

不同级配基质方式下垂直流人工湿地净化效果及渗透性能研究

王 荣^{1,2}, 贺 锋¹, 肖 蕾^{1,2}, 武俊梅^{1,2}, 徐 栋¹, 吴振斌¹

(1.中国科学院水生生物研究所淡水生态和生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 2.中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要:本研究设置了基质正、反级配垂直流人工湿地,通过测定系统对 COD_Cr 、TN、TP、 NH_4^+-N 等指标的去除效率、有效孔隙率和渗透系数的变化来比较两种级配方式下垂直流人工湿地净化效果和系统渗透性能。结果表明,两种级配方式下,垂直流湿地系统对污染物去除的综合效果优于单一粒径的无烟煤湿地系统;反级配系统在除磷方面存在优势,正级配系统在 COD_Cr 去除方面显著强于反级配系统,在脱氮方面两者不存在显著性差异;反级配系统的有效孔隙率在各层的降幅变化不大,而正级配系统表层及上层有效孔隙率的降幅显著大于中层和底层;正级配系统渗透系数的变化显著高于反级配系统,且出现了持续性表面滞水现象。以上结果均表明,反级配垂直流湿地系统可以在保证净化效率的同时,缓解湿地基质堵塞,有效延长基质的使用寿命。

关键词:人工湿地;无烟煤;正级配;反级配;净化效果;有效孔隙率;渗透系数

中图分类号:X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)05-0969-07

Treatment Efficiency and Permeability of Vertical Flow Constructed Wetland in Different Gradation Substrates

WANG Rong^{1,2}, HE Feng¹, XIAO Lei^{1,2}, WU Jun-mei^{1,2}, XU Dong¹, WU Zhen-bin¹

(1.State Key Lab of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Science, Wuhan 430072, China; 2.Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: When constructed wetlands (CWs) were applied in the sewage treatment, the clogging of the substrates appeared to be the crucial limited factor. Therefore, anti-graded system was proposed. This paper presented a comparative study on the treatment efficiency of some main pollutants including COD_Cr , TN, TP, NH_4^+-N and the permeability between progressively-graded and anti-graded vertical flow constructed wetland system. The results showed that in the two gradations, the comprehensive effects to main pollutants were significantly higher than that of the system which was filled with single size anthracite. The progressively-graded system showed better performance in the removal of COD_Cr , while anti-graded system in the removal of TP. As for the removal of N, there was no significant difference between the two systems. The depressed extents of available porosity rate in different layers of the anti-graded system were similar. While in the progressively-graded system, the depressed extents of available porosity rates in surface and upper layers were significant higher than those in middle and bottom layers. Variation of penetration coefficient in the progressively-graded system which appeared the upper backwater for a long time was obviously greater than that in the anti-graded system. These results indicated that the anti-graded system had advantages to slow down the clogging, prolong the longevity of the substrates in CWs, as well as maintaining higher removal efficiency.

Keywords: vertical flow constructed wetland; anthracite; progressively-graded; anti-graded; treatment efficiency; available porosity rate; penetration coefficient

收稿日期:2009-10-21

基金项目:国家自然科学基金(50808172,20877093,30870221);国家“十一五”水专项(2009ZX07106-002-004)

作者简介:王 荣(1985—),女,湖北荆门人,硕士研究生,研究方向为人工湿地。E-mail:xiaofei0329@163.com

通讯作者:贺 锋,吴振斌 E-mail:hefeng@ihb.ac.cn, wuzb@ihb.ac.cn

人工湿地是 20 世纪 70—80 年代发展起来的一种污水净化生态工程技术,其净化机理包括物理、化学和生物的重重协同作用^[1]。由于其具有处理效果好、投资费用低、运行维护简单以及良好的生态和环境效益等优点,因而越来越受到人们的重视^[2]。

当前,困扰人工湿地高效长效运行最严重的问题之一就是基质堵塞^[3],它使得人工湿地净化效能降低,甚至无法继续运行。因此,如何解决人工湿地的堵塞问题成为当前研究的热点之一^[4-5]。研究人员进行了许多有益的尝试,例如前置污水预处理^[6-8]、使用高效基质^[9-10]、对基质进行粒径组配^[11]等。其中,粒径组配对湿地内部空隙大小和水容量有决定性的影响,是影响基质堵塞的主要因素,但相关研究还不全面、深入。粒径较大的基质可以有效地防止堵塞的发生,但过大的粒径会缩短水力停留时间,进而影响净化效果,因此,基质粒径的选择需要在保证净化效果(小粒径)和防止堵塞(大粒径)之间寻求平衡点^[12]。

对于有多层基质的人工湿地,除基质材质外,不同粒径基质之间配比的选择也十分重要。为了有效延缓基质堵塞问题,国内外学者参照快速过滤原理提出了基质反级配的概念。Zhao 等^[13]利用正级配(即上部填充小粒径基质,下部填充大粒径基质)和反级配(即上部填充大粒径基质,下部填充小粒径基质)的垂直流普通砾石床处理高浓度的养猪废水,发现反级配人工湿地不仅能取得很好的污染物去除效果,而且在延缓基质堵塞方面有着明显的优势。但是对于目前研发并广泛应用的一些新型基质,还没有相关的正、反级

配性能比较的报道。为此,本研究选取新型基质——无烟煤作为研究对象,比较了正、反级配方式下垂直流人工湿地的净化效果以及抗堵塞性能,以期为提高人工湿地的性能提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验装置

垂直流人工湿地系统共 3 套,采用内径 250 mm 的 PVC 管制成,其中管高 750 mm,基质有效高度为 600 mm,管顶留有 100 mm 的布水区,另有 50 mm 的超高。自管顶向下每隔 150 mm 设置 1 个分层水样采集口及 1 个测压管接口。如图 1。

无烟煤取自河南巩义,大颗粒基质粒径为 10~16 mm,小颗粒基质粒径为 5~8 mm,组成成分如下:CO₂ 74.6%、SO₃ 7.65%、Al₂O₃ 7.36%、SiO₂ 7.68%、Fe₂O₃ 1.69%、CaO 1.10%。

1 号系统填充反级配基质,其中种植植物美人蕉(*Canna generalis*)。2 号系统填充反级配基质,未种植植物。3 号系统填充正级配基质,也种植植物美人蕉(*Canna generalis*)。

1.2 运行方式

系统采用间歇式进水,每日进水 4 次(进水时间分别为 9:00 am、1:00 pm、5:00 pm、9:00 pm),日进水量为 44 L,水力负荷为 900 mm·d⁻¹。

1.3 进水特性

系统进水采用自配污水(C:N>20),其中碳源主要采用葡萄糖,氮源主要采用硫酸铵及硝酸钾,磷源主

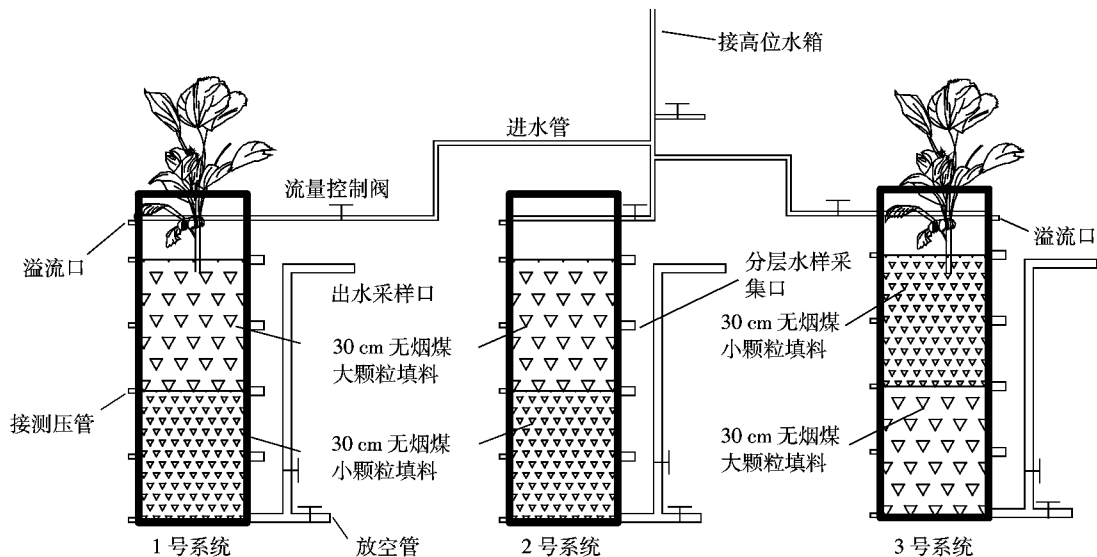


图 1 垂直流人工湿地单元模型示意图

Figure 1 The schematic diagram of the experimental unit model

要采用磷酸二氢钾。实际配置后的污水浓度及相应的污染物负荷如表 1。

表 1 进水水质及相应的污染物负荷

Table 1 The water quality of the inflow and the loading of pollutants in every system

主要指标	COD _{Cr}	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N
进水水质/mg·L ⁻¹	707.69±94.45	34.63±9.04	3.29±0.22	23.40±0.97
污染物负荷/g·m ⁻³ ·d ⁻¹	635.48	31.10	2.95	21.01
水温/℃	30±2.4			
平均环境温度/℃	33.7			

1.4 主要监测指标及方法

实验运行中,每周采集水样两次测定 pH、DO、COD_{Cr}、TN、TP、NH₄⁺-N 等指标,同时测定整个系统及各层的有效孔隙率、系统的出水流量及水头损失,并计算渗透速率。水质指标采用国家环保局标准分析方法^[14]:COD 采用重铬酸钾法;TN 采用过硫酸钾-紫外分光光度法;TP 采用过硫酸钾氧化-钼锑抗比色法;NH₄⁺-N 采用纳氏试剂分光光度法。有效孔隙率按照基质饱和和放空的水量体积进行计算。同时,渗透系数的测定参照土工实验方法标准(GB/T50123—1999)中的常水头法^[15]进行计算。

1.5 数据处理

测定结果用 SPSS13.0 统计软件进行 One-way ANOVA 方差分析,用 LSD 法进行均数的多重比较,显著性水平设为 0.05。

2 结果与分析

2.1 进出水 pH 及 DO

由表 2 可以看出,3 个系统出水 DO 显著降低。经方差分析,1 号系统出水 DO 显著高于 3 号系统出水($P<0.05$),1、2 号系统出水 DO 不存在显著性差异($P>0.05$)。这表明表面大颗粒基质的复氧作用显著高于表面小颗粒基质,而植物的种植与否对出水 DO 影响不大;随运行时间的延长,出水 DO 均呈现出下降趋势,据分析,这与表面生物膜的累积有关,过厚的生物膜阻碍了氧气的进入。此外,3 个系统的出水 pH 也

表 2 3 个系统进出水 DO 及 pH

Table 2 The DO and pH of the outflow and inflow in the three systems

在线指标	进水	1 号系统出水	2 号系统出水	3 号系统出水
DO/mg·L ⁻¹	4.05±0.28	1.03±0.17	1.00±0.18	0.85±0.17
pH	7.37±0.24	6.07±0.21	6.08±0.25	6.00±0.23

显著降低,无烟煤基质不论何种级配方式的出水 pH 均呈现出弱酸性,这主要与两方面因素相关:一是基质材质的影响^[16],无烟煤填料中富含铁铝元素,在实验条件下可能会游离出来,形成铁铝氧化物沉淀,从而使系统呈酸性;二是本研究有机负荷高,湿地下层会出现严重厌氧状态,污水流经湿地内部时产生厌氧发酵现象^[17],从而使湿地系统内部酸性增强。3 个系统的出水 pH 不存在显著性差异($P>0.05$),说明级配方式的变化及植物的种植对出水 pH 无显著性影响。

2.2 净化效果

3 个系统对污水中主要污染物(COD、TP、TN、氨氮)的去除效果如图 2。

随运行时间的延长,3 个系统对 COD 的去除效率呈现上升趋势,这主要与系统内微生物群落的逐渐成熟稳定相关。经统计分析,3 号系统对 COD 的去除效率显著高于 1 号系统($P<0.05$);1、2 号系统之间不存在显著性差异($P>0.05$)。3 号系统(正级配系统)由于表层填充的是小颗粒基质,比表面积相对大一些,可以附着更多的微生物,且表层氧气浓度比较高,有利于 COD 的好氧降解。此外,植物的种植对 COD 去除效率的影响不显著,这与 Yang^[18]和 Tang^[19]的研究结果是一致的。

3 个系统对 TP 的平均去除效率均高于 70%,均略优于单一粒径的无烟煤系统^[20]。但 3 个系统对 TP 的日去除率呈现下降趋势。经方差分析,1、3 号系统对 TP 的去除效率之间存在显著性差异($P<0.05$);1、2 号系统之间不存在显著性差异($P>0.05$)。此外,3 个系统对 TP 的去除率下降的起始时间也存在着差异:3 号系统从正式运行后的第 12 d 即出现下降,而 1、2 号系统从第 20 d 开始出现了下降。以 TP 的平均去除效率估算 3 个系统的磷吸附总量:系统调试及运行时间共 75 d,1、2、3 号系统基质吸附磷总量分别为 177.01、172.43、157.83 mg·kg⁻¹,均显著低于张新颖等^[21]研究得出的无烟煤最大吸附容量 666.67 mg·kg⁻¹,因此排除基质吸附饱和导致除磷效率下降的可能性。经观察,3 个基质柱表面基质颗粒上均可以观察到一层很厚的生物膜,这表明磷去除效率的下降有可能是生物膜的累积影响了水中磷素向基质传质的过程^[22]导致的;由于 3 号系统的主要净化区间里填充小颗粒基质,比表面积大,拦截的有机物较多,生物膜累积快,较早抑制基质对磷的有效去除。此外,1、2 号系统的出水 DO 显著高于 3 号系统,这也影响了系统内部微生物对磷的去除^[23]。

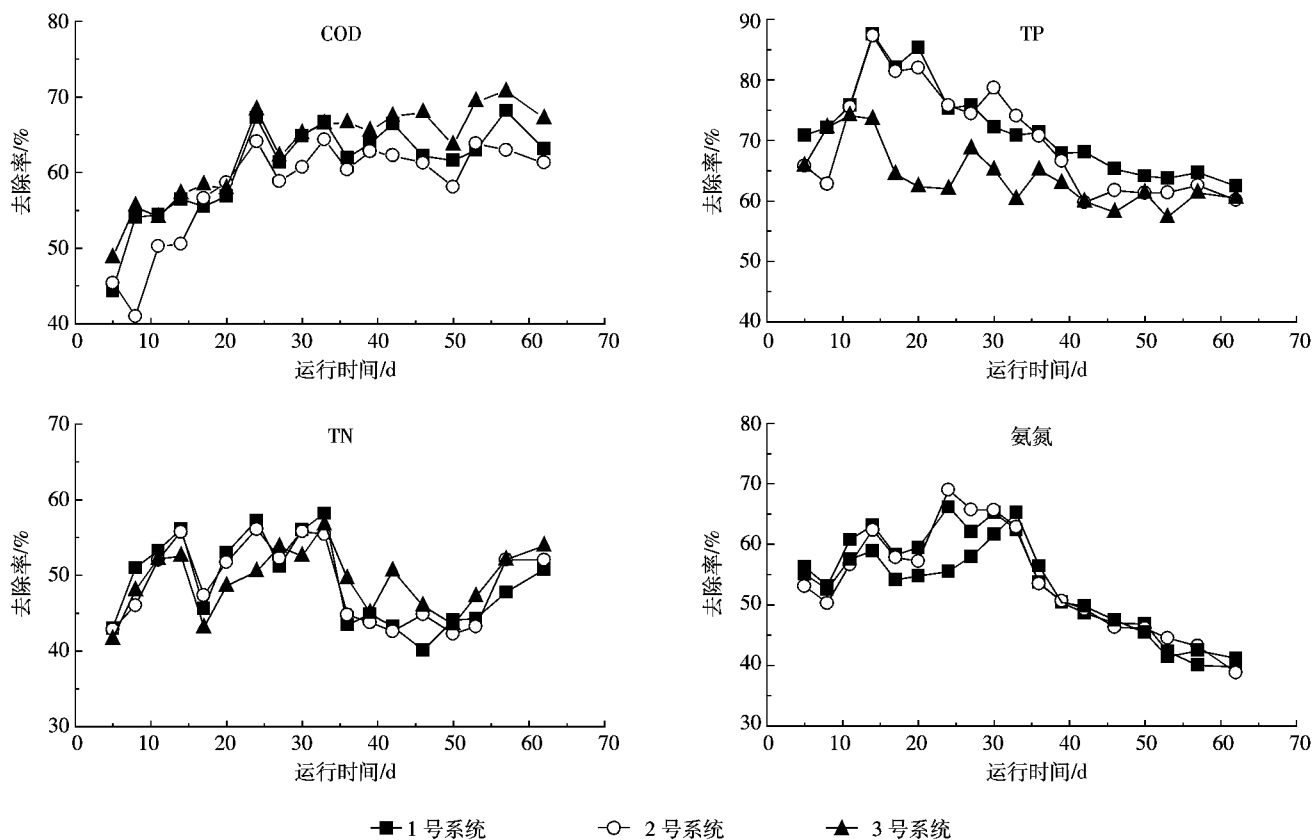


图 2 3 个系统对主要污染物的净化效果

Figure 2 The removal efficiency of the main pollutants in the three systems

3 个系统对 TN 的去除效率均高于单一粒径的无烟煤基质^[9],但存在一定的波动,相互之间不存在显著性的差异($P>0.05$)。进行基质组配的系统可能有益于对传统脱氮过程中的硝化反硝化过程进行合理的分区,从而可以提高除氮效率。后期 TN 的去除效率呈现先下降后上升的趋势:前段由于溶氧量的下降,氨氮无法有效去除影响了总氮去除效率;后段系统对低溶氧量有了一定的适应,且环境温度普遍高于 30℃,反硝化细菌作用增强,系统中仅痕量硝态氮检出,从而导致 TN 的去除效率出现上升。

3 个系统对氨氮的去除效率呈现先上升后下降的趋势。前期由于环境温度较高、微生物的迅速成熟且氧气含量比较高,对氮素可以有效去除;后期由于生物膜的积累影响了氧气的进入,影响了硝化作用的进行,从而使氨氮的去除效率急剧下降。

2.3 有效孔隙率的变化

2.3.1 3 个系统整体有效孔隙率的变化

实验条件下,各垂直流人工湿地系统的整体有效孔隙率的变化如图 3。对 3 个系统的实测数据进行分析可以看出,人工湿地在运行过程中有效孔隙率均有

一定程度的降低,1、2、3 号系统的整体有效孔隙率的降幅分别为 9.02%、8.97%、9.43%,其中 3 号系统略微大于 1、2 号系统。这与 COD 的去除效率有一定的关系,有机物截留多的系统将产生更多的生物膜,占据更多的空间,则有效孔隙率也降低的更快一些。

2.3.2 3 个系统垂直分层有效孔隙率的变化

定期对各系统各层有效孔隙率进行测定,可得到 3 个系统各层有效孔隙率的变化图(图 4),各系统

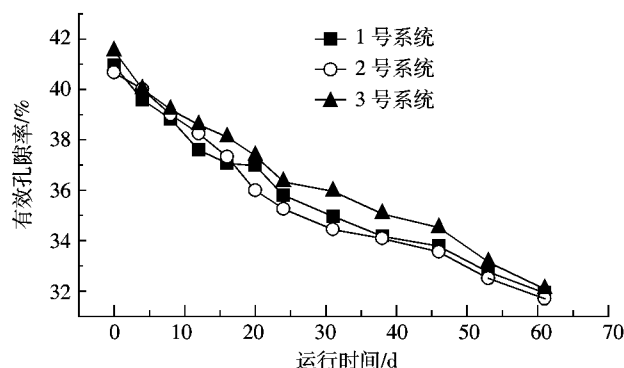


图 3 3 个系统整体有效孔隙率的变化

Figure 3 Variation of available porosity rate in the experimental period

各层的降幅如表3。3个系统各层的有效孔隙率均出现一定的降低,但降幅各不相同。其中1、2号系统各层降幅比较平均,表层最大,底层最小,但差异并不明显;1、2号系统表层填充的为大颗粒基质,附着的微生物不如小颗粒基质丰富,对有机营养物的截留降解能力有限,因而部分营养物质可以随水流至中下层,提供给中下层小颗粒基质较为充足的有机营养,则可以在中下层形成较多的生物膜,导致了基质有效孔隙率降低的也较大。3号系统各层有效孔隙率也出现降低,但降幅迥异,其中表层的有效孔隙率降低的最大,高达20%,上层也高达11%,而中下层仅有略微降低。这主要是与3号系统的基质布置相关,表层及上

层填充了小颗粒基质,比表面积大,且氧气含量高,可以截留大量的有机营养物并可以快速好氧降解;最终中层和底层只有少量的营养物质,产生的生物膜量少,则基质的有效孔隙率降低较小。

2.4 出水流量、水头损失及渗透系数的变化

3个系统的出水流量变化及水头损失变化如图5。3号系统由于底层填充大颗粒基质,可快速收集上层下渗的水从而出水流量最大,但是变化也最大。1号系统由于种有植物,具有一定的导水性,出水流量比2号系统大,但下降的速率也比2号系统大。在实验运行期间,3号系统的水头损失持续上升,运行第61 d时,高达1.8 cm,这主要与3号系统表层丰富的生物膜有关。

根据出水流量及水头损失计算出3个系统的渗透系数的变化如图6。由于实验在夏天进行,最高气温均在35℃以上,导致生物膜快速生长,3个系统的渗透系数均出现降低,但降幅各不相同。3号系统降幅最大,降至初始渗透系数的1/30,且开始阶段降低较快,到后期逐渐变慢趋于平缓。1、2号系统渗透系数分别降至初始值的1/3、1/2,前期渗透系数反而出

表3 分层有效孔隙率的降幅

Table 3 The depressed extents of available porosity rate in different layers

有效孔隙率 降幅/%	表层/ 0~15 cm	上层/ 15~30 cm	中层/ 30~45 cm	底层/ 45~60 cm
1号系统	10.06	8.84	9.39	7.89
2号系统	10.99	8.84	9.93	6.39
3号系统	20.09	11.29	3.95	3.81

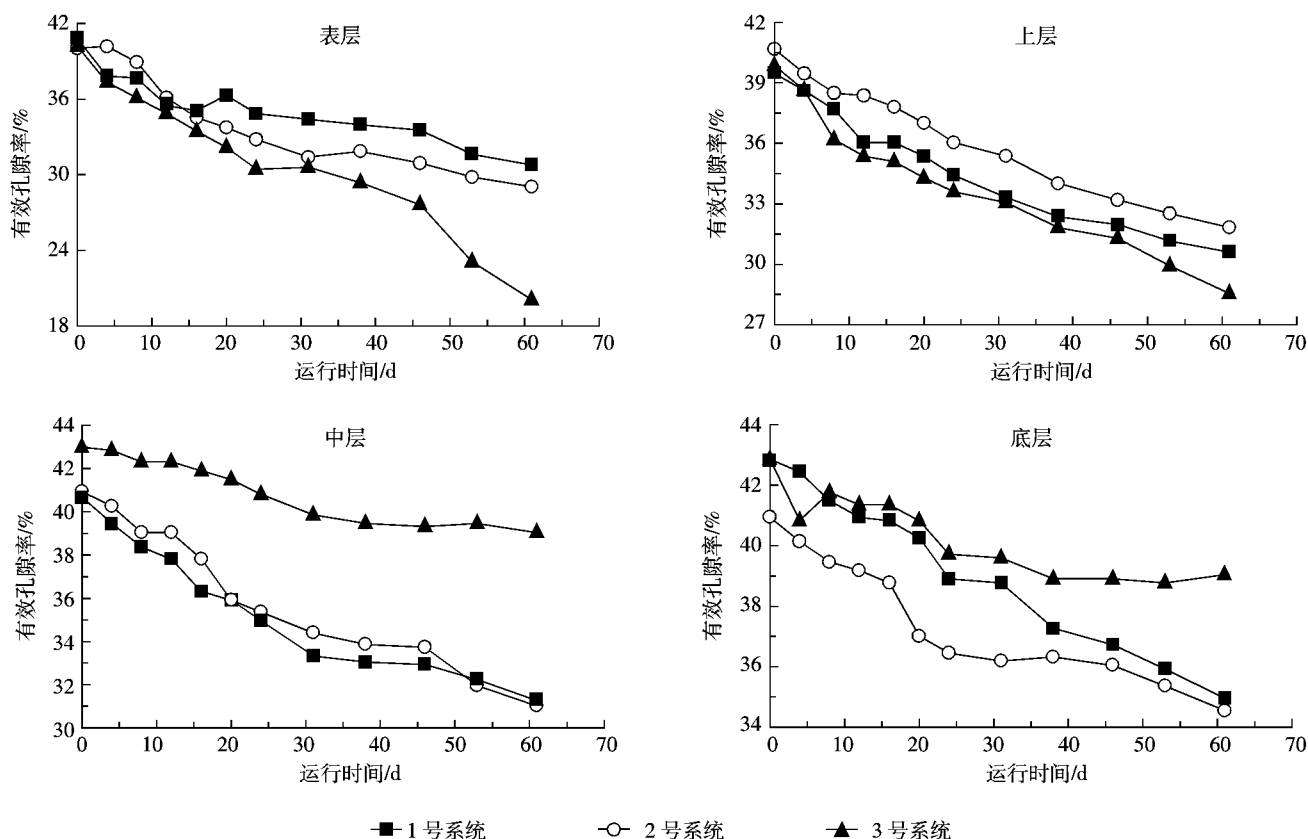


图4 3个系统分层有效孔隙率的变化

Figure 4 Variation of available porosity rate in different layers of the three systems

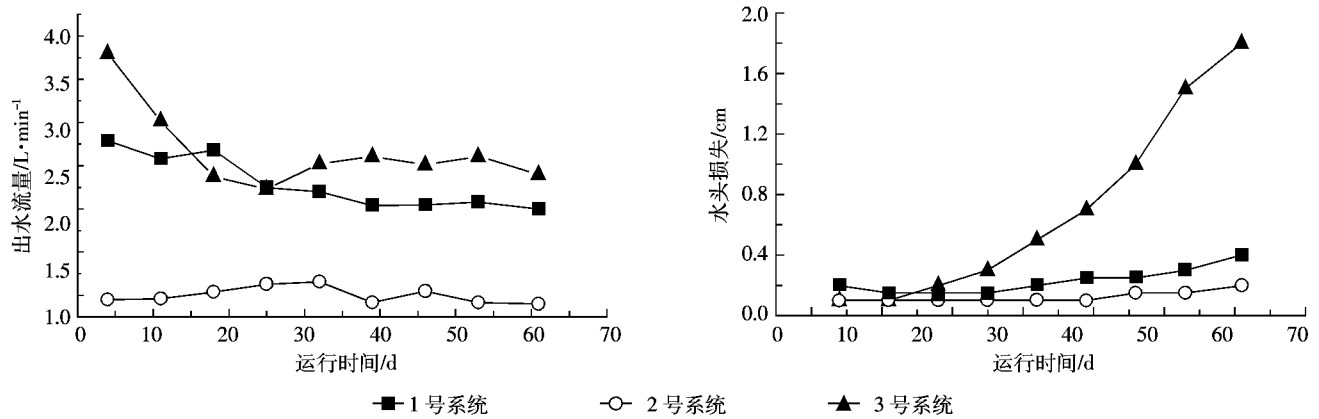


图 5 3 个系统出水流量及水头损失的变化

Figure 5 Variation of the quantity and the head loss of the outflow in the three systems

现部分轻微上升现象,后期则是逐步下降,但下降速率比较缓慢。3号系统这种基质填充方式导致大部分的有机营养物在表层和上层被降解,则大量的生物膜形成于中上层,而下层较少,系统的上层滤水能力出现了下降,致使系统运行第45 d就出现持续性的表面滞水现象,进一步导致渗透系数的不断下降。按照 Siegrist 等^[24]划分的人工湿地堵塞过程的3个阶段,3号系统的堵塞过程已经从堵塞开始阶段(渗透速度快速下降)运行至堵塞发展阶段(渗透速度平稳下降至持续滞水)。1、2号系统由于各层形成生物膜量差异不大,至实验结束均未出现表面滞水现象。

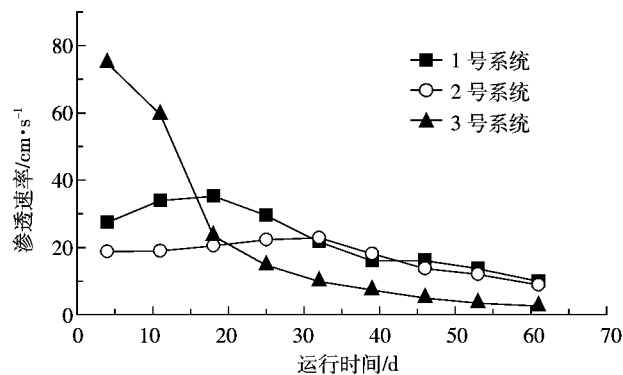


图 6 整体渗透速率的变化

Figure 6 Variation of penetration coefficient in the experimental period

3 结论

(1)正反级配系统在对主要污染物的去除效率方面均优于单一粒径的无烟煤系统。

(2)在高有机负荷运行条件下,正反级配系统出水 pH 不存在显著性差异。反级配系统的出水溶氧显

著高于正级配系统,正级配系统对 COD 的平均去除效率(63%)显著高于反级配系统(58%);在 TP 的去除方面,反级配系统平均去除效率为 72%,显著高于正级配系统的 64%;两种级配方式在对氮的去除方面没有显著性差异。

(3)在水力负荷为 $900 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 的运行条件下,正级配系统渗透性能显著降低至初始值的 $1/30$,降幅显著高于反级配系统。

综合上述结论,在高水力负荷($900 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)和高有机负荷[(707.69 ± 94.45) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$]运行条件下,反级配系统可以在保证较高的主要污染物净化效率的同时,有效地减缓系统的堵塞过程,从而延长基质的使用寿命。

参考文献:

- [1] Hammar D A, Breen P F, Perdomo S, et al. Constructed wetlands for waste water treatment[M]. Michigan: Lewis Publishers Inc, 1989, 5-20.
- [2] 吴振斌. 复合垂直流人工湿地[M]. 北京: 科学出版社, 2008. Wu Z B. Integrated vertical-flow constructed wetland[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [3] Blazejewski R, Murat-Blazejewska S. Soil clogging phenomena in constructed wetlands with subsurface-flow[J]. *Water Science & Technology*, 1997, 35(5): 183-88.
- [4] Turon C, Comas J, Poch M. Constructed wetland clogging: A proposal for the integration and reuse of existing knowledge[J]. *Ecological Engineering*, 2009(in press).
- [5] Zhao L F, Zhu W, Tong W. Clogging processes caused by biofilm growth and organic particle accumulation in lab-scale vertical constructed wetlands[J]. *Journal of Environment Science*, 2009, 21(6): 750-757.
- [6] 詹德昊. 复合垂直流构建湿地长期安全运行机理与对策研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文, 2003. Zhan D H. Studies on mechanism and strategy for long-safety of integrated vertical flow constructed wetland[D]. Beijing: Doctoral Disserta-

- tion, Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2003.
- [7] 袁英兰, 常文越, 张帆, 等. 浮动生化床预处理工艺在人工湿地系统中的应用[J]. 环境保护科学, 2006, 32(3): 16-18.
Yuan Y L, Chang W Y, Zhang F, et al. Application of pretreatment technique of flooded to constructed wetland system[J]. *Environment Protection Science*, 2006, 32(3): 16-18.
- [8] 郭晋玲, 宋逸清. PAC 与 PAM 复合絮凝剂对湿地进水预处理试验[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2009, 29(4): 379-382.
Guo J L, Song Y Q. Using PAC and PAM composite coagulant to pretreat constructed wetlands influent[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2009, 29(4): 379-382.
- [9] 崔理华, 朱夕珍, 骆世明, 等. 几种人工湿地基质磷的吸附特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 894-898.
Cui L H, Zhu X Z, Luo S M, et al. The characteristic of phosphorous adsorption on different substrates used in constructed wetland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3): 894-898.
- [10] Sakadevan K, Bavor H J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems[J]. *Water Research*, 1998, 32(2): 393-399.
- [11] 莫凤鸾, 王平, 李淑兰, 等. 人工湿地系统的维护[J]. 云南环境科学, 2004, 23(增刊): 5-8.
Mo F L, Wang P, Li S L, et al. Maintenance of artificial wetland system[J]. *Yunnan Environmental Science*, 2004, 23(supplement): 5-8.
- [12] Davison L, Headley T, Pratt K. Aspects of design, structure, performance and operation of reed beds—eight years experience innorth eastern New South Wales, Australia[J]. *Water Science & Technology*, 2005, 51(10): 129-138.
- [13] Zhao Y Q, Sun G, Allen S J. Anti-sized reed bed system for animal wastewater treatment: A comparative study[J]. *Water Research*, 2004, 38(12): 2907-2917.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测方法[M]. 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration of China. Standard methods for testing water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environment Science Press, 2002.
- [15] 中华人民共和国水利部主编. 土工试验方法标准[M]. 北京: 中国计划出版社, 1999: 68-74.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for soil test method[M]. Beijing: China Planning Press, 1999: 68-74.
- [16] 张翔凌. 不同基质对垂直流人工湿地处理效果及堵塞影响研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文, 2008.
Zhang X L. Studies on performance of purification and influence on clogging of vertical flow constructed wetlands with different filter media [D]. Beijing: Doctoral Dissertation, Graduate School of the Chinese Academy of Science, 2008.
- [17] 叶建锋. 垂直流人工湿地中污染物去除机理研究[D]. 上海: 同济大学博士学位论文, 2007.
Ye J F. Research on removal mechanism for pollutant in vertical-flow constructed wetland[D]. Shanghai: Doctoral Dissertation, Tongji University, 2007.
- [18] Yang Q, Chen Z H, Zhao J G, et al. Contaminant removal of domestic wastewater by constructed wetlands: Effects of plants species[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2007, 49(4): 437-446.
- [19] Tang X Q, Huang S L, Scholz M. Nutrient removal in pilot-scale constructed wetlands treating eutrophic river water: assessment of plants, intermittent artificial aeration and polyhedron hollow polypropylene balls[J]. *Water Air Soil Poll*, 2009, 197: 61-73.
- [20] 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.
Zhang X L, Zhang S, He F, et al. Effect of different filter media on the treatment performances of vertical flow constructed wetlands at high hydraulic loading [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(5): 1905-1910.
- [21] 张新颖, 丁为民, 陈豪, 等. 人工湿地填料的静态吸附特性和动态除磷能力研究[J]. 江苏农业科学, 2009, 3: 416-418.
Zhang X Y, Ding W M, Chen H, et al. Study on static adsorption properties and dynamic phosphorus removal capacity of substrate in constructed wetland[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2009, 3: 416-418.
- [22] 李剑波, 闻岳, 赵星杰, 等. 有机物对人工湿地基质除磷影响研究[J]. 环境科学, 2008, 29(7): 1880-1883.
Li J B, Wen Y, Zhao X J, et al. Effect of organic matter on phosphorus removal for substrate in constructed wetland[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(7): 1880-1883.
- [23] 吴建强, 黄沈发, 丁玲, 等. 人工湿地中的 SND 机理以及 DO、pH 对其的影响[J]. 环境污染与防治, 2005, 27(6): 476-478.
Wu J Q, Huang S F, Ding L, et al. Mechanism on simultaneous nitrification and Denitrification(SND) in constructed wetlands with emphasis on DO and pH effect[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2005, 27(6): 476-478.
- [24] Siegrist R L, Boyle W C. Wastewater induced soil clogging development[J]. *Journal of Environment Engineering*, 1987, 113(3): 550-566.
- 致谢: 张甬元教授和刘保元教授在实验设计和实验开展过程中给予了指导, 成水平、梁威、周巧红、张翔凌和张丽萍等在实验实施和论文修订过程中给予了支持和帮助, 在此一并感谢。