

基于藻类连续生长的生物慢滤池深度净化污水的研究

苏振铎¹, 徐志嫻¹, 许光远^{1,2}, 党航博¹, 文辉¹, 张程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: 利用藻类连续生长的生物慢滤池开展污水深度净化实验,通过分析生物慢滤池不同深度区域污染物浓度,考察其对氮磷等污染物的降解规律。研究表明:在生物慢滤池中,总氮的去除主要依靠填料表层中微生物的降解和藻类吸收作用,其降解幅度可达31.5%;总磷的去除主要依靠滤柱深层的滤料的吸附作用以及上覆水中藻类的吸收,其降解幅度可达47.0%;氨氮浓度的降低主要依靠硝化转化作用和滤池上覆水表面的挥发作用,其降解幅度为21.8%。可见,生物慢滤池的上覆水和填料表面存在有大量的微生物和藻类,其对水质的净化起到了关键作用。

关键词: 生物慢滤池; 污染物分布; 深度净化; 藻菌共生; 污水净化

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)03-0096-04

Study on deep purification of wastewater in biological slow filter pool based on continuous growth of algae

SU Zhenduo¹, XU Zhiqiang¹, XU Guangyuan^{1,2}, DANG Hangbo¹, WEN Hui¹, ZHANG Cheng¹

(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: By applying biological slow filter of continuous growth of algae, the paper carried out advanced purification experiment. The degradation mechanisms of nitrogen and phosphorus in the system was evaluated through the analyses of pollutant contents in different depth areas of biological slow filter pool. The results showed that in biological slow filter pool, the removal of total nitrogen mainly depends on the function of a combined denitrification and dephosphorization reactor. The degradation rate of total nitrogen reaches 31.5%. While the removal of total phosphorus mainly relies on both algal absorption and microbial adsorption, The degradation rate of total phosphorus reaches 47.0%. Moreover, the decrease of ammonia nitrogen concentration mainly relies on volatilization and nitrification in the overlying water, the degradation rate of ammonia nitrogen concentration reaches 21.8%. There are large amount of microorganism and algae in the overlying water and filter material surface of biological slow filter pool, which have key role in purification of water quality.

Key words: biological slow filter pool; pollutant distribution; advanced purification; algae - bacteria symbiotic system; wastewater purification

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,已成为再生水水质保障的难点和热点问题^[1],但由于城市污水二级生物处理工艺对氮磷等营养物质的去除率仅能维持在10%~20%的水平,造成二级处理出水

具有低碳高氮的特点,这时再用微生物处理方法去除氮磷就存在有机碳源不足的问题。而藻类在低C/N比的情况下仍然能够低成本、有效地去除氮磷营养物质,与一般的污水处理措施相比,藻类不仅能有效吸收水体中的营养物质、降解有毒污染物、富集

收稿日期:2015-01-28; 修回日期:2015-02-28

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。

重金属离子、提高水体的 pH 和 DO,而且还可以收获藻类生物量^[2],目前已被用于小型污水处理厂出水中致病菌和营养物质的去除^[3]。研究表明,利用浮游微藻与活性污泥形成的藻-菌共生处理系统不仅能发挥藻类对氮磷的吸收作用,藻类光合作用产生的氧还能被水中的好养菌所利用,增强对污水中 BOD₅ 及 NH₃-N 的去除^[4];藻类在白天进行着固氮酶硝化作用^[5],而夜间异养菌对于去除水体中的部分含氮污染物也具有一定的作用。可见,将藻类和微生物净化理论整合到传统的污水处理技术中,既经济又有效,是一种污水资源化的生物工程。

Malzer 等^[6]、Aronino 等^[7]、刘来胜等^[8]、曹相生等^[9]等已从污染物净化机理、影响因素等不同方面研究了生物慢滤池在污水深度处理领域的应用问题;Zheng 等^[10]将慢滤池作为污水深度处理中的预处理有机物的降解效果和影响因素。但目前存在的主要问题是慢滤池中藻类的生长易造成滤床的堵塞,藻类虽然能与微生物一起形成表层滤膜,向水中提供充足的溶解氧,但其会对慢滤池的运行和净化效果产生不利影响。因此,本研究受日本学者中本信忠研究的启示^[11],开发了带有藻类溢流设施的藻类连续生长的生物慢滤池系统。其原理主要利用藻类光合作用产生的气泡的浮力作用,使附着于滤层表面的藻类被膜漂浮到水面上,过量的藻类被膜将不断通过表面溢流设施流出,从而形成藻类连续培养系统。

为明确具有藻类连续生长的生物慢滤池对污染物的净化效果,本文以人工模拟废水为处理对象,考察滤池中不同深度区域对污染物的去除状况,探讨生物慢滤池的净化机理,为生物慢滤池技术在污水深度处理方面的应用提供技术支撑。

1 实验材料与方法

1.1 实验装置

本研究于 2013 年 7 月在西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室露天实验场进行实验。实验装置如图 1 所示:采用多组内径为 300 mm、柱高 180 cm 的有机玻璃柱作为慢滤池的实验柱,以石英砂和砾石做为柱内滤料。石英砂粒径在 0.4~0.8 mm 之间,填料高度 800 mm;承托层厚 100 mm,由 1~30 mm 的砾石组成;设置阀门做溢流口使上层水深为 800 mm。通过蠕动泵给装置供水。其中 C、D 两取样口的阀门链接 PVC 管,长度为 150 mm 的直径为 20mm,两侧向上 45°每 5 mm 开直径为 3 mm 的小孔,小孔均匀分布,这样以避免取水出现断流现象。

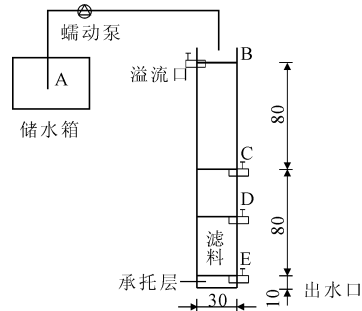


图 1 实验装置与取样点示意图

1.2 进水水质选择与配制

实验原水水质参照《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),采用分析纯的葡萄糖、磷酸二氢钾、氯化铵、硝酸钾等配制,以模拟污水处理厂二级出水的营养盐。实验期间,生物慢滤池进水水质情况见表 1。

水质指标	总氮	氨氮	总磷	COD _{Mn}
浓度	18 ± 1.5	8 ± 1.5	1 ± 0.15	18 ± 1.5

1.3 实验方法

用人工模拟的污水来培养驯化自然生长的藻类,在生物慢滤池中投加 100g 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,还有少量的衣藻、纺锤藻、颤藻和栅藻等。

采用人工模拟污水进行慢滤池动态实验。每天对慢滤池进水、出水、慢滤池表层水、溢流口下 80cm 处、溢流口下 120 cm 处等 5 个取样点(如图 1 中 A、B、C、D、E 点)取水样监测,监测指标主要有总氮(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,运行 6 d 后,出水基本趋于稳定,稳定后连续监测 7 d,选取稳定后的数据作为分析数据。

2 实验结果与数据分析

2.1 叶绿素截留效果分析

在生物慢滤池的净化过程中,藻类具有重要作用,水体中藻类的数量及发育情况与叶绿素 a 的浓度有具有正相关的关系,所以叶绿素 a 在一定程度上可以估算水体中藻类的数量。人工模拟的废水中没有藻类的投加,藻类含量很低,但实验过程中在 B 点接种藻类,所以 B 点具有一定浓度的藻类(图 2),

随着藻类的生长和附着作用,上覆水中含有大量悬浮态藻,在滤柱的内表面和填料的上层也附着大量的藻类,所以藻类在填料表层浓度达到最高(即为C点值 $63.57 \mu\text{g/L}$),经过 40 cm 填料的过滤作用,D点藻类含量明显降低,再经过 40 cm 的填料过滤截留作用,使最终出水(E点)中叶绿素 a 浓度仅为 $2.29 \mu\text{g/L}$,可见实验过程中产生的藻类可以通过生物慢滤池的作用来截留去除。

2.2 氮素的降解规律分析

图3为生物慢滤池中总氮的浓度分布图。

由图3可知,生物慢滤池中总氮浓度随滤柱深度的增加而逐渐降低。由于生物慢滤池中的上覆水体中(滤柱B-C部分)氮含量较低,所以原水进入生物慢滤池表面时即被上覆水稀释,此作用表现显示为总氮浓度的降低,降低 13.14%;上覆水中、滤柱的内表面、填料的表层存在大量的藻类,同时还有一些细菌和微型动物在滤层表面大量繁殖,藻类在光合作用下营造一个富氧的环境,提高异养菌和其他微生物的活性,促进氮的硝化作用,同时藻类的生长也会消耗氮,所以藻类的存在加强并促进氮的去除效果,从而B-C部分总氮浓度降低 9.82%。

由于填料表层(C点)附着大量微生物,并形成一层具有净化作用的生物滤膜;在填料层到出水口之间

没有充氧措施,这就为氨氮的缺氧反硝化作用提供环境。从而使氨氮在填料层发生反硝化作用,使氮大幅度的降低,如图3所示,主要表现为滤柱C-D和D-E部分总氮浓度分别降低 31.48%、11.86%。

在不考虑微生物同化作用的情况下,氨氮的降低主要表现在硝化阶段,即将氨氮转化为硝氮;总氮的降低主要表现在反硝化阶段,硝态氮转化为气态氮。由图4可以看出,由于人工模拟废水在上覆水的稀释和表面挥发作用使氨氮浓度降低 21.81%,而B-C和C-D部分存在一定的好氧环境,发生一定程度的硝化作用,从而氨氮呈降低趋势,两段氨氮的浓度降低幅度分别为 11.65% 和 12.35%,但是D-E部分的氨氮有升高趋势,可能发生了氨化作用。图2说明藻类在滤柱D-E部分处于降低状态,藻类被填料过滤而存留在这层填料中,由于这些被滞留的藻类和微生物体内氮元素发生了氨化作用,这部分氮经过氨化成氨态氮,氨化作用的速率高于硝化速率,从而表现氨氮浓度升高。这也是本实验氨氮的变化情况与刘来胜等^[8]研究结果不同的原因。

可见,氨氮浓度的变化曲线不同于总氮,氨氮的降低主要在滤柱上覆水层,而总氮降低最多在填料层,这验证了生物慢滤池中的藻-菌共生系统形成一个硝化反硝化的反应器,从而促进氮的转化和去除。

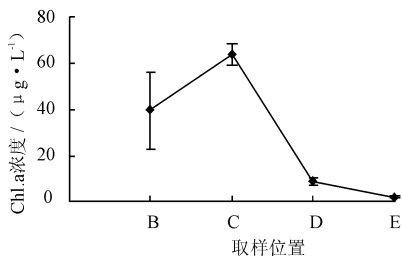


图2 生物慢滤池中不同区域叶绿素 a 的浓度分布图

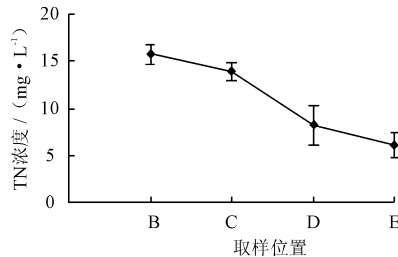


图3 生物慢滤池中不同区域总氮的浓度分布图

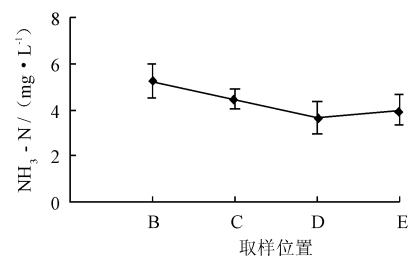


图4 生物慢滤池中不同区域氨氮的浓度分布图

2.3 磷素的降解规律分析

磷是生物体中 DNA 和 RNA 等一些生物物质的必需元素,磷也是光合作用中间体 ATP、ADP 的主要元素之一,前人提出用分子式 $\text{C}_{106}\text{H}_{181}\text{O}_{45}\text{N}_{16}\text{P}$ 表示藻类,可以得出生物的同化作用需要吸收的磷量,且这部分磷的重量占藻类细胞干重的 1%,所以微生物与藻类的繁殖以及藻类的光合作用等生命活动都需要消耗磷。如图5所示,生物慢滤池中总磷浓度随着滤柱深度的增加而呈减少趋势。人工模拟污水进入生物慢滤池被较低含磷浓度的上覆水稀释,总磷浓度的降低 21.35%。上覆水中、滤柱的内表面、填料的表层存在大量的藻类,同时还有一些细菌和

微型动物在滤层表面大量繁殖,这些微生物和藻类形成的具有同化吸收营养元素生物膜,其在同化吸收氮的同时也同化吸收磷,从而使总磷浓度降低 14.51%。滤柱C-D部分和DE部分总磷浓度分别降低 5.08% 和 25.71%,这两部分浓度降低幅度差别较大,可能是C-D部分的填料经过长时间的吸附,填料吸附作用趋于饱和,而D-E部分的吸附作用还处于不饱和状态。

在实验监测过程中发现,柱体中的 pH 随着深度的增加而呈现逐渐增加的趋势,而 PO_4^{3-} 和 NH_4^+ 可以生成 MgNH_4PO_4 、 CaNH_4PO_4 等沉淀物,如形成 CaNH_4PO_4 的化学反应为:



CaNH_4PO_4 为碱式盐,当 pH 升高升高时使反应向右进行,从而使磷以沉淀的形式去除。这也是使 D - E 部分的吸附作用强于 C - D 部分的原因。

2.4 高锰酸盐指数的降解规律分析

如图 7 所示生物慢滤池中高锰酸盐指数随着柱体深度的增加而呈逐渐降低趋势。首先人工模拟污水在较低 COD_{Mn} 的上覆水中被稀释,使混合水体中 COD_{Mn} 降低 18.97%;在 B - C 段由于在生物慢滤池形

成的藻 - 菌共生系统中存在的大量异氧菌,同时水体中还存在的游离型的异氧菌,这些细菌降解了水中大部分的 COD_{Mn} ,从而使水体中 COD_{Mn} 降低 26.24%,可见滤层表面形成的生物膜对 COD_{Mn} 的净化发挥了主要作用;而滤柱的 C - D 部分是填料的过滤最初阶段,也是微生物比较集中的部分,所以 COD_{Mn} 降低较多,降低幅度为 18.17%,而滤柱 D - E 部分的微生物很少,且大部分颗粒型 COD_{Mn} 已经在上层被过滤,所以这部分的降低百分比比较低,仅为 9.86%。

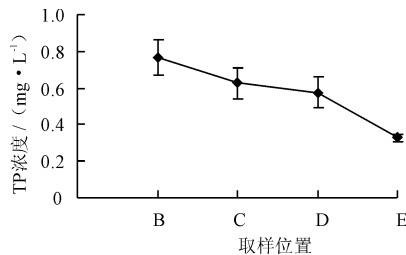


图 5 生物慢滤池中不同区域总磷的浓度分布图

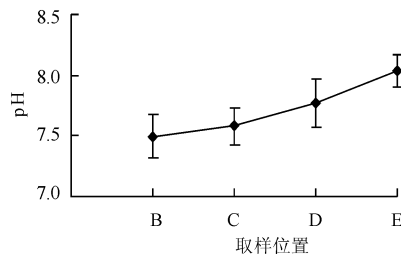


图 6 生物慢滤池中不同区域 pH 分布图

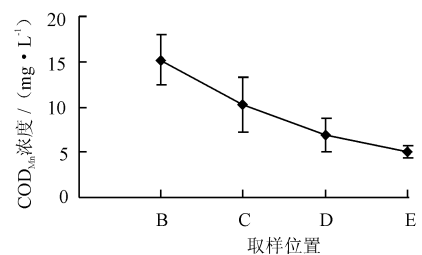


图 7 生物慢滤池中不同区域高锰酸盐指数的分布图

3 结 语

(1) 总磷、总氮和 COD_{Mn} 浓度均随生物慢滤池柱体深度的增加而逐渐减少,而氨氮浓度则呈先减少后增加的趋势。藻类在上覆层中得到较好的生长,随着填料层深度的增加,水体中藻类含量减少。

(2) 在生物慢滤池中,藻类的光合作用为系统营造一个富氧的环境,促进异养菌和其他微生物的活性,促进氮的硝化作用,同时藻类和微生物的自身同化作用对氮磷具有一定的吸收作用;较深填料层为氮的反硝化作用创造一个缺氧的环境,这样整个生物慢滤池就形成了一个脱氮除磷的反应器。

(3) 在生物滤池中对总氮降解贡献率最大的区域位于填料下 40 cm 到表层之间,其对总氮的降解幅度为 31.5%,主要作用为反硝化;氨氮主要依靠其在滤池上覆水表面的挥发和转化作用,这层对氨氮的降解幅度为 21.8%;总磷的去除主要依靠上覆水中藻类的吸收以及滤柱深层的滤料的吸附作用,其降解幅度可达 47.0% 左右。

参考文献:

[1] 胡洪营, 吴乾元, 黄晶晶, 等. 再生水水质安全评价与保障原理[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
 [2] Peña - Castroa J M, Martínez - Jerónimob F, Esparza - García, et al. Heavy metals removal by the microalga *Scenedesmus incrasatulus* in continuous cultures [J]. *Bioresource Teehnology*, 2004, 94(2): 219 - 222.

[3] Schumacher G, Sekoulov I. Improving the effluent of small wastewater treatment plants by bacteria reduction and nutrient removal with an algal biofilm [J]. *Water Science and Technology*, 2003, 48(2): 373 - 380.
 [4] R. Muñoz, B. Guieysse. Algal - bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review [J]. *Water Research*, 2006, 40(15): 2799 - 2815.
 [5] Rodrigo V, Eberto N. Seasonal changes in periphyton nitrogen fixation in protected tropical wetland [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43(3): 367 - 372.
 [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*, 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] 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.
 [10] Zheng X, 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.
 [11] 中本信忠, 金胜哲, 徐云. 安全应用水生物净化法指南 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.