

三角帆蚌对城镇污水处理厂尾水深度净化效果及机理研究

宁军¹,董蓓¹,谢康¹,牧运洋¹,项贤领²

(1.安徽水韵环保股份有限公司,安徽 芜湖 241002;2.安徽师范大学 生态与环境学院,安徽 芜湖 241002)

摘要:以某城镇污水处理厂尾水为试验对象,设计了一种贝类立体净化系统,选择三角帆蚌作为试验贝类,考察三角帆蚌对城镇污水处理厂尾水深度净化效果及其机理特征.结果表明,三角帆蚌对城镇污水处理厂尾水COD_{cr}(化学需氧量)、NH₃-N(氨氮)、TP(总磷)净化效果均能稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)的Ⅳ类标准,对COD_{cr}、NH₃-N、TP的平均去除率分别为48.2%、56.2%、63.9%;三角帆蚌体质量每生长1 kg所能削减的COD_{cr}、NH₃-N、TP污染量分别为91.69、6.42、1.46 g.三角帆蚌主要通过发达的滤食组织系统,将尾水中C、N、P等物质吸收转化为贝壳和软组织生长元素,一方面可以深度净化尾水水质,另一方面贝类可被提取作为生态产品,带来经济效益,进而对城镇污水处理厂尾水深度净化应用提供科学技术依据.

关键词:尾水;城镇污水处理厂;贝类立体净化系统;三角帆蚌;深度净化

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2024)06-0027-09

在中国碳达峰碳中和的战略背景下,城镇污水处理厂尾水等低污染水体虽相较于污染严重水体的危害性低,但因其排放量大且集中等原因,低污染水体的净化也一直受到广泛关注.近年来人工湿地技术被广泛运用于城镇污水处理厂尾水水质提升中^[1-2],主要通过设计表流、潜流、水平流或其他组合形式的湿地,利用不同种类生物填料、水生植物或辅助搭配一些水生动物等达到水质净化目的,然而以淡水贝类为核心的城镇污水处理厂尾水深度净化相关研究较少.

三角帆蚌(*Hyriopsis cumingii*)是一种滤食性淡水贝类,已有研究表明,三角帆蚌能有效控制水体富营养化^[3-4],SUN等^[5]在研究合适藻类的选择以及不同微藻对贻贝生理的影响中发现,三角帆蚌因具有净水能力可在一定程度上控制水体富营养.储忝江等^[6]比较底播和悬挂两种方式下三角帆蚌对富营养化水体净化效果,发现两种放养方式对水体净化效果差异不显著,化学需氧量(COD_{cr})的去除率均在50.0%以上.然而,已有研究都是基于特定条件下三角帆蚌对地表富营养水体净化模拟的结果,针对三角帆蚌在城镇污水处理厂尾水深度净化中的研究显得颇为不足.

本研究以某城镇污水处理厂尾水作为试验对象,探究三角帆蚌在城镇污水处理厂尾水中的深度净化效果及机理,旨在为城镇污水处理厂尾水深度净化应用提供科学技术依据.

收稿日期:2023-09-19;**修回日期:**2024-01-06.

基金项目:安徽省自然科学基金(2308085MC72);安徽省高等学校科学研究项目(2023AH040021);皖江流域退化生态系统的恢复与重建省部共建协同创新中心开放课题(CIWB018);芜湖市科技项目(2023yf130).

作者简介:宁军(1985-),男,河南信阳人,安徽水韵环保股份有限公司高级工程师,主要研究方向为水污染控制和水环境治理,E-mail:417929176@qq.com.

通信作者:项贤领(1978-),男,安徽肥东人,安徽师范大学教授,博士,主要研究方向为水生态修复和水环境治理,E-mail:xiangxianling@163.com.

引用本文:宁军,董蓓,谢康,等.三角帆蚌对城镇污水处理厂尾水深度净化效果及机理研究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2024,52(6):27-35.(Ning Jun,Dong Bei,Xie Kang,et al.Study on the deep purification effect and mechanism of tail water in urban sewage treatment plants by *Hyriopsis cumingii*[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2024,52(6):27-35.DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2023.09.19.0003.)

1 试验材料与方法

1.1 试验材料与装置

试验所采用的装置(见图 1),主要由 4 个部分组成,分别为进水水箱(400 mm×800 mm×400 mm)、贝类立体净化系统 1 及贝类立体净化系统 2(尺寸均为 600 mm×800 mm×1 000 mm)、出水水箱(300 mm×800 mm×400 mm),每个箱体采用透明有机玻璃制成,箱体底部设置装有阀门的排空管。试验水体经蠕动泵从进水水箱抽至贝类立体净化系统 1,再通过底部连通口进入贝类进化系统 2,贝类立体净化系统 1 与贝类立体净化系统 2 为串联系统,经两级贝类立体系统净化后,出水通过管道最终溢流至出水水箱。

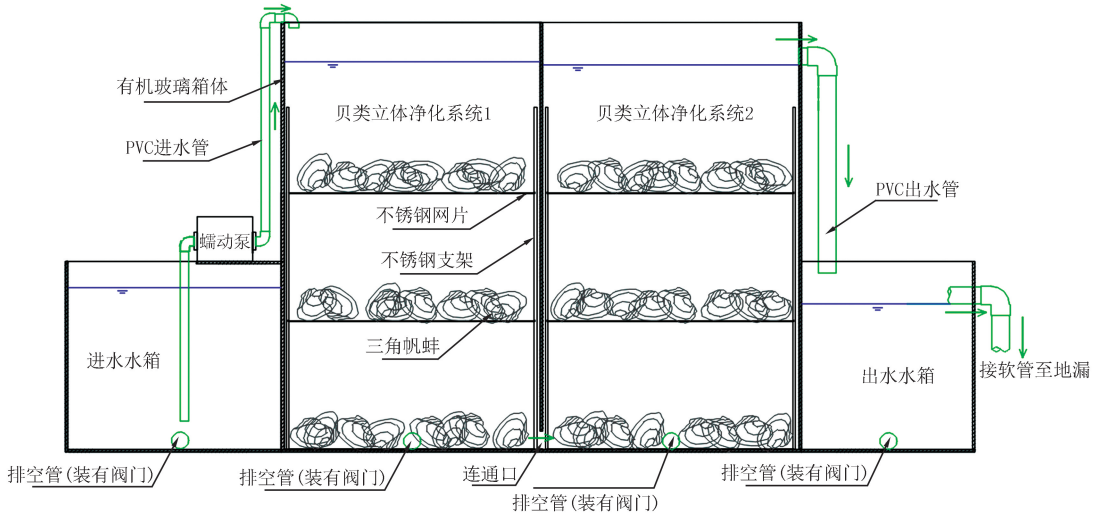


图1 试验装置

Fig. 1 Experimental device

在两级贝类立体净化系统中,通过不锈钢支架及网片搭建立体框架,贝类放置于各层框架的网片上,构建 3 层立体式贝床。试验用淡水贝类来自安徽水韵环保股份有限公司人工自主繁育的三角帆蚌,选取健康、活力旺盛的三角帆蚌进行试验。试验用水为某城镇污水处理厂尾水,该污水处理厂尾水水质满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 排放标准,即 $\rho_{\text{COD}} \leq 50 \text{ mg/L}$ 、 $\rho_{\text{NH}_3\text{-N}} \leq 5$ (或 8) mg/L 、 $\rho_{\text{TP}} \leq 0.5 \text{ mg/L}$ 。

1.2 试验设置

试验在立体式贝床内等密度(2 kg/m^2)投放大小规格一致的三角帆蚌,三角帆蚌初始壳长为(3.00 ± 0.20) cm ,体质量为(23.00 ± 2.00) g 。试验系统为连续流进出水,进出水流量为 $0.24 \text{ m}^3/\text{d}$,污水水质稳定一致(一级 A),综合考虑水流阻力等因素影响,两级贝类立体净化系统总水力停留时间按 4 d 考虑。试验周期设置为 2021 年 5 月 1 日至 2022 年 4 月 30 日,试验期间在两级贝类立体净化系统设置 12 组三角帆蚌取样监测点,每组 3 个三角帆蚌作为观察蚌,每月跟踪记录三角帆蚌生长情况。

1.3 样品采集及指标分析

1.3.1 样品采集及保存

试验期间,在试验装置进、出口进行水样采集并同步监测理化指标,监测时间持续 1 a,每天定时取样 1 次,取样采集 3 个平行样,样品保存在 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱中。

每月一次对 12 组取样监测点的三角帆蚌进行监测,连续监测 1 a。

1.3.2 水质监测指标

本试验监测水质指标包括化学需氧量(COD_{cr})、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、总磷(TP)。化学需氧量检测方法参照《水质 化学需氧量的测定 重铬酸钾法》(HJ 828—2017),氨氮检测方法参照《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 535—2009),总磷检测方法参照《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB/T 11893—1989)。

1.3.3 贝类监测指标

本试验贝类监测指标为三角帆蚌的体质量及生长尺寸,监测时将三角帆蚌壳表面洗净并用海绵吸干水分,用电子天平称量其体质量,用游标卡尺测量三角帆蚌壳长、壳高、壳宽。

试验周期结束后,进行12组试验监测点三角帆蚌的蚌壳、蚌肉碳(C)、氮(N)、磷(P)含量测定,取试验组三角帆蚌烘干至恒重后,壳肉分离,分别研碎进行测定。C检测方法采用酸碱滴定法;蚌壳或肉的主要含碳物质成分为 CaCO_3 ,将其研碎并加入已知浓度的过量HCl标准溶液,即发生下述反应: $\text{CaCO}_3 + \text{HCl} = \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O}$ 。过量的HCl溶液用NaOH标准溶液返滴定,由加入HCl的物质的量与返滴定所消耗的NaOH的物质的量之差,即可求得试样中 CaCO_3 的含量,再根据C的质量比换算出C的含量;N检测方法参照《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》(GB 5009.5-2016);P检测方法参照《食品安全国家标准 食品中磷的测定》(GB 5009.87-2016)。

1.4 数据处理与分析

采用SPSS 18.0和OriginPro 2015软件来进行数据处理、分析,用单因素方差分析(One-way ANOVA)及Duncan检验法($p < 0.05$)研究指标间的差异显著性水平。

在分析水质指标 COD_{cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP去除率和蚌壳、蚌肉成分指标C、N、P含量时,为保持两种指标的统一性,在数据处理、分析时,统筹考虑元素的质量比和相应检测方法,均统一换算成以元素质量浓度或质量计算的对应值。

2 结果与分析

2.1 三角帆蚌壳长、壳高、壳宽的时间变化特征

从图2可以看出,三角帆蚌壳长、壳高、壳宽3个生长指标随时间的变化呈不同程度的增长趋势。在1~6月龄、11~12月龄,三角帆蚌3个生长指标尤其是壳长和壳高增长趋势相对缓慢,7~10月龄增长趋势相对较快,可以看出7~10月龄主要为三角帆蚌生长期,各生长指标生长较快,其他月龄各指标生长较为缓慢。直至试验周期结束,三角帆蚌壳长共增长12.61 cm,壳长增长率为79.01%;壳高共增长8.58 cm,壳高增长率为75.88%;壳宽共增长2.28 cm,壳宽增长率为70.01%。

2.2 三角帆蚌体质量的时间变化特征

从附录表S1、图3可以看出,三角帆蚌生长体质量随时间的变化呈不同程度的增长趋势。其中三角帆蚌增长率在1月龄、11~12月龄相对偏低,增长率最低值出现在12月龄,增长率为4.24%;2~10月龄增长率数值相比较,且7~10月龄与其他月龄相比增长率差异明显,增长率最高值出现在9月龄,增长率为53.30%。以上数据进一步说明了三角帆蚌的生长受月龄影响较大,7~10月龄主要为三角帆蚌的生长期,尤其是在9月龄,三角帆蚌生长速度快,生长体质量增加明显,与张根芳等^[7]研究结果较为一致。

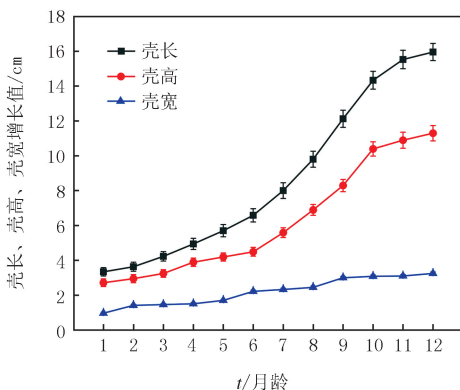


图2 三角帆蚌壳长、壳高、壳宽的累积生长趋势

Fig.2 Cumulative growth trends of shell length, shell height and shell width of *Hyriopsis cumingii*

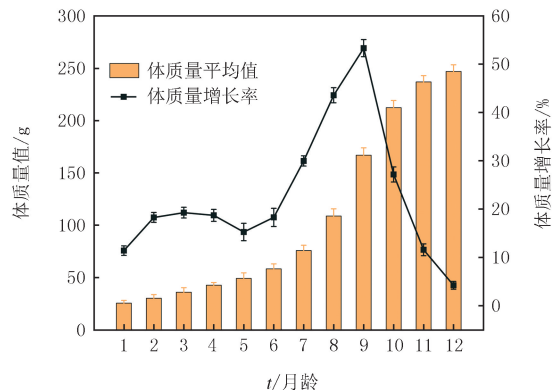


图3 三角帆蚌体质量随时间的变化趋势

Fig.3 Trends in changes of the body weight of *Hyriopsis cumingii* over time

2.3 水体水质的时间变化特征

从图4可以看出,污水处理厂尾水出水 COD_{cr} 均能稳定达到地表Ⅳ类水标准,1~12月龄 COD_{cr} 平均去除率为48.2%,平均出水质量浓度为25.10 mg/L.1~12月龄 COD_{cr} 去除率随时间变化总体呈上下波动趋势,其中,1~3月龄 COD_{cr} 去除率呈先下降后上升趋势,4~6月龄去除率波动幅度较小,7~10月龄的去除率上升趋势明显,11~12月龄去除率呈下降趋势.9月龄 COD_{cr} 去除率最高,达到59.2%,出水质量浓度为20.70 mg/L;2月龄去除率最低,为37.3%,出水质量浓度为27.70 mg/L,9月龄 COD_{cr} 去除率是2月龄的1.59倍.

从图5可以看出,污水处理厂尾水出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 均能稳定达到地表Ⅳ类水标准,1~12月龄 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均去除率为56.2%,平均出水质量浓度为1.19 mg/L.总体来看,1~12月龄 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率随时间变化呈先上升后下降趋势,1~6月龄、11~12月龄去除率相对较低,7~10月龄去除率相对较高,其中9月龄 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率最高,达到75.8%,出水质量浓度为0.82 mg/L;2月龄去除率最低,为35.3%,出水质量浓度为1.44 mg/L,9月龄 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率是2月龄的2.15倍.

从图6可以看出,污水处理厂尾水出水 TP 均能稳定达到地表Ⅳ类水标准,1~12月龄 TP 平均去除率为63.9%,平均出水质量浓度为0.21 mg/L.总体来看,1~12月龄 TP 去除率随时间变化总体呈上下波动趋势,其中,1~3月龄 TP 去除率呈现先下降后上升趋势,4~6月龄去除率波动幅度较小,7~10月龄的去除率上升趋势明显,11~12月龄去除率呈下降趋势.9月龄 TP 去除率最高,达到75.7%,出水质量浓度为0.15 mg/L;2月龄去除率最低,为52.8%,出水质量浓度为0.22 mg/L,9月龄 TP 去除率是2月龄的1.43倍.

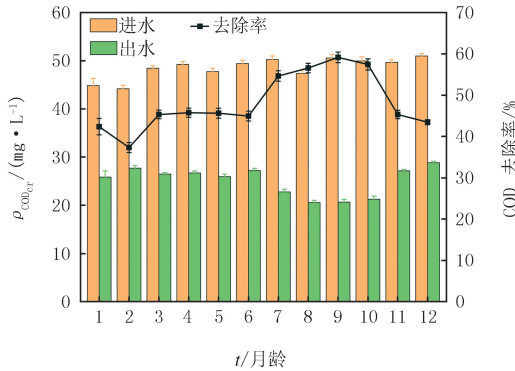


图4 尾水 COD_{cr} 随时间的变化趋势

Fig.4 Trends in COD_{cr} changes over time in tail water

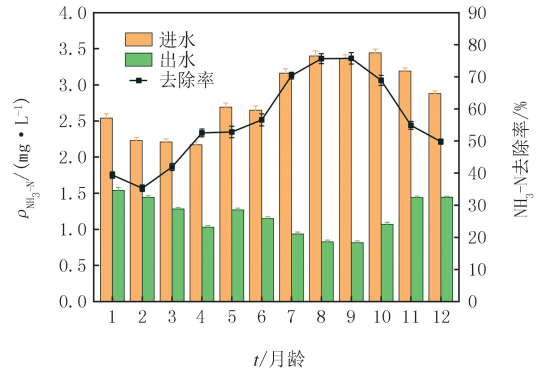


图5 尾水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 随时间的变化趋势

Fig.5 Trends in $\text{NH}_3\text{-N}$ changes over time in tail water

通过以上分析可知,三角帆蚌对 COD_{cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 净化效果均能稳定达到地表Ⅳ类水标准.试验初期三角帆蚌对水质净化效果呈波动趋势,分析主要是与三角帆蚌适应试验环境的过程有关,试验初期时三角帆蚌还处于适应阶段,其对试验水体的吸入与排出等生理活动还不稳定.此外,对比其他月龄,7~10月龄三角帆蚌对水质净化效果有明显的上升趋势,这与三角帆蚌7~10月龄时生长较快的生物学特性相关,7~10月龄三角帆蚌生长正处于青中年期,新陈代谢快,滤水率相对其他月龄提高很多,因而水质净化效率在7~10月龄相对较高,从而达到水质净化较好的效果.

2.4 三角帆蚌对水体污染物的削减

2.4.1 三角帆蚌生长率变化对水体污染物的削减

根据相关研究,壳长与三角帆蚌体质量的相关性最强^[8],因此三角帆蚌生长率以壳长为计算主体.从图7

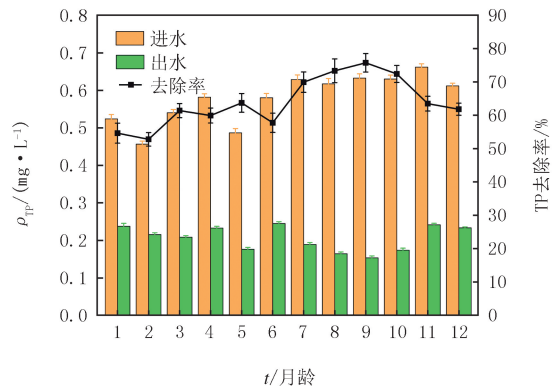


图6 尾水TP随时间的变化趋势

Fig.6 Trends in TP changes over time in tail water

可以看出,三角帆蚌生长率9月龄生长率最高,达到23.70%,12月龄生长率最低,为2.77%。 COD_{cr} 、TP月削减量在9月龄达到最高值,削减量分别为215.00 g、3.45 g, $\text{NH}_3\text{-N}$ 在8月份达到最高值,削减量为19.10 g; COD_{cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP月削减量均为2月龄最低,削减量分别为111.00 g、5.29 g、1.62 g。通过以上数据分析可知,三角帆蚌生长率与污染物月削减量变化趋势较为一致,7~10月龄三角帆蚌的生长率较高,与之对应地,污染物月削减量也较高^[9]。分析原因,7~10月龄污染物月削减量增加与三角帆蚌在青中年时生长较快的生物学特性相一致,这一时期三角帆蚌的净化效率提高,污染物月削减量增加。

2.4.2 三角帆蚌体质量变化对水体污染物的削减

从表1可以看出,三角帆蚌体质量月增长量与污染物月削减量变化趋势大体一致,7~10月龄体质量月增长量相较其他月龄增长较多,与之对应地, COD_{cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP月削减量在7~10月龄也相对较高。9月龄三角帆蚌体质量月增长量达到58.00 g,为全月龄最高;1月龄体质量月增长量最低,月增长量为2.63 g。 COD_{cr} 、TP月削减量在9月龄均达到最高, $\text{NH}_3\text{-N}$ 在8月龄达到最高; COD_{cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP月削减量在2月龄均出现最低值。

从表1、附录表S2、图8可以看出,三角帆蚌体质量累积增长值呈逐步上升趋势,1~12月龄体质量累积共增长约224 g,其中,1~6月龄体质量累积增长变化幅度较小,总体呈缓慢上升趋势,7~12月龄体质量累积增长变化幅度较大,尤其是7~10月龄,体质量累积增长值有明显的上升趋势。污染物累积削减量累积增长值呈逐步上升趋势,12月龄时 COD_{cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP累积削减量分别约为2 053 g、144 g、33 g,其中,在7~10月龄 COD_{cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP累积削减量均呈一定的上升趋势。

通过三角帆蚌全年体质量累计增长值及污染物累计削减量计算可知,三角帆蚌体质量每生长1 kg所能削减的 COD_{cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP污染量分别为91.69 g、6.42 g、1.46 g。此外,通过污染物月削减量与体质量月增长量比值(表1)、体质量累积增长量与污染物累积削减量变化趋势(图8)可以看出,1~6月龄由于体质量增长量初始基数小且增长速率慢,而污染物削减量在1~6月龄维持较高值且总体变化幅度较小,导致两者的比值在1~6月龄呈现较高值,其中,三角帆蚌体质量增长量与 COD_{cr} 削减量之间比值最大。1~6月龄三角帆蚌生长虽总体处于幼年时期,仍具备一定的净化功能,此时受环境适应性、新陈代谢慢等因素影响,体质量增长速率相对缓慢;7~10月龄体质量增长速率快,体质量增长量基数大,而污染物削减量在7~10月龄增长值虽有一定的上升趋势但变化幅度波动仍相对较小,导致7~10月龄两者的比值呈现较低值,其中,三角帆蚌体质量增长量与 COD_{cr} 削减量之间比值仍最大。7~10月龄三角帆蚌进入青中年时期,新陈代谢大大加快,体质量增长明显。

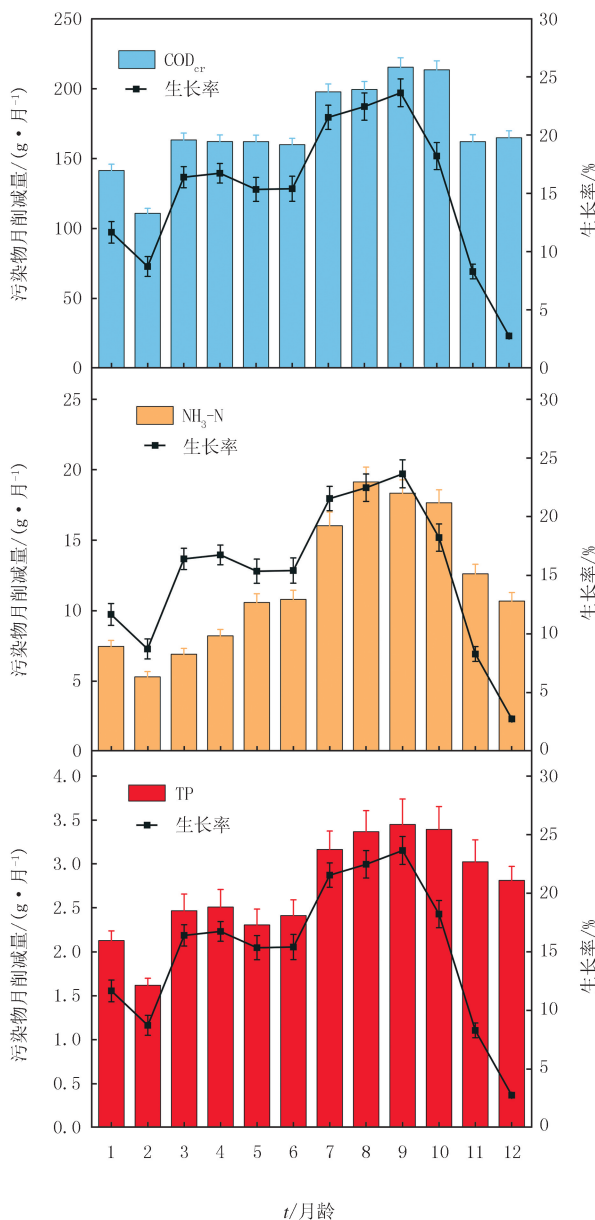


图7 三角帆蚌生长率与污染物月削减量变化趋势

Fig. 7 Trends in changes of growth rate of *Hyriopsis cumingii* and pollutant reduction monthly

表 1 三角帆蚌体质量月增长量与污染物月削减量的变化

Tab.1 Changes in the increase of the body weight of *Hyriopsis cumingii* and the reduction in pollutants monthly

指标	1月龄	2月龄	3月龄	4月龄	5月龄	6月龄	
体质量月增长量/g	2.63±0.16d	4.62±0.25d	5.82±0.33d	6.73±0.42d	6.53±0.39d	9.02±0.48d	
污染物月削减量/g	COD _{cr}	141.00±4.58d	111.00±4.52e	164.00±5.23c	162.00±4.98c	162.00±4.85c	160.00±4.52c
	NH ₃ -N	7.45±0.43c	5.29±0.49c	6.90±0.52c	8.21±0.63c	10.60±0.69a	10.80±0.72a
	TP	2.13±0.11c	1.62±0.09d	2.47±0.16c	2.51±0.18c	2.31±0.12c	2.41±0.15c
月削减量/月增长量	COD _{cr}	53.80a	24.00b	28.10b	24.10b	24.80b	17.70c
	NH ₃ -N	2.83a	1.15b	1.19b	1.22b	1.62b	1.20b
	TP	0.81a	0.35b	0.42b	0.37b	0.35b	0.27b

指标	7月龄	8月龄	9月龄	10月龄	11月龄	12月龄	
体质量月增长量/g	17.50±0.65d	33.00±1.45b	58.00±2.39a	45.40±2.13b	24.60±1.22c	10.00±0.53d	
污染物月削减量/g	COD _{cr}	198.00±6.31b	199.00±6.02b	215.00±6.95a	214.00±6.88a	162.00±5.10c	165.00±5.23c
	NH ₃ -N	16.00±0.92a	19.10±0.95a	18.30±0.88a	17.70±0.82a	12.60±0.65a	10.70±0.63a
	TP	3.16±0.22b	3.37±0.25a	3.45±0.28a	3.39±0.12a	3.02±0.19b	2.81±0.17b
月削减量/月增长量	COD _{cr}	11.30d	6.03d	3.71d	4.71d	6.59d	16.40c
	NH ₃ -N	0.92b	0.58c	0.32c	0.39c	0.51c	1.06b
	TP	0.18c	0.10c	0.06c	0.07c	0.12c	0.28b

注：“±”表示平均值±标准差，同一行不同英文字母表示不同处理组的差异性(相同字母表示差异不显著 $p>0.05$ ，不同字母表示差异显著 $p<0.05$)。下表同。

2.5 三角帆蚌对水体污染物净化机理的研究

从表 2 数据中可以看出,三角帆蚌蚌壳与蚌肉均含一定量的 C、N、P 物质,其中 N 含量最多,蚌壳与蚌肉含 N 量分别为 7.250%、0.580%;P 含量最少,蚌壳与蚌肉含 P 量分别为 0.232%、0.069%。通过以上数据分析可知,三角帆蚌通过滤食作用吸收一定量的 C、N、P 物质,并将这些物质转化为自身生长的营养元素,一方面实现自身的生长,另一方面实现水质的深度净化^[10]。

通过图 9 三角帆蚌净化机理图可以发现,三角帆蚌具有发达的滤食组织系统,其依靠鳃、食道等滤食器官对浮游动植物及有机碎屑等进行高强度滤食,吸收转化为贝壳和软组织生长元素,从而直接或者间接吸收水体中的 C、N、P 等物质,水体氮磷营养盐的食物链过程为:氮磷营养盐→浮游动植物+有机碎屑→三角帆蚌→同化,在这一转化过程中可极大地提高水体透明度、净化并改善水质^[11]。除此之外,三角帆蚌还增加了水体生态系统中功能微生物的丰度,有助于强化系统的脱氮除磷效能^[12]。

表 2 三角帆蚌的蚌肉、蚌壳含 C、N、P 量

Tab. 2 Contents of C, N and P in *Hyriopsis cumingii* meat and shell

测定部位	C/%	N/%	P/%
蚌壳	6.340±0.200a	7.250±0.500a	0.232±0.030b
蚌肉	0.421±0.050a	0.580±0.090a	0.069±0.001b

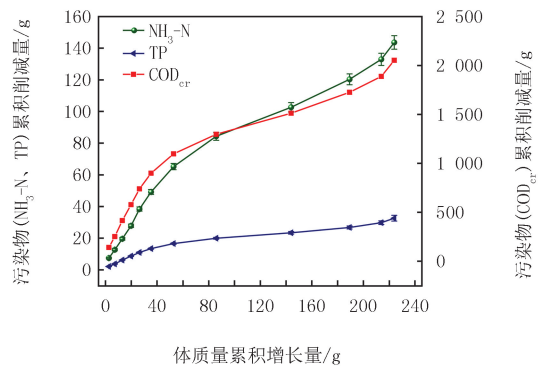


图 8 三角帆蚌体质量累积增长量与污染物累积削减量变化趋势

Fig. 8 Trends in changes of cumulative growth of the body weight of *Hyriopsis cumingii* and cumulative reduction in pollutants

2.6 讨论

目前,大部分城市污水处理厂出水能够达到一级 A 排放标准,但随着环境污染物排放标准的日趋严格,污水处理厂尾水的深度处理也在逐渐受到关注.本研究主要是对城市污水处理厂尾水进行进一步的处理,通过对比城市污水处理厂尾水直接排入地表水体与尾水经处理后排入地表水体,探究三角帆蚌在尾水提标和实际应用中的可行性.通过查阅文献,将本研究与人工湿地对污水处理厂尾水 C、N、P 的去除效果进行对比.段田莉等^[13]在处理城市污水处理厂尾水时,采用了人工湿地+生态塘组合工艺,该工艺对 COD、NH₃-N、TP 平均去除率分别为 59.2%、81.1%、55.8%,出水水质可达地表Ⅳ类水标准,具有出水稳定、运行费用较低等优点.但人工湿地和生态塘在冬季运行时,要定期收割植物和

清理枯死植物残体,否则出水浓度还会出现反弹.陶炳池等^[14]以杭州市某城镇污水处理厂尾水作为试验进水,采用大孔树脂吸附后 COD、NH₃-N、TP 出水平均质量浓度为 5.89、0.12、0.11 mg/L,相应的去除率分别为 43.0%、53.9%、44.4%;该中试试验连续运行情况下,水处理成本为 1.34 元/t.王翔等^[2]采用强化澄清调节池+微曝气垂直潜流人工湿地+水平潜流人工湿地+表面流人工湿地+氧化塘组合工艺来处理城市污水处理厂尾水,实际运行结果表明,该组合工艺对 COD、NH₃-N、TP 平均去除率分别为 47.4%、72.6%、45.8%.复合型人工湿地对尾水具有较好的处理效果,出水稳定且对污染物浓度变化有一定的抗冲击能力,但占地面积较大,且建设费用和运维费用较高.李美玉等^[15]同样采用人工湿地对河南某污水处理厂尾水进行水质提升, COD、NH₃-N 和 TP 的平均去除效率分别为 45.9%、72.7%和 52.1%.本研究以三角帆蚌对城镇污水处理厂尾水进行处理,使得水体水质可从一级 A 排放标准提高至地表Ⅳ类水标准. COD、NH₃-N、TP 的平均去除率分别为 48.2%、56.2%、63.9%.相比较人工湿地而言,三角帆蚌处理尾水时,全年出水水质稳定、高效.其次,冬季时,植物枯萎会降低人工湿地对尾水水质净化效果,难以保证出水稳定达到地表Ⅳ类水;本研究工艺受季节影响较小,可保证出水稳定达到地表Ⅳ类水标准.再次,人工湿地的植物需要定期收割、清理,应用时维护成本较高;而蚌类提取频次很低,一般在幼蚌长至成蚌并开始老化后(一般 3~5 a)才需提取,并补放幼蚌,应用时维护成本较低,同时成贝可进行增殖放流,强化水生生物资源的保护,改善水域生态环境.此外,成贝富含钙和蛋白质,还可用于饲料加工.三角帆蚌是淡水珍珠育珠主力军,年产量超过淡水珍珠年产量的 80%.在进一步降低污水处理成本和后期维护成本的基础上,还可实现收益的增长.整体而言,可降低运维成本的 50%.

在实际设计贝类立体净化系统时,为保证能有效复制并推广本研究效果甚至更好的效果,需从以下几点考虑:(1)选择活力良好的三角帆蚌.投放前优选生长线完整、分布有规律,蚌体整体形状完好,外观色泽新鲜;(2)三角帆蚌运输过程中需保湿保温.湿度以湿润为宜,温度控制在 5~10 ℃为宜;(3)三角帆蚌摆放时要分散,不得挤压,不得叠堆;(4)需满足水中足够的溶解氧含量.以 $\rho_{DO} \geq 3$ mg/L 为宜,溶解氧不足时需人工及时增氧;(5)污水厂尾水消毒剂的投加量需严格控制.以尾水余氯含量 ≤ 0.01 mg/L 为宜,余氯过量时需尾水进入贝类立体净化系统前采用人工曝气除余氯;(6)冬季时水温控制.可通过增加人工曝气适当提高水体温度,以 5~10 ℃为宜.

3 结论

三角帆蚌在城镇污水处理厂尾水中能够稳定、健康生长,在 7~10 月龄时其生长率及体质量月增长量均呈现较高值,其中,9 月龄生长率及体质量月增长量均达到最高值,分别为 23.70%和 58.00 g.三角帆蚌对城

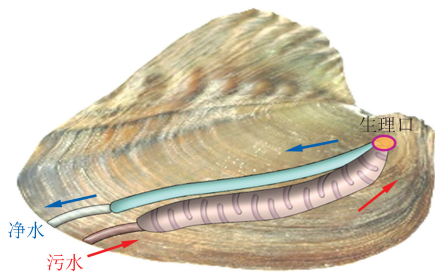


图9 三角帆蚌体内水体净化机理

Fig.9 Water purification mechanism of *Hyriopsis cumingii*

镇污水处理厂尾水具有较好的深度净化效果, COD_{cr}、NH₃-N 和 TP 出水净化效果均能稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类标准, 平均去除率分别为 48.2%、56.2%和 63.9%。基于本研究, 三角帆蚌体质量每增长 1 kg 即可分别削减尾水中 91.69 g、6.42 g 和 1.46 g 的 COD_{cr}、NH₃-N 和 TP, 可实现水体污染物资源化利用。因此, 三角帆蚌的立体净化系统, 既可深度净化尾水水质, 实现污染资源化, 又可通过贝类吸收转化形成生态产品, 实现资源产业化, 最终为城镇污水处理厂尾水深度净化提供科学技术依据。

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2023.09.19.0003)。

参 考 文 献

- [1] 黄荣敏, 陈建, 叶挺, 等. 组合型人工湿地在湿地公园中的应用: 以芜湖市为例[J]. 给水排水, 2022, 58(S1): 246-250.
HUANG R M, CHEN J, YE T, et al. Application of combined constructed wetland in wetland park: a case study of Wuhu city[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 58(S1): 246-250.
- [2] 王翔, 朱召军, 尹敏敏, 等. 组合人工湿地用于城市污水处理厂尾水深度处理[J]. 中国给水排水, 2020, 36(6): 97-101.
WANG X, ZHU Z J, YIN M M, et al. Application of hybrid constructed wetland in tail water treatment of municipal sewage plant[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(6): 97-101.
- [3] TANG X Q, WANG T, YANG Q L, et al. Potential benefits of *Bacillus subtilis*-mediated bioflocs in supplementary feeding on triangle sail mussels *Hyriopsis cumingii*: a pilot study of fluorescence-labeled floc-forming bacteria[J]. Aquaculture Reports, 2024, 34: 101904.
- [4] 李乾岗, 魏婷, 张光明, 等. 三角帆蚌对白洋淀底泥氮磷释放及微生物的影响探究[J]. 环境科学研究, 2020, 33(10): 2318-2325.
LI Q G, WEI T, ZHANG G M, et al. Effects of *Hyriopsis cumingii* on nitrogen and phosphorus releases from sediment and on wetland microorganisms in Baiyangdian wetland[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(10): 2318-2325.
- [5] SUN Y, GUO K F, YU X B, et al. Molecular and biochemical effects on metabolism and immunity of *Hyriopsis cumingii* fed with four different microalgae[J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 970781.
- [6] 储忝江, 郭炜. 三角帆蚌放养方式对富营养化水体的净化效果[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(13): 51-53.
CHU T J, GUO W. Purification effect of eutrophic water by *Hyriopsis cumingii*'s stocking mode[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(13): 51-53.
- [7] 张根芳, 张文府, 罗雨, 等. 不同月龄三角帆蚌形态性状及体重的主成分与判别分析[J]. 淡水渔业, 2018, 48(6): 101-107.
ZHANG G F, ZHANG W F, LUO Y, et al. Principal component and discriminant analysis of traits of *Hyriopsis cumingii* in different months age[J]. Freshwater Fisheries, 2018, 48(6): 101-107.
- [8] 张根芳, 张文府, 罗雨, 等. 1 龄三角帆蚌壳形态性状对体质量的通径分析[J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(6): 755-759.
ZHANG G F, ZHANG W F, LUO Y, et al. Path analysis of morphometrical traits on body weight of one-year old freshwater mussel *Hyriopsis cumingii*[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2018, 33(6): 755-759.
- [9] HU B J, ZHOU J, DONG J Y, et al. Association of algae diversity and *Hyriopsis schlegelii* growth in mixed fish-mussel aquaculture[J]. Algal Research, 2022, 65: 102736.
- [10] 周志金, 沈乃峰. 三角帆蚌的水质净化作用及经济利用[J]. 渔业致富指南, 2019(7): 33-34.
ZHOU Z J, SHEN N F. Water purification and economic utilization of *Hyriopsis cumingii*[J]. Fishery Guide to Be Rich, 2019(7): 33-34.
- [11] 李萍. 滤食性贝类、沉水植物及其共存对水体富营养化的影响[D]. 广州: 暨南大学, 2016.
LI P. Effects of Filter-feeding Mussel, Submerged Macrophyte and Their Coexistence on Eutrophication[D]. Guangzhou: Jinan University, 2016.
- [12] 孙家君, 李乾岗, 魏婷, 等. 三角帆蚌生物扰动对白洋淀湿地水环境影响探究[J]. 环境科技, 2021, 34(1): 8-13.
SUN J J, LI Q G, WEI T, et al. Effect of *Hyriopsis cumingii* on water environment of Baiyangdian wetland[J]. Environmental Science and Technology, 2021, 34(1): 8-13.
- [13] 段田莉, 成功, 郑媛媛, 等. 高效垂直流人工湿地+多级生态塘深度处理污水厂尾水[J]. 环境工程学报, 2017, 11(11): 5828-5835.
DUAN T L, CHENG G, ZHENG Y Y, et al. Advanced treatment of tail water from sewage plant by high-efficiency vertical flow constructed wetland-multistage ecological ponds[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(11): 5828-5835.
- [14] 陶炳池, 黄慧敏, 王宇芳, 等. 大孔树脂对污水处理厂尾水提标及再生液的高效脱氮处理中试研究[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(8): 1076-1079.
TAO B C, HUANG H M, WANG Y F, et al. Pilot-scale research on macroporous resin to raise standard of tail water from sewage treatment plant and efficient nitrogen removal of regenerated resin desorption solution[J]. Environmental Pollution & Control, 2023, 45(8): 1076-1079.
- [15] 李美玉, 李婉, 魏佳明, 等. 人工湿地在污水处理厂尾水水质净化中的应用[J]. 环境生态学, 2022, 4(6): 54-58.

LI M Y, LI W, WEI J M, et al. Application of constructed wetland system in purification of tail water quality of sewage treatment plant [J]. *Environmental Ecology*, 2022, 4(6): 54-58.

Study on the deep purification effect and mechanism of tail water in urban sewage treatment plants by *Hyriopsis cumingii*

Ning Jun¹, Dong Bei¹, Xie Kang¹, Mu Yunyang¹, Xiang Xianling²

(1. Anhui Shuiyun Environment Protection Co., Ltd., Wuhu 241002, China; 2. School of Ecology and Environment, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China)

Abstract: By using the shellfish *Hyriopsis cumingii* (*H. cumingii*), a three-dimensional purification system was designed for the tail water of an urban sewage treatment plants to explore the removal rate and mechanism of pollutants during the purification. It was shown that the purification effect of COD_{cr} (chemical oxygen demand), NH₃-N (ammonia nitrogen) and TP (total phosphorus) in tail water of urban sewage treatment plants by *H. cumingii* can stably meet the level IV criteria of Environmental Quality Standard for Surface Water (GB 3838—2002), and the average removal rates of COD_{cr}, NH₃-N and TP were 48.2%, 56.2% and 63.9%, respectively. The amount of pollutants COD_{cr}, NH₃-N and TP can be respectively reduced by 91.69 g, 6.42 g and 1.46 g, for 1 kg fresh weight of the body weight growth of the *H. cumingii*. The *H. cumingii* mainly absorbs C, N, P and other substances in the tail water, and transforms into shell and soft tissue through the well-developed filter-feeding system. On the one hand, the water quality of tail water can be further improved to be deeply purified, on the other hand, the shellfish can be treated as ecological products, bringing about economic benefits. Furthermore, it provides scientific and technical support for the application of tail water deep purification in urban sewage treatment plants.

Keywords: tail water; urban sewage treatment plants; shellfish three-dimensional purification system; *Hyriopsis cumingii*; deep purification

[责任编辑 赵晓华 陈留院]

附 录

表 S1 三角帆蚌体质量的时间变化特征

Tab. S1 Temporal variation characteristics of the body weight of *Hyriopsis cumingii*

指标	1 月龄	2 月龄	3 月龄	4 月龄	5 月龄	6 月龄
体质量平均值/g	25.60±1.10e	30.20±0.65e	36.10±1.10e	42.80±1.21d	49.30±1.46d	58.30±1.60d
增长率/%	11.40±0.99d	18.30±1.02c	19.30±1.11c	18.70±1.24c	15.30±1.80 cd	18.30±1.88c
指标	7 月龄	8 月龄	9 月龄	10 月龄	11 月龄	12 月龄
体质量平均值/g	75.80±1.33d	109.00±1.24c	167.00±1.63b	212.00±1.74 ab	237.00±1.59a	247.00±1.14a
增长率/%	30.00±1.06c	43.60±1.56a	53.30±1.78a	27.20±1.52b	11.60±1.22d	4.24 ±0.81e

注：“±”表示平均值±标准差，同一行不同英文字母表示不同处理组的差异性(相同字母表示差异不显著 $p > 0.05$ ，不同字母表示差异显著 $p < 0.05$)。下表同。

表 S2 三角帆蚌体质量与污染物累积削减量的变化

Tab. S2 Changes of the body weight of *Hyriopsis cumingii* and cumulative reduction in pollutants

指标		1 月龄	2 月龄	3 月龄	4 月龄	5 月龄	6 月龄
体质量平均值/g		25.60±1.10e	30.20±0.65e	36.10±1.10e	42.80±1.21d	49.30±1.46d	58.30±1.60d
污染物累积削减量/g	COD _{cr}	141.00±4.58g	252.00±7.63g	416.00±10.98f	578.00±12.35f	740.00±13.90e	900.00±14.85e
	NH ₃ -N	7.45±0.43g	12.70±0.68g	19.60±0.85f	27.80±1.05f	38.40±1.32c	49.20±1.55e
	TP	2.13±0.11g	3.75±0.15g	6.22±0.19f	8.72±0.23f	11.00±0.31e	13.40±0.38e
指标		7 月龄	8 月龄	9 月龄	10 月龄	11 月龄	12 月龄
体质量平均值/g		75.80±1.33d	109.00±1.24c	167.00±1.63b	212.00±1.74ab	237.00±1.59a	247.00±1.14a
污染物累积削减量/g	COD _{cr}	1 098.00±16.68d	1 297.00±17.55c	1 512.00±19.70b	1 726.00±20.95a	1 888.00±21.98a	2 053.00±24.35a
	NH ₃ -N	65.20±1.98e	84.40±2.54d	103.00±2.95c	120.00±3.43b	133.00±3.85a	144.00±4.26a
	TP	16.60±0.45d	20.00±0.60d	23.40±0.85c	26.80±0.96b	29.80±1.15a	32.70±1.81a