

垂直流湿地对生活污水中磷的去除效果研究

龚琴红, 田光明, 丁 晔, 吴坚阳

(浙江大学环境与资源学院环境工程系, 浙江 杭州 310029)

摘要:在 5 个不同的水力负荷条件下,研究了 2 种填料结构的垂直流湿地对低浓度生活污水中磷的去除效果。结果表明,运行初期人工湿地填料的结构和水力负荷对污水中磷的去除有一定的影响。水力负荷为 8.5、10.6、14.1 和 21.2 $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,双层填料湿地(1 号湿地)对磷的去除效率均可高达 97.5%。多层填料湿地(2 号湿地)的水力负荷为 8.5 和 10.6 $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,对磷的去除率可达 96.3%;当水力负荷为 14.1、21.2 和 42.4 $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,人工湿地对 TP 的去除效率随水力负荷的增大而逐渐降低,分别为 92.7%、81.2% 和 34.5%。磷的静态吸附实验表明,填料对磷的吸附是非常有限的。填料对磷吸附饱和前,垂直流湿地对生活污水中的磷具有良好的去除效果;填料磷吸附饱和后,去除效果较差。

关键词:垂直流湿地; 生活污水; 磷; 吸附

中图分类号:X703.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672 - 2043(2004)06 - 1046 - 04

Removal Efficiency of Phosphorus in Sewage by Vertical Flow Constructed Wetlands

GONG Qin-hong, TIAN Guang-ming, DING ye, WU Jian-yang

(College of Environment and Resource, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: Under conditions of 5 hydraulic loading rates, the effects of TP removal from a low concentration level of sewage by two vertical flow constructed wetlands, which had different media structure, were evaluated. The wastewater was fed continuously with hydraulic loading rates of 8.5, 10.6, 14.1, 21.2 and 42.4 $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ and drained intermittently at intervals of 2.5, 2, 1.5, 1, and 0.5 d, respectively. The media of the two wetlands systems were sand and gravel. The influent TP concentration was in a range of 1.3 ~ 3.3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The experimental data indicated that media structure and hydraulic loading rate affected TP removal at the early stage of experiment. Changes of TP concentration along the path were obvious different between the dual-media wetland (No1 wetland) and the multilayer media wetland (No2 wetland). TP concentration for No1 wetland reduced gradually along the path, No2 wetland changed wavy along the path. TP removal efficiency of the No1 wetland got up to 97.5% with the hydraulic loading rates of 8.5 ~ 21.2 $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$, No2 wetland 96.3% with the hydraulic rates of 8.5 and 10.6 $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$. However, TP removal rates of No2 wetland were 92.7%, 81.2% and 34.5%, respectively, with the hydraulic rates of 14.1, 21.2 and 42.4 $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$, which declined following hydraulic rates rising. P-adsorption experiment results showed that P-adsorption quantity of media were very limited. P removal efficiency was satisfactory before media P-adsorption saturation, while got worse after its saturation of the two vertical flow constructed wetlands.

Keywords: vertical flow constructed wetland; sewage; phosphorus; adsorption

垂直流湿地是一种对农村生活污水和农业面源污染治理行之有效的废水治理技术,其低投资、低运行费用、稳定的出水水质和简便的管理能较好地适应农村地区的社会经济环境。垂直流湿地对废水中磷的

去除效率在不同的文献报道中差异很大^[1-5],本文主要从垂直流湿地在不同的水力负荷条件下对低浓度生活污水中磷的去除效果进行研究,以期为提高垂直流湿地除磷效率提供理论依据和为农业面源污染治理提供技术指导。

1 试验设计与方法

1.1 填料磷静态吸附试验

为了了解填料对磷的吸附去除机理,进行了磷静

收稿日期:2004 - 04 - 06

基金项目:浙江省重大项目(021103723);国家高科技项目太湖 863 专项(2002AA601012 - 01)

作者简介:龚琴红(1973—),女,江西进贤人,浙江大学环境工程硕士,主要从事水污染控制工程研究。E-mail: gmtian@zju.edu.cn

态吸附试验。填料对磷的吸附与溶液磷浓度和吸附时间有关,根据试验进水 TP 的平均浓度,确定静态吸附试验 TP 浓度为 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。称取一系列风干后的填料 10.000 g 置于 500 mL 三角瓶中,加入浓度为 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (以 P 计)的磷酸二氢钾水溶液 200 mL 。溶液加入后开始计时,即时置于 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ 恒温室中的摇床(转速为 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)上振荡,振荡平衡时间分别为 4、8、12、24、36、48、60 和 72 h。

1.2 试验设计

模拟人工湿地装置为圆柱形,其内径 19 cm 、高 120 cm ;采用粒径为 $2 \sim 5 \text{ mm}$ 的碎石和 $0 \sim 2 \text{ mm}$ 的细砂为填料,碎石和细砂的容重分别为 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $1.38 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。1 号湿地为双层填料湿地,上层填料为 40 cm 碎石,下层为 30 cm 细砂。为了进一步强化系统虹吸排水时填料内部的充氧能力,同时设计了多层填料湿地(2 号湿地),第一层设为 30 cm 大颗粒碎石,接下来依次为 10 cm 细砂和 5 cm 碎石相间排列共 40 cm 。模拟湿地承托层相同,均为 30 cm 的碎石。1 号和 2 号湿地模拟装置各一套,不种植植物。试验采用连续进水间歇排水的方式运行,污水由蠕动泵从调节池提升至试验湿地装置中,湿地中的水平面随进水时间的延长而上升,并由虹吸管控制垂直流湿地的最高水平面。为了提高系统的供氧能力,在垂直流湿地中央设置了多孔通气管。模拟农村生活污水的状况,试验污水取自浙江大学华家池校区学生宿舍区生活污水排污口。

1.3 水力负荷设计

水力负荷是影响垂直流湿地处理效果的一个重要因素。为了寻找一个处理低浓度生活污水的最佳水力负荷,试验设计了 5 个不同的水力负荷,分别为 8.5 、 10.6 、 14.1 、 21.2 和 $42.4 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。试验采用间歇排水的方式运行,排水时间间隔分别为 2.5、2、1.5、1 和 0.5 d。场所设在户外,试验期间没有种植湿地植物。从 2003 年 3 月 21 日开始,试验从低水力负荷 $8.5 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 逐步提高到 $42.4 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 连续运行,到 7 月 5 日结束。TP 采用过硫酸钾氧化钼蓝比色法测定。

2 结果与讨论

2.1 填料磷吸附速率曲线

在 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的磷酸二氢钾水溶液中,填料磷吸附量与吸附时间之间的关系如图 1 所示。根据吸附曲线可知,填料对磷的吸附量随吸附时间的延长而增

大;碎石磷吸附量远远低于细砂。两填料对磷的吸附速率可用对数方程来拟合,碎石的吸附速率方程为 $y = 4.1295 \ln(x) - 1.84$, $r^2 = 0.9245$;细砂的吸附速率方程为 $y = 8.8834 \ln(x) - 0.5438$, $r^2 = 0.9866$ 。根据吸附速率方程计算可得,在吸附时间为 60 h 时,碎石对磷的吸附量为 $15.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而细砂为 $35.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由此可知,碎石和细砂填料对磷的饱和吸附量是相当有限的。

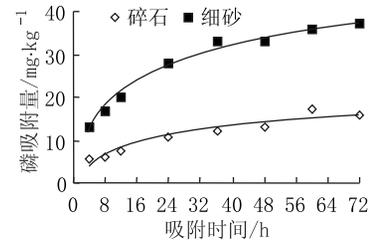


图 1 填料磷吸附速率曲线

Figure 1 Curves of media P adsorption

2.2 进出水中 TP 的变化

在不同的水力负荷条件下,进出水中 TP 浓度变化情况如图 2 所示。从图 2 中可知,进水浓度波动较大,1 号湿地在前 4 个水力负荷(即水力负荷小于 $21.2 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$)下,磷的去除效率随水力负荷的增大没有明显的变化,均高达 97.5%,出水 TP 的浓度低于 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,可以达到地表水环境质量标准(GB3838—2002)Ⅲ类湖库水质标准,说明此时水力负荷对磷的去除没有明显的影响。当水力负荷增大为 $42.4 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,1 号湿地出水 TP 浓度急速增大;当进水 TP 浓度突然降低时,出水 TP 浓度反而大于进水浓度,出现明显的磷解吸现象,TP 去除率仅为 0.96%。2 号湿地在前 2 个水力负荷对磷的去除理想,去除率可达 96.3%,出水 TP 浓度稳定在 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。但水力负荷逐步增大为 $14.1 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $21.2 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,出水 TP 浓度随运行时间的延长而逐步升高,从第 3 个水力负荷开始,TP 去除率随水力负荷的增大而逐渐下降,平均去除率分别为 92.7%、81.2% 和 34.5%。

2.3 TP 的沿程变化

垂直流湿地 TP 浓度沿程变化如图 3 所示,1 号湿地在 8.5 、 10.6 和 $14.1 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 3 个水力负荷条件下,出水 TP 浓度沿程降低;当水力负荷增大为 $21.2 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,填料深 40 cm 处出水 TP 浓度稍高于进水浓度,说明此时该填料层对磷的吸附基本饱和;水力负荷增大为 $42.4 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,填料深 60 cm 处出水 TP 浓度为 $3.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,大大高于进水浓度 $1.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,说明该填料细砂层对磷吸附达到过饱和状态,并发生了填

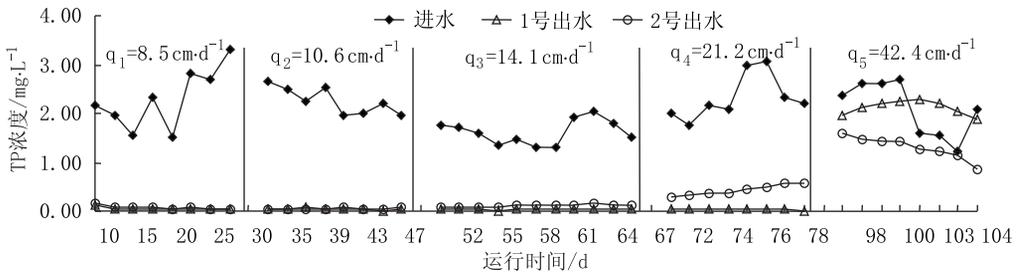


图2 进出水中TP浓度变化

Figure 2 Changes of the influent and effluent TP concentration

料磷的解吸。1号湿地TP沿程变化规律说明双层填料湿地除磷的主要部位是40~70cm的细沙层。2号湿地TP浓度沿程波浪式变化,各取样点处的TP浓度随着运行时间的延长、水力负荷的增大而逐渐增大。多层填料湿地磷去除的主要部位是20~40cm和60~80

cm。填料层55~60cm为碎石,这可能是60cm深处TP浓度较高的主要原因。湿地系统TP沿程变化和磷去除效率之间的差异,说明填料的结构对磷去除有一定的影响。

2.4 填料磷吸附与垂直流湿地磷去除之间的关系

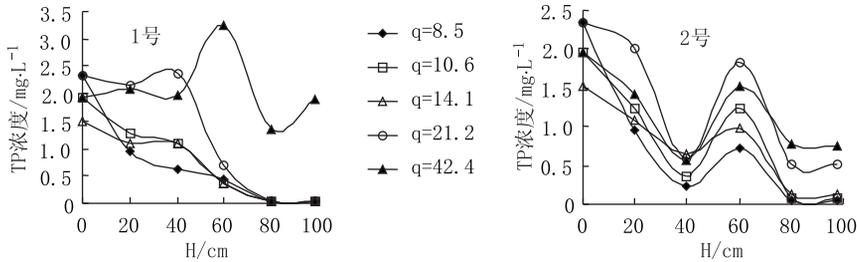


图3 TP的沿程变化

Figure 3 Changes of TP concentration along the path

人工湿地对磷的去除主要是通过填料吸附、微生物和植物的吸收以及有机物的吸附等来实现的^[6, 7],但人工湿地填料对磷去除的贡献率有多大,尚没有定论。根据运行期间进出水中TP浓度的变化,对每个垂直流湿地在5个水力负荷条件下磷的去除量进行计算,在每个水力负荷运行结束时,它们对磷的累积去除量见图4。根据静态吸附速率曲线方程,可估算供试垂直流湿地填料在不同的吸附时间对磷的吸附量。湿地对磷的吸附量随时间的关系如图4所示。在排水时间间隔为2.5、2和1.5d时,湿地填料在所对应的吸附时间内对磷的吸附量远大于湿地磷累积去除量,仅从吸附的角度来考虑,填料对磷仍有一定的吸附容量,在这种条件下,垂直流湿地对磷具有良好的去除效果。综合考虑微生物和湿地系统中累积的有机物对磷去除的作用,供试湿地在第4个水力负荷运行结束时,填料对磷的吸附已基本达到饱和状态,之后湿地对TP的去除主要依靠微生物吸收和有机物吸附作用,故湿地在第5个水力负荷TP的去除效率非常低,1号湿地仅为0.96%,2号湿地为34.5%。

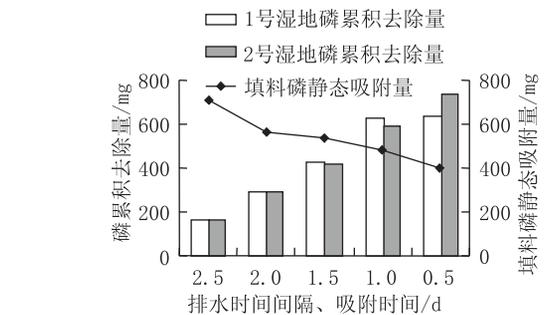


图4 湿地磷累积去除量与填料磷吸附容量关系

Figure 4 Relations between P accumulative adsorption capacity of VFCW and media P adsorption capacity

3 结论

(1) 无植物的垂直流湿地对低浓度生活污水中磷去除的主要途径是填料对磷的吸附,当填料磷吸附趋于饱和后,垂直流湿地对磷的去除效果较差。

(2) 1号湿地和2号湿地对磷去除之间的差异,说明垂直流湿地填料结构对污水中磷的去除有一定的影响。

(3) 在水力负荷为8.5~21.2 cm·d⁻¹时,双层

填料湿地(1号湿地)磷的去除与水力负荷之间没有明显的关系,在运行初期对磷去除效率均可达到 97.5%;当水力负荷为 $42.4 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,由于水力停留时间的缩短,填料对磷的吸附容量明显变小,磷的去除主要依靠微生物的吸收来实现,故 1 号湿地对磷的去除效率迅速降低(仅为 0.96%)。

(4) 当水力负荷为 $8.5 \sim 10.6 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,多层填料湿地(2号湿地)对磷的去除效率可达 96.3%,与水力负荷之间没有明显的关系;而水力负荷为 14.1、21.2 和 $42.4 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,垂直流湿地对 TP 的去除效率随水力负荷的增大而逐渐降低,分别为 92.7%、81.2% 和 34.5%。

(5) TP 去除效果与水力负荷和垂直流湿地运行时间有关,水力负荷越大,运行时间越长,去除效率越低。从长远来看,采用垂直流湿地处理生活污水不宜采用太大的水力负荷。

参考文献:

[1] Verhoeven J T A, Meuleman A F M. Wetlands for wastewater treatment:

- Opportunities and limitations[J]. *Ecol Eng*, 1999, 12: 5 - 12.
- [2] Luederitz V, Eckert E, Lange - Weber M, Lange A, Gersberg R M. Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands[J]. *Ecol Eng*, 2001, 18: 157 - 171.
- [3] Kadlec R H. Chemical, physical and biological cycles in treatment wetlands[J]. *Wat Sci Tech*, 1999, 40(3): 37 - 44.
- [4] 吴振斌,陈辉蓉,贺 锋,等. 人工湿地系统对污水磷的净化效果[J]. *水生生物学报*, 2001, 25(1): 28 - 35.
- [5] 杨 敦,徐丽花,周 琪. 潜流式人工湿地在暴雨径流污染控制中的应用[J]. *农业环境保护*, 2002, 21(4): 334 - 336.
- [6] Tanner C C, Sukias P S and Upsdell M P. Subsurface phosphorus accumulation during maturation of gravel - bed constructed wetlands[J]. *Wat Sci Tech*, 1999, 40 (3): 147 - 154.
- [7] Sakadevan K, Bavor H J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slag and zeolite to be used as substrates in constructed wetlands[J]. *Wat Res*, 1998, 32 (2): 393 - 399.