

水平潜流人工湿地对污水中有机物的降解特性

闻 岳,周 琪*,蒋玲燕,姚枝良,殷 峻 (同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室,上海 200092)

摘要:采用芦苇-砾石(W1)、组合植物-砾石(W2)和芦苇-组合填料(W3)3种不同类型的水平潜流人工湿地系统处理受污染水体.当进水 COD 为 44~96mg/L, HRT ≥ 2 d 时,3 个系统出水 COD 均 < 30 mg/L,达到地表水环境 Ⅲ类水体 COD 标准.W2 系统在 HRT ≥ 4 d 时,出水 COD < 20 mg/L,达到 Ⅲ类水体 COD 标准.有机物降解速率依次为 W2 $>$ W3 $>$ W1.GC/MS 分析表明,与 W1 相比较,W2 和 W3 出水中有机物的碳原子数、分子量和化合物组成类似,对污染物向低碳小分子迁移转化更为彻底.运用 PCR-DGGE 技术考察不同湿地系统中微生物种群及其分布特征表明,不同类型湿地系统中水生植物和填料种类及空间位置对微生物群落结构具有显著的影响.

关键词:水平潜流人工湿地;受污染水体;有机物降解;微生物多样性

中图分类号:X703 文献标识码:A 文章编号:1000-6923(2007)04-0508-05

Degradation characteristics of organic substances in polluted surface waters treatment with horizontal subsurface flow constructed wetlands. WEN Yue, ZHOU Qi*, JIANG Ling-yan, Yao Zhi-liang, YIN Jun (State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuses, Tongji University, Shanghai 200092, China). *China Environmental Science*, 2007,27(4): 508~512

Abstract: Three different types of horizontal subsurface flow constructed wetlands, i.e. reed/gravel bed (W1), multiple plants/gravel bed (W2) and reed/multiple substrates bed (W3), were applied to treat the polluted surface water. COD of the three beds were reduced from influent 44~96mg/L to effluent below 30 mg/L, with HRT no less than 2d, reaching case-Ⅲ waters for GB3838-2002. The performance of COD removal efficiency was the best in W2 bed with effluent below 20mg/L with HRT no less than 4d, reaching case-Ⅲ waters. The degradation rate of organic compounds was in turn W2 $>$ W3 $>$ W1. Organic compounds in effluents of W2 and W3 were similar in carbon number, molecular weights and components with more complete degradation, compared with that of W1. The microbial community and its distribution investigated by PCR-DGGE technology showed that the types of macrophytes and substrate as well as space distributions significantly affected the microbial community in the wetland systems.

Key words:horizontal subsurface flow constructed wetlands ;polluted surface water ;degradation of organic compounds ; microbial diversity

水平潜流人工湿地污水是近 10 年来国内外研究热点之一^[1-5].研究发现,在营养元素去除取得理想效果的同时,湿地出水 COD 往往无法满足受纳水体的要求^[6].本试验以城市受污染水体为对象,研究不同水力负荷条件下 3 种类型水平潜流人工湿地中有机物去除效果.运用 GC/MS 分析废水中有机污染物的相对组分变化,以考察有机污染物迁移和降解规律.运用 PCR-DGGE 技术,考察不同类型水平潜流人工湿地中微生物种群及其分布特征,探讨微生物多样性与有机物降解速率之间的内在联系,为提高水平潜流人工湿地降解受污染水体中有机

物提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验水质

试验用水为上海市杨浦区三好坞湖水.试验期间湖水水质为 pH 7.1~8.7,浊度 16~48NTU, COD44~96mg/L, TN3.4~12.1mg/L, TP0.5~1.2mg/L, 属于劣 V 类水体^[7].

收稿日期:2006-09-22

基金项目:国家“863”项目(2002AA601023);上海市科技委员会 2004 年重大科技攻关项目(04dz12029)

* 责任作者,教授, zhouqi@mail.tongji.edu.cn

1.2 装置与运行

水平潜流人工湿地装置材料为 PVC,长×宽×深为 1.2m×0.4m×0.6m.填充高度 0.50m,有效水深 0.45m,植物栽种的密度为 16 株/m².进水采用穿孔管布水,经过粒径 30~50mm 砾石布水区进入湿地填料床,填料粒径 8~15mm,出水经粒径 30~50mm 砾石收水区进入底部穿孔管,流出湿地系统.试验装置共 3 套,分别为芦苇-砾石(W1)、组合植物-砾石(W2)和芦苇-组合填料(W3).装置沿水流方向均分为 4 段.W1 中各段的植物均为芦苇,填料均为砾石;W2 中各段植物依次为芦苇、菖蒲、水葱和芦苇,填料均为砾石;W2 中各段植物均为芦苇,填料依次为砾石、沸石、钢渣和砾石.小试装置构建于 2005 年 4 月底,间歇运行,启动期日均换水 25L.7 月开始按不同工况连续运行.本研究数据取自 2005 年 8~10 月.

1.3 分析方法

常规指标测定参照文献[8],pH 值用便携式 pH 测定仪(上海雷磁 PHB-4)测定.

1.3.1 GC/MS 测定 准确量取 HRT 为 4d 的进水及 W1、W2、W3 出水各 1000mL,参照文献[9]进行水样预处理.检测条件:Finnigan Voyager 气相色谱/质谱联用仪,色谱柱为 HP-5 石英毛细管柱(30m×0.25mm,0.25μm);柱温 50 ,保持 2min,10 /min 升至 300 ,保持 10min;汽化温度 250 ;载气为 1.0mL/min 的 He;分流比 15:1;质谱检测器为 EI 源,电子能量 70eV,源温 200 .扫描范围 41~450amu;质谱标准库为 NIST 库+NBS 库.

1.3.2 微生物种群多样性分析 与采集 GC/MS 水样同日沿反应器水流方向设 4 个微生物取样点,距离填料表层 15~35cm 处取样,所得悬浊液 10000r/min 离心后置于-70 冰箱用于 DNA 提取.原水样本:取当日进水 500mL,0.22μm 滤膜过滤,10000r/min 离心后沉淀物也置于-70 冰箱用于 DNA 提取.采用 3S 柱环境样品 DNA 回收试剂盒提取样品 DNA,试剂盒购自上海申能博彩生物公司.DNA 提取结果用 0.8%琼脂糖凝胶电泳检测.按文献[10]对污泥 DNA 进行 PCR 引物设计与扩增.DGGE 分析:采用 Bio-Rad 公司 DcodeTM Universal Mutation Detection System 制备变性剂浓度从 35%~60%(100%的变性剂含 7mol/L 尿素和 40%去离子甲酰胺)的 8%聚丙烯酰胺凝胶.电泳电压 150V,温度 60 ,电泳缓冲液为 1×TAE,时间 5h.

2 结果与讨论

2.1 结果与分析

2.1.1 HRT 对出水 COD 的影响 由表 1 可见,水平潜流人工湿地对 COD 有较好的净化作用.HRT ≥ 2d 时,3 个系统出水 COD 均低于 30mg/L,达到地表水环境 类水体 COD 标准^[7].W2 系统在 HRT ≥ 4d 时,出水 COD 低于 20mg/L,达到 类水体 COD 标准^[7].在 HRT ≤ 6d 时,去除效率为 W2 > W3 > W1,如当 HRT 为 4d 时,W2 出水 COD 可稳定达到 类水体标准,W3 和 W1 各有 70%和 30%监测点达到同一标准.

表 1 各工况运行结果(n=15)
Table 1 Operational results of process experiment (n=15)

HRT (d)	容积负荷 [kgCOD/(m ³ ·d)]	进水 COD (mg/L)	W1 出水		W2 出水		W3 出水	
			COD(mg/L)	去除率(%)	COD(mg/L)	去除率(%)	COD(mg/L)	去除率(%)
8	6.9	55±11	12±1	78	12±2	78	12±2	78
6	9.2	55±10	14±2	75	13±1	76	13±1	76
4	21	84±12	21±4	75	16±4	81	19±4	77
2	40	79±5	22±5	72	18±6	77	20±6	75

2.1.2 COD 负荷对其去除速率的影响 由图 1 可见,随着进水 COD 负荷的增加,3 个系统的 COD 去除速率也随之增加,且具有显著的线性关系.比较拟合方程的斜率,有 W2 > W3 > W1,这与

COD 去除效果一致.说明净化受污染水体中有机物,W2(组合植物)和 W3(组合填料)在降解速率上优于 W1(单植物单填料)系统.

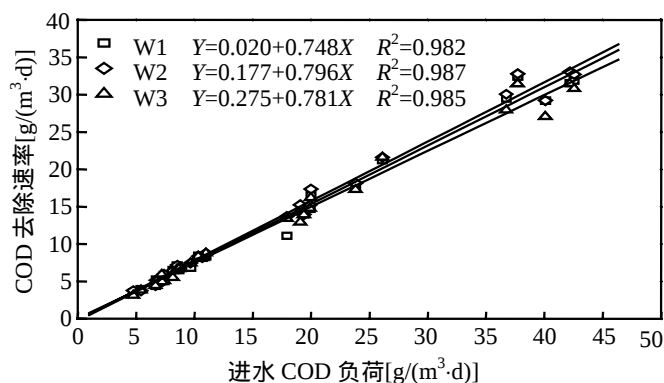


图 1 不同进水负荷下 COD 的去除速率

Fig.1 COD removal rate under different influent COD loads

2.2 污染物质的迁移降解

试验结果的定性与定量测定按 US EPA 625 法进行.以样品的重现色谱图经图库检索并参考文献和标样而定性,以仪器对十五烷的响应值(特征离子峰面积)确定相对含量.

由图 2 可见,原水的有机物以 C_{16} 、 C_{27} 、 C_{29} 和 C_{30} 为主,有机物分子量主要集中在 250、400 和 420 左右.W1 出水中的有机物以 C_7 、 C_{13} ~ C_{16} 为主,有机物分子量主要集中在 100 附近和 200~300. W2 和 W3 出水中的有机物均以 C_7 和 C_{10} 为主,有机物分子量主要集中在 100~160.说明湿地系统对水中的有机污染物均有较好的降解,污染物均向低碳小分子迁移转化.与 W1 相比较,W2 和 W3 对污染物向低碳小分子迁移转化彻底,因此其出水在综合指标 COD 上表现为更低的数值.此外,W2 出水中 C_{27} 有机物未检出, C_{29} 约为 W3 的 30%, C_{30} 约为 W3 的 40%,表现出对进水中 C_{27} 、 C_{29} 和 C_{30} 有机物更彻底的分解转化.

由表 2 可见,受污染水体中的有机物经湿地系统处理后有机组成发生了较大的变化,醇类化合物、烯烃均得到大幅度降解.COD 降解率为 75%左右,可见酸类化合物也有较好的降解.W2 对含氮、酮类和酯类化合物有较好的降解效

率,W3 对酚类也有较好的降解能力.此外,W2 和 W3 出水有机物在化合物组成上也显示出了相似性,其主要组分都是芳香族化合物和烷烃.进一步考察其出水,发现均有多环芳香族化合物菲、萘和蒽.这 3 种化合物在原水中均未检出,从降解途径看,这 3 种化合物并非进水中有机物的降解产物,而是水生植物或微生物新陈代谢的产物.这就在物质层面上证实了 Shepherd 等^[11]从反应动力学上的分析:人工湿地 $K-C^*$ 模型中 C^* (湿地系统有机物背景浓度)含有水生植物与微生物的代谢产物.

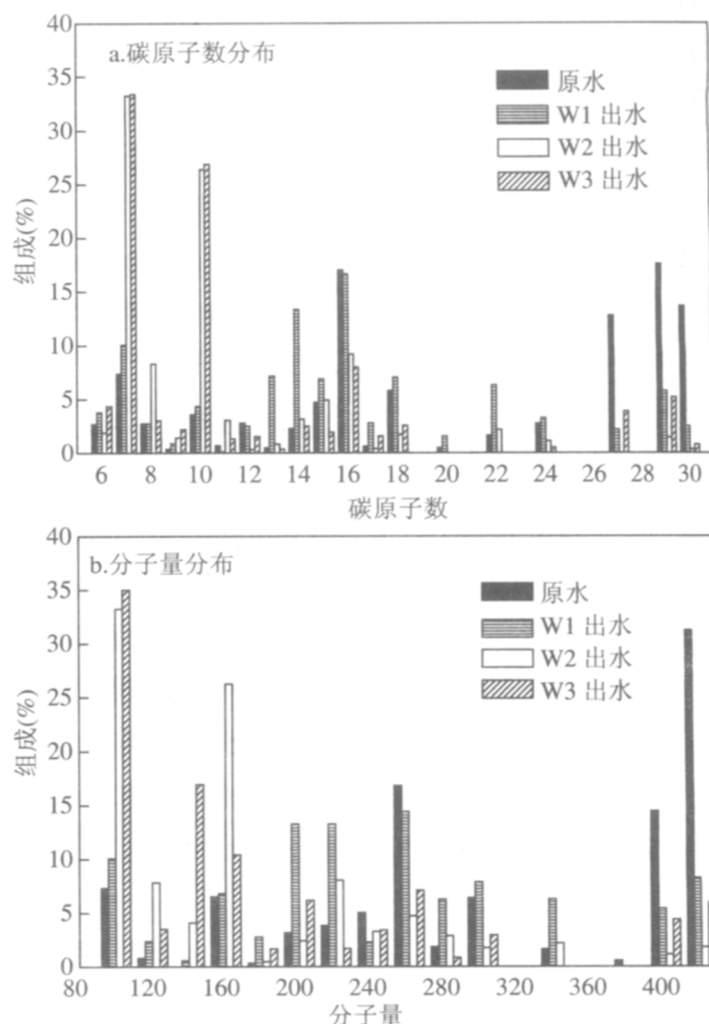


Fig.2 Carbon number and atomic weight distribution of compounds in polluted surface water

2.3 PCR-DGGE 结果分析

用试剂盒提取的 DNA 经 0.8%琼脂糖凝胶电泳检测后,证实其分子量大小为 23kb 左右,与细菌基因组 DNA 大小相同.PCR 经 1.5%琼脂糖

凝胶电泳检测后显示扩增片断大小为 240bp 左右,证实为 16S rDNA V3 区特异性片断.

表 2 水体中有机物的组成(%)

Table 2 Analysis of wastewater component (%)				
类 型	进水	W1 出水	W2 出水	W3 出水
芳香族化合物	11.54	15.02	42.53	36.16
醇类化合物	29.89	10.29	3.45	11.59
酚类化合物	3.61	11.5	5.75	1.6
含氮化合物	1.07	3.77	0.79	2.37
醛类化合物	0.22	1.24	n.d.	1.66
酸类化合物	28.87	28.22	8.25	12.37
酮类化合物	4.31	15.74	2.07	4.88
烷烃	2.73	4.26	32.84	28.07
烯烃	13.63	2.5	0.35	0.79
酯类化合物	4.12	7.47	3.97	0.51

注: n.d.为未检出

2.3.1 DGGE 结果分析 由图 3 可见,原水 DGGE 条带数量不仅最少,且其特征条带 1、2 和 3 在水平潜流人工湿地中均消失,说明进水中微生物的种群结构在湿地系统中均发生了显著迁移.湿地系统均有条带 4、5、6、7 和 8,说明这些条带表征的微生物在湿地物质和能量代谢中发挥着重要的作用,但从亮度差异可知其在不同的空间位置所起的作用存在差异.条带 9、10 和 11 分别为 W1、W2 和 W3 中的特征条带,这与不同类型的湿地系统产生的特定生态条件直接相关.W1 在 4 个取样位置上的条带数目与位置无明显差异,这与其构造特点有关,即单植物(芦苇)单填料(砾石).微生物在相似的环境条件的种群结构也类似.W2 和 W3 的条带在数目、位置和亮度均有较大的变化,说明不同的水生植物能够刺激或抑制特定菌种生长,而其群落依赖于不同的填料而存在,种群结构变化大.这与 Vacca 等^[12]在垂直流人工湿地中的研究有类似的结论.

2.3.2 Shannon 指数分析 由表 3 可见,原水 Shannon 指数均低于水平潜流人工湿地样品,其微生物多样性最低.沿水流方向湿地系统 Shannon 指数,即微生物多样性均呈现先增后减

的规律,这与湿地的推流流态和沿程污染物的种类与数量相关.在系统前 1/4 段有机物负荷较高,但种类较少,对底物竞争能力强的微生物维持优势,其 Shannon 指数较低.在装置中段,大量中间产物生成使污染物种类激增,这使微生物的种类随之增多,表现为取样点 2 和 3 的 Shannon 指数的升高.装置后 1/4 段,水中可生物降解的污染物基本耗尽,且其种类也大幅减少,微生物种类和数量也随之减少,因此取样点 4 的 Shannon 指数下降.

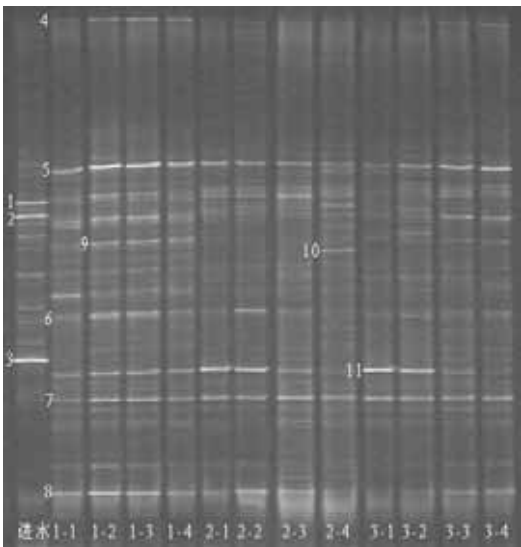


图 3 样品 DGGE 图谱

Fig.3 DGGE patterns produced from 13 samples
1-1、1-2、1-3、1-4 表示 W1 沿水流方向 4 个样品;
2-1、2-2、2-3、2-4 表示 W2 沿水流方向 4 个样品;
3-1、3-2、3-3、3-4 表示 W3 沿水流方向 4 个样品

表 3 样品 Shannon 指数

Table 3 Shannon index of samples

样品 编号	Shannon 指数	样品 编号	Shannon 指数	样品 编号	Shannon 指数
原水	2.22				
1-1	2.65	2-1	2.26	3-1	2.16
1-2	2.84	2-2	2.59	3-2	2.95
1-3	2.85	2-3	2.92	3-3	3.11
1-4	2.58	2-4	2.79	3-4	2.98

由图 4 可见,在 W2 和 W3 中沿程 COD 与沿程 Shannon 指数呈现显著线性相关, R^2 达到 0.96.Shannon 指数随着 COD 减少而增加,且 W2 的 Shannon 指数单位增量对应更大幅度的 COD

的降低,且沿程分布均匀.这说明微生物种群结构多样性对 COD 的降解有较大的作用.湿地系统中植物组合和填料组合能够提供更多样的生境提高微生物的多样性,使得系统处理能力增强,且植物组合对微生物的作用要优于填料组合.W1 系统沿程 COD 变化与 Shannon 指数无显著相关性,微生物群落多样性变化小,削弱了微生物系统对有机物的降解性能.

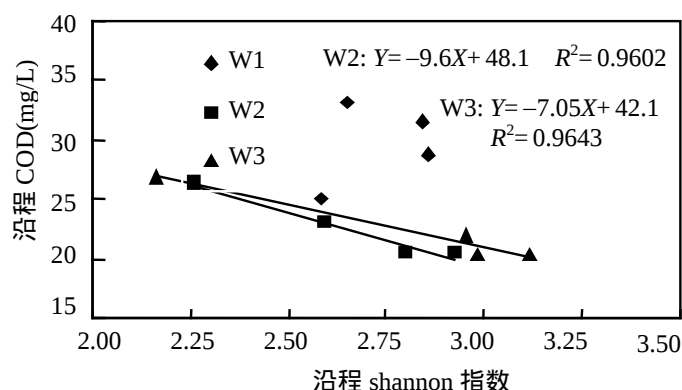


图4 COD 与 Shannon 指数沿程变化

Fig.4 Relationship of COD and Shannon index along flow

3 结论

3.1 水平潜流人工湿地对受污染水体中的有机物具有理想的处理效果,当进水 COD 为 44~96mg/L, HRT ≥ 2d,出水 COD 均可达到 Ⅲ类水体标准,组合植物系统在 HRT ≥ 4d 时出水 COD 可稳定达到 Ⅲ类水体标准.有机物降解速率依次为 W2 > W3 > W1.

3.2 用 GC/MS 技术分析受污染水体中的有机污染物相对组分变化规律,湿地系统对水中的有机污染物均有较好的降解,污染物都向低碳小分子迁移转化.与 W1 相比较,W2 和 W3 在碳原子数,分子量和化合物组成类似,对污染物向低碳小分子迁移转化更为彻底.因此其出水在有机物综合指标 COD 上表现为更低的数值.

3.3 研究所采用的提取方法、PCR 反应体系的设定及其 DGGE 的操作对于成分复杂的湿地污泥样本中微生物种群动态的分析是可行的.不同

类型湿地系统中水生植物和填料种类及空间位置对微生物群落结构具有显著的影响.

参考文献:

- [1] Kadlec R H, Hey D L. Constructed wetlands for river water quality improvement [J]. Water Science and Technology, 1994, 29(4):159-167.
- [2] Michal Green, Iris Safray, Moshe Agami. Constructed wetlands for river reclamation experimental design, start-up and preliminary results [J]. Bioresource Technology, 1996,55: 157-162.
- [3] Jing S R, Lin Y F, Lee D Y, et al. Nutrient removal from polluted river water by using constructed wetlands [J]. Bioresource Technology, 2001,76:131-135.
- [4] Jing S R, Lin Y F. Seasonal effect on ammonia nitrogen removal by constructed wetlands treating polluted river in southern Taiwan [J]. Environmental Pollution, 2004,127:291-301.
- [5] 严立,刘志明,陈建刚,等.潜流式人工湿地净化富营养化景观水体 [J]. 中国给水排水, 2005,21(2):11-13.
- [6] 闻岳.水平潜流人工湿地净化受污染水体研究 [D]. 上海:同济大学环境科学与工程学院, 2007.
- [7] GB3838-2002.地表水环境质量标准 [S].
- [8] 国家环境保护局.水与废水监测分析方法 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 1998.
- [9] 闻岳,黄翔峰,袁湛,等.水解酸化-缺氧生物法处理油田废水的机理 [J]. 中国环境科学, 2006,26(3):288-292.
- [10] Muyzer G, Dewaal E C, Uitterlinden A G. Profiling of complex microbial populations by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of polymerase chain reaction-amplified genes coding for 16SrRNA [J]. Applied Environmental Microbiology, 1993,59(3): 695-700.
- [11] Shepherd H L, Tchobanoglous G, Grismer M E. Time-dependent retardation model for chemical oxygen demand removal in a subsurface-flow constructed wetland for winery wastewater treatment [J]. Water Environment Research, 2001,73(5):597-606.
- [12] Vacca G, Wand H, Nikolausz M, et al. Effect of plants and filter materials on bacteria removal in pilot-scale constructed wetlands [J]. Water Research, 2005,39(7):1361-1373.

作者简介: 闻岳(1974-),男,江苏南京人,讲师,博士,主要研究领域为水污染控制与资源化及受污染水体的生态修复.发表论文 5 篇.