

DOI:10.11918/202408044

净化槽工艺水冲厕系统处理寒区乡村黑灰水效能

武继文^{1,2}, 单潇清^{1,2}, 尤世界^{1,2}, 刘冰峰^{1,2}, 林生强³, 马放^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 环境学院, 哈尔滨 150090; 2. 城乡水资源与水环境全国重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090; 3. 黑龙江博通管业有限公司, 哈尔滨 150056)

摘要: 针对黑龙江寒冷地区农村分散式水冲厕所粪污处理效率低及运行不稳定等问题, 通过微生物复合菌剂的投加提高运行稳定性及粪污处理效果。对黑龙江地区农村家庭实地运行的水冲厕系统进行长期监测, 分析“黑水”和“灰水”处理过程中出水水质的变化, 包括化学需氧量(COD)、氨氮(NH₃-N)、总氮(TN)、总磷(TP)质量浓度及粪大肠杆菌数的变化情况。结果表明: 处理“黑水”过程中, COD去除率最高可达91.53%, 氨氮去除率保持在80%以上, 总磷去除率在63.85%~82.00%波动; 处理“灰水”过程中, COD去除率达81.95%~90.08%, 氨氮去除率最高达91.11%; 复合菌剂显著降低了出水中的粪大肠杆菌数, 去除率达90%以上。细菌群落结构分析显示, 复合菌剂的应用优化了微生物结构, 有效富集了 *Acinetobacter* 和 *Psychrobacter* 等耐冷微生物。复合菌剂在寒区农村厕所粪污处理中的应用不仅提高了污染物去除效率及运行稳定性, 还为寒区农村厕所改造和粪污处理提供了科学依据和技术支持。

关键词: 复合菌剂; 净化槽水冲厕; 黑水; 灰水; 寒区农村

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)06-0043-08

Treatment efficiency of black and gray water in cold rural areas using johkasou-based flush toilet system

WU Jiwen^{1,2}, SHAN Xiaoqing^{1,2}, YOU Shijie^{1,2}, LIU Bingfeng^{1,2}, LIN Shengqiang³, MA Fang^{1,2}

(1. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. State Key Laboratory of Urban-rural Water Resource and Environment (Harbin Institute of Technology), Harbin 150090, China; 3. Heilongjiang Botong Pipeline Industry Co., Ltd., Harbin 150056, China)

Abstract: This study addressed the challenges of low efficiency and operational instability in decentralized flush toilet waste management in rural areas of Heilongjiang, a cold region in China. By introducing a microbial composite agent, we aimed to enhance the stability and quality of effluent. Through long-term monitoring of flush toilets in rural households, we analyzed the water quality changes in the treatment of "black water" and "gray water", focusing on parameters such as chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen (NH₃-N), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and fecal coliform content. The results showed that during black water treatment, COD removal rates reached as high as 91.53%, with ammonia nitrogen removal consistently above 80%, and total phosphorus removal rate fluctuating between 63.85% and 82.00%. In gray water treatment, COD removal rates ranged from 81.95% to 90.08%, and ammonia nitrogen removal peaked at 91.11%. Additionally, the composite agent significantly reduced fecal coliform counts in the effluent, achieving a removal rate over 90%. Bacterial community structure analysis revealed that the application of the composite agent optimized microbial composition, effectively enriching cold-tolerant microbes such as *Acinetobacter* and *Psychrobacter*. This study demonstrated that the use of microbial composite agents in rural toilet waste treatment in cold regions not only improved pollutant removal efficiency and operational stability but also provided a scientific basis and technical support for the renovation of rural toilets and fecal waste management in cold regions.

Keywords: composite microbial agent; johkasou-based flush toilet; black water; gray water; cold rural areas

黑龙江省全年平均温度低于4℃, 省内大部分区域地下冻土深度超过2 m^[1], 而水冲厕系统的污水处理过程以生物法为主, 低温环境不利于微生物

的生长和代谢, 限制了新型农村水冲厕系统的污水处理效能^[2-5]。目前, 已有大量研究致力于强化低温条件下农村厕所粪污及废水处理的效能。赵文斌

收稿日期: 2024-08-20; 录用日期: 2024-10-25; 网络首发日期: 2024-11-29

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20241129.1522.002>

基金项目: 黑龙江省重点研发计划(GA22B003)

作者简介: 武继文(1995—), 女, 博士, 副研究员; 马放(1963—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 马放, mafang@hit.edu.cn

等^[6]利用 MBBR 工艺处理低温条件下农村厕所废水,优化工艺参数后,出水水质可达到农田灌溉水的标准。赵伟华等^[7]以校园生活污水为处理对象,利用聚丙烯颗粒柱状填料富集硝化菌。陈卓昂等^[8]用包含微生物菌剂的原位发酵床技术处理甘肃寒区的农厕粪污,并实现了无害化处置。综上,使用微生物复合菌剂是强化生物活性的有效方法,可优化微生物群落结构,实现反应装置的快速启动,加速有机物的降解,从而改善出水质量。

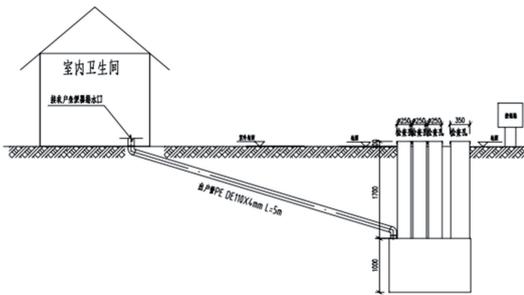
本研究长期监测黑龙江农户家中处理“黑水”和“灰水”的两类净化槽工艺水冲厕系统,并投加微生物复合菌剂强化出水,对关键水质指标进行检测,并分析功能微生物丰度变化情况,以期为寒区农村改厕工程的妥善实施提供科学依据。

1 试 验

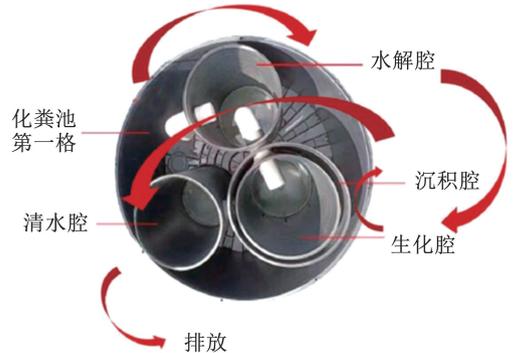
1.1 试验装置

如图 1(a)所示,水冲厕系统通过管道将污水排

入净化槽内,净化槽内部结构如图 1(b)所示,包括第一格初沉池、水解腔、生化腔(套筒结构,分为内腔和外层沉积腔)和清水腔。污水进入第一格沉淀池进行初步沉淀后进入水解腔,水解腔初步沉淀、分解粪污,将污水溢流到生化腔。生化腔为双腔套筒结构,内腔有微动力曝气充氧装置,外腔起到沉积污泥的作用,泥水分离后的上清液溢流到清水腔。清水腔中有水泵,可以设置水泵根据液位高度自动调控排水。生化腔中添加的复合菌剂主要包括瘤胃解蛋白质菌 *Proteinclasticum ruminis*、速生嗜冷杆菌 *Psychrobacter*、耐冷假单胞菌 *Pseudomonas psychrophilia*、絮状束毛球菌 *Trichococcus Scheff* 和约氏不动杆菌 *Acinetobacter. johnsonii* 等。设备启动时向生化腔内一次性投加菌剂和配套的 K3 生物填料,菌剂添加量约 1 500 g,闷曝驯化 48 h,闷曝过程严禁进水。菌种驯化完成后用户可正常使用,使用过程中日排水量小于 150 L。水冲厕系统集成净化槽施工图如图 1(c)和图 1(d)所示。



(a) 单户净化槽水冲厕系统设计图



(b) 净化槽水内腔结构图



(c) 净化槽水冲厕系统实物图



(d) 净化槽水冲厕系统施工图

图 1 水冲厕系统单户集成净化槽设计及施工图

Fig. 1 Design and construction diagrams of an integrated purification tank for a single household flush toilet

1.2 指标测定方法

将采集的水样静置 15 min,取上清液测定 COD。用 0.45 μm 滤膜过滤后,参照《水和废水监

测分析方法》^[9]进行水质指标检测。化学需氧量(COD)采用重铬酸钾快速密闭催化消解法测定,氨氮(NH₃-N)采用纳氏试剂分光光度法测定,总氮

(TN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法检测,总磷(TP)采用钼锑抗分光光度法测定。粪大肠菌群的检测采用多管发酵法,参照 HJ 347.2—2018《水质 粪大肠菌群的测定 多管发酵法》^[10]中的12管法进行检测。

1.3 细菌群落结构检测

进行细菌群落结构检测的黑水取样于2023年10月31日,灰水取样于2023年10月29日,取样后立即冷冻保存。采用 E. Z. N. ATM Mag-Bind Soil DNA Kit 试剂盒(OMEGA)提取水样中细菌 DNA。PCR 扩增采用全式金公司的 Pfu 高保真 DNA 聚合酶,并严格控制扩增循环数,保证同一批样本的扩增条件一致。扩增产物磁珠纯化回收后,将 PCR 扩增回收产物进行荧光定量,荧光试剂为 QuantiTProGreen dsDNA Assay Kit,定量仪器为 MicroplateReader (BioTek, FLx800)。采用 Illumina 公司的 TruSeqNano DNA LT Library Prep Kit 制备测序文库。上机测序前,先用 Agilent High Sensitivity DNA Kit 对文库在 Agilent Bioanalyzer 上进行质检,利用保守区域设计引物来扩增 rRNA 基因的单个或多个可变区,测序分析微生物的多样性。

1.4 数据分析

利用 Origin 2019 和 SPSS 22.0 软件对试验数据进行统计分析并绘图。

2 结果与分析

2.1 净化槽工艺处理农村厕所黑水效能

2.1.1 污染物去除效果

厕所排放的污水主要包括尿液、粪便及冲厕水,由于这类水体含有大量的有机物、病原体、营养盐和其他污染物而被称为“黑水”^[11]。黑水具有高有机负荷、高病原体含量、高营养盐含量及恶臭等特点^[11],如果不经过适当处理直接排放,会对环境和人类健康造成严重影响^[12-13]。本研究基于净化槽工艺水冲厕系统,处理农村厕所黑水,从2023年6月—11月份持续检测不同取样口出水中的 COD、NH₃-N、TN 和 TP 质量浓度变化情况(图2)。取样设置在净化槽处理过程的3个不同环节,依次为水解腔、生化腔和最后排水的清水腔。总体上,进水 COD 在 916.24~1 379.79 mg/L 波动。伴随净化槽内各腔体的处理过程,各取水口的污染物质量浓度依次呈现下降趋势,最终出水 COD 维持在 86.47~235.59 mg/L。6月18日—7月6日处于设备启动前期,出水 COD 略高,去除效率由6月18日的74.29%上升到7月6日的91.53%,从7月6日开始直到9月25日,COD 去除率都在90%以上,处于稳定运行阶段。10月9日—10月31日期间,出水 COD 略有下降,但也能达到86%以上的去除率,11月8日气温为-15~-5℃,当日出水 COD 仍能达到81.95%的去除效率。

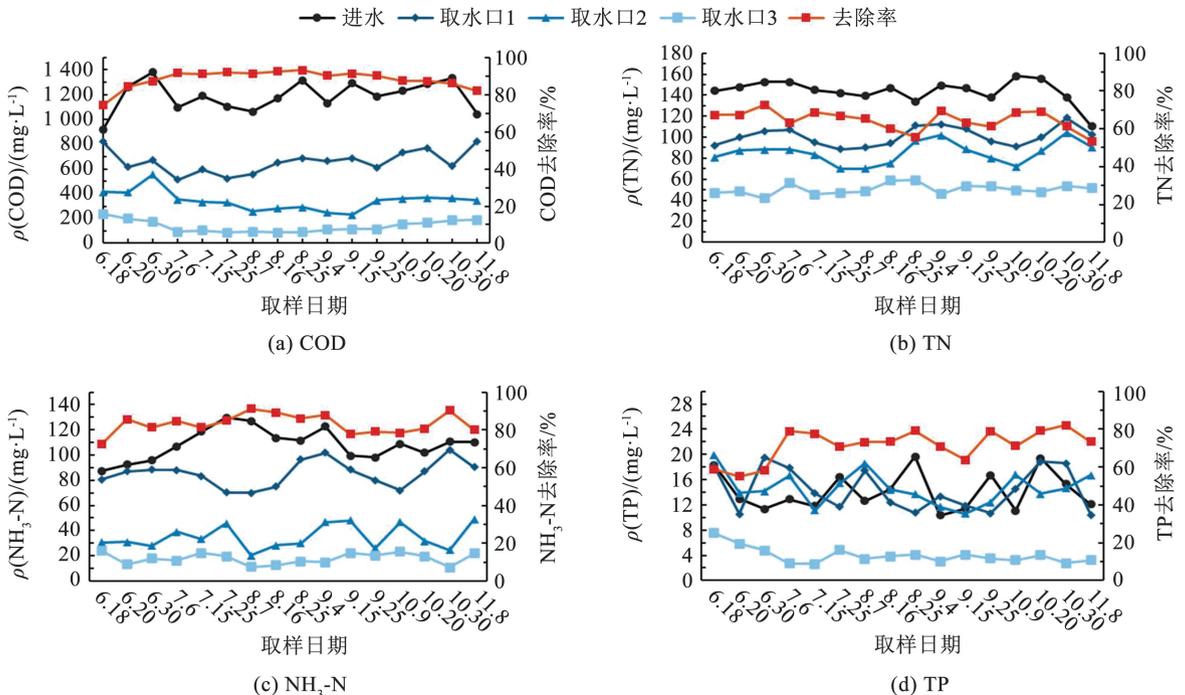


图2 黑水处理过程中 COD、NH₃-N、TN 和 TP 质量浓度变化及去除率

Fig. 2 Changes in concentration and removal rates of COD, NH₃-N, TN, and TP during blackwater treatment

在脱氮方面,进水 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 质量浓度范围为 87.45 ~ 129.74 mg/L,总氮质量浓度范围为 110.33 ~ 158.44 mg/L,出水 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 质量浓度在 11.30 ~ 24.00 mg/L 波动,出水总氮质量浓度为 41.82 ~ 59.33 mg/L。 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的去除效率最高可达到 91.11%,在进入冬季后去除率虽然有所下降,但是在复合菌剂的强化作用下,依然能维持 80% 左右的去除效率。相比 $\text{NH}_3 - \text{N}$,总氮的去除效率较低,在 53.41% ~ 72.62% 波动。这主要是由于反应体系中没有充足的碳源进行反硝化^[14],进水碳氮比在 6.35 ~ 9.83 波动,远低于生化过程所需的合理碳氮比,限制了反硝化脱氮过程^[15-17]。总磷的去除率在前期启动期略低,在 55.09% ~ 58.83% 波动,进入稳定期后去除率可达 63.85% ~ 82.00%,且从稳定期直到 11 月 8 日取样时,出水中总磷质量浓度均低于 5 mg/L,满足 DB 23/2456—2019《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》^[18] 中三级出水的总磷排放指标,这表明虽然低温环境对微生物的代谢活动产生了限制,但由于复合菌剂对生化过程的强化作用,依然能保持较高的污染物去除能力。

2.1.2 粪大肠菌群处理效果

农村厕所产生的黑水含有大量病原菌,如大肠杆菌、病毒和寄生虫,直接排放会污染土壤和水体,导致水源和农作物的病菌传播,危害人畜健康,破坏生态平衡^[19-21],因此,有效处理黑水使其无害化是保护自然环境和公共卫生的关键。粪大肠菌值是粪便无害化卫生要求的主要指标,反映水体受到粪便污染的程度。6 月—11 月定期对出水进行采样,按照 GB 7959—2012《粪便无害化卫生要求》^[22] 检测出水中的粪大肠菌群数,以评价本工艺是否能实现农厕黑水处理的无害化(图 3)。进水粪大肠菌群数在不同月份呈现出一定的波动,从 6 月的 2 200 MPN/L 升高到 7 月的 3 600 MPN/L,而后呈现下降趋势,这可能与温度的升降变化有关,低温不利于病原细菌的繁殖,但总体进水中粪大肠菌群数呈现出一个较高的水平。通过复合菌剂的强化作用,出水的粪大肠菌群数相较进水有了显著下降,出水的粪大肠菌群数在 70 ~ 180 MPN/L 波动,且大多数时间保持在 100 MPN/L 以下。这表明处理系统能够有效地将进水中的粪大肠菌群数降低至较低水平,从而达到无害化的效果。

从去除率的角度,所有粪大肠菌群的去除率都保持在 93% 以上,且大部分时间在 95% 以上,最高达 97.67%,显示了处理系统在整个观察期内具备高效且稳定的粪大肠菌群去除能力。7 月 15 日和 8 月 7 日的去除率分别达到了 96.94% 和 97.08%,

说明在这段时间处理系统的性能尤为突出。最低去除率出现在 6 月 20 日,为 93.33%,略低于其他时间点,但依然在一个较高的水平。综合来看,整个观察期内水冲厕系统保持了高效且稳定的运行状态。尽管进水的粪大肠菌群数在不同时间段有所波动,但出水的大肠菌群数始终保持在低水平,且去除率均在 93% 以上。这说明处理系统在应对不同污染程度的进水时,都能有效地去除粪大肠菌群,从而保证出水的无害化。

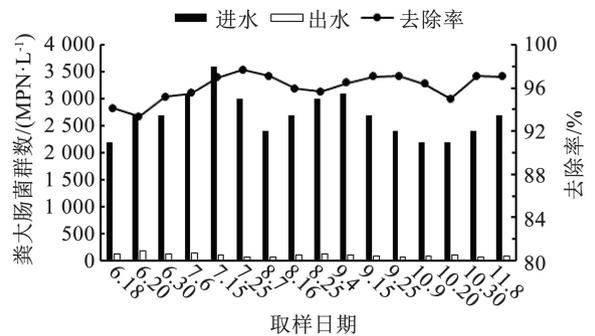


图 3 黑水处理过程中粪大肠菌群数变化

Fig. 3 Changes in fecal coliform counts during blackwater treatment

2.1.3 细菌群落结构变化

对比了仅处理粪污黑水水冲厕系统中不同腔体的细菌群落结构变化,如图 4 所示,处理黑水过程中,各环节细菌群落以厚壁菌门(Firmicutes)为主,3 个取水口的水样中 Firmicutes 占比分别达到 85.09%、86.01% 和 58.69%。在属水平上厚壁菌门的瘤胃解蛋白质菌(*Proteiniclasticum*)和泰氏菌属(*Tissierella*)丰度较高。*Proteiniclasticum* 是能够分解复杂蛋白质和肽,生成小分子氨基酸或其他代谢产物的厌氧菌^[23-24]。*Tissierella* 属于梭菌纲的厌氧细菌,在 3 个腔体水样中的丰度分别为 24.2%、25.83% 和 14.19%,主要参与复杂有机化合物的分解。最终出水口中 *Tissierella* 丰度大幅下降,而速生嗜冷杆菌(*Psychrobacter*)丰度提高到了 24.87%。*Psychrobacter* 是典型的耐冷菌,能够在低温条件下生存和繁殖且能参与到有机物分解过程中,*Psychrobacter* 丰度的提高证明了所投加复合菌剂的有效扩培。

2.2 净化槽工艺处理农村厕所灰水效能

2.2.1 污染物去除效果

针对厕所粪污和洗漱用生活污水混合物,采取净化槽工艺处理灰水中污染物。如图 5 所示,由于洗漱排水对粪污的稀释作用,进水 COD 在 258.12 ~ 567.41 mg/L 波动,经过处理后末端 COD 显著降低,出水 COD 在 45.50 ~ 117.79 mg/L 波动。前期 6 月 29 日和 7 月 2 日出水 COD 略高,分别为

117.79、99.00 mg/L,去除率分别为 54.36% 和 70.11%,而自 7 月 6 日开始,出水 COD 逐渐降低,去除率均达到 80% 以上,在 81.95% ~ 90.08% 波动。直至 10 月 20 日进入秋冬季后,日间最高温小于 7℃,也能维持在 80% 以上的去除效率。自稳定

运行后,出水 COD 符合 DB 23/2456—2019《农村生活污水处理设施水污染排放标准》^[18] 中规定的 COD 排放三级标准,同时符合 GB 5084—2021《农田灌溉水质标准》^[25] 中对于水田作物和旱地作物的灌溉标准。

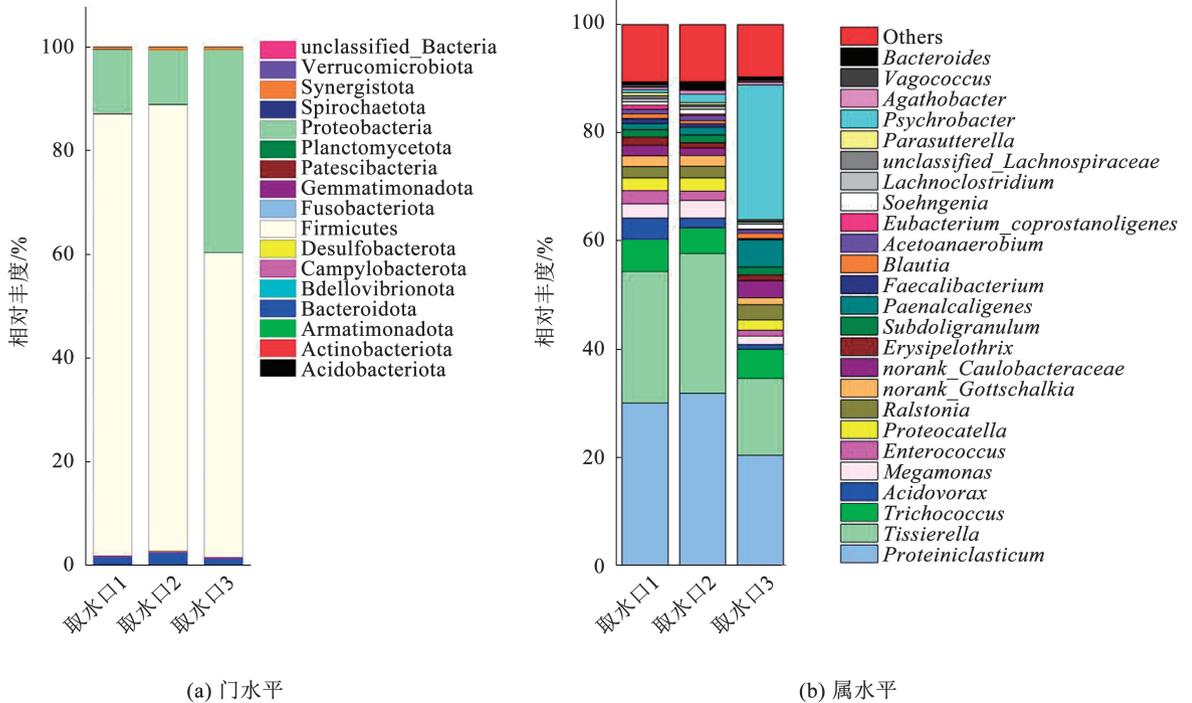


图4 黑水处理过程细菌群落结构门水平和属水平的变化

Fig. 4 Changes in bacterial community structure during blackwater treatment at the phylum and genus levels

在脱氮方面, $\text{NH}_3 - \text{N}$ 进水质量浓度在 23.72 ~ 64.87 mg/L 波动,出水 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 质量浓度降至 6.20 ~ 12.00 mg/L,去除率由初次启动的 49.4% 上升到 91.11%。总氮进水质量浓度为 32.13 ~ 71.08 mg/L,总氮的去除效果较为稳定,出水质量浓度在 20.91 ~ 29.67 mg/L,去除率由初次启动的 26.71% 上升到 66.89%。在脱氮过程中,氨氮在好氧条件下被硝化细菌转化为硝酸盐和亚硝酸盐,随后在反硝化过程中,这些硝酸盐和亚硝酸盐在厌氧条件下被反硝化细菌还原为氮气,从而实现总氮的去除^[26]。图 5(c) 中的数据表明,尽管存在温度变化,氨氮去除率仍保持较高水平,显示出复合菌剂的添加以及净化槽微动力曝气装置在强化氨氮处理方面的有效性。

在除磷方面,总磷的去除率较低,在 26.58% ~ 73.69% 波动,这是由于经过生化池的处理后,碳源质量浓度大幅降低,难以满足氮和磷元素同时去除的要求。另一方面,农村水冲厕系统以生物处理为主,由于缺少化学沉淀法除磷的强化,总磷的去除效率略低。由于现在无磷洗衣粉的普及,进水总磷质量浓度处于较低水平,在 3.98 ~ 7.66 mg/L,出水水质

量浓度降至 1.41 ~ 3.81 mg/L,虽然去除效率略低,但是出水的总磷质量浓度满足 DB 23/2456—2019《农村生活污水处理设施水污染排放标准》^[18] 中规定的 TP 排放三级标准。

总体上,与黑水处理系统相比,灰水中包含冲厕水和生活洗涤用水,虽然污染物含量低于黑水,但是日进水量更高导致水力停留时间缩短,且洗涤用水中含有洗护用品等含有表面活性剂的物质,不利于净化槽生化腔的细菌培养,但净化槽工艺水冲厕系统在灰水处理过程中运行稳定且出水达标,表现出良好的实用性。

2.2.2 粪大肠菌群处理效果

在无害化方面,以粪大肠菌群数为评价指标,考察净化槽工艺对灰水的无害化处理效果。如图 6 所示,进水的粪大肠菌群数在 180 ~ 380 MPN/L 波动,远低于黑水处理中粪大肠菌群数,这是由生活污水的稀释及日化用品的除菌作用导致的。进入秋冬季,例如,10 月 29 日的进水粪大肠菌群数降至 180 MPN/L,这是由于低温环境不利于病原菌的生长。总体上,经过净化槽工艺处理后,出水的粪大肠菌群数显著下降,出水的粪大肠菌群数从最高的

110 MPN/L(6月29日)逐渐降至最低的7 MPN/L(10月20日),整体上大多数时间保持在30 MPN/L以下。去除率由启动阶段的63.33%上升到90%,后期运行阶段一直在90.00%~97.41%波动,7月15日—8月26日期间,去除率在89.47%~92.50%波动,显示处理系统在夏季的表现相对稳定且较为高效。9月和10月的去除率则在91.00%~

97.40%波动,表明处理系统在秋冬季节依然能运行稳定。总体上,处理粪污和生活污水混合物的水冲厕所系统在整个观察期内保持了良好的运行状态。尽管进水的粪大肠菌群数有所波动,但出水数值显著降低,且去除率多数时间保持在90%以上。这说明处理系统在应对不同污染程度的进水时,都能有效地去除粪大肠菌群,从而保证出水的安全性。

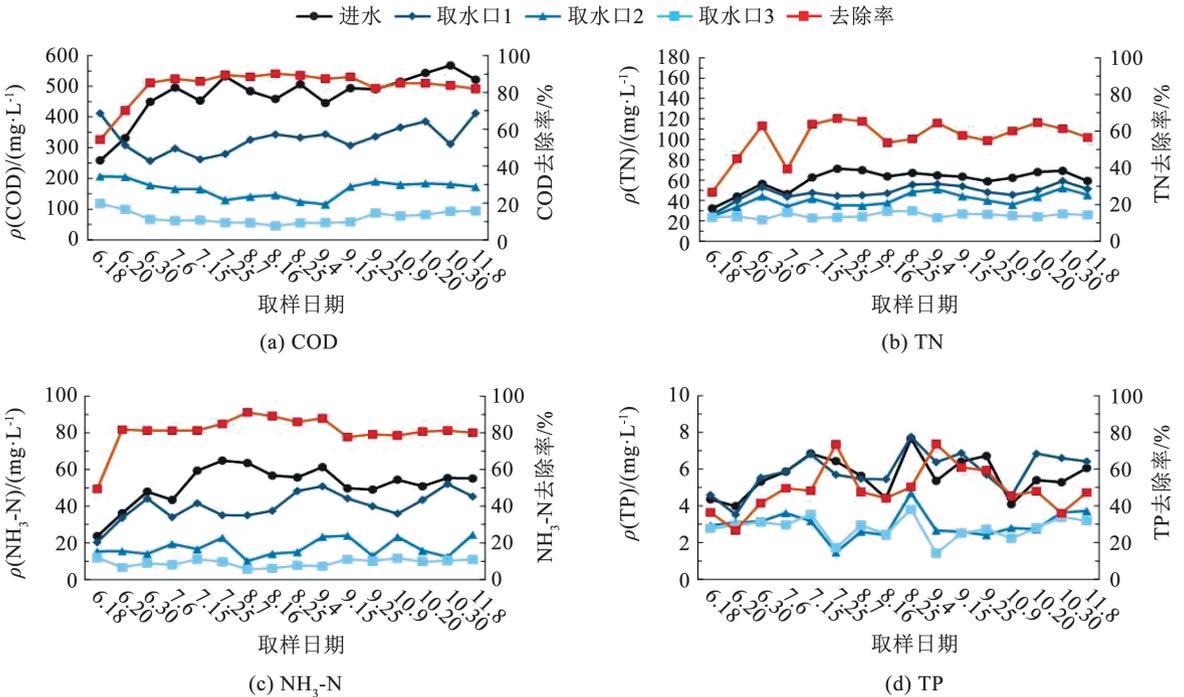


图5 处理灰水过程 COD、NH₃-N、TN 和 TP 质量浓度变化及去除率

Fig. 5 Changes in concentration and removal rates of COD, NH₃-N, TN, and TP during graywater treatment

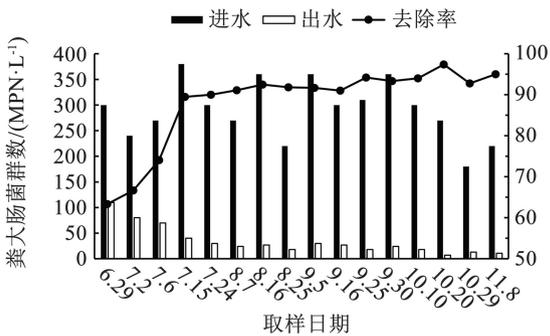


图6 处理灰水过程中粪大肠菌群数变化

Fig. 6 Changes in fecal coliform counts during graywater treatment

2.2.3 细菌群落结构变化

在处理灰水的水冲厕所系统中,由于进水为生活污水和粪污的混合物质,总体上细菌种类和丰度与处理黑水的水冲厕所系统差异很大。对净化槽水解腔、生化腔和清水腔的水样进行细菌群落结构分析,

可以看出污水处理不同环节中的菌群结构差异显著。如图7(a)所示,在门水平上,以变形菌门(Proteobacteria)为主,在3个腔体水样中的丰度分别为60.94%、86.42%和84.31%^[27]。Firmicutes丰度变化比较稳定,在3个腔体水样中的丰度分别为9.76%、7.98%和6.23%。如图7(b)所示,不动杆菌属(*Acinetobacter*)在3个腔体水样中的占比分别为31.94%、80.38%和75.42%,*Acinetobacter*菌属中包括约翰氏不动杆菌(*Acinetobacter johnsonii*)等多个菌种,都已被证实具有优异的低温脱氮能力^[28-30]。生化腔水样中*Acinetobacter*属的绝对优势丰度,证实了所添加复合菌剂对于群落结构的优化作用。致病菌弓形杆菌属(*Arcobacter*)在净化槽第一腔的相对丰度为2.82%,经生化腔处理后丰度下降到0.20%,假单胞菌(*Pseudomonas*)的相对丰度也由2.36%下降到0.86%^[31]。

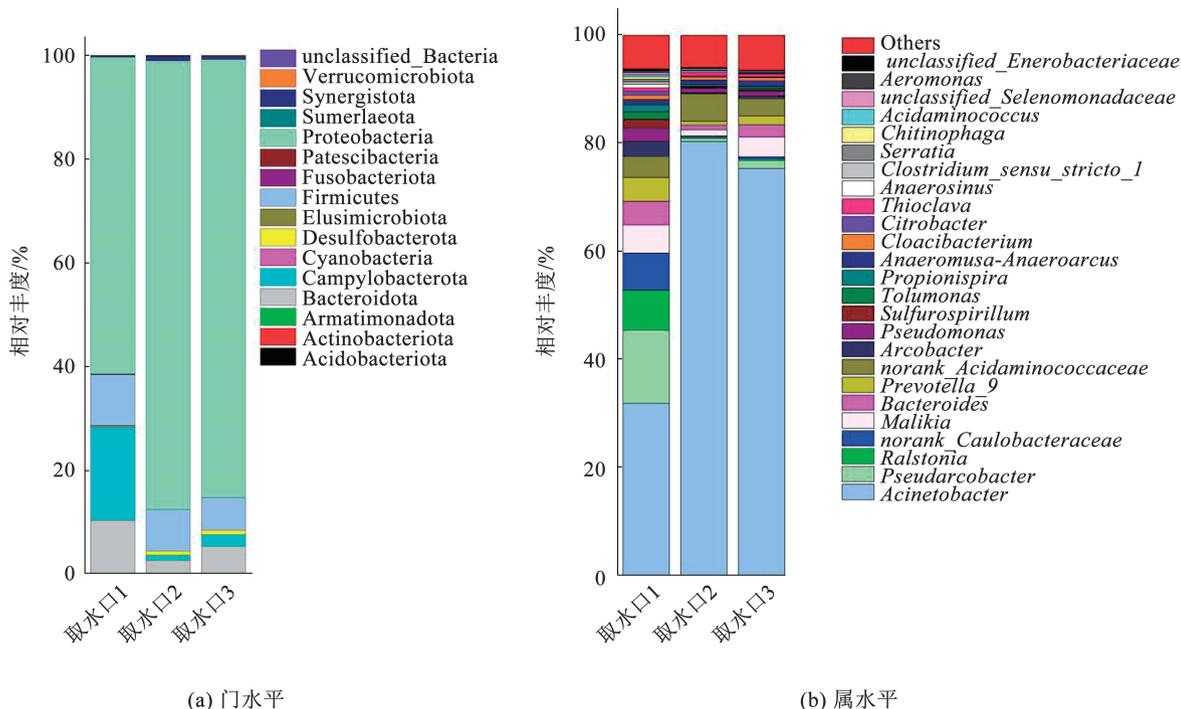


图7 灰水处理过程细菌群落结构门水平和属水平的变化

Fig. 7 Changes in bacterial community structure during graywater treatment at the phylum and genus levels

3 结论

1) 净化槽工艺水冲厕系统对“黑水”中污染物的去除效果显著, COD 去除率达 91.53%, 氨氮去除率达 80% 以上, 总磷去除率在 63.85% ~ 82.00%, 粪大肠菌群去除率保持在 90% 以上, 净化槽生化腔中复合菌剂的投加富集了优势功能菌, 保证了运行的稳定性。

2) 净化槽工艺水冲厕系统处理“灰水”过程中, COD 去除率为 81.95% ~ 90.08%, 氨氮去除率最高达 91.11%, 粪大肠菌群去除率达 90% 以上, 具备耐冷特性的 *Acinetobacter* 属在“灰水”处理中为绝对优势菌, 增强了降解功能。出水 COD 与总磷质量浓度均符合 DB 23/2456—2019《农村生活污水处理设施水污染排放标准》中规定的污染物排放三级标准, 同时符合 GB 5084—2021《农田灌溉水质标准》中对于水田作物和旱地作物的灌溉标准。

3) 总体上, 净化槽工艺水冲厕系统集成沉淀、水解及生物处理过程, 能满足日排水量小于 150 L 的农村分散式粪污及污水处理需求, 且维护简单, 不需要频繁清掏。通过向生化腔中投加复合菌剂富集功能微生物, 有助于水冲厕所在寒区冬季稳定运行, 且对于“黑水”或“灰水”都有良好的处理效果。未来可以根据农户应用习惯调整净化槽容量及曝气功率等设计参数, 灵活配置净化槽各模块处理容量和菌剂添加量, 以应对不同类型污水的处理需求, 保证

出水水质符合环保标准。

参考文献

[1] 尤明东, 李海波, 葛敏, 等. 黑龙江省冻土活动层厚度年际变化影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2018, 40(3): 480
YOU Mingdong, LI Haibo, GE Min, et al. The influence factors of permafrost active layer depth and their annual change in Heilongjiang Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(3): 480. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0053

[2] 刘聪. 基于模糊综合评价的农村厕所改造效果评价研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019
LIU Cong. Research on evaluation of rural toilet reconstruction effectbased on fuzzy comprehensive evaluation[D]. Taian; Shandong Agricultural University, 2019

[3] 孟凡琪. 哈尔滨市 P 区农村厕所改造问题研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2023
MENG Fanqi. Study on rural toilet renovation in area P of Harbin [D]. Shenyang; Liaoning University, 2023

[4] 王东旭. 大庆市农村厕所改造问题研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020
WANG Dongxu. Research on the reconstruction of rural toilets in Daqing City [D]. Daqing; Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2020

[5] 毕涛, 卢博宇, 邓雪霏, 等. 关于大庆市、黑河市农村环境整治情况的调研报告[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2019, 31(4): 103
BI Tao, LU Boyu, DENG Xuefei, et al. Investigation report of the rural environment improvement in Daqing and Heihe city[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019, 31(4): 103. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2090.2019.04.016

[6] 赵文斌, 迟光宇, 陈欣, 等. 低温条件下 MBBR 工艺处理农村厕所废水研究[J]. 水处理技术, 2022, 48(4): 119
ZHAO Wenbin, CHI Guangyu, CHEN Xin, et al. Study on treatment of rural toilet wastewater by MBBR process under low temperature[J]. Technology of Water Treatment, 2022, 48(4): 119. DOI:10.16796/j.cnki.1000-3770.2022.04.024

- [7] 赵伟华, 白萌, 马旭蛟, 等. 净化槽不同填料生物膜在低温下的脱氮性能与种群结构[J]. 水处理技术, 2023, 49(1): 108
ZHAO Weihua, BAI Meng, MA Xujiao, et al. Nitrogen removal performance and microbial structure of different fillers biofilm in johkasou under low temperature[J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(1): 108. DOI:10.16796/j.cnki.1000-3770.2023.01.021
- [8] 陈卓帛, 李佳彬, 李路瑶, 等. 原位发酵床处理干旱寒冷区农村厕所粪污研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4): 912
CHEN Zhuobo, LI Jiabin, LI Luyao, et al. In situ microbial fermentation systems for treating human feces in rural regions with cold and water shortages[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(4): 912
- [9] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 38
- [10] 辽宁省环境监测实验中心. 水质 粪大肠菌群的测定 多管发酵法: HJ 347.2—2018[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2018
- [11] 徐娇, 杨黎彬, 周雪飞. 厕所黑水、黄水处理和资源化技术研究现状与展望[J]. 环境卫生工程, 2022, 30(5): 1
XU Jiao, YANG Libin, ZHOU Xuefei. Research status and prospect of toilet black water and yellow water treatment and resource recovery technology [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2022, 30(5): 1. DOI:10.19841/j.cnki.hjwsgc.2022.05.001
- [12] 顾浩, 梁文伯, 李永木, 等. 农村生活污水处理与资源化利用及新污染物控制探讨[J]. 能源环境保护, 2024, 38(1): 181
GU Hao, LIANG Wenbo, LI Yongmu, et al. Situation of treatment and resource utilization of rural domestic sewage and discussion of emerging contaminants [J]. Energy Environmental Protection, 2024, 38(1): 181. DOI:10.20078/j.eep.20231208
- [13] SLAYMAKER T, BAIN R, HUNTER P, et al. Global assessment of exposure to faecal contamination through drinking water based on a systematic review [J]. Tropical Medicine and International Health, 2014, 19(8): 917. DOI:10.1111/tmi.12334
- [14] 赵远哲, 杨永哲, 王海燕, 等. 新型填料 A/O 生物滤池处理低碳氮比农村污水脱氮[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2329
ZHAO Yuanzhe, YANG Yongzhe, WANG Haiyan, et al. Nitrogen removal in low-C/N rural sewage treatment by Anoxic/Oxic biofilter packed with new types of fillers[J]. Environmental Science, 2020, 41(5): 2329. DOI:10.13227/j.hjxk.201910118
- [15] 王亚宜, 彭永臻, 王淑莹, 等. 反硝化除磷理论、工艺及影响因素[J]. 中国给水排水, 2003(1): 33
WANG Yayi, PENG Yongzhen, WANG Shuying, et al. Theory, process and influencing factors of denitrification and phosphorus removal[J]. China Water & Wastewater, 2003(1): 33
- [16] 冯叶成, 王建龙, 钱易. 生物脱氮新工艺研究进展[J]. 微生物学通报, 2001(4): 88
FENG Yecheng, WANG Jianlong, QIAN Yi. Research progress on new biological nitrogen removal processes[J]. Microbiology China, 2001(4): 88. DOI:10.13344/j.microbiol.china.2001.04.023
- [17] 周丹丹, 马放, 董双石, 等. 溶解氧和有机碳源对同步硝化反硝化的影响[J]. 环境工程学报, 2007(4): 25
ZHOU Dandan, MA Fang, DONG Shuangshi, et al. Influences of DO and organic carbon on simultaneous nitrification and denitrification[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2007(4): 25
- [18] 黑龙江省环境科学研究院. 农村生活污水处理设施水污染物排放标准: DB 23/2456—2019[S]. 哈尔滨: 黑龙江省生态环境厅, 2019
- [19] 潘玉钦, 张美霞. 农村公厕与卫生防病效果分析[J]. 环境与健康杂志, 2002(3): 223
PAN Yuqin, ZHANG Meixia. Effectiveness of improvement of latrines on disease prevention in countryside [J]. Journal of Environmental Health, 2002(3): 223. DOI:10.16241/j.cnki.1001-5914.2002.03.034
- [20] 周自严, 钟巍, 王德东, 等. 广州市农村地区改厕粪便无害化效果及影响因素[J]. 环境与健康杂志, 2014, 31(7): 598
ZHOU Ziyang, ZHONG Yi, WANG Dedong, et al. Harmless treatment effects of feces and influencing factors of latrines improvement in rural areas in Guangzhou [J]. Journal of Environmental Health, 2014, 31(7): 598. DOI:10.16241/j.cnki.1001-5914.2014.07.006
- [21] ROSE C, PARKER A, JEFFERSON B, et al. The characterization of feces and urine: a review of the literature to inform advanced treatment technology [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2015, 45(17): 1827. DOI:10.1080/10643389.2014.1000761
- [22] 国家疾控局. 粪便无害化卫生要求: GB 7959—2012[S]. 北京: 中华人民共和国卫生部、中国国家标准化管理委员会, 2013
- [23] 李麟. 高铁酸盐预处理剩余污泥厌氧发酵产短链及中链脂肪酸研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020
LI Lin. Short-chain and medium-chain fattyacids production performance and mechanism from ferrate pretreated waste activated sludge[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020
- [24] 王芷薇. 间歇/连续流模式下猪场粪污的水解酸化过程调控及产物特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021
WANG Zhiwei. Study on regulation and product characteristics of hydrolysis and acidification process of pig manure in batch/continuous flow mode[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021
- [25] 中国环境科学研究院. 农田灌溉水质标准: GB 5084—2021[S]. 北京: 生态环境部环境标准研究所, 2021
- [26] MA Bin, XU Xinxin, GAO Maohong, et al. Advanced nitrogen removal characteristics of low carbon source municipal wastewater treatment via partial-denitrification coupled with Anammox [J]. Huanjing Kexue, 2020, 41(3): 1377. DOI:10.13227/j.hjxk.201907135
- [27] XIA L, LI X, FAN W, et al. Heterotrophic nitrification and aerobic denitrification by a novel *Acinetobacter* sp. ND7 isolated from municipal activated sludge [J]. Bioresource Technology, 2020, 301: 122749. DOI:10.1016/j.biortech.2020.122749
- [28] 王乙舒, 李圆, 侯连刚, 等. 低温对异养硝化菌 *Acinetobacter* sp. 生长代谢及群体感应影响研究[J]. 中国环境科学, 2024, 44(7): 4063
WANG Yishu, LI Yuan, HOU Liangang, et al. Effects of low temperature on the growth, metabolism, and quorum sensing of heterotrophic nitrifying bacteria *Acinetobacter* sp. [J]. China Environmental Science, 2024, 44(7): 4063. DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2024.0153
- [29] 赵紫荆. 低温污水处理用脱氮功能菌的筛选及性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022
ZHAO Zijin. Screening and performance study of denitrifying bacteria for low-temperature sewage treatm [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022
- [30] 秦雯. *Acinetobacter* HITLi 7^T 适冷机制及其构建的菌群去除低温水中氨氮的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018
QIN Wen. Study on cold-adapted mechanism of *Acinetobacter* HITLi 7^T and ammonium removal from drinking water at low temperature by functional bacterial community [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018
- [31] 毕水莲, 孟赫诚. 致病性弓形杆菌属生物学特性及诊断研究进展[J]. 现代食品科技, 2013, 29(1): 211
BI Shuilian, MENG Hecheng. Biological characteristics and diagnoses of pathogenic *Arcobacter* species [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(1): 211. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2013.01.030