

生物慢滤系统对再生水中氮磷降解的试验研究

苏振铎¹, 徐志墙¹, 王东琦¹, 许光远^{1,2}, 李 婵¹

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 安徽国祯环保节能科技股份有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘 要: 利用生物慢滤系统中菌-藻共生的特点, 对用于景观补水的再生水中氮磷进行有效的去除, 可有效预防由于再生水中氮磷营养盐浓度较高而引发的景观水体富营养化问题。通过生物慢滤系统净化再生水的试验研究表明, 生物慢滤系统在保持上覆水深为 80cm、滤层厚度为 80cm、滤速为 0.1m/h 的条件下, 对水体中总氮、氨氮、硝酸盐氮、总磷和高锰酸盐指数平均去除率分别为 57.55%、50.16%、46.37%、66.32% 和 47.04%, 叶绿素 a 的去除率可达 95.75%; 经生物慢滤系统处理后的再生水在景观储存过程中藻类的生长缓慢, 叶绿素 a 含量始终维持在较低水平, 氮磷含量较低且趋于稳定。经生物慢滤池处理的再生水用于景观水体的补充水源, 可减少富营养化的发生频率。

关键词: 生物慢滤系统; 再生水; 氮磷营养盐; 氮磷降解

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)04-0069-04

Experiment on degradation of nitrogen and phosphorous in reclaimed water by biological slow filter

SU Zhenduo¹, XU Zhiqiang¹, WANG Dongqi¹, XU Guangyuan^{1,2}, LI Chan¹

(1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Anhui Guozhen Environmental Protection Science & Technology Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: Using bacteria - algal symbiosis characteristics of biological slow filtration system and the effective removal of nitrogen and phosphorus in reuse water for landscape replenishment can effectively prevent the problems of eutrophication of landscape water body result from the high nutrient concentration of nitrogen and phosphorus in water. The experimental of reclaimed water purification by biological slow filter system showed that when biological slow filter system keep the conditions of overlying water depth of 80cm, filter layer thickness of 80cm, filtration rate of 0.1m/h, the average removal rate of total nitrogen, ammonia nitrogen, nitrate nitrogen and potassium permanganate index in water is 57.55%, 50.16%, 46.37%, 66.32% and 47.04% respectively, the removal rate of chlorophyll a is up to 95.75%. After the reuse water is treated by biological slow filter system, the growth of algae is slow and the content of chlorophyll a maintains at a low level during the process of landscape storage, and the content of nitrogen and phosphorus is low and stabilizing. The reclaimed water which is treated by biological slow filter system can be used as the replenishment source of landscape water so as to reduce the frequency of eutrophication.

Key words: biological slow filter system; reclaimed water; nitrogen and phosphorous; degradation of nitrogen and phosphorous

城市污水经处理后再生利用于景观水体是缓解城市水资源供需矛盾、改善城市水环境质量的重要

手段,是实现有限水资源可持续利用的重要措施,同时可以改善生态环境。具有菌藻共生特点的生物慢

收稿日期: 2015-03-29; 修回日期: 2015-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409209); 陕西省水利科技计划项目(2013-09); 陕西省教育厅基金项目(12JK0648、14JK1546); 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地基金项目(2013ZZKT-7)

作者简介: 苏振铎(1988-), 男, 甘肃平凉人, 硕士研究生, 主要从事污水再生利用与水生态修复技术研究。

通讯作者: 徐志墙(1969-), 女, 重庆人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水生态修复与污水处理技术研究。

滤池(Biology Slow Filter,BSF)是最古老且十分有效的水处理技术,由于其水处理工艺拥有独特的生物净化功能,特别是优良的出水水质,工艺简单、技术要求低、经济可靠,维护方便,在饮用水领域受到重视^[1]。目前国外已有好多应用实例,如英国泰晤士水务局运行七套慢滤装置,总处理能力约250万m³/d^[2],生物慢滤在一些发展中国家也有一定的应用^[3],被视为最具发展潜力的水处理设施之一^[4]。Nakhla等^[5]、Malzer H J等^[6]、R Aronino等^[7]对生物慢滤池的脱氮过程,净化溶解性有机物、消除致病菌的作用机制进行了系统研究。国内利用生物慢滤对再生水进行深度处理的研究还处于初步阶段,对与生物慢滤技术相关的生物净化过程和污水中各类污染物的降解机理有待于深入研究。刘杰等^[8]从滤速、滤层厚度对慢滤池深度处理污水的影响及滤池启动方式等方面开展了相关研究,Xing Zheng等^[9]还开展了慢滤池作为污水深度处理中UF的预处理工艺降低溶解性生物聚合物类有机物的效果和影响因素的研究。

本文在以往研究的基础上,通过小试装置处理人工配制二级出水,开展了生物慢滤技术对污水中总氮、氨氮、硝酸盐氮、总磷、高锰酸盐指数等指标数

据监测并分析处理效果。

1 材料与方法

1.1 试验装置

根据课题组以前的试验研究结果,生物慢滤系统的最佳运行条件为保持上覆水深为80 cm、滤层厚度为80 cm、滤速为0.1 m/h,整个试验研究装置放在西安理工大学露天实验场。采用有机玻璃柱作为慢滤池的试验柱,内径100 cm、高180 cm,柱内滤料为石英砂和砾石。填料厚度600 mm,石英砂粒径在0.4~0.8 mm之间,且均匀系数K<2;承托层高度厚400 mm,分两层,上层为2.49~5.00 mm的粗砂,高度200 mm,下层由4~30 mm的砾石组成,高度200 mm。通过蠕动泵(型号:BT102S)给装置供水,为避免柱体受到光照的影响,用黑色塑料袋包裹滤柱。试验装置示意图见图1。

1.2 进水水质选择与配制

试验用原水采用葡萄糖、硝酸钾、氯化铵、磷酸二氢钾配制再生水,原水水质如表1所示(所配原水水质接近污水排放标准)。

1.3 试验方法

装置每天24 h连续进水运行,当系统出水稳定

后,将装置滤速控制在0.1 m/h,进水水温为20℃~25℃,试验时间30 d,3 d一个周期,每次定时九点取样1次。试验测定的项目有慢滤池进、出水中的氮、磷、高锰酸盐指数、叶绿素等指标。水质指标测定中总氮采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;氨氮采用纳氏试剂法;硝氮采用酚二磺酸光度法;总磷采用钼酸铵分光光度法。

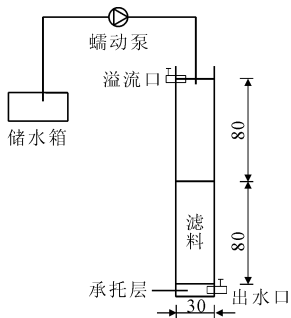


图1 试验装置示意图

表1 生物慢滤池进水水质 mg/L

水质指标	总氮	氨氮	总磷	高锰酸盐指数
配水水质	21~27	6~10	0.8~1.2	30~35

2 结果与讨论

2.1 氮的去除效果分析

总氮和氨氮是水体富营养化的两个重要指标,而水体中氮元素主要以有机氮和氨氮形式存在。氮的生物降解就是运用氮循环的原理,主要在硝化细菌和反硝化细菌的作用下,将有机氮和氨氮转化为氮气排放到外界环境中。生物慢滤池通过对氮素进行机械筛滤、生物吸附降解、沉淀、扩散、传递及静电吸附等物理化学和生物化学作用等多种方式联合处理^[10]。

生物慢滤工艺对总氮的去除效果如图2所示。

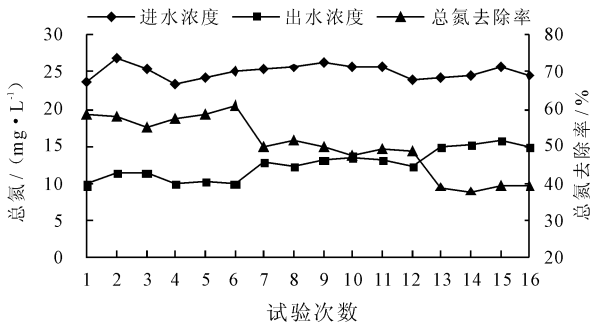


图2 生物慢滤工艺对总氮的去除效果

由图2可见,生物漫滤池对总氮有明显的降解效果。生物漫滤系统进水总氮质量浓度在21~27 mg/L时,出水中总氮含量平均值可降低到10~12 mg/L,符合《城市污水再生利用景观环境用水水质》(GB/T18921-2002)中娱乐性景观水体对总氮浓度(15 mg/L)的标准。生物慢滤池对总氮的平均去除率为57.55%,最大去除率可达63.26%。生物慢滤池中菌-藻共生系统对氮的去除起到了重要作用。首先是因为表层具有粘性的生物滤膜形成后,使生物慢滤池中滤料的孔隙率减小,表层滤膜截留水中大量的悬浮杂质,滤池中的滤料通过吸附和拦截的方式为微生物的生长繁殖提供了丰富的有机质等营养物质,硝化细菌和反硝化细菌大量繁殖。其次原因是生物慢滤池上层生长大量的藻类,藻类的光合作用产生的氧气形成了富氧环境,氧是微生物硝化作用过程中的电子受体,这样就提高了硝化反应的速率,促进氨氮转化成硝氮。生物慢滤工艺对氨氮的去除效果见图3。

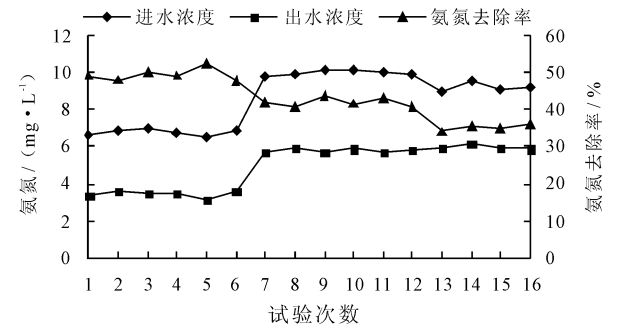


图3 生物慢滤系统对NH₄⁺-N的去除效果

由图3所示,生物慢滤池对氨氮有较好的净化效果,当生物慢滤池进水氨氮平均含量为6.38 mg/L时,出水平均浓度为3.60 mg/L,低于《城市污水再生利用景观环境用水水质》(GB/T18921-2002)中的氨氮浓度(5 mg/L)的限值。生物慢滤系统对氨氮的平均去除率为50.16%,相关研究表明,滤料表面存在着各种类型的微生物群体甚至微型动物,并形成了有机物-细菌-原生动物的食物链,NH₄⁺-N的去除依靠微生物的氧化作用;同时滤料表层滤料为微生物的生存提供良好的粘附条件,生物膜中菌藻共生系统依接触絮凝和微生物自身生长消耗了水体中的氨氮。

由图4可以看出,当生物慢滤进水中硝酸盐氮平均浓度保持在3.86 mg/L左右,出水平均浓度可降低至2.02 mg/L,平均去除率为46.37%,生物慢滤池对硝酸盐氮的降解效果明显。滤料层中的生物

膜形成了稳定的反硝化微生物环境,而反硝化细菌大都是异养、兼性厌氧型细菌,反硝化杆菌可利用硝酸中的氧,氧化滤料表层的机物质而获得自身生命活动所需的能量;同时藻类可以通过直接吸收硝酸盐氮作为其生长必须的氮素,从而提高了硝酸盐氮的去除率。

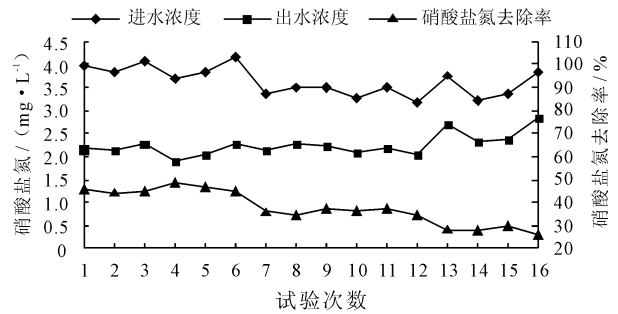


图4 生物慢滤工艺对硝酸盐氮的去除效果

2.2 磷的去除效果分析

生物慢滤系统进水总磷浓度在0.82~1.20 mg/L时,对磷的去除效果如图5所示,去除率明显,出水平均浓度可降至0.33 mg/L,其平均去除率为66.32%。处理效果达到(GB/T18921-2002)中对总磷浓度(0.5 mg/L)的标准,根据Sakamoto等^[11]人研究表明,当m(TN)/m(TP)>17时磷是藻类生长的限制性因素,在生物慢滤菌藻共生系统中,磷主要通过上覆层水体中藻类自身生长的营养物质而利用。同时磷是微生物生长的必须元素,能够很好的满足反硝化除磷菌的生存条件,加快反硝化除磷过程的进行。且砂滤料的比表面积较大,容易产生吸附拦截作用而使悬浮态磷得以去除。

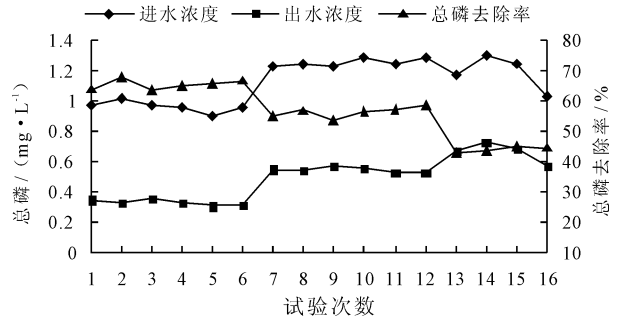


图5 生物慢滤工艺对TP的去除效果

2.3 高锰酸盐指数的降解效果

生物慢滤工艺对COD_{Mn}的降解效果见图6。生物慢滤系统对COD_{Mn}有明显的去除效果,在进水的COD_{Mn}平均浓度为31.42mg/L时,出水COD_{Mn}平均值为16.64mg/L,生物慢滤系统对COD_{Mn}的平均去除率为47.04%,接近《地表水环境质量标准》V类

水质中高锰酸盐指数的限制(15mg/L),景观环境用水水质标准对 COD_{Mn} 没有明确的规定, COD 主要由颗粒性 COD 和溶解性 COD 组成,其中颗粒性 COD 降解主要靠粒状滤料(石英砂)的机械截留和网捕作用;溶解性 COD 依靠生物慢滤池表层生物膜去除,生物膜的比表面积大,吸附有机质能力强,藻菌共生系统中微生物的分泌物如多聚糖等粘性物质有化学絮凝和生物氧化作用,使有机物被填料表层上的生物膜吸附和降解。

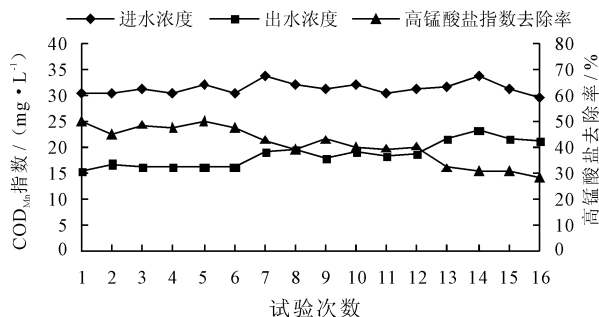


图6 生物慢滤工艺对 COD_{Mn} 指数的去除效果

2.4 叶绿素的去除效果分析

图7为生物慢滤系统对叶绿素去除效果,当系统进水中叶绿素含量在 $51.36 \sim 60.76 \text{ mg/m}^3$ 时,经处理后出水平均浓度降至 2.19 mg/m^3 ,叶绿素去除率可达 95.75%,OEDC 规定景观水体发生水化时叶绿素 a 浓度限值(42.6 mg/m^3),生物慢滤工艺处理后的出水远远低于 OEDC 标准体现了生物慢滤工艺对去除叶绿素的优越性。叶绿素含量的高低和藻类密度有紧密的相关性,叶绿素是各种藻类细胞的重要组成部分,因此叶绿素含量在一定程度上反映了水体中藻类的数量。

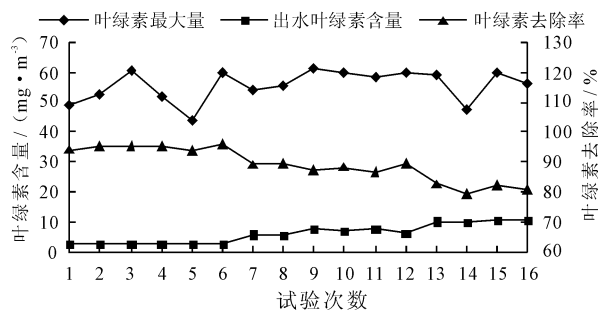


图7 生物慢滤工艺对叶绿素 a 的去除效果

2.5 景观储存过程中水质的变化分析

叶绿素是表征藻类和浮游植物生长的最常用的指标之一,所有的藻类均含有叶绿素 a, 叶绿素 a 含量的高低与水体中藻类的数量呈正相关性。从防止水体富营养化的角度考虑,考察采用生物慢滤工

艺处理后的出水在景观回用和储存过程中水质的稳定性,进行了模拟储存实验,从图8可以看出,储存前期叶绿素 a 浓度呈上升趋势,储存 15 d 以后叶绿素 a 浓度逐渐降低,30 d 后水质基本处于稳定状态,低于国际对水体富营养化叶绿素 a (10 ug/L) 的规定标准(自然条件下再生水的浓缩系数取 0.5,保持在原水体积下,叶绿素 a 的浓度为 9.15 ug/L),可见采用生物慢滤工艺处理再生水后回用于景观水体可以降低水体富营养化的风险。

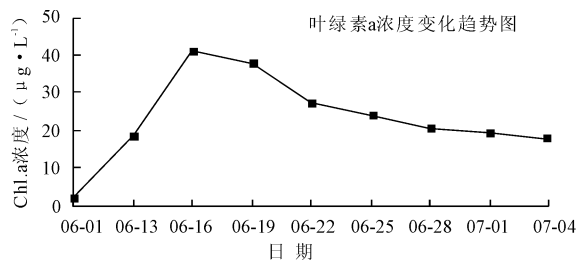


图8 景观储存过程中叶绿素 a 浓度的变化图

3 结 语

(1)生物慢滤池在最佳运行条件下,对再生水中总氮、氨氮、硝酸盐氮、总磷和高锰酸盐指数去除率分别为 57.55%、50.16%、46.37%、66.32% 和 47.04%。叶绿素的平均截留率达 95.75%,出水满足《城市污水再生利用 景观环境用水水质》标准要求。

(2)生物慢滤池对氮磷营养盐的去除机理分析,主要是依靠滤料表面藻类对污染物质的吸收、慢滤池表面形成的生物膜的吸附截留与微生物的捕食及生物化学作用降解以及砂滤料对悬浮态磷的过滤截留等的共同作用达到改善水质的效果。

(3)经过生物慢滤池处理的再生水在存储过程中,藻类的生长繁殖较差,叶绿素 a 含量始终保持较低状态;其出水水质稳定,不易恶化,可做景观用水的补充水源。

(4)再生水景观储存过程中,叶绿素 a, TN、TP, 经生物慢滤池处理的再生水用于景观环境中,可减少富营养化的发生。

参考文献:

- [1] Dorea C C, Clarke B A. Chemically enhanced gravel pre-filtration for slow sand filters: advantages and pitfalls[J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2006, 6 (1):121-128.

(下转第 79 页)

- ling, 2010, 32(1-2): 86-104.
- [4] Zhang Mingliang, Wu Weiming, Lin Lihua, et al. Coupling of wave and current numerical model with unstructured quadtree grid for nearshore coastal waters [J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(2): 568-580.
- [5] 包芸. 人类重大工程改变河口潮波传播方向引发的灾害与恢复 [J]. 中国科学(物理学、力学、天文学), 2014, 44(5): 531-538.
- [6] Kuang Cuiping, Chen Siyu, Zhang Yu, et al. A two-dimensional morphological model based on a next generation circulation solver I: Formulation and validation [J]. Coastal Engineering, 2012, 59(1): 1-13.
- [7] Wu Weiming, Sánchez A, Zhang Mingliang. An implicit 2-D shallow water flow model on unstructured quadtree rectangular mesh [J]. Journal of Coastal Research, 2011, 59(S1): 15-26.
- [8] 张明亮, Wu W M. 基于四叉树网格近海海域波浪、潮流相互作用的数学模型 [J]. 中国科学(物理学、力学、天文学), 2012, 42(3): 294-309.
- [9] Daoud A H, Rakha K A, Abul-azm A G. A two-dimensional finite volume hydrodynamic model for coastal areas: Model development and validation [J]. Ocean Engineering, 2008, 35(1): 150-164.
- [10] 万由鹏, 毛献忠, 朱佳. 深圳湾污染物平均输运时间数值研究 [J]. 水力发电学报, 2014, 33(4): 149-155.
- [11] 韩松林, 梁书秀, 孙昭晨. 狭长海湾象山港三维污染物运移特征的数值模拟 [J]. 海洋通报, 2014, 33(5): 511-518.
- [12] Chao Xiaobo, Shankar N J, Cheong H F. Two-and three-dimensional oil spill model for coastal waters [J]. Ocean Engineering, 2001, 28(12): 1557-1573.
- [13] Patankar S V. Numerical heat transfer and fluid flow [M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [14] Saad Y. ILUT: a dual threshold incomplete LU factorization [J]. Numerical Linear Algebra with Applications, 1994, 1(4): 387-402.
- [15] Tkalic P, Huda M D K, Gin K Y H. A multiphase oil spill model [J]. Journal of Hydraulic Research, 2003, 41(2): 115-125.

~~~~~  
(上接第72页)

- [2] American Water Works Association, American Society of Civil Engineers. Water treatment plant design [M]. New York: McGraw Hill, 2005.
- [3] Jenkins M W, Tiwari S K, Darby J. Bacterial, viral and turbidity removal by intermittent slow sand filtration for household use in developing countries: Experimental investigation and modeling [J]. Water research, 2011, 45(18): 6227-6239.
- [4] Mark Sobsey, Christine E Stauber, Lisa Casanova, et al. Point of use household drinking water filtration: a practical, effective solution for providing sustained access to safe drinking water in the developing world [J]. Environmental Science and Technology, 2008, 42(12): 4261-4267.
- [5] Nakhla G, Farooq S. Simultaneous nitrification-denitrification in slow sand filters [J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 96(2-3): 291-303.
- [6] Malzer H J, Gimbel R. Protection layers for the extension of slow sand filter running times in wastewater reuse [J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2006, 6(1): 105-111.
- [7] Aronino R, Dlugy C, Arkhangelsky E, et al. Removal of viruses from surface water and secondary effluents by sand filtration [J]. Water Research, 2009, 43(1): 87-96.
- [8] 刘杰, 曹相生, 孟雪征. 水温对慢滤池深度处理污水的性能影响 [J]. 环境工程学报, 2010, 4(11): 2437-2440.
- [9] Xing Zheng, Ernst M, Jekel M. Pilot-scale investigation on the removal of organic foulants in secondary effluent by slow sand filtration prior to ultrafiltration [J]. Water Research, 2010, 44(10): 3203-3213.
- [10] 王永胜, 李培红. 慢滤水处理技术 [J]. 中国农村水利水电, 2000(1): 57-58.
- [11] Sakamoto M. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth [J]. Archiv Fur Hydrobiologie, 1966, 61: 1-28.