

# 循环速率及低温环境对复合生态床修复 北方景观水体的影响

刘书宇<sup>1,2</sup>, 刘一龙<sup>3</sup>, 吴明红<sup>1</sup>, 马放<sup>2</sup>, 张杰<sup>2</sup>, 齐志勇<sup>4</sup>

(1. 上海大学 环境与化学工程学院, 上海 201800; 2. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 哈尔滨 150090;  
3. 东北农业大学 水利与建筑学院, 哈尔滨 150030; 4. 哈尔滨市环境工程评估中心, 哈尔滨 150076)

**摘 要:**以天然矿物质沸石及煤渣为基质构建新型复合生态滤床, 分层布设并采用下向流-上向流联合运行方式, 修复北方微污染景观水体。通过出水循环方式下的动态实验, 考察循环速率、低温环境对污染物去除过程的影响, 深入分析水体氮、磷在系统内的转换过程及修复机理。结果表明, 加快循环速率提高了  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  及 TN 的去除率, 且使得硝化作用进行得更加迅速和彻底, 补充了氮从系统中去除的好氧反硝化途径。温度下降过程中, 动态运行 24 h 及 48 h 的去除率无明显变化, TP 去除率明显降低, 分别由 15~25℃ 时的 72%、77.4% 降低到 0~5℃ 的 42.4% 及 60.2%; 温度是 TP 去除的主要影响因素, 对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  影响不大。

**关键词:**循环速率; 生态床; 景观水体; 低温

**中图分类号:** X 52

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0254-0037(2009)06-0805-04

以沸石和煤渣为基质的新型复合生态床作为景观水体修复有效方法<sup>[1]</sup>, 作用机理为物理沉淀, 过滤吸附和生物净化。运行过程中的物理、化学及生物学过程受多种因素影响<sup>[2-5]</sup>, 包括温度、水流方式、基质的选择及布设方式等<sup>[6]</sup>。在已有的实验研究及实际应用中, 生态床以多种形式主要应用于城市污水处理, 且集中在不同基质的单一吸附过程<sup>[7]</sup>, 对于景观水体修复其影响因素不同于污水处理, 而主要受自然环境因子的变化与运行中工艺参数的影响, 因此, 本研究针对循环速率及低温环境在修复过程中的影响作用, 为实际工程中工艺设计及运行方式提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 生态床结构

沸石作为天然矿物质材料以其特殊的物理结构与吸附特性成为主要基质材料, 煤渣作为回收资源, 以其对水体磷素的较好吸附性作为底层基质, 表面铺设细砂, 结构如图1所示, 床体中间设有隔板, 使水流

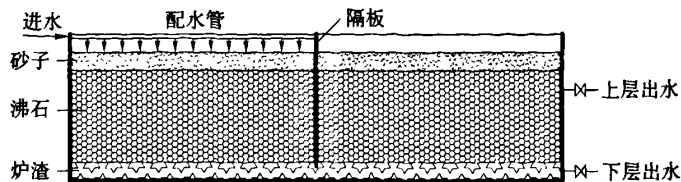


图1 生态床结构简图

Fig.1 Sketch of Structure of Ecology filter

收稿日期: 2007-12-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50809037); 上海大学创新基金(10-0111-07-010); 上海市优秀青年教师科研专项(37-0111-07-701); 国家科技支撑计划项目(2008BAC32B03).

作者简介: 刘书宇(1979-), 黑龙江肇东人, 博士生.

历程为下向流-上向流, 历经不同功能基质并延长污染物与基质的接触时间.

## 1.2 运行方式及进水指标

出水循环流经系统, 分别控制水循环速率为 5、10、15 L/min. 开始运行后, 每 12 h 取上层出水测定各项指标. 为使所模拟的修复过程、机理及影响条件与自然条件相符合, 实验整个过程置于室外. 实验用水取自黑龙江省太阳岛富营养化景观湖(45°45'N, 126°38'E), 水质指标见表 1.

表 1 进水水质指标  
Table 1 Water quality of inflow

| 项目     | $\rho_{\text{NH}_4^+-\text{N}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$ | $\rho_{\text{TN}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$ | $\rho_{\text{TP}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$ | pH       |
|--------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------|
| 范围     | 3.608~4.428                                                   | 4.964~7.101                                      | 0.082~0.219                                      | 8.5~9.08 |
| 平均值    | 3.939                                                         | 5.908                                            | 0.169                                            | 8.87     |
| 景观用水标准 | 0.5                                                           | —                                                | 0.02                                             | 6.5~8.5  |

## 1.3 监测项目及分析方法

$\text{NH}_4^+-\text{N}$  测定采用纳氏试剂分光光度法; TN 测定应用总氮分析仪; TOC-VCPN 测定应用有机碳分析仪; TP 测定应用 ICP-OES 分析仪进行.

# 2 结果与分析

## 2.1 循环速率

系统 N 的去除一部分来源于基质的吸附作用, 一部分源于系统内功能菌群的生理生化活动. 氮从化合态到气态的转化去除主要通过硝化-反硝化作用<sup>[8]</sup>. 如图 2(a)所示,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除在经生态床系统即时净化后, 出水浓度无明显差异, 当循环速率逐渐提高,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除率随之提高, 这是由于系统溶解氧的提高促进了硝化菌群对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  硝化作用. 当循环速率加快, 系统内硝化强度显著提高, 大量氧的融入增强了系统内硝化菌群的活动能力. 如图 2(b)所示, 经生态床的第 1 循环的净化, TN 的浓度显著降低, 且与  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度变化曲线相似, 同时说明无机氮为氮污染物的主要形态.

基质本身存在的孔径和腔道形成了床体内的氧梯度, 而当系统溶解氧提高时, 外部好氧菌群的活动增强, 同时保留了孔隙内部分厌氧及低氧环境, 厌氧反硝化菌群及兼氧菌群的活动没有被外部的高浓度氧破坏, 且由循环工艺带来的溶解氧改变使得系统内的氧梯度形成过程渐变, 生物相有了缓慢适应和驯化的过程, 不会因为氧浓度的突然增加而失去本身的生物活性.

在动态循环条件下, 总磷的去除率由原来的 1.6% 提高到 46.54%, 如图 2(c)所示. 试验采用的炉渣

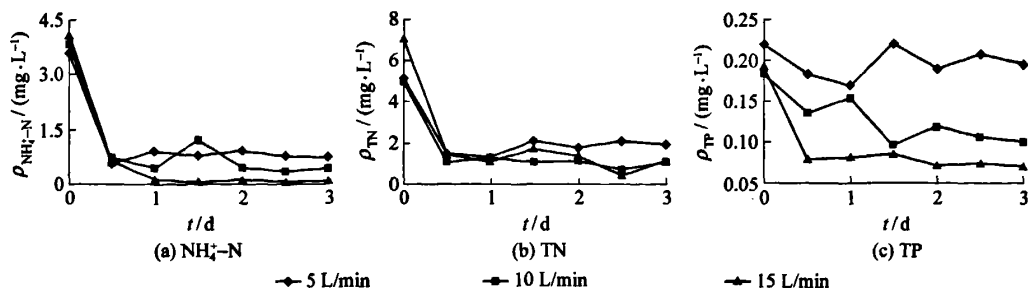


图 2 不同循环速率下各指标的变化

Fig. 2 Change of each item in different cycle rate

最大吸附量为 2.97 mg/g. 试验原水中总磷的质量浓度为 0.155~0.204 mg/L,在此基础上继续降低磷的质量浓度并不容易.

## 2.2 低温环境的影响

功能微生物的转化活动受到温度的严重影响. 水温由 25 ℃ 下降至 0 ℃ 过程中,基质与系统生物与水质变化都将产生影响.

图 3(a)表明,当温度由 15~25 ℃ 下降至 0 ℃~5 ℃ 时, $\text{NH}_4^+$ -N 即时去除率明显降低,而 24 h 和 48 h 去除率几乎无变化. 沸石吸附是  $\text{NH}_4^+$ -N 去除的主要途径,在短时间内即可完成. 沸石对铵离子的吸附属于物理吸附和离子交换过程. 当污染水充满整个床体,而外部环境明显减低时,沸石内部孔径的微环境影响较小,此时交换速率取决于内部扩散,包括离子的选择性、相互作用及孔径等因素. 因此,即时去除率的降低主要源于颗粒外部扩散能力的降低.

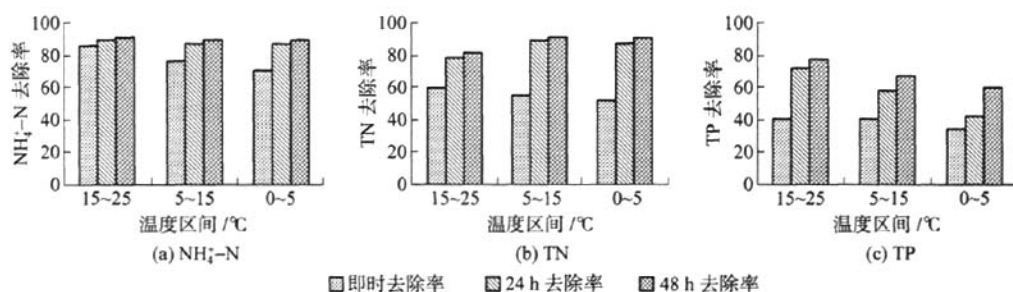


图3 不同温度下各指标去除过程

Fig.3 Removal of each item in different temperature

图 3(b)表明,当温度下降时,TN 即时去除率降幅较小,而 24 h 及 48 h 去除率均有所升高. 在系统污染水循环过程中,环境温度的降低导致水体本身大部分功能菌群的死亡,包括固氮菌,在与外界环境接触时,这部分菌群活动能力降低甚至消失,对氮的合成量大大减小,即是后续进水 TN 浓度的降低导致了去除率的升高. 同时说明景观水体中相当部分固氮菌将空气中 N 转换合成,无外援污染输入的情况下,成为水体 TN 浓度高的原因.

图 3(c)表明,TP 的 24 h 和 48 h 去除率在温度下降过程中明显降低,即时出水的去除率无明显变化. 由于 TP 的去除主要靠下层煤渣的吸附交换,过程缓慢,与基质中  $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  发生的化学反应去除  $\text{PO}_4^{3-}$  属缓慢过程<sup>[9]</sup>,且受基质自身组成和理化性质影响<sup>[10-11]</sup>. 温度降低,P 的释放活性降低,与矿物质中  $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  结合的机率随之降低.

## 3 结论

1) 提高循环速率促进了氮的转化和去除,加快了  $\text{NH}_4^+$ -N 的硝化作用,使其去除率提高,TN 的去除率也随循环速率加快而提高. 使得硝化作用更迅速和彻底,补充了氮去除的好氧反硝化途径.

2) 温度下降过程中, $\text{NH}_4^+$ -N 即时去除率下降,但动态运行 24 h 及 48 h 的去除率无明显变化,温度降低所导致基质吸附交换量的减少可通过延长接触时间来补充;TP 的 24 h 及 48 h 去除率在温度下降过程中明显降低,即温度是氨氮和总磷去除的主要影响因素.

### 参考文献:

[1] 刘书宇,马放. 优势菌群在复合生态床修复景观水体中的强化能力研究[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1204-1208.

LIU Shu-yu, MA Fang. Intensification copubility of dominant consortium on landscaping water remediation by compound ecological filter[J]. Environmental Science, 2007, 28(6): 1204-1208. (in Chinese)

- [2] BERENDSE F. Organic matter accumulation and nitrogen mineralization during secondary succession in heath land eco systems[J]. *Journal of Ecology*, 1990, 78(2): 413-427.
- [3] HOEWYK D V, GROFFMAN P M, ERIK K, et al. Soil nitrogen dynamics in organic and mineral soil calcareous wetlands in eastern New York[J]. *Soil Science society of America Journal*, 2000, 64(6): 2168-2173.
- [4] CHEN R, TWILLEY R R. A simulation model of organic matter and nutrient accumulation in mangrove wetland soils[J]. *Biogeochemistry*, 1999b, 44(1): 93-118.
- [5] WILSON D J, JEFFERIES R L. Nitrogen mineralization, plant growth and goose herbivory in an Arctic coastal eco system [J]. *Journal of Ecology*, 1996, 84(6): 841-851.
- [6] 袁东海, 景丽洁, 高士祥. 几种人工湿地基质净化磷素污染性能的分析[J]. *环境科学*, 2005, 26(1): 51-55.  
YUAN Dong-hai, JING Li-jie, GAO Shi-xiang. Analysis on the removal efficiency of phosphorus in some substrates used in constructed wetland systems[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(1): 51-55. (in Chinese)
- [7] JOHNSTON C A. Sediment and nutrient retention by freshwater wetlands: effects on surface water quality[J]. *Critical Reviews in Environmental Control*, 1991, 21(5,6): 491-565.
- [8] HALEEM D A E, VON W F, MOTER A, et al. Phylogenetic analysis of rhizosphere associated  $\beta_2$  subclass proteo bacterial ammonia oxidizers in a municipal wastewater treatment plant based on hizeoremediation technology[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2000, 31(4): 34-38.
- [9] DONALD W, KIRK CHARLES Q, JIA JINYING YAN, et al. Torrenueva, wastewater remediation using coal ash[J]. *Mater Cycles Waste Manage*, 2003, 5(1): 5-8.
- [10] ARIAS C A, BUBBA M D, BRIX H. Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds[J]. *Water research*, 2001, 35(5): 1159-1168.
- [11] BUBBA M D, ARIAS C A, BRIX H. Phosphorus adsorption maximum of sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds as measured by the Langmuir isotherm[J]. *Water Research*, 2003, 37(14): 3390-3400.

## Effect of Recycling Rate and Low Temperature on Remedying Northern Landscaping Water by Ecological Filter

LIU Shu-yu<sup>1,2</sup>, LIU Yi-long<sup>3</sup>, WU Ming-hong<sup>1</sup>, MA Fang<sup>2</sup>, ZHANG Jie<sup>2</sup>, QI Zhi-yong<sup>4</sup>

(1. School of Environment and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 201800, China;

2. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

3. School of Water Conservation and Architecture, Northeast Agriculture University, Harbin, 150030, China;

4. Harbin Environmental Engineering Assessment Centre, Harbin 150076, China)

**Abstract:** Natural zeolite and coal cinder were chosen as main compound of the substrate layered ecological bed instead of traditional filling to bio-remedy the static lake water in Northern China, and its running mode was upward combining with downwards flow. Dynamic experiments were carried to study the effect of main factors on contamination removal rate by zeolite ecological filter. It showed that Removal ratios of  $\text{NH}_4^+$ -N and TN were promoted with recycling rate increase. The increase of recycling rate made the nitrification more rapidly and completely, and the transition approach of nitrogen was shortened. And the aerobic denitrification was added in the nitrogen removal process. when the temperature declined, the instant removal rate of  $\text{NH}_4^+$ -N fell, but the removal rate of remained when it operated for 24 hours and 48 hours respectively. It means that rest time played an important role in  $\text{NH}_4^+$ -N removal; removal rates of TP after 24 h and 48 h decreased when temperature declined evidently, and it was from 72% and 77.4% in 15~25 °C to 42.4% and 60.2% in 0~5 °C respectively. Environment temperature was the important factor for TP removal.

**Key words:** recycling rate; ecological filter; landscaping water; low temperature

(责任编辑 张士瑛)