

生物慢滤池用于污水深度处理的实验研究

许光远^{1,2}, 徐志嫻², 苏振铎², 党航博², 王东琦²

(1. 安徽国祯环保节能科技股份有限公司, 安徽 合肥 230088;

2. 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)

摘 要: 利用生物慢滤池对人工模拟污水和西安市某污水处理厂的二级出水进行了深度净化处理实验, 通过分析进出水中氮、磷含量和高锰酸盐指数及上层水和出水中的叶绿素 a 含量等指标, 考察了生物慢滤池的净化效果。结果表明: 生物慢滤池对人工模拟污水的处理效果较好, 总氮、氨氮、总磷和高锰酸盐指数的去除率分别为 66.4%、40.2%、66.4% 和 73.3%; 深度净化污水厂二级出水, 总氮、氨氮、总磷和高锰酸盐指数的去除率分别为 35.1%、21.0%、30.2% 和 12.6%, 去除率略低于人工模拟实验; 生物慢滤池对叶绿素 a 有很好的截留效果, 去除率分别为 93.4% 和 66.4%; 生物慢滤池处理后的再生水水质达到《城市污水再生利用景观环境用水水质》要求, 可回用于城市景观水体, 作为城市景观水体的补充水源, 避免水体富营养化的发生。

关键词: 生物慢滤池; 深度处理; 再生水回用; 景观水体

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)04-0186-04

Experiment on advanced purification of sewage with biological slow filter pool

XU Guangyuan^{1,2}, XU Zhiqiang², SU Zhenduo², DANG Hangbo², WANG Dongqi²

(1. Anhui Guozhen Environmental Protection Science & Technology Co., Ltd., Hefei 230088, China; 2. State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Northwest Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The paper carried out advanced purification experiment on both simulated wastewater and the secondary effluent of a wastewater treatment plant in Xi'an by applying biological slow filter pool. The purification effect was evaluated through the analysis of nitrogen, phosphorus contents and potassium permanganate indices in the influent and effluent as well as chlorophyll a content in the overlying water and effluent. The results suggested that biological slow filter showed better treatment performance on simulated sewage and the removal rate of total nitrogen, ammonia nitrogen, total phosphorus and potassium permanganate index is 66.4%, 40.2%, 66.4% and 73.3% respectively; the removal rate of the secondary effluent of a wastewater treatment plant to which is 35.1%, 21.0%, 30.2% and 12.6%, the removal rate is lower than that of manual simulated test. Moreover, biological slow filter has good retention effect to chlorophyll a, the removal rate is 93.4% and 66.4% respectively. The quality of the reclaimed water treated by the biological slow filter reaches the requirements of water quality standard for scenic environment use. Therefore, the reclaimed water can be re-used as urban landscape water body and prevent the occurrence of eutrophication.

Key words: biological slow filter; advanced purification; reclaimed water reuse; landscape water

污水的再生利用对于解决水资源短缺, 缓解水环境污染蕴藏着巨大的潜力, 而再生水回用于景观环境, 是完成水的自然循环的最佳途径。但再生水用于景观水体的补水过程中存在氮磷浓度高, 易引发水体富营养化。因此, 在二级生化基础上采取有

效的深度脱氮除磷工艺技术措施, 进一步控制再生水中氮磷含量, 保障景观水体水质生态安全, 已成为再生水回用于景观水体的难点和热点问题^[1]。

具有藻菌共生特点的生物慢滤池 (Biology Slow Filter, BSF) 具有处理效果好且造价低廉的优点, 被

收稿日期: 2014-01-14; 修回日期: 2014-04-16

基金项目: 陕西省水利科技计划项目 (2013-09); 陕西省教育厅基金项目 (12JK0648)

作者简介: 许光远 (1986-), 男, 安徽合肥人, 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: 徐志嫻 (1969-), 女, 重庆人, 博士, 硕士生导师, 副教授, 主要从事水生态修复与污水处理技术研究。

视为最具发展潜力的水处理设施之一。目前,英国泰晤士水务局运行着七套慢滤装置,一些发展中国家也有应用^[2]。近年,Aronino^[3]等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。国内研究主要集中在农村饮用水方面,如厦门天竺山森林公园^[4]利用生物慢滤池处理地表水或雨水后作为饮用水源,甘肃农业大学利用生物慢滤池处理地窖水^[5]等。目前,利用生物慢滤池对污水进行深度处理的研究较少,相关生物净化过程及机理有待于深入研究。刘杰、曹相生等^[6-7]从滤速、滤层厚度对慢滤池深度处理污水的影响等方面开展了相关研究,主要研究慢滤池对 COD、色度和浊度指标的去除效果。刘来胜等^[8]分析滤床中不同深度滤料中的微生物,并通过细菌总数、SS、POC 3 个指标来研究出水水质。李丽等^[9]利用生物慢滤池净化昆明理工大学用于绿化中的水。考虑到废水中的水质多样性,实验原水选取人工模拟废水和典型实际废水。本文以人工模拟的污水和西安市某污水处理厂的二级出水作为生物慢滤池小试装置的进水,对进出水中氮、磷含量和高锰酸盐指数及上层水和出水中叶绿素 a 等含量进行了测定,考察其处理效果,为生物慢滤池技术在污水处理和回用方面的应用提供技术经验和参考资料。

1 材料与方法

1.1 实验装置

本实验于 2013 年 8 月在西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室露天实验场进行。实验装置如图 1 所示。

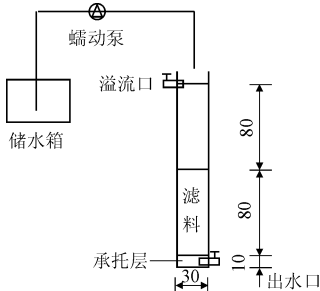


图 1 实验装置示意图

采用 1 个内径为 300 mm 的有机玻璃柱作为慢滤池的实验柱,柱高 180 cm,柱内滤料为石英砂和砾石。石英砂粒径在 0.4 ~0.8 mm 之间,填料高度 80 cm;承托层厚 10 cm,由 1 ~30 mm 的砾石组成;设置阀门做溢流口使上层水深为 80 cm。通过蠕动泵给装置供水。用黑色塑料袋包裹滤柱以避免慢滤

柱受到光合作用的影响。

1.2 进水水质选择与配制

实验原水选用西安市某污水处理厂二级出水和人工模拟污水,其中人工模拟污水采用葡萄糖、硝酸钾、氯化铵、磷酸二氢钾配制,水质按照《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918 - 2002)中的一级 B 标准最高允许排放浓度(日均值)进行配制,实验期间,生物慢滤池进出水水质情况见表 1。

表 1 生物慢滤池进水水质				mg/L
水质指标	总氮	氨氮	总磷	COD _{Mn}
二级出水水质	15 ± 2.5	10 ± 2.0	0.11 ± 0.01	12.9 ± 0.7
配水水质	18 ± 1.5	8 ± 1.5	1 ± 0.15	18 ± 1.5

1.3 实验方法

用人工配制的污水来培养驯化自然生长的藻类,两组实验各投加 100 g 鲜重的藻类,通过显微镜观察辨别藻种主要为小球藻、浮球藻,还有少量的颤藻、栅藻、衣藻和纺锤藻等。

投加藻类后每天 24 h 连续运行,蠕动泵转速为 50 ± 1 转/min,进水流量为 56.6 ± 2.83 mL/min,通过出水口阀门调节出水流量,保持和进水一致,水力停留时间为 16.6 h 通过溢流口排出过量的藻。实验进水温度 25 ± 3℃。每天对慢滤池进出水及慢滤池中的总氮(HJ636 - 2012)、总磷(GB11893 - 89)、氨氮(HJ535 - 2009)、高锰酸盐指数(GB11892 - 89)、叶绿素 a(利用哈希多参数水质分析仪测定)等指标进行取样分析,运行 6 d 后,出水基本趋于稳定,继续监测 7 d。

2 结果与讨论

2.1 叶绿素截留效果分析

生物慢滤池具有藻菌共生特点,而且藻类在此净化过程中具有重要作用^[10],所以监测藻类含量可以间接表现出生物慢滤池中污染物的生化效果和净化能力。叶绿素 a 是各种藻类的重要成分,其含量高低与水体中藻类的数量及发育情况密切相关,因此叶绿素 a 含量在一定程度上反映了水体中藻类的数量。实验稳定阶段,玻璃内壁附着一层藻类和微生物组成的生物膜,同时,上层水中存在一定悬浮态的藻,实验监测值主要是悬浮态藻中的叶绿素 a 含量。

由图 2 可以看出两组实验中上层水中的叶绿素 a 含量都呈现出明显的增加趋势,深度处理城市污水处理厂二级出水实验(深度处理实验)增加比较缓慢,而处理人工模拟污水实验(模拟实验)增加较快。上

层水中叶绿素 a 含量在实验周期中逐渐增大,而出水叶绿素含量稳定于较低水平,深度处理实验出水稳定于 $3.20 \sim 3.92 \mu\text{g/L}$,模拟实验为 $1.67 \sim 2.85 \mu\text{g/L}$,平均截留率分别为 66.4% 和 93.4%,说明生物慢滤池中的填料对藻类具有很好的截留效果。

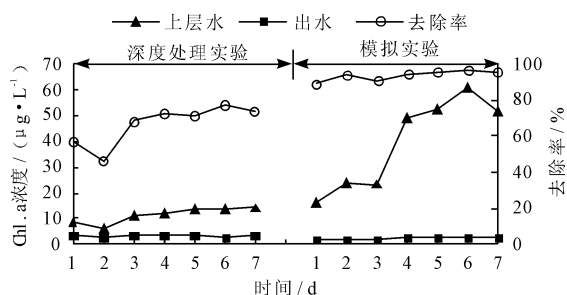


图2 生物慢滤池对叶绿素的去除效果

根据 Liebig 最小值定律,藻类的生长是由水体中含量最少的营养盐控制。藻类体内碳、氮、磷原子比约为 106: 16: 1,当氮磷浓度比即 $\rho_{\text{TN}}/\rho_{\text{TP}} > 16$ 时,磷是藻类生长的限制性因素,由表 1 可知,在实验过程中,深度处理实验进水中磷的含量处于 0.1 mg/L 左右,所以深度处理实验的生物慢滤池滤料表面藻类处于饥饿状态,导致藻类生长不是很旺盛,而模拟实验中氮磷比接近 16,所以藻类生长状况良好,叶绿素 a 增加较快。

2.2 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。《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T18921-2002)与《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)中总氮和氨氮浓度指标要求存在一定差异。生物慢滤池中有机氮的消耗主要来自两方面,填料对大颗粒有机物的截留作用和填料表面的藻菌共生系统的生物膜硝化作用;对无机氮的去除主要是藻菌共生系统的同化吸收。

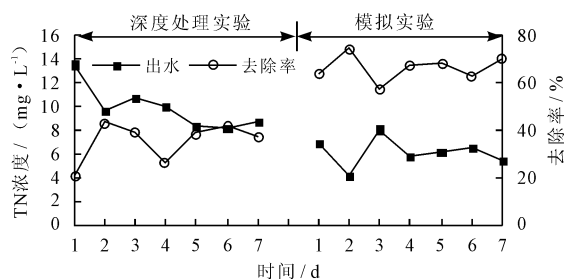


图3 生物慢滤池对总氮的去除效果

如图 3 所示,两组实验中生物慢滤池对总氮都有较好的净化效果,深度处理实验中出水的总氮含量为 $8.09 \sim 13.57 \text{ mg/L}$,总氮去除率为 20.4% ~ 43.1%,模拟实验中总氮去除率为 57.5% ~ 70.0%,而在同样

进水条件的传统生物脱氮工艺深度中,氮的去除率仅为 20% ~ 40%。结果表明,深度处理实验比模拟实验中氮去除率低,两组实验出水总氮均符合景观环境用水水质标准($\text{TN} \leq 15 \text{ mg/L}$)。

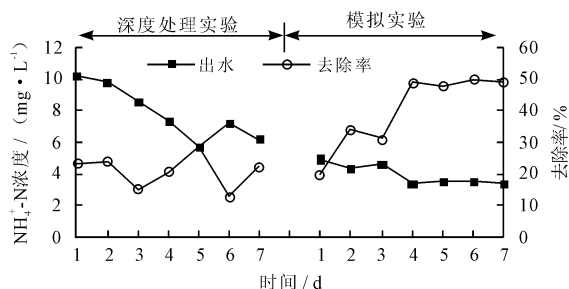


图4 生物慢滤池对氨氮的去除效果

如图 4 所示,两组实验中生物慢滤池对氨氮都有较好的净化效果,深度处理实验中氨氮的去除率在 13.1% ~ 28.6%,出水最低含量为 5.78 mg/L ,接近《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T18921-2002)中景观环境用水水质标准要求(氨氮 $\leq 5 \text{ mg/L}$)。模拟实验中氨氮的去除率在 20.0% ~ 50.1%,出水氨氮含量 $\leq 5 \text{ mg/L}$,符合景观环境用水水质标准要求。结果表明,深度处理同模拟实验相比,氨氮去除率较低。

由图 3、4 可知,两组实验中出水总氮和氨氮的浓度逐渐下降并达到平衡;图 2 中两组实验上层水中叶绿素 a 含量与总氮和氨氮浓度的变化具有一定的相关关系。两组实验的总氮和氨氮出水结果表明,模拟实验的处理效果要比深度处理实验好,模拟实验上层水中藻类含量也明显高于深度处理实验,这验证了藻类的生长消耗了水中的总氮和氨氮^[11-12]。藻类光合作用可以产生良好的有氧环境,进而提高硝化细菌及亚硝化细菌的生物活性,促进氨氮氧化成硝态氮。此外,砂滤部分使得滤池底部形成缺氧环境,促使反硝化细菌将硝态氮还原成 N_2 或 N_2O ^[13]。

2.3 磷的去除效果分析

磷是湖泊富营养化的主要限制因素,生物慢滤池对磷的去除主要来自藻类和微生物对磷的吸收和降解作用与填料对悬浮态磷的过滤截留作用,两组实验对磷的去除效果见图 5。

如图 5 所示,深度处理实验对总磷的去除率能达到 26.3% ~ 33.7%,平均去除率为 30.2%,而传统生物除磷工艺中磷的去除率为 5% ~ 20%。由于进水中磷的含量较低,可达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)Ⅲ类水质标准,所以出水磷浓

度可达到Ⅱ类水质标准要求,使水质提升一个水平;模拟实验对总磷的平均去除率为 66.4%。两组实验中出水总磷浓度均小于《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T18921-2002)中对总磷浓度(0.5 mg/L)的限值。深度处理实验的出水中总磷含量比模拟实验小,主要是由于其进水的磷含量偏低,但深度处理实验的去除率不如模拟实验高。

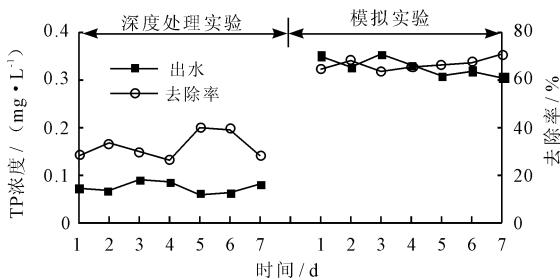


图 5 生物慢滤池对总磷的去除效果

2.4 高锰酸盐指数的去除效果分析

COD 可以分为溶解性 COD 和颗粒性 COD。生物慢滤池中 COD_{Mn}的消耗主要来自两方面,填料对大颗粒有机物(主要是颗粒性 COD)的截留和滤料表面的藻菌共生系统的生物膜氧化作用(溶解性 COD)。由图 6 可知,深度处理实验对 COD_{Mn}去除率在 6.4%~29.1%,平均去除率为 12.6%。出水 COD_{Mn}的最低含量 9.66 mg/L,达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)Ⅳ类水质标准,使水质提升一个水平;而模拟实验对 COD_{Mn}的平均去除率在 73.3%,出水 COD_{Mn}的含量均低于Ⅳ类标准。慢滤池形成一个藻菌共生系统,在光照的情况下,细菌和藻类在滤层表面繁殖,形成一个滤膜,通过这个滤膜对有机物进行氧化降解和分解,从而去除部分 COD_{Mn}。

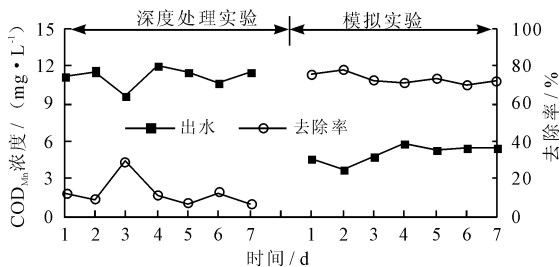


图 6 生物慢滤池对 COD_{Mn}的去除效果

模拟实验的 COD_{Mn}去除率比深度处理实验高,这是因为污水处理厂二级出水中溶解性 COD 高,填料截留效果不理想,且深度处理实验中的氮磷比限制藻类和微生物的生长,导致生长能力不足,数量少,生物慢滤池去除效果变弱。

3 结 语

(1)传统生物脱氮工艺的氮的去除率为 20%~40%,磷的去除率为 5%~20%。而生物慢滤池对污水厂二级出水中总氮、氨氮、总磷和高锰酸盐指数的去除率分别为 35.1%、21.0%、30.2%和 12.6%;对人工模拟污水中总氮、氨氮、总磷和高锰酸盐指数的去除率分别为 66.4%、40.2%、66.4%和 73.3%。生物慢滤池处理后的再生水水质达到《城市污水再生利用 景观环境用水水质》要求,可回用于城市景观水体。

(2)生物慢滤池对人工模拟污水的处理效果优于二级出水深度净化效果。主要是因为藻类在生物慢滤池中起到关键作用,而进水中磷含量的不同使磷成为藻类生长的限制因素,从而最终影响到生物慢滤池的净化效果。

(3)生物慢滤池中的填料对叶绿素有很好的截留效果,两组实验中叶绿素的平均截留率分别为 66.4%和 93.4%,出水中的叶绿素 a 含量稳定且低于 10μg/L 的富营养化限值,回用于景观水体可避免富营养化的发生。

(4)生物慢滤池具有一次性投资少,运行简单,水处理成本和维护成本较低廉等优点,但占地面积较大,较适用于土地资源丰富、经济和管理水平相对较低的广大小集镇和农村地区。

参考文献:

[1] 胡洪营,吴乾元,黄晶晶,等. 城市污水再生利用安全保障体系与技术需求分析[J]. 中国建设信息(水工业市场),2010(8):8-12.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 钟启荣. 生物慢滤水处理技术在天竺山森林公园中的应用[J]. 福建建筑,2010(12):97-99.

[5] 李 鹏. 家用型生物慢滤装置在窖水处理中的应用研究 [D]. 兰州:甘肃农业大学,2012.

[6] 曹相生,刘杰,孟雪征,等. 滤层厚度对慢滤池深度处理污水的性能影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(3):566-569.

(3) 直剪慢剪试验主要表现为粘聚力的增长,内摩擦角影响不大。最大抗剪强度与相应的残余强度比素土提高了 75% 与 84%,抗变形能力也有所提高。

(4) 加筋率为 0.8%,棕榈尺寸为 6 mm × 12 mm 时,CBR 值增加的幅度最大,为素土的 1.91 倍。

(5) 无侧限抗压强度随加筋率与加筋尺寸呈现先增大后减小的趋势。加筋率为 0.8%,棕榈尺寸为 6 mm × 12 mm 的加筋土达到最大值,为素土的 1.73 倍,应变为素土的 3.01 倍,使土体的变形得以延迟。

参考文献:

- [1] 刘恩龙,沈珠江. 结构性土的强度准则[J]. 岩土工程学报,2006,28(10):1248-1252.
- [2] 中国建筑科学研究院地基研究所. GB505007-2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [3] 璩继立,蒯会勇. 盾构施工地面长期沉降的神经网络预测[J]. 上海地质,2004,25(3):42-46.
- [4] 中交第二公路落勘察设计院. JTG D30-2004 公路路基设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [5] 周学明,袁良英,蔡坚强,等. 上海地区软土分布特征及软土地基变形实例浅析[J]. 上海地质,2005(4):6-9+61.
- [6] 门福录. 上海粘土流变性质及地面沉降问题初步研究(一)[J]. 自然灾害学报,1999,8(3):117-126.
- [7] 余沛,柴寿喜,王晓燕,等. 麦秸秆加筋滨海盐渍土的加

筋效应及工程应用问题[J]. 天津城市建设学院学报,2010,16(3):161-166.

- [8] Manbeian T. The influence of soil moisture suction, cyclic wetting and drying, and plant roots on shear strength of cohesive soil[D]. Berkeley: University of California,1973.
- [9] Prabakar J,Sridhar R S. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil[J]. Construction and Building Materials,2002,16(2):123-131.
- [10] 张瑞敏,王晓燕,柴寿喜. 稻草加筋土和麦秸秆加筋土的无侧限抗压强度比较[J]. 天津城市建设学院学报,2011,17(4):232-235.
- [11] 李敏,柴寿喜,王晓燕,等. 以强度增长率评价麦秸秆加筋盐渍土的加筋效果[J]. 岩土力学,2011,32(4):1051-1056.
- [12] 刘晓霞,茅琛. 棕叶纤维性能研究[J]. 上海纺织科技,2006,34(9):20-21.
- [13] 中华人民共和国交通部. JTG E40-2007 公路土工试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2007.
- [14] 魏丽. 麦秸秆加筋固化滨海盐渍土的筋材防腐与力学特性研究[D]. 天津:天津城市建设学院,2007.
- [15] 魏丽,柴寿喜,蔡宏洲. 麦秸秆防腐评价及加筋滨海盐渍土的补强机制[J]. 工程勘察,2009,37(1):5-7.
- [16] 杨继位,柴寿喜,王晓燕,等. 以抗压强度确定麦秸秆加筋盐渍土的加筋条件[J]. 岩土力学,2010,31(10):3260-3264.
- [17] 石茜. 稻草加筋滨海盐渍土的强度与变形特性[D]. 兰州:兰州大学,2011.

(上接第 189 页)

- [7] 曹相生,刘杰,孟雪征. 滤速对慢滤池深度处理生活污水的影响[J]. 生态环境学报 2010, 19(8): 1947-1950.
- [8] 刘来胜,周怀东,刘玲花,等. 生物慢滤技术中的微生物作用研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2013,11(2):137-143.
- [9] 李丽,王琳,李文露,等. 生物慢滤对污染物的去除效果研究[J]. 化学与生物工程,2012,29(1):76-78.
- [10] 中本信忠. 安全饮用水生物净化法指南[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [11] Ruiz-Marin A,Mendoza-Espinosa L G,Stephenson T.

Growth and nutrient removal in free and immobilized green algae in batch and semi-continuous cultures treating real wastewater[J]. Bioresource Technology,2010,101(1):58-64.

- [12] Ruiz J,Álvarez P,Arbib Z, et al. Effect of nitrogen and phosphorus concentration on their removal kinetic in treated urban wastewater by chlorella vulgaris[J]. International Journal of Phytoremediation, 2011,13(9):884-896.
- [13] 刘来胜,周怀东,刘玲花,等. 生物慢滤技术脱氮性能试验研究[J]. 中国农村水利水电,2013(5):81-84.