

碳源对蚯蚓人工湿地净化养殖废水的影响

郝益婷^{1,2}, 高峰^{1,3*}, 马欢欢⁴, 马天^{1,2}, 胡超^{1,3}, 刘春成^{1,3}, 崔二苹^{1,3}

(1.中国农业科学院 农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 2.中国农业科学院 研究生院, 北京 100081; 3.中国农业科学院 农业水资源高效安全利用重点开放实验室, 河南 新乡 453002; 4.河南师范大学 环境学院, 河南 新乡 453007)

摘要:【目的】为资源化利用农业秸秆优化人工湿地净化水质提供理论依据。【方法】设置 8 组人工湿地, 其基质分别为细沙 (KW), 细沙+玉米秸秆粉 (JW), 细沙+工业葡萄糖 (PW), 细沙+玉米秸秆生物炭 (SW), 细沙+蚯蚓 (KQ), 细沙+玉米秸秆粉+蚯蚓 (JQ), 细沙+工业葡萄糖+蚯蚓 (PQ), 细沙+玉米秸秆生物炭+蚯蚓 (SQ)。

【结果】在添加玉米秸秆生物炭、工业葡萄糖以及玉米秸秆粉为碳源后 COD 的去除率分别为 81.80%、88.58%、85.77%, 添加碳源后 COD 去除率均有所提升, 每组分别提升了 2.3%、9.1%、6.3%。添加工业葡萄糖和玉米秸秆粉可提高人工湿地净化 TN、TP 的效果, 分别提高了 7.0%和 2.8%; 添加工业葡萄糖和玉米秸秆粉为碳源的人工湿地去除 TN 的效果最好, 去除率可达 98%和 98.2%; 在不同处理组中加入蚯蚓后, 添加玉米秸秆粉处理组对铜 (Cu) 的去除率最高, 处理水中检测不出铜的量。【结论】在人工湿地中加入蚯蚓后, 养殖废水的 COD、重金属 Cu 和 Zn 的去除率分别提升 1.8%、6.3%和 2.6%; 人工湿地添加玉米秸秆生物炭作为碳源对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率有明显提高; 相比玉米秸秆粉和玉米秸秆生物炭, 添加工业葡萄糖对人工湿地净化养殖废水的 COD、TP、TN、重金属 Cu 效果最佳; 添加不同碳源与蚯蚓对人工湿地去除 COD 的效果均有适当提高。加入玉米秸秆粉与蚯蚓联合作用会显著提高人工湿地 COD、TP、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、以及重金属 Cu、Zn 的去除率; 人工湿地中添加玉米秸秆粉时, 蚯蚓吸收重金属 Cu 效果最佳。

关键词: 人工湿地; 蚯蚓; 碳源; 养殖废水

中图分类号: S271

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2022299

OSID:



郝益婷, 高峰, 马欢欢, 等. 碳源对蚯蚓人工湿地净化养殖废水的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(2): 117-122, 144.

HAO Yiting, GAO Feng, MA Huanhuan, et al. Improving Wastewater-treatment Wetlands by Exogenous Carbon Earthworms[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(2): 117-122, 144.

0 引言

【研究意义】推进乡村畜牧粪污处理、农作物秸秆综合利用及农业面源污染防治等是国家乡村振兴战略中农村环境综合治理的重要内容。据 2020 年 6 月发布的《全国第二次污染源普查公报》显示, 在农业源中畜禽养殖业的化学需氧量 (COD) 和氨氮排放量分别为 604.83 万 t 和 7.5 万 t, 总氮 37 万 t, 总磷 8.04 万 t。目前我国的农村畜禽养殖废水和乡村污水面广量大, 现有处理技术中的人工湿地技术具有效果好、成本低并有生态景观作用的优点, 具有较大的应用推广前景。【研究进展】人工湿地最早是在德国被提出, Seidel^[1]在 1953 年研究发现芦苇能去除大量有机物和无机物, 进一步的研究表明污水中的细菌在通过芦苇床时消失, 且芦苇及其他大型植物能在水中吸

收重金属和有机物等。1990 年人工湿地被引入我国开始研究^[2], 经过这几十年的发展, 人工湿地研究主要集中在如何提高脱氮除磷效率、对新兴污染物的去除、人工湿地根区的微生物结构与功能、人工湿地模型等方面^[3]。而在人工湿地中加入蚯蚓的研究是在 2002 年 Davison^[4]研究芦苇床时发现 6 种蚯蚓, 进而研究发现蚯蚓将堵塞物从基质表面移到床的表面, 从而延长了芦苇床的寿命。付大能等^[5]在 2009 年研究赤子爱胜蚓强化潜流人工湿地效能也表明, 蚯蚓增强了湿地土壤的透气性, 并且发现湿地系统的水位线对处理效果有明显影响, 研究发现湿地系统中水位位于土壤与砾石的分界处时添加蚯蚓可以明显提高净化效果。王国芳等^[6]在研究蚯蚓改善垂直潜流人工湿地时发现, 蚯蚓的添加提高了人工湿地 COD、氨氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、总氮 (TN)、总磷 (TP) 的去除率, 并且蚯蚓的添加增加了人工湿地基质每层的微生物量, 一定程度上缓解了人工湿地堵塞问题, 可以提高人工湿地对重金属的去除率。陈中兵等^[7]研究发现添加蚯蚓可降低镉的毒性, 因此在添加蚯蚓后, 人工湿地去除重金属的效果增强。徐德福等^[8]在蚯蚓对人工

收稿日期: 2022-05-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0403503)

作者简介: 郝益婷 (1997-), 女。硕士研究生, 主要从事农业水资源与水环境研究。E-mail: haoytdyx@163.com

通信作者: 高峰 (1963-), 男。研究员, 主要从事农业水资源与水环境研究。E-mail: gfyx@sina.com

湿地系统优化分析中表明蚯蚓可作为人工湿地运行状况监控的有效生物指标,并且将蚯蚓引入植物-微生物-基质的循环中,蚯蚓可以改变原有的物质循环进而提高人工湿地运行的稳定性。由此可见,将蚯蚓添加到人工湿地中有很好的应用价值。于建光等^[9]及 Ning 等^[10]研究表明在施加玉米秸秆的情况下在土壤中接种蚯蚓可以丰富微生物浓度,而微生物结构变化是可以揭示土壤内蚯蚓对重金属的吸收效果。胡安等^[11]利用木屑和猪粪的混合物作为碳源接种蚯蚓发现其对铜(Cu)、锌(Zn)的富集量增加, Khan 等^[12]的研究也表明在蚯蚓堆肥过程中加入生物炭降低了重金属(Cu、Zn、Cd、Cr、Mg等)量和TP、TN量。周磊等^[13]在蚯蚓-人工湿地中添加生物炭(稻壳生物炭,椰壳生物炭,木质生物炭)的研究发现,在人工湿地中添加生物炭和蚯蚓可以提高溶解氧浓度进而提高氮的去除率。表明碳源和蚯蚓在净化N、P和重金属方面有协同作用,可增强人工湿地净化水质的效果。【切入点】目前国内外研究人工湿地净化水质效果提升多集中于添加木质生物炭和植物碳源等,添加蚯蚓虽有研究,但对于不同碳源和蚯蚓联合作用对人工湿地的净化效果还需要进一步研究,以寻求净化水质效果最优的人工湿地组合方式。【拟解决的关键问题】探究添加作物秸秆碳源和葡萄糖等碳源与蚯蚓对人工湿地净化水质提升效果,为农作物秸秆合理利用以及养殖废水农业安全利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2021年10月7日—12月16日在中国农业科学院河南新乡农业水土环境野外科学观测试验站阳光温室内进行。该试验站地处河南省北部,南临黄河,地理位置为N35°15'38"—N35°15'45"、E113°55'5"—E113°55'7",海拔73.2 m。

1.2 供试材料

供试蚯蚓品种为赤子爱胜蚓(以下简称蚯蚓),供试植物为芦苇(购自于江苏欣唯珩园林有限公司),供试碳源有玉米秸秆粉(购自于联丰农产品深加工公司)、玉米秸秆生物炭(购自于立泽环保科技有限公司)、工业葡萄糖(购自于河南沃瑞环保科技有限公司),试验用人工湿地小试模型为聚乙烯板制成的长65 cm,宽65 cm,高100 cm的容器。人工湿地小试模型由下往上分别为10 cm厚的砾石(粒径20~30 mm)层,60 cm厚的沙子(粒径0.25~0.35 mm)基质层。砾石和沙子填入人工湿地模型之前用清水冲洗3次并自然风干。砾石和沙子购买于河南省新乡市有利建材有限公司。

废水选用河南省新乡市某猪场废水经一级厌氧消化后的厌氧发酵液,经过稀释40~60倍后利用滴灌方式加入人工湿地。

1.3 试验设计

人工湿地模型采用垂直下行流模式(表1),试验基质内设置细沙(KW),细沙+玉米秸秆粉(JW),细沙+工业葡萄糖(PW),细沙+玉米秸秆生物炭(SW),细沙+蚯蚓(KQ),细沙+玉米秸秆粉+蚯蚓(JQ),细沙+工业葡萄糖+蚯蚓(PQ),细沙+玉米秸秆生物炭+蚯蚓(SQ),细沙与碳源混合比均为200:1,蚯蚓均接种250 g(约200只),并种植16棵长势相同的成熟期根系发达芦苇,每组设3个重复,进水选用滴灌方式,滴灌管环绕水箱内壁进行滴灌,控制水力停留时间为5 d进水5 t,在人工湿地水箱组合群出水口2(图1)上方布置1条出水管控制水位以保证人工湿地基质内含水率不超过70%。

表1 人工湿地模型基质构成

人工湿地编号	植物	基质	蚯蚓
KW	芦苇	细沙	无
JW	芦苇	细沙+玉米秸秆粉(200:1)	无
PW	芦苇	细沙+工业葡萄糖(200:1)	无
SP	芦苇	细沙+玉米秸秆生物炭(200:1)	无
KQ	芦苇	细沙	蚯蚓(250 g)
JQ	芦苇	细沙+玉米秸秆粉(200:1)	蚯蚓(250 g)
PQ	芦苇	细沙+工业葡萄糖(200:1)	蚯蚓(250 g)
SQ	芦苇	细沙+玉米秸秆生物炭(200:1)	蚯蚓(250 g)

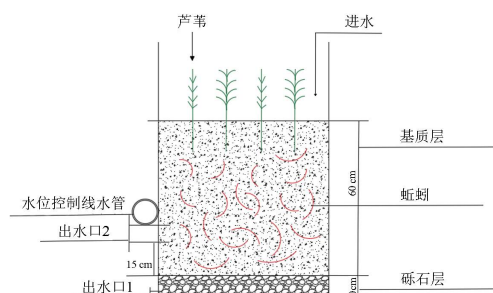


图1 人工湿地剖面图

Fig.1 Constructed wetland section

1.4 指标测定及方法

将布置好的试验箱先连续进清水15 d,使湿地内的芦苇、蚯蚓以及湿地中微生物适应环境,然后取芦苇根系土壤测定微生物群落结构。而后开始灌入猪场厌氧发酵后的废水,第1次灌水稀释60倍,第2、第3次稀释40倍,每次灌水测定水质的COD、TP、TN、Cu、Zn以及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 等指标,从每个湿地箱子抽取2只蚯蚓测定重金属Cu、Zn量。水质指标(COD、总磷、

总氮和重金属铜、锌等)测定参考《水和废水监测分析方法(第4版增补版)》进行检测。

根据张聪等^[14]对蚯蚓重金属量的研究方法,蚯蚓重金属量的测定是在灌水第5天、第10天和第15天后每组人工湿地中随机取出2条蚯蚓,用蒸馏水洗干

净后分别放入烧杯中吐泥48 h(保鲜膜封口,扎孔),然后用蒸馏水洗干净放入烘箱105℃烘干至衡质量,冷却后研磨测定重金属量。

1.5 养殖废水水质指标

人工湿地灌水水质指标如表2。

表2 养殖废水水质指标

Table 2 Aquaculture wastewater quality indicators

COD/(mg L ⁻¹)	总磷/(mg L ⁻¹)	总氮/(mg L ⁻¹)	氨氮/(mg L ⁻¹)	铜/(mg kg ⁻¹)	锌/(mg kg ⁻¹)	pH 值
10 000±400	800±30	4 000±500	2 600±150	9.5±0.5	30±12	5.6±0.1

1.6 数据处理

试验数据通过 Excel 2016 进行作图,利用 SPSS 25.0 进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同碳源添加对 COD 去除率的影响

添加不同碳源后有无蚯蚓对废水 COD 的去除率如图2。空白组的 COD 去除率为79.5%,在添加玉米秸秆生物炭、工业葡萄糖以及玉米秸秆粉为碳源后 COD 的去除率分别为81.8%、88.5%、85.8%,可见,添加碳源后 COD 去除率均有所提升,分别提升了2.3%、9.1%、6.3%。而在不添加碳源的空白组中加入蚯蚓后,人工湿地对养殖废水的 COD 去除率也有所提升,提升了1.8%。当人工湿地内添加蚯蚓后又同时加入玉米秸秆生物炭、工业葡萄糖、玉米秸秆粉为碳源时,人工湿地去除养殖废水 COD 的去除率分别为84.5%、88.1%和82.3%,可见,在人工湿地内添加蚯蚓与3种碳源均会提高 COD 的净化效率,但通过 SPSS 显著性分析发现提升效果不明显。而在生物炭处理组引入蚯蚓后可增强对 COD 的去除率。通过与空白组 COD 去除率对比,在所有处理中,添加工业葡萄糖为碳源的人工湿地去除 COD 的效率最佳。

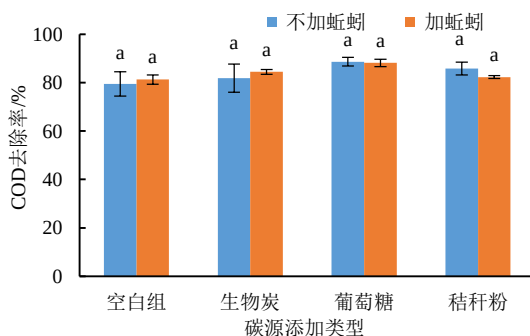


图2 不同碳源添加下 COD 的去除率

Fig.2 COD removal rate under different carbon sources

2.2 不同碳源添加对总磷去除率的影响

添加不同碳源后有无蚯蚓添加对废水 TP 的去除率如图3。在不添加蚯蚓空白组中,添加工业葡萄糖和玉米秸秆粉可提高人工湿地净化 TP 的效果,分别提高了7.0%和2.8%,但根据 SPSS 显著性分析发现,

提高效果不明显,在添加玉米秸秆生物炭为碳源的人工湿地对去除 TP 效果不佳,而在添加蚯蚓的人工湿地空白组中,添加工业葡萄糖和玉米秸秆粉的人工湿地 TP 去除的效果提升了7.7%和4.3%,添加玉米秸秆生物炭则效果不佳,根据每组碳源相同但对比有无蚯蚓的添加对人工湿地净化 TP 的影响可以看出,添加蚯蚓会提高人工湿地的净化效果,并且根据八组人工湿地出水 TP 去除率发现在添加工业葡萄糖为碳源时加入蚯蚓与其联合作用效果最好,去除率可达94.0%。

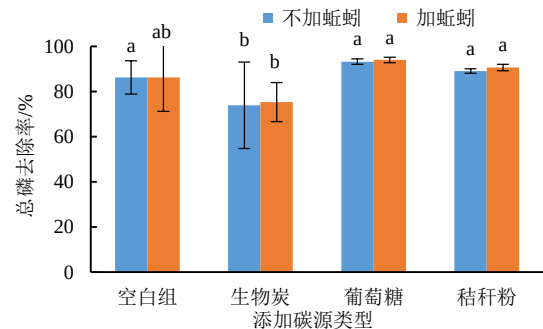


图3 不同碳源的添加下总磷的去除率

Fig.3 TP removal rate under different carbon sources

2.3 不同碳源添加对总氮去除率的影响

图4是在添加不同碳源后有无蚯蚓添加对废水 TN 的去除率比较,在不添加蚯蚓的人工湿地空白组中,添加工业葡萄糖和玉米秸秆粉为碳源的人工湿地去除 TN 的效果最好,去除率可达98%和98.2%,添加玉米秸秆生物炭为碳源的人工湿地则效果不明显,在添加蚯蚓的人工湿地空白组中,工业葡萄糖和玉米秸秆粉的添加会使人工湿地去除 TN 的效果更好,分别提高了6.3%和5.1%,在不同碳源的添加下对比有无蚯蚓的添加发现,在人工湿地中加入蚯蚓去除 TN 效果不佳,与空白组对比,在人工湿地中加入玉米秸秆粉为碳源时 TN 去除率达98.2%,效果最好。

2.4 不同碳源添加对氨氮去除率的影响

图5是在添加不同碳源后有无蚯蚓添加对废水 NH₄⁺-N 去除率的比较,空白组 NH₄⁺-N 去除率为90.9%,在添加玉米秸秆生物炭、工业葡萄糖、玉米秸秆粉后,人工湿地对 NH₄⁺-N 的去除率均有所提高,

且玉米秸秆生物炭的去除效果最好,可达 99.5%,并且与空白组相比达到显著水平。而在不添加碳源的空白组中加入蚯蚓后,发现 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率反而降低,但添加玉米秸秆生物炭、工业葡萄糖和玉米秸秆粉为碳源时再加入蚯蚓, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率均有提升,去除率依次为 99.3%、99.4%和 95.1%,并且与不添加蚯蚓相比,工业葡萄糖组与玉米秸秆粉组的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率增加了 1.1%和 2.5%。

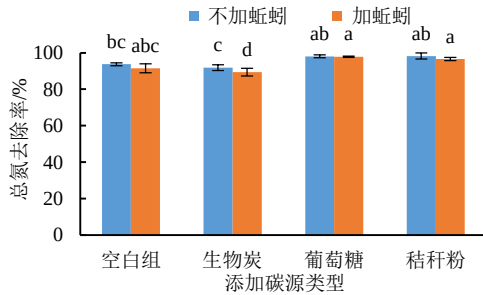


图 4 不同碳源的添加下总氮的去除率

Fig.4 TN removal rate under different carbon sources

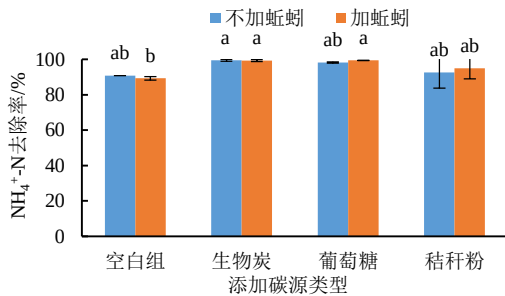
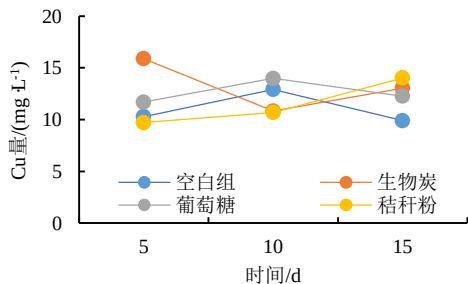


图 5 不同碳源的添加下氨氮的去除率

Fig.5 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal rate under different carbon sources

2.5 不同碳源添加对铜去除率的影响

表 3 是在添加不同碳源后有无蚯蚓添加对废水中重金属 Cu 去除率的比较,对于不添加蚯蚓的处理组,人工湿地中加入工业葡萄糖和玉米秸秆粉后,对重金属 Cu 的去除率均有所增加,对 Cu 的去除率分别为 96.3%和 90.8%,相比不加碳源的人工湿地对 Cu 的去除提高了 22.3%和 16.9%。在不同处理组中加入蚯蚓后,添加玉米秸秆粉处理组对 Cu 的去除率最高,



(a) 蚯蚓体内重金属 Cu 量

可全部去除重金属 Cu。

表 3 不同碳源的添加下铜的去除率

Table 3 The removal rate of copper under different carbon sources

碳源	不加蚯蚓/%	加蚯蚓/%
空白组	73.9bc	80.2abc
生物炭	71.2bc	62.8c
葡萄糖	96.3ab	87.3abc
秸秆粉	90.8ab	100a

2.6 不同碳源添加对锌去除率的影响

表 4 是在添加不同碳源后有无蚯蚓添加对废水中重金属 Zn 去除率的比较,通过表 4 可知添加工业葡萄糖和玉米秸秆粉会明显提高废水 Zn 的去除率,在不加蚯蚓的情况下,添加工业葡萄糖和玉米秸秆粉为碳源时,锌的去除率分别提高了 17.5%和 21.9%,添加秸秆粉对 Zn 的去除率相比空白处理达到显著水平。在人工湿地中加入蚯蚓后,添加工业葡萄糖和玉米秸秆粉的人工湿地对 Zn 的去除率明显提高,添加秸秆粉的处理组达到显著水平。对比空白组重金属 Zn 的去除,在人工湿地中引入蚯蚓的同时添加玉米秸秆粉为碳源时去除重金属 Zn 的效果最好,去除率可达 98.1%。

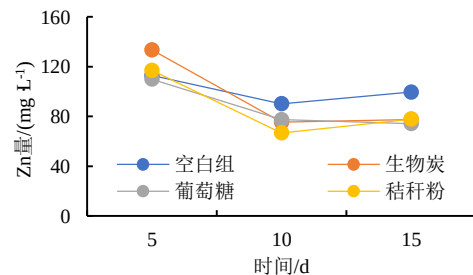
表 4 不同碳源的添加下锌的去除率

Table 4 Zn removal rate under different carbon sources

碳源	不加蚯蚓/%	加蚯蚓/%
空白组	75.9bc	78.6bc
生物炭	74.5bc	64.8bc
葡萄糖	93.5ab	93.2ab
秸秆粉	97.9a	98.1a

2.7 蚯蚓人工湿地中添加不同碳源后蚯蚓重金属量变化

如图 6 是人工湿地运行第 5 天、第 10 天和第 15 天时蚯蚓体内重金属 Cu、Zn 量的变化。蚯蚓在人工湿地运行一段时间后,主要分布于芦苇根系以及基质层距离地面 5~20 cm 处,蚯蚓在人工湿地运行 15 d 后质量提升 0.1 g,蚯蚓存活率为 100%。



(b) 蚯蚓体内重金属 Zn 量

图 6 蚯蚓体内重金属 Cu 量和 Zn 量

Fig.6 Heavy metal Cu and Zn content in earthworm

由图 6 (a) 可知,在进水浓度、水力条件和芦苇密度及生长状况相同的情况下,人工湿地运行前期,

添加玉米秸秆生物炭为碳源的人工湿地中的蚯蚓吸收重金属 Cu 最多,蚯蚓重金属 Cu 量 15.88 mg/kg,

但在人工湿地运行 10 d 时玉米秸秆生物炭为碳源的人工湿地中的蚯蚓重金属 Cu 量下降, 而空白组和玉米秸秆粉组以及工业葡萄糖组的蚯蚓重金属 Cu 量呈上升状态, 最终在运行第 15 天时玉米秸秆粉和玉米秸秆生物炭组的蚯蚓重金属 Cu 量再次升高, 而空白组和葡萄糖组下降, 最终空白组蚯蚓重金属 Cu 量最低, 为 9.89 mg/kg, 玉米秸秆粉组蚯蚓重金属 Cu 量最高, 为 14.03 mg/kg。

由图 6 (b) 可知, 玉米秸秆生物炭组的蚯蚓重金属 Zn 量在运行初期最高, 为 133.50 mg/kg, 在第 10 天和第 15 天重金属 Zn 量明显下降后又稍有回升, 但最终空白组的蚯蚓重金属 Zn 量最高, 为 99.57 mg/kg。

3 讨论

3.1 添加蚯蚓对人工湿地净化水质的影响

付大能^[5]研究发现, 在人工湿地内引入蚯蚓后, 水位线达到中水位线时人工湿地的 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、TN 等的去除率分别提高 12.98%、26.73%、16.94%、27.21%。吴颖^[15]研究表明将蚯蚓生态滤池结合植物生态床处理污泥可显著提升污泥有机物降解率以及 TP 去除率, 并促进体系硝化作用的进行。在本研究中将蚯蚓引入人工湿地后, 人工湿地的 TP、COD 和重金属 Cu、Zn 的去除率均有所提高, 这与付大能等^[5]和吴颖^[15]的研究结果一致。与付大能等^[5]研究相比, 本研究中加入蚯蚓并没有提高 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率, 田锁霞^[16]认为, 蚯蚓对不同浓度氨氮的耐受性不同, 本研究中将蚯蚓引入人工湿地未能提高氨氮的去除率, 原因可能是稀释后的养殖废水中氨氮浓度使蚯蚓活性降低。其次在添加蚯蚓后人工湿地的 TP、COD 和重金属 Cu、Zn 的去除率虽有提高但与空白组相比未达到显著性水平, 根据苏北等^[17]研究发现, 蚯蚓人工湿地去除总氮和氨氮在 7、8 月是效果最好的, 而本试验在 10 月进行原因可能除蚯蚓对氨氮浓度有耐受性外, 还有人工湿地基质内微生物环境对其有一定影响。

3.2 添加不同碳源对人工湿地净化水质的影响

张弛等^[18]研究表明玉米秸秆作为人工湿地外加碳源可提升总磷和总氮的去除率, 陆松柳等^[19]在人工湿地中添加葡萄糖后发现可以提高硝氮的去除率。而在本试验中加入不同碳源(工业葡萄糖、玉米秸秆粉、玉米秸秆生物炭)后也提高了人工湿地去除 COD、总磷、总氮、氨氮以及重金属铜、锌等的去除率, 根据对比发现在人工湿地中加入玉米秸秆粉和工业葡萄糖的效果最好, 这与张弛等^[18]的研究结果一致。但本研究认为在人工湿地中加入玉米秸秆生物炭为碳源时, 去除养殖废水中的氨氮可达效果最好, 马锋锋等^[20]对玉米秸秆生物炭对水中氨氮吸附特征的研

究表明, 玉米秸秆生物炭对氨氮吸附的最佳 pH 范围为 5~8, 而本研究中养殖废水的 pH 范围在 5.4~5.5 之间, 因此玉米秸秆生物炭作为碳源在人工湿地中可能会吸附一定量氨氮使其相比添加玉米秸秆粉和工业葡萄糖为碳源时效果更佳。对比添加 3 种不同碳源后, 人工湿地 COD、TP、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、重金属 Cu、Zn 等去除率, 本研究发现, 在人工湿地中加入工业葡萄糖为碳源时, 人工湿地净化水质的效果最好。

3.3 添加蚯蚓与不同碳源联合作用对人工湿地净化水质的影响

在李宗宇等^[21]的研究提到在赤子爱胜蚓生态滤池中, 生物炭和水稻秸秆混合作为填料有利于去除氨氮和总氮。而在本试验中进一步研究发现, 在人工湿地中分别加入生物炭和玉米秸秆粉后总氮的去除率均有所提高, 加入玉米秸秆生物炭为碳源时强化了人工湿地的氨氮去除率。这说明将秸秆制作为秸秆粉或秸秆生物炭能够提升净化水质效果。吴海露^[22]研究认为在反硝化微生物利用碳源的过程中带有给电子基团的物质和易降解的物质(如葡萄糖)更易被反硝化过程利用, 本试验进一步研究说明添加工业葡萄糖为碳源的人工湿地在去除 COD、TP、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和重金属 Cu、Zn 等方面都有很好的效果, 并印证了添加工业葡萄糖后能显著影响人工湿地的基质内微生物数量和结构, 增强硝化作用和反硝化作用。

李晶^[23]发现赤子爱胜蚓对重金属 Cu、Zn 的消解作用与堆置物的酶活性相关性很大, 而本试验发现, 蚯蚓在不同碳源添加的人工湿地中重金属铜锌的吸收量随时间不同而变化, 原因主要是由于人工湿地内基质酶活性的不同, 同时也与蚯蚓在不同碳源添加的人工湿地中的适应性以及蚯蚓酶活性的不同有关。在人工湿地中加入玉米秸秆生物炭为碳源时, 人工湿地的总磷和重金属 Cu、Zn 的去除率效果不佳, 这可能是玉米秸秆生物炭在加入人工湿地基质后与基质本身和芦苇根系微生物有抑制作用, 具体还需根据基质微生物群落结构分析探讨。

4 结论

1) 在人工湿地中加入 250 g 约 200 只蚯蚓后, 养殖废水的 COD、重金属 Cu 和 Zn 的去除率分别提升 1.8%、6.3%和 2.6%。

2) 人工湿地添加玉米秸秆生物炭作为碳源对氨氮去除率有明显提高; 相比玉米秸秆粉和玉米秸秆生物炭, 添加工业葡萄糖对人工湿地净化养殖废水的 COD、TP、TN、重金属 Cu 效果最佳。

3) 添加不同碳源与蚯蚓对人工湿地去除 COD 的效果均有适当提高; 加入玉米秸秆粉与蚯蚓联合作用

会显著提高人工湿地 COD、TP、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 以及重金属 Cu、Zn 的去除率;

4) 人工湿地中在添加玉米秸秆粉与基质细化混合比为细沙:玉米秸秆粉=200:1 时,蚯蚓吸收重金属 Cu 效果最佳。

参考文献:

- [1] SEIDEL Käthe. Abbau von bacterium coli durch höhere wasserpflanzen[J]. Naturwissenschaften, 1964, 51(16): 395.
- [2] 黄时达, 冷冰. 污水的人工湿地系统处理技术[J]. 四川环境, 1993, 12(2): 48-51.
HUANG Shida, LENG Bing. The technique of man-made wetland treatment system[J]. Sichuan Environment, 1993, 12(2): 48-51.
- [3] 成水平, 王月圆, 吴娟. 人工湿地研究现状与展望[J]. 湖泊科学, 2019, 31(6): 1 489-1 498.
CHENG Shuiping, WANG Yueyuan, WU Juan. Advances and prospect in the studies on constructed wetlands[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(6): 1 489-1 498.
- [4] DAVISON Leigh, HEADLEY Tom, PRATT Karen. Aspects of design, structure, performance and operation of reed beds-eight years' experience in northeastern New South Wales, Australia[J]. Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2005, 51(10): 129-138.
- [5] 付大能, 贾静, 府灵敏, 等. 赤子爱胜蚓强化潜流人工湿地效能的研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(9): 20-24.
FU Daneng, JIA Jing, FU Lingmin, et al. Eisenia foetida for enhancing subsurface flow constructed wetlands[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(9): 20-24.
- [6] 王国芳, 金秋, 李先宁. 蚯蚓改善垂直潜流人工湿地处理农村污水效能的研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(23): 10-14.
WANG Guofang, JIN Qiu, LI Xianning. Improving rural sewage treatment efficiency of vertical-flow constructed wetland by adding earthworms[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(23): 10-14.
- [7] CHEN Zhong Bing, HU Shan Shan. Heavy metals distribution and their bioavailability in earthworm assistant sludge treatment wetland[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 366: 615-623.
- [8] 徐德福, 李映雪, 方华, 等. 蚯蚓对人工湿地系统优化分析[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2010, 2(3): 242-247.
XU Defu, LI Yingxue, FANG Hua, et al. Earthworm's optimizing function in constructed wetland system[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2010, 2(3): 242-247.
- [9] 于建光, 陈小云, 刘满强, 等. 秸秆施用下接种蚯蚓对农田土壤微生物特性的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 99-103.
YU Jianguang, CHEN Xiaoyun, LIU Manqiang, et al. Effects of earthworm activities on soil microbial characteristics under different straw amendment method in cropland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(2): 99-103.
- [10] NING Yucui, ZHOU Haoran, ZHOU Dongxing. Study on the microbial community in earthworm and soil under cadmium stress based on contour line analysis[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(20): 20 989-21 000.
- [11] 胡安, 梅凌斐, 张志, 等. 猪粪、木屑混合物蚯蚓堆制处理中蚓体 Cu、Zn 富集的影响因素[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(1): 77-81.
HU An, MEI Lingfei, ZHANG Zhi, et al. Factors affecting Cu and Zn accumulation in earthworms in vermicomposting pig dung and sawdust mixture[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 28(1): 77-81.
- [12] KHAN Muhammad Bilal, CUI Xiao Qiang, JILANI Ghulam, et al. Eisenia fetida and biochar synergistically alleviate the heavy metals content during valorization of biosolids via enhancing vermicompost quality[J]. Science of the Total Environment, 2019, 684: 597-609.
- [13] ZHOU Lei, WANG Jiajun, XU Defu, et al. Responses of nitrogen transformation and dissolved oxygen in constructed wetland to biochar and earthworm amendment[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 27(23): 29 475-29 484.
- [14] 张聪, 王志新, 刘新会, 等. 河北黄壤中铅和铬(VI)对赤子爱胜蚓的毒性效应[J]. 环境化学, 2021, 40(6): 1 683-1 690.
ZHANG Cong, WANG Zhixin, LIU Xinhui, et al. Toxic effects of lead and chromium (VI) on the earthworm (Eisenia fetida) in Hebei soils[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(6): 1 683-1 690.
- [15] 吴颖. 蚯蚓植物生态床稳定浓缩剩余污泥的效果及机理研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
WU Ying. Effect and mechanism of the stabilization of concentrated excess sludge by vermi-filter combined with wetland plant[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [16] 田锁霞. 蚯蚓生态湿地系统处理厌氧发酵液的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
TIAN Suoxia. Study on the treatment of anaerobic digestion slurry by earthworm-constructed wetland system[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [17] 苏北. 蚯蚓对复合垂直流人工湿地净化能力影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
SU Bei. Effect of earthworms on integrated vertical flow constructed wetland purification capacity[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2014.
- [18] 张驰, 陈帅全, 王印, 等. 植物秸秆碳源强化人工湿地脱氮除磷[J]. 净水技术, 2021, 40(S2): 19-27.
ZHANG Chi, CHEN Shuaiquan, WANG Yin, et al. Nitrogen and phosphorus removal from constructed wetland by plant stalk carbon source[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(S2): 19-27.
- [19] 陆松柳, 张辰, 王国华. 碳源强化对人工湿地反硝化过程的影响研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9): 1 949-1 954.
LU Songliu, ZHANG Chen, WANG Guohua. Study on the influence of enhanced carbon resource on denitrification in the constructed wetland[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(9): 1 949-1 954.
- [20] 马锋锋, 赵保卫, 念斌. 玉米秸秆生物炭对水中氨氮的吸附特性[J]. 兰州交通大学学报, 2015, 34(1): 125-131, 135.
MA Fengfeng, ZHAO Baowei, NIAN Bin. Adsorption characteristics of ammonium onto biochar derived from corn straw[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2015, 34(1): 125-131, 135.
- [21] 李宗宇, 赵海涛, 颜志俊, 等. 基于生物炭填料的蚯蚓生态滤池净化养殖污水的效果分析[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(6): 10-14, 19.
LI Zongyu, ZHAO Haitao, YAN Zhijun, et al. Effects of earthworm ecological filter based on biochar fillers on breeding wastewater purification[J]. Environmental Pollution & Control, 2016, 38(6): 10-14, 19.
- [22] 吴海露. 人工湿地中植物根系分泌物及其对脱氮过程的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
WU Hailu. Plant root exudates and their function on the nitrogen removal in constructed wetlands[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [23] 李晶. 蚯蚓堆制猪粪对 Cu、Zn 形态变化与关键生物学指标间关系的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
LI Jing. Effects of vermicomposting on the relationship between Cu, Zn speciation and key biological indicators[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.

(下转第 144 页)

how reusing the effluent water for irrigation affects leaching of nitrogen (N) and phosphorus (P) from soils. **【Method】** In-situ experiment was set up in a field to measure the change in water flow and N and P concentrations in the ditches and the ditch buckets. We calculated the ratio of recycled water volume to the volume of water pumped for irrigation (i.e., regression rate), as well as the change in N and P pollutant loads and their determinants. **【Result】** The water had been drained and reused for irrigations for 24 cycles during the growing season, and the total regression rate reached 89.93%. The loads of total P, total N, nitrate nitrogen and ammonia nitrogen during the growing season were 0.28, 3.27, 2.35 and 2.35 kg/hm², respectively. The load reductions of P and N were correlated with the ratio of their concentrations in the effluent and in the irrigation water. The reduction in total P and ammonia was significantly correlated with the regression rate. The reduction in total N and nitrate was significantly correlated with irrigation and rainfall in the second day after the irrigation. Nitrate reduction rate was also significantly correlated with temperature. **【Conclusion】** The cycles of drainage and its reuse for irrigation not only saves water but also improves utilization of water and fertilizers, thereby reducing the risk of N and P pollution to the downstream.

Key words: hilly irrigated area; circular irrigation; nitrogen and phosphorus load; rice; water saving and pollutant reduction

责任编辑: 白芳芳

(上接第 122 页)

Improving Wastewater-treatment Wetlands by Exogenous Carbon Earthworms

HAO Yiting^{1,2}, GAO Feng^{1,3*}, MA Huanhuan⁴, MA Tian^{1,2}, HU Chao^{1,3}, LIU Chuncheng^{1,3}, CUI Erping^{1,3}

(1. Institute of Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

3. Key Laboratory of Efficient and Safe Utilization of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China; 4. College of Environment, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: **【Objective】** Constructed wetland is a biotechnological technique to treat wastewater; its function depends on a multitude of biotic and abiotic factors. This paper compares the performance of eight wetlands constructed by different materials. **【Method】** The eight wetlands we studied were constructed by fine sand only (CK), fine sand + corn straw powder (JW), fine sand + industry glucose (PW), sand + corn-straw biochar (SW), fine sand + eisenia fetida (KQ), fine sand + corn straw powder + eisenia fetida (JQ), fine sand + industrial glucose + eisenia fetida (PQ), fine sand + corn stover biochar + eisenia fetida (SQ), respectively. **【Result】** Adding corn-straw biochar, industrial glucose and corn-straw power increased the COD removal rate by 81.80%, 88.58% and 85.77%, respectively, compared to CK. Adding industrial glucose combined with corn straw powder improved purification efficiency of total N (TN) and total P (TP) by 7.0% and 2.8%, respectively. Wetland with industrial glucose and corn straw powder had the best TN removal rate, reaching 98% and 98.2%, respectively. Adding corn-straw power along with eisenia fetida was most effective to remove cooper, compared with other treatments. On average, introducing eisenia fetida to the wetlands increased the removal rates of COD, Cu and Zn by 1.8%, 6.3% and 2.6%, respectively, while adding corn-stover biochar significantly increased the removal rate of NH₄⁺-N. Compared with corn straw powder and corn straw biochar, industrial glucose was more efficient for removing COD, total N and N, and Cu. **【Conclusion】** Adding eisenia fetida and organic carbon to the wetland can improve its efficacy to remove COD, nitrogen and heavy metals, especially corn-stover powder combined with eisenia fetida. For removing Cu, corn straw powder combined with eisenia fetida works the best.

Key words: constructed wetland; Children love worms; carbon source; aquaculture wastewater

责任编辑: 赵宇龙