

# 背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)对池塘底泥释放营养盐的净化效果

陈修报, 刘洪波, 苏彦平, 戈贤平, 杨 健

(中国水产科学研究院淡水渔业研究中心 中国水产科学研究院长江中下游渔业生态环境评价和资源养护重点实验室, 江苏 无锡 214081)

**摘要:** 为了阐释鱼、蚌生态混养的可行性, 通过建立微型生态系统, 探索不同养殖密度和处理时间的背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)对池塘底泥释放营养盐的净化效果。结果表明: 背角无齿蚌对 pH、DO 和总固溶物的影响总体不明显, 但能够显著降低浊度和 Chl-a 含量( $P < 0.05$ ), 最大去除率分别为 79.2% 和 83.4%; 背角无齿蚌对营养盐的净化效果受到处理时间、养殖密度的显著影响( $P < 0.05$ ); TN、 $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 呈现升高的趋势, 而能够显著降低  $\text{NH}_4^+$ -N、TP 和  $\text{PO}_4^{3-}$  的含量( $P < 0.05$ ), 最大去除率分别为 90.9%、55.6% 和 52.9%。响应面优化分析显示蚌养殖密度和处理时间的配比分别为 27 个/ $\text{m}^3$  和 22.63 d、25 个/ $\text{m}^3$  和 23.69 d 时, 对 TP 和  $\text{PO}_4^{3-}$  的去除率可进一步提升至 68.9% 和 58.1%。本研究表明背角无齿蚌有潜力用于养殖池塘底泥富营养化的防控。

**关键词:** 背角无齿蚌; 底泥; 营养盐; 净化

中图分类号: S959 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2017)11-0008-07

DOI: 10.11759/hyhx20170716001

据《2016 中国渔业统计年鉴》资料, 我国淡水池塘养殖面积  $2.7 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 占淡水养殖总面积的 43.94%。可是面临着严峻的营养盐污染, 《2015 年中国渔业生态环境状况公报》指出, 我国内陆渔业水域总氮和总磷的超标面积分别高达 94.3% 和 26%。其中, 底泥作为内源性营养盐的供给源, 向水体中释放了大量的硝酸盐、磷酸盐等<sup>[1-3]</sup>。研究表明, 养殖池塘底泥中 N 和 P 主要以  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{PO}_4^{3-}$  形式释放到水体中, 日释放速率分别可高达  $200 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  和  $25 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ <sup>[1-2]</sup>。因此, 迫切需要对底泥释放至水体中的营养盐进行有效净化。

背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)在养殖池塘中广泛分布<sup>[4]</sup>, 具有育珠、药用和食用等功能<sup>[5]</sup>, 而且通过滤水和生物沉降等作用能够有效净化水体中营养盐, 对 TN<sup>[6]</sup>、 $\text{NO}_3^-$ -N<sup>[6]</sup> 和 TP<sup>[7]</sup> 的去除率分别可达到 24.1%、42.6% 和 40.5%。然而, 前人的研究主要是基于单纯的水体<sup>[6-8]</sup>, 对于养殖池塘底泥这一特殊的营养盐“贮存库”(沉积了大量的残饵和鱼类粪便等代谢废物<sup>[9]</sup>)释放营养盐的净化效果尚不清楚。因此, 本研究以代表性大宗淡水鱼——团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)养殖池塘的底泥为对象, 探索其营养盐的释放特征, 并评价背角无齿蚌对释放水体的理

化指标(pH、DO、总固溶物、浊度、Chl-a)和营养盐(TN、 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N、TP、 $\text{PO}_4^{3-}$ )的净化规律, 以期为渔业生态环境的保护和修复, 以及鱼、蚌混养的生态养殖模式开发提供支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 微型生态系统的建立

在实验室内模拟养殖池塘环境建立微型生态系统。按照底泥厚度与水深之比为 3 : 28<sup>[10]</sup>, 向 12 个规格为  $100 \text{ cm} \times 45 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ (长×宽×高)的玻璃缸中铺上 3.5 cm 厚的底泥(取自中国水产科学研究院淡水渔业研究中心团头鲂养殖池塘 0~10 cm 的表层泥,

收稿日期: 2017-07-16; 修回日期: 2017-08-30

基金项目: 现代农业产业技术体系大宗淡水鱼产业技术体系专项(CARS-46); 江苏省自然科学基金(BK20161144); 国家自然科学基金项目(31502166)

[Foundation: The Modern Agriculture Industrial Technology System special project – the National Technology System for Conventional Freshwater Fish Industries, No. CARS-46; Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China, No. BK20161144; National Natural Science Foundation of China, No. 31502166]

作者简介: 陈修报(1983-), 男, 助理研究员, 博士, 从事渔业生态环境评价与保护研究, E-mail: chenxb@ffrc.cn; 杨健, 通信作者, 研究员, E-mail: jjiany@ffrc.cn

质量约 25 kg), 然后加入 33 cm 深的曝气自来水(150 L)。将底泥充分搅动, 静置 72 h 后, 实验组分别放入 2、4 和 6 只人工繁育的背角无齿蚌<sup>[5]</sup>(壳长 10.2 cm±0.4 cm, 壳宽 4.2 cm±0.3 cm, 壳高 6.3 cm±0.3 cm, 带壳湿重 130 g±19 g, n=36; 平均值±标准差, 下同), 用聚乙烯网笼吊养于微型生态系统的中央位置, 养殖密度分别约为 13、27 和 40 个/m<sup>3</sup>。对照组不放蚌, 仅悬挂聚乙烯网笼, 以保证吊养设施对系统的影响均等。对照组和不同养殖密度的实验组均设置 3 个重复, 实验过程中不充氧、不投喂饵料。实验为期 30 d, 自然光照, 水温为 19~22℃, 期间没有发生蚌死亡。

### 1.2 样品采集与分析

针对底泥向水体中释放营养盐, 对微型生态系统水体的理化指标和营养盐每 10 d 测定一次。用 pH 计(HI98120 型, HANNA)、溶氧仪(SevenGo pro™ 型, METTLER TOLEDO)、电导率仪(SevenGo™ 型, METTLER TOLEDO)和浊度计(TN-100 Protoble 型, EUTECH)现场测定水体的 pH、DO、总固溶物和浊度。

用虹吸管采集微型生态系统的中层水, 依据《水和废水监测分析方法》测定水体 Chl-a 含量; 应用水质分析仪(DR6000 型, HACH), 以过硫酸盐消解法测定 TN 和 TP, 水杨酸盐法测定 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, 二甲苯酚法测定 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, 重氮化方法测定 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N, 抗坏血酸法测定 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>含量。

### 1.3 去除率的计算

鉴于微型生态系统中的水质指标变化受到自然沉

降和背角无齿蚌作用的共同影响, 应用去除率(removal efficiency,  $E_R$ )<sup>[11]</sup>分析背角无齿蚌对底泥释放营养盐的净化效果:

$$E_R = [(C_B - C_T) / C_B] \times 100\%$$

式中:  $C_B$  是指对照组的指标含量,  $C_T$  指处理组的指标含量。 $E_R > 0$  表示蚌能够对水质起到净化作用;  $E_R < 0$  表示增加了水体中相应指标的含量。

### 1.4 统计分析

应用 SPSS 22.0 统计软件的 one-way ANOVA 比较不同组别理化指标和营养盐的变化, 用 two-way ANOVA 分析净化效果与养殖密度和处理时间的关系, 这两种分析方法均对数据进行自然对数转换以满足正态分布<sup>[12]</sup>,  $P < 0.05$  表示差异水平显著。此外, 应用 Design-Expert 8.0 统计软件的响应曲面法(response surface)对各响应值进行优化<sup>[6]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 对理化指标的影响

由表 1 可见, 背角无齿蚌对 pH、DO 和总固溶物的影响总体不明显。pH 仅在 30 d 的 6 只蚌组低于对照组( $P < 0.05$ ); DO 在 20、30 d 的 6 只蚌组低于对照组( $P < 0.05$ ); 总固溶物在处理 10 d 时略高于对照组( $P < 0.05$ ), 而在 30 d 时略低于对照组( $P < 0.05$ )。然而, 能够显著降低浊度和 Chl-a 含量。浊度在 10 d 和 20 d 的所有处理组均显著低于对照组( $P < 0.05$ ); Chl-a 在 10 d 和 20 d 的所有处理组以及 30 d 的 4 只蚌组显著低于对照组( $P < 0.05$ )。背角无齿蚌对浊度和 Chl-a 的

表 1 背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)对理化指标的影响

Tab. 1 Influence of *Anodonta woodiana* on physicochemical parameters

处理时间(d)	组别/蚌密度(个/m <sup>3</sup> )	pH	DO(mg/L)	总固溶物(mg/L)	浊度(NTU)	Chl-a(μg/L)
0	起始组/0	7.7±0.1 <sup>B</sup>	6.4±0.4	299±2.3 <sup>D</sup>	10.1±1.7 <sup>A</sup>	13.7±0.3 <sup>B</sup>
10	对照组/0	7.3±0.2 <sup>b, C</sup>	5.6±0.4	311±2 <sup>b, C</sup>	4.7±0.7 <sup>a, B</sup>	30.2±8 <sup>a, A</sup>
	2 只蚌/13	7.5±0.04 <sup>a</sup>	5.7±0.1 <sup>A</sup>	321±2 <sup>a, B</sup>	2.1±0.6 <sup>b</sup>	11.1±5.5 <sup>b, A</sup>
	4 只蚌/27	7.5±0.01 <sup>a</sup>	5.5±0.1	324±4 <sup>a, B</sup>	1.1±0.4 <sup>c</sup>	7.4±1.5 <sup>b, A</sup>
	6 只蚌/40	7.5±0.01 <sup>a</sup>	5.3±0.04 <sup>A</sup>	324±5 <sup>a, B</sup>	1.0±0.2 <sup>c, B</sup>	5.0±1.3 <sup>c, AB</sup>
20	对照组/0	7.7±0.3 <sup>B</sup>	5.6±0.1 <sup>a</sup>	327±3 <sup>B</sup>	4.8±1.4 <sup>a, B</sup>	10.2±0.3 <sup>a, B</sup>
	2 只蚌/13	7.6±0.1	5.5±0.1 <sup>ab, A</sup>	325±1 <sup>B</sup>	1.9±0.9 <sup>b</sup>	6.8±0.8 <sup>b, B</sup>
	4 只蚌/27	7.6±0.06	5.2±0.1 <sup>ab</sup>	332±0.6 <sup>AB</sup>	1.0±0.2 <sup>c</sup>	5.0±0.5 <sup>bc, AB</sup>
	6 只蚌/40	7.5±0.02	5.1±0.03 <sup>b, AB</sup>	327±6 <sup>B</sup>	1.2±0.5 <sup>bc, B</sup>	4.6±0.9 <sup>c, B</sup>
30	对照组/0	8.0±0.3 <sup>a, A</sup>	5.5±0.8 <sup>a</sup>	358±19 <sup>a, A</sup>	4.5±1.4 <sup>B</sup>	5.5±0.5 <sup>ab, C</sup>
	2 只蚌/13	7.9±0.04 <sup>ab</sup>	5.2±0.04 <sup>ab, B</sup>	338±1.5 <sup>b, A</sup>	2.7±0.1	4.7±1.6 <sup>ac, B</sup>
	4 只蚌/27	7.9±0.02 <sup>ab</sup>	5.2±0.1 <sup>ab</sup>	344±3 <sup>b, A</sup>	3.1±0.8	3.7±0.8 <sup>c, B</sup>
	6 只蚌/40	7.7±0.01 <sup>b</sup>	4.8±0.1 <sup>b, B</sup>	338±5 <sup>b, A</sup>	3.4±0.1 <sup>A</sup>	6.9±1.1 <sup>a, A</sup>

注: 同一列中, 不同小写字母表示相同时期不同组别之间差异水平显著, 不同大写字母表示相同组别不同时期之间差异水平显著

最大去除率分别出现在 20 d 的 4 只蚌组和 10 d 的 6 只蚌组, 高达 79.2%和 83.4%。

## 2.2 对营养盐的影响

### 2.2.1 营养盐含量的变化

不同组别的营养盐含量变化见表 2。对照组 TN 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  表现为降低趋势,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  呈现先升高后降低趋势, 而  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、TP 和  $\text{PO}_4^{3-}$  总体保持不变。处理组 TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  总体呈现出升高的趋势。TN 在 20 d 的 2、6 只蚌组和 30 d 的 2 只蚌组显著高

于对照组 ( $P < 0.05$ );  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在 10 d 的 2 只蚌组、20 d 的 2 和 6 只蚌组以及 30 d 的所有处理组均显著高于对照组 ( $P < 0.05$ );  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  在 10 d 的所有处理组和 20 d 的 6 只蚌组显著高于对照组 ( $P < 0.05$ )。然而, 能够显著降低  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 和  $\text{PO}_4^{3-}$  的含量。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  在 20 d 的 2、4 只蚌组显著低于对照组 ( $P < 0.05$ ); TP 在 20 d 的 4 只蚌组显著低于对照组 ( $P < 0.05$ );  $\text{PO}_4^{3-}$  在 20 d 的 4 只蚌组显著低于对照组 ( $P < 0.05$ )。背角无齿蚌对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 和  $\text{PO}_4^{3-}$  的最大去除率均出现在 20 d 的 4 只蚌组, 分别高达 90.9%、55.6%和 52.9%。

表 2 背角无齿蚌 (*Anodonta woodiana*) 对营养盐含量 (单位: mg/L) 的影响

Tab. 2 Influence of *Anodonta woodiana* treatment on nutrient concentrations (unit: mg/L)

处理时间 (d)	组别/蚌密度 (个/m <sup>3</sup> )	TN	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	TP	$\text{PO}_4^{3-}$
0	起始组/0	9.3±2.8 <sup>A</sup>	2.1±0.6 <sup>A</sup>	0.43±0.06 <sup>B</sup>	0.002±0.001	0.17±0.02	0.17±0.02 <sup>AB</sup>
10	对照组/0	6.2±1.2 <sup>B</sup>	<0.01 <sup>c, C</sup>	0.80±0.1 <sup>b, A</sup>	0.002±0.001 <sup>b</sup>	0.12±0.02	0.12±0.05 <sup>ab, B</sup>
	2 只蚌/13	6.7±0.3	0.32±0.5 <sup>b, A</sup>	1.27±0.06 <sup>a, A</sup>	0.018±0.01 <sup>a, A</sup>	0.17±0.06	0.14±0.01 <sup>ab, AB</sup>
	4 只蚌/27	8.5±2.8 <sup>A</sup>	0.68±0.4 <sup>a, A</sup>	0.77±0.06 <sup>b</sup>	0.021±0.009 <sup>a, A</sup>	0.06±0.006	0.10±0.02 <sup>b</sup>
	6 只蚌/40	7.9±1.3	1.33±0.45 <sup>a, A</sup>	0.77±0.3 <sup>b</sup>	0.02±0.01 <sup>a, A</sup>	0.12±0.07	0.17±0.006 <sup>a</sup>
20	对照组/0	5.0±0.9 <sup>c, B</sup>	0.11±0.02 <sup>a, B</sup>	0.57±0.15 <sup>c, AB</sup>	0.002±0.001 <sup>b</sup>	0.27±0.15 <sup>a</sup>	0.17±0.07 <sup>a, AB</sup>
	2 只蚌/13	7.5±1.0 <sup>a</sup>	0.02±0.006 <sup>b, B</sup>	1.13±0.25 <sup>a, AB</sup>	0.002±0.002 <sup>ab, B</sup>	0.11±0.08 <sup>ab</sup>	0.10±0.03 <sup>ab, B</sup>
	4 只蚌/27	5.8±1.2 <sup>ac, B</sup>	0.01±0.02 <sup>b, B</sup>	0.63±0.23 <sup>bc</sup>	0.002±0.002 <sup>ab, B</sup>	0.12±0.1 <sup>b</sup>	0.08±0.03 <sup>b</sup>
	6 只蚌/40	6.9±0.3 <sup>ab</sup>	0.03±0.006 <sup>ab, B</sup>	0.87±0.15 <sup>ab</sup>	0.005±0.001 <sup>a, B</sup>	0.16±0.1 <sup>ab</sup>	0.17±0.11 <sup>a</sup>
30	对照组/0	5.5±0.3 <sup>c, B</sup>	0.05±0.03 <sup>B</sup>	0.53±0.25 <sup>b, B</sup>	0.001±0.0006 <sup>ab</sup>	0.32±0.07	0.23±0.03 <sup>A</sup>
	2 只蚌/13	8.6±1.4 <sup>a</sup>	0.05±0.07 <sup>B</sup>	0.77±0.06 <sup>a, B</sup>	0.002±0.001 <sup>b, B</sup>	0.24±0.08	0.18±0.03 <sup>A</sup>
	4 只蚌/27	6.3±0.6 <sup>bc, AB</sup>	0.04±0.07 <sup>B</sup>	0.77±0.15 <sup>a</sup>	0.002±0.003 <sup>ab, B</sup>	0.14±0.16	0.14±0.04
	6 只蚌/40	6.5±0.8 <sup>ac</sup>	0.03±0.01 <sup>B</sup>	1.07±0.1 <sup>a</sup>	0.005±0.0006 <sup>a, B</sup>	0.29±0.16	0.21±0.1

注: 同一列中, 不同小写字母表示相同时期不同组别之间差异水平显著, 不同大写字母表示相同组别不同时期之间差异水平显著

### 2.2.2 响应面优化分析

应用曲面响应法对上述有明显净化效果的营养盐分析, 结果显示背角无齿蚌对 TP 和  $\text{PO}_4^{3-}$  的去除率可进一步提升。蚌的养殖密度 ( $d$ ) 和处理时间 ( $t$ ) 与 TP 和  $\text{PO}_4^{3-}$  去除率 ( $E_R$ ) 之间的响应曲面见图 1。模型  $P < 0.01$ , 表明所建立的回归模型极显著。 $d$ 、 $t$  和  $E_R$  之间的实际回归方程为

$$E_{R\text{-TP}} = -285.80710 + 83.31452d + 16.65190t - 0.70710dt - 8.42742d^2 - 0.30560t^2 \quad (R^2 = 0.8511)$$

$$E_{R\text{-PO}_4^{3-}} = -192.15747 + 58.70690d + 11.99620t + 0.15088dt - 8.44895d^2 - 0.26496t^2 \quad (R^2 = 0.9770)$$

对 TP 和  $\text{PO}_4^{3-}$  分别优化, 得出  $d$  和  $t$  的最优组合分别为 3.99 只蚌 (27 个/m<sup>3</sup>) 和 22.63 d、3.69 只蚌 (25 个/m<sup>3</sup>) 和 23.69 d, 在此最优组合条件下, 去除率可进一步提升至 68.9%和 58.1%。

## 2.3 影响净化效果的因子分析

营养盐含量受到背角无齿蚌的养殖密度和处理

时间的影响 (表 3)。其中, TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、TP 和  $\text{PO}_4^{3-}$  的净化效果与养殖密度显著相关 ( $P < 0.05$ ), 而 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}$  的净化效果与处理时间显著相关 ( $P < 0.05$ ),  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  的净化效果与养殖密度和处理时间的交互作用显著相关 ( $P < 0.05$ )。

## 3 讨论与结论

背角无齿蚌对富营养化水环境的适应能力较强<sup>[7]</sup>, 且滤水功能强大<sup>[13]</sup>。根据壳长和水温估算<sup>[13]</sup>, 本研究中背角无齿蚌的滤水率约为 0.6 L/(个·h), 养殖密度分别为 13、27 和 40 个/m<sup>3</sup>, 即微型生态系统的水分别在 5、2.5 和 1.5 d 左右可被过滤一遍。因此, 水质指标的变化除了受到自然沉降的影响之外, 蚌的高强度滤水起到重要作用。本研究中所有的微型生态系统均处于相同的环境中, 并经历着相同的时间

段, 水体理化指标和营养盐含量表现出的差异应归

因于蚌养殖密度和处理时间的不同。

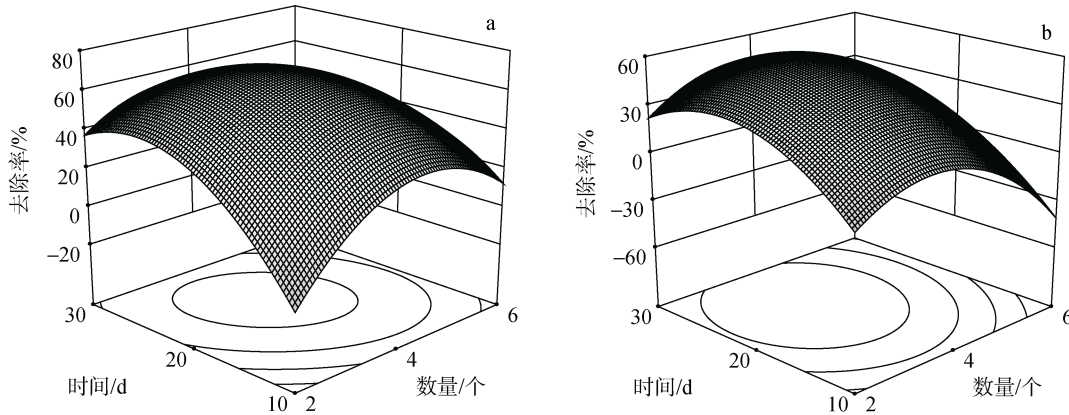


图 1 不同养殖密度和处理时间的背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)对 TP(a)和  $PO_4^{3-}$ (b)去除率的响应曲面

Fig. 1 The response surface of the effect of *Anodonta woodiana* with different density and treatment time on removal efficiency of TP (a) and  $PO_4^{3-}$ (b)

表 3 背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)的处理时间和养殖密度对营养盐含量的影响

Tab. 3 The effect of treat time and culture density of *Anodonta woodiana* on nutrient concentrations

营养盐	因子	F 值	自由度( $f_d$ )	相伴概率(P)
TN	处理时间	7.072	3	0.001
	养殖密度	5.088	3	0.007
	处理时间×养殖密度	1.498	6	0.218
$NH_4^+$ -N	处理时间	29.765	3	0.000
	养殖密度	2.366	3	0.094
	处理时间×养殖密度	10.722	6	0.000
$NO_3^-$ -N	处理时间	2.342	3	0.096
	养殖密度	8.290	3	0.000
	处理时间×养殖密度	2.586	6	0.042
$NO_2^-$ -N	处理时间	15.738	3	0.000
	养殖密度	10.166	3	0.000
	处理时间×养殖密度	2.725	6	0.034
TP	处理时间	2.874	3	0.055
	养殖密度	3.454	3	0.031
	处理时间×养殖密度	0.503	6	0.800
$PO_4^{3-}$	处理时间	3.725	3	0.024
	养殖密度	4.624	3	0.010
	处理时间×养殖密度	0.742	6	0.621

### 3.1 背角无齿蚌对理化指标的影响

背角无齿蚌属于底栖动物, 耗氧率较低, 仅有 0.5 mg/(g·h)左右<sup>[14]</sup>。因此, 对微生态系统中的 DO 影响不明显。养殖水体 pH 主要受到生物的呼吸作用和光合作用影响。本研究显示背角无齿蚌对 pH 影响不明显, 这与陈修报等<sup>[6]</sup>和 Kim 等<sup>[7]</sup>的研究结果一致, 而不同于敬小军等<sup>[15]</sup>认为背角无齿蚌的呼吸作用导致水体 pH 降低, 这可能是由于后者的养殖密度太高

(160 个/ $m^3$ )的缘故。此外, 不同组别的总固溶物含量变化亦不太明显, 表明背角无齿蚌的滤水作用不会加剧底泥向水体中释放可溶性有机质。值得注意的是, 背角无齿蚌能够显著降低浊度和 Chl-a 含量(表 1), 对它们的去除率可分别达到 79.2%和 83.4%。这与前人研究结果相吻合, 魏小飞等<sup>[16]</sup>发现背角无齿蚌能够快速降低再悬浮水体中总悬浮质和 Chl-a 的含量, 处理 2 d 对它们的去除率就可达到 61%和 64%左右;

李萍等<sup>[17]</sup>应用背角无齿蚌对含有底泥的水体进行相对长期(58 d)净化实验,发现其对 Chl-a 的平均去除率为 39.3%。提示背角无齿蚌能够有效提高养殖水体的透明度和防控以 Chl-a 为代表的富营养化。

### 3.2 背角无齿蚌对营养盐的净化效果

底泥是大宗淡水鱼类养殖池塘等水生生态系统的重要组成部分,它可以吸附水体的营养盐,降低上覆水体的污染程度<sup>[1-2, 18]</sup>。同时,如果环境条件发生改变(如 DO 变化、鱼类搅动),底泥中的营养盐又会释放到水体中,造成二次污染<sup>[1-2, 18]</sup>。一般认为 N 的释放机理是底泥表层的有机氮在异养微生物作用下发生降解、矿化生成  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,被黏土矿物吸附而形成交换态  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  积存于间隙水中,然后通过扩散作用释放到上覆水中,在有氧状态下释放  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,厌氧状态下释放  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ <sup>[1, 19]</sup>。P 释放则与底泥表层的有机质的矿化分解相关<sup>[2]</sup>。对照组中 TN 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  表现出降低趋势,而  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  呈现出短暂的升高,这可能与池塘底泥对 TN 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的再次吸附,以及在有氧条件下交换态的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  转换为  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  有关。

背角无齿蚌通过摄食细菌、藻类、浮游动物和底泥<sup>[20]</sup>,吸收和利用了水环境中大量的 N 和 P 等生源要素,从而有效降低水体中的营养盐<sup>[6]</sup>。本研究显示背角无齿蚌对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除率可达到 90.9%,高于铜锈环棱螺(*Bellamyia aeruginosa*)和背角无齿蚌混养对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的净化效果(25.6%)<sup>[21]</sup>。背角无齿蚌对 TP 的去除率可达到 55.6%,不同于魏小飞等<sup>[16]</sup>研究显示的无法明显去除 TP,这可能与其处理时间较短(7 d)有关。背角无齿蚌对 TP 的去除率高于铜锈环棱螺和背角无齿蚌混养对其 26.1%的去除率,但低于芦苇湿地对 TP 的净化效果(87.1%)<sup>[22]</sup>。此外,本研究中背角无齿蚌对  $\text{PO}_4^{3-}$  也表现出较高的去除率(52.9%),这不同于其对单纯水体中  $\text{PO}_4^{3-}$  未表现出明显净化效果<sup>[6]</sup>,这可能是由于后者  $\text{PO}_4^{3-}$  含量相对较低(0.046~0.169 mg/L)造成的。研究表明水生生物如挺水植物对 N、P 的去除率就与水体中 N、P 含量成正相关<sup>[23]</sup>。在吸收营养盐的同时,贝类也会通过呼吸作用和排泄作用排出一定量的 N 和 P<sup>[14, 24]</sup>。例如,背角无齿蚌对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的排泄率约为 5.5 mg/(kg·h)<sup>[14]</sup>。而且淡水贝类对 N 的排出率远高于 P,如斑马贻贝(*Dreissena polymorpha*)排出的 N:P 比约 20:1,这可能是本研究中 TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  含量升高的原因。

贝类被认为是净化水环境营养盐的较为理想的物种<sup>[25-26]</sup>。Petersen 等<sup>[25]</sup>研究表明养殖生物量是影响

贝类去除营养盐(N 和 P)的主要因素。而背角无齿蚌对营养盐的净化效果受到养殖密度和处理时间的共同影响(表 3),从而通过优化养殖密度和处理时间的配比能够将 TP 和  $\text{PO}_4^{3-}$  的去除率进一步提升至 68.9%和 58.1%。这将对利用背角无齿蚌开展鱼、蚌混养的生态养殖模式以及养殖池塘底泥富营养化的防控提供借鉴作用。

综上所述,背角无齿蚌具有防控、修复养殖池塘底泥富营养化的潜力。对于底泥释放营养盐的水环境,背角无齿蚌能够显著降低浊度,并有效去除 Chl-a、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 和  $\text{PO}_4^{3-}$ ,对它们的去除率分别可达到 79.2%、83.4%、90.9%、55.6%和 52.9%。同时,背角无齿蚌对营养盐的净化效果与养殖密度和处理时间密切相关。当养殖密度和处理时间分别优化为 27 个/m<sup>3</sup>和 22.63 d、25 个和 23.69 d 时,对 TP 和  $\text{PO}_4^{3-}$  的去除率有望进一步提升至 68.9%和 58.1%。

参考文献:

- [1] 周劲风,温琰茂,李耀初. 养殖池塘底泥-水界面营养盐扩散的室内模拟研究: I 氮的扩散[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 786-791.  
Zhou Jinfeng, Wen Yanmao, Li Yaochu. Nutrients diffusion at the water-sediment interface of farming ponds by indoor simulation experiment: I Diffusion of nitrogenous compounds [J]. Journal of Agro-Environment Scienc, 2006, 25(3): 786-791.
- [2] 周劲风,温琰茂,李耀初. 养殖池塘底泥-水界面营养盐扩散的室内模拟研究: 磷的扩散[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 792-796.  
Zhou Jinfeng, Wen Yanmao, Li Yaochu. Nutrients diffusion at the water-sediment interface of farming ponds by indoor simulation experiment: Diffusion of phosphorous compounds [J]. Journal of Agro-Environment Scienc, 2006, 25(3): 792-796.
- [3] 夏新建,许忠能,林小涛,等. 不同池塘养殖模式的环境氮磷负荷及其水质特征[J]. 海洋科学, 2012, 36(5): 87-92.  
Xia Xinjian, Xu Zhong-neng, Lin Xiao-tao, et al. Environmental nitrogen and phosphorus loading and water quality of three culture methods in ponds [J]. Marine Sciences, 2012, 36(5): 87-92.
- [4] Spyra A, Jędraszewska N, Strzelec M, et al. Further expansion of the invasive mussel *Sinanodonta woodiana* (Lea, 1834) in Poland - establishment of a new locality and population features[J]. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems, 2016, 417: 41.
- [5] Chen X B, Liu H B, Su Y P, et al. Morphological development and growth of the freshwater mussel *Ano-*

- donta woodiana* from early juvenile to adult [J]. *Invertebrate Reproduction and Development*, 2015, 59(3): 131-140.
- [6] 陈修报, 苏彦平, 刘洪波, 等. 背角无齿蚌对养鱼水体的净化效果[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(4): 1757-1762.  
Chen Xiubao, Su Yanping, Liu Hongbo, et al. Purification capacity of *Anodonta woodiana* on fishpond water[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(4): 1757-1762.
- [7] Kim B H, Lee J H, Hwang S J. Inter- and intra-specific differences in filtering activities between two unionids, *Anodonta woodiana* and *Unio douglasiae*, in ambient eutrophic lake waters[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37: 1957-1967.
- [8] 丁涛, 李林, 彭亮, 等. 背角无齿蚌摄食率及对水中叶绿素 a 清除能力的研究[J]. *水生生物学报*, 2010, 34(4): 779-786.  
Ding Tao, Li Lin, Peng Liang, et al. Studies on elimination of chlorophyll-a and ingestion rate in eutrophic water by *Anodonta woodiana elliptica*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, 34 (4): 779-786.
- [9] 孟顺龙, 吴伟, 胡庚东, 等. 底栖动物螺蛳对池塘底泥及水质的原位修复效果研究[J]. *环境污染与防治*, 2011, 33(6): 44-47.  
Meng Shunlong, Wu Wei, Hu Gengdong, et al. Preliminary study on the restoration effect of snail on the sediment and water of ponds[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2011, 33(6): 44-47.
- [10] Hu G J, Zhou M, Hou H Bo, et al. An ecological floating-bed made from dredged lake sludge for purification of eutrophic water[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36: 1448-1458.
- [11] Li X, Song H, Li W, et al. An integrated ecological floating-bed employing plant, freshwater clam and biofilm carrier for purification of eutrophic water[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36: 382-390.
- [12] Razzaghmanesh M, Beecham S, Kazemi F. Impact of green roofs on stormwater quality in a South Australian urban environment [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 470-471: 651-659.
- [13] 徐钢春, 顾若波, 闻海波, 等. 温度、pH 对圆背角无齿蚌滤水率的影响[J]. *水生生物学报*, 2007, 31(4): 600-603.  
Xu Gangchun, Gu Ruobo, Wen Haibo, et al. Influence of water temperature and pH on filtration rate of *Anodonta woodiana pacifica*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, 31(4): 600-603.
- [14] 温晓蔓, 孙陆宇, 禹娜, 等. 温度和盐度对背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)代谢的影响[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2011, 50(5): 632-639.  
Wen Xiaoman, Sun Luyu, Yu Na, et al. Effect of temperature and salinity on metabolism of *Anodonta woodiana*[J]. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2011, 50(5): 632-639.
- [15] 敬小军, 闵宽洪, 姜海洲, 等. 背角无齿蚌净化精养池塘水质试验[J]. *南方农业学报*, 2011, 42(4): 450-452.  
Jing Xiaojun, Min Kuanhong, Jiang Haizhou, et al. Experiment on water purification of intensive culturing fishpond using *Anodonta woodiana*[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2011, 42(4): 450-452.
- [16] 魏小飞, 关保华, 刘正文. 背角无齿蚌对水体净化作用的研究[J]. *生态科学*, 2016, 35(1): 56-60.  
Wei Xiaofei, Guan Baohua, Liu Zhengwen. Research on water purification of *Anodonta woodiana*[J]. *Ecological Science*, 2016, 35(1): 56-60.
- [17] 李萍, 张修峰, 莫树青. 背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)、苦草(*Vallisneria natans*)及其共存对水质的影响[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(6): 1589-1594.  
Li Ping, Zhang Xiufeng, Mo Shuqing. Effects of mussel (*Anodonta woodiana*), submerged macrophyte (*Vallisneria natans*) and their coexistence on water quality[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(6): 1589-1594.
- [18] 邹乐, 严少华, 王岩, 等. 水葫芦净化富营养化水体效果及对底泥养分释放的影响[J]. *江苏农业学报*, 2012, 28(6): 1318-1324.  
Zou Le, Yan Shaohua, Wang Yan, et al. Effect of water hyacinth on purification of eutrophic water and nutrients release from sediment[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 28(6): 1318-1324.
- [19] Moore P A, Reddy K R, Graetz D A. Nutrient transformations in sediments as influenced by oxygen supply[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1992, 21: 387-393.
- [20] Christian A D, Smith B N, Berg D J, et al. Trophic position and potential food sources of 2 species of unionid bivalves (Mollusca: Unionidae) in 2 small Ohio streams[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2004, 23: 101-113.
- [21] 李雪娟, 和树庄, 李军, 等. 螺、蚌对污水处理厂再生水环境的改善稳定作用[J]. *环境工程学报*, 2012, 6(10): 3485-3492.  
Li Xuejuan, He Shuzhuang, Li Jun, et al. Role of snails and mussels in improving and stabilizing reclaimed water environment of sewage treatment plants [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(10): 3485-3492.
- [22] 欧维新, 杨桂山, 高建华. 苏北盐城海岸带芦苇湿地对营养物质的净化作用初步研究[J]. *海洋科学*, 2012, 10(6): 3485-3492.  
OU Weixin, Yang Guishan, Gao Jianhua. Preliminary

- study on purification function of reed wetland for nutrients in coastal zone of Yancheng [J]. *Marine Sciences*, 2012, 10(6): 3485-3492.
- [23] 陈晓希, 白晓华. 洱海湿地植物不同组合配置对氮磷的去除效果研究[J]. *环境科学导刊*, 2017, 36(3): 46-52.  
Chen Xiaoxi, Bai Xiaohua. Removal effects of nitrogen and phosphorus on wetland plant assemblages in Erhai Lake [J]. *Environmental Science Survey*, 2017, 36(3): 46-52.
- [24] Arnott D L, Vanni M J. Nitrogen and phosphorus recycling by the zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) in the western basin of Lake Erie [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1996, 53: 646-659.
- [25] Petersen J K, Hasler B, Timmermann K, et al. Mussels as a tool for mitigation of nutrients in the marine environment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 82: 137-143.
- [26] 沈辉, 万夕和, 何培民. 富营养化滩涂生物修复研究进展[J]. *海洋科学*, 2016, 40(10): 160-169.  
Shen Hui, Wan Xihe, He Peimin. Review of research on bioremediation in the eutrophication of intertidal flats[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(10): 160-169.

## Purification capacity of *Anodonta woodiana* on nutrients released from pond sediment

CHEN Xiu-bao, LIU Hong-bo, SU Yan-ping, GE Xian-ping, YANG Jian

(Key Laboratory of Fishery Eco-Environment Assessment and Resources Conservation in Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China)

**Received:** Jul. 16, 2017

**Key words:** *Anodonta woodiana*; sediment; nutrients; purification

**Abstract:** Microcosm experiments were conducted to determinate the purification capacity of freshwater mussel *Anodonta woodiana* on nutrients released from pond sediment, and to study the effect of mussel systems by different density and treatment time. No significant effect was observed on pH, DO, and total solid solution. Significantly reduced levels were found on turbidity and Chl-a ( $P < 0.05$ ), and the maximum removal efficiencies for them were 79.2% and 83.4%, respectively. The purifying effect of *A. woodiana* on nutrients was significantly affected by culture density and treatment time ( $P < 0.05$ ). The total nitrogen,  $\text{NO}_3^-$ -N, and  $\text{NO}_2^-$ -N showed increased levels. In contrast, the levels of  $\text{NH}_4^+$ -N, TP, and  $\text{PO}_4^{3-}$  were significantly decreased ( $P < 0.05$ ). The maximum removal efficiencies for  $\text{NH}_4^+$ -N, TP, and  $\text{PO}_4^{3-}$  were 90.9%, 55.6%, and 52.9% respectively. Furthermore, analysis of response optimization showed that the removal efficiencies for TP and  $\text{PO}_4^{3-}$  could possibly be elevated to 68.9% and 58.1% respectively, if the mussel systems are assigned at density-time of 27 ind./m<sup>3</sup>-22.63 d and 25 ind./m<sup>3</sup>-23.69 d. The present study suggests that *A. woodiana* can be effectively utilized in a purification approach for sediment eutrophication.

(本文编辑: 李晓燕)