

梁则优,谭鹤群,郑祺,等.3种滤料对池塘圈养尾水处理效果的影响[J].华中农业大学学报,2024,43(2):56-63.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.02.007

3种滤料对池塘圈养尾水处理效果的影响

梁则优,谭鹤群,郑祺,李彬涛

华中农业大学工学院/农业农村部水产养殖设施工程重点实验室,武汉430070

摘要 为了探究过滤材料用于池塘圈养尾水的处理效果,采用火山岩、活性炭及沸石作为过滤材料,以滤料种类、滤料粒径和滤料厚度为试验因素,以总固体悬浮物(total suspended solid, TSS)去除率、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)去除率和化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)去除率为试验指标,开展池塘圈养尾水处理试验。结果显示,3种滤料均能去除池塘圈养尾水中的TSS和COD,均能在一定程度上降低池塘圈养尾水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度,活性炭的处理效果优于其他2种滤料,且活性炭粒径越小或厚度越大时对池塘圈养尾水处理效果越好。正交试验结果显示,以活性炭滤料、粒径为0.5~2 mm、滤料厚度为80 cm时,过滤装置对池塘圈养尾水具有最佳的综合处理效果,在该条件下对池塘圈养尾水的TSS、COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率分别为83.86%、49.78%、29.89%。

关键词 池塘圈养; 养殖废水; 尾水处理; 滤料过滤; 绿色养殖

中图分类号 S965;X714

文献标识码 A

文章编号 1000-2421(2024)02-0056-08

池塘零排放圈养是何绪刚等^[1]于2016年提出的一种全新的淡水鱼养殖模式,2019年和2020年连续入选农业农村部十大引领性技术,该养殖模式将鱼圈养在直径4 m的圈养桶中,圈养桶下部呈锥形,桶底中心的排污口通过管道与集排污系统、尾水处理系统连接,以实现尾水的收集处理^[2]。由于圈养尾水是经集排污装置高效收集的养殖废水,其中包括圈养过程中产生的残饵、粪便、养殖对象代谢产物,含有的总固体悬浮物(total suspended solid, TSS)及其他杂质含量均比普通池塘养殖尾水高^[3-4]。

针对养殖尾水处理问题,国内外学者进行了大量研究^[5-7],常见的物理处理方法主要有机械过滤、泡沫分离、固定筛、膜分离等^[8-10]。章霞等^[11]研究了不同滤料及不同碳氮比的生物填料过滤对对虾养殖尾水的影响,得到了滤料和碳氮比的最佳参数;张正等^[12]研究了弧形筛及生物净化池净化海水养殖废水的作用效果,结果表明该系统对TSS及无机氮去除具有较强的效果;Ridha等^[13]采用塑料生物过滤介质对筒易罗非鱼循环养殖系统进行尾水过滤,取得了很好的净化效果。但不同养殖对象、不同养殖模式下的养殖尾水存在较大差异,池塘圈养尾水因圈养桶下部锥形导致的固体悬浮物“浓缩”效应,处理难

度更大。目前,针对池塘圈养尾水处理的研究较少。张佳^[14]应用改进的转鼓式微滤机针对池塘圈养尾水进行过滤处理,研究了不同转速及滤网孔径的处理效果,李金能^[3]利用固液分离塔及垂直流人工湿地对池塘圈养尾水进行处理,得到最佳沉降时间和曝气策略优化方案。上述2种处理方式中,转鼓式微滤机是目前养殖尾水处理过程常用的机械过滤方式,在处理圈养尾水时,因TSS浓度高,滤网极易发生堵塞;固液分离塔的分离效率依赖于固体悬浮物的自然沉降,处理效率低。

滤料过滤水处理具有见效快、成本低、可反复使用等特点。丁磊等^[15]利用沸石对水库储水进行过滤,试验结果表明粒径为0.80~1.20 mm沸石对浊度、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、有机物都表现出良好的去除效果。金星等^[16]利用活性炭和沸石对污水厂尾水进行过滤处理,发现沸石和活性炭分别对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和COD有较好的去除效果。张小璇等^[17]研究发现适宜的活性炭能够应用于污水处理厂尾水中多种有机氯化物的分离去除。刘梅等^[18]将火山石等多孔径滤料用于淡水养殖尾水处理工艺,结果显示火山石对不同污染程度的尾水均具有明显的净化效果。目前,有关滤料过滤作用于池塘圈养尾水的研究鲜见报道。本研究

收稿日期:2023-04-07

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2662020GXPY003);湖北省科技重大专项(2023BBA001)

梁则优, E-mail: 732192965@qq.com

通信作者:谭鹤群, E-mail: thq@mail.hzau.edu.cn

采用自制的尾水过滤装置,以火山岩、活性炭及沸石作为过滤材料,探讨滤料种类、滤料粒径和滤料厚度对池塘圈养尾水处理效果的影响,探索滤料过滤处理集约化池塘圈养尾水的最佳工艺参数^[19-20],旨在为圈养尾水处理相关设备的研发提供基础依据,以进一步完善和发展池塘零排放圈养模式。

1 材料与方法

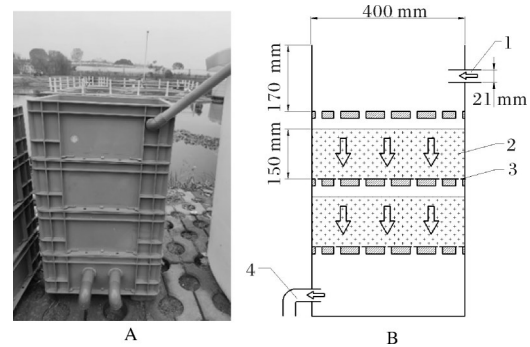
1.1 试验材料与设备

1) 圈养尾水。尾水采集地点为华中农业大学零排放圈养模式养殖示范区。试验池塘均匀分布8个圈养桶,共饲养约9 000尾体质量为500 g左右的大口黑鲈。试验于2022年10月至2023年1月进行,通过池塘圈养的尾水收集系统同时收集8个圈养桶的污水(正常抽排污时间为08:00和17:00)混合作为试验用尾水。试验周期内,尾水TSS、COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度分别为47.62~187.10、20~53、0.56~1.17 mg/L。

2) 过滤材料。活性炭为食品级椰壳活性炭,碘吸附值为1 038 mg/g;火山岩为红色火山碎岩;沸石为天然斜发沸石,吸氨值为144.22 mmol/100 g。活性炭、火山岩、沸石选购粒径分别为1~8、1~6、1~10 mm,购回后活性炭分别用孔径为0.5、2、4、6、8 mm的定制标准筛筛分,火山岩分别用孔径为0.5、2、4、6 mm的定制标准筛筛分,沸石购回后先用铁锤将4~10 mm沸石块砸碎,再分别用孔径为0.5、2、4、6 mm的定制标准筛筛分,将各层筛上物分别装袋保存,使用前用清水洗净。

3) 自制过滤装置。过滤装置如图1所示,装置由长宽高分别为400、300、170 mm的水箱堆叠而成,水箱材质为高密度聚乙烯。最上层水箱内分布有口字型均匀进水管,进水管通过直径为21 mm的PE管与样本尾水桶内潜水泵(HJ-3000, 3 000 L/h)相接。最上层水箱和中间层水箱底部均匀分布着8 mm孔径的圆孔,中间层水箱底部同时粘附1层孔径为0.425 mm的尼龙滤网防止滤料漏出,滤料均匀分布于中间层水箱之中,可通过增减中间层箱体个数调控滤料厚度。最下层水箱底部不开孔,侧面设置2个孔径为25 mm的出水管。

4) 其他仪器。多参数水质测定仪, GL-660型(山东格林凯瑞精密仪器有限公司),显示误差 $\leq 4\%$,重复性 $\leq 2\%$,光学稳定性: $\leq \pm 0.000 1 \text{ Abs/min}$ 。COD快速消解仪, GL-24双温区智能消解仪(山东格林凯瑞精密仪器有限公司),控温精度为 $\pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$,温度范围35~199 $^\circ\text{C}$ 。



A: 过滤装置实物图 Filtering device physical picture; B: 过滤装置结构图 Structure of the filter unit; 1. 进水口 Water inlet; 2. 滤料层 Media layer; 3. 滤网 Filter screen; 4. 出水口 Water outlet.

图1 过滤装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of filtration device

1.2 试验方法

1) 单因素试验。滤料种类共设3个处理:A1(滤料为火山岩)、A2(滤料为活性炭)、A3(滤料为沸石)。设置滤料粒径为0.5~2 mm,滤料厚度为30 cm,水力负荷为6 250 L/($\text{m}^2\cdot\text{h}$)。滤料粒径共设计4个处理:B1(滤料粒径为0.5~2 mm)、B2(滤料粒径为2~4 mm)、B3(滤料粒径为4~6 mm)、B4(滤料粒径为6~8 mm)。按上述试验的结果设置滤料种类为活性炭,滤料厚度为30 cm,水力负荷为6 250 L/($\text{m}^2\cdot\text{h}$)。考虑到滤料过滤处理方式为初次应用到零排放圈养模式中,将此试验设置多个水平,探究此因素对处理效果影响的边界条件。滤料厚度共设计9个处理:C1(滤料厚度为20 cm,下同)、C2(30 cm)、C3(40 cm)、C4(50 cm)、C5(60 cm)、C6(70 cm)、C7(80 cm)、C8(90 cm)、C9(100 cm)。按上述试验的结果设置滤料种类为活性炭,滤料粒径为0.5~2 mm,水力负荷为6 250 L/($\text{m}^2\cdot\text{h}$)。试验每个水平重复3次。

2) 过滤工艺优化试验。参考单因素试验结果,选择L9(3^4)标准正交表开展三因素正交试验。正交试验以TSS、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、COD去除率作为试验指标评价尾水处理效果。试验方案如表1所示,滤料种类设置为沸石、活性炭和火山岩,滤料粒径设置为0.5~2、2~4、4~6 mm,滤层厚度设置为40、80、60 cm,第4列做误差列,每个处理重复3次。

3) 尾水过滤方法。从集排污系统抽取500 L污水至试验水桶,搅拌均匀后选择3处不同的水位,采集水样作为处理前水样。开启水泵将桶内污水以750 L/h的流速持续泵入过滤装置中,污水在重力的作用下自然沉降至水箱底部出水口。待水流稳定后,分别间隔9 min采集3份出水口水样作为处理后

表1 L₉(3⁴)正交试验方案Table 1 L₉(3⁴) orthogonal test scheme

试验号 Test number	A 滤料种类 Filter media type	B 滤料粒径 Filter material particle size	C 滤料厚度 Filter media thickness	误差列 Error column
T1	1	1	1	1
T2	1	2	2	2
T3	1	3	3	3
T4	2	1	2	3
T5	2	2	3	1
T6	2	3	1	2
T7	3	1	3	2
T8	3	2	1	3
T9	3	3	2	1

水样。将水样在1 h内送往实验室检测所有指标并记录,分别取处理前后3份水样测量指标的平均值作为有效值。为保证过滤效果,每次试验前用清水将滤料洗净。

4) 试验指标测定。本研究选取 TSS、COD、NH₄⁺-N 去除率为试验指标,均采用多参数水质测定仪进行检测,检测方法如表2所示。去除率为:

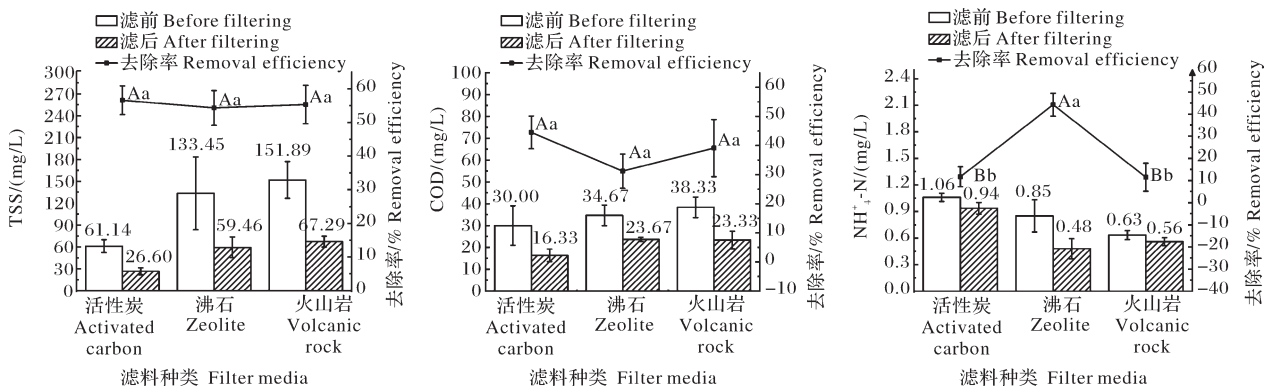
$$n_1 = \frac{A-B}{A} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中:A为过滤前指标含量,B为过滤后指标含量,n₁为对应指标的去除率。

2 结果与分析

2.1 不同种类滤料对圈养尾水的处理效果

3种滤料对圈养尾水 TSS、COD、NH₄⁺-N 去除



同一曲线不同大写字母表示处理间差异极显著(LSD, $\alpha = 0.01$);同一曲线不同小写字母表示处理间差异显著(LSD, $\alpha = 0.05$)。下同。Different capital letters in the same curve indicate highly significant differences between treatments (LSD, $\alpha = 0.01$); different lowercase letters in the same curve indicate significant differences between treatments (LSD, $\alpha = 0.05$). The same as below.

图2 3种滤料对圈养尾水 TSS、COD 和 NH₄⁺-N 的去除效果Fig. 2 Effectiveness of TSS, COD and NH₄⁺-N removal in tailwater filtered by three types of filter media

2.2 不同滤料粒径对圈养尾水的处理效果

不同粒径滤料对圈养尾水 TSS、COD、NH₄⁺-N

表2 试验指标检测标准

Table 2 Test index analysis standards

指标 Indicators	测定标准 Measurement standards	检测下限/ (mg/L) Lower detection limit	精确度/ (mg/L) Accuracy
TSS	GB/T 11901—1989 改进	1	0.01
COD	HJ/T 399—2007	5	1
NH ₄ ⁺ -N	HJ 535—2009	0.05	0.01

率如图2所示。滤料粒径为0.5~2 mm、滤料厚度为30 cm时,活性炭、沸石、火山岩对圈养尾水 TSS 的去除率分别为56.59%、54.29%和55.30%,对 COD 的去除率分别为44.49%、31.20%和39.11%,对 NH₄⁺-N 的去除率分别为11.72%、44.24%和11.49%。3种滤料对圈养尾水的 TSS 和 COD 去除率差异不显著 ($P > 0.05$),去除圈养尾水 NH₄⁺-N 时,沸石处理显著高于其他2组处理 ($P < 0.01$)。3种滤料对圈养尾水 TSS 去除率都达到50%以上,对 COD 去除率均达到30%以上,说明3种滤料对圈养尾水 TSS 和 COD 均有较好的去除效果。3种滤料对圈养尾水 NH₄⁺-N 的去除主要缘于滤料对 NH₄⁺-N 的吸附作用,试验表明,3种滤材中沸石对 NH₄⁺-N 的吸附能力最强。事实上,由于天然斜发沸石对离子氨和非离子氨均具有一定的去除能力,沸石常被用于污水处理,作为 NH₄⁺-N 吸附剂^[21-22]。由于活性炭中间有大量且十分微小的缝隙,最小的能达到10 nm 以下,从而吸附更多悬浮物和有机物,降低 TSS 和 COD 浓度,所以在 TSS 和 COD 去除方面,活性炭表现最好。

去除率如3图所示。滤料厚度为30 cm时,活性炭粒径为0.5~2、2~4、4~6、6~8 mm对圈养尾水 TSS 去

除率分别为56.59%、51.58%、30.51%、26.48%，对圈养尾水COD去除率分别为44.49%、31.89%、25.74%、20.44%，对圈养尾水NH₄⁺-N去除率分别为11.72%、

26.99%、24.91%、11.69%。试验结果显示，随着滤料粒径的增大，对圈养尾水TSS、COD去除率均呈下降趋势，对圈养尾水TSS、COD的去除能力减弱。

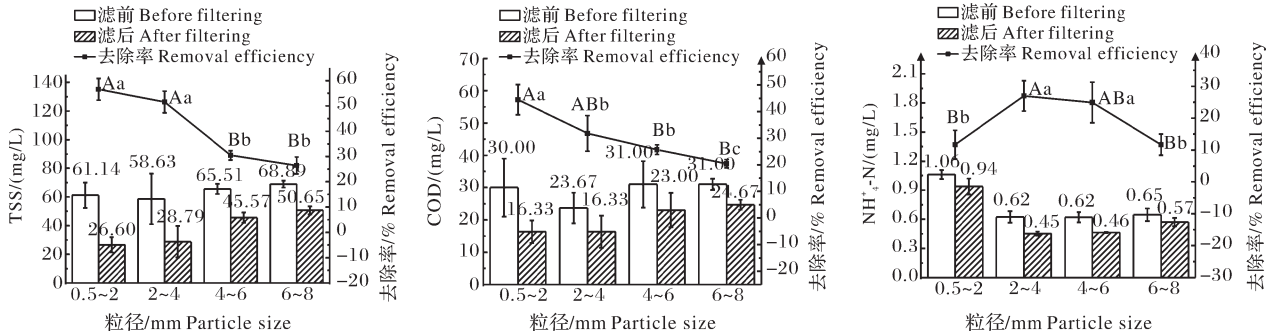


图3 不同粒径的活性炭对圈养尾水TSS、COD和NH₄⁺-N的去除效果

Fig.3 Effectiveness of TSS, COD and NH₄⁺-N removal by different particle size activated carbon

2.3 不同滤料厚度对圈养尾水的处理效果

不同滤料厚度的单因素试验结果如图4所示。由图4可知，当滤料为0.5~2 mm活性炭，滤料厚度由20 cm增至100 cm时，对圈养尾水TSS去除率分别为50.57%、56.59%、61.34%、64.43%、76.32%、79.90%、83.86%、80.71%、82.27%；对圈养尾水COD去除率分别为35.28%、44.49%、54.00%、59.34%、42.56%、46.36%、49.78%、61.46%、66.09%；对圈养尾水NH₄⁺-N去除率分别为6.40%、11.72%、15.23%、23.40%、22.78%、23.97%、29.89%、26.67%、28.97%。总体上，随滤料厚度增加，对圈养尾水TSS、NH₄⁺-N去除率总体均呈上升

趋势，但当滤料厚度达到80 cm后，对圈养尾水TSS、NH₄⁺-N去除率曲线保持平缓或稍有下降。多重比较结果表明，当滤料厚度达到70 cm后，对圈养尾水TSS、NH₄⁺-N去除率各处理之间均无显著差异(P>0.05)，即滤料厚度达到70 cm后，增加滤料厚度并不能显著提升圈养尾水处理的效果。对圈养尾水COD去除率随滤料厚度增加呈先增加后减小再增加趋势，当滤料厚度为100 cm时去除效果最好，去除率为66.09%。滤料厚度决定了滤料与尾水的接触时长，一般认为滤料厚度越大，尾水处理效果越好，但到达一定临界值后，滤料厚度的增加对提升尾水处理效果不再明显^[23]，试验结果符合这一趋势。

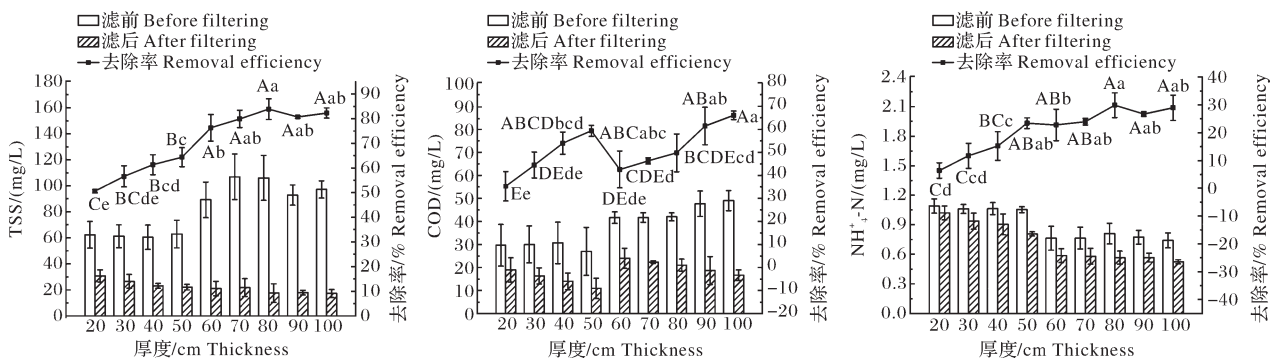


图4 不同厚度的活性炭对圈养尾水TSS、COD和NH₄⁺-N的去除效果

Fig.4 Effectiveness of TSS, COD and NH₄⁺-N removal by different thicknesses of activated carbon

2.4 正交试验结果

滤料种类、粒径、厚度三因素的正交试验结果、方差分析结果及各因素指标分析如表3~表5所示。

由表4可知：3种滤料对圈养尾水COD、NH₄⁺-N去除率均差异显著(P<0.05)，而对圈养尾水TSS去除率差异不显著(P>0.05)，对圈养尾水COD、NH₄⁺-N去除率而言，活性炭的去除效果最好。3种粒径的滤料对圈养尾水TSS去除率有极显著差

异(P<0.01)，对圈养尾水COD去除率有显著差异(P<0.05)，对圈养尾水NH₄⁺-N去除率差异不显著(P>0.05)。0.5~2 mm粒径的滤料对圈养尾水TSS、COD去除率最高。3种厚度的滤料对圈养尾水TSS去除率有极显著差异(P<0.01)，对圈养尾水NH₄⁺-N去除率有显著差异(P<0.05)，而对圈养尾水COD去除率差异不显著(P>0.05)。滤料厚度为80 cm时，对圈养尾水TSS去除率最高，滤料厚度为

表3 滤料种类、粒径、厚度三因素正交试验结果

Table 3 The results of the three-factor orthogonal test of filter media type, filter media particle size and filter media thickness

试验处理 Experimental treatment	TSS去除率 TSS removal efficiency	NH ₄ ⁺ -N去除率 NH ₄ ⁺ -N removal efficiency	COD去除率 COD removal efficiency	%
T1	70.03±2.87	26.10±5.99	42.58±6.35	
T2	59.90±1.46	22.36±5.73	34.14±2.84	
T3	56.68±2.28	29.64±1.38	25.84±3.68	
T4	83.86±3.42	29.89±3.63	49.78±6.66	
T5	61.39±1.42	35.30±2.36	47.67±3.15	
T6	42.18±1.80	24.81±9.08	33.91±4.25	
T7	74.26±2.19	24.95±6.80	49.16±6.50	
T8	56.79±1.50	18.54±2.12	33.83±8.07	
T9	55.56±4.40	19.37±1.40	48.03±9.51	

表4 滤料种类、粒径、厚度三因素正交试验方差分析

Table 4 Three-factor orthogonal test ANOVA for filter media type, filter media particle size and filter media thickness

指标 Index	变异来源 Source of variation	平方和 Square sum	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	显著性 Saliency
TSS去除率 TSS removal efficiency	种类 Types	0.456	2	0.228	0.011	
	粒径 Grain size	2 834.797	2	1 417.398	71.380	**
	厚度 Thickness	504.262	2	252.131	12.697	**
	误差 Error	397.142	20	19.857		
	总和 Total	3 736.657	26			
COD去除率 COD removal efficiency	种类 Types	546.670	2	273.335	3.792	*
	粒径 Grain size	622.822	2	311.411	4.320	*
	厚度 Thickness	235.674	2	117.837	1.635	
	误差 Error	1 441.652	20	72.083		
	总和 Total	2 846.817	26			
NH ₄ ⁺ -N去除率 NH ₄ ⁺ -N removal efficiency	种类 Types	370.161	2	185.080	5.195	*
	粒径 Grain size	26.350	2	13.175	0.370	
	厚度 Thickness	251.887	2	125.943	3.535	*
	误差 Error	850.685	20	42.534		
	总和 Total	1 273.710	26			

注：“**”表示影响极显著；“*”表示影响显著； $F_{0.05}(2,20)=3.49$ ； $F_{0.01}(2,20)=5.85$ 。Note：“**” indicates extremely significant impact；“*” indicates significant impact； $F_{0.05}(2,20)=3.49$ ； $F_{0.01}(2,20)=5.85$ 。

60 cm时,对圈养尾水NH₄⁺-N去除率最高。

从表4的F值可以看出,滤料种类、粒径及厚度等因素对TSS、COD、NH₄⁺-N去除率的影响不同,对圈养尾水TSS去除率的影响大小为粒径>厚度>种类,对圈养尾水COD去除率的影响大小为粒径>种类>厚度,对圈养尾水NH₄⁺-N去除率的影响大小为种类>厚度>粒径。综合考虑,选取滤料种类为活性炭、滤料粒径0.5~2 mm、滤料厚度80 cm,可以获得圈养尾水最佳的去除效果;此时,对圈养尾水TSS、COD去除率分别为(83.86±3.42)%、(49.78±6.66)%,均高于其他处理;对圈养尾水NH₄⁺-N去除率为(29.89±3.63)%(表3)。

3 讨论

本研究中,单因素试验结果表明,当滤料粒径均为0.5~2 mm、滤料厚度均为30 cm时,滤料种类对圈养尾水的TSS、COD去除率的影响并不显著,其原因可能是:3种过滤材料均具有大量细微孔隙,可吸附较多水中悬浮物。在实际应用中,COD指标常被用来表示尾水中有机的含量,试验中圈养尾水COD去除率与TSS去除率两者变化趋势基本相同,可见过滤处理主要是通过去除尾水中的悬浮物含量进而降低COD浓度。沸石在去除NH₄⁺-N方面较其他过滤材料优势更为明显,主要原因为:沸石是一种多孔状

表5 滤料种类、粒径及厚度三因素正交试验指标分析

Table 5 Index analysis of orthogonal tests

指标 Index	因素 Factor	各水平均值 Mean of each factor			影响显著因素的优水平 Superior level of influencing significant factors
		水平1 Level 1	水平2 Level 2	水平3 Level 3	
TSS去除率 TSS removal efficiency	种类 Class	62.20	62.48	62.20	/
	粒径 Particle size	76.05	59.36	51.47	1
	厚度 Thickness	56.33	66.44	64.11	2
COD去除率 COD removal efficiency	种类 Class	34.19	43.79	43.68	2
	粒径 Particle size	47.17	38.55	35.93	1
	厚度 Thickness	36.77	43.99	40.89	/
NH ₄ ⁺ -N去除率 NH ₄ ⁺ -N removal efficiency	种类 Class	26.03	30.00	20.96	2
	粒径 Particle size	26.98	25.40	24.16	/
	厚度 Thickness	23.15	23.88	29.96	3

材料,对NH₄⁺-N同时具有物理吸附和离子交换作用,从而降低水中NH₄⁺-N含量的效果更明显^[24]。

王群等^[23]认为减小滤池滤料的粒径或增加滤料层厚度可以提高滤池的水处理效果,本研究试验结果与其观点相符。滤料粒径越小,尾水处理效果越好,其原因在于:一是更小粒径的滤料具有更大比表面积,因而尾水中悬浮物与滤料接触的面积更大,从而提高了吸附作用效果;二是小粒径的滤料颗粒间的空隙也越小,减少了大滤料颗粒因“架空”作用形成的大孔径通道,从而提高了滤料对尾水中小颗粒悬浮物的过滤能力。随粒径的增加,对圈养尾水NH₄⁺-N去除率呈先增加后减少的趋势,显然活性炭对NH₄⁺-N的吸附作用并不主要依赖滤料堆叠产生的孔隙,而是依赖滤料本身的物理特性。虽然对圈养尾水NH₄⁺-N去除率总体处于较低水平,但仅用物理方法处理尾水时,短时间内对化学指标影响均较小,所以完整的尾水处理工艺需要多种处理方法组合。

本研究中,随着滤料厚度的增加,圈养尾水中悬浮物与滤料的有效接触时间相对增加,过滤作用增强,因而滤料厚度对3个试验指标均有显著影响。试验结果表明,与微滤机过滤处理池塘圈养尾水效果^[14]相比,滤料过滤具有明显优势:(1)滤料过滤对圈养尾水NH₄⁺-N具有直接去除效果,微滤机过滤处理池塘圈养尾水对NH₄⁺-N浓度基本无影响;(2)在滤料粒径为0.5~2 mm、滤料厚度为30 cm时,滤料为活性炭和火山岩,滤料过滤在对圈养尾水COD去除方面优于微滤机;(3)针对TSS去除率而言,30 cm厚度的滤料过滤同微滤机最优处理效果仅相差10%左右。

总体而言,滤料过滤用于池塘圈养尾水处理,可以有效去除圈养尾水中的TSS,对COD也有较好的

去除效果,但对NH₄⁺-N去除效果不佳。这是因为滤料过滤主要通过滤料对尾水中固相成分的截留、吸附作用达到去除TSS和COD的目的,而NH₄⁺-N在水中主要以水溶态形式存在,上述截留、吸附作用很难有效去除^[25]。沸石由于离子交换作用,可以去除部分NH₄⁺-N,但由于过滤过程时间很短,这种离子交换作用的去除效果也是有限的。因此,滤料过滤可以作为圈养尾水处理的一级处理工艺,去除绝大部分TSS和COD。利用0.5~2 mm粒径的活性炭作为滤料,当滤料厚度达到80 cm时,可以去除圈养尾水中(83.86±3.42)%的TSS和(49.78±6.66)%的COD。经滤料过滤后,尾水TSS指标浓度均达到江苏省养殖尾水一级排放标准(≤40 mg/L),但后续仍然需要生物滤池、人工湿地或生物反应器等措施或装置对NH₄⁺-N等进一步去除,才能达到较好的综合尾水净化效果。

参考文献 References

- [1] 何绪刚,侯杰.池塘圈养模式研究进展[J].华中农业大学学报,2021,40(3):21-29.HE X G,HOU J.Research progress on pond Juanyang mode[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2021,40(3):21-29 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张镇府.基于机器视觉的圈养鲈鱼智能决策投饵系统的研究[D].武汉:华中农业大学,2022.ZHANG Z F.Research on intelligent decision feeding system for captive perch based on machine vision [D].Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [3] 李金能.固液分离塔-垂直潜流人工湿地用于池塘圈养尾水处理的研究与实践[D].武汉:华中农业大学,2022.LI J N.Study on process optimization and practice application of solid-liquid separation tower coupled vertical subsurface flow constructed wetland in treating tailwater of pond Juan Yang sys-

- tem [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [4] 廖洪平, 张文琦, 邓泳妍, 等. 珍珠龙胆石斑鱼高位养殖池塘氮磷动态及收支的研究[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(1): 92-99. LIAO H P, ZHANG W Q, DENG Y Y, et al. Dynamics and budgets of nitrogen and phosphorus in higher-place ponds of gentian grouper[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(1): 92-99 (in Chinese with English abstract).
- [5] DUAN J W, CUI R X, HUANG Y, et al. Identification and characterization of four microalgae strains with potential application in the treatment of tail-water for shrimp cultivation [J/OL]. Algal research, 2022, 66: 102790 [2023-04-07]. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102790>.
- [6] 徐嘉波, 施永海, 刘永士. 淡水池塘养殖尾水处理系统对氮磷的净化效果[J]. 大连海洋大学学报, 2022, 37(1): 104-112. XU J B, SHI Y H, LIU Y S. Nitrogen and phosphorus purification effect of aquaculture wastewater treatment system in freshwater culture ponds [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2022, 37(1): 104-112 (in Chinese with English abstract).
- [7] 徐嘉波, 刘永士, 施永海, 等. 淡水集中连片池塘与养殖尾水处理系统的综合水质评价[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(1): 170-180. XU J B, LIU Y S, SHI Y H, et al. Comprehensive water quality evaluation of freshwater concentrated continuous ponds and aquaculture tail water treatment system [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 37(1): 170-180 (in Chinese with English abstract).
- [8] 黄英, 王利. 水处理中膜分离技术的应用[J]. 工业水处理, 2005, 25(4): 8-11. HUANG Y, WANG L. Application of membrane separation to wastewater treatment [J]. Industrial water treatment, 2005, 25(4): 8-11 (in Chinese with English abstract).
- [9] 张俊, 刘奥胜, 李乐, 等. 用于池塘养殖尾水处理的串联式旋流器水动力特性及分离效率[J]. 农业工程学报, 2022, 38(20): 49-58. ZHANG J, LIU A S, LI L, et al. Hydrodynamic characteristics and separation efficiency of the series cyclone separator for pond aquaculture tail water treatment [J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(20): 49-58 (in Chinese with English abstract).
- [10] 赵春霞, 李天一, 付亿俊, 等. 基于案例分析的人工湿地尾水处理技术进展[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2023, 43(1): 75-82. ZHAO C X, LI T Y, FU Y J, et al. Advanced progress of constructed wetland technology for tail sewage treatment based on case analysis [J]. Journal of Hebei University (natural science edition), 2023, 43(1): 75-82 (in Chinese with English abstract).
- [11] 章霞, 徐志进, 柳敏海, 等. 不同滤料和碳氮比对对虾养殖尾水处理效果的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(5): 620-624. ZHANG X, XU Z J, LIU M H, et al. Effects of different C:N ratios and biofiltration materials on wastewater treatment in shrimp culture [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2018, 33(5): 620-624 (in Chinese with English abstract).
- [12] 张正, 王清印, 王印庚, 等. 弧形筛及生物净化池净化陆基工厂化海水养殖废水的效果[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S2): 176-181. ZHANG Z, WANG Q Y, WANG Y G, et al. Effluent purification effect of system in sieve bend combined with four grade biological cleansing ponds in industrialized mariculture [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(S2): 176-181 (in Chinese with English abstract).
- [13] RIDHA M T, CRUZ E M. Effect of biofilter media on water quality and biological performance of the Nile Tilapia *Oreochromis niloticus* L. reared in a simple recirculating system [J]. Aquacultural engineering, 2001, 24(2): 157-166.
- [14] 张佳. 转鼓式微滤机改进设计与试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022. ZHANG J. Improved design and experimental study of rotary drum microfilter [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [15] 丁磊, 王萍. 沸石强化过滤的中试及生产性试验研究[J]. 矿物学报, 2008, 28(3): 289-293. DING L, WANG P. On pilot-scale and full-scale production test on enhanced filtration with zeolite [J]. Acta mineralogica sinica, 2008, 28(3): 289-293 (in Chinese with English abstract).
- [16] 金星, 庞博文, 于鹏飞, 等. 天然沸石/活性炭处理污水厂尾水试验研究[J]. 辽宁化工, 2018, 47(9): 869-871. JIN X, PANG B W, YU P F, et al. Experimental study on treatment of tailwater from sewage plant by natural zeolite/activated carbon [J]. Liaoning chemical industry, 2018, 47(9): 869-871 (in Chinese with English abstract).
- [17] 张小璇, 任源, 贺明和, 等. 污水处理厂尾水中有有机氯化物的活性炭吸附深度处理[J]. 环境科学学报, 2009, 29(3): 548-554. ZHANG X X, REN Y, HE M H, et al. Adsorption of chlorinated organic compounds in effluents from wastewater treatment plants with powdered activated carbon [J]. Acta scientiae circumstantiae, 2009, 29(3): 548-554 (in Chinese with English abstract).
- [18] 刘梅, 原居林, 倪蒙, 等. “三池两坝”多级组合工艺对内陆池塘养殖尾水的处理[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(1): 97-106. LIU M, YUAN J L, NI M, et al. Treatment of inland pond aquaculture tail water by multi-stage combined process of “Three ponds and two dams” [J]. Journal of environmental engineering technology, 2021, 11(1): 97-106 (in Chinese with English abstract).
- [19] LI H, CUI Z G, CUI H W, et al. Hazardous substances and their removal in recirculating aquaculture systems: a review [J/OL]. Aquaculture, 2023, 569: 739399 [2023-04-07]. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739399>.
- [20] 肖茂华, 李亚杰, 汪小岳, 等. 水产养殖尾水处理技术与装备的研究进展[J]. 南京农业大学学报, 2023, 46(1): 1-13. XIAO M H, LI Y J, WANG X C, et al. Research progress of aquaculture tailwater treatment technology and equipment [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2023, 46(1): 1-13 (in Chinese with English abstract).
- [21] 饶力. 天然沸石对氨氮废水吸附特性及再生工艺的研究[D].

- 广州: 华南理工大学, 2016. RAO L. Research on the adsorption behaviour of natural zeolite to ammonia wastewater and regeneration process [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [22] 李晔, 王建兵, 肖文浚, 等. 沸石去除水源中低浓度氨氮的实验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(2): 4-6. LI Y, WANG J B, XIAO W J, et al. The experimental study of removing low concentration of ammonia nitrogen from the water source by zeolites[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 25(2): 4-6 (in Chinese with English abstract).
- [23] 王群, 李涛, 叶琳嫣, 等. 粒径及厚度对双层滤料滤池过滤的影响[J]. 给水排水, 2012, 48(2): 27-31. WANG Q, LI T, YE L Y, et al. Effect of particle size and thickness on filtration of double-layer filter media[J]. Water & wastewater engineering, 2012, 48(2): 27-31 (in Chinese).
- [24] 王文超, 管俊芳, 严春杰, 等. 斜发沸石处理氨氮废水[J]. 环境工程学报, 2014, 8(3): 1036-1040. WANG W C, GUAN J F, YAN C J, et al. Adsorption of ammonium-nitrogen in wastewater by clinoptilolite[J]. Chinese journal of environmental engineering, 2014, 8(3): 1036-1040 (in Chinese with English abstract).
- [25] 关正军, 尹恒, 韩威, 等. 基于玉米秸秆滤料的养禽冲洗废水过滤技术[J]. 农业工程学报, 2021, 37(13): 216-223. GUAN Z J, YIN H, HAN W, et al. Filtration technology of poultry washing wastewater based on maize stover filter media [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(13): 216-223 (in Chinese with English abstract).

Experimental study of filter media filtration for pond captive tailwater treatment

LIANG Zeyou, TAN Hequn, ZHENG Qi, LI Bintao

College of Engineering, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Aquaculture Facilities Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China

Abstract Filter media filtration can effectively reduce the content of suspended solids and other harmful substances in fish culture tailwater and is often used as a primary treatment technology for aquaculture tailwater. In order to investigate the effect of filter media filtration for pond captive tailwater treatment, this study used volcanic rock, activated carbon and zeolite as the filter media materials, and carried out pond captive tailwater treatment experiments with filter media type, filter media size and filter media thickness as the test factors, and total suspended solid (TSS) removal efficiency, ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) removal efficiency and chemical oxygen demand (COD) removal efficiency as the test indexes. The results showed that all three filter media could remove TSS and COD in the tailwater, and all could reduce the concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in the tailwater to a certain extent, and among the three filter media, the treatment effect of activated carbon was better than the other two, and the smaller the particle size or the larger the thickness of the filter media, the better the effect of the activated carbon in treating the tailwater. The results of the orthogonal test based on the single-factor test showed that the best overall treatment effect of the filtration device was achieved when the filter media was activated carbon, the particle size was 0.5-2 mm, and the thickness of the filter media was 80 cm. Under these conditions, the removal efficiencies of TSS, COD and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ were 83.86%, 49.78% and 29.89%, respectively. The study showed that the filter media filtration has good effect on the removal of TSS and COD, but the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal effect is not satisfactory. Therefore, in the treatment of captive tailwater, media filtration can be used as a primary treatment process for captive tailwater, but further purification of tailwater is needed for ammonia nitrogen by means of biofilter, artificial wetland or bioreactor.

Keywords pond enclosure; farming wastewater; tailwater treatment; filter material filtration; green aquaculture

(责任编辑: 陆文昌)