

水力负荷对蚯蚓生物滤池污水处理效果的影响

杨健¹, 杨健^{1*}, 杨居川², 陈巧燕³, 娄山杰¹

(1. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 2. 上海国际机场股份有限公司, 上海 201202; 3. 上海市南汇区申港街道办事处, 上海 201313)

摘要:通过分析不同水力负荷下蚯蚓生物滤池进出水水质以及蚯蚓生存状况, 研究水力负荷对蚯蚓生物滤池污水处理效果的影响. 结果表明, 水力负荷由 $2.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 增大到 $6.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时, 蚯蚓生物滤池出水各污染物浓度均缓慢增大, 受水力负荷影响较小. 当水力负荷增大到 $6.7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时, 滤池出水 COD 、 BOD_5 、 SS 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 TP 浓度明显增大, 出水 TN 浓度则呈下降趋势, 蚯蚓出现严重不适现象. 随着水力负荷增大, 蚯蚓相对摄食能力呈先升高后降低趋势, 水力负荷为 $4.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时, 蚯蚓相对摄食能力最大, 有机物去除效果良好. 滤池内蚯蚓平均重量、平均密度、单位面积蚯蚓生物量和水力负荷均呈极显著负相关. 推荐蚯蚓生物滤池运行水力负荷 $4.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 不宜超过 $6.7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

关键词: 蚯蚓生物滤池; 蚯蚓; 水力负荷; 摄食能力

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)07-1890-07

Effect of Hydraulic Load Distribution on Sewage Treatment Efficiency of Earthworm Bio-filter

YANG Jian¹, YANG Jian¹, YANG Ju-chuan², CHEN Qiao-yan³, LOU Shan-jie¹

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai International Airport Co. Ltd., Shanghai 201202, China; 3. Shengang Street Office Nanhui District, Shanghai 201313, China)

Abstract: Effect of hydraulic load distribution on sewage treatment efficiency of earthworm bio-filter was studied by analyzing influent and effluent of earthworm bio-filter and earthworm behaviors. The results show that when hydraulic load varying from $2.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ to $6.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, the concentration of each pollutant in earthworm bio-filter effluent increases slowly and is little effected by hydraulic load. When hydraulic load reaches $6.7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, the concentration of COD , BOD_5 , SS , $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TP in earthworm bio-filter effluent increases obviously, but the TN concentration in effluent presents descending tendency. The earthworms become rather inadaptable to the living conditions at this operating mode. As hydraulic load increasing, the earthworms' relative ingestive ability is improved at first, and then decreases. The earthworms' relative ingestive ability comes to the maximum at hydraulic load of $4.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, with good organic removal efficiency. The relation ships between hydraulic load and average weight, average density, unit-area biomass of the earthworms are significant negative correlation. The hydraulic load of $4.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ is recommended, but not over $6.7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

Key words: earthworm bio-filter; earthworm; hydraulic load; ingestive ability

“厌氧水解-高负荷生物滤池和蚯蚓生物滤池组合工艺”是一种适合我国中小城镇水污染治理特点的新工艺, 先后经历了小试、中试和示范工程的试验研究^[1~3]. 该组合工艺的创新点在于开发了蚯蚓生物滤池, 创新性在于污水处理工艺中引入了蚯蚓, 延长和扩展了原有的微生物代谢链, 强化了生态系统富集与扩散、合成与分解、拮抗与协同等多种自然调控作用. 在该生态系统中, 蚯蚓以污水中的悬浮物、生物污泥为食料^[4,5], 在体内各种酶和微生物^[6,7]的作用下, 降解污水中有机物, 同时代谢产生的蚓粪还是微生物的优良食料^[8].

在温度条件基本相同条件下, 通过改变系统水力负荷, 分析了蚯蚓生物滤池进出水水质以及蚯蚓的生存状态, 研究了水力负荷对其污水处理效果的影响, 以期找到使蚯蚓生物滤池高效稳定运行的水

力负荷参数.

1 材料与方法

1.1 试验污水水质

该工艺的示范工程建于上海某污水处理厂内, 自 2004 年 12 月开始微生物驯化, 到目前已稳定运行 2 a 多. 工艺总进水为经过格栅和沉沙池初步处理的城市合流污水, 蚯蚓生物滤池进水为高负荷生物滤池出水, 工艺流程见图 1. 水力负荷工况试验在 2006 年 5~8 月间进行, 试验期间进水温度变化不大 ($17.5 \sim 28.6^\circ\text{C}$). 蚯蚓生物滤池各工况进水水质及

收稿日期: 2007-07-05; 修订日期: 2007-08-17

基金项目: 国家科技支撑计划项目-世博科技专项(2007BAK27B05)

作者简介: 杨健(1953~), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为城市污水污泥同步生态处理技术, E-mail: yishu@online.sh.cn

* 通讯联系人, E-mail: 0520050027@smail.tongji.edu.cn

主要运行参数见表 1.

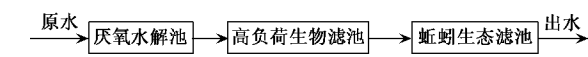


图 1 组合工艺流程
Fig.1 Flow chart of combined process

表 1 蚯蚓生物滤池进水水质及各工况滤池主要运行参数

Table 1 Influent quality and major operational parameters at different operating modes of the earthworm bio-filter										
试验 工况	日期(2006 年) /月-日	进水温度 /℃	进水 pH	进水 DO /mg·L ⁻¹	水力负荷 /m ³ ·(m ² ·d) ⁻¹	平均有机负荷(BOD ₅) /kg·(m ³ ·d) ⁻¹	COD /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	SS /mg·L ⁻¹	BOD ₅ /mg·L ⁻¹
1	05-01 ~ 05-31	17.5 ~ 22.8	7.27 ~ 7.79	4.60 ~ 5.33	2.4	0.46	65 ~ 125	5 ~ 28	20 ~ 48	31 ~ 44
2	06-01 ~ 06-30	21.5 ~ 27.8	7.47 ~ 7.90	4.60 ~ 5.33	4.8	0.75	45 ~ 105	8 ~ 30	14 ~ 41	24 ~ 42
3	07-01 ~ 08-01	26.0 ~ 28.5	7.45 ~ 7.97	4.60 ~ 5.33	6.0	0.76	40 ~ 90	8 ~ 26	13 ~ 38	14 ~ 42
4	08-02 ~ 08-25	27.2 ~ 28.6	7.59 ~ 7.89	4.60 ~ 5.33	6.7	1.20	40 ~ 115	16 ~ 22	14 ~ 46	29 ~ 38

境温度的剧烈变化,为蚯蚓正常生存提供保障,蚯蚓生物滤池构造见图 2.

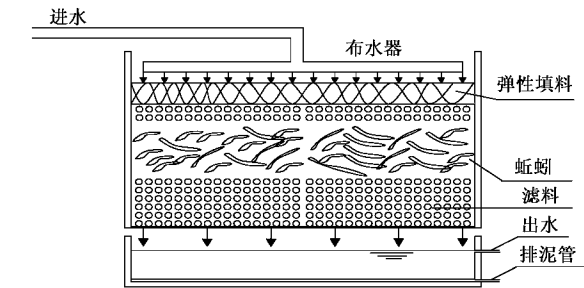


图 2 蚯蚓生物滤池构造
Fig.2 Structural drawing of earthworm bio-filter

本试验采用的蚓种为赤子爱胜蚓,俗称红蚯蚓,属变温动物,繁殖快,趋肥能力强,对生存环境要求较低,喜潮湿和阴暗,是广泛应用于环境污染生态治理中的蚯蚓种.赤子爱胜蚓极限生存温度为 3 ~ 35℃,20 ~ 25℃是蚯蚓生存的最适宜温度^[9],环境温度高于 35℃或低于 5℃会导致蚯蚓休眠或滞育^[10],最适宜蚯蚓活动的土壤含水率为 20% ~ 30%,饲料

1.2 试验装置

蚯蚓生物滤池采用旋转布水器布水,滤池直径 $\phi=3.7\text{ m}$,高 1.83 m,填料层高 0.20 m.滤池装填 3 ~ 8 mm 陶粒,空隙率 39.02%,陶粒表面铺一层植物型弹性填料,高 10 cm,起到二次布水的作用,孔隙率高达 96%,遮光率强(83.71% ~ 92.34%),能缓解环

含水量一般以 60% ~ 70% 为最佳^[11],若蚯蚓长期处于渍水状态,会导致其逃逸甚至死亡.

1.3 测试仪器与测试方法

水质指标及测试方法见表 2.
蚯蚓生理生态指标包括蚓粪 OM、蚓粪产率、摄食量、消化量及消化率等,采用 SPSS 软件处理数据.
相对蚓粪产率为单位质量蚯蚓 1 d 产粪量.试验方法:从滤池中挑选体重约 0.20 ~ 0.30 g 健康成蚓 15 条,在培养皿中培养 24 h,将收集的蚓粪在 105℃下烘干 2 h,测量蚓粪干重.

相对摄食量为单位质量蚯蚓 1 d 摄取有机质总量,假设蚯蚓吞食、排泄前后污泥中无机成分不变,则:

相对摄食量 = 相对蚓粪产率 $\times \frac{(1 - \text{蚓粪 OM})}{(1 - \text{污泥 OM})}$

相对消化量为被单位质量蚯蚓 1 d 消化吸收的有机质总量,则:

相对消化量 = 相对摄食量 - 相对排泄量

相对消化率 = $\frac{\text{相对消化量}}{\text{相对摄食量}} \times 100\%$

表 2 水质测试指标及测试方法

Table 2 Items and methods of wastewater test					
序号	项目	测试仪器与测试方法	序号	项目	测试仪器与测试方法
1	COD	重铬酸盐法 ^[12]	8	TP	钼酸铵分光光度法 ^[12]
2	BOD ₅	Merck BOD ₅ 测试仪	9	DO	WTW Oxi330 溶氧仪
3	SS	重量法 ^[12]	10	pH 值	玻璃电极法
4	VSS	重量法 ^[12]	11	温度	水银温度计
5	NH ₄ ⁺ -N	纳氏试剂分光光度法 ^[12]	12	有机质含量(OM)/%	灼烧法 ^[13]
6	TN	碱性过硫酸钾紫外分光光度法 ^[12]	13	滤料含水率	烘干法 ^[14]
7	NO ₃ ⁻ -N	紫外分光光度法 ^[12]			

2 结果与分析

2.1 水力负荷对蚯蚓生物滤池出水水质影响

2.1.1 水力负荷对有机物去除效果的影响

图3表明,水力负荷由 $2.4\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 提高到 $6.0\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 时,蚯蚓生物滤池出水COD略有升高,但上升速度缓慢,平均COD去除率相近,分别为47.82%、47.36%和43.94%,在此水力负荷范围内,滤池出水COD变化幅度较小.但当水力负荷增大到 $6.7\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 时,出水COD上升速度加快,平均COD去除率降至39.71%,水力负荷对出水COD影响加大.

第2工况温度($21.5\sim 27.8^\circ\text{C}$)比第1工况($17.5\sim 22.8^\circ\text{C}$)更适宜微生物和蚯蚓的生长,滤池内生物种类多、数量大、活性高,能够及时分解进水中的有机物,因此虽然水力负荷有所增大,但第2工况和第1工况COD去除效果却基本相同.第2~4工况温度基本一致,水力负荷依次增大,滤池出水COD随之增大,说明水力负荷是影响各污染物去除效果的主要因素,增大水力负荷不利于污染物的去除.

图4表明,随水力负荷提高,各工况出水 BOD_5 变化不大,平均去除率分别为47.00%、56.76%、51.56%和55.14%,说明蚯蚓生物滤池 BOD_5 去除效果较为稳定,受水力负荷影响较小.

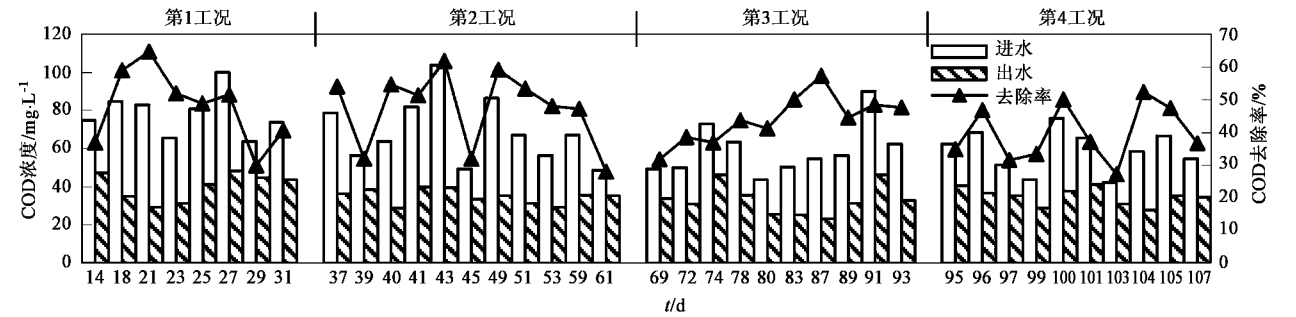


图3 蚯蚓生物滤池 COD 去除效果
Fig.3 COD removal effect of earthworm bio-filter

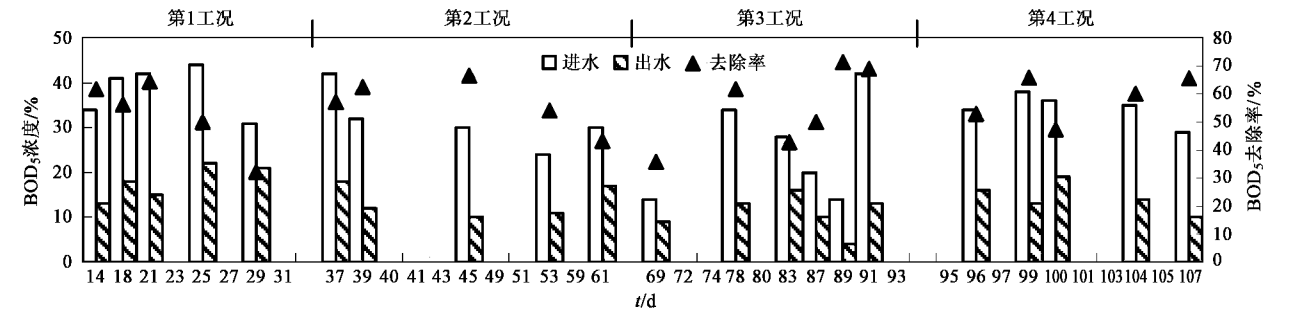


图4 蚯蚓生物滤池 BOD_5 去除效果
Fig.4 BOD_5 removal effect of earthworm bio-filter

2.1.2 水力负荷对悬浮物去除效果的影响

由图5可知,随着水力负荷由 $2.4\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 提高到 $6.0\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,蚯蚓生物滤池出水SS变化不大,当水力负荷达到 $6.7\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 时,出水SS略有升高,说明滤池出水SS受水力负荷影响较小.被滤料截留的悬浮物能为蚯蚓和微生物提供丰富的食料,蚯蚓和微生物在降解有机物的同时,为自身生长繁殖提供能量;而数量增大、活性增强的生态系统又能分解更多的悬浮物.

图6表明,当水力负荷由 $2.4\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 提高到 $6.7\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 时,蚯蚓生物滤池出水VSS/SS非常稳定,基本不受水力负荷影响.出水VSS/SS仅有31.96%~45.39%,远小于进水VSS/SS($41.21\%\sim 69.60\%$),出水水质的稳定性显著提高.进水SS中的有机物是蚯蚓的主要食物来源之一.在蚯蚓吞食有机物的同时,大部分SS被降解,滤池出水稳定性显著提高,可见蚯蚓在降解SS和稳定出水水质中扮演着重要角色.

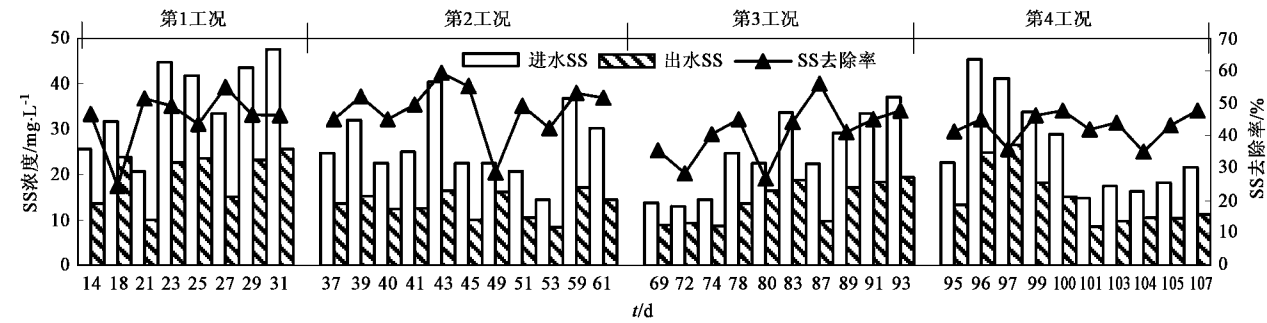


图 5 蚯蚓生物滤池悬浮物去除效果
Fig.5 SS removal effect of earthworm bio-filter

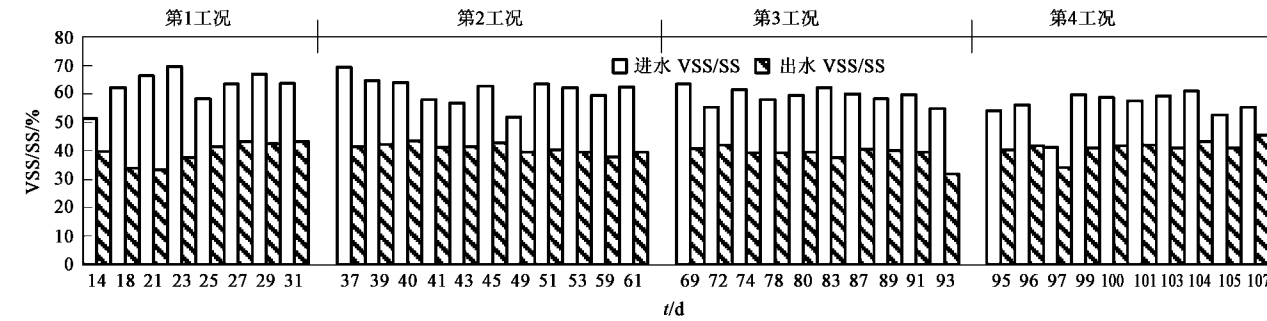


图 6 不同工况下滤池进出水 VSS/SS 变化
Fig.6 Earthworm bio-filter VSS/SS variation of influent and effluent at different operating modes

2.1.3 水力负荷对营养物质去除效果的影响

图 7 表明,当水力负荷 $< 6.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,随着水力负荷的提高,蚯蚓生物滤池出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 呈上升趋势,但变化不明显,水力负荷达到 $6.7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 明显增大.由于硝化细菌主要从无机碳中得到碳素,第 1 ~ 3 工况 BOD_5 负荷分别为 0.46 、 0.75 和 $0.76 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, BOD_5 负荷变化较小,对氨氮去除率影响不大,第 4 工况 BOD_5 负荷迅速增大到 $1.2 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,出水氨氮迅速增大, BOD_5 负荷已经成为影响氨氮去除的主要因素之一.异养菌

受冲击负荷影响要小于硝化菌,随着水力负荷和 BOD_5 负荷增大,异养菌逐渐抑制硝化菌的生长成为优势菌,不利于氨氮去除.第 4 工况滤池出现积水现象,破坏了滤池的好氧条件,不利于硝化作用进行.

滤池中不仅陶粒表面微生物相丰富,而且蚓粪中微生物种类和数量也非常多(见表 3),为维持较为稳定的硝化效果做出了重要贡献.蚯蚓在滤池中穿梭觅食不仅能疏通填料,改善滤池污泥积累现象,还能增加滤池氧含量^[15],有利于硝化细菌等好氧微生物生长繁殖.文献[16]报道,蚓粪是带负电的有机胶体,对污水中带正电荷的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 有较强的吸附能

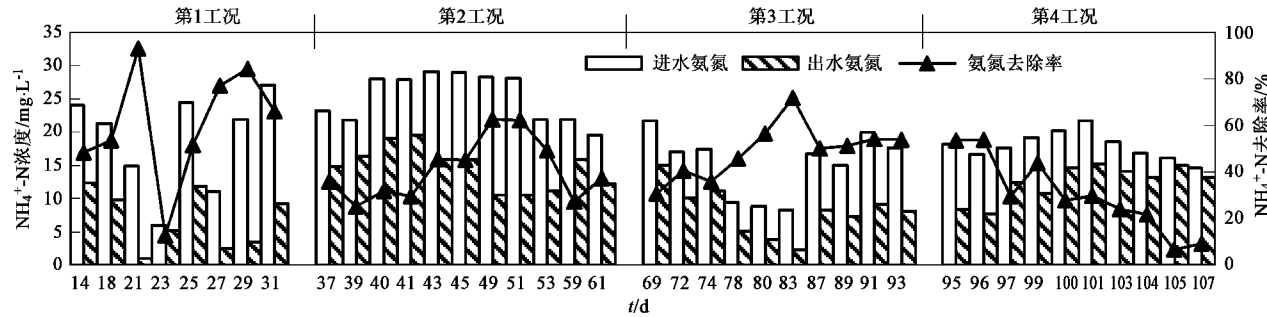


图 7 蚯蚓生物滤池 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果
Fig.7 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ removal effect of earthworm bio-filter

力,滤池中丰富的微生物能迅速降解蚓粪吸附的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$,提高滤池的硝化效果.

表 3 蚯蚓蚓粪中的微生物计数/ $\text{CFU} \cdot \text{g}^{-1}$

Table 3 Species and numbers of microbe in earthworm dung/ $\text{CFU} \cdot \text{g}^{-1}$

大肠杆菌	异养细菌	放线菌	真菌
4.5×10^4	1.9×10^7	6.8×10^4	2.0×10^4

蚯蚓生物滤池的 TN 去除效果不明显(见图 8),受水力负荷影响不大.蚯蚓在陶粒中穿梭觅食增加了滤池氧含量,抑止厌氧生物生长,同时由于滤床高度仅 0.20 m,缺少厌氧环境,影响了 TN 去除.碳源不足是造成滤池 TN 去除效果不好的另一个重要因

素,水力负荷达到 $6.7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,COD 负荷增大到 $1.98 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,为反硝化进行提供相对较多的碳源,同时滤池积水创造的厌氧环境也为 TN 去除提供有利条件,去除率比前 3 个工况略有上升.

由图 9 可以看出,随着水力负荷增大,蚯蚓生物滤池 TP 去除率略有下降,但变化不明显.第 2 工况温度高于第 1 工况,微生物数量大、活性强,虽然水力负荷增大,但 TP 去除效果无显著下降.有资料表明^[17],蚓粪较大的表面积对磷也有较好的吸附作用,滤池内蚓粪含量多,能吸附部分磷.

2.2 水力负荷对蚯蚓生存状况的影响

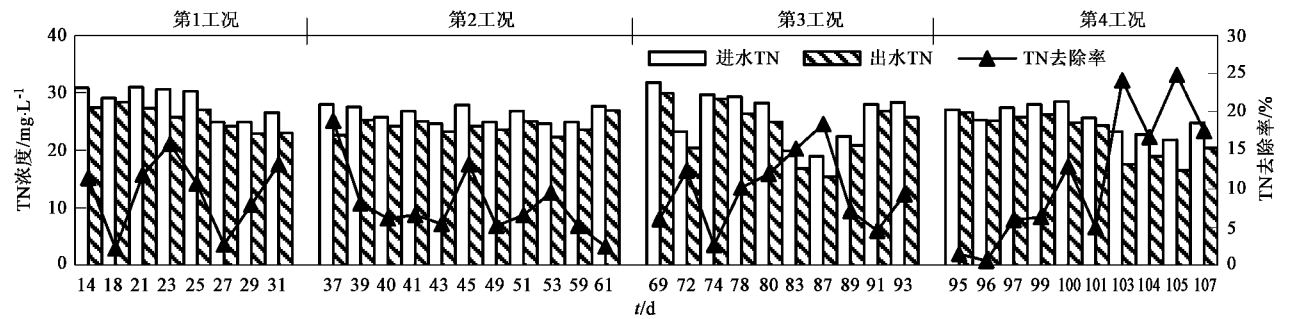


图 8 蚯蚓生物滤池 TN 去除效果
Fig.8 TN removal effect of earthworm bio-filter

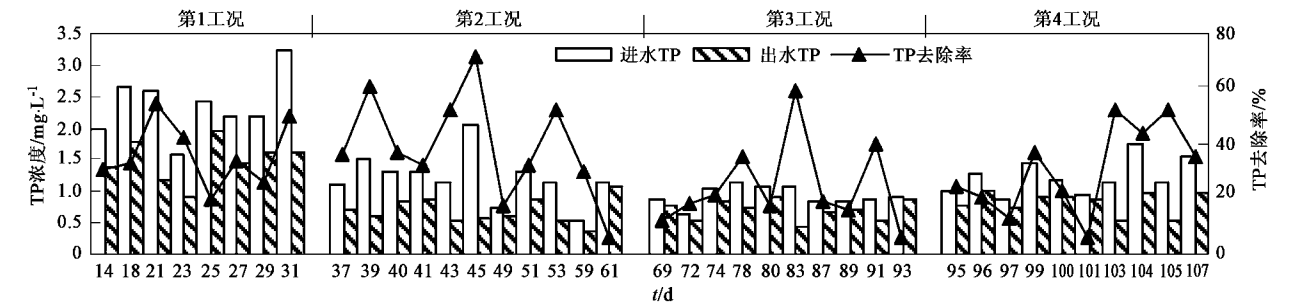


图 9 蚯蚓生物滤池 TP 去除效果
Fig.9 TP removal effect of earthworm bio-filter

2.2.1 水力负荷对蚯蚓摄食能力的影响

在蚯蚓生物滤池生态系统中,蚯蚓处于生物链的末端,主要以进水中有机物为食物,其摄食能力大小取决于蚯蚓食料有机质含量、食料的充足程度、水力冲刷程度、滤床温度等外界因素和蚯蚓对食料的消化吸收能力.因此蚯蚓摄食能力强弱可以反映蚯蚓在陶粒滤料中的生存活性高低.

生物滤池的进水经过了厌氧和好氧处理,进水 F/M、有机质含量(OM)高且较为稳定(见表 4),能为滤池中的蚯蚓和微生物提供充足而丰富的食物.各

工况陶粒平均含水率依次为 27.67%、30.21%、27.91%和 27.87%,均在蚯蚓适宜环境含水率范围之内(20% ~ 30%).

由表 4 可知,随着水力负荷增大,蚯蚓食料 OM、蚯蚓相对摄食量(以 OM 计)、相对消化量(以 OM 计)及相对消化率呈先升高后降低的趋势,但变化不显著.因为蚯蚓处于饥饿状态时(食料不充足)能及时吞食进水中的有机物,用以完成各项生命活动.第 2 工况温度较高,进水有机负荷适中,食料丰富,蚯蚓相对消化率最高,此时 COD、BOD₅ 去除效果也最

好.随着水力负荷升高,有机负荷不断增大,当食料超过蚯蚓吞食能力时,蚯蚓处于摄食饱和状态(维持最大摄食量),过量的食料会导致填料空隙率降低,滤池积水,恶化蚯蚓的生存环境.此时滤池水力冲刷也逐渐严重,在水力冲刷和滤池积水双重因素影响下,会导致蚯蚓数量减少、摄食能力下降、活性降低,甚至出现蚯蚓逃逸现象,COD、BOD₅去除率显著降

低,严重影响蚯蚓生物滤池的正常运行.

由此可见,维持适当的水力负荷和有机负荷,保证蚯蚓较高的摄食能力,对维护滤池高效稳定运行和去除进水中的污染物起到至关重要的作用,推荐运行水力负荷 4.8 m³/(m²•d).同时可以看出,蚯蚓摄食能力强弱与有机物去除效果密切相关.

2.2.2 水力负荷对蚯蚓生物量的影响

表 4 各工况条件下蚯蚓相对摄食能力比较

Table 4 Earthworms' relative ingestive ability comparison at different operating modes					
工况	进水 F/M	进水平均 OM/%	蚯蚓相对摄食量 /mg•(g•d) ⁻¹	蚯蚓相对消化量 /mg•(g•d) ⁻¹	相对消化率 /%
1	2.11	60.7	10.21	3.77	36.92
2	1.62	63.3	20.45	8.48	41.47
3	2.07	58.9	12.97	4.58	35.31
4	2.14	58.2	8.27	2.73	37.35

蚯蚓数量、密度、重量等指标反映蚯蚓对环境的适应能力,即环境对蚯蚓生存状况的影响.表 5 表明,随着水力负荷增大,滤池内蚯蚓平均密度、平均重量及单位面积蚯蚓生物量均成下降趋势.通过 SPSS 软件进行水力负荷与这几个指标的偏相关分析,结果表明水力负荷与这 3 个指标均呈极显著负相关(见表 6),说明水力负荷增大严重影响蚯蚓生存状况.当水力负荷增加到 6.7 m³/(m²•d)时蚯蚓密

度、平均重量及单位面积生物量均急剧减少.试验期间观察到第 4 工况蚯蚓个体很小,体色发黑,反应迟钝,环带提前消失,说明蚯蚓自身异化作用逐渐大于同化作用,开始消耗自身合成的物质,生物量减少,生物活性降低,大大影响了滤池出水水质.从表 6 可知,单位面积生物量的减少比蚯蚓密度减小的显著性更明显,说明生物量减少是蚯蚓发生逃逸、死亡等数量减少和蚯蚓自身重量减少 2 种作用的结果.

表 5 各水力负荷下蚯蚓指标变化

Table 5 Variation of earthworm indexes at different operating modes			
工况	蚯蚓平均密度 × 10 ⁴ /条 • m ⁻²	蚯蚓平均重量/g	单位面积蚯蚓数量/kg • m ⁻²
1	1.45	0.29	4.15
2	1.32	0.228	3.04
3	1.12	0.196	2.17
4	0.83	0.113	0.94

表 6 水力负荷与蚯蚓指标的相关性分析¹⁾

Table 6 Correlation analysis between hydraulic load and earthworm indexes				
参数 ¹⁾	变量	蚯蚓密度	平均重量	单位面积蚯蚓生物量
Spearman 相关系数(R _s)		- 0.745 7 * *	- 0.816 6 * *	- 0.854 9 * *
概率(p)	水力负荷	0.001	0.000	0.000
自由度(N)		14	14	14

1) * 表示显著相关(0.01 < p ≤ 0.05), * * 表示极显著相关(p ≤ 0.01)

3 结论

(1)当水力负荷由 2.0 m³/(m²•d)增大到 6.0 m³/(m²•d)时,蚯蚓生物滤池出水各污染物浓度均呈缓慢增大趋势,但变化不明显,受水力负荷影响较小.当水力负荷增大到 6.7 m³/(m²•d)时,滤池出水 COD、BOD₅、SS、NH₄⁺-N、TP 浓度明显增大,出水 TN 浓度则呈下降趋势.此时蚯蚓摄食能力、蚯蚓生物量

及活性均明显降低,甚至出现蚯蚓逃逸、死亡等现象,严重影响蚯蚓生物滤池的稳定运行.

(2)随着水力负荷增大,蚯蚓相对摄食能力呈先升高后降低趋势,蚯蚓摄食能力和有机物去除密切相关,水力负荷为 4.8 m³/(m²•d)时,蚯蚓相对摄食能力最大,微生物及蚯蚓数量多、活性大,有机物去除效果良好.滤池内蚯蚓平均重量、平均密度、单位面积蚯蚓生物量和水力负荷均成极显著负相关,单

位面积生物量的减少比蚯蚓密度减小的显著性更明显.

(3)为维持蚯蚓较好的生存环境,保证滤池良好的出水水质,推荐水力负荷 $4.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,最大不宜超过 $6.7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

参考文献:

- [1] 杨健,陆雍森,王树乾.绿色生态滤池处理城镇污水的中试研究[J].环境工程,2001,19(2):2-22.
- [2] 韩润平,张宗培,石杰,等.生态滤池处理城市污水小试研究[J].环境污染治理技术与设备,2005,6(7):58-62.
- [3] 韩润平,陆雍森,杨健,等.复合床生态滤池处理城市污水中试研究[J].环境科学学报,2004,24(3):450-454.
- [4] Brye K R, Norman J M, Bundy L G. Nitrogen and Carbon Leaching in Agroecosystems and Their Role in Denitrification Potential [J]. J Environ Qual, 2001, 30(1):58-70.
- [5] Yberg P M F N. Infiltration of Wastewater in a Newly Started Pilot Sand-filter System: II Development and Distribution of The Bacterial Population [J]. J Environ Qual, 1989, 18:457-462.
- [6] 张宝贵.蚯蚓与微生物的相互作用[J].生态学报,1997,17(5):556-560.
- [7] 张宝贵,李贵桐,申天寿.威廉环毛蚯蚓对土壤微生物量及活性的影响[J].生态学报,2000,20(1):168-172.
- [8] 罗固源,周健,吉方英,等.污水蚯蚓土地处理与资源回归[J].重庆环境科学,1997,19(2):27-29.
- [9] 曾宪顺.蚯蚓养殖技术[M].广州:广东科技出版社,2002.
- [10] Edwards C A, Lofty J R. 蚯蚓生物学 [M]. 北京:科学出版社,1984.
- [11] 仓龙,李辉信,胡锋,等.赤子爱胜蚓处理畜禽的最适湿度和接种密度研究[J].农村生态环境,2002,18(3):38-42.
- [12] 国家环保总局.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002.
- [13] 王关禄,张国治.土壤知识与土壤普查技术[M].北京:水利电力出版社,1983.14-36.
- [14] 南京农业大学.土壤农化分析[M].(第二版).北京:中国农业出版社,1992.
- [15] Pant H K, Reddy K R. Hydrologic Influence on Stability of Organic Phosphorous in Wetland Detritus [J]. J Environ Qual, 1999, 28(1):225-231.
- [16] 吉方英,罗固源,周健,等.蚯蚓与污水土地处理试验研究[J].重庆环境科学,1998,20(4):12-15.
- [17] 韩润平,杨贯羽,李宏魁,等.生态滤池污水处理过程中磷形态转化与平衡[J].河南科学,2006,24(4):593-595.