

文章编号: 1674-5566(2024)03-0646-12

DOI: 10.12024/jsou.20231204376

大型海藻南方浒苔对水产养殖废水净化作用的研究

陈春丽¹, 林翰翔¹, 林坤¹, 谢恩义¹, 姜海波², 朱文荣³, 崔建军¹

(1. 广东海洋大学 水产学院, 广东 湛江 524088; 2. 宁波大学 海洋学院, 浙江 宁波 315211; 3. 象山旭文海藻开发有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘要: 为了确定南方浒苔对水产养殖废水的净化效率、最适藻体密度和最佳处理时长, 实验以模拟水产养殖废水为藻体培养液, 设置0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 g/L(实验组)和0 g/L(对照组)共6个藻体密度梯度, 培养于bluepard生化培养箱内, 在第0、12、24、36、48、60、72 h测定藻体培养液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的浓度。结果显示, 南方浒苔对水产养殖废水具有显著的净化效果($P < 0.05$), 其中净化养殖废水最适藻体密度为2.5 g/L。在南方浒苔最适藻体密度下有效净化水产养殖废水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 时最佳处理时长分别为24、60、48、72 h, 其去除率分别可达96.02%、51.83%、80.85%、97.67%。同时, 南方浒苔对不同形式无机氮的吸收效率会受到水产养殖废水中不同氮源组成的影响, 具体表现为先吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 再吸收 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 最后吸收 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 。研究表明, 藻体密度为2.5 g/L的南方浒苔在水产养殖废水中处理72 h对废水中氮磷净化效果最佳。本研究可为生物净化水产养殖废水提供数据支持。

关键词: 大型海藻; 南方浒苔; 水产养殖废水; 脱氮去磷; 净化作用

中图分类号: S 949

文献标志码: A

中国是世界上的水产养殖大国, 也是唯一一个水产养殖量高于捕捞量的国家^[1]。近年来, 工厂化、规模化水产养殖技术的不断进步, 推动了水产养殖规模的不断扩大, 集约化、规模化的水产养殖模式应运而生^[2]。由于片面追求经济效益、不规范管理、药物滥用、机械化发展不平衡不充分等原因, 导致富含大量无机营养盐(铵盐、硝酸盐、亚硝酸盐、磷酸盐)、有机废物(水产经济动物排泄物、残饵等)、重金属以及抗生素等的养殖尾水未经处理直接排出, 严重污染周围的水环境, 造成水体富营养化^[3-5]。富营养化水体中的无机营养盐和有机物等通过一系列的转化与分解, 不仅降低了水中溶氧量, 影响水产经济动物的正常生长, 同时高浓度氨氮也会降低水产经济动物的免疫力, 致使各类疾病频繁发生, 阻碍了水产养殖业的健康发展^[6-8]。

目前, 广泛应用于净化养殖废水的方法有物理处理法、化学处理法和生物处理法^[9]。物理处

理法通常包括过滤、泡沫、吸附分离技术以及固液分离技术^[10-11], 该处理法需要大型设备, 操作复杂, 往往不适用于中小型养殖场。化学处理法一般是利用过氧化氢、二氧化氯、次氯酸钠等化学试剂, 氧化分解养殖废水中难以被生物降解的有机物^[9]; 但由于水中易残留化学药品, 易对养殖环境造成二次危害。生物处理法是指通过生物的吸收、转化、降解达到净化水质的目的, 与物理、化学处理法相比, 具有资金投入少、效率高、不产生二次污染等特点, 更适用于净化水产养殖废水^[9]。例如, 赵秀侠等^[12]发现0.28 g/L栅藻(*Scenedesmus* sp.)能去除龟鳖养殖废水中93.65%的总氮(TN), 0.26 g/L小球藻(*Chlorella* sp.)能去除99.46%的总磷(TP)。刘庆辉等^[4]指出绿色巴夫藻(*Pavlova viridis*)对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 去除效果最佳, 最大去除率分别为88.35%和97.43%。MARINHO-SORIANO等^[13]通过用龙须菜处理虾池的养殖污水, 发现龙须菜在4 h内能去除

收稿日期: 2023-12-22

修回日期: 2024-02-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2401303); 广东海洋大学博士启动费及研究生培养经费项目(R19049)

作者简介: 陈春丽(1988—), 女, 硕士, 研究方向为海藻生理生化。E-mail: chen Chunli16@163.com

通信作者: 崔建军, E-mail: cuijianjun29@163.com

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

http://www.shhydx.com

59.5% 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、49.6% 的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 12.3% 的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 。牛化欣等^[14]发现 360 g/m²混养江鳊可以改善水质条件并且能将混养对虾的成活率提升至 74.17%。卢宏博等^[15]指出生物量为 200 g 和 300 g 的孔石莼(*Ulva pertusa*)生物滤器能吸收去除废水中 90% 的氨氮和磷酸盐。以上研究均表明,经济藻类不仅可有效净化水产养殖废水,同时还有助于实现水产养殖废水的循环利用,促进可持续发展。

大型经济绿藻浒苔类海藻隶属于绿藻门(Chlorophyta)绿藻纲(Chlorophyta)石莼目(Ulvales)石莼科(Ulvaceae)石莼属(*Ulva*),具有分布范围广、生长速度快、生殖方式多、繁殖能力强、营养价值高等特点,广泛应用于保健食品、饲料、化妆品等行业^[16-19]。南方浒苔(*Ulva meridionalis*)最早在 2000 年日本的德岛发现,在 2009 年正式命名^[20]。南方浒苔在中国、日本等均有分布,常常在河口、湖泊、内湾海域附近的潮带间形成优势种群^[21]。其生长速度是正常浒苔的 2 倍,且可以耐受 30 °C 的高温环境,净化市政污水效果显著,是用于净化养殖废水的优选材料之一^[22-23]。为了评估南方浒苔净化水产养殖废水的能力及效果,本文以不同密度的南方浒苔藻体处理人工配制的水产养殖废水,揭示其净化水产养殖废水的效率、最适藻体密度及最佳处理时长。研究结果为浒苔应用于净化水产养殖尾水提供数据支持,也为我国水产养殖业健康可持续发展提供助力。

1 材料与方 法

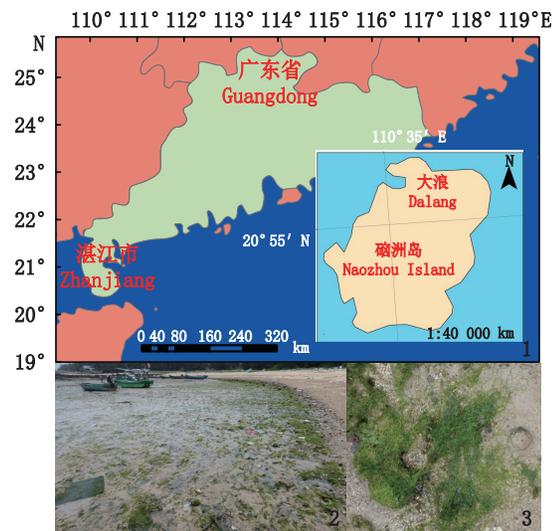
1.1 样品采集

实验用南方浒苔样品于 2021 年 3 月采自广东省湛江市硇洲岛大浪(20°56'49''N, 110°36'07''E)(图版 I)。采集后的样品低温运回实验室,用灭菌海水清洗样品表面杂质后暂养于藻类培养室中,每 3 天更换 1 次灭菌海水。暂养条件为温度(25±1)°C,光照强度 5 000 ~7 000 lx,盐度 30,光周期为 12 L:12 D。

1.2 簇状幼苗

南方浒苔簇状幼苗的培养分别参照了 HIRAOKA 等^[22]和 XIE 等^[24]的培养方法。首先,从暂养室中选取藻体粗壮、顶端呈黄绿色的南方浒苔藻体为母藻(图版 II-1);将母藻切为 1~3 mm

藻段,并用蒸馏水冲洗 3~5 次(图版 II-2);冲洗后的藻段转入含有 ES 营养液^[25]的烧杯(500 mL)中进行充气培养(图版 II-3);培养 2~3 d 后,将变为棕黄色的藻段进行单侧光刺激,获取高密度生殖细胞液(图版 II-4);转移高密度生殖细胞液于玻璃培养皿($\Phi=90$ mm)中,经过 24 h 黑暗处理后培养于 bluepard 生化培养箱中(培养条件与藻体暂养条件相同),1 周后,培养皿中萌发的高密度幼苗长度为 3~5 mm(图版 II-5);用孔径为 40 μm 的滤网将高密度幼苗进行人工分离,分离后的簇状幼苗(每簇约含有几十株幼苗)转入含有 ES 营养液^[25]的 1 L 烧杯中,在相同条件下扩大培养至簇状幼苗 1 cm 左右(图版 II-6)。选取部分簇状幼苗藻体培养于未添加营养液的灭菌海水中,饥饿处理 72 h,用于后续氮磷吸收和无机氮交互作用实验。

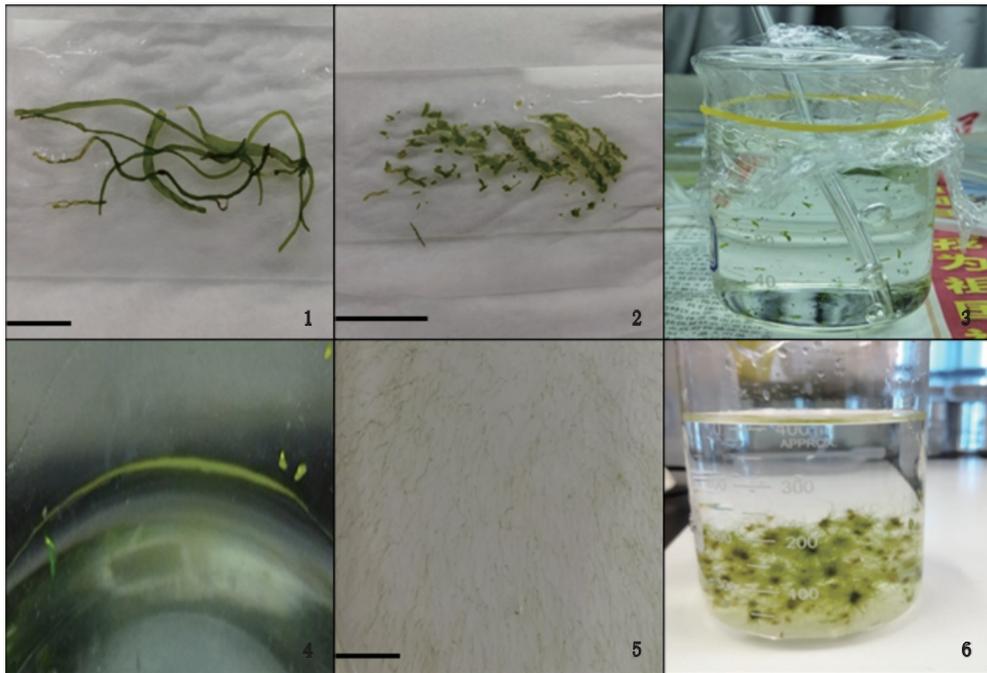


1. 南方浒苔样品采集的地理位置(红点表示采集地点);2和3. 野生南方浒苔藻体。
1. geographical location of *U. meridionalis* (red dot was the collection site); 2 and 3. wild *U. meridionalis*.

图版 I 南方浒苔样品采集位点
Plate I Collection site of *U. meridionalis*

1.3 模拟水产养殖废水

模拟水产养殖废水的配制分别参照了刘洋^[9]和黄静依等^[26]的配制方法。首先,称取 0.492 9 g NaNO_2 、1.214 3 g NaNO_3 、0.439 0 g KH_2PO_4 、1.528 6 g NH_4Cl 分别溶于 100 mL 蒸馏水中,配置为模拟养殖废水母液。然后,取 1 mL 母液溶于 1 L 灭菌人工海水^[27](表 2)中,配成模拟养殖废水,其中各氮磷最终浓度如表 1 所示。



1. 母藻; 2. 藻体片段; 3. 片段培养; 4. 生殖细胞液; 5. 萌发幼苗; 6. 簇状幼苗。标尺刻度为1 cm。

1. Mother thalli; 2. Thalli fragments; 3. Culturing fragments; 4. Zoid suspension; 5. Germling aggregations; 6. Germling clusters. The scale bars=1cm.

图版 II 簇状幼苗制作过程。

Plate II Culture process for the production of germling clusters.

表1 模拟养殖废水中无机氮磷浓度
Tab. 1 Inorganic nitrogen and phosphorus concentration in artificial aquaculture wastewater

指标 Index	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$
浓度 Concentration/(mg/L)	4	1	2	1

表2 人工海水配方
Tab. 2 Artificial seawater formula

化学试剂 Chemical reagent	试剂用量 Reagent dosage/(g/L)
氯化钠(NaCl)	24.540
硫酸钠(Na_2SO_4)	4.090
氯化钾(KCl)	0.700
碳酸氢钠(NaHCO_3)	0.200
溴化钾(KBr)	0.100
硼酸(H_3BO_3)	0.003
氟化钠(NaF)	0.003
六水合氯化镁($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	11.100
氯化钙(CaCl_2)	1.540
六水合氯化锶($\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	0.017

注:人工海水经高压灭菌(120 °C, 0.2 MPa, 20 min)后使用。
Notes: Autoclaved artificial seawater is used 120 °C, 0.2 MPa for 20 min after high-pressure sterilization.

1.4 实验设计

1.4.1 南方浒苔对氮磷元素的吸收速率

转移经饥饿处理后的上述南方浒苔簇状幼

<http://www.shhydxxb.com>

苗于玻璃培养皿中,从玻璃培养皿中筛选生长状态良好、藻体长度为1 cm左右的簇状幼苗,平摊于两层(每层吸水纸由4张吸水纸堆叠组成)吸水纸之间,吸水纸上方放置1 L三角瓶,计时15 s后用分析天平(FA1104,上海,中国)分别称取0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 g南方浒苔簇状幼苗。分别转移上述称取的0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 g(实验组)和0 g(对照组)簇状幼苗于含有1 L模拟水产养殖废水的烧杯中,充气培养于bluepard生化培养箱内,培养条件与暂养条件一致。每组设置3个平行,并在0、12、24、36、48、60、72 h时各取10 mL水样,测定水样中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的含量。

1.4.2 模拟水产养殖废水中无机氮的交互作用

称取0.4929 g NaNO_2 、0.6072 g NaNO_3 、0.4390 g KH_2PO_4 、0.3822 g NH_4Cl 分别溶于100 mL蒸馏水中,配置为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 母液。将1.5 mL $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 母液转移至含有500 mL灭菌海水的不同烧杯中,用于单氮源实验;将0.75 mL $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 母液、0.75 mL $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 母液、及0.75 mL $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 母液转移至含有500 mL灭菌海水的不同烧杯中,用于双氮源实验;将0.5 mL $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 母液

转移至含有 500 mL 灭菌海水烧杯中,用于三氮源实验。同时,分别转移 2 mL $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 母液和 0.5 g 南方浒苔簇状幼苗于上述单氮组、双氮组和三氮组实验的烧杯中,在上述培养条件下,于第 0、3、6、9 小时各取 10 mL 水样,用于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的检测,每组实验设置 3 个平行,其中各实验组氮磷浓度如表 3 所示。

表 3 各实验组无机氮磷浓度
Tab. 3 Inorganic nitrogen and phosphorus concentration in each treatment group

氮源 Nitrogen source	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	$\text{NH}_4^+\text{-N}$
单氮源 Single nitrogen source/(mg/L)	4	3	0	0
	4	0	3	0
	4	0	0	3
双氮源 Double nitrogen source/(mg/L)	4	1.5	1.5	0
	4	1.5	0	1.5
	4	0	1.5	1.5
三氮源 Three nitrogen source/(mg/L)	4	1.0	1.0	1.0

1.5 各氮磷含量测定方法与吸收速率计算

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度的测定方法参照海洋监测规范(GB17378.4—2007)。

总无机氮(TIN)浓度计算方法如下:

$$C_{\text{TIN}}=C_1+C_2+C_3 \quad (1)$$

式中: C_1 为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度, C_2 为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度, C_3 为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度。

南方浒苔对氮磷的去除率计算方法如下:

$$\gamma=(C_0-C_t)/C_0 \quad (2)$$

式中: γ 为氮磷的去除率,%, C_0 为溶液中氮磷的初始浓度, mg/L, C_t 为第 t 小时溶液中氮磷的浓度, mg/L, t 为取样时间, h。

南方浒苔对氮磷的吸收速率计算方法如下:

$$v=(C_n-C_t) \times V/m \times t \quad (3)$$

式中: v 为南方浒苔吸收速率, $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$, C_t 为第 t 小时溶液中氮磷的浓度, mg/L, C_n 为第 n 小时溶液中氮磷的浓度, mg/L, V 为取样前水体的体积, mL, m 为实验开始时藻体的鲜重, g, t 为取样时间, h, n 为与 t 相邻的前一次取样时间, h。

1.6 数据处理

实验数据用 Excel 2021 进行整理,以 SPSS 26.0 进行统计分析,以平均值 \pm 标准差表示。通过单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan 氏多重比较检验藻类净化模拟养殖废水的效

果,当 $P < 0.05$ 时认为实验组与对照组具有显著差异。

2 结果

2.1 南方浒苔对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的净化作用

由图 1 可知南方浒苔簇状藻体对模拟水产养殖废水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 有显著的净化作用($P < 0.05$)。在同一藻体密度下,随着取样时间的延续,养殖废水中无机氮磷的浓度呈现先快速降低、后变缓的趋势,对无机氮磷的吸收速率整体呈逐渐降低趋势(图 1 和图 2)。在同一取样时间下,南方浒苔藻体密度越大,养殖废水中无机氮磷的浓度越低,去除率越高(图 1 和图 3)。

对于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收,在藻体密度为 2.5 g/L 时,南方浒苔去除养殖废水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 效果最佳;经过 24 h 处理,养殖废水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度由 4.0 mg/L 降低至 0.16 mg/L,去除率高达 96.02%;处理 72 h 后,养殖废水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度降至最低,为 0.062 mg/L (图 1a, 图 3a);而在第 12 小时、藻体密度为 0.5 g/L 时,南方浒苔对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收速率最大,为 177.83 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$ (图 2)。对于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收,经过 48 h 处理,2.5 g/L 的南方浒苔使养殖废水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度由 2.0 mg/L 降低至 0.375 mg/L,去除率高达 80.85%;处理 72 h 后,养殖废水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度降至最低,为 0.083 mg/L (图 1b, 图 3b);而在第 12 小时、藻体密度为 0.5 g/L 时,南方浒苔对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收速率最大,为 74.00 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$ (图 2b)。对于 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的吸收,前 12 小时养殖废水中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的浓度快速下降,随着时间的推移, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的浓度在一定范围内波动。在南方浒苔藻体密度为 2.5 g/L,时间为 60 h 时,其浓度从 1.0 mg/L 降至 0.498 mg/L,去除率达到 51.83%;处理 72 h 后,养殖废水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的浓度降至最低,为 0.352 mg/L (图 1c, 图 3c);而在第 12 小时、藻体密度为 0.5 g/L 时,南方浒苔对 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的吸收速率最大,为 25.45 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$ (图 2c)。对于 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸收,藻体密度为 2.5 g/L 的南方浒苔去除养殖废水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 效果最佳,经过 72 h 处理, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度由 1.0 mg/L 降低至 0.024 mg/L,去除率高达 97.67% (图 1d, 图 3d);而在第 12 小时、藻体密度为 1.0 g/L 时,南方浒苔对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸收速率最大,为 20.44 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$ (图 2d)。

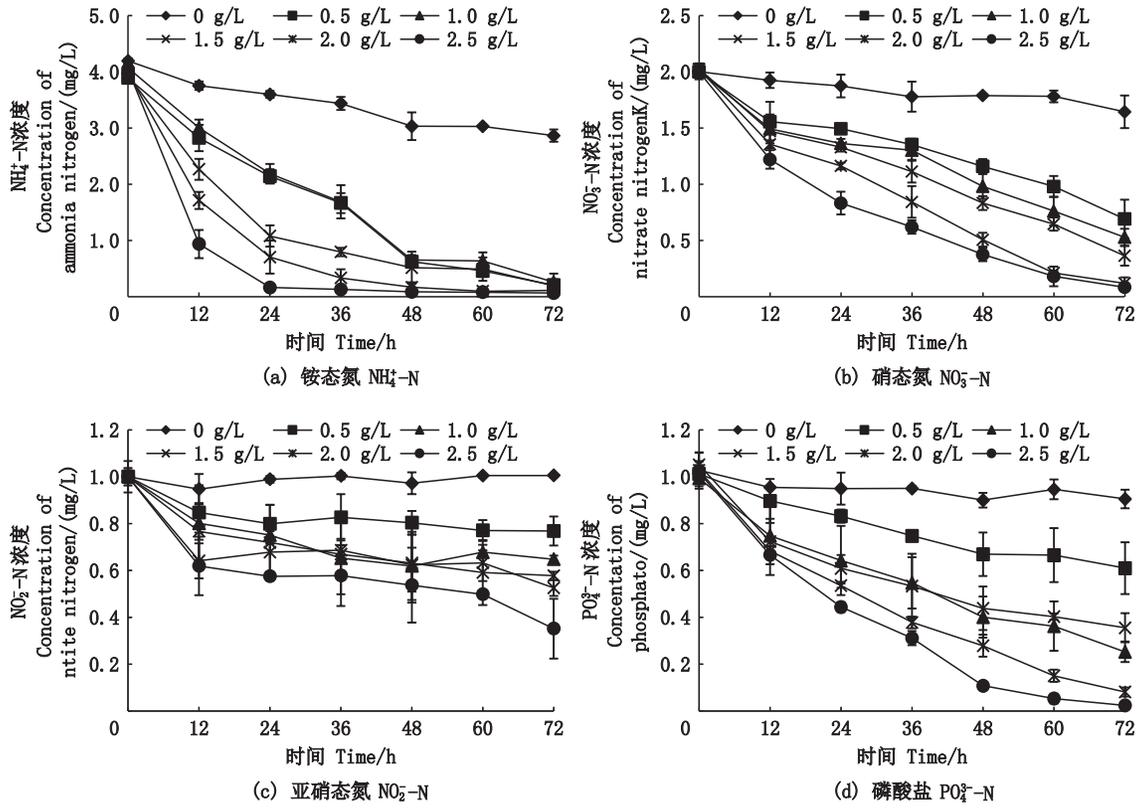


图1 不同浒苔藻体密度下模拟养殖废水中无机氮磷浓度的变化

Fig. 1 Change of inorganic nitrogen and phosphorus concentration in artificial aquaculture wastewater at different *U. meridionalis* densities

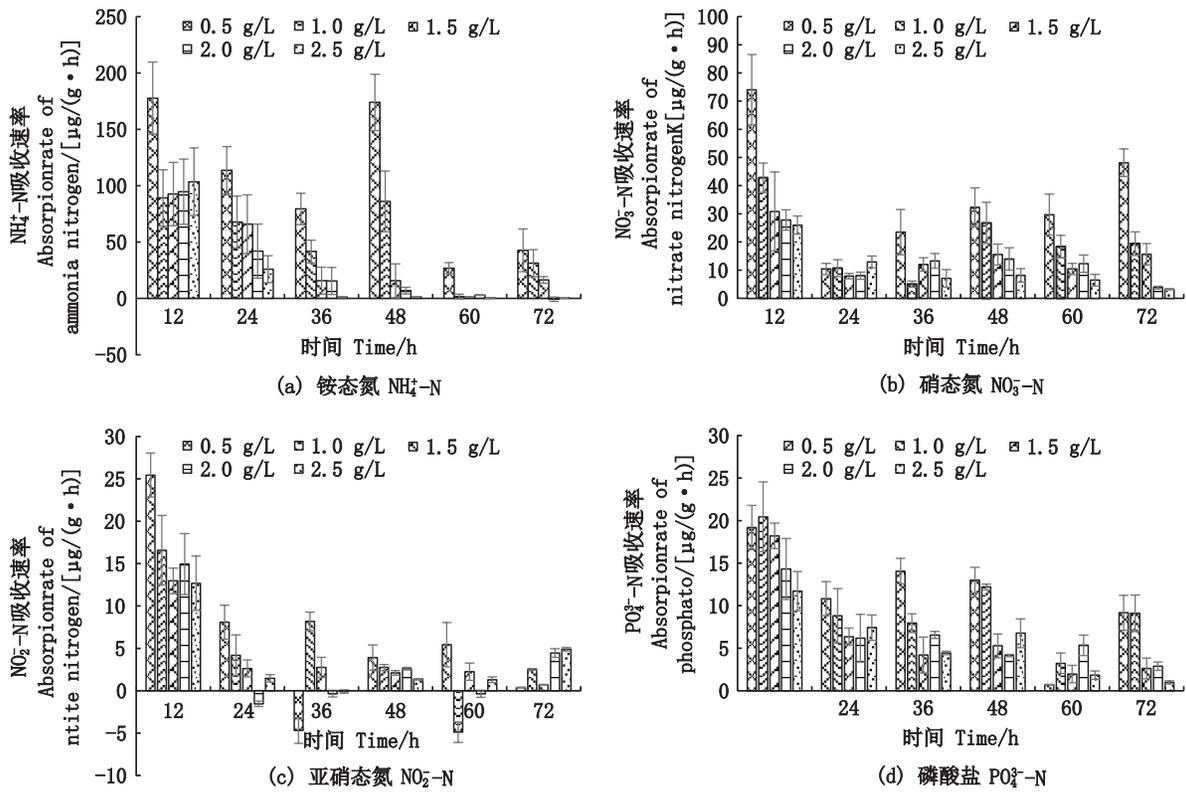


图2 不同浒苔藻体密度下无机氮磷的吸收速率

Fig. 2 Absorption rate of inorganic nitrogen and phosphorus at different *U. meridionalis* densities

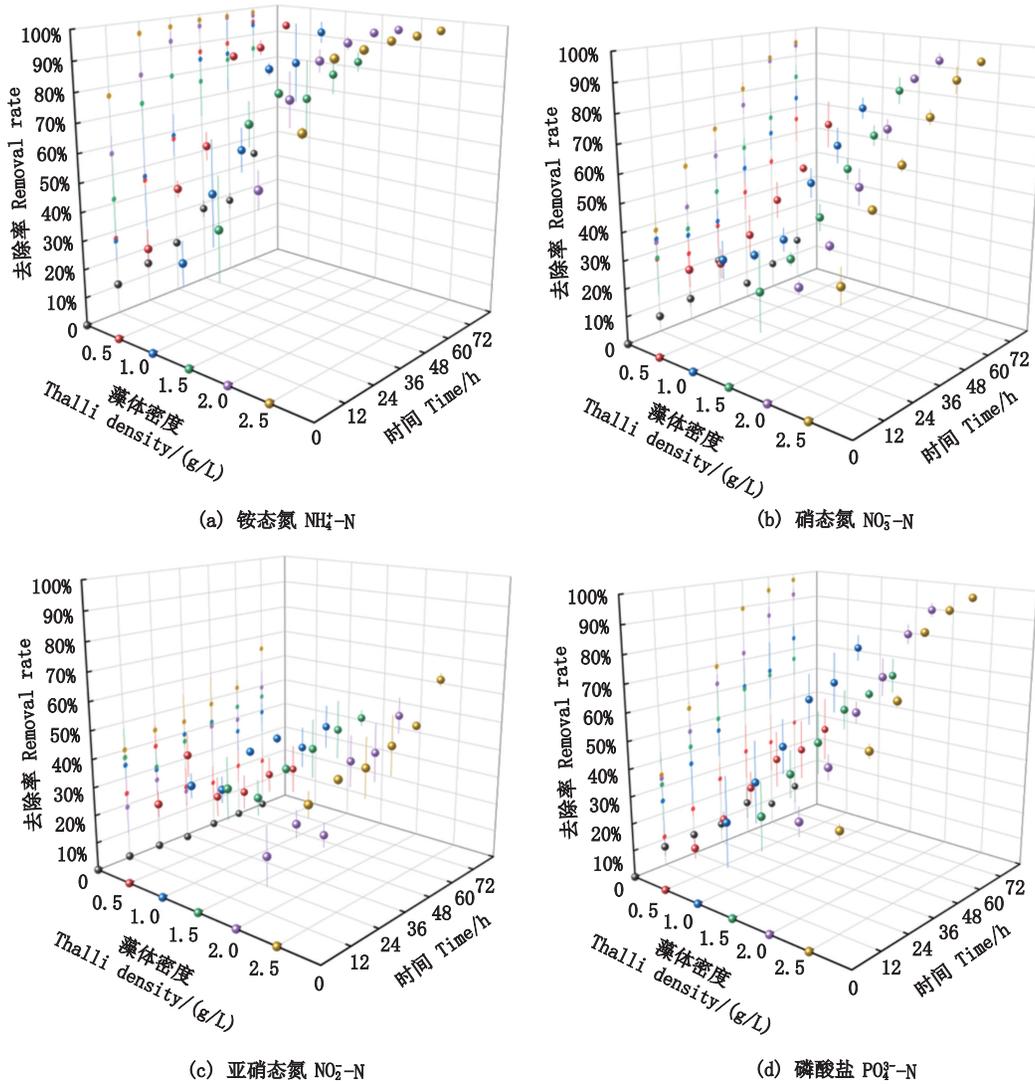


图3 不同浒苔藻体密度下模拟养殖废水中无机氮磷的去除率
Fig. 3 Removal rates of inorganic nitrogen and phosphorus concentration in artificial aquaculture wastewater at different *U. meridionalis* densities

2.2 养殖废水中无机氮的交互作用

为了解析浒苔吸收养殖废水中3种无机氮源 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$) 的优先顺序及吸收过程中3种无机氮源之间的相互作用,本实验设计了在单一氮源组、双氮源组和三氮源组培养下,浒苔对3种氮源的吸收速率(图4)。结果表明,在单一氮源培养条件下,浒苔对3种氮源的吸收速率整体呈下降趋势;在第3小时时,浒苔对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的吸收效率最大,分别为 $598 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 、 $397 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 、 $372 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ (图4)。在双氮源培养条件下,当 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 或 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 组合时,浒苔对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸收速率逐渐下降,而对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 或 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 吸收速率逐渐升高;浒苔对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$

N 的最大吸收速率出现在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 组合,为 $405 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$;相对于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的添加更加抑制浒苔藻体对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收(图5a和5b)。在 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 组合培养下,浒苔对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收速率显著高于 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ($P < 0.05$),且在第3小时均取得最大值,分别为 $152 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 、 $122 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ (图5c)。在3种氮源共同培养下,培养液中 TIN 浓度随着培养时间的延长而降低,到第9小时降低至 1.101 mg/L (图6);而浒苔对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 吸收速率的变化趋势与单一氮源培养下一致,3种氮源的吸收速率总体呈现 $\text{NH}_4^+\text{-N} > \text{NO}_3^-\text{-N} > \text{NO}_2^-\text{-N}$ (图5d)。

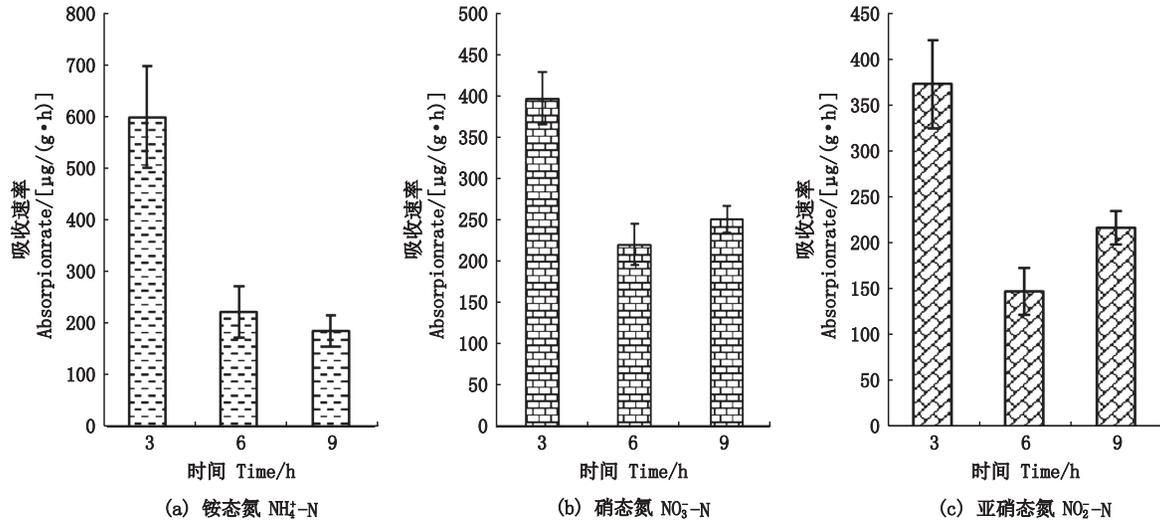


图4 单一氮源培养下浒苔对无机氮的吸收速率

Fig. 4 Absorption rate of inorganic nitrogen by *U. meridionalis* under the culture condition of a single nitrogen source

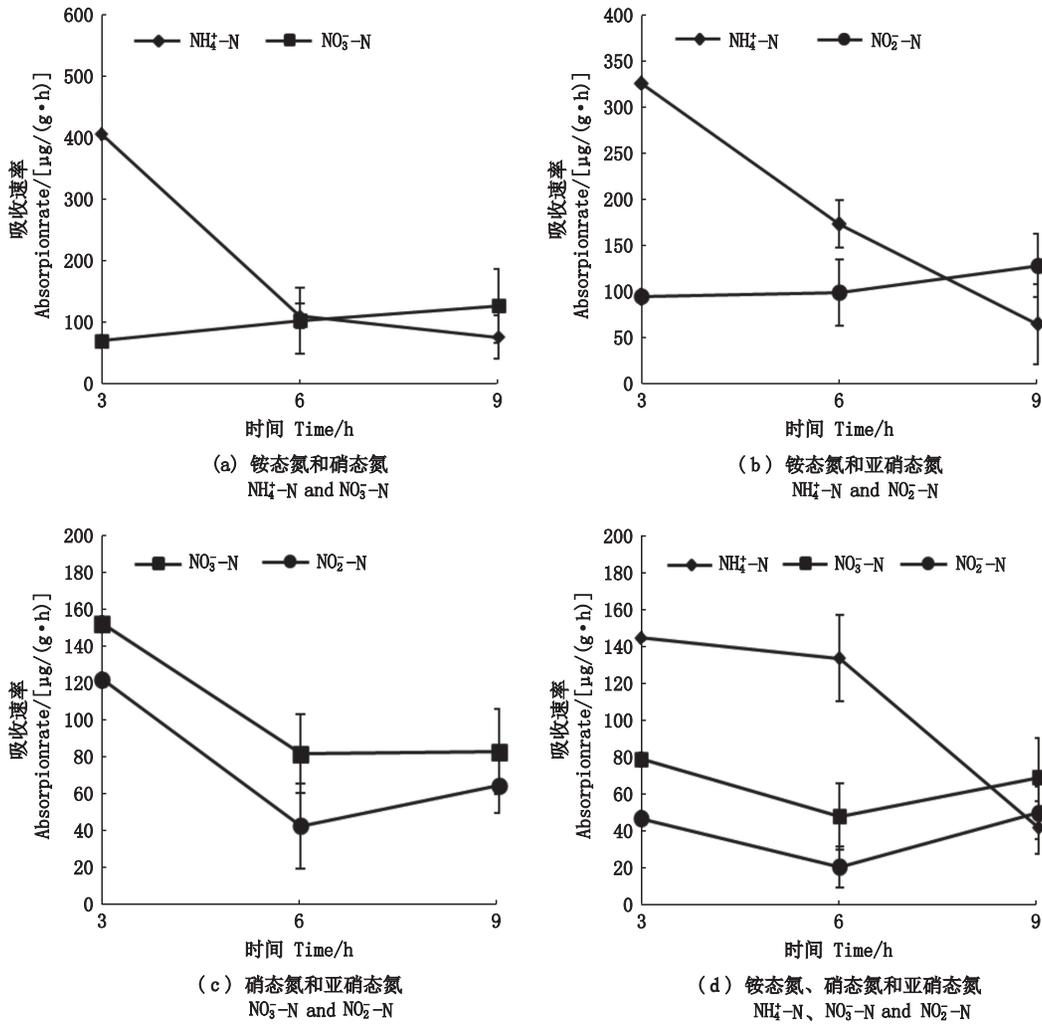


图5 多氮源共培养下浒苔对无机氮的吸收速率

Fig. 5 Absorption rate of inorganic nitrogen by *U. meridionalis* under the co-culture condition of multiple nitrogen sources

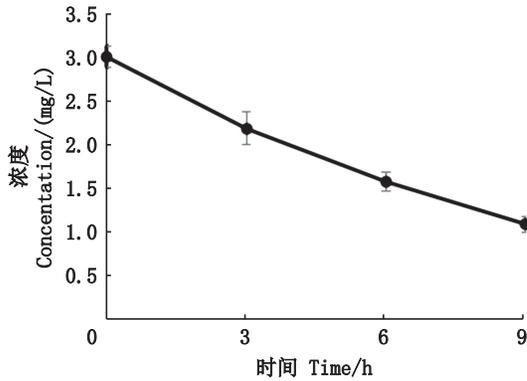


图6 模拟养殖废水中总无机氮(TIN)浓度变化
Fig. 6 Change of total inorganic nitrogen in artificial aquaculture wastewater

3 讨论

3.1 大型海藻对养殖废水中氮、磷的净化效果

在水产经济动物养殖过程中,由于未被利用饵料的积累和水生动物本身的生理代谢,造成了养殖水体中氮磷含量过高^[1-3]。根据海水水质标准,当无机氮浓度超过0.5 mg/L,活性磷酸盐浓度超过0.045 mg/L时,不适合用作水产经济动物的养殖水体^[28]。氮磷元素是大型海藻生长过程中不可缺少的营养盐,N是蛋白质的主要组成部分,又在生理代谢过程中发挥着重要作用,在大型藻类中,蛋白质和游离氨基酸(FAA)是最重要的N储存库^[29]。P主要是通过对大型海藻光合磷酸化生成ATP的过程产生影响,从而影响大型海藻的生长^[30]。因此,利用大型海藻进行水产养殖废水的净化,不仅经济高效、生态环保,还可以提高大型海藻人工养殖的产量,变废为宝,促进大型海藻的资源化利用。例如,毛玉泽等^[31]指出龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)对扇贝排泄氮、磷有较强的吸收作用,其吸收率和去除效率与放养密度和养殖时间有关;使用龙须菜与栉孔扇贝混养,在第一周对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的最大去除率为83.7%;在第三周对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的最大去除率达到70.4%。邵魁双等^[32]研究指出缘管浒苔对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸收属于主动运输,且最大吸收速率分别为30.91、4.21 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 。丁月旻等^[33]发现采自黄海的浒苔对海水中溶解无机氮(DIN)、溶解有机氮(DON)、溶解无机磷(DIP)和溶解有机磷(DOP)都有吸收作用,其平均吸收速率分别为10.87、2.41、0.183和0.023 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{d})$,对溶解无机氮的吸收效果最佳。田千桃等^[34]进一步研究了黄海

漂浮浒苔对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收特征,揭示了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度比例显著影响浒苔对无机氮源的吸收,浒苔对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的最大吸收速率分别为84.03和17.78 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 。葛红星等^[35]对采集自东海的浒苔进行了氮源吸收特性的研究,结果显示22.5 °C条件下,浒苔对TNA、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的平均吸收速率分别为14.65、9.41和11.28 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的最大吸收速率为16.57 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 。本实验中,在南方浒苔藻体密度为2.5 g/L时,净化水产养殖废水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 最短处理时长分别为24、48、60和72 h,其去除率分别可达96.02%、80.85%、51.83%和97.67%;且浒苔对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 最大吸收速率分别可达598、397和372 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 。与上述大型藻类相比,在去除富含无机氮磷的水产养殖废水中具有一定的竞争优势。

3.2 大型海藻对不同氮源的吸收特性

N是植物需求量较大的矿质元素,是植物个体生长和整个生态系统演替的重要因子。海水中的N营养盐主要包括无机氮和有机氮,无机氮主要包括 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ^[36-37]。养殖水体中三态氮浓度并不是恒定的,而是处于动态平衡中。在溶氧丰富的水体,亚硝化细菌和硝化细菌大量繁殖, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 则被亚硝化细菌氧化为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 是很不稳定的中间产物,在硝化细菌的作用下很快氧化为硝态氮 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ^[38]。

本实验中,在单氮源条件下,南方浒苔对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收速率最高, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 次之, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 最低。这是由于海藻吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 后直接转化为谷氨酸盐被藻体利用;相对于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收需要更多的能量支出且被吸收后必须先还原为氨氮或低价态氨盐再被藻体吸收利用,海藻体内并不产生活性硝酸氮还原酶,吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在能量学上占优势^[36,39-40];而 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 一般在浓度低至1 mmol/L时才可作为氮源,浓度太高则会破坏藻体的细胞器结构,对藻体产生毒害作用,进而抑制藻体的生长^[41-42]。故可以认为南方浒苔优先吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,然后是 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,最后是 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 。邵魁双等^[32]发现缘管浒苔对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收方式为主动运输,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收方式为被动扩散,在低营养盐浓度时具有较强的亲和力。葛红星等^[35]发现,温度在22.5~31.5 °C时,浒苔可以有效吸收总

氮氨(TAN,包括 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 NH_3)、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 等对虾工厂化养殖废水中的营养盐,浒苔对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收速率最大,与本研究结果一致。

大型海藻对不同氮源的吸收存在一定的规律,而不同氮源之间也存在相互作用^[39,41,43]。具体表现为当水体中同时存在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 时,大型海藻优先吸收水体中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,且这种优势随着 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度比例升高而更加突出;而当水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度比例较低时,水体中高浓度的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 产生吸收竞争位点,进而抑制大型海藻对其的吸收^[41-44]。本实验中,无机氮在双氮源条件下对氮源的吸收速率均低于单氮源,说明无机氮间的交互作用影响了南方浒苔对氮源的吸收。从对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收来看,添加 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 均会抑制 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的抑制作用更强;从对 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的吸收来看,添加 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均会抑制 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的吸收, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的抑制作用更强;从对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收来看,添加 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均会抑制 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的抑制作用更强。田千桃等^[34]在浒苔对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 吸收的相互作用中发现,浒苔对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收受到 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的影响,随着 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度升高,藻体对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收速率逐渐升高,而对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 吸收受到抑制,只有当 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 或 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度较低时,才以吸收相对应的氮源为主。FLYNN^[45]认为, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 两种离子所带电荷不同,会影响其膜内外离子浓度梯度,进而影响 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收。THOMAS等^[46]发现 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 会限制 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收。因此,在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的组合中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸收主导 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 吸收,与本研究的结果相一致。对于 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的添加,部分在硝化细菌的作用下转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,造成水体中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 上升。上述研究表明,添加额外氮源,其吸收效率均会有降低。因此,在使用南方浒苔净化水产养殖废水中,需要考虑到养殖水体氮源的组成与比例,通过调整藻体密度和养殖时间,使得净化效率达到最佳效果。

4 结论

南方浒苔对水产养殖废水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 均有显著的净化效果,使用2.5 g/L的南方浒苔藻体处理水产养殖废水72 h,可以使养殖废水中总无机氮和磷的含量降低至0.497

和0.024 mg/L,达到海水养殖水一级排放标准。同时,南方浒苔对不同形式无机氮的吸收效率会受到水产养殖废水中不同氮源组成的影响,具体表现为:优先吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,然后是 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,最后是 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 。从对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收来看,添加 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 均会抑制 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的抑制作用更强;从对 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的吸收来看,添加 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均会抑制 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的吸收, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的抑制作用更强;从对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收来看,添加 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均会抑制 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的抑制作用更强。综上可知,南方浒苔是净化水产养殖废水的理想材料之一。

参考文献:

- [1] 石建高,毕士川.我国水产养殖业的现状及发展对策[J].现代渔业信息,2004,19(3):21-23.
SHI J G, BI S C. Status and development countermeasure of aquaculture in our country [J]. Modern Fisheries Information, 2004, 19(3): 21-23.
- [2] 柯瑞林,任黎华,孟顺龙.水产养殖尾水处理技术研究进展[J].中国农学通报,2023,39(29):146-151.
KE R L, REN L H, MENG S L. Research progress of aquaculture tail water treatment technology [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(29): 146-151.
- [3] 汤坤贤,范祥,李和阳,等.南方典型富营养化海区生态修复技术与策略[J].应用海洋学学报,2021,40(1):163-169.
TANG K X, FAN X, LI H Y, et al. Ecological restoration techniques and strategies for typical eutrophication sea areas in southern China [J]. Journal of Applied Oceanography, 2021, 40(1): 163-169.
- [4] 刘庆辉,余祥勇,叶孝飞,等.4种饵料微藻对水产养殖废水的净化效果研究[J].水产科技情报,2021,48(5):267-273.
LIU Q H, YU X Y, YE X F, et al. Research on purification effect of four bait Microalgae on aquaculture tailwater [J]. Fisheries Science & Technology Information, 2021, 48(5): 267-273.
- [5] TOVAR A, MORENO C, MÁNUEL-VEZ M P, et al. Environmental impacts of intensive aquaculture in marine waters [J]. Water Research, 2000, 34(1): 334-342.
- [6] 王纯,袁子茜,原艺杭,等.海水养殖尾水生物处理技术研究进展与碳减排思考[J].大连海洋大学学报,2022,37(6):1055-1065.
WANG C, YUAN Z X, YUAN Y H, et al. Research progress of biological treatment technology of mariculture wastewater and thoughts on carbon reduction: a review [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2022, 37(6): 1055-

- 1065.
- [7] 洪磊,张秀梅. 环境胁迫对鱼类生理机能的影响[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(1): 114-121.
HONG L, ZHANG X M. Effects of environmental stress on physiological function of fish [J]. Advances in Marine Science, 2004, 22(1): 114-121.
- [8] 吕俊平,折雨亭,刘洋,等. 不同接种浓度绿球藻对水产养殖废水净化的影响[J]. 水生生物学报, 2021, 45(3): 617-624.
LÜ J P, ZHE Y T, LIU Y, et al. Effect of *Chlorococcum sphaerosum* gd with different inoculation concentrations on the purification of aquaculture wastewater [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2021, 45(3): 617-624.
- [9] 刘洋. 微藻净化养殖废水中碳氮磷污染物的特性研究[D]. 太原: 山西大学, 2018: 1-60.
LIU Y. The study on carbon, nitrogen and phosphorus removal from aquaculture and livestock wastewater by microalgae[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2018: 1-60.
- [10] 陈志刚,乔丹,许小红,等. 泡沫分离法去除废水中的Cr(II)离子[J]. 环境工程学报, 2016, 10(7): 3623-3628.
CHEN Z G, QIAO D, XU X H, et al. Foam separation method for removing Cr (III) ion from wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(7): 3623-3628.
- [11] 徐晓云,邱俊,张磊,等. 固液分离+间歇增氧工艺处理猪场废水研究与应用[J]. 水处理技术, 2013, 39(11): 132-135.
XU X Y, QIU J, ZHANG L, et al. Study and application of piggery wastewater treatment by solid-liquid separation, intermittent aeration process [J]. Technology of Water Treatment, 2013, 39(11): 132-135.
- [12] 赵秀侠,杨坤,方婷,等. 3种微藻在龟鳖养殖废水中的生长与脱氮除磷特性[J]. 水资源保护, 2018, 34(1): 83-87, 94.
ZHAO X X, YANG K, FANG T, et al. Growth feature and nitrogen and phosphorus removal characteristics of three microalgae in turtle breeding wastewater [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1): 83-87, 94.
- [13] MARINHO-SORIANO E, PANUCCI R A, CARNEIRO M A A, et al. Evaluation of *Gracilaria caudata* J. Agardh for bioremediation of nutrients from shrimp farming wastewater [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(24): 6192-6198.
- [14] 牛化欣,马甦,田相利,等. 菊花心江蓠对中国明对虾养殖环境净化作用的研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2006, 36(s1): 45-48.
NIU H X, MA S, TIAN X L, et al. A study on environmental purification of shrimp culture water quality by *Gracilaria lichenoides* [J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(s1): 45-48.
- [15] 卢宏博,车鉴,夏宁,等. 孔石莼 *Ulva pertusa* 生物滤器对氨氮和磷酸盐的去除研究[J]. 水产学杂志, 2022, 35(3): 51-57.
LU H B, CHE J, XIA N, et al. Removal of ammonia nitrogen and phosphate by sea lettuce *Ulva pertusa* biofilter [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2022, 35(3): 51-57.
- [16] CUI J J, ZHANG J H, MONOTILLA A P, et al. Assessment of blooming *Ulva* macroalgae production potential in the Yellow Sea, China[J]. Phycologia, 2019, 58(5): 535-541.
- [17] CUI J J, SHI J T, ZHANG J H, et al. Rapid expansion of *Ulva* blooms in the Yellow Sea, China through sexual reproduction and vegetative growth [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 130: 223-228.
- [18] CUI J J, ZHANG J H, HUO Y Z, et al. Adaptability of free-floating green tide algae in the Yellow Sea to variable temperature and light intensity [J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 101(2): 660-666.
- [19] 崔建军,朱文荣,施建华,等. 浒苔规模化人工育苗技术研究[J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(5): 697-705.
CUI J J, ZHU W R, SHI J H, et al. Studies on the technology of artificial breeding of *Ulva prolifera* on a large scale[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2014, 23(5): 697-705.
- [20] HORIMOTO R, MASAKIYO Y, ICHIHARA K, et al. *Enteromorpha*-like *Ulva* (Ulvoephyceae, Chlorophyta) growing in the Todoroki river, Ishigaki Island, Japan, with special reference to *Ulva meridionalis* Horimoto et Shimada, sp. Nov[J]. Bulletin of the National Museum of Nature and Science Series B, 2011, 37(4): 155-167.
- [21] ZHAO L, GONG N, MI D, et al. Kinetics of stereoselective enrichment of Dechlorane plus in *Ulva pertusa*[J]. Chemosphere, 2014, 111: 580-586.
- [22] HIRAOKA M, OKA N. Tank cultivation of *Ulva prolifera* in deep seawater using a new "germling cluster" method [J]. Journal of Applied Phycology, 2008, 20(1): 97-102.
- [23] 杨雨竹. 海藻 *Ulva meridionalis* 吸收氮磷及其对市政污水的净化作用研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2018: 1-61.
YANG Y Z. Study on nutrient removal from secondary effluent and water purification using *Ulva meridionalis*[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2018: 1-61.
- [24] XIE E Y, XU R S, ZHANG J H, et al. Growth characteristics of hybrids produced by closely related *Ulva* species[J]. Aquaculture, 2020, 519: 734902.
- [25] ANDERSEN R A, BERGES J A, HARRISON P J, et al. Recipes for freshwater and seawater media [M]// ANDERSEN R A. Algal Culturing Techniques. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2005: 429-538.

- [26] 黄静依, 张皓驰, 李先宁. 水产养殖废水处理的菌藻共生系统中藻种优选及氮、磷转化特性[J]. 净水技术, 2020, 39(9): 57-66, 84.
HUANG J Y, ZHANG H C, LI X N. Optimization of microalgae species and characteristics of nitrogen and phosphorus conversion in algae-bacteria symbiotic system for aquaculture wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2020. 39(9): 57-66, 84.
- [27] GUILLARD R R L. Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates [C]//Proceedings of the 1st Conference on Culture of Marine Invertebrate Animals. New York: Springer, 1975: 26-60.
- [28] 国家环境保护局. GB 3097-1997 海水水质标准[S]. 北京: 环境科学出版社, 2004: 15-21.
State Department of Environmental Conservation. GB 3097-1997 Marine water quality standard [S]. Beijing: Environmental Science Press, 2004: 15-21.
- [29] NALDI M, WHEELER P A. Changes in nitrogen pools in *Ulva fenestrata* (chlorophyta) and *Gracilaria pacifica* (rhodophyta) under nitrate and ammonium enrichment[J]. Journal of Phycology, 1999, 35(1): 70-77.
- [30] 徐日升. 不同氮源对礁膜配子体生长与生化组分的影响研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2020: 1-50.
XU R S. Effects of different nitrogen sources on the growth and biochemical components of *Monostroma nitidium* gametophytes [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2020: 1-50.
- [31] 毛玉泽, 杨红生, 周毅, 等. 龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)的生长、光合作用及其对扇贝排泄氮磷的吸收[J]. 生态学报, 2006, 26(10): 3225-3231.
MAO Y Z, YANG H S, ZHOU Y, et al. Studies on growth and photosynthesis characteristics of *Gracilaria lemaneiformis* and its capacity to uptake ammonium and phosphorus from scallop excretion [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3225-3231.
- [32] 邵魁双, 巩宁, 李珂, 等. 缘管浒苔和羽藻氮、磷营养生理学研究[J]. 海洋学报(中文版), 2011, 33(3): 131-139.
SHAO K S, GONG N, LI K, et al. Nitrogen and phosphorus nutrition physiology of *Enteromorpha linza* and *Bryopsis plumosa* (Chlorophyta) [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2011, 33(3): 131-139.
- [33] 丁月旻, 颜天, 耿慧霞, 等. 在流水系统中浒苔对营养盐吸收和转化的模拟实验[J]. 海洋科学, 2020, 44(9): 38-46.
DING Y M, YAN T, GENG H X, et al. Experimental study of nutrients absorption and transformation by *Ulva prolifera* in a flowing water system [J]. Marine Sciences, 2020, 44(9): 38-46.
- [34] 田千桃, 霍元子, 王阳阳, 等. 浒苔对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 吸收的相互作用[J]. 海洋科学, 2010, 34(7): 41-45.
TIAN Q T, HUO Y Z, WANG Y Y, et al. The interaction between $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in nitrogen uptaking by *Ulva prolifera* [J]. Marine Sciences, 2010, 34(7): 41-45.
- [35] 葛红星, 陈钊, 李健, 等. 温度对浒苔生长及不同氮源吸收特性的影响[J]. 渔业科学进展, 2019, 40(6): 138-144.
GE H X, CHEN Z, LI J, et al. Effects of temperature on the growth rate and nitrogen uptake of *Ulva prolifera* [J]. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(6): 138-144.
- [36] PRITCHARD D W, HURD C L, BEARDALL J, et al. Restricted use of nitrate and a strong preference for ammonium reflects the nitrogen ecophysiology of a light-limited red alga [J]. Journal of Phycology, 2015, 51(2): 277-287.
- [37] 王琪, 徐程扬. 氮磷对植物光合作用及碳分配的影响[J]. 山东林业科技, 2005(5): 59-62.
WANG Q, XU C Y. Affects of nitrogen and phosphorus on plant leaf photosynthesis and carbon partitioning [J]. Shandong Forestry Science and Technology, 2005(5): 59-62.
- [38] 王武. 鱼类增养殖学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 1-658.
WANG W. Culture and enhancement of fishes [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 1-658.
- [39] 何洁, 刘瑀, 张立勇, 等. 三种大型海藻吸收营养盐的动力学研究[J]. 渔业现代化, 2010, 37(1): 1-5.
HE J, LIU Y, ZHANG L Y, et al. Study on the nutrient uptake kinetics of three kinds of macro-alga [J]. Fishery Modernization, 2010, 37(1): 1-5.
- [40] ABREU M H, PEREIRA R, BUSCHMANN A H, et al. Nitrogen uptake responses of *Gracilaria vermiculophylla* (Ohmi) Papenfuss under combined and single addition of nitrate and ammonium [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2011, 407(2): 190-199.
- [41] 黄鹤忠, 梁建生, 张群英. 菊花江蓠(*Gracilaria lichenoides*)对 N、P 吸收效应及其细胞超微结构变化[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(1): 95-102.
HUANG H Z, LIANG J S, ZHANG Q Y. Uptake effects of nitrogen and phosphorus and cell ultrastructure changes of *Gracilaria lichenoides* [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(1): 95-102.
- [42] 刘静雯, 董双林. 海藻的营养代谢及其对主要营养盐的吸收动力学[J]. 植物生理学通讯, 2001, 37(4): 325-330.
LIU J W, DONG S L. Nutrient metabolism and the major nutrient uptake kinetics of Seaweeds [J]. Plant Physiology Communications, 2001, 37(4): 325-330.
- [43] 郑辉. 大型海藻对水产养殖废水中无机氮和活性磷酸盐吸收作用研究[J]. 科技通报, 2018, 34(4): 258-261.
ZHENG H. Study on purification effects of the economic Algae on inorganic nitrogen and active phosphate in the

- Aquaculture wastewater [J]. Bulletin of Science and Technology, 2018, 34(4): 258-261.
- [44] 钱鲁闽, 徐永健, 王永胜. 营养盐因子对龙须菜和菊花江蓠氮磷吸收速率的影响[J]. 台湾海峡, 2005, 24(4): 546-552.
- QIAN L M, XU Y J, WANG Y S. Effects of nutrient availability on the uptake rates of nitrogen and phosphorus by *Gracilaria lemaneiformis* and *G. lichevoide* [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2005, 24(4): 546-552.
- [45] FLYNN K J. Algal carbon - nitrogen metabolism: a biochemical basis for modelling the interactions between nitrate and ammonium uptake [J]. Journal of Plankton Research, 1991, 13(2): 373-387.
- [46] THOMAS T E, HARRISON P J. Rapid ammonium uptake and nitrogen interactions in five intertidal seaweeds grown under field conditions [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1987, 107(1): 1-8.

Study on the purification potential of *Ulva meridionalis* in aquaculture wastewater treatment

CHEN Chunli¹, LIN Hanxiang¹, LIN Kun¹, XIE Enyi¹, JIANG Haibo², ZHU Wenrong³, CUI Jianjun¹

(1. College of Fisheries, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong, China; 2. College of Marine Science, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 3. Xuwen Seaweed Development Co., Ltd., Ningbo 315000, Zhejiang, China)

Abstract: To investigate the threshold of purification efficiency of *Ulva meridionalis* for aquaculture wastewater, in addition to identifying the optimal algal density and treatment duration for the purification of such wastewater, *U. meridionalis* was cultured in simulated aquaculture wastewater using a bluepard biochemical incubator. Six density gradients of 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 g/L (treatment groups) and 0 g/L (control group) were established. The concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in the simulated aquaculture wastewater was respectively measured at 0, 12, 24, 36, 48, 60, and 72 hours. *U. meridionalis* demonstrated a significant purification effect on aquaculture wastewater ($P < 0.05$). The optimal *U. meridionalis* density for effective purification of the culture wastewater was determined to be 2.5 g/L. The optimal treatment times for achieving effective purification of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in aquaculture wastewater, at the optimum algal density, were found to be 24, 60, 48, and 72 hours, respectively. Additionally, the removal efficiency of *U. meridionalis* for different forms of inorganic nitrogen was influenced by the composition of nitrogen sources present in the aquaculture wastewater. It was observed that $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was preferentially absorbed, followed by $\text{NO}_3^-\text{-N}$, and finally $\text{NO}_2^-\text{-N}$. The treatment of aquaculture wastewater with *U. meridionalis* at an algal density of 2.5 g/L for a duration of 72 hours yielded the most effective purification of nitrogen and phosphorus in the wastewater. This study provided data support for biological purification of aquaculture wastewater.

Key words: macroalgae; *Ulva meridionalis*; aquaculture wastewater; nitrogen and phosphorus removal; purification