

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.07.006

# 农村户内生态渗井的除污特性及微生物种群结构

王骞乐<sup>1,2</sup>, 荣懿<sup>1</sup>, 徐瑶瑶<sup>1</sup>, 于优城<sup>3</sup>, 金鹏康<sup>1,4</sup>

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中核华辰建筑工程有限公司, 陕西 西安 712000; 3. 陕西优斯达环境科技有限公司, 陕西 宝鸡 721300; 4. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 针对农村生活灰水分布分散、不易集中处理的现状,设计了一种可有效去除灰水中碳、氮、磷的无动力户内生态渗井,以模拟生活灰水为处理对象,探究该系统对污染物的去除特性及其微生物种群结构。充氧效果试验结果表明,内均布管通气模式运行后期充氧效果变差,而外部双立管通气模式对各污染物的平均去除率均可稳定维持在较高水平,证明后者更利于硝化菌和反硝化菌分区生长;外部双立管生态渗井通气层位置与布水周期交互影响试验结果表明,通气层在第5层、布水周期为进3 min 停9 min 时,生态渗井对污染物的去除效果最好,COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN 和 TP 的平均出水浓度分别为 14.85、0.14、4.67 和 0.47 mg/L,去除率分别为 94.11%、97.91%、70.45% 和 73.92%;16S rRNA 基因测序结果表明,运行稳定的生态渗井内部微生物群落分布从上到下有明显差异,反硝化菌群与硝化菌群分别集中在生态渗井的中上部与下部,聚磷菌的相对丰度在生态渗井中上部较高,呈现出高效脱氮除磷的分布状态。

**关键词:** 分散式农村灰水; 生态渗井; 无动力充氧; A/O 工艺

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)07-0036-09

## Pollutants Removal Characteristics and Microbial Community Composition of Indoor Ecological Seepage Wells in Rural Areas

WANG Qian-le<sup>1,2</sup>, RONG Yi<sup>1</sup>, XU Yao-yao<sup>1</sup>, YU You-cheng<sup>3</sup>, JIN Peng-kang<sup>1,4</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. China Nuclear Huachen Construction Engineering Co. Ltd., Xi'an 712000, China; 3. Shaanxi Urstar Environmental Technology Co. Ltd., Baoji 721300, China; 4. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** This paper designed an unpowered indoor ecological seepage well for effectively removing carbon, nitrogen and phosphorus from grey water, and investigated the pollutant removal characteristics and microbial community composition of the system for treating simulated domestic grey water, so as to solve the problems of decentralized distribution of rural domestic grey water and its difficulty in centralized treatment. The oxygenation performance of the inner uniformly distributed pipe

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400701); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016TZC-S-19-3); 陕西省重点科技创新团队项目(2013KCT-13)

通信作者: 金鹏康 E-mail: pkjin@hotmail.com

aeration mode became worse in the later period of operation, while the average removal rate of each pollutant under the external dual-riser ventilation mode could be stably maintained at a high level, indicating that the latter was more conducive to the zonal growth of nitrifying bacteria and denitrifying bacteria. The test results of the interaction between the position of aeration layer and the water distribution cycle of the external dual-riser ecological seepage well showed that the best pollutants removal performance of the ecological seepage well was obtained when the aeration layer was in the 5th layer and the water distribution cycle was inflow of 3 min with interval of 9 min. The average effluent COD,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , TN and TP were 14.85 mg/L, 0.14 mg/L, 4.67 mg/L and 0.47 mg/L, and the removal rates were 94.11%, 97.91%, 70.45% and 73.92%, respectively. The results of 16S rRNA sequencing showed that the distribution of microbial communities in a stable ecological seepage well was significantly different from top to bottom. The denitrifying and nitrifying bacteria were concentrated in the middle-upper part and the lower part of the ecological seepage well, respectively, and the relative abundance of phosphorus accumulating bacteria was higher in the middle-upper part of the ecological seepage well. Their distribution accounted for the efficient nitrogen and phosphorus removal.

**Key words:** decentralized rural grey water; ecological seepage well; unpowered oxygenation; A/O process

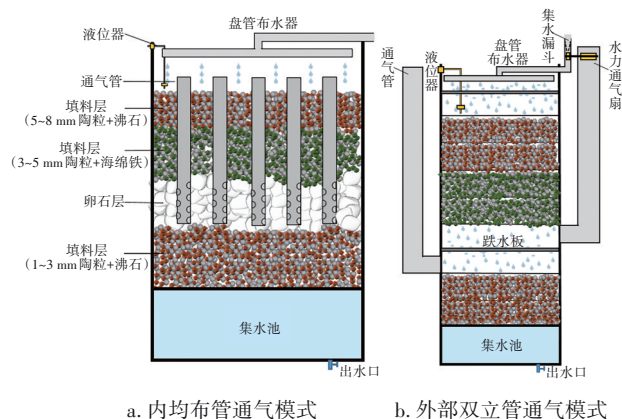
农村生活污水按照来源和水质特征的不同,大致可以分为灰水和黑水两大类。其中,灰水是指不包括冲厕污水(黑水)在内的生活杂水,主要包括餐厨污水、洗涤污水和洗浴污水等,由于具有基本不含肠道病原微生物、污染物浓度较低且易于自然生物处理等特点,具有很高的直接回用价值<sup>[1]</sup>。

目前灰水处理技术主要有物理化学处理、生物处理和生态处理三大类<sup>[2]</sup>。其中,物理化学处理主要包括化学混凝、过滤和膜处理,混凝和过滤虽然可有效降低灰水中的污染物浓度,但并未削减污染物,只是将其进行了转移;膜处理出水水质较好,但存在动力消耗大、膜污染等问题<sup>[3]</sup>。生物处理可有效降解灰水中的有机物和营养物质,但目前多适用于集中式处理,需要长期稳定的经济投资与运行维护<sup>[4]</sup>;生态处理如人工湿地、生态净化池等,存在村镇无法承担运行费用、而村级自助运行又有一定困难的问题,因此同样不适用于分散式农村污水的处理。鉴于此,笔者基于生物滴滤池和传统渗井的构造理念,针对农村生活灰水分布分散、不易集中处理的现状,利用生物脱氮除磷原理,设计了一种在无动力前提下有效去除灰水中碳、氮、磷的户内生态渗井,进行农村污水分质收集处理,以期为我国农村污水分散式处理提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置及运行方式

在埋地和无动力运行条件下,本研究设计了两种通气模式,试验装置如图1所示,参考生物滴滤池进行设计,均从上部重力流滴状进水、底部出水。



a. 内均布管通气模式 b. 外部双立管通气模式  
图1 两种通气模式的生态渗井

Fig.1 Schematics of ecological seepage well with two aeration modes

内均布管生态渗井的直径为400 mm,共有4层填料,每层高度为200 mm,等间距布置10根直径为20 mm的通气孔,顶端连接90°挡水弯头,高度为80 mm,底端均匀布置孔径为10 mm的通气孔,通气孔连接填料层外大气和大粒径卵石填料层(粒径为20~35 mm)中空气。外部双立管生态渗井的直径为

300 mm,共有6层填料,每层高度为100 mm,在顶部和中部设置含圆形多孔跌水板的通气层,层高为200 mm,两边设置直径为50 mm的通气管低进高出,且进水管和通气管处设水力通气扇,利用集水漏斗使进水水流带动叶轮转动,实现生态渗井内的气体流动。

## 1.2 试验用水及接种污泥

本研究主要针对西北偏远地区农村单户灰水进行处理,通过实地调研发现,西北地区供水相对不足,零散农户用水量和清洁用品用量少、生活饮食和生活用品等较单一,其生活灰水的COD、TN、TP浓度分别在300、15、2.5 mg/L左右。本试验据此人工配制模拟农村灰水,碳源由葡萄糖(155 mg/L)及无水乙酸钠(193 mg/L)提供,氮源由尿素(17.2 mg/L)及硫酸铵(28.3 mg/L)提供,磷元素由磷酸二氢钾(13 mg/L)提供,并投加碳酸氢钾以调节pH。模拟灰水水质如下:COD为253~330 mg/L(均值为278.81 mg/L),TP为1.73~2.61 mg/L(均值为2.47 mg/L),TN为13.66~17.01 mg/L(均值为15.85 mg/L), $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 为8.96~10.38 mg/L(均值为9.53 mg/L),pH为6~8.51(均值为7.13)。接种污泥取自西安市某污水处理厂好氧池的活性污泥。

## 1.3 试验方案

试验共进行132 d,阶段Ⅰ确定生态渗井最佳通气模式,阶段Ⅱ在最佳通气模式下探索生态渗井脱氮除磷的最佳运行工况。具体运行参数见表1。

表1 生态渗井在不同试验阶段下的运行条件

Tab.1 Operating conditions of ecological seepage well in different test stages

项 目		运行天 数/d	进水方式	HRT/h	流量/(L· h <sup>-1</sup> )
阶段Ⅰ	启动	30	连续进水	23.5	1.2 ~ 3
阶段Ⅱ	启动	30	连续进水	23.5	1.2 ~ 3
	沿程分析	30	连续进水	23.5	2.4 ~ 3
	交互试验	42	间歇进水	3.93 ~ 5.89	9.6 ~ 14.4

挂膜启动:对于内均布管生态渗井,先将接种污泥浸泡12 h,之后排掉内部污泥,以1.2 L/h的流量泵入模拟灰水;对于外部双立管生态渗井,采用间歇式直接挂膜法,先以小流量进水,然后逐渐增加水力负荷。当系统对COD的去除率保持在70%以上时可视为系统挂膜成功,通过挂膜特性验证两种通气模型的有效性。

试验阶段:在确定通气模式的基础上,改变通

气层位置及布水周期。成功启动后稳定运行一段时间,定期沿程取样,分析氮污染物浓度的沿程变化情况,研究通气层位置对整个生态渗井内部氧浓度分布的影响;通过改变布水周期来控制生物膜的落干时长,考察在不同布水周期(进3 min停12 min、进3 min停9 min和进3 min停6 min)条件下,不同通气层位置的生态渗井对COD、氨氮、TN和TP的去除效果。

## 1.4 分析项目及方法

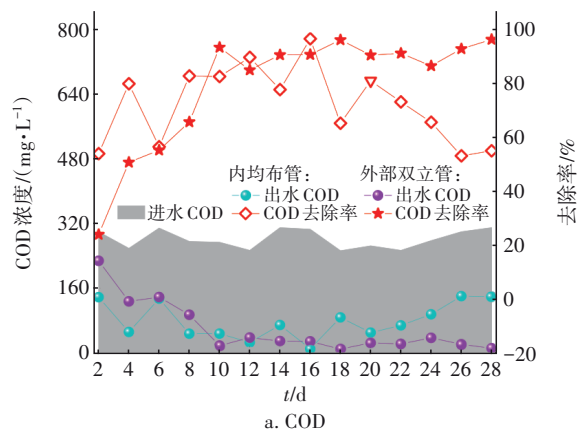
对试验装置的进水及出水水质进行检测分析,主要检测指标为COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 、TN、TP、pH,均采用国家标准方法进行测定。

微生物群落分析:取各层生物填料样品放入烧杯中,加入适量去离子水,然后进行超声振荡,待填料表面的生物膜完全脱落后,以6 000 r/min的转速离心10 min,每层取3个样品进行平行测定,以降低取样的偶然性。对制得的微生物样品采用干冰低温存放,送至北京百迈客生物科技有限公司进行DNA提取和细菌16S rRNA基因全长区域的PCR扩增检测。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同通气模式下生态渗井的除污效果

内均布管生态渗井与外部双立管生态渗井在启动阶段的30 d内对模拟农村灰水的处理效果见图2。由图2(a)可知,内均布管生态渗井对COD的去除率在启动16 d后达到最高即96.45%,此时出水COD浓度为10.86 mg/L,随后COD去除效果开始变差,后期去除率降为54.95%,分析原因在于后期滤层内部环境逐渐变为缺氧甚至厌氧,导致无法有效去除COD。而外部双立管生态渗井的COD去除率从启动第10天开始一直稳定在较高水平。



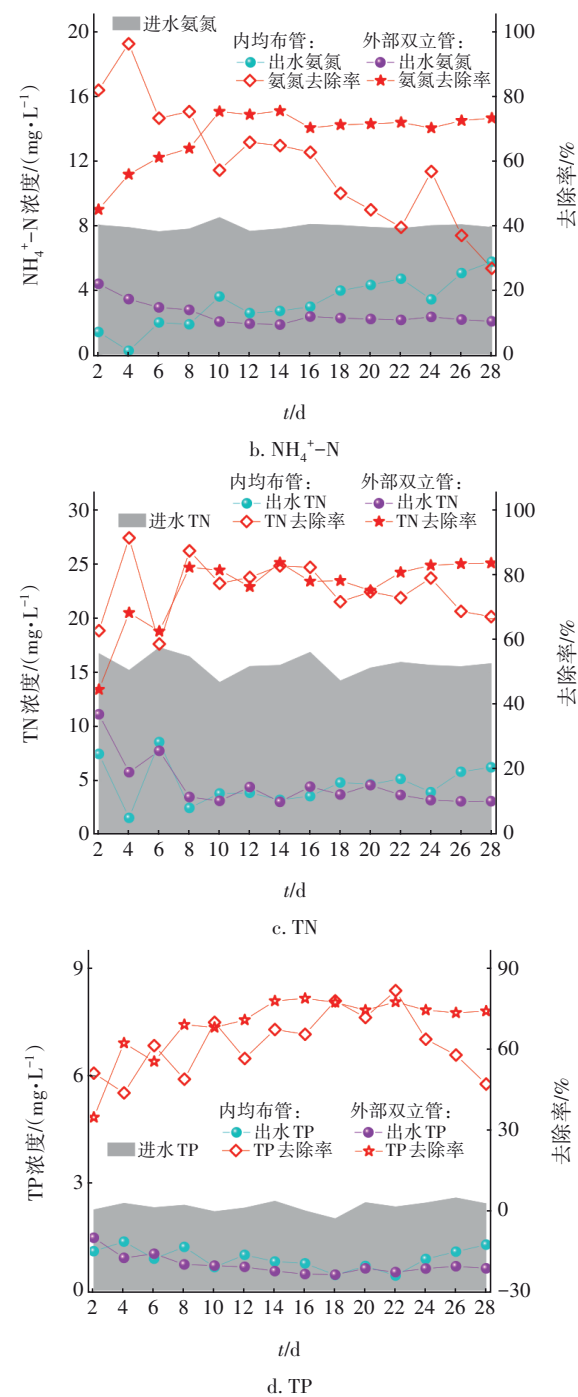


图2 不同通气模式生态渗井对污染物的去除效果

Fig.2 Removal of pollutants in ecological seepage well with different aeration modes

由图2(b)和(c)可知,内均布管生态渗井的出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度在运行初期较低,随后逐渐升高;出水TN浓度在第10~16天稳定在(3.59±0.25) mg/L,随后逐渐升高。外部双立管生态渗井在第12天后出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和TN浓度分别稳定在(2.15±0.25)、(3.32±0.37) mg/L,运行后期出水浓度有小幅波动

动,分析原因是水中溶解氧优先被异养菌利用,因此NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除效果受到了影响<sup>[5]</sup>。

图2(d)显示,内均布管生态渗井在第22天时出水TP浓度开始缓慢升高,第28天时出水TP浓度为1.29 mg/L,TP去除率仅为46.96%;外部双立管生态渗井在第8~24天出水TP浓度稳定在1 mg/L以下,后期TP去除率稳定在70%以上。启动前期生态渗井对TP的去除主要靠填料化学沉淀作用<sup>[6]</sup>、离子交换或离子对的吸附作用<sup>[7]</sup>,随着运行时间的增加,填料化学沉淀作用减弱,此时主要靠生物作用去除TP,内均布管生态渗井在填料吸附作用减弱后除磷效果逐渐下降,证明了只有外部双立管通气结构能够有效充氧,使生态渗井内部形成厌氧和好氧交替区,从而实现生物除磷。

## 2.2 外部双立管生态渗井的除污效果

在不同通气模式试验中发现,随着生态渗井不断运行,内均布管生态渗井整体上对COD、氮素及TP均不能维持良好的去除效果,而外部双立管生态渗井在运行稳定后对污染物的去除效果一直维持在较高水平,因此确定生态渗井通气层采用外部双立管模式。设置不同位置通气层的外部双立管生态渗井ESW1、ESW2和ESW3(见图3),通过改变布水周期探索生态渗井脱氮除磷的最佳运行工况。

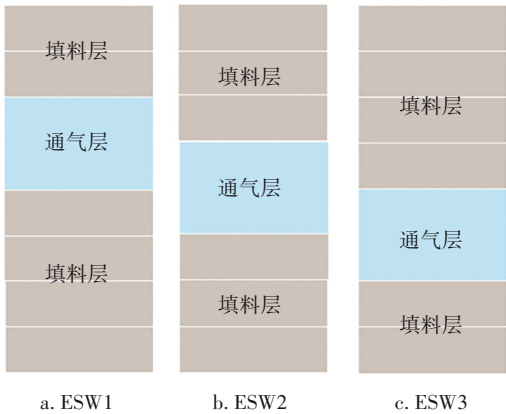


图3 通气层位置不同的外部双立管生态渗井

Fig.3 External dual-riser ecological seepage well with different aeration zones

### 2.2.1 COD去除特性

图4为不同外部双立管生态渗井在不同布水周期条件下对COD的去除效果。可以看出,在3种布水周期工况下,各生态渗井均呈现出随布水周期的缩短,COD去除率先上升后下降的趋势。其中,

ESW3对COD的去除效果最好,出水COD平均浓度在3种布水周期工况中均为最低,分别为25.01、14.85和21.70 mg/L,说明通气层位置靠下有利于增加滤料能够接触的氧气量,提高生物膜活性,在去除有机物方面起到积极作用。在布水周期方面,落干时间过长会对微生物活性造成一定影响<sup>[8]</sup>,同时易出现干固状态<sup>[9]</sup>,不利于填料的吸附截留和微生物的生长,且会造成水力冲刷变小而不利于生物膜的更新<sup>[10]</sup>;而当落干时间过短时,微生物降解有机物负荷变大,也不利于COD的去除。

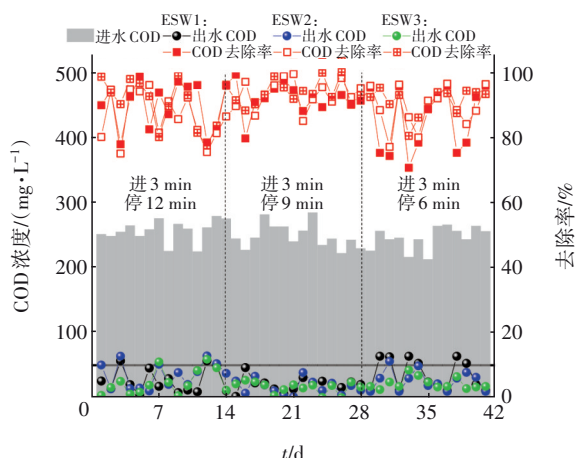


图4 不同布水周期下各生态渗井对COD的去除效果

Fig.4 COD removal effect in each ecological seepage well under different water distribution cycles

## 2.2.2 氮素去除特性

在外部双立管生态渗井稳定运行阶段,检测各滤层出水中氮污染物的浓度,结果见图5。进水中的有机氮除ESW1外其余基本在靠近通气层的填料层中被去除,氨氮逐层转化为 $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N。在ESW1中,模拟灰水经过通气层后 $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N浓度先升高后降低;在ESW2中,通气层上下填料层出水 $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N浓度增加,经底部填料层后小幅度降低;在ESW3中,第三填料层出水 $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N浓度达到最大值,在通气层上下填料层出水中两者浓度显著降低,分析原因,当通气层位于生态渗井下部时,反硝化菌更多地聚集在中上部,因此在通气层以上就出现了 $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N浓度降低的情况。ESW3出水 $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N浓度最低,说明通气层位置靠下,渗井内部所形成的氧气分布更有利于硝化菌和反硝化菌分区生长<sup>[11]</sup>,有利于反硝化菌利用中上部的碳源,使得大部分TN被去除。

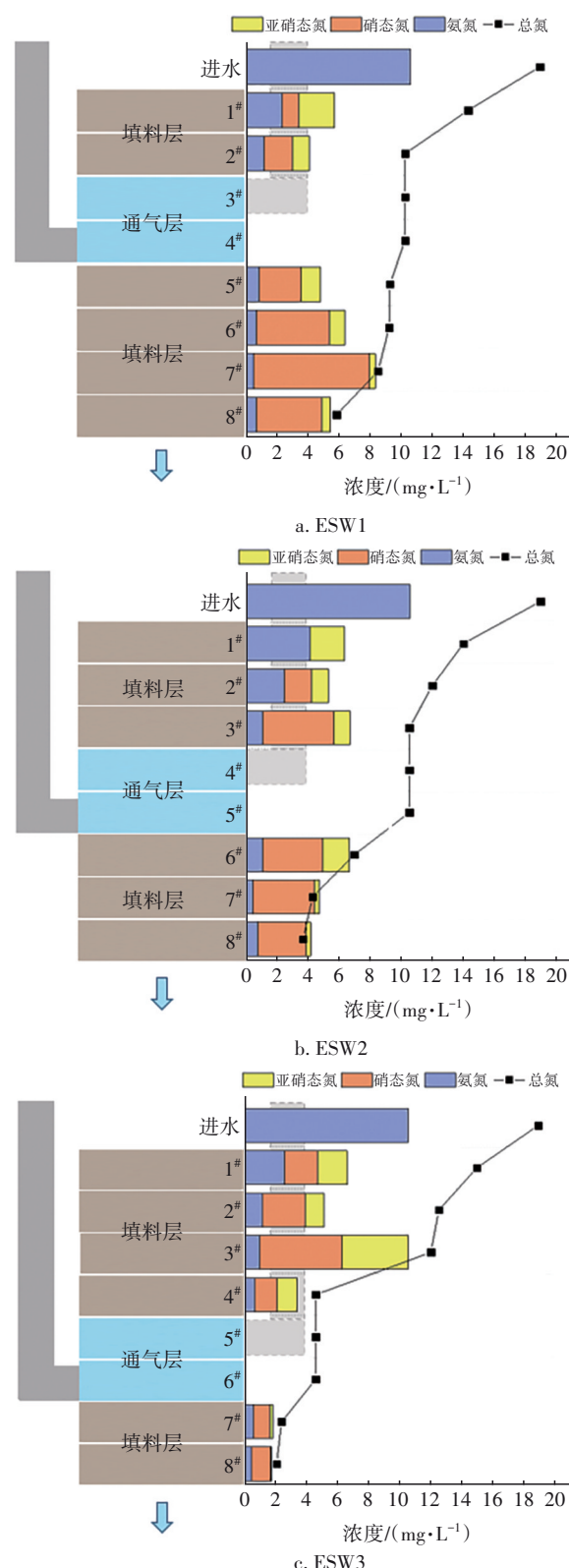


图5 不同生态渗井中氮素污染物的沿程去除效果

Fig.5 Removal effect of nitrogen pollutants along different ecological seepage wells

如图6(a)所示,布水周期对不同生态渗井的

$\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率影响不大,各生态渗井在不同工况下的出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度均保持在  $0.5\text{ mg/L}$  以下,其中 ESW3 对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除效果相较于其他两个更稳定、波动幅度更小。从图 6(b)可以看出,随着落干时间的缩短,各生态渗井的出水 TN 浓度均呈现出先下降后上升的趋势。ESW1、ESW2 和 ESW3 的出水 TN 平均浓度分别为  $6.23$ 、 $6.33$  和  $5.79\text{ mg/L}$ ,TN 平均去除率分别为  $58.68\%$ 、 $58.09\%$  和  $62.53\%$ ,表明 ESW3 对 TN 的去除效果最佳,最佳布水周期为进  $3\text{ min}$  停  $9\text{ min}$ 。落干时间过长时,会引起内部溶解氧浓度过高,易产生大量硝酸盐堆积<sup>[12]</sup>,且过长的停水时间导致有机物量供给不足,不利于 TN 的去除;而当落干时间过短时,进水负荷升高,水力冲刷增强,不利于硝化菌在滤料上附着生长,含氮物质不能得到充分的降解<sup>[13]</sup>。

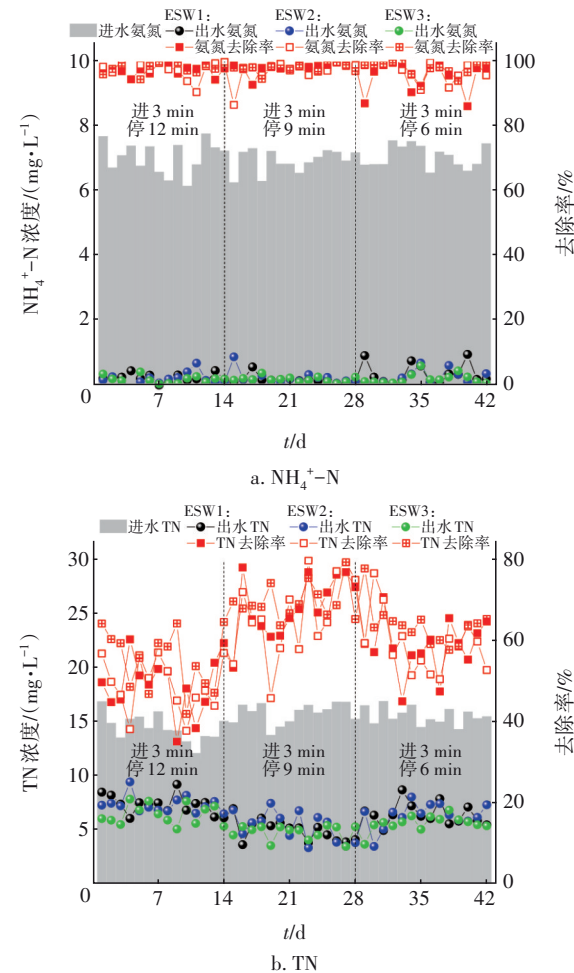


图 6 不同布水周期下各生态渗井对氮素的去除效果  
Fig.6 Nitrogen removal effect in each ecological seepage well under different water distribution cycles

2.2.3 TP 去除特性

如图 7 所示,在相同布水周期下,各生态渗井对 TP 的去除效果基本相当。在不同布水周期下,ESW1 对 TP 的去除效果变化不大,而 ESW2 和 ESW3 受落干时间的影响较 ESW1 明显,对 TP 的去除率随落干时间的缩短而先下降后略升高,原因在于落干时间缩短导致滤料表面湿润的程度增强,为聚磷菌提供了更适宜其生长的缺氧/厌氧环境,且合适的水力冲刷作用可以促进填料表面生物膜的自然更新<sup>[14]</sup>,空出更多的吸附和反应点位。

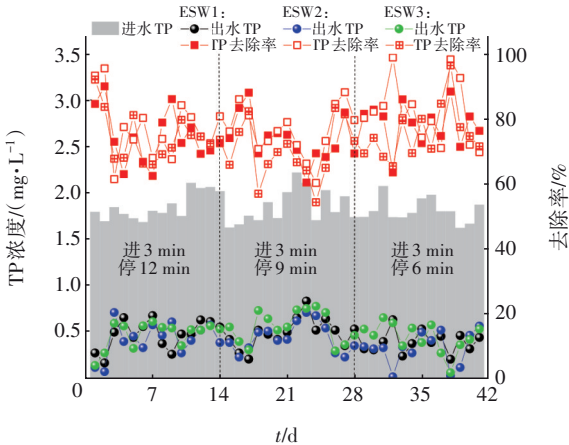


图 7 不同布水周期下各生态渗井对 TP 的去除效果  
Fig.7 TP removal effect in each ecological seepage well under different water distribution cycles

2.3 生态渗井中微生物种群的分布情况

在试验进行的第 105 天,对整体处理性能最好的 ESW3 内不同高度滤料上的生物膜进行微生物群落检测,在微生物层面探究生态渗井高效脱氮的原因。生态渗井上部、中部和下部微生物样品分别记作 A(1,2,3)、B(1,2,3)和 C(1,2,3)。表 2 反映了微生物样品的物种丰度及多样性。

表 2 生物多样性分析

Tab.2 Analysis of microbial diversity

项目	Feature	Ace 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	Coverage 指数
A1	299	364.64	5.27	0.89	0.992
A2	327	388.45	5.43	0.91	0.993
A3	286	339.64	5.02	0.87	0.993
B1	495	663.65	5.10	0.90	0.991
B2	486	606.99	5.41	0.92	0.994
B3	517	621.99	5.62	0.93	0.993
C1	688	746.97	7.85	0.99	0.991
C2	685	733.25	7.58	0.98	0.991
C3	715	780.54	7.62	0.98	0.994

从表2可以看出,样品覆盖率均在99%以上,表明本次测序结果能代表样品中微生物的真实情况。Feature为特征(OTUs或ASVs)的个数,Ace指数用于衡量物种丰度,Shannon和Simpson指数用于衡量物种多样性。表2显示,Ace指数从A到C呈现上升趋势,Shannon和Simpson指数A与B基本相同且均低于C,表明生态渗井中微生物群落的物种丰度和多样性均随生态渗井的深度而逐渐增加。

图8为生态渗井各反应段滤料生物膜样品的OTUs韦恩图,共有特征个数271,占总OTUs数的30.97%,表明生态渗井从上到下滤料生物膜上的微生物群落有明显差异;C组样品OTUs数量最多,为781,是A组的2.1倍,是B组的1.4倍,说明通气层使生态渗井内氧浓度分布发生了变化,为附着在填料上的微生物提供了更好的生长环境,有效增加了生态渗井底部微生物群落的数量和多样性。

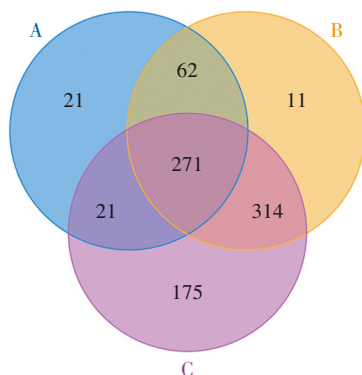


图8 生态渗井不同反应段中微生物OTUs特征韦恩图

Fig.8 Venn diagram of OTUs characteristics of microorganism in ecological seepage well under different reaction stages

生态渗井不同反应段中微生物在门水平上的分布情况如图9所示,变形菌门(*Proteobacteria*)、拟杆菌门(*Bacteroidetes*)、疣微菌门(*Verrucomicrobia*)和硝化螺旋菌门(*Nitrospirota*)为生态渗井的主要优势菌门。随着生态渗井深度的增加,变形菌门和拟杆菌门的相对丰度基本呈下降趋势,从上到下的相对丰度分别为61.10%、68.42%、56.14%和22.57%、17.22%和16.09%,相对丰度随垂直流由上至下有相同变化趋势的还有弯曲菌门(*Campilobacterota*)和厚壁菌门(*Firmicutes*);而硝化螺旋菌门的相对丰度随生态渗井深度的增加而上升,分别为0.44%、2.48%和6.94%,相对丰度同样呈上升趋势的还有

浮霉菌门(*Planctomycetes*)、酸杆菌门(*Acidobacteria*)和绿弯菌门(*Chloroflexi*),酸杆菌门和硝化螺旋菌门可以强化系统的硝化作用<sup>[15]</sup>,其中硝化螺旋菌门可以将亚硝酸盐氧化为硝酸盐<sup>[16]</sup>,绿弯菌门能够降解各种有机物,起到提高系统脱氮能力的作用。综上,不同菌门的相对丰度随生态渗井深度的增加而发生了明显的变化。

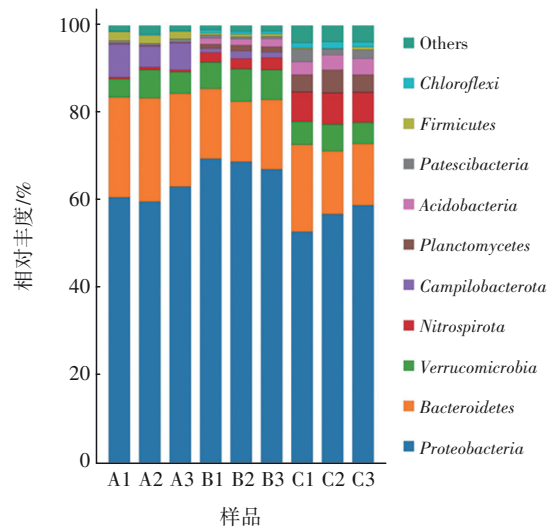


图9 生态渗井中微生物群落在门水平上的分布

Fig.9 Microbial community composition in ecological seepage well at the phylum level

图10显示了生态渗井由上到下属水平上的关键功能菌分布情况。

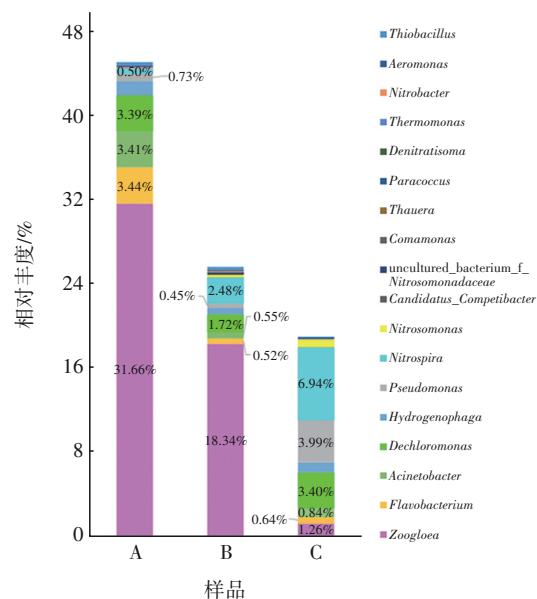


图10 生态渗井中关键功能菌在属水平上的分布

Fig.10 Distribution of key functional bacteria in ecological seepage wells at the genus level

由图10可知,氨氧化细菌(AOB)即亚硝化单胞菌(*Nitrosomonas*)和亚硝酸盐氧化菌(NO)即硝化螺旋菌(*Nitrospira*)的相对丰度随生态渗井深度的增加而呈上升趋势,分别为0.05%、0.20%、0.71%和0.50%、2.48%、6.94%。假单胞菌(*Pseudomonas*)为异养硝化菌,对氨氮具有很好的去除能力<sup>[17]</sup>,其相对丰度也随深度的增加而上升,在A、B和C组样品中的相对丰度分别为0.73%、0.45%和3.99%,原因是生态渗井底部的通气层提供了更适宜其生长的溶解氧。在主要的反硝化菌群中,动胶菌属的相对丰度随生态渗井深度的变化最为明显,从31.66%降至1.26%。生态渗井中主要的聚磷菌为不动杆菌(*Acinetobacter*)、脱氯单胞菌(*Dechloromonas*)和气单胞菌(*Aeromonas*),在A、B和C组样品中的相对丰度分别为6.95%、2.39%和4.41%,表明聚磷菌相对集中在生态渗井中上部。

## 2.4 技术经济分析

此地埋式无动力生态渗井(含通气管)占地面积仅为0.15 m<sup>2</sup>,外壁材料选用PPH管,填料选用球形生物陶粒、沸石及海绵铁,结构简单,耗材及加工费用低,且每日产泥量极少,基本不需要日常维护,村民能够自主运行。在运行防堵方面,填料粒径从上到下逐层减小,改善滤池操作条件的同时可预防上层填料堵塞。此外,可在生态渗井底部安装反冲洗装置,每年冲刷1次以去除老化的生物膜,降低生物膜厚度,防止滤料堵塞并提高处理效率,确保其长久稳定运行。

## 3 结论

① 在生态渗井无动力通气模式研究中发现,外部双立管通气模式能够在无需曝气的条件下在渗井内部形成厌氧-好氧区,且没有明显分区的厌氧-缺氧段有利于硝化菌和反硝化菌在生态渗井内协同生长,从而实现高效脱氮。

② 在研究外部双立管生态渗井内的污染物沿程变化时发现,生态渗井的除磷效果与通气层位置没有明显关系,而脱氮能力随通气层位置的下降而增强;在交互试验阶段,不同生态渗井对COD、TN和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除率均随布水周期的缩短而呈现先上升后下降的趋势,对TP的去除率则是先降低后上升。综合考虑得出,通气层设置在生态渗井下部且布水周期为进3 min停9 min时,污染物的去除效果

最佳。

③ 微生物群落的多样性及不同群落的空间分布与生态渗井的深度有关,反硝化菌为比例最高的功能菌群,主要集中在渗井中上部,硝化菌群主要集中在下部通气层周围,聚磷菌集中在生态渗井中上部,生态渗井中的微生物群落整体呈现出高效脱氮除磷的分布状态。

## 参考文献:

- [1] 李文凯,郑天龙,刘俊新.农村小管径重力流灰水道中生物膜细菌群落的特征[J].环境工程学报,2020,14(3):691-700.  
LI Wenkai, ZHENG Tianlong, LIU Junxin. Characteristics of bacterial communities in biofilms of rural gray water diameter gravity sewer systems [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(3): 691-700 (in Chinese).
- [2] UDIMAL T B, ZHUANG J C, AYAMBA E C, et al. China's water situation: the supply of water and the pattern of its usage [J]. International Journal of Sustainable Built Environment, 2017, 6(2): 491-500.
- [3] 朱明石,陈轩,周少奇,等.适合于西部山区的分散式农村污水治理技术探讨[J].广东化工,2019,46(7):181-182.  
ZHU Mingshi, CHEN Xuan, ZHOU Shaoqi, et al. Suitable for the western mountainous areas of decentralized rural sewage treatment technology [J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46(7): 181-182 (in Chinese).
- [4] 雷星星. SBR处理分散式生活污水效果实验研究[D].兰州:兰州交通大学,2020.  
LEI Xingxing. Experimental Study on Treatment Effect of Dispersed Domestic Sewage by SBR [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020 (in Chinese).
- [5] 张琳琳. UBF-复合生物滤池-人工湿地处理分散养殖废水研究[D].上海:上海交通大学,2017.  
ZHANG Linlin. Research on Combined Process of UBF/ Multi-layered Biological Trickling Filter/Constructed Wetland for Rural Dispersed Livestock Wasterwater Treatment [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017 (in Chinese).
- [6] 潘伟亮,练春江,曹云鹏,等.生态滤池工艺处理农村生活污水的季节特征分析[J].水处理技术,2021,47(3):106-109.  
PAN Weiliang, LIAN Chunjiang, CAO Yunpeng, et al.

- Seasonal characteristics analysis of ecological filter in the treatment of rural domestic sewage [J]. *Technology of Water Treatment*, 2021, 47 (3): 106-109 (in Chinese).
- [7] FU J H, LIN Z Y, ZHAO P C, *et al.* Establishment and efficiency analysis of a single-stage denitrifying phosphorus removal system treating secondary effluent [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 288: 121520.
- [8] DUPNOCK T L, DESHUSSES M A. Detailed investigations of dissolved hydrogen, and hydrogen mass transfer in a biotrickling filter for upgrading biogas [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 290: 121780.
- [9] DIEZ-MONTERO R, CASTRILLO M, CASAO M, *et al.* Model-based evaluation of a trickling filter facility upgrade to biological nutrient removal [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 661: 187-195.
- [10] DIAZ-ELSAIED N, REZAEI N, GUO T J, *et al.* Wastewater-based resource recovery technologies across scale: a review [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 145: 94-112.
- [11] ABOU-ELELA S I, FAWZY M E, EL-GENDY A S. Potential of using biological aerated filter as a post treatment for municipal wastewater [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 84: 53-57.
- [12] 潘伟亮, 李果, 秦宇, 等. 厌氧反应器/生态滤池处理农村生活灰水效果分析[J]. *中国给水排水*, 2016, 32 (11): 25-28.
- PAN Weiliang, LI Guo, QIN Yu, *et al.* Treatment efficiency of rural grey wastewater by combined system of anaerobic reactor and vertical eco-filter [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32 (11): 25-28 (in Chinese).
- [13] 马常玥. 多级慢速渗滤系统深度处理农村分散式生活污水研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- MA Changyue. Decentralized Domestic Sewage Treatment by a Multi-stage Slow Speed Infiltration System in Rural Areas [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019 (in Chinese).
- [14] AJIBADE O F, WANG H C, GUADIE A, *et al.* Total nitrogen removal in biochar amended non-aerated vertical flow constructed wetlands for secondary wastewater effluent with low C/N ratio: microbial community structure and dissolved organic carbon release conditions [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 322: 124430.
- [15] CHANG M D, WANG Y Z, PAN Y, *et al.* Nitrogen removal from wastewater via simultaneous nitrification and denitrification using a biological folded non-aerated filter [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 289: 121696.
- [16] 念兴宇. 基于分子生物学技术的IFAS系统不同季节下菌群结构及关键硝化细菌变化研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
- NIAN Xingyu. A Molecular Biology & Ecology Technologies Based Study on Microbial Community Structure and Significant Nitrobacteria Variation in IFAS System under Different Seasons [D]. Shanghai: East China Normal University, 2015 (in Chinese).
- [17] ROVETO P M, SCHULER A J. Performance and diversity responses of nitrifying biofilms developed on varied materials and topographies to stepwise increases of aeration [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 281: 429-439.

作者简介:王骞乐(1995-),女,山西运城人,硕士研究生,研究方向为水和废水深度处理技术。

E-mail:442625428@qq.com

收稿日期:2021-10-17

修回日期:2022-01-05

(编辑:刘贵春)