

刘娟, 谢雪东, 张洋, 等. 不同基质厌氧折流-垂直流人工湿地(ABR-VFW)对农村生活污水的处理效果[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(8): 1758–1766.

LIU Juan, XIE Xue-dong, ZHANG Yang, et al. Experimental study on treatment of rural domestic sewage by four substrates anaerobic baffled reactor-vertical flow wetlands(ABR-VFW)[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(8): 1758–1766.

不同基质厌氧折流-垂直流人工湿地(ABR-VFW)对农村生活污水的处理效果

刘娟¹, 谢雪东², 张洋¹, 雷平^{1,3}, 顾儒馨¹, 倪九派^{1*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 北碚 400715; 2. 遂宁市安居区环境保护局, 四川 遂宁 629006; 3. 绵阳师范学院城乡与建设学院, 四川 绵阳 621000)

摘要:为筛选不同污染浓度下垂直流人工湿地处理农村生活污水的最优基质, 选取4种常见的基质: 页岩砖渣(YZZZ)、火山岩(HSY)、生物陶粒(SWTL)和无烟煤(WYM), 构建厌氧折流-垂直流人工湿地(ABR-VFW), 水力负荷统一设置为 $4.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 通过对比分析不同污染浓度(低、中、高)下4种基质对农村生活污水中的有机物(以COD计)、总氮(TN)、总磷(TP)、铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)的处理效果, 为垂直流人工湿地治理农村生活污水最佳基质的选取提供了合理依据。结果表明: YZZZ对污水中COD和TN的去除率最高, 分别为88.12%~95.78%(低浓度)、64.05%~84.09%(中浓度)、61.25%~74.07%(高浓度)和51.98%~55.98%(低浓度)、38.52%~50.84%(中浓度)、47.42%~53.22%(高浓度), 其次为WYM和HSY, 而SWTL最低; SWTL对农村生活污水中 NH_4^+-N 和TP的去除率显著高于其他基质, 其分别高12%~24%(NH_4^+-N)和13%~23%(TP)。研究表明, 对COD和TN含量较高的农村生活污水以YZZZ基质去除效果为佳, 而对TP或 NH_4^+-N 为主的农村生活污水以SWTL基质去除效果为优。

关键词: 厌氧折流-垂直流人工湿地(ABR-VFW); 污染负荷; 基质; 处理效果

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)08-1758-09 doi:10.11654/jaes.2017-1442

Experimental study on treatment of rural domestic sewage by four substrates anaerobic baffled reactor-vertical flow wetlands(ABR-VFW)

LIU Juan¹, XIE Xue-dong², ZHANG Yang¹, LEI Ping^{1,3}, GU Ru-xin¹, NI Jiu-pai^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Environmental Protection Bureau of Suining City, Suining 629006, China; 3. College of Urban and Rural Construction, Mianyang Teachers' College, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to select optimal substrates for artificial vertical flow wetlands (VFW) that are used to filter domestic sewage with varying levels of pollution, four common substrates (i.e., shale debris, volcano ash, biological porcelain, and anthracite) were used to construct anaerobic baffled reactor (ABR)-VFWs. Hydraulic load was set uniformly to be $4.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. The effects of the four substrates were analysed on three pollution loadings (low, medium, and high concentration) in terms of the chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and ammonium nitrogen (NH_4^+-N) of rural domestic sewage. The shale debris substrate reduced the COD of the low, medium, and high-pollution sewage by 88.12%~95.78%, 64.05%~84.09%, and 61.25%~74.07%, respectively, and the TN by 51.98%~55.98%, 38.52%~50.84%, and 47.42%~53.22%, whereas the anthracite and volcano ash substrates were less effective, and the biological porcelain was the least effective. In contrast, the biological porcelain substrate removed NH_4^+-N and TP from the rural domestic sewage at significantly higher rates than the other substrates. Therefore, shale debris are the most effective substrate for purifying rural domestic wastewater with high COD or TN, whereas biological porcelain is the most effective substrate for purifying wastewater with high TP or NH_4^+-N .

Keywords: anaerobic baffled reactor-vertical flow wetland; pollution load; matrix; purification effect

收稿日期: 2017-10-24 录用日期: 2018-01-24

作者简介: 刘娟(1992—), 女, 重庆彭水人, 硕士研究生, 从事水污染控制研究。E-mail: 826869818@qq.com

*通信作者: 倪九派 E-mail: nijupai@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671291); 重庆市社会事业与民生保障科技创新专项项目(cstc2017shms-xdny80062)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41671291); Special Project for Scientific and Technological Innovation in Social Undertakings and Livelihood Security of Chongqing(cstc2017shms-xdny80062)

厌氧折流(Anaerobic Baffled Reactor, ABR)是 McCarty 等于1981年发明的一种高效新型厌氧污水生物处理技术^[1]。废水在反应器内沿折流板作上下流动,依次通过每个反应室的污泥床,废水中的有机基质通过与微生物接触而得到去除。人工湿地是由基质、植物和微生物菌落组成的综合性系统^[2],垂直流人工湿地(Vertical Flow Artificial Wetland, VFW)不但具有潜流型人工湿地的优点,而且能充分利用基质表面,提高污水处理效率^[3-4]。刘哲^[5]指出VFW可显著提升生活污水中 NH_4^+-N 和TN的去除率,增加植物和微生物对COD的消耗,净化污水效率显著高于表面流和潜流人工湿地;涂汉等^[6]的研究结果表明垂直流湿地对农村生活污水污染物的去除率高于水平潜流。然而,VFW因水力停留时间较短而影响出水水质效果^[7],因此选取合适的基质变得至关重要。

VFW的填料基质选取应遵循易取材、性价比高、投资少、因地制宜及可重复循环利用等原则。目前我国西南地区生活污水治理普遍采用的基质为页岩砖渣(YZZZ)、生物陶粒(SWTL)、无烟煤(WYM)和火山岩(HSY)等材质。其中YZZZ的孔隙率大(比例为62.51%),吸附性能强^[8-9];SWTL具有耐冲刷、抗磨损、理化性能稳定且微孔丰富、表面粗糙、比表面积大,及吸附性能好等优点;WYM和HSY取材方便、价格便宜且 SiO_2 含量高,污水中磷素的吸附去除能力的主要因素是由基质中活性物质Fe、Al、Ca、Mg的含量所决定^[10-13]。四种基质对净化生活污水具有重要作用,然而其对农村生活污水净化效果的优劣却存在争议性。因而,本研究利用ABR-VFW比较四种基质

(YZZZ、HSY、SWTL和WYM)对不同污染负荷下农村生活污水的处理效果,以期找到最优基质,为人工湿地处理农村生活污水提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验工艺流程

本研究采用ABR-垂直流人工湿地组合工艺进行污水处理,其处理过程如图1所示:生活污水→格栅→沉砂池→ABR→曝气池→高位水箱→垂直流人工湿地→出水。

1.2 试验设计

具体分为ABR反应器挂膜、VFW挂膜和VFW运行等三阶段。其挂膜操作流程为:采集适量污水处理厂沉淀池的活性污泥在200 L的塑料箱中厌氧培养一段时间后,将体积约为100 L的塑料浮球浸泡在该活性污泥之中培养24 h,使塑料浮球内的火山岩表面(或塑料条)及内部空隙形成一层涟漪,球体表面呈黑色。将塑料浮球置于ABR内不同格室,加入活性污泥继续培养24 h,完成ABR反应器预挂膜。以一定浓度的生活污水通过反应器,促使反应器内折流板、塑料浮球及不同格室形成相应的微生物膜及优势菌群,并最终完成挂膜。VFW挂膜是指选取直径为0.3 m,底板开孔(直径0.5 mm和间距10 mm)的渗流柱构建VFW,并将好氧培养后的活性污泥添加在配水箱中,通过管道从有机玻璃柱体的顶端慢慢注入,渗滤液从低端渗出进入有机玻璃柱体下方的渗滤液收集箱,用污水提升泵将渗出液提升至柱体的顶端,如此往复循环运行3 d之后,柱体内部填料的表面与空隙

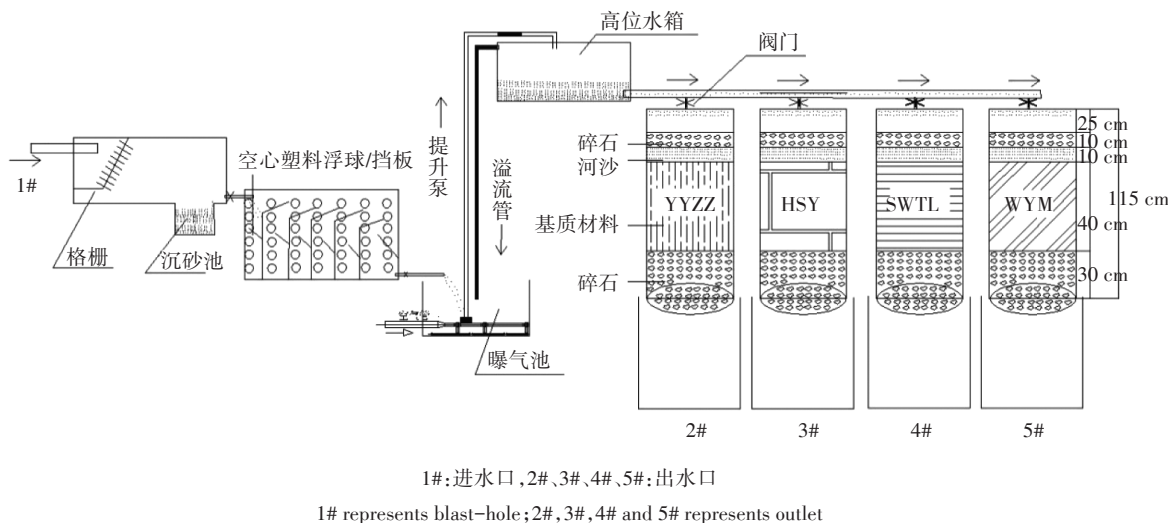


图1 ABR-VFW 组合工艺构建

Figure 1 Integrated process of the ABR-VFW

间生长出一层生物膜,达到预挂膜效果。该阶段渗流柱的构建过程为:首先,向柱中装填30 cm高预先洗净的碎石(粒径为30~50 mm);然后,铺设一层孔径为1 cm 钢丝网;之后,将粒径8~15 mm的四种填料(YZZZ、HSY、SWTL、WYM)分别装填在4组湿地内,高度为40 cm;最后,装填高度各为10 cm,粒径5~10 mm的碎石和河沙,上留25 cm保护高度,形成湿地,基质的粒级参考杨俊^[14]的研究。VFW 运行阶段是通过调控进水污染物浓度(低、中、高)来研究不同基质(YZZZ、HSY、SWTL、WYM)VFW 对农村生活污水中污染物的处理能力。

试验运行时间从2017年3月21日开始,到7月5日结束。通过调节进出水口的阀门,采用连续进水、间歇排水的运行方式,进水量约15 L·h⁻¹,每日排水3次,每日运行8~10 h,晚上不运行,水力停留时间为2 d,主要目的是维持湿地内微生物的活性。pH 值控制在7.0~8.6之间,运行温度为25~35℃。垂直流人工湿地水力负荷统一设置为4.2 m³·m⁻²·d⁻¹。主要检测项目为COD、TN、TP、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N。

1.3 供试污水特性

试验采用C₆H₁₂O₆、NH₄NO₃、KH₂PO₄等试剂配水来模拟农村生活污水水质,其组成和浓度如表1所示。配制后的农村生活污水中污染物的浓度如表2所示。

1.4 试验材料

本试验采用的4种填充基质(YZZZ、HSY、SWTL、WYM)的理化性质如表3所示。

1.5 样品采集及测定方法

每隔2 d用预先酸化的塑料瓶在出水口(2#、3#、4#和5#)采集500 mL处理水,放于4℃冰箱内,以供后续测定。

本研究中监测的指标主要为:COD(重铬酸钾法^[15])、TN(过硫酸钾消解-紫外分光光度法^[15])、TP(钼酸铵分光光度法^[15])、NH₄⁺-N(纳氏试剂光度法^[15])、NO₃⁻-N(紫外分光光度法^[15])。

1.6 数据处理

采用Excel 2013和SPSS 19.0进行数据分析,同时采用Origin 8.5软件进行图表绘制,采用Pearson 简单

表1 人工生活污水的配制(mg·L⁻¹)

Table 1 Configuration of artificial life sewage(mg·L⁻¹)

项目	C ₆ H ₁₂ O ₆	NH ₄ NO ₃	KH ₂ PO ₄	MgSO ₄	CaCl ₂	FeSO ₄
低浓度	150	30	5	225	275	25
中浓度	300	60	10	225	275	25
高浓度	500	100	20	225	275	25

表2 试验用水水质特征(mg·L⁻¹)

Table 2 Quality features of the waste water(mg·L⁻¹)

指标	低浓度	中浓度	高浓度
COD	175±8.05	265±12.19	365±12.79
TN	17.5±0.81	28±1.29	40.5±1.86
TP	3±0.14	5±0.23	7±0.32
NH ₄ ⁺ -N	17±0.78	24.5±1.13	36.5±1.68
NO ₃ ⁻ -N	0.3±0.01	0.75±0.03	1.1±0.05

表3 基质填物理化性质

Table 3 Physicochemical properties of the fillers

基质类型	YYZZ	HSY	SWTL	WYM
CaO/%*	1.19	9.86	3.26	2.65
MgO/%*	1.58	1.49	2.04	0.48
Fe ₂ O ₃ /%*	7.26	11.86	7.84	7.40
Al ₂ O ₃ /%*	22.10	14.71	16.32	19.30
SiO ₂ /%*	63.01	43.27	62.12	65.01
其他/%*	4.87	8.05	8.42	5.17
孔隙率/%	62.51	78.10	60.65	49.34
基质比重	2.08	1.29	1.87	1.17
堆积密度/g·cm ⁻³	0.78	0.62	0.74	0.59
比表面积/cm ² ·g ⁻¹	6.17×10 ²	1.95×10 ⁵	3.91×10 ³	29.80

注:部分数据为实测值(“*”),部分数据来自巩义市泰和水处理材料有限公司。

Note: The measured data are annotated with ‘*’ and the rest are from water treatment Coordinated Yin and Yang Water-treatment Materials limited inc., Gongyi City, China.

相关系数表征相关性。

2 结果与分析

2.1 对不同浓度COD的去除效果

不同污染浓度下,四种基质对生活污水中COD的去除效果如图2所示。以YYZZ、HSY、SWTL为基质的VFW在低污染浓度下的COD去除率较好,其中基质YYZZ垂直流人工湿地工艺去除率处理效果最高,高达95.78%,其次为HSY型VFW(93.85%),最后是SWTL型VFW(79.82%)。相比其他三种基质构建的VFW工艺,以WYM为基质构建的VFW在中浓度下的去除率高于低浓度下的去除率。此外,采样时间也是垂直流人工湿地运行的一个重要参数,影响农村生活污水净化效果。在低浓度下,以YYZZ、WYM为基质构建的VFW的最低拐点于采样时间第6 d出现,HSY、SWTL型VFW于第8 d出现最高拐点。

2.2 对不同浓度TN的去除效果

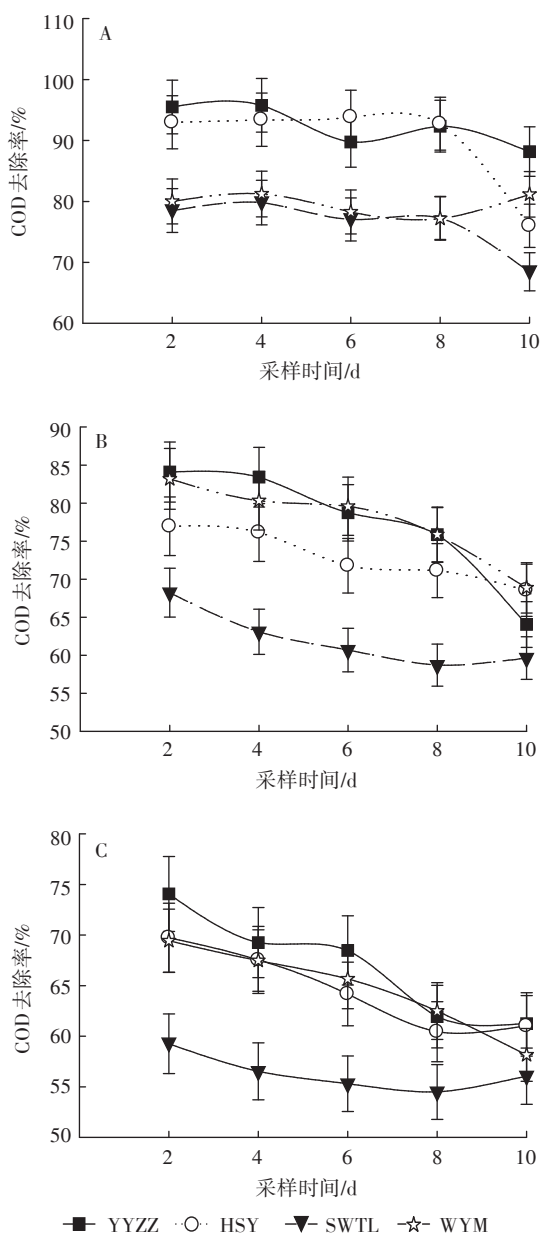
生活污水中N是引起面源污染的重要驱动因子。

不同污染浓度下,4种基质对生活污水中N的去除效果如图3所示。中低浓度下,以YYZZ和HSY为基质的VFW对生活污水TN的去除效果显著大于以SWTL基质构建的VFW;高浓度下,以YYZZ和WYM为基质构建的VFW对污水中TN的去除效果大于基质HSY和SWTL构建的VFW。由图3可以发现低浓度下以YYZZ、HSY、WYM为基质的VFW TN去除率在

采样时间第6 d出现拐点,中浓度下以SWTL基质构建的VFW在第6 d出现了最高拐点。通过4种基质下的VFW对生活污水中TN的去除效果可知,以YYZZ为基质的VFW的处理效果最好,而以SWTL为基质的VFW处理效果最差。

2.3 对不同浓度 NH_4^+-N 的去除效果

NH_4^+-N 的去除率随进水污染浓度增加及采样时



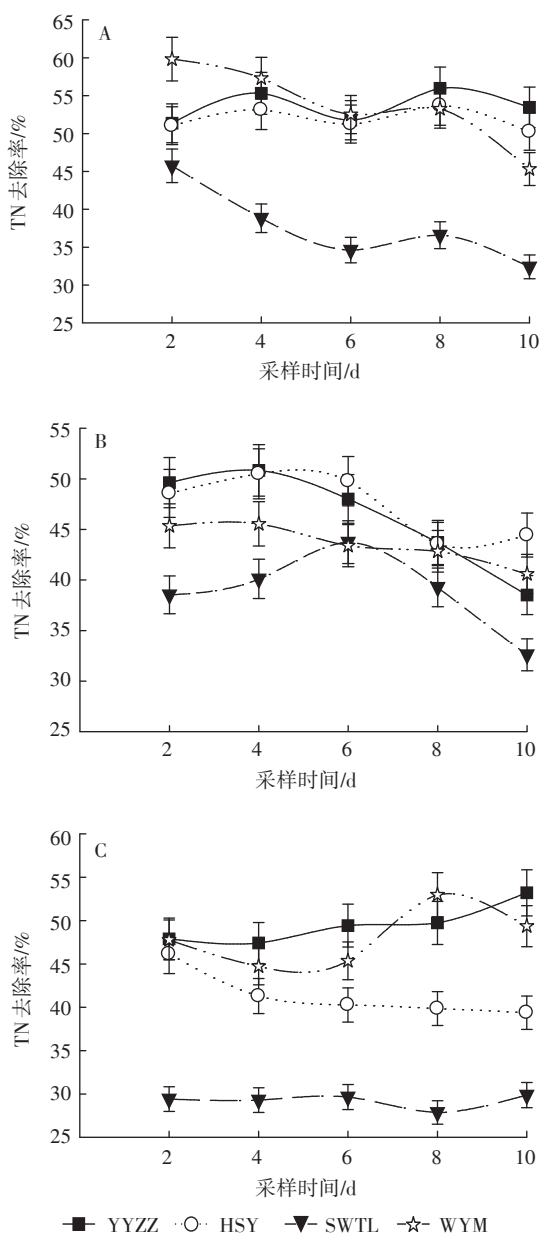
A:低浓度 B:中浓度 C:高浓度

A: low concentration; B: medium concentration;

C: high concentration

图2 四种基质垂直流人工湿地对不同浓度COD的去除效果

Figure 2 Removal efficiency of the VFW on COD with different matrices



A:低浓度 B:中浓度 C:高浓度

A: low concentration; B: medium concentration;

C: high concentration

图3 四种基质垂直流人工湿地对不同浓度TN的去除效果

Figure 3 Removal efficiency of the VFW on TN with different matrices

间(2、4、6、8、10 d)出现波动起伏(图4)。在低浓度下,以YYZZ、HSY及SWTL为基质的VFW相应的对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率随采样时间逐渐下降,其分别下降了23%、33%和26.93%,而以WYM为基质的VFW所对应的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率从43.34%上升到54%。由图可知,低浓度下以SWTL和HSY为基质的VFW对污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果较好;中浓度下,以HSY、SWTL和WYM为基质的VFW去除效果显著大于以YYZZ为基质的VFW;高浓度下,YYZZ、HSY、SWTL及WYM四类基质构建的VFW对污水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率逐渐增加,分别增加了11.69%、16.78%、19.25%及11.58%,且相比其他三组基质,SWTL为基质的VFW的去除率最大,效果最好。综合比较4种基质构建的VFW在三种污染浓度下对污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果,发现以SWTL为基质构建的VFW去除效果最优。

2.4 对不同浓度 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除效果

低浓度下的各处理出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 均出现累积效应,且以SWTL为基质的VFW累积率最大,其次为YYZZ型VFW和WYM型VFW,而以HSY为基质的VFW最小(图5)。低浓度下,相比其他三种基质,以

HSY为基质的VFW对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的累积作用最小,这与HSY抑制了硝化细菌,减少了 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的累积有关,且采样时间为第4 d的时候出现了最低拐点。在不同浓度下,污水经过四类基质VFW处理后,其出水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量明显大于进水前 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量,且以SWTL为基质的VFW对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 累积量最大,说明四种基质均促进了水中硝化反应的进行,且以SWTL为基质的VFW中硝化作用最强。同时,通过整体比较四种基质构建的VFW对不同浓度污水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除率,发现以SWTL为基质的VFW对其去除效果最好。

2.5 对不同浓度TP的去除效果

污水中的P不易转化,只能通过基质吸附或者微生物代谢而去除。四种基质构建的VFW对不同污染物浓度下对TP的去除效果如图6所示:不同污染浓度下,以SWTL为基质的VFW对污水P的处理效果最好(低、中、高浓度分别为:78.43%~80.50%、75.37%~77.21%、77.33%~80.43%),其次为WYM型VFW,在低浓度下采样时间为第4 d时出现了最低拐点。而YYZZ型VFW和HSY型VFW对污水中TP的去除率基本上都处于60%以下。

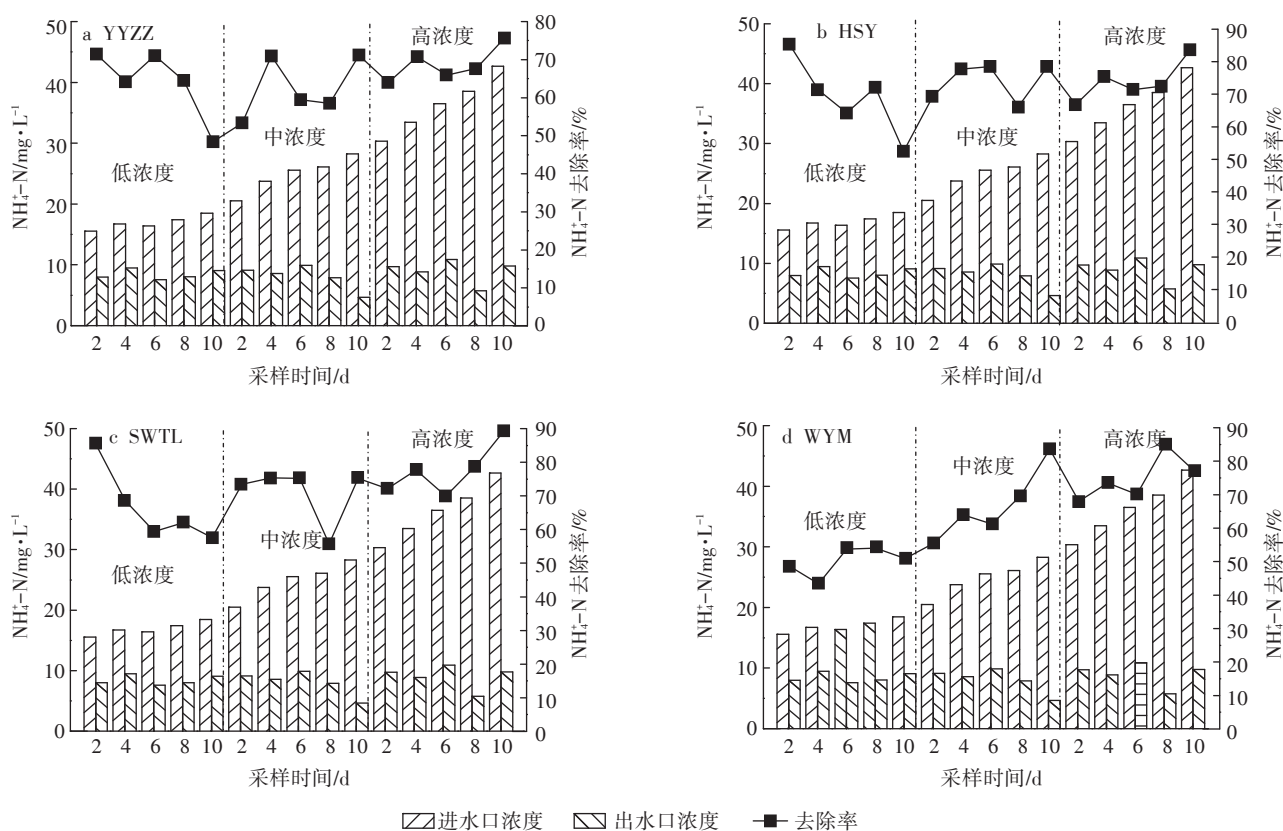
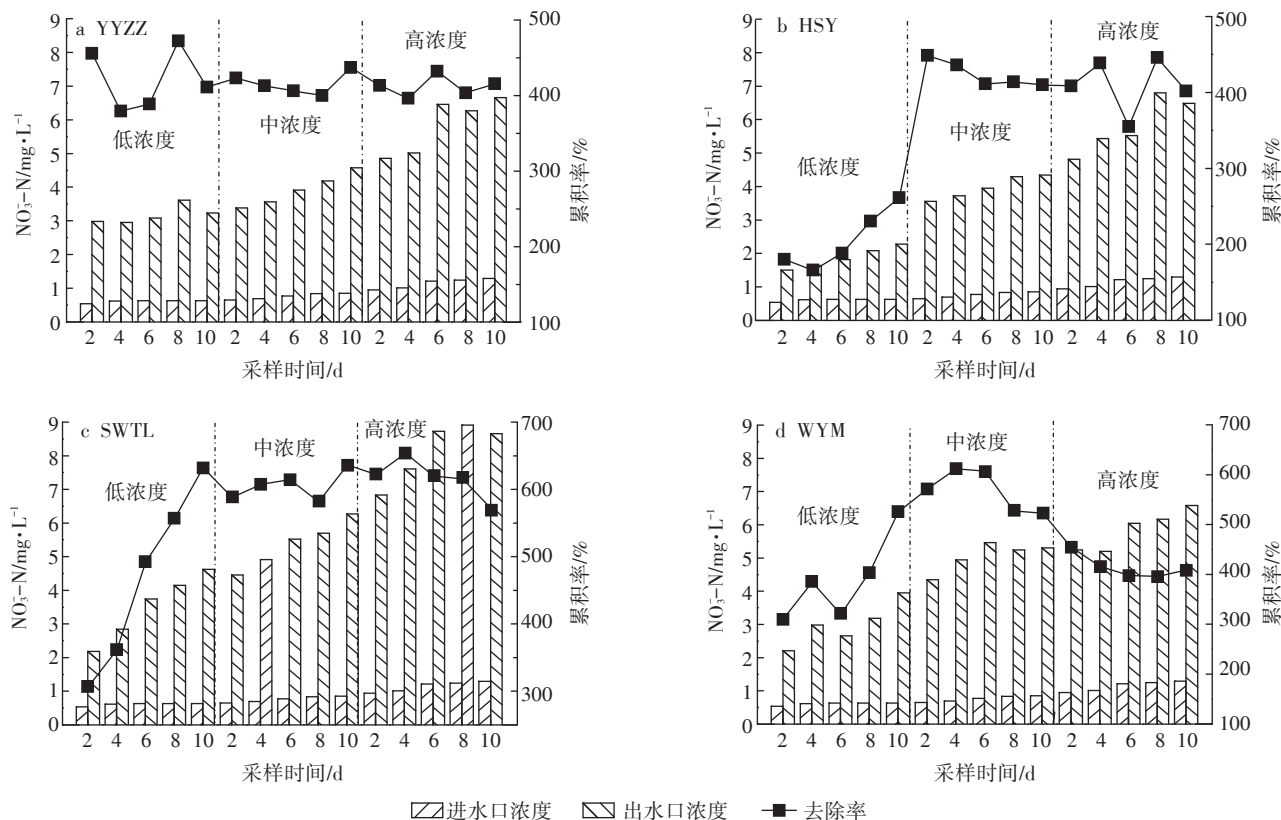


图4 四种基质垂直流人工湿地对不同浓度 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果

Figure 4 Removal efficiency of the VFW on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ with different matrices

图5 四种基质垂直流人工湿地对不同浓度 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的去除效果Figure 5 Removal efficiency of the VFW on $\text{NO}_3\text{-N}$ with different matrices

2.6 进水污染物浓度与各处理出水养分的相关性分析

通过比较不同的污染物浓度(低浓度、中浓度及高浓度)和不同基质(YZZZ、HSY、SWTL和WYM)处理后出水中各水质指标(COD、TN、TP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$)的线性相关性程度(表4)。发现进水中的污染物浓度梯度与处理后出水中的TP存在极显著负相关关系,COD、TN、TP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 及 $\text{NO}_3\text{-N}$ 相互之间存在极显著正相关关系。

3 讨论

VFW具有占地面积较小、高效节能、投资省、运行费用低等特点,使其在农村生活污水处理中具有重要地位^[16]。YYZZ、HSY、SWTL、WYM四种基质都易取且价格便宜,其理化性质的不同导致对农村生活污水的处理效果存在差异。

其中YYZZ具有较高的孔隙率(62.51%),能够通过渗透吸附作用来强烈吸附污水中的COD,这一结果与朱夕珍等^[17]研究结果一致。此外,YYZZ对COD去除率随污染浓度的增加而逐渐减少,这是由于YYZZ基质的厌氧微生物生长繁殖不均衡,导致厌氧污泥系

统活性下降,从而使COD去除率降低^[17]。在低浓度下YYZZ出现了最低拐点,原因可能是运行期间植物生物量较低,根系泌氧量较少,导致了COD去除率降低^[17]。另外,WYM在运行初期基质生物量比较少,溶解氧不足,影响好氧微生物代谢活性,浓度的增加有利于微生物的繁殖,COD的去除率上升,所以导致了WYM在中浓度下的去除率高于低浓度,吴海明等^[18]研究的人工湿地植物泌氧与污染物降解耗氧关系中也证实了这一点。

不同基质硝化、反硝化强度与其基本理化性质,以及系统内的氧化还原条件存在一定关系。4种基质中YYZZ的 Al_2O_3 含量(22.1%)相对较高,为系统内微生物提供了反硝化所需的厌氧环境,保证其反硝化作用,因此降低污水中TN含量。同时,Boylewright等^[19]也指出, Al_2O_3 对污水中的TN的转化具有催化作用,促进微生物对N的吸收和代谢,加速水中TN的消耗。

污水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的含量与进水口污染物的浓度和系统中的硝化环境有关。本研究表明进水中污染物浓度的变化对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除率影响比较明显,这与龚

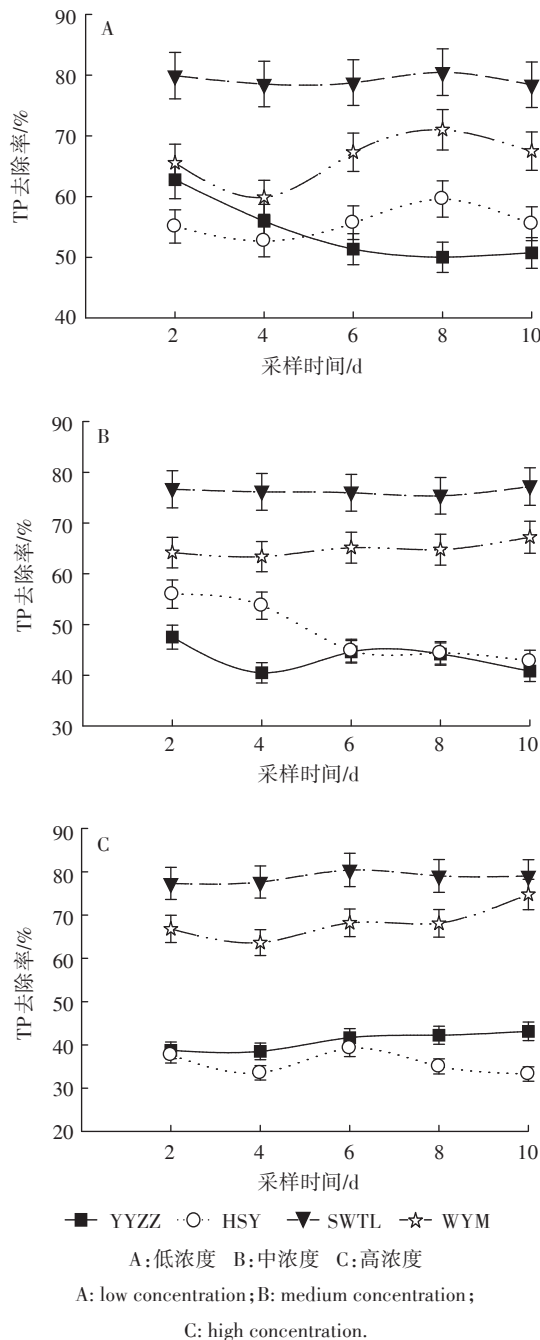


图6 四种基质垂直流人工湿地对不同浓度TP的去除效果

Figure 6 Removal efficiency of the VFW on TP with different matrices

琴红等^[20]研究VFW中污染物的沿程变化的结果一致。同时本研究指出SWTL对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率优于其他基质。这与其物理化学吸附和硝化-氨化作用有关。SWTL的比表面积($3.91 \times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)较大,其吸附强度较强,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附效果较好。童晶晶等^[21]指出生物陶粒较大的比表面积为氨化细菌和硝化细菌着床提供了空间,促进了污水中微生物群落的繁殖和

表4 不同污染物浓度下垂直流人工湿地处理农村生活污水相关性分析

Table 4 Correlation analysis of different pollutants concentration to VFW treated rural domestic sewage

因子	处理	COD	TN	TP	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$
处理	1					
COD	0.129	1				
TN	0.082	0.952**	1			
TP	-0.474**	0.509**	0.521**	1		
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	-0.053	0.403**	0.402**	0.519**	1	
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.177	0.915**	0.947**	0.378**	0.434**	1

注:**表示在0.01水平(双侧)上显著相关,*表示在0.05水平(双侧)显著相关,表中数值为person相关系数。

Note:** representation that there was a significant correlation at 0.01 level(bilateral),* representation that there was a significant correlation at 0.05 level(bilateral), The values in the table are person correlation coefficient.

增长,提升了污水中氮的反硝化作用。此外,SWTL吸附的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在硝化细菌作用下转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,使SWTL表面吸附位点恢复,重新具备吸附能力。

VFW中P的去除效果与基质中发生的吸附/沉淀反应、微生物同化作用以及有机物的吸附有关^[22-23]。不同基质对TP的去除率随采样时间的延长而降低,这是由于基质对TP的吸附逐渐饱和所致。本研究结果表明,SWTL对TP的去除率最高,这是由于SWTL具有较高的CaO(3.26%)和MgO(2.04%),而污水中TP能够与CaO和MgO发生化学沉淀反应^[24],生成钙/镁磷酸盐吸附在SWTL表面。Wang等^[24-25]研究也表明,基质中含有大量金属,同时具有较高的电导率,能有效地去除污水中的磷。此外,童晶晶等^[21]指出比表面积较大的基质能为磷酸盐化合物的着床提供空间,也提升了SWTL对污水中TP的去除效果。此外,聚磷菌的好氧聚磷和厌氧释磷作用也影响磷的去除^[20]。本研究构建的VFW结构与曝气管位置,能够在上部形成好氧区,下部形成厌氧区,进水中的磷在好氧区被聚磷菌过量吸收,在厌氧区被释放出来,进一步被基质SWTL吸附。

基质对污水中污染物的去除效果直接影响出水水质是否达到排放标准,本研究中四种基质构建的VFW出水污染物COD、TN、TP及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率分别达到了95.5%、59.83%、79.94%及89.19%,其出水水质可以达到《城镇污水处理厂排放标准》(GB 8978—2002)一级标准。

综上所述,使用高效廉价的基质构建垂直流人工

湿地系统处理农村生活污水实现了区域水污染防治和污水的再生利用。在利用VFW处理农村生活污水的生产实践中,可以综合农村生活污水中污染物(COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP)的权重和净化要求选择基质。对于COD和TN含量较高的农村生活污水建议采用YYZZ基质构建VFW,而以TP或 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主的农村生活污水应选择SWTL基质。

4 结论

(1)YYZZ基质对农村生活污水中COD和TN去除率分别达到95.5%和55.98%,是去除污水中耗氧有机污染物和总氮等指标的理想基质。

(2)SWTL基质对农村生活污水中TN的去除率只有27.88%~45.75%,但对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP的去除率达到57.52%~89.19%和75.37%~80.50%,是去除污水中氨氮和总磷的理想基质。

参考文献:

- [1] Barber W P, Stuckey D C. The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: A review[J]. *Water Research*, 1999, 33(7):1559-1578.
- [2] 陈佳利. 多级土壤渗滤系统处理污染河水的试验研究[D]. 长沙:湖南大学, 2012.
CHEN Jia-li. The experimental study on the treatment of polluted water by the multistage soil leaching system[D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [3] Vymazal J. The use of subsurface-flow constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic[J]. *Ecological Engineering*, 1996, 7(1):1-14.
- [4] 张虎成, 田卫, 俞穆清, 等. 人工湿地生态系统污水净化研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5(2):11-15.
ZHANG Hu-cheng, TIAN Wei, YU Mu-qing, et al. Progress in purification of artificial wetland ecosystem[J]. *Environmental Pollution Control Technology and Equipment*, 2004, 5(2):11-15.
- [5] 刘哲. 垂直流人工湿地处理生活污水性能研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2015.
LIU Zhe. The study on the sewage treatment performance by using vertical constructed wetland[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [6] 涂汉, 刘强, 龙婉婉, 等. 水平潜流和垂直流人工湿地对生活污水净化效果的比较研究[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2013, 34(5):31-35.
TU Han, LIU Qiang, LONG Wan-wan, et al. A comparative study on domestic sewage purification for horizontal subsurface flow and vertical flow constructed wetlands[J]. *Journal of Jinggangshan University(Natural Science Edition)*, 2013, 34(5):31-35.
- [7] 朱夕珍, 崔理华, 温晓露, 等. 不同基质垂直流人工湿地对城市污水的净化效果[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(4):454-457.
ZHU Xi-zhen, CUI Li-hua, WEN Xiao-lu, et al. Removal efficiency of different substrates used in vertical flow constructed wetlands for treating municipal wastewater[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(4):454-457.
- [8] Drizo A, Frost C A, Grace J, et al. Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems[J]. *Water Research*, 1999, 33(17):3595-3602.
- [9] Zhu T, Jenssen P D, Mæhlum T, et al. Phosphorus sorption and chemical characteristics of lightweight aggregates (LWA) - potential filter media in treatment wetlands[J]. *Water Science & Technology*, 1997, 35(5):103-108.
- [10] 李晓东, 孙铁珩, 李海波, 等. 人工湿地除磷研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(3):1226-1232.
LI Xiao-dong, SUN Tie-heng, LI Hai-bo, et al. Current researches and prospects of phosphorus removal in constructed wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3):1226-1232.
- [11] 黄辉, 赵浩, 饶群, 等. 人工湿地基质除磷影响因素研究进展[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(11):112-114.
HUANG Hui, ZHAO Hao, RAO Qun, et al. Review on influential factors of phosphorus removal by substrates in constructed wetland[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 29(11):112-114.
- [12] 薛重华, 闻岳, 张倩. 不同因素对人工湿地基质除磷效果的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(36):8122-8125.
XUE Zhong-hua, WEN Yue, ZHANG Qian. Influences of different factors on removal effect of phosphorus in substrate of constructed wetlands[J]. *Anhui Agricultural Science*, 2009, 37(36):8122-8125.
- [13] 管策, 王亚伟, 魏源送, 等. 镁橄榄石与钢渣除磷特性的比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(7):1437-1444.
GUAN Ce, WANG Ya-wei, WEI Yuan-song, et al. Comparison of phosphorous adsorption by forsterite and furnace slag[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(7):1437-1444.
- [14] 杨俊. 不同级配基质对人工湿地处理生活污水效果的影响研究[D]. 南昌:南昌大学, 2015.
YANG Jun. The study of influence on the effect of sewage treatment in the constructed wetland by different gradation fillings[D]. Nanchang: Nanchang University, 2015.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [16] 白玉华, 章小军, 雷志洪, 等. 垂直流人工湿地净化机理及工程实践[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(7):761-766.
BAI Yu-hua, ZHANG Xiao-jun, LEI Zhi-hong, et al. The purification mechanism and engineering practice of vertical flow artificial wetland[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2008, 34(7):761-766.
- [17] 浦江. PTA废水COD去除率下降原因分析与解决措施[J]. 给水排水, 2013, 39(8):55-58.
PU Jiang. Analysis and solution of COD removal rate of PTA wastewater[J]. *Water Supply and Drainage*, 2013, 39(8):55-58.
- [18] 吴海明, 张建, 李伟江, 等. 人工湿地植物泌氧与污染物降解耗氧关系研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(9):1973-1977.

- WU Hai-ming, ZHANG Jian, LI Wei-jiang, et al. Relationship between oxygen release from plants in constructed wetland and oxygen demand for pollutant degradation[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(9):1973-1977.
- [19] Boylewight E J, Katz L E, Hayes K F. Macroscopic studies of the effects of selenate and selenite on cobalt sorption to gamma-Al₂O₃[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(6):1219-1225.
- [20] 龚琴红, 田光明. 垂直流人工湿地中污染物的沿程变化[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(6):2139-2143.
- GONG Qin-hong, TIAN Guang-ming. Changes of pollutants concentration at various depths in vertical flow constructed wetland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(6):2139-2143.
- [21] 童晶晶, 籍国东, 周游, 等. 高效功能陶粒生物滤池处理农村生活污水研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(9):1924-1931.
- TONG Jing-jing, JI Guo-dong, ZHOU You, et al. The study on the treatment of rural domestic sewage by the high-efficient ceramic filter [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(9):1924-1931.
- [22] Sakadevan K, Bavor H J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems[J]. *Water Research*, 1998, 32(2):393-399.
- [23] Abbona F, Madsen H E L, Boistelle R. The initial phases of calcium and magnesium phosphates precipitated from solutions of high to medium concentrations[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1986, 74(3):581-590.
- [24] Wang Z, Dong J, Liu L, et al. Screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetlands treating swine wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 54(4):57-65.
- [25] Wang Z, Dong J, Liu L, et al. Study of oyster shell as a potential substrate for constructed wetlands[J]. *Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2013, 67(10):2265-2272.
- [26] Abbona F, Madsen H E L, Boistelle R. The initial phases of calcium and magnesium phosphates precipitated from solutions of high to medium concentrations[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1986, 74(3):581-590.