

不同填料垂直流人工湿地系统的净化能力研究

吴小凤 邹晓彪 李林锋*

(广东海洋大学 农学院, 广东 湛江 524088)

摘要: 以火山石、沸石、牡蛎壳、陶粒、麦饭石和砖红壤作为人工湿地填料,在水力负荷(0.5~1.5 m/d)的条件下,构建垂直流人工湿地模拟系统,进行单一填料和组合填料的污水净化实验。结果表明,单一填料砖红壤、牡蛎壳、陶粒和麦饭石人工湿地系统对有机物去除能力较好,COD的去除率在40%以上。砖红壤、麦饭石和沸石对总氮的去除率达到39%以上,火山石29%,牡蛎壳和陶粒填料对总氮去除率均低于20%。除砖红壤具有较好去除磷的能力86%外,其余填料系统对磷的去除效率均在30%左右。与单一填料湿地系统相比,9种组合填料系统对主要污染物的去除效率均有所增加,其对COD、TN和TP的去除率分别为54%~82%、40%~91%、47%~84%,且均优于单一填料系统。由此可见,在垂直流人工湿地系统中,通过选择适宜的填料组合,完全可以在相对较高的水力负荷条件下取得较好的处理效果。

关键词: 垂直流人工湿地; 填料; 净化能力

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2012)02-0414-05

A Study on Purification Capacity of Different Substrates on the Treatment Performance of Vertical Flow Constructed Wetland

WU Xiao-feng, ZOU Xiao-biao, LI Lin-feng*

(College of Agriculture, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: Several kinds of substrates were utilized in the vertical flow constructed wetlands simulation system to compare the purification capacity of single packing and combination packing by treating artificial sewage at hydraulic loading rate of 0.5~1.5 m/d, including volcanic rock, zeolite, oyster shells, ceramsite, medical stone and laterite. The results showed that the COD removal efficiency was more than 40% in the single packing constructed wetlands of laterite, oyster shells, ceramsite and medical stone. The removal efficiency of total nitrogen (TN) was more than 39% in laterite, medical stone and zeolite-filled wetlands, that treated by volcanic rock was 29%, the treated by oyster shells or ceramsite was low than 20%. In addition to the high total phosphorus (TP) removal efficiency 86% in laterite-filled wetland, the total phosphorus (TP) removal efficiencies were about 30% obtained by the other five kinds substrates-filled wetland systems. Compared with the single packing wetland system, the major pollutants removal efficiencies increased in nine combination packing wetland systems, and its removal efficiencies for COD, TN and TP were 54%~82%, 40%~91%, and 47%~84%, respectively, and the results were better than the single packing wetland system. The experiment indicated that good performance could be achieved at high hydraulic loading by choosing appropriate substrates and combinations.

收稿日期: 2011-10-26 修回日期: 2011-12-30

基金项目: 农业部生态农业重点开放实验室资助项目(2009k13)、湛江市科技攻关计划项目(20096-16)和广东省海洋大学大学生创新实验项目(1056610037)

作者简介: 吴小凤(1964—),女,实验师,主要从事环境生态学研究, E-mail: gdouwuxiaof@126.com; * 第二作者与第一作者同等贡献, * 通讯作者: 李林锋,副教授,博士, E-mail: llf801@126.com.

Key words: vertical flow constructed wetlands; substrates; purification capacity

作为一种生态环保型的污染水体修复技术,人工湿地污水处理技术被广泛应用,而填料作为人工湿地的重要组成部分,对污染物的净化,尤其是有机污染物及氮磷等营养物质的净化起着十分重要的作用。填料一方面为植物和微生物的生长提供介质,另一方面也能够通过沉淀、过滤和吸附等作用直接去除污染物。此外,不同填料的理化特性、比表面积及其搭配组合也会影响到人工湿地系统的净化效果。因此,开展湿地基质的筛选与配置研究对提高人工湿地污水处理效果,改善水质,实现水生态系统恢复研究,无疑具有十分重要的意义。

本文以火山石、沸石、牡蛎壳、陶粒、麦饭石和砖红壤作为人工湿地填料,通过构建垂直流人工湿地模拟系统,分别进行单一填料和组合填料的污水净化实验,旨在为选择合适的人工湿地填料及获得良好的处理效果提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验采用 15 根内径 25 cm,管高 100 cm 的 PVC 管来构建垂直流人工湿地系统,其中填料层有效高度为 90 cm,管顶留有 10 cm 的布水区 and 超高,侧壁 95 cm 处有溢水口。污水利用蠕动泵提升,通过浮子流量计精确计量和控制由管顶的环形穿孔布水管进出,由管底出水^[1],如图 1。

试验由两部分组成,第一部分测试单种填料垂直流人工湿地系统对有机污染物和氮磷的处理效果,即取上述 6 根填料柱分别填充火山石、砖红壤、牡蛎壳、陶粒、麦饭石和沸石,填料有效高度为 90 cm。第二部分为将上述

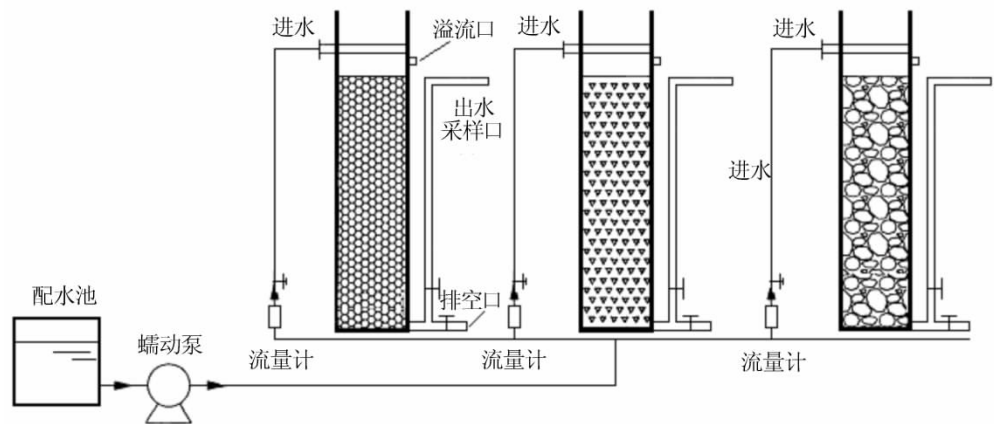


图 1 垂直流人工湿地处理系统示意

Fig. 1 The schematic diagram of the vertical flow constructed wetland processing system

6 种填料任选 3 种随意组合构成复合填料人工湿地系统,测试其对有机污染物和氮磷的处理效果,复合填料组合方案见表 1。

砖红壤取自广东海洋大学一建筑工地,自然风干后过 20 目筛备用;火山石从学校后山采集,牡蛎壳系从海鲜市场收集废弃的牡蛎壳,用水将表面的泥沙、附着物和牡蛎肉渣清洗干净,自然风干。火山石和风干后牡蛎壳用小锤砸碎,选择大小相对均匀一致的材料备用,粒径大小为 25 ~ 35 mm;陶粒、麦饭石和沸石购买自河南巩义,粒径大小为 8 ~ 16 mm。

表 1 复合填料组合方案

Tab. 1 Match program of mixed matrix in vertical flow constructed wetland

项目 Project	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
上层 Upper strata	牡蛎壳	陶粒	麦饭石	沸石	麦饭石	陶粒	火山岩	沸石	牡蛎壳
中层 Middle level	砖红壤	麦饭石	沸石	陶粒	砖红壤	砖红壤	沸石	陶粒	麦饭石
下层 Lower stratum	火山岩	沸石	火山岩	牡蛎壳	沸石	沸石	牡蛎壳	火山岩	沸石

1# ~ 9#柱各层的填料厚度均为 30 cm。

The filling thickness of each layer from 1# to 9# is 30 cm.

1.2 运行方式

各人工湿地系统均采用连续进、出水的方式运行;每 4 d 为一个周期,第 1 天配水后连续运行 1 次,间隔 2 d 再连续运行 1 次,每次连续运行时间为 8 h^[1]。连续运行时的流量控制 1~3 L/h,水力负荷为 0.5~1.5 m/d。试验时间为 2010 年 7 月至 10 月,历时约 3 个月。

1.3 进水特性

系统进水为受污染的湖水经人工投加葡萄糖、氯化铵和磷酸二氢钾等物质配置而成的混合水,其中受污染湖水取自广东海洋大学蝴蝶湖旁的出水口。实际配置后的污水浓度如表 2 所示。

1.4 分析指标及方法

实验运行中,每个运行周期每次连续运行结束之前采集水样测定 pH、COD、TN、TP 等指标^[1]。依据国家环保局《水和废水监测分析方法》^[2]对所有水质指标进行分析,其中 COD 采用重铬酸钾法;TN 采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法;TP 采用过硫酸钾氧化—钼锑抗比色法。

1.5 数据处理

试验数据用 SPSS 13.0 统计软件进行方差分析,用 LSD 法进行多重比较,用 SigmaPlot 软件绘制图形。

2 结果与分析

2.1 单一填料垂直流人工湿地系统对主要污染物的去除效果

由单一填料构建的垂直流人工湿地系统对主要污染物(TN、TP 和 COD)的去除效果如图 2。在高水力负荷条件下,各系统对 TN、TP 和 COD 的去除效果存在显著性差异($P < 0.05$)。砖红壤系统对 TN、TP 和 COD 的去除效率最高,分别为 42%、86% 和 67%,牡蛎壳系统对 TN 和 TP 的去除效率最低,分别为 14% 和 18%,火山石系统对 COD 的去除效率最低,仅为 22%。

6 个单一填料垂直流人工湿地系统对主要污染物去除效果的差异,一方面与污染物在人工湿地系统中的去除方式不同有关,另一方面与不同填料各自理化特性的差异有关。如人工湿地系统中氮主要通过挥发、填料吸附、植物吸收、微生物的硝化、反硝化等去除,其中微生物的氨化、硝化、反硝化作用是最主要的氮去除机理^[3]。崔理华等^[4]认为垂直流人工湿地相当于好氧池,随着运行时间的延长,填料中的氧逐渐消耗,从而在填料中可以形成若干个好氧-缺氧单元,达到了一定的脱氮目的。但由于部分垂直流人工湿地采用干湿交替方式运行,不利于缺氧条件的形成,因而反硝化脱氮作用不强。Spieles 等^[5]研究表明,人工湿地系统中,反硝化作用脱除的氮占总氮去除量的比例高达 60%~70%。本试验采用间歇式运行方式可能影响到反硝化作用的进行,使所有系统的总氮去除率相对较低。

表 2 Water quality used in constructed wetland

指标 Index	变化范围 Range of variation
pH	6.58~7.90
COD/(mg·L ⁻¹)	19.7~78.41
TP/(mg·L ⁻¹)	0.30~5.05
TN/(mg·L ⁻¹)	1.87~49.27

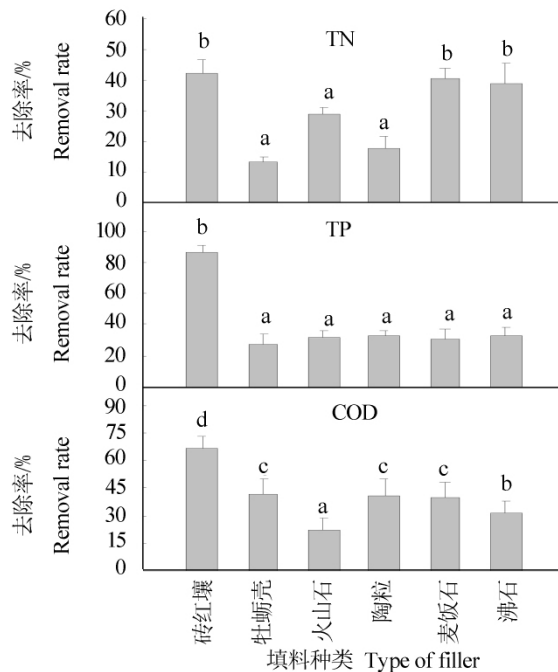


图 2 单一填料垂直流人工湿地系统对主要污染物的净化效果
Fig. 2 The removal efficiency of the main pollutants in different vertical constructed wetlands filled with the single substrates

人工湿地中磷主要通过植物吸收、填料吸附、化学沉淀和微生物同化作用去除,其中填料对磷的吸附和沉降是最重要的去除机理,尤其是当填料富含活性氢氧化铁或铝基团时,往往能与磷形成难溶化合物通过沉淀作用去除^[6]。本试验中砖红壤系统对磷的去除效率比较高,主要是由于它由玄武岩发育而成,铁和铝含量较高。砖红壤中铁的富集量可高达 150 g/kg 左右,铝可达 120 g/kg 左右,铁的游离度红壤为 33%~35%,赤红壤 53%~57%,砖红壤为 64%~71%^[7]。虽如此,但由于其孔隙度较小,平均为 52.1%,在试验过程中易造成堵塞。

此外,填料的粒径大小也与污染物的去除有很大关系。粒径大小一方面影响到填料的比表面积,必将极大地影响污染物在该填料表面的吸附与附着效应。另一方面影响到空隙度,进而影响污染物与填料接触的时间。本试验中砖红壤的粒径最小($\Phi < 1$ mm),空隙度也不高,故对磷的去除率相对其它填料系统为最高。

2.2 复合填料垂直流人工湿地系统对主要污染物的去除效果

9 个组合填料人工湿地系统对主要污染物(TN、TP 和 COD)的去除效果如图 3。9 个系统对主要污染物 TN、TP 和 COD 的去除效率存在显著性差异($P < 0.05$)。9 个系统对 TN 的平均去除效率均高于 50%,均优于单一填料的人工湿地系统。2 号系统的 TN 去除率最高 82%,其次为 5、6 号系统,去除率分别为 70%和 69%,3 号系统去除率最低为 54%。

除单一填料的砖红壤系统外,9 个组合填料系统对 TP 的去除率均显著优于其余单一填料系统($P < 0.05$)。5 号系统的 TP 去除率最高 95%,其次为 1、6 号系统,去除率分别为 91%和 90%,4 号系统去除率最低为 40%。1、5、6 系统高 TP 去除率与它们的填料组合中含有砖红壤有关。

9 个组合填料人工湿地系统对 COD 的平均去除率为 66%,与单一填料的砖红壤系统 COD 去除率很接近,且均优于其它所有单一填料系统。2 号系统的 COD 去除率最高 84%,其次为 5、6 和 9 号系统,去除率分别为 73%、72%和 74%,4 号系统去除率最低为 47%。

和单一填料系统运行监测结果相似,运行初期除 1、5、6 系统外,其余各组合填料系统对 COD 去除效率较低且很少受进水水质波动和填料堵塞的影响,这说明这些系统主要是依靠物理截留和吸附作用去除有机物,试验后期去除效率大幅度提高,可能与试验后期生物膜的逐渐形成有关。与此相反,1、5、6 号系统试验初期 COD 去除效率较高,可能是由于其砖红壤填料的较强物理截留及吸附作用的结果,但后期伴随生物膜的形成,易受填料的堵塞影响,从而使处理效果有所下降。

垂直流人工湿地技术由于占地面积小,同时又能在相对较高的水力负荷下运行,从而使单位湿地面积处理污水的能力大大提高。填料作为人工湿地的重要组成部分,对污水中污染物的净化起着十分重要的作用,但许多研究都发现由单一填料构建的人工湿地系统除污能力比较单一^[1]。于是,选择将不同基质组合或搭配来构建新型高效人工湿地系统便成为一段时期以来研究的热点。如徐丽华和周琪^[8]将沸石和石灰石填料按 1:1 混合,通过构建水平潜流人工湿地系统来研究对人工污水的处理效果,通过与单一填料沸石和石灰石人工湿地系统相比较,发现填料混合使用对 TN、TP 的去除效果均好于其单独使用。崔丽华等^[9]利用煤灰渣-草炭填料构建的垂直流人工湿地系统来净化处理城市污水,其

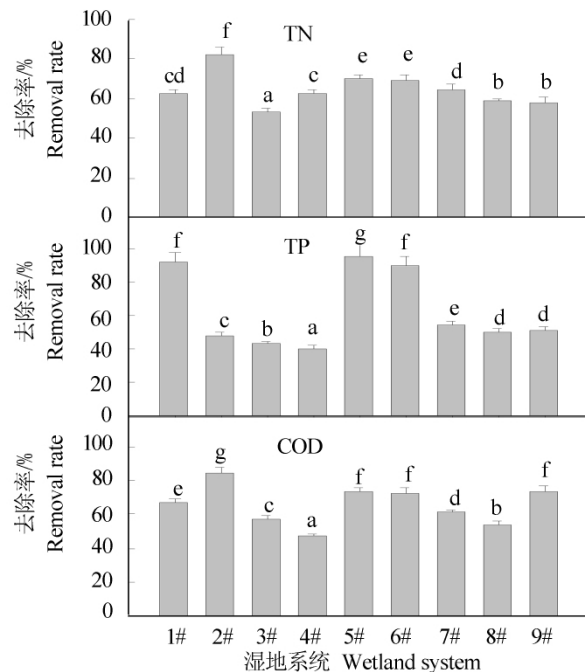


图 3 复合填料人工湿地系统对主要污染物的净化效果

Fig. 3 The removal efficiency of the main pollutants in different vertical constructed wetlands filled with the combined substrates

COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TP 的去除率分别为 76% ~ 87%、75% ~ 85% 和 77% ~ 91%。张翔凌等^[10] 选取 5 种填料,以不同的组合方式构建模拟垂直流人工湿地处理污水系统,结果发现 4 种组合填料对 COD 的平均去除率较单一填料都有所提高,其中填充无烟煤、生物陶粒、沸石的组合填料对 TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均去除率分别达到 85% 和 91%;而无烟煤、蛭石、钢渣的组合填料对 TP 的平均去除率均可达到 85% 以上。严华勇和邹仲勋^[11] 将对硝态氮具有良好去除效果的铁炭混合物、对氨氮具有良好吸附能力的沸石和对磷具有良好吸附能力的炉渣分层填装构建了波形潜流人工湿地系统来处理生活污水,其对 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 和 TP 的去除率分别为 86%、80%、75% 和 90%。

和上述试验对主要污染物的去除效果相比,本试验的 9 组组合填料垂直流人工湿地系统对 COD、TN 和 TP 的去除效果分别为依次为 54% ~ 82%、40% ~ 91% 和 47% ~ 87%,部分填料柱的污染物去除效果与上述研究结果接近,且基本都优于单一填料系统对污染物的去除效果。然而和上述研究发现的问题一样,组合填料的种类、各填料的粒径大小、装填的顺序、装填方式(分层或按一定比例均匀混合)都会对净化结果产生很大影响,本试验只重点关注了单一填料与组合填料湿地系统处理效果的差异,对影响组合填料处理效果的上述问题还需进一步探讨和研究。

3 结 论

(1) 在高负荷垂直流人工湿地中,主要通过物理、生物和化学的三重协同作用来实现对水体的净化。对于不同填料,由于其自身理化特性的差异,3 种作用机理对净化效果的贡献大小不同。

(2) 在相同实验条件下,砖红壤、牡蛎壳、陶粒和麦饭石单一填料垂直流人工湿地系统对有机物的去除能力较好,砖红壤、麦饭石、沸石填料系统具有较好去除总氮的能力,除砖红壤系统具有较高的总磷去除能力外,其它填料系统对总磷的去除能力差异不显著。

(3) 在相同实验条件下,9 种组合填料垂直流人工湿地系统对有机污染物和氮磷的去除效果存在显著性差异,且均优于单一填料系统对污染物的去除效果。2、5、6 和 9 号系统去除有机物的能力较好,2、5 和 6 号系统去除总氮的能力较好,1、5 和 6 号系统去除总磷的能力较好。

参考文献:

- [1] 张翔凌,张晟,贺锋,等.不同填料在高负荷垂直流人工湿地系统中净化能力的研究[J].农业环境科学学报,2007,26(5):1905-1910.
- [2] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编写组.水和废水监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,1989:230-351.
- [3] Cook J G. Nutrient transformations in a natural wetland receiving sewage effluent and the implications for waste treatment[J]. Water Science and Technology, 1994, 29(4):209-217.
- [4] 崔理华,郝离妮,楼倩,等.不同回流比对无植物垂直流人工湿地除氮效果的影响[J].环境工程学报,2009,3(7):1170-1174.
- [5] 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 systems[J]. Ecological Engineering, 2000, 14(1/2):77-91.
- [6] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. Science of the Total Environment, 2006, 9(14):1-18.
- [7] 罗凯.雷州半岛砖红壤的理化性质[J].热带亚热带土壤科学,1997,6(2):140-142.
- [8] 徐丽花,周祺.不同填料人工湿地处理系统的净化能力研究[J].上海环境科学,2002,21(10):603-605.
- [9] 崔理华,朱夕珍,骆世明,等.煤渣-草炭基质垂直流人工湿地系统对城市污水的净化效果[J].应用生态学报,2003,14(4):597-600.
- [10] 张翔凌,武俊梅,王荣,等.垂直流人工湿地系统中不同组合填料净化能力研究[J].中国给水排水,2005,25(19):1-4.
- [11] 严华勇,邹仲勋.分层填料人工湿地处理生活污水的研究[J].污染防治技术,2009,22(3):17-20.