别也较大,说明即使床体结构完全相同,所选植物不同,其总氮的进出水负荷变化规律也不同,说明植物对脱氮具有一定的影响.但所有床体的共同规律是出水负荷随入水负荷升高而升高,这符合生物脱氮的普遍规律,说明

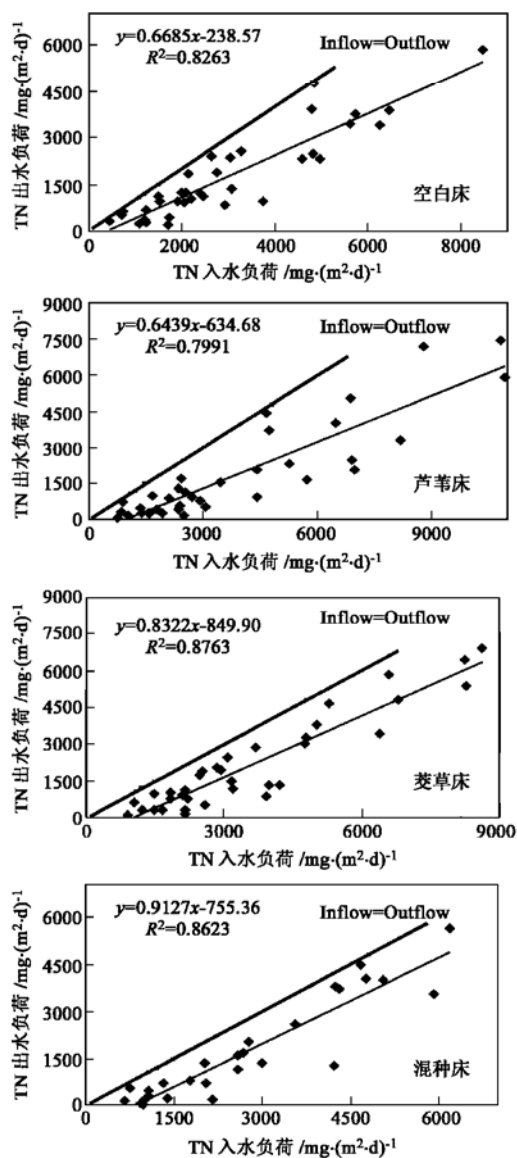


图 2 总氮进出水负荷的关系

Fig. 2 Relationship between TN outflow and inflow loading

潜流湿地脱氮是与微生物作用紧密相关的。

图 2 中粗斜线表示进水负荷等于出水负荷, 2 条线的垂向差值代表相应负荷下的单位面积的去除率, 2 线相差越远其单位面积去除率也就越高。在低入水负荷时, 进出水负荷相对比较稳定, 即出水负荷与粗斜线的差值相对恒定, 植物床要优于空白床。在入水高负荷时, 各床出水负荷变化较大, 即在高入水负荷时出水负荷点较为松散, 出水出现不稳定。图 2 中的直线关系式表达了进出水负荷的关系式, 在设计中给定入水负荷和所选植物种类后, 可根据图 2 中表达式计算出出水负荷, 结果可以用于校核潜流湿地的设计参数。

2.2 总氮去除率与入水负荷的关系

不同潜流床单位面积总氮去除率和入水负荷的关系见图 3。图 3 中总氮单位面积去除率和入水负

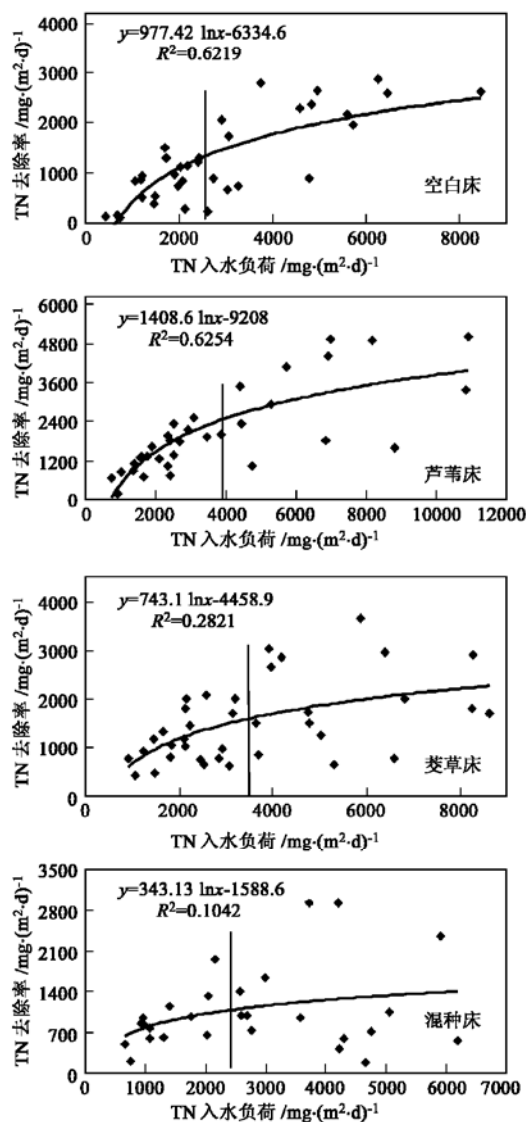


图 3 总氮去除率与入水负荷的关系

Fig. 3 Relationship between TN removal rate and inflow loading

荷的关系采用指数曲线拟合, 空白床和芦苇床更接近指数关系, 相关系数较高, 而茭草床和混种床则近似直线关系, 相关系数较低, 拟合线比较平缓。空白床和芦苇床的拟合线可以明显反映出潜流湿地脱氮过程线类似于 monod 曲线, 在低负荷时, 单位面积去除率随入水负荷的升高而升高, 到达一定程度后, 去除率基本不随入水负荷的变化, 达到一个恒定水平, 很多湿地处理系统研究报告也证明此规律的存在^[12, 13]。观察茭草床和混种床在入水负荷小于 $2000 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 的散点变化趋势, 其规律也和空白床和芦苇床类似, 只是在高负荷时波动较大, 造成整个拟合线趋势线比较平缓, 相关系数不高。从图 3 中可以看出, 各潜流系统在低负荷时去除率变化规律性较好, 运行比较稳定, 但在高负荷时, 系统的去除率变化波动较大, 导致出水负荷变化也较大, 运行出现不稳定, 当然这种不稳定的运行效果与环境因素的变化关系较大。图中竖直线的位置近似标明系统能够稳定运行的最佳入水负荷, 各系统的最佳运行范围在 $2000 \sim 4000 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间。

试验中 4 条潜流床运行条件相同, 同步监测, 因此对整个试验周期内氮的去除率进行算术平均计算, 用于比较各床脱氮效果的差别, 空白床、芦苇床、茭草床和混种床平均单位面积去除率分别为 $1234 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $2007 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $1569 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $1062 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 除混种床去除量较小外, 其它植物床单位面积去除率均优于空白床, 其中芦苇床的脱氮效果最好。混种床去除率较低的原因可能与其结构有关, 自建成后其植物始终生长不良, 覆盖率较小 (70% 左右), 前段还存在大部分植物死亡现象, 这是导致其不良运行的主要原因。其中芦苇床和茭草床单位面积氮去除率要高于空白床 63% 和 27%, 考虑植物的氮吸收量通常在去除量的 10% 以内^[11], 本次试验周期内分时段对植物的生长量和氮含量进行分析, 监测茭草和芦苇的氮吸收量分别为 $100.70 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $9.45 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 占去除量的 5% 以内^[14], 说明植物吸收作用并不重要, 但植物床脱氮效果明显高于空白床, 说明植物通过其它作用如改善水流条件、增加根系微生物的量和活性等作用来改善潜流湿地的脱氮效果。

2.3 不同季节总氮的去除率变化

由于本试验持续周期较长, 不同月份均有总氮进出水负荷变化数据, 因此对总氮去除率按试验进程中的不同月份进行平均处理, 用于反映季节变化

对脱氮效率的影响. 各潜流床在不同月份的总氮单位面积去除率变化见图 4.

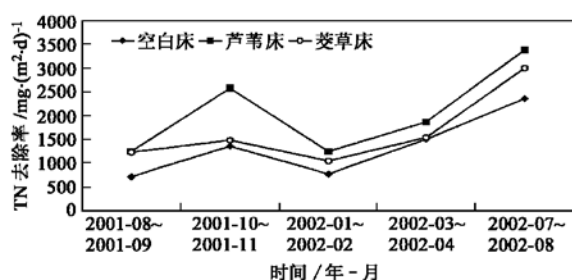


图 4 不同月份总氮去除率

Fig. 4 TN removal rate in different month

图 4 中明显反映出季节对总氮去除率的影响, 冬季 (2002-01 ~ 2002-02 月) 去除率最低, 夏季 (2002-07 ~ 2002-08) 去除率最好, 秋季 (2001-10 ~ 2001-11) 春季 (2002-03 ~ 2002-04) 去除率除了芦苇床异常外, 其它床体去除率基本相同, 对应季节平均气温分别为: 8.2、19.7、16.1、15.2℃. 湿地脱氮季节差别尤其在冬季的低去除率说明脱氮过程与温度相关性较强, 符合微生物脱氮的基本原理. 从不同湿地类型比较可以看出, 在不同季节植物床的去除率均优于相应时期空白床, 芦苇床去除率优于茭草床, 这一点与全年平均结果相符. 其中 2001-08 ~ 2001-09 去除率偏低与系统的成熟过程有关, 系统在 2001-03 建成, 还处于逐渐生长成熟阶段.

系统最大总氮去除率在 2002-07 ~ 2002-08 为空白床: $2361 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 、芦苇床: $3374 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 、茭草床: $2998 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 、混合床: $2006 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 对应冬季最低去除率为 $773 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $1244 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $1044 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $1380 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 冬夏季总氮去除率差别明显, 因此, 湿地设计考虑用于脱氮处理且全年运行时, 应该考虑冬季降温的影响. 这一试验结果与 Maehlum 等研究^[7]认为冬季对潜流湿地脱氮效果基本没有影响的报道不符. 说明冬季植物的地上部分的死亡对其根部的微生物活动产生一定的影响, 同时低温也导致部分微生物活性的降低, 进而影响了湿地冬季的脱氮效率.

3 结论

(1) 潜流湿地总氮的出水负荷与入水负荷具有明显的线性相关关系, 出水负荷随入水负荷的增加而增加, 线性关系式可用于校正潜流湿地的设计. 单位面积的去除率与入水负荷近似地服从 monod 关

系式, 在低负荷时系统运行稳定, 去除率随入水负荷增加而增加, 高负荷时系统去除率变化波动较大, 同时出水水质也不稳定, 其最佳运行范围在 $2000 \sim 4000 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间.

(2) 植物床与空白床比较, 总氮去除效率明显好于空白床. 空白床、芦苇床、茭草床平均去除率分别为 $1234 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $2007 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $1569 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 去除率受季节变化的影响, 夏季去除率最高, 冬季最低, 脱氮过程受温度影响较大.

(3) 通过植物吸收氮量对比, 单位面积吸收量仅占去除量的 5% 以内, 但芦苇床和茭草床单位面积去除率平均高出空白床 63% 和 27%, 证明植物除吸收氮外, 通过其它作用对改善脱氮效果作用更大.

参考文献:

- [1] Dafner G. Eight years of operating experience with plant covered sewage treatment works[J]. *Korrespondenz Abwasser*, 1992, **39**: 880~ 885.
- [2] Hammer D A, Knight R L. Designing constructed wetlands for nitrogen removal[J]. *Water Sci. Technol.*, 1994, **29**: 15~ 27.
- [3] Del Bubba M, Lepri L, Tabani F, *et al.* Nitrogen removal in a pilot-scale subsurface horizontal flow constructed wetland[M]. *Ann. Chim.*, 2000, **90**: 513~ 524.
- [4] Brix H. Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development, present status and future perspective [J]. *Water Sci. Technol.*, 1994, **30**: 209~ 223.
- [5] Borner T. Factors influencing the efficiency of constructed wetlands[M]. *German WAR*, 1992.
- [6] Mander U, Kuusemets V, Oovel M, *et al.* Experimentally constructed wetlands for wastewater treatment in Estonia [J]. *Environ. Sci. Health Part A*, 2000, **35**: 1389~ 1401.
- [7] Maehlum T, Stalnacke P. Removal efficiency of three cold climate constructed wetlands treating domestic wastewater: effects of temperature, seasons, loading rates and input concentration[J]. *Water Sci. Technol.*, 1999, **40**: 273~ 281, 25~ 36.
- [8] Kadlec R H. Chemical physical and biological cycles in treatment wetlands[J]. *Water Sci. Technol.*, 1999, **40**: 37~ 44.
- [9] Spieles D J, Mitsch W J. The effects of season and hydrologic and chemical loading on nitrate retention in constructed wetlands: a comparison of low- and high-nutrient riverine system [J]. *Ecol. Eng.*, 2000, **14**: 77~ 91.
- [10] Thable T S. Turnover of nitrogen compounds in the constructed wetland Othfresen[M]. *University Kassel*, 1984.
- [11] Osman R. Nitrogen turnover in a wetland in. uenced by domestic sewage[M]. *University Kassel*, 1981.
- [12] Kadlec R H, Knight R L. *Treatment Wetlands* [M]. Boca Raton: CRC Press, 1996.
- [13] Tanner C C, Sukias J P S, Upsdell M P. Relationships between loading rates and pollutant removal during maturation of gravel-bed constructed wetlands[J]. *Environ. Qual.*, 1998b, **27**: 448 ~ 458.
- [14] 张荣社, 李广贺, 周琪, 等. 潜流湿地中植物对脱氮除磷效果的影响中试研究[J]. *环境科学*, 2005, **26**(4): 83~ 86.