

潜流人工湿地填料筛选及其对小城镇微污染水的修复性能评价

The Selection of Substrates for Subsurface Flow Constructed Wetlands and the Remedy for Slightly Polluted Water in Small-Sized Towns

谢伟丹 高旭* 黄磊 陈俊宏 马晓霞 (重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

Xie Weidan Gao Xu* Huang Lei Chen Junhong Ma Xiaoxia (College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045)

摘要 为了选择适合小城镇潜流人工湿地的填料,选取小城镇较为常见的材料(废砖、卵石、碎石),结合物化性质,研究 25℃ 下填料对磷的吸附效果,并分析了填料种类对野外潜流人工湿地运行的影响。结果表明:(1)25℃时,3种填料对磷的吸附量随着溶液中初始磷浓度的增加而增加,吸附能力依次为废砖>碎石>卵石;(2)野外潜流人工湿地运行过程中,随 HRT 的延长,组合填料湿地 WL1 和废砖填料 WL2 湿地对总磷的净化效果有所提高,且 WL2 湿地对总磷的去除效果略优于 WL1。因此,可以选择废砖作为小城镇潜流人工湿地系统的填料。

关键词: 潜流人工湿地 填料 磷 微污染水 吸附性能 生态修复

Abstract In order to select suitable substrates for subsurface flow constructed wetlands (CWs) in small-sized towns, common materials (waste bricks, gravel and crushed stone) were used to study their phosphorus adsorption performance. The tests showed that the uptake by substrates would rise as the initial phosphorus concentration increased, and the phosphorus sorption ability of waste bricks was the highest and gravel was the lowest at a temperature of 25°C. The performance of CWs indicated that the total phosphorus removals by WL1 and WL2 wetlands with composite substrate and waste bricks, respectively, would be inclined to enhance along with the prolonged hydraulic retention time (HRT) whilst the latter one showed somewhat superior efficiency. As a result, waste bricks were adaptable as a substrate to subsurface flow constructed wetlands in small-sized towns.

Key words: Subsurface flow constructed wetland Substrate Phosphorus Slightly polluted water Sorption Ecological remediation

人工湿地系统主要是利用填料、微生物及动植物群落的物理、化学及生物的协同作用去除水中的污染物,具有高效率、低投资、低运转费、低能耗以及能够实现污水的原位处理等^[1]特点。该系统广泛应用于生活污水^[2]、工业废水、矿山开采废水^[3]、医疗废水和暴雨径流等的处理^[4],以及水体富营养化的控制^[5],对农村生活污水^[6]及山地小城镇微污染水体的处理也具有很强的可行性^[7]。

填料是人工湿地中非常重要的组成部分^[8]。一方面,填料为植物根系提供稳定的根际微环境,并为微生物提供生长空间^[9];另一方面,某些填料具有的特殊理化特性^[10],可提高系统对水中特定污染物(主要是磷)的去除效果^[11],并保证一定的水力传导性能。对于潜流湿地来

说,填料的粒径尺寸,应既具有较高的比表面积为微生物提供更多的附着介质,又能促进水力传导,防止床体被堵塞^[12]。常被应用于潜流湿地系统的填料有砂子、碎石、鹅卵石、土壤、煤渣、沸石、粉煤灰、陶瓷和页岩^[13]等。

目前,在湿地填料的筛选过程,往往是在实验室条件下关注其对水体中某组分的吸附能力。但在具有实际意义的野外潜流人工湿地运行中,填料的吸附性能及使用寿命受到磷饱和点、给水策略、水力停留时间和

“十一五”国家支撑计划项目,编号:2006BAJ08B01-03。

第一作者谢伟丹,女,1986年生,2011年毕业于重庆大学城市建设与环境工程学院,硕士。

*通讯联系人,gaoxu@cqu.edu.cn。

进水磷浓度等因素的影响^[14],而相关研究报道也较少。

此外,针对净化小城镇微污染水体的人工湿地系统填料的筛选也鲜有报道,且缺乏实际运行的动态监测数据。本文以山地小城镇微污染水作为处理对象,在潜流湿地填料选择过程中,分析填料的物理化学性质,着重考察温度对填料吸附磷的影响,并讨论启动阶段湿地填料种类对微污染水中磷的净化效果,充分考虑经济因素,旨在为修复山地小城镇微污染水的潜流湿地中填料的选择提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验装置及材料

1.1.1 试验装置

为了研究在启动阶段,填料种类对湿地运行的影响,在野外构建潜流人工湿地系统 WL1 和 WL2(见图 1)。湿地采用水平流态,池体内面长、宽、高为 3.0 m × 1.0 m × 1.0 m(有效高度 0.9 m,超高 0.1 m),底面坡度为 2%。其中,WL1 的填料组成为土壤/卵石/废砖/大碎石,WL2 的填料组成:土壤/废砖。湿地种植芦竹(*Arundo donax*),种植密度为 9 株/m²。试验于 2008 年 9 月至 11 月在重庆市万州区高峰镇雷家村长地坪鹿山河边的中试基地进行。潜流人工湿地运行的水力

停留时间(HRT)分别为 0.5、1、2 d,平均水温为 21℃。

1.1.2 试验填料

适合的填料对于保证潜流湿地系统的运行效果是非常重要的。因此,针对山地城镇微污染水的污染特征,同时参考潜流人工湿地的常用填料,初步选择当地特有、方便易得并能废物再利用的填料。试验选取了碎石、卵石及废砖 3 种填料。各种填料的密度、规格及产地见表 1。各填料的主要化学成分见表 2。

从表 2 可以看出,卵石中 Ca、Al 氧化物含量最多,比其他填料分别约多 25% 和 30%。废砖中的 Ca、Fe 氧化物含量较高,其中 Fe 氧化物含量约高出 75%。

1.2 试验方法

1.2.1 填料的静态吸附试验

取一定量粒径为 10~15 mm 左右的废砖、卵石和碎石,于 105℃ 干燥至恒重。为研究温度对填料吸附的影响,称取烘干后的 10 g 填料分别加入各具塞三角瓶中,分别准确加入浓度为 1.0、2.0、5.0、10.0、20.0、50.0、100.0 mg/L 的 KH₂PO₄ 溶液 200 mL,在摇床上连续振荡 24 h。实验分别在温度为 25、35℃,转速为 150 r/min 下进行,并平行 1 次实验。振荡完毕后,取上清液用钼酸盐比色法^[15]测定磷酸盐的含量,再由溶液的初始浓度 C₀(mg/L)和吸附平衡时溶液的磷浓度 C(mg/L)得

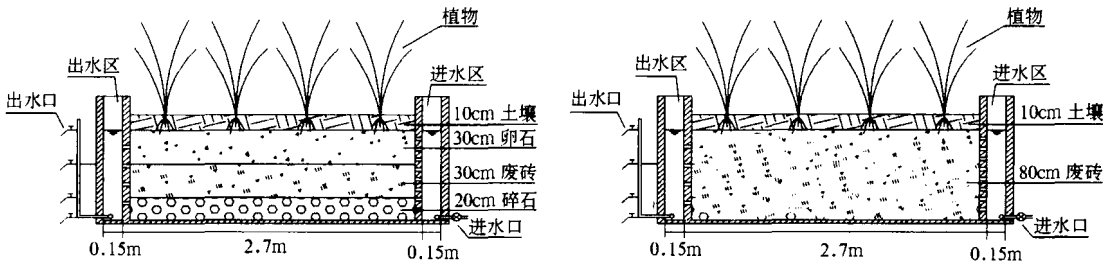


图1 WL1、WL2 水平潜流湿地构造

表1 填料的密度、规格和产地

填料名称	密度 (kg/m ³)	规格 (mm)	产地
砖	2 014.8	10~15	鹿山河上游鹿山乡碎石场
卵石	2 507.4	10~15	万州区某堆石场
碎石(砂石)	2 235.5	10~15	民用设施修建的废料

表2 填料的化学成分(质量分数,%)

填料名称	CaO	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
砖	15	—	20	7	60
卵石	20	12	5	10	40
碎石(砂石)	0.27	—	1.8	6.11	35.47

到填料的磷吸附量 $W(\text{mg/kg})$ 。计算公式如下:

$$W = (C_0 - C) \times 0.2/0.01 \quad (1)$$

1.2.2 湿地水样取样点及分析方法

取样点分别位于湿地进水处及2个湿地的出水处。水样 TP 分析采用过硫酸钾消解法。水样 pH、水温

用 YSI 公司提供的 pH 计及溶解氧仪测定。

2 结果与讨论

2.1 填料对磷的静态吸附效果

当吸附达到平衡时,吸附平衡液浓度 C 与单位填料吸附量 W 的关系,采用吸附等温线表达(见图2)。

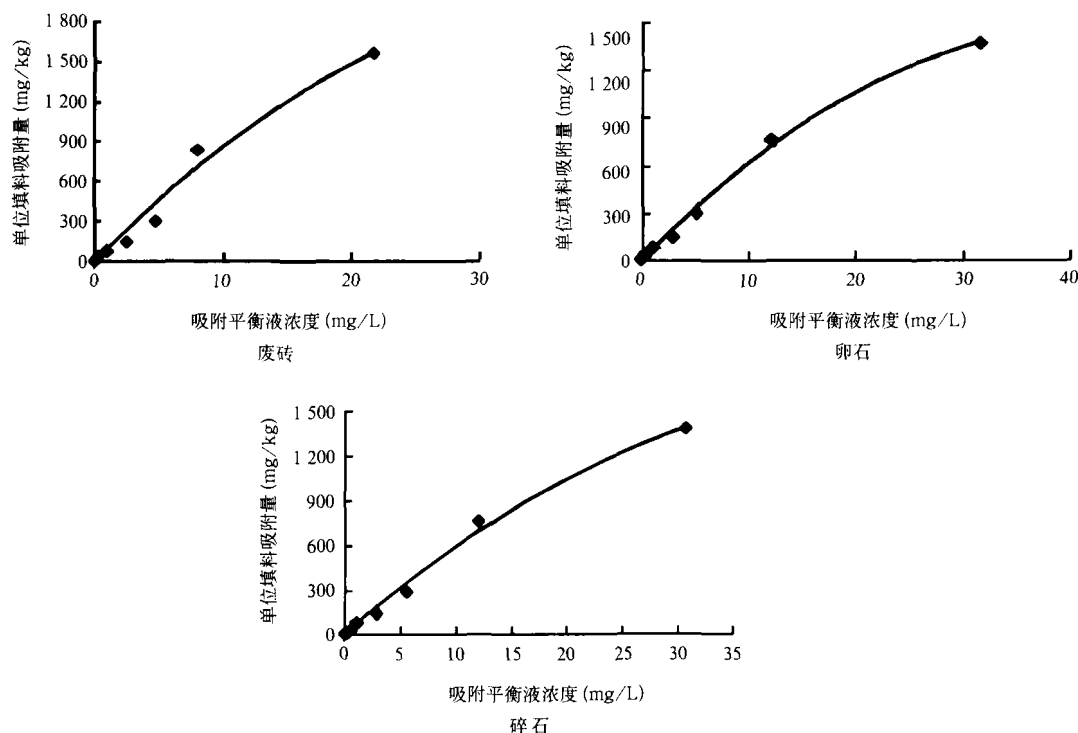


图2 不同填料 25℃ 磷吸附等温曲线

在 25℃ 恒温条件下,填料对磷的吸附量在总体上均表现出随着溶液中初始磷浓度的增加而增加的规律,吸附能力依次为废砖>碎石>卵石。当初始浓度为 100 mg/L 时,填料达到最大单位吸附量,其中废砖的单位吸附量为 1562.15 mg/kg,碎石和卵石分别为 1382.41 mg/kg 和 1364.99 mg/kg。

填料对水体中磷的吸附是一个动态平衡过程。溶液中的磷先被吸附在填料表面,然后进行化学吸附反应。填料均含有一定量的 Ca、Fe、Al 等金属氧化物(由表1可知),可以和磷酸盐发生反应,生成溶解度非常小的化合物^[16]。此外,湿地系统磷的吸附能力还受到基质的 pH 值和各自的吸附表面积影响^[17]。废砖内部有许多微细小孔,比表面积大,更易将磷吸附于表面,且 Ca、Fe 氧化物含量较高。在废砖烧制过程中,材料中所含的 Ca 极易在高温中形成氧化钙,而这种条件下形成的氧化钙更易和磷形成磷酸钙盐沉淀^[18]。因此,废

砖对磷的吸附量较大。卵石表面比较光滑,而且密度大,单位质量填料的表面积最小,因此对磷的吸附量最少。碎石表面粗糙,比表面积较卵石具有优势,利于磷均匀地吸附在其表面。碎石中较高的 Al_2O_3 含量促进了铝离子与磷的物理化学作用^[19],但由于其钙氧化物含量太低,故吸附平衡时碎石的吸附量仅比卵石多 17.42 mg/kg。

由图2还可发现,吸附等温曲线均属于缓慢上升型。在浓度较低时,等温吸附线的斜率较大,此时为填料对磷的快速吸附阶段^[20],其原因是填料表面吸附位点充足,物理吸附作用强烈;在浓度较高时,曲线趋于平缓,这一阶段为填料慢速吸附,是填料中无定形铁、铝、钙等水解与磷酸根进一步发生化学吸附引起的。在较低浓度时,废砖对磷的吸附高于卵石。在高浓度时,随着填料对磷的吸附逐渐趋于饱和,磷与金属氧化物的化学作用是磷去除的主要途径。卵石中 Ca、Al 氧化

物含量很高,故对磷的吸附去除率有所上升。

2.2 填料种类对湿地运行的影响

从废砖、卵石和碎石的静态吸附试验表明,废砖对磷有较好的吸附效果。由不同填料构成的野外潜流人工湿地 WL1 和 WL2 对 TP 去除率变化情况见图 3。试验期间,湿地平均水温为 21℃,pH 为 7.47~7.68,进水 TP 浓度为 0.11~0.30 mg/L,WL1 湿地平均去除率为 30.4%,WL2 平均去除率为 38.8%。

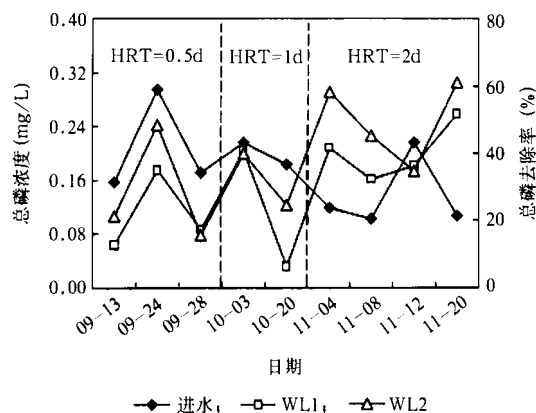


图3 填料种类对湿地运行的影响

由图 3 可见,随着湿地水力停留时间 HRT 延长,不同填料种类组合的湿地 WL1、WL2 对总磷的净化效果有所提高。由表 3 可知,在相同 HRT 下,废砖填料组成的 WL2 湿地对 TP 的去除效率优于 3 种填料组合的 WL1 湿地,说明废砖对磷的吸附效果优于卵石/废砖/大碎石组合填料,与实验室得到的结论相符。随着 HRT 的提高,WL2 湿地对 TP 的去除率显著提高。这与张海^[21]等对处理含油地表水体的潜流湿地填料的性能评价相同。当 HRT 增大为 2 d 时,WL2 湿地对 TP 的去除率提高了 21.3%,而 WL1 湿地仅提高了 10.6%。

表3 不同停留时间,各湿地系统对 TP 的去除率

湿地	TP 去除率 (%)		
	HRT=0.5 d	HRT=1 d	HRT=2 d
WL1	21.7	23.6	32.3
WL2	28.4	32.3	49.7

由图 3 还可以发现,当 HRT 为 0.5 d 和 1 d 时,WL1 和 WL2 对总磷的去除率与进水总磷浓度的变化规律一致。这主要是由于 HRT 较小,进水中的磷与填料未能充分接触。因此,当进水磷浓度增大时,可提供填料吸附的磷增加,进水总磷浓度是限制湿地系统除

磷的主要因素。当 HRT 为 2 d 时,WL1 和 WL2 对总磷的去除率随进水总磷浓度降低而升高。这主要是由于随着 HRT 的增大^[22],湿地进水的磷与填料接触较为充分,更有利于填料对 TP 的吸附、截留。此时,湿地系统中的填料种类是造成系统除磷出现差异的主要因素,而废砖内部有许多微孔结构,比表面积大,对 TP 的吸附更具优势。

根据填料的物化性质、静态吸附和野外潜流人工湿地的实际运行效果,并考虑到填料的产地及经济性,可以选择废砖作为小城镇潜流人工湿地系统的填料。

3 结论

3.1 25℃ 恒温条件下,试验所用 3 种填料(废砖、卵石、碎石)对磷的吸附量在总体上均表现出随着溶液中初始磷浓度的增加而增加的规律,吸附能力依次为废砖>碎石>卵石。

3.2 试验期间,随 HRT 的延长,不同填料种类组成的 WL1、WL2 湿地对总磷的净化效果有所提高,且废砖填料组成的 WL2 湿地对总磷的去除效果略优于 3 种填料组成的 WL1 湿地。当 HRT 为 0.5 d 和 1 d 时,进水总磷浓度是限制湿地系统除磷的主要因素;当 HRT 为 2 d 时,湿地的填料种类成为限制系统除磷的主要因素,WL2 湿地对总磷的去除效果略优于 WL1。

3.3 根据填料的物化性质、静态吸附和野外潜流人工湿地的实际运行效果,并考虑到填料的产地及经济性,可以选择废砖作为小城镇潜流人工湿地系统的填料。

4 参考文献

- [1] 杨新萍,周立祥,戴媛媛,等. 潜流人工湿地处理微污染河道水中有有机物和氮的净化效率及沿程变化[J]. 环境科学, 2008,29(8):2177-2182.
- [2] 闻岳,周琪,蒋玲燕,等. 水平潜流人工湿地对污水中有有机物的降解特性[J]. 中国环境科学, 2007,27(4):508-512.
- [3] 张建,何苗,邵文生,等. 人工湿地处理污染河水的持续性研究[J]. 环境科学, 2006,27(9):1760-1764.
- [4] Sakadevan K, Bovar H J. Nutrient removal mechanisms in constructed wetlands and sustainable water management[J]. Wat. Sci. Tech., 1999,40(2):121-128.
- [5] 张建,邵文生,何苗,等. 潜流人工湿地处理污染河水中级运行及升温强化处理研究[J]. 环境科学, 2006,27(8):1560-1564.
- [6] 孙亚兵,冯景伟,田园春,等. 自动增氧型潜流人工湿地处理农村生活污水的研究[J]. 环境科学学报, 2007,26(3):404-408.

(下转第 61 页)

- saturated porous media[J]. Environmental Science & Technology, 2000,34:3649-3656.
- [9] Gong Z Q, Wilke B M, Alef K, et al. Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from manufactured gas plant-contaminated soils using sunflower oil: Laboratory column experiments[J]. Chemosphere, 2006,62:780-787.
- [10] 李绪谦, 商书波, 林亚菊, 等. 石油类污染物在包气带土层中的水化学迁移率测定[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005,35(4):501-504.
- [11] 纪学雁, 刘晓艳, 李兴伟, 等. 分层土柱法研究石油类污染物在土壤中的迁移[J]. 能源环境保护, 2005,19(1):43-45.
- [12] Weigand H, Totsche K U, Kogel-Knabner I. Effect of fluctuating input of dissolved organic matter on long-term mobility of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils[J]. physics and chemistry of the earth, 1998,23(2):211-214.
- [13] Enell A, Reichenberg F, Warfvinge P, et al. A column method for determination of leaching of polycyclic aromatic hydrocarbons from aged contaminated soil[J]. Chemosphere, 2004,54(6):707-715.
- [14] 胡俊栋, 陈静, 王学军, 等. 多环芳烃室内土柱淋溶行为的CDE模型模拟[J]. 环境科学学报, 2005,25(6):821-828.
- [15] Chung N, Alexander M. Differences in sequestration and bioavailability of organic compounds aged in dissimilar soils[J]. Environmental Science & Technology, 1998,32:855-860.
- [16] Luthy T G, Aiken G R, Brusseau M L, et al. Sequestration of hydrophobic organic contaminants by geosorbents[J]. Environmental Science & Technology, 1997,31:3341-3347.
- [17] Brusseau M L, Jessup R E, Rao P S C. Nonequilibrium sorption of organic chemicals: elucidation of rate-limiting processes[J]. Environmental Science & Technology, 1991,25:134-142.
- [18] Guthrie E A, Bortiatynski J M, Vanheemst J H, et al. Determination of ^{13}C pyrene sequestration in sediment microcosms using flash pyrolysis-GC-MS and ^{13}C NMR[J]. Environmental Science & Technology, 1999,33:119-125.
- [19] Northcott G L, Jones K C. Experimental approaches and analytical techniques for determining organic compound residues in soils and sediment[J]. Environmental Pollution, 2000,108:19-43.
- [20] Yim U H, Hong S H, Shim W J. Distribution and characteristics of PAHs in sediments from the marine environment of Korea. Chemosphere, 2007,68:85-92.
- 责任编辑 张 弛 (收到修改稿日期:2011-12-13)

(上接第55页)

- [7] 张毅敏, 张永春. 利用人工湿地治理太湖流域小城镇生活污水可行性探讨[J]. 农业环境保护, 1998,17(5):232-234.
- [8] 李远伟, 邓仕槐, 武俊英, 等. 人工湿地基质磷吸附特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2006,25(增刊):643-648.
- [9] 张海, 张旭, 梁军, 等. 处理含油地表水体的潜流湿地填料筛选及其性能评价[J]. 环境科学学报, 2007,27(7):1121-1126.
- [10] 高超, 张桃林, 吴蔚东. 不同利用方式下农田土壤对磷的吸持与解吸特征[J]. 环境科学, 2001,22(4):67-71.
- [11] Zhu T, Jenssen P D, Machlum T, et al. Phosphorus sorption and chemical characteristics of lightweight aggregates(LWA):potential filter media in treatment wetlands[J]. Water Sci. Technol., 1997,35(5):103-108.
- [12] IWA. Constructed wetlands for pollution control: processes, performance, design and operation. International Water Association Scientific and Technical report NO.8, London, UK: IWA Publishing, 2000.
- [13] 张静, 张旭, 李广贺, 等. 潜流人工湿地中填料的理化作用及对植物生长的影响[J]. 环境科学, 2008,27(5):874-879.
- [14] 王冬梅, 刘培斌, 丁跃元, 等. 人工湿地填料对磷的吸附特性及预期使用年限[J]. 环境科学与技术, 2008,31(4):17-21.
- [15] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [16] 袁东海, 景丽洁, 高士祥, 等. 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.
- [17] Sakadevan K, Bavor H J. Phosphate absorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrate in constructed wetland systems. Water Res, 1998,32:393-399.
- [18] 汤显强, 黄岁樑. 人工湿地去污机理及其国内外应用现状[J]. 水处理技术, 2007,33(2):9-13.
- [19] 郭本华, 宋志文, 韩潇源. 碎石、沸石和页岩陶粒构建人工湿地的除磷效果[J]. 工业用水与废水, 2005,36(2):46-47.
- [20] 谭宏新, 周琪. 湿地填料的磷吸附特性及潜流人工湿地除磷效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2005,24(2):353-356.
- [21] 张海, 张旭, 梁军, 等. 处理含油地表水体的潜流湿地填料筛选及其性能评价[J]. 环境科学学报, 2007,27(7):1121-1126.
- [22] 徐丽花, 周琪. 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.
- 责任编辑 唐东雄 (收到修改稿日期:2012-02-13)