

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S2.038

# 水平潜流人工湿地处理住宅灰水技术研究

唐世敏<sup>1</sup>, 秦庆东<sup>2</sup>, 钱元弟<sup>1</sup>, 王孝平<sup>1</sup>, 雷团结<sup>1</sup>

(1. 马鞍山十七冶工程科技有限责任公司, 安徽 马鞍山 243000; 2. 东南大学市政工程系, 南京 210096)

**摘要:**以陶粒及天然沸石为基质, 黄菖蒲为植物, 构建新型水平潜流式人工湿地, 研究其净化实际小区灰水的效果, 进水流量 50 L/d, 水力停留时间 2 d, 进水 COD、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP 浊度为 164、4.3、5.2、0.44 mg/L、82.4 NTU 时, 出水可分别降至 70、1.07、2.07、0.33 mg/L、7.27 NTU, 去除率分别为 57.32%、75.19%、60.26%、24.24%、91.18%, 对实际灰水 COD、NH<sub>3</sub>-N、TN、浊度有良好的去除效果。利用人工配水考察不同水力停留时间下湿地的去污效果。提高停留时间能有效提高湿地对 COD、NH<sub>3</sub>-N 的去除效果, 停留时间为 3 d 时, 该湿地的去污效果最好, COD、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP 浊度去除率分别为 68.46%、81.75%、66.67%、34%、86.91%。

**关键词:**住宅灰水; 人工湿地; 去污效果**中图分类号:** X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)S2-0146-05

## A Study of Residential Grey Water Treated by Subsurface Horizontal Constructed Wetland

Tang Shimin<sup>1</sup>, Qin Qingdong<sup>2</sup>, Qian Yuandj<sup>1</sup>, Wang Xiaoping<sup>1</sup>, Lei Tuanjie<sup>1</sup>

(1. Maanshan MCC17 Engineering Science &amp; Technology Co., Ltd, Maanshan 243000;

2. Department of Municipal Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

**Abstract:** Ceramsite and natural zeolite were used as mixed substrates in subsurface horizontal constructed wetland which is planted with Yellow flag to investigate the treatment efficiency of real residential grey water, Inflow rate was 50l/d, HRT was 2d. The wetland reduced COD, NH<sub>3</sub>-N, TN, TP and turbidity from 164mg/l, 4.3mg/l, 5.2mg/l, 0.44mg/l, 82.4NTU to 70 mg/l, 1.07 mg/l, 2.07 mg/l, 0.33 mg/l, 7.27NTU, removal efficiency was respectively 57.32%, 75.19%, 60.26%, 24.24%, 91.18%, and have a good performance in COD, NH<sub>3</sub>-N, TN, turbidity treatment. Used synthetic grey water to study different HRT effect of wetland. Increasing HRT could be increase the wetland ability of COD, NH<sub>3</sub>-N removal. When the HRT was 3d, the wetland had the best decontamination effect. The removal efficiency of COD, NH<sub>3</sub>-N, TN, TP, turbidity was respectively 68.46%, 81.75%, 66.67%, 34%, 86.91%.

**Key words:** residential grey water, constructed wetland, decontamination effect

近年来水污染问题已经得到社会及政府的广泛关注, 水污染处理工程及设备日臻完善, 城市给排水管网系统也在不断修建和改造当中。住宅小区作为人们生活的主要场所, 其集中用水主要包括人的起居、饮食、出行等方面, 用水特点可以概括为水量大, 用处广, 水质成分复杂。面临水资源日渐匮乏的状况, 提高住宅小区水资源的利用效率, 不仅能缓解水资源紧缺的问题, 还能减轻城市污水处理的压力, 可谓一举两得。

住宅小区污水根据其来源和水质可分为灰水(grey water)和黑水(black water)两大类, 国内外关于灰水和黑水的定义基本一致。灰水是指淋浴、盥洗、洗衣、厨房排出的废水<sup>[1]</sup>, 由于厨房废水有机物浓度较高, 并含油等杂质, 现在一些学者已不将其归为灰水一类<sup>[2]</sup>; 由于地区差异, 灰水水量及水质差别很大。上海、北京等经济发达地区, 每日灰水量可达 100~200 L/(人·d), 而缺水或欠发达地区灰水量用量

仅 20 L 或更低; 经济发达的上海等地其灰水水质也明显优于缺水或欠发达的地区, 表 1<sup>[3]</sup>列出了我国平均生活用水量及一些基本水质指标。Halalsh<sup>[4]</sup>, Li<sup>[5]</sup>等学者在自己的文章提到有关国外灰水水量和基本水质的情况, 其灰水水量从 20~150 L/(人·d)不等; 水质差别也相差很大, 就单 COD 指标而言, 平均灰水 COD 含量最低仅 100 mg/L 不到, 最高竟可达 2 000 mg/L。

表 1 住宅生活水的比例

类别	水量/ (L/(人·d <sup>-1</sup> ))	%	BOD <sub>5</sub> / (mg·L <sup>-1</sup> )	COD/ (mg·L <sup>-1</sup> )	SS/ (mg·L <sup>-1</sup> )
厕所	40~60	31~32	220~260	300~360	250
淋浴	40~60	31~32	50~60	120~13	100
盥洗	20	15	60~70	90~120	200

收稿日期: 2013-09-30

基金项目: 东南大学“十七冶”可持续土木工程新技术联合研发中心基金项目

作者简介: 唐世敏(1968-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事工程地质、建筑材料和住宅产业化研究, (E-mail) tsm@MCC17.cn。

灰水回用需要满足卫生,安全,环境友好和经济可行等诸多条件<sup>[6]</sup>。灰水回用及技术规范的缺失将妨碍灰水回用的发展。国内住宅中水回用经过多年发展,已经有相关的中水回用设计规范和技術,例如,2001年我国颁布了《中水回用设计规范》。但在运行管理方面还存在诸多漏洞和疏忽,深圳地区早在 20 世纪 90 年中期就有 70 多个小区在建设过程中安装了中水管道系统,总规模达 400 m<sup>3</sup>/h,但实际运行的只有 2 座,规模才为 30 m<sup>3</sup>/h<sup>[6]</sup>。多年来,在中水回用设计上也没有制定新的地区性设计规范和规程,设计规范笼统单一,不利于实际住宅区中水回用的实现,也没有开发专门针对灰水分质收集的配套设备和集水系统。国外例如 1999 年德国柏林参议院办公室建立了灰水回用指南<sup>[7]</sup>,2006 年世界卫生组织颁布了灰水回用农田灌溉指南<sup>[8]</sup>等等,地区及国家性的指南及标准不可胜数。

灰水技术作为灰水回用领域的核心,是研究灰水回用的重点。国内外诸多学者已经就灰水处理技术的分类达成了基本的共识,即物理、化学处理技术、生物处理技术和生态处理技术。灰水的物理、化学处理技术主要包括化学混凝、膜处理。通过化学混凝和膜处理可以有效去除灰水中污染物质,降低灰水的浊度,其缺点包括膜污染、化学污泥污染和不能有效去除灰水中的病原微生物;灰水的生物处理工艺是利用反应器中的微生物对灰水中的有机物和营养物质进行降解和去除,主要包括 SBR、生物转盘、接触氧化、MBR 等,国内在这些生物处理工艺应用于污水厂尾水、微污染水、城市灰水,并进行了相关研究和探讨;灰水的生态处理技术主要包括氧化塘、人工湿地等自然净化系统,利用自然自身和人工填料对污水进行就地处理。

作为生态处理技术中的一种,人工湿地被认为是“环境最友好,经济效益高”的灰水处理技术<sup>[9]</sup>,也是近年来国外学者研究的热点。Gross 等<sup>[9]</sup>研究的循环垂直流人工湿地应用于高负荷混合型灰水处理,其进水 TSS、BOD<sub>5</sub>、COD、TN、TP 质量浓度从 158、466、839、34.3、22.8 mg/L 降至出水的 3、0.7、157、10.8、6.6 mg/L。由于其处理效果良好、运行费用低、环境效益好等诸多特点,必将成为今后灰水处理领域研究的热点。

人工湿地是 20 世纪 70 年代发展起来的新型废水处理工艺<sup>[10]</sup>。它根据自然湿地生态系统中物理、化学、生化反应的协同作用来处理废水,其主要构成可分为三方面:基质、植物、微生物。

人工湿地中的基质又称填料、滤料,它一般由土壤、细沙、粗砂、砾石、碎瓦片或灰渣等构成。基质是污水处理的主要场所,也是微生物的主要载体,同时又可以作为水生植物提供支持载体和生长所需的营养物质,当这些营养物质通过污水流经人工湿地时,基质通过一些物理、化学途径(如吸附、吸收、过滤、沉淀、络合反应和离子交换等)来去除污水中的 N、P 等营养物质。

在人工湿地净化污水过程中,植物主要发挥三个重要作用:直接吸收利用污水中可利用的营养物质,吸附和富集重金属和一些有毒有害物质;为根区好氧微生物输送氧气;增强和维持介质的水力传输能力。

微生物起到了净化污水的主要作用。附着生长在基质填料及植物根系部位的微生物承担了污水中大部分有机物

的降解任务。

笔者搭建小试人工湿地进行灰水处理,并根据不同进水条件,进行灰水处理效果分析。

## 1 材料与方法

### 1.1 基质的选取

基质选取主要考虑其对 TN、TP 的吸附性能,陈丽丽<sup>[11]</sup>等就沸石、陶瓷滤料和炉渣 3 种材料的吸附性能进行了对比,发现陶粒对 TP 的吸附性能最好,沸石对 NH<sub>4</sub>-N 的吸附性能最好,为了平衡基质对 N、P 的吸收效果,实验装置内基质采用沸石和陶粒组合的方式。

### 1.2 植物的筛选

筛选植物的原则,可以概括为以下几点<sup>[12-14]</sup>:1)植物的适应性。植物耐受污染物和高度富营养化水体的能力强,抗逆性强(抗冻、抗热和抗病虫害能力强),以乡土植物为主。2)植物的生长力强。在湿地环境中,植物能够繁殖、建群、扩展和生长,生物量较大,生长周期长,根系发达。3)景观性。选择的植物应与周围的景观融为一体,具有观赏价值。4)多样性。尽量设计多种植物组合去污,做到物种间的合理搭配。5)经济性。种植经济价值高的植物。6)易于管理。选用易于管理的植物,避免造成二次污染。本实验装置可以栽种菖蒲、香蒲及芦苇等作为湿地植物,这些植物具有抗寒,景观性好,价格便宜等诸多优点。

### 1.3 水流方式的设计

应用于住宅小区灰水处理的人工湿地不宜采用表面流(容易滋生蚊蝇);基质并不单一(陶粒、沸石、泥土),孔隙率变化大,垂直流容易堵塞;可以选择水平潜流式人工湿地。

### 1.4 湿地的搭建与实验步骤

实验装置为长 80 cm、宽 40 cm、高 65 cm 的湿地,PVC 材料制作,左边进水部分长 10 cm,其中填满砾石,作为前置过滤(去除灰水中的毛发及衣物纤维等),中间湿地主体填料部分上层为土壤(高度 15 cm),下层为沸石、陶粒(高度 45 cm),植物为菖蒲,右边出水部分长 10 cm,湿地主体两侧 25 cm 下方打孔,水流从进水口均匀布水流经砾石、陶粒、沸石、土壤至右边出水。图 1 为示意图,图 2 为装置实际图。

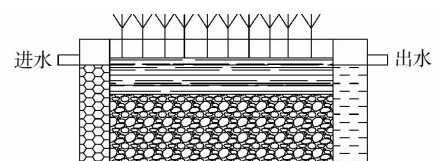


图 1 湿地装置示意图



图 2 湿地装置实际图

实验装置搭建于江苏省南京市环科院内,于 2012 年 8 月

启动,初期进水采用人工配水,配水 COD100~150 mg/L(采用葡萄糖来投加),NH<sub>4</sub>-N 8~10 mg/L(采用硫酸铵投加),TP0.5 mg/L(磷酸二氢钾),同时投加少量钠、钾、铁、锰等微量元素及蛋白胨。由蠕动泵向湿地装置连续进水,进水流量 50 L/d,停留时间 2 d,至 2013 年 3 月,运行 6 个月,出水基本稳定。2013 年 3~6 月初(春季)研究进水流量及水质变化对装置处理效果的影响。进水为人工合成及实际采样灰水两种。具体实验步骤如下:

1)采用实际灰水进水,首先测量实际灰水水质,灰水收集自东南大学学生集体宿舍淋浴废水、盥洗废水洗衣废水,水量混合比 2:1:1,每次收集水样 350 L,进水阶段流量调节为 50 L/d,可运行 1 周,每隔 3 d 进行一次出水水样检测,取 3 次灰水,共历时 1 个月。

2)采用人工合成灰水,在保证进水水质一致的前提下,通过调节泵的流量,控制人工湿地的停留时间,控制停留时间分别为 1、2、3 d,流量分别为 100、50、25 L/d。每个阶段运行 15 d,每个阶段间隔 5 d 的适应时间,每 3 天测一次出水水质,共历时 2 个月。

### 1.5 测量方法及使用仪器

测量指标为 COD、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP、浊度各指标测量具体步骤均参照《水和废水监测分析方法》第四版中的方法。实验用 COD 测定仪:TWT(Themoreaktor CR3000)德国产;紫外可见分光光度计(T6 新世纪)北京普析通用仪器有限责任公司;立式电热压力蒸汽灭菌器(LDZX-50B)上海悦丰仪器仪表有限公司。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 考察人工湿地对实际灰水的处理效果

采样灰水,进水各指标如表 2 所示。

表 2 3 次采样灰水各类指标

	COD/ (mg·L <sup>-1</sup> )	NH <sub>3</sub> -N/ (mg·L <sup>-1</sup> )	TN/ (mg·L <sup>-1</sup> )	TP/ (mg·L <sup>-1</sup> )	浊度/ NTU
第 1 次取水	164	4.3	5.2	0.44	82.4
第 2 次取水	189	5.2	6.3	0.54	102.0
第 3 次取水	142	4.1	4.9	0.48	99.3

### 2.2 对 COD 的去除效果

实际灰水的 COD 的值在 142~189 mg/L 之间;从表 3 可知,湿地对 COD 的去除率 46.56%~61.59%;当 COD 浓度较高时,出水 COD 浓度值也相对较高,去除效率相对较低;进水 COD 为 164 mg/L 时去除效率最佳,平均去除效率为 57.32%,进水浓度为 189 mg/L 时,去除效率最低,平均去除效率 48.68%;可见该湿地对 COD 浓度为 150 mg/L 的灰水具有良好的去除效果。

表 3 实际灰水 COD 去除效果

	COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	去除率/%
实际灰水进水 1	164	
出水 1	78	52.44
出水 2	63	61.59

续表 3

	COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	去除率/%
出水 3	69	57.93
平均出水	70	57.32
实际灰水进水 2	189	
出水 1	98	48.15
出水 2	92	51.32
出水 3	101	46.56
平均出水	97	48.68
实际灰水进水 3	142	
出水 1	68	52.11
出水 2	64	54.93
出水 3	72	49.30
平均出水	68	52.11

### 2.3 对 NH<sub>3</sub>-N、TN 的去除效果

实际灰水的 NH<sub>3</sub>-N 的为 4.1~5.2 mg/L、TN 为 4.9~6.3 mg/L;从表 4 可知,3 次水样的进水 NH<sub>3</sub>-N 浓度变化较低,平均出水质量浓度基本稳定在 1~1.1 mg/L 左右,平均去除效率分别为 75.19%、77.56%、60.76%;TN 平均出水质量浓度 2.0~2.4 mg/L,平均去除效率分别为 60.26%、61.38%、58.50%;由于进水 NH<sub>3</sub>-N 与 TN 浓度变化不高,湿地内除了有微生物的硝化、反硝化作用,同时沸石、陶粒基质也对 NH<sub>3</sub>-N 有良好的吸收作用,保证了湿地良好的除氮效果。

表 4 实际灰水 NH<sub>3</sub>-N、TN 去除效果

	NH <sub>3</sub> -N/ (mg·L <sup>-1</sup> )	去除率/ %	TN/ (mg·L <sup>-1</sup> )	去除率/ %
实际灰水进水 1	4.3		5.2	
出水 1	0.9	79.07	1.8	65.38
出水 2	1.0	76.74	2.0	61.54
出水 3	1.3	69.77	2.4	53.85
平均出水	1.07	75.19	2.07	60.26
实际灰水进水 2	5.2		6.3	
出水 1	1.0	80.77	2.2	65.08
出水 2	1.1	78.85	2.5	60.32
出水 3	1.4	73.08	2.6	58.73
平均出水	1.17	77.56	2.43	61.38
实际灰水进水 3	4.1		4.9	
出水 1	0.9	78.05	1.8	63.27
出水 2	1.0	54.93	1.9	61.22
出水 3	1.4	49.30	2.4	51.02
平均出水	1.1	60.76	2.0	58.50

### 2.4 对 TP 的去除效果

实际灰水的 TP 为 0.44~0.54 mg/L;从表 5 可知,3 次

水样的进水 TP 浓度较低,平均出水浓度分别为 0.33、0.34、0.34 mg/L,去除率仅为 24.24%~37.04%;进水无机磷被微生物降解为有机磷之后,只能通过植物吸收和基质对有机磷的拦截作用来去除,因此效果较差;由于进水 TP 浓度较低,虽然去除效果不佳,但仍能满足住宅小区灰水回用的要求。

表 5 实际灰水 TP 去除效果

	TP/(mg·L <sup>-1</sup> )	去除率/%
实际灰水进水 1	0.44	
出水 1	0.32	27.27
出水 2	0.33	25.00
出水 3	0.35	20.45
平均值	0.33	24.24
实际灰水进水 2	0.54	
出水 1	0.3	44.44
出水 2	0.34	37.04
出水 3	0.38	29.63
平均值	0.34	37.04
实际灰水进水 3	0.48	
出水 1	0.34	29.17
出水 2	0.29	39.58
出水 3	0.38	20.83
平均值	0.34	29.86

## 2.5 对浊度去除效果

实际灰水的浊度为 82.4~102 NTU;从表 6 可知,该湿地对灰水的浊度有良好的去除效果,出水浊度低于 10 NTU,去除率可达 90%以上,出水效果稳定;可见前置砾石过滤+基质吸附+后置沉清池出水的工艺装置设计可以保证出水的低浊度。

表 6 实际灰水浊度去除效果

	浊度/NTU	去除率/%
实际灰水进水 1	82.4	
出水 1	6.2	92.48
出水 2	6.7	91.87
出水 3	8.9	89.20
平均值	7.27	91.18
实际灰水进水 2	102.0	
出水 1	7.2	91.26
出水 2	7.5	90.90
出水 3	9.2	88.83
平均值	7.97	90.33
实际灰水进水 3	99.3	
出水 1	7.2	91.26
出水 2	7.7	90.66
出水 3	8.4	89.81
平均值	7.8	90.57

## 3 考察水力停留时间对除污效果的影响

### 3.1 水力停留时间对 COD 去除效果的影响

进水 COD 为 104 mg/L,在 1、2、3 d 水力停留时间下出水 COD 平均质量浓度为 78、72、57 mg/L,随着水力停留时间的增加湿地对 COD 的去除效率也逐步提高,由平均停留时间 1 d 的 57.14% 提高至平均停留时间 3 d 的 68.46%,具体数据如图 3 所示。

湿地系统对 COD 的去除主要依靠微生物的降解作用,当水力负荷过大时,对应的断面流速较大,根系微生物与污染物的接触时间较短,对污染物的分解利用有限而使其不能充分发挥降解和吸收作用,保证足够的接触时间,可以有效的提高微生物降解有机物的能力,提高 COD 的去除率,但停留时间过长,将降低湿地的处理能力。

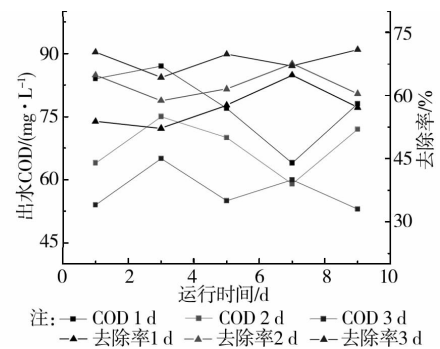
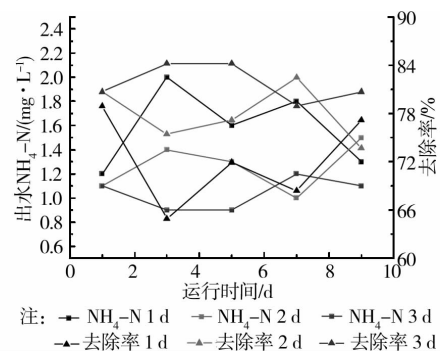


图 3 不同水力停留时间对 COD 去除效果

### 3.2 水力停留时间对 NH<sub>3</sub>-N、TN 去除效果的影响

进水 NH<sub>3</sub>-N 为 5.7 mg/L, TN 为 6.3 mg/L 在 1、2、3 d 水力停留时间下出水 NH<sub>3</sub>-N 平均质量浓度为 1.58、1.26、1.04 mg/L,出水 TN 平均质量浓度为 2.24、2.18、2.1 mg/L,随着水力停留时间的增加,湿地对 NH<sub>3</sub>-N、TN 的去除效率也有所提高,由平均停留时间 1 d 的 72.28%、66.44% 提高至平均停留时间 3 d 的 81.75%、66.67%;具体数据如图 4、5 所示。

湿地系统中氮的去除主要通过微生物的硝化、反硝化作用和植物的吸收作用和基质的吸附作用,由实验数据可知,基质吸附速率应远高于微生物分解作用,随着停留时间的增加,N 的去除效率的提高应主要来自微生物的贡献。

图 4 不同水力停留时间对 NH<sub>3</sub>-N 去除效果

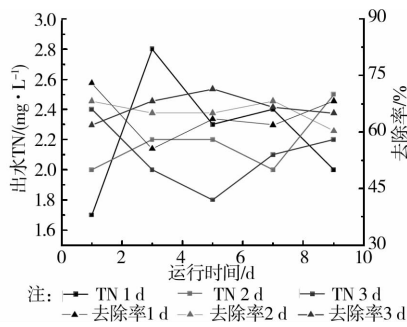


图 5 不同水力停留时间对 TN 去除效果

### 3.3 水力停留时间对 TP 去除效果的影响

进水 TP 为 0.50 mg/L, 在 1、2、3 d 水力停留时间下出水 TP 平均浓度为 0.38、0.37、0.34 mg/L, 随着水力停留时间的增加湿地对 TP 的去除效率提高并不显著, 由平均停留时间 1 d 的 23% 提高至平均停留时间 3 d 的 34%, 如图 6 所示。

本装置除磷效果较低的主要有 3 个原因, 陶粒、沸石基质的吸附能力不够; 陶粒、沸石基质上没有形成能高效分解有机磷的微生物; 植物黄菖蒲对磷的吸收效果不明显。

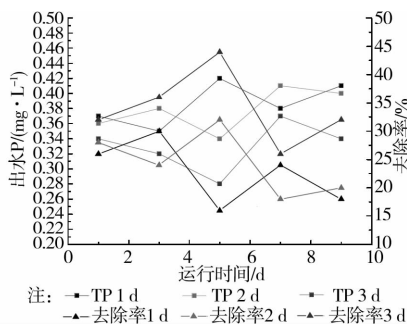


图 6 不同水力停留时间对 TP 去除效果

### 3.4 水力停留时间对浊度去除效果的影响

进水浊度为 46 NTU, 在 1、2、3 d 水力停留时间下平均出水浊度为 8.6、7.3、6.0 NTU, 出水浊度低于 10 NTU, 甚至接近 5 NTU, 去除率达到了 80% 以上, 具体数据如图 7 所示。

停留时间变化对于出水浊度的变化不大, 该湿地去除灰水浊度主要依靠前置砾石过滤、基质吸附及后置澄清作用, 以物理作用为主, 作用时间短, 1 d 的停留时间已基本能够去除水中大部分浊度。

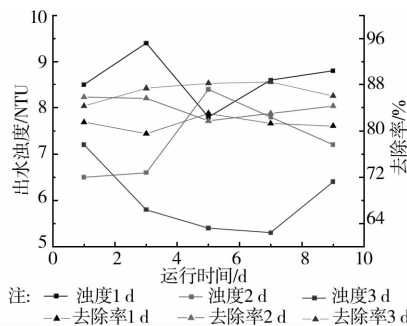


图 7 不同水力停留时间对浊度的去除效果

## 4 结论

1) 用该人工湿地装置处理实际灰水, 对实际灰水有良好的去污能力, 平均 COD 去除率近 60%、 $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率近 80%、TN 去除率近 65%、TP 去除率近 80%、浊度去除率高达 90%。

2) 在不同停留时间下考察该湿地对灰水的去污能力, 通过实验结果发现, 水力停留时间为 3 d、进水流量为 25 L/d 时, 该湿地的去污效果最好, COD 去除率 68.46%、 $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率 81.75%、TN 去除率 66.67%。

3) 该装置除磷效果较差, 应通过更换其他类基质、尝试种植其他类植物等方式提高湿地对磷的去除效果。

4) 提高水力停留时间能够提高湿地的去污能力, 实际湿地的停留时间应结合湿地的大小及实际灰水处理量决定, 应尽可能保证湿地的停留时间, 保证灰水处理效果。

### 参考文献:

- [1] Sawattayothin V, Polprasert C. Nitrogen mass balance and microbial analysis of constructed wetlands treating municipal landfill leachate [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(3): 565-570.
- [2] Wilderer P A. Applying sustainable water management concepts in rural and urban areas: some thoughts about reasons, means and needs [J]. *Water Science and Technology*, 2004, 49(7): 8-16.
- [3] 孙玉林, 王冠军, 萧正辉, 等. GB 50336-2002 建筑中水设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [4] Vohla C, Alas R, Nurk K, et al. Dynamics of phosphorus, nitrogen and carbon removal in a horizontal subsurface flow constructed wetland [J]. *The Science of the Total Environment*, 2007, 380(1/2/3): 66-74.
- [5] 何连生, 刘鸿亮, 席北斗, 等. 人工湿地氮转化与氧关系研究[J]. *环境科学*, 2006, 27(6): 1083-1087.
- [6] 叶建锋, 徐祖信, 李怀正. 垂直潜流人工湿地中有机物去除动态规律研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(8): 2166-2171.
- [7] 李巍, 王尚文, 刘礼祥, 等. 广东住宅小区中水回用探析[J]. *供水技术*, 2009, 3(2): 40-43.
- [8] 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.
- [9] 李雄勇, 张帆, 袁英兰, 等. 对人工湿地污水处理系统设计技术关键的探讨[J]. *环境保护科学*, 2009, 35(1): 42-44.
- [10] 沈耀良, 杨铨大. 新型废水处理技术: 人工湿地[J]. *污染防治技术*, 1996, 9(1): 1-8.
- [11] 陈丽丽, 赵同科, 张成军, 等. 不同人工湿地基质对磷的吸附性能研究[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(3): 587-592.
- [12] 陈永华, 吴晓英, 郝君, 等. 人工湿地植物应用现状与问题分析[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(31): 88-92.
- [13] 宁静, 鲁敏, 裴翡翠, 等. 人工湿地植物受污水胁迫存在的问题与解决对策[J]. *山东建筑大学学报*, 2011, 26(2): 149-152.
- [14] 张清. 人工湿地的构建与应用[J]. *湿地科学*, 2011, 9(4): 373-379.

(编辑 张 苹)