

蔬菜和水鳖对泥质与沙质底养殖水体的净化效果研究

董贯仓^{1,2}, 杜兴华^{1,2}, 王亚楠^{1,2}, 孙鲁峰^{1,2}, 冷春梅^{1,2}, 谭圣延³

(1 山东省淡水渔业研究院, 山东 济南 250013;

2 山东省淡水水产遗传育种重点实验室, 山东 济南 250117;

3 济宁利民渔业专业合作社, 山东 济宁 272061)

摘要:为解决淡水池塘集约化投饲养殖水体的营养物质富集问题,采用围隔试验方法,研究了蔬菜(*Ipomoea aquatica*)和水鳖(*Hydrocharis dubia*)两种植物对泥质和沙质两种底质养殖水体的净化效果。研究发现:泥质底水体的氨氮、亚硝酸盐氮和总磷(TP)自净去除率显著低于沙质底,而泥质底水体的高锰酸盐指数(COD_{Mn})自净去除率显著高于沙质底($P<0.05$);不同底质水体中,两种植物对水体氨氮、亚硝酸盐氮、总氮(TN)和COD_{Mn}的去除率显著高于相应对照组($P<0.05$);12.5%与25.0%的水鳖处理对营养物质的去除率基本无显著差异($P>0.05$),12.5%的蔬菜与水鳖处理组仅在泥质底水体中水鳖(MSBI)对氨氮的去除率显著小于蔬菜(MKC)以及MSBI对亚硝酸盐氮的去除率显著高于MKC($P<0.05$);泥质底水体中植物处理对氨氮、亚硝酸盐氮、TN、TP和COD_{Mn}的最大去除率分别为60.07%、54.78%、52.68%、23.96%和47.32%,沙质底分别为72.43%、83.54%、57.20%、37.07%和40.75%;此外,试验末植物处理组水体的所测营养物质均存在一定程度的上升。沙质底水体中氨氮、亚硝酸盐氮和TP等营养物质波动较大且自净去除率高于泥质底;在泥质和沙质底水体中蔬菜和鳖浮床均具有显著净化作用,本地种水鳖可作为生态浮床的潜力净水植物;浮床应用过程中应加强收割与收获等管理,以避免水体二次污染。

关键词:池塘养殖;池塘底质;水生植物;水质净化

中图分类号:S949

文献标志码:A

文章编号:1007-9580(2020)02-033-09

淡水池塘养殖是中国传统的养殖模式,也是目前主要的渔业生产方式。过度追求高产往往引起氮、磷等营养物质积累而造成水体恶化乃至病害发生,反而导致养殖效益下降并影响水产品品质等弊端,并且尾水排出还可能加剧区域水体富营养化^[1]。孙云飞等^[2]研究发现,不同草鱼混养池塘中饵料占氮磷总输入的85.54%~93.38%和82.60%~84.26%,而在氮的输出中养殖生物收获、底泥积累和水层积累分别占62.80%~77.15%、15.19%~27.60%和5.04%~7.71%,在磷的输出中底泥积累、水层积累和养殖生物收获则分别占76.46%~80.04%、13.04%~15.14%和4.09%~9.79%。同时,底泥又是水域生态系统的“源”^[3],其氮磷负荷可通过沉积物-上覆水界面迁移转化而影响养殖水体质量。因而,控制养殖

污染并进行水环境修复,是实现渔业健康发展的重要保障。目前,池塘养殖水体的净化处理主要有物理、化学和生物方法,其中生物净化作为绿色环保的养殖尾水处理技术,被广泛关注并应用于水环境修复^[4-5]。

植物浮床系统作为一种较新的水体原位修复和控制技术,已在池塘养殖水体净化中得到应用。其利用大型水生植物在生长和营养繁殖过程中对水体中氮、磷的较强吸收和固定能力^[6-7],通过收割将营养物质带出水体以实现修复水体系统的目的^[8],适宜的水生植物选择则成为影响净化效果的关键因素。已有研究表明,蔬菜(*Ipomoea aquatica*)不仅能实现对养殖水体的净化,还具有一定的食用和经济价值^[8-11]。水鳖(*Hydrocharis dubia*)分布广泛,环境适应能力较强且为草食性鱼类的良好饵

收稿日期:2019-12-10

基金项目:山东省农业重大应用技术创新项目“淡水池塘生态养殖关键技术研究”“内陆水产绿色养殖技术研究与示范”(SD2019YY008);山东省重点研发计划(2019GSF109111);山东省现代农业产业体系鱼类创新团队环境调控岗项目(SDAIT-12-07)

作者简介:董贯仓(1980—),男,副研究员,博士,研究方向:水产增养殖、渔业资源与环境评价等。E-mail:dgc3869676@163.com

料,但将其用于养殖水体净化鲜见报道。同时,底质作为池塘系统的重要组成部分,既是水体各种颗粒性物质的沉积场所,也是水体营养物质的重要来源^[2-3,12]。而不同类型的底质,由于其物理特性及其对营养物质的储存和释放的差异,对养殖环境及养殖生物的影响不同^[13-14]。

本研究针对泥质和沙质两种底质养殖池塘,通过对比分析本土水鳖与菹菜对养殖水体的净化效果,以期改善池塘养殖环境及构建渔业健康养殖模式提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于山东省济宁市任城区2处0.67 hm²的养殖池塘中进行,主养草鱼并套养少量鲤、鲢和鳊鱼。两处池塘分别设置8个4 m×4 m×2.5 m的双面涂塑高密度聚乙烯编织布围隔^[15],间距1 m。试验期间水深1.5~1.7 m。试验用菹菜购自市场,水鳖采自附近水体,试验前1周先以带网浮床暂养于试验池塘。

1.2 试验设计

试验自2018年9月15日开始至10月9日结束,共历时24 d。试验设置空白对照(MT和ST)、菹菜浮床(KC)、低覆盖度水鳖浮床(SBI)和高覆盖度水鳖浮床(SBII)等组别,并选择泥质和沙质等2种底质池塘(表1)。水生植物密布在1 m×1 m带双层网的PVC管浮床中并设置于试

验围隔内。

1.3 样品采集与测定

试验期间,于水生植物放置后即采集初始水样,随后于2、4、8、16和24 d采集每试验围隔的表层水样进行水质分析。水质监测指标中,水温(WT)、溶氧(DO)、pH采用YSI-MP556型水质仪现场测定,其他指标如氨氮(NH₄⁺-N)、亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)、总氮(TN)、总磷(TP)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})主要参照《水和废水监测方法》^[16]中的方法分析测定。同时,参照《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)^[17]对水质状况进行分析与评价。

1.4 数据处理与分析

数据分析使用Office Excel 2010软件、单因素方差分析(ANOVA)及Duncan多重比较采用SPSS 21.0软件,并以 $P<0.05$ 作为差异显著性水平。

2 结果与分析

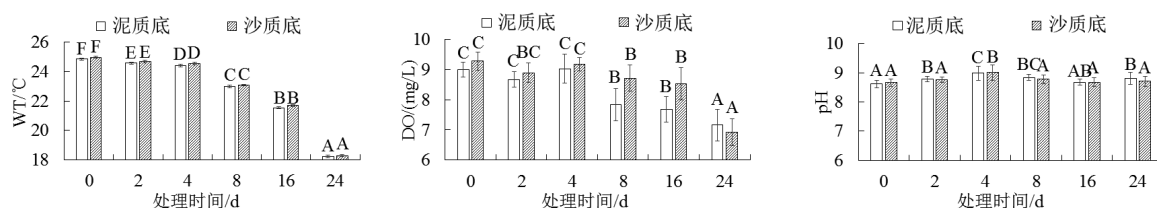
2.1 水体理化指标变化

试验期间,水体水温均呈显著下降趋势($P<0.05$,图1),其中泥质底与沙质底水温分别为18.1~24.9℃和18.2~25.1℃,相互无显著差异($P>0.05$)。两种底质水体的DO和pH分别于6.43~9.87 mg/L和8.33~9.34及6.32~9.54 mg/L和8.36~9.47间波动,相互亦基本无显著差异($P>0.05$)。

表1 不同试验处理水生植物浮床的设置情况

Tab. 1 Setting of floating beds of aquatic macrophytes subject to different tests

试验处理	泥质底养殖池塘				沙质底养殖池塘			
	对照(MT)	低覆盖度水鳖浮床(MSBI)	高覆盖度水鳖浮床(MSBII)	菹菜浮床(MKC)	对照(ST)	低覆盖度水鳖浮床(SSBI)	高覆盖度水鳖浮床(SSBII)	菹菜浮床(SKC)
植物种类	-	水鳖	水鳖	菹菜	-	水鳖	水鳖	菹菜
覆盖面积/%	0.0	12.5	25.0	12.5	0.0	12.5	25.0	12.5



注:不同大写字母表示处理不同时间差异显著组($P<0.05$)

图1 试验水体理化指标变化情况

Fig. 1 Variation of physical and chemical indexes of test water

2.2 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度变化

植物处理组对水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果均显著优于对照组 ($P<0.05$, 图2)。其中, 试验初泥质底水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度 ($2.22\pm0.05\text{ mg/L}$) 稍低于沙质底 ($2.39\pm0.15\text{ mg/L}$) 且均属地表水劣 V 类水质; 试验期间, 对照组水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度稍有波动, 整体呈下降趋势并均于 8 d 后显著降低, 到试验末期, ST 组对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 最大去除率 (44.19%) 显著大于 MT (29.08%) 并且 ST 处理后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度显著低于 MT 而分属 IV 类和 V 类水质; 同时, 不同植物处理组水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度均显著下降, 并于 16 d 降至最低而后稍上升。16 d 时 MSBI、MSBII 和 MKC 及 SSBI、SSBII 和 SKC 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 最大去除率分别为 56.27%、59.67% 和 64.29% 及 71.52%、76.73% 和 69.06%, 且各水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均达到地表水 III 类水质, 最大去除率中同底质内 MKC 显著优于 MSBI、SSBII 显著优于 SSKC, 而同植物处理内 SSBI 和 SSBII 分别显著优于 MSBI 和 MSBII ($P<0.05$), 之后各水体于 24 d 均有所上升并再次达到 IV 类水质; 此外, 各植物处理组对水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 最大去除率均显著高于对照组 ($P<0.05$)。

2.3 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度状况

植物处理组对水体 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的去除效果均显著优于对照组 ($P<0.05$, 图3)。其中, 试验初泥质底水体 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度 ($0.26\pm0.01\text{ mg/L}$) 显著低于沙质底 ($0.38\pm0.03\text{ mg/L}$, $P<0.05$); 试验期间, 泥质底对照组水体 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度先显著上升后下降, 而沙质底对照组水体 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 则逐渐下降, 至试验末 ST 处理对 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 最大去除率 (80.24%) 显著大于 MT (20.40%), 但其质量浓度相互无显著差异; 同时, 在不同植物处理组对水体 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度影响中, 泥质底水体均显著上升后于 16 d 降至最低而后稍上升, 沙质底水体则逐步下降至 16 d 最低而后稍上升, 16 d 时 MSBI、MSBII 和 MKC 及 SSBI、SSBII 和 SKC 对 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 最大去除率分别为 59.02%、63.14% 和 42.19% 及 84.31%、86.07% 和 80.24% 且各水体均达到地表水 III 类水质, 最大去除率中同底质内仅 MKC 显著优于 MSBI 和 MSBII, 而同植物处理内沙质底全部优于泥质底 ($P<0.05$), 之后各水体于 24 d 均

有所升高; 此外, 同底质内各植物处理组对水体 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 最大去除率均显著高于对照组 ($P<0.05$)。

2.4 TN 去除效果

植物处理组对水体 TN 的去除效果均显著优于对照组 ($P<0.05$, 图4)。其中, 试验初泥质底与沙质底水体 TN 质量浓度分别为 ($6.17\pm0.18\text{ mg/L}$ 和 $(6.22\pm0.12)\text{ mg/L}$, 均属地表水劣 V 类水质; 对照组水体 TN 质量浓度整体呈下降趋势, 泥质底于 24 d 及沙质底于 8 d 后显著低于 0 d ($P<0.05$), 至试验末 MT 和 ST 对水体 TN 最大去除率分别为 13.64% 和 18.43%, 但仍均属劣 V 类水质。同时, 不同植物处理组水体 TN 质量浓度均显著下降, 并于 16 d 降至最低而后稍上升, 16 d 时, MSBI、MSBII 和 MKC 及 SSBI、SSBII 和 SKC 对 TN 最大去除率分别为 51.70%、52.55% 和 53.79% 及 56.17%、59.90% 和 55.53%, 但仍全部属地表水劣 V 类水质, 最大去除率在同底质内各处理无显著差异 ($P>0.05$) 而同植物处理内仅 SSBII 显著优于 MSBII ($P<0.05$), 之后除 MSBI 外 TN 质量浓度均显著升高; 此外, 各植物处理组对水体 TN 最大去除率均显著高于对照组 ($P<0.05$)。

2.5 TP 去除效果

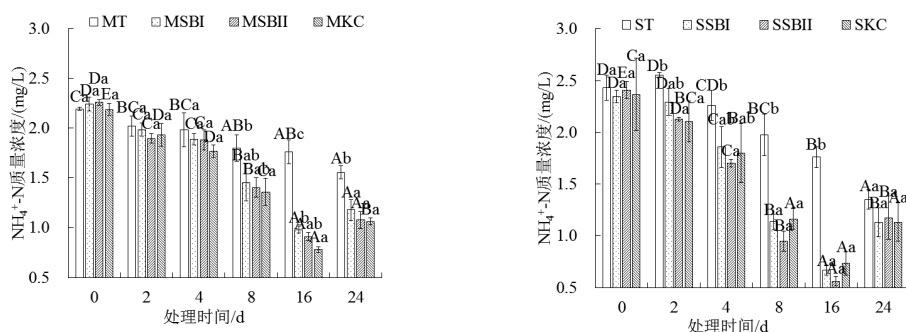
试验期间各水体 TP 质量浓度均属地表水 III 类水质 (图5)。其中, 试验初泥质底与沙质底水体 TP 质量浓度分别为 ($0.14\pm0.01\text{ mg/L}$ 和 $(0.15\pm0.02)\text{ mg/L}$, 均属地表水 III 类水质; 试验期间, 泥质底对照组水体 TP 质量浓度先下降后上升但无显著差异, 而沙质底对照组水体则逐渐下降且 24 d 显著低于 0 d 和 2 d, ST 处理 24 d 时对 TP 最大去除率 (41.29%) 显著大于 MT 处理 8 d 时的最大去除率 (7.33%, $P<0.05$); 同时, 不同植物处理组水体 TP 质量浓度先下降而后稍上升, MSBII 和 SSBII 于 8 d 及其他处理于 16 d 降至最低, MSBI、MSBII 和 MKC 及 SSBI、SSBII 和 SKC 对 TP 最大去除率分别为 20.02%、27.21% 和 24.64% 及 35.80%、43.64% 和 31.79%, 但相互无显著差异 ($P>0.05$), 之后均稍升高; 此外, 同底质内各植物处理组对水体 TP 最大去除率与对照组无显著差异 ($P>0.05$)。

2.6 COD_{Mn} 净化效果

植物处理组对水体 COD_{Mn} 的去除效果均显

著优于对照组 ($P < 0.05$, 图 6)。其中, 试验初泥质底水体 COD_{Mn} 质量浓度 ($8.29 \pm 0.35 \text{ mg/L}$) 显著高于沙质底 ($6.18 \pm 0.24 \text{ mg/L}$, $P < 0.05$), 但均属地表水 IV 类水质; 试验期间, 对照组水体 COD_{Mn} 质量浓度稍有波动, 整体呈下降趋势, 试验末 MT 对 COD_{Mn} 去除率 (20.17%) 显著大于 ST (7.17%, $P < 0.05$), 但水体 COD_{Mn} 质量浓度于 ST 仍显著低于 MT 并分属 III 类和 IV 类水质 ($P < 0.05$); 同时, 不同植物处理组水体 COD_{Mn} 质量浓

度均显著下降, 并于 16 d 降至最低而后稍上升, 16 d 时 MSBI、MSBII 和 MKC 及 SSBI、SSBII 和 SKC 对 COD_{Mn} 去除率分别为 46.08%、46.89% 和 48.99% 及 42.66%、38.89% 和 39.71%, 前三者属地表水 III 类水质, 后三者属 II 类水质, 各植物处理对 COD_{Mn} 最大去除率无显著差异 ($P > 0.05$), 之后各水体于 24 d 均有所上升且全部属 III 类水质; 此外, 各植物处理组对水体 COD_{Mn} 最大去除率均显著高于对照组 ($P < 0.05$)。



注: 不同大写字母表示同处理不同时间差异显著性 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同时间不同处理差异显著性 ($P < 0.05$), 下同

图 2 不同试验水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度变化

Fig. 2 Variation of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content in different test water

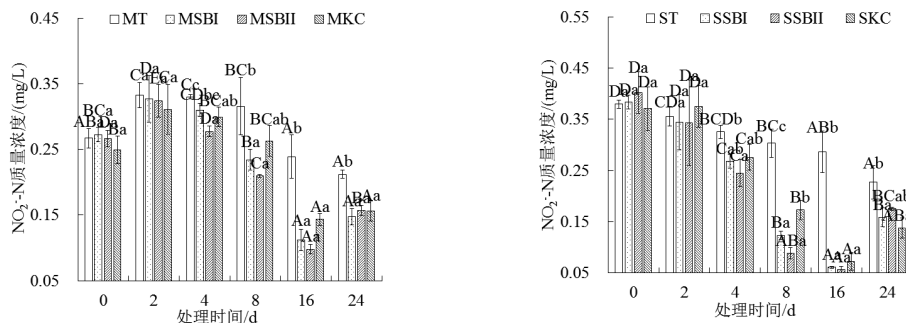


图 3 不同试验水体 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度变化

Fig. 3 Variation of $\text{NO}_2^-\text{-N}$ content in different test water

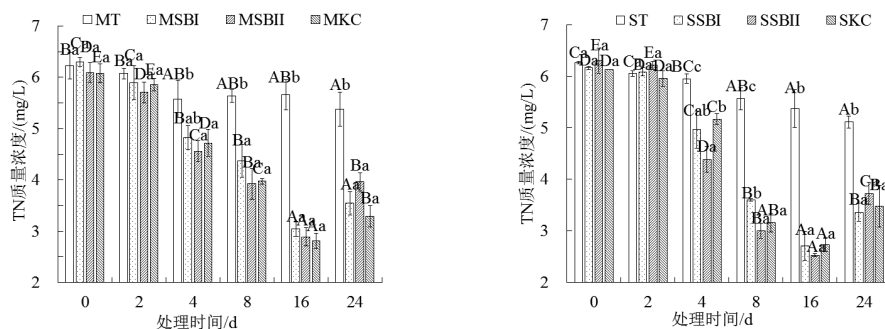


图 4 不同试验水体 TN 质量浓度变化

Fig. 4 Variation of TN content in different test water

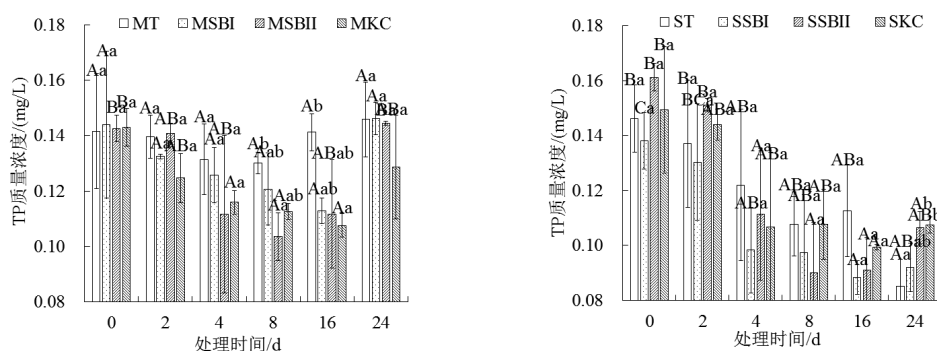
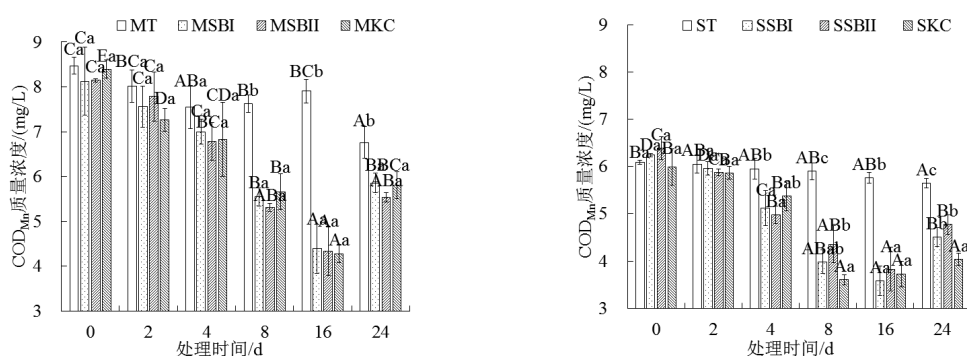


图5 不同试验水体 TP 质量浓度变化

Fig. 5 Variation of TP content in different test water

图6 不同试验水体 COD_{Mn} 质量浓度变化Fig. 6 Variation of COD_{Mn} content in different test water

3 讨论

3.1 不同水生植物对养殖水质净化效果的影响

池塘封闭养殖中,大量饲料投入常导致水体氮磷等营养物质富集。其中,氮元素常以养殖生物排泄的氨氮形式积累,而水体中氨氮和亚硝酸盐过高会直接毒害养殖生物或影响其免疫力而导致病毒入侵^[18-19],因而水体中的氨氮和亚硝酸盐是水质调控的重要指标。李建柱等^[20]对草鱼养殖池塘的研究发现,薤菜浮床能够有效降低水体氨氮和亚硝酸盐的质量浓度。本研究中,泥质及沙质等两种底质水体中薤菜处理(MKC和SKC)对NH₄⁺-N去除率分别为64.29%和69.06%及NO₂⁻-N去除率分别为42.19%和80.24%,比张志山等^[9]于东平湖鲤池塘养殖研究中薤菜去除水体80.4%~82.2%的NH₄⁺-N和81.5%~88.0%的NO₂⁻-N的结果稍低。其原因,一方面在于本研究中植物浮床12.5%的覆盖面积稍低于张志山

等^[9]的20%,另一方面,MKC和SKC对NO₂⁻-N去除率与张志山等^[9]研究结果的差别表明底质对植物浮床的净化效果存在影响,此外鲤鱼的扰动作用有助于促进富营养化池塘的去氮作用^[21],故而主养品种差异也存在一定影响。同时,植物浮床可通过水上栽培植物的直接吸收与根系吸附,将水体营养物质转化为植物体从而降低水体中营养物质的质量浓度^[6-7]。本研究中,两组薤菜处理(MKC和SKC)对TN去除率分别为53.79%和55.53%,与张志山等^[9]54.7%~56.9%的TN去除率结果一致。但是,本研究中MKC和SKC处理24.64%和31.79%的TP去除率远低于张志山等^[9]研究中91.4%~92.6%的TP去除率,原因可能在于本研究实施较晚,随着温度升高及沉积物中营养物质的大量累积,在养殖中后期各种形态的氮磷向上覆水扩散^[22],同时池塘沉积物中氮和磷分别主要以有机态氮和生物活性磷形式存在,养殖过程使得沉积物中内源磷的释放潜力增加^[23];并且本研究中TP质量浓度远低于张志山

等^[9]的研究水体及水体长期处于磷限制状态,可能更易受到沉积物磷元素释放的影响。此外,COD_{Mn}作为水体有机物质的衡量指标,本研究中蔬菜处理(MKC和SKC)对COD_{Mn}去除率分别为48.99%和39.71%,稍低于徐芳等^[24]研究中20 d时几种禾草对水体COD的59%以上的去除率。周玥等^[25]研究表明植物对高质量浓度污水中COD_{Mn}的净化效果优于低质量浓度污水,本研究初始水体COD_{Mn}为地表水IV类,而徐芳等^[24]试验水体COD属劣V类,水体有机质去除率的差异应与水体中含量差异有关。

水鳖常分布于静水池沼中,丰富的不定根使其可悬浮于水体并从中吸收营养。本研究中,12.5%覆盖面积的水鳖浮床处理(MSBI和SSBI)均对水体NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、TN、TP及COD_{Mn}净化效果显著,其最大去除率分别达到56.27%、59.02%、51.70%、20.02%和46.08%及71.52%、84.31%、56.17%、35.80%和42.66%(图2~图6),表明了水鳖对养殖水体良好的净化效果。许国晶等^[26]对采煤塌陷区水域的研究也发现,结合水鳖处理较单独底栖动物具有更佳的营养盐去除效果,且覆盖面积10%的水鳖和田螺组合对水体NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、TN和TP的去除率分别达到65.12%、66.67%、55.56%和77.50%。本研究中单独水鳖浮床设置对水体NH₄⁺-N、NO₂⁻-N和TN的净化效果与之基本一致,而偏低的TP去除率原因可能在于许国晶等^[26]研究中采用了水鳖与螺蛳的组合处理以及本研究中TP质量浓度较之偏低并长期处于磷限制状态。同时,本研究同底质类型池塘中,12.5%的水鳖与蔬菜对不同营养物质的去除率无显著差异($P>0.05$),表明水鳖对水体的净化效果与目前较多使用的蔬菜相当,故而本地种水鳖可作为生态浮床的备选植物。焦利民等^[27]研究却认为水鳖对黑土洼人工湿地水体各化学指标基本无净化能力,虽然与其研究中水鳖受浮萍挤压成一团及其本身根茎太小等因素导致的长势较差有关,但也为利用水鳖进行水质净化的管理提出更多要求。

此外,本研究中覆盖面积分别为12.5%与25.0%的水鳖处理(SBI和SBII),除沙质底池塘中SBII对NH₄⁺-N去除率显著高于SBI($P<0.05$)外,同底质池塘内不同覆盖面积水鳖处理

对水体主要营养物质的去除率均无显著差异($P>0.05$)。许国晶等^[26]在采煤塌陷区水域研究中认为,10%覆盖面积水鳖+田螺组合较20%水鳖+田螺组合对水体中NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、TN和TP具有更好的净化效果。郭忠宝等^[10]研究却发现,20%蔬菜浮床组对罗非鱼养殖水体氮磷化合物的去除效果优于10%浮床组。但也有对植物浮床的研究发现,当浮床覆盖率达到一定程度后会影响到水体中浮游植物结构并影响养殖生物正常生长,并非无限制提高浮床覆盖率都对池塘养殖有利^[28]。同时,试验末期两种水生植物均存在一定程度的枯萎及衰败情况,而24 d水质监测结果也显示植物处理组水体的营养物质含量存在一定程度的上升,可能试验后期伴随水温的降低,植物的生长减缓与净化能力可能有所降低,但也提醒渔业生产者在使用植物浮床过程中应注意对植物体的收割或收获管理^[8],以确保其不造成二次污染。另外,如焦利民等^[27]研究就因水鳖长势较差而导致对湿地水体各化学指标均无净化能力,也为水鳖乃至植物浮床在净化利用中的管理提出更高要求。

3.2 不同底质条件对养殖水体净化效果的影响

在养殖池塘系统中,底质状况往往会影响到水体环境,并与水体共同组成物质能量循环系统及养殖生物的生存空间^[29]。不同类型底质的理化特性不同,底泥粒径越大则表面相对光滑而吸附能力较弱,颗粒越小则比表面积越大而具有更强的吸附能力^[30]。本研究中,试验初泥质底养殖水体较沙质底具有稍低的NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、TN、TP和较高的COD_{Mn},但仅NO₂⁻-N和COD_{Mn}差异显著($P<0.05$)。而伴随试验的实施及系统内停止投喂,泥质底对照组(MT)和沙质底对照组(ST)水体中主要营养物质多呈现逐步下降趋势,但其水体NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、TN和COD_{Mn}的去除率显著低于相应的两种植物处理组($P<0.05$,图2、3、4、6),表明养殖系统自身虽具有一定的自净能力但其净化效果显著差于植物浮床。同时,ST对水体中NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、TN和TP的去除率显著高于MT,对COD_{Mn}的去除率低于MT且仅对TN去除率无显著差异($P>0.05$),其与试验初本底值的大小差异一致。周玥等^[25]研究认为湿地植物对高质量浓度污水中有机质的净化效果优于低质量浓

度污水。而本研究中 MT 和 ST 对所测营养物质去除率与初始质量浓度的大小差异一致, 养殖系统对水体营养物质的自净去除效率可能与质量浓度本底值的大小有关。此外, 试验末 ST 水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、TN 和 TP 均由试验初高于 MT 降为低于 MT, 仅 COD_{Mn} 仍为 MT 高于 ST (图 6)。随着水体营养物质的自净去除, 且试验系统已停止饵料投喂, 故而可能其他无机营养盐的输入影响了两种水体的自净去除效果。首先, 试验期间 MT 较 ST 一直具有较高的 COD_{Mn} , 而王春英^[31] 研究认为 COD_{Mn} 主要通过影响异养菌与硝化菌对氧的竞争而影响硝化过程, 污水 COD_{Mn} 对硝化菌在一定程度上产生抑制作用且 COD_{Mn} 越高抑制作用时间越长, 另外, 有机质的分解也可能增加营养物质含量, 故而 MT 较高的 COD_{Mn} 可能影响了对泥质底水体氮磷营养盐的转化利用; 其次, 吴俊峰^[32] 研究认为底泥的粒径越细则吸附能力越强, 因而池塘养殖的泥质底较沙质底具有更丰富的营养物质积累, 本试验中饵料停止投入可能导致泥质底沉积物作为水体营养物质“源”的作用彰显^[3]。

在不同底质水体的水生植物浮床处理中, 沙质底水体中的植物处理对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、TN 和 TP 的去除率均高于泥质底, 而对 COD_{Mn} 的去除率稍低于泥质底但无显著差异 ($P>0.05$)。植物浮床对沙质底水体中的氮、磷等营养盐净化效果, 可能与泥质底较沙质底颗粒更细而具有更强的缓冲能力^[33] 有关。同时, 本研究中植物处理更快地降低了沙质底水体中的主要营养物质, 并且在 24 d 的试验末沙质底水体中植物处理组水体主要营养物质浓度上升也更为显著 (图 2、3、4、6), 也在一定程度上表明了沙质底水体较泥质底水体中的营养物质浓度波动幅度较大而缓冲能力稍差。沙质底和泥质底水体中营养物质浓度对植物浮床净化及浮床植物腐败影响的不同响应特征, 表明沙质底水体更易通过生态浮床进行调控, 但也更容易受植物腐败的影响, 也为不同底质池塘水体中的浮床设置和植物收获管理提出了更高的要求。

4 结论

不同底质的养殖系统均具有一定的自净能

力, 且沙质底养殖系统对水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 TP 的去除率显著高于泥质底, 沙质底养殖系统对水体 COD_{Mn} 的去除率显著低于泥质底 ($P<0.05$)。薹菜和水鳖植物浮床对不同底质养殖水体均具有良好净化效果, 其中植物浮床对泥质底水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、TN、TP 和 COD_{Mn} 的去除率平均为 60.07%、54.78%、52.68%、23.96% 和 47.32%, 对沙质底水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、TN、TP 和 COD_{Mn} 的去除率分别为 72.43%、83.54%、57.20%、37.07% 和 40.75%。12.5% 覆盖面积的水鳖和薹菜处理对不同底质水体所测营养物质的去除率, 除在泥质底水体中水鳖对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率低于薹菜及对 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的去除率高于薹菜外基本无显著差异, 本地种水鳖可作为生态浮床的潜力净水植物。□

参考文献

- [1] 邓来福, 江兴龙. 池塘养殖生物修复技术研究进展[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(5): 1270-1272.
- [2] 孙云飞, 王芳, 刘峰, 等. 草鱼与鲢、鲤不同混养模式系统的氮磷收支[J]. 中国水产科学, 2015, 22(3): 450-459.
- [3] EMILY J D, CONRAD A P, ANDRES M L, et al. Sedimentary environment influences ecosystem response to nutrient enrichment [J]. Estuaries and Coasts, 2018, 41(7): 1994-2008.
- [4] LI X N, SONG H L, LI W, et al. An integrated ecological floating-bed employing plant, freshwater clam and biofilm carrier for purification of eutrophic water [J]. Ecological Engineering, 2016, 36(4): 382-390.
- [5] 沈建筑, 李潇轩, 李志辉, 等. 浅析淡水养殖尾水处理技术及达标排放措施[J]. 水产养殖, 2019, 40(5): 37-39.
- [6] 洪瑜, 王英, 王芳, 等. 5 种浮床植物对宁夏引黄灌区稻田退水中氮磷的去除效果[J]. 环境工程学报, 2019, 13(11): 2637-2645.
- [7] 贾成霞, 辛文明, 曲疆奇, 等. 16 种观赏植物对锦鲤工厂化循环水养殖水体污染物的净化作用研究[J]. 渔业现代化, 2018, 45(3): 1-8.
- [8] 黄海平, 谢从新, 何绪刚, 等. 密度和收割对水薹菜净水效果的影响[J]. 渔业现代化, 2012, 39(1): 22-26, 39.
- [9] 张志山, 朱树人, 杨玲. 空心菜浮床对东平湖鲤养殖池塘水质的净化作用[J]. 长江大学学报(自然版), 2015, 12(15): 39-43.
- [10] 郭忠宝, 王柏明, 阴晴朗, 等. 浮床种植空心菜对罗非鱼养殖池塘水质的净化效果[J]. 南方农业学报, 2019, 50(6): 1378-1384.
- [11] 袁泉, 任艳, 周文宗, 等. 水薹菜浮床对盐碱地池塘水质与中华绒螯蟹生长的影响[J]. 淡水渔业, 2019, 49(6): 94-99.

- [12] 皮坤, 张敏, 李保民, 等. 主养草鱼与主养黄颡鱼池塘沉积物—水界面氮磷营养盐通量变化及与环境因子的关系[J]. 水产学报, 2018, 42(02): 246-256.
- [13] 苏利, 姜志强, 宋波澜. 3种底质对水质和红鲫生长的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2011, 26(2): 149-152.
- [14] 刘冉, 吴雪, 王琛, 等. 3种仿刺参养殖池塘底质特性的研究[J]. 水产科学, 2017, 36(1): 29-35.
- [15] 李德尚, 杨红生, 王吉桥, 等. 一种池塘陆基实验围隔[J]. 青岛海洋大学学报, 1998, 28(2): 199-204.
- [16] 水和废水监测分析方法[M]. 中国环境科学出版社, 国家环境保护总局, 水和废水监测分析方法编委会编, 2002.
- [17] GB 3838-2002. 地表水环境质量标准[S]. 1983.
- [18] KROUPOVA H, MACHOVA J, SVOBODOVA Z. Nitrite influence on fish: A review[J]. Veterinari Medicina, 2005, 50(11): 461-471.
- [19] 黄世明, 陈献稿, 石建高, 等. 水产养殖尾水处理技术现状及其开发与应用[J]. 渔业信息与战略, 2016, 31(4): 278-285.
- [20] 李建柱, 侯杰, 张鹏飞, 等. 空心菜浮床对鱼塘水质和微生物多样性的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(10): 3071-3080.
- [21] 钟大森, 王芳, 王春生, 等. 不同密度下的鲤鱼扰动作用对沉积物-水界面硝化、反硝化和氨化速率的影响[J]. 水生生物学报, 2013, 37(6): 1103-1111.
- [22] 皮坤, 张敏, 李保民, 等. 主养草鱼与主养黄颡鱼池塘沉积物—水界面氮磷营养盐通量变化及与环境因子的关系[J]. 水产学报, 2018, 42(2): 246-256.
- [23] 刘金金, 张玉平, 李晓蓓. 凡纳滨对虾池塘沉积物中氮、磷形态的赋存特征[J]. 广东海洋大学学报, 2019, 39(6): 39-47.
- [24] 徐芳, 刘明, 宗俊勤, 等. 低温季节不同禾草对富营养水体净化能力的研究[J]. 草地学报, 2016, 24(1): 184-190.
- [25] 周玥, 韩玉国, 张梦, 等. 4种不同生活型湿地植物对富营养化水体的净化效果[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3353-3360.
- [26] 许国晶, 田功太, 李壮, 等. 漂浮植物与底栖动物重建对采煤塌陷水域修复效果的研究[J]. 江西农业学报, 2018, 30(2): 112-116.
- [27] 焦利民, 赵振国, 刘树军. 不同水生植物对黑土洼人工湿地净化效果水流量变化分析[J]. 中国水运, 2016, 16(7): 117-118.
- [28] 邴旭文, 陈家长. 浮床无土栽培植物控制池塘富营养化水质[J]. 湛江海洋大学学报, 2001, 21(3): 29-33.
- [29] 胡亚东, 杨兴丽. 集约化养殖池塘水质调控关键因素探讨[J]. 中国水产, 2006(10): 35-37.
- [30] 张斌亮. 浅水湖泊沉积物-水界面磷的行为特征与环境风险评估[D]. 上海: 华东师范大学, 2004.
- [31] 王春英. 碱度、氨氮负荷和COD对独立硝化的影响[J]. 四川环境, 2009, 28(4): 16-19.
- [32] 吴俊峰. 金沙江其宗水电站下坝址坝基深厚覆盖层工程地质研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
- [33] 刘宗进, 陈桂梅. 池塘底质的改良与渗漏防治[J]. 齐鲁渔业, 2003(12): 20.

Study on purification effects of *Ipomoea aquatica* and *Hydrocharis dubia* on muddy and sandy aquaculture water

DONG Guancang^{1,2}, DU Xinghua^{1,2}, WANG Ya'nan^{1,2}, SUN Lufeng^{1,2}, LENG Chunmei^{1,2}, TAN Shengyan³

(1 Shandong Freshwater Fisheries Research Institute, Jinan 250013, Shandong, China;

2 Shandong Provincial Key Laboratory of Freshwater Genetics and Breeding, Jinan 250117, Shandong, China;

3 Limin Fishery Specialty Cooperative of Jining, Ltd, Jining 272061, Shandong, China)

Abstract: In order to solve the problem of nutrient enrichment in intensive aquaculture water of freshwater pond, the purification effects of *Ipomoea aquatica* and *Hydrocharis dubia* on muddy and sandy aquaculture water were studied using enclosure test method. The results showed that the removal rates of ammonia nitrogen, nitrite nitrogen and TP in muddy water were significantly lower than those in sandy water, and the removal rate of COD_{Mn} in muddy water was significantly higher than that in sandy water ($P < 0.05$). In different water, both macrophytes could significantly remove more ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, TN and COD_{Mn} than the corresponding control treatments ($P < 0.05$). There was no significant difference in the nutrient removal rate between 12.5% and 25.0% of treatment with *H. dubia* ($P > 0.05$), and 12.5% of treatment with *I. aquatica* and *H. dubia* was adopted only when the removal rate of ammonia nitrogen by MSBI in muddy water was significantly lower than that by MKC and the removal rate of nitrite nitrogen by MSBI was significantly higher than that by MKC ($P < 0.05$). The maximum removal rates of ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, TN, TP and COD_{Mn} by macrophytes in muddy water were 60.07%, 54.78%, 52.68%, 23.96% and 47.32% respectively, while those in sandy water were 72.43%, 83.54%, 57.20%, 37.07% and 40.75% respectively. Moreover, the contents of nutrients tested in the water treated with macrophytes increased to a certain extent at the end of the test. The contents of ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, TP and other nutrients in sandy water fluctuated greatly and the removal rate was higher than that in muddy water. The floating beds of *I. aquatica* and *H. dubia* in muddy and sandy water had significant purification effects, and local *H. dubia* could be used as a potential water purification macrophyte in ecological floating bed. The management of harvesting should be strengthened in the application of floating bed to avoid the secondary pollution of water.

Key words: pond aquaculture; pond sediment; aquatic macrophyte; water purification